

マツダ技報

Mazda Technical Review

2012 No. **30**

マツダ技報 第30号 (2012)

目次

巻頭言	人見光夫	1
特集：SKYACTIV TECHNOLOGY		
1. CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術	長谷川裕一，草開良治，平岡哲男 高旗達也，中原康志，佐々木潤三	3
2. SKYACTIV-D エンジンの紹介	森永真一，詫間修治，西村博幸	9
3. SKYACTIV-Dの電子制御システム	杉山貴則，丸本真玄，名越匡宏 前川耕太，波多野崇	14
4. SKYACTIV-DRIVEの開発	土井淳一，鎌田真也，丸末敏久 岩下典生，三谷明弘，宮濱芳文	19
5. SKYACTIV-MTの紹介	石井 護，吉倉 佑，高田雅史	24
6. SKYACTIV技術を商品化したCX-5パワートレインの紹介	秋山耕一，高戸剛，佐々木健二 山根義昭，山形弘彦，河野敏文	28
7. SKYACTIV-シャシーのダイナミクス性能	村田 親，岩野光男，田中 稔 中村 聡，戸田良二，林 義博	32
8. 減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”の開発	高橋正好，高橋達朗，北木義正 山下丈晴，北川浩之，平野晴洋	37
9. 減速エネルギー回生システム “i-ELOOP”のデバイス開発	高橋正好，藤田弘輝，鈴木正悟 西田史彦	43
10. “i-ELOOP”制御技術の開発	小谷和也，水落洋行，久米章友 湯原将光，高木 宏，中上信宏 春名亮二，田村和寛	51
11. “i-ELOOP”制御系開発における机上環境の進化	柴田敏治，小森 賢，彌生啓介 上野隆司，小谷和也，亀井裕介	56
特集：新型車（アテンザ）		
12. 新型アテンザの紹介	梶山 浩，松岡 完，岩本信也	60
13. 新型アテンザのデザイン	玉谷 聡	66
14. 新型アテンザのパッケージング	三宮正義，大坪智範	73
15. 新型アテンザ ボデーシェル開発	青沼隆浩，坂上大介，亀井丈広 阪井克倫	78
16. “SOUL RED”の開発	中野さくら，久保田寛，篠田雅史	83

特集：新型車（CX-5）

17. CX-5の紹介	田中英明, 前田俊和	88
18. CX-5のデザイン	中山 雅	93
19. CX-5のパッケージング	佐伯和洋, 大坪智範, 廣川正人 芦原友惟奈, 山田大輔	98
20. CX-5 SKYACTIV-BODYストラクチャの開発	木村隆之, 橋本 学, 中内 繁 田中祐充, 近藤量夫, 岡田義浩	103
21. CX-5への発泡成形ドアモジュールの適用	梶山智宏, 高橋知希, 高橋信之	109

特集：新型車（デミオEV）

22. 新型デミオEVの紹介	藤中 充, 梅垣康治, 吉田浩之	114
23. デミオEVの電子式巻線切り替えモータドライブの開発	佐藤隆之, 新富将克, 瀬尾宣英	120
24. デミオEVの高エネルギー密度Liイオンバッテリー開発	松井恒平, 喜田裕万, 栃岡孝宏	125
25. デミオEVの制御開発	福庭一志, 浦本征吾, 吉末知弘 岡本 篤, 島山未来, 三戸秀樹 大佐古昌和, 末富隆雅	130
26. 電気自動車の衝突安全性能開発	神本一朗, 元木正紀, 上野正樹	135
27. 感電安全を考慮したワイヤハーネス設計の紹介	佐藤宏樹, 松川剛志	140

特集：安全

28. マツダの安全性向上の取組み	竹本 崇, 下野博典, 中野隆裕 渡辺通成	145
29. 衝突安全開発におけるCAEの進化	河野勝人, 朝日龍介, 杉本 繁 上野正樹, 小島宏介, 花田 裕	151
30. 低速域衝突被害軽減システムの概要	細田浩司, 後藤多加志, 高橋恭宣 久米孝則, 安松洋仁, 三戸手亮太	156
31. SBS/MRCCの機能 / 性能向上について	尾崎 昂, 西條友馬, 福井聡一郎 清水大輔	161
32. フォワード・センシング・カメラの開発	内海将司, 原田 司, 遠野安広	166
33. Rear Vehicle Monitoring, an Award Winning Safety Function	Christian Schultze, Takashi Takemoto, Takashi Terano	170

論文・解説

34．新世代4WDシステムの紹介	八木 康, 三戸英治, 石田一之 松室義隆, 沢崎朝生	175
35．磁界CAEを用いたアドバンストキーレス開発	吉田俊秀, 浜田 康, 沼元正樹 稲田貴裕	181
36．AM/FM/シリウスラジオ受信用シャークフィンアンテナの開発	重田一生, 谷口龍昭, 柳 陽一 長嶺晋路, 井上英通	186
37．バンパ用高剛性ポリプロピレン材料の開発	朝野千明, 藤 和久, 原 正雄 大西正明	191
38．内装質感バーチャル開発	米澤麻実, 川口幸一, 平山和幸 福井信行, 田中松広	195
39．MBDを用いたパワーウィンドウのシステム開発	徳光文広, 田中松広	201
40．マツダのライフサイクルアセスメント(第3報) -CX-5-	新田茂樹, 森口義久	205
41．走行場を学習し判断する創発型制御システムの研究	古郡 了, 山崎 卓, 黒田康秀 農沢隆秀, 末富隆雅, 氏家良樹 中澤和夫, 松岡由幸	209
42．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, 藤本英史, 山下洋幸 山本博之	214
43．ウェルドボンド用接着剤の市場劣化推定技術の開発	氷室雄也, 定井麻子, 松井恵子 住田弘祐, 山本研一	219
44．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, 岩国秀治, 國府田由紀 住田弘祐, 重津雅彦, 高見明秀	224
45．世界初の廃車バンパから新車バンパへのマテリアルリサイクル	新田茂樹, 伊東加奈子, 森脇健二 古田和広, 田中宣隆, 松田祐之 山崎和重, 小出朋之	229
46．塗布型制振材の高精度塗布工法	高崎政憲, 河瀬英一, 高場宣弘	234
社外への発表論文一覧表		240

Mazda Technical Review No.30

CONTENTS

Foreword

<i>(M.Hitomi)</i>	1
-------------------------	---

Special Edition for SKYACTIV TECHNOLOGY

1. Engine Technology for SKYACTIV-G on CX-5 <i>(H.Hasegawa, Y.Kusabiraki, T.Hiraoka, T.Takahata, Y.Nakahara, J.Sasaki)</i>	3
2. Introduction of New SKYACTIV-D 2.2 Engine <i>(S.Morinaga, S.Takuma, H.Nishimura)</i>	9
3. Electronic Control System for SKYACTIV-D <i>(T.Sugiyama, M.Marumoto, M.Nagoshi, K.Maekawa, T.Hatano)</i>	14
4. Development of SKYACTIV-DRIVE <i>(J.Do, S.Kamada, T.Marusue, N.Iwashita, A.Mitani, Y.Miyahama)</i>	19
5. New Manual Transmission SKYACTIV-MT <i>(M.Ishii, Y.Yoshikura, M.Takada)</i>	24
6. Introduction of CX-5 Powertrain, the Commercialized SKYACTIV Technology <i>(K.Akiyama, T.Takato, K.Sasaki, Y.Yamane, H.Yamagata, T.Kawano)</i>	28
7. Dynamics Performance of SKYACTIV-CHASSIS <i>(S.Murata, M.Iwano, M.Tanaka, A.Nakamura, R.Toda, Y.Hayashi)</i>	32
8. Development of the "i-ELOOP" <i>(M.Takahashi, T.Takahashi, Y.Kitaki, T.Yamashita, H.Kitagawa, S.Hirano)</i>	37
9. Development of the "i-ELOOP" Device <i>(M.Takahashi, H.Fujita, S.Suzuki, F.Nishida)</i>	43
10. Development of Control Technology for i-ELOOP <i>(K.Kotani, H.Mizuochi, A.Kume, M.Yuhara, H.Takaki, N.Nakagami, R.Haruna, K.Tamura)</i>	51
11. Virtual Development Environment of "i-ELOOP" System for All-New ATENZA <i>(T.Shibata, S.Komori, K.Yayoi, T.Ueno, K.Kotani, Y.Kamei)</i>	56

Special Edition for All-New ATENZA

12. Introduction of All-New ATENZA <i>(H.Kajiyama, K.Matsuoka, S.Iwamoto)</i>	60
13. Design of All-New ATENZA <i>(A.Tamatani)</i>	66
14. Package of All-New ATENZA <i>(M.Sannomiya, T.Ohtsubo)</i>	73
15. Development of BODY Structure for All-New ATENZA <i>(T.Aonuma, D.Sakagami, T.Kamei, K.Sakai)</i>	78
16. Development of "SOUL RED" <i>(S.Nakano, H.Kubota, M.Shinoda)</i>	83

Special Edition for CX-5

17. Introduction of CX-5 (<i>H.Tanaka, T.Maeda</i>)	88
18. Design of CX-5 (<i>M.Nakayama</i>)	93
19. Package of CX-5 (<i>K.Saeki, T.Ohtsubo, M.Hirokawa, Y.Ashihara, D.Yamada</i>)	98
20. Development of SKYACTIV-BODY Structure for CX-5 (<i>T.Kimura, M.Hashimoto, S.Nakauchi, M.Tanaka, K.Kondo, Y.Okada</i>)	103
21. Development of CX-5 Door Module Carrier Using Foam Molding Technology (<i>T.Kajiyama, T.Takahashi, N.Takahashi</i>)	109

Special Edition for Demio EV

22. Introduction of Demio EV (<i>M.Fujinaka, K.Umegaki, H.Yoshida</i>)	114
23. Development of Motor-Drive with Electronic Winding Change System for Demio EV (<i>T.Sato, M.Shintomi, N.Seo</i>)	120
24. Development of High energy Density Li-ion Battery for Demio EV (<i>K.Matsui, H.Kita, T.Tochioka</i>)	125
25. Development of Demio EV Control System (<i>H.Fukuba, S.Uramoto, T.Yoshizue, A.Okamoto, M.Hatakeyama, H.Mito, M.Ohsako, T.Suetomi</i>)	130
26. Development of Crash Safety Performance for EV (<i>I.Kamimoto, M.Motoki, M.Ueno</i>)	135
27. Wire Harness Design for Electric Shock Prevention (<i>H.Sato, T.Matsukawa</i>)	140

Special Edition for Safety

28. Mazda's improvement measure in safety (<i>T.Takemoto, H.Shimono, T.Nakano, M.Watanabe</i>)	145
29. Evolution of CAE Technology in Crash Safety Development (<i>K.Kouno, R.Asahi, S.Sugimoto, M.Ueno, K.Kojima, Y.Hanada</i>)	151
30. Outline of the System for Low-Speed Collision Damage Reduction (<i>K.Hosoda, T.Goto, K.Takahashi, T.Kume, H.Yasumatsu, R.Mitote</i>)	156
31. Improvement of SBS/MRCC Function and Performance (Smart Brake Support / Mazda Radar Cruise Control) (<i>T.Osaki, Y.Nishijo, S.Fukui, D.Shimizu</i>)	161
32. Development of Forward Sensing Camera (<i>M.Utsumi, T.Harada, Y.Enno</i>)	166
33. Rear Vehicle Monitoring, an Award Winning Safety Function (<i>C.Schultze, T.Takemoto, T.Terano</i>)	170

Technical Reports

34. Introduction of New-generation 4WD System (<i>Y.Yagi, E.Mito, K.Ishida, Y.Matsumuro, T.Sawazaki</i>)	175
35. Development of Advanced Keyless System Using Magnetic Field CAE (<i>T.Yoshida, Y.Hamada, M.Numoto, T.Inada</i>)	181
36. Development of Shark-fin Antenna for AM/FM/Sirius Radio Reception (<i>K.Shigeta, T.Taniguchi, Y.Yanagi, S.Nagamine, H.Inoue</i>)	186
37. Development of High Stiffness PP for Bumper Fascias (<i>C.Asano, K.To, M.Hara, M.Onishi</i>)	191
38. Virtual Development for Interior Feel of Quality (<i>A.Yonezawa, K.Kawaguchi, K.Hirayama, N.Fukui, M.Tanaka</i>)	195
39. MBD to Power Window System Development (<i>F.Tokumitsu, M.Tanaka</i>)	201
40. Mazda Life Cycle Assessment (3rd report) - CX-5 - (<i>S.Nitta, Y.Moriguchi</i>)	205
41. Study on Emergent Control System to Learn and Judge the Driving State (<i>S.Furugori, T.Yamazaki, Y.Kuroda, T.Nouzawa, T.Suetomi, Y.Ujue, K.Nakazawa, Y.Matsuoka</i>)	209
42. High Efficiency of Internal Combustion Engine by High Compression Ratio and Cooling Loss Reduction (<i>M.Fujimoto, H.Fujimoto, H.Yamashita, H.Yamamoto</i>)	214
43. Development of Technology to Estimate Deterioration of Structural Adhesives in Market (<i>K.Himuro, A.Sadai, K.Matsui, H.Sumida, K.Yamamoto</i>)	219
44. PGM Single-Nano Size Catalyst with High Thermal Stability and Low-Temperature Activity (<i>M.Akamine, H.Iwakuni, Y.Koda, H.Sumida, M.Shigetsu, A.Takami</i>)	224
45. World's First Material Recycling of ELV Bumpers into New Vehicle Bumpers (<i>S.Nitta, K.Ito, K.Moriwaki, K.Furuta, N.Tanaka, Y.Matsuda, K.Yamasaki, T.Koide</i>)	229
46. Highly-accurate Application System of Liquid Sound Deadener (<i>M.Takasaki, E.Kawase, N.Takaba</i>)	234
List of Reports Published in 2011	240

巻頭言

SKYACTIV 技術とモデルベース開発



執行役員

人見 光夫
Mitsuo Hitomi

2012年、SKYACTIV 技術を全て採用した車両が商品化されるという記念すべき年にマツダ技報は第30回の発行となる。今回の特集は2006年よりマツダが総力を挙げて取り組んできたSKYACTIV 技術とそれをフル搭載したCX-5、アテンザ、そしてビルディングブロック戦略の最後に位置する電気自動車についてである。また安全技術についてもマツダ独自の取り組みを特集した。

さて、昨年より世に問い始めたSKYACTIV 技術は、車そのものに真正面から取り組み大きな進化を果たしたものでマツダの今後の生きざまを示したものともいえよう。世の中はハイブリッド、電気自動車というシナリオが常識化しつつある中で内燃機関の改善の余地はまだ十分残っていることを示し、少なくとも業界にはかなりの影響を与えたものと思う。今後、新興国等自動車の台数は飛躍的に伸びて行くがその大半はまだ内燃機関にしかかなりえないという現実を考えれば少なくとも正しい方向への影響を与えることができたものと思っている。

「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」を技術的に支えるビルディングブロック戦略は環境面では、まず、ベースとして動力源の効率を上げ、効率の悪いところは使わないようにし、車を駆動するために必要なエネルギーを極力減らすべく軽量化や抵抗低減を進めている。次に車を駆動しないときはエネルギーを使わないようにし、更に、捨てているエネルギーを回収してエンジンの仕事量を減らすという順番に取り組んでいこうというものである。これらは、車の効率改善の全てをとらえたものであり、順番も大変合理的であると確信している。

技術者は謙虚に他社の優れた技術は真摯に参考にさせていただくという姿勢は常に維持すべきである。ただしそればかりでは自社が存在する意味は低くなってしまう。やはり我々は技術の将来像は自ら描く必要があると思う。SKYACTIV 技術はマネジメントと現場の技術者がともに理想像、究極の姿を描いた上で取り組んだ技術である。構成する技術の個々の部分では他社の優れた技術も大いに参考にしているが進むべき道は自ら選んだものである。

有力なメディアなり企業がある方向に動き始めるとそれが正しく見えてくるのが世の常であろう。アップル社の故スティーブジョブズ氏はアップルが勝つためにマイクロソフトを負かさなければならぬとしたらアップルは負けることになるといったそうであるが、成功者をただ追随するだけでは決して勝者にはなれないという意味である。我々技術者はこの言葉を是非とも心にとどめておきたいと思う。我々はやはり自分で考えユーザになぜこれを作ったのか理由を説明したくなるようなものを提供し続けなければいけないと思う。

そのためには技術の進化の方向性については究極の姿を描くことに尽きるだろう。それに向けてチャレンジすれば他社がどう進むかそれほど気にする必要はない。ただしそれを実現していくには多くのそして大きな技術課題を克服せねばならない。そして商品として我々がお客様に提供する価値はどこにあるのか、数値的に競うところで勝つことを常に求められるがそれだけではエンドレスの競争に引き込まれ疲弊するだけだろうし、そのうち有意差はなくなり優位性を競う意味もなくなる。この解を見つけることこそが企業としての一番重要なことであろう。技術もその実現手段の一つと考えるべきである。それが明確だったのがアップル社であるといえる。

誰かが一生懸命考えるというのは答ではないはずである。企業としてのより正しい解は将来に向かうための技術や我々の提供する価値についてより多くの人が考え続けられるような環境を作ることだと思う。そのためにはやると決めたことはいかに少人数で効率的にやるか、そして効率化できた分だけ人材を将来に向けて回すような仕組み、それをみんなが目指している状態にすることだと思う。

ここでマツダ技報の初刊が出たころと比べて開発のやり方はどう変化したかを見てみる。当時のエンジンは排気量が違ってもバルブタイミングなどは同じであり、燃料供給や点火時期制御も機械的なキャブレター、機械式進角装置等であり、全て実験的に決めていた。CAE といっても有限要素法を用いた構造計算程度であったと記憶している。今では厳しい排ガス規制対応、飛躍的に高まりつつある燃費改善や性能改善要求への対応等で諸元を決めるまでに検討すべき項目も指数関数的に増大しており、試行錯誤の繰り返しでは到底多くの機種開発などは望むべくもない。しかし IT 技術が進化し、燃焼解析や信頼性解析、大規模 NVH 解析等、当時は考えられないことであったが今では開発のなかで当然のごとく使われるツールとなりつつある。我々はこれをモデルベース開発と呼んでおり、SKYACTIV 技術開発もかなりの割合をモデルで開発した。

今後の企業の開発、生産はこのモデルベース開発にかかっていると考えている。やると決めたものはモデル上で開発をしてしまいその後試作して検証だけで終える。新技術さえもモデル上で有効性を検証することで開発サイクルが縮小可能であるし、アイデア検証も大きく効率化できる。このようにして人材や資金を将来に向けることが正しいとする風潮を作ることが企業を永続させるための重要な条件であると考えます。

今後マツダ技報が刊を増すごとに SKYACTIV 技術とモデルベース開発が進化していくものと予想して巻頭言としたい。

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

1

CX-5 SKYACTIV-G のエンジン技術 Engine Technology for SKYACTIV-G on CX-5

長谷川 裕一*1 Hirokazu Hasegawa	草開 良治*2 Yoshiharu Kusabiraki	平岡 哲男*3 Tetsuo Hiraoka
高簾 達也*4 Tatsuya Takahata	中原 康志*5 Yasushi Nakahara	佐々木 潤三*6 Junsou Sasaki

要約

SKYACTIV-G は、走る歓びと環境性能を高次元で両立することを宣言したマツダの技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」と、究極の内燃機関を実現したいという内燃機関エンジニアの果てしない夢に基づいて開発されたガソリンエンジンである。従来エンジンに対して、燃費とトルクを同時に 15% 向上し、クラス世界一の燃費率・全負荷トルクを実現するという挑戦的な目標を掲げた。

その達成に向け、従来にない高圧縮比化やその実現のために 4-2-1 排気系を標準採用するなど、多くの技術課題をブレイクスルーした。⁽¹⁾

Summary

SKYACTIV-G is the gasoline engine which was developed based on the Mazda's long term technology development strategy (Sustainable Zoom-Zoom declaration: SKYACTIV-G aims at combining fun-to-drive and environment performance at a high level) and the engineers' everlasting dreams of realizing the ultimate internal-combustion engine. A challenging goal was set to realize the class top and world's best fuel consumption and full load torque by improving both the fuel efficiency and torque by 15% from those of the current engine.

Toward the achievement of the goal, breakthroughs were made on many technological issues, and the highest compression ratio ever as well as the 4-2-1 exhaust system is adopted as standards.

1. はじめに

SKYACTIV-G は既に 1.3L エンジンを新型デミオ、2.0L エンジンを新型アクセラに搭載し、市場導入されている。それぞれ「燃費性能」と「走行性能」のバランスを重視して、サステイナブル“Zoom-Zoom”に基づいた技術の進化を、商品を通じて着実に体現してきた。

CX-5 に搭載する SKYACTIV-G 2.0 は、プラットフォーム（車台）の刷新とあわせ、新たに専用の 4-2-1 排気系を開発し、採用した。これによって、走る喜びと、優れた環境性能を更に高い次元で両立させ、マツダが目指す内燃機関の進化を示した。

2. エンジン開発コンセプト

Fig.1 は、SKYACTIV-G で目指す燃費、出力目標とそのポジショニングである。ハッチングエリアは、既存エンジンの存在するバンドである。燃費、全開出力性能、ともにクラス世界一レベルを目指し、従来エンジンから「燃費と出力性能をそれぞれ同時に 15% 向上する」ことを目標として掲げた⁽¹⁾。

以下、SKYACTIV-G のキー技術である高圧縮比化と出力開発を中心に、CX-5 に新たに採用した主要な性能改善、および解決すべき課題に対する取り組みを論じる。

*1~5 エンジン設計部
Engine Engineering Dept.

*6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

3. 高圧縮比化への対応

3.1 高圧縮比化の狙いと課題

燃費改善のため、まず、熱効率改善に着目した。理論的に圧縮比を上げるとエンジンの熱効率は良くなる。これは膨張比が上がることで、燃焼ガスがピストンを押す期間がより長くなり、燃焼エネルギーがより多く運動エネルギーに変換されるためである。このため、圧縮比 14 (日本/北米仕様は 13) を目標とした。これまで高圧縮比化を拒んでいた障壁は、

- 1) ノッキングによるトルク低下
 - 2) プリイグニッション発生によるエンジン破損
- など、異常燃焼に関わる課題であった。

(プリイグニッション回避技術については、デミオの SKYACTIV-G 1.3 から織り込み、マツダ技報 No.29 にて紹介しているため割愛する。)

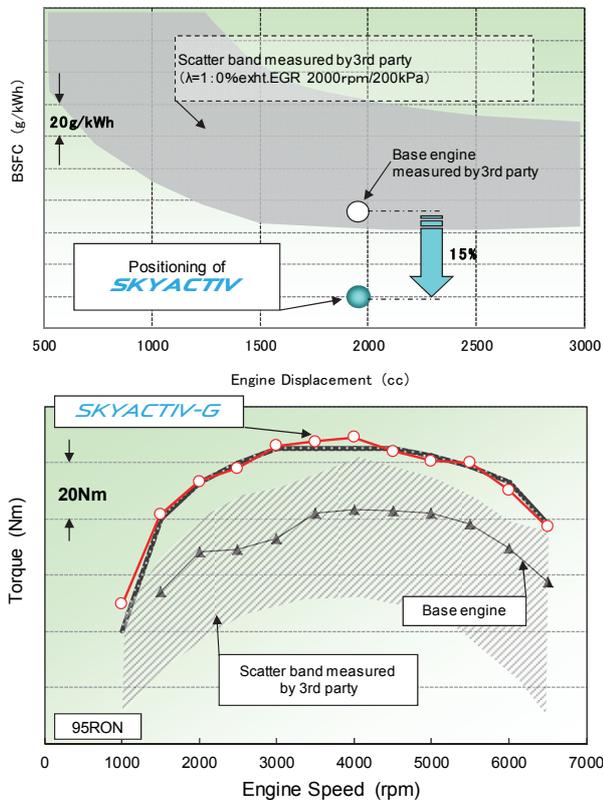


Fig.1 Positioning of SKYACTIV-G⁽¹⁾

3.2 ノッキング対策のアプローチ

(1) SKYACTIV-G 1.3

デミオに搭載した SKYACTIV-G 1.3 は、特に燃費性能を重視し、圧縮比 14 のエンジンと低回転高負荷の使用頻度の高い CVT と組み合わせている。このため、高負荷域のノッキング発生の回避を目的に、Cooled EGR システムを採用した。これによって、走り(出力)を維持し、高圧縮比エンジン本来の熱効率を発揮させることで、ハイブリッド車並みの燃費を実現した⁽³⁾。

(2) SKYACTIV-G 2.0 (CX-5)

これに対し、SKYACTIV-G の最終目標は前述の通り、「燃費と出力性能をそれぞれ同時に 15%向上する」ことである。燃費性能のため、デミオの SKYACTIV-G 1.3 同様、圧縮比を 14 とした。しかし、低速トルク含め、出力性能も同時に向上させるためには、低回転から高回転までの全高負荷域にわたり、ノッキングを抑制する必要がある。更に、組み合わせるトランスミッションなどを含めた市場展開性、機種展開性を考慮して、デミオとは違う手段で高圧縮比化と出力向上の両立を達成するというアプローチが必要であった。ノッキングの抑制には、圧縮比上昇に伴う筒内温度上昇を抑制することが有効と考え、筒内温度の低減を図ることとした⁽⁴⁾。

4. 排気系改善

Fig.2 は、2,000rpm のトルク目標に対するロードマップを示している。圧縮比を 14 とし、直噴効果を含む燃焼改善効果 (7%) と排気系改善効果 (8%) により、ベース比 15% のトルク向上を達成する計画とした。

そのためには、排気系の機能強化と、車両搭載のための大幅なブレークスルーが必要であった。本稿では新設計した排気系を中心に説明する。

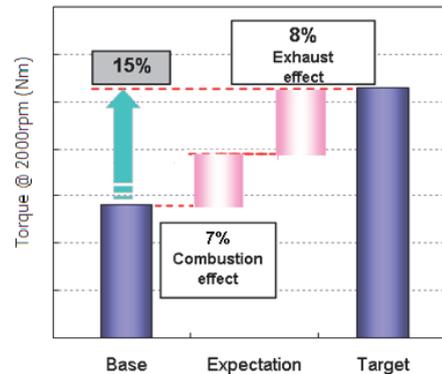


Fig.2 Roadmap to Achieve the Torque Target⁽²⁾

4.1 排気系開発コンセプト

排気系の基本機能はエンジンの燃焼ガスを燃焼室内から「静かに(減音)」、「きれいに(浄化)」、「スムーズに」排出することである。SKYACTIV-G では目標を達成するため、特に「スムーズに」排出する機能を改善、強化した。具体的には、

- ・ 4-2-1 排気系を用いた気筒干渉抑制と脈動掃気の活用
- ・ 排気抵抗の低減 (従来比 -20%以上)

に取り組んだ。残留ガスを低減し、筒内温度を低減することでノッキングの発生を抑制する。それらに排気脈動を活用して、更に多くの残留排気ガスを引き出すことで、エンジンの充填効率の向上を目指した。

(1) 気筒干渉抑制

筒内温度低減のため、他気筒からの排気圧力波の到達により発生する気筒干渉を抑制し、残留ガスの排出不良を回避する

ことを図った。近年、排ガス浄化の観点から主流である 4-1 集合タイプの排気マニホールドは各ポート長さが短い。従って、次工程気筒までのバルブ間距離が短いため、例えば、Fig.3 において、3 番気筒の排気行程で排出された排気圧力波は、1 番気筒の排気バルブが閉じる前に到達し、1 番気筒の残留ガスの排出を阻害する。これが、いわゆる気筒干渉である。これを抑制するためには、先の例で述べた 3 番気筒の排気圧力波が、1 番気筒の排気バルブに到達した時には、排気バルブは既に閉じている状態にまで、バルブ間距離を十分長くとることが必要である。これにより、筒内残留ガスを低減することで筒内温度を大きく下げ、ノッキングの発生を大幅に低減できた⁽²⁾。

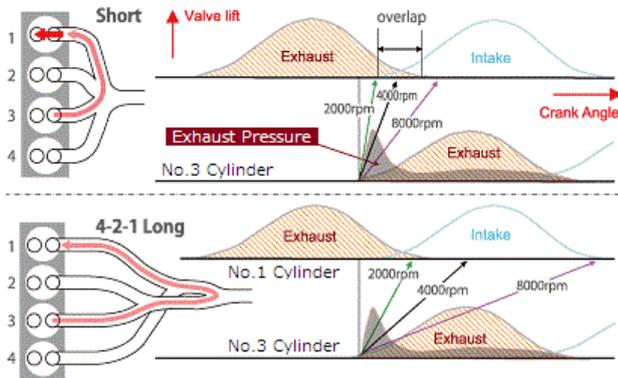


Fig.3 Advantages of 4-2-1 Exhaust System⁽²⁾

(2) 排気脈動を活用した掃気改善

更に従来エンジン比、15%のトルク向上のためには、気筒干渉の抑制に加え、より積極的に筒内の残留ガスを減らし、新気の充填効率を上げることが必要である。

排気の圧力脈動は、ブローダウン後、マニホールド集合部の開放端で反転波となり、奇数回の往復時にエキゾーストバルブ近傍に負圧を生じる。この負圧を活用し、残留ガスを低減（掃気）することで、更なる充填効率向上が可能となる。

4.2 4-2-1 排気系の諸元決定

上記 2 つの要件から、排気マニホールドは 4-2-1 のロングポートタイプを前提とした。目標とするトルクの特性に合わせ、負圧波を活用する回転数（同調回転数）を決定し、マニホールド集合部までの長さなどの諸元を決定した。集合部などの形状検討から評価までのサイクルを短縮するため、CAE および実機でのスピーカによる音響加振テストを行い、性能検証した (Fig.4)。

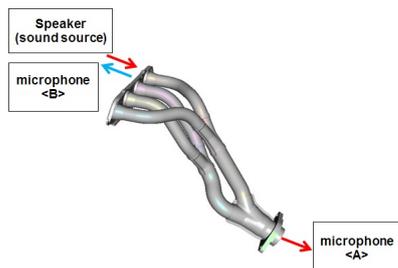


Fig.4 Image of Acoustic Excitation Test

4.3 サイレンサの最適配置

マニホールドでの排気脈動を活用する場合、排気圧力波の偶数回の往復時には、エキゾーストバルブ近傍は正圧となり、掃気効果が得られない。そこで、下流にある 2 つのサイレンサ（プリ/メイン）での反転負圧波も活用した (Fig.5)。狙いの同調回転数をもとに搭載位置とプリサイレンサ仕様を適正化し、マニホールドの正圧反転波の影響を打ち消すことで、更に広範囲でのトルク改善効果を得た。特にプリサイレンサの諸元（径、長さ、吸音材等）によって、メインサイレンサへの脈動波分配が変化するため、CAE を用いて最適化を行った。

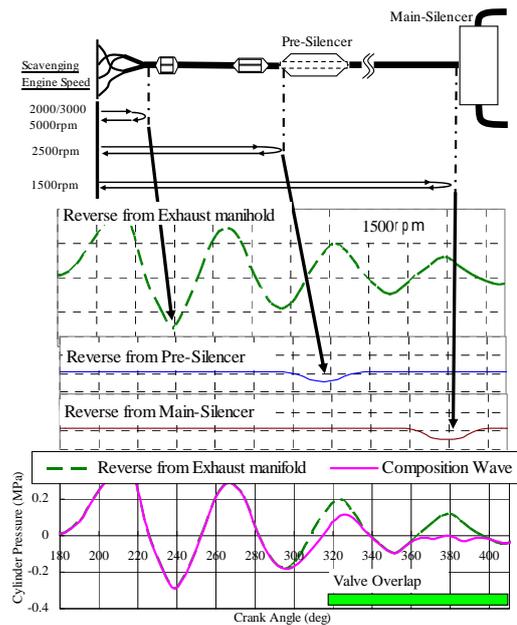


Fig.5 Optimization of Exhaust Pulsation by Silencers

4.4 低抵抗排気系

上記、4-2-1 排気の性能を更に有効に発揮させるためには、排気脈動波のスムーズな伝達が必要である。マニホールドから下流の排気系の抵抗を従来比、約 20%低減した。キャタリストには低抵抗担体を新規採用し、排気系経路は、曲りの少ないストレート構造とした。サイレンサは大容量の拡張構造とし、デュアルテールパイプとの組み合わせにより、排気抵抗低減と消音機能を両立させた。加えて、低抵抗吸気系、吸気レゾネータチューニングやエンジン本体の改善によって従来エンジン比、約 15%のトルク向上を達成した。

また、メインサイレンサは車両後方に配置し、走行中の車両下面の風流れを形成する空力パーツとしての機能を付加し、車両の空気抵抗低減にも貢献している。

5. 車両搭載のためのブレークスルー

上記の通り、4-2-1 排気系は SKYACTIV-G のコンセプト実現のために不可欠なキー技術である。しかし、実際に量産車へ搭載して機能を発揮するためには、背反する排ガス浄化性能、商品性（振動、こもり音）、車両搭載スペースなどの課題を構造や燃焼、制御の工夫によってブレークスルーする必要があった。

5.1 車両搭載性課題

排気系を量産車へ搭載する場合、マニホールドやサイレンサ以外に排ガス浄化装置（以下、キャタリスト）や振動吸収構造（以下、フレキシブルチューブ）が必要である。両者とも機能上、できるだけエンジンに近づけて配置する必要がある。

4-2-1 排気系を従来の発想で搭載した場合、キャタリストが前席の足元付近に配置されるため、足元スペースが狭くなる。また、重量物であるキャタリストが、エンジンから離れた配置となるため、不快な振動やこもり音の発生要因にもなる。

“ループ型” 排気系の開発

4-2-1 排気系の搭載性課題を解決し、性能を発揮するため、従来の発想から転換し、マニホールド、キャタリスト、フレキシブルチューブがエンジンルーム内にコンパクトに収まるよう、“ループ型”とした（Fig.6）。

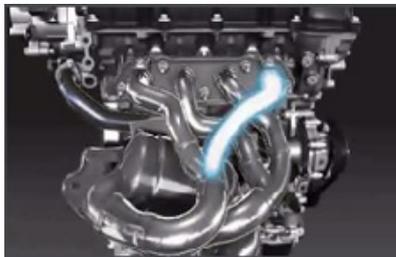


Fig.6 “Loop type” 4-2-1 Exhaust System

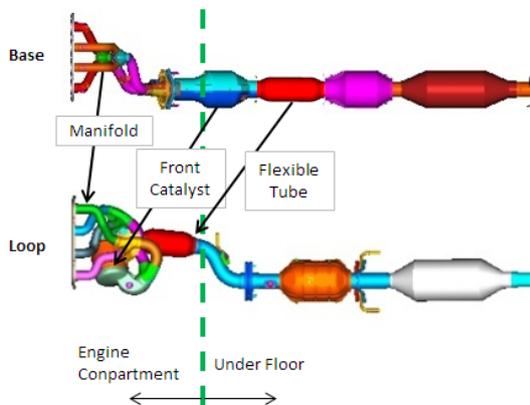


Fig.7 Packaging Breakthrough by Loop Type Exhaust System

これによって、主要部品をエンジンルーム内に納めることで搭載性の課題を解決できた。重量物であるキャタリストはエンジンブロックに直接固定できるまで近づけることが可能となった。同時にフレキシブルチューブの位置もエンジン近くに配置することが可能となり、下流排気経路のストレート化と合わせ、振動やこもり音の発生を抑えた排気システムとすることができた（Fig.7）。

しかし、マニホールドのループ化に当たっては、排気脈動への影響が懸念される。そこでパイプ曲げ角度/曲げ半径、集合部形状、集合角度などの要素に着目した。簡易モデルを樹脂で作成し、前述の音響加振テストによって、それぞれの要件を明確化し、設計時に守るべき基本形状要件を決定した。

5.2 「モノ造り革新」による製造革新

従来、サプライヤの製造ラインでは機種ごとに専用の製造ラインが設けられていた。そのため、マツダの生産変動により、サプライヤの製造ラインの稼働率が変動してしまう。そこでマツダが取り組む「モノ造り革新」をサプライヤの製造ライン構想に展開し、機種ごとの専用から機種を超えたフレキシブルな混流製造ラインの構築を目指した。そのために、生産/設計/サプライヤの技術者が協働で製造ラインの「標準構造化」を検討した。その結果、新型アクセラの4-1 排気系およびCX-5の4-2-1 排気系の部品（Fig.8）は上記の標準構造の製造ラインで混流生産されている。

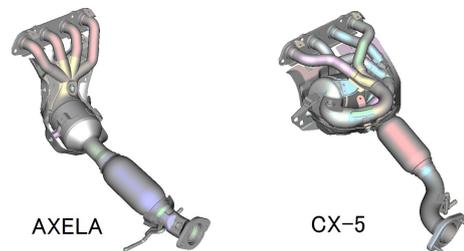


Fig.8 Exhaust Manifold of New AXELA and CX-5

標準構造のなかでも“ループ型” 4-2-1 排気系は、複雑かつ部品点数の多い構造となっている。標準構造ラインへ適合するために、開発初期から「構造最適化」による工程削減および「同時セット同時加工」化による工程集約を主眼に置いて活動してきた。例えば、マニホールドの溶接においては、1工程内で溶接トーチがすべての溶接箇所へアクセスできるよう、溶接トーチの軌跡を考慮し、パイプの経路や形状を検討した（Fig.9）。更に構造および形状の最適化により、複雑な形状でありながら、従来の部品と比べ、工程数を30%低減し、将来の機種展開にも対応し得るフレキシブルかつ、高効率な製造ラインを構築することができた。

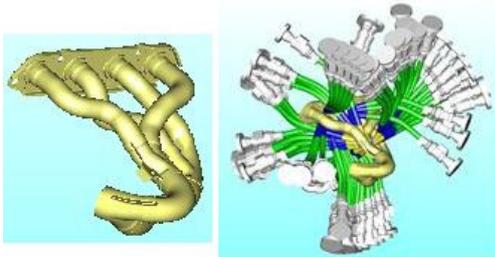


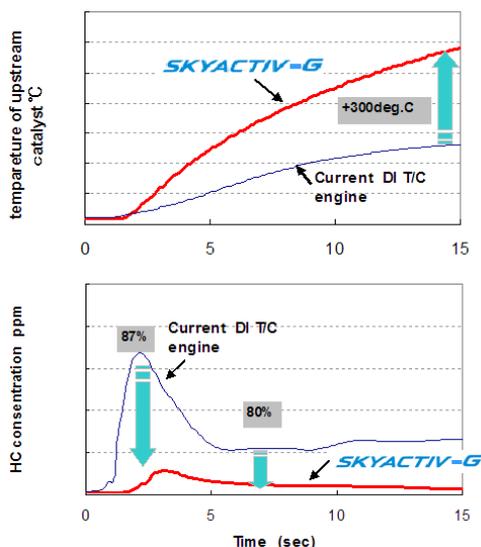
Fig.9 Investigation of Welding Torch Accessibility

5.3 排出ガス浄化性能課題（始動時エミッションの改善）

4-2-1 排気系は、4-1 排気系に対して排気管が長いこと、特に冷間始動時の排気ガス温度が低下する。そのため、触媒浄化率低下に起因する排出ガス規制への適合性能低下あるいは、排ガス浄化触媒に使用する貴金属量の増大が課題であった。

この課題を解決するにあたっては、点火プラグ周囲に徹底した強い成層混合気を作ることで、始動直後の大幅な点火時期の遅延により、キャタリスト前の排ガス温度を高め、触媒の早期暖機を図ることとした。最適化したピストンのキャビティ形状と噴霧の組み合わせによって、プラグ周囲に空燃比 8 程度の濃い混合気を形成することができた。その結果、燃焼安定性を悪化させることなく、従来エンジン比 10degCA 以上の点火時期遅延が可能となった。また、高燃圧（4MPa）始動と組み合わせることでクランキング中の燃料の微粒化促進、壁面付着低減効果を得て、Fig.10 に示すように、始動直後に、300℃以上の排気ガス温度上昇と、80%以上のHC低減を実現することができた⁽¹⁾。

これらに加え、熱容量の小さい超薄壁担体や低温活性触媒の採用により、従来機種よりも貴金属量を低減した上で、EU 最新規制の Euro6 や最も厳しい規制である北米の PZEV などの排出ガス規制に適合させることができた。

Fig.10 Feed Gas HC and Exhaust Gas Temperature at Cold Start⁽¹⁾

6. 燃費改善ベース技術

SKYACTIV-G のコモンアーキテクチャとして、下記の燃費改善技術を織り込んでおり、上記の取り組みとの組み合わせにより、目標とする燃費 15%向上を実現した。

6.1 機械抵抗

摺動・回転部位の接触面積・接触荷重・摩擦係数の最小化、ポンプ類の流動仕事の最小化という観点で、抵抗低減に取り組んだ。採用した主要技術は、ローラフォロー型の動弁系機構、細軸クランクシャフト、新型ウォーターポンプ、可変油圧ポンプ、などである。また、単一部品の抵抗低減の視点のみならず、システム視点での抵抗低減に取り組んだ。たとえば、ボアの真円度を高め、ピストンの姿勢安定化を図り低張力ピストンリングを採用することで機械抵抗低減とオイル消費率の大幅改善を図った。チェーン張力低減は、ガイドレバーの剛性の最適化を図り、チェーンの挙動を安定化させたことで採用可能となった。その他、クランクシャフト主軸受ボルト締付制御によるメタルクリアランス安定化など、トータルで 30%の機械抵抗を改善した⁽¹⁾。

6.2 ポンプ損失

ポンプ損失改善手段としては、対費用効果と高圧縮比化エンジンにおける実有効圧縮比の制御性確保という観点から、吸気弁遅閉じ化とワイドオーバーラップ化の実現で内部EGR増大による改善を図り、外部EGRなどの追加デバイスは採用しなかった。ワイドオーバーラップ化により、10%の外部EGRを導入したベースエンジンを上回る、16%の内部EGR導入を可能にし、燃焼安定性を悪化させることなく、20%のポンプ損失改善を図った⁽¹⁾。

7. まとめ

理想の内燃機関実現をビジョンとして掲げ、徹底したメカニズム解明に基づいてエンジンの基本性能を磨き、技術課題に正面から取り組んできた。燃費と出力を高次元に両立、進化させた SKYACTIV-G を車両開発部門他、関連部門との部門を超えた One Mazda での協働によって CX-5 に搭載し、世界のお客様に新しい価値を提供することができた。

参考文献

- (1) 富澤和廣ほか：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) 石野勲雄ほか：新世代技術「SKYACTIVパワートレイン」，マツダ技報，No.29，pp.29-35 (2011)
- (3) 富澤和廣ほか：新型デミオのエンジン技術，マツダ技報，No.29，pp.8-13 (2011)

■著者■



長谷川 裕一



草開 良治



平岡 哲男



高旗 達也



中原 康志



佐々木 潤三

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

2

SKYACTIV-D エンジンの紹介

Introduction of SKYACTIV-D Engine

森永 真一*1
Shinichi Morinaga詫間 修治*2
Shuji Takuma西村 博幸*3
Hiroyuki Nishimura

要約

今日のディーゼルエンジンに求められるものは燃費性能はもちろんのこと、優れた環境性能、走り性能、音・振動性能を低コストで具現化することであり、その期待は更に高まる一方である。今回新開発した SKYACTIV-D は、内燃機関の効率を徹底的に追求し相反する関係にあった燃費とエミッションをブレークスルー技術で飛躍的に向上させた。このエンジンは、卓越した走行性能を実現した上でより厳しい排出ガス規制に NOx 後処理なしで適合し、前モデルより燃費を約 20% 向上した。本稿では SKYACTIV-D 2.2L における開発の狙いと導入技術コンセプトについて紹介する。

Summary

For today's diesel engines, not only high fuel efficiency but also excellent environmental protection performance, driving dynamics, noise and vibration performance are required, and all of them must be achieved at low cost. Such expectation seems to never cease. The newly developed SKYACTIV-D significantly improves the inversely related fuel efficiency and emission performance with breakthrough technologies developed through thorough pursuit of high efficiency of internal combustion engine. This engine, which achieves superior driving dynamics, complies with a stricter emissions regulation without a nitrogen oxide (NOx) aftertreatment system while increasing the fuel efficiency by 20 percent over the previous model. This paper describes the development target of the SKYACTIV-D 2.2L and applied technology concepts.

1. はじめに

近年の世界的な燃費志向の高まりにより、ガソリンエンジン（以下、GE）の燃費改善、HEV の低コスト化が進んでおり、これまで燃費ポテンシャルの高かったディーゼルエンジン（以下、DE）も一層の燃費改善とコスト低減が望まれている。また近年強化されつつあるエミッション規制に適合する優れた環境保護性能を有することも重要である。

以上の背景から、燃焼の理想状態を追求することで走る歓びと優れた環境性能を高い次元で両立させたエンジンユニットである新世代型 2.2L DE（以下、SKYACTIV-D）を開発した。

2. 技術コンセプト

内燃機関の効率改善とは、排気損失、冷却損失、ポンプ損失、機械抵抗損失を低減することである。各種損失を低減するために制御可能な因子としては、Fig.1 に示す圧縮比、比熱比、燃焼期間、燃焼時期、壁面熱伝達、吸排気行程圧力差、機械抵抗にまとめられ、内燃機関の効率改善とはそれらを理想状態に近づけて行くことであると考えている。SKYACTIV-D は、これら制御因子のうち、理想状態と乖離している燃費最適燃焼タイミングと機械抵抗の改善を行った。

従来の高圧縮比 DE（以下、既存 DE）はピストン上死点付近で燃焼（以下、TDC 燃焼）させて高膨張仕事を得

*1, 3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*2 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

たいが、上死点付近で燃やそうとすると混合気の均質化のための時間が稼げないうちに燃焼するため NO_x と煤の同時低減には限界がある。そのため、排気ガスのクリーン化の要望に応えるためにはリタード燃焼を強いられて Fig.2 のように有効膨張比が低下し、効率低下を招いていた。また、高圧縮比かつ出力増大を狙うと、筒内最高燃焼圧力（以下、P_{max}）が高くなり、耐圧性のために部品強度を高くする必要があり、一般的な GE に比べて機械抵抗が高くなる傾向であった。この DE が抱える制約を解決するために SKYACTIV-D が採用したイネーブラは世界一の低圧縮比化であり、以下の技術コンセプトをサポートする。

-TDC で燃やしても煤と NO_x を出さないよう、燃料と空気のみキシング時間を確保すること

-同一出力において低剛性構造を実現し、軽量化と機械抵抗低減するために P_{max} の低減を図ること

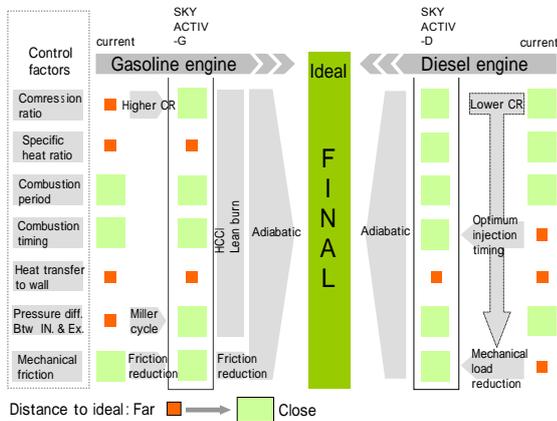


Fig.1 Vision for Evolution of Internal Combustion Engine

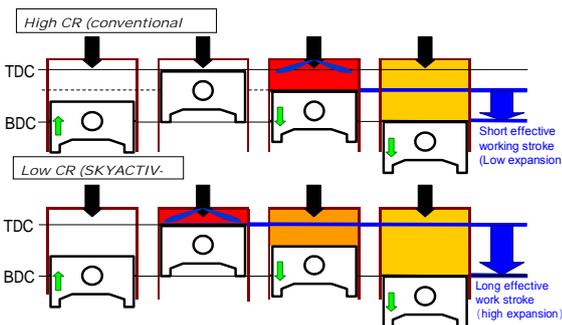


Fig.2 Increase of High Expansion Ratio With Low Compression Ratio

3. エンジン諸元と基本エンジンシステム

Table 1 に新エンジンの主要な特徴を前モデルと比較して示す。また、Fig.3 にエンジン制御システム図を示す。先に述べた技術コンセプト達成のために、圧縮比は 16.3 から 14.0 へ低下、EGR を多量に入れても必要な酸素量を確保できるような高効率過給のために、過給機を Variable Geometry Turbocharger から 2 つのターボチャージャーで低

回転から高回転まで突出した過給性能を実現する 2Stage Turbocharger（以下、2T/C）へ変更した⁽¹⁾。ノズルは前モデルと同様に 10 孔のミニサックノズルで高回転でも燃焼速度が緩慢にならないように 23% 噴孔流量を増加し、インジェクタは噴射制御性を改善するためにピエゾアクチュエータを採用した。また燃焼室形状は、キャビティー内での燃料と空気のみキシングの促進と、スキッシュエリアの空気利用の促進を目的とした新開発のエッグシェイプ型とした⁽²⁾。排気カムには吸気行程で排気バルブを微小リフトさせ、排気ガスを再度シリンダ内に導入できる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）を新規に採用した。後処理システムは前モデル同様に酸化触媒と DPF の組み合わせで、NO_x 後処理システムを採用せずに国内ポスト新長期&Euro6 規制に適合している。

Table 1 Main Dimension and Specification

Engine	MZR-CD (Previous Model)	SKYACTIV-D (New Model)
Displacement (cm ³)	2184	2188
Bore X Stroke (mm)	φ86 × 94	φ86 × 94.2
Mounting (Tilt) Angle (degree)	0	10
Compression Ratio	16.3	14.0
Max. Firing Pressure (MPa)	17.5	13.5
Valve System		
DOHC 4valve Chain-Driven		
DOHC 4valve Chain-Driven w/ IDEVA		
Valve Timing (deg.)	In. Open (BTDC)	6
	In. Close (ABDC)	30
Ex. Open (BBDC)	36	40
	Ex. Close (ATDC)	9
Crankshaft Main / Pin Journal Dia. (mm)		
φ60/φ51		
φ52/φ52		
Fuel Injection System		
Common Rail System G3 Solenoid		
Common Rail System G3 Piezo		
Maximum Injection Pressure		
200		
Nozzle		
10hole 900cc/min. Mini-Sac		
10hole 1112cc/min. Mini-Sac		
Combustion Bowl Shape		
Reentrant Type		
Egg-Shaped Type (New Concept of Reentrant Type)		
Glow		
Ceramic Glow		
Turbocharger		
Variable Geometry Turbocharger		
2Stage Turbocharger		
EGR Route		
High Pressure w/Cooling		
Aftertreatment System		
DOC + DPF /Under foot		
DOC + DPF /w Engine		
Maximum Torque	400Nm / 2000rpm	420Nm / 2000rpm
Maximum Power	136kW / 3500rpm	129kW / 4500rpm
Emission Standard	EURO5	EURO6 JPN PNLT

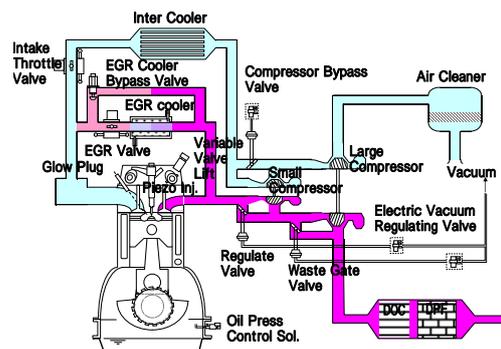


Fig.3 Engine Control System Diagram

4. 軽量化・機械抵抗低減

4.1 ピストン、クランク系

Fig.4 にDE, GEの機械抵抗総量の比較, Fig.5 にDEの各部品の抵抗比率を示す。前モデルのDEはGEに比べ機械抵抗総量が約 1.5 倍高い。その中でもピストン、クランク系の機械抵抗は全抵抗の約半分を占めている。⁽³⁾

既存 DE は GE に比べ Pmax が高く、ピストン、クランク系に加わる荷重が大きい。そのため荷重に応じた剛性に設定することから重量が重く、耐焼付き性から摺動部や軸受部の面積を広く設定するため、機械抵抗が大きい。

それに対して SKYACTIV-D では低圧縮比の採用による Pmax 低減とクランク軸オフセットを採用することでピストン、クランク系に加わる荷重を低減した。その結果下記のように軽量化や機械抵抗低減を行うことができた。

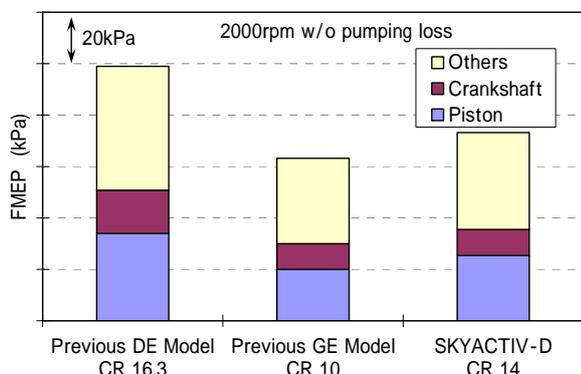


Fig.4 Comparison of Mechanical Resistance

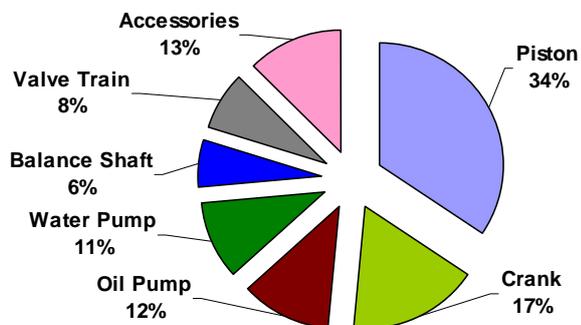


Fig.5 Breakdown of Diesel Engine Mechanical Resistance

ピストンは圧縮高さや各部肉厚の最適化を行うことで前モデル比約 26%重量低減した。またスカート剛性や面積を低減することで前モデル比約 28%機械抵抗を低減した。

ピストンリングはシリンダブロックのアルミオープンデッキ化によりボア真円度が向上した効果とオイルリング摺動面に採用したハーフバレル形状による油膜のせん断力低減により、オイル消費性能を前モデル比約 20%向上しながらも機械抵抗を 25%低減した。

クランクシャフトは荷重低減と剛性バランスの最適化によって、クランク軸の細軸化を行った。それにより、機械抵抗を前モデル比約 40%低減した。

4.2 オイルポンプ、ウォーターポンプ、補器駆動系

オイルポンプは、IDEVA, 2/T/C 等、全モデルと比較して油圧を要するデバイスが増加したが、オイル通路の最適化等により最小限のポンプ容量増加に抑えた。また油圧フィードバックシステムと電子制御 2 段油圧切り換え機構を採用し、実用域と高負荷域の油圧切り替えにより、必要最低限まで油圧を抑えることで機械抵抗を前モデル比約 22%低減した。

ウォーターポンプはインペラをシュラウド付き形状にすることで効率を改善した。また冷却を要するデバイスの水経路の最適化するとともにシリンダヘッド内冷却水方向をシリンダごとに排気から吸気側に水が横に流れるように設計し、高流量時の流量抵抗を下げた。

補器駆動系は油圧式オートテンショナや 1WayClutch の採用によりベルトのスリップや弦振動音を抑えつつベルト幅、張力を低減させることで、ウォーターポンプ含む補器駆動系の機械抵抗を前モデル比約 40%低減した。

以上による軽量化およびシリンダブロックのアルミ化や部品点数の削減により、エンジン全体の重量を前モデル比約 20%低減した。また全体の機械抵抗は約 26%低減することができ、従来 GE 並みの機械抵抗レベルを達成した。

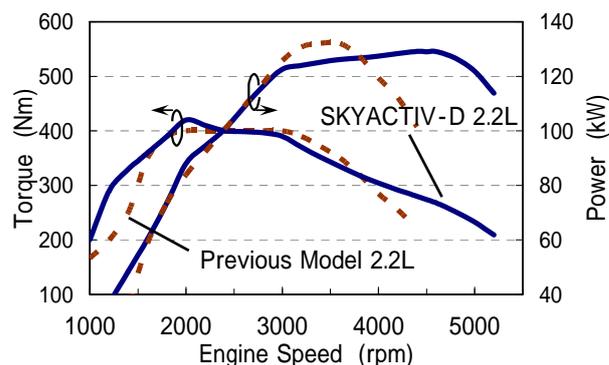


Fig.6 Engine Performance

5. パフォーマンス

5.1 出力性能

従来モデルのエンジンは出力を増加させるために Pmax を増大する手法を利用していたが、SKYACTIV-D は低圧縮比にして同じ吸気量を導入しても圧縮上死点での圧力を抑えることができる。そのため従来モデルより低い Pmax で Fig.6 に示すように最高出力 129kW を 4,500rpm で出し、前述のピストン、クランクの往復回転系の軽量化のおかげで使用可能な回転領域を 5,200rpm まで拡大して、伸びやかな加速ができるようにした。最大トルクは 420Nm を 2,000rpm で出し、1,500rpm 以下のトルクを現行エンジンより 20-45%改善した。その結果、Fig.7 に示すように車両走行において低速からの加速性能を前モデルより大幅に改善することができた。

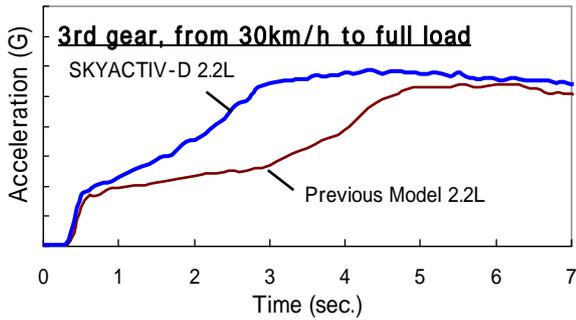


Fig.7 Acceleration Performance

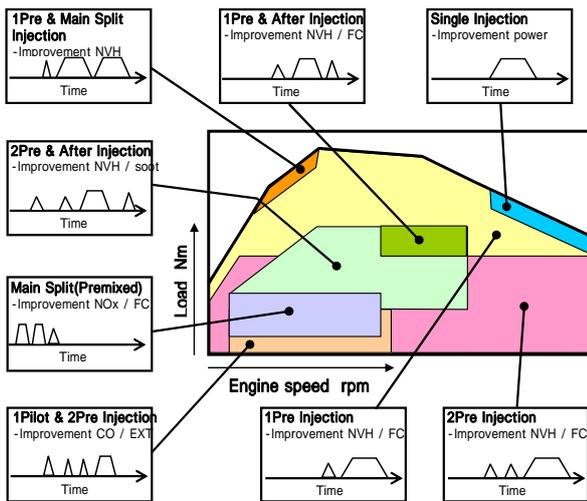


Fig.8 Example of Multi-Pilot Injection Pattern

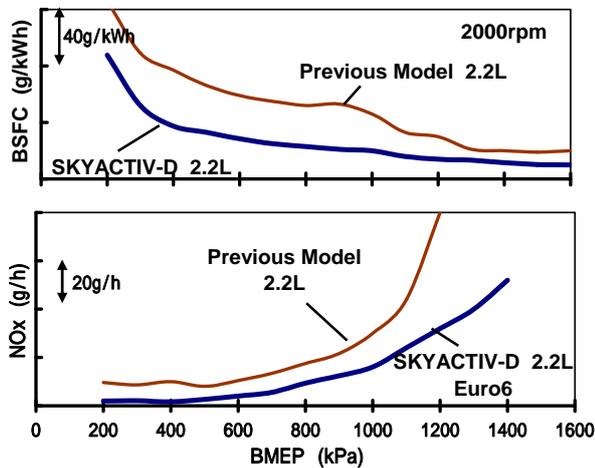


Fig.9 Fuel Efficiency and NOx Discharge Characteristic

5.2 低排気エミッションと燃費性能

SKYACTIV-Dでは低圧縮比と高過給・高EGRによる燃焼温度低下と空気と燃料のミキシング促進により、煤とNOxの発生を同時に低減できた。また、燃焼開始時期を進角させたことで膨張比が大きくとれ、燃焼期間も前モデルより短縮できた。更に従来モデルより実施してきた多段噴射⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾の更なる最適化を実施した (Fig.8)。これらの効果により、Fig.9 に示すように前述のPF低減と合わせて大

幅な燃費改善と同時にNOx低減を実現した。

6. 技術コンセプト実現の課題と対応技術

6.1 未燃成分低減技術

低圧縮比化および多量 EGR の導入は、エンジンから排出される NOx を低減させる一方で未燃成分である HC/CO は増加する。更に燃費を改善すると排気ガス温度が低下するため、触媒が活性するまでの期間が長期化する。これら問題を解決するため、後処理システムを前モデルのアンダーフット位置からクローズドカップルド位置へ移動させるとともに、エンジンスタート時に D-AWS (Diesel Accelerated Warm-up System) を採用して、触媒の早期活性を可能にする技術を開発した。D-AWS 時は、排気ガス温度を上昇させるために吸気を絞り、最大で 8 段のマルチ噴射を行っている。D-AWS 中の NOx は IDEVA で内部 EGR を利用して抑制している。D-AWS 採用でテールパイプ HC/CO が 20~40%低減でき、触媒の貴金属量を前モデルより低減することができた。

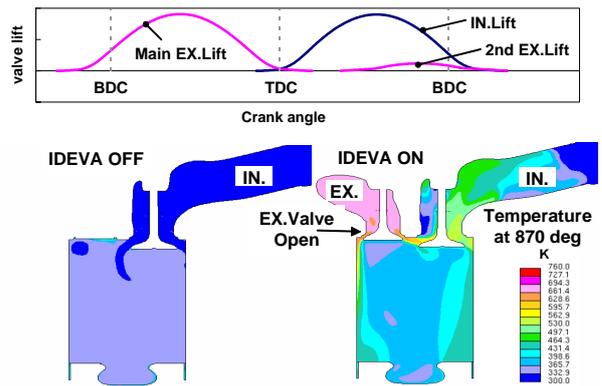


Fig.10 Rise of Temperature in Cylinder by IDEVA

6.2 極冷間の耐始動半失火性能

DE の圧縮比は年々低下傾向にあるが、低くなりすぎると高地極冷間のような環境下では必要十分な圧力・温度が確保できない。そのため、耐失火性能を確保する技術が必要となる。SKYACTIV-D では以下の技術により着火性能を向上した。

①多噴孔ノズルおよびピエゾインジェクタを活用した近接マルチパイロット噴射による可燃混合気増加、②2T/C を活用した過給能力の向上、③セラミックグロー、④IDEVA による残留ガス量の増加による筒内温度上昇 (Fig.10)。

これら着火安定技術により、低セタン燃料を使用して、極低外気かつ高地のような厳しい環境でも始動でき、安定した燃焼ができる。

6.3 後処理システムのコンパクト・低コスト化

(1) DPF 容量・貴金属量選定

近年ディーゼル車の後処理システムは、排出ガス規制強化に伴い大型・高コスト化しつつある。この後処理システムをコンパクトに仕上げかつ低コスト化を図ることが重要課題の一つに揚がっている。SKYACTIV-D では、理想に近づく燃焼の実現により NO_x 触媒を不要にするだけでなく、世界最小レベルの DPF 容量とし、また貴金属の担持量についても前モデル比約 70%削減した。とくに DPF 容量低減にあたっては、容量を低減すると堆積できる煤の許容量が減少し再生頻度が増えることから、エンジンオイルへの燃料希釈量が過多になり場合によっては品質の不良につながってしまう。SKYACTIV-D では、前モデルに対して煤を高密度で収集し再生頻度を抑制する、また燃料希釈しにくい理想の再生燃焼を実現することで課題解決を図った。

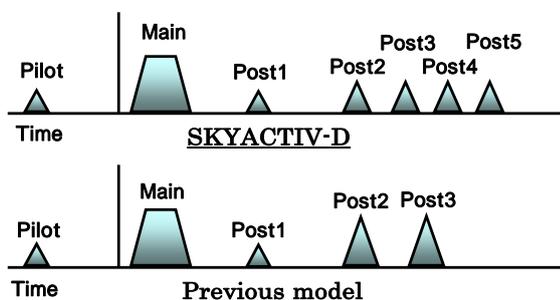


Fig.11 Multi-Pilot Injection Pattern of DPF Regeneration

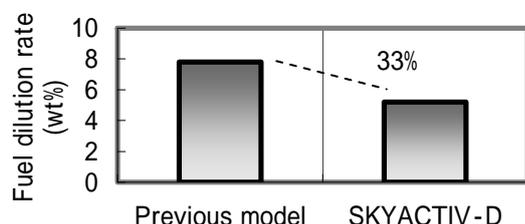


Fig.12 Fuel Dilution Rate Comparison

(2) DPF 再生時燃料噴射制御改良

DPF へ堆積した煤は、排気ガス温度を 600℃程度に昇温させ煤を再燃焼させる。この排気ガス温度昇温のために、ポスト噴射を実施するがポスト噴射は噴射時期が ATDC30deg 以降とピストンキャビティ外へ噴射するため、燃料の一部がシリンダライナ壁面へ付着しエンジンオイルへの燃料希釈が発生する。燃料希釈対策としてポスト噴射をピストンキャビティ内へ噴射する技術があるが、この場合ポスト噴射が主燃焼と干渉し排気ガス温度の異常上昇およびエンジントルクばらつき等が発生し実現は難しい。また、排気管へ専用の噴射インジェクタを追加するなどの技術があるがこのシステムは搭載性・コスト・排気インジェクタの耐久性等システムとして効率性に欠ける。そこで SKYACTIV-D では、壁面付着しないポスト噴射にて再生制御を行うことを理想に掲げ検討を行った。ポスト噴射の改良ポイントは噴霧のペネトレーションである。燃料噴射

インジェクタからシリンダライナへの到達距離よりポスト噴射時の噴霧ペネトレーションが短ければシリンダライナへの燃料付着量が抑制される。噴霧のペネトレーションは 1 噴射当りの噴射量および噴射圧で決まることからポスト噴射を多段化し 1 噴射当たりのポスト噴射量を少なくすることで燃料希釈は抑制可能である。SKYACTIV-D では、前モデル比ポスト噴射の更なる多段化を図りポスト噴射の段数を最大 5 段噴射 (Fig.11) とし前モデルに比べ燃料希釈を約 3 割低減した (Fig.12)。

7. まとめ

SKYACTIV-D は、理想の内燃機関へ近づけるために、世界一の低圧縮比をキーイネーブラとして従来の相反する技術課題をブレークスルーしていくことで、コスト低減しながら以下を実現した。

- ・ワイドレンジ高トルク化&機械抵抗を 26%低減
- ・TDC 燃焼による燃焼効率改善
- ・NO_x 後処理なしで国内ポスト新長期規制&Euro6 適合
- ・20%の軽量化

SKYACTIV-D は走り、燃費、EM を高次元でバランスさせたユニットとして自信を持ってお客様に提供するものである。

参考文献

- (1) 旗生篤宏ほか：乗用車用新世代クリーンディーゼルエンジンの開発、2012 年自技会春季大会、20125188 (2012)
- (2) 金尚奎ほか：ディーゼル機関における燃焼室形状の改良による排気低減—EGG 燃焼室コンセプトの検証—、第 21 回内燃機関シンポジウム、P.135-140
- (3) Sakono., et al. : Mazda SKYACTIV-D 2.2L Diesel Engine, AACHEN COLLOQUIUM 2011, p.943 (2011)
- (4) 中井英二ほか：2002 年自技会春季大会、20025154 (2002)
- (5) 中井英二ほか：乗用車直噴ディーゼルエンジン New MZR-CD の紹介、マツダ技報、No.23, pp.98-103 (2005)
- (6) 上杉康範ほか：新型 MZR-CD 2.2 エンジン の紹介、マツダ技報、No.27, pp.15-20 (2009)

■ 著 者 ■



森永 真一



詫間 修治



西村 博幸

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

3

SKYACTIV-D の電子制御システム Electronic Control System for SKYACTIV-D

杉山 貴則*1 Takanori Sugiyama	丸本 真玄*2 Masaharu Marumoto	名越 匡宏*3 Masahiro Nagoshi
前川 耕太*4 Kota Maekawa	波多野 崇*5 Takashi Hatano	

要約

マツダの技術開発の長期ビジョンである「サステナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づいて、「走る歓び」と「優れた環境性能」を両立させた新世代クリーンディーゼル「SKYACTIV-D」を開発し、CX-5に搭載した。

自動車用量産ディーゼルエンジンとして世界一低い圧縮比(14.0)を採用し、高価な NOx 後処理システムなしで排出ガス規制をクリアし燃費を従来比約 20%向上した。また、2 ステージターボチャージャを採用し低速から高速までスムーズでリニアなレスポンスと力強い走りを実現した。

本稿ではこれらの目標達成のために新規に構築した SKYACTIV-D の電子制御システムの概要について述べるとともに高い制御精度を実現し、飛躍的な性能向上を可能とした燃焼/吸排気のシステムについて紹介する。

Summary

Based on the “Sustainable Zoom-Zoom” plan, detailing company’s long-term vision for technology development, the next generation clean diesel engine, SKYACTIV-D, was developed, which provides both "driving pleasure" and "excellent environmental performance". The engine is installed in CX-5.

By achieving the world’s lowest compression ratio (14.0:1) as a mass production automotive diesel engine, global emissions regulations were cleared without expensive NOx aftertreatment, and the fuel efficiency was improved by 20 percent from that of conventional diesel engines. In addition, the new two-stage turbocharger realizes smooth and linear response from low to high engine speeds as well as powerful driving performance.

This paper describes the outline of the electronic control system of the SKYACTIV-D, which was newly constructed to achieve above mentioned goals, and the combustion and intake/exhaust systems that realize high control accuracy, enabling drastic improvement in the performance.

1. はじめに

マツダは、パワートレインの効率改善や車両軽量化などの「ベース技術」を徹底追求した上で、段階的に減速エネルギー回生システムやハイブリッドシステムなどの電気デバイスを導入して環境技術を進化させる「ビルディングブロック戦略」を進めている (Fig.1)。

SKYACTIV-D はこの戦略に沿って展開される新世代ク

リーンディーゼルであり、燃費・出力・エミッション性能を飛躍的に高めることを目標としている。

以下、SKYACTIV-D の開発目標と技術コンセプト、および、それを実現するために構築した制御技術について詳しく説明していく。

*1,3~6 パワートレインシステム開発部
PT System Development Dept.

*2 技術研究所
Technical Research Center

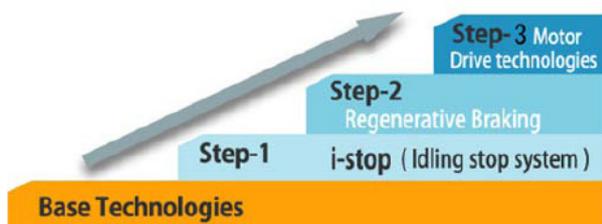


Fig.1 Building Block Strategy

2. SKYACTIV-D の開発目標

SKYACTIV-D では環境性能の追求だけではなく燃費／エミッション／出力／騒音・振動の各性能を高次元でバランスさせ、マツダらしい力強い走りを実現させることを目標とした。以下、具体的な各性能目標について述べる。

2.1 エミッション

大幅に強化される欧州の Euro6／国内のポスト新長期規制に適合させることはもちろん、燃費改善が進むガソリン車や低価格化が進むハイブリット車に対しても優れた商品競争力を持たせるため排出ガス規制対応のためのコストを低減することが必要不可欠である。

クリーンな燃焼によりエンジンより排出されるエミッションを低減し、コストアップにつながる尿素 SCR システムやリーン NOx トラップ触媒といった NOx 後処理システムなしでグローバルな排出ガス規制に適合することを目標とした。

2.2 燃費

一般的にガソリンエンジンに比べ燃費性能が良いとされているディーゼルエンジンであるが、近年の厳しい排出ガス規制に対応するため、高圧縮ディーゼルエンジン本来の高い熱効率が実現できていない。

SKYACTIV-D では従来の 16.0~18.0 という圧縮比に対し 14.0 という低圧縮比を採用し高膨張比燃焼と機械抵抗低減を実現し、更にアイドリングストップシステムも導入し従来比約 20%の燃費向上を図ることを目標とした。

2.3 走行性能

燃費やエミッションといった環境性能を高めるだけではなく、マツダの Zoom-Zoom な走り感を実現するため、ディーゼルエンジン特有の力強さの更なる向上 (MAX トルク 420Nm/2,000rpm) と、スムーズに高回転 (5,200rpm) まで伸びのある特性の実現を目標とした (Fig.2)。

加えて、ドライバの「意のままに」、アクセル操作に対して期待どおりの車両挙動(加速 G)で狙いの車速に到達する走りを目指した。

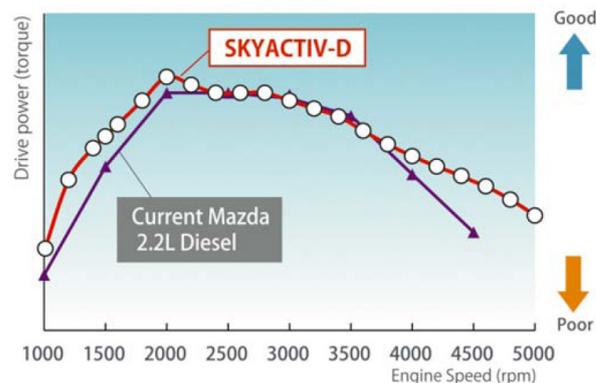


Fig.2 SKYACTIV-D Torque Improvement

3. SKYACTIV-D の制御システム

3.1 技術コンセプト

従来の高圧縮比ディーゼルエンジンでは、上死点における圧縮温度や圧力が非常に高くなるため、筒内に噴射された燃料は空気と十分に混合する前に着火し局所的で不均一な燃焼が起こり、高温化による NOx 生成や酸素不足によるススの発生を招いてしまう。そのため、ピストンが上死点を超え筒内圧力と温度が低下してから低膨張比で燃焼させる必要があり燃費が悪化していた。

SKYACTIV-D では圧縮比を大幅に下げ上死点における筒内圧力と温度を低下させ、燃料と空気を混合する時間を稼ぎ均質燃焼させることを可能にした (Fig.3)。

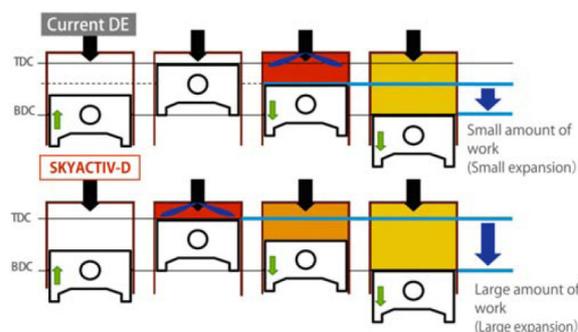


Fig.3 Higher Expansion Ratio Due to Lower Compression Ratio

その結果、NOx・ススの発生を抑制しつつ、上死点付近から高膨張比で燃焼できるようになり燃費が向上した。更に EGR 率を高め燃焼温度を下げることで NOx の低減を図り、NOx 後処理システムなしで排出ガス規制に適合している。

また、2 ステージターボチャージャを採用し、少流量で効率よく過給できる高圧段小型ターボチャージャ (以下小ターボ)と大流量での高過給が可能な低圧段大型ターボチャージャ(以下大ターボ)を、それぞれ最適な運転領域で作動させることにより、低回転での高トルクと高回転における高出力を両立し、従来のディーゼルエンジンと比較しワイドレンジな運転領域、かつ全域での高いレスポンス性能を

実現している。また、高い EGR 率を満たしつつもススの発生を抑制し、加速時に要求される燃料を燃焼させるために必要となる余剰空気を確保している。

ドライバの「意のまま」の走りを実現するため、ドライバのアクセル操作に対して期待される目標加速度を推定し、そのときの車両状態を考慮し目標エンジントルク、目標燃料噴射量を決定する駆動力制御を採用した。

また、停車時の燃料消費量を最小限に抑えるため、ディーゼルエンジン乗用車としては国内初のアイドリングストップシステム (i-stop) を搭載した。

3.2 全体システム

Fig.4 に SKYACTIV-D の全体システムを示す。

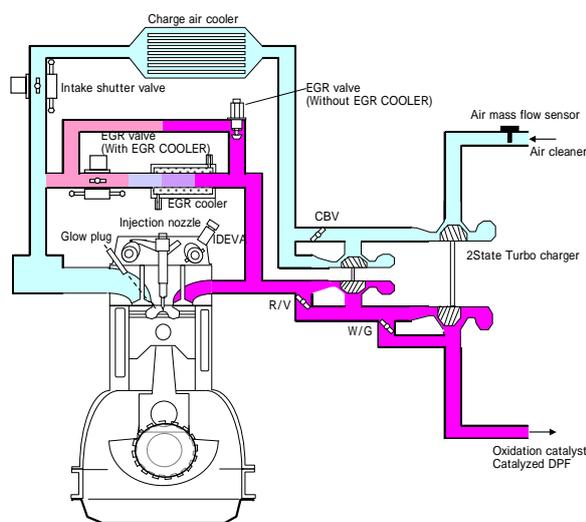


Fig.4 Fuel and Engine Control System

(1) 燃料噴射システム

最大噴射圧 197MPa のマルチホールピエゾインジェクタを採用することにより、従来のソレノイドインジェクタに対し噴霧粒径・噴射量・タイミング・段数・噴射インターバルの制御性を改善し、緻密な混合気形成を可能としている。

(2) 吸気システム

エアフロセンサにより吸入空気量を検出した後、2ステージターボチャージャの大ターボ・小ターボにより過給されインタークーラを介してインテークマニホールドに流入させる。

(3) 排気システム

排気ガスをインテークマニホールドに再循環し燃焼温度を下げることにより NO_x 発生を低減させる EGR 経路と、ターボチャージャ(タービン)を駆動し、酸化触媒・DPF にてススを処理した後、外部に排出する経路からなる。

EGR 経路では、2つのバルブを使用しホット EGR と EGR クーラを通過したクールド EGR の割合を適切にコントロールしている。また、インテークマニホールド上流のインテークシャッターバルブにより吸入空気量・EGR 量を

制御している。

(4) IDEVA (Intake stroke EGR using Double Exhaust Valve Actuation system)

排気バルブ二度開きによる吸気行程 EGR システムを採用し、吸入行程中に排気バルブを開くことにより高温の燃焼ガスをシリンダ内に逆流させ圧縮時の温度上昇を促進し着火を安定させている。

(5) グロー

耐久性に優れたセラミックグローと通電電流を調整するグローコントローラを採用し、始動時に急速昇温を行うことで、極冷間での始動時間を大幅に短縮させている。

3.3 車両制御との協調

PCM (Powertrain Control Module) は、TCM (Transmission Control Module) や DSC (Dynamic Stability Control) などの車両系制御モジュールと、CAN 信号によりエンジン・車両状態について相互に通信を行い、車両全体として整合の取れた制御を実現している。

以下、CX-5 で採用した走行性能・安全性能・燃費性能の向上のための各種制御について説明する。

(1) AT 協調制御

PCM はエンジン回転数や目標トルクなどの各種運転状態に加え、高精度に推定したエンジン発生トルクを TCM へ送信し、変速時には TCM の要求トルクを忠実に再現することにより新世代高効率 AT「SKYACTIV-DRIVE」でのなめらかな変速に貢献している。

(2) DSC

滑りやすい路面や危険回避の急ハンドル操作時などにも安定した走行姿勢を維持するために DSC から要求されるホイールトルクに対し、PCM は TCM から受信したギヤ比やトランスミッション伝達効率のほか、オルタネータやエアコンコンプレッサでのロストルクを推定し、目標エンジントルクを決定したのちエンジン制御をしている。

(3) i-stop

エンジンがアイドリングしている間の燃焼消費をなくし燃費を向上するシステムである。

PCM はハンドル舵角信号やドア・シートベルト等の情報をもとに、運転者の安全性を確保しエンジン休止、エンジン再始動を行う。また車両の電源を確保するためにバッテリーの状態を監視し確実なエンジン再始動を実現している。

以下、SKYACTIV-D 制御として、新規に開発した燃料噴射制御と吸気排気コントロールについて説明する。

3.4 燃料噴射制御

(1) 予混合燃焼の着火時期制御

SKYACTIV-D では低圧縮比と多量 EGR により、燃料と空気を十分に混ぜて均一に燃焼させる予混合燃焼を実現することで、不均一燃焼によって発生する NO_x とススの抑制を目指した。予混合燃焼では、従来の拡散燃焼のよう

に燃料を噴いて直ちに着火はせず、エンジンの吸気温度、圧力および EGR 量などの影響により、燃料を噴射してから着火するまでの時間が変化する (Fig.5)。また、着火時期によって NOx, ススおよびエンジン出力 (燃費・音) などの各性能に影響を及ぼす (Fig.6)。

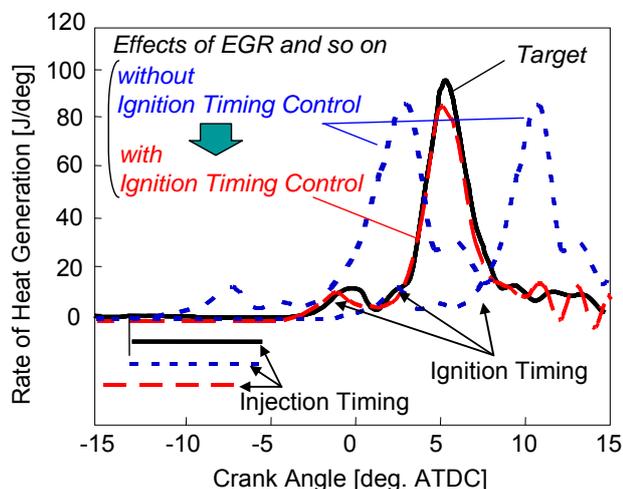


Fig.5 Ignition Timing of Premixed Combustion

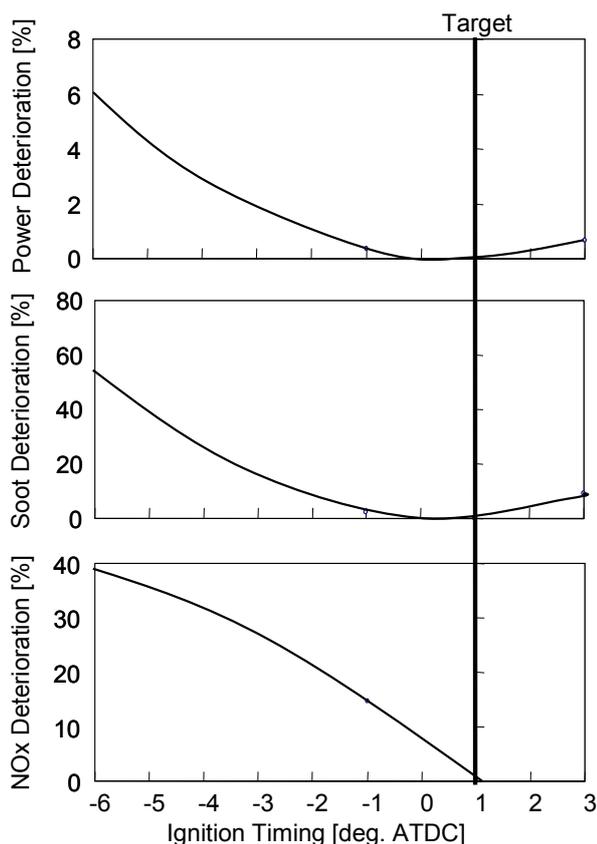


Fig.6 Performance of Ignition Timing

このため、予混合燃焼については、熟炎自着火発生時期の推定方法として知られている Livengood-Wu 積分式をベースにエンジンの吸気温度、圧力および EGR 量などの影響因子から着火時期を予測し、狙いの着火時期になるように噴射タイミングを最適に制御している。これにより、着

火時期の影響因子に対して NOx, ススおよび燃費などのロバスト性を確保している。

(2) 拡散燃焼の燃料噴射制御

SKYACTIV-D では低圧縮比と多量 EGR により、ピストンの圧縮圧力や温度が下がるため、エンジンの吸気温度、圧力および EGR 量などの影響により、失火や半失火が生じてエンジンが不安定な状況が起きる可能性が高圧縮比エンジンと比べ高くなる。

このため、着火誘導期の前炎反応進行速度を表現する方法として、実験結果の回帰式を用いて、エンジンの吸気温度、圧力および EGR 量など着火に影響する因子から着火のしやすさを見積もる指標を設定し、確実に燃焼させるために必要な噴射回数、噴射量および噴射タイミングを最適に制御することで、耐失火性を確保した。

3.5 吸排気コントロール

(1) EGR 制御

EGR の制御方式として排気 λ 制御が一般的であるが、SKYACTIV-D ではシリンダ内の酸素濃度制御を採用している。

NOx 排出量に高い相関がある筒内酸素濃度を制御することにより、排気 λ の変動や過給遅れに対しても NOx 排出量をロバストに制御可能となる。また、筒内酸素濃度は予混合燃焼時の着火遅れ期間に対しても支配的であるため、着火タイミング制御にも貢献する。

一方、排気 λ と異なり、筒内酸素濃度のセンシングは非常に困難であるため、吸排気経路内ガスの酸素濃度をモデル化することにより筒内酸素濃度制御を実現している。

(2) 2 ステージターボチャージャ制御

Fig.7 に 2 ステージターボチャージャのシステム図を示す。排気側にはレギュレート・バルブ (以下、R/V), ウェイストゲート・バルブ (以下、W/G) の 2 つのバルブを備えており、R/V を制御することで小タービンへの排気ガス流入量を、W/G で大タービンへの流入量を調整している。吸気側に配したコンプレッサ・バイパス・バルブ (以下、CBV) は、大コンプレッサで過給した新気を、小コンプレッサを介さずにシリンダへ吸気させる場合に開放する。これら 3 つのバルブを制御することにより、低回転軽負荷では小ターボを主体とした大小ターボ 2 段過給とし、高回転高負荷側では大ターボ単段過給へと切り替えを行っている (Fig.8)。

低回転軽負荷では全バルブを閉とし、大小 2 ステージ過給を行う。回転/負荷の上昇と排気エネルギーの上昇に応じて R/V を徐々に開けてゆき、過給圧の急激な低下を発生させないように CBV を開け、大ターボ単段過給へと切り替える。一方減速時、大ターボ単段過給から、大小 2 ステージ過給に切り替える場合には、CBV を閉じる前に R/V をわずかに閉じて小ターボを予回転させた後に CBV を閉じることで過給圧変動を抑制している。

また、酸化触媒への熱供給が要求される冷間の早期暖機制御時や DPF 再生制御時には、排気側の 2 つのバルブを開けてタービンをバイパスさせて排気ガスを流すことにより、効率よく酸化触媒への熱供給を行っている。

更に、EGR 量変化によるターボ運転状態の変動を抑えるため、EGR 量の変化に合わせてタービンに流入する排気エネルギー量が変動しないように R/V 開度の補正を行い EGR 制御との協調を行っている。

SKYACTIV-D では、大小ターボの過給状態をコンプレッサ特性マップおよびタービン特性マップに基づくモデルにより推定しながら制御することにより、ターボおよびエンジンの信頼性を確保しつつ、上述のような過給圧制御を実現した。

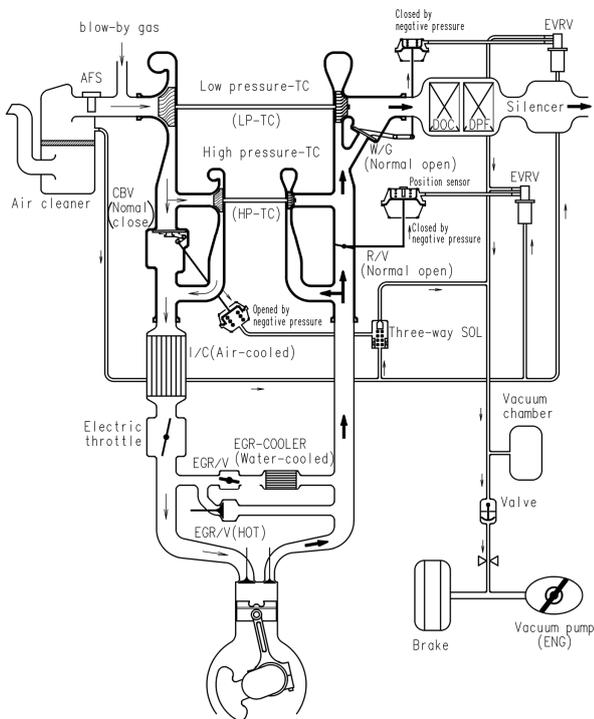


Fig.7 2stage Turbocharger System

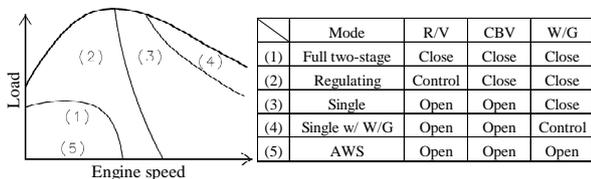


Fig.8 Two-Stage Turbocharger Operating Mode

4. おわりに

CX-5 に採用された SKYACTIV-D では、低圧縮燃焼コンセプトのもと冷間時の始動性や燃焼安定性が悪化するという低圧縮比ディーゼルエンジンの課題をハードウェアとソフトウェアの改良により解決し理想的な燃焼を追求することで、燃費・出力・EM を飛躍的に高めた新世代高効率クリーンディーゼルエンジンを実現できた。

今後もマツダのビルディングブロック戦略に沿ってベースエンジンの改良と電気デバイスの導入を進めていき、全てのお客様に走る歓びと優れた環境性能をお届けする“Zoom-Zoom”な車づくりを進化させていく。

■ 著 者 ■



杉山 貴則



丸本 真玄



名越 匡宏



前川 耕太



波多野 崇

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

4

SKYACTIV-DRIVE の開発 Development of SKYACTIV-DRIVE

土井 淳一*1

Junichi Doi

岩下 典生*4

Norio Iwashita

鎌田 真也*2

Shinya Kamada

三谷 明弘*5

Akihiro Mitani

丸末 敏久*3

Toshihisa Marusue

宮濱 芳文*6

Yoshifumi Miyahama

要約

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。「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を両立するため、新型自動変速機「SKYACTIV-DRIVE」の開発を行った。

「SKYACTIV-DRIVE」の開発では、「低燃費」「ダイレクト感」「スムーズで力強い発進」「滑らかな変速」を追求した。燃費向上では、走行中の滑りをなくすフルレンジロックアップの実現、またトルクコンバータ以外についてもシステム機能の理想を追求することで効率向上を図った。ダイレクト感向上については、ロックアップクラッチのすべり量を緻密に制御できるよう当クラッチの制御性を飛躍的に高めることで対応した。スムーズで力強い発進については、発進時にのみトルクコンバータを使用するシステムとした。滑らかな変速については、クラッチ油圧を精度良く直接コントロールできる新システム(Mechatronics Module)を採用した。

以上により理想を追求することでブレイクスルーを成し遂げ、その結果として「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を両立することができた。

Summary

While public eco-awareness is increasing, Mazda Motor Corporation aims to build environmentally friendly and fun-to-drive vehicles based on the long-term vision, the Sustainable “Zoom-Zoom” concept. To achieve both “driving pleasure” and “outstanding eco-friendly and safety performance”, the all-new automatic transmission “SKYACTIV-DRIVE” was developed.

“Low fuel economy”, “direct feel”, “smooth and powerful startup” and “smooth gearshift” were focused on in the “SKYACTIV-DRIVE” development. Fuel efficiency was improved by the Full range lockup which eliminates the slippage of the torque converter, and by pursuing the ideal function of other systems.

To achieve direct feel, the controllability of the clutch was drastically improved, so the lockup clutch slippage can be controlled precisely. Smooth and powerful startup was realized by using the torque converter at vehicle startup. For smooth gearshifts, the new system called “Mechatronics Module” was adopted, which directly and precisely controls the clutch hydraulic pressure.

Breakthroughs were made in seeking for the ideal transmission, and both the “driving pleasure” and “outstanding eco-friendly and safety performance” were realized.

*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る。今回はその技術の一つである、新型自動変速機「SKYACTIV-DRIVE」の開発について述べる (Fig.1)。



Fig.1 Phantom View of SKYACTIV-DRIVE

2. 開発の狙い

SKYACTIV-DRIVEの開発にあたり、トランスミッションの理想を再定義するところからスタートした。現在普及しているオートマチックトランスミッションのタイプを大別すると、CVT、デュアルクラッチ式、ステップATの3タイプがある。これらの特徴を Table 1 に示す。それぞれに得意とする特性があるが、理想を全て満足したトランスミッションは存在しない。そこで、SKYACTIV-DRIVEでは、以下の4つの性能を追求することで各々の得意とする特性を全て備えた理想のトランスミッションの実現を目指した。

- 1) 低燃費への貢献
- 2) MTのようなダイレクト感とクイックシフト
- 3) スムーズで力強い発進性能
- 4) 滑らかな変速

Table 1 Transmission Types and Characteristics

Technology		Dual Clutch Transmissions	Continuously Variable Transmission	Conventional Torque Converter	Ideal AT
Good fuel economy	Low-speed FE	+	+		+
	High-speed FE	+		+	+
Easy launch (launch feel)			+	+	+
Easy hill start (creep)			+	+	+
Direct feel		+			+
Smooth shifting (shifting quality)			+		+

3. 技術コンセプト

SKYACTIV-DRIVEの開発では、その性能を実現するために、個々に理想を描き、それを可能とする方法をゼロベースで考えた。

まず、燃費向上では、車両全体からトランスミッションのロスエネルギーを分析した。その結果、トルクコンバータのロスが大きいことに着目し、まず、走行中の滑りをなくすフルレンジロックアップを実現したいと考えた(Full range direct drive)。次に、トルクコンバータ以外にもシステム機能の理想を追求することで各抵抗要素の効率向上を図った。

ダイレクト感については、アクセル操作に対し加速感の遅れなくリニアに感じられることを目標とした。そのために、ロックアップクラッチのすべり量を、緻密に制御できるように当クラッチの周波数応答を現行比 10 倍以上向上することで対応した。

スムーズで力強い発進については、発進時にのみトルクコンバータを使用するシステムとした。

変速応答性と滑らかな変速の両立については、クラッチ油圧を精度良く直接コントロールできる新システム (Mechatronics Module)を採用した。

4. Full range lock-up 実現のためのブレイクスルー

走行中のロックアップ領域を拡大するためには、こもり音や加減速ショックが障害となる。従って、これらをいかに解消するかという課題に取り組んだ。

前述の課題をブレイクスルーするキーイネーブラが”Full range direct drive”である (Fig.2)。

以下、Full range direct driveのキー技術である、1) ダンパ改善による振動抑制、2) ロックアップクラッチの耐久性、制御性の向上、3) 機能向上したダンパとクラッチを、全長が制約されるFFトランスミッションパッケージにコンパクトに収めるためのトラス小型化、について説明する。

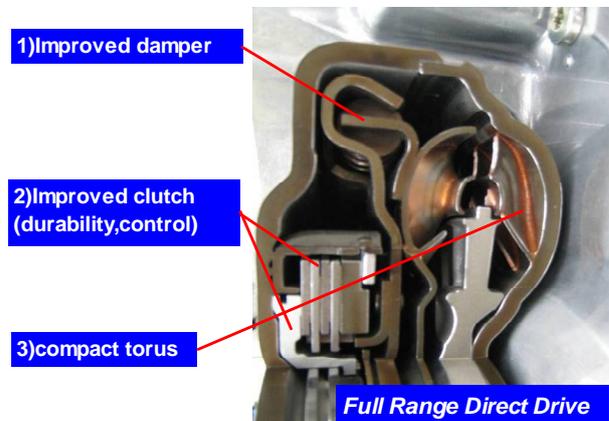


Fig.2 Development Goal of Full Range Direct Drive

4.1 振動抑制

ロックアップ時の振動抑制のため、トランスミッションに留まらず、エンジン、マウント、排気系、車体、制御の車両システム全体を CAE で解析し、各要素の寄与度を把握した上で、車両システム全体から機能配分を行った (Fig.3)。この中で、Full range direct drive は、ダンパを従来比 46%低剛性化することにより振動減衰に大きく貢献した。従来品との対比を Fig.4 に示す。

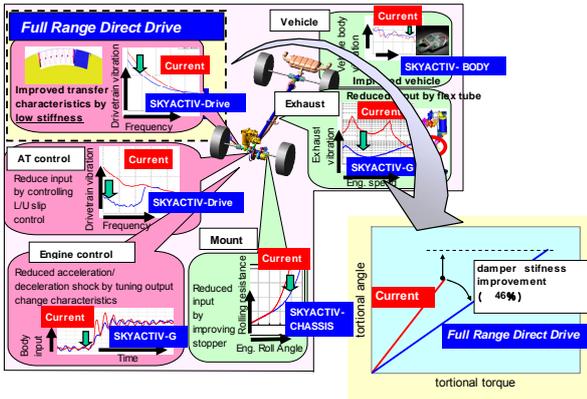


Fig.3 Functional Distribution of Full Range Direct Drive



Fig.4 Comparison with Full Range Direct Drive Damper

4.2 ロックアップクラッチの耐久性, 制御性改善

ロックアップ領域を拡大するためには、クラッチの劣化に伴うシャッターを防止する必要がある。そのため、クラッチの冷却機能を高めて耐久性向上を図った。具体的には、セグメントタイプの湿式多板クラッチを採用するとともにオイル流れを最適化し、従来比冷却能力を約 50%向上した (Fig.5, 6)。

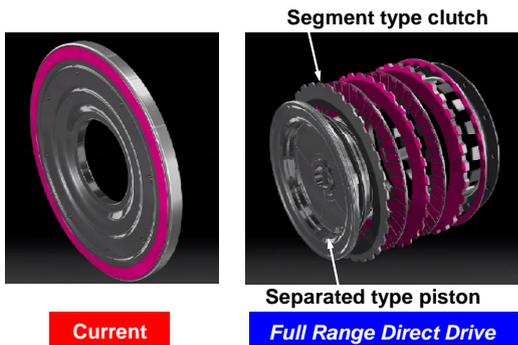


Fig.5 Comparison with Full Range Direct Drive Clutch

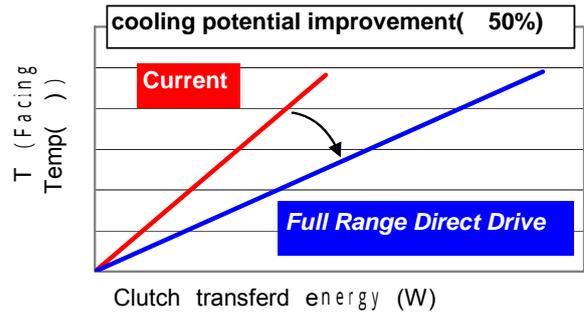


Fig.6 Comparison of Clutch Cooling Performance

更に、ロックアップクラッチのすべり量を緻密に制御するため、独立ピストン室構造を採用し、ロックアップクラッチの周波数応答を 10 倍以上向上した (Fig.7)。

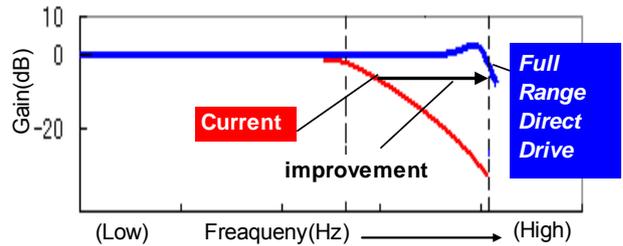


Fig.7 Comparison with Full Range Direct Drive Clutch Responsiveness

4.3 トーラスのコンパクト化

前述の機能を高めたダンパやロックアップクラッチを全長制約が厳しい F F トランスミッションパッケージに収めるためにコンパクト化が不可欠となる。そこで、トルクコンバータの使用領域を発進時に限定するとともに、CAE 等を駆使してオイル流れを最適化することでトーラスをコンパクト化し、これを可能とした (Fig.8)。

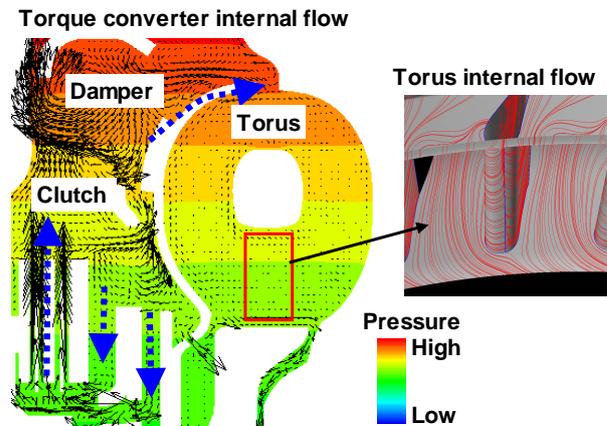


Fig.8 CAE Analysis of Internal Flow of Full Range Direct Drive

発進にはトルクコンバータを用いるが、発進直後からロックアップ状態にスムーズに移行させることで、従来のATと変わらない滑らかな発進を実現した (Fig.9)。

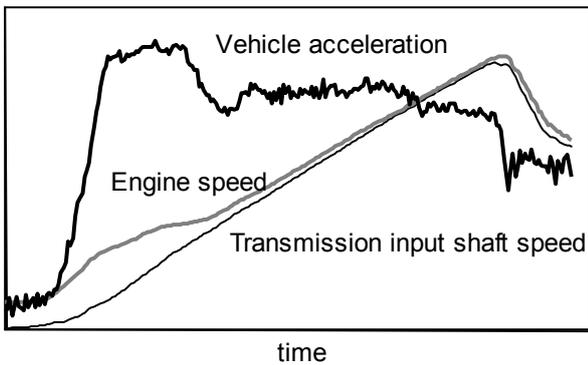


Fig.9 Acceleration Curve at Startup

Fig.10 は、従来ステップATとSKYACTIV-DRIVEのJC08モード走行中のロックアップ領域を比較したものである。SKYACTIV-DRIVEの採用により、JC08モード走行中のロックアップ領域を約49%⇒82%に拡大することが可能となった。



Fig.10 Comparison of Lockup Range in JC08 Mode

5. 機能向上による各抵抗要素の効率改善

更に、自動変速機の抵抗を司る各抵抗要素について、夫々のシステム機能の理想を追求し基本機能が高めることで、抵抗低減を実現させた。主な改善内容を以下に示す。(Fig.11)

- a) オイルポンプ：ポンプギヤの理想歯形を追求しポンプ機能を高め効率を改善
- b) クラッチ：クラッチ摩擦材の溝形状を最適化し排油機能を高めることで抵抗低減
- c) ベアリング：ベアリングの耐久性能を高めることでボールベアリングの採用を実現
- d) ワンウェイクラッチ：ラチェット式を採用し相対回転部のオイル攪拌を極限まで低減
- e) シールリング：最小クラッチ数で6速化を実現するスケルトンを選定してシール箇所を最小化するとともに、サイドフォースを極限まで低減するシールリング形状を採用

f) デフ攪拌抵抗：デフ室へのオイル流入の抑制とオイル排出性の向上によりオイル攪拌による抵抗を削減

g) ATオイル：劣化による粘度低下を抑制するとともに、潤滑機能を高めることで耐焼きつき性を向上させてオイルの低粘度化を実現

以上の改善により、ユニット全体での機械抵抗を現行5ATと比べ約16%低減し、デュアルクラッチ式と同等以下の抵抗を実現した。

前述の Full range direct drive の効果と抵抗低減により、ATユニット全体で現行比4~7%の燃費改善を可能とした。

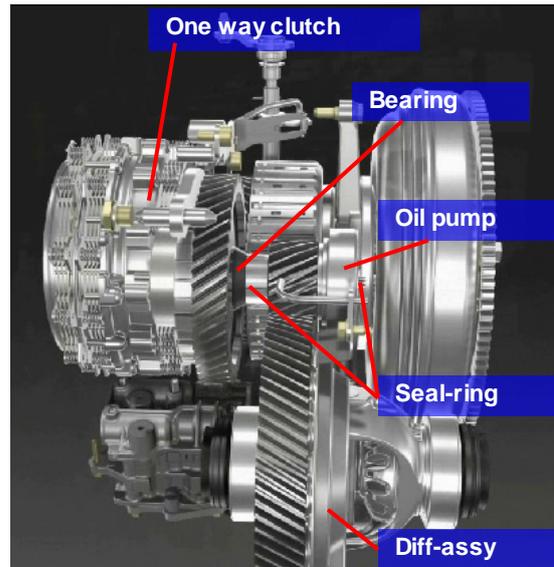


Fig.11 Name and Structure of Major Parts

6. 変速応答性とショック改善のブレイクスルー

変速応答性とショックを高次元で両立させるためには、ロックアップクラッチや変速クラッチの作動油圧をいかに精度良く、応答良く制御できるかがポイントとなる。この基本機能を飛躍的に高めるためのブレイクスルーが "Mechatronics module"である。

6.1 Mechatronics module による高応答・高精度の実現

ATの油圧精度は、多数の機械部品と電子部品のバラツキが影響する。そこで、これまで個別管理していた油圧回路と電子部品を一体化し、出力される油圧特性を制御コンピュータに記録することで、クラッチ油圧のバラツキを従来比1/5に抑制することが可能となった。同時に各種センサー類も一体化することで、部品点数の削減と信頼性の向上を図った (Fig.12)。

また、油圧応答速度を高めるために、ダイレクトリニアソレノイドを採用するとともに、電流応答遅れ、油路抵抗、変速用クラッチ剛性などの解析を進め、油圧回路一本一本に至るまで理想を追求することで、高速で安定した制御システムを構築した。

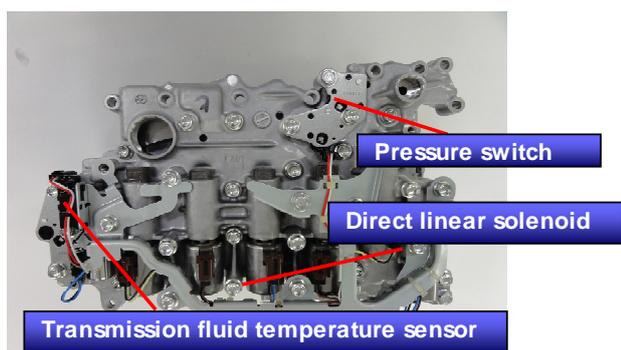
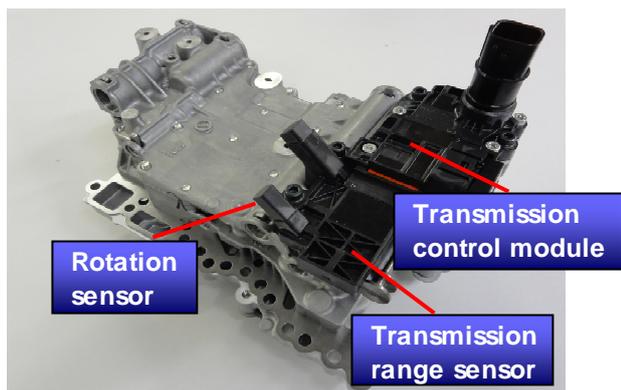


Fig.12 Makeup of Mechatronics Module

6.2 高速変速制御によるシフトクオリティの向上

SKYACTIV-DRIVE では前述の Mechatronics module によって得られた高応答、高精度の制御システムを最大限生かし、スムーズかつ高応答の変速を実現した。

アップシフトでは、変速中も車両の加速度が不連続にならないようにクラッチ油圧とエンジントルクを制御するシステムを構築した (Fig.13)。

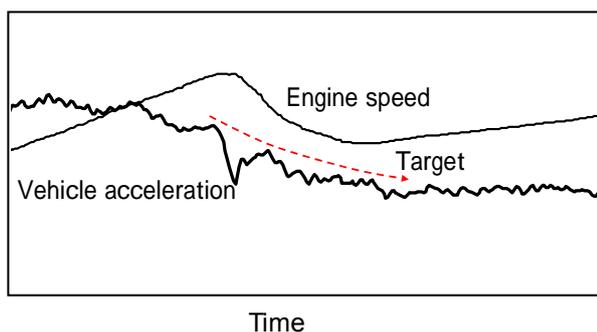


Fig.13 Upshift of SKYACTIV-DRIVE

ダウンシフトでは、応答性を実現するとともに、エンジントルクを変速に同期して上昇させることで、スムーズで早い変速を実現した (Fig.14)。

また外乱に対しても安定したシフトクオリティが得られるように現代制御論によるフィードバック制御を全変速で採用するとともに、制御コンピュータ内に油圧モデルを構築し、リアルタイムでクラッチやバルブの作動状態を推定している。

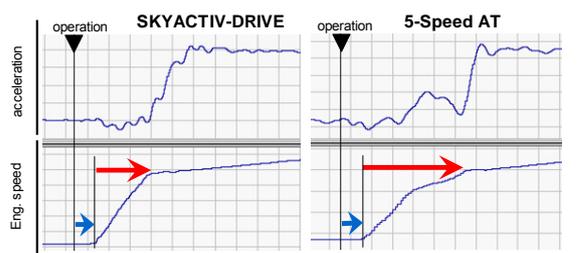


Fig.14 Comparison of Downshift Responsiveness

7. おわりに

SKYACTIV-DRIVE の開発では、理想を追求し続けることによりブレークスルーを成し遂げ、その結果として、走る喜びと優れた環境性能を両立することができた。

ロックアップ領域の拡大によりダイレクト感を向上、更に変速応答性もデュアルクラッチタイプ同等以上を実現。加えてプラネタリギヤ式構造であるためトルク制約もなく、大トルクディーゼルエンジンとの組み合わせでもその良さを存分に発揮できる。これらが従来 AT 比率の低かった欧州市場でも受け入れられ、AT 比率が非常に高くなっている。また全部品を一新するに当たり、モノ造り革新として、機能配分・設計・生産・調達の最適化をお取引先様と共同で行い、低コストを実現した。

最後に、本開発に多大なご協力をいただいたお取引先様はじめ、関係各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 石野勲雄ほか：新世代技術「SKYACTIVパワートレイン」、マツダ技報 No.29, pp.29-35 (2011)
- (2) 黒川和司ほか：ドライブトレイン技術開発の現状と展望,自動車技術 vol.65 2011.09.01, P.11-P.16
- (3) 土井淳一ほか：New Mazda SKYACTIV-Drive Automatic Transmission, ATZ auto technology September 2011, P.52-P.55

■ 著 者 ■



土井 淳一



鎌田 真也



丸末 敏久



岩下 典生



三谷 明弘



宮濱 芳文

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

5

SKYACTIV-MT の紹介

Introduction of SKYACTIV-MT

石井 護*1
Mamoru Ishii

吉倉 佑*2
Yu Yoshikura

高田 雅史*3
Masashi Takada

要約

SKYACTIV-MT は、従来型トランスミッションに対し、大幅な小型・軽量化と抵抗低減、シフトフィールの進化を追求したマニュアルトランスミッションである。適用する入力トルクバンドに対するギヤトレイン構造の最適化と操作系機構の刷新により、優れた環境・安全性能とマツダシフトフィール DNA である「意のままの操作性」を実現した。

Summary

SKYACTIV-MT is the manual transmission that achieved significant downsizing, weight and frictions reduction, better shift feel compared to the conventional transmission. Superior environment/safety performance and "shift quality as a driver is intended" representing Mazda shift feel DNA are achieved by optimizing the gear train structure for input torque range and improving the shift mechanism.

