マツダ技報 2015 No.32
MAZDA TECHNICAL REVIEW

マツダ技報
Mazda Technical Review

2015 No.32

マツダ技報　第32号　（2015）

目　次

巻頭言 …… 前田育男 …… 1

特集：新型デミオ

1．新型デミオの商品開発 …… 土井　歩，野間幸治，柴田恵一郎，西河内研，磯部太郎 …… 3

2．新型デミオのデザイン開発 …… 柳澤　亮 …… 8

3．スモールカー群の車両アーキテクチャ …… 吉村康志，豊田　稔，長尾治典，高橋達矢 …… 14

4．小排気量クリーンディーゼルエンジンSKYACTIV-D1.5の開発 …… 平林千典，大西　毅，白井裕久，佐藤雅昭，森永真一，志茂大輔 …… 21

5．新型デミオ用 小型SKYACTIV-DRIVEの開発 …… 岡山裕之，坂　時存，藤川昌道，本瓦成人，永井祥太郎，齊藤忠志 …… 28

6．新型デミオの小型高効率MTの開発 …… 岡留泰樹，池本孝之，北原智之，福田真人 …… 33

7．新型デミオ・CX-3の小型・軽量4WDシステムの紹介 …… 沢崎朝生，八木　康，石田一之，丸谷哲史 …… 38

8．新型デミオのパフォーマンスフィール …… 渡辺洋史，田中健治，藤岡陽一，國分弥則，山口俊行 …… 42

9．新型デミオ・CX-3の軽量ボデーシェル開発 …… 松岡秀典，山本裕士，田代邦芳，宮本康史，影山和宏，山崎　忠，檜原隆志，西村佳和，阿部　健，藤谷駿介 …… 48

10．新型デミオ・CX-3のシャシーダイナミクス性能 …… 西　隆司，池山　学，安野谷知城，水島裕文，新田祐司 …… 56

11．高強度発泡充填材フレームの開発 …… 奥山智仁，田中　力，本田正徳，松岡秀典，棗　裕貴，椙村勇一，石亀勝義 …… 60

12．1180MPa級高強度鋼板の車体への適用について …… 坂野律男，岡田又治，丸山秀幸，小田修二，清水　昇，森林竜也 …… 65

特集：CX-3

13．CX-3の紹介 …… 冨山道雄，野間幸治，柴田恵一郎，渡辺康和，吉岡謙一郎，久保裕希 …… 71

14．CX-3のデザイン …… 松田陽一 …… 77

15．新型デミオとCX-3の空力性能開発 …… 中田章博，伊川雄希，川北正寿，大平洋樹，李　　曄，岡田義浩，岡本　哲，田中松広 …… 85

特集：新型ロードスター

16. 新型ロードスターの紹介 …… 山本修弘，山口宗則，下村　剛，浅田健志，森　茂之，板垣友成 …… 93

17. 新型ロードスターのデザイン …… 中山　雅 …… 99

18. 新型ロードスターのパッケージング …… 中村幸雄，望月政徳，甲原靖裕，十亀克維，大野晃史，松山寛尚 …… 108

19. 人馬一体 新型ロードスターのパフォーマンスフィール …… 兼為正義，八木　淳，佐々木貴洋 …… 114

20. 新型ロードスターの軽量ドライブトレインの紹介 …… 延河克明，渡部雅晃，石田一之，佐々木雅弘，松原伸幸 …… 119

21. 新型ロードスターのエンジン技術 …… 星野　司，早川元雄，村中宏彰 …… 124

22. 新型ロードスターのPTシステムNVH …… 小泉　陽，児玉真吾，陳　　宇，松岡和洋 …… 128

23. 新型ロードスターのシャシーダイナミクス …… 友貞賢二，野田曜一，戸田良二 …… 134

24. 新型ロードスター SKYACTIV-BODYストラクチャの開発 … 木村隆之，阪井克倫，山内一樹，丸山賢司，四柳泰希，岡沢恭久 …… 139

25. 新型ロードスターのアルミニウム適用拡大による軽量化（ボデーシェル領域） … 内堀　佳，橋本　学，池田　敬，山内一樹 …… 145

26. 新型ロードスターの超軽量ソフトトップ開発 …… 松本浩一，黒田将仁，鯉渕達夫，武田健二 …… 150

27. 新型ロードスターの遮音性能開発と軽量化技術 …… 山本秀俊，末國和憲 …… 154

28. 高効率衝撃吸収ボンネットレインフォースメント構造とアクティブボンネットの開発 …… 藤田賢治，曽我部洋，藤井照雅 …… 158

29. 新型ロードスターのネットシート開発 …… 元吉菜緒子，竹内良敬 …… 163

30. 新型ロードスターの軽量ワイヤハーネス開発 ～電線導体のアルミ化～ …… 三好俊充，下河内次生 …… 167

論文・解説

31. 技術開発用エンジン制御コンピュータの開発 …… 末繁恵一郎，二宮　洋，高田哲也，福馬　勉，谷岡輝明，光本伸義，吉田景太，柏島幸雄 …… 173

32. 電気二重層キャパシタの劣化解析技術 …… 宇都宮隆，阪井博行，藤田弘輝 …… 180

33. ビルディングブロックを支えるバッテリモデルベース開発 … 藤田弘輝，庄司　明，松井恒平，宇都宮隆，楊　殿宇，大路　潔 …… 185

34. ロータリエンジンを用いたレンジエクステンダユニットの紹介 … 清水律治，木ノ下浩，伊藤達夫，森　健次，稲田　潤，齋尾奈穂子，数面宏昭 …… 191

35. サブタンクレスFFV（Flexible Fuel Vehicle）の開発 …… 古市展之，島本　祥，西尾貴史，渡辺友巳，大橋美貴典，安田京平 …… 197

36. エンジンの省燃費を支えるトライボロジ解析技術 …… 栗栖　徹，木村昇平，白井裕久，菅近直範 …… 203

37. リアルワールドでの安全性向上に向けた取り組み …… 神本一朗，河口健二，吉村美枝
宮島陽一，柴原多衛，成川岳宏 …… 210

38. マツダの先進安全技術「i-ACTIVSENSE」の進化 …… 中村　正，内海将司，朝日雅博
古山貫一，三戸手亮太 …… 216

39. 高応答遮熱壁面における瞬時熱流束計測技術 …… 中尾裕典，青木　理，清末　涼
原田雄司，角島信司，小池祐輔 …… 222

40. 高精度スリップ率制御による駆動力制御技術 …… 髙野　毅，延本秀寿，岡﨑俊実
藤本博志 …… 228

41. 広島ITS実証実験における路面電車-自動車間通信型ASVの機能検証 …… 山本雅史，奥木友和，岩下洋平
岡崎晴樹，是　治久，長谷川智紀 …… 234

42. 筋骨格系の特性を考慮した運転支援技術の開発 …… 菅野　崇，楠本信平，高橋英輝
中畑洋一朗，山本康典，谷田晴紀 …… 240

43. SKYACTIV-D用PM酸化触媒の高性能化技術 …… 馬場誉士，原田浩一郎，滝沢知也
山田啓司，重津雅彦，高見明秀 …… 246

44. 炭素繊維強化射出成形複合材料を用いた電波遮蔽プラスチックの開発 …… 宮本嗣久，稲田貴裕，遠藤靖之
久常晃裕，鶴長真里絵 …… 252

45. “魂動デザイン”を実現する金型設計技術 …… 佐藤博紀，古川智司，澤田義裕
松田善光，鈴木広之 …… 257

特許紹介 …… 263

社外への発表論文一覧表 …… 265

Mazda Technical Review No.32

CONTENTS

Foreword

(I. Maeda) 1

Special Edition for New DEMIO

1. Product Development of New DEMIO
   (A. Doi, K. Noma, K. Shibata, K. Nishigouchi, T. Isobe) 3
2. Design Development of New DEMIO
   (R. Yanagisawa) 8
3. Vehicle Architecture of Small Car Series
   (Y. Yoshimura, M. Toyota, H. Nagao, T. Takahashi) 14
4. Newly Developed SKYACTIV-D 1.5
   (K. Hirabayashi, T. Onishi, H. Shirai, M. Sato, S. Morinaga, D. Shimo) 21
5. Development of SKYACTIV-DRIVE for New DEMIO
   (H. Okayama, T. Saka, M. Fujikawa, N. Hongawara, S. Nagai, T. Saito) 28
6. Development of SKYACTIV-MT for New DEMIO
   (Y. Okadome, T. Ikemoto, T. Kitahara, M. Fukuda) 33
7. Introduction of 4WD Technology for New DEMIO and CX-3
   (T. Sawazaki, Y. Yagi, K. Ishida, T. Marutani) 38
8. Performance Feel for New DEMIO
   (Y. Watanabe, K. Tanaka, Y. Fujioka, H. Kokubu, T. Yamaguchi) 42
9. Development of Light Weight Body Structure for New Demio and CX-3
   (H. Matsuoka, H. Yamamoto, K. Tashiro, K. Miyamoto, K. Kageyama, T. Yamazaki, T. Narahara, Y. Nishimura, K. Abe, S. Fujitani) 48
10. Chassis Dynamics Performance of New DEMIO and CX-3
    (T. Nishi, G. Ikeyama, T. Anotani, H. Mizushima, Y. Nitta) 56
11. Development of Frame Reinforced High Strength Structural Foam
    (T. Okuyama, C. Tanaka, M. Honda, H. Matsuoka, H. Natsume, Y. Sugimura, K. Ishigame) 60
12. Application of 1180MPa Grade Ultra-high Strength Steel to Vehicle Body
    (R. Sakano, M. Okada, H. Maruyama, S. Koda, N. Shimizu, T. Moribayashi) 65

Special Edition for CX-3

13. Introduction of CX-3
    (M. Tomiyama, K. Noma, K. Shibata, Y. Watanabe, K. Yoshioka, H. Kubo) 71
14. Design of CX-3
    (Y. Matsuda) 77
15. Aerodynamic Development for New Demio and CX-3
    (A. Nakata, Y. Ikawa, M. Kawakita, H. Ohira, Ye Li, Y. Okada, S. Okamoto, M. Tanaka) 85

Special Edition for New Roadster

16. Introduction of New Roadster
(N. Yamamoto, M. Yamaguchi, T. Shimomura, K. Asada, S. Mori, T. Itagaki) ····· 93

17. Design of New Roadster
(M.Nakayama) ····· 99

18. Package of New Roadster
(Y. Nakamura, M. Mochizuki, Y. Kohara, K. Sogame, A. Ohno, H. Matsuyama) ····· 108

19. New Roadster Performance Feel
(M. Kanei, A. Yagi, T. Sasaki) ····· 114

20. Lightweight Drivetrain for New Roadster
(K. Nobukawa, M. Watanabe, K. Ishida, M. Sasaki, N. Matsubara) ····· 119

21. Engine Technology for New Roadster
(T. Hoshino, M. Hayakawa, H. Muranaka) ····· 124

22. PT System NVH of New Roadster
(Y. Koizumi, S. Kodama, Yu Chen, K. Matsuoka) ····· 128

23. Chassis Dynamics Performance of New Roadster
(K. Tomosada, Y. Noda, R. Toda) ····· 134

24. Development of SKYACTIV-BODY Structure for New Roadster
(T. Kimura, K. Sakai, K. Yamauchi, K. Maruyama, T. Yotsuyanagi, Y. Okazawa) ····· 139

25. Light Weight Development by Using Aluminum for New Roadster (Body Shell)
(K. Uchibori, M. Hashimoto, K. Ikeda, K. Yamauchi) ····· 145

26. Development of Soft-top for New Roadster
(K. Matsumoto, M. Kuroda, T. Koibuchi, K. Takeda) ····· 150

27. Development of Sound Insulation Performance and Lightweight Technology for New Roadster
(H. Yamamoto, K. Suekuni) ····· 154

28. Development of Highly Efficient Shock Absorbing Reinforcement Structure and Active Bonnet
(K. Fujita, H. Sogabe, T. Fujii) ····· 158

29. Net Seat Technology for New Roadster
(N. Motoyoshi, Y. Takeuchi) ····· 163

30. Development of New Roadster Light Weight Wiring Harness ～Replacement of Wire Conductor Material into Aluminum～
(T. Miyoshi, T. Shimokouchi) ····· 167

Technical Reports

31. Development of Engine Control Module for Technological Development
(K. Sueshige, H. Ninomiya, T. Takata, T. Fukuma, T. Tanioka, N. Mitsumoto, K. Yoshida, Y. Kashiwajima) ····· 173

32. Degradation Analysis Technology for Electric Double Layer Capacitor
(T. Utsunomiya, H. Sakai, H. Fujita) ····· 180

33. Battery Model Based Development for Building Block Strategy
(H. Fujita, A. Shyoji, K. Matsui, T. Utsunomiya, Tenyu Yan, K. Oji) ····· 185

34. Introduction of Range Extender Unit using Rotary Engine Technology
(R. Shimizu, H. Kinoshita, T. Ito, K. Mori, J. Inada, N. Saio, H. Suumen) ····· 191

35. Development of Sub-Tank Less FFV(Flexible Fuel Vehicle)
(N. Furuichi, S. Shimamoto, T. Nishio, T. Watanabe, M. Ohashi, K. Yasuda) ····· 197

36. Tribology Analysis Technology Supports Engine Fuel Economy
(T. Kurisu, S. Kimura, H. Shirai, N. Kanchika) ····· 203
37. Our Activities for the Real-World Safety Enhancement
(I. Kamimoto, K. Kawaguchi, M. Yoshimura, Y. Miyajima, T. Shibahara, T. Narikawa) ····· 210
38. Evolution of Mazda Advanced Safety Technology "i-ACTIVSENSE"
(T. Nakamura, M. Utsumi, M. Asahi, K. Koyama, R. Mitote) ····· 216
39. Technology of Instantaneous Heat Flux Measurement on a High Response Heat Insulation Coating
(Y. Nakao, O. Aoki, R. Kiyosue, Y. Harada, S. Kadoshima, Y. Koike) ····· 222
40. Driving Force Control Method Based on High Accuracy Slip Ratio Control
(T. Takano, H. Nobumoto, T. Okazaki, H. Fujimoto) ····· 228
41. Functionality Tests of Advanced Safety Vehicle Using Vehicle-to-Tram Communication on Hiroshima Public Roads
(M. Yamamoto, T. Okugi, Y. Iwashita, H. Okazaki, H. Kore, T. Hasegawa) ····· 234
42. Development of Driving Support Technology in Consideration of Musculoskeletal System
(T. Sugano, S. Kusumoto, H. Takahashi, Y. Nakahata, Y. Yamamoto, S. Tanida) ····· 240
43. Advanced PM Oxidation Catalyst Technology for SKYACTIV-D
(T. Baba, K. Harada, T. Takizawa, H. Yamada, M. Shigetsu, A. Takami) ····· 246
44. Development of Electromagnetic Shield Plastic using Carbon Fiber Composite Material by Injection Molding
(T. Miyamoto, T. Inada, Y. Endo, A. Hisatsune, M. Tsurunaga) ····· 252
45. Mold Technology to Achieve "Soul of Motion Design"
(H. Sato, S. Furukawa, Y. Sawada, Y. Matsuda, H. Suzuki) ····· 257

Introduction of Patents ····· 263

List of Reports Published in 2015 ····· 265

巻 頭 言

「夢」への礎

Cornerstone to Our Dream

執行役員　　前田　育男
Ikuo Maeda

2014 年の後半，デミオとロードスターそれから CX-3 と新型車 3 台を色んな形で登場させた。どれもマツダにとって非常に重要なクルマであり，6 世代商品全体を成功に導くうえで大きな布石を打てたと感じている。

2010 年に魂動デザインをスタートさせて，CX-5，アテンザ，アクセラを市場導入させ，そのクルマ創りの真摯な姿勢，提供するオンリーワンの価値について多くの人に共感して頂いていると実感できるようになってきた。

そんな矢先，新型デミオが COTY 日本・カー・オブ・ザ・イヤーを受賞した。頑張ってこのクルマを創り上げたプログラムチームのメンバーの皆さんに感謝したい。と同時に，この様なクルマを世に送り出せるマツダ全社員の底力を誇りに思う。その受賞の場にいて感じたのが，メディア全体のマツダに対する期待の大きさだった。「日本車を代表するクルマらしい質の高い商品を創ってください」というエールだと思った。メルセデス・ベンツ　C クラス　セダンと僅差だったが，デミオが価格/質感で勝る相手を上回ったのはその期待の表れだと思った。

デザインの評価も，ここ数年で大きく変わったと感じている。昨年，一昨年と 2 年連続でワールド・カー・デザイン・オブ・ザ・イヤーの 3 ベストに，アテンザ，アクセラが連続して選ばれた。プレミアムブランドの雄，アストンマーティン，ジャガー，BMW，メルセデスと同じ土俵に登っての選出だった。今までなかった素晴らしい結果だ！と素直に喜びたいと思う。

この世代，クルマは「命あるアートであり，心高ぶるマシンでありたい」という思いで，デザイン創造を行って来た。提唱している「魂動」というデザインテーマは，フォルムに命を与えるという創作行為全般に付けた呼称である。そのネーミングに，魂を感じる動きを表現しクルマを鉄の箱から友，家族のような命ある存在にしたい，という思いを込めた。そして，クルマのカタチとしての本質を追求し，タイムレスで長く愛され続けるデザインを創りたいと思っている。

ビジネス効率という企業命題に直面しつつ，それをエクスキューズにして安易で短命なデザインを創り続けること。これが，近年日本のカーデザインが犯してきた罪であり，結果子どもたちはクルマへの興味を失い，大人たちはクルマ文化を語れなくなっていった。欧米に出掛けると，よく人とクルマが創る独特の文化の香りに触れることがある。大人の香りである。大の大人がクルマで必死になって遊んでいる屈託のない笑顔に出会う。でも子どもの遊びとも違う。しかも飛び抜けて「カッコいい」のである。こんな大人を見て育った子どもたちは，自分の将来に重ねあわせていくだろう。こうやってクルマ文化

が創られてきた。日本では大半の大人は家族が出来たら，クルマを家族の移動手段に変えてしまう。「私は家族がいるから・・・」大人は子どもたちのためだと言っているが，そこに子どもたちの憧れはなく，次第にそれがクルマであることすら忘れていくのである。その移動手段が街に溢れ，日本の風景は殺風景なものになってしまった。我々大人はこの罪を認め，クルマ本来の魅力を取り戻すべきである。

車は本来かっこいいものである。心動かすマシン，道具だと思う。少なしマツダはその美しい道具を提供するブランドだと思っている。

「クルマはアート」というテーマで広島県立美術館で展示会を行った。

商業デザインという域を超えて，アートというレベルに達したいというメッセージを提唱し，我々がクルマのデザインに掛ける思いを訴求した。根底には広島を文化レベルの高い芸術の街にしたい，という思いもある。これが，大切なマツダの故郷広島に対する恩返しにならないか？とも思っている。その県立美術館で同時開催していたのは「榮久庵憲司の世界展」だった。彼は日本のインダストリアルデザインの第一人者，広島出身のデザイナーである。日本のインダストリアルデザインは広島がそのルーツであるとも言える。彼が提唱しているのは「道具論」。道具に魂が宿るという日本古来のモノ創りの精神であり，モノ創りに対する思いは同じだと感じている。広島から世界に向けて日本のデザインの素晴らしさを発信していけたらとも思う。この展示会はその一歩である。

デザインは，古臭いものは駄目だが，思想なくただ新しいだけのものはもっと価値がないと思う。過去を理解しその上に進化を重ね，飛び抜けた価値を創る。それを熟成し時間を掛けて伝統に繋げる。それがブランドに繋がっていく。気が遠くなるような時間を要するかもしれないが，継承する強い意志と，それを継承していける人材が居ないと実現できないのがブランドだと思う。マツダは今そのブランドを築くため，大きな挑戦を行う大事なステージに居る。今しかない！と感じている。

わたしは建築を見るのが好きで色んな場所に出掛けるのだが，これまで見たなかで最も心を動かされたのは，バルセロナの教会サグラダ・ファミリアだった。19 世紀末に着工していまも工事中。その建築を設計した建築家（アーティスト）ガウディは自分の遺志を継ぐ後輩設計者に仕事を託し，自分の人生を超えてゴールを定めた。その設計思想を受け継いだ後輩たちによって 100 年の時をかけて今日も完成を目指して築かれている。建築物としてのスケールの大きさはもとより，その壮大な時間のとらえ方にも心を動かされた。壮大な戦略である。我々もこのくらいの壮大な計画のもと，執念を持ってブランド構築を図っていく必要があると思う。

マツダブランドがプレミアムな価値を持ち，世界中のクルマ好きから尊敬されるブランドになり，大人のクルマ文化を創れるブランドになる。これが私の夢であり，マツダブランドとして目指す目標だと考えている。

2020 年にマツダは 100 周年を迎える。

あと 5 年余りでその目標に到達するとは思っていないが，それまでに我々が，後輩たちに託せる大きな「夢」への礎を創り上げたいと思っている。

特集：新型デミオ

1

新型デミオの商品開発
Product Development of New DEMIO

土井　歩*1　野間　幸治*2　柴田　恵一郎*3
Ayumu Doi　Kohji Noma　Keiichiro Shibata
西河内　研*4　磯部　太郎*5
Ken Nishigouchi　Taro Isobe

要　約

新型デミオは新世代商品の第4弾として，これまで培ってきたSKYACTIV 技術，魂動デザインを継承・進化させ，今回は「クラス概念を打ち破る」ことにチャレンジした。スタイリングにおいてはコンパクトカーのサイズに魂動デザインを巧みに具現化。インテリアではコンパクトカーとは思えない品質感の実現にチャレンジした。新開発の小排気量クリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 1.5」を搭載し，新世代商品群の設計思想をベースとしシャシー，ボデーもコンパクトカーセグメント向けに新開発することで，走りと燃費性能の高い次元での両立を実現した。また，骨格を見直すことで最適なドライビングポジションや運転視界を実現し，安心感をもたらすHMI（Human Machine Interface）や先進安全技術の展開により，低燃費性能による長い航続距離と相まって，コンパクトカーにもかかわらず安心で快適な長距離ドライブ性能を提供する。

Summary

As the forth new generation product, the all-new Demio challenged to “break through the class standard” by inheriting and evolving SKYACTIV technologies and KODO design that have been cultivated in Mazda. For the styling, the KODO design was skillfully embodied in the compact body, while above-the-class quality feel was realized in the interior. With the small clean diesel engine, SKYACTIV-D 1.5L, and the newly developed body for B-segment as well as the chassis embodying the engineering concept of new generation products, both the vehicle driving performance and fuel efficiency were realized at a high level. Also, the renewed framework allowing optimum driving position and visibility together with HMI (Human Machine Interface) and advance safety technologies, safe and comfortable driving was realized, whose distances tend to get longer due to the high fuel efficiency.

1. はじめに

今回の新型デミオは「CX-5」「アテンザ」「アクセラ」に続き，更に進化させた魂動（こどう）デザインとSKYACTIV 技術を全面的に採用した新世代商品の第4弾である。新型デミオはマツダの4本のブランドピラー最後の1本であり，この成功により初めてブランド構築の礎が完成するという，マツダにとって非常に重要なモデルの一つである（Fig. 1）。

一方，デミオは1996年のデビュー以来，常に「コンパクトカーの常識を打ち破る」ことにチャレンジしてきた。初代は機能的で広々とした室内空間を，2代目はコンパクトカーとは思えない走行性能を，3代目はスポーティなス

Fig. 1　New Generation Products

*1～5　商品本部
Product Div.

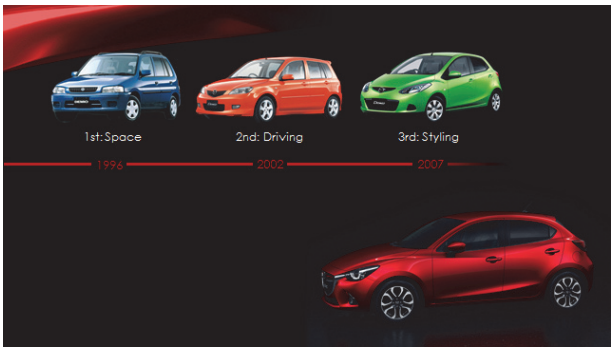


Fig. 2　History of Demio

タイリングを，と常に新しい価値を提案してきた。4代目である今回の新型デミオもこれまでのモデルと同様，常識を打ち破ってコンパクトカーセグメントに新しい価値を提案することにチャレンジした（Fig. 2）。

2. チャレンジと志

新型デミオが今回チャレンジしたのは「クラス概念を打ち破る」。サイズが大きくなるほどクルマの価値が上がるという既成のクラス概念を打ち破り，経済性だけではなく，デザイン，走り，機能性など全ての面でお客様に心からの誇りを持って所有いただけるコンパクトカーを目指した。

このチャレンジの実現に向け，よりサイズの大きなこれまでの新世代商品で一貫して培ってきたクルマ造りの考え方や技術の全てを進化させつつ，コンパクトなボデーに凝縮するという難題に取り組んできたが，この難題にチーム全員が一丸となって取り組むために，開発当初に「志」を立てた（Fig. 3）。

新型デミオはまさしくコンパクトカーであるので，守るべき価値はしっかり守った上で，これまで仕方なく行ってきたコンパクトカーゆえの妥協や言い訳は一切せず，コンパクトカーなのにここまでするか，といった価値を追求する，そういう「志」である。

この「志」を共有化することによりチームの方向性はぶれることなく，クラス概念を打ち破るコンパクトカーを世の中に送り出すことができた。

Fig. 3　Product Aspirations of New Demio

3. ターゲットカスタマとコンセプト

新型デミオのターゲットカスタマは「楽しさの徹底的な追求」と「良識に基づいた行動」の二面性を融合させた独自の世界観を楽しむ，流行に敏感な若年層である。彼らは創造性を発揮しながら仲間との刺激的な体験を通じ，成長を思い浮かべた自負心に満ち溢れていることを理想としており，新型デミオは，発信・体験・成長という3つのタッチポイントで，彼らが強い絆を感じる価値を提供する。

商品コンセプトは「Inspiring Lifestyle Compact」。信じることを楽しさに変える若者に，理性と感性を強く刺激する新たな体験を提供し共に成長をするクルマ，である。

4. ブレイクスルーポイント

以上のようなターゲットカスタマに対して，今回，新型デミオで打ち破ったクラス概念は次の3点である。

4.1　スタイリングと品質感

スタイリングは，デザインコンセプトカー「マツダ靭（SHINARI）」に代表されるのびやかな魂動デザインを，コンパクトカーである新型デミオでいかに表現するかがブレイクスルーポイントであった（Fig. 4）。

魂動デザインのフィロソフィをコンパクトカーのサイズで解釈し，エネルギーの凝縮によって生み出される爆発的な前進感を骨格から練り直し表現することで，クラスを超越する存在感と生命感にあふれるスタイリングを実現した（Fig. 5）。

インテリアにおいては，空間構成・造形・質感・カラーコーディネーションなど全てを変革し，コンパクトカーとは思えない品質感を実現している（Fig. 6）。

また，新型デミオでは「スタイルコレクション」というキーワードで，多彩なターゲットカスタマをイメージして複数の世界観を表現することにチャレンジした（Fig. 7）。

Fig. 4　Expression of KODO Design

Fig. 5　Exterior Design

Fig. 6　Interior Design

Fig. 7　Style Collection

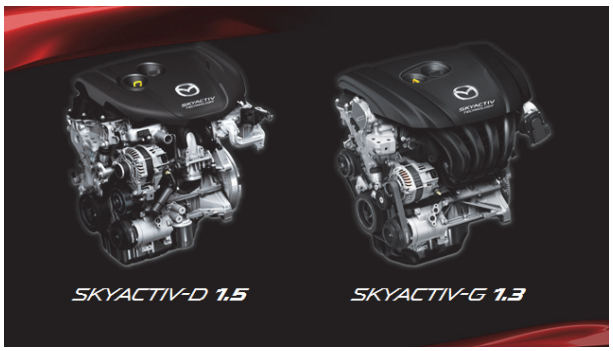


Fig. 8　SKYACTIV Engine

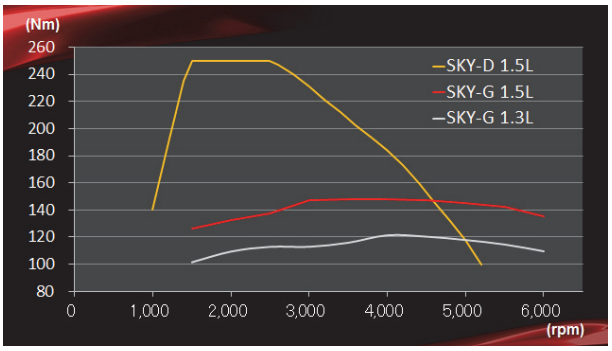


Fig. 9　Engine Torque

Fig. 10　Drive Selection

4.2　走りと燃費

新型デミオでは，走る歓びと優れた環境・安全性能を両立する「スカイアクティブ テクノロジー」において，これまでの新世代商品の設計思想を継承しながら，全てをコンパクトカーセグメント向けに新開発した。

エンジンはグローバルで次の3つを用意した（Fig. 8）。

1つ目は新開発の小型ディーゼルSKYACTIV-D 1.5。このエンジンは1200rpmから2.5Lガソリンエンジン並みの最高トルクをフラットに発生し5000rpmオーバまでスムースに回り，のびやかで軽快な走りを実現する（Fig. 9）。

2つ目は新開発の1.3LガソリンSKYACTIV-G 1.3。これまでと同様，低燃費はそのままに，高出力化で走りの性能を向上した。

3つ目はアクセラで導入済のSKYACTIV-G 1.5。ガソリンのAT車には「Drive Selection」というモードスイッチを用意し，SPORTモードに切り替えることにより，ギヤおよび燃料のマップを変更し加速性能をサポートする。これにより，例えば混雑した高速道路への流入時の安心感を向上している（Fig. 10）。

オートマチックトランスミッションはガソリンエンジン用とディーゼルエンジン用に2タイプを用意した。いずれも6速で，小型・軽量化や抵抗の低減，ロックアップ領域の拡大などにより燃費性能の向上とともにダイレクト感を強化した。

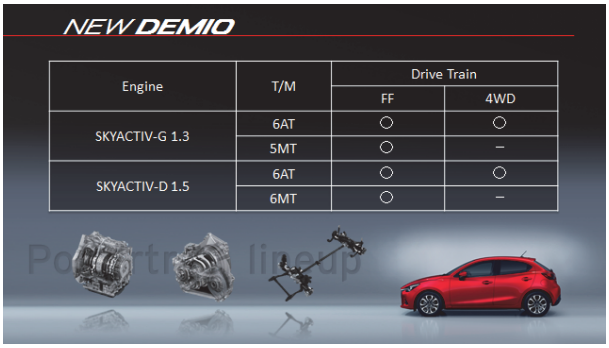
マニュアルトランスミッションはこれまでにはなかった5速をガソリン車に新設定。6速同様，ショートストロークとし，SKYACTIV-MTならではの軽快で小気味よいシフトフィールを踏襲した。

4WDシステムはCX-5から採用している，路面状況に応じて前後のトルク配分を自動的に制御する「アクティブオンデマンド方式」を採用。4WDモデルの走破性と車両の走行安定性を大きく向上させた。
グローバルでのパワートレインラインナップをTable 1に示す。

新型デミオは，パワートレインだけでなく，ボデー，シャシーなど全てのSKYACTIV 技術を進化させることで，走りと燃費を更に高い次元で両立している。

特に燃費については，モード燃費のみならず，他のSKYACTIV パワートレインと同様，お客様が実際に使用される中での実用燃費で高い実力を発揮できるよう，クルマトータルでの造り込みを行った。

Table 1　Powertrain Line Up



4.3　長距離ドライブ性能

これまでのコンパクトカーは，主に市街地走行を重視し長距離ドライブ性能についてはプライオリティを下げる傾向にあった。

新型デミオでは，長距離ドライブは当たり前な，より大きな車からのダウンサイジングを検討されるお客様にも満足いただけるよう，長距離ドライブに関わるさまざまな性能を総合的に向上させた（Fig. 11）。

アンダ・アッパボデーとも，骨格を一から見直し，アテンザやアクセラで体現した新世代商品の思想をコンパクトなサイズでも実現した。これによりクラスを問わず人間中心のクルマ造りを追求し，最適なドライビングポジションや優れた視界を実現している。

安心・安全においては，コンパクトカーといえども妥協せず，先行する新世代商品が採用した先進安全技術群を展開している。新型デミオが採用している先進安全技術をFig. 12 に示す。HMIにおいても，アクセラから展開されたアクティブドライビングディスプレイおよびマツダコネクトを，コマンダも合わせて新型デミオでも展開している（Fig. 13）。

また，今回骨格を見直したことで燃料タンク容量を拡大，SKYACTIV エンジンの低燃費と相まって，これまでの新世代商品同様，1000kmオーバの航続距離（モード燃費×燃料タンク容量）を実現した（Fig. 14）。

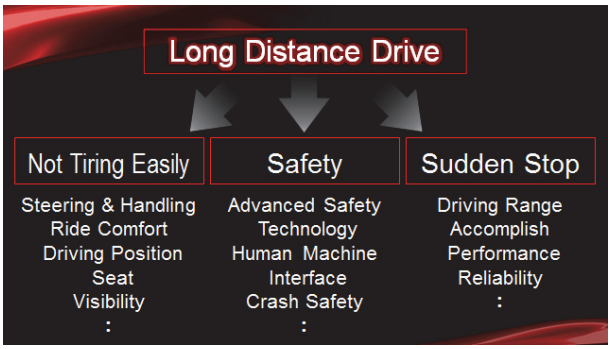


Fig. 11　Long Distance Drive

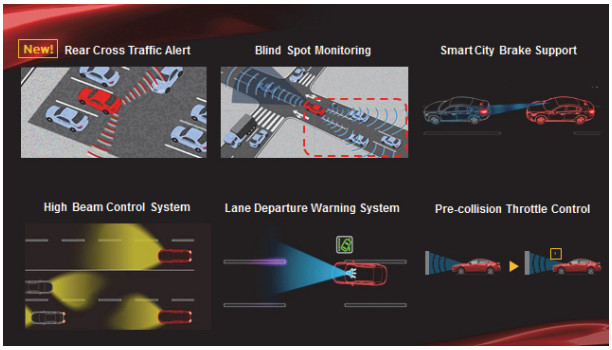


Fig. 12　Advanced Safety Technology

Fig. 13　HMI of New Demio

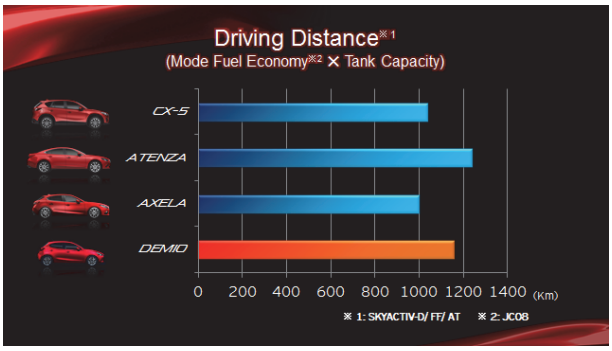


Fig. 14　Driving Range

5. 新型デミオの提供価値

新型デミオがお客様に提供する価値としてまとめると次のようになる。

まず，メインターゲットである運転経験の少ない若年層のお客様には，運転中の不安を少しでも解消し，逆に余裕を感じていただくことで運転の楽しさに目覚めていただく。

次に，より大きなサイズのクルマを含めて，さまざまなクルマを経験されてきたようなお客様には，今まで乗っていたクルマ同様，クラス概念を打ち破った“安心感”と“満足感”を感じていただく。

そして，新型デミオに乗っていただける全てのお客様には，ワクワクする「スタイリングと品質感」，高い次元で両立した「走りと燃費」，そしてどこまでも行きたくなる「長距離ドライブ性能」によって「笑顔」と「楽しさ」を提供する。

6. おわりに

新型デミオは，新生マツダブランドのDNAをこのコンパクトなボデーに凝縮するとともに，デミオブランドの真骨頂である「常識を打ち破る！」に今回もチャレンジし体現することで，コンパクトカー市場に一石を投じるモデルを送り出すことができたと自負している。

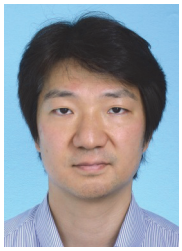
■著　者■

土井 歩

野間 幸治

柴田 恵一郎

西河内 研


磯部 太郎

特集：新型デミオ

2

新型デミオのデザイン開発
Design Development of New DEMIO

柳澤　亮*1
Ryo Yanagisawa

要　約

魂動デザインの第4弾である新型デミオは，機能的価値に偏重する現代の国産コンパクト・ハッチバック市場へのアンチテーゼとして，上級車種同様の情緒的価値を提供することで，ユーザーの人生に心の豊かさを与えることを目指した。「コンパクトカーだから」との既成概念を打ち破り，独自のポジションを確立する革新的なクルマを標榜し開発した。

そのためにデザインでは，一切の妥協を排して素直に「カッコイイ」と思える姿を追求し，厳しいボディーサイズ制約の中で，魂動デザインを凝縮し，進化・飛躍すべくチャレンジをした。①伸びやかな前進感と踏ん張り感による新たな走りの骨格「Pouncing Motion（跳び掛かる動き）」，②獲物を見据える彫りの深い顔付きと豊かなボディーの「生き生きとした表情」，③クラスを超えた素材使いによる「圧倒的な質感」，④顧客の好みに合わせて色や素材のスタイルを選べる「洗練のコーディネーション」の四つのポイントにより，他に類を見ない「圧倒的な存在感・生命感・質感」を実現した。

Summary

New Demio / Mazda2, the fourth in Mazda's lineup of new-generation products that feature KODO (Soul of Motion) design, is aimed at enriching the life of its users by offering emotional values comparable to those offered by high-end models, as the antithesis of Japan's compact hatchback market where too much emphasis is placed on functional values. We set a goal for breaking through the conventional image of compact cars and developing a groundbreaking vehicle that would establish its unique position.

To achieve this goal, we pursued **a stand-out styling** by concentrating, innovating and evolving the KODO design concept, without making compromises, under a severe body size restriction. As a result, the New Demio / Mazda2 has realized **an unrivaled Dominant Presence, Sense of Vitality, and Quality Feel,** with the focus on the following four points: (1) **Pouncing Motion** delivered by a new framework with unrestrained driving force and ground-gripping force; (2) **Spirited Expression** represented by a rich body line and a sharply sculptured front face like an animal watching its prey; (3) **Stunning Quality Feel** with the use of materials that outclass any other in the segment; and (4) **Sophisticated Coordination** that offers flexible options for colors and materials.

1. はじめに

新型デミオをデザインするに当たり，私たちがゴールとして描いたのは，深く満ち足りたユーザーの笑顔である。クルマに乗り込むとき，ステアリングを握ったとき，たたずむ愛車を眺めるとき，気の合う仲間と遊びに出かけるときなど，クルマと触れ合う一瞬一瞬で豊かな時間をともに過ごすことで，ユーザーの人生が深い笑顔に満ちたものになることを描いた。そうしていつまでも愛着を持って乗り続けていただきたいとの願いを込めて，このクルマを創ってきた。

そのためには機能性の高さでは計れない感情的な結びつき，言い換えれば，見るたびに使い込むほどに惚れ込み，本当に良いクルマを手に入れたと思えるようなモノづくりを追求する必要があった。このクルマは「魂動（こどう）-SOUL of MOTION」を採用した第4弾の商品として，圧

*1　デザイン本部
Design Div.

倒的な存在感と生命感にあふれる姿を追求している。骨格・表情・造形・質感・コーディネーションを匠の技で磨き上げ，毎日をともにしたい唯一無二の存在だと思っていただけるクルマを目指した。

2. デザインコンセプト

2.1　圧倒的な存在感と生命感にあふれたデザイン

新型デミオでは，これまでのクラス概念を超えた圧倒的な存在感と生命感にあふれた新たなコンパクトカー像を目指した。これまで，より大きなクルマで培ってきたマツダのデザインテーマ「魂動（こどう）-SOUL of MOTION」を，小さなボディーに凝縮し，再構築している。

エクステリアでは，エネルギーの凝縮によって生み出される爆発的な前進感，踏ん張り感のある骨格を造り上げた。そして端正ながらも生き生きとした表情と，生命感あふれる造形を匠の技で造り込んでいる。

インテリアでは，ドライビングに集中できるコクピットと抜けのよい助手席空間を鮮やかな対比でデザインし，細部に至るまで素材と形状を吟味して質感高く造り込んだ。また，自分のお気に入りの服を選ぶようにクルマのカラーコーディネーションを選べる「スタイルコレクション」では，スタイリッシュなラインアップを揃えた（Fig. 1）。

Fig. 1　Exterior Overall View

3. エクステリアデザイン

3.1　爆発的な前進感，踏ん張り感の構築

エクステリアデザインでは「走りの骨格」を徹底して追求した。全高を低く抑え，他に類を見ないロングノーズ＆コンパクトキャビンとすることで，SKYACTIVのパワートレインを強調しつつ，リアタイヤに荷重がかかったスポーティなシルエットとしている。このために，前モデルに対してフロントタイヤを80mm前へ移動するとともに，居住性を悪化させないようAピラーを立てながら付け根部分では約80mm後方へ移動している。

また，ボディーの前半と後半で異なる動きを持たせることで，爆発的な前進感を表現した。後半部は勢いよく跳ね上がるショルダーでリアエンドを高く突き上げ，エネルギーを溜めて緊張した凝縮感を表現し，前半部は前後にスピーディに抜けていく動きでエネルギーを一気に解放し，爆発的に前進する様子を肉感的に表現した。

タイヤの配置にもこだわった。大地を捉える力強いスタンスを生み出すため，クラス最大径のタイヤを極限まで車体の四隅に配置して，ショートオーバーハング，ワイドトレッドとした。力強く張り出した前後フェンダーにより，タイヤを起点とする台形シルエットを造ることで，踏ん張り感と俊敏な走りを強調している。

これらの力強い骨格をベースにして，鍛え上げられた筋肉を彷彿とさせる艶やかな立体造形を表現し，金属加工の限界に挑戦した匠の技で実現した（Fig. 2, 3, 4）。

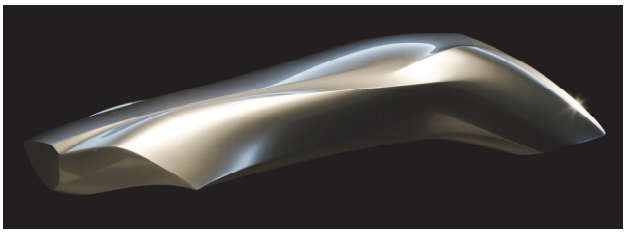


Fig. 2　Theme Sculpture

Fig. 3　Cabin Proportion

Fig. 4　Wide Stance and Trapezoid Shape

3.2　フロントビュー

ヘッドランプやラジエーターグリルを極限まで低い位置に前傾姿勢で配置し，地を這って獲物を狙う猛獣のような，精悍で端正でありながらも生き生きとした表情を生み出した。ハイグレード仕様のヘッドランプでは肉厚の導光リングを丸く配置し，野生動物の鋭い瞳に見立ててデザインした。これにより昼夜を問わず遠くからでもマツダ車と分かる個性的な顔を造り上げている。なお，プロジェクターとパラボラを組み合わせたLED4灯ヘッドランプをマツダで初めて採用した。

新世代のマツダ車の証であるクロームのシグネチャーウイングは，より力強く立体的な造形に進化させ，金属の塊を削り出したかのような重厚感と質感を実現した。ウイングの先端はヘッドランプの中心を貫き，車両後方に伸びていくかのようにデザインすることでシグネチャーウイングとヘッドランプの一体感をさらに高め，クルマ全体の前後方向の動きに勢いを持たせている。

ラジエーターグリル内部は，冷却開口エリアとライセンスプレートエリアを明確に分けた，上下2段構成とした（Fig. 5）。

Fig. 5　Front-end Design

3.3　リアビュー

ボディーサイドから一気に駆け上がるショルダーのキャラクターラインと，それに続く高い位置にレイアウトしたリアコンビネーションランプ，強く前傾したバックウインドウなどによって，高く突き上げた立体的なリアエンドを創出した。さらに，強く張り出したリアフェンダーと大径タイヤがそれらをしっかりと支えることで強いスタビリティを実現し，一気に前進しようとする力を溜め込んだ，迫力のあるリアビューを造り上げている。

リアコンビネーションランプにはリッドランプを採用することで，薄くシャープな横長のデザインを実現した。これにより，フロントからボディーサイドを経てリアへと流れてくる動きをブランドシンボルへとまっすぐ導くとともに，リアビューを精悍に引き締めている。また，フロントの生命感のある表現をリアにも展開し，U字型のテール／ストップランプを独自の発光シグネチャーとした。

ルーフエンドでは，リフトゲートの上端をスポイラー形状とすることで，高い空力性能と美しさを両立した（Fig. 6）。

Fig. 6　Rear View

3.4　ホイールデザイン

ダイナミックな走りを予感させるクラス最大径のタイヤの採用に伴い，16インチおよび15インチのアルミホイール，15インチフルキャップスチールホイールを設定した。いずれのホイールも中央からタイヤに向かって広がる躍動感と，ボディーをしっかり支える金属の強靭さを追求した。

16インチアルミホイールには切削加工を採用し，金属の本物の輝きと，ガンメタリック塗装のスポークとのコントラストによって上級仕様の特別さを際立たせた。

15インチアルミホイールは，より大きく見えるように形状のアクセントを外側に配置し，質感が高くスポーティなデザインとした。

フルキャップスチールホイールは，大小2本のスポークを立体的に組み合わせ，強さとしなやかさを併せ持つデザインとした（Fig. 7）。

Fig. 7　Wheels (16”Alloy, 15”Alloy, 15”Steel with Cap)

4. インテリアデザイン

4.1　走る歓びと，所有する歓びの空間

インテリアでは世界のベンチマークとされることを目指

し，これまでにない，新たなコンパクトカー・インテリアの世界を創出した。そのために，匠の技が息づく造形美，クラスを超えた質感，ドライバー中心の空間構成，カラーコーディネーションなど，すべてを飛躍的に進化させた。ドライバーシートに納まるたびに所有する歓びを満たすとともに，もっと走りたくなる気持ちを高揚させるインテリアを目指した。

デザインのヒントは小型飛行機である。メーターフードから広がるインストルメントパネルは飛行機の翼，丸い空調ルーバーはジェットエンジンの排気口，ドアトリムに放射状に広がるラインはジェットエンジンから吹き出す気流をイメージし，大空を翔るようにこのクルマを操っていただきたいとイメージしてデザインした（Fig. 8）。

Fig. 8　Interior Overall View

4.2　二つのゾーンを組み合わせた革新的な前席空間

通常の前席空間は，車両中央のセンタースタックを中心に構成される。しかし新型デミオでは，ドライバーのコクピットゾーンを中心と捉え直し，車両の中心を意識させない革新的な構成を取った。

前席空間は，二つのゾーンの組み合わせで構成した。一つはドライバーが走りを楽しむことに集中できるコクピットゾーンである。メーターフードを頂点に，ドライバーを左右対称に包み込むようにデザインすることで，自然に体の中心軸をまっすぐ保つことができ，クルマとの強い一体感が生まれる。また，メーターフードからドアトリムとコンソールのニーレストパネルへとつながる動きによって，前進感を強調している。

そしてもう一つが，左右への広がり感のある助手席ゾーンである。メーターフードから水平に広がるインストルメントパネルが，乗員の腰から下に安定感・安心感を与えながらも，上半身に対してはすっきりとした開放的な空間を造り出している。

この二つのゾーンを際立たせているのが，丸型三つに薄型一つという独特な空調ルーバーの配置である。丸型のルーバーをメーターフードの左右に一つずつ配置してドライバーを挟み込むことで，コクピットゾーンの中心軸を強調した。そして助手席側には，性能を犠牲にすることなく約30mmという通常の半分以下の高さを達成した薄型ルーバーを採用し，インストルメントパネルのスリットと一体化させてその存在感を消している。これにより，コクピットと助手席を車両の中央で隔てていたセンタースタックの存在を排除でき，広々とした革新的な助手席空間を造り上げている（Fig. 9）。

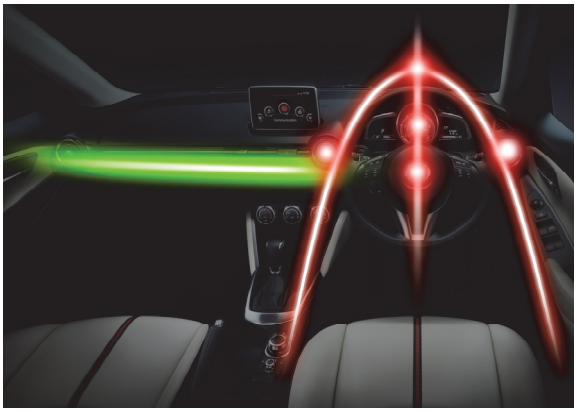


Fig. 9　Interior Space

4.3　ヒューマン・マシン・インターフェイス（HMI）

操作視認系のシステムは，アクセラから採用したマツダのHMIコンセプト「Heads-up Cockpit」に基づいて開発した。メーターフードの上にはアクティブ・ドライビング・ディスプレイを，ダッシュボードには7インチセンターディスプレイを，そしてセンターコンソール上にはコマンダーコントロールを配置した。

メーターは，円形の1眼メーターをウイング状のデジタルディスプレイで挟んだレイアウトを採用している。ハイグレード仕様では，中央をアナログタコメーターとデジタルスピードメーターを組み合わせ，左右にはインフォメーションディスプレーを配置した。その他の仕様では，中央をスピードメーターとして，左側のウイングにデジタルタコメーターを配置した。金属調のリングや精緻な立体文字盤により，スポーティかつ上質なデザインとした（Fig. 10）。

Fig. 10　Human Machine Interface

4.4　センターコンソール

前席左右のシート間距離の拡大に伴い，クラスを超えた幅広のセンターコンソールを実現した。これにより，大型フロントトレイ，コマンダーコントロール，二つのカップホルダーとフレキシブルリアトレイなどの多彩な機能を盛り込むとともに，1クラス上の雰囲気を感じるデザインができた。またコマンダーコントロールには，手のひらで支えて操作を安定させるパームレストを採用した。

4.5　シート

シートデザイン開発では，まずカラースタイルの世界観を決めてからそれにマッチしたシート形状を造るという，通常とは異なるプロセスを採った。フロントシートには優れたホールド性を持ちながら，前後方向の中心軸をしっかり感じるスピード感のあるテーマを採用した。また，肩の部分を可能な限り絞り込むことで，後席からの開放感を与えた。ハイグレード仕様ではショルダー部を立体的な形状としてスポーティなイメージを強調している。

4.6　匠の造形と高い質感へのこだわり

新型デミオは，細部に至るまでコンパクトカーの概念を覆す圧倒的な質感表現を目指した。豊かな面造形と細部の質感は，匠のこだわりをもって造り込んだ。インストルメントパネル上面の膨らみやドアトリムショルダー部の表情などには，光と影が織りなす彫刻的かつ上質な造形表現を随所に取り入れた。

表面処理では，サテンクロームやピアノブラック，光沢カラーパネルのハニカムシボ，カーボン調シボ，レザーとステッチの使い方など，素材の持つ質感を効果的に組み合わせることで，スポーティで質感高いインテリア空間を創出している。特に金属調パーツにはこだわり，削り出しのような精緻な表現や，鍛造のような強靭な表現など，パーツごとに表現を細かく変化させた。

夜間照明色はすべて白色化し，洗練された上質さを表現した（Fig. 11, 12）。

Fig. 11　Stunning Quality

Fig. 12　Stunning Quality

5.　カラーコーディネーション

5.1　スタイルコレクション

新型デミオの特徴の一つが，個性の異なる複数のコーディネーションから選ぶ楽しさを提供する「スタイルコレクション」である。例えば数ある洋服の中から自分らしい一着を選ぶように，お客様が自分好みのスタイルを楽しみながら選ぶことで，クルマに自分らしさを表現し，より深い愛着を持てるようになると考えた。

スタイルの選択には幅広い色域を設定し，ボディーカラーでは11色，インテリアカラーでは色と素材の組み合わせを5種類用意した。

5.2　部品の対応

「スタイルコレクション」に対応するため，部品の構成を工夫した。ラジエーターグリルのバー，助手席前のパネル，コンソール前方のニーレストパネル，ドアアームレスト上下部，空調周りの加飾などをあえて分割部品とすることで，ステッチを施したレザー調ソフトパネル，光沢樹脂パネルなど，色だけでなく素材までもバリエーションを持たせている。

5.3　ボディーカラー

新世代商品群で開発してきた質感の高い成熟した9色に，客層を広げる新開発の2色を加え，全11色を設定した。新色のダイナミックブルーマイカはスポーティさを追求し，強さを際立たせたピュアで鮮やかなブルーを造り上げた。もう一つの新色のスモーキーローズマイカは，艶やかな色味と硬質な輝きによってスタイリッシュな大人の美しさを表現した。

その他に，ソウルレッドプレミアムメタリック，チタニウムフラッシュマイカ，ブルーリフレックスマイカ，ディープクリスタルブルーマイカ，アルミニウムメタリック，メテオグレーマイカ，ジェットブラックマイカ，スノーフレイクホワイトパールマイカ，アークティックホワイトをラインアップした（Fig. 13）。

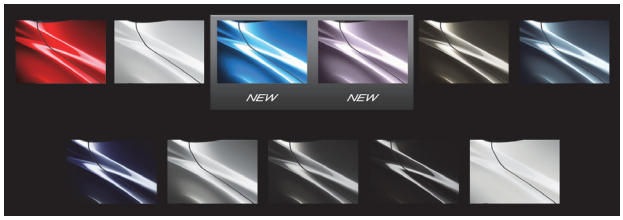


Fig. 13　Body Color Line-up

5.4　インテリアカラー

（1）スタイル1

スタンダードなスタイルながらも，基本の質感をしっかりと表現した。黒をベースに青基調のストライプを取り入れたファブリックシートや，光沢ブラックの空調リングなどをアクセントとし，加飾パネルは革シボの樹脂素材とした。

（2）スタイル2

シックで洗練されたスポーティさを表現した，ユニセックスなスタイルである。

新開発の高光沢カラー樹脂の黒い加飾パネル，エンボス加工を施したネイビーブルーのシートと，クロームシルバーをコーディネートした。

（3）スタイル3

上級モデルとして，上質さとエネルギッシュなスポーツマインドを追求したスタイルである。

黒を基調としたメカニカルな織物のシートに，赤いストライプやステッチでスポーティに仕立てた。またソフト素材のパネルやサテンクロームを採用し，上質感とクラフトマンシップを高めた。シートは仕向け地によりファブリックまたはハーフレザーコンビネーションを設定している。

（4）スタイル4

最上級モデルとして，エレガントで大胆なスポーティさを表現したスタイルである。

アテンザと同じ高級オフホワイトレザーとメカニカルな黒い織物を使用したハーフレザーシートに，鮮やかな赤いストライプやステッチを使った。またソフト素材のパネルやサテンクロームを採用し，上質感とクラフトマンシップを高めた。

（5）スタイル5

1950年代に流行したモダンファニチャーとスポーティさを融合させたスタイルで，樹脂素材の存在感を強調した赤，白，黒のヴィヴィッドな色づかいとした。

新開発の高光沢カラー樹脂の加飾パネル，エンボス加工を施した真っ赤なシートと，クロームシルバーをコーディネートした。

この高光沢カラー樹脂のパネルは，「樹脂の既成概念を覆す」という発想のもと，樹脂の原料から顔料，シボのパターンに至るまで徹底した吟味を重ねて造り上げたスタイルコレクションの特徴的なアイテムの一つである（Fig. 14）。

Fig. 14　Interior Color Coordination

6. おわりに

これまで大型の商品で培った技術とデザインを，コンパクトカーのボディーサイズで実現するということは並大抵のチャレンジではなかった。しかしコンパクトカーのクラス概念を超えた圧倒的な存在感を確立するという目標に対して，デザイン本部内外の多くの関係者の理解を得ることができた結果，全社一丸となって多くの課題をブレークスルーし，マツダ独自の世界観と理想のデザインを実現することができた。

新型デミオはマツダのラインアップの中で最も小さなモデルであるが，マツダブランドの大きな体現者でもある。魂動デザインの神髄のすべてを凝縮した新型デミオで，お客様の人生がこれまで以上に笑顔に満ちたものに変わっていくことを願ってやまない。

■著　者■

柳澤　亮

特集：新型デミオ

3

スモールカー群の車両アーキテクチャ
Vehicle Architecture of Small Car Series

吉村　康志*1　豊田　稔*2　長尾　治典*3
Yasushi Yoshimura　Minoru Toyota　Harunori Nagao
高橋　達矢*4
Tatsuya Takahashi

要　約

新型デミオ，CX-3のスモールカー群の車両全体の構想（車両アーキテクチャ）は，CX-5以降の一括企画のスコープの中で立案されたものである。本稿では，CX-5以降の車種群一括の考え方を踏まえつつ，スモールカーとしてどのように各機能，システムを統合していったかについて記述する。マツダのクルマ造りは，車両全体の構想を立案し，これを実現させるために各システムがブレークスルーする方向と，これとは反対に各システムの重点ポイントを実現するために，車両全体の構想が構築される方向の双方が存在することを一つの特徴とする。本稿ではこのような，車両全体からのアプローチとシステムからのアプローチが同時，かつ相互に機能した具体例を紹介する。これはフォルクスワーゲングループが開発したMQB（モジュラ・トランスバース・マトリックス）に代表されるような，厳格なデザインルールによって事前に全体構想を規定するモジュラ戦略とは一線を画すやり方である。他社に秀でた高い商品力を効率的に創出していくことに着目すると，増大する各機能や各構造のコンフリクトを理解し，これを最適に解決する全体構想が必要となる。従ってこうした統合機能の強化が，厳しい環境の中においてもブランドを体現する商品を創出していくのに必要不可欠であると考える。

Summary

The overall concept (vehicle architecture) of a series of small cars such as New Demio and CX-3 was developed within the scope of a bundled planning which started with CX-5. In this article, we describe how varying functions and systems were integrated in the small cars based on the idea of such bundled planning. Mazda's car manufacturing is characterized by its development approach in which each of the systems break through to turn the whole concept of the vehicle into reality, and reversely, the overall concept is developed to materialize prioritized points of respective systems. In this article, we introduce a concrete example of the vehicle-based and system-based approaches going together well. This development style draws a clear line from the modular strategy, as represented by Volkswagen Group MQB (Modular Transverse Matrix), which defines the overall concept in advance in accordance with strict design rules. Focusing on achieving a higher level of product competitiveness than that of our competitors efficiently, we need to come up with an overall concept that reconciles increasingly conflicting structures and functions and provides solutions in an optimal way. For this reason, we believe the enhanced functional integration is essential to design competitive products that embody Mazda brand even under challenging circumstances.

1. はじめに

新型デミオ，CX-3は，CX-5以降のモノ造り革新，コモンアーキテクチャ構想を進化させ，SKYACTIV技術，魂動デザインを体現する車両全体のアーキテクチャをスモールカーで実現した。PT（パワートレイン），ボデー，シャシーといったシステム，要素の技術進化，魂動デザインなどを一つの商品として，どのように空間制約の大きいスモールカーで統合してきたか，その思想と技術について記述する。

*1～4　企画設計部
Architecture Design Dept.

2. コモンアーキテクチャ構想に基づく車両アーキテクチャ

コモンアーキテクチャ構想（以下CA構想）とは，車格を越えて各ユニットや基本レイアウトの設計思想を共通化することで，多種多様な商品を効率的に創出する取り組みである。PT，ボデー，シャシーといった各機能，各システムにおいて共通の設計思想を貫くのと同様，車全体においても共通の考え方に基づいた開発を実践している。

CX-5以降の商品群は，それ以前の“セグメントごとにプラットフォームを共通化する車づくり”から，“セグメントを超えた共通のCA構想に基づく車づくり”へと刷新した。その範囲はプラットフォームに限らず車全体を対象にしている。一例を示すと，プラットフォーム戦略を推進していた時代，デザインはトップハットで主に開発する傾向があった。しかし，CX-5以降の魂動デザインでは，タイヤの車両に対する位置といったプラットフォーム領域にまでデザインの基本骨格を織り込んでいる。このような各機能の理想を車全体で最適に実現する構想を，プラットフォーム構想に対して車両アーキテクチャと称す。

車両アーキテクチャでは，着座位置や空間形成の考え方，タイヤ／サスペンション／PT／インパネ等の基本配置の考え方を構築し，この考え方に従った固定／変動構想を確立する。この際に重要なことは，各システム，ユニットの技術進化，特に機能の理想状態を実現するための“寸法上の重点ポイント”を，いかに車として成立させるか，という“賢いモノの配置計画”を体現することにある。

同種の取り組みには，昨今VW（フォルクスワーゲン）MQBに代表されるようにモジュール戦略，プラットフォーム戦略が各社で展開されている。これらに対するマツダの特徴を車両統合という視点で分析する。各社の考え方は，粒度の違い（VW MQB：30程度，日産自動車とルノーが共同開発したCMF（コモン・モジュール・ファミリー）：4+1，トヨタが提唱するTNGA（トヨタ・ニュー・グローバル・アーキテクチャ）：アッパ／アンダ）はあるものの，車をいくつかのモジュールに分け，モジュールの中で仕事が完結できる状態を作ることで構造的，機能的に分業化し，統合作業の効率化（例えば，組み合わせによるカーラインごとの開発要素の低減や部品共通化など）を図っている。

ところで自動車はデスクトップパソコンなどとは違い，機能と構造の関係が複雑に絡むインテグラルアーキテクチャといわれている。機能と構造が一体であることが前提のモジュラ概念をインテグラルアーキテクチャである自動車に適用するには，モジュール間のインタフェースやモジュールごとの役割をモジュールの開発に先行して厳格に規定，確立させることが前提となる。各社の組織改革などの施策を見ても，このような事前のデザインルールの規定が，モジュラ戦略のキーポイントであるように見受けられる。

一方，事前のデザインルールの規定は，もし事後に予測を超える新技術の織り込みや仕様変更が発生した場合，必ずしも最適な前提条件であるとはいい難く，結果的に期待する機能，性能に対して冗長となる可能性がある。そのため，事前予測の精度が重要となる。

これに対してマツダの場合は，各ユニット，システム間のルールの規定を，各機能／システムのCA構想の確立と同時並行で実施している。同時並行とする理由は，“マツダのクルマ像”を高い次元で実現するには，各機能，システムの重点ポイント，及び，これによるコンフリクト要素を十分熟知したうえで，ルールを規定する必要があるためである。すなわち，機能－構造の複雑性に対して，高度な統合機能を発揮して最適解を導くことで冗長性を回避し，高い商品力を効率的に生み出していくアプローチといえる。

これは，大規模メーカが，厳しい環境によって増大する新規開発要素を，効率的な開発によるリソースの再配分という視点で対処しようとしているのに対して，中規模メーカのマツダでは，ブランド戦略により商品の目指す方向が一致していることを利して，全体集約志向で新技術の具現化と効率化を一挙に達成しているといえる。

以下に，CX-5以降，一括で構築してきた車両アーキテクチャを紹介しつつ，マツダの商品ラインナップにあって最もコンパクトであり，そのために構造面の制約条件も厳しい新型デミオ，CX-3における車両統合の注力ポイントを，フロント，センタ，リヤに分けて述べる。

3. フロントアーキテクチャ

3.1 横置きFFアーキテクチャの新しい考え方

横置きFFは，1960年代後期から，小型車を中心に普及したレイアウトである。フロントタイヤとトランスミッション，エンジンが一体で配置されることで小型化を図ることができ，初代フォルクスワーゲンゴルフなど小型車のスタンダードとなった。横置きFFのレイアウトは，エンジン自体の小型化に加えて，タイヤ～アクセルペダル間の寸法を極力小さくすることが原則であり，これによりエンジンルーム長を最小化し圧倒的な空間効率を実現している（Fig. 1）。

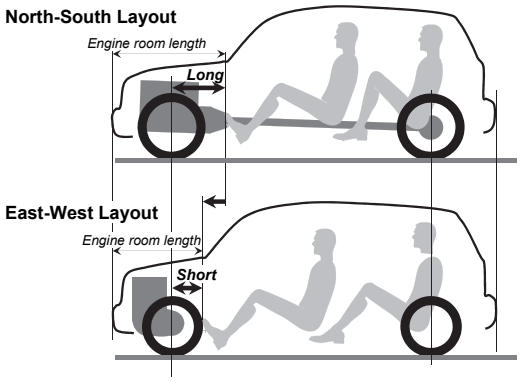


Fig. 1　East-West FF Layout

一方タイヤ～アクセルペダル間の寸法を小さくすることは，①タイヤサイズを大きくすることが困難である，②室内にホイールハウスが出っ張り，ペダルが内側に寄った窮屈なドライビングポジションを強いる，などの弊害がある。

マツダではCX-5以降の商品において，マツダの走る歓びを体現する車両アーキテクチャとするため，従来の横置きFFの概念を根本的に変革した。まず，従来のFFの定石とは異なり，タイヤ～アクセルペダル間の寸法を拡大した。この拡大されたスペースを活用して，ペダルが乗員に正対する理想的な運転操作配置と，SKYACTIVエンジンの重点ポイントである「ガソリン：4-2-1排気システム，ディーゼル：後処理システム（DPF）」を実現した（Fig. 2）。

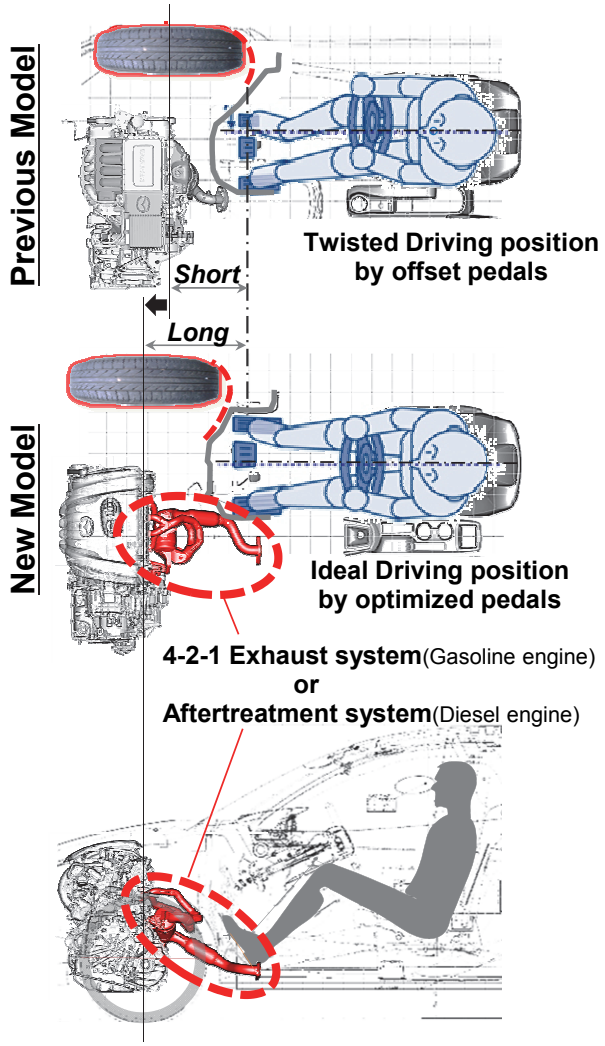


Fig. 2　Key Points of New Model Layout

また，このタイヤ～アクセルペダル間の寸法拡大は，大径タイヤの装着を可能とするとともに，タイヤに対してキャビンを相対的に後方化することができ，「魂動デザイン」を基本骨格，プロポーションレベルで実現することにも貢献している（Fig. 3）。

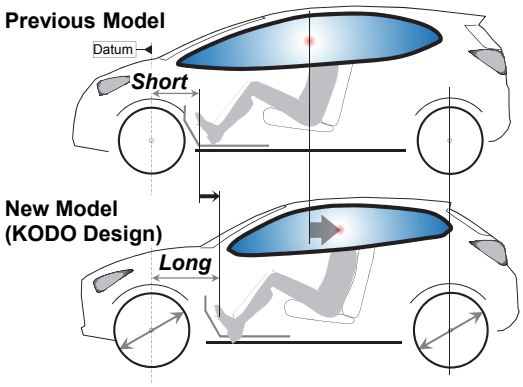


Fig. 3　Cabin Proportion

3.2　コンパクトなエンジンルームの実現

車両サイズの制約が厳しいスモールカーでは，コンパクトなエンジンルームの実現は不可欠である。そこで，タイヤ～アクセルペダル間寸法は拡大しつつ，タイヤよりも前のフロントオーバハング部分を極小化することが，車両アーキテクチャ実現のブレークスルーポイントである。

具体的には，フロントオーバハングを決める機能，部品構成を全て記述した，主要寸法の決定ルートを策定し，各機能，システムがオーバハング値にどのように影響しているかを明確化した。これにより，部品構成の最適化と，各部品の効率的な最小化を実現した（Fig. 4）。

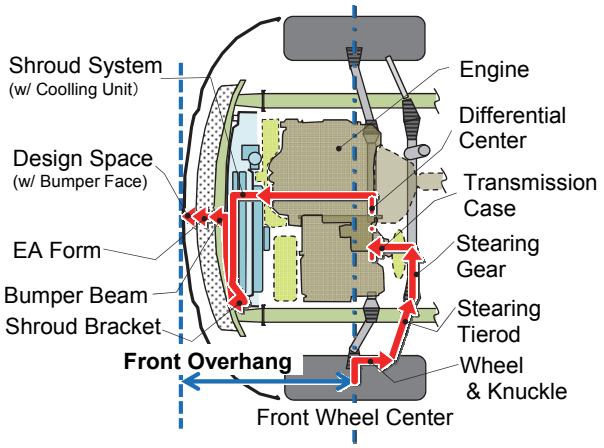


Fig. 4　Example of the Route to Decide Front Overhang

またこれにより，エンジンやラジエータの搭載位置といったデザインルール，固定変動構想をユニットの機能，構造とセットで最適に設定することができた。主要寸法の決定ルートには静的な寸法構成に加えて，衝突時のエンジン挙動といった動的要件も考慮し，乗員に障害を及ぼさない部品配置構成を明確にした。その結果，新型デミオ，CX-3は，全世界の衝突安全性能をクリアしつつ，コンパクトな外観諸元を達成した。

3.3　骨格革新による新たなクロスオーバ価値の実現

タイヤ～アクセルペダル間の寸法拡大は，クロスオーバの新しい骨格実現にも貢献している。クロスオーバに相応しい大径タイヤを装着するには，従来の横置きFFでは，ドライバの足元フロアを上昇させて対応する必要がある。CX-3では，タイヤ～アクセルペダル間の寸法拡大により，足元フロアを上昇させることなく，大径タイヤの装着を実現している（Fig. 5）。 これにより，グランドクリアランスを確保しつつ，全高を国内機械式立体駐車場に納まる1550mmに設定でき，他社が追随できない独自のポジショニングを達成した。また，足元フロア位置を新型デミオと共通にすることができ，新型デミオとの共通構造でクロスオーバを実現することができた。

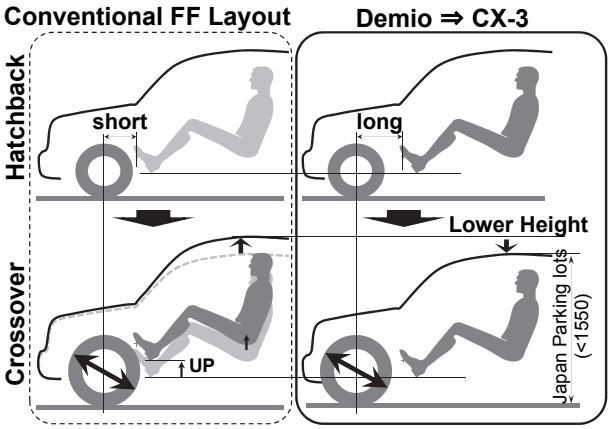


Fig. 5　Large Tire and Passenger Layout

4. センタアーキテクチャ

4.1　コンソール周りの操作系の革新

前述，Fig. 2に示すように，従来の横置きFFでは，室内にタイヤハウスが張り出すために，ペダル配置が内寄りになると同時に，乗員も内側に着座する配置が基本である。これは，スモールカーで特に顕著である。タイヤ～アクセルペダル間の拡大は，ペダル配置の最適化とともに，乗員全体を車両外側に配置することを可能とし，従来のコンパクトカーでは実現できなかった，幅広いコンソールスペースを使った操作系の最適配置を実現した。具体的には，新たな操作デバイスであるコマンダなどを追加しながらも，従来は直列にしか配置できなかったパーキングブレーキとカップホルダを，上級車種と同様の並列配置とした。これにより，全ての体格の人が，適切なリーチの中で一連の操作ができるドライバーズカーとして理想的な運転環境をスモールカーで実現した（Fig. 6）。

また，前席乗員を車両外側に配置したのに対して，後席乗員は相対的に内側に着座するポジションとした。これによって，センタ部分が前方へ抜けていることにより後席乗員に広さ感をもたらすとともに，前後席でコミュニケーションが広がる空間を実現した（Fig. 7）。

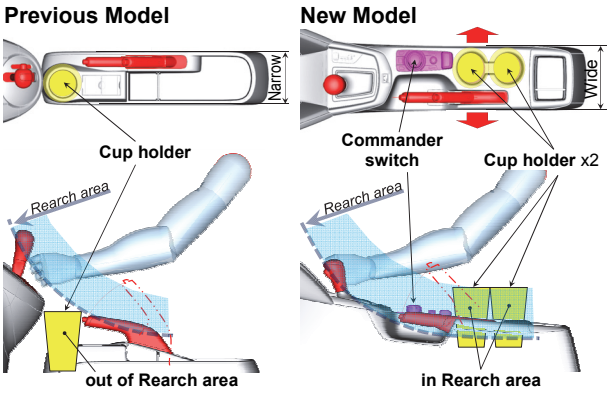


Fig. 6　Rear Console Layout

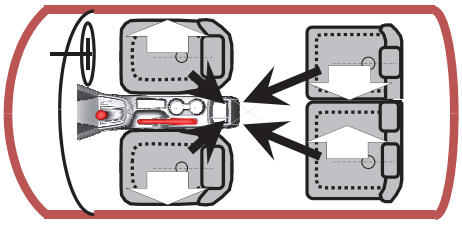


Fig. 7　Communication Space

4.2　乗員～車両外側スペースの効率化

乗員着座位置を車両外側に配置することによる課題は，乗員～車両外側スペースの縮小であり，特に国内5ナンバー幅を達成するには，側面衝突に対応するスペース，構造確保が最重要課題である。乗員より外のスペースにおいても，寸法制約となる機能，構造を明確にする，主要寸法の決定ルートの考え方を採用し，最小スペースでグローバルな側面衝突要件を満足する寸法と構造を明確にした（Fig. 8）。

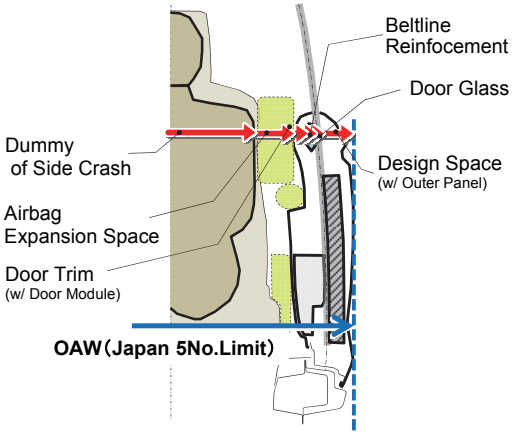


Fig. 8　Example of the Route to Decide Overall Width

4.3　運転環境におけるCA構想と乗員着座位置

(1) 運転環境におけるCA構想，固定／変動構想

CX-5以降の商品群は，“デミオでもアテンザでも人間にとって理想の運転席は共通”という考え方の基，車種群

共通の理想のドライビング環境を目指している。スモールカーでこれを達成する方策として，オルガンペダルなど，従来上級車種にのみ適用されてきたユニットをスモールカーに展開することに加え，立ち姿勢から寝姿勢まであらゆる着座姿勢に対応する固定／変動構想を構築した（Fig. 9）。

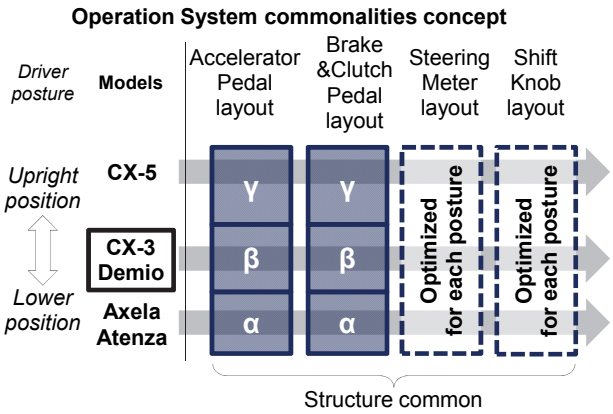


Fig. 9　Concept of Operation System Commonalities

Fig. 9に示すように，着座姿勢に応じて，ペダル，ステアリング，シフトの理想を実現するレンジをそれぞれ規定し，これに応じてきめ細かい固定／変動構想を設定した。具体的には，ペダル類は，理想レンジが比較的広いので，3種類の構造で全姿勢をカバーする構想とし，ステアリング，メータ，シフト配置については，理想のレンジが狭いために，着座姿勢が比較的近い車種群で共通構造とした上で，その中で変動要素をきめ細かく設定することで各車要件に対応した。新型デミオ，CX-3のステアリング，メータ，シフト周りは乗員着座姿勢が近いため共通構造とし，一括で効率的に理想運転環境を実現した。

（2）新型デミオ，CX-3の乗員着座位置

乗員着座位置は，スモールカーの「魂動デザイン」である躍動感の表現と，空間を有効活用するために，アップライトポジションとし，アクセラ，アテンザに対して立ち姿勢とした。また，CX-3については，前述の国内機械式立体駐車場に納まる1550mmの全高に加え，高い乗車姿勢による視界の良さ，乗り降り性の良さなど，クロスオーバとして訴求点となる複数の要件を最適に満たす乗員ポジションに設定した（Fig. 10）。

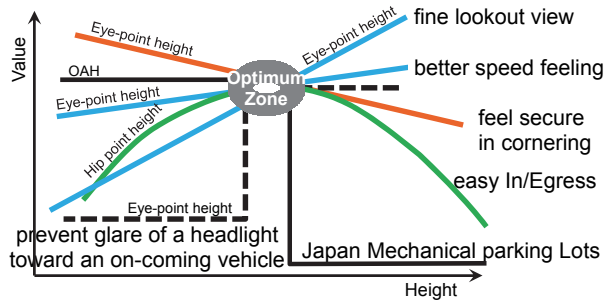


Fig. 10　Optimum Zone of Height

5. リヤアーキテクチャ

5.1　スモールカーのリヤアーキテクチャのねらい

新型デミオ，CX-3のリヤサスペンション形式はCX-5，アテンザ，アクセラのマルチリンクに対してトーションビームアクスル（以下TBA）を採用した。両者は構造面での違いが大きいためTBAに最適化したアーキテクチャとした。

CX-5，アクセラ，アテンザのマルチリンクは，トレーリングアーム取り付け位置を上方配置することが重点ポイントである。これは，突起などの路面入力をサスペンションストロークにより吸収させ，ブッシュへの前後入力を低減することで，乗り心地性能を向上させる方策である。これはマツダ共通の乗り心地性能向上の考え方であるため，サスペンションが異なるスモールカーでも共通の注力点である（Fig. 11）。

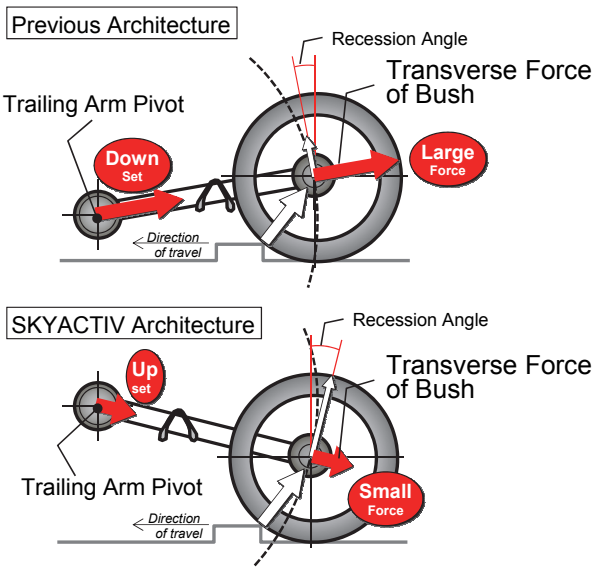


Fig. 11　Reduction of Rear Suspension Transverse Force

また，クロスオーバを持つスモールカーでは4WDの設定が必要である。従来構造ではTBA 4WDは2WDに対してサスペンションやボデーに大幅な変更を加える必要があり，性能面でも十分とはいえないなどの課題がある。この理由は，TBAの左右を連結するクロスビームが4WDのプロペラシャフトと干渉するためである。クロスビームの上下位置は，トレーリングポイントと連動するジオメトリ上の制約があり，かつクロスビームが横剛性を分担するため，剛性確保のためにクロスビームをストレートに配置する必要があるなどレイアウトの制約が大きい。

従来は，2WDで理想のジオメトリとストレート配置を実現し，4WDはそれをベースに，クロスビームを湾曲させて4WDを成立させてきた（Fig. 12）。

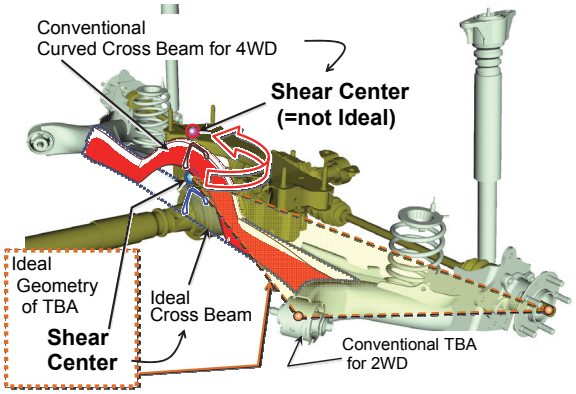


Fig. 12　Conventional TBA for 4WD

以上から，以下2点をレイアウトの最重点課題とした。

① トレーリングブッシュの上方化を，TBAにおいても実現する。

② 性能面で妥協のないメカニカル4WDを実現し，2WD／4WD，ハッチバック（新型デミオ）／クロスオーバ（CX-3）で共通構造を実現する。

5.2　ねらいを実現するブレークスルーポイント

トレーリングブッシュを上昇させる実現構造においての工夫について記述する。TBAは構造上，サスペンション入力を全てトレーリングブッシュで受けるため，マルチリンクのようにフレーム下面に穴を空けて，ブッシュをフレームの中に入れて上昇させることは困難である。従って，フレーム断面形状の最適化に加えて，マルチリンクに対して乗員を内側に着座させるなどの工夫をすることでトレーリングブッシュの上方化を達成した。この乗員位置の内側配置は，前述Fig. 7の前後席のコミュニケーションが広がる空間構成の実現のソリューションにもなっている（Fig. 13）。

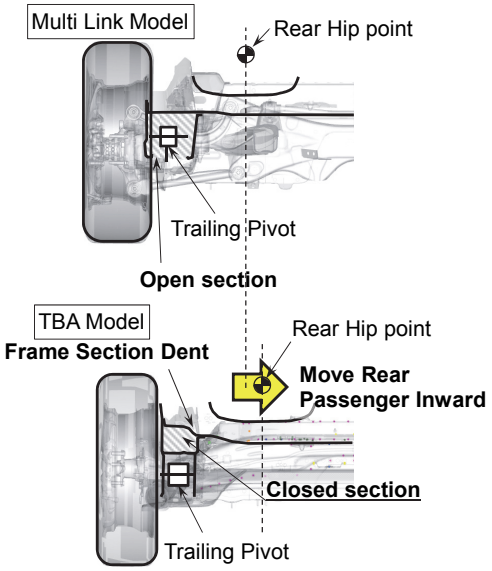


Fig. 13　Trailing Arm Pivot Position and Frame Section

トレーリングブッシュの位置を上昇させると，クロスビームも連動して上昇させる必要がある。これまでの構造はクロスビームの上方に排気管を配置していたため，クロスビームが上昇すると排気管のスペースが不足する。このため，クロスビームの下方に排気管を配置するコンセプトを採用した（Fig. 14）。

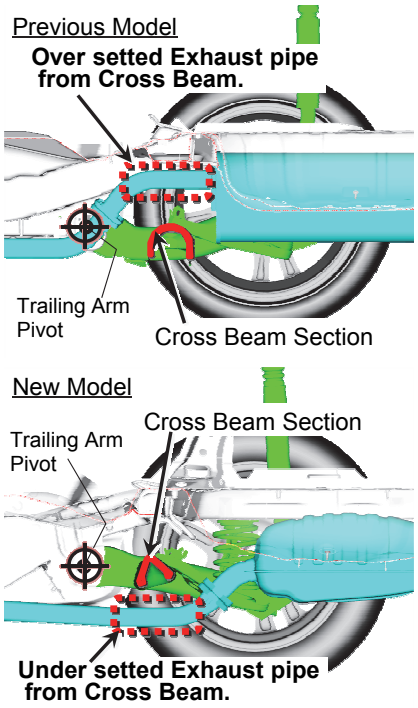


Fig.14　Rear Architecture - Previous and New Model

このコンセプトを実現するため，クロスビーム形状の最適化，排気管を部分的に扁平化，クロスビームの上方に配置せざるを得ないフィラーパイプの経路を給油性能とセットで最適化するなどの工夫を実施した（Fig. 15）。

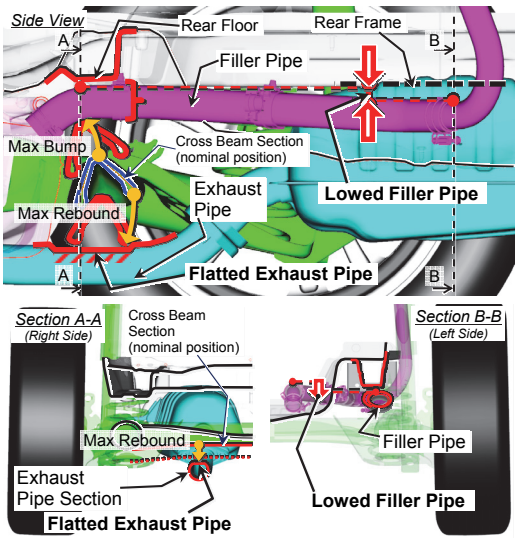


Fig. 15　Optimized Exhaust Pipe Shape and Fuel Pipe Route

こうして実現したクロスビームの上方化は，4WDにおいても駆動系を避けてクロスビームを極力ストレートに通すことを可能とし，2WD／4WD双方の理想を実現させた。

このように，排気系の下通し配置の実現は，2WD／4WD，ハッチバックとクロスオーバを含めた共通構造を実現するキーとなるブレークスルーであったといえる。TBA 2WDでの排気系の下通しは世界初であり，骨格レベルでの他社に対するアドバンテージとなっている（Fig. 16）。

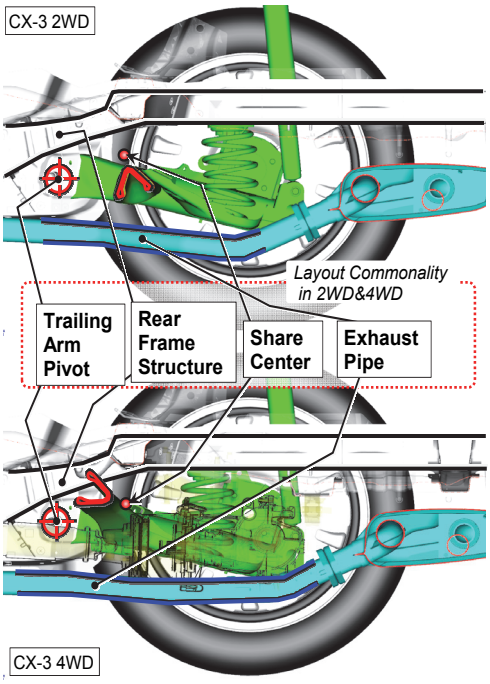


Fig. 16　TBA Layout Commonality between 2WD and 4WD

6. おわりに

本稿ではスモールカーにおける統合化の具体策を紹介した。フロントの例では，タイヤの前出しが，パワートレイン，デザイン，ペダル配置，コンソール幅広化のソリューションとなったと同時に，スモールカーでタイヤ前出しを実現するために，ショートオーバハングなどのブレークスルーが貢献したことを示した。同様にリヤでは，排気系の下通しが理想的な乗り心地とクロスオーバを含めた4WDの理想構造を達成した一方で，排気系の下通しを実現するために各ユニットのブレークスルーが必要であったことを示した。これは，各機能，システムの重点ポイントを実現するために車両アーキテクチャとして前提条件やレイアウト方針を定める一方で，車両アーキテクチャで定めた前提条件やレイアウトは，逆にシステム側のブレークスルーによって実現されるといった高度なすりあわせの実例である。

自動車は機能と構造が複雑に絡み合うアーキテクチャであり，かつ人間を乗せて高速で走るうえに，環境，安全等の要請，快適性や楽しさを求める顧客ニーズに応えていく必要がある。従って常に新しい技術を導入しつつも，冗長性を許容しない構造が要求される。このような環境におけるマツダのクルマ造りは，厳格なデザインルールに基づくモジュラ志向による分業とは異なり，各機能，システムの理想構造を熟知したうえで，車両全体で最適に統合することにある。このアプローチこそ，マツダのブランドを体現する一貫した商品を創出し，商品力でリードし続けていくために必要不可欠なものであると考える。

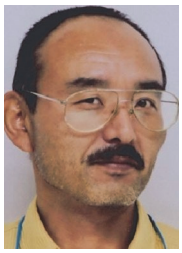
参考文献

（1）長島聡：欧州OEMのモジュール戦略，自動車技術，Vol.67，No9（2013）
（2）藤本隆宏：いわゆる「自動車のモジュール化」に関する一考察，自動車技術，Vol.68，No.6（2014）
（3）目代ほか：新たな車両開発アプローチの模索 －VW MQB，日産 CMF，マツダ CA，トヨタ TNGA－，赤門マネジメント・レビュー，12巻，9号

■著　者■

吉村 康志

豊田 稔


長尾 治典

高橋 達矢

特集：新型デミオ

4

小排気量クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 1.5の開発 Newly Developed SKYACTIV-D 1.5

平林　千典*1　大西　毅*2　白井　裕久*3
Kazunori Hirabayashi　Tsuyoshi Onishi　Hirohisa Shirai

佐藤　雅昭*4　森永　真一*5　志茂 大輔*6
Masaaki Sato　Shinichi Morinaga　Daisuke Shimo

要　約

超低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラにした燃焼コンセプトによって，SKYACTIV-D 2.2 ではトルクフルかつ伸びやかな走り，クラストップレベルの低燃費，及びNOx触媒なしで最新の排気規制に適合するクリーン排気を実現した。この価値をより幅広いユーザへ提供したいと願い，小排気量エンジンへの燃焼コンセプトの踏襲とその更なる進化を狙った SKYACTIV-D 1.5 を新たに開発し，新型デミオに搭載した。本報ではこの新型エンジンの開発コンセプトと，小排気量コンパクト化という困難な制約をブレークスルーした新技術について紹介する。

Summary

SKYACTIV-D 2.2, which embodied SKYACTIV-D combustion concept with a super-low compression ratio and high-efficiency supercharging as key enablers, realized torqueful and smooth driving, class-top fuel consumption and emissions clean enough to comply with the latest emission regulations without NOx after-treatment systems. In order to deliver the value of SKYACTIV-D to wider range of users by incorporating or even refining the combustion concept in a small-displacement engine, Mazda has newly developed SKYACTIV-D 1.5 and mounted it in New Demio. This paper introduces the development concept of the new engine and the new technologies adopted to break through the restrictions due to the small displacement and package.

1. はじめに

走行性能・燃費性能・環境性能のすべてに高次元でのバランスを実現した排気量2.2Lの新世代クリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 2.2」（以下2.2L）の価値[1][2]を，より幅広いお客様に提供したいと願い，小排気量1.5Lのクリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 1.5」（以下1.5L）を新しく開発した。本稿ではこの新型エンジンの開発コンセプトと，その実現のために採用した新技術について紹介する。

2. 開発コンセプトと主要諸元

マツダでは究極の内燃機関を目指し，Fig. 1に示すように，熱効率を支配する7つの制御因子を理想状態に近づける取組みをガソリンとディーゼル両面から進めている[3]。ディーゼル側の取り組みの1st StepがSKYACTIV-D燃焼コンセプトであり，既存の2.2Lにおいて超低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラ技術にして各制御因子の状態を改善した。この燃焼コンセプトによってトルクフルかつ伸びやかな走り，優れた燃費性能と静粛性，およびNOx触媒なしで国内平成21年（ポスト新長期）規制および欧州EURO6規制へ適合するクリーン排気を実現した[1][2]。

1.5Lの開発においても2.2Lと同じ燃焼コンセプトの踏襲を狙った。しかしながら小排気量&コンパクト化に際しては自然法則や空間自由度の制約が厳しくなる問題を伴う。具体的には要求噴射量が少ないことに伴う燃料噴霧の自己着火性低下，燃焼室壁面からの冷却熱損失悪化，構造系の比熱容量増大による暖機性悪化，および排気系面積／体積比増大に伴うDOC（Diesel Oxidation Catalyst）入口ガス温度の低下などである。これらの問題を克服するため1.5LではFig. 2 に示すようなブレークスルー技術を新たに開発した。

*1, 4　エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

*2, 3, 5, 6　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

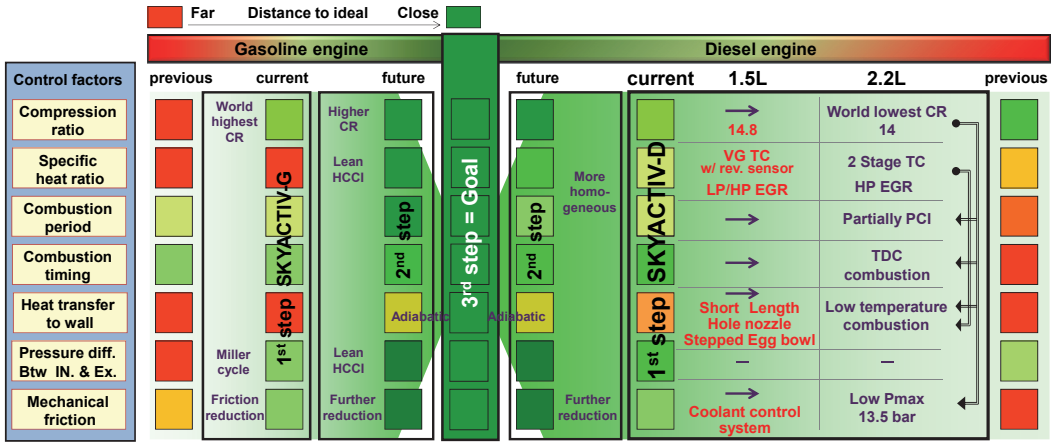


Fig. 1 SKYACTIV-D 2.2/1.5 Combustion Concept on Internal Combustion Engine Evolution Roadmap

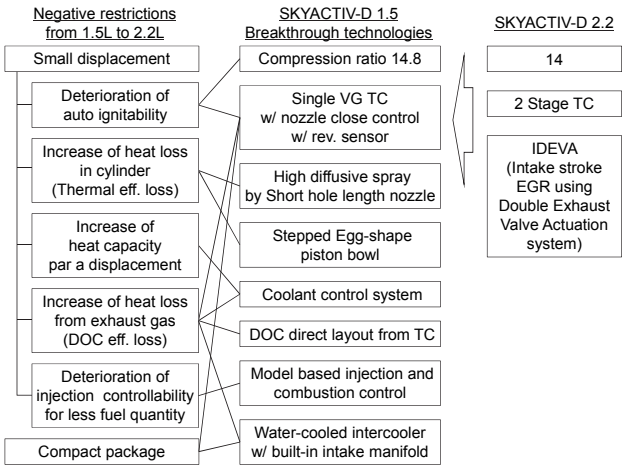


Fig. 2 Restrictions from SKYACTIV-D 2.2 to 1.5 Small Displacement Engine and Breakthrough Technologies

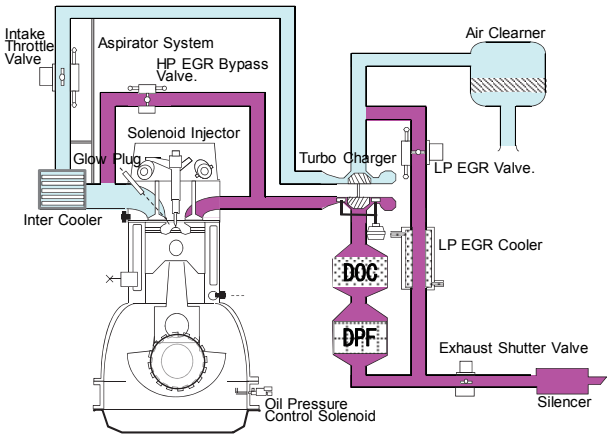


Fig. 3 SKYACTIV-D 1.5 Engine System

Table 1 Dimensions and Specifications

Engine	SKYACTIV-D 2.2	SKYACTIV-D 1.5 (New Model)
Engine Type	In-line4	←
Displacement	2188 cm^3	1498 cm^3
Bore x Stroke	φ86 x 94.2	φ76 x 82.6
Compression Ratio	14	14.8
Injection System	Common Rail System G3 Pizeo (Max. 200 MPa)	Common Rail System G4 Solenoid (Max. 200 MPa)
Nozzle Type	10 holes 1112 cm3/min	10 holes Short Hole Length Nozzle 600 cm3/min
Piston Combustion Bowl Shape	Conventional Egg-shape Bowl	Stepped Egg-shape Bowl
Turbocharger	Serial Sequential 2-Stage Turbocharger	Turbocharger with Variable Turbine Geometry with Rev. Sensor
EGR System	High Pressure with & w/o Cooling	High Pressure w/o Cooling & Low Pressure with Cooling
After-treatment System	DOC+DPF	←
Maximum Torque	420 Nm / 2000 rpm	220/250/270 Nm / 1600~2500 rpm
Maximum Power	129 kw / 4500 rpm	77 kw / 4000 rpm
Emissions	EURO6 JPN PNLT	←

同時にこれらの技術によってFig. 1に示した熱効率を支配する各制御因子の状態の更なる改善を狙った。これらの技術の詳細については後述する。1.5L の主要諸元をTable 1に，システム概要をFig. 3 に示す。

3. 性能パフォーマンス

1.5L は後述のブレークスルー技術によって，2.2Lの燃焼コンセプトの踏襲，および熱効率を支配する各制御因子の状態の更なる改善を実現した。これによりSKYACTIV-Dの共通価値を提供可能とした。

3.1 出力性能

1.5LはFig. 4 に示すように1500rpmから2500rpm の幅広い領域で250Nmという高いトルクを達成した。高回転側は4000rpmで最高出力77kWを発生し，5200rpmまでリニアなトルク特性を達成した。その結果，Fig. 5に示すように実用域からのリニアで力強くかつ高速域までの伸びやかな加速を実現した。性能の絶対値は異なるものの，1.5Lのこのようなトルクや加速の特性は2.2Lを踏襲している。

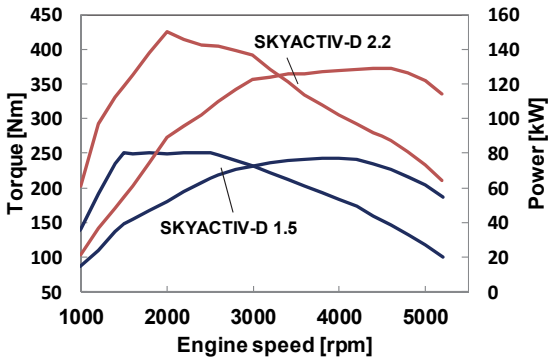


Fig. 4　Torque and Power Performance

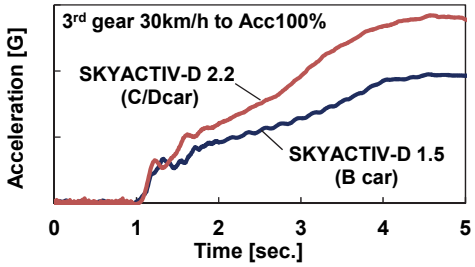


Fig. 5　Acceleration Performance

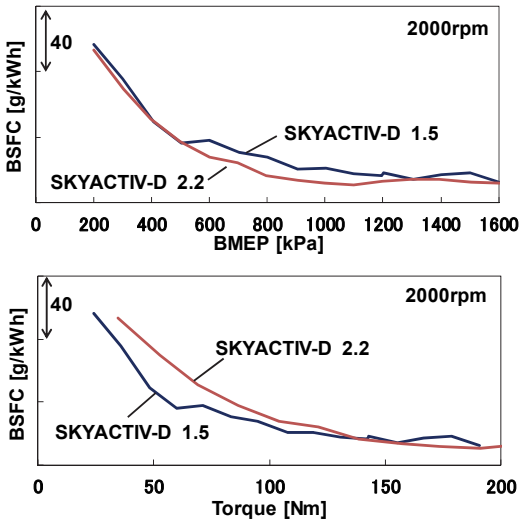


Fig. 6　Fuel Consumption Characteristics

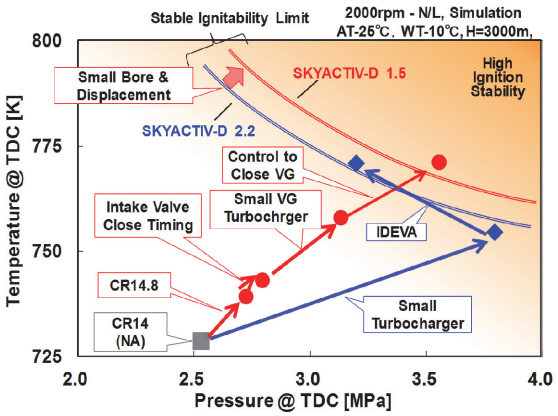


Fig. 7　Comparison of Technologies for Fuel Auto-ignitability

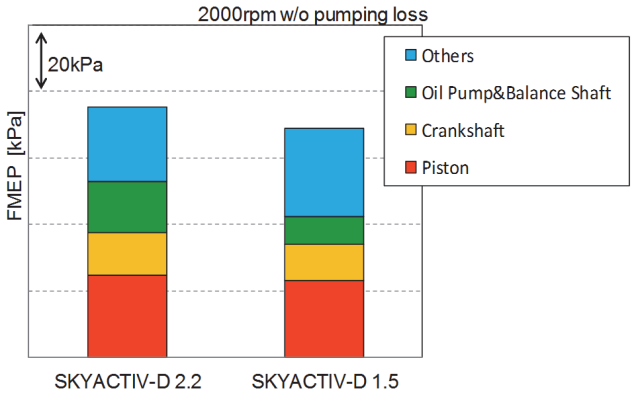


Fig. 8　Comparison of Mechanical Resistance

3.2　燃費性能と排気性能

1.5Lは，Fig. 6に示すように平均有効圧[kPa]に対する燃費率において2.2Lと同様の乗用車用ディーゼルトップレベルの値を達成した。また，NOx触媒なしで国内ポスト新長期規制およびEURO6規制へ適合するクリーン排気性能についても2.2Lから1.5Lへ踏襲している。

4. ブレークスルー技術

SKYACTIV-D燃焼コンセプトを踏襲するために小排気量&コンパクト化に伴う制約の悪化を克服し，加えて熱効率を支配する各制御因子の状態の更なる改善を狙って，以下のブレークスルー技術を新たに開発した。

4.1　超低圧縮比燃焼の継承と機械抵抗の更なる低減

SKYACTIV-D燃焼コンセプトの要が超低圧縮比である。しかしながら小排気量では無負荷運転条件での燃料噴射量の減少，小ボア燃焼室での壁面と燃料の干渉などにより，燃料の自己着火性が低下する。この対策のためFig. 7に示すように技術構成と機能配分を見直した。近接少量多段噴射によるリッチ混合気形成機能[2]は踏襲しつつ，可変ジオメトリーターボチャージャ（以下VGターボチャージャ）のノズルベーンを一般的な使用域よりも絞り込む精密制御を行い，無負荷域での過給効果と内部EGR増量を得た。これにより2.2Lでは内部EGR増量のために採用していた切替式排気二度開きシステム（Intake Stroke EGR using Double Exhaust Valve Actuation system，以下IDEVA）[1],[2]の機能統合を図った。更に吸気バルブタイミングの変更および圧縮比を14.8とすることで，1.5Lと2.2Lで等価の自己着火性を確保した。

最小限の圧縮比上昇に留めることでSKYACTIV-D燃焼コンセプトの特徴である最高燃焼圧13.5MPaの低Pmax燃焼を踏襲し，更にピストンリング，動弁系等の構造系摺動部をトライボロジ上最適な形状に見直した結果，Fig. 8に示すように1.5Lは2.2Lをしのぐ摩擦平均有効圧力を達成した。

4.2　高効率過給，EGR，吸排気システム

SKYACTIV-D燃焼コンセプトのもう一つの要が高効率過給である。空気とEGRガスを同時に過給することで，高比熱比での低温燃焼が可能となり，高熱効率とクリーン排気の両立が達成できる。1.5Lでは回転センサ付き小型VGターボチャージャ，およびHP（High Pressure）経路とLP（Low Pressure）経路を併用したEGRシステムを採用し，高効率過給を実現した。

Fig. 9に中負荷条件においてLP-EGRとHP-EGR（EGRクーラレス）を比較したエンジン実験結果を示す。LP-EGRではEGR増量によってNOxを低減した場合においても，過給圧と吸気温度がほとんど変化しない。このためHP-EGRと比較して充填量が大きくなる分，比熱比を高くすることができる。また吸気温度が低く保てるので冷却損失の抑制にも有利である。これらの効果によってLP-EGRはHP-EGRに対し，特にNOxを低減した条件において大幅に低い燃費率を達成している。また，充填酸素量が多いためにスモークの増大も抑制できている。

LP-EGRシステムでは一般に，長いEGR経路でのガス交換に伴うレスポンスの遅れ，およびEGRガス中の水蒸気が冷却されて生じる凝縮水の問題が懸念される。1.5Lでは，高機能化した水冷式インタークーラ一体式の樹脂製インテークマニホールドによってこれらの問題を対策した。Fig. 10に示すように2.2Lの別体式の空冷インタークーラシステムと比べてガス経路を大幅に短縮してガス交換のレスポンスを確保した。また2ステージターボチャージャからシングルターボチャージャへの変更とも合わせて，コンパクトなエンジンルームに合わせた小スペース化と軽量化を実現した。耐凝縮水については，冷却効率制御性の高い水冷式インタークーラによりEGRガスの過度な冷却を控えるとともに，発生してしまった少量の凝縮水はFig. 3のシステム図に示したアスピレータ機構によって強制的にエンジン筒内に噴霧状に吸引することで対処した。

1.5Lでは小型VGターボチャージャを採用することで低中速域を重視しながらも，回転センサによってターボチャージャの回転数をセンシングして細やかに燃焼を制御することで従来よりも12000rpm以上も回転限界を高めることが可能となった。これによりシングルターボチャージャながらFig. 4に示したように高回転側5200rpmまでリニアなトルク特性を実現した。

4.3 高分散噴霧と燃焼室による低冷却損失燃焼システム

小排気量化で悪化する燃焼室壁面からの冷却損失を抑制するため，燃焼室壁面への燃料付着と火炎の接触を抑制可能な噴霧混合気形成技術として，ペネトレーションを抑えた高分散噴霧インジェクタを新たに採用した。

高分散噴霧の実現手段として，噴孔長を短くし，特に冷却損失の影響が大きい軽負荷での低噴射圧の少量多段噴射

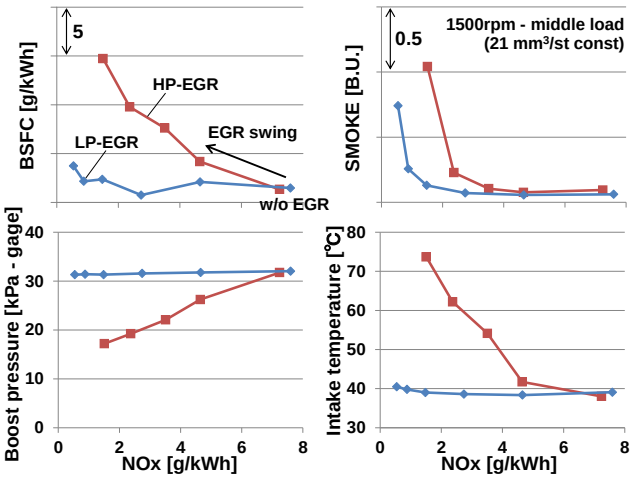


Fig. 9　LP-EGR Effect on Fuel Consumption and Emissions

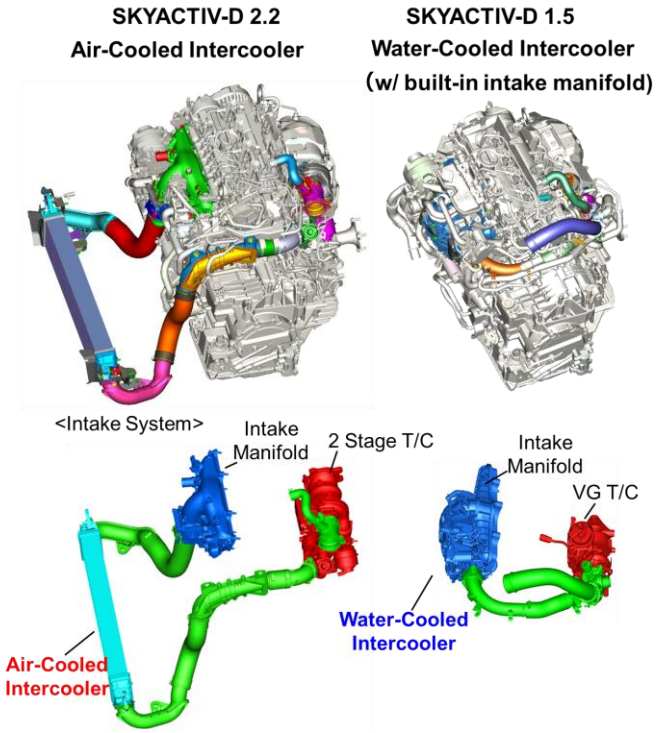


Fig. 10　Compact Package of Intercooler System

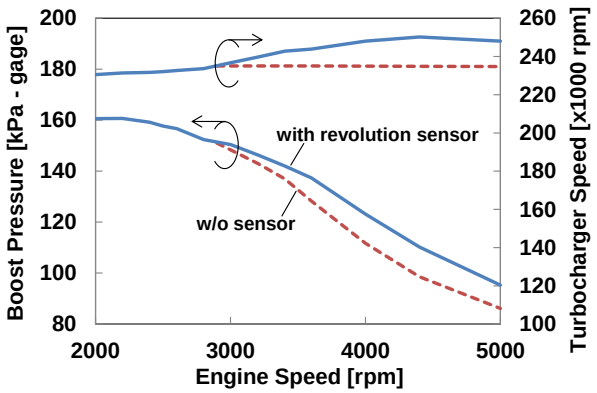


Fig. 11　Turbocharger Speed and Boost Pressure

条件において噴孔内部で生じた乱流エネルギを噴霧に保持させたまま噴射することを可能とした。これにより，Fig. 12に示すように狙いどおりにペネトレーションを抑制した高分散噴霧を実現した。一方で冷却損失の影響が少ない高負荷での高噴射圧の噴射条件においては従来どおりの強いペネトレーションが得られることも確認した。

2.2Lで採用したエッグ燃焼室壁面によって噴射燃料の運動エネルギから強い縦渦流動を形成し，これにより燃料と空気の混合を促進してクリーン燃焼を実現するエッグシェイプ燃焼室コンセプト[4]を1.5Lでも踏襲した。これに加えて小排気量化に伴う冷却損失の悪化への更なる対策として，Fig. 13に示すように膨張行程初期に冷却損失の要因となるリップ部での逆スキッシュ流動の低減を狙って，段付きエッグシェイプ燃焼室コンセプトを新たに開発した。

高分散噴霧と段付きエッグシェイプ燃焼室を用いて冷却損失の影響が大きい軽負荷条件でCFD燃焼解析を行った結果をFig. 14に示す。Fig. 14上段に示すように多段で少量噴射された高分散噴霧によって狙いどおりに噴霧混合気と壁面との接触を抑制できている。またFig. 14下段に示すように膨張行程初期にリップ部とシリンダヘッド間に生じる逆スキッシュ流についても狙いどおりに低減できていることを確認した。Fig. 15に軽負荷条件と中負荷条件でのエンジン実験による検証結果を示す。高分散噴霧と段付きエッグシェイプ燃焼室では，狙い通りに軽負荷で大幅な燃費率の低減を達成し，中負荷でも有意な燃費率の低減を確認した。この際のスモークの増大はほとんどなく，THC（Total Hydro Carbon）については有意な低減を確認した。

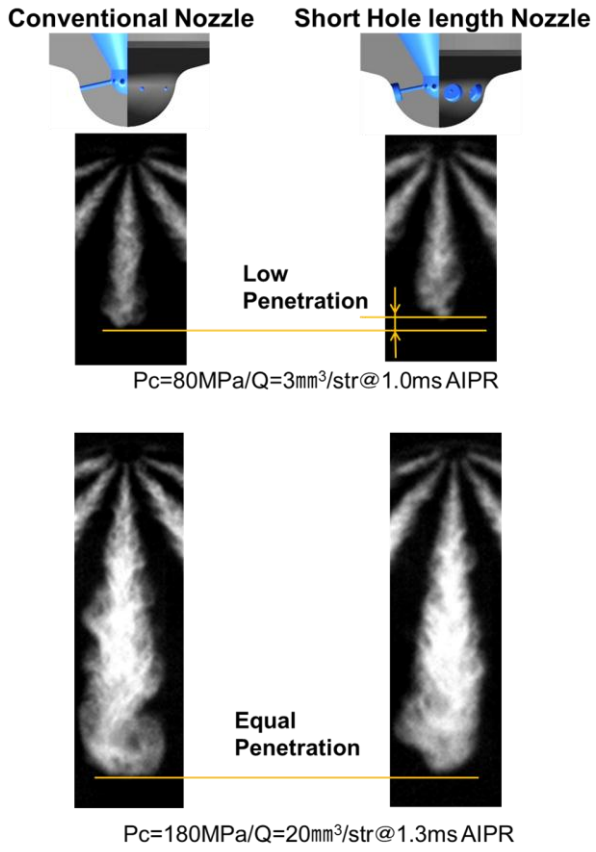


Fig. 12　Improvement of Spray Characteristics

4.4　多段燃料噴射による噴射量制御と燃焼制御

前述の高分散噴霧は少量多段燃料噴射時に有効であるが，小排気量化に伴い要求される燃料噴射量の絶対値が小さくなるために噴射量制御の精度が相対的に低下する問題がある。一般的に多段噴射を実施すると，前噴射の終了時に生じる圧力脈動の影響を受け，噴射間隔に応じて後段の噴射量が変化する。従って，噴射圧力・噴射指示値・噴射間隔

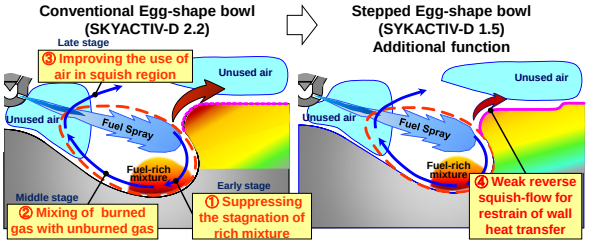


Fig. 13　Stepped Egg-shape Piston Bowl Concept

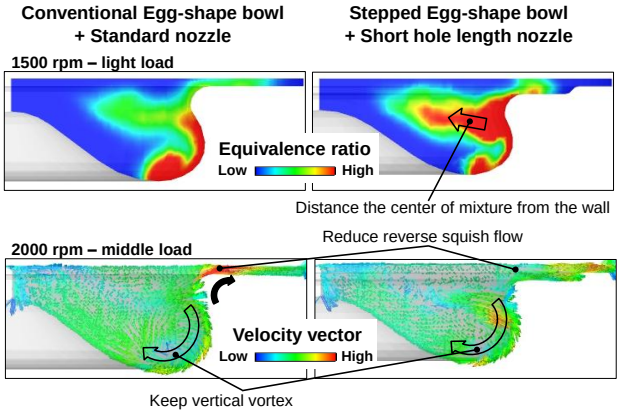


Fig. 14 CFD Results for Piston Bowl and Spray Concept

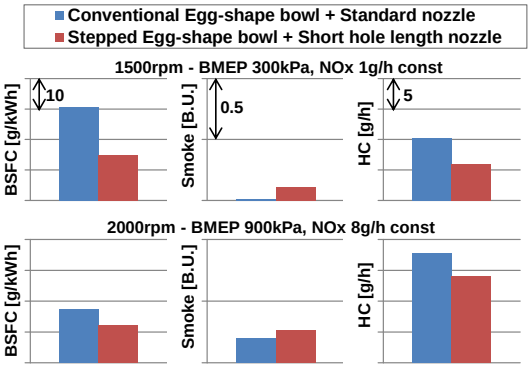


Fig. 15　Engine Experimental Results for Piston Bowl and Spray Concept

などの条件ごとに変化する噴射量のずれを補正する噴射量制御が必要となる。このような多段噴射時の各段噴射量の補正制御の精度を向上させるため，1.5Lでは2.2Lで採用していた補正マップによる制御ではなく，燃圧脈動の物理現象を数式化して噴射量のずれを噴射間隔に対する減衰振動の和で表すモデル制御を新たに開発して採用した。数式モデル内の振幅や位相などのパラメータを噴射圧力や噴射量指示値ごとに同定することでFig. 16に示すように任意の条件における噴射量ずれの予測を可能とした。

高精度な噴射量制御性の確保により，1.5Lでは Fig. 17 に示すような多段燃料噴射による燃焼制御を実施している。2.2Lで構築した燃焼制御[1] [5]をベースに，各段の燃料噴射量が少なく，また小刻みなアクセルワークが多くなる小排気量化に対応させている。更に過渡や環境条件変化に伴う外乱に際しては，サイクルごとに筒内の温度，圧力，ガス成分等の状態を予測して，その筒内状態において必要十分なパイロット発熱量が得られるような要求パイロット噴射量を数式から予測して制御するモデル燃焼制御を新たに開発して採用した。これにより過渡や環境条件変化の外乱に際しても，燃費と排気の悪化を最小限に留め，かつ燃焼ノック音を抑制した優れた静粛性を実現した。

4.5　冷却水制御システム

小排気量化に伴う構造系の比熱容量増大による暖機性悪化，および排気系面積/体積比増大に伴うDOC入口ガス温度の低下への対策として，1.5LではFig. 18に示すように，エンジン冷却水回路をモータ駆動の専用バルブで切り替える冷却水制御システムを採用している。冷間時にはシリンダブロック，オイルクーラ，ATFクーラへの水流を停止して，シリンダヘッドへは最低限の水流を供給する。エンジン実験による検証結果をFig. 19に示す。冷却水回路を制限した場合に冷間始動後200secでの冷却水温度，シリンダライナ壁温度，DOC入口排ガス温度ともに約15degの暖機効果を確認した。また暖機後において従来の機械式サーモスタットと比べて目標水温への安定した制御が可能になった。

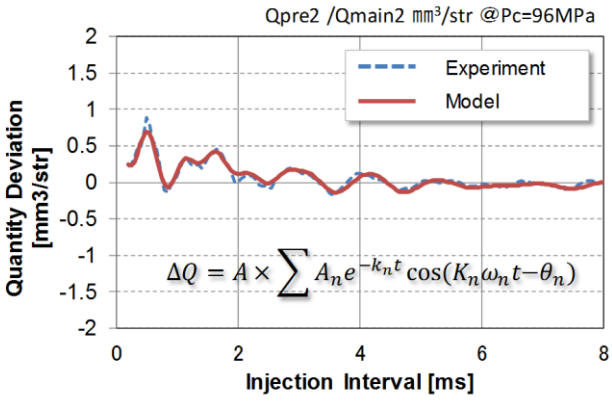


Fig. 16　Results of Injection Quantity Deviation Model

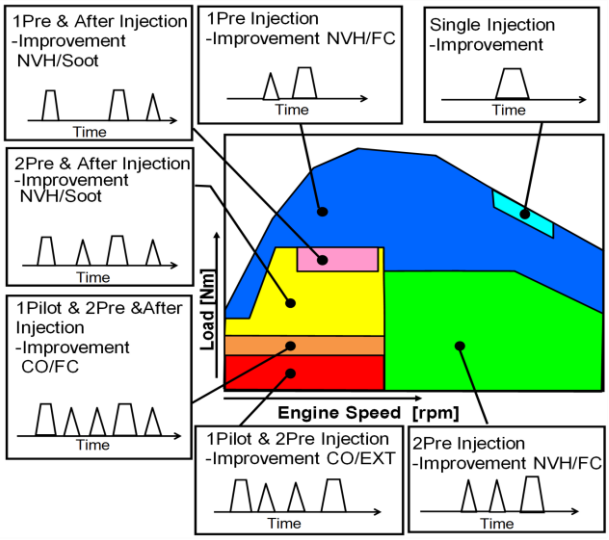


Fig. 17　Multi-Stage Injection Control Strategies

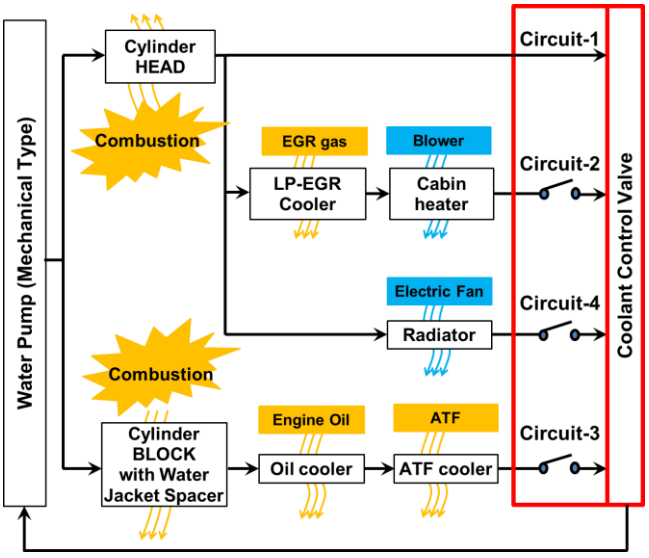


Fig. 18　Engine Coolant Control System

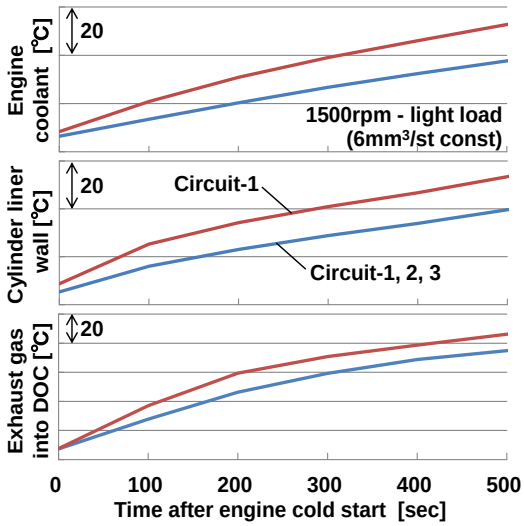


Fig. 19　Results of Engine Warm-up Curves

5. おわりに

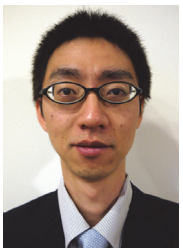
SKYACTIV-D 1.5 は，小排気量&コンパクト化に伴う困難な制約の克服に加え，熱効率を支配する各制御因子の状態の更なる改善を達成した。これによりSKYACTIV-Dシリーズの共通価値である，走り，燃費，排気，および静粛性を高次元でバランスさせた，国内外に無類の小排気量クリーンディーゼルエンジンである。

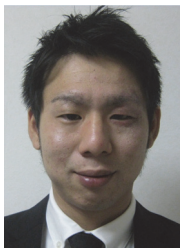
参考文献

(1) 森永ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介，マツダ技報，No.30，pp.9-13（2012）
(2) T. Sakono, et al. : 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, pp.943-965（2011）
(3) 人見, 第21回内燃機関シンポジウム講演論文集，pp.1-23（2010）
(4) S. K. Kim, et al. : 8th COMODIA, Paper No. EC1-2（2012）
(5) H. Sahara, et al. : 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, pp.95-100（2013）

■著　者■

平林　千典


大西　毅


白井　裕久

佐藤　雅昭

森永　真一

志茂　大輔

特集：新型デミオ

5

新型デミオ用 小型SKYACTIV-DRIVEの開発
Development of SKYACTIV-DRIVE for New DEMIO

岡山　裕之*1　坂　時存*2　藤川　昌道*3
Hiroyuki Okayama　Tokimori Saka　Masamichi Fujikawa
本瓦　成人*4　永井　祥太郎*5　齊藤　忠志*6
Narihito Hongawara　Shotaro Nagai　Tadashi Saito

要　約

新型デミオに搭載される1.3Lガソリンエンジン用と1.5Lディーゼルエンジン用に，それぞれのトルク容量に適応する2種類の小型6速オートマチックトランスミッション（以下「ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVE」，「ディーゼル用小型SKYACTIV-DRIVE」）を開発した。

ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVEはトルクキャパシティ165Nm対応とし，ほぼ全ての部品を専用に設計した。基本コンセプトは先行して商品化した中型SKYACTIV-DRIVEを踏襲しつつ，「低燃費」と「走る歓び」の更なる向上を開発のねらいとした。「低燃費」としては，小型軽量化と振動低減を図るために，ワンウェイクラッチの廃止や低剛性ロックアップダンパ付きトルクコンバータを開発した。「走る歓び」については，遠心キャンセル構造によるロックアップ応答性の向上やギヤ比を最適化することで，スムーズな発進とダイレクト感を両立した。

ディーゼル用小型SKYACTIV-DRIVEは，CX-5，アテンザ及びアクセラに搭載される2.0L/2.5Lガソリンエンジン用中型SKYACTIV-DRIVEをベースに小型化を図った。軸支持構造など大幅に見直し，入出力の軸間距離を短縮することで，コンパクトカーの限られたスペースに270Nmまで対応できるディーゼル用小型SKYACTIV-DRIVEを搭載可能とした。また，ダンパを高減衰化し振動を抑制することで，エンジン低回転域からのロックアップを実現し，「低燃費」と「走る歓び」の両立に貢献した。

Summary

For 1.3L gasoline engines and 1.5L diesel engines equipped in new DEMIO, two types of small 6-speed automatic transmissions (hereinafter called “Small SKYACTIV-DRIVE for Gasoline” and “Small SKYACTIV-DRIVE for Diesel”) were developed.

Small SKYACTIV-DRIVE for Gasoline can provide 165Nm and almost all of parts were exclusively designed. The development goal of the transmission is to improve “fuel economy” and “driving pleasure” while inheriting the basic concept of previous “SKYACTIV-DRIVE”. To improve fuel economy and reduce vibration, downsizing and weight reduction was performed, one-way clutch was eliminated and low stiffness lock-up damper was employed to the torque converter. To improve driving pleasure, smooth launch and direct feel were achieved by improving lock-up responsiveness with Canceller Chamber System and optimizing gear ratio.

Small SKYACTIV-DRIVE for Diesel was developed by downsizing the previous mid-size SKYACTIV-DRIVE for 2.0L and 2.5L gasoline engine equipped in CX-5, ATENZA and AXELA. By modifying shaft supporting structure significantly and shorten the center distance between input and output shaft, Small SKYACTIV-DRIVE for Diesel can be fit into the limited space of the compact car while providing maximum torque of 270 Nm. In addition, drastic reduction in rigidity of the damper contributes to torque fluctuation control as well as improvement in fuel economy.

*1～6　ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

1. はじめに

地球環境に対する意識が高まる中，マツダでは，技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき，環境に優しく，走って楽しい車造りを目指している。SKYACTIV TECHNOLOGYは，「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を両立するための新世代技術の総称であり，その技術の一つとして，新型自動変速機「SKYACTIV-DRIVE」[(1),(2)]を開発してきた。今回は新型デミオ用として小型軽量化したSKYACTIV-DRIVEの開発について述べる。

2. 開発のねらい

新型デミオでは，コンパクトカーの常識を破るべく，高次元の走行性能と燃費性能の両立を目指した。その達成のために，特性の異なるガソリンエンジンとディーゼルエンジン用に，以下をねらいとした新型の小型SKYACTIV-DRIVEを開発した。

1）ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVE
- ・各抵抗要素の効率改善及び小型軽量化
- ・ロックアップ領域の拡大による，スリップロスの低減
- ・発進直後からのロックアップによる発進性能の向上
- ・ギヤ比とギヤレシオステップの最適化

2）ディーゼル用小型SKYACTIV-DRIVE
- ・ディーゼルエンジンの大トルクに対応しつつ，コンパクトカーに納まるサイズへの小型化
- ・ディーゼルエンジンのトルク変動を減衰し，低回転からのロックアップを実現する振動抑制技術の開発

3. 主要諸元と構造

小型SKYACTIV-DRIVEの主要諸元を示す（Table 1）。

ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVEは中型SKYACTIV-DRIVEの基本構造をベースに，小排気量エンジン向けに新設計し，旧型デミオのCVTと比較して，9%の軽量化及び30.2mmの全長短縮を実現するとともに，ユニット抵抗を22%低減した。

また，ディーゼル用小型SKYACTIV-DRIVEは，同じく中型SKYACTIV-DRIVEをベースとして，同等のトルク容量270Nmを確保しながら，新型デミオへ搭載するためにユニット前後長を25mm，インプット軸（エンジン軸）～デフ軸間距離を10mm短縮した。

Table 1　Main Specifications

		Small SKYACTIV-DRIVE for Gasoline	Small SKYACTIV-DRIVE for Diesel
Torque Capacity[Nm]		165	270
Overall Length[mm]		338.3	349.3
Input-Output Axis Distance[mm]		185	197
Gear Ratio	1st	3.529	3.552
	2nd	2.025	2.022
	3rd	1.348	1.452
	4th	1.000	1.000
	5th	0.742	0.708
	6th	0.594	0.599
	Rev.	2.994	3.893
	Final	3.609～5.279	3.390～4.957

4. ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVE

4.1　各抵抗要素の効率改善及び小型軽量化

SKYACTIV-DRIVEの基本コンセプト[(1),(2)]を踏襲しながら，（1）～（7）の技術を採用し、ユニット抵抗低減と小型軽量化を実現した(Fig. 1～3)。以下主要な技術について、説明する。特に記述のない場合は、中型SKYACTIV-DRIVEとの比較を表す。

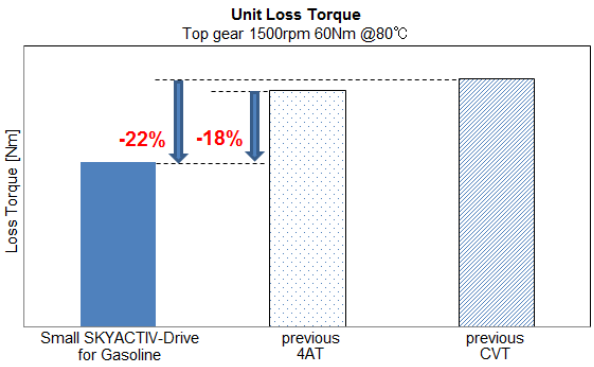


Fig. 1　Comparison of Unit Loss Torque

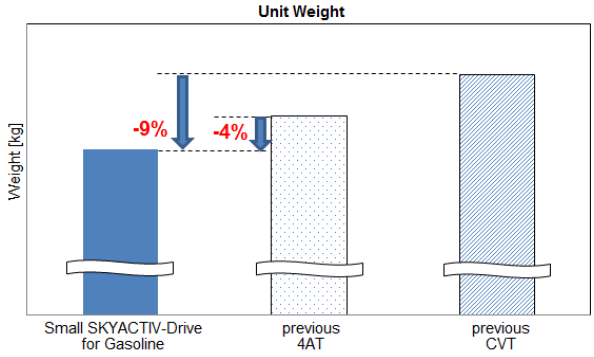


Fig. 2　Comparison of Unit Weight

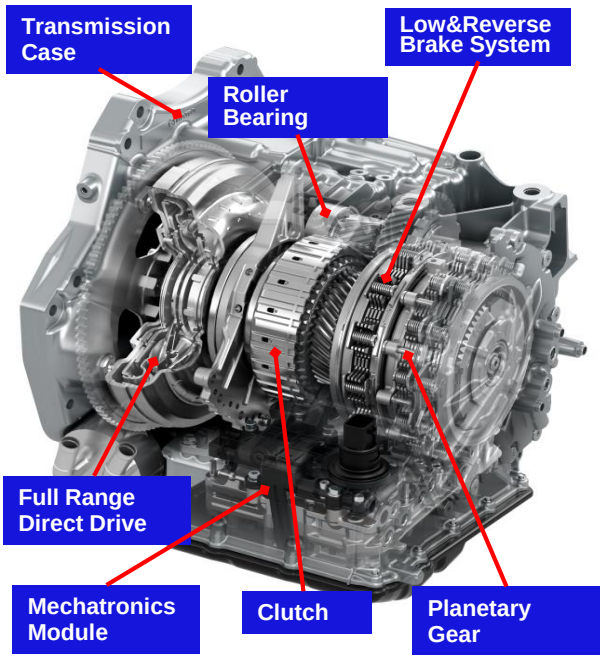


Fig. 3　Structure of Major Parts

（1）ロー・リバースブレーキシステム(ゼロクリアランスシステム)

低抵抗とクラッチの応答性を両立するために，ワンウェイクラッチを廃止し，タンデムピストン構造のゼロクリアランスシステムを開発した(Fig. 4)。クラッチ解放時は，ワンウェイクラッチの引き摺り抵抗を排除するとともに，ストローク用のピストンを後退させることでクラッチの引き摺りトルクも低減した。一方，締結時はストローク用ピストンを前進させることで，ゼロクリアランスの状態とし、クラッチの応答性を向上した。また，ワンウェイクラッチを廃止することで，全長短縮と軽量化にも貢献した。

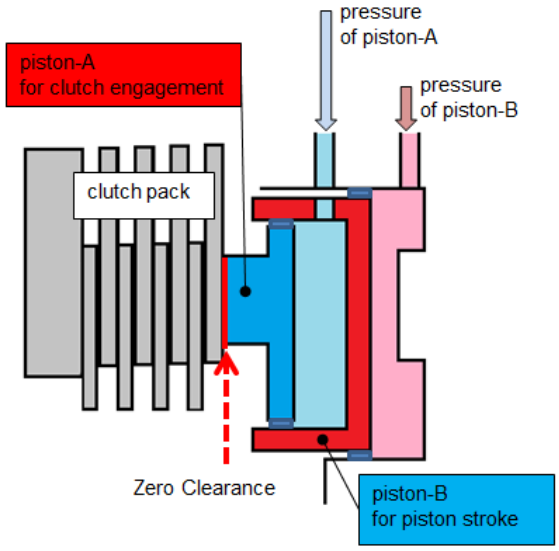


Fig. 4　Structure of Brake System

（2）トルクコンバータ(Full Range Direct Drive)

発進装置であるFull Range Direct Driveを，ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVE専用として新規に開発した。流体解析に基づくトーラス部分の小型化や，振動解析に基づくダンパの設計及び剛性解析と内部構造の最適形状化により軽量化した。

（3）潤滑システム

ギヤ，ベアリング，ブッシュ及びクラッチへの潤滑供給油量をコントロールし，回転部位とクラッチ部位のオイル撹拌抵抗を低減した。また，デフ室へのオイル流入を抑制するシール性の高いバッフルプレートを設置し，デフ部位のオイル撹拌抵抗を低減した。

（4）ローラベアリング

カウンタ軸支持部のアライメント解析とベアリング接触部のクリープ防止構造の採用によって，支持ベアリングをテーパローラからローラタイプに変更し，回転抵抗を低減した。

（5）プラネタリギヤ

プラネタリピニオンシャフトを小径化することで，ピニオンギヤのスペースを確保し，後述するギヤ比最適化とプラネタリキャリアのコンパクト化を図った。また，強度とノイズ性能を両立できるギヤ諸元を採用することで，ギヤ幅及びユニット全長を短縮した。

（6）ケースハウジング

CAE解析によって，可能な限り薄肉軽量化した形状をベースに，強度と振動伝達特性を両立するための最小限の肉厚とリブ形状を決定した。これによって，軽量化（全長短縮，外殻形状小型化）とケース強度と振動伝達特性を両立させた。

（7）Mechatronics moduleの小型軽量化

油圧制御部であるMechatronics module[1]の必要機能を解析し，それに合わせた油圧回路とすることで，スプールバルブの削減とアキュームレータピストンの小型化を行った。またレイアウトの見直しを行うことで小型軽量化を図った。

4. 2　ロックアップ領域の拡大

ロックアップ領域を拡大し，低燃費に貢献するために，Full Range Direct Driveのロックアップ応答性の向上と振動抑制性能の向上に取り組んだ。

（1）ロックアップ応答性向上

ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVEでは，ロックアップ領域の低回転化を図るために，精度の高い油圧制御を必要とした。ピストン室を密閉された構造とすることで，発進後のコンバータ内部の圧力変化の影響を排除し，ロックアップピストンの制御性を向上した。また，リターンスプリングを廃止し，遠心油圧キャンセル構造を採用することで，常にクラッチクリアランスを最小にコントロールする

システムを構築した（Fig. 5）。これによって，ロックアップクラッチの油圧制御を精密化し，発進直後からのロックアップ走行とスムーズで自然な発進を実現した。

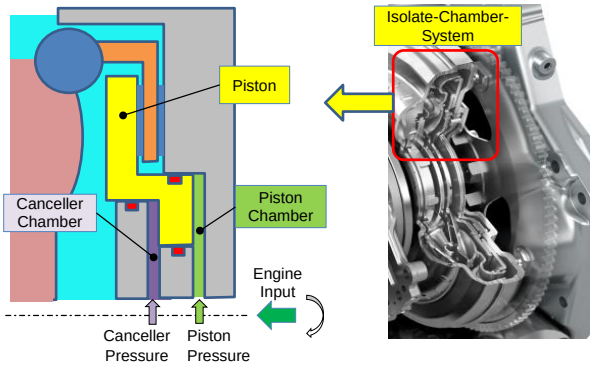


Fig. 5　Structure of Full Range Direct Drive

（2）振動抑制技術

発進直後からのロックアップを可能とするために，パワートレイン系のねじり共振モード及び振動伝達特性などCAE解析を行い，減衰性能とロックアップダンパ剛性目標を定めた。その達成のため，従来比半減以下と大幅に低剛性化したガソリン用小型SKYACTIV-DRIVE専用のダンパを開発した。

（1）項のロックアップ応答性向上と（2）項の振動抑制技術の採用により，JC08モード比較で，中型SKYACTIV-DRIVEの82%に対し，86%までロックアップ走行割合を拡大した（Fig. 6）。

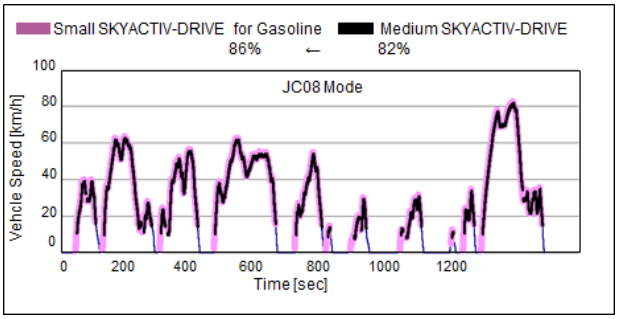


Fig. 6　Comparison of Lockup Range in JC08 Mode

4. 3　発進性能の向上

コンパクトカーの重要性能の一つとして，発進停止を繰り返す街乗りでの快適性が挙げられる。ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVEでは特に発進時のフィーリング向上に努めた。ロックアップの応答性を向上したことで，発進直後からスリップ制御が可能となり，中型SKYACTIV-DRIVEと比べてエンジン回転のコントロール性を向上させ，トルクコンバータによるすべり感を低減した。それによって，加速時のドライバーのアクセル操作(右足の感覚)と車速の上昇及びエンジンサウンドが同期した，マニュアルトランスミッションのようなダイレクト感を伴った発進性能を実現した（Fig. 7）。

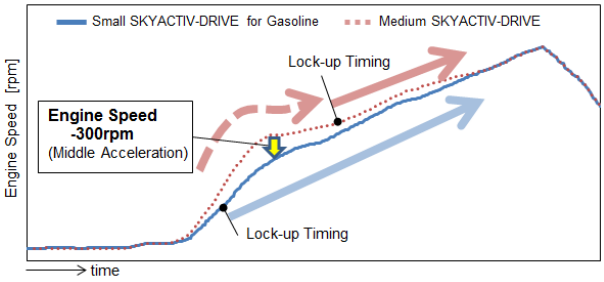


Fig. 7　Comparison of Acceleration Curve

4. 4　ギヤ比とレシオステップの最適化

2.0Lガソリンエンジンに比べ余裕駆動力が小さい1.5Lガソリンエンジン用のSKYACTIV-DRIVEを開発するにあたり，各ギヤ段のギヤ比だけではなく，ギヤ段間のレシオステップも最適化した。高ギヤ段になるに従い同じ割合で徐々にステップ比を小さくすることで，エンジントルクを無駄なく使い切りながら，より滑らかな変速フィーリングと駆動力を得ることを目指した（Fig. 8）。中型SKYACTIV-DRIVEをベースに内部構造を見直し，変速ブレーキの締結要素とプラネタリギヤ比の変更及びダブルピニオンギヤを採用することによって，これを実現した。

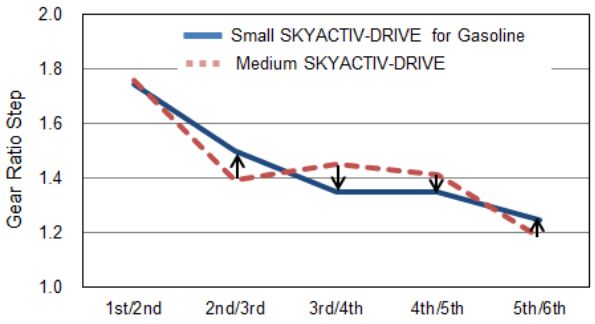


Fig. 8　Comparison of Gear Ratio Step

5. ディーゼル用小型SKYACTIV-DRIVE

既存の中型SKYACTIV-DRIVEをベースに，小型化と振動抑制技術を進化させ、新型デミオに搭載した。

5. 1　小型化

SKYACTIV-DRIVEで採用しているインプット軸，カウンタ軸，デフ軸の3軸構造で，軸間距離を短縮するために，カウンタ軸～デフ軸間距離を16.2mm短縮するとともに3軸配置を最適化した（Fig. 9）。これによって，ユニットの前後長を25mm短縮し，新型デミオ用プラットフォームへ搭載可能なサイズへと小型化した。また，インプッ

ト軸（エンジン軸）～デフ軸間の距離を10mm短縮することで，前輪をより車両前側にレイアウトでき、新型デミオのロングホイールベース化に貢献した。その際，カウンタ軸回転数を減速するファイナルギヤのギヤモジュールを縮小しつつ，信頼性とギヤノイズ性能を両立できるギヤ諸元を採用した。また，ガソリン用小型SKYACTIV-DRIVEのファイナルギヤとギヤ諸元を共通化することで，生産性にも貢献した。

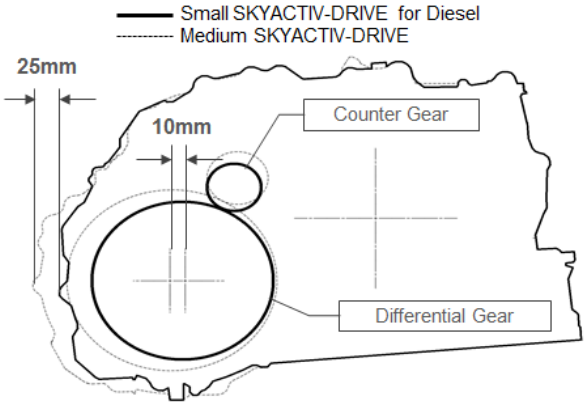


Fig. 9　Comparison of Pulley Axis Distance

5. 2　振動抑制技術

ガソリンエンジンに対し加振力が大きいディーゼルエンジン搭載車両で，発進直後からのロックアップを可能とするために，発進装置（Full Range Direct Drive）の振動抑制性能を向上させた。ねじり共振モードや振動伝達系のCAE解析を行い，ダンパのばね剛性を30%以上低減することで（Fig. 10），低回転域においても高いトルク変動減衰性能を得ることができた（Fig. 11）。これによって，ディーゼルエンジンの大トルク特性を生かしつつ，滑りのないダイレクトな発進性能を実現した。

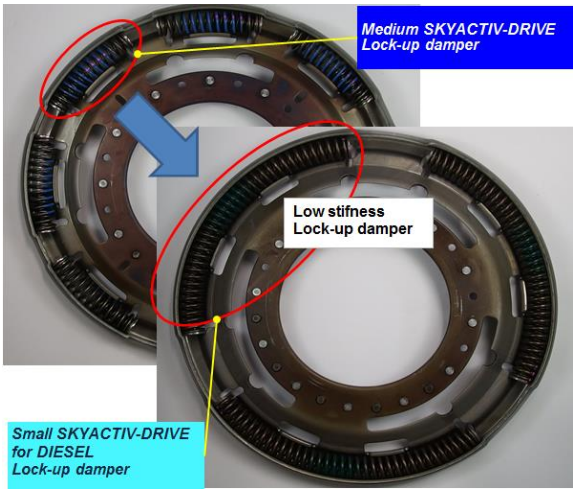


Fig. 10　Structure of Lock-up Damper

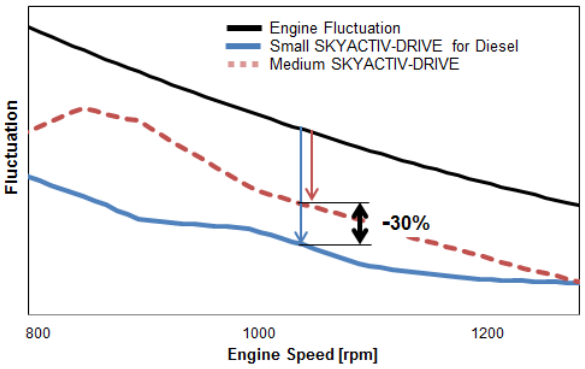


Fig. 11　Comparison of Damping Characteristics

6. おわりに

新型の小型SKYACTIV-DRIVEの開発では，コンパクトカーの理想を追求し，ゼロクリアランスシステムや低剛性ダンパーシステムなどのブレイクスルーを成し遂げた。

その結果として，コンパクトカークラスの常識を破る，「走る歓び」と「優れた環境性能」を高いレベルで両立するトランスミッションを開発することができた。

また，小型SKYACTIV-DRIVEの開発によって，ほぼすべてのクラスの車両に，一貫したコンセプトのSKYACTIV-DRIVEをラインアップすることができた。

参考文献

(1) 土井ほか：SKYACTIV-DRIVEの開発，マツダ技報，No. 30，pp.19-23（2012）

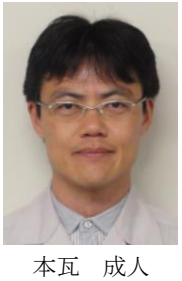
(2) J. Doi, et al.：New MAZDA SKYACTIV-Drive Automatic Transmission, 10th CTI International Symposium and Exhibition in Berlin, Germany A3（2011）

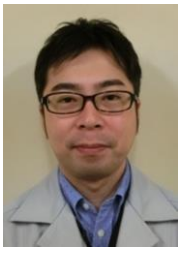
■著　者■

岡山　裕之

坂　時存

藤川　昌道


本瓦　成人


永井　祥太郎

齊藤　忠志

特集：新型デミオ

6

新型デミオの小型高効率MTの開発
Development of SKYACTIV-MT for New DEMIO

岡留　泰樹*1　池本　孝之*2　北原　智之*3
Yasuki Okadome Takayuki Ikemoto Tomoyuki Kitahara
福田　真人*4
Masato Fukuda

要　約

小型SKYACTIV-MTは，既に量産化された中型・大型SKYACTIV-MTの基本コンセプトを踏襲しつつ，デミオクラスの小型車にふさわしい，更なる「小型・軽量・低抵抗化」を追求・進化させたマニュアルトランスミッションである。小型SKYACTIV-MTは，エンジンの特性に合わせ，6MT＆5MT双方に派生可能で幅広いトルクバンドに適応したギヤトレイン構造とコンパクトな操作系機構を備え，優れた環境・安全性能と意のままの操作性を実現した。

Summary

While inheriting the basic concept of mid/large size SKYACTIV-MT already in production, new small size SKYACTIV-MT was made suitable for compact car by pursuing further “downsizing, weight and friction reduction”. The new SKYACTIV-MT matches with the characteristic of the engine and can be used as 5 and 6-speed MT and provides compact shift mechanism and geartrain structure that accommodates wide torque range. The transmission achieved outstanding environmental and safety performance and excellent shiftability that enables drivers to maneuver the vehicle as they intend.

1. はじめに

「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の実現を目指し新開発した，新型6速，及び5速小型マニュアルトランスミッション SKYACTIV-MT（F66M-R型，F65M-R型）の主要技術の概要について紹介する。

2. 開発の狙い

SKYACTIV-MTをデミオに搭載するにあたり，既存のSKYACTIV-MTの基本性能を継承しつつ，以下の3つの性能を更に高めることで，理想のトランスミッション（以下T/M）の実現を目指した。

(1)　小型・軽量化と低抵抗化による走りと燃費への貢献
(2)　意のままに操れる変速操作性の進化
(3)　NVH性能（静粛性）の向上

3. 構造と主要諸元

3.1　F66M-R型（以下　小型6MT）

小型6MTは，並行2軸構造で，旧型デミオに搭載されていたF35M-R型（以下　従来5MT）比，約52%のトルク容量アップ及び，6速化に対応しながら5%の軽量化を実現した。1速，2速にはトリプルコーンシンクロ，3速～6速には，シングルコーンシンクロを採用した。また，リバース専用同期装置を廃止し，リバース操作時には，5速用の同期装置を作動させる構造とした。Fig. 1に外観図を示す。

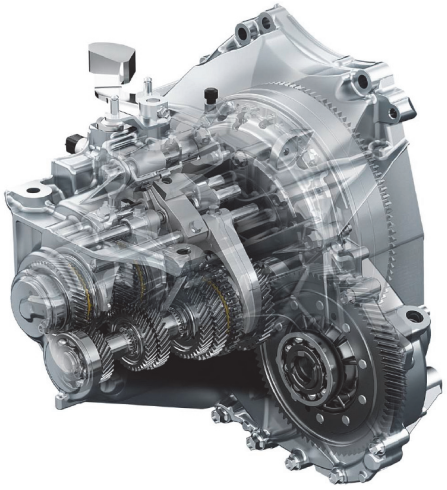


Fig. 1　Phantom View of F66M-R

*1～4　ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

3.2　F65M-R型（以下　小型5MT）

小排気量エンジン搭載車では，適正な駆動力確保のため5MT設定のニーズがあることを考慮し，6MT構造から最小限の部品変更により，5MT対応が可能な構造とした。

Fig. 2に小型5MTへの主要変更部位を示す。

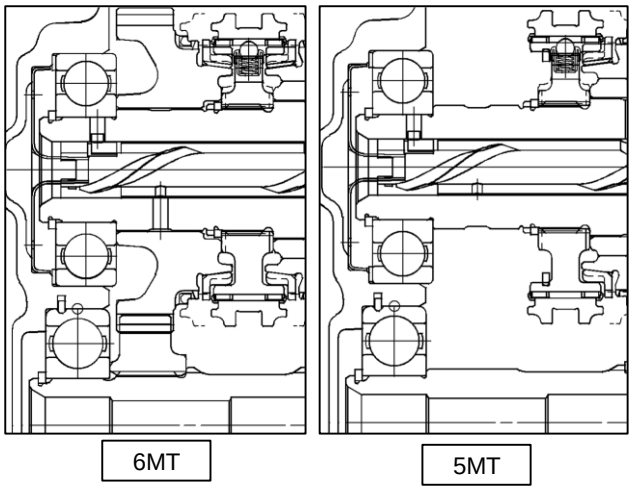


Fig. 2　Main Section of F66M-R and F65M-R

Table 1に小型5MT及び小型6MTのギヤ比を示す。出力トルクの異なる複数エンジンへ適応するため，主変速部で発生するギヤ荷重の適正化を狙い，低速・高速の2種類の主変ギヤレシオシリーズを設定した。

Table 1　Gear Ratio

Gear Ratio	5MT	6MT
1st	3.583	3.230
2nd	1.904	1.652
3rd	1.218	1.088
4th	0.918	0.775
5th	0.717	0.580
6th	-	0.490
Rev	3.454	3.454
Final	4.105	3.850

3.3　骨格設計プロセス（最適機能配分の実現）

小型6MT・5MT（以下小型MT）は，ギヤトレイン・軸受・ケースへの機能配分にあたり，各サブシステムごとに軸芯間距離と重量との関係を求め，システム全体で最軽量となる軸芯間距離を決定した。特に，少し大きめの軸芯間距離を設定することでギヤ噛合い反力を軽減，セカンダリ軸に深溝玉／円筒ころ軸受の採用を可能とし，ケースへの入力荷重軽減による軽量化と，軸受の回転抵抗低減を実現した。Fig. 3に軸芯間距離とユニット重量，抵抗の関係を示す。

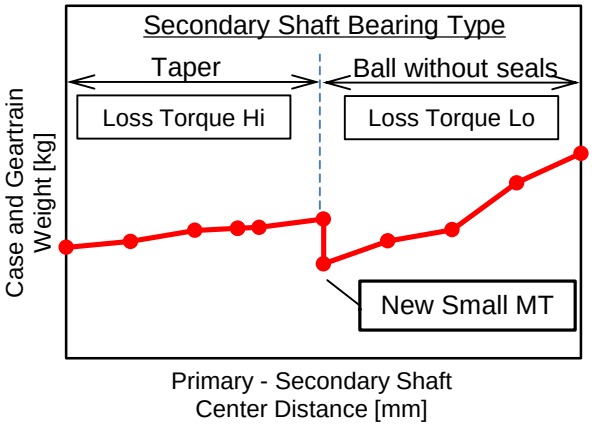


Fig. 3　Relation between Center Distance and Weight

3.4　フレキシブル生産への対応

マツダのMT組立ラインは，シャフトアッセンブリなどユニーク部品のモジュール単位でのサブアッセンブリ化と，メインラインの生産順序に合わせた部品供給（マーシャリング化）により，5速・6速や2軸・3軸など構造が異なるMTユニットを同一ラインでランダム生産できる混流生産を可能としている。

小型MTの開発においても，開発初期段階から生産部門とのコンカレント活動を実施し，サブアッシできる最少モジュール単位構造，メインラインでの組立基準共通化，及び組み付け方向統一などの生産要件を織り込んだ製品設計を行い，既存のSKYACTIV-MT組立ラインでのフレキシブル生産を実現した。

4. 小型・軽量化

前述の動力伝達機構及びケースの最適機能配分に加え，シフトリンク機構の小型化により，6速化に対応しつつ，トルク容量アップと軽量化を実現した。Fig. 4にMTユニットトルク容量とユニット質量の関係を示す。

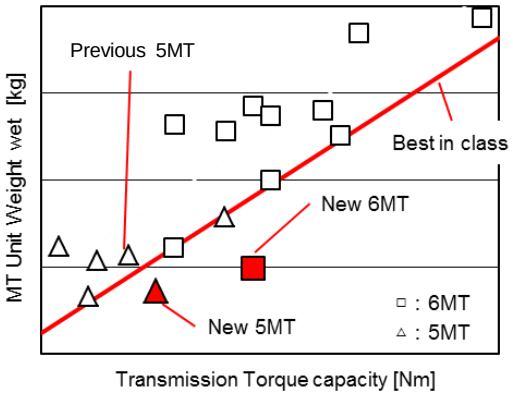


Fig. 4　Transmission Weight

4.1　シフトリンク機構

小型MTは，T/M上部へ操作系機能部品をコンパクトに集約することで，従来5MT比 約17%の軽量化を実現した。Fig. 5にシフトリンク機構の構造を示す。

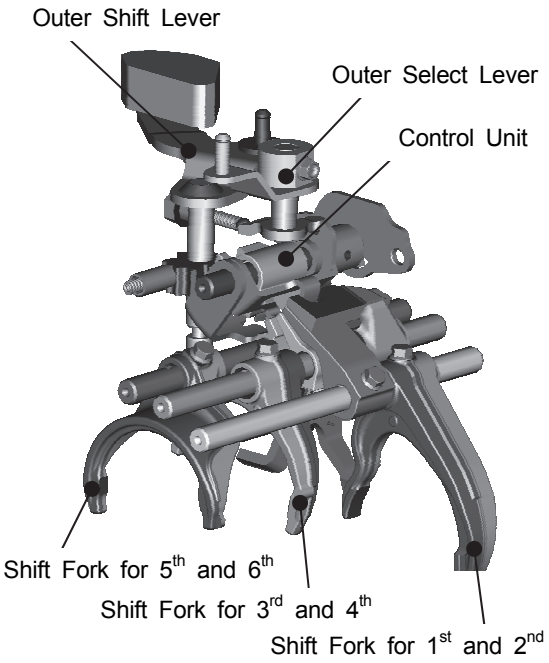


Fig. 5　Shift Mechanism

4.2　ケース

小型MTは，従来5MTのリヤカバーがある3分割ケース構造から，2分割構造へ変更した。更に既存SKYACTIV-MTのケース開発プロセスを進化・適用することで，従来5MT比，部品点数の削減と10%の軽量化を実現した。特に，ケースの基本骨格設計段階で，位相最適化の設計手法[2]を適用することで，狙いのギヤトレイン支持剛性を最小の重量で実現するケース基本形状やリブ配置等のケース骨格を造り込んだ。

Fig. 6にケース形状の検討推移を，Fig. 7に従来ユニットとの重量比較を示す。

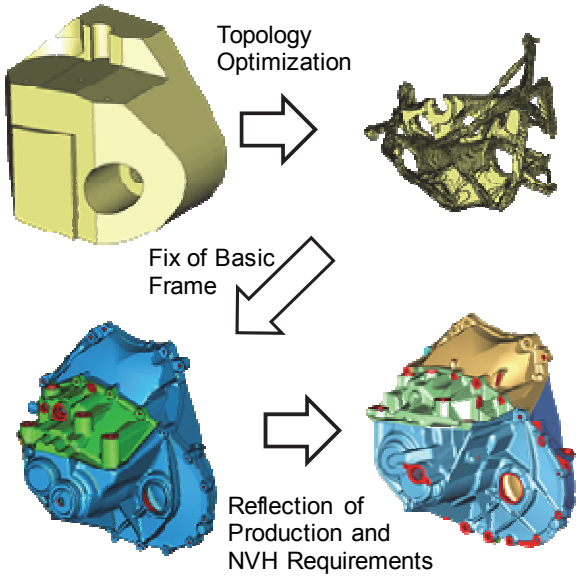
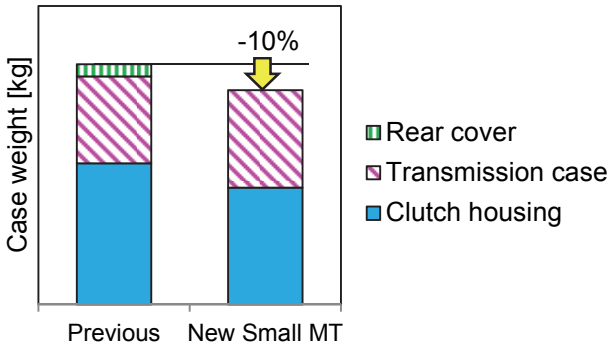


Fig. 6　Optimization of Case Shape by CAE



Fg. 7　Case Weight

5. ユニット抵抗低減

小型MTは，以下の主要施策により，従来5MT比23%の抵抗低減を図り，ベストインクラスとなる低抵抗化を実現した。Fig. 8にトルク容量に対するユニット損失トルクの比較を示す。

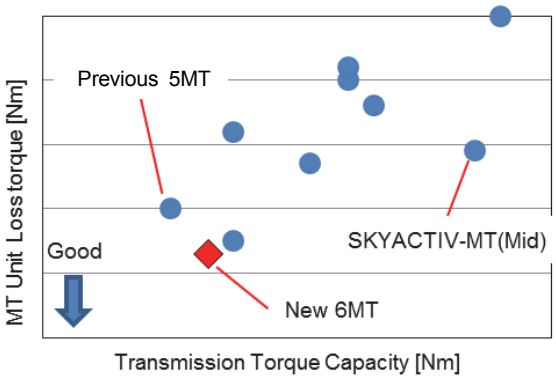


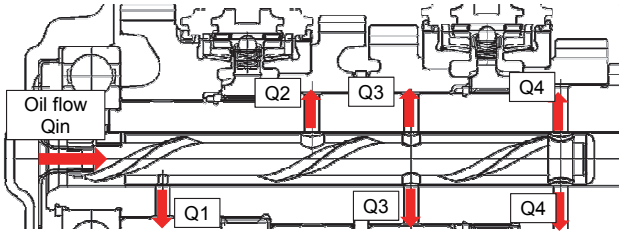
Fig. 8　Transmission Loss Torque

5.1　軸受損失の低減

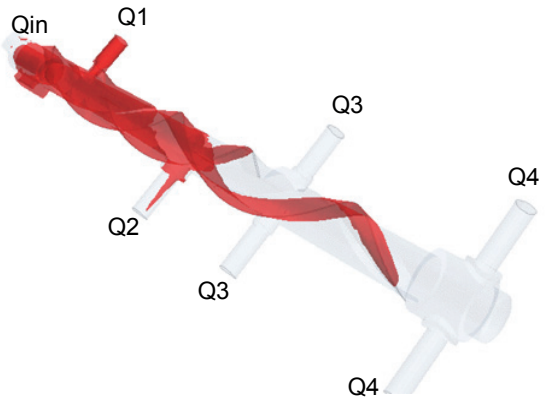
小型MTは，セカンダリ軸への深溝玉／円筒ころ軸受の採用（前述）に加え，デファレンシャル軸に深溝玉軸受を採用し，軸受損失の最小化を実現した。適用する深溝玉軸受は，原則オープンタイプとし，一部使用条件の厳しい車種へはシール付軸受と併用可能とした。

5.2　オイル撹拌抵抗の低減

必要な箇所へ必要な量だけオイルを供給可能な，オイルパス，ファンネル，オイルパイプ等の潤滑システムを開発し，従来5MT比，45％のオイル量低減と，撹拌抵抗の低減を実現した。特に，プライマリシャフト内のオイルパイプの仕様決定には，流体解析CAEを活用し，導出溝や吐出穴径・数量の仕様最適化を図った。Fig. 9にオイルパイプを通過する流体解析CAE解析結果の例を示す。



(a)　Section of Primary Shaft and Oil Pipe



(b)　Fluid Analysis

Fig. 9　Oil Flow in Oil Pipe by CAE

Fig. 10にオイルパイプ追加時の，シャフト穴からのオイル吐出量測定結果を示す。オイルパイプの設定により，オイル吐出量の均等・安定化が図れ，ギヤジャーナル部の耐焼付性能の確保とオイル量低減の両立が可能となった。

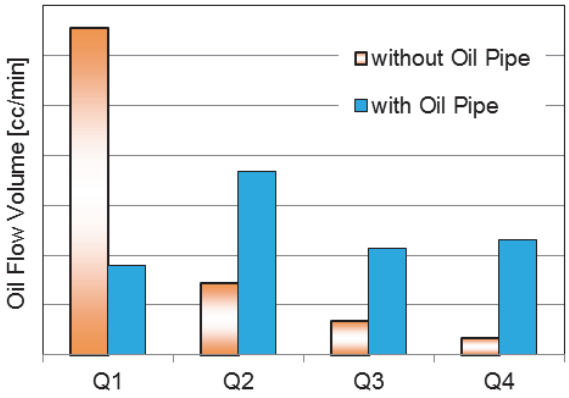


Fig. 10　Oil Flow Volume from Discharge hole

5.3　リバース専用シンクロの廃止

前進走行時のリバースアイドルギヤ及び，リバース専用シンクロリングの回転抵抗を排除するため，選択摺動式のリバースギヤ構造と，リバースプレボーク機構を採用した。小型MTで新開発したリバースプレボーク機構は，リバース操作時に5速の同期装置を作動させることで，同期変速を可能とし，リバース専用シンクロを廃止した。Fig. 11にリバースプレボーク機構を示す。

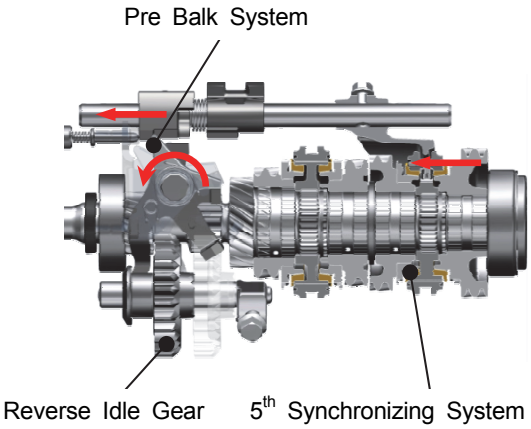


Fig. 11　Reverse Shift Mechanism

6. シフトフィール開発の進化

小型MTは，従来SKYACTIV-MTで好評を得た，「ドライバの意のままに操作でき，小気味よいシフトフィール」のDNAを，継承・進化させた。

特に，静的シフト操作特性の造り込みでは，機構解析CAEを活用，狙いとする荷重特性をよりロバストに実現できる部品設計を実現した。Fig. 12にユニットレバー上のシフト操作特性の実測値と解析結果を示す。

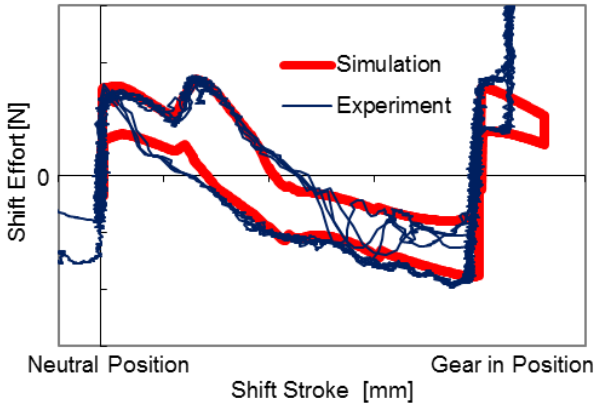


Fig. 12　Shift Characteristic

7. NVH性能（静粛性）の向上

小型MTのNVH開発では，従来SKYACTIV-MTでのNVH開発を踏襲し，車両部品を含めて全体最適となるシステム設計を行った。

特に，起振源と対象周波数帯が異なる，エンジン振動とギヤノイズのNVH性能に対しては，T/Mケースとエンジンマウントブラケットを同時に最適化を行い，両性能の主要常用域から主要振動ピークを外すことで，NVH性能確保に要する部品重量を最小化した。

また，ギヤの正しい噛合いを予測し，最適な歯面設計を実現するため，非接触光学式3次元変位計測器によりトルク負荷時のギヤ倒れ量を計測，より高精度のアラメントエラー予測モデルを構築した。これによりギヤ強度とギヤノイズを両立する歯面設計を実現した。Fig. 13に，ギヤアライメントエラーの予実差を示す。

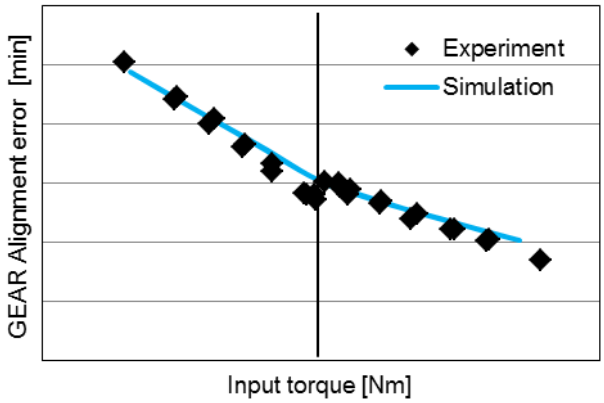


Fig. 13　Gear Alignment Error of Final Gear

8. おわりに

小型SKYACTIV-MTは，中型・大型SKYACTIV-MTの小型・軽量・低抵抗のDNAを継承，進化させることで，小型車搭載に相応しい「優れた環境・安全性能」と軽快なシフトフィールの「走る歓び」を具現化するユニットに仕上がった。

参考文献

(1) 石井ほか：SKYACTIV-MTの紹介，マツダ技報，No.30，pp.24-27（2012）
(2) 三浦ほか：トランスミッションケース開発における基本骨格形状最適化，シンポジウム「動力伝達系の最新技術2013」，pp.12-16（2013）

■著　者■

岡留　泰樹

池本　孝之

北原　智之

福田　真人

特集：新型デミオ

7 新型デミオ･CX-3の小型･軽量4WDシステムの紹介
Introduction of 4WD Technology for New DEMIO and CX-3

沢崎　朝生*1　八木　康*2　石田　一之*3
Tomoo Sawazaki　Yasushi Yagi　Kazuyuki Ishida
丸谷　哲史*4
Tetsushi Marutani

要　約

マツダでは，技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき，環境に優しく，走って楽しい車造りを目指している。その中で，CX-5以降の商品に採用している新世代4WDシステムは「どんな道でも，　人とクルマは，ひとつになれる」をスローガンとし，SKYACTIV TECHNOLOGYとの組み合わせで，走破性・操縦安定性と燃費を高次元で両立した「マツダらしい4WDの走る歓び」を実現している。

本稿では，新世代4WDシステムを踏襲しつつ大幅な小型・軽量化を実現した新型デミオ・CX-3用4WDシステムについて紹介する。

Summary

Mazda aims to build environmentally friendly and fun-to-drive vehicles based on the long-term vision, “Sustainable Zoom-Zoom” concept.　With the slogan of “You can feel unity with the car on any roads”, “Mazda’s signature, fun-to-drive 4WD” was newly developed for CX-5 with superior drivability, handling stability and fuel economy in combination with SKYACTIV technologies.

This paper introduces development spirit and performance of the new generation 4WD that achieves further weight reduction for the compact models, the all-new DEMIO and CX-3.

1. はじめに

CX-5以降の商品に採用している新世代4WDシステムは，以下の考えのもと，4WD機能の理想をゼロベースから再定義して開発した。

（1）SKYACTIV TECHNOLOGYとの組み合わせで「走る歓び」を実現するシステムとする。

（2）走破性・操縦安定性と燃費の良さを両立し，運転を心から楽しめるようにする。

本稿では，マツダの4WDシステムの制御コンセプト，及び新たに再定義した4WD機能の理想について紹介し，新型デミオ･CX-3用として小型・軽量として新規開発した4WDシステムについて述べる。

2. 4WDシステムコンセプト

4WD性能（走破性・操縦安定性）と燃費を高い次元で両立させるため，『必要な時に，必要なだけ，後輪にトルク配分する』の制御コンセプトを定め，以下2点によるブレークスルーを実現した。

（1）リアルタイムなトルク配分制御

刻々と変化する路面状況と，ドライバ意図をリアルタイムに検知し，トルク配分を最適に制御する。

（2）エネルギロスの最小化

タイヤスリップロスと4WDユニットロスの総和を最小化する。

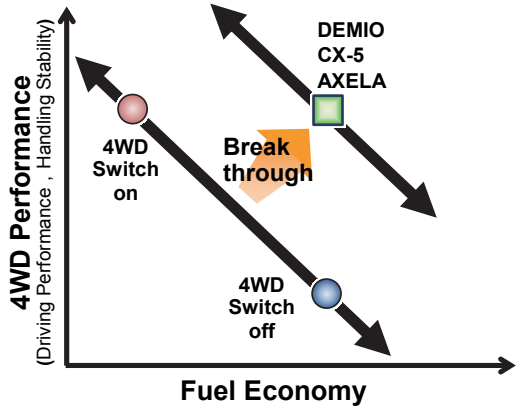


Fig. 1　Breakthrough of 4WD Performance and Fuel Economy Alternative

*1～4　ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

3. 4WDシステムの機能

3.1　4WDの機能目標

4WD性能と燃費を両立させるために，前後タイヤのタイヤスリップロスと4WDユニットロス（回転により発生するスピンロス，トルクを印加することにより発生する機械効率ロス）の合計である総合エネルギロスに着目した。

摩擦係数が低い路面をFFで加速走行している状態（後輪トルク配分比 0%）では，前輪がスリップして，前輪のエネルギロスが大きく，かつ，車両挙動が安定しない（Fig. 2のA点）。

後輪へのトルク配分を増加させるにつれ，前輪のスリップが減少し，一方で駆動ユニットロスが増加する。後輪トルク配分を更に増加させると，後輪スリップが増大し，ユニットロスも増加する（Fig. 2のC点）。

以上の関係において，総合エネルギロスが最小値となる後輪トルク配分が存在し（Fig. 2のB点），ここが燃費の最も優れた後輪トルク配分比である。更に，この後輪トルク配分の状態においてはタイヤのスリップが抑制されているため，車両挙動が安定している。つまり，総合エネルギロスが最小となる後輪トルク配分が，燃費と4WD性能を両立させる後輪トルクの最適配分比である。

一方で，後輪トルク配分比と総合ネルギロスの関係を示す曲線は路面状況や走行条件によって異なり，後輪トルクの最適配分比も変化してしまう。以上を考慮し，路面状況や走行条件が変化しても後輪トルクを常に最適配分比に維持することを4WDの機能目標とした。

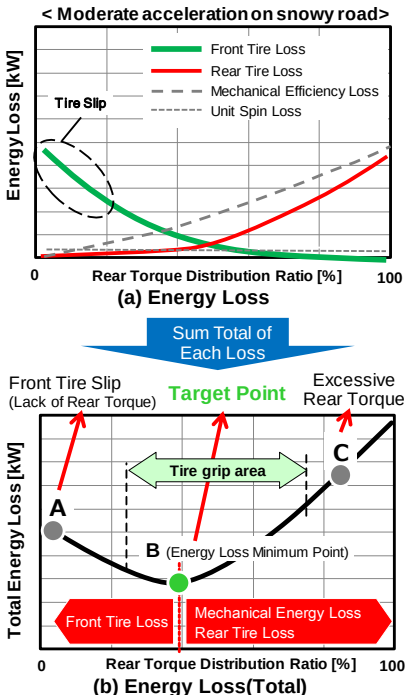


Fig. 2　Minimum Point of Total Energy Loss

3.2　機能目標の達成手段

総合エネルギロスの最小点を維持するように，後輪トルクを最適値に制御することで，以下の2点を同時達成し，4WD性能（走破性・操縦安定性）と燃費のブレークスルーを実現した。

（1）タイヤグリップ限界内で駆動力を制御することで車両挙動の安定を実現

（2）エネルギロスの最小点をトレースすることによる燃費性能の改善

4. マツダ4WDシステム

4.1　4WDシステム概要

新型デミオ･CX-3に搭載したシステムは，CX-5・アクセラに搭載した新世代4WDシステムと同様にトルク制御の自在性からアクティブトルクコントロールカップリングを採用した（Fig. 3）。旧型デミオからトルク容量を増大させるとともに，4WDオフモードへの切り替え機能を廃止することで，運転手の判断によるスイッチ操作をすることなく，刻々と変化する環境変化へリアルタイムに対応するシステムとした（Fig. 4）。

多数のセンサ信号をもとに，ドライバの走行意図と走行環境を検知し，最適な後輪トルクを瞬時に演算・指令を行うことで不安定な状況に備える。また，突然の状況変化にも，瞬時に反応して車両を安定させている（Fig. 5）。

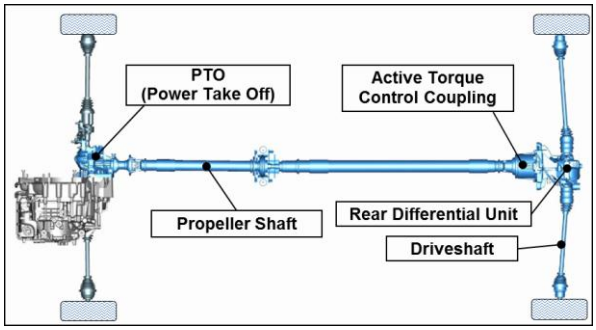


Fig. 3　Schematic of 4WD System

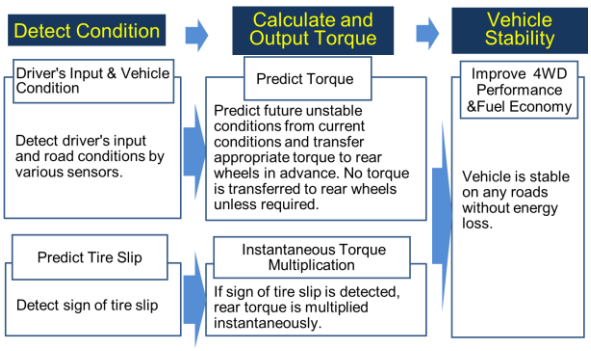


Fig. 4　Control Flow of 4WD System

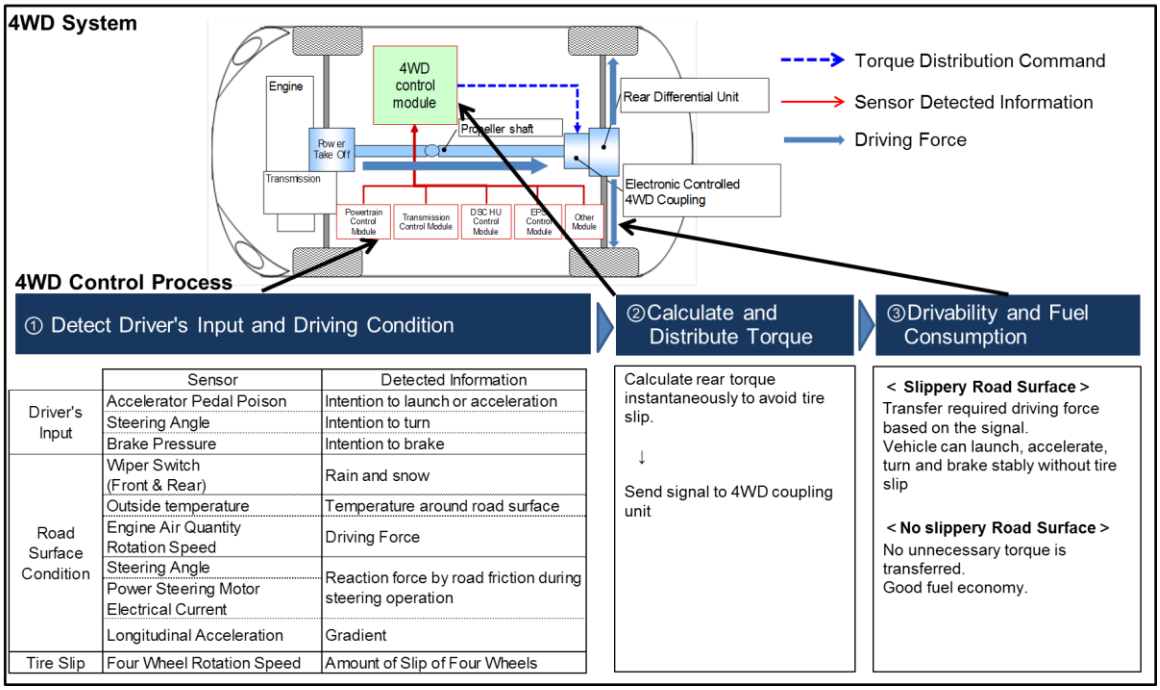


Fig. 5　4WD System Chart

4.2　4WDシステムの特長

状況変化に応じた最適な後輪トルク配分を実現するため，新世代4WDシステムは以下の4つの特長を備えている。

（1）前輪スリップ予兆検知システム

4輪の車速センサ情報をもとに，車体の対地速度と前輪速度を高精度で検出し，ドライバが気付かないタイヤの空転予兆（微小スリップ）を察知する（Fig. 6）。

（2）路面状態の検知システム

路面状況によってタイヤのグリップ限界は異なる。タイヤスリップの予兆を正しく察知するために，車両に搭載された各種センサを用いて路面状態を検知している。

（3）前輪横グリップ力の余裕確保

前輪グリップ余裕の少ない運転状況では，後輪にトルク配分して，前輪のグリップ負担を軽減している（Fig. 7）。

（4）タイムラグ「ゼロ」のトルク制御システム

後輪トルクの応答性を高めるため，前輪のみの駆動力で走行できる時でも，微小なトルクを後輪に付加することで，後輪トルク制御指令に対して瞬時に反応できる状態を維持させている（Fig. 8）。

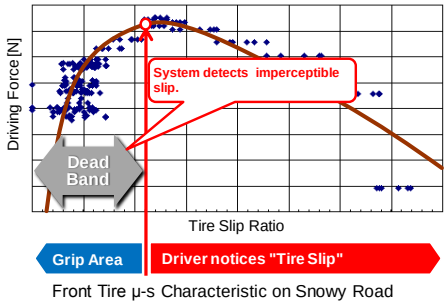


Fig. 6　Tire Slip Ratio

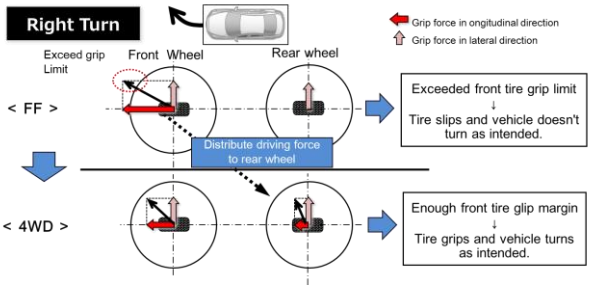


Fig. 7　Torque Distribution

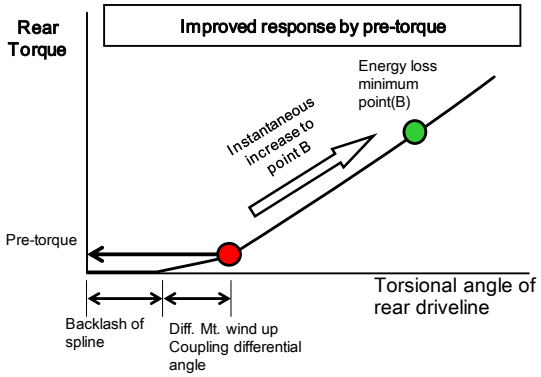


Fig. 8　Standby Torque

5. 4WDハードウエア

新世代4WDの制御コンセプト『必要な時に，必要なだけ，後輪にトルク配分する』に沿って，デミオ･CX-3用に小型・軽量の高効率ユニットを新たに開発した（Fig. 9）。

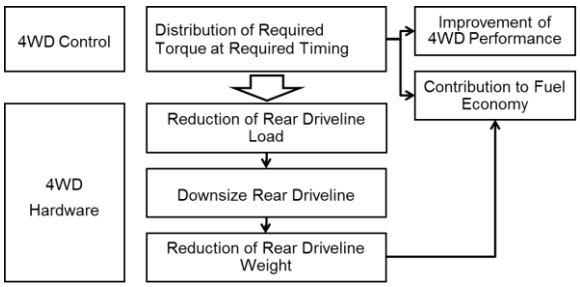


Fig. 9　Theory of Hardware Size Down

5.1　軽量化

パワー・テイク・オフ（PTO），リヤデフユニットは，軽自動車並みの質量を実現し，小型車クラスとして，ベストインクラスを達成した（Fig. 10）。リングギヤサイズは，最適化された後輪駆動トルクに耐える最適サイズに決定した。

デフキャリヤ形状は，CAE解析により，強度，NVHの基本となるギヤ支持剛性をCX-5用ユニット並みに確保しつつ，更なる軽量化を実現した（Fig. 10，11）。

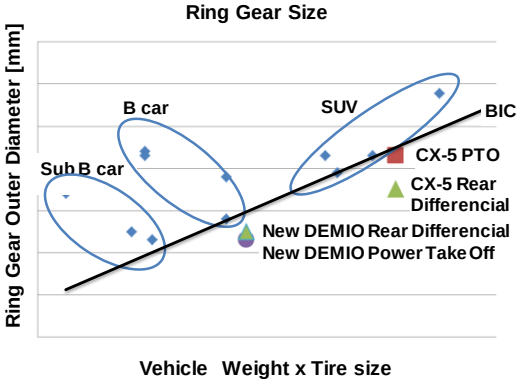


Fig. 10　Ring Gear Size

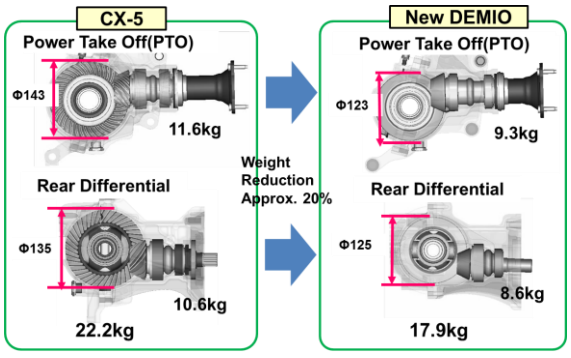


Fig. 11　Size Reduction

5.2　ユニット抵抗低減

ユニット抵抗は，低温での攪拌抵抗低減を重視した低粘度化学合成オイルを新規開発した上で（Fig. 12），樹脂製クリアケースによるオイル流れ可視化技術の活用により，キャリヤ内面に最適な整流リブを新規に設定し，ギヤによるオイル攪拌抵抗を低減した。

その結果　ユニット効率は60km/h走行時の損失トルクで27%の低減を達成した（Fig. 13）。

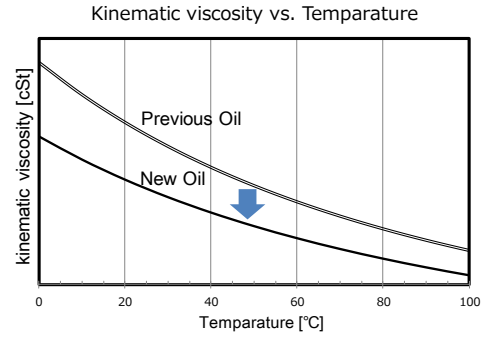


Fig. 12　Oil Kinematic Viscosity

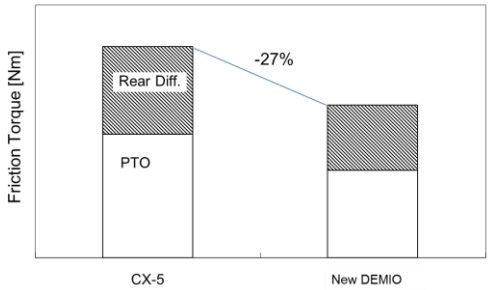


Fig. 13　Friction Torque Reduction

6. おわりに

CX-5以降の商品に採用した新世代4WDシステムを踏襲しつつ，更に小型・軽量化した4WDユニットを新開発し，新型デミオ･CX-3に採用した。

新型デミオ･CX-3においても，抜群の低燃費と路面を選ばない「走る歓び」を感じていただけると確信している。

参考文献

(1) 八木ほか：新世代4WDシステムの紹介，マツダ技報，No.30，pp.175-180（2012）

■著　者■

沢崎 朝生

八木 康

石田 一之

丸谷 哲史

特集：新型デミオ

8

新型デミオのパフォーマンスフィール
Performance Feel for New DEMIO

渡辺　洋史*1　田中　健治*2　藤岡　陽一*3
Yoji Watanabe　Kenji Tanaka　Yoichi Fujioka
國分　弥則*4　山口　俊行*5
Hironori Kokubu　Toshiyuki Yamaguchi

要　約

“人馬一体”とは「ドライバが車との一体感を感じること」，「意図どおりにクルマが動くこと」とマツダで定義しており，ダイナミック性能共通の狙いとして一貫した取り組みを行っている。人馬一体を体現させる一要素であるパフォーマンスフィールはアクセル操作に伴う操作感，前後加速度などに対する人間の感じ方を示す。

新型デミオでは，CX-5，アテンザ，アクセラからのSKYACTIV TECHNOLOGYの進化の流れを引き継ぎ，サステナブル“Zoom-Zoom”を体現する商品として，セグメントの概念を超え，パフォーマンスフィールの一層の進化をさせることを狙いとした。本稿では，マツダが目指すパフォーマンスフィールの考え方と，ガソリンエンジン，ディーゼルエンジンにおいて，新型デミオで実現させたパフォーマンスフィール性能について定量データを交えながら解説する。

Summary

“Jimba Ittai” is defined as “a special bond between driver and vehicle” and “vehicle runs as driver’s intent” and is our common goal to improve dynamic performance. One of the elements constituting Jimba Ittai is performance feel, which represents driver’s perception of accelerator operation feel and vehicle dynamic response.

The development goal of New Demio is to inherit SKYACTIV TECHNOLOGY from CX-5, Atenza and Axela, embody Sustainable “Zoom-Zoom” concept and achieve further evolution of performance feel in all segments. This paper describes the concept and quantified data of performance feel of new Demio’s SKYACTIV-G 1.3 and SKYACTIV-D 1.5.

1. はじめに

パフォーマンスフィールはドライビングポジション，操安性能，制動性能等とともに“人馬一体”を体現するための一要素として研究を積み重ね，これまでの量産車に織り込みを継続してきた。マツダの新世代技術である「SKYACTIV TECHNOLOGY」は，狙いのパフォーマンスフィールを実現させる技術進化と位置づけ，新型デミオではCX-5，アテンザ，アクセラのベース技術を継承し，性別や世代層を問わず，扱いやすく，人馬一体を共感していただけるように技術進化を織り込んだ。

本稿では新型デミオの各エンジンにおけるパフォーマンスフィールの技術と性能について紹介する。

2. マツダの目指すパフォーマンスフィール

2.1　パフォーマンスフィールの考え方

人馬一体をお客様に共感していただくためには，ヒトとクルマで最高の走行状況を作り出せ，ヒトとクルマが心まで通じ合うまでの高みをドライバに感じさせたい。

パフォーマンスフィールはクルマの前後加速度をコントロールする場面で人馬一体を感じさせることを狙いとしており，理にかなった自然な反応，正確で素直なフィードバックができることが重要である。Fig. 1はドライバの加減速に対する意図をアクセルペダルを通じてインプットし，クルマはエンジン，トランスミッションを使って動きや音

*1～5　走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

に変換し，ドライバにフィードバックするサイクルを示す。このインプット⇔フィードバックするサイクルで，アクセルを踏み加えた力やその勢いが，そのまま加速度やエンジンサウンドとして感じ取れることが必要であり，これが理にかなった自然な反応であると考える。

それでは，理にかなった自然な反応とはどのような特性なのか，その考え方を少し掘り下げてみる。

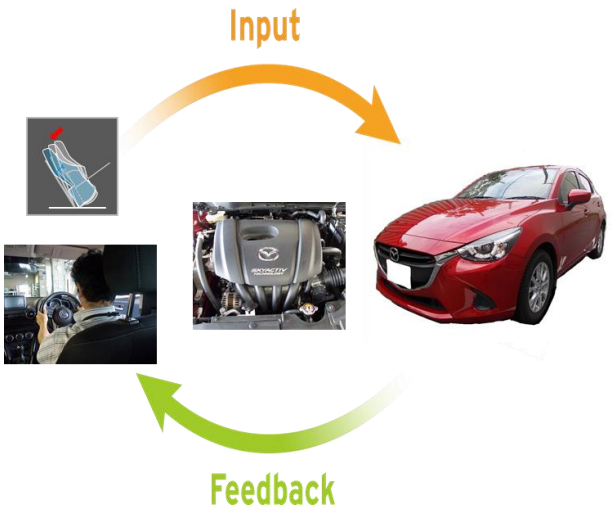


Fig. 1　Driver's Expectation and Reaction

2.2　理にかなった自然な反応とは

クルマを運転するときには交通環境（交通の流れ，登降坂，交差点など）を認知するとともに，その中でクルマをどのように運転したいのか（急いでいる，丁寧になど）のドライバの欲求にあわせてドライバは「これくらい」というイメージで操作を始める。本稿では加速度の大きさと，加速度の勢いへの「これくらい」を取り上げる。ドライバは足裏でアクセルペダルの感触を感じながら，「これくらい」をアクセル操作に反映し，操作に応じた加速度を発生させる。その加速度を自然でかつ，心地よく感じさせることが狙いの性能特性である。

Fig. 2 上段のイメージ図は，ドライバが大きな加速度を急いで要求するときの狙いを示し，アクセル操作にあわせて大きな加速度を遅れなく発生させる。Fig. 2 下段のイメージ図は，ドライバが丁寧に加速度をあわせたいときの狙いを示し，ゆっくりとアクセルが踏み込まれ，踏込み量にあわせて遅れなく加速度を発生させる。

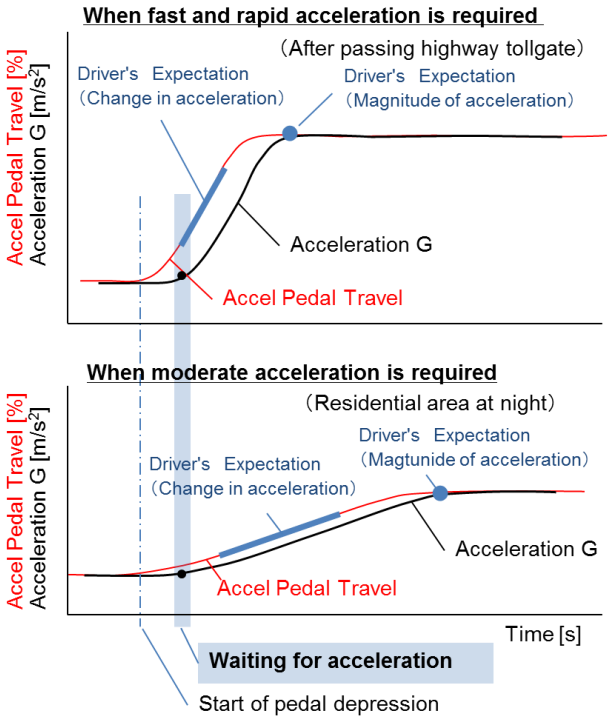


Fig. 2　Aim of Driver's Expectation and Reaction

Fig. 2の中にWaiting for accelerationと記載してあり“構えのタイミング”と称す。ドライバはクルマの運転経験から，アクセルを踏むと背中がシートバックに押され，頭部が後ろに持っていかれることを既に体得している。Fig. 3にイメージ図を示す。この既知の感覚からドライバはアクセルを踏む行為に無意識のうちに身構える。その身構えとは，頭部を支えるための首筋の緊張でありマツダでは“構え”と呼称している。アクセルを動かし始めて，首筋の緊張が始まるまでの時間は0.2～0.3秒で一定であり，その“構えのタイミング”に合わせて加速度を発生させることが，理にかなった自然な反応を実現する第一の必要条件である。

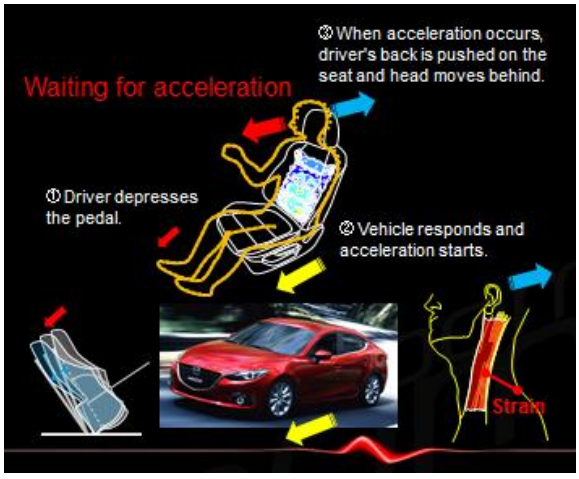


Fig. 3　Acceleration Timing Expected by Driver [1]

第二の必要条件は，ドライバの期待に応じた加速度の大きさを実現することである。ドライバがアクセルを踏むときにはさまざまな理由がある。ほんの少し前車との距離を縮めたいのか，交差点の停車で前の車にあわせて加速度を出したいのか，自分が先頭で停車していて勢いよく発進したいなど，停車場面からの加速だけでもその加速度への期待はさまざまである。ドライバが期待する加速度はアクセルの操作量に反映され，その操作量に応じて加速度の大きさを実現させることである（Fig. 4）。

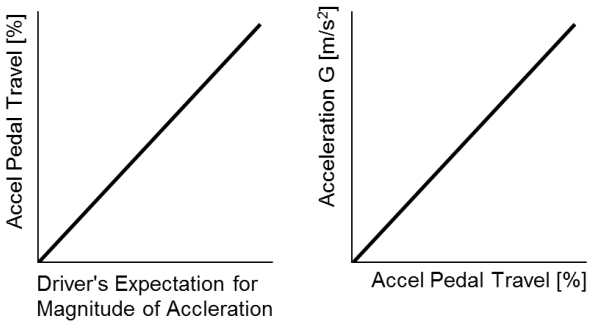


Fig. 4　Magnitude of Acceleration Expected by Driver vs. Actual Acceleration G

第三の必要条件は，ドライバの期待に応じた勢いを実現することである。大切な人が同乗しておりゆっくりと丁寧な加速をしたいのか，自分が進入したい道路でここぞというタイミングで一気に加速したいのかなど，ドライバが期待するクルマの勢いはアクセル操作速度に反映され，その踏込み速度に応じて加速度が変化する速度を実現させることである（Fig. 5）。

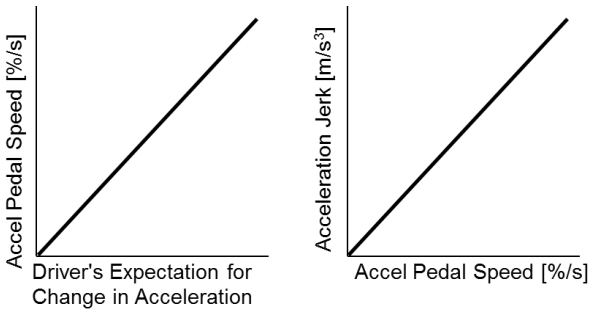


Fig. 5　Expected vs. Actual Jerk

これらのことから，どのようなアクセル操作でも一定の構えのタイミングを実現させ，更に早い踏込み，ゆっくりした踏込み，それぞれで操作量や操作速度に応じた加速度を発生させる。更にアクセルペダル操作に応じて安定した加速挙動を再現させることで，ドライバは加速度の出方を自然に体得し，理にかなった自然な反応として感じさせることができる。

3. 新型デミオのパフォーマンスフィール

3.1　理にかなった自然な反応の実現（SKYACTIV-G 1.3）

Fig. 6は，新型デミオで一定開度のアクセル開度条件でアクセル操作速度を3水準変動させた計測データを示す。グラフ上段に示すアクセル操作速度にかかわらず，グラフ中段に示す新型デミオは一定の構えのタイミングが実現でき，踏込み速度や踏込み量にあわせて加速度発生勾配や発生量が変化することが分かる。一方でグラフ下段のケースでは，アクセル操作速度が遅くなるに従って加速度の発生が遅れ，加速度の発生勾配も変化しないことからドライバは自分のアクセル操作に対する加速度の反応が予見しにくく，加速度のコントロールが難しい。

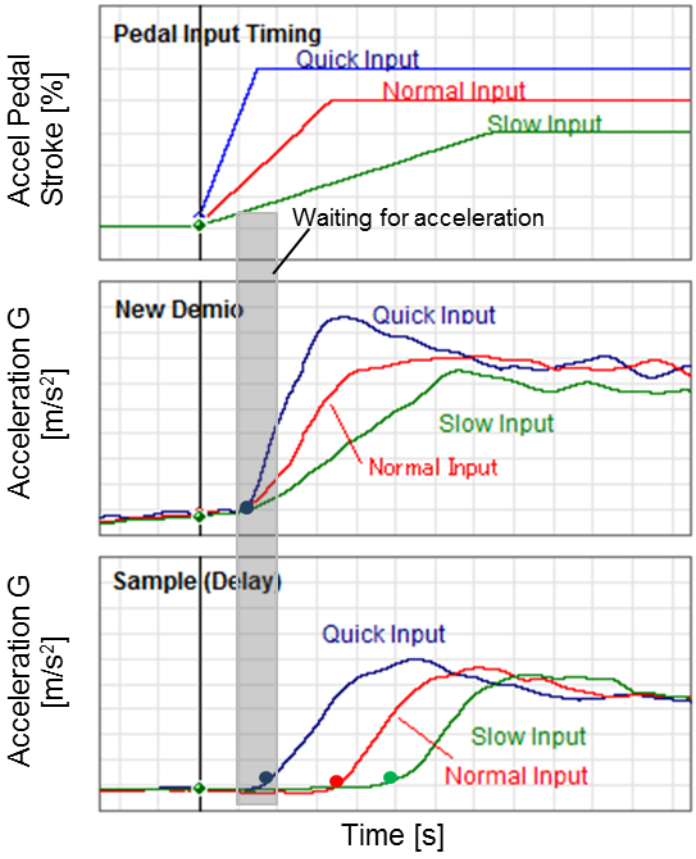


Fig. 6　Time vs. Acceleration of New DEMIO

（1）構えのタイミング

Fig. 7は停車状態から加速のためにアクセルを踏み込んだ時の加速度発生時間を横軸アクセル操作速度縦軸応答時間で散布図にしたものである（母数80個）。新型デミオはどのアクセル操作からも同じタイミングでの加速度発生を実現させており，比較車と比べてもバラツキ幅が小さく，安定して構えのタイミングが実現できている。

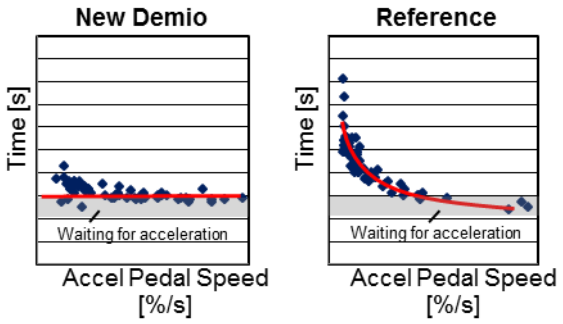


Fig. 7　Pedal Speed vs. Response Time of New DEMIO

（2）加速度の大きさ

Fig. 8は同データに対して横軸アクセル操作量，縦軸加速度大きさで散布図にしたものである。国内市場で使用頻度の高い加速度の領域で，新型デミオは操作量に応じて加速度をリニアに変化させている。中開度以上の領域は加速度発生を緩やかに抑えていき，加速度上限が近いことをドライバが自然に認知できるように設定している。

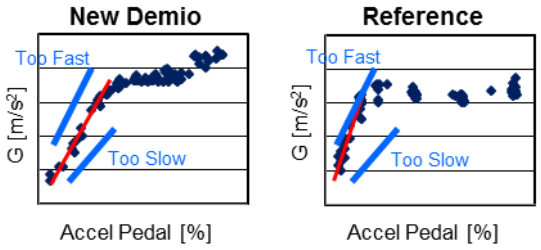


Fig. 8　Pedal Travel vs. Acceleration of New DEMIO

（3）勢い

加速度の勢いは，加速度が単位時間当たりに変化する量としてとらえており，すなわち加速度を時間で微分した躍度を代用特性として用いることができる。Fig. 9は同データに対して横軸アクセル操作速度　縦軸躍度の散布図にしたものである。新型デミオはアクセル操作速度に応じて躍度のコントロールができていることが分かる。

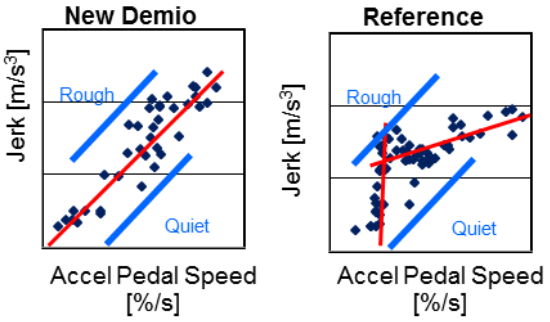


Fig. 9　Pedal Speed vs. Jerk of New DEMIO

3.2　一層の自然さを感じさせるために（SKYACTIV-G 1.3）

（1）一体性を感じる発進加速

クルマの挙動とドライバの走行感覚をできるだけマッチさせるには，その挙動の様が加速度や聴覚，視覚などを通じてもドライバが感じ取れることが重要である。加速度の視点からは前述のとおりで操作に対して自然な反応をすること，聴覚の視点からは視覚から得られる車速上昇感覚にあわせてエンジン音が上昇変化していくことが必要とされる。また加速度，音ともに変化方向に対して連続的な変化が必要である。

新型デミオ搭載のSKYACTIV-DRIVEは発進直後からリニアな駆動力伝達を行うため，ロックアップクラッチを精度よくコントロールしている[2]。

Fig. 9に発進時のアクセル開度，エンジン回転数，車速の時間軸チャートを示すが，車速上昇に対するエンジン回転数変化がCVT搭載車よりも相似していることが分かる。車速上昇とエンジン音（エンジン回転数）の同期，アクセル操作に応じた加速度変化などが自然であり，ドライバとクルマが一体となる感覚を生み出している（Fig. 10）。

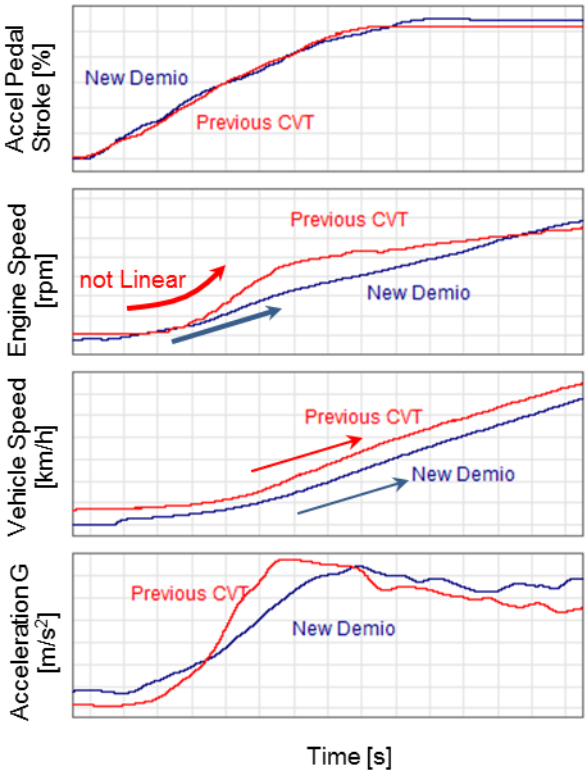


Fig. 10　New DEMIO's Direct Feel at Startup

（2）一体性を感じる再加速（ドライブセレクション）

高速道路進入に代表される，交通の流れに入り込んでいくシーンでは，速度や車間距離を正確に調整することが求められる。本線後方から車両がある場合は，追突されな

いように大きな加速度で進入したく，混雑した高速道路進入では本線の車両の前後車間を気にしながら正確に車間距離が保てる位置に進入したい。

小さな加速度から大きな加速度まで正確にコントロールするには，アクセル操作に対して遅れなく加速度を発生させることと，アクセル操作量に対して連続的に加速度の大きさを変化させることが必要である。ところが，AT搭載車ではアクセルを踏み込んでいくとダウンシフトし，シフト動作の間の時間遅れが発生する。弊社ではこれまでもAAS（Auto Adaptive Shift）を採用して過去の走行状況判断により同場面のギヤ段位の適正化を行っているが，新型デミオではドライブセレクションの採用により，多種多様な走行状況がある中でもフィードフォワードによる走行ギヤ段位選択が実現できた。

Fig. 11は高速道路進入シーンでのモード選択の“Standard”“Sport”を押した時の時間経過軸のデータを示す。“Standard”ではダウンシフトによる加速度の発生遅れがあり，またダウンシフト後に期待よりも高い加速度が発生している。“Sport”では，遅れなく期待する加速度が発生でき，より安心安全に，気持ち良く交通の流れに入ることができる。

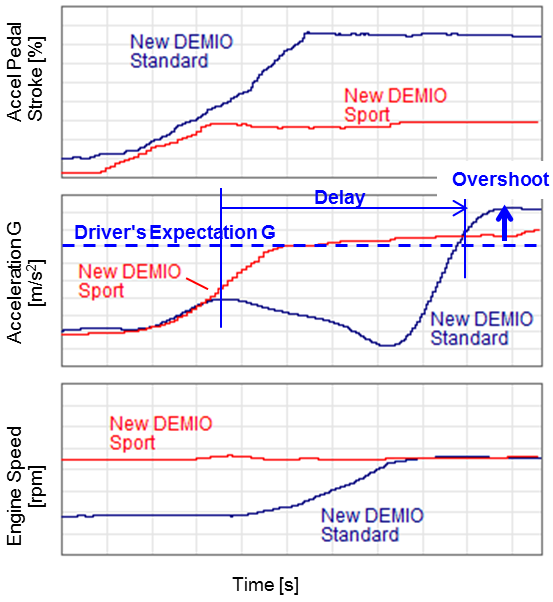


Fig. 11　New DEMIO’s Direct Feel when Entering HWY

3.3　クラス概念を打ち破る（SKYACTIV-D 1.5）

新型デミオでは「クラス概念を打ち破る」ことにチャレンジした。パフォーマンスフィールとしては，クラス概念を打ち破る余裕を感じる走りを狙いとしている。たとえば，高速道路で登坂に差し掛かった時にシフトダウンを必要としないため静粛性が保たれ，更にその状態から加速もできる。これらのことはクラス概念を打ち破るほどの余裕を感じさせる。そのためには，ダウンシフトをさせずに加速ができるトルク性能と，高いトルクを遅れなく使える応答性能を実現させ，新型デミオのSKYACTIV-Dに織り込んでいる。

（1）ダウンシフトをさせずに走れる加速度の大きさ

Fig. 12のAのラインは高速道路車速域での登坂勾配条件値を示す。SKYACTIV-DではD6段位のまま登坂巡航させるだけでなく，更なる登坂や加速までも可能とする余裕のある加速をさせるために，250Nmという2.5Lガソリン車に匹敵する高いエンジントルク特性を実現させた。

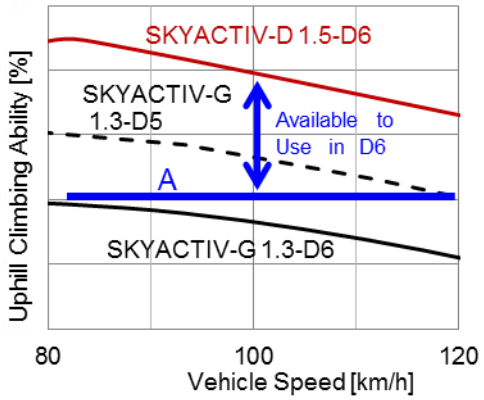


Fig. 12　Max. Uphill Grade for New DEMIO

Fig. 13は高速道路での追い抜き加速における時間経過軸の加速度データで，HEV車やガソリンターボチャージャ車と比較している。グラフ中の加速度高さ（B）は高速道路の加速時に必要とされる加速度を示す。一般的には加速時にダウンシフトが発生し回転上昇を伴うが，SKYACTIV-Dでは低い回転数を保ち加速をさせる。また最大トルク前後のエンジン回転数を使用できるようにさせており，静粛性を保ったままで強い加速感を継続でき，余裕を感じさせている。

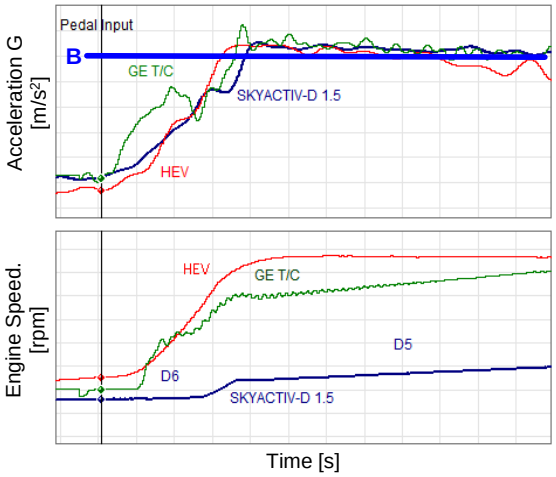


Fig. 13　New DEMIO’s Improved Acceleration on HWY

（2）遅れのない応答性能

ターボチャージャ付のエンジンで大排気量並みの余裕を感じさせるには，低回転域から期待される加速度を遅れなく発生させる必要がある。

Fig. 14に市街地走行でよく使われる加速度高さ（C）を示すが，この加速度を所定時間内（D）で発生できれば遅れを感じることなく加速応答性が確保できる。また表中の破線は同一モードでの他銘柄車を含めたターボチャージャ付車の加速度上昇レンジを示す。新型デミオでは超小型VG（Variable Geometry）ターボチャージャの搭載による過給トルク応答性の向上を図った。加えて，加速応答性の要求レベルに応じた過渡トルク制御により，過給付車群の中で上位レベルの応答性能を実現させ，市街地でも余裕を感じながらの加速ができる。

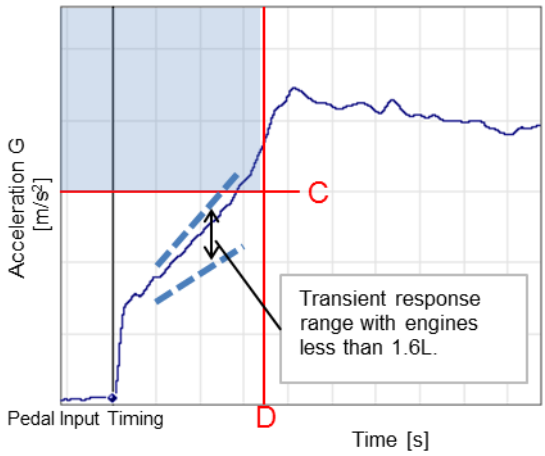


Fig. 14　New DEMIO's Acceleration Response at Startup

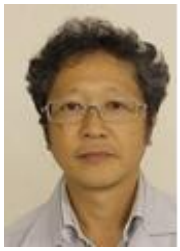
4. おわりに

ヒトがクルマのように高速で走りたいと願っても，ヒトの運動能力には限界がある。またクルマもヒトの期待にどこまでも応じてくれるわけではなく，新幹線のように高速で移動はできない。マツダの一貫した狙いである人馬一体を実現するには加速度高さなどの最大性能が高いクルマというよりも，必要とされる加速度高さの範囲で手足のように自然に扱えるクルマが重要で，本稿で記載しているクルマの応答性の狙いとその実現ユニットを新型デミオに織り込み実現させ，クラス概念を打ち破る性能にすることができた。この狙いのパフォーマンスフィールは，感覚的なことであるがゆえに，皆様にできるだけ分かりやすく狙いが伝えられるように，感覚的な言葉を織り交ぜながら執筆した。新型デミオを運転されるときに，クラス概念を打ち破るパフォーマンスフィールとして皆様に共感していただけると幸いである。

参考文献

(1) 井上，増井ほか：ドライバの構えと車の動きを一致させる（社外説明資料　2013）
(2) 岡山ほか：新型デミオ用 小型SKYACTIV-DRIVEの開発，マツダ技報，No.32，pp.28-32（2015）

■著　者■


渡辺 洋史

田中 健治

藤岡 陽一

國分 弥則

山口 俊行

特集：新型デミオ

9

新型デミオ・CX-3の軽量ボデーシェル開発
Development of Light Weight Body Structure for New DEMIO and CX-3

松岡　秀典*1　山本　裕士*2　田代　邦芳*3　宮本　康史*4　影山　和宏*5
Hidenori Matsuoka　Hiroshi Yamamoto　Kuniyoshi Tashiro　Kouji Miyamoto　Kazuhiro Kageyama
山崎　忠*6　楢原　隆志*7　西村　佳和*8　阿部　健*9　藤谷　駿介*10
Tadashi Yamazaki　Takashi Narahara　Yoshikazu Nishimura　Ken Abe　Shunsuke Fujitani

要　約

新型デミオはマツダ独自の新世代技術であるSKYACTIV TECHNOLOGYをコンパクトカーに全面導入した最初の商品である。CX-3は新世代商品のクロスオーバとしては第2弾である。新型デミオとCX-3の開発目標であるクラスの概念を越えた価値をお客様に提供するため，マツダの世界中の製造拠点で製造可能でかつ軽量で高性能なプラットフォームを新規開発した。CX-5以降の新世代商品群の高いダイナミクス性能や衝突性能と軽量ボデーを両立させるため，これまでのSKYACTIV-BODYの設計思想に加え，新たな技術を導入することで，理想構造を追求した。新型デミオでは先代比22%のねじり剛性向上やトップクラスのパッシブセーフティを実現しながらも同クラスの最軽量ラインより8%もの軽量化を実現した。加えて，CX-3は新型デミオ以上に高性能を実現した。更に新開発プロセスを導入することで短期間開発にも成功した。本稿では新型プラットフォームの戦略や新型デミオとCX-3に織り込んだ高性能と軽量化を実現させるための新技術，新開発プロセスについて紹介する。

Summary

The new Demio is the first mini-segment vehicle with the Mazda's unique new-generation technology, SKYACTIV TECHNOLOGY is fully incorporated. The CX-3 is a compact-crossover vehicle, which is the second crossover in Mazda's new-generation vehicles. A lightweight and high performance platform was newly developed to provide "values beyond the class concepts" which was the target of the new Demio and CX-3 development. This is a "global platform" that can be manufactured at Mazda plants all over the world. To realize lighter body and high dynamic/safety performance of the new generation products after CX-5, ideal body structure was pursued by adopting new technologies in addition to the current engineering concept of SKYACYIV-BODY. The new Demio successfully reduces weight by 8% comparing with the predecessor while realizing the class top level passive safety and 22% increase in torsional rigidity. High performance is achieved in CX-3 moreover than this Demio. And also a short-term development was realized due to the newly introduced development process. This article introduces the new-type platform strategy and new technologies and development process performed for the new Demio and CX-3.

1. はじめに

CX-5に始まるSKYACTIV-BODY採用車は新型デミオで4車種目，CX-3で5車種目となる。これまで新車開発のたびに成熟と進化を続けてきた本技術であるが，新型デミオ・CX-3のコンパクトカー開発において更なる進化を成し遂げ，高性能と軽量化を両立させることに成功した。本稿では高性能と軽量化を両立させた新型プラットフォーム戦略，新技術及び新開発プロセスを紹介する。

2. プラットフォーム戦略

2.1　ニュープラットフォームのターゲット

世界市場の要求は年々高まってきており，競争力を確保するため次のことを達成する必要がある。

・世界中の工場で生産可能である
・商品目標に対してフレキシブルに対応できる
・高品質で費用対効果の優れたコンポーネントを採用する
・軽量で高いダイナミクス性能と衝突性能を達成する

*1～10　ボデー開発部
Body Development Dept.

上記の4点を踏まえたプラットフォームを短期間で作り上げることを命題に，以下3点を具体的達成目標として開発に挑んだ（Fig. 1）。以下，先代デミオプラットフォーム比。

・派生可能な車種数を1.5倍に増加
・開発期間の40%短縮
・製造拠点を66%増加

更にSKYACTIV TECHNOLOGYの優れた特質をコンパクトカーにも織り込むことでセグメントを越えたダイナミクス性能の達成に取り組み，新技術を導入することで目標達成を可能にした。

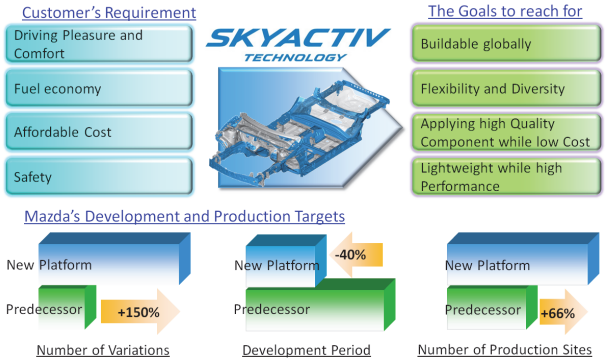


Fig. 1　Target

2.2　ニュープラットフォームの位置づけ

CX-5，アテンザ，アクセラのプラットフォームはCセグメントより上の質量レンジを想定して開発したものである。軽量化と高性能を両立するにはコンパクトカーとして，更に進化させたプラットフォームを構築する必要があった。

コンパクトカー用のニュープラットフォームは，空車質量レンジで960kg～1500kg弱のワイドな質量レンジをカバーでき，今後もさまざまなB・Cセグメントの派生車種に対応可能なものとした（Fig. 2）。

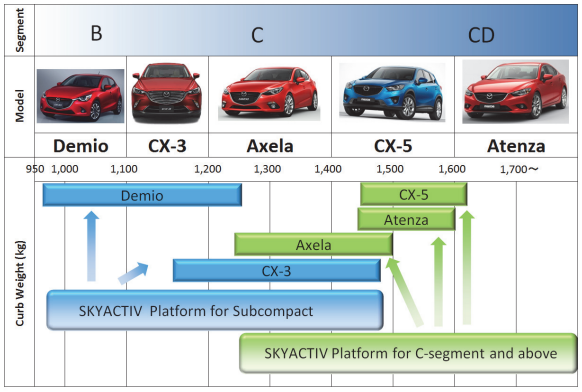


Fig. 2　New Platform Range

2.3　アーキテクチャ構想

先述のとおり，ニュープラットフォームは先代デミオのプラットフォームとは切り離し，SKYACTIV-BODYをベースに，単なるダウンサイジングではなく，新技術の導入，コンパクトカーとしての適正化をコンセプトに，アーキテクチャを進化させた。結果，先代デミオのプラットフォームから性能を改善しながらも12%の軽量化を達成した（Fig. 3）。

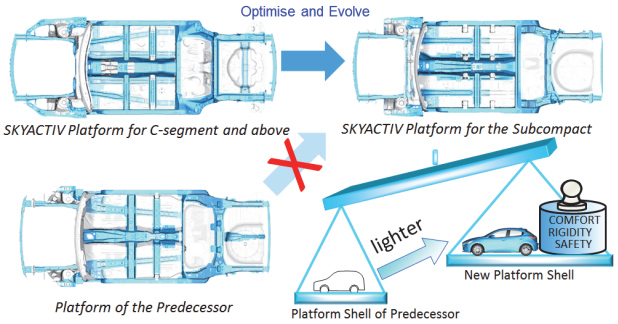


Fig. 3　Architecture

2.4　派生車種への対応

今後の派生展開を見越し，あらかじめ変動要素を決めることで，その変動に対してフレキシブルに対応できるプラットフォームとした。具体的には，ヒップポイント，ホイールベース，オーバハング，ダンパマウント位置等の変動に対応可能である。

プラットフォームはフロントボデー，フロア，リヤと3つのモジュールに大別し，モジュールごとに固有の変動要素に対応した仕様バリエーションを設定した。フロントモジュールは車両質量により2種類のモジュールを設定しており，各モジュールを選択することで容易に幅広い派生車種を作り出すことを可能とした（Fig. 4）。

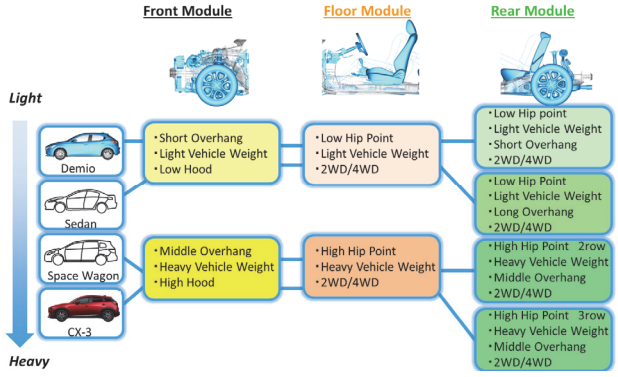


Fig. 4　Flexible Platform

3. 新技術及び開発プロセス

SKYACTIV-BODY ではマルチロードパス，連続構造，ストレートフレームの設計コンセプトで，性能と軽量化を両立させたが，新型デミオ，CX-3 の開発では更なる軽量化追求のため，材料に最大限の仕事をさせるという観点で改善の余地ありと考えた。まずは高コスト工法やアルミ等

の高価格材料には頼らず，従来の工法でかつスチールを用いながら，より高効率な効果を生み出す技術追求を行った。

ここでは，開発段階で注力したマルチロードパスの進化，使い切り断面(性能最大化断面)，コンセプト CAE についての説明を行う。

3.1　マルチロードパスの進化

フレームワークのマルチロードパス（Fig. 5）に加えて，部品にもマルチロードパスのコンセプトを応用した。高い荷重が伝わる稜線に対して，稜線の本数を増やすことで更にエネルギー吸収効率を向上させた（Fig. 6）。

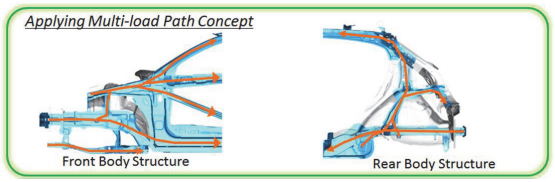


Fig. 5　Multi-Load Path

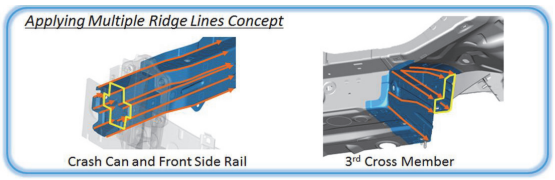


Fig. 6　Multi-Ridge Lines Load Path

また，ボデーパネルにも荷重伝達させることで，伝達効率と軽量化の両立を行った。従来は骨格部材が中心にその機能を担っていたが，新型デミオ，CX-3からは材料強度をあげることで，ボデーパネル自体にも荷重を分担させる考え方をボデーの広範囲に適用した（Fig. 7）。

これらの考え方を導入することで，大幅な軽量化と構造の簡素化を実現した。

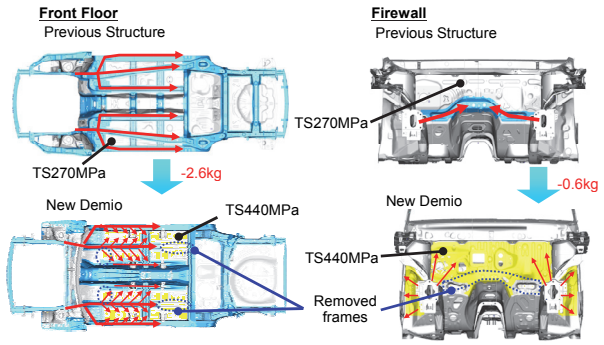


Fig. 7　Panel-Load Path

3.2　使い切り断面（性能最大化断面）

部材により高い強度を持たせるため，断面構造の工夫に注力した。

以下のグラフの縦軸は理論強度に対する実強度の達成率，横軸は板厚及び断面高さである（Fig. 8）。

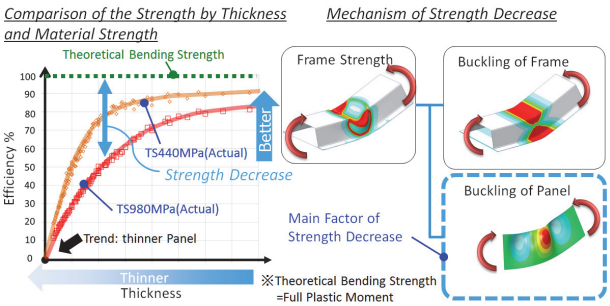


Fig. 8　Material Strength

中空フレームの曲げ荷重は，一般的に断面が大きく薄板で材料強度が高いほど理論的な強度から減少していく傾向があり，薄板を多用することが多いコンパクトカーは，高張力鋼板を採用しても，材料のポテンシャルを十分に発揮させづらい。特に自動車の骨格部材のような薄板中空フレームでは，強度の減少は主に各面の平面部であるパネル自体の変形や座屈が支配的となる。そこで，フレームの稜線部に変形や座屈が発生する強度とパネル自体が変形や座屈する強度を等価にすることで，フレームの曲げ荷重を理論値に近づけることができる。

この考え方をベースに新型デミオ，CX-3の開発ではパネルの変形，座屈を抑制する断面形状を追求した。この曲げ強度を最大限に発揮する断面を「性能最大化断面」と呼んでおり，ポイントは以下の3点である。

① 側面の適切な位置に第一のくびれを設定すること。
② 上面と側面をつなぐ面の角度をできるだけ直角に近づけること。
③ 上面の幅を最小化することで，上面の座屈を防ぐこと。

下図に断面の1例を示す（Fig. 9）。

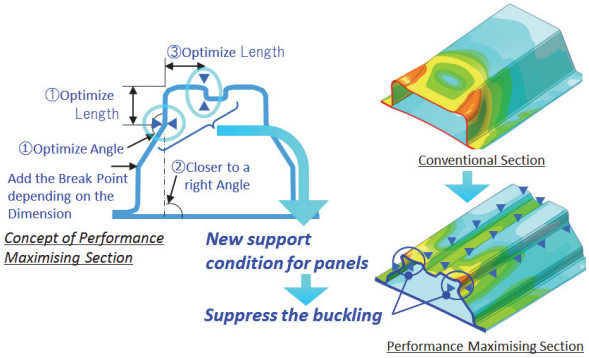


Fig. 9　Parts Sectional Example

この基本形状を基に断面のサイズや形状によって最適化を行った。下図は性能最大化断面を適用した結果である（Fig. 10）。

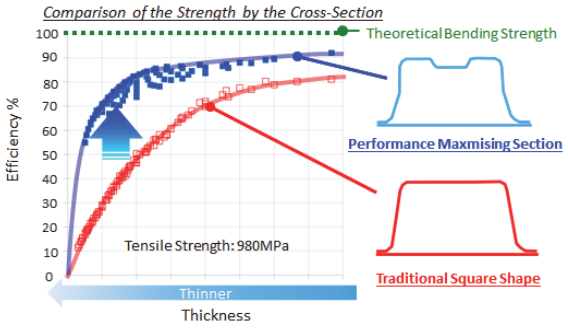


Fig. 10　Sectional Strength Comparison

この断面は一般的な断面に比較し，薄板の領域では最大で約4倍の強度が得られ，薄板のハイテン材を多用している新型デミオとCX-3ではこの断面を車体の各部に適用することで大幅な軽量化を実現した。

3.3　コンセプトCAE

（1）構造最適化の開発アプローチ

従来は，3段階のステップを回すことによって構造の適正化を行ってきた。1stステップでトポロジによるフレームワークの検討を行い，2ndステップで3次元バネ-マスモデルを用いて部材の耐力を決める。そして，3rdステップでCADデータを作成し，フルFEMのCAEで検証していくというステップである（Fig. 11）。

しかし，性能・質量・コストの更なる改善，開発期間の短縮の使命を背負った新型デミオ，CX-3の開発にとって，いかに精度の高い机上検証を開発の初期段階で完了させるかが重要な課題であった。

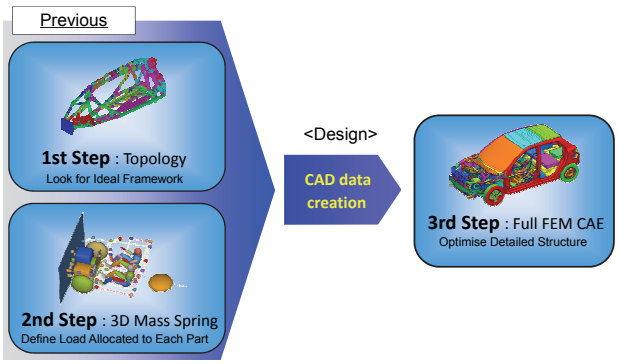


Fig. 11　Conventionally Process

そこで，従来の検証プロセスを一から見直し，軽量化・短期開発をサポートすべく，量産開発へ新しいプロセスを導入した。これをコンセプトCAEと定義し，CADデータ製作前の段階で構造最適化検証を目指した（Fig. 12）。

この新しいプロセスは，軽量化ボデー構造や形状を構築していく上での，キーイネーブラであると考えている。

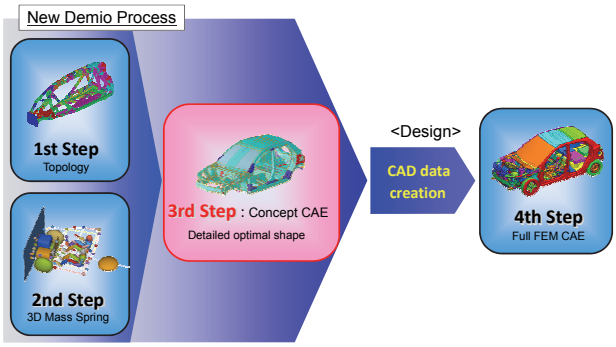


Fig. 12　New Process

実際にコンセプトCAEを開発に適用し，期間短縮を実現したプロセスを以下に示す（Fig. 13）。

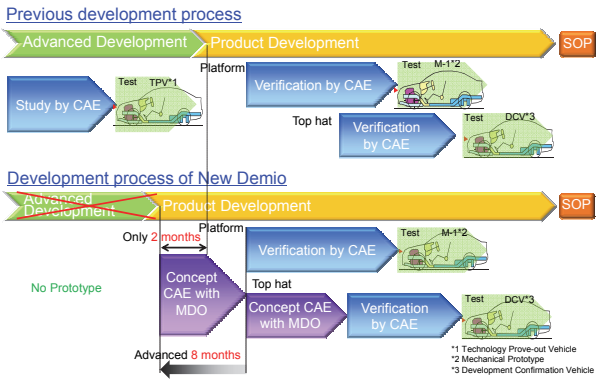


Fig. 13　Development Schedule

マツダでは従来，先行技術開発期間を設け，試作車での検証後に量産開発に移行するという開発プロセスを採用していたが，コンセプトCAEの導入により従来のプラットフォーム開発から8か月の開発期間の短縮につなげた。

（2）コンセプトCAEの適用

アテンザのモデルをベースに，ボデーをコンパクトカーサイズに縮小させ，先代の解析モデルのリヤボデーと結合させることにより，新型デミオのコンセプトCAEモデルを構築した。このモデルを前面・側面・後面衝突に加えNVH性能や剛性解析に適用した（Fig. 14）。

このアプローチにより，トップハットも含めた構造適正化，開発効率化に貢献した。

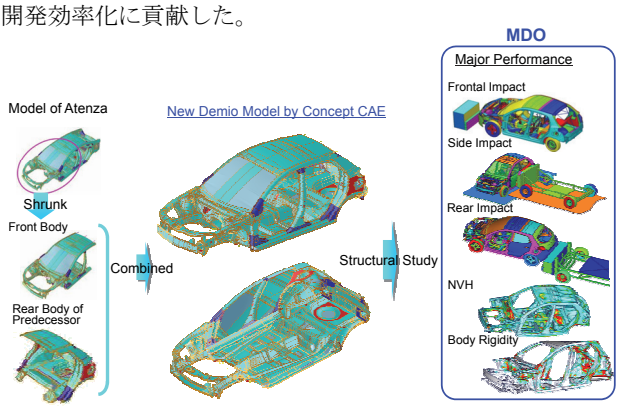


Fig. 14　Concept CAE Application Process

新型デミオ，CX-3は車両質量が軽く，上位セグメント車よりも構造をシンプル化できるとの考えのもと，クロスメンバの位置やスレッドランナの位置・長さ及び断面サイズを変動パラメータとし，実験計画法による構造最適化でベースモデルから大幅に構造をシンプル化した。

結果，フロントフロアのNo.2クロスメンバを移動（かつ2.5クロスメンバと統合）し，スレッドランナの短縮化による軽量化を実現した（Fig. 15）。

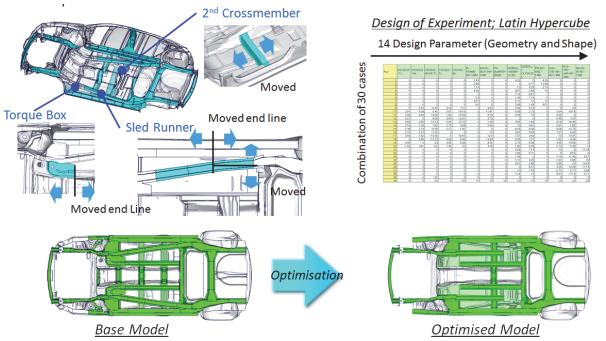


Fig. 15　Framework Optimization

（3）前面衝突時の構造適正化に適用した事例

フルラップ衝突のクラッシュパルスとオフセット衝突時のトーボード変形量を制約条件とし，最軽量な断面サイズを探索した。

その結果フロントフレームの上下方向や，スレッドランナの左右方向への断面縮小が可能であることを見出し，2.0kgの軽量化を実現させた（Fig. 16）。

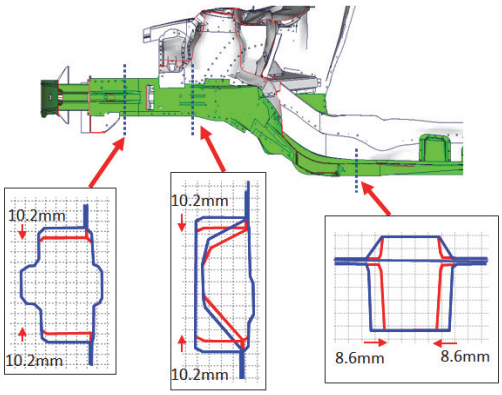


Fig. 16　Parametric Analysis Application Example

このような適用を車体各部に行い，形状最適を行った。60000回に及ぶ計算や新設計コンセプトの適用により新型デミオでは35.6kgの軽量化効果を生み，Body In White（BIW）の軽量化目標を達成した。特に性能最大化断面とマルチロードパスコンセプトの適用や構造最適化が大きな割合を占めている（Fig. 17）。

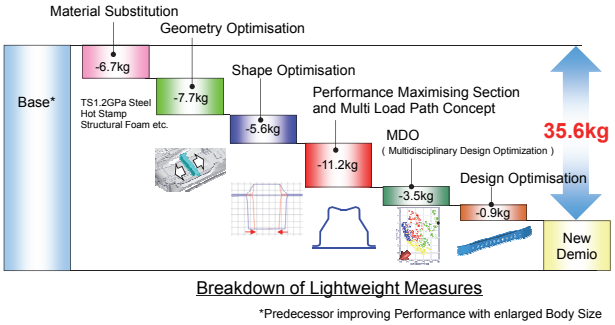


Fig. 17　Effect of Concept CAE

4. 性能と構造

4.1　材料

新型デミオはタイ・メキシコなど世界各地の生産拠点で製造するため，ホットスタンプ（1800MPa級）は調達性の関係よりバンパビームへの適用に留めたが，マツダ初の採用となる1180MPa級ハイテンを代表に，コールドスタンプハイテン材の使用比率を大幅に引き上げた。

780MPa級以上の使用比率（質量比）は，先代デミオ10.6%に対し30%とし，高強度発泡充填材の新規開発材料（4.3 側面衝突性能欄参照）の採用により，軽量化を追求した（Fig. 18）。CX-3もほぼ同様のハイテン使用比率とした。

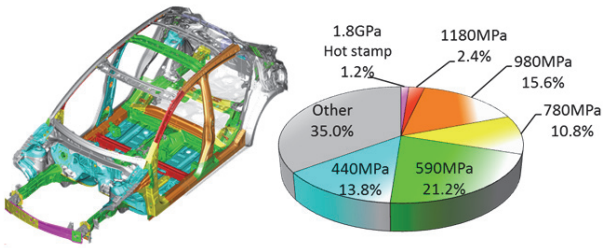


Fig. 18　Application Rate of Sheet Metal

4.2　前面衝突性能

先代デミオはシングルロードパスとスクエア断面のフロントフレームのコンベンショナルな構造を採用したが，新型デミオとCX-3では，サスペンションクロスメンバにエクステンションメンバとクラッシュカンを設定することでロードパスを追加し，効率的なエネルギー吸収が可能な十字型のクラッシュカンとフロントフレームを採用した。

また衝突時にサスペンションクロスメンバを離脱させクラッシュストロークを拡大する構造を採用した。

上記構造を採用することで，4.7kgの軽量化を実現した（Fig. 19）。

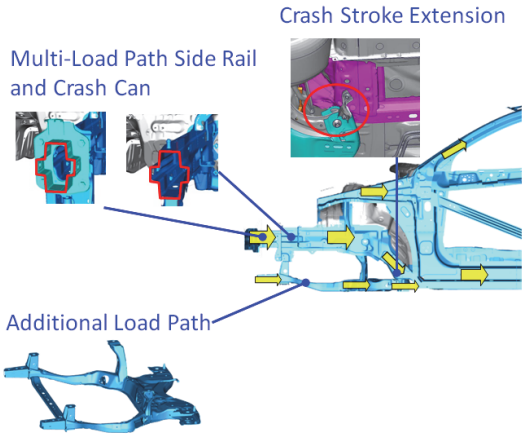


Fig. 19　Multi-Load Path

4.3　側面衝突性能

SKYACTIV-BODYの思想の反映によりNo.3クロスメンバは閉断面とし，多稜線化によるサイドシル間の結合強化を行った。更に，先代デミオでは2本あったフロントフロアのクロスメンバを統合し，最も効率のよいBピラーの根元に配置することで，目標性能を落とすことなく，2.3kgの軽量化を実現した。

またBピラーには，新たに技術開発した高強度発泡充填材を採用した（Fig. 20）。これは，側突バリアが侵入する際に最も応力がかかるベルトラインを補強し，衝突荷重を部材の広い範囲に分散させることで局部座屈を抑えることが可能で，スチールでの補強比で1.0kgの軽量化を実現した。

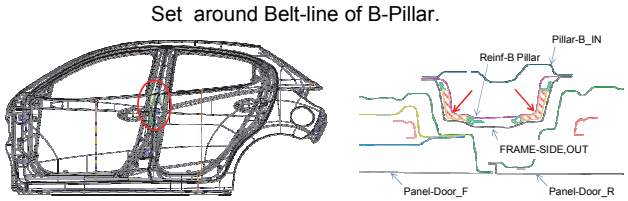


Fig. 20　High Strength Structural Foam

4.4　後面衝突性能

クラッシュスペースが限られるコンパクトカーでは一般に高速後突の対応が難しく，また一般的にリヤサスがトーションビームアクスルの場合，高速後面衝突時にロバスト性を確保するのが難しくなる傾向がある。

限られたクラッシュスペースでロバストに高速後突に対応させるには，保護する領域とクラッシュさせてエネルギー吸収する領域を分け，モードコントロールを行う必要がある。新型デミオではエネルギー吸収を行いつつ，ロバスト性を持った構造にするために，3か所にクラッシュビードを設定し，リヤサイドレールを横に曲げるようにした。

また曲げない部位は変形防止ビードを設定することで，リヤサイドレールの変形を効果的にコントロールできる構造とした（Fig. 21）。

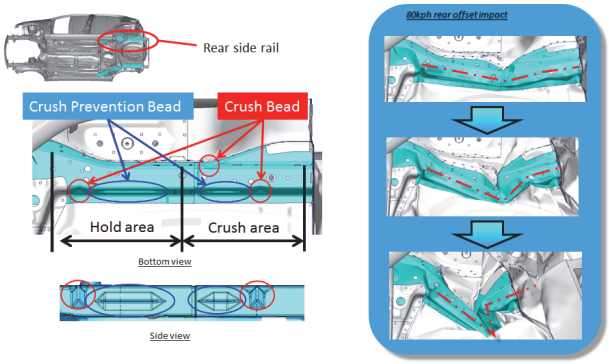


Fig. 21　Bending Concept

4.5　歩行者保護性能

（1）脚部の保護

ロアレッグサポータとバンパビームの前に設定したエネルギーアブソービングフォームで同時に脚部を押すことで，膝の靭帯の傷害の抑制に効果的な構造にした（Fig. 22）。

（2）頭部の保護

一体型のS字型カウルパネルを採用し，インパクト時にこのカウルパネルが上方から折りたたまれる挙動にコントロールすることで，頭部傷害の抑制に効果的な構造とした（Fig. 22）。

また効果的な補強を追加することでロードノイズ性能とも両立させた。

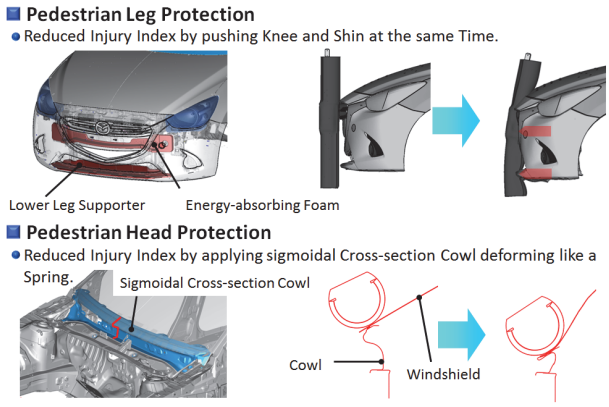


Fig. 22　Pedestrian Protection

4.6　操縦安定性

車体の剛性感の開発に当たり，従来の静的剛性やローカルスティフネスに代わる新たに二つの指標を設定した。

（1）箱感

実車の走行評価で，コーナリング時に路面からタイヤに入る荷重の変化を時系列で測定した。その情報を元に，入

力を模擬したCAE評価を行い車体の変形を抑制するボデーを作り上げた（Fig. 23）。

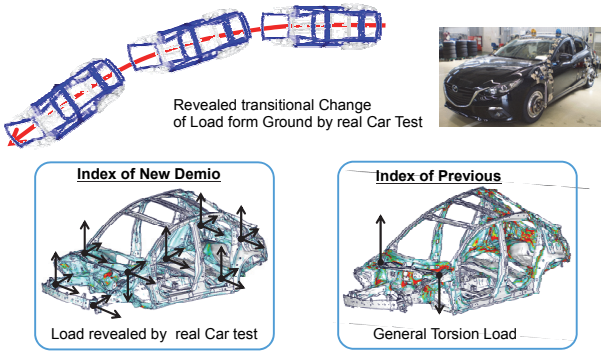


Fig. 23　Body Stiffness Feeling

新たな指標で検証した結果，リフトゲート開口部の変形を抑制することが，箱感を大幅に向上させることが分かった。そこで，トポロジ解析を用いて，どこに効率的なパスがあるか検証した結果，クロスメンバからリヤダンパマウントを経由してリフトゲート開口につなぐ構造が，最も効率的であることが判明した。よって，リヤダンパマウントからつながる三又構造を採用した（Fig. 24）。

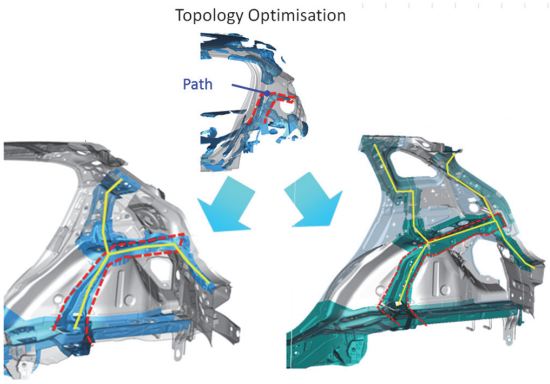


Fig. 24　Improvement of Body Stiffness Feeling

（2）減衰感

振動領域については，実車のベンチテストにより，車両として満足すべき特性を決めた。そしてCAEで求めた振動レベルをモード分離して分析することにより，抑えるべき車体の振動モードを明らかにした。そして主要車体振動モードを抑制することにより，乗員に伝達する振動レベルを低減した。これらにより新たな開発指標を定義し，適切な構造を決めた（Fig. 25）。

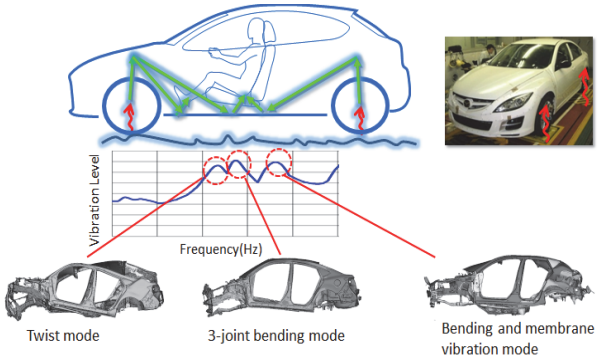


Fig. 25　Body Damping Feeling

この考え方を適用しリヤシートバッグにダイナミックダンパ機能を持たせて車体の減衰性能を向上させた。シートバックをマス，固定ブラケットをバネとしてとらえ，シートと車体の共振を回避するよう，シート固定ブラケットの剛性を厳密に計算して決めた。車として必要なリヤシートを機能部品として最大限活用することで，軽量で高い性能目標を達成した（Fig. 26）。

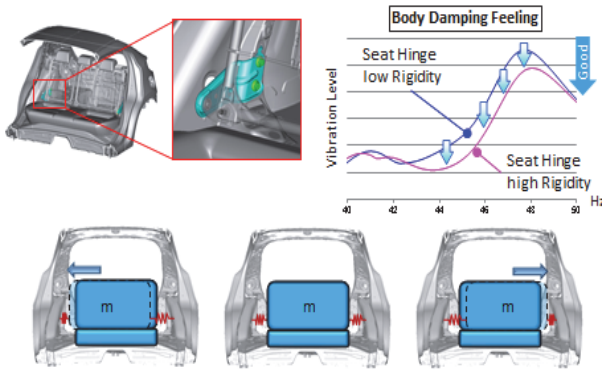


Fig. 26　Improvement Body Damping Feel

4.7　NVH性能の進化

新型デミオ，CX-3では，入力に対して励起されにくいボデーを実現するというコンセプトで取り組んだ。低周波数領域のロードノイズについては，サスペンション入力を使いエネルギー分担が高い車体振動の主要モードを絞り込んだ。

これら主要モードの骨格変形量を減らすため，パネル形状を最適化し，音響放射エネルギーを抑制した。この取り組みで顕著なピークをもたない平坦なエネルギーフロー特性を実現し，1kgの軽量化と5dBのロードノイズ低減を両立した（Fig. 27）。高い周波数領域のロードノイズについては，音の侵入経路で集中的に音を吸収し，経路を遮断する設計を採用した。リヤのエアーエキストラクタ付近に吸音材を設定することで3dBのロードノイズ低減を実現した。

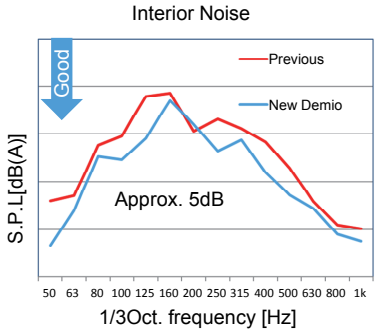


Fig. 27　Sound Pressure Level at a Driver's Ear

4.8　質量

新型デミオは車両サイズが大きくなり各性能の大幅な向上を図ったにもかかわらず，先代デミオ比で10.2kgの軽量化を実現した。サイズや性能を同条件で合わせると，約16%（35.6kg）の軽量化に相当する。これらの軽量化は先に述べた新設計技術の適用により，成し遂げることができた。

結果，先代デミオもBest In Classレベルの軽量化を実現していたが，新型デミオではBest In Classから更に8%以上の軽量化を実現した。スチール製のボデーとしてトップクラスを実現した（Fig. 28）。CX-3も新型デミオ同様にトップクラスの軽量化を実現した。

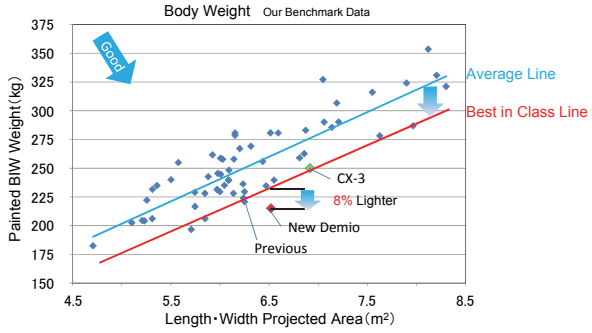


Fig. 28　Top-Level Light Weight Body

質量効率を表すLight Weight Indexは先代デミオから26%向上させ，新型デミオでクラストップの3.0を実現している（Fig. 29）。CX-3では2.7を実現した。

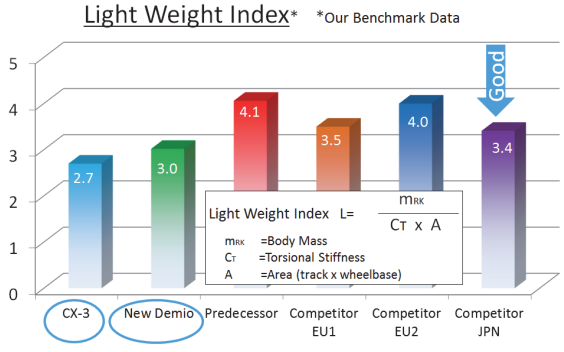


Fig. 29　Achievement of High Weight Efficiency

5. おわりに

新型デミオとCX-3の軽量ボデーシェル開発について報告した。新プロセス・新技術の開発は設計部門単独で成し遂げたものではなく，企画・デザイン・実研・他開発設計・生産技術及び製造部門とONE MAZDAで活動することにより達成することができたと考える。今後もお客様に共感していただけるよりよい商品を生み出していくため，ONE MAZDAでSKYACTIV-BODY技術を進化させていく所存である。

参考文献

（1）松岡秀典ほか：EuroCarBody2014 MAZDA2，pp.33-89（2014）

■著　者■

松岡 秀典

山本 裕士

田代 邦芳

宮本 康史

影山 和宏

山崎 忠

楢原 隆志

西村 佳和

阿部 健

藤谷 駿介

特集：新型デミオ

10

新型デミオ・CX-3のシャシーダイナミクス性能
Chassis Dynamics Performance of New DEMIO and CX-3

西　隆司*1　池山　学*2　安野谷　知城*3
Takashi Nishi　Gaku Ikeyama　Tomoki Anotani
水島　裕文*4　新田　祐司*5
Hirofumi Mizushima　Yuji Nitta

要　約

SKYACTIV-シャシーは走る歓びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現した上で「人馬一体のドライビングプレジャー」と快適性や安心感改善による「走りの質」の向上を実現した。新型デミオ・CX-3はこのブレークスルー技術を継承した上で更なる進化技術を織り込むことにより，セグメントを超える「走りの質」と「人馬一体感」を実現した。

Summary

In addition evolving the fun-to-drive and achieving the weight reduction that supports environmental friendliness, Mazda SKYACTIV-chassis has enhanced “Pleasure of Jinba-Ittai” (the sense that a person and a car become one as if a person and a horse become one) and realized higher “driving quality” including higher comfort and relief. While inheriting the technology of break-through from Mazda SKYACTIV-chassis, New DEMIO and CX-3 have achieved the segment-exceeding “driving quality” and “Jinba-Ittai” with farther evolved technology.

1. はじめに

SKYACTIV-シャシーは走る歓びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現し「人馬一体のドライビングプレジャー」の向上，安心感や快適性の向上による「走りの質」の向上を狙い，サスペンション・ステアリング機能を根本から見直すことで一体感・安心感・快適性の間にある背反性能を高次元で両立するため，技術開発によるブレークスルーを実現した(1)。

本稿では，SKYACTIV-シャシー採用商品の第4弾である新型デミオ・CX-3について，SKYACTIV-シャシーのブレークスルー技術を継承・進化させながらセグメントを超える性能をどのように具現化したか，その手段と達成性能を報告する。

2. 開発の狙い

SKYACTIV-シャシーは以下の背反性能の両立に取り組み実現した。

・中低速域の軽快感と高速域での安心感の両立
・中低速域の軽快感と乗り心地の両立
・軽量化とダイナミクス性能，NVH性能の両立

新型デミオ・CX-3はSKYACTIV-シャシーを採用したCX-5・アテンザ・アクセラのダイナミクス性能を継承しながら「人馬一体感」の進化を目指した。具体的には「ドライバの操作に対しその意図したとおりに車が動き，車からはドライバが必要とする情報が期待どおりに伝わる」このドライバと車との対話が心地よく続けられることである。快適性においては，単に刺激を小さくするのではなくドライバが必要とする情報は伝えながら予期しにくい不快な振動や騒音を低減することで長時間・長距離の走行でも疲れにくい快適性を目指した。

3. 達成手段

3.1　構造と特徴

新型デミオ・CX-3ではフロントはCX-5・アテンザ・アクセラと同形式のマクファーソンストラット式サスペンションをコンパクトカープラットフォーム用に新開発した（Fig. 1）。リヤはSKYACTIV-シャシーのブレークスル

*1, 2　シャシー開発部
Chassis Development Dept.
*3, 4　操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.
*5　NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.

一技術を継承したトーションビーム式サスペンションを新開発した（Fig. 2）。ステアリングギアのサスペンションクロスメンバ取り付け部においてはラバーブッシュを介さずにリジッドにボルト締結するリジッドマウントタイプをマツダで初めて採用した（Fig. 3）。前後ダンパにおいては摩擦特性を向上させたダンパをマツダで初めて採用した。

Fig. 1　Front Suspension and Steering

Fig. 2　Rear Suspension

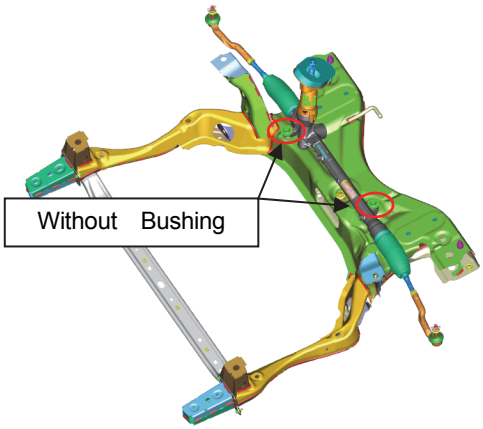


Fig. 3　Steering Gear

3.2　人馬一体感

SKYACTIV-シャシーのフロントサスペンションは「人馬一体感」に必要な「手応えと車両応答のバランス」と「直進安定性」を得るために，キャスタ角とキャスタトレールを拡大することでセルフアライニングトルクを増やしステアリングホイールの手応えを増加し，外乱に動じない安定性を確保した。新型デミオにおいてもこの技術を継承しコンパクトカーのホイールベース・トレッド・タイヤのキャパシティに適応させるために前モデルからキャスタ角を約2度，キャスタトレールを約10mm増加した（Fig. 4）。

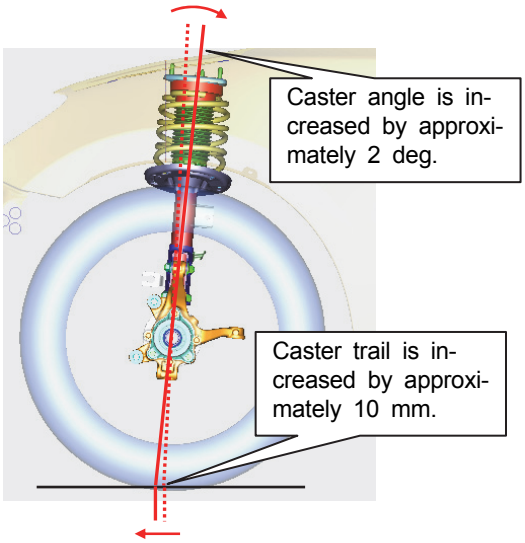


Fig. 4　Caster Angle and Trail

SKYACTIV-シャシーの進化としてステアリングギアのサスペンションクロスメンバの取り付け部においてラバーブッシュを介さないリジッド締結にすることに挑戦した。リジッド結合することによりステアリングホイールの回転角とタイヤの舵角（トー角）の関係をドライバの期待値に近づけることでステアリング操舵時の剛性感を向上した（Fig. 5）。

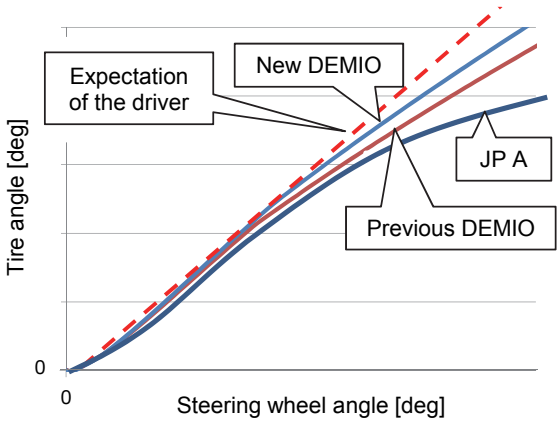


Fig. 5　Steering Wheel Angle vs. Tire Angle

一方その背反性能として，通常リジッド締結化するとドライバに不必要で不快な振動が絶縁できずにステアリングホイールに伝わってしまうが，ステアリングギアとサスペンションクロスメンバのアセンブリの共振周波数を不快な振動の周波数と離間することでこの背反性能をブレークスルーした（Fig. 6）。

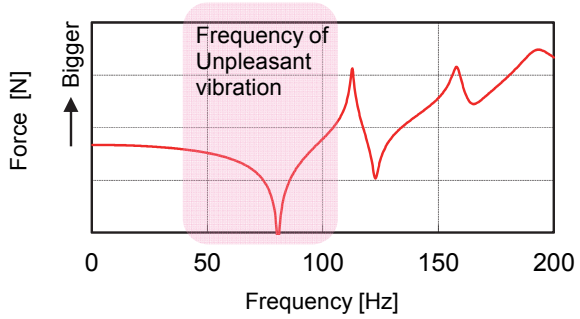


Fig. 6　Frequency Characteristic of Steering Gear and Suspension Member

リヤサスペンションにおいては旋回時の安心感や操舵の正確性を得るため，トーションビームブッシュの特性とトーションビーム本体の剛性を最適化しリヤのコーナリングパワーを増やした（Fig. 7）。

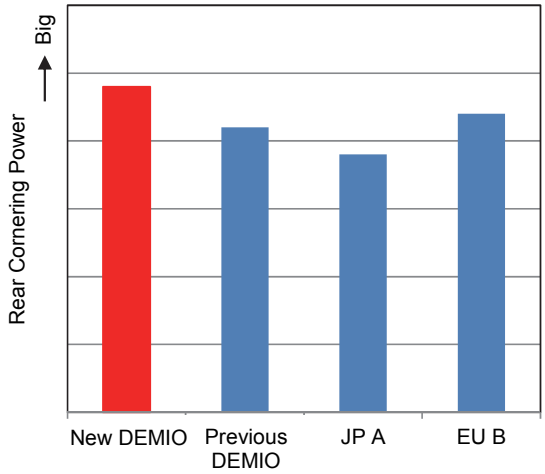


Fig. 7　Rear Cornering Power

3.3　快適性

（1）乗り心地

SKYACTIV-シャシーではリヤサスペンションのトレーリングブッシュの取り付け位置を上げることにより，突起乗り越え時のショックの低減と制動時の姿勢変化の低減を実現した。新型デミオ・CX-3においてもこの技術を継承し，トーションビームブッシュの取り付け位置を前モデル比約35mm上方移動し上記性能の向上を実現した（Fig. 8）。

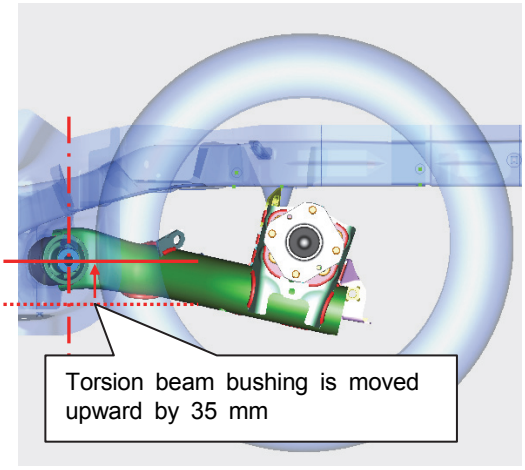


Fig. 8　Position of Torsion Beam Bushing

（2）ロードノイズ性能

SKYACTIV-シャシーにおいて初採用となるトーションビーム式リヤサスペンションにおいてはCAE技術を駆使してビーム形状やブッシュ剛性の最適化を行い，ロードノイズの主要入力となる各振動モードとボデーの車室内空洞共鳴と離間することでロードノイズを低減した。

4. 達成性能

新型デミオ・CX-3で実現した達成性能の代表例を紹介する。

4.1　人馬一体感

Fig. 9はヨーの発生タイミングとヨーに対する横Gの発生遅れの関係を表すものでグラフ中央部が理想のバランスを示している。ステアリングギアのリジッド締結化，キャスタ・キャスタトレール拡大，サスペンション特性の見直しにより，ドライバの期待どおりに反応する特性を実現した。

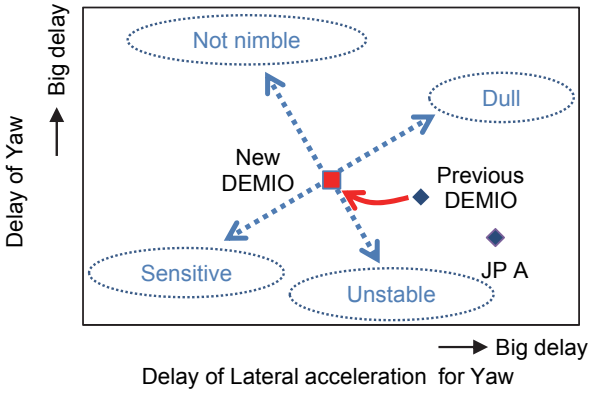


Fig. 9　Delay of Lateral Acceleration for Yaw

4.2　快適性

（1）乗り心地

Fig. 10は突起乗り越え時のインパクトショックの大きさを表している。トーションビームブッシュ取り付け位置の上方移動とサスペンション特性の見直しにより，競合車を凌ぐ性能を達成した。またビリビリするといった不快な振動についてもダンパの摩擦特性の向上とサスペンション特性の見直しにより，競合車を凌ぐ性能を達成した（Fig. 11）。

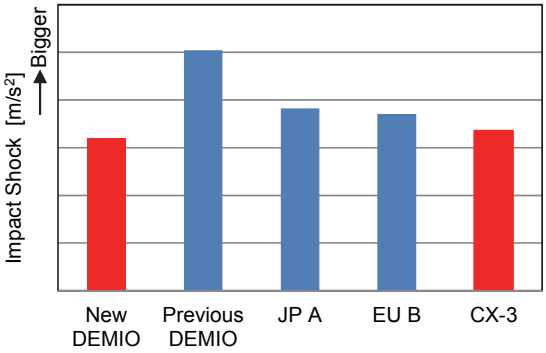


Fig. 10　Result of Impact Shock Measurement

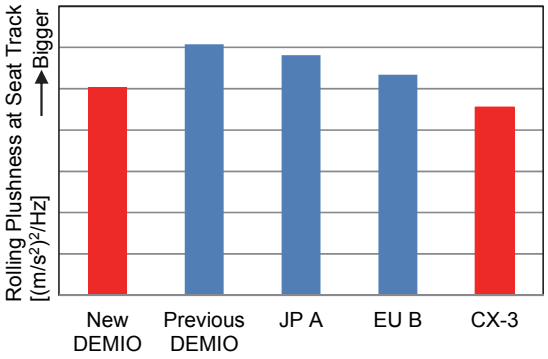


Fig. 11　Result of Rolling Plushness Measurement

（2）ロードノイズ性能

Fig. 12，13は粗れた路面を走行時のロードノイズの音圧を表している。ボデーの車室内空洞共鳴とサスペンションの共振周波数を離間することにより，新型デミオ・CX-3ともに競合車と同等以上のロードノイズ性能を達成，一般的に相反する軽量化やダイナミクス性能と両立できた。

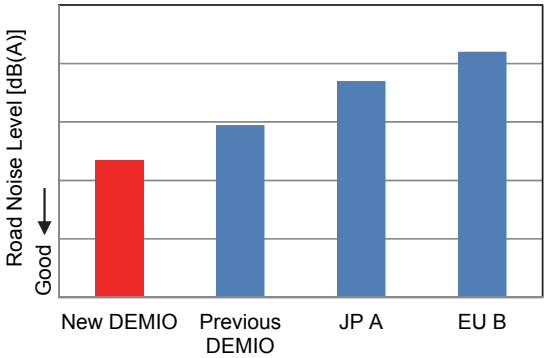


Fig. 12　New DEMIO Result of Road Noise Level

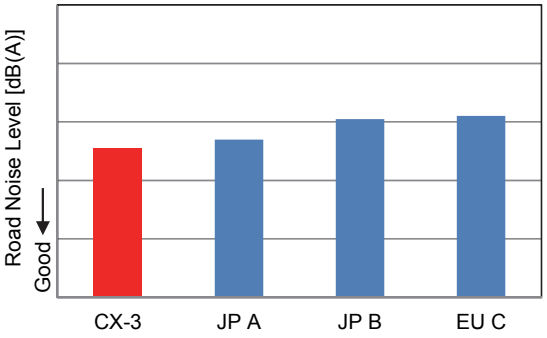


Fig. 13　CX-3 Result of Road Noise Level

5. おわりに

新型デミオ・CX-3のシャシーダイナミクス性能について簡単に紹介した。SKYACTIV-シャシーの技術をコンパクトカーのプラットフォームに凝縮し進化を加えることにより現行モデルに対してダイナミクス性能を大きく向上することができた。今後もSKYACTIV-シャシーが進化し続けることを目指して取り組んでいく。

参考文献

（1）山本忠信ほか：SKYACTIV-シャシー，マツダ技報，No.29，pp.53-60（2011）

■著　者■

西　隆司

池山　学

安野谷　知城

水島　裕文

新田　祐司

特集：新型デミオ

11

高強度発泡充填材フレームの開発
Development of Frame Reinforced High Strength Structural Foam

奥山　智仁*1　田中　力*2　本田　正徳*3　松岡　秀典*4
Tomohito Okuyama　Chikara Tanaka　Masanori Honda　Hidenori Matsuoka
棗　裕貴*5　椙村　勇一*6　石亀　勝義*7
Hirotaka Natsume　Yuichi Sugimura　Katsuyoshi Ishigame

要　約

低燃費をもたらす車体の軽量化と高い衝突安全性能の両立には，鋼板製車体フレームの曲げ強度について質量効率の向上が重要であり，曲げ変形時の断面崩壊の抑制が有効であることが知られている。高強度発泡充填材をフレーム内部に全て充填し補強する技術は，曲げ強度を向上させる有効な技術であるが，軽量化と低コストの視点で質量効率の向上が必要であった。本開発では，断面崩壊の抑制に重要なフレーム縦面とその支持部材に着目し，最小限の充填量で曲げ強度を向上できる構造の導出と，商品化における構造制約や製造時に求められる特性を満たす材料開発を行い，新型デミオのBピラーに適用した。

Summary

That the compatibility of high crash safety performance and reducing vehicle weight resulting in low fuel consumption, improvement of mass efficiency of the bending strength of the steel body frame is important, suppression of the cross-section collapse of the deformation is effective bending is known have. Technique of reinforcing filling all within the frame of high strength structural foam, is an effective technique for improving the bending strength, but improved mass efficiency was required in perspective of cost and weight. In this development, to derive the structure that focuses on an important frame vertical surface to the suppression of the cross-section collapse and the support member, it is possible to improve the bending strength in the filling amount of the minimum, the properties required at the time of manufacture and structural constraints in commercialized it developed as a new material to satisfy, it is applied to the B-pillar of the new Demio.

1. はじめに

近年，自動車はCO_2排出量の削減や省エネルギー化に対して燃費性能を向上することと，衝突時において人命を保護するために車体フレーム（以下，フレーム）の高い衝突安全性能との両立が求められている。フレームの曲げ強度の向上には高張力鋼板を用いるが，グローバルな供給・仕様を考慮すると板厚の増加や補強用鋼板の追加等が避けられず，コスト増や重量増となる。また，高強度発泡充填材（以下，充填材）をフレーム内部に全て充填する構造は，曲げ強度を向上させる有効な技術ではあるが，軽量化と低コスト化の視点では質量効率が低く，マツダで一部車種[(1)]，他社も高級車への採用に留まっている。そこで，質量効率の向上をねらい，最小限の充填量で曲げ強度を向上できる構造の考え方と具体形状を見出し商品化における構造制約や製造時に求められる特性を満たす材料開発に取り組んだ。

2. 最小量の充填構造の導出

2.1　質量効率を上げる着眼点

フレームに多く用いられる薄肉中空断面の場合，断面崩壊によってフレームの曲げ強度が理想強度である全塑性モーメントより大幅に低く，鋼板が本来有する材料強度を活用できていない。Fig. 1に示すフレームの断面において，上面幅を狭めることで曲げ強度を向上する方法[(2)]は知られているが，更なる曲げ強度の向上には縦面の座屈耐力を向上する必要がある。木村ら[(3)]によると，薄板の曲げ座屈耐力Mと全塑性モーメントMpの関係は，換算幅厚比λ^*の値により式(1)または，式(5)のいずれかで表される。

*1～3　技術研究所
Technical Research Center
*4, 5　ボデー開発部
Body Development Dept.
*6, 7　衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

i)$\lambda^* \leqq \lambda_e^*$の場合，座屈耐力の式

$$\frac{M}{Mp}=(\alpha-1)\left(\frac{\lambda^*}{\lambda_e^*}\right)+1 \quad (1)$$

$$\alpha=\frac{\sigma_{YP}}{\sigma_{TS}} \quad \therefore \alpha<1 \quad (2)$$

$$\lambda^*=\frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_{TS}}{kE}} \quad (3)$$

$$\lambda_e^*=\sqrt{\frac{0.9}{\alpha}} \quad (4)$$

ここで，σ_{YP}：降伏応力　σ_{TS}：最大引張応力

k：座屈係数　E：ヤング率　b：板幅　t：板厚

ii) $\lambda^* \leqq \lambda_e^*/\alpha$の場合，弾塑性座屈の式

$$\frac{M}{Mp}=\frac{\lambda_p^*}{\lambda^*} \quad (5)$$

$$\lambda_p^*=\frac{3\alpha-1}{2\alpha}\lambda_e^* \quad (6)$$

Fig. 2に，式(1)～(6)に基づき算出した1,180MPa級高張力鋼板（σ_{YP}=777MPa，σ_{TS}=1,199MPa，E=205,900MPa，質量密度ρ=7.6g/cm^3，板長さ=150mm）の曲げ座屈耐力*Moment*を質量*Mass*により除した質量効率を示す。材料特性一定のもとに質量効率を向上させるには，断面幅bの拡大により質量効率を向上させた上で，板厚t，もしくは座屈係数kの増大により全塑性モーメントMpからの低下率を低減することが有効であると分かる。しかし，板厚tの増大は軽量化，板幅bの増大はレイアウト成立性を考慮すると設計が困難である。

一方，座屈係数kは，板のアスペクト比，荷重条件一定の場合には，板の支持条件によって決定する因子である。従って，板の曲げ座屈耐力の質量効率を向上させるため，板の支持条件の工夫による座屈係数kの増大が有効な方策である。理由は，式(1)のα－1が式(2)より負の値となるため，式(3)よりkを大きくすると，λ*の値を小さくでき，結果M/Mpを1に近づけることができるためである。

ここまで述べてきたように，マツダのフレーム開発において，板の曲げ座屈耐力の向上は，板幅bをできるだけ大きくした上で，板の支持条件を工夫し，座屈係数kを増大させる方策で進めており，本田ら[4]が報告しているように支持条件をFig. 3に示す断面形状により実施している。しかし，更なる高張力鋼板の高強度薄板化は，断面が座屈しやすくなる。そこで，断面形状に加え，より一層の座屈係数kの向上を図る手段として充填材フレームの開発に取り組んだ。

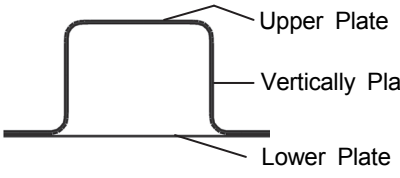


Fig. 1　Section of Frame

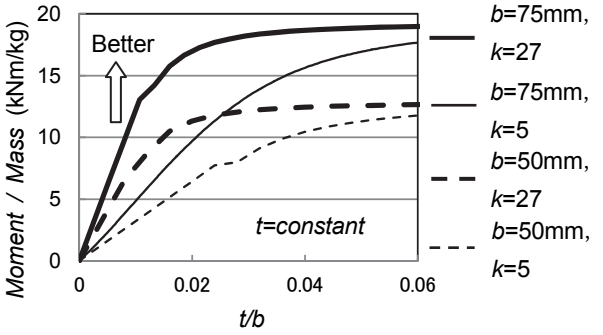


Fig. 2　Mass Effectiveness of Bending Buckling Strength

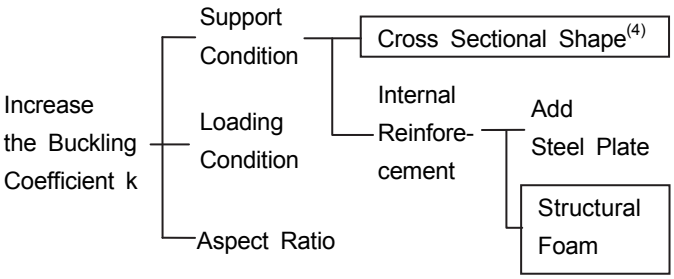


Fig. 3　Technique to Increase the Buckling Coefficient k

2.2　座屈係数kを満たす効果と適値

（1）充填材フレーム構造

充填材フレームはFig. 4に示すアウタパネル・レインフォースメント・インナパネルの3枚の鋼板から構成される。フレーム曲げ強度の質量効率の向上を図るには，2.1からレインフォースメント縦面の端部拘束による座屈係数kの増大が有効である。充填材は，Fig. 4に示すアウタパネルとレインフォースメントの板間を充填し，充填材と各鋼板とを接着し，端部を拘束する補強効果を得る。フレーム縦面を拘束する上で，上端にRを持つ稜線部（Fig. 4のA部）は変形起点となり強度は低下する。また，充填材と鋼板との接着面が剥離することで拘束力が大きく低下する。そのため，まずはフレーム内部の変形挙動を把握できるCAEを用いて，剥離現象を再現させ，次にフレーム縦面と稜線部の補強箇所に着目して，質量効率が最大となる充填量を明らかにした。

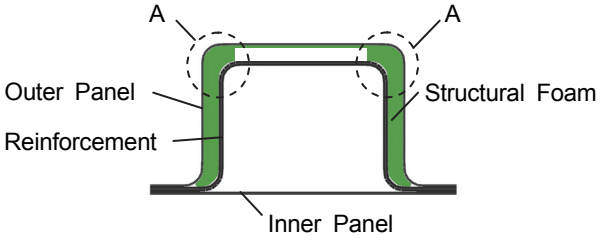


Fig. 4　Section of Frame Reinforced Structural Foam

（2）接着界面の剥離挙動を再現できるCAE手法の構築

CAEは，解析ツールとしてLS-DYNAを用いた。充填材の剥離現象は，Fig. 5に示すフレーム内の充填構造を模擬したサンドイッチ試験から，Fig. 6に示す粘りを伴ってから完全剥離に至る。従来のCAEは，境界条件の設定が接触する面同士が干渉した量に応じて反力を生じるAutomatic Surface to Surfaceであり，この粘りを再現できなかった。そこで，接着界面に一定荷重が生じた後に，鋼板と充填材の相対変位の大きさにより徐々に伝達荷重が減少し，完全剥離に至る境界条件とすることで，粘りを再現した。この境界条件は，実部品レベルでも剥離挙動を再現でき，曲げ強度の予実差を10%から5%以下へと精度を向上させ，以降に述べる検討（2.2(3)と4.1）に適用した。

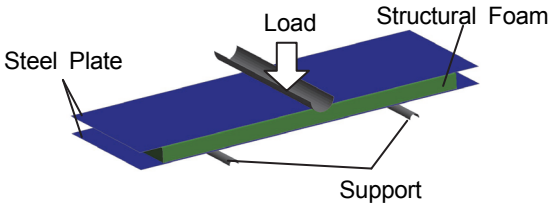


Fig. 5　Sandwich Test Piece

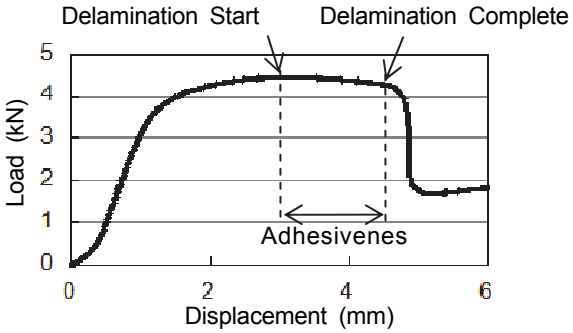


Fig. 6　Delamination Behavior for Sandwich Test

（3）充填材による効果と適値

フレーム縦面の拘束に必要な充填範囲とフレーム強度の質量効率の関係をFig. 7に示す。充填範囲は，縦面の拘束に影響しない上面の稜線R止まりを起点x=0とし，徐々に範囲を下面に向けて広げている。また，フレーム強度の質量効率は，充填材の追加質量$\Delta Mass$と，フレームの曲げ強度の向上代$\Delta Moment$の商とした。座屈係数kは，式(1)～式(6)とフレームの曲げ強度結果から算出した。

結果，最も質量効率が高いのは，拘束端部となる縦面の稜線R止まりまで充填した範囲x=0～30であり，座屈係数kは補強なしのフレームから3倍以上に向上した（Fig. 7のMax Point）。つまり，縦面の拘束は，稜線部（Fig. 4のA）を支持，補強することで十分であり，それ以上の追加補強は，充填材を増量した質量ほどフレーム強度の向上が得られないと分かった。

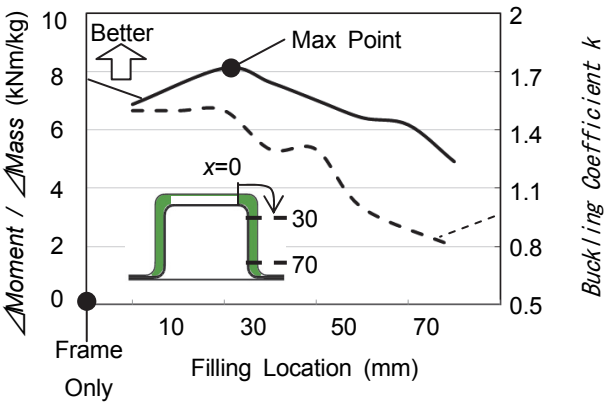


Fig. 7　Range of Filling Location and Mass Efficiency

3. 充填材の材料開発

3.1　開発の狙いと目標特性

Bピラー等に充填材フレーム構造を取り入れる際に，設計の制約や生産性を満たす主要要件は，以下の3点とした。特にCの観点から，充填材のタイプは，過去に実績のあるマツダで使用した軟質シートではなく，成形タイプの充填材開発が必要である（Table 1）。

A. 板間隙を確実に充填するために2倍の高発泡率
B. 衝突性能を満足する圧縮強度
C. 組み付け時の作業容易性や位置ずれが生じないこと

Table 1　Comparison the Features of the Structural Foam

Type		Flexible	Molding
Appearance			
Storage	Temperature Control	Need	No Need
Manufacture	Ease of assembly	Bad	Better
	Assembly Position	Varies	Not Vary
Efficiency	High Strength	Both Easy	Both Not Easy
	High Foaming		

3.2　材料開発

成形タイプの充填材における組成改良の考え方をTable 2に示す。フレームの板間隙を充填し，衝突性能を満足するため，充填材は高発泡と高強度の両立が求められた。従来の成形タイプは，発泡硬化前のエポキシ樹脂のモノマー分子量が大きく，ポリマー化させたときの架橋密度が低いため，高強度化できなかった。そこで，分子量が異なる複数種のエポキシ樹脂をブレンドし高強度化を実現した。更に，高強度を維持した上での高発泡化は，従来は気泡が肥大化し低強度化するため，複数種の発泡剤の併用により発泡セルを微細化して実現した（Fig. 8）。

Table 2　Modification Concept of Material Composition

	Concept	Initiatives
Epoxy Resin	Increase of the Cross-linking Density	Mono Material →Multi Material
Foaming Agent	Hypertrophy Suppress of Bubbles	Mono Material →Multi Material

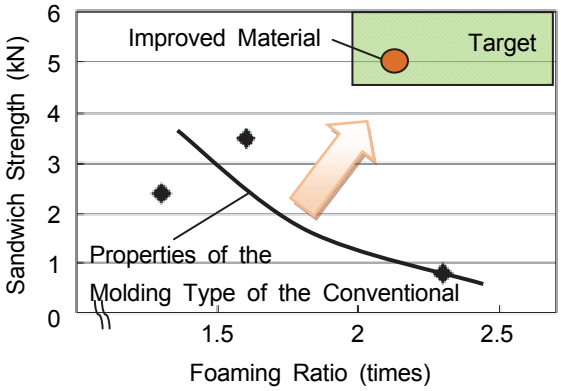


Fig. 8　Target and Performance of the Improved Material

4. 商品化開発

4.1　実部品構造化への応用

充填材フレーム構造を車体に適用するために，設計や衝突安全性の観点から以下の課題に取り組んだ。

（1）レイアウト要件との両立

充填材を発泡させる最低板厚を確保するためには，レインフォースメントとアウタパネルの板間隙が一定以上必要である。その板間隙が確保可能な範囲を明らかにした。

（2）衝突要件との両立

車両を模擬したバリアが車両側面に衝突すると，ドアのヒンジを介してBピラーに荷重が伝達される。その際，車室内の空間を確保するには，ロアヒンジ部より上部のBピラーが座屈しない強度分布とする必要がある（Fig. 9）。その強度分布を充填材フレーム構造により，4.1（1）の充填可能な範囲内で適量配置とした。

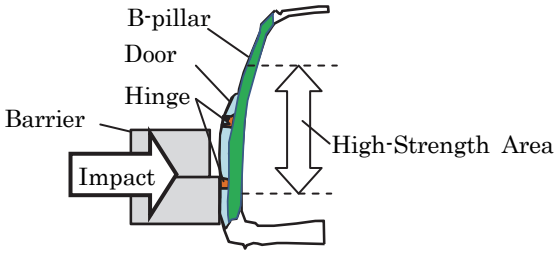


Fig. 9　Concept of High-Strength Area in Side Impact

4.2　品質確保

充填材は，フレームに組み付ける工程，及び塗装工程で発泡硬化させる。そのため，組み付ける工程の生産性確保と発泡硬化後の材料性能の確保が必要となる。更に，海外生産を考慮すると，物流を含む2か月間の保存による特性劣化の防止が必要であった（Table 3）。

（1）保管条件

充填材を常温で保管できるように，充填材の吸湿性メカニズムを明らかにした。充填材は，発泡硬化の前後において，海外工場を含む温度・湿度計測から温度35℃・湿度58%の高温多湿環境下（以下，高温多湿環境下）での強度低下の抑制が課題となる。充填材を発泡硬化する前に高温多湿環境下で長期間保管した充填材は，発泡セルの肥大化により必要な強度以下となる。発泡セルの肥大化抑制は，エポキシ樹脂の粘度を上げる必要がある。一方で，発泡硬化後の被水環境下に長期間さらされると，鋼板界面の濡れ性が低下し，強度が低下する。濡れ性を上げるためには，エポキシ樹脂の粘度を下げる必要がある。そのため，発泡硬化前後に要求される粘度を両立させるため，複数のエポキシ成分と複数のフィラーを配合した（Fig. 10）。

（2）品質保証

充填材のマツダ構内への輸送から発泡硬化までの一連の工程において品質保証を実施した。以下に車体組み立て工程と塗装工程の各工程での取り組みを示す。

車体組み立て工程について，充填材により充填するレインフォースメントとアウタパネルの板間隙が広すぎると，未充填や密度低下により，フレーム強度の目標品質を確保できない。そのため，試作車やパイロット車の板間隙を測定し，設計において許容できる板間隙のバラつき範囲内であることを確認した。

塗装工程について，国内外の塗装工場では，異なる種類の化成処理液，電着液を使用している。充填材がそれらの液に浸漬した際に液を汚染しないこと，充填材が溶解・変質しないことを確認した。また，発泡硬化条件として電着塗装時の乾燥炉の温度が重要である。海外工場も含めた乾燥炉の温度が1年を通してどのような時間変動を示すか計

測し，充填材が発泡硬化し要求性能を満たす温度であることを確認した。

Table 3　Initiatives and Tasks at the Time of Manufacture

Task	Initiatives
Storage Condition	・Hydroscopic mechanism ・Inspection of the storage stability
Cure Condition	・Make the cure wind curve ・Measure cure extent
Quality Assurance	・Transportation condition of temperature and humidity ・Measurement dispersion of the space between the outer panel and the reinforcement ・Compatibility with electrodeposition and chemical conversion treatment ・Measurements of the drying oven temperature, including overseas plants

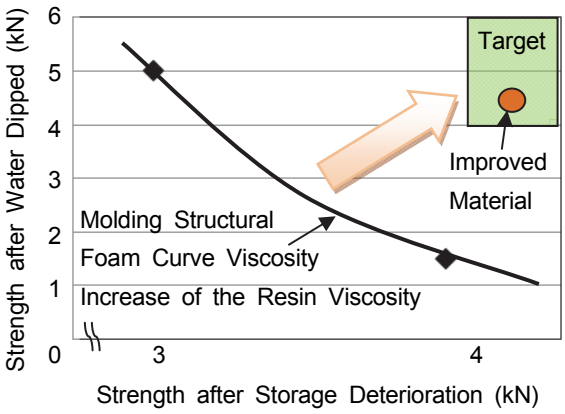


Fig. 10　The Strength Relationship in the Water Resistance of the Foaming before and after

4.3　軽量化と低コスト化の効果

新型デミオのBピラーに本構造・材料を適用し，従来のフレーム内部に充填材を全て充填する構造から充填量を7割削減し，低コスト化を実現した。従来の構造に比べ約1 kg/台の軽量化をした上で性能を向上し，各国NCAPなどの高い衝突安全性能を満足した（Fig. 11）。

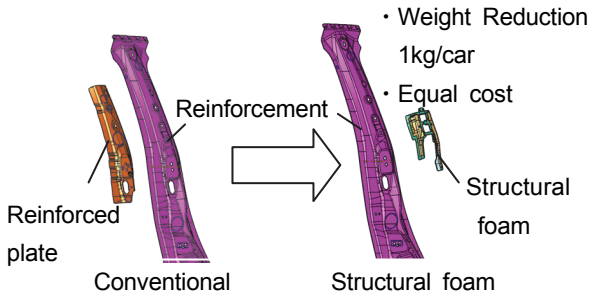


Fig. 11　Structure that are Applied to the B-pillar

5. おわりに

（1）板の座屈理論より，フレーム縦壁の支持部を補強する考え方を見出し，最小限の充填量で曲げ強度を向上できる稜線補強の形状を見出した。

（2）構造制約や製造時に求められる特性を満たす充填材を開発した。

参考文献

(1) 深堀ほか：車体フレームの剛性に対する充填材の効果，マツダ技報，No.20，pp.115-121（2002）

(2) 槌田ほか：部材の座屈強度に及ぼす材料強度と断面形状の影響に関する考察（その1），自動車技術会 学術講演会前刷集，No.115-09，pp.21-24（2009）

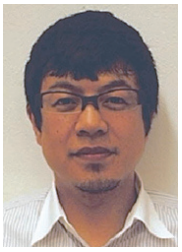
(3) 木村ほか：薄板の座屈後耐力，日本建築学会論文集，第545号，pp.135-140（2001）

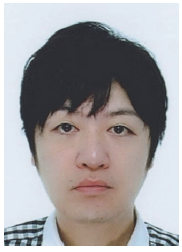
(4) 本田ほか：薄肉中空フレームにおける曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.129-14, pp.1-4（2014）

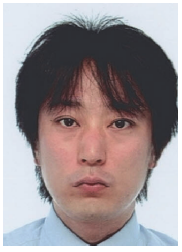
■著　者■

奥山　智仁

田中　力


本田　正徳


松岡　秀典


棗　裕貴

椙村　勇一

石亀　勝義

特集：新型デミオ

12

1180MPa級高強度鋼板の車体への適用について
Application of 1180MPa Grade Ultra-high Strength Steel to Vehicle Body

坂野　律男*1　岡田　又治*2　丸山　秀幸*3
Ritsuo Sakano　Mataharu Okada　Hideyuki Maruyama
小田　修二*4　清水　昇*5　森林　竜也*6
Shuji Koda　Noboru Shimizu　Tatsuya Moribayashi

要　約

自動車車体への高強度・高剛性と軽量化の両立の必要性は増している。これを達成するために鋼板の更なる高強度化は費用対効果の面でのバランスが良く，主なる手法である。新型デミオでは従来に比べワンランクアップの1180MPa級高強度鋼板を採用した。高強度化に伴う材料特性の変化により，プレス・溶接等の生産加工性に及ぼす影響が大である。量産工場において，安定して品質と生産性を確保する必要がある。そのために，材料特性の変化に対して，基本特性を検証した。そして，製品設計・工程設計・要具設計・シミュレーション等事前評価ツール・加工条件・量産管理に反映していく活動を行った。これらの取り組みを紹介する。

Summary

The need of the coexistence of the high-strength, and high-stiffness to the car body and the light-weighting increase. The further high-strength steel is a major technique, because of a good balance of an effect and a cost. A 1180MPa grade high-tension steel sheet which one rank up in comparison with before is adopted to new Demio. The change of material property with becoming high strength, influence to a stamping formability, welding workability and so on very much. In a mass production factory, it is necessary to secure a quality and productivity for these characteristic. Therefore, the basic properties are evaluated for a change of various kinds of material property. And we performed the activity to upgrade for product design, process design, tool design, prior evaluation tool such as simulation, process condition, process control. We introduce these activities.

1. はじめに

地球環境を配慮したCO_2の削減，そして自動車の衝突安全と運転性能への要求は高まっている。その要求に答えるためには，自動車車体の高強度・高剛性と軽量化の両立が必要である。それに対しては，種々の取り組みがあるが，材料面からの取り組みの中では鋼板材料の更なる高強度化が費用対効果の面でバランスが良く主なる取り組みである。既にマツダ技報にても980MPa級高強度鋼板の採用は報告されている[(1)]が，新型デミオでは1180MPa級高強度鋼板の量産適用に取り組み採用した。高強度化に伴う，材料特性の変化により，プレス成形及び溶接組立加工性が悪化し，加工方案・加工条件及び要具での対応が必要となる。本稿では，1180MPa級高強度鋼板の適用に当たり，お客様品質を確保し，安定生産を行うための取り組みを紹介する。

2. 材料特性と生産上の課題

1180MPa級高強度鋼板の引張強さは1180MPa以上である。材料特性の中で弾性変形から塑性変形に代わる降伏点，破断に至るまでの伸び量等は成形性に影響する。980MPa級と比べると，降伏点は30-40％アップ，伸び量は20-40％ダウンとなり，共に成形性は悪化する。高強度に伴い材料の硬度も高くなり要具の摩耗に影響を与える。また，高強度を得るためにSi，Mn，C等の合金成分の添加量を増加させ，熱処理を施し製造されている。この合金成分により，電気抵抗の固有値が増加するため，材料の電気抵抗発熱を利用したスポット溶接では加工性に影響を受ける。以上の影響に対する対応策を次章以下で述べる。新型デミオへの適用をFig. 1に示す。

*1～6　車体技術部
Body Production Engineering Dept.

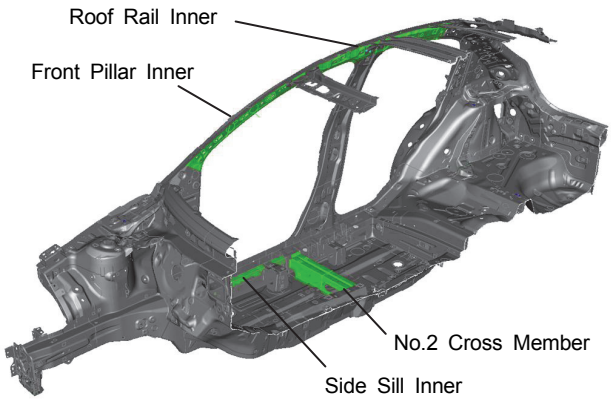


Fig. 1　1180MPa Grade Materials in New Demio

3. プレス成形上の課題と取り組み

3.1　1180MPa級材料の現状把握

1180MPa級材料を扱うにあたり，機械特性から成形時に困難が増すことは予想されたが，問題への対応は未知の領域であった。そこで，実際のパネル挙動とCAEによる机上予測精度を確認するため実験型による実機検証を行った。金型はBピラーレインフォースメントの絞り工程上部を模した成形面とし，供試材は引張強さ1180MPa，複数の鋼種を用いた。

Fig. 2　Stamped Panel of Experiment

取得したパネルの状態を確認すると割れやしわが発生しスプリングバック量も大きくなっているものの，極度に深刻な現象は見受けられなかった（Fig. 2）。また，机上予測精度としては割れやしわなどの成形性ではおおむね良好だったが，寸法精度では±1.0mmの範囲で一致度が65%に留まり予測精度の不足が明らかになった。

実験での一連の知見を踏まえ1180MPa級材料を扱うにあたり，形状凍結性（金型どおりの寸法，形状が確保できること）による寸法精度対策と机上予測精度の更なる向上の必要性を見出すことができた。

3.2　新型デミオ適用部品での工法選定

1180MPa級材料適用部品の内，板厚1.2mmのフロントピラーインナ（Fig. 3）の事例を紹介する。

Fig. 3　Front Pillar Inner in New Demio

当該部品を既存車種（アクセラ）と比較すると引張強さは2倍，板厚は2/3である。高強度化による延性劣化，薄肉化による座屈耐性悪化，高強度化と薄肉化双方による形状凍結性悪化を考慮すると従来工法のままでは金型調整時の困難さが予想された。

初期工程設計段階において旧型デミオで用いた深絞り工法に対し，新たにフォーム工法とフランジ工法の組み合わせを検討した。当工法は初工程でフォーミングにより浅く成形し，後工程で正規位置までフランジ曲げを行う（Fig. 4）。

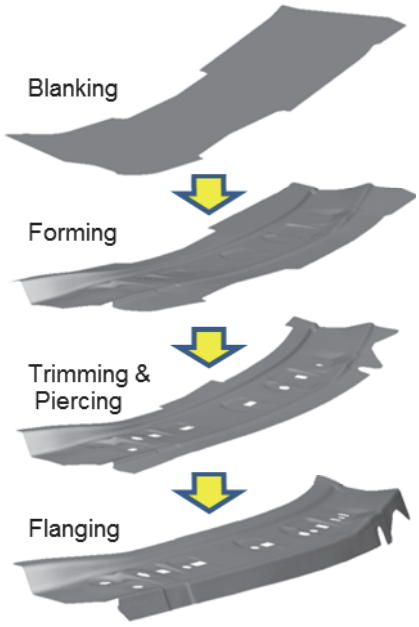


Fig. 4　Stamping Methods for Front Pillar Inner

この工法立案の狙いは以下のとおりである。

（1）絞り成形からフォーム成形への変更

絞り成形からフォーム成形へ変更することで，材料の伸び及びすべり性に依存することなく成形を行う。これにより安定した成形を可能とする。また，壁そりの発生や寸法精度変化を低減させる。

（2）初工程で浅く展開する成形の採用

成形荷重と材料の流入量を低減することで金型への負荷を下げ，型かじりの発生を防ぐ。また，成形方向と同じ方向でトリム加工が行えるようになることで，トリム型の負荷軽減と製品端精度の向上を図る。

最終的にCAEを用いた比較検証により新たな工法の優位性を確認し，詳細工程設計段階に移行した。

3.3　机上検証での寸法精度保証に対する取り組み

机上予測精度向上に対して，曲げ・曲げ戻しを受ける成形を正確に表現するために用いているバウシンガー効果の考慮可能なY-Uモデル（吉田－上森モデル，移動硬化則）に対して，構成パラメータの調整など実機結果を織り

込む取り組みを行った。その結果，机上検証ではスプリングバック増大による長手方向に沿った寸法精度不良が最も大きな課題となった。Fig. 5に異車種，同一部品でのスプリングバック量の違いを示す。

CAE結果からスプリングバック増大の主要因は降伏点が高いために部分的に塑性域に移らず弾性域内で形状が元の形に戻ろうとするためであることを解析し，形状凍結性向上と縮み量低減による対策案を検討した。

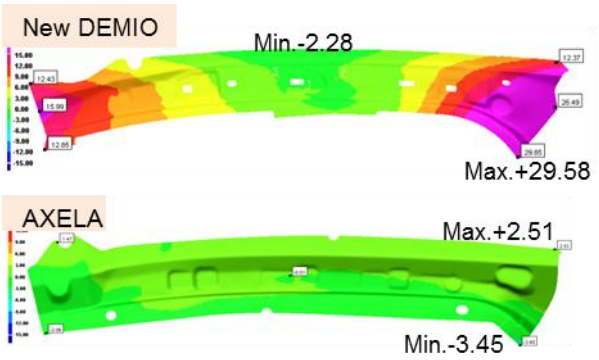


Fig. 5　Amount of Spring Back

具体的には，型から離形後のパネルでは形状がだれて形状剛性が低下していることから，部品長手方向の稜線Rを離形後に正寸Rになるように見込む。そして剛性を上げるための部品内ビード形状の追加を検討した。また，フランジ部分へ新たにノッチを追加することでフランジ成形での縮み量を低下，分散を図った。これら部品形状変更を伴った検討内容を開発部門に提起し部品，車体性能と量産性の両立を図りながら対策を実現した（Fig. 6）。

対策の結果，各工程でのスプリングバック量はフォーム工程では52.7%，フランジ工程では43.2%の低減を実現した。残りのスプリングバック量に対しては金型を見込むことで対処し金型製作の段階に移行した。

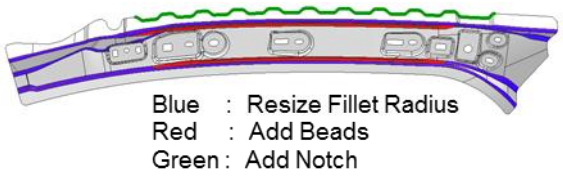


Fig. 6　Measures Shapes in Part Shape

3.4　実型における机上検証結果の確認

金型製作後の初加工品では机上検証結果以上のキャンバーバックが発生した。発生原因はCAE検証において実機での成形状態を詳細に再現しきれず成形荷重に差異が生じていたためであった。成形荷重の差異を解消したCAE検証要領により実機との一致度を取り，金型を見込み直すことで部品単体での寸法精度を満足させた。

4. プレス金型設計上の課題と取り組み

4.1　高強度鋼板におけるプレス金型の現状

引張強さ980MPa級をはじめとした高強度鋼板は，金型調整に多くの工数がかかっている。1180MPa級材料の採用にあたり，プレス金型にかかる負荷がより高まることで，金型調整工数増加が懸念され，対応が求められた。

4.2　金型に負荷される打ち抜き荷重について

ここでは，鋼板を切る機能を持つせん断型にかかる負荷として，打ち抜き力について説明する。せん断部の長さL［mm］，板厚t［mm］，引張強さσ_B［N/mm$_2$］の打ち抜きに要する力P［N］は，式(1)によって求められる。

$$P = K \cdot L \cdot t \cdot \sigma_B \qquad (1)$$

K：係数

Fig. 7に現行と新型デミオに適用された鋼板の板厚と引張強さを示す。現行モデルに対し引張強さは増加傾向にあり，式(1)より1180MPa級をはじめとして，打ち抜き力がより高まる傾向にあり，金型に与える負荷が高くなっている。

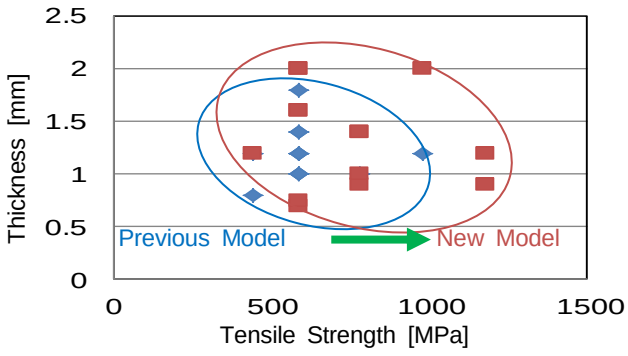


Fig. 7　Thickness per Tensile Strength

4.3　高強度鋼板におけるプレス金型の課題

せん断加工の中でも切断部の加工精度が必要なテーラードブランク材を取得するブランキング型の事例を紹介する。

ブランキング型とは，コイル材から絞り成形に最適なシート材を打ち抜く金型である。その複数のブランキング型で取得されたシート材同士を溶接して1枚のシート材にしたものをテーラードブランク材と呼び，最適な板厚と高剛性を両立させる軽量化対応として適用拡大している。シート接合部となるせん断部は，一般的なせん断部と比較して要求品質が高く，その金型調整には多くの工数を要している。

これまでは，テーラードせん断部の品質問題を現場の経験的な対処法により解決してきたが，材料の高強度化により打ち抜き力が高まるにつれて，より多くの工数を費やすようになってきた。しかしながら，品質問題の発生メカニ

ズムが明確でなく，金型設計段階に打ち抜き力の増加に伴ったリブの配置，形などを保証できていなかった。このせん断部の要求品質を満足させるためには，机上で打ち抜き力によって生じる金型の挙動を予想し対策する必要があり，金型構造解析の技術構築に取り組んだ。

4.4　構造解析を用いた金型構造革新の取り組み

従来の解析手法では，金型を構成する部品単体でしか解析が行えず，ブランキング型を構成する1000点以上の部品全てをまとめて解析し，複数部品間の力の伝ぱを机上で再現できなかった。また，金型サイズが約3000×2000×800mmもある中で，テーラードせん断部の要求品質は，0.01mmオーダであり，解析でも同等のオーダで挙動を把握する必要性があった。上記を実現するために，新たな解析環境を構築した上で，最適なメッシュ作成，境界条件設定などのプリプロセッシングにおける技術構築を行うことで，複数部品の解析が可能となり，部品間を力が伝ぱする状態を机上で確認することができるようになった。

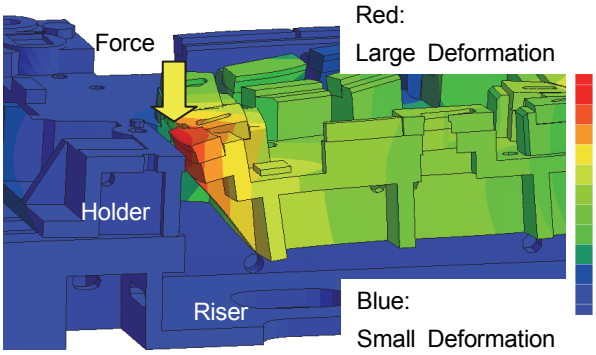


Fig. 8　Structure Analysis of the Die

この解析技術を用いて，過去に品質問題が発生した型と発生しなかった型を解析し，金型の挙動を相対比較した。結果，問題発生箇所と金型のたわみに相関関係が認められ，この品質問題の発生メカニズムは，せん断加工部が打ち抜き力の影響によりたわんだ状態で，シート材をせん断することによって発生していると推測された。また，解析上で品質保証ができるように，せん断加工部のたわみと現物のシート材の加工精度の関係より，たわみの閾値を導き出した。

設定した閾値による評価を金型設計時に適用したところ，高い打ち抜き力が負荷される金型において，閾値を超えた，たわみが発生していることが確認された（Fig. 8）。

解析技術構築時において，力を受ける機能部位周辺にかかる力を分散させることが，金型のたわみ低減に有効である知見を得られており，テーラードせん断加工部も同様に，打ち抜き力を分散するように，リブの配置や厚さなど周囲の金型構造を再設計した。従来は，品質改善初期段階において，このせん断部に真直度0.09mm，だれ0.3mm，溶接接合不良率20%発生していたが，（Fig. 9にせん断部溶接接合箇所を示す）保証した金型構造では，1回の金型調整で真直度0.04mm，だれ0.15mmに抑え，溶接接合不良率0%を達成し，金型改善工数を大幅に削減することができた。

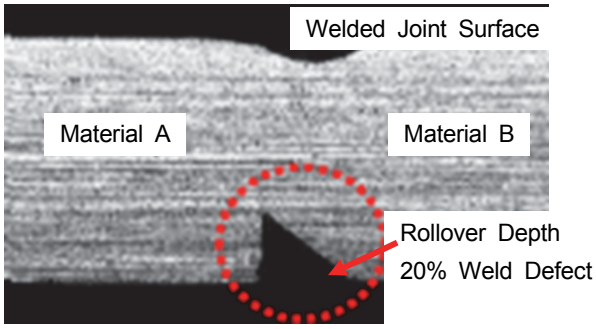


Fig. 9　Welded Joint Shearing Surface

5. 接合の課題と取り組み

5.1　接合強度面での課題

材料強度とスポット溶接接合強度の関係をFig. 10に示す。引張せん断強度は材料強度が上がるにつれて増加していくが，十字引張強度は780MPaを超えたあたりで飽和し，1180MPaでは低下していることが分かる。また，軽量化のため高強度化とともに薄板化された部位は，更に接合強度が低下する。このような高強度鋼板の強度特性を把握し，打点位置や打点数など製品設計への織り込みを行った。

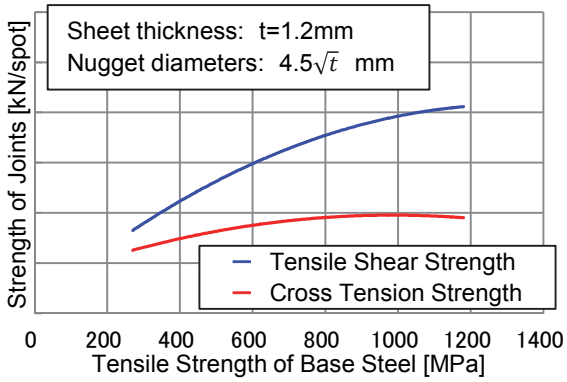


Fig. 10　Effect of Tensile Strength of Base Steel on Spot Weld Strength

5.2　スポット溶接性の課題

材料強度とスポット溶接性の関係をFig. 11に示す。一定条件下で溶接電流のみを変化させ，基準強度を満足する電流から入熱過多によりスパッタが発生する電流までを求めた。この電流範囲を適正電流範囲とよび，広いほど溶接性が良い。同板2枚重ねで溶接性の比較を行った場合，同一条件では，材料強度が上がるにつれて適正電流範囲が低電流側にシフトし，範囲が狭くなっていることが分かる。

これは，材料成分による電気抵抗率の増加や，母材強度の増加による通電面積の減少の影響と考えられる。2枚重ねの場合，電極加圧力の増加や，本通電前に余熱を加えるプリヒート等により，通電面積を拡大することで適正電流範囲を拡大できる。

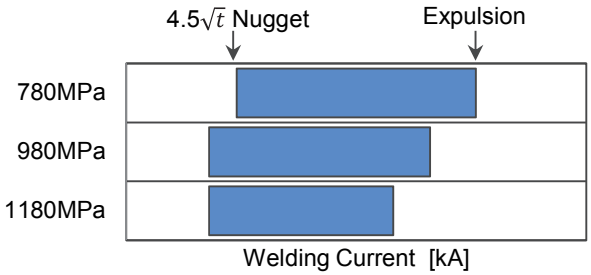


Fig. 11　Effect of Tensile Strength of Base Steel on Suitable Welding Current Range

5.3　生産面での課題と取り組み

生産現場では，溶接強度とスパッタレスの両立に取り組み，溶接品質の安定化を図っている。実車では，さまざまな板組が存在し，適正な溶接条件が異なる。Table 1に新型デミオの板組の一例を示す。

Table 1　Sheet Combination

Parts name	Strength	Thickness
Side Flame Outer	270MPa	0.65mm
Front Pillar Reinforcement	780MPa	1.4mm
Front Pillar Inner	1180MPa	1.2mm

高強度鋼板2枚に軟鋼板（270MPa）の薄板を加えた3枚重ねでは，高強度鋼板間と軟鋼板薄板－高強度鋼板間とで抵抗率の差が大きいことから熱バランスが悪化し，薄板側のナゲットの生成が困難であるため，一般的な溶接条件では適正電流範囲を十分に得ることができない。

そこで，溶接条件の設定を改善した。一例として，2段通電として溶接性を改善する通電パターンでは，第一通電を短時間高電流にすることで薄板側ナゲットを生成させ，第二通電を長時間低電流にすることで厚板側ナゲットを生成させた。これにより適正電流範囲を拡大することができた。

また，生産現場では，部品の合い沿いや溶接ガンの施工状態によって，適正電流範囲が変化する。特に，高強度化により溶接性に対する板間隙の影響が従来材と比較して大きくなる。Fig. 12に板間隙と適正電流範囲との関係を示す。

板間隙により溶接性は大きく変化することが分かる。そのため，溶接品質という目的で従来よりも厳しい公差で板間隙を管理した。更に，適正溶接条件はスポット溶接1打点ごとに異なるため，それに合わせて溶接条件は1打点ごとに1条件を設定し調整することで溶接品質を確保した。

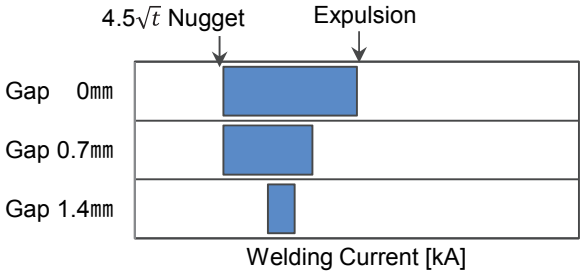


Fig. 12　Effect of Gap on Suitable Welding Current Range

6. ボデー精度保証の課題と取り組み

ボデーへの超高強度鋼板適用にあたっては，プレス成形や金型設計等の部品精度保証課題への取り組みに加え，それらを接合するボデー精度保証への取り組みも必要である。そこで，本章では車体組立工程でのボデー精度保証に対する取り組みについて述べる。

6.1　ボデー精度保証の現状と課題

ボデーは複数のプレス部品を組み合わせているため，ボデー精度は部品の接合面精度の影響を受けやすい。通常，接合面精度は0.1mm単位の調整を複数回繰り返して行っている。鋼板は強度が上がるほど寸法精度のコントロールが難しく，寸法精度を調整する期間もそれに比例して必要となる。超高強度鋼板を適用する比率が増えてくるこれからのボデー精度保証においては，接合面精度を部品精度のみで保証するのでなく，車体組立工程として接合面精度を補助する保証方法とプロセス構築が急務である。

6.2　接合面精度を補助するボデー精度保証の取り組み

6.1で述べたように超高強度鋼板は寸法精度のコントロールが難しい。そこで，部品精度の許容範囲を通常よりも緩和しつつボデー精度を保証するために，加工基準の配置を見直して部品の接合面精度を補助する方法を考えた。加工基準とは，3次元空間中の指定位置に部品を配置し，接合での変形を防止し，狙いのボデー精度を保証するための基準穴と保持面のことを指す。この加工基準を1180MPa級超高強度鋼板に合わせて，部品の接合面精度を補助するために配置を見直した。以下に加工基準の配置とボデー精度保証の考え方について述べる。

（1）旧型デミオまでの考え方

部品の位置を拘束できる必要最低限の加工基準を配置し，商品機能に必要な精度を部品として保証する。部品単体での寸法精度が満足していることを前提として，その寸法精度を重力やその他の外力により変化させないように加工基準を配置し，接合することでボデー精度を保証していた。

（2）新型デミオからの考え方

部品として保証する特性のうち，一部の接合面精度を車

体組立工程の中で補助する基準を検討した。3章で紹介したプレス部品の精度検証結果から，接合面の中でどこが精度を出しにくいかを明確にした。そして，解析ソフトを用いて，その部位を補助する上で最も効果がある部位，部品を狙いの精度に拘束するために必要な力，接合後の拘束解放時の変位も検証した。その結果，設計段階においては，部品が狙いの精度まで行きつかなくてもボデー精度を保証できる加工基準を設定した（Fig. 13）。この過程で，部品精度のコントロールの難易度によって，プレス部品の精度検証結果を活用する新たな加工基準設定プロセスを考案した。

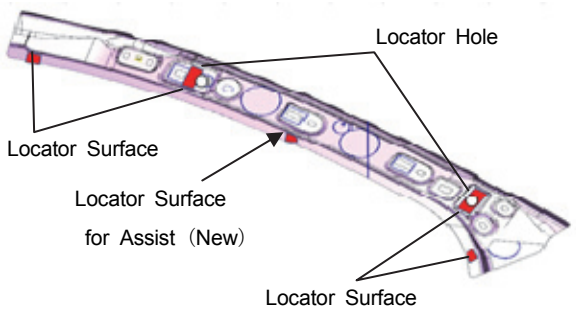


Fig. 13　Locator of Front Pillar Inner in New Demio

6.3　ボデー精度保証プロセス変革の取り組み

6.2で述べた加工基準によってねらいどおりの効果を得られるか，実際の部品と車体組立工程で検証した。

設計段階で設定した接合面精度を補助するための加工基準について，実際の工程内で狙いの精度で拘束できることを3次元測定器で確認し，そのために必要な拘束力も定量的に計測した。その結果，解析ソフトでの検証から得られた部品を狙いの精度に拘束するために必要な力について，実機との一致度が確認できた。一方で漏らしていた要素も見つかった。それは打点順序と打点位置である。部品を接合する打点の順序と打点位置によって，接合後の拘束解放時の変異に1.0mm程度の差が見られた。部品の接合後のボデー精度を1点1点確認しながら，最適な打点順序と打点位置を実機にて調整し，拘束解放時の変位を縮小した。

ボデー精度は保証されたが，接合面を拘束したことによる内部応力の影響が懸念された。内部応力の影響は車体組立工程の次工程である塗装工程で現れる。そこで，車体での検査ツールを塗装工程に持ち込み，塗装工程での精度を確認することで，内部応力による精度変化への影響がないことを確認した。

設計段階で足りていなかった打点順序と打点位置等の検証を補い，実機検証のやり方を改善して検証手順に織り込んだ。6.2で述べた新たな加工基準設定プロセスに加え，打点順序や打点位置の要素を設計段階での検証へ織り込むことで，設計段階での検証精度を更に高めたボデー精度保証プロセスを構築した。

6.4　今後に向けた取り組み

今回の取り組みでは，実機での検証によってボデー精度保証プロセスを補う必要があった。今後は，実機での検証を設計段階へ前倒すことによって，新たなボデー構造の提案や，他工程へまたがった精度保証プロセスの構築など，ボデー精度保証方法のアプローチの幅を広げ，これからの商品開発とお客様価値の向上に貢献していく。

7. おわりに

以上が1180MPa級超高強度鋼板を自動車車体に適用し，安定量産するための取り組みである。超高強度鋼板はその本来の特性により，生産性を悪化させる方向に働く。設計部門と生産部門が相反する要求の中で，各部門の担当者が密接に議論を重ねることにより達成できた。高強度・高剛性と軽量化との両立によるマツダのブランドが目指す“走る歓び”の実現に貢献できたものと考える。

参考文献

(1) 中村ほか：新型アクセラの軽量ボデーシェル開発～SKYACTIV-BODY の更なる進化～，マツダ技報，No.31，pp.14-18（2013）

■著　者■

坂野 律男

岡田 又治

丸山 秀幸

小田 修二

清水 昇

森林 竜也

特集：CX-3

13

CX-3の紹介
Introduction of CX-3

冨山　道雄*1　野間　幸治*2　柴田　恵一郎*3
Michio Tomiyama　Koji Noma　Keiichiro Shibata
渡辺　康和*4　吉岡　謙一郎*5　久保　裕希*6
Yasukazu Watanabe　Kenichiro Yoshioka　Hiroki Kubo

要　約

CX-3は，CX-5／アテンザ／アクセラ／デミオと続く新世代商品の第5弾である。基幹車種を刷新したマツダにとって，新しいネームプレートを冠するCX-3は，次の時代を切り開き，多くの方々に「これだ！」と感じていただけるような，「次の時代のスタンダードを創造する」という志を掲げた。その志の実現に向け，マツダはスペックや数値を追い求めるのではなく，人がクルマに求めている本質的な価値とは何か，をゼロベースで問い直し，徹底して人の感覚に沿うことでお客様の感性を刺激することを目指した。走る歓びを追求し続けるマツダブランドの魅力を最大限に注ぎ込むと同時に，ワゴンやミニバン，SUVなどの車型の持つ常識／既成概念の打破，を目指し，成熟した自動車社会の中にあっても一際存在感を醸し出し，使う顧客にとって，車型では語れない新しい価値をお届けすることで，色褪せない所有する歓びを最大化するのがそのねらいである。

そのために，一瞬で見る人を魅了するデザイン，顧客が本質的に欲する車型の概念を超えたパッケージ／コマンドポジション，クロスオーバスペシャリティを彷彿させる使うたびに実感できる走りの質の追求，を実現している。CX-3がお客様のライフスタイルの中で欠かすことのできない存在となり，彩を添えることを願ってやまない。

Summary

The Mazda CX-3 is the fifth in Mazda's lineup of new-generation products following the CX-5, Atenza, Axela, and Demio. Having its key models renewed, Mazda has developed the CX-3, which is crowned with a new nameplate, with an eye toward laying a path to a new age, making a lot of people say "That's it!", and eventually "creating a next-generation standard". To this end, Mazda raised anew the question "What is the core value people want from the car?" and set out to stimulate customers' senses, rather than merely going after specs and numerical targets. While putting Mazda's hallmark fun-to-drive character into the vehicle, we aimed at breaking through common sense and ready-made ideas of car types such as wagon, minivan and SUV, making its strong presence felt even in a mature car-oriented society, and maximizing fadeless pleasure of car ownership by delivering new values that cannot be shown by the car type alone.