1. はじめに

「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の更なる進化を目指し新開発した、新型 6 速マニュアルトランスミッション SKYACTIV-MT (C66M-R 型, D66M-R 型) の概要と主要技術について紹介する。

2. 開発のねらい

- (1) 「意のままに操れる変速操作性」の更なる進化
- (2) 小型・軽量化と抵抗低減による環境・安全性能への貢献
- (3) NVH 性能（静粛性）の向上による低騒音化への対応

3. 構造と主要諸元

3.1 C66M-R 型（以下、中型 MT）

中型 MT は、並行 2 軸構造で、最大入力トルク 270Nm に対応する。1 速, 2 速にはトリプルコーンシンクロ, 3 速~6 速, リバースにはカーボン摩擦材を使用したシングルコーンシンクロを採用した。

Fig.1 に主断面図, Table 1 に主要諸元を示す。

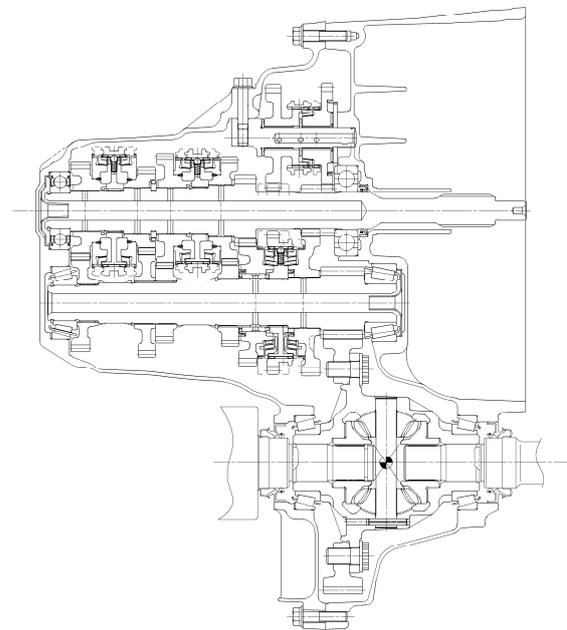


Fig.1 Main Section of C66M-R

*1~3 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

Table 1 Main Specs of C66M-R

Gear Ratio	1st	3.700
	2nd	1.947
	3rd	1.300
	4th	1.029
	5th	0.837
	6th	0.680
	Rev	3.724
Final		4.388
Weight;Wet [kg]		42.9

3.2 D66M-R 型 (以下, 大型 MT)

大型 MT は、2 速と 3 速の駆動ギヤを共用する並行 3 軸構造で、最大入力トルク 460Nm に対応する。1 速～4 速、リバースにはトリプルコーンシンクロ、5 速、6 速にはカーボン摩擦材を使用したシングルコーンシンクロを採用した。

Fig.2 に主断面図、Table 2 に主要諸元を示す。

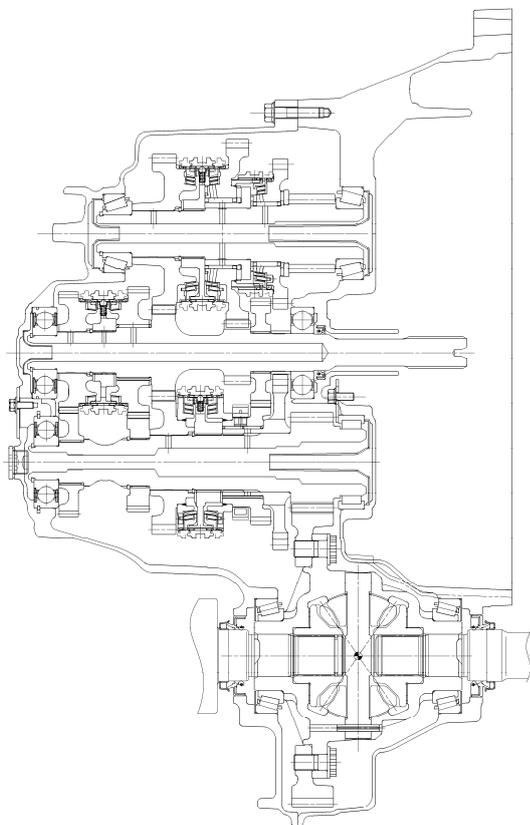


Fig.2 Main Section of D66M-R

Table 2 Main Specs of D66M-R

Gear Ratio	1st	3.357
	2nd	1.826
	3rd	1.565
	4th	1.147
	5th	0.893
	6th	0.745
	Rev	4.091
Final(1,2)		4.105
Final(3-6,R)		3.120
Weight;Wet [kg]		56.9

4. SKYACTIV-MT のもの造り革新

4.1 高トルク容量と小型・軽量・高効率の両立

中型 MT では、SKYACTIV-G のトルクに対応しつつ、搭載長短縮を両立したコンパクトな 2 点支持 2 軸構造を採用し、小型・軽量化と回転抵抗低減を実現した。

また、入力負荷に合わせてデファレンシャルサイズを使い分けることにより、幅広い車種・エンジンに適用可能とした。

大型 MT では、SKYACTIV-D の高トルクに対応したギヤトレイン強度と目標全長の両立のため、2 点支持 3 軸構造を採用した。2 本あるカウンタ軸を、入力負荷が高い 1 速、2 速用と比較的負荷が低い 3 速～6 速用で分けることにより、3 速～6 速用カウンタ軸の支持ベアリングに低抵抗タイプを採用し、小型化と同時に回転抵抗低減を実現した。

4.2 コモンアーキテクチャ構想

ドライバが感じるシフトフィールの理想特性を数値目標化し、実現のための最適化設計を行った。中型 MT と大型 MT で操作系と同期装置の基本構造を共通化することによりストローク特性を統一し、シンクロの同期容量を変動要素として荷重特性を最適化する思想で設計することにより、ギヤトレイン構造やサイズによらない同体質の操作フィールリングを実現した。

4.3 一括企画とフレキシブル生産構想

一括企画・開発とフレキシブル生産構想を効率的に実現するため、開発初期段階から生産部門とのコンカレント活動を行った。これにより、機能開発と生産ライン設計の要件を相互にフィードバックし、開発効率と生産性の改善、および生産準備期間の短縮を実現した。

従来、機種ごとの専用設備で生産していたトランスミッションケースの事例では、加工基準や固定基準座を統一化することで、サイズや形状の異なる SKYACTIV-MT と SKYACTIV-DRIVE の 4 種類以上のケースを同一設備で生産可能な多種変量対応の高稼働率生産ラインとした。

5. シフトフィールの進化

SKYACTIV-MT では、従来から目標としてきた、マツダシフトフィール DNA である「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」を更に進化させるために、乗車姿勢や操作時の腕の動き、筋肉の使い方などを人間工学的に分析し、従来型 MT のシフトストローク 50mm・約 50N の操作力に対し、ストローク 45mm・約 40N の操作力を理想目標とした。

また、変速開始から終了までのシフト操作力目標を、フィールングから数値化し、同期終了後にシフト完了位置に向けて吸い込まれるように動き、ストップ部では適度な剛性感が得られる設定とした。

Fig.3 にシフト操作特性の目標と実測値を示す。

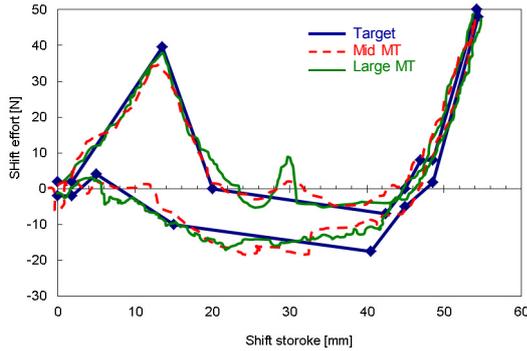


Fig.3 Shift Characteristic

シフト操作のショートストローク化と操作力低減の相反する目標両立のため、以下を目指し開発した。

- ・必要な仕事量を減らす (被同期側イナーシャ低減)
- ・大きな増幅比で操作力を伝える (レバー比拡大)
- ・最大の効率で操作力を伝える (高効率システム)
- ・2段モーション性能向上 (阻害要因の排除)

5.1 被同期側イナーシャ低減

変速中の仕事量を減らすため、クラッチディスクとシンクロ間にあるギヤトレイン部品のイナーシャ低減を行った。

3軸構造の大型MTでは、構造選定時にシンクロとギヤの最適配置を行い、5速・6速用シンクロをインプット軸上に配置することにより、クラッチディスクを含む被同期イナーシャを約12%低減した。

5.2 レバー比拡大

シフトノブのショートストローク化と、ノブからシンクロに操作力を伝えるレバー比拡大を両立するため、MT内部のスリーブストローク短縮を行った。

シンクロスプラインの小モジュール化によりスリーブとギヤスプラインの噛合い長さを縮小するとともに、シンクロ同期時の熱収支解析を行い、シンクロとギヤの熱容量最適化によりシンクロ摩耗量を低減することで、シンクロからギヤスプラインの距離を縮小した。

これらにより、スリーブストロークを従来型比で約15%短縮した。Fig.4に熱収支解析モデル例を示す。

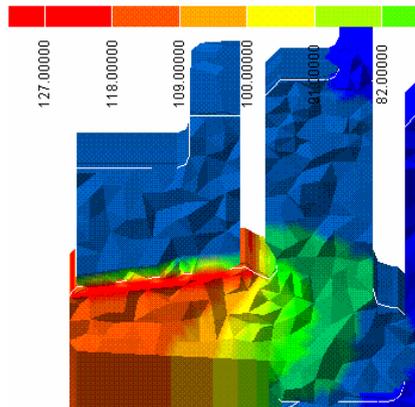


Fig.4 CAE Model

5.3 高効率リンク機構

変速機構を構成するロッド支持部にスライドボールベアリングや低摩擦タイプのブッシュを採用したことに加え、シフトフォークを作動させるレバーをインボリュート形状とし、作動中の摩擦抵抗を低減した。また、作動中のスリーブの傾きによるハブとの摺動抵抗を低減するため、シフトフォーク周辺のレバーやロッドを含むシステムとして最適化し、シフトフォークの両腕を等剛性化した。

Fig.5に操作系部品の構造を示す。

コントロールロッドが上下動するセレクト操作に対しては、1速・2速のセレクト位置を上方へ設置し、シフトアップ時にロッド上部品の自重で下げる構造とした。また、シフト用ディテントがセレクト操作時に摺動しない構造とすることで、操作時の抵抗を低減した。

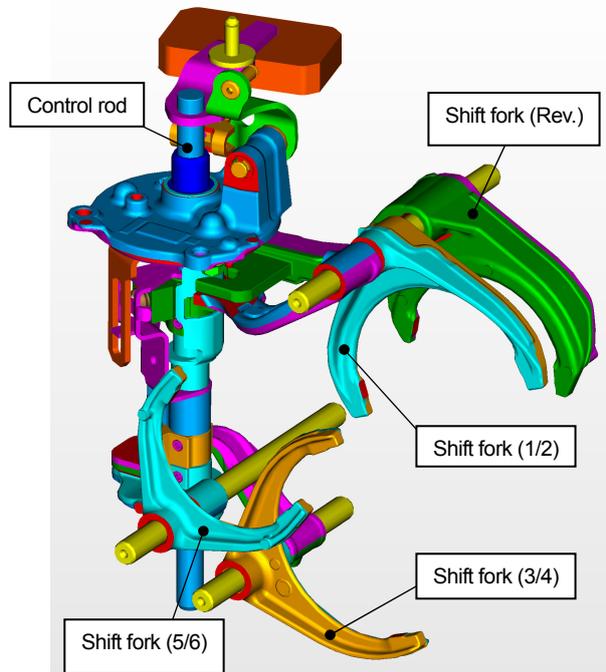


Fig.5 Shift Mechanism

5.4 2段モーション性能向上

変速操作中のスリーブとギヤスプラインの噛合い時に発生する、ゴツゴツとしたフィーリングの2段モーションは、シフトフィールを損ねる要因となる。この現象は、シンクロ同期時に蓄積されたねじりエネルギーが同期終了後に解放され、噛合い時にギヤスプラインとスリーブが相対回転によって衝突することにより発生する。

この対策として、変速操作中の関連部品について挙動解析と高精度の回転変動測定を実施し、ギヤスプラインに対するスリーブの進入角度を明確化するとともに、同期後のスリーブ挙動を可視化することでギヤスプラインのチャンファ形状を最適化した。

これにより、常用シフト荷重域での2段モーション発生を防止し、シフトフィーリングの向上を図った。

6. 小型化・軽量化

MT の全長は、軸上に並ぶギヤの歯幅と同期装置スペース、支持ベアリング寸法等の要素によって構成される。

このため、構造選定時に全長とともに伝達効率や被同期イナーシャも考慮して各要素を最適配置した上で、各要素の小型化を行った。

大型 MT では、共用ギヤの組み合わせ、リバースの配置などが異なる多軸ギヤスケルトンを比較し、ユニット全長および伝達効率から、現在の構造を選定した。

次に中心間距離の設定は、外観サイズ、重量、ギヤ比の設定範囲を考慮し、シミュレーションにより約 1 万通りの中から最適な中心間距離バランスを決定した。

ポテンシャルの高い基本構造と中心距離を選定した上で、各構成部品の軽量化を行うことにより、目標のユニット全長と重量を達成した。

アルミダイカストのトランスミッションケースでは、軽量構造を実現するために、ゼロベースで低周波から高周波振動の順に構造体を設計し、必要最小限の補強リブを設定した。また、生産技術部門と共同で、一般肉厚を従来型比で約 30% 低減に取り組み、形状の最適化と合わせて約 20% の軽量化を実現した。

7. 伝達効率向上

ギヤトレインの構造選定において、摩擦抵抗を考慮した構造選定とギヤ配置を行った上で、MT の伝達損失の多くを占める、オイル攪拌抵抗とベアリングをはじめとする回転部分の摩擦抵抗を低減し、ヨーロッパのモード燃費で約 1% に相当する伝達効率を向上した。

オイル攪拌抵抗では、低粘度オイルを新たに開発するとともに、各部の潤滑状態をシミュレーションと樹脂製の透明ケースを用いた可視化を併用して最適化することにより、オイルレベルを低減した。また、オイルパス構造を工夫し、走行状態では積極的にオイルパス上にオイルを蓄積し、デフの攪拌抵抗を低減した。

摩擦抵抗では、ギヤ諸元や中心距離の最適化により入力を低減し、低抵抗タイプのベアリングを採用した。

8. NVH 性能（静粛性）の向上

従来の開発では、ギヤノイズをはじめとする NVH 性能に対し、起振源である MT ユニットでの振動低減に重点が置かれていたが、振動低減に対する必要重量の効率が悪く、弊害が発生することも多かった。

そこで、SKYACTIV-MT では車両全体で性能をコントロールし、システムとして設計することにより、軽量化と NVH 性能を両立させている。

8.1 システム最適設計

ギヤノイズ開発では、ギヤ設計や支持構造の最適化による MT ユニットの基本的な振動低減を行った上で、Fig.6 の振動伝達における特性に着目し、それぞれの伝達経路に対して最適となるように振動伝達の周波数特性をチューニングした。

これにより、車体側感度の高い周波数域とユニット振動レベルが高い周波数域を離すことで、車両目標を達成し、トランスミッションケースの剛性チューニングで対策を行った場合に比べ、振動低減に必要な重量を約 50% に低減できた。

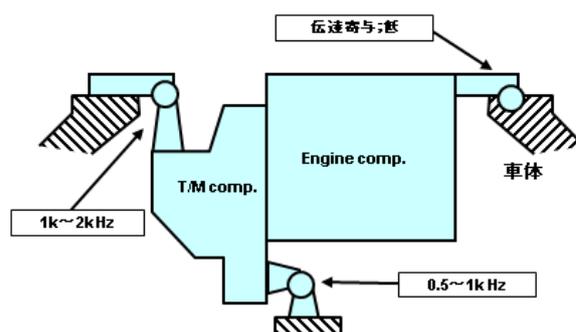


Fig.6 Gear Noise System Model

8.2 構造最適化 CAE の適用

上記のシステム設計を実現するにあたり、NVH 性能以外にも含めた複雑なシステムを成立させる必要があった。そこで、車両システムまで含めた CAE モデルと、最適化ソフトの適用を実施した。

これにより、より精度の高い解析結果と効果的な振動低減形状が実現できている。

9. おわりに

SKYACTIV-MT は、相反する課題をブレークスルーする技術開発に取り組み、小型・軽量・高効率で「優れた環境・安全性能」を、シフトフィールの更なる進化で「走る喜び」を高次元で両立しサポートできるユニットに仕上がった。

是非「意のままに操作でき、小気味よいシフトフィール」を体感していただきたい。

■ 著 者 ■



石井 護



吉倉 佑



高田 雅史

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

6

SKYACTIV 技術を商品化した CX-5 パワートレインの紹介

Introduction of CX-5 Powertrain, the Commercialized SKYACTIV TECHNOLOGY

秋山 耕一*1
Koichi Akiyama
山根 義昭*4
Yoshiaki Yamane

高戸 剛*2
Tsuyoshi Takato
山形 弘彦*5
Hirohiko Yamagata

佐々木 健二*3
Kenji Sasaki
河野 敏文*6
Toshifumi Kawano

要約

CX-5 は SKYACTIV TECHNOLOGY をフルに採用し、「サステイナブル“Zoom-Zoom”」を体現する最初の商品である。CX-5 の開発は SKYACTIV TECHNOLOGY を導入することに加え、商品と使う人との関係を深く見つめながら、人間中心思想で商品作りに取り組んだ。本稿では、パワートレイン開発の主要要素である環境対応と走行性能についてこだわりを持って取り組んだ内容を紹介する。

Summary

CX-5 is the first model which fully mounts the SKYACTIV TECHNOLOGY and embodies 'Sustainable Zoom-Zoom'. In addition to mounting SKYACTIV TECHNOLOGY, CX-5 development has been forwarded under human-centered thought, deeply looking at the relation between product and user. The following article introduces how we worked on CX-5 development with a focus on environmental friendliness and driving performance that are major elements of Powertrain development.

1. はじめに

CX-5 は世界的に需要が拡大しているクロスオーバー SUV カテゴリに導入する新型車であると同時に、「サステイナブル“Zoom-Zoom”」として、「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」をすべてのお客様に提供することを宣言して以降、最初の All New 開発モデルである。

「サステイナブル“Zoom-Zoom”」を具現化する新世代技術である SKYACTIV TECHNOLOGY とは、相反する課題を同時に解決しながら、開発/生産が一体となって「モノ造り」も革新した、マツダ 90 年の総智の結集である。技術の詳細は、それぞれの論文を参照されるとして、本稿では「優れた環境性能」と「走る喜びの革新」を主体に、CX-5 のパワートレインが実現した内容を紹介する。

2. CX-5 のパワートレイン

2.1 パワートレイン展開

CX-5 はクロスオーバー SUV としての幅広いニーズに応え

るため、ガソリン/ディーゼルの 2 つのエンジンに、6AT/6MT の 2 つのトランスミッション、FWD/AWD の 2 つの駆動方式をラインナップしている (Table 1)。

Table 1 Powertrain Line-Up

SKYACTIV		Japan	N.America	Europe	Other
Gasoline 2.0L	6MT	FWD			
		AWD			
	6AT	FWD			
		AWD			
Diesel 2.2L	6MT	FWD			
		AWD			
	6AT	FWD			
		AWD			

2.2 パワートレインの目指したもの

(1) 欧州/日本

① SKYACTIV-G搭載車は、SUV競合ガソリン車の中でクラストップのCO₂/燃費を目指した。代表値としては競合SUVディーゼル車と同等となる、欧州CO₂値

*1, 2 パワートレイン企画部
Powertrain Planning Dept.

*3~6 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

139g/km (NEDC) を目標とした。走り性能はアクセル操作にリニアな特性を持たせ、意のままに走れる質感の高さを追求した。

② SKYACTIV-D搭載車は、HEVや燃費特化モデルを含めSUVの中でトップのCO₂/燃費を目指した。代表値としてはSUVの中でトップとなる、欧州CO₂値119g/km (NEDC) を目標とした。欧州の次世代の排出ガス規制であるEuro6 に対しては、競合SUVモデルは一部機種のみに対応となっているが、CX-5 では全機種での適合を目指した。走り性能はディーゼルの力強いフィーリングと、ガソリン車のような軽快な走り感をあわせ持ち、従来のディーゼルエンジンのイメージを払拭しながら、リニアな特性によって意のままの走りを目指した (Fig.1)。

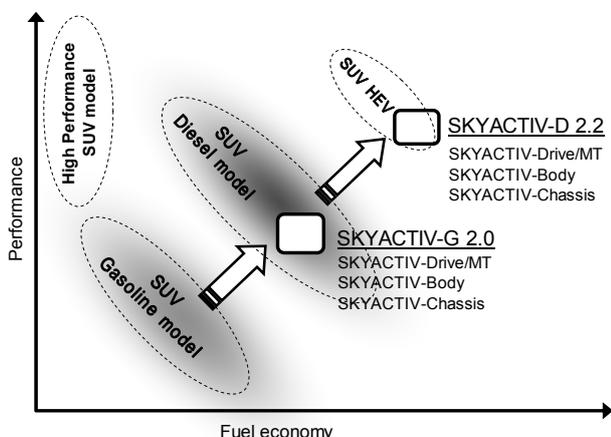


Fig.1 Positioning Target in JPN/Europe

(2) 北米

競合 SUV 車は 2.4~2.5L ガソリンエンジンが主流となる中で、SKYACTIV-G (2.0L) は、燃費性能はSUVの中でトップを目指し、Hwy 燃費: 33MPG を目標とした。走り性能は、競合車並みの加速性能を確保することを目標とし、意のままの走りを目指した (Fig. 2)。

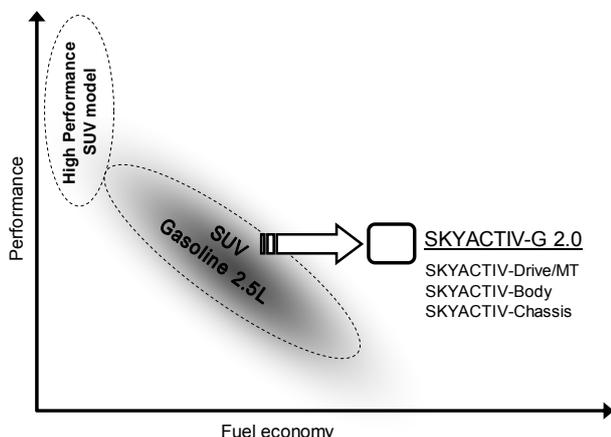


Fig.2 Positioning Target in N.America

3. 環境性能

3.1 エミッション性能

エミッション性能は、最新の各国の厳しい排出ガス規制に適合しながらも、商品をアフォーダブルな価格でワールドワイドに提供することで、多くのお客様に購入いただき、全体の環境負荷を低減する考え方である。

SKYACTIV-D 搭載モデルのエミッションシステムは、酸化触媒と DPF (Diesel Particulate Filter) を基本とし、高価な Nox 後処理システムを使わずに、欧州 Euro6 や日本ポスト新長期規制に代表される厳しい規制に適合することでコストを抑制し、アフォーダブルな車両価格の設定に貢献している。

3.2 モード燃費性能

CX-5 のモード燃費性能は、SKYACTIV 技術を中心に、空気抵抗/転がり抵抗等の車両抵抗低減や、エンジン/トランスミッションの性能向上等、車両全体の燃費向上活動を積み重ねて実現している。その中でも、制御開発は制御ストラテジーを一括開発し、それをコモンアーキテクチャとして次々に車種展開する考え方で開発。

SKYACTIV-G 搭載車では、先行していた国内デミオや北米アクセラで制御ストラテジーが次々に改良され、その改良された制御ストラテジーが CX-5 に展開されたことによって、国内と北米では目標を過達することができた。これによって CX-5 は開発途中の市場での競合環境変化への余裕が生まれ、販売開始時点でクラストップの燃費をアピールできた。

SKYACTIV-D 搭載車については、CX-5 をリードモデルとして制御を開発し目標を達成した。この制御仕様は今後の車種に継承するものである (Table 2) (Fig.3, 4)。

Table 2 Fuel Economy & CO₂ value (Main Model)

Region	Model	Drive/MT	Wheels	Fuel Economy	CO ₂ value
Europe	SKYACTIV-G	6MT	2WD	139 g/km	
	SKYACTIV-D	6MT	2WD	119 g/km	
Japan	SKYACTIV-G	6AT	2WD	16.0 km/L	JC08mode F/E
	SKYACTIV-D	6AT	2WD	18.6 km/L	JC08mode F/E
N.America	SKYACTIV-G	6MT	2WD	26/35 MPG	city/hwy
	SKYACTIV-G	6AT	2WD	26/32 MPG	city/hwy

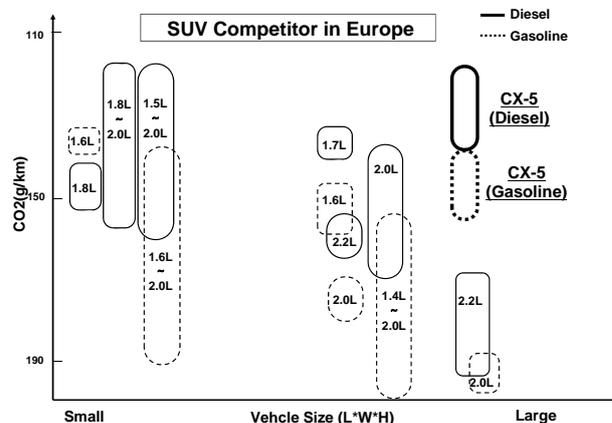


Fig.3 CO₂ & Vehicle Size Comparison (EU)

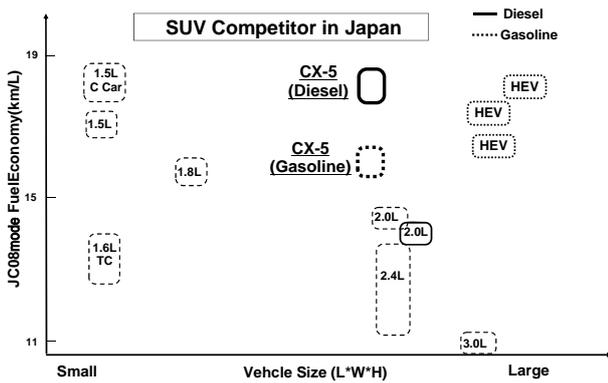


Fig.4 F/E & Vehicle Size Comparison (JPN)

3.3 実用燃費性能

燃費については、モード燃費のアピールに留まらず「永く愛される」「懐の深さを備える」商品となるように、実用での燃費の良さを「給油頻度」や「長距離ドライブ時の残燃料」からも実感できるように取り組んだ。実用燃費の目標は、56L (AWDは58L)の燃料タンクでありながら、ロングドライブに適したSKYACTIV-D搭載車では1,000kmの航続距離を持たせることを目標とした。

開発完了後には、山口県下関市から神奈川県横浜市間の約1,000kmを無給油で実際に走行し、ロングドライブでおおむね1,000km以上の航続距離があることを実証した。

4. 走る喜びを革新したダイナミック性能

4.1 走り感(パフォーマンスフィール)の方向性

CX-5のパフォーマンスフィールは、「永く愛される」「懐の深さを備える」を実現するため、ドライバーは意のままに操るドライビングを楽しみながら、同乗者が快適に安心して上質なドライブを楽しめることに主眼を置いて開発した。

最初に取り組んだのは、ドライバーの最適な運転環境の実現である。アクセルペダルには、人間が足首を動かす軌跡と同じ動きをするオルガンタイプを採用。ステアリングの中心線上にドライバーが座り、足を伸ばせば自然な位置にペダルがあるという、最適な操作環境を実現した。

パフォーマンスフィールのチューニングは、ドライバーが想像する通りのフィードバックを得ながら、意のままに操るフィーリングを実現。同時に「走る/曲がる/とまる」の一連の動作のつながりを調和させることで、車両全体で違和感のない自然な動きを造り出し、ドライバーと同乗者がともにドライブを楽しめるダイナミック性能を実現している。

CX-5のパフォーマンスフィールにおいて、SKYACTIV-G/SKYACTIV-D搭載モデルの注力ポイントと、光るシーンを以下に記す。

4.2 SKYACTIV-G 搭載モデル

SKYACTIV-G 搭載モデルは、高回転までストレスなく回るエンジン特性と、アクセル操作に対する優れた応答性やコントロール性の高さにより、ワインディングや市街地等、運転シーンを問わず、ポテンシャルを使いきりながら、意のままの走りを楽しむことができるオールマイティなモデルである。

CX-5では理想とするパフォーマンスフィール特性を運転シーンごとに目標加速度として定め、エンジンとトランスミッションの協調制御により、加速度を的確にコントロールすることで「扱いやすさ」と「意のままに操る喜び」の両立を実現している。

① リニアで質感の高い走り

ドライバーが車両挙動を予測しやすく、修正操作を必要としない状態を作り出すため、加速度の絶対値をリニアにするのではなく、人が感じる加速度の強さを指標化してリニアな特性を定め、目標加速度の特性とした(Fig.5, Fig.6)。

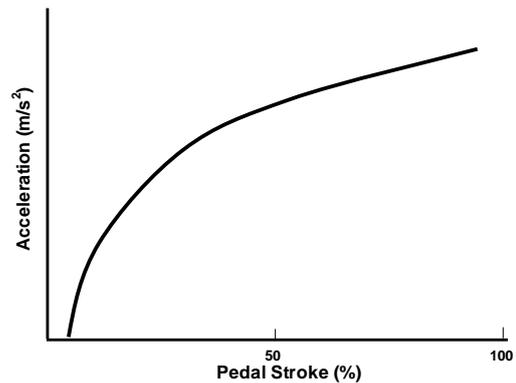


Fig.5 Acceleration – Pedal Stroke Relation

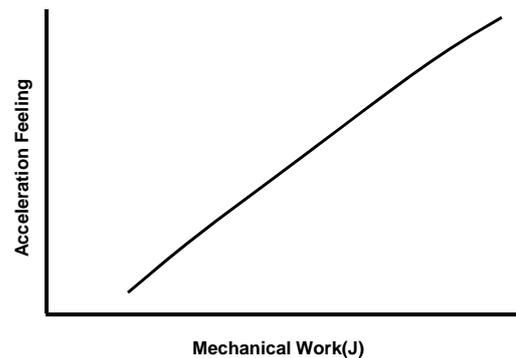


Fig.6 Acceleration – Pedal Feeling Relation

② 変速による駆動力段差のない走り

強い加速度を必要としないアクセルペダルの低开度領域では、変速前後の駆動力変化の抑揚を抑えることで、ドライバーが想定しない加速度変化が変速によって発生しない特性とした (Fig.7)。

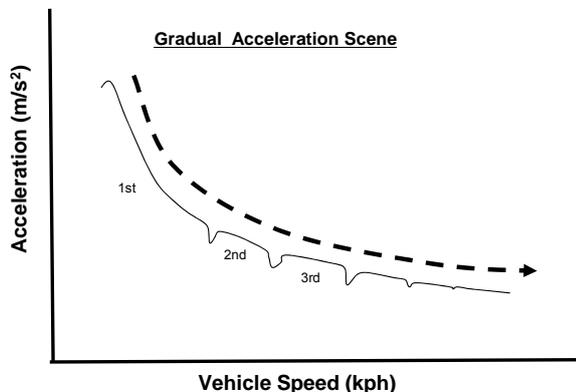


Fig.7 Acceleration – Vehicle Speed Relation

② 高回転まで伸びやかな加速感

アクセルペダル開度が比較的大きく、強い加速力や伸びやかな加速フィールを要求する領域では、余裕のあるトルクを活かしてギヤ段ごとに加速度の抑揚を持たせ、人間が伸びやかさを感じる目標加速度特性とした (Fig.9)。その結果、市場でも好評を得ている SKYACTIV-D 特有の力強く、伸びやかと感じる加速性能を実現した。

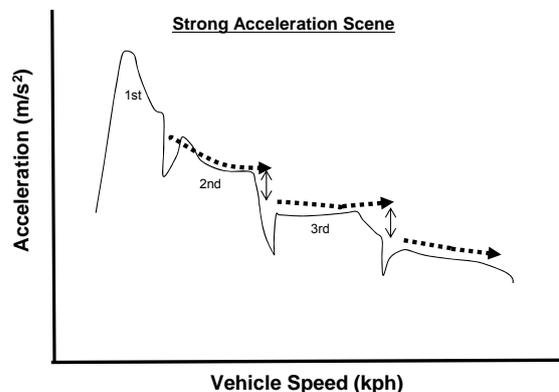


Fig.9 Acceleration – Vehicle Speed Relation

4.3 SKYACTIV-D 搭載モデル

SKYACTIV-D 搭載モデルは圧倒的な低速トルクと高回転までフラットにまわるトルク特性を活かし、加速感の楽しさや、余裕のある駆動力を意のままに操ることの楽しさが特長である。

CX-5 では以下の点に注力して、従来のディーゼルエンジンの常識を変える優れたレスポンスと、伸びやかな加速性能を実現した。

① アクセル操作に忠実なレスポンス

2 ステージターボの過給特性とエンジン低圧縮化によるフリクション低下のメリットを最大限に活用し、加速度の立ち上がりを早め、変化率をリニアにすることで、過給遅れを感じさせないレスポンスと扱いやすい加速特性を実現した (Fig.8)。

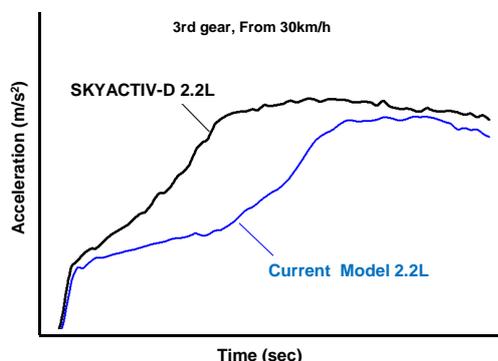


Fig.8 Acceleration - Time Relation

5. おわりに

CX-5 は、SKYACTIV TECHNOLOGY 開発に関わった多くの方がたゆまずブレークスルーに挑戦し、商品プロジェクト開発に担当された人々が最後まで諦めることなくこだわり続けたことで、サステイナブル“Zoom-Zoom”の体現車として相応しい商品を完成させることができたと感じている。

■ 著 者 ■



秋山 耕一



高戸 剛



佐々木 健二



山根 義昭



山形 弘彦



河野 敏文

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

7

SKYACTIV-シャシーのダイナミクス性能 Dynamics Performance of SKYACTIV-CHASSIS

村田 親*1

Shin Murata

中村 聡*4

Akira Nakamura

岩野 光男*2

Mitsuo Iwano

戸田 良二*5

Ryouji Toda

田中 稔*3

Minoru Tanaka

林 義博*6

Yoshihiro Hayashi

要約

SKYACTIV-シャシーは、走る喜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。このブレークスルー技術の基本構造を共通としながら、サスペンションジオメトリやステアリングギヤレシオ、その他多くの細かな造りこみを行うことで、クロスオーバー SUV の CX-5 と、フラッグシップセダンの新型アテンザのキャラクタへ進化させた。また、車両応答と操舵力の関係をリニアに見直し、他のダイナミクスフィールドと調和させ、クルマ全体で一体感を実現した。これらのダイナミクス性能の進化を実現しながら、骨格の最適化などにより大幅な軽量化を達成した。

Summary

With further evolved fun-to-drive and significant weight reduction to support environmental friendliness, Mazda SKYACTIV-chassis has also achieved “enhanced driving pleasure with oneness between a driver and a car”, and improved “driving quality” with enhanced comfort and a sense of confidence. With this technological breakthrough and base structure used as in common, suspension geometry, steering gear ratio and many other detailed specifications were developed to characters of CX-5 as crossover SUV and New ATENZA as a flagship sedan. Furthermore, oneness between a driver and a car was achieved by linearly-related vehicle response and steering wheel torque. With these evolved dynamic performance, significant weight reduction was also achieved by optimization of base structure.

1. はじめに

SKYACTIV-シャシーは走る喜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、マツダ新世代商品のトップバッターでクロスオーバー SUV の CX-5 と、これまでスポーティな走りでの好評を得てきたフラッグシップセダンの新型アテンザについ

て、SKYACTIV-シャシーのブレークスルー技術と基本構造を共通としながら、それぞれの異なるキャラクタをどのように具現化したか、その手段と達成性能を紹介する。

2. 開発のねらい

SKYACTIV-シャシーは、基本機能に立ち返りその役割分担を見直すことで、以下の一体感・安心感・快適性の間に存在する背反課題の両立（ブレークスルー）に取り組んだ。

- (A) 中低速域の軽快感と高速安定性の両立
- (B) 中低速域の軽快感と乗心地の両立
- (C) 軽量化とダイナミクス性能、NVH 性能の両立

*1～3 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

*6 NVH 性能・CAE 技術開発部
NVH & CAE Technology Development Dept.

*4, 5 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

これに加え、現行プレマシーから注力してきた、「走る・曲がる・止まる」に関わる他のダイナミクスフィールとの「統一感」の実現を SKYACTIV-シャシーの進化として取組んだ。ドライバの操作とクルマがシンクロしたような、予測しやすいリニアなフィードバックを得られることを狙った。加えて、他のダイナミクスフィールとの調和により「一体感を持ってクルマを操る喜び」の実現を目指した。

これらのダイナミクス性能を向上しながら、お客様に提供する商品として様々な要件を満足させるべくサスペンション・ステアリングシステムの開発を行った。

CX-5 は新世代クロスオーバー SUV として悪路走破性を担保しながら「乗用車に近い運転感覚」を併せ持った競合車にない魅力としてオンロード性能に注力した。

新型アテンザでは、現行モデルの「軽快でスポーティな走り」をいっそう進化させる。フラッグシップとしてスムーズなストローク、インパクト入力を抑えた質感の高い乗心地と、予見性のある挙動で欧州競合車レベルまで安定性を向上させつつ、ドライバの期待どおりの挙動となるよう操舵フィール、初期応答、ロール姿勢を造りこむことで欧州プレミアム車同等以上の「意のままに操る楽しさを実感する真の Zoom-Zoom」の実現を目指した。

3. 達成手段

3.1 構造と特徴

SKYACTIV-シャシーでは、性能と軽量化の高次元のバランスを狙い、フロントにマクファーソンストラット式サスペンションを、リヤに E 型マルチリンク式サスペンションを新開発した(Fig.1,2)。CX-5 と新型アテンザは車幅、車高やタイヤサイズ等の車両諸元の違いに適合させながら、共通の基本構造を実現した。

ステアリングは軽量かつ燃費性能の高いコラム式電動パワーステアリングを採用、ハードとソフト面に工夫を施しシステムを新開発した。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およびフリクション感を低減、また、ソフト面は従来制御では操舵トルクおよび車速情報でのアシスト量調整だったのに対し、新制御では絶対舵角およ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調整を可能にした。

3.2 (A) 中低速域の軽快感と高速安定性の両立

SKYACTIV-シャシーでは特に後輪のコーナーリングパワーを増加させ安定性を高めた上で、ステアリングギヤレシオを高速化しヨーレイトゲインを高め、パワーステアリングのアシスト量を最適化することで、中低速の軽快感と高速安定性を両立させた。

後輪のコーナーリングパワーを増加させるため、サスペンションのリンク配置とブッシュばね定数を最適化した。横力コンプライアンスステアをトーイン特性としつつキャ

ンバコンプライアンスを適値に設定、ロールステア変化を調整し、コーナーリングパワーに占めるサスペンションジオメトリ、コンプライアンス分の割合を増加させた。

CX-5 と新型アテンザはコンプライアンスとロールステア変化量で必要なコーナーリングパワーを調整した。CX-5 は SUV としての穏やかな動きを持ちながら乗用車に近い運転感覚を得るのに必要十分なコーナーリングパワーを設定し、新型アテンザではより高速までをカバーしながらスポーティセダンにふさわしい軽快な応答を実現するため大幅に増加させた (Fig.3)。



Fig.1 Front Suspension and Steering



Fig.2 Rear Suspension

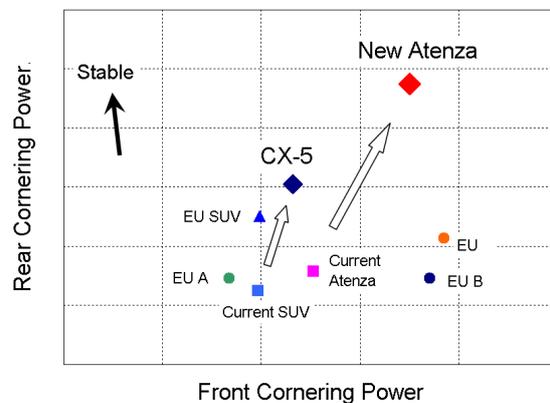


Fig.3 Rear Cornering Power Comparison

トータルギヤレシオは CX-5 の 15.5, 新型アテンザの 14.2 と現行比約 10%高速化し中低速のヨーレイトゲインを増加させた。

フロントサスペンションはキャスト角を約 7deg と大きく取りキャストトレールを拡大することで、セルフ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増加, 外乱に動じない安定性を確保した。また、車速や操舵角, 操舵速度に応じたきめ細かなアシスト特性を持たせ、様々なシーンに適応した操舵フィールを実現した。

3.3 (B) 中低速域の軽快感と乗心地の両立

サスペンションのジオメトリとコンプライアンスを最適化することで、車両運動に必要なコーナリングパワーに占めるタイヤ接地荷重変動成分を減らした、これによりダンパ減衰力とブッシュのばね定数を低くでき、軽快感と乗心地を両立させた。また、リヤダンパはアクスルに取り付け点を設けることで、ダンパレバー比を 1.0 とし減衰力の応答を向上させた。

前後入力を主に受け持つトレーリングリンクはボデー取り付け点を、現行アテンザ比 45mm 上方に設置し上下ストロークに対する後退軌跡を大きく取った。これにより突起乗り越し時のショックや粗粒路面の細かな入力をリンク前後方向に伝えるべくして車体乗員位置の振動を低減した。

3.4 (C) 軽量化とダイナミクス性能, NVH 性能の両立

SKYACTIV-シャーシでは基本骨格の最適化により軽量化と高剛性の両立を実現した。

リヤサスペンションクロスメンバのボデーマウントはラバーマウントとし、フロントペリメータフレームは従来のラバーマウントからリジッドマウントとすることで、操舵時の剛性感や応答遅れと NVH や乗心地を両立しながら全体で軽量化を計った。

サスペンションの構造部材は、入力をストレートに受け止めるよう最適化した基本骨格とすることで薄板化ができ、軽量化と高剛性の両立をはかった。例えば、リヤサスペンションクロスメンバは現行から約 20%の軽量化をしながら剛性は同等を達成した。

ロードノイズの低減は、サスペンション部品の共振点を重なり合わないよう調整することで、特定の周波数の音が大きくなることを防止した。部品ごとの共振点配置を Fig4 に示す。更にホイールについては、各部位の構造とロードノイズに寄与の大きい特性との関係を解明することで、デザイン性を確保しながら最も重量効率が優れる仕様を導出、大径化に関わらず重量増加を最小限に抑え、大幅な特性改善を実現した。

サスペンションブッシュは、前述のように軽快感と乗心地を両立しながら、ばね定数を低減させたが、更にロードノイズに寄与の高い部位のブッシュについては、構造とラバー材料を工夫することで動的ばね定数の低減に配慮した。たとえばフロントストラットマウントは現行比 24%減、リ

ヤクロスメンバブッシュは約 80%と大幅に低減した。

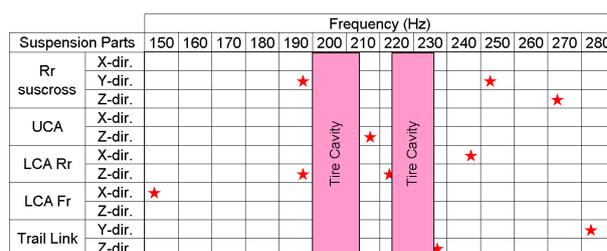


Fig.4 Suspension Modal Map

3.5 ダイナミクスフィールの統一感の実現

SKYACTIV-シャーシの進化として取り組んだダイナミクスフィールの統一感とは、車両のヨーレイト, 横 G およびロール応答の位相遅れを適正化し、車両応答のつながりを向上、操舵力と車両応答の関係を、切り込み側のみならず戻し側も見直すことにより、リニアでドライバ操作と車両の一体感が得られることに注力した。このために、コーナリングパワーの前後輪のバランスを微妙に調整しヨーレイト, 横 G 応答のリニアなつながりを実現した。

ロール軸は前下がりのダイアゴナルな設定にするとともにアンチダイブ/スクワット, アンチリフトジオメトリの最適設定を行った。CX-5 はセダン比で高い重心に合わせてロールセンターを高く設定した。

スムーズなストローク感を実現するためフロントコイルスプリングの配置と横力制御量を適正化、フロントロアアーム前後ブッシュ特性のバランスにより抗力を減らしストロークに対するフリクション低減を行った、リヤサスペンションでは従来に対して十分長いリンク長を確保しブッシュのねじり角度変化を抑え二重ブッシュとしてストローク抗力を低減した。

その上で CX-5, 新型アテンザそれぞれのキャラクターにあわせ、前後のスプリングとスタビライザの調整により、ばね上の動き量と動きモードを造りこんだ、これらにより荷重移動に対して初期からスムーズでリニアなサスペンションストローク感, ボデーモーションを実現した。

4. 達成性能

SKYACTIV-シャーシでは走る歓びの更なる進化「人馬一体のドライビングプレジャー」の向上, 快適性や安心感改善による「走りの質」の向上を目指してきた。これらの基本性能のポテンシャル向上の造りこみに加えて、個別車種としてのキャラクター造りに注力した。

CX-5 は SUV としての穏やかな動きを持ちながら、一体感のある乗用車に近い運転感覚で競合車にない魅力を狙い、新型アテンザでは上質で気持ちのよい走りを目指して、より高速域までをカバーしながらスポーティセダンにふさわしい一体感のある応答の実現を目指した。これらの達成性能を以下に紹介する。

4.1 人馬一体感と安心感の達成

Fig.5 に車速によるヨーレイトゲインの変化を示す。後輪のコーナーリングパワーを増加させ、ステアリングギヤレシオを高速化することで、ヨーレイトゲインを中低速では高く、高速域では低くすることを旨とした。

CX-5、新型アテンザとも現行と比較して、ピークはより低速側に移動し、中低速ではヨーレイトゲインを高く軽快に、高速ではゲインを低く安定感を得ることを達成した。その上で、CX-5はSUVとしての一体感を得るのに十分高いヨーレイトゲインを設定し、新型アテンザは、より高いゲインを持たせることで、スポーティセダンに相応しい軽快感を実現した。欧州現地で200kphの高速域でも安心感が大幅に向上していることを確認できた。

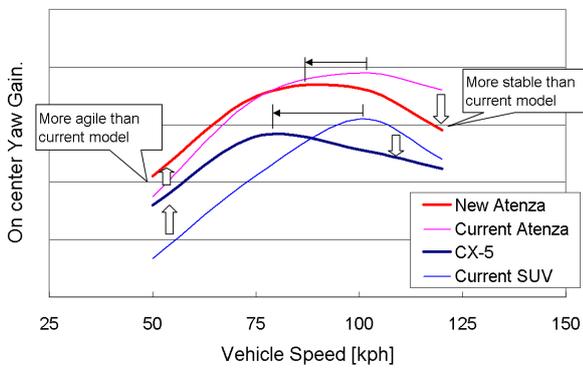


Fig.5 Improvement of Yaw Rate Gain

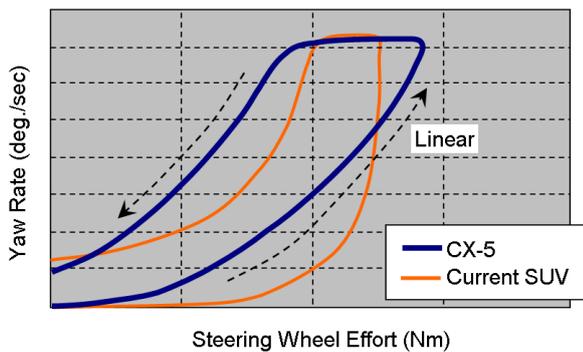


Fig.6 Steering Torque-Yaw Rate Linearity

統一感の実現については、操舵力と車両応答の関係を見直した。Fig.6 に操舵力と車両応答の一例としてヨーレイトの関係を示す。ヨーレイト、横G応答やロールなどの動きがリニアでスムーズにつながるように造りこむことに注力した。これに加え、パワーステアリングのアシスト特性を小舵角付近では操舵力を軽めにして明確で軽快に、舵角が進むとアシストを小さく重めでしっかりした感じを出すことで、車両応答と手応えのリニアな関係を実現した。また、切り込み時にリニアと感じられる特性の実現と、戻し側でのコントロール性を向上させる適切なヒステリシスの

設定を行った。

CX-5では重心の高いSUVで軽快感と安心感を両立させるため、特にロールのモードの造りこみに注力した。Fig.7はブレーキング～ターンイン～定常旋回の一連のシーンの中で、ターンインの瞬間の四輪それぞれの上下変位、つまりロールモードを示したものである。CX-5のロールはダイアゴナルモードが強く、前輪の旋回外輪はしっかり沈みこみ、内輪は浮きが小さく抑えられ不安感なく軽快と感じられる、また、定常に至る過渡的な動きの変化を穏やかにして、ドライバが感じる車両の応答性を弱アンダーでリニアな特性に合わせ込んだ。

新型アテンザでは、更に応答遅れを短縮しながら、コーナーリングではステアリングを切った分だけのリニアなフィードバックから感じる一体感のある操舵フィーリングとコントロール性、フロントの内外輪がしっかりと路面をつかんでカーブを曲がりきる、意のままの運転感覚を実現した。

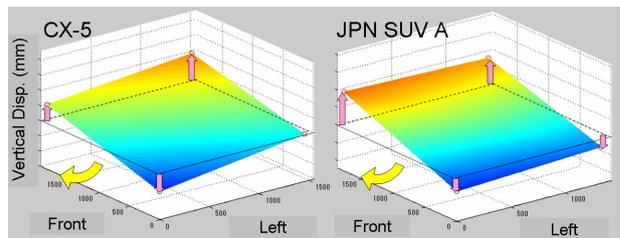


Fig.7 Roll Mode Comparison

4.2 快適性の達成

快適性では乗心地とロードノイズ性能の向上を実現した。突起乗り越し時のインパクトショック入力のレベルをFig.8に示す。大径タイヤで地上高を確保したSUVは後退軌跡が取りやすくインパクト入力は低く抑えやすいがCX-5は競合車と比べても低いレベルを達成した。新型アテンザも軽快感を確保しながら欧州プレミアム以下のショックレベルに抑えた。また、荒れた路面でのビリビリ、ゴツゴツとした振動レベルも低減し、入力を抑えスッキリとして減衰感のある質感の高い乗心地を実現した。

Fig.9は粗粒路ロードノイズの音圧レベルを示すが、前述のようなダイナミクス性能と軽量化で進化を実現しながら、現行車からの低減を達成した。新型アテンザは更に欧州プレミアム車並みの上質さを出すため一段低いレベルを実現した。

まとめとしてSKYACTIV-シャシーで目指した「人馬一体のドライビングプレジャー」の向上、快適性や安心感改善による「走りの質」の向上についての達成状況をFig.10,11に示す。

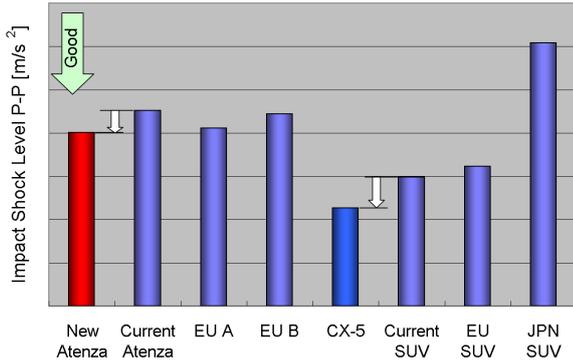


Fig.8 Result of Impact Shock Measurement

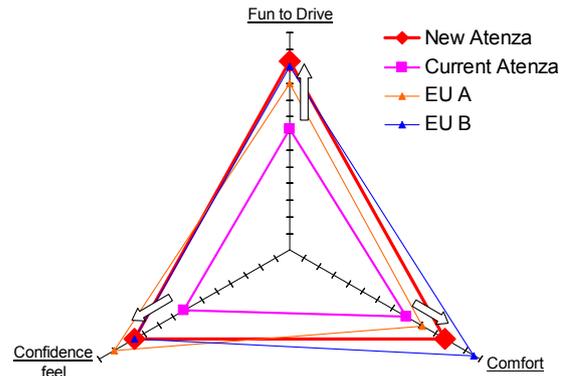


Fig.11 New Atenza Dynamics Result

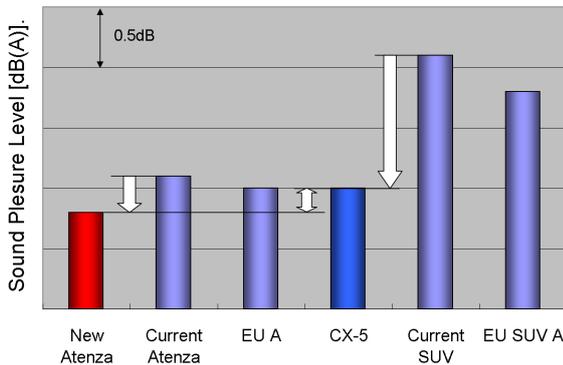


Fig.9 Result of Coarse Road Noise Level

5. おわりに

SKYACTIV-シャシーのダイナミクス性能について、CX-5 と新型アテンザの商品開発のエッセンスを紹介した。チームはマツダのダイナミクス性能レベルを大きく引き上げられたと自負しており、CX-5 も市場で好評に受け入れられている。今後、更なる高みを目指して取り組みを続けていく。

参考文献

- (1) 山本忠信ほか:SKYACTIV-シャシー, マツダ技報, No29, pp.53-60 (2011)

評価指標は一体感・安心感・快適性の3軸で定義しているが、この3軸はお互いに背反するため、三角形の大きさは、つまりシャシーのポテンシャルの高さを表現している。

CX-5 は快適性で欧州競合車レベルをキープしながら一体感・安心感でそれを超える性能を達成した。

新型アテンザも大幅なポテンシャル向上を達成し安心感・快適性で欧州プレミアム群と同等に、一体感では同等以上を達成し、質が高く意のままの走りを実現した。

これらのダイナミクス性能の大幅なポテンシャルアップを達成しながら、サスペンション・ステアリングの重量は現行に対して約 28kg (新型アテンザ) 低減し環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現した。

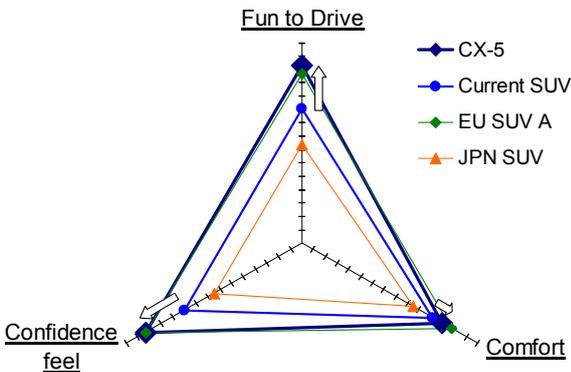


Fig.10 CX-5 Dynamics Result

■ 著 者 ■



村田 親



岩野 光男



田中 稔



中村 聡



戸田 良二



林 義博

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

8

減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”の開発

Development of the “i-ELOOP”

高橋 正好*1 Masayoshi Takahashi	高橋 達朗*2 Tatsuro Takahashi	北木 義正*3 Yoshimasa Kitaki
山下 丈晴*4 Takeharu Yamashita	北川 浩之*5 Hiroyuki Kitagawa	平野 晴洋*6 Seiyo Hirano

要約

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、「ビルディングブロック戦略」を推進している（Fig.1）。新世代技術「SKYACTIV TECHNOLOGY（スカイアクティブテクノロジー）」で、クルマの基本性能となるパワートレインの効率向上や車両の軽量化などのベース技術を徹底的に向上し、段階的に電気デバイス技術を組み合わせて、CO₂の総排出量を削減していく。そのSTEP2となる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新たな減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」（Intelligent Energy LOOP）を開発した。

今回その「ビルディングブロック戦略」のSTEP2となる減速回生技術「i-ELOOP」について技術紹介する。



Fig.1 Building Block Strategy

Summary

Based on the Sustainable “Zoom-Zoom” plan, Mazda’s long-term vision for technology development, we have been advancing what is called a “Building Block Strategy”.

With use of a new-generation technology called “SKYACTIV TECHNOLOGY”, we intend to thoroughly improve Mazda’s base technologies with an eye to improving the powertrain efficiency, reducing the vehicle weight, and eventually combining them with electric device technologies in a phased manner so as to reduce total CO₂ emissions.

As the second step of this approach, Mazda has developed a new regenerative braking system called “i-ELOOP”, where the energy generated during deceleration is recovered and reused as electric energy necessary for a vehicle to move.

This paper introduces the “i-ELOOP”, a regenerative braking technology developed as the second step of the Building Block Strategy.

1. はじめに

世界的な低燃費志向の高まりを受け、マツダでも数々の燃費低減策が提案されてきた。Fig.2 はスカイアクティブテクノロジーのコンセプトを示している。このコンセプトと“i-ELOOP”との関連をはじめに説明する。これらの改善

アイテムの中で、電気システムでの改善が効率的にできる領域として、Fig.2 の 5.の廃棄していたエネルギーの再利用と 3. エンジンの仕事量削減と 4.エンジンの駆動力不要時燃料カットを関連付けてシステム化し、改善できる領域があると考え、燃料を使用したオルタネータでの発電をゼロ

*1～5 車両システム開発部
Vehicle system Development Dept.

*6 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

にするコンセプトの“i-ELOOP”の開発となった。

このシステムは、「回生する」、「ためる」、「使う」の3要素からなっており、特に「回生する」、「ためる」では、減速時の短時間で、いかに減速エネルギーを効率よく回収するかが開発のポイントとなる。

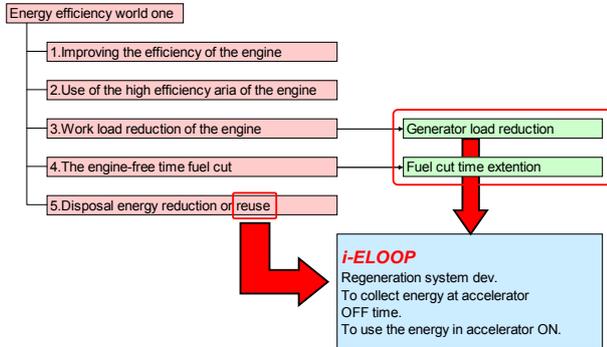


Fig.2 Improvement Items of Energy Efficiency Vs “i-ELOOP”

2. システム説明

2.1 主要機能説明 & レイアウト

減速エネルギーを回生する機能は、パルス幅コントロールにより励磁電流を制御した最大25V発電の可変電圧オルタネータに持たせた。回生したエネルギーを溜める機能は、主に電気二重層キャパシタ（以下 EDLC ; Electric Double Layer Capacitor）に持たせている。瞬時に大きなエネルギーを溜めるため、低抵抗で大容量の EDLC をキャパシタ サプライヤと開発した。（Fig.3, 4）

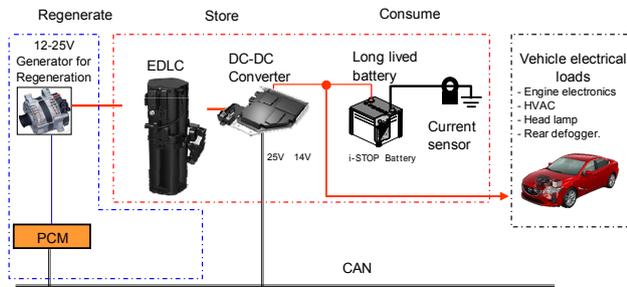


Fig.3 System Diagram

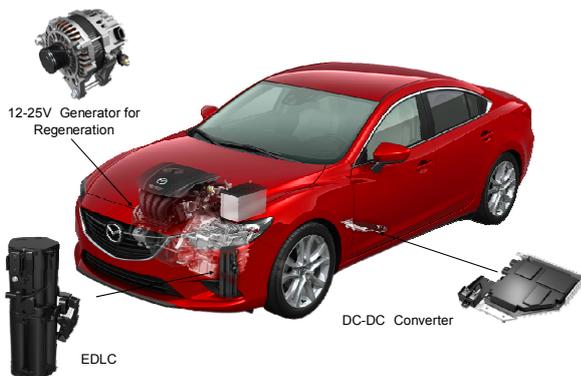


Fig.4 Layout

2.2 “i-ELOOP”システムのブレークスルー技術

効率的に減速エネルギーを回生し、回生したエネルギーを素早く蓄え、蓄えた電気を素早く・効率的に使用するシステムを構築するため、下記の2項目をブレークスルー技術 (Fig.5) として開発した。

- ・高電圧化によりエネルギーを効率的に回生する 12V～25V 可変電圧式の減速エネルギー回生用オルタネータを採用 (Fig.6)
- ・回生したエネルギーを瞬時に溜める低抵抗大容量電気二重層キャパシタを採用 (Fig.7)

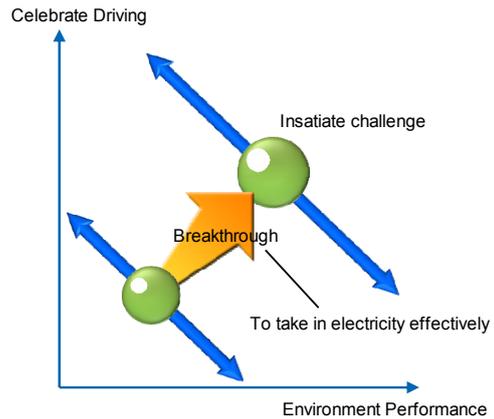


Fig.5 Break Through Image



Fig.6 12V-25V Generator for Regeneration



Fig.7 EDLC

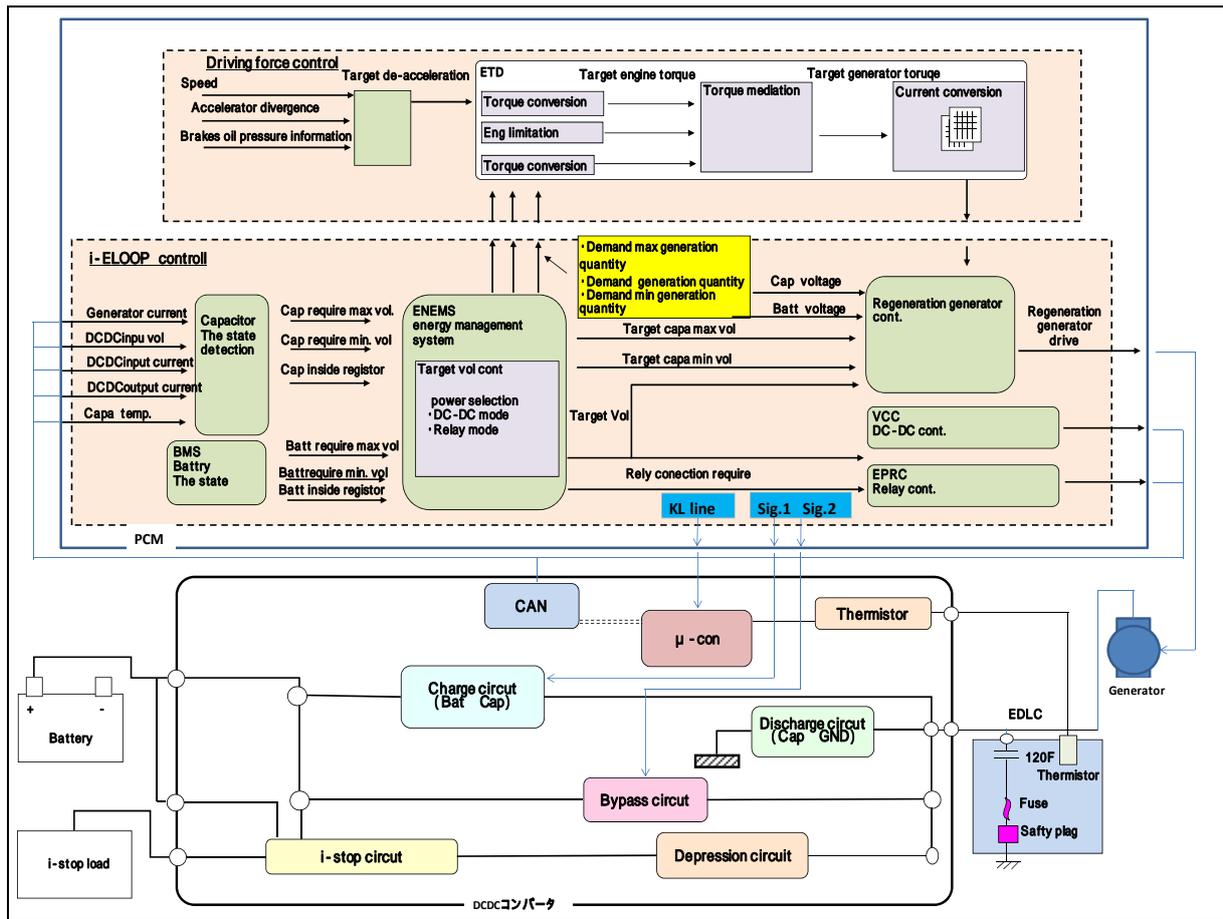


Fig.8 System

2.3 機能別システム説明

システム構成を電気回路の機能別に示した図が Fig.8 である。EDLC にはショート保護用ヒューズとサービス用安全プラグ、温度保証用としてサーミスタを配置している。DC-DC コンバータには降圧回路、EDLC 充電用回路、放電用回路、i-stop バックアップ回路、過電流時直結リレー回路、EDLC サーミスタ読み取り回路を配置している。

PCM(Power train Control Module)は車速、アクセル開度、ブレーキ油圧を読み込み、目標減速度を算出する。この結果と減速回生制御が監視している EDLC や鉛バッテリーの状態からオルタネータの発電量を決定している。更に PCM は、車両消費電流とバッテリー状態から DC-DC コンバータの出力電流を決定し、発電を指示している。

また、"i-ELOOP"システム関連のリレー制御指示も PCM が行っている。Fig.8 で示す KL ライン(図中青塗)は i-stop 時のリスタート情報を PCM から DC-DC コンバータに送りリスタート時の電源変動対応を行っているリレーを制御する回路である。Fig.8 で示す Sig1, Sig2(図中青塗)は、車両負荷が過負荷時や DC-DC 故障時などに対応するバイパスリレーを PCM から制御している信号である。バイパスリレーを ON するとオルタネータと鉛バッテリーは直結され、通常の車両と同じ機能になる。

2.4 燃費改善目標と個別部品スペックの決定について

"i-ELOOP"では、燃料を使用したオルタネータでの発電をなくし、回生エネルギーだけで車両消費電流をカバーすることを柱とした。

実際の加減速が頻繁にある市場走行シーンにおいて、相当の電気負荷時に約 10%程度の燃費改善率が得られるように目標を設定した。実際は、燃費測定モードの方が実走行シーンに比べ加減速が少なく回生エネルギーが少ないことから、燃費測定モードの走行において、燃料での発電をなしにできれば、狙いの燃費の向上が図れる。よって、ヨーロッパ燃費測定モード NEDC で燃料による発電をゼロとなるよう先行暫定目標を立て個別部品に振り分けた。Fig.9 のように最初に車両の必要総エネルギーを算出する。また回生エネルギーを取るための余裕減速度を算出し、回生取得可能総エネルギー量を出す。この総量から減速 1 回当たりの必要エネルギーを算出し、関連デバイスの個別スペックに振り分けた。

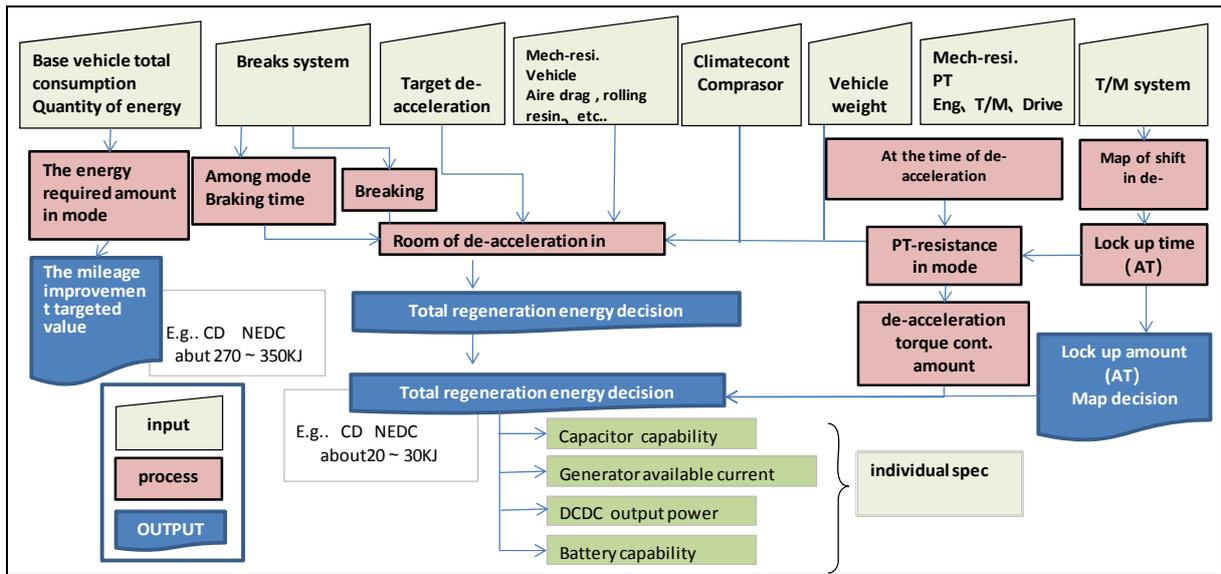


Fig.9 Relation for Spec

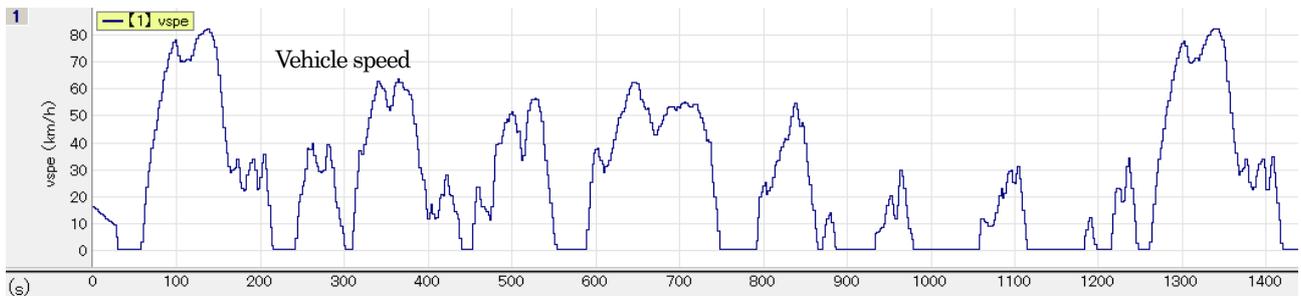


Fig.10 JC08 Speed Pattern

3. デバイス仕様と効果

3.1 “i-ELOOP” キャパシタ容量決定と効果

“i-ELOOP”は、消費電流が大きく加減速の比較的多い実走行時に実力を発揮する。仮の目標を決定するため、実際の走行シーンの加減速頻度の一般的代表として日本の燃費測定モード JC08 (Fig.10) を使用した。JC08 での加減速では、10 秒以上の車速ゼロおよびアクセル ON が 20 回で最長 80 秒であり、平均すると 38.7 秒となる。いろいろな走行シーンから、燃費モード測定時の消費電流値約 15~20A に対し実走行時を考慮 40A の消費電流時でのエネルギー計算とした。40A の消費電流で、45 秒電力供給できる $13.5V \times 40A \times 45 \text{ 秒} = 24.3kJ$ を仮の目標とした。実際の仕様では EDLC の規格やオルタネータの仕様から 25.7kJ の設計となっている。

キャパシタの必要容量 C を求める。1 回当たりの充電必要エネルギー E は 24.3kJ。電荷を Q とすると E は Q の電圧 V での積分値となる。よって関係は次式となる。これにより静電容量 C を求める。

$$E = \int_{14}^{25} Q \, dv \quad Q=CV \text{ から } E = \int_{14}^{25} CV \, dv = \left[\frac{1}{2} CV^2 \right]_{14}^{25}$$

以上から $C=113F$ (実際は実用燃費優先で劣化も考慮し 120F とした。)

1 回あたり充電時間検証

充電時間 t は 1 回あたりの充電電流を 200A とすると、 $Q=CV$ から $200t=120 \times (25-14) \Rightarrow t=6.6 \text{ sec}$ ただし本計算では内部抵抗値は無視している。

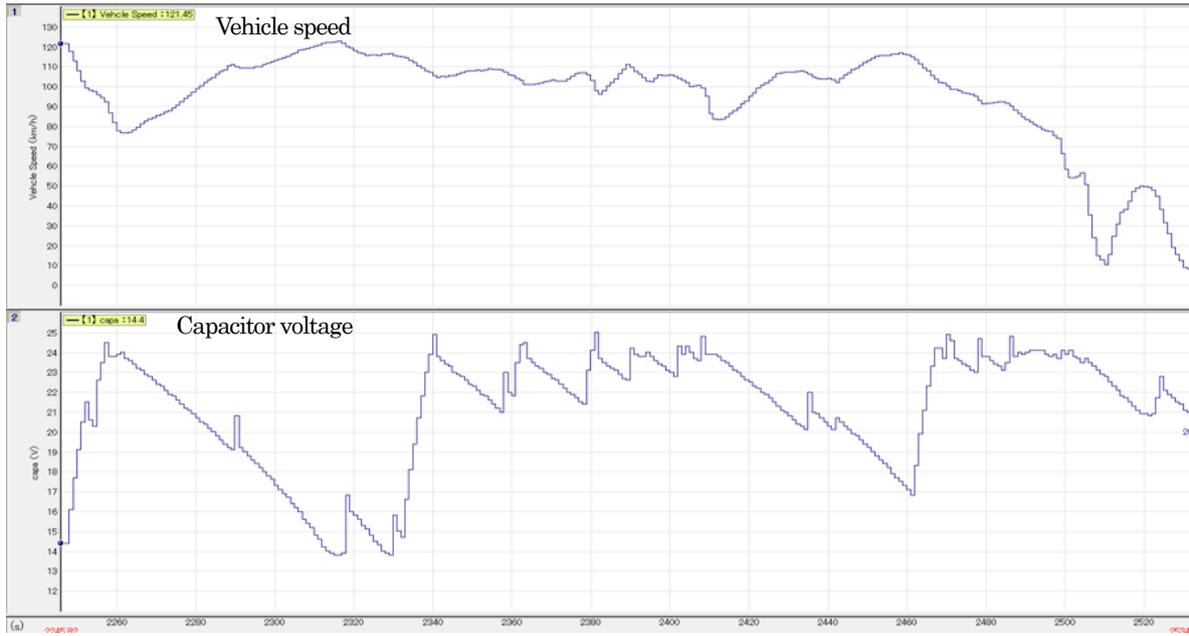


Fig.11 Test Data of USA 405 Freeway (Ex. Scene A)

シーン A <十分な加減速頻度で常に車両消費電流を回生エネルギーで賄えるシーンでの効果>

Fig.11 は、シーン A の実際の走行データである。USA405 フリーウエイでの約 5 分間のデータを示す。車間距離が詰まりながらも 80km/h から 120km/h の加減速を繰り返している。シーン A では、常に減速エネルギーのみで車両の電気負荷を補い、燃料による発電がないことがわかる。Fig.12 は十分な加減速頻度で常に車両消費電流を回生エネルギーで賄える場合の消費電流 Vs 燃費改善率のイメージをグラフ化したものである。実際の燃費改善率は、各車種の質量やエンジン効率、平均消費電流により変化する。

例えば 15A の平均消費電流の車種では、3~5%程度の改善率と推定される。実用走行では 30~40A の消費電流が一般的にあり、シーン A のような十分な加減速頻度で、常に車両消費電流を回生エネルギーで賄える場合の燃費 10%程度が見込まれる。

シーン B <加減速頻度が少なく車両消費電流の約半分を回生エネルギーで賄えるシーンでの効果>

Fig.13 は加減速頻度が少なく車両消費電流の約半分を回生エネルギーで賄える場合の消費電流 Vs 燃費改善率のイメージをグラフ化したものである。Fig.12 同様に実際の燃費改善率は各車種の質量やエンジン効率により変化する。同様に実用走行では 30~40A の消費電流でシーン B のような加減速頻度が少なく車両消費電流の約半分を回生エネルギーで賄える場合 5%程度の燃費向上が見込まれる。走行中の発電は約半分が燃料による発電となる。

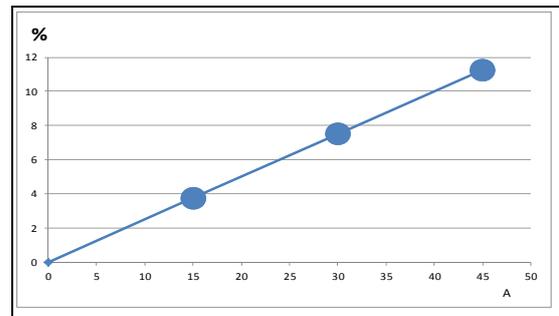


Fig.12 Fuel Economy Ratio Vs Current Image

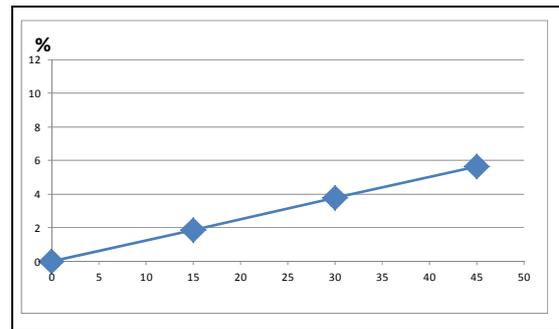


Fig.13 Fuel Economy Ratio Vs Current image

3.2 車両消費電流について

ヨーロッパの燃費測定モード NEDC では Fig.14 のような消費電流となる。

ただし車種やエンジン、ミッション等の種類で CD カークラスでは 16~24A 程度となる。

実用時では、上記のベース電流に加えて Fig.15 のような電気負荷がある。走行中の状況に消費電流は変化するが、例えば、夏の雨の日の夜であれば、プロア Cool-MID、ワイパー、ヘッドライトで約 23A が上記のベースに追加される。よってトータルの消費電流は約 40A となる。

このような場合、加減速が頻繁にあるシーンAのような状況では10%程度の燃費向上が見込まれる。

また連続した加減速があまりないシーンBのような状況でも5%程度の燃費向上が見込まれる。

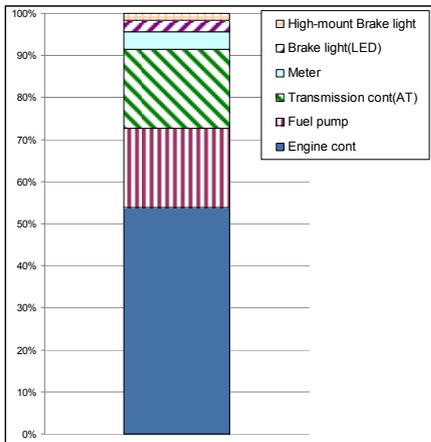


Fig.14 Basic Current for EU Image

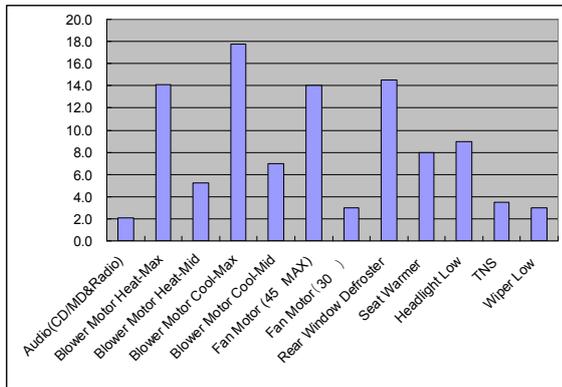


Fig.15 General Current Image

4. “i-ELOOP”のエネルギー表示について

新型アテンザの“i-ELOOP”表示について回生エネルギーの循環がわかる表示 (Fig.16) と、よりアトラクティブな表示 (Fig.17) の2種類を用意した。(ただし一部地域で異なる)

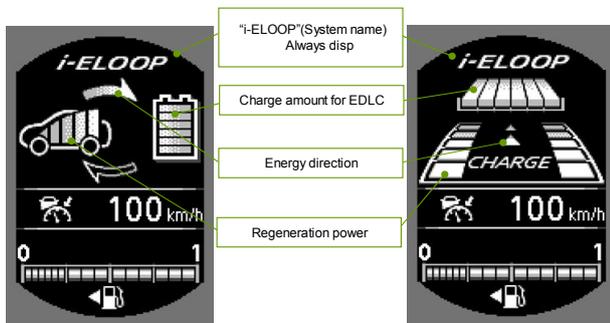


Fig.16 “i-ELOOP” Disp.1

Fig.17 “i-ELOOP” Disp.2

主な表示の説明

瞬間回生エネルギー量；

アクセル OFF 後回生オルタネータの発電電流量をバー表示で表したものを。

エネルギー移動の向き；

Fig16では左から右への矢印が回生オルタネータからEDLCへの充電方向を示す。

Fig17では下から上の方向に回生オルタネータからEDLCへの充電方向を示す。

右から左への矢印；

EDLCから車両電気負荷に送られる方向を示す。

EDLCの充電量；

EDLCの充電量を示す。

今回の表示では、実使用可能エネルギー 25.7KJ がフルバー表示となる。エンジンコントロールユニットからの表示指示に従いメータに表示する。また、上記2種類の画面は、ハンドルスイッチの中のINFOボタンで選択可能である。

5. まとめ

燃料を使いオルタネータで発電した電気を使用する通常の車両のシステムに対し、これまで捨てていた減速時の運動エネルギーを再利用することで、極力燃料による発電をなくす回生システムである。通常のシステムに対し、オルタネータの電子回路の小変更とキャパシタ、DC-DCコンバータを追加するのみで、システム構成で大きな変更もなく、コストパフォーマンスに優れたシステムである。特に実用領域では、モード燃費測定時に比べ消費電流が多いため、より燃費向上効果を発揮することが見込まれ、環境対応に貢献できると考えている。将来的には、電動ウォーターポンプや電動コンプレッサの採用等の環境対応や衝突被害軽減装置等の安全装備のエレキシステムが増え、それらのシステムでの消費電流の増加による燃費悪化に対応できるシステムとして、システムの進化、デバイスの進化による対応が不可欠と考えている。“i-ELOOP”を通じて、環境に優しく“Zoom-Zoom”な走りのクルマの提供に今後も貢献していきたい。

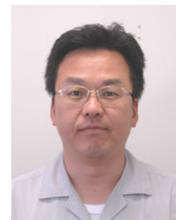
■ 著 者 ■



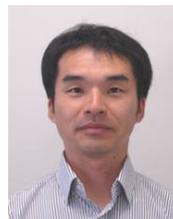
高橋 正好



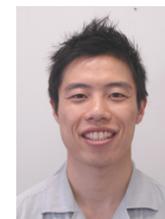
高橋 達朗



北木 義正



山下 丈晴



北川 浩之



平野 晴洋

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

9

減速エネルギー回生システム “i-ELOOP” のデバイス開発

Development of the “i-ELOOP” Device

高橋 正好*1 藤田 弘輝*2 鈴木 正悟*3
Masayoshi Takahashi Hiroki Fujita Seigo Suzuki
西田 史彦*4
Fumihiko Nishida

要約

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、「ビルディングブロック戦略」を推進している。

新世代技術「SKYACTIV TECHNOLOGY（スカイアクティブテクノロジー）」で、クルマの基本性能となるパワートレインの効率向上や車両の軽量化などのベース技術を徹底的に向上し、更に段階的に電気デバイス技術を組み合わせて、CO₂の総排出量を削減していく。そのSTEP2となる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新たな減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」（Intelligent Energy LOOP）を開発した。今回はその「ビルディングブロック戦略」のSTEP2となる減速回生技術「i-ELOOP」のデバイス技術として低抵抗大容量電気二重層キャパシタ（以下EDLC；Electric Double Layer Capacitor）とDC-DCコンバータについて技術紹介する。

Summary

Based on the “Sustainable Zoom-Zoom” plan, Mazda’s long-term vision for technology development, we have been advancing what is called a “Building Block Strategy”.

With use of a new-generation technology called “SKYACTIV TECHNOLOGY”, we intend to thoroughly improve Mazda’s base technologies with an eye to improving the powertrain efficiency, reducing the vehicle weight, and eventually combining them with electric device technologies in a phased manner so as to reduce total CO₂ emissions.

As the second step of this approach, Mazda has developed a new regenerative braking system called “i-ELOOP”, where the energy generated during deceleration is recovered and reused as electric energy necessary for a vehicle to move.

This paper introduces the Electric Double Layer Capacitor (hereinafter referred to as EDLC) and the DC-DC converter as device technologies of the “i-ELOOP”, a regenerative braking technology developed as the second step of the Building Block Strategy.