In the CX-3, we have realized a design that attracts viewers with just one look, a package and a command position that go beyond the conventional concept of the car type and meet customers' real demands, and driving quality that offers a sensation of crossover specialty for every driving situation. We hope the CX-3 will become an essential ingredient for customers' lifestyles, adding color to the day.

1. はじめに

CX-3は「CX-5」「アテンザ」「アクセラ」「デミオ」に続き，更に進化させた魂動（こどう）デザインとSKYACTIV技術を全面的に採用した新世代商品の第5弾である。基幹車種を一新した今，CX-5以降3年ぶりとなる全

*1～6　商品本部
Product Div.

く新しいネームプレートで導入するCX-3は，あえてカテゴライズするならクロスオーバであるが，既存のセグメントに当てはめて開発したつもりはない。一般的には車型やボデーサイズがお客様のライフスタイルを規定するかのような既成概念が形成される傾向がみられる。マツダが，CX-3で目指したのは，この既成概念の打破であり，これからの時代にもっと最適な「ライフスタイルのクロスオーバ（融合）」を提供する新しいクルマを造ることに挑戦した。

2. チャレンジと志

CX-3の開発で掲げた志は「次の時代のスタンダードの創造」である。車型やボデーサイズから連想されるクルマの使われ方の既成概念を覆し，どんな場所や使用シーンにおいても，お客様の創造的なライフスタイルをサポートするクルマ造りに挑戦した（Fig. 1）。

Fig. 1　Aspiration of CX-3

3. ターゲットカスタマとコンセプト

3.1　ターゲットカスタマ

情報とモノがあふれる時代。何が大切で何が不要なのか，その見極めも難しくなっている。CX-3 は 30 代の「時代の最先端を行くカスタマ層」をターゲットとした。30 代は，独身，結婚，出産と，ライフステージが大きく変化する。彼らは，そんな変化の中，本質を見極める目を持ち，先鋭的なライフスタイルを送り続けたいと考えている。

こういった人たちがクルマに求める本質を

（1）先鋭的なライフスタイルが表現できること

（2）純粋に運転を楽しめること

（3）家族と楽しく移動できること

の三つとし，既成概念や常識に捉われず，この価値の実現に徹底的にこだわり抜くことで，次の時代のスタンダードを生み出したいと考えた（Fig. 2）。

3.2　商品コンセプト

商品コンセプトは，『街も郊外も自由に純粋に楽しめる，型に捉われない先進先鋭のクロスオーバ』とし，マツダが提案する CX-3 のキーバリュー（KV）を以下 3 つとした。

Fig. 2　Essential Values of CX-3

KV1　新ジャンルを彷彿とさせる魅惑的なデザイン

KV2　都市生活のフィールドを広げる移動基地

KV3　純粋に楽しめる自由な走り

都市生活で機動性を発揮できるコンパクトなサイズの中に，クルマの持つ本質的な魅力を一台に凝縮させた。このクルマで時代を切り拓き，多くの人に感動していただきたい。この商品コンセプトには，その想いを託している。

4. 商品特徴

4.1　KV1～新ジャンルを彷彿とさせる魅惑的なデザイン

CX-3で目指したデザインの表現は「ジャンルの枠を超えた存在感」。美しさの本質をマツダの魂動デザインで描き直すことをテーマに取り組んだ。

その実現に向け，最新の魂動デザインによる，力強く生命感に満ちた彫刻のような造形の中に，もてる感性の全てを注ぎ込んだ。

「既成概念やヒエラルキに縛られずに，いまの時代を美しく駆け抜けるカタチを現実のモノに！」この想いは，妥協なく造り込んだショーカーの存在感に迫るプロポーション，要素を極限までシンプルにすることで実現した凛とした表情，徹底したこだわりが生み出す，引き込まれるようなディテールにより，比類ないスタイリッシュな仕上がりとなって現れている。これらは，製品という枠を超えて，アーティストが自分の作品に込める思いとなんら変わりない。

（1）　エクステリアデザイン

魂動デザインのDNAである「生命感のあるダイナミックな動きの表現」を更に研ぎ澄ませるイメージで進化させ，シャープさとスピード感を高めた造形とすることで，究極にスタイリッシュなデザインを追求した。エクステリアは，ボデー前半部の伸びやかな塊と，力を包み込んだような強さを感じさせるリヤ周りの塊，そしてAピラーを後ろへ引き，Dピラーをブラックアウトとしたスリークなキャビンという三つの基本要素に絞り込み，その上で，それぞれの塊を緊張感のあるエネルギッシュな基本の面で構築している。そしてそれらをつなぐ面をドラマチックに変化させる

ことで，その間に生まれる稜線を鮮やかに強調。余計なディテール表現を極力排除したシンプルな構成ながらも，表情豊かで深みのあるかつてないボデー造形を造り上げた（Fig. 3）。

Fig. 3　Exterior Design

（2）　インテリアデザイン

斬新なエクステリアデザインに呼応する世界観を，先鋭的かつ上質なデザインで表現することを追求した。そのため，空間造形の統一感，素材の質感や表情造り，色の合わせ方に徹底してこだわっている。ソフト素材のやわらかさや，金属を加工したときのエッジのシャープさ，固いものが柔らかい素材に埋め込まれたときの沈み込み。こだわり抜いて造り込んだ細部の造形と，ドアトリムやシートなどのスタイリッシュなデザインとが相まって，先鋭的かつ上質なインテリアを実現している（Fig. 4）。

Fig. 4　Interior Design

4.2　KV2～都市生活のフィールドを広げる移動基地

最新の魂動デザインによるスタイリッシュなプロポーションの中に，ターゲットカスタマにとって必要十分なスペースを確保している。

その上で，「次の時代のスタンダード」としてマツダが提案するパッケージを造り込んだ。

（1）　理想的な着座位置

CX-3はゼロからの自由な発想で取り組んだことで理想的な着座位置を実現した。ここで目指したのは，

a. 高めの着座位置ならではの，見晴しの良さ

b. 乗員がアイコンタクトしやすい会話が弾む車内

c. 颯爽とした乗り降りを実現する優れた乗降性

である（Fig. 5）。

Fig. 5　Essential Quality of Packaging

この実現に向け，高さ方向の諸元がお客様に提供する価値を分析した。例えば，アイポイントは高ければ見晴しが良く，また乗員が感じるスピード感は低減し安心感が増す。一方で，着座位置が低い方が重心は低く，ロールによる揺れは少なく感じる。また，クルマへの乗降性は着座位置が高すぎても低すぎても筋負担を強いるため，適度な高さがある。そして，日本の機械式立体駐車場では全高が1550mm以下が都市部では未だに主流である。こうした高さによる価値を整理した結果，価値が重なるスイートスポットを見出し，CX-3ではそのスイートスポットを着座位置とした（Fig. 6）。

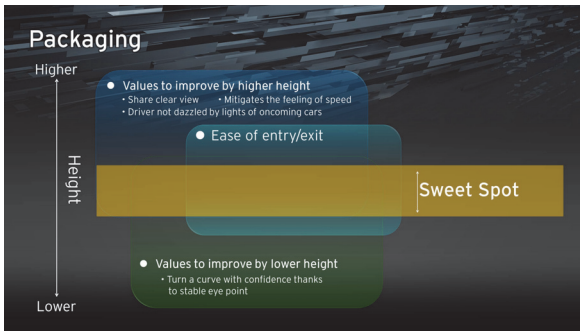


Fig. 6　Ideal Sitting Height

Fig. 7　Ideal Driving Position

（2）一体感の感じられるドライビングポジション

最適なペダルレイアウトやステアリング位置，オルガン式アクセルペダルやステアリング調整機構により，新世代

商品以降，一貫してこだわる優れたドライビングポジションも実現している。更にスイートスポットに着座させることでアイポイントも1250mmの地上高を実現し，良好な運転視界を提供する。その理想的なドライビングポジションを支えるシートは，振動吸収ウレタンの採用により長距離ドライブでも疲れにくく，フィット感を高めている（Fig. 7）。

（3）前後席での会話のしやすい室内空間

カップル，ヤングファミリー等，親子4人が快適に移動できる空間諸元を確保した。更に移動中での会話しやすい室内環境とするために，乗員の着座位置を前席は外側へ，後席は内側へと左右で25mmずらすとともに，後席の着座位置を前席より37mm高く着座させ，お互いがアイコンタクトしやすくした（Fig. 8）。

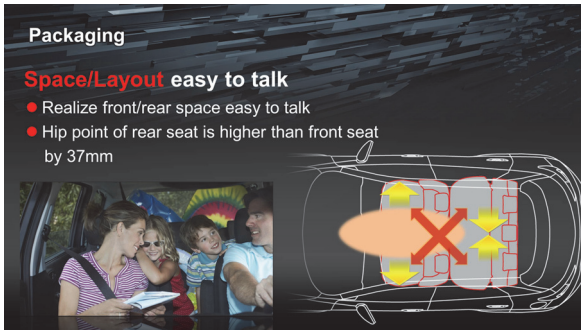


Fig. 8　Easy Communicative Package

（4）使い勝手の良い荷室

荷室については，親子4人が旅行に行ける十分な荷室容量（350L）を確保した。上下2段階にセットできるフレキシブルボードを採用。当該ボード下はシークレットスペースとして，遊びの道具を収納できるスペースとし，ファミリーでの生活をサポートしている（Fig. 9）。

Fig. 9　Luggage Room

4.3　KV3〜純粋に楽しめる自由な走り

CX-3 では，マツダの意のままに操れる人馬一体の走りを継承しながら，更に走りの質の向上を追求した。特にこだわったのが，高い応答性とリニアリティにより，運転が楽しく，次のカーブが待ち遠しくなるハンドリング性能とパフォーマンスフィール，高い減衰感と静粛性により，快適でもっと乗っていたくなる上質な乗り心地である。

（1）パワートレイン

エンジンはグローバルで次の二つを用意した（Fig. 10）。

一つ目は新型デミオから採用の小型ディーゼルSKYACTIV-D 1.5。 新型デミオより20Nmのトルクアップを実施し，1600rpmから2.5Lガソリンエンジンを超える最高トルク270Nmをフラットに発生し5000rpmオーバまでスムースに回り，力強くのびやかな走りを実現する。優れた燃費性能，高価なNOx後処理システムを搭載することなく，優れた環境性能を両立した。日本国内にはSKYACTIV-D 1.5のみの導入とし，世界初のナチュラル・サウンド・スムーザーを採用することで，静粛性を大幅に向上させている。これは，通常は空洞であるピストンピンに組み入れることで，ピストンの上下振動により発生するDEノック音を消し去ることにより，エンジンそのものの自然で気持ち良い音を聞けるようにしたものであり，CX-3が世界初の採用となる（Fig. 11）。

二つ目はCX-5以降の新商品でグローバルに導入している2.0LガソリンSKYACTIV-G 2.0。 自然吸気ガソリンエンジンのリニアな走行性能と優れた燃費性能を両立している。

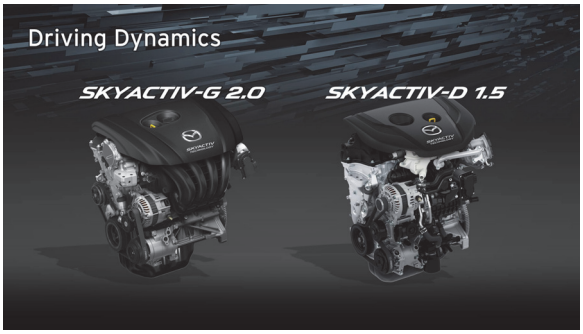


Fig. 10　SKYACTIV Engine

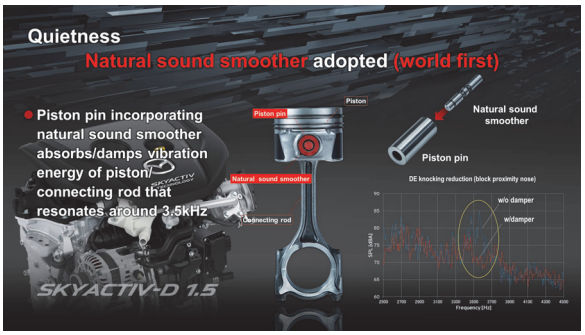


Fig. 11　Natural Sound Smoother

ガソリンのAT車には「Drive Selection」というモードスイッチを用意し，SPORTモードに切り替えることにより，ギヤおよび燃料のマップを変更し加速性能をサポートする。これにより，例えば交通量の多い高速道路への合流

時の安心感を向上している（Fig. 12）。

Fig. 12　Drive Selection

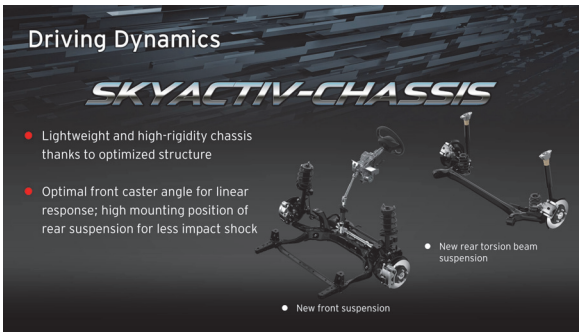


Fig. 14　SKYACTIV-Chassis

トランスミッションはSKYACTIV-G 2.0，SKYACTIV-D 1.5にSKYACTIV-DRIVE，SKYACTIV-MT，そしてAWDシステムをそれぞれ組み合わせることで，さまざまなライフスタイルへの適用を可能としている。

AWDシステムはCX-5から採用している，路面状況に応じて前後のトルク配分を自動的に制御する「アクティブオンデマンド方式」を採用。AWDモデルの走破性と車両の走行安定性を大きく向上させた（Fig. 13）。

Fig. 13　AWD Total Concept

（2）シャシー

CX-3は新型デミオとアーキテクチャをコモンとするSKYACTIV-Chassisを採用。デミオと同様に，フロントサスペンションは，キャスタ角を増して高い直進安定性を確保。また，リヤサスペンションもトーションビームの車体取り付け点を上方に配置し，段差を乗り越える時の衝撃をダンパで吸収させやすいジオメトリを採用しているため，悪路走行時の安定性が高く，かつ上質な乗り心地を実現している。一方，デミオから，総重量が増大し重心高が上昇するため，運動性能は低下する傾向にある。これを補うために，ロールセンタ高を上げ，更にロール剛性も高めることで，ロールを最適にコントロールしている。これによりコーナでの安定性を確保し，ドライバや同乗者に大きな安心感を与えている。また，ロアアームブッシュの剛性の見直しや，ロールステアの変更により，ハンドル操作にリニアに反応する上質なハンドリング性能を実現した（Fig. 14）。

（3）ボデー

ボデーも新型デミオとアーキテクチャをコモンとするSKYACTIV-Bodyを採用している。新型デミオで，軽量・高剛性・衝突安全性を高レベルで実現しているが，CX-3に求められる性能達成のために，ボデーの板厚アップ，効果的な補強材の追加を行った。その結果，最低限の重量追加で，振動減衰感を向上しつつ剛性アップすることができたため，ねじれにくく，しっかりと減衰するボデーに仕上げることができた。これにより，ステアリング操作に対する高い応答性とリニアリティを確保できたため，気持ちの良いコーナリングができるようになり，更にはずっと乗っていたくなるすっきりとした乗り心地を実現できた（Fig. 15）。

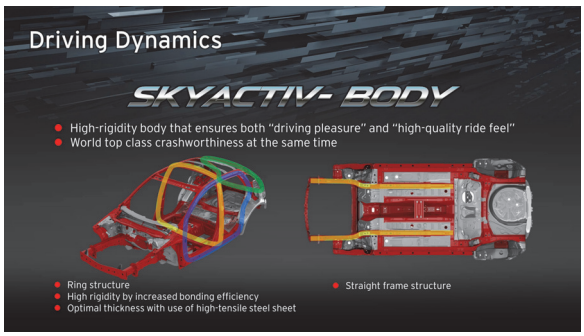


Fig. 15　SKYACTIV-Body

4.4　マツダの安全思想に基づく先進技術

安心・安全においては，街中から高速走行，ワインディングロード等どんなシーンでも，お客様に安心して運転を楽しんでいただきたいとの想いより，先行する新世代商品が採用した先進安全技術群を展開している。CX-3が採用している先進安全技術をFig. 16 に示す。HMI（Human Machine Interface）においても，アクティブドライビングディスプレイに加え，マツダコネクト，コマンダなどをCX-3にも展開している（Fig. 17）。

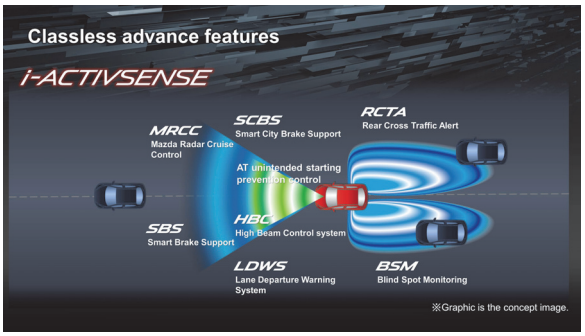


Fig. 16　Advanced Safety Technology

Fig. 17　Human Machine Interface of CX-3

5. おわりに

私たちは，情報とモノがあふれる時代に生きている。求めようとすればWebの情報を駆使して，世界中から最適なモノが選べる時代である。究極に機能的なモノ，とてもリーズナブルなモノ，選択肢は山のようにあるが，「これだ！」と感じるモノに出会うことは難しくはないだろうか？ クルマという複雑な製品ではなおさらと思う。

マツダは，そういう世の中にあって，一貫した哲学の下，開発過程では競合車を設定せず，技術／車を開発しお客様に新しい価値をお届けしている。

CX-3はその中にあっても“無駄を削ぎ落とし本質を追求する”ことをあらゆる領域で徹底するクルマ造りを行った。その結果，マーケットの現場でも競合を想起させない“唯一無二のクルマとして孤高を放つ”存在を示せたのではないかと自負している。このCX-3が，当初の狙いである既成概念／セグメントの枠を超えてお客様に感動を与え，世界中のお客様から愛され，人生の良きパートナとして長く付き合っていただけることを，切に願っている。

■著　者■

冨山 道雄

野間 幸治

柴田 恵一郎

渡辺 康和

吉岡 謙一郎

久保 裕希

特集：CX-3

14

CX-3のデザイン
Design of New CX-3

松田　陽一*1
Youichi　Matsuda

要　約

CX-3のターゲットは先鋭的カスタマーに設定し，彼らの価値観として，自分らしく生きるための独自の指標と本質へのこだわりを持ち，積極的姿勢で人生を生きることを志向し，常に新しい何かを求めるという分析と仮定を行った。彼らの感性をダイレクトに刺激するために，CX-3のデザインが提供する価値は，①彼らのライフスタイルや個性を表現できる，②ジャンル（車型）やクラスにとらわれない自由な発想，③オーナーの予想を超える新しさや美しさの本質を持ったデザイン，を目標とした。この提案により今までのマツダの商品ラインナップにない新たなカスタマーの取り込みと，ブランド表現の幅を広げることを目指した。そのためにデザインテーマ「魂動」を基礎としながら，ハッチバックやSUV等の概念を超えたスタイリッシュで先鋭的な「魂動」の新たな可能性にチャレンジした。エクステリアでは，第一に美しさの基礎であるプロポーションを妥協なく磨き上げ，全身にわたり無駄な要素を徹底的に排除し，その本物感がストレートに伝わるよう取り組んだ。インテリアでも，エクステリアデザインに呼応する造形テーマで空間を造り込み，斬新かつスタイリッシュな世界観を，かつてない素材使いやコンビネーションによるディテールで，より深く追求している。そのことで，これまでのカーインテリアとは明確に異なる，先鋭的な仕上がりの中にも人の手わざの温かみを感じさせる，心地よくも洗練された室内空間を実現した。

Summary

CX-3 targets at forward-thinking customers who value the essence of things, live by their own values, and aspire to live their life with a positive attitude. To get the customers directly and emotionally engaged, CX-3 design was developed to offer the following values: (1) expression of lifestyle and personality of the customers; (2) unconventional ideas not bound by genres and classes; and (3) a design that offers newness and the essence of beauty surpassing owner's expectations. By focusing on these three points, we aimed at acquiring new customers that had never been targeted at by any of Mazda's previous models and also expanding the range of expression of Mazda brand. To this end, we explored a new possibility for a stylish and innovative KODO design beyond the boundaries of segments such as hatchback and SUV. In terms of the exterior design, we put priority on refining the proportion, which is the basis for the beauty, eliminating all excess elements, and conveying its genuine quality straight. As for the interior design, we created an exquisitely detailed interior space in line with the exterior design, and sought for a totally new and stylish view of the world through unprecedented use of materials and their combinations. As a result, a distinctive interior space has been realized that is sophisticated and leading-edge, but warm and comfortable at the same time.

1. はじめに

私たちは，情報とモノが溢れる時代に生きている。求めようとすればWebの情報を駆使して，世界中から最適なモノが選べる時代であり，選択肢は山のように存在する。しかし理想と感じるモノに出会うことは難しく，クルマという複雑な製品ではそれは顕著である。

このような状況下で作り手の立場として，自分たちの純粋な気持ちに立ち返って理想を実現するという開発姿勢を固めた。

*1 デザイン本部
Design Div.

最新の魂動デザインによる，力強く生命感に満ちた彫刻のような造形の中に，既成概念やヒエラルキーに縛られずに，いまの時代を美しく駆け抜けるカタチを現実のモノに，という思いの基，妥協なく造り込んだショーカーの存在感に迫るプロポーションの作りこみと，要素を極限までシンプルにすることで実現した，凛とした表情，徹底したこだわりが生み出す，引き込まれるようなディテールにより，比類ないスタイリッシュな仕上がりを実現した。

2. エクステリアデザイン

2.1　圧倒的なプロポーションと強いスタンス

CX-3のエクステリアデザインにはマツダの新世代商品がそれぞれの個性を最も活かす形で採り入れてきた「魂動」のデザインテーマが，きわめてスタイリッシュな姿で結実している（Fig. 1）。

ひと目見ただけで，実際のサイズを忘れさせるほどの圧倒的な存在感を与えるスタイリングを形づくるのは，まるでショーカーのような存在感のあるプロポーションを，クロスオーバーならではの高さを巧みに利用することで妥協なく取り入れていることによる。ソリッドで分厚いボディーサイドに大径ホイールを組み合わせた力強い下半身と，それとは対照的にタイトで軽快な印象のキャビン，「魂動」デザインに共通するスタンスの良さをリッチなドア断面と，今まで以上にこだわったショートオーバーハング等により更に強調。力強く踏ん張ったスタンスの良いフォルムを実現している。

このプロポーションを構成するキャビンとボディー各部の造形はすべて，緩急の付いたスピード感をもつシャープな表現に統一されており，なおかつ，そのキャラクターの動きがボディーの中で収束することなく，クルマのはるか後方消失点を目指すようにデザインされている。またDピラーをブラックアウトさせて，薄くシャープな造形のグラスエリアがリアで途切れることなくキャビンは後方へと抜けていくような印象を与えた。

このように，塊感のある圧倒的なプロポーションと強いスタンス，そしてサイズを超えてダイナミックに広がる勢いのある表現を，量産車においても妥協なく追求したことで，新ジャンルにふさわしい，比類のないスタイリッシュなアピアランスを生みだすことができた。

Fig. 1　Exterior View

2.2　進化した魂動デザイン

エクステリアスタイリングでは，魂動デザインのDNAである生命感のあるダイナミックな動きの表現を更に研ぎ澄ますイメージで進化させ，シャープさとスピード感を高めた造形とすることで，より強い意思を持った動きの表現を追求した。そして余計なディテール表現を極力排除して，シンプルながらも表情豊かな造形を心がけた。基本のテーマは，長く伸びたフロントノーズの先端からリアフェンダーへ向かう伸びやかな塊と，力を包み込んだような強さを感じさせるリア周りの塊，そしてAピラーを後ろへ引き，Dピラーをブラックアウトとしたスリークなキャビンという3つの基本要素に絞り込み，その上で，それぞれの塊を緊張感のあるエネルギッシュな基本の面で構築している（Fig. 2，3）。

この三つの塊はシンプルながら，非常にデリケートに刻々と移り変わる表情をもった面質を備えている。そしてそれらをつなぐ面を更にドラマチックに変化させ，その間に生まれる稜線を鮮やかに際立たせた。こうして生まれたCX-3のボディー造形は，シンプルでシャープなイメージのなかに，変化に富んで深みのある表情を創出することができた。そしてこの表情は，人の手仕事による入念な造り込みによる，魂動デザイン特有の技によって創りだした。

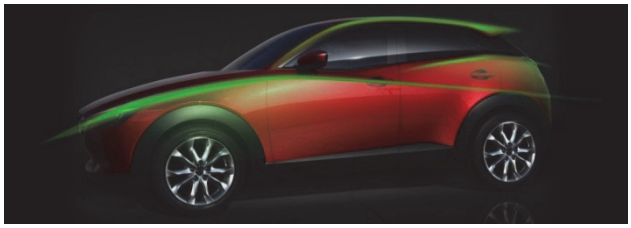


Fig. 2　Design Theme

Fig. 3　Fundamental Element

2.3　フロントデザイン

CX-3は，マツダブランドを強く訴求しながらも，スタイリッシュなプロポーションに相応しい精悍で新しい表情を与えることを目指した（Fig. 4）。

クロスオーバーの車高の高さを活かし，フロントノーズは通常のパッセンジャーカーより高く設定し，ボリューム感のある自信に満ちた佇まいにした。フロントグリルには７本のフィンがあり，先端をシルバー塗装（ハイグレードのみ）にしたことで，マツダシンボルから横方向へと密度をもって広がるエネルギーと，精緻な造り込みを感じさせている。ライセンスプレートはロア開口部（グリル外）に置かれ，グリルの精緻で力強い印象を損なうことがないようこだわった，新世代商品の証であるシグネチャーウイングは，削り出された金属の強さをイメージし，全身に漲るスピード感のスタートポイントとして骨太かつ立体的に造形した。そのシャープなラインはスリークなLEDヘッドランプに一体化し，夜間にはランプ内のライティングシグネチャーと直線的につながって強烈に個性を主張している。

Fig. 4　Front View

2.4　ボディーデザイン

新世代モデルに共通の，大きく後退したAピラー位置に加え，通常はタイヤセンターの真上に置くフロントフェンダーの頂点をAピラーの付け根にまで後退させたことで，力強く伸びやかなボンネットのシルエットを創りだし，前へと進むスピード感を強調している。またAピラーは付け根部分が細く上へ行くほど太くなる形状として，キャビン外観に軽快感を与えている。

Dピラーはウインドウと一体感のあるブラックとし，ルーフサイドラインの動きを止めることなくボディー後方へ解放することで，伸びやかさをより強めた。またドアミラーの直後を境として，緩やかなV字を描いて後方へ駆け上がるベルトラインにより，グリルから始まってリアオーナメントまで突き抜ける，クルマ全体の動きの軸を構築した。同時に，リアクォーターウインドウにより，タイトなキャビンのイメージと優れた視界を絶妙なバランスで両立させた。

サイドビューを構成するキャラクターラインと，面造形の断面形状はすべて，始点では鋭く立ち上がり，ピークを過ぎると撓めた力を穏やかかつスムーズに開放するような，緩急をつけたスピードの表現で統一した。その余韻をボディーの外にまでつなげるイメージでデザインすることで，実際のサイズ感を圧倒的に上回る伸びやかさを演出した。更に，前後フェンダーとサイドシルのブラックのガーニッシュとボディーカラーとの対比によって，その前後方向への伸びやかさをより一層強調している（Fig. 5）。

Fig. 5　Side View

2.5　リアデザイン

通常リフトゲートもしくはバンパー下端に配置されることの多いライセンスプレートを，リフトゲートと同色のバンパー上部にリセスを設けて配置し，立体的かつすっきりとしたリフゲート面と，非常に短いイメージのリアオーバーハングを実現した。またライセンスプレートの取り付け段差を利用し，カメラやスイッチ等のリフトゲートに求められる機能部品のすべてを視線から隠れる所にレイアウトした。ゲート面とバンパー面とのパーティング段差を2 mm以内に抑えるという高精度な仕上げ品質と相まって，連続感とクリーンな印象が際立つリアエンドデザインを実現した。エグゾーストパイプは左右2本出しとして，力強さとスポーティさを強調し，更に，ブラックアウトしたDピラーによってサイドウインドウからバックウインドウへのつながりを持たせ，キャビンをガラスで包み込むような造形としたことで，Dピラーの存在感を消したキャビンの抜けの良いイメージを際立たせている。こうした造形と，ボディーサイドから連なるショルダーをしっかり感じさせるボリューム感によって，他に類のない圧倒的な塊感と力強いスタンスを感じさせるリアビューを造り上げた。

Fig. 6　Rear View

2.6　LEDランプ類

CX-3ではヘッドランプ，フォグランプ，リアコンビネーションランプにLEDを採用し，先進的なイメージをより高めている。フォグランプへのLED採用はマツダ車で初めて（同じタイミング）採用した。

フロントエンドでは，彼方の獲物を見据える獣の眼光鋭い瞳をイメージした薄くシャープなヘッドランプ形状を実現するため，ターンランプをヘッドランプユニットではなく，フォグランプとともに下部のコンビネーションランプユニットに配置した。

ハイグレードモデルのヘッドランプは，ハイビーム2灯・ロービーム2灯の4灯をすべてLEDとし，ハイビームを小型化して灯体の存在感を消すようにデザイン。グリルから連なり，ランプユニットに溶け込むシグネチャーウイングと相まってよりシンプルで鋭い印象を際立たせている。ランプ内に連なるシグネチャーウイングにはLED発光のレンズを一体化。導光技術によってロービーム周囲のライティングシグネチャーとシームレスにつなげることで，先進的かつ知的な表情を造り上げた。スタンダードグレードのヘッドランプは，同じ薄くタイトなユニットにハロゲン4灯を収めている。スタンダードグレードにはライティングシグネチャーは採用されないが，クローム処理によるシグネチャー表現やポジションランプのインナーレンズ等により，シンプルでクオリティー感の高い表現ができた。

またターンランプとフォグランプを収めたフロント下部のコンビネーションランプユニットは，フォグランプのLED化で実現した細く縦長のユニークなベゼル形状をもち，サイドから見ると前傾によるスピード感を，正面視ではハの字型の力強いスタンスを表現した（Fig. 7）。

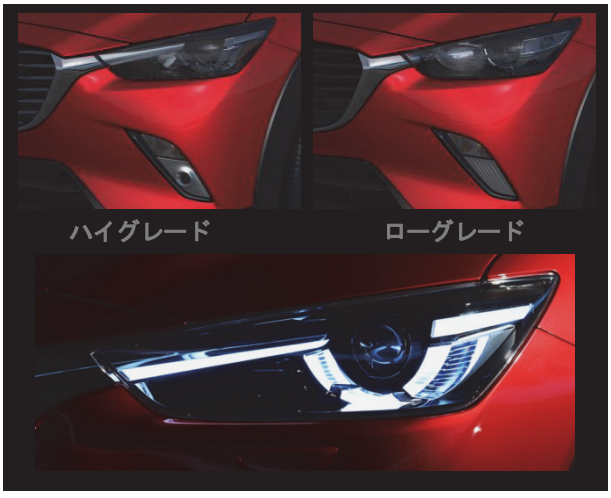


Fig. 7　Lamp Design (Front)

リアエンドでは，リッドランプの採用と，リフレクター／フォグランプ／サイドRR等（仕向けにより機能が変わる）の機能を一体化して，バンパー部へ分離させることで，ヘッドランプと同じく薄くシャープな横長のリアコンビネーションランプ形状を実現した。導光技術によるランプ上部の光るラインと，立体感のあるテール／ストップランプを組み合わせた発光シグネチャーとすることで，しっかりとした記号性を持たせ，マツダの個性を際立たせる印象的な後ろ姿を創り上げている（Fig. 8）。

Fig. 8　Lamp Design (Rear)

2.7　ホイール

クロスオーバーならではの力強い走りを予感させる大径のタイヤを採用し，18インチと16インチの2種類のアルミホイールを設定した（Fig. 9）。

18インチホイールには，生命感を感じるひねりを加えたガンメタリック塗装の太いスポークによる，立体的な造形を採用し，その断面の先端部分に大胆な切削加工を施し，本物の金属ならではの輝きとガンメタリック塗装との，鋭くエッジの効いたコントラストによって独自の個性を造り上げた。

16インチホイールには，実サイズよりも大きく見せる彫刻的な印象のデザインを採りいれた。彫りの深さや軽量化はもちろん，リム断面も数mm単位でこだわり抜き，質感高く造り込むことで，16インチながらもシンプルかつ大胆なスタイリングの実現に大きく貢献している。

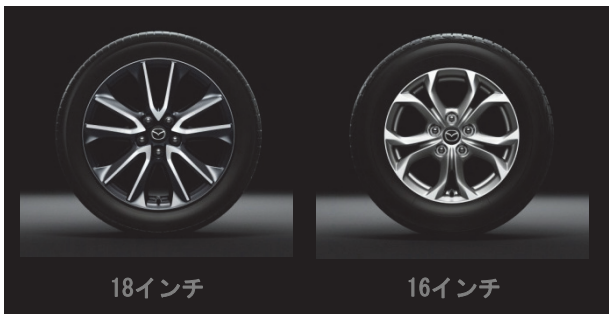


Fig. 9　Wheel Design

2.8　サイドガーニッシュ

大径タイヤの力強さを強調する，幅広の前後ホイールアーチモールをブラックとして，ボディーサイド下部にはそれをつなぐ大胆なブラックサイドガーニッシュを採用。ボディーカラー部とのコントラストにより，前後への伸びやかさを感じさせる効果をより一層強調した。ガーニッシュの上端キャラクターはリアドアの中程へ向かってキックアップした後，リアホイールアーチに向かってキックダウンする意匠を与え，全体の動きの躍動感をサポートしている。

更にハイグレードモデルでは，サイドシルガーニッシュの高輝度シルバー塗装のブライトモールディングを通し，スピード感とクオリティー感を高めている（Fig. 10）。

Fig. 10　Side Garnish Design

2.9　キャビン

キャビンはピラー類をすべてブラックとし，ウインドウを連続したガラス面に見せている。特に最後部ではブラックのドアサッシュとDピラーガーニッシュを設定。段差を極力少なくするパーツ構成や見せ方に留意しフラッシュな印象に仕上げ，リフトゲートウインドウまで滑らかにつながるようにしたことで，「後方へと抜けて行く開放的で伸びやかな動き」を強く感じさせている。またベルトラインがリアフェンダーのピークへ向かって上昇するのに対し，ルーフラインをDピラーの上で少し下降させてリアフェンダーへの塊をフォローするイメージのアクセントをつけ，塊のまとまり感も演出した。これは同時に単調になりがちな6ライトウインドウのグラフィックに，リズムを持たせるという効果も持たせている（Fig. 11）。

Fig. 11　Cabin Design

3. インテリアデザイン

3.1　心地よくスタイリッシュなインテリア

CX-3の室内空間の基本構造は，プラットフォームを同じくするデミオと多くのパーツやインナーモジュールを共有している。例えばインストルメントパネルは，CX-3とデミオそれぞれのインテリアデザインの要求をともに満たすことができるカウル（インパネ前端部）高さを決定するまで，双方のデザイナーが検討を重ねて最善の解を追求して造り上げたものだ。そうした基本構造の諸元をベースとしながら，CX-3では斬新なエクステリアデザインに呼応する独自の世界観を表した，新ジャンルにふさわしい先鋭的なインテリアデザインの創造を目指した。

エクステリアに呼応する先鋭的な造形と手造りの質感という相反する要素のコントラストを活かし，これまでにないスタイリッシュさの実現を，デザイン開発のテーマとした。室内の造形はエクステリア同様にシンプルでスピード感のある動きの表現に統一し，伸びの良さと連続性を追求。同時に，既成のコーディネートの概念にとらわれず，色や素材の選択は内装パッケージごとに徹底的に吟味し，視覚にも触覚にも上質で心地よく感じられるよう，クラフトマンシップにあふれた仕立てに注力した（Fig. 12）。

Fig. 12　Interior Overall View

3.2　包まれ感と解放感を融合した空間

インパネからドアトリムへのラウンドなつながりを生むキャラクターラインと高めのベルトラインにより，ほどよい包まれ感を乗員に提供。ドアサイドのエリアでは，分厚いドア断面を活かした彫りの深い立体造形で動きを表現しながら，その上部のグラスエリアでは視覚的にも広さを感じる空間造形を図り，心地よさを高めている。ドライビングに必要な視界はもちろん，6ライトのキャビンならではの開放感を活かし切るため，視認性を高めながら視覚的な圧迫感を排除したピラートリムの造形や，トップシーリングとC・Dピラーの色を合わせることで生まれる視覚効果などを採り入れ，エクステリアのキャビンデザインに呼応した，抜けの良い空間イメージを創り上げている（Fig. 13）。

Fig. 13　Cabin Design

3.3　前席空間デザイン

コックピットには新世代モデルに共通の，ドライバーが走りを楽しむことに集中できるドライバーオリエンテッドな空間を追求。マツダのヒューマンマシンインターフェイス（HMI）思想「Heads-up Cockpit」のコンセプトに基づき，ドライバーを中心にメーターやディスプレイ，コマンダーコントロールなどを適切に配置している。助手席側では，横方向への広がり感を際立たせるデコレーションパネルに，ステッチを施したソフトパッドを採用。この横への広がりを，インストルメントパネル端の丸型エアコンルーバーを経て，ドアトリムの印象的な金属調加飾へと連続させることで，前席空間の一体感を更に強調している（Fig. 14）。

Fig. 14　Front Seat Space Design

3.4　インストルメントパネル／コンソールデザイン

アクセラから採用している単眼アナログメーターと両翼のデジタルメーターを組み合わせたメーターセットと，デミオにも採用した三つの丸型空調ルーバーと中央の薄型空調ルーバーをCX-3にも採用し，またハイグレードモデルではダッシュボード上の7インチ液晶センターディスプレイとメーターフード上のアクティブドライビングディスプレイを搭載。安全を最優先にすべての乗員がわくわくする走りを楽しめる，クルマとの一体感を高めるキャビン空間を造った。

ハイグレード用アクティブドライビングディスプレイ付きメーターフードはCX-3のための専用デザインとし，二層インジェクションを用いて成型した，質感表現にこだわった表皮構造とした。フードの前縁に入れた成型ステッチのリアリティーにも最新の注意を払い，縫いの立体的なディテールを実際の革の縫い仕上げの３Dスキャンデータを元にイメージを再現。こうした造り込みにより，大人の雰囲気が漂うメーターフードを完成した。更に，ハイグレードのコンソールシフトブーツには，周辺のアクセントとコーディネートを取ったダークレッドのストライプを配する造り込みをした（Fig. 15）。

Fig. 15　Instrument Panel and Console Design

3.5　ドアトリムデザイン

ドアトリムでは，インパネからのなだらかな流れが，後方に向かって解き放たれるように加速していくダイナミックな動きを表現するため，前後ドアそれぞれに上方へ向かうキャラクターラインを採用。面造形では，ウインドウのすぐ下で切り返されるラインやアームレストの上面に外光が当たるときの，光の入り方や反射の仕方にまで注目した。トリムのボリュームと面質に微妙な変化を織り込み，トリムのみならず周囲の空間にまで動きを感じさせるイメージで，心地よさとダイナミックさを同居させている。

隣接する丸型エアコンルーバーとの組み合わせを重視して綿密に造り込んだ，印象的なインナーハンドルベゼルは，金属を削り出したかのようなシャープで先鋭的なイメージで造形し，更にレザー内装のモデルには，インナーハンドルベゼルに緻密な切削加工を彷彿とさせるヘアライン処理を施すなど，徹底したこだわりを注ぎ込んで仕上げた。ドアマウントスイッチベゼルには，革質感のパネルでスイッチパネルを包み込むようにするパネル合わせを採用し，タイトさと品質感を表現した。またアームレストにはフロアコンソールのニーパッドとコーディネートした，ステッチ付きのソフトパッドを採用。こうした造り込みによって，ドアを開いた瞬間に車格を超えた品質感とエモーショナルな空間を予感させる，先鋭的なドアトリムデザインを実現した（Fig. 16）。

Fig. 16　Door Trim Design

3.6　シートデザイン

デミオのハイバージョン（レザー仕様）の基本形状を全グレードに採用した（基本構造はデミオ／CX-3何れもアクセラを踏襲）。個性と上質な造り込みをともに感じさせるデザインを実現した。

レザーシートは，センター部にラックススエードを採用するコンビネーションとし，スポーティな中にも高い質感も待たせている。素材の切り替わるきわには，スタイリッシュなアクセントとなる新開発のソフトなパイピングをあしらい，更にセンター部表面に縫製仕上げを施して，立体感と素材の表情の豊かさを強調。後席にも同じ素材遣いとパイピング，縫製仕上げを採用して全体への造り込みに配慮している。レザレット仕様のセンター部とファブリックシートには，艶の見せ方に徹底的に注力して開発したセミマットな布地を採用し，柄ではなく精緻な素材感がもたらす魅力によって全く新しい質感を実現。このシートでもセンター部に縫製仕上げを施して，素材の持つ絶妙な艶による素材感を一層引き立てている（Fig. 17）。

Fig. 17　Seat Design

4. カラーデザイン

4.1　ボディーカラー

CX-3のスタイリッシュなエクステリアの造形をより際立たせるボディーカラー全9色を設定した（国内8色）。

このモデルで新規開発したCeramic Metallicは，研ぎ澄まされた金属感や緻密な硬質感を表現し，光によって表情が変化する，まったく新しい質感表現にこだわって造り上げたボディーカラーである。通常時はソリッドな雰囲気でキャラクターラインをシャープに強調し，エッジの効いたクールさを醸成した。そして明るい環境下では，ハイライトの鋭く白い艶やかな輝きによって，未来的な表情を造り出している（Fig. 18）。

Fig. 18　Body Color of Ceramic Metallic

他には新世代商品共通のプロダクトブランドカラーSoul Red Metallicをはじめ，Arctic White，Jet Black，Dark Crystal Blue，Meteor Grey，Titanium Flash，Dynamic Blue，White Pearlをラインアップし，個性的なテイストを求めるカスタマーの多様な要望に応えるワイドなカラーバリエーションとしている（Fig. 19）。

Fig. 19　Body Color

4.2　インテリアカラー

このクルマの先鋭的なスタイリッシュさと，オーセンティックな造り込みの味わいをともにサポートするような色の遣い方を実現し，さまざまな内装素材の質感を最大に活かすことに注力した。ブラック基調のインテリアに，フロアコンソールのニーパッドやシフトブーツのステッチ，ドアトリムアームレストなどに印象的なアクセントカラーを用い，主要なパーツをピアノブラックとメタリック系の加飾に統一し，新鮮かつハイクオリティーな要素を加えている。CX-3には以下に挙げる三つの内装コーディネーションを設定している。

（1）x Future（クロスフューチャー）

最上級仕様となるx Futureでは，シートのメイン素材とインパネ加飾パネルに新開発のピュアホワイトレザーを，シートセンター部には上質なオフブラックのラックススエードを用い，スタイリッシュで洗練された雰囲気を醸成した。アクセントカラーには新開発の，やや青みがかったダ

ークレッドの素材を大胆にあしらい，メタリックパネル部分にはアルミを削り出したようなヘアライン調の加飾を採用した。これらにより，ターゲットカスタマーの感性に訴えかける一歩先を行く新しさと造り込みを表現している（Fig. 20）。

Fig. 20　x Future

（2）x Performance Mode（クロスパフォーマンスモード）

シートのメイン素材はブラックのレザレットとし，センター部にダークグレイの精緻なイメージの新開発ファブリックを用いて，x Futureと同じダークレドのアクセントカラーを効果的に配している。これらにより，一般的なストイックなスポーティな世界とは一味違う，スタイリッシュさとスポーティさの融合した新しいイメージを創り上げている（Fig. 21）。

Fig. 21　x Performance Mode

（3）x Edge Mode（クロスエッジ―モード）

量販グレードにありがちな単調な「黒一色」のコーディネーションを脱却し，グレイを効果的に使った新しいモノトーンコーディネーションの創造に取り組んだ。シートセンター部にはx Performance Modeと同じファブリックを採用，メイン素材をブラック，センター部をダークグレイとして，シルバーアクセントできわを引き締めたクールでスタイリッシュな雰囲気を生み出している。またインパネの加飾パネルにはブラックのステッチ仕上げのソフトパッドをこのグレードにまで展開して質感の高さを表現している。更にこのコーディネーションでは，丸型空調ルーバーのリングを上位グレードと共通の深みのあるメタリックレッドとしてモノトーンの中にスパイスを利かせ，シンプルなダークスーツをスタイリッシュに着こなすような知的なテイストを醸し出している（Fig. 22）。

Fig. 22　x Edge Mode

5. おわりに

Bセグメントのコンパクトクロスオーバーというカテゴリーは，開発当初は市場での圧倒的成功事例のない新しい領域であり，CX-3はそこにブランニューのカーネームとして新しい価値を訴求していくプロダクトとして企画された。新しいターゲットカスタマーの好奇心と日常的ライフスタイルに応えるべく，通常の乗用車でもなく典型的なSUVでもない，またそれぞれの要素を混ぜるのでもない，新しい発想で新しい存在感をこのデザインで示すということを，CX-3における「クロスオーバー」という言葉の解釈とした。発想の転換を求められる難しい課題ではあったが，このターゲットの姿はまさにクリエイターである私たち自身にも重なり，プロジェクトが目標とすることは，つまり自分たちの欲求に答えることでもあった。

積極的姿勢で人生を生きることを志向し，常に新しい何かを求めたいという思いは，先鋭的カスタマー特有の価値観ではなく，誰の心の中にもある，ひとつの感情であり，そうありたいという姿でもある。CX-3のデザインは，本質的な美しさと現代的感覚をストレートにまとめ上げることに取り組み，それは多くのカスタマーに直観として伝わるレベルが実現できたと確信している。CX-3のデザインを通して今の時代を生きる多くのカスタマーと私たちの想いを共有できたら幸いである。

■著　者■

松田　陽一

特集：CX-3

15

新型デミオとCX-3の空力性能開発
Aerodynamic Development for New Demio and CX-3

中田 章博*1 Akihiro Nakata　伊川 雄希*2 Yuki Ikawa　川北 正寿*3 Masatoshi Kawakita　大平 洋樹*4 Hiroki Ohira
李 曄*5 Ye Li　岡田 義浩*6 Yoshihiro Okada　岡本 哲*7 Satoshi Okamoto　田中 松広*8 Matsuhiro Tanaka

要　約

新型デミオとCX-3は新世代商品群のBカーとして，共通のプラットフォームから開発した。空力開発としては低燃費実現のため，空気抵抗の低減に注力して取り組んだ。プラットフォームの空力開発では燃費低減に大きく寄与する車体の軽量化実現のために，空力付加物の設定を必要最小限として，空気抵抗を低減させることを目指した。また各車種のユニーク要素であるアッパーボデーの空力開発では，魂動デザインのコンセプトである「生命感のある動き」の表現を最大限に活かしながら空気抵抗を低減することを目指した。以上により，新型デミオとCX-3の空力開発は非常に難しいタスクであった。

この難易度の高いタスクを実践するために，空力シミュレーション（以下CFD）を開発ツールとして本格適用することで，CX-5，アテンザ，そしてアクセラの開発で培ってきた空気抵抗低減技術と開発プロセスを更に進化させた。そして，この進化させた技術とプロセスを適用することで，新型デミオとCX-3はクラストップレベルの空力性能を実現できた。

Summary

New Demio and CX-3 were developed from a common platform as new generation B-cars. Aerodynamic drag was reduced through the aerodynamic development in order to enhance fuel economy performance. In the process of the aerodynamic development of the platform, in order to realize reduction of car weight which contributes to fuel economy, the volume of aerodynamic parts had to be minimized. Also, the aerodynamic drag had to be reduced while realizing the Mazda “Kodo” design concept of expressing “dynamic and lively motion”. Therefore, the drag reduction developments of New Demio and CX-3 were quite difficult tasks.

To work out them, we worked on the innovation of the aerodynamic development process and aerodynamic drag reduction technology by the full use of computational fluid dynamics (CFD). By applying this development process and technology, New Demio and CX-3 achieved top level aerodynamic drag among the same class vehicles.

1. はじめに

近年，燃費向上やCO_2削減は自動車開発の重要課題となっている。これに大きく寄与する空気抵抗の低減が空力開発における重要な目的となっている。一方で，空気抵抗は車体形状に依存するため，商品性や他機能との両立が開発課題となる。特にマツダはデザインに強いこだわりを持っている。そのため，車種開発では魂動デザインで表現したいコンセプトを最大限に実現しつつ空力性能を高めることが使命となる。更に，燃費低減に大きく寄与する軽量化実現のために必要最小限の空力付加物の設定で空気抵抗を低減させる必要があった。これらのチャレンジをやり遂げ，クラストップレベルの空力性能を実現するために，これまでの新世代商品開発で培ってきた空力開発のプロセスと空気抵抗低減技術を更に進化させた。本稿では，新型デミオとCX-3の空力開発のコンセプトとプロセス，そして空気抵抗低減技術について述べる。

*1～8　車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

2. 新世代商品群の空力開発プロセス

新型デミオ，CX-3の空力開発は，CX-5，アテンザ，アクセラの開発に適用した一括開発プロセスと空気抵抗低減の共通コンセプトを引き継いで行った。そしてCFD技術の本格適用で更に開発力を強化した。次節では，まずCX-5，アテンザ，アクセラの開発プロセスと空気抵抗低減コンセプトについて述べる。

2.1 一括開発プロセスと空気抵抗低減のコンセプト

CX-5，アテンザ，アクセラの開発ではマツダの一括企画開発[1]を適用した。この開発は，下記①～③のとおり車格，セグメントを超えてプラットフォームを共通化し，そこから派生させて商品群を開発するというものである。

①商品開発に先駆けて，ベストな性能を発揮するために必要な要素技術を開発する。

②開発した技術を車格，セグメントを超えた共通のプラットフォームの基本構造に織り込む。

③各車種に共通のプラットフォームの基本構造を織り込んだ上で残りの個別要素を車種ごとに開発する。

空力開発では，まず①の要素技術開発の段階で，空気抵抗低減の共通コンセプトを構築した。この共通コンセプトはこれまでの研究から明らかになった空気抵抗の発生要因となる特徴的な渦構造[2]の抑制を要素技術とした。この渦構造は（Ⅰ)アッパ領域，(Ⅱ)床下領域，(Ⅲ)ボデーサイド領域に分けて考えることができ，各部位の渦を最小にすることで，空気抵抗に支配的である(Ⅳ)車体後方の渦を抑制するものである[2]（Fig. 1）。この考え方をもとに車両後方で上下の流れを制御し，一点に収束するような流れを作ることで(Ⅳ)車体後方の渦を抑制できる[3]。これを空気抵抗低減の共通コンセプトとした。そして，②のプラットフォーム開発の段階では床下フロアラインを定義し，このラインに沿った床下基本構造を共通プラットフォームに織り込むことで，空気抵抗低減の共通コンセプトとした流れを実現した[3]（Fig. 2）。

そして，③個別車種開発の段階ではこの共通プラットフォームを全車両に織り込み，変動要素についてのみ開発を行うことで開発期間の短期化を実現した。主な変動要素は，アッパ領域の渦構造を変化させるエクステリアデザイン領域，床下とボデーサイドの渦構造を変化させる車高とタイヤサイズ，そして後流の渦構造を変化させる車体後部の形状であった（Fig. 3）。 これらの渦構造の変化に対応できるように，形状の最適化や空力付加物の設定を風洞実験主体で行った[4]。 その結果，一括開発した全ての車種でクラストップレベルの空気抵抗係数：Cd値を実現することができ，空気抵抗低減のコンセプトと開発プロセスの実効性を確認できた。

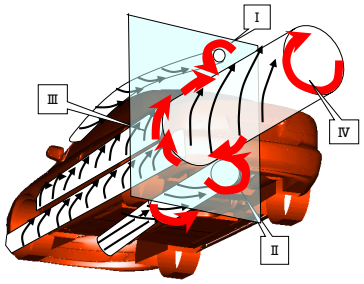


Fig. 1 Flow Structure around a Vehicle[2)]

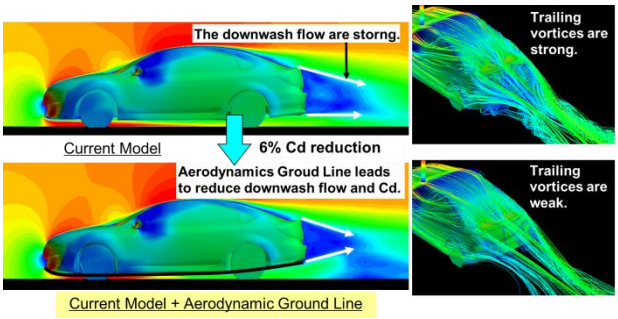


Fig. 2 Aerodynamic Optimization Concept by Modifying Underbody Geometry[3)]

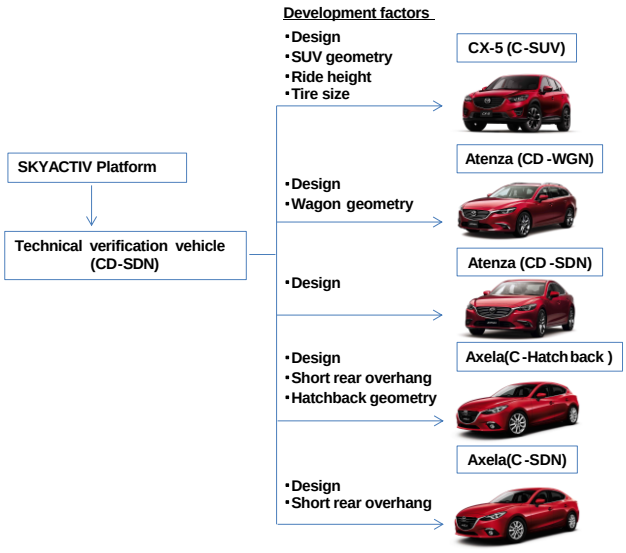


Fig. 3 Aerodynamic Development Factors of CX-5, Atenza, and Axela

2.2 空力開発への本格適用のためのCFD技術の強化

CX-5，アテンザ，アクセラでの空力開発に並行して，開発力を更に高めるべくCFDの技術の強化も行ってきた。CX-5，アテンザ，アクセラの開発時もCFDを活用してきたが，解析精度や計算時間の課題から補足的な検討ツールとして使用し，風洞実験主体でスペックを決定していた。しかし，この検討方法には以下の課題があった。

・圧力や速度等流れ場の計測に時間がかかり，計測できる物理量も限られているため，可視化や現象の理解が困難

である。

・風洞実験用の実車モデル作成・形状変更に検討時間がかかるため，デザインや他性能の検討に対してタイムリーな提案ができず，整合取りに時間がかかる。

そこで，更なる低Cd値の実現に向けて，流れを詳細に見える化でき，モデル作成，形状変更が容易な利点を持つCFDを主体にした開発に切り替えることを検討した。CFDを開発のメインツールとするには，Cd値の予測精度を高めることに加えて，要素技術開発の対象としている渦構造の再現が重要になる。そこで，CX-5，アテンザ，アクセラの開発において，CFDと風洞の流れ場を比較検証し，メッシュの解像度と乱流モデルを最適化する活動を並行して行った。特に，境界層メッシュのサイズと厚み，そしてホイールハウス周りの空間メッシュの解像度を上げることが精度向上に効果的であった。これらの検討の結果，Cd値の予測誤差を3%以下（Fig. 4）とし，他社が報告している予測精度[5],[6]と同等以上に優れたものにできた。また渦構造の再現についても一括企画で注力している領域については信頼に足るレベルまで向上させることができた。更に解析の自動化や計算リソースの整備により開発のスピードに追従できるまで解析速度を高めた。このようにCFD技術を一括企画開発に適合するように育成することで，開発のメインツールとして活用できる環境を構築できた。

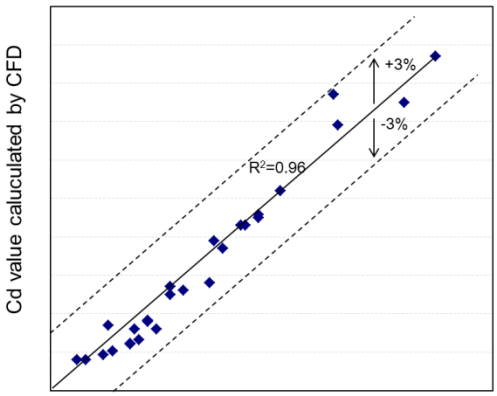


Fig. 4　Correlation Diagram of Cd Value between CFD and Mazda Wind Tunnel

2.3　新型デミオ，CX-3の開発プロセス

新型デミオとCX-3の開発はこれまでに述べてきた新世代商品群の開発で培った空気抵抗低減の共通コンセプトと開発プロセスを踏襲し，精度を向上したCFDをスペック決定のメインツールとして活用した。

本開発はコンパクトカーの一括開発にて行った（Fig. 5）。まずコンパクトカー用のプラットフォームを開発した。この開発でもCX-5，アテンザ，アクセラに採用したCDカー用のプラットフォームと同様に，渦を抑制できる基本構造を織り込んだ。そして，新型デミオの個別要素であるデザイン開発を行った。これらの開発では，CFDの利点を活かし短期間で詳細な渦構造の分析を行うことでスペックを決定した。その結果，デザインのコンセプトを実現し，なおかつ必要最小限の空力付加物で渦抑制のコンセプトを実現することができた。これらの検討の詳細は次章以降で述べる。

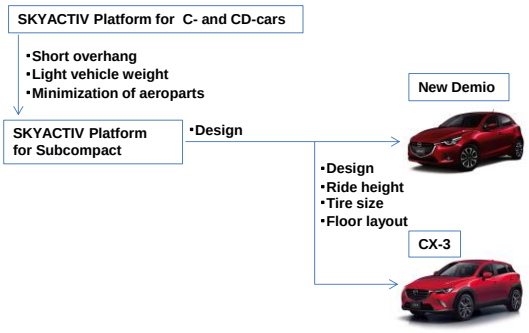
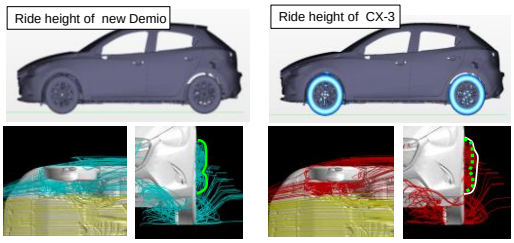
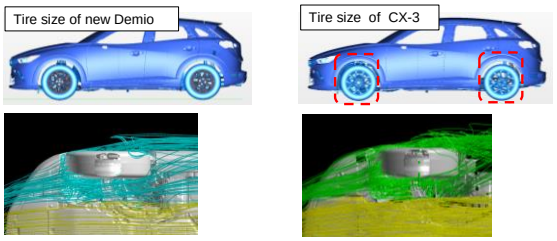


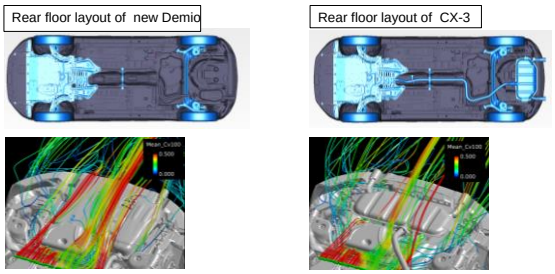
Fig. 5　Aerodynamic Development Factors of New Demio and CX-3



(a) Difference of ride height



(b) Difference of the size



(c) Difference of rear floor layout

Fig. 6　Difference of Flow Structure between New Demio and CX-3

そしてCX-3の開発については，新型デミオをベースに渦構造に変化を及ぼすユニーク要素についてのみ開発を行った。この開発においてもCFDを最大限に活用した。具体的には，新型デミオとCX-3の渦構造の相違点とその根本原因を詳細に理解するために，構造の違いを一つ一つ段階的に再現したモデルを作成し，渦構造の変化を分析した

（Fig. 6）。 その結果，共通部品で渦の抑制が可能な領域と個別部品の設定が必要な領域を細かく区別することができ，最小限の個別パーツで渦を抑制できる仕様を短期間で見出すことができた。この検討の詳細は第5章で述べる。

このようにCFDを本格活用することで，車種の個別要素の空力開発の質の向上と短期化を同時に実現することができた。

3. プラットフォームの空力開発

本章以降では，これまで述べてきた空力開発プロセスを適用して行った空力開発の詳細について述べる。まず新型デミオとCX-3の共通骨格となる新型コンパクトカー用プラットフォームに織り込んだ空気抵抗低減技術について述べる。

3.1 プラットフォームの空力開発上の課題

2.1節で述べた空気抵抗低減のコンセプトを実現するためには，アンダカバー等の空力付加物が必要であるが，燃費向上を狙った軽量化のため，これらの必要最小化が必要である。この課題に対して検討した結果を床下領域とエンジンルーム領域の二つに分けて述べる。

3.2 床下領域での空気抵抗低減技術

床下領域では，車両後端部の流れを持ち上げる流れのコンセプト（Fig. 2）を軽量化と整合させた上で実現させることを目指した。まず一括開発する車種の中で最小ボディとなる新型デミオのFF 1.3 ℓ ガソリンエンジン車をベース車両として床下のレイアウト検討を行った。そして，CFDの利点を活かして，流れのコンセプトを実現出来る必要最小限の床下付加物を設定することができた（Fig. 7）。実例として，燃料タンク横カバーでの空気抵抗低減事例について述べる。床下詳細設計段階において，燃料タンクの前側と横側の領域で流れが巻き上がることにより，床下の渦が増大することが分かった（Fig. 8(a)）。この結果から，本箇所は空気抵抗低減のための重要ポイントと判断し，カバーの設定を検討した。カバーの具体化を検討する段階において，流れ場解析の結果より，燃料配管との干渉防止のために必要な隙から燃料タンク横に流れが巻き上がっていることが分かった（Fig. 9(a)）。この流れの抑制のために，必要な隙を確保しつつ，巻き上がる流れの流路を狭めるカバー形状を見出し，流れを改善した（Fig. 9(b)）。CFDの検討サイクルの短さにより，短期間で流れコンセプトを実現できるカバー最適形状を効率的に見出すことができた （Fig. 8(b)）。

3.3 エンジンルーム領域の空気抵抗低減技術

エンジンルーム領域では，エンジンの冷却のために，エンジンルームへ空気を取り込む必要があるが，その流量の増加によりエンジンルームから床下，車両側方に気流が流出して生じる乱れ，渦が強められ，空気抵抗は増大する[2]。

この流れはフロントエンドの車体形状とエンジンルーム内部の構造に依存しているが，デザイン自由度を高めるためには後者で空力改善を行うことが望ましい。そこでフロントグリルから放熱器までの間に導風ダクト構造を設定し，エンジン冷却に寄与しない無駄な流れの最小化に取り組んだ。具体的にはCFDにより，フロントグリルから流入した流れの流出経路を評価した。エンジン冷却に不要な流れがどの箇所に存在しているかを確認するために，放熱器周辺の隙間を通過する流量を算出しつつ，流れの可視化から問題箇所を明確にした（Fig. 10, 11）。これらの解析結果より，サイド部の隙間からの流出の寄与度が大きいことを見出した。そして，CFDの流れが詳細に可視化できる利点を活かして，流出の経路を把握することで該当箇所を重点的にシールできるダクト構造を見出し，設定した。その結果，冷却に必要なラジエータの通過風量を高めつつ冷却に不要な漏れ流量を26%低減することができ，Cd値を2%低減することができた。

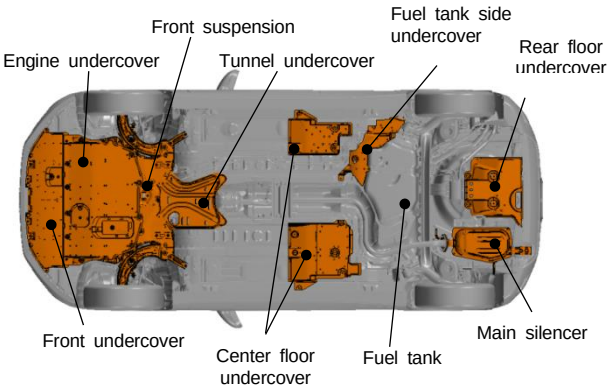
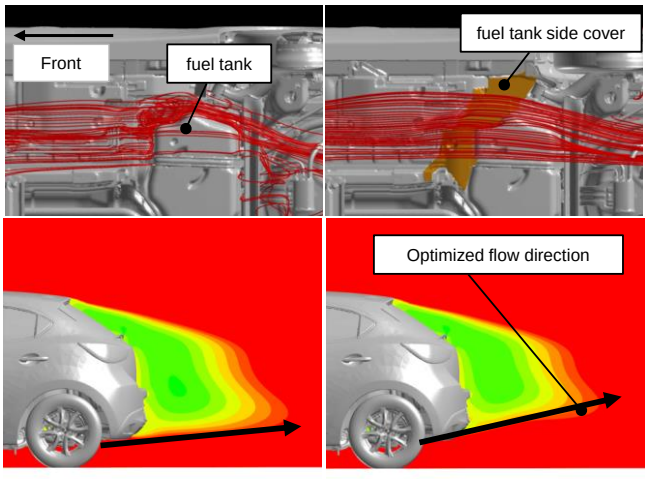
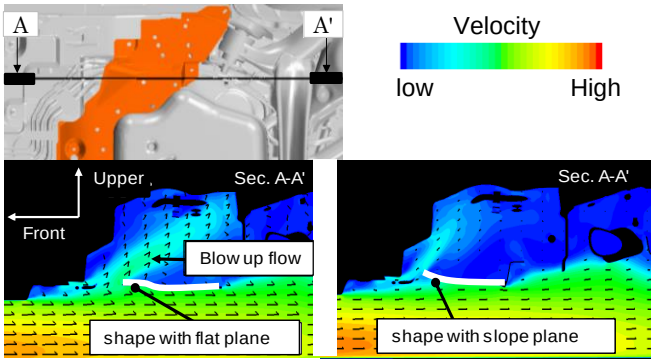


Fig. 7 Aerodynamic Optimization on Under Body of New Demio



(a) Without fuel tank side undercover (b) With fuel tank side undercover

Fig. 8 Flow Streamlines around Left Side of Fuel Tank and Velocity Contours behind the Vehicle



(a) Fuel tank cover without optimization　(b) Fuel tank cover with optimization

Fig. 9　Velocity Contours and Vectors at Left Side of Fuel Tank

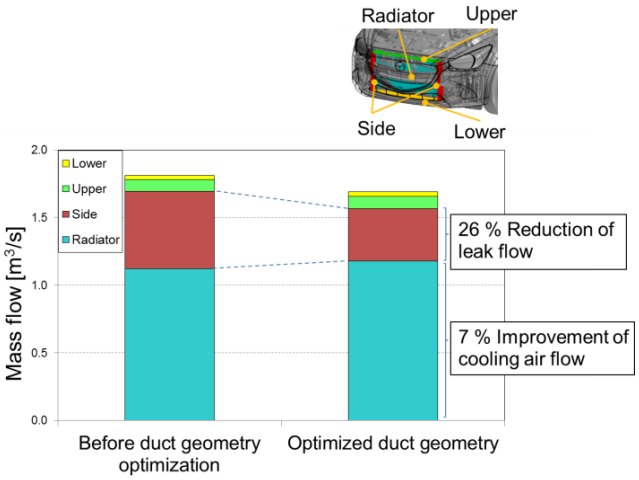


Fig. 10　Mass Flow Passed through Front Grille

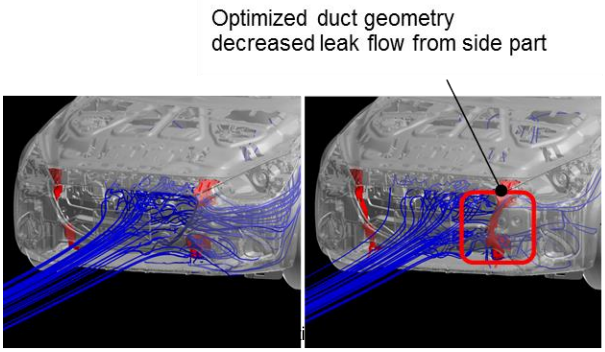


Fig. 11　Flow Streamlines around Front Grill

4. 新型デミオの空力開発

本章では，新型デミオのユニーク要素であるデザイン領域に織り込んだ空気抵抗低減技術について述べる。

4.1　新型デミオの空力開発上の課題

デザインのコンセプトを最大限に実現しつつ2.1節で述べた後流を制御して一箇所に集約させ，空気抵抗を大幅に低減するコンセプトの実現を目指した。これに際し，主に以下二つのデザインコンセプトとの整合課題に集約して開発に取り組んだ。

・アッパ領域のスタイリングとの整合：迫力あるリヤビューを実現するため，バックウィンドウが前後方向に前傾したスタイリングを採用した。これは空気抵抗を増大させる後流の渦を誘起する方向である。よって，この渦の抑制が必要であった。

・タイヤ大型化との整合：力強いデザインの実現に加え操縦安定性向上のため，幅，径ともに大きいタイヤを採用した。これは，タイヤ周りで生じる渦が大きくなる方向である。よって，この渦の抑制が必要であった。

これらの課題を解決するために，検討した結果を述べる。

4.2 アッパ領域での空気抵抗低減技術

アッパ領域では，車両周りの剥離などによる乱れ，渦の抑制，車両後方での後引き渦の抑制を行った。具体的に形状を改善した箇所をFig. 12に示す。特に課題であった，バックウィンドウを前傾させたスタイリングと空気抵抗低減の整合について報告する。Fig. 13に示すように，バックウィンドウを前傾させたスタイリングにより，リヤピラーからバックウィンドウに流れが巻き込み，この領域で空気抵抗が増大していた。この渦の抑制のため，本箇所にリヤサイドスポイラの設定を検討した。CFDによる流れ現象の見える化，検討期間の短期化の利点を活かし，デザインテーマを崩さないように，見栄えや取り付け構造と整合のとれた必要最小限の形状を効率的に見出すことができた。その結果，バックウィンドウを前傾させたスタイリングを活かしつつ，Fig. 14のとおりバックウィンドウに巻き込む流れを抑制し，Cd値を1%低減することができた。

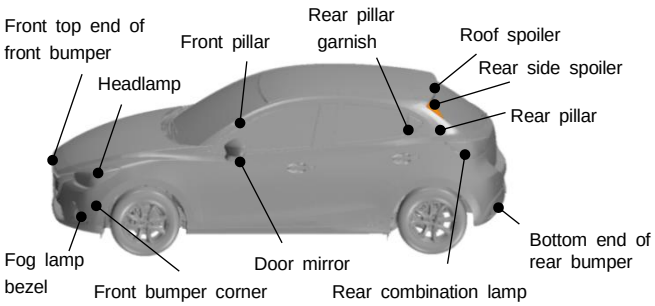
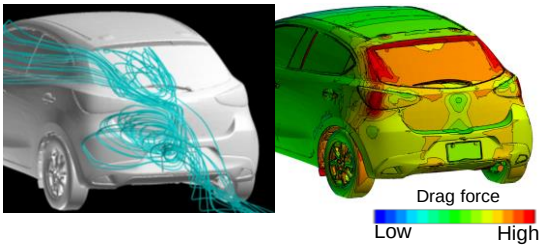
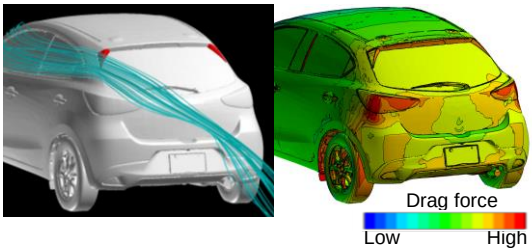


Fig. 12　Aerodynamic Optimization on Upper Body of New Demio



(a) Flow stream lines　(b) Drag force distribution

Fig. 13　Flow and Drag Force around Back Window without Rear Side Spoiler

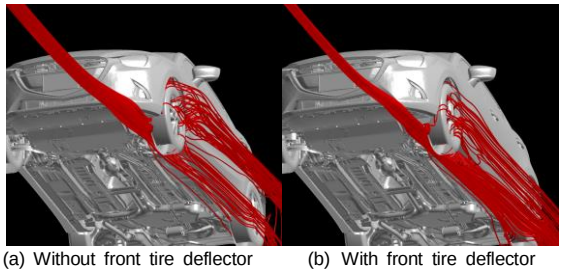


(a) Flow stream lines　(b) Drag force distribution

Fig. 14　Flow and Drag Force around Back Window with Rear Side Spoiler

4.3　タイヤ周りでの空気抵抗低減技術

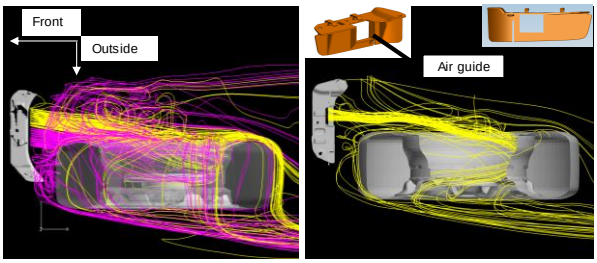
タイヤ周り領域では，大きなタイヤ，および軽量化と空力との整合の実例として，フロントタイヤデフレクタでの空気抵抗低減について述べる。大きいタイヤに対するボデーサイドの渦，乱れを抑制するため，より大きなタイヤを設定しているCDカーのフロントタイヤデフレクタの検討結果を活用した。検討の初期段階ではレイアウト，見栄えとの整合取りが必要であったため，CFDでタイヤ周りの流れを見ながら検討を行い，整合取りをした上で，タイヤ上部，ホイール開口から生じる渦を抑制できる形状を見出した（Fig. 15）。



(a) Without front tire deflector　(b) With front tire deflector

Fig. 15　Flow Streamlines around Front Tire

また詳細設計段階ではブレーキの冷却性能との整合取りについて検討を行った。デフレクタの設定は空力性能を向上させる一方で，ブレーキロータに当たる冷却風量を低下させる。特に新型デミオは軽量化のためブレーキロータを小型化しており，放熱量が小さくなるため，冷却風量が不足していた。そこで，両立案としてブレーキ冷却のため，フロントタイヤデフレクタに開口を設けた。ブレーキに必要な冷却性能から経験的に設定した初期の開口形状に対し，CFDで流れ場分析を行い，ブレーキに向かう流れを理解することで，効率的な開口位置，最小限の大きさ，導風ダクト形状を見出した（Fig. 16）。その結果，ブレーキ冷却性能を満たし，かつ空気抵抗についてもほぼロスのないフロントタイヤデフレクタのブレーキ冷却開口を設定でき，Cd値を3%低減することができた。



(a)Brake cooling hole without optimization　(b)Brake cooling hole with optimization

Fig. 16　Flow Streamlines thorough Brake Cooling Hole of Front Tire Deflector

5. CX-3の空力開発

本章では，CX-3のユニーク要素に対して織り込んだ空気抵抗低減技術について述べる。

5.1　CX-3の空力開発上の課題

CX-3は新型デミオに対して以下のユニークの課題があり，これらの整合課題に集約して開発に取り組んだ。

・リアフロア領域のレイアウト変更との整合：CX-3はベースとなるBカー用プラットフォームに対し大排気量エンジン対応のため，サイレンサを大型化し，リアフロア部のレイアウトを変更した（Fig. 17）。これらの変更に適した床下と後流の渦最小化技術が必要である。

・更なるタイヤ大型化・車高アップとの整合：CX-3は新型デミオに対し，力強いデザイン実現のため，タイヤ径と幅を更に大きくした。加えて，車高が高いスタイリングを採用したので，いずれもタイヤ周りで生じる渦が大きくなる。よって，これを抑制できる技術が必要である。

これらの課題に対して，検討した結果を述べる。

5.2　CX-3の床下領域での空気抵抗低減技術

2.3節で述べた新型デミオとCX-3の渦構造の変化を分析した結果（Fig. 6）から，新型デミオと部品を共通化しつつ個別の空力付加物の設定は必要最小限とした上で流れのコンセプトを実現できる仕様を見出した（Fig. 17）。実例として，リヤバンパに設定したアンダカバーでの空気抵抗低減事例について述べる。CX-3のユニーク部品であるサイレンサ下を通った流れがリヤバンパ内側に巻き込み，車両後部で乱れていることを見出した（Fig. 18(a)）。本箇所は空気抵抗低減のための重要ポイントと判断し，カバーの設定を検討した。高温となるサイレンサと樹脂製カバーとの間に要求される必要な隙間からリヤバンパ内へ巻き込む流れが課題であったため，本カバーに耐熱性の高い樹脂を採用し，隙を最小とした。加えて，CFDによる流れ場分析を行い，リヤバンパの内側に巻き込まないようにし

つつ後流の流れが一箇所に集約するように風を車体後方にガイドする形状を見出し（Fig. 19）採用した。これにより，リヤバンパ下から車両後方への流れを整流し（Fig. 18(b)），Cd値を1%低減することができた。

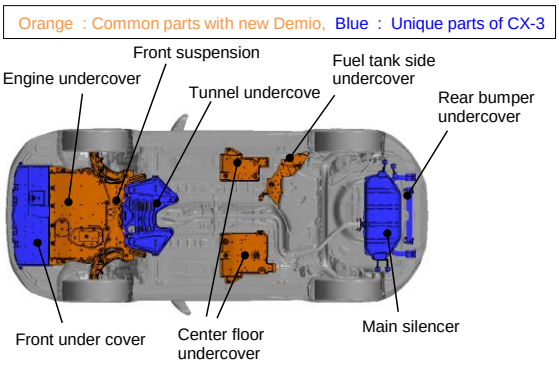
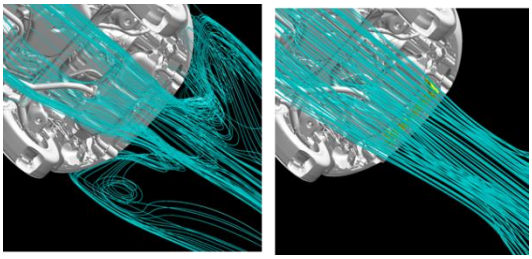


Fig. 17　Aerodynamic Optimization on Under Body of CX-3



(a) Without rear bumper cover　(b) With rear bumper cover

Fig.18　Flow Streamlines around Rear Floor

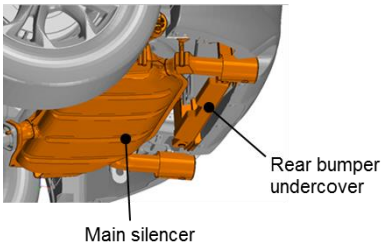


Fig. 19　Rear Bumper Under Cover

5.3　タイヤ周りでの空気抵抗低減技術

CX-3でも新型デミオ同様，前後タイヤの前にタイヤデフレクタを設定した。タイヤの大型化や車高アップの課題に対し，タイヤデフレクタの大型化に加え，フロントタイヤ前のフェンダ部やリヤタイヤ前のガーニッシュ部にもデフレクタ形状を織り込んだ（Fig. 20）。

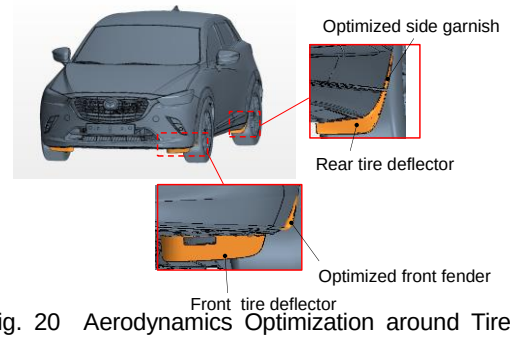
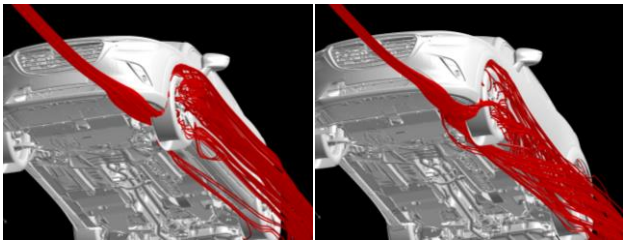


Fig. 20　Aerodynamics Optimization around Tire

デフレクタの大型化はブレーキの冷却性能が悪化する方向であったため，新型デミオと同様にCFDによる流れ場分析を行い，最も冷却に有利な場所と必要最小限の面積の冷却用開口を設けることで整合取りを行った。また大型デフレクタでの見栄えの整合取りも重要課題であったため，CFDで流れ場を見える化し，ミリ単位で形状を最適化しデザイン，空力を満足する形状を見出した。その結果，タイヤ上部，ホイール開口から生じる渦を抑制することができ（Fig. 21），Cd値を3%低減することができた。

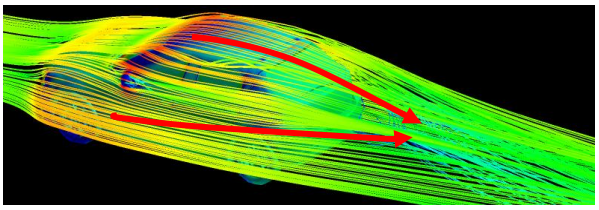


(a) Without front tire deflector　(b) With front tire deflector

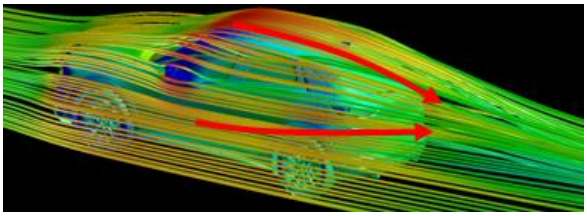
Fig. 21　Flow Streamlines around Front Tire

6. 新型デミオとCX-3の空力性能

新型デミオとCX-3は，これまでに述べてきた空気抵抗低減技術を織り込むことで，流れを整流し，車両後方で上下左右の流れを一点収束させるコンセプトを実現した（Fig. 22(a), (b)）。そして，開発の最終段階にて，検証車両を用いた風洞実験の結果，当初のねらいどおりの風流れ（Fig. 23）と空気抵抗を左右するCd値と前面投影面積（FA）の積であるCd・FAについてクラストップレベルの性能達成を確認した（Fig. 24, 25）。



(a) New Demio



(b) CX-3

Fig. 22　Flow Streamlines around New Demio and CX-3

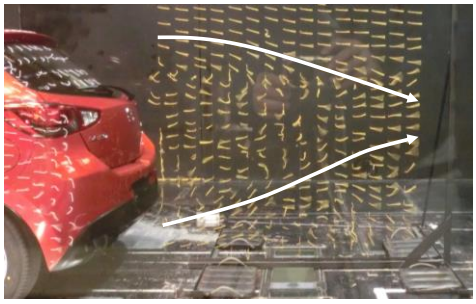


Fig. 23　Wind Tunnel Test Result of Flow Visualization behind Body of New Demio

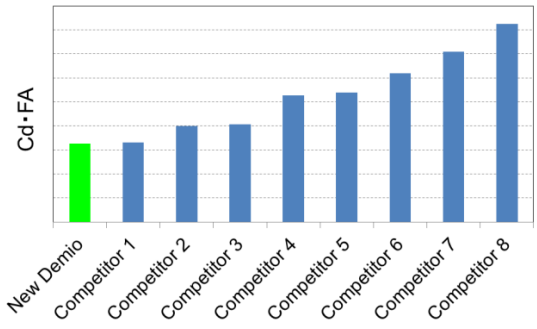


Fig. 24　Aerodynamic Drag of New Demio and Competitors Measured in Wind Tunnel

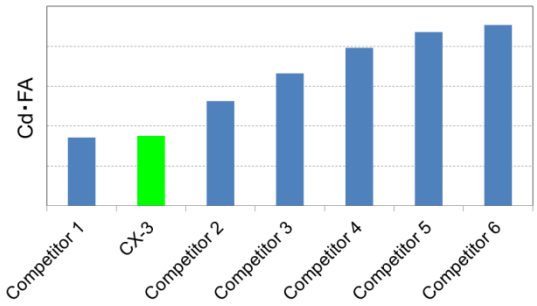


Fig. 25　Aerodynamic Drag of CX-3 and Competitors Measured at Wind Tunnel

7. まとめ

SKYACTIV TECHNOLOGYを全面導入したCX-5，アテンザ，アクセラの開発で培ってきた空力開発プロセスと空気抵抗低減技術をCFDの本格活用により更に進化させ，これを新型デミオとCX-3の開発に適用した。その結果，いずれもクラストップレベルのCd・FAを達成することができ，開発プロセス，そして空気抵抗低減技術の実効性を確認できた。

参考文献

(1) マツダの構造改革とブランド価値の向上に向けた取り組み，MAZDA ANNUAL REPORT，pp.16-27（2008）
(2) 農沢ほか：自動車の空気抵抗を増大させる車体周りの流れ構造：第2報，日本機械学會論文集B編，75，pp.1807-1813（2009）
(3) 木村ほか：SKYACTIV-ボディ，マツダ技報，No.29，pp.61-67（2011）
(4) 木村ほか：CX-5 SKYACTIV-BODY ストラクチャの開発，マツダ技報，No.30，pp.103-108（2012）
(5) 清野ほか：バーチャル風洞の構築と車両空力性能開発への適用，学術講演会前刷集，No.24-14，pp.5-8（2014）
(6) Andreas Kremheller：The Aerodynamics Development of the New Nissan Qashqai，SAE Technical Paper，2014-01-0572

■著　者■

中田 章博

伊川 雄希

川北 正寿

大平 洋樹

李 曄

岡田 義浩

岡本 哲

田中 松広

特集：新型ロードスター

16

新型ロードスターの紹介
Introduction of New Roadster

山本　修弘*1　山口　宗則*2　下村　剛*3
Nobuhiro Yamamoto　Munenori Yamaguchi　Takeshi Shimomura
浅田　健志*4　森　茂之*5　板垣　友成*6
Kenji Asada　Shigeyuki Mori　Tomonori Itagaki

要　約

初代モデルを市場に導入して以来25年間，ロードスターは全くぶれることなく，一貫して「人馬一体」と「Lots of Fun」を追求し続けている。4代目となる新型ロードスターは「人生を楽しもう“Joy of the Moment, Joy of Life”」を商品コンセプトとし，「人がクルマを楽しむ感覚の進化」に徹底的に取り組み「感（かん）」をキーワードとした商品開発を行った。そしてその商品コンセプトを，以下の価値で実現した。

1.「誰もが一瞬で心ときめくデザイン」
2.「誰もが夢中になるドライビング体験」
3.「誰もが開放的でリフレッシュできる気持ちよさ」

Summary

We have been pursuing “Jinba-ittai (Oneness between horse and rider)” and “Lots of Fun” consistently for Roadster without any deviation for the past 25 years since the introduction of its first model. The product concept of the 4th generation New Roadster is “Joy of the Moment, Joy of Life”. We have worked on “the evolution of senses and sensations through which people enjoy cars”, and conducted product development with “Sensation” as the keyword. The above-mentioned product concept has been realized as described below.

1. “A look that gets the heart racing”
2. “Driving experience that will captivate any driver”
3. “Pleasantly refreshing roadster experience that anyone can enjoy”

1. はじめに

ロードスターは初代から一貫して，乗り手と馬とが心を通い合わせて走る一体感を意味する「人馬一体」，更に走りだけにとどまらないさまざまな楽しみ「Lots of Fun」を追求した商品開発を行っている。4代目となる新型ロードスターの開発においても，全くぶれることなく，この2つを不変のテーマとして追求し続け，「守るために変えていく」を挑戦するキーワードとして，ロードスターならではの走りと楽しさを更に進化させた。本稿では，新型ロードスターの商品コンセプト及びそれを実現した商品全体の概要を紹介する。

2. 商品コンセプト

ロードスターが，人馬一体の走りとLots of Funにこだわるのは，このクルマを単なるモノとして捉えていないからである。その姿を眺める，思いのままに走る，感触を味わう，自分らしさを主張する，仲間と集い語り合う。このクルマがいることで，人生がより楽しくより濃密になる。そんな，クルマであることを超えた存在になることを願って，新型ロードスターの商品コンセプトは「人生を楽しもう“Joy of the Moment, Joy of Life”」とした。

この商品コンセプトをより純粋に具現化するために，クルマとしての進化，すなわちSKYACTIV技術と「魂動」デザインの進化に加え，新型ロードスターは，初代，2代目，3代目延長線上ではなく，「人がクルマを楽しむ感覚の進化」に徹底的に取り組み，この飛躍的な向上をねらって，「感（かん）」をキーワードとした商品開発と造り込みを行った（Fig. 1）。

*1～3　商品本部
Product Div.
*4～6　商品企画部
Product Planning Dept.

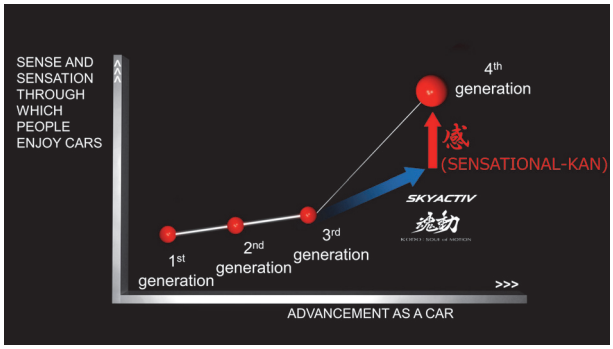


Fig. 1　Direction of Evolution

そして，その商品コンセプトを，
「誰もが一瞬で心ときめくデザイン」
「誰もが夢中になるドライビング体験」
「誰もが開放的でリフレッシュできる気持ちよさ」
の，3つの価値で実現した。

3. 誰もが一瞬で心ときめくデザイン

デザインはそれを見るだけで心が躍り，そこに座るだけで笑みがこぼれ，いますぐオープンにして走り出したくなる，そして，歳月とともにかけがえのない存在になっていく。そうしたロードスターだからこその歓びを，純粋に表現することを目指した。

3.1　エクステリアデザイン

エクステリアデザインは，主役をあくまでも人とし，乗る人の姿が際立つ美しいプロポーションを実現した。人の座る位置がボデーの真ん中に感じられるようにキャビンをやや後方に置き，オープン状態での美しさはもちろんのこと，ドライバの姿が際立ち，その満足感や高揚感まで伝わってくるような表現にこだわった。また，デザインテーマ「魂動」を更に深化させ，路面に張りつくような安定感と同時に，前後左右どこへでも瞬発的に動ける敏捷さを表現した。エクステリアのキーとして，世界で最も低く，短いフロントオーバハングの実現のため，世界最小・最軽量の4灯LEDヘッドランプを採用した（Fig. 2）。

Fig. 2　Exterior Design

3.2　インテリアデザイン

インテリアデザインは，ただそれを見るだけ，そこに座るだけで笑みがこぼれ，心が躍る，そんなコクピットを目指した。コクピットに座ると，ドアトリム上部からフロントフェンダの頂点へ力強く伸びる稜線がはっきりと見え，オープンボデーならではの開放感に加えて，人とクルマの一体感を強調した。更に，木漏れ日や夕暮れの光の反射など環境の変化をライブに体感するという，オープンならではの楽しみを更に追求した。また，同軸上に配置したタコメータと小径ステアリング，メータクラスタ，左右に完全対称な位置で配した丸型ルーバなどによって，コクピットに1本の軸を通すとともに，運転に集中できる心地よくタイト感のある空間を実現した（Fig. 3）。

Fig. 3　Interior Design

4. 誰もが夢中になるドライビング体験

ロードスターは初代から，絶対性能ではなく「人がクルマを楽しむ感覚」を重視している。2章で述べたとおり，新型ロードスターでは「感（かん）」をキーワードとした商品開発を行った。特にドライビングの領域では「軽快感」「手の内・意のまま感」をテーマとして造り込んだ。

4.1　軽量化

「軽快感」を実現する，最も基本的な手段は軽量化である。新型ロードスターでは，抜本的な軽量化を実現するために車両を全面的に新設計し，これまでに蓄積したノウハウと最新のSKYACTIV技術と理論を駆使し，最適機能配分とコンパクト化，構造革新，軽量材料の適用拡大などを行い，前モデルに対して100kgを超える大幅な軽量化を達成した（Table 1）。

Table 1　Weight Comparison

New Model (1.5L / 6MT)	Previous Model (2.0L / 6MT)	Difference
990 kg	1,120 kg	▲130 kg

（1）最適機能配分とコンパクト化

2人乗りオープンライトウエイトスポーツカーのあるべきボデーやシャシーの理想構造を再度徹底的に追求した結果，新型は前モデルと比較しコンパクトな車両サイズとした。これに伴いブレーキサイズ，タイヤ&ホイールのサイズを適正化，またハブボルトも4本に戻し，前モデルからコンパクト化した。また同様にエンジンを小排気量化した結果，エンジン本体，吸排気・冷却系・トライブトレイン系の軽量化を実現した（Table 2）。

Table 2　Exterior Dimension

	New Model	Previous Model	Difference
Overall length (mm)	3,915	4,020	▲105
Overall width (mm)	1,735	1,720	15
Overall height (mm)	1,235	1,245	▲10
Wheel base (mm)	2,310	2,330	▲20

（2）構造革新

車両の新設計に伴い，特にボデーシェル，シャシーは構造を徹底的に見直し，大幅な軽量化を実現した。ボデーシェルはフレームワークの適正化，前モデルから採用しているハイマウントバックボーンフレームの大断面化とストレート化，ハイテン材の適用拡大などにより，歴代モデルの中で最軽量のボデーと高剛性を高次元で両立させた（Fig. 4）。

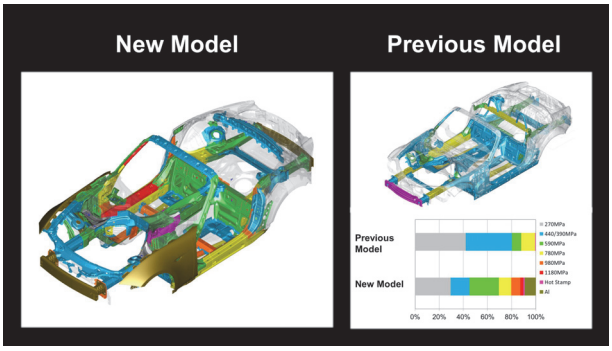


Fig. 4　Expand Use of High Tensile Material

シャシーもフレームワークを再度適正化，またボデーフレームの一部をシャシーのフレームとして活用し，更にそれらの骨格をトラス形状でつなぐことにより，軽量で高剛性な構造を実現した。

パワートレイン系では，6速マニュアルトランスミッションとデファレンシャルギアを，小型で軽量なものに新設計し直し，軽量化を実現した。

（3）軽量材料の適用拡大

新型ではアルミ材の適用を更に拡大した。ボデーでは，前モデルのボンネットやトランクリッドに加え，フロントフェンダ，前後のバンパレイン，シートバックバー，アンダクロスメンバ，バルクヘッドパネル，ソフトトップリンクなどをアルミ化した。シャシーでは，3代目のフロントアッパアーム，ロアアーム，パワープラントフレーム，リヤハブサポートに加え，フロントナックルもアルミ化した。またハーネスの一部にもアルミ材を適用した。更にパワートレイン系ではデファレンシャルギアのキャリアケースなどを新たにアルミ化した。

これらに加え新技術として，シートにはシートバックとクッションにネットを用いた新構造を採用した。またアルミホイールにも軽量化新工法を採用した（Fig. 5，6）。

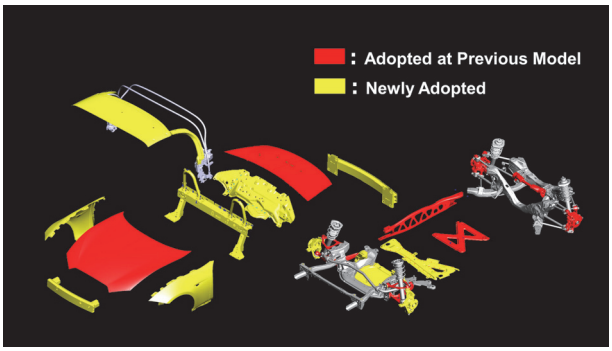


Fig. 5　Expand Aluminum Applied Parts

Fig. 6　Seat with New Structure

（4）グラム作戦

前述した大物の軽量化策のみでなく，マツダの歴代スポーツカーが取り組んできた「グラム作戦」を今回も推進した。車両の全部品に対して1グラムでも削減できる余地があれば実行した。ボデーやシャシーの補強部材は，強度上影響のない部分には重量軽減穴をあけ，また溶接に影響のない端末部はカットした。ドアガラスも，目に見えない部分で機能上必要のない部位はカットし，更に重量軽減穴を設定した。シートの前後位置を調整するレバーも必要最小限の太さとした。

以下に，軽量化主要アイテムの抜粋を示す（Table 3）。

Table 3 Extract Weight Reduction Major Items

(1) The most appropriate function allocation and downsizing			**About 30%**
Vehicle area			
	Chassis	Fr. brake	Downsize 15"⇒14"
		Tire & wheel	Downsize 205/45R17(7J)⇒195/50R16(6.5J)
		Fr.&Rr. hub bearing	Reduce weight by axle load reduction. 4 hub bolts
		Brake booster	Appropriate size by weight reduction: 9"⇒8"
Powertrain area			
	Engine	Engine main unit	Smaller displacement (main mechanism structure)
		Intake system	Small & lightweight intake system
		Exhaust system	Small & lightweight exhaust system
		Cooling system	Small & lightweight cooling system
	Drivetrain	Drive shaft	
(2) Structural evolution			**About 40%**
Vehicle area			
	Body	Body shell	Appropriate framework/cross-section shape, Expand application of high tensile
	Chassis	Fr.&Rr. suspension	Appropriate cross member & arm/link/cross-section shape, Expand application of high tensile
		PPF	Reduce back and forth length (51.6mm), Reduce plate thickness（7.0t⇒6.0t)
	HVAC	I/P & A/C unit	Appropriate structure/system, Reduce plate thickness, etc.
Powertrain area			
	Engine	Engine main unit	Drop engine/oil cooler due to improvement of heat efficiency
			Address to achieve target torque with VIS less
	Drivetrain	Transmission	Newly set up small & lightweight transmission
		Differential gear	Thin shaft & joint part
(3) Expand application of lightweight materials			**About 30%**
Vehicle area			
	Body	Fr. fender	Aluminum
		Fr.&Rr. bumper reinforce	Aluminum
		Seat back bar	Aluminum
		Under cross member	Aluminum
		Bulkhead panel	Aluminum
	Softtop	Softtop link	Aluminum
	Chassis	Fr. knuckle	Aluminum
		AL wheel	Adopt new method of weight reduction
		Engine mount bracket	Aluminum
		Differential mount rubber	Aluminum inner pipe
	Seat	Fr. seat	Adopt net seat
Powertrain area			
	Engine	Engine main unit	Water outlet main: Aluminum -> Resin
		Exhaust system	Exhaust manifold, Heat insulator: Steel plate -> Aluminum
	Drivetrain	Differential gear	Carrier case Cast iron -> Aluminum

4.2 パッケージング

コンパクトなボデーサイズにもかかわらず，クルマの美しいプロポーションを実現し，同時に徹底した軽量化と前後50：50の重量配分，ヨー慣性モーメントの低減，低重心化と，そのすべてを実現する要となるのがパッケージングである。パッケージングはロードスターの商品づくりの考え方そのものであり，新型では「誰もが一瞬で心ときめくデザイン」と誰もが夢中になる「軽快感」「手の内・意のまま感」を実現する重量配分やドライビングポジションを高次元で実現した。

（1）プロポーションの実現と重量配分の最適化

新型ロードスターの全長は歴代モデルの中では最も短い。この短いサイズで美しいプロポーションを実現するために，エンジン搭載位置を更に下方化，後方化することなどによりボンネットの高さを低減，乗員位置を下方化することで全高を低減した。また前後オーバハングも短縮した。ロードスターは，重量配分の適正化をねらい，初代モデルから一貫してフロントミッドシップの後輪駆動レイアウトを継承しているが，これらにより更なる低重心化とヨー慣性モーメントの低減，また前後重量配分の適正化を実現し，運動性能の素性を高めた（Fig. 7）。

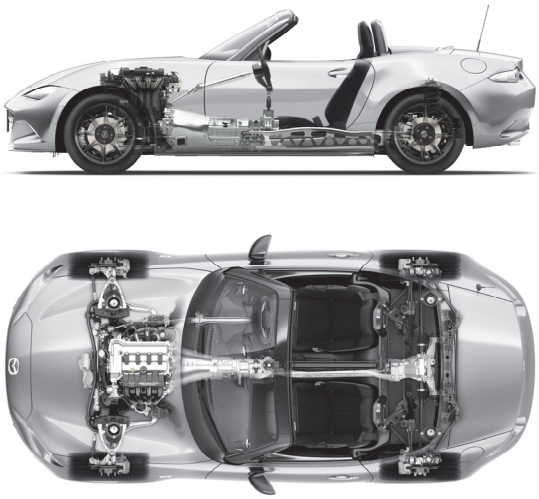


Fig. 7 Vehicle Layout

（2）ドライビングポジション

クルマが手の内にある感覚や，意のままに操る楽しさを実現するために，「人」中心のドライビングポジションを重視した。そのために，ドライバがまっすぐな姿勢で操作できる位置にペダル類を配置し，主要な操作系，視認系の機器を人間中心にレイアウトした。また，低いフロントノーズ，後方に移動させたAピラー，薄型化したフロントヘッダなどにより，進行方向や周囲の状況，そして自車の挙動も認知しやすい視界を実現した。

4.3 ドライビングダイナミクス

ロードスターが目指す「誰もが夢中になるドライビング体験」とは，誰もが直感できて，乗るたびに深まってゆく運転の楽しさである。新型では，クルマを意のままに操る気持ちよさに加え，ドライバがクルマのポテンシャルをフルに引き出しながら，自分の体の一部のように，自分の意思どおりに動かしている感覚を更に高めることに注力した。

（1）パフォーマンスフィール

軽快で気持ちの良い走りを目指し，初代モデルから受け継ぐダイレクトレスポンス，伸び感，エンジンサウンド，シフトとクラッチフィールの良さを更に追求した。

パワートレインは，SKYACTIV-G 1.5の直噴ガソリンエンジンを縦置きとし，吸排気系を最適化，エンジン本体を高回転化し，低回転域から扱いやすく，高回転域まで伸びのあるトルク特性を実現した（海外仕向けにはSKYACTIV-G 2.0の設定あり）（Fig. 8）。

エンジンのセッティングはアクセル操作に呼応した加速感を出すために，躍度（加速度の変化）に注目したコントロールを行い，アクセルの踏み込みに対し加速度の変化を感じ続ける時間を拡大した。またレスポンスも改善，軽量な車体と相まって，低回転域から高回転域まで，ドライバ

の意思どおりの気持ちの良い加速感がずっと続くようにセッティングした。

Fig. 8　SKYACTIV-G 1.5

走りに呼応したエンジンサウンドの実現にもこだわった。サイレンサの工夫などでベースとして不快な音を抑え込んだ上で，低回転域では軽快感，中回転域から力強い鼓動感が加わり，それが伸び感をもって高回転域まで吹き抜けてゆくサウンドとした。鼓動感の実現にはデフマウントの振動特性をチューニングして活用した。

トランスミッションは6速を直結とし，構造をシンプル化，小型化したものを新設計した。前述した軽量化に寄与するとともに，軽い操作感，シフト中の吸い込み感とともに，カチッとした節度感の実現にこだわった。適正なペダル配置としたクラッチもミートポイントでの特性を造り込み，シフトと合わせ，扱いやすく軽快でリズミカルな操作感を実現した（Fig. 9）。

Fig. 9　6-Speed Manual Transmission

(2) ダイナミックキャラクタリスティック

車両の運動特性は，コーナリング時の全ての挙動がイメージどおりのリズムでつながることをねらって開発した。

サスペンションシステムはボデーとのユニット共創により軽量で剛性を高め，フロントはダブルウィッシュボーン式，リヤはマルチリンク式のものを新設計した（Fig. 10, 11）。

Fig. 10　Double Wishbone Front Suspension

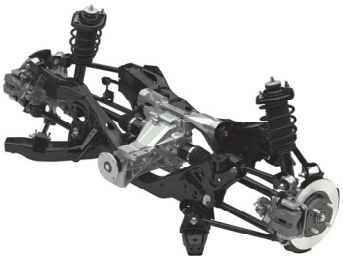


Fig. 11　Multilink Rear Suspension

コーナリング前の自然にコントロールできる減速と荷重移動を実現するために，制動時のピッチセンタを適正化，またブレーキ特性をリニア化した。ターンイン時は車両挙動の掴みやすさをねらって，ダイアゴナルロールによる3Dモーションの最適化を追求した。ボンネット高の低減とデザインの工夫による抜群のドライバビューで，車両挙動を認知しやすくし，「手の内・意のまま感」を更に向上させた。コーナリング中の正確なフィードバックをねらって，ダンパマウント部の剛性を強化，またリニアなステアリングフィードバックを得るため，タイヤの近くでパワーをアシストする電動パワーステアリングを採用した。ターンアウト時は荷重移動の安定性をねらって，サスペンションのジオメトリを最適化した。

5. 誰もが開放的でリフレッシュできる気持ちよさ

ロードスターはオープンカーである。「感（かん）」造りのもう一つのテーマとして，いつでもどこでも誰もが迷いなく，五感を通じて心から解き放たれる「開放感」を追求した。

5.1　ソフトトップ

ソフトトップは着座姿勢でも楽に開閉操作が可能となるよう，人の手の動作の軌跡，力を発揮しやすい方向とソフ

トトップのリンクジオメトリを最適化した。またアルミダイキャスト化して軽量化したリンクにアシストスプリングを設定し，操作荷重を大幅に低減した。更にトップを開閉する際には，ドアウインドウが自動的に下がる機構を織り込んだ（Fig. 12）。

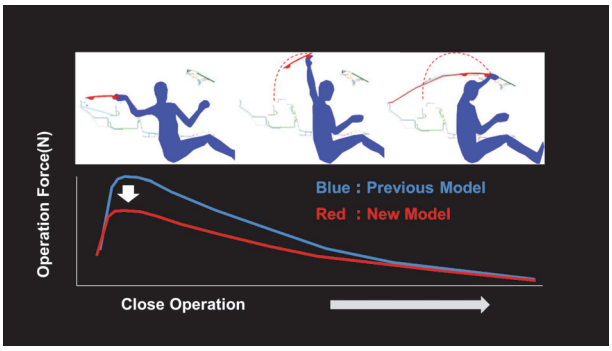


Fig. 12　Reduce Soft Top Control Force

5.2　ウインドコントロール

オープン走行時には心地よい風を感じられるよう，積極的に風をコントロールした。Aピラーとヘッダの後方化により不快な風の巻き込みを抑制し，三角窓とドアトリム形状の最適化により心地よい導風を実現した。

5.3　オーディオ＆カーコネクティビティシステム

オープン走行時でもクリアな音楽や通話を実現するためにヘッドレストスピーカを設定した。オーディオはスタンダードシステムに加えて，Bose®社と共同で専用のオーディオシステムを開発し，オープン走行中でも質の高い音響空間を実現した。更にカーコネクティビティシステム「マツダコネクト」を設定し，いつでもどこでも外の世界とつながるようにした。

6. セーフティ・環境への配慮

6.1　セーフティ

マツダの「Mazda Proactive Safety（マツダ・プロアクティブ・セーフティ）」の思想に基づき，人間中心の安全性能を追求した。

アクティブセーフティでは，街中から高速走行，ワインディングロードなど，どんなシーンでも安心して走りを楽しめるよう，リスクの認識を支援して危険を回避する先進安全技術「i-ACTIVSENSE（アイ・アクティブセンス）」を採用した。パッシブセーフティーでは，高強度・安全ボデーSKYACTIV-BODYの技術をFRのオープンボデーに適用し，優れた衝撃吸収性能と高強度を両立させた。また運転席／助手席エアバッグに加え，頭部保護機能を備えたサイドエアバッグを設定した。歩行者保護のためのアクティブボンネットは低いボンネット高を実現するために，前モデルから進化させたものを採用した。

6.2　環境への配慮

マツダは，自動車外装部品にも使用できる，無塗装で高質感のバイオエンジニアリングプラスチック（マツダバイオテックマテリアル）を開発した。この材料を新型ロードスターの内装意匠部品に，マツダ車として初めて採用する（Fig. 13）。

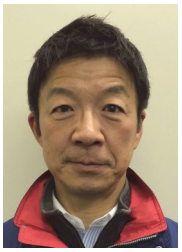
Fig. 13　Mazda Biotechmaterial Parts

7. おわりに

「守るために変えていく」は，次の25年，50年を迎えても愛し続けられるロードスターであるために，大切なものを継承してつくり続けることへの誇りと，そして走りを心から楽しむことを貫き通した新型ロードスターに込めた思いである。私たちは，お客様に感謝を込めて新しいロードスターをお届けしたい。

■著　者■

山本 修弘


山口 宗則

下村 剛

浅田 健志

森 茂之

板垣 友成

特集：新型ロードスター

17

新型ロードスターのデザイン
Design of New Roadster

中山　雅*1
Masashi Nakayama

要　約

4代目のモデルである新型ロードスターの開発にあたり，「守るために変える」を開発全体の志とし，マツダの最新技術である「SKYACTIV TECHNOLOGY」の全面採用と，新デザインテーマ「魂動（こどう）」を深化させることで，世界中のロードスターファンの期待に応えるべく，初代から25年間続いた歴史を継承・発展させ，後世に残すことを目標とした。

スポーツカーを愛する人に対して強い影響力のあるエクステリアデザイン開発では，見た瞬間に心ときめく，情緒的で美しいスタイリングを造った。また，運転時に重要視されるインテリアデザインには，乗り込んだ瞬間に高揚する走りの予感や，味わい深い空間構成やディテールの造り込みを行った。これらのデザインを，人間でいう体形に相当する車両プロポーションを決める基本設計領域や，さまざまな分野のエンジニアとの妥協のない共創活動を行い，実現した。

Summary

Mazda's all-new 4th-generatin Roadster was developed with the aim of inheriting and evolving the 25-year-long heritage and pass it down the generations. It adopts the Mazda's latest technology, "SKYACTIV TECHNOLOGY", and the new design theme "KODO" on a full scale under the concept of "Change to Preserve", so that it can respond to the expectation of roadster fans all over the world.

The exterior design projects a human body line on the car proportion, realizing an alluring and throbbing-at-a-sight styling, while the interior is exquisitely detailed achieving a profound atmosphere that gives the urge of "getting on the move" at once. Such designs were realized through the no-compromising co-creative activities with the engineers of Architecture Design Dept. and other fields.

1. はじめに

マツダ・ロードスターは，1989年2月のシカゴ・ショーでデビューし，2014年で25周年を迎えた。2座オープンスポーツカーとしては，世界で最も多く生産されたクルマであり，その販売台数は現在も更新しており，世界中で多くのファンに支えられている。

今回，そのロードスターを4代目の新型としてデビューさせることになった。これは単なるモデルチェンジを越えた，これまでの25年の歴史を継承し，10年後もロードスターファンとの絆を保つための，実は「歴史的な大仕事」であった。

今日の自動車を取り巻く環境は，時代とともに刻一刻と変化している。その中で，本来クルマが持っていた，いくつかの本質的な魅力さえも時に失われていくことがある。とりわけLight Weight Sports car（以下LWS）は，全うなスポーツカーとしての性能を担保するための凝った設計を要求されながら，同時に手頃な価格を維持する必要があるため，時代の景気に極端に左右されやすく，過去にもたびたび現れては衰退するという歴史を繰り返してきた。誰もが一度乗れば「楽しい！」と肌で感じる魅力を備えていながらも，時代に風化されやすいタイプのクルマである。

しかしマツダは，これまでロードスターを支持していただいた多くのファンの期待に応えるため，それに挑戦した。

*1　デザイン本部
Design Div.

この開発に当たって，開発思想の大きな柱となったのが「守るために変える」という合言葉である。守りたいものとは，走る歓びであり，クルマを所有するという根源的な幸せである。それを守るためには，時代の風化に対抗する変革が必要であり，だからこそ「変える」必要があった。それはデザインにおいても全く同じことが当てはまった。

幸いにも，現在のマツダには「SKYACTIV TECHNOLOGY」と「魂動」デザインがある。この歴史的な大仕事を行うに十分な素養が揃っていた。

本論文では，それらの素養を十分に活かした，4代目ロードスターのデザイン開発プロセスの紹介とともに，そのデザインの魅力について述べる。

2. デザインコンセプト

2.1　The Roadster，心ときめくデザイン

「誰もが一瞬で心ときめくようなデザイン」，それを見るだけで心が躍り，座るだけで笑みがこぼれ，今すぐオープンにして走り出したくなる。そして歳月とともにかけがえのない存在になっていく。そうしたロードスターならではの歓びをこれまで以上に純粋に表現することを開発のねらいにし，「The Roadsterを創る」というコンセプトワードで示し，デザイン開発をスタートさせた。

それを実現するために，乗る人の姿が引き立つ美しいプロポーションを体現するとともに，デザインテーマ「魂動」（Fig. 1）を更に深化させ，オープンカーならではの気持ちよさを堪能できるデザインを追求した。

具体的には，主に次のような開発に取り組んだ。

- ドライバーの姿が引き立つ美しいプロポーション
- 「魂動」デザインの更なる深化
- 日本の感性を象徴しアーティスティックに表現したボディー曲面
- クルマの内と外の境界を感じさせないインテリア
- タイトで運転に集中できるコックピット

Fig. 1　KODO Design Theme

2.2　「魂動」デザインの深化とロードスターらしさ

これまでのロードスターは，25年の歴史の中で「ロードスターらしさ」を想起させる独立した記号性を培ってきた。新型ロードスターでも，その継承の期待が大きいと想像したが，一方では，マツダのブランドアイコンとして，「魂動」デザインのファミリーである必要も感じていた。

そこで新型ロードスターでは，それらを両立することを当初からの目標とした。ロードスターらしさを追求すると，実は魂動の深化につながる。そう言い切れる答えを見つけ出すことをゴールとし，その答えを「シンプルで明快なイメージ」と「情緒的で表情豊かなイメージ」という，一見相反する要素の両立だと考え，ここに到達するまではデザインの完成と見なさないという，高い目標を掲げてデザイン開発に取り組んだ（Fig. 2）。

以下にその具体的なデザイン手法について述べる。

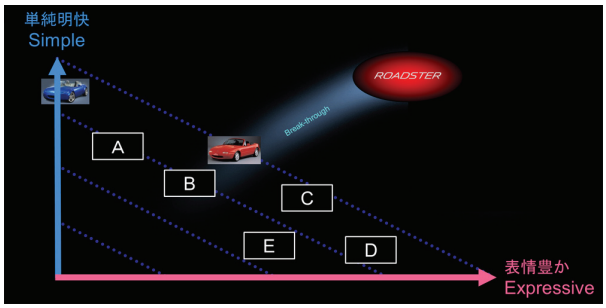


Fig. 2　Design Target Map

3. エクステリアデザイン

3.1　均整のとれた教科書のような LWS プロポーション

人とクルマが一体となって走りを楽しむLWSらしさと，乗員が外から見えるオープンカーとしての美しさを追求するため，むしろ人が乗っているときが格好いいと思えるエクステリアデザインの実現を目指した。そのためには，前後ホイール間における乗員位置の適正化と，それを合理的に包み込むキャビン位置の設定，またそれら全体が均整のとれた基本プロポーションを持つことが不可欠であると考えた（Fig. 3）。

その実現のために，デザイナーとエンジニアが一体となって，全体プロポーションを徹底的に見直し，前述に加え，ホイールベース，前後オーバーハング，タイヤ径といった基本設計を磨き上げた。その検証に役立ったのが，デザインの主要要素を入れずに，全体プロポーションのみを表現した，実物大「プロポーションモデル」である。これにより，プロポーションを決定付ける重要な設計要件についての協議が活発化し，基本設計に反映することができた。その結果，極めて短く低いフロントオーバーハングと，従来車比で約70mm後方に配置したコンパクトなキャビンという，流麗で存在感のある，新型ロードスターの基本骨格が出来上がった（Fig. 4）。

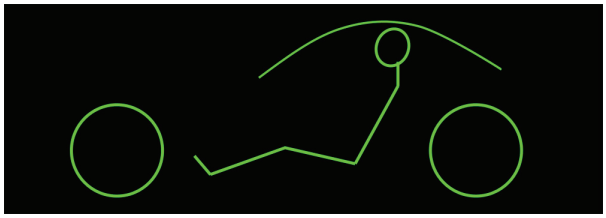


Fig. 3　Proportion Principle

Fig. 4　Proportion Model Study

3.2　開けても閉めても美しい姿

正統派LWSを名乗るべく，オープン時のルーフの納まりの良さ，スタイルの美しさはもちろん，クローズド状態でのルーフやキャビンの端正な姿を目指した。短いリヤオーバーハングの中で，トランク容量と両立する幌の格納スペースを確保するのは非常に困難だったが，リヤデッキ高を上げてしまっては，ボンネットフードからの延長線上にリヤデッキのラインが通る，オープンスタイルでの重要なシルエットが実現できない（Fig. 5）。そのために，コンパクトに格納できる幌構造の新開発をはじめ，さまざまなエンジニアリングの成果を得て，低く短いリヤデッキにルーフを納めることに成功した。

また，丸味を帯びたスムーズなルーフ形状と優れた空力性能の両立を実現するため，クローズ時のルーフ後端を僅かに下げるとともに，平面形状で側面後方を内側へ絞り込み，キャビン全体を空力特性の良い「ティアドロップ形状」に近づけた。これによってキャビン後ろ側の気流は，よりスムーズに後方へ導かれ，高い空力性能の実現に寄与している（Fig. 6）。また，良好な前後リフトバランスを保つために，チンスポイラーに開口部を設けてフロントの沈み込みを抑え，リヤの浮き上がりを抑制する新しいアイデアも採用している（Fig. 7）。

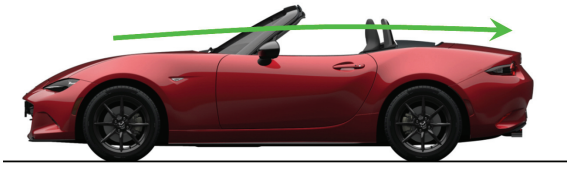


Fig. 5　Side View with Opened

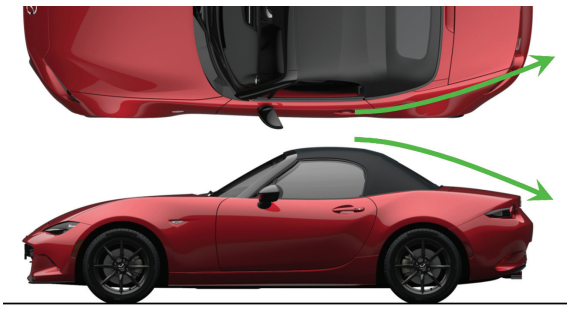


Fig. 6　Side View with Closed

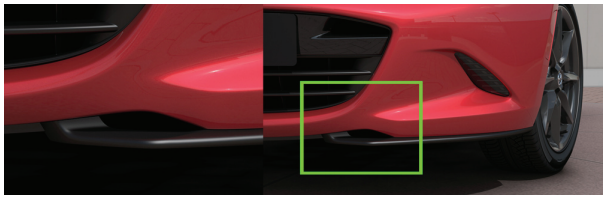


Fig. 7　Chin Spoiler

3.3　魂動デザインの深化

10年以上の永きにわたってクルマに愛着を持ち続けるオーナーが多いロードスターの特性も考慮し，「魂動」デザインを更に深め，経年に耐え得るデザインを目指した。具体的には，「魂動」デザインの大きな特徴であるスタンスの良さを極限まで追い求めるとともに，ボディーの面表現にどこまでもこだわり，アーティスティックな造形を目指した。

（1）圧倒的なスタンス表現

LWSに求められるスタンスの良さとは，地面をしっかり捉える安定感と，小気味よくクルマの向きを変えられそうな踏ん張り感を，決してクルマを重く見せずに表現することである。そのために，前後オーバーハングを限界まで切り詰めた上に，タイヤ上部を覆うボディーのボリュームをそぎ落とし，フロントにもリヤにも，低くワイドな力強い台形フォルムを与えた。また，小さなロードクリアランスと水平に通ったサイドシル下部の黒色のフィンで，路面に張り付くような安定感を表現した。それら全体で，低く構えて前後左右へ俊敏に駆け出そうとする，瞬発力も感じさせた（Fig. 8）。

Fig. 8　Enhance of Stance

（2）アーティスティックな面表現

「魂動」デザインでマツダが追求してきたダイナミックに変化するボディー面の造形美を，スポーツカーならでは

の立体的なフォルムとして昇華することを目指した。クレイモデラーの職人技が生み出す，思わず触れてみたくなる精妙な曲面変化と，美しいリフレクションを持つボディーを，工業製品とアートとの融合を希求する「魂動」デザインの真骨頂として高い完成度で具現化した（Fig. 9）。

それに加えて，日本文化の土壌が育んだ，書道や武道にも通じる「力の集中と拡散」のリズムの美しさを，クルマのボディーに表現することにも挑んだ。

ヘッドランプからフロントフェンダーを経て後方へと向かう特徴的なキャラクターは，フロントフェンダーピークでいったん集約され，そこから拡散しながらリヤフェンダーに至り，そこで反転して駆け上がると，リヤフェンダーピークで再び集約されたあと，クルマの後方へ拡散しながら一気に抜けて行く。

この表現には，筆を操りながら力とスピードによって線の太さや質感をコントロールし，力の「ため」と「抜け」によって，一つのグラフィックを創り出す，東洋の「書」の精神を反映させた。西洋の美意識とは異なる，日本独特の美学の神秘性をボディー造形に込め，「魂動」デザインの新たな可能性を表現したものである（Fig. 10）。

Fig. 9　Alluring Body Surface

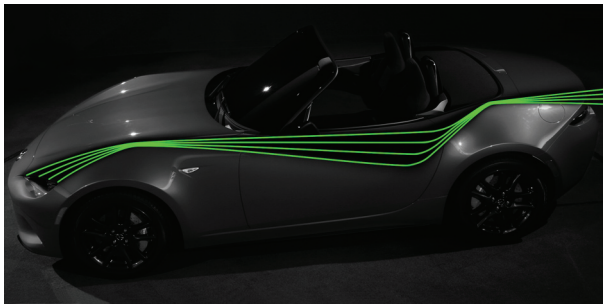


Fig. 10　Rhythm of Tense and Speed

3.4　フロントデザイン

前述のプロポーションモデルを活用したデザインスタディの結果，美しくバランスの取れたプロポーションを実現するためには，フロントオーバーハング部分を極限まで切り詰め，低く短く作ることがポイントであると分かっていた。

フロントノーズに関しては，SKYACTIV パワートレイン採用によるエンジン搭載位置の後退や，アクティブボンネットが可能にした歩行者保護性能等の向上によって，高さそのものを低く抑えることができた。しかし最大の難関はヘッドランプユニットの格納である。その解決策として，十分な発光量を持ちながら，光源の発熱量が小さく，ユニットをコンパクトに作れるLEDを採用した。

その結果，前述の低く短いオーバーハングが実現し，また小さいスペースで成立できるように，ランプ外形を薄くスリークな形状にした。

また，ランプの奥にはペスと呼ばれるプロジェクターランプユニットがあるが，それを「眼球」に見立てて全体をデザインした。見る角度によって目の奥の「瞳」が表情を変える，印象的な顔立ちを造ることができた。これは，初代ロードスターのリトラクタブルヘッドライトが持っていた，表情を変える「目」からヒントを得たもので，オーナーに深い愛情を持って迎えられることを願ってデザインした（Fig. 11）。

マツダの新世代商品に共通のシグネチャーウイング（Fig. 12）は，アッパーグリルを持たないスポーツカーでは省略し，そのニュアンスのみを，ヘッドランプへ走るバンパー上のシャープなキャラクターラインと，ランプユニット内側で点灯するLEDポジションランプの発光ラインによって形造り，シンプルなブランド表現にした。
またバンパーコーナー部には，海外向けにデイタイムランニングランプとなるLEDの補助ランプを「ハ」の字型に配し，安定感のあるスタンスを強調した（Fig. 13）。

Fig. 11　Lamp Design

Fig. 12　Signature Wing

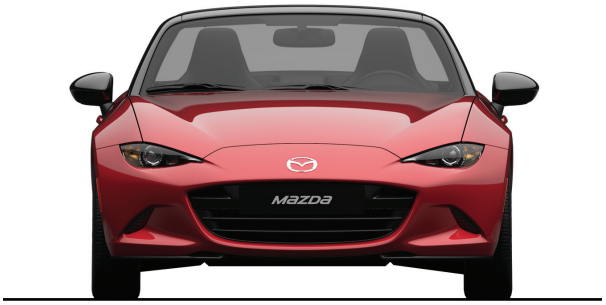


Fig. 13　Front View

3.5　リヤデザイン

後続車に追い越された後，あるいは後方から追尾される時など，多くの場面で長く見るのが実はリヤビューである。また，動物のヒップに例えられるなど，リヤエンドは自動車好きが愛着を感じるところである。したがって，いつまでも眺めていたくなる魅力的な表情をリヤに与えることを目指した。

両サイドを強く絞り込んで角をなくしながら，リヤフェンダーを張り出した量感豊かな造形に加え，丸型のテールランプを，できるだけ中央に寄せて配置することで，全体としてタイトに引き締まった印象を作った（Fig. 14）。

ライセンスプレートはバンパー下部に取り付け，トランクエンド面とバンパー面の連続性を保つようにした。またキーシリンダーを廃止し，オーナメント以外の部品が目に入らない，すっきりしたリヤデザインにした。

テールランプには，初代ロードスターから継承する丸型モチーフを採用しながら，上下幅を極限まで薄くコンパクトにし，潔いデザインとした（Fig. 15）。

Fig. 14　Rear View

Fig. 15　Tail Lamp

3.6　ホイールデザイン

LWSの性能を十分に発揮する剛性と軽さから生まれる機能美を優先し，これまでのマツダのホイールとは少し違う，新しいキャラクターを表現した。

16インチ／17インチどちらのホイールもセンターハブを造形的に強調しながら，視覚的にも機能的にも駄肉を削いだ形状とした。軽量設計により，センターハブのホイールナットは従来車の5穴から4穴としたことから，ハブとリムをつなぐスポークは応力と剛性に無理のない8本とし，冷却強化鋳造という新工法を採用し，アルミ素材の強度を高めながらリムの肉厚を薄くするなど，軽量化と機能美を両立するデザインにした。

ホイールカラーには，精悍でスポーティなガンメタリックを16インチ／17インチともに採用した上，16インチにはノーマルなシルバー，17インチには高品質でエレガントな印象の高輝度シルバー塗装を設定した（Fig. 16）。

Fig. 16　Wheel

4. インテリアデザイン

4.1　内と外が連続したオープンカーらしい空間構成

ドアを開けて乗り込んだ瞬間から「これぞオープンカーだ！」とオーナーの心を高揚させるコックピットをデザインし，スポーツカーという非日常的な空間を演出することに注力した。

まず，クルマの内外の境目をなくすことで，常に外界とつながっているという開放感と，クルマのボディーとの一体感を同時に感じ取れるようにした。オープンにすれば「窓ガラスがない」状態が標準であるオープンカーの魅力を最大限に高める工夫として，ボディーの意匠をドアトリム上部まで回り込ませ，ガラス位置で切り替えられていた内外の空間を融合し，季節や時間，走行によって移り変わる景色がインテリアにも映り込むデザインにした（Fig. 17）。

また運転席から見たときに，自分の肩口のドアトリムからフェンダーピークまでが，遮るものがなく一直線につながっている感覚を作ることで，クルマを操る「手の内感」を増強した。更にフェンダーピークを前輪キャスター角の延長線上に置き，ボンネット上に設けた谷間は前輪キングピンの延長線上に通し，操舵輪である前輪を自分の身体の一部のように動かしていることが視覚的に実感できるデザインにした（Fig. 18）。

Fig. 17　Open Feeling

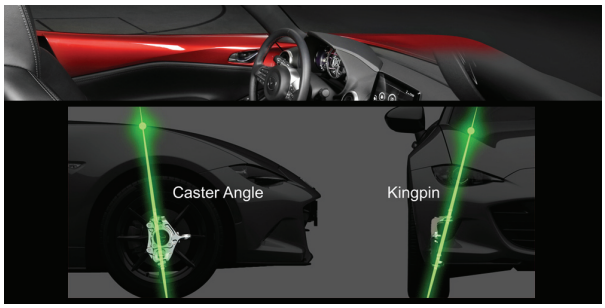


Fig. 18　Arm to Wheel

4.2　左右対称のコックピット

ドライバーの脚に正対するペダルレイアウトの設計思想と統一感を持たせ，コックピットに一本の軸を通すことを意識した。ドライバーの真正面に小さな円形エアバッグがあることで，軸を感じるステアリングホイールにし，その向こうに垂直ゼロ指針の精緻な三連メーターを配置し，丸型空調ルーバーを左右対称に，かつ同じ角度でドライバーへ向けて配置した。この中心軸は，座面からシートバックへと中央を縦に貫くステッチのラインにも一致し，まるでドライバーの背骨のように一直線につながっている。この視覚的なノイズが少ないタイトなコックピットに包まれ，ドライバーは正確な運転操作に集中できるよう配慮した（Fig. 19）。

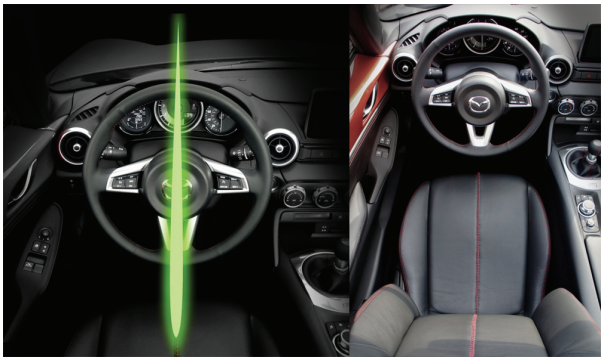


Fig. 19　Cockpit

4.3　インストルメントパネルデザイン

ドライバーを中心に据え，前後方向の軸を通したコックピットとは対照的に，運転席以外のエリアでは水平基調のデザインを採り入れ，クルマの挙動を正しく感じられるようにした。

フロントウインドシールド位置の後退により，ダッシュボードの前後寸法が短くなったため，ボリュームが増した印象にならないよう，全体をスリムにし，前後方向に抜けよい翼断面型の薄い形状にした。これは特に助手席の開放感や足元の広々感に寄与しており，運転席から見ても軽くシンプルなLWSらしいデザインである。

また低く抑えたダッシュボードには，メーターセットや7インチセンターディスプレイを適切な位置にレイアウトした。センターディスプレイは，アクセラとデミオでも採用しているもので，前方視界を全く遮らない高さに配置し，突出感の少ないデザインにした（Fig. 20）。

視認性を高めた三連メーターセットには，大型のタコメーターをセンターに置き，垂直ゼロ指針で心地よい緊張感を強調した。

ドライバーが操作するデバイスは，すべてピュアな美しさを備えた機能的な形状にし，手に触れた感触や操作感にも，スポーツカーならではのテイストが感じとれるデザインにした。

そして，ドライバーがステアリングホイールを握り，球形のシフトノブに手をかけ，一つ一つの感触を楽しみながら自然に手を伸ばす位置に，エンジンスタートボタンを配置した。クルマの始動を，「エンジンに火を入れる感覚」のスポーツカーらしい儀式として，ドライバーに堪能してほしいという想いを込めた（Fig. 21）。

また，ハイグレード車のダッシュボードロアーパネルには，ドアトリムセンター部と揃えた，ステッチ入りのソフト素材を使用し，品質感を高めると同時に，タイトな室内での心地良さを演出した。

Fig. 20　Instrument Panel

Fig. 21　Detail

4.4　ドアトリムデザイン

ドアトリムのアッパーパネルは，ボディー外板と同色にし，造形テイストもボディーからの延長で作り込み，オープン走行での外の世界とのつながりを存分に感じられるデザインにした。

トリム全体の造形は，車高が低くドアの上下幅が少ないスポーツカーならではのドア形状を活かし，彫りの深い断面形状で，前後方向への動きを強めた面構成の，ダイナミックなデザインにした。

ドアアームレストとトリムセンター部には，「タイトなコックピットを持つLWSだからこそ，乗員の体に触れる部位はソフトな素材で作る」という，往年のスポーツカーづくりの様式美を感じる材質にした。そのソフトな素材感をより心地よく愉しめるよう，アームレストとトリムセンター部には飾りステッチを施した。

サテンクロームのインナードアハンドルは，ボディーカラーのアッパーパネルの中に収め，ともに硬い質感でコーディネートした。これにより，ドアトリム上部は硬く，下部は柔らかいという素材感の違いを際立たせ，シンプルで洗練されたコーディネーションのドアトリムにした（Fig. 22）。

Fig. 22　Door Trim

4.5　ステアリングホイールデザイン

乗り込んだ瞬間にLWSらしさを感じさせるシンプルでコンパクトな外観と，軽やかなステアフィールを予感させる細身のグリップや，操舵の邪魔をしないスポーク形状など，操作したくなるステアリングホイールのデザインを追求した。

特に，グリップ保持を妨げないよう極細に設計した3本のスポークは，それぞれの太さを均整のとれた美しいバランスにし，人が持つ根源的な美的感覚に訴える造形にした。

また，ワインディング走行時にクイックに操作でき，指を滑らせやすいグリップとリムの形状も，丹念に造り込んだ。

グリップは赤のステッチを施したブラックレザー，スポークはサテンクロームのカバーをし，クォリティの高さを表現した。また，構造体を素直に表現した，プリミティブなデザインとしている。

スポーク上のスイッチは，素早い操作時に障害にならないよう，スポーク内に埋め込んだ形にし，周囲のサテンメッキ部とのコンビネーションによってモダンで洗練されたデザインにした（Fig. 23）。

Fig. 23　Steering Wheel

4.6　シートデザイン

LWSのコンパクトなボディーにマッチし，オープン時に上部が露出することを意識して，スリムさとホールド感の両立を図ったシートデザインにした。

また，クッションとシートバックにネットを用いた新開発の構造に合うよう，表面はシンプルな意匠とし，人体に沿う美しいカーブを描く縦基調のプリーツパターンにした（Fig. 24）。

布シートでは，ラバーのような艶感としっかりした立体感をグリッド調のパターンで表現した，新しいファブリックを採用した。これにより，LWSらしい軽くて機能的なイメージと，日射しを直接受けるオープンカーならではの表情をつくり出し，新しい質感を実現した。立体感のあるラバー状の粒で身体をしっかりとグリップし，身体を包み込むようなネットシートの特性とともに，ドライバーとシートとの一体感をより高めることをねらった。

シートバックとクッションの中央を貫く3本のステッチは，シート形状の豊かなカーブを際立たせ，その陰影によって素材の表情に変化を作り出した（Fig. 25）。

また革シートでは，シート中央の縫い継ぎ部分に，2013年のミラノデザインウイークにマツダが出品して大きな賞賛を集めたデザインテーマ魂動を体現したChair（Fig. 26）と同じクロスステッチ（Fig. 27）をあしらい，左右の革をしっかりと引き締めて立体感を高めながら，マツダの誇る高いクラフトマンシップを表現した。

魂動のダイナミックな造形の粋を極めたモチーフと，マツダの匠の手による仕上げ品質を活かした，美しいスポーツカーシートを生み出した。

Fig. 24　Seat Shape

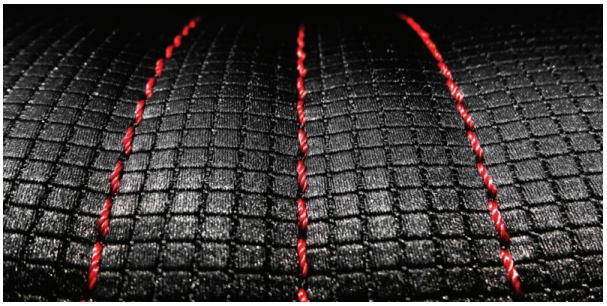


Fig. 25　Detail of Fabric

Fig. 26　Chair of KODO Design

Fig. 27　Stitch of KODO Design

5. カラーデザイン

5.1　ボディーカラー

ブランドカラーであるSoul Red Metallicを中心に，白・黒・シルバーというはっきりとした色合いで，ロードスターの小気味よさを最大限に表現した。

硬質で軽量なハイテク素材をイメージした新色のCeramic Metallicは，新しいLWS誕生の幕開けを予感させる先進性があり，生まれ変わったロードスターを象徴する色として開発した。この色には緻密で塊感のある，ややマットな艶感を持たせており，それによって晴天や曇り空，夕日，夜景などのシーンで見映えが劇的に変化するのが特徴であり，ボディーのダイナミックな造形ともマッチし，新しい感性を刺激するカラーとして期待できる。

そのほかにArctic White，Crystal White Pearl Mica，Blue Reflex Mica，Meteor Grey Mica，Jet Black Micaという多様な色を揃え，ロードスターをよく知るお客様から，これから出逢う若い世代まで，幅広い年齢層に興味を持たれるボディーカラーのバリエーションにした（Fig. 28）。

Fig. 28　Body Color

5.2　内装カラー

内装にはグローバルで2種類のカラーコーディネーションを用意し，グレードによって加飾パネルやステッチ色にバリエーションを設けた。Black内装はピュアなスポーティさを表現し，Sport Tan内装はオーセンティックな味わいと華やかさを演出した（Fig. 29）。

いずれのコーディネーションにも，メッキパーツには少し艶を落としたサテンクロームを使用した。たとえば，ステアリングホイールのスポーク，シフトノブのグリップ，スターターボタンのリング，コマンダーコントロールなど，手で操作するデバイスへ視線を誘導する部位と，シフトブーツパネル，インナードアハンドル，センターディスプレイ外周部など，剛性感を表現する部位にだけ使用し，華美な装飾を排した潔い空間作りをした。

Fig. 29　Interior Color Coordination

6. おわりに

新型ロードスターの開発チームは，当初の志を遂げ，見た瞬間に心ときめき，乗った瞬間に納得できる，後世に残すべきスポーツカーを造り上げたと思う。

それを可能にしたものが，マツダの最新技術「SKYACTIV TECHNOLOGY」と「魂動」デザインであり，それらの素養が揃った今だからこそ，抜本的にLWSの理想形を描くことができた。

その中で我々デザインチームは，ボディーやインテリアの意匠に加えて，部品間の合わせ品質等，造り込み領域を含めた「目に見えるもの全ての責任を担う」という決意を持ちながら，プロダクトとしての完成度にこだわった。

このような開発チーム全員の努力が実ったものと思われるが，2014年9月のワールドプレミア以降，世界中で大きな反響を呼び，幸いにも，これまでロードスターを愛してくださった多くのファンを中心に，高い評価をいただいている。これは，近年のマツダのクルマ造りへの共感も含めて，ロードスターの進化の方向が評価されていることと思う。

これまでロードスターは，多くの熱狂的なファンに支えていただき，マツダ車の中でも特別な存在だった。これからはそれに加えて，マツダブランドの方向を示すアイコン的な役割を期待されているし，そのことをおそらくファンの方たちも喜んでくださると思う。

走る歓びをいつの時代も提供し，そのことをお客様から信頼してもらえるブランドにマツダがなることと，その象徴として，ロードスターが多くのファンの方に長く愛されることを願ってやまない。

■著　者■

中山 雅

特集：新型ロードスター

18

新型ロードスターのパッケージング
Package of New Roadster

中村　幸雄*1　望月　政徳*2　甲原　靖裕*3
Yukio Nakamura　Masanori Mochizuki　Yasuhiro Kohara
十亀　克維*4　大野　晃史*5　松山　寛尚*6
Katsumasa Sogame　Akifumi Ohno　Hirohisa Matsuyama

要　約

ロードスターは，人とクルマが心を通い合わせて思いのままに駆ける「人馬一体」の走りを軸に，このクルマを通じて過ごす充実した時間によって生まれるさまざまな楽しみ「Lots of Fun」を四半世紀にわたって追求してきた，FRライトウエイトオープンスポーツである。

4代目となる新型ロードスターのパッケージ開発に当たり，人がクルマを楽しむ感覚の進化として掲げた「手の内・意のまま感」，「軽快感」，「開放感」を極めるというを3つの「感」をテーマに取り組み，人中心のコクピット，車両サイズのコンパクト化による軽量化と運動性能の進化，気持ちの良いオープン走行のための造り込みの3つを実現した。また，このクルマを楽しみ続けていただくために，日常ユースでの実用性にも着目し，市場でニーズの高い積載物の収納や使い勝手の良さを織り込んだ収納性を具現化した。

Summary

The new Mazda Roadster is a lightweight open-top FR sports car, through the development of which Mazda has pursued “Lots of Fun” that comes from quality time spent with a car over the last quarter century, with the focus placed on “Jinba-Ittai”, oneness between the driver and the car, and faithful response to the driver’s will.

In developing the package of the fourth model of Mazda Roadster, we put a great effort into achieving the three evolved forms of “sensations” for driving pleasure: faithful response to driver’s will, crispy and lively motion, and a sense of openness. By so doing we realized a human-centric cockpit, reduced weight and advanced kinematic performance through downsizing, and craftsmanship that offers pleasant open driving. To continue to deliver fun-to-drive moments to the users, we also focused attention on practicality for daily use to provide ease of use along with a large luggage storage capacity with high market needs.

1. はじめに

1989年のデビュー以降，ロードスターは“だれもがクルマの運転を楽しめる”というクルマ創りの理想にチャレンジし続け，25年の長きにわたり世界中で熱狂的なファンを創出してきた。その中心にある「人馬一体」の思想は，いまやマツダ車に共通する考え方にまで深化した。

4代目となる新型ロードスターでは，今一度，ロードスターの原点に立ち返り，人がクルマを楽しむ感覚をより純粋に研ぎ澄ませるために，「感」を極めるという開発目標を掲げ，以下の3つのテーマに取り組んだ。

① 乗った瞬間からクルマが手の内にあり，自在に操る楽しさに期待が膨らむ「手の内・意のまま感」
② 楽しさ，気持ちの良さが連成し，心まで軽やかになる「軽快感」
③ 五感を通じて心から解き放たれる「開放感」

この「感」の進化に向け，クルマとしての性能進化はもとより，人を中心に考えたパッケージングの進化に取り組んだ。本稿ではこの新型ロードスターのパッケージング進化について紹介する。

*1 商品企画部
Product Planning Dept.
*2～6 企画設計部
Architecture Design Dept.

2. パッケージの注力点

「感」の進化として掲げた「手の内・意のまま感」，「軽快感」，「開放感」の3つのテーマを具現化するために，人中心のコクピット，人が主役となる美しいプロポーションと徹底した軽量化，運動性能の適正化を実現する車両サイズのコンパクト化，気持ちの良いオープン走行のための造り込みの3つをパッケージングで徹底的に取り組んだ。

3. 「感」の進化

3.1 「手の内・意のまま感」を体現するコクピット

コクピットは，クルマを自分の意のままに操る楽しさを体現するためのもっとも大事な要素であり，クルマが手の内にあるような一体感を訴求できる乗員，操作系配置，視界の具現化を人間中心の考え方で目指した。

（1）乗員配置

パッケージの骨格を固める上で起点となる乗員配置について，クルマを自分の意志で動かしている感覚，すなわち人と車の一体感の強化をねらい，よりドライバをクルマの中央寄りに，そしてより路面に近くへの配置に取り組み，前モデルから乗員を15mm内側に，20mm下方に配置した。

具体的には，パワープラントフレームの形状最適化を中心にフロントフロアトンネル部内のレイアウトを効率化するとともに，フロントフロアトンネル部をプレス成型の限界まで深絞り化することで可能とした（Fig. 1）。

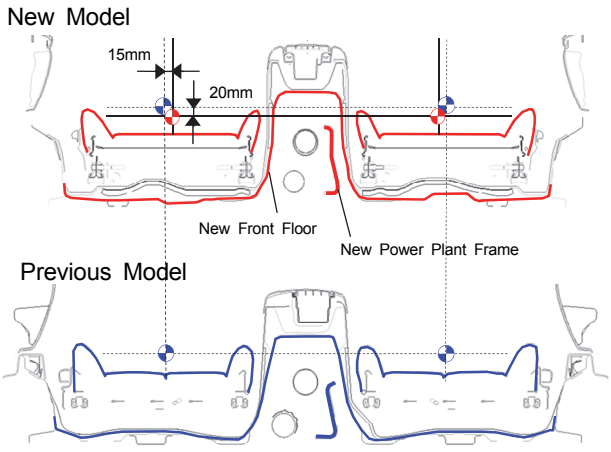


Fig. 1　Seating Position of Driver

（2）理想の操作系配置

① ペダル

ペダルは加減速をコントロールするだけでなく，安全にもかかわる重要な操作機器であり，乗員が素直な姿勢で真っ直ぐに踏めるペダル配置を目指した。

フロアトンネル部に駆動系を配置するFRモデルで，乗員を内側へ配置しつつ，乗員に対して真っ直ぐなペダル配置の実現は難易度の高い命題であったが，フロントホイールセンタとエンジンを前出しすることで実現した。フロントホイールセンタに対して，重量物であるエンジンの前出し量を最小とすることで，スポーツカーの運動性能のキーとなるヨー慣性モーメントの低減とも両立させた。

また，アクセルペダルには他新世代商品と同様に，人間の自然な足の動きに沿った操作を実現できるオルガンタイプのペダルを採用しつつ，スポーツ走行に特有のヒール&トウ操作がしやすい形状を造り込んだ。

② ステアリング，シフト

クルマを操るためのインタフェースであるステアリングホイールには，直径366mmのコンパクトな外径を採用し，スポーツカーらしいクイックな操作を可能にした。

シフトノブには，スポーツ走行時にも手のひらで確実に操作できる直径48mmの球形シフトノブを採用し，前モデル同様にステアリングからスムーズに持ち替えられる最適位置に配置した。

また，前モデルではリヤコンソールBOX内にカップホルダを配置していたのでドリンクがある状態ではシフト操作の邪魔になっていたが，新型ロードスターではカップホルダを後方化し，いかなる時もシフト操作を阻害するものがないシフトワークスペースを確保した（Fig. 2，3）。

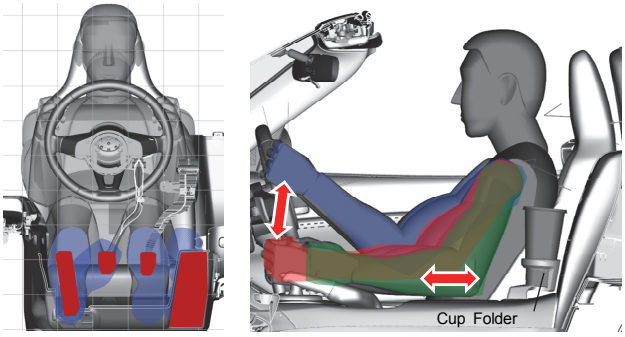


Fig. 2　Ideal Layout of Operation Unit

Fig. 3　Design of Steering and Shift Knob

（3）居住空間

前モデル同等の居住空間を確保しながら，シートリク

ライニング角を前モデルから2度拡大し，長身のお客様も好みのドライビングポジションが取れる9mmの頭上スペースのフレキシビリティを拡大した（Fig. 4）。

また，スポーツカーのように着座位置の低いクルマは，ステアリング下のレッグスペースがハンドル操作，及び乗降時に重要になる。新型ロードスターではステアリングホイールの小径化，ステアリングチルト量の拡大によってレッグスペースを最大で12mm拡大した（Fig. 5）。

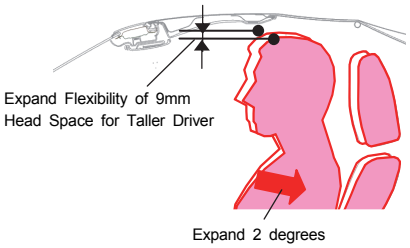


Fig. 4　Expansion of Seat Reclining Angle

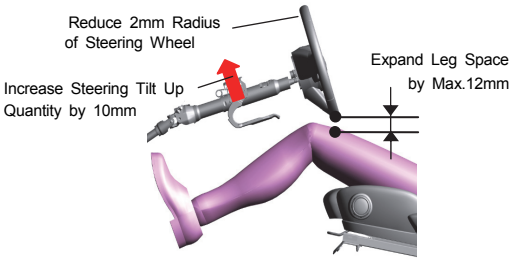


Fig. 5　Expansion of Leg Space

（4）視界

「手の内・意のまま感」において自車の周囲の情報，車両感覚，車両挙動の認知のしやすさは重要な要素であり，そのキーは視界である。市街地の狭い道や郊外のワインディングでも自在な運転を可能にする視界を目指し，特に前方視界の拡大に注力した。

① 前方視界の上下見開き角の拡大

前モデルに対して乗員を20mm下方配置しながら，ボンネット高を28mm低減することで前方下方視界を拡大するとともに，実速度と体感速度が一致しやすい前方路面の最短明視距離を実現した。

加えて，前モデルからフロントヘッダ部を77mm後方化するとともにヘッダ部の断面を縮小することで前方上方視界も拡大し，前方視界の上下の見開き角を5.5度拡大した。

また，女性のような小柄な乗員に対しては，軽量化の視点からシートリフタを採用せず，シートのスライド角を4度拡大することで，前モデルのシートリフタ最上段と同等の前方下方視界を確保した（Fig. 6，7，8）。

② 前方視界の左右見開き角の拡大

前述の乗員の内側配置と合わせて，前モデルからAピラーを57mm後方化することにより，前方視界の左右の見開き角を4.7度拡大した。

これにより，ワイディング走行時のコーナ進行先の状況を認知しやすくした（Fig. 8）。

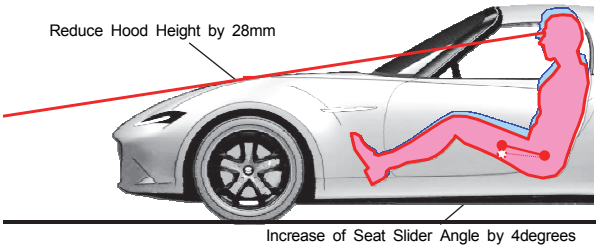


Fig. 6　Improvement of Front Down Vision

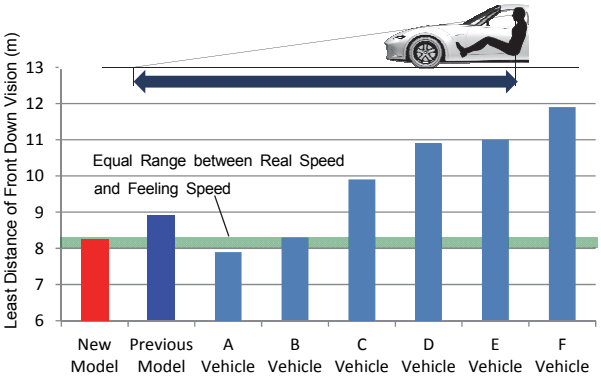


Fig. 7　Least Distance of Front Down Vision

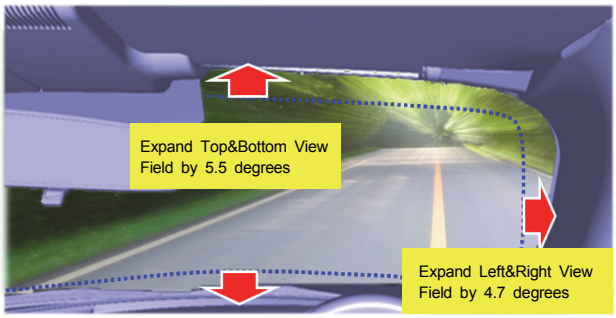


Fig. 8　Expansion of Front Vision Field

③ フロントフェンダ形状の造り込み

デザイナと協力してフロントフェンダに稜線の通ったエッジ形状を織り込むことで，運転操作に対する車両のローリング，ヨーイング，ピッチングの車両挙動の認知性を向上させた（Fig. 9）。

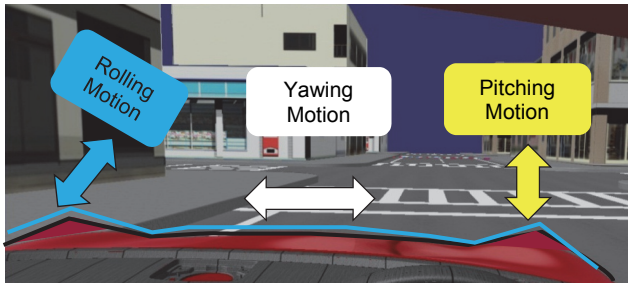


Fig. 9　Fender Forming to Recognize Vehicle Motion

3.2　「軽快感」を具現化するコンパクト化

ライトウエイトスポーツならではの軽快なドライビングフィールである「軽快感」の一番のキーは，いかに車を軽くするかである。新型ロードスターでは，前モデルに対して100kgを超える軽量化目標を達成した。この実現に向け，パッケージングでは，車両サイズのコンパクト化に取り組み，軽量化に貢献するとともに，運動性能諸元の進化を実現した。

（1）車両サイズのコンパクト化

車両サイズのコンパクト化については，乗員の居住空間は前モデル並みを確保しながら以下に取り組み，前モデルから105mm全長を短縮し，歴代モデル最短の全長を実現した（Fig. 10，Table 1）。

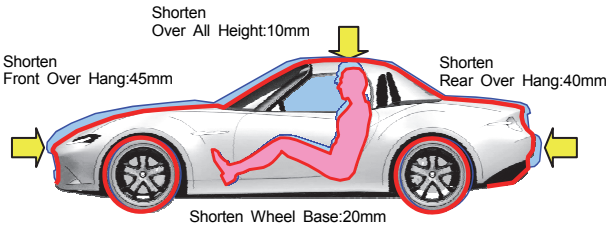


Fig. 10　Change of Exterior Dimension

Table 1　Exterior Dimension of All Roadster in History

		New Model	3rd.Model	2nd.Model	1st. Model
Over All Length	(mm)	3,915	4,020	3,955	3,955
Over All Width	(mm)	1,735	1,720	1,680	1,675
Over Oll Height	(mm)	1,235	1,245	1,235	1,235
Wheel Base	(mm)	2,310	2,330	2,265	2,265

① オーバハング短縮

フロントオーバハング短縮に向け，フロントボデーのアッパパスと，フロントサスペンションクロスメンバに衝撃吸収用のエクステンションを設定したロアパスの上下2方向に分散するマルチロードパスを採用し，前面衝突のエネルギー吸収を効率化することで，前モデルから45mmのフロントオーバハング短縮を実現した。

リヤオーバハングもリヤボデーとリヤサスペンションクロスメンバによる上下のアッパパスとロアパスの2方向に分散するマルチロードパス構造を採用し，後方からの衝撃を，リヤフレームとリヤサスペンションに分散して吸収させることで，後面衝突のエネルギー吸収を効率化し，前モデルから40mmのリヤオーバハング短縮を実現した（Fig. 11）。

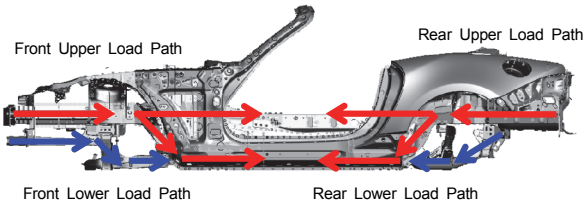


Fig. 11　Front and Rear Multi Frame Structure

② ホイールベース短縮

前述のペダルスペース確保に向けて，前モデルからフロントホイールセンタを35mm前方化しながら，リヤホイールセンタを55mm前方化することで，ホイールベースを20mm短縮した。リヤホイールセンタの前方化は，軽量化とタイヤからの横入力に対して強固な剛性の確保を両立するリヤサスペンションクロスメンバのV字型の左右メンバの採用と合わせて，フューエルタンク後部の容量確保を効率化することで実現した（Fig. 12）。

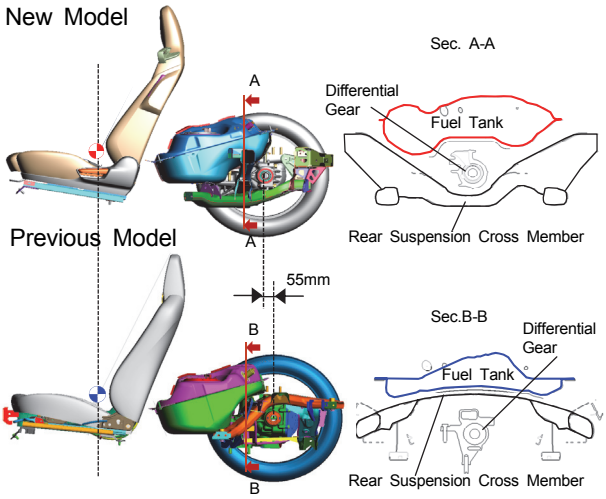


Fig. 12　Forward Rear Wheel Center by 55mm

（2）運動性能諸元の進化

車両サイズのコンパクト化と合わせて，手足の延長のように操れる楽しさの追求として，運動性能諸元の進化に取り組み，ヨー慣性モーメントの低減と低重心化に注力した（Fig. 13）。

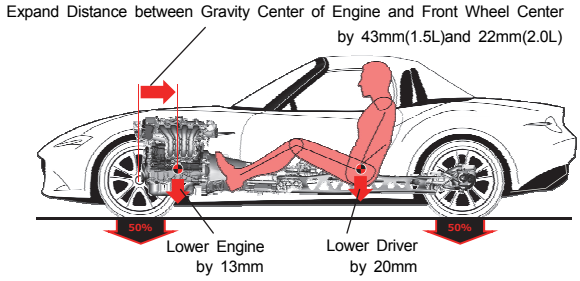


Fig. 13　Package for Evolution of Dynamic Characteristic

① ヨー慣性モーメント低減

ヨー慣性モーメントの低減としては，アルミバンパレインの採用等，車両端部への軽量材料の採用に加え，重量物であるエンジンをいかに車両重心に近づけるかに注力し，前モデル比で11%のヨー慣性モーメントの低減を実現した。

前述の乗員中心のペダルスペースの確保，SKYACTIV-Gの要である吸排気スペースの確保，そして軽量化の要であるハイマウントバックボーンフレームを中心とするボデ

ーストラクチャの理想化を妥協なく実現しつつ，エンジンを車両重心に近づけることは，非常に難易度の高い命題であったが，従来のSKYACTIV-Gからエンジンの搭載スラント角を変更することで，エンジンの吸排気スペースを確保するとともに，エンジン後部のバキュームポンプユニットを移設することで，フロントホイールセンタの35mm前出しに対してエンジンの前出し量を20mmに抑え込むとともに，エンジン長の短縮も加え，フロントホイールセンタに対する相対的なエンジンセンタ位置を前モデルから1.5Lエンジン搭載車で43mm，2.0Lエンジン搭載車で22mm後方化するフロントミッドシップレイアウトとすることで，ヨー慣性モーメントの低減に貢献させた（Fig. 14，15，16）。

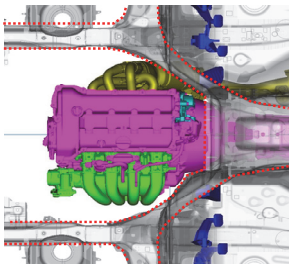


Fig. 14　Front Midship Layout of SKYACTIV-G

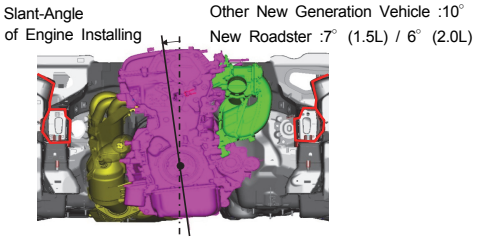


Fig. 15　Change Slant-Angle of Engine Installing

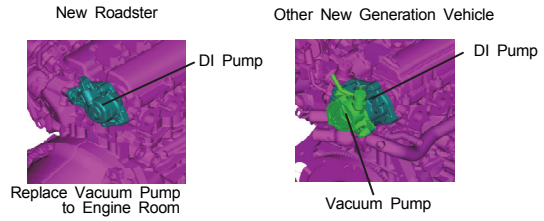


Fig. 16　Change of Engine Rear Unit

② 重心高の低減

同様に重心高の低減に関しても，乗員の下方配置に加え，重量物であるエンジンに着目し，従来のSKYACTIV-Gからオイルパンを薄型化することでエンジンを前モデルから13mm下方に配置し，前モデル比で5mmの重心高低減を実現した（Fig. 17）。

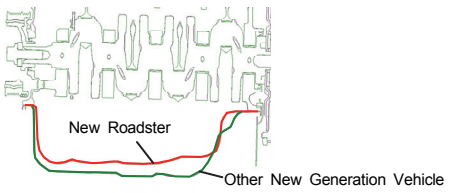


Fig. 17　Lower Oilpan Height of SKYACTIV-G

3.3　「開放感」を実感させるウインドコントロール

「開放感」の具現化としては，オープン走行の気持ちの良さとして，オープン走行時のウインドコントロールに取り組んだ。

これまでの調査や研究からオープン走行時に頭や顔に直接当たる風は不快に感じるが，胸や肩に当たる風は心地良い風と感じることに着目し，視界のところでも述べたフロントヘッダとAピラーの後方化により，頭上の風を乗員に対して高く，後方に飛ばし，頭や顔に直接当たる風や後ろからの巻き込み風といった不快な風を低減しながら，サイドウインドオープン時に心地良い風を積極的に導風することに注力し，ドアの三角窓の縮小やドアトリムの高さ，形状を造り込んだ（Fig. 18）。

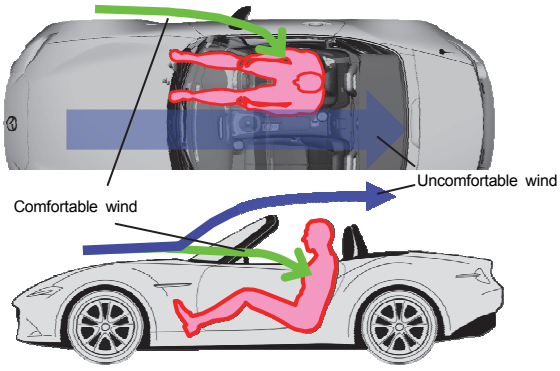


Fig. 18　Wind Control for Open Feeling

4. 実用性に着目した収納性

荷室，室内の小物入れについては，実用性に着目し，市場でニーズの高い積載物の収納と日常ユースでの使い勝手に注力した。

（1）荷室

新型ロードスターでは，リヤオーバハングを短縮しながらも，前モデルに対して荷室の深底部の前後長を35mm，深さを36mm拡大することで，近年，ニーズの高い旅客機の機内持ち込み最大サイズのキャリーオンバッグの積載数を前モデルの1個から2個に向上させた。これにより大人2人の国内旅行はもとより，海外への小旅行もカバーする荷室を実現した（Fig. 19）。

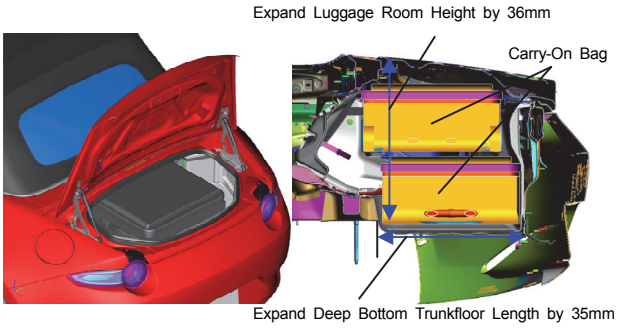


Fig. 19　Two Carry-On Bags in Luggage Room

（2）室内小物入れ

軽量化とシンプルなインテリアデザインを追求しつつ，使い勝手の良さにこだわった室内小物入れを造り込んだ。

シフトノブの前方にはUSB端子などの外部接続ハブとスマートフォン等の携行品が置けるオープンスペースを設けた。リヤコンソール部には，サングラスなどを収納できるコンソールボックスを，シートの間には貴重品等を入れられる鍵付きのコンソールボックスを設定し，オープン状態のまま駐車するようなシーンのセキュリティも確保した。

また，カップホルダは脱着式とし，一人，二人と乗るシーンに応じて取り付け位置を変更できるようにした（Fig. 19，20）。

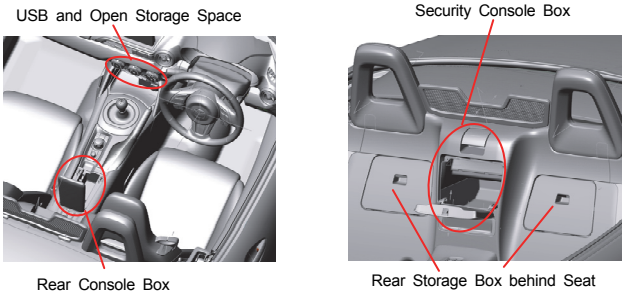


Fig. 19　Interior Storages

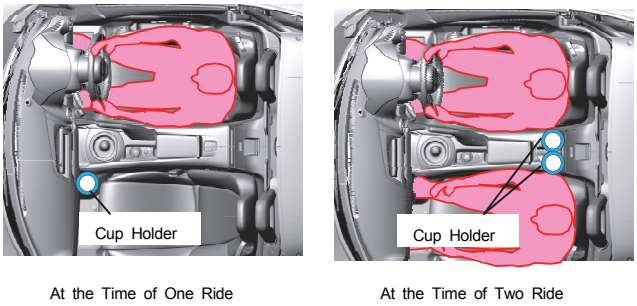


Fig. 20　Cup Holder Location

5. おわりに

新型ロードスターは，初代モデルから追求し続けてきた人馬一体の思想の深化として，人中心のクルマ造りに取り組み，クルマを楽しむ感覚を徹底して研ぎ澄ませることで飛躍的な進化を遂げたと自負している。

四半世紀もの長きにわたり，ロードスターを愛し，支え，育んでいただいたお客様に感謝を込めて，この新型ロードスターをお届けするとともに，今後も更なる進化に向けたクルマ造りに邁進する所存である。

■著　者■

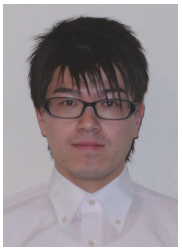
中村 幸雄

望月 政徳

甲原 靖裕

十亀 克維

大野 晃史


松山 寛尚

特集：新型ロードスター

19 人馬一体　新型ロードスターのパフォーマンスフィール
New Roadster Performance Feel

兼為　正義*1　八木　淳*2　佐々木　貴洋*3
Masayoshi Kanei　Atsushi Yagi　Takahiro Sasaki

要　約

パフォーマンスフィールとは，人馬一体を体現させるダイナミック性能の一つの要素である，アクセル操作に対する加速度やサウンドの反応，操作や実際の車の動きに対する人間の感じ方を示す指標のことをいう。

25周年を迎えたロードスターの4代目となる新型モデルでは，ロードスター伝統の“人馬一体”感と“Fun to Drive”といった，お客様が“乗って楽しいと感じる”感性の訴えるパフォーマンスフィール（走り感）の更なる進化に取り組んだ。本稿では，パフォーマンスフィールの核となる加速度の作り込みについて，新型ロードスターが実現できた性能を，定量データを交えながら解説する。

Summary

Performance feel is one of the elements of the dynamic performance that embodies “Jimba Ittai” and the indicator of human perception to acceleration/sound response and car operation/movement.

In the 4th generation Roadster, we worked on further evolution of performance feel that provides our customers with driving pleasure and Jimba Ittai. This paper introduces the acceleration performance and the core of performance feel achieved by new Roadster with qualitative data.

1. はじめに

新型ロードスターは，初代ロードスターから脈々と受け継いできた軽快感あふれる走りをドライバが感じられるよう，理想のエンジン特性を描き，高回転まで軽快に吹き上がるエンジン特性と，軽量化ボデーを達成し，前モデルをしのぐ走る喜び・楽しさを実現した。

パフォーマンスフィールは，加速フィール，ペダル操作フィール，エンジンサウンドフィールなどの感性を刺激する各特性が絡み合う性能であり，本稿ではその核と考えている加速度特性の技術と性能について紹介する。

2. 新型ロードスターが目指したもの

2.1 新型ロードスターのこころざし

ロードスターは一貫して軽快さを感じる走りをこころざし，初代モデルの1.6Lから，1代目1.8L，2代目2.0Lへと排気量アップして一層の軽快さと，高い加速能力を支える安心感が得られるようパフォーマンスフィール性能を進化させてきた。

新型ロードスターは，3代目で進化させた，より安心に運転できる軽快さの感覚を残しながらも，初代で築いたまさにヒトとクルマが完全一体となった軽快さ（軽さ）が感じられることを目指した。たとえば，アクセルを踏んで車を動かし始める瞬間に漠然と「軽い」とか「重い」といったフィーリングを感じることはないだろうか。それは自分が車から降りて車を押してみた時に分かる車の軽さと同じようなものである。車を押した時に力をいれて押さないと動かない車ではなく，力を入れなくても簡単に車が動き出す感覚を指す。新型モデルでは，原点に戻り，アクセルやステアリング操作に対し，遅れなく車両の動きに伝わり，反応することの気持ち良さをドライバに感じてもらいたい。その思いを実現するためにロードスター用に新開発したSKYACTIV-G 1.5エンジンを搭載し，車両の軽量化と組み合わせて，環境性能も大幅に向上しつつ，現行モデルをしのぐ軽快感あふれるパフォーマンスフィール性能を目指した。

*1～3　走行・環境性能開発部
Drivability & Environmental Performance Development Dept.

2.2　軽快感あふれるパフォーマンスフィールとは

実現したい軽快感は，アクセル操作に対して，エンジンの反応が遅れることなく車両に伝わり，動き出しからイナーシャを感じることなくドライバの意図どおりに車が動くこと，次にアクセルを踏み続けることでエンジンが軽く回り，最高回転数までを気持ち良く使いきれる加速性能である。

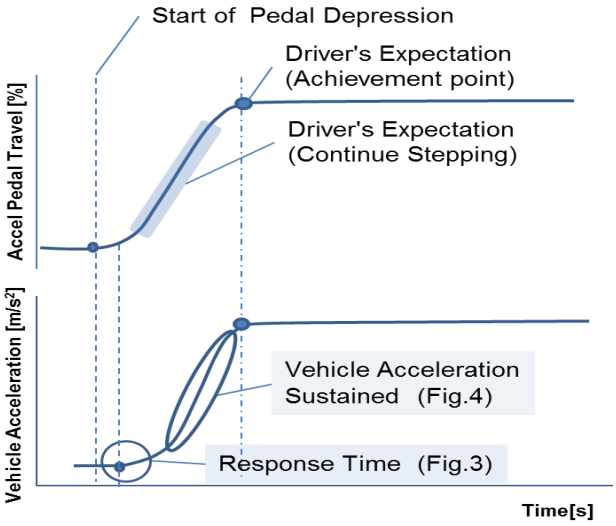


Fig. 1　Basic Concept of Driver's Expectation and Reaction

Fig. 1のイメージ図は，ドライバが加速度を要求する時の狙いを示し，アクセル操作と同じタイミングに感じる応答時間と，遅れなく思ったとおりと感じられる加速度の強さ，そして反応した後の加速度がスムーズに狙いどおり扱える，3つの要素が重要である。イナーシャを感じさせない応答目標を実現するには，日常的なアクセル操作場面でこの反応の最適最早タイミングを実現させ，更に最早で反応させながらも加速度反応の強さを自在に操れる応答性能が必要になる。

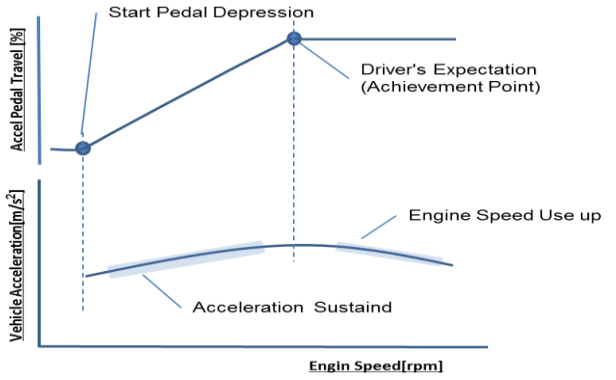


Fig. 2　Acceleration and High Engine Speed Use up

Fig. 2のイメージ図は，アクセルを踏み続けることでエンジンが軽く回り，エンジン回転数を最後まで使いきる時の狙いを示す。ドライバのアクセル操作に合わせて遅れなく加速度が発生し一気にエンジン回転数が上昇，そのまま加速度が大きく低下することなく，最高回転数までエンジンを回して走れることが重要である。

2.3　軽快感を実現するための車両性能目標

最適最早で反応しそれを自在に操るようにするには，機敏に感じ取れる加速度応答感を実現できていることが前提となる。Fig. 3は最速でアクセルペダルを動かした時の応答の強さ最大値と応答の強さピークの発生時間を横軸に配置したグラフを示す。応答の強さは加速度を微分したヤクド（m/s³）を用いている。

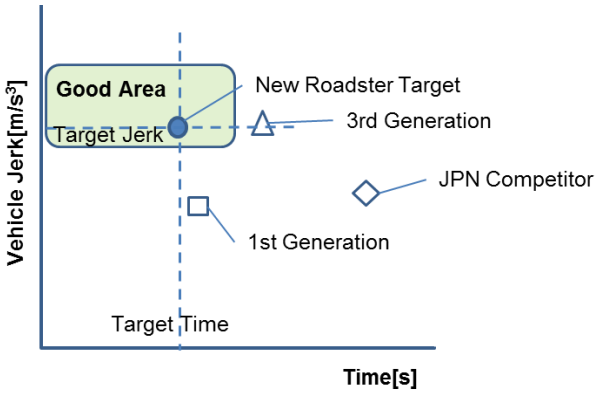


Fig. 3　Vehicle Response Target of New Roadster

新型ロードスターでは，最大ヤクド高さまでの応答時間と，最大ヤクド高さの目標を実現させ，最速最大ヤクドまでをアクセルペダル操作に応じてリニアにコントロールさせることで，軽快に感じる応答を実現させた。

次に，最高回転数までを気持ち良く使いきることができる加速性能（伸び感）については，ドライバがアクセルを踏んで高回転域まで加速してゆく中での加速度の変化のさせ方が重要と考えている。アクセルを踏み込み前述の応答を感じたさせたのちに，シートに体が押し付けられ車と一体に感じられるだけのしっかりした加速度高さで高回転域まで気持ち良く加速できること，そしてレッドゾーンまでを安心して使いきることができることが必要と考えている。

Fig. 4では，ドライバがアクセルを踏み込み，前述の応答を感じたさせた後の加速度変化のさせ方を示す。ドライバは周囲の交通環境を確認しながら注意深くアクセルを踏み増していく操作をするが，その踏み込み期間を通して同レベルのヤクド高さを継続させることでシートに押し付けられる感覚を持続させることができる。

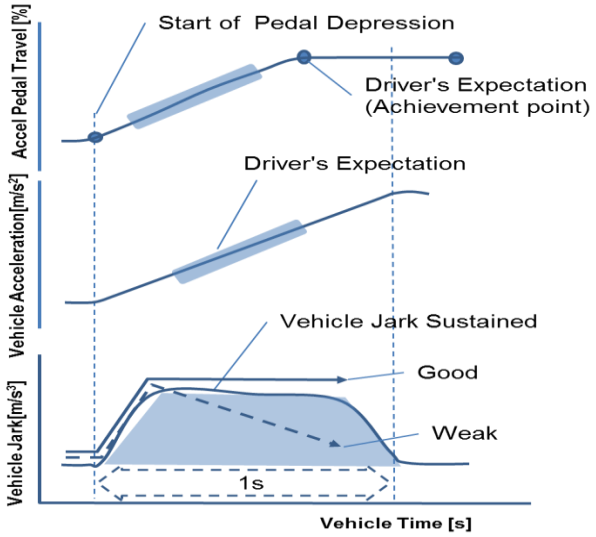


Fig. 4　Developmnt Taregt of Vehicle Jerk Duration

その後，最大トルク発生回転数から最高馬力発生点に向けてスムーズな回転上昇を感じさせるように車速に対する加速度を変化させ（Fig. 5），そのままレッドゾーンまで使いきれる感覚が得られるようにさせた。そして，最高回転数まで使いきる時の主要ギヤ段の最高車速を，2ndギヤ90km/h以上，3rdギヤ140km/h以上にすることで，高速道路への進入シーンだけでなく，サーキット走行までも気持ち良く扱えるようなギヤ比の配置を織り込んでいる。

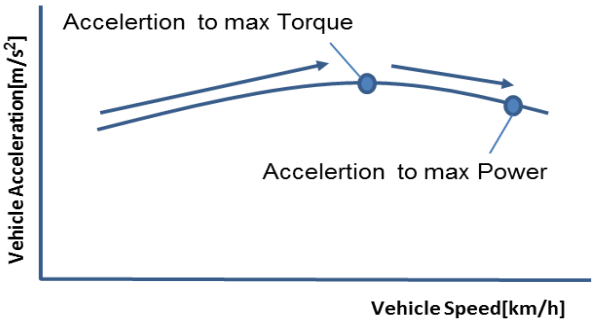


Fig. 5　Vehicle Acceleration Curvature

3. 軽快感の実現に向けての取り組み

新型ロードスターで目指す車両性能の狙いを実現させるための車両特性やパワートレイン特性までの取り組みについて紹介する。

3.1　車両のイナーシャを感じさせない応答性能

（1）車両の軽量化

ドライバがアクセル操作したときに車が重いと感じる要因は，アクセル操作から車が動き始めるまでの時間や加速度の発生波形，音や筋負担量などさまざまな要素の必要条件が併行して存在する。その中でも主要な要素は車両重量の軽量化である。Fig. 6は，スポーツカーにおける車両重量の分布を示し，初代からのロードスターの車両重量の変遷を示す。初代ロードスターと同等の1000kgを下回ることができると，ドライバが操作する，アクセル，ステアリング，ブレーキなどの操作時の車の動き出しが合致し，短時間で必要な操作が完了でき，ヒトとクルマが完全一体となった動きを感じるようになると考えている。新型ロードスターでは，部品レベルまでの軽量化への取り組みができ，クラストップに匹敵する車両重量にある。

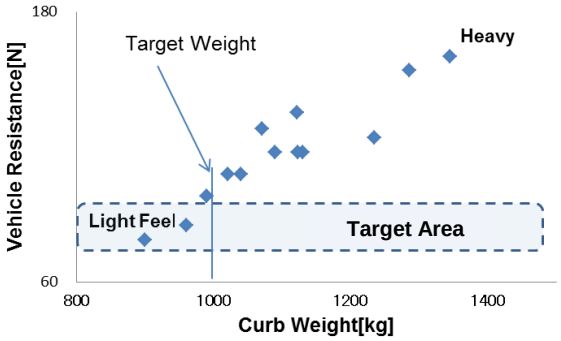


Fig. 6　Curb Weight and Vehicle Resistance

（2）パワートレイン伝達系剛性の改善

狙いの応答時間を実現させるためにはエンジンのトルク変化を無駄なく車両の挙動へと変換させるために車両イナーシャを低減させることと同時にPT伝達系の剛性向上が必要になる。

マツダスポーツカーDNAを支えるパワープラントフレーム（PPF）Fig. 7は，軽量化と応答時間短縮化を実現するために重要な部品であり，新型ロードスターでも継続して使用した。また，デファレンシャルユニットからタイヤへつなげる，ドライブシャフトの剛性やパワートレインユニットと車体をつなぐ，エンジンマウント，デフマウントについても，よりダイレクトに出力を伝えることを目的に，歴代ロードスター同様にねじり剛性の検討を行い，狙いの織り込みを行った。

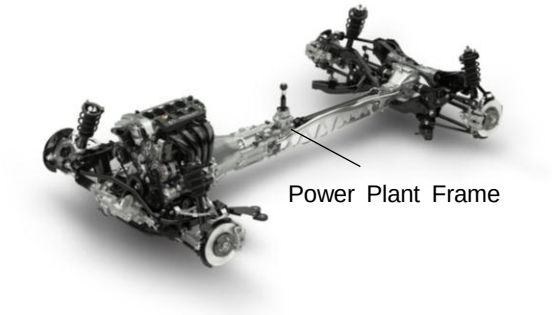


Fig. 7　Powertrain Unit (Power Plant Frame, Driveshaft, and Mount)

Fig. 8は，ドライブシャフトのねじり剛性に対する応答時間や振動収束性の良さに対する官能評価点を予測したものを示す。要求特性とドライブシャフトの中空構造を採用するなどの軽量化との両立をはかり，体感レベルで性能差を感じとれる性能織り込みをした。

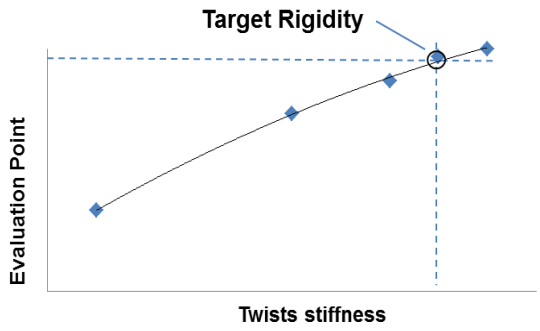


Fig. 8　Torsion Rigidity of Driveshaft Contribution Rate

Fig. 9に示す3代目ロードスターとの実際の比較データでも分かるように，応答性と収束性について同等の性能を確認できた。

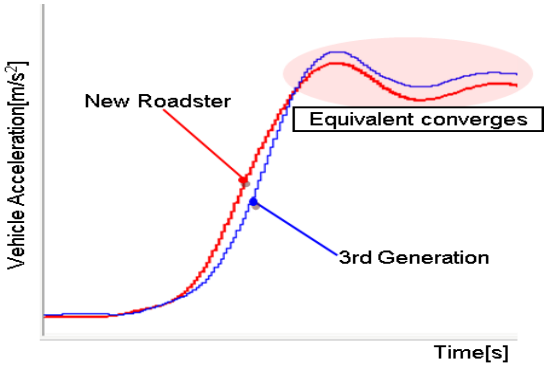


Fig. 9　Vehcle Acceleration of Previous and New Roadster

（3）エンジンイナーシャの最適化

応答時間を実現させるための一要素として，エンジンイナーシャ低減のフライホイールの軽量化（Fig. 10）も行った。慣性モーメントで17%，重量で9%低減し，アクセルを操作してから加速度が反応するまでの応答時間で3代目ロードスターより約5%の応答時間短縮ができた。

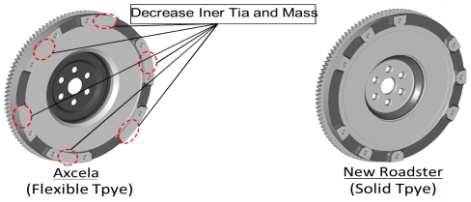


Fig. 10　Flywheel Comparison between Axela and New Roadster

Fig. 11にフライホイールイナーシャ軽減時の加速データを記載する。フライホイールイナーシャ軽減により，アクセル操作から0.1G加速度の立ち上がりポイントでみて，約10msec応答時間を短縮できていることが分かる。

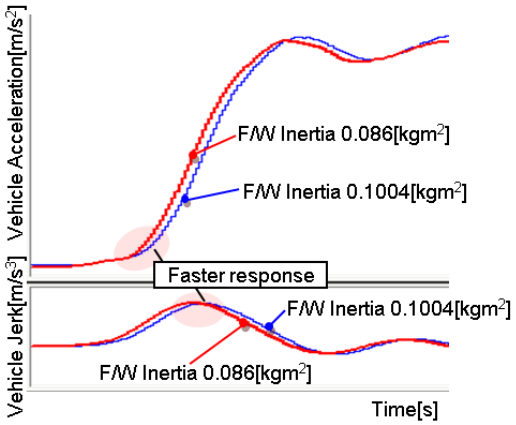


Fig. 11 Effect of Flywheel Inertia Reduction on Vehicle Acceleration and Jerk

（4）車両性能の改善

部品単位では数値的に小さな性能効果になるが，その積み上げをしていくことで，ドライバが性能変化を感じることができる，狙いの性能ができた。

Fig. 12に新型ロードスターでアクセルを踏み込んだ時の応答性能の時間軸チャートを示す。

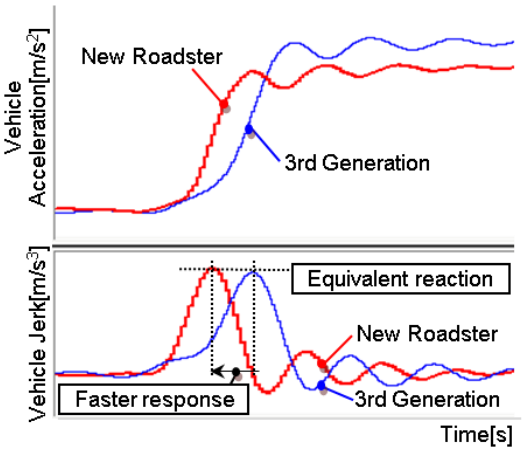


Fig. 12　Vehicle Acceleration and Jerk

3.2　気持ち良い加速性能

（1）シートに体が押し付けられる加速度

シートに体が心地良く押し付けられるヤクド高さと，その押し付けられた感覚が最大トルク回転数まで頭に残るような加速特性を狙いに描いた。

Fig. 13にアクセルを踏み込んでからの加速度高さとヤクドの時間軸チャートを示す。

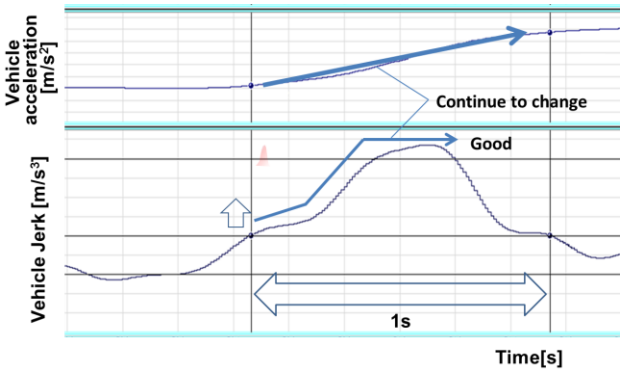


Fig. 13　Development Result of Jerk Duration

シートに押し付けられるしっかりとした加速度にするために，一定のヤクド高さを所定時間持続させることと，そのドライバの印象を残像のように記憶できるだけのヤクド高さを発生し継続させていくことで，Fig. 4で述べた狙いのどおりの特性を発生させることができている。

(2) レッドゾーンまでしっかり使いきれる加速性能

最大トルク発生回転数からレッドゾーンまでをスムーズに使いきれる加速性能を実現するためには，高回転域のエンジンの最大トルク特性が重要である。

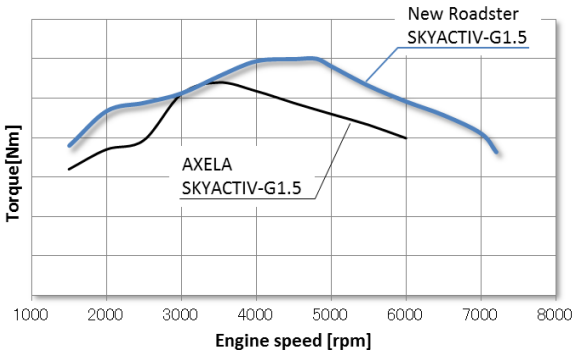


Fig. 14　Engine Torque Curvature

新型ロードスターでは，SKYACTIV-G 1.5をFR専用設計し，クランクシャフト周りの高剛性化，高バランス化，吸排気系など細部にわたりこだわっていくことで，7500rpmまでスムーズに回転上昇していくトルク特性を実現させた（Fig. 14）。

(3) 達成できた車両性能

Fig. 15に，横軸車速（km/h），縦軸加速度（G）で2ndギヤでの加速特性を示す。新型ロードスターはレッドゾーンまでの使用可能車速が旧型比で5km/h以上高くし，高速道路進入のような場面でも2ndで95km/hまで使用できる。車速が上昇していくときに加速度は徐々に低下していくが，高回転域まで連続した軽やかなエンジンサウンドが実現できていることと加速度の低下の仕方を緩やかにすることで，ドライバは限界回転数に向けてスムーズに変化してゆく気持ち良さを感じることができる。

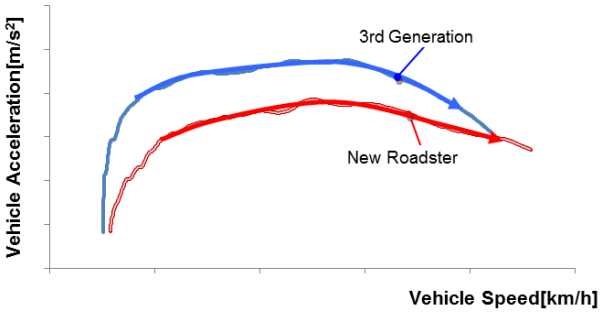


Fig. 15　Acceleration Comparison in 2nd Gear

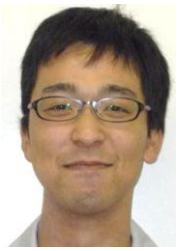
4. おわりに

新型ロードスターでは，軽快感あふれる“Fun to Drive”を実現するため，研究成果を織り込むことができた。本稿では，加速度特性を中心とした開発の一部を紹介したが，パフォーマンスフィールと関係の深い，サウンドや操作フィーリングなど、加速度とフィーリングの交互作用との関係など，人間が感じる感性領域も含めて，軽快感を実現している。

参考文献

(1) 星野ほか：新型ロードスターのエンジン技術，マツダ技報，No.32，pp.124-127（2015）

■著　者■


兼為 正義

八木 淳

佐々木 貴洋

特集：新型ロードスター

20

新型ロードスターの軽量ドライブトレインの紹介
Lightweight Drivetrain for New Roadster

延河　克明*1　渡部　雅晃*2　石田　一之*3
Katsuaki Nobukawa　Masaaki Watanabe　Kazuyuki Ishida
佐々木　雅弘*4　松原　伸幸*5
Masahiro Sasaki　Nobuyuki Matsubara

要　約

マツダは，初代ロードスターへの原点回帰と『守るために変える』の志の下，開発に取り組んだ。新たに開発した専用 6 速マニュアルトランスミッションのドライブトレインは，クラッチペダル，チェンジレバーの操作性や静粛性等の環境性能を進化させつつ，初代のドライブトレインよりも軽量，コンパクト，高効率を実現し，この車の軽快で楽しい走りに貢献した。本稿では開発プロセスをマツダの志と行動を含めて紹介する。

Summary

A new drivetrain was developed based on the concept of the original Roadster and our philosophy “Change to protect”. The drivetrain for 6-speed transmission is lighter, more compact and efficient than the original and contributes to agile and fun driving while improving clutch pedal/shifter operation and environmental performance such as quietness. The paper presents the development process including our visions and efforts.

1. はじめに

ドライブトレインは，ロードスターの軽快で楽しい走りの進化のために，エンジントルク容量比で世界最軽量を理想に掲げ，開発に着手，商品化を実現した。

2. 開発のねらい

新型ロードスターの車両コンセプト実現のため，下記項目をドライブトレイン開発のねらいとした。

(1) エンジントルク容量比世界最軽量
(2) 操作性の正常進化
(3) 静粛性向上と高効率の両立

3. ドライブトレインの構造と主要諸元

基本構造は初代ロードスターを受け継ぎながら，軽量，コンパクト，高効率化したものとなっている。

SKYACTIVの英知を集め，大幅な進化を遂げた。意のままに発進加速度をコントロール，リズミカルな変速をサポートするクラッチシステム。初代の伝統であるカチッときまる操作性を守りつつ，軽量，コンパクト，高効率を実現させた6速マニュアルトランスミッションとディファレンシャル。高張力鋼材で軽量化を実現したプロペラシャフト。軽量化と走りに最適な剛性を両立したドライブシャフト。外観をFig. 1に示す。

Fig. 1　Drivetrain Overview

4. ドライブトレインの詳細

4.1　クラッチシステム

新型ロードスターのクラッチシステム開発では人馬一体を実現するため，下記2点に注力して開発した。

*1～5 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

（1）最適なクラッチ切れ性能と締結ポイント

（2）意のままに加速度を操ることができるペダル特性

人間工学を駆使し，ドライバの左足が感じる負担が最少になる範囲に，クラッチ切れポイントと締結ポイントを配置した。ペダルの踏み切り位置から締結ポイントまでの最適なストローク寸法を定義し，それを実現することで，軽快感のあるリズミカルな変速操作性に貢献した（Fig. 2）。

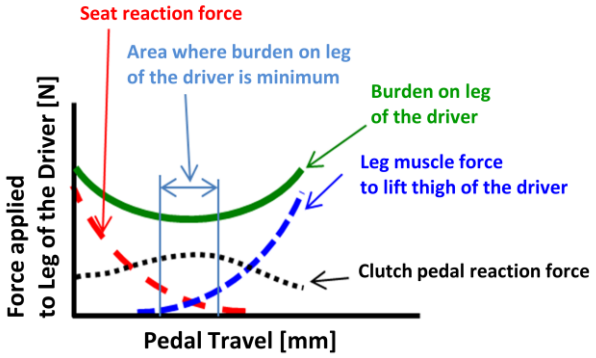


Fig. 2　Burden on Leg - Clutch Pedal Travel

また，ドライバの仕事量と加速度の関係をリニアに表現できる伝達特性カーブを最適にチューニングすることで，意のままに加速度がコントロールできるクラッチフィールを実現した。現行車との比較をFig. 3に示す。

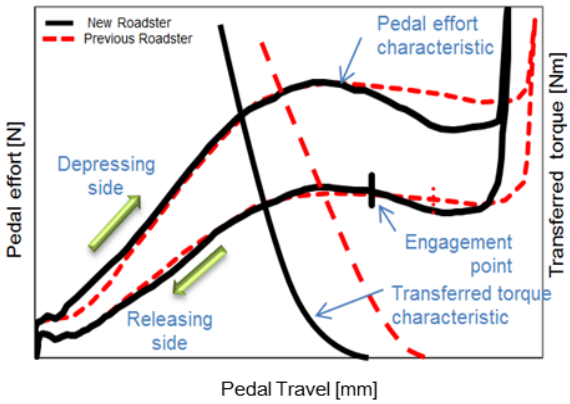


Fig. 3　Clutch Pedal Transferred Torque Characteristics

4.2　6速マニュアルトランスミッション

開発のねらいを高いレベルで実現させるため，トランスミッションの機能配分について，ゼロベースで熟考し，ねらいを実現できるキー技術を見極めた上で，詳細の開発設計に着手した。機能配分の概要を Fig. 4 に示す。

このユニットは 4 つのキー技術と 2 つのプロセス革新で，開発のねらいとユニット性能，質量，コストの高次元バランスを実現した。まずは，各キー技術と開発のねらいの関係を紹介する。

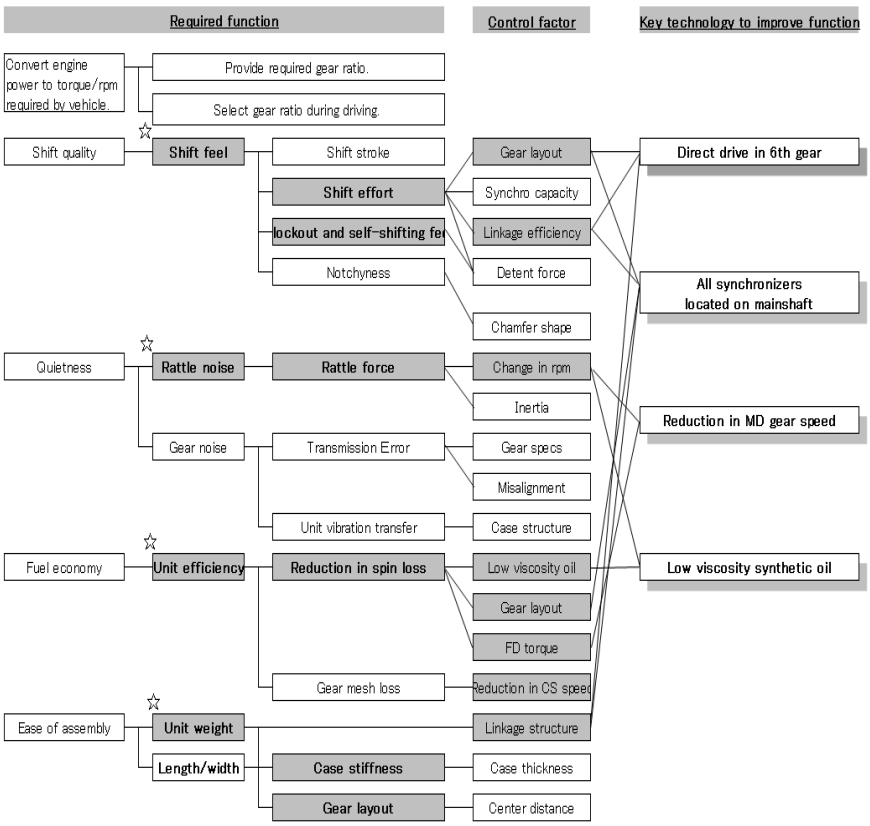


Fig. 4　Functional Allocation Outline

（1）6速直結構造

6速ギヤをギヤ比1.000直結とすることで，チェンジロッド上の反転機構が不要となり，軽量となる上，チェンジリンク効率の高いダイレクトフィールを向上させた。

（2）インプットリダクションギヤ比の低速化

オイル攪拌抵抗低減，トランスミッションに入力されるエンジンの回転変動低減によるラトル音低減にも貢献した背反機能のブレークスルーである。このキー技術で軽量化，静粛性と高効率化の両立を実現できた。

（3）シンクロの全段メイン軸配置

チェンジリンク構造のカウンタ軸上へつなぐ部品が不要なため，リンク効率向上と軽量化。また，カウンタ軸の攪拌抵抗の低減も実現し，高効率に貢献できた。

（4）低温時低粘度オイル

冬季，ミッションオイル温度低下により，オイルの粘度が上がることで，シフトが入りにくいシーンがあり，これを払拭するため，新たに低温時低粘度オイルを開発した。攪拌抵抗低減とともに，季節変動に左右されないチェンジフィールを実現した。ユニット抵抗は現行ロードスターの6速マニュアルトランスミッションと比較して約30%低減した。ユニット抵抗をFig. 5に示す。

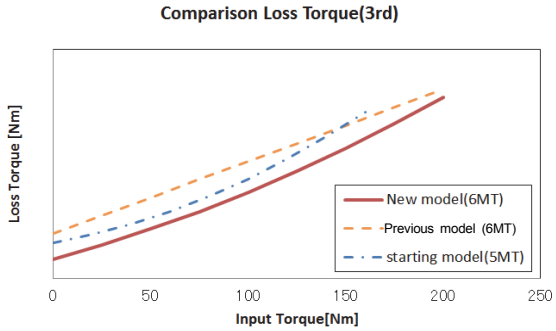


Fig. 5　Comparison Loss Torque

これらのキー技術とSKYACTIV技術の融合で新型ロードスター用の6速マニュアルトランスミッションは誕生した。次にプロセス革新事例を紹介する。

（1）軽量と高剛性を両立したハウジング

トランスミッションへの入力負荷とシンクロ同期容量から軸間距離を決定，初代のカチッと決まるチェンジを守るために，シャフト及びロッドの軸受け配置は初代を踏襲した。初代の伝統を守るために変えなければならないこと，変えてはならないことを決めて開発を進めた。ハウジング輪郭は内部の構造体にギリギリ沿うように，オイル整流も加味して描いた。SKYACTIV-MTのケース開発プロセス[1]を進化させ，従来の均一肉厚という考え方を適用せず，強度，剛性，NVH性能から最小限必要な厚みを必要な部位のみに肉厚としてのせた。エンジンと接続するトランスミッションケースは外リブを立てないことで，高剛性とスリムなボディシェイプを両立させた。均一ではない薄肉厚はアルミダイカストの生産課題であったが，生産サイドのサポートで商品化を実現できた。ハウジングの設計手順を以下に示す。

① ハウジング存在可能空間の定義

ハウジング輪郭と関連するレイアウト要件から定義した。主な項目は下記のとおりである。

（i）フロントミッドシップレイアウト

（ii）乗員ヒップポイントを低く中央に配置する。

（iii）ドライバの下半身が車両前方にまっすぐ向くようにペダル位置を改善する。

トランスミッションハウジングのスリム化は，新型ロードスターのコンセプトの重要な要件に貢献できた。

② ハウジングコンセプト設計

下記項目を満足できる形状と肉厚を決定した。

（i）ひずみエネルギの最小化

（ii）基本剛性確保

③ 基本機能設計

基本形状，肉厚をベースに下記項目を設計した。

（i）潤滑性能

（ii）合わせ面のシール性と強度

④ 製品仕様の決定

NVHに関する項目を満足できる仕様を適用して最終製品形状を決定した。

（i）伝達特性

（ii）共振応力発生回避

（iii）増幅および放射特性

設計手順の中でポイントとなった領域を次に紹介する。ハウジング形状の成り立ちは，位相最適検討で必要最小限の柱，壁，外殻を定義した後，製品化する上での制約条件を必要最小質量で満足し，形状を決定した（Fig. 6）。

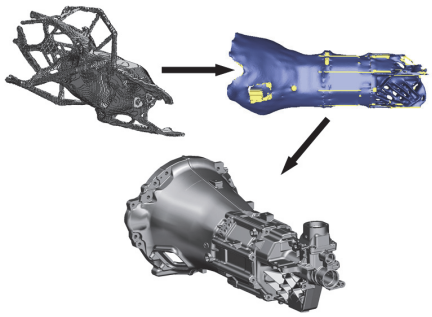


Fig. 6　Transmission Housing Optimization

潤滑性能確保のためのハウジング内壁形状については，トランスミッション内部は空気とオイルの2相状態であり，粒子法や差分法による数値計算のみで造り込むにはCAEでは十分でなく，透明ハウジングを作製し，油の流れを可視化した。攪拌抵抗が小さく，ねらいの油流れになるように，内壁形状を決定した（Fig. 7）。

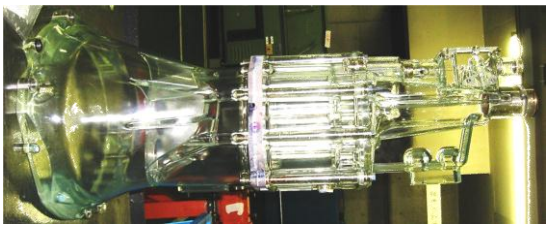


Fig. 7　Clear Transmission Case for Lubrication Development

NVH について，エンジン起振力による NVH，ギヤノイズ，ラトルノイズの目標値を最小限の肉厚（質量）で成立させた。FR レイアウトでは，エンジン，トランスミッション，プロペラシャフト，リヤディファレンシャル，トランスミッションとディファレンシャルをつなぐパワープラントフレーム，ドライブシャフトと長く大きな系を形成しており，各部品で切り離した振動系と全体での振動系には差異が見られた。そのため，パワートレイン系が一体となった大規模なモデルで解析し，実測することで高い精度の設計を効率よく実施できた。モデル規模を Fig. 8 に示す。

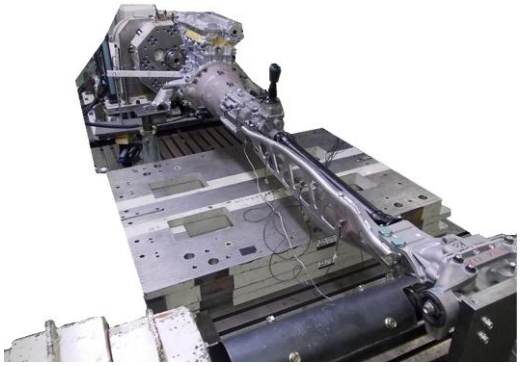


Fig. 8　NVH Measurement Analysis Model

以上のハウジング軽量化も含め，ドライブトレイン全体で初代の 5MT とほぼ同等の質量を実現した（Fig. 9）。

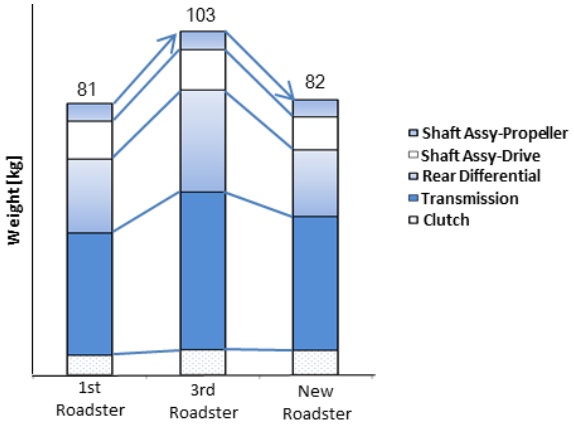


Fig. 9　Weight of Drivetrain System of Roadsters

（2）チェンジ操作性造り込みの革新と正常進化

他の操作系部品との調和,ステアリングとチェンジノブ位置関係まで，操作フィーリングを構成する特性を可能な限り分解してデータ化し，ベースとなる静的な操作波形の理想を描いた。単品部品の面粗さに至るまで徹底して突き詰めた。基本は初代の 40mm シフトストローク波形とし，節度を維持させながら，変速時に不快に感じる摺動抵抗のないフィーリングを実現。セレクト操作，シフト操作のベースとした理想波形と実波形を Fig. 10 に示す。

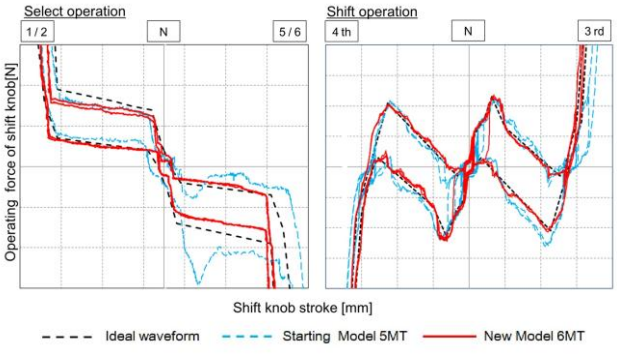


Fig. 10　Operation Waveform of 6MT

ベースの波形に同期荷重，チャンファ掻き分け荷重が加わり，走行時の変速操作波形，力積となる。操作スピードの時間軸の幅を考慮して，各段位ごとにシンクロスペックとスプラインチャンファ形状を設計した。初代のカチッと決まるチェンジを守りながら，4 代目ロードスターにふさわしい軽快で楽しいフィーリングに仕上がった。このフィーリングは唯一無二のマツダロードスターフィーリングである。ギヤ比とシンクロスペックを Table 1 に，新型 6MT の透視図を Fig. 11 に示す。

Table 1　Gear Ratio and Spec. of Synchronizer

	Gear Ratio	Synchronizer
1st	5.087	Triple cone with Carbon
2nd	2.991	Triple cone with Carbon
3rd	2.035	Triple cone
4th	1.594	Triple cone
5th	1.286	Double cone
6th	1.000	Single cone with Carbon
Rev.	4.696	Single cone

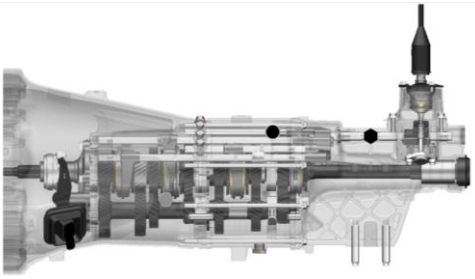


Fig. 11　Main Section of New 6MT

4.3　ディファレンシャル

小型軽量化，形状最適化により，ライトウエイトスポーツカーとしてベストインクラスの質量を達成した。また，ユニット効率に寄与度の大きいオイル潤滑に着目した抵抗低減技術の育成を行い，燃費性能向上を実現した。

キャリア基本形状はCAEを活用し，強度，NVHの基本となるギヤ支持剛性を前モデル並に確保した上で，軽量化を実現した。具体的には，キャリアとリヤカバーの分割位置変更，骨格リブの設置により，鋳鉄同等の剛性で薄肉アルミダイカストへの材料置換を実現した。新型ディファレンシャルの透視図をFig. 12に示す。

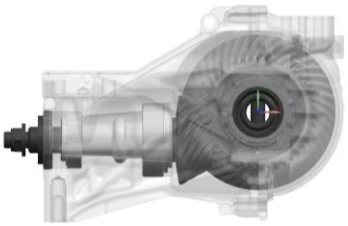


Fig. 12　Main Section of Rear Differential Unit

キャリア外部形状は車両フロア下回りの風の流れ解析とユニット発熱，伝熱，放熱のモデル解析を駆使しリヤデフ油温の基本となる冷却，放熱性能予測から，冷却フィンを最小化した（Fig. 13）。抵抗低減技術のポイントとなる潤滑改善は，低温時攪拌抵抗の低減を重視した低粘度オイルを新規開発することで実現した。また，キャリア内部形状はギヤ攪拌によるオイル流れの整流化に注力した（Fig. 14）。その結果，ユニット効率は60km/h走行時の損失トルクで27%低減した。レスポンスとダイレクト感を重視した小型リミテッドスリップデフを新規開発した。

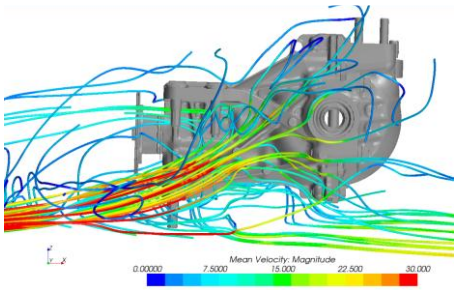


Fig. 13　Analysis Model of Air Flow

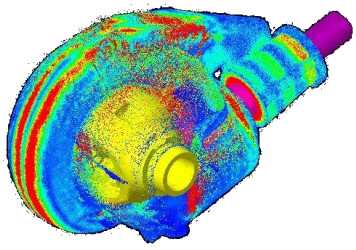


Fig. 14　Analysis Model of Oil Flow

4.4　プロペラシャフト・ドライブシャフト

プロペラシャフトは高張力鋼材を採用することで，軽量化を図った。ドライブシャフトはマニュアルトランスミッション車用に中空タイプを採用して走りのレスポンスからの要求剛性を維持しながら軽量化に貢献した。

5. おわりに

4代目ロードスターは，初代の『人馬一体』コンセプトを受け継ぎ，革新的な進化を遂げた。軽量，コンパクト，高効率で優れた環境性能を，クラッチ，シフト操作性の更なる進化で『走る歓び』を高次元で実現したドライブトレインシステムに仕上がった。

参考文献

（1）三浦ほか：トランスミッションケース開発における基本骨格形状最適化，自動車技術会駆動系シンポジウム2013前刷集 No.03-13，pp.12-16（2013）

■著　者■

延河 克明

渡部 雅晃

石田 一之

佐々木 雅弘

松原 伸幸

特集：新型ロードスター

21

新型ロードスターのエンジン技術
Engine Technology for New Roadster

星野　司*1　早川　元雄*2　村中　宏彰*3
Tsukasa Hoshino　Motoo Hayakawa　Hiroaki Muranaka

要　約

2014年に25周年を迎えたロードスターの4代目となる新型モデルへ搭載するFRスポーツ用ガソリンエンジンSKYACTIV-G 1.5を開発した。ロードスター伝統の人馬一体コンセプトを実現するために，SKYACTIV-Gの究極の内燃機関を実現するという考えに基づき，ドライバの意のままに高回転まで軽快で伸びのあるエンジンを開発した。本稿では，このエンジンの諸性能と採用技術について紹介する。

Summary

SKYACTIV-G engine for FR Sports car was newly developed to be installed in the 4th generation All-new Roadster that reached its 25th anniversary in 2014. The new engine was developed with the SKYACTIV-G's basic concept of "realization of an ultimate internal combustion engine" added to the Roadster's inheriting "Jinba-Ittai" concept, resulting in more lively performance which is extensive up to high rpm.　This article introduces the engine performances and technologies applied to the engine.

1. はじめに

SKYACTIV-G 1.5は，2013年に3代目アクセラに搭載され，マツダのブランドメッセージである「サステイナブル“Zoom-Zoom”」を具現化したエンジンである。

新型ロードスターに搭載するSKYACTIV-G 1.5は，初代ロードスターから受け継いでいる人馬一体をコンセプトに，走る歓びと優れた環境性能を高い次元で両立させるために，究極の内燃機関を実現するという理想を掲げてエンジン開発に取り組んできた。

理想を具現化するために，開発したロードスター用SKYACTIV-G 1.5（Fig. 1）に採用した技術を紹介する。

2. 開発のねらい

スポーツカーに搭載するエンジンといえども，地球環境保全に対応する期待は年々増している状況である。アクセラに搭載しているSKYACTIV-G 1.5の高圧縮燃焼による高効率及び，低排出エミッション性能はそのままに，スポーツカーにふさわしい，高回転域までどこまでも軽快に伸びていくエンジントルク特性とすることを目標に開発に取り組んだ。

Fig. 1　New Roadster SKYACTIV-G Engine

3. エンジン諸元

エンジン本体は3代目アクセラ用SKYACTIV-G 1.5をベースとし，パフォーマンスフィール領域では伸び感，軽快レスポンス及び，スポーツカーサウンドの造り込みを実施し，FRフロントミッドシップ搭載への対応として，コンパクト化と軽量化を目的にTable 1に示す領域を開発した。

*1，3　エンジン設計部
Engine Engineering Dept.

*2　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

Table 1　Principal Specification

Engine	AXELA SKYACTIV-G1.5	New Roadster SKYACTIV-G1.5
Mouting type	FF	FR
Max Power(JIS net)	82kW/6,000rpm	96kW/7,000rpm
Max Torque(JIS net)	144N・m/3,500rpm	150N・m/4,800rpm
Max Engine speed(rpm)	6500	7500
Bore×Stroke(mm)	φ74.5 x　85.8	←
Displacement(cc)	1,496	←
Compression ratio	13.0	←
Crank Shaft Material	Cast Iron	steel
Crank Shaft Type	semi full counter	full counter
Intake-valve event angle	254°	←
Exhaust-valve event angle	244°	249°
Int. Manifold Runner Length(mm)	395	365
Exh. Manifold Runner Length(mm)	600	450
Throttle Dia(mm)	50	55
Exh. Manifold	4-2-1type	←
Induction Sound Enhancer	w/o.	w/.
Fuel Grade	Regular	Premium

4. パフォーマンスフィール

4.1　伸び感への取り組み

高回転まで気持ちよく回る「伸び感」の実現を狙い，エンジン回転限界をベースエンジン比で1000rpm高い7500rpmとした。高回転化に伴い往復系の慣性荷重が増加する。そのためクランクシャフトを高剛性化し，バランス率を高めた。高剛性化はスチール材を採用し，ウェブ形状を最適化することで軸径を増やすことなくベース比剛性を16%向上した。フルカウンタウエイト構造を採用しウェイトの配置を最適化することでバランス率を高め，7500rpmまでのスムーズな吹け上がりを実現している。不快な可聴領域の共振周波数モードを抑えることを狙いとしてカウンタウエイト周りの形も最適化した（Fig. 2）。

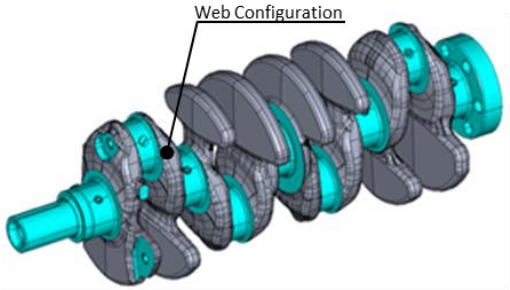


Fig. 2　Optimized Crank Shaft

4.2　軽快レスポンスの取り組み

スポーツカーにふさわしい軽快な吹け上がりを実現するために，主運動部品のイナーシャ低減に取り組んだ。主にフライホイールに関しては吹け上がりに加え，シフトチェンジの操作感，クラッチ操作のダイレクト感を求めて，新設計のソリッドフライホイールを採用した（Fig. 3）。パワープラント全体の振動減衰を見直すことでフライホイールイナーシャを17%，質量で9%低減を実現し，無負荷レーシング時の吹け上がり感やレスポンスの代用値である0.1G発生時間を改善した（Fig. 4）。また，ピストンとコンロッドの往復系部品は質量を増加させることなく高回転化に対応しBIC質量を実現した。

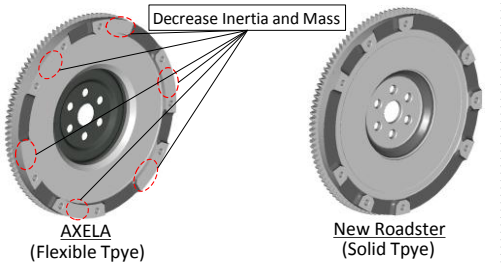


Fig. 3　Flywheel Comparison

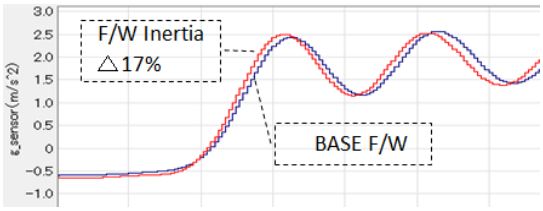


Fig. 4　Improvement of Response

4.3　吸排気系によるトルク特性の取り組み

SKYACTIV-Gの排気系の特徴は，4-2-1排気マニフォールド集合部，プリサイレンサ，メインサイレンサからの反転負圧波が吸気バルブと排気バルブのオーバラップ期間に同調する回転数をコントロールすることである(1)。新型ロードスターへ搭載するエンジンでは，高回転まで気持ちよく回ることが重要であるため，排気マニフォールド集合部までの長さを高回転チューニングした。具体的には，排気カム角の変更を考慮した上で，排気マニフォールド集合部までのランナ長さを450mmとすることで，4500rpmと6000rpmで同調するようにした。

排気マニフォールド同調点を高回転化することにより，低中回転域の体積効率低下といった弊害が発生する。吸排気系の超低抵抗化により弊害をリカバーした。吸気系についてはスロットル部内径を拡大し，吸気ダクト最狭部断面積を30%拡大した。排気系については各部径拡大及びFR搭載化に伴い，ストレート形状化を実施した（Fig. 5）。これらのことにより，吸気系通気抵抗及び，排気系背圧をアクセラ用SKYACTIV-G 1.5比で25%低減した。

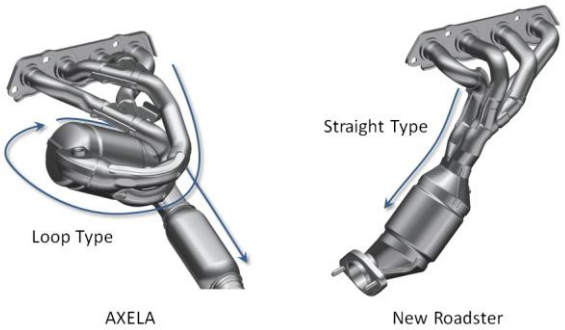


Fig. 5　Improvement of Exhaust Manifold Shape

4.4　ポンプ損失と機械抵抗低減の取り組み

（1）ポンプ損失低減技術

全回転及び全負荷領域において，高いバランスを示す開弁角249degの広角排気カムと排気ポート拡大専用ヘッドを含む低背圧排気系を織り込んだ。広角排気カムと低背圧排気系を組み合わせることで，高回転時の排気押し出しロスを抑制するとともに，ノック改善による効率アップを後押しする残留ガス低減も実現した。

（2）機械抵抗低減技術

クランクケース内における各気筒間のオイル連通路面積を広く取ることで，高回転のオイル撹拌抵抗を抑制した。

4.5　トルク特性

以上に記述した高回転化，ロス低減及び吸排気系の取り組みにより，低中速トルクを十分に維持しつつ高回転域まで気持ちよく回るトルク特性を実現した（Fig. 6）。

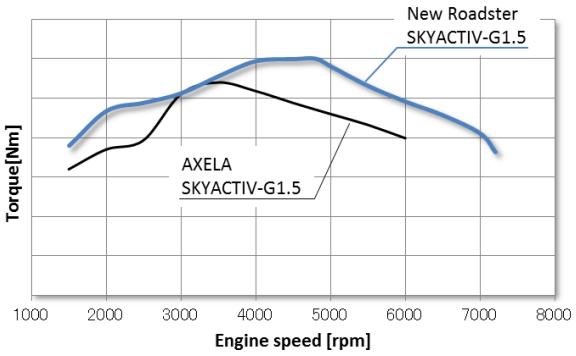


Fig. 6　WOT Performance

5. コンパクト化と軽量化の取り組み

FRスポーツカーへ搭載するに当たり軽量化とエンジン全高の低減による低重心化へも取り組んだ。軽量化ではFR搭載のマウント位置をパワープラント変形の節に配置することで振動レベル低減を図るとともに不要なリブをなくし肉厚低減による軽量化を実施した（Fig. 7）。冷却系配管レイアウトにおいても，ウオータアウトレットを車両前方に配置し，水配管を最短レイアウトで接続できるようにするために，シリンダブロック及びヘッドを新設し冷却水の流れ方をFF用のU字フロータイプから縦流れタイプへ変更した。また，開発初期から生産部門と開発部門が同時進行で詳細の形状検討を行うコンカレント活動を実施し，グラム単位での軽量化に取り組んだ結果，アクセラ用SKYACTIV-G 1.5エンジン比17kgの軽量化を行った。

エンジン全高低減に対してはオイルパンとロアブロックの幅を広くし高さを減らす変更を行った。旋回時にエンジンオイルが偏りやすくなるがオイルパン形状を3次元的に最適化し適正な油面を確保するようにした結果，エンジン全高を20mm低減し低重心化を図った（Fig. 8）。

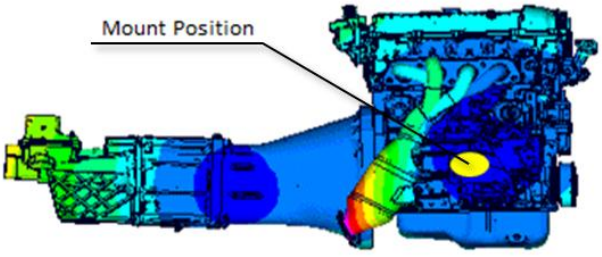


Fig. 7　Optimized Mount Position

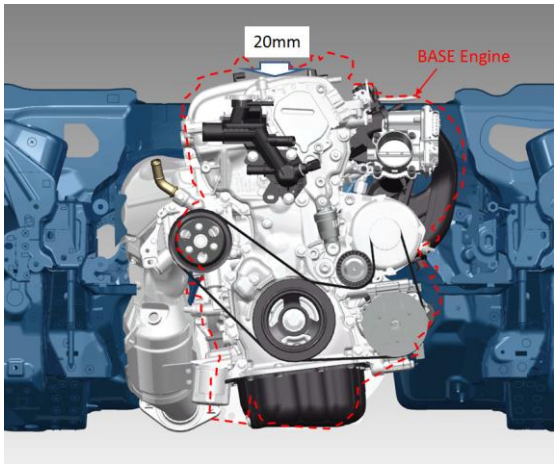


Fig. 8　Reduction of Engine Height

6. エンジンサウンド

スポーツカーにとってドライバの感性を刺激する「走り感」を演出することが重要である[2]。低回転域での軽快感，中回転域での力強さを強調する鼓動感，高回転域での伸び感をイメージさせるエンジンサウンドを実現することで聴覚の側面から走り感を演出した。

低回転域では排気音を強調することで軽快感を実現することとした。4気筒エンジンの回転基本次数とその倍音成分である偶数次数がきれいに強調された澄んだ音質とするために各気筒の燃焼圧力波の干渉が均等になる等長4-2-1排気マニフォールドを採用した。また，メインサイレンサ内のパイプ長さ及び拡張室長さ共鳴により，低回転域のエンジン回転4次及び6次成分である130Hzから250Hzの排気音圧を強調した。加えて，100Hzにて車体キャビン空間と排気音とが共鳴することで発生する不快なこもり音を抑制するためにメインサイレンサ内に100Hzのヘルムホルツ共鳴器を設けた。このことにより，排気音による低回転域での軽快感を実現した。

中回転域における鼓動演出のために，パワープラント振動を車体に伝達しているリヤデフマウントの振動特性をチューニングする必要がある。中回転域でのエンジン回転4次及び6次と隣り合うハーフ次数成分とが干渉するうなり効果により鼓動感を実現するため，振動特性を350Hzにチューニングした。

高回転域における伸び感は，旧型ロードスターから採用しているインダクションサウンドエンハンサー（ISE）[3]を用いて吸気音にて演出した。新型ロードスターで採用しているISEの概略図をFig. 10に示す。旧型ロードスターではカウルアッパ内へ音を開放していたが，新型ロードスターではダッシュパネルを貫通し，直接キャビン内へ音を開放するレイアウトを採用した。このことにより，ドライバのアクセル操作に対し，よりダイレクトに周波数300Hzから400Hzの領域で吸気音を演出することが可能になった。

排気音，パワープラント振動伝達音，吸気音を使って実現した新型ロードスターとアクセラ1.5Lエンジンの全開加速車内音マップをFig. 9に示す。乗用車らしいアクセラのサウンドと比較し，スポーツカーにふさわしい低回転から高回転までつながりを持って「走り感」の演出を実現した。

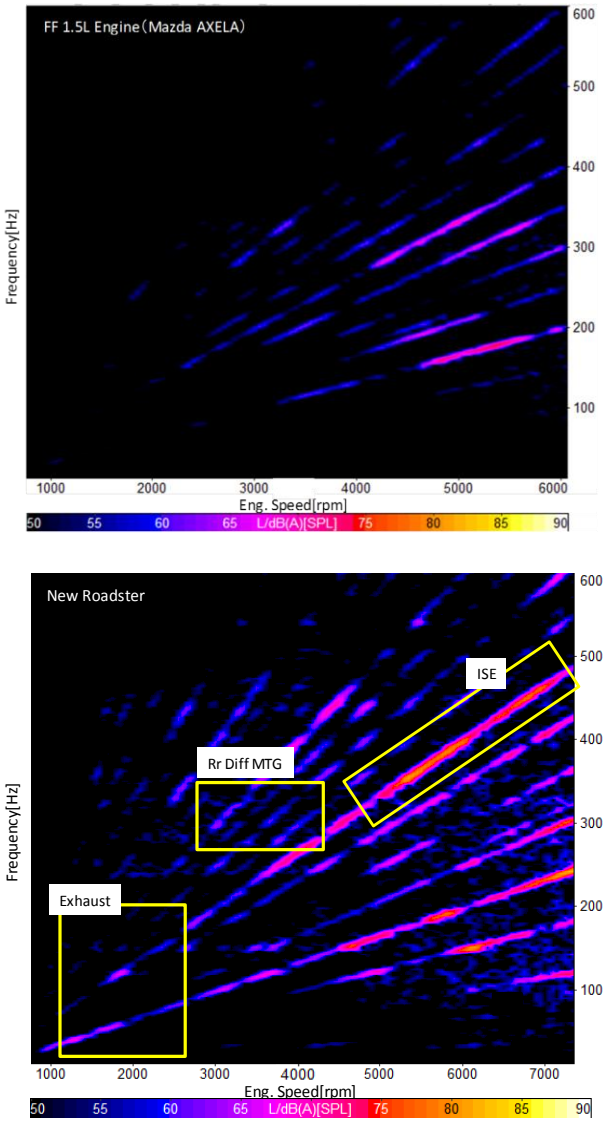


Fig. 9　Interior Sound Pressure Map

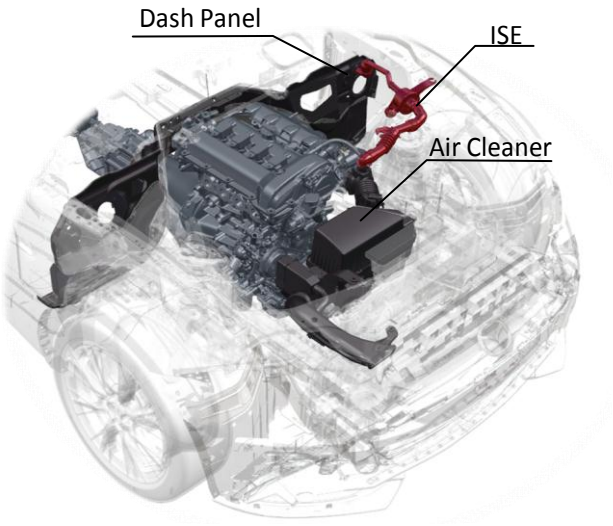


Fig. 10　ISE Layout of New Roadster

7. おわりに

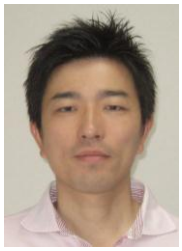
4代目となる新型ロードスターにふさわしいエンジンを開発するために，アクセラ用SKYACTIV-G 1.5をベースに主運動系，シリンダヘッド，シリンダブロック，吸排気系，冷却系というほぼすべての部品を新設した。

固定と変動要素を明確にしたコモンアーキテクチャ構想を活用することで，開発期間と投資の効率化を図り，アフォーダブルスポーツカーに搭載できる理想を追求した専用エンジンを開発した。

参考文献

(1) 富澤ほか：SKYACTIV-G 新型ガソリンエンジンの紹介，2012 年 自動車技術会シンポジウム（2012）
(2) 山本：ロードスター20周年の総括，マツダ技報，No.28，pp.106-110（2010）
(3) 若狭ほか：新型ロードスターのパワートレインの進化，マツダ技報，No.27，pp.103-107（2009）

■著　者■


星野 司

早川 元雄

村中 宏彰

特集：新型ロードスター

22

新型ロードスターのPTシステムNVH
PT System NVH of New Roadster

小泉　陽*1　児玉　真吾*2　陳　宇*3
Yoh Koizumi　Shingo Kodama　Yu Chen
松岡　和洋*4
Kazuhiro Matsuoka

要　約

新型ロードスターは，SKYACTIV技術の適用により走りと燃費を大きく進化させた。このために必要な軽量化，エンジントルクの向上，エンジン低回転領域の使用拡大は，車体応答特性の悪化，起振力のレベル増大，周波数の各種共振周波数との近接等により，一般的にはいずれもNVHの悪化を招く。ここで問題となるNVH現象は，起振力となるエンジンやトランスミッション，伝達系となる駆動系やPTの剛体振動系，またサスペンションや車体といった車両全体にわたる構成要素が相互に影響しあいながら一体の系としてふるまう現象であり，PTシステムNVHと呼ぶ。PTシステムNVHの設計のためには，文字どおりシステムとしての最適が必要となるが，マツダでこれまで整備を進めてきたMBD（Model Based Development，モデルベース開発）のプロセスを活用することにより，優れたNVH性能を保ちながら高い「人馬一体」性能と低燃費を実現した。

Summary

Driving performance and fuel efficiency were greatly improved for Mazda all-new Roadster with SKYACTIV technology. To achieve both of them, weight reduction, engine torque increase and more frequent use of low engine speed range are required, which end in the deterioration of body response and excitation level, and put excitation force frequency closer to the resonance frequency of the vehicle, generally degrading NVH. The NVH phenomena are called “PT system NVH” as the components of vehicle overall including engine and transmission (excitation force), drivetrain and PT rigid body system (transfer system), suspension, and vehicle body interact each other and act as one, affecting each other’s vibrations. Therefore, to properly design the PT system NVH, optimization of the whole system is necessary. The process of MBD (Model Based Development) that had been developed in Mazda was applied to realize the excellent “Jinba-Ittai” dynamic performance and fuel efficiency without compromising NVH performance.

1. はじめに

新型ロードスターは，大幅な軽量化と低速トルクを生かした走りの進化を，燃費改善とともに実現した。振動騒音（NVH）は，気軽に楽しめる走りの気持ち良さのため，乗っていて楽しい，Zoom-Zoomを彩るエンジンサウンドともに，こもり音等の不快な振動騒音現象が抑えられた，上質な室内空間を目指した。

パワートレイン（PT）の動作により生じるNVH現象は，エンジン，トランスミッション，駆動系といったPTの構成要素はもちろん，PTのマウント系，サスペンション，車体等の広範囲のコンポーネントが相互に複雑に関与する。この，さまざまな要素が一体のシステムとしてふるまうNVH性能を迅速に最適設計するため，これまでマツダで整備を進めてきたMBD[(1),(2),(3),(4)]を活用した。

本稿では，新型ロードスターのPTシステムNVHの最適設計の考え方と事例を，当社が進めているMBDの概要とともに紹介する。

2. PTシステムNVHとマツダのMBD

2.1　PTシステムNVH

PT NVHとは，PTの起振力により生じるNVH現象を指し，エンジン始動時の振動，アイドル中の振動，走行中のこもり音，ギヤノイズ等，エンジンの始動から加減速，停止まで，車のあらゆる運転シーンにおいて，低周波から高周波まで可聴域全域にわたる幅広い周波数の音，及び振動

*1～4　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

からなる。これらの現象には，起振力を発生するエンジン，トランスミッション等の他，発生した力を伝達するマウント，吸排気系，駆動系，サスペンション，伝達された力を受けて乗員が感知する振動騒音を発生するボデー等，すべての車両構成要素が関与する。

そしてこれらの関連要素は，強い相互作用を及ぼしあいながら複雑に応答する。例えば，高い変速段における低回転域のこもり音では，エンジンのトルク変動がフライホイール，トランスミッション，クラッチダンパ，ドライブシャフト，等で構成される駆動系のねじり振動を励起し，この振動が更にエンジン，リアデフ，PPF（Power Plant Frame），マウントで構成される振動系と連成して車体に入力される。そして車体に入力された振動は，更にボデーシェル，各種のふた物，車室内空洞の共鳴等と連成して乗員位置の音や振動となる。このようにPT NVHは，関連する要素が一体の系として相互に影響しあうため，本稿では特にPTシステムNVHと呼ぶ（Fig. 1）。

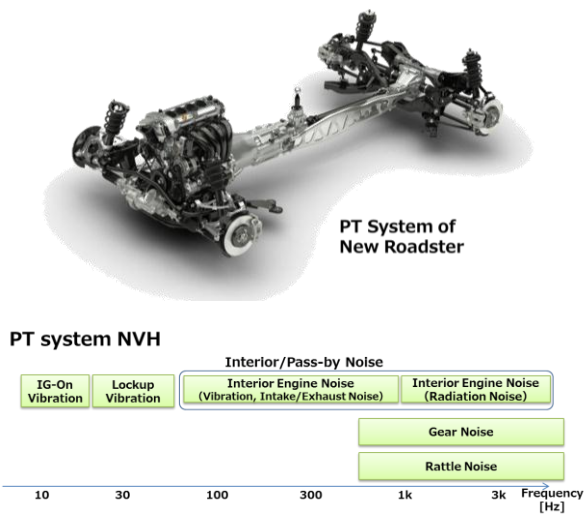


Fig. 1　PT System NVH

2.2　マツダのMBD

PTシステムNVHは，前述のとおり多くの要素の相互作用を伴うため，NVH性能向上のためにはこれらの要素を一体のものとして同時に最適化しなくてはならない。また関連要素が広いことから影響をあたえる性能も幅広く，加速応答，操縦安定性，乗り心地，燃費等もNVHと同時に最適設計する必要がある。

当社では，1990年代に開始したMDI（Mazda Digital Innovation）の活動をはじめとして早くから，旧来の実験に基づく試行錯誤開発から机上開発による合理的かつ効率的な開発への移行に取り組んできた。最適設計の対象は，古くはユニットの局部的な構造の設計パラメタ最適が中心であった。しかし近年ではモデルの大規模・高精度化に伴い，開発初期段階でのPTシステムNVHの最適化，また更に早い段階では，市場におけるさまざまな使われ方の模擬による性能要求の把握にもCAEを活用している。一方開発後期には，詳細なプラントモデルと制御モデルによる制御パラメタのキャリブレーションへの適用も行っている。このように，マツダにおける開発の机上化は，単に実機試験をシミュレーションに置き換えることによる効率化にとどまらず，CAEの全面活用による詳細設計，構想設計，制御設計，生産品質開発，更には市場要求性能の把握にまで広範囲に及んでいる（Fig. 2）。

マツダでは，一般的には制御のシステム設計として使われることが多い“MBD”の語を，上記のような車両設計における初期のシステム設計から構造設計，制御のパラメタ設計等まで含めた広い概念ととらえている。以後，PTシステムNVHの設計を，MBDプロセスに則って新型ロードスターの開発に適用した例を紹介する。

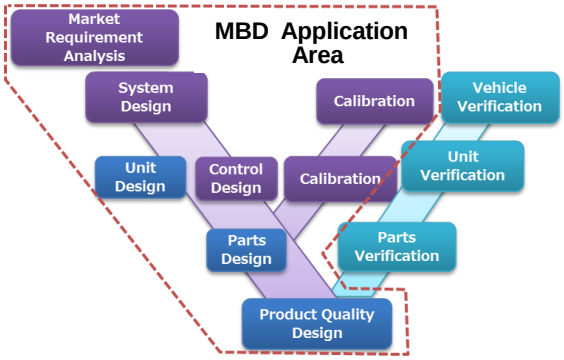


Fig. 2　MBD Application Area

3. 新型ロードスターのPTシステムNVHの課題に対するMBDの適用

3.1　PTシステムNVH性能の開発課題

一般的にPTシステムNVH性能は，走り，燃費性能と相反する。したがって，走り，燃費性能の劇的な向上を目標に掲げる新型ロードスターにとっても，これらの諸性能を高いレベルでバランスさせることが大きな課題であった。

例えば，走り性能，燃費性能の向上のための低速トルク向上やATのロックアップ範囲拡大は，こもり音の起振力となるエンジントルク変動を増大させる。アイドリング時の燃費改善のためのエンジン低回転化や，操縦安定性の向上などからのPTマウントの高剛性化はPTシステム共振周波数とエンジン回転の近接をまねくため，車体振動を悪化させる。また，車両の軽量化，例えばPTケースやボデーパネルの薄肉化，遮音材の削減は，振動応答や音響特性の増加を通じて車内音を悪化させる。

3.2　MBDによる課題解決へのアプローチ

走り，燃費性能，NVH性能は，PTマウントシステムや部品構造に大きく影響される。特にPTのマウントシステムは車両の基本骨格を大きく左右するため，実機のない段

階で慎重に選定する必要がある。新型ロードスターを開発するにあたり，これまでの開発で培ってきたMBDの技術とプロセスを活用し，PTマウントシステムの選定と，部品形状の検討を行った。

CAEモデルはPTシステムNVHに関与するさまざまな要素，例えばエンジン，トランスミッション，PPF，デフ，駆動系や排気系等をモデル化の対象とした。まず低周波性能向けのモデルを使用してPTの懸架方式やマウント等の基本構造を決定し，更に高周波向けのモデルを用いてエンジン,トランスミッションやPPF等の詳細形状を設計した。Fig. 3，4にそれぞれ低，高周波現象のモデル外観を示す。評価する性能や検討する内容により，必要な自由度，再現すべき現象の性質が異なるため，モデルを使い分けた。

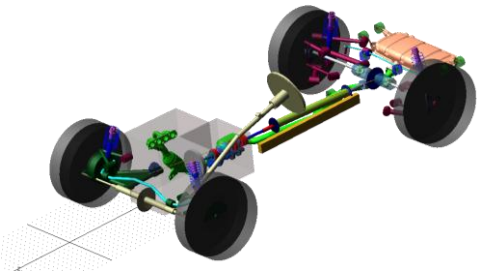


Fig. 3　CAE Model for Low Frequency NVH

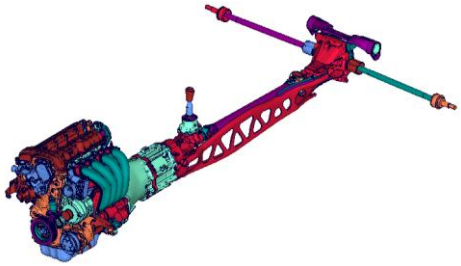
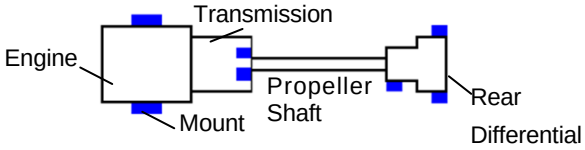


Fig. 4　CAE Model for High Frequency NVH

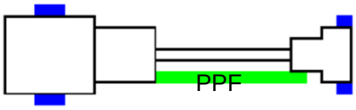
4. PTシステムNVHの設計

4.1　PT懸架方式の選定

開発最初期に，NVHや走り性能と質量の基本的な素性を決定づけるPT懸架方式の選定を行った。候補として，エンジンートランスミッションとリアデフを独立して懸架する一般的なトランスミッションマウント方式（a）と，エンジンートランスミッションとリアデフをPPFで接続してPTシステムを一体として懸架するPPF方式（b）を検討した（Fig. 5）。



(a) Transmission Mount Type



(b) PPF Type

Fig. 5　PT Mount Type

選定の基準は，（1）低周波NVH性能から要求されるPTシステム共振と，ボデー，サスの共振，PT起振力との周波数配置（モーダルアライメント）のコントロール性，（2）走り性能の要求としてエンジントルク入力に対するGの立ち上がりの速さと収束性，（3）シャシー側のフレームも含めた重量とした。（1）～（3）について，独自の指標を用いて評価し比較した結果，Fig. 6に示すとおり（1）については同等だが，（2）（3）はPPF方式が有利であることが分かった。これにより，歴代のロードスターで採用してきたPPF方式の優位性が改めて確認され，新型ロードスターでもこの方式を一層進化させることとした。

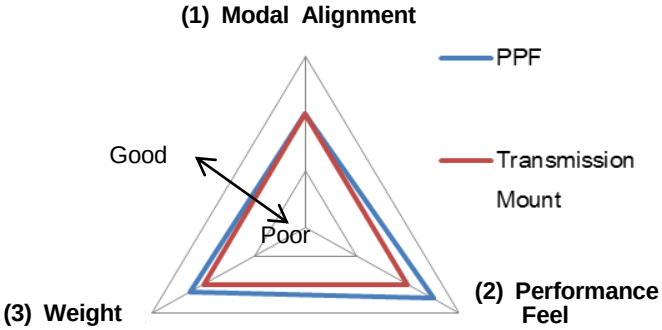


Fig. 6　Comparision of PT Mount Type

4.2　アイドル振動，低回転こもり音

本節では，PT全体にわたる基本構造である，エンジンーPPFーデフのマウント系と，駆動系ねじり振動の設計を決める，アイドル振動と低回転時のこもり音について述べる。

（1）アイドル低回転化と振動の両立

燃費改善のためのアイドル低回転化で，起振力とPT剛体共振の周波数が近接する。また，PTの軽量化や乗り心地の向上のためのPTのマウント高剛性化は，いずれもPT剛体共振周波数を上昇させるため，一層起振力周波数と近接する。そこで以下の施策によりアイドル低回転化と振動の両立に取り組んだ。

①　PTロール共振周波数上昇の抑制

アイドル振動に大きく寄与するPTの剛体ロール共振周波数は，主にPTの慣性とロール剛性で決まる。ロール剛性はエンジンマウントの上下剛性と左右スパン（距離）の

積で表される。乗り心地向上のために必要な上下剛性を保ちつつロール共振周波数を低下させてアイドル振動の悪化を防ぐため，左右スパンを縮小した（Fig. 7）。初期設計にこの要件を考慮することによりステアリングシャフトとマウントの干渉を回避するレイアウトを確保し，マウントスパンを前モデル比10%程度短縮した。これにより前モデル比でPTを軽量化し，かつマウント剛性を向上する中でPTロール共振周波数の上昇を抑制できた。

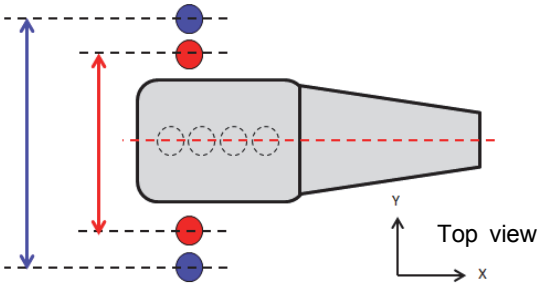


Fig. 7　Engine Mount Lateral Span

② PT剛体共振モード形状の最適化

アイドル時のエンジントルク変動は主にPTのロール運動を励起するが，共振モード間の連成によりヨー共振が励起され，アイドル時の車体の左右振動が悪化する。新型ロードスターでは，PT重心と弾性ロール軸（エンジンの動的なトルク入力に対してPTが回転する軸）が接近するようエンジンマウントの剛性配分と上下方向取り付け位置を設計した。この結果ロール共振とヨー共振の連成を改善し，アイドル時のヨー共振の励起を減少できた。

以上により，乗り心地要件を満足しながら振動悪化させることなくアイドル低回転化を実現した（Fig. 8）。

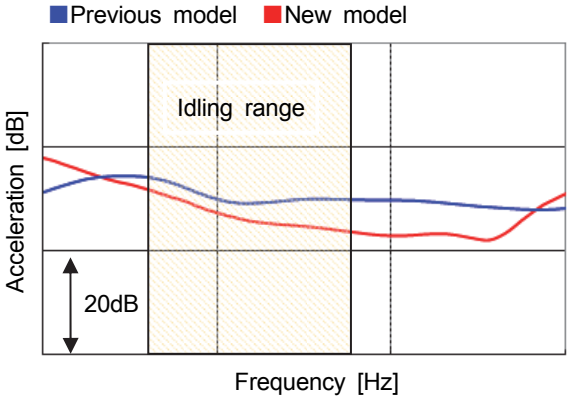


Fig. 8　Floor Vibration During Idling

(2) AT車ロックアップレンジ拡大とこもり音の両立

低燃費化のためのATロックアップレンジ拡大によるエンジントルク変動周波数の駆動系の共振周波数への近接は，こもり音及び振動を悪化させる。この現象に関与する，駆動系ねじり共振，及びデフの剛体共振特性を改善した。

① 駆動系2次共振特性の改善

駆動系のねじり共振周波数を決める重要なばね要素にロックアップダンパがある。新型ロードスターでは前モデル比大幅に低剛性なダンパ（Long Travel Damper）を採用することで，駆動系2次共振周波数を低下させ，常用域の振動応答特性を大幅に改善した（Fig. 9）。

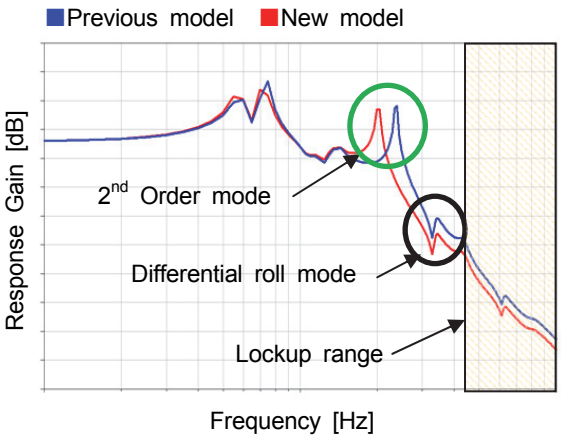


Fig. 9　Driveline Frequency Response

② デフロール共振特性の改善

車体振動の観点から，デフのロール共振周波数はエンジントルク変動周波数から離すために低周波化することが望ましいが，低過ぎるとアイドル振動の悪化につながるため，適正な配置が重要である。デフは前モデルより軽量化したため，デフマウントの剛性を下げ，デフロール共振の周波数上昇を抑制し，アイドル振動とロックアップ時の振動が両立する範囲にデフのロール共振周波数を配置した。

以上の取り組みで，前モデルよりロックアップ時の振動を大きく低減し，NVHの悪化を招くことなく大幅なロックアップ領域の拡大を実現した（Fig. 10）。

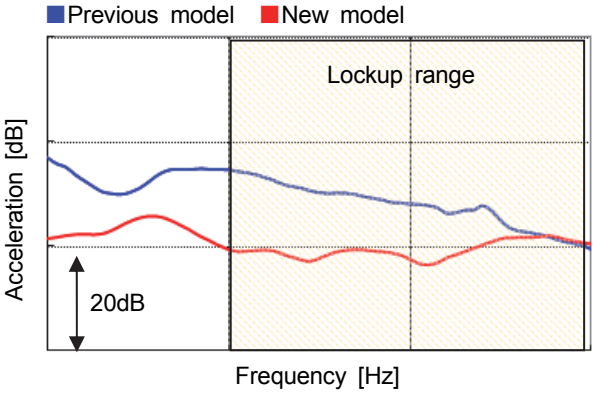


Fig. 10　Floor Vibration During Lockup

4.3　高回転こもり音

直列4気筒エンジンでは，ピストン，コンロッドの往復慣性力によるエンジン回転2次成分の力に起因する問題が非常に多い。近年のFF車はPTの高剛性化が進んでいるが，

FR車ではトランスミッションの細長い構造により，エンジンとトランスミッションが組み合わされて生じるPTの曲げ／捩じりモード（PPB：Power Plant Bending）が比較的低い周波数に存在する。このPPBがエンジン回転2次の力により励起され，振動としてマウントから車体に伝わることで特に高回転で車内のこもり音となる。

新型ロードスターは前モデル同様に高回転エンジンを採用したため，PPBの高周波化に加え，ロードスターの特徴であるPPFと駆動系（デフやドライブシャフト）の弾性モードの最適設計が課題である。前述のPTマウント系に続いて，PPBや駆動系についても，最適なモード配置・形状となるように取り組んだ。

（1）PPB周波数特性への取り組み

狙いのPPB周波数特性を最軽量で実現するため，トランスミッションケースの形状最適化を行い，必要な部位のみ肉厚を厚くしリブが不要となる構造にした（Fig. 11）。更にこのトランスミッションケースの最適化をエンジンとトランスミッション合わせ面のボルトパターン検討と組み合わせて行い，PPBが成立する最小の結合範囲となるボルト配置を決定した。CAEを活用したこれらの取り組みにより，軽量化しつつ前モデル同等のPPB周波数特性を確保した。

また，マウントブラケットをPPBの節位置に配置し（Fig. 12），PPB起因による振動を車体側に伝わりにくい構造とした。

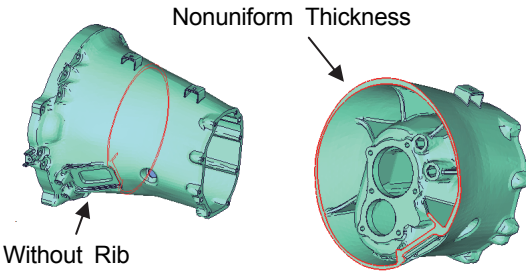


Fig. 11　Transmission Case Optimization

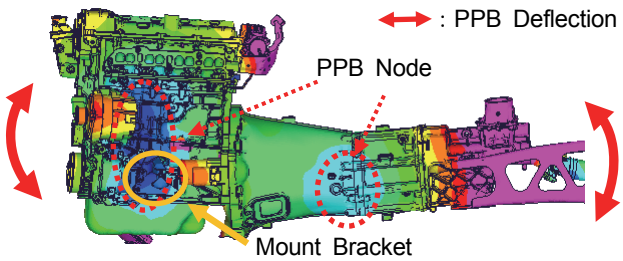


Fig. 12　PPB Mode Shape and Mount Position

（2）駆動系共振への取り組み

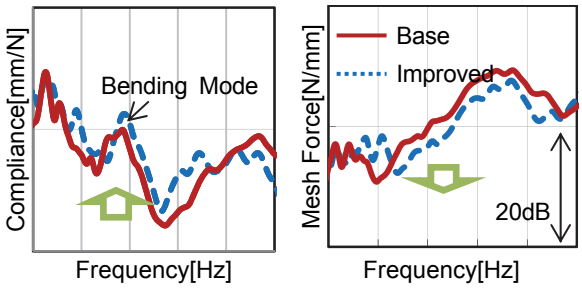
駆動系にはPPF，プロペラシャフト，ドライブシャフトなどのローカルモードに加え，互いに連成するモードが低周波から多数存在する。新型ロードスターでは，他性能との整合を取りながらPPFの形状最適化，ドライブシャフトのローカルモードにチューニングを施し，エンジン2次振動の伝達を抑えた。

4.4　ギヤノイズ

懸架方式，及びPT全体にわたる振動特性の最適設計を受け，PTの重要な構成ユニットであるトランスミッションの基本構造及びケース等形状の最適化設計を行った。新開発のマニュアルトランスミッションに対して，ギヤノイズの観点からメッシュフォース，伝達特性の二つの振動特性に着目して，軽量化との両立に取り組んだ。

（1）メッシュフォースの最適化

ギヤノイズの起振力であるメッシュフォースは，対となるギヤの自己コンプライアンスが大きいほどレベルが小さくなるため[4]，起振力の低下には関連する振動モードの応答を増加させることが有効である。メインドライブギヤの自己コンプライアンスに対してカウンタシャフトの曲げモードの寄与が高いことが判明したため，信頼性に影響のない範囲でシャフトを細径化し，曲げ剛性を落としてメインドライブギヤのコンプライアンスを増加させ，メッシュフォースを低減した（Fig. 13）。



(a)Countershaft Complianse　　(b) Mesh Force

Fig. 13　Mesh Force Improvement

（2）軽量化と振動特性の両立

走り，燃費性能の向上のためにトランスミッション，リアデフなどのケース設計において軽量化に取り組んだ。ケースを単純に軽量化し軸の支持剛性が低下した場合，ギヤかみ合い部のアライメントエラーが増加するためギヤノイズが悪化する。そこで位相最適化手法[3]を適用して，高剛性で軽量な基本形状とした。

例として，リアデフキャリアの位相最適化の結果をFig. 14に示す。リアデフは軽量化のため，鋳鉄からアルミへの材料置換を実施したが，位相最適化より算出した効果的なリブの配置により鋳鉄と同等の支持剛性を保つことができた。トランスミッションでも，前モデルに対して同等のシャフト支持剛性とPPB特性をキープしながら軽量化を実現した。

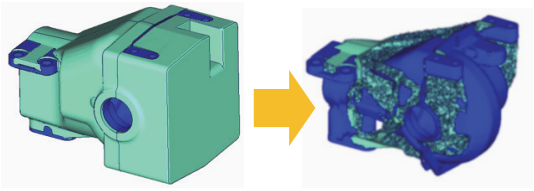


Fig. 14　Topology Optimization of Differential Carrier

また，PPFについても最適化手法を適用して軽量化とギヤノイズをはじめとするPTシステムNVH性能，走り性能の向上の両立に取り組んだ。位相最適化の結果を，断面形状や軽減孔の開け方に反映し，詳細形状については形状最適化も実施した。その結果，前モデルと比較して24%の軽量化を実現した（Fig. 15）。

(a) Previous Model　　(b) New Model

Fig. 15　New and Previous PPF

5. おわりに

マツダが長年進めてきたMBDの最新の成果として，新型ロードスターのPTシステムNVHの開発事例を紹介した。システムCAEモデルの適用による基本構造の最適設計により，従来を大きく上回る走りと燃費性能を，NVH，及び関連する周辺性能を犠牲にすることなく実現することができた。今後更に予測モデルの精細化，精度向上と開発プロセスの進化を進めることにより，「人馬一体」性能，燃費，デザインを極め，マツダのブランド価値を一層磨き上げてゆきたい。

参考文献

(1) 小泉ほか：駆動系の非線形特性を利用した4WD車の燃費とNVの最適化，自動車技術会春季大会前刷集，No.44-12，pp.5-8（2012）
(2) 児玉ほか：駆動軸トルクと振動系の最適化によるi-stopシステムの再始動時振動の低減，自動車技術会駆動系シンポジウム2010前刷集，No.05-10，pp.6-11（2010）
(3) 三浦ほか：トランスミッションケース開発における基本骨格形状最適化，自動車技術会駆動系シンポジウム2013前刷集，No.03-13，pp.12-16（2013）
(4) 工藤ほか：モデルベースによるSKYACTIV-DRIVEのNVH 開発，マツダ技報，No.31，pp.60-66（2013）

■著　者■

小泉 陽

児玉 真吾

陳 宇

松岡 和洋

特集：新型ロードスター

23

新型ロードスターのシャシーダイナミクス
Chassis Dynamics Performance of New Roadster

友貞　賢二*1　野田　曜一*2　戸田　良二*3
Kenji Tomosada　Yoichi Noda　Ryouji Toda

要　約

SKYACTIV-シャシーは走る歓びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現したうえで「人馬一体のドライビングプレジャー」と快適性と安心感改善による「走りの質」の向上を実現した。新型ロードスターは歴代のロードスターの人馬一体を更に突き詰め，人の感覚を大切にした“感”にこだわり，究極の人馬一体を目指した。フロントサスペンションにはダブルウィッシュボーン式，リヤサスペンションにはマルチリンク式というサスペンション形式とし，前モデルを継承しながら，新たにFR用SKYACTIV-シャシーを開発した。ステアリングギアには，マツダとしては初のデュアルピニオン式電動パワーステアリングを採用した。これらにより軽量化を実現しながら，究極の人馬一体を体現する軽快感と意のまま感を実現した。

Summary

With further evolved “Fun to Drive” and significant weight reduction, which supports environmental friendliness, Mazda SKYACTIV chassis has achieved “enhanced Jinba-Ittai (Oneness between driver and car) driving pleasure” and realized higher “driving quality” that provides enhanced comfort and a sense of security. The New ROADSTER is aimed at achieving an ultimate level of Jinba-Ittai with the focus placed on human senses. While adopting the double-wishborn front suspension and multi-link rear suspension systems, we have developed the new SKYACTIV chassis to use for front –engine, rear-drive (FR) vehicles. For steering gear, we have applied the dual-pinion electric power assist steering system, which is first application in Mazda cars. By so doing, we have been able to realize a sense of briskness and responsive drive as an ultimate level of Jinba-Ittai, while achieving a weight reduction at the same time.

1. はじめに

SKYACTIV-シャシーは走る歓びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現し「人馬一体のドライビングプレジャー」の向上，安心感や快適性の改善による「走りの質」の向上をねらい，サスペンション・ステアリング機能を根本から見直すことで，一体感・安心感・快適性の間にある背反性能を高次元で両立するため，技術開発によるブレークスルーを実現した。

本稿では，後輪駆動方式（FR方式）としては初のSKYACTIV-シャシー，及びその達成性能について紹介する。

2. 開発のねらい

人馬一体とは，人の操作に対するクルマの反応が人の感覚に合っていて，クルマと一体と感じること。つまり意図どおりにクルマが動くこと，と定義している。歴代のロードスターはダイナミクス性能の方向性として，“人馬一体”を目指してきた。

この方向性は，スカイアクティブ技術を搭載した商品群CX-5，アテンザ，アクセラ，デミオの流れにつながっており，新型ロードスターでは，究極の人馬一体をねらった。その中で，新型ロードスターは特に人の感覚を大切にした“感”にこだわり，人を中心とした開発に取り組んだ。究極の人馬一体を実現するために，軽快感と意のまま感をキーワードとして開発に取り組んだ。軽快感は，単に軽い

*1，2　シャシー開発部
Chassis Development Dept.

*3　操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

車でキビキビ動くのではなく，操作に対する反応の気持ち良さ，車両運動をドライバに気持ち良く伝えることを目指した。意のまま感は，どのような状況でもドライバがハンドル操舵した時に思ったとおりに車両挙動が発生し，安定してコントロールできることを目指した。

3. 達成手段

3.1　構造と特徴

（1）フロントサスペンション

新型ロードスターのフロントサスペンションには，従来のロードスターと同様，コンパクトでジオメトリの設定自由度の高いインホイールタイプのダブルウィッシュボーン式サスペンション（Fig. 1）を採用し，アライメント，ジオメトリの最適化をねらいハードポイントを一新した。クロスメンバはリジッド結合として剛性を確保した。また，高張力鋼板を採用し，板厚の最適化を行い，軽量化を実現した。クロスメンバ下面には補強部材としてアルミ製アンダカバーを配した。このアンダカバーは平面視のクロスメンバを面で支え，効率的にクロスメンバ全体剛性を向上させ，後端にはメンバとしての断面を形成しトランスバースメンバとしての機能も付与した。これらによりフロントサスペンションの剛性を効率的に向上させ，同時に軽量化を実現した。ロアアーム，アッパアーム，ナックルにはアルミを，またハブは4本のハブボルトを採用し，軽量化した。

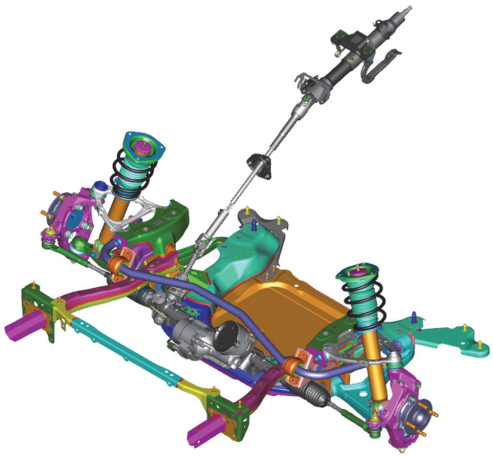


Fig. 1　Front Suspension and Steering

（2）リヤサスペンション

新型ロードスターのリヤサスペンションには，従来のロードスターを更に進化させたマルチリンク式サスペンション（Fig. 2）を採用した。リヤクロスメンバはボデーフレームと一体となって車体剛性を高める構造とした。具体的には前後のクロスメンバとそれらをつなぐ縦メンバで構成され，前側のクロスメンバはデフの下に配置し，前後をつなぐメンバもメンバ下面で結合し，ボデーのフレームと合わせて立体的なボデー構造を構成し，高いボデー剛性を実現した。全てのリンクはストレートなパイプで構成し，軽量かつ高剛性なリンクとした。

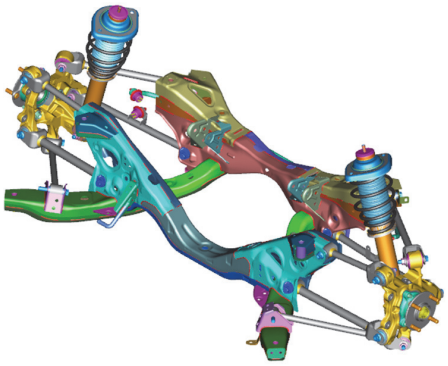


Fig. 2　Rear Suspension

（3）ステアリングギア

新型ロードスターのステアリングギアは燃費性能に優れた電動パワーステアリングとした。更にデュアルピニオン式をマツダとして初めて採用した。ハード面ではブラシレスモータ採用によりイナーシャ感及びフリクション感を低減，またソフト面では前モデルが操舵トルク及び車速情報でのアシスト量調整だったのに対し，新型ロードスターでは絶対舵角及びハンドル操舵方向を情報に加え，より緻密でフレキシビリティの高いアシスト量の調整を可能にした。

3.2　軽快感

新型ロードスターの軽快感は，単に軽い車でキビキビと動くだけでなく，爽快な運転感覚，操作に対する反応の気持ち良さをねらった。

（1）制動時のピッチング挙動

車両が制動する際には，制動力と重心の高さによって，回転モーメントが発生する。このモーメントにより，前輪は沈み込み，後輪は持ち上げられる挙動を示す。新型ロードスターはフロントのアンチノーズダイブ特性を見直し，また，リヤサスペンションのアンチリフト特性を強めた。具体的にはリヤサスペンションのリンク配置を見直し，リーディングリンクを設定することによりキャビンのパッケージを確保しながらアンチリフトジオメトリ特性を強くすることを可能とした。これにより，乗員の視点が制動時に持ち上げられる挙動を抑制し，制動すると，安定するように沈み込むような気持ちの良い挙動を実現した。

（2）操舵特性

新型ロードスターはステアリングを切り込む際の，操舵トルクの変動が少なく，正確に操舵できることを目指した。ステアリングギアはデュアルピニオン式を採用することにより，ラック軸上でアシストしているため，接地点からパワーユニットまでの経路が短くでき，その間の剛性が高く

できる。また，ステアリングギアをクロスメンバにリジッドでマウントすることにより更なる高剛性を実現した。この高剛性により，操舵角を正確に再現させた。

（3）ヨー慣性モーメント

車両の前端，後端に位置するサスペンションの軽量化や車両全体で軽量化に取り組んだ結果，ヨー慣性モーメントの低減を実現した。車両寸法によって決定されるヨー慣性モーメントに対し，新型ロードスターは同等の車両寸法，車両重量の他銘柄車と比較して，より小さいヨー慣性を実現した。この小さいヨー慣性は基本的な運動性能の向上に寄与し，軽快感を実現した（Fig. 3）。

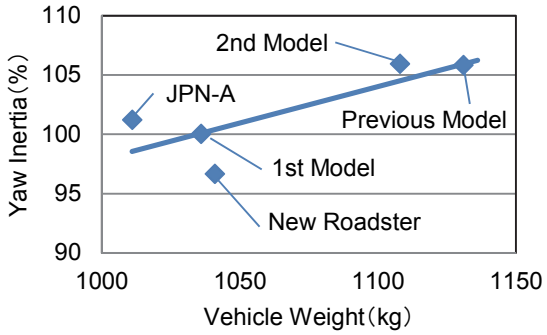


Fig. 3　Yaw Inertia

3.3　意のまま感

新型ロードスターでは，ハンドル等を操作した際に，ドライバが意図したとおりに動くことを目指した。また路面との接地状況が掴め，手足のように動かせることを目指した。

（1）コーナリング時のコントロール性

中高G域のコーナリング時において，車両の実舵角はタイヤからの反力により，パワーユニットまでの剛性に応じて減少していく。新型ロードスターはステアリングギアのパワーユニットをラック軸上に配置することでタイヤからパワーユニットまでの剛性を向上させ，操舵角と実舵角をリニアにすることにより，ドライバのねらったとおりの操舵角に応じた正確な実舵角を実現している。また，フロントキャスタ角を前モデル比較で増加させ，操舵時のネガティブキャンバ角を増加させ，アンダステア特性を抑制し，意のままのコーナリングコントロール性を実現した。

また，リヤサスペンションのダンパを微小でも効率良く減衰力を発生するよう，ホイールストロークに対するダンパストロークの比率（ダンパレバー比）を1：1とするようダンパをハブサポートに直付けとした。更に，ダンパの取り付け位置を見直してダンパレバー比がどのストローク位置においても変化が少ない配置とした。これらによりいかなる状況で走行しても期待どおりの減衰力を得ることを可能とした（Fig. 4）。

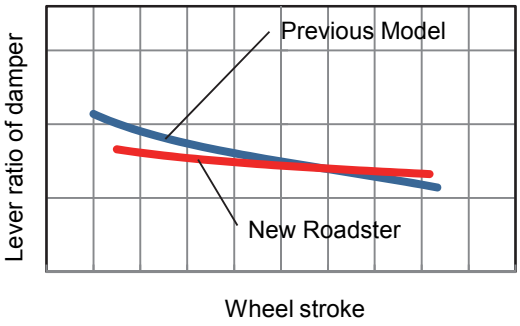


Fig. 4　Lever Ratio Change of Rear Damper

（2）コーナリング時の安定性

新型ロードスターはリヤサスペンションの横力コンプライアンスステア特性を見直した。SKYACTIV-シャシーと同様な考え方に基づき，リンクの配置を最適化して，リヤタイヤの横力が入った場合の弾性軸を前傾とすることで，安定して横力－トーインとなる特性を実現した（Fig. 5）。これにより横力が大きくなるに従い，適切なトーイン特性を与え，コーナリング時の安定性を向上させた。またフロントサスペンションには接地点のネガティブキングピンオフセットを採用した。これにより，コーナリング中含め，制動時の安定性を高めた。

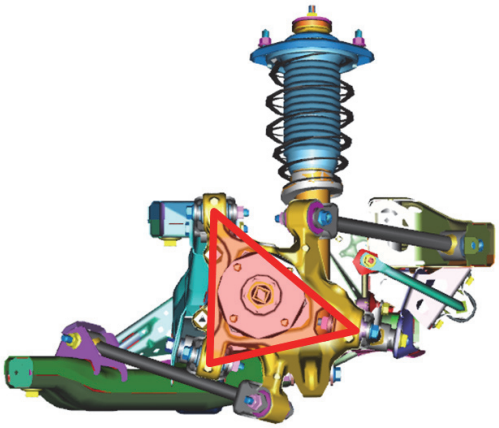


Fig. 5　Rear Suspension

（3）接地感

常に適切な路面情報をドライバに伝えることにより，接地感の向上を目指した。具体的には，不要な振動を除き，路面の状況をハンドルにフィードバックした。また，デュアルピニオン式採用により，路面からの入力をラック軸上のピニオンで減衰させ，必要量の情報をステアリングシャフトに伝えた。更に，タイヤからパワーユニットまでの剛性が高いことにより，タイヤが外乱によって勝手に舵角を変化させることなく，路面の情報を適切に伝達することにより，接地感を向上させた。

4. 達成性能

4.1　軽快感

新型ロードスターは，前述のように単に軽い車でキビキビと動くだけでなく，操作に対する反応の気持ち良さで，軽快感を実現することに取り組んだ。その実現した性能について，紹介する。

気持ち良さは，ドライバの微小な入力から，リニアに期待どおりに微小にかつスムーズに車両が反応することで実現させた。Fig. 6に操舵力とヨーレートの関係を示す。操舵の初期から小さな操舵力でリニアにヨーレートが立ち上がっており，操舵初期の車両応答のリニアリティを実現している。

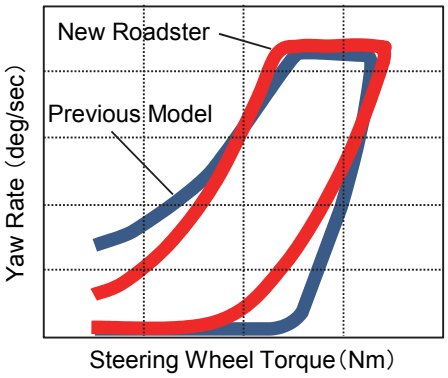


Fig. 6　Steering Wheel Torque vs Yaw Rate

また，レーンチェンジ時の切り込み始めの操舵トルクのグラフを示す。新型ロードスターは前モデルに比較して切り込み時のトルク変動が少なくできており，操舵初期の操舵力のリニアリティを実現している（Fig. 7）。

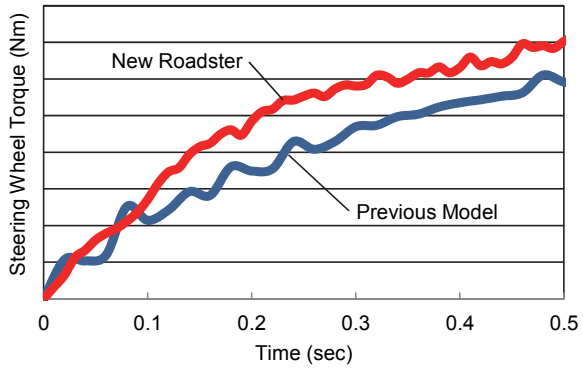


Fig. 7　Steering Wheel Torque at Lane-change

操舵初期のヨー運動に加え，サスペンションが小さな入力にも反応するように，サスペンションの上下動のフリクションを適正化した。Fig. 8にフロントサスペンションの上下動のフリクションの比較を示す。

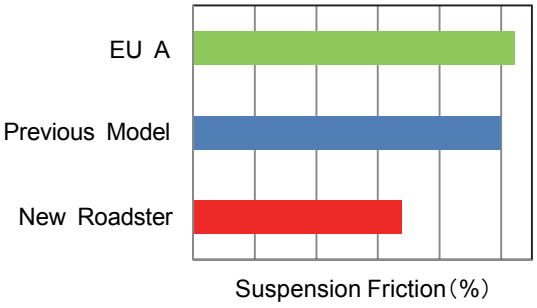


Fig. 8　Front Suspension Friction

これにより，操舵初期の小さな入力に対し，ヨー運動と同時にフロントサスペンションがストロークすることでダイアゴナルロールを始め，自然なロール特性を実現した。これらの微小な入力に対し，ドライバの期待どおりの微小でリニアな車両挙動を示すことにより，気持ち良さ，つまり軽快感を実現している。

Fig. 9，10に新型ロードスターと前モデルのブレーキング時のフロントサスペンションとリヤサスペンションの上下動を比較した。新型ロードスターはねらいどおり，リヤサスペンションの浮き上がりを抑制し，フロントサスペンションの沈み込み量は少し大きめにして，制動時のドライバの視点が沈み込むような動きを実現し，気持ち良いブレーキング挙動を実現した。

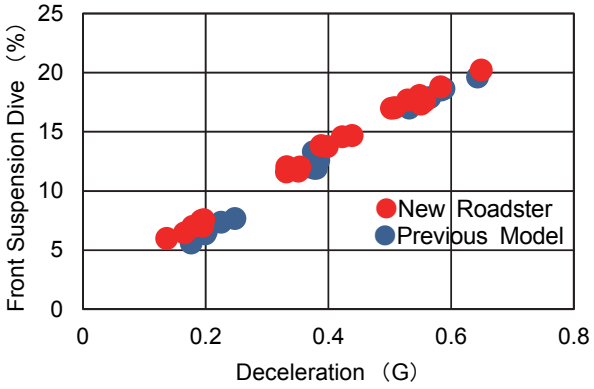


Fig. 9　Front Suspension Dive at Braking

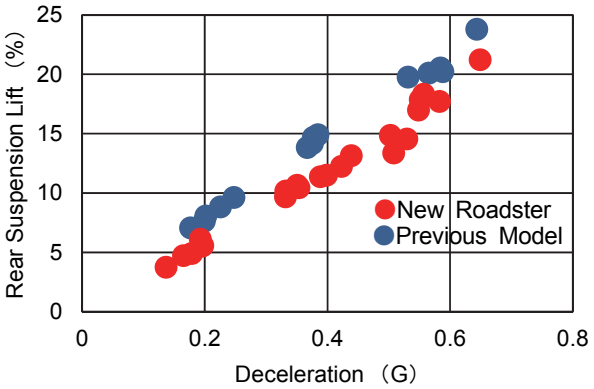


Fig. 10　Rear Suspension Lift at Braking

4.2　意のまま感

新型ロードスターはドライバの意図どおりに車両が挙動することを，また意図しない挙動を抑え込むことに取り組んだ。Fig. 11，12に緩加速旋回時の横Gと操舵角度，及びリヤスリップアングルの関係を示す。

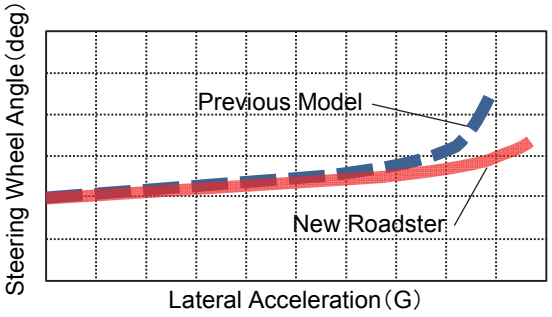


Fig. 11　Constant Cornering Radius Test

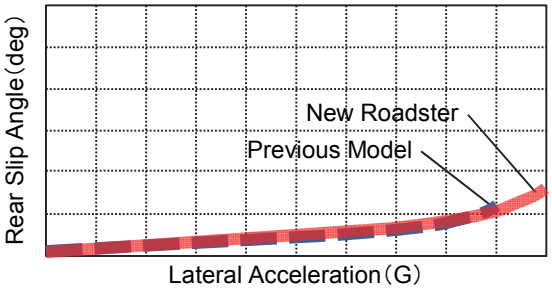


Fig. 12　Constant Cornering Radius Test

限界時にはアンダステア傾向を示しているが、新型ロードスターは前モデルに比較してアンダステア傾向を抑制しており，ニュートラルステア方向の特性を有していることが分かる。同時に，新型ロードスターは前モデル比較，高いコーナリング限界を有している。これらによりドライバの意図どおりの挙動を示し，意図しない挙動を抑制することに成功している。

また，意のまま感を実現するためには，路面の状況が手に取るように分かることが重要である。Fig. 13に緩加速旋回時の操舵角のグラフを示す。保舵時に舵角の変動がなく，路面からの適切なフィードバックを感じ，安定した保舵ができていることを示している。

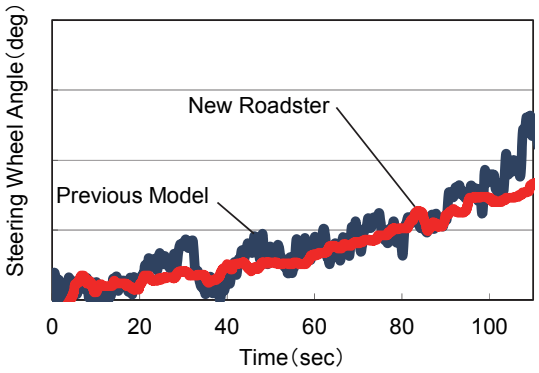


Fig. 13　Constant Cornering Test

5. おわりに

新型ロードスターのシャシーダイナミクス性能について簡単に説明した。FR用SKYACTIV-シャシーを新規開発し，前モデルに対して大きくダイナミクス性能を向上できたと確信している。今後も更なるシャシーダイナミクス性能の向上に取り組んでいく。

参考文献

（1）山本忠信ほか：SKYACTIV-シャシー，マツダ技報，No.29，pp.53-60（2011）
（2）村田親ほか：SKYACTIV-シャシーのダイナミクス性能，マツダ技報，No.30，pp.32-36（2012）
（3）吉村匡史ほか：新型アクセラのシャシーダイナミクス性能，マツダ技報，No.31，pp.19-23（2013）

■著　者■

友貞 賢二

野田 曜一

戸田 良二

特集：新型ロードスター

24 新型ロードスター SKYACTIV-BODYストラクチャの開発
Development of SKYACTIV-BODY Structure for New Roadster

木村　隆之*1　阪井　克倫*2　山内　一樹*3
Takayuki Kimura　Katsunori Sakai　Kazuki Yamauchi
丸山　賢司*4　四柳　泰希*5　岡沢　恭久*6
Kenji Maruyama　Taiki Yotsuyanagi　Yasuhisa Okazawa

要　約

新型ロードスターは，“だれもが楽しめる”というロードスターの原点に立ち帰り人馬一体感を進化させた。これを支えるボデーストラクチャは，CX-5・アテンザ・アクセラで採用したSKYACTIV-BODYのアプローチをFRのオープンボデーに適用することで，操縦安定性能，衝突安全性能，NVH性能を劇的に向上させながら，初代ロードスターを上回る軽量ボデーの実現を目標設定した。また，デザインテーマ「魂動」によってスポーツカーとして美しさと生命感をカタチにすることを目指した。

結果として，操縦安定性能やNVH性能の基礎となる車体剛性の向上やトップレベルの衝突安全性能を実現しながら，ホワイトボデー質量で3代目217kg，2代目230kg，初代211kgを下回る197kgを達成し，セグメント中で最軽量を実現した。本稿ではこの軽量コンパクトなオープンボデー開発における実現手段を紹介する。

Summary

New Roadster is a product that is made by getting back to basics of Roadster “Everybody can enjoy” and focused on improving “Jinba-Ittai” performance. Following CX-5・Atenza・Axela, FR open body structure is applied the same approach of SKYACTIV-BODY and aimed to improve handling and stability, crash safety and NVH performance by lighter weight than the first Roadster. And we aimed to embody the beautiful sporty styling and a feeling of vitality by design theme “KODO: SOUL of MOTION”.

Consequently, body stiffness (fundamental of handling and stability and NVH performance) and crash safety are improved and the weight of body in white results in 197kg (3rd Roadster 217kg, 2nd Roadster 230kg, 1st Roadster 211kg) which is the lightest weight in open car segment. This paper outlines development activities for a light weight open body structure

1. はじめに

今回4代目新型ロードスターの開発に当たり，FRオープンスポーツカーの車体に求められる機能をもう一度ゼロから見つめ直した。実際に運転する車両状態で実現すべき「人馬一体」のキーコンセプトをボデーストラクチャのレベルにブレークダウンした。

開発目標は，人馬一体感とNVHの基礎となる車体剛性感の劇的進化。リアルワールドでの安全性向上のために衝突時のエネルギー吸収量の向上。そして，代々進化させてきたNVH性能の継続進化を目標とした。

更にライトウエイトスポーツの根幹をなす軽量化においては1989年発売の初代ロードスターを超える最軽量値を目標に掲げた。これらの実現には初代から続くロードスターの伝統を受け継ぎ，乗員の運転姿勢や乗降性を含めて人馬一体感を表現すべく構造要件を定めた。

スポーツカーとしての美しさと生命感をカタチにすべく，「魂動」の深化を目指すデザインの方向をボデーストラクチャとしてサポートした。

2. 開発プロセス

2.1 開発アプローチ

SKYACTIV-BODY(1)で紹介した開発アプローチ
① 力学の原理原則から構造の理想化
② 工法選択による接合効率の向上
③ 材料・板厚の適正化
を基に新型ロードスター開発における変化点
① エンジン／ミッションの縦置き化

*1～5　ボデー開発部
Body Development Dept.
*6　車両開発本部
Vehicle Develop Div.

② PPF（パワープラントフレーム）の採用
③ FFベースの4WD車に対しリヤ・デフを大型化
④ フロント&リヤ・サスペンションのシステム変更
⑤ オープンボデー化

によるボデー機能とカラクリ（性能のメカニズム）の変化を明確化し，それに対応するボデー構造を理想化した。

2.2 基本コンセプト

ボデーの理想の骨格を実現するためのコンセプトを
① 基本骨格のストレート化
② 連続フレームワーク
③ マルチロードパス。特にハイマウント・バックボーンフレームへの伝達強化

として開発構想を立案した（Fig. 1）。

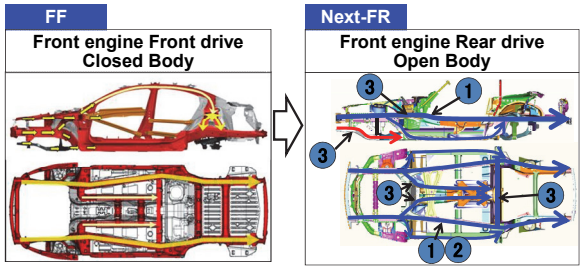


Fig. 1　SKYACTIV-BODY Vision

2.3 理想構造化のプロセス

理想構造を構築するに当たり
① 衝突，剛性，NVH等に対応するフレームワークの構造検証
② 機能配分量の適正化
③ 品質工学による寄与度分析を用いた検証

を繰り返した。特にフレームワークの検証においてトポロジー解析を実行した。その結果ハイマウント・バックボーンフレームとフロント・サストップの結合剛性向上が車体剛性の向上に有効であることが明確となり，開発構想の進化につながった（Fig. 2）（ topology）。

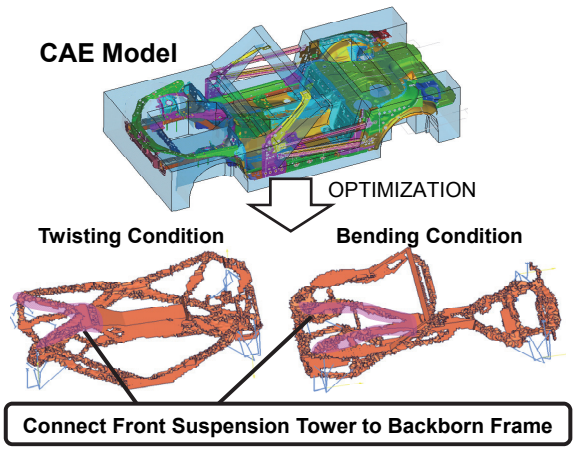


Fig. 2　Topology Analysis

3. ボデー構造

新型ロードスターのボデー構造の特徴をねらいと適用技術を踏まえて紹介する。

3.1 フロント・フレーム，クラッシュカン

衝突性能の実現のため，3代目ではクラッシュスペースが短いまま780MPa級超ハイテン材を採用し高い耐力を出すことで衝突エネルギーを吸収していた。これを，4代目ではクラッシュスペースをより長く確保し，耐力を相対的に下げる手法とした。

そのために，よりクラッシュスペースを広げる工夫を行い，バンパレイン後端からサスペンションタワー部までの範囲を十字断面とした。稜線の多い十字断面の効率の良さと耐力目標減から，材質を780MPa級超ハイテン材から440MPa級ハイテン材化し，板厚を1.6t ⇒1.2t / 1.4t に低減し，軽量化した。

次に，サスペンションタワー後方も潰してクラッシュスペースを無駄なく使い切る構造とした。この部位はサスペンションタワー支持部にもなるため，衝突性能と剛性のバランス取りに注力し，CAE 検討を繰り返しながら設計仕様を決定した。

これらの結果から，衝突時のキャビンへの入力が低減され，ボデー全体の軽量化へ寄与した。また，限られたスペースを無駄なく潰しきることで，車両のフロント・オーバハング短縮につながり，デザインを向上させた（Fig. 3）。

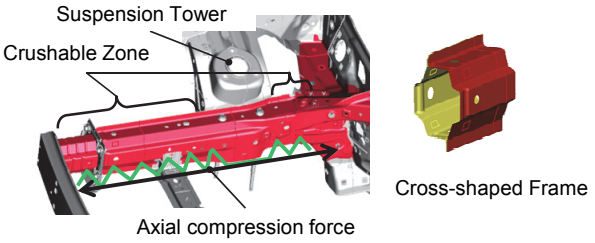


Fig. 3　Front Frame Structure

3.2 ダッシュクロスメンバ

ダッシュクロスメンバはフロント・フレームとバックボーンフレームをつなぐ部材であり，2.3で前述のように両者の結合を強化することで車体剛性は向上し，かつ前面衝突時の乗員足元保護にも有効である。一方，構造体を実現するには，ドライビングポジション適正化による足元スペース拡大や，ヨー慣性モーメント低減のためのエンジン後方配置等のパッケージとの両立が課題となった。

そこで車体性能とパッケージを高次元でバランスさせるため，従来車で断面内に設定していたステアリングシャフト用貫通穴を独立させて断面不連続部位をなくすとともに，もち上げた断面を緩やかにバックボーンフレームへつなぎ，部材全体で荷重を受ける構造として，足元スペース

に影響なく断面拡大を図った（Fig. 4）。また，1500MPa級ホットスタンプ材を適用し，構造変更と合わせて曲げ耐力を向上させた（5. 材料参照）。これらにより，パッケージと性能の両者に妥協なく，重量低減しながら高強度，高剛性化を実現した。

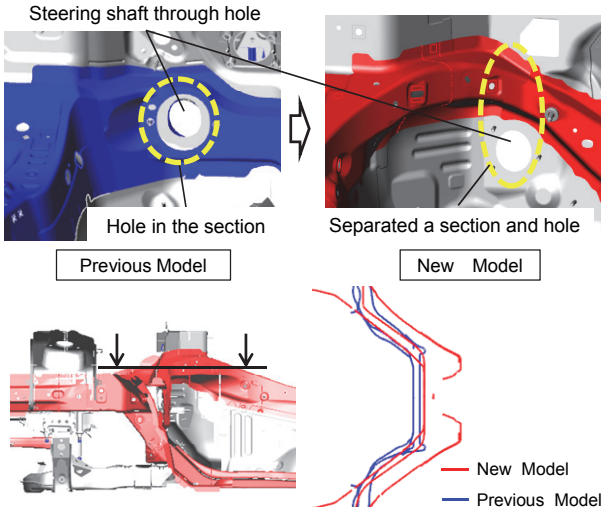


Fig. 4　Dash Cross Member

3.3　ハイマウント・バックボーンフレーム

バックボーンフレームはオープンボデー化に伴う剛性ダウンを，サイドシルに頼らずに向上できる技術である。新型ロードスターでは，SKYACTIV-BODYのストレート化，連続化の考えを徹底し，急激な折れや穴による断面不連続が生じないよう，開発初期段階から関連部門と一丸となりONE MAZDAで活動し理想構造化した。部材がもつポテンシャルを最大限発揮させた。

（1）断面稜線のスムーズ化

インパネ取り付けなどを適正化し，平面視，側面視ともにフレーム稜線の角度変化を最小限として，部材全体で荷重分担して軽量化した（Fig. 5）。

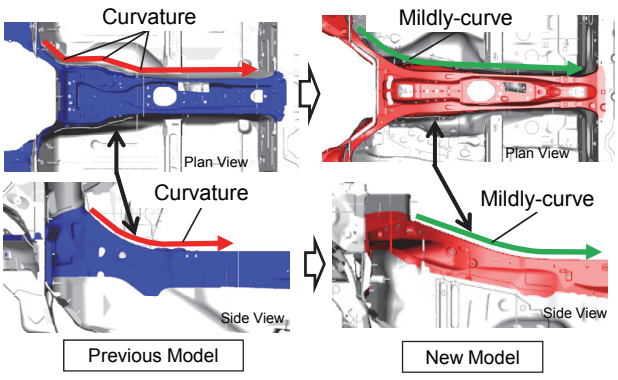


Fig. 5　High Mount Backbone Frame（1）

（2）閉断面の連続化

パーキングレバー取り付け部の穴を工夫し，断面を後方部材まで一定の閉断面でつなげて断面の不連続をなくした（Fig. 6）。

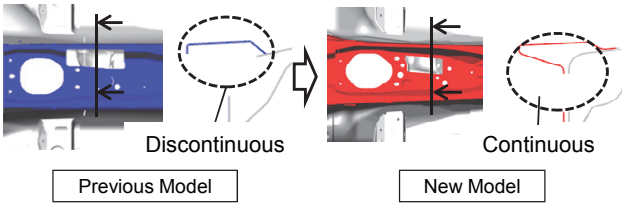


Fig. 6　High Mount Backbone Frame（2）

3.4　サイドシル

オープンカーにおいてサイドシルはフロント・ボデーとリヤ・ボデーをつなぐ重要な部品であり，高強度／高剛性が求められる。一方で乗員の乗降性の確保や，デザインテーマ「魂動」の実現のために断面サイズに制約がある。そこで新型ロードスターは断面形状の最適化に取り組むことでこの課題を解決した。

（1）断面形状の最適化

新型ロードスターのサイドシルには，衝突時，断面の潰れ方をコントロールする新断面を採用した。この断面は，断面二次モーメントが小さいにもかかわらず稜線を増やすことで曲げ／ねじり強度を向上させる仕組みである。横からの衝突大荷重が入った場合は，断面は座屈し断面崩れを起こすが，稜線を意図的にかつ，適正な量と方向に設けることでこの現象を抑制した。この採用により現行モデルより高い性能を発揮しつつ，30％の質量低減を実現した（Fig. 7）。

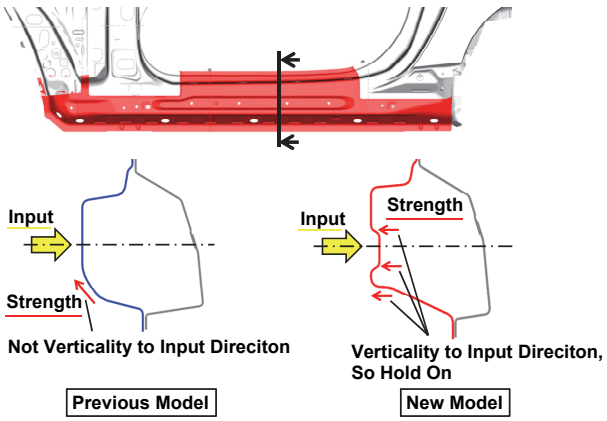


Fig. 7　Side-Sill

3.5　リヤ・サイドフレーム

デザインのリヤ・ショートデッキ化を実現するために，リヤ・サイドフレーム長を従来モデル比で90mm縮小した。そこで効率的にエネルギー吸収をさせるためにSKYACTIV-BODY技術を活用し，リヤ・サイドフレーム

にダブルハット断面を採用し，更にリヤ・フロアパネルにはハイテン材を使用した。これにより従来モデルより短いスペースでも，衝突安全性の向上を実現した（Fig. 8）。

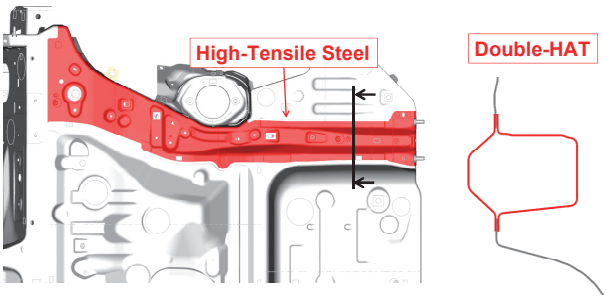


Fig. 8　Rear-Side Frame

3.6　フィラーリッド

軽量化と操作性向上を目的に，フィラーリッドをレバー操作によるケーブルロック式からパネルのプッシュ操作で開くドアロック連動の電磁ロック式へ切り替えた。従来構造を最大活用しながら部品削減を進め，前モデルに比べ操作性を向上させた上で，112g軽量化した（Fig. 9）。

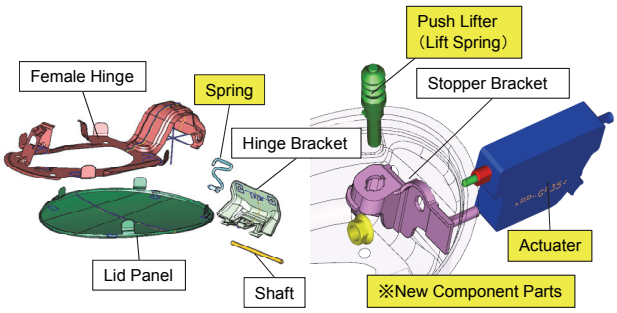


Fig. 9　Lid-Filler

4. 工法

車体の剛性感を向上させるため，カウル，フロアレイン，ホイールハウス，リヤ・サスペンションレインフォースの結合部にウェルドボンドを採用することにより，ロードノイズの低減と車体剛性を向上させた（Fig. 10）。

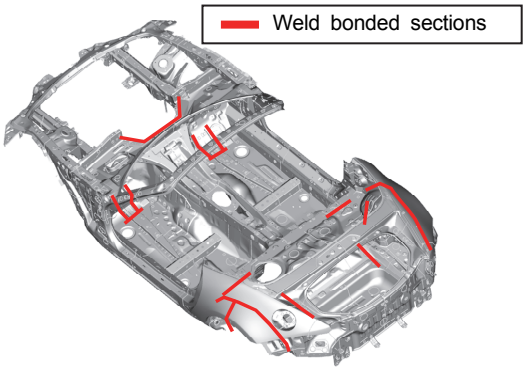


Fig. 10　Weld Bond

5. 材料

5.1　材料選定

車体剛性から必要な板厚を複数性能最適化技術（Multi-disciplinary Design Optimization : MDO）（6. CAEの取り組み参照）にて算出し，その上で衝突性能から強度が要求される部品には，エネルギー吸収性と強度・信頼性に優れるハイテン材を適用した（Fig. 11）。中でも高耐力が求められるキャビン周囲には，新たに980／1180MPa級超ハイテン材，及び1500MPa級ホットスタンプを適用することで，あらゆる衝突モードでのキャビン部の変形を効率的に抑制した（Fig. 12）。また，前モデル比でハイテン材適用率は58%から62%に増加した。更に，フェンダ／バンパレインら車両の重心から遠く，ヨー慣性モーメント低減に効果的なフェンダ／バンパレインにアルミニウムを適用するなど（詳細は「新型ロードスターのアルミニウム適用拡大による軽量化（ボデーシェル領域）」を参照願います。），各部位に要求される特性に応じた効率的な材質を選定した。

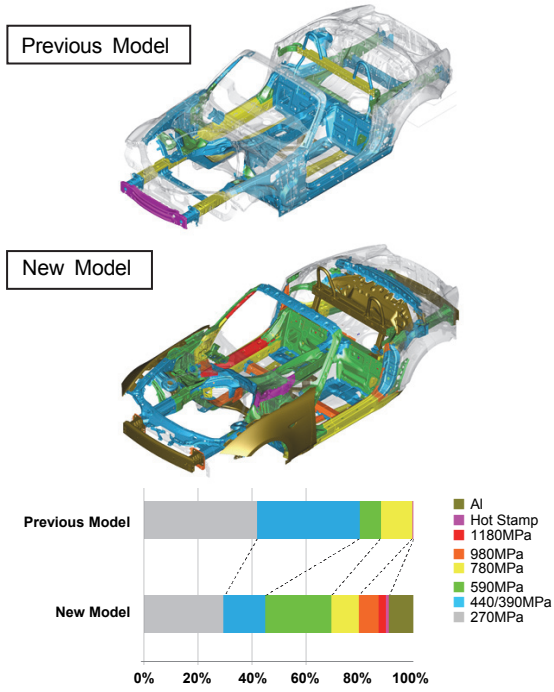


Fig. 11　High-Tensile Steel Usage Rate

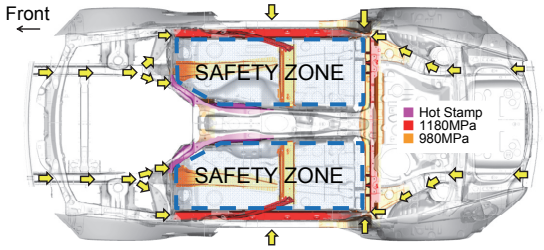


Fig. 12　Occupant Protection

5.2　ホットスタンプ材の車体適用

1180MPa級超ハイテン材を超える1500MPa級ホットスタンプ材を衝突荷重により潰したくない車体部品に適用した。より強い材料を効果的に使用することで薄板化により軽量化した。前述したバックボーンフレーム部の圧縮荷重入力部に採用した。部品加工性，溶接性や車体精度保証性を生産部門とONE MAZDAで取り組み量産化を実現した（Fig. 13）。

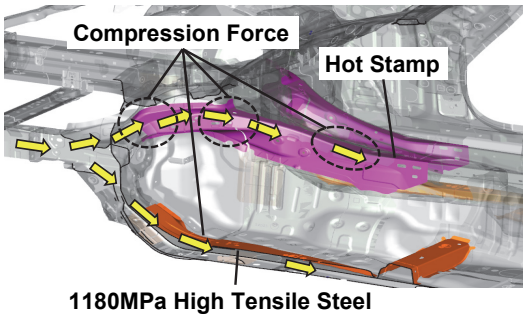


Fig. 13　Hot Stamp Material

6. CAEの取り組み

6.1　車体剛性感の劇的向上

主要な骨格構想を理想的な具体構造にする上で，詳細なCAEを開発初期段階から実施。最適な形状に到達するまで検討を繰り返し行うことで，軽量化と各部の剛性の維持改善を図り，車体剛性感を向上した。

フロント・サスペンショントップでは，バックボーンフレームとの結合剛性向上とともに，サイドシルへの結合剛性の向上に取り組んだ。特にサスペンショントップのダンパ取り付け周辺の構造を一新し，サスペンショントップへの入力荷重を車体外側へ効率よく分散させ，ダンパ支持剛性を向上した。その結果，ストラットタワーバーなしでも，従来モデルのストラットタワーバー付きと同等レベルのサスペンショントップのダンパ支持剛性を得た（Fig. 14）。

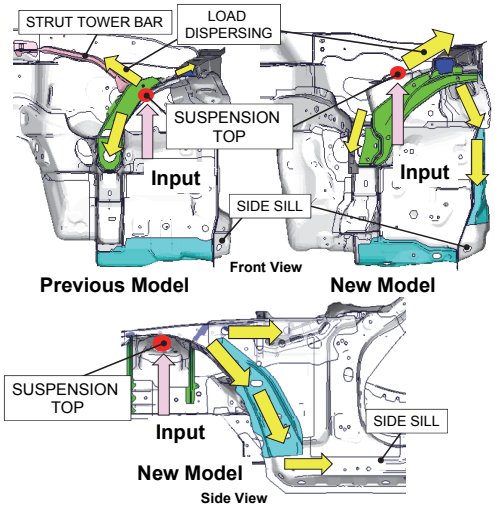


Fig. 14　Front Body Structure

リヤ・サスペンショントップでは，ダンパ取り付け構造の変更に合わせ，サスペンショントップとパッケージを従来モデルの構造から大幅変更し，サスペンショントップからの入力荷重をパッケージ側により効率良く分散する構造とすることで，フロントと同様に格段のダンパ支持剛性の向上を果たした（Fig. 15）。

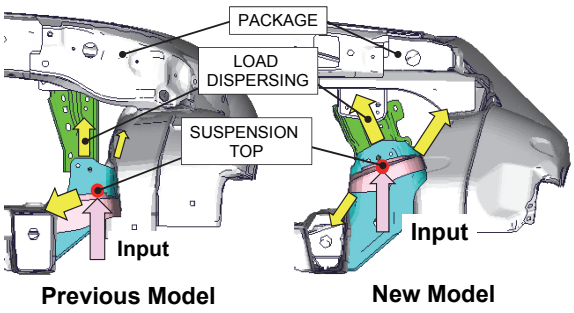


Fig. 15　Rear Body Structure

フロント・サスペンションアーム取り付け部においても，ボデー側への取り付け構造にブレースを設定し，サスペンションアームからの荷重をサイドシルへ分散させる構造とすることで，高剛性化した（Fig. 16）。

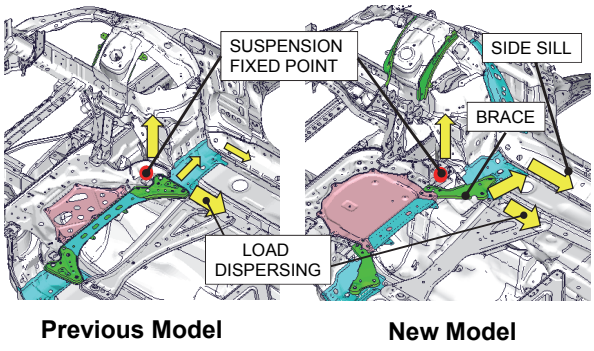


Fig. 16　Front Suspension Body Structure

6.2　複数性能最適化技術の適用

今回の新型ロードスターの開発では，MDOを適用し，複数性能（衝突，NVH，強度，剛性）間の同時最適化による質量効率の向上にも取り組んだ。具体的には，各性能目標を満足する指標を制約条件として与え，質量最小化を目的関数とするMDOをアンダボデー，アッパボデー各開発段階で実施し，最軽量化の検証を行った。

アンダボデー領域の開発段階では，プラットフォーム主要部品を設計変数として設定し，板厚変化による質量寄与度，性能寄与度を明らかにしたうえで，その分析結果から，トータル3.9kgの軽量化案を発掘した。

アッパボデー領域の開発段階では，アッパ系部品を中心に，他に最軽量となる板厚組み合わせの仕様可能性が残さ

れていないか，ぜい肉として板厚低減の余地がある部品が取り残されていないか，出図前最終確認としてMDOを実施した。この結果，追加での板厚低減（340g軽量化）とともに，車体トータルとして最軽量レベルを実現した（Fig. 17）。

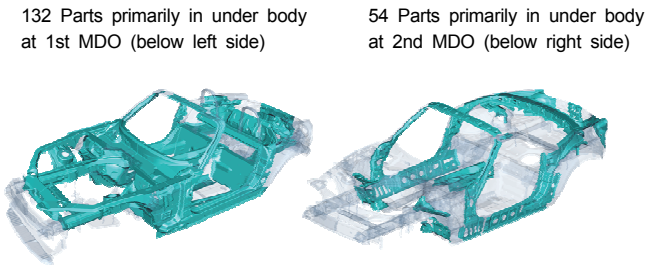


Fig. 17　MDO Application

7. 結果

7.1　車体剛性値

大幅な軽量化と，効果的な構造変更により，ねじり剛性や前後サスペンショントップのダンパ支持剛性などの各剛性値は，質量比で従来モデルから向上した（Table 1）。

Table 1　Stiffness

	Previous Model	New Model
Torsional Stiffness	100%	109%
Front Damper Stiffness	100%	119%
Rear Damper Stiffness	100%	117%

7.2　衝突安全性能

現代の自動車開発においては，安全性要求の高まりによりモデルチェンジを重ねるたびに質量増加する傾向がある。新型ロードスターでは，ライトウエイトへ原点回帰すべく，マルチロードパス構造や材料置換，工法の見直しによって衝突時の車体変形を大幅に抑えた。結果として，質量を下げながら社内テストにおいて各国の安全アセスメントプログラム（NCAP）トップレベルの車体性能を実現した。

7.3　軽量化

新型ロードスターはSKYACTIV-BODYの考え方を踏まえてFRとしての構造適正化を進めた結果，従来車を上回る剛性感や衝突安全性を実現しながら，アルミ材を使用していないホワイトボデー単位の質量で3代目217kg，2代目230kg，初代211kgより軽量の197kgを達成した（Fig. 18）。

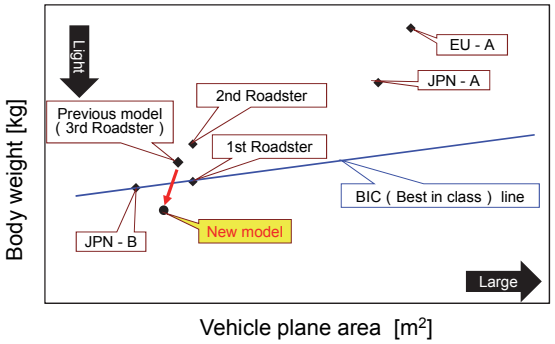


Fig. 18　Body in White Weight Per Projected Area

また，バンパレインフォースメントなどのサービス性や生産効率化のためボルトアップ化した主要部品を含めたボデーストラクチャ質量でも3代目248kgより軽量の225kgを達成した。

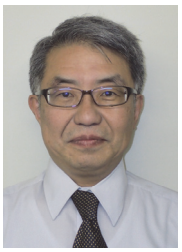
8. おわりに

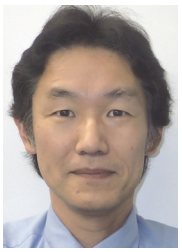
以上が新型ロードスターのボデーストラクチャの進化と特徴である。SKYACTIV-BODYのアプローチをオープンボデーに適用し，軽量化が商品価値に直結するロードスターにおいて，パフォーマンスを向上させながら歴代を上回る軽量ボデーを実現できた。今後も技術を磨き，より軽量でパフォーマンスの高いボデーの実現に向けて歩みを続けていく所存である。

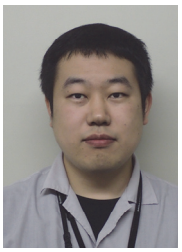
参考文献

（1）木村隆之ほか：SKYACTIV-Body，マツダ技報，No.29，pp.61-67（2011）
（2）木村隆之ほか：新型ロードスター軽量化ボデーストラクチャの開発，マツダ技報，No.24，pp.66-71（2006）

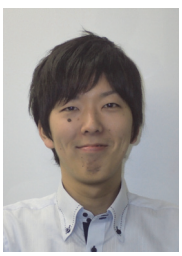
■著　者■


木村 隆之


阪井 克倫


山内 一樹

丸山 賢司


四柳 泰希

岡沢 恭久

特集：新型ロードスター

25

新型ロードスターのアルミニウム適用拡大による軽量化（ボデーシェル領域）
Light Weight Development by Using Aluminum for New Roadster（Body Shell）

内堀　佳*1　Kei Uchibori
橋本　学*2　Manabu Hashimoto
池田　敬*3　Kei Ikeda
山内　一樹*4　Kazuki Yamauchi

要　約

新型ロードスターは過去の歴代モデルが構築したライトウエイトスポーツカーというジャンルを引き継ぎ，「人馬一体」感の進化を，軽量化を一つのキーとして目指した商品である。今回，ボデーシェル領域では前モデルからの更なる軽量化を，材料置換（鉄からアルミニウム）を一つの手段として用い実現した。またアルミニウムは軽量化効果が大きい反面，一般的な自動車用鋼板と比較し剛性，強度が低下する特徴がある。アルミニウム適用拡大の考え方と併せ，断面形状，構造に工夫を加えることで「人馬一体」感を高める高剛性ボデーシェルの獲得と，社会的ニーズの強い衝突安全性能を高いレベルで実現した手段を中心に紹介する。

Summary

New Roadster is a product which is taken over light weight sports constructed by past models and aimed to improve “Jinba-Ittai” performance by reducing body weight. This time, body weight reduction is accomplished by using aluminum instead of steel. Aluminum has a great deal of light weight effect, but stiffness and strength is lower than steel for automobiles. This paper outlines development activities for improving “Jinba-Ittai” performance and high crash safety by designing cross-section shapes and structures.

1. はじめに

1989年に登場した初代ロードスターは，当時ではほぼ壊滅的であったオープン2シータ，ライトウエイトスポーツというジャンルを，軽量ボデーを一つの武器とし，自動車を操る楽しさを世界中に広め，再定義したモデルである。その後，社会的に高まる衝突安全性能の要求に合わせ，同ジャンルの競合他車の車両重量は増加の一途をたどったが，ロードスターは操る楽しさ＝「人馬一体」感は失わず進化し続けた。

今回の新型ロードスターはライトウエイトスポーツの原点に立ち戻るべく，高い社会ニーズに十分に応えながらも，前モデルから更なる軽量化を目標とし開発した。本稿ではボデーシェル領域へのアルミニウムの適用拡大の考え方，構造上の工夫，達成手段などを中心に紹介する。

2. アルミニウム適用拡大の考え方

新型ロードスターではボデーシェル領域で前モデル比23.0kgの軽量化，そのうち材料置換（鉄→アルミニウム）による軽量化は12.1kgを占める（Fig. 1）。

これを実現したアルミニウム適用拡大の考え方について述べる。

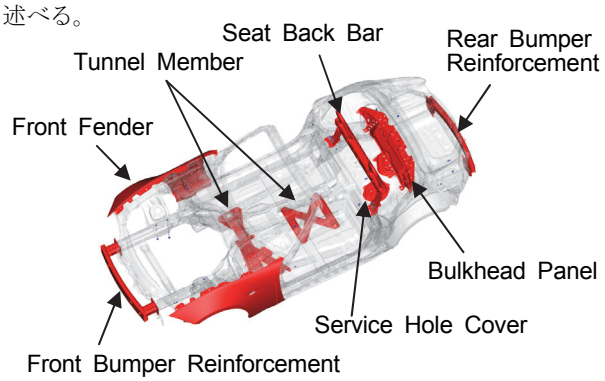


Fig. 1　Applied Parts of Aluminum

*1～4　ボデー開発部
Body development Div.