1. はじめに

世界的な低燃費志向の高まりを受けマツダでも数々の燃費低減策が提案されてきた。Fig.1 はスカイアクティブテクノロジーのコンセプトを示している。このコンセプトと“i-ELOOP”との関連をはじめに説明する。これらの改善アイテムの中で電気システムでの改善が効率的にできる領域

として、「廃棄していたエネルギーの再利用」と、「エンジンの仕事量削減」と、「エンジンの駆動力不要時燃料カット」を関連付けてシステム化し改善できる領域があると考へ、オルタネータによる燃料での発電をゼロにするコンセプトの“i-ELOOP”の開発となった。その柱となる低抵抗大容量EDLCとDC-DCコンバータについて紹介する。

*1, 3~4 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

*2 技術研究所
Technical Research Center

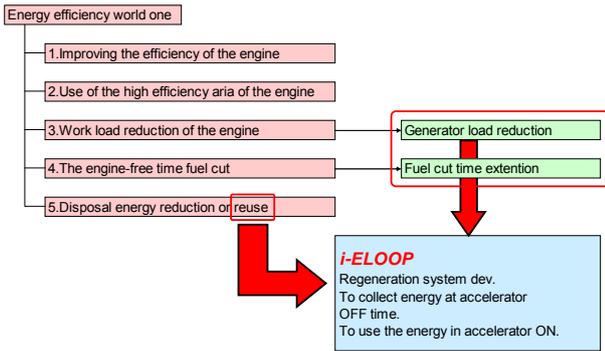


Fig.1 Improvement Items of Energy Efficiency vs "i-ELOOP"



Fig.2 Module Form

i-ELOOPのシステムについては、「減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」の開発」を参照願います。

2. "i-ELOOP"用 EDLC の仕様について

2.1 要求仕様

"i-ELOOP"システムは、燃料による発電をなくし回生エネルギーだけで車両消費電流をカバーすることを柱としており、加減速が頻繁で 40A 程度の電流消費時に 10%程度の燃費向上を目標とした。そのため、Table 1 に示すように、EDLC に求められるエネルギー量は、モジュール容量 120F 以上、エネルギー量 23kJ 以上とした。

回生する機能は最大 25V 発電の可変電圧オルタネータに持たせた。パルス幅制御により励磁電流を制御しレギュレータレスの可変電圧としている。EDLC モジュールは、鉛バッテリーと並接し、回収機能をメインで持たせるため、12~25V の範囲で 200A (オルタネータの制約のため) の回生が可能な事が要求される。また、居住空間 (車室内/トランク) の広さを優先し、エンジンルーム内搭載を目指した。

そのため、特に 85℃のような高温環境下でも、特性劣化しにくく、自身の発熱による性能悪化を最小限にするため、従来より低い内部抵抗を要求仕様とした。これらの要求を満足させることで、軽量コンパクトなモジュールが実現可能となった (Fig.2)。

Table 1 Requirements specification of i-ELOOP capacitor module

1)	Input Voltage	0~25V
2)	Module Capacity	120F
3)	Energy amount	min.23kJ (At 14-25V)
4)	Resistance	12mΩ
5)	Charge electric current level maximum	200A
6)	Temperature security range	-30~70℃
7)	Storage Temperature	Max.85℃

3. 電気二重層キャパシタ (EDLC) 選定理由

3.1 性能要求からの選定理由

上記仕様を満足する蓄電デバイスの検証を行った。蓄電デバイスとして、物理反応原理の EDLC と化学反応原理の Li イオン電池 (以下 LiB)、ニッケル水素電池 (以下 Ni-MH) 及び鉛バッテリーで比較を実施した (Table 2)。選定のポイントは、①低電圧系で、大電流 (200A) での受入れ性、②エンジンルーム搭載を想定した寿命性能の実現性である。

まず、①受入れ性であるが、Ni-MH電池は、電流受入れ性を考えると、2 並列以上で対応する必要があり、モジュールが大型化する懸念があることから候補からはずした。また鉛バッテリーは、受入れ性を高めると寿命が短くなるため、本システム用途には適用できないと考えた。EDLCとLiBは、パワー密度が 4,000W/kg以上であり、本システムへの適用は可能である。ただし、LiBは、寿命末期では回生効率の低下が懸念される。次に②寿命性能であるが、エンジンルーム搭載場所は、通常走行であれば走行風が当たるため、温度は上昇しにくい。渋滞やアイドリング停車では、80℃を超える高温環境に曝される場合がある。そのため、蓄電デバイス自身の耐熱特性のみで寿命性能を満足する必要がある。更に、本システムは低電圧系のため、通常のHEVよりも平均電流値が大きくなり、発熱量の増加が懸念される。よって使用环境温度の上限が 60℃であるLiBとNi-MH電池は、専用の冷却システムが必要となり大型化することと安全性面で選定から外した。一方EDLCは自動車用途として高温での寿命性能の向上が検討されており、使用範囲が 70℃以上まで拡大したのもも報告されている⁽¹⁾ ⁽²⁾。また、LiBやNi-MHに比べて内部抵抗が小さいことが特徴であるとともに、長寿命、環境への負荷低減などに優位性がある。従って、エンジンルーム内への搭載が可能で、本システムのような短時間大電流回生用途に適していると考え、EDLCを選定した。

Fig.3 に "i-ELOOP" と従来車の比較イメージ図を示す。

Table 2 Performance Comparison of Storage Device

	Capasitor		Lithium-ion batteries		Nickel-metal hydride bateries		Lead-acid storage batteries	
type	Electric double layer		HEV application		HEV application		Vent type	
Energy density(Wh/kg)	×	5 ~ 10		100 ~ 200		50 ~ 80		30 ~ 40
Voltage(V)		2.5		3 ~ 3.7		1.2		2
Maximum Output(W/kg)		10000>		4000		1000 ~ 2000	×	
Resistance (mΩ)		1		2.5		3		
Operating temperature ()		-30 ~ 70		-30 ~ 60		-30 ~ 60	×	
Depth of discharge(%)	—	0-100	—	40-60	—	40-60		
Cycle life		1,00,000>		100,000>		100,000>	×	
Safety		—		—		—		—
Environmental load		—	×	Li,Co,Ni,Mn	×	Ni	×	Pb

Current model



i-ELOOP model

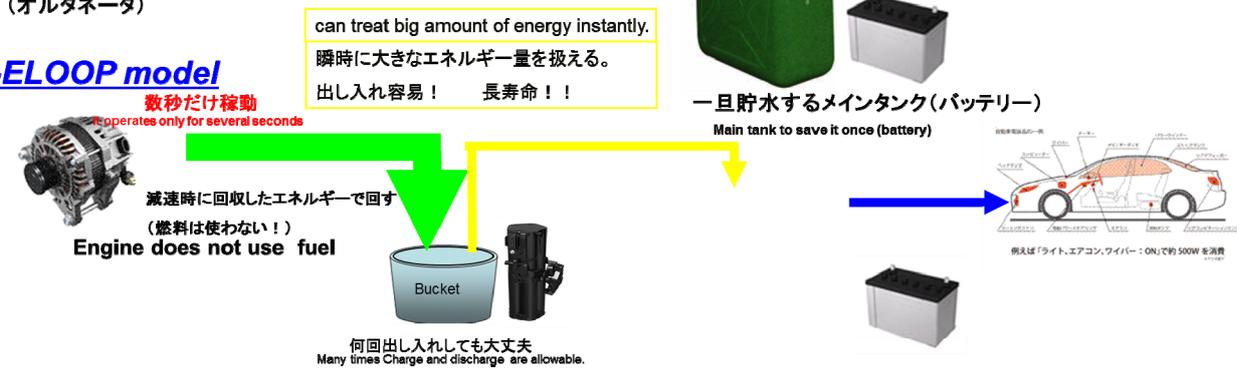


Fig.3 Comparison between Conventional Car and i-ELOOP

従来車における鉛バッテリーは、ポリタンクのようなもので入り口は小さいが容積は大きい。従って、今回の減速回生用途では、回生量が限定され回収効率が低い。そこで、回収と車両負荷に機能を分け、それぞれの蓄電デバイスに担当させる手法を考案した。”i-ELOOP”におけるEDLCは、入り口の大きなバケツのようなもので入り口は容易だが貯めることのできる容積は小さい。従って、回収機能に特化させ、鉛バッテリーと並接させるシステムを今回新たに構築した。

4. 電気二重層キャパシタ (EDLC) について

4.1 EDLC の原理と構造

Fig.4 に示すように EDLC の基本的なセル構成は、セパレータを介した 2 枚の分極性電極と電解液からなる。電圧

を印加すると、電解液中のイオンが電荷補償のため電極表面へ引き寄せられ、電極と電解液界面にそれぞれ電荷層が形成される。これを電気二重層 (electric double layer) と呼び、正極・負極上での電気二重層形成により EDLC は電荷を蓄える。Fig.5 に EDLC の構造を示す。電極には、高比表面積の活性炭にバインダ及び導電助剤を混練し、そのスラリーを集電板 (アルミ箔) に塗布したものをを用いる。その他の材料としては、セパレータとしてセルロース系、電解液には TEMABF₄ (トリエチルメチルアンモニウムテトラフルオロボレート) を溶解した PC (プロピレンカーボネート)、アルミケース、封口板などから構成されている (Fig.6 EDLC 外観)。

今回、自動車の回生システム用途への適用を目指し、日本ケミコン(株)と共同でセル・モジュールの設計・開発を

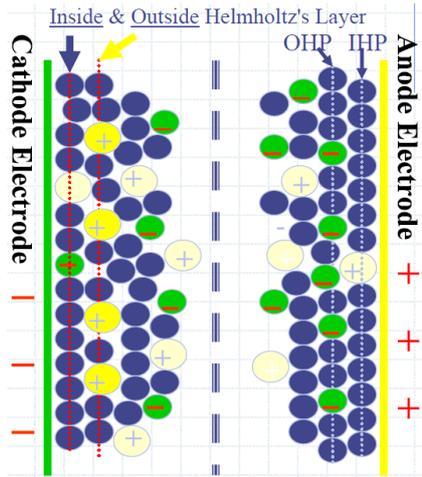


Fig.4 Principle of Electric Double Layer Capacitor⁽³⁾

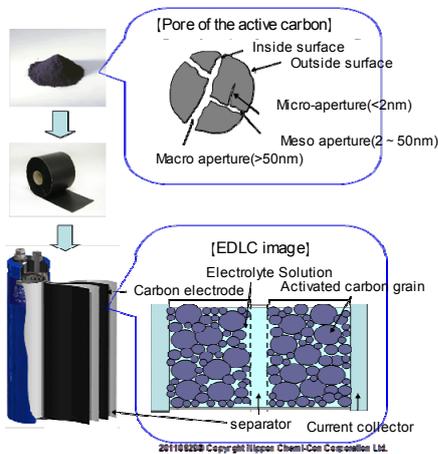


Fig.5 Structure of Electric Double Layer Capacitor⁽³⁾



Fig.6 EDLC Cell for Vehicle Made in Nippon Chemi-Con⁽³⁾

実施した。エンジンルーム内への搭載を実現するためには、酷暑地域においても内部発熱による温度上昇を抑える必要がある。そのためには、セル当たり $1\text{m}\Omega$ 以下の低抵抗化が理想である。しかし、これまでの EDLC では、モジュールでの内部抵抗が約 $25\text{m}\Omega$ 以上が一般的であった。そこで、集電構造の改良及び電極材組成の最適化による接触抵抗の低減を実施することで、単セル $0.9\text{m}\Omega$ 以下を実現し

て大電流に対する効率を高められた。更に、高温での耐久性をこれまでの 60°C から 70°C に向上させ、頻繁な回生による自己発熱への許容度も向上した。

4.2 活性炭について

電極に使用されている活性炭 (Activated carbon) は脱臭剤などで知られているが、石炭やヤシ殻などを二酸化炭素や水蒸気、空気、燃焼ガス等を約 $1,000^\circ\text{C}$ の温度で反応させ炭化賦活して作られる微細孔を持つ炭素のことである。この微細孔の壁の活性炭面積が、EDLC の静電容量に大きく関係し、セル 1 本分の表面積は東京ドーム約 3 個分に相当する。今回開発の EDLC はヤシの実の内果皮 (Fig.7) から製造する活性炭を使用しており、その内果皮は木や竹より硬く、良い活性炭原料となる。

内果皮以外も例えば中果皮はスポンジなど、胚乳はヤシ油、石鹼等にいろいろ使われ無駄にするところがほとんどない。フィリピンでは 2010 年ヤシ油用に 120 億個のヤシの実が使用されているが、その廃材の内果皮約 30 億個 (Fig.8) が活性炭用として使用されており、今後 EDLC が増産されても廃材利用率が向上し環境破壊等が発生する懸念は少ない。EDLC は鉛電池やリチウム電池等と比べ比較できないくらい環境にやさしい材料で構成されている。

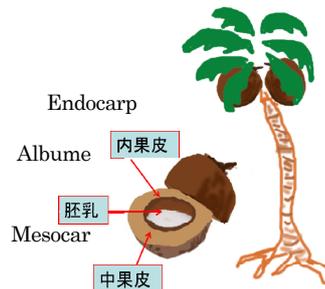


Fig.7 Coconut Structure

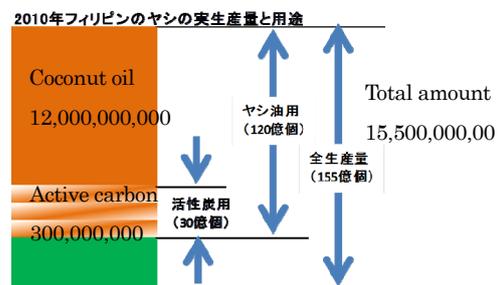


Fig.8 2010 Production and Use of the Philippine Coconut

5. 信頼性

5.1 基本特性

開発した EDLC の基本特性について以下に示す。

Fig.9 には、EDLC 容量の電流値依存性を示す。電流値が大きくなるほど、電圧降下が大きくなるため容量が小さくなるが、電圧降下も小さく良好な放電直線を示す。

Fig.10 には、EDLC 容量の温度依存性を示す。放電容量は、-30 から 70°Cの間で容量値の変化は小さいが、充電容量は、温度が低くなると共に小さくなった。これは、100A の測定電流値に対して、イオンの活性炭細孔内部への拡散が追いつかないためと考える。しかし、冷間時での容量低下率は小さく、冷間時での回生量の低下は問題ないレベルであると考えられる。Fig.11 には、EDLC 内部抵抗の温度依存性を示す。これまでのモジュール内部抵抗の半減以下を実現した。低温時の内部抵抗の増加率は、3 倍 (-30°C と 20°C比較) 以下であり、LiB や Ni-MH と比較しても小さく、低温時の受入れ性の悪化を抑えることが可能である。

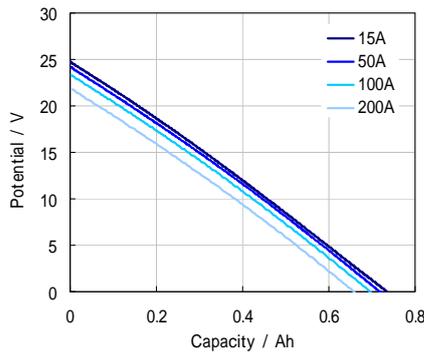


Fig.9 Current Dependency of Capacity

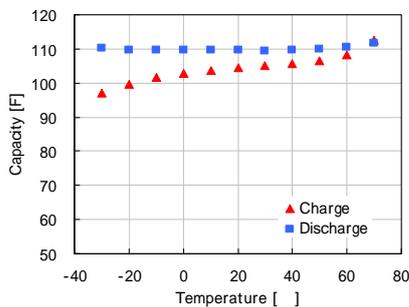


Fig.10. Temperature Dependency of Capacity (at 100A)

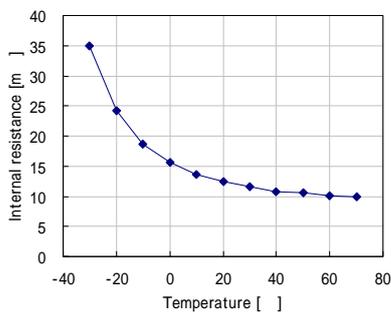


Fig.11 Temperature Dependency of Resistance (at 100A)

5.2 劣化特性

Fig.12 にサイクル試験結果を示す。サイクル時間と共に容量は一樣に低下している。Fig.13 には、横軸を \sqrt{t} にした時のサイクル劣化試験結果を示す。横軸 \sqrt{t} に対して直線的に低下し、LiB と同様に \sqrt{t} 則に従うことを明らかに

し、使用範囲内であれば劣化予測が可能であることを確認した。Fig.13 より、切片部と傾き部に大別でき、切片部は初期の劣化に傾き部は主劣化と表現できる。初期劣化は、製造過程で活性炭の表面に吸着した官能基や水分及び不純物と電解液との反応が主であり、EDLC に特有の劣化と推定される。主劣化は、電解液の分解により電極表面に堆積物やガスが生じ、電極面積の減少による容量の低下を引き起こし、イオン拡散性が低下して内部抵抗の増加を導くメカニズムと推定している。

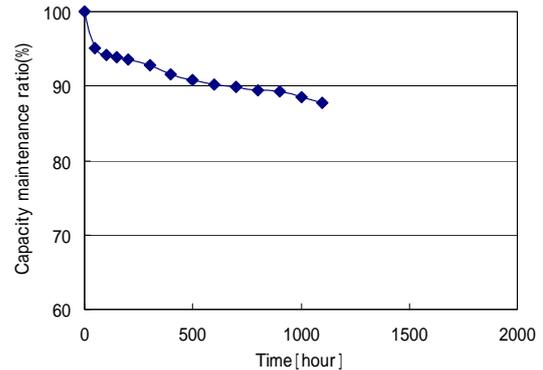
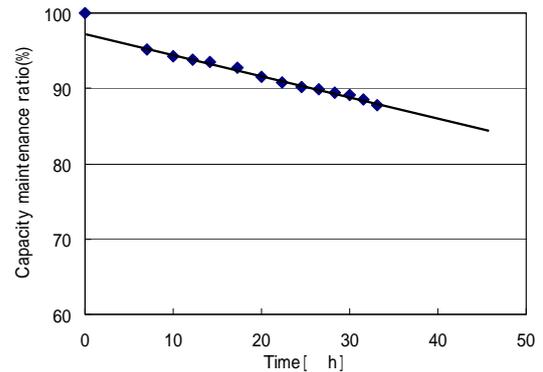


Fig.12 Deterioration of Cycle Test (at 70°C ave.70A 12-25V)

Fig.13 Deterioration of Cycle Test (\sqrt{t} as the abscissa)

次に、主劣化に及ぼす劣化因子の調査を行った。Fig.14 ~16 には、制御因子である、温度・電圧・電流による影響度を調査した結果を示す。影響度に関しては、温度>電圧>電流の順であることを見出した。特に、電流に関しては、10~200Aの電流範囲で 1.6%の変化率であり、非常に小さいことを明らかにした。これは、EDLC が物理反応原理のため、高レート対応可能なことから、充放電時の副反応が少ないためと推定される。以上のことから、制御因子として温度と電圧を制御できれば劣化をコントロールできる可能性を示した。今回開発したEDLCは、高温での性能保証を 70°Cまで向上させたが、エンジンルーム内への搭載のためにはまだ不十分であった。そこで、70°C以上から、段階的に上限電圧を下げていき、85°C以上では 16V以下で制御する劣化コントロールを組み合わせることで、10 年 24 万 kmの保障を実現することが可能となった。

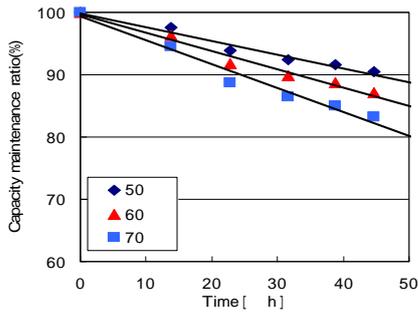


Fig.14 Temperature Dependence of the Life in Float Examination (at 2.5V)⁽³⁾

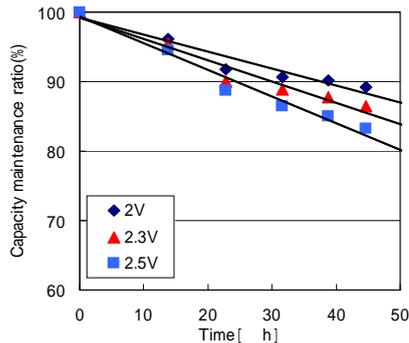


Fig.15 Voltage Dependence of the Life in Float Examination (at 70°C)⁽³⁾

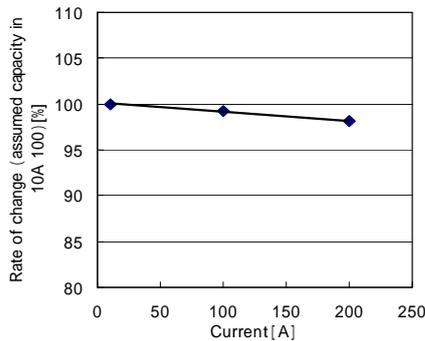


Fig.16 Current Dependence of the life in Cycle Examination (at 60°C, after 10,000cy)⁽³⁾

次に、自動車用途を想定した劣化試験による寿命の検証を実施した。劣化試験は、エンジンルーム搭載で、ハードユーザの実車走行を想定した走行モードと、停車時を想定した保存モードを組み合わせた複合モードである。複合モードによる容量劣化は時間の平方根に比例して減少し、内部抵抗劣化は時間の平方根に比例して増加した。10年24万km相当の劣化後でも、回収能力は確保できる事を確認した。以上より、今回新規に開発した EDLC と劣化制御を組み合わせることで、エンジンルーム内への水冷や油冷のような特殊な冷却機能が不要な搭載が可能な i-ELOOP 用 EDLC システムを開発することができた。

6. DC-DC コンバータ

6.1 DC-DC コンバータ仕様

DC-DC コンバータの仕様は、定格電圧 DC12.5V にお

いて、入力電圧範囲 0~25V, 出力電圧範囲 11~14.8V, 作動温度範囲-40~85°C, 最大定格 MAX.50A とした。

今回開発した DC-DC コンバータは降圧型のコンバータである。車両に搭載するために、DC-DC コンバータ自体の発熱とラジオに対する放射ノイズを特に注意して開発した (Fig.17)。

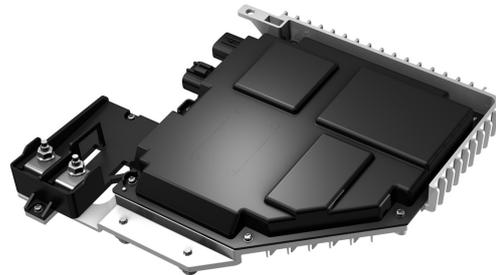


Fig.17 DC-DC Converter

6.2 DC-DC コンバータ容量決定について

全世界の車両消費電流調査を実施し容量を決定した。

Fig.18 はベルリンでの四季による消費電流の例で、Fig.19 は大阪での消費電流例である。通常 40A でほとんどのシーンをカバーできるが、今後の電子部品の増加を考えて MAX.50A とした。消費電流が 50A を超える状態が続く時はオルタネータとバッテリーを直結し車両側に電流供給される。

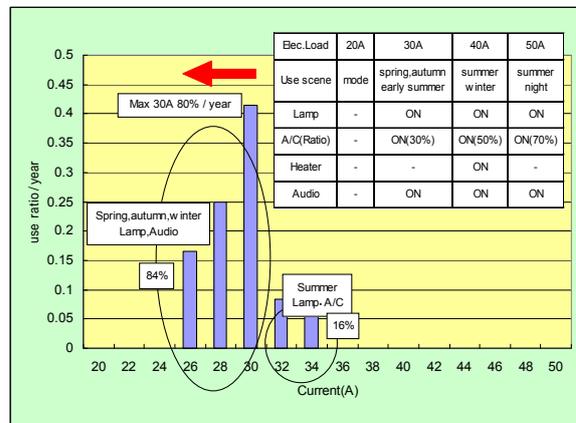


Fig.18 Electric Load VS Annual Use Frequency @ Berlin

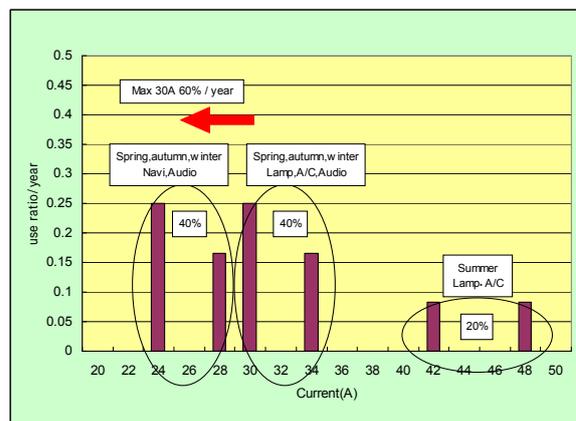


Fig.19 Electric load VS Annual use Frequency @ Osaka Japan

6.3 輻射ノイズ対応について

Fig.20 は降圧式 DC-DC コンバータの基本回路である。今回の DC-DC コンバータはスイッチング制御で降圧しているが 1 チャンネルでのスイッチングでは輻射ノイズと発熱量が多いため、今回は 4 チャンネル(Fig.21)でのスイッチングとしエネルギーを分散させる対応とした。4 チャンネル化で発熱を分散させるとともに、輻射ノイズも約 1/4 とした。

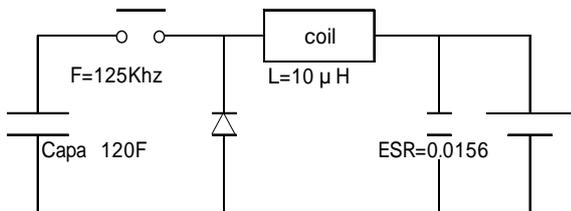


Fig.20 DC-DC Converter Circuit

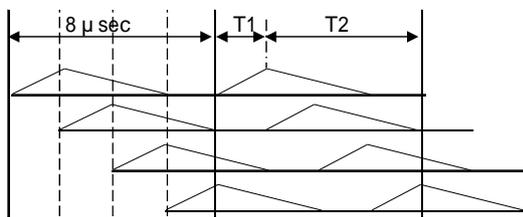


Fig.21 DC-DC Converter Basics Output Wave Pattern

DC-DC コンバータの出力は車両電装品に供給されている。よって出力の電源リップルは各電装補機類に大きな影響を及ぼす可能性がある。以下にリップルの机上検証結果を示す。最大入力電圧 $V_{in(max)} = 25V$ 。リップル電流 y とすると y と V_{out} の関係は次式となる (125kHz 時)。

$$y = \frac{1}{L \cdot F} \times V_{out} \times \left[\frac{V_{inmax} - V_{out}}{V_{inmax}} \right]$$

$$y = \frac{-1}{31.3} \times (V_{out} - 12.5)^2 + 5.0$$

よって V_{out} が 12.5V のときリップル電流が最大となり 5.0A 出力コンデンサ ESR=0.0156Ω からリップル電圧最大値は $0.0156 \times 5 = 0.078V$ と小さく適正である。ただし実回路では車両負荷やバッテリー内部抵抗があり、0.078V 以上となるが、実車での評価結果もオルタネータリップル基準値より充分小さいことが確認できている。

6.4 各機能ごとの出力波形

各箇所の電流波形例を示す(Fig.22)。今回の DC-DC コンバータでは 4 チャンネル化しておりこの IC を 2 個使っている。

入力電圧 V_{in} の MAX は 25V。スイッチング周波数は

125kHz/110kHz である。本図との実回路との大きな違いは負荷側には鉛バッテリーが接続されているため V_{in} が鉛バッテリーの電圧以下になると電流が逆流する。実回路では逆流防止の FET を設置している。

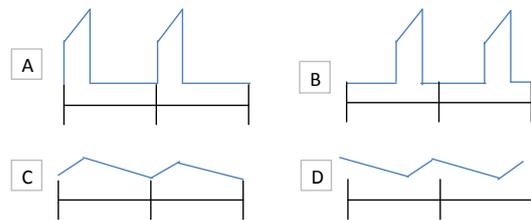
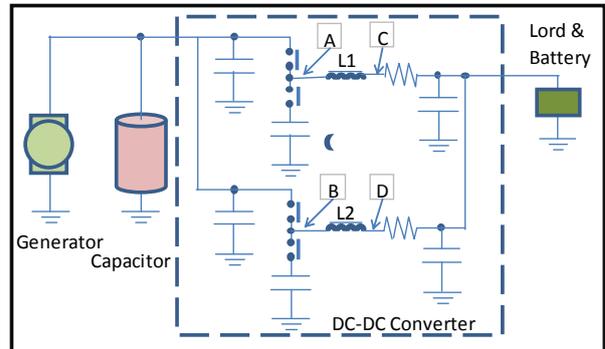


Fig.22 DC-DC Converter Wave Pattern

6.5 DC-DC コンバータ放熱特性

DC-DC コンバータの重要な管理仕様として放熱特性がある。今回の DC-DC コンバータでは降圧用のコイルが一番発熱する。放熱は DC-DC の放熱フィンを通して行われるがコイル、FET、コンデンサの温度分布を見ながら放熱特性を確認する必要がある。コイル、FET、コンデンサの中で一番熱的に弱いのはコンデンサであるため発熱源から充分必要な距離を取ることが重要である。Fig.23 は放熱フィンの温度測定結果で FET、コイルに近接するサーミスタでの測定の CAN 値である。約 50A 連続通電で 85°C 付近で熱平衡状態となる。

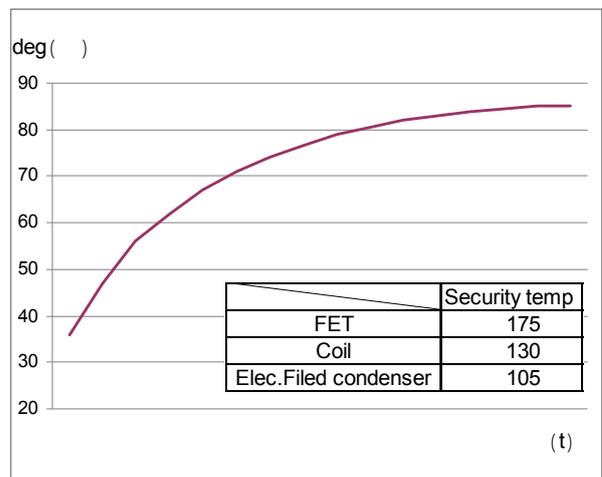


Fig.23 DC-DC Converter Heat Radiation Performance

7. まとめ

システム紹介で“i-ELOOP”の機能や効果を説明したが、システムを支える重要なデバイスとして本編では EDLC と DC-DC コンバータについて触れた。EDLC は、将来更なる大容量、高電圧化されると予測される。また、DC-DC コンバータも車両の機能がどんどん増加しており消費電流が増えることで大出力化していく傾向にある。システムで賄える電力を増加させ、これから増加していくであろう環境対応システムや安全システムへの対応や駆動力補助等への対応を可能とし、“i-ELOOP”を通じて環境に優しく“Zoom-Zoom”な走りの車作りに今後も貢献していきたい。

参考文献

- (1) 日清紡ホールディングスホームページ N's CAP の特徴より
- (2) JM エナジーホームページ ULTIMO ラミネートセルのご紹介より
- (3) 日本ケミコン(株) 提供資料

■ 著 者 ■



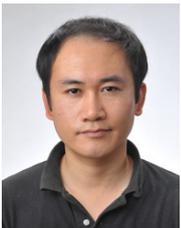
高橋 正好



藤田 弘輝



鈴木 正悟



西田 史彦

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

10

“i-ELOOP” 制御技術の開発

Development of Control Technology for “i-ELOOP”

小谷 和也*1	水落 洋行*2	久米 章友*3	湯原 将光*4
Kazuya Kotani	Hiroyuki Mizuochi	Akitomo Kume	Masamitsu Yuhara
高木 宏*5	中上 信宏*6	春名 亮二*7	田村 和寛*8
Hiroshi Takaki	Nobuhiro Nakagami	Ryoji Haruna	Kazuhiro Tamura

要約

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、「ビルディングブロック戦略」を推進している。車の基本となるエンジンの効率向上、車両の軽量化などを実施し、段階的に電気デバイス技術を組み合わせることで、CO₂の総排出量を削減していく。そのStep2として、減速時の運動エネルギーを回生し、車の使用電力として再利用する減速エネルギー回生技術であるi-ELOOPを導入する。i-ELOOPでは、新たにキャパシタ（EDLC：Electric Double Layer Capacitor）、可変電圧オルタネータを採用することで、回生能力を向上させた。更に新たな制御技術を採用することで、より多くの減速エネルギーを回生することが可能となった。

Summary

Based on the technology development long-term vision, “Sustainable Zoom-Zoom”, Mazda has been promoting the “Building Block Strategy”. We thoroughly improve the base technologies for Powertrain efficiency, vehicle weight reduction while combining them with electric devices technology in a phased manner so as to reduce CO₂ emission. In the second step of this approach, we have developed a new regenerative braking system “i-ELOOP” that recovers energy generated by deceleration and reuses it as electric energy necessary for vehicle. i-ELOOP, because of a new capacitor (EDLC: Electric Double Layer Capacitor) and variable voltage alternator, improves the regenerative capability as the vehicle decelerates. A new control technology is also employed to recover braking energy in a stable manner so as to minimize fuel consumption for power generation.

1. はじめに

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、「ビルディングブロック戦略」を推進している。車の基本となるエンジンの効率向上、車両の軽量化などを実施し、段階的に電気デバイス技術を組み合わせることで、CO₂の総排出量を削減していく。「ビルディングブロック戦略」に基づき、2009年から停車時にエンジンを停止させ、燃料消費を削減するi-stopを導入した。今回、減速時の運動エネルギー（以下、減速エネルギー）を回生し、車の使用電力として利用するi-ELOOPを導入する。

本稿では、i-ELOOPにおける制御技術について紹介する。

2. i-ELOOPのねらい

従来、市街地を走行する際、エンジン出力の約10%は、車の使用電力を供給するための発電負荷として利用している。安全装備や環境対策技術等の電装品追加に伴い、車の使用電力は増え発電負荷は増加傾向にある。一方、燃費改善のため、車両の軽量化、空気抵抗の低減等が進むことで走行負荷は減少傾向にある。つまり、エンジン出力に占める発電負荷の比率は更に高まる傾向にある（Fig.1）。そこでi-ELOOPは回生能力を向上させ、多くの減速エネルギーを回生し発電負荷をなくすことを目指した。

*1～8 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

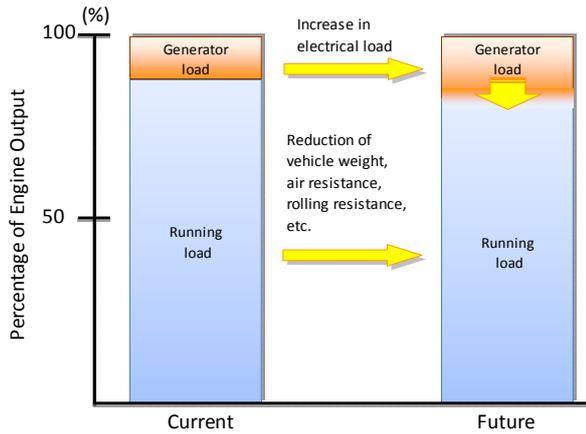


Fig.1 Rate of Generator Load

多くの減速エネルギーを回生するため、発電装置は最大電圧 25V、最大電流 200A の発電性能を持つ可変電圧オルタネータを採用した。減速の限られた時間で多くのエネルギーを蓄えるため、蓄電装置は鉛バッテリーの 10 倍以上の充電受入性能を持つキャパシタを採用した。キャパシタに蓄えたエネルギーは、DC-DC コンバータで電装品に適した電圧に変換、供給する (Fig.2)。

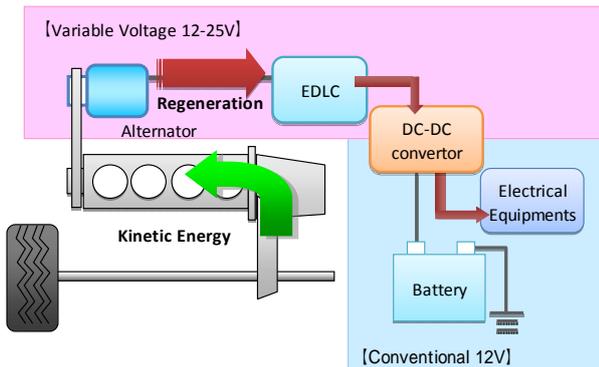


Fig.2 Schematic View of i-ELOOP

i-ELOOP は可変電圧オルタネータとキャパシタを採用することで、従来比約 3 倍の減速エネルギーを回生する能力を得た。しかし、回生する際は減速度がドライバに違和感を与えないよう発電トルクを制限するため、発電能力を最大限利用できない可能性がある。また、減速時にキャパシタの充電状態 (以下、SOC : State Of Charge) が満杯だと減速エネルギーを充電できない可能性がある。これらの懸念を解決するためには、違和感を与えない最大限の発電トルクを明確にして、精度良く発電する必要がある。また、次の減速で得られる減速エネルギーを推定し、キャパシタ SOC を減速エネルギーが充電できる状態にする必要がある。よって、i-ELOOP は新たな制御技術として、可変電圧オルタネータ制御とデュアルストレージ制御を開発した。更に、加減速が少ない走行シーンでも発電による燃料消費を最小に抑える高効率発電制御も採用している。

3. i-ELOOP 制御技術

3.1 可変電圧オルタネータ制御

可変電圧オルタネータは従来の約 3 倍の発電能力を有しており、多くの減速エネルギーを回生する能力がある。一方、減速時の発電量が多いと発電トルクが原因で、ドライバが期待している減速度を超えてしまい違和感を与えてしまう。そこで、可変電圧オルタネータ制御では、ドライバに違和感を与えない範囲で回生できる最大発電トルク (以下、最大回生トルク) を演算する。そして、最大回生トルクを精度良く実現することで、可変電圧オルタネータの発電能力を最大限利用する。

ドライバの操作から違和感を与えない減速度 (以下、許容減速度) は、アクセルペダルとブレーキペダルの操作から推定する。アクセルペダルを離れた際は、車速の低下に応じて許容減速度をリニアに変化させる (Fig.3)。ブレーキペダルを操作した際は、油圧ブレーキの制動力に応じて許容減速度を変化させる (Fig.4)。最大回生トルクは、走行抵抗、パワートレイン抵抗から算出した減速度と許容減速度の差から逐次演算する。以上から、ドライバに違和感を与えることなく回生できる発電トルクの最大値を演算可能となった。

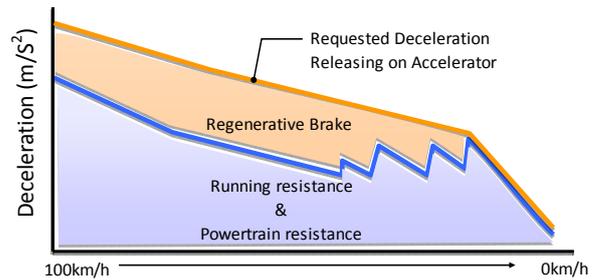


Fig.3 Acceptable Deceleration

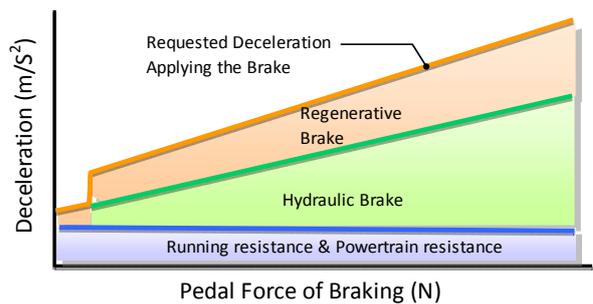


Fig.4 Acceptable Deceleration with Braking

最大回生トルクで減速エネルギーを回生するためには、許容減速度を超えないよう目標発電トルクを精度良く実現する必要がある。これまでのオルタネータ制御は、発電による電圧変動が電装品の動作に影響しないように電圧制御を行っていた。回生の際は目標発電トルクとなる目標電圧を推定して発電するため、実発電トルクは推定誤差の影響を受けた。i-ELOOP は電装品の電力供給を DC-DC コンバータで行うため、発電トルクを目標として制御する構造に

変更し、推定誤差の影響を排除した。目標発電トルクは、ロータに励磁電流を流すことで実現するが、励磁電流はロータ温度によって影響を受ける。そのため、ロータの実励磁電流をフィードバックすることで、励磁電流を高精度に制御している。結果、回生によってロータ温度が変化しても目標発電トルクを高精度に実現することが可能となった (Fig.5)。

以上の制御によりドライバへ違和感を与えることなく、発電能力を最大限利用した減速エネルギー回生を実現している (Fig.6)。

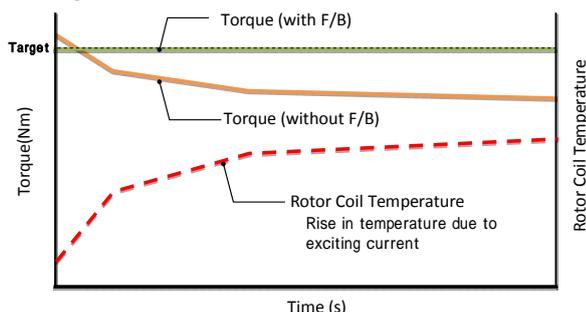


Fig.5 Effect of Feedback Control

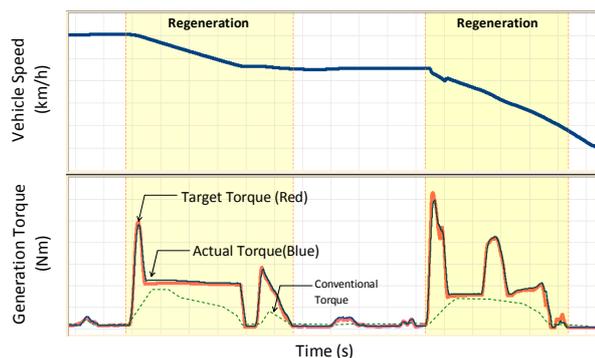


Fig.6 Effect of New Torque Control

3.2 デュアルストレージ制御

キャパシタは大電力を高効率に充電することができるが容量は限られるため、満杯になり減速エネルギーを充電できない場合がある。一方、鉛バッテリーは、大きな容量を有しているが充放電の効率が低いため、充放電によってエネルギー損失が大きくなる。そのため、キャパシタと鉛バッテリーの異なる特性を活かし、2つの蓄電装置を最大限活用するデュアルストレージ制御を行っている (Fig.7)。

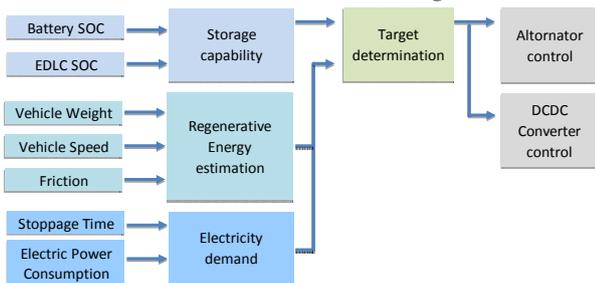


Fig.7 Dual Storage Control Structure

減速エネルギーをキャパシタへ充電するためには、次の減速までにキャパシタ SOC を下げておく必要がある。一方、キャパシタ SOC を下げるためにエネルギーを鉛バッテリーへ移動させると、充放電にともなうエネルギー損失が発生する。そこで、減速エネルギーを充電できるキャパシタ SOC を演算し、鉛バッテリーへ移動させるエネルギーを最小にしている。具体的には、車両重量、車速、エンジン抵抗、車両走行抵抗等を用いて、次の減速時に得られる減速エネルギーを逐次演算する。演算した減速エネルギーを充電できる SOC を目標 SOC と定め、目標 SOC を上回るエネルギーを鉛バッテリーに移動させる (Fig.8)。

この制御によって、キャパシタと鉛バッテリーを最大限活用して、減速エネルギーを充電することが可能となった。その結果、キャパシタの容量は一般的な減速 1 回分の減速エネルギーを充電できる容量となり、システムの小型化に貢献している。

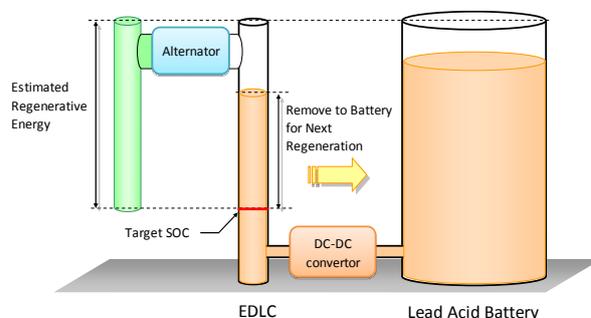


Fig.8 Image of SOC Control

更に、停車時には減速エネルギーによってキャパシタが満杯となり、アイドルストップ中の使用電力をキャパシタで供給可能となる。その結果、鉛バッテリーの充放電量は従来の半分以下になり、寿命を延ばすことが可能となった (Fig.9)。

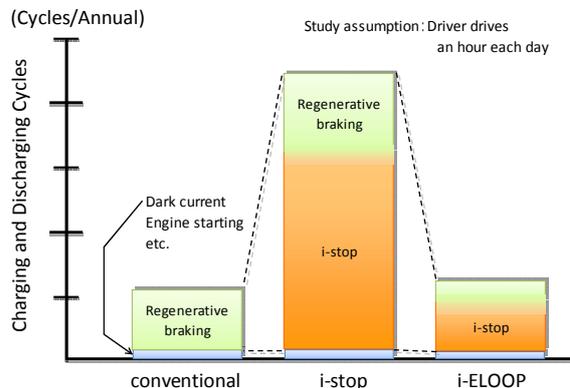


Fig.9 Charging and Discharging Cycles with Lead Acid Battery

3.3 高効率発電制御

可変電圧オルタネータ制御、デュアルストレージ制御によって多くの減速エネルギーを回生することが可能となった。それでも、加減速の少ないシーンにおいては減速エネルギーが少ないため、燃料を使用して発電する必要がある。そのため、エンジンの燃焼効率とオルタネータの発電効率を考慮し、発電による燃料増加量が最小となるように高効率発電制御を行っている。

エンジンの燃焼効率は同じ回転速度でも負荷状態によって異なるため、同じ発電負荷を与えても燃料増加量は変化する。更に、負荷状態は、走行環境、ドライバの走り方で変化するため、燃料増加量が最小となる発電タイミングを見極める必要がある。そこで、エンジンの燃焼効率特性、負荷状態から、単位発電負荷あたりの燃料増加量を発電燃料消費率(以下、発電燃費)として逐次算出している (Fig.10)。発電燃費は過去の平均発電燃費と逐次比較することで、現状の走行における燃料増加量が最小となる発電タイミングを見極めることができる。

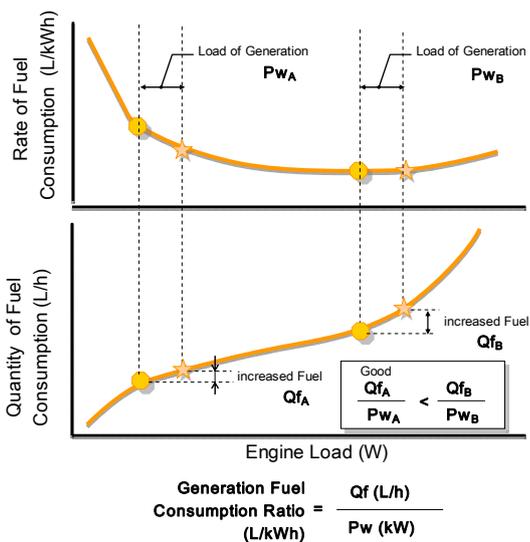


Fig.10 Fuel Consumption Ratio by Generation

見極めたタイミングで発電を行う際は、同じエネルギーからより多くの電力を得るため、オルタネータの発電効率が低い領域で発電している。発電効率の高い領域は、発電電力が平均的な使用電力を上回るため、使用電力を超えた分はキャパシタへ充電している (Fig.11)。そこで、発電は目標 SOC を超える前に停止し、その後、キャパシタへ充電したエネルギーを電装品に供給している (Fig.12)。この制御により、同じ電力を発電するための発電負荷は、最大20%低減され発電による燃料増加を最小にすることが可能となった。

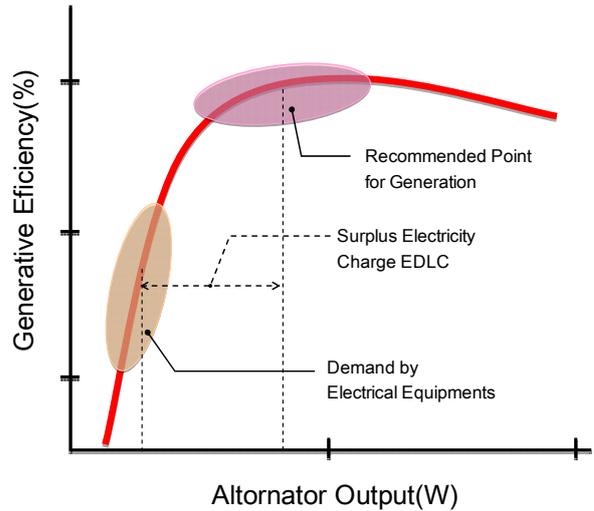


Fig.11 Recommended Point for Generation

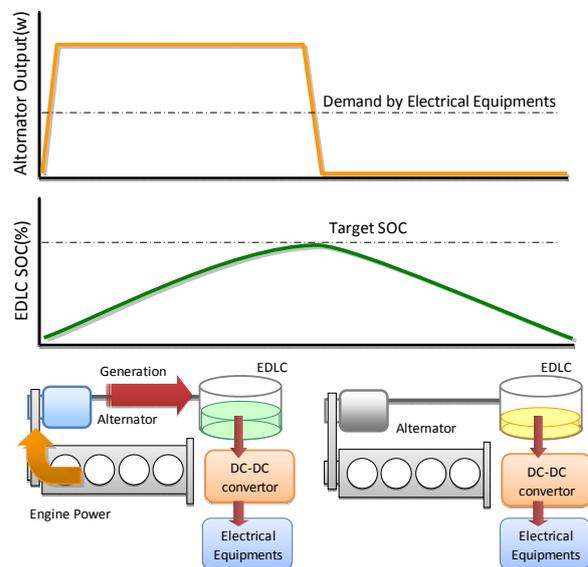


Fig.12 Example of System Operation

4. おわりに

新たに採用した制御技術によって、可変電圧オルタネータ、キャパシタの能力を最大限活かし、減速エネルギーを回生することが可能となった。

減速エネルギー回生技術は車の燃費向上にとって重要な技術であり、引き続きより多くの減速エネルギーを回生できるよう開発を続ける。更にビルディングブロック戦略に基づき、回生したエネルギーを利用する技術を開発し、マツダ車の更なる進化に貢献してゆく。

参考文献

- (1) 吉田ほか：新型デミオ向けバッテリーマネジメントシステムの紹介, [マツダ技報No.29](#), pp.14-19 (2011)
- (2) 久米ほか：次世代バッテリーマネジメント技術の開発, [マツダ技報No.28](#), pp.54-58 (2010)
- (3) 西里ほか：バッテリーマネジメントによる燃費改善, [マツダ技報No.25](#), pp.152-156 (2007)
- (4) 猿渡ほか：マツダ i-STOP (アイ・ストップ), [マツダ技報No.27](#), pp.9-14 (2009)

■著者■



小谷 和也



水落 洋行



久米 章友



湯原 将光



高木 宏



中上 信宏



春名 亮二



田村 和寛

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

11

“i-ELOOP”制御系開発における机上環境の進化 Evolution of the Virtual Environment in the Development of “i-ELOOP” Control System

柴田 敏治*1
Toshiharu Shibata
上野 隆司*4
Takashi Ueno

小森 賢*2
Satoshi Komori
小谷 和也*5
Kazuya Kotani

彌生 啓介*3
Keisuke Yayoi
亀井 裕介*6
Yusuke Kamei

要約

新型アテンザでは、マツダ独自の減速エネルギー回生技術である「i-ELOOP」を搭載した。これは社会からの要求の高い燃費向上技術であるが、この要求にタイムリーに応えるためには、より短期間での開発が必要であった。そこでモデルベース開発を全面的に採用し、各段階で活用可能な仮想開発環境を構築した。これによって、実車試作までに机上でシステム検証を終え、更に適合までも机上にて実施することができた。

Summary

All-new ATENZA is equipped with Mazda-unique regenerative braking system, “i-ELOOP.” The fuel-saving technology was much demanded from society. To respond to the demand in a timely manner, a model-based development approach was applied overall, in which virtual development environments available in each process were established. As a result, calibration works as well as system verifications were completed with the computer before a prototype vehicle was actually built.

1. はじめに

環境意識の高まりから燃費向上への期待はますます大きくなってきている。マツダでは、この期待に応えるために、まず優先的に内燃機関などの「ベース技術」を改良した上で、段階的に電気デバイスを追加していく”ビルディングブロック戦略”を掲げて技術開発を行っている⁽¹⁾ (Fig.1)。

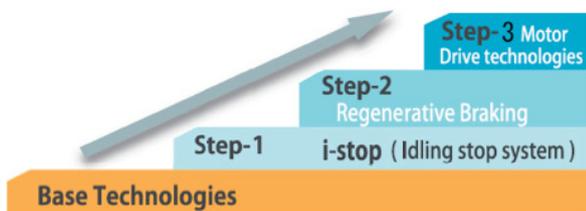


Fig.1 Building Block Strategy

今回、新型アテンザでは、ビルディングブロック構想の Step-2 として、減速エネルギー回生システムである「i-ELOOP」を搭載した。「i-ELOOP」によって、減速エネルギーを電力として効率良く回生・蓄電・活用することがで

き、大幅なコストアップなく約 10%の実用燃費低減効果が期待できる。しかしながら、この機能を実現するためには、従来以上に複雑化した電気回路を高頻度かつ緻密に切り替えながら、発電トルクや電流の大きさおよびエネルギーの流れを適切に制御する必要がある。

そこで、この新技術を開発するにあたり、効率的な設計・検証を行う手法であるモデルベース開発 (MBD) を全面的に採用した。これにより開発初期から実車検証に至るまでの各段階で設計・検証のサイクルを充実させ、試作車の完成前に、机上でシステム検証や適合まで実施できた。本稿では、「i-ELOOP」の開発で活用した仮想開発環境について紹介する。

2. 「i-ELOOP」について

「i-ELOOP」とは、乗用車として世界で初めて蓄電器にキャパシタを用いることで、減速時のエネルギー蓄積量の増加と、充放電速度を向上させたマツダ独自の減速エネルギー回生システムである。このシステムは、主要デバイスと

*1~6 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

して可変電圧オルタネータ・DC-DC コンバータ・キャパシタ・バッテリーから構成される (Fig.2)。

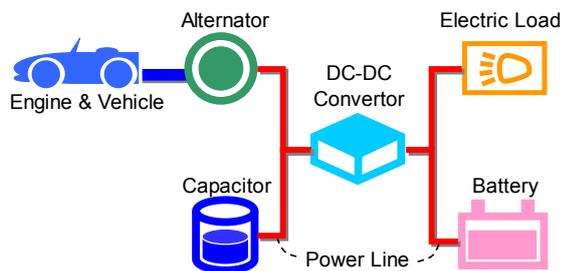


Fig.2 System of i-ELOOP

「i-ELOOP」は、エアコンやオーディオなど、走行中の車両に必要な電力をほぼ減速回生エネルギーで賄うだけでなく、アイドリングストップ技術「i-stop[®]」と組み合わせることで適切な充放電コントロールを行うことにより、アイドリングの停止時間を延長し、相乗的な燃費低減効果を発揮する。

この相乗効果を十分に引き出すべく、エンジンが停止して発電できないアイドリングストップ中に、蓄電したキャパシタから消費分の電力を供給する必要がある。このため、アイドリングストップに入る前にはできるだけキャパシタを満杯に充電しておきたい。一方で、減速時に多くのエネルギーを回生するには、事前にできるだけキャパシタを空にしておきたい。これらの相反する要件を満たし、時々刻々と変化する走行状態に応じて各デバイスを適切な状態に保てるような、緻密なエネルギーフロー制御を行っている。

3. 仮想開発環境について

3.1 全体概要

自動車の制御系開発で採用されている V 字型の開発プロセスにおいて、下流の検証段階で不具合が発覚した場合には大きな手戻りにつながる。手戻りを最小化するには、各段階において検証サイクルをまわす必要があり、今回複雑なシステムを短期間で開発するために、MBD を最大限活用した (Fig.3)。

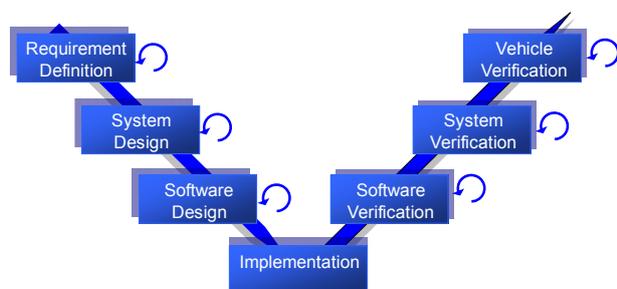


Fig.3 V-Process in MBD

これまでもSKYACTIV-G開発においてMBDを実践し、仮想開発環境を構築・活用してきた^③。例えば制御ソ

フトウェア設計段階でMILS (Model In the Loop Simulation) 環境や、制御ソフトウェア検証段階でのHILS (Hardware In the Loop Simulation) 環境を構築し開発効率化を図ってきた。

「i-ELOOP」の開発においても、これらの MILS・HILS 環境を活用しつつ、更に仮想開発環境を充実させた。その結果、従来以上に多くの開発項目をこれまでにない短時間で完了し、高品質なシステムとして「i-ELOOP」を完成させることができた。

以下では、今回新たに充実させた、システム設計・システム検証における仮想開発環境と、一部机上で完了することができた適合について記す。

3.2 システム設計段階での仮想開発環境

システム設計とは、プロセスの上流にて定義された要件を満足するためのシステムを検討する段階である。

本開発においては、燃費目標を達成するシステム構成とエネルギーフロー制御のコンセプトを構築し、回路構成や各デバイスの仕様を決定する必要がある。また、よりロバストなシステムとするために、お客様の様々な使い方のデータから実用上のシーンや使用頻度などを分析し、個々の加減速の大きさや頻度、停車時間などを加味して最適なシステムとする必要がある。

ここで求められる仮想開発環境の要件は、燃費を含む車両全体のエネルギーフローを高速で解析できることである。そこでマツダ社内で開発・運用している、燃費検討用モデル^④をベースとして仮想開発環境を構築した(Fig.4)。

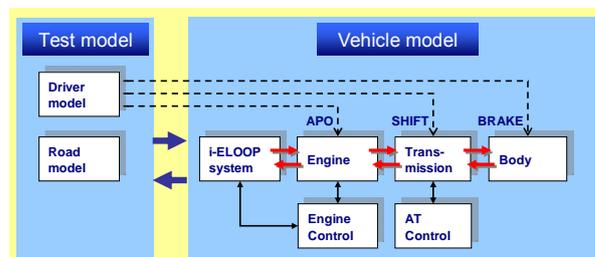


Fig.4 Framework of Virtual Testing Model

利用したモデルは、エンジンやトランスミッション、車両など走行に関わる主要な要素を含む仮想車両モデルであり、機械系および電気系のエネルギー収支を短時間で計算できるよう簡素に構築した。これにより動的に変化するエネルギーフローを可視化しながら、お客様の走行シーンを網羅的に検討することができ、燃費に大きく影響する回生・蓄電・活用の推移を解析し、効率的なエネルギーフローを検討した。

デバイス容量を大きくすればするほど、より多くのエネルギーを扱うことができ、より多くの走行シーンに対応できるようになるが、重量およびコストが増大してしまう。また、エネルギーをどのタイミングでどのデバイスに配分するか、という制御の方法においても回生エネルギーは増減する。

これらを踏まえて燃費効果・重量・コストのバランスから最も効率的なエネルギーフローを検討し、最適な回路構成および過不足ないデバイス容量を決定し、最小限のサイズおよびコストで最大限の燃費効果を実現する仕様を決定できた。

3.3 システム検証段階での仮想開発環境

システム検証とは、設計した機能が実現できているかを確認し、実用上の品質確認を行いロバスト性を検証する段階である。「i-ELOOP」においてはエネルギーフローを確認し、各デバイスの動作およびロバスト性について検証する必要がある。

特に設計段階とのギャップが出やすい領域、例えば極高温や劣化によるデバイス性能の急激な変化については、十分な動作確認が必要である。しかし、この領域は関わる因子が多く、再現のための技術的な難易度が高い。そこで、精度よく再現しつつ品質検証を短期間で行うために、キャパシタやバッテリーといったデバイスの実部品を活用し、「電気デバイス HILS」と呼ぶ HILS 環境を構築した (Fig.5,6)。



Fig.5 Operation Room for HILS

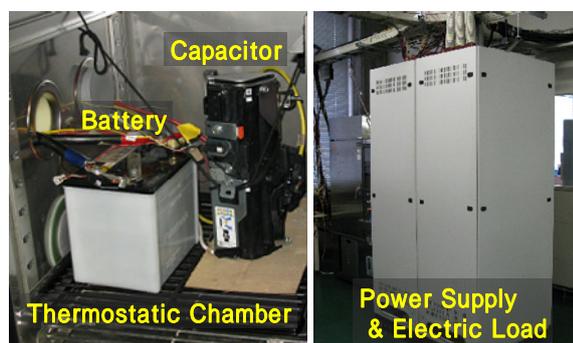


Fig.6 Experimental Equipment of HILS

電気デバイス HILS では、キャパシタ・バッテリー・DC-DC コンバータ・PCM について実部品を使用し、その他の要素はモデルや装置で置き換えて演算する (Fig.7)。

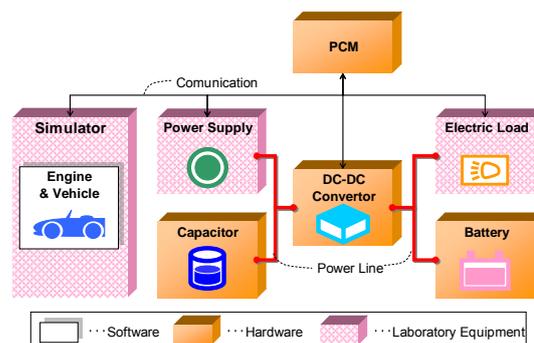


Fig.7 Framework of HILS

オルタネータの発電量の演算はシミュレータ上でを行い、この情報が電源装置に伝えられて狙いの電流が発生する。電源装置から発生したオルタネータ発電相当の電流はキャパシタに蓄電され、一部は DC-DC コンバータを介して、変圧後にバッテリー系統とへ供給される。ここでの変圧は、DC-DC コンバータに内蔵されたコントローラが制御する。また、お客様の操作によって変化するオーディオなどの電気負荷は、消費電流としてシミュレータ上で演算し、この情報を電気負荷装置へと伝え、演算量と同じになるように電流が消費される。このように、電流・電圧を伴った実回路としての状態を動作させることで、「i-ELOOP」における回生・蓄電・活用を再現させた。

従来、デバイスを組み合わせたトータルシステムとしての動作は、実車に搭載して確認を行っていたが、今回電気デバイス HILS を用いることで、温度や劣化による性能の急変やフェイルといった領域についても、机上で検証することができた。

テストでは、まず設計段階に想定したエネルギーフローを実際の電圧・電流として再現させ、時系列での動作確認を行った。次に、劣化状態にあるデバイスと交換することで長期使用を模擬したり、物理的な断線・短絡によるフェイル処理などを発生させたりして、想定した異常状態におけるシステムの動作確認を行った。更にロバスト検証として、様々な条件を想定した意地悪テストを行い、極端な温度条件での挙動や、異常な高電圧下における破損に至るまでの推移などを確認し、試作車への搭載までに対策を打つことができた。

以上のようなステップを踏んで検証を実施していくことで、机上においてシステムのロバスト性までも十分に確認することができた。

4. 仮想開発環境での検証結果

電気デバイス HILS と実車との比較結果を以下に示す (Fig.8)。

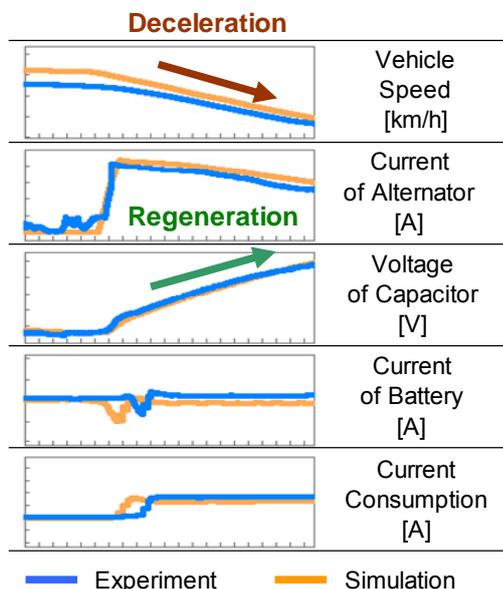


Fig.8 Comparison of Test Results

電気デバイス HILS は、減速時のオルタネータの回生電流、蓄電されていくキャパシタの電圧、バッテリーへ供給される電流および消費電流といった推移を、机上において精度よく実現できている。

これにより、実車を試作する前に、様々な環境で十分な精度を持った検証を行うことができ、「i-ELOOP」に関わるほとんどの制御適合定数もセッティングすることができた (Fig.9)。

結果として、時間のかかる実車でのセッティングを省くことが可能となり、大きな手戻りなく短期間に開発することができた。

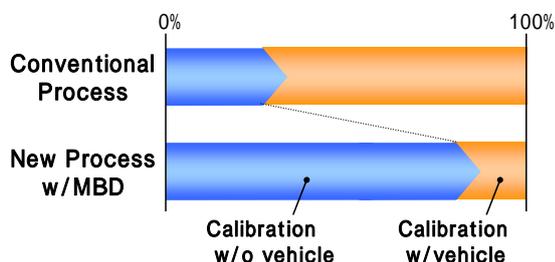


Fig.9 Numbers of Calibration Parameters

5. おわりに

以上に述べたように、V 字型の開発プロセスの各段階で活用可能な仮想開発環境を構築し、これらを活用することで実車に搭載する前段階で、高品質に「i-ELOOP」の技術を確認することができた。今後もビルディングブロック戦

略に従う技術開発等において、仮想開発環境を発展させ、品質の確保と開発効率の向上を両立させていく予定である。

参考文献

- (1) 石野ほか: 新世代技術「SKYACTIV パワートレイン」, マツダ技報, No.29, pp.29-35 (2011)
- (2) 猿渡ほか: マツダ i-STOP (アイ・ストップ) マツダ技報No.27, pp.9-14 (2009)
- (3) 江角ほか: SKYACTIV-G制御技術の紹介, マツダ技報, No.29, pp.36-40 (2011)
- (4) 平松ほか: パワートレイン構想設計のVirtual Testing技術の紹介, マツダ技報, No.22, pp.50-55 (2004)

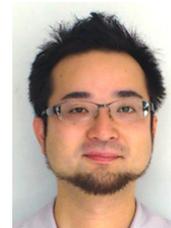
■ 著 者 ■



柴田 敏治



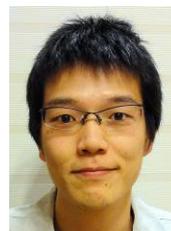
小森 賢



彌生 啓介



上野 隆司



小谷 和也



亀井 裕介

特集：新型車（アテンザ）

12

新型アテンザの紹介 Introduction of All-New ATENZA

梶山 浩*1
Hiroshi Kajiyama

松岡 完*2
Kan Matsuoka

岩本 信也*3
Shinya Iwamoto

要約

マツダの新世代商品群のフラッグシップモデルとして、マツダ独自の商品価値を体現し、より高いブランドポジションを獲得すること。それが、新型アテンザ（海外名：Mazda6）に託された使命である。これまで、カペラ（海外名：Mazda626）やアテンザなどの CD カーを世界に向けて送り出し、常に CD カーの進化をリードし続けてきた歴史があり、かつブランドイメージの増進を牽引してきた。しかしながら、現在の CD カーは中国などごく一部の市場を除いて減少傾向にある。

このような状況下、新型アテンザでは多くのお客様から共感を得るのではなく、一部の限られたお客様であっても強く熱狂的な共感を得ることで、その鮮明な存在感の獲得を目指した。つまり、お客様がアテンザ、およびマツダに強く期待する項目であるデザイン、走りにフォーカスして、クラス概念を超える「マツダならではの独自の価値」を提供することを開発方針の中心に据えた。

アテンザ、およびマツダが提供すべき独自の価値とは何か。それを徹底的に突き詰めて得た答えは、クルマが自分の体の一部であるかのように、意のままに軽快にクルマを操ることができた瞬間、人は自然と笑顔になるということである。つまり、ヒトとクルマの一体化を達成手段として、意のままに軽快に操ることでの走る喜びを提供することから生まれる「笑顔」こそが、マツダが提供すべき「独自の価値」であり、これを体現した自信作が新型アテンザである。

Summary

Embodying the company's essential product values throughout, the mission of the new ATENZA (known as Mazda6 overseas) is to stand as the flagship model of a new generation of vehicles and raise the Mazda brand to new heights. Mazda has a history of always leading evolutions of CD-cars by putting Capella (known as Mazda626 overseas) and ATENZA out into the world, which has driven our brand image enhancement. The current CD car market is, however, on a shrinking trend except for a small portion of the entire market such as China.

Under such circumstances, we focused on creating a powerful presence of the new ATENZA by valuing something absolutely irreplaceable to some individuals, even if the number is small, rather than something acceptable to a wide range of customers. At the center of our development, therefore, we laid out a strategy to offer "Mazda's own exclusive value" that goes beyond common perceptions of this class by focusing on the design and performance, which customers would strongly expect from ATENZA as well as Mazda.

What is the exclusive value that Mazda should offer? The answer to this question we finally figured out after our uncompromised study was the fact that drivers can naturally smile at a moment when they succeed in handling the car in a precise and responsive manner as if it were part of their bodies. This "smile" is, we concluded, what Mazda should offer as our "exclusive value" and it is our all-new ATENZA that proudly embodies such value.

*1 商品本部
Product Div.

*2 MNAO
Mazda North America Operation

*3 商品本部 商品企画部
Product Div. Product Planning Dept.

1. はじめに

新型アテンザの商品開発では、全面導入する SKYACTIV TECHNOLOGY の高い運動性能を最大限に引き出すことに主眼を置いた。具体的には、極低速域から超高速域まで常にヒトとクルマとの高い一体感があり、意のままに軽快に操る感覚が体感できる、新次元の「走る喜び」を目指した。更には、優れたコントロール性と自然なフィーリングを合わせ持つステアリング、アクセル、ブレーキ、エンジンサウンドなどの造り込みに注力した。

また、「魂動 – Soul of Motion」デザインによるエクステリアとインテリア、パッケージ、クラフトマンシップなどの領域でも、「意のままに軽快に操る喜び」を追求した。そして、見るだけで走りへの期待が高まるデザイン、「意のままに軽快に操る喜び」が更に深まる上質な造り込み、運転の楽しさや快適性をサポートする様々な創意工夫により、ドライビングシーンに限らず、走り出す前から始まり、走り終えた後も余韻が続く、新次元の「走る喜び」を体現することができた。

更に、「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」の一翼である環境安全性能では、環境性能に貢献するマツダ独自の減速エネルギー回生システム「i-ELOOP (アイ・イーループ)」を搭載するほか、「お客様が安全に運転できる状態を最大限に高めることが、安全の基本」というマツダ独自の安全思想に立って、世界基準に基づいた様々な先進アクティブセーフティ技術を採用している。

SKYACTIV TECHNOLOGY と「魂動」デザインの本質を最大限に引き出すことによって新次元の「走る喜び」を創出し、マツダのブランドポジションの革新に挑む新型アテンザが、気概を持って毎日を生きるお客様のベストパートナーとなることを願ってやまない。

2. 商品コンセプト

新型アテンザの商品コンセプトを構築するに当たり、従来の市場情報から得られる定量データに基づいたコンセプト創造活動から、特定の個人に絞った定性データに基づいたコンセプト創造活動へと変革を行った。

つまり、市場で際立つ個性を持った「マツダならではの独自の価値」を具備した商品を世に送り出すために、お客様を集合体として捉えるのではなく、特定の個人に焦点を当てることとした。

具体的には、ブランドプロポジションという手法を用い、新型アテンザが存在していないことによるお客様の現在の状態と、新型アテンザが存在していることでのお客様の理想状態を明らかにした。そして、その差こそが新型アテンザおよびマツダの存在価値であり、お客様が理想状態に達する根拠になるとの考え方に基づくものである。

そして、任意に選定したお客様の日常行動について徹底的

な追跡調査を行った。その結果、新型アテンザのターゲットカスタマーは、社会的チャレンジャーであり、周囲に知的かつエネルギー豊富な人格を伝えたいとの期待を有していることが分かった。こういったお客様の価値観を踏まえ、新型アテンザが提供すべき最重要価値は、「日々挑戦し続けるお客様を強力に後押しする存在」であるべきと結論付けた。つまり、お客様にとっての存在意義そのものを最も重要な価値として位置づけた。

お客様を後押しする新型アテンザの価値とは、クルマに触れるたびに自身が前へ進むエネルギーを充電できることである。すなわち、気持ちが落ち込んでいるときにも自信を取り戻させてくれ、気持ちを高揚させて明日への活力を新たに与えてくれるクルマであるということである。

これらコンセプト創造活動の結果から、新型アテンザの商品コンセプトは、『人生を豊かにするモチベータ』とした。ドライバに活力をもたらす、ドライバにとってクルマが掛け替えのない存在に成ることを目指し、主要な価値として、

1. 対峙する度、思わず心が凜とする存在感
2. ヒトとクルマの一体化により、胸のすく爽快感が味わえる運動性能
3. どこにでも行ける期待感を醸成する環境安全性能

を提供すべきとの結論に至った。

次に、これら 3 つの主要な価値を実現するための商品開発における注力ポイントを述べる。

3. 商品特徴

3.1 対峙する度、思わず心が凜とする存在感

社会的チャレンジャーであるターゲットカスタマーに対して、新型アテンザは「自分のスタイルを貫き、気持ちを奮い立たせる存在」でありたい。新型アテンザのデザインは、この想いを実現すべく、群れの中にも異彩を放ち、心を凜とさせるエクステリアデザインを目指した。そして、乗り込んだ瞬間に訪れる静寂、操作の度に感じる節度感、クルマとの一つ一つの対話によってドライバ自身の本来のペースを取り戻すことのできるインテリアデザインを目指した。更に、新型アテンザではマツダの「魂動(KODO)」デザインに対する挑戦をフルに採用している。

(1) デザインコンセプト

新たな挑戦「魂動」では、動きを表現する立体造形の進化を追求し、これをサポートする骨格、質感革新、ブランド表現の進化に注力した。動きの表現には色々な解釈があるが、魂を持った動きは、強く美しく、感情的であると同時に、理論があって無駄がない。このような造形を実現するのが、「魂動」デザインに対するマツダの思いである。

また、マツダが特に力を入れているのがモデリングである。現在のデジタル処理を主体とするデザイン開発の時代にあって、あえてモデラーの匠の技を活用したクレイによるモデリングを強化し、「マツダならではの独自の価値」を提供する高い品質の立体造形を創りきった (Fig.1)。



Fig.1 Mazda Clay Modeling Technology

これらの結果として、お客様の野生を呼び覚ますような艶っぽく情熱的な造形、質感を追求し、自然を壊すのではなく自然に溶け込むような動く形として理にかなった、完成度の高いデザインを目指したのが新型アテンザである。

また、デザイン開発プロセスを革新し、ビジョンモデルを創り、量産車に展開し、また次のビジョンモデルを創るといふ新たなプロセスへのチャレンジを行った。今までのショーカーとは全く異なり、次世代商品のイメージを牽引するビジョンモデルという意味を持たせ、非常にリアルで質の高いものを創り出すプロセスとしている。この新たなデザイン開発プロセスで発表してきたのが「SHINARI 靱と TAKERI 雄 (Fig.2)」である。そして、これらのビジョンモデルをベースとして商品開発した量産車が「新型アテンザ」である。

このように、「魂動」デザインによる動きの立体表現と艶やかな面質を極めたこのクルマに向かい合うたびに、所有するお客様の心を凜とさせ、元気にさせるデザインを新型アテンザでは実現している。



Fig.2 Shinari & Takeri

(2) エクステリアデザイン

エクステリアデザインでは、一目見ただけで感じ取れる強い骨格と高い艶感によって品格とスポーティさを兼ね備えながらも、生き物のように美しい強靭さを表現している。そして、対峙する度、思わず心が凜とする存在感をデザイン領域で実現するため、3つのデザイン革新を取り入れた (Fig.3~6)。

- 1.プロポーション革新
- 2.サーフェス革新
- 3.ブランドシグネチャ



Fig.3 Front Quarter View (SDN)



Fig.4 Rear Quarter View (SDN)



Fig.5 Rear Quarter View (WGN)



Fig.6 Head Lamp & Rear Combination Lamp Signature

(3) インテリアデザイン

インテリアデザインでは、一目見ただけで感じられる品格の高さと質感の良さを実現し、そこに「粹」なデザインとコーディネート織り込むことを目指した。また、お客様に長く愛されるクルマとなるよう、形の新しさのみに偏重することを避け、インテリアの造形全体の質感や部品と部品の合わせ部の造形など、細部にもこだわった質感の向上に取り組んだ。具体的には、室内空間を構成する2つの大きな要素として、インパネ上部から両サイドへと流れるスピード感のある大きな動きを感じさせるラインと、インパネ中央部を水平に貫く安定したラインを設定し、この両者を核とした立体

造形の創出に取り組んだ (Fig. 7)。



Fig.7 Interior

(4) 魂動を実現する諸元／居住空間

新型アテンザでは、セダンとワゴンそれぞれに求められるターゲットカスタマーの期待に基づき、グローバルで最適化された諸元とした。セダンは「車格と後席のスペース」、ワゴンは「取り廻しと荷室」への期待が高い。

これらの期待を両立させるため、セダンとワゴンにそれぞれ専用のホイールベースを諸元として与えている。更に、「リヤローディングキャビン」と「タイヤの四隅配置と大径化」をパッケージ革新として取り入れた。これらの革新により、魂動デザインを具現化した躍動的なフォルムの中に、ターゲットカスタマーの期待に沿った十分なスペースと心地よい居住空間、使いやすい荷室を両立し、ドライバーが安心して運転に集中できる、一体感に満ちた運転環境を実現した。

3.2 ヒトとクルマの一体化により、胸のすく爽快感が味わえる運動性能

お客様と新型アテンザの一体化により得られる胸のすく爽快感が味わえる運動性能を獲得するため、ダイナミクス領域においても新たな挑戦を行った。

(1) ダイナミクスパフォーマンス

これまでのアテンザおよびマツダは、Zoom-Zoom をキーワードに、わずかな Input に対してクルマを俊敏に反応させる車両の応答特性を訴求し、提供してきた。今回、新型アテンザの商品開発では、ドライバーの意図した Input に対してクルマが期待通りの反応をする「意のままに軽快に操る喜び」を提供すべく、「減速、旋回、加速の 3 つの運動のスムーズなつながり」の実現を目指した (Fig.8)。そして、従来の Acceleration/Steering/Braking に加えて、Engine Sound のつながりにもチャレンジした。これにより、「ドライバーの神経がクルマとつながったかのような感覚」を生み出すほどの一体化を実現した。

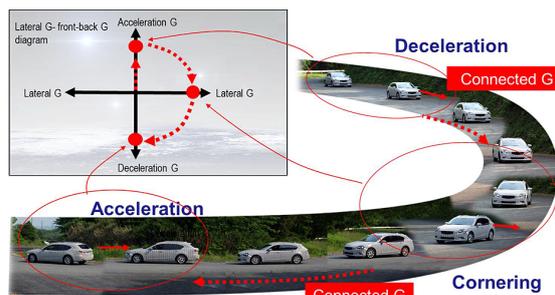


Fig.8 Connection of Accelerating/Steering/Braking

<加速感>

一般的に、走りの良さを追求する車は、少しアクセルを踏んだだけでドライバーの意図を超えた、飛び出すような走り感を演出している。一方で、新型アテンザでは、踏んだら踏んだだけ加速する特性を提供している。つまり、修正操作が不要な一発で決まるアクセルの操作性を目指した。これは、フラットで太いトルクを発生する SKYACTIV TECHNOLOGY の効果であり、思い通りの加速が得られる走りを提供している (Fig.9)。

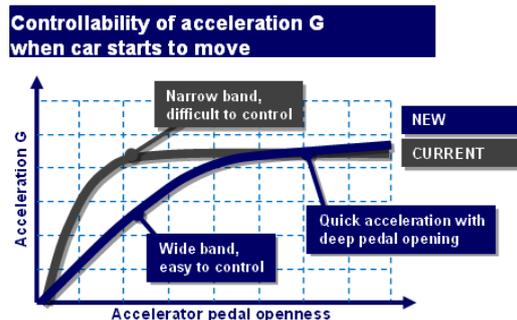


Fig.9 Accelerator Openness vs. Acceleration G

<ステアリング・ハンドリング>

加速感と同様に、走りの良さを追求する車は、ロールが抑えられた軽快なハンドリング特性を演出している。しかし、少しハンドルをきいたら、ドライバーの意図を超えて車が動き、その後、ステアリングを切り増していくと突然ロールが発生し、またそのロールスピードが速いため、違和感を生じる場面がある。また、荒れた路面では、敏感に路面の段差を拾うため、頻繁に修正するための操舵を必要としている。

一方で、新型アテンザは、ステアリングからの舵角入力に対して、リニアに反力が増えていき、ロールが穏やかに増えていく。ロールの量としては大きいですが、ゆっくりとしたロールとしているため、違和感が生じない (Fig.10)。

そして、マツダは、新型アテンザの商品開発によって「ヒトとクルマの一体化」に貢献する新たなコア技術を獲得した。更に、この技術によって荒れた路面に対しても、ロバストな寛容性を発揮している。

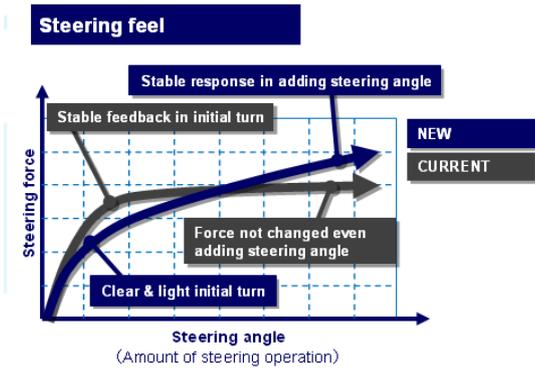


Fig.10 Steering Feel

(2) エンジンサウンド

新型アテンザでは、定常走行シーンと加速走行シーンなどのそれぞれで、ドライバの操作に呼応した心地よいエンジンサウンドを奏でることを目指した。

具体的には、車両構造の最適化により静粛性を大幅に向上させた上で、定常走行シーンでは澄んだ音を中心としたハーモニック成分を強調し、加速走行シーンでは変動感のある鼓動成分を強調したエンジンサウンドを奏でることで、ヒトとクルマの走行状態に対応した心地よいエンジンサウンドを提供している (Fig.11)。

心地良い音色を達成するための具体的な対応として、SKYACTIV TECHNOLOGY を採用したガソリンエンジンとディーゼルエンジンの持つ音のメカニズムを徹底的に分析し、エキゾーストマニホールドのインシュレータ構造の2重化への変更や、インテークマニホールドへの遮音材の追加を実施している。更に、エンジンマウント振動を活用し、ハーモニック感と鼓動感を両立したエンジンサウンドを実現するなど、従来の音量にこだわったエンジンサウンド開発から、音質にこだわったエンジンサウンド開発へと変革した。

加えて、プレミアムオーディオ装着車には、強い加速シーンでの鼓動音をオーディオのスピーカから発生させる Active Engine Sound(アクティブエンジンサウンド)を採用することで、ヒトとクルマの一体化を更に高めるエンジンサウンドとしている。

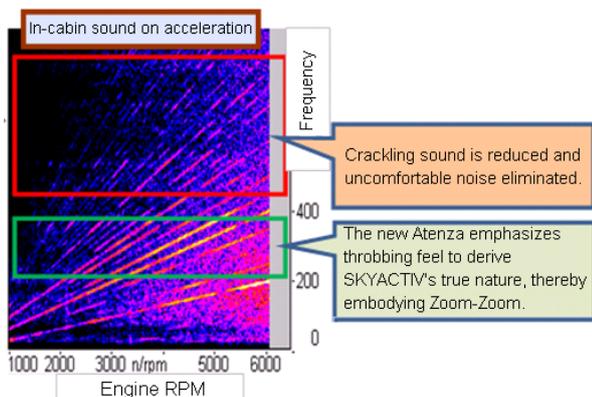


Fig.11 Engine RPM vs. Sound During Acceleration

(3) ドライビングインターフェース：操作機器／視界

「ヒトとクルマの一体化」はマツダ DNA の「走る歓び」の原点であり、運転への集中を促すドライビングポジションの提供と適正な機器配置により、正確な認知と操作を実現した。具体的には、人間工学に基づき、スムーズで安定した操作を可能にするオルガン式アクセルペダル、「しっかり握れる」と「軽く握れる」を両立したステアリングホイール、シフト操作時の圧力分布の均一化にこだわったシフトレバーの採用などにより実現している。

また、基本性能としてのドライバの直接視界確保は普遍的な条件である。つまり、見るべきところが確実に見え、無理やストレスのない運転を可能とする視界を提供している。新型アテンザでは、操作系・視認性機器の形状や配置の最適化、的確でスムーズなコーナリングをサポートする広く見通しの良い視界などによって、違和感なく「意のままに軽快に操ることでの走る歓び」を体感できる運転環境を実現した。

3.3 どこにでも行ける期待感を醸成する環境安全性能

新型アテンザの商品開発において、どんなにデザインが優れ、どんなにダイナミクス性能が優れているクルマでも、環境や安全に不安を抱えた状態では、「意のままに軽快に操ることでの走る歓び」を提供できないと考えている。

そこで、ダイナミクス性能のみでなく、燃費性能・空力性能・軽量化などの環境技術や、マツダプロアクティブセーフティの考え方に基づいた安全技術にも注力して商品開発を行った。

(1) 燃費性能

エンジンは、2.0L/2.5L のガソリンエンジン(GE)、2.2L のクリーンディーゼルエンジン(DE)を用意している。

新型アテンザから新規導入となる 2.5L GE は、2.5L 競合群の中において上位レベルの Max Torque を有しながら、高速走行時にはハイブリッド車と同等の燃費性能を実現している。2.2L DE は、V6 を遙かに上回る Max Torque を有しながら、ハイブリッド車や他社の DE 車を凌駕する高速燃費性能を実現している。

更に、新型アテンザは減速時のエネルギー回生システムとして、i-ELOOP を採用している。i-ELOOP は、熱エネルギーとして捨てられていた運動エネルギーを回生するシステムであり、走行中にアクセルをオフした瞬間から、最大 25V の電圧でオルタネータによって発電し、自動車用に新開発したキャパシタへ瞬時に蓄えられる。

キャパシタに一時的に蓄えられた電力は、DC-DC コンバータで 12V に降圧し、直接エアコンやオーディオなどの電装品の電力として供給するほか、必要に応じてバッテリーの充電も行う。

これにより、電装品を作動させるための電力の発電に消費していた燃料の使用を抑制することができる。結果として、頻繁に加減速を繰り返す実用走行時には、特に燃費改善効果が見込める。

(2) 空力性能

クラスストップレベルの燃費性能を実現すべく、空力性能 (Cd 値) にもこだわり抜いた。エンジン下カバー、センターフロアカバー、トンネルカバー、前後タイヤディフレクタを設定して床下流れの整流を図るとともに、メインサイレンサによる跳ね上げ形状で流れを上方向にわかした。これにより、Cd 値を大幅に低減している。

また、センターフロアカバーは燃料タンク下まで配置、トンネルカバーと大型トンネルメンバを新たに設定、ディフレクタ前方の跳ね下げ形状の採用は現行車からの進化であるとともに、他社に類を見ない床下流れの整流を実現し、クラスストップレベルの燃費性能に貢献している。

また、こだわり抜いた空力性能により、高速走行時の直進安定性能においても、高い性能を実現している。

(3) 軽量化技術

新型アテンザでは、歩行者保護対応やオフセット衝突対応など、年々強化される規制対応や、安全技術の拡大展開による安全対応による重量増を最小限に抑制している。

具体的には、SKYACTIV 技術を活用して 100kg の軽量化技術を織込むことで、規制対応や安全対応などの重量増をオフセットしている。これにより、クラスストップレベルの燃費性能を実現するとともに、意のままに軽快に操ることでの走る喜びの提供に貢献している。

(4) 安全技術

新型アテンザでは、マツダの安全思想 (マツダプロアクティブセーフティ) に則り、「お客様が安全に運転できる状態を最大限に高めること」にこだわって商品開発を行った。お客様が「意のままに軽快に操ることでの走る喜び」を楽しみ尽くすために世界基準の様々な先進アクティブセーフティ技術を採用している。

このため、新型アテンザの先進アクティブセーフティ技術は、カメラ、レーザ、レーダなど複数の最新センシング技術を用いて、それぞれの長所・短所を有機的に相互補完することで、どのような天候、どのような路面でも、常にお客様が安全に運転できる状態を確保している。

4. おわりに

新型アテンザは、フルに SKYACTIV TECHNOLOGY を搭載した初の乗用車として、「ヒトとクルマの一体化」を実感できる卓越したダイナミクス性能を提供している。更に、ドライバの感情を刺激する唯一無二の存在感を具備したスタイリングにより、お客様にとってかけがえのないパートナーとなることを目指した。また、SKYACTIV TECHNOLOGY は運転の楽しさだけでなく、いつまでも気兼ねなくドライブできる環境安全性能を実現している。このように、新型アテンザは、「走る喜び」を愚直に追求するマツダが、自信を持って世に送り出す作品である。お客様のライフスタイルをより豊かなものにするための良き

パートナーとして、このクルマを末永く愛していただけたら、開発者としてこれに勝る喜びはない。

参考文献

- (1) 延岡健太郎：価値づくり経営の論理－日本製造業の生きる道，日本経済新聞社 (2011)
- (2) 加藤雄一郎：ブランドマネジメント－究極的なありたい姿が組織能力を更に高める，日本規格協会 (2009)
- (3) W・チャン・キム,レネ・モボルニユ：ブルー・オーシャン戦略 競争のない世界を創造する，ランダムハウス講談社 (2005)
- (4) 楠木建：ストーリーとしての競争戦略－優れた戦略の条件，東洋経済新報社 (2010)
- (5) 延岡健太郎：マルチプロジェクト戦略，有斐閣 (1996)
- (6) 延岡健太郎：MOT [技術経営] 入門，日本経済新聞出版社 (2006)
- (7) 沼上幹：経営戦略の思考法，日本経済新聞出版社(2009)
- (8) 青島矢一，加藤俊彦：競争戦略論，東洋経済新聞社 (2003)
- (9) Vargo S.L. ほか：“Evolving to a New Dominant Logic for Marketing” *Journal of Marketing*, Vol.68, pp.1-17 (2004)
- (10) Vargo S.L. ほか：“Service-Dominant Logic : Continuing the Evolution” *Journal of the Academic Science*, Vol.36, No.1, pp.1-10 (2008)
- (11) Christensen C.M., 玉田俊平太, 伊豆原弓：イノベーションのジレンマ，翔泳社 (2001)
- (12) Clark K. B. , 藤本隆宏, 田村明比古：増補版 製品開発力，ダイヤモンド社 (2009)
- (13) 安部義彦, 池上 重輔ほか：日本のブルー・オーシャン戦略，ファーストプレス (2008)

■ 著 者 ■



梶山 浩



松岡 完



岩本 信也

特集：新型車（アテンザ）

13

新型アテンザのデザイン Design of All-New ATENZA

玉谷 聡*1

Akira Tamatani

要約

新型アテンザは、新デザインテーマ「魂動（こどう）」の真髄といえるダイナミックで生命感ある動きとスピード感、そして艶感あふれる面質を純粋に、そしてアーティスティックに表現し、他にはない圧倒的な存在感と美しさの実現を目指したマツダのフラッグシップカーである。エクステリアでは CD クラスとしての堂々とした存在感、品格とともに、あたかも隅々まで血液や神経が通う生き物がドライバの意志を忠実にタイヤの接地点まで伝えるような生命感を表現した。インテリアではドライバにはドライビングプレジャを、パッセンジャには心地よく包まれる空間を提供し、エクステリアデザインと呼応するスピード感ある造形と、CD クラスにふさわしい素材感を与え、上質なデザインとした。

Summary

The new ATENZA is a Mazda's flagship car, aiming to realize unparalleled presence and beauty by expressing dynamic lively movements and speedy feeling – the core of the new design theme “Kodo” – with pure and artistic expression of alluring surface language. Its exterior design has imposing dignified presence worthy as a car in CD segment, but at the same time it expresses dynamic vitality that directly delivers a driver's intention even to the points where tires meet ground as if it were a living creature with blood and nerves all over its body. The interior provides driving pleasure for a driver while comfortably enclosed feeling for a passenger. At a glance, its elegant design gives impression of speedy feeling, equivalent with the exterior, through suitable material feeling as CD class car.

1. はじめに

CD セグメントの歴史は長いですが、その市場規模は近年グローバルに縮小を続け、プレミアムとノンプレミアムに二極化している。市場は小さくも、そこにプレミアムメーカは各ブランドの威信をかけ、性能、品質、技術、デザインの全てに各社の先進性を表現している。新型アテンザはマツダのフラッグシップとして、「SKYACTIV TECHNOLOGY」と「魂動」デザインを究極的に体現することで、マツダブランドを飛躍的に向上させることをミッションとして開発された。

初代アテンザはアスレチックな表現を、2代目は品格や日本の美意識の表現を目指した。3代目の今回は動体としての骨格的な動き、造形テーマの躍動感、艶のレベルを飛躍的に進化させる「魂動」デザイン表現を追求する中で、疾走する捕食動物の野性的な造形テーマをアーティスティックに洗練させ、量産車に実現することに成功した。以下にそのポイントを紹介する。

*1 デザイン本部
Design Div.

2. エクステリア・デザインコンセプト

2.1 「靱 (SHINARI)」「雄 (TAKERI)」と、新型アテンザ

「魂動」デザインとは、生き物やアスリートが瞬発力やスピード感のある動きの中で見せる一瞬の美しさや力強さを捉えてクルマのデザインに昇華することであり、「靱」は 2010 年夏、「魂動」デザインコンセプトを表すモデルとして発表された。2011 年東京モーターショーでは「雄」を、「靱」のデザインテーマに、量産の可能性を示唆する CD カーコンセプトモデルとして世界に紹介した。その「雄」のデザインは当時開発を終えようとしていた新型アテンザのテーマ造形をショーカー用にアレンジしたものであり、新型アテンザのデザインは、フラッグシップモデルとして、まさしく「靱」「雄」で世界に示してきた「魂動」デザインの開発と時を同じく行われ、それをストレートに量産車に実現する役割を持って開発がすすめられた (Fig.1, 2)。



Fig.1 SHINARI & TAKERI



Fig.2 New ATENZA

2.2 様式と革新的な美を調和させるデザイン

CD クラスには、長い歴史の中で培われてきたある様式がある。それは、各機能のレイアウト、人を快適に乗せ、荷室や視界も確保するパッケージ、そして走りや空力などの究極のバランスを突き詰めながら、同時にそのスタイリングに高い престиージュ性が求められてきた中で確立されてきたものである。新型アテンザのデザインは、全体のプロポーシオンやスタンスの良さという基本的な構成に動きを追求し、過去のマツダ車にない進化した骨格を創り上げた。その上に野性的な躍動や艶を表現する造形テーマを、他にはない大胆さで採り入れた。更に全体造形をアーティストティックに練り上げることで、様式美と革新性を調和させることを目指した。

3. エクステリアデザイン

3.1 生命感あふれる動きの表現

(1) 骨格の動き

骨格では、先ず四隅にしっかりと踏ん張らせた大径タイヤと、それを強調するフェンダの張り出しに対し、キャビンをコンパクトに引き締め、ロー&ワイドな強いスタンスを創り上げ、新型アテンザの高性能な走りを表している。またキャビンの前後位置を後方に移動させ、ボデーのウェッジ角度を強めて、後方に溜められた力をショルダからノーズへ向かって解き放つような、大地を強く蹴って前へ突き進む力感のある造形を行った (Fig.3, 4, 5)。



Fig.3 Strong Tire Stance

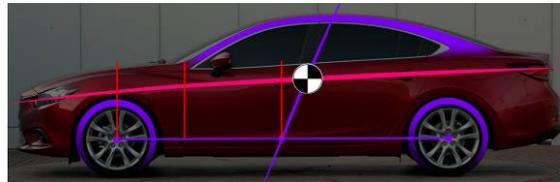


Fig.4 Cabin Position which Set Backward



Fig.5 Force Toward Front

長く伸びやかなボデーのショルダ部には、「靱」から継承したデザインテーマを CD カーとして磨き直した、疾走する動物の筋肉を思わせる 3 本の特徴的なキャラクタラインが走っている。1 本目はリヤタイヤを起点に前方へ伸びる、跳躍を表すエレガントなラインで、捕食動物が後ろ足で地面を蹴って飛び出す姿をイメージした (Fig.6)。2 本目はその「後ろ足」の蹴りを支える「腰」の筋肉の隆起を表現するリヤフェンダのラインで、跳躍の推進力を表す (Fig.7)。3 本目は、俊敏に方向転換をする前肢を支える「肩」を表現するフロントフェンダのライン (Fig.8)。これら 3 本のキャラクタラインの美しいコンビネーションは、タイヤの位置を起点とした造形コントロールをしており、ボデー全体が表す「地面を掴む鋭い跳躍」と「前へ突き進むスピード感」の力強い表現を完結させている (Fig.9, 10, 11)。



Fig.6 Leap Image Toward Front



Fig.7 Muscle on the Back for the Leap



Fig.8 Shoulder Muscle for Nimbleness



Fig.9 3 Character Lines on the Shoulder



Fig.10 Close Character Control Based on Tires



Fig.11 Artistic Surface Control

(2) 生命感を醸成する艶のある面のコントロール

ラインとラインの間に生まれる面の造形にも細心の造り込みを行い、シャープな緊張感があるなかにも艶を感じさせる、新しい面質のエモーショナルな表現を完成させた。ボデーに映り込む光はキャラクタラインと絡み合いながらある部分ではスピーディに動き、ある部分ではゆったりとどまり視線の移動につれてリズムカルな脈動を描き出す。そこに生まれる光と影のバランス、映しこまれる光のコントロールにも徹底的にこだわり、他とは明確に一線を画す独自性と魅力を備えた (Fig.12, 13)。



Fig.12 Alluring Reflection



Fig.13 Alluring Light & Shadow

3.2 CDカーとしての風格、品格の表現

(1) 強い意志を表すフロントフェイス

新世代商品群のファミリーフェイスであるシグネチャーウィングを、彫りの深いフェイスの造形に巧みに取り込み、前方を見据える眼光鋭いヘッドランプデザインと相まって、意志の強い表情を持った堂々とした品格ある「顔」を創り出した (Fig.14)。

シグネチャーウィングの延長線はリヤフェンダのキャラクタラインへつながり、ボデー全体の動きの表現に連動する。フロントグリルから始まるノーズの立体造形はボデーサイドやキャビンへと続く面による造形の起点となり、強く前進するクルマ全体の動きや力の方向性を牽引している。一方ロアグリル周りの造形は台形モチーフで地面を掴む安定感を与えている (Fig.15)。



Fig.14 Dignified Front Face



Fig.15 Strong 3D Front Form as Start Point of Body Side and Cabin Form

(2) フロントと一貫した強いリヤデザイン

リヤビューにも、フロントフェイスと同様、ひと目で新型アテンザと分かる表情と品格・スポーティさを備えたマツダのフラッグシップとしての一貫した表現を追求した。セダン・ワゴンモデルいずれも、ウェッジしたボデーと強く張り出したリヤフェンダ、コンパクトなキャビンの組み合わせによって、四隅のタイヤを意識させる安定感あふれるプロポーションを獲得し、また横長のリヤコンビネーションランプ形状が、いっそうのワイド感と安定感を与えている。左右のランプの上部を結ぶように設定されたブライトモールは、シャープさと貫録を与えると同時に、ボデーサイドからランプへのつながりも表す (Fig.16, 17)。



Fig.16 Sedan Rear Design



Fig.17 Wagon Rear Design

(3) マツダ初のヘッドランプ・ライティング・シグネチャー

ヘッドランプには、シグネチャーウィングがヘッドランプ上端のラインへと入って消える延長線上に、LED 灯による直線的な発光ラインを設け、ボデーサイドにスピーディに抜けて行く動きを与えた。更に、ドライビングランプの外周には導光体をリング状に並べた円形の発光シグネチャーを置き、これを直線の LED 発光が貫くように配置した。点灯時には直線と円によるシンプルで力強い独自のキャラクタが現れ、ひと目で新型アテンザと分かる個性的な外観を獲得している (Fig.18)。リヤコンビネーションランプにも、丸型テールライトからセンターに向かって直線的に伸びる発光シグネチャーを設定し、後ろ姿にもスピード感と、一目で新型アテンザと認識できるキャラクタを持たせた (Fig.19)。(ヘッドランプシグネチャーはハイグレード仕様を設定)



Fig.18 LED. Lighting Signature in Head



Fig.19 Lighting Signature in Rear Combination Lamp

4. インテリアデザイン

4.1 前席の空間構成

運転席には適度なタイト感でクルマとの一体感を感じられるアーチ形の空間を表現し、一目で「座って運転してみたい」と感じさせる、ドライバを中心とした空間を表現した。インパネに深く押し込まれたタイトなメータフードに 3 連メータを左右対称に配置し、ドライバを中心に推進するベクトルが感じられる奥行きのあるコックピットである (Fig.20)。

一方助手席では水平方向に通した軸で、包まれるような安心感を持てる空間とした。センタースタックの空調ルーバまでを囲んだデコレーションパネルが助手席乗員の目前に水平方向に広がり、開放的でゆとりのある空間を感じさせる。適度に量感のある断面形状を持つインパネの造形は、しっかりと守られている安心感を乗員に与える (Fig.21,22)。



Fig.20 Space for Driver & Passenger



Fig.21 2 Main Lines as a Composition



Fig.22 Interior (Black Leather)

4.2 エクステリア造形と同期したインテリア造形

インテリアデザインでは、新世代マツダのフラッグシップカーにふさわしい「粹」な造形とコーディネーションを目指した。そしてお客様に長く愛されるよう、形の新鮮さに偏重することを避け、一目で感じられる室内各部の造形のクオリティや隅々までの質感の向上に取り組んだ。

造形要素として、インパネ上部から両サイドへ流れるスピード感ある大きな動きと、インパネ中央部を水平に貫く安定感を核とした。特に動きのラインは特徴的でエクステリアの同じ部分のキャラクタラインと呼応して内と外で、一貫した世界感を表現している。またドアトリムの彫刻的な面の陰影の変化にはCDカーのインテリアにふさわしい上質な造形美を表現した。(Fig.23,24)



Fig.23 Same Speed Expression in its Exterior & Interior Theme Lines



Fig. 24 Sculptural Speed Expression on Trims

4.3 素材の質感へのこだわり

樹脂パーツやトリム材、デコレーションパーツなどの各種素材の質感は、触感の良さ、本物らしい自然な面変化の実現を徹底的に追求した。インパネアッパ部とメータフード、ドアトリム上部などお客様が手に触れやすい部分には、前席・後席ともソフト素材を用い、プラスチック的な素材感の露出を最小限に抑えた。またソフト素材とハード素材が隣り合う箇所では、素材の柔らかさ・硬さを視覚的に感じ取れるよう形状を工夫し、例えば硬い素材が柔らかい素材にめり込む形状を自然に再現した。更に、サテンクローム処理を施したメタリックパーツは、あたかも無垢の金属を削り出して、手で丹念に磨き上げたような本物らしさを醸し出すため、形状に細心の注意を払った (Fig.25)。

インパネの中段を水平に貫くラインには、新開発の積層フィルムをインサートした立体的なデコレーションパネルを2種類設定した (Fig.26)。深みのあるダークチェリーのような「ボルドーメタル」と、渋みのある黒く焼いた鋼のような「ダークメタル」である。いずれも、磨き込まれたガラスのような滑らかな表面のフィルムの最下層に、ヘアライン加工されたリアルアルミのレイヤがあり、透明感のある深みを生みながら、強い光が当たった瞬間には金属の高輝度な反射によって「凄み」を見せる。



Fig 25 Satin Chrome Parts which Have Real Metal Feel



Fig.26 New Material which Have Deep Gross Color & Real Metal Feel

5. カラーデザイン

5.1 新世代デザインの形状を最大限に表出させる新ボデーカラー

新世代「魂動」デザインを極めるため、新型アテンザのデザイン開発では造形とボデーカラーのベストマッチを追求した。大胆さと繊細さをあわせ持つ「魂動」の面の表情を余すところなく表現する、光と影、深みのある艶を持つ新色を開発した。

新型アテンザでは全8色のボデーカラー・ラインナップ (Fig.27) のうち、4色がその新色となる。

中でも新型アテンザのイメージカラーとなる Soul Red は、マツダが長い年月開発してきた鮮やかで情熱的な「赤」を更に極めた。難易度の高いハイライトの発色の良さと深みの両立を成功させ、内からエネルギーを発する、エモーショナルな「赤」として完成させた。エンジニアがデザイナーの意を酌み技術と試行錯誤を重ねて実現した、マツダ渾身の Red である。

第二のイメージカラーは「靱」のボデー色に近い Blue Reflex である。鍛え抜かれた金属が放つ独特の強靱な質感を表現するため、細かな光輝材をこれまで以上に緻密に配置し、滑らかな質感としなやかで強い光沢を実現した。

Meteor Grey も Blue Reflex 同様に硬質で密度感の高さを追求したグレーマイカである。

そして今までに存在しないほどの「漆黒のシェード」と、ハイライトの輝きを実現したのが、新開発の Jet Black である。

既存色の Stormy Blue Mica, Aluminum Metallic, Snowflake White Pearl, Arctic White も含め全8色を設定した。

(日本仕様は Arctic White の設定がないため全7色)

【ボデーカラーラインナップ】

- | | | |
|----------------------------|------|-------------------------------------|
| ① -Soul Red Metallic (41V) | (新色) | ⑤ -Stormy Blue Mica (35J) |
| ② -Blue Reflex Mica (42B) | (新色) | ⑥ -Aluminum Metallic (38P) |
| ③ -Meteor Grey Mica (42A) | (新色) | ⑦ -Snowflake White Pearl Mica (25D) |
| ④ -Jet Black Mica (41W) | (新色) | ⑧ -Arctic White (A4D) |



① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧

Fig.27 Body Color Line-Up

5.2 「粋」な大人のインテリアカラーコーディネート

インテリア全体に、ブラックを基調にデコレーション素材を活かした、男性的で大人の魅力を感じさせるカラーコーディネーションを心がけた。シート&トリムには、革内装にオフホワイトとブラック、ファブリック内装にブラックとサンド、合わせて4種類のカラーを設定した。(日本仕様はサンドファブリックの設定をしないため3種類。)

ハイグレードモデルの革内装色の一つ、オフホワイトでは、ブラック基調の引き締まった内装にハイコントラストとなるホワイトを配し、シート形状やドアトリムのスピード感ある前後方向の動きを強調している (Fig.28)。冷たい印象を与えない、微妙に温かみのあるオフホワイトとし、永く愛用していただけるものとした (Fig.29)。革内装色ブラックでは、きめ細かさやしっとりした質感を活かす艶やかな色合いを追求し、またシートバックに採用した荒めのシボの黒のビニルレザーとのコントラストで、「凄み」を感じさせている (Fig.30)。革内装にはインテリア造形のスピード感を表現する部分に赤のステッチを配して動きを強調した。

ファブリック内装では、シルキーかつ立体感のある高品質な素材に最適な色合いで、心地よさを感じさせるサンドとブラックを、赤味や青味のわずかなブレも許さないピンポイントな色選定を行った (Fig.31, 32)。(日本仕様はサンドファブリックの設定無し。)



Fig. 28 Off - White Leather Coordination and Texture



Fig.29 Off-white leather



Fig.30 Black leather



Fig.31 Sand fabric



Fig.32 Black fabric

5. アルミホイールデザイン

17インチと19インチにサイズアップし、高い走行性能と風格をあわせ持つCDカーブアランスに貢献している (Fig.33, 34)。いずれのタイプでも、センターハブからタイヤにつながるダイナミックな動きの表現を重視すると同時に、各スポークの面に動きを持たせ撓らせることで、軽さと金属感を印象づけるデザインを目指した。塗装色にも新色を採用し、金属感をより強くしている。

19インチアルミホイールでは力強い造形のスポークを5対組み合わせ、ひねりを加えた面形状を与え、強さを表現している。17インチアルミホイールでは、直径は小さくても全体的に厚みを持たせたデザインでソリッド感を出した。

新しいホイールでは、性能面の向上にも取り組んだ。互いに相反する要件であるダイナミックなデザイン表現と剛性の向上、軽量化の3領域の目標を同時に達成するため、デザイナーとエンジニアが緻密な検証を繰り返し、重量増を抑えながら剛性を高め、ねじれに強く変形の少ないホイールを完成させ、操縦安定性の向上とNVHの低減を実現した (Fig.35)。



Fig.33 17inch Aluminum-Whee



Fig.34 19inch Aluminum-Whee

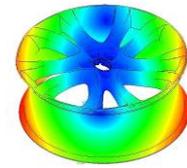


Fig.35 Analysis of Stability

6. おわりに

「目新しさ」と「新しさ」は違うとはよく語られる。私が新型アテンザに追い求めた「品格」「粋」とはアバンギャルドな「目新しさ」ではなく、歴史を理解した上で常識を打ち破る「新しさ」である。魂動デザインを進化させて表現する中で、エクステリア、インテリア、カラーコーディネーションの全てにその同じ思想で一貫性を持たせることができた実感している。

新型アテンザは、魂動と SKYACTIV TECHNOLOGY を体現する商品の第二弾となる。サステイナブルな「走る喜び」を追求し続けるマツダのフラッグシップとしての確かな進化によって、マツダブランドが今向かおうとしている新たな方向性を内外に明示し、お客様からのマツダへの信頼を更に高いものとする礎としたい。

■ 著 者 ■



玉谷 聡

特集：新型車（アテンザ）

14

新型アテンザのパッケージング Package of All-New ATENZA

三宮 正義 *1 大坪 智範*2
Masayoshi Sannomiya Tomonori Ohtsubo

要約

歴代アテンザは、際立つデザインと優れたダイナミック性能を持つミディアムカーとしてグローバルに高い評価をいただいた。3代目となる新型アテンザは、SKYACTIV TECHNOLOGYを全面的に活用して「ヒトとクルマの一体化」を成し遂げることを目指した。パッケージングの開発においては、デザインテーマ「魂動」の実現、「意のままに操る楽しさ」を感じるコックピットの実現、そして乗員全員を元気にする居心地のよい居住空間の実現の三つの注力点を定めて開発に取り組んだ。それぞれの注力点を満足すべく新しい技術や考え抜いた工夫を織り込み、マツダのフラグシップモデルとしてふさわしいパッケージングを実現した。

Summary

Successive ATENZAs have highly valued worldwide as a medium car with distinctive design and exceptional dynamics. The New ATENZA, third generation model, mounts SKYACTIV TECHNOLOGY in full scale to accomplish “oneness between car and driver”. As for packaging, it focused to realize the design theme, ‘KODO - Soul of Motion’, the cockpit environment to make drivers feel fun handling, and comfortable seating package to make all occupants vigorous. By incorporating new technologies and thought-out devices, the new ATENZA developed appropriate packaging for a Mazda flagship model.

1. はじめに

歴代アテンザは、ミディアムクラスのグローバルカーとして、スポーティな外観と反応の優れた走行性能でマツダのDNAを体現した車として世界的に高い評価をいただいた。

3代目となる新型アテンザは、「人生を豊かにするモチベーター」をコンセプトに、SKYACTIV TECHNOLOGYを全面的に活用して「ヒトとクルマの一体化」の実現を目指して開発した。本稿では、その実現の一翼を担うパッケージングの開発経緯と注力点を紹介する。

2. パッケージングの狙い

新型アテンザのコンセプト創造活動では、前モデルの市場でのお客様の評価を踏まえながら、新型アテンザの存在がお客様の期待に応えるための突出すべき商品性とそのレ

ベルを導き出した。その中で、デザインはお客様の期待が高く、パッケージングの構築においてはデザインと両立したうえで、乗員がクルマとの一体化を感じることができるコックピットと居心地のよい居住空間の提供が重要と捉え、以下の考え方に基づき実現に注力した。

- ① デザインテーマ「魂動」を実現する諸元、スペックの実現
- ② 「意のままに操る楽しさ」を感じるコックピットの実現
- ③ 乗員全員を元気にする居心地のよい居住空間と期待に応える荷室の実現

*1 商品企画部
Product Planning Dept.

*2 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

3. デザインテーマ「魂動」の実現

デザインテーマ「魂動」の具現を目指した新型アテンザのデザインは、フロントピラー及びリヤデッキ位置を後方に移動しキャビン全体を後方に置いたプロポーション (Fig.1) と、タイヤを四隅に踏ん張らせた揺るぎないスタンス表現を特徴としている。この実現に向けパッケージングでは以下に述べる対応を行った。

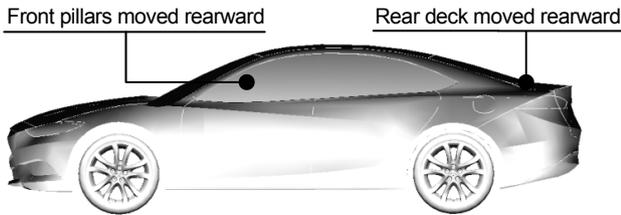


Fig.1 Rear Loading Cabin Proportion

3.1 フロントピラーの後方移動

フロントホイールセンタからフロントピラーまでの前後距離を、前モデルから約 100 mm拡大した。これにより短いフロントオーバーハングと相まって、重心を後方に置いたプロポーションを強化している。

フロントピラーの後方移動は、左右ピラー間の見開き角度を拡大しドライバの視界を改善する効果があるが、乗降性や視覚的な圧迫感に影響を与えるため、ピラー断面やトリム形状の工夫で影響を抑えた。

3.2 リヤデッキの後方移動

セダンのリヤデッキは位置を、前モデルから約 50 mm後方移動したショートデッキとして、後ろに溜めた力を一気に蹴り出す力強さを表現するプロポーションの実現に寄与した。ショートデッキ化により縮小するトランクの前後開口寸法は、積載動作、筋負担の二つの視点から荷物出し入れ性の分析を行い、デザインと出し入れ性を両立するトランク開口寸法とした。

3.3 タイヤの四隅配置と大径化

キャビンの後方移動に伴って、フロントとリヤのピラーからの力をしっかりとタイヤに伝えて高性能な走りを実現するため、前モデルに比べてセダンは 105 mm, ワゴンは 25 mmホイールベースを延長した。

最大径タイヤは前モデルの 225/45R18 から 225/45R19 にサイズアップして外径を 26 mm拡大した。これにより、タイヤが四隅に踏ん張り、支えが効いた揺るぎないスタンス表現を実現している。ホイールベースの延長やタイヤの大径化で影響を受ける最小回転半径は、前モデルと同等レベルとして取り回し性を維持している。

4. 「意のままに操る楽しさ」の具現化

4.1 ドライビングポジション

「人とクルマの一体化」はマツダ DNA の意のままに操る楽しさの原点であり、運転への集中を促すドライビングポジションの提供と適正な機器配置により、正確な認知と操作を可能とすることを目指した。その実現のために、運転操作がしやすい姿勢での腕や足の関節角度状態を求め、その状態に適合する位置に主要な運転操作機器を配置した (Fig.2)。

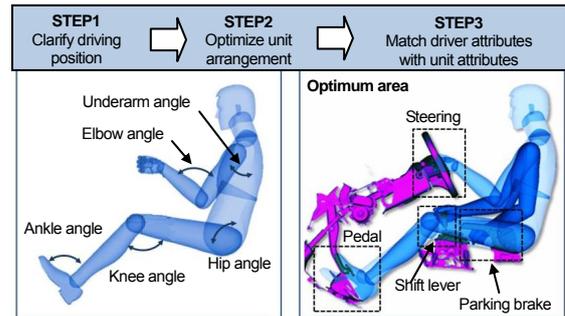


Fig.2 Driving Position Concept

(1) ペダル

新型アテンザは、フロントホイールセンタの前出しによりタイヤハウスの室内への突出が小さくなり、アクセルペダルを前モデルから外側に 10 mm出すことが可能となった。また、フットレストの幅も前モデルから 10 mm拡大することで、足を伸ばせば自然に足が置ける左右均等なペダル配置を実現した。また、アクセルペダルは、あらゆる体格のドライバに負担の少ない細やかで安定した操作を可能とするため、オルガンタイプのペダルを採用しドライバの意のままの操作を可能とした (Fig.3)。

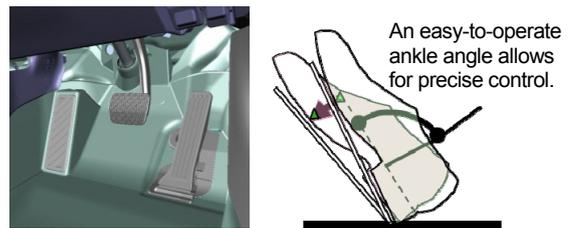


Fig.3 Hinged Accelerator

(2) ステアリング

ドライバがクルマを操るためのインターフェースであるステアリングは、クルマとの一体化を醸し出す重要な部品である。ハンドリング性能として「中低速の軽快感」と「高速の安定感」の両立を目指す新型アテンザは、前モデルのステアリング位置から 17 mm後方, 8 mm下方に移動してドライバに近づけ、操作のしやすさと保持のしやすさを実現した。グリップ形状においても「しっかり握れる」と「軽く握れる」の両立を目指し、1/10 mmレベルの形状チュ

ーニングを施した幾種類ものステアリングの中から最適形状を見出した。

(3) パーキングレバー

新型アテンザのパーキングレバーは、前モデルの助手席側から運転席側へ変更し、小柄なドライバーも手が届きやすく操作しやすい配置とした。また、ドライバーの引き方向に合わせレバーを斜めに置くことで、脇を締めた操作を可能としドライバーの引き力を発揮しやすくした。

(4) シフトレバー

AT車のシフトレバーは、ステアリングからシフトへのスムーズな持ち替えを可能とするため、前モデルから6mm後方、20mm下方に配置した。ノブ形状もシフト操作時のノブに加わる圧力分布を均一化することで手や指に馴染む形状として、握りやすくフィット感に富んだものとした。

シフトゲートの形状も一新し、前モデルの複雑な形状からすっきりとした形状にすることでスムーズなセレクト操作とポジションの認知性の向上を実現した (Fig.4)。



Fig.4 AT Shift Lever Layout

MT車のシフトレバーは、シフトストロークを前モデルから5mm短縮して手首の返しだけでのシフトを可能としてスポーティな操作性を実現した。

4.2 視界

視界のなかで前方視界はドライバーの運転動作に直接影響を与える重要な視覚情報であり、見るべきところが確実に見え、無理やストレスのない運転を可能とする視界の実現を目指した。特に「意のままに操る楽しさ」を代表するシーンとしてワインディングロードでの視界確保に注力した。

(1) 前方左右の見開き視界

前述のフロントピラーの後方移動により、左右ピラー間の見開き視界角は前モデルに対して9.6°拡大した。

これにより、前方の状況を確認し、思い通りのコースをトレースする視界の提供を実現した (Fig.5)。

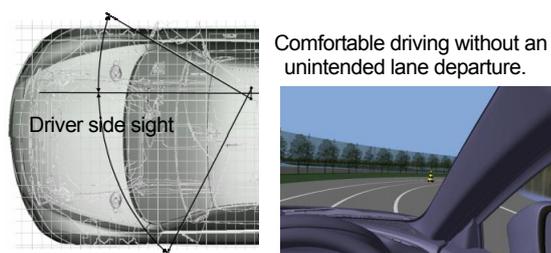


Fig.5 Wider Angle of Forward Visibility

(2) ドアボデーマウントミラー

ドアミラーを前モデルのドアガーニッシュへのマウント構造から、ドアボデーへのマウント構造に変更した。

ミラーとフロントピラーの間に隙を確保することにより交差点右左折時、ドライバーの姿勢変更を少なくし自然な動きでの歩行者の視認を可能とした (Fig.6)。

また、ミラーの鏡面も前モデルから拡大して後方の視認性を改善している。

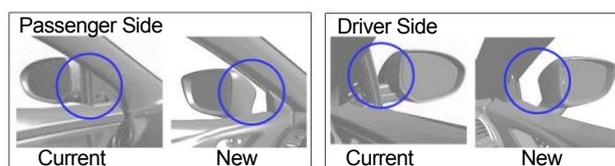


Fig.6 Improved Visibility Over Side Mirrors

4.3 視認操作性

ナビやi-DM (Intelligent Drive Master) などドライバーへの運転に関する情報量の増加に対して、現行アクセラから「ゾーンレイアウトコンセプト」を適用している。これは、視認機器はドライバーの視線移動のしやすさ、操作機器は運転中の操作の有無や頻度を基に配置する優先ゾーンを定めたものである。

新型アテンザもこのコンセプトに基づき、見やすく操作しやすい機器配置として、運転への集中力を高めるコックピットを実現している。

(1) ナビ画面の視認、操作

ナビ画面の位置は前モデルに対して50mm上方に移動して、見おろし視認角度を30°から20°に減少させて視認性を改善した。また、ナビ画面のタッチスイッチはブラインド操作を可能とする最小限の数とするとともに、文字とスイッチのサイズは見やすく操作のしやすい寸法を規定して反映した。画面の直前には手を置ける平面部を設けることで、安定した指先の操作を可能とした。また、コンソール部にはロータリマルチコマンドも装備しており、操作性は格段に向上している (Fig.7)。

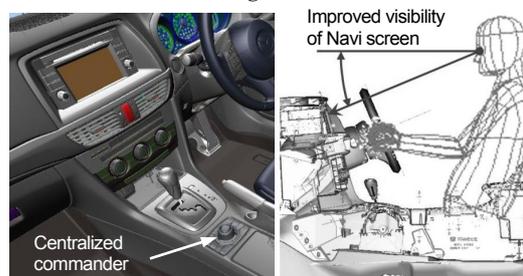


Fig.7 Improved Visibility and Operability of Navi

(2) パドルシフトの操作性

前モデルのステアリング左右のスポーク上部にダウン、下部にアップのスイッチ配置から、ステアリングの左側にダウン、右側にアップのパドルの配置に変更した。これに

より、スッキリとしたデザインで不用意に指が当たらず、操作しやすいパドルシフトを実現した (Fig.8)。



Fig.8 Improved Operability of Paddle Shift

5. 乗員全員が元気になる居住空間の実現

乗員全員の期待に応える居心地のよい前後席の居住空間と、入れたいものが確実に収納できる小物収納スペースの提供に向けて以下の取り組みを行った。

5.1 前席乗員の快適性

コンソールとドアトリムの周りを中心に前席乗員へのきめ細かな配慮や各種の工夫を行った。

(1) コンソールの足当たり配慮

特に大柄な人が、フットレストに足を置いたり後方に足を引いた時など、ふくらはぎがコンソールの側面に接してもエッジ感を感じないようにコンソールの基本形状に大きなコーナRを設けた (Fig.9)。

また、Bピラートリムはドアのアームレストに腕を置き、肘を後ろに引いても干渉を避けるように形状に工夫を施している。

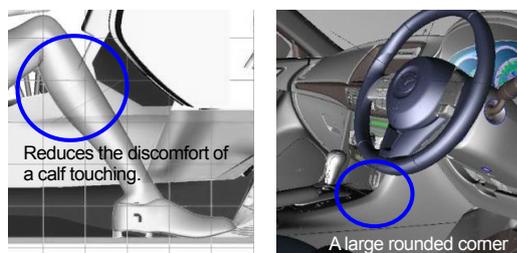


Fig.9 Careful Consideration to Tall Occupants

(2) アームレストの機能向上

コンソールのアームレストの幅は前モデルに対して、10 mm拡大した。また、前モデル同様にスライド機構を有すが、スライド量は 15 mm増加させて小柄なドライバーにも使いやすいアームレストとしている。

ドアトリム側のアームレストとの高低差は前モデルの 30 mmから 10 mmに縮小して、両方のアームレストを同時に使用してもほとんど差を感じないようにした。

5.2 後席乗員の快適性

後席空間は前後方向への姿勢自由度の拡大を目指し、膝前や足元の前後スペースを拡大した。後席スペースの期待が大きいセダンは前モデルに対して膝前スペースを 39 mm、足元の前後スペースを 37 mm拡大している。

これはホイールベースの延長及びフロントシートバックの薄型化で実現している。フロントシートのスライド左右間の幅は、前モデルに対して 25 mm拡大して自然な足開きを可能とした。更に、後席用の空調グリルの設定、センターアームレストの幅を前モデルから 60 mm拡大したことで、後席の居心地のよさは格段に向上している (Fig.10)。

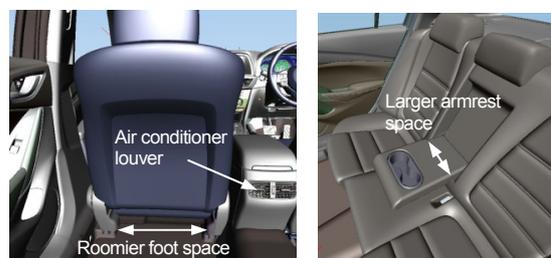


Fig.10 Improved Comfort of the Rear Seat

5.3 室内小物収納性

前モデルの小物収納性の評価を分析し、改善が必要な部位を明らかにした。その結果、「置きたい物を置きたい所に、自然に使いこなせる室内収納スペース」を目指して以下に取り組んだ。

(1) 前席の小物収納性

ドライバーが携行品を簡単に、さっとまとめて置くことができるようにシフトレバーの前にオープンボックスを設けた。また、左右のドアには 1L サイズのペットボトルの収納を可能とし、グローブボックスの開閉レバー位置はドライバー側に寄せアクセスを容易にした (Fig.11)。

グローブボックスのロック機構も前モデルのセンター配置からサイド配置に変更したことで、ボックス内にロックの突出がなくなり収納性が向上した。



Fig.11 Interior Storages (Front Seat)

(2) 後席の小物収納性

新型アテンザは前席同様に後席のドアにも 1L サイズのペットボトルの収納を可能とした。シートバックのセンターアームレストに設けたカップフォルダはアームレストの幅の拡大を活用し、前モデルに対して1サイズ大きなカップの収納を可能とした (Fig.12)。



Fig.12 Interior storages (Rear seat)

6. 期待に応える荷室の実現

歴代アテンザの荷室は、クラストップレベルの広さと KARAKURI トノカバーに代表される使い勝手のよさで高い評価を得た。新型アテンザは「魂動」デザインをサポートするショートデッキやボデー後部の絞り込みの中で、歴代モデルと同等の評価を得ることを目指し、積載動作、筋負担の分析とその結果の反映、構造や形状の工夫、そして、KARAKURI の進化で使い勝手のよさを実現した。

6.1 セダンの荷室

歴代モデルのトランクヒンジは荷室への突出がなく、積載物の傷付き防止に有効なリンクタイプを採用していた。このヒンジはダンパを有することから、外気温の変化がトランクの開閉操作力に影響を与えることと、開時のポップアップ量が少ないため開閉状況の確認に不利な点があった。新型アテンザはヒンジをスワンヒンジとすることでロック開時は大きく開き、閉める時も操作力が軽減されスムーズな開閉を可能とした。開時のポップアップ量も増加して開閉状態の確認も容易となった。開口幅寸法もスワンヒンジとしたことで 32mm 拡大し積載性を有利にしている。スワンヒンジの弱点である荷室へのヒンジ飛び出しも、荷室内のトリムに格納することで積載した荷物を傷付けないように配慮した (Fig.13)。



Fig.13 Cargo space convenient (Sedan)

その他の荷室ユーティリティとしては荷室の左右に小物の収納に便利なトレイを設けた。シートバックの可倒の操作方式は紐タイプからノブタイプに変更して操作性を改善した。

6.2 ワゴンの荷室

歴代モデルの荷室の評価は、グローバルに好評を得ており、荷室の容量や寸法は歴代モデル同等を維持したうえで、使い勝手の向上に取り組んだ。荷室の左右にはセダン同様に小物収納に便利なトレイを設定した。荷室開口部のコーナ R を小さくして見た目にも広く、積載性にも有利な形状とした。トノカバーは従来の KARAKURI トノカバーをシンプルで軽量の構造とし、脱着の簡便性を進化させた。また、トノカバーを使わないときは荷室床下にスッキリと格納でき、その下にも小物収納スペースを確保してユーティリティの向上を図った。リフトゲートの開閉操作は、ダンパのレイアウト適正化とトノカバーのフリクション低減により前モデルから改善した (Fig.14)。



Fig.14 Cargo space convenient (Wagon)

7. おわりに

CX-5 に続き、SKYACTIV TECHNOLOGY を全面的に活用した新型アテンザは、マツダのフラッグシップとして、デザインそして他の性能と一体化したパッケージングを実現した。新型アテンザが「人生を豊かにするモチベーター」として皆様に関わっていければ幸甚である。

■ 著 者 ■



三宮 正義



大坪 智範

特集：新型車（アテンザ）

15

新型アテンザ ボデーシェル開発 Development of BODY Structure for All-New ATENZA

青沼 隆浩*1

Takahiro Aonuma

阪井 克倫*4

Katsunori Sakai

坂上 大介*2

Daisuke Sakagami

亀井 丈広*3

Takehiro Kamei

要約

新型アテンザは、セダンとワゴンの二つの車種を持つマツダのフラッグシップモデルであり、CX-5に続いて、マツダ技報 29号で発表したSKYACTIV-BODYに、デザインテーマ「魂動」を表したボデーを持つ商品である。このデザインの実現と、すぐれたパッケージングの両立を目指すと同時に、ワゴンにおいて、セダンと同等のダイナミクス性能を持たせる課題に取り組んだ。この達成手段として、構造の「ストレート化」「連続化」を基本的な考え方として堅持し、CAE検証を繰り返し行いながら、最適構造を具体化した。その上で、高剛性発泡充填材の採用や部材ごとの仕様最適化検証を行った。

この結果、ワゴンでは、従来モデルに対して、45%のねじり剛性向上を果たし、セダンと同等の乗り心地性能を得ることができた。

Summary

The All-New ATENZA is a flagship model of Mazda with sedan and wagon vehicle types. Following the CX-5, the design theme "KODO" was expressed on the SKYACTIV-BODY which was published in the Mazda Technical Review No.29. Realizing both the design and excellent packaging at the same time, and improving the dynamic performance of the wagon to the equivalent level to the sedan were focused on. To realize them, based on the "straight structures" and "continuous structures" concepts, an optimal structure was developed by repeated CAE studies. Then, the high stiffness foamed material was introduced, and the spec of each part was optimized.

As a result, the torsional stiffness of the wagon was improved by 45% over the previous model, achieving the sedan-level ride comfort.

1. はじめに

CX-5に始まる一連の新商品群におけるボデーシェルは、その生い立ちをマツダ技報 29号に発表したSKYACTIV-BODY⁽¹⁾に遡る。ここで「機能配分」という考え方に基づき、車体各部の機能を見える化し、実現のための指標を各部位に設定した。これらを目指して描いた構想をCAEや実機検証を繰り返して、様々な車種に対する車体の基本骨格を一括で決定した（Fig.1）。その上で目標性能を実現するための具体的な手法の筋通しを車種間で横断的に行い、生産効率の向上を図った。これらをマツダはコモンアーキテクチャ構想と呼び、車体設計のよりどころと位置付け、新

型アテンザの車体設計に着手した。

この設計過程において、優れた安全性の確保、マツダのDNAともいえるエモーショナルなデザインの具現化、そして、優れたダイナミクス性能を更に高め、新商品に相応しい日常での機能性や使い勝手をお客様に提供するために、相反する課題を解決してきた。

本稿では、優れた機能性を実現するために取り組んだ、デザイン・パッケージングと各性能要件を両立させた実現手法について述べる。また、セダン/ステーションワゴンという2種の車種と、異なるホイールベースを一つのプラットフォームから効率良く派生させ、かつ性能差を極力な

*1~4 ボデー開発部
Body Development Dept.

くし、具体化させた手法を紹介する。

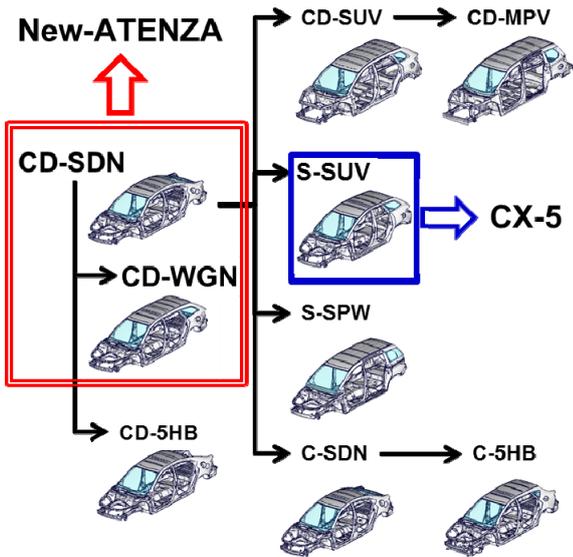


Fig.1 Common Architecture CAE Model

2. デザイン / パッケージング

2.1 デザインと性能要件の両立

新型アテンザのデザインテーマ「魂動」と、性能要件を両立した代表的な部位として、Fig.2 に示すフェンダ先端部と、ワゴンのDピラーについて述べる。

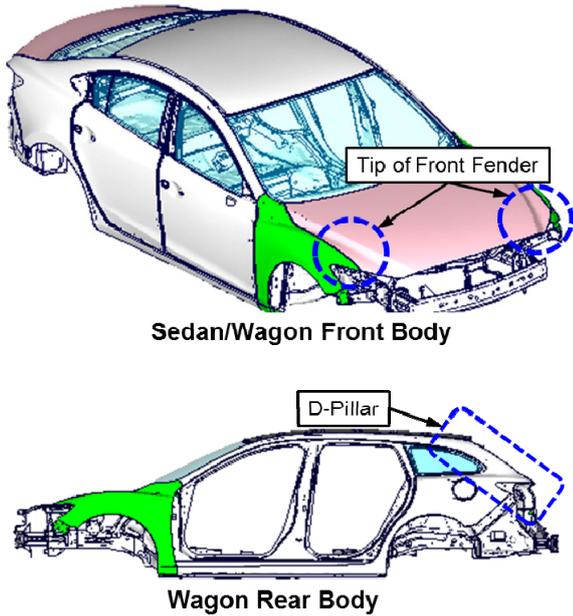


Fig.2 Appearance

(1) フェンダ先端部

Fig.3 に示すように、フェンダ先端部には、ボンネットストップラバーを設置するフェンダブラケットがある。このブラケットおよびその周辺構造には、ボンネット開閉時の強度や、フェンダ取り付け剛性、そして、歩行者保護などの要件が求められる。これらの要件のうち、歩行者保護は一定の入力で座屈させる必要があり、パネル剛性やボン

ネット閉時の強度確保と相反するものであり、この両立が大きな課題であった。この解決にあたり、関係者が一丸となり、各性能の CAE 検証を繰り返すことで、すべての性能を満足する仕様を見出した。具体的には、3 本足の構造となり、各足の配置や、足の傾き、形状を最適化した。

結果として、美しいパーティングラインと『堅くて柔らかい』フロントフェンダを実現させた。

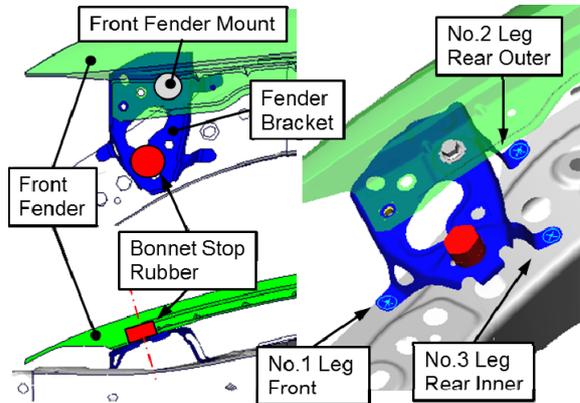


Fig.3 Fender Bracket

(2) Dピラーまわり

新型アテンザでは先代モデルよりタイヤ径を大型化(225/45R18→225/45R19)し、Dピラーを大きく傾斜させたデザインを採用した。基本骨格を構築した後に検証を繰り返し徹底的に無駄な部位を削ることで Fig.4 に示すように、リヤピラーインナパネルのスリム化を実現した。結果、先代より小さい空間の中で先代と同等の 505L (DIN) の荷室容量を確保した。この過程では操縦安定性能を更に向上させるために、リヤ周りの構造を工夫した(詳細は後述)。

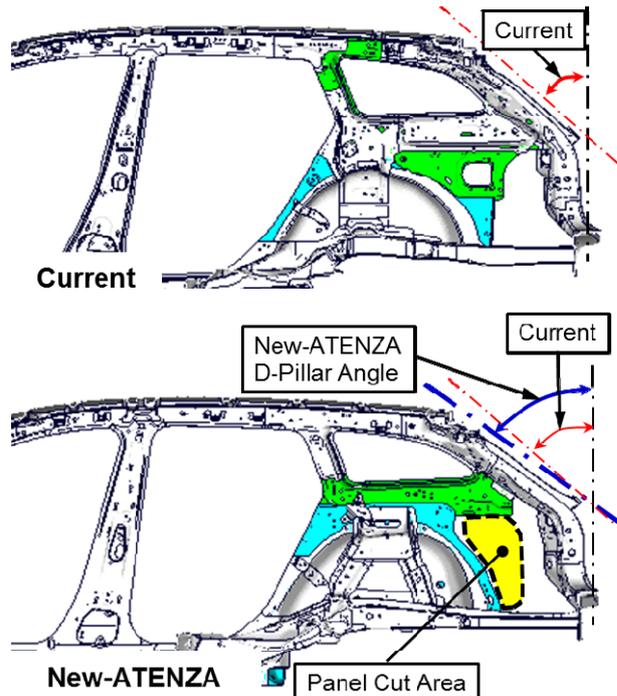


Fig.4 Rear Body Structure

2.2 パッケージングの実現

(1) シート配置

新型アテンザではセダンボデー／ワゴンボデーでそれぞれ 2 種類のホイールベースを持つ。SKYACTIV-BODY コモンアーキテクチャ構想に則り B ピラー後部のフロアを延長することで車台の基本骨格を維持しつつ最低限のユニーク部品でホイールベース違いを実現している。

セダンではルーフ後部からリアデッキにかけて滑らかに絞り込まれたデザインの実現と居住性の向上を目指して、ホイールベースをワゴン比 80mm 延長している。これに対して後席乗員位置をワゴン比 24mm 後方へ移動とすることで後席の足元スペースの拡大とヘッドクリアランスを両立させた。乗員位置が 2 種類になることにより、従来であれば乗員拘束装置位置がユニークとなることにより、パネル類の新設が必要となる。これを回避するために開発・生産が一体となってシート取り付け構造および乗員保護装置アンカー位置を検討し、Fig.5 に示す取り付け穴と、Fig.6 に示す同形状ブラケットの位置を移動するのみで、骨格、パネル形状を共通としたまま、乗員位置違いに対応することができた。

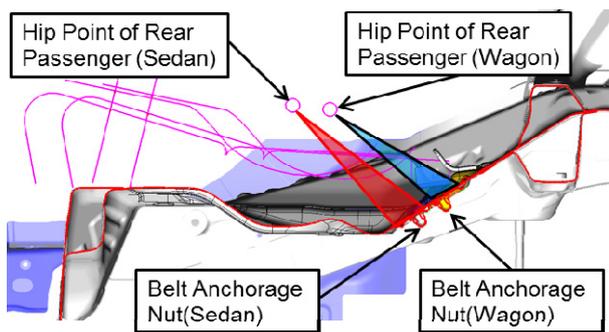


Fig.5 Belt Anchorage

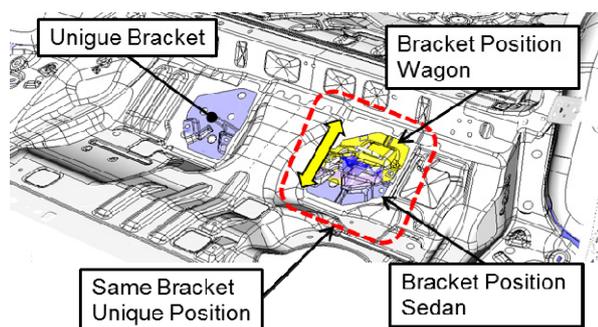


Fig.6 Belt Anchor Bracket

3. ワゴンボデー構造

新型アテンザでは、プラットフォーム性能を左右する重要なリヤダンパマウント周辺の構造において、各車型の連続性を考慮した工夫を行い、ワゴン車型でもセダン同様の高い車体剛性感を実現すると同時に軽量化を達成した。このための構造と特徴について述べる。

(1) リヤダンパまわり構造

CX-5 と同様、セダン／ワゴンともに、リヤダンパ取り付け下側には、SKYACTIV-BODY の大きな特徴であるデュアル・ブレース構造を用いた (Fig.7)。そして、リヤダンパ取り付け上側では、車型に合わせた構造を採用した。

Fig.8 のように、セダンは、リヤダンパ取り付け部から上方へ伸びるサスペンションハウジングレインが、ルーフサイドレインへ連続して結合する構造である。一方、ワゴンは、リヤダンパ取り付け上部にクォータウインドウがあるため、ルーフサイドレインと「連続化」が困難であった。そこで、C ピラーレインなどの構造に工夫を行い、併せて連続性を阻害する部位に発泡充填材を採用し、局所的な弱点部のない構造とした。

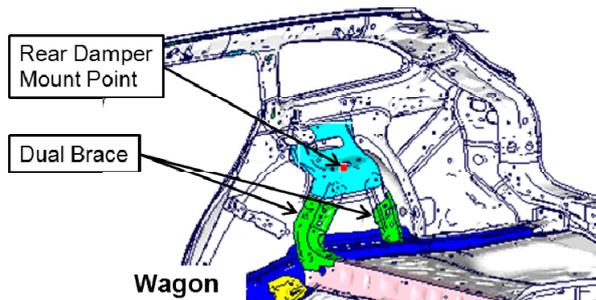
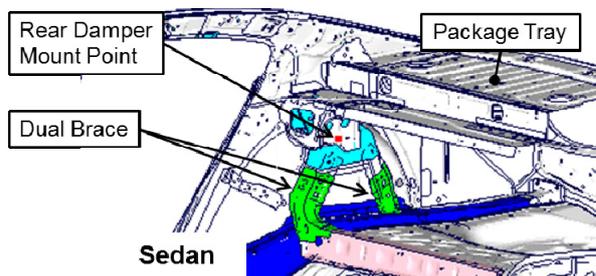


Fig.7 Rear Body Structure

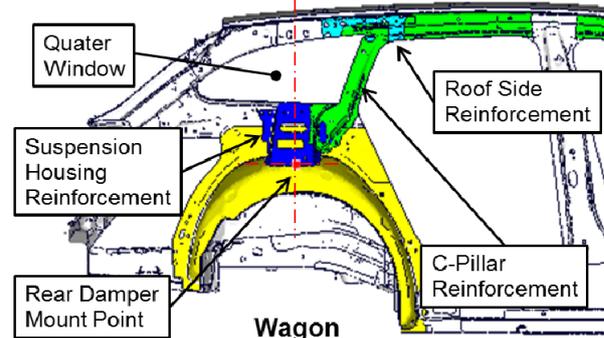
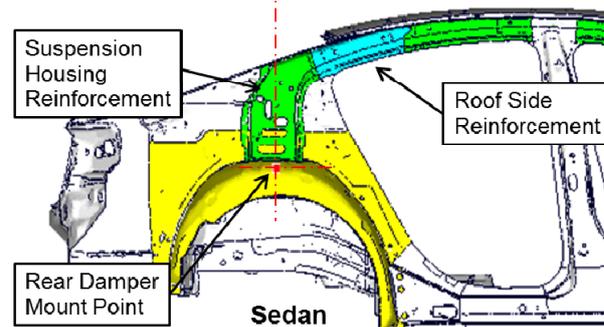


Fig.8 Rear Side Body Structure

(2) 発泡充填材

SKYACTIV-BODY のリヤボデーには、「連続化」と「マルチロードパス」のために、結合部位にウェルドボンドを採用している。更に、新型アテンザでは高剛性発泡充填材を多用している。特にワゴンは、Fig.9 に示す性能向上に重要な結合部位①～④にこれを採用することで、セダンと同レベルの剛性値を確保した。

まず、リヤピラーインナパネルとアウトパネルの間に設定しているサスペンションハウジングレイン内部に設定した発泡充填材は、前後方向に荷重を伝達するとともに、アウトパネルを介して、クォータウィンドウへも荷重を伝達。更には、サスペンションハウジングレインに接している C ピラーレインとの結合を向上する機能を持たせた。この結果、広いクォータウィンドウを持つワゴン車型でも、セダンと同等のリヤダンパの支持剛性を確保できた。

このほかに、C ピラー上部やリヤエンドにもワゴン車型専用として発泡充填材を配置した。

このような、配置や発泡サイズなどの決定には、CAE 検討をフルに活用した。また、感度解析や最適化などの CAE 手法を駆使して、周辺部品の適正化を図った。

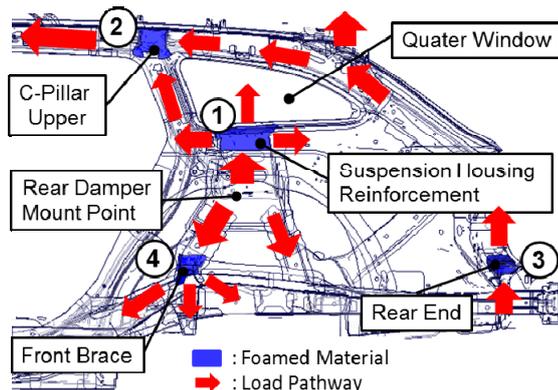


Fig.9 Foamed Material Layout

(3) リヤヘッド周辺補強

リヤヘッド周りはコーナプレートを厚板化するとともにコーナー部でのねじれを抑制するためにフランジを延長した (Fig.10)。また断面崩れを抑えるためにガセットを設定しリヤヘッド部と接合した (Fig.11)。ここでも CAE を用いて形状検討を行い、ねじり剛性を向上した。

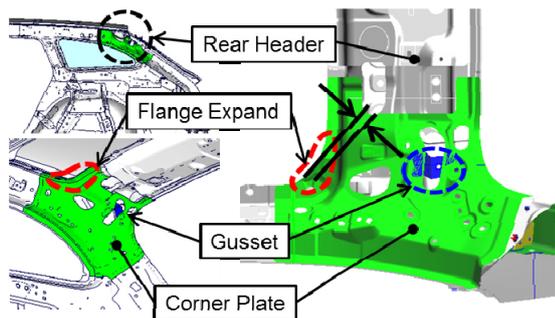


Fig.10 Rear Header Structure

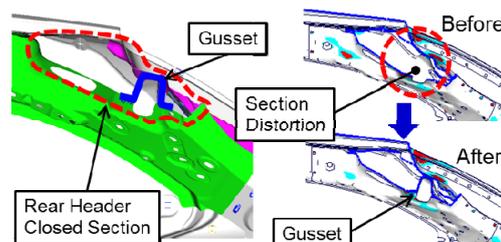


Fig.11 Rear Header Section

(4) ルーフ締結ボルトフランジ径アップ

後述する車体剛性感を向上するため、Fig.12 に示す B ピラーとルーフレインを結合するルーフコーナガセットの締結ボルトについて、フランジ径を半径で 2mm 大型化した。このような変更は CAE の数値には表れないが、感性領域において大きな効果を発揮する。単純に代用特性値だけを追い求めるのではなく、実走において操縦安定性に寄与する部位にも着目し構造適正化を図った。

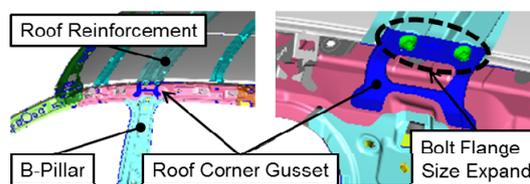


Fig.12 Roof Junction Structure

(5) リヤシート取り付け剛性確保

Fig.13 は、各車型のリヤシートバック取り付けレイアウトである。セダンは、パッケージトレイ部へ左右のシートバックの取り付けを設定している。これに対し、ワゴンでは、シートバックの側面に付ける構造となる。このため、セダンと同様のリヤシートの乗り心地性能を確保する上で、各シート取り付け部の剛性を確保する必要がある。そこでワゴンでは、Fig.14 のアンカーレインフォースメントをシートバックヒンジの側面に配置することで、シートバック左右方向の入力に対して、シートバックヒンジが倒れこむことを防ぎ、余分な質量をかけずに剛性を確保した。

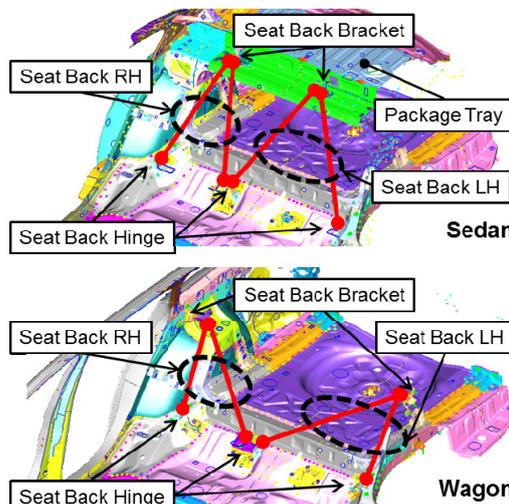


Fig.13 Rear Seat Back Fixing Structure

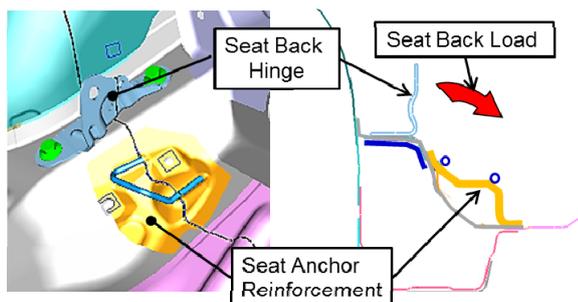


Fig.14 Seat Hinge Structure

4. 結果

4.1 車体剛性値と乗り心地性能

(1) 各車型の車体剛性結果

SKYACTIV-BODY の技術開発により、セダン車型の実験車両 TPV (Technology Prove-out Vehicle : 技術検証車) は、先代モデル比 30%のねじり剛性向上を果たすことなどにより、卓越した操縦安定性や乗り心地を実現していた。新型アテンザのセダンでは、TPV からホイールベースを伸ばしながらも、ねじり剛性を 30%向上させている。更に、ワゴンは、前述の構造により、先代モデル比 45%のねじり剛性アップを果たした。また、リヤダンパ支持剛性は、セダンが 5%向上、ワゴンは、30%向上させることができた (Table 1)。

Table 1 Progress Rate of Stiffness

	Progress Rate of Stiffness(%)	
	Current → New	
	Sedan	Wagon
Torsional Stiffness	30%	45%
Rear Dumper Support Stiffness(Z-direction)	5%	30%

(2) 乗り心地性能

歴代のアテンザは、常にダイナミクス性能の向上を図っており、今回の新型アテンザも、大幅なダイナミクス性能の向上を図れた。特に、乗り心地性能の一つである「車体剛性感」は、ボデーでの乗り心地の質感を図る評価項目であり、この向上に努めてきた。今回、ねじり剛性や、ダンパ支持剛性の大幅向上と、更に実験車両による感性領域の改善を進めた結果、セダン/ワゴンともに、CD セグメントでトップクラスの車体剛性感を達成した。特にワゴンの減衰感、先代モデル比 5%向上となり、セダン同等の乗り心地性能を達成した。

5. おわりに

以上が新型アテンザのボデー構造の特徴である。これらは、マツダが進めた、企画 - デザイン - 開発 - 生産が一体となって活動したモノ造り革新の成果であり、それぞれの部門が自らに課せられた目標のみに固執することなく「す

べてはお客様の笑顔のために」を合言葉に、新型アテンザに関わる一人ひとりがお客様の方を向いて仕事をした成果と認識している。結果として開発部門においては多くの若手のエンジニアが育ち、次世代を担う大きな力となった。次世代の商品群の開発に向けて、ONE-Mazda の旗の下より良い商品開発に邁進する所存である。

参考文献

- (1) 木村隆之ほか：SKYACTIV-Body, マツダ技報, No.29, pp.61-67 (2011)

■ 著 者 ■



青沼 隆浩



坂上 大介



亀井 丈広



阪井 克倫

論文・解説

16

“SOUL RED”の開発 Development of “SOUL RED”

中野 さくら*1
Sakura Nakano

久保田 寛*2
Hiroshi Kubota

篠田 雅史*3
Masafumi Shinoda

要約

マツダは赤のボデーカラーに対し、常に新しい色域（質感）の開発に挑戦し、それを実現させてきた。近年も、コンセプトカーの『勢（MINAGI）』、『雄（TAKERI）』のボデーカラーに高彩度のレッドを採用している。これらの塗色は、“鮮やかさ”と“深み”を兼ね合わせた質感をもっており、新デザインテーマの「魂動」を表現している。今回、新型アテンザに採用したソウルレッドカラーはコンセプトカー同様の“鮮やかさ”と“深み”の質感をもつ塗色として新たに開発を行った。このソウルレッドカラーは今までにない新しい塗膜構成を採用しており、発色に寄与しているベース層を下層の反射層と上層の半透明の着色層に分けることで、“内から発せられたような鮮やかな赤”という目標意匠を具現化した。また、本塗色は塗装工程の緻密な制御による塗装膜厚の均一化等で生産上の課題を解決し、狙いの色相と生産性を両立した。

Summary

Mazda has been dedicated and committed to develop “red” as a body color. The recent concept cars: “MINAGI” and “TAKERI” are painted in high-chroma red. Those red body colors share common feels of “vividness” and “deepness” and express “KODO,” the new design theme. Soul Red adopted in the New Atenza is a newly-developed paint color, which offers “vivid” and “deep” feels as in a concept car. This new color employs unprecedented coating constitutions dividing the base coat, which contributes to the color development, into two layers: the lower reflective layer and the upper semi-transparent layer to embody the design intent to make this vivid red appear as if it is glaring from inside. Furthermore, the mass-production of Soul Red results from overcoming production challenges by making the paint film uniform through meticulous paint process control and achieving productivity equivalent to conventional paints.

1. はじめに

マツダは“赤いファミリア”や MPV, RX-8 に代表されるように、これまで赤のボデーカラーは、色や質感にこだわりをもって開発を進めてきた。新型アテンザに設定されたソウルレッドカラー（Fig.1）は、新デザインテーマの「魂動」を体現した、躍動感あふれる造形美を表現するため、これまでにない新しい質感を量産工程で安定的に実現することを目標に開発を進めた。塗色を開発・生産する関係部

門の挑戦的な取り組みの結果、究極の高彩度レッドを高い質感と生産性を両立して実現することができた。本稿では、ソウルレッドカラーの開発に関する技術の概要について説明する。

*1, 2 技術研究所
Technical Research Center

*3 車両技術部
Painting, Trim&Final Assembly Engineering Dept.



Fig.1 SOUL RED Color

2. 開発目標

2.1 狙いの色・質感

今回のソウルレッドでは、デザインテーマ「魂動」により、“内から発せられたような鮮やかな赤”の色の実現に向け、“ハイライトの鮮やかさ”と“深み”を有する塗色の開発を行った。ここで、“深み”とは、目視した際に塗膜の奥深くから光の反射があるように感じることである。この質感をボデーカラーで表現するには、ハイライトの鮮やかさに加えて、観察角度による色の変化（陰影）が重要であり、正反射付近（ハイライト部）で、光の反射が強く感じられ、それ以外の部分（フェース～シェード部）では光の反射を感じない程に暗くなる必要がある。ハイライト、フェース及びシェードの観察角度を Fig.2 に示す。

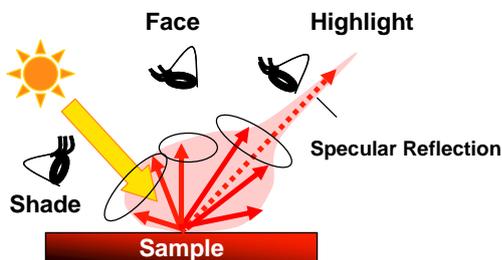


Fig.2 Angle to Observe

2.2 質感の定量化

狙いの色を短期間に確実に開発するためには、質感のレベルを開発関係者間で共有化できる指標が必要であり、塗色ごとにポイントとなる質感を数値に落とし込まなければならない。そこで、塗色開発に先立ち、前項で述べた“鮮やかさ”や“深み”の質感に対し、人間の感覚の定量化を行った。Fig.3 にソウルレッドの開発で用いた質感マップを示す。このマップは様々な光学的な測定値とデザイナーの目で見ただけの関係から新たに“鮮やかさ”と“深み”の指標を設定し、他社のレッドも含めてポジショニングしたものである。この2つの指標を用いることで、赤系の塗色に対し、質感の特徴を1つのマップ上で把握することが可能となった。

Fig.3 には、他社のボデーカラーとマツダのこれまで量産してきた赤系のボデーカラー（図中の赤丸）を記載した。トゥルーレッドは、際立った“鮮やかさ”をもつ色で、白色の中塗り層と、赤顔料が入ったソリッドカラーベース層により、構成されている。ベロシティレッドは、“鮮やかさ”とマイカ特有の“輝き”が特徴的な色で、赤のソリッドベース層と、光輝材であるマイカの入った半透明のベース層で構成されている。ジールレッドは光輝材であるアルミフレークを入れることで、陰影が増し、“深み”を有する (Fig.4)。

これらに対し、ソウルレッドカラーは今までにない高いレベルで“鮮やかさ”と“深み”の両立を狙っており、Fig.3 において、鮮やかさと深みが量産色よりも高い斜線範囲を開発色のターゲットに設定した。

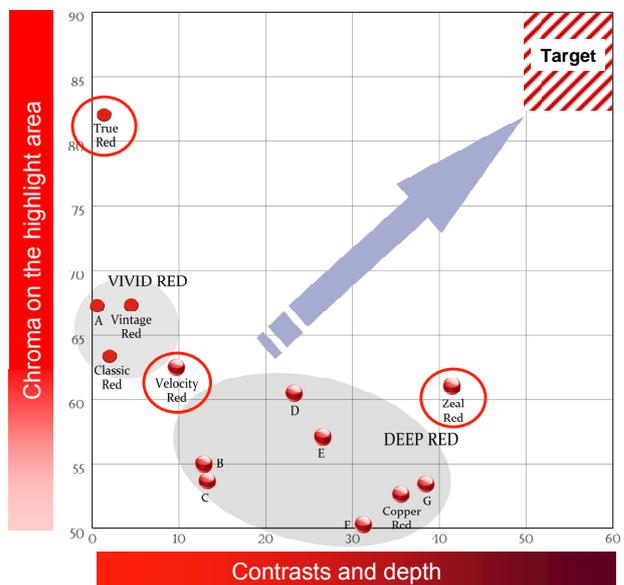


Fig.3 The Quality Level of Red Colors and Target

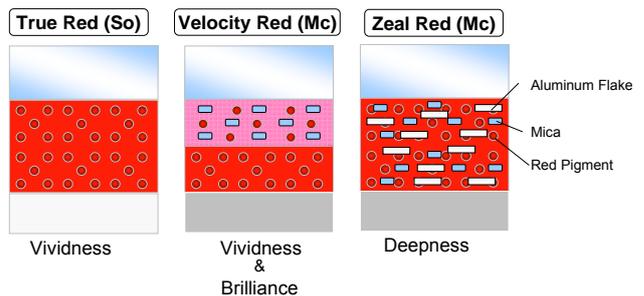


Fig.4 Mass Production-Colored Coating Constitution

3. 開発コンセプト

3.1 目標質感に対する理想的な光学特性

“鮮やかさ”と“深み”の質感を発色させるための理想の光学特性（分光反射率）を Fig.5 に示す。狙いの発色の一つのポイントは、物体に当たる可視光（光の波長：400～700nm）のうち、赤以外の光（波長：400～570nm）の反射を抑え、余分な光の混ざりをなくすことで、よりクリア

で高彩度な赤色にすることである。二つ目のポイントは、赤い光（波長：600～700nm）に対し、ハイライトとシェードの反射率の差を大きくすることによって、“ハイライトの鮮やかさ”と“深み”を実現できると考えた。

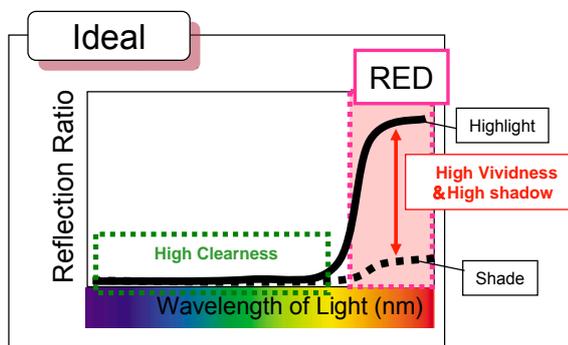


Fig.5 Spectral Reflectance

3.2 新たな塗膜構成について

前項の理想的な光学特性を実現するために、新たな塗膜構成を創出し、目標質感を実現することを検討した。顔料や光輝材の濃度が増えすぎると塗膜品質が低下するという課題があり、前章で述べた赤顔料の多く入ったトゥルーレッドがもつ“鮮やかさ”とアルミフレークが多く入ったジールレッドがもつ“深み”を、単層で両立させることは困難である。そこで、ベース層を顔料の入った着色層とアルミフレークの入った反射層に機能分配することで“鮮やかさ”と“深み”の両立を図った。ソウルレッドの塗膜構成を Fig.6 に示す。これは従来にない新しい塗膜構成となっており、第1ベースの反射層で反射された光が、第2ベースの赤の半透明層を透過することで、塗膜の奥深くから反射がある感じを有することができる。ソウルレッドカラーの第1ベース塗料には、ハイライトでの強い反射と高い陰影が望める高輝度アルミフレークを、また、第2ベース塗料には鮮やかな発色が望める赤の高彩度顔料を配合した。

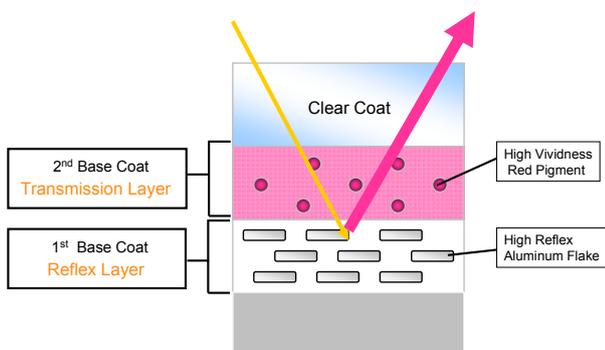


Fig.6 Coating Constitution

(1) クリアな発色のための工夫

Fig.6 に示した塗膜構成において、第2ベースで赤以外の光を完全に吸収することが可能であれば、濁りのないクリアで高彩度の発色が期待できる。しかし、第1ベースからの反射を活かして高い彩度を得るためには、第2ベースの透明性を確保することが必要であり、第2ベースの顔料だけでは、Fig.7 に示す通り、赤以外の光の吸収が十分でない。そこで、その対策としてソウルレッドカラーは第1ベースにも赤の顔料を入れることで、赤以外の光の吸収を補い、赤以外の光の混ざりをなくし、クリアな発色を実現することを検討した。今回、実際に採用した塗膜構成を Fig.8 に示す。

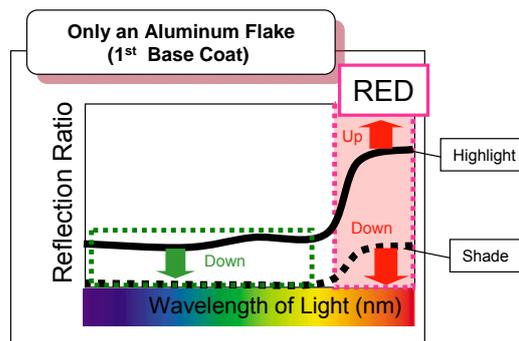


Fig.7 Spectral Reflectance In Case of Only an Aluminum Flake

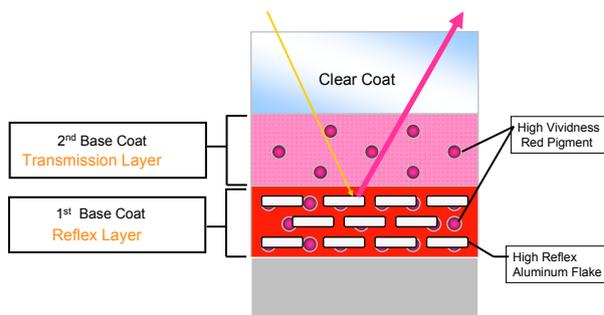


Fig.8 Coating Constitution of Production Color

(2) 鮮やかな発色と高陰影（深み）の両立の工夫

鮮やかな発色と高陰影を実現させるために、第1ベースに含まれるアルミフレークの配向性を良くすることを検討した。Fig.9 にアルミフレークの配向と反射光分布の関係を示す。アルミフレークの配向が悪い場合、拡散される光が多くなり、ハイライトとシェードの反射量の差が小さいために、陰影が弱くなる。一方、アルミフレークの配向が良いと拡散される光が少ないために、正反射付近への反射量が多く、正面からシェードにかけては反射量が少なくなる。したがって、ハイライトとシェードでの反射量の差が大きいため、陰影が大きくなる。本開発では、塗料の粘性制御と塗装条件の影響を明らかにすることによって、第1ベースのアルミフレークの配向性の向上を図った。

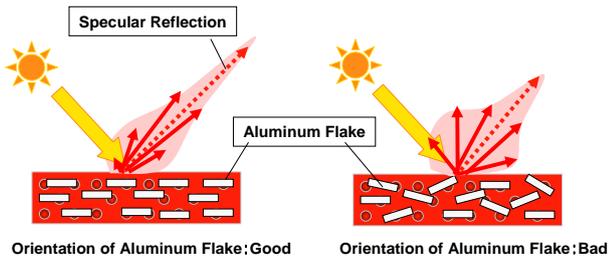


Fig.9 Distribution of the Reflected Light

4. 結果

4.1 クリアな発色

第1ベースと第2ベースに添加する赤顔料の濃度を変化させ、ハイライトにおける赤以外の光の平均反射率との関係を調べた。その結果を Fig.10 に示す。実験では、第1ベースの上に第2ベースを塗り重ねた塗板を作製し、分光反射率を測定した。目視により、色域外（赤以外の光）の平均反射率を0.5%以下にすることで、濁りのないクリアな赤が得られることがわかった。そして、第2ベースの顔料濃度に関係なく、クリアな発色をさせることができる第1ベースの赤顔料の濃度範囲が明らかになった。

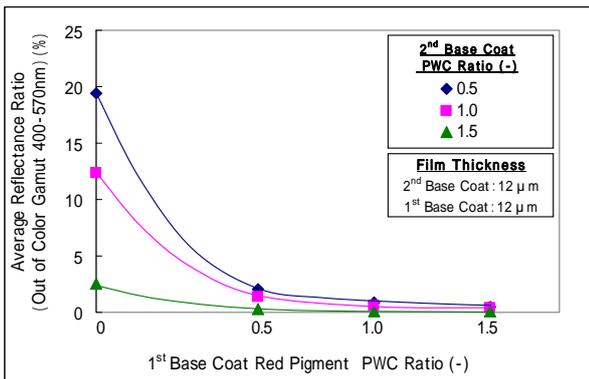


Fig.10 Relations of Red Pigment PWC and Average Reflectance Ratio of Out of Color Gamut

4.2 鮮やかな発色と高陰影

陰影と深みをつけるために、第1ベースの塗装条件（塗装機のシェーピングエア流量と回転数）の最適化と粘性制御剤での粘度調整により、アルミフレークの配向性を向上させた。アルミフレークの配向と総合膜（第1ベース+第2ベース+クリア）における彩度の関係を調べた結果を Fig.11 に示す。用いたサンプルは、配向性に最も影響が大きいとされるシェーピングエア流量を第1ベース塗装時に変化させて作製したものである。ここで、配向性の指標には配向と相関がある FI (Flop Index) を用いた。Fig.11 よりアルミフレークの配向性が良いほど、ハイライトの彩度が高くなり、またシェードとの差が大きくなることわかった。

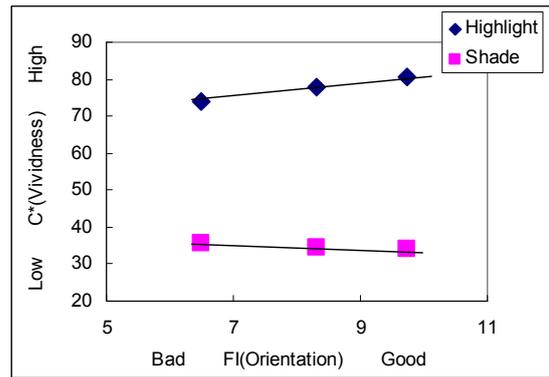


Fig.11 Relations of Orientation of the Aluminum Flake and the Chroma

4.3 開発色の質感レベルと塗膜構成

今回開発したソウルレッドの質感について、測定した結果を Fig.12 に示す。この図から明らかなように開発色は“ハイライトの鮮やかさ”と“深み”を両立できており、初期に掲げた、「魂動」が感じられる突き抜けた高い目標を達成することができた。



Fig.12 Result of Color Quality Level of the Soul Red Color

最終的な塗膜の断面図を Fig.13 に示す。上層の半透明層（2nd Base Coat）とアルミフレークの配向性が良い反射層（1st Base Coat）で構成されていることが確認できる。

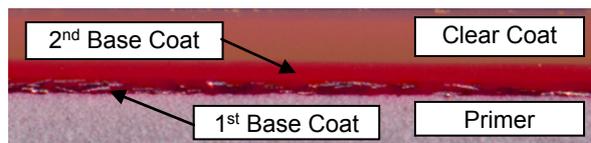


Fig.13 Cross Section Picture of Soul Red

5. 生産性

ソウルレッドカラーは全く新しい塗膜構成により、高い質感を実現しているが、上層の半透明層と下層の反射層の2層で発色させているため、他色に比べ、生産性に大きな課題があった。主な課題は以下の4点である。

- 1) 上層の半透明層の膜厚の差による“色むら”の発生
- 2) 静電効果によりエッジの膜厚が厚くなることによる“額縁むら”の発生
- 3) 下層の反射層のアルミフレークの配向の乱れによる“アルミむら”の発生
- 4) 2種類のベース塗料を使用することによる、“内板部への入り込みによる見映え低下”

課題の原因と対応策を Table 1 にまとめた。これらの課題を解決することで、高い質感を維持しながら従来塗色と同等の生産性を確保することができた。

Table 1 Issues and Countermeasures of Paint Process

Issues	Causes	Countermeasures
1) Color irregularity	Appearing of the irregularity by the film thickness differences of the half transparent layer	Equalization of the painting film thickness by introduction of the special paint program
2) Frame irregularity		
3) Aluminum irregularity	Appearing of the irregularity by disorder of the orientation of aluminum flake	・Control of paint viscosity ・Optimization of the paint condition
4) Deterioration of the inner panel appearance	Deterioration in an appearance by getting into to inner panel of two different base paint	・Change of B-pillar shape ・Use of the special paint for the inner panel

6. まとめ

今回のソウルレッドの開発では、以下の3つの取り組みにより、生産性を維持したまま、ハイライトの鮮やかさと深みを両立する高い質感のカラーを量産導入することができた。

- ① 鮮やかさと“深み”の質感に対する新たな定量指標の設定
- ② 着色層と反射層で構成した新しい塗膜構造の実現
- ③ 質感を発揮するための塗料配合と塗装膜厚均一化

今後も、今回の開発で得た知見を基に、他社に先駆けて新たな質感をお客様に提案し続けられるように、社内外の関係部門とともに新色開発に取り組んでいきたい。

■ 著 者 ■



中野 さくら



久保田 寛



篠田 雅史

特集：新型車 (CX-5)

17

CX-5の紹介

Introduction of CX-5

田中 英明*1
Hideaki Tanaka

前田 俊和*2
Toshikazu Maeda

要約

CX-5 は、マツダが満を持して世に放つ新開発のコンパクトクロスオーバー SUV であり、新世代技術“SKYACTIV TECHNOLOGY”と、新世代デザインテーマ「魂動（こどう） - SOUL of MOTION」を全面的に導入し、走る喜びと優れた環境安全性能を高次元で両立するサステイナブル“Zoom-Zoom”宣言を、余すことなく具現化した新世代商品のトップバッターである。マツダは、仕事にも遊びにもアクティブで、毎日をはつらつと過ごしているお客様の期待をあらゆる面で超えることを目指し、見るたび・運転するたび・乗るたび・使うたびに心がときめく「永く愛される『懐の深さ』」を備えた、すべてが新しいクロスオーバー SUV を商品コンセプトとした。商品コンセプトの実現に向けては、4 つのキーバリュー：「魅せる喜び」「意のままに操る喜び」「使い切る喜び」「永くつきあう喜び」を掲げ、人間中心思想に基づいて原理原則に忠実に、そして様々な市場における厳しい走行環境での走り込みを通じて、現地最適化を図りながら開発を進めてきた。

今、CX-5 が単なる移動手段を超えて、お客様に喜びを与え続ける存在となることを確信している。

Summary

The CX-5 is Mazda's long-awaited all-new compact crossover SUV and is the first vehicle of our new generation that adopts the full range of Mazda's new generation technology called SKYACTIV TECHNOLOGY and new generation design theme, 'KODO - Soul of Motion', delivering driving pleasure matched to outstanding environmental and safety performance and fully embodying Mazda's long term vision, "Sustainable Zoom-Zoom". We aimed to exceed expectations of lively customers who are actively engaged in both their work and activity for fun in every way with a product concept of an all-new crossover SUV that satisfies their high expectations every time they see, drive or ride, and use it over the long term. In order to achieve this concept, we focused on four key values: providing pleasure through the CX-5's appearance, its precise handling, its insightful functionality, and its long-term appeal. We have engaged in development of the CX-5, closely following the principles based on the idea of human centered design as well as driving in harsh driving environment in various markets to make it best suit each region.

We are convinced that CX-5 will go beyond merely the means of transportation and become a presence that will continue to provide pleasure to customers.

1. はじめに

北米や欧州を中心に世界的に安定したシェアを獲得しているクロスオーバー SUV カテゴリの中でも、近年、特にコンパクトクラスがボリュームゾーンとなってきた。CX-5 は、そのど真ん中に送り込む新開発のクロスオーバー SUV であり、デミオ・アクセラ・アテンザに次ぐ基軸車

種としてマツダのブランド力向上に貢献することを、そのミッションとして与えられた。同時に CX-5 は、新世代技術“SKYACTIV TECHNOLOGY”と新世代デザインテーマ「魂動（こどう）」を全面的に導入する、初めての市販モデルとなる。マツダが、これまでに育んできた「走る喜び」を革新しながら、持続性と両立するサステイナブル“Zoom-Zoom”宣言を余すことなく具現化した新世代商品の

*1 商品本部
Product Div.

*2 商品本部 商品企画部
Product Planning Dept.

トップバッターであり、このクルマがマツダの新時代を切り拓く大役を担うことになった。

2. 商品コンセプト

マツダは CX-5 のターゲットカスタマーを、「家族や仲間といった大切な人達とともに”豊かで充実したかけがえのない人生”を送ることを求めて、仕事にも遊びにもアクティブで、毎日をはつらつと過ごしている方たち」とした。そして、彼らがクルマに期待することは、「自分の生き方に自信と誇りをもち、気持ちに落ち着きと余裕を与え、何事にも果敢に挑戦し続ける活力をみなぎらせてくれること」であると考えた。これらの期待に応えるべく、CX-5 の商品コンセプトを「永く愛される『懐の深さ』」を備えた、すべてが新しいクロスオーバー SUV」とし、以下 4 つのキーバリューを掲げた。

1. 魅せる喜び：

新デザインテーマ「魂動（こどう）」がもたらす、研ぎ澄まされた躍動感と自信に満ちた存在感

2. 意のままに操る喜び：

SKYACTIV TECHNOLOGY が生み出す、上質かつ洗練された気持ちが昂る爽快感

3. 使い切る喜び：

様々な使い方に余裕を持って柔軟かつスマートに対応できる、考え抜かれた抜群の機能性

4. 永くつきあう喜び：

いつまでも、心置きなくクルマ本来の楽しさを享受できる、先進の環境安全性

キーバリューの実現においては、デザイン・走り・環境・安全・使い勝手・品質感などすべての面でお客様の期待を超え、見るたび、運転するたび、乗るたび、使うたびに心がときめく、そんな喜びの実体化を目指した。

そのために、人はどんな物・どんな形・どんな瞬間に生命の息吹や躍動を直観するのか、人は何をもって思い通りに動くと感じるのかなど、人とクルマのすべてにわたって基本に立ち返り、原理原則に忠実に開発を進めてきた。また、既成概念や慣習にとらわれることなく、造形的にも機能的にも無駄を徹底的に削り取ることで、美しさにも走りにも使い勝手にも、真に価値のある余裕や、違和感のない心地よさを追求した。

3. 商品特徴

キーバリュー1. 魅せる喜び

新デザインテーマ「魂動（こどう）」がもたらす、研ぎ澄まされた躍動感と自信に満ちた存在感

マツダは、風や水の流れの美しさといった自然における様々な「動き」のある造形を模索し、デザインに取り入れ

てきた。その中でたどり着いたのが、野生動物が見せる一瞬の動きの強さや美しさであり、それを表現したのが新デザインテーマ「魂動（こどう）」である。CX-5 では、チーターが駆け出す瞬間のムダがない美しさを表現し、研ぎ澄まされた躍動感と自信に満ちた存在感を訴えかける、マツダならではのデザインを実現した。

(1) エクステリアデザイン

クロスオーバー SUV の特徴である「アクティブで力強く、機能的」というイメージの表現とともに、マツダらしいダイナミックでエモーショナルなスタイリングの実現を目指した。存在感のあるフロントノーズと、踏ん張り感のある大きく張り出したホイールアーチで、ミニバンやハッチバックとは一線を画すドライブを中心に置いたシルエットを創出。また、車両の姿勢を前傾させつつ A ピラーを後方にレイアウト。チーターが全身のバネを使って飛び出す瞬間の「今にも走り出しそうな動き」を感じさせるサイドビューを表現し、アスレチックでありながらも堂々とした、これまでとはまったく異なる SUV スタイルを実現した。

(2) インテリアデザイン

ドライバーオリエンテッドな空間を実現するとともに、SUV らしい力強さと剛性の高さを感じられる室内空間の表現を目指した。更に、走りへのワクワク感はもちろん、質感の高さにもこだわり、洗練された空間創りを行った。機能的で美しく、そして愛着の湧くインテリアによって、触ってみたい、運転してみたいという気持ちを湧き立たせる、マツダらしい運転空間を創出した。

● 機能に裏付けられたデザインクラフトマンシップ

「精緻な造り込み」「優れた機能美」「カスタマーディライト」を磨きあげながら、感性領域にまで踏み込み、お客様が五感で感じる本質的な高い質感を、丹念な造り込みとデザインによって実現。インストルメントパネルに採用したシボは、微細な形を吟味し、しっとりとした質感を表現。また、室内各部に施した上質なサテッククロームメッキの加飾は、丁寧な造り込みで陰影のある輝きを演出するだけでなく、視線をスムーズに誘導する、雑多なものを置いても気になり難い、といった視覚効果をも創出している。更に肘や腕など、触れる部位によってクッション感や触感を最適化することで、いつまでも触れていく心地よさを醸成している。

キーバリュー2. 意のままに操る喜び

SKYACTIV TECHNOLOGY が生み出す、上質かつ洗練された気持ちが昂る爽快感

CX-5 で目指したのは、ドライブが思い描くイメージ通りにクルマが忠実に反応するという、初代ロードスター以降「人馬一体」という独自の言葉でマツダが追求してきた

「一体感を持ってクルマを操る喜び」である。

この目標を実現するため、エンジン・トランスミッション・ボデー・シャシーのすべてにおいて SKYACTIV TECHNOLOGY を採用するとともに、人間中心思想に基づいてドライビング環境を徹底的に造り込んだ。

(1) 理想の運転姿勢を実現するドライビング環境

CX-5 では、人間を中心としてすべての機能や装備を適切にレイアウトするという考え方にに基づき、特にドライビングポジションにこだわりを注ぎ込んだ。手足を自然に伸ばした位置にステアリング、アクセルペダル、フットレストがあり、それらをドライバの身体に合わせて左右均等に配置した。ステアリングは軽い力でもしっかりとグリップできる形状を実現。シフトノブは手のひらにフィットして力が入れやすく、かつステアリングからの持ち替えがなめらかなに行える位置にレイアウトした。アクセルペダルは踏み込む足の軌跡とペダルの軌跡が同じになり、かかとのズレがないオルガン式ペダルを採用。また、A ピラーを一般的な SUV よりも後ろに引いた位置にレイアウトすることで、前方視界を広げるとともに、右左折時やコーナ進入時に、斜め前方を確認しやすくした。更に、A ピラーとドアミラーの間に十分なすき間を設けることで、歩行者の視認を妨げないようにした。このように、人間が直接操作したり見る部分を丁寧に造り込むことで、クルマとの一体感や快適な走りを実現した。

(2) 進化した「人馬一体感」

「意のままに操る」とは運転意図に応じて念じるままに迅速かつ忠実にクルマが挙動することであり、それには運転者の意図しない無駄な修正行為が皆無の状態を理想状態と定義した。その実現のためのアプローチが以下に示す三段階の人とクルマの一体感の獲得である。

● 予見性の確保

ドライバの運転意図に対して、クルマがどのように動くのか。実際の操作を行う前にクルマの挙動をイメージできる「予見性」の確保に注力した。これにより、ドライバは次にどのようなインプットをクルマに与えるべきか、そして与えたインプットでクルマがどのように動くのかを、瞬時に判断することが可能になる。このために運転操作に対するクルマの反応を人間がリニアであることを感じるレベルに造り込んでいった。

● 同期性の確保

運転操作には操作するだけでなく戻す動きが必要になる。「同期性」とは、ドライバの運転意図に対して操作する側だけでなく戻す側にもクルマの挙動が一度で決まり、ムダな修正が不要となる状態、すなわちドライバとクルマが「シンクロした状態」を示す。「同期性」の質の良し悪しによって、ドライバが「予見」した動きに対してクルマがどう反応した

かを判断することができる。

● 調和性の確保

実際の運転環境では、つねに複数の運転操作を同時に、そして連続的に行う必要がある。これらの複合的な「走る・曲がる・止まる」すべての運転操作がドライバにとってハーモナイズしていると感じられる理想状態を目指し、統合的な開発を行った。

(3) クルマとの一体感を実現する、リニアなフィード

バックの造り込み

CX-5 では、以下に示す「走る・曲がる・止まる」のそれぞれの領域において、ドライバの操作とクルマからのフィードバックがシンクロし、ドライバが予見しやすいリニアなフィードバックが得られるよう、ドライビングダイナミクスの作り込みを行った。

● 「走る」領域でのフィードバックの造り込み

もっとも注力したのは、アクセルペダルの踏み込みに対する加速の発生仕方である。ドライバのアクセル操作に加速をリニアに反応させることで、車速のコントロールがしやすく、長時間乗っても疲れにくい操作フィーリングを実現している。

● 「曲がる」領域でのフィードバックの造り込み

クルマの動きを予見できるステアリングの手応えを実現するため、電動パワーステアリングの制御をきめ細かく進化させた。ステアリングを切ると横 G の増加に伴ってリニアに手応えが増えてゆき、戻すときにも横 G の減少に伴って手応えを減らしていくことで、クルマの動きと手応えが一致し、コーナを安定して気持ちよく駆け抜けることができる。

● 「止まる」領域でのフィードバックの造り込み

ドライバのブレーキの踏み込み量に対してリニアに制動力を発揮し、期待した通りの減速 G が得られるようにした。また、アクセルペダルとブレーキペダルとの踏み換え操作をしやすくするため、かかとを軸とした回転軌跡に各ペダルを配置。更にショートストローク化することで、素早く安定した操作を可能にしている。

キーバリュー3. 使い切る喜び：

様々な使い方に余裕を持って柔軟かつスマートに対応できる、考え抜かれた抜群の機能性

CX-5 は、新デザインテーマ「魂動（こどう）」を採用した躍動的なデザインで SUVらしい力強さとアクティビティを表現しながらも、様々なシーンにおいて、乗員全員が快適に楽しく使える空間を確保した。運転のしやすさ、乗り降りのしやすさ、荷物の収納しやすさなど、お客様に本当に便利で快適と実感していただくことを最優先し、使い切る楽しさと満足感を提供するパッケージを造り上げた。

(1) 扱いやすいワイドボデーと伸びやかな室内空間

ひと目で SUV とわかるワイドなボデーでありながら、最小回転半径は 5.5m。更に、優れた前方視界などによって、ボデーサイズを感じさせない取り回しのしやすさを実現している。室内空間は、お客様が外界から遮断されたスペースで運転に意識を集中でき、心を落ち着かせることのできる空間の実現に注力。開放感のあるヘッドスペースや、足を伸ばして寛げる後席のレッグスペース、ゆとりの室内幅など、長距離移動でも疲れにくく、大人 4 人が快適に過ごせる伸びやかさを確保した。

(2) こだわりを注ぎ込んだ優れた乗降性

ヒップポイントを前席・後席ともに高めに設定し、少し立ち気味のポジションとすることで、乗降時に乗員の腰や足がスムーズに動かせることを目指した。また、乗降時にふくらはぎがボデーに当たりにくいようにサイドシルの張り出しを少なくするとともに、ドアでサイドシルを覆う構造とすることで、水ハネなどの付着が少なくなり、乗降時の衣服の汚れを防ぐようにした。

(3) 大容量かつ使い勝手に優れたラゲッジスペース

スタイリッシュな外観からは想像できない大容量のラゲッジスペースを実現。定員乗車時には、ゴルフバッグ 4 個を積み込める 500L (DIN 方式)。リアシートをすべて倒せば、1,620L (DIN 方式) のフラットなスペースが広がる。また、フロア下には全車にサブトランクを標準装備した。更にリアゲート開口部は、ピンジョイントタイプのステーダンパを採用し大きな四角い開口を実現。ぎりぎり収納できないと思われていた多種の組み立て家具などの収納もスムーズに行うことができる。加えて、以下に示すマツダならではの「カラクリ機構」を採用することで、日常における使い勝手を大幅に高めた。

● 4 : 2 : 4 分割可倒式シートバック&カラクリフォールド

後席のシートは、フルフラットを実現するため S パネ方式を採用してダイブダウンのスペースを確保。荷室側に設定したリモコンレバーの操作で後席シートバックとクッションを連動して沈み込ませることで、広くフラットなフロアを実現した。また、中央席のみをリモコンレバーで独立して倒すことができるため、後席に大人 2 名がゆったりと座っていても、またはチャイルドシートを 2 脚装着していても、長い荷物を積み込むことを可能とした。

● カラクリトノカバー

リアゲートの開閉に連動してトノカバーを上下に動かすことで、荷物の出し入れのたびにトノカバーを動かす手間を省いた。モータなどを使わないシンプルな構造のため、簡単に取り外しができ、使わない時はサブトランクへ収納することができる。また、トノカバーの一部をネット状にすることで、リアゲートを開けて荷室側で作業しながらリ

アシートの乗員とコミュニケーションを取ることでもできる。

キーバリュー4. 永くつきあう歓び：

いつまでも、心置きなくクルマ本来の楽しさを享受できる、先進の環境安全技術

CX-5 では、マツダ車に相応しい走る歓びと、永くつきあえる優れた環境安全性能を同時に提供するため、SKYACTIV TECHNOLOGY を全面的に採用した。新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 2.2 と高効率直噴ガソリンエンジン SKYACTIV-G 2.0。ともに、高効率 6 速オートマチックトランスミッション SKYACTIV-DRIVE と組み合わせ、力強い走りと優れた燃費性能を両立。加えて、「安心感・信頼感に裏打ちされたクルマで、走る歓びを支える」という、マツダの安全思想の実現に向けて、SKYACTIV-CHASSIS をベースにアクティブセーフティの基本となる優れた操縦安定性の造り込みに注力した。更に、ドライバの安全確認や危険認知をサポートする多くの先進技術を採用するとともに、パッシブセーフティでは、新世代の軽量高剛性ボデーSKYACTIV-BODY を導入し、世界最高水準の衝突安全性能を目指した。

(1) 走る歓びと優れた環境性能を両立するパワートレイン

● 新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 2.2

ディーゼルエンジンの、汚い、うるさい、走らないというネガティブイメージの払拭に取り組んだ。世界一の低圧縮比 14.0 の実現に加え、多段噴射燃焼、回転系部品の軽量化等によって、クリーンかつ静かでありながら、4.0L V8 ガソリンエンジン並みの力強いトルクを発生し、意のままに走るディーゼルエンジンを実現した。燃費はすべての SUV の中でトップの燃費性能 18.6km/L (2WD 車 JC08 モード燃費) を達成。また、NOx や PM の排出量を飛躍的に低減して、高価な後処理システムを搭載することなく日本のポスト新長期規制や欧州の EURO6 に適合、求めやすい価格設定にも貢献した。

● 高効率直噴ガソリンエンジン SKYACTIV-G 2.0

量産ガソリンエンジンで世界一となる高圧縮比 14.0 (欧州ハイオク仕様、日本やアメリカ等のレギュラー仕様は 13.0) を実現するため、4-2-1 排気システムを新採用。より高次元での燃費性能とトルクの両立を実現した。街中から高速道路まで、様々なシーンを爽快に楽しめる走行性能と、クラストップレベルの燃費性能 16.0km/L (2WD 車 JC08 モード燃費) を実現している。

● 高効率 6 速 AT SKYACTIV-DRIVE

発進のしやすさに定評のあるステップ AT、スムーズな変速が特徴の無段変速機 (CVT)、低燃費でダイレクト感の高いデュアルクラッチトランスミッション (DCT)、これらの利点をすべて備えた、理想的なオートマチックトランスミッションを追求した。ロックアップ領域の大幅な拡

大に加え、エンジンとトランスミッションの協調制御によって、MT のようなダイレクト感、力強い発進とスムーズな変速フィールを実現した。また、クラストップの優れた燃費性能の達成にも大きく貢献している。

(2) 先進のアクティブセーフティ技術

● スマート・シティ・ブレーキ・サポート (SCBS)

& AT 誤発進抑制制御

SCBS は、4~30km/h の低速走行中に、レーザセンサで前方の車両を検知、衝突の危険性が高いと判断した場合には、即座に強い制動力を発揮できるよう、ブレーキの遊びを詰める。更に、ドライバがブレーキ操作を行わなかった場合、自動的にブレーキを作動させて減速し、衝突の回避や衝突による被害の低減を図る。

AT 誤発進抑制制御は、徐行(約 10km/h 以下)または停車時、前方に障害物があるにも関わらず、アクセルが一定以上踏み込まれた場合に作動。警報とメータ表示によってドライバへの注意を促すと同時に、エンジン出力を自動で抑えて急発進を抑制する。

● リア・ビークル・モニタリングシステム (RVM)

リアバンパ内側に備えたレーダで隣車線上の後方から接近する車両を検知すると、ドアミラー鏡面に備えたインジケータが点灯してドライバの注意を喚起する。

従来のマツダ車では 60km/h 以上でのみ作動させていたが、CX-5 では低速時の車線変更をサポートするため、30km/h 以上で作動するよう進化させた。

(3) 軽量・高剛性・安全ボデーSKYACTIV-BODY

● 前面衝突への備え

十字型断面のフロントフレームをはじめとしたボデー前部の高効率マルチロードパス構造によって、前方からの衝撃を多方向に分散。衝突時にはエンジンやフロントクロスメンバがフレームから外れる構造とすることで、衝撃吸収スペースを確保。加えて、衝突時のキャビン変形を抑制する要所に高張力鋼板を採用し、軽量化とキャビンの強度の向上を両立した。

● 側面衝突への備え

ルーフレール、センターピラー、アンダーボデーを連続させた環状構造によって、側面からの衝撃に対するキャビンの変形を抑制。ドアの内部にはフロントに 2 本、リアに 1 本のサイドインパクトバーを設定し、衝撃を効率よく分散させるとともに、ドアの室内への侵入を防いでいる。

● 後面衝突への備え

後面への衝突に対しては、B フレームとリアフレームの締結によって、衝突エネルギーの分散を促進。燃料タンクの周囲はタンクを保護する構造やフレームのレイアウトによって、衝突による燃料漏れや車両火災の発生を防止した。

● 歩行者保護

万一の際、歩行者の頭部への傷害を軽減するため、ボンネット下にエネルギー吸収スペースを確保し、カウルグリルやフェンダブラケットにエネルギー吸収構造を採用。

また、歩行者の脚部への傷害を軽減するため、バンパビームに発泡材のエネルギー吸収構造を、バンパロア部には樹脂製のエネルギー吸収材を採用した。

4. おわりに

私たちは、以前は家族や仲間とともにドライブするだけで、笑顔を浮かべることができました。流れる景色を楽しむ。これから向かう知らない土地に思いを巡らせる。期待で胸が高鳴り、乗員同士の会話が弾む。運転をするだけで、楽しい時間を過ごすことができたのです。

しかし、最近は「ドライブ」という言葉自体が死語になっています。それどころかクルマで移動する間、ドライバは燃費と安全に気を遣い、同乗者は暇を持て余す。「目的地に着くまでの辛抱だ」そんな緊張と我慢を強いられる屈辱な時間と感じる人も少なくありません。

けれども私たちは、もう一度「ドライブ」という言葉と楽しさを復活させたいと考えています。そのためにも、CX-5 が単なる移動手段ではなく、移動時間そのものを楽しみに変え、乗員全員に歓びを与え続けるクルマとなることを願って止みません。

CX-5 を選んでいただき、運転し、長く使っていただいたとき、あらゆる場面において、お客様に笑顔を浮かべてもらうこと。それが私たちにとって最高の歓びです。

■ 著 者 ■



田中 英明



前田 俊和

特集：新型車（CX-5）

18

CX-5 のデザイン
Design of CX-5

中山 雅*1

Masashi Nakayama

要約

CX-5 はマツダの「SKYACTIV TECHNOLOGY」と新デザインテーマ「魂動（こどう）」を採用した初めての市販モデルである。これまでにない技術とデザインテーマを融合し、マツダは CX-5 を、まさに獲物に飛びかかろうとするチーターを彷彿とさせる、生命力と躍動感を研ぎ澄ませたデザインに造り込んだ。エクステリアでは、造形がクルマとしての性能・機能と高次元でバランスした、スポーティかつ堂々としたスタイルを追求した。インテリアでは、ひと目で「運転してみたい」と感じ、乗って納得する空間の創出を目標に、力強さと質感の高さを感じられるドライバオリエンテッドなデザインを表現した。

Summary

The CX-5 is the first vehicle available in the market that has adopted Mazda's next generation "SKYACTIV TECHNOLOGY" and its new design theme "KODO". Through the process of bringing the entirely-new "technology and design theme" into reality, we came up with the CX-5 having a sophisticated styling with vital energy and dynamics feel. This reminds us of a cheetah that is about to pounce on its prey. With regard to the exterior, we pursued a sporty and dignified styling that would allow users to sense a perfect balance between the form and the performance and functionality as a car. Meanwhile, for the interior, we attempted to create a space that would make users feel like driving the car just by looking at it and convince them once they get in the car. Through these efforts, we were able to achieve a driver-oriented design that offers dynamism and high quality feel.

1. はじめに

コンパクトクロスオーバー SUV セグメントは市場規模がグローバルに拡大傾向にあり、この先も有望なセグメントである。CX-5 は、その真ん中を狙って投入され、デミオ・アクセラ・アテンザに次ぐ新たな基軸車種として、マツダのブランド力向上に貢献する使命を持って開発された。

そのため、開発にあたっては世界各国の市場特性を理解し、それぞれのコンパクト SUV クラスへジャストミートさせることを念頭に入れながら、マツダらしいデザインを実現することに注力した。

一方その開発自体は、「SKYACTIV TECHNOLOGY」を余すことなく具現化するべくほぼ全ての部品を新設計し、

同時に新デザインテーマ「魂動」を表現するという、大きなチャレンジを伴うものとなった。そのチャレンジが独自のデザインとして結実するよう取り組んできた開発過程も絡め、CX-5 のデザインの魅力について紹介する。

2. デザインコンセプト

2.1 新時代デザインテーマの構築

2010 年夏、マツダは新しいデザインテーマ「魂動」を発表した (Fig.1)。これは「生き物が『動き』の中で見せる一瞬の美しさや力強さ」から受ける強いインスピレーションを自動車のデザインに昇華させようというものである。

これを端的に表現したコンセプトカーとして「靱（シナリ）」を同時に発表し、世界的に高い評価で受け入れられ

*1 デザイン本部
Design Div.

た。更に第2弾として、2011年、「勢（ミナギ）」をジュネーブショーで発表し、魂動のさらなる可能性を示すモデルとして世界に紹介した（Fig.2）。

実際には「勢」は、CX-5のデザインテーマが決定した後で、同じテーマを使いながらショー用の化粧を施して製作されたモデルである。つまりCX-5のデザイン開発は、実は「魂動」の創出と同時に進められていた。マツダの新しいデザインテーマを創りながら、同時にそれをCX-5のデザインとして結実させる。これが「魂動」のトップバッターであるこの車のデザインチームに課せられた役割だった。



Fig.1 KODO: SOUL of MOTION



Fig.2 SHINARI & MINAGI

2.2 マツダらしさとSUVらしさの両立

一般的な傾向では、SUVらしい強さや逞しさを表現すると鈍重なデザインになりやすく、逆にスポーティで軽快なデザインにすると力強さが失われがちである。しかしカスタマーの多くがSUVの力強いイメージをポジティブに捉え、それを好んで乗っていることがマツダの調査で分かっていた。

そこでこれらを両立し、力強さとスポーティさを併せ持つ独自のポジショニングターゲットとして設定した（Fig.3）。

以下にその具体的な手法について解説する。

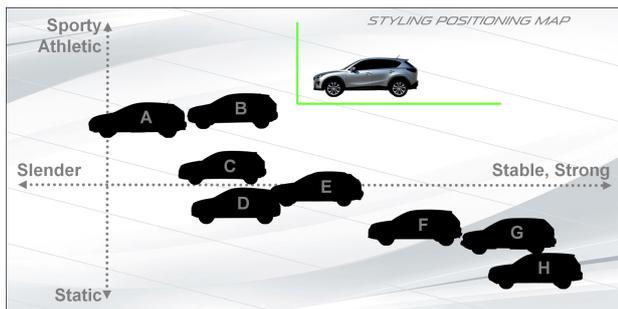


Fig.3 Styling Positioning Map

3. エクステリアデザイン

3.1 動きを予感させる独特のプロポーション

CX-5はグローバル商品である。したがって世界のどの国でも強い存在感を表現しなければならず、たとえ北米の大地のスケールで見ても認知できる骨格を持つ必要がある。

まずSUVらしさを表現するために、車の「高さ」と「踏ん張り感」の重要性に着目し、加えてしっかりとノーズの存在感を出すことで、ミニバンやハッチバック車と一線を画すSUVらしい基本のシルエットを規定した（Fig.4）。

その上で、陸上短距離選手のスタート前の姿勢のように車全体の姿勢を前傾させ、かつ、A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（Fig.5）。

これらにより、アスレチックでありながら堂々たるSUVらしいプロポーションができただけでなく、後ろに引いたAピラーが良好な運転視界にも寄与するため、運転する喜びとスポーティなデザインとが高次元でバランスした基本骨格になった。

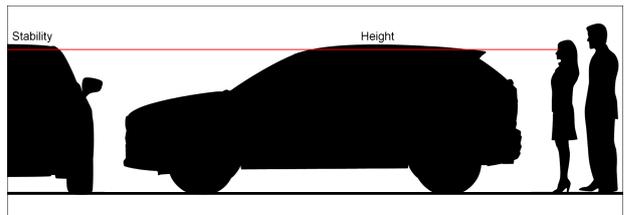


Fig.4 SUV silhouette

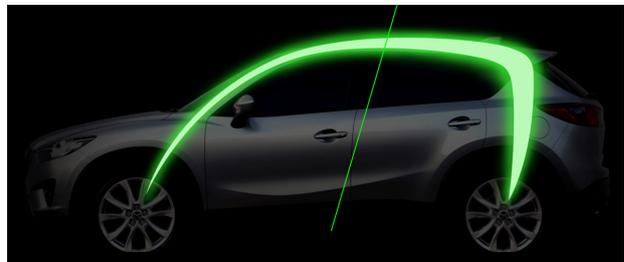


Fig.5 Side View Proportion

3.2 新しいファミリーフェイス

一目でマツダと分かる顔を目指し、コンセプトカー「翹」で発表して「シグネチャーウイング」と名付けた羽ばたく翼の紋章をグリル外周にあしらった、新しいファミリーフェイスを持った最初の量産車となる（Fig.6）。

やや下を向かせた立体的なフロントグリルは前傾した車の姿勢を強調し、反対に上を睨み上げるようなランプの表情は獲物を狙うチーターをイメージしてデザインした。それらをつなぐシグネチャーウイングはクロームメッキ処理され、スポーティさと質感の高さを表現している。

フェイス下側の力強い造形はSUVらしさと車格感を表現し、全体として精悍でハンサムな顔立ちを構成、CDカーから乗り換えても納得できる風格に仕上がった（Fig.7）。



Fig.6 Family Face with Signature-Wing



Fig.7 Front View

3.3 艶があって凛とした、魂動のボデーランゲージ

(1) 「動きの予感」に呼応するキャラクタ

ボデー全体のウェ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演出した。クーペのように倒れたバックウィンドウは、SUV にありがちな鈍重なイメージを払拭し、特にクォータービューでのシルエットに軽快感を与えている。その際、リヤウインドウ下端位置を後方かつ上方に持ち上げることで十分な荷室を確保し、同時に車体が前傾したイメージも強調した。

ヘッドランプ内側からつながるボンネット上の折れラインは、フェンダを斜めに横断しながらドアへと消えて行き、RX-8 に始まるマツダ独特の「隆起したフェンダ」の新たな表現とした。そのラインの曲率にも変化を持たせ、ボデー下部の跳ね上がるラインとともに書道の「ため」と「はらい」のようなリズムとスピード感を表現した(Fig.8)。



Fig.8 Design Theme

(2) アスリートのように引き締まったリヤビュー
リヤフェンダの張り出しは強い踏ん張り感を表現した。加えて、鍛え上げたアスリートのヒップを思わせるリフトゲート周りの面の張りとのコンビネーションによって、お尻が重い一般的な SUV とは違うセクシーな後姿を作り出している。

フェンダ自体も SUV に多いオーバーフェンダ風とせず、強い抑揚のあるボデー断面と連続させることで、艶やかで魅力的な面の表情を狙った。それらによって、美しくも逞しいたたずまいを実現している (Fig.9)。



Fig.9 Rear View

3.4 世界最高レベルの空力特性と魅力あるデザイン

走る歓びを高い環境安全性能と両立するマツダの「サステイナブル “Zoom-Zoom”」を表現するには、スポーティなデザインと高い空力特性とが並び立つ必要があると考えた。

ボデー後方は、緩やかに下がるカーブを描くルーフ形状と、サイレンサ部分が上方に跳ね上がる形状を持ったフロアとの組み合わせによって、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。これはルーフから吹き降ろす風とフロアから吹き上げる風とをスムーズに整流させる効果があるが、引き締まったリヤビューを表現することにも役立っている。また標準装備としたルーフスポイラの横に小さなフィンをつけることで、整流効果を更に高めながら、アグレッシブな外観を作り出した。

フロントのコーナ部の造形は、気流を剥離させるために単にエッジを立てるだけでなく、SUVらしい強さと踏ん張り感の表現としても造形した。

これら全体の工夫により、Cd値はクラストップとなる0.33を実現した。しかしこれは構造の見直しだけでなく、コストもかける必要があった。スポーティなデザインと高い空力特性の実現という、妥協なき目標を開発チーム全体で共有していたことにより達成できたものである (Fig.10)。



Fig.10 Aerodynamics

4. インテリアデザイン

4.1 乗る人をワクワクさせるコックピット

インテリアデザインは、ドアを開けた瞬間「乗ってみたいくなる」、また、乗れば「走る喜び」を体感できるコックピットを目指した (Fig.11)。

運転席周りを車の前後方向、それ以外の部分を横方向 (水平基調) とする造形のコントラストを付け、運転席を特別な空間として演出した。小ぶりのメータクラスターの彫りの深い造形は走りのワクワク感を誘い、それと対照的に水平基調のインパネ本体はロール等「車の挙動」を自然に読み取れるようデザインした (Fig.12)。

立体文字盤とクロームリングでスポーティかつ精緻感あるメータでドライブ正面を演出し、コンソールとドアトリムに配した金属質感のバーで足元のタイト感を強調。全体としてドライバの気持ちを高揚させるコックピットの雰囲気づくりを行っている (Fig.13)。



Fig.11 Cockpit



Fig.12 Design Theme



Fig.13 Gauge / Door

4.2 欧州プレミアムと並ぶ高いクラフトマンシップ

造り込みに関してもグローバルに通用する高いクラフトマンシップを目指し、丹念なデザイン処理を施した。

インパネとドアトリムの上部はメータフード含めて全てソフト素材で覆い (Fig.14), SWパネル等の表面に縦縞ストライプ処理を加えてモダンなテイストを与えた。また、体が触れるアームレストは柔らかい素材で覆い、触感の良さも表現している。

インパネ中央部には、高い質感を表現する加飾パネルを装着。表面処理はマツダが RX-8 で世界に先駆けて採用したピアノブラック塗装とし、形状を含めてロードスターとの関連性も感じさせる、マツダの伝統への想いを込めている。

金属質感を持った光沢パーツは、スイッチなどに瞬時に目が行くよう考えた視線誘導用と、骨組みのような強さを視覚的に期待したい剛性感表現に集約し、それぞれに妥協なく配している。剛性感表現に使用した部位は、金属を削り出したような本物感溢れる形状と断面を再現した。そのため、表面処理は削り出しのアルミを丹念に磨いたような鈍い光を放つ「サテクローム」と呼ぶ新しい手法のメッキとしている。これらにより、大人っぽく質感の高いインテリアの雰囲気を醸し出している (Fig.15)。



Fig.14 Soft Material



Fig.15 Satin Chrome

5. カラーデザイン

5.1 SKYACTIV と魂動を表現したボデーカラー

ボデーカラーに関しては、車の特徴やマツダのイメージを牽引する戦略カラーと、カスタマーの好みや各市場のニーズを反映したスタンダードカラーとに大別してラインナップを揃えた。

「SKYACTIV TECHNOLOGY」の象徴としてアクセラから導入した Sky Blue MC は CX-5 でも継承し、新たに魂動デザインの表現（力強さや色気）をより際立たせるカラーとして Zeal Red を新色として開発、この2色がイメージを牽引する役割を担う。他の色はグローバルなカスタマーニーズに適確に答えることを目的とし、マツダの既存ラインナップの中で最も時代性に合う高品位なカラーを選びすぎり、全体のバリエーションに幅を持たせている (Fig.16)。



Fig.16 Body Color

5.2 インテリアコーディネーションは大人の知性と艶

(1) カラーコーディネーション

黒で統一した内装は、サテッククロームの加飾とのコントラストによりスポーティさをピュアに表現した。助手席前のピアノブラック加飾は、基調となる Black の空間に艶やかさを加えることに寄与させた。

(2) レザーシート

レザーシート素材にはパーフォレーション（穴開け）加工を施した本革を採用した。パーフォレーションは吸音性能が高く、室内の静粛性向上にも貢献。そのため、穴の大きさやピッチまで吟味しており、最上級グレードに相応しい質感と機能性を持った仕上がりとなっている。

ステッチに関しても、ダブルステッチ部はツインカラーステッチ（隣り合う糸の色を変える）という新しい手法を用い、アクセントカラーの主張を適度にコントロールすることで、センスの良さを醸し出している。

(3) ファブリックシート

緻密で質感の高い織物とテクニカルなエンボス加工を融合させた、革新的発想のシート素材を採用した。

布表面の凹凸はダイナミックな模様を描き、「マット&グロス」と呼ぶ艶のコントラストが SUVらしい力強さとスポーティさを引き出している。また、シート本体の立体感と相まって、存在感と造り込みの良さが表現されている

(Fig.17)。



Fig.17 Seat Material

6. おわりに

CX-5 は「動いて」カッコよく見え、「使って」喜びを感じるデザインになったと思っている。

SUV が欲しいと思う人の期待を裏切らない力強さを持ちながらスポーティなエクステリアは、止まっても動き出しそうに見え、オーナーの心を昂ぶらせるだろう。

また、無駄のない機能美を追求し、本物感にこだわりながら丹念に造り込んだインテリアは、使い込むほどに深い満足感を味わっていただけるものと思う。

「SKYACTIV TECHNOLOGY」と「魂動」を具現化した CX-5 は、発表後、当初の期待以上の高い評価をいただいております。マツダの考え方に共感してもらえる人々が数多く増えていることを実感しています。

CX-5 とこれからの新型車を通して、サステイナブルな走る喜びを提供するマツダの「お客様への約束」が、これからもより多くの方に届くことを心から願っている。

■ 著 者 ■



中山 雅

特集：新型車 (CX-5)

19

CX-5 のパッケージング Package of CX-5

佐伯 和洋*1 Kazuhiro Saeki	大坪 智範*2 Tomonori Ohtsubo	廣川 正人*3 Masato Hirokawa
芦原 友惟奈*4 Yuina Ashihara	山田 大輔*5 Daisuke Yamada	

要約

CX-5 は、デザインテーマ「魂動」を採用した市販モデルの第一弾であり、SKYACTIV TECHNOLOGY を全面搭載し、Sustainable “Zoom-Zoom”の「いつまでも『ワクワク』するクルマ、『見て乗りたくなる、乗って楽しくなる、そしてまた乗りたくなる』」を目指して開発した「クロスオーバー SUV」である。

パッケージングでは、デザインテーマ「魂動」の具現化と「人間中心の発想」で抜群の機能性を持つ室内・荷室スペースの融合を目指して開発した。仕事にも遊びにもアクティブで、毎日をはつらつと過ごしているカスタマにとって、乗員全員が快適に楽しく過ごせるスペースを具現化した。

Summary

CX-5 is the first commercial model of adopting the design theme, ‘KODO-Soul of Motion’, and mounting SKYACTIV TECHNOLOGY in full scale. It is a crossover SUV, which was developed in an effort to realize “exhilaration of driving cars” of Sustainable “Zoom-Zoom” and fulfilling the idea of “See it and you will want to drive it. Drive it and you will have fun. Then you will want to drive it again.”

As for packaging, the design theme, ‘KODO-Soul of Motion’ and “human-centered” idea fused to develop cabin and cargo space with exceptional functionality. As a result, CX-5 materialized comfortable and fun space for customers, who spend spirited everyday life and are active in both work and play.

1. はじめに

CX-5 は、マツダの基軸車種として、グローバル市場で成長が注目されている Compact-SUV クラスに投入する「クロスオーバー SUV」である。パッケージにおいては、デザインテーマ「魂動」の具現化と「人間中心の発想」で抜群の機能性を持つ室内・荷室スペースの融合を目指して開発した。本稿では、パッケージコンセプトから商品へと具現化する手段とその価値について紹介する。

2. パッケージングの狙い

ターゲットとするカスタマーに、「自分の生き方に自信と誇りをもたらし、気持ちに落ち着きと余裕を与え、何事にも果敢に挑戦し続ける活力をみなぎらせてくれる」という価値を提供するために、以下 4 項目のパッケージコンセプトを設定し、具現化を目指した。

- ① 自信をみなぎらせるスタイリング
- ② 活力をもたらすコックピット
- ③ 心を落ち着かせる室内空間
- ④ 余裕を生み出す荷室空間

3. 自信をみなぎらせるスタイリング

自信をみなぎらせるスタイリングを、野生動物が獲物を狙って身構える力強さと、躍動感あふれる動きで表現した。力強さは、全身にエネルギーをみなぎらせ、足を踏ん張る姿として、「タイヤの四隅配置化」で具現化した。躍動感は、軽快な走りを予感させる「コンパクトキャビン化」による実現を狙った。

*1 商品企画部
Product Planning Dept.