2.1　「人馬一体」感の進化への寄与

新型ロードスターは「人馬一体」感の進化として軽快感の作り込みに注力した。軽快感とはドライバの意思とズレのない軽快な操舵が実現された状態を指し，運動性能の代用特性指標であるYWR（Yaw Weight Ratio）（Fig. 2）の低減，SSF（Static Stability Factor）（Fig. 3）の向上が必要となる。

YWR，SSFは下記式で表される。

YWR = Yaw Moment / Vehicle Weight

SSF = Width of Tread / Height of Gravity Center / 2

（1）YWRの低減

YWRを低減するには車両前後端の軽量化を行いヨー慣性モーメントを低減する必要がある。新型ロードスターでは車両前後端に設定しているフロント／リヤバンパレインフォースメント（以下，バンパレインと略す），フロントフェンダのアルミニウム化に着目し6.6kgの軽量化を達成することでYWRの低減を実現した。

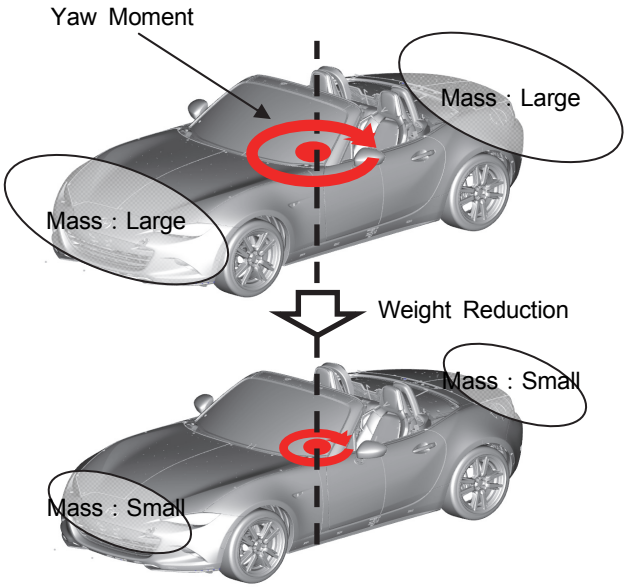


Fig. 2　Yaw Weight Ratio

（2）SSFの向上

SSFの向上には①車両トレッド幅の拡大，②車両重心高の低下，という二つのアプローチの仕方があるが，コンパクトな車幅を実現するため，②車両重心高を下げる（車両重心位置より上の重量物の軽量化）手段を検討した。ボデー領域では重心位置上方にある衝突安全対策部材のシートバックバー，車室内前後の隔壁となるバルクヘッドパネルのアルミニウム化を検討し3.7kgの軽量化を達成，SSFの向上を実現した。

YWRの低減，SSFの向上をベストインクラスのレベルにするとともに歴代ロードスターの実力から進化させることで「人馬一体」感の進化を達成した（Fig. 4）。

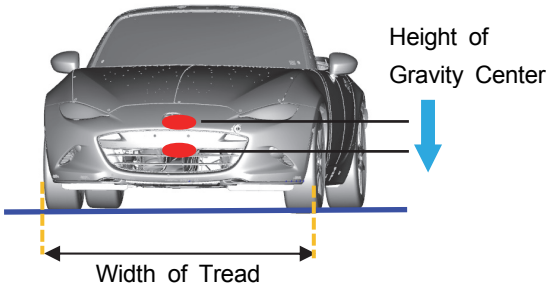


Fig. 3　Static Stability Factor

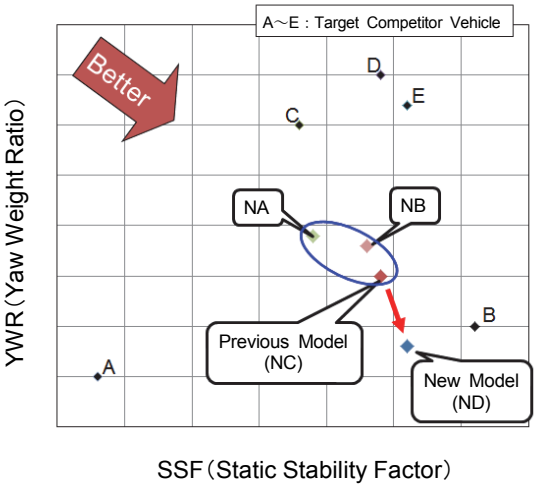


Fig. 4　Performance Target

3. 技術ブレイクスルー

新型ロードスターでは最高レベルの衝突安全性能と軽量化を高次元で両立させるため，衝突安全レインフォースメントにアルミニウム押出し工法を採用した。押出し工法の最大の特徴は断面上の部分的な板厚変化と，断面内へのリブ設定の自由度が高いことである。これを重量効率に主眼をおくことで性能上必要な強度を確保しつつ，強度が不要な個所については限界まで贅肉を削ぎ落とし大幅な軽量化を行った。前／後面衝突時のエネルギー吸収を行うバンパレインと，側面衝突時にドア開口後方の車両左右間を支え乗員傷害値を抑えるシートバックバーにアルミニウム押出し工法を採用し重量の軽量化を達成した。次節ではその具体的事例を紹介する。

3.1　バンパレイン

最高レベルの安全性能を確保しながら鉄材使用比4.1kgの軽量化を実現した。強度を求められるバンパレインでは，7000系高強度アルミニウムに単純置換したとしても，SKYACTIV-BODYで採用しているホットスタンプ材に対

し材料強度は30%程度であり，大幅な軽量化の達成は困難である。アルミニウムの優位性を最大限活用するため，工法も含めゼロベースで見直しを行った結果，プレス工法から押出し工法に変更した。押出し工法は，各構成面の厚さを変化させることが可能であり，強度上必要な部位を厚くし，不要な部位は逆に限界まで薄くすることで，大幅な質量低減を達成できた（Fig. 5）。

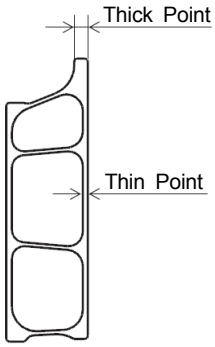


Fig. 5　Section of Front Bumper Reinforcement

押出し工法は断面形状が一定という制約がある。バンパレインは，両端支持ばりと同様に中央部の曲げモーメントが最大となる構造であり，断面形状も，その構造に合わせて設計を行う必要がある。新型ロードスターは車両外側が絞り込まれたバレルシェイプデザインを採用しており，押出したままの単純形状ではバンパフェイス内に収まらない。他社で採用されている外端プレスや単純曲げでは形状変化が顕著となり応力集中が発生するため，バンパレインの加工では採用例の少ないストレッチベンド工法を採用した。これにより，デザイン内に収める形状を達成し，かつ断面形状を保ち応力集中を回避することで，質量増加を防止した（Fig. 6）。

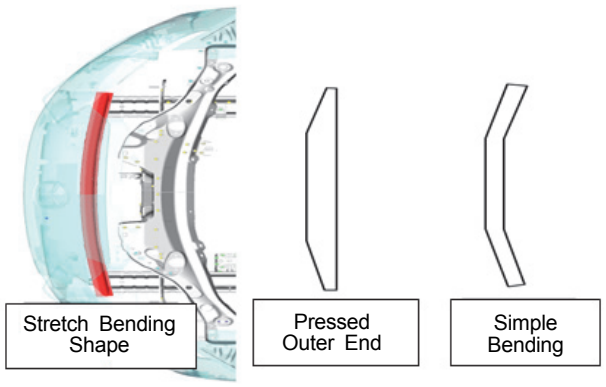


Fig. 6　Stretch Bending Method

また，アルミニウムは鉄材に対し許容伸び率が低く，衝撃で割れ破断を起こす性質がある。開発当初，この現象が発生し，メカニズムを分析した結果，単純な衝突荷重に対する入力が原因ではなく，曲げ伸びが原因で割れ破断が発生していた。断面の中立軸を非衝突面側に寄せることでこの問題を解決し，質量増加を防止した（Fig. 7，8）。

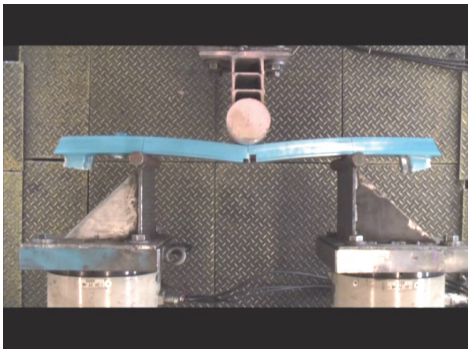


Fig. 7　Static Strength Test

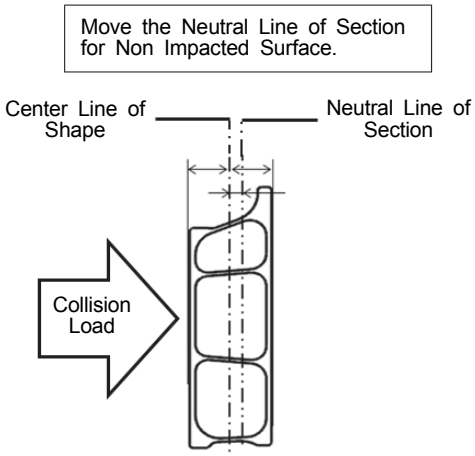


Fig. 8　Section of Front Bumper Reinforcement

3.2　シートバックバー

シートバックバーの機能は側面衝突時にフロントドア，Bピラーに入力される荷重を車室内側から受け止め，Bピラーとドアの車室内侵入量を抑え乗員傷害値を低減させることにある（Fig. 9）。

前モデルのシートバックバーは780MPa級ハイテン材のプレス構成部品であったが，新型ロードスターは高強度アルミニウムを用いた押出し部品とすることで衝突安全などの必要性能が上がっている中，前モデル比1.9kgの軽量化を実現した（Fig. 10）。

荷重分担が最も多いメインバーにはアルミニウム合金の中で最も高い強度を持つ7000系アルミニウム材を，その他の押出材にも高強度が得られる6000系アルミニウム材を採用した。また押出し断面は上部には閉断面を，下部には片持ちのリブを設定することで荷重入力時に局所的に発生する変形を抑え，側面衝突において最高レベルの衝突安全性能を達成した（Fig.11）。

バンパレインと同様，押出し工法の特徴を活かし各構成面の厚さを変化させ不必要な部分は薄くすることで重量低減した。

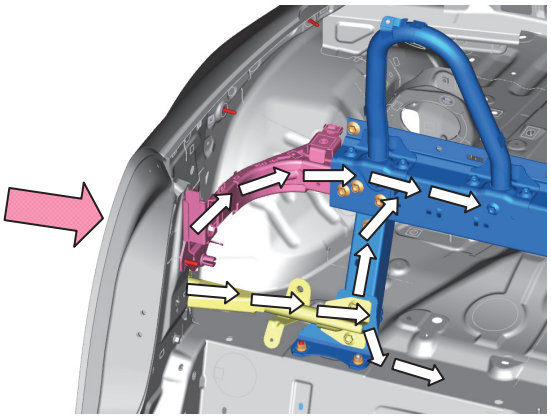


Fig. 9　Side Crash Load Path

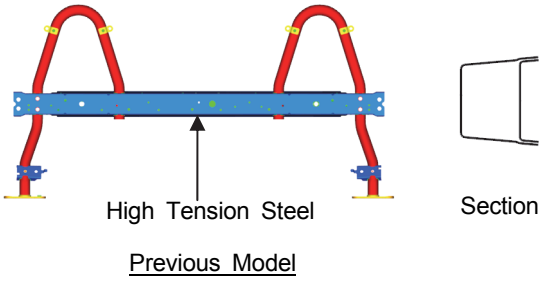


Fig. 10　Structure of Seat Back Bar

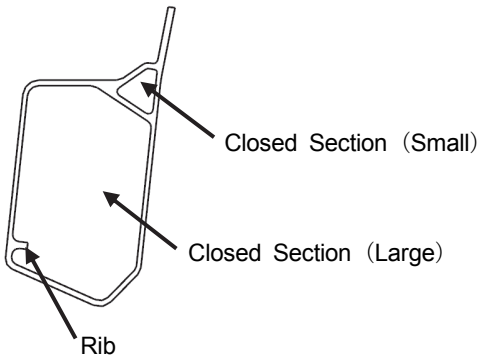


Fig. 11　Section of Seat Back Bar

4. パネル部品アルミニウム適用事例

アルミニウム押出し部品以外にもプレス構成部品へのアルミニウム適用を拡大し軽量化を行った。

4.1　フロントフェンダ

フロントフェンダパネルをアルミニウム材化することで，鉄材仕様比2.8kgの軽量化を実現した。

アルミニウム材は鉄材に対し許容伸び率が低く，プレス成形時に割れが発生しやすい。マツダではスポーツカーのボンネットフード（RX-7，RX-8，前ロードスター）やトランクリッド等，プレス成形時の絞り深さが浅い部品にアルミニウム材を適用してきた。今回更なる軽量化を実行するため，フロントフェンダへのアルミニウム適用を実施した。

新型ロードスターのデザインは眼を低く構え，ボンネットの見切りラインを内側に切り込むことで立体的な造形に見せる意図がある（Fig. 12）。そのため，パネルの絞り深さが大きく成形が不利な条件が重なり，アルミニウムによるプレス成形性とデザインを両立させることが困難であった。この課題を解決するため，デザイナと見切りの位置をmm単位で調整しながら成形シミュレーションを繰り返し実施することでアルミニウム材化の実現ができた。

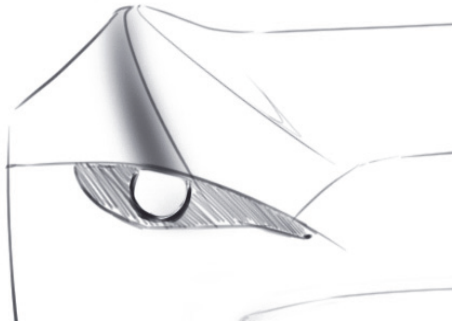


Fig. 12　Initial Sketching

4.2　その他部材

サービス性や生産効率化のためボルトアップ化しているバルクヘッドパネル，トンネルクロスメンバ，サービスホールカバーについてもアルミニウム化を行った。これらは板材を成形加工し，その材質はボンネット，フェンダと共用することでコスト増加を抑えながら材料置換を行うことができた。また，バルクヘッドパネルは両サイドと中央上下の4部品構成，車両前側のトンネルクロスメンバは閉断面の2部品構成としている。両者のパネルの接合には，RX-8のアルミショックコーンボンネットでも採用した摩擦点接合（Spot Friction Welding）を適用した（Fig. 13）。この技術を採用することで高接合品質を実現しつつ，部位ごとに求められる強度，剛性に応じた板厚で部材

を構成することが可能となり，軽量化やコスト低減に貢献した。

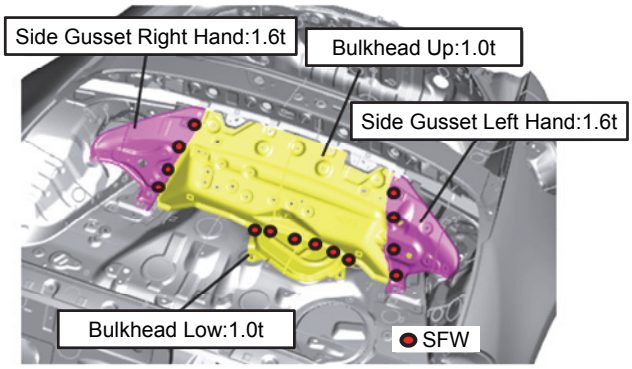


Fig. 13　Applied Point of Spot Friction Welding

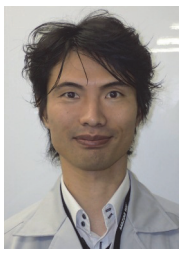
5. おわりに

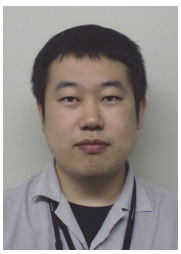
新型ロードスターの開発においては，一層の軽量化による「人馬一体」感の進化を実現するため，アルミニウム材の適用を積極的に進めた。しかしその開発過程では精度，接合品質の問題，そしてなにより性能目標達成の壁に何度もぶち当たり，そのたびに関連部門や協力メーカ殿の協力を経て課題を克服し，お客様に胸を張って提供できる商品を作り上げることができた。

今回培った技術を今後の開発車種にも適用し，マツダの目指す「走る歓び」を多くのお客様に体感していただけるよう，引き続き全社一体となって開発を進めていく所存である。

■著　者■

内堀 佳


橋本 学


山内 一樹

特集：新型ロードスター

26

新型ロードスターの超軽量ソフトトップ開発
Development of Soft-top for New Roadster

松本　浩一*1　黒田　将仁*2　鯉渕　達夫*3
Koichi Matsumoto　Masahito Kuroda　Tatsuo Koibuchi
武田　健二*4
Kenji Takeda

要　約

歴代ロードスターのソフトトップはモデルチェンジごとに進化を積み重ね，現在に至っても手動式のベンチマークとなっている。「人馬一体」は初代から変わらない車両としてのコンセプトであるが，ソフトトップにおいても「シンプルで軽量，開閉しやすく使い勝手が良い」という初代から不変のコンセプトがある。ルーフの重心位置は高く，開閉により位置が変動するため，ハンドリングに対する影響が大きく，軽量化は重要な要素である。また，できるだけオープンにして乗っていただきたいとの考えから，開閉操作性についても重要視している。新型ロードスターの開発にあたり，上記のコンセプトをより高い次元で実現するため，材質，構造を一新しCAEを用いて最適化した。更に，走行時の静粛性，質感についても向上させている。本稿ではそれらの実現手段と開発経緯について報告する。

Summary

The soft-tops of the successive Roadsters have been evolved every model change, becoming the benchmark of manual type soft-tops even today. While “Jinba-Ittai” has been the concept of the vehicle itself since the first Roadster production, “Simple, light-weight, smooth open/close, easy to use” has been the unchanged concept of the soft-top. As the center of gravity of the roof is high from the ground and the position changes when the roof is opened or closed, the roof’s influence to the handling performance of the car is large. Therefore the weight reduction of the roof is one of the important tasks. Ease of open/close is also a key factor for the driver to feel like to open the roof as much as possible, which is our desirable way of their riding the car. Renovated structure, materials and optimized using CAE for the full-model-changed Roadster to realize the above concept at a higher level than before. The outside and inside appearances and quietness at driving are also improved. This report describes the measures and the development process taken.

1. はじめに

1.1　開発の狙い

より多くのユーザがより多くのシーンでオープンエアを楽しんでいただける，ロードスターという車両コンセプトにふさわしいルーフシステム。これらをより高い次元で実現するために今回ソフトトップの構造を全面的に見直した。

ロードスターのソフトトップは初代から一貫して最軽量で，操作がしやすく使い勝手もよいというコンセプトで開発してきた。今回開発した新しいソフトトップにおいてもその考え方を踏襲し，飛躍的に性能を向上させることを目標に開発を行った。

1.2　開発構想

（1）最軽量ソフトトップ

前モデルのソフトトップは現在でもトップクラスの軽さを維持しているが，お客様の期待に応えるためには，大幅な軽量化が必要と判断した。具体的には開発初期に前モデル比3kg（17%）低減を目標にした。部品形状，板厚の見直しに加え，主要部品の材料置換に踏み込んで開発を進めた。

（2）座ったままで開閉できる操作性

オープン走行の機会を逃さないために，座ったままで軽快に開閉できることが必要と考え，操作荷重と開閉軌跡の目標を設定している。特にオープン状態からのクローズ操

*1　ボデー開発部
Body Development Dept.
*2，3　車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.
*4　車両開発本部
Vehicle Development Div.

作は閉め始めに力が入りにくく，操作性を最も重視した部分である。

（3）静粛性向上

遠出や高速走行時でも快適な室内空間を実現することにより，より行動範囲を広げ，カーライフを満喫していただきたいと考え，新しいソフトトップではクローズ時の静粛性も重視した。音の発生源を分析し，効率よく遮音・吸音させることで，軽量化と両立をさせている。

2. 軽量化

2.1　質量構成と材質選定

シンプルな2分割式のリンク，センタロック構造を実現し，板厚低減，余肉削減で軽量化を突き詰めた前モデルに対し，新しいソフトトップではシンプルなリンク，ロック機構を踏襲しながら，リンク及びロック構造にアルミニウム（以下，アルミ）を多用し軽量化した。

全体重量の55%を占めるリンクアセンブリについてはフロントヘッダ部とメインリンクをアルミ化。ルーフパネルはアルミのプレス成形品とした。前モデルは，ルーフからピラーにかけてのメインリンクを鋼管，鋼板材による5部品で構成していたが，アルミダイカスト化による一体成型とすることにより，部品点数を大幅に減らした。メインリンクは成形が難しい形状であるが，薄肉化と両立させ軽量化した。結果として，ソフトトップ全体で前モデル比3kgの軽量化を達成した（Fig. 1）。

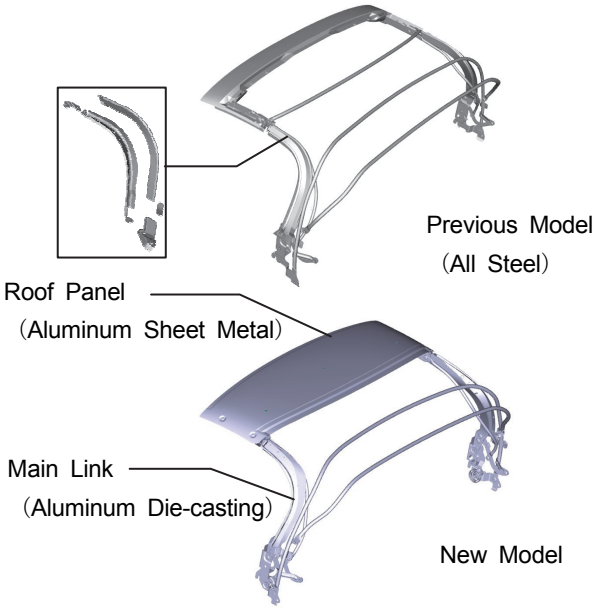


Fig. 1　Structure of the Link Assembly

単に軽量化するのではなく，質感や性能をトータルでレベルアップさせることを念頭に仕様検討を行った。ルーフパネルは前後に大型化し，ルーフの前半分の外板面の張りを持たせることでオープン／クローズ時の外観見栄え，及び遮音性を向上させている。また，一体化したリンク構造は室内側面をフラットな形状とすることができ，内装質感向上に貢献している。

その他の部品としては，トップロックストライカ，ウェッジを亜鉛ダイカストからアルミダイカストへ変更，更に，鋼管，サブリンクの板厚低減を行った。限界板厚，限界肉厚については後述のCAE活用で見極めを行った。

2.2　CAE活用による最適化

ソフトトップに必要な強度・剛性を確保しながら，軽量化構造を実現するため，静的な荷重条件に加え，開閉操作時の操作荷重・ルーフたわみ量・リンクの発生応力を考慮し，リンクの剛性配分を最適化した。

開閉操作時の強度・剛性を評価したモデルをFig. 2に示す。ソフトトップ全体を機構解析でモデル化し，開閉時の操作荷重やリンクにかかる荷重を算出可能にするとともに，リンク類はFEMモデルをモーダル自由度に縮約して取り込み，ルーフのたわみ量やリンクの応力を評価可能にした。幌布の抵抗力は，非線形のバネ要素としてモデル化し，幌布の有無による操作荷重実測値とのコリレーションを取ることで，クローズ状態からオープンロック状態まで，リンクにかかる荷重が正確に予測できるモデルとなっている。

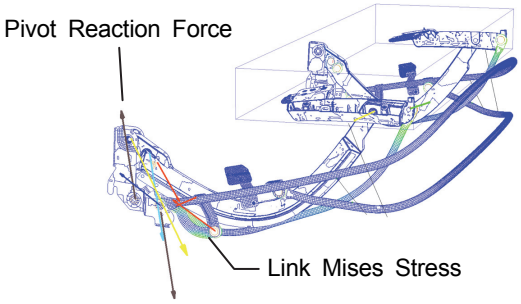


Fig. 2　Soft-top Opening and Closing Mechanism Model

この解析技術を用い，各リンクの板厚変更に対する操作荷重・ルーフのたわみ量・リンク応力への影響を調べ，各リンクの適切な剛性配分を決定した。一例として，あるリンクの板厚を低減させたときの各リンクのミーゼス応力（開閉操作における最大値）の変化をFig. 3に示す。リンクAの板厚を低減すると応力は増加するが，他のリンクの応力は低減する。このように，全体のバランスを考慮しながら，板厚低減や形状を見直し，軽量化につなげた。

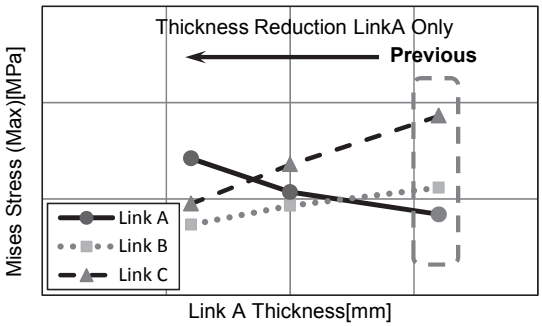


Fig. 3　Relationship of Stress and Thickness of the Link

3. 操作性向上

3.1 狙い

ここぞというシーンを逃すことなく，“Fun To Open”をユーザに提供することをコンセプトに，シートに座ったままで，軽快に開閉できる操作性の実現のため，操作荷重の低減と開閉軌跡の適正化に取り組んだ。

着座状態での閉め操作で，操作姿勢上人が最も負担と感じるのは，オープン状態からルーフを頭上付近まで持ち上げるエリアであり，操作性の良し悪しはここで決まる。人間工学知見とモニタ実験により，日常生活上負担と感じないレベルの操作荷重や，手が届きやすく力の発揮しやすい操作軌跡を定量化した。前モデルからの飛躍的な操作性の進化を目指し，AM50tile 体格の一般成人男性から非力な女性までが使用することを視野に入れて目標設定を行った。ロードスター伝統の軽快で人馬一体な走りと，軽快で使い勝手の良いソフトトップで，多くのユーザにマツダのオープンLWS（Light Weight Sports）を楽しんでいただきたい。

3.2 実現手段

操作荷重はソフトトップ本体の自重モーメント，アシストスプリング，幌の張力，摩擦抵抗の総和で決まってくる。

最も重要視する閉め始めの操作荷重は自重モーメントとアシスト力の関係が支配的である。自重モーメントは軽量化で低減することができるが，特性のコントロールまではできない。従って，アシスト力の特性を最適化することが操作荷重低減のポイントとなる。

前モデルはメインリンク回転軸のアシストスプリングで操作荷重を低減しているが，アシスト力は開度に単純比例し，調整代に制約がある。今回はアシストスプリング力を，リンクを介して伝えることで，アシスト力の特性を最適化した（Fig. 4）。これにより閉め始めが軽く，閉め切りまでフラットな操作荷重を実現した（Fig. 5）。

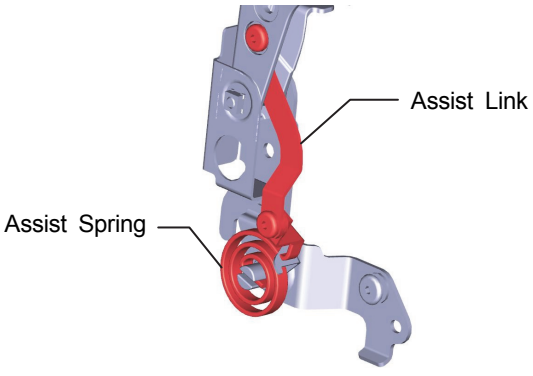


Fig. 4　Structure of the Assist Link

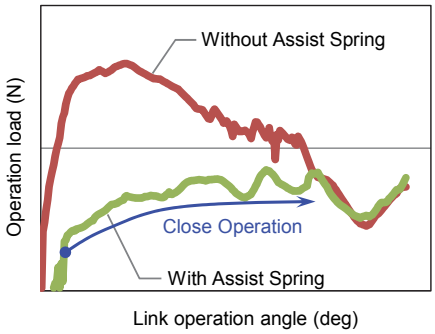


Fig. 5　Operation Load Characteristic Result

アシスト力の最適化は机上計算，CAEで行い，先行試作品を用いて幌の抵抗・自重による影響の確認，及びスプリングセット位置最適化による操作フィーリング領域のチューニングを行った。

4. 静粛性向上

4.1 狙い

高速走行時も乗員同士の会話を阻害しない快適な室内空間実現のため，ルーフクローズ時の室内音の低減に取り組んだ。人の会話の大部分は200Hzから6.3kHzの周波数帯であり，その周波数帯の室内音を低減することを目指した。

前モデルでの室内音音源探査結果（Fig. 6）及び車両各部の音響インテンシティ計測によるパネル放射音の寄与分析（Fig. 7）から，ルーフ部の音を抑制することが効率的であることが分かったため，インナクロス，ヘッダトリムを設定し遮音・吸音性能を向上させ，更に，ヘッダパネルを設定し，ばたつきを低減することで室内音を低減した（Fig. 8）。

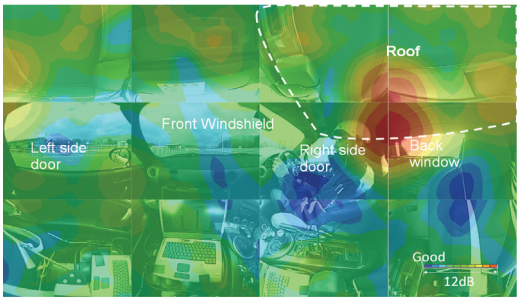


Fig. 6　Interior Noise（1kHz）

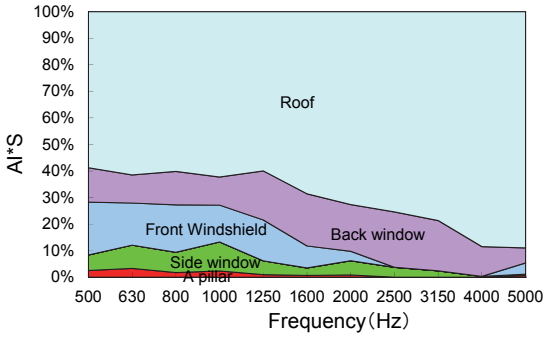


Fig. 7　Acoustic Intensity Distribution

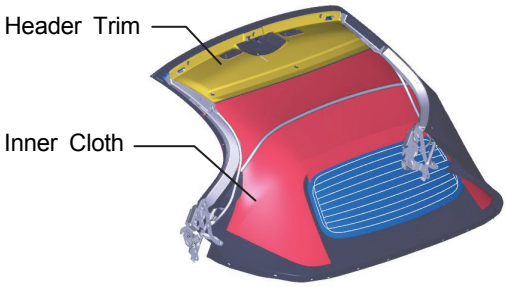


Fig. 8　Inner Cloth & Header Trim

4.2　試作評価と仕様決定

ソフトトップのクロス単体での透過損失，吸音率（Fig. 9）の検討，及び先行試作品を前モデルに搭載した先行試作車による検討（Fig. 10）を実施し，仕様を決定した。

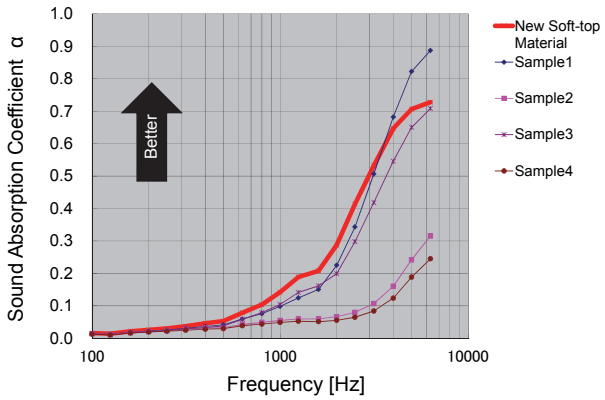


Fig. 9　Acoustic Intensity Distribution

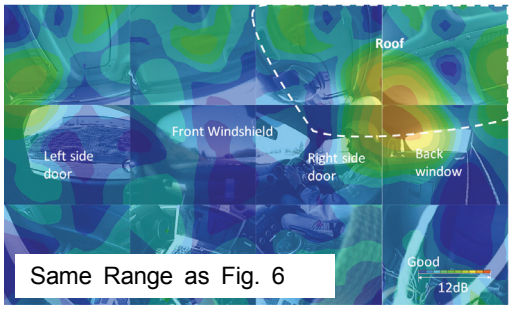


Fig. 10　Interior Noise Improvement　（1kHz）

その結果，会話の伝わりやすさを数値化したArticulation Indexの7%向上を実現した（Fig. 11）。

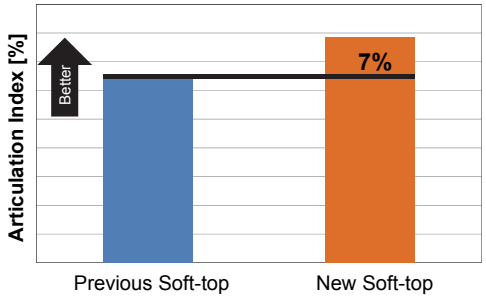


Fig. 11　Articulation Index（140km/h On-road）

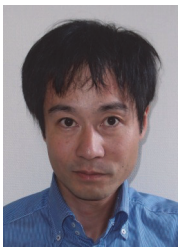
5. まとめ

今回，ソフトトップに求められる商品性，信頼性を確保した上で，軽量化及び操作性向上を実現し，商品化することができた。しかし，これで満足することなく，今回得られた技術のフィードバックを基に初代から受け継いできたコンセプトを飛躍的に向上させるための活動を進めていく。その結果として，より多くの方々にオープンカーの爽快感を体験していただければと思う。

6. おわりに

今回のソフトトップ開発において，多大な協力をいただいた（株）東洋シート殿，西川ゴム工業（株）殿，（株）ニフコ殿，片山工業（株）殿，宮川化成工業（株）殿，（株）イノアックコーポレーション殿に，この紙面をお借りし，厚く御礼を申し上げます。

■著　者■


松本 浩一

黒田 将仁

鯉渕 達夫

武田 健二

特集：新型ロードスター

27

新型ロードスターの遮音性能開発と軽量化技術
Development of Sound Insulation Performance and Lightweight Technology for New Roadster

山本　秀俊*1　Hidetoshi Yamamoto
末國　和憲*2　Kazunori Suekuni

要　約

新型ロードスターでは“夢中になる運転体験～乗る度に深まっていく運転の楽しさ”を提供価値の一つとして掲げ，開発を進めてきた。車両運動性能からは徹底した軽量化による“手足の延長のように操れる楽しさ”の提供を目標に，また振動騒音性能からはLight Weight Sports（以下LWS）としての軽快でリニアな印象をサウンドでも実現することで，ドライバが何度でもアクセルを踏みたくなる，そんな運転体験の提供を目標に開発を進めてきた。徹底した軽量化では，最軽量モデルで初代ロードスターと同様の1,000kg（以下1.0t）を切ることを目指し，従来車から100kg以上の軽量化に取り組んだ。また，LWSを成立させながら心地よいサウンドを阻害するノイズ除去を行うには遮音材の最適配置が必要である。そのため，効果の高い部位の特定や重量効率の高い材料の採用等，軽量化しながらも性能の維持向上が可能な手段を検討してきた。

車両全体で100kg以上におよぶ軽量化のうち，遮音性に関わる部品では約8～12kgの重量軽減を行い，遮音性能を維持／向上させながらLWSとしての軽快感と心地よいサウンドの両立を実現した。

Summary

Holding the ideal of “Fantastic driving experience - Fun-to-drive that deepened each time you ride” as one of the offering values, the all-new Roadster was developed with an aim of providing outstanding driving experiences such as “the maneuverable car just like the driver’s arms and legs” (Driving dynamics) gained by drastic weight reduction and “nimble and linear sound impression as a Light Weight Sports (LWS)” (NVH performance) which makes the driver feel like to depress the accelerator again and again. For the radical weight reduction, aiming at the lightest model to reach 1000kg or less which is equivalent level to the original Roadster, efforts were made to achieve about more than 100kg reduction from the previous model. To remove noises that hinder pleasant engine sound while realizing the LWS, optimum arrangements of insulation materials are required. To do so, measures enabling to maintain or improve NVH performance while reducing the weight were considered such as specifying high effective areas and applying materials of high weight efficiency.

Of the more than 100kg weight reduction from the car, about 8 to 12kg is the cutback amount of the components related to the sound insulation. Both lively feeling and pleasant engine sound as a LWS were realized while sound insulation performance is maintained or improved.

1. はじめに

新型ロードスターの軽量化の取り組みでは歴代モデルで増加してきた絶対重量の原点回帰，すなわち1.0t以下の車両質量を目指した（Fig. 1）。新型ロードスターの提供価値の一つである“軽快な操舵／加速フィールの実現による手足の延長のように操れる楽しさ”を実現する以下の車両特性のねらい（目標）から，前後オーバハングとバネ上部分を重量削減の主要対象部位として設定した。その車両特性のねらいとは，①ヨー慣性モーメント／重量（YWR）の低減による旋回しやすく止めやすい特性，②トレッド／重心高／2（SSF）を高めることによる旋回安定性の高い

*1　NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.
*2　装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

特性，でありこれらを歴代モデルから進化させることを目指した（Fig. 2）。

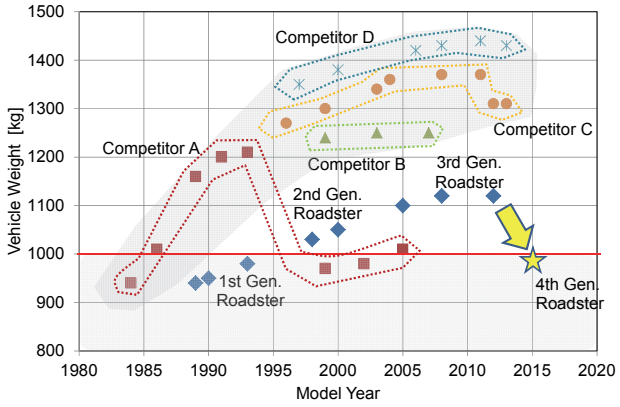


Fig. 1　Weight History of Roadster

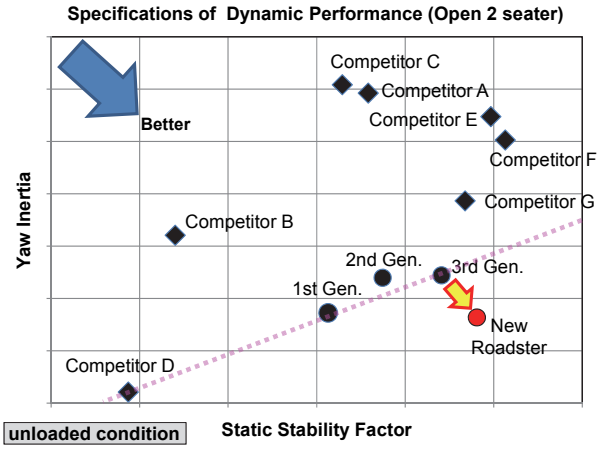


Fig. 2　Target of Dynamic Performance for New Roadster

上記背景を踏まえた上で，新型ロードスターの振動騒音（以下NVH）性能開発では，LWSとして提供したい価値から，以下の点に注力した開発を行ってきた。

(1)　パッセンジャとの会話を自然に楽しめる車内静粛性の実現。

(2)　エンジンサウンド（聞かせる音）の作り込み。

(3)　(1)と(2)の実現手段である遮音性能に関わる部品の質量最適化（質量目標と性能目標の両立）。

本稿では，(1)(2)の定量目標について述べた後，(3)についての取り組み事例について紹介する。

2. NVH性能目標

2.1　車内静粛性目標

ロードスターとしてパッセンジャとの会話が楽しめることは，提供価値の一つとして重要である。長距離移動等において一定速で走るようなシーンを想定し，高い静粛性の確保を目指した。具体的開発指標としては，耳障りな高周波音を従来モデルから約40%低減することを目標として開発した（Fig. 3）。

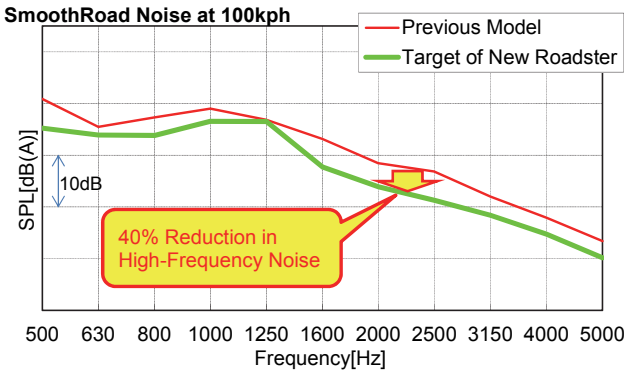


Fig. 3　Smooth-Road Noise Level Target for New Roadster

2.2　エンジンサウンド目標

新型ロードスターではキーテーマである「軽快感」を演出するために低周波音を大幅に低減し，更に以下のサウンドチューニングを行った（Fig. 4）。

①　低回転域（～2,500rpm）：中周波を基調とした排気音でLWSらしさを主張。

②　中回転域（2,500-5,000rpm）：SKYACTIV-Gの特徴を活かした“鼓動サウンド(*)”により，軽快な中にもパワフルさを感じるサウンドを実現。
(*)ゴロゴロという変動感のある音色

③　高回転域（5,000rpm～）：こもり感のないリニアなサウンドを実現することでどこまでもエンジンが回るような印象を与える，“伸び感”を演出。

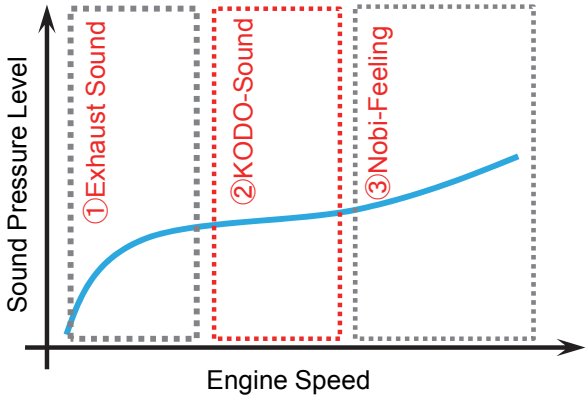


Fig. 4　Image of Engine Sound（①②③）

Fig. 4のサウンドイメージ②を周波数分析したものをFig. 5に示す。従来型比でサウンドが聞こえやすい理想の周波数特性とするために，高周波域のノイズ低減を目指した。

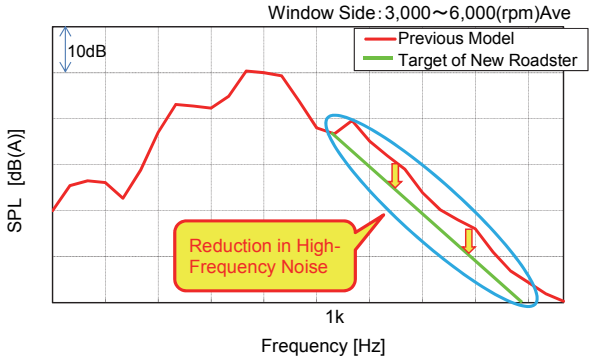


Fig. 5　Frequency Characteristic of KODO-Sound

3. 遮音性と軽量化の両立

3.1　遮音性と軽量化の両立の考え方／達成手段

2章の目標を満足する遮音性確保と軽量化を両立する機能配分の考え方として，次の3つの方針で検討を行った。

① 寄与度分析による重点対策部位の明確化
② 新規の軽量／高性能材料の採用
③ 機能統合による部品点数の削減

3.2　遮音性と軽量化の両立の具体例

ここでは，3.1節の達成手段の具体的一例として，タイヤ音に対する遮音性と軽量化の両立の取り組みについて述べる。

この取り組みでは3.1節で述べた①~③の手段を適用した。

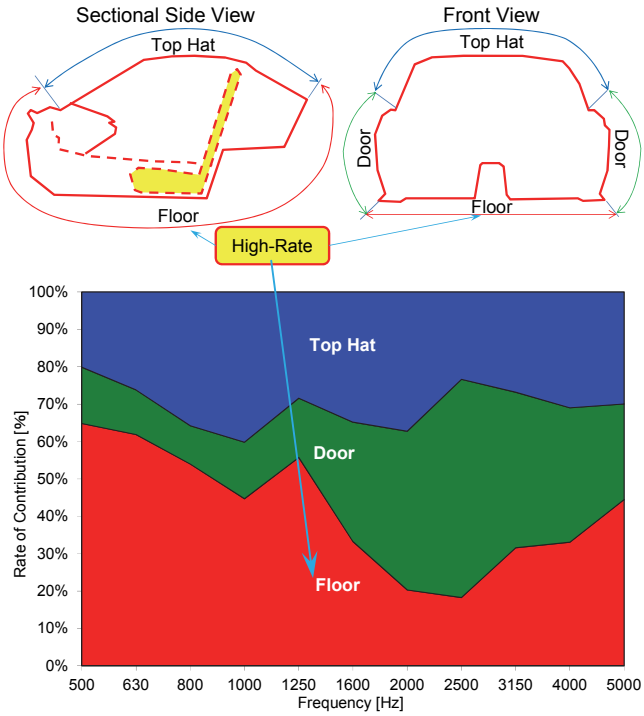


Fig. 6　Vehicle Panel Contribution on Smooth Road

まず実走行テストによる寄与度分析を行った（手段①）。この結果よりフロア部分の寄与が高いことが分かった（Fig. 6）。

次にこのフロア部分で特に寄与の高いリヤフロア部分に着目した。リヤフロア部分に対して高周波音の経路寄与分析を行った結果（Fig. 7）から主要経路である［A]センタフロア経路・[B]リヤフロア／ホイールハウス経路に対して遮音機能の強化を注力し，寄与の低い［C]トランク経路に対しては軽量化を重視した手段を配分することで性能と軽量化の両立を狙った仕様選定を行った。以下にその詳細な検討内容について述べる。

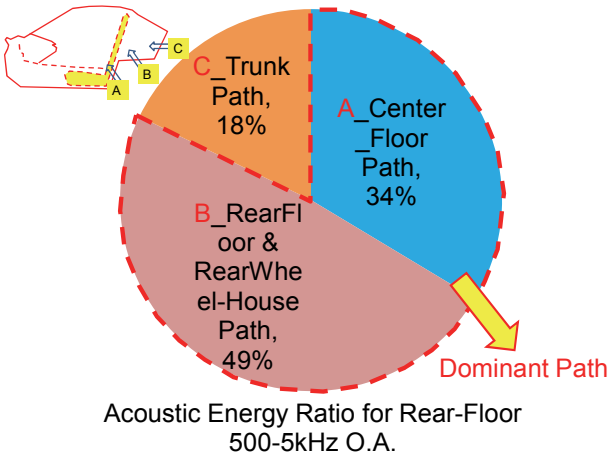


Fig. 7　Transfer Path Analysis For Rear Package Area

従来型では，[A]，[B]，[C]の各経路を透過するトリムの構成はハード（PP基材）の裏面にフェルトを部分的に貼り付ける構造であり，ボデーパネルの透過音に対して吸音し切れない入力があるとトリムを透過する音があった。新型では，フェルト材を3次元形状化し全面に配置することで，ボデーパネルからの透過音を十分減衰させ車室内に透過する音を小さくするねらいとした。具体的には，リヤパッケージトリム（幌格納部のトリム）およびトランクトリム本体の材料構成を従来型のPP基材から不織布成形品（遮音層／吸音層を持った素材）に変更した。

耳位置から近いリヤパッケージトリムの吸音層には，PET（ポリエチレンテレフタレート）製の極細繊維を採用し，吸音層の内部減衰エネルギーを効率的に高めた（Fig. 8）（手段②）。

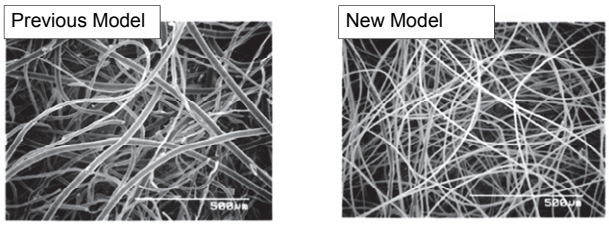


Fig. 8　PET Felt Fiber (REAR-PACKAGE TRIM.BACK)

リヤパッケージ部分でのねらいは，意匠（見栄え）機能と遮音機能を機能統合することにより，部品点数削減による軽量化とNVH性能の両立を達成することである（手段③）。キャビン部フロアマットの吸遮音メカニズムを参考に，リヤタイヤに近い幌格納部のトリム，トランク内部のトリムへ全域にわたってそのメカニズムを採用した。幌格納部位については，幌格納機構のレイアウトとの整合取りに，とりわけ苦労した。リヤパッケージトリムの板厚を幌収容性に必要な部分は薄肉化し，逆に幌収容性に影響しない部分をつぶさに確認してその部分の板厚を上げ，性能目標とレイアウトの整合取りを徹底した。

更に，効果的に吸音するために，リヤパッケージトリム両端末は落とし込み形状を作り，フロア下からの入射音がサイド部分へ漏れにくい構造設計とした（Fig. 9）。

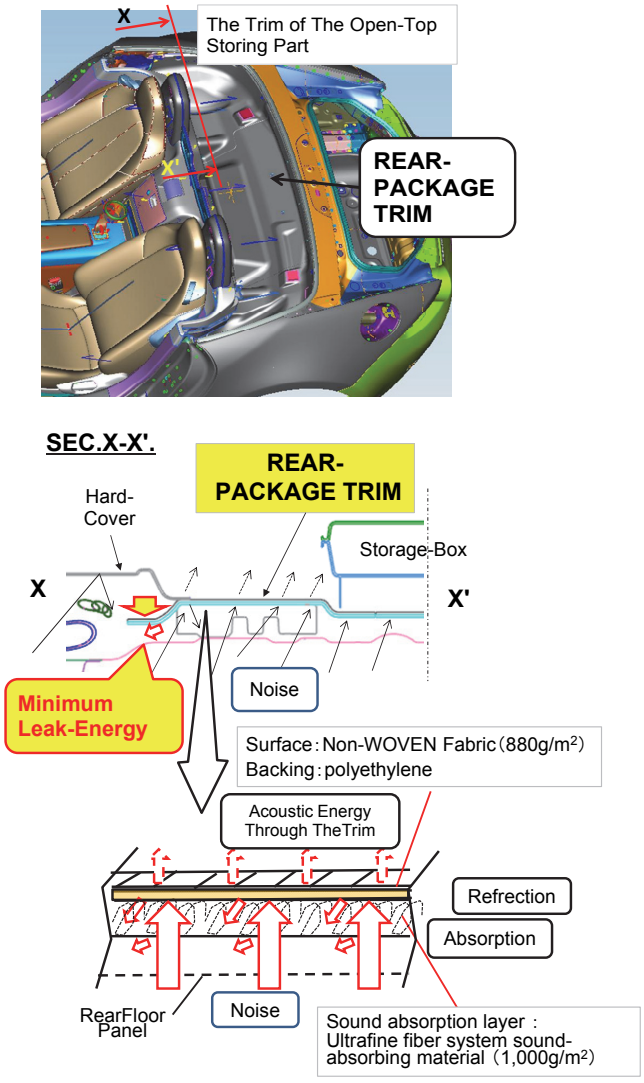


Fig. 9　Sound Insulation of REAR-PACKAGE TRIM

この結果，幌格納部及びトランク部のトリムの質量は，従来型から0.8kg下げることができた。これは，本部位（リヤパッケージおよびトランク）のトリム総質量の約9%の低減にあたる。

3.3　遮音関連部品の質量最適化結果

3.2節での取り組み例を含めたその他部分の軽量化と遮音性の両立の取り組みを進めた結果，遮音関連部品での軽量化は従来型から性能を維持／向上しながら，大幅な軽量化（約8kg）を達成した（Fig. 10）。

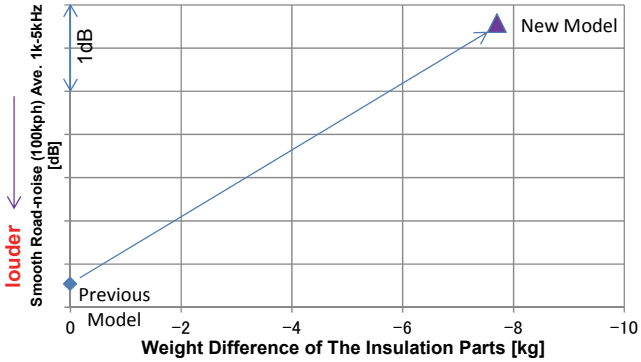


Fig. 10　Changes in Weight-to-Performance Relation

4. おわりに

車両開発において軽量化と遮音性（NVH性能）の両立は永遠のテーマであるが，今回新型ロードスターにおいて原点回帰を目標とした軽量化との両立に取り組んだことは，今後の車種開発にも活かせる知見やノウハウを得る重要な取り組みとなった。

■著　者■

山本 秀俊

末國 和憲

特集：新型ロードスター

28

高効率衝撃吸収ボンネットレインフォースメント構造とアクティブボンネットの開発

Development of Highly Efficient Shock Absorbing Reinforcement Structure and Active Bonnet

藤田　賢治*1　曽我部　洋*2　藤井　照雅*3
Kenji Fujita　Hiroshi Sogabe　Terumasa Fujii

要　約

市場事故での死亡者低減の観点から，歩行者死亡者の低減（歩行者頭部保護）は重要課題である。一般的に歩行者頭部保護のためには，ボンネットとその下のエンジン部品との隙（ストローク）を多く取ることで頭部傷害基準値（Head Injury Criterion：HIC）の低減を図るが，その結果としてボンネット面の上昇を招き，スタイリングへの影響が大きい。特にライトウエイトスポーツを標榜する新型ロードスターにおいては，旧来からの軽量でスポーツカーらしいスタイリング（低重心ボンネット）を継承したうえで，最高レベルの歩行者頭部保護性能を達成するという相反性能の両立が課題である。その課題を解決した2つの技術，高効率衝撃吸収ボンネットレインフォースメント構造とアクティブボンネット技術について紹介する。

Summary

To reduce traffic fatalities, decrease in pedestrian death toll (protecting their heads) is an important task. Generally, the larger the clearance between a hood and the below engine parts is, the safer pedestrians' heads become, but it will raise the hood top, which ruins the vehicle overall styling. Especially, for the All-new roadster which leading the Light Weight Sports, achievement of both opposing performances, the sports-car-typical styling (low hood position) and the top level pedestrians' head protection performance, was a big challenge. This was solved by the development and application of the highly efficient Shock Absorbing Reinforcement Structure and Active Bonnet as shown below.

1. はじめに

Fig. 1に示す平成25年の警察庁事故統計データ(1)によると，日本国内で発生した交通事故死亡者数は減少傾向にある。これを状態別に見ると，現在では歩行中の死亡者数が最多であり，更に状態別死亡者数の減少率では，自動車乗車中は平成15年に比べて53.7%であるのに対し，歩行中は32.8%に留まっている。このことから，歩行中の死亡者数の更なる低減が重要な課題となっている。

また，Fig. 2に示す歩行中死亡者の損傷部位別で見ると，頭部の損傷が全体の55%を占めている。このことから，頭部保護への対応が上述の重要課題解決には不可欠である。

一般的には，頭部の受傷を低減させるためには，自動車に衝突した際の衝撃エネルギーを多くのストロークで吸収させる必要がある。一方，マツダのライトウエイトスポーツの方向性は軽量かつ低重心ボンネットであるため，非常に限られたスペースしかない。本稿では，この相反する2つの要件を解決するための手法について紹介する。

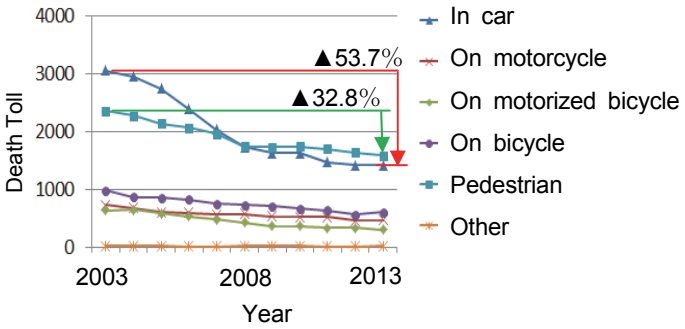


Fig. 1　Change in Death Toll

*1，3　ボデー開発部
Body Development Dept.

*2　衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

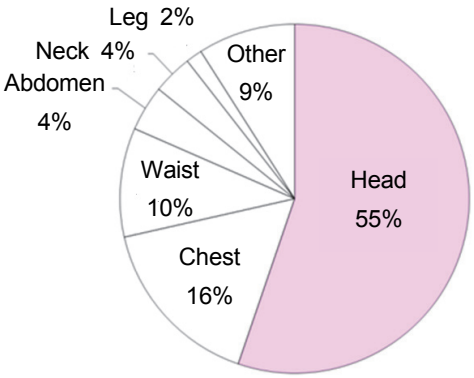


Fig. 2　The Damaged Area of the Deceased During a Walk

2. 課題

2.1　軽量化と頭部衝撃吸収性能の両立

人馬一体のライトウエイトスポーツでありながら，高い歩行者保護性能を達成するためには，次の2つが課題であった。1つ目は，軽量化目的で採用するアルミボンネットで，鋼板ボンネットと同等の衝撃吸収量を確保すること。2つ目は低重心ボンネットスタイリングを守りつつ，十分な衝撃吸収ストロークを確保することである。

歩行者の頭部がボンネットに衝突した際に，少ないストロークで効率良く衝撃を吸収するためには，衝突初期から適正な減速度を得ることが重要である。この減速度を決定する要素の1つがボンネットの質量であり，質量が増加すると減速度も増加する関係にある。この関係を鉄とアルミニウムの比重に置き換えて考えると，アルミニウムの比重は低いため，減速度も低くなり，結果としてストロークが多く必要になる。同じボンネットで，材料特性のみを変えて歩行者頭部衝突をCAE検証した結果，質量低減により減速度が低下し，アルミニウム採用による軽量化と適正な衝撃吸収の確保は相反することが確認できた（Fig. 3）。

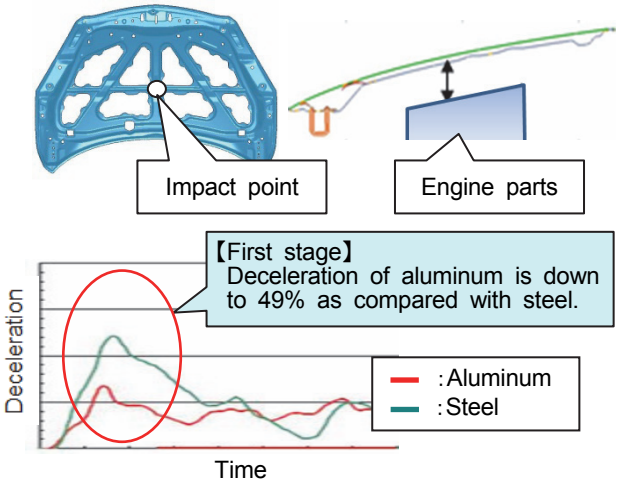


Fig. 3　Effect of Deceleration Wave Form by Each Material Characteristic

新型ロードスターにふさわしい低重心ボンネットスタイリング実現のため，上記課題の解決が必要であった。

3. 対策

3.1　高効率衝撃吸収ボンネットレインフォースメント

軽量化による衝撃吸収量の低下を改善するためには，質量の有効活用が課題解決の鍵である。すなわち，ボンネットを広範囲に変形させることで衝突初期の減速度を多く得て，衝撃吸収量を多くすることが重要である。このコンセプトに基づき，荷重伝達効率に優れるレインフォースパターンを検証した。下記，Fig. 4として，ボンネットの広範囲に荷重伝達させるねらいと予測を，Fig. 5として，レインフォースパターンの検証結果を示す。

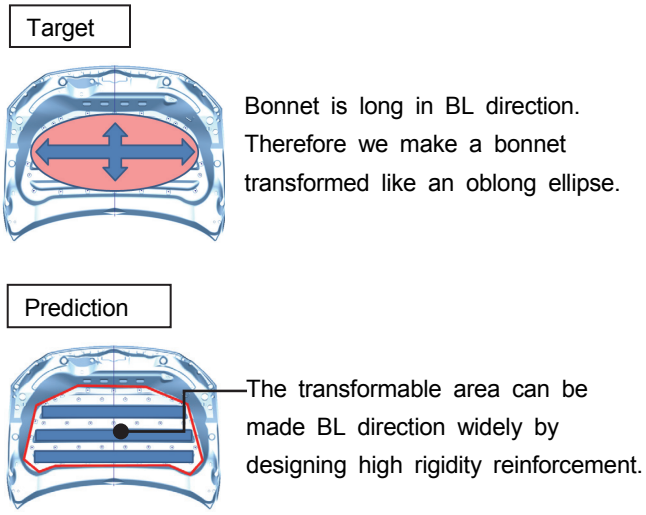


Fig. 4　Target and Prediction of Load Transfer

Fig. 5に代表されるさまざまなレインフォース形状を検討した結果，①横骨タイプの構造にすることで初期減速度のピーク値を鋼板ボンネット相当にできることが分かった。

荷重伝達状態を見ると，上述のねらいどおりボンネット左右方向の広いスペースに荷重伝達ができていることが分かる。本構造により，アルミで鋼板と同等の衝突初期衝撃吸収が可能になり，1つ目の課題を解決できた。

3.2　アクティブボンネット

一方，目標の低重心スタイリングを達成するためには，更に50%程度のストローク拡大が必要であり，このためには質量増加または，ボンネット高を上げるデザイン変更を伴うことから，ライトウエイトスポーツのコンセプトを実現できなくなる。

そこで，歩行者との衝突時のみボンネットを持ち上げるアクティブボンネットを採用することとした（Fig. 6）。本機能により，通常時のボンネット高をスタイリング目標に抑えつつ，歩行者保護ストロークを確保することが可能になり，2つ目の課題が解決できた。

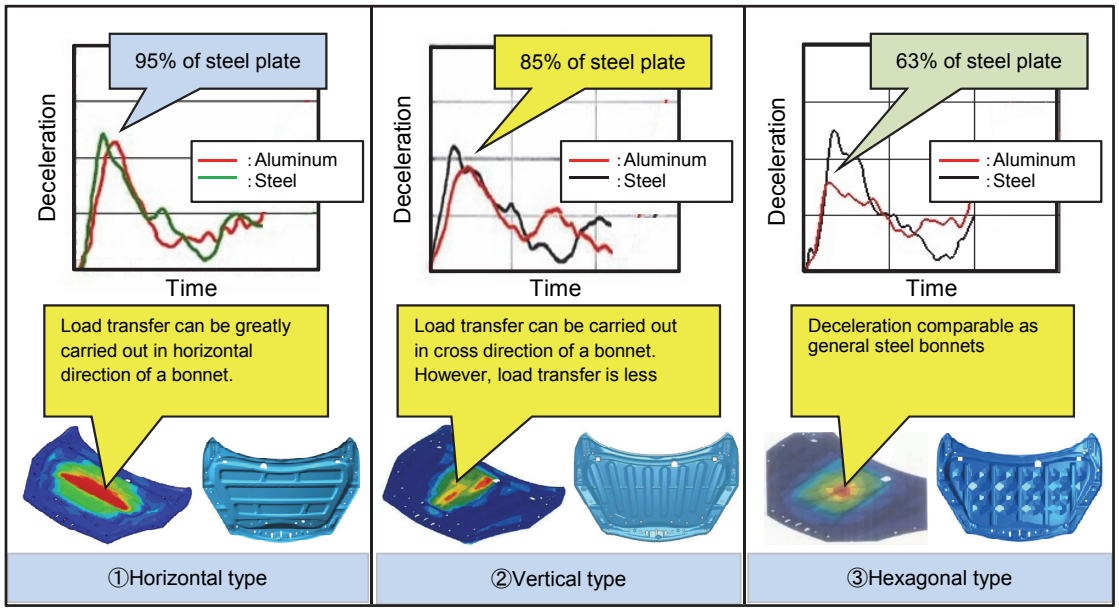


Fig. 5　Influence Comparison to Deceleration by the Difference in Reinforcement Form

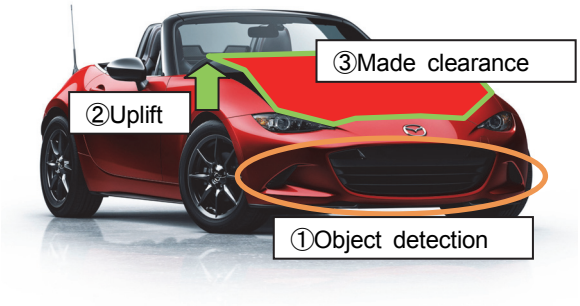


Fig. 6　Image of Active Bonnet

（1）アクティブボンネットの概要

アクティブボンネットとは，歩行者との万一の衝突の際に，①歩行者との衝突を検知し，②アクチュエータでボンネットを押し上げ，③エンジンルーム部品との間の空間を拡大し，歩行者頭部が受ける衝撃を緩和する機構である。

（2）各システムの機能分担

アクティブボンネットを開発するにあたり，歩行者との衝突開始から頭部がボンネットに衝突するまでの全体像のカラクリを描き，システム構成と各システムに求められる性能の可視化を行った。その結果，次のように機能を分担した（Fig. 7，8）。

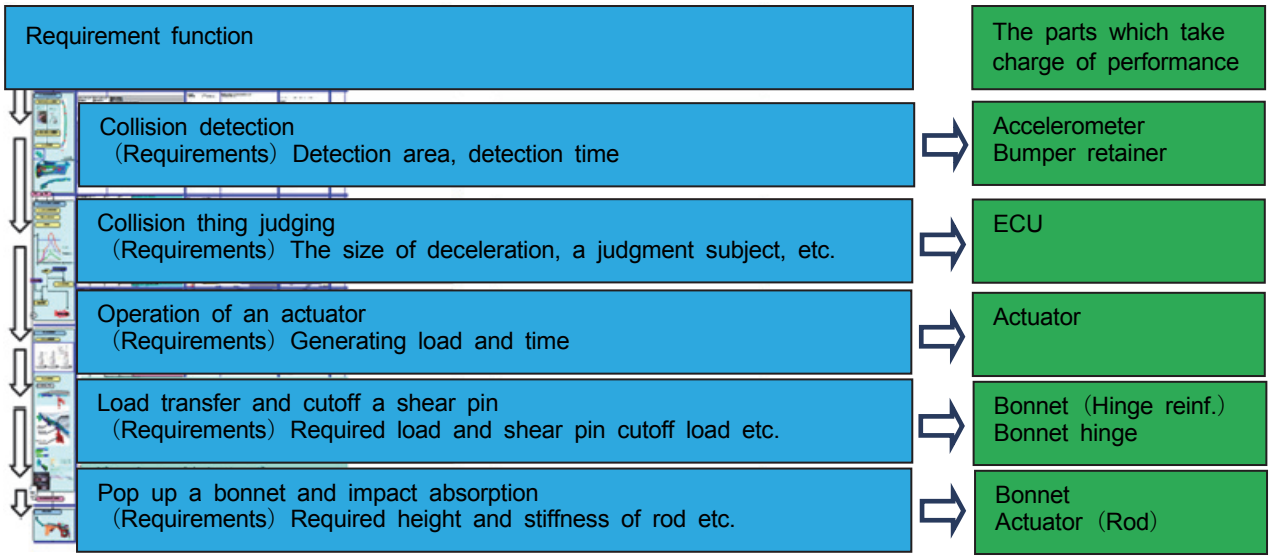


Fig. 7　The KARAKURI Outline of Active Bonnet
Requirement Function from Collision of a Pedestrian and a Vehicle to Impact Absorption

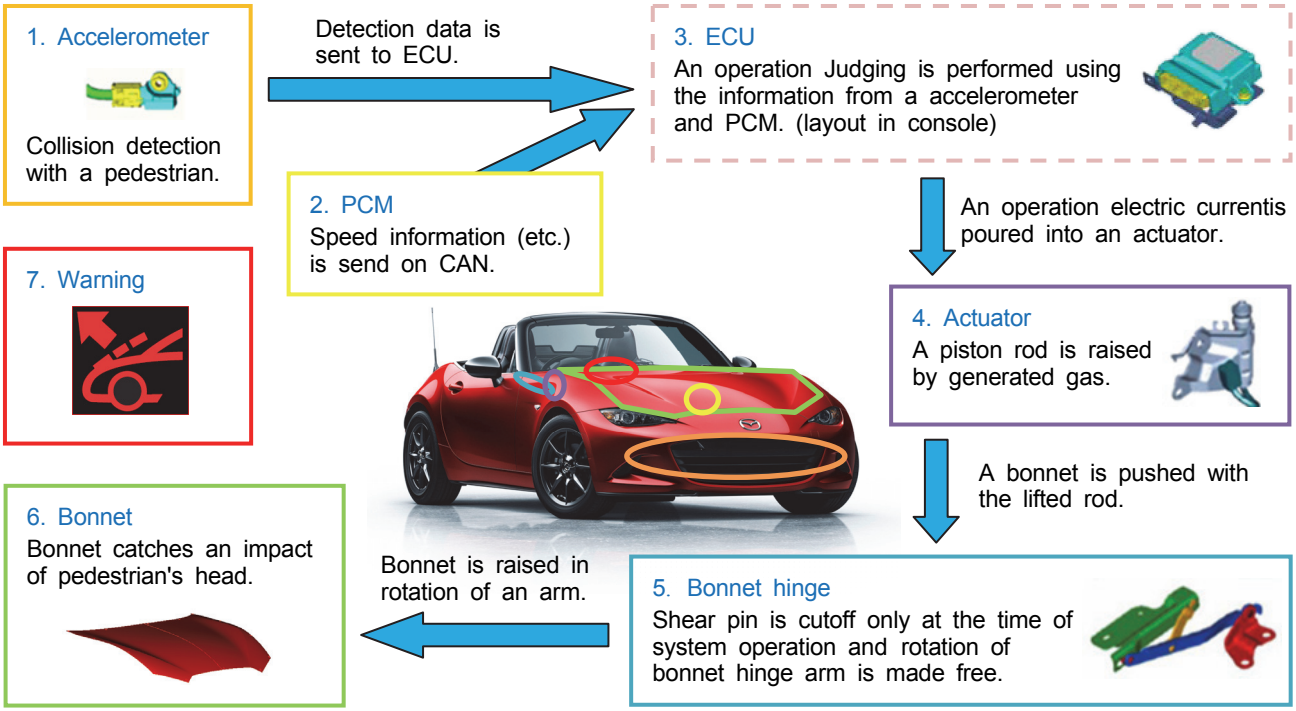


Fig. 8　Scheme of a Component and the Function

衝突検知…バンパ，バンパリテーナ，加速度センサ
衝突物判定…ECU
起爆・ボンネット持ち上げ…アクチュエータ，
　　ボンネットヒンジ
衝撃吸収…アクチュエータ（ロッド），ボンネット

（3）要求性能の具体化例

・ボンネットの展開機構

ECUが衝突物を歩行者だと判定した場合，アクチュエータに起爆信号が送られ，MGG（マイクロガスジェネレータ）に着火，発生するガス圧によりアクチュエータ内のロッドが突出する。

ロッドからの荷重は，ボンネット内のヒンジレインフォースメントによりヒンジ部に伝達されシアピンを切断，ボンネットを上昇させる。シアピンは，通常想定される荷重（ボンネット開閉，悪路走行，耐久走行等）では破断することなく，アクチュエータからの荷重が伝達された場合のみ破断するように，材質・寸法を設定している（Fig. 9）。

・ボンネットの展開動作

衝突時，最も早く頭部がボンネットに衝撃するタイミング以降，いかなる時間においてもHICが目標レベルに収まることを保証するという思想に基づいて，ボンネット上昇から制振（目標振幅の達成）に至るまでの高さおよび時間を決定した（Fig. 10）。

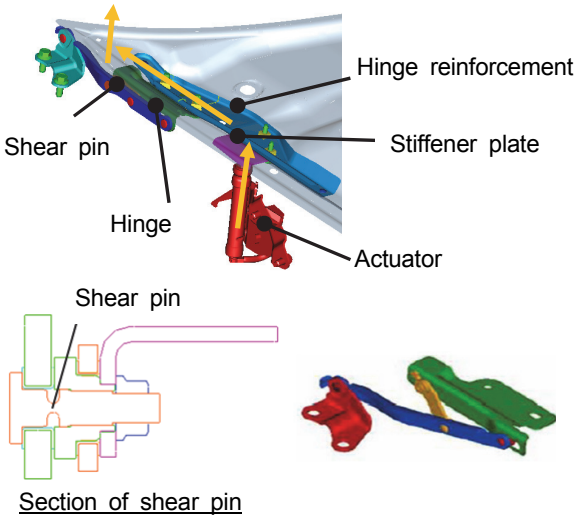


Fig. 9　Load Transfer of Active Bonnet and Detail of Shear Pin

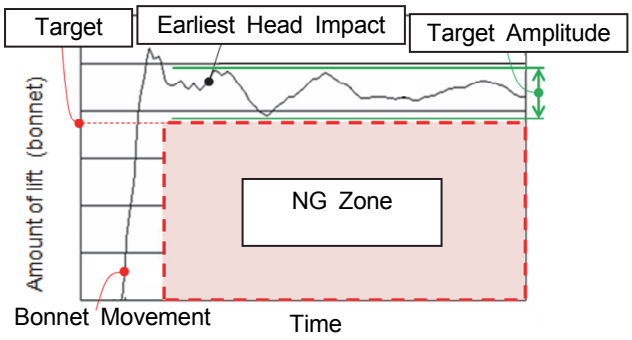


Fig. 10　Diagram of Bonnet Deployment

代表的な注力点として以下を挙げる。

・最も早く頭部がボンネットに衝突する時点で，目標高さにボンネットを上昇させ，その後も常に目標高さを維持すること。
・上昇後のボンネット振動によりHICが目標レベルを超えてしまわないように，適正な振幅とすること。

4. 成果

（1）高効率衝撃吸収レインフォースメント構造の開発

衝撃吸収のメカニズムを解明し，重要な因子を適正化することで，軽量でありながら高い衝撃吸収性能をもつボンネットレインフォースメントを開発できた。

（2）アクティブボンネットの開発

ボンネット展開機構のカラクリ，それぞれの部品の機能を明確にして設計を行うことで，衝突時に迅速かつ確実に展開するアクティブボンネットを開発できた。

上記の技術を開発することで，最高レベルの安全性能とライトウエイトスポーツにふさわしいスタイリングおよび質量を実現した。

5. おわりに

本開発により，困難な相反事象を両立して高い目標を達成することができた。スポーツカーらしいスタイリングを実現しつつ，最高レベルの安全性を確保しており，自信をもってお客様にお届けできる。今後も，相反する要件に対して真摯に開発を行い，安全でマツダらしい車をお客様にお届けしたい。

参考文献

（1）警察庁ホームページ　平成25年データ

■著　者■

藤田 賢治

曽我部 洋

藤井 照雅

特集：新型ロードスター

29

新型ロードスターのネットシート開発
Net Seat Technology for New Roadster

元吉　菜緒子*1　　竹内　良敬*2
Naoko Motoyoshi　　Yoshinori Takeuchi

要　約

新型ロードスターのシートは，「世界一のシートを追求し全てのお客様に笑顔を届ける」という志の下，CX-5以降の新型車で追求してきた理想のシート快適性コンセプトを継承した。更に，スポーツ走行でも身体をしっかり支える「ホールド性」と振動を絶縁した快適な「乗り心地」を進化させることを目標とした。それをライトウエイトスポーツカーの車両スペース制約と重量目標の中で実現させるため，新構造「ネットシート」の技術開発に取り組んだ。シートの支持構造を従来のウレタンパッドや金属ばねから新素材「弾性ネット材」へ変更することで薄型かつ軽量化し，身体を支持する部位ごとにネット材の特性を最適化することで，ホールド性や乗り心地を向上させた。

Summary

Having aspirations to “develop the world’s number one seat and make all customer smile”, new Mazda Roadster tried to carry on the concept of ideal seat comfort, which had been pursued in the developments of Mazda CX-5 and subsequent new models. In addition, new targets are set to improve the “lateral support performance” for the driver in sports driving, and “comfortable ride feeling” to insulate the driver from uncomfortable vibration. To achieve this goal within the constraints of interior space and target weight for a light-weight sports car, Mazda conducted technology development for a new seat structure called “Net Seat”. The seat structure was changed from the conventional urethane pads and metal springs to the new “Elastic Net”, with the aim of making the seat thinner and lighter. The characteristics of elastic net were optimized so as to improve lateral support and ride comfort.

1. はじめに

マツダの商品コンセプトである「人馬一体」とは，ドライバが車を意のままに操り，車との一体感を味わうことである。新型ロードスターは，歴代モデルで培ってきた人馬一体コンセプトの「継承と進化」をキーワードに開発を行った。車に乗り込んだ瞬間から降車するまで常にお客様と直接接する「シート」は，人馬一体感を提供する上で重要な部品であり，新型ロードスターのシートでは，車両コンセプトに従ってシート快適性の「継承と進化」に取り組んだ。これを前モデルよりダウンサイジングしたボデーに収めるため，省スペースかつ軽量なシート構造で成立させることを目指した。本稿では，「快適性向上」と「省スペースかつ軽量化」という二つの課題を両立するために新開発した「ネットシート」について，性能の狙いとその実現手段，達成性能を紹介する。

2. 開発の狙い

マツダのシート開発では，シートに求められる快適性能を大きく4項目に分類している。

（1）フィット性：乗員の身体を優しく包み込み，心地よさを提供する。

（2）姿勢の支持：長時間走行でも疲れにくい快適な運転姿勢の支持を提供する。

（3）ホールド性：スポーツ走行などで車両に横Gが入っても，身体がずれたり力を入れて踏ん張ることなく，快適な運転操作ができるようなサポート性を提供する。

（4）乗り心地：荒れた路面走行時でも振動を絶縁し，す

*1，2　装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

っきりとした乗り心地を提供する。

新型ロードスターでは，CX-5以降の新型車で実現してきたこれらのシート快適性コンセプトを継承すると同時に，スポーツカーとして重要な性能であり，初代ロードスターから一貫して目指してきた，身体をしっかり包み込む「ホールド性」と，振動を絶縁した快適な「乗り心地」を進化させることを目標とした。

3. 課題

3.1　克服すべき課題

新型ロードスターでは，歴代モデルで培ってきた「人馬一体」コンセプトの継承と進化のため，最軽量モデルで車両質量1.0t以下を目標とし，車両サイズもコンパクト化した。これらの車両目標を実現するため，シートも限られたスペースで軽量化，かつ高性能を求めるという挑戦的課題に取り組んだ。

3.2　課題克服の方針

一般的なシートは，主に表皮，プリーツ，ウレタンパッド，金属ばね，フレーム等の構造から成る。この中で，シートの厚みの主要因を占めるウレタンパッドは，乗員が着座した時の体圧分散性，クッション性，振動減衰性といった機能を持ち，シート快適性への寄与度が高い。そのため，薄型かつ軽量化のためにパッド厚を薄くすると，シート快適性が悪化する。そこで，新型ロードスターでは，既存のウレタンシート構造とは異なる，「ネットシート」という構造を採用した。

ネットシートとは，シートの支持構造を従来のウレタンパッドや金属ばねから「ネット材」へ変更した構造である（Fig. 1）。従来シートと比べてウレタンパッド量を削減し，金属ばねを廃止することができるため，薄型かつ軽量効果がある。この「ネット材」とは，特殊な弾性繊維を使用して作り上げた織編組織で，軽く弾力性に優れた布状のばね材である。ネット材はクッション性，振動減衰性の機能を持ち，金属ばねと比較して面支持による体圧分散性の効果がある。また，ネットのハンモック効果によりネットが身体に追従し包み込むように支えるため，ホールド性が向上する。更に，ネット材自体の振動減衰性が高いため乗り心地が向上するといった性能向上効果を期待できると考えた。

マツダでは，2011年に発売したSKYACTIV技術を搭載したデミオで，初めてシートバックのみネットシート構造を採用し，軽量化と高性能の両立化を実現した。そこで今回，新型ロードスターでは，シートバックのみならずクッションにもネットシート構造を採用することで，更なる薄型化と軽量化，かつシート快適性の向上に取り組んだ。

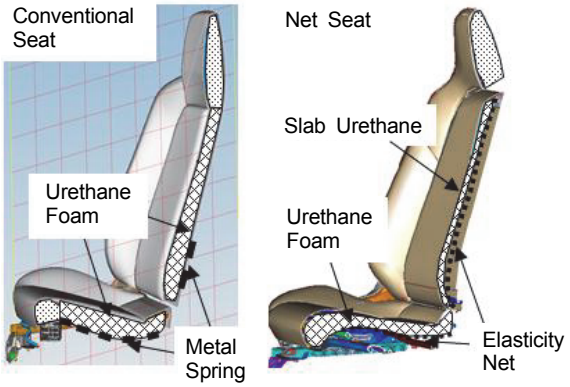


Fig. 1　Comparison of Net Seat with Conventional Seat Structure

4. 実現手段と達成性能

4.1　フィット性

（1）実現手段

乗員の身体を包み込み，心地よさを提供する「フィット性」を確保するためには，シートが身体を柔らかく，広い面積で支えることが必要であると考えた。そこで，新型ロードスターでは，ネット材にスラブウレタンを接着し，ネット材とスラブウレタンの密度，硬度を最適化することで，シート表面が柔らかく身体にフィットし，広い接触面積を確保できるようにした。

（2）達成性能

Fig. 2に，基準体格のマネキン[1]で計測したシートの体圧分布を示す。新型ロードスターは，前モデルと比較してシートバックの腰椎部とクッションの骨盤部の接触面積が約1.2倍大きくなり，フィット性が向上した。

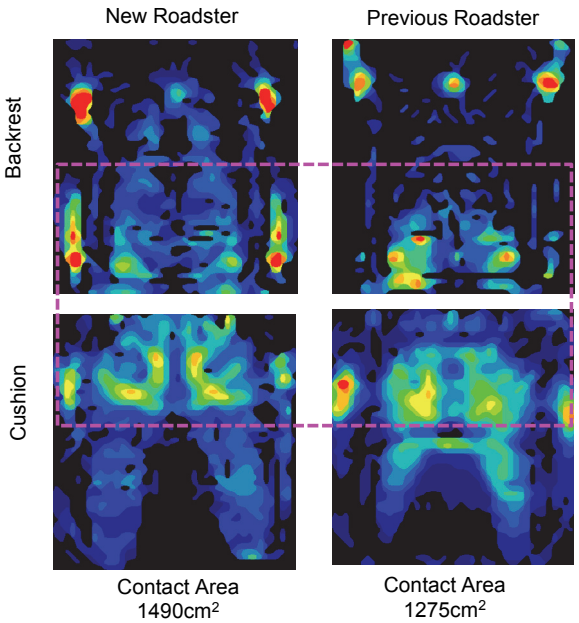


Fig. 2　Contact Area of Pressure Distribution

4.2　姿勢の支持

（1）実現手段

人は立位状態の時，側面から見ると腰椎がS字状のカーブを描いている。これを生理的前湾といい，立位だけでなく着座状態でも生理的前湾を維持することで，椎間板への負担を最小化し，長時間走行でも疲れにくい支持性能を確保できる(2)。マツダはこの考え方に基づき，長時間走行でも疲れにくい理想的な支持バランスの目標を定義している(3)。

新型ロードスターでは，理想の支持バランスに沿うように，腰椎部と骨盤上部はしっかり支えるためネット材を高張力にし，胸郭部は広い面積で適度な柔らかさで支えるため低張力にというように，1枚のネット上で部位ごとに張力を最適化した（Fig. 3）。

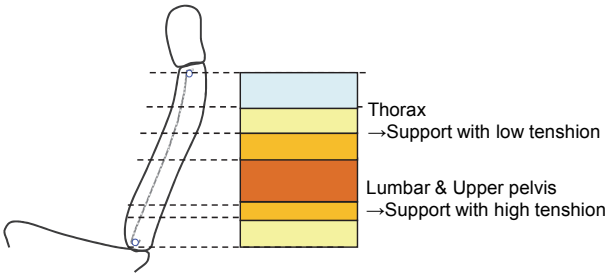


Fig. 3　Tension Distribution of the Elastic Net

また，クッションは，臀部が前ずれせず，長時間走行時に坐骨結節部に圧力が集中して痛くならないよう，臀部や大腿部をしっかり支える必要がある。新型ロードスターでは，クッション座面部のネット材の下面に，前後方向に帯状のネット材を追加した。これにより座面中央部の反力不足を帯状ネットで補うことで，臀部全体を面で支える構造とした（Fig. 4）。帯状ネット材のサイズは，小柄から大柄な体格までの乗員の坐骨結節の幅を考慮して決めた。

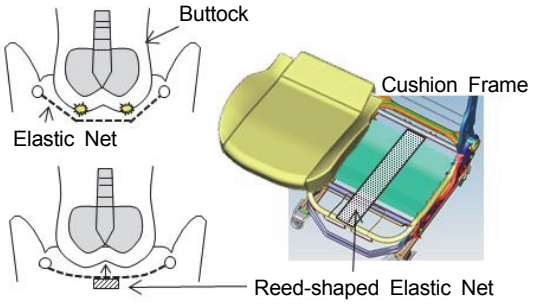


Fig. 4　Cushion Structure

（2）達成性能

Fig. 5に，基準体格のマネキン(1)で計測したシートの体圧分布を示す。縦軸にシートバックは高さ，クッションは前後位置を，横軸に座面部の各高さ，前後位置における荷重和の割合を示す。新型ロードスターは，シートバックは腰椎部から骨盤上部までを連続的に支持し，クッションは帯状ネットがない場合と比較して，臀部に圧力が集中しすぎることなく，大腿部までを適切な強さで支持しており，マツダが考える理想の支持バランスに近い支持性能を実現することができた。

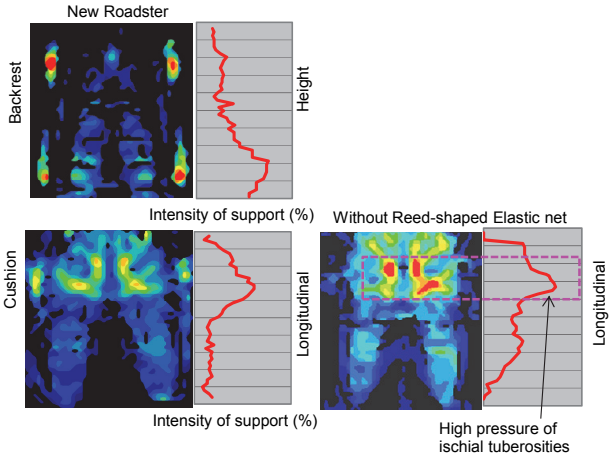


Fig. 5　Pressure Distribution of the Seat

4.3　ホールド性

（1）実現手段

シート座面部は，ネット材が身体に追従し包み込むように支える特徴を生かして，コーナリング時の横Gに対して背中がシートバックから離れるのを防いだ。サイドボルスタ部は，脊柱や骨盤が横方向に傾かないように人体形状にフィットする形状とした。更に，身体を柔らかくかつしっかりサポートするよう，サイドボルスタの硬度と密度を最適化した。

（2）達成性能

シートバックに載せたマネキンを横方向に0.8G相当で負荷した時の体圧分布をFig. 6に示す(4)。新型は，サイドボルスタの接触圧が高く，身体をしっかりサポートしており，コーナ内側の接触面積と接触圧も高いことから，狙いどおり，背中がシートバックから離れていないことが確認できた。それと同時に，Fig. 5に示すように着座状態でのサイドボルスタの接触圧は高くなく，窮屈感も生じていない。つまり，横Gに対して窮屈感なくしっかり身体をサポートしており，高いホールド性を実現した。

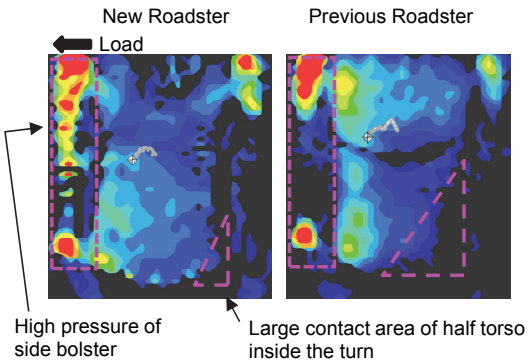


Fig. 6　Pressure Distribution while Lateral Force Applied to Simulate Cornering

4.4　乗り心地

（1）実現手段

新型ロードスターでは，ネット材のばね定数の調整と，スラブウレタンの厚みや密度を最適化することで，振動減衰性を向上させた。

（2）達成性能

荒れたコンクリート路面などの路面入力を再現したモードで，標準体格のパネラーが着座した時の，シートバックとクッションの振動伝達率を示す（Fig. 7，8）。縦軸の振動伝達率は，乗員着座状態でのシート座面上のPSD（Power spectral density）を，シート取付け部付近のフロアのPSDで割った値を示す。シートバック，クッションとも振動入力が低減し，乗り心地が向上した。

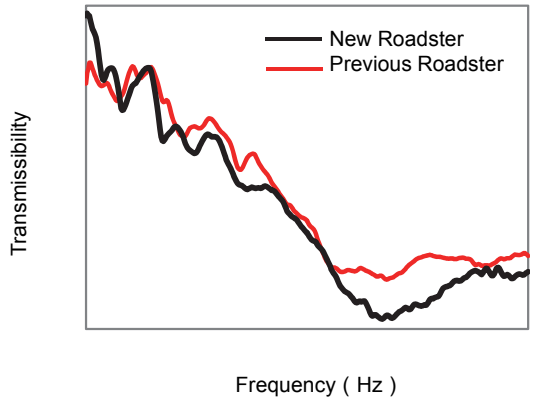


Fig. 7　Fore-and-aft Vibration on Backrest Surface

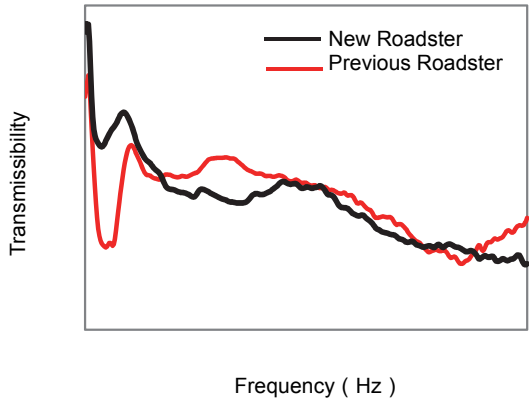


Fig. 8　Vertical Vibration on Cushion Surface

5. おわりに

以上，新型ロードスターのネットシート性能について報告した。新構造である同シートの開発により，ホールド性や乗り心地といったシート快適性を向上させることができた。データ上は上述のとおりだが，モックアップ段階から試作車段階まで，幾度も社内外のパネリストの協力を得て評価を繰り返した。特に，コンパクトな空間レイアウトにおけるポイントはドライビングポジションとの共創であり，実走評価による検証を行いつつ改良を加えた。更に，従来シート比で10％の軽量化と最大で30mmの薄型化を実現し，軽量・薄型化と高性能を両立させることができた。今後も，お客様に今まで以上に人馬一体感を楽しんでいただけるよう，更なるシート快適性向上に努めていく。

参考文献

（1）Reed,M.P. et al. : Design and Development of the ASPECT Manikin, SAE paper, 9901963（1999）

（2）N. Michida et al. : A Study of Drivers' Fatigue Mechanisms during Long Hour Driving, SAE paper, 2001-01-0381（2001）

（3）N. Michida et al. : Seat Lumbar Support Evaluation with ASPECT Manikin, SAE paper, 2005-01-1007（2005）

（4）H. Okiyama et al. : Seat Lateral Support Evaluation with SAE Manikin, SAE paper, 2005-01-1006（2005）

■著　者■

元吉　菜緒子

竹内　良敬

特集：新型ロードスター

30

新型ロードスターの軽量ワイヤハーネス開発
～電線導体のアルミ化～

Development of New Roadster Light Weight Wiring Harness
～Replacement of Wire Conductor Material into Aluminum～

三好　俊充*1　　下河内　次生*2
Toshimitsu Miyoshi　Tsuguo Shimokouchi

要　約

新型ロードスターは，初代ロードスターから受け継ぐ人馬一体を追求し，全社一丸となり，飽くなき軽量化へのこだわりを持ち，開発に取り組んだ。電装部品を「つなぐ」役割を担うワイヤハーネスでは，従来は“システム統合により電線本数を削減する省線化”や“電線径を細くする細線化”，“電装部品間を最短で接続する短線化”により，その重量を軽減してきた。今回，軽量化の新技術である“電線導体のアルミ化”をこのクルマをターゲットとし，減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」ハーネスで実現した。このハーネスをアルミニウムに置換することにより，クルマ1台に使われるハーネス総重量の約3%にあたる500gの軽量化を達成した。その開発経緯と実現手段を紹介する。

Summary

The New Roadster pursues the “Jinba-Ittai” concept inherited from its original model, and Mazda developed it with an insatiable determination for weight reduction. In wiring harness taking a role “to connect” all electric equipment parts, the weight reduction is conventionally done by reducing wire number through system integration, by thinning wire diameter and by shortening wire length through the shortest connection of electric equipment parts. Now Mazda have achieved to reduce the wiring harness weight for the regeneration system “i-ELOOP” by using new technology of “wire material replacement to Aluminum”. Mazda achieved weight reduction of 500g equal to approximately 3% of wiring harness total weight used for one car by replacing wire material to Aluminum. This article describes the details of development and the technique.

1. はじめに

新型ロードスターは，初代ロードスターから一貫して追求し続けている「人馬一体」と「Lot of Fun」を継承し進化させながら，全社一丸となり飽くなき軽量化へのこだわりを持ち，開発に取り組んだ。

電装部品を「つなぐ」役割を担うワイヤハーネスは，クルマ1台あたり約15～20kgの重量がある。さまざまな部品で構成されるワイヤハーネスは，電線重量の占める割合が最も高く，全体の約70%を占めるため，軽量化の鍵を握るのは電線重量の軽減である（Fig. 1）。従来，電線重量の軽減実現手段として，次の3つが挙げられる。

(1) 省線化；システム統合により電線本数を削減する
(2) 細線化；電線径を細くする
(3) 短線化；電装部品間を最短で接続する

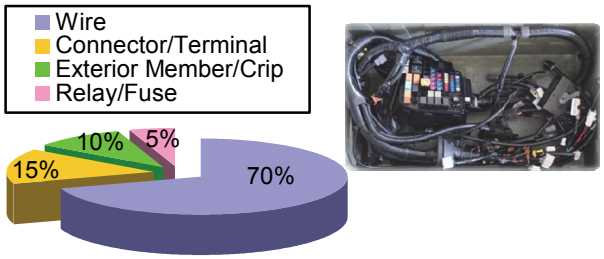


Fig. 1　Weight Ratio of Wiring Harness Components

*1, 2　電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

新型ロードスターでは，軽量化の新技術である“電線の導体材料を従来の銅から軽量のアルミニウムに置き換える材料置換”により，電線そのものを軽量化した（Fig. 2）。本稿ではこの軽量化の開発経緯と実現手段を紹介する。

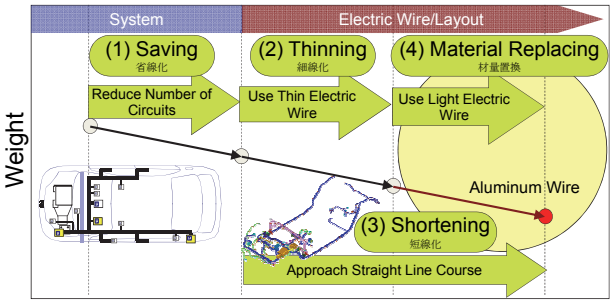


Fig. 2　Approach of Wire Weight Reduction

2. アルミ電線の搭載部位

ワイヤハーネスに使用する電線は，通電電流の大きさにより，適切な電線径を選定している。大電流回路に使用する大径の太物電線は，小電流回路の細物電線に比べ，導体である金属を多く使用するため，電線重量は重くなる（Fig. 3）。太物電線の重量を軽減することが軽量化にとって効果的だといえる。

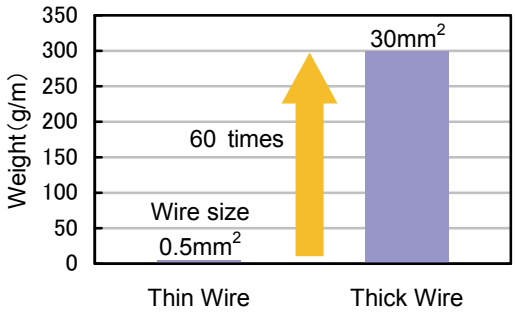


Fig. 3　Weight of Copper Wire

新型ロードスターは，燃費向上を目的として減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」を搭載する。このシステムは，クルマの減速時に発生するエネルギーを電気として回収し，クルマが必要とする電気エネルギーとして再利用する。可変電圧式オルタネータで発電し，キャパシタへ充電を行う。DC-DCコンバータにて最大24Vのキャパシタ電圧を12Vへ降圧し，各電装品へ電力を供給する。このオルタネータ，キャパシタ，DC-DCコンバータ，バッテリは太物電線によって接続される（Fig. 4）。アテンザ，アクセラはこの太物電線の導体に銅を使用している。新型ロードスターではこの導体をアルミニウムに置き換えることで，軽量化により人馬一体／Lot of Fun／低燃費化に貢献できると考えた。

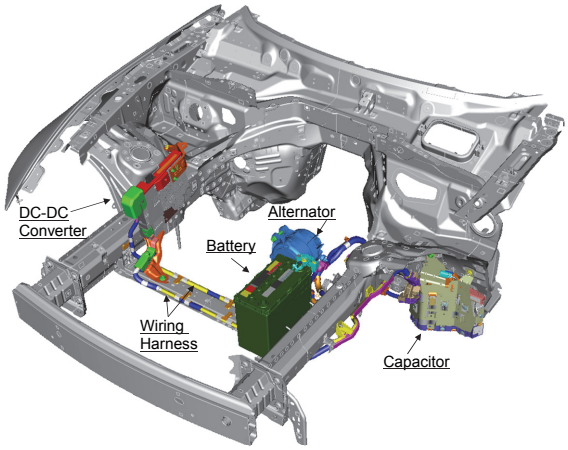


Fig. 4　i-ELOOP Layout of New Roadster

i-ELOOPハーネスのアルミ化は，キャパシタとDC-DCコンバータの接続区間及び，DC-DCコンバータとバッテリの接続区間とした（Fig. 5）。

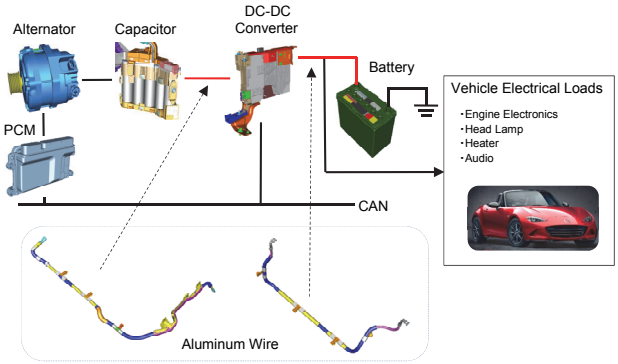


Fig. 5　System Diagram[1]

この2本の電線導体を銅からアルミニウムに置き換えることで，約66%低減となる500gの軽量化が見込める（Fig. 6）。

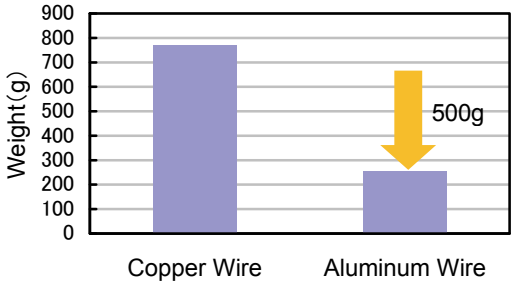


Fig. 6　Weight Comparison

3. アルミ電線採用に向けた検証

車載における課題を明らかにするためFMEA／DRBFMを実施し，以下3点の故障モードを抽出した。

（1）アルミニウム表面の酸化皮膜が強固なため，電線と端子の接続間で接触不良が発生する
（2）電線（アルミニウム）と端子（銅）間で異種金属接触腐食による導通不良が発生する
（3）導体をアルミニウムに変更することで，電線の発煙及び電線の熱劣化が発生する

（1）の酸化皮膜による接触不良について，アルミ電線の酸化皮膜を除去した上で端子と接続する技術が必要となる。アルミ電線の端子接続技術を調査し，圧着部の耐久性評価を行った（3.1節にて説明）。

次に（2）の異種金属接触腐食による導通不良について，どのような条件下で腐食が発生するのか，腐食耐力はどの程度あるのか，腐食耐久評価と車両腐食環境の把握を行った（3.2節にて説明）。

最後に（3）の導体材料変更による電線の発煙と電線の熱劣化の発生について，アルミ電線の特性値を反映した電線発煙のヒューズによる回路保護及び，電線熱劣化寿命の検証を行った（3.3節にて説明）。

アルミ電線採用の際に想定される3つの課題についての具体的検討内容を次に詳述する。

3.1　アルミ電線端子接続技術

電線と端子の接続において，安定した電気的特性を得るには，電線と端子間及び，電線を構成する素線間の電気的接続が必要となる。アルミ電線の導体表面を覆う酸化皮膜は，銅電線の酸化被膜より強固で抵抗値が高い（Table 1）。端子圧着時，導体外周部に位置する素線の酸化皮膜は，端子セレーション（溝）により破壊することで電線と端子間の接続は可能となるが，導体中央部の素線は端子に触れる割合が少なく（Fig. 7），また素線間の導通も乏しいため，電気的特性が安定しない。

Table 1　Oxide Film Properties of Aluminum Wire[2]

Oxide Film	Hardness [HV]	Resistivity [Ω･cm]
Al_2O_3	700～1900	10^{12}～10^{14}
CuO	about 130	10^{2}～10^{3}

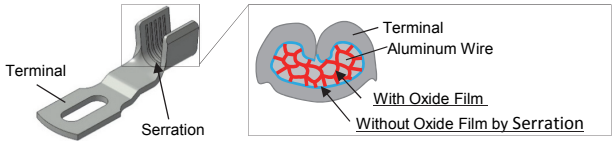
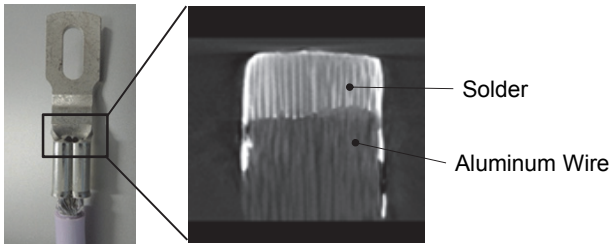


Fig. 7　Cross Section of Crimp Department

端子接続作業時にアルミニウム表面の酸化皮膜を除去し生成させない端子接続技術として，超音波半田や超音波溶接などの工法がある。

（1）超音波半田による接続

超音波振動によるキャビテーション効果により，素線表面を覆っている酸化皮膜を破壊することで，半田をアルミ素線間に浸透させる。その後，圧着することで電線中央部の素線は，半田を介して端子と接続される（Fig. 8）。



Ultrasonic Soldering[2]

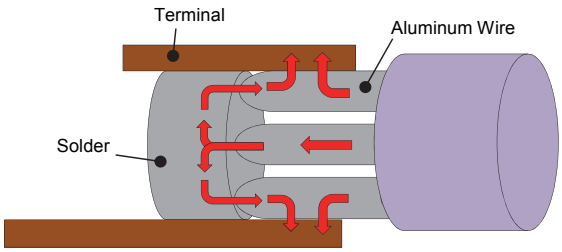
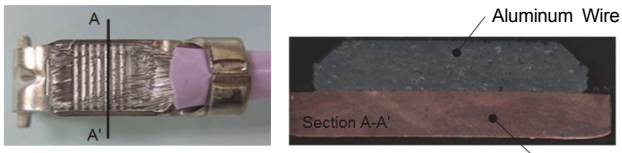


Fig. 8　Flow of Electricity (Ultrasonic Soldering)

（2）超音波溶接による接続

超音波振動を加えることにより素線の酸化皮膜を破壊しながら加圧することで，素線間の接続及び端子との接続を同時に行う（Fig. 9）。



Ultrasonic Welding[3]

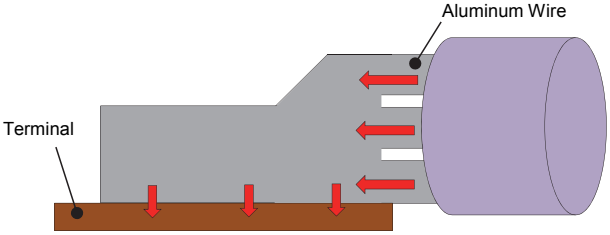


Fig. 9　Flow of Electricity (Ultrasonic Welding)

これら2種類の接続技術を用いて，車載環境を想定した各種耐久評価を行い，銅電線と同等の接続信頼性を確保できていることを確認した。

3.2　腐食耐久評価と車両腐食環境の把握

一般的に電位の異なる金属を電解液中で接触すると異種金属接触腐食が発生する。電線（アルミニウム）と端子（銅）間で異種金属接触腐食が発生するメカニズムを以下に記載する。

（1）異種金属接触の腐食メカニズム

端子圧着部に塩水などの電解液が付着するとアルミニウムが溶出される。これは，標準電極電位が高い銅と低いアルミニウム（Table 2）が接触した部位に電解液が付着すると，銅がカソード，アルミニウムがアノードとなり，アルミニウムが溶出する（Fig. 10）。以下の3つがそろい，腐食電流が流れるルートができると腐食が進行する。

① 異種金属の接触
② 電解液（塩水）
③ 溶存酸素

Table 2　Ionization Tendency

Aluminum Wire - Copper Terminal

Element	AL	Zn	Fe	Ni	Sn	Pb	(H)	Cu
Standard Electrode Potential [V]	-1.66	-0.76	-0.45	-0.26	-0.14	-0.13	0	0.342

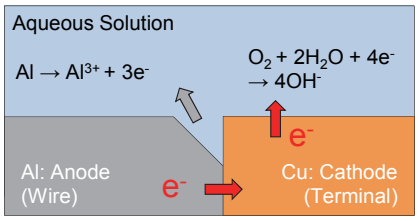


Fig. 10　Schematic View of Different Kind Metal Contact Corrosion

（2）試作品による塩水噴霧試験

自動車の腐食環境は，沿岸地域や冬季の融雪剤散布地域での塩害による影響が大きい。アルミ電線の端子圧着部に塩水が付着した場合の腐食進行状況を確認するため塩水噴霧試験を行った。アルミ電線を銅端子に圧着した試作品を製作し，圧着部に5%の塩水を長時間噴霧し高温高湿放置した後に，端子圧着部の電圧降下と圧着強度の測定を行った。また，比較対象として以下の電線サンプルを準備した。

＜サンプル仕様＞

サンプル1；アルミ電線
サンプル2；アルミ電線＋圧着部の防食処理（Fig. 11）
サンプル3；銅電線

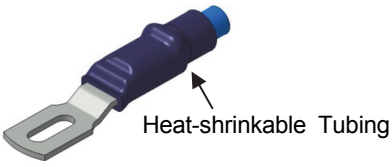


Fig. 11　Corrosion Protection

電圧降下について，銅電線及び防食処理したアルミ電線は変動が見られないが，アルミ電線は徐々に上昇している（Fig. 12）。また電線を端子に圧着させている部分の圧着強度についても，アルミ電線は低下している（Fig. 13）。銅電線と防食処理したアルミ電線は，顕著な変動は見られなかった。

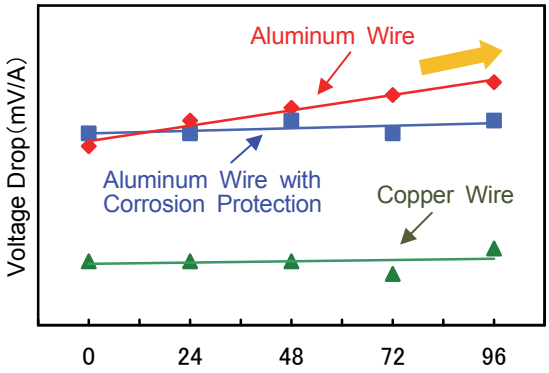


Fig. 12　Voltage Drop after Salt Spray Test[3]

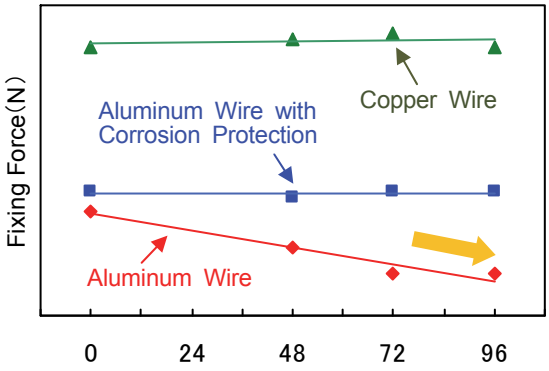


Fig. 13　Fixing Force after Salt Spray Test[3]

これらの評価結果から，塩水が多量にかかる環境下でアルミ電線を使用すると，異種金属接触腐食により端子との接続間のアルミニウムが溶出し（Fig. 14），接触抵抗の上昇や圧着強度が低下することが分かった。またこれを防ぐには，圧着部に塩水が掛からないように熱収縮チューブ等により防水する手法が有効であることが分かった。

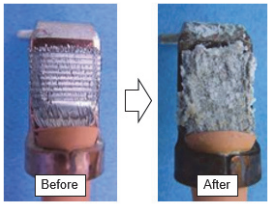


Fig. 14　Corrosion of Aluminum Wire

（3）試作車両による促進腐食耐久評価

車両での腐食環境を確認するため，促進腐食耐久評価を行った。端子圧着したアルミ電線の試作品を試作車両に搭載し，塩水路走行及び湿潤温暖室での暴露を繰り返し行った。アルミ電線の腐食状態を経過観察できるようにサイクル数を変え（サイクル数；0，市場1年相当，3年相当，6年相当），各耐久後に端子圧着部の電圧降下を測定した。評価結果，キャパシタ部においては，電圧降下が徐々に上昇しているが（Fig. 15），DC-DCコンバータ及びバッテリ部では，初期と比較しても顕著な増加は見られず，腐食の様子も観察されなかった。また圧着強度についても，キャパシタ部のみ低下が見られた。

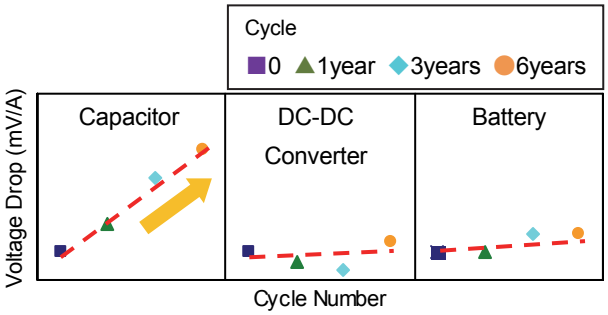


Fig. 15　Voltage Drop after Corrosion Durability Vehicle Evaluation[3]

このような差が出たのは，車両搭載部位により塩水の被水量が異なり，アルミニウム溶出量の差が出たと考え，被水状況を確認した。タイヤ付近にレイアウトしているキャパシタ部は，大量の水が掛かる様子が観察された（Fig. 16）。車両上部にあるDC-DCコンバータとバッテリ周辺は，多少の水しぶきは飛散しているが，端子圧着部は絶縁カバーで覆われており（Fig. 17），被水することはなかった。

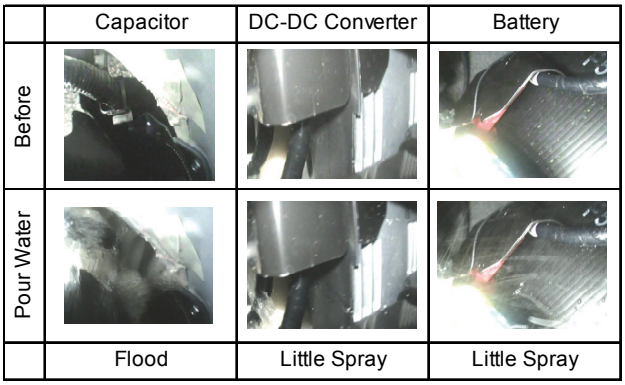


Fig. 16　Situation of Pour Water

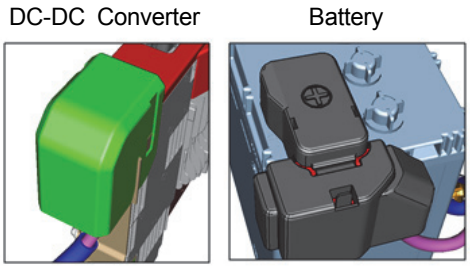


Fig. 17　Insulation Cover of Crimp Terminal

これらの評価結果から，キャパシタ部のアルミ電線端子圧着部には，熱収縮チューブを取り付けることで，塩水が掛からないよう防食処理を施した（Fig. 11）。防食処理をしたアルミ電線を試作車両に搭載し，促進腐食耐久評価を行い，電圧降下及び，圧着強度の変動がないことを確認した。また，熱収縮チューブの各種耐久評価を行った後，防水性試験を行い，防水性に問題ないことを確認した。

DC-DCコンバータ及びバッテリ部については，実車検証の結果から，腐食環境にないことを確認できたため，防食処理は不要とした。

3.3　電線発煙のヒューズ保護と電線熱劣化寿命の検証

（1）電線発煙のヒューズによる回路保護

電線がショートし，許容電流を超える過剰な電流（ショート電流）が流れた際に，電線が発煙し車両火災を発生させないために，回路上にヒューズを設定している。ショート時には，このヒューズがジュール熱により溶断し，電線が発煙する前に通電を遮断し，回路保護を行うよう回路設計している。導体をアルミ化すると，電線抵抗／熱容量／抵抗温度係数などの電線特性が変わり，通電時の電線の自己発熱による電線温度上昇値が従来の銅電線から変わる。このため，アルミ電線の特性値を反映した温度上昇値[4]を算出する必要がある。この値を用いて，電線の発煙時間T_1とヒューズ溶断時間T_2を比較し，ショート時にヒューズが先に溶断することを確認した（Fig. 18）。

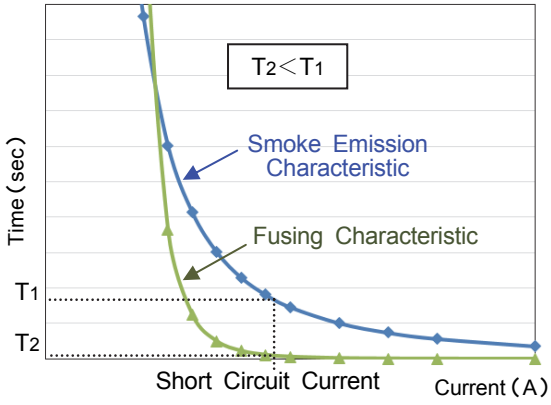


Fig. 18　Fusing Characteristic and Smoke Emission Characteristic

（2）電線熱劣化寿命検証

電線は，高温環境下で長時間使用していると，電線の絶縁体が硬化し，絶縁機能が損なわれ，断線やショートが発生する懸念がある。この状況を防ぐために，雰囲気温度の高いエンジンルーム等の高温環境下では電線熱劣化寿命検証を実施している。絶縁体の伸び率100%[(4)]を電線寿命とし，その範囲内で電線を使用するよう設計している。エンジンルーム内の雰囲気温度とアルミ電線の特性値を反映した通電時の電線温度上昇値を加味した電線熱劣化寿命検証を行い，基準内であることを確認した（Fig. 19）。

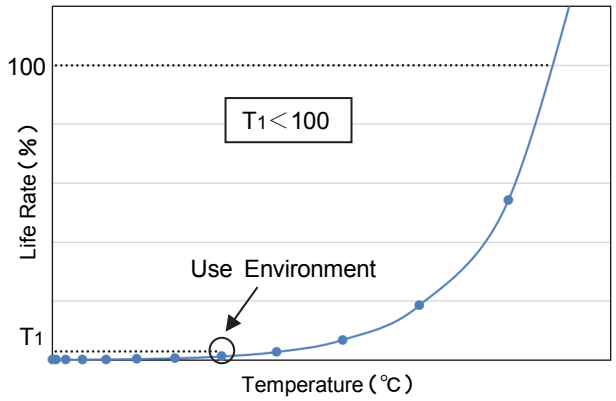


Fig. 19　Characteristics of Heat Life

4. おわりに

アルミ電線を車両に搭載するためには，3つの課題があった。新たにアルミ電線接続技術を導入し，車両搭載技術の開発及び，アルミ電線特性値を用いた電線検証の実施により，これらの課題を解決し，新型ロードスターにアルミ電線を搭載することに成功した。減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」ハーネスをアルミニウムに置換することにより，クルマ1台に使われるハーネス総重量の約3%にあたる500gの軽量化を達成した。

アルミ電線の車両搭載技術は，軽量化にとって重要な技術であり，今後更に搭載量を拡大していく。今後もお客様に，より良い商品を提供できるよう努力する所存である。

最後に，この開発にあたり多大なご指導とご協力をいただいた住友電装（株），（株）オートネットワーク技術研究所，古河AS（株）の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

（1）高橋正好ほか：減速エネルギ回生システム“i-ELOOP”の開発，マツダ技報，No.30，pp.37-42（2012）
（2）古河AS（株）提供資料
（3）住友電装（株），（株）オートネットワーク技術研究所 提供資料
（4）日本自動車技術会規格　JASO D 609

■著　者■

三好 俊充

下河内 次生

論文・解説

31

技術開発用エンジン制御コンピュータの開発
Development of Engine Control Module for Technological Development

末繁　恵一郎*1　二宮　洋*2　高田　哲也*3　福馬　勉*4
Keiichiro Sueshige　Hiroshi Ninomiya　Tetsuya Takata　Tsutomu Fukuma
谷岡　輝明*5　光本　伸義*6　吉田　景太*7　柏島　幸雄*8
Teruaki Tanioka　Nobuyoshi Mitsumoto　Keita Yoshida　Yukio Kashiwajima

要　約

マツダでは，制御システムの開発プロセスとして「モデルベース開発（MBD：Model Based Development）」を導入し，性能・品質の向上及び開発の効率化に大きな成果を上げてきた。しかし，車両性能，環境・安全性能を究極まで追求すればするほど，システムの大規模・複雑化が従来とは桁違いのハイペースで進行しており，これまで取り組んできたレベルのMBDでは，解決できない課題も増えつつある。

その課題解決の1つとして，今後は電子制御ユニット（ECU：Electronic Control Unit）の電子回路レベルでのMBD技術獲得も必要となる。そして，技術開発用ECUの実機&モデルを駆使した環境下でハードウェア及びソフトウェアの機能開発を終え，ECUメーカ様には商品版ECUを整然と開発いただくプロセスを目指したい。

Summary

Mazda introduced “Model Based Development (MBD)” as a method of developing control systems, and thereby has greatly improved the performance and quality of its products and increased development efficiency. As we seek to improve the vehicle, safety, and environmental performances to the utmost limit, however, the control systems are becoming larger and more complex at a speed much faster than ever before. Consequently, the number of issues that cannot be solved by conventional MBD is on the rise.

To solve such issues, it is required to acquire MBD technologies at the level of electronic circuit in the ECU (Electronic Control Unit). Mazda aims at establishing a process in which the developments of hardware and software functions are completed in an environment where actual and/or virtual Technology Prove-out ECU models are made full use of and ECU manufacturers can develop mass-marketed ECUs in an orderly manner.

1. はじめに

マツダでは，技術開発の長期ビジョンとして策定した「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき，「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の両立を目指してパワートレインを進化させてきた。これに伴って大規模化かつ複雑化してきたエンジン制御システムの開発プロセスとしてMBDを全面導入し，制御モデルの開発を手の内化することで，性能・品質の向上及び開発の効率化に多大な成果を上げることができた。

しかし，環境・安全性能への要求が今後一段と厳しさを増していく中，制御システムの大規模化・複雑化が，従来とは桁違いのハイペースで進行していくことに疑いの余地はない。したがって，性能・品質の向上及び開発の効率化に向けた改善の手を緩める訳にはいかず，MBDの現状を踏まえた上で更なる進化を図る必要がある。

2. エンジン制御ECU開発の現状と課題

2.1　機能開発の現状

ECUの機能開発として導入したMBDをV字プロセスで表現したものをFig. 1に示す。

*1～8　パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

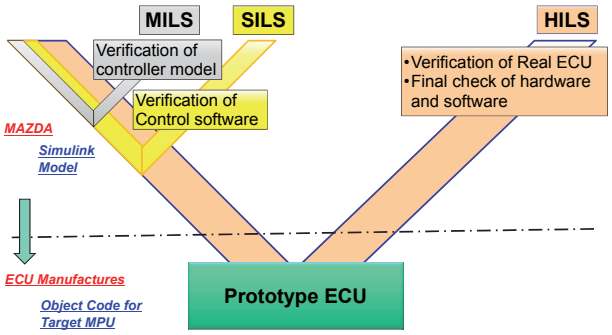


Fig. 1　Current MBD Process of ECU

左バンクには，ECUメーカ様によるECU試作の前工程として，Simulinkで記述した制御モデルをMATLAB上で実行するMILS（Model In the Loop Simulation），及び該モデルのC言語ソースを自動生成（オートコード）後PCネイティブコードに変換し実行するSILS（Software In the Loop Simulation）のプロセスを導入している。MILS／SILSは，制御モデルとプラントモデルが扱う物理データをメモリで共有する構成（論理結合）となっており，制御モデルの機能開発に主眼を置いたプロセスといえる（Fig. 2）。

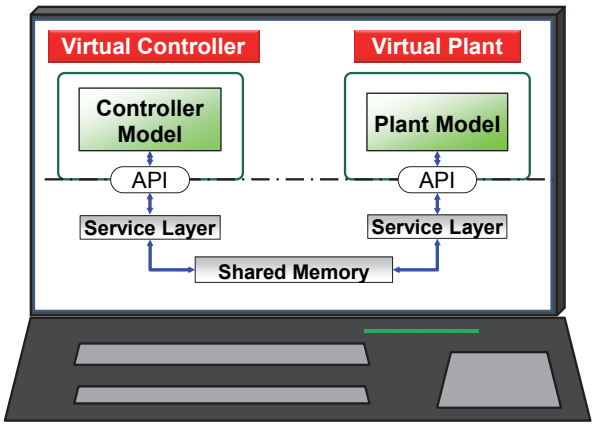


Fig. 2　Development Environment Using MILS／SILS

MILS／SILSでの制御モデルの機能開発完了後は，ECUメーカ様によるECU試作の工程に移行するが，ECUメーカ様へは，ECU仕様としてSimulinkで記述した制御モデルの他に，ハードウェア及びソフトウェアプラットフォーム（ソフトウェアPF）への要求仕様を提示する必要がある。

一方，右バンクには，実車による総合評価の前工程として，ECUメーカ様から納入された試作ECUの機能検証を行うHILS（Hardware In the Loop Simulation）のプロセスを導入している。HILSは，実ECU内の制御モデルとシミュレータ内のプラントモデルが扱う物理データをAPI（Application Programming Interface）よりも下の層で変換された電気信号で接続する構成（物理結合）となっており，ECUとしての全機能を実時間で検証することを目的としたプロセスである（Fig. 3）。

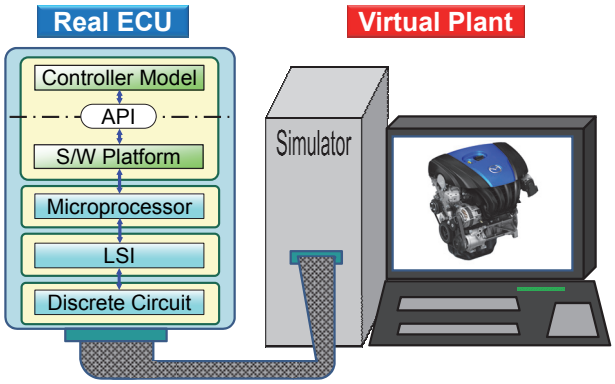


Fig. 3　Development Environment Using HILS

マツダでは制御モデルの機能開発として，技術開発から商品開発に至る各段階へのMBDの導入によって，ECUメーカ様へ提示する制御モデルの完成度が飛躍的に向上し，HILS検証や実車評価から制御モデル開発への手戻り，及び商品開発から技術開発への手戻りを大幅に削減することが可能となった。

2.2　開発プロセスの更なる進化ニーズ

Fig. 2，Fig. 3から明らかなように，MILS／HILSは実ECUには実装されているハードウェア（マイコン，システムLSI，汎用素子で構成されるディスクリート回路）及びソフトウェアPFのモデルを省略した構成となっている。したがって，この部分に起因する問題が右バンクで発覚した場合，大きな手戻りや品質問題への発展，場合によっては機能上の制約に至るリスクを含んでいる。MBDの更なる進化によって，これらを未然防止することが課題だと考えている。

MBDの進化を考える上で，同時に織り込んでおくべき将来ニーズとして，下記3点を挙げておく必要がある。

（1）CPUのマルチコア化

マイコンのプログラム処理速度向上の手段として，今後のCPUがマルチコア化へ向かうことは必至であり，自動車メーカにとっても並列プログラミングに対する技術修得は急務である。

（2）故障注入への対応

機能安全規格ISO26262の要件として，半導体内部を含めた電気・電子回路への故障注入（Fault Injection）による機能安全性検証が要求されている。

（3）実チップ入手前の機能開発着手

新技術・新機構開発の早期開発着手による商品競合力の確保，及びチップ選定の効率化のため，仮想チップでの機能開発の必要性が高まっている。

2.3　MBD開発プロセスの更なる進化

上述のリスク及び将来ニーズへ対応するためには，左バンクでECUの全機能及び信頼性の開発が行えるよう，MBDプロセスを進化させる必要がある。

（1）仮想ECU環境による機能開発の実現

ECUの全機能を左バンクで開発するためには，ハードウェア及びソフトウェアPFを含むECU全体を仮想空間上で設計し動作検証が行える仮想ECU（vECU）環境の構築が必要である（Fig. 4）。これはFig. 3との対比から明らかなように，右バンクのHILS検証と等価な検証を左バンクのモデル上で行うプロセスということができる。これにより，右バンクから左バンクへの手戻りの大幅な削減が期待できる。

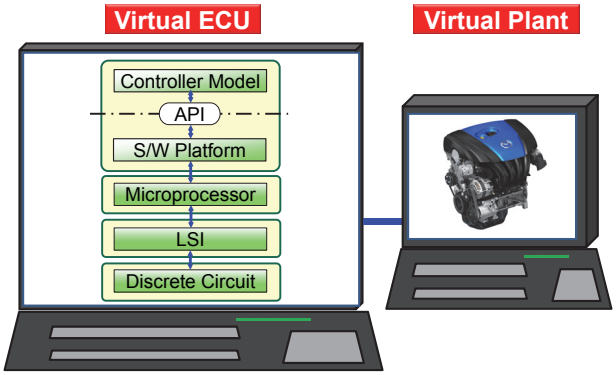


Fig. 4　Development Environment Using Virtual ECU

（2）シミュレーションによる信頼性開発

ECUハードウェアの信頼性開発についてもMBDを適用していくという基本的考え方は同じであるが，熱・振動・電磁ノイズは支配している物理法則が異なるため，それぞれ個別の解析環境の構築が必要である。

（3）MBDプロセスの将来構想

ECU機能開発のための仮想ECU環境，信頼性開発のためのシミュレーション環境を加えた新たなMBDのV字プロセスをFig. 5に示す。これを実現するためには，第一段階として，ハードウェア及びソフトウェアPFの開発技術を獲得してECUに関するブラックボックスを排除することが必要であり，その開発に取り組んできた。次の章では，その結果について紹介する。

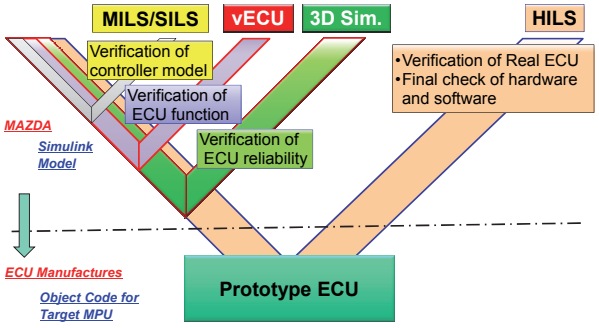


Fig. 5　MBD Process of ECU

3. 将来構想実現に向けた取り組み

3.1　ハードウェア開発技術

マツダでは，ECUハードウェア設計をV字プロセスの左バンクでやり切れるほどの，開発力の内部留保を目指し，マイコンやICなど中核となるデバイスを選定して電子回路を設計する機能開発フェーズと，ECUの使用環境や搭載上の制約条件を考慮してプリント基板を設計する信頼性開発フェーズの，それぞれに対して取り組んだ（Fig. 6）。

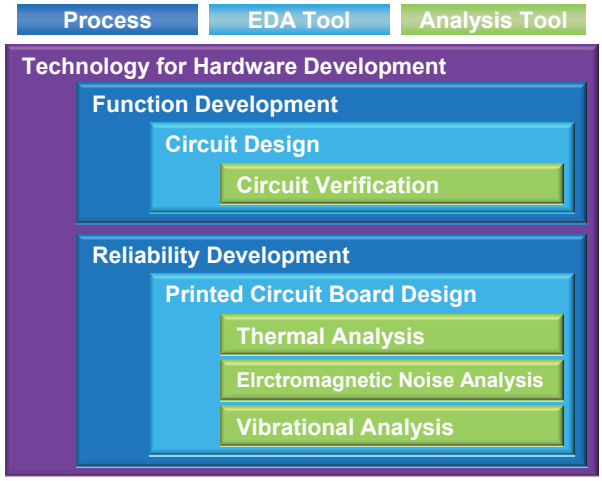


Fig. 6　Hardware Development in Left-bank of V-Process

3.2　ハードウェア機能開発力の内部留保

これまでマツダにとって技術開発用ECUハードウェアは，ECUメーカ様の高い技術により開発されたASIC（Application Specific IC）などの専用デバイスもあり，多くの部分がブラックボックス化していた。このため，新たな入出力機能を加えたり，処理能力を高めたりすることが，マツダだけの力では容易にできず，技術開発用ECUを準備するときの大きな支障になっていた。

そこで，マツダが必要とする入出力機能のからくりを分析・整理し，汎用電子部品によりFig. 7のような電子回路

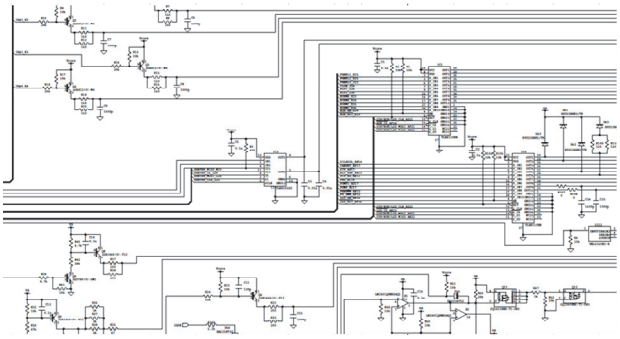


Fig. 7　Circuit Design

として組み直すことで，機能的なブラックボックスを排除した。

この結果，マツダだけの力で技術開発用ECUの機能を自在に変更・追加できるようになり，また，この過程で次のようなスキルも獲得することができた。

（1）最適な電子部品の選定能力

処理負荷，入出力機能，耐環境性能から選択可能なマイコンなどの部品を選定する能力が身についた。この能力は，今後の量産開発で，適切なコスト低減を図りつつ品質を高めるために活用ができる。

（2）回路設計検証技術の獲得

電子回路CADを使っての基板設計やSPICE（Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis）などの回路解析技術の獲得ができた。これにより，回路構成を考える段階から，基板上の部品配置や配線パターンの形状や取り回し，それらが性能や信頼性に与える影響をイメージしながら設計することが可能となった。

これにより，商品版ECUを見たときにも品質やコストの審査が可能となる。

3.3　ハードウェア信頼性開発力の内部留保

技術開発用ECUは，民生品に比べて熱や振動など，はるかに過酷な環境条件で使われ，しかも高い精度が要求される。また，1枚の基板上にマイコン，デジタル回路，小信号回路，高電流・高発熱回路などが混在して互いに干渉し合う。

上述の機能開発で得られた回路図は，あくまで理想状態であり，これを元にFig. 8のような基板を設計する際は，種々信頼性に対して設計結果を検証しながら進めていく必要がある。

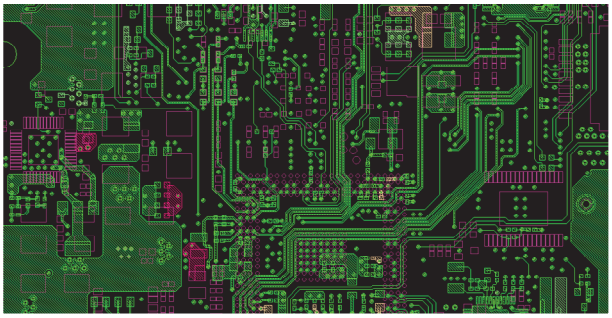


Fig. 8　Printed Circuit Board Design

基板上では，部品配置や回路パターンに依存して，回路の性能や安定性，発熱信頼性，電磁ノイズ，耐振性などが，同時に変化する。これを勘と経験，定性的な解析，人手による計算のみで検証するのは困難である。このため，開発対象と環境をモデル化した上で，回路解析，熱解析，電磁ノイズ解析，振動解析などによる検証技術が必須となる。

今回は中でも技術難度が高く，ブラックボックス化していた，熱，電磁ノイズ，振動について，解析技術の取り組みを紹介する。

信頼性開発も機能開発と同様に，実機で起こる技術的な問題及び検証の難しさを経験した上で，それらをイメージしながら，左バンクでやり切れるようになる姿を目指した取り組みとした。

（1）熱解析

一般的に，解析ツールは解析対象の設計スペックなどから得たデータを入力しただけでは，予実差が大きく目標の精度が得られない。

そこで，まず実基板各部の温度を測定する技術を修得するところから始め，予実差の検証ができる状態とした。その上で，熱解析モデルの精度向上と，発熱量予測精度の向上に取り組み，目標の精度達成に目処を付けた。

1）熱解析モデルの精度向上

熱解析モデルの対象デバイス内部構造の重要なパラメータのみを詳細にモデル化することで精度向上につなげた。また，リグ評価基板を製作して専用の同定装置により熱構造関数の合わせ込みを実施するやり方で，許容できる誤差範囲内で解析可能な，熱解析モデルを得ることができた。このようにして得た各デバイスの熱解析モデルを基板の熱解析モデルと結合し，部品が実装された基板全体の熱解析を，目標の精度で実施することを可能にした（Fig. 9）。

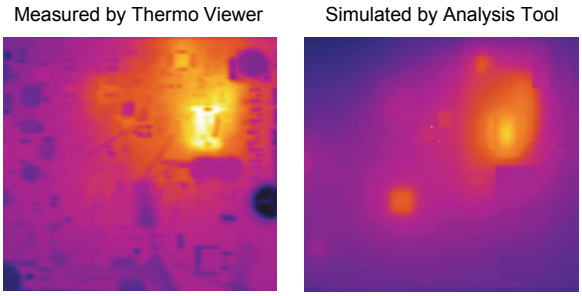


Fig. 9　Thermal Analysis

2）発熱量予測精度の向上

解析時に入力する発熱量の精度を向上させるため，回路解析技術を組み合わせ，ソフトウェアでの動きを考慮した対象デバイスの作動状態で回路解析を行い，熱解析の発熱量を算出する。今後，技術開発用ECUの搭載要件や小型化でますます厳しくなる熱環境に対応するためにも，更なる精度向上を目指したい。

（2）電磁ノイズ解析

特に，EMC（Electronic Magnetic Compatibility）においては，多層基板上に数千もある配線やパターン形状のひとつひとつが電磁ノイズに関連し，相互に影響し合う。このため複雑な解析が必要となる。

回路図では説明できない潜在的な裏のからくりが存在す

る。この複雑なからくりを理解し，戦略をもって基板設計検証を進めていける解析スキルアップも行った。これらに取り組んだ結果，左バンクでEMC基準を満たす基板を開発できる技術を獲得できた（Fig. 10）。

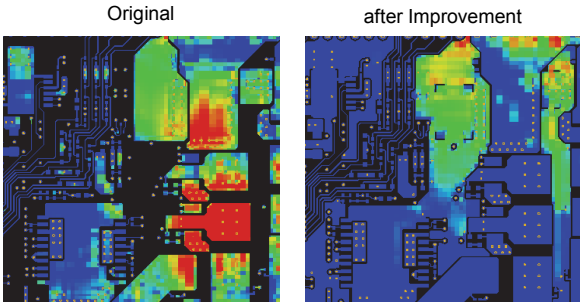


Fig. 10　Electromagnetic Noise Analysis

設計検証解析技術の強化だけでなく，できあがった実ECUの電磁ノイズ評価環境の強化も実施した。

クルマとエンジンのプラントモデルを実装したHILSに，実ECUを接続し，電磁ノイズ試験場内への持ち込みを可能にした。ここでの問題は，通常のHILSでは電磁ノイズでの悪影響から正しい機能検証ができなくなることであった。そこで，HILS自体の電磁ノイズ性能改善対策や，HILS-ECU間の干渉の切り離し対策のカスタマイズ開発を行った。

これにより，実機での確認が前倒しでき，効率化できるだけでなく，本来の目的である電磁ノイズ評価を安定して正しく実施できるようになる。

（3）振動解析

振動は，熱や電磁ノイズのように，一般的な試験方法で機能不全になるまでの余裕代を求めることができず，設計の良否水準が判断しにくい特徴がある。

そこで，試験方法の中でも市場で発生する振動状態に近いといわれる6軸ランダム振動に温度も加え，複合ストレスとして与えるHALT（Highly Accelerated Limit Test）に着目して解析技術の内部留保に取り組んだ。

一般的な耐久試験は，一定のストレスを与えて対象の強度劣化を時間軸でとらえるが，HALTは，ある強度をもつ対象が，どの程度のストレスで，どこが機能不全になるかを試験する方法であり，短時間で部品を実装した基板の弱点を把握でき，そこからさまざまな考察につなげることができる。

更に，これを左バンクにもち込むために，基板設計時に机上で6軸ランダム振動と等価なCAE解析が可能な環境を構築した。今後，HALTの実測結果との予実差をみて精度改善を進めていく。

これらの技術は，購入品ECUに限らず，今後ますます増えてくる電子部品の審査の力を握ることにつながるものであり，品質の向上に貢献していきたい。

3.4　ソフトウェア開発技術

ECUのソフトウェア全体像は，大きくは2つの階層がある。上の階層から順番に，①アプリケーション層（制御仕様書に主に書かれる表層機能），②プラットフォーム層（OSや入出力ドライバなど）である。これまでのソフトウェア開発は，Simulinkで記述したアプリケーション層をV字プロセスの左バンクで機能検証し，プラットフォーム層は右バンクでしか機能検証ができていなかった。今後は，仮想ECU環境にてプラットフォーム層も含むソフトウェア全体の機能検証を左バンクで実現できるように，これまでブラックボックスであったプラットフォーム層のソフトウェアをホワイトボックス化し，技術開発用ECU上でアプリケーション層が動作する独自のソフトウェアPFを開発した。

3.5　ソフトウェア機能開発力の獲得

ソフトウェアに対する要求分析，構想設計，詳細設計を行い，要求機能を満足するソフトウェアPFの設計技術を修得した。これにより，機能的なブラックボックスを排除することができた。

（1）ソフトウェアPF構想設計

プラットフォーム層は，階層化アーキテクチャを適用し，最下位層にマイコンの周辺回路などマイコンの機能に依存する層を配置し，その上にアナログ回路やシステムLSIなどECUハードウェアの機能に依存する層を，更にその上にセンサやアクチュエータなどデバイスの機能に依存する層を配置した。こうして，各層ごとに役割を分離することで，マイコンやデバイスの変更に対する影響を最小限に抑えた。

また，マイコン依存層は，クランク角センサ信号入力や燃料噴射パルス出力などの入出力処理を行うI／Oドライバ，CAN（Controller Area Network）通信などの処理を行う通信ドライバ，RAM／ROMを管理するメモリドライバなどで構成した。これらドライバ群も，DIO（Digital Input Output）ドライバ，ADC（Analog Digital Converter）ドライバ，SPI（Serial Peripheral Interface）ドライバなど，個々の機能ごとにソフトウェアをコンポーネント化することで，ソフトウェアの保守性・拡張性を高めた（Fig. 11）。

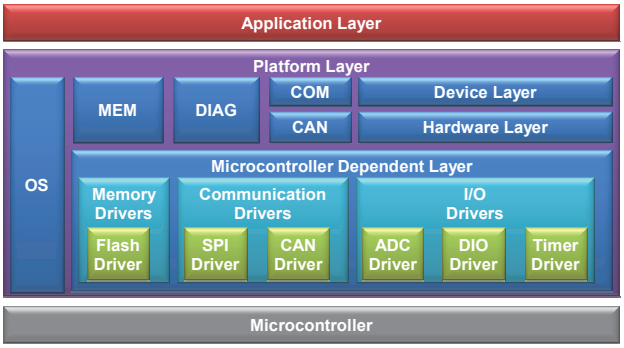


Fig. 11　Platform Software Architecture

（2）ソフトウェアPF詳細設計

ソフトウェアPF構想に基づき，個々のソフトウェア・コンポーネントの詳細設計を行った。ここでは，その事例を2つ紹介する。

1）燃料噴射・点火タイミング処理

エンジン制御では，アプリケーション層からの燃料噴射及び点火要求をクランク角に同期して緻密に制御することが要求される。そのため，プラットフォーム層では，マイコンの高度なタイマ機能を用いて，緻密なタイミング制御を実現した。具体的には，クランク角信号からエンジンの回転角度位置を示すアングルクロックを生成し，これをコンペアマッチタイマのクロックソースとすることで，CPUの負荷を最小限に抑えながら，正確な燃料噴射及び点火タイミング制御を実現することができた。

2）デジタル信号処理

エンジン制御では，エンジンの燃焼状態をセンサで検知し，最適な燃焼状態となるようフィードバック制御しており，センサの電気信号からノイズ成分を除去し，特定の信号成分のみを正確に抽出することが要求される。そのため，プラットフォーム層では，センサ信号を高速にAD変換し，デジタルフィルタ処理を行うことで，簡易なアナログフィルタのみで，高次のアクティブフィルタを実現した（Fig. 12）。

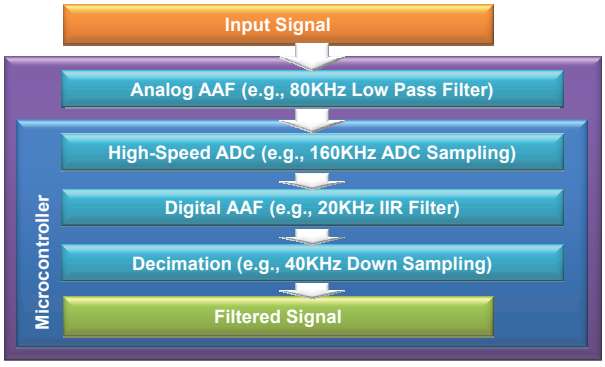


Fig. 12　Digital Anti-Aliasing Filter（AAF）

3.6　ソフトウェア開発環境の構築

組込みソフトウェアを開発するための統合開発環境を構築すると共に，ソフトウェア品質を検証するための静的・動的解析ツールを導入した。

（1）自動コード生成環境の構築

アプリケーション層は，Simulinkを用いて実行可能な制御モデルとして記述している。そのため，オートコード・ジェネレータを用いて，制御モデルから組込みC言語ソフトウェアを自動生成する環境を構築した。これにより，組込みソフトウェア品質の安定と開発期間の短縮を図った。

（2）ソフトウェア統合開発環境の構築

実マイコン上で動作するソフトウェアを開発するため，C言語コードのコンパイル，アセンブリ言語コードのアセンブル，出力されたオブジェクトコードのリンクといった一連のビルド環境を構築した。また，マイコンのオンチップ・デバッグ・インターフェイスを用いて，ソフトウェアを検証するテスト環境を構築した。これらのツール群をシームレスに結合させることにより，組込みソフトウェア開発の効率化を図った（Fig. 13）。

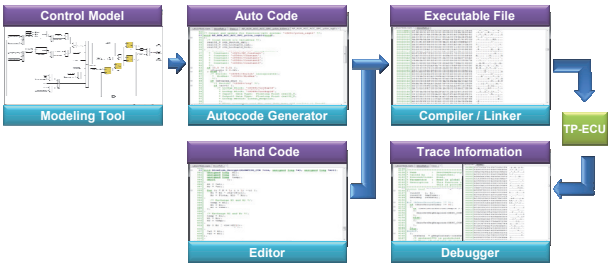


Fig. 13　Software Development Environment

（3）ソフトウェア品質検証環境の構築

ソフトウェアの品質を確保するには，網羅的なテストとレビューが重要であるが，大規模・複雑化するソフトウェアのテストやレビューの全てを人手に頼ることは困難である。そのため，ソースコードを静的に解析し欠陥を検出する静的解析ツールを導入して，ソフトウェアの信頼性・保守性・移植性の向上を図った。また，テストシナリオの作成を支援し，テストカバレッジを評価するカバレッジ計測ツールを導入して，テストの効率化と網羅性の向上を図った。

4. 成果

技術開発用ECUの開発を通じて以下の成果を得た。

（1）ECUハードウェア領域

半導体部品選定から始まり，基板設計CADを用いた設計技術獲得，信頼性などをCAE解析する技術が獲得できた。これにより，商品版ECUについての適切な仕様設計が上流で可能になる。

（2）ECUソフトウェア領域

従来からアプリケーション層については，モデルベース開発を実践し，図面を出す前にクルマモデルとの接続検証を終えていたが，それに加えて，プラットフォーム層のソフトウェア開発力も学び，エンジン制御の全ソフトウェアについての技術が獲得できた。

（3）プロセス領域

上記ホワイトボックス化された技術開発用ECUを用いた制御システムの先行技術開発が可能となった。

（4）人材領域

電装品メーカ様の高い技術力をもつエンジニアの方と，このレベルの技術について共創できるエンジニアが社内に育ったことは大きな成果であった。

5. おわりに

世界一のクルマを目指すとき，マツダは大規模・複雑化する制御システムの開発を克服しなければならない。今後も，更なるモデルベース開発技術力の進化で，これに立ち向かう決意である。そのためには，本稿で示したような，より深いレベルのMBD技術獲得が必要となる。

技術開発用ECUや仮想ECUモデルを駆使した環境下でハードウェア及びソフトウェアの機能開発を終えることをねらいたい。更には，熱・振動・電磁ノイズなどの解析技術の獲得も行い，電子回路レベルの不具合も未然防止したい。

将来は，商品版ECUの上で試行錯誤するのではなく，技術開発用ECU（実機&モデル）の上でしっかり開発を終え，ECUメーカ様には商品版ECUを整然と開発いただくプロセスを目指したい。今後もECUメーカ様とのWIN-WINな関係を発展させ，会社を超えたモデルベース開発の取り組みに広げ，自動車関連業界全体のビジネス強化につながれば理想である。

社内においては，「サステイナブル“Zoom-Zoom”」を実現するため，この活動をエンジン制御用ECUだけではなく全車載ECUの開発へ拡大展開していくことにより，MBDの次世代ステージへの進化を図っていく。

参考文献

(1) 江角ほか：SKYACTIV-G制御技術の紹介，マツダ技報，No.29，pp.36-40（2011）
(2) 寺岡ほか：エンジン制御系仮想開発環境と新型エンジン開発への適用，自技会論文集，No.20124464 Vol.43 （2012）
(3) 臼田ほか：SKYACTIVのMBD検証環境について，マツダ技報，No.31，pp.48-53（2013）

■著　者■

末繁 恵一郎

二宮 洋

高田 哲也

福馬 勉

谷岡 輝明

光本 伸義

吉田 景太

柏島 幸雄

論文・解説

32

電気二重層キャパシタの劣化解析技術
Degradation Analysis Technology for Electric Double Layer Capacitor

宇都宮　隆*1　阪井　博行*2　藤田　弘輝*3
Takashi Utsunomiya　Hiroyuki Sakai　Hiroki Fujita

要　約

乗用車として世界で初めて電気二重層キャパシタ（以下，キャパシタ）を採用したマツダの減速回生システム“i-ELOOP”は2012年10月のアテンザに搭載以降，アクセラ，新型デミオ，CX-5（中国向け）と適応車種を拡大させてきている。燃料消費として非効率な“発電”をゼロにするというi-ELOOPの初期コンセプトの下にi-stopとの組み合わせで約10%の燃費改善（実用走行時）を可能にした。“i-ELOOP”の蓄電デバイスとしてキャパシタを採用するに当たり，他の蓄電池にはない優れた特徴を踏まえ，車載適用に必要な技術，特に車載を模擬した劣化に関する解析技術と劣化予測技術を開発した。

Summary

Mazda's regenerative braking system “i-ELOOP”, which is equipped with an electric double layer capacitor (hereinafter referred to as the “capacitor”), is the first of its kind in the world that has been mounted on a passenger car. The i-ELOOP was first mounted on the Atenza in October 2012, followed by the Axela, New Demio, and CX-5 (for China), and is now widely appreciated by world customers. Based on its initial concept of bringing inefficient “power generation” to zero, the i-ELOOP system, in combination with the i-stop, achieved an approximate 10% improvement in mileage. In connection with the capacitor deployed as an electric storage device for the i-ELOOP system, this article introduces a technology necessary for its on-vehicle application, results of deterioration test in a simulated on-vehicle condition, an analysis technique used and a deterioration prediction technology, in light of its distinctive characteristics that other storage batteries do not have.

1. はじめに

近年，“燃費”や“走り”の向上を目的として，減速時に熱として捨てられていた運動エネルギーを回収し，電気エネルギーとして有効に利用する減速回生システムが注目を集めている。(1)

マツダは技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき，「走る歓び“ZOOM-ZOOM”」と「優れた環境・安全性能」を両立する取り組みの一環として，乗用車としては世界で初めてキャパシタを採用した減速回生システム“i-ELOOP”を2012年に発表し，それ以降適用車種を拡大してきた。Fig. 1に示すように減速時には車両の持っている運動エネルギーで発電することで，発電コスト（燃料代）をゼロにすることができ，また，Fig. 2に示すように加速時には減速時に発電した電気エネルギーを電装品などへの電力供給に使用できるため，今まで発電のために使用したエンジン出力の一部を走りに振り向けることができる。このようにi-ELOOPシステムは発電が不要となり，“燃費”と“走り”の向上が両立可能なシステムとなっている。

減速時の運動エネルギーを電気エネルギーとして蓄えるキャパシタは，電極と電解液の界面上で形成される電気二重層を利用した蓄電デバイスである。電極の活物質には比表面積の大きな活性炭が用いられ，電解液には充放電による電荷移動の役割を担う支持塩を有機溶媒に溶解させた混合液が用いられる。電解液中のイオン（アニオンとカチオン）が活性炭表面に移動・吸着することで静電容量＝キャパシタンスが発現する。このようにキャパシタはエネルギーを出し入れする充放電過程において化学反応を介さないため，理論上，充放電における劣化はなく，大電流での充

*1～3　技術研究所
Technical Research Center

放電が可能である。

これら優れた特徴を有するキャパシタは，エンジンルームに搭載されるため長期間にわたって過酷な環境下にさらされ続ける。その際に徐々にダメージが蓄積したとしても車両としての機能を十分に発揮し続ける必要がある。このダメージの蓄積＝劣化のメカニズムを正確に理解し，そして予測することはキャパシタを使いこなすための重要な技術である。

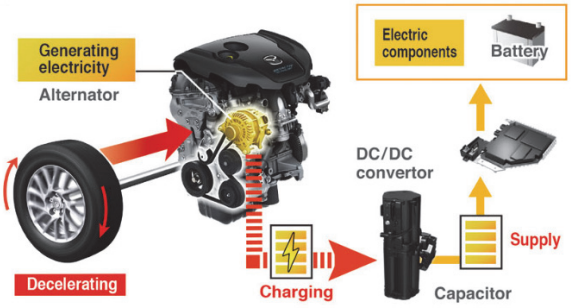


Fig. 1　Efficiency Image of the Regenerative Braking System (Deceleration)

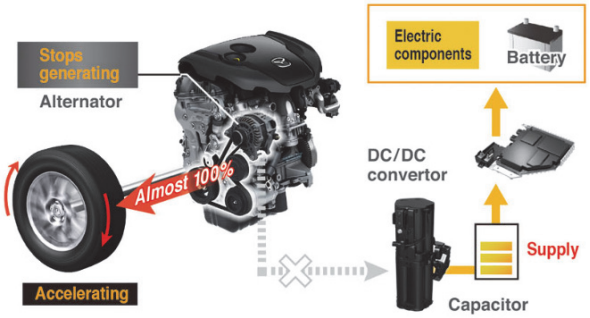


Fig. 2　Efficiency Image of the Regenerative Braking System (Acceleration)

2. キャパシタの特徴

マツダの減速回生システムi-ELOOPの蓄電デバイスとしてキャパシタが採用された理由としては，効率的な減速回生を実現する“高い入出力特性”，外部環境温度に左右されない“温度依存性”，あらゆるユーザにおいてメンテナンスフリーを可能とする“長寿命特性”といった特徴を高いレベルで有しているためである。以下に，これらのキャパシタの特徴について紹介する。

2.1　高い入出力特性

キャパシタはイオンの物理吸着を利用した蓄電デバイスであるため，低抵抗で，非常に高い入出力特性を有している。Fig. 3，4に15A～200Aの電流値での入出力特性の結果を示す。一般的に，乗用車ではオルタネータによる発電能力とハーネスでの送電能力を考慮し，最大200A程度の電流受け入れ性が求められる。キャパシタは200Aという大電流に対して約90%という高い容量維持率を有している。更に，キャパシタは化学反応を伴わないため抵抗に関して，イオン濃度や拡散によるState of Charge（SOC：充電状態）に対する依存性がほとんどない。つまり，どのようなSOCであっても低抵抗な状態を維持できる。よって，車両にとっては常に大電流での回生が可能となるため，減速時に高効率でエネルギーを回収することが期待できる。

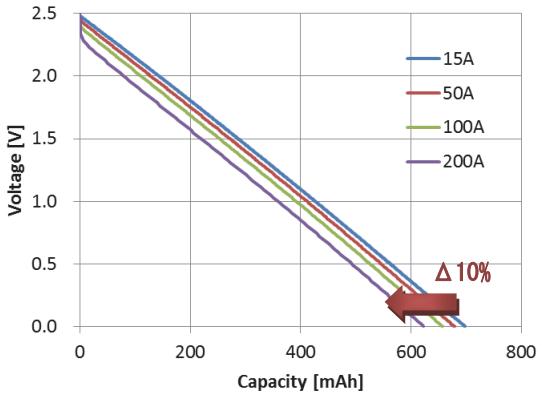


Fig. 3　Discharge Profiles of the Capacitor under Constant-current Cycling at 25℃

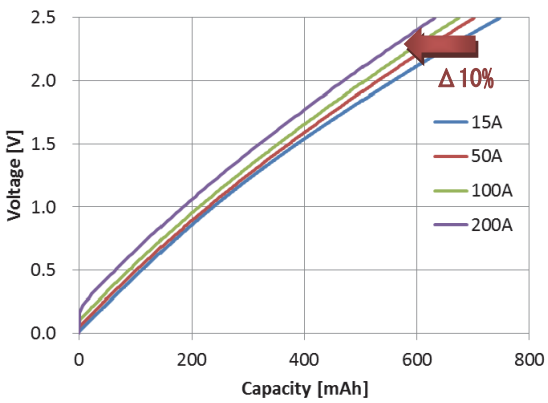


Fig. 4　Charge Profiles of the Capacitor under Constant-current Cycling at 25℃

2.2　温度依存性

車両に求められる温度適用範囲はユーザの使われ方，つまりライフスタイルや気候・環境によって規定される。車両の機能部品として使用されるキャパシタも例外ではない。あらゆる条件に対応するためには，極低温から高温まで対応することが理想となる。Fig. 5に100Aでの静電容量の温度依存性を示す。静電容量に関し，放電時は70℃から30℃という広い温度範囲においてもほとんど変化がなく，

充電時でも低温でのわずかな低下に留まった。低温時の充電においてもリチウムイオン電池で懸念されるリチウム析出のような安全性に直結する心配は全くないため，低温での大電流の受け入れにも適している。

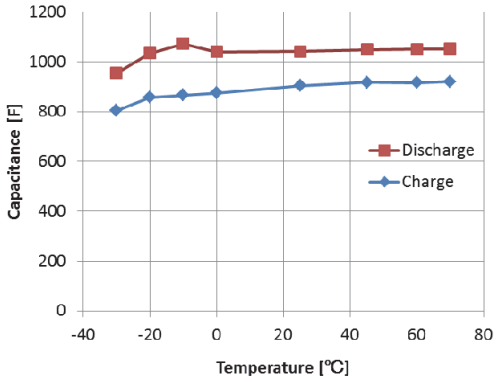


Fig. 5　Temperature Dependence of the Capacitance

2.3　長寿命特性

キャパシタは比較的温和な条件下では劣化がほとんど進行せず，数百万サイクルという長期間の寿命を有している。しかし，高温・高電圧といった高負荷状態では，容量減少や抵抗増加といった劣化が進行する。キャパシタは電気二重層と呼ばれる活物質＝活性炭表面にイオンが吸着されることで静電容量＝キャパシタンスを発現することから，この吸着が阻害されると劣化が進行することになると考えられる。

前途のとおり，車両の使われ方はユーザによって変わるため，キャパシタも世界中のさまざまなユーザに対応できる寿命特性を有しておく必要があるため，高負荷状態で運用されることを想定した，セル温度70℃で充電200A，放電50Aを繰り返したサイクル特性の結果をFig. 6に示す。これはマツダで定める24万キロ相当の走行距離に相当し，温度は砂漠地帯でのエンジンルーム内温度を想定したものである。この過酷な試験に対して，キャパシタは約85%という高い容量維持率であった。

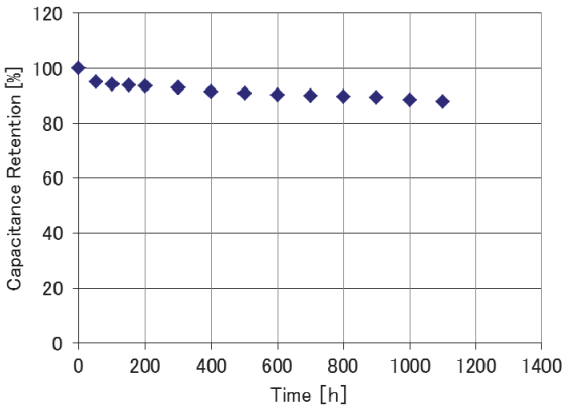


Fig. 6　Discharge Capacity Retention by the Cycle Test

3. 劣化メカニズム

キャパシタの蓄電原理から劣化＝静電容量が減少とは，活性炭表面へのイオンの物理吸着能力が低下することである。この原理原則に従い，新品と劣化品のキャパシタを用いてイオンの物理吸着に寄与する活性炭と電解液の物性と電極について分析を実施し，化学的および物理的な変化について解析を試みた。

3.1　活性炭

Fig. 7に高負荷状態に長時間放置したキャパシタの放電カーブを示す。初期状態と比較して容量維持率約80%，抵抗上昇率約100%となった。容量維持率約80%ということはキャパシタの容量発現メカニズムからイオンの吸着能力が約20%低下したと推定することができる。このイオンの吸着サイトが活性炭表面に着目して，正負極それぞれの比表面積を評価した。Fig. 8に結果を示す。劣化状態の活性炭の比表面積は初期状態と比較して，正極で約30%，負極で約10%低下していることが分かった。Fig. 9にこの活性炭の細孔分布を示す。比表面積低下に伴う細孔体積の低下がみられるが，細孔の分布形状はほとんど変化していないことから，この比表面積の変化量はイオンの吸着サイト数の変化量と推定できる。つまり，静電容量に寄与するイオンの吸着サイト数は正極で30%，負極で10%低下したこととなる。吸着サイト数の減少は各電極のキャパシタンスの減少と同一であるから，Table 1よりセルとしてのキャパシタンス減少率を算出すると，約20%となり，Fig. 7で示した実測での容量減少率と一致した。よって，容量低下の主要因は比表面積の低下が主要因であると考えられる。

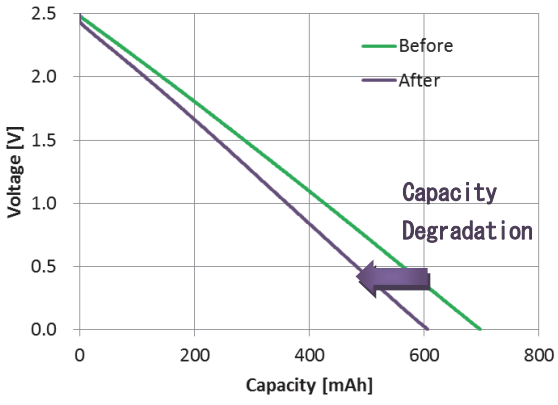


Fig. 7　Discharge Profiles of the Capacitor under Accelerated Aging at 25℃

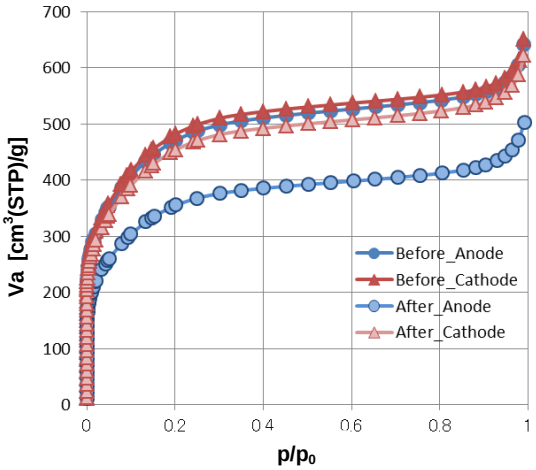


Fig. 8　Specific Surface Area of the Activated Carbon

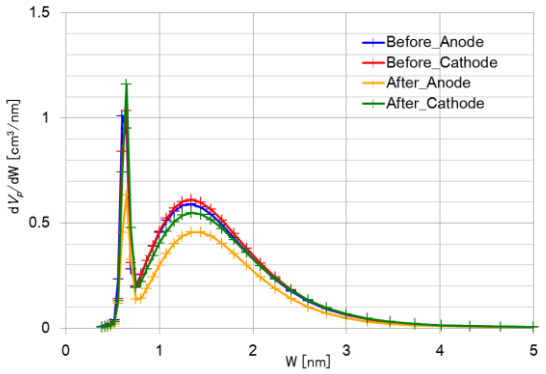


Fig. 9　Pore Distributions of the Activated Carbon

Table 1　Calculated Cell Capacitance Ratio from Several Electrodes

	C_+	C_-	C_{cell}
Before	100%	100%	100%
After	72%	95%	82%

* Theoretical Capacitance of Capacitor Cell

$$C_{cell} = \frac{C_+ C_-}{C_+ + C_-}$$

C_{cell}：Capacitance of Cell
C_+：Capacitance of Positive Electrode
C_-：Capacitance of Negative Electrode

3.2　電解液

電解液は有機物であり，材料固有の分解電位を有している。高電圧では熱力学的に安定な電子状態から外れることになり，特に高温状態では電極表面上で不可逆な分解反応が加速度的に進行することが懸念される。このような高負荷状態で劣化したキャパシタの電解液に化学的な変化が生じていないかをNMRを用いて分析した。結果をFig. 10に示す。新品時の電解液成分を標準として，劣化後の電解液と比較して示した。劣化前後でケミカルシフトに違いが見られていないこと，劣化後に新しいピークが検出されていないことから，今回の高負荷条件での試験では電解液は劣化にほとんど影響がないことが示唆された。

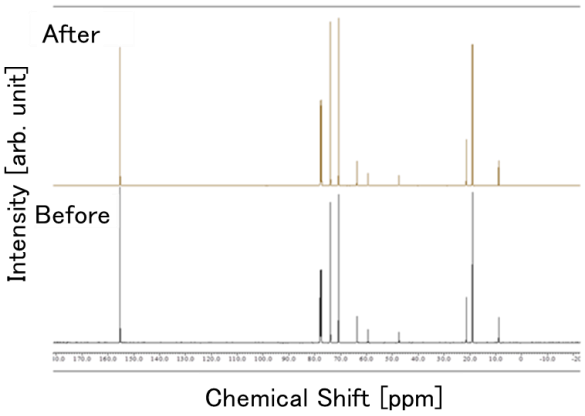


Fig. 10　^{13}C NMR Spectra of Electrolyte for the Capacitor

3.3　電極

吸着サイトの減少は電極の有効面積の減少でもある。有効面積が20%減少し，面積当たりの抵抗が変化しなかったと仮定すると，“100÷80＝125”となり約25%の抵抗上昇となる。実際は，約100%の抵抗上昇であるので，残りの75%分は有効面積以外に原因があると推定できる。静電容量には直接起因しなかった抵抗上昇の原因としては，電解液の分解物の堆積，気体発生，バインダや導電助剤のマイグレーションなどが考えられる。Fig. 11に劣化前後での電極断面のSEM像を示す。初期状態の電極は活性炭と導電助剤が均一に分散していることが分かるのに対して，劣化後の電極は導電助剤が偏在している箇所が散見され，ハレーションしている様子が確認できた。SEM像で現れるハレーションは，局所的な帯電を反映したものであり，部分的に低い導電率であることが推定される。炭素材料で構成される活性炭や導電助剤の導電率の低下は考えづらいため，電極内で唯一の絶縁物であるバインダの偏在の可能性が高い。バインダは導電助剤との親和性が高いため，結果的にハレーションが発生している部分には導電助剤も偏在していたと考えられる。

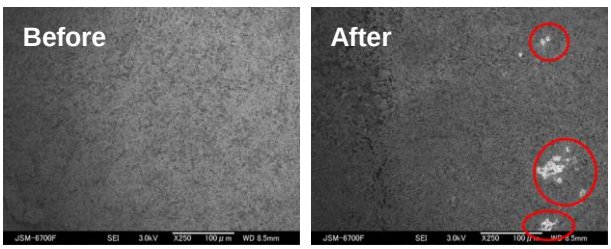


Fig. 11　SEM Images of Stripping Surface for the Electrode (Circle: Halation)

4. 劣化予測技術

上記のようなダメージが蓄積することで，容量減少や抵抗上昇といった劣化が発生することは結果であり，使われ方にその根本的な原因が存在するはずである。原因＝劣化因子として，“電圧”，“温度”，“電流”の3つを仮定し，それらの影響度を調査した。“電圧”は一定の温度環境下で異なる電圧での保存試験，“温度”は一定の電圧負荷状態で異なる環境温度での保存試験，“電流”は電圧範囲を指定した一定温度環境化での定電流サイクル試験によりそれぞれの劣化に対する依存性を検証した。その結果，“電圧”はバトラーボルマー則，“温度”はアレニウス則に従った規則性を有していた。しかし，“電流”は劣化への影響はほとんど確認されなかったため，そのような規則性はないと判断した。以上の結果より“電圧”と“温度”の二つの変数に対して線形化された劣化との相関関係を与えることができるため，劣化予測としての活用を試みた。

一般的な使われ方を模擬した走行モードでのキャパシタに掛かる入出力と環境温度から劣化因子として“電圧”および“温度”を抽出し，モデル化した劣化予測式とベンチ評価での実測との検証を実施した。結果をFig. 12に示す。実測と劣化予測との劣化率の誤差は±3%以内であった。キャパシタは“電圧”，“温度”という基本的かつ単純な劣化情報から規則性をモデル化し，種々の車両の使われ方に対する劣化予測が可能であることを確認した。

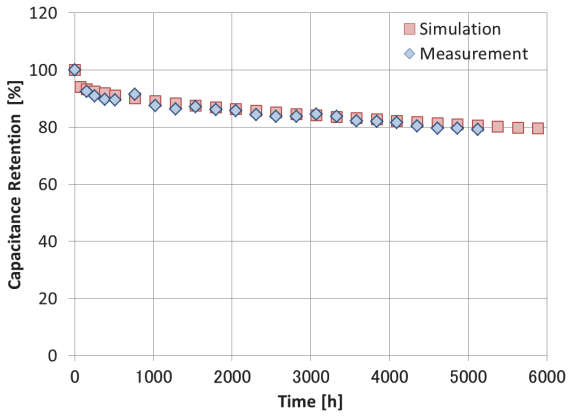


Fig. 12　Discharge Capacity Retention by the Cycle Test

5. おわりに

キャパシタは高い入出力特性を有し，低電圧であっても高効率なエネルギーの出し入れが可能である。更に，過酷な環境条件であっても減速回生能力を長期間にわたって維持することが可能である。減速回生システムのように短時間での入出力が多く，あらゆる環境下で満足できる機能を発揮するためにはキャパシタは十分な能力を有している。また，劣化のメカニズムと材料物性の紐付，劣化因子と影響度の規則性から車両の使われ方を模擬した劣化予測が可能となった。

今後，お客様にとって有意義であると感じていただける車両としての機能を拡張させていくため，劣化解析技術や劣化予測技術を進化させ，キャパシタの可能性を早期に見極めていく。

参考文献

(1) 高橋ほか：減速エネルギ回生システム“i-ELOOP”の開発，マツダ技報，No.30，pp.37-42（2012）

■著　者■

宇都宮　隆

阪井　博行

藤田　弘輝

論文・解説

33

ビルディングブロックを支えるバッテリモデルベース開発
Battery Model Based Development for Building Block Strategy

藤田　弘輝*1　庄司　明*2　松井　恒平*3
Hiroki Fujita　Akira Shyoji　Kohei Matsui
宇都宮　隆*4　楊　殿宇*5　大路　潔*6
Takashi Utsunomiya　Tenyu Yan　Kiyoshi Oji

要　約

マツダは，環境戦略としてi-stop，減速回生，モータ駆動と，段階的に電気デバイスを付与していく「ビルディングブロック戦略」を進めている。これらの進化を実現するために，バッテリ領域の技術を高度かつ迅速に構築していく必要があり，研究開発を支えるモデルベース開発が重要になってくる。今回，バッテリモデルベース開発で核となるモデル化について，種々のバッテリに適用できるモデル作成技術構築のための考え方や作成方法を中心に紹介する。

Summary

Mazda is promoting the “Building Block Strategy” as its environmental strategy, with a view to offering electric devices in stages such as i-stop, regenerative braking system, and motor drive technology. To evolve these electric devices, it is important to quickly establish advanced technologies in the battery domain and carry out Model Based Development that supports research and development activities. This article introduces a viewpoint of and procedure for establishing a model building technology that can be applied to various batteries and plays a key role in the Model Based Development of batteries.

1. はじめに

マツダは，ベース技術の徹底追求と電気デバイス技術の段階的導入による環境技術の進化を目指した「ビルディングブロック戦略」を掲げている。この戦略に基づき，2012年には，減速時に失われる運動エネルギー（以下，減速エネルギー）を回収し，車の消費電力として再利用する，世界初のキャパシタを用いた減速回生システム（i-ELOOP）を導入した。各社からも同様の減速回生システムが提案されており，減速エネルギー回生技術が拡大してきている。一方，各国の燃費規制に対応するためには，更なる燃費向上が必要であり，次のブロックへ向けた新しいシステムの検討が必要である。

その中で，車に求められる機能は高度化，多様化する一方であり，これらを実現するためのバッテリシステムは今後ますます進化が加速していく方向にある。このようなバッテリシステムを，限られたリソースの中で迅速に開発し続けるには，開発そのものを机上で効率よく行う「モデルベース開発」（MBD：Model Based Development）が極めて重要である。

2. バッテリモデルベース開発

バッテリ開発プロセスの中で，特に開発初期の車両のシステム構想やバッテリの詳細設計時にモデル適用が重要になってくる。

開発初期では，異なる燃焼方式のエンジンの採用や各種電気駆動システムの採用，そしてこれらを組み合わせた場合に，目標とする車両性能を満足させるために求められるバッテリシステムの要求仕様を効率よく設定する必要がある。

バッテリの詳細設計では，市場での使われ方を十分に把握し，その使われ方におけるバッテリの異常劣化がないことを見極め，寿命信頼性を加味したバッテリ要求スペックを導きだす必要がある。

*1,2,4～6　技術研究所
Technical Research Center
*3　電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office

バッテリ開発を行う上で最も時間がかかるのは，寿命信頼性である。寿命信頼性評価は，一般的に，バッテリの劣化に影響度が大きい劣化因子（例えば，温度，電圧，電流など）を加速させることで，短期間で評価（加速劣化試験）する方法がとられている。しかし，複数の市場の使われ方での寿命検証を行うためには，膨大な試験数が必要となる。一方，バッテリは日進月歩で進化しており，材料系（リチウムイオン電池の場合：三元系，Fe系，Mn系，Liリッチ系など）の違い，原理（鉛蓄電池，キャパシタ，ニッケル水素電池，リチウムイオン電池）の違いなど検討すべきバッテリは多岐にわたる。これら複数のバッテリを比較検討するためには，膨大な時間を要してしまう。

これら課題の解決には，モデルを用いることが効果的であり，机上検証による短時間検証及び複数条件での同時評価を可能とし，実車評価を減らすことで効率的にバッテリ開発を進めることが期待できる。

そこで，簡便でありながら，原理原則やメカニズムに基づきバッテリの状態を再現できるモデル作成が求められる。そのためには，各バッテリの充放電挙動や劣化挙動において，その挙動のメカニズムが共通の部分と非共通の部分を明確にし，共通部分をベースとしたモデル化ができれば，汎用性のあるモデル化技術を構築できると考えた。本稿では，モデルベース開発を進める上で必要なモデル化において，考え方や作成方法について紹介する。

ここで，バッテリ挙動のモデル化について説明する。車の使われ方は，走行と駐車に大別される。走行時は，バッテリは充放電状態であり，これにより発熱し劣化が進行するので，充放電モデル，温度モデルと劣化モデルが必要となる。駐車時は，バッテリは保存状態であり，保存により劣化が進行するので劣化モデルが必要となる。このように，バッテリの挙動は，3種のモデルによって表現することができる。今回は，充放電モデルと劣化モデルについて紹介する。

3. 充放電モデル

3.1　充放電モデルの考え方

バッテリの充放電挙動のモデル化に関して，バッテリの充放電メカニズムから考える（Fig. 1）。

例えば，リチウムイオン電池では，充電時において正極の結晶内のLiは，正極から脱離し（正極反応），電解液内に移動する。一方負極では，電解液内を拡散したLiイオンが，溶媒と混ざり合っている溶媒和した状態から脱溶媒和を行いながら負極内に挿入（負極反応）する。これら充電メカニズムで，正極及び負極反応はバッテリの種類によって異なるが，イオンの拡散を伴う充放電メカニズムを有しているバッテリでは，拡散現象は共通で考えることができる。つまり，イオンの拡散をモデル化できれば，共通の充放電モデルを作成することができると考える。ここで，イオンの拡散は，電解液中を拡散する場合や正極や負極の結晶格子内を拡散する場合などがあり，これらを総じてイオン拡散と定義した。

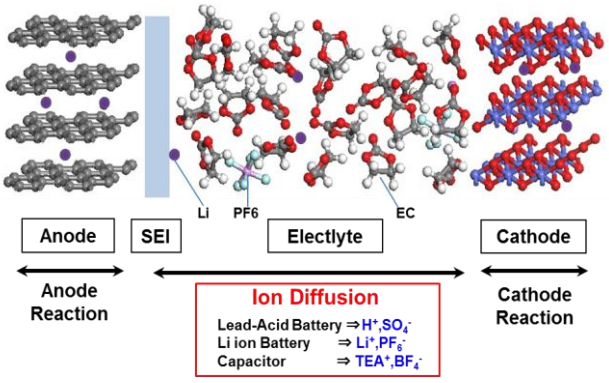
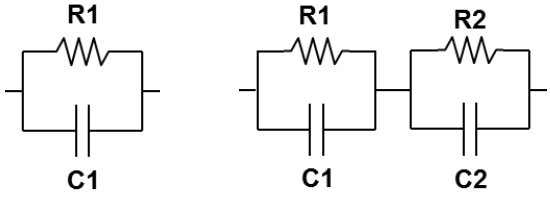


Fig. 1　Battery Charge Mechanism

イオン拡散のモデル化について，一般的に拡散モデルと等価回路モデルの二つの物理モデルがある。拡散モデルは，拡散方程式を用いたものであるが，車載を想定した場合，計算量が多く実装性に課題があると考えた。一方，Fig. 2に示す等価回路（抵抗とコンデンサで構成されたRC回路）は，他のデバイスでも使用されている一般的なプラントモデルであり，マツダにおいても鉛バッテリにおいて初めて適用した[1]。そこで，他のバッテリに関してもRCモデルの適用を検討した。



(a)One RC Circuit Model　(b) Two RC Circuit Model

Fig. 2　RC Circuit Model

リチウムイオン電池の充電時の電圧挙動をFig. 3に示す。この結果から，1段RC（以下1RC）よりも2段RC（以下

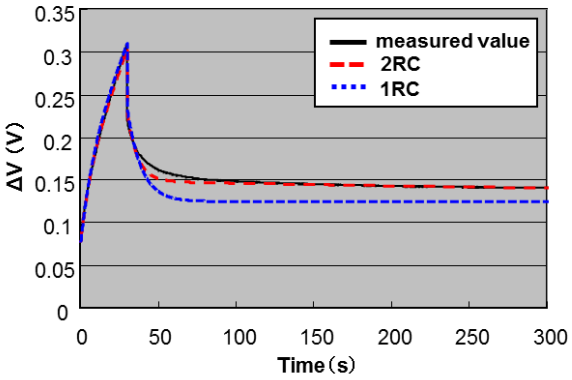


Fig. 3　Battery Voltage Behavior in Charge

2RC）の方が実測値を精度よく再現できることが分かった。これは，実際のバッテリは，イオンの拡散において「速い拡散」と「遅い拡散」の二つが起きていることが推測され，2RCで電圧挙動を再現するために必要な精度が確保できていることを確認した。

Fig. 4に，2RCモデルを示す。IRドロップと電極反応をR0，二つの速度を有する拡散を二つのRC回路に当てはめた。従って，バッテリの電圧V_{BAT}は，式(1)で表される。

$$V_{BAT} = V_{IR} + EP + OCV0 - \Delta OCV \quad (1)$$

V_{IR}：IRドロップ電圧

EP：EP1＋EP2　拡散分極電圧

ΔOCV：充放電に伴うバッテリ起電力の変化分

OCV0：充電開始前の電圧

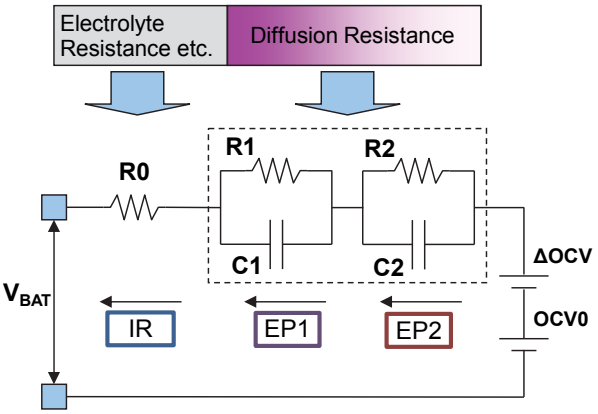


Fig. 4　2RC Circuit Model

等価回路の各パラメータは，Fig. 5に示す矩形波応答を使用して抽出した。

以上のように，イオンの拡散挙動を伴う電圧応答を2RCモデルで表現することが可能となった。

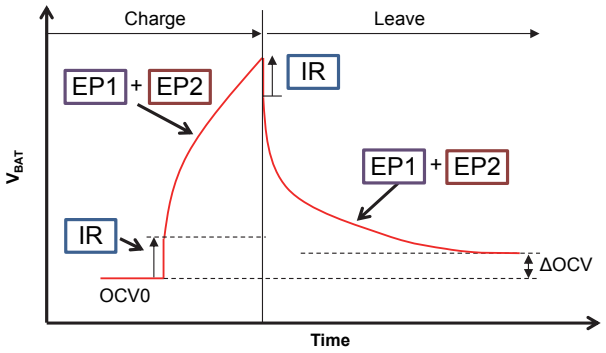
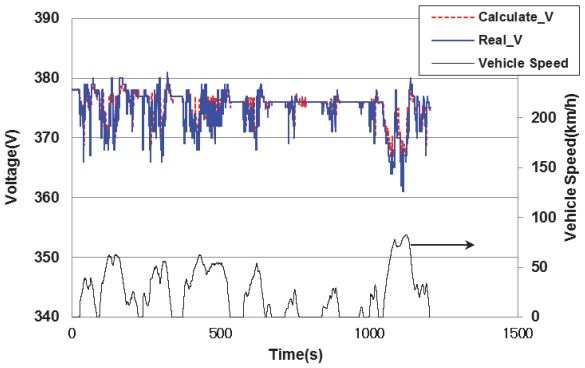


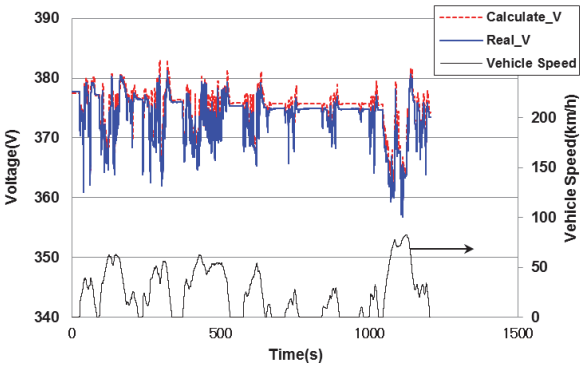
Fig. 5　Rectangular Respondence for Calculating Parameter

3.2　結果

上記の等価回路を用いて，リチウムイオン電池で充放

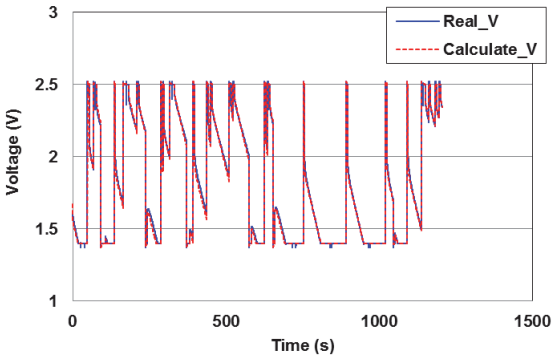


(a)New

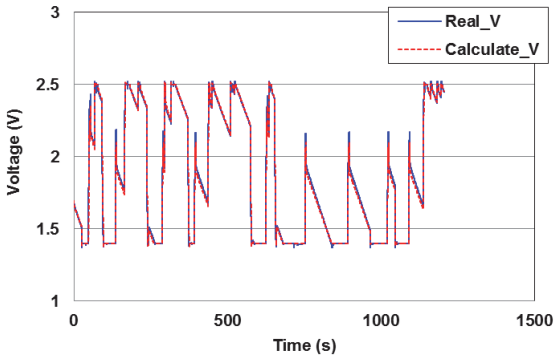


(b)Aged

Fig. 6　Comparative Result of 2RC Model and Real Measured Value in Li Ion Battery (JC08 mode)



(a)New



(b)Aged

Fig. 7　Comparative Result of 2RC Model and Real Measured Value in Capacitor (JC08 mode)

電シミュレーションを実施した結果をFig. 6に示す。電気自動車を想定し，JC08モードの要求パワー（W）に対する電圧挙動を新品時と劣化時で比較した。劣化時の内部抵抗は，初期比35%増加時のデータを用いた。どちらも3%以内の誤差でシミュレーションが可能であることが分かった。同様に，Fig. 7に減速回生車を想定したキャパシタの充放電シミュレーション結果を示す。劣化時のデータは，内部抵抗が初期比83%増加時，容量維持率80%時を用いた。キャパシタでも，3%以内の誤差でシミュレーションが可能であることが分かった。

以上より，充放電モデルは，イオンの拡散メカニズムをモデル化した2RCモデルを用いることで，鉛バッテリのみならず，キャパシタやリチウムイオン電池へも適用でき，汎用性の高いモデル作成手法を構築した。

4. 劣化モデル

4.1　劣化モデルの考え方

次に，劣化挙動のモデル化について検討を行った。Fig. 8に，リチウムイオン電池の電極／電解液界面の被膜形成イメージを示す。バッテリの容量低下の主因子は，充放電や保存などの使われ方により，負極に被膜〔＝SEI（Solid Electrolyte Interface)〕が成長し，SEI 被膜中へのLi 蓄積によるLi損失が主劣化である[2),3)]。

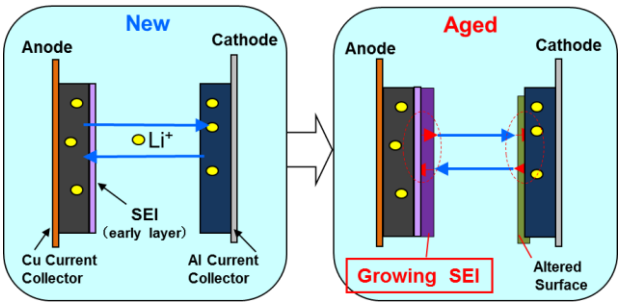


Fig. 8　SEI Formation Behavior at Electrode/Electrolyte Interface

Fig. 9にXPSによる電極表面分析から，初期に対する劣化後のSEI膜厚の測定結果を示す。容量維持率が小さくなるにしたがって，被膜が厚くなることが確認できた。

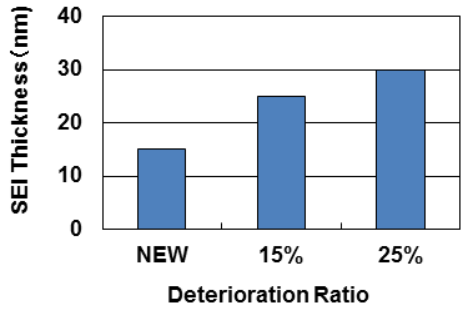


Fig. 9　SEI Film Thickness Measurement (XPS)

一方，キャパシタにおいては，劣化後に比表面積が減少することが窒素吸脱着測定による比表面積測定から確認された。これは，充放電の副反応として電解液の劣化によって生成した分解生成物が活性炭の細孔に堆積し，比表面積が低下したと推定される。キャパシタにおいては，劣化と被膜形成による比表面積低下に比例関係があり，主要因として劣化を表現できることが分かった。

以上より，リチウムイオン電池とキャパシタの劣化モデルは，SEIのような被膜形成による劣化への影響をモデル化することで，共通のモデルを作成できると考える。

被膜形成に関して被膜の成長反応が，累積試験時間に，常に同じメカニズムで進行するものと仮定して，この被膜の成長速度が被膜の厚さの逆数に比例するという関係式が時間のルート則の根源となる理論モデルである[3)]。つまり，被膜形成が主劣化のバッテリの劣化は，ルート則に従うといわれている。

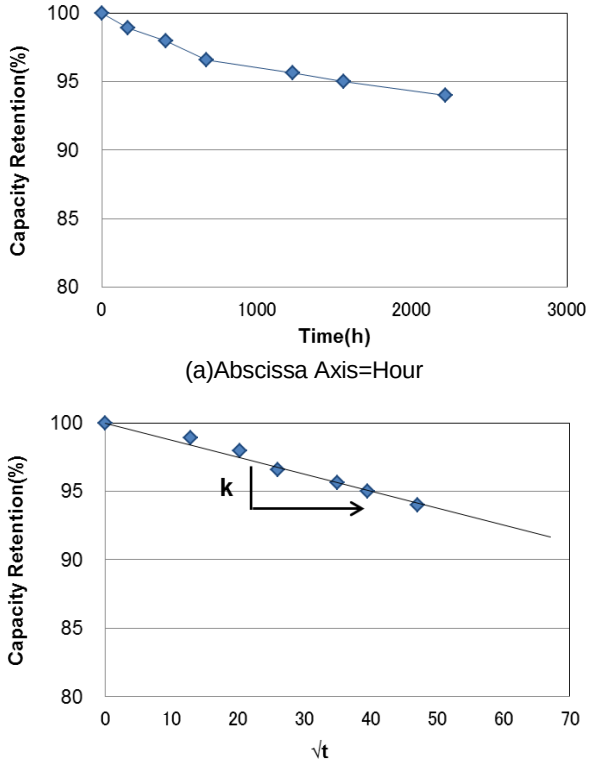


Fig. 10　Deterioration Characteristic of Li Ion Battery

一例として，Fig. 10に，リチウムイオン電池の保存時の劣化試験結果を示す。横軸を√tにした場合が，Fig. 10(b)であり，容量劣化が√tに比例して減少することが実験的に確かめられた。容量維持率Yは，以下の式(2)で表せる。

$$Y = -k\sqrt{t} + 100 \qquad (2)$$

k：劣化係数

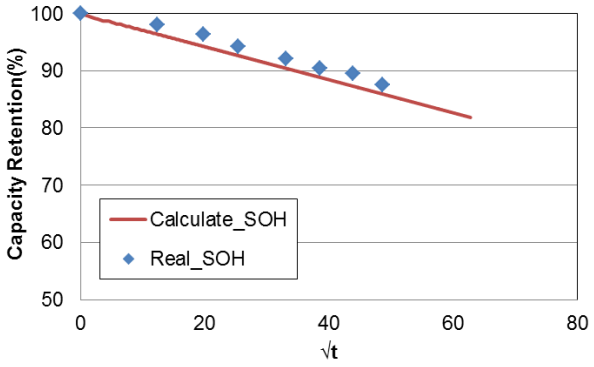
ここで，劣化係数kは，劣化の反応速度に対応している。サイクル時の劣化でも同様の結果が得られており，上記理論モデルが適用できることを確認した。

次に，劣化係数に対する劣化因子の影響を調べた。主要な劣化因子である，電圧，温度及び電流について調査した結果，電圧はバトラーボルマー則，温度はアレニウス則に従った劣化を示した。一方，電流はバッテリの種類によりレートや電流積算量のような因子によって影響が異なることが分かった。そこで，これらの関係をベースに，劣化モデルを構築した。

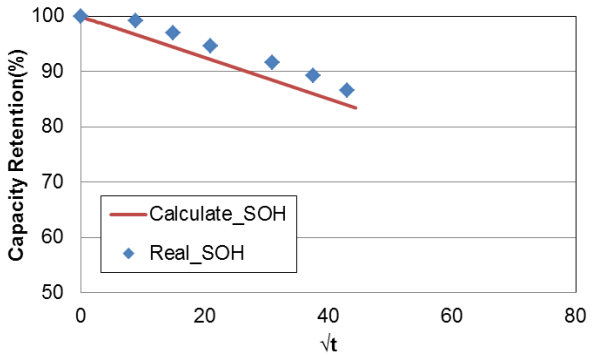
4.2　結果

リチウムイオン電池の劣化シミュレーションを実施した結果をFig. 11に示す。

電気自動車を想定し，複数の劣化因子を加速劣化させた複合試験を用い，走行モードパターンとして，加減速モードAと高速モードBの2つで，セル温度45℃の場合において実測値と比較した。その結果，両モードでも，3%以内の誤差でシミュレーションが可能であることが分かった。



(a)Mode A



(a)Mode B

Fig. 11　Comparative Result of Deterioration Model and Real Measured Value in Li Ion Battery

同様に，Fig. 12に減速回生車を想定したキャパシタの劣化シミュレーション結果を示す。キャパシタにおいても，実測値との誤差が3%以内でシミュレーションが可能であることが分かった。

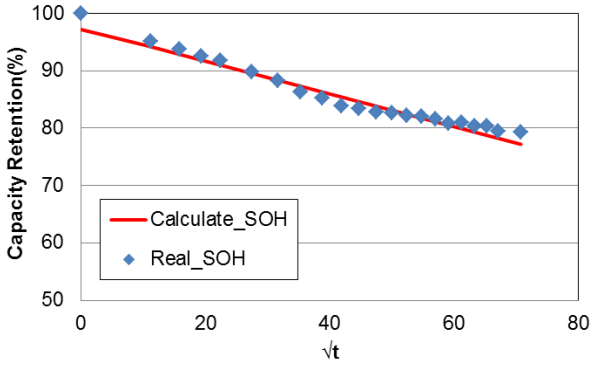


Fig. 12　Comparative Result of Deterioration Model and Real Measured Value in Capacitor

本劣化モデルは，キャパシタでは，電気二重層キャパシタやリチウムイオンキャパシタなど，リチウムイオン電池では，正極違いや負極違いのバッテリでも適用できることを確認した。

以上より，劣化モデルは，被膜形成メカニズムをベースとしたモデルを用いることで，汎用性の高いモデル作成手法を構築した。その結果，複数のバッテリでも短期間でポテンシャルを把握することができ，バッテリ開発の早期化に貢献できると考える。

5. おわりに

各バッテリの充放電挙動や劣化挙動において，その挙動のメカニズムが共通の部分と非共通の部分を明確にし，共通部分をベースとしたモデルの作成を行うことで，汎用性のあるモデル化技術を構築することができた。このモデルを用いて，モデルベース開発を実施することで，開発の効率化，工数や費用の大幅な削減に貢献できると考える。また，非共通部分のメカニズムと劣化への寄与度を明確にし，個別にモデル化して組み合わせることで更なるモデルの精度向上が実現できると考える。

今後，ますますMBDが重要になってくると考える。バッテリ開発においても適用範囲を拡大させていくとともに，お客様に満足いただく商品へ貢献していくために，モデル化技術の更なる進化を目指していく。

参考文献

(1) 久米ほか：次世代バッテリマネジメント技術の開発，マツダ技報，No.28，pp.54-58（2010）

(2) 市村雅弘ほか：小型リチウムイオン電池の寿命特性，NTT Building Technology Institute 2005，pp.1-7（2005）

(3) 田尾洋平ほか：リチウムイオン二次電池用グラファイ

ト負極上のSEI 被膜の成長過程，GS Yuasa Technical Report，No.10-2，pp.8-15（2013）

■著　者■

藤田 弘輝

庄司　明

松井 恒平

宇都宮　隆

楊　殿宇

大路　潔

論文・解説

34 ロータリエンジンを用いたレンジエクステンダユニットの紹介
Introduction of Range Extender Unit using Rotary Engine Technology

清水　律治*1 Ritsuharu Shimizu
木ノ下　浩*2 Hiroshi Kinoshita
伊藤　達夫*3 Tatsuo Ito
森　健次*4 Kenji Mori
稲田　潤*5 Jun Inada
齋尾　奈穂子*6 Naoko Saio
数面　宏昭*7 Hiroaki Suumen

要　約

レンジエクステンダユニットは，小型内燃機関を使った発電ユニットで，電気自動車の航続距離に対する不安を解消することが大きな役割となる。ユニットがあくまでバッテリの補助的役割を担うことを前提としたコンセプトにおいては，極力，その存在影響が小さいことが望ましい。本ユニットは，シリーズハイブリッドの延長線で開発されたプレマシーハイドロジェンREレンジエクステンダーEV[(1)]とは異なり，既存のEVに後付け可能で，更に現存のインフラを活用できるコンセプトとして，当社の独自技術であるロータリエンジンの特徴を生かし，小型，軽量，低ＮＶ，高効率なレンジエクステンダユニットを開発したので，その主要技術について紹介する。

Summary

An electric power generating unit, Range Extender Unit, plays a major role in relieving electric-vehicle driver's frustrations on the driving distances. As the unit's concept was to take a peripheral role for a battery, the influence by the unit's existence should be minimized. In contrast to Premacy Hydrogen Range Extender EV [(1)] for series hybrid, this newly developed range extender unit can be mounted to conventional EV and utilized with conventional infrastructure. By taking advantage of the characteristics of Mazda's original technologies of the rotary engine, highly-efficient compact and light weight Range Extender Unit with low NV was developed. The major technologies of the unit are introduced in the following report.

1. はじめに

近年，電気自動車(以下 EV)が市販され普及が始まっているが，従来ガソリン車・ディーゼル車と比較して航続距離が短いことが課題の一つとなっている。EV の航続距離向上のための手段としては，EV 専用のインフラ整備を必要とせず，容易に入手可能な燃料を用いて内燃機関で発電して航続距離を伸ばせるレンジエクステンダが有望と考えている。本稿ではロータリエンジン(RE)の特徴を生かし，レンジエクステンダユニットに求められる小型，軽量，低NV，高効率を追求して EV への後付けまで視野に入れたユニットとして開発したレンジエクステンダユニットを紹介する（Fig. 1）。

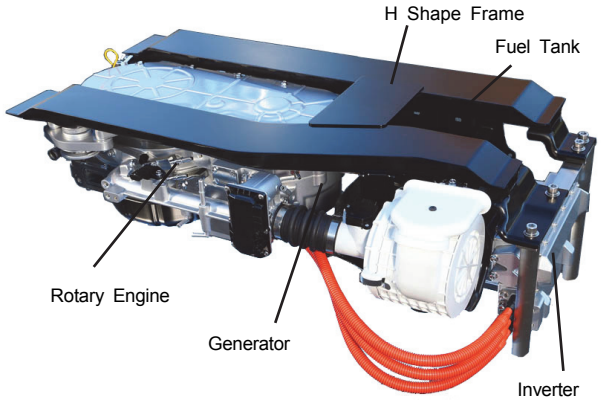


Fig. 1　Range Extender Unit with Rotary Engine

*1～4　パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.
*5，6　電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office
*7　シャシー開発部
Chassis Development Dept.

2. 基本コンセプト

レンジエクステンダはEVの航続距離延長のための補助電源であるため，装着してもベース車両との差が目立たず，更にユーザのニーズによって取り付けを選択できることが望ましい。そこで開発にあたっては以下2点を前提とした。

・ユニットレイアウト：トランクルーム下のスペアタイヤスペースに置くことができる（Fig. 2，3）。

・制御システム：EV制御系への後付け可能。

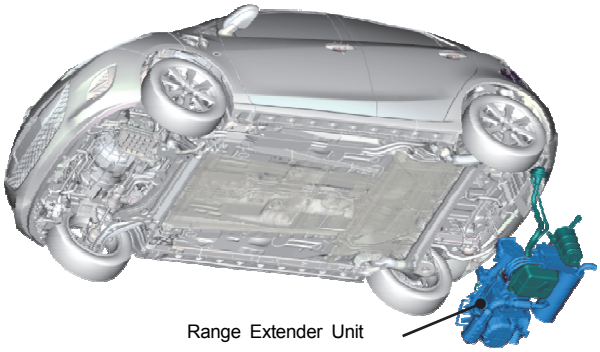


Fig. 2　Unit Attached under Trunk Room

Fig. 3　Demio EV, Range Extender Unit Installed

これらを実現するため，小型軽量であるREの特徴を生かして全高を最大限抑え，以下の考え方でユニット開発を行った。

① 小型軽量：トランクルーム下に収まり荷室サイズを犠牲にせず，重量増は最小限とする。

② 低NV：発電時（運転時）に気にならないレベルの静粛性を確保する。

③ 燃費：高効率な運転条件で使用する。

④ 汎用性：EV車に容易に後付け可能とする。

なお，必要な給電能力は，Bカー，Cカーへの搭載を考慮したときに，20kW程度と考えた（Fig. 4）。

コンセプトカーとして公開されたデミオEVレンジエクステンダは，デミオEV [2] をベースに簡単な改造を施し，レンジエクステンダユニットを搭載したものである。

上記の狙いに対し導入した技術をFig. 5に示す。

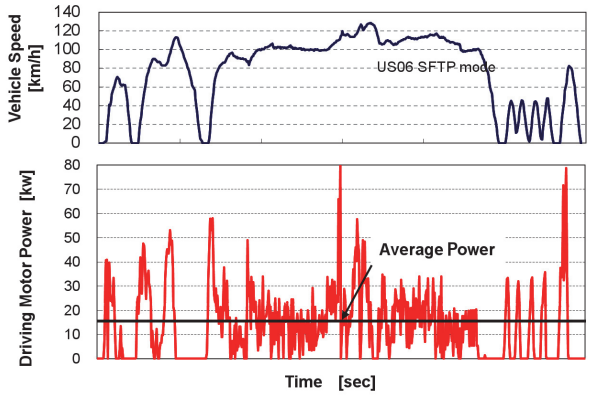


Fig. 4　EV Required Power

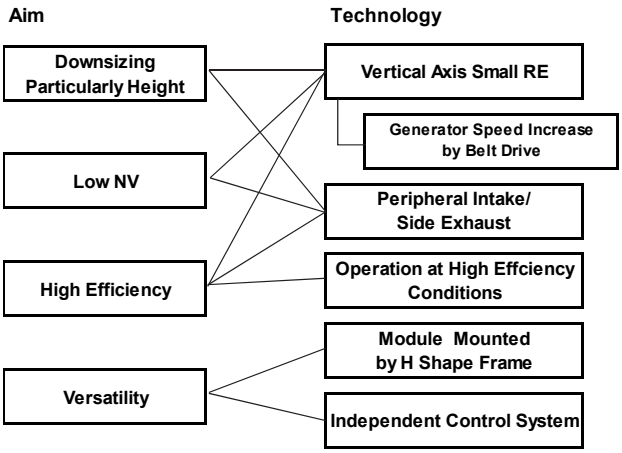


Fig. 5　Aim of Development and Major Technology

Table 1　Unit Specifications

Categoly	Type
Rotary Engine	
Displacement	330 cc
Cylinder Arrangement	1-rotor
Compression Ratio	10.0
Output Axis	Vertical Axis
Fuel Supply System	Electronic Controlled Fuel Injection
Ignition System	Electronically-Controlled
Engine power	22 kW at 4500rpm
Fuel type	Gasoline
Generator	
Type	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
Rated Output	20 kW
Engine:Generator speed rate	1:2
Fuel tank capacity	9 L

3. ユニット概要

ユニットはエンジン，ジェネレータ及び制御システムにて構成される。主要諸元を Table 1 に，ユニット外観を Fig. 6 に示す。最大給電能力は 20kW であり，バッテリ状態，車両運転条件により発電制御を行っている。

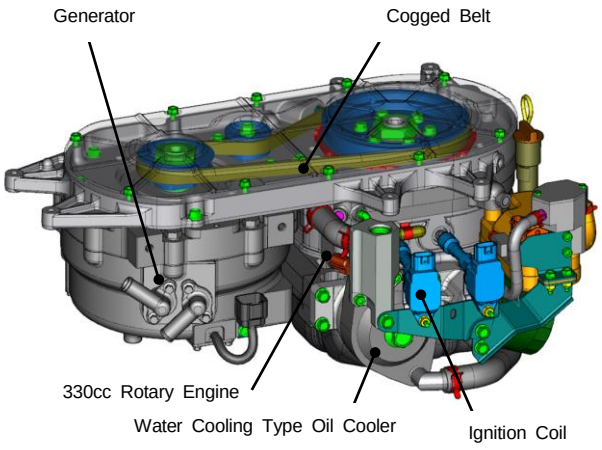


Fig. 6　External Representation of Unit

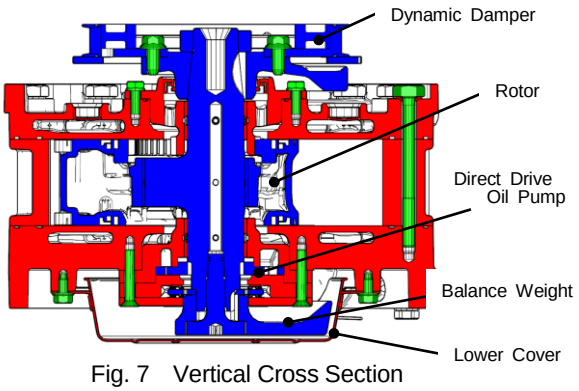


Fig. 7　Vertical Cross Section

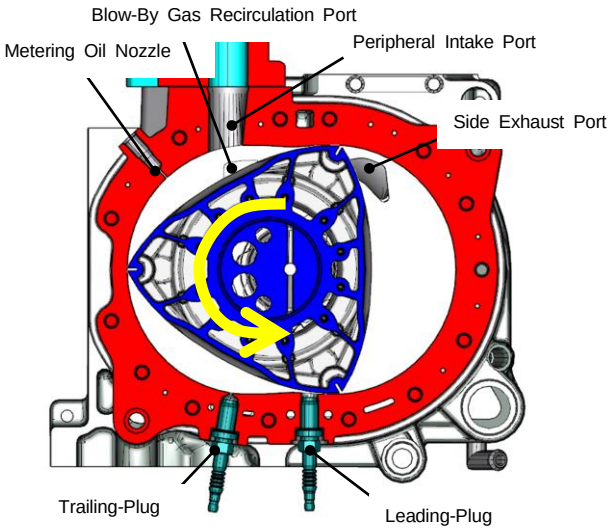


Fig. 8　Horizontal Cross Section

3.1　エンジン概要

エンジン断面図を Fig. 7，8 に示す。エンジンは排気量 330cc の 1 ロータ RE であり，出力軸を鉛直配置としロータは水平面で回転する。圧縮比は 10.0 とし，吸排気ポートはペリフェラル吸気／サイド排気の組み合わせとした。インテークマニホールドは水平に配置し，エアクリーナにはサイクロン式を採用した。オイルポンプは出力軸直動式とし，水冷オイルクーラを採用，ベルト駆動でジェネレータと接続しており，エンジン最高回転数は 4,500rpm に設定している。

3.2　システム概要

レンジエクステンダの制御モジュールはデミオ EV の制御モジュールとは別体とし，車両からの信号によってエンジン制御を含む発電制御のみを行うシステムとした（Fig. 9）。

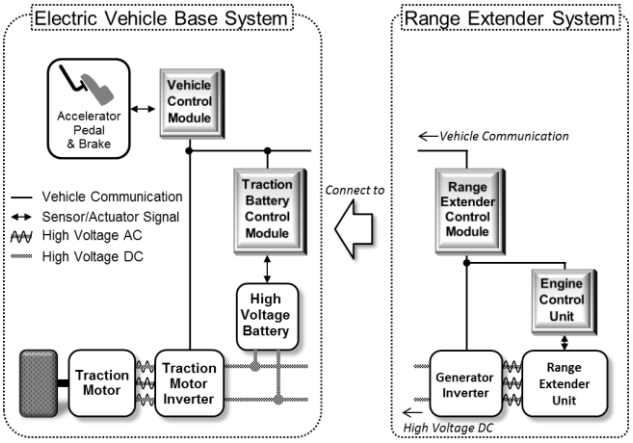


Fig. 9　Range Extender EV Control System

3.3　車両への搭載

レンジエクステンダユニットは，エンジン，ジェネレータ，燃料タンク等をいったん H 型フレームにマウントし，フレームごと車両に組み付けている（Fig. 10）。

また，レンジエクステンダユニットの冷却系はデミオ EV とは別系統の独立した冷却系としている（Fig. 11）。

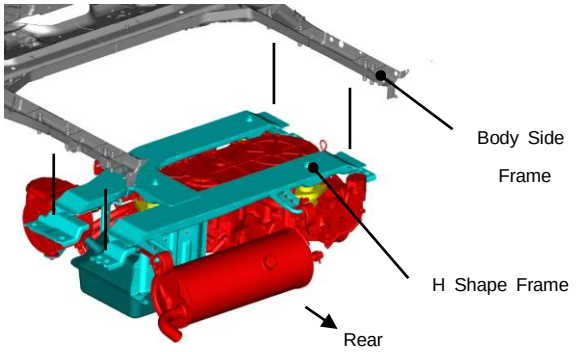


Fig. 10　Unit Installation to Demio EV

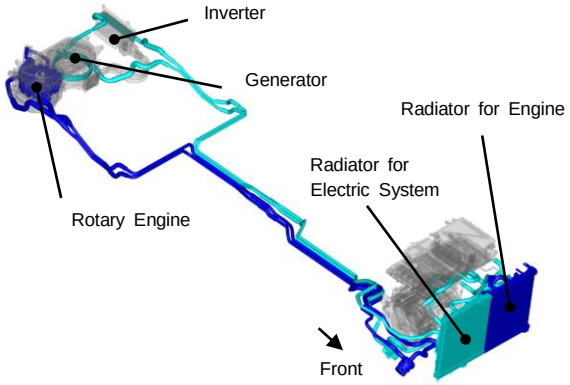


Fig. 11　Cooling Circuit

4. RE採用技術

4.1　主要諸元

主要諸元は，小型化を最優先とし設定した。レンジエクステンダの発電で要求される出力を高効率領域で発生可能な排気量330ccを選定した（Fig. 12）。ロータ数は1ロータとし作動室の単位体積あたりの比表面積を低減，レシプロエンジンでいうボアストローク比を量産ユニットである13B型エンジンに比べロングストローク化し，熱効率向上を図った。

また，エンジンとジェネレータの速度比を1:2とすることでジェネレータを増速運転し，発電効率向上と同時にジェネレータの小型化を実現している。

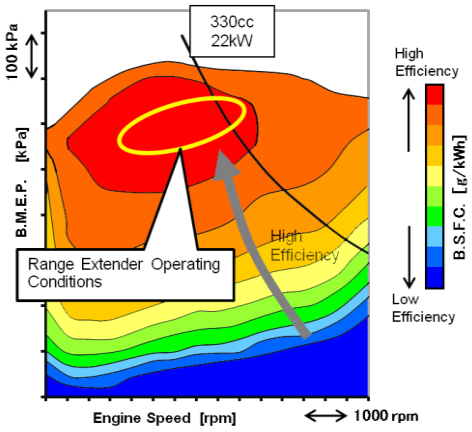


Fig. 12　Operating Condition

4.2　小型・軽量技術

軽量コンパクトなREの特性を生かし，更に，高さ低減を最優先とした設計を行った。

1ロータエンジンの出力軸を鉛直配置とし，出力に有利かつコンパクト化が可能なペリフェラル吸気ポート方式を採用，またオイルポンプはジャーナル軸受及びスラスト軸受との一体構造とし，全高低減を図っている。

出力軸を鉛直配置としたため，供給されたオイルが回転体軌跡の外側を通ってオイルパンに戻るよう通路を設定してオイルの撹拌抵抗を抑えるとともに，オイルパン内にロアカバーを取り付けてオイルジャケット容積を確保することで旋回時の油面変化にも強い構造とし，オイルパンの高さ低減を図っている（Fig. 13，14）。

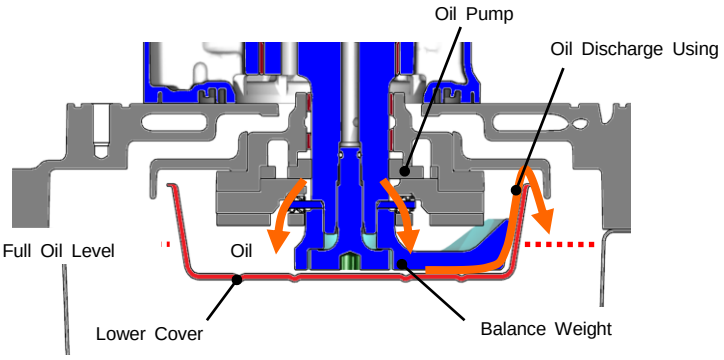


Fig. 13　Oil Control in Lower Part of Engine

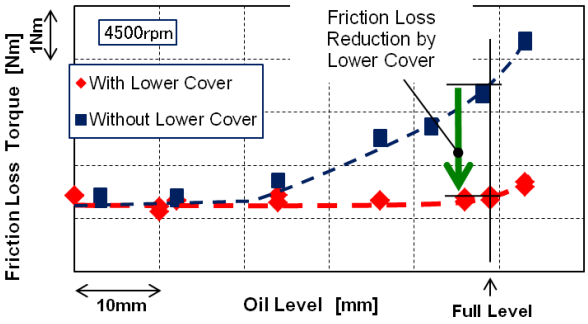


Fig. 14　Friction Loss Reduction Effect of Lower Cover

吸気系は，最大出力を4,500rpmとするためのロングインマニをほぼ水平方向にレイアウトすることでユニット全高を阻害しないよう配慮し，エアクリーナも濾過面積あたりの容積に有利なサイクロン方式を採用した（Fig. 15）。

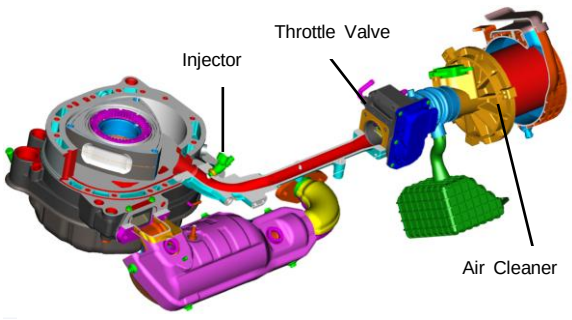


Fig. 15　Layout of Intake and Exhaust System

4.3　低NV化技術

排気ポートはサイド排気方式[3]を採用し，ポート開口時

の圧力波を低く抑えることで低騒音化を図った。またロータギヤの歯数を減らすためモジュールを大きくとり，ギヤノイズの基本周波数を低周波側に寄せて車両搭載時にユーザが感知しにくくした。エンジンとジェネレータ間の動力伝達についてはベルト駆動とし，ダイナミックダンパを採用することで音，振動を低減している（Fig. 16，17）。

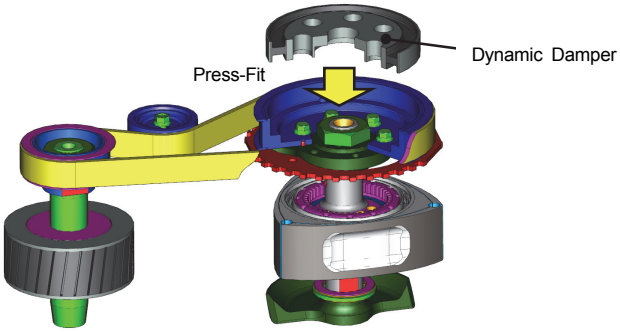


Fig. 16　Power Transmission Mechanism

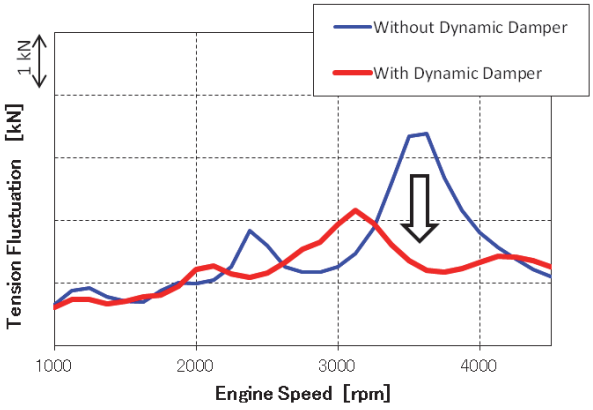


Fig. 17　Tension Fluctuation Reduction Effect by Dynamic Damper

吸気系フレッシュエアダクトの開口を発電ユニット上部でかつ後方に向け配置し，音が室内に入りにくくするのと同時に水浸入を抑制した。

車両搭載時のマウントには，振動伝達音低減のためにエンジンロール方向のバネ定数を低く，弾性中心をレンジエクステンダユニット重心に一致させることが要求される。

レンジエクステンダでは，エンジン出力軸が鉛直方向であるためエンジン振動の起振力は水平方向に発生する。支持剛性が求められる上下方向とは独立したバネ定数設定が可能であるため，マウント特性を方向別に最適化した（Fig. 18）。

更に，発電ユニット全体をマウント 3 点で支え，マウント位置を適切に配置することで，同一特性部品を使用しながら弾性中心を重心に一致させ，音，振動の低減を実現した。

始動時の振動に関しても，ユニットや車体，サスペンションなどの共振を避ける回転数での始動とすることで，ほとんど体感されないレベルとした。

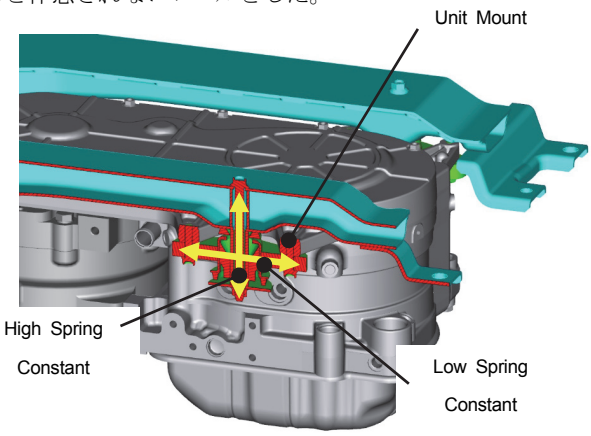


Fig. 18　Unit Mount Properties

5. 制御システム

5.1　システムコンセプト

レンジエクステンダのコンセプト実現のため，制御システムコンセプトは以下とした。

・レンジエクステンダをEV車のオプションとして提案できるように，既存EVシステムに後付けするシステムとする。

5.2　EV制御システムとの協調

レンジエクステンダシステムは，シリーズハイブリッド自動車と同じエネルギーの流れとなるため，シリーズハイブリッド自動車であるマツダ プレマシー ハイドロジェンREレンジエクステンダーEVの制御システムを活用することが可能である。しかし，マツダ プレマシー ハイドロジェンREレンジエクステンダーEVの，発電と走行を1つのコントローラで統括するシステムでは，後付けが難しいため，走行に関係する制御は既存EVシステムから変更せず，発電機能である「発電実行の判断」「発電量の決定」「発電制御」のみを新規追加するレンジエクステンダシステムが担うこととした。

5.3　レンジエクステンダ制御システム

既存EVシステムへの変更を避け展開を容易にするため，入力信号は一般的に車載ネットワークで通信されている信号を用いることとした。

（1）発電実行の判断

「EVの航続距離の不安を解消すること」を重視し，バッテリの残容量が十分にある場合はEV走行し，バッテリ残容量が少なくなった場合のみレンジエクステンダシステムを起動し発電することとした。

（2）発電量の決定

発電効率を重視して定点運転を行うと，車速にかかわら

ず同じ音が絶えず聞こえ，ユーザに違和感が生じる。そこで，Fig. 19に示すように，レンジエクステンダシステムでは静粛性を重視し，作動音を走行時の車両暗騒音に隠し，かつ車速に応じて音圧が変わるよう，発電量を変化させた。また，音圧だけではなく音質にも配慮し，発電効率，音質のバランスを考慮して発電ポイントを決定した。

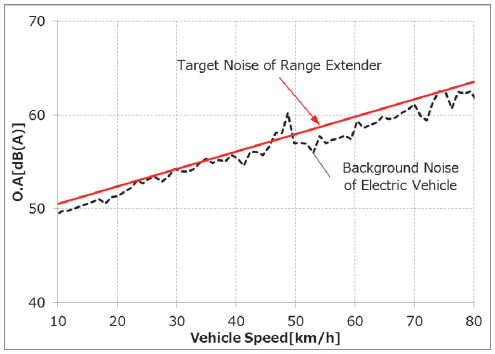


Fig. 19　Background Noise and Range Extender Noise

(3) 発電制御

発電量を制御するためには，エンジン発生トルクとジェネレータ吸収トルク及び，回転数を制御する必要がある。エンジン発生トルクを制御するには1サイクル以上を必要とするが，ジェネレータ吸収トルクの応答性はエンジン発生トルクの応答に対し非常に速い。

そこで発電制御は，エンジン発生トルクに対し，それに見合ったジェネレータ吸収トルク，ジェネレータ回転数を実現するように高応答でフィードバック制御した。

また，1ロータエンジンではエンジンのトルク変動から来る回転変動が大きく，ジェネレータ吸収トルク制御により回転変動を抑え込む従来の制御手法では発電電力が短い周期で変動し，バッテリの放電，充電に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで，この現象を防止するために，ジェネレータのフィードバック制御に用いる実ジェネレータ回転数に，回転速度に応じた平均化処理を施した。これにより，ジェネレータ吸収トルク制御が微細な回転変動に左右されることを抑制し，安定した発電電力を実現した（Fig. 20）。

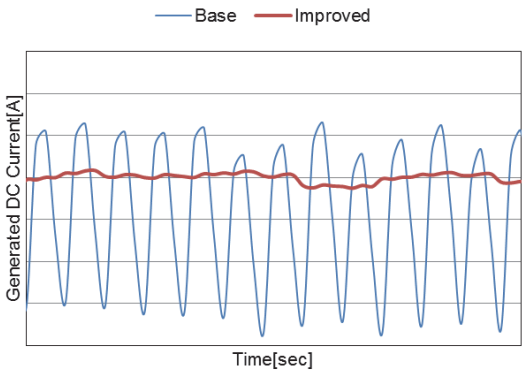


Fig. 20　Generated Current Improvement by Equalization Processing

6. まとめ

REを使ったレンジエクステンダを開発し，以下の成果を得た。

① ベースのデミオEVのトランクルーム下に収まるユニットを作成し，制御システム含め後付け可能なコンセプトを実現した。

② 発電運転において，EVの商品性に影響しないレベルの静粛性であることを確認した。

③ デミオEVに対し，約2倍の航続距離を可能とした。

REの主要諸元含め従来経験のない要素を多く含んだレンジエクステンダユニットの開発はチャレンジングなものだった。今後も技術開発に飽くなき挑戦で立ち向かうことで，お客様に感動を提供し続けていきたい。

参考文献

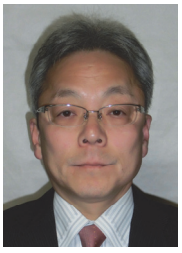
(1) 森本ほか：プレマシーハイドロジェンREレンジエクステンダーEVの開発，マツダ技報，No.31，pp.137-142（2013）

(2) 藤中ほか：デミオEVの紹介，マツダ技報，No.30，pp.114-119（2012）

(3) 田島ほか：サイド排気ポート方式ロータリエンジンの概要，マツダ技報，No21，pp.18-23（2003）

■著　者■

清水　律治


木ノ下　浩

伊藤　達夫

森　健次

稲田　潤

齋尾 奈穂子

数面　宏昭

論文・解説

35

サブタンクレスFFV（Flexible Fuel Vehicle）の開発
Development of Sub-Tank Less FFV (Flexible Fuel Vehicle)

古市 展之*1 Nobuyuki Furuichi　島本 祥*2 Sho Shimamoto　西尾 貴史*3 Takafumi Nishio
渡辺 友巳*4 Tomomi Watanabe　大橋 美貴典*5 Mikio Ohashi　安田 京平*6 Kyohei Yasuda

要　約

近年，バイオエタノールが注目されており，ブラジルではE22（エタノール22%，ガソリン78%）からE95（エタノール95%，水5%）に対応したFFV（Flexible Fuel Vehicle）が普及している。ただし，エタノールは低沸点成分を含まない単一成分の燃料であるため，冷間での気化改善と燃焼改善が課題となる。そのため，ブラジル向けのFFVは一般的に補助燃料タンク（サブタンク）等の追加システムを採用し，冷間始動性や走行性を改善させるが，マツダはSKYACTIV-Gの圧縮比やバルブタイミングを最適化し，そして直噴であることを活かすことで，サブタンクレスFFV（サブタンク等の追加システムを用いないE95対応のFFV）を開発した。

Summary

Bio-ethanol fuel attracts attention in recent years. FFV (Flexible Fuel Vehicle) that can run on E22 (ethanol 22%, gasoline 78%) and up to E95 (Ethanol 95%, Water 5%) has become popular in Brazil. Since ethanol is a single-component fuel that does not contain any low-boiling point components, vaporization and combustion performance at low temperature need to be improved. FFV for Brazilian market are generally equipped with sub-fuel tank systems to avoid cold startability and driveability problem.

This paper introduces our newly developed sub-tank less FFV that can use E95 by optimizing compression ratio and valve timing, and taking advantage of the direct-injection system of our SKYACTIV-G engine.

1. はじめに

近年，地球温暖化への関心の高まりから，再生可能燃料であるバイオエタノールが注目されている(1)。そして，既にブラジルではE22からE95に対応したFFVが普及しており，アメリカやヨーロッパでもガソリンからE85（エタノール85%，ガソリン15%）に対応したがFFVが普及しつつある(2) (3)。

ただし，エタノールは低沸点成分を含まない単一成分の燃料であるため，エタノールを自動車用燃料として使用する際には，冷間での気化改善と燃焼改善が課題となる。そのため，ブラジル向けのE95に対応したFFVは一般的にサブタンク等の追加システムを採用し，このサブタンクに低温でも蒸発する成分を有するE22を入れ，冷間ではこのE22を噴射することによって始動性や走行性を確保する。

しかし，SKYACTIV-Gの高圧縮比かつ直噴エンジンである利点を最大限に活用すれば，冷間でもシリンダ内でE95の飽和蒸気圧を超える状態を作り，E95を気化させることが可能であると考え，E95に対応したサブタンクレスFFVの開発を行った。

2. 開発条件

FFVにはブラジルで普及するE22からE95に対応したFFVと，欧州，米国，タイで普及するガソリンからE85に対応したFFVの2種類が存在する。エタノールおよびガソリンの性状から，開発難易度が高いのはE22からE95に対応したFFVである。そのため，E95に対応できる技術が構築できれば，E85を含む全てのエタノール混合燃料での運転も保証できると考えた。そこで，このE95が普及するブラジル市場を想定して開発条件を設定した。

*1，2 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.
*3 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.
*4～6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

2.1 温度，燃料条件

Table 1に示すように最低保証温度はブラジルの最低気温に合わせて-5℃とした。また，評価燃料はブラジルに流通している燃料と同様にE22と含水5%のE95とした。

Table 1 Evaluation Temperature and Evaluation Fuel

Minimum Temperature		-5degC
Fuel	E22	Ethanol 22%, Gasoline 78%
	E95	Ethanol 95%, Water 5%

2.2 ベースとしたエンジンの仕様

エンジンはTable 2に示す新型Mazda2に搭載される油圧S-VT（Sequential Valve Timing）を採用するSKYACTIV-G 1.5Lをベースに検討した。このエンジンのスペックは以下のとおりである。

Table 2 Specifications of Base Engine

Fuel	Gasoline
Cylinder Type	In-line 4
Bore × Stroke[mm]	74.5 × 85.8
Displacement[cm3]	1495
Compression Ratio	12 : 1
Valve System	DOHC 16Valves Hydraulic In-VVT
Fuel Injection System	Direct-injection

3. 開発目標

ブラジル市場でBICのFFVを開発することを目指し，次の①～③を開発目標とした。

① サブタンクレスであること。
② 環境によらずE22からE95の使用が可能であること。
③ E95使用時でもガソリン車やE22使用時と同等の始動性，走行性であること。

4. エタノールの特性とエンジン性能

Table 3にガソリンとエタノールの性状を，Fig. 1にガソリンとエタノールの蒸留特性を示す。これらからエタノールの以下の特性が確認できる。

① エタノールのオクタン価はガソリンより高い。
② エタノールの単位空気量当たりの発熱量はガソリンと同等である。
③ エタノールの気化潜熱はガソリンよりも多い。
④ エタノールは低沸点成分を含まず沸点が一定である。
⑤ エタノールは蒸気圧が低く一定である。

①～③から，エタノールを自動車用燃料として使用することで，出力向上の利点がある反面，④～⑤から，冷間での気化改善が課題であることが分かる。

Table 3 Fuel Property of Gasoline and Ethanol

		Gasoline	Ethanol
Chemical Formula	-	-	C_2H_5OH
Theoretical Air Fuel Ratio	-	14.6	9.0
Density	g/cm^3	0.75	0.79
Octane Number	Ron	91-100	111
Low Calorific Value	MJ/kg	44	27
	MJ/Air kg	3	3
Latent Heat of Vaporization	MJ/kg	0.30-0.38	0.84
Boiling Point	degC	30-200	78
Flash Point	degC	-43	13
Reid Vapor Pressure	kPa	50-80	20

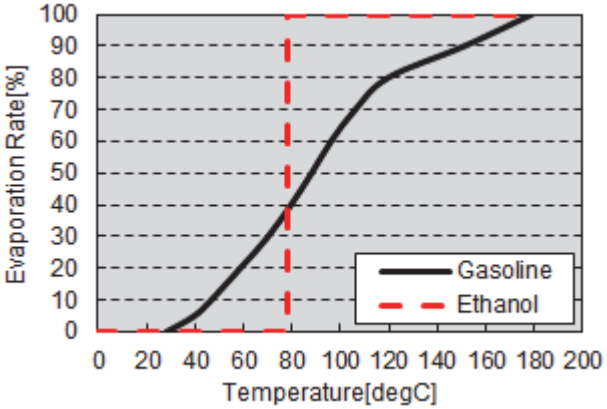


Fig. 1 Evaporation Properties of Gasoline and Ethanol

5. 冷間でのE95の気化改善

5.1 考え方

ガソリンは低沸点成分を含むため，冷間でも燃料噴射量を増やすことで混合気を最適な空燃比にすることが可能である。ただし，E95は低沸点成分を含まないため，ブラジルの最低気温である-5℃のような環境下では，燃料噴射量を増やしても最適な混合気にはならない。

そこで，E95の冷間での気化改善および最適な混合気形成を目的にTable 4の技術を織り込んだ。

(a) 圧縮行程時の混合気温度を高めるために，圧縮比を上げるとともにIVC（Intake Valve Close，吸気バルブ閉時期）を進め有効圧縮比を高めた。
(b) 燃料の微粒化とペネトレーションの低下によるシリンダ壁面への燃料付着を抑制するために，燃料噴射燃圧を最大20MPaまで高めた。
(c) E95が気化できるシリンダ内の温度と圧力の時に燃料噴射するために，圧縮行程噴射を行った。
(d) 混合気分布を最適化するために，圧縮行程－圧縮行程もしくは吸気行程－圧縮行程の分割噴射を採用した。
(e) シリンダ内の温度低下を抑制しE95の気化を向上させるために，電動スロットルの最小開度を制限した。
(f) シリンダ内の負圧を確保しE95の気化を向上させるために，電動スロットルの最大開度を制限した。

Table 4　Technology of Sub-Tank Less FFV for E95 Vaporization

	Rise Temperature	Atomize Fuel	Inject E95 when Cylinder Temp. is High	Reduce Adhering Fuel on Cylinder Wall	Optimize Air-Fuel Mixture
High Compression Ratio	(a)				
IVC Advance	(a)				
High Pressure Injection		(b)		(b)	
Compression Stroke Injection			(c)		
Divided Injection					(d)
Min. Guard of Throttle Angle	(e)				
Max. Guard of Throttle Angle		(f)			

次節から実際の自動車の運転状態に沿ってサブタンクレスFFVに織り込んだTable 4の技術ついて具体的に説明する。なお，自動車の運転状態は次の3つに分けた。

① 冷間始動性領域
② 冷間アイドル領域
③ 冷間走行性領域

5.2　E95での冷間始動性

（1）考え方

エンジンの圧縮行程中ではシリンダ内の温度と圧力は共に上昇する。そのため，圧縮比を上げIVCを進めることで，圧縮行程時のシリンダ内の温度と圧力はE95が気化できる状態まで上昇する。次に，SKYACTIV-Gの直噴エンジンである噴射時期の自由度を活かし，圧縮上死点付近のE95が気化できる時に燃料噴射することで，サブタンクレスでもE95での冷間始動が可能と考えた。

（2）圧縮比，IVCの選定

Table 5に示すようにFFVエンジンでは圧縮行程中の温度を上げるために圧縮比を上げるとともにIVCを進めた。

Table 5　Specifications of Gasoline Engine and Sub-Tank Less FFV Engine

		Gasoline Engine	FFV Engine
Fuel		Gasoline	E22-E95
Cylinder Type		In-line 4	In-line 4
Bore × Stroke[mm]		74.5 × 85.8	74.5 × 85.8
Displacement[cm^3]		1495	1495
Compression Ratio		12 : 1	14 : 1
Valve System		DOHC 16Valves Hydraulic In-VVT	DOHC 16Valves Hydraulic In-VVT
Valve Timing	IVO	ATDC8degCA	ATDC8degCA
	IVC	ABDC82degCA	ABDC60degCA
Injection System		Direct-injection	Direct-injection

Fig. 2にE95の蒸気圧曲線とTable 5に示すガソリンエンジンおよびFFVエンジンの圧縮行程時の温度と圧力変化を示す。

ガソリンエンジンではシリンダ内の温度と圧力はほぼE95の蒸気圧曲線を越えないが，FFVエンジンでは圧縮比を上げIVCを進めた効果でシリンダ内の温度と圧力はE95の蒸気圧曲線を大幅に越える。すなわち，FFVエンジンはE95が気化できる状態を作り出せることが確認できる。

また，Fig. 2の星印のポイントがシリンダ内の温度と圧力がE95の蒸気圧曲線を越えるポイントであり，FFVエンジンでは約BTDC40degCAである。

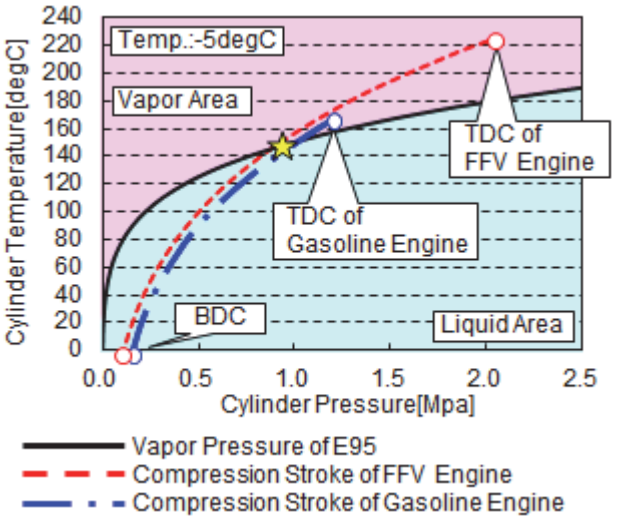


Fig. 2　Relationship between Ethanol Vapor Pressure and Cylinder Condition at Compression Stroke

（3）噴射時期の選定

FFVエンジンではBTDC40degCAより上死点寄りでE95が気化できる状態になることが確認できたため，このBTDC40degCAを基に噴射時期を選定した。

Fig. 3は冷間で当量比2のE95を噴射した時の気化率をCAE解析した結果である。

一括噴射では噴射時期が上死点に近づくに従い，気化率は高くなる傾向にある。しかし，噴射時期がBTDC20degCAになるとBTDC40degCAと同等の気化率であり，気化率は改善しない。これは噴射後の気化時間が不足するためである。

更に，シリンダ壁面の燃料付着を減らし，かつ気化率を高めるため，分割噴射についてもCAE解析を行った。Fig. 3に示すようにBTDC40degCAとBTDC20degCAの分割噴射は，BTDC40degCAの一括噴射よりも気化率が改善する。この結果からE95での冷間始動の噴射時期はBTDC40degCAとBTDC20degCAの分割噴射とした。

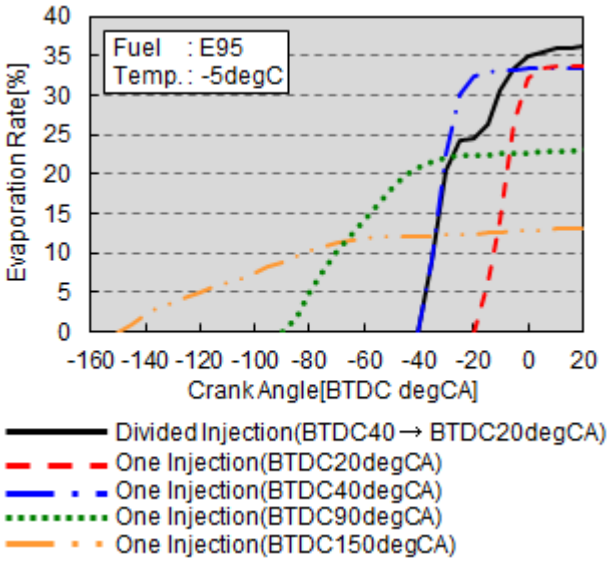


Fig. 3　Relationship between Injection Timing and Vaporization Rate

Fig. 4にAT車での始動性評価結果を示す。サブタンクレスでありながら，E95の始動性はブラジルの平均的な気温である20℃以上ではE22と同等であり，ブラジルの最低気温である-5℃でも始動時間は2秒以内である。すなわち，サブタンクレスFFVは燃料や温度に寄らず，迅速な始動性を実現できているといえる。

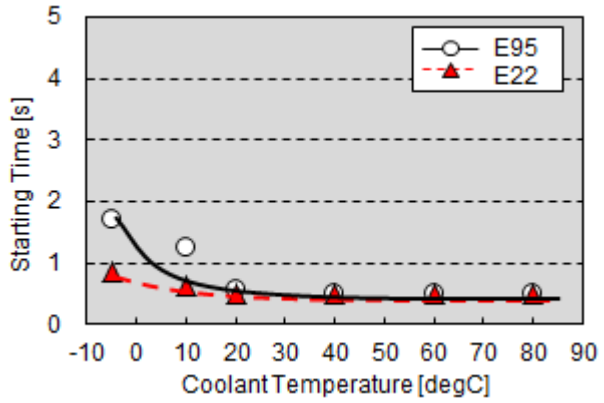


Fig. 4　Relationship between Coolant Temperature and Starting Timing of AT Vehicle

（4）プリイグニッションの抑制

圧縮比を高めIVCを進めることで，低オクタン燃料使用時や熱間時はプリイグニッションが発生する懸念がある。

そこで，まずノックコントロールシステムの信号から燃料のオクタン価を推定する制御モデルを作成した。次に，この推定オクタン価と吸気温，エンジン水温からプリイグニッションの発生を予測する制御モデルを作成した。

そして，始動時にプリイグニッションの発生が予測される場合は膨張行程噴射を行い，走行時にプリイグニッションの発生が予測される場合はIVCを遅らすとともに電動スロットルの最大開度の制限し，プリイグニッションを抑制した。

5.3　E95での冷間アイドル安定性

（1）噴射制御の最適化

一般的にガソリン車ではアイドルは吸気行程の一括噴射である。ただし，E95の冷間では吸気行程の一括噴射は気化率が低く，アイドル安定性が悪化する。そこで，噴射時期を吸気行程と圧縮行程の分割噴射とし，気化率の向上と混合気形成の最適化を行った。

（2）充填効率の最適化

Fig. 5はAT車の外気-5℃での冷間アイドル安定性評価結果であり，冷間アイドル時の充填効率と角加速度変動（回転変動）の関係を示す。角加速度変動が小さいほどアイドル安定性は良いことを意味する。Fig. 5から，E95の冷間は充填効率0.5前後ではガソリン同等のアイドル安定性であるが，低負荷と高負荷では共にアイドル安定性が悪化することが確認できる。低負荷でのアイドル安定性の悪化は，圧縮行程時のシリンダ内の温度が低くE95の気化が悪化するためであり，高負荷でのアイドル安定性の悪化は燃料噴射時のシリンダ内の圧力が高くE95の気化が悪化するためである。

そこで，　E95での冷間アイドルでは充填効率が0.5程度になるように点火時期を遅角するとともにアイドル回転数を最適化することで，E95でもE22と同等のアイドル安定性と耐エンスト性を実現した。

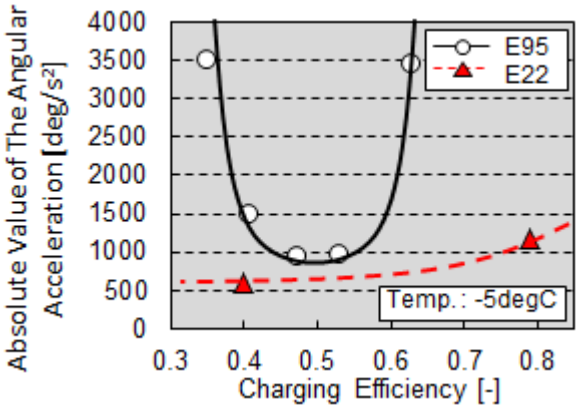


Fig. 5　Cold Idling Stability of AT Vehicle

5.4　E95での冷間走行性

（1）噴射制御の最適化

前節のアイドル安定性の改善と同様に，冷間での走行領域についても混合気形成の最適化を目的に，吸気行程と圧縮行程の分割噴射を採用した。

Fig. 6にE95の冷間での分割噴射の効果を示す。Fig. 6から分割噴射は一括噴射に比べ，燃焼変動率を表すCOV

（Coefficient of Variance：所定サイクル中の図示平均有効標準偏差を所定サイクル中の図示平均有効圧平均値で割った値）が下がり，かつ燃料噴射量も減っていること，すなわち，分割噴射により気化率の改善と混合気形成の最適化が図れ燃焼安定性が改善することが確認できる。

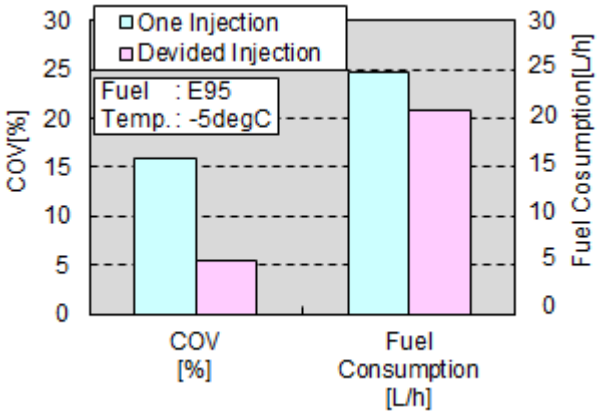


Fig. 6　Effect of Divided Injection with E95

Fig. 7に分割噴射及び一括噴射を行う領域を示す。吸気行程と圧縮行程の分割噴射は，気化率が低くなるエンジン水温が低く，かつエタノール濃度が高い領域のみで使用する。

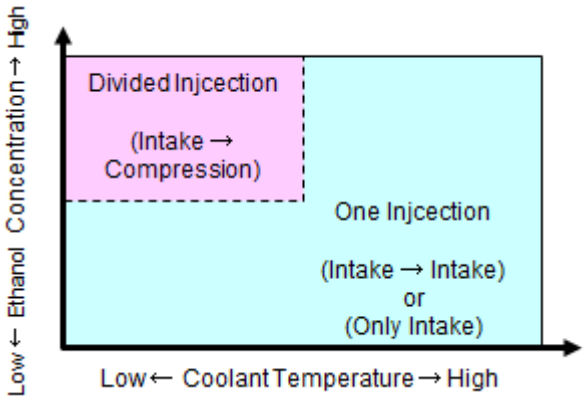


Fig. 7　Area of Divided Injection

（2）充填効率の最適化

サブタンクレスFFVは前述のとおり噴射制御により積極的に冷間でのE95の気化改善を行う。Fig. 8にE95での充填効率と失火度合いを表すLNV（Lowest Normalization Value：所定サイクル中の図示平均有効圧最小値を所定サイクル中の平均有効圧平均値で割った値）の関係を示すが，これらの噴射制御による気化改善技術を織り込んでも，低負荷及び高負荷では燃焼安定性が悪化することが確認できる。

低負荷でのLNVの悪化は，圧縮行程時のシリンダ内の温度が上昇せずE95の気化が悪化するためであり，高負荷でのLNVの悪化は，燃料噴射時のシリンダ内の圧力が高くE95の気化が悪化するためである。

そのため，E95使用時はエンジンの運転範囲をFig. 8の赤線で示した領域に制限するために，電動スロットルの最小開度と最大開度に制限を設定し，燃焼安定性が確保できる領域でのみ運転するようにした。なお，この充填効率の制限はエンジン水温の上昇に伴い減少する。

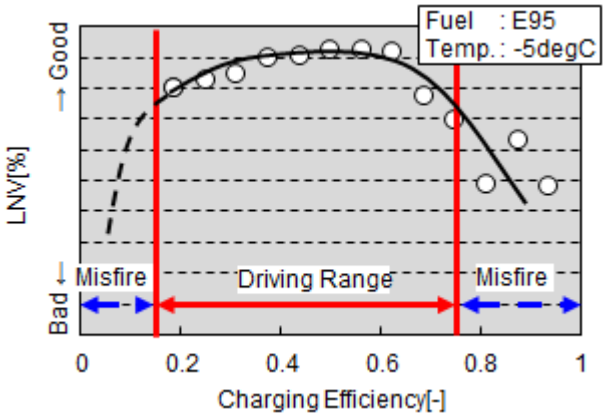


Fig. 8　Cold Combustion Stability of E95

Fig. 9にMT車の外気-5℃での冷間走行評価結果を示す。Fig. 9から，サブタンクレスFFVはE95でも冷間始動直後からアクセル開度に寄らずE22同等の加減速ができることが確認できる。すなわち，サブタンクレスFFVは燃料や温度によらず応答性の良い走行性能を実現できているといえる。

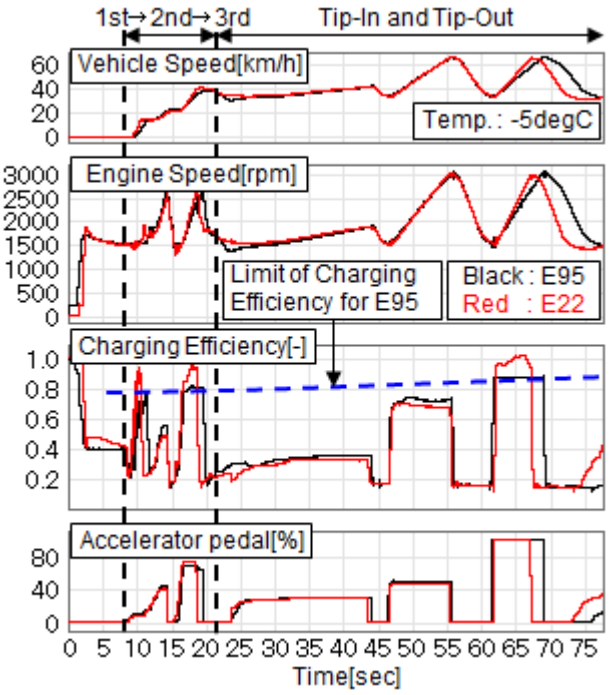


Fig. 9　Cold Driveability of MT Vehicle

6. エンジン制御

6.1　エタノール濃度推定制御

E22とE95では理論空燃比が異なるため，E95使用時はE22使用時よりも燃料噴射量を増やさないと理論空燃比にはならない。また，FFVエンジンはガソリンエンジンと同様に，LAFS（Linear Air-Fuel Ratio Sensor）を用いて理論空燃比にフィードバック制御している。そこで，この燃料フィードバック制御の増減量から燃料タンク内のエタノール濃度を推定する。

Fig. 10に濃度推定制御の概要を示す。燃料給油時に燃料タンクのレベルゲージの出力を用いて給油判定を行い，この給油判定後にLAFSを用いた濃度推定制御が作動する。

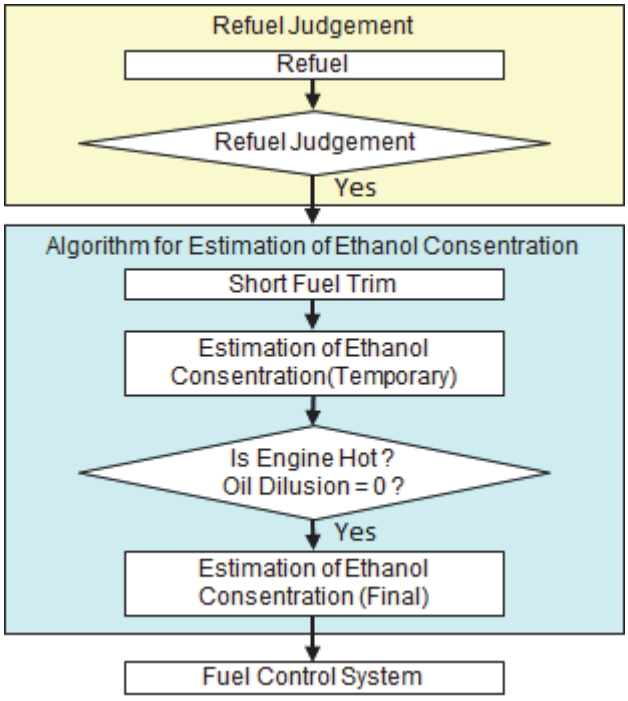


Fig. 10　Algorithm for Estimation of Ethanol Concentration

6.2　オイル希釈量推定制御

E95では冷間での燃料増量率が多いため，オイル希釈量（エンジンオイルに希釈している燃料量）がガソリン車よりも多い。暖機が進むと，このオイル希釈した燃料が蒸発するとともに，蒸発した燃料がシリンダ内に流入し空燃比がリッチとなる。すると，LAFSによるフィードバック補正は燃料を減量する側に補正し，濃度推定制御はアルコール濃度を低濃度と誤学習する。この誤学習を回避するためには，オイル希釈量を正確に推定する必要がある。

そこで，まず次の2つの制御モデルを作成した。

① 燃料噴射量とエンジン水温からエンジンオイルに混ざる燃料量を推定する制御モデル

② 推定エンジン油温と推定クランクケース内圧からエンジンオイルから蒸発する燃料量を推定する制御モデル

そして，この2つの制御モデルを使い燃料希釈量と燃料希釈量がなくなるタイミングを推定し，濃度推定制御の精度を改善させた。

7. おわりに

サブタンクを用いることなくE95の冷間での気化改善と燃焼改善を行い，開発目標どおりE95でもガソリン車と同等の始動性，走行性能を有するサブタンクレスFFVが開発できた。

また，エタノール燃料は気化潜熱により吸気温度が低下することで充填効率が上がり，オクタン価上昇によりノックを回避できるため，出力が向上する。

すなわち，今回開発したサブタンクレスFFVは，冷間はガソリン車同等，温間はガソリン車以上の走行性を実現できるFFVである。更なる改善を行い，早い時期での市場導入を目指す。

参考文献

(1) 齋木ほか：ブラジル向けCIVIC用1.8Lフレックスフューエルエンジンの開発，Honda R&D technical review Vol.19，No.1，pp.13-19（2007）

(2) 中島：FFV用エンジンにおける低温燃焼の改善，Honda R&D technical review，Vol.22，No.2，pp.126-133（2010）

(3) 相川ほか：高濃度エタノール混合ガソリン（E85）の気化特性とエンジン低温始動性，Honda R&D technical review，Vol.21，No.1，pp.170-177（2009）

■著　者■

古市 展之

島本 祥

西尾 貴史

渡辺 友巳

大橋 美貴典

安田 京平

論文・解説

36

エンジンの省燃費を支えるトライボロジ解析技術
Tribology Analysis Technology Supports Engine Fuel Economy

栗栖　徹*1　木村　昇平*2　白井　裕久*3
Toru Kurisu　Shohei Kimura　Hirohisa Shirai
菅近　直範*4
Naonori Kanchika

要　約

エンジンの燃費改善において，機械摩擦抵抗の低減は，重要な課題である。SKYACTIV技術の開発においても，エンジンの燃費改善のために設定した制御因子のうちの一つであり，高い目標をかかげ，その低減に取り組んだ。機械摩擦抵抗低減には，さまざまな運転条件での潤滑状態を把握し，潤滑油消費をはじめ関連する信頼性やNV性能を損なうことなく油膜をコントロールすることが重要である。そのために，マツダでは，トライボロジ領域へのCAE活用を積極的に進めており，流体潤滑理論や弾性流体潤滑理論を基に内製したシミュレーションプログラムをはじめ，高機能の市販アプリケーションソフトなど種々の解析ソフトを駆使して潤滑メカニズムの解明や潤滑状態の最適化に活用している。本稿では，エンジンのさまざまなトライボロジ解析技術を紹介するとともに，それらをどのように活用してエンジンの燃費低減に結びつけたか紹介する。

Summary

Reduction in the friction loss of Internal Combustion Engine (ICE) is a key for fuel efficiency. In the SKYACTIV TECHNOLOGY development, this was one of the seven control factors established for the improvement in fuel efficiency, which was addressed with a high target. To reduce the machine friction loss, recognizing the lubrication status at various driving conditions, and controlling oil films without ruining NVH performance, reliability of lubricant consumption and others is important. For that purpose, Mazda has been promoting the application of CAE to tribology areas. Clarifications of lubrication mechanisms and optimization of lubrication status are performed by various analysis softwares such as high function applications on the markets and internaly-made simulation programs based on fluid lubricant theory and elastohydrodynamic lubrication theory. This paper introduces various tlyporogy analysis technologies of engin and how to use them for the reduction in fuel cunsumption of the SKYACTIV engine.

1. はじめに

近年，省燃費の観点からハイブリッド車や電気自動車など自動車の動力源としてモータの採用が急速に増加してきている。エンジンは，比出力の高さや経済性などその優れた特性から20世紀の初頭から自動車の動力源の大半を占めてきた。2020年時点においてもグローバル市場における主要な動力源として，使われ続けると考えられる。したがって，自動車の燃費を支配するエンジンには，一層の燃費率の向上が必要で，特に実用走行において寄与の大きい摩擦抵抗損失低減への期待が大である。

自動車のエンジンは，その内部で燃料を燃やし，発生する熱を運動エネルギに変換する内燃機関である。内燃機関はFig. 1に示すように，燃焼によって発生する熱エネルギの大部分が排気損失，冷却損失，ポンピング損失，機械抵抗損失として捨てられている。自動車を走らせる仕事として有効に活用できているエネルギは，これまでは最大でも3割程度であった。

内燃機関の熱効率改善には，これらの損失を低減し，有効仕事の割合を高めることが必要である。そのために制

*1～3　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.
4　パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

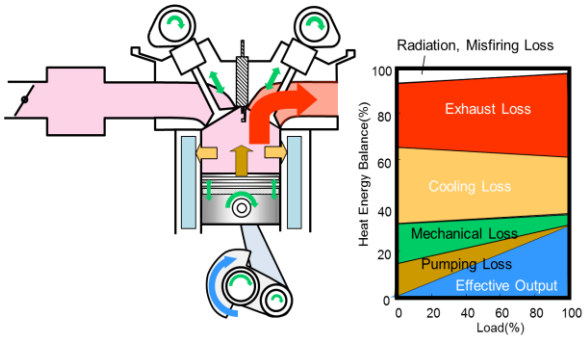


Fig. 1　Status of ICE Efficiency

御できる因子として，膨張比（圧縮比），比熱比，燃焼期間，燃焼タイミング，壁面熱伝達，ポンピング損失，機械抵抗（摩擦抵抗）の7つに分類できる（Fig. 2）。SKYACTIV-G ガソリンエンジン 及び SKYACTIV-D ディーゼルエンジンの開発においては，これらの制御因子を理想に近づけて究極の熱効率を実現していくことを目指した。

以下，この制御因子のうち摩擦抵抗低減のためのキー技術として，エンジンのSKYACTIV技術の開発で活用したトライボロジ解析技術について紹介する。

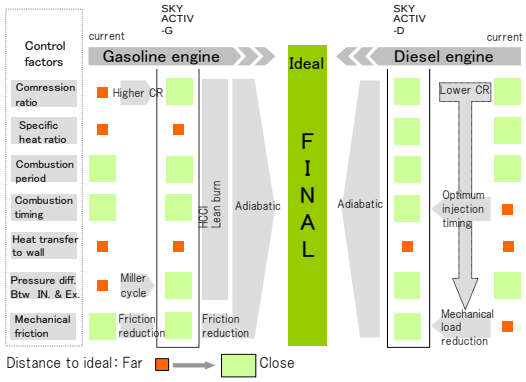


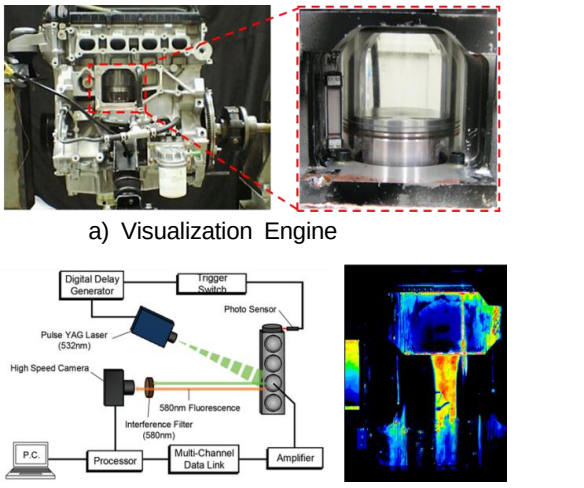
Fig. 2　Ideal Vision of 7 Control Factors

2. トライボロジ解析技術とエンジンへの適用

2.1　トライボロジ解析技術

エンジンには摺動部分が多く，Table 1に示すように機械抵抗をはじめ，焼き付きや摩耗，異音などトライボロジに関連する諸問題が複雑に絡み合っている。これらの問題をバランスさせ，最も低摩擦で異音や信頼性問題を引き起こさない設計が必要である。そのため，マツダのエンジン開発におけるトライボロジ領域でも，シミュレーション解析による予測検討が不可欠になっている。潤滑油膜のEHL（Elasto-Hydrodynamic Lubrication）シミュレーションをはじめ，構造解析，流体解析，機構解析など市販のソフトや開発した内製ソフトを駆使して種々の解析を連成したり組み合わせたりすることによって，要素技術開発から商品開発にいたるまで，さまざまな運転条件での潤滑状態を正確に机上予測し，最適な潤滑状態で運転できる仕様を決定している。

そのために，大学や部品メーカなどに協力いただいて，精度検証のための先端の実験計測を実施し，予測結果の精度を検証して，どの程度の予測精度が得られるのか把握しながら，実用に供している。Fig. 3は，鳥取大学との共同研究により，ピストンスカート部の油膜をLIF（Laser Induced Fluorescence）で可視化して計測した例である[1][2]。



a) Visualization Engine　b) Visualization System　c) Visualized Oil Film

Fig. 3　Visualization of Piston Skirt Oil Film Provided by Tottori University

2.2　ピストン及びピストンリングの最適化

ピストンは，エンジン摩擦損失の約3割を占め，燃費への影響が大きいことから，その摩擦低減が重要である。ピストン摩擦には，スカート部の摩擦とピストンリングの摩擦とがあるが，それらの寄与はおよそ半々になっている。

Table 1　Relation of Engine Sliding Bearings and Its Tribological Problems

Parts	Portion	Friction Loss	Seizure	Wear	Strength	LOC	BB	Impact Noise
Piston	Piston Skirt Bearing	S	S	M	M	M	N	S
	Piston Ring Bearing	S	M	M	N	S	S	S
	Piston Ring Groove	N	N	M	M	M	M	N
	Piston Pin Bearing	W	M	S	M	N	N	M
Crank	Crankpin Journal Bearing	M	S	S	M	N	N	M
	Crank Main Journal Bearing	M	M	M	M	N	N	S
Valvetrain	Cam vs. Tappet	S	M	S	M	N	N	S
	Camshaft Bearing	W	W	W	M	N	N	W
	VVL vs. Cam	N	M	S	M	N	N	N
CamDrive	Timing Chain	W	W	S	S	N	N	S
Others	Balancer Shaft Bearing	N	W	W	W	N	N	S
	Injector Needle	N	S	S	N	N	N	M
	Injector Pump Bearing	N	S	S	N	N	N	W

Relationship S : Strong　M : Medium　W : Weak　N : Nothing

（1）ピストンスカート

ピストンスカートは，ピストン往復動における首振り挙動を安定させ，姿勢変化時のライナへの衝突を緩和してピストンスラップと呼ばれる冷間時の衝撃音をはじめ，焼き付きや摩耗を抑止したうえで，摩擦抵抗を最小化するすべり面形状（プロフィール）にすることが必要である。Fig. 4は，最適化プログラムとピストンの潤滑挙動解析プログラムを組み合わせて，それらの特性をバランスさせた最適なスカートプロフィール形状を設定した例である。

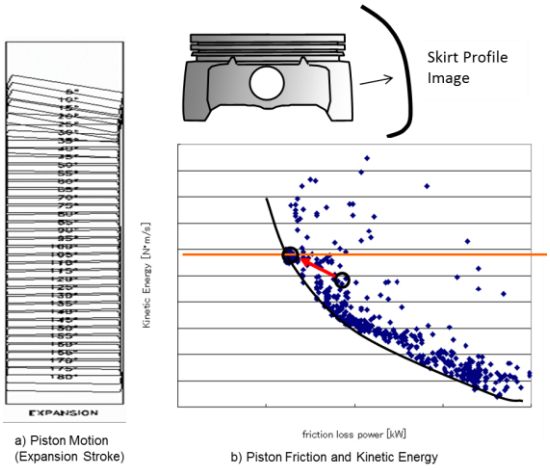


Fig. 4　Optimization of Piston Skirt Profile

この解析では，数百通りのプロフィール形状について摩擦損失や衝突エネルギを計算し，その中から最もバランスのとれた形状を選択することによって，スカートの局所で生じやすい強い当たりを緩和し，境界潤滑状態あるいは金属接触を防ぐことによって，摩耗や焼き付きを防止するとともに，摩擦損失を低減した（Fig. 5）。

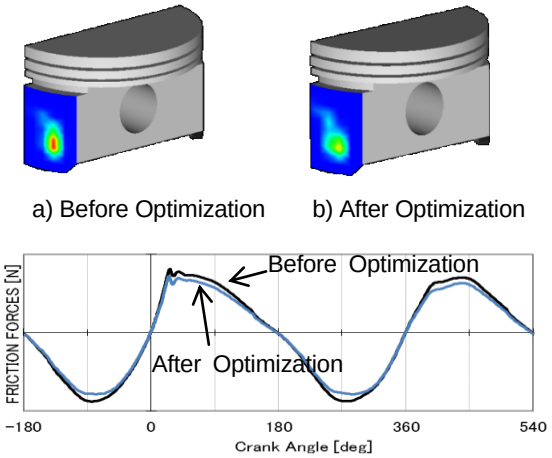


Fig. 5　Improvement of Piston Skirt Profile

（2）ピストンリング

ピストンリングは，摩擦低減の観点から，薄幅化や張力低減が進められてきている。しかしながら，張力を下げると潤滑油消費の増大につながりやすく，個々のエンジンの潤滑油消費メカニズムに適った方法で張力を下げる必要がある。ピストンリングが関係する潤滑油消費のメカニズムには，①トップリングがシリンダライナ表面にかき残した油膜が高温の燃焼ガスにさらされて蒸発するもの，②トップリング合口部から燃焼室への吹き返しガスに乗って運ばれるもの，③トップリング摺動面とライナとの間にできたすきまから燃焼室へのガスの吹き返しに乗って運ばれるもの，④トップリングの背面を通って燃焼室に運ばれるもの，⑤トップリングによってかき上げられるもの，がある。これらを全て切り分けて定量的に予測することは困難であるが，ガスの流れや油膜厚さを計算することによって，ある程度潤滑油消費の良し悪しを予測することが可能である。

Fig. 6は，セカンドランド圧力の計算結果を実測と比較した事例である。この解析に用いたシミュレーションでは，モデルの改良によってそれまで実測と合っていなかったランド圧力の予測精度が大幅に向上し，リング部からのガス流れを精度よく求めることが可能になった。

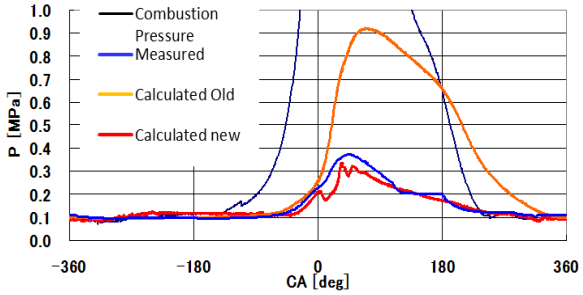


Fig. 6　Comparison of Second Land Pressure

SKYACTIV-G ガソリンエンジン，SKYACTIV-D ディーゼルエンジンでは，このモデルを用いてリングの合口寸法やランド部の形状検討を行い，燃焼室へのガスの吹き返しを抑え，潤滑油消費が少ない仕様を設定することができた。Fig. 7は，先行するリングによる油膜のかき残しを考慮して各リングの油膜厚さMOFT（Minimum Oil Film Thickness）を計算した事例である[3]。これまでの解析は，先行リングのかき残しの考慮が不十分であり，リングのオイル掻き作用が十分評価できなかった。このようなより実際に近いモデルを使った計算を駆使することによって摩擦抵抗と潤滑油消費の観点から各リングの作用を明らかにし，リング摺動面プロファイルを最適化するとともに張力を最小化した。

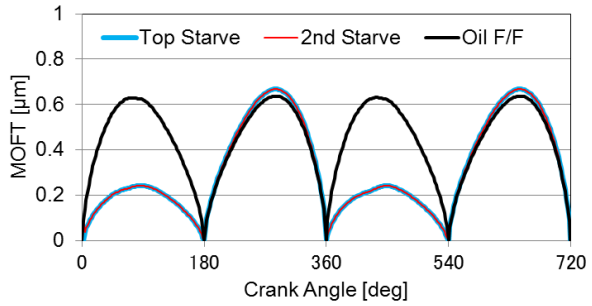


Fig. 7　Piston Ring Oil Film Analysis Example

2.3　シリンダライナ変形の抑制

摩擦抵抗の小さい低張力リングでも，オイル消費を少なくするにはシリンダライナのいびつな変形を抑え，リングをライナに沿いやすくすることが必要である。そこで，ライナ上部の高次変形を抑えやすいオープンデッキ構造を採用した。しかし，冷却の不均一やガスケット面圧の不均一によっていびつな変形を起こすため，シリンダブロックの変形解析を実施し，ライナの高次変形を抑制した。Fig. 8は，ライナ変形を元にリングによるライナ上のかき残し油膜厚さを計算した結果である。この計算結果を元にブロック形状などの見直しを行い，高次のライナ変形を抑制することによって，低張力リングでもオイル消費を抑えることができた。

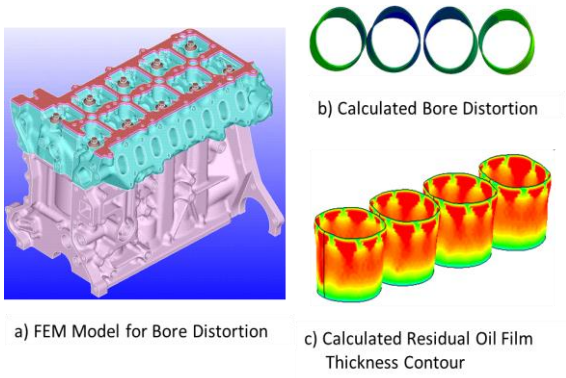


Fig. 8　Cylinder Bore Distortion Analysis

2.4　クランクシャフトの抵抗低減と摩耗防止

（1）クランクシャフトの抵抗低減

エンジンの軸受には，主にすべり軸受が使われており，その代表がクランク軸受である。クランク軸受は，燃焼室圧力やピストンの慣性力などによる変動荷重を受けるため，軸心が軸受すきま内で複雑に動き回り，油膜厚さが絶えず変動している。クランク軸受は，焼き付きなどの問題を起こしやすく，信頼性開発の主要テーマの一つである。そのため，古くから流体潤滑理論による油膜厚さの解析が行われてきている。しかし，軸の曲げ・ねじりによるたわみや軸受ハウジングの弾性変形などの影響が大きく，精度のよい設計にはEHLによる解析が不可欠である。マツダでは20年ほど前からEHL解析プログラムを開発し，順次活用を進めてきた。

Fig. 9は，EHLで表面粗さを考慮するための修正レイノルズ方程式と，その式を使って解析したクランクピン軸受の油膜解析結果の1例である。

Modified Reynolds Equation

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\phi_x \frac{h^3}{12\mu_0 e^{\alpha p}}\frac{\partial p_h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\phi_y \frac{h^3}{12\mu_0 e^{\alpha p}}\frac{\partial p_h}{\partial y}\right)=\frac{U}{2}\frac{\partial h}{\partial x}(1+\alpha\phi_s)+\frac{\partial h}{\partial t}$$

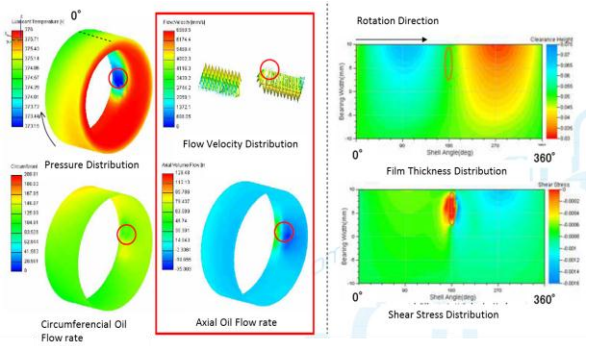


Fig. 9　Calculation Result of Crank-Pin Bearing Lubrication Film

Fig. 10は，精度検証のため，油膜温度の計算結果を実測の軸受温度と比較した結果で，この解析によって2℃程度の誤差で温度を予測できることがわかった。

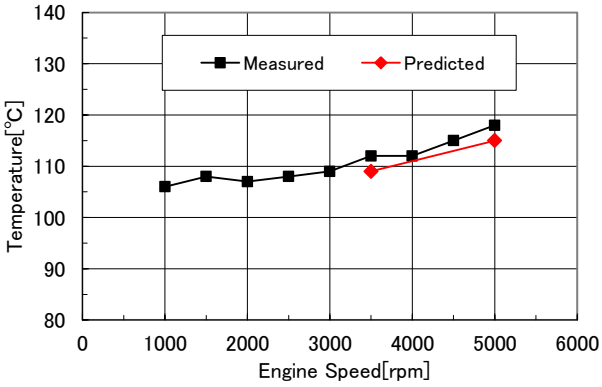


Fig. 10　Comparison of Crank-Pin Bearing Temper

SKYACTIV-D 2.2Lにおいてクランク軸の軸受の摩擦抵抗を減らすため，軸受部の細径化を行っているが，軸受投影面積の減少によって面圧が高くなり，開発初期にピッチングが発生した。また，偏当たりによる摩耗・焼き付きの未然防止も必要なため，軸受油膜の解析を実施して，実働時の面圧分布を均一化し，油膜厚さを確保することによって，ピッチングの発生防止とともに焼き付きや摩耗も防止した。

（2）アイドル停止時のクランク軸受摩耗の防止

燃費改善としてアイドル停止を行うと，停止，起動のくり返しによって，クランク主軸受での金属接触の頻度が増加し，凝着による摩耗が起きやすくなる。そのため，起動時の軸受油膜厚さの予測が必要となるが，速度が非常に遅く金属接触が起きる条件でレイノルズ方程式を解くと，計算時間が非常に長くなるうえ，発散してしまい解が得られない場合が多い。そこで，中原の方法をベースに，油膜厚さと摩耗を予測するプログラムを開発した[4]。このプログラムによって摩耗量の予測が可能となり，摩耗の進行が緩やかな仕様を設定することができた（Fig. 11）。

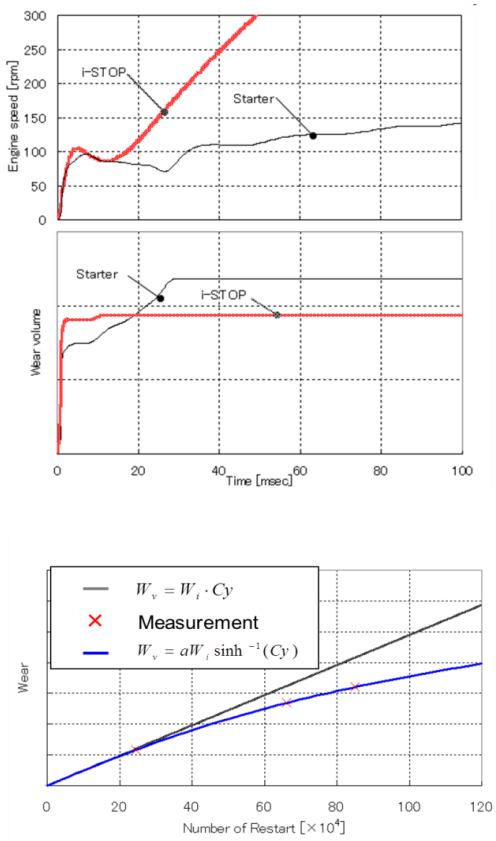


Fig. 11　Calculation Result of Crank Bearing Wear

2.5　動弁系の抵抗低減と摩耗防止

（1）ローラフォロワ式可変動弁機構の抵抗低減

冷間時の失火防止のため，SKYACTIV-D 2.2Lに採用した排気弁二度開きによる吸気行程EGRシステムには二段切り替え式フィンガフォロワを使用している。しかし，スペース上の制約からカム～フォロワ間のすべり面幅が狭く，摩耗に対して厳しくなっている。それゆえ，カムの面圧及びEHL油膜解析を実施して十分な油膜厚さを確保し，金属接触を回避することによって摩耗を防止し，低機械抵抗のローラ＆スライディング式の2段切り替えフォロワを実現した（Fig. 12）。

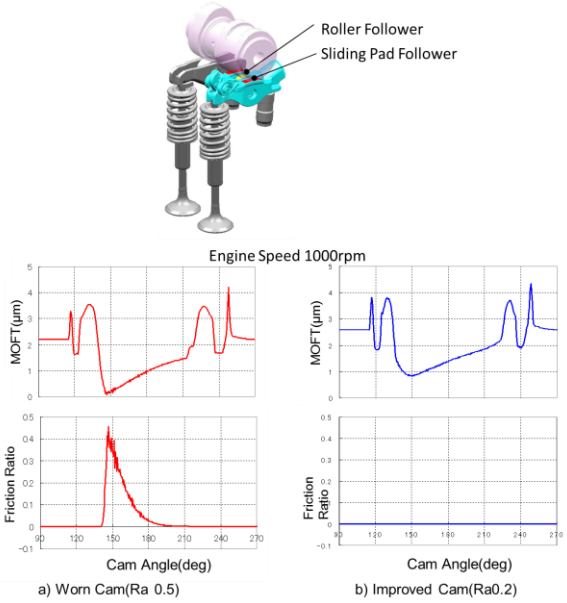


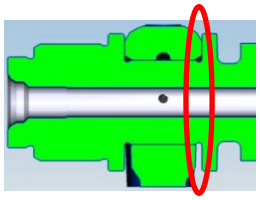
Fig. 12　Calculated Oil Film Thickness at Cam-Follower Contact

（2）カムシャフトスラスト軸受摩耗の防止

同じエンジンで，開発初期にカムシャフトのスラスト軸受の摩耗が発生した。製造誤差や熱変形などわずかなアラインメントの狂いによって，カムシャフトにスラスト力が発生し，油膜切れが起きていることが推測された。そこで，非定常レイノルズ方程式による油膜モデルを解き，スラスト軸受の解析を行った。Fig. 13は，スクイーズ効果による油膜形成を検討した結果で，軸受面を油膜形成しやすい形状にすることにより，油膜保持時間を長くして摩耗を防止することができた。

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial r}\right)+\frac{h^3}{12r\eta}\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{d\theta}\right)=\frac{\omega}{2}\frac{\partial h}{\partial \theta}+\frac{\partial h}{\partial t}$$

Reynolds Equation in Polar Coordinate System



Cam Shaft Thrust Bearing

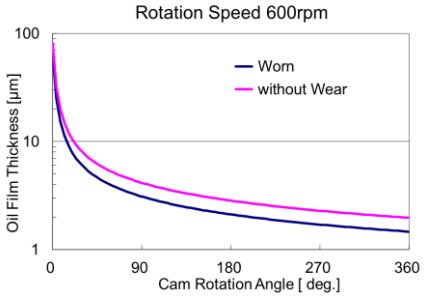


Fig. 13　Camshaft Thrust Bearing Oil Film Thickne

2.6　潤滑システムの抵抗低減

SKYACTIV-G，SKYACTIV-D エンジンでは国内初の技術となるオイルポンプ吐出圧の最適制御を採用した（Fig. 14）。その特徴を以下に示す。

- エンジン回転数／負荷／暖機状態に応じて吐出圧を電子制御で2段階に切り替える
- メインギャラリ油圧を直接検出してフィードバックすることにより吐出圧制御動作の無駄を排除する

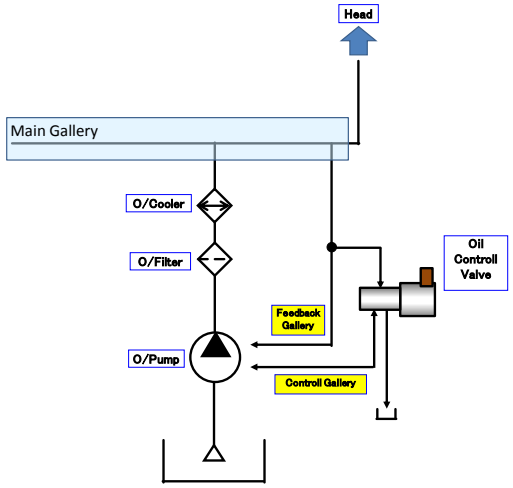


Fig. 14　Oil Supply Circuit Diagram

オイルポンプの吐出圧を設定するために，潤滑油供給回路をモデル化（Fig. 15）して，実測油圧との合わせ込みを行い，各部への必要油量を供給するための要求油圧の検討を行った。

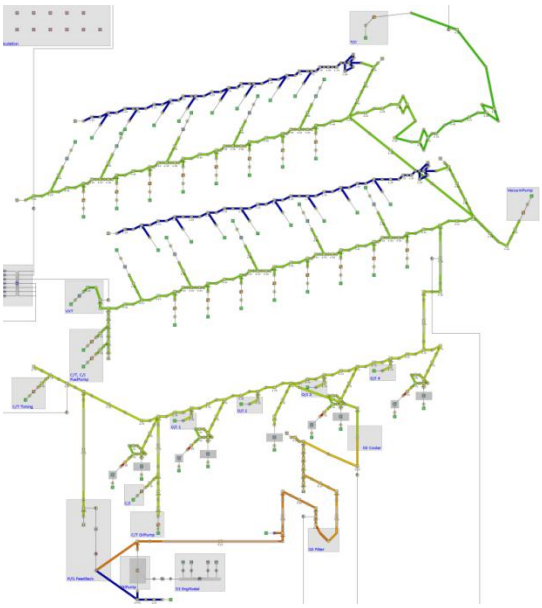


Fig. 15　Oil Supply Circuit Model

この検討により，高回転と低回転でのオイルポンプの吐出仕事をそれぞれ最適化することができ，機械抵抗を改善した。オイルポンプ駆動力を新旧エンジンで比較した結果をFig. 16に示す。従来に比べ全回転域で幅広く駆動力が低下している。

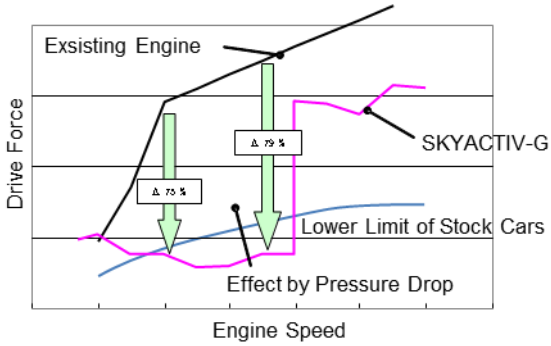


Fig. 16　Comparison of Oil Pump Drive Force

3. おわりに

ここに紹介したように，さまざまなトライボロジ解析を駆使することによりSKYACTIV-G，SKYACTIV-D エンジンの摩擦損失を低減し，燃費を改善してきた。今後も，究極の高効率なエンジンを目指して更なる機械抵抗低減を行うために，トライボロジ解析技術の活用を進めていく。

参考文献

(1) 大澤ほか：ピストンスカート部の潤滑油膜挙動の可視化と膜厚測定，自動車技術会 計測・診断部門委員会企画シンポジウム 「多様なニーズに対応する計測・診断技術」講演論文集（2011）
(2) 中川ほか：ピストンスカート部における潤滑油膜厚さの定量測定精度向上とクロスハッチ加工の有無が油膜に及ぼす影響，日本機械学会中四国支部第50期講演会前刷集（2012）
(3) 栗栖ほか：ピストンリング部の油膜可視化と油膜厚さ計算による潤滑油消費メカニズムの考察，日本機械学会年次大会前刷集（2013）
(4) 宮内ほか：境界潤滑を考慮した主軸受け弾性流体潤滑計算手法の研究，自動車技術会論文集，298-20075017（2007）

■著　者■

栗栖　徹

木村　昇平

白井　裕久

菅近　直範

論文・解説

37

リアルワールドでの安全性向上に向けた取り組み
Our Activities for the Real-World Safety Enhancement

神本　一朗*1　河口　健二*2　吉村　美枝*3
Ichiro Kamimoto　Kenji Kawaguchi　Mie Yoshimura

宮島　陽一*4　柴原　多衛*5　成川　岳宏*6
Yoichi Miyajima　Taei Shibahara　Takahiro Narikawa

要　約

日本政府の目標「2030年世界一安全で円滑な道路交通社会」を達成するため，政府，県警など地方自治体，各自動車メーカなどはさまざまな努力をしている。本稿では，交通事故時の傷害低減のマツダの取り組みについて，リアルワールドでの事故の統計分析から，ミクロ事故データを用いての個別の事故の再現と対策検討までの一連のプロセスを解説する。また，具体例として，前面衝突時の後席高齢者乗員の傷害を取り上げ，車両挙動と乗員挙動の事故再現や，傷害に影響する要因を分析，傷害低減のための知見を得ることができた。

Summary

In order to achieve the Japanese government's target, "The safest and smoothest road traffic society in the world by 2030", various efforts have been made by the local and central governments, automotive manufacturers and others. This paper introduces Mazda's efforts including a comprehensive accident research covering from statistical analyses to in-depth study such as accident reconstructions and countermeasure considerations. In the study, rear-seating elderly occupants' injury cases at frontal collisions were focused on, and the reproduction of vehicle and human behaviors at the accidents and the analyses of the factors affecting injuries are explained. The findings of this study provide us the hints leading to the injury/fatality reduction from the perspective of a human body.

1. はじめに

日本では，法規制の強化や独立行政法人自動車事故対策機構（NASVA）による衝突安全性能の評価（New Car Assessment Program, NCAP）をはじめ，さまざまな研究により，より安全な自動車開発が促進されてきている。このような活動の効果もあり，交通事故による死者は2000年をピークに下がり続けており，政府は戦略市場創造プランの中で，2030年に世界一安全で円滑な道路交通社会を実現すべく施策を検討している。このような状況の中，マツダも自動車メーカとして，お客様の事故や傷害を低減できる商品を開発してきている。

SKYACTIV 技術を織り込んだCX-5とアテンザは，日本の新型車の安全性能評価JNCAPでファイブスター賞を受賞するなど，各国アセスメントで高い安全性能を持つことが実証されている。NCAPは代表的な事故形態での評価で，その傷害低減効果は上がっているが，一方で，リアルワールドでのさまざまな事故形態の対応も必要で，マツダでは，NCAPモード以外の死亡重傷者等を低減することにも取り組んできている。このためには，事故実態の分析，事故件数の低減技術，事故時の乗員や歩行者の傷害低減技術などが必要である。本稿では，これまでの市場事故分析による成果と現在の傷害低減技術に関する取り組みを紹介する。

2. これまでのリアルワールド分析とその成果

2.1　マツダ車関与事故の分析

本稿で示す日本における交通事故の統計分析は，(公財)交通事故総合分析センター（ITARDA）の集計結果に基づいて行っている。2013年の事故データを用いて，マツダ車が関与した死亡重傷事故の死亡重傷当事者の状態別内訳を示したものがFig. 1で，マツダ車乗員が22%，歩行者が21%，相手四輪が18%，自転車が17%，原動機付き自転車が11%，自動二輪11%となっている。

*1～6　衝突性能開発部
Crash Safety Development Div.

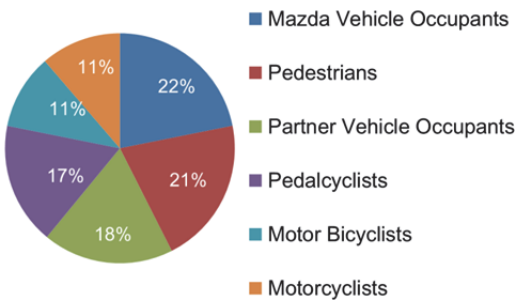


Fig. 1　Configuration Rate of Type of Fatally and Seriously Injured Participants in Accidents Involved with Mazda Passenger Car (2013)

Fig. 2はマツダ車乗員の死亡重傷事故における衝突部位の比率を示している。前，右前，左前の前方三つを合算すると64%を占め，死亡重傷事故の衝突部位の中で最も多くなっていることが分かる。

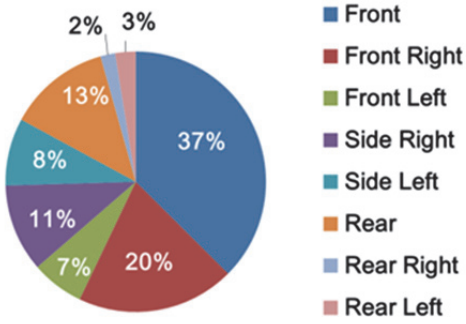


Fig. 2　Configuration Rate of Crash Area of Mazda Vehicle with Fatally and Seriously Injured Occupants of Mazda Passenger Car (2013)

2.2　これまでの事故分析の成果

前節のような状況を踏まえ，マツダは自車乗員，歩行者，相手側乗員の傷害低減に取り組んできた。

例えば，前面衝突事故の脚部傷害について，フットレストやトーボードの衝突時の後退量と大腿骨荷重などの影響を定量的に明らかにしてきた[1]。この知見は，CATARC（China Automotive Technology & Research Center）でのCNCAPの基準策定に参考とされている。また，歩行者事故での死亡重傷者低減のためには，JNCAPで評価する歩行者頭部保護性能の向上が効果的であることを定量的に明らかにし[2]，引き続き事故時の傷害低減に向け歩行者保護性能改善に取り組んでいる。更に，保有台数1万台当たりの歩行者死傷者数には，フロントウインドウ越しに見渡せる幅広さの指標である「見開き角」の影響があることも明らかにした[3]。見開き角の拡大は既に商品に織り込まれ，歩行者事故低減を図ってきている。

3. 傷害低減プロセス

3.1　事故分析

リアルワールドでの安全性向上には，衝突被害軽減ブレーキやAT誤発進抑制機構等のActive Safety中心の事故発生率低減，エアバッグやシートベルト等のPassive Safety中心の事故時傷害低減，事故発生時の傷害予測や緊急通報等事故後の対応の三つの領域がある。本稿では事故時の傷害低減に焦点を当て，そのプロセスをFig. 3に示す。

まず，市場事故の統計データや技術文献により，追突や正面衝突等の事故類型や衝突部位などの視点から，市場全体の事故の状況を見える化して対応の優先順位をつける。

次に，その優先度の高い領域において，死傷事故件数の大小に影響を及ぼす因子を統計的分析により明らかにする。

そして，個々の事故の詳細調査されたミクロ事故データに基づいてのミクロ事故分析を行う。具体的には，事故現場周辺に残ったブレーキ痕や車両変形状態をはじめ事故調査情報を手掛かりに，衝突の速度や角度を含む事故前後の一連の車両挙動を分析する。この車両挙動を基に，事故車両に残ったインパネやシートベルトについた傷や変形などの痕跡から，実際に発生した傷害，乗員の挙動，乗員に加わった衝撃などの傷害メカニズムを推定する。

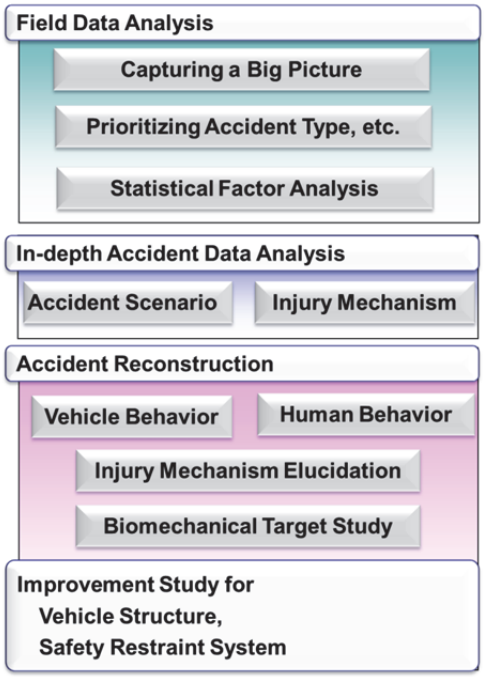


Fig. 3　Injury Reduction Process

3.2　事故再現

傷害低減策の検討のためには，前述の詳細なミクロ事故分析を実施し，実際に発生した事故をできるだけ忠実にコンピュータ上に再現し，事故や傷害のメカニズムを把握することが不可欠であり，そのための主な技術は以下の二つがある。

（1）車両挙動シミュレーション技術
事故発生時の周辺環境情報，衝突速度，衝突部位，車両諸元などの情報を基に，DSD社開発の交通事故シミュレーションソフトPC-Crash（ver.9.0）を活用して車両挙動を再現し，これで得られた車両の加速度や角速度データを（2）の人体シミュレーションに適用する。
（2）人体シミュレーション技術
車両挙動シミュレーション技術で再現した車両挙動データを用いて，人体の挙動や傷害の発生メカニズム検討のためにTASS社製のMADYMOヒューマンモデル（以下ヒューマンモデル）を用いた。これは，挙動に関わる人体の構造を離散化したマスと非線型の力学的特性を持つバネの集合としてFig. 4のようにモデル化されている。また，このモデルはPMHS（Post Mortem Human Surrogate，人の供試体）テストやボランティアテストによって高い人体再現性が確認されている[4],[5]。

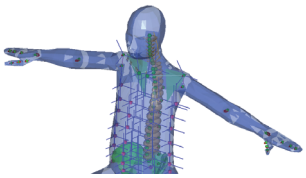


Fig. 4　Human Structure Modeled by Lumped-masses and Springs with Non-linear Stiffnesses

個別の事故再現では，性別や体格をはじめ，事故時の乗員の条件をできるだけ忠実に再現することが重要である。本検討ではミクロ事故データから得られる乗員の性別，身長，体重を入力条件として，ここから計算される人体各部のサイズと力学的特性をモデルに反映させるスケーリングの手法を用いる[6],[7],[8]。そのスケーリングの事例をFig. 5に示す。

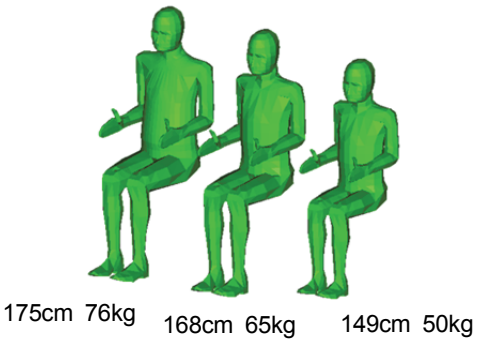


Fig. 5　Standard-Sized Model(Left) and Scaled Models (Center,Right)

（3）傷害発生メカニズム解明
（2）項のシミュレーションから得られる人体の挙動，人体各部の荷重，モーメント，変位等の結果から，傷害発生メカニズムが把握できれば，衝突速度，シートベルトやエアバッグの特性を変化させることにより，傷害変化のパラメータスタディと対策検討が可能となる。
今後は，人体そのものを忠実に再現した有限要素モデルを用い，人体の骨格や内臓等の加速度や荷重，傷害を研究する活動を行うとともに，実際の傷害状況についても，事故調査データにとどまらず，救急病院や大学等とも連携して，人体挙動と人体の受傷メカニズムとの関係解明に取り組んでいく。

4. 前面衝突時の乗員傷害要因分析

3.2で述べたプロセスに従って，前面衝突時の後席乗員の分析に取り組んだ。

4.1　座席別・年齢層別事故分析

自車乗員の死亡重傷者数を衝突部位別に分析すると，前面衝突が大きな比率を持つことは2章で示したとおりである。ここでは更に座席別と年齢層別に分析する。
男女別，65歳以上の高齢者，65歳未満の非高齢者の死亡重傷率を比較したグラフがFig. 6で，死亡重傷率は式(1)で計算される。

死亡重傷率（%）＝死亡重傷者数／死傷者数×100　(1)

男女とも，高齢者の死亡重傷率が非高齢者と比較してかなり高くなっていることが分かる。座席間の比較では，助手席の死亡重傷率が高めとなっている。

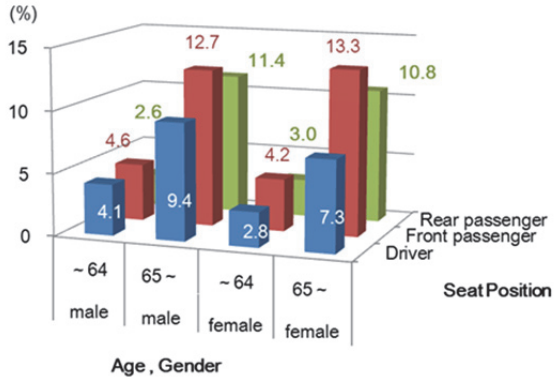


Fig. 6　Fatal and Serious Injury Rate by Age, Gender and Seat Position

また，男性，女性，座席ごとに，非高齢者を基準として，高齢者の死亡重傷率を示したグラフがFig. 7である。後席の高齢者の死亡重傷率が非高齢者に対して男性で4.4倍，女性で3.6倍となっており，悪化率が運転席や助手席に対して大きい。

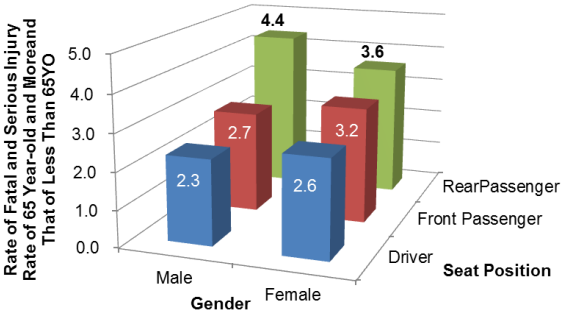


Fig. 7　Rate of Fatal and Serious Injury Rate of 65 Year-old and More and That of Less Than 65YO

年齢層別の後席乗員の死亡重傷率をFig. 8に示す。高齢になるに従って死亡重傷率が増加していることが分かる。

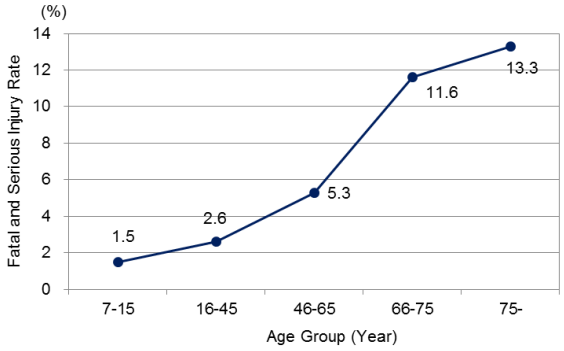


Fig. 8　Fatal and Serious Injury Rate by Age Group in Rear Passenger

損傷主部位別の後席乗員死亡重傷数をFig. 9に示す。高齢者の胸部の傷害者数が著しく多いことが分かる。

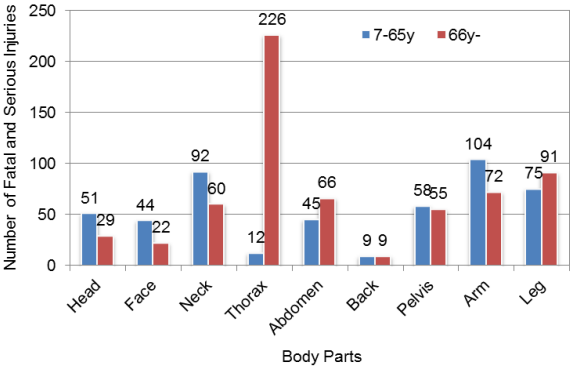


Fig. 9　Number of Fatal and Serious Injuries by the Body Parts Mainly Injured in Rear Passenger

損傷主部位別の後席乗員死亡重傷率をFig. 10に示す。これは，前出の式(1)で示した死亡重傷率を損傷主部位ごとに示したもので，高齢者は全般に高くなっているが，特に腹部の死亡重傷率が高い。

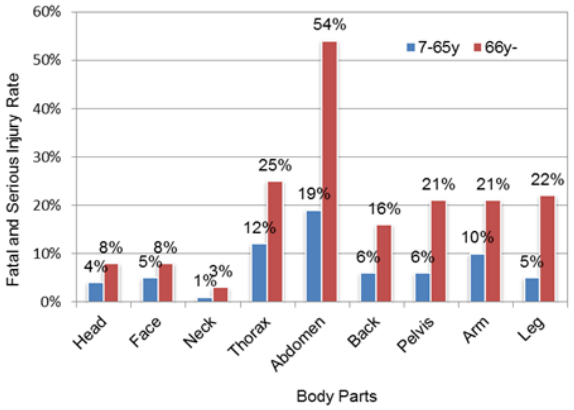


Fig. 10　Fatal and Serious Injury Rate by the Body Parts Mainly Injured in Rear Passenger

以上の結果から，前面衝突事故時に胸部や腹部に傷害を受けた後席高齢乗員の事故事例を取り上げて，事故再現及び要因分析を行った。

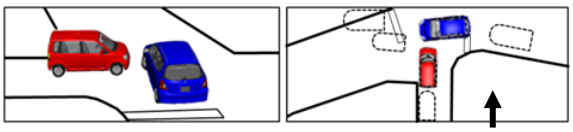
4.2　事故再現

（1）事故概要

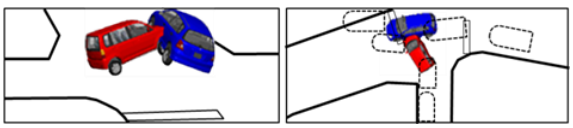
Fig. 11は，左前方から来た推定衝突速度30km/hの車両が出会い頭で交差車両の側面に衝突し，後席男性高齢者に胸部血管損傷（大動脈起始部破裂），膵臓損傷が発生，死亡した事例である[9]。

（2）車両挙動再現

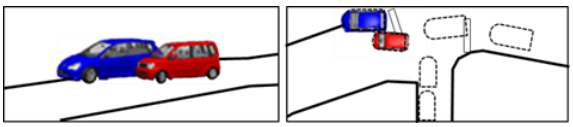
3.2節（1）項で説明したPC-Crashを用いて，衝突現象を再現させた。Fig. 11に示すように，衝突前から衝突後にわたって，2台の車の衝突現象が，現場見取り図の点線のとおり，精度よく再現されていることが分かる。



(a) Views at 550ms before the Crash



(b) Views at 295ms after the Crash



(c) Views at 995ms after the Crash

Fig. 11　Reconstruction Summary of the Cars Behavior

（3）人体挙動再現ケース

対象乗員は83歳男性，身長149cm，体重50kgであり，通常の着座であると考えられる。実際の傷害はFig. 12に示すように，AIS（Abbreviated Injury Scale）5の胸部血管損傷とAIS2の腹部膵臓損傷である。（2）項で述べた車体挙動のデータと3.2節で示したヒューマンモデルを用いて，乗員をスケーリングした上で挙動を再現した結果をTable 1に示す。

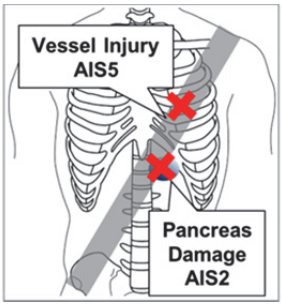


Fig. 12　Injuries of the Elderly Rear Seat Occupant in the Case

Table 1　Summary and Passenger Simulation Condition

Accident mode			Car to car Accident (Crossing-Paths)	
Accident / model			Accident data	MADYMO Model
Rear seat Occupant			83 years old/Male	Adult male human body model
Result	Injury		**Max Injury**:AIS5 The chest blood vessel damage **Injury source**: Seat belt **Other Injury**:AIS2 The abdominal pancreatic damage **Injury source**: Seat belt	Chest def.34 mm Abdomen def.23 mm
	Injury Source	Rear door & B-pillar Trim	No Paratripsis mark	No contact
		Fr. Seat	Intact	Intact
	Seat belt	Retractor Pay-out	60-70 mm	65 mm
		Webbing slip at Buckle	20-30 mm	20 mm

傷害確率との関係を示したリスクカーブを用いて確認した結果，ヒューマンモデルで再現した胸部変位量34mmは，80歳で重体相当のリスクであり，今回の事故の結果をほぼ再現している。また，車両側の状況として，Table 1に示すように，シートベルトのショルダ側の伸び出し量とシートベルト擦過痕が一致しており，事故を再現できたと判断した。

4.3　乗員傷害に影響を及ぼす要因の分析

ここでは前出の事故再現乗員挙動モデルを用いたケーススタディとして，リアルワールドで発生しうる着座姿勢とシートベルトの誤使用について評価した結果を紹介する。

（1）腰を前に出して着座しているケース

特異な腰の着座姿勢として，腰を前に出した姿勢（当評価では150mm腰を前出し）を評価したところ，シートベルトが腸骨から外れ，サブマリン現象が発生した。その結果，Fig.13 に示すように，胸部変位量は減少するものの，Fig. 14 に示すように，腹部変位量が 23 mm から 57mm へ増加している。

（2）シートベルトを脇の下に通しているケース

特異なシートベルトの使用状態で，ショルダベルトを脇の下に通している場合，ショルダベルトが腹部に食い込み，Fig. 14に示すように，腹部の変位量が23mmから42mmへ増加している。

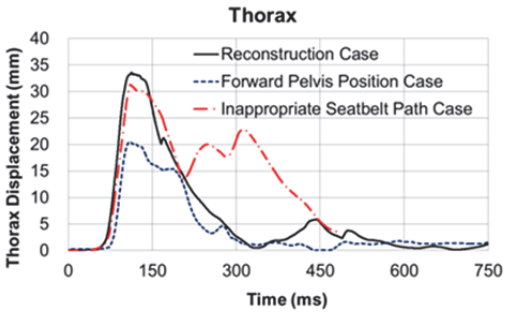


Fig. 13　Thorax Displacement

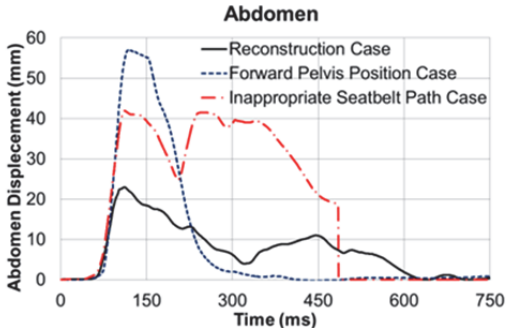


Fig. 14　Abdominal Displacement

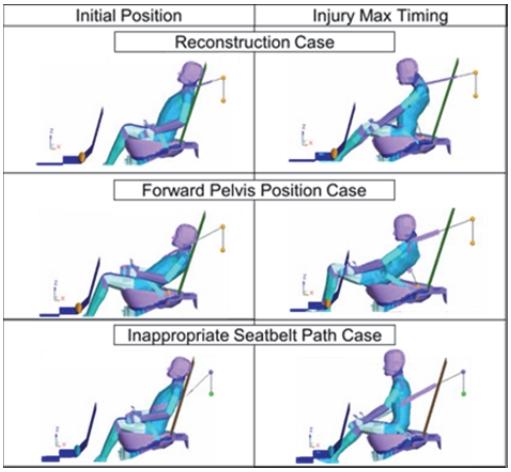


Fig. 15　Comparison of the Rear Passenger Behaviors

Fig.15には，以上3つのケースの初期位置と最大傷害時の挙動の違いを示している。

（3）ケーススタディによる乗員傷害低減検討のまとめ

（1）（2）項の結果から，前突時の後席乗員の腹部保護のためには，サブマリン現象を発生させないことであり，正しい着座姿勢と適正なシートベルトの使用が重要であることが分かった。お客様への啓発活動を通じて，これらを訴求していきたい。

また，リアルワールドでの死亡重傷者低減を目指して，腹部傷害に関しての更なる研究が必要であり，医学関連のエキスパートとの協議と検討も進める。

今後，今回のような研究を推進して，増加する高齢者をはじめとする市場事故全体を考慮した上での効果的な拘束装置の開発を継続していく。

5. おわりに

本稿では，交通事故での死傷者を低減していくために，日本における交通事故の分析と得られた知見を安全な商品造りに結びつけていくプロセスを紹介した。

（1）自車乗員で死亡重傷となったケースの64%は前面衝突である。特に，後席の高齢者のリスクの増加は前席より多いことから，本稿では，前面衝突時の後席高齢者乗員を研究対象に選定した。

（2）個別の事故の詳細を記述したミクロ事故データの分析で，事故と傷害発生のシナリオを把握し，コンピュータ上で事故を再現し，それを基に，要因を分析し，対策を検討し，その傷害低減検討プロセスを確立した。今後，このプロセスを用い，日本のITARDAミクロ事故データや中国のCIDAS（China In-depth Accident Study）データ(10)等を活用して，さまざまな傷害低減のための知見を拡大していく予定である。また，更なる詳細な傷害発生の研究を行うための医学的知見を取り入れた研究を検討していく。

（3）今回事例の前面衝突，後席乗員，高齢者のケースの検討結果から，後席乗員の正しい乗車姿勢と正しい拘束装置使用の重要性が明らかになった。

（4）リアルワールドの正確で詳細な事故分析に基づいて，事故や傷害を低減する技術開発を継続し，更なる安全性向上を目指した商品を具現化し続けることで，お客様の安全と安心の向上に貢献していきたい。

参考文献

(1) Kawaguchi, K., et al. : Frontal Crash Data Analysis in Japan for the Real-world Safety Enhancement, FISITA F2006M136（2006）
(2) 河口ほか：歩行者頭部保護性能の市場事故時傷害低減効果の研究，マツダ技報，No.31，pp.161-167（2013）
(3) Ogawa, S., et al. : Effect of Visibility and Pedestrian Protection Performance on Pedestrian Accidents, ESV13-0365（2013）
(4) Happee, R., et al. : A Mathematical Human Body Model for Frontal and Rearward Seated Automotive Impact Loading, SAE983150（1998）
(5) Happee, R., et al. : athematical Human Body Modelling for Impact Loading, SAE1999-01-1909（1999）
(6) Mertz H.J., et al. : Size Weight and Biomechanical Impact Response Requirements for Adult Size Small Female and Large Male Dummies, SAE 890756（1989）
(7) Happee, R., et al. : Optimization of Vehicle Passive Safety for Occupants with varying Anthropometry, ESV98-S9-O-03（1998）
(8) Rodarius, C., et al. : Scalability of Human Models, ESV 07-0314（2007）
(9) 田仲：後席同乗中の高齢死者の傷害状況の分析，ITARDA 第16回研究発表会テーマ論文（2013）
(10) Chen, Q., et al. : A Comparison Study of Car-to-Pedestrian and Car-to-E-Bike Accidents: Data Source: The China In-Depth Accident Study (CIDAS), SAE No. 2014-01-0519（2014）

■著　者■

神本　一朗

河口　健二

吉村　美枝

宮島　陽一

柴原　多衛

成川　岳宏

論文・解説

38

マツダの先進安全技術「i-ACTIVSENSE」の進化
Evolution of Mazda Advanced Safety Technology “i-ACTIVSENSE”

中村　正*1　内海　将司*2　朝日　雅博*3
Tadashi Nakamura　Masashi Utsumi　Masahiro Asahi
古山　貫一*4　三戸手　亮太*5
Kanichi Koyama　Ryota Mitote

要　約

マツダは，技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」にて，『マツダ車をご購入いただいた，すべてのお客様に「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を提供する』ことを宣言している。このビジョン実現のため，安全性能領域では，マツダが目指す安全性能の考え方「MAZDA PROACTIVE SAFETY」に基づき，運転する環境が変化しても，正しく認知・判断することをサポートし，「安全に安心して運転している状態」を提供すること。また，万が一のドライバのミスにも対応できるよう，事故被害を回避・軽減することをサポートする技術を開発・提供していくことを掲げている。そして，その考えに基づき開発した先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を2012年に市場へ導入し，安全装備の普及に努めた。車線逸脱警報システムやハイビームコントロールなどである。更により良い理想状態の実現のために，夜間視界，車線維持支援，疲労・注意力検知等，安全な運転に必要不可欠な領域で更なる技術革新を推し進め，さまざまな先進安全技術を開発している。今回その開発成果の一端をアテンザ，CX-5へ新たに導入したので内容を紹介する。

Summary

In our long-term strategy “Sustainable Zoom-Zoom Announcement”, Mazda commits to providing “driving pleasure” and “excellent environmental/safety performance” to all customers who purchase Mazda’s vehicles. To achieve this vision, we aim to support drivers’ recognition/decision so as to keep “safe driving condition” even when the driving environment changes and develop safety features to avoid/mitigate accident even in case of driver’s mis-operation. The i-ACTIVSENSE, a series of advanced safety features developed based on this vision, was put into market in 2012. It includes the Lane Departure Warning system and the High Beam Control system. In order to further approach the ideal, various advanced safety features have been developed for night time visibility, lane keeping support, fatigue detection, and so on. This paper describes those technologies adopted by new Atenza and CX-5.