*2 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

*3~5 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

3.1 タイヤの四隅配置

タイヤを四隅に配置する指標として、全長に対するホイールベースの比率をクラストップレベルとした (Fig.1)。競合に対しホイールベースが長い為、取り回しの良さについては不利となるが、舵角を拡大して競合車と遜色ない最小回転半径を確保した。

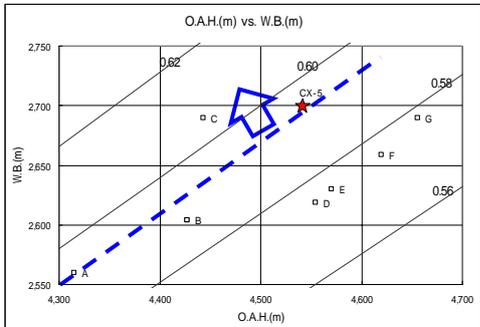


Fig.1 O.A.H.(m) vs. W.B.(m)

3.2 コンパクトキャビン

コンパクトキャビンを表現するため、正面視、側面視のプロポーションから指標を策定し、各諸元を設定した。

正面視では、全幅 (乗員着座位置) に対するルーフ幅の比率が小さい程、キャビンがコンパクトに見えることより、その比率をクラストップレベルとした (Fig.2)。

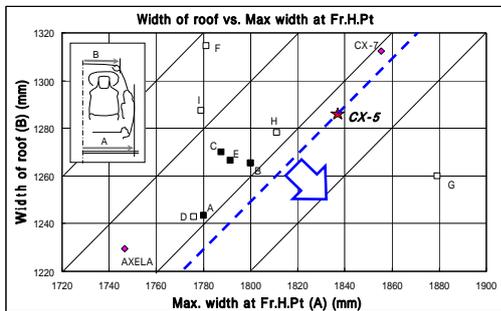


Fig.2 Width of Roof vs. Max Width at Fr.H.Pt

側面視では、全高に対するタイヤ径の比率が大きい程、キャビンが小さく見えるため、その比率をクラストップとした。タイヤ径は 720mm 以上必要とし、タイヤサイズは 225/65R17 (724mm) と 225/55R19 (731mm) を採用した (Fig.3)。

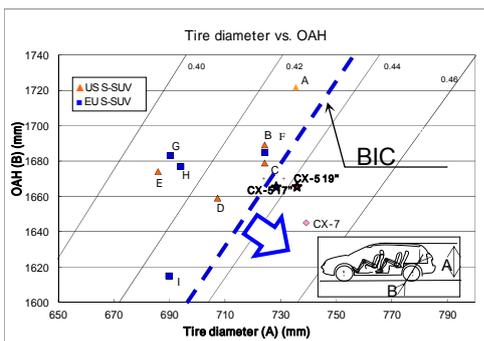


Fig.3 Tire Diameter vs. OAH

タイヤ径との比率を考えると、全高はできるだけ低い方が良い。一方で、低すぎると SUV と認知されない懸念がある。全高を低く抑えつつ、一目見て SUV として認知できる高さを、「車の傍らに立った時、ルーフ面が目線より上にある高さ」と定義し、1,670mm (ルーフ面まで) とした (Fig.3, 4)。

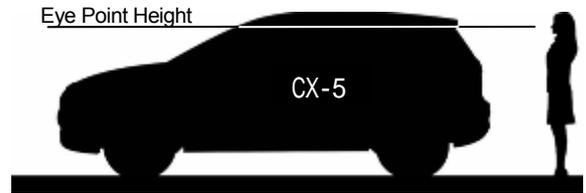


Fig.4 Roof is Above Eye Line

4. 活力をもたらすコックピット

クルマを意のままにコントロールする体験が、自信につながり、ドライバに活力をもたらす。何事にも果敢に挑戦し続けるお客様が、クルマとの一体感を楽しみながら走る喜びを感じる「コックピット」を具現化した。

4.1 コックピット

「コックピット」は、お客様とクルマをつなぐ接点である。思い通りに運転できる「コックピット」の実現に貢献する要素を、運転への集中を促す「ドライビングポジション」、周囲の情報を素早く確認できる「視界」、運転に関する情報を確実に伝える「視認操作性」と捉えた (Fig.5)。

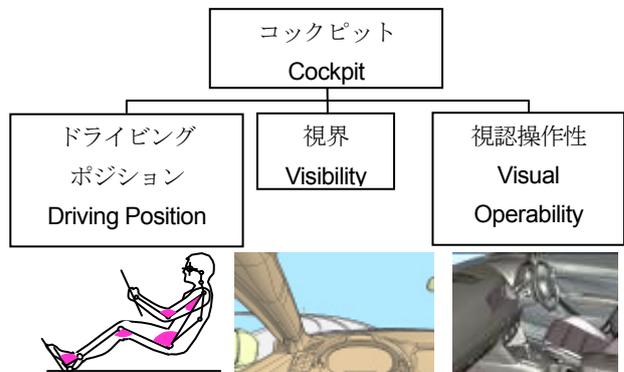


Fig.5 Conceptual Diagram of No.1 Cockpit

その中でも特に、CX-5 は視界に注力し、SUVとしての視界と取り回しの良さを実現した (ドライビングポジションと視認操作性については、[新型アテンザのパッケージング 4.1, 4.3 参照](#))。

4.2 視界

SUV に期待される視界を実現するため、路面からの目の高さを同クラスの SUV 並みとした。これにより、遠くまで見渡せ、前方情報を素早く察知し危険を未然に回避することにつながり、疲労・ストレスを軽減した。

また、街中や郊外路での取り回しでは、車両周囲の状況を把握するために重要な A ピラー廻りの視界に注力した。街中の交差点右左折時では、ドアミラーの取り付け方式をドアマウントとし、A ピラーとドアミラーの間から横断歩道を渡る歩行者の視認性を向上した (Fig.6)。郊外路のカーブ走行時では、前方左右の見開き角を確保し、クリッピングポイントの視認性を向上させて、狙い通りの走行ラインをトレースできる視界を実現した。

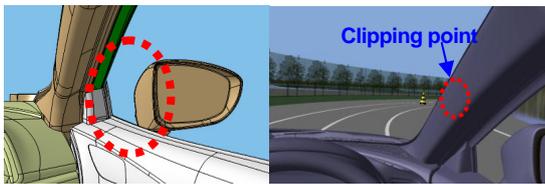


Fig.6 Visibility Around A Pillar Lower

5. 心を落ち着かせる室内空間

心を落ち着かせる場所として、運転に集中でき、気の合う仲間と談笑できる室内空間の実現を狙った。運転へと意識をいざなう「包まれ感」が心地良い前席空間、及び、大人が様々な姿勢で座りやすい後席空間、を具現化した。

5.1 前席乗員

フロントヘッドやインストルメントパネルは、圧迫感と包まれ感の両立を図った。これら部位から乗員の受ける圧迫感、アイポイントからの距離と視野角の組み合わせにより変化する。これらの要素を最適にバランスさせることで、圧迫感と包まれ感が両立するフロントヘッドとインストルメントパネルの造形を実現した。

居住空間については左右スペースを重視し、ドアトリム間の寸法をクラストップの 1,460mm とした。乗員着座位置は、ドアトリムとコンソールのアームレスト間のほぼ中央とし、左右のアームレストを均等配置した。中央のアームレスト幅は 190mm とし、運転席と助手席から同時に肘が置けるスペースを確保した。

5.2 後席乗員

大柄な乗員でも、足を前方へ投げ出したり膝を組んだりして姿勢を変えられるように、クラストップレベルの足元・膝前スペースを実現した。足元スペースではフロントシートの取り付けブラケット部の幅 (380mm) とシートクッション下面~床面の上下スペース (185mm) の拡大、膝前スペースではシートバックの薄型化により、トップレベルのスペースを確保した (Fig.7,8,9)。

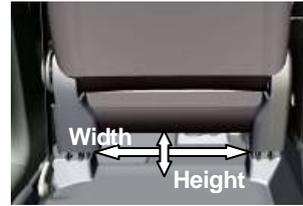


Fig.7 Rr. Occupant's Leg Space

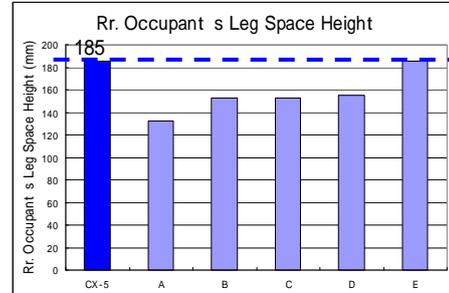


Fig.8 Rr. Occupant's Leg Space Height

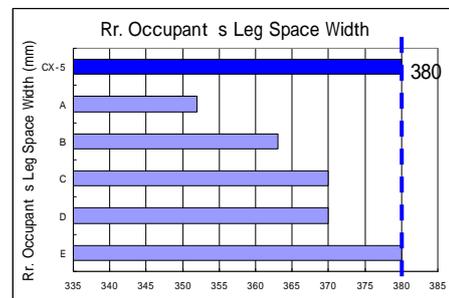


Fig.9 Rr. Occupant's Leg Space Width

シートバック高さは、580mm 確保し、同クラスの SUV でトップレベルとした。大柄な乗員でもゆったりとシートバックにもたれかけられる高さとした。

中央のアームレストは、バック分割ラインいっぱいまでアームレスト幅を拡大し、後席でも大人 2 名がリラックスした姿勢で肘が掛けられるセンターアームレスト幅 (250mm) を実現した。

5.3 乗降性

乗降時の筋負担やサイドシルへの足当たりを分析し、自然な動作での乗降を可能とした。ヒップポイント地上高は、乗降時に重心の移動が少なく、腰や膝にかかる負担が小さくなる高さとした。更に、ドア下端部でサイドシル外側面を覆う構造を採用し、乗降時の足当たり改善とズボンの裾汚れを抑止している (Fig.10, 11)。

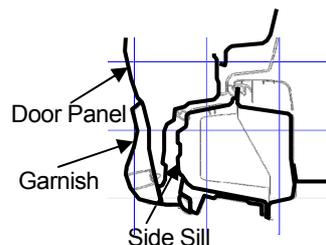


Fig.10 Door Structure



Fig.11 Ingress/Egress

また、後席乗降時につま先当たりが懸念される部位について、ドアトリム前側部分の膨らみをなくし B ピラートリム下部の面を削ることで (Fig.12 斜線部)、滑らかな動きによる足の出し入れを可能とした。



Fig.12 Rr. Door Structure

6. 余裕を生み出す荷室空間

外出先での思わぬ積載ニーズに対応できる気持ちのゆとりや、レジャーの荷物を手際よく積載できるようにするため、「余裕を生み出す荷室 KARAKURI」に注力した。日常生活やレジャーシーンにおいて、荷物や後席乗員数に応じてアレンジ可能で、使い勝手の良い荷室を具現化した。

6.1 シートアレンジ・荷室アレンジ

多彩なシートアレンジと使い勝手の良さを実現するために、後席を 4:2:4 に分割し、それぞれにワンタッチ操作で荷室をフラットにできる KARAKURI フォールド (シートバックの動きに連動してクッションが沈み込む) を採用した (Fig.13)。

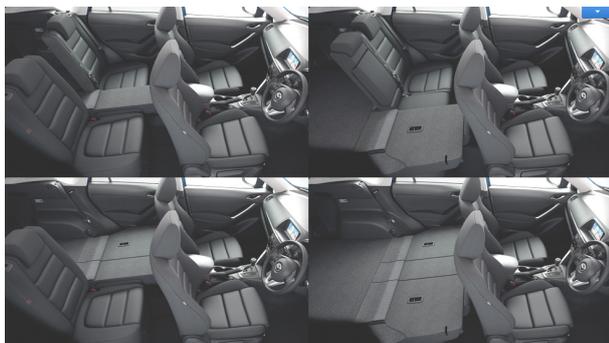


Fig.13 Versatile Seat Arrangement

これらにより、大人 4 人乗車で寬いで着座したり、後席の両サイドにチャイルドシートを固定したまま、長尺物を車両中心に積載することが可能となった。

中央席のフォールド幅については、4 名がスキーやスノボを積載して出かけるシーンを想定し、全員のスキー/スノボが積載できる幅 (250mm) とした。

また、多様な積載シーンに対応できるように、フォールド操作は、室内側と荷室側の両方から可能としている。室内側からはバック上部のノブ (Fig.14) で、荷室側からはトランクサイドに設定したレバーで、全ての後席をフォール

ド可能とした。また、トランクサイドに設定したレバーの位置は、服を汚すことなくフォールドできるよう、バンパから離れた位置からでも操作可能な荷室後方に配置した (Fig.15)。また、操作しやすさとデザインのバランスを考慮して、左側席用のレバーと一体で中央席用のレバーを設置したコンパクトな設計とした (Fig.16)。

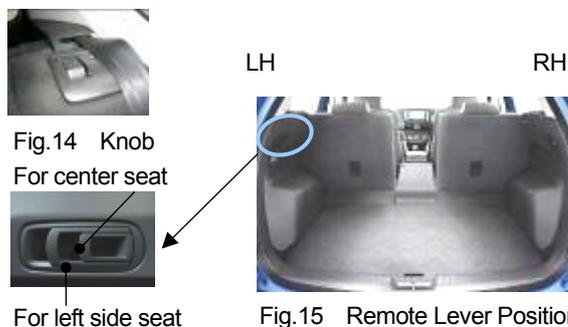


Fig.14 Knob For center seat

For left side seat

Fig.15 Remote Lever Position

Fig.16 Remote Lever-LH

6.2 KARAKURI トノカバー

日常生活やレジャーなど、あらゆるシーンにおける使いやすさの実現を目指し、KARAKURI トノカバーを進化させた。

(1) 日常生活における使いやすさ

買い物やちょっとした外出時の荷物など、手荷物を荷室へ収納するときのアクセスしやすさに注力した。KARAKURI トノカバーの後端をリフトゲートに連結して、リフトゲートの開閉に連動するカバー開閉機構を採用している。従って、リフトゲートの操作力には、トノカバーの巻き取り力が作用しているため、CX-5 ではトノカバーのフリクションを低減して巻き取り力を抑え、リフトゲートの操作力を旧型アテンザより小さくした。トノカバー開閉の手間を省いたことに加え、操作力を低減して、スムーズな荷物の出し入れが可能となった。

また、カバーの一部にメッシュ地を新たに採用し、荷物を出し入れしている時にも、室内の様子を確認できるようにした (Fig.17)。



Fig.17 KARAKURI Tonneau Cover

(2) レジャーシーンに置ける使いやすさ

スポーツやキャンプに出かける際の大きな荷物を積載するために、KARAKURI トノカバー取り付け位置や脱着作業の容易さに注力した。荷室奥にある荷物の取り出しや高さのある荷物の収納、広々感の実現を狙い、荷室の幅や D ピラー厚さ、リフトゲート開時のカバー保持構造等の周辺レイアウトを工夫し、トノカバー本体の取り付け位置を後席シートバック上端とした。

身長約 150cm の小柄な女性でも操作しやすいように、リフトゲートとトノカバーの連結位置を手が届く高さとした。さらに、トノカバー脱着時に操作する部位に工夫を凝らし、指にフィットする形状とした。また、トノカバー脱着作業を容易にするため軽量化（製品質量：1.9kg）を実現し、収納位置が判るようサブトランク形状に工夫を凝らした。

6.3 荷室スペース

スポーティな外観でありながら大きな荷物を積載できる荷室サイズを実現した。

荷室容量は、同クラスの SUV と比べても遜色ないアテンザクラスの 500L を確保した (Fig.18)。

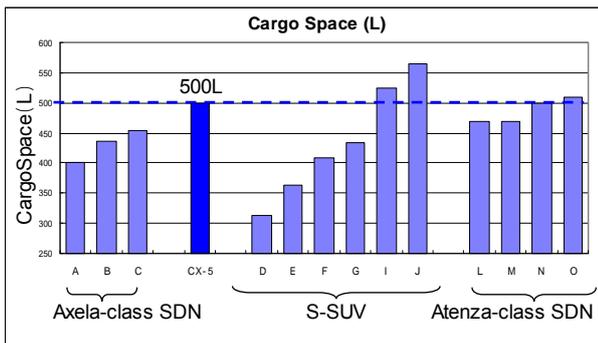


Fig.18 Cargo Space

特に、北米のお客様は、後席を倒した際の荷室サイズへの感度が高い。CX-5 では、クラストップレベルの後席フォールド時の積載性能（積載可能な直方体サイズ）を実現しており、コンシューマーレポート誌 (*) で高い評価 GOOD を得ることができた。

(*USA 雑誌。あらゆる商品の性能をお客様目線で評価すると定評がある。北米のお客様は、車両を購入する際にその情報を参考されている)

7. おわりに

お客様にとって必要な機能や構造・レイアウトをお客様の視点で考え抜き、使い勝手の良いパッケージを具現化できたと考えている。CX-5 に乗っていただいたお客様に、「乗って楽しくなる、そしてまた乗りたくなる」と実感いただけると確信している。これからも、お客様とともに人生を歩むクルマを発信し、「走る歓び」を世界中に広めていく所存である。

■ 著 者 ■



大坪 智範



廣川 正人



芦原 友惟奈



山田 大輔

特集：新型車（CX-5）

20

CX-5 SKYACTIV-BODY ストラクチャの開発 Development of SKYACTIV-BODY Structure for CX-5

木村 隆之*1 Takayuki Kimura	橋本 学*2 Manabu Hashimoto	中内 繁*3 Shigeru Nakauchi
田中 祐充*4 Masamitsu Tanaka	近藤 量夫*5 Kazuo Kondo	岡田 義浩*6 Yoshihiro Okada

要約

CX-5 は、技術開発した SKYACTIV-BODY を量産適用した最初の車である。お客様にマツダが目指すいつまでも「ワクワク」するクルマを提供する上で必要な「走る歓び」を支える高い剛性と最高レベルの衝突安全性を共存させた軽量ボデーを実現した。今回は CX-5 の開発プロセスと構造の特徴に関して、その狙いと適用技術を紹介する。

力学の原理原則から理想の構造を描き、そのコンセプトを CAE 解析やテストにより整合を取り具体的構造を決定した。また開発初期から材料低減等の VE (Value Engineering) 活動を並行して進め、全てのお客様にリーズナブルな価格で商品提供することを目指した。その結果欧州 CD プレミアムセダン並の車体剛性値と主要市場 NCAP のトップランクの安全性能を確保し、同クラスの最軽量ラインより 8%軽量化を実現した。

Summary

The CX-5 is Mazda's first production model to adopt the SKYACTIV-BODY. Its light weight body has achieved a high rigidity that enhances "driving pleasure" and the highest level of crash safety performance, both of which support Mazda's commitment to making cars that always excite. This article introduces the development process of the CX-5 and its structural features, including the aims and the technologies applied.

Based on the basic principles of mechanics, we designed an ideal body structure and nurtured concept technologies through CAE analyses and vehicle tests before determining the structural details. In addition, we applied VE effective material utilization from an early stage of development so as to offer the vehicle to all our customers at an affordable price. As a result, a body rigidity equivalent to the level of European premium sedan of CD segment has been achieved, the crash safety performance has ranked top in NCAP of major markets, and the vehicle weight has been reduced to a level 8% lighter than the lightest line of the same segment cars.

1. はじめに

SKYACTIV-BODY の技術開発内容についてはマツダ技報 29 号にて報告済みである。今回 CX-5 の開発に当たり、この技術開発内容とその技術を織り込んだ車両である TPV (Technology Prove-out Vehicle : 技術検証車) の内容を量産構造に置き換える必要があった。

商品化に当たって、車型はセダンから SUV となった。

それでもセダン車型と同じ性能を求めた。技術開発段階に一括企画として SUV 車型に対応すべく車体の変更点を決定し準備を進めていたが、実際の商品仕様としては、乗員のドライビングポジション改善、フロア高さの変更、乗降性の更なる改善からサイドシル部断面の小型化など車体の基本諸元の変更に対応する必要があった。

新しいデザインテーマ「魂動」を実現しつつ、「走る歓び」を支える高い剛性と最高レベルの衝突安全性を両立さ

*1~4 ボデー開発部
Body Development Dept.

*6 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

*5 NVH 性能・CAE 技術開発部
NVH & CAE Technology Development Dept.

せ、更に環境と運動性能に直結する軽量化を実現するといった「全ての面でベストであること」の革新的な目標を設定し、商品開発に取り掛かった。

また、収益性を確保するには円高環境に対応するだけのコスト適正化を、性能の低減なしにやり切る VE 活動が必須だった。

加えて、商品のタイムリーな市場導入のため更なる短期開発を目指した。

2. 開発プロセス

2.1 開発アプローチ

技術開発においてボデーの機能と機能量を明確にした上でボデー構造との関係を解明した。これを CX-5 の諸元に当てはめて開発を進めた。

お客様に提供する価値が最大となるべく、必要とされる機能を最大化し質量が最小となる構造を決めるアプローチとして

- 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

に取り組み、これらの項目を CAE による解析シミュレーションを用い繰り返し検証した (Fig.1)。

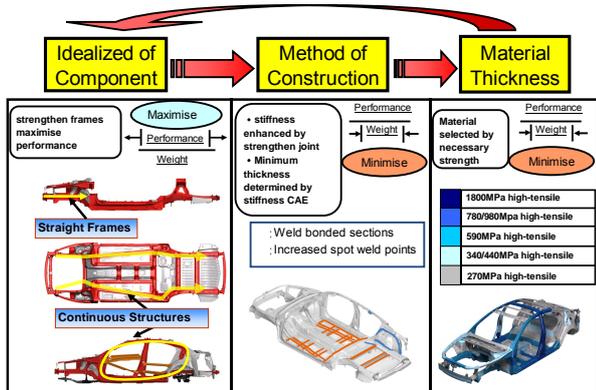


Fig.1 SKYACTIV-BODY Vision

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

として開発構想を立案した。しかし従来の開発では他の部品との開発タイミングにずれがあり、その既存部品の制約により理想構造が取れない場合が発生する。そこで今回の SKYACTIV-BODY の開発においては、4 番目のコンセプトとして下記に取り組んだ。

- ④ 車両トータルでもベスト

開発の初期段階から企画・開発・生産の各部門が協調して従来の制約や常識を見直し、パワートレインを含めた車両全体の新規開発を同時に進めることでお互いの理想構造

を造り込み、お互いがベストの構造を ONE MAZDA の精神で決定した。

2.3 理想構造化のプロセス

理想構造を構築するのに当たり

- 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について、同様に検証を繰り返した (Fig.2)。

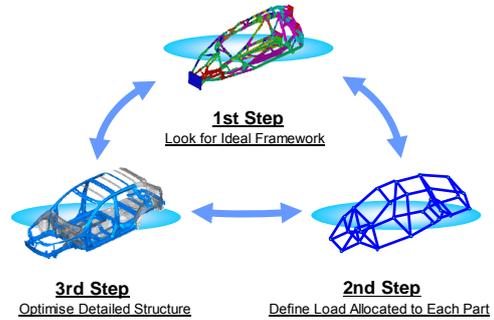


Fig.2 Development Approach

3. 目標性能実現に向けたボデー構造の理想化

CX-5 の構造の特徴を狙いと適用技術を含めて紹介する。

3.1 フロントフロア下フレーム

原理原則に基づきフロントフロア下フレームをストレートに配置し、フロントフレームとリヤサイドフレームを連続して結合する構造を発想した。しかし、自他車種をベンチマークしてもクロスカントリの一部の車種を除き SKYACTIV-BODY 構造と同じ車は存在しなかった。この発想が正しいのか CAE 解析により検証を重ねた。これまでの構造に加え様々なケースで解析を実施し CX-5 の構造が最も衝突安全性や車体剛性に有利であることを確認した (Fig.3) (動画 B_FRAME)。

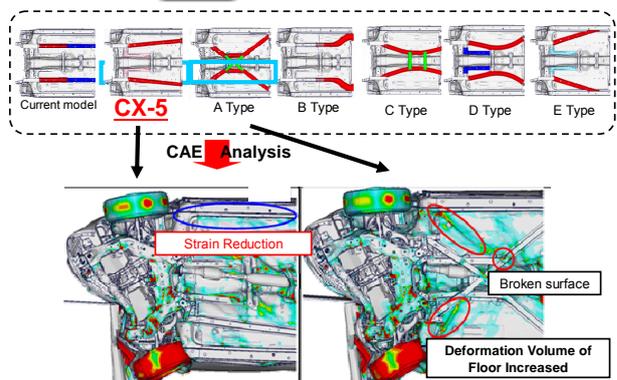


Fig.3 CAE Analysis

ベンチマーク結果を技術的に分析し、詳細構造の決定に反映した。検証を積み重ねることで、確かな開発を行った。

3.2 環状構造

ボデーストラクチャにおいて、ドアやリフトゲート部の大開口部による剛性や強度低下を、どう補うかがポイントとなる。また、サスペンションからの路面入力や衝突入力に対して入力点に適応する部材を配置するが、車両として性能目標を達成するにはその個々の部材を連続する一つの部品として機能性を上げる必要がある。

CX-5 では 4 つの部位に車体の骨格を継ぎ目なく連続する環状構造を設定し、効果的に機能性を向上している (Fig.4)。この構造によりデザイン要素にて最外板面を変動させても骨格としての強度は影響を受け難くなり、デザインテーマと性能目標の両立を実現した。

特に①フロントドアからリアドア開口部にかけて設定した環状構造はフロントサスペンションとリアサスペンションのストラットユニット取り付け部をダイレクトにつながり構造となり、操縦安定性能のリニア感を向上している。

この構造の実現においては通常溶接できない鉄板接合部にウエルドボンドを施工し、既存の車体の製造設備変更を最小限に止めながら実現した。

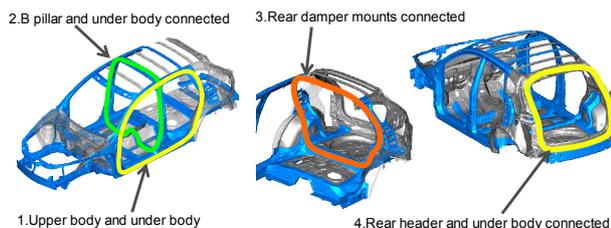


Fig.4 Continuous Structures

3.3 フロントボデーストラクチャ

SKYACTIV-BODYにて技術開発したマルチロードパス構造を CX-5 にそのまま適用することを実現した。衝突時の車両に受けるエネルギーを①エブロン②フロントフレーム③サスペンションメンバのマルチロードパスで吸収し、土台となるキャビンの環状構造でしっかりと支えることで、乗員生存空間を確保した。従来車では厚板となっていたフロントフレームの板厚を下げることで軽量化した (Fig.5)。

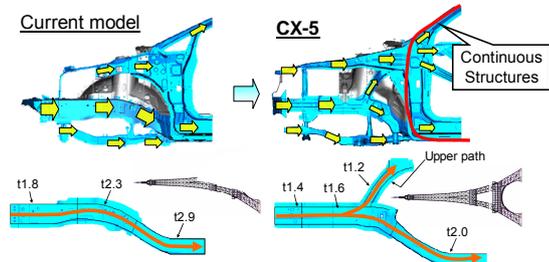


Fig.5 Front Body Structure with Multi-Load Path

3.4 デュアルブレース

(1) 車体剛性における各車体部品の寄与度分析

「走る歓び」に不可欠な操縦安定性を支える車体剛性値の向上に向けて品質工学の手法を用いて各車体部品の寄与

度を分析した (Fig.6)。その結果リヤフレームやリヤホイールハウス、リヤサスペンションハウジング部の寄与度が高いことが判明した。

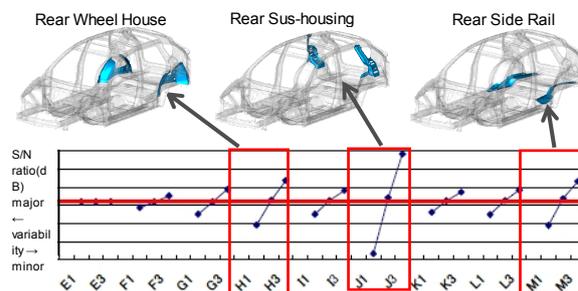


Fig.6 Contribute Significantly Analysis

しかしながらこれらの部品構造を 0 (ゼロ) から見直すことは既存の機能を失うリスクが高い。また、いたずらに板厚を厚くすることは、質量増加に直結し軽量化に相反する。

(2) 新構造の発想と具体化

寄与度の高い部品の結合強度を上げることで、相乗効果により効果的に車体剛性の向上を実現した。

具体的な構造の発想においては鳥居の足部構造などを参考にしながら、リヤサスペンションの固定部に合わせて寄与度の高い部品を効果的に結合するデュアルブレース構造を開発した (Fig.7)。本構造により、質量を犠牲にすることなく、信頼性の確保と車体剛性の向上を実現した。



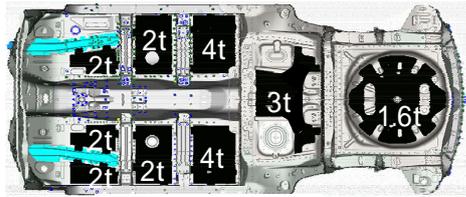
Fig.7 Dual Brace

3.5 塗布型制振材

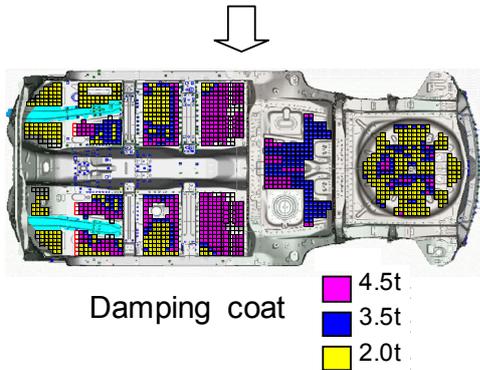
軽量化と生産性改善を目的に、フロア制振材を制振シートから塗布型制振材へ切り替えた。

CX-5 では、フロア形状を決めた上で、CAE 解析での最適化計算により、従来制振材と同等のフロア振動特性となる塗布パターンを導き出した。ただし、この振動特性の最適化だけでは、重量軽減による透過遮音性能が悪化するため、SEA (Statistical Energy Analysis) 解析と実機検証による遮音性能の寄与度分析結果から、性能を満足する塗布パターンを決定した (Fig.8)。

その結果、ロードノイズ性能をキープした上で、従来制振材比 2.4kg 軽量化を実現した。



Damping sheet



Damping coat
 4.5t
 3.5t
 2.0t

Fig.8 Setting Range

3.6 アンダークロスメンバ

CX-5 では人間が体が剛性感を感じる部位にこだわって構造を工夫した。特にエンジンの排気効率向上のために大きくなったトンネル部に関しては変形量を抑えるアンダークロスメンバを設定した。当部位の適正化についてはCAEにより、まず動的な模擬解析を行いサスペンションからの入力を求め、それをボデーモデルにインプットし変形の検証を繰り返した (Fig.9)。

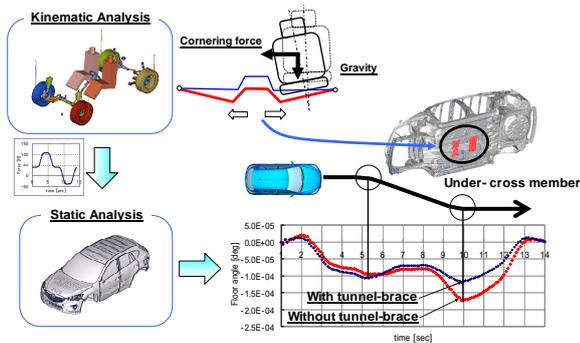


Fig.9 Under-Cross Member

3.7 空力性能向上構造

新しいデザインテーマ「魂動」を実現しつつ、環境と運動性能に直結する空力性能に向上を目指し、世界トップレベルの低 Cd プラットフォーム実現に取り組んだ。車両周りの流れの解析を行い、後流の上下の流れを制御して1カ所に集約させることによって、車両後部の乱流・渦の発生を抑制し、空気抵抗を大幅に低減するコンセプトを構築し、「その流れを実現するための構造の具体化」を実施した。

その結果、Fig.10 に示す、車両後端部の空気の流れを持ち上げる形状として、Fig.11 に示すフロア部・トンネル

部・タイヤ周り等の空気の流れを制御するアンダーカバー形状を見出した。

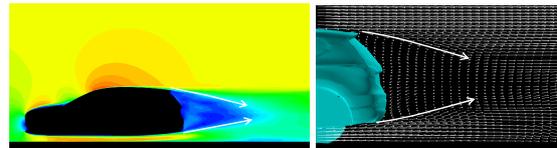


Fig.10 Aerodynamics Performance

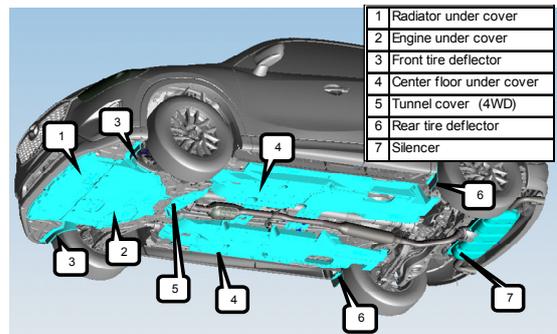


Fig.11 Under Cover

3.8 バンパレインの軽量化

ハンドリングのこだわりの一つとしてヨー慣性モーメントの低減を目指した。車両の前後端に位置するバンパレインの軽量化に取り組んだ。衝突時にエネルギーを吸収する必要機能を維持しながら薄板化して軽量化させるため、世界初となる 1,800MPa のホットスタンプ工法と材料を含め開発した。熱した鉄板をプレス加工と同時に冷却し焼き入れを行うホットスタンプ工法に対して開発を行い、エネルギー吸収性、プレス加工性と焼入れ性の全てが成立する部品構造を決定した。その結果約 4.8kg 軽量化しながら性能を満足した (動画: REINF_BUMP)。

4. VE 活動

4.1 歩留まり向上活動

板金部品は、そのコストの約 60%が材料費である。製品品質を原板材料で割った数値を歩留まりと呼ぶ。通常は歩留まり 60%程度であり、残り 40%は溶かしてリサイクルするが追加のエネルギーとコストを要する。CX-5 では開発の初期から歩留まり向上を意識した活動を実施した。一品一品の形状を吟味し個々の歩留まりを向上させるとともに、同じ板厚・材料の部品を集めて一枚の材料を無駄なく活用した。また、これまで捨てていた材料から違う製品を加工する残材活用や、部品の穴で別部品を同時加工する孫取り等を屈指し、ドアやリフトゲートなどのリッド部品を含め歩留まり 70%を実現した。

4.2 設備投資のミニマム化

溶接工程数の削減や金型数削減にも取り組み、設備投資を抑制した。例えば溶接工程では、部品の組み合わせにより、これまでは溶接作業を複数回に分けて行っていたが、1工程で溶接を可能とする構造に見直し、溶接機への投資を削減した。また、プレス加工では、複数回プレスして成形していたものを、形状工夫によりプレス回数を削減し、金型数を削減した。

5. CAE の取り組み

SKYACTIV-BODY から CX-5 での変更部位に注力し、性能確認を行いながら、材料歩留りや生産性を考慮した詳細設計を行っていくため、プラットフォーム開発の段階で3回、トップハット開発の段階で4回のCAE検証を実施した (Fig.12)。

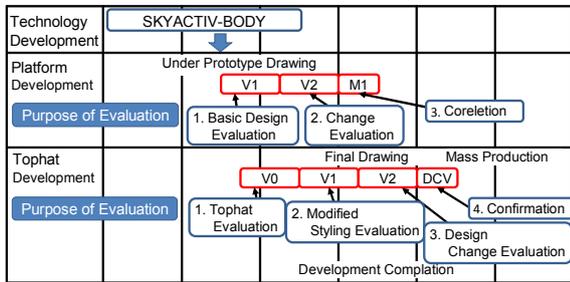


Fig.12 CAE Application Process

ここでは、CAE 検証の回数は従来の車種開発と同じとしながら、モデル作成の効率化や評価期間の短縮により、車体の金型作製に着手するまでのタイミングを早めている。また、プラットフォーム開発では試作車によるテストを行っているが、トップハットは量産金型を使った開発確認車での性能確認であり、CAE をはじめとした机上検証により詳細仕様を決定している。

取り組みの事例として、高剛性ボデー開発におけるリフトゲート開口部構造の改善について述べる。この部位はリヤサスペンションへの上下入力や旋回時の左右力を受けることにより、開口部の対角線が伸び縮みする変形が起こる。クルマとの一体感を実感できる走りや思いのままのコーナリングを実現するためには、この変形を小さく抑えていく必要がある。開発初期の CAE 結果より、環状構造による基本骨格の大幅な改善が見られるものの、断面の稜線やコーナの R 止まり部、SW 接合のための作業穴などの詳細な箇所には弱点部があることが分かったため、構造改善の CAE 検討を繰り返し実施しながら設計仕様を決定していった (Fig.13)。また、剛性アップによる質量増加を抑えるために、板厚感度解析や最適化などの CAE 手法を用いながら詳細設計を進めることで、車体構造の効率化を実現している。

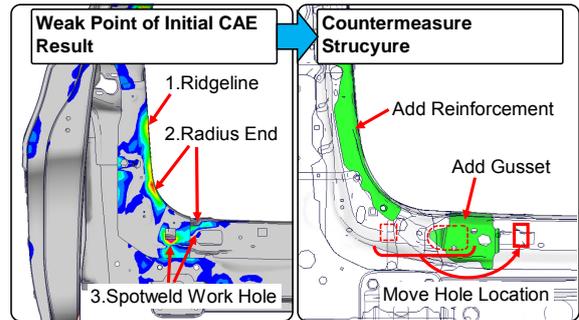


Fig.13 Rigidity Structure Improvement

6. 結果

6.1 車体剛性値

SUV の同セグメントにおいてトップクラスであり、欧州の CD クラスのプレミアムセダンと同レベルのねじり剛性値と軽量化指数を達成した (Fig.14)。

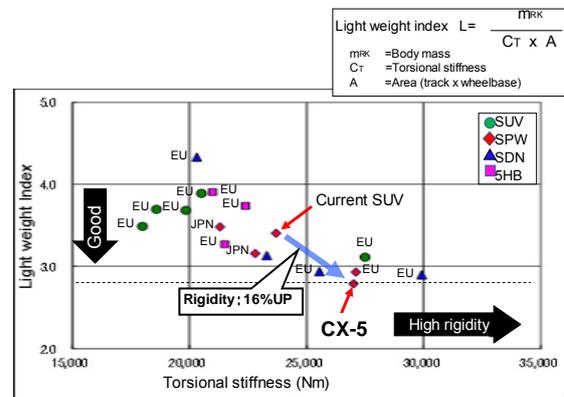


Fig.14 Light Weight Index

6.2 衝突安全性能

主要市場の NCAP を網羅的対応し、Euro-NCAP の 5 星獲得を皮切りにトップランクを獲得予定である。更に米国 IIHS (道路安全保険協会) による衝突安全試験で最高評価の「トップセーフティピック 2012」を獲得した。

6.3 軽量化

これまでに紹介した構造見直しや材料見直しにより、従来車から比べて 10% (36kg) 軽量化した。これは CX-5 と同セグメントの最軽量ラインより 8%軽い数値である (Fig.15)。

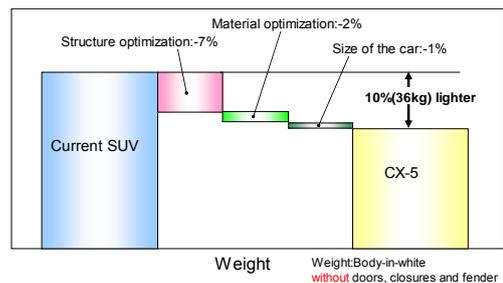


Fig.15 Weight Reduction

6.4 空力性能

SUV セグメントにおいてトップクラスの Cd 値と低リフト値を達成した (Fig.16)。

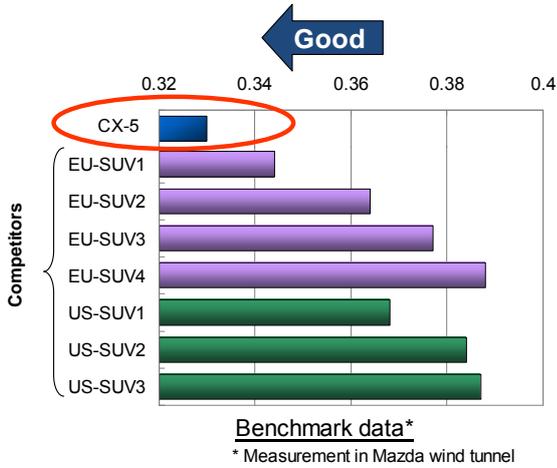


Fig.16 Aerodynamics Performance

7. おわりに

「技術があればできるはず」の精神で現時点では全ての面でベストな車体構造を実現した。今後も更なる技術のブラッシュアップを行い、全てのお客様に技術の進化を感じていただける商品を提供する所存である。

参考文献

- (1) 木村隆之ほか:SKYACTIV-Body, マツダ技報, No.29, pp.61-67 (2011)

■ 著 者 ■



木村 隆之



橋本 学



中内 繁



田中 祐充



近藤 量夫



岡田 義浩

特集：新型車 (CX-5)

21

CX-5 への発泡成形ドアモジュールの適用 Development of CX-5 Door Module Carrier Using Foam Molding Technology

梶山 智宏*1 高橋 知希*2 高橋 信之*3
Tomohiro Kajiyama Tomoki Takahashi Nobuyuki Takahashi

要約

近年のCO₂排出量削減や原材料費の高騰不安などといった背景から、自動車用プラスチック部品においても更なる軽量化と材料費低減が強く求められている。これを達成する手段として、高強度・高剛性な材料による薄肉化とともに、発泡技術による材料使用量低減が注目されている。しかしながら、発泡に伴う機械物性の低下が著しく、大幅な材料削減が困難であり適用部位も限られていた。

マツダは、超臨界流体を活用しコアバック法と組み合わせた射出発泡成形技術を開発し、微細な気泡構造を有し機械物性を保持した表層と、高発泡化で軽量な中心層を持つサンドイッチ気泡構造によって、機械物性の保持と大幅な材料削減の両立を可能とし、ドアモジュール基材に適用することで 20%以上の軽量化ポテンシャルがあることを確認している。

今回、この技術を CX-5 のドアモジュールに適用し量産化した。

Summary

The growing need to cut CO₂ emissions and concern about higher prices of raw materials have raised the need for drastic weight reduction and material cost saving for automotive plastic parts. Under such circumstances, in addition to the conventional thickness reduction technique using high-strength and high-stiffness materials, a reduction of material usage by use of foaming technology has drawn attention as a new approach to meet those requirements. The current foaming technology, however, only allows limited applications because of significant deterioration of mechanical properties.

We have developed an injection foam molding technology that uses super critical fluid as a foaming agent, in combination with the core-back process. With use of this technology, we have achieved a multi-layer cell structure, which consists of a micro-cell surface layer that retains mechanical properties and a highly-foamed light-weight core layer. This enabled us to significantly reduce material usage while maintaining mechanical properties. It has been confirmed that a door module carrier molded by use of this technology has the potential of 20% or more weight reduction.

We have applied this technology to the CX-5 door module carrier and made it into mass production.

*1~3 ボデー開発部
Body development Dept.

1. はじめに

自動車部品の軽量化及びコスト削減を達成する手段として、周辺部品の機能統合や一体化によって VE (Value Engineering) を図る機能統合型モジュール化が進み、モジュール基材も樹脂材料を使用して軽量化の取り組みが多く見られるようになった。マツダではガラス繊維強化ポリプロピレンの高い強度と射出成形の形状自由度を両立する新たな射出成形技術を開発し、2002 年よりフロントエンドモジュール及びドアモジュールの基材として実用化してきた。軽量高強度な樹脂材料の適用から、高い形状自由度を生かしてブラケット類との一体化、防水機能の統合などによって重量低減及びコスト削減を達成している。

しかしながら、近年のCO₂排出量削減や原材料費の高騰不安などといった背景から、モジュール基材やその他の硬質プラスチック部品の更なる軽量化及び材料費低減が必要となってきている。これを達成するアプローチとして、素材そのもの高強度化・高剛性化による薄肉化とともに、発泡成形技術による低比重化が注目されている。

マツダは、超臨界流体 (supercritical fluid, 以下 SCF) を発泡剤とし、コアバック法と組み合わせる気泡構造をコントロールする独自の射出発泡成形技術を開発し、高発泡倍率で低密度な中心層と、微細発泡によって機械物性を保持した表層を有するサンドイッチ気泡構造を形成することで、ドアモジュール基材において 20%以上の材料削減と実用性を満足する性能を両立させる基礎技術を確立した。今回これを CX-5 のドアモジュール (Fig.1) に採用することを決定し、詳細仕様の確定と検証を実施した。

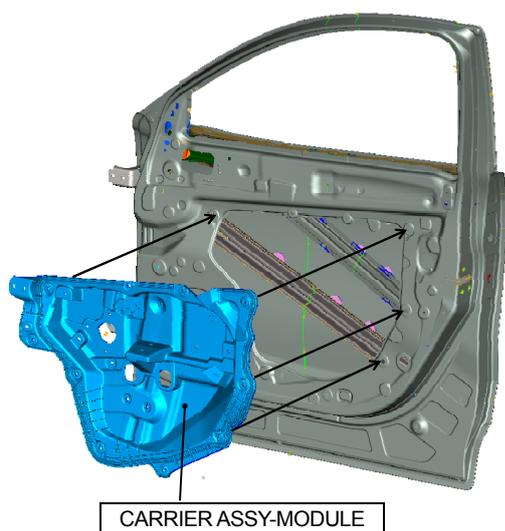


Fig.1 CX-5 Door Module

2. 詳細仕様の決定

2.1 ガラス繊維含有量の決定

従来の成形法によるドアモジュールでは、必要な剛性・強度を確保するため、ガラス繊維を 25~30%程度

混合させている。一般的に、ガラス繊維の含有量が大いほど、剛性・強度は高くなる。一方で、製品質量や原材料費が高くなり、成形時の流動性や成形後の寸法精度が悪化することが知られている。

これまでの開発経過から、発泡成形技術を用いた場合、剛性・強度いずれも従来品同等以上の性能を得られることを確認している。発泡成形技術を採用するにあたり、その軽量化と原材料費低減効果を最大化するため、ガラス繊維含有量を従来比以下とすることを目標として、これまでの検証結果を踏まえ、ガラス繊維の混合率を 23%に決定した。

2.2 非発泡領域の設定

発泡成形技術を用いた場合、板厚方向の寸法は従来品より大きくなり、またその精度も出し難い。ウィンドレギュレータなど、モジュールに装着する装備品で従来成形のモジュール板厚に合わせて寸法が標準化されている締結部や、高い寸法精度が求められるシール面など、発泡成形技術と同時に適用することが困難な部位が存在する。

そこで、1 つのドアモジュール内に発泡させる領域とさせない領域を設定することとした。具体的には、コア型を 2 分割した上で、コアバックさせる領域とさせない領域を設定することにより、必要な部位において従来品と同等の寸法と精度を確保した。

3. CX-5 採用に向けた検証

3.1 側面衝突性能の適合性検証

(1) 基本物性からの影響予測

材料強度やシャルピー衝撃値の物性値が変化すると割れる部位や大きさが変わり、側面衝突性能に影響する。しかし、材料の物性値は、曲げ弾性率、曲げ強さ、シャルピー衝撃値においていずれも等価以上になることを確認しており、側面衝突性能には大きく影響しない見通しを得ていた。

一方で、等価以上になると、側面衝突時の破壊モードによるモジュールの破断箇所などが変わり、トリム破壊へ影響を及ぼし、衝突ダミーへのエネルギー入力が大きくなるなどの懸念があった。

(2) 試作品による先行検討

従来成形品と発泡成形品でユニット評価を実施し、比較評価を行なった結果、発泡成形品ではモジュール締結部の座面が抜け、従来品よりも低い荷重で破壊が発生するため、締結部の周辺形状の剛性アップと応力集中させない形状への変更が必要となった (Fig.2)。

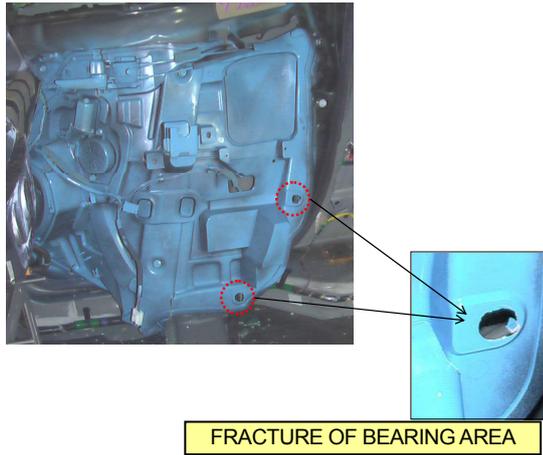


Fig.2 Fracture of Bearing Area

3.2 CAE による解析検討

(1) CAE による机上予測

先行評価の結果を受けて、LS-DYNA（構造解析ソフト）を用いて詳細 CAE 解析を実施し検討・検証活動を行った。縮結部では、従来と同じ構造・剛性（未発泡）であるため、着想するポイントとして、取り付け部周辺の剛性アップを検討した結果、縮結部中心より放射状に細かいリブ形状を設定する、リブ形状に大きく形状差をつけないなどの工夫をすることで、応力集中させないことと、剛性アップということを同時に実現した（Fig.3）。

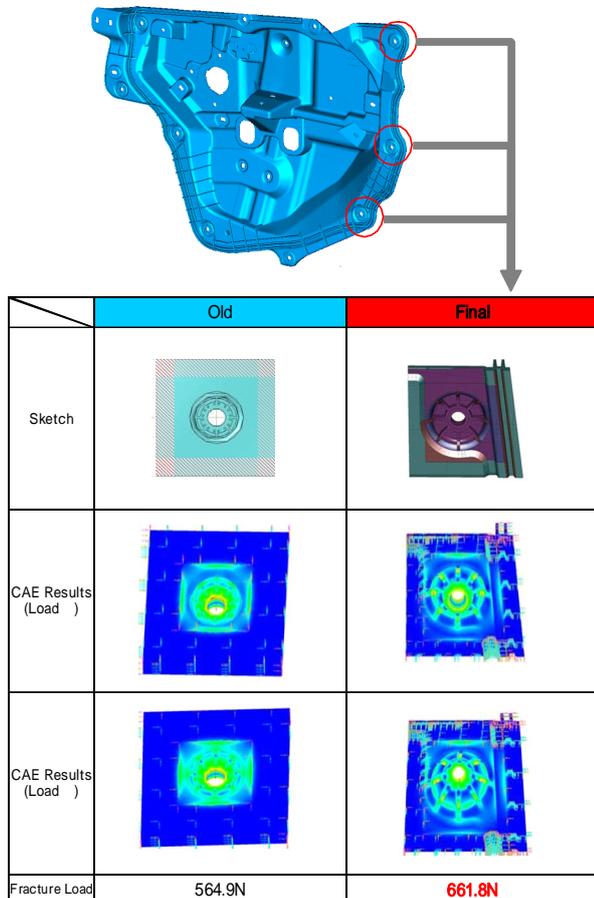


Fig.3 Bearing Area CAE

一方、トリムの側突パットとラップしているモジュール縦壁部分の剛性が高すぎて、衝突時に潰れず、狙いの EA（Energy Absorption）ストロークが確保できず、ダミー傷害値が高くなるという懸念があることが分かった（Fig.4）。本部位は縮結部とは逆に剛性を低下させる必要があり、縮結周りとは排他的な要件を両立する必要があった。

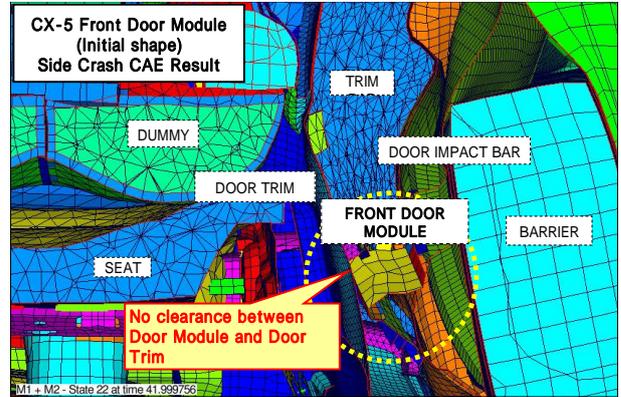


Fig.4 Side Crash CAE Results

従来、本部位は、モジュールを一部カットし剛性の低い別パーツを設定するという手段を取ったが、本部位付近に縮結されるウィンドレギュレータ取り付け剛性を低下させる、部品が増えてコストアップとなるなどの理由から、カットせず、また縮結周りのリブ形状も変更することなく、モジュール縦壁部形状を変更し、衝突（バリア侵入）方向に対してのみ剛性が落ちるような形状とした（Fig.5）。

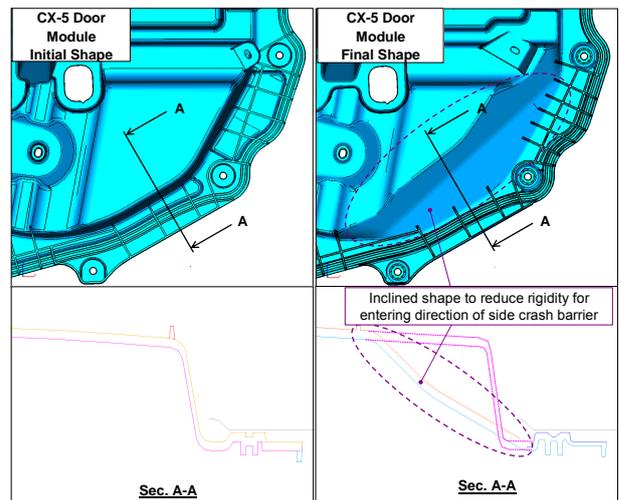


Fig.5 Shape for Side Crash

(2) 部品ユニット評価の結果と解析との比較

CAE 検証の検討結果を織り込んだ製品を、ユニット評価した結果、解析の狙い通りで問題は発生しなかった。

Fig.6 にユニット評価結果と、解析結果の比較を示す。ユニット評価結果と解析結果から、応力集中位置・割れ発生起点など相関が取れることが確認でき、今後の車種開発でも有効であることが分かった。

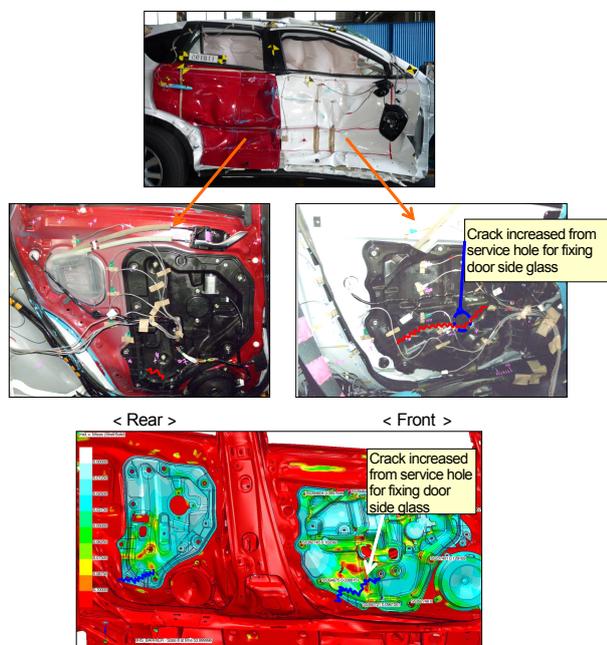


Fig.6 Comparison of CAE and Unit Test Results

3.3 その他検証・育成

(1) 締結部の強度検証・育成

ドアモジュール自身の締結部や、ウィンドレギュレータ等ドアモジュールに装着する装備品の締結部強度について、CX-5 の本型品を使用し評価・検証を実施した。評価の際は各部位の規定締結トルクに留めず、破壊に至るトルクとその破壊状況を、従来成型品と比較する形で実施した。

初期評価の結果、ウィンドレギュレータのガイドレール BRKT 下部締結の逃がし穴において、部品バラツキ最大状態を模擬した場合に、シールリップの白化を認めた。対応として、部品公差を詰めた上で逃がし穴を小径化し、部品バラツキ最大状態におけるボルトフランジとシールリップのラップ量を増やす修正を行い、応力レベルを緩和させることで解決した。これにより全ての締結部において従来成型品と同等以上の強度を確保した。

(2) 寸法精度の評価・育成

従来成形によるドアモジュールでは、成形時の反り等により、外形形状やシール面の精度出しのために何度も型修正や条件修正を実施していたが、今回の発泡成形ドアモジュールにおいては、成形時の流動性や成形後の剛性が改善している効果もあり、より少ない修正回数にて狙いの精度を出すことができ、短期間で育成が可能となった。

4. まとめ

発泡成形技術を用いたドアモジュールを適用することで以下の結果を得ることができた。

- (1) 軽量化：従来車種比 フロント 19%、リア 25%低減
投影面積辺りの質量を図に示す (Fig.7)。
- (2) コスト：材料費 27%削減、成形加工費 20%削減
各々の削減量を図に示す (Fig.8)。
- (3) 製品育成：型修正回数半減
育成に要した型修正回数を図に示す (Fig.9)。

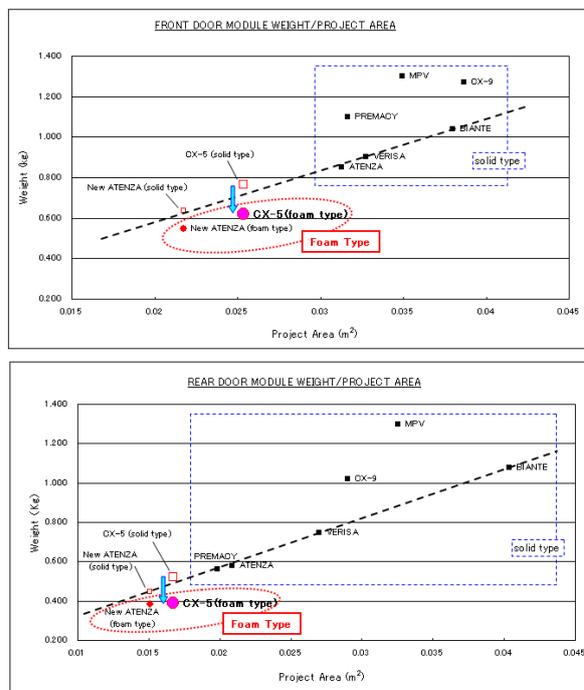


Fig.7 Module Weight-Project Area Fr-Rr

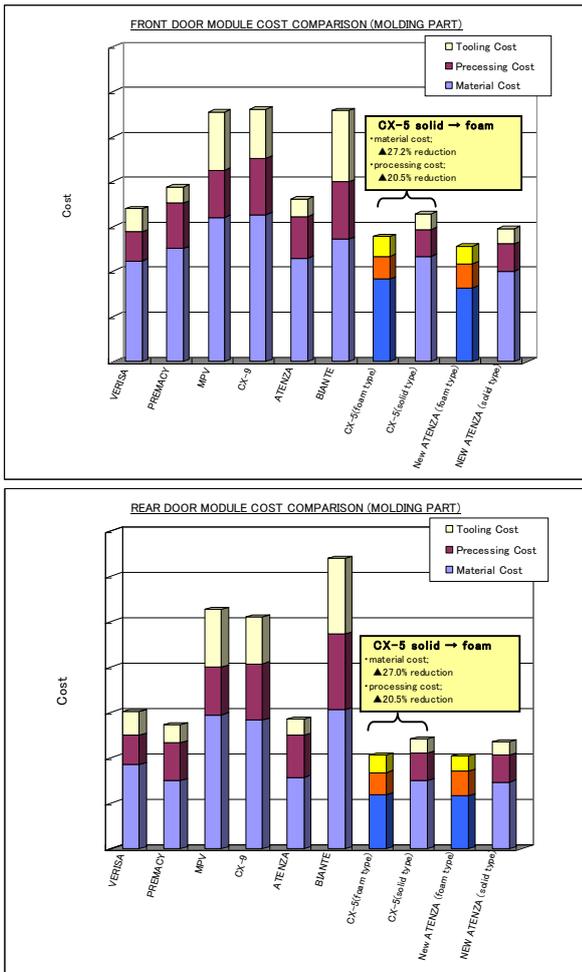


Fig.8 Cost Comparison

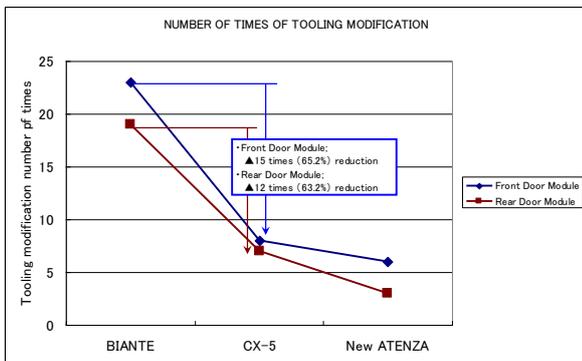


Fig.9 Number of times of Tooling Modification

5. おわりに

この技術を適用したドアモジュールを今後開発する各車種に標準採用するとともに、今回未発泡領域とした、締結部、シール面など更に発泡領域を拡大して軽量化を進めていく予定である。また、ドアモジュール基材以外の樹脂部品にも広く応用展開することによって、樹脂使用量削減と部品の軽量化を進め、サステイナブルな自動車作りに貢献していく。

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ダイキョーニシカワ㈱の皆様にご感謝の意を表します。

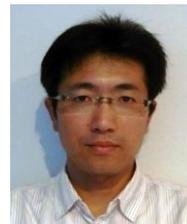
参考文献

- (1) 小川ほか：発泡成形技術を用いたドアモジュール基材の開発
マツダ技報, No.27, pp21-25 (2009)
- (2) 吉田ほか：ドアモジュールの開発,
マツダ技報, No.20, pp.103-107 (2002)

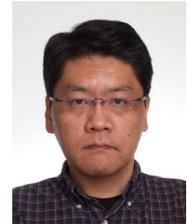
■ 著 者 ■



梶山 智宏



高橋 知希



高橋 信之

特集：新型車（デミオ EV）

22

デミオ EV の紹介 Introduction of Demio EV

藤中 充*1
Mitsuru Fujinaka

梅垣 康治*2
Koji Umegaki

吉田 浩之*3
Hiroyuki Yoshida

要約

デミオ EV は、独自開発の EV 技術により、EV においても“Zoom-Zoom”な走り感を実現するとともに、一充電当たり 200km の航続距離も実現した。また、電気駆動ユニットをコンパクト化したことで、ベース車と同等のスペースユーティリティを確保した。更に、100V 給電システム、予約充電などのユーザーサポート機能を持つ IT サポートシステムを装備する等、機能の充実を図った。

本稿では、開発目的及び、上記特長を実現する主要コンポーネント、また車両としての、安全性・耐久性などの諸性能について述べる。

Summary

Adopting the unique developed EV component technology, the Demio EV realized Zoom-Zoom drive feel and 200km driving range for one charge. Also, the EV drive units were miniaturized, securing almost the same space-utility as that of the base vehicle. The 100V electric supply system and IT support system which supports users in charge reservation and so on are also adopted to improve vehicle utility functions.

The development purposes, vehicle outline including the safety and durability, and main components are introduced in this paper.

1. はじめに

近年の環境意識の高まりに加え、EV 市販化等により、国内では EV への関心が強まっている。それに伴い、自治体や一部の民間企業が主導する、充電ポイントの整備も進んでいる。

一方、北米ではカリフォルニア州を筆頭に、ZEV 規制を強化し EV 販売が必要となる自動車メーカーの拡大と台数要件を強化する動きが出てきており、自動車メーカーとして EV の市販化は必須で対応すべき要件になりつつある。

マツダは 1966 年に EV 開発に着手、現在までに約 70 台の EV を市場に投入してきたが、このような社会環境の変化に伴い、本車両で将来の本格量産に向けて備えを作る。

デミオ EV の開発目的は、マツダのクルマ作りの方向性を EV においても具現化するために必要な要素技術開発を行うとともに、限定リース販売を通じて、製造から販売、サービス、廃却に至る自動車メーカーとしての一連の活動における知見を蓄積することにある。

2. デミオ EV で実現した性能

2.1 EV で実現した“Zoom-Zoom”な走り

(1) 気持ちの良い加速

モータは、ゼロ回転から最大トルクを発生するだけでなく、発生させる出力の緻密な制御が可能である。この特長を生かし、自然な発進フィール、リニアなレスポンス、滑らかな加速の3つの注力点で、アクセル操作に対する出力制御の開発を行い、EVでも“気持ちの良い加速”を実現した。

*1~3 商品本部
Product Div.

① 自然な発進フィール

アクセル操作から加速開始までの応答時間を最適化した。リアリティ重視のトルク特性と合わせ、自然なフィーリングを実現した。特に、発進時にはEVならではの質的な加速を体感できる。Fig.1にアクセルオン直後の加速度の時間変化を示す。

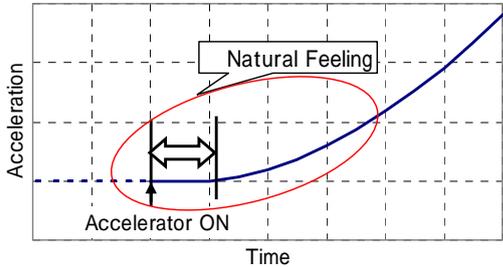


Fig.1 Acceleration Just After Accelerator ON

② リニアなレスポンス

Fig.2にベース車（デミオ1.3L 4AT）とデミオEVの加速度の時間変化を示す。ベース車では、発進後に2次関数的に加速度が変化するのに対して、デミオEVでは直線的に変化、加速中のアクセル操作に対して、応答の遅れがなくリニアに加速度が立ち上がる特性を実現した。

③ 滑らかな加速

同じく Fig.2 に示すように、ベース車では、エンジンの出力特性と変速の影響で加速度がピーク到達後に急激に落ち込み、運転者が減速感を感じる。一方、デミオEVでは、ピーク到達後の加速度が緩やかに変化、運転者に減速感を感じさせない滑らかな加速感を実現した。

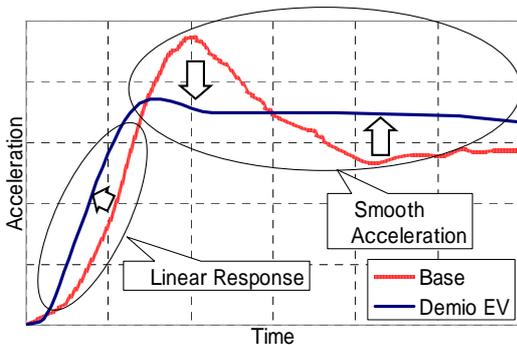


Fig.2 Comparison of Acceleration

(2) 乗り心地とハンドリングの両立

EV化に伴い、車室内の静粛性を大幅に向上させたとともに (Fig.3), バネ上バネ下重量比を改善し、上質な乗り心地を実現した。更に、前後の重量配分もベース車の65 : 35から60 : 40に変更、50 : 50に近づいたことで、ハンドリングも軽快になった。

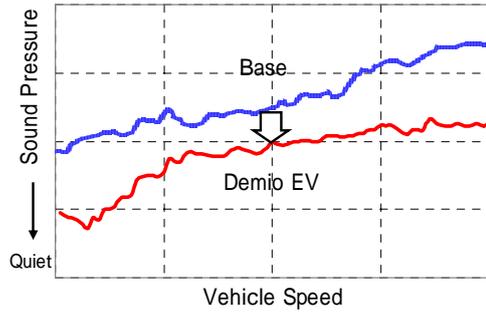


Fig.3 Comparison of Sound Pressure

2.2 一充電当たり 200km の航続距離

(1) バッテリー

デミオEVは、小型、高密度化とともに、ケースのアルミ化等により軽量化した、電池容量 20kWh のリチウムイオンバッテリーを搭載している。ベース車の高い燃費ポテンシャルと相まって、JC08 モードで一充電当たり 200km の航続距離を実現した。

(2) 減速エネルギー回生システム

既存のブレーキシステムを併用するシンプルかつ高効率な減速回生システムを新規に開発した。このシステムは、アクセルオフ時にエンジンブレーキ相当の回生を行うだけでなく、ブレーキオン時も回生を行う。その際、ブレーキ踏み込み量に応じて回生量を増大させると同時に摩擦ブレーキを併用させることで、減速エネルギーの回生と自然なブレーキフィールを両立している。Fig.4 に回生制御の概念図を示す。

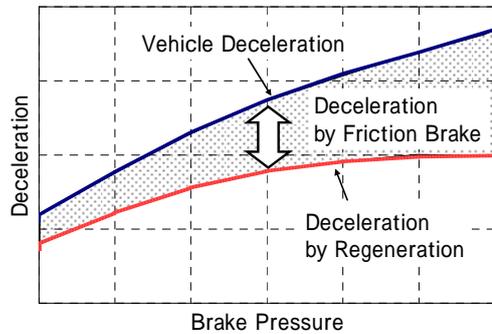


Fig.4 Concept of Regeneration Control in Braking

2.3 パッケージング

モータ、トランスアクスルなどの駆動システム、及びインバータ、DC-DC コンバータ/車載充電器をモーター室内に配置した。また、駆動用バッテリーパックをフロア下に搭載することで、ベース車のスペースユーティリティを犠牲にしないパッケージングを実現した。また、リヤのスペアタイヤパン内には 100V 給電システム（メーカーオプション）の搭載が可能である。Fig.5 に各コンポーネントの搭載図を示す。

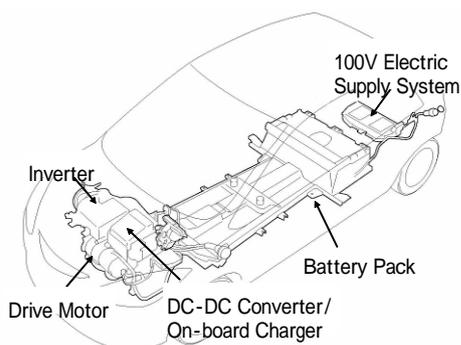


Fig.5 Installation of Each Components



Fig.7 Meter Set



Fig.8 Power Meter



Fig.9 Multi Information Display

2.4 その他の特長

(1) 走行モード

デミオ EV では、通常走行用の D レンジのほかに、エコな運転をサポートできるように、アクセル操作に対する出力の発生を緩やかにし、かつ、減速時の回生エネルギー量を増加させた E レンジを設定している。更に、D/E 両レンジで使用可能なチャージスイッチ (Ch スイッチ) を備えており (Fig.6)、①D ②D+Ch ③E ④E+Ch の 4 つの走行モードを選択することができる (Table 1)。

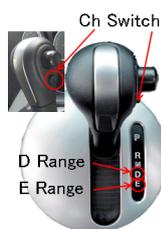


Fig.6 Shift Panel & Ch Switch

Table 1 4 Driving Mode

Shift Pos.	Ch switch	
	Off	ON
D	Acc.	Acc.
	Regen.	Regen.
E	Acc.	Acc.
	Regen.	Regen.

Acc.: Acceleration Force
Regen.: Regeneration Energy

(2) メータ表示

ベース車のメータセットの基本的な構成を踏襲しながら、EV として必要な機能を付加した。Fig.7 にメータセットの外観を示す。中央にスピードメータを配置し、その左側に車両の充放電状態を表示するパワーメータを配置した (Fig.8)。パワーゾーンは放電状態 (出力)、チャージゾーンは充電状態 (回生) を表す。また、右側には、マルチインフォメーションディスプレイ (MID) を配置した。MID には、オドメータ、トリップメータ、シフト位置、外気温、駆動用バッテリー残量を表示、更に、走行可能距離、平均車速、瞬間電費、平均電費といった情報を任意に切り変えて表示することができる。また、各種警報も表示される。Fig.9 に表示例を示す。

(3) 充電システム

AC200V 電源から充電を行う普通充電と、CHAdeMO (チャデモ) 規格に準拠した充電器による急速充電の 2 つの充電方式に対応している。車両左側面の後方に普通充電用 (Fig.10)、前方に急速充電用 (Fig.11) の充電口を配置している。



Fig.10 Normal Charge Lid



Fig.11 High Speed Charge Lid

普通充電では、バッテリー残量計の表示がゼロの状態から満充電まで約 8 時間、急速充電では、同じくバッテリー残量計の表示がゼロの状態から SOC (State of Charge) 80% まで約 40 分で充電が可能である。

(4) IT サポートシステム

デミオ EV は車載通信機 (DCM: Data Communication Module) を搭載しており、スマートフォンや PC を介して、ユーザがリモート充電、エアコンのリモート操作、及び、

駆動用バッテリーの状態チェックが可能である。また、車両走行データ、主要な電気駆動ユニットの作動状況等の車両情報を専用サーバに収集することができる。

(5) 100V 給電システム

100V 給電システムをリヤトランクルーム内に搭載した。これにより、駆動用バッテリーに蓄えた電力を、車両から直接 AC100V の電気機器に最大 1,500W まで供給することが可能である (Fig.12)。



Fig.12 100V Electric Supply System

(6) 車両接近通報装置

EV は走行騒音が非常に小さい。そこで、駐車場や街中などで歩行者に車両の接近を通報するため 25km/h までの速度で作動する車両接近通報装置を装着した。この装置は、インパネに配置されるスイッチにより、任意に OFF することが可能である。

(7) 空調システム

EV 専用の空調システムとして、PTC (Positive Temperature Coefficient) ヒータで直接温風を暖める即温式の暖房システムと電動コンプレッサを使用した冷房システムを採用した。

3. 車両概要

3.1 車両諸元

Table 2 に車両諸元を示す。

Table 2 Vehicle Specifications

Size (Length x Width x Height)		3900 x 1695 x 1490mm
Weight		1180kg
Seat Capacity		5人
Max Speed		130km/h
Driving range (JC08mode)		200km (Internal measurement)
Motor	Type	Permanent Magnet AC Synchronous Motor
	Max Power	75kW
	Max Torque	150N・m
Drive system		FF
HV Battery	Type	Lithium ion
	Nominal Voltage	346V
	Capacity	20kWh

3.2 デザイン

標準で装着される左右 Fr. ドアとリヤバッジ下のデカール (Fig.13) の他に、大型のデカール (Fig.14) も選択が可能である (受注対応)。



Fig.13 Decals in Side & Rear



Fig.14 Large Decals

3.3 安全性・耐久性

(1) 乗員保護

デミオ EV では、ベース車のボデー構造を流用した。社内衝突試験により、ベース車と同等の乗員保護性能が確保されていることを確認した。

(2) 高電圧安全

① 高電圧部品の配置

高電圧部品を、強度の高い車体骨格の内側に配置することで、衝突などの外部からの衝撃から高電圧部品を保護する構造とした。

② 感電防止

高電圧部品への接触による感電を防止するために、高電圧部品は、通電部に人体が直接触れない場所に配置した。

また、高電圧部品のケースと車体を等電位化することで、高電圧部品の絶縁抵抗が低下した場合でも、人体に電流が流れない構造とするとともに、衝突・故障を検知した場合には、高電圧回路を自動的に遮断、回路内の残留電荷を放電するシステムを搭載している。

更に、修理作業などの際に、誤って触れることを防止するため、警告ラベルの貼りつけやオレンジ色の高電圧配線の採用により認知性を向上させた。

(3) 耐久・信頼性評価

高温/低温テスト、冠水路走行テスト、高圧洗車テスト、路面干渉テスト、強度テストなどの各種耐久/信頼性評価を実施、ベース車並みの信頼性があることを確認した。

また、EV として高電圧/大電流を扱うことにより懸念される、発生電磁波の外部への影響や、搭載の電子制御機器に対する外来電磁波の影響についても、入念な EMC (Electro-Magnetic Compatibility) 試験を行い、一般車両と同等であることを確認した。Fig.15 に EMC 評価の様子を示す。



Fig.15 EMC Test

4. 主要コンポーネント

4.1 バッテリーパック

セル単体に 18650 型のリチウムイオン電池 (Fig.16) を採用した。このセルを並列・直列に接続してモジュール化し、バッテリーコントロールユニット、電装品等も含め、冷却性能も考慮した最適な配置にすることで、信頼性と高エネルギー密度を両立したコンパクトな駆動用バッテリーパックを実現した。これにより、容量 20kWh のバッテリーをフロア下に配置することが可能になった。



Fig.16 18650 Battery Cell

4.2 電子式巻線切り替えモータ

プレマシーハイドロジェンRE ハイブリッドで採用した電子式巻線切り替えモータを進化させた新開発のモータを採用した^①。

電子式巻線切り替えモータは、Fig.17 に示すように、回転数に応じて、巻線を切り替えることにより、通常のモータでは、低回転時の力強さと高回転時の伸び感のどちらか一方の特性しか持ち得ないのに対して、巻線切り替えモータでは、一つのモータで低回転時の力強さと高回転時の伸び感を両立することが可能になる (Fig.18)。その結果、同サイズであれば、通常のモータに比べて高回転/高トルク化が可能になる。Fig.19 にモータの外観を示す。

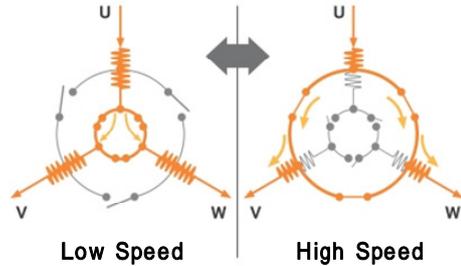


Fig.17 Concept of Winding Change

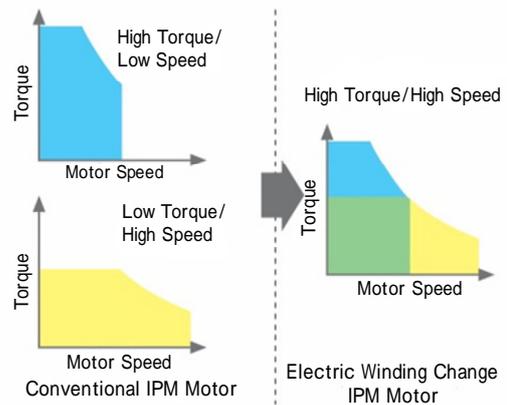


Fig.18 Torque-Speed Characteristic



Fig.19 Motor



Fig.20 Inverter

4.3 インバータ

駆動用バッテリーからの直流電圧を交流に変換、走行に必要な電力をモータに供給する。減速回生時には、モータで発電した交流電流を直流に変換し、駆動用バッテリーに蓄電する (Fig.20)。

4.4 DC-DC コンバータ/車載充電器

12V バッテリーの充電、オーディオ、灯火等 12V で動作する電装品に電力を供給する。普通充電用の車載充電器と一体構造となっている。

5. おわりに

デミオ EV は、EV 化に伴い、動力性能、ハンドリング、静粛性、乗り心地のすべての領域を新開発し、EV として独特の“Zoom-Zoom”な走り感を実現した。また、バッテリーをメインとする電気駆動ユニットの軽量化、シンプルかつ高効率な減速回生システムの採用等により、JC08 モードで一充電当たりの走行距離 200km (社内測定値) を実現した。更に、バッテリーパックの小型・高密度化により、ベース車と同等のスペースユーティリティを確保、EV として

の走る楽しさと実用性を両立することができた。

これらにより、マツダの現在のクルマ作りの方向性をデミオEVでも具現化できたと考えている。

本車両は2012年8月に改造申請により認可を取得、同年10月から中国地方の地方自治体や法人顧客を中心にリース販売を開始した。EVがユーザに提供できる価値を具体的に検討する材料として、本車両を活用していきたいと考えている。

参考文献

- (1) 若山ほか：ハイドロジェンREハイブリッドシステムの開発, [マツダ技報](#), No.27, pp.31-35 (2009)

■ 著 者 ■



藤中 充



梅垣 康治



吉田 浩之

特集：新型車（デミオ EV）

23

デミオ EV の電子式巻線切り替えモータドライブの開発

Development of Motor-Drive with Electronic Winding Change System for Demio EV

佐藤 隆之*1
Takayuki Sato新富 将克*2
Masakatsu Shintomi瀬尾 宣英*3
Nobuhide Seo

要約

電気自動車（EV）の普及促進には、航続距離は重要な改善課題の一つである。この課題に対して、このたび開発した「デミオ EV」では電子式巻線切り替えモータドライブシステムを採用し、効率を向上させること、およびシステム自体を小型軽量化することで航続距離改善を図っている。この巻線切り替えとは、低速回転用と高速回転用の異なる二つのモータ巻線を電子デバイスにより切り替えるシステムである。二つのモータ巻線はそれぞれの割り当て回転範囲において高効率に設計されており、二つを巻線切り替え機構で切り替えることによって広範な領域で高効率を実現している。また巻線を切り替える際に発生するトルクショックを抑制する制御を織り込んでおり、切り替えを感じさせない走行フィールを実現している。本稿ではこれら巻線切り替えシステムおよび巻線切り替え時の制御について述べる。

Summary

For the popularization of EV, the short driving range is one of the most important task. To improve this task, Mazda's DEMIO EV adopts the electronic winding change system that makes to improve its efficiency and reduce its size and weight. This winding change system consists of two windings for low and high speed range, and switches the windings by the electronic devices. The each winding is designed to be high efficiency at the each speed range. Therefore, with coupling two windings, the high efficiency is realized on the wide speed range. In addition, the torque pulsation suppression control technology which is actuated when winding is changed enables seamless dynamic performance. The electronic winding change system and the control at winding changed are explained in this paper.

1. はじめに

近年の環境意識の高まりに伴って、走行中に二酸化炭素を排出しない電気自動車（EV）への関心が強くなってきている。自動車各社の取り組みにより一般ユーザへの認知度は向上したが、更なる普及には航続距離の延長が望まれている。このたび開発した「デミオ EV」では電子式巻線切り替えモータドライブシステムを採用して効率を向上させること、およびシステム自体を小型軽量化することで航続距離延長に貢献している。また巻線切り替え時のトルクショック等を抑え

る制御を織り込むことによって伸びやかでストレスのない走行フィールを実現した。その開発内容を報告する。

2. 巻線切り替えシステム

2.1 巻線切り替えとは

EV 用をはじめとする電気駆動用モータに対する要求性能として、低速回転域では段差乗り越えなどの対応のため高トルクが必要であり、かつ高速巡航に対応するため高回転も可能でなければならない。しかしながらこの高トルクと高回転という要件は相反する性質がありモータ構造は異

*1~3 電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office

なってくる。例えば高トルクに対応する場合は巻線数を増やす必要があるが、一方の高回転域ではその増やした巻線と永久磁石によって大きな誘起電圧が発生して所望のトルクや回転数に到達できないことがある。またその逆の高回転域でのトルク、回転数を達成するために巻線数を低減すると低速での高トルクを発生できないことがある。一つのモータで銅損と鉄損のトレードオフを探り、この高トルクと高回転の要件を両立させることは可能ではあるものの、その際は高効率な運転エリアが縮小する傾向となる。

本開発では一つのモータでこれらの要求性能を満足させるための手段として巻線切り替え技術を用いている。その内容について述べる。

Fig.1 に本開発で採用した電子式巻線切り替えの概念図を示す。

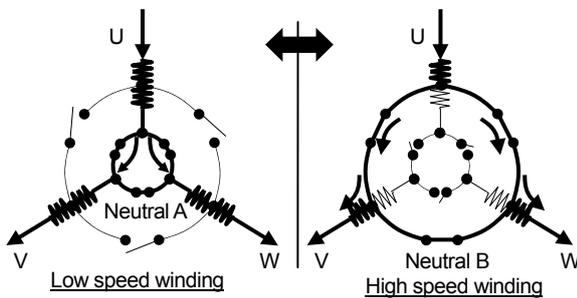


Fig.1 Conceptual Diagram of the Electric Winding Change

開発したモータは永久磁石同期モータであるが、そのステータ巻線は回転数に応じて電子デバイスによって巻線数が選択可能な構造となっている。具体的には高速用と低速用の二つの中性点を備えておりこれを切り替えている。例えば低速回転時はスター結線の中心側の中性点 A (Neutral A) を導通させて全巻線を使用し高トルクを発生する。これを低速巻線 (Low speed winding) と称する。一方で高速回転時にはそれぞれ三相の巻線途中の中性点 B (Neutral B) を導通させて短い巻線のスター結線を構成し、ロータ内の埋込永久磁石による誘起電圧の影響を低減して高回転特性を実現している。これを高速巻線 (High speed winding) と称する。これら低速巻線、高速巻線はそれぞれの使用範囲で高効率となるように設計されており、巻線切り替え機構で両巻線の高効率部分を連結することにより従来の永久磁石同期モータよりも広い回転数範囲で高効率なモータドライブが可能となっている (Fig.2)。

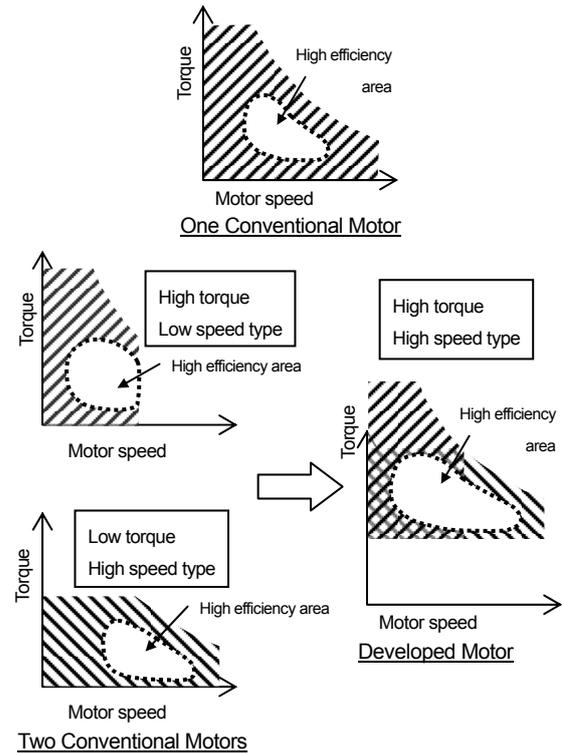


Fig.2 Torque-Speed Characteristic of the Traction Motor

2.2 巻線切り替え機構の小型軽量化

本開発以前の巻線切り替えシステムは内部の電子デバイスの振動耐久性を考慮してそれらを許容環境下であるインバータ内部に搭載していた。これにより、Fig.3 の Neutral A と B、それらにつながる電力ケーブルインバータ内に引き込むことになりケーブル本数が増えるため筐体が大きくなり重量も増加していた。

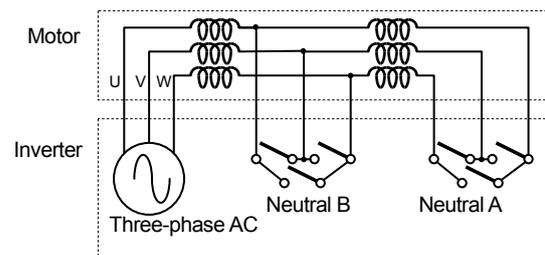


Fig.3 Motor-Drive Structure of Previous System

一方デミオ EV では航続距離改善の観点から巻線切り替え機構をモータ側に搭載することによってシステムの小型軽量化を図っている (Fig.4)。

デミオ EV では、モータの振動環境の見極めを行い巻線切り替え部の耐久性向上を図った。実際に耐久試験路を走行し、その振動波形を計測し FFT 解析および頻度解析を行ってモータ振動要件の定量化をした。そしてその振動環境下で十分な耐久性を確保するため電子デバイスの軽量部品への置換を進めた。また比較的重量のある部品は耐久性

の高いレイアウト配置へ見直しを行った。これによりモータ筐体内に搭載することが可能となり、インバータ～モータ間の電力ケーブルは以前のシステムでは 9 本あったものを Fig.4 に示したようにインバータからの三相交流電源線 (Three-phase AC) の 3 本のみとすることができた。またインバータ、モータは電力ケーブルを削減することによって筐体構造を簡素化でき、軽量化合計で約 7kg の重量低減を達成、高出力高効率でありながら小型軽量化が実現できた。

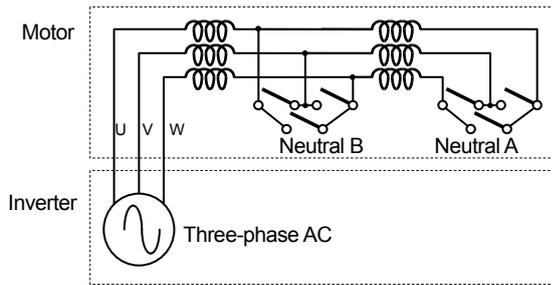


Fig.4 Motor-Drive Structure of DEMIO EV

3. 巻線切り替え制御技術

3.1 巻線切り替え時のトルクショックと過大電流の抑制

(1) トルクショックや過大電流の発生原因

モータを制御するインバータ内の制御ループは、モータを等価な回路定数 (L_d , L_q , R , Ke) として内部に持っており、目標トルクを発生させるために回路定数に基づいてモータに流す電流の大きさや位相を適切に制御している (Fig.5, 式 (3.1))。

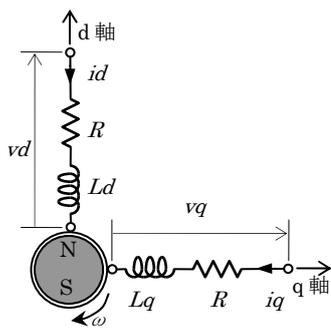


Fig.5 d-q Equivalent Circuit Model of Motor

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega Ke \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

v_d : d 軸電圧, v_q : q 軸電圧, R : 巻線抵抗,
 ω : 角速度, L_d : d 軸リアクタンス,
 L_q : q 軸リアクタンス, i_d : d 軸電流, p : d / dt ,
 i_q : q 軸電流, Ke : 誘起電圧定数

デミオ EV は巻線切り替え機構を有しているため、モータ回路定数は低速巻線と高速巻線の 2 種類あり、巻線切り替えの際にインバータ内の制御ループの回路定数 (Controller parameter) の切り替えを行っている (Fig.6)。

実際の巻線切り替え時には、制御ループの回路定数 (Controller parameter) は巻線切り替え指令 (Controller command) と同時に瞬時に切り替わるものの、実機側の巻線状態 (Winding state) はソフトウェアの構造上の制約により巻線切り替え指令 (Controller command) から最大で 1 制御周期遅れて切り替わる。これは制御ループが一定周期で動作しているのに対し、巻線切り替え制御は三相電流位相に連動しているためである。この間は制御ループの回路定数 (Controller parameter) と実機側の巻線状態 (Winding state) には乖離が生じている。この乖離により q 軸電流フィードバック値 (i_q feed back) との偏差が大きくなりインバータ内の制御ループは過大な電流指令値 (i_q reference) を発することになる。そして次の制御周期で巻線側は高速巻線に切り替わり、インピーダンスの低い高速巻線に電流が一気に流れ込み、q 軸電流 (i_q) がオーバシュートしてこれによりトルクショックが発生、また過大電流が発生する (Fig.6)

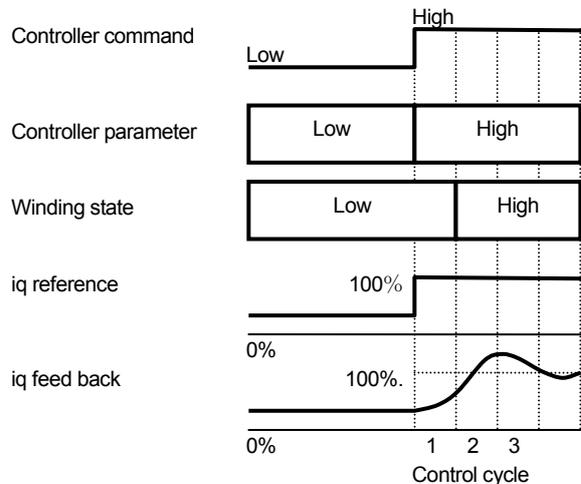


Fig.6 No-Countermeasure Against Deference on the Control

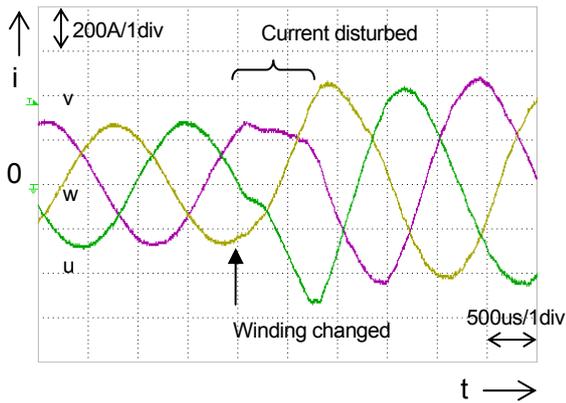


Fig.7 Disturbed 3-Phase AC of Motor

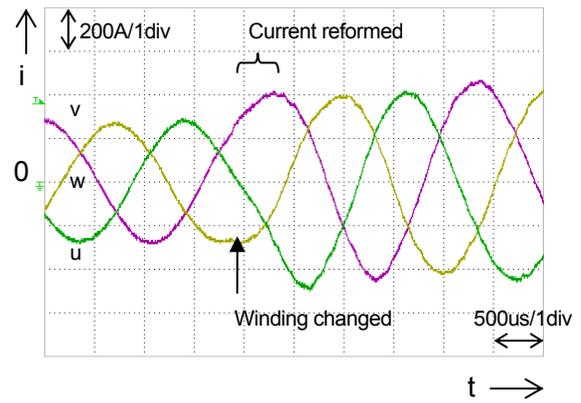


Fig.9 Reformed 3-Phase AC of Motor

(2) トルクショックや過大電流への対応

トルクショックや過大電流の原因である q 軸電流 (iq) のオーバershootをなくすため、最適な指令値の立ち上げ特性を設計した。

制御ループの回路定数と実際の巻線状態の乖離は正は構造上困難であるため、制御ループの過大な電流指令値 (iq reference) に対する対策を講じることにした。当初、巻線切り替え指令 (Controller command) と同時に電流指令値を一気に引き上げていたものを複数ステップに分けて段階的に引き上げる制御を開発した (Fig.8)。Fig.9 に対策後の改善された波形を示す。

上記は低速巻線から高速巻線への遷移に対する制御であるが、逆方向の高速巻線から低速巻線への遷移においても過大電流指令によるトルクショックが発生するため同様の制御を織り込んでいる。

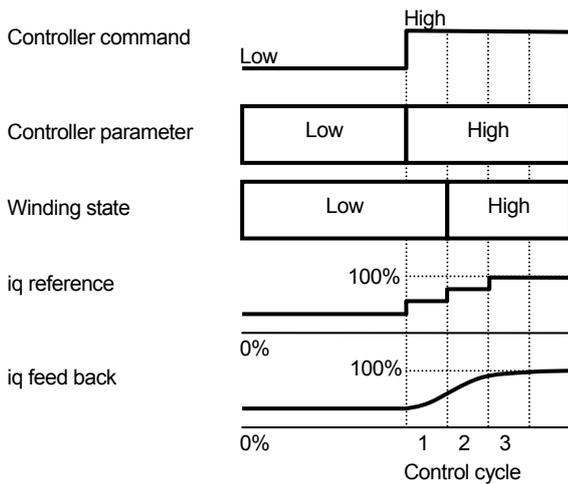


Fig.8 Taking Countermeasure Against Diference on the Control

3.2 巻線切り替え時の弱め磁束制御最適化

(1) 電流位相ずれによるトルクショック

EV では駆動用バッテリーが低 SOC (State of Charge) 状態になるとそれに伴ってバッテリー出力電圧が低下する。そのため低速巻線から高速巻線に切り替わった直後でも、ある電圧以下では弱め磁束制御を行う必要がある。切り替え指令と同時に回路定数 (Ld, Lq, R, Ke) が低速巻線から高速巻線に切り替わるため、モータ電流も瞬時にステップ状に切り替わる必要があるが、回路定数の変化に追従しないと電流位相ずれを起こす。このように位相ずれにより過渡的に電流が変化した場合、モータに対して余分な電流が流れたことになり、この乖離が原因で巻線切り替えのタイミングで不要なトルクショックが発生する。

そのバッテリー電圧が低い状態での低速巻線から高速巻線への切り替え時のモータ電流波形を示す (Fig.10)。

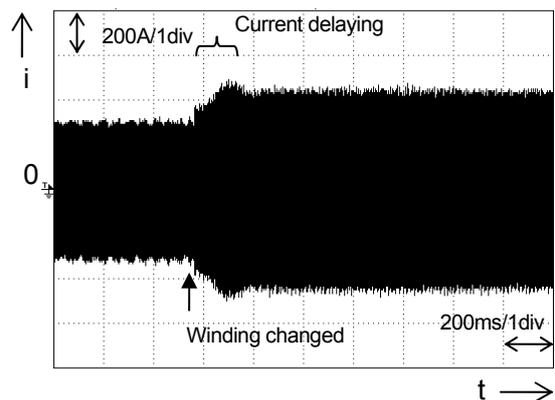


Fig.10 Motor Current Before Turning the Flux-Weakening Offset Block

(2) 電流位相の最適化

低バッテリー電圧状態下での低速巻線から高速巻線への切り替えにおいて、モータ電流が過渡的に変化する原因は弱め磁束制御の追従性が低いためである。その弱め磁束制御の位相に直接関わる d 軸電流 (id) 電流の応答性の改善を行った。具体的には dq 軸電流算出ブロック (d-q current calculation block) に電流位相最適化を図るための弱め磁束補正ブロック (flux-weakening offset block) を追加した (Fig.11)。このブロックは高速巻線に切り替わった際の電流位相角を予測しておき、切り替わった際に瞬時に補正するフィードフォワード制御である。それは dq 軸電流算出ブロック (d-q current calculation block) から出力される低速巻線 d 軸電流値指令値 (id ref1) に d 軸電流位相補正 (id ref2) を加えて高速巻線側の d 軸電流指令値 (id reference) を生成する (Fig.12)。

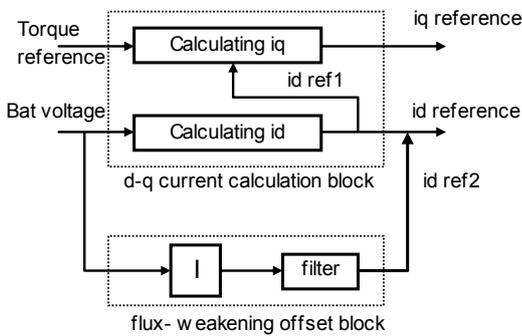


Fig.11 d-q Current Calculation with Flux-Weakening Offset Block on Changing Winding “Low” to “High”

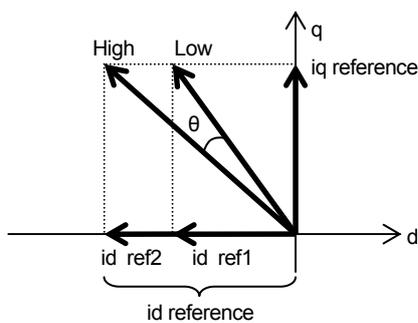


Fig.12 Motor Current Vector Diagram of Each Winding Status at Changing Winding

弱め磁束補正ブロック (flux-weakening offset block) を追加した場合のモータ電流波形を示す (Fig.13)。

巻線切り替え直後にモータ電流が瞬時に立ち上がっている状況が確認できる。これは切り替え直後に高速巻線の回路定数に合致した電流に供給できていることを表している。また実車においてもトルクショックを感じさせない切り替えができていたことを確認できた。

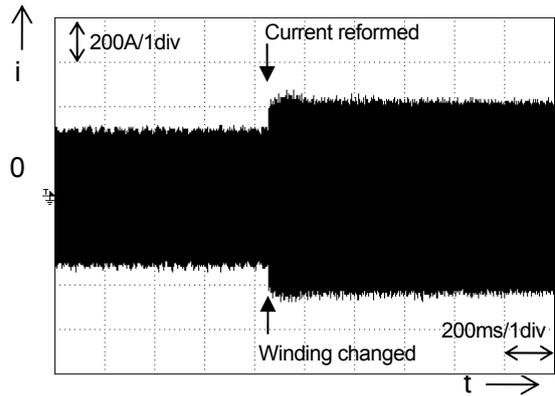


Fig.13 Motor Current after Turning the Flux-Weakening Offset Block

4. あとがき

このたびのデミオ EV のモータドライブシステムは (株) 安川電機と共同開発したものである。電子式巻線切り替え方式を採用して、かつ巻線切り替え時のトルクショックを抑える制御技術を織り込むことにより、小型高効率でスムーズな走行を可能にするモータドライブシステムを開発することができた。今後もこの技術を発展させ環境への負担が小さい車両開発を通じて社会に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 若山ほか：水素燃料電池ハイブリッドシステムの開発, マツダ技報, No27, pp.31-35 (2009)

■ 著 者 ■



佐藤 隆之



新富 将克



瀬尾 宣英

特集：新型車（デミオ EV）

24

デミオ EV の高エネルギー密度 Li イオンバッテリー開発

Development of High energy Density Li-ion Battery for Demio EV

松井 恒平*1
Kohei Matsui喜田 裕万*2
Hirokazu Kita栃岡 孝宏*3
Takahiro Tochioka

要約

電気自動車（EV）の普及には、航続距離が短い、車室内空間が制限される、価格が高い等の課題を解決する必要がある。これらの課題は主として、EV が従来の液体燃料に比べてエネルギー密度が極端に低いバッテリーのみをエネルギー源として使用していることに起因する。

今回開発したデミオ EV 用のバッテリーパックでは、比較的安価な 18650 型バッテリーセルを直並列に接続した薄型バッテリーモジュールとコントロールユニットやコンタクタといったその他電装品の最適配置により、信頼性・安全性を確保しながら高エネルギー密度を実現した。また、バッテリーの状態を判定・制御するバッテリーマネジメントシステムもあわせて開発した。本稿では開発したバッテリーパックシステムの技術的特長について述べる。

Summary

For the popularization of EV, it is necessary to solve issues such as the short driving ranges, limited interior space, and high prices. The main reason of such issues is that the energy source is only a battery, whose energy density is extremely low compared to the conventional liquid fuel.

For the newly developed battery pack for the Demio EV, thin battery modules consist of relatively-inexpensive 18650-type battery cells connected in series-parallel combinations and the electronic parts such as a control unit and a contactor were optimally arranged, realizing high energy density while securing reliability and safety. In addition, the battery management system that judges and controls the battery conditions was developed. The technological characteristics of the battery pack system are explained in this paper.

1. はじめに

近年、地球温暖化問題により、走行中にCO₂を全く排出しない電気自動車（以下EV）が注目されている。ただし、EVの普及には、航続距離が短い、室内空間が制限される、価格が高い等の課題を解決する必要がある。これらの課題は主として従来の液体燃料に比べてエネルギー密度が低く、大きくて重たいバッテリーに起因するものである。EV用のバッテリーには上記の課題を克服するための高いエネルギー密度と車載信頼性及び安全性の両立が求められる。今回、デミオEVの開発においては、車両の室内空間を制限することなく航続距離 200kmを達成することを目的として、高

エネルギー密度と高信頼性を両立させたバッテリーパックシステムを開発したので、その内容を報告する。

2. バッテリーパックの概要

2.1 バッテリーパックの構成

デミオ EV に搭載したバッテリーパックを Fig.1 に示す。バッテリーパックは、動力源となるリチウムイオンバッテリー、各バッテリー間を電氣的に接続するバスバー・ハーネス類、電流センサ、バッテリーの電圧・温度を計測するユニット（以下 CMU（セルモニタユニット））、CMU 及び電流センサからのデータを基に演算を行い車両コントロールユ

*1,2 電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office

*3 技術研究所
Technical Research Center

ニットと通信を行うユニット（以下 BCU（バッテリーコントロールユニット））、パック外への高電圧の供給・遮断を行うコンタクタ、車両整備の際に高電圧を遮断するサービスプラグ及び急速充電時等にエアコンからの冷却風を取り入れるためのファン等で構成される。

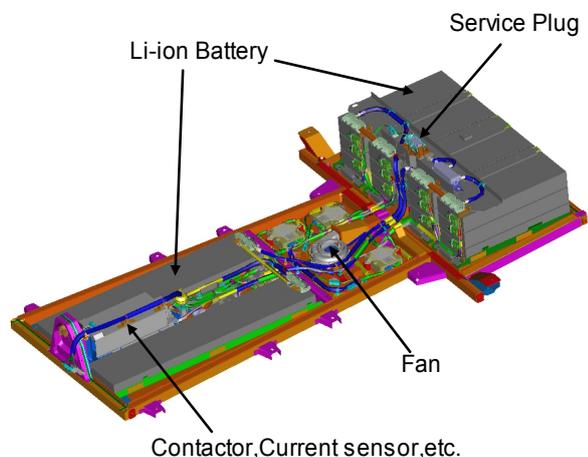


Fig.1 Configuration of Battery Pack

2.2 バッテリーパックのレイアウト

バッテリーパックは前後車軸間の客室の下にレイアウトされている。これはベース車で実現している居住空間、荷室容量はそのままに確保しつつ、低重心・ヨー慣性モーメントの低減による“Zoom-Zoom”な走りの実現のためである。更には、万が一の衝突の場合、あらゆる方向からの衝突に対して最もバッテリーを保護できるためである。ただし、ベース車であるデミオのガソリン車のパッケージングにおいて、床下の形状は、前席の乗員着座位置の下は車両の前後方向には比較的空間があるものの、上下方向には余裕がない。逆に後席の乗員着座位置の下は車両の上下方向には比較的空間があるものの、リヤサスペンション部品との関係から前後方向には余裕がない。このような客室床下の特徴と車両の最低地上高確保の観点からバッテリーパックの形状は前方部分の高さが低く、後方部分の高さが高い特徴的な形状に制約される (Fig.2)。

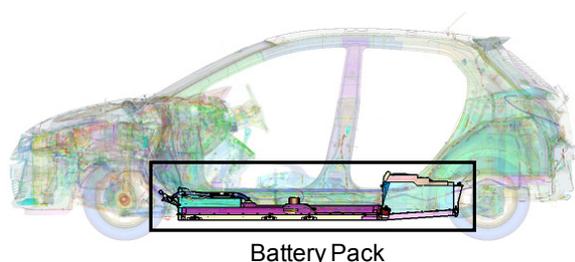


Fig.2 Layout of Battery Pack

このパック形状制約条件に対応するため、レイアウト自由度の高い薄型バッテリーモジュールを開発し、それらをパック前方部分・後方部分の形状に合わせて最適配置することでスペースを有効活用し、業界トップレベルの高エネルギー密度と居住空間の両立が可能となった。

2.3 バッテリーモジュールの構成

(1) バッテリーセル

蓄電デバイスの基本単位であるセルに関しては、ノートパソコン用等で多くの市場実績がある 18650 型リチウムイオンバッテリーセルを採用した (Fig.3)。

- ・高エネルギー密度である
 - ・市場実績のある汎用形式セルであるため価格が安い
- といった特長があり、EV の主要課題である航続距離の延長とコストの低減を両立するために最適であると判断した。



Fig.3 18650type Battery Cell

(2) バッテリーモジュール

Fig.4 にモジュール構成概要を示す。今回採用した 18650 型セルは小型であるため、セル 1 個当たりの容量 (Ah) が小さい。従って、車載適用する場合は複数のセルを並列接続し、容量を確保する必要がある。デミオ EV においては、車両としての必要容量及びモジュール化の際の汎用的な形状を考慮して 20 個のセルを並列接続して基本セルブロックを構成し、このセルブロックを直列接続してモジュールを構成した。

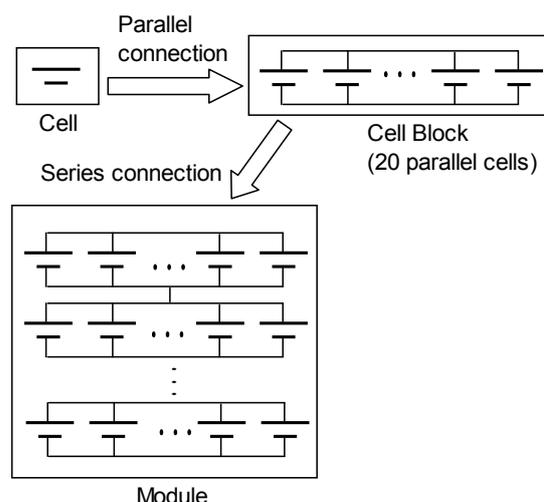


Fig.4 Configuration of Battery Module

3. バッテリーパックの性能

3.1 基本性能

EV においては車両を駆動するエネルギー源がバッテリーのみであるため、バッテリーの性能が航続距離・加速性能といった車両の基本性能に大きな影響を与える。デミオ EV では、“Zoom-Zoom”な走りや航続距離を両立するため、高エネルギー密度のバッテリーパック設計としている。Table 1 にセルの主要諸元、Table 2 にバッテリーパックの主要諸元を示す。デミオ EV のバッテリーパックは 20 並列、96 直列のセル（総セル数：1,920 個）で構成され、パックとしての公称電圧は 346V、公称容量は 58Ah である。高エネルギー密度なセルの特長とパック内でのバッテリーの最適配置により、パックとしてのエネルギー密度は体積当たりで 125Wh/L、重量当たりで 89Wh/kg と業界トップレベルの水準を実現している。

Table 1 Specifications of Battery Cell

Cell type	18650 type
Nominal voltage	3.6V
Nominal capacity	2.9Ah
Energy density	Over 600Wh/L

Table 2 Specifications of Battery Pack

Weight	225kg
Volume	160L
Nominal voltage	346V
Nominal capacity	58Ah
Nominal energy	20kWh
Energy density	89Wh/kg
	125Wh/L
Max power	89kW
Max current	300A
Operating temperature	-20 ~ 60

3.2 耐久性

リチウムイオンバッテリーは長期間使用していく中で徐々に劣化し、容量が低下していく。EV ではバッテリーの容量劣化がそのまま車両の航続距離の減少につながるため、バッテリーの耐久性確保が重要になる。バッテリーの劣化モードは充放電サイクル劣化と保存劣化の 2 種類があり、これらの複合でバッテリーの耐久性が決まる。また、バッテリーの劣化現象にはセル内部の化学的副反応（電極表面での皮膜形成等）が深く寄与していることから、劣化度合いはバッテリーの使用温度にも大きな影響を受ける。

一方、EV 車両としてのバッテリーの使われ方は

- (a) 走行（力行・回生による放電・充電の繰り返し）
- (b) 車両充電（普通充電・急速充電）
- (c) 車両放置（ガレージでの駐車等）

のパターンがあるが（Fig.5）、(a)、(b)での劣化は充放電サイクル劣化、(c)での劣化は保存劣化に相当する。

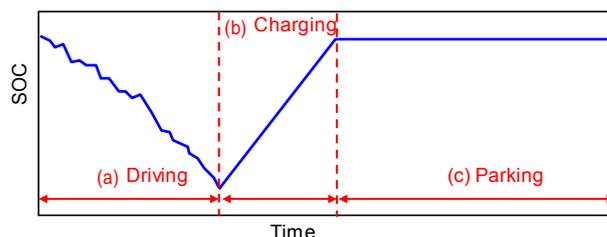


Fig.5 Pattern Diagram of SOC Change

そこで、EV 車両用途としてのバッテリー耐久性検証として、市場走行を想定した充放電パターン、車両充電相当の充電及び保存を組み合わせ、温度を劣化加速因子として取り入れた複合劣化サイクルテストでバッテリーの容量劣化を評価した。結果を Fig.6 に示す。リチウムイオンバッテリーにおいては電極表面での皮膜形成が容量劣化の大きな要因であることが多数報告されている。この場合、容量劣化は皮膜の形成速度に起因して経過時間や充放電サイクル数の平方根に比例するが、本テスト条件においてもバッテリーの容量は設定した複合劣化サイクルのサイクル数の平方根に比例して劣化していくことが分かった。この関係性を用いて劣化を予測すると、実用的な走行距離及び耐用年数において顕著な容量劣化がないことが示唆され、EV 車両用途として十分なバッテリー耐久性の目処がついた。

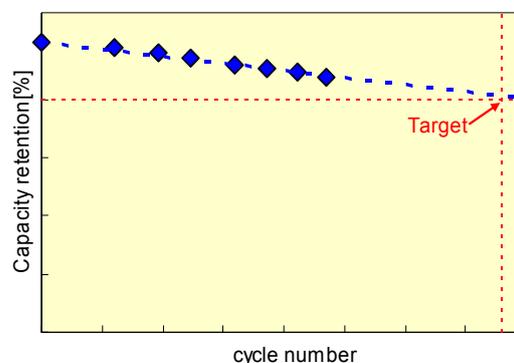


Fig.6 Capacity Retention in Combined Degradation Cycle

3.3 安全性

(1) 安全性確保の考え方

リチウムイオンバッテリーは可燃性の有機電解液を使用しており、エネルギー密度が高いことから不適切な使用方法で使用すると、発熱・発火の可能性がある。そこで、車載適用する場合はパックシステムとして安全性を確保することが重要である。Fig.7 にパックシステムにおける安全性確保の概念図を示す。デミオ EV のバッテリーパックにおいては、セル製造・検査工程での管理を徹底し、異常発熱等につながるコンタミによる内部短絡等の不良セルの流出防止を行うことはもちろんであるが、それに加えて、

- ・セルでの基本的な安全性確保
- ・バッテリーマネジメントシステム (BMS) による適切な制御とフェイルセーフ
- ・バッテリーパック構造による保護

という考え方でパックシステムとして安全性を確保している。

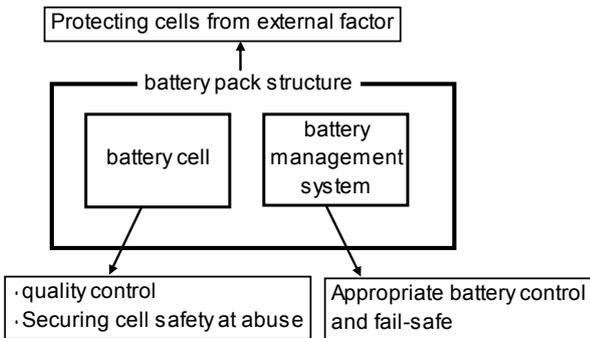


Fig.7 Concept of Battery Pack System Safety

(2) セルでの安全性確保

Table 3 にセルでの安全性試験項目例を示す。今回採用したセルの過充電、外部短絡、圧壊といった異常状態に対する基本的な安全性を確認している。

Table 3 Example of Battery Safety Test

Item	Result
External short circuit	
Forced Internal short circuit	
Overcharge	
Heating	
Crush	
Impact	

(3) BMS による制御とフェイルセーフ

デミオ EV のバッテリーパックでは全セルブロックの電圧監視、各モジュールでの温度監視、電流・電圧情報に基づく SOC (State of charge) 推定等バッテリーの状態を常時正確に把握して入出力を適切に制御するシステムを開発し、外気温やユーザの走り方といった非制御要因がある中でもバッテリーが過充電・過放電・異常高温といった異常状態に陥らないようにしている。また、バッテリー自体や付随するセンサ系に異常が発生した場合においても、故障を自己診断し適切な制御を行うシステムとしている。

(4) パック構造での安全性確保

① 外部衝撃からのバッテリー保護

外部からの衝撃に対して内部のバッテリーモジュールを保護することがパック筐体の重要な役割である。車両衝突時の衝撃対策として、車両前面・側面・後面いずれの方位からの衝突に対しても最も有利な車両の中心（前後輪軸間及びフロアフレーム間）にバッテリーパックを配置している。これにより衝突相手物（車両や壁等）及び搭載物（モータ

等）からの衝撃荷重を作用させない配置にすることができた。万が一衝撃荷重が作用した場合でも内部のバッテリーモジュールが破壊されないよう、バッテリーパックの外周はすべて閉断面のフレーム構造をとし、衝撃に対する十分な強度を確保している。

② 類焼防止構造

何らかの理由で万が一セルが発火した場合、セルからは高温のガスが噴出する。デミオ EV のバッテリーパックではこの高温の噴出ガスを適切に排気し、高温ガスの熱が周囲のセルに伝わらない構造とした。また、各セル間距離を適切な距離に設定することで発火セル自身の熱が周囲のセルに伝わりにくい構造としている。以上のような構造上の工夫で、万が一セルが発火した場合でも周囲のセルへの類焼を防止して、パックとしての安全性を確保している。

4. バッテリーマネジメントシステム

4.1 バッテリーマネジメントシステムの概要

Fig.8 にバッテリーマネジメントシステム (BMS) の構成を示す。BMS は電流センサ、バッテリーモジュール内のセル電圧及び温度を計測する CMU、電流センサ及び CMU からの情報に基づきバッテリーの状態を判定し、車両 ECU に送信する BCU で構成されている。CMU - BCU 間、及び BCU - 車両 ECU 間の通信には CAN を用いた。

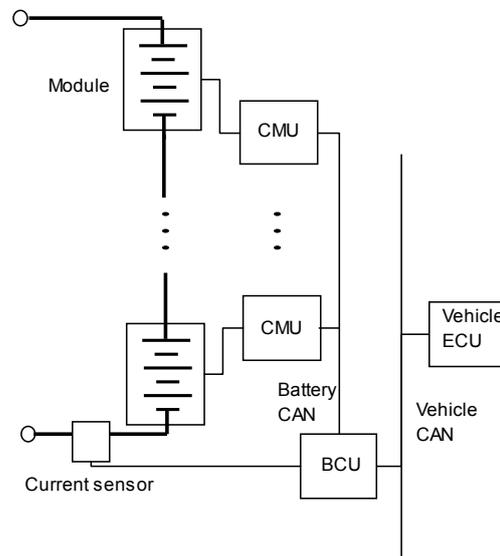


Fig.8 Configuration of Battery Management System

デミオ EV の車両全体のシステムとしては BMS のバッテリー情報を基に車両 ECU がエネルギー管理を行うことから、BMS でのバッテリー状態判定の正確さが車両全体の挙動・性能に大きな影響を与えることになる。以下、BMS の代表的な機能について説明する。

4.2 SOC (State of charge) 推定

リチウムイオンバッテリーはバッテリー温度、SOC によって入出力特性が大きく変化する。また SOC 精度の良し悪しによって使用可能 SOC 範囲が制限され、バッテリーの実使用エネルギーも制限を受ける。以上のことから、EV の車両性能を確保する上で、正確な SOC を推定することが重要である。SOC は電流値を積算することで以下の式から推定される。

$$SOC_n = SOC_{n-1} + \frac{\int Idt}{\text{バッテリー容量}} \times 100$$

しかし、この電流積算法のみでは以下の懸念がある。

- ・電流センサのオフセット等による電流積算誤差が時間とともに拡大し、SOC 推定精度が低下する。
- ・制御電源 OFF 時のバッテリーの自己放電に起因する SOC 減少に対応できない。

一方、リチウムイオンバッテリーではバッテリーの開放電圧 (OCV) と SOC に相関性があり、OCV を推定することで SOC を推定することが可能である。(OCV 推定法)

そこで、デミオ EV の BMS では電流積算法と OCV 推定法を状況に応じて最適に組み合わせた SOC 推定ロジックを構築した。Fig.9 に車両走行時の充放電パターンにおける SOC 精度検証結果を示す。上記ロジックで SOC を推定した場合、8 時間以上の長時間にわたる連続充放電においても、実用上十分な精度の SOC 推定ができることを確認できた。

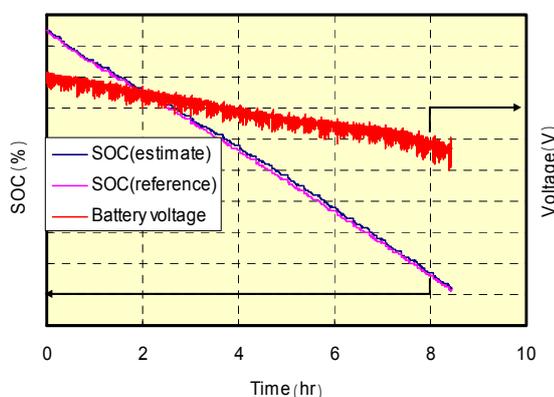


Fig.9 Time Charts of SOC Estimation

4.3 故障診断

デミオ EV の BMS では BCU がバッテリー内の各種情報を判定し故障診断を行う。以下に代表的な故障診断項目を示す。

- ・バッテリー自体の異常 (電圧異常, 温度異常等)
- ・センサ系の異常 (電流センサ, 電圧センサ, 温度センサ, 絶縁抵抗センサ)
- ・CAN 通信異常
- ・高電圧回路の絶縁抵抗低下

なお、各故障によって車両安全性に与える影響度が異なる

ことから、発生した故障によって車両制御を、車両停止、制限走行等にレベル分けし、故障が発生しても可能な限り安全に走行できるシステムとしている。

4.4 セルブロック電圧均等化

デミオ EV のバッテリーパック内には 96 直列のセルブロックがあるが、使用状況によって、各セルブロック間の電圧にバラツキが生じる場合がある。電圧バラツキが生じた場合、充電側では最も電圧が高いセルブロックに、放電側では最も電圧が低いセルブロックに充放電が制約され、パック全体としての使用可能容量が制限される。この現象を抑制するため、各セルブロックの電圧を計測し、必要に応じてセルブロック電圧を均等化して、パック全体としての容量を最大化できるシステムとしている。

5. まとめ

デミオ EV 用に、18650 型セルを用いた薄型バッテリーモジュールを最適配置するとともに、独自のバッテリーマネジメントシステムを開発することで、高エネルギー密度と信頼性・安全性を両立したバッテリーパックシステムを成立させることができた。本バッテリーパックを車両フロア下に配置することで、車室空間を制限することなく航続距離 200km (JC08) を実現した。今後も航続距離の更なる伸長、価格の低減といった EV に対する社会のニーズに答えるためバッテリーシステムの技術開発を進めていく。

参考文献

- (1) 久米ほか：次世代バッテリーマネジメント技術の開発，マツダ技報，No.28，pp.54-58 (2010)

■ 著 者 ■



松井 恒平



喜田 裕万



板岡 孝宏

特集：新型車（デミオ EV）

25

デミオ EV の制御開発 Development of Demio EV Control System

福庭 一志*1
Hitoshi Fukuba
畠山 未来*5
Miki Hatakeyama

浦本 征吾*2
Seigo Uramoto
三戸 秀樹*6
Hideki Mito

吉末 知弘*3
Tomohiro Yoshizue
大佐古 昌和*7
Masakazu Ohsako

岡本 篤*4
Atsushi Okamoto
末富 隆雅*8
Takamasa Suetomi

要約

電気自動車は、従来のガソリン車にはないモータ（駆動）制御系／バッテリー（エネルギー）制御系を持っている。モータは高速で正確なトルク制御性を有しているが、その制御は“バイワイヤ”システムであるため高い信頼性が求められる。また、エネルギーを蓄えるバッテリーは、温度や入出力電流がその性能や寿命に大きな影響を与えるため、性能を十分引き出すためにはバッテリー状態に応じた緻密な制御が求められている。

デミオ EV の開発では、これらモータやバッテリーのシミュレーションモデルを独自に開発し、それを活用した MBD(Model Based Development) によって、高い信頼性と緻密さを保ちながら効率的に制御系を開発することができた。開発したモータ制御は、アクセル操作に応じたリニアでなめらかな駆動トルク応答を実現しており、エンジン車両との違和感がなく、電気自動車らしい“Zoom-Zoom”な走りを具現化している。

Summary

Different from engine vehicles, electric vehicles have has a battery (energy) control system and motor control system. The motor has high-speed response and high-accuracy driving-force controllability, but it needs highly-reliable controller due to its “by-wire” control system. Regarding the high voltage battery, temperatures and input/output currents greatly affect the battery’s performance and life. Therefore, to enhance their performances, precise control of the system is required.

For the DEMIO EV, simulation models of the motor and battery were originally developed, and MBD (Model Based Development) utilizing them enabled the efficient development of a highly reliable control system. The developed motor control system allows smooth and linear response to the accelerator operations by the driver, realizing "Zoom-Zoom" feel similar to that of engine vehicles, with EV-typical driving performance.

1. はじめに

車両に搭載したバッテリーに電気を蓄え、その電気エネルギーでモータを駆動して走行する電気自動車は、燃料を燃やして駆動力を発生させる車両とは異なったシステムを搭載しており、その制御も異なる部分が多くある。中でも、タイヤ駆動力を制御するモータ制御とバッテリーを管理する高

電圧制御は車両の性能や信頼性に直接影響を与える重要な制御である。デミオ EV では安全で効率的に電気エネルギーを使用するために、個別ユニットごとに制御器を設けそれぞれの状態をモニタし制御すると同時に、個別のコントローラの制御を統合し車両全体をコントロールする車両統合コントローラ（VCM：Vehicle Control Module）を設置し、それを中心として個別ユニットの制御器が協調する制御系

*1～6,8 電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office

*7 技術研究所
Technical Research Center

を構成した (Fig.1)。

VCM はドライバのシフトレバーやアクセル操作に応じてモータのトルクを制御して車両を駆動/減速させるが、同時にバッテリーの充電量や温度、モータインバータ温度、車室内の温度などの状態も把握し、これらのシステムを適切な状態に保つようにバッテリー冷却システムを含めた車両全体を制御する。充電時にはバッテリーを保護しつつ最短の充電時間となるよう充電器と合わせてバッテリー冷却システムを制御する。また、携帯電話通信網を通じて充電や空調を操作したり、車両状態をモバイルで把握することを可能にする遠隔操作システムを実現した。

このように、電気自動車ではドライバの操作を電気信号として検出して車両をコントロールする“パイワイヤ”システムとなっており、バッテリー/モータ等で高電圧を使用していることと相まって、制御には高い信頼性が求められる。そこで、デミオ EV では MBD と HILS (Hardware In the Loop Simulation) を活用することで、信頼性の高い制御系を効率的に開発した。

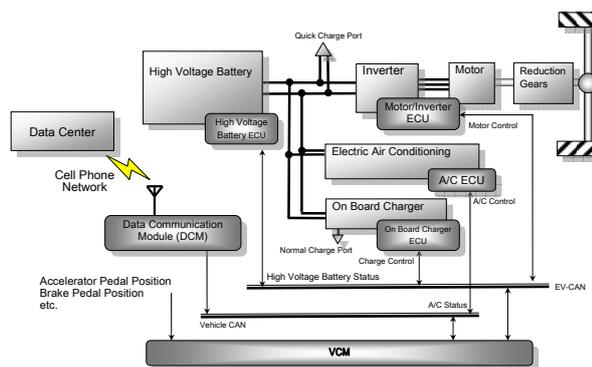


Fig.1 Control System Configuration

2. デミオ EV の制御系

2.1 制御系概要

デミオ EV の制御システムは、前述のように車両全体をコントロールする VCM を中心として個別ユニットごとに設けられた制御器が協調して制御している。VCM は個別の制御器から送られるユニットの状態と VCM に入力されるアクセルやシフトレバーなどによるドライバ操作を総合的に判断し、車両走行/充電/外部 AC 給電などの状態に制御状態を移しながら制御を行う (Fig.2)。

走行や充電のために制御システムが起動すると、VCM の起動制御に含まれる車両状態判定部でユーザの操作や車両状態を判断し、その結果に基づいて Fig.2 に示すように走行/充電/遠隔操作/外部給電のいずれかに制御状態が移行、その機能を提供する。そこでの処理が終了した後は、車両を安全にシステム停止させるために残電荷の放電など終了処理を行い、車両システムを停止させる。ある状態から他の状態へ制御を移行する場合は、終了処理を経て再び車両状態判定した後に次の状態へ移行することで、状態移

行の安全性を確保している。これら全ての状態を通して高電圧バッテリー ECU によって高電圧バッテリーの状態がモニタされており、その状態と車両要求とに応じたバッテリー電流が VCM によって制御される。

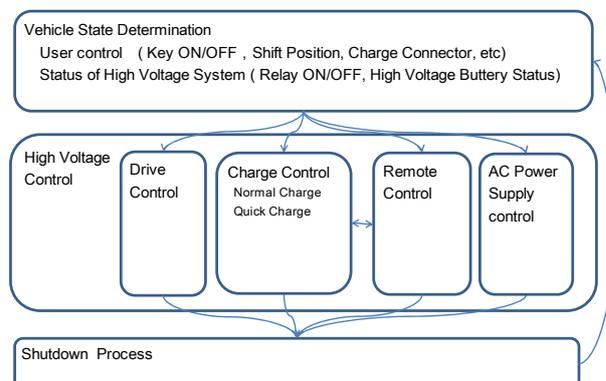


Fig.2 Vehicle Control State Flow

2.2 高電圧制御

電気自動車においてエネルギー供給元となるバッテリーは、その寿命を保ちながら性能を最大限に引き出すために、状態にあわせて適切な範囲で電力を出し入れする必要がある。デミオ EV では高電圧バッテリー ECU が温度と充電状態を元に入力可能電力/出力可能電力を決定し、その範囲内で VCM が車両で使用する電力を制御している。また、バッテリー高温・低温時は車両エアコンシステムが出力する空気の一部をバッテリー内に取り込みバッテリー温度を調節する機能を備えている。このために、バッテリー内にはクーリングファンを設置しており、エアコンはユーザによる操作に加えて VCM からの操作も可能で、エアコン ECU と VCM が協調してエアコンとパック内ファンを制御し冷気/暖気をバッテリーに送り込んでバッテリー温度を調節する。

また、VCM はバッテリー故障時に備えて SOC (State of Charge) ・バッテリー電流・入出力可能電力などの演算を行っており、バッテリー ECU からの情報が得られなくなった場合には、VCM によるバッテリー状態推定に切り替えて、安全を確保しつつ走行が可能である。

2.3 駆動制御

モータによる駆動は、内燃機関による駆動と比較して制御性が格段に高く、正確な駆動力を高速な応答で発生することができる。デミオ EV では、EV として“Zoom-Zoom”な走り感を実現するために、ドライバのアクセル操作に対するリニアでスムーズなトルク応答を目標に制御系を開発した。開発したトルク制御系の概要を Fig.3 に示す。駆動トルク制御では、アクセルやブレーキの操作によるドライバ指示と車体速度によってあらかじめ設定されたマップから目標駆動トルクが設定される。次に、アクセルペダル操作量の変化や車両の走行状態に応じてトルク変化率を制限した後にフィルタ処理され、モータトルク指示としてインバータに入力される。この時に、制御システム内の通信な

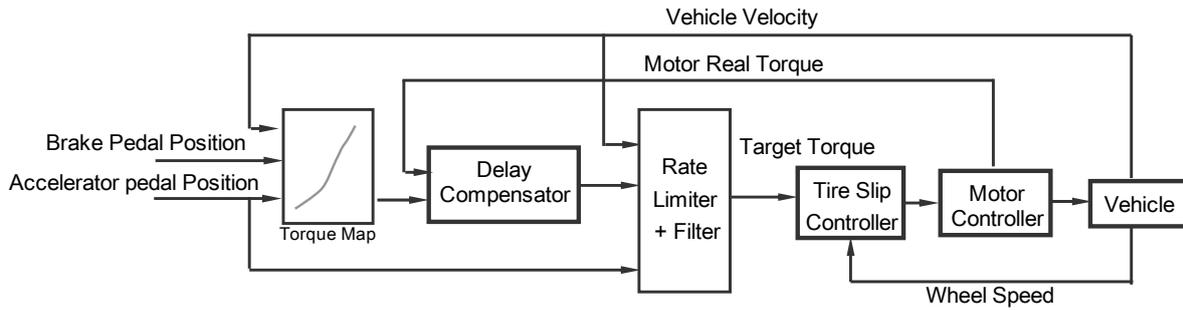


Fig.3 Drive Torque Control

どに起因するモータトルク指示に対する実際のモータトルク出力の遅れを補正することで、アクセル操作と車両加速感のつながりを向上させている。これらの制御パラメータを、シミュレーションと実車実験によって最適にチューニングすることで、アクセル操作に対するリニアでスムーズな駆動トルク応答を実現し、EVにおける”Zoom・Zoom”な走り感を具現化した。

また、このモータのトルク制御系にはタイヤスリップを抑制する制御も織り込んでいる。これはタイヤの空転を検出してモータトルクを抑制する制御で、駆動時のみではなく減速中の回生トルクでタイヤの空転が発生した場合でも最適なトルク制御を行い、安全な走行を可能としている。

2.4 充電制御

電気自動車のバッテリー充電は、内燃機関の燃料補給に相当し、充電の簡便性が車両の利便性に大きく影響している。デミオ EV の充電システムは、車載充電器を用いた 200V 電源による充電と CHAdeMO 規格 (国内の車両・充電器メーカーが参画する協議会で決められた、電気自動車 (EV) およびプラグインハイブリッドカー (PHEV) の充電に利用する急速充電方式の共通規格) に対応した急速充電器を用いた充電に対応し、いずれの場合も定電流充電を基本として、VCM が充電電流およびバッテリー冷却システムを制御して充電を行う。

急速充電器による充電では、VCM は充電器の電流と同時に必要に応じて車両のエアコンを制御してバッテリーを冷却しながら充電することで、バッテリーの保護と充電時間の短縮を両立している。この制御は、1 次元シミュレーションツールである AMESim を用いて充電と冷却によるバッテリーパック全体の温度変化をモデル化し、これを用いて充電電流とバッテリー冷却を最適化した。

2.5 遠隔操作制御

デミオ EV ではスマートフォン・PC から遠隔で車両の状態のモニタ、充電開始/停止、空調開始/停止を行う機能を実現した。この機能では、スマートフォンや PC の Web ブラウザで現在の車両状態をモニタできる他、時間を指定して充電や空調を開始することができる。例えば午後 10 時に「9 時間後に空調開始」と予約指定することで、翌朝快適な

室内温度となった状態で車両に乗り込むことができる。

システムはユーザインタフェースとなる Web ブラウザと、車外サーバ、車載通信ユニット (DCM, Data Communication Module) と VCM で構成される (Fig.4)。ユーザの操作はインターネット網や携帯電話通信網を介して車外サーバに一時保存され、指定された時間に携帯電話通信網・DCM を経由して VCM に送られて実行される。実行の結果は逆経路でユーザに連絡される。

本機能では意図しない充電・空調起動を防止するため、ボンネットが開いている・シフトが P レンジ以外であるなど、危険が予測される場合にはユーザの要求は実行されない。また電池に残った電力が少ない場合は空調の運転を禁止あるいは中断し、思わぬ電力不足を防止している。

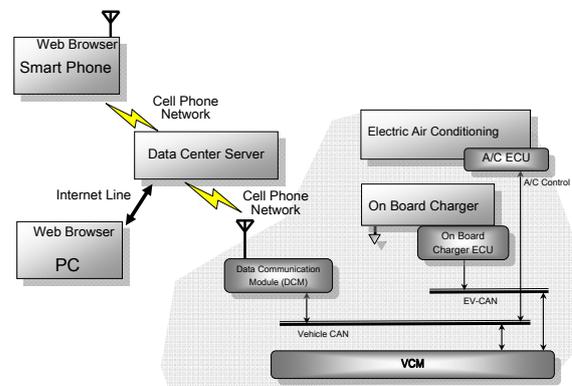


Fig.4 Remote Control System

3. 制御系の開発

3.1 MBD を活用した制御システム開発

これまで述べてきたような、ガソリン車にはないモータ駆動系制御や高電圧制御を搭載した VCM の制御ソフトウェアを、高い信頼性を保ちながら効率良く開発するために、制御対象と制御器をモデル化して制御開発を進める MBD を活用した。特に、車両全体を制御する VCM では、その制御プログラムを更に機能別にサブプログラムに分割した上で、その相互関係を「模式化」「見える化」してつながりを明確に定義して、大規模な制御プログラムをサブプロ

グラム別に分割並行開発した。

3.2 制御プログラムの実装

VCMの制御プログラム開発には、制御系CADであるMATLAB/Simulinkを採用した。このとき、VCMの入出力回路にアクセスするために、VCMのハードウェアに適合する専用インターフェース制御ブロックを独自開発し、プログラム開発環境に組み込んだ。これによりMATLAB/Simulinkのオートコード機能を最大限活用できるようになり、ソフトウェア設計～実装～検証という開発サイクルを短縮し効率的な開発が可能になった。

機能別に並行して開発されるプログラムは、ソフトウェアのバージョン管理ツールを使用しそれぞれの変更履歴を細かく管理した。またソフトウェア管理上のルールを明確に定め開発者間でこれを遵守する体制を築くことで、組み合わせ違いなどによる機能不全などの混乱を未然に防止した。

3.3 HILSによる検証

開発した制御ソフトウェアは、それぞれのユニットごとにHILSで動作を検証し、更に、これらのHILSを相互に接続してデミオEVの高電圧系全体をシミュレーション可能なHILSを構成して、システム故障に対するVCMの動作(フェイルセーフ)を確認した。

HILSは制御対象の動作を再現したシミュレーションモデルによって実車両で制御ユニットに入力される電気信号を模擬し、その電気信号を制御ユニットに力設入力して制御ユニットやそのプログラムの開発・検証を行う技術である。従って、HILSを構成するためには、制御対象のシミュレーションモデルが必要であり、デミオEVの制御開発でも、従来の内燃機関車両にはないインバータ/モータ駆動系およびバッテリーに対して、独自にそのシミュレーションモデルを作成した(Fig.5)。

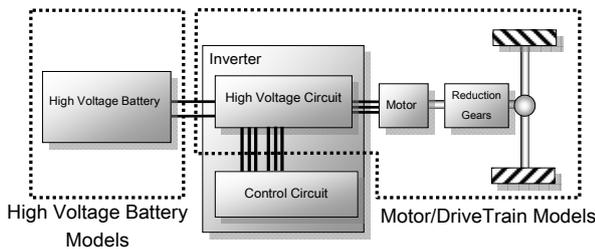


Fig.5 Motor and Battery Model

(1) モータ・駆動系 HILS

モータは電気エネルギーを機械エネルギーへ変換するデバイスであることから、モデルは大きく分けると電気系モデルと機械系モデルから構成されている。電気系モータモデルは、式(1)式(2)に示すdq軸基本モデルをベースにしてモデル化を行い、また、機械系モデルは式(3)に示す回転運動の運動方程式をベースにMATLAB/Simulinkを用いてモデル化を行った。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt}L_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + \frac{d}{dt}L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = P_n \{ \Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (2)$$

v_d/v_q : d/q軸電圧, i_d/i_q : d/q軸電流, R: 巻線抵抗, L_d/L_q : d/q軸インダクタンス, Ψ_a : 鎖交磁束, ω_e : 電気角速度, P_n : 極対数

$$J\dot{\omega} = T_e - T_m \quad (3)$$

J: イナーシャ, T_e : モータトルク, T_m : 負荷トルク
 ω : 機械角速度

デミオEVは巻線切り替え機構を備えたモータを搭載しており、回転数に応じて使用する巻線状態が動的に切り替わる。上記電気系モータモデルの(1)式(2)式のパラメータはモータの形状やコイルの巻方で決まるため、巻線を低速側から高速側に切り替えることでこれらのパラメータが変化するが⁽¹⁾、モータの機械系は切り替えによって変化しないため機械系モデル(3)のパラメータは変化しない。モータの2つの巻線状態に対してそれぞれ電磁界解析を行って電気系モデルのパラメータを抽出してマップ化し、回転数に応じてこれを切り替えることで巻線切り替えを備えたモータをモデル化した。

(2) バッテリー HILS

バッテリーに対しても、電力要求に対する電流応答を電解液中と電極中で異なるイオン拡散速度を反映した2段RC回路をベースにモデル化した(Fig.6)。このモデルをシミュレータに搭載し、パック内で96直列に接続されたそれぞれの電圧を出力してバッテリーコントローラに入力したHILSを構成し、高電圧制御系の動作検証を進めた。

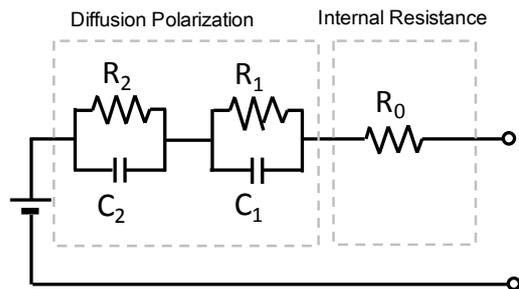


Fig.6 Principle of Battery Models

(3) 車両 HILS

上記モータ/バッテリーのHILSに加え、車両や急速充電器などを模擬する車両HILSを接続し、計3台のHILS構成でEVシステム全体の制御系開発を行う環境を整備した(Fig.7)。3台のシミュレータは光ファイバで接続され、各モデル間の演算パラメータを高速で授受することで、1台の車両として振る舞う。

EVは複雑にシステムが絡み合っており実車での確認が困難であるが、複数のHILSを接続し、各コントローラを

実車両と同様に CAN で接続して制御開発を行うことで、

- ① 各コントローラ間の微妙な通信タイミング
EV システムの起動・遮断シーケンスなど
- ② システム間の制御連携や干渉

フェイルセーフ挙動の他システムへの影響有無などが机上で確認できるようになると同時に、実世界では再現の難しい様々なフェイルなどを網羅的に考慮したテストシナリオに基づいて検証することで、高品質な制御を効率的に開発することが可能となった。

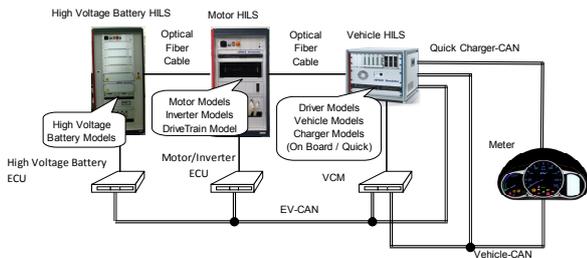


Fig.7 Entire vehicle HILS

4. デミオ EV のフェイルセーフ

4.1 フェイルセーフの概要

電気自動車の制御はパイワイヤシステムとなるため、フェイルセーフには特に配慮する必要がある。デミオ EV における制御系のフェイルセーフは、内燃機関車両制御系のフェイルセーフをベースとして、充電を含む高電圧系とモータ駆動系に拡張したものになっている。

デミオ EV では電気の供給や走行の指示は高電圧/駆動制御系の CAN を経由して送られる制御システムとなっており、フェイルセーフでは CAN 信号に対する故障診断に特に注力した。この CAN 信号に対する故障診断は、(1)相互監視：ユニットごとの制御器が相互に出力を監視し故障を検出する、(2)故障診断結果共有：故障を検出した場合、その故障を他のユニット制御器と共有しシステム全体に影響を与えない、(3)通信異常：CAN 通信自体の状態を監視し故障を検出した場合システムを安全な状態へ移行させる、などの機能を備え、車両全体の状態を監視・故障の検出を行っている。

故障を検出した場合、VCM は故障の重篤度に応じて車両を以下のフェイルレベルに移行させると同時にユーザにその状態を提示して対応を促すことで、安全を確保すると同時に利便性の低下を最小限にとどめている。

- レベル 4：警告灯点灯
- レベル 3：制限走行（トルク抑制）
- レベル 2：走行禁止（高電圧供給継続）
- レベル 1：高電圧供給を遮断

4.2 フェイルセーフの検証

デミオ EV の制御系は、VCM を中心に構成されており、フェイルセーフにおいても VCM を中心とした検証を進め、全ての VCM 入出力と CAN で接続されたユニットを対象

として、フェイル時の動作を検証した、

更に、連続して発生した複数の故障に対しても、数万通りの故障組み合わせをリストアップし、(1)故障検出の独立性：最初の故障が発生しても問題なく次の故障が検出できること、(2)故障検出の影響性：最初の故障の結果が影響して他の故障を誤判定しないこと、の観点から確認が必要な約 4,000 通りの組み合わせを抽出して、HILS・実車を用いて独立性と影響性を検証した。

5. まとめ

デミオ EV の制御システムについて解説した。制御系は車両全体を制御する VCM を中心として構成されており、アクセル操作に対するリニアでなめらかな駆動トルク応答により、エンジン車両との違和感がなく、かつ、電気自動車らしい走りでの“Zoom・Zoom”を具現化した。

この制御プログラムは MBD を活用して開発を進め、万一のシステム故障に対しても、車両を安全に制御できるように、車両全体を HILS によって再現した動作確認も行ってフェイルセーフを検証した。

参考文献

- (1) 前村明彦：埋込み磁石形同期電動機の電子巻線切替えによる速度範囲の拡大方法，平成 22 年電気学会産業応用部門大会，p.II-93-96 (2010)

■ 著 者 ■



福庭 一志



浦本 征吾



吉末 知弘



岡本 篤



畠山 未来



三戸 秀樹



大佐古 昌和



末富 隆雅

特集：新型車（デミオ EV）

26

電気自動車の衝突安全性能開発 Development of Crash Safety Performance for EV

神本 一朗^{*1}
Ichiro Kamimoto

元木 正紀^{*2}
Masaki Motoki

上野 正樹^{*3}
Masaki Ueno

要約

近年、地球温暖化問題や化石燃料枯渇問題など、環境への関心が高まっている。マツダでは当環境問題への取り組みとしてSKYACTIV engineを皮切りに、ビルディングブロック戦略を着実に実現しつつあり、その一環としてHEV (Hybrid Electric Vehicle) やBEV (Battery Electric Vehicle) の開発にも取り組んでいる。電気駆動車両においては、従来の化石燃料車では装備していなかった高電圧部品の衝突安全への配慮が必要となる。

本稿では、駆動用バッテリーやインバータ、モータ、ハーネスなど高電圧部品を搭載した電気自動車の衝突安全性能開発について紹介する。

Summary

There are growing concerns about environmental problems such as global warming and exhaustion of fossil fuel. Mazda is steadily adopting the Building Block Strategy as an approach to such environmental issues, starting with the SKYACTIV engine. As part of this approach, Mazda is also working on the development of HEV and BEV. Electric vehicles demand a lot of attention to ensure high crash safety performance for high voltage parts which the existing fossil fuel-powered cars are not equipped with.

This paper introduces the development of crash safety performance for Electric Vehicle which contains high voltage parts such as the propulsive battery, inverter, motor and harness.

1. はじめに

地球温暖化問題や化石燃料枯渇問題への関心が高まる中、自動車メーカーにとり、車の燃費向上や二酸化炭素の排出量の削減への対応が急務となっている。これらの動向に対する一つの対応として、電気駆動モータを用いた電気自動車（以下EV）の開発や商品化が各メーカーで活発化している。マツダにおいても、ビルディングブロック戦略として、アイドリングストップにはじまり、減速エネルギー回生、そしてHEVやプラグインHEVも視野にいれて段階的に電気デバイスを導入する予定であり、その一環としてEVの商品開発を行っている。EVには、ガソリン車の燃料タンクやエンジンの代わりに駆動用バッテリーやモータなどの高電圧部品が数多く搭載される。従って、EVの開発では、従来の車の衝突安全性能に加えて、衝突時に感電から人を守るために高電圧安全の確保が必要となる。本稿では、「デミオEV」を例にEVの衝突

安全性能開発の取り組みについて紹介する。

2. 衝突時の高電圧安全の基本

本章では各国の主な高電圧衝突安全関連の法規について紹介し、EVの基本的な高電圧安全の考え方について述べる。

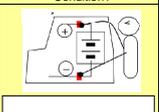
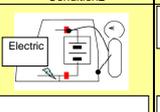
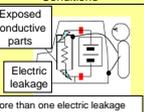
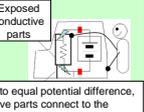
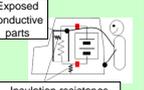
2.1 各国の高電圧安全法規

EV乗車中、メンテナンス中、あるいは、事故の際のレスキュー時などの場面において、人体が感電する主な状況はTable 1に示す3つのケースにまとめることができる。Condition 1は電位差のある2つの露出活電部に人体が触れることで感電するケース、Condition 2は1ヶ所の絶縁性能の低下がある場合に、人体が露出した活電部とボデーに触れることで感電するケース、Condition 3は高電圧部品絶縁ケーシングとボデーなど2ヶ所以上での絶縁性能の低下部位があり等電位化されていない状態のケーシングと

*1~3 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

ボデーの双方に触れることで感電するケースである。各国の衝突時の高電圧安全法規の基本的な考え方は、Table 2 に示すように「直接接触保護」と「間接触保護」と「絶縁抵抗の保持」の組み合わせによる感電からの保護を必要事項としており、加えて有害なバッテリー電解液の流出防止、バッテリーの飛散防止などの要件を要求している。そこで、マツダの衝突時の高電圧安全基本方針を、市場事故で想定される事故のモードに対して高電圧バッテリーの電解液流出防止と固定保持に加えて、「直接接触保護」と「間接触保護」への対応と、レスキュー時の感電防止を勘案した「高電圧遮断」を必要基本性能として確保すること、また、法規で「絶縁抵抗の保持」と「低電圧化」が求められる場合には、これらにも確実に対応できる技術を確保することとした。

Table 1 Electric Shock Conditions and Protections

Electric shock Conditions	
Condition1	Condition2
	
Direct contact with more than one live parts.	An electric leakage and direct contact with live part.
	
	More than one electric leakage and exposed conductive parts are not equivalent potential difference the electrical chassis.
Requirement	
Protection against direct contact with high voltage live parts	 Investigation the conditions of protection IPXXB.
Protection against electrical shock with arise from indirect contact	 In order to equal potential difference, conductive parts connect to the electrical chassis.
Electrical Isolation	 Insulation resistance  Insulation resistance

Requirement of the electrical power train operating on high voltage		JPN	EU	USA
		ECER-94,R-95	ECER-94,R-95	FMVSS305
I. Protection against electrical shock	1. Protection against Direct contact with high voltage live parts			
	2. Protection against electrical shock with arise from indirect contact			
	3. Electrical Isolation			
	4. Automatic disconnection and low voltage, low electrical energy			
II. Rechargeable energy storage system retention	Rechargeable energy storage system (RESS) retention			
	Electrolyte spillage			

Table 2 Regulatory Requirement of the Electrical Power train Operating on High Voltage

2.2 直接接触からの保護

直接接触回避とは、人体が活電部に直接接触することのない構造とすることで感電させないようにすることである。具体的には通電部を絶縁性の被覆や構造体で隔離する構造が挙げられ、Table 1 中の Condition 1, Condition 2 の感電条件を防止する。

2.3 間接触からの保護

間接触回避とは、高電圧部品と車体の当電位を確保することにより何らかの理由で高電圧部品内での短絡が発生した場合でも人体を経由した回路ができないようにすることである。具体的には、各高電圧部品と車体間の導通を保つために人体よりも抵抗の低い部品でアースを取る方法が挙げられ、Table 1 中の Condition 3 の感電条件を防止する。

2.4 高電圧の遮断

高電圧遮断の目的は、電源を電氣的に隔離することで感電を防止することであり、加えて過電流による電気火災を防止する機能もある。具体的には、駆動用バッテリー内のシステムメインリレーをオープンにすることで高電圧回路を遮断する。

3. EV の高電圧システムの概要

本章では、デミオ EV の主要な高電圧システムの概要を説明する。Fig.1 に構成部品を示す。駆動用バッテリーとしてフロア下からリヤシート下の範囲にリチウムイオンバッテリー（高電圧バッテリー）を搭載しており、そこから高電圧ハーネスを介して直流電力をインバータへ供給し交流へ変換後モータを駆動し走行する。

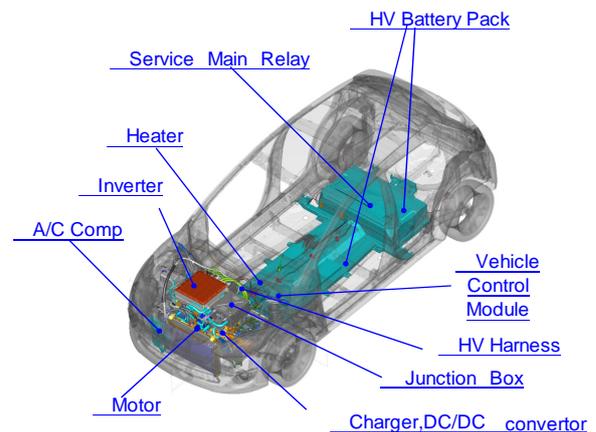


Fig.1 System of Electric Drive Vehicle

3.1 EV の高電圧システム

駆動用システムの電源として、また、補器類作動用の 12 V バッテリーの電源として、高電圧バッテリーからそれぞれに電力を供給する。公称電圧は 346 V で、電気容量は 20 kWh である。走行時にはバッテリー電力をインバータにて直流 346 V から交流へ変換する。その電流で駆動用モータが回転し、駆動力がトランスアクスルを介してタイ

ヤへ伝達される。また、減速時の制動力はモータにより回生され、電力に変換され、再びバッテリーに電力として蓄えられる。通常充電時には一般電源からの供給電力が充電器・DC-DCコンバータユニットを介して高電圧バッテリー電圧に昇圧され、充電される。また、高電圧バッテリーから一般電装品用の12Vバッテリーへの電圧変換もこのユニットで行われる。他にも、各ユニット間への配電ボックスであるジャンクションボックスや、車両の電気駆動システムを制御するビークルコントロールモジュール(VCM)、メンテナンスやレスキュー時の安全作業のために高電圧回路を意図的に解除するサービスプラグ、エアコン用電動コンプレッサやPTCヒータ(暖房用電熱ヒータ)などの高電圧システムが装備されており、それぞれが高電圧ハーネスにより結線されている。

4. 衝突時の高電圧安全確保のための対応

本章では、デミオEVにおける特徴的な高電圧安全の工夫点について詳細を解説する。高電圧バッテリーの保護構造詳細、および、FEM解析を用いた性能予測、実車衝突試験による評価結果について紹介する。最後に、衝突検知式高電圧電源遮断システムについて述べる。

4.1 高電圧部品の基本レイアウト

デミオEVの高電圧バッテリーの基本レイアウトについて紹介する。Fig.2に示すように、高電圧バッテリーや高電圧ハーネスをはじめとする高電圧部品は乗員が直接触れることができないようにキャビン外側にレイアウトしている。これは衝突時に乗員が高電圧のバッテリーターミナルや高電圧ハーネスに直接接触し感電するのを防ぐことを目的としている。また、高電圧バッテリーと高電圧ハーネスをフロントフレーム(サイドメンバ)やサイドシル、フロアフレームといった骨格部材より車体内側に配置し、衝突時の変形が及びにくい部位にレイアウトし保護する考え方である。

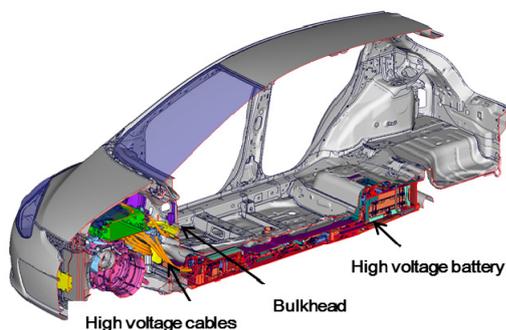


Fig.2 Layout of High Voltage Cable and Battery

4.2 高電圧バッテリーの保護構造

デミオEV高電圧バッテリーの保護構造について紹介する。Fig.3は、ベース車であるデミオのホワイトボデーとバッテリー形状を示している。骨格フレーム内に最大限のバッテリー搭載ができるようにレイアウトや形状や取り付け構造を

工夫した。これにより、衝突時の車体変形や衝撃からのバッテリー保護を可能とした。また、バッテリーモジュールは、アルミ製フレームの筐体で包み込む構造とすることで、複数の構造体で保護するようにしている。これは、特に市場事故での電柱や立木に側面から衝突するといった局部的に大きな車体変形が発生する事故を想定した場合でも、バッテリーモジュール本体の破損による感電や漏電火災を防止するための配慮である。

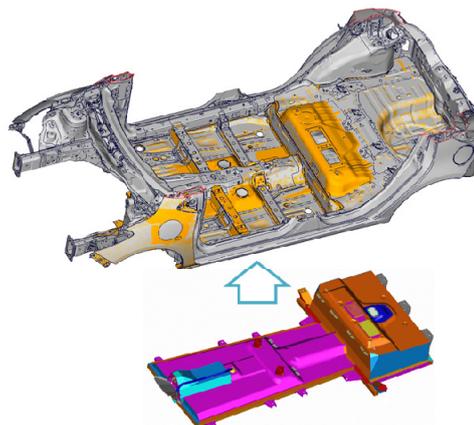


Fig.3 Mounting Electric Drive Battery

4.3 モータールーム内の高電圧部品の保護構造

デミオのフロントフレームは、前面衝突時に先端部が軸圧縮して衝突エネルギーを効率良く吸収した後、エンジンルーム内のクラッシュスペースを十分に使い切るためにフレームを曲げ変形させる構造を採用しエンジンルームでの衝突エネルギー吸収を最大化させている。デミオEVにおいても同じフロントフレーム変形モードを実現させるため、インバータ等の高電圧部品のレイアウトに配慮した。これは、Fig.4, 5に示すようにインバータや充電器などの高電圧部品は左右のフロントフレーム間を橋渡す2本のクロスバーの上に配置することで、高電圧部品の前突時のフレーム変形への影響を回避するとともに、高電圧部品のフロントフレーム間へのレイアウトを可能とした。これにより、前突時のフロントフレームによるエネルギー吸収と高電圧部品の保護を実現している。また、前出のクロスバーをマスタバックとABSユニットに意図的に干渉させることで前突時のハーネス生存空間を確保し、このゾーンに高電圧ハーネスを集中配置することで衝突時のハーネスの破損を防いでいる。

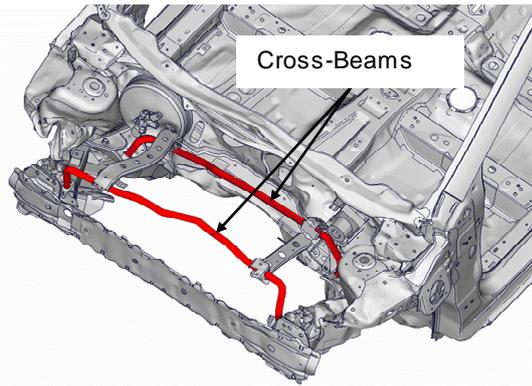


Fig.4 The Cross-Beams on Front Side Frames

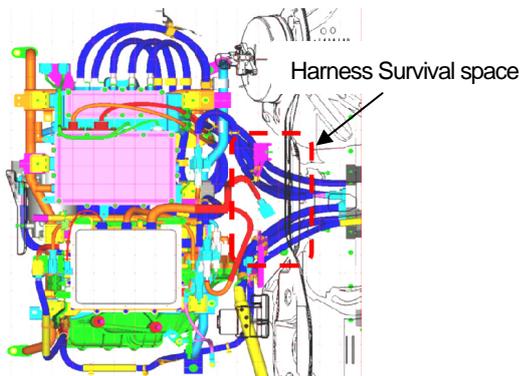


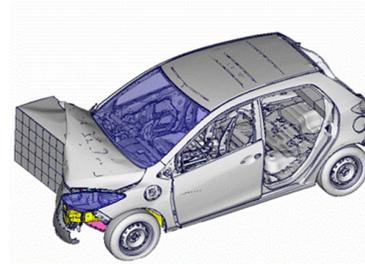
Fig.5 Survival Space for High Voltage Cables

4.4 衝突時の高電圧安全評価

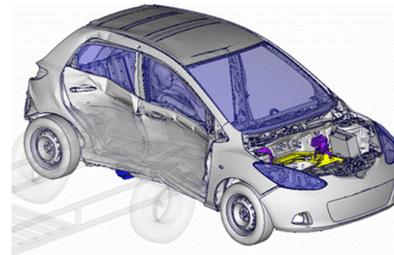
デミオ EV の開発過程では衝突時の高電圧部品の保護に関する徹底した評価を行っている。本章では例を挙げて紹介する。

(1) CAE を用いた衝突安全評価

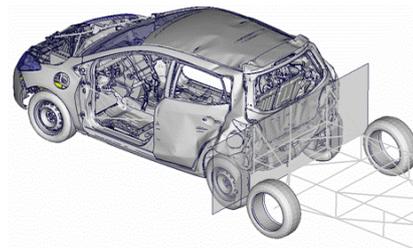
Fig.6 に示すように市場の事故を模擬したさまざまな衝突形態で CAE 評価を実施し、高電圧バッテリーやモータ、インバータ、高電圧ハーネスなどの高電圧部品に対する安全評価を行った。特に高電圧ハーネスは、衝突時の車体変形による挟まりやエッジ干渉が発生すると、絶縁抵抗の低下や活電部が露出し感電につながるリスクが高い部品であるため、CAE 上でもハーネスの挙動や潰れが再現できる詳細なモデルを作成し衝突中の挙動を解析して配置を決定した。また、評価モードは従来の乗員保護の観点で実施しているモードに加えて、高電圧部品のレイアウトを踏まえて損傷を被りやすい衝突形態を選択し追加評価を行った。更に、追加のモードでは、エアバッグセンサ判定による高電圧遮断が作動することを評価している。



Offset frontal Crash



Lateral Crash



Rear-end Crash

Fig. 6 CAE Evaluation in Various Crash Modes

(2) 実車衝突試験での衝突安全評価

Fig.7 に示すように市場の事故を代表する衝突形態で実車による試験を実施し、高電圧バッテリーやモータ、インバータ、高電圧ハーネスなどの個別部品ごとに損傷の有無と導通抵抗値の計測、絶縁抵抗値の計測を行い、「直接接触からの保護」、「間接接触からの保護」、「絶縁抵抗の保持」の観点で高電圧保護性能が確保されていることを確認している。また、乗員保護性能についても評価を行い、前面衝突、オフセット前面衝突、側面衝突の各衝突モードでデミオ EV はベース車のデミオ (ガソリン燃料車) と同等の性能を有していることを確認している。



Offset frontal Crash



Lateral Crash



Rear-end Crash

Fig. 7 Actual Vehicle Crash Tests

4.5 衝突検知による高電圧電源遮断機能

デミオ EV では、衝突時の感電防止のために直接接触，間接接触の保護に加え衝突検知を活用した高電圧電源遮断システムを採用している。このシステムにより、衝突後の感電防止性能をより高めている。

Fig.8 に高電圧電源遮断システムの模式図を示す。車両前後左右の衝撃力は加速度センサで計測されて衝突の検知をレストレイントコントロールモジュール (RCM) が実施する。次に RCM から高電圧システムを制御するピークルコントロールモジュール (VCM) へ衝突検知信号が送られ、その後 VCM が高電圧バッテリー内のシステムメインリレー (SMR) を遮断する。この高電圧電源遮断システムを実車評価した結果、前面衝突の場合は衝突後、瞬間的 (100 ms 以内) に作動することを確認している。

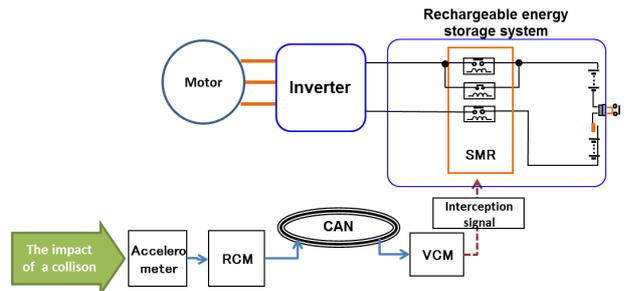


Fig.8 Automatic Disconnect System

5. まとめ

本章では、デミオ EV の衝突時の高電圧安全性能開発への取り組みについて紹介した。下記にその要点を示す。

特徴的な高電圧安全の工夫点として、高電圧部品のレイアウト、高電圧バッテリーの保護を目的としたレイアウトや衝突検知システムを活用した高電圧電源遮断システムを紹介した。

高電圧部品の高電圧衝突安全の一例として、市場での事故を模擬したさまざまな衝突試験における高電圧バッテリーの保護に関する評価結果を示した。

乗員保護性能についても、ベースのデミオと同等の安全性能を達成していることを示した。

著 者



神本 一朗



元木 正紀



上野 正樹

特集：新型車（デミオ EV）

27

感電安全を考慮したワイヤハーネス設計の紹介 Wire Harness Design for Electric Shock Prevention

佐藤 宏樹*1
Hiroki Sato

松川 剛志*2
Takeshi Matsukawa

要約

マツダは環境技術としてアイドリングストップシステム「i-stop」や減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」を搭載した商品を順次市場導入している。

マツダは1966年にEV開発に着手し、これまでに約70台のEVを市場導入してきた。デミオEVは将来の本格的な量産に向けた取り組みとして、現行デミオの基本構造を共通化しつつ、EV用機器（以下高電圧機器という）、及びワイヤハーネス（以下高電圧ハーネスという）を搭載するコンセプトで開発したものである。デミオEVは動力として高電圧を使用しているため、人体への感電防止と従来と同様の信頼性を両立した設計に加えて、今後段階的に導入予定の電気デバイスを含めたEVプラットフォームの構築を目指した。

Summary

Mazda has been launching new products equipped with environmental technologies such as an idling stop system, “i-stop”, and a regenerative braking system, “i-ELOOP”.

Mazda has started EV development since 1966, and released about 70-sets EV. Among such products, the DEMIO EV is positioned as the next action for future full mass production, using a common base-structure with the current DEMIO, and installing the devices for EV (high voltage devices) and wire harnesses for connecting them. As the car uses high voltage for its power, an electric shock preventive design is considered while high reliability is kept as before. The EV platform is constructed in view of other electric devices to be incorporated step by step.

1. はじめに

マツダは段階的にアイドリングストップシステム「i-stop」、減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」、モータ駆動技術などの電気デバイスを導入する「ビルディングブロック戦略」（Fig.1）を推進しており、今後導入する商品においては、パワーソースを内燃機関に加えて高電圧の電気デバイスを段階的に採用し、優れた環境性能の実現を目指している。一方、車両の高電圧化は、高電圧という新たな危険因子を市場へ追加することを意味する。これら高電圧機器を接続する高電圧ハーネスも、従来と同様の信頼性と安全性を確保するだけでなく、機器の高電圧化に伴う人体への感電防止を考慮した設計が必須である。本稿では、

高電圧システム搭載における感電安全を考慮したワイヤハーネスの設計の取り組みを紹介する。

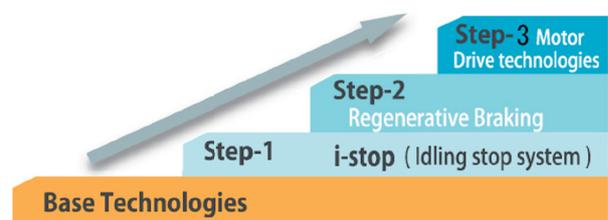


Fig.1 Building Block Strategy ⁽¹⁾

*1, 2 電子開発部
Electrical and Electronics development Dept.

2. 開発コンセプト

デミオ EV は現行デミオのデザイン、居住性を維持しつつ (Fig.2) , 現行デミオのプラットフォームに EV システムを搭載することで“Zoom-Zoom”な走りの進化とともに、従来同等の信頼性と実用安全の確保に加え、高電圧からの感電防止構造の構築を目指した。



Fig.2 DEMIO EV

デミオ EV におけるワイヤハーネス開発の注力ポイントは以下である。

- ・感電安全設計
 - ・活電部の直接接触保護
 - ・露出導電部の間接接触保護
 - ・高電圧ハーネスの絶縁
 - ・衝突時の感電安全設計
- ・EV プラットフォームの構築
 - ・EV プラットフォーム
 - ・充電インレットのパッケージング

3. 感電安全設計

3.1 感電に関する安全思想

電気自動車をはじめとする高電圧機器や高電圧ハーネスを搭載する車両には、感電等に関する法規が定められている。マツダにおける感電安全の統一安全思想は、市場はもちろんのこと、取引先様も含めた社内外の人々には感電に対する知識はないという考えのもと、

- ・予見や回避行動は期待しない。
- ・“うっかり”行動は考慮の範囲内とする。

ことを前提としている。

マツダはお客様をはじめ、サービスマン、生産ライン作業員、開発者、消防レスキュー関係者、警察関係者など、いかなる人々にも感電させないための施策を講ずることが自動車メーカーとしての使命と捉えて、施策を以下のように定めた。

- ・構造的な安全確保を最優先とする。
- ・1つのミスや故障では感電に至らない配慮をする。
- ・電動化車両に接触する全員に教育、啓蒙を実施する。

高電圧の感電は、人体を介して電流が流れる閉回路が構

成された場合に発生する。主として閉回路が構成される状況は以下のような場合である (Fig.3) 。

- ・高電圧+/-の活電部分両側に直接接触した場合
- ・高電圧部の絶縁抵抗低下時に露出導電部に間接的に接触した場合

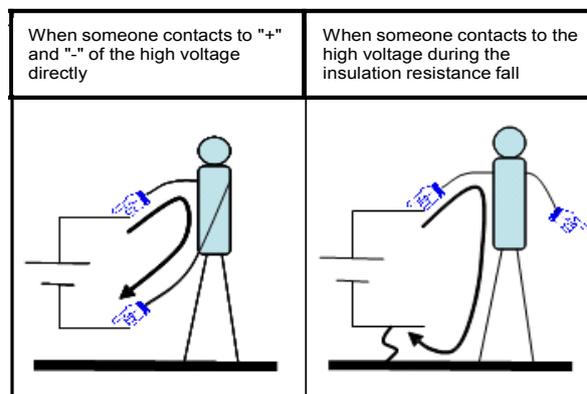


Fig.3 Situation with the Danger of an Electric Shock

デミオ EV では、法規要件の適合に加えて他に1つ以上の構造的な感電防止策を講じる二重系保護を基本として設計することとした。二重系保護とは2つ以上の防止策が失陥しないと、上記に示すような人体を介した閉回路が構成されず、感電には至らない配慮をした設計のことである。

3.2 感電安全設計の重要性

デミオ EV の開発では、先ずワイヤハーネスの機能を FMEA で徹底的に見つめ直し、網羅的に故障モードが及ぼす影響を確認することから始めた。その結果、高電圧ハーネスの故障による影響で最も重大な事象が「感電」であり、感電防止は商品の基本品質として考慮すべき性能であると捉えた。

感電は「故障」のみに起因して発生するとは限らず、開発段階から生産、物流、お客様の使用、サービス、廃却など時系列的な検証に加えて、人為的なミスやイレギュラな使用や作業も想定した検証にて、あらゆる感電シーンを洗い出す必要がある。

マツダでは高電圧ハーネスも含めた高電圧システムについて感電を Top 事象とした FTA にて網羅的に感電シーンを洗い出して、必要な施策を実施した。

内容は設計的な感電防止構造の採用、絶縁保護着用等の作業要領の教育、マニュアル等多岐にわたる。

3.3 具体的な設計の考え方

設計的な感電防止構造は、主としてワイヤハーネス単体の信頼性確保と、車両の実用に耐え得るパッケージングを確保することである。特に衝突安全性能はその性能の大部分がパッケージングで決まるため、デミオ EV の開発では先ず必要な衝突安全性能を満足するパッケージングを成立させることから着手した。

電気自動車の衝突後の感電安全は、法規で定められている。デミオ EV の衝突時の感電安全設計は基本的に法規で定められている衝突モードに加え、市場での事故を代表する、さまざまな衝突モードにおいても高電圧ハーネスを損傷させない構造とした。更に、衝突時に高電圧を自動的に遮断するシステムや高電圧機器内部の残留電荷を強制的に放電するシステムを搭載することで、上述の安全思想に則った設計を実現した。

通常使用時の感電安全に関しても同様である。お客様の整備／点検時に触れる可能性がある部位は、ブラケットや他の部品等のバリヤやエンクロージャによる感電防止構造の採用や、活電部が露出した直後に、危険電圧以下に下げる設計によって二重系保護を実現した。

以下にその内容を詳述する。

3.4 活電部への直接接点保護

高電圧+/-両方に、人体が直接接触すると感電が発生する。直接接触による感電リスクは、その感電防止構造が故障や外乱によって失陥した場合のみとは限らず、量産ラインや市場での整備や点検時等、完成車でない状態に車両に触れるだけでも感電のリスクがある。電気保安統計（政府統計）による、過去の感電事故を原因別に見てみると、人為的なミスや不注意、過失によるものが多くを占めていることが分かっており、工場やディーラでの作業工程、開発中の評価も含めた一連のプロセスを考慮しなければならない。高電圧機器内部の活電部は高電圧から絶縁された筐体で覆われており、通常の使用過程において直接人体が接触するリスクは少ない。一方、高電圧ハーネスの活電部は機器を接続する電線の芯線部分と圧着された端子部分であり、芯線部分は絶縁体の被覆で覆われているものの、端子部分はコネクタの脱着によって容易に露出する。従って、コネクタは量産ラインや市場サービスでの脱着作業性を確保しつつ、容易に活電部が露出しない構造が必要となる。デミオ EV では、コネクタ部をバリヤで保護することを最優先で検討した。まず、完成車状態において、コネクタのロック部分に手が入る可能性がある箇所に対しては、容易にコネクタが脱着できないようコネクタのロック部分を覆い隠すブラケットを設定した。具体例を Fig. 4 に示す。

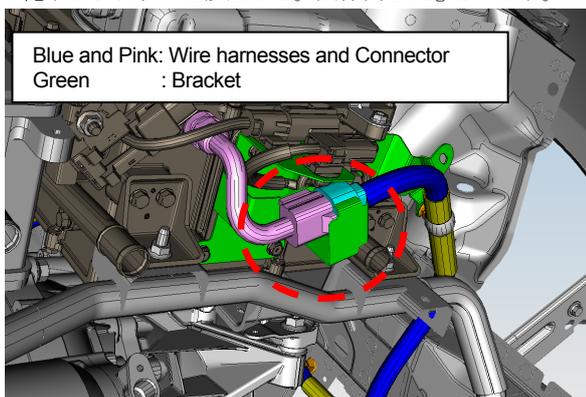


Fig.4 Protect high Voltage Connector by the Bracket

ブラケットの設定が困難な箇所は、意図的に工具でクリップを取り外さないと、コネクタ脱着作業ができない構造を採用して、容易に活電部を露出させない構造を実現した。具体的には、オス側にコネクタ固定用、メス側にもクリップを設定し、双方のクリップアンカ部を取り付け穴に差し込み、コネクタの挿抜軌跡上にクリップアンカを座面へ干渉させることで、量産ラインでのコネクタ結線作業性を確保しつつ、クリップをブラケットに嵌合させた後は、工具で、コネクタをブラケットから外さないと、コネクタの脱着ができない構造とした。具体例を Fig. 5 に示す。

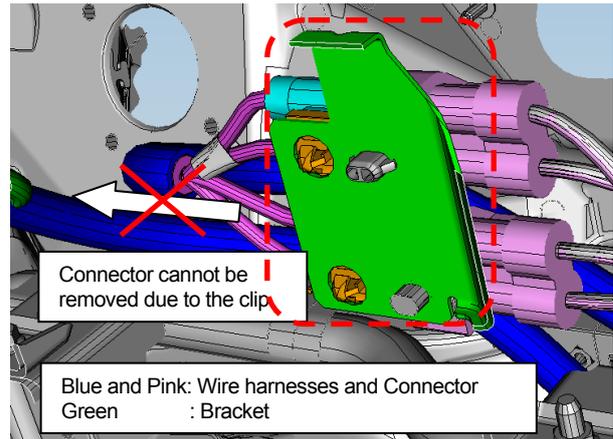


Fig.5 Protect High Voltage Connector by the Clip

これらは物理的に活電部に到達するまでの「壁」を作ることであり、安全性を担保する最も有効な手段であると考えている。しかし、新たな部品を設定することによるコスト/質量 UP とパッケージングに制約を与えることとなり、車両全体で考えると必ずしも有効な手段となるとは限らない。加えて採用したのが、コネクタが取り外された直後に活電部が危険電圧以下の電圧となる構造である。これはコネクタが取り外されても安全な状態を作ることである。デミオ EV では基本的に高電圧の+側をメス端子、-側にオス端子を採用し、コネクタを分離した状態で接触が容易なオス端子は危険電圧が生じないように配慮するとともに、パッケージングの都合上コネクタへのアクセスが容易な箇所についてはインターロック回路を設定した。インターロックとは高電圧コネクタ内に 12V 系回路を同時に設定し、接続状態をモニタして、接続されていない状態 (OPEN) を検出すると高電圧を遮断するシステムである。実施例を Fig. 6 に示す。

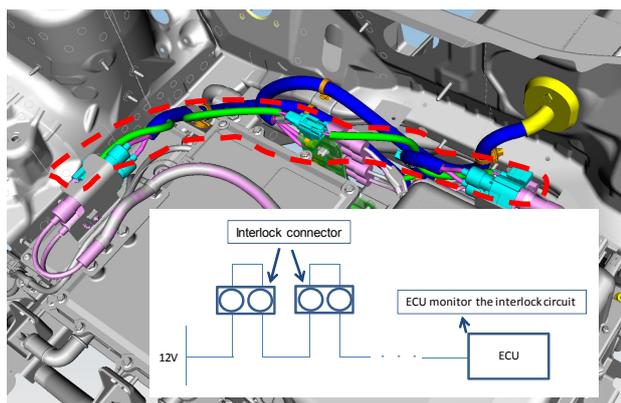


Fig.6 Interlock Circuit

これらは机上での設計検証に加えて、開発車にて安全性に問題ないことを確認した。

3.5 露出導電部の間接接触保護

故障によって高電圧部の絶縁抵抗が低下し、通常は絶縁されている高電圧機器の筐体などに漏電して、その部位に人体が接触して閉回路が形成されると感電に至る。この防止策として、万一人体が接触しても人体への通電電流を極力小さくする目的で、常時露出している導電性部分は車体との等電位化を行っている。等電位化は筐体と車体とを固定する締結部分で電気的な接続を作る方法と、ワイヤハーネスで接続する方法がある。車体へのボルト等による締結で電気的な接続を作る方法は、追加部品が不要であることが大きなメリットであるが、車体は、絶縁性の塗料で塗装されているため、安定的な性能を出すにはアースボルト等で締結し、締結部から車体まで確実に電気的な接続を保証する必要がある。一方、ワイヤハーネスによる接続は、専用の電線や端子等が必要であるが、EMC (Electromagnetic Compatibility) 性能等も考慮した位置に設定できる点が優れている。デミオ EV では基本的に筐体と車体の電気的接続はワイヤハーネスで接続している。

3.6 高電圧ハーネスの絶縁

高電圧システムが、外部と十分な絶縁を保持していないと人体の接触によって閉回路が形成されて感電に至る。デミオ EV の高電圧ハーネスを構成する電線やコネクタは、必要な絶縁抵抗、耐電圧性能を有していることを確認している。

3.7 衝突時の感電安全設計

通常使用時だけでなく、衝突時における高電圧の保護要件が法規で定められている。

高電圧ハーネスは、活電部を電線被覆やコネクタハウジングで保護しているが、衝突後においても、他の部品との干渉等に起因した活電部の露出による、人体への感電を避けなければならない。また、衝突時においては高電圧の電圧レベル及び電気エネルギーに関する要件も定められており、デミオ EV の高電圧システムは一定以上の衝撃を検知する

と、自動的に高電圧システムを遮断し、残留電荷を強制的に放電するシステムを搭載している。

デミオ EV の高電圧ハーネスのパッケージングは、正突フルラップやオフセットなど数種類の衝突モードにおける接触や挟まれ、相対変位による電線の引っ張りなどでの芯線の露出、コネクタの破損等、高電圧ハーネスが損傷しない構造を採用した。構造決定に当たっては CAE を中心とした検証を行った。実施例を Fig.7 に示す。

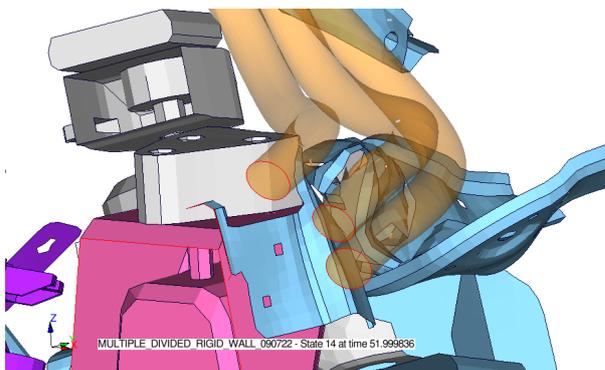


Fig.7 Crash CAE of DEMIO EV

高電圧遮断システムや強制放電システムの制御は、12V 系の高電圧システム制御機器によって行っている。これらの制御に関わる 12V 系ハーネスも、衝突時の高電圧ハーネスと同様の考え方で保護する構造を採用した。

12V 系ハーネスは保護構造に加えて、さまざまな衝突モードにおける、システム作動への影響範囲を最小限にするため、システムを構成する部品を最少とするよう設計した。また、高電圧遮断システムは、衝突時のボデーとの接触によるハーネスの損傷で高電圧制御用の回路が地絡して、高電圧遮断システムの機能不良につながる可能性がある。

万一、損傷しても地絡と同時に制御用の電源回路も遮断できるハーネス配策の工夫で、ロバストなパッケージングを実現した。

12V 系の高電圧システム制御機器の電源分配も、衝突時における高電圧の強制放電システムの制御回路を他機能と独立した電源回路とする等、他システムのショート故障においても確実に作動するよう設計した。

4. EV プラットフォームの構築

4.1 EV プラットフォーム

既述の感電安全設計と並行して、エンジン車の基本構造を流用しつつ効率的に EV へ、載せ替えを可能とする EV プラットフォームを構築した (Fig.8)。

デミオ EV に織り込んだ EV プラットフォーム構造を以下に詳述する。

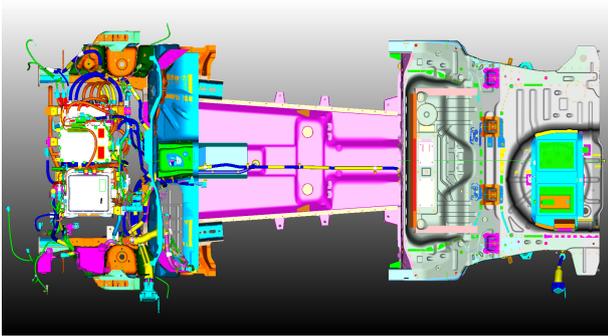


Fig.8 EV Platform

高電圧ハーネスの車体取り付け経路は、内燃機関用の部品である、フューエルパイプや、ヒータホースと置き換えることで、衝突安全性能などの諸性能の確保と、車体構造の共通化を図り、現行デミオと同一の量産ラインでの車両組立製造も可能とした EV プラットフォームを実現した。

更に、12V 系の高電圧システム制御機器の車両搭載位置とそれらを結ぶ、制御回路の 12V 系ハーネスの経路は、先ず 12V 系の高電圧システム制御機器を、助手席フロア配置として、フロア下のバッテリーを制御するハーネス回路は最短経路とし、質量抑制と車体共通化を実現した。

今後の EV 開発においては EV プラットフォームをベースとした更なる理想の追求が必要であり、発展させていく方針である。

4.2 充電インレットのパッケージング

高電圧機器の中には、直接お客様がアクセスする充電インレットがある。他の高電圧機器と違い、充電インレットはお客様自身が充電時に接続する部位であり、他の高電圧機器同様の考え方の感電安全設計に加えて、充電インレットの接続操作性等も考慮した設計が必要である。

エンジン車にない充電インレットの車載配置は、さまざまな車両環境とお客様の使用状況を想定した未然防止の設計と、車載状態での確認検証を実施すべく、各開発部門の協力による FMEA を実施した上で決定した。使用頻度が高い普通充電 (AC) インレットは、エンジン車と同様に違和感なく取り扱えるよう従来のフューエルリッド部に (Fig. 9)、急速充電 (DC) インレットは、充電中であることの認知性を高めるため、左側のフロントフェンダ部 (Fig. 10) とした。また、充電インレット部はボデー側を庇とする設計等、被水や塵埃等に対してロバストなパッケージングとした。



Fig.9 AC Charge Inlet (Rear Fender LH)



Fig.10 DC Charge Inlet (Front Fender LH)

5. おわりに

今回のデミオ EV は、開発部門、生産部門、物流部門、サービス部門、取引先様と一丸となった ONE MAZDA の活動により、車両を取り巻く全ての人々に安全で信頼性の高い商品を提供することができた。

今後の EV 開発においては、高電圧機器を安全に車載する技術開発が使命と捉え、安全で信頼性の高い商品の導入を最優先としていく。一方、パワートレインの電動化が拡大している中、車両全体でワイヤハーネスが占めるコストや質量も飛躍的に増大しており、同時にこれらの低減が必須の状況となっている。

EV プラットフォームを通じて、理想の追求と更なる進化を実現し、全てのお客様へ飲ばれる商品が提供できるように ONE MAZDA で邁進していく所存である。

参考文献

- (1) 吉田ほか: 新型デミオ向けバッテリーマネジメントシステムの紹介, マツダ技報 No.29, pp.14-19 (2011)

■ 著 者 ■



佐藤 宏樹



松川 剛志

特集：安全

28

マツダの安全性向上の取り組み Mazda's Improvement Measure in Safety

竹本 崇*1
Takashi Takemoto

下野 博典*2
Hironori Shimono

中野 隆裕*3
Takahiro Nakano

渡辺 通成*4
Michinari Watanabe

要約

自動車の安全性能を高め続けることは、自動車企業として必要不可欠な活動である。2007年に「持続可能なZoom-Zoom」宣言を掲げたマツダの安全への取り組みの考えは、「ドライバを信頼・尊重して運転状況を正しく認識し、判断・操作を支援するだけでなく、事故リスクが拡大している時には、ドライバに気づかせてリスク拡大の回避行動を促し安全に運転している状態を拡大する。更に、ミスゼロにはできない人間の本質を理解した上で、時として避けられないドライバのミスにも対応し、事故被害の防止・軽減をサポートする技術も提供していく」ことである。また、安全技術は世の中に普及してこそ価値を発揮する。マツダは、こうした安全技術の普及も目指していく。

Summary

A continuous improvement of a vehicle safety performance is an indispensable activity for an automobile company. Mazda, that published a sustainable "Zoom Zoom" declaration in 2007, has been executing safety actions based on the philosophy that "while trusting and respecting drivers, Mazda not only supports drivers to comprehend a driving condition and assists drivers to make a correct judgment and to execute appropriate operations, but also to help drivers to extend a safe drivable conditions by notifying a driver of a risk to them by facilitating avoidance activities of a risk increase when an accident risk is evolving. Furthermore, understanding the human nature, unfortunately, can never eliminate all errors to zero, Mazda's vehicle addresses a driver's unavoidable mistake by developing and providing technology that prevents and alleviates damages as a result of an accident." Mazda recognizes that a safety technology can demonstrate its true value of technology only when the technology is prevalent. Mazda aims to permeate a safety technology throughout communities.

1. はじめに

自動車の安全性能を高め続けることは、自動車企業として企業活動を継続する上で、必要不可欠な活動である。マツダもこれまで継続的に安全技術を開発育成し、自動車製品としての安全性能向上を行ってきた。こうした脈々とした安全性能向上への取り組みの根底にある使命や意味(第2章)、マツダとしての安全への取り組みの考え方(第3章)、更に実際に市場導入を行ってきた安全技術の全体像(第4章)を説明紹介し、これからの安全技術を展望する(第5章)。

2. 自動車の安全性能向上への取り組み

2.1 自動車の役割

自動車は交通移動の手段として、その利用者の意志によって、自分だけでなく複数の人や物を運ぶことを可能にする。また、利用者がいつでも使えるだけでなく、その人の行動半径を広げて社会活動や経済活動を充実化させ、生活を豊かにすることに貢献してきた。つまり、自動車とは、人々の暮らしの中に深く浸透し、人々の経済活動、社会活動とともにある欠かせないものである^①。一方で、環境(エネルギー資源消費、CO₂排出など)や、交通安全(事故による損失など)の点において、社会的費用を発生させている^②。こうした社会

*1~4 技術企画部
Technology Planning Dept.

的費用を最小化する対策を行い、生活の豊かさを最大化していくことが、自動車の使命であり、自動車を製造販売する企業の命題である。

2.2 自動車安全の取り組み視点

近年の世界の人口増加率は年率 1~2%であるが、世界の自動車保有台数の増加率は、年率 2.5~3.5%で、自動車の保有台数は一貫して人口を上回る拡大を続けている。

こうした世界規模での自動車普及の潮流の中で、世界保健機構 (WHO) によると、交通事故による死者数は、世界全体 (2004 年) で 130 万人、負傷者数は 2,000~5,000 万人に達する。更に、2004 年時点で世界の死亡理由の 2.2% (第 9 位) であった交通事故は、2030 年には 3.6%に上昇し死亡原因の 5 位になるという予測もされている⁹⁾。世界的視野で、交通安全対策を考える必要がある。

過去、日本においても交通事故死亡者が 16,000 人を超える交通戦争と表現される時期があった。こうした問題は、自動車が普及する過程で、その普及スピードに人々の安全感覚 (安全希求水準)、自動車の安全性能、道路インフラの整備や交通ルールの整備が伴わずに発生したものであり、交通安全の取り組みは、自動車利用者・製造者・社会が協調し、「人・クルマ・道路/インフラ」の 3 つの視点で総合的な取り組みを進める必要がある。

2.3 自動車安全対策の今後の課題

日本の交通事故対策政策として、昭和 46 年以降 5 年ごとに策定されてきた交通安全基本計画では、重要課題として交通死亡事故対策が継続的に掲げられた。前述の「人・クルマ・道路/インフラ」の 3 つの視点から、道路整備やシートベルト義務化、アンチロックブレーキやエアバッグの自動車安全装備の普及など様々な交通安全対策が講じられ、着実な改善が進んだ。その中で、平成 13 年の第 7 次交通安全基本計画以降は、交通事故被害対策だけでなく、重大事故そのものの低減にも意識が向けられ始め、予防対策への期待が強まってきた。

一般に、事故の背景的構造は、ハインリッヒの法則で説明され (Fig.1)、自動車事故に関してもこの法則概念が当てはまる。この法則に基づけば、重大な事故を予防するためには、背景的に潜んでいる軽微な事故自体を減らす取り組み、すなわち、事故という結果に対して防衛する対処的視点から、事故原因を取り除く原因的視点が重要になる。

つまり、これから我々に必要とされる安全への取り組みは、世界規模の視点を持った上で、各国の自動車普及実態 (道路交通環境や人々の安全意識、提供する自動車の安全性能) を理解し、原因的対処を継続強化していくことであると考えている。

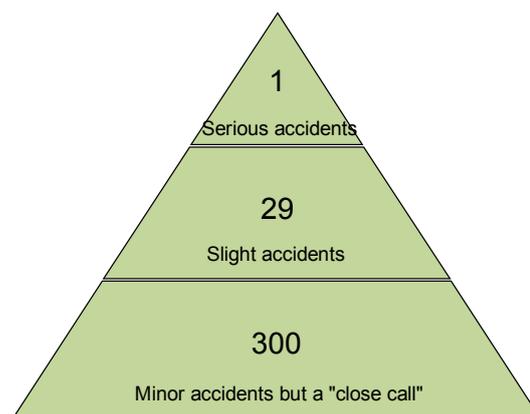


Fig.1 Heinrich's Law

3. マツダの安全への取り組み

3.1 マツダの安全性能向上についての基本的な考え方

マツダとしても、交通安全対策に必要な「人・クルマ・道路/インフラ」の 3 つの視点での取り組みを行っている (Fig.2)。本紙では、クルマからの安全への取り組みを説明する。

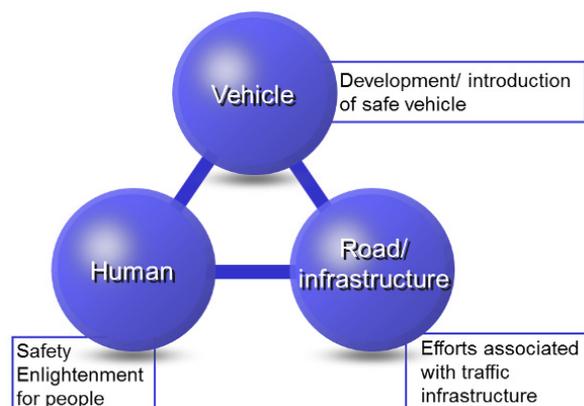


Fig.2 Viewpoint to Safety

Fig.2 に示した視点での取り組みを基本的な土台としながら、2007 年にサステイナブル“Zoom-Zoom”宣言として、『マツダ車をご購入いただいたすべてのお客さまに「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を提供する』ことを掲げた (Fig.3)。これは交通安全という多面的かつバランスのとれた総合的な取り組みが必要な課題に対し、まず、マツダ自らが主体的に行動できるところから (クルマ作りを通して)、全てのお客様に優れた安全性能を提供していくという意味である。このメッセージには、安全技術の先進性は磨き続けるとともに、世の中に普及してこそ価値を発揮する安全技術について、お客様や社会への受容性 (経済性や機能性) の向上を行い、技術普及を目指していく意志が込められている。

Basic Policy

Deliver "Driving Pleasure" and "Excellent Environment/Safety Performance" to all customers who buy Mazda's vehicles.

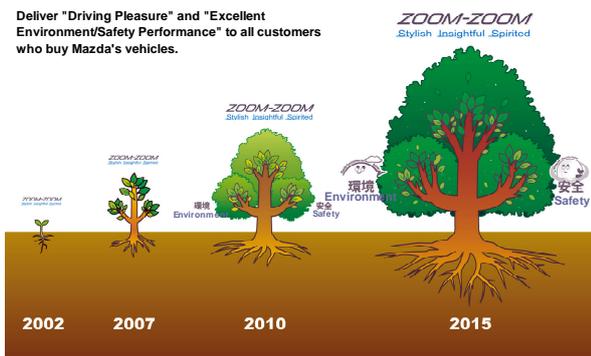


Fig.3 Sustainable "Zoom-Zoom" Announcement

3.2 マツダが実現を目指す安全の姿

前述のような考え方に則って全てのお客様に安全性能を提供していくが、「どのような安全の実現を目指していくか」について、以下のように考えている。

- ① ハインリッヒの法則を拡張して考えると、事故の陰には、『事故に至らなかった"ひやり"や,"あわや"というミス』があり、更に『普段の運転におけるストレス・不安・不便・疲れ』という運転集中の阻害因子が存在している (Fig.4)。事故の結果に対応するのではなく、事故に至る過程の中で、可能な限り、こうした潜在的な要因に対策することによって安全を確保していく。
- ② ドライバを安全確保の主人公と考え、ドライバを信じて尊重し、ドライバに対して行き過ぎた介入は行わない。クルマは、ドライバが正しく運転状況を認知して判断できるように支援して、安全に運転していただけるようにする。それだけでなく、時としてミスを起こしてしまう人間を理解し、ミスを守る技術や重大な事故につなげない技術の提供を通して安全を確保していく。

こうした考え (MAZDA Proactive Safety) の全体像を事故までのリスクの程度・段階に応じて構造的に整理したものが、Fig.5 である。まず、お客様の普段・平常時における運転の不安・ストレスを取り除き、集中して運転していただけるシーンを拡大したいと考えている。具体的には、良好な運転環境の追求 (視界視認性, 操作性, 操縦安定性の基本機能向上と安全装備など) により、お客様が運転状況を正しく認識できるように支援し、正しい判断, 正しい操作ができるように、安全に安心を感じて運転している状態を最大化していく。事故のリスクが発生し拡大している時には、クルマ側のセンシング機能を使ってドライバにその危険に気づかせて、ドライバ自身による回避行動を促し、安全な状態に戻していく。こうした積極的に早めに事故に至るリスクに対応し安全に運転している状態を拡大

していく (Fig.6)。更に、ミスやエラーをゼロにはできない人間の本质を理解し、時として避けられないドライバのヒューマン・エラーに対しても、可能な限り発生を防ぎ、「もしも」の場合は、車の安全機能によって、事故被害を軽減する。事故に至る時間的猶予が、ドライバ自身による事故回避行動の必要時間より短くなった場合には、ドライバ自身による安全確保はできない。こうした状況になった場合は、車が事故に備えて、重大な事態を引き起こさないようにドライバを守る。こうした人間尊重と人間理解に基づいた安全技術提供を通じて、ドライバの安全安心な運転を支えていく。

可能な限りリスクが拡大しないように早めのリスク解消をするために、事故リスクの状況に合わせた対応を行うが、安全対策のアプローチは、「もしも」から考える (結果対策から考える) 対応ではなく、普段・平常時から考える (普段の運転の質を高め、事故に至る原因の芽を早期に摘み取る) ことを充実させていこうとしている。

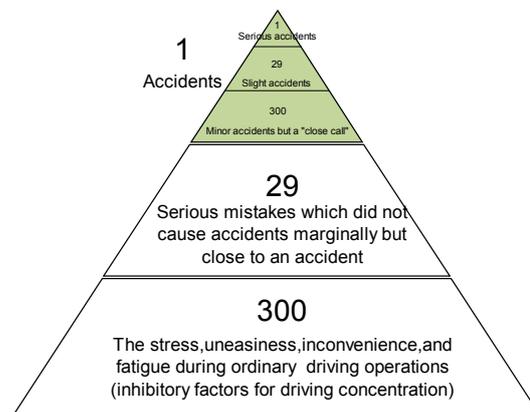


Fig.4 Structure of the Background of Accidents

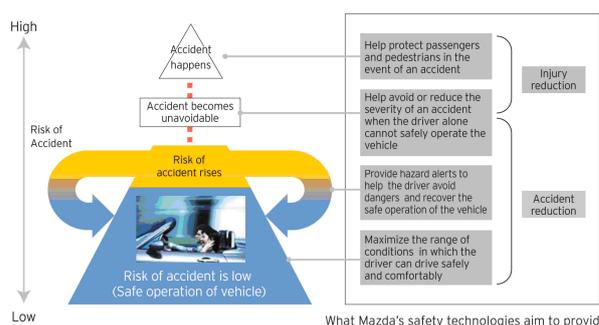


Fig.5 Safety Mazda aims to Realize

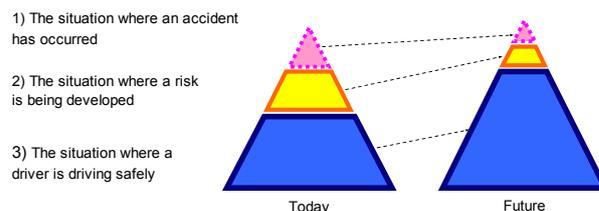


Fig.6 Expansion of Safety

Table 1 Mazda's Safety Technologies

Category	Accident reduction		Injury reduction	Support after accident *for certain models only
	Accident prevention (Active Safety technology)	Mitigation of risk/damage from the accident (Pre-Crash Safety technology)	Minimizing injuries in accidents (Passive Safety technology)	
Vehicles <small>(Setting status of Safety Technologies depends on market, model, and grade.)</small>	<p>Alerts drivers to potential danger</p> <ul style="list-style-type: none"> Monitoring systems for vehicles approaching from behind on either side: Blind Spot Monitoring (BSM)/Rear Vehicle Monitoring (RVM) system Emergency Signal System (ESS) Lane Departure Warning System (LDWS)¹ Front Obstruction Warning (FOW)¹ <p>Supports to avoid danger</p> <ul style="list-style-type: none"> Brake assist and EBS 4-wheel antilock braking system (4W-ABS) Dynamic Stability Control (DSC) Brake Override System (BOS) Acceleration Control for AT (additional function of SCBS)² <p>Provides driving support</p> <ul style="list-style-type: none"> Parking assist system Intelligent Drive Master (i-DM) <p>Supports both safety and 'Driving Pleasure'</p> <ul style="list-style-type: none"> SKYACTIV-CHASSIS: A newly developed front strut and rear multi-link suspension system; a lightweight cross member with high rigidity Inter-car distance control feature: Mazda Radar Cruise Control System Adaptive Front Lighting System (AFS) High Beam Control (HBM)² Power windows with injury prevention function Water-repellent window glass Improved front field vision² Organ-style accelerator pedal² 	<p>Minimizes damage in an accident</p> <ul style="list-style-type: none"> Smart Brake Support (SBS)¹ Smart City Brake Support (SCBS)² 	<p>Helps to protect drivers/passengers in accidents</p> <ul style="list-style-type: none"> SKYACTIV BODY: Straightened the basic frame and continuous framework, multi-load path structure Curtain and front airbags Soft interior to absorb impacts Seats designed to reduce impacts to the neck / rear seats that resist against luggage flying forward Pre-tensioners and load-limiter seatbelts Collapsible brake pedal ISO-FIX-compliant child seat anchoring point Impact-absorbing steering column <p>Minimizes damage in an accident with pedestrians</p> <ul style="list-style-type: none"> Impact-absorbing bumpers Impact-absorbing hood Active hood³ 	<p>Automatically sends information about current location (Mazda G-BOOK ALPHA)</p> <ul style="list-style-type: none"> HELPNET G-Security
People	<p>Safety education</p> <ul style="list-style-type: none"> Safety-related exhibitions at the Mazda Museum Traffic safety awareness quiz website for children Presentation of safety technologies at various events 			
Roads and infrastructure	<p>Initiatives for a safe society</p> <ul style="list-style-type: none"> Intelligent Transport Systems (ITS) Smart Traffic Flow Control ITS Spot services ASV-5*² Road-vehicle communication ITS (DSRC)² 			

4. 具体的な安全技術の商品導入

4.1 市場導入技術の全体像と進化ロードマップ

前述の考え方にに基づき、マツダでは、事故防止技術の開発や、衝突安全性開発などの安全性能向上のための研究開発に取り組み、より安全なクルマづくりを行っている⁽⁴⁾。こうした安全技術の性質を「事故を未然に防止する技術（アクティブセーフティ技術）」から「事故のリスク/被害を軽減する技術（プリクラッシュセーフティ技術）」、「万が一の事故の被害を軽減する技術（パッシブセーフティ技術）」に分類し取り組みの全体像を体系的に整理したのが、Table 1 である。

4.2 事故を未然に防止する技術

Table 1 の「事故を未然に防止する技術（アクティブセーフティ技術）」は、ドライバの危険回避や危険の認知をサポートする技術が中心であり、その技術の 1 つに、リアビークルモニタリングシステム (RVM) がある。このシステムは、運転進行方向に意識を集中しているドライバに対して、後方から接近中の車両や、車線移行する際に接触危険性のある後側方の車両への知覚を高めるシステムである。あたかも、ドライバに対して、直接見えないリスクの気配を感じ取れるように支援する技術である。

また、夜間走行時のドライバの視覚・認知能力を拡大する技術として、ハンドル操舵に応じて前照灯を進行方向に向けるアダプティブフロントライティングシステム (AFS) や、前方走行車両や対向車を直射しないように配慮しながら可能な限り視認できる範囲を広げるハイビームコントロール (HBC) などの技術を市場導入している。目視困難な暗闇を可視化するナイトビジョン (暗視装置) は 2012 年現在、高価であるが、上述のような照明技術の工夫によって安価に提供できることで、安全対策の普及を目指していくことが可能になると考えている。

他にも、ドライバの運転環境を整えることも事故につながるリスクの発生を防ぐことになる。快適な運転視界を確保することで安全な運転をサポートするため、A ピラーを一般的な車両よりも後ろ側にレイアウトすることで、交差点での右左折時などに歩行者がピラーに隠れることを防ぎ、斜め前方が確認しやすいよう設計した。更に、A ピラーとドアミラーの間に十分な隙間を設け、運転席側・助手席側ともに横断歩道を歩行中の子どもも視認しやすくし、安全な運転をサポートしている (Fig.7)。こうした構造的な対策技術も、広くお客様に提供可能な地道かつ重要な「事故を未然に防止する」技術である。

4.3 事故のリスク/被害を軽減する技術

「事故のリスクを軽減する技術（プリクラッシュセーフティ技術）」として、万が一事故が避けられなくなった場合に、運転者および同乗者の被害を緩和させるためにクルマ側からの被害軽減方法として緊急時の自動ブレーキ技術も市場導入している。どの市場でも発生頻度が高い追突事故の多くは、低速走行時のドライバの不注意や油断によって発生している。スマート・シティ・ブレーキ・サポート（SCBS）は、上述の状況で前車への追突が回避困難な状況になった場合、クルマ側が自動的にブレーキをかける技術である（Fig.8）。この技術が機能する制動能力範囲は限定的（低速度域）ではあるが、雨天時にも安定的に機能する技術であり、かつ安価で普及を目指せるシステムである。

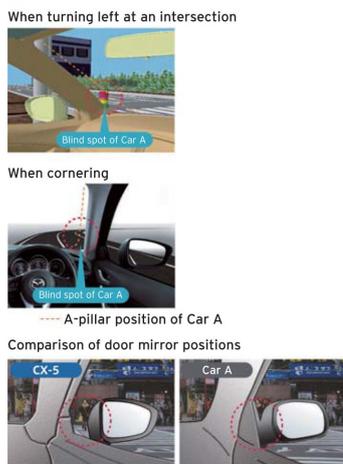


Fig.7 Front View Improvement by A-pillar Form



Fig.8 Smart City Brake Support

4.4 万が一の事故の被害を軽減する技術

「万が一の事故の被害を軽減する技術（パッシブセーフティ技術）」として、各国・各地域の法規で定められている条件だけでなく、道路上で発生しうる様々な状況を想定した衝突実験を行い、乗員保護の技術を着実に進化させている。CX-5以降順次適用していく新世代の軽量・高剛性「SKYACTIV-BODY」は、ボデー構造の原理原則に立ち返り、構造、工法、材料を一から見直した理想のボデーを目指して開発している。前後のバンパビームに、世界最高の強度を持つ1,800MPa級の自動車用高張力鋼板を採用するなど、ボデーの61%に高張

力鋼板を使用し、軽量化を追求するとともに高い衝突安全性能を実現した（Fig.9）。このような「もしも」の際にドライバや乗員を守る技術についても地道な技術進化を行い、CX-5では米国IIHS（注釈※1）のトップセーフティピック2012や、ユーロNCAP（注釈※2）で最高評価の5つ星を獲得した。また、新型ロードスターでは、スポーツカーとしてボンネットを低く抑えたデザインを維持しながら、万が一の事故の際に、ボンネット後端を瞬時に持ち上げて、エンジンとボンネットの間に衝撃を吸収する空間を確保し、歩行者の頭部への衝撃を緩和する「アクティブボンネット」（歩行者保護システム）を開発して、同車へ初採用している。

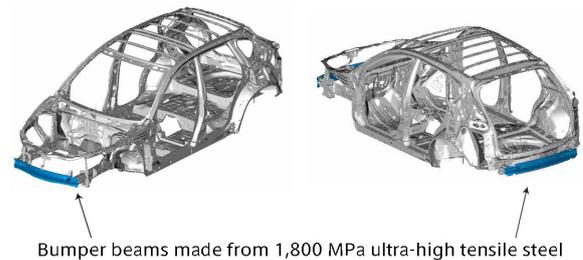


Fig.9 SKYACTIV-BODY

注釈※1：Insurance Institute for Highway Safetyの略。安全性評価を行っている米国保険業界の非営利団体。

注釈※2：New Car Assessment Programの略。世界各国で実施されている、新しい自動車の衝突安全をはじめとする安全性を評価・公表する自動車安全性テスト。

5. おわりに（今後の展望）

安全技術の目的は、その技術の価値を直接的・間接的に受け取る方々に、安心を生み出すことだと考えている。心理的安心を達成するためには、技術的安全の提供を土台に、コミュニケーションを通して、利用者や関与者に「理解できる・頼りになる・役立つ」と実感していただくこと、更には持続的に取り組むことが欠かせない⁽⁵⁾。お客様、更には社会に安心を生み出すために、今後ともたゆまぬ安全への取り組みを進めなければならない。

また、今後普及が進む事故予防の先進安全技術が、お客様の過信を生むことがあれば、安全技術が持っている価値を発揮させることができない⁽⁶⁾。安全技術は、お客様・使用者の安全感、安全行動能力を高め、研ぎ澄ませるために使われることが理想だと考えている。ドライバを深く理解し、ドライバの安心を高め、社会の安心を高めるためにこれからも真剣な取り組みを継続していく。

参考文献

- (1) 日本自動車工業会, 自動車の役割と安全・環境への取り組み 豊かなクルマ社会の実現に向けて, 自動車技術会 HP (2011)
- (2) 宇沢弘文: 自動車の社会的費用, 岩波新書 (1974)
- (3) World Health Organization, 世界の交通安全に関する報告<Global status report on road safety> (2009)
- (4) マツダ サステナビリティレポート (2011)
- (5) 酒井幸美ほか: 原子力発電所に対する安心感の構造 (2003)
- (6) 伊藤 誠: 信頼されすぎない高信頼度なシステムへ (日本信頼工学学会) (2003)

■著者■



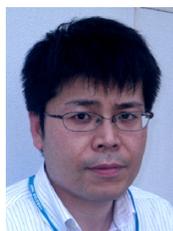
竹本 崇



下野 博典



中野 隆裕



渡辺 通成

特集：安全

29

衝突安全開発における CAE の進化

Evolution of CAE Technology in Crash Safety Development

河野 勝人*1

Katsuhito Kouno

上野 正樹*4

Masaki Ueno

朝日 龍介*2

Ryusuke Asahi

小島 宏介*5

Kosuke Kojima

杉本 繁*3

Shigeru Sugimoto

花田 裕*6

Yu Hanada

要約

マツダでは「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を持つ商品の開発を目指している。その中で、衝突安全開発においては、安全性能と軽量化という背反する課題を高次元で両立させるために、CAE (Computer Aided Engineering) を駆使して車両構造を開発している。SKYACTIV-ボデーに代表される車体開発においては、高精度な CAE モデルを用いて、衝突荷重を効率的に分散させるマルチロードパソコンセプトを採用した新しい構造を作り上げた。更に、この車体モデルと高精度なダミーモデル、内装・拘束装置モデルを組み合わせ、車体変形挙動から乗員傷害値まで予測可能な CAE 技術を開発した。この技術を CX-5 開発にフル適用し、世界トップレベルの衝突安全性能を実現した。

Summary

To develop a vehicle that offers “driving pleasure” and “excellent environmental and safety performance”, we made full use of CAE (Computer Aided Engineering) in developing crash safety performance, with an eye to achieving two conflicting targets: A high level of safety performance and weight reduction. In developing the new vehicle structure, which is represented by SKYACTIV-BODY, we analyzed the loads transferred to each part of the body by use of highly accurate CAE models. This led us to develop a “multi-load path” structure in which loads are dispersed across multiple parts of the body. In addition, by a combination of this body model, high-precision dummy model, and interior and restraint system model, we developed a CAE technology that makes it possible to even predict body deformation behavior and occupant's injury value. By fully applying this technology to the CX-5 development, we were able to achieve a world's top-level crashworthiness.

1. はじめに

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、マツダ車を購入いただいた全てのお客様に「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の提供を目指して商品開発を行っている (Fig.1)。それを具現化したのが現行デミオ以降導入している SKYACTIV 技術である。特に CX-5 以降では、クリーンディーゼルに代表される新世代のパワートレイン技術と並んで、世界トップレベルの衝突安全性能とクラストップの軽量化を両立する SKYACTIV-ボデーを開発し、これから

順次新型車に展開していく予定である。

SKYACTIV-ボデーの開発においては、衝突安全性能と軽量化という背反する課題を高次元で両立させるために設計段階で徹底的に CAE による検討を行い、車体構造を最適化させた。具体的には、衝突エネルギーを無駄なく車体各部に伝達・吸収させるために、フレームの配置や形状の最適化や高張力鋼板の適用領域拡大の検討を行った。更に衝突時の乗員保護のため、車体変形を分析した上で、乗員に伝わる衝撃を吸収するインパネやトリムなどの内装部品、乗員の挙動をコントロールするシートベルトやエアバッグ

*1~4 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

*5, 6 NVH 性能・CAE 技術開発部
NVH&CAE Technology Development Dept.