1. はじめに

マツダは，「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」で，『マツダ車をご購入いただいた，すべてのお客様に「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を提供する』というビジョンを掲げ，技術開発を進めてきた。安全性能領域においては，ドライバを尊重した『Mazda Proactive Safety』に基づき，2012年にi-ACTIVSENSEを市場に導入した。ここで開発したシステムを更に進化させ，夜間視界の大幅な改善を狙ったアダプティブ・LED・ヘッドライト（ALH）や路外逸脱事故を未然に防ぐレーンキープ・アシスト・システム（LAS），ドライバー・アテンション・アラート（DAA）また，前進時に加え，後退時の衝突被害を軽減させるスマート・シティ・ブレーキ・サポート［後退時］などを開発した。これらの技術内容について，以下紹介する。

2. アダプティブ・LED・ヘッドライト（ALH）

マツダは夜間でも安全・安心に走行できる視界環境を，『昼間と同じ運転視界』と定義し，夜間でのドライバ視認性をサポートする先進ヘッドランプ制御システムALHを，新型アテンザ，CX-5より導入した。

*1，2，4，5　車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.
*3　装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

死亡事故のうち，歩行者事故は全体の約35%を占めており，特に夜間においてその死亡事故率が高くなる傾向にある（Fig. 1）。ALHは，ドライバの認知によって事故を未然に防ぐことを目的とし，グレアフリー（防眩）ハイビーム，ワイド配光ロービーム，ハイウェイモードの3機能を使って，走行環境に応じて配光を可変にすることで，視認性を向上させている。次項で各機能を紹介する。また，ヘッドランプの光源はすべてLEDとし，省電力かつ高輝度を実現している（Fig. 2）。

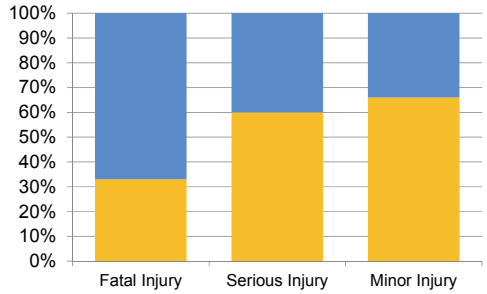


Fig. 1　Pedestrian Accident Analysis[1]

Fig. 2　System Architecture

2.1　グレアフリー（防眩）ハイビーム

前方車に眩惑を与えずにハイビームでの走行を可能にする機能。フォワード・センシング・カメラ（FSC）で前方車両の位置を検出し，その情報に基づき，左右のハイビームを可変する。ハイビームは片側4つのエリア（Fig. 3）を独立で点消灯制御でき，Fig. 4に示すように前方車の位置のハイビームだけを消灯することで，前方車に眩惑を与えることなく，周囲をハイビームで照射することができる。これにより路肩の歩行者や遠方の路面の視認性を向上させることができる。

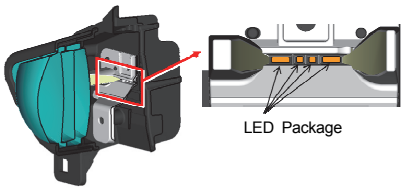


Fig. 3　Glare Free High Beam Module

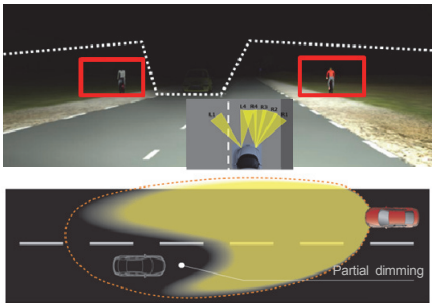


Fig. 4　System Perform Example

2.2　ワイド配光ロービーム

市街地等での低速走行中に，ロービームを側方（前方から60度）へ照射する機能。これにより交差点横断中の歩行者など車両近傍の視認性を向上させることができる。また，高速走行中は減光し，ドライバへの煩わしさを軽減している（Fig. 5）。

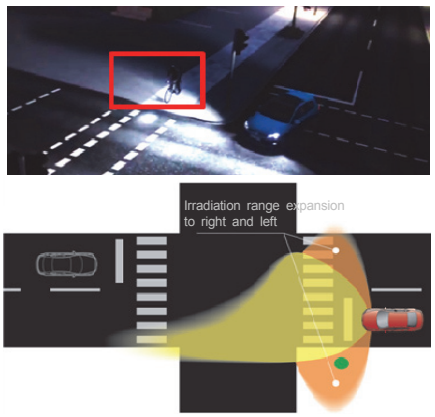


Fig. 5　Wide Distribute Low Beam

2.3　ハイウェイモード

高速走行中（95km/h以上）に車速に応じてヘッドランプの光軸を上下させる機能。これによりヘッドランプの光をより遠方まで照射し，遠方の路面や障害物等の視認性を向上させることができる（Fig. 6）。

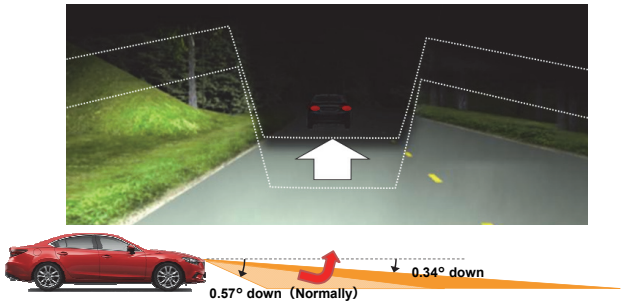


Fig. 6　Activation of Highway Mode

3. レーンキープ・アシスト・システム（LAS）

フロントガラスに装着されたフォワード・センシング・カメラ（FSC）により白線を検知し，車両と車線との相対関係を推定した上で，車線内に車両を維持するように電動パワーステアリングコントロールユニットに目標制御量を伝達し，運転を支援する。今回，①車線中央への常時誘導，②車線逸脱時回避支援の2機能に加えステアリング振動警報制御を開発した。警報のみの場合に対し，認知，判断，操作遅れ時間を減少させ，低覚醒時や不注意による車線逸脱事故の低減を狙いとしている（Fig. 7，8）。作動条件：車速約60km/h以上（手放し運転状態では非作動）

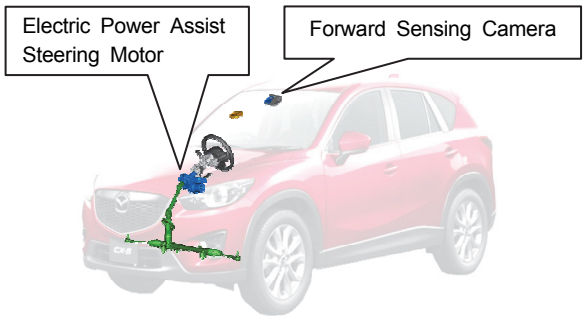
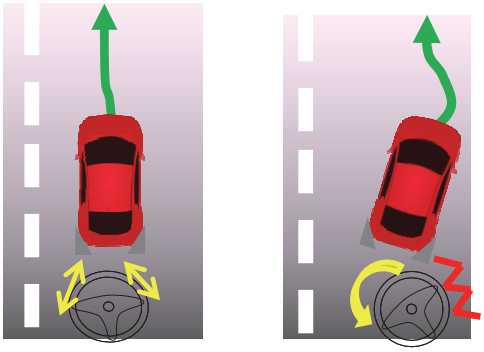


Fig. 7　System Architecture



Centering　　Lane Departure Prevent

Fig. 8　Mazda Lane-keep Assist System

3.1　開発の狙い

マツダにおけるレーンキープ・アシスト・システム（LAS）制御では，ドライバのステア操作フィールを優先させることとし，その上で車線維持性能を満足させることを狙いとした。通常，自動操舵等精密制御の必要な分野では，強力なハンドル角サーボにより操舵系の非線型性などを補償し，追従性能を確保する手法をとるが，これではドライバの操舵フィールを阻害する。このため今回は舵角サーボを採用せず，代わりにトルクを制御目標量とすることとした。

しかし，一般に操舵系は非常に強い非線型性をもつため，舵角のサーボ系をもたないシステムの場合，多様な車両運動状況により目標制御量に対する追従性が悪化する。

そこで車両ダイナミクスモデルに基づき操舵トルクを推定するオブザーバを開発し，目標制御量をリアルタイムで予測補正するフィードフォワード制御を行い目標追従性と操舵フィールの双方を高い次元で確保した。

3.2　制御アルゴリズム

制御アルゴリズムをFig. 9に示す。LASの作動領域はライントレースしている緩やかな操舵と逸脱回避支援時の比較的早い操舵があり，舵角速度，舵角量ともに非常に範囲が広く，ロバストな制御が求められる。ところが操舵系の制御外乱（セルフアライニングトルク，以下SAT）は，舵角速度，舵角量に応じて非線型性が非常に高くヒステリシスも存在する上に，車両ダイナミクスの影響を強く受けるのでマップベースのフィードフォワード制御ではステア応答の遅れによるハンチングや誘導遅れよる逸脱が発生する。この課題を解決するため，オブザーバによる状態フィードバック制御を導入した。

3.3　オブザーバ車両モデル

オブザーバ構築にあたっては量産ハードウェアの演算処理速度の制約を考慮する必要があるため，LASが作動する領域における車両挙動を分析の上，比較的処理負荷の少ない2輪モデルを採用することとした（Fig. 9，10）。

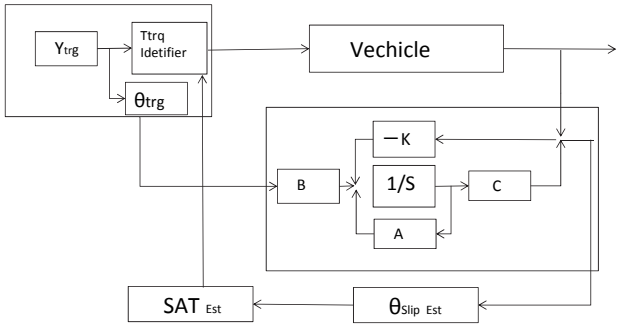


Fig. 9　Algorithm of Lane-keep Assist System

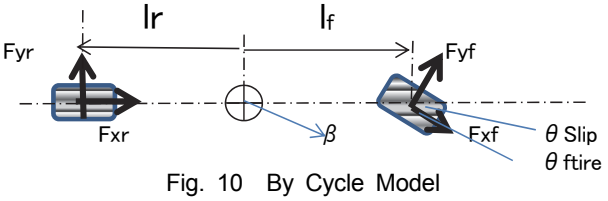


Fig. 10　By Cycle Model

ここで，γを車両ヨーレイト，βを車体滑り角，車両の慣性モーメントをI，フロント，リヤそれぞれのタイヤ位置と重心点との距離をlf，lrとする。この場合線型性を担保できる領域では，以下のように車両状態を記述できる。

$$MV\ (\beta+\gamma) = Fyfr + Fyfl + Fyrr + Fyrl$$
$$I\gamma = lf\ (Fyfr + Fyfl) - lr\ (Fyrr + Fyrl) + N$$
$$N = d/2\ (Fxfr - Fxfl + Fxrr - Fxrl) \quad (1)$$

ここで得られた車体滑り角からフロントタイヤ滑り角βfは，以下のように記述できる。

$$\theta Slip\ Est = \beta + (lf/V)\ \gamma - \theta Tier \quad (2)$$

SATとθSlipの関係は一般には強い非線型性をもつが，舵角の小さい領域でのみ制御するLASのシステム特性を生かし以下の線型式に簡素化した。

$$SAT\ est = \alpha\ (V)\ \theta Slip\ Est \quad (3)$$

α（V)は車速，車種をパラメータにもつMapであるが，実車評価及びシミュレーションにより確定した。

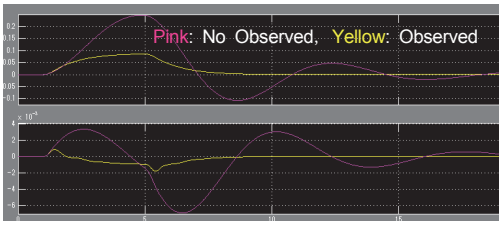


Fig. 11　Result of Simulation

横位置とYaw角の収斂性をシミュレーションし，オブザーバによる高応答性を確認した（Fig. 11）。

実車評価によりアウトバーンのような高速域でも高応答性が確保されていることを確認した。

4. ドライバー・アテンション・アラート（DAA）

事故が発生する直前だけでなく，ドライバに疲労や注意力低下が要因で発生する事故のリスクが増加していることを知らせるシステムとして，ドライバー・アテンション・アラートを開発した。ドライバの疲労や注意力低下を推定する手法として心拍・脳波などの生体量を用いて推定する手法があるが，生体量を計測する装置を着用する必要があるため，ドライバの快適な運転を妨げてしまう問題があった。そこで，Fig. 12に示すようにハンドル操作，アクセル操作，フォワード・センシング・カメラ（FSC）の画像情報などから得られる車両挙動を，覚醒状態の運転時の車両挙動と比較するアルゴリズムによって，疲労や注意力低下を推定する手法を開発した。

4.1　疲労・注意力低下推定アルゴリズム

疲労や注意力低下状態の運転と，覚醒状態の運転と比較するためには，運転するドライバ個人の特性を考慮する必要がある。そのため，ドライバの運転状態が変化したことを正しく判定するアルゴリズムとして，品質工学で多く用いられているMTシステム（Mahalanobis-Taguchi System）を拡張したシステムの開発を行った（Fig. 13）。

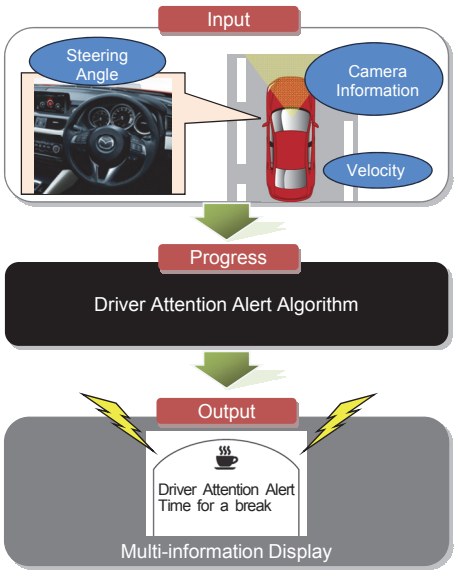


Fig. 12　Driver Attention Alert System

本システムでは，ハンドル操作，アクセル操作，フロントセンシングカメラの画像情報などの多要素をマハラノビス距離の単位空間へ計算する。運転開始から約20分間はドライバが覚醒状態であるとしドライバ運転特性を学習結果として設定する。その後，ドライバの疲労や注意力低下監視状態に遷移し，随時ドライバの運転挙動を学習結果との距離値で比較する。距離値が一定のしきい値以上であった場合は，疲労や注意力低下の危険な運転状態であることが推定されるため，ディスプレイ表示とブザーでドライバに休憩を促す。

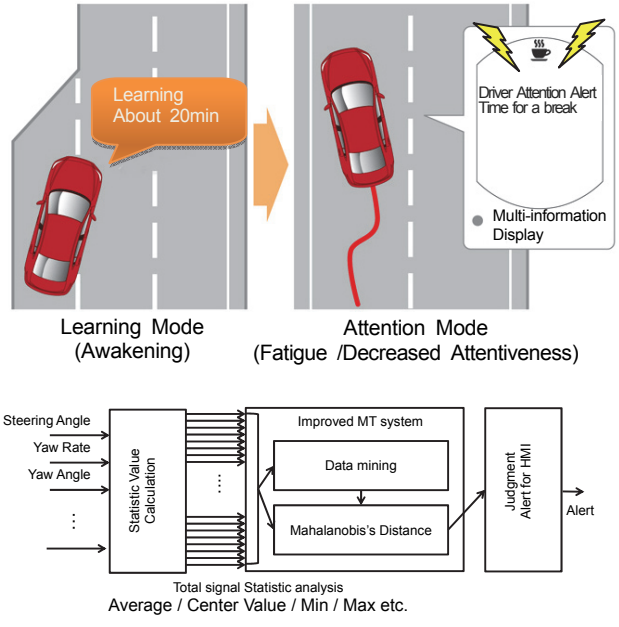


Fig. 13　Driving State Estimation

4.2　システム性能検証

複数人のドライバに5分ごとに疲労・注意力の低下を申告してもらい，その時の車両挙動データを用いてシステム性能検証を行った。システムの距離値がしきい値を超えたイベントと，ドライバが実際に疲労や注意力が低下したと申告したイベントを比較した一例をFig. 14とFig. 15に示す。Fig. 14のしきい値は20分間のドライバの運転特性を学習した結果から算出され，このしきい値を超える状態になった場合，疲労や注意力が低下していると判断する。Fig. 14のドライバ申告と比較すると，システムが疲労・注意力の低下を適切に検知できていることがわかる。

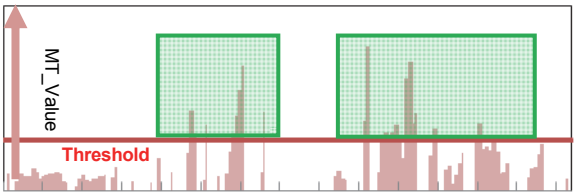


Fig. 14　MT Value & Threshold

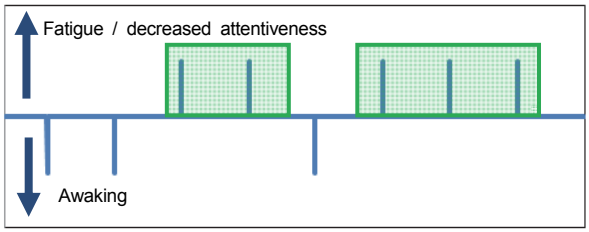


Fig. 15　Ground Truth Data

5. スマート・シティ・ブレーキ・サポート［後退時］（SCBS R）& AT 誤発進抑制制御［後退時］

現在，前進低速走行中，わき見運転などによる前方車両への衝突被害を軽減するスマート・シティ・ブレーキ・サポート［前進時］（SCBS F）を既に導入している。これに加え，車両後方の障害物に気づかずに後退してしまったり，ブレーキペダルを踏むつもりが誤ってアクセルペダルを踏んでしまったりすることによる車両後方の障害物への衝突被害を軽減するシステムを新たに開発した。

5.1　システムの機能

システムは，車両後方の障害物との衝突の危険性が高まった場合に，自動ブレーキ制御，あるいは，エンジントルク抑制を行うことで衝突被害を軽減するシステムである。大きく分けて，以下の2つの機能がある。

（1）SCBS R

約2～8km/hで後退している際に，車両後方障害物との衝突時間を計算し，衝突の危険性が高まっていると判断したときに衝突被害軽減ブレーキを作動させ，車両を減速させることで，衝突による事故被害を軽減する（Fig. 16）。

（2）AT 誤発進抑制制御［後退時］

10km/h以下の後退中（停止中含む），車両後方の障害物をシステムが認識している状態で，アクセルペダルが所定以上に踏み込まれた場合，ペダル操作やギア操作ミスと判断して，音と表示によってドライバに警報するとともに，エンジンのトルクを抑制し，急発進による衝突被害を軽減する（Fig. 17）。

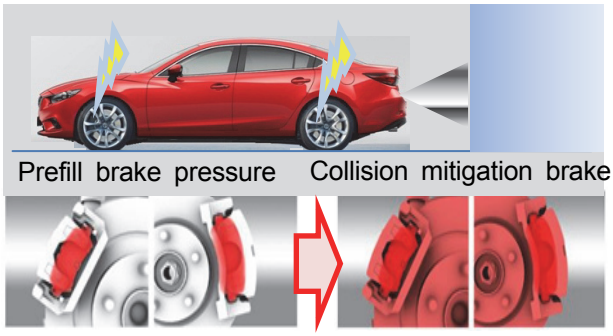


Fig. 16　Autonomous Braking

Fig. 17　Acceleration Control for AT

5.2 システムの構成

システムはソナー・センサ／パーキングセンサモジュール（PSM），ダイナミック・スタビリティ・コントロール（DSC）ユニット，パワートレイン・コントロール・モジュール（PCM），ボディ・コントロール・モジュール（BCM）及びメータで構成される（Fig. 18）。

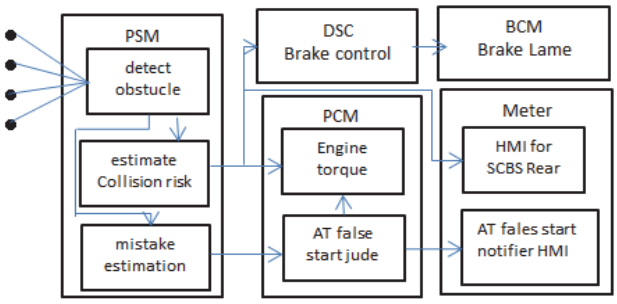


Fig. 18　System Architecture

リヤ・バンパに設置されているソナー・センサと，車室内に設置されている PSM により，車両後方の障害物を検知

する。障害物の検知には超音波を採用している。PSM の指令によってソナーが送波した超音波が車両後方障害物より反射し，その反射波の情報を PSM 内で処理することにより，障害物の位置を認識する。障害物の種類や形状にもよるが，センシングの範囲は，車両であれば数 m 程度の検知が可能である。

また，PSM は前述の物標検知機能に加え，SCBS R における，衝突危険性判断機能や，操作ミス判断機能を併せもつ。具体的には，認識した車両後方の障害物の情報と自車両の情報（車速，舵角，アクセル開度，等）を基に衝突の危険性判断や，操作ミス判断を行い，衝突の可能性が高いと判断した場合に，DSC への自動ブレーキ要求や，PCM への自動エンジントルクダウン要求などを行う。

5.3　システムの性能

（1）SCBS R

① 物標検知

後退時に発生している事故を分析した結果，停止車両に対する衝突による人身事故が約半数を占めていることから，SCBS R は，車両に対する衝突被害軽減を目標とした。その結果，対象とする障害物は，自車両に対して正対する 4 輪以上の車両やそれ以上の大きな障害物（壁など）のみとしている。

② 衝突可能性判断

a. 静止物判定

ソナー・センサ／PSM が認識した距離情報と，自車両の車速情報から，障害物が静止物か否かの判定を行い，静止物と判定された場合は制御対象とした。

b. 進行路推定

舵角情報から自車両の進行路を推定し，進行路にある物標情報を制御対象とした。

c. SCBS R における衝突予測時間の演算

衝突被害軽減ブレーキの作動は『ドライバのシステムに対する過信を防ぐ』との考えから衝突が回避できなくなる限界タイミングとしている。

③ ブレーキプレフィル

後方障害物との距離及び相対速度から得られた衝突予測時間の約 1 秒前にブレーキの液圧を高め，ブレーキ操作に対する応答性を向上させる。

④ 衝突被害軽減ブレーキ

ブレーキプレフィル後，ドライバによる回避操作がない場合，最大 9.8m/s^2 の減速度を DSC に対して要求する。

（2）AT誤発進抑制制御［後退時］

障害物との距離，アクセルペダルの踏込量及び自車速から目標加速度を演算し，これに応じてエンジンのトルクを抑制する。制御目標は，例えば踏切での閉じ込めや雪道での緊急脱出を考慮し，最低限のトルクを残す仕様とした。この制御により，駐車場等に設置されている一般的な輪止めに後輪のタイヤが接している場合は乗り越えないレベルまでエンジントルクが抑制され，車両の急発進や急加速を防止する。輪留めが存在しない場合においても車両の加速度及び車速が制限され，衝突時の車速を約 50%以下（衝突エネルギーは約 25%以下）に抑えることが可能である。

6. おわりに

今回，新型アテンザおよび新型 CX-5 に搭載した先進安全技術を紹介した。今後も，マツダの安全思想に基づき，i-ACTIVSENSE の技術を継続的に進化させることにより，事故のない安全クルマ社会の実現に向け貢献していく考えである。

参考文献

（1）ITARDA（交通事故総合分析センター）
（2）Roberto Horowitz：Emergency Braking Control with an Observer based Dynamic Tire/Road Friction Model and wheel Anglar Velocity Measurement.
（3）安部正人：車両運動力学の理論形成と応用
（4）東京大学 井上友子：電気自動車における車両すべり角の推定と制御
（5）東京大学 堀洋一ほか：遅い共振比制御における外乱オブザーバの最適推定速度について

■著　者■

中村 正

内海 将司

朝日 雅博

古山 貫一

三戸手 亮太

論文・解説

39

高応答遮熱壁面における瞬時熱流束計測技術
Technology of Instantaneous Heat Flux Measurement on a High Response Heat Insulation Coating

中尾　裕典*1　青木　理*2　清末　涼*3
Yusuke Nakao　Osamu Aoki　Ryo Kiyosue
原田　雄司*4　角島　信司*5　小池　祐輔*6
Yuji Harada　Shinji Kadoshima　Yusuke Koike

要　約

内燃機関の冷却損失改善技術として，燃焼室壁面に低熱伝導，低比熱の遮熱材をコーティングする手法が検討されている。その際の遮熱材表面温度は，ガス温に追従して数百℃変化することが想定される。本研究では，遮熱壁温を高応答計測可能な壁温センサを開発し，これが内燃機関の燃焼室壁温の計測に十分な応答速度を有しているかを確認した。加えて，本センサをRCEM（Rapid Compression Expansion Machine）に適用して壁温計測と壁面熱流束算出を行い，この結果を用いて壁面熱伝達率算出方法を検討した。その結果，本遮熱壁は遮熱なしに比べ，*Re*（Reyonldos number）変化が*Nu*（Nusselt number）に与える影響が小さいことが分かった。

Summary

To reduce the cooling loss of internal combustion engines, a method is currently being studied for applying heat insulation coating with low heat conductivity and low specific heat capacity onto the combustion chamber wall. With this technology used, the temperature of the coating surface is assumed to fluctuate in a range of several hundred degrees Celsius in accordance with the gas temperature. In this study, a highly-responsive wall temperature sensor was developed and its response speed was confirmed to be appropriate for measuring temperature of the combustion chamber wall of the internal combustion engine. In addition, this wall temperature sensor was applied to RCEM to measure the wall temperature and calculate the wall-surface heat flux. Besides, a study was conducted on a method for calculating wall-surface heat transfer coefficient, using the measurement and calculation results above. As a result, this coating confirmed that the influence that *Re* fluctuation gave *Nu* in comparison with noncoating is small.

1. はじめに

温暖化やエネルギーセキュリティの課題に対処するため，内燃機関の熱効率改善が求められている。この策として燃焼室壁へのセラミックス等の遮熱材適用による冷却損失低減[1]が試みられてきたが，期待の効果は得られていない。伊藤ら[2]はセラミックス材では壁温上昇による圧縮仕事増加と排気損失増加により熱効率向上効果が得られないと報告している。一方，低熱伝導，低比熱の遮熱材を燃焼室壁面にコーティングし，壁温をガス温に追従して数百℃レベルで振幅させて冷却損失低減を図る方法がCAE検討結果で報告[3][4]されている。また，熱効率予測のCAE手法である燃焼室内ガスの状態量0次元モデルと構造部分の熱伝導1次元モデルを連成計算するサイクルシミュレーションにて，藤本ら[4]は壁面熱伝達率算出にWoschni式[5]を用いているが，遮熱壁適用時の予測精度は検証されていない。

本研究では，遮熱材コーティングの壁温を高応答計測可能なセンサを開発し，RCEMにて遮熱壁温がガス温に追従して数百℃レベルで変化する状態の計測，熱流束および遮熱壁の熱伝達率を算出し，熱流束低減効果を明確にする。

2. 遮熱壁温センサ

最近では燃焼室壁温の高応答計測に同軸型薄膜熱電対を用いた計測例[6]が報告されており，高応答壁温計測には同軸型熱電対の使用が一般的になりつつある。しかし，同軸型熱電対は熱接点を熱電対構成金属部材の表面に形成するため遮熱壁面上には形成できない。これに対し，Assanisら[7]はジルコニア溶射膜の壁温計測のために積層型薄膜熱

*1～6　技術研究所
Technical Research Center

電対を採用した。本研究では，積層型薄膜熱電対方式を採用し，遮熱壁温の高応答計測が可能なセンサを開発した。

2.1　センサ構造とセンサ設置が温度場に与える影響

Fig. 1に遮熱壁温センサの構造を示す。基材は薄膜熱電対の耐久性を考慮して窒化アルミとした。この熱拡散率は燃焼室材AC8Aアルミ合金の48mm²/sに近い43mm²/sである。熱電対金属は，耐熱性，耐酸化性で有利なAg-Niとした。Agは硫化や塩化が懸念されるため，燃焼実験に使用する燃料はイソオクタン（C_8H_{18}）とした。熱電対素線は基材に耐熱接着剤で固定後，遮熱なしセンサは先端を研削処理し，遮熱センサは遮熱コーティング後に研削処理を行った。薄膜熱電対の熱接点は，先端中央にφ1.5mm形状となるようスパッタリングにて成膜し，各膜厚0.4μmにて積層した。センサ表面から内部への熱流束一次元性は，センサ側面へ熱拡散率0.84mm²/sのアルミナを配置して確保した。Fig. 2にセンサ表面写真を示す。薄膜熱電対は剥離や断線なく仕上がっている。

次に，センサ設置が温度場に与える影響を検証するため，燃焼室に遮熱なしセンサを設置した際のセンサ内温度分布と熱流束変化を，非定常熱伝導FEM解析で確認した。計算条件は後述の実験条件Case 1を設定し，その他条件である燃焼ガス温はRCEM燃焼圧力から気体の状態方程式で算出，壁面熱伝達率はWoschni式から算出した。Fig. 3に最大熱流束発生時のセンサ構造ありなしモデル中央縦断面温度分布，Fig. 4に表面熱流束を示す。図によると，温度差は表面で僅かであり，熱流束差も最大1.72%と小さく，センサ設置の影響は無視できる。

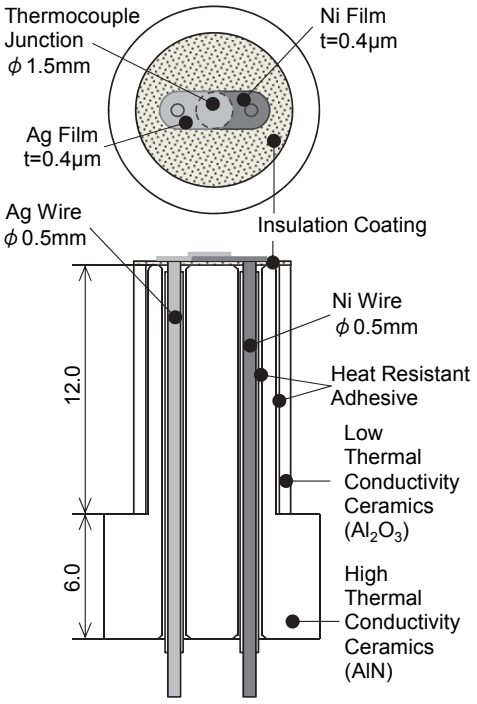


Fig. 1　Thin Film Thermocouple (with Insulation Coating)

2.2　遮熱壁温センサの応答速度評価

製作した遮熱壁温センサの応答速度評価を実施した。応答速度評価手順は，まず，出力既知のレーザでセンサ表面を加熱してセンサ測温点の過渡温度を計測し，次に，同出力の熱エネルギーを遮熱壁へ照射した時の遮熱壁温の過渡変化を計算で求める。次に，これらを比較して，遮熱壁温変化に対する測温点温度変化の遅れで応答速度を評価する。なお，1次遅れ要素の時定数は，ステップ応答が定常値の63.2%に達する時刻となるため，加熱開始から測温点が遮熱壁温の63.2%となる時刻を応答速度として定義した。

（1）Ag-Ni熱電対の温度校正

JISクラス2K型熱電対を用いたAg-Ni熱電対の熱起電力測定結果をFig. 5に示す。この結果から各温度間を3次スプライン関数補完し，Ag-Ni熱電対温度換算を行った。

（2）レーザエネルギー立ち上がり出力

評価用レーザは，照射時間，照射エネルギーを任意設定できる半導体レーザ（波長532nm）を使用した。このレーザについて，以下の方法でレーザ照射直後の出力を特定した。

通常，レーザ出力測定には定常計測のパワーメータが使われるが，定常計測では立ち上がり出力は捉えられない。そこで，まず，レーザ光をパワーメータ受光部に照射して

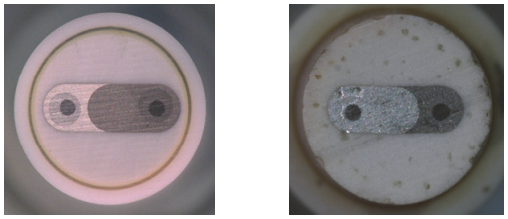


Fig. 2　Thin Film Thermocouple Surface

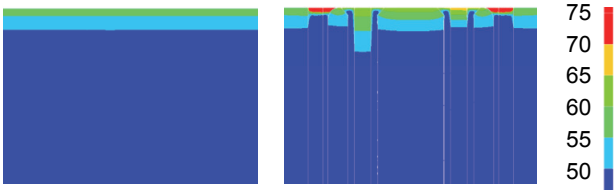


Fig. 3　Temperature Distribution of the Cross Section

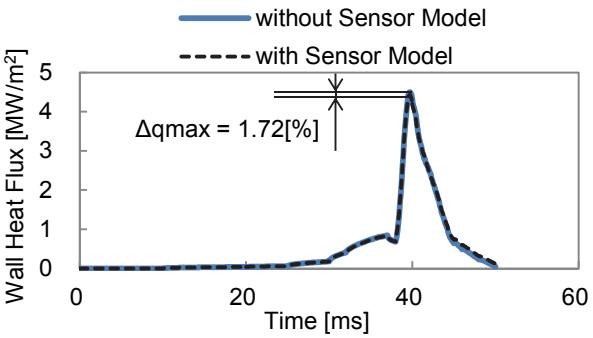


Fig. 4　Calculation Result of Wall Heat Flux

定常で出力計測し，次に，受光部の反射光を高速度カメラ（5μs/1コマ）で撮影し，レーザ輝度を算出する。この結果からレーザ出力と輝度の関係を捉える。その後，この受光部に同レーザをパルス照射し，過渡状態での反射光の輝度を算出する。この輝度の過渡変化と，先程の出力と輝度の関係を用い，レーザ立ち上がり出力を特定する。

Fig. 6に出力調整したレーザのパワーメータ計測値と，その時の反射光の輝度を示す。この結果，出力と輝度は2次式で補完可能なことが判明した。Fig. 7に受光部へレーザをパルス照射し，反射光を高速度カメラで撮影して算出した輝度を示す。これによると，レーザは起動後（時刻0μs）から50μsで照射が始まっている。また，レーザ出力が安定的ならば矩形波を示すはずだが，起動直後はスパイク状を示しており，その後，数百μsは出力が安定する。よって，このレーザは起動直後に出力がオーバシュートする特性がある。しかし，輝度波形はオーバーレンジせず捕捉しており，レーザ立ち上がり出力は特定可能と判断した。

（3）レーザ吸収率の測定

レーザ光は照射面の吸収率に応じて吸収される。よって，遮熱材表面や測温部に照射される熱流束の特定には，測温部の吸収率が必要である。この確認のため，センサ測温部と同一構造のテストピースを製作し，分光光度計にて測温部の吸収率を測定した。その結果，遮熱膜センサ測温面（Ag表面）は，波長532nmで吸収率7.78%であった。

（4）センサ測温部表面での横方向熱移動の影響

センサ測温部はφ1.5mmだが，測温部のみにレーザを照射することは困難であり，実際は測温部以外へもレーザが照射される。しかし，測温部以外に照射されたエネルギーが横移動して測温部に温度変化を与える可能性がある。この確認のため，レーザ出力をレーザ立ち上がり評価の出力に固定して500μs間パルス照射し，センサ測温点を中心とした同心円の複数スリットにて照射面積を変更させ，センサの出力変化を確認した。Fig. 8にその結果を示す。この図によると，φ2.0mmとφ3.0mmは同温度だが，φ1.5mmはこれらより低い。つまり，φ1.5mmではレーザ照射されない測温部があるが，φ2.0mm以上なら全測温点にレーザ照射されると推測する。また，懸念していた横方向への熱移動の影響はないと判断できる。

（5）遮熱材表面温度の計算方法

遮熱材表面温度の算出は，境界条件として，入射熱流束にレーザエネルギーの立ち上がり出力，背面温度にセンサ基材後端部に取り付けた熱電対で計測した値を設定し，非定常1次元熱伝導方程式をコントロールボリューム法で離散化し，完全陰解法を用いて行った。

（6）遮熱壁温センサの応答速度評価結果

以上の結果から確認されたレーザエネルギーと照射条件にて実施した遮熱壁温センサ測温結果，遮熱材表面温度計算結果，遮熱壁面温度63.2%ラインをFig. 9に示す。

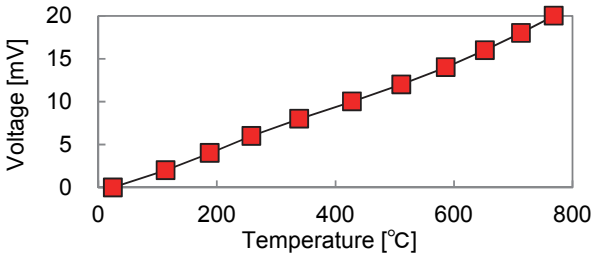


Fig.5　Ag-Ni Thermo Electromotive Force

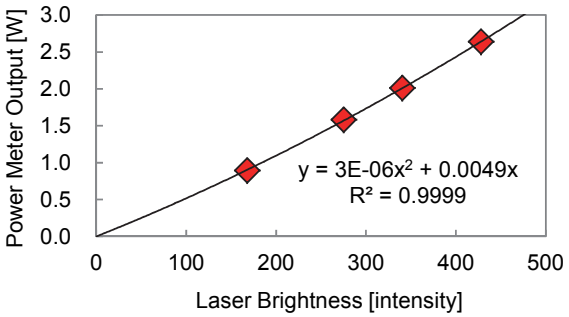


Fig. 6　Relationship between Laser Power and Brightness

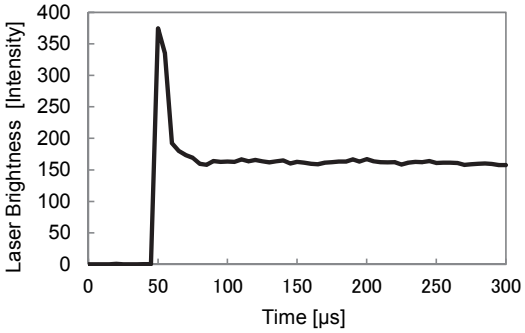


Fig. 7　Initial Rise Time and Laser Brightness

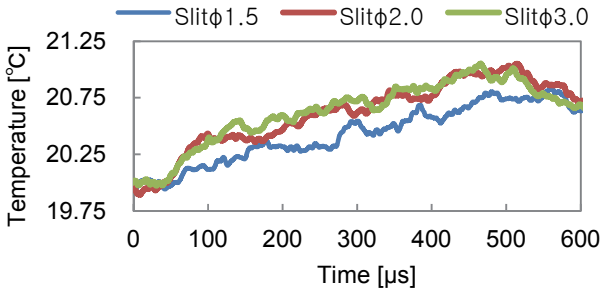


Fig. 8　Relationship of Thermocouple Temperature and Slit

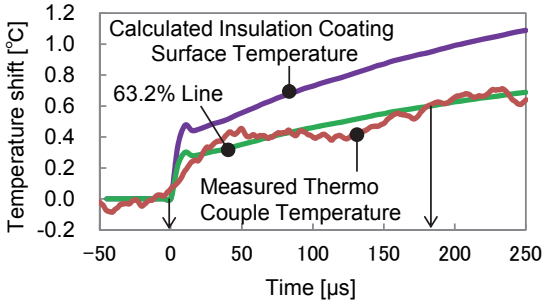


Fig. 9　Response Speed of Thin Film Thermocouple Sensor

図から明らかなように，遮熱壁温センサ出力は20μsで63.2%ラインと交差して50μsで低下し始める。120μsで再上昇し，180μsで63.2%ラインと再交差し，以後上昇が継続する。この初めの交差点はレーザによるオーバシュートの反応と考え，センサ応答時刻ではないとし，後の交差点をセンサ応答時刻であると判断した。その結果，センサ応答速度は180μs=5.6kHzであることが分かった。これはエンジン回転速度926rpmでのクランクアングル1.0°相当の応答速度である。供試するRCEMの運転速度は高速運転時の圧縮・膨張行程平均で923rpm相当であり，センサ応答速度は壁温計測に十分な速度であると判断する。

3. 計測装置および計測条件

3.1 RCEM概要

本実験はRCEMを用いて行った。Fig. 10にRCEM概観，Table 1に燃焼室諸元，Table 2に運転条件を示す。RCEMの燃焼室形状は周方向の温度分布を均一とするため軸対称形とし，燃焼室表面は，アルミ合金燃焼室と，ヘッドとピストンの表面に遮熱コーティングした燃焼室の2仕様を用意した。なお評価時の燃焼形態はHCCI（Homogeneous Charge Compression Ignition）燃焼とし，ピストン上昇開始直後に燃料噴射時期を設定して燃焼室内の均一混合気形成を行い，初期ガス温安定のため初期壁温管理を実施した。

3.2 壁温計測点

計測点は燃焼室全体の熱損失を求めるため多点とし，ヘッド5点，ピストン4点を各中心から半径方向へ位置を変えて設置した。Fig. 11に各壁温計測点を示す。

4. 計測結果

4.1 燃焼室内圧力

上記条件，装置にて，壁温と燃焼室内圧力を計測し，熱流束算出を行った。Fig. 12に筒内圧計測結果を示す。横軸の0msはピストン動作開始時刻である。図によると，遮熱ありの燃焼中の圧力は高くなっている。これは，壁面熱損失低減に伴い燃焼開始時期が早期化したためと推測する。

4.2 局所壁面熱流束分布

Fig. 13にCase 1での代表6点（ヘッド3点，ピストン3点）の壁面熱流束を示す。測定点はFig. 11と対応する。なお，熱流束は非定常1次元熱伝導方程式をコントロールボリューム法により離散化し，完全陰解放を用いて算出した。

図によると，遮熱なしは，ありに比べて測定点によるピーク値ばらつきが大きいが，Fig. 12の圧力立ち上がりで読み取れる熱発生と同時に始まる熱流束発生時期は0.5ms程度に収まっている。よって，燃焼室全体で同時に燃焼が開始すると考えられ，以降は，各計測点が代表する燃焼室壁の面積Aで重み付けした燃焼室全体平均値を対象とする。

4.3 燃焼室全体平均の壁温と熱流束

各計測点の局所壁温計測値に対して，式(1)から，燃焼室全体の平均壁温T_{wall}を算出した。iは計測点番号である。

$$T_{wall} = \Sigma(T_{wall,I} \cdot A_i) / \Sigma A_i \qquad (1)$$

遮熱ありなしの壁温比較結果をFig. 14に示す。これによると，遮熱コーティングにて壁温振幅は数百℃レベルになることが確認できる。

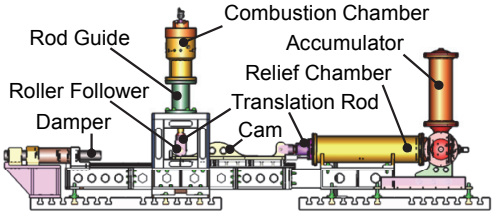


Fig. 10　RCEM External View

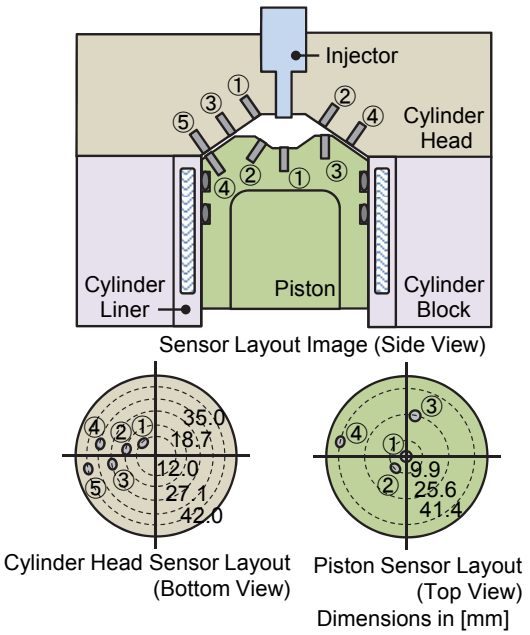


Fig. 11　Wall Temperature Measuring Point

Table 1　RCEM Specification

Bore [mm]	89
Stroke [mm]	95
Compression Ratio	23.4

Table 2　RCEM Operating Condition

	Case 1	Case 2
Fuel	iso-Octane	
Fuel pressure [MPa]	20	
Combustion system	HCCI	
Equivalence Ratio	0.48	
Initial gas & wall temperature [℃]	45	25
Piston speed average [m/s]	2.9	1.7
corresponding engine speed [rpm]	923	545

壁面熱流束q_{ave}も同様に燃焼室全体平均値を算出した。

$$q_{ave} = \Sigma(q_i \cdot A_i) / \Sigma A_i \quad (2)$$

結果をFig. 15に示す。この結果から，遮熱コーティングによる壁面熱流束の大幅な低減が確認できる。

5. 熱伝達率評価

サイクルシミュレーションで用いる熱伝達率としては，Woschni式[5]が知られており，この式はヌセルト数Nuとレイノルズ数Reの関係を表す実験式[5]に基づいている。

$$Nu = C \cdot Re^{0.8} \quad (3)$$

そこで本研究では，ヌセルト数とレイノルズ数の関係を，遮熱材有無で比較することとし，ヌセルト数の計算に必要な熱伝達率h は，RCEMで計測した燃焼室壁面全体の平均熱流束q_{ave}，及び平均壁温T_{wall}から，次式にて算出した。

$$h = q_{ave} / (T_{gas} - T_{wall}) \quad (4)$$

ここで，燃焼室内ガス温T_{gas}は，気体の状態方程式から算出した。なお，遮熱なしの場合，圧縮行程（燃焼開始前），及び，膨張行程後半では，壁温変化が小さく，壁面熱流束のS/N比が低いため，熱伝達率hの誤差が大きい。そこで今回は，膨張行程前半（Case 1：40～50ms，Case 2：65～75ms）を解析対象とした。

ヌセルト数とレイノルズ数を算出する際の代表長さは，Woschni式と同様に，燃焼室ボア径とした。レイノルズ数の代表速度vは，Woschni式では次式で定義されている。

$$v = C_1 S_p + C_2 (V_d T_r) / (P_r V_r)(P - P_{motoring}) \quad (5)$$

この式の記号は，C_1,C_2は行程ごとの定数，S_pは平均ピストン速度，Pはガス圧，$P_{motoring}$はモータリング時ガス圧，V_dはシリンダ容積，P_r,V_r,T_rは初期状態を示す。右辺第1項のS_pは主にエンジン回転速度に比例した吸気流動を表していると考えられる。しかし，供試したRCEMは吸気流動がなく静止状態から圧縮行程が始まる。そこで，ピストン頂面で直接駆動されるガス流速を正確に表現できるよう，平均ピストン速度に替えて瞬時ピストン速度を使用した。その上で，まず，遮熱なしのCase 1で，式(3)の関係に従うように係数C_1を調整した。その結果をFig. 16に示す。この時のC_1は，Woschni式で採用している値の約1/10となった。また，この値を用いて算出したCase 2の関係もFig.15にプロットしたが，Case 1と同様に，式(3)を表す直線に沿っていることが分かる。

次に，遮熱ありの結果をFig.17に示す。代表長さと代表速度の定義は，C_1の値も含めて上述の遮熱なしと同じにした。また，比較のため式(3)の関係を破線で示す。遮熱ありではプロット点の傾きが小さくなり，レイノルズ数変化がヌセルト数に及ぼす影響が小さい傾向を表している。

このことは，高温遮熱壁面の近傍ではガス温も高くなり，壁面近傍の粘性係数が増加して境界層が厚くなり，その結果，熱伝達率が燃焼室内の平均的な流動の影響を受け難くなったためと考えられる。過去の研究では，高温壁面では消炎距離が減少し，熱流束が増える例が報告されている[8]が，本実験範囲では上述の境界層が厚くなる効果が強く出たと思われる。

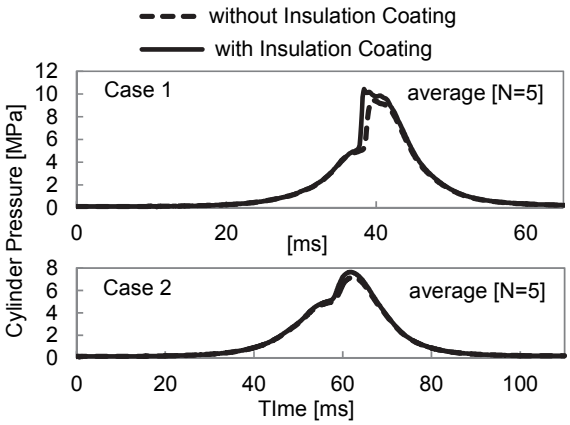


Fig. 12　Cylinder Pressure

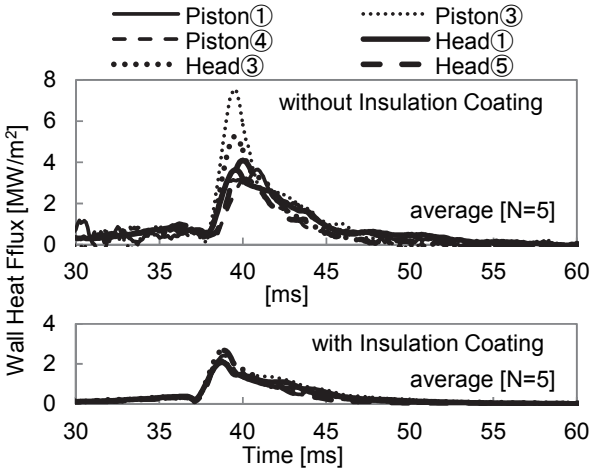


Fig. 13　Instantaneous Local Wall Heat Flux (Case 1)

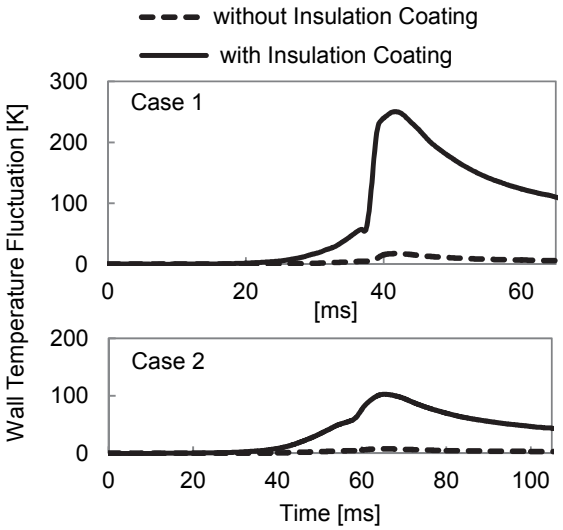


Fig. 14　Instantaneous Wall Temperature

6. おわりに

高応答遮熱壁温センサを開発し，RCEMによる遮熱壁温計測，および，熱流束算出を行い，以下の結論を得た。

(1) 開発した遮熱壁温センサは，燃焼室内遮熱壁温計測に十分な応答速度を持つことを実験にて確認した。

(2) 燃焼室へ遮熱壁を設置した場合の壁温計測において，数百℃の壁温振幅が得られること，および，遮熱壁設置により熱流束が大幅に低減することを確認した。

(3) 本研究の範囲にて，遮熱壁のヌセルト数は，通常の遮熱なし壁面に比べ，レイノルズ数変化の影響が小さい傾向がある。

本研究に供試したRCEM装置の設計，導入には，九州大学大学院工学研究院機械工学部門の村瀬英一教授に多大なご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

また，本研究の一部は，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援を受け，戦略的省エネルギー技術革新プログラムの一環で実施したものである。

参考文献

(1) 松岡ほか：セラミック遮熱エンジンの構造と遮熱性，自動車技術会学術講演会前刷集，912-1，pp.53-56（1991）

(2) 伊藤ほか：エンジン断熱化による冷却損失低減に関する一考察，日産技法 Vol. 18，pp.13-21（1983）

(3) D. N. Assanis, et al. : Transient Heat Conduction in Low-Heat-Rejection Engine Combustion Chambers, SAE Paper 870156（1987）

(4) Fujimoto H., et al. : A Study on Improvement of Indicated Thermal Efficiency of ICE Using High Compression Ratio and Reduction of Cooling Loss, SAE Paper 2011-01-1872（2011）

(5) G. Woschni : A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine, SAE Paper 670931（1967）

(6) G. Orgun, et al. : Thermal Characterization of Combustion Chamber Deposits on the HCCI Engine Piston and Cylinder Head Using Instantaneous Temperature Measurements, SAE Paper 2009-01-0668（2009）

(7) D. N. Assanis, et al. : Heat Transfer Measurement in Ceramic-Coated Combustion Chambers, SAE Paper 900691（1990）

(8) J. Yang, et al. : Predictions of the Effects of High Temperature Walls, Combustion, and Knock on Heat Transfer in Engine-Type Flows, SAE Paper 900690（1990）

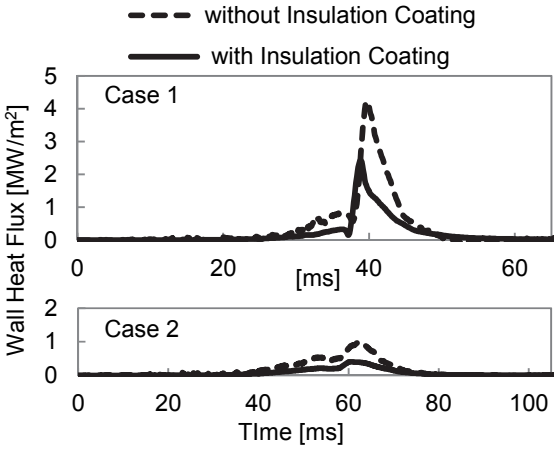


Fig. 15　Instantaneous Wall Heat Flux

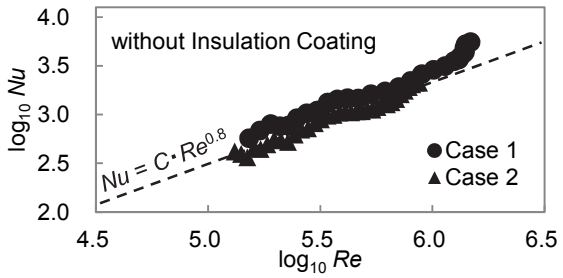


Fig. 16　*Re* and *Nu* w/o Insulation Coating

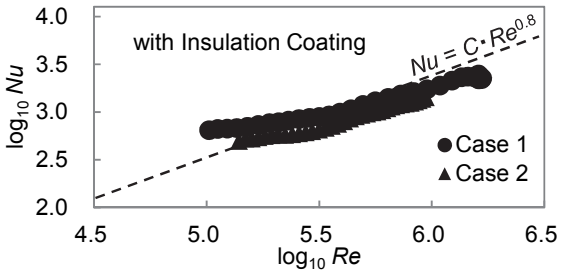


Fig. 17　*Re* and *Nu* with Insulation Coating

■著　者■

中尾　裕典

青木　理

清末　涼

原田　雄司

角島　信司

小池　祐輔

論文・解説

40

高精度スリップ率制御による駆動力制御技術
Driving Force Control Method Based on High Accuracy Slip Ratio Control

髙野　毅*1　延本　秀寿*2　岡﨑　俊実*3
Takeshi Takano　Hidetoshi Nobumoto　Toshimi Okazaki
藤本　博志*4
Hiroshi Fujimoto

要　約

近年，電気自動車（Battery Electric Vehicle：BEV）やハイブリッド電気自動車（Hybrid Electric Vehicle：HEV）などの電気駆動モータは，効率の高さから地球環境問題や化石燃料枯渇問題のために使われてきたが，その素早く正確なトルクのコントロール性能を活かした精密な車両運動制御のアクチュエータとしても使われている。この特性を活かした制御技術として，スリップ率に基づいた駆動力制御がある。この技術によって安全性，快適性，航続距離が改善できることが知られている。しかしながら，この技術を1ディファレンシャルギア，1モータ構成の車両に適用しようとすると駆動系共振の問題があり、共振を回避するために制御の安定性を確保するには，ドライバが違和感を覚えるほど制御の応答性を落とす必要があった。そこで，あらかじめドライビングスティフネスを算出し，そこから目標スリップ率を算出することで2重フィードバックループを1重にするという手法を開発した。この手法により，スリップ率に基づいた駆動力制御の応答性を改善することができ，目標とするトルクや加速度に高速でかつ精密に制御できる。この制御をBEVに実装し，低摩擦路面で試験し，その性能を実証した。

Summary

A traction motor on Electric Vehicle (EV) can be utilized for not only a green power source, but also an accurate controller of vehicle motion. As a method of utilizing these characteristic, traction control method of EV based on a precise control of slip ratio between driving tire and road surface has been proposed. By this method, improvement of safety, comfort and mileage per charge was reported. But, this method was for an application to In Wheel Motor (IWM) vehicle. In case of application to conventional EV, improvement of resonant vibration and control response were the major problem due to its complex drive-line. In this paper, we propose the new method which calculates a target slip ratio by using estimated driving stiffness without driving force feedback loop. Therefore this method has higher response than the conventional method. We also applied this method to EV and tested its performance on snowy, icy surface in the proving ground. The effectiveness of this method is verified by experiments.

1. はじめに

地球温暖化や化石燃料枯渇問題の対策手段としてBEVやHEVが注目され出して久しい。当初は環境性能に主眼を置いて開発が行われてきたが，近年では電気駆動モータの優れた応答性や正確な力行・回生トルク制御を使った快適化技術，車両運動制御技術が次々と提案されている(1) (2)。我々は電気駆動モータの優れた特徴を車両運動制御へ応用する研究として，スリップ率ベースの駆動力制御に着目し研究を行っている。この制御には航続距離延長，アンチスリップによる安全性，頻繁に路面摩擦係数の変わる環境下の快適な走行性といった多くの利点が期待できる。電気自動車のスリップ率制御に基づく駆動力制御方法として，従来は制御性に優れるインホイールモータ（IWM）による駆動力制御法が提案されてきたが(3)，この制御をディファレンシャルギアと1モータを持つ電気自動車に適用し，安定

*1～3　技術研究所
Technical Research Center
*4　東京大学　大学院新領域創成科学研究科
先端エネルギー工学専攻
Department of Advance Energy, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

した制御ができるゲイン設定をすると，路面摩擦係数の変化に対するトルク変化の応答性が悪いなどの問題が発生する。そこでディファレンシャルギアと1モータを持つ電気自動車のスリップ率に基づく駆動力制御を高速化し，応答性の高いスリップ率制御を開発した。

2. タイヤのスリップ率と駆動力

車両の運動を変える際，たとえば加減速や旋回などを行うためにタイヤに力を加えるとタイヤが変形を始める。タイヤと路面間の力の伝達は摩擦力で行われるため， ある程度以上の力を加え，摩擦力が最大静止摩擦力を超えると静摩擦の状態から動摩擦の状態へと移行する。動摩擦の状態は静摩擦の状態に比べ摩擦力が小さいため，力を加えても車両の運動が変えにくい。これにより効率が悪い・ブレーキが効かない・車体が安定せず不快である等のデメリットが多い。この状態を極力避ける手段としてスリップ率制御が開発された。

摩擦力は静摩擦状態，動摩擦状態と表現することもできるが，前述のとおり，タイヤをはじめ物体は力を加えると変形するため，静摩擦といわれる状態でも微小なスリップを起こしている。このため，以降では静摩擦状態のことを微小すべり状態，動摩擦状態を巨視的すべり状態と表現する。制動力・駆動力の場合はスリップ率と摩擦係数の関係からこの二つの領域を分けることができる。Fig. 1はスリップ率と摩擦係数の関係を表している。これを見ると微小すべり領域ではスリップ率と摩擦係数の関係は線形的に変化しているが，最大摩擦係数を超えた点からはスリップ率を増加させても摩擦係数は増加しないことが分かる。

本制御ではこのスリップ率と摩擦係数の関係を用いて制御則を構築する。

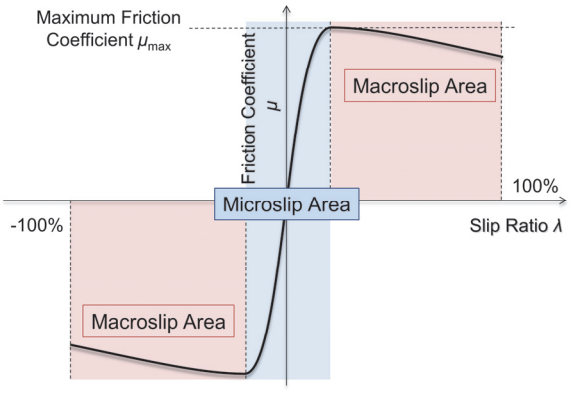


Fig. 1　Typical Relationship between Slip Ratio and μ

3. 車両モデル

本研究では制御車両としてマツダデミオEV（Fig. 2）を使う。この車両の構成をFig. 3で示す。前輪駆動でモータからディファレンシャルギアを介してドライブシャフト，前輪へ続く駆動系になっている。

Fig. 2　Appearance of Test Vehicle

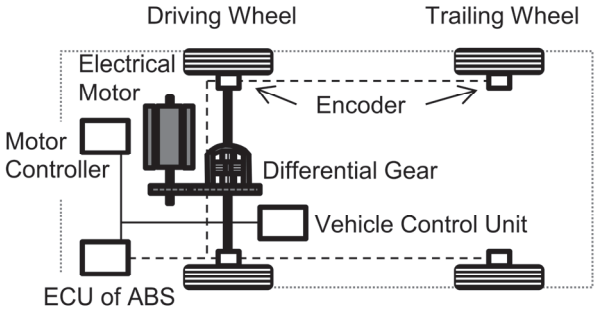


Fig. 3　Physical Architecture of Test Vehicle

制御ロジックを構築するにあたり制御対象をモデル化した。車輪を中心とした車両モデルを考える。Fig. 4のような一輪モデルを考え走行抵抗を無視した時，次式が成り立つ。

$$J\dot{\omega} = T_d - rF_d \tag{1}$$
$$M\dot{V} = F_d \tag{2}$$
$$F_d = \mu N \tag{3}$$
$$V_t = r\omega \tag{4}$$
$$y = \frac{V_t - V}{\max(V, \epsilon)} \tag{5}$$

ここで，Jは車輪周りの慣性モーメント，ωはタイヤの角速度，Tは車輪軸周りのトルク，rはタイヤ半径，F_dは一輪あたりの駆動量，Mは車両質量，Vは車体速度，μは摩擦係数，Nはタイヤ荷重，yは分母を車体速に固定した疑似スリップ率[3]（以下単にスリップ率という），ϵはゼロ割防止の微小定数である。 実際には駆動輪は左右にあるため二輪で考え，

$$F_d = F_{dL} + F_{dR} \tag{6}$$

とする。添え字のL，Rは左右を表す。

さて，直進かつ左右からの駆動力反力が等しければ一輪車両モデルとしても不都合がないが，左右で路面摩擦係数が異なり，左右の反力が異なる路面を走行した時，Fig. 5のようなディファレンシャルギア周りの運動方程式を考慮する必要がある。

この時，式(1)は

$$gT_{\mathrm{mot}} - J_{\mathrm{mot}}\dot{\omega}_{\mathrm{fg}} = rF_{dL} + J_L\dot{\omega}_L + rF_{dR} + J_R\dot{\omega}_R + J_p\dot{\omega}_p \quad (7)$$

$$J_p\dot{\omega}_p = rF_{dL} - rF_{dR} \quad (8)$$

となる。ただしJ_{mot}はモータからファイナルギアまでの慣性モーメント，J_pはピニオンギア周りの慣性モーメント，gはトランスアクスルの減速比，T_{mot}はモータトルクである。本実験車はLSD（Limited Slip Differential gear）のような差回転を制限する機構を持たないため，直進時ではピニオンギアの回転をゼロ，すなわち

$$F_{dL} = F_{dR} \quad (9)$$

となるように制御する。これは左右輪反力の小さい方に合わせて制御することを意味しており，左右の路面摩擦係数が異なるときは摩擦係数の低い方に合わせて制御を行う。

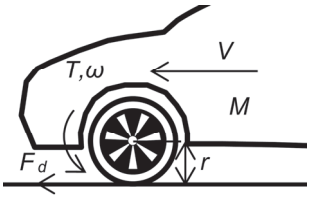


Fig. 4　One Wheel Model

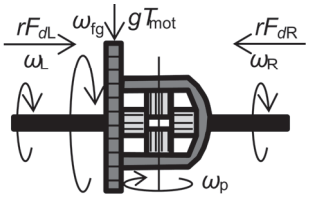


Fig. 5　Differential Gear

4. 制御の考え方

4.1　ドライビングスティフネスを使った駆動力制御法

制御対象を前述のようなモデルとし，式(3)とFig. 1の関係を用いて制御法を考える。スリップ率を使った駆動力制御法はたとえば文献(4)のような2重ループを使った駆動力制御法が提案されてきた（Fig. 6）。しかしながらこのような目標の駆動力を得るまでに微細に駆動力を制御する制御方法では今回の実験車のような1ディファレンシャルギア，1モータを持つ車両に適用すると駆動系共振の抑制と駆動力制御応答性がトレードオフになり十分な性能を得ることができなかった。そこで，以下のような方法を考案した。

Fig. 7はスリップ率と駆動力の関係を模式的に示したものである。F_{d0}は現在発生している駆動力，F_d* は目標駆動力，y_{j0}は現在のスリップ率，y_j*は目標スリップ率であり，添え字のjには高摩擦路面を表すHと低摩擦路面を表すLが入る。2重ループを持つフィードバック制御で駆動力制御を行う時，スリップ率と駆動力が線形関係にあると見做せる領域で応答性を保つためにはドライビングスティフネスk_dに合わせてフィードバックゲインKを決める必要がある。

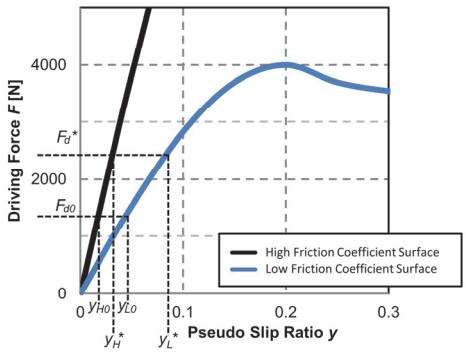


Fig. 7　Typical Relationship between F and y

そこで本稿では，ドライビングスティフネスをy_{j0}とF_{d0}の関係から求め，その逆数と要求駆動力から目標スリップ率を算出する方法を提案する。そして，そのスリップ率と車両からフィードバックされたスリップ率の差分を求め，ドライビングスティフネスからモータトルク指令値を算出するというものである。ドライビングスティフネスの同定方法はさまざまな提案があるが，ここではスリップ率と駆動力の関係が原点を通ると仮定し，単純に比を使い，時間で移動平均することで同定している。

4.2　ドライビングスティフネスを使ったフィードバック制御の構築

文献(4)など従来の提案では，スリップ率から目標駆動車輪速を算出し，実駆動車輪速との差分から指令トルクを算出していた。著者らは目標駆動力が一定の時，目標値が変わりにくい車輪加速度のフィードバックの方がより安定して制御できると考えた。車輪加速度の導入にあたり，

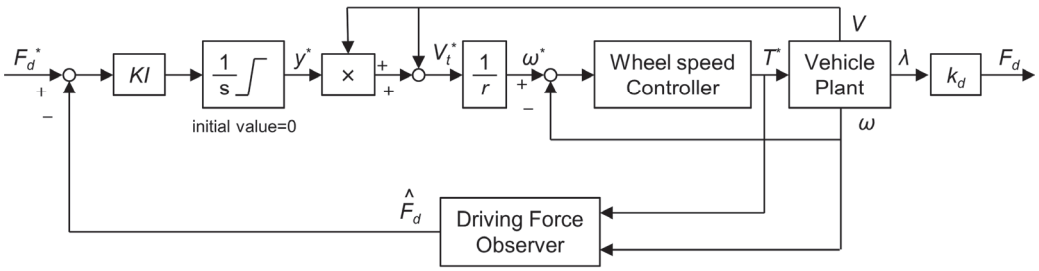


Fig. 6　Double Loop Method (Fujimoto, 2011)[7]

次のように考える。駆動力とスリップ率が線形関係にある領域を使うことを前提に，式(5)を変形すると以下のようになる。

$$y = k_d^{-1} F_d = k_d^{-1} M\dot{V} \tag{10}$$
$$V_t = (1+y)V = (1 + k_d^{-1} M\dot{V})V \tag{11}$$
$$\dot{V}_t = k_d^{-1} M\ddot{V}V + (1 + k_d^{-1} M\dot{V})\dot{V} \tag{12}$$

ここで一定で加速している時は車体加加速度をゼロとみなす。式(12)の右辺第一項を無視し，加速度をAと置き，

$$A_t^* = (1 + k_d^{-1} MA)A \tag{13}$$

として，目標車輪加速度を求める。

次に車輪加速度のフィードバックゲインの与え方を考える。まず式(13)に式(10)を代入すると

$$A_t^* = (1+y)A \tag{14}$$

となる。現在発生している車輪加速度をA_{t0}としたとき，次式のように目標車輪加速度との差分から変形でき，スリップ率を暗示的に持たせながら駆動トルク増分を車輪加速度の差分を使って表すことができる。

$$\begin{aligned} A_t^* - A_{t0} &= (y^* - y_0)A \\ &= \frac{F_d^* - F_{d0}}{k_d} A \\ &= \frac{T_d^* - T_{d0}}{r k_d} A \end{aligned} \tag{15}$$

$$\Delta T_d = \frac{r k_d}{A}(A_t^* - A_{t0}) \tag{16}$$

一方，非線形領域は次のように考える。一定加速状態で目標スリップ率を超えたとき，目標スリップ率に応じた実駆動力と目標駆動力の乖離に応じて慣性力が上昇したと考えることができる。この時の剰余トルクは次のように表現できる。

$$\Delta T_d = r(k_d y_L^* - F(y_L^*)) \tag{17}$$

関数$F(x)$はスリップ率xを入力した時に真の駆動力Fを返す関数である。この剰余トルクは駆動系の慣性力に変換されているとすると，式(1)の関係からこのΔT_dを求めることができる。まず，角加速度は

$$\dot{\omega} = \frac{A_t}{r} \tag{18}$$

と求めることができるので，

$$\begin{aligned} \Delta T_d &= J(\dot{\omega}^* - \dot{\omega}_{L1}) \\ &= \frac{J}{r}(A_t^* - A_{t1}) \end{aligned} \tag{19}$$

と書ける。添え字１は非線形領域上にいる状態を表す。

以上をまとめると，以下の式のようにモータへの指令トルクを決めることができる。

$$k_d[k] = \frac{g}{r(n+1)} \sum_{l=0}^{n} \frac{T_{\mathrm{real}}[k-l]}{y[k-l]} \tag{20}$$

$$y^* = \frac{g T_{\mathrm{mot}}^*}{r k_d} = \frac{M A^*}{k_d} \tag{21}$$

$$A_t^* = (1 + y^*)A \tag{22}$$

$$T_{\mathrm{req}} = \begin{cases} \dfrac{r k_d}{\max(A, \epsilon)}(A_t^* - A_t) + T_{\mathrm{real}} & \text{if } T \propto y \\ \dfrac{J}{r}(A_t^* - A_t) + T_{\mathrm{real}} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{23}$$

ここで，　T_{real}はモータ電流から算出されるモータが実際に発生しているトルク，T_{req}はインバータに要求するモータトルクである。式(20)は移動平均を示しており，T_{real}やyの添え字kは離散時間上のステップを表している。nは任意の自然数で，k_dが十分収束するように設定する。

式(20)から式(23)にフィードフォワード項を加えたものをブロック線図で表したものがFig. 8となる。この時，APはアクセルペダルポジションを表し，ΔT_{FF}はフィードフォワードから算出されるトルク増分，ΔT_{FB}はフィードバックから算出されるトルク増分，sのブロックは微分演算を表している。

4.3　フィードフォワード制御

EVが内燃機関車に対して優位な点としてアクセルペダルの踏み込に対する加速の反応の良さがしばしば取り上げ

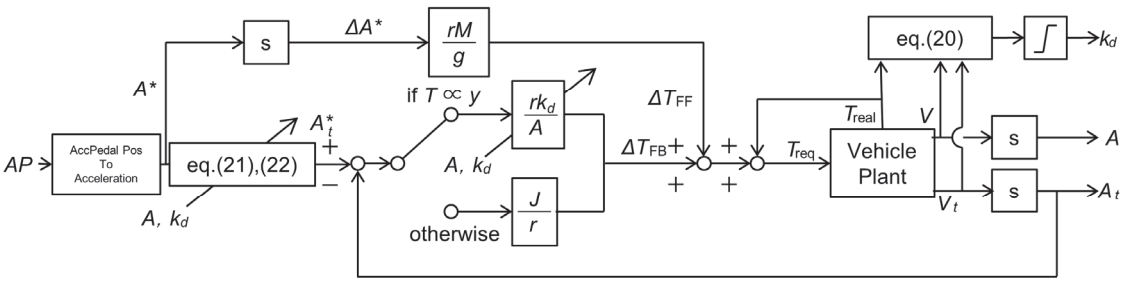


Fig. 8　Block Diagram of Driving Force Controller

られる。前述のフィードバック制御は路面摩擦係数変化による駆動力変化の応答性は確保できたが，アクセルペダル踏み込みに対する応答性が，ベース車両であるデミオEVに対し劣っていた。

そこでフィードフォワード制御を導入し，この問題を解決した。アスファルト路面での全開加速のレスポンスを市販車同等になるようにゲインのチューニングを施した。こうすることによりEVの持ち味を損なわず，本制御の利点を付加することができる。

5. 車両への実装と走行実験

開発した制御を実装する実験車両（デミオEV）は，指令トルクに基づいたベクトル制御で永久磁石同期モータの発生トルクをインバータが制御している[5]。駆動モータの電流量から発生トルクを推定し，それぞれの駆動輪のエンコーダから車輪速を検出することができる。加速度センサは搭載されていないため，加速度は車輪速センサから求める。インバータに送信するトルク指令値を生成するロジックに，提案するFig. 8の制御ロジックを置き換えることで機能を実装した。実験車両を用いて，特にその効果を発揮しやすい低摩擦路面で制御効果を検証した。この時，式(23)の分母の車体加速度は簡単化のために本実験に関しては1m/s²で固定としている。実験では，従来のトラクションコントロールシステム（TCS）の制御と，今回提案する駆動力制御を実装し，同じ条件でテストした。そして提案した制御ロジックが従来のTCSに対しどの程度アドバンテージがあるのかを確認した。

低摩擦路面性能の確認は北海道の寒冷地試験場で行った（Fig. 9）。試験時の外気温は-7℃であり，融解による路面の水膜はない状態である。

Fig. 10は圧雪路での走行結果である。従来のTCSは最初に起きたスリップを検知して，スケジュールされたトルクまでトルクダウンしてスリップを止める。この時の車体の加速度を表しているのがFig. 10の下段であるが，これを見るとトルクダウンに伴い大きな加速度の落ち込みが発生していることが分かる。これに対してスリップ率制御は目標のスリップ率に収束するようにトルクを制御するので，大きなトルクダウンは発生しなかった。

Fig. 11はアイスバーンでの走行結果である。TCSとスリップ率制御は一見同じトルクで制御されているが，TCSは大きなスリップ率に高止まりしているのに対してスリップ率制御は速やかに目標スリップ率に収束するという現象を確認できた。スリップ率制御は応答性が改善されており，速やかに目標までトルクダウンするために，確実に線形領域までスリップ率が落ちる。線形領域ではタイヤの横力が残るので，旋回中に安定した走行ができるということも確認できた。

また，加速以外の走行シーンとして登坂の試験も行った。Fig. 12は勾配が12%～25%変化する圧雪の勾配路を登った時の結果である。勾配路を登っていくと，フロントタイヤにかかる荷重がだんだん抜けていき，同じ駆動力でもスリップ率が増えてやがて巨視的なスリップが発生する。この時，従来のTCSはスリップを検知し，大きくトルクダウンしてグリップを回復させようとするが，一方で坂道なのでトルクが落ちすぎると坂道で止まってしまうという現象が起こる。提案したスリップ率制御の方も勾配の増加とともに巨視的スリップ領域に突入しようとするが，応答性が改善されているため，目標スリップ率を超えると速やかにかつ精細にトルクダウンが発生できるため，結果として大きくトルクダウンすることなく，止まらずに最後まで登りきることを確認した。

Fig. 9　Scene of Cold Region Test

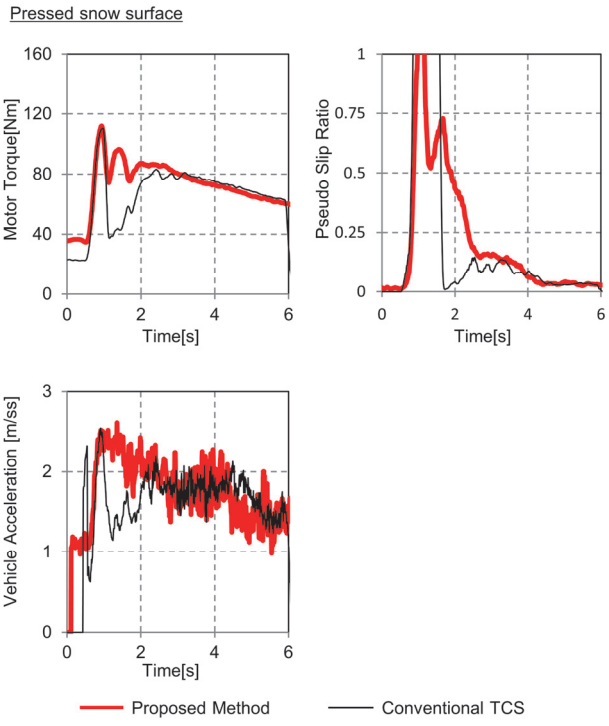


Fig. 10　Result of Pressed Snow Road Test

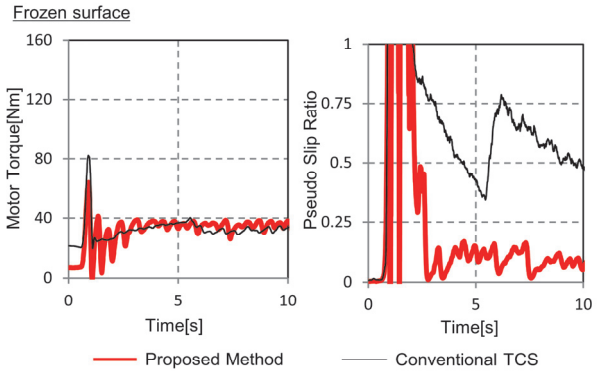


Fig. 11　Result of Frozen Road Test

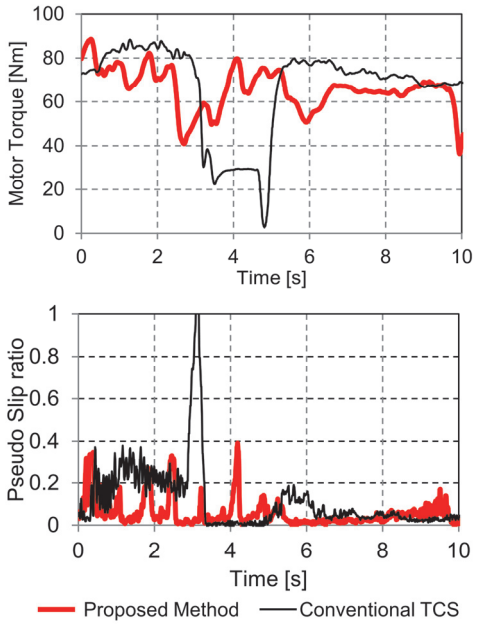


Fig. 12　Result of Snowy Steep Slope Test

6. 結論

本研究では，1ディファレンシャルギア，1モータを持つ電気自動車の構成でスリップ率に基づく駆動力制御の実装において，駆動系共振を回避しながら制御速度を上げるために，ドライビングスティフネスを使ったシングルループの制御法を開発した。

そして，本制御を実装した車両を寒冷地試験場に持ち込み，試験を行うことで以下の知見を得た。

・圧雪路で強い加速を行い，タイヤがスリップするような条件では，スリップ率制御を行うことで高い加速度を維持しながら加速することができる。

・アイスバーンのようなすぐに滑るような路面でスリップ率制御を行うと，微小すべり領域までスリップ率を落とすことができるので，車体の安定感が増す。

・滑りやすい登坂路のような駆動力が落ちてほしくない場面のトラクションをコントロールする手段としてもスリップ率制御は有効であった。

以上から，スリップ率をコントロールし，さまざまな路面で利点の多い駆動力制御を開発することができた。

参考文献

(1) 苅込ほか：新開発EV 向けの高応答加速度制御，自動車技術会学術講演会前刷集No.55-11，pp.5-8（2011）

(2) 藤本ほか：安全性/快適性/航続距離向上のための前後輪独立駆動電気　自動車の制御，自動車技術会学術講演会前刷集，No.10-12，pp.5-8（2012）

(3) 藤本ほか：電気自動車におけるスリップ率制御に基づく駆動力制御法，自動車技術会学術講演会前刷集，No.3-11，pp.11-14（2011）

(4) 藤本ほか：可変駆動ユニットシステムを有する電気自動車の開発と制御，2013 年自動車技術会春季学術講演会前刷集，No8-13，pp. 17-20（2013）

(5) 佐藤ほか：デミオEV の電子式巻線切り替えモータドライブの開発，マツダ技報，No.30，pp.120-124（2012）

(6) 前田ほか：左右独立可能な電気自動車の運動制御，2013 年自動車技術会春季学術講演会前刷集，No30-13，pp.11-14（2013）

(7) 吉村ほか：インホイールモータを搭載した電気自動車の駆動トルク制御法，電気学会論文誌D，Vol. 131-D，No.5，pp.721-728（2011）

■著　者■

髙野 毅

延本 秀寿

岡﨑 俊実

藤本 博志

論文・解説

41

広島ITS実証実験における 路面電車-自動車間通信型ASVの機能検証

Functionality Tests of Advanced Safety Vehicle Using Vehicle-to-Tram Communication on Hiroshima Public Roads

山本　雅史*1　奥木　友和*2　岩下　洋平*3
Masashi Yamamoto　Tomokazu Okugi　Yohei Iwashita
岡崎　晴樹*4　是　治久*5　長谷川　智紀*6
Haruki Okazaki　Haruhisa Kore　Tomonori Hasegawa

要　約

路面電車と自動車との間の無線通信に車載センサを組み合わせることで，路面電車と自動車が道路空間を共用する場所において，自動車と路面電車双方の安全性が高まる先進安全運転支援システムを構築した。2013年に「広島における世界初の路面電車-自動車間通信型ASV（Advanced Safety Vehicle：先進安全自動車）」として広島市内の公道で広島ITS（Intelligent Transport Systems：高度道路交通システム）実験を実施した。

本稿では，自動車と路面電車の間の通信を利用した安全運転支援システムについて，システムの概要と支援機能の内容を述べるとともに，広島市内の公道で実施した機能検証実験とその結果について述べる。

Summary

To improve the safety of both vehicles and trams on their shared roads, an innovative safe driving support system was developed, which combines onboard sensors with the vehicle-to-tram radio-communications. Mazda Atenza ASV-5 (Advanced Safety Vehicle - Phase 5) was developed to verify the system as the “world’s first vehicle-to-tram cooperative ASV”, which was tested on Hiroshima public roads in 2013.

Five driving support functions were installed in the Mazda Atenza ASV-5, including the approaching tram information provision systems selected based on the tram-involving accident analysis.

This paper describes the overview of the ASV-5 system, the safe driving support functions, and the results of the functional verification tests conducted on the public roads.

1. はじめに

日本，米国，欧州では，無線通信を使って車同士が情報を交換する「車車間通信（V2V：Vehicle-to-Vehicle Communication）」や，路側設備と車が無線通信する「路車間通信（I2V：Infrastructure-to-Vehicle Communication）」を利用して，交通安全，環境問題，交通円滑化，利便性向上などの道路交通に係る諸問題の解決を目指した研究開発が行われている(1)。

日本では，国土交通省が主導し，国内自動車メーカ全社が参加するASV-5プロジェクト（第5期先進安全自動車推進計画）があり，車車間通信を利用した安全運転支援システムの検討が行われている。また，2014年からは内閣府に設置されている総合科学技術・イノベーション会議が主導する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：Cross-Ministerial Strategic Innovation Promotion Program）において，「自動走行（自動運転）システム」の研究開発の取り組みが行われ，この中で，2017年ごろの実用化を目標として，V2V／I2Vを活用した安全運転支援技術の実証実験が実施される計画である(2)。これらは，V2V／I2Vにより周辺車両の存在を検知することで，物陰に隠れて見えにくい接近車両の情報を事前にドライバに伝えたり，衝突する危険性がある場合に注意を喚起したりすることで，交通事故を未然に防止することをねらいとしている(3)。

このような車車間通信，路車間通信を活用して交通事故

*1　Mazda North American Operations
*2，3　技術研究所
Technical Research Center
*4，5　車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.
*6 (独)交通安全環境研究所
National Traffic Safety and Environment Laboratory

を減らそうとする取り組みは，自動車のみならず，道路空間を共有する他の交通参加者（鉄道や歩行者など）へ展開・適用することで，より安全・安心な道路交通社会の実現に資すると期待される。

広島市では，路面電車が市民の足として定着しており，一日平均約15万人の利用がある。近年，路面電車はエコな交通手段として世界的に見直されるなかで，自動車も自由な移動手段として発展を続けている。この二つの交通形態が，それぞれのメリットを活かしつつ共存できる交通体系を作るために，東京大学，マツダ(株)，広島電鉄(株)，(独)交通安全環境研究所が協働して，鉄道とクルマとの安全な連携を目指して共同研究に取り組んでいる。路面電車と自動車との間の無線通信に自律型車載センサを組み合わせることで，自動車と路面電車双方の安全性が高まるシステムを構築し，2013年に「広島における世界初の路面電車-自動車間通信型ASV」として広島市内の公道で広島ITS実験を実施した[4),(5)]。

本稿では，車車間通信を利用した路面電車-自動車間通信型の安全運転支援システムについて，システムの概要と支援機能の内容を述べるとともに，広島市内の公道で実施した機能検証実験とその結果について述べる。

2. 路面電車-自動車間通信型ASVの開発

広島ITS実証実験を実施するにあたり，「マツダアテンザASV-5」実験車（Fig. 1），およびデモ路面電車を開発し，自動車と路面電車との間の車車間通信を利用した安全運転支援システムを搭載した。本章では，開発した安全運転支援システムの概要を述べる。

Fig. 1　Mazda Atenza ASV-5

2.1　システム構成

Fig. 2 に，マツダアテンザASV-5に搭載したデバイスを示す。カメラやレーダなどの車載センサに加えて，車車間・路車間通信を行う通信デバイスを搭載した。また，ドライバへの情報提供デバイスとして，ウインドシールド投影型のHUD （Head-Up Display：ヘッドアップ・ディスプレイ）とスピーカを搭載した。

マツダアテンザASV-5と路面電車間の車車間通信は，

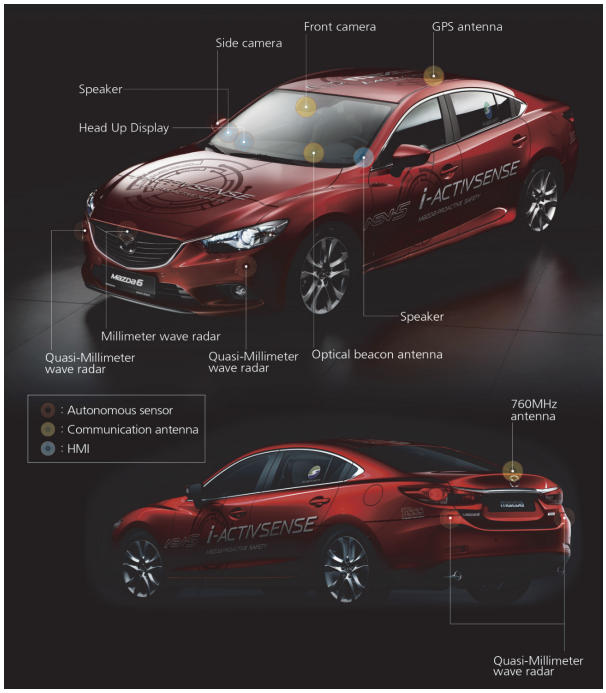


Fig. 2　System Configuration

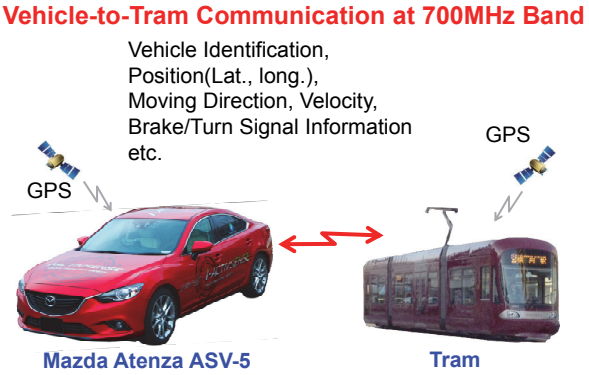


Fig. 3　Communication System

700MHz帯高度道路交通システム標準規格（ARIB STD-T109）に準拠した700MHz 帯無線通信機を用いた（Fig. 3）。この車車間通信機を用いることで，マツダアテンザASV-5と路面電車は，GPSで測位した位置情報（緯度，経度）や進行方向，速度，ブレーキやウインカなどのドライバ操作情報などを，100msの間隔で送受信する。

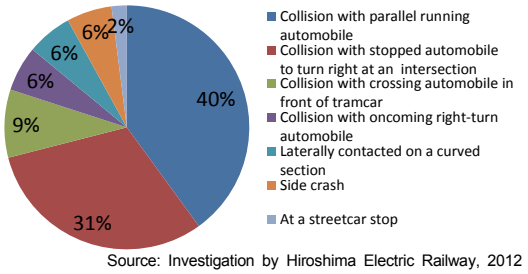
3. 搭載した安全運転支援機能

自動車と路面電車の事故実態に基づき，自動車，路面電車に搭載する支援サービスを検討し，アプリケーション開発を行った。本章では，自動車と路面電車の事故実態の概要と，マツダアテンザASV-5に搭載した安全運転支援サービスの機能について述べる。

3.1　自動車と路面電車の連携による支援

路面電車が関与する衝突事故の内訳を表したグラフを

Fig. 4に示す。Fig. 4より，並走する自動車との衝突事故（40%），右折待機中の自動車との衝突事故（31%），直前を横断する自動車との衝突事故（9%）の割合が高いことが分かる。このことから，これら3つの事故類型に対応した安全運転支援サービスを開発することとした。すなわち，駐車車両や障害物を避けるために自動車が軌道敷内に進入してくる場面，路面電車の前方で自動車が右折しようとしている場面，見通しの悪い路地から自動車が出て軌道敷を横断する場面において，衝突の可能性を判断し，自動車のドライバ，路面電車の運転士双方に対して情報提供・注意喚起するサービスを構築した（Fig. 5, 6）。なお，路面電車側の支援機能の開発は，(独)交通安全環境研究所が取り組んだ。



Source: Investigation by Hiroshima Electric Railway, 2012

Fig. 4　Collision Types Involving Tram

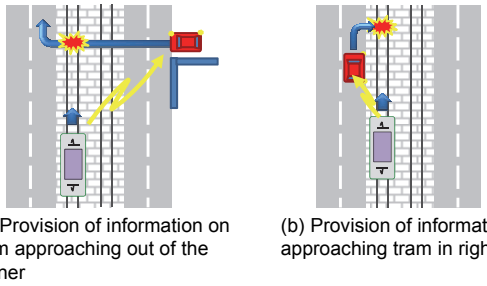
3.2　システムの機能動作

本節では，Fig. 5 (a), Fig. 6(a) に示した見通しの悪い路地から自動車が出て軌道敷を横断する場面における支援を例に取り上げ，マツダアテンザASV-5，路面電車双方におけるシステムの機能動作について述べる。一連の機能の動作の流れをFig. 7に示す。

（1）マツダアテンザASV-5での支援

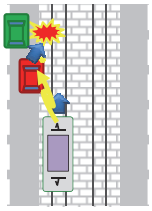
システムを搭載したマツダアテンザASV-5が，信号のない交差点から路面電車が走行する道路に進入するときに，接近する路面電車が存在すると，喚起音とともにFig. 7の右下に示す画像をHUD に表示することでドライバに路面電車が接近していることを注意喚起する。

マツダアテンザASV-5が，対象となる交差点に接近し十分に減速すると，支援機能がアクティベートされる。自車が交差点に接近し，十分に減速したことは，ドライバのブレーキ操作の有無，車速，交差点に対する自車の位置から判定する。このとき，路面電車が存在し，注意喚起する必要があるかを判断する。注意喚起を出すタイミングの判断は，路面電車のTTC（Time To Crossing：交差点までの到達時間＝交差点までの距離／速度）に基づいて行う。車車間通信で獲得した路面電車の位置と走行速度，マツダアテンザASV-5に搭載した道路地図データベースを用いて逐次TTC を計算し，あらかじめ設定しておいた閾値を下回った時点で注意喚起を出す。注意喚起の終了タイミング



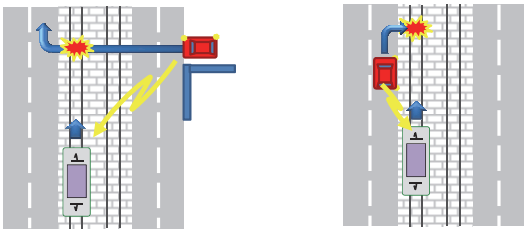
(a) Provision of information on tram approaching out of the corner

(b) Provision of information on approaching tram in right turn



(c) Provision of information on approaching tram in overtaking

Fig. 5　Supports for Car Driver



(a) Provision of information on right-turn vehicle at blind corner ahead

(b) Provision of information on right-turn vehicle ahead

Fig. 6　Supports for Tram Driver

は，路面電車が交差点に到達したこと，もしくは自車が発進したことを判定して算出している。

（2）路面電車での支援

システムを搭載した路面電車が交差点に接近したときに，交差する道路から直進，もしくは右折しようとする自動車が存在すると，音声メッセージを出力するとともにFig. 7の左下に示す画像をディスプレイに表示することで運転士に対して自動車が交差点に進入しようとしていることを知らせる。更に，自動車との距離が縮まり衝突の危険が高まったときには，Fig. 7の左上に示す画像で運転士に注意を喚起する。

以上のように，自動車と路面電車の双方で支援を行うことで，万が一，ドライバ，運転士のどちらかが認知ミスを起こした場合でも，他方がカバーすることで衝突を防ぐことができ，双方の安全性を高めることが期待できる。

4. 広島でのITS 公道実験

Fig. 5, 6 に示す7 つの支援機能を確認するために，2013年9月から10月に広島市内の公道で走行実験を行った。実験は，Fig. 8に示す広島電鉄江波線（江波駅～舟入本町

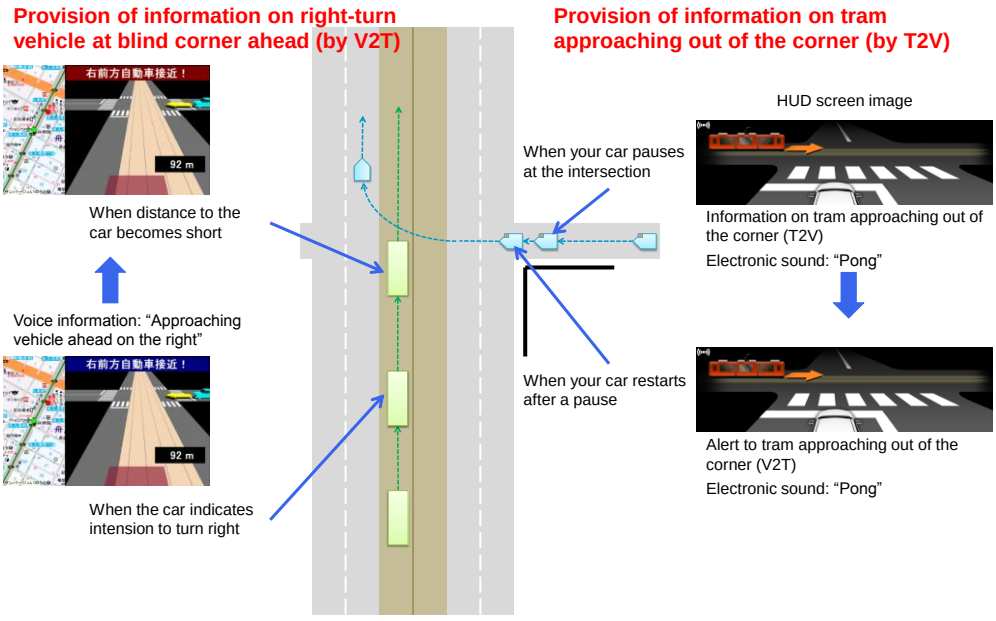


Fig. 7　Example of Support Scenario

駅）沿いで行った。また，実験に用いたマツダアテンザASV-5，路面電車をFig. 9に示す。

実験では，それぞれの支援サービスについて実交通環境の中で設計どおりに機能・動作するか検証を行った。本章では，マツダアテンザASV-5に搭載した路面電車に対する支援サービス（Fig. 5）について結果を示す。

4.1　マツダアテンザASV-5の支援機能の検証

実験では，4日間でのべ25回の試験走行を行った。今回の実験の目的は，アプリケーションの機能検証であるため，マツダアテンザASV-5，路面電車の走行開始タイミングをコントロールすることでアプリケーションが作動する状況を作り出し，データを収集した。

（1）軌道横断時の路面電車接近の注意喚起

Fig. 10に，軌道横断時に路面電車の接近を注意喚起する支援サービス（Fig. 5 (a)）の機能検証の結果を示す。Fig. 10 (a) のグラフにおいて，緑色線は路面電車の位置（交差点までの距離）を，青色線はTTCを示す。Fig. 10 (b) のグラフにおいて，橙色線と紫色線は，それぞれマツダアテンザASV-5の速度と位置（交差点までの距離）を示す。Fig. 10 (a), (b) のグラフにおいて，赤色線はマツダアテンザASV-5における路面電車接近の注意喚起支援のステータス（0：支援サービス終了，1：支援サービス起動中（接近路面電車なし），2：注意喚起起動中（接近路面電車あり））を示す。

Fig. 10のグラフより，マツダアテンザASV-5が対象の交差点に接近した時点で，支援サービスがアクティベート状態（支援ステータス1）となり，路面電車が交差点に近づいた時点（路面電車の位置，もしくはTTCが所定の閾値を下回ったとき。掲載したデータでは路面電車の位置が50m以内となったとき）で注意喚起が開始された（支援

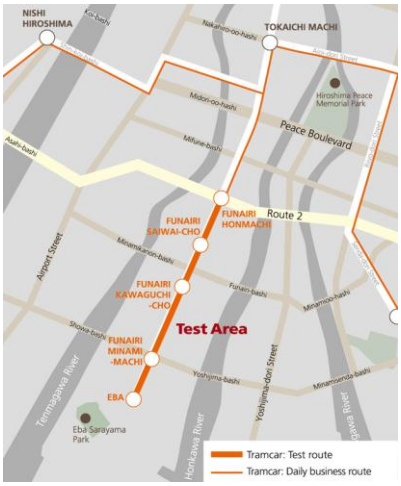


Fig. 8　Test Area

Fig. 9　Mazda Atenza ASV-5 and Test Tram Operation

ステータス2）ことが分かる。支援サービスは，路面電車が交差点に進入した時点で終了（支援ステータス0）したことが分かる。

（2）右折時の路面電車接近の注意喚起

Fig. 11に，右折時に後方からの路面電車の接近を注意

喚起する支援サービス（Fig. 5 (b)）の機能検証の結果を示す。Fig. 11 (a) のグラフにおいて，緑色線は路面電車の位置（交差点までの距離）を，青色線はTTC（交差するまでの余裕時間＝車と路面電車の相対距離／相対速度）を，灰色線はマツダアテンザASV-5と路面電車の相対距離を示す。Fig. 11 (b) のグラフにおいて，橙色線と紫色線は，それぞれマツダアテンザASV-5の速度と位置（交差点までの距離）を，水色線はウインカ状態（0：ウインカオフ，1：ウインカオン）示す。Fig. 11の上下のグラフにおいて，赤色線はマツダアテンザASV-5における後方からの路面電車接近の注意喚起支援のステータスを示す。

Fig. 11のグラフより，マツダアテンザASV-5が右ウインカを出して対象の交差点に接近すると，支援サービスがアクティベート状態（支援ステータス1）となり，更に交差点に近づいたとき（今回は交差点から50m以内と設定）に後方から路面電車が接近すると注意喚起が開始された（支援ステータス2）ことが分かる。支援サービスは，マツダアテンザASV-5が交差点手前で右折待ちの間も継続され，路面電車が交差点に進入した時点で終了（支援ステータス0）したことが分かる。

（3）障害物回避時の路面電車接近の注意喚起

Fig. 12に，障害物回避時に後方からの路面電車の接近を注意喚起する支援サービス（Fig. 5 (c)）の機能検証の結果を示す。Fig. 12のグラフにおいて，緑色線はマツダアテンザASV-5と路面電車との相対距離を，青色線はマツダアテンザASV-5のウインカ状態を，赤色線はマツダアテンザASV-5における障害物回避時の路面電車接近の注意喚起支援のステータスを示す。

Fig. 12のグラフより，マツダアテンザASV-5が駐車車両などの障害物を回避することを模擬して右ウインカを出したときに，後方に路面電車が存在していたために注意喚起が開始された（支援ステータス2）ことが分かる（今回の検証実験では，支援サービスがアクティベートとなる条件を満たすと同時に注意喚起を実行する条件を満たしていたため，支援ステータス1の状態は記録されていない）。

以上の結果から，路面電車に関する3つの支援サービスが，支援効果を発揮すると期待されるそれぞれの基本シナリオに相当する実交通環境下において，設計どおりにアプリケーションが作動し，路面電車の接近状況に応じてドライバに情報提供ができていることが確認できた。

5. 今後の課題

5.1　複雑な交通状況への対応

今回の機能検証実験は，マツダアテンザASV-5と路面電車の走行開始タイミングをコントロールすることで，支援サービスの基本シナリオとなるように管理された条件下で行った。しかし，実交通環境下では刻一刻と複雑に交通環

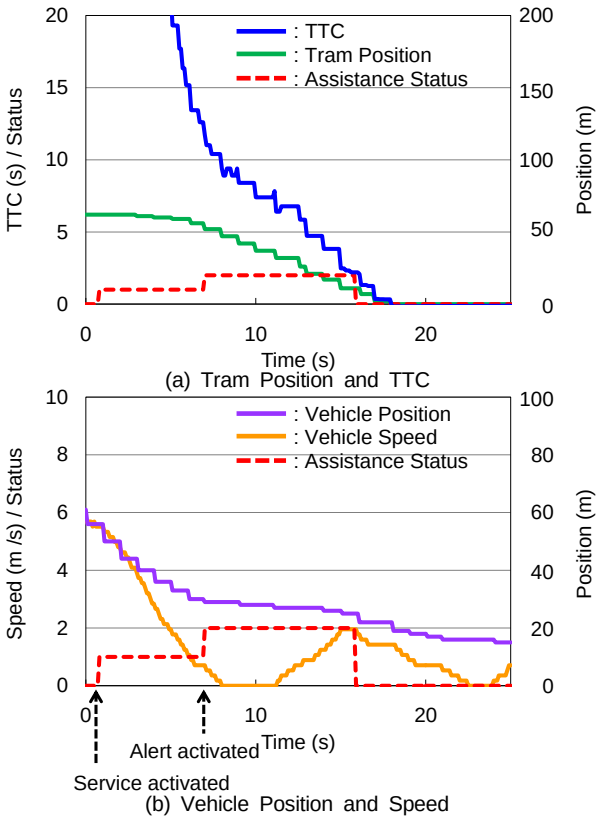


Fig. 10　Result of Function Verification
(Alert to Tram Approaching out of Corner)

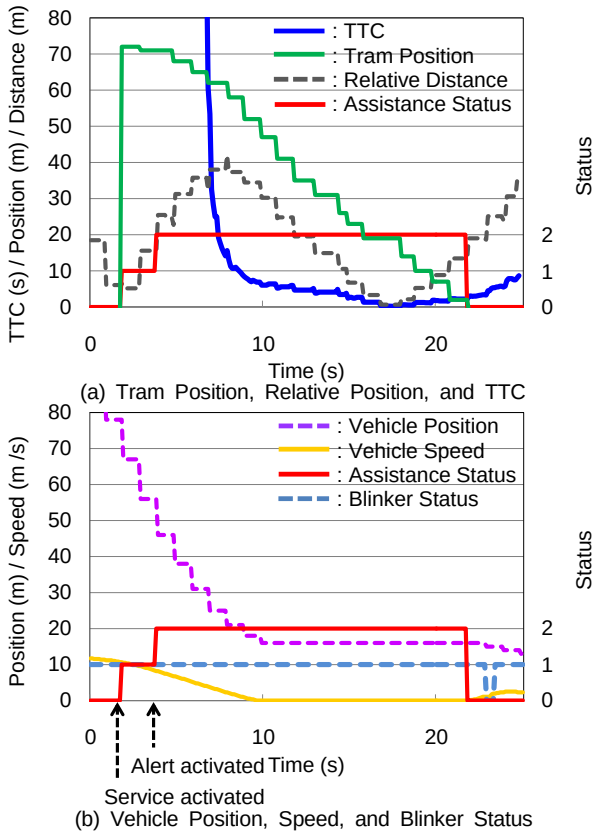


Fig. 11　Result of Function Verification
(Alert to Approaching Tram in Right Turn)

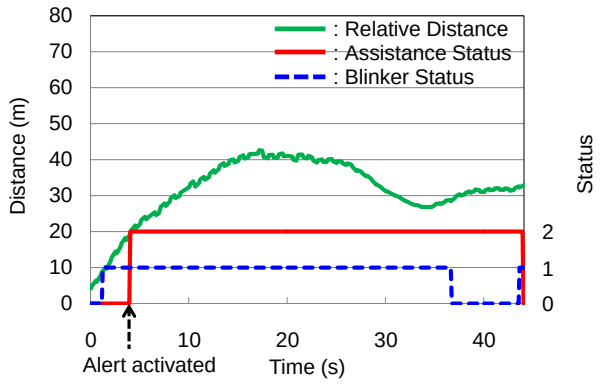


Fig. 12　Result of Function Verification
(Alert to Approaching Tram in Overtaking)

境が変化するため，実験条件を必ずしも統制できない場合があった。そのような場合でも危険判断ロジックが対応できたケースと，危険判断ロジックが対応できずに注意喚起が遅れる，出ない，またはタイミングが不適切となる場合があった。実交通環境下の実験では，ロジックのロバスト性を向上させるために有効な課題抽出につながることが分かった。また，今回の判断ロジックは，接近する路面電車の存在を検知し，注意喚起する支援であるが，ドライバが路面電車の接近に気づいている場合に注意喚起が行われると，ドライバにとって不要な支援となる。

以上のような課題を解決するために，ドライバにとってどのようなシーンでどのような支援を受けるとありがたみがあるか，きめ細かくシナリオ分析を行い，その状況を判断できるように状況判断技術を改善する必要がある。

5.2　位置推定精度の向上

車車間通信を利用した安全運転支援システムは，GPSで測位した位置情報を交換することで，自車と相手との相対的な位置関係を算出し，危険を判断する材料のひとつとしている。GPSの測位精度は，高い建物がある都市部ではマルチパスの影響で悪化する。この影響を少なくするために，マツダアテンザASV-5では，受信した位置情報をもとに搭載した道路地図データベース上で相手車両をマップマッチングする機能や，カメラやレーダ等の車載センサで相手車両との距離を計測した情報を活用して位置推定する機能を装備している。しかし，道路に対する車両の位置誤差は注意喚起タイミングが遅れたり，早まったりする原因となるため，より高精度な位置推定が必要となる。そのために，こうした機能の統合化や，カメラやレーダ等の車載センサで計測した路上構造物の位置情報と高精度地図データベースとを利用した自車位置の高精度特定や，マルチGNSS（Global Navigation Satellite System：全地球航法衛星システム）の統合的利用等，さまざまな位置推定要素技術の研究開発とその全体最適な適用が必要となる。

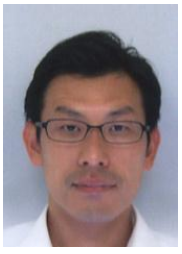
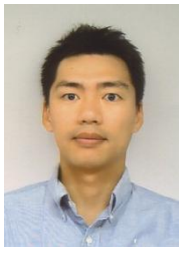
6. まとめ

本稿では，車車間通信を利用した路面電車-自動車間通信型安全運転支援システムについて，システムの概要と支援機能の内容を述べるとともに，広島で実施した公道検証実験とその結果について述べた。今回の公道検証実験により，マツダアテンザASV-5に搭載した路面電車-自動車間通信型安全運転支援システムが，基本シナリオに相当する実交通環境下において，路面電車からの送信データと，自車の位置情報，車速，ドライバ操作情報をもとに状況・危険を判断し，必要な場合に表示，音でドライバに注意喚起する機能が設計どおりに動作することを確認した。今後，自動車と路面電車の連携支援の有効性評価，5章で挙げた課題の解決に取り組んでいく。

参考文献

(1) 花井：ITS（高度道路交通システム），自動車技術，Vol. 67，No. 8，pp. 170-177（2013）
(2) 内閣府：SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）自動走行システム研究開発計画，http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf（2014）
(3) 山本ほか：車車間通信を利用した安全運転支援システムの開発，マツダ技報，No. 26，pp. 131-136（2008）
(4) 山本ほか：先進安全自動車「マツダ アテンザASV-5」の開発，マツダ技報，No. 31，pp. 118-123（2013）
(5) 渡辺ほか：路面電車と自動車の衝突防止を目的とした車車間通信による注意喚起サービスの検討，自動車技術会学術講演会前刷集，No.49-14（2014）

■著　者■

山本 雅史

奥木 友和

岩下 洋平

岡崎 晴樹

是 治久

論文・解説

42

筋骨格系の特性を考慮した運転支援技術の開発
Development of Driving Support Technology in Consideration of Musculoskeletal System

菅野　崇*1　楠本　信平*2　高橋　英輝*3
Takashi Sugano　Shimpei Kusumoto　Hideki Takahashi
中畑　洋一朗*4　山本　康典*5　谷田　晴紀*6
Youichiro Nakahata　Yasunori Yamamoto　Seiki Tanida

要　約

車両とドライバが協調した状態を最適と考え，運転支援システムの技術開発に取り組んでいる。この考え方に基づき，車両がドライバの期待した動きになっている状態では，修正操作等の無駄な体の動きや筋肉の緊張がないものと仮説を置き，横方向と前後方向の支援制御を構築した。横方向の支援制御では，車線維持支援システム（LAS）において，これまでも車両とドライバの調和を目指し腕の筋活動に注目してきたが，更に腕のみでなく姿勢維持に関わる骨格筋活動まで範囲を広げ，全体として負担低減となる支援方法へと進化させた。前後方向の支援制御では，協調型オートクルーズ制御（CACC）において，先行車の速度変動を増幅させないことにより後続の渋滞緩和に寄与するという一般的な目的に加えて，その制御性能と乗り心地を両立させるべく，車両の動きとドライバの頭部挙動を関連付けて評価を行うことで，速度変動を抑制させつつ，ドライバの無駄な頭部の動きを発生させない制御手法を開発した。

Summary

Mazda has been conducting technology development for driving support systems under the assumption that a good match between a vehicle and a driver provides a perfect condition for driving. Under such a condition, the vehicle behaves as intended by the driver and thereby he/she is not forced into unnecessary motion or muscular strain for correcting operations. In the development of Lane-keeping Assist System (LAS), which assists the control in the lateral direction, the primary focus had previously been placed on the activity of muscles of arms. This time, the scope of research was expanded to include the activity of skeletal muscles involved with postural maintenance, with the aim of reducing the overall workload of the driver. Another development related to the control in the front-back direction is of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) system. The general purpose of CACC is to contribute to traffic congestion relief by preventing velocity changes of a preceding vehicle from being amplified. With a view to improve both the velocity change control performance and the driver's ride comfort, the motion of a vehicle was evaluated in relation to that of the driver's head. As a result, a control method to restrain unnecessary motion of the driver's head while controlling velocity changes has been realized.

1. はじめに

近年，自動車の周辺環境を認識する技術の発達，通信インフラの整備により，それらを利用した運転支援システムが数多く開発されている。マツダではドライバが中心であるという考え方を運転支援技術にも適用し，操舵の支援システムである車線維持支援システム（LAS：Lane-keep Assist System），また車車間通信を利用した協調型オートクルーズ（CACC：Corporative Adaptive Cruise Control）の技術開発に取り組んできた。本稿では，これらの取り組み事例について解説する。

なお，本研究で行った全ての被験者実験は，試験開始前にインフォームドコンセントを得て行っている。

2. 運転支援開発取り組みの考え方

運転行動の全体の流れを簡略化するとFig. 1となる。ド

*1～5　技術研究所
Technical Research Center
*6　車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

ライバは運転席に座り，外部環境や自車の運動を車体構造，窓枠形状，シートを通して感覚器官，体性感覚から検出し，状況を認知する。そして行うべき操作を判断して，ハンドルやペダルを動かす，ひとつの大きなシステムである。その操作に基づいて車両が運動を起こし，外部環境との相対関係が変化し，それをまたドライバが知覚するというインタラクションを繰り返す。

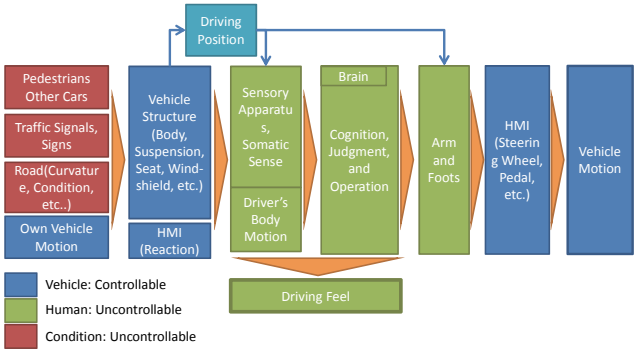


Fig. 1　Schematic of Driving Behavior

運転支援システムの開発において，設計者がコントロールできるのは車両の設計要素だが，その良し悪しは，このインタラクションに内在するドライバによって判断され，運転のしやすさや安心感といった，ドライビングフィールに現れてくる。すなわち良い運転支援とは，ドライバの特性と，車両特性とが調和したものでなければならない。更に，道路形状など外部環境に対して支援するシステムでは，外部環境とドライバの認知特性が調和するよう，その間を仲介する車両や支援方法の設計をしなければならない。

マツダではドライバと車両が調和した状態というのは車両がドライバの意に沿った動きとなっており，そのため無駄な体の動きや筋肉の緊張が少ない状態であると考えた。そこで下記の手順により，運転支援技術の開発をした。

(1)　ドライバの主観評価を表す運転行動の変化や筋活動等の反応を見極め，定量評価を行う。

(2)　上記(1)の反応が生じる仮説を立て，筋活動や体の動きを低減させる支援方法を立案し，効果を確認する。

3. 操舵支援の設計

3.1　車線維持支援システム（LAS）の主観評価と課題

LASは，走行中に常に舵を支援するシステムであるため，ドライバが操舵する際の違和感がなく，一方で支援感を与えることが要件となる。マツダではこれらの相反する要件の両立のため，ドライバの腕の使い方に注目し，腕の筋負担を効果的に低減する支援手法を提案してきた(1)。次に，LASの操舵支援量を0%～100%で変更できる技術検証車両を用意し，支援量に対する負担の軽減度合を調査する主観評価を行った。支援量0%とは操舵支援が全くない通常の車両の状態であり，支援量100%とはドライバが操舵しなくても車線内を走行できる支援を意味する。実験は運転支援システムの開発に従事する男性4名を対象として，最小曲率半径R=300mの周回路にて車速100km/hでの定速走行を行うことにより実施した。その結果，提案してきた制御則に基づき支援量を上げていくと腕の負担は下がるものの，あるところから腕以外の部位で負担を感じる主観評価結果が得られた。そこで2章の考え方に基づき，運転姿勢維持を含む体全体の変化を捉えた設計に取り組んだ。

3.2　操舵支援量と運転姿勢の関係・仮説立案

主観評価と同じ条件のもと，操舵支援量に応じた頭部／胴体の変動と首・腕・胴・脚の筋電を計測した。実験結果をFig. 2に示す。図の左側のグラフは支援量に対する頭部および胴体の，車両に対するロール方向の傾きである。また右側のグラフは筋活動を示しており，事前に計測した最大随意収縮（MVC：Maximum Voluntary Contraction）で正規化した値である。結果から操舵支援量を大きくすると，操舵反力が減ることにより，上腕三頭筋などの腕の負担は軽減されることが分かる。ところが主観評価どおり，胸鎖乳突筋（首）や大腿四頭筋（足）の活動量が増えている。

この現象を理解するために，腕の機能を改めて考える。結果の中で，支援により胸鎖乳突筋や大腿四頭筋を活動量が増えるのは，旋回に起因する横加速度が大きくなり，頭部や胴体に強い遠心力が加わるシーンの場合である。この場面で支援が大きい場合，操舵反力が小さくなっているため，力をいれてハンドルを持つことが難しい。そのためドライバは遠心力に抗うために腕が使い難くなり，胴体と足を使って運転姿勢を維持することになり，結果のような筋活動となったと考えることができる。

以上から腕の機能は，「舵を回す」だけでなく「運転姿勢の維持」という機能があると再定義し，両方を考慮した支援にする必要があると考えた。

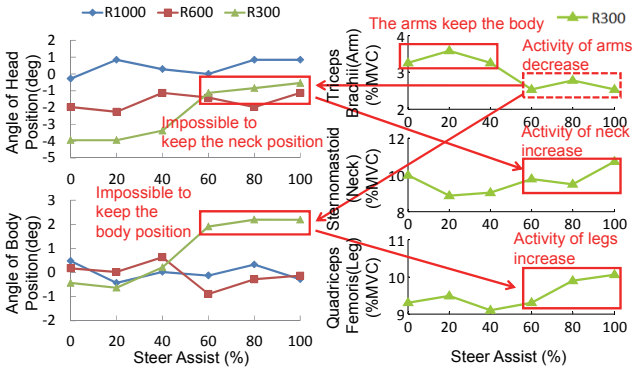


Fig. 2　Relationship Between Steer Assist and Muscular Activities

3.3　制御則と効果確認

運転姿勢の維持の観点で，腕が果たしている機能について考察する。Fig. 3に示すように，ドライバはシート座面

に胴体を押し当てて，運転姿勢を維持していると考え，ドライバの自重およびハンドルからの反力成分が垂直抗力となり，シートとの摩擦を利用して，旋回時の横力とつりあいを保って運転姿勢を維持していると仮説を立てた。

この仮説の下，速度100km/hで曲率半径300mの旋回をしているときの遠心力と，操舵トルク（すなわちドライバが発生する操舵力）によって発生する摩擦力を計算するとFig. 4となる。なお，この計算にはTable 1に示す実測値を使用した。Fig. 4より，ドライバの操舵トルクが1.2Nm以下となると，遠心力が摩擦力を上回ることになる。

そこで，このつりあいを超えないように操舵支援量の上限を抑える制御則を構築し，効果を確認した。Fig. 5に結果を示す。胸鎖乳突筋や大腿四頭筋の力みなく，上腕三頭筋などの腕の操舵負担のみを軽減できている。

以上のように操舵支援に関して，2章に示した考え方に基づいた設計により，腕のみならず体全体としての負担を低減できる支援量を決定することができた。

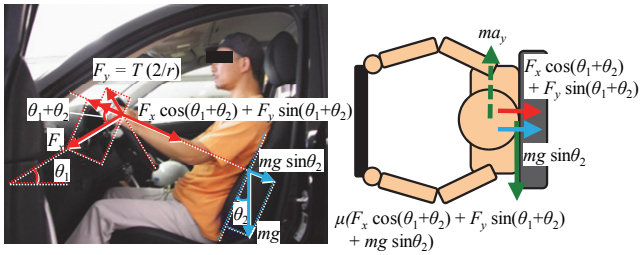


Fig. 3　Force during Cornering

Table 1　Simulation Parameters

Symbol	Parameter	Value	Unit
m	Mass of Upper Body	412	N
g	Gravity Acceleration	9.81	m/s^2
r	Diameter of Steering Wheel	0.350	m
θ_1	Angle of Seat	0.414	rad
θ_2	Angle between Seat and Steering Force	0.305	rad
μ	Static Friction Coefficient	0.44	
a_y	Lateral Acceleration	1.96	m/s^2

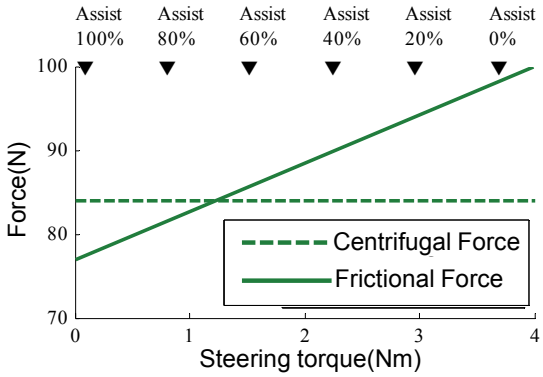


Fig. 4　Centrifugal Force and Frictional Force Which Act on the Body

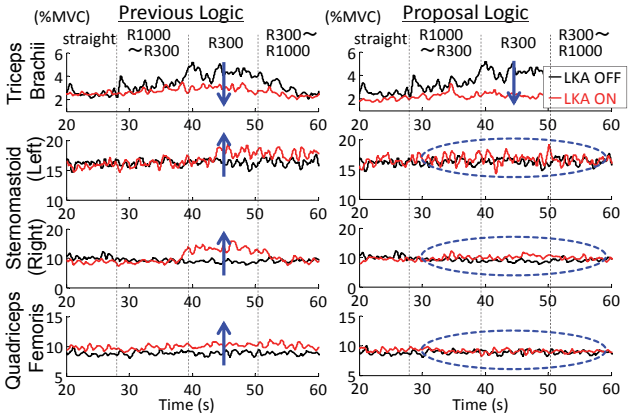


Fig. 5　Reduction Effect of Muscles Activity by LAS

4. 速度制御への設計

4.1　協調型ACC（CACC）の狙いと課題

ACC（Adaptive Cruise Control）についても，ドライバとの調和を目指して取り組んでいる。ACCの機能を拡張し，車車間通信を活用して車両の状態量のやり取りを行い，制御に活用することにより，複数の車両で協調しながら車群の制御を行う協調型クルーズコントロール（CACC）という考え方がある[2]。CACCでは，Fig. 6に示すように，自車の速度変動を先行車の速度変動よりも小さくコントロールする（速度増幅率：自車の速度変動／先行車の速度変動　を1以下に抑える）ことにより，後続への速度変動の伝播を抑制し渋滞を緩和する。この技術開発が国交省，国総研と自動車各社による共同開発で進んでいる。そしてITS世界会議2013では通信プロトコルを共通化した上で，各社が独自に開発した制御方法による隊列走行実証実験を実施した[3]。

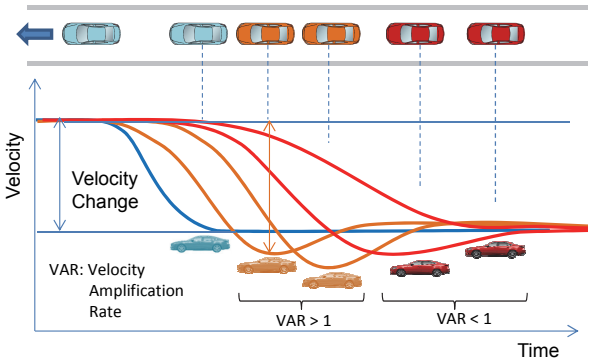


Fig. 6　Concept of CACC to Suppress Traffic Congestion

先行研究より，速度増幅率を抑制するには先行車の速度変動に対する応答性を上げることが有効であることが分かっている[2]。しかし単純に応答性を上げると，先行車の動きに過敏に追従することになり，乗り心地等のフィーリングが悪化する。それを防止するには，車両の挙動がドライバの知覚と調和させることにより解決できると考えた。

4.2　追従減速における評価軸とドライバの反応

（1）評価軸の策定

LASでの取り組み[1]と同様，ターゲットとしている追従～減速シーンにおけるACCの評価の良いベンチマーク車両（車両A）と技術検証車両（車両B）との比較評価を行った。主観評価のコメントからテキストマイニングを行ったところ，追従減速という動的なシーンでの評価軸として下記(a)～(c)の三つが挙がった。なお車間距離も重要なファクターだが，対象としているシーンでは，(a)と(c)に関わる一因子となる。この三つの評価軸の中でベンチマーク車両Aは，特に(b)の性能が技術検証車両を上回っていた。

(a) 加減速タイミングの良さ
(b) 加減速度の滑らかさ
(c) 加減速度の絶対量の適切さ

実験を通してこれらの評価軸を示す客観指標を調べ，それを用いて性能を計った。

（2）ドライバの反応調査Ⅰ：ベンチマーク車両との比較

車両Aと車両Bを用い，下記の手順による実験を行った。

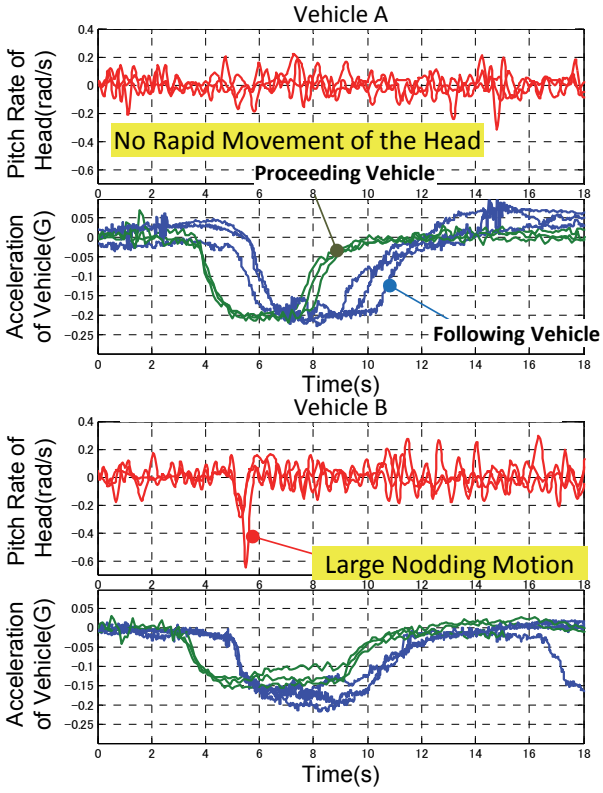
① 一定速度で走行する先行車と，ACCにて追従する後続車を用意し，被験者は後続車に乗る。
② 先行車は指示された加速度で減速し，①に対して低速となる定常走行をする（Fig. 6と同様の走行）。
③ 上記②に追従して減速した際の先行車および後続車の車両挙動と被験者の状態を計測する。

上記の性能に関してフィーリングを評価・比較できそうな物理量として，車両の挙動（速度変化，加減速度）と，人間の加速度の知覚に関連の深い顎部の筋活動[4]および頭部の動きを計測した。被験者は3人であり，先行車は0.1Gおよび0.2Gを目標とした減速を行った。

この実験では，車両が車両Aと車両Bとで異なるため構造の特性も異なる。しかしながら本実験は動きの評価が中心となる点と，評価の良い車両Aをそのまま比較したかったことから，シートや窓枠形状等の構造部材の変更はせず，またシートポジションについて厳格な規定は行わず，被験者にとって，それぞれの車両で違和感のないドライビングポジションを取ることとした。

実験の結果として先行車および自車の加速度と，頭部のピッチ角速度（前屈がマイナス）をFig. 7に示す。また，同じ実験ケースでの顎部の筋活動として，胸鎖乳突筋の反応をFig. 8に示す。なお胸鎖乳突筋は，顎を上げ頭部を上に向ける際に使う筋肉である。

Fig. 7から車両Bは車両Aと比較して，減速Gが小さいにもかかわらず，頭部が急激に前屈することが分かる。またFig. 8から車両Aに対して車両Bは，常に筋の活動量が大きく，姿勢維持の負担が大きいことが分かる。頭部の動きや筋負担が車両挙動の知覚に影響があることが分かっている[4]ので，この挙動を抑えることが乗り心地の改善につながると考えた。



（※It is superimposed on three persons' result）

Fig. 7　Test Result of Following and Braking

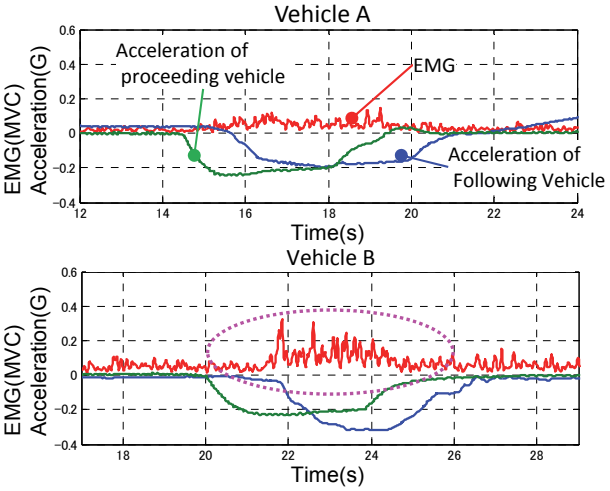


Fig. 8　Muscular Activity on Proceeding Vehicle Braking

（3）ドライバの反応調査Ⅱ：ドライバ自身の運転との比較

次に，ドライバ自身が後続車である車両Bを運転し，上述（2）項と同様に追従～減速～追従の一連の走行を行った場合と，車両BのACCによる追従減速との比較である。

Fig. 9に，実験結果として頭部のピッチ角と先行車両および自車両の減速度を示す。ドライバ自身による運転では，減速度の傾きが急であり，かつ減速度そのものもACCよ

り大きいが，頭部の動きは安定している。一方でACCでは，一旦頭部を仰け反らせた後，大きく下に向ける挙動となった。制動開始のタイミングは図中(a)として示すようにドライバの方が早いことが分かった。

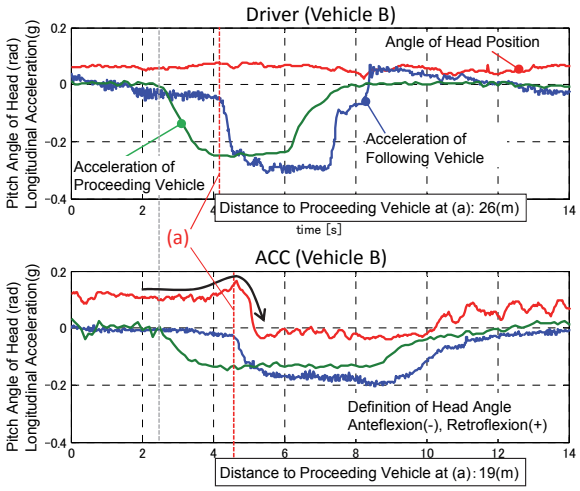


Fig. 9　Comparison with Driver Operation and ACC

上記の２つの結果を考察する。ACCの場合，ドライバは車両の挙動が出る前に顎を上げ，頭部を後屈する。車両の応答前なので慣性力が筋を活動させている原因にならないことから，この反応は先行車両の減速をドライバが知覚したことに起因していると考えられる。このことから，ドライバが期待する減速タイミングは，制御ブレーキのタイミングよりも早いと解釈できる。そしてその後，すでに緊張した筋に対して減速度が加わることにより，頭部（または上体とともに）前方に倒れると考えることができる。

以上の考察から，制御タイミングをドライバの姿勢変化に調和させて減速度を発生させることにより，ドライバの期待にあった車両挙動となり，頭部の挙動が小さくなると考えた。それに加え速度増幅率抑制の条件を満たすよう減速量を制御することにより，乗り心地と速度増幅率低減性能の両立が可能との仮説を立て，制御則の構築を行った。

4.3　仮説および制御則の立案と効果確認

制御モデルのエッセンスをFig. 10に，基本となる制御則を式[1]に示す。式[1]の右辺第一項は相対距離に比例する項，右辺第二項は相対速度に比例する項であり，右辺第三項は，先行車加速度のフィードフォワード項である。この加速度は，ACCの場合，カメラまたはレーダによる相対速度推定値の微分を伴うためノイズ等の影響が大きく主な要素として使用できないが，CACCでは通信により高精度な先行車両の状態量が取得できるため使用可能である。すなわちACCでは，右辺第一項と第二項にて制御するが，CACCではすべての項を使用する。

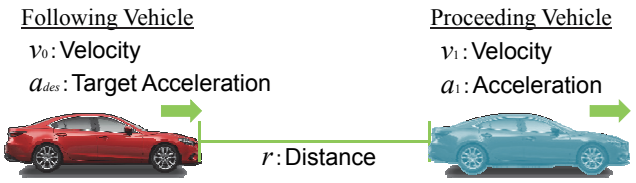


Fig.10　Simplified Control Model

$$a_{des} = K_1(r - hv_1) + K_2(v_1 - v_0) + \frac{K_3}{(Ts+1)^2}a_1 \quad \cdots [1]$$

K_1:　車間距離ゲイン
K_2:　相対速度ゲイン
K_3:　加速度フィードフォワードゲイン
h:　車頭時間(sec)
T:　FF項伝達特性係数

上記の構成による基本特性を解析的に評価すると，式[1]の右辺第三項がないACCでは，速度増幅率を抑制するためのパラメータは限定的であることが知られている[5]。そのため，乗り心地との両立が困難である。一方で右辺第三項を利用するCACCでは，速度増幅率を満たすパラメータに幅をもたせることができる。そこで右辺全体として，ドライバのブレーキタイミングを模擬する伝達特性とし，かつ速度増幅率1以下となるようK_3とTを設定した。

制御の効果を確認するため検証実験を行った。実験はACC,CACCの制御手法の異なる車両3車種3台に，先行車を加えた4台による追従減速について，ドライバによる運転とACCおよびCACCについて実施した。実験はテストコースにて行われたが，ドライバによる運転では一般道での運転を模擬するように指示した。速度増幅率の低減効果の確認結果をFig. 11に示す。

結果を見るとドライバによる運転では，先行車の挙動を見ながらの操作であるため，動きが安定せず3台後の速度変動量が38%増加している。また先行車の減速に対する，制動行為のタイミング（アクセルオフを含む）は，car1，car2は先行車の停止灯に反応し0.8~1.2秒後に開始しているが，car3については先行車の接近を視認して制動を行っているため反応が遅く減速幅も大きいことになった。ACCの結果では，制動開始は遅いものの動きは安定しており，3台後の速度変動量は22%増加と改善している。CACCでは，制動開始は停止灯により制動する運転に近く，動きも安定していて3台後でも先行車の最低速度を下回らないように制御できている。次に，フィーリングの結果として顎部の筋負担の比較をFig. 12に示す。実験結果から，ACCでは自車の減速の直前から筋活動が増加しているが，CACCでは減速タイミングが早まっており，目立った筋活動が発生せずに顎部の負担が低下していることが分かる。次にベンチマークとの比較で差があった「加減速の滑らか

さ」と「加減速タイミング」の主観評価の結果をFig. 13に示す。いずれの指標についてもACCよりも改善した結果となっている。

以上の結果から制御則は，速度増幅抑制と，乗り心地の両方の性能を向上できていることが確認できた。

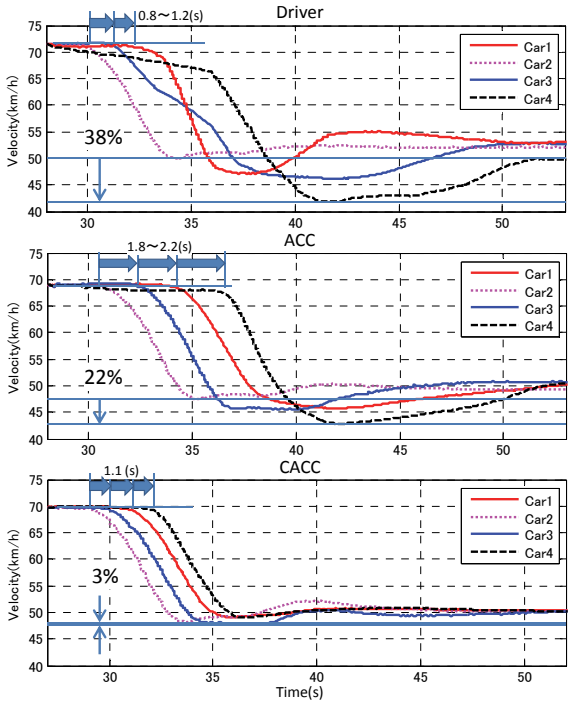


Fig. 11　Result of Damping Traffic Shockwave

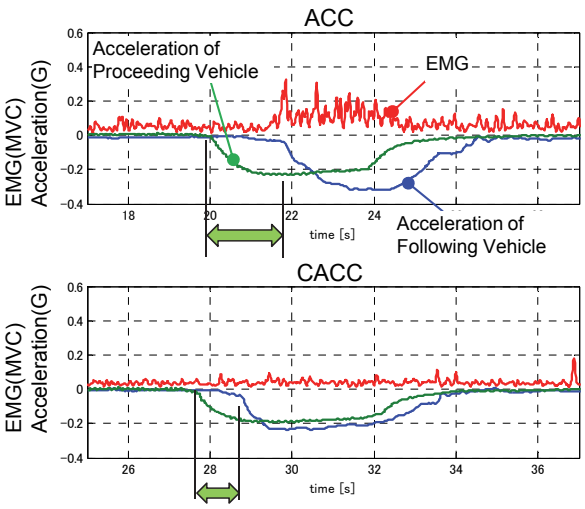


Fig. 12　Result of Muscular Activity on ACC and CACC

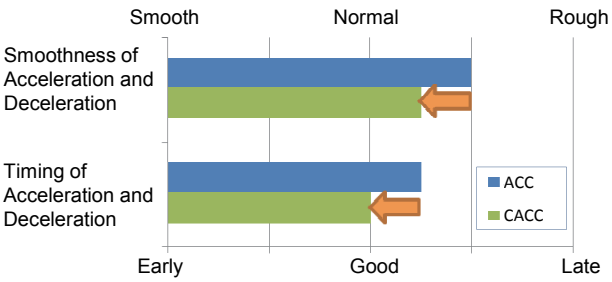


Fig. 13　Result of Subjectivity Evaluation (N=3)

5. おわりに

今回，車両の動きと体の動かし方の両方を評価・考察して，ドライバに無駄な動き・筋活動をさせない支援手法を開発した。横方向の支援（LAS）と前後方向制御（ACC）の両方で同じ考え方で評価と課題設定，仮説とロジック構築，効果検証を進め，いずれにおいてもドライバの無駄な動きが減り，フィーリングの良い操縦支援が実現できた。今後，この考え方を発展させていき，人間はどのようにしてクルマを運転しているかを解明する研究へと結びつけていく。

参考文献

(1) 高橋ほか：ドライバの筋活動に基づく車線維持操舵支援制御の研究，マツダ技報，No.31，pp131-136（2013）
(2) 日高ほか：ACCを活用した高速道路サグ部の交通流円滑化，自動車技術会学術講演会前刷集，No.87-12，pp.1-6（2012）
(3) 土井ほか：通信利用レーダークルーズコントロールによる渋滞抑制に向けた取り組み，自動車技術会学術講演会前刷集，No.50-14，pp.5-8（2014）
(4) 梅津ほか：新型プレマシー ダイナミックフィールの統一感，マツダ技報，No.28，pp.13-18（2010）
(5) 大前ほか：大型トラックのCACCにおける車間距離制御アルゴリズムの開発 －エネルギーITS推進事業における自動運転・隊列走行の開発－，自動車技術会学術講演会前刷集，No.56-13，pp.11-16（2013）

■著　者■

菅野 崇

楠本 信平

高橋 英輝

中畑 洋一朗

山本 康典

谷田 晴紀

論文・解説

43

SKYACTIV-D用PM酸化触媒の高性能化技術
Advanced PM Oxidation Catalyst Technology for SKYACTIV-D

馬場　誉士*1　原田　浩一郎*2　滝沢　知也*3
Takashi Baba　Koichiro Harada　Tomoya Takizawa
山田　啓司*4　重津　雅彦*5　高見　明秀*6
Hiroshi Yamada　Masahiko Shigetsu　Akihide Takami

要　約

小型乗用車用ディーゼルエンジンの排出ガス中に含まれるパティキュレートマター（PM）の除去には，触媒担持型ディーゼルパティキュレートフィルタ（DPF）がコスト・搭載性の観点から有効であり，近年のPM排出規制値の対応のためには必須の技術となっている。触媒担持型DPFによるPMの酸化除去において，自動再生における燃費悪化の抑制のために，PM酸化速度向上による再生時間の短縮が求められる。マツダではこれまで，酸素交換反応により脱離する酸化活性の高い酸素によってPMを酸化する高酸素イオン伝導材料に着目し，速やかなPMの酸化除去を実現してきた。今回，高酸素イオン伝導材料のPM酸化反応に関与する電子の伝導性を高めることと，PMが主に反応する材料表面に貴金属を局部的に集中させる技術により，優れたPM酸化性能を有する触媒材料を開発した。

Summary

To reduce PM emissions from light diesel passenger cars, the use of catalyzed diesel particulate filters (DPF) is effective in terms of cost and mountability, and these filters are becoming increasingly important to meet PM emissions regulations. During the oxidation of trapped PM using the catalyzed DPF, it is necessary to shorten the duration for fuel injection by improving the PM oxidation rate so as to reduce fuel consumption. Mazda has been putting the focus on high-oxygen ion conducting materials, which have high oxygen exchange property and facilitate active PM oxidation, and achieved speedy PM reduction. This time, a new catalyst material having superior PM oxidation performance has been developed by raising electronic conductivity involved in PM oxidation reaction of high oxygen ion conducting materials and by using a technique to increase the concentration of precious metals locally on the material surface where PM is mainly oxidized.

1. はじめに

ディーゼルエンジンは，ガソリンエンジンと比較して，熱効率が高く，CO_2の排出が少ないことから，温室効果ガスの低減に有効である。また，優れた運動性能を有しており，欧州を中心に広く普及している。しかし，ディーゼルエンジンにおいては，排出ガス中に含まれる粒子状物質（Particulate Matter：PM）の低減が大きな課題となる。このPMの低減のために，小型乗用車用ディーゼルエンジンでは，搭載性及びコストの観点から，触媒担持型DPFが採用されている。ところが，小型乗用車用ディーゼルエンジンの排気ガス温度は，高負荷運転時を除いて，捕集したPMを自己燃焼で酸化除去するのに十分な温度が得られない。そのため，DPF上に捕集されたPMの量が一定量を超えた際には，排気ガス温度を上昇させる再生処理を行う必要がある。再生処理における排気ガス温度の上昇には，メイン噴射による燃焼行程後の追加の噴射（ポスト噴射）が必要となり，燃費の悪化につながる。再生時間が長いとポスト噴射量が増えるため，熱効率に優れるというディーゼルエンジンのメリットを減少させてしまう。そのために，DPFに担持されるPM酸化触媒には，捕集したPMを速やかに酸化除去することが求められる。

マツダではこれまで，触媒表面だけでなく，触媒内部の酸素を活性酸素として利用できる高酸素イオン伝導材料に

*1～6　技術研究所
Technical Research Center

着目し，これにより速やかなPMの酸化除去を実現してきた[1),2)]。今回，更なるPM酸化反応促進を目的とし，高酸素イオン伝導材料の電子伝導性の向上及び，材料表面の酸化能力を高める貴金属の担持状態に着目し，優れたPM酸化触媒を開発したのでこれを紹介する。

2. 触媒担持型DPFによるPMの酸化

触媒担持型DPFの内部構造をFig. 1に示す。排出ガス中に含まれるPMは，DPF内部において，セラミックスからなる多孔質壁によって捕集される。捕集されたPMは，多孔質壁にコーティングされた触媒によって酸化される。PMの酸化反応（C+ O_2→ CO_2）を促進するためには，触媒からの反応性の高い酸素種でPMを酸化することが有効となる。マツダが開発した高酸素イオン伝導材料からなるPM酸化触媒は，Fig. 2に示すように，気流中酸素を内部に取り込むと同時に活性な格子酸素を放出する酸素交換反応に優れている[1),2)]。この特性により，PMに活性な酸素を多量に供給することができるため，優れたPM酸化速度を実現することが可能である。

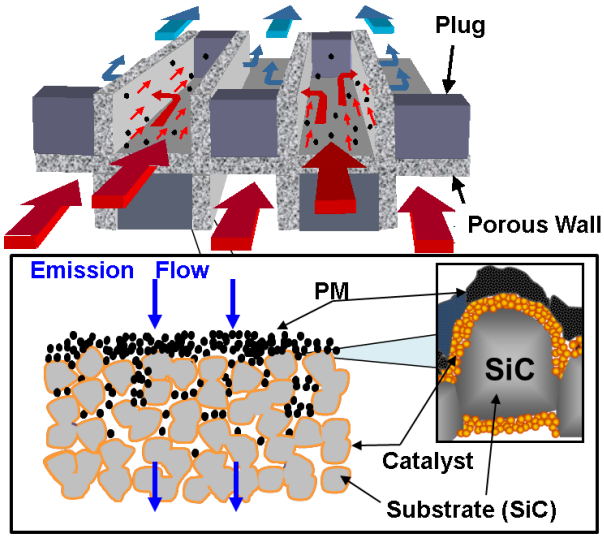


Fig. 1　Internal Structure of a Catalyzed DPF

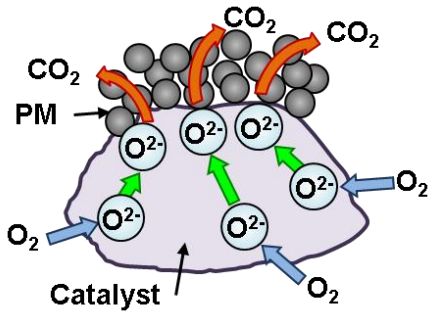


Fig. 2　PM Oxidation Reaction over the Oxide-ion Conducting Material

3. 触媒材料コンセプト

PM燃焼を促進するために，酸素イオン伝導材料の更なる酸素交換能の向上を検討した。酸素交換に伴うPM酸化反応の反応式は，

① O_2+ $4e^-$→ $2O^{2-}$（酸素の取り込み）

② C+ $2O^{2-}$→ CO_2+ $4e^-$（酸素の脱離に伴うPMの酸化）

で表されるが，反応式で示されるように，電子の授受が必要となる。そこで，酸素イオン伝導材料に高い電子伝導性を付与することがPM酸化反応促進につながると考え，電子伝導性を高める元素として，Prの添加を検討した。

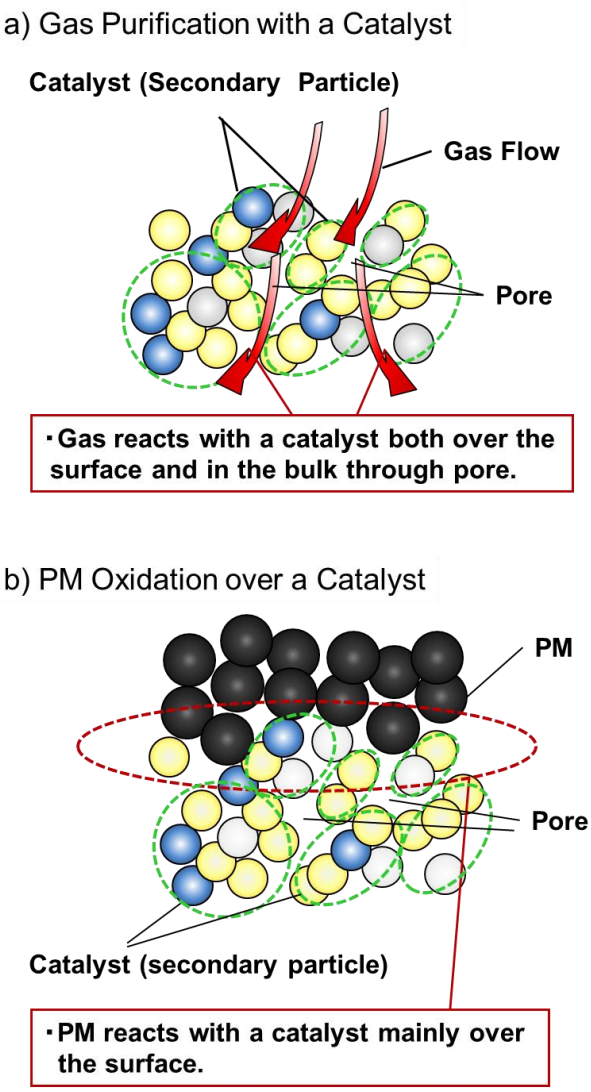


Fig. 3　Difference between Gas-catalyst and PM-catalyst Reaction

Fig. 3に示すように，触媒によるガス浄化反応は，ガスが，触媒粒子の凝集体である触媒2次粒子中の細孔内に容易に拡散し，反応が進む。一方，固体であるPMの酸化反応は，大半のPMは触媒の細孔よりも大きいため，細孔内

に入り込むことができず，触媒2次粒子表面の接触反応が主体である。そのため，触媒2次粒子表面に活性なサイトとなる貴金属を局所的に集めることで，高酸素イオン伝導性材料による酸化活性を更に向上できると考えた。

4. 実験方法

4.1　触媒仕様

酸素イオン伝導性に優れるZr-Nd-O（従来触媒）および，PrもしくはCeを置換固溶したZr-Nd-Pr-O，Zr-Nd-Ce-O（Pr及びCeは等mol量を添加）を共沈法により調製した。各触媒の物理的特性をTable 1に示す。各触媒は，DPF再生時のPMの酸化で曝される高温条件を考慮し，800℃ 24hの高温エージング処理後のものを用いた。

Table 1　Surface Areas and Pore Volumes for Samples

	Surface Area (m^2/g)		Pore Volume (cm^3/g)	
	Fresh	Aged	Fresh	Aged
Zr-Nd-O	104	61	0.58	0.52
Zr-Nd-Pr-O	37	28	0.23	0.12
Zr-Nd-Ce-O	85	78	0.60	0.46

4.2　触媒の物理化学特性の評価

（1）酸素吸蔵放出特性

CeやPrを含む酸化物で生じる，価数変化を伴った酸素吸蔵放出反応について，H_2ガスを用いた昇温還元法（H_2-TPR）による解析を行った。解析には整粒したペレット状の触媒を用いて，雰囲気中のH_2と触媒に吸蔵されるO_2との反応によって生成されるH_2O濃度を測定することで，昇温過程での酸素放出量を調べた。各ガス濃度は，四重極質量分析計で測定した。

（2）酸素交換反応特性

気相中酸素と格子酸素の酸素交換反応特性[2]については，同位体トレーサ法を用いて解析した。解析には酸素吸蔵放出特性評価と同様に，ペレット状に加工した触媒を用いた。同位体酸素（$^{18}O_2$）を流通させ，触媒内部酸素（^{16}O）との反応で生成する酸素種（$^{16}O_2$，$^{16}O^{18}O$）の濃度を四重極質量分析計で測定した。脱離した^{16}Oの量から，酸素交換反応特性を評価した。

（3）格子酸素によるPM酸化反応の解析

酸素交換反応で脱離する格子酸素によるPM酸化反応について，同様に，同位体トレーサ法を用いて解析した。触媒粉末とカーボンブラックの重量比4：1として，めのう乳鉢を用いて1分間混合するタイトコンタクト条件で処理した試料を用いた。Fig. 4に示すように，ガラスチューブに試料を挿入した状態で同位体酸素を流通させ，昇温によって触媒内部酸素（^{16}O）及び雰囲気中酸素（^{18}O）で酸化され生成する各一酸化炭素及び二酸化炭素種（$C^{16}O$，$C^{16}O_2$，$C^{16}O^{18}O$）の濃度を四重極質量分析計で測定した。放出された^{16}Oを含む一酸化炭素及び二酸化炭素種の量から，格子酸素によるPM酸化性能を評価した。

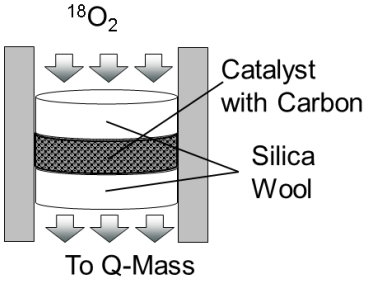


Fig. 4　Schematic of Test Method for Carbon Oxidation Property

（4）電気伝導度測定

各触媒の酸素イオン伝導性や電子伝導性について検討するために，電気伝導度を測定した。測定試料の加工として，触媒粉末をプレスしてディスク状に成形し，1000℃で焼成した後に，切削・研磨により矩形上に成形し，電極を取り付けた。直流四端子法を用いて，電気伝導度の温度依存性及び酸素分圧依存性を評価した。

4.3　PM酸化性能評価

（1）モデルガスによるPM酸化性能評価

PM酸化性能をモデルガス条件で評価した。評価装置の概略図及びモデルガス条件をFig. 5に示す。

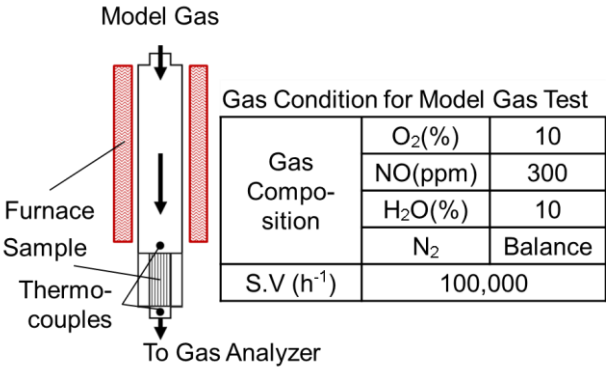


Fig. 5　Evaluation Apparatus and Test Conditions for Model Gas Evaluation Using a Catalyzed DPF Sample

DPF担体には材質がシリコンカーバイド（SiC）のものを用いた。触媒をコーティングした担体から評価用試料（25cm^3）を抜き出し目封じ加工を行ったものにカーボンブラックを5g/L堆積させた。580℃まで窒素雰囲気中で昇温し，温度が安定化した後にモデルガスに切り替え，排出されるCOおよびCO_2濃度と経過時間からPM酸化速度を算出した。

（2）実機によるPM酸化性能評価

PM酸化性能評価に用いたエンジン及びDPFシステムをTable 2に示す。

Table 2　Specifications of Engine for Dyno Evaluation

	Specification
Combustion Type	Direct Injection
Displacement	2.2L
Fuel Injection System	Common Rail System

DPFシステムはDPF前段にフロースルー型酸化触媒を配置した。DPFの担体にはモデルガス評価と同様にSiC製の担体を用いた。評価はDPFにPMを7g/L捕集させた後，エンジンの燃焼制御によりDPF入口温度で640℃まで昇温させ，経過時間からPM酸化速度を算出した。

5. 結果と考察

5.1　Zr-Nd系酸素イオン伝導性材料へのPr添加効果

（1）酸素交換反応特性

ディーゼルエンジンのような酸化雰囲気の条件下において，酸素交換反応がPM酸化の促進に重要と考える[3]。100～600℃の昇温中に各触媒から酸素交換反応によって放出された内部酸素（^{16}O）の積算量をFig. 6に示す。

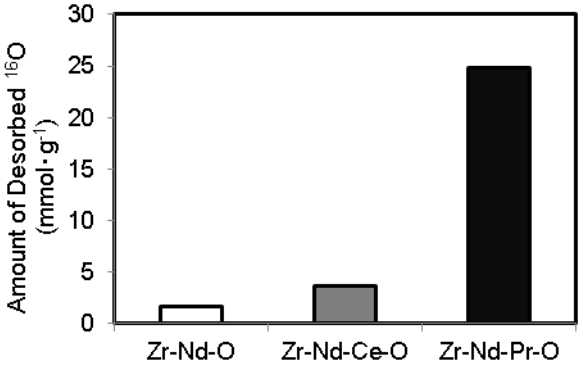


Fig. 6　Cumulated Amount of ^{16}O Desorbed from the Catalysts in $^{18}O_2$

いずれの試料についても，酸素交換反応が生じたが，従来触媒（Zr-Nd-O）に対して，Ceの固溶では^{16}Oの脱離量は約2倍程度だが，Prの固溶では約14倍となり，酸素交換反応特性が向上した。

（2）格子酸素によるPM酸化反応

酸素交換によって脱離する格子酸素により酸化されたカーボンの量（100～600℃までの積算量）をFig. 7に示す。

格子酸素に酸化されたカーボン量は，従来触媒（Zr-Nd-O）に対して，Ceの固溶では約1.8倍，Prの固溶では約2.6倍となった。

以上の結果より，Zr-Nd-OにPrを固溶することで，酸素交換反応によって酸化活性の高い格子酸素が脱離する特性が向上し，優れたPM酸化性能を示すことを確認した。

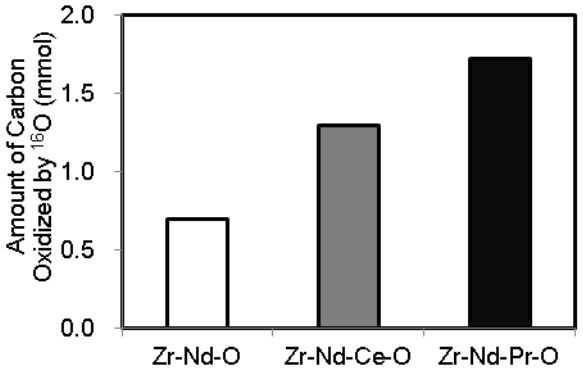


Fig. 7　Cumulated Amount of Carbon Oxidized by^{16}O Desorbed from the Catalysts in $^{18}O_2$

5.2　Pr固溶によるPM酸化性能向上メカニズムの検討

（1）酸素吸蔵放出特性

H_2-TPR法により測定した各触媒の酸素吸蔵放出特性（100～600℃の放出酸素の積算量）をFig. 8に示す。

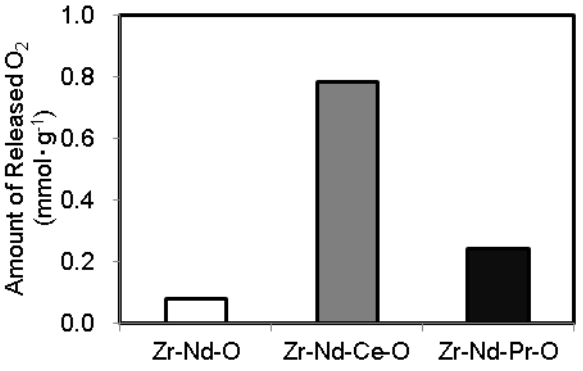


Fig. 8　Cumulated Amount of Released Lattice Oxygen from the Catalysts under a Reducing Condition in H_2

Zr-Nd-Oは価数変化を生じる元素を含まないため，還元条件においてほとんど酸素の放出が生じない。価数変化を生じる特性を有するCeを固溶すると，酸素放出が顕著に生じた。これに対して，同じくPrは価数変化を生じやすい元素であるが，Zr-Nd-Oに固溶させた場合については，酸素放出量が少ないことから，価数変化が生じにくいことが確認できた。

（2）**電気伝導特性**

酸素イオン伝導材料中の酸化活性の高い内部酸素による

PM酸化反応においては，酸化物イオンや電子，正孔の動きやすさが重要な指標となる[2]と考え，電気伝導度測定を行った。直流四端子法を用いて温度依存性について測定した結果をFig. 9に，酸素分圧依存性について測定した結果をFig. 10に示す。

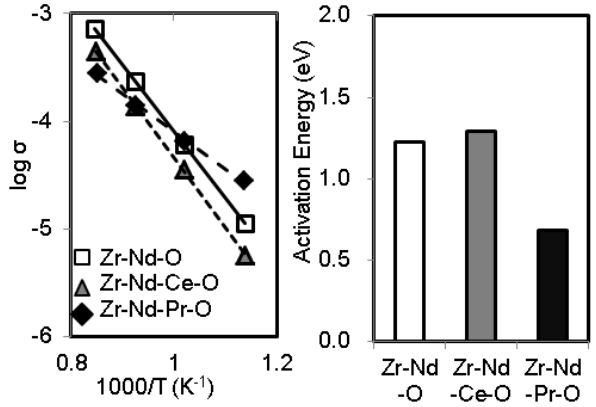


Fig. 9　Temperature Dependence on Electrical Conductivity Measured in Air

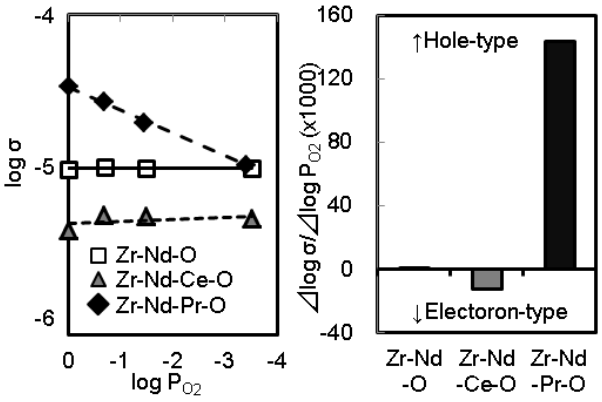


Fig. 10　Oxygen Partial Pressure Dependence on Electrical Conductivity Measured in N_2, Air/N_2, Air and O_2 at 600°C

温度依存性の傾きから導出したZr-Nd-Pr-Oの電気伝導の見かけの活性化エネルギーは，Zr-Nd-O，Zr-Nd-Ce-Oに対して約1/2と小さく，酸化物イオンが移動しやすいことが示された。また， DPF再生時の温度条件（600℃近傍）において，高い電気伝導度を示した。温度依存性は直線的であることから，電気伝導は酸化物イオン伝導が支配的であり，Prの固溶は酸化物イオンの移動度の向上に寄与することを確認した。

酸素分圧依存性については，Zr-Nd-O及びZr-Nd-Ce-Oにおいては，明確な酸素分圧依存性は確認できなかった。一方，Zr-Nd-Pr-Oにおいては，酸素分圧が減少するに従い電気伝導度が減少した。この結果から，Zr-Nd-OへのPr固溶は，Ceを固溶する場合と異なり，正孔を生じやすい性質が付与されることを確認した[4]。

以上の結果より，Zr-Nd-Pr-Oの優れた酸素交換特性には，Prの価数変化の影響は小さく，Prの固溶により正孔が生成されやすいことが強く関与していると分かった。

5.3　触媒粒子表面の酸化活性向上

Pr固溶によりPM酸化活性の向上が認められた酸素イオン伝導材料について，その特性を最大化することを目指し，触媒粒子表面の酸化活性を向上する貴金属（PGM）担持状態について検討した。

酸化物粉末への貴金属担持の際の細孔内部への貴金属の侵入を抑制することを目的として，従来用いてきた貴金属原料に含まれる金属錯体よりも大きな金属錯体を有する貴金属原料を適用した。Fig. 11には，XPSを用いて測定した触媒表面の貴金属濃度（横軸）及び，DPF担体に触媒を担持しモデルガス条件で評価したPM酸化性能（縦軸）の関係を示す。

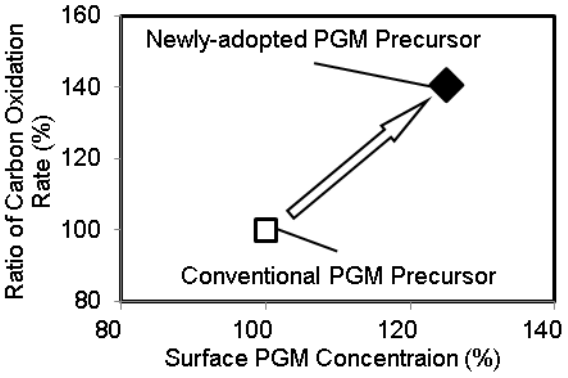


Fig. 11　Relation between Carbon Oxidation Rate and Surface PGM Concentraion (Conventional= 100)

貴金属溶液に含まれるPGM1原子あたりの化合物サイズが大きい原料を用いることで，触媒粒子表面の貴金属濃度は約30%増加し，これにより，PM酸化速度が約40%向上した。優れた酸素交換特性を有するZr-Nd-Pr-Oについて，PMと触媒の固体どうしの酸化反応に関与する粒子表面の反応性を局所的に向上させることで，更なるPM酸化性能の向上が得られたと考える。

5.4　開発触媒の実機によるPM酸化性能評価

上述した材料技術を適用した新たな開発触媒について，実機にてPM酸化性能評価を行った結果をFig. 12に示す。

新たな開発触媒は，従来触媒に比べ，貴金属担持量を約1/5まで低減しても，約20%PM酸化性能が向上した。開発触媒は，酸素交換反応特性の向上，触媒材料表面への貴金属の局在化により，低貴金属担持量にもかかわらず優れたPM酸化性能を有することを確認した。

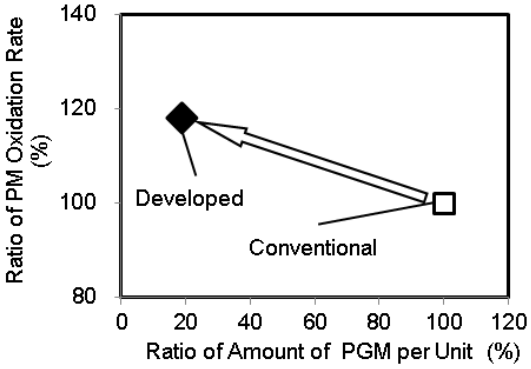


Fig. 12　PM Oxidation Performance of Developed and Conventional Catalyst under a DPF Regeneration Control with a Dyno Engine (Conventional= 100)

6. まとめ

(1)　高酸素イオン伝導性を示す材料は，気相酸素と格子酸素の酸素交換反応量が多く，脱離した格子酸素によるPM酸化性能の向上が確認できた。
　①　Zr-Nd-Oに電子伝導性を高めるPrを固溶することで，酸素交換反応が向上し，PM酸化性能も向上した。
　②　電気伝導度の測定結果より，Prの固溶によって生成される正孔が，高酸素イオン伝導材料の電子伝導性の向上に強く関与していた。

(2)　触媒2次粒子表面に貴金属を局在化させることにより，PM酸化性能が向上した。

(3)　実機評価の結果，高酸素イオン伝導材料を織り込んだ開発触媒は，従来触媒比で貴金属量約1/5においても，PM酸化性能が約20%向上した。

参考文献

(1) K. Harada, et al. : Development of High Performance Catalyzed DPF with New Soot Burning Mechanism, Cata. Surv. Asia, I4, pp.176-184（2010）
(2) 鈴木ほか：新しいメカニズムによるPM燃焼触媒，マツダ技報，No.26，pp.88-93（2008）
(3) G. Mul, et al : Transition Metal Oxide Catalyzed Carbon Black Oxidation : A Study with $^{18}O_2$ J. Catal., 179, pp.258-266（1998）
(4) P. J. Gellings, et al. : Ion and mixed conducting oxides as catalysts, Catal. Today, 12, pp.1-105（1992）
(5) 山本ほか：材料開発における結晶格子欠陥とその応用，東京，IPC，pp.241-281（2002）
(6) H. Iwakuni et al. : Development of PGM Single Nano Catalyst Technology, SAE Technical Paper, 01, 1079（2009）

■著　者■

馬場　誉士

原田　浩一郎

滝沢　知也

山田　啓司

重津　雅彦

高見　明秀

論文・解説

44

炭素繊維強化射出成形複合材料を用いた電波遮蔽プラスチックの開発

Development of Electromagnetic Shield Plastic using Carbon Fiber Composite Material by Injection Molding

宮本　嗣久*1　稲田　貴裕*2　遠藤　靖之*3
Tsuguhisa Miyamoto　Takahiro Inada　Yasuyuki Endo
久常　晃裕*4　鶴長　真里絵*5
Akihiro Hisatsune　Marie Tsurunaga

要　約

バンパ内部に搭載されている後側方レーダにおいて，バンパ内面で反射する送信電波が路面等へ漏れると意図しない反射波が返ってきた場合に誤検知の原因となる。誤検知を防ぐためには，不要な反射波を遮蔽する必要がある。今回，炭素繊維強化樹脂を用い，射出成形時に繊維を長く残しながら分散性を高める樹脂複合技術を開発した。本開発により，樹脂内部に炭素繊維の導電ネットワークを効率的に形成させ，少量の添加で十分な電波遮蔽効果を発現させることができた。これにより，同等性能を持たせる他の技術（金属，塗装等）と比べて，低コスト／軽量化を実現し，量産車に適用した。

Summary

In the Side-to-Rearward Sensing Radar interposed between the inside of a bumper and a car body, leaking of transmitted radio reflected by the backside of the bumper to a road surface may cause a false alarm. This time we developed a resin compound technology for enhancing dispersibility while suppressing a fiber breakage during injection molding, using carbon-fiber reinforced resin. This development made it possible to produce a sufficient electromagnetic shielding effect with a little fiber content by efficiently forming an electric conduction network for the carbon fiber inside the resin. In addition, a low-cost weight saving technology, which is superior to other technologies (metal, paint, etc.) offering equivalent performance, was put into practice and applied to production vehicles.