などの拘束装置の設計にも CAE 技術を適用することにより車両全体で世界トップレベルの安全性能を実現している。本稿では、マツダの衝突安全性を支えている最新の CAE 技術について報告する。

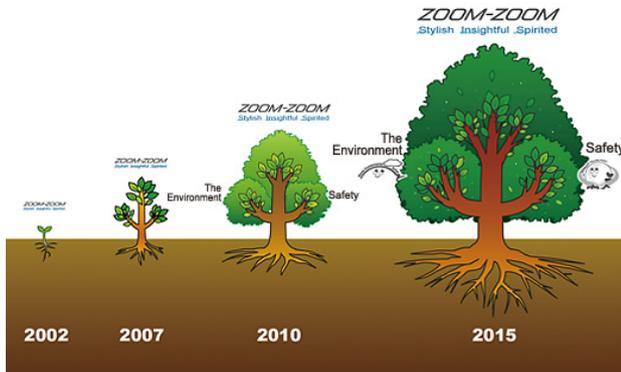


Fig.1 Defining Sustainable Zoom-Zoom

2. 衝突性能開発の概要

自動車の衝突現象は、Fig.2 に示すように車体系と内装系の 2 つに大別できる。自動車の持つ運動エネルギーは車体の変形により吸収され、この際に車体の減速度や各部の変形が内装部品を介して、乗員に伝わることで乗員傷害値を発生させる。乗員を保護するには、意図した車体の変形により、乗員の挙動をコントロールし、最終的には、乗員へのダメージを最小限に抑えることが重要である。このため設計段階で CAE をくり返し、車体の構造や内装部品、拘束装置の仕様を緻密に設計している。

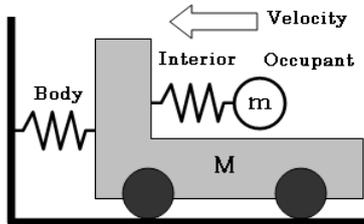


Fig.2 Kinematics Model of Front Impact

3. 車体解析の高精度化

車体の設計においては、衝突過程で車体の各部が時々刻々どのように潰れ、乗員にいかにか減速度や力を伝達するのかを CAE で正しく予測することが必要である。マツダでは非線形解析ソフト LS-DYNA (LSTC-Livermore Software Technology Corp., 米国) による大規模有限要素モデルを用いて車両開発を行っている。CAE の高精度な予測を実現するポイントは、モデルの精密な作りこみである。車体各部の変形形態 (曲げ変形, ねじり変形) や潰れ量をモデル上で再現するためには、詳細な有限要素 (以下, メッシュと呼ぶ) を用いて、潰れの起点となるピード・座面などの形状の不連続や、部材の断面変形を正確に再現することが重要である。メッシュサイズに関しては、小さくするほど部品の形状再現性が向上する反面、要素数の増大と

計算の時間きざみ (タイムステップ) の短縮を招き、計算時間の増大に直結する。この問題に関しては、社内のスーパーコンピュータを継続的に増強し、計算処理能力を向上させることにより解決している。ちなみに、マツダが衝突 CAE を開始した 1990 年代初頭ではメッシュサイズが約 100mm でモデルの総要素数が数万要素程度だったのに対し、現在ではメッシュサイズは 3~7mm まで詳細化し、総要素数も 300~400 万要素まで大規模化している (Fig.3)。

また、近年軽量化の要求から、車体を構成する鋼板材料も多様化している。成形性に優れた低炭素鋼から、高強度な高張力鋼板まで、部位により適切に使い分けられている。これら鋼板の材料特性を正しくモデルに反映させることが重要である。そして、衝突現象で特有となる、過大な入力による溶接点や部材の破断リスクを高精度に予測するモデル化技術を組み合わせることで、軽量でありながら高強度な車体の設計を実現している。

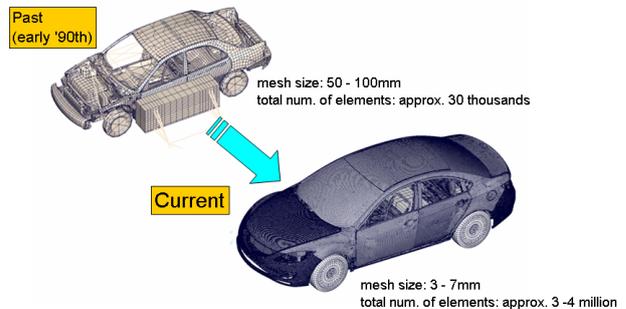


Fig.3 Improvement of CAE Model

4. 乗員傷害値評価技術

前章で述べた高精度な車体解析モデルをベースに、乗員傷害値の予測を可能にした技術を紹介する。

4.1 乗員ダミーモデル

衝突テストでは、各種体型や性別に応じたダミーを用いて、衝突過程での乗員の挙動と、乗員の各部に発生する入力や加速度を計測し、乗員傷害値を評価している。乗員傷害値を CAE で精度よく予測するためには、このダミーのシミュレーションモデルが必要不可欠であり、マツダは、LS-DYNA の高精度ダミーモデルを用いている (Fig.4)。このダミーモデルでは、内部の構造や各ジョイント部の特性まで詳細かつ正確に再現されており、高精度な内装部品や拘束装置モデルと組み合わせ、更に前述の車両モデルに組み込むことにより衝突過程でのダミーの挙動ならびに乗員傷害値を定量的に予測し、これを低減するために最適な車体および内装の構造を開発している。

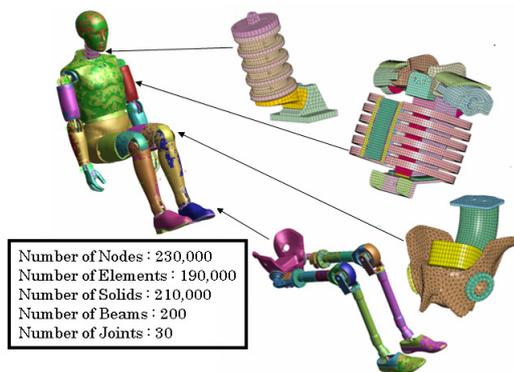


Fig.4 Dummy Model for Front Impact (Hybrid III・AM50 Model, Developed by LSTC)

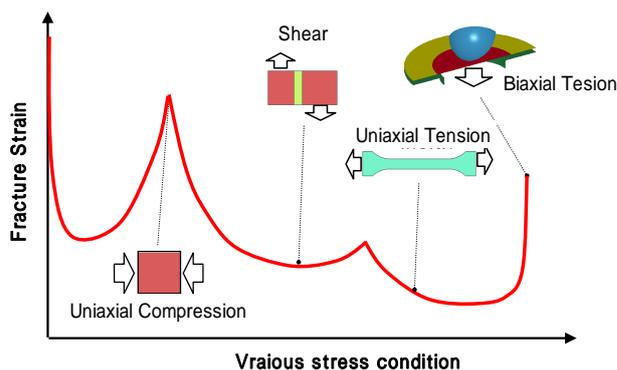


Fig.6 Relationship between Stress Condition and Fracture Strain

4.2 内装部品モデル

乗員傷害値の予測においては、ダミーを取り囲む内装部品からの影響を解析上で予測する必要がある。インパネやドアトリム、シート等は乗員に近く、衝突時にはダミーと接触するためダミーの挙動や乗員傷害値に直接的に影響を及ぼす。これらの内装部品の構造解析には、その主要な材料である樹脂の変形挙動を CAE 上で精度よく予測する必要がある。そのポイントは、材料特性の正確なモデル化であり、鉄鋼材料に比べはるかに高い延性特性やひずみ速度依存性を正しくモデルに考慮する必要がある。更に、樹脂部品は変形時に容易に破断を伴うため、設計段階で破断のリスクを適切に予測することが重要である。これに関しては、まず樹脂部品に特有の、各部で異なる板厚の分布を細かくモデル化するとともに、内部の補強構造であるリブのような形状の細部まで精密にモデル化している (Fig.5)。また、樹脂は発生する応力の状態により破断限界が大きく変化する特徴を持ち (Fig.6)、各要素の応力状態をもとに、破断リスクを判定する手法を開発することで、部品の詳細な構造を CAE により設計段階で決定することができるようになった。

Fig.7, 8 は、前面衝突時のグローブボックス部と膝の干渉を再現した解析結果を示す。グローブボックスを構成する部品の破断を再現することで、衝突の後半に至るまで、膝部への入力を正確に CAE 上で再現できた。

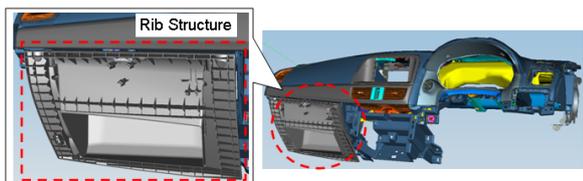


Fig.5 Instrument Panel Model (ex. Glove Box)

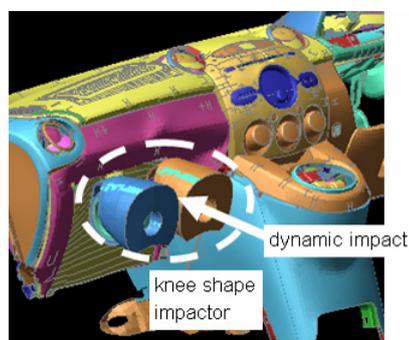


Fig.7 Instrument Panel Knee Impact Simulation

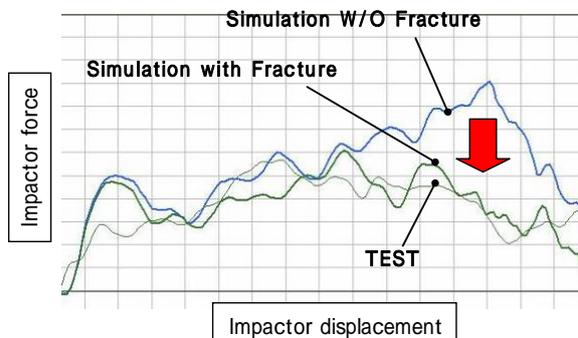


Fig.8 Simulation Result

4.3 拘束装置モデル

拘束装置とは、エアバッグやシートベルトなどの安全デバイスのことである。衝突時にダミーの挙動を制御する機能を持つ。従って、乗員傷害値に対して直接影響を及ぼすため、高度な解析精度が必要である。

衝突時にダミー挙動を制御するために、シートベルトは、衝突の瞬間にベルトを引き込むことにより乗員の拘束性を高めるプリテンショナと、衝突の後半では一定荷重で伸び出すロードリミッタの機能を有している。CAE モデルにおいても実機計測で求めたベルトの引き込み、伸び出し特性を忠実に設定している。

また、エアバッグは、複数の布材を縫製したバッグの基布と、起爆して希ガスを噴出させるインフレーターで構成さ

れる。エアバッグからダミーへの入力を正しく再現するためには、内部の圧力状態を精度よく解析する必要がある。そのためには、基布やインフレータの特性が必要となる。基布の異方性を含めた伸び特性やガスの漏れ量、インフレータ特性などの基礎データを実験から求め、CAEモデルに反映している。

更に、側面衝突のようにダミーとドアトリムの狭い空間でエアバッグが展開する場合においては、展開過程でのダミーへの荷重伝達を正確に予測する必要がある。これに対しては、インフレータからのガスの流動を考慮し、エアバッグの展開順序やダミー各部への入力分布を正確に予測する粒子法によるエアバッグの解析手法を開発した(Fig.9)。粒子法はエアバッグ内部に充填するガスの分子を数10万~数100万の粒子で表現し、基布表面に衝突する粒子の運動量の変化から、エアバッグ内の圧力を計算するものである。詳細なメッシュで作成したエアバッグの基布モデルを、実物の手順に併せて折り畳み、これに粒子法を適用することで、エアバッグの展開挙動やダミー各部への入力を正確に再現できる。この技術は、後述のSKYACTIV-ボデー開発に適用した。

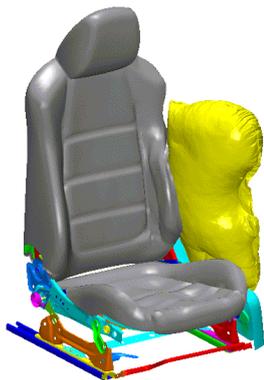


Fig.9 Simulation of airbag deployment
(動画 : SAB-ANIME)

5. SKYACTIV-ボデー開発へのCAE適用事例

5.1 車体開発へのCAE適用事例

以上のCAE技術を、CX-5をはじめとする新世代商品群の車体コンセプトであるSKYACTIV-ボデー開発に適用した事例を、前面衝突を例にして紹介する。

SKYACTIV-ボデーでは、衝突性能と軽量化を両立するために、マルチロードパスコンセプトを採用している(Fig.10)。すなわち、従来の構造では、衝突による入力はエンジンルーム内のフロントフレームを中心に吸収していたのに対し、SKYACTIV-ボデーではエプロンやサブフレームといったフロントフレーム以外の周辺部材にも荷重を分散させることで、エネルギー吸収率を上げつつ、フロントフレームやそれを支えるフレーム後部の負担を軽減することで、車体全体を軽量化するものである。

マルチロードパス構造の実現にあたっては、車体を構成するコンポーネントが、各々所定の耐力を発揮しつつ、適切なタイミングおよび順序で圧潰し、車両全体として目標のエネルギー吸収を達成することが必要である。

そのため、前述のCAE技術を用いて、コンポーネントごとに変形形態や潰れ量に応じた荷重特性の目標を設定し、それを最軽量で実現する構造を決定した。そして、それらを車両として組み合わせた状態で目標どおりの順序で変形し、エネルギー吸収できるよう、コンポーネント間の接合強度や変形の伝達を最適化した。Fig.11にその結果を示す。フロントフレームのみならず、エプロンやサブフレームにも効果的に荷重伝達している様子が分かる。

以上の取り組みにより、SKYACTIV-ボデーでは従来車に対して衝突性能を向上させつつ、車体全体で従来車比8%の軽量化を実現した(Fig.12)。

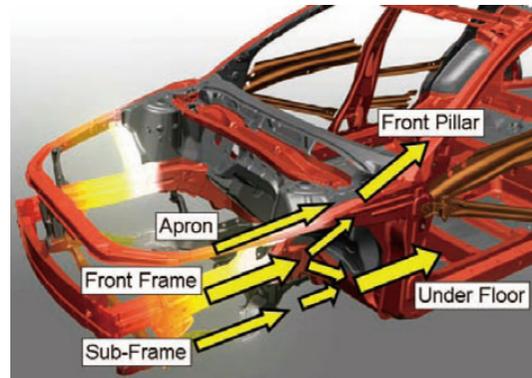


Fig.10 Multi-Load Path Concept

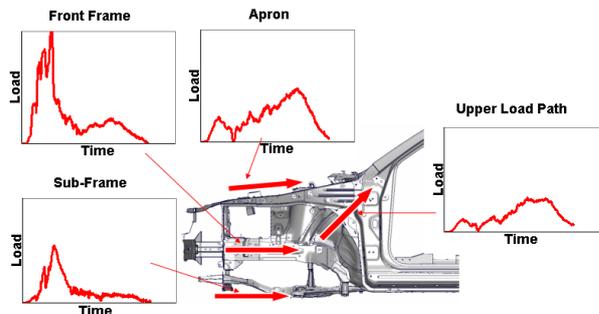


Fig.11 Multi-Load Path and Cross Section of the Frame

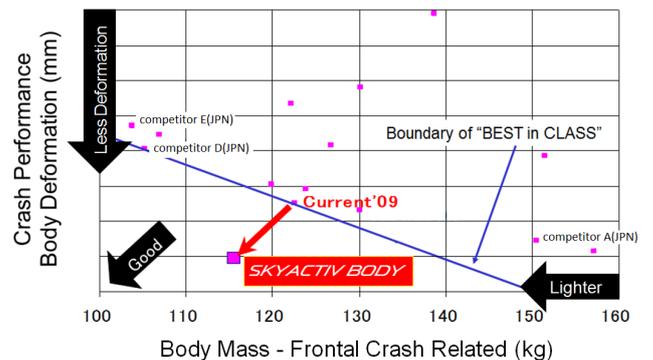


Fig.12 Body Mass and Crash Performance Comparison

5.2 内装開発への CAE 適用事例

次に、前面衝突において乗員傷害値予測に CAE を適用した事例を紹介する。Fig.13 に前面衝突の際に乗員の頭部および胸部がエアバッグとシートベルトにより拘束された状態を示す。

頸部の傷害を軽減するためには、頭部がエアバッグに拘束される際の頭部への入力制御することが重要である。CAE を活用することで、Fig.14 に示すように、衝突過程の頭部とエアバッグの接触状態を詳細に分析し、改善の検討を行うことができる。この場合、エアバッグ形状や、圧力の制御を最適化することで、Fig.15 に示すように頸部への入力を効果的に削減できた。

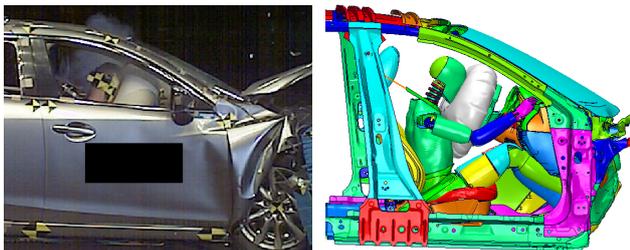


Fig.13 Comparison of H3 50%ile Dummy Kinematics Under J-NCAP Condition

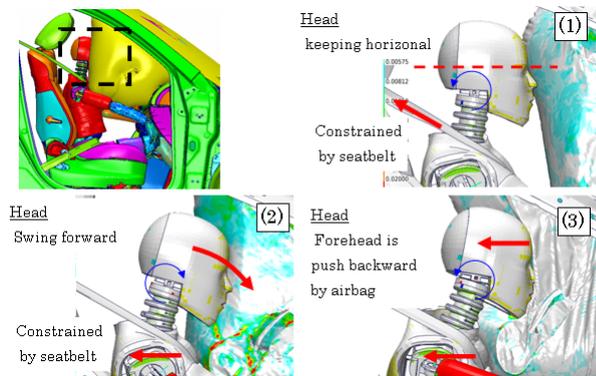


Fig.14 Analysis of Neck Injury Mechanism

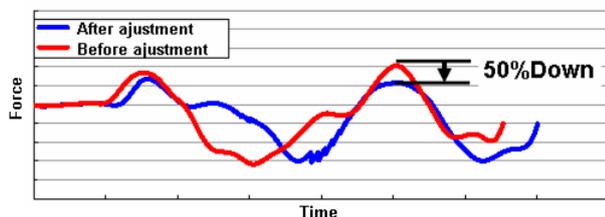


Fig.15 Improvement of Neck Injury

以上のような乗員傷害値予測技術は、前面衝突だけでなく側面や後面衝突にも適用している。その結果、CX-5 の開発においては、Fig.16 に示すように、従来車に比べ、CAE による図面段階での性能評価項目数を 270%拡大し、開発の最終段階における開発確認車による内装部品に関する設計変更要求を 70%削減させ、計画通り市場導入するこ

とに貢献した。

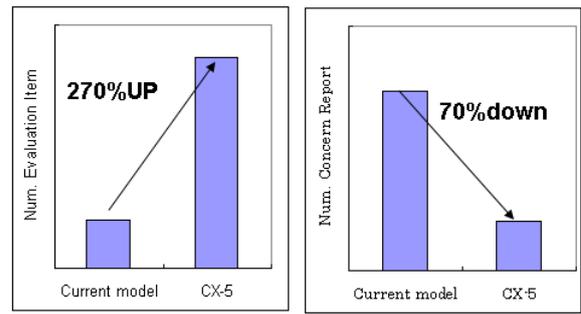


Fig.16 Improvement of Development Process

6. おわりに

高精度な車体と内装そしてダミーモデルを組み合わせ、車体変形挙動から乗員傷害値まで予測可能な CAE 技術を開発した。この技術を SKYACTIV-ボデーの開発にフルに適用した。その最初の商品である CX-5 では、すでに米国の IIHS, 欧州 NCAP で最高レベルの評価を受けている (Fig.17) (*1)。今後も高い安全性能に裏打ちされた“Zoom-Zoom”な商品をお客様にお届けするため、現状に満足することなく衝突安全 CAE 技術の進化に取り組んでいく。



Fig.17 CX-5 Safety Assessment Result (USA, Europe) (*1) 2012 年 7 月時点。

■ 著 者 ■



河野 勝人



朝日 龍介



杉本 繁



上野 正樹



小島 宏介



花田 裕

特集：安全

30

低速域衝突被害軽減システムの概要

Outline of the System for Low-Speed Collision Damage Reduction

細田 浩司*1

Koji Hosoda

久米 孝則*4

Takanori Kume

後藤 多加志*2

Takashi Goto

安松 洋仁*5

Hirohito Yasumatsu

高橋 恭宣*3

Kiyonobu Takahashi

三戸手 亮太*6

Ryota Mitote

要約

日本国内で発生している車両事故の約 37%が追突によるもので、更にその約 67%が 30km/h 以下の低速域で発生している。また、同様に近年、多くの発生事例がみられるのが AT 車での誤発進事故である。マツダはこの事実に着目し、低速域での事故被害軽減に特化した先進安全技術、「スマート・シティ・ブレーキ・サポート (以下、SCBS)」と「AT 誤発進抑制制御」を新たに開発し、CX-5 に搭載した。SCBS は、追突による衝突を予測して自動ブレーキを作動させるシステムであり、一方、AT 誤発進抑制制御は、AT 車でのペダル踏み間違いによる発進時にエンジントルクを抑え、急発進を抑制するシステムである。本稿ではマツダ初となるこれら低速域衝突被害軽減システムの概要について紹介する。

Summary

In Japan, about 37% of the car accidents occurred in the markets was rear-end collisions, of them, 67% was occurred at 30 km/h or lower speeds. Similarly, in recent years, a number of accidents caused by false departure of AT have occurred. Focusing on this fact, Mazda newly developed a "Smart City Brake Support" and an "AT False Departure Restraint System", an advanced safety technology specialized in reducing the damages of collisions occurred at low speeds, which is applied to the CX-5. The Smart City Brake Support is an automatic brake system that predicts the occurrence of a rear-end collision and operates the automatic brake, and the AT False Departure Restraint System which reduces the engine torque to inhibit sudden acceleration caused by misapplication between the brake pedal and the gas pedal of AT. In this paper, the general outline of Low-speed collision damage reducing system which is Mazda's first time production is reported.

1. はじめに

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、全てのお客様に「走る歓び」と「優れた環境安全性能」を提供することを目指している。そのなかで今回、車両事故で多く発生している低速域での車両事故に対して衝突被害を軽減する先進安全技術、「SCBS」及び「AT 誤発進抑制制御」を新たに開発し、CX-5 に搭載した。以下にその技術を紹介する。

2. 車両事故の実態

国内で発生している衝突事故を類型別に見てみると、Fig.1 に示すように追突事故が全体の約 37%を占め最多となっている⁽¹⁾。更に、追突事故発生時の車速分布をみると、その約 67%が時速 30km/h以下の低速度域で発生していることがわかる (Fig.2)⁽²⁾。

また、同じく車両事故で多く発生しているのがAT車での誤発進による衝突事故である。これは主にシフトやペダルの誤った操作によるもので、国内における事故発生件数

*1~6 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

は年間約 7,000 件程度でここ数年推移している⁽³⁾。特にブレーキペダルとアクセルペダルの踏み間違い事故は、高齢者での発生頻度が高く、75 歳以上での発生率は 24 歳以下の発生率に比較して約 3 倍となっており⁽³⁾、ドライバーの高齢化に伴い今後の増加が予想される。また、ペダル踏み間違い事故による死亡率は高く、全交通人身事故平均の約 17 倍となっているのが特徴で⁽³⁾、重大事故につながる可能性が非常に高い。

このように比較的低い車速域で発生している多くの衝突事故を軽減することができれば、交通事故全体の被害軽減に効果的であるといえる。

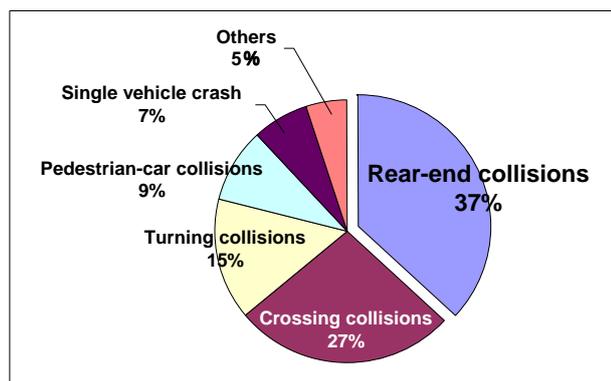


Fig.1 Types of Traffic Accident (1)

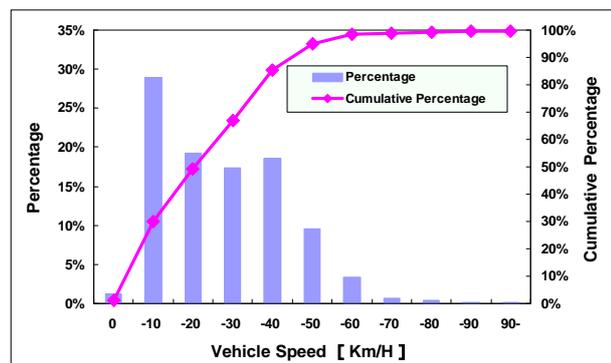


Fig.2 Distribution of Vehicle Speed in the Rear-end Collisions (2)

3. 開発のねらい

今回、CX-5 に導入した低速域衝突被害軽減システムは、「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に則り、全てのお客様に提供できる優れた安全性能の実現をねらいとして開発した。このねらいを具現化するために、システムの機能と目標性能を見極め、高い事故被害軽減効果が期待できる領域に絞り込むことで、「高い安全性能」と「アフォーダブルなコスト」を両立することを目指した。

4. 低速域衝突被害軽減システムの概要

低速域衝突被害軽減システムは、先行車への追突による衝突被害を軽減する「SCBS」と、AT 車でのペダル踏み間違いによる誤発進時の衝突被害を軽減する「AT 誤発進抑

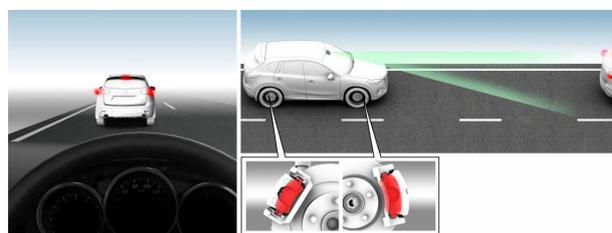
制制御」、のふたつの機能で構成する。

4.1 システムの機能

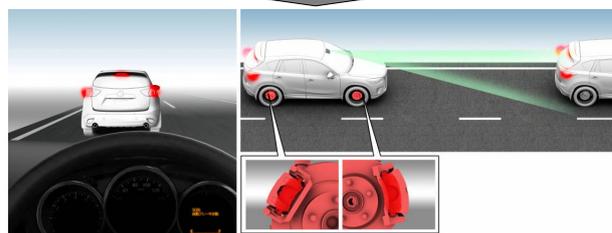
(1) SCBS

約 4km/h~30km/h の低速走行中に先行車との衝突の危険性がある場合、[STEP 1] 先ず、ブレーキプレフィルを作動させてブレーキの遊びを詰め、ドライバーのブレーキ操作に対して即座に制動力を発揮できるよう準備する。

[STEP 2] 更に、ドライバーが衝突回避操作を行わず、システムが衝突回避できないと判断した場合は衝突被害軽減ブレーキを作動させ、減速することで追突事故による被害を軽減する (Fig.3)。なお、SCBS によるブレーキプレフィルからブレーキ制御中にドライバー自身による回避操作 (操舵やアクセル操作) があった場合は、ドライバー操作を優先させ、SCBS による制御を速やかにキャンセルするオーバーライド機能も備えている。



[STEP 1] Electronic Brake Prefill

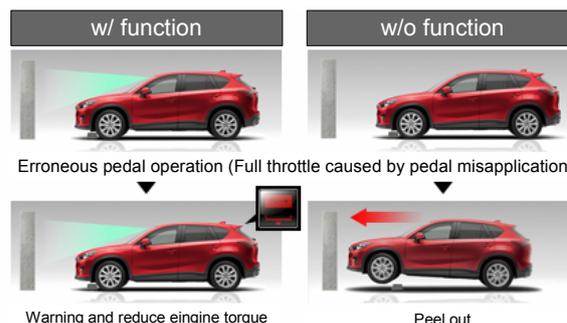


[STEP 2] Automatic Emergency Brake

Fig.3 Functional Overview (SCBS)

(2) AT 誤発進抑制制御

停車、または 10km/h 以下の徐行中、前方に車両や障害物があ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、警報音とメータパネル上の警報表示によってドライバーに注意喚起し、アクセルオフ操作を促すとともにエンジントルクを抑制して車両の急発進を抑え、前方車両・障害物との衝突による被害を軽減する (Fig.4)。



Erroneous pedal operation (Full throttle caused by pedal misapplication)

Warning and reduce engine torque

Peel out

Fig.4 Functional Overview (AT False Departure Restraint System)

4.2 システム構成

SCBS, 及び, AT 誤発進抑制制御システムは, 新たに開発したレーザセンサを中心に, 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), ボデー・コントロール・モジュール (BCM), 及び, メータで構成する。各 ECU を CAN (Controller Area Network) で接続し, 双方向の通信によって制御している (Fig.5,6)。

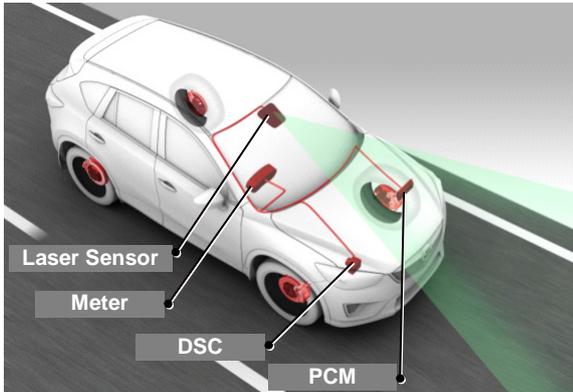


Fig.5 Parts Layout

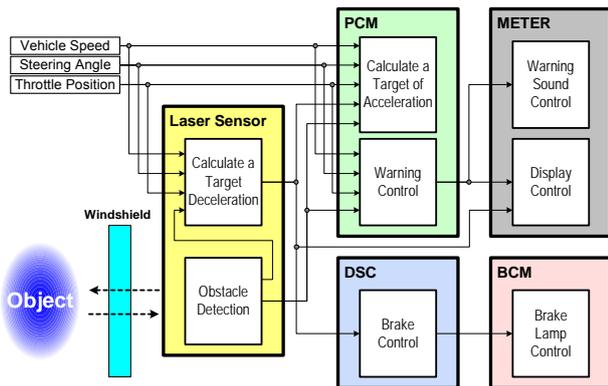


Fig.6 System Configuration

(1) レーザセンサ

フロントウィンドシールド中央上部の車室内側にレイアウトされ (Fig.7, 8), 車両前方の先行車や障害物などの物標を検知する。物標の検知には近赤外線反射式を採用しており, センサ送信部より照射された近赤外線が対象物に反射して返ってくる反射波をセンサ受信部で捉え, 送信から受信までの時間差を測定し, 物標との距離と相対速度をセンサ内で算出している。移動物に加え静止物の検知も可能なほか, 反射波の方向と信号強度によって物標の位置を車両前方センタ, 左前, 右前の 3 つのエリアで識別する。本センサのセンシング範囲は車両前方数メートル程度の近傍にとどまるが, 外部環境による性能劣化が少ないのが特徴で, 日射など外乱光を受けるような環境下や夜間, トンネル内でも影響を受けることなく精度良く物標を検知することが可能である。また, 雨や雪, 霧といった気象環境による影響も小さく, ロバスト性に優れている。

更に, 本センサで用いている近赤外線技術は, 一般的な家電製品のリモコン等にも使われているもので, その仕組みや構造が簡単のため, ハードウェア的に比較的安価に実現することができる。性能, コスト面から見て, 低速域での障害物検知に用いるセンサとして最適であるといえる。

なお, 本センサは前述の物標検知機能に加え, SCBS における衝突被害軽減ブレーキの目標演算機能も併せ持つ。具体的には, 算出した先行車両の情報 (距離, 相対速度) 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を判断し, 衝突の可能性が高いと判断した場合にブレーキ作動要求を DSC と PCM に対して送信する。



Fig.7 Sensor Mount



Fig.8 Sensor Appearance

(2) DSC ユニット

レーザセンサからのブレーキ作動要求に従いブレーキアクチュエータを制御するとともに, 衝突被害軽減ブレーキ制御時はこれに同期してストップランプ点灯要求を BCM に対して送信する。また, SCBS によるブレーキ制御中に, ドライバによる所定以上のブレーキ操作があった場合はブレーキ・アシスト機能によって制動力を高め, 衝突被害を一層軽減する。

なお, SCBS に係るブレーキ制御機能は, ソフトウェアの追加により従来の DSC 制御機能を拡張することで実現した。

(3) PCM

レーザセンサからのブレーキ作動要求に従い SCBS のエンジンブレーキ制御を行う。また, レーザセンサからの物標情報をもとに, アクセルペダルの踏込量 (アクセル開度) と自車速に応じて目標加速度を演算し, AT 誤発進抑

制制御におけるエンジントルクの制御を行うとともに、メータに対して警報音吹鳴・表示要求を送信する。

DSC と同様、ソフトウェアの追加によって従来の PCM の機能を拡張することで、SCBS, AT 誤発進抑制制御の機能を実現している。

(4) BCM

DSC からのストップランプ点灯要求に従い、ストップランプの点灯/消灯を制御する。

(5) メータ

メータパネル右側に設けられたマルチ・インフォメーション・ディスプレイ上に SCBS 衝突被害軽減ブレーキ作動時の作動表示、及び、AT 誤発進抑制制御作動時の警報表示を行う (Fig.9)。加えて、AT 誤発進抑制制御作動時は警報音によるドライバーへの注意喚起も行う。



Fig.9 Multi Information Display

5. システムの性能

5.1 SCBS

(1) 物標検知性能

車両前方 6m, センサを中心に水平角 27 度, 俯角 11 度の範囲内にある物標を検知する。なお、SCBS は追突事故被害の軽減に特化した機能であるため、検知対象は 4 輪以上の車両で、かつ、車両後面のみとしている。

(2) 制動性能 (ブレーキプレフィル)

先行車との距離、及び、相対速度から演算された衝突予測時間の約 1.0 秒前にブレーキの遊びを詰め、ドライバーによるブレーキ操作に対する応答性を向上させる。

(3) 制動性能 (衝突被害軽減ブレーキ)

ブレーキプレフィル後、ドライバーによる回避操作が行わ

れない場合は最大 9.8m/s²の減速度で衝突被害軽減ブレーキを作動する。路面環境や車両の積載状況 (車重) にもよるが、一般的なアスファルト路面 (路面μ=0.7 程度) で、2 名乗車の条件であれば、先行車との相対走行速度差が 15km/h 未満の場合は追突を回避することが可能である。また、相対速度が 15km/h~30km/h の場合は、SCBS の衝突被害軽減ブレーキにより衝突時の速度は 50% 以下 (衝突エネルギーは 25% 以下) に抑えられる (Fig.10)。

なお、衝突被害軽減ブレーキの作動タイミングは、『ドライバー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。同じ考えから衝突被害軽減ブレーキによって衝突回避できる場合においても、車両の停止位置は先行車との距離が 1m 以下となるように制御している。

Fig.11 は車速 15km/h で静止ターゲット (先行車) に対して走行した際の実測データである。ターゲットの手前約 4m (衝突予測時間の約 1 秒前) でブレーキプレフィル作動後、約 3m 手前 (0.8 秒前) で衝突被害軽減ブレーキが作動し、最終的にターゲットの手前約 50cm 位置で停車している。

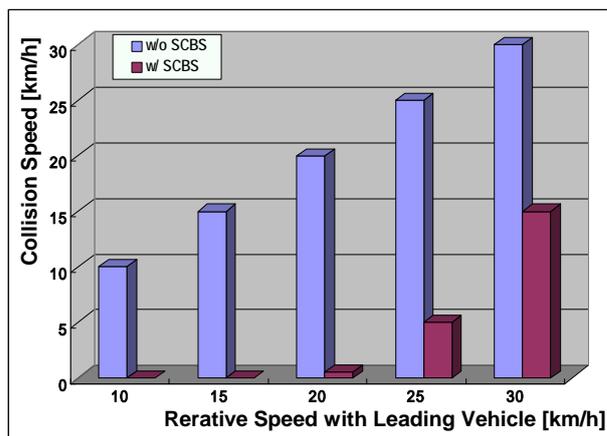


Fig.10 Collision Speed with or without SCBS

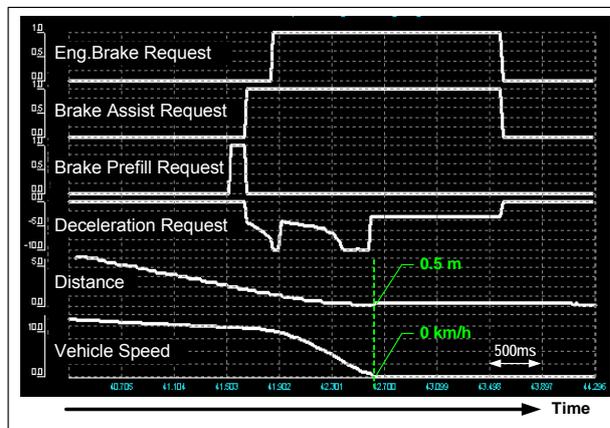


Fig.11 Effect of SCBS

5.2 AT 誤発進抑制制御

(1) 物標検知

SCBS と同じレーザセンサを用いており、検知角は SCBS と同等であるが、不要検知を抑えるために検知距離を車両前方 4m に絞っている。また、検知対象も SCBS と異なり、車両以外の物標（壁、窓、植込み等）も障害物として認識するよう設計した。

(2) 障害物判定性能

AT 誤発進抑制制御では衝突の可能性のある障害物を精度よく検知するためのロジックを備えており、不要作動や過警報を抑制、実用品質を確保した。

a. 静止物判定

レーザセンサが出力する物標との相対速度と自車速情報から障害物が静止物か否かの判定を行い、静止物でない判定された場合は制御対象から除外する仕様とした。

b. 進行路推定

舵角センサから得られる舵角情報から自車両の進行路を推定し、進行路にない物標情報は制御対象から除外する仕様とした。

(3) エンジントルク抑制性能

障害物との距離、アクセルペダルの踏込量（アクセル開度）、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など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。本トルク抑制制御により、駐車場等に設置されている一般的な輪止めの前輪タイヤが接している場合は、それを乗り越えない程度までトルクが抑制され、車両の飛び出しを防止する。輪止めと前輪が離れている場合、あるいは輪止め等が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 50%以下（衝突エネルギーは 25%以下）に抑えることが可能である（Fig.12）。

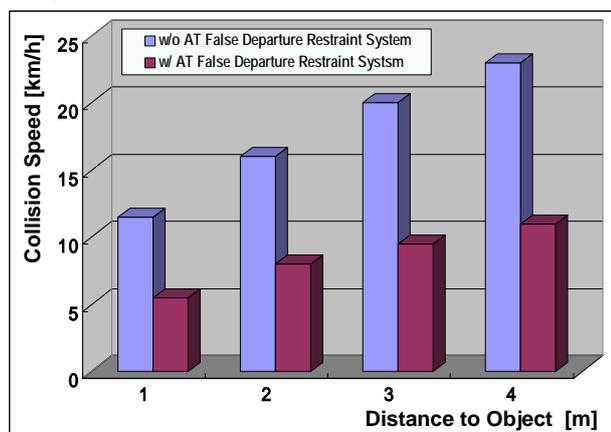


Fig.12 Collision Speed with or without False Departure Restraint System

6. おわりに

SCBS、及び、AT 誤発進抑制制御は、市場において多く発生している事故形態に注目し、機能を絞り込むことでコストを抑え、より多くのお客様に提供できるシステムを目指して開発した。このシステムの普及により現在、市場で発生している多くの衝突事故被害の低減に貢献できると確信している。今後はこのシステムの機能・性能を更に進化させ、より多くのシーンにおいて被害軽減できるシステムを目指し開発していきたい。

参考文献

- (1) (財)交通事故総合分析センター：交通事故統計表データ、平成 20 年版 (2008)
- (2) 国土交通省：事故の全体俯瞰のグラフ等 (平成 17 年)、俯-93 (2005)
- (3) (財)交通事故総合分析センター：イタルダ・インフォメーション、No.86, pp.3-6 (2010)

■ 著 者 ■



細田 浩司



後藤 多加志



高橋 恭宣



久米 孝則



安松 洋仁



三戸手 亮太

特集：安全

31

SBS/MRCC の機能 / 性能向上について

Improvement of SBS / MRCC Function and Performance (Smart Brake Support / Mazda Radar Cruise Control)

尾崎 昂*1

Takashi Osaki

清水 大輔*4

Daisuke Shimizu

西條 友馬*2

Yuma Nishijo

福井 聡一郎*3

Soichiro Fukui

要約

ミリ波レーダを用いた前方障害物衝突軽減制動装置 (SBS : Smart Brake Support) と追従型定速走行装置 (MRCC : Mazda Radar Cruise Control) を新型アテンザに搭載した。グローバルに展開するため、機能/性能を向上するとともに、車速に応じた車間距離を表示する機能や旋回中の車速制限機能を新たに採用した。これらのより使いやすい機能、より安全な運転を促す機能について報告する。

Summary

Pre-crash Safety System (SBS: Smart Brake Support) and Adaptive Cruise Control System (MRCC: Mazda Radar Cruise Control), both using millimeter-wave radars, are globally deployed, and functions that display inter-vehicle distances corresponding to the vehicle speeds and limit vehicle speeds in turning are newly applied to improve the functionality and performance. Functions that are easier to use and improve driving safety are explained in this paper.

1. はじめに

近年、アクティブセーフティ技術の認知度や必要性が高まり、安全装備/商品がグローバル市場でより一層求められている。これまでに、マツダでは衝突時の被害を軽減する前方障害物衝突軽減制動装置 (SBS) と、ドライバの運転負担軽減を目的とした追従型定速走行装置 (MRCC) の商品化を行い⁽¹⁾⁽²⁾、MPVやアテンザ、CX-7 に搭載し、国内向けに展開してきた。今回新たにグローバルに展開するとともに、より使いやすく、より安全な運転を促す機能を追加し、性能向上を行った技術について報告する。

2. システムの機能

2.1 スマート・ブレーキ・サポート (SBS)

SBS は、運転者に追突事故が発生する可能性を事前に警告するフォワード・オブストラクション・ワーニング (FOW : Forward Obstruction Warning) と自動的に衝突速度を低減する制動機能を持つブレーキシステムで構成している。今回、従来システムに比べ、自動ブレーキによ

る減速度、および警報機能 (前方の車両との衝突の可能性をより遠くから警報する) を向上させた。また、新たに先行車までの車速に応じた車間距離を表示し、適切な車間距離維持をサポートするディスタンス・レコグニション・サポート・システム (DRSS) を採用した。

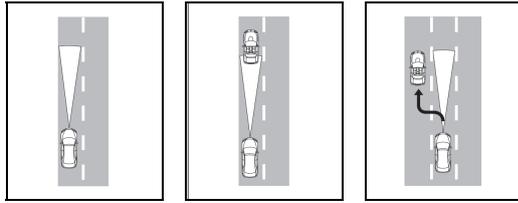
2.2 マツダ・レーダ・クルーズ・コントロール (MRCC)

MRCC の基本動作を Fig. 1 に示す。

先行車がない、もしくは先行車との車間距離が遠い場合は、ドライバが設定した車速で定速走行を行う。また、自車より遅い先行車を検出すると、先行車の速度に応じて、エンジンおよびブレーキによる減速制御を行う。先行車がいなくなった場合は、設定車速を上限に加速する。

今回は新たに、カーブで適切な車速に制御する機能や、スムーズな追い越しをサポートする加速機能を付与し、より多くのシーンでドライバの運転負担を軽減することを目指した。

*1~4 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.



(1) Constant Speed (2) Deceleration (3) Lost=>Acceleration

Fig.1 Typical State of MRCC

3. システム構成

SBS/MRCC システム構成を Fig. 2 に示す。各 ECU 間は CAN (Control Area Network : 車載 LAN) によりつながれており、システム全体として ECU 間でやり取りする制御信号を相互に監視するフェイルセーフ機能を有している。

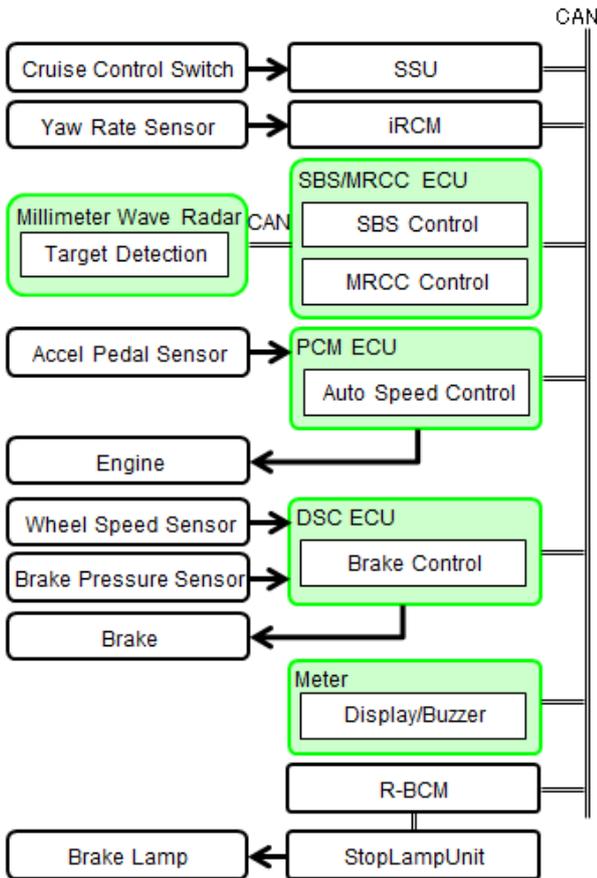


Fig.2 System Configuration

3.1 ミリ波レーダ

マツダエンブレム後方に設置し、前方の車両や障害物の状態を検出する (Fig.3)。ミリ波 (76-77GHz 帯) を車両前方に照射し前方車両や障害物に反射した電波を受信し、ドップラー効果を利用して障害物との相対速度/距離および横位置を測定する。ミリ波レーダでは、カメラやレーザーレーダに比べて、悪天候 (雨・霧・雪など) 時の障害物の検出性能が低下しにくい特徴があり、信頼性が高い。

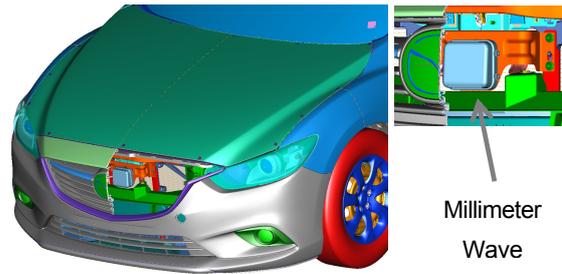


Fig.3 Millimeter Wave Radar

3.2 SBS/MRCC ECU

ミリ波レーダから送られてきた複数の物体情報 (距離, 相対速度, 横位置), 及びヨーレートセンサを用いた自転車進行路の推定結果から, 追従すべき先行車や衝突対象を抽出する。

SBS 制御では, 先行車や自車の情報を基に衝突の可能性を予測し, 警報や制動の指示を行う。

MRCC 制御では, ドライバが設定した車間段階, 先行車との車間距離と相対速度から, 目標となる加減速度を算出し, アクチュエータとなるエンジンやブレーキをコントロールすることで, 走行シーンに適した車両制御を行う。

3.3 PCM (エンジン) ECU

PCM ECU に対しては, 車両として実現したい要求加減速度を SBS/MRCC ECU から出力し, PCM ECU 自身で駆動力と制動力の最適な配分を行うことで, 回生制御やトランスミッションなどの駆動デバイスの変化にも対応できる構成とした。

3.4 DSC (ブレーキ) ECU

通常の DSC 制御(Dynamic Stability Control)に加え, SBS/MRCC ECU や PCM ECU からの制動指示に従い, 要求減速度となるようにフィードバック制御を行う機能を追加した。

3.5 メータ

メータ内でのシステムの作動状態や警報のための表示装置として, 視認性に優れ, 様々な情報を適宜表示可能なマルチディスプレイ (Fig.4) を装備した。このディスプレイとメータのチャイムによって, 運転者に対してシステムの作動限界や衝突の可能性を警報する。



Fig.4 Multi Display

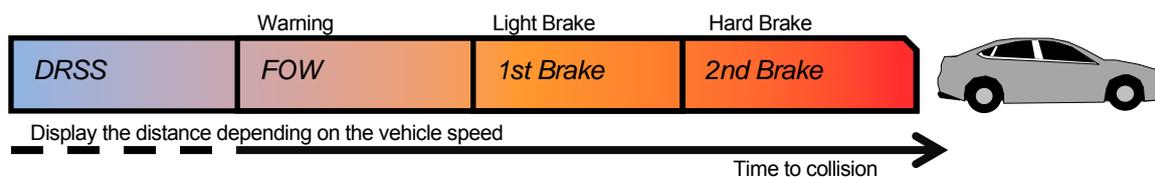


Fig.5 SBS Function

4. SBSの機能/性能向上について

SBSの機能は、通常走行状態から衝突に至るまでの間で段階的に安全上の価値を提供するものであり、そのサポートのイメージをFig.5に示す。

4.1 減速量の向上

自動車事故の速度域ごとの死傷事故数の割合をFig.6に示す。自動車事故のデータ^③の分析結果によると、速度域が0～30km/hまでの走行では軽傷事故が多いが、40～60km/hでは死亡事故の比率が大きくなっている。

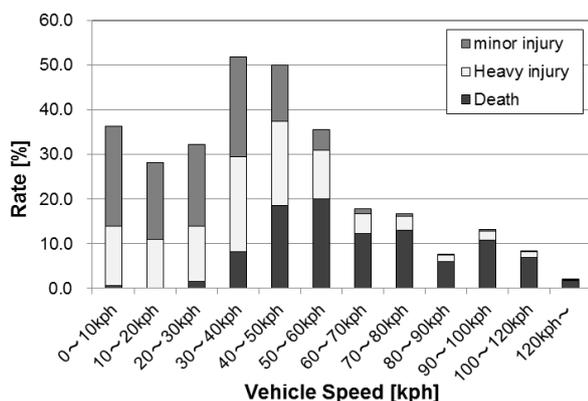


Fig.6 The Rate of Fatal and Injury Accident

この分析結果より、衝突速度を20～30km/h下げることができれば、少なくとも60 km/h以下の死亡者数を大幅に減少させ、20 km/h以下の事故数を減少させることができると考えられる。そこで、現行のシステムは、減速量が平均10km/h程度であったが、平均25km/hまで向上させることを目標とした。そのため、減速量の向上と、自動ブレーキ作動タイミングの早期化に取り組んだ。

始めに、自動ブレーキによる減速量を向上させるために、最大減速度をこれまでの 5.1m/s^2 から 6.5m/s^2 まで引き上げた。次に、タイミングの早期化のため、ミリ波レーダの物体認識および作動判断ロジックの改良に取り組み、物標の信頼性を加味した。主な取り組みは次の2つである。①ミリ波レーダは、対象物の幅や上下の位置を認識することが難しいため、遠方の上下方向の衝突しない構造物を制御対象と認識してしまう。その対策として、レーダの受信状態による属性判断（道路標識やマンホールなど）を基に制御対象から除外した上で、一定時間正しく検出された制御

対象を信頼性の高い対象と判断し制御を開始することとした。②進行路外の構造物を制御対象としないよう、レーダによる静止物体列の情報を基にヨーレート情報の補正を行い推定進行路の精度を向上させた。

これらにより、誤検知による警報などの不要作動を抑え、移動車両に対しては、平均25km/h減速させ、静止車両に対しては、自車速30km/h以下であれば衝突直前で停止させることを可能としている。

4.2 警報機能の高機能化

米国運輸省道路交通安全局（NHTSA）は衝突安全テストのNCAP（New Car Assessment Program）の評価に、前方衝突警報システムの要件を設定している。また、米国道路安全保険協会（IIHS：Insurance Institute for Highway Safety）は、「トップセーフティピック」（TSP）の要件において、前方衝突警報システムの事故低減効果に関心を持っている。こうした状況を踏まえ、マツダではNCAPに適合した前方衝突警報（FOW）を開発した。

SBSの警報感度設定は、前方衝突警報システムの要件に適合した設定（Far）と、市街地のような複雑な交通環境で過警報を抑えることを考慮した設定（Near）の2段階設定とした。更に、両方のセッティングにおいても、市場での過警報を抑えるために、相対速度差によって、タイミングの調整を行う制御を追加した。

また、減速度を加味して警報の早期化を行うことによって、前方衝突警報システムのテストモード（追従状態から先行車両の急減速に対する試技）に対応させた。

4.3 ディスタンス・レコグニション・サポート・システム（DRSS）の開発

予防安全の究極はドライバーにリスクを正しく認知させ、ドライバー自身でリスクマージンを確保できる車と考えている。リスク認識のフロントローディングとしてSBSが作動する領域に近づかず、ドライバー自身が車間距離を意識して運転できるように、前走車との車間情報を提供する機能を開発した。

DRSSの主な機能は、先行車両の有無、先行車両までの距離、車間距離が狭い状態であることをドライバーに認識させるよう、メータ内のディスプレイにそれらを表示することである。

先行車両の有無と、先行車両との距離を車速に応じて表示する (Fig.7)。先行車両との車間距離が近いときに、先行車両表示を点滅させて、車間距離が近い状態であることをドライバに伝え、ドライバ自身で車間距離を保って走行できるようにサポートする。

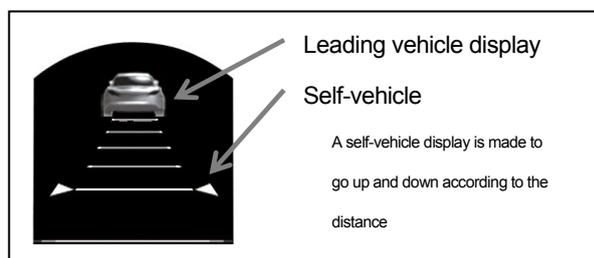


Fig.7 DRSS Display

150m 以内の先行車両をミリ波レーダで検出し、先行車両の有無を表示することで、視界不良時などで先行車両の存在を認識することができる。また、現在の車間距離を表示することで、時々刻々と変化する前方車両との車速に応じた車間距離が適切か否か感覚的にわかるようになる。これらにより、ドライバ自身で安全な車間を保って走行できるようにサポートする。

5. MRCC の機能 / 性能向上について

5.1 高速域への対応

今回 MRCC をグローバルに展開するにあたって、欧州のアウトバーンでは速度無制限区間が存在することから、より高速域での MRCC 制御が必要となる。高速域では割り込まれや追い付き時の余裕時間が少なく、より遠くから先行車を検知し早期に減速することが有効であるが、先行車検知や自車進行路推定における精度は距離が遠いほど低下するため、従来よりも精度の高い先行車捕捉性能が求められる。

そこで、①レーダセンサの遠距離検知性能の向上、②ヨーレートセンサの補正ロジックの改良を行い、遠方での先行車捕捉性能を高めた。

- ① レーダセンサ自身の出力の向上により、200m 先の物標を測距可能であり、実際の MRCC 制御に入るよりも遠くから先行車を認識できる。
- ② ヨーレート補正ロジックについて、従来の車輪速の内外輪差を用いた推定では精度 $\pm 1.0\text{deg/sec}$ 程度が限界であったが、新たにレーダセンサを用いたヨーレート推定を行うことで、 $\pm 0.2\text{deg/sec}$ 程度まで精度を高めた。

また、追い付き車速差が大きく、高い加減速度が求められる欧州市場に対し、減速量の向上および滑らかな減速立ち上がり制御を実現した。最大減速度を従来の 2.2m/s^2 から 3.0m/s^2 に向上させるとともに、万が一低速車線を走行中の遠方車両を誤検出しても直ちに急減速しないよう、初

期の減速度の立ち上がりを緩くし、かつ減速が必要な際には早期に減速度を立ち上げるため、要求加減速度の出力値に 2 次のフィルタを導入した。

5.2 走行シーンに応じた車速制御の追加

高速道路 / 自動車専用道に乗ってからランプウェイを降りるまで、ずっと継続して使える MRCC を実現するために、走行シーンに応じて適切な自車速制御を行うことが求められる。そこで、以下のシーンで制御の切り替えと目標加減速度の細やかなチューニングを行い、ストレスのない走行を目指した。

(1) カーブでの車速制限

カーブでは車両の旋回状態に応じて、適切な車速を維持する機能を追加した。安定した旋回状態を得るために、補正済みのヨーレート値から現在の旋回半径を算出したうえで、カーブでの目標となる車速を決定する。自車速がその目標車速を上回っている場合、旋回時の目標車速を維持するようにブレーキも使って減速する。

(2) 降坂制御

下り坂を一定の車速で走行するためには、駆動力と制動力をシームレスにつなぐ必要がある。そこで先行車との車間距離および自車速と相対速度から、SBS/MRCC ECU が車両の加減速度の目標値を算出し、その目標値を PCM ECU および DSC ECU に出力する。PCM ECU で目標値に対する車速フィードバック制御を行い、下り坂でエンジンブレーキだけでは実現できない減速度が要求された場合、DSC ECU への要求を行い、設定車速を維持するようにブレーキを制御する (Fig. 8)。

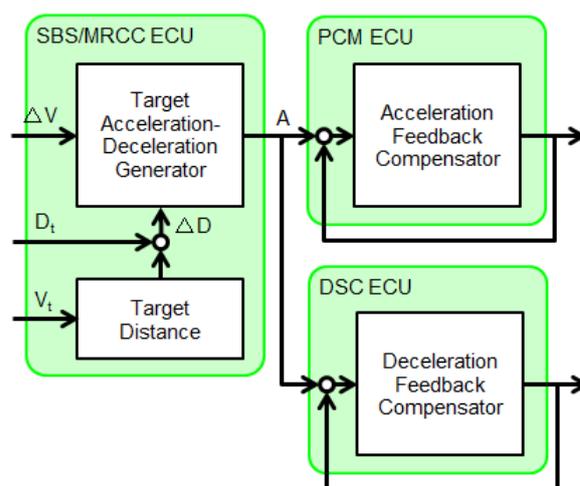


Fig.8 Block of MRCC Logic

(3) 追い越し加速支援

高速車線へのレーンチェンジを速やかに行うことを目的とし、先行車との追従走行中にドライバが高速車線に移行する方向にウインカを作動させた場合、一定時間加速する制御を行う。このとき追い越し前に先行車との車間距離が

近づきすぎた、または先行車自身が減速した場合、加速を終了するよう配慮している。

5.3 MRCC 追い付き追従性能

高速域での MRCC 性能として、自車よりも低い車速で定速走行している先行車に接近した際に、安定して先行車速まで減速可能な車速差 (70km/h 以上) のときの、先行車検知距離とブレーキ開始距離について、競合車と比較した結果を Fig.9 に示す。いずれも車間設定が最大および最小のときを抽出した。追い付き許容車速差およびブレーキ(減速)開始距離は競合車と同レベルもしくはそれ以上であり、かつ競合車よりも遠くから先行車を検知し MRCC 制御に入ることができることで、高速域でもより安心感のある MRCC が実現できた。欧州や北米での現地走行評価においても、安心感があるとのコメントをいただいている。

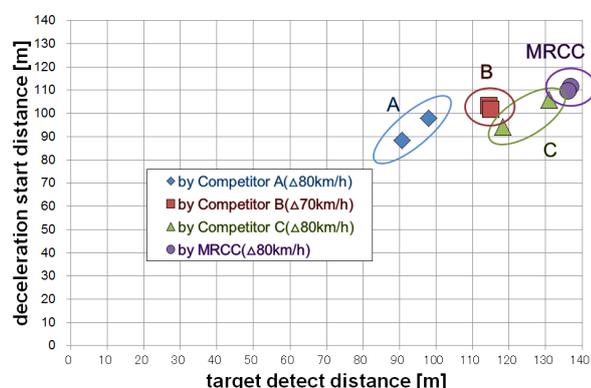


Fig.9 Result of Deceleration Test

6. おわりに

ミリ波レーダを用いた SBS や MRCC システムを開発し、グローバルでより使いやすく、より安全な運転を促す機能を付与したことで、ドライバの運転負荷を一層軽減し、安全運転を支援することができた。

今後は、さらなる適応シーンの拡大はもとより、より安価で、より使いやすいシステムとして進化させていく。そうすることで、より多くの人のもとへ、安全技術を普及させていき、交通事故削減に貢献したい。

参考文献

- (1) 山本ほか：マツダ・レーダ・クルーズ・コントロール・システムの開発，マツダ技報，No.24，pp.154-158 (2006)
- (2) 西鍛冶ほか：マツダ・プリクラッシュ・セーフティ・システムの開発，マツダ技報，No.24，pp.150-153 (2006)
- (3) (財)交通事故総合分析センター：交通事故例調査・分析報告書，平成 21 年度，p.85 (2010)

■ 著 者 ■



尾崎 昂



西條 友馬



福井 聡一郎



清水 大輔

特集：安全

32

フォワード・センシング・カメラの開発 Development of Forward Sensing Camera

内海 将司*1
Masashi Utsumi

原田 司*2
Tsukasa Harada

遠野 安広*3
Yasuhiro Enno

要約

近年、日本では交通事故による死者数が大幅に減少傾向にあるが、負傷者数や事故発生件数は、依然増加傾向である。また、車線逸脱が起因の車両単独事故や、夜間の対歩行者事故件数の割合は高い傾向にあり、運転支援・予防安全技術への期待が高まっている。

マツダでは、ミリ波レーダを使った予防安全技術を 2006 年から、近赤外線レーザを使った予防安全技術を 2012 年から量産化している。本稿では、マツダ初の画像認識技術を活用した予防安全技術として、単独衝突事故低減効果が期待される「車線逸脱警報システム：LDWS (Lane Departure Warning System)」と、夜間歩行者事故の未然低減効果や、夜間のハイビーム切り替え操作の負担低減による夜間視界向上が期待される「ハイビーム・コントロール・システム：HBC (High Beam Control System)」について、システムおよびその技術を紹介する。

Summary

Recently the number of traffic accidents and death toll are sharply decreasing in Japan, but the number of injuries and accident frequency rates are still on the rise. Especially, the rates of single-car accidents caused by lane departures and pedestrian accidents at night are still high, and requirements for driving support and active safety (preventive safety) technologies are rising.

This year Mazda has started the mass productions of the active safety technologies using millimeter-wave radars and near-infrared lasers. The active safety technologies using Mazda-originated-image recognition technology, “LDWS: Lane Departure Warning System” and “

HBC: High Beam Control System” are introduced in this paper.

1. はじめに

近年、日本では、交通事故による死者数が大幅に減少傾向にあるが、負傷者数や事故発生件数は、依然増加傾向^①である。また、車線逸脱が起因の車両単独事故や、夜間の対歩行者事故件数の割合は高い傾向^②にあり、運転支援・予防安全技術への期待が高まっている。マツダでは、ミリ波レーダや近赤外線レーザを使った予防安全技術を既に量産化している。本稿では、マツダ初の画像認識技術を活用した予防安全技術として、「車線逸脱警報システム：LDWS (Lane Departure Warning System)」と、「ハイビーム・コントロール・システム：HBC (High Beam

Control System)」について、システムおよびその技術を紹介する。

2. システム構成

2.1 フォワード・センシング・カメラ (FSC)

今回マツダが開発したフォワード・センシング・カメラには、カラーCMOS センサ (画角水平 45 度、垂直 24 度) と白線認識アルゴリズムと夜間の光源物標検出/先行車、対向車識別アルゴリズムが搭載されており、また、車線逸脱判定やハイビーム/ロービームの切り替え判定を行う情報処理演算装置 (ECU) も内蔵されている (Fig.1)。

*1~3 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

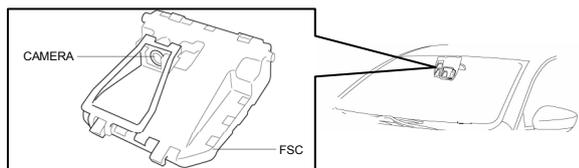


Fig.1 Sensor Layout

3. システム概要

3.1 車線逸脱警報システム (LDWS)

(1) 車線逸脱事故の現状

国内事故統計によると、車線逸脱に起因する車両単独事故および正面衝突事故の件数は死亡・重傷事故件数の約70%と高い⁽³⁾。その車線逸脱事故のインフラ側の対策として、Fig.2 に示すようなランブルストリップスの設置を進められているが、全ての道路（自動車専用道、一般道含む）への展開は難しい。欧州、北米でも同様に車線逸脱に起因する事故件数は高い傾向にあり、本システム装着による事故低減効果が期待される。

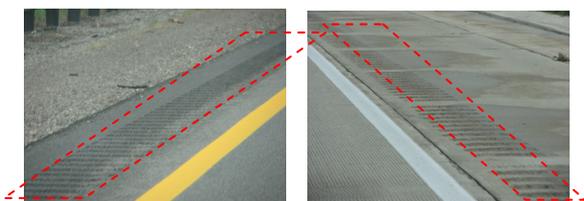


Fig.3 Rumble Strips

(2) システム構成

2.1 で示すフォワード・センシング・カメラで、車両前方の白線を検出し、自車前輪との位置を推定するとともに、アクセルやブレーキペダル操作量、ウィンカ操作、車両加減速度など、さまざまな車両情報から車両の逸脱状態を判断する。フォワード・センシング・カメラで判断した情報に基づき車両ネットワークを介してメータ表示、および警報吹鳴を行う (Fig.3)。

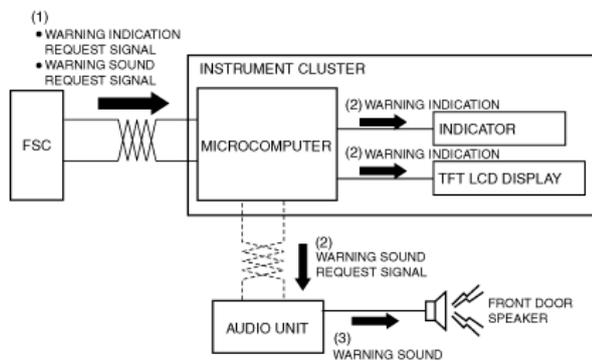


Fig.3 LDWS System Structure

(3) システム作動条件

インパネに設置される LDWS スイッチを ON にした状態で、車速 40km/h (欧米では 65km/h) 以上で車線を逸

脱したときに警報を行う。ただし、本システムでは、さまざまな車両状態量に基づく、ドライバの運転意思を推定しており、意図的な車線変更や、やむを得ない逸脱時（ウィンカを出して車線変更したときや、障害物を回避するなど）は、警報をしないようにしている。

(4) システム表示/警報

メータインジケータおよびLCDディスプレイにシステムの作動状態を示す (Fig.4)。車両が左右いずれかに逸脱したと判断された場合、インジケータを点滅させるとともに、ディスプレイ (ディスプレイ装着車のみ) に左右どちらの方向に逸脱したか表示する。同時に、左右いずれかの逸脱した側のフロントスピーカから、ランブルストリップスを踏んだ時に発生するロードノイズを模擬した警告音を吹鳴する (純正オーディオ装着車のみ、それ以外はメータブザーのみ) ことで、ドライバに車線逸脱状態を報知し、安全な運転操作を促す。

(動画: LDWS)

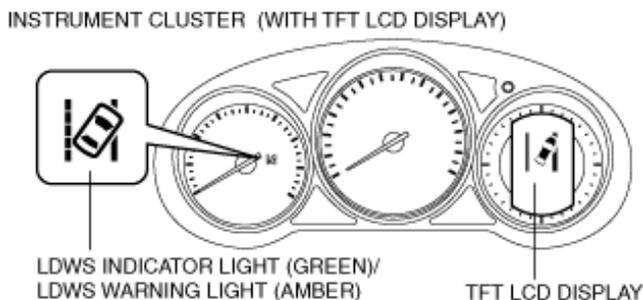


Fig.4 LDWS Warning Display

マツダの車線逸脱警報システムで採用した警報手段は、上記ディスプレイ表示と、インフラ側の車線逸脱防止策として広く普及しているランブルストリップス音を模擬した警告音を逸脱方向から吹鳴する方式を採用した。K.Kozakらの研究⁽⁴⁾によると、車線逸脱警報システムの警報手段としてランブルストリップスを模擬した音を吹鳴する方式とすることで、欧州車で多く採用されているステアリング振動による警報手段よりも、左右の逸脱方向を知らせることで同等以上のドライバ反応と正確な回避操作が期待できる。

(5) ランブルストリップスの育成

車線逸脱警報にランブルストリップスを模擬した音を採用するにあたり、各国のランブルストリップスが設置されている道路を実際に走行して発生音を体感、収集し音作りの参考とした。また、日本、米国および欧州に設置されているランブルストリップス施工基準⁽⁵⁾を調査し、凹凸のピッチ幅 (Fig.5) の大半が 0.3m であることからタイヤが溝を通過するとき発生するノイズ (=ランブルストリップス音) は各国共通であると考え、共通音源とした。音源は、実際にランブルストリップスを踏んだ時にドライバが聞こえる周波数帯域にピークを持つ警告音となるよう、試行錯

誤を繰り返しながら音源作りを行った (Fig.6)。

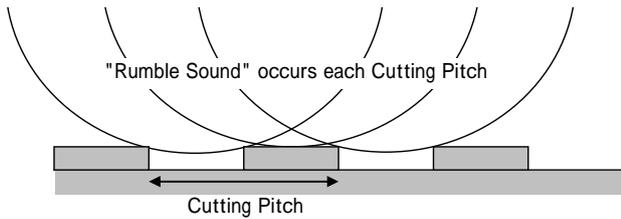


Fig.5 Mechanism of Rumble Strips Sound

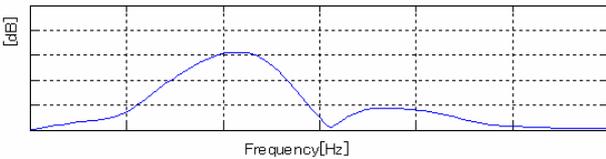


Fig.6 Frequency Spec of Rumble Strips Sound

3.2 ハイビーム・コントロール・システム (HBC)

(1) 夜間歩行者事故の現状

H23年度の事故統計⁽⁶⁾によると夜間の対歩行者死亡事故の約96%がロービーム点灯状態であり、ハイビームであれば事故を回避できた可能性がある⁽⁷⁾と試算されている。また、Mafford.M.Lらの研究⁽⁸⁾によると、ハイビーム使用に適切な条件(街灯のない道、対向車/先行車が居ない)において25.4%のドライバしか、ハイビームを使用しないという結果が出ている。以上のことから、ドライバに状況に応じた切り替え操作負担を与えることなく、ハイビーム/ロービームを自動で切り替えることのできる本システムが夜間の視認性を確保するとともに、事故低減への効果も期待される。

(2) システム構成

2.1で示すフォワード・センシング・カメラで、夜間走行時の光源物標を検出し先行車、対向車、街灯を識別し、ハイビーム/ロービーム切り替え要否を判断する。フォワード・センシング・カメラで判断した情報に基づき、車両ネットワークを介して、メータ表示、およびヘッドライトユニットのハイビーム点消灯を切り替える (Fig.7)。

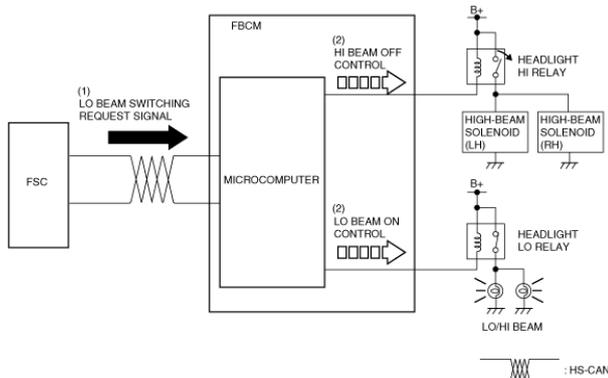


Fig.7 HBC System Structure

(3) システム作動条件

ライトスイッチを”Auto”ポジションと”HI”ポジションにセットし、オートライトが点灯したときに作動する。車速30km/h以上で先行車/対向車が居ない時は自動的にハイビームに切り替わり、先行車/対向車を検出したとき、市街地など周辺が明るい環境を走行しているとき、もしくは車速が20km/h以下となった時は、自動的にロービームに切り替わる (Fig.8)。

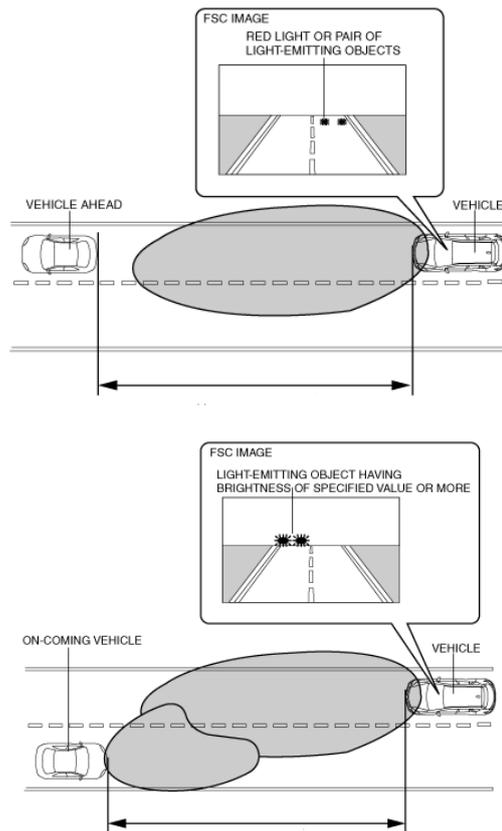


Fig.8 HBC System Operation

(4) 操作/表示

上記システムが作動状態となると下図に示すインジケータ (Fig.9) が点灯する。また、ハイビームインジケータは、自動切り替えでハイビームが点灯したときに点灯、ロービームに切り替わったときに消灯する。

(動画: HBC)

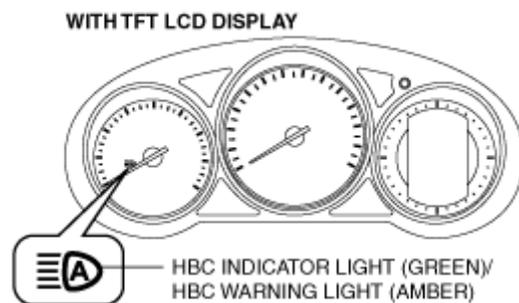


Fig.9 HBC Operation Display

(5) 各国市場環境への対応 (ロバスト性向上)

本システムは、日本国内の他に、欧米各国へ展開するため、それぞれ異なる市場環境でのヘッドライト・テールライトの識別性能向上を進める必要があった。例えば、欧州では本システムの効果を発揮する郊外路には街灯が少なく、反射率の低いリフレクタが多いことから、誤識別による不要なハイビーム/ロービームの切り替えをしてしまうことは少なかった。一方、米国や日本では、路側のリフレクタや路面に埋め込まれたキャッツアイや、街灯、自発光するタイプのリフレクタや、一般的にみられる赤色や白色ではなく、緑色に反射タイプのリフレクタ (Fig.10) など、ヘッドライト・テールライトの誤識別による不要なハイビーム/ロービームの切り替えをしてしまう傾向にあった。そこでマツダは、日本国内はもとより、各主要拠点の欧米を中心に膨大な夜間走行中の学習データを収集し、アルゴリズムに反映することで街灯などの自発光物やリフレクタなどの反射物に対する識別のロバスト性を向上することができた。



Fig.10 Unique Reflectors

4. おわりに

今回開発した LDWS, HBC により、お客様の単独衝突事故や夜間歩行者事故を未然に防止できるとともに、夜間のハイビーム切り替え負担低減による夜間視界の向上へ寄与できると確信している。

今後は、画像認識技術を活用した追突警報システムや、夜間視界のさらなる向上するシステムなど、より安全/利便性/快適性を向上させたシステムへの拡張を図っていきたい。

参考文献

- (1) 警視庁交通局：交通事故統計 (平成 24 年 4 月末)，(2012)
- (2) (財)交通事故総合分析センター：イタルダイフオメーション，UMTRI-2006-11 (2006)
- (3) (財)交通事故総合分析センター：自動車における車線逸脱の要因分析，H22 年度 自主研究 H22-04 (2010)

- (4) K.Kozak et al.: Evaluation of Lane Departure Warnings for Drowsy Drivers, Proceedings of the HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY 50th ANNUAL MEETING, pp.2400-2404 (2006)
- (5) ランプルストリップス整備ガイドライン (案)，(独) 土木研究所 寒冷地研究所 (2008)
- (6) 茨城県警察本部交通企画課：ライト切り替えによる交通事故防止 (平成 23 年度中)，交通安全かわら版 号外 (2012)
- (7) M.L.Mefford et al.: Real-World use of High-Beam Headlamps, UMTRI-2006-11 (2006)

■ 著 者 ■



内海 将司



原田 司



遠野 安広

特集：安全

33

Rear Vehicle Monitoring, an Award Winning Safety Function

Christian Schultze^{*1} Takashi Takemoto^{*2} Takashi Terano^{*3}

Summary

Passive safety technology has achieved a very high degree of perfection. In order to further reduce accidents, active safety technologies need to be introduced that avoid accidents rather than mitigate them. Mazda Motor Corporation (hence Mazda) follows this approach to make its products ever safer, aiming for zero accidents.

Mazda developed a safety function called Rear Vehicle Monitoring (hence RVM) that is able to assist the driver, warning him not only about invisible cars in the so-called blind spot of the vehicle, but also about cars that are approaching fast, leaving insufficient time for a safe lane change.

RVM has been presented to the Euro NCAP consortium and the Euro NCAP Advanced Award has been granted to Mazda for introducing RVM into most of its current passenger cars. This report describes the background of this technology and the way to the award.

1. Introduction

Lane change accidents happen frequently on multi lane roads, mainly insufficient observation of lanes and misjudgement of other vehicles' motion path cause them. Mazda developed Rear Vehicle Monitoring (RVM), a radar based technology that helps the driver detect vehicles in the blind spot and warns of fast approaching vehicles on the target lane.

2. European accident analysis as a trigger for safety development

2.1 Basic situation

Mazda has researched traffic situations and accident causation in order to find ways how to avoid accidents. High performance brake systems or electronic stability control systems are found nearly paramount in cars helping to stay in a safe state. Beyond these basic accident avoidance functions, Mazda searched for specific driving scenes that frequently trigger accidents and how safety functions could avoid them.

2.2 Lane changes as a critical driving manoeuvre

On multi lane roads a typical scene can be found: Vehicles approach slower vehicles ahead, face an ending or a blocked lane or merge in from other roads using special acceleration lanes.

In order to continue the journey, a lane change needs to be executed. This can only be done, if no vehicle is present laterally to the "ego-vehicle" on the target lane and there is no vehicle that will occupy to this space within a certain time.

In order to assure this, the driver of the ego-vehicle, aiming at change lane, needs to check the target lane by a view into the side mirror. However vehicles can be invisible in this mirror, if they are located in the so-called blind spot. Therefore the driver should always execute an over-the-shoulder view to confirm the vacant space. If vehicles are approaching from the rear, then the driver must decide, if

- a lane change still is possible, as the approaching car has sufficient time to safely react or
- the lane change should better not get executed in order to avoid a potentially dangerous situation.

*1 Advanced Technology Engineering Mazda Motor Europe *2 Technology Planning Dept *3 Vehicle Systems Dept.

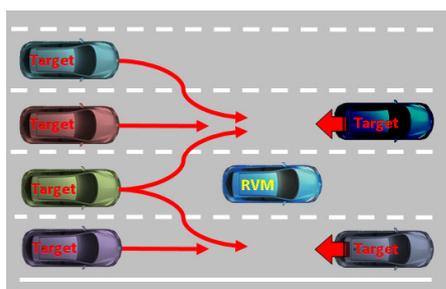


Fig.1 Different Critical Pathways to Enter Blind Spot Area

In parallel to this task, the driver must judge the traffic situation ahead: how much time is left until the lane ends or the car in front be reached.

The criticality of this situation rises with high speed differences of the rear approaching vehicle compared to the ego-vehicle and its speed difference to a vehicle in front or the distance to the end of lane ahead. In Europe high differential speeds occur on highways where passenger cars typically travel at 130km/h (in Germany partly unlimited). Trucks and merging traffic from other roads drive at 80 to 100km/h, so that a ΔV of up to 50km/h can occur frequently.

2.3 Accident causation research and expected effect of RVM to accident occurrence

In Europe various accident statistics on country and EU level exist that count the number of accidents and often assess the severity and causation. The most recent German official accident statistics of Destatis (1) from 2010 show that around 4.4% of accidents with injury happen laterally among cars that travel in the same direction. A "German In-Depth Accident Study" database called GIDAS (2) has analyzed about 20,000 accidents with injury in detail and with full reconstruction. GIDAS reports about 4.8% lateral accidents, the British Transport Research Lab (TRL) (3) about 5%. These values need to be corrected by some factors such as cars that did not pursue a lane change but e.g. lost control. Nevertheless it is important to work on these numbers in order to reduce fatality, injury and damage. By considering all factors available and using the GIDAS Database as the information source of highest accuracy, it is possible to extrapolate that annually about 560 lives could be saved in the EU through general introduction of RVM technology, 2,100 severe injury accidents and about 8,300 slight injury accidents could be avoided. The number of accidents with just damage are at least 2 magnitudes higher.

3. Describing the task

3.1 The process of a proper lane change and the task of avoiding its accidents

As already described above, lane change typically should start with a look into the mirror and over the shoulder. (4) In reality drivers often neglect the shoulder view based on carelessness, discomfort or age based physical impairment. This can lead to undetected vehicles in the blind spot area. Also it is reported that based on distraction or other mental occupation drivers look into the mirror or over the shoulder, but do not identify an approaching vehicle.(5) Even if a vehicle gets detected by the driver, the judgement of the relative speed difference can be very difficult, if the other vehicle is extremely fast, has a colour that contrasts little to the road environment (e.g. dark grey) or weather conditions like rain mask it.

The task of a safety device that supports to avoid lane change accidents can be described with the following statements:

- Vehicles in the blind spot area should be confirmed to the driver, even, if he does not detect them based on above mentioned reasons.
- Vehicles that will reach the lateral position to the ego-vehicle on the adjacent lane within a defined short time shall be notified as well.
- Should the driver of the ego-vehicle still indicate his lane change intention, then a warning should be placed, convincing the driver to abstain from lane change.

3.2 The critical area around the vehicle

The above described tasks imply the detection of vehicles in an area, left and right and behind of the vehicle. The blind spot area is depending on the driver seating position and the resulting side mirror aiming. To be sure to detect cars in all possible blind spot geometries, Mazda decided that the detection area should stretch longitudinally from the centre of front side window back to 10m behind the vehicle. The lateral detection should reach from the vehicle to a distance of 3.5m, covering also wide highway lanes. For defining the so-called closing area of approaching cars, the relative speeds of vehicles on different lanes and necessary reaction time for driver of the detected vehicle need to be considered. This lead to the understanding that this zone should stretch 50m behind the blind spot detection zone.

3.3 Detection and classification of issues preventing lane change

Not every vehicle being in the closing or blind spot area is a thread to the safety of the ego vehicle. It is necessary to further classify the target vehicles to judge, if a potential danger is existing. E.g. vehicles that are entering the closing area from rear with a very low differential speed (10km/h) need nearly 20s to progress from border of closing area to the blind spot area. Here a notification should be given to the driver of the ego vehicle, when a Time-To-Collision (TTC) of 5.5s is reached. This value has been developed based on extensive driver tests, considering reaction times, perception of urgency and its latency. However a vehicle entering the blind spot area of the ego-vehicle should always be notified from wherever it enters. Only if the vehicle has completely left this area, the notification can be cancelled.

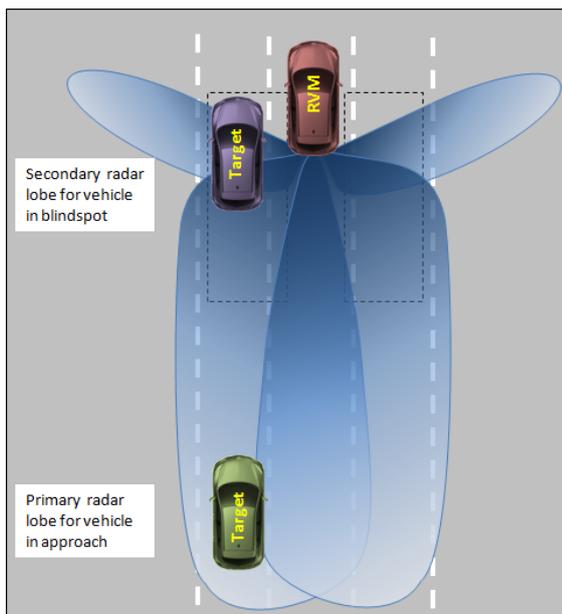


Fig.2 Radar Beam Forms and Vehicle Detection

3.4 Technical solution

In principle a detection of vehicles in the blind spot zone can be done by different sensor types such as camera systems. This has been shown already by some OEMs. Such technical solution shows insufficiencies in terms of weather robustness and especially the detection of vehicles in the closing area. A very robust sensor is a 24GHz short range radar. Mounted well protected behind the bumper fascia at the two rear vehicle corners allows to detect vehicles in the closing and blind spot area. The classification allows to distinguish stationary objects like road signs from moving objects and to

analyze their location and relative speed very precisely. Weather influences the performance only very minor, so that a continuous operation can be achieved. The picture on the right shows the beam shapes of the radar sensors of the blue Mazda and the detected vehicles in the blind spot and approach zone.

4. The Human-Machine-Interface (HMI) Concept

4.1 Warning the driver

The HMI should not make the driver give up his checking of mirrors. (Misuse avoidance) Therefore the indication of a vehicle in blind spot area or closing with $TTC < 5.5s$ is notified by a LED light in both side mirror areas. This is far out of the primary area of vision so that the driver still needs to look into the mirror direction. In case the driver neglects the notification and sets turn signal for changing lane, an audible warning is given, to prevent action. Mazda followed by this a two step warning procedure using a warning indication based on SAE J 2802 with fast blinking lights for the imminent danger warning.



Fig.3 Indication of Car in Blindspot Area or Approaching to it

4.2 The HMI dilemma

Any lane change support device suffers one key issue: the knowledge about the actual driver intention. Drivers show their intention to change lane differently:

- drivers set the turn indicator to show their will to change lane and await a suitable “gap” on the target lane,
- others set the turn indicator, when the “gap” is present and notify the instant following lane change action,
- finally some drivers do not indicate lane change at all.

Mazda decided to change from notification to warning as soon as the driver sets the turn indicator. This leads to a safe warning of the majority of drivers. To assure that the driver recognizes the warning Mazda introduced a strong blinking of the notification LED and an audible buzzer. The later one (if notification LED and audible buzzer turn on at the same time) can be reduced in volume or switched off to avoid driver annoyance.

Therefore Mazda's RVM fully complies with ISO 17387 that specifies system requirements and test methods for Lane Change Decision Aid Systems (LCDAS).

4.3 Results from external research

Mazda reviewed research of field tests such as the Integrated Vehicle-Based Safety Systems Project (IVBSS) (6) among many others. The IVBSS used more than 100 non-professional testers in a naturalistic, 40 day driving test on vehicles that were equipped with different active safety systems, among them a RVM-type function. The review showed: 25% told they increased their turn signal use. 20% increased their general awareness and 13% had more awareness of the blind spot region. The RVM-type function was rated highest for satisfaction and usefulness in particular when changing lanes and merging into traffic. 7 drivers reported that a RVM-type warning they received prevented them from crashing during a lane change or merging into traffic.

Mazda could confirm similar effects during the prototype test phase done in various locations of the world.

5. The technical performance verification of RVM

5.1 Selection of test scenes

During the development verification tests were used to confirm the production readiness, detection effectiveness, but also the fault free function of RVM. Later tests were carried out with external partners that should neutrally confirm the performance of RVM. In Germany this was done together with BAST, the Federal Highway Research Institute.(7) 17 different scenarios were selected that cover almost all possible configurations for the approach of cars in a target lane in longitudinal and transversal direction with speed differences of up to 50km/h. They represent all typical accident scenarios for lateral accidents with lane change as stated in the GIDAS research. Examples are shown on the right. BAST measured the detection distance L , notifying timing accurateness (5.5s Time-To-Collision) and the possible influence on different turn signal setting timings by the driver. This should give evidence that the expected warn process of detecting a critical approach and warning to the driver should he intend to change lane, was achieved. A further important part was confirmation of the absence of potential false positive or negative detections.

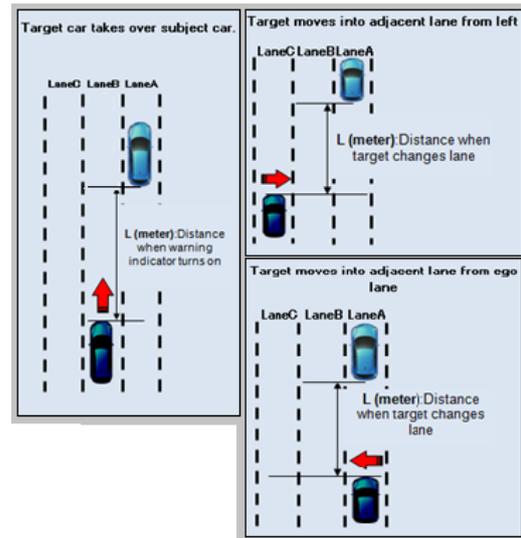


Fig.4 Examples of Test Scenarios for Critical Approach

5.2 Test Results

The test results showed that RVM is able to detect cars fault-free and at required precision within the designed areas. The calculation of the TTC was correct and the warning was issued timely independent of driver behaviour. False positive or negative detections were not present. This is very much in line with the results from the IVBSS project which had found that radar based RVM-type functions have the highest reliability.

6. The application to Euro NCAP Advanced Award

6.1 The application of Euro NCAP Advanced Award

In 2010 the Euro NCAP consortium had started to award automotive OEMs with a **Euro NCAP Advanced Award** for introducing advanced safety systems to the market without any legal obligation. As Mazda had successfully tested and deployed RVM throughout its core models, Mazda decided to apply for this award through developing a comprehensive application report.

6.2 The Award

On 23rd of September 2011 the Euro NCAP Advanced Award for Rear Vehicle Monitoring was handed out to Mazda during the Frankfurt Motor Show acknowledging Mazda's efforts to raise vehicle safety beyond the conventional levels through applying advanced technology.



Fig.5 The Euro NCAP Advanced Award

7. Future outlook to lane change assist systems

7.1 Intelligent detection and function

The next challenge in further improving RVM will be to detect the driver intention, even if the driver does not indicate his lane change wish by using the turn signal. This will only be possible by using additional information from other sensors. It will have another big impact on RVM effect.

Further RVM should distinguish the criticality of the situation in a more differentiated way. Doing a lane change, when a vehicle is already in the blind spot or the TTC is very short, should effect a different, stronger reaction of the vehicle.

Finally the driver of a car is facing the difficulty to judge, if e.g. he better performs a critical lane change or e.g. executes a hazard braking, if a lane is blocked ahead. Here a criticality check and advice by RVM would be a desirable new feature.

7.2 Human Machine Interface HMI

With regards to the HMI we expect also in future a progress. Warning chimes should be restricted for actual, imminent dangers.

As RVM is mostly dealing with less critical situations, the HMI should be adapted. Research projects are scheduled that aim at a lane change assistant that not only detects suitable gaps on an adjacent lane, but also can advice proper speed and steering to reach them.

Should the driver aim at a critical lane change that would lead to a crash, a different interaction of the RVM should be considered. This could be even a steering impulse preventing the driver from lane changing.

8. Conclusions

Mazda has successfully developed and introduced Rear Vehicle Monitoring, which supports the driver to confirm vehicles in the blind spot of his mirror or in approach to that. RVM is assisting drivers in a fact based decision on executing or aborting a lane change. In this way it is possible to reduce typical lane change accidents that are quite frequent on multi lane roads / highways all over the world. RVM has proven its performance and customers put their confidence in its trustworthy recommendation. Mazda is proud to have received the Euro NCAP Advanced Award for introducing this advanced safety technology.

Mazda is continuously developing new safety systems towards the vision of a zero accident traffic.

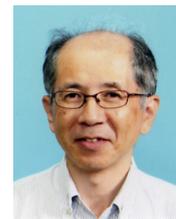
Ref.

- (1) Destatis, Official German Statistics Office, Publication of annual accident statistics, www.destatis.de
- (2) Gidas, German In Depth Accident Study, of real accidents that get reconstructed through an expert team by in depth analysis on the accident location. Database with more than 20000 accidents with injury/fatality is already available.
- (3) Study on lane departure warning and lane change assistant systems, Transport Research Laboratory, England 2005
- (4) Olsen et al, Eye glance behaviour during lane changes and straight ahead driving, Journal of Transport Research Board, USA 2005/ vol. 1937, p.44-50
- (5) Review of the "Looked, but failed to see" accident causation factor, Department for Transport, England 2005, Report 60
- (6) Integrated Vehicle Based Safety Systems - Light Vehicle Field Operational Test – Methodology and Test Results Report, University of Michigan, USA 2010, UMTRI-2010-30 report
- (7) BAST Bundesanstalt für Strassenwesen, Federal German Highway Research Center, www.bast.de is a governmental research organisation for road / transport related research including accidentology.

■Authors■



Christian Schultze



Takashi Takemoto



Takashi Terano

新世代4WD システムの紹介

Introduction of New-Generation 4WD System

八木 康*1

Yasushi Yagi

松室 義隆*4

Yoshitaka Matsumuro

三戸 英治*2

Eiji Mito

沢崎 朝生*5

Tomoo Sawazaki

石田 一之*3

Kazuyuki Ishida

要約

新世代 4WD システム開発では、他の SKYACTIV TECHNOLOGY と同様のアプローチで、4WD システムの理想である「タイヤの駆動力を最大に活用できる駆動力マネジメント」を追求した。4WD 制御面では、刻々と変わる路面状態をリアルタイムで把握し、ドライバが車輪のスリップを感じる前に前後輪の駆動力配分を高精度で制御する新制御システムを構築した。また、ユニット、コンポーネントハード面では、必要とされる後輪駆動力を徹底的に研究、設計・製造の考え方も全面的に見直し、従来システム比 43%の軽量化と、25%のトルク伝達効率改善を実現した。

これらにより、CX-5 では優れた 4WD 走破性能と低燃費など高い環境性能の実現に貢献できた。

Summary

During the development of the next generation 4WD system, like the same approach of other SKYACTIV TECHNOLOGY, we pursued the ideal 4WD system with "precise torque management that makes best use of wheel torque". The new control system detects road surface conditions in real time and distributes torque to front and rear wheel before a driver can feel slip of wheels. By analyzing required rear torque precisely and improving the concept of design and production process, we also achieved 43% weight reduction of the hardware system and 25% torque transfer efficiency compared to the current system. These enabled superior drivability and high environmental performance of CX-5.

1. はじめに

CX-5 をはじめとする新商品群に搭載する新世代の 4WD システムを開発するに当たり、4WD システムの理想を再定義した。それは、前後タイヤの駆動力を最大限に活用することである。その理想を実現するためには、前輪/後輪への駆動力配分を自在にコントロールし、必要な時に必要十分な駆動力を後輪に伝える駆動力マネジメントが鍵となる。それにより、求められる 4WD 走破性を向上させ、燃費など環境性能を最大化させることが可能となり、ユニット、コンポーネントの小型・軽量・高効率化にも貢献できる。

本稿では、駆動力マネジメントと、4WD システムを構成する 4WD 制御デバイスやユニット、コンポーネントについて紹介する。

2. 駆動力マネジメント

2.1 駆動力マネジメントコンセプト

Fig.1 は、市場の舗装路走行における前後加速度頻度を示している。路面 μ の大きな舗装路において、その低加速度域に頻度は集中している。路面 μ の小さな雪路等では、低加速度域集中が更に顕著になると推測する。これらを踏まえ、市場走行における後輪駆動力が必要なシーンを Fig.2 に示す。滑りやすい路面で急加速する等のエンジン駆動力が前輪グリップ容量を超えるシーン (Fig.2 斜線部) では、エンジン駆動力を分担するため後輪への駆動力伝達が必要である。もし、実際に前輪グリップ容量を超えてしまうと 4WD 走破性を喪失してしまう。一方で、前輪グリップ容量に余裕のあるシーンでは、後輪駆動力をゼロ

*1~5 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

としても4WD走破性能に影響がない。

よって、後輪駆動力が必要な時をエンジン駆動力が前輪グリップ容量を超える直前とし、必要十分な後輪駆動力を、前輪グリップ容量を超えさせない最小限の後輪駆動力配分とする。すなわち、駆動力マネジメントコンセプトは「必要な時に必要十分な駆動力を後輪に伝える」である。これにより、後輪駆動力を必要最小化し、その頻度も極限まで低くできるため、ユニットの小型・軽量化に貢献でき、更に小型化によって、ユニットのエネルギーロス低減、高効率化にも貢献できる。

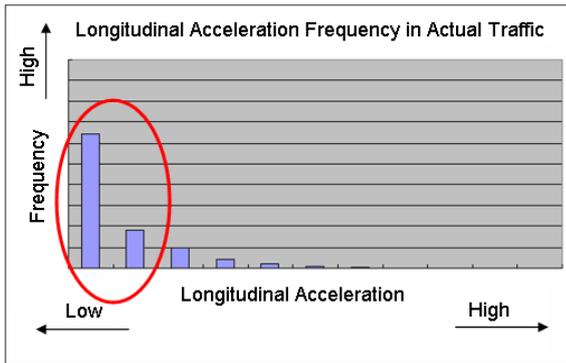


Fig.1 Longitudinal Acceleration Frequency (Dry Asphalt Road)

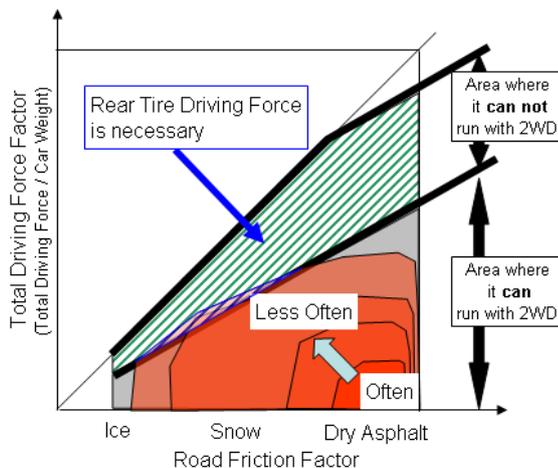


Fig.2 4WD Scene in Actual Traffic

2.2 4WD 制御の狙い

駆動力マネジメントコンセプトを換言すれば、前輪がスリップする直前に後輪に駆動力を配分して前輪スリップを未然に防ぐということである。従来システムでは、前輪スリップを後輪速度と前輪速度の差と定義していたが、本システムでは、前後それぞれのタイヤ自体のスリップ比として求める。前輪スリップ比は車体速度に対する前輪タイヤのスリップ比とし、後輪タイヤのスリップ比も同様に扱う。タイヤはスリップ比に応じた摩擦力を発生させ、スリップ比と車速、摩擦力等によってタイヤのエネルギーロスが求められる。前後輪タイヤのエネルギーロス（スリップロス）の他に、PTO (Power Take Off) とリヤデフユニットそれぞれのエネルギーロス（機械効率ロスとスピロス）があり、これらの総和を4WDシステムのエネルギーロス総和と定義する。そして、この総和を最小化することが4WD制御の狙いである (Fig.3のBがそのポイント)。Fig.3のA点は、後輪駆動力配分過小により前輪スリップロス増加し、エネルギーロス総和が増大しており、逆に、Fig.3のC点は、後輪駆動力配分過大によりユニット機械効率ロスが増加して、エネルギーロス総和が増大している。このエネルギーロス総和の最小点は、路面 μ やエンジン駆動トルク等の変化により時々刻々変化し続ける。

時々刻々変化するエネルギーロス総和の最小点をトレースするために、その肝といえるリアルタイムのスリップ比推定と路面に応じたタイヤモデルの推定に取り組んだ。その過程で、雪路走行中のタイヤのスリップ比-摩擦力の特性とドライバーのスリップを感じる特性を計測すると、タイヤが駆動力を伝えてスリップ比が発生する現象において、ドライバーが気付くスリップ比はある程度大きいことが判明した。そこで、スリップ比検知しながらスリップ比コントロールのため4WD制御の介入できる余地「不感帯」があることを見出し (Fig.4)、ドライバーに不安感を与えることなく、エネルギーロスを最小化し、タイヤの駆動力を最大に活用できるスリップ比に制御できる技術を構築した。

ここで、このエネルギーロス総和を最小化すると、4WD走破性能を向上させ、自ずと燃費など環境性能は最大化されていることになる。従来までは、4WD走破性能を向上させるとユニットのエネルギーロスが増加するため、燃費など環境性能と相反すると考えていたが、タイヤまで含めた4WDシステムエネルギーロス総和の常時最小化を狙うことで、4WD走破性能と燃費など環境性能の双方を高めるというブレークスルーを実現した。

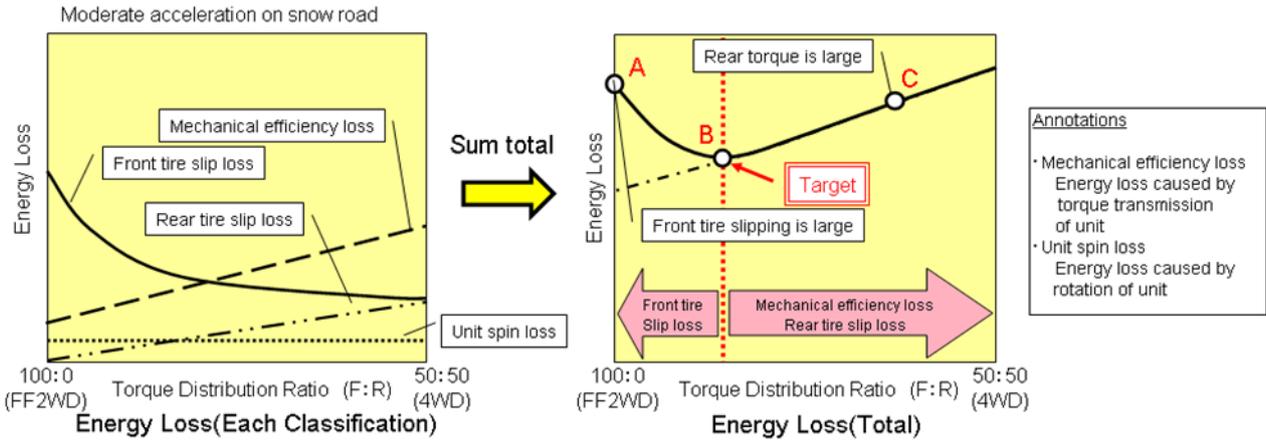


Fig.3 4WD Energy Loss Minimize Concept

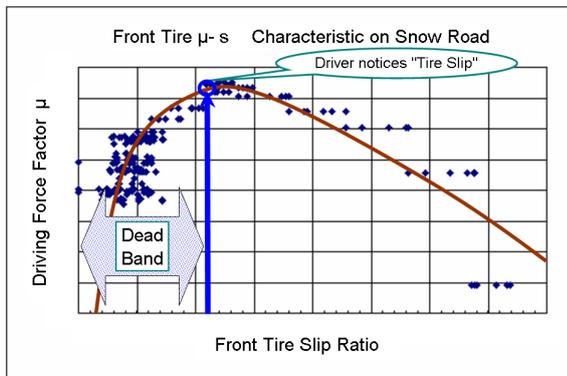


Fig.4 Dead Band on Front Tire μ -s Characteristic

3. 4WD システムの具現化

3.1 4WD システム構成

駆動カマネジメントコンセプトに対応するため、電子制御 4WD カップリングと制御ロジック、構成ユニット、コンポーネントを新規開発した。その 4WD システム構成は、定評のある従来システム（アクティブトルクコントロールカップリング 4WD）を踏襲した上で、駆動カマネジメントの考え方を一新し、4WD 制御用に新たに制御信号を追加、小型・軽量・高効率の PTO ユニット、リヤデフユニット、プロペラシャフトを採用した (Fig.5)。

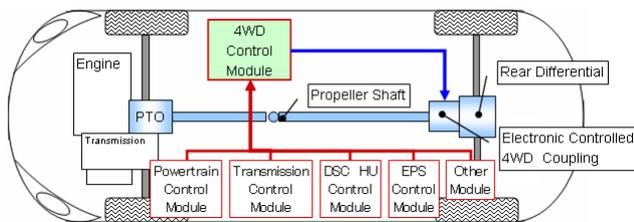


Fig.5 New 4WD System

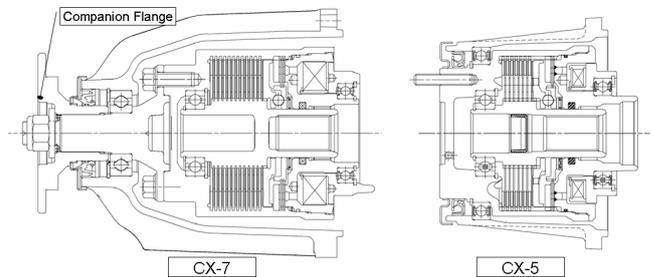


Fig.6 New 4WD Coupling (CX-5)

3.2 4WD 制御デバイス

電子制御 4WDカップリングは従来システムの基本構造をベースに、4WD走破性能目標に応じて容量を最適化、駆動カマネジメントコンセプトに基づいて内部構造を見直し、更にコンパニオンフランジとそれにつながるインプットシャフトを廃止してカップリングとプロペラシャフトを直付けすることで小型・軽量化（質量 34%低減）した。また、カップリング容量最適化に加えて、カップリングと ECM (Electronic Control Module) とを一对のペアにした制御電流値調整によってトルク補正することにより、トルクばらつきを従来比 68%低減させた (Fig.6)。

前述の 4WD 制御の狙いを Fig.7 の制御モデルに具現化した。前輪スリップ比やエンジン駆動トルク信号等をモニタして、エネルギーロス総和が最小化されるようにカップリング指令トルクを決定している。タイヤスリップ比推定やタイヤモデル推定のロジックを新規開発し、採用した。

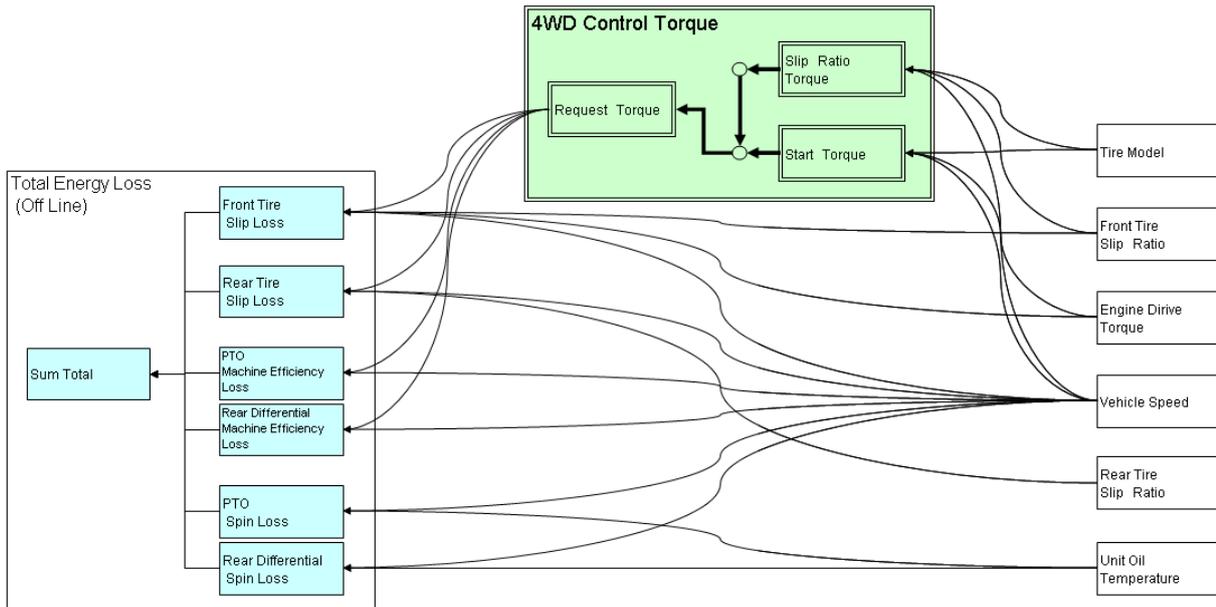


Fig.7 New 4WD Control Model

3.3 ユニット, コンポーネント

(1) PTO, リヤデフユニット

新開発の PTO, リヤデフユニットは、駆動力マネジメントコンセプトを前提に、必要な構成要素の最少化と、CAE (Computer Aided Engineering) による極限まで部品の縮小・薄肉・小容積化を行うことで、従来システムに対して劇的な小型・軽量・高効率化を図った (Fig.8, 9)。

PTO ユニットは、開発構想段階からエンジン・トランスミッションと一体で機能構成部品の最小化設計に取り組み、入力軸上に方向変換ギヤを配置する 1 軸式のアドオン構造を採用した。また、後輪駆動力の必要十分化による PTO ユニット発熱量の低減と、エンジンルーム内の風流れ解析による放熱特性向上により、従来システムで採用していた強制水冷クーラを廃止した。ケース類においては、アルミダイカスト製法により無駄肉を排除した基本構造を採用するとともに、効率的かつ効果的に CAE を活用することで求められる剛性・強度・シール性・NV (Noise and Vibration) 性能等の各機能要件を確保しつつ従来比 50%以上の薄肉化を達成し、ギヤ等の構成要素の最小化も併せてユニットトータルで従来システム比 55%減の軽量化を達成した。更に、ユニット内のオイル潤滑については、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オイル量低減・オイル攪拌抵抗低減、更に 1 軸化や強制水冷クーラポンプ廃止の抵抗低減も加えて、ユニット損失トルクを従来システム比 28%低減した。

リヤデフユニットは、ファイナルリングギヤサイズは 135mm とし軽自動車並みの小型化を実現。デフキャリア・リヤカバー等のケース構造はサイドベアリング中央部での分割構造を採用した。ユニットトータル質量は従来比 46%低減し、クラス最軽量を達成した。更に、ユニット内オイル潤

滑については PTO ユニット同様に、CAE 解析と併せ樹脂製クリアケースによるオイル流れ可視化技術を活用し、オイル量低減・オイル攪拌抵抗低減を図った。その結果、ユニット損失トルクを従来システム比 34%低減した。

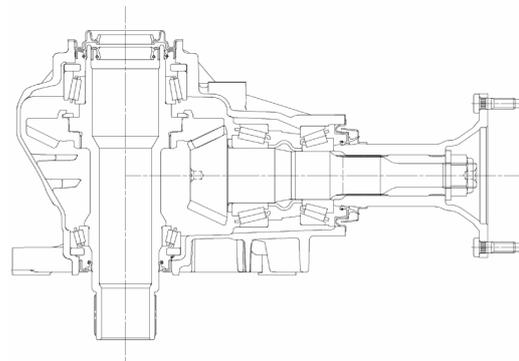


Fig.8 New PTO Unit

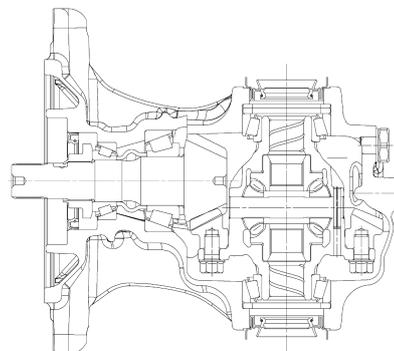


Fig.9 New Rear Differential Unit

(2) プロペラシャフト

プロペラシャフトにおいても、新しい駆動力マネジメントコンセプトに適合させることにより、従来システムと比較して大幅な小型化と軽量化、かつ、高効率化を図った (Fig.10)。基本構成は従来の3本(4ジョイント)構造から2本(3ジョイント)構造とすることで駆動力伝達のロスを低減すると同時に部品点数を減らし、更に、CAEを駆使して信頼性要求と車両全体でのNV性能を高次元で両立させる仕様を追求し、ジョイントなど各種構成部品の小型・軽量化(質量40%低減)を実現した。

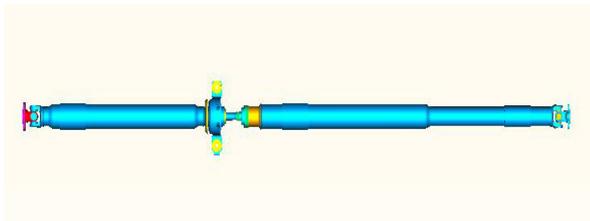


Fig.10 New Propeller Shaft

4. 4WD システムの貢献

4WD システムの理想の追求により、ベストインクラスの優れた4WD走破性能を発揮しながら、従来システム比のエネルギーロス大幅低減が実現した。まず、4WD走破性能をFig.11とFig.12に示す。CX-5は、前輪/後輪が人工氷路/コンクリート路である前後スプリット μ 登坂路において、市場要求に対して必要十分な登坂能力を有している。旋回登坂においても前輪スリップロスが小さいことで燃費性能に貢献していることに加えて、前輪の横滑りが抑えられて車両安定性も高められる。次に、実用燃費の社内モード走行時のエネルギーロスは、従来モデルCX-7から約80%低減できた (Fig.13)。これにより、社内モードで16%程度の実用燃費性能向上が見込める。

最後に、雪路緩加速中のエネルギーロスを Fig.14 に示す。CX-5 4WD は、2WD 車のように大きな前輪スリップロスを発生させることなく、後輪駆動力配分によってエネルギーロス総和を小さく抑えている。すなわち、雪路で2WD車よりも高い燃費性能を得られる4WD車CX-5を世に送り出すことができた。



Fig.11 4WD Driving Performance

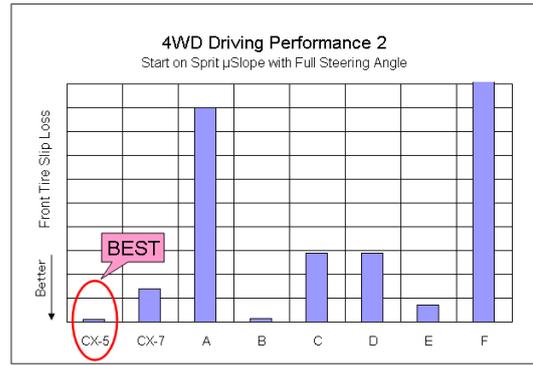


Fig.12 4WD Driving Performance with Full Steering Angle

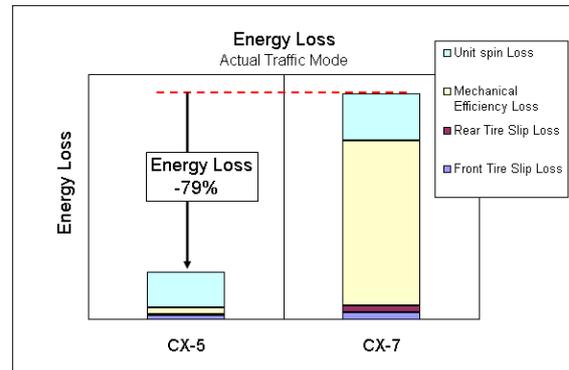


Fig.13 Total Energy Loss (Actual Traffic Mode)

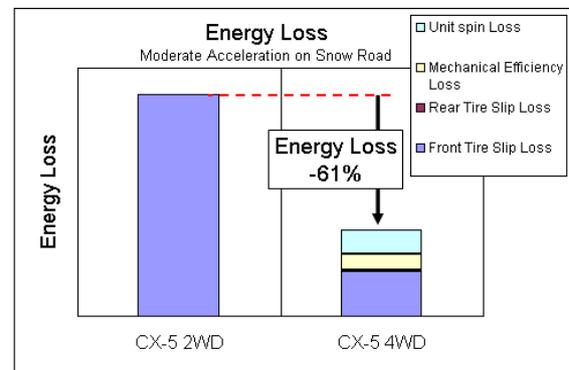


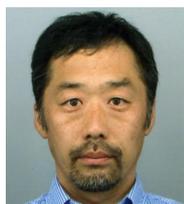
Fig.14 Total Energy Loss (with Winter Tire on Snow Road)

5. おわりに

新規採用した新世代 4WD システムについて、その概要を説明した。CX-5 は、全世界に展開するクロスオーバー SUV として、「ベストインクラスの走破性能を発揮する 4WD・・・なのに低燃費」と、ご満足いただけると自負している。

最後に、開発に多大な協力をいただいた関係各社の皆様に厚くお礼申し上げます。

■著者■



八木 康



三戸 英治



石田 一之



松室 義隆



沢崎 朝生

論文・解説

35

磁界 CAE を用いたアドバンストキーレス開発

Development of Advanced Keyless System Using Magnetic Field CAE

吉田 俊秀*1

Toshihide Yoshida

稲田 貴裕*4

Takahiro Inada

浜田 康*2

Yasushi Hamada

沼元 正樹*3

Masaki Numoto

要約

車の利便性を高める商品として、アドバンストキーレスシステムやイモビライザシステムなどの、磁界通信を用いたシステムの導入をマツダは進めてきた。これらシステムの通信性能を確保するためには、磁界送信用のコイルアンテナ（以下 LF アンテナ（LF: Low Frequency））を、車両の適切な場所にレイアウトする必要がある。従来は、試作車を用いて実験的に LF アンテナのレイアウト設計を行ってきたが、試作車レス開発に対応すべく、バーチャル評価による通信性能開発が必要となってきた。今回、磁界シミュレーション（以下 CAE）技術を用いて、これらシステムの通信性能を机上で検証可能な技を開発した。

Summary

Mazda has been promoting the introduction of systems using magnetic field communications, such as an advanced keyless system and immobilizer system, as products that enhance vehicle convenience. To ensure the communication performance of these systems, it is necessary to lay out the coil antenna for the use of magnetic transmission (hereinafter referred to as LF antenna) in an appropriate place of the vehicle. In the conventional design method, the layout of the LF antenna is determined experimentally by use of a prototype vehicle. To realize prototype-free development, however, it became necessary to develop the communication performance through virtual evaluations. This time, with use of the magnetic field simulation technology (hereinafter referred to as CAE), we have developed a technology to theoretically verify the communication performance of these systems.