1. はじめに

さまざまな走行シーンにおいてドライバに優れた安全性能を提供するため，近年，ミリ波レーダやカメラなどの検知デバイスを用いた先進安全技術を開発している。

車両後側方の障害物警報システムに利用する後側方レーダは，リヤバンパ内側の左右に設置しており，準ミリ波の電波を用いている(1)。この電波は周囲の車両構造物で反射しやすい特性を持っているため，接近してくる車両を検知することが可能となる。しかし，電波は自車のバンパ内面でも反射してしまい，路面などの意図しない方向に放射すると，その不要な電波を検知して誤った警報を出してしまう（Fig. 1）。そのため，レーダのユニットは，車体とバンパの間にブラケット（以下，BRKT）及びレーダ本体に加え，路面方向への不要電波をカットするために，電波遮蔽カバーを取り付けている（Fig. 2）。この電波遮蔽カバーには，従来，導電性を持った金属材料が採用され，これを取り付けるBRKTも金属製のため，大幅な重量増となっていた。一方，導電性塗料のスプレー塗布では塗料費や塗膜付着性の対策が必要となるなど，コスト増となってしまう。

そこでマツダは，炭素繊維（以下，CF）強化樹脂を用いてこの金属製のBRKTと電波遮蔽カバーを樹脂化して軽量化することを着想した。そのためには，レーダ本体を保持するための剛性と，電波遮蔽性の両立が必要となる。

マツダが本開発において最も重視したのが，「CFが本

*1　技術研究所
Technical Research Center
*2～4　車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.
*5　電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

来持っている特性を最大限引き出す使い方」である。CF強化樹脂では高強度・高弾性率の特性を活かして，大幅な軽量化の可能性があるが，構造部材を対象としたプリプレグの成形品ではCFを多く添加しているため高価になり，高級車での採用にとどまっている。そこでマツダはCFの導電性にも着目した。さらに，CFの一本一本をしっかり機能させて，少ない添加量で最大の効果を得ることで，コストを抑え量産車に広く採用していくことをねらいとした。

そのために，汎用的な成形工法である射出成形を採用し，CFを長く残しつつ，分散性を高めて導電ネットワークを形成させることで，数wt%の少量添加でも十分な電波遮蔽効果を実現する樹脂複合技術を開発した。

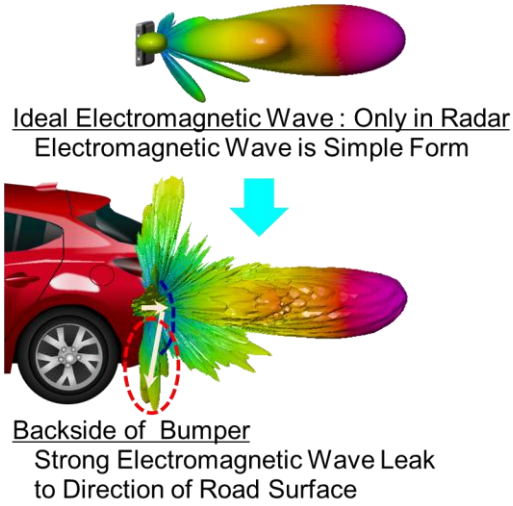


Fig. 1　Electromagnetic Wave Leaked by Bumper

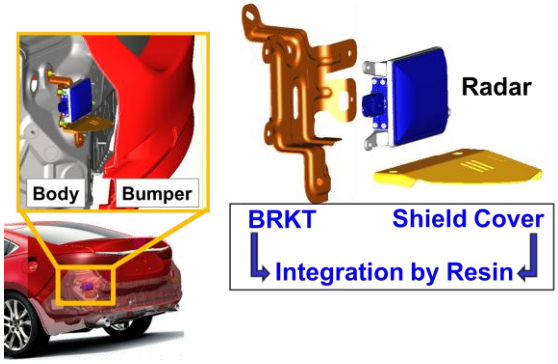


Fig. 2　Electromagnetic Shield Cover Integrated BRKT

2. 材料開発の考え方

2.1　要求材料特性

自動車に使われている電波は多種多様であり，周波数により遮蔽メカニズムが異なる。後側方レーダで使用される電波はラジオや，タイヤ空気圧センサなどに比べて周波数が高い24GHzの直線偏波である。

通常，電磁波を構成する電界成分は低周波から高周波まで導電体で遮蔽できるが，磁界成分は低周波と高周波で遮蔽メカニズムが異なる。低周波の磁界遮蔽には透磁率が高い磁性体を使用する必要があるが，高周波では導電体において電磁誘導効果により遮蔽が可能となる。従って，高周波である本用途においては，遮蔽用材料として導電体を採用することで電波遮蔽が可能となる。

射出成形に用いる導電性フィラーは，カーボンブラックが一般的であるが，粒子状であり，導電性塗料のスプレー塗布による層形成により高密度化するのとは異なり，製品内全体にフィラーが分散するため，高い電波遮蔽効果を得るには30wt%以上の高充填が必要となる。一方で，繊維状の導電性フィラーは高価なため，いかに少ない添加量で製品内に効率的に導電ネットワークを形成するかが電波遮蔽効果を達成するためのポイントとなる。

そこで，電波遮蔽機能を得るための導電性フィラーとして，繊維状で径が細く低比重，すなわち同じ添加量でも繊維の数を多くできる，また導電性の経時安定性に優れる，といった利点を持つCFを選定した。CF添加量は5wt%未満に抑えて，遮蔽効果は一般的に効果があるとされる20dBより高い値とすることを目標とした。また，レーダユニットを車体に締結するためのBRKTの機能を，樹脂製電波遮蔽カバーに統合させた。レーダ本体の保持に対するワースト条件を想定して，高温の弾性率を確保する必要があり，目標値はCAEにより算出し，1.1GPa以上とした（Table 1）。

Table 1　Target Value of Material Properties

Item	Unit	Target
CF Content	wt%	<5
Electromagnetic Shielding Effect	dB	>20
Elastic Modulus (80℃)	GPa	>1.1

2.2　開発方針

CF少量添加で目標とする遮蔽効果を達成するポイントは，CFの繊維長と分散性の両立である。CFを射出成形する場合，Fig. 3に示すように混練条件によって繊維長と分散性は背反する。例えば，混練条件を調整してせん断力を抑えると，繊維長を長く残すことができるが，解繊しにくくなり繊維が密集したところができてしまい，CFの機能を十分に活用できない。従って，樹脂内部でCFを均一分散させる対策が必要である。

マツダは，成形プロセスのなかでペレットをシリンダ内で溶融混練する際の解繊性が重要と考え，特にCFとPPの界面の接着性に着目した。つまり，接着性が低いとCFにせん断力が伝わらないためCFが凝集してしまうが，接着性が高いとCFがPPに引き寄せられ一緒に動くことで解繊が進み，均一に分散すると考えた。そこで，マトリクスPPの変性とCF表面の改質処理を選定し，界面接着性を上

げることで分散性の改善を試みた（Fig. 4）。

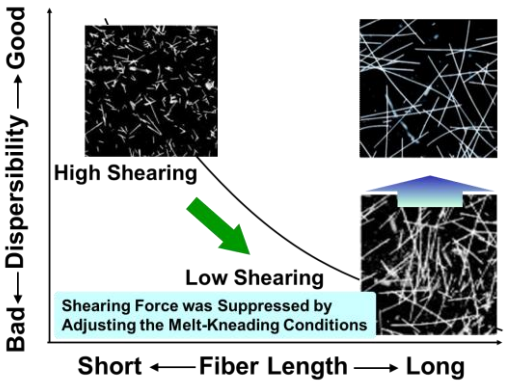


Fig. 3　Dispersibility of CF by Molding Conditions

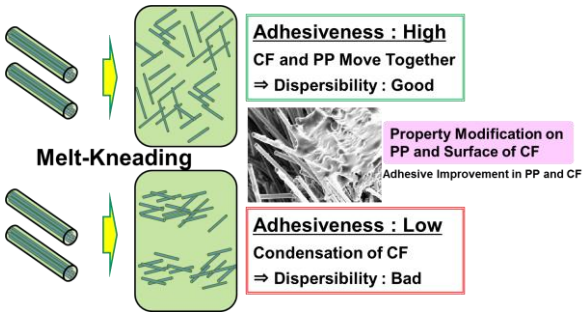


Fig. 4　Concept of CF Content Reduction

3. 実験

3.1　実験方法

電波遮蔽機能を得るCFペレットは，繊維長8mmのCFを40wt%含有したものを使用し，マトリクスPPの変性とCF表面の改質処理の組み合わせが異なる3タイプ（A，B，C）とした。このCFペレットとPPペレットをドライブレンドしてCF5wt%未満に希釈して射出成形することにより，360mm×250mm，板厚1.5～2.5mmの平板を作製した。

電波遮蔽効果の評価は，ホーンアンテナ（23dBi 標準矩形，導波管規格WR-34）を用いて後側方レーダの電波を模擬した評価装置を用い，電波の送信機と受信機の間に成形品を置いて電波の減衰量を測定した（Fig. 5）。試験片の設置に際しては，CFの分散性を図る一つの指標とするため，樹脂の流動方向と電波の偏波方向が平行な場合を「平行」方向，直交する場合を「垂直」方向とし，置き方を90度変えて測定した。

弾性率の測定は，成形品から切り出したテストピースを用いてISO 527-1に準じて，後側方レーダの使用環境を想定し雰囲気温度80℃にて行った。

成形品中の繊維解析には，デジタルマイクロスコープを用いた。

PPとCF界面の接着性評価に関しては，ミクロ，ナノの領域の接着力を実験的に測定することは簡単ではない。そこで，界面で起こる現象や反応を電子レベルで見える化できる計算化学シミュレーションを用いて，界面の官能基に着目して相互作用の大きさを評価した。改質処理が異なる材料の界面モデルを構築し，量子力学計算プログラムMaterials Studio DMol3を用いて構造最適化計算および電子密度解析を行った。各モデルについて最適化構造の全エネルギーから接着エネルギーを算出[2]し比較を行った。

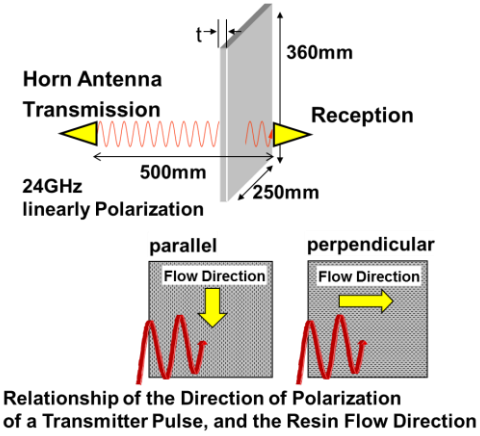


Fig. 5　Measuring Method of Electromagnetic Shielding Effect

3.2　実験結果

まず，成形品中の残存繊維長による影響を評価した。繊維長は，射出成形の混練条件を振って変化させることを試みた。A材を使用し，CF添加量は1wt%とした。残存繊維長と電波遮蔽効果の関係をFig. 6に示す。左から混練度がHard→Mildとなるにつれ平均残存繊維長が長くなり，ねらいどおり遮蔽効果が高くなることが確認できた。繊維長を長く残すことにより，繊維同士の接触確率が増えたためと考えられる。ただし，混練度を低くし過ぎると，CFが未解繊となる傾向があった。射出成形機のシリンダサイズやスクリュ仕様により混練状態が変化するため，成形機仕様ごとに混練条件のチューニングが必要である。

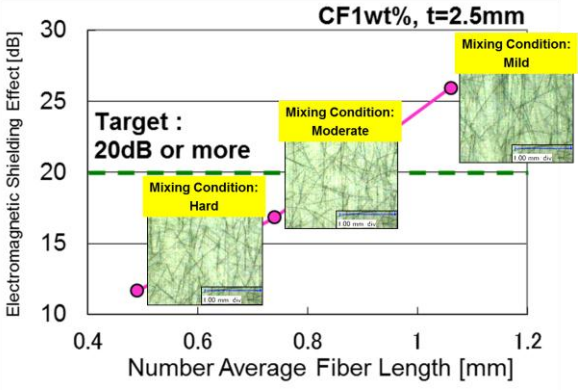


Fig. 6　Relationship between Fiber Length and Electromagnetic Shielding Effect

次に，改質処理の影響を評価した。処理の異なるA～C

の材料において，遮蔽効果を比較した結果をFig. 7に示す。C材は平行方向の遮蔽効果が低く，「平行」と「垂直」の方向による差が大きいことが分かった。一方，A材とB材は，方向による差が小さく，CFの分散性が良いと考えられる。また，遮蔽効果の低い「平行」方向で比較すると，A材の遮蔽効果が最も高いことが確認できた。

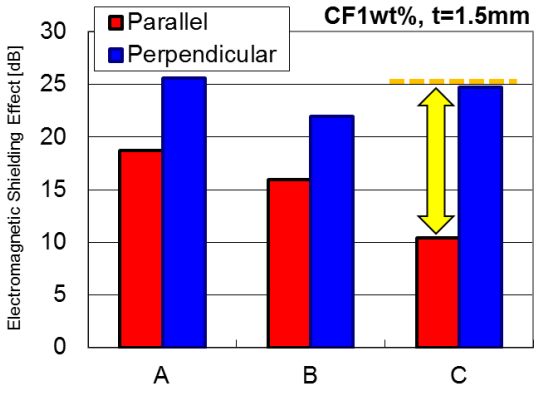


Fig. 7　Electromagnetic Shielding Effect of Developed CFPP

PPとCF界面の接着性が良いものが，本当に分散性が良いのかを検証するため，計算化学シミュレーションを用いて改質処理の違いによるPPとCF界面の接着性を評価した。

改質処理が異なるA～Cの界面モデルを構築し，各モデルについて接着エネルギーを算出し比較を行った（Table 2）。また，界面の電子雲の重なりも比較した。その結果，C材は界面に電子雲の重なりがないのに対し，A材とB材は電子雲の重なりが認められ接着エネルギーも大きいことが確認できた。この結果は，電波遮蔽効果の優劣と一致していることから，ねらいどおり改質処理の違いによる界面接着性がCFの分散性に影響していることが示唆された。

Table 2　Material Properties of Developed CFPP

	Material A	Material B	Material C
Adhesion Energy [Calculation Result]	14.1kJ/mol	11.1kJ/mol	5.8kJ/mol
Electromagnetic Shielding Effect [Experimental Result]	22.2dB	19.0dB	17.6dB

次に，開発した材料の物性を示す。以上の結果から選定したA材および成形条件により，板厚2.0mmの成形品を試作して評価を行った（Fig. 8）。この結果，CF2wt%以上で目標物性を満足することが確認できた。

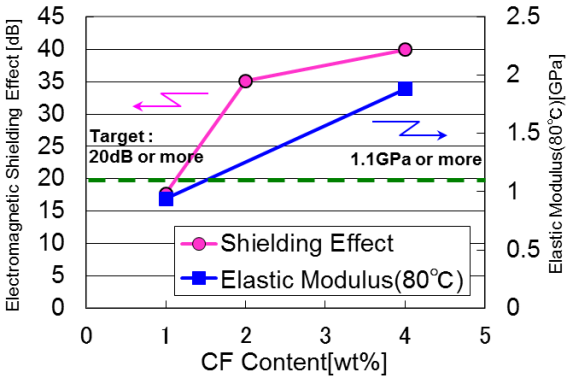


Fig. 8　Electromagnetic Shielding Effect and Elastic Modulus of Developed CFPP

4. 部品での検証

4.1　量産性

量産で使用する射出成形機を用いて，CFが未解繊とならないように混練条件をチューニングした上で成形を行った。遮蔽効果の評価部位は，部品の一般面とウェルド部とした。ウェルド部では，射出成形時に樹脂の流動がぶつかり，CFの配向が極端に強くなるため，遮蔽性能が低下する。ここで，ウェルド部の局部的な電波遮蔽効果を評価するには，これまで使用していたホーンアンテナでは測定ができないため，小型のプローブアンテナ（金属導波管，導波管規格WR-34）に変更した。なお，アンテナの違いによる測定値の相関を調べたところ，決定係数は0.96で相関が高いことを確認した。

部品の遮蔽効果を評価した結果，予想どおりウェルド部の遮蔽効果が低いが，CF2wt%以上で目標を満足することを確認できた（Fig. 9）。

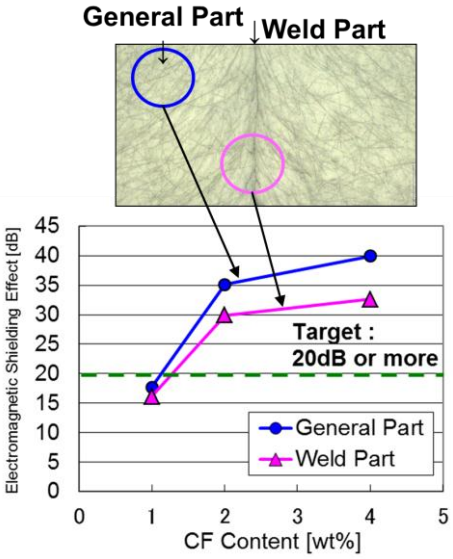


Fig. 9　Electromagnetic Shielding Effect of Developed Electromagnetic Shielding Cover

次に，工程能力を検証した。評価部位は，遮蔽性能が低いウェルド部とした。しきい値は，電波遮蔽性能20dBを下限とし，無検査が可能とされるCpl≧1.67を目標とした。CF2wt%と4wt%における工程能力を評価した結果，4wt%であれば十分な工程能力を得られることが確認できた（Fig. 10）。

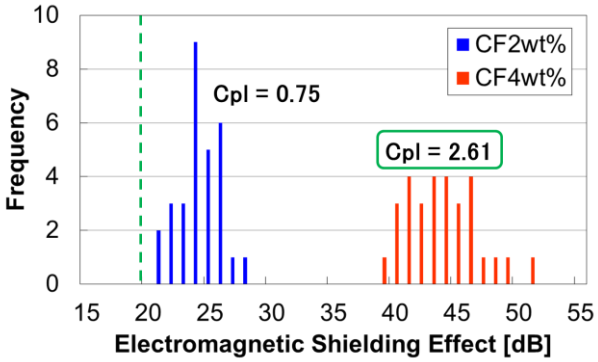


Fig. 10　Process Capacity of Developed Electromagnetic Shielding Cover

4.2　部品性能

不要電波の低減効果をCAEで評価したところ，電波遮蔽カバーにより大幅に電波漏れが抑えられ，路面等への反射が低減することを確認した（Fig. 11）。

また，部品でも全ての目標物性を満足することを確認し（Table 3），部品単体での剛性，耐熱試験や，実際の車両に搭載し走行耐久試験などの信頼性評価を行った結果，全ての基準を満足することを確認した。

Fig. 11　Effect of Electromagnetic Shielding Cover

Table 3　Material Properties of Developed Electromagnetic Shielding Cover

Item	Unit	Developed Material
CF Content	wt%	4
Electromagnetic Shielding Effect	dB	40
Elastic Modulus (80℃)	GPa	1.8

5. おわりに

CF強化樹脂を用い，射出成形時に繊維を長く残しながら分散性を高める樹脂複合技術を開発した。これにより，樹脂内部にCFの導電ネットワークを効率的に形成させ，少量の添加で十分な電波遮蔽効果を発現させることができた。そして，従来の金属部品を樹脂化することにより，軽量化30%と低コスト化を実現し，量産車に適用した。

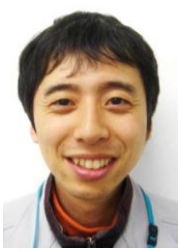
参考文献

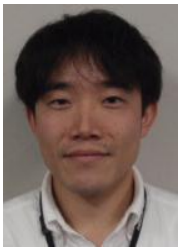
(1) 信時ほか：後側方障害物警報システムの開発，マツダ技報，No.26，pp.124-130（2008）
(2) 大迫ほか：金属/エポキシ樹脂界面の接着に関する分子論的研究，高分子論文集，Vol.68，No.2，pp.72-80（2011）

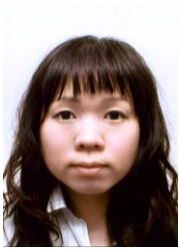
■著　者■

宮本 嗣久

稲田 貴裕


遠藤 靖之


久常 晃裕


鶴長 真里絵

論文・解説
45

“魂動デザイン”を実現する金型設計技術
Mold Technology to Achieve “Soul of Motion Design”

佐藤　博紀*1　古川　智司*2　澤田　義裕*3
Hiroki Sato　Satoshi Furukawa　Yoshihiro Sawada
松田　善光*4　鈴木　広之*5
Yoshimitsu Matsuda　Hiroyuki Suzuki

要　約

マツダは，ブランド価値の向上や卓越したデザインの実現，モノ造り革新を進めており，プラスチック領域では，ブランドにとって重要であり最大の樹脂部品であるバンパについて取り組みを進めている。

バンパは射出成形によって生産され，その金型はさまざまな機能が求められるため複雑な内部構造を持つ。しかし，複雑な構造は，魂動デザインによるバンパの魅力ある造形や大型化の実現達成に支障を与える上，投資の増加と生産性の悪化を招く。そこで，デザイン・バンパ設計の自由度と効率の両立のためには，必要最小限の機能で軽量・コンパクト・高剛性の金型造りを追究するべきと考え，金型が本来持つべき機能を定量評価する技術を開発し，「軽量・シンプル・高剛性なワンピース金型」を目指した活動の事例を紹介する。

Summary

Mazda is advancing brand value enhancement, distinctive “Soul of Motion Design”, cost improvement, and Monotsukuri Innovation. We, in charge of the plastic area, are also working on the innovation of the bumper, the largest plastic component in the car, which represents the brand.

The bumpers are manufactured by injection molding. The mold, which requires a variety of functions, has a complex internal structure. Such a complex structure, however, leads to limitation to realizing the “Soul of Motion Design”, increased investment, and lower productivity. We therefore recognized the necessity to achieve both productivity and design flexibility by pursuing technologies for developing a simple, high-rigidity and light-weight mold having minimum necessary functions.

1. はじめに

現在，マツダでは構造改革プランを進めており，技術本部では「魂動デザイン」「人馬一体」「燃費」の観点で，お客様の期待を超える価値の実現を目指している。その実現へ向けて，通常はトレードオフの関係にあるV（Value:商品価値・性能）とC（Cost:投資・生産性）を技術開発によってブレークスルーし，双方を両立させることが必要と考えている。これを我々はFig. 1に示すとおり，分子をVとして分母をCとした指標である「ビジネス効率」と定義し，その向上へ取り組んでいる。

そこで，プラスチック領域では次の理由から，製品のVとCを向上させるために重要な部品である，フロントバンパ・リヤバンパのビジネス効率の向上へ取り組んでいる。

① 魂動デザインを再現する上で重要な，フロントビュー，リヤビューを大きく占める部品である。
② 魂動デザインや機能要件を満たすために大型化し，樹脂部品の中でも最大で，車両や生産設備・製造コストに占める割合が大きい。

本稿では，バンパ金型においてビジネス効率最大で魂動デザインを実現するために，金型に求められる性能を，成形工程の机上再現により定量化する技術を開発した取り組みを紹介する。

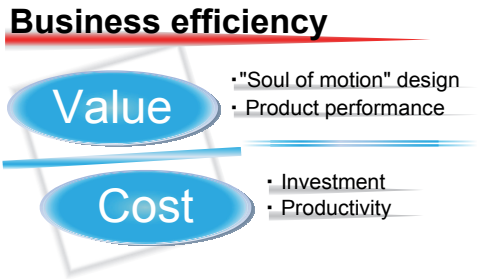


Fig. 1　Business Efficiency

*1～5　車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

2. バンパ成形の技術向上

2.1　バンパ成形の技術向上への取り組み

バンパは，溶けた樹脂を金型内部へ注入し，冷却固化した後に取り出すという射出成形工法で生産している。この工法は，種々ある量産における工法の中では転写性が高く，魂動デザインの持つ複雑な曲面やキャラクタラインの再現に適した工法で，生産効率も高く大量生産に適している。そのビジネス効率を更に向上させるために，これまで以下の取り組みにより効果を出してきた。

① 従来材料と比べて重量強度比を20%向上させた，高剛性材料の導入と薄肉による車両の軽量化
② 業界トップクラスのハイサイクル成形による，省エネと生産能力の向上
③ 周辺部品を取り込み同時に成形することで，型数削減と生産効率向上を実現

そして，今後バンパの付加価値を高めビジネス効率をより向上させるには，デザイン自由度や品質に与える影響が大きい金型構造での更なる改善が重要であると考えた。

2.2　付加価値とコストを両立した金型とは

ビジネス効率最大の金型を実現するには，VとC双方の向上が欠かせない。しかし，高まるデザインニーズと環境・安全といったバンパ機能を満たすため，他部品との一体感向上のための位置決めや，部品を設置する締結が必要になり，バンパ構造は複雑になる傾向にある。そのため金型構造も，Fig. 2に示すように多数のブロックを組み合わせた複雑な構造になり，強度の低下や「割り」と呼ばれる分割面が多数発生する。割りに生じる段差はバンパ表面の平滑性を阻害するが，完全に0mmにはできない。そのため今後，魂動デザインの持つ流麗な面の忠実な再現を追究していく中で，障害となることが予想された。

そこで金型造りにおいて，デザイン・バンパ設計の自由度を更に高めながら優れた生産性を達成するには，形状面に分割のない1つの部品で作られた「ワンピース金型」を目指すことが最も重要と考えた。つまり，金型構成部品点数が極少化されたシンプルな金型構造によって，バンパ裏面に存在する金型の「割り」の量をミニマム化しながら，金型を軽量・シンプル・高強度に作れるため，VとC双方の向上を実現できる。

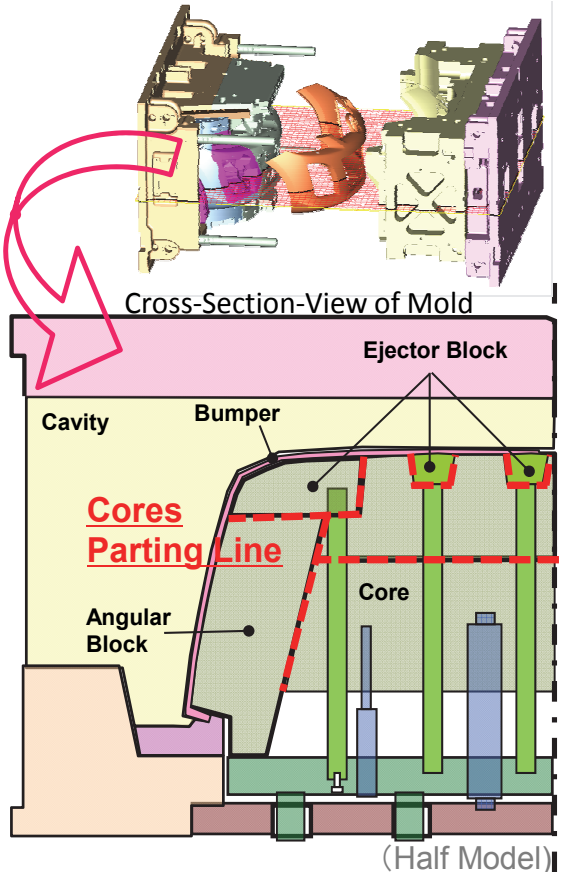


Fig. 2　Cores Parting Line

3. 金型の目指す姿へ必要な技術

目指す姿を実現するには，割りが必要な金型構造をいかに減らすかが重要である。これは，後述する「アンダーカット処理構造」と「突き出し構造」に分類され，それぞれ生産に必要な機能を金型へ持たせている。そのため，金型におけるバンパ裏面の割りをなくしてワンピース金型を達成するには，必要機能の定義とその性能を定量化して構造の要否を判断するための，以下3つの技術が必要である。

3.1　金型強度の評価技術

射出成形金型は溶融した樹脂が高速で注入されるため，部位ごとに約40～100Mpaという非常に高い圧力が加わる。そのため金型の強度が低いと，金型が変形してシール部に隙間ができるため，その隙間から樹脂が漏れ出て固まるバリ不良が発生する。バンパ裏面に割りの多い金型は強度が低下し，シール部からのバリも増えて不良が増加する傾向にある。従来は，バリの発生を予測するために，簡易的な理論式に置き換えて計算を行う程度であったため，精度が低くバラツキがあった。ゆえに，バリ発生の予測を正確かつ定量的に行うためには，樹脂圧による金型変形量を100分の1ミリという精度で，正確に予測する技術が必要である。

3.2　アンダーカット処理機能の評価技術

自動車のバンパの外周は，車両構造と締結するために内方向にアンダーカット（折り返し）がある“つぼ”のような構造である。従来のバンパ金型構造はこのアンダーカットを処理するために大型の突き出しブロックと傾斜コアをセットで用いることが多く，Fig. 3のように突き出しながら傾斜コアを金型内側へ動作する複雑な金型構造となっていた。この複雑な構造を簡略化する手法として，バンパの素材である樹脂の材料特性を利用して，バンパを外側へ曲げてアンダーカットを処理する，外まくり構造が従来より知られてきた。しかし，バンパの剛性やまくり量によっては弾性領域を超えてバンパが変形し，ひずみを生じさせることがあり，外まくり構造採用の大きな障害となっていた（Fig. 4）。それをバンパ構造設計の初期段階で発見し，デザインや構造に影響を与えずに行う手法を検討するため，定量的な判断指標が必要である。

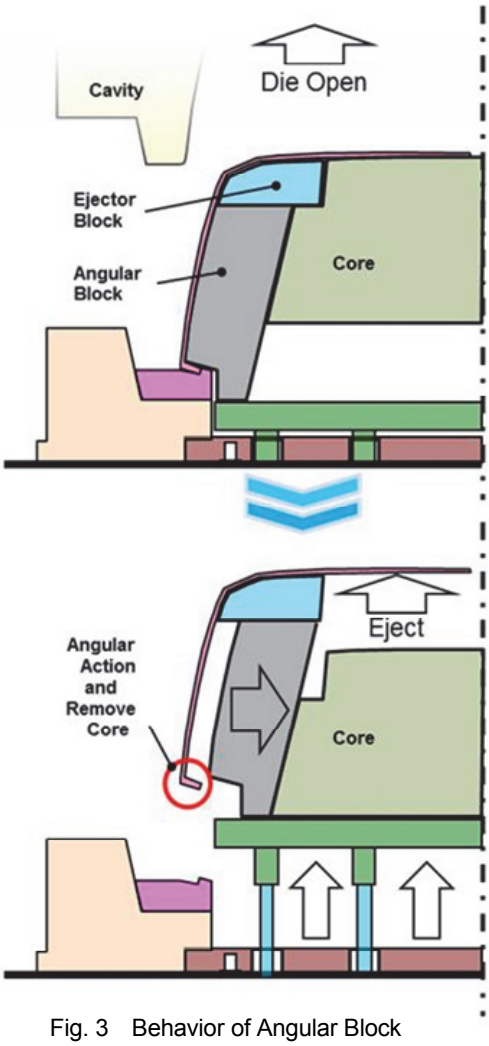


Fig. 3　Behavior of Angular Block

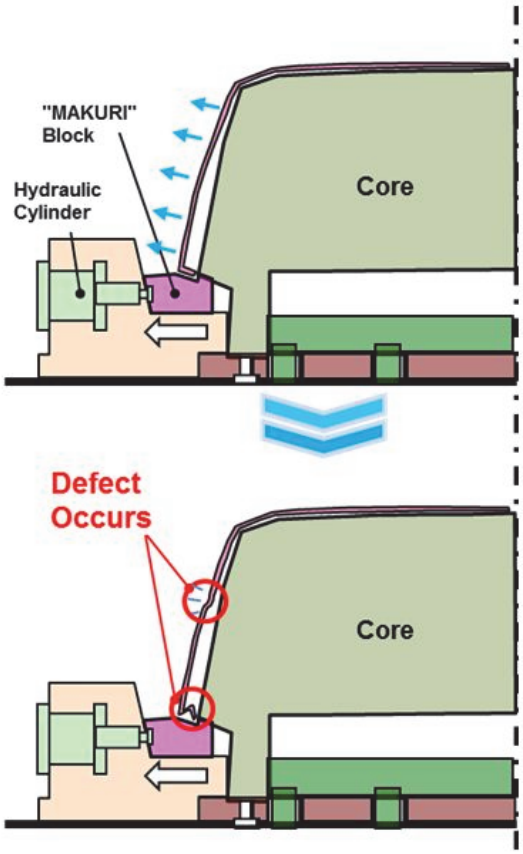


Fig. 4　Behavior of “MAKURI” Block

3.3　バンパの突き出し機能の評価技術

金型へ注入された樹脂は，冷えて固まる際に収縮して金型へ張り付くため，Fig. 5に示す突き出しブロックによって強制的に離型させる必要がある。突き出しブロックは成形完了後に突き出し変形などの不具合を発生させないために，バンパの張り付き力に対してバランス良く配置する必要がある。通常は突き出しブロックの配置を金型設計者の経験やカンに依存しており，不具合防止のため過剰に配置してしまう傾向があるため，その定量的な判断指標が必要である。

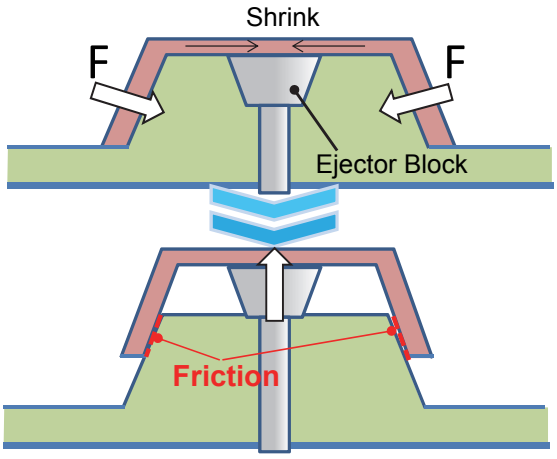


Fig. 5　Behavior of Ejector Block

4. 定量評価技術の構築

金型強度，アンダーカット処理機能，突き出し機能といった3つの金型機能を必要最小限とするために必要な技術として，からくりの解明と，これを机上で再現するための連成解析技術を構築した。これはFig. 6に示すように，「射出&保圧・冷却・アンダーカット処理&突き出し」といった一連の成形工程を解析する過程で解析結果を別の解析と連成させることで，より実態に則した結果を得る技術であり，後述する3つの主要な技術で構成されている。

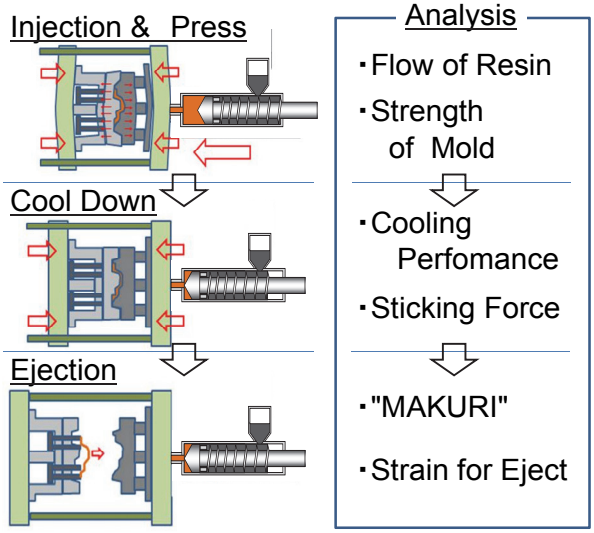


Fig. 6　Analysis Performed in Process

4.1　金型構造解析と樹脂流動解析の連成解析技術

金型が成形時に変位する量を正確に予測してバリ不良を防止するため，金型構造解析に用いる樹脂圧力に樹脂流動解析の結果を用いた連成解析技術を構築して，その精度を向上させた。具体的には，金型をFEMモデルで再現して，設備への固定を想定した拘束を掛けた解析モデルを作成する。その解析モデルに摩擦係数，材料物性値を入力し，バンパ面へ樹脂流動解析で計算された圧力を付与する解析である。通常，金型構造解析と樹脂流動解析は異なる解析モデルを用いており，簡単に圧力を連成することはできない。そこで，異なる解析モデルでも圧力情報の共有が容易となるように，解析作業工程と圧力付与のロジックを整備し，短時間で高精度な連成を可能とした。その結果，従来の樹脂圧力を一定の力で均一に付与する解析と比べ，樹脂流動解析によって得られる緻密な樹脂圧力分布を金型構造解析で再現することで，実態に近い金型変位量が算出できるようになった。更に任意のタイミングでの樹脂圧付与が可能なため，射出・保圧・冷却と成形中に変動する樹脂圧によって時系列で変化する金型の変位も確認可能になった。そして，この解析結果から金型変位量を算出し，バリ不良の発生評価を行う。これらの取り組みにより，金型の割りによる強度低下によって，樹脂圧による金型変位量が許容値を超えて不良の発生が予測される場合は，設計段階で金型を補強するなどの対策を織り込むことが可能となった。

4.2　外まくり解析技術

ワンピース金型の実現に必要不可欠な外まくりを可能とするため，実際のひずみと解析値との一致を目指し，バンパのひずみの量や位置の調査といった実際の現象を基に，材料物性や解析モデルの作り方，判定基準の調整や見直しを行った。その結果，バンパの塑性変形や傷付きを定量評価するための外まくり解析技術を構築できた。

外まくり解析は金型構造解析と同様に，タイヤアーチ部周辺の金型構造とバンパ形状をFEMモデルで再現し，金型モデルとバンパモデルの間に接触条件を設定した解析モデルを作成する。その解析モデルに，摩擦係数，材料の物性値を入力して，アンダーカット処理に必要な量を強制変位させる解析である。この解析からバンパのひずみ量と変位量を算出して外まくりの可否を判断する。この際，可否判断へ用いる基準を一律ではなく部位別に数値を変更したり，可視部以外へひずみを分散させ，まくりが成立する範囲を広げている。例えば，魂動デザインに影響しないバンパ最下部に，スリットを入れるなどの対応策を施し，ひずみの基となる応力を効果的に分散させる手法が挙げられる（Fig. 7）。

この解析技術によって，バンパ裏面に割りの出ないまくり構造を広く採用できるようになり，魂動デザインを阻害せずにアンダーカット処理ができるようになった。更に，割りをなくすだけでなく，従来の傾斜コア構造では成立しないFig. 8のような形状にも，本技術を適用してまくり構造とすることで成立できた事例もある。

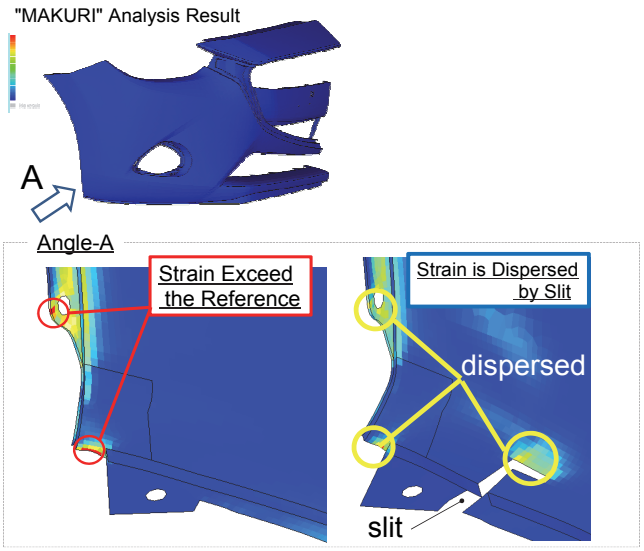


Fig. 7　Improvement by Slit

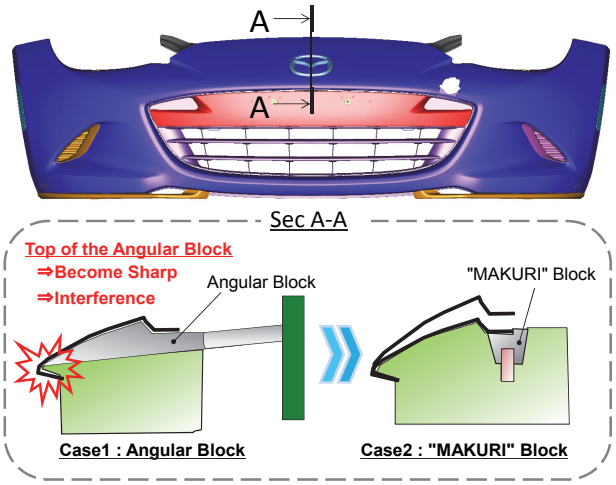


Fig. 8　"MAKURI" Applied to New Point

またこの解析は，ひずみ量を確認できるだけでなく，外まくり時に発生する反力とバンパのまくり時（曲げ時）の軌跡も可視化できる。これにより，Fig. 9のようにまくり構造を設置する部位とバンパのまくり量との関係を確認することで，設置する構造の数や大きさを必要最小限に抑えて金型構造の簡易化が可能になった。

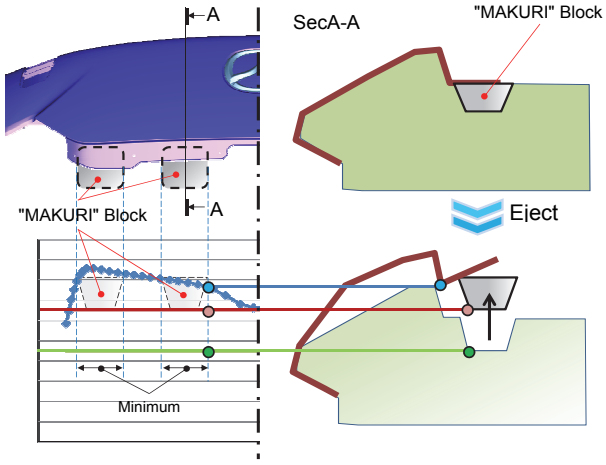


Fig. 9　Visualize the Behavior of the Bumper

4.3　張り付き・突き出し変形解析技術

突き出し機構の適正配置技術を構築するため，まずバンパが収縮によって金型に張り付く力と，バンパの突き出しの際に発生する抵抗力が，温度や突き出し速度などの条件にどれだけ影響されるかを，実験によって解明した。その結果を基に，必要最小限の突き出しレイアウトを達成する適正配置技術を可能とする，張り付き解析技術と突き出し解析技術の2ステップの連成解析技術を構築することができた。

具体的には，まずバンパの張り付き力解析を行う。外まくり解析と同様に解析モデルを作成し，線膨張係数などの物性値を入力する。更に，実験型で成形を行うことで解明した，張り付き力に与える影響が大きい因子も入力する。解析の結果として，樹脂の収縮によってバンパが金型へ張り付く力が可視化される。更に，この張り付き力と突き出しブロックが発生する突き出し力の及ぼす影響との相関式を用いて，突き出しが必要な部位を，張り付き力を中心とした円で表現した。これを基に突き出し配置をすることで，容易に突き出しブロックの配置を必要最小限にできる（Fig. 10）。

次に，バンパの突き出し変形解析を行う。先の張り付き解析により得られた突き出し構造の位置を基に，解析モデルに突き出し構造のFEMモデルを追加し，突き出し構造のモデルを強制変位させる。その際，突き出し時のバンパと金型の摩擦係数は，実験によって突き出し速度に依存することが判っているので，その値を入力する。これらの条件から突き出し変形解析を行い，アウトプットとして，ひずみ量，突き出し量，バンパの突き出しに必要な力が確認できる（Fig. 11）。

これら2つの解析を連成して行うことで，過剰になりがちであった突き出し構造を，必要な場所に必要な数だけ配置することができた。

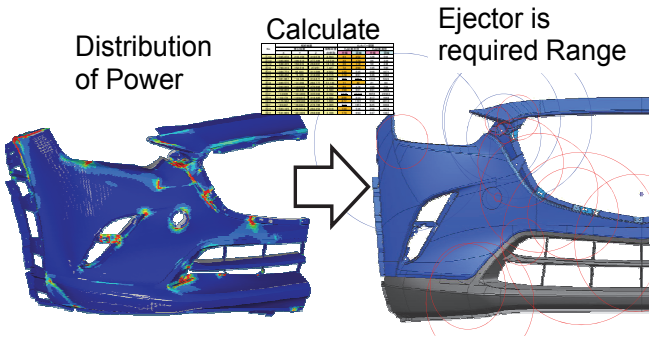


Fig. 10　Analysis Result of the Sticking Force

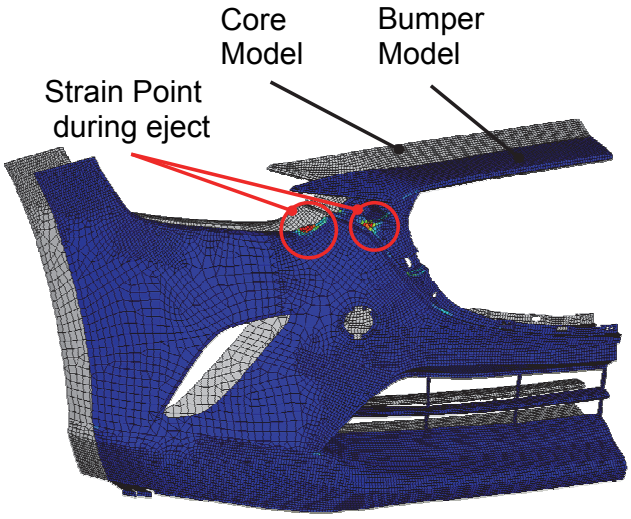


Fig. 11　Visualization of Strain in Eject Process

5. 結果

今回，バリ不良の発生やまくり変形，及び突き出しブロックの適正配置を予測する技術を開発した。これを活用し，金型構造をシンプル化してバンパ裏面の割りを極少化するワンピース化を進めてきた。その結果，魂動デザインの実現に貢献しつつビジネス効率を最大化する金型を設計する手法を構築できた。具体的な事例として，Fig. 12でCX-7からCX-5を経て，CX-3で開発したフロントバンパ金型での改善の様子を示す。図中の左図が実際の金型モデルで右図がそれを簡略化した絵である。

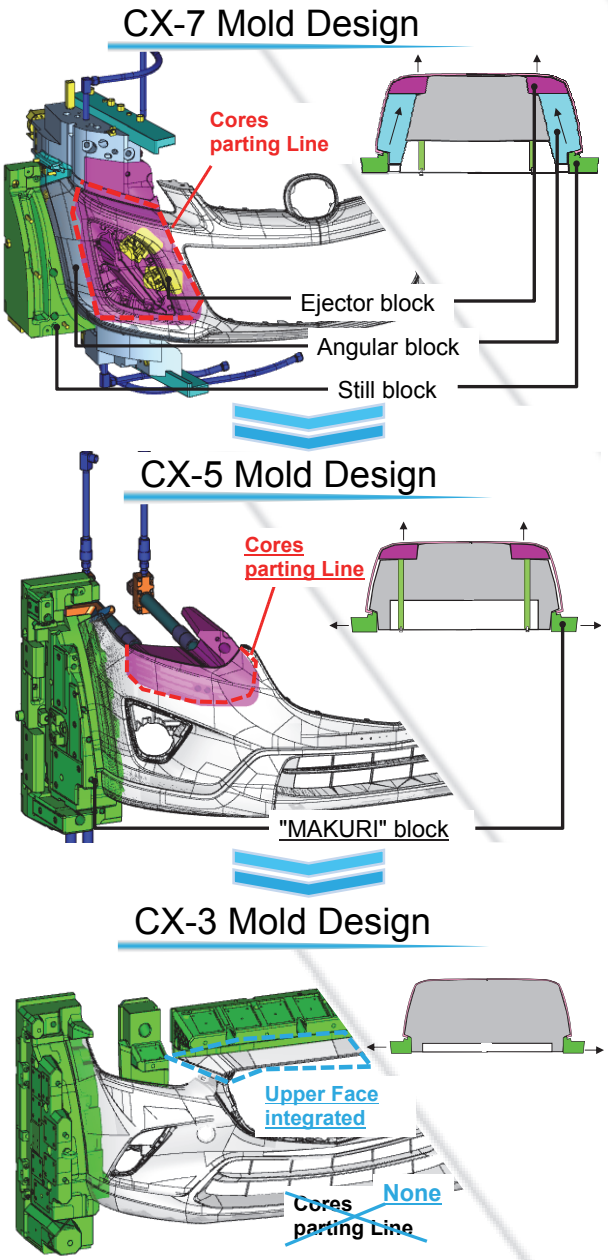


Fig. 12　Progress of Mold Design

CX-7では傾斜コア構造のため大きな割りがバンパ上に存在していた上，金型構造も複雑であった。CX-5ではまくり構造の適用により金型構造は幾分シンプルになったが，依然としてヘッドランプ下のアンダーカット処理のための中型エジェクタブロックの割りがバンパ裏面に存在していた。そしてCX-3では，CX-5では中型エジェクタブロックを適用していた部位にまくり構造を採用することで，魂動デザインを阻害する割りをなくすことができた。

更にボンネットの先端を構成するアッパーフェースの一体化成形も行い，その際にアッパーフェースへFig. 8に示すようなまくり構造を採用することで，魂動デザインを忠実に再現しつつ投資削減を同時に達成できた。

6. おわりに

車両のブランド価値を向上させるためには，内外装に多数使用されているプラスチック部品の質感や折り合いなどの商品価値を向上させ，魂動デザインや人馬一体をより高めていくことが重要と考える。これをビジネス効率最大で行うためのソリューションの1つとして，更なる金型設計技術の開発を今後も進めていく所存である。

参考文献

(1) 得平ほか：バンパー金型構造のシンプル化への取組み，型技術，Vol. 28　No. 5，pp.64-69（2013）
(2) 佐藤ほか：“魂動デザイン”を実現する金型における，生産性の最大化に向けた金型構造解析技術の構築，型技術，Vol. 29　No. 9　pp.31-35（2014）

■著　者■

佐藤　博紀

古川　智司

澤田 義裕

松田 善光

鈴木　広之

特許紹介

コンパクトクロスオーバSUV（乗用車ベーススポーツ用多目的車）の意匠

意匠登録第 1460391 号（登録日 2012 年 12 月 21 日）
創　作　者　中山　雅，岩尾　典史，宮地　善和，岩内　義人，淺野　行治
発明の実績　社内実施（CX - 5）　　平成 26 年度全国発明表彰発明賞受賞

本意匠に係るCX-5は，平成25年度中国地方発明表彰では上位特別賞の特許庁長官奨励賞を受賞し，平成26年度全国発明表彰では発明賞を受賞した。これら発明表彰は毎年さまざまな業種の企業から優れた技術やデザインが数多く応募されており，その中から車のデザインが全国発明表彰で発明賞を受賞するのは、産業界で最上位のデザインであることが認められたことを意味する。

＜意匠の背景＞

本意匠に係るコンパクトクロスオーバSUVは，新しい技術「SKYACTIV TECHNOLOGY」と新デザインテーマ「魂動（こどう）」を融合し，獲物に飛びかかろうとするチーターを彷彿させる生命力と躍動感をデザインに造り込んで，スポーティかつ堂々としたものである。

世界的にSUVの人気は高まっているが，国によって車へのサイズ感への期待は相違する。すなわち，米国では低く長い車を，欧州では効率的で短い車を好む傾向が多く，1つのボデータイプですべての期待に応えるデザインに造り上げることは，造形上至難な課題である。そこで，生命感を表現する「魂動（こどう）」デザインにより上記課題を解消し，米国人も納得する大きさ感を表現しながら欧州人が期待する合理的なパッケージを持たせるようにした。

このようにして本コンパクトクロスオーバSUVに独自のスポーティな外観を与え，欧米人を納得させる存在感を持ちながら，日本人の目にも馴染みやすい世界的に共感を呼ぶデザインに仕上げた。

＜意匠の概要＞

本意匠の特長は以下のとおりである。

（1）動きを予感させる独特のプロポーション

車の高さと踏ん張り感・しっかりとノーズの存在感を出すことでSUVらしいシルエットを規定した上で，車全体の姿勢を前傾させフロントピラーを後方に引いてキャビンを後退させることで，より後ろ足に荷重が掛かった今にも走り出しそうな動きの予感を表現した。

（2）艶があって凛とした魂動のボデーランゲージ

ボデー全体のウエッジシェイプに呼応するようボデーサイドのキャラクタラインやホイールアーチの傾きを合わせ，全体の印象をダイナミックに表現した。

フェンダも強い抑揚のあるボデー断面と連続させ，艶やかで魅力的な面の表情を狙った。

（3）世界最高レベルの空力特性と魅力あるデザイン

ボデー後方は，全体を飛行機の翼断面の一部のようなカタチに構成している。Cd値はクラストップとなる0.33を実現した。

図1　本コンパクトクロスオーバ SUV の外観図

特許紹介

新世代高圧縮比高効率ガソリンエンジンの発明

特許第 4582217 号（登録日 2010 年 09 月 10 日）

発　明　者　山川　正尚，西本　敏朗，渡辺　友巳，中山　佳映，藤川　竜也

発明の実績　社内実施（SKYACTIV-G）　　平成 25 年度全国発明表彰発明賞受賞

SKYACTIV-Gは，100件を超える特許群に支えられた低燃費を実現するための優れた技術である。その技術の代表として本件特許が，平成24年度中国地方発明表彰では最上位特別賞の文部科学大臣発明奨励賞を受賞し，平成25年度全国発明表彰では発明賞を受賞した。これら発明表彰は毎年さまざまな業種の企業から優れた技術が数多く応募されており，その中からエンジン技術が全国発明表彰で発明賞を受賞するのは，産業界でもトップクラスの技術であることが認められたことを意味する。

＜発明の背景＞

近年ハイブリッド車や電気自動車の開発が活発化し，電気デバイスによる燃費改善技術の採用が進んでいるが，2020年時点でも自動車の多くは内燃機関を動力源として搭載していると考えられている。さらに，今後，アイドリングストップや減速エネルギー回生等の電気デバイスが量産効果によるコスト低減で普及していくと思われる。その効果を十分発揮させるためには，ベースとなる内燃機関の効率向上が重要である。本新世代高圧縮比高効率ガソリンエンジンは，理想の燃焼を追求した高圧縮比の新燃焼コンセプトに関するものである。

高圧縮比にすると，高負荷において中心部に設けられた点火プラグから火炎の伝わりにくい場所の混合気が圧縮されて自己着火による異常燃焼が発生し，最悪の場合，ピストンや点火プラグの溶損に至る。そのため，圧縮比が高いと燃費が良くなるのはわかっているが異常燃焼を回避する燃焼技術が確立できていなかった。

＜発明の概要＞

本新世代高圧縮比高効率ガソリンエンジンは，圧縮比を13以上にしてトルクが低下しないという燃料の化学反応を発見し，その効果を高圧縮比化の障害となる異常燃焼改善のベースにした。また，異常燃焼前に通常火炎で燃やし切るため，初期の火炎を大切に育てて，燃焼速度を早めるピストンキャビティを考案するとともに，混合気を冷却して異常燃焼を抑制するため，マルチホールインジェクタの噴射自由度を生かし，ピストンからではなく混合気から蒸発潜熱で熱を奪うようにした。さらに，始動時にはこのピストン形状と噴霧によって排気ガスを浄化する触媒を早期に活性化する機能も開発した。

その結果，世界一の高圧縮比13-14を柱に，従来機種比でポンプ損失を20%と機械抵抗損失を30%低減し，アイドリングストップ機構と組み合わせることで，ハイブリッド車と同等レベルの低燃費を実現した。

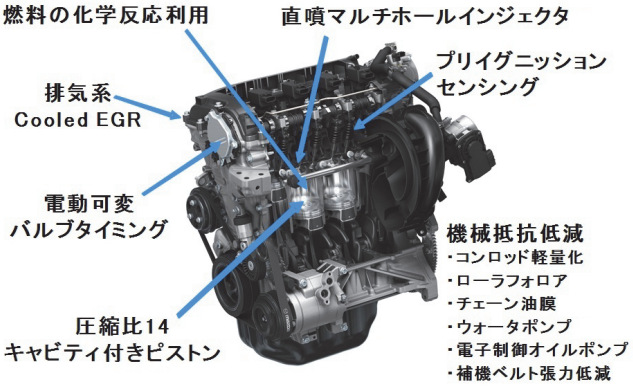


図1　新世代高圧縮比高効率ガソリンエンジンの概要

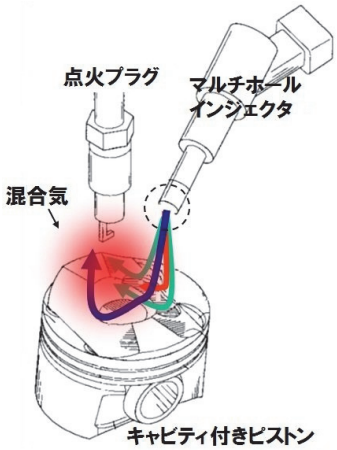


図2　新世代高圧縮比高効率ガソリンエンジンの燃焼コンセプト

社外への発表論文一覧表（2013年1月～2014年12月）

1. 社外講演(海外)　　＊所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.4.22-24	Society of plastics Engineers ANTEC 2013	SANDWICH-STRUCTURED THERMO PLASTIC OLEFIN RESIN FOR LIGHT WEIGHT AUTOMOTIVE BUMPER FACIAS ENABLES MOLDING BY A CONVENTIONAL INJECTION MOLDING MACHINE	藤　和久 朝野　千明 原　正雄 大西　正明 古田　和広	技術研究所 同上 同上 同上 同上
2013.5.12	Sabanci University 1st joint Turkey-Japan Workshop on Polymer Composite Materials	Study on Sandwich-Structured Fiber Reinforced Composites Enable Molding by a Conventional Injection Molding Machine	濱田　泰以 藤　和久 小林めぐみ 森脇　健二 松田　祐之 Cuntao Wang Sungeon Kim 山田　浩明	京都工繊大学 技術研究所 同上 同上 同上 京都工繊大学 ダイキョーニシカワ(株) 同上
2013.6.3-6	2013 TOCICO International Conference	Technology Breakthrough by Operation Breakthrough	人見　光夫	執行役員
2013.6.24-27	31st AIAA Applied Aerodynamics Conference	Unsteady Aerodynamics Simulation of A Road Vehicle Running with Cyclic Yaw and Side-slip Motions	中島　卓司 岡田　義浩 坪倉　誠 農沢　隆秀	広島大学 車両実研部 北海道大学 技術研究所
2013.6.24-28	AAB (Advanced Automotive Batteries) Advanced Automotive Battery Conference Europe 2013	Mazda “i-ELOOP” Brake Energy Regeneration System and Strategy	久米　章友 平野　晴洋 高橋　正好	パワートレインシステム開発部 同上 車両システム開発部
2013.9.4-7	7th IFAC (International Federation of Automatic Control) Symposium on Advances in Automotive Control	Development of Control Technology for i-ELOOP	久米　章友 小谷　和也 水落　洋行	パワートレインシステム開発部 同上 同上
		Development of Model-Based Combustion Control to Ensure Robustness of Emissions, Fuel Consumption and Noise Performances in New Generation Diesel Engine	佐原　寛哉 角田　良枝 金　尚奎 志茂　大輔 丸山　慶士 森永　真一 橋本　孝芳 林原　寛 鐵野　雅之	エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術開発部 エンジン性能開発部 パワートレイン技術開発部 エンジン性能開発部 パワートレイン技術開発部 走行環境性能開発部 パワートレインシステム開発部
2013.9.12-13	Image Media Quality Technical Group Proceedings of the 6th International Workshop on Image Media Quality and its Applications (IMQA2013)	An evaluation of Automotive Interiror Shapes Based on Human Ergocentric Direction Perception	武田　雄策 村瀬　健二 梶川　浩子 大坪　智範 橋本　悟 井岡　忠士 民谷　謙	技術研究所 同上 同上 車両実研部 商品企画部 同上 開発企画部
2013.9.15-18	Euro PM2013 Höganäs POP Seminar, Gothenburg	PM components in Mazda SKYACTIV Powertrain and trend of Japanese PM technologies	小笠原　徹	パワートレイン開発本部
2013.10.14-18	The Japan Organizing Committee of ITS World Congress Tokyo 2013 ITS Japan 20th ITS World Congress Tokyo 2013	Fading characteristic modeling of V2V communication at 700MHz band and the system margin design	強矢　昌宏 山本　雅史 山田　秀行 奥木　友和 松本　光平 荒木　純道 タンザカン	技術研究所 同上 同上 同上 東京工業大学 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		Advanced Safety Vehicle “Mazda ASV-5” Innovative ASV demonstration in Hiroshima – LRV and automobile cooperation –	山本　雅史	技術研究所
		A Study of Lane Keeping Assistance by Steering Control Based on Muscular Activity	高橋　英輝 菅野　　崇 岡崎　俊実	技術研究所 同上 同上
2013.10.16	IEEE IEEE SMC 2013	A Subjective Force Perception Model of Humans and its Application to a Steering Operation System of a Vehicle	竹村　和紘 山田　直樹 岸　　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀 栗田　雄一 辻　　敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2013.12.15	IEEE/SICE SII2013	Investigation of subjective force perception based on estimation of muscle activities during steering operation	佐藤　純平 竹村　和紘 山田　直樹 岸　　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀 辻　　敏夫 栗田　雄一	広島大学 技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2014.4.8-11	Computational, Engineering & Technology Conferences and Publications The Second International 2014 Conference on Railway Technology	Prompt Report of FOT of innovative ASV in Hiroshima	山本　康典	技術研究所
2014.4.13-16	COMPSAFE 2014 (Sendai)	Elasto-Plastic Damage Analysis Based on Divided Back Stress Model by Full-Implicit Algorithm	山王丸将吾 岡澤　重信 田中　智行	エンジン性能開発部 広島大学 同上
2014.4.29	Society of plastics Engineers ANTEC2014	Influence of Carbon Fibers Used in Composites on Melt Viscosity of Composites in the Injection Molding Process	藤　　和久 小林めぐみ 森脇　健二 松田　祐之 濱田　泰以 Cuntao Wang Sungeon Kim 山田　浩明	技術研究所 同上 同上 同上 京都工繊大学 同上 ダイキョーニシカワ(株) 同上
2014.5.7	ESAFORM ESAFORM 2014 International Conference	Mechanical behavior of 980MPa NANO-HITEN at elevated temperatures and its effect on springback in warm forming	蓑手　　徹 船川　義正 斉藤　直子 深堀　　貢 濱崎　　洋 吉田　総仁	JFEスチール(株) 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上
2014.5.14-15	TEBIS A.G TEBIS Open house	Achieve strategic targets for Tool & Die Production - Mazda Tooling Innovation by adopting Tebis System -	安達　範久	ツーリング製作部
2014.5.19-23	AAB (Advanced Automotive Batteries) Advanced Automotive Battery Conference Asia 2014	Mazda “i-ELOOP” Brake Energy Regeneration System and Strategy	久米　章友 平野　晴洋 高橋　正好	電気駆動システム開発室 同上 同上
2014.5.22	ESI-Group ESI Global Forum 2014	Simulation of communication performance for E-Call system	浜田　　康 鶴長真里絵	電子開発部 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.5.22-24	JSAE International Electric Vehicle Technology Conference and Automotive Power Electronics Japan 2014	Comparison of low-voltage regenerative braking systems in WLTP	久米　章友 小谷　和也	電気駆動システム開発室 同上
2014.5.28-30	The 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP 2014), Hiroshima University	SKYACTIV Technology and Model-Based Development	今田　道宏	パワートレインシステム開発部
2014.6.5	Catalysis Society of Japan TOCAT7	Properties and catalytic performance of Pr doped Zr-Nd based oxides for soot oxidation	馬場　誉士 原田浩一郎 山田　　啓 石原　達己 高見　明秀	技術研究所 同上 同上 九州大学 技術研究所
2014.8.3-7	The 12th International Conference on Motion and Vibration	Control of the longitudinal vortex generated around the front pillar of vehicles, based on clarification of the vortex generation mechanism using a delta-wing	尾川　　茂 李　　曄	呉工業高等専門学校 車両実研部
2014.9.7-11	ITS America 2014 World Congress on Intelligent Transport Systems	Innovative ASV Demonstration in Hiroshima – Automobile and Tram Cooperation –	山本　雅史	Mazda North American Operations
2014.9.8-10	Particles and Process Engineering Department, University Bremen ILASS 2014	Experimental Study on In-Cross-Flow Spray Injected by Hole-Type Nozzle for DISI Engine	岸　　諒輔 Guo Min Baolu Shi 尾形　陽一 西田　恵哉 和田　好隆	広島大学 同上 同上 同上 同上 エンジン性能開発部
2014.9.9-12	CMT-Motores Termicos THIESEL 2014 (Thermo and fluid dynamic processes in direct injection engine)	Cavitation in Mini-Sac Nozzle and Injected Liquid Jet	Raditya Hendra Pratama 宋　　明良 横畑　英明 和田　好隆	神戸大学 同上 エンジン性能開発部 同上
		Mazda's future powertrain strategy and development status of new internal combustion engines	寺沢　保幸	パワートレイン技術開発部
2014.9.21-24	Euro PM2014 Congress & Exhibition, Salzburg	Mazda SKYACTIV technology and engineering trend in Japanese Powertrain PM Components	小笠原　徹	パワートレイン開発本部
2014.10.7-8	Romax Technology Romax Global Forum 2014	Applications of Romax Designer to Mazda SKYACTIV transmission	宮本　崇史	エンジン性能開発部
2014.10.21-23	Automotive Circle International EuroCarBody 2014 - 16th Global Car Body Benchmarking Conference	Body of New Mazda2	松岡　秀典 山田　泰生	ボデー開発部 車体技術部

2. 社外講演(国内)　　＊所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.1.22	日本自動車査定協会 2012年度 定期研修会	SKYACTIV BODY について	清武　真二	ボデー開発部
2013.1.16-18	リード エグジビション ジャパン（株） オートモーティブワールド2013	デミオEVの開発	末冨　隆雅	電気駆動システム開発室
		ISO26262導入の課題と自動車業界の取り組み	久保　敬也	車両システム開発部
		CX-5の軽量化と安全性の両立にTOSCAを適用	田中　祐充 小平　剛央	ボデー開発部 技術研究所
2013.1.30	日本分析化学会 X線分析研究懇談会 第245回例会	リチウムイオン電池負極用球状カーボン材料の分析	三根生　晋 甲斐　裕之 石津　嘉子 對尾　良則 住田　弘祐 玉井　久司	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学
2013.2.14	日本陸用内燃機関協会 講演会	乗用車用ディーゼルエンジン SKYACTIV-Dの開発　超低圧縮比14.0コンセプトの実現	中井　英二	エンジン性能開発部
2013.2.22	電気学会 研究会 自動車用スマート電力マネジメント技術	マツダ減速エネルギー回生システム i-ELOOP (intelligent energy loop) の開発	久米　章友 平野　晴洋 高橋　正好	パワートレインシステム開発部 同上 車両システム開発部
2013.2.27-3.1	リード エグジビション ジャパン（株） 第4回 ［国際］二次電池展	減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」について	高橋　達朗	電気駆動システム開発室
2013.3.5-8	計測自動制御学会 第13回 制御部門大会	i-ELOOPの制御技術について	湯原　将光 久米　章友	パワートレインシステム開発部 同上
2013.3.8	日本機械学会 中国四国支部 第51期 総会・講演会	バイオガス燃料を用いたロータリエンジンとレシプロエンジンの性能比較	炭崎　智貴 田端　道彦 Nizal　Jaber 香川　良二	近畿大学 同上 パワートレイン技術開発部 同上
		複数性能を扱う車体構造最適化手法	小平　剛央 小池　真人 天野　浩平	技術研究所 同上 同上
2013.3.8	腐食防食学会 中国・四国支部 材料と環境研究発表会	電気化学的手法による塗膜質の評価と腐食メカニズムの推定	浅田　照朗 重永　　勉 礒本　良則	技術研究所 同上 広島大学
		亜鉛めっき鋼板の腐食評価に関する研究	原田　　圭 礒本　良則 重永　　勉	広島大学 同上 技術研究所
		車両への飛石に対する腐食抑制技術の研究	古賀　一陽 山根　貴和	車両実研部 同上
2013.3.13-15	国際自動車素材・加工展実行委員会 第4回 国際自動車素材・加工展	薄肉バンパー用高剛性ポリプロピレン材料の開発	古田　和広	技術研究所
2013.3.17-19	日本セラミックス協会 2013年 年会	MO6S8有機修飾体へのリチウムイオンの導入とその反応性	花岡　輝彦 甲斐　裕之 對尾　良則	広島大学 技術研究所 同上
2013.3.19	ひろしま産業振興機構 カーエレクトロニクス推進センター 次世代自動車社会研究会「部本・制御技術WS」第4回 技術報告会	電動車両用トラクションモータの技術開発動向	米盛　　敬	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.3.25	触媒学会 第111回触媒討論会	PM燃焼反応におけるZrNd系酸化物のCO酸化反応メカニズムの検討(2)	原田　浩一郎 馬場　誉士 山田　啓司 重津　雅彦 畑井　美里 石原　達己 髙見　明秀	技術研究所 同上 同上 同上 九州大学大学院 同上 技術研究所
2013.3.29-31	電気化学会 電気化学会創立第80周年記念大会	小粒径カーボンのリチウム吸蔵メカニズムについて	甲斐　裕之 三根生　晋 國府田由紀 住田　弘祐 對尾　良則 玉井　久司	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学
		減速エネルギ回生システム(i-ELOOP)用キャパシタの開発	藤田　弘輝 高橋　正好 鈴木　正悟 栃岡　孝宏	技術研究所 電気駆動システム開発室 同上 技術研究所
2013.4.12	自動車技術会 中部支部 第1回技術講習会 「ボディー・シャシ技術の最先端」	CX-5の車体技術	松岡　秀典	ボデー開発部
2013.4.19	技術情報協会 セミナー	「i-ELOOP」でのキャパシタの応用技術	高橋　正好	電気駆動システム開発室
2013.4.19	国立都城工業高等専門学校　機械工学科 平成25年度 機械工学科学内研修	マツダの紹介	梶本　芳靖	技術研究所
2013.4.24	MathWorks MATLAB/Simulink特別セミナー（国分寺）	SKYACTIV-G モデルベース開発におけるMATLABの活用	小森　　賢	パワートレインシステム開発部
2013.5.21	サイエンス&テクノロジー（株） 自動車におけるエネルギー回生技術の開発動向と実用拡大に向けて	マツダのi-ELOOPシステム&エネルギー回生ストレージの戦略について	久米　章友 高橋　正好	パワートレインシステム開発部 車両システム開発部
2013.5.22-24	自動車技術会 2013年 春季大会フォーラム	「マツダのディーゼルエンジン開発と研究会への期待	中井　英二	エンジン性能開発部
		内燃機関の将来ビジョン	山本　博之	技術研究所
2013.5.22-24	自動車技術会 2013年 春季大会 学術講演会	超ハイテン材の破断に対する予測技術の研究（第2報）	岩井　隆浩 高田　賢治 坂本　匡史 西浦　友子 麻　　寧緒 長坂　　圭 西村　　律 武田　力紀 小島　宏介 大宮　正毅	トヨタ車体（株） （株）本田技術研究所 いすゞ自動車（株） 伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ（株） （株）JSOL スズキ（株） ﾄﾖﾀﾃｸﾆｶﾙﾃﾞｨﾍﾞﾛｯﾌﾟﾒﾝﾄ（株） 日産自動車（株） NVH性能・CAE技術開発部 慶應義塾大学
		冬季暖房条件下の模型実験と車室内環境の伝熱解析	永野　秀明 津上　貴光 尾関　義一 井上　　実 片岡　拓也 岩瀬　洋直 土井　久史 水野　　涼 北野　善久 松永　和彦 郡　　逸平 加藤　信介	東京都市大学 同上 旭硝子（株） 装備開発部 （株）デンソー 富士重工業（株） 三菱自動車工業（株） ダイハツ工業（株） いすゞ自動車（株） 同上 東京都市大学 東京大学生産技術研究所
		EV用高エネルギ密度リチウムイオンバッテリパック開発	松井　恒平 喜田　裕万 福庭　一志 坂上　　翔 楠木　寛之	電気駆動システム開発室 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		減速エネルギ回生システム（i-ELOOP）用キャパシタの開発	藤田　弘輝	技術研究所
		電動車両の走行フィーリングを考慮した発電制御法　エンジン出力と走行フィーリングとの両立	大室　　朗 堂園　一保 末冨　隆雅	技術研究所 同上 電気駆動システム開発室
		直噴ガスエンジンの筒内混合状態に及ぼす噴射パラメータの影響	大竹　恵子 青木　　理 堂園　一保 森本　賢治 水戸部典明	技術研究所 同上 同上 同上 同上
		車線変更シーンにおける車両認知特性のモデル化に関する研究	楠本　信平	技術研究所
2013.5.22-25	日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2013	筋力推定に基づくステアリング操作時の力知覚特性に関する考察	佐藤　純平 竹村　和紘 山田　直樹 岸　　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀 辻　　敏夫 栗田　雄一	広島大学 技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2013.5.27-28	日本船舶海洋工学会 平成25年 春季講演会	旋回運動する自動車模型の曳航水槽試験	中島　卓司 藤本　　創 土井　康明 岡田　義浩 農沢　隆秀 坪倉　　誠	広島大学 同上 同上 車両実研部 技術研究所 北海道大学
2013.5.30	エムエスシーソフトウェア（株） MSC Software 2013 Users Conference	SKYACTIV排気音開発へのACTRAN適用	石原　教示	エンジン性能開発部
		応答曲面法を用いた複合領域最適化における自動車車体構造の軽量化検討	小平　剛央	技術研究所
2013.6.1-2	日本人間工学会 日本人間工学会 第54回大会	筋力推定に基づく力知覚の感覚量評価の試み	栗田　雄一 佐藤　純平 辻　　敏夫 竹村　和紘 山田　直樹 岸　　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上 同上
		自動車用パーキングブレーキレバー操作性向上のための生体特性に基づく検討手法について	松原　弘明 大坪　智範 沖山　　浩 田中　松広	車両実研部 同上 同上 同上
2013.6.1	日本設計工学会 中国支部 平成25年度 研究発表講演会	圧電フィルムセンサーの歩行者保護安全開発への活用	徳山　辰哉 伊東　紀明 尾川　　茂 藤本由紀夫	衝突性能開発部 同上 呉工業高等専門学校 広島大学
2013.6.7	自動車技術会 伝熱技術専門委員会	PT部品熱害特性検討　排気管周囲のリング部品温度特性計測とSim結果の比較	本郷　　均	エンジン性能開発部
2013.6.18-19	型技術協会 型技術者会議2013	SKYACTIVを実現した 高精度薄肉ダイカストとその金型技術	河野　一郎	パワートレイン技術部
		高精度薄肉ダイカストとその金型技術	藤井　祥平	パワートレイン技術部
		ハイテン金型量産準備の取り組み事例	中居　佳子	車体技術部
		プレス金型形状加工の品質向上事例	中原　寛海	ツーリング製作部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.6.19-21	リード エグジビション ジャパン（株） 第24回 設計・製造ソリューション展 専門セミナー	マツダのモノ造り革新「車種を超えた，従来と異なる共通化」を支える3次元CAD活用	菅本　大成	ボデー開発部
2013.6.19-21	日本計算工学会 第18回 日本計算工学講演会	非線形弾塑性解析モデルの開発	山王丸将吾 岡澤　重信 田中　智行	エンジン性能開発部 広島大学 同上
		FIB-SEMを用いた多孔質溶射皮膜のミクロ構造モデリング	鈴木　智洋 高野　直樹 増山　　将	慶應義塾大学 同上 技術研究所
2013.6.20	（株）デンソー 講演会	マツダのディーゼルエンジン SKYACTIV-Dの開発	中井　英二	走行環境性能開発部
2013.6.20-21	品質工学会 第21回 品質工学研究発表大会	フレームハード品質の安定化	大塚　宏明	ツーリング製作部
2013.6.21	日本マグネシウム協会 平成25年度 技術講演会「実用化に向けたマグネシウム技術開発と進歩」	自動車の軽量化と材料開発の方向性	杉本　幸弘	技術研究所
2013.6.21	（株）日経BP セミナー「材料・加工技術で勝つ」軽量化	改良型ポリプロピレンによるマツダの車体軽量化への取り組み	朝野　千明	技術研究所
2013.6.25	広島大学 応用化学概論	”応用化学”と”ものづくり”	甲斐　裕之	技術研究所
2013.7.4-5	日本学術会議総合工学委員会 安全工学シンポジウム2013	公共交通車両と車車間通信型ASV実証実験の構想	平沢　隆之 須田　義大 中野　公彦 鈴木　高宏 吉田　秀範 伊丹　誠 水間　毅 長谷川　智紀 坂本　一朗 林田　守正 小嶋　浩一 山本　康典 藤元　秀樹 東　耕一	東京大学 同上 同上 同上 同上 東京理科大学 交通安全環境研究所 同上 同上 同上 車両システム開発部 技術研究所 広島電鉄 同上
2013.7.9	オートモーティブ・コンポジット研究会 第7回 オートモーティブ・コンポジット研究会	超薄肉バンパーの開発	古田　和広	技術研究所
2013.7.10	MathWorks Japan MATLAB EXPO in 浜松	SKYACTIV-G モデルベース開発におけるMATLABの活用	小森　　賢	パワートレインシステム開発部
2013.7.12	ニュートンワークス（株） 第7回System Simulation Symposium	Modelicaベースのモデリングと ツールへの期待	小森　　賢	パワートレインシステム開発部
2013.7.16-17	可視化情報学会 第41回可視化シンポジウム2013	応答曲面法を用いた車体構造に求められる複数機能の可視化	小平　剛央	技術研究所
2013.7.17-19	日本能率協会 第28回 スイッチング電源技術シンポジウム	車両電源システムの新展開	高橋　正好	電気駆動システム開発室
2013.7.19	新技術開発財団 第15回 市村産業賞受賞記念講演会	新世代クリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D」超低圧縮比14.0への挑戦	中井　英二	エンジン性能開発部
2013.7.29	日本鋳造工学会 鋳造CAE研究部会	ダイカスト溶着事前検証技術の開発と金型設計適用事例の紹介	竹村　幸司	パワートレイン技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.8.7	日本機械学会 2013年度「機械の日・機械週間」記念講演会	期待される次世代移動体としての自動車	西川　一男	技術研究所
2013.8.26	日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2013 V-Base フォーラム	サスペンション振動によるロードノイズ	木下　浩志	NVH性能・CAE技術開発部
2013.8.27-29	電気学会 平成25年 電力・エネルギー部門大会	過電圧劣化試験を行った電気二重層キャパシタの電極表面分析	田口　幹雄 田島　大輔 迫田　達也 湯原　将光 宇都宮　隆	宮崎大学大学院 同上 同上 パワートレインシステム開発部 技術研究所
2013.8.28-30	電気学会 平成25年 電気学会産業応用部門大会	移動体エネルギーストレージシステムの技術動向　～EDLCの自動車応用（1）～	宇都宮　隆 藤田　弘輝 平野　晴洋 高橋　正好 高橋　達郎 栃岡　孝宏	技術研究所 同上 パワートレイン開発本部 車両開発本部 同上 技術研究所
2013.9.2-3	日本燃焼学会 夏季研究会（夏の学校 2013）	高圧縮比ガソリンエンジン（SKYACTIV-G）を実現した燃焼技術	養祖　　隆	パワートレイン技術開発部
2013.9.4	計測自動制御学会 モデルベース開発（MBD）チュートリアル	マツダにおけるディーゼルエンジンのMBCによるキャリブレーションの概要	原田　真悟	エンジン性能開発部
2013.9.5	伝熱学会中四国支部 25年度 伝熱セミナー	マツダのディーゼルエンジン（SKYACTIV-D)への取り組み	中井　英二	エンジン性能開発部
2013.9.5-6	藻類産業創成コンソーシアム 藻類バイオマス国際シンポジウム	従属栄養藻類からのバイオ燃料と高付加価値生産物　藻類炭化水素油70%によるデモ走行	渡邉　　信 寺沢　保幸	筑波大学 パワートレイン技術開発部
2013.9.6	日本鋳造協会 平成26年度 鋳造カレッジ中国四国地区 鋳鉄コース	量産小物鋳鉄鋳物を中心とした鋳鉄の材質 量産小物鋳鉄を中心とした 鋳鉄の製造プロセス，鋳造方案	黒谷　真司 田中　裕一	パワートレイン技術部 パワートレイン技術部
2013.9.9-11	日本機械学会 2013年度 年次大会	スターブ状態を考慮したピストンリング油膜厚さのシミュレーション	栗栖　　徹 菅近　直範	エンジン性能開発部 同上
2013.9.11-13	日科技連 ソフトウェア品質シンポジウム 2013	SKYACTIVテクノロジーと　その誕生を支えたモデルベース開発	原田　靖裕	パワートレインシステム開発部
2013.9.12-13, 9.19-20	熊本大学 平成25年度 特別講義「組込みシステム関連産業概論」	SKYACTIV-Gエンジン制御とそのモデルベース開発	今田　道宏	パワートレインシステム開発部
2013.9.13	（株）くいんと くいんと交流会2013	均質化法を用いたエンジン燃焼室の断熱構造の研究	宮内　勇馬	技術研究所
2013.9.14	京機会 京都の会 講演会	マツダのディーゼルエンジン SKYACTIV-Dの開発	中井　英二	エンジン性能開発部
2013.9.18-20	触媒学会 第112回 触媒討論会	高酸素イオン伝導性ZrNd系酸化物を用いたパティキュレート燃焼触媒の開発と実用化 Rh担持ZrO2-La2O3複合酸化物触媒の三元触媒活性に与える担体効果	原田浩一郎 川端　久也	技術研究所 技術研究所
2013.9.20	自動車技術会 電気動力技術部門委員会	キャパシタを用いた減速回生システムについて	藤田　弘輝	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.9.24-25	電気関係学会九州支部連合大会委員会 平成25年度（第66回）電気関係学会九州支部連合大会	電気二重層キャパシタ内における電解液の金属元素分析	田口　幹雄 春田　篤二 籾木　　崇 田島　大輔 迫田　達也 湯原　将光 宇都宮　隆	宮崎大学大学院 同上 同上 同上 同上 パワートレイン開発本部 技術研究所
2013.9.25-26	電気学会　電子・情報・システム部門 第23回 インテリジェント・システム・シンポジウム	応答曲面法を用いた複合領域最適化による自動車車体構造の軽量化検討	小平　剛央	技術研究所
2013.9.26-27	薄鋼板成形技術研究会 2013年度 第2回 研究討論会	ハイテン金型量産準備の取組み事例	森澤　　誠	車体技術部
2013.9.27	日本鋳造工学会 ダイカスト研究部会	SKYACTIVを実現した 高精度薄肉ダイカストとその金型技術	小国　英明	パワートレイン技術部
2013.9.8	溶接学会 平成25年度 秋季全国大会	自動車分野における高張力鋼溶接技術の進歩	清水　　昇	車体技術部
2013.9.12-14	日本流体力学会 年会2013	自動車の旋回および滑り運動時に生じる流体力の曳航水槽模型試験	藤原　創太 中島　卓司 土井　康明 岡田　義浩 農沢　隆秀 坪倉　　誠	広島大学 同上 同上 車両実研部 技術研究所 北海道大学
2013.9.19	自動車技術会 第59回 技術交流会 （CAD/CAM/CAE）	プレス金型製造における CAD/CAM/CAE連携による金型品質向上の取組み	西本　光毅	ツーリング製作部
2013.10.2-4	リード エグジビション ジャパン（株） 第16回 関西 設計製造ソリューション展	マツダのモノ造り革新「車種を超えた，従来と異なる共通化」を支える3次元CAD活用	小川　裕司	ボデー開発部
2013.10.7.	電気化学会 電池技術委員会 第54回 電池討論会	小粒径カーボン負極における電池特性への添加剤の影響	石津　嘉子	技術研究所
2013.10.8	ねじ研究会 第7回設計検討委員会	実締結部品における摩擦係数計測手法とその特徴	渡辺　忠俊	技術研究所
2013.10.9-10	省エネルギーセンター 平成25年度 省エネ大賞西日本地区発表大会	揮発性有機化合物とCO2を同時削減する新塗装技術	和久　直人	車両技術部
2013.10.9-11	名古屋国際見本市委員会 第3回 次世代ものづくり基盤技術産業展	内燃機関の更なる効率改善 （SKYACTIV-GE/DE の進化）	赤木　裕治	パワートレイン開発本部
2013.10.11-14	日本機械学会 M&M2013材料力学カンファレンス	多孔質材料の微視スケールにおける不確かさを考慮した均質化解析	市村　　光 高野　直樹 宮内　勇馬	慶應義塾大学 同上 技術研究所
2013.10.12-13	西日本乱流研究会 日本流体力学会中四国・九州支部 創立30周年シンポジウム	自動車のフロントピラー周りに発生する縦渦の特性	尾川　　茂 李　　曄	呉工業高等専門学校 車両実研部
2013.10.18	自動車技術会 関西支部 2013年度 講習会	SBS/MRCCの機能と性能向上について	大村　博志	車両システム開発部
2013.10.22	日本トライボロジー学会 トライボロジー会議2013秋福岡 サテライトフォーラム	SKYACTIVエンジンの省燃費トライボロジー技術	栗栖　　徹	エンジン性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.10.23-25	自動車技術会 2013年 秋季大会 学術講演会	自動車の旋回および滑り運動により生じる空気力について	中島　卓司 岡田　義浩 坪倉　誠 農沢　隆秀 溝兼　通矢 土井　康明	広島大学 車両実研部 北海道大学 技術研究所 広島大学 同上
		樹脂部品の熱収縮現象解明とCAE予測技術開発	井上　実 平本　健治 高田　幸次 藤　和久 西村　賢治	装備開発部 技術研究所 装備開発部 技術研究所 装備開発部
		悪路走行入力における車体スポットの疲労強度分析技術の開発	武田　健二 白松　広大 岩田　成樹 寺口　毅	NVH性能・CAE技術開発部 同上 同上 車両実研部
		超ハイテン材の破断に対する予測技術の研究(第3報)	西村　隆一 高田　賢治 新居　直樹 佐藤健太郎 西　龍 池田光太郎 岩井　隆浩 小島　宏介 大宮　正毅	新日鐵住金(株) (株)本田技術研究所 いすゞ自動車(株) JFEスチール(株) トヨタ自動車東日本(株) ダイハツ工業(株) トヨタ車体(株) NVH性能・CAE技術開発部 慶應義塾大学
		人の視覚特性の分析による払拭欲求発生要因の解明	岩瀬　耕二 松岡　悟 新部　忠幸	技術研究所 同上 同上
		ロータリエンジン筒内オイル挙動可視化技術の開発	日高　弘順 新井　栄治 浅利　元紀 Mathieu Picard Tian Tian	パワートレイン技術開発部 同上 同上 マサチューセッツ工科大学 同上
2013.10.24	東京大学-宇宙航空研究開発機構 反応性熱流動グループ第3回 研究会	直噴ガソリンエンジンにおける高温高圧下でのエタノール/ガソリン燃料噴霧の蒸発と混合気特性	佐藤　圭峰	技術研究所
2013.10.24-25	色材協会 色材協会創立85周年記念会議	環境に優しい新水性塗装システムの開発および実用化	久保田　寛 山根　貴和 神田　輝夫 松田　隆臣 和泉　昭雄	技術研究所 車両実研部 車両技術部 同上 同上
2013.10.26	日本材料学会　ほか 第5回 自動車用途コンポジットシンポジウム	超薄肉軽量バンパの開発	藤　和久	技術研究所
2013.10.28	近畿大学工学部研究公開フォーラム2013	超軽量薄肉バンパの開発	朝野　千明	技術研究所
2013.10.29	ひろしま医工連携イノベーション推進協議会 イノベものづくり士育成研修 「CAD/CAM/CAE/VE実践研修」	自動車開発におけるCAE活用事例の紹介	武田　健二	NVH性能・CAE技術開発部
2013.10.31	SCSK(株) Ricardo Software Japan User Conference	燃費と信頼性を両立した SKYACTIVエンジン用ピストンの開発　～PISDYNを用いた多目的最適化検討事例紹介～	菅近　直範	エンジン性能開発部
2013.10.31-11.1	日本イーエスアイ（株） PUCA2013 -ESI Users' Forum Japan-	ハイテン部品の予測精度向上の取組みその２	酒井　明	車体技術部
2013.11.1	日本機械学会 中国四国機素潤滑設計技術(MD&T)研究会	SKYACTIVエンジンの省燃費トライボロジー解析技術	栗栖　徹	エンジン性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.11.2-4	日本機械学会 第26回 計算力学講演会	確率均質化法による多孔質材料のミクロ構造設計手法に関する研究	市村　光 高野　直樹 宮内　勇馬	慶應義塾大学 同上 技術研究所
		多孔質溶射皮膜の確率的マルチスケールモデリング	鈴木　智洋 高野　直樹 宮内　勇馬	慶應義塾大学 同上 技術研究所
		完全陰解法による分割背応力モデルに基づく損傷弾塑性解析	山王丸将吾 田中　義和 渡部　雅晃 岡澤　重信 田中　智行	エンジン性能開発部 広島大学 ドライブトレイン開発部 広島大学 同上
2013.11.7	システム制御情報学会 システム制御情報学会セミナー2013	構造最適化手法を用いた自動車車体構造の軽量化検討	小平　剛央	技術研究所
2013.11.7-8	プラスチック成形加工学会 第21回 プラスチック成形加工学会秋季大会	複合材料中の強化繊維の種類や量などが射出成形時の溶融粘度に与える影響	小林めぐみ 森脇　健二 松田　祐之 藤　和久 金　成彦 山田　浩明 王　存涛 濱田　泰以	技術研究所 同上 同上 同上 ダイキョーニシカワ（株） 同上 京都工芸繊維大学 同上
		樹脂部品の熱収縮CAE技術の開発	平本　健治 井上　実	技術研究所 装備開発部
2013.11.8	SCSK（株） MAGMAユーザーカンファレンス2013	ダイカスト溶着事前検証技術の開発と金型設計適用事例の紹介	竹村　幸司	パワートレイン技術部
2013.11.8	日本鋳造協会 平成26年度 鋳造カレッジ中国四国地区 鋳鉄コース	鋳鉄鋳造概論（キュポラ溶解理論と実際）	田中　裕一	パワートレイン技術部
2013.11.12	自動車技術会 シンポジウム（No.03-13）「動力伝達系の最新技術」	トランスミッションケース開発における基本骨格形状最適化	三浦　広樹 三瀬　大海 長嶺　成将 甘利　哲一 山王丸将吾 石原　教示	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 同上
2013.11.16	日本化学会 中国四国支部 2013年日本化学会中国四国支部大会　産学連携企画	酸素イオン伝導材を用いた高性能パティキュレート燃焼触媒の開発	馬場　誉士	技術研究所
2013.11.16	早稲田大学理工学研究所 早大モビリティ研究会 第33回 早大モビリティシンポジウム	水素REレンジエクステンダーEVの紹介	水戸部典朗	技術研究所
2013.11.18	東京大学-宇宙航空研究開発機構 接触・摩擦研究グループ第3回研究会	自動車用エンジンオイルの劣化および摩耗・摩擦の予測	宮内　勇馬	技術研究所
2013.11.20	九州大学 環境とエネルギー安全保障	マツダにおける自動車，パワートレイン開発	山本　博之	技術研究所
2013.11.20	自動車技術会 シンポジウム（No.05-13）「車体構造の信頼性を支える新たな接合技術の展開」	車体における接着接合部の経年劣化による影響調査	小林　敏男 井口　博行 梅村　俊文 曹　敏 花井　洋志 山本　研一 江口　達也 菅田　淳	サンスター技研（株） トヨタ自動車（株） トヨタ車体（株） 同上 トヨタ自動車東日本（株） 技術研究所 日産自動車（株） 広島大学大学院
2013.11.20	九州大学マス・フォア・インダストリー研究所 IMI Colloquium	自動車内装空間の設計における数理技術応用事例	中本　尊元	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.11.20	LCA日本フォーラム 平成25年度 第3回 LCA日本フォーラムセミナー	「SKYACTIV TECHNOLOGYを搭載したマツダ車のLCA評価」	森口　義久	技術企画部
2013.11.21	（株）島津製作所 マイクロアナリシス研究懇談会	EPMAによる状態分析手法の検討	川上　愛子	技術研究所
2013.11-26-28	自動車技術会・日本機械学会 第24回 内燃機関シンポジウム	多段噴射を用いた高効率ディーゼルエンジンにおける燃焼室形状の最適化	金　　尚奎 志茂　大輔 福田　大介 片岡　一司	パワートレイン技術開発部 エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術開発部
		水素噴流特性とエンジン燃焼に及ぼす高圧水素噴射弁の噴孔パターンの影響	田端　道彦 Nizar　Jaber 香川　良二	近畿大学 パワートレイン技術開発部 同上
		Research on the Combustion of Hard-to-Burn Fuels in Spark Ignition Engines	Nizar　Jaber 香川　良二 田端　道彦	パワートレイン技術開発部 同上 近畿大学
		多段噴射を用いた高効率ディーゼルエンジンにおける燃焼室形状の最適化	金　　尚奎 志茂　大輔 福田　大介 片岡　一司	パワートレイン技術開発部 エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術開発部
		可視化ロータリエンジンによる燃焼観測―ボトムビューとサイドビューの同時観測―	小林　篤人 香川　良二 唐津　雄一 橋本　英樹 森上　　修 村瀬　英一	九州大学 パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上
		LIF法によるピストンリング及びスカート部の油膜厚さ測定	吉澤　隆浩 中川　　俊 大澤　克幸 小田　哲也 菅近　直範	鳥取大学 同上 同上 同上 エンジン性能開発部
		高応答遮熱壁面における瞬時熱流束計測	中尾　裕典 青木　　理 田中　達也 小池　祐輔 山本　博之	技術研究所 同上 同上 同上 同上
2013.11.28-29	型技術協会 型技術ワークショップ2013 in きたかみ	980MPa級ハイテン部品の成形性改善と寸法精度の向上を両立させる新工法	田丸　真司	車体技術部
		プレス金型 機械加工 工程削減の取組み	上村　勝利	ツーリング製作部
2013.11.30	日本機械学会 技術と社会部門 講演会「技術と社会の関連を巡って」	高圧縮比化と冷却損失低減による内燃機関の高効率化	藤本　昌彦	技術研究所
		自動車の軽量化材料/工法の歴史	杉本　幸弘	技術研究所
2013.12.2	日本自動車研究所 自動車機能安全カンファレンス2013	マツダでのISO 26262導入取り組みと気づき	久保　敬也	車両システム開発部
2013.12.4-6	日本燃焼学会 第51回 燃焼シンポジウム	詳細な素反応過程を考慮したエンジン燃焼シミュレーション～高速数値解法の検証～	佐藤　圭峰 藤本　英史 寺島　洋史 草鹿　　仁 森井　雄飛	技術研究所 同上 東京大学 早稲田大学 宇宙航空研究開発機構
2013.12.4-5	（株）JSOL JMAGユーザ会2013	JMAG-RTおよびPSIMを用いたモータシステムモデルを活用した自動車のモデルベース開発プロセス	宮腰　　穂 戸田　浩隆 椛島　寿行	パワートレインシステム開発部 同上 技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2013.12.8	日本人間工学会 中国・四国支部 第46回 日本人間工学会中国・四国支部大会	空間の感性と視方向の知覚に基づくインテリア形状の検討	村瀬　健二 武田　雄策 原　利弘 民谷　謙 大坪　智範 沖山　浩 西川　一男	技術研究所 同上 同上 開発企画部 車両実研部 同上 技術研究所
		人間の主観的な反力知覚モデルを用いた感性評価～ステアリングホイール操作系への適用～	竹村　和紘 山田　直樹 新部　忠幸 岸　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀 栗田　雄一 辻　敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
		人間特性を考慮した自動車アクセルペダル特性の設計手法	松原　弘明 大坪　智範 古島　剛	車両実研部 同上 同上
		感性工学を用いた自動車のドア，リッド類の外観品質向上研究	宮本　謙典 友景　功二 名原　成実 古川　浩二 福井　信行 古島　剛	車両実研部 同上 同上 同上 同上 同上
2013.12.13	精密工学会 成形プラスチック 歯車研究専門委員会 第113回 研究会	樹脂の使用量を20%以上削減できるプラスチック発泡成形技術	金子　満晴	技術研究所
2013.12.28	福井大学 着火 WS in 福井	詳細な素反応過程を考慮したエンジン燃焼シミュレーション -常微分方程式の高速数値解法の検証-	藤本　英史	技術研究所
2014.1.9	電子情報技術産業協会 電解蓄電器研究会新年特別講演	減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」について	高橋　達朗	電気駆動システム開発室
2014.1.10	自動車技術会 シンポジウム（No.10-13）「車両の運動性能を向上させる先進技術」	人馬一体のドライビングプレジャーを実現するボディ・シャシー技術（SKYACTIV-BODY/SKYACTIV-CHASSIS）	吉岡　透	操安性能開発部
2014.1.15	電気学会 第4回 共同研究委員会	応答曲面法をもちいた複合領域最適化による自動車車体構造の軽量化検討	小平　剛央	技術研究所
2014.1.20	型技術協会 第113回 型技術セミナー	New ATENZA におけるボディづくりの革新 ～デザインを際立たせるクルマづくり～	中野　伸哉	車体技術部
2014.1.21	日本能率協会 TECHNO-FRONTIER WEST 技術セミナー	減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」について	高橋　達朗	電気駆動システム開発室
2014.1.23-24	電子情報通信学会 第4回 ソフトウウェア無線（SR）研究会	車車間通信環境における到来波角度プロファイルのモデル化	松本　光平 強矢　昌宏 山本　雅史 山田　秀行 タン　ザカン 荒木　純道	東京工業大学 技術研究所 同上 同上 東京工業大学 同上
2014.1.24	自動車技術会 燃料電池部門委員会	水素ロータリーエンジン研究の歴史と最新状況の紹介	稲目　力	技術研究所
2014.1.25	自動車技術会 中部支部 学術研究講演会	低圧縮比への挑戦　SKYACTIV-Dの設計思想とその実現のための工夫	中井　英二	エンジン性能開発部
2014.1.29	日本トライボロジー学会 第3回 エンジン潤滑研究会	SKYACTIVエンジンの省燃費トライボロジー解析技術	栗栖　徹	エンジン性能開発部
2014.1.29-31	省エネルギーセンター 平成25年度 省エネ大賞事例部門受賞発表大会	揮発性有機化合物とCO2を同時削減する新塗装技術	和久　直人	車両技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.2.7	日本機械学会 第99回 振動・音響研究会（VS研究会）	「自動車開発におけるパワートレインおよび騒音振動問題の変遷と将来」	熊野　昌平	パワートレイン技術開発部
2014.2.8	ちゅうごく産業創造センター　ほか 平成25年度 第4回 電子デバイス事業化フォーラム	各種センサの自動車予防安全機能への適用	大村　博志	車両システム開発部
2014.2.26	（株）技術情報協会 セミナー	減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」について	高橋　正好	電気駆動システム開発室
2014.2.26-28	リードエグジビション ジャパン（株） 第5回 国際二次電池展 ～バッテリー ジャパン2014～	減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」について	高橋　正好	電気駆動システム開発室
2014.3.5	腐食防食学会 中国・四国支部 2014年 材料と環境研究発表会	車両の腐食環境モニタリング技術	江﨑　達哉 重永　　勉	技術研究所 同上
		塗膜の防錆性能定量評価手法の開発	浅田　照朗 重永　　勉 礒本　良則	技術研究所 同上 広島大学
2014.3.6	広島大学放射光科学研究センター 第18回 広島放射光国際シンポジウム	In-situ XAFS measurements of lithium secondary batteries with lithium titanium oxide negative active material	早川慎二郎 百崎賢二郎 Galif Kutluk 生天目博文 三根生　晋 住田　弘祐 山田　洋史	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2014.3.6	東京大学生産技術研究所　ほか 文部科学省「HPCI戦略プログラム」分野4 次世代ものづくり 第1回 統合ワークショップ	高速蛇行走行する自動車周り流れのLES解析	岡田　義浩 農沢　隆秀 坪倉　　誠 中島　卓司 藤原　創太	車両実研部 技術研究所 北海道大学 広島大学 同上
2014.3.6-7	日本機械学会 中国四国支部 第52期 総会・講演会	980MPa級高張力鋼板の温間繰返し変形特性	市川　祐也 佐々木　尭 濱崎　　洋 吉田　総仁 斉藤　直子 深堀　　貢	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上
		キャパシタを用いた世界初の減速回生システム「i-ELOOP」の開発(受賞講演)	宇都宮　隆 藤田　弘輝 平野　晴洋 高橋　正好 高橋　達郎 栃岡　孝宏	技術研究所 同上 電気駆動システム開発室 同上 同上 技術研究所
		エンジン排気を模した曲り管路内脈動流の計測と数値解析	木村　直人 大木　純一 西田　恵哉 尾形　陽一 石保　　禄 山本　　亮 中村　和博 柳田　春菜	広島大学 同上 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
2014.3.13	ちゅうごく産業創造センター 平成25年度 中国地域質感色感研究会成果発表会	中国地域の感性に関する取り組み紹介「精神的価値が成長する感性イノベーション拠点」の取り組み	坂本　和夫	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.3.14	自動車技術会 生産加工部門委員会 ワーキンググループ活動報告会	2045年の自動車づくり -日本が自動車生産をリードするために-	河野　英樹 大島佑太郎 山根　慎也 新井　孝拓 湯口　友人 岩崎　進一 宮本　嘉昭 久連山　剛 岡田　裕介 佐野　　健 高本　　亮 小林　　崇 内海　　図 岩崎　康弘 鈴木　　貴	車体技術部 UDトラックス（株） いすゞ自動車（株） スズキ（株） ダイハツ工業（株） トヨタ自動車（株） 日産自動車（株） 日野自動車（株） 同上 富士重工業（株） 同上 ホンダエンジニアリング（株） 本田技研工業（株） 三菱自動車（株） ヤマハ発動機（株）
2014.3.19	日本セラミックス協会 2014年 年会	メソポーラスシリカ-リチウム塩複合体のイオン伝導	松下　悟士 犬丸　　啓 甲斐　裕之 對尾　良則	広島大学 同上 技術研究所 同上
2014.3.20	日本粉末冶金工業会 第9回 粉末冶金交流会	SKYACTIV開発事例紹介及び粉末冶金製法に期待すること	小笠原　徹	パワートレイン開発本部
2014.3.20	広島大学 ヒューマンモデリング国際ワークショップ	Digital Human Model, KANSEI Human Model	西川　一男	技術研究所
2014.3.22	日本感性工学会 第9回春季大会	歩行者事故削減に対する取り組み ～飛び出し時の特徴抽出～	中村　一美 露木　章史 山崎　慎也 田中　一基	近畿大学 技術研究所 同上 近畿大学
2014.3.26	総務省 情報通信が支える次世代のITS ～総務省ITS関連事業成果発表会～	広島における世界初の路面電車-自動車間通信型ASVの走行実験	山本　雅史	技術研究所
2014.3.26-27	触媒学会 第113回 触媒討論会	高酸素イオン伝導性ZrNd系酸化物に固溶したPrのPM燃焼反応における役割	滝沢　知也 馬場　誉士 原田浩一郎 重津　雅彦 石原　達己 高見　明秀	技術研究所 同上 同上 同上 九州大学大学院 技術研究所
		自動車用排ガス浄化用触媒における運転条件が及ぼすリン被毒劣化状態への影響	國府田由紀	技術研究所
2014.3.29	電気化学会 第81回 大会	高レートの電流入力に対する正極活物質の結晶構造変化観察	三根生　晋 古賀　広之 住田　弘祐 山田　洋史	技術研究所 同上 同上 同上
		低抵抗円筒型電気二重層キャパシタの開発とその車載用途への応用	渡邊　　晋 秋葉　直樹 藤田　弘輝	日本ケミコン（株） 同上 技術研究所
		窒素含有小粒径カーボン材料のリチウムイオン電池特性	甲斐　裕之 三根生　晋 國府田由紀 住田　弘祐 對尾　良則	技術研究所 同上 同上 同上 同上
2014.4.15	関西FRPフォーラム 平成25年度 総会・記念講演会	ガラス繊維強化樹脂の発泡成形技術と今後の自動車における複合材料採用拡大の可能性について	藤　　和久	技術研究所
2014.4.18	型技術協会 第11回 型技術ミーティング『若手技術交流セミナー』	マツダ　モノ造り革新	荒津　　亘	車体技術部
2014.4.25	（株）技術情報協会 セミナー	『電気二重層キャパシタを用いた減速エネルギ回生システム”i-ELOOP“の開発』	高橋　正好	電気駆動システム開発室

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.5.7	ダイキョーニシカワ（株） 質感に関する講演会	医工連携活動報告-ピアノブラックと漆黒の相違についての研究	中本　尊元	技術研究所
2014.5.14-16	リードエグジビション ジャパン（株） 第17回 組込みシステム開発技術展	SKYACTIVテクノロジーと　その誕生を支えたモデルベース開発	原田　靖裕	パワートレインシステム開発部
2014.5.15	広島市産業振興センター 平成26年度 品質工学研究会	デザイン形状再現に向けた金型磨き工程の砥石使用条件最適化	久保　祐貴	ツーリング製作部
		熱歪削減に向けたフレームハード条件の最適化	岡山　一洋	ツーリング製作部
2014.5.16	キャパシタフォーラム キャパシタフォーラム年次大会	次世代電動車両に求められる蓄電デバイスへの期待	藤田　弘輝	技術研究所
2014.5.18	軽金属学会 126回 春季大会	張出し試験によるアルミニウム合金板の温間成形限界線図の取得	濱崎　洋 吉田　総仁 西口　勝也 鳥飼　岳	広島大学 同上 技術研究所 （株）UACJ
2014.5.19-23	AAB (Advanced Automotive Batteries) Advanced Automotive Battery Conference Asia 2014	Mazda "i-ELOOP" Brake Energy Regeneration System and Strategy	久米　章友 平野　晴洋 高橋　正好	電気駆動システム開発室 同上 同上
2014.5.21-23	自動車技術会 2014年 春季大会 フォーラム	更なるディーゼルイノベーションに向けて ディーゼルエンジンの熱効率向上に関する再考察 ―乗用車メーカー側からの熱効率向上要件と最新技術―	志茂　大輔	エンジン性能開発部
2014.5.21-23	自動車技術会 2014年 春季大会 学術講演会	パネル等価放射パワー発生要因の分析技術の開発	新保晋太郎 中野　伸一 川口　克也	車両開発本部 同上 同上
		高圧縮比ガソリンエンジンの耐環境ロバスト性能特性	志々目宏二 大橋美貴典 養祖　隆 山川　正尚	パワートレイン技術開発部 エンジン性能開発部 パワートレイン技術開発部 同上
		車室モデル内の伝熱解析（第2報）車内人体の熱的影響把握	永野　秀明 尾関　義一 松永　和彦 井上　実 郡　逸平 加藤　信介	東京都市大学 旭硝子 いすず自動車 装備開発部 東京都市大学 東京大学生産技術研究所
		車載モータとディファレンシャルギアを持った電気自動車におけるスリップ率制御に基づく駆動力制御の高速化の提案	高野　毅 藤本　博志	技術研究所 東京大学
		炭素繊維強化射出成形複合材料を用いた電波遮蔽プラスチックの開発	宮本　嗣久 遠藤　靖之 塚本　大地 久常　晃裕	技術研究所 車両システム開発部 同上 同上
		車体における接着接合部の経年劣化による影響調査	小林　敏雄 梅村　俊文 曹　敏 山本　研一 清水　寛文 江口　達也 井口　博之 菅田　淳	サンスター技研 トヨタ車体（株） 同上 技術研究所 トヨタ自動車東日本（株） 日産自動車（株） トヨタ自動車（株） 広島大学大学院
2014.5.21-23	日本伝熱学会 第51回 日本伝熱シンポジウム	自動車用三元触媒の白金族元素上でのNO,CO触媒反応 の解析	村上　浩 松本　有平 竹林　広行 下栗　大右 延谷　尚輝 石塚　悟	パワートレイン技術開発部 エンジン性能開発部 パワートレイン技術開発部 広島大学 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.5.22-24	自動車技術会 EVTeC2014&APE Japan2014	減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」について	高橋　達朗	電気駆動システム開発室
2014.5.23	福井大学 ものづくり講演会	究極の内燃機関を目指して SKYACTIV-Dの開発	中井　英二	走行環境性能開発部
2014.5.27	MathWorks Japan MATHWORKS DAY in 浜松	直噴ディーゼル・エンジンにおけるモデルベース キャリブレーションの適用	原田　真悟	エンジン性能開発部
2014.5.28	エムエスシーソフトウェア（株） MSC Software 2014 Users Conference	悪路走行時に発生する車体スポット溶接部の応力に関する入力経路寄与分析技術の開発	武田　健二	車両開発本部
		車室内騒音におけるパネル等価放射パワー発生要因の分析技術および最適化技術の開発	中野　伸一	車両開発本部
2014.6.6	dSPACE Japan(株) dSPACE Japan User Conference 2014	SKYACTIVテクノロジーとその誕生を支えたモデルベース開発	原田　靖裕	パワートレインシステム開発部
2014.6.11-13	日本計算工学会 第19回 計算工学講演会	完全陰解法に基づく分割背応力モデルによる損傷弾塑性解析	山王丸将吾 岡澤　重信 田中　智行	エンジン性能開発部 広島大学 同上
		動的コンプライアンスを目的関数とした減衰材のトポロジー最適化に関する研究	大福　将史 竹澤　晃弘 中川　興也 杉原　　毅 北村　　充	広島大学 同上 技術研究所 同上 広島大学
2014.6.13	大田区産業振興協会 第７回 大田区加工技術展示商談会	SKYACTIVエンジンと今後のエンジン進化の展望	山川　正尚	パワートレイン技術開発部
2014.6.17-18	型技術協会 型技術者会議2014	高ハイテン部品における見込み・事前検証～金型への転写に関する取り組み事例	岡田　又治	車体技術部
		自動車メーカー各社のBODY金型関係トップエンジニアが語る最新金型技術事情	安達　範久	ツーリング製作部
		フレームハード品質の安定化	小田上　進	ツーリング製作部
2014.6.19-20	薄鋼板成形技術研究会 2014年度 第1回 研究討論会	980MPa級ハイテン部品の成形性改善と寸法精度を両立させる新工法	岩田　有馬	車体技術部
2014.6.20	日本機械学会 第11回 自着火制御技術の高度化研究会	高圧縮比ガソリン燃焼技術	養祖　　隆	パワートレイン技術開発部
2014.6.21-22	日本生理人類学会 第70回 大会	冬季寒冷暴露時における香りの生理心理反応	赤島　健太 林　小百合 和田　宏子 キムヨンキュ 松井　恵子 山田　洋史	九州大学大学院 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2014.6.25-27	リード エグジビション ジャパン（株） 第25回 設計・製造ソリューション展 専門セミナー	マツダにおけるPDM・CAD 連携を活用した開発効率化事例	西林　　玄	ボデー開発部
2014.6.26-27	品質工学会 第22回 品質工学研究発表大会	デザイン形状再現に向けた金型磨き工程の砥石使用条件最適化	久保　祐貴	ツーリング製作部
		熱歪削減に向けたフレームハード条件の最適化	岡山　一洋	ツーリング製作部
2014.6.27	自動車技術会 中部支部 2014年度 第2回 技術講習会	マツダ先進安全技術 「i - Activsense」の技術紹介	小川　伯文	車両システム開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.6.27	電気化学会 平成26年度 第3回 研究会	減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」について	高橋　正好	電気駆動システム開発室
2014.6.28	日本技術士会 中国本部 平成26年度 機械部会 例会 及び講演会	高精度CAE解析技術を活用したエンジン・変速機のSKYACTIV技術の開発	栗栖　　徹	エンジン性能開発部
2014.6.28	日本化学会 ほか 第51回 化学関連支部合同九州大会	自動車排ガス中のCOの除去を目的としたPd/Al2O3触媒の高活性化	中野　孝紀 佐藤　勝俊 永岡　勝俊 山田　啓司	大分大学 同上 同上 技術研究所
2014.7.1	広島大学 応用化学概論	“応用化学” と“ものづくり”	甲斐　裕之	技術研究所
2014.7.2-4	（株）日経BP IT Japan 2014	SKYACTIVの製造工程におけるビックデータ活用	菖蒲田清孝	技術本部
2014.7.3	自動車技術会 第2回 エレクトロニクス部門委員会（2014-2015年度）	先進安全自動車「マツダ アテンザASV-5」 広島における世界初の路面電車-自動車間通信型ASVの走行実験	山本　雅史	技術研究所
2014.7.3	（株）技術情報協会 セミナー	貴金属シングルナノ触媒の微細構造設計とレアメタル使用量の低減	岩国　秀治	技術研究所
2014.7.3	（株）アライドエンジニアリング ほか ADVENTURECluster ユーザー会2014	SKYACTIVトランスミッションの開発におけるADVC適用事例（モデルベース開発の理想実現に向けた信頼性CAEの精度改善活動）	山王丸将吾	エンジン性能開発部
2014.7.4	自動車技術会 第60回 技術交流会『プレス･溶接』	車体組立領域におけるスポット溶接スパッタレス化の取り組み	清水　　昇	車体技術部
2014.7.18	エイヴィエルジャパン（株） パワートレインセミナー2014 『適合』	SKYACTIV開発へのMBC適用	村上　　康	エンジン性能開発部
2014.7.21	可視化情報学会 第42回 可視化情報シンポジウム	エンジン熱効率改善のための可視化計測技術	原田　雄司 田中　達也 山下　洋幸	技術研究所 同上 同上
2014.7.24	ICTを活用した経営向上の取組み	SKYACTIVテクノロジーとその誕生を支えたモデルベース開発	原田　靖裕	パワートレインシステム開発部
2014.7.25	デザイン塾 ほか デザイン科学，タイムアクシスデザインの創験	買替え車両に価値を移行させる価値伝承システム	古郡　　了 柴崎　直貴 戸田　敬介 神谷　　慶 楠　　雄磨 西村　秀和	技術研究所 慶應義塾大学 同上 同上 同上 同上
2014.7.28-30	日本混相流学会 混相流シンポジウム2014	燃料インジェクタ内キャビテーションの三次元構造	田中　彩娜 西　　風太 宋　　明良 横畑　英明 和田　好隆	神戸大学 同上 同上 エンジン性能開発部 同上
2014.7.30-8.5	九州大学IMI研究所 Study Group Workshop	人の感性に基いた質感定量評価関数の構築について	中本　尊元	技術研究所
2014.8.11-12, 9.17-18	熊本大学 平成26年度 特別講義「組込みシステム関連産業概論」	SKYACTIV-Gエンジン制御とそのモデルベース開発	今田　道宏	パワートレインシステム開発部
2014.8.20	自動車技術会 関東支部 講演・講習会	乗用車エンジンの燃焼および高効率化	山本　寿英	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.8.21	日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部 金属第54回 鉄鋼 第57回 中国四国支部講演大会	LiをプレドープしたSiの負極特性	川人　浩司 谷本　晃一 池田　　卓 對尾　良則 宮岡　裕樹 市川　貴之 小島　由継	広島大学 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上 同上
2014.8.22	広島県音振動技術研究会 平成26年度 第2回 研究会	車室内騒音におけるパネル等価放射パワー発生要因の分析技術および最適化技術の開発	新保晋太郎	車両開発本部
2014.8.29-31	日本機械学会 西日本エンジンシステム研究会 2014年 夏季セミナー	負圧作用時のピストンリング部から燃焼室内へのオイル上がり現象の可視化	松本　貢典 中村　純平 大澤　克幸 栗栖　　徹	鳥取大学 同上 同上 エンジン性能開発部
2014.8.29	日本工作機械販売協会，日本立地センター 日工販教育研修	自動車の軽量化材料/工法の最新動向と今後の方向性	杉本　幸弘	技術研究所
2014.9.2	省エネルギーセンター 中国支部 平成26年度 第348回 省エネ技術講座	揮発性有機化合物とCO2を同時削減する新塗装技術	篠田　雅史	車両技術部
2014.9.2	広島市産業振興センター 平成26年度 環境経営実践講習会	マツダ車の環境保全への取り組みとLCAの実施	森口　義久	技術企画部
2014.9.2-5	日本磁気学会 第38回 日本磁気学会学術講演会	モータ駆動負荷によるNd-Fe-B系焼結磁石の減磁評価	池田壮一郎 藤原　幸星 森本　祐治 竹澤　昌晃 椛嶌　寿行	九州工業大学 同上 同上 同上 技術研究所
2014.9.3	広島市立大学，広島市 広島市立大学産学連携研究発表会	精神的価値が成長する感性イノベーション～感性豊かな社会を目指して～	農沢　隆秀	技術研究所
2014.9.3-5	電気学会 平成26年 電子・情報・システム部門大会	SKYACTIV TECHNOLOGYの電動化技術	宮腰　　穂	パワートレインシステム開発部
2014.9.4	型技術協会 第116回 型技術セミナー	SKYACTIVを実現した 高精度薄肉ダイカストとその金型技術	河野　一郎	パワートレイン技術部
2014.9.4-5	高輝度光科学研究センター　ほか 第11回 Spring-8産業利用報告会	マイクロビームを用いたリチウムイオン電池正極の分析	三根生　晋 住田　弘祐 山田　洋史 横山　和司	技術研究所 同上 同上 兵庫県立大学，神戸大学
2014.9.5	日本鋳造協会 平成26年度 鋳造カレッジ中国四国地区 鋳鉄コース	量産小物鋳鉄鋳物を中心とした鋳鉄の材質	黒谷　真司	パワートレイン技術部
		量産小物鋳鉄を中心とした鋳鉄の製造プロセス，鋳造方案	田中　裕一	パワートレイン技術部
2014.9.7-10	日本機械学会 2014年度 年次大会	エンジン排気を模した曲り管路内脈動流の計測と数値解析	木村　直人 大木　純一 西田　恵哉 尾形　陽一 石保　　禄 山本　　亮 中村　和博 柳田　春菜	広島大学 同上 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
		予混合気の不均質性を考慮したHCCI燃焼簡易モデル	上杉　康登 山崎　由大 金子　成彦 疋田　孝幸 津村雄一郎 水野　沙織	東京大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		HCCIエンジンの圧力上昇率およびサイクル変動の予測モデルの検討	馬橋　奏太 山崎　由大 金子　成彦 疋田　孝幸 津村雄一郎 水野　沙織	東京大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
		HCCIエンジンの簡易ダイナミクスモデル	Ma Qiong 山崎　由大 金子　成彦 疋田　孝幸 津村雄一郎 水野　沙織	東京大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
2014.9.17-19	日本分析化学会 第63年会	熱分解GC/MSによるリチウムイオン電池構成材の成分分析	定井　麻子 石津　嘉子 三根生 晋 國府田由紀 高山　　修 住田　弘祐 山田　洋史	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 同上
		熱分解GC/MSによるポリビニルアセタール系接着剤の劣化分析	浅田　里沙 定井　麻子 石津　嘉子 國府田由紀 住田　弘祐 山田　洋史	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
2014.9.20-21	日本計算工学会 JSCES学生サマーキャンプ2014	マツダビルディングブロックの戦略の紹介と社会人博士号取得者からのメッセージ	佐藤　圭峰	技術研究所
2014.9.24-26	リード エグジビション ジャパン（株） 第17回 関西 設計製造ソリューション展	マツダにおけるPDM・CAD 連携を活用した開発効率化事例	飯田　健次	ボデー開発部
2014.9.25	日本金属学会 2014年 秋季（第155回）講演大会	全個体セルを用いたLiSi合金の負極特性	川人　浩司 谷本　晃一 池田　　卓 對尾　良則 宮岡　裕樹 市川　貴之 小島　由継	広島大学 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上 同上
2014.9.25-27	触媒学会 第114回 触媒討論会	自動車排ガス浄化触媒の現状と課題	原田浩一郎	技術研究所
		尿素SCR触媒の劣化メカニズムに関する検討	佐藤　義志 山田　啓司 重津　雅彦 高見　明秀	技術研究所 同上 同上 同上
2014.9.29	インターモールド振興会 第86回 インターモールド・テクニカル・セミナー	高ハイテン部品の成形性と寸法精度両立に向けた新工法と見込み要領の適用事例	岡田　又治 酒井　　明	車体技術部 同上
2014.10.9	山口県 山口ものづくり企業セミナー	SKYACTIVエンジンと今後のエンジン進化の展望	山川　正尚	パワートレイン技術開発部
2014.10.14	日本化学会 第4回 CSJ化学フェスタ	メソポーラスシリカ-LiC104複合体のイオ伝導特性	松下　悟志 犬丸　　啓 甲斐　裕之 對尾　良則	広島大学 同上 技術研究所 同上
2014.10.16-18	石油学会 第44回 石油・石油化学討論会	自動車排ガス中のCO浄化を目的とした担持Pd触媒の開発	中野　孝紀 佐藤　勝俊 永岡　勝俊 山田　啓司	大分大学 同上 同上 技術研究所
2014.10.17	自動車技術会 関西支部 2014年 講習会	車室内騒音におけるパネル等価放射パワー発生要因の分析技術および最適化技術の開発	新保晋太郎	車両開発本部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.10.22-24	自動車技術会 2014年 秋季大会 学術講演会	薄肉中空フレームにおける曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究	本田　正徳 河村　力 寺田　栄 椙村　勇一 木崎　勇 石亀　勝義 玄道　俊行 川﨑　敬三	技術研究所 同上 車両開発本部 衝突性能開発部 同上 同上 ボデー開発部 同上
		冷却水流制御がHCCI燃焼に及ぼす影響	田村　亮 岡屋　晋伍 草鹿　仁 養祖　隆 山川　正尚	早稲田大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
		燃焼制御に向けた過給EGR-HCCIエンジンの0次元燃焼予測モデルの構築	西口　嵩人 田村　亮 草鹿　仁 養祖　隆 山川　正尚 三浦　靖智 田中　重行	早稲田大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 コスモ石油 同上
		燃料成分種に対応できる簡略化反応スキームの開発	養祖　隆 山川　正尚 田村　亮 草鹿　仁	パワートレイン技術開発部 同上 早稲田大学 同上
		自動車の空気抵抗を増大させる車両回りの非定常流れ構造	清水　圭吾 農沢　隆秀 岡田　義浩	技術研究所 同上 車両実研部
		ディーゼル排ガス浄化用酸化触媒に対する六角セル担体の効果	山田　啓司 佐藤　義志 原田浩一郎 重津　雅彦 髙見　明秀	技術研究所 同上 同上 同上 同上
		空力シミュレーションを本格活用した小型ハッチバック車の空気抵抗低減技術	伊川　雄希 岡田　義浩 岡本　哲 中田　章博 李　曄 田中　松広	車両実研部 同上 同上 同上 同上 同上
		樹脂部品の衝突CAE予測精度向上への取り組み（第2報） -自動車用エネルギー吸収部品のモデル化手法の提案-	西原　剛史 増田　出光 高木　崇 小林　督矢 篠原　一彦 田中　康規 大宮　正毅 横山　敦士	衝突性能開発部 スズキ（株） アイシン精機（株） トヨタ車体（株） 日泉化学（株） 同上 慶應義塾大学 京都工芸繊維大学
2014.10.24	腐食防食学会 中国・四国支部 第20回 材料と環境講習会	自動車が曝される世界の様々な腐食環境	重永　勉	技術研究所
2014.10.27	近畿大学工学部研究公開フォーラム2014	電気二重層キャパシタを用いた減速エネルギー回生システム	藤田　弘輝	技術研究所
2014.10.29-31	粉体粉末冶金協会 平成26年度 秋季大会	高性能パワートレイン開発事例紹介及び粉末冶金製法に期待すること	小笠原　徹	パワートレイン開発本部
2014.10.30-31	日本分析化学会 X線分析研究懇談会 第50回 X線分析討論会	チタン酸リチウム負極活物質を用いたリチウムイオン電池のTiK殻その場XAFS測定	早川慎二郎 三根生　晋 住田　弘祐 山田　洋史 百崎賢二郎 Galif Kutluk 生天目博文	広島大学 技術研究所 同上 同上 広島大学 同上 同上
2014.11.3-4	やまぐちものづくり＆ビジネスフェア2014実行委員会 やまぐちものづくり＆ビジネスフェア2014	SKYACTIVにおけるクルマづくり・モノ造りと自動車の未来	小笠原　徹	パワートレイン開発本部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.11.5	IAV(株) 2014 IAV Powertrain Calibration Conference	新世代ディーゼルエンジンにおけるエミッション，燃費，ノイズ性能のロバスト性を確保する為のモデルベース燃焼制御の開発	佐原　寛哉	エンジン性能開発部
		i-ELOOPのモデルベース開発	小谷　和也	電気駆動システム開発室
2014.11.6	ひろしま医工連携イノベーション推進協議会 イノベものづくり士育成研修「CAD/CAM/CAE実践研修」	自動車開発におけるCAE活用事例の紹介	武田　健二	車両開発本部
2014.11.7	日本鋳造協会 平成26年度 鋳造カレッジ中国四国地区 鋳鉄コース	鋳鉄鋳造概論（キュポラ溶解理論と実際）	田中　裕一	パワートレイン技術部
2014.11.8	日本経営工学会 2014年 秋季大会	自動車を操る感覚	西川　一男	技術研究所
2014.11.11	長野県工業技術総合センター ほか 研究・成果発表会	内燃機関の更なる効率改善（SKYACTIV-GE/DE の進化）	赤木　裕治	パワートレイン開発本部
2014.11.11	自動車技術会 シンポジウム（No.03-14）「動力伝達系の最新技術 2014　-環境保護のため進化する駆動系-」	SKYACTIV-DRIVEを支えたモデルベース開発	清岡　　毅	ドライブトレイン開発部
2014.11.11-14	エムエスシーソフトウェア（株） Adams Technology & Solution Day 2014	悪路走行における車体スポット溶接部の応力に関する入力経路寄与分析技術の開発	武田　健二	車両開発本部
2014.11.13-14	(株)IDAJ IDAJ CAE Solution Conference 2014	CONVERGEを用いた噴霧・燃焼解析の活用事例	本田　雄哉	エンジン性能開発部
2014.11.14	自動車技術会 ガソリン機関部門委員会	内燃機関の進化構想	山本　博之	技術研究所
2014.11.14-15	プラスチック成形加工学会 成形加工シンポジア'14	自動車用ポリプロピレン発泡体の気泡構造が物性に及ぼす影響	宮本　嗣久 金子　満晴 大嶋　正裕	技術研究所 同上 京都大学
		分子動力学法を用いたガラス繊維強化ポリプロピレン樹脂複合材の界面特性解析	平本　健治 藤　　和久 松田　祐之 小川　淳一 小林めぐみ 森脇　健二 宮本　嗣久 住田　弘祐 王　　存涛 濱田　泰以	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 京都工芸繊維大学 同上
2014.11.15	早稲田大学理工学研究所 第34回 早大モビリティシンポジウム	小排気量クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 1.5 の開発	志茂　大輔	エンジン性能開発部
2014.11.19	北九州産業学術推進機構 自動車技術センター 平成26年度 次世代自動車勉強会「水素エンジン車の開発と水素供給施設の整備」	もう一つの水素自動車(水素REレンジエクステンダーEVの紹介)	水戸部典朗	技術研究所
2014.11.20-21	日本イーエスアイ（株） PUCA2014-ESI　Users' Forum Japan-	eCallシステム性能の解析事例紹介	浜田　　康 鶴長真里絵	電子開発部 同上
		高ハイテン部品における見込み・事前検証～金型への転写に関する取り組み事例	岡田　又治	車体技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.11.21	日本科学技術連盟 第20回 品質機能展開シンポジウム	QFD，TRIZ，タグチメソッドを活用した技術開発プロセス	山田　洋史	技術研究所
2014.11.23	日本機械学会 第27回 計算力学講演会	SEM画像の統計処理に基づく多孔質ジルコニア溶射被膜の3次元ミクロモデル構造モデリングとマルチスケールシミュレーション	鈴木　智洋 高野　直樹 宮内　勇馬	慶應義塾大学 同上 技術研究所
		Microstructure design by stochastic multiscale simulation considering geometrical fluctuation at microscale and uncertainly in constituent material property	W.Pin 高野　直樹 宮内　勇馬	慶應義塾大学 同上 技術研究所
2014.11.26-28	日本機械学会 第25回 内燃機関シンポジウム	NO,CO 濃度が自動車用三元触媒の反応経路に与える影響	松本　有平	エンジン性能開発部
		直噴ガソリン機関用多噴孔ノズル噴霧の詳細考察：噴孔長及び噴孔数が初期噴霧形成に及ぼす影響	文　石洙 駒田　佳介 安田　伸広 岩本　裕之 鈴木　芳生 佐藤　圭峰 横畑　英明 和田　好隆	産業技術総合研究所 同上 大型放射光施設 同上 同上 技術研究所 エンジン性能開発部 同上
		詳細化学反応に並列化陽解法を適用した三次元数値流体解析による高速化とディーゼル微粒子の生成過程に関する研究	喜久里　陽 向後　和也 周　ベイニ 草鹿　仁 大聖　泰弘 佐藤　圭峰 藤本　英史 寺島　洋史 森井　雄飛	早稲田大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上 東京大学 宇宙航空研究開発機構
		ディーゼル噴霧燃焼における詳細反応を考慮した微粒子生成過程のLES解析	周　蓓霓 喜久里　陽 草鹿　仁 大聖　泰弘 佐藤　圭峰 藤本　英史	早稲田大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上
		高応答遮熱壁面が速度境界層に及ぼす影響	田中　達也 原田　雄司 中尾　裕典 服平　次男 山下　洋幸 山本　博之	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
2014.11.27	電気化学会 第90回 新電池構想部会	xEVにおけるエネルギ回生の活用	進矢　義之	電気駆動システム開発室
2014.11.27	日本鋳造工学会・東海支部 岐阜地区技術講演会	高精度薄肉ダイカストとその金型技術	大石　宏和	パワートレイン技術部
2014.11.27-28	（株）日経BP，中部産業連盟 「国内大手７社が語る　自動車産業の針路2015」	燃費効率に向けた取り組み	田中　伸彦	パワートレイン技術開発部
2104.11.27-28	型技術協会 第20回 型技術ワークショップ 2014 in 愛知	”魂動デザイン”の実現と生産性の最大化に向けた金型構造解析技術の構築	佐藤　博紀	車両技術部
		プレス金型設計におけるCAE技術の活用	丸山　秀幸	車体技術部
		プレス金型におけるマルチセットマシニングによる生産性向上	溝部　祥子	ツーリング製作部
2014.11.28	日本航空宇宙学会 西部支講演会（2014）	タイヤ回転状態を再現した自動車周りの流れ場予測技術について	北風　慎吾 李　曄 川北　正寿 岡本　哲	車両実研部 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.11.30	日本産業衛生学会 中国地方・四国地方会 第58回 中国四国合同産業衛生学会	上肢力学特性に基づく自動車用シフトレバーの機械特性の研究(上肢運動におけるヒューマンマシンマッチング	西川　一男	技術研究所
2014.12.1 - 3	日本機械学会 第23回 交通・物流部門大会	路面電車との車車間通信型ASVプロトサービス実証実験の評価	平沢　隆之 須田　義大 渡辺　　翔 中野　公彦 水間　　毅 長谷川智紀 竹内　俊裕 栃岡　孝宏 山本　康典 岩下　洋平 藤元　秀樹 東　　耕一	東京大学 同上 同上 同上 交通安全環境研究所 同上 同上 技術研究所 同上 同上 広島電鉄（株） 同上
2014.12.4-5	日本AEM学会 第23回 MAGDAコンファレンスin高松	柔軟発電体とエンジン振動を用いた発電に関する研究	田中　義和 尾古　卓也 陸田　秀実 市川　和男 山本　寿英 沖濱　圭佑	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2014.12.5	化学工学会 中国四国支部 大学院生発表会	企業が求める人物像と教育	小川　淳一	技術研究所
2014.12.5	東京大学生産技術研究所 文部科学省HPCI戦略プログラム 第5回 「分野4次世代ものづくり」シンポジウム	スパコン「京」と多数目的進化計算アルゴリズムを用いた複数車種同時最適化	小平　剛央	技術研究所
2014.12.8	クオリカ（株） 第25回 JSCASTユーザ会　事例報告	堰別流入表示を活用したガス欠陥対策とメッシュ作成方法の改善事例	檜垣　幸久 宮野　靖幸	試作部 同上
2014.12.8-9	理化学研究所 計算科学研究機構 第5回 AICS国際シンポジウム	Design Optimization Method for Vehicle Structure Developments	天野　浩平	技術研究所
2014.12.9	自動車技術会 シンポジウム（No.07-14）「新しい時代が求める振動騒音の技術」	車室内騒音におけるパネル等価放射パワー発生要因の分析技術および最適化技術の開発	新保晋太郎	車両開発本部
2014.12.9-11	日本流体力学会 第28回 数値流体力学シンポジウム	流入・流出を伴う気液二相が存在する容器内における気泡挙動の解析	泉田　康太 青木　尊之 小野寺直幸 杉原　健太 中島　　聖 本郷　　均 横畑　英明	東京工業大学 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
2014.12.11-12	九州大学　マス・フォア・インダストリ研究所 境界モデリング手法の研究	mazdaにおけるディーゼルエンジンのMBCによるキャリブレーション概要と境界モデルの課題	原田　真悟	エンジン性能開発部
2014.12.12	トライボロジー学会 自動車のトライボロジー研究会	エンジンしゅう動面の弾性流体潤滑解析	宮内　勇馬	技術研究所
2014.12.13	日本人間工学会 中国・四国支部，関西支部 平成26年 日本人間工学会中国・四国支部，関西支部合同大会	反力知覚特性に基づく自動車操作機器特性に関する考察	山田　直樹 竹村　和紘 新部　忠幸 岸　　篤秀 西川　一男 農澤　隆秀 栗田　雄一 辻　　敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2014.12.15-17	計測自動制御学会 第15回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会	人間の力知覚空間を考慮したステアリングホイール操作感性評価法の提案	竹村　和紘 山田　直樹 新部　忠幸 岸　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀 栗田　雄一 辻　敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2014.12.16-18	土木学会 第21回 鉄道技術・政策連合シンポジウム	自動車との車車間通信を活用した路面電車の安全運転支援システムに関する検討	渡辺　翔 平沢　孝之 須田　義大 中野　公彦 長谷川智紀 坂本　一朗 山本　康典 岩下　洋平 藤元　秀樹 東　耕一	東京大学 同上 同上 同上 交通安全環境研究所 同上 技術研究所 同上 広島電鉄（株） 同上
2014.12.17	ITS情報通信システム推進会議 平成26年度 Vehicle Safety Communications関連国際会議結果報告会	第44回ISO/TC204（ITS）国際会議結果報告	三角　正法	技術研究所
2014.12.18	日本機械学会 関西支部 第194回 内燃機関懇話会	マツダの内燃機関進化①	寺沢　保幸	パワートレイン技術開発部
2014.12.18-19	日本液体微粒化学会・日本エネルギー学会 第23回 微粒化シンポジウム	横風気流中に噴射した燃料噴霧構造の可視化計測	岸　諒輔 郭　敏 尾形　陽一 西田　恵哉 石　保禄 和田　好隆	広島大学 同上 同上 同上 北京理工大学 エンジン性能開発部
		平板に衝突する噴霧の燃料付着の計測	朴　啓太 小立　俊己 西田　恵哉 尾形　陽一 張　武 藤川　竜也	広島大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
		ミニサックノズルの各種形状因子がキャビテーション流れに及ぼす影響	南　慎一郎 Raditya Hendra Pratama 宋　明良 横畑　英明 和田　好隆	神戸大学 同上 同上 エンジン性能開発部 同上
		壁面の表面粗さが液滴の衝突挙動に及ぼす影響	松尾　亮佑 山本　啓介 小田　哲也 大澤　克幸 曾田　将太 横畑　英明	鳥取大学 同上 同上 同上 山陽特殊製鋼（株） エンジン性能開発部
2014.12.19	自動車技術会 シンポジウム（No.10-14）「これからの人と環境に優しい自動車とそれを支える生産技術」	2045年のクルマづくり -日本が世界をリードする為に-	河野　英樹 大島佑太郎 山根　慎也 新井　孝拓 湯口　友人 岩崎　進一 柳井　寛 久連山　剛 岡田　裕介 佐野　健 高本　亮 小林　崇 内海　図 岩崎　康弘 鈴木　貴	車体技術部 UDトラックス（株） いすゞ自動車（株） スズキ（株） ダイハツ工業（株） トヨタ自動車（株） 日産自動車（株） 日野自動車（株） 同上 富士重工業（株） 同上 ホンダエンジニアリング（株） 本田技研工業（株） 三菱自動車（株） ヤマハ発動機（株）

3. 社外寄稿

＊所属は原則発表時点を示す

寄稿誌名　巻･号･ページ	題目	発表者	所属
自動車技術			
Vol.67, No.6(2013), pp.4-5	超薄肉軽量バンパの開発	朝野　千明 藤　和久 原　正雄 大西　正明 古田　和広	技術研究所 同上 同上 同上 同上
Vol.67, No.7(2013), pp.4-5	電気二重層キャパシタを用いた減速エネルギー回生システムの開発	藤田　弘輝 高橋　正好 高橋　達朗 平野　晴洋	技術研究所 車両システム開発部 同上 パワートレイン技術開発部
Vol.67, No.7 (2013), pp.35-40	最新ディーゼル機関の静粛性向上技術	住谷　章 阿部　宏司 白橋　尚俊 菊池　正和 渡邉　淳司	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上
Vol.67, No.7 (2013), pp.66-71	新型自動変速機のNVH性能と燃費・走り性能の両立	田中　和宏 工藤　健志 佐野　徹	パワートレイン開発本部 同上 車両開発本部
Vol.67, No.8 (2013), pp.107-112	その他の動力 水素エンジン	森本　賢治	技術研究所
Vol.68, No.8 (2014), pp.105-108	代替燃料エンジン 水素エンジン	森本　賢治	技術研究所
Vol.68, No.12 (2014), pp.38-43	ミリ波レーダを用いた予防安全システムの機能／性能について	西條　友馬 尾崎　昴	車両システム開発部 同上
自動車技術会論文集			
Vol.44, No.2(2013), pp.535-542	逐次実験計画法による車体構造の複合領域最適化手法	小平　剛央 中本　尊元 小池　真人 天野　浩平 西井　龍映 秦　攀	技術研究所 同上 同上 同上 九州大学ﾏｽ・ﾌｫｱ・ｲﾝﾀﾞｽﾄﾘ研究所 同上
Vol.44, No.6 (2013), pp.1335-1340	予混合型ディーゼル燃焼による排気と燃費の低減(第3報) ― モデルベース着火時期制御と多段噴射によるロバスト性の改善 ―	志茂　大輔 角田　良枝 金　尚奎 丸山　慶士 橋本　孝芳 林原　寛 鐵野　雅之	エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上 走行環境性能開発部 パワートレインシステム開発部
Vol.45, No.1(2014), pp.83-88	電動車両の走行フィーリングを考慮した発電制御法 ―シリーズ型HEV におけるエンジン出力と走行	大室　朗 堂園　一保 末冨　隆雅	技術研究所 同上 電気駆動システム開発室
Vol.45, No.2(2014), pp.337-342	悪路走行入力における車体スポット溶接の疲労強度分析技術の開発	武田　健二 白松　広大 岩田　成樹 寺口　毅	車両開発本部 同上 同上 車両実研部
Vol.45, No.3(2014), pp.559-565	人の視覚特性の分析によるワイパーの払拭欲求発生要因の解明と払拭特性の考察	岩瀬　耕二 松岡　悟 新部　忠幸	技術研究所 同上 同上
Vol.45, No.3(2014), pp.579-584	人間の主観的反力知覚モデルに基づく自動車のステアリングホイール操作系評価	竹村　和紘 山田　直樹 岸　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀 栗田　雄一 辻　敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上

寄稿誌名　巻・号・ページ	題目	発表者	所属
Vol.45, No.6(2014), pp.1099-1104	超ハイテン材の破断に対する予測技術の研究	佐藤健太郎 岩井　隆浩 高田　賢治 新居　直樹 坂本　匡史 西　　龍 福井　清之 横井　龍雄 西村　隆一 池田光太郎 徳永　孝行 西浦　友子 社納眞一郎 麻　　寧緒 長坂　　圭 西村　　律 武田　力紀 小島　宏介 大宮　正毅	JFEスチール（株） トヨタ車体（株） （株）本田技術研究所 いすゞ自動車（株） 同上 トヨタ自動車東日本（株） 新日鐵住金（株） 同上 同上 ダイハツ工業（株） 富士重工業（株） 伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ（株） 同上 （株）JSOL スズキ（株） ﾄﾖﾀﾃｸﾆｶﾙﾃﾞｨﾍﾞﾛｯﾌﾟﾒﾝﾄ（株） 日産自動車（株） 車両開発本部 慶應義塾大学
自動車技術会　Motor Ring			
No.36 (2013)	SKYACTIV-G エンジンの紹介	冨澤　和廣	エンジン設計部
No.36 (2013)	SKYACTIV-D エンジンの紹介	森永　真一	エンジン性能開発部
No.36 (2013)	マツダの先進安全技術	小嶋　浩一 小川　伯文 遠野　安宏 遠藤　靖之 大村　博志	車両システム開発部 同上 同上 同上 同上
自動車技術会関西支部ニュース			
第43号 (2014), pp.1-3	マツダの先進安全技術	小嶋　浩一	車両システム開発部
第44号 (2014), pp.6-7	SKYACTIV-G エンジンの紹介	長谷川裕一	エンジン設計部
第44号 (2014), pp.8-9	SKYACTIV-D エンジンの紹介	森永　真一	エンジン性能開発部
第45号 (2014), pp.2-3	耐熱性と低温活性を両立した貴金属シングルナノ触媒	赤峰　真明	技術研究所
自動車技術会　技術創造人			
オートテクノロジー2014,pp8-13	電気二重層キャパシタを用いた減速エネルギー回生システムの開発	藤田　弘輝 高橋　正好 高橋　達朗 平野　晴洋	技術研究所 電気駆動システム開発部 同上 同上
オートテクノロジー2014,pp20-25	超薄肉軽量バンパの開発	朝野　千明 藤　　和久 原　　正雄 大西　正明 古田　和広	技術研究所 同上 同上 同上 同上
日本機械学会論文集　A編			
Vol 79, No. 808(2013), pp.1818-1831.	完全陰解法による分割背応力モデルに基づく損傷弾塑性解析	山王丸将吾 岡澤　重信 田中　智行	エンジン性能開発部 広島大学 同上
日本機械学会論文集　C編			
Vol.79, No.807(2013), pp.4039-4046	視空間知覚の感性特性を考慮した自動車インテリア構造の検討	武田　雄策 大黒谷陽子 村瀬　健二 大坪　智範 橋本　　悟 伏見　　亮 民谷　　謙	技術研究所 同上 同上 車両実研部 商品企画部 同上 開発企画部

寄稿誌名　　巻･号･ページ	題目	発表者	所属
Vol. 79, No. 808(2013), pp.4917-4925	筋力推定に基づくステアリング操作時の力知覚モデル	佐藤　純平 竹村　和紘 山田　直樹 新部　忠幸 岸　　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀 辻　　敏夫 栗田　雄一	広島大学 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
Vol. 80, No. 809(2014), BMS0019	人間の下肢の力学特性を利用したペダル特性の設計	西川　一男 宮崎　　透 古川　浩二 阿部　治彦 農沢　隆秀 辻　　敏夫	技術研究所 車両実研部 同上 同上 技術研究所 広島大学
日本機械学会論文集			
Vol.80, No.809 (2014)	自動車の高速操舵走行時の安定性に寄与する車体周りの非定常流れ特性	岡田　義浩 農沢　隆秀 坪倉　　誠 中島　卓司	車両実研部 技術研究所 北海道大学 広島大学
Vol.80, No.818 (2014)	定常円旋回時の自動車に作用する空気力について	中島　卓司 坪倉　　誠 岡田　義浩 農沢　隆秀 溝兼　通矢 土井　康明	広島大学 北海道大学 車両実研部 技術研究所 広島大学 広島大学
日本機械学会誌			
Vol.116, No.1141(2013), p.867	低温酸化反応を活用した高効率高圧縮比ガソリンエンジン	山川　正尚 養祖　　隆 草鹿　　仁	パワートレイン技術開発部 同上 早稲田大学
Vol.117, No.1144 (2014), pp.132-133	飽くなき挑戦で実用化したロータリーエンジン	清水　律治	パワートレイン技術開発部
日本金属学会　まてりあ			
Vol.53, No.12, pp.599-602	自動車エンジン用トライボロジー材料技術の動向	坂手 宣夫	技術研究所
電気学会論文誌C			
Vol. 134(2014) No. 9, pp.1348-1354	複合領域最適化とトレードオフ分析による車体構造の軽量化に向けた設計知見の抽出	小平　剛央	技術研究所
計測自動制御学会誌　計測と制御			
Vol.53, No.8(2014), pp.702-709	エンジン制御システム開発技術	今田　道宏	パワートレインシステム開発部
計測自動制御学会論文集			
vol.49, No.6, 602/611 (2013)	駐車運転技量育成のための力覚呈示を用いた運転行動支援システム	廣川　暢一 上杉　直久 古郡　　了 北川　朋子 鈴木　健嗣	筑波大学 技術研究所 同上 同上 筑波大学／JST
計算科学振興財団（FOCUS）シミュレーション事例集			
2013年度版（第４号）	計算モデルと実験を高度に統合したSKYACTIVエンジンの性能開発―モデルベース開発	人見　光夫 横畑　英明	パワートレイン開発本部 エンジン性能開発部
日本ロボット学会誌			
Vo. 32, No. 10, pp. 851-854, 2014.	意のままに操る自動車を目指して	西川　一男 農沢　隆秀 辻　　敏夫	技術研究所 同上 広島大学
月刊トライボロジー			
2014.10　No.326, pp.16-18	内燃機関におけるトライボロジーの取組み	田中　伸彦 今村　悟志	パワートレイン技術開発部 同上

寄稿誌名　　巻･号･ページ	題目	発表者	所属
一般財団法人素形材センター月刊誌「素形材」			
12月号	「1800MPa級車体部材のホットプレス成形技術の開発」 第30回素形材産業技術賞において「経済産業大臣賞」を受賞	鈴木　貴之 増尾　俊二 林　康彦 波部　光利 匹田　和夫 中山　伸之	アイシン高丘（株） 同上 同上 同上 新日鐵住金（株） ボデー開発部
Value Engneering バリューエンジニアリング			
	マツダのモノ造り革新に伴った試作活動の質の変化	三宅　智史	試作部
型技術			
2013年5月号, pp.54-58	「SKYACTIV」を実現した高精度薄肉鋳造とその金型技術	青田　巌 河野　一郎	パワートレイン技術部 同上
2013年5月号, pp.59-63	New ATENZA におけるBody造りの革新 0311	中野　伸哉	車体技術部
2013年7月号	高精度薄肉ダイカストとその金型技術	藤井　祥平 米澤　英樹 小国　英明 大塚　真	パワートレイン技術部 同上 同上 同上
2013年12月号, pp.18-19	980MPa級ハイテン部品の成形性改善と寸法精度の向上を両立させる新工法	田丸　真司 酒井　明 森澤　誠	車体技術部 同上 同上
2014年1月号	《2014年新春座談会》自動車メーカーの海外展開における金型づくりの課題と展望	安達　範久	ツーリング製作部
2014年7月号, pp.70-71	高ハイテン部品における見込み・事前検証～金型への転写に関する取り組み事例	岡田　又治 酒井　明 小松　誠司	車体技術部 同上 同上
2014年9月号, pp.30-34	魂動デザインを実現する金型における，生産性の最大化に向けた金型構造解析技術の構築	佐藤　博紀 小瀧　和志 垰　慎一	車両技術部 同上 同上
型技術者会議2013			
P110～111	ハイテン金型量産準備の取り組み事例	中居　佳子 吉崎　真吾 入江　和郎 毎田　和博	車体技術部 同上 同上 同上
型技術ワークショップ2014			
P92～93	プレス金型設計におけるCAE技術の活用	丸山　秀幸 吉崎　真吾 三笹　護	車体技術部 同上 同上
月刊 「省エネルギー」			
Vol.66 No.2 2014 p .42-45	「揮発性有機化合物とCO_2を同時削減する新塗装技術」	脇本　浩司 和久　直人 篠田　雅史 加藤　秀和 亀迫　裕介 和泉　昭雄	プラント技術部 車両技術部 同上 同上 同上 同上
品質工学会第21回品質工学研究大会論文集			
	フレームハード品質の安定化	大塚　宏明	ツーリング製作部
日本金型工業会機関紙「金型KANAGATA」			
No.154	フレームハード品質の安定化	大塚　宏明	ツーリング製作部
型技術者会議2013　講演論文集			
pp.142-143	プレス金型形状加工の品質向上事例	中原　寛海 田中　貞夫 井筒　幸雄 秋月　匠	ツーリング製作部 同上 同上 同上

寄稿誌名　巻・号・ページ	題目	発表者	所属
型技術者会議2014　講演論文集			
pp.144-145	フレームハード品質の安定化	大塚　宏明 小田上　進 潮田　丈晴 井上　　満	ツーリング製作部 同上 同上 同上
型技術ワークショップ2013 in きたかみ　講演論文集			
pp.108-109	プレス金型 機械加工 工程削減の取組み	栢野　宏幸 上村　勝利 石橋　茂樹 藤川　宏明	ツーリング製作部 同上 同上 同上
型技術ワークショップ2014 in 愛知　講演論文集			
pp.50-51	プレス金型におけるマルチセットマシニングによる生産性向上	溝部　祥子 嶋村　誠仁 木谷　英治 西本　光毅	ツーリング製作部 同上 同上 同上
日本規格協会『標準化と品質管理』誌			
2014年6月号	フレームハード品質の安定化	大塚　宏明	ツーリング製作部
品質工学会第22回品質工学研究大会論文集			
pp.30-33	デザイン形状再現に向けた金型磨き工程の砥石使用条件最適化	久保　祐貴	ツーリング製作部
pp.202-205	熱歪削減に向けたフレームハード条件の最適化	岡山　一洋	ツーリング製作部
燃料電池			
Vol.13 No.3(2014),pp.87-92	高酸素イオン伝導性酸化物を用いたパティキュレート燃焼触媒の開発	石原　達己 原田浩一郎	九州大学 技術研究所
触媒の設計・反応制御　事例集			
pp.535-543	貴金属シングルナノ触媒の微細構造設計とレアメタル使用量の低減	岩国　秀治	技術研究所
季刊　中国総研			
Vol.17.2 No.63(2013),pp.21-36	自動車開発における感性の活かし方	岸　　篤秀	技術研究所
成形加工			
Vol.26 No.2(2014),pp.59-64	自動車における防音への取り組み	杉原　　毅	技術研究所
会報・人間工学専門家認定機構			
Vol.40(2014),pp.1-2	ドライバの知覚・認知特性を考慮した自動車の情報提供方法の開発	中里　仁美	技術研究所
触媒技術の動向と展望 2014年版			
pp.293-302	高酸素イオン伝導性ZrNd系酸化物を用いたパティキュレート燃焼触媒の開発と実用化	原田浩一郎	技術研究所
自動車オートパイロット開発最前線			
pp.269-277	広島市内における車車間通信技術実証実験	山本 雅史	技術研究所
ITUジャーナル			
Vol.44 No.7(2014),pp7-8	広島における世界初の路面電車－自動車間通信型ASVの走行実験	山本 雅史	技術研究所
JMAG Newsletter			
2013年6月号	磁界解析技術の進化に対する期待	米盛　　敬	技術研究所
SAE International Journal of Engines			
Vol.7, Issue 3 (2014), Paper number 2014-01-1664	Oil Transport Cycle Model for Rotary Engine Oil Seals	Mathieu Picard Camille Baelden Tian Tian 西野　隆之 新井　栄治 日高　弘順	マサチューセッツ工科大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
Vol.7, Issue 3 (2014), Paper number 2014-01-1665	Visualization of the Rotary Engine Oil Transport Mechanisms	Mathieu Picard 日高　弘順 Tian Tian 西野　隆之 新井　栄治 大久保昌紀	マサチューセッツ工科大学 パワートレイン技術開発部 マサチューセッツ工科大学 パワートレイン技術開発部 同上 同上

寄稿誌名　　巻･号･ページ	題目	発表者	所属
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems			
Vol.15, No.4, August 2014, pp.1758-1769	Vehicle Active Steering Control System Based on Human Mechanical Impedance Properties of the Arms	田中　良幸 山田　直樹 辻　　敏夫 末冨　隆雅	長崎大学 技術研究所 広島大学 電気駆動システム開発室
IEEE Transactions on Haptics			
2014.11.14オンライン公開	Analysis of Operational Comfort in Manual Tasks Using Human Force Manipulability Measure	田中　良幸 西川　一男 山田　直樹 辻　　敏夫	長崎大学 技術研究所 同上 広島大学
Chemical Communications			
Chem. Commun., 2013, 49 (38), 4015 - 4017	Active three-way catalysis of rhodium particles with a low oxidation state maintained under an oxidative atmosphere on a La-containing ZrO2 support	川端　久也 國府田由紀 住田　弘祐 重津　雅彦 高見　明秀 犬丸　　啓	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学
Catalysis Science & Technology			
Catal. Sci. Technol., 2014, 4 (3), 697 - 707	Self-regeneration of three-way catalyst rhodium supported on La-containing ZrO2 in an oxidative atmosphere	川端　久也 國府田由紀 住田　弘祐 重津　雅彦 高見　明秀 犬丸　　啓	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学大学院
Catalysis Today			
doi:10.1016/j.cattod.2014.10.041	Effect of Pr doping on catalytic properties of oxide ion conductor, Zr–Nd–O, for soot oxidation	馬場　誉士 滝沢　知也 原田浩一郎 山田　　啓 石原　達己 高見　明秀	技術研究所 同上 同上 同上 九州大学 技術研究所

編　集　委　員　会

委 員 長	本橋　真之	商品戦略本部 技術企画部
編集委員	温品　一雄	商品戦略本部 技術企画部
	田坂　寿康	商品戦略本部 技術企画部
	豊田　　稔	商品本部 商品企画部
	岡　　康治	デザイン本部 アドバンスデザインスタジオ
	栗原　洋治	車両開発本部 車両開発推進部
	平田　栄志	車両開発本部 車両システム開発部
	小笠原　徹	パワートレイン開発本部
	松田　祐之	技術研究所
	杉山　裕基	技術本部 生産企画部
	植月真一郎	広報本部 グローバル広報企画部
	柿沢　修成	広報本部 グローバル広報企画部
編集幹事	大森　正志	商品戦略本部 技術企画部

マツダ技報　第32号

発　行　2015年5月
発行人　素利　孝久
編集人　本橋　真之
事務局　大森　正志
発行所　マツダ株式会社
　　商品戦略本部　技術企画部
　　〒730-8670
　　広島県安芸郡府中町新地3番1号
　　電話　082（287）4106

Mazda Technical Review No.32

May 2015
Publisher　Takahisa Sori
Editor　Masayuki Motohashi
Bureau　Masashi Ohmori
Publishing office　Technology Planning Dept.
　　Product Strategy Div.
　　Mazda Motor Corporation
　　3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,
　　Hiroshima 730-8670, Japan

©2015 マツダ株式会社（禁無断転載）

ISSN 2186-3490