1. はじめに

車の利便性を高める商品として、マツダはアドバンストキーレスシステムの導入を進めてきた。アドバンストキーレスとは、ユーザが Fig.1 に示すようなアドバンストキー（以下キー）をポケットやバッグから取り出すことなく、車両のロック、アンロックや、エンジン始動を可能とするシステムである。これを実現するために、車室内外にキーを検知するための検知エリアを形成する。この検知エリアは、LF アンテナに高周波電流を流し、LF アンテナを中心に磁界を発生させることで形成している。この形成した検知エリア内にキーがあれば、車両はキーと無線通信を行い、

キーを持ったユーザが車室内もしくは車室外のどちらに居るかを判別できる。ここで、LF アンテナのレイアウトが悪いと検知エリアが不適切となり、誤検知を引き起こす要因となる。これは、高周波磁界の振る舞いが金属により大きく影響を受け車両の構成物により複雑に変化するためである。従来の LF アンテナレイアウト活動は、試作車を用いた開発が中心であり、試作車評価後の設計変更を前提とした開発となっていた。更なる開発の効率化が必要とされる昨今では、試作車中心の開発は回避する必要がある。

*1~3 電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

*4 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

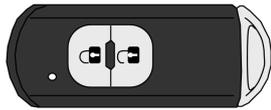


Fig.1 Advanced Key

本技術開発では、車室内にレイアウトされる 125kHz の周波数を使用した LF アンテナの磁界分布特性を、CAE により予測する技術を開発し、高精度な机上検証を可能としたので、これを報告する。

2. アドバンストキーレス開発の現状

2.1 アドバンストキーレスの性能開発における問題

車両に搭載されるアドバンストキーレス用 LF アンテナのレイアウト例を Fig.2 に示す。

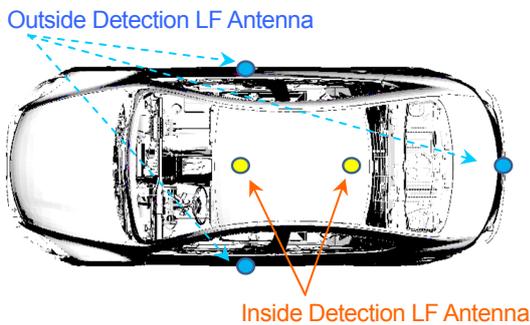


Fig.2 Layout of LF Antennas

LF アンテナは、車室外送信用と車室内送信用に分けられ、1 本当たりの検知エリアは半径約 1~2m である。車室外送信用の LF アンテナは、運転席と助手席のアウトハンドル内や、リヤバンパ内にレイアウトすることで、十分な検知エリアを確保できる。一方、車室内送信用の LF アンテナはダッシュボード内部やリヤフロア上にレイアウトする 경우가多く、車両のボデー形状をはじめとした様々な金属部品により影響を受け、検知エリアが複雑に変化する。そのため、車内の検知エリアを十分に確保できず、キーが車内にあるにも関わらずエンジン始動ができないという問題や、車内の検知エリアが車外に漏れることにより、キーが車外にあるにも関わらずエンジン始動ができてしまうなどの問題を引き起こす。

2.2 性能予測技術の必要性

車室内における磁界強度分布の事例を示す。Fig.3 は、車両を簡易的なモデルとして模擬した計算モデルである。Fig.3 の計算モデルをベースとして、LF アンテナを X 軸方向に±20mm 移動した場合の磁界強度分布を、CAE で計算した結果を Fig.4 に示す。この結果からわかるように、LF アンテナのレイアウトが数十 mm 移動すると、磁界強度分布が大きく変化する。このように、磁界はボデーの構造物など様々な金属形状の影響を受けやすく、検知エリアも同様に、LF アンテナのレイアウト変更やボデー形状の変更で複雑に変化する。そのため、量産形状と同等の試作車が

できる開発の後期で初めて問題が発覚する場合があります、LF アンテナのレイアウト変更が必要となる。そこでこれらレイアウト変更をなくすべく、机上で LF アンテナのレイアウト設計を可能とする技術開発を行った。

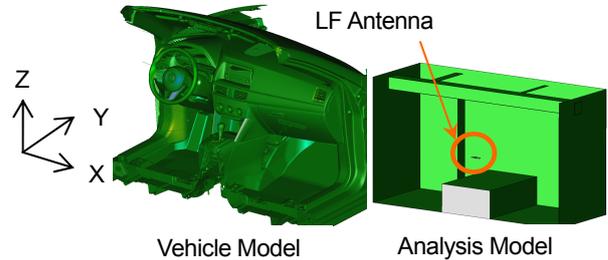


Fig.3 Vehicle Model and Analysis Model

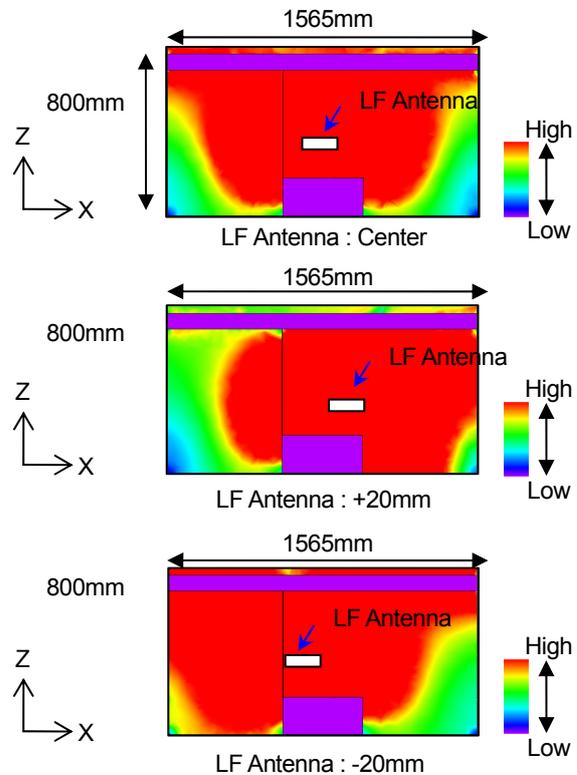


Fig.4 Magnetic Field Strength Distribution vs. LF Antenna Layout

3. 磁界 CAE 開発

車室内の検知エリアを机上で検証可能とするために、磁界 CAE 技術開発に取り組んだ。最初に簡易モデル検証を行い、次に実車モデル検証を行った。最終的には、磁界通信を応用したその他システムの検証を行った。

3.1 簡易モデル検証

CAE に必要な LF アンテナや実車モデルの材料特性、メッシュサイズを明確化するために、(1) 自由空間における LF アンテナ単品の磁界強度分布、(2) 車両ボデー相当の簡易金属モデルにおける磁界強度分布について、実測と

CAEの相関検証を行った。

(1) 自由空間の検証

まずは、自由空間におけるLFアンテナ単品の磁界強度分布を、メッシュサイズを変化させながら検証した。自由空間におけるLFアンテナの磁界強度は、測定距離 (r) が数mに対し、波長(λ) が数kmと長く、近傍界(λ/2πr>1)となるため、式(1)で表される。磁界強度は、λがrと比較し十分長く、式(1)に示す 1/r³項が支配的となるため、距離の3乗に反比例する。Fig.5に、LFアンテナの自由空間における磁界強度の測定結果と、CAE計算結果、距離の3乗で反比例する理論式のグラフを示す。グラフは、Fig.6に示すようにLFアンテナ中心を原点とし、原点からX軸方向に離れた場合の磁界強度をFig.5にプロットした。Case1とCase2は、CAEの計算結果であり、それぞれメッシュサイズが異なる。この結果より、Case2が測定結果と理論式に一致しており、LFアンテナのメッシュサイズ条件としては、Case2を用いることとした。

$$H(t) = \frac{A}{4\pi} i(t) \left(\frac{1}{r^3} + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{j}{r^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{r} \right) \quad (1)$$

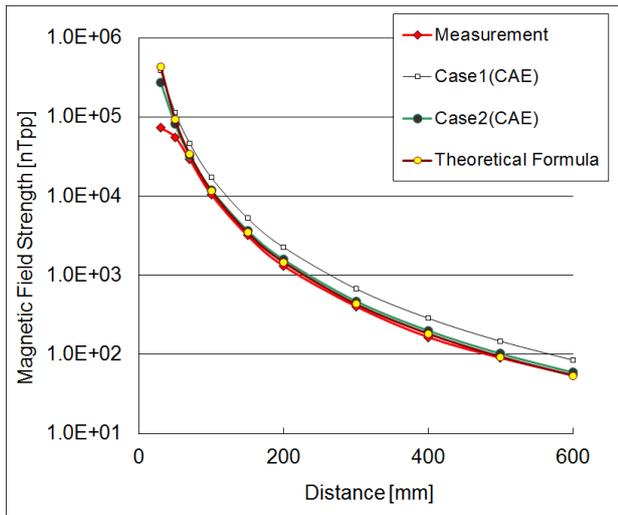


Fig.5 Magnetic Field Strength in Free Space

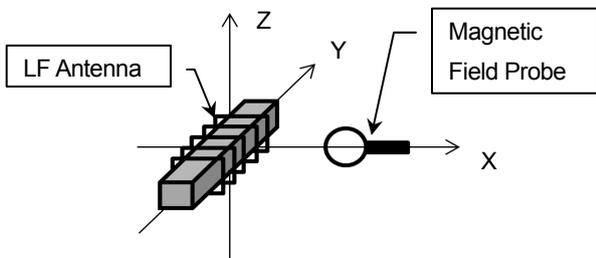


Fig.6 Measurement Conditions

(2) 簡易金属モデルの検証

次に、簡易金属モデルを作成し、実測値とCAEの比較検証を行った。実測用の簡易金属モデルは、車両ボデー同等の材質を使用し、CAE上の簡易金属モデルは、Table 1に示すように、計算結果に影響を与えると予想される金属

の磁気特性やメッシュ条件、計算条件などを変化させ検証を行った。パラメータは、Material (材質の磁気特性)、Eddy current (渦電流)の適用、Skin depth layer (表皮深さ)層の数、SIBC (表面インピーダンス法)を適用の4種類である。Fig.7に簡易金属モデルの形状と磁界強度の測定条件を示す。LFアンテナは金属モデルの底面より20mm離れており、磁界はLFアンテナの中心を原点とし、原点からX軸方向に離れた場合の強度を測定している。Fig.8に実測値とCase1~Case5のCAE計算結果を示す。

Table 1 Analysis Condition

Case	Material	Eddy Current	Skin Depth Layer	SIBC
Case1	Material1	✓	4	N/A
Case2	Material2	✓	4	N/A
Case3	Material3	✓	4	N/A
Case4	Material3	N/A	4	N/A
Case5	Material3	✓	1	✓

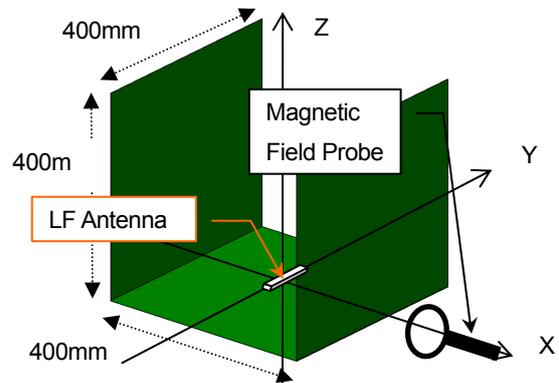


Fig.7 Measurement Conditions in Simplified Model

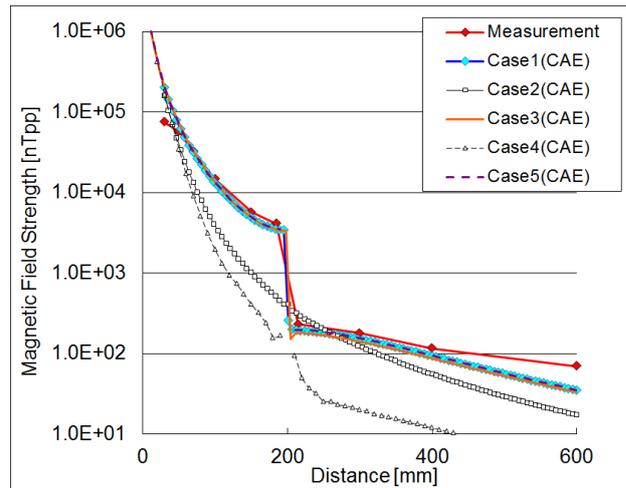


Fig.8 Magnetic Field Strength in Simplified Metal Model

Fig.8からわかるように、Case1、Case3、Case5の結果は同等であり、これらを実測値と比較すると、金属内側 (Fig.8のX<200mmエリア) においてほぼ一致している。これは、金属で囲まれた車室内における磁界強度を、CAEで高精度に解析可能であることを示している。ここで、

Case1 と Case3 は、金属の磁気特性が異なり、磁化特性が線形もしくは非線形であるかによって異なる。本結果からこれら磁化特性が計算結果に影響を与えないことが判明した。モデルの物性値を車両ポデー相当とし、渦電流による影響を考慮することで、簡易金属モデルにおいても、磁界強度は実測値と一致することが判明した。

次に、Case3 と Case5 の結果を比較する。磁場解析では、式(2)に示すように、金属モデルの表面を表皮深さ分、複数の層に分けてメッシュを作成する必要があるが、Case3 の簡易金属モデルでは、4 層のメッシュを作成している。一方、Case5 は SIBC を適用し、簡易金属モデル表面のみに電流が流れるように計算を行うことで、メッシュの層構造を1層としている。Case5 の結果より、SIBC を用いることで、表皮効果を考慮した場合と同等の結果が得られ、モデルのメッシュ層を複数考慮する必要がないことが判明した。これにより、数十万のメッシュ数を削減でき、モデル作成時間や計算時間の短縮が可能となった。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (2)$$

δ : Skin Depth
 μ : Magnetic Permeability
 σ : Electrical Conductivity
 f : Frequency

3.2 実車モデル検証

(1) 実車簡易モデル

計算時間を短縮化するために、Table 1 の Case5 の計算条件と材料条件を用いて、実車を実物大に模擬した簡易モデルを作成し、メッシュサイズを変更した場合の計算コスト（使用メモリ、計算時間）と計算精度の関係を明確化した。Fig.9 に今回 CAE で用いた計算モデル、Fig.10 にモデルの計算範囲、Table 2 に計算条件と計算コスト、Fig.11 に磁界強度の計算結果、Fig.12 に計算に使用したメモリ数と計算時間の関係を示す。

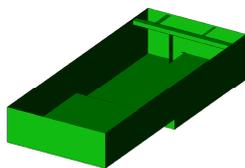


Fig.9 Analysis Model

Fig.11 からわかるように、磁界強度減衰は、メッシュサイズによらず同等である。また、Fig.12 からわかるように、Mesh3~Mesh5 は計算コストがほぼ同等である。計算精度と計算コスト、更には計算結果の後処理を考慮すると、Mesh3~Mesh5 が、解析モデルとして適している。しかしながら、Mesh4, Mesh5 では、メッシュサイズが大きく、一部車両形状を保持しない。以上の結果より、車両形状を適切な形に保ち、精度よく、そして計算コストを抑える条件として、Mesh3 の条件を用いて実車モデルを計算することとした。

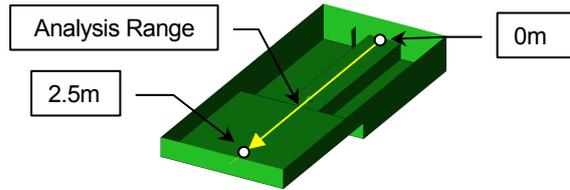


Fig.10 Analysis Range

Table 2 Analysis Condition

	Mesh1	Mesh2	Mesh3	Mesh4	Mesh5
Count of Mesh	6,750,365	768,319	418,297	315,978	224,796
Size of Memory [Mbyte]	7053.1	969.1	535.1	427.9	305.4
Analysis Time [sec]	3790	260	96	86	73

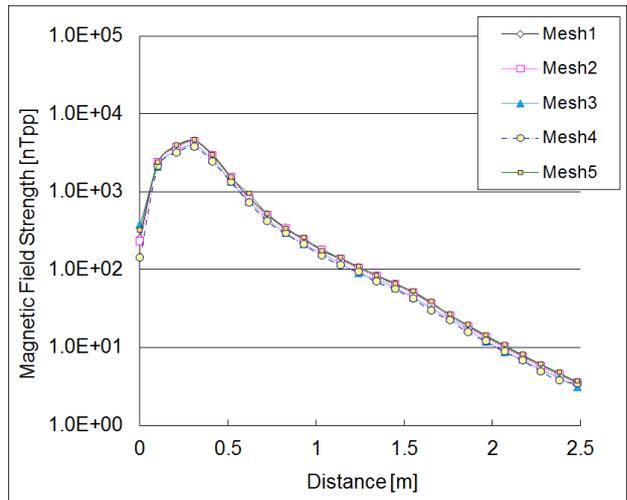


Fig.11 Magnetic Field Strength in Simplified Vehicle Model

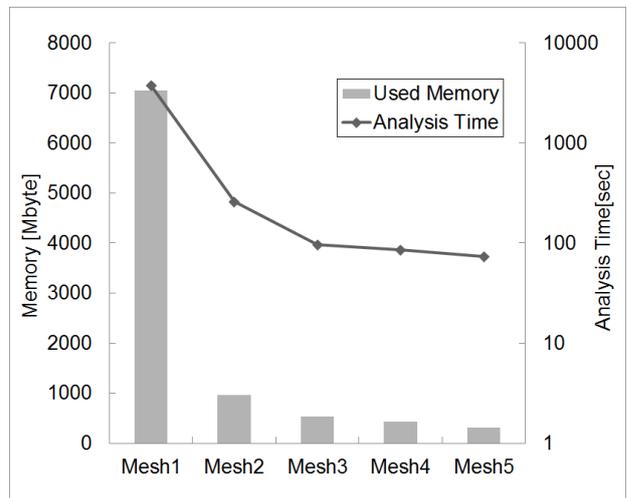


Fig.12 Used Memory and Analysis Time

(2) 実車モデル

前述のメッシュサイズで作成した実車モデルを用いて、CAE 計算結果と、実車の測定結果を磁界強度分布に表し、比較した図を Fig.13 に、実車における各測定ポイントの磁界強度を Fig.14 に示す。また、Table 3 に、各測定ポイントにおける磁界強度の測定結果と、CAE 計算結果の誤差比率 [dB] と、検知エリアの大きさ [mm] に換算した結果を示す。

Fig.13 より、磁界強度分布の傾向は、測定結果と CAE

計算結果でほぼ一致しているのがわかる。また、Table 3より、検知エリアの絶対値誤差の平均は 30mm であり、キー1 個分の大きさに相当する精度であることが判明した。

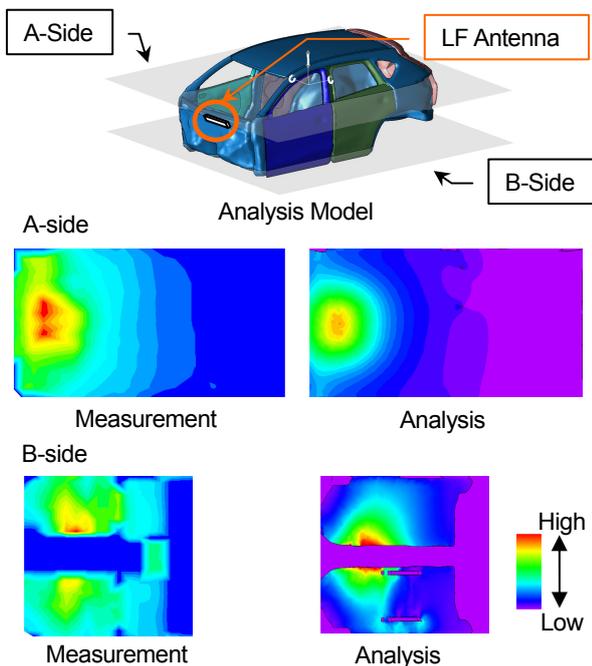


Fig. 13 Comparison of Magnetic Field for Measurement and Analysis Value

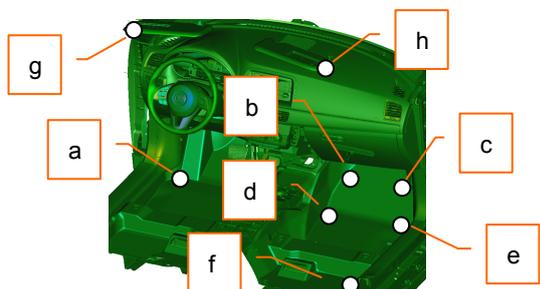


Fig. 14 Measurement Point

Table 3 Comparison of Measurement and Analysis Value

Point	Measurement [nTpp]	CAE [nTpp]	Error [dB]	Error [mm]	Absolute Error [mm]	
Floor	a	80.0	73.2	0.8	-30	30
	b	86.5	94.7	0.8	50	50
	c	42.4	37.6	1.0	-40	40
	d	76.6	78.0	0.2	50	50
	e	63.9	54.7	1.4	-30	30
	f	47.3	36.5	2.3	-40	40
Visor	g	48.6	48.8	0.0	0	0
	h	52.5	52.8	0.0	0	0
Average→					30	

3.3 その他システムへの応用

磁界通信を応用したシステムの事例として、キーに電池なしで信号の送受信可能なトランスポンダを内蔵し、あらかじめ登録されたキー以外ではエンジン始動ができない、イモビライザ（盗難防止）システムが挙げられる。Fig.15 に示すように、CX-5 のイモビライザシステムは、プッシュボタンスタートのスイッチ内に、コイルアンテナがレイアウトされており、キーが電池切れなどの際、登録されたキーの裏面

がプッシュボタンスタートに触れることで、コイルアンテナとトランスポンダ間で認証通信を無線で行い、イモビライザシステムが解除され、エンジン始動を可能とする。

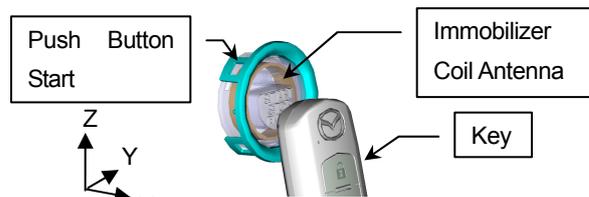


Fig.15 Immobilizer System

イモビライザの通信可能距離の測定結果と、本解析手法で計算した結果を Fig.16 に示す。測定結果と計算結果はほぼ一致し、他の磁界通信を用いたシステムの通信性能も、検証可能であることが判明した。今後更に、無線充電システムの充電効率予測などの解析が、机上検証可能となると考える。

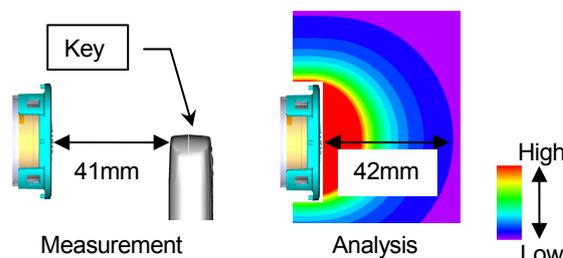


Fig.16 Communication Performance of Immobilizer System

4. おわりに

本技術開発により、アドバンスドキーレスの検知エリアを机上で検証する技術を開発し、他の磁界通信を用いたシステムへの適用も可能であることを明らかにした。これにより、試作車レス開発が実現可能となってきた。

■ 著 者 ■



吉田 俊秀



浜田 康



沼元 正樹



稲田 貴裕

論文・解説

36

AM/FM/シリウスラジオ受信シャークフィンアンテナの開発

Development of Shark-fin Antenna
for AM/FM/Sirius Radio Reception

重田 一生*1

Kazuo Shigeta

長嶺 晋路*4

Shinji Nagamine

谷口 龍昭*2

Tatsuaki Taniguchi

井上 英通*5

Hidemichi Inoue

柳 陽一*3

Yoichi Yanagi

要約

車載アンテナには、車のデザインを阻害しないような目立たない外観形状が望まれる。このため、ヘリカル素子を用いた短ポールアンテナを開発し、ガラスアンテナの採用が難しいワゴン車系や SUV を中心に搭載している。しかし、風切り音の発生、ポールの折れ/曲がり、洗車の際にポールの取り外しが必要等の問題が、依然として存在する。これらの問題を解決するため、高さ 68mm の筐体内に、AM/FM ラジオ受信に加え、北米でサービス中の衛星ラジオ放送であるシリウスラジオの受信機能を備えたシャークフィンアンテナを開発し、CX-5 に搭載した。

Summary

Vehicle antennas should be low-profile so as not to disfigure the vehicle designs. For this reason, short pole antennas using helical elements were developed and applied to SUVs and wagons that were difficult to adopt glass antennas. However, the short pole antennas still have some concerns such as wind noise, broken/bent rod and rod removal required at car washes. Accordingly, a shark-fin antenna was newly developed, which has a satellite radio receiving function as well as AM/FM radio in a 68mm-high housing. This shark-fin antenna was applied to the CX-5.

1. はじめに

インターネットなどが普及し、情報化が進んだ現代においても、車載ラジオは、ドライブに道路交情報や天気予報等の運転に必要な情報や、音楽やトーク等のエンターテインメントを提供するために欠かせないメディアである。

アンテナは、車載ラジオの受信性能を決定付ける重要な部品であるが、車の使い勝手、デザイン、空力性能等と受信性能との両立を図るため、これまで、さまざまな技術開発をしてきた。例えば、窓ガラスにアンテナ素子を埋め込み/印刷するガラスアンテナや、ヘリカル素子を用いてポールの長さを短縮化した短ポールアンテナ等を実用化している。

2. 新アンテナ開発の背景

ガラスアンテナは、車体外部への突起をなくすことがで

きるため、デザインや使い勝手の観点からは、車載アンテナとして最適な構造と考えられる。しかし、車の形状によっては、ガラス上にアンテナ性能確保に必要なスペースが確保できない等の理由から、ガラスアンテナが採用できない場合がある。短ポールアンテナは、その場合の代替策として用いられており、通常ルーフに設置されるため安定した性能が得られるとともに、車両ノイズにも強いという優れた特徴がある (Fig.1)。その反面、従来のポールアンテナに比べて大幅に短縮化されているとはいえ、依然として 180mm の長さのポールが存在するため、風切り音の発生、ポールの折れ/曲がりの懸念がある。また、洗車や駐車時にポールを取り外したり、倒す等の操作が必要で使い勝手が悪い上に、ポールを外したり、倒したまま使用すると感度が悪化する (FM 利得で最大 16dB) 等、本来の性能が発揮できないという問題もある。

*1~4 電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

*5 原田工業 (株)
Harada Industry Co.,Ltd

これらの問題を解決するため、新しいアンテナの開発に着手した。



Fig.1 Short Pole Antenna

3. 新アンテナ

3.1 開発方針

前述の短ポールアンテナの問題点を踏まえ、以下のような開発方針とした。

- (1) 風切り音の発生の心配がなく、車のデザインを阻害しないコンパクトでスタイリッシュな形状とする
- (2) 開発の効率化のため、全仕向けに対して同一の外観サイズ/形状とする。欧州の規制対応のため、アンテナ高は70mm以下とする
- (3) 短ポールアンテナと同等の性能を確保する

3.2 基本構造

上記の開発方針を基に形状、アンテナ方式を検討した結果、以下のような構造を導いた。幅77.1mm、高さ68mmのサメのヒレ（シャークフィン）に似た形状の樹脂カバー（Fig.2）の内部に、対向させた2枚1組の基板からなるAM/FMラジオ受信アンテナ（以下AM/FMアンテナ）とその前方にシリウスラジオ受信アンテナ（以下シリウスアンテナ、米仕向けのみ）を配置した（Fig.3）。

(1) AM/FMラジオ受信アンテナ

Fig.4 は一般的なAM/FMアンテナの等価アンテナと特徴について説明した表である。車載用AM/FM用ポールアンテナは、4分の1波長のモノポールアンテナの動作原理を利用している。これに対して、短ポールアンテナは、ヘリカルコイル素子を用いてアンテナ長の短縮化を実現している。新しいアンテナの更なる低姿勢化へのアプローチとして、短ポールアンテナと同様に、ヘリカルコイルによる短縮化手法を用いているが、大幅な低姿勢化による放射抵抗の低下とコイルの高Q値化に起因する、利得の低下と狭帯域化の克服が課題となった。このため、1) 2枚の基板を組み合わせたコイル径拡大、巻きピッチ低減によるアンテナ

単体特性の改善、2) アンテナアンプの低NF（雑音指数）化、及び高利得化、3) 整合回路によるアンテナ素子&アンプのマッチング等の技術を駆使し、短ポールアンテナに対する性能低下を最小限にしている。なお、ケース側にアンテナ素子を追加してアンテナ高を稼ぐ方法も考えられるが、後述するシリウスアンテナとの複合化を考慮し不採用とした。Fig.5 は実際のAM/FMアンテナ素子の外観写真である。Fig.6 はシャークフィンアンテナの利得の周波数特性である（FM帯、アンテナアンプは未使用）。短ポールアンテナに対し、約7dBの利得差があることがわかる。次に、Fig.7 は高利得アンプとマッチング回路を組み合わせた場合の利得である。短ポールアンテナと同等レベルが達成できている。車載ラジオと組み合わせた総合感度評価においては、短ポールアンテナと比べて、若干の感度低下は認められるものの、実用的な性能が得られている。

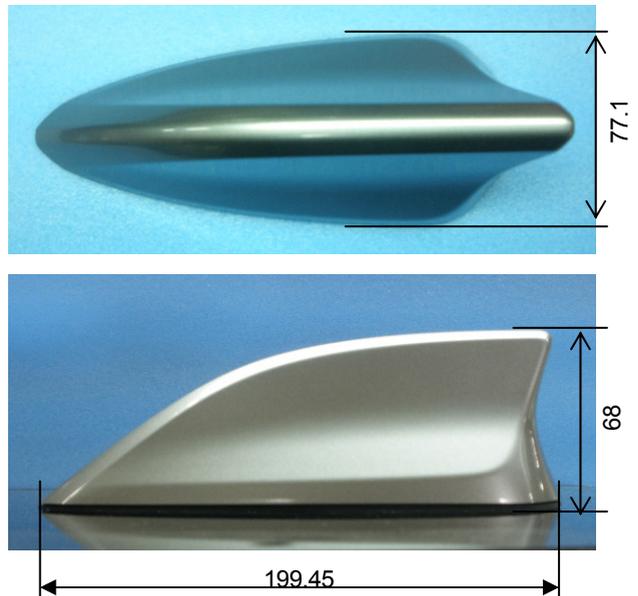


Fig.2 Upper View & Side View of Shark-fin Antenna

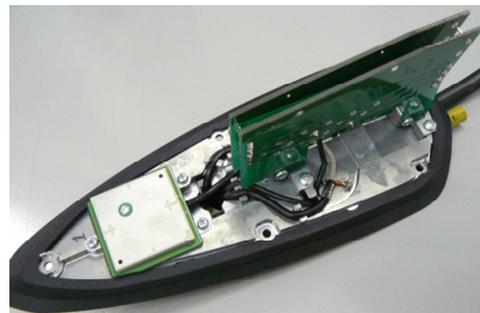


Fig.3 Inner Structure of Shark-fin Antenna

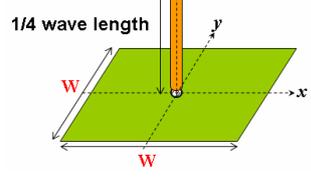
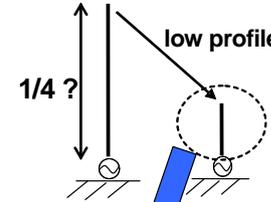
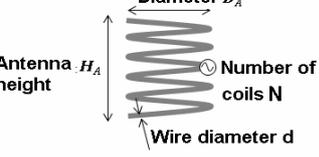
	Exterior	Equivalent antenna	Characteristics
Pole antenna			<ul style="list-style-type: none"> Element length : 800mm ($1/4\lambda$) Usable bandwidth : broad * (wave length)=3000mm@100MHz
Short pole antenna			<ul style="list-style-type: none"> Element length : 180mm (with helical coil) Emission resistance : low Usable bandwidth : narrow Determinant factor (D_a, H_a, d, N)
Shark-fin antenna			<ul style="list-style-type: none"> Element length : 61mm (with helical coil made of substrate) Emission resistance : very low Usable bandwidth: very narrow Determinant factor (D_a, H_a, d, N)

Fig.4 Comparison of AM/FM Antenna

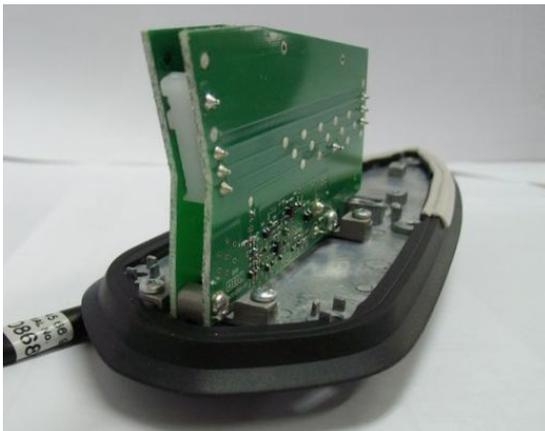


Fig.5 AM/FM Antenna Element

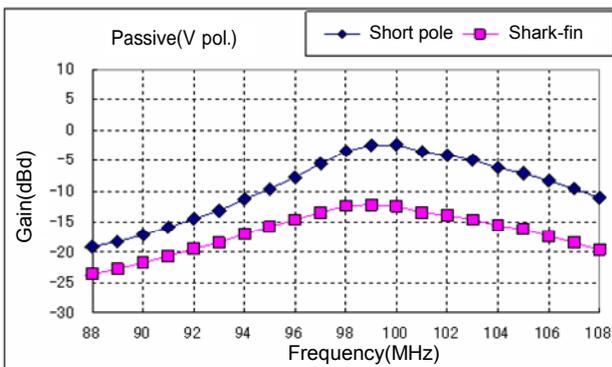


Fig.6 Passive Gain Frequency Characteristic (FM)

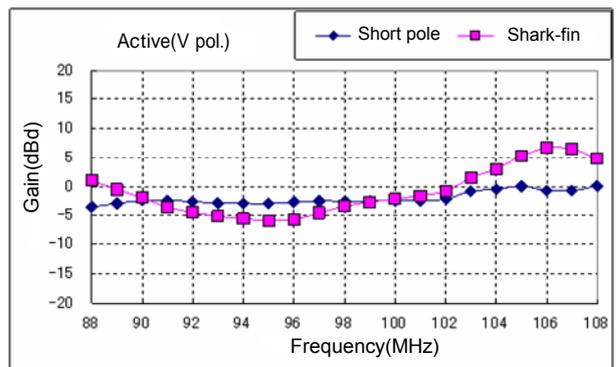


Fig.7 Active Gain Frequency Characteristic (FM)

(2) シリウスラジオ受信アンテナ

北米では、コマーシャルフリーで充実したコンテンツをもち、全米エリアで受信可能な衛星ラジオのニーズが高い。マツダはシリウスラジオ受信に対応することで、このニーズに応えている。衛星からの電波を効率的に受信するには、アンテナをルーフへ設置する必要があるが、複数のアンテナをルーフに置くのは現実的ではなく、AM/FM アンテナとシリウスアンテナの複合化が必要となる。このため、基板特性の見直しによりシリウスアンテナ素子を小型化し(33×34mm→30mm×30mm)、複合アンテナを設置する際に、衛星電波の受信に有利なルーフ中央側に設置するように、AM/FM アンテナ基板の前方に配置した (Fig.8)。しかし、そのままでは、AM/FM ラジオ用アンテナ素子用基板の影響により、利得が低下することが判明したため、シリウス用アンテナの上方(樹脂ケース裏側)に無給電素子(トッププレート)を配置して (Fig.9)、シリウス用アンテナの電気特性を調整している。Fig.10, Fig.11 は、シリウスラジオ使用周波数帯域における両者のインピーダンス特性と利得を比較した結果である。トッププレートにより、広帯域化と高仰角での利得を同時に改善できていることがわかる。



Fig.8 Patch Antenna for Sirius Radio Reception

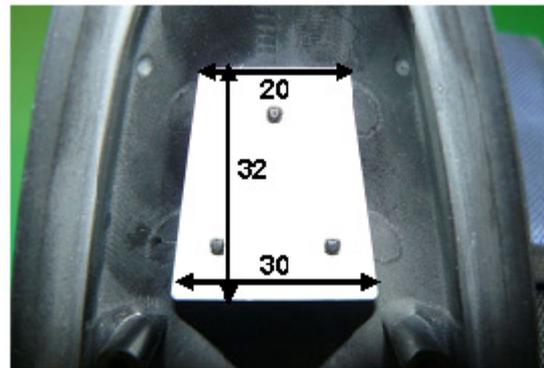


Fig.9 Top Plate for Sirius Radio Reception Antenna (On the Reverse Side of Case)

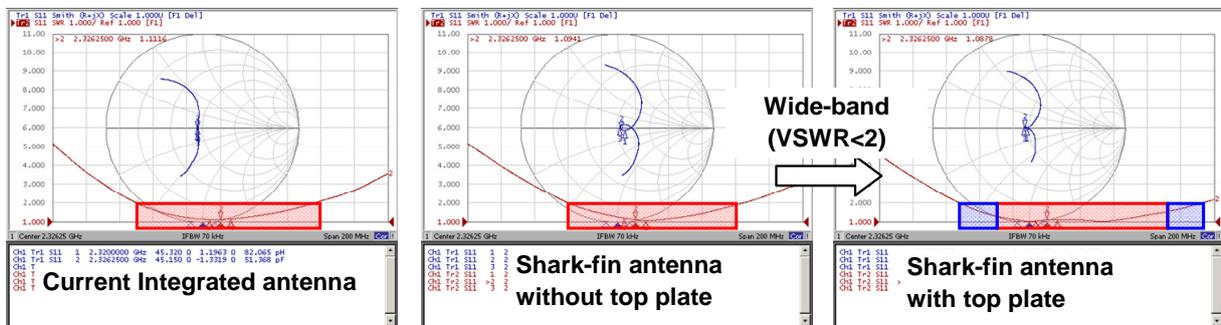


Fig.10 Improvement of Sirius Radio Reception Antenna Characteristics by Top Plate (VSWR)

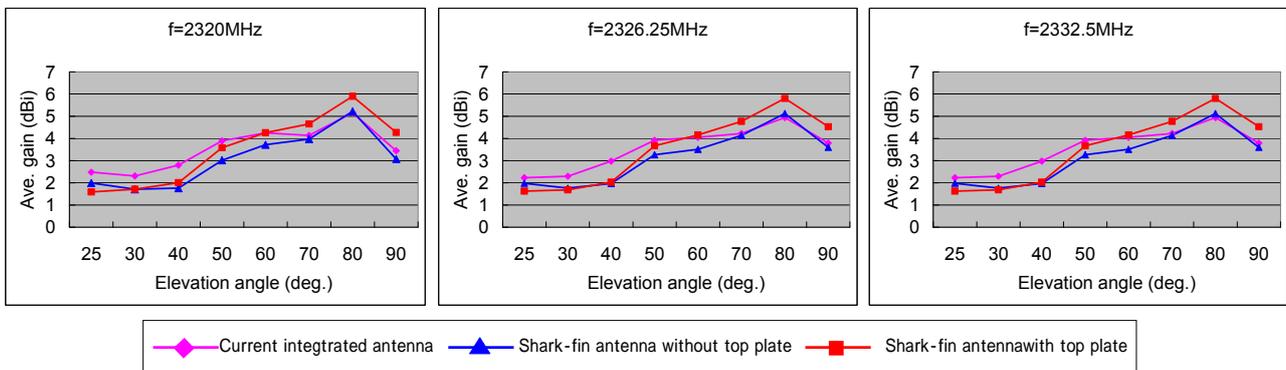


Fig.11 Improvement of Sirius Radio Reception Antenna Characteristics by Top Plate (Gain)

3.3 基板形状及び機構部

性能面からは、アンテナ素子を形成する基板の面積を可能な限り確保する必要がある。その一方で、デザイン面からはすっきりした外観形状が求められ、異音等への配慮も必要となる。これらをバランスさせるため、基板形状について、種々検討した結果、部分的にアンテナ高が確保されれば、良好なアンテナ特性を確保できることが判明したため、基板形状は、樹脂カバーの傾斜に合わせ、隙を十分確保した前下がりの形状とし、異音防止ウレタンの使用を最小限に止めた。また、基板の固定については、基板 2 枚とサポータ（保持部品）2 個を組み合わせた状態でサブアッシとすることで、グラウンドベースへの固定は上方向からのねじ締めのみで可能とした (Fig.12)。

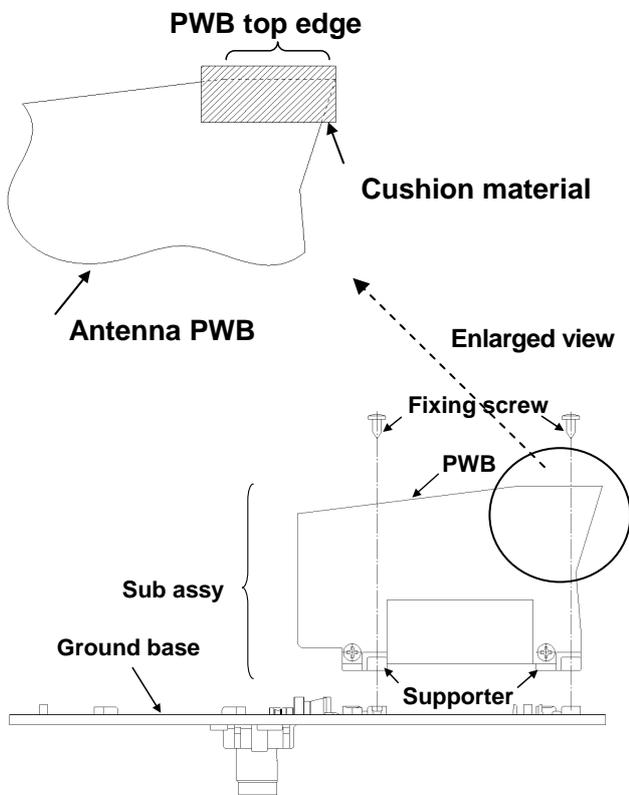


Fig.12 Assembly Architecture

4. 市場適合性確認

市場導入する前に、市場適合性を確認するために、主な市場となる日本、北米、欧州にて現地評価を実施した。特に、低姿勢化に伴う単品利得の低下による弱電界での性能及びそれを補償するためのアンプの高利得化による強電界下での悪影響を評価のポイントとし、市場実績のある短ポールアンテナシステムと比較評価した。結果は、弱電界エリア、強電界エリアともに、短ポールアンテナとの若干の差異は認められるものの、実用上問題ないレベルであることが確認できた。また、衛星ラジオ受信性能については、サービスプロバイダであるシリウス社の認証も取得し、フィールドテストの結果も問題ないことを確認済みである。

5. まとめ

新たに開発したシャークフィンアンテナは、短ポールアンテナ並みの AM/FM 受信性能を確保しながら、大幅な小型化を実現した。短ポールアンテナの欠点である、風切音や故障、使い勝手の問題を払拭し、また、受信性能がアンテナ素子の傾け方に依存するというポールアンテナ特有の問題も解消することができた。また、シリウスアンテナとの複合化も達成し、同一形状で複数仕向けへの展開を可能とした。本アンテナは CX-5 (Fig.13) に採用し、CX-5 のスタイリッシュなデザインをサポートすることができた。

今後も、更なるアンテナの小型化、複合化の実現に向けた技術開発にまい進する所存である。

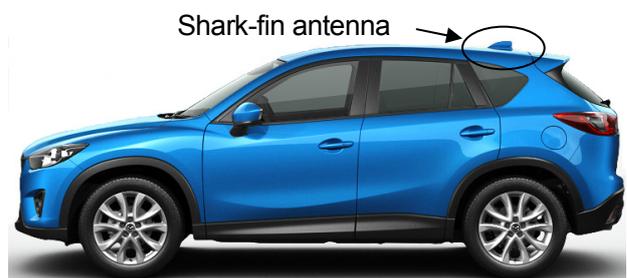


Fig.13 Exterior of CX-5

■ 著 者 ■



重田 一生



谷口 龍昭



柳 陽一



長嶺 晋路



井上 英通

論文・解説

37

バンパ用高剛性ポリプロピレン材料の開発

Development of High Stiffness PP for Bumper Fascias

朝野 千明*1

Chiaki Asano

大西 正明*4

Masaaki Onishi

藤 和久*2

Kazuhisa To

原 正雄*3

Masao Hara

要約

低比重という樹脂材料の特徴を活かした軽量化が期待される中、バンパ用材料の剛性を飛躍的に向上させることにより、薄肉化を実現する新規材料を開発した。材料の高剛性化による薄肉化において、材料として最大の課題は、材料の剛性と耐衝撃性など相反する特性の両立である。従来、基材であるポリプロピレン（以下 PP）と耐衝撃性を向上させるゴム、そして充填材であるタルクの 3 成分系であった材料のうち、PP とゴムを機能別に 2 種類ずつ配合することで 5 成分系とした。この成分と組成比の制御により表層に低分子量ゴムを、断面中央に、耐衝撃性を担う高分子量ゴムを偏在させた。これにより各種特性を両立し薄肉軽量バンパを実現して、2012 年 2 月に発売した CX-5 に採用した。本開発により、20%の軽量化と成形サイクルタイムの半減を実現している。

Summary

We have developed resin material for bumper fascias that maintains the equivalent stiffness to parts made with conventional materials while achieving significant weight reduction. Using this material, the parts manufactured are thinner than those using conventional resin, resulting in a significant reduction in the resin required to manufacture parts. When the material is used for bumper fascias, it contributes to weight reduction of approximately 20%. In the bumper fascia production process, this reduced thickness allows for shorter cooling time for molding, and by using computer-aided engineering (CAE) technology, the fluidity of the resin material has also been optimized. As a result, bumper fascia molding time, previously 60 seconds, has been halved to 30 seconds, leading to cost reductions of bumpers molding process.

1. はじめに

自動車の燃費性能競争が激化する昨今、エンジン性能だけでなく、空力性能の向上や軽量化を、これまで以上に追求する必要が高まっている。

マツダは大型の外装部品として剛性や成形性などの要求レベルが高いバンパ用に、従来より高剛性、高流動の PP 材料を開発した。バンパなどの射出成形部品は、薄肉や大型の成形品になるほど成形が難しく、バンパで通用する軽量化や材料に関する技術は、自動車部品の多くに適用が可能である。

2. 開発の狙い

バンパとしての開発目標は、従来の部品コストと同等以下で、20%の軽量化を達成することとした。20%軽量化のためには、現状の平均板厚 2.5mm を 20%削減して 2.0mm にする必要がある。薄肉化によって低下した剛性を補うため、Table 1 のとおり材料としての開発目標は、曲げ弾性率を従来材に対して 50%向上の 2300MPa とした。剛性は板厚の 3 乗に比例することから 50%の曲げ弾性率向上では不足するが、不足分については、構造と板厚配分の最適化によって達成したいと考えた。また、薄肉化によって成形性が悪化することを防ぐため、成形時の樹脂の流

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

れやすさの指標であるメルトフローレート (以下 MFR) は25%上げ、40g/10min とすることを目標とした。

Table 1 Properties of Conventional PP and Target Value

Properties		Value	
		Conventional	Target Value
Stiffness	Flexural Modulus	1570 MPa	2300 MPa
Moldability	Melt Flow Rate	33 g/10min	40 g/10min
Impact Resistance	High Speed Tensile Strength(-30)	57 MPa	57 MPa

3. 材料の開発

3.1 開発コンセプト

材料開発において、最も重視したのが「高次元での物性バランス」である。ここでは、材料の剛性、成形性、耐衝撃性について説明する。

従来のバンパ材は、ベースとなる PP にゴム、そして充填材としてタルクを配合した、いわゆる 3 元系の材料である。Fig.1 に示すように剛性を向上させるにはタルクの配合量を増やし、PP の分子量を上げればよい。しかし、それでは成形性や耐衝撃性が低下してしまう。

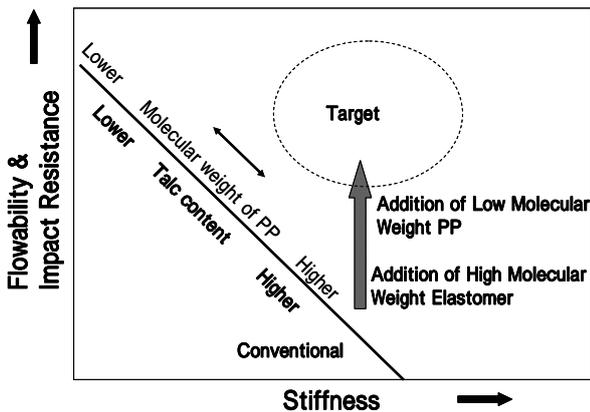


Fig.1 Relation between Flowability, Impact Resistance and Stiffness

これに対して開発材は、高分子量の PP と、低分子量の 2 種類の PP にそれぞれ役割を分担させた。高分子量 PP で剛性を向上し、低下した成形性を低分子量 PP の添加で補って、剛性と成形性を両立した。

また、開発材は剛性向上のために増加したタルクの影響により、耐衝撃性が低下した。これを補うために従来中程度であったゴムの分子量を上げて耐衝撃性を向上した。しかし、高分子量ゴムの使用にも問題があった。

これまでの量産材の検討などから成形品表面に出るゴムの面積が外表面に存在する比率 (以下表層ゴム分率) を一定値以上確保することで、塗装の密着性が確保できることがわかっていて、ところが高分子量のゴムは球状になろうとする性質が強く、表層ゴム分率が確保できない。そこで表層にゴ

ムが出るように、分子量が低いゴムを別に添加した。

つまり従来、中程度の分子量を持つゴムを使用していたものを、高分子量のゴムで耐衝撃性を向上させ、低下する塗装密着性を、低分子量のゴムで補うことで、耐衝撃性と塗装性を両立した。

射出成形用材料は特性が異なるものを混ぜた場合に、層分離を起こし、層間剥離することがあり、安易な多成分化は危険である。開発材料にあっても各組成の分子量と配合量を調整しながらテストピースでの確認はもちろん、実際のバンパを成形して性能確認を繰り返し、最適化を行った。

また、日本国内で生産される PP、インラインコンパウンドといわれ、樹脂の重合プラントでペレットといわれる状態に造粒される。この方法は、別に造粒工程を持たないためコスト的に有利である。一方重合プラントは巨大で、基材となる PP 以外の成分を多種、大量に添加するとプラント自体の生産性が低下し、経済的に成立しない。本開発では材料メーカーとの密接な共同開発を通じての材料の限界設計に近づけることで 5 成分系を経済的に生産可能な組成バランスを探し出した。

3.2 開発材の微細構造

Fig.2 に従来材のマイクロ断面構造を模式的に示した。従来材は PP、タルク、ゴムの 3 成分で構成される。Fig.3 は開発材の断面構造の模式図で、PP もゴムも各 2 成分からなる 5 成分系である。

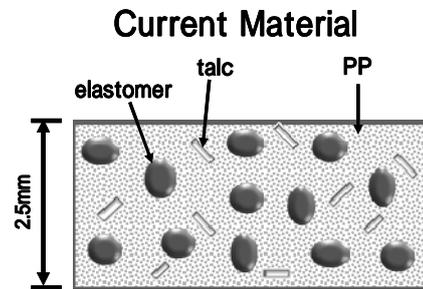


Fig.2 Section Microstructure(STD PP Composite)

Developed Material

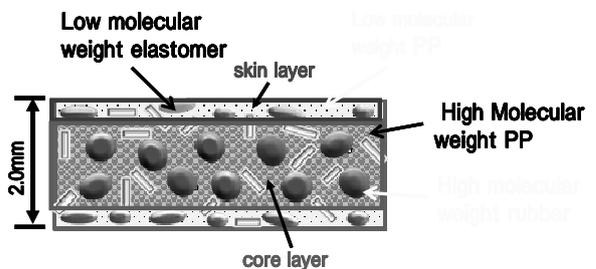


Fig.3 Section Microstructure(Developed PP Composite)

Fig.4 に、開発材の断面を透過型電子顕微鏡によって観察した結果を示す。表層のゴムが引き伸ばされ、表層ゴム分率が確保できていることが確認できた。また、コア部についても、模式図のとおり、高分子量のゴムが球状になっている状態が確認できた。

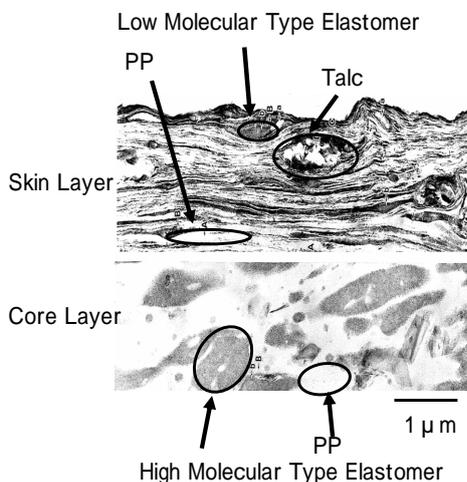


Fig.4 Cross Section of Microstructure of Developed PP

3.3 開発材の物性

開発材と従来材の物性を比較した結果を Table 2 に示した。開発材は従来材と比べて曲げ弾性率が 50%，MFR が 25% 向上し、目標を満足した。更に高速引張強度も 5% レベル向上した。

Table 2 Properties of Conventional PP and Developed PP

Properties		Value		
		Conventional	Target Value	Developed
Stiffness	Flexural Modulus	1570 MPa	2300 MPa	2300 MPa
Moldability	Melt Flow Rate	33 g/10min	40 g/10min	42 g/10min
Impact Resistance	High Speed Tensile Strength(-30)	57 MPa	57 MPa	61 MPa

4. SUV 用バンパへの適用

4.1 薄肉化による重量低減

開発材を用いた CAE 解析を実施した。Fig.5 に樹脂の流れを金型に充填されていく流れを示した。薄肉にすると冷却しやすい反面、早く充填してやらないと樹脂の粘度が上がり、流れが途中で止まってしまう。

射出成形では、樹脂の注入口であるゲートの位置や、樹脂の流れの乱れなどをコンピュータによるシミュレーションで予測し、事前に形状等の最適化を行う。

薄肉にすると流れる距離が短くなりゲートのレイアウトが困難となる。材料物性だけで解決できないものはゲートの位置や形状などに変更を繰り返し、最適な形状を探り出した。

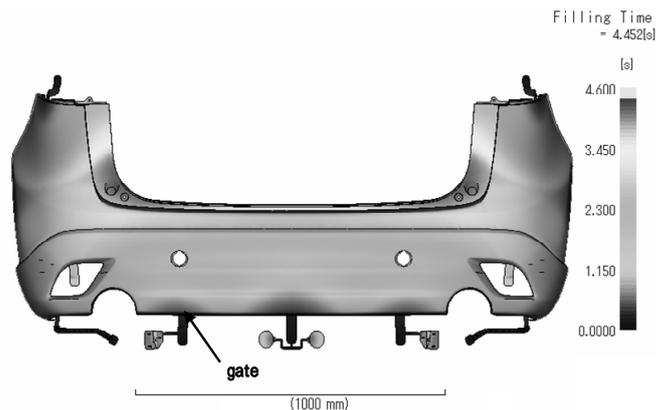


Fig.5 CAE for Filling Period (Flow pattern)

その上で、実際に開発材を用いて板厚 2.0mm で成形したバンパの性能を評価した結果、剛性、耐衝撃性といった必要機能を全て満足することを確認した。

その結果、Fig.6 に示すように、フロントとリヤを合わせて 7.5kg から 6.0kg へ重量を低減し、目標とした 20% の軽量化を達成することができた。

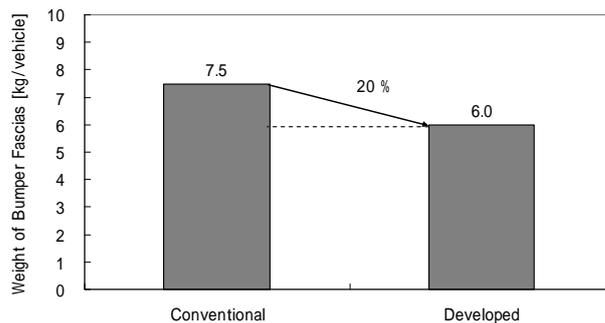


Fig.6 Weight of Bumper Fascias

4.2 成形サイクル短縮

射出成形は、樹脂を溶かし（可塑化）、型内に充填し（射出）、固める（冷却）という本質的な工程と、型を開いて成形品を取り出す、といった付随的な工程に分類される。

このうち可塑化時間と射出時間は材料の量が 20% 減らせたことにより短縮した。薄肉化による時間短縮の効果が更に大きいのは冷却工程で、冷却時間は板厚の 2 乗に比例し、20% の板厚削減の効果で 46% 削減できる計算となる。今回、実成形においても冷却時間はほぼ半減できた。

更に付随的な工程も見直すことで、Fig.7 に示すようにバンパ 1 本あたりの成形サイクルを 60sec から 30sec に削減した。

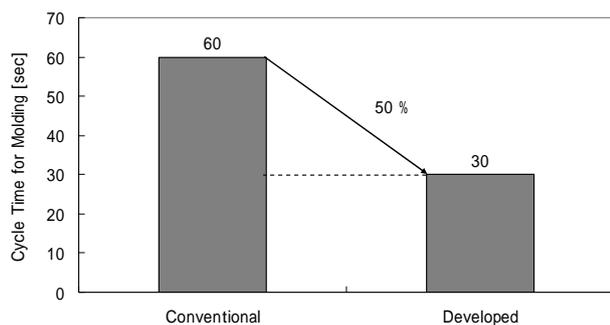


Fig.7 Cycle Time for Molding of Bumper Fascia

5. まとめ

本開発材を CX-5 のバンパに採用した。前後バンパで目標の 2.0mm 板厚を実現し、重量も従来から 20%低減して 6.0kg を達成した。また、材料のコストアップなく材料使用量を 20%削減し、更に成形サイクルを 30sec 短縮したことで、バンパの製造コストも削減できた。

本材料の開発にあたって採用した、相反する特性を両立させる多成分を制御した機能配分の考え方は、他の材料を設計する上でも有用である。今後の材料開発で活用し、更なる軽量化技術の開発を目指す。

参考文献

- (1) 武藤一夫ほか: 実例に見る最新プラスチック金型技術, 工業調査会, 119 (1997)
- (2) 藤田祐二ほか: 自動車用ポリプロピレン系材料, 高分子, 60 巻, 8 月号, pp.504-506 (2011)
- (3) 藤田祐二: ポリプロピレンの開発現場 第 4 回 素材の力, Polyfile, 2009.4, pp.50-53 (2009)

■著者■



朝野 千明



藤 和久



原 正雄



大西 正明

論文・解説

38

内装質感バーチャル開発 Virtual Development for Interior Feel of Quality

米澤 麻実*1

Asami Yonezawa

福井 信行*4

Nobuyuki Fukui

川口 幸一*2

Koichi Kawaguchi

田中 松広*5

Matsuhiko Tanaka

平山 和幸*3

Kazuyuki Hirayama

要約

お客様の内装質感に対する期待値が高まる中で、マツダは CX-5 以降の新世代商品群において、質感をより高めるため、デザイナーとエンジニアが共創して新しいクラフトマンシップの取り組みを進めている。より高次元の共創を実現するために、基本造形や表面材質などを決めていく開発の極めて初期段階に、新しいクラフトマンシップの評価視点に基づいて実車状態を予測することが重要となる。そのため、これまで部品の表面質感評価に活用してきたバーチャル技術を、内装全体の質感評価が可能となるものに進化させる必要があった。本稿では、お客様に、より高い質感の商品を提供可能とした開発技術の取り組み内容と、CX-5 や新型アテンザの車種開発に適用した事例を紹介する。

Summary

As customer expectations for the feel of interior quality is increasing, we have been promoted new challenge of Craftsmanship by creative cooperation of car graphic designers and engineers in the development of new-generation products including CX-5 and the all-new Atenza. In order to achieve the closer cooperation, it's important to predict the quality of production model based on a viewpoint of new Craftsmanship in the very early stage of product development in which basic shape and surface material are decided. Therefore, our virtual evaluation technique for surface feel of quality needs to be progressed to the evaluation technique of whole interior feel of quality. In this report, we introduce our technique, which makes possible us to provide better feel of interior quality to our customer, and our activities to apply this technique to CX-5 and all-new Atenza.

1. はじめに

近年、欧州市場を中心に内装質感に対するお客様の期待が高まり、いかに効果的に質感を向上させるかが重要な課題である。これまで、優れた造り込み、実用性に裏打ちされた機能美、そしてカスタマーデライトの3つの柱をクラフトマンシップとして、開発に取り組んできた。CX-5 以降の新世代商品群では、更なる質感向上を目指し、従来はエンジニアリング領域に焦点を当てていたクラフトマンシップを、デザイナーのセンスや美意識に関わる領域と統合した新クラフトマンシップに進化させた。

マツダ車のお客様からの声や市場評価の分析結果から、実用性や造り込みに加え、デザイン造形の調和やスッキリ感、

本物感の視点が重要であることがわかった。その結果を踏まえ、「デザインクラフトマンシップ」として評価体系を再構築した。以下にその考え方と評価体系 (Fig.1) を示す。

(1) 調和/スッキリ感

自動車の内装は、多くのパーツで構成され、それらを複数の部署、メンバで開発するため、全体の見映えを、調和がとれ、スッキリした印象に仕上げるのは非常に難しい。そこでデザイン段階から、デザイナーとエンジニアが「形」、「グラフィック」、「表面処理」について一緒に考え、インテリア全体としての調和/スッキリ感の実現を目指す。

*1~5 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

(2) 本物感

自然素材の場合は、素材ごとに適切な形状や風合いがある。しかし、自動車に用いる素材は重量やコスト、難燃性や耐候性のために使用できる素材が限定され、自然の素材と異なる印象を受けることがある。1つの原因として、表面の色やツヤ、シボとよんでいる凹凸形状が自然素材と異なるために違和感を与えていることがある。また、見て受ける印象と触ったときの感覚を一致させることも重要となる。

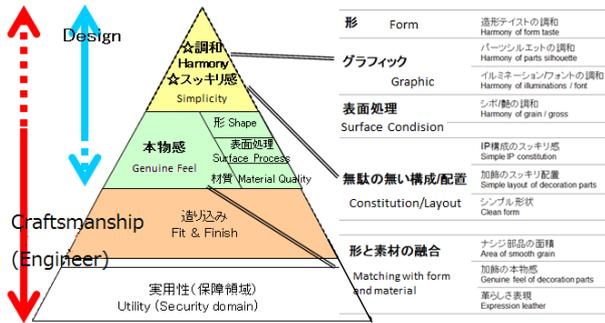


Fig.1 The Concept of New Craftsmanship

デザインクラフトマンシップでは、質感を高めるために、造形や表面材質の仕様を決める段階 (Fig.2) で、実車状態のよし悪しを評価し検証精度を上げる必要がある。我々は、これまでインストルメントパネル (IP) やドアトリムの表面質感の評価用としてバーチャル技術を開発し部品単品に適用してきた⁽¹⁾。その技術の評価対象エリアを内装品全体へ拡大し、適用できるよう技術開発に着手した。

本稿では、質感バーチャルの技術開発の取り組み内容と、CX-5、新型アテンザへの適用事例を紹介する。

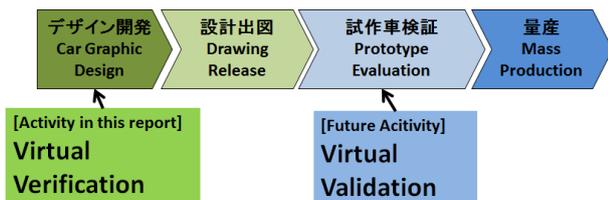


Fig.2 Flow of Vehicle Development and Virtual Timing

2. 質感バーチャル技術のデザインクラフトマンシップへの適用課題

2.1 質感バーチャルの基本原理

一般的なコンピュータグラフィックス (以下 CG) は Fig.3 に示すような①~⑤のフローで作成される。フロー内の Surface Mapping では、色の設定や表面材質として使いたい材質画像の貼り付けを行う。そして③Lighting で、作成者が対象物を見せたいように表現できるよう光源モデリングを行う。

今回開発した技術では、②の段階で表面の凹凸形状や、

異方性反射分布関数 (BRDF : Bidirectional Reflectance Distribution Function) を計測し、結果を表面材質のデータとして使用する。また③の段階では、実車評価を行うテスト場光源を計測し、結果を用いて光源モデリングを行う。最後に⑤Rendering の実施前に光学計算させることで、表面で起こる現象を忠実に再現した (Fig.3 の赤枠部)。表面質感評価まで適切に行うことを目的とするこの技術は、美しさや本物らしさを追求する一般的な CG とは一線を画したマツダオリジナルの CG 技術である。

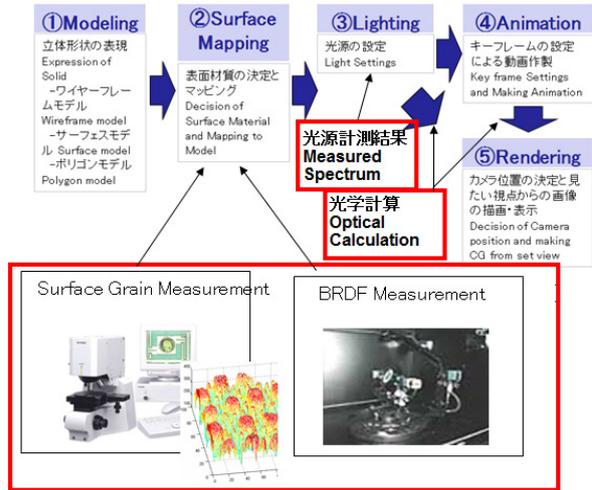


Fig.3 Flow of Making CG

2.2 デザインクラフトマンシップ適用への課題

デザインクラフトマンシップで拡大した評価項目に対し、バーチャル検証を可能とするために、再現すべき項目と、質感バーチャルでの再現状況をまとめた (Table 1)。

Table.1 Virtual Required Contents for Design Craftsmanship Evaluation

評価項目 Evaluation Contents	バーチャルで再現すべき項目 Required Contents for Virtual	Status	Activity
調和/スッキリ感 Harmony / Simplicity	色/Color	△	✓
	ツヤ/Gloss	△	✓
	輝度/Luminance	×	✓
本物感 Genuine Feel	シボ形状/Grain	○	-
	部品形状/Parts Form	△	✓
	部品配置/Parts Arrangement	×	✓

質感をバーチャルで開発するために、「調和/スッキリ感」、「本物感」に関連の深い「色」、「ツヤ」、「輝度」、「部品形状」、「部品配置」の5項目を適切に再現することを目標とした。これらのCG再現に対して、以下の技術的な課題があった。

(1) 色／ツヤ／輝度の再現性の課題

人間が色や光沢を知覚するメカニズムから、車室内の「光源の分光分布」と部品の「材質固有の反射特性」を正しく捕えることが重要となる。お客様が車を見る環境、たとえばショールームの環境光源を適切にする手法を確立すること、また、内装材に使われる色部品や加飾類の適切なBRDF計測手法を確立することが課題であった。

(2) 部品形状再現とモデル容量の課題

対象となる部品の表面形状を正しく評価できる精度を確保し、車室内でIP、ドアトリム他の複数部品を同時に再現し評価可能とする必要がある。バーチャル評価を車種開発に適用するには、実用的な速度で計算できる適切なメッシュの作成手法を確立する必要がある。

3. 課題解決に向けた技術開発

3.1 課題解決

(1) 環境光源の計測とCG内再現

分光放射計 (SR-3AR TOPCON 製) を用いてショールームを模擬したテスト場で分光分布を計測し、更に車室内での分光分布を計測した。Fig.4 にその結果を示す。このような分光分布データを、光源ジオメトリごとに適切に設定した。

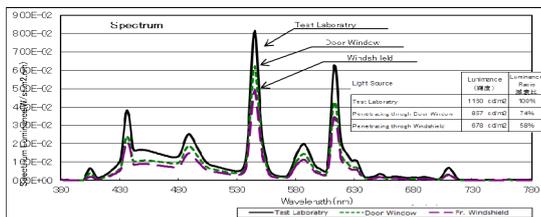


Fig.4 Spectrum of Evaluation Environment

(2) 材料の適切なBRDFの計測

BRDFは、計測方向軸の設定と計測角ピッチの設定に工夫を凝らし、質感再現に重要なレンジについては細密に計測した。これにより、従来手法では黒色のみの再現にとどまっていたが、色部品の計測が可能になった。また通常の設定のままでは高反射材質ではハレーションを起こし、計測ができなかったため、特殊なフィルタの追加、測定光源設定の工夫を行い、高反射材質についても適切なBRDF計測を可能とした。

(3) モデリングの工夫

従来は精度の良いモデルを作成するために細かいメッシュを使用していたが (Fig.5 左), データ容量が膨大になり、光学計算の際に動きが遅くなり、実用性に耐えない。そこで、部品の折れ線やRを持つ部位 (以下稜線) に対してはメッシュを細密に、広い面積は粗いメッシュを使用し、更に稜線に沿った長辺エッジを持つメッシュを使用することにより、精度を確保しながら、部品単品のモデル容量を抑えた (Fig.5 右)。それによりコックピットの全部品を

一度に評価できるモデルを作成した場合に、従来約180MBのデータ容量になったものを20分の1に抑えることができた。

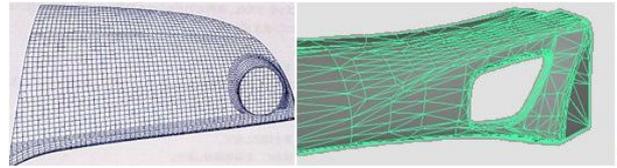


Fig.5 Mesh Shape of Old Method (L) & New Method (R)

3.2 検証

3.1の方法で作成したCGモデルの妥当性の検証結果を以降に示す。

3.2.1 色の検証

実サンプルの色計測データとCGモデルの色出力値をsRGBで比較し、定量的に色の一致性を検証した。

(1) 検証方法

Fig.6のようなφ65mmの同一シボ形状で異なる3色のサンプル1~3に対し、実サンプルはテスト場光源下の車室内で計測を実施した。計測器には光源計測と同じ分光放射計を使用した。サンプルと計測機の配置についてはFig.7に示す。計測角度は、水平面を0°とし20°/45°/60°/85°の4角度とした。

- サンプル1 シボパターンA/黒
- サンプル2 シボパターンA/グレー
- サンプル3 シボパターンA/ライトグレー



Fig.6 CG Samples for Color Verification

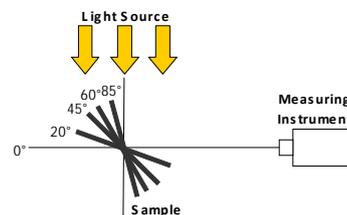


Fig.7 Relation between Measuring Instrument and Samples

CG モデルについては、3.1 (1) で再現した光源下で実サンプルと同角度の CG 画像を作成し光学計算された色値を出力した。

(2) 検証結果

Table 2 は実サンプル計測結果と CG モデルの色出力値の黒色サンプルでの比較の一例である。この結果から、実サンプルと CG モデルの色は、見る角度が変化しても近似しており、色について再現可能と判断した。

Table2 Difference of CG and Sample1 in sRGB

	20°		45°		60°		85°	
	Sample1	CG	Sample1	CG	Sample1	CG	Sample1	CG
sR	41	40	50	51	50	49	41	42
sG	41	41	48	49	50	49	41	41
sB	40	43	46	48	49	48	41	41

3.2.2 ツヤの検証

ツヤは、CG モデルの定量的アウトプットすることができないので、実サンプルと CG モデルを官能評価手法で検証した。

(1) 検証方法

Fig.8 のようなツヤ違いの同じシボ形状サンプル 4~6 を実サンプルと同サンプルの CG モデルをそれぞれランダムに並べ、エキスパート 5 名によりツヤの高いものから順番に並べてもらった。

サンプル4 シボパターンB (梨地) /グロス値3.9 (60°) /黒
 サンプル5 シボパターンB (梨地) /グロス値5.1 (60°) /黒
 サンプル6 シボパターンB (梨地) /グロス値8.0 (60°) /黒
 グロス値計測 : Handy Glossmeter PG-1M Nippon

Denshoku を使用

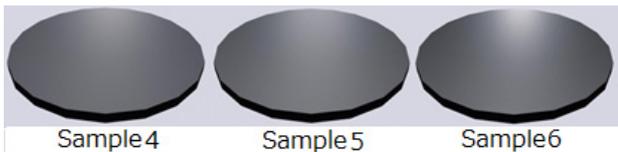


Fig.8 CG Samples for Gloss Evaluation

(2) 検証結果

Fig.9 に官能評価の結果を示す。横軸は実サンプルのツヤの物理特性値であるグロス値^②、縦軸はエキスパートが回答したCGモデルのツヤの高さを示す。ツヤの一番高いサンプル 6 については全員が正解した。グロス値が近く実物サンプルでもその違いがわかりにくいサンプル 4 と 5 についても 4 名が正解した。このことからCGモデルでも実サンプル同様に相対的にツヤの高さの違いを評価できる。

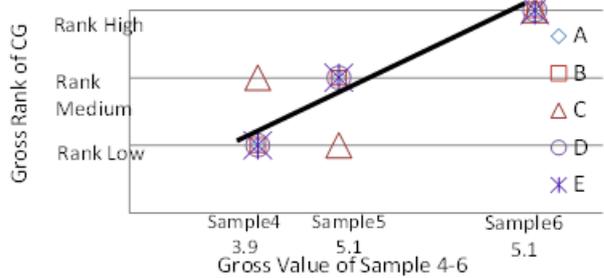


Fig.9 Result of Experts Evaluation

3.2.3 輝度の検証

(1) 検証方法

Fig.10 は CX-5 の実車の金属調加飾 (左) と CG モデルの同部位 (右) である。画像内の A の位置で、実車では 2 次元色彩輝度計 (ICAM DELTA 製) を用いて輝度を計測し、CG モデルは出力値から輝度値を計算し、比較した。



Fig.10 Photo (L) vs. CG (R) for comparing luminance

(2) 検証結果

Fig.11 に実機計測値及びCGモデルの輝度計算値の比較結果を示す。横軸がA部上から下の位置座標、縦軸がその座標に対する輝度値である。金属調加飾の本物感、輝度の高さと、金属素材の持つシェード部からハイライト部までの輝度変化の特性が重要であることが過去の研究で明らかになっている^②。本結果から実機とCGモデルでその 2 点において非常に近似しており、金属調加飾の本物感についての再現は可能であると判断した。

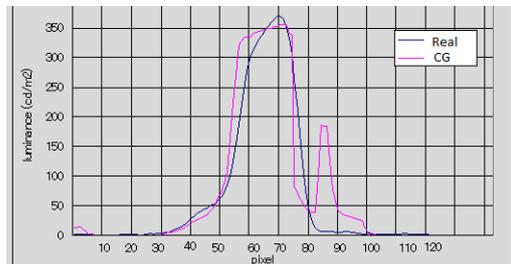


Fig.11 Result of Comparing Luminance Value of Real Parts and CG Model

3.2.4 部品形状精度検証

(1) 検証方法

各部品の稜線などの R を持つ部位に対して、Fig.12 のように図面 (左) と CG (右) モデルでの形状差を比較した。

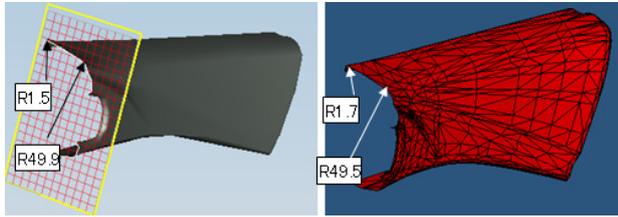


Fig.12 Geometric Difference between Design (L) and CG Model (R)

(2) 検証結果

各部位での形状差が非常に小さいこととエキスパートによる実機と CG モデルとの比較結果から、デザインクラフトマンシップ評価で必要となる形状再現は可能であると判断した。

4. CX-5 / 新型アテンザ開発での適用事例

CX-5 / 新型アテンザで、設計部門からリリースされた CAD データから内製のデータ変換ソフトを使い約 3 日でモデリングを行い、既定の開発日程の中で検証活動を行った。

(1) 新開発シボの実車での質感

CX-5 以降、IP やドアトリムなどの広範囲に新シボを採用している。このサンプルの実用性評価実施後に、この新シボが狙いとする「造形をきれいにさせる適度なツヤ感の実現」を達成できていることを確認した。Fig.13 は CX-5 の CG 例である。



Fig.13 CG of CX-5

(2) 金属調加飾 (サテン調メッキ) の本物感

欧州車を中心に多用されているサテン調メッキを CX-5 以降にも採用している。実車状態で部品毎の輝き感や素材感、配置による加飾の効果、内装全体での統一感などを検証した。

(3) IP / ドアトリムのハイライトの通り方

新型アテンザでは調和感を高めるために、IP とドアトリムで連続性を持った形状を採用した。その連続性を高める素材や形状から決まる光の通り方 (以下ハイライト) がデザイナーの狙いと一致しているかを確認した。Fig.14 はその検証用 CG の一例である。



Fig.14 CG of All-New Atenza

(4) カラー加飾の再現

新型アテンザでは更に新しく採用したカラー加飾の検証も行った (Fig.15)。試作車との比較結果、見た目での特徴は再現できていることが確認できた。カラー加飾については現時点カラーバリエーションを上げ、再現性の検証中であり、引き続き技術開発の取り組みを行う。



Fig.15 CG of Color Decoration Panel in New Atenza

5. 今後の課題

本取り組みでは、図面段階でデザインクラフトマンシップに基づいた内装質感評価を可能とする質感バーチャル技術を確認し、車種開発に活用した。今後は多様化するカラー加飾の再現、質感を向上させる効果のある高輝度、高反射素材の防眩性能のバーチャル評価技術開発に取り組む。

将来的には、評価モデルの実車サイズ化及び 3DCG 化により、試作部品や車両がゼロで見映えの開発ができるまでに発展させたいと考える。

参考文献

- (1) 平山和幸ほか：感性工学を用いた自動車の内装質感に関する設計手法について，日本人間工学会，中国・四国支部 講演論文集，pp.112-113 (2010)
- (2) 福井信行ほか：感性工学を用いた自動車の内装質感に関する設計手法について－内装表面に関する質感の定量化－，可視化情報学会誌，30巻，Suppl.号，pp.57-62 (2010)
- (3) 森重領介ほか：感性工学を用いた金属加飾の質感メカニズムの解明，日本人間工学会 中国・四国支部 九州・沖縄支部 合同開催支部大会 講演論文集，pp.102-103 (2011)

■著者■



米澤 麻実



川口 幸一



平山 和幸



福井 信行



田中 松広

論文・解説

39

MBD を用いたパワーウィンドウのシステム開発

MBD to Power Window System Development

徳光 文広*1

Fumihiro Tokumitsu

田中 松広*2

Matsuhiko Tanaka

要約

開発期間短縮と更なる品質向上を両立するため、開発の初期段階から性能検証や適正化などを実現する技術革新とプロセス革新に各社が取り組んでいる。その中で、パワーウィンドウのシステム開発に、機構と制御の連成解析を活用したモデルベース開発を適用し、性能開発を早期化した事例を紹介する。

Summary

In order to shorten development period and to maintain at high quality level, every car manufacturer challenges to develop technology and process which can be realized the adequate architecture and verifications in an early development phase. Mechanism and control were used for the development of power window system. And the method is an instance of Model Based Development (MBD).

1. はじめに

市場のニーズは、多様化を増し、嗜好が変化する速度は加速しているため、より早くよりもめやすい価格で市場が要求する製品を提供することが競合力を得る必須課題となっている。しかし実際には、最終的に車両として組み上がった段階で相反性能などの関連性能間の干渉や不整合があり、対策が必要となり開発期間の短縮を困難にしている。これらに対し整然とした開発を実現するために、開発の初期段階から相反性能などの関連性能間の整合取りに注目し多くの技術を展開している。その手段としての一例が、モデルベース開発 (MBD) である。

本稿では、パワーウィンドウのシステム開発へモデルベース開発 (MBD) を適用することで、確実にウィンドウガラスが昇降する商品性と、挟み込みを検知しウィンドウガラスの上昇を停止し反転する安全性を、実機が存在しない開発の初期段階から確実に検証し、目標性能を満足する仕様を短期開発の中で決定することができた事例を紹介する。

2. モデルベース開発 (MBD) の必要性

市場 (ユーザ) からのパワーウィンドウへの要求機能は、ユーザ意図 (スイッチ操作) に沿って確実に昇降する商品

性と、頭部や手などの挟み込みを確実に検知し上昇を反転する安全性に大別される。この中で、国民生活センターからは、近年、安全機構の装着率拡大や挟み込みを検知する荷重を低くすること等が望まれている。

その一方で、環境への関心の高まりからアイドリングストップや減速時のエネルギー回生などの燃費向上技術を実用化している。これらの技術は急激な電圧変動を伴うため、電気が動力源となる電子制御を行うパワーウィンドウのシステムが悪影響を受けない工夫が必要となっている。この要求に対応するため、パワーウィンドウのシステム開発工数は増加傾向にある。加えて、パワーウィンドウのシステムは、モータやギヤ等の機械系、消費電流や制御等の電気系、負荷に伴う発熱によるモータ出力トルク低下等の熱力系など、扱わなければならない分野が多岐にわたるため、技術的な難易度が高い。よって、製品製作後から性能検証を開始していたのでは、開発期間短縮の中で全ての性能検証を完結することは困難である。ましてや課題が発見された場合、課題対策期間と費用が必要となる。

以上のことから、市場が要求する製品をより早くよりもめやすい価格で提供するためには、市場が要求する機能や性能を満足した上で開発期間を短縮することが必須であり、これらの課題を解決する必要がある。この解決手段として、

*1, 2 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

パワーウインドウのシステム開発にモデルベース開発 (MBD) を適用した。

3. モデル構成

モデル化の対象となるシステム構成を Fig.1 に示す。

このシステムを納入部品単位で分割し、設計諸元とモデルパラメータの一致を厳守することで、納入部品単位の出力特性を対象に、モデルと製品の開発プロセスと管理の整合性を堅持した。しかし、同一の設計諸元を用いても、納入部品単位で分割したモデルごとの粗密によって解析精度に差異が発生すると適正な機能配分が困難である。

分野の壁を越えて適正に機能配分を行いたい領域を明らかにし、演繹的推論と帰納的推論の双方から無理矛盾なく必要とする解析精度を導出可能な、詳細化レベルと範囲を明示することが重要であり、相応の試行錯誤が必須である。この試行錯誤を、モデル作成過程で実施することは膨大な時間を要し、非効率であり現実性に欠ける。そこで、モデル作成前に、特性、状態、エネルギー流れを視覚的に表現するブロック線図^①を用いて、納入部品単位で分割したモデル間の入出力の整合取りを含めて論理展開の妥当性検証を完了し、モデルの設計図とした。このモデルの設計図に沿って詳細設計へと展開することで、分野の壁を越えて関連性能を適正に機能配分可能とするモデルを開発した。

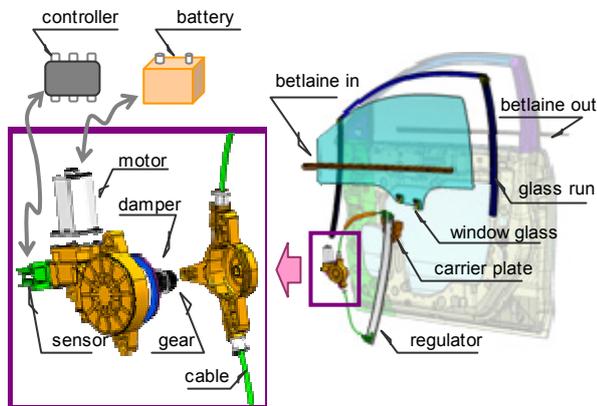


Fig.1 Power Window System Organization

4. モデル開発期間と演算時間の短縮

実機が存在しない開発の初期段階から性能検証を行い、目標性能を満足する仕様を短期開発の中で決定するには、モデル開発の早期化に加えて、予測精度は維持した上で短時間に解析が完了できるモデルとする技術が必要となる。しかし、三次元曲面を持つウインドウガラスが弾性特性を有したガイドレール内を昇降する際の接触力分布を求め抵抗として扱おうとした場合、数学モデルだけで全ての現象を再現することは困難である。また、経験的な統計モデルだけで再現することも信憑性に欠ける。このたびの開発では、ウインドウガラスがモータから駆動力を受け取るキャリアプレートまでのパワーフローを数学モデルで再現し、

三次元形状に依存する領域は大規模シミュレーションを用いた機構解析モデルにて再現し、ウインドウガラスの加速度をコントロールモデルが受け取る構成とした (Fig.2)。これにより、ウインドウガラス昇降時の挙動を詳細に再現する機構と制御の練成解析モデルの開発期間を、過去の経験をもとに、三次元形状に依存する領域までを数学モデルで構成した場合、80 時間程度必要であったが、本開発方法では 12 時間に短縮できた。解析時間を短縮する手段として、大規模シミュレーションの離散化が挙げられるが、演算ステップごとの運動エネルギーの急激な変化を伴い、モデルが不安定となり演算が発散する課題がある。この対応策として、演算ステップを細かくして運動エネルギーの急激な変化を緩和しモデルの安定化を図った。更に、数学モデル側で、大規模シミュレーションが受け取る駆動力が大規模シミュレーションから出力される加速度を正規化し、モデル全体を安定させることで、実機では 10 秒の現象の演算時間が 18,000 秒から 100 秒に短縮できた。

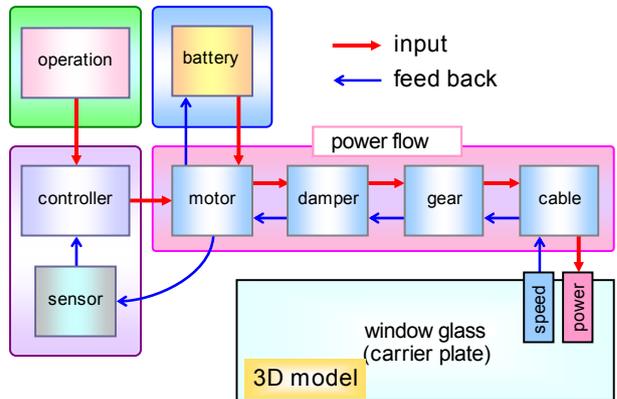


Fig.2 Model Building Image



Fig.3 Experimental Environment

5. 妥当性検証

このモデルの解析精度を確認するため、既存の量産車両を用いて予実検証を行った。実機計測状況を Fig.3 に示す。

Fig.4 は、ステップ入力に対する過渡応答の検証結果を示す。ウインドウガラス上昇途中に、頭部 (剛体) などの挟み込みを想定した評価モードである。モータの最大出力

となるロック状態に向けて、モータ回転速度が減速する状態の予実差は約3%以内であり精度よく再現できている。

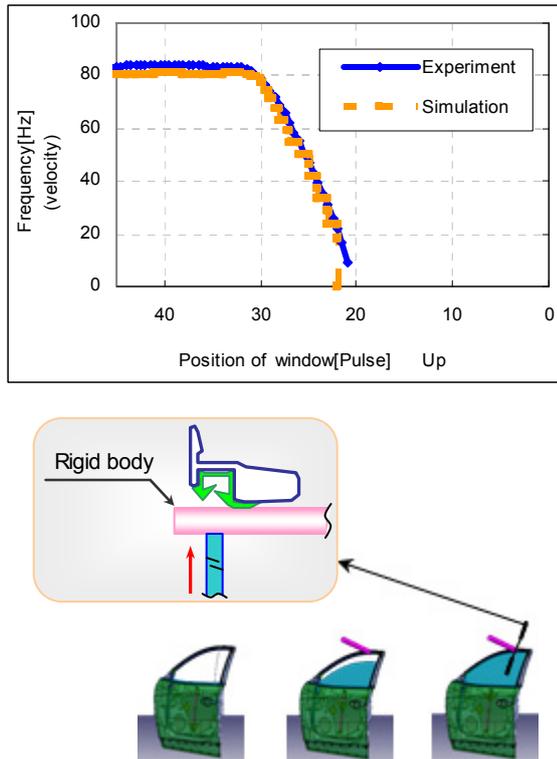


Fig.4 Rigid Body Caught In Window Glass While Moving Up

Fig.5 は、ランプ入力に対する過渡応答の検証結果を示す。ウインドウガラス上昇途中に、手や足（弾性体）などの挟み込みを想定した評価モードである。接触力が上昇する状態の予実差は約3%以内であり精度よく再現できている。

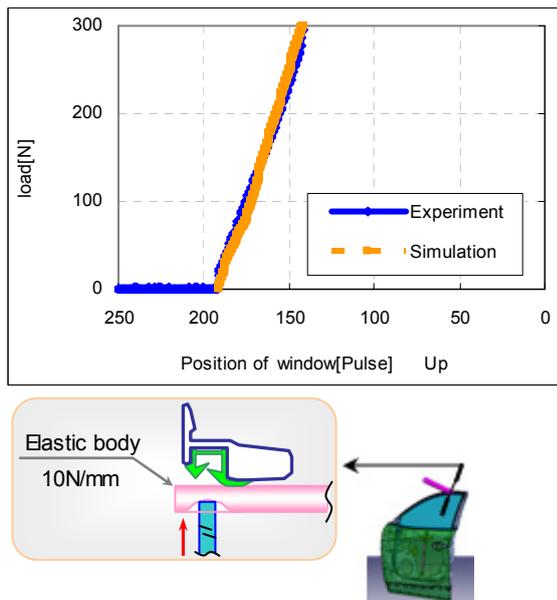


Fig.5 Elastic Body Caught in Window Glass While Moving Up

Fig.6 は、矩形波入力に対する過渡応答の検証結果を示す。アイドルストップや減速時のエネルギー回生による急激な電圧変動を想定した評価モードである。モータ回転速度が変動する状態の予実差は約3%以内であり、オーバシュートやアンダシュートなく精度よく再現できている。

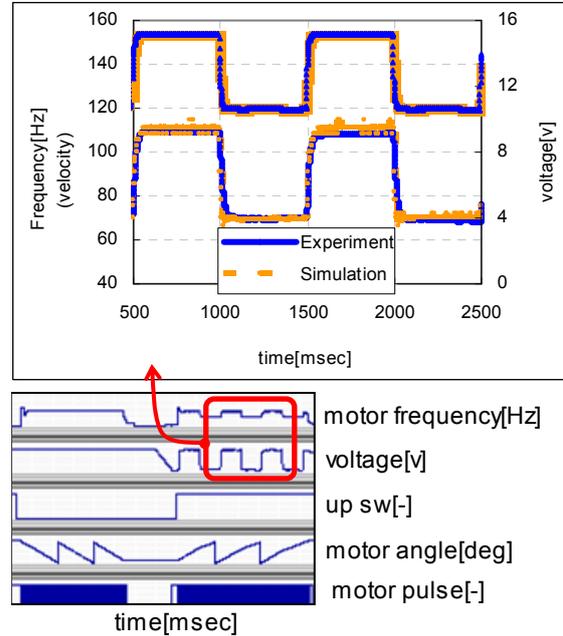


Fig.6 Voltage Changing in A Rectangular Wave Form While Moving Up

Fig.7 は、複合条件入力に対する過渡応答の検証結果を示す。ウインドウガラス全閉の評価モードである。ウインドウガラス上端がサッシ開口部に接触を開始し (x)，サッシ内にもぐり込み (y)，底突きする (z) 過程のモータ回転速度が減速する状態の予実差は約3%以内であり精度よく再現できている。

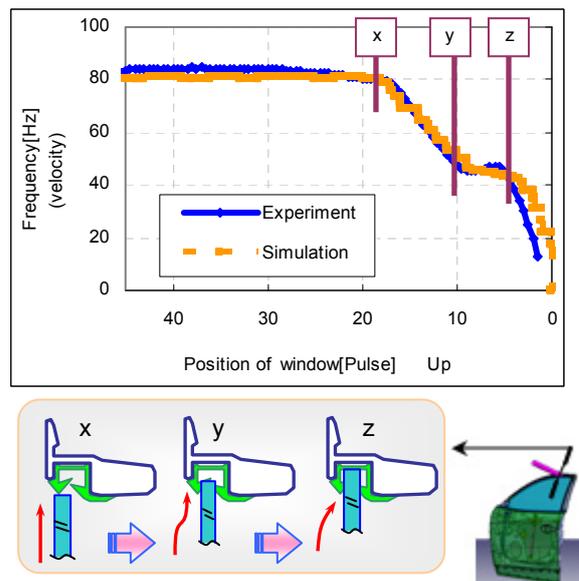


Fig.7 Behavior at Near-Top Dead Point

いずれも、剛体の有無、弾性体の有無、電圧変動の有無だけが異なるだけの、全く同一のモデルパラメータを用いたモデルの演算結果である。評価条件を変えても解析精度が維持されたので、分野の壁を越えて適正に機能配分可能なモデルとして実証が得られた。

予実検証の過程でモデルの不備が認められた場合、整然としたモデル開発が困難となるため、最も効率的な検証手順としたいものである。今回の事例では、まずステップ入力による過渡応答にて、高負荷領域のシステム全体としての無駄時間と時定数と最大出力の整合取りを完了させ、次にランプ入力による過渡応答にて、中負荷領域のシステム内の伝達ロスとの整合取りを完了させる。更に矩形波入力による過渡応答にて、軽負荷領域のシステム内の無駄時間と時定数の配分確認を完了させる。最後に複合条件入力による過渡応答にて、軽負荷から高負荷までの整合取りの完了を確認する予実検証手順が最も効率的である。

6. 成果

ユーザ意図（スイッチ操作）に沿って確実に昇降する商品性と、頭部や手などの挟み込みを確実に検知し上昇を反転する安全性を両立する制御定数を決定するだけでも、供給電圧変動、製作誤差、昇降繰り返しによる劣化などのクロスチェックが必要であり 2,000 を超える評価パターンを実行する必要がある。更に、必要な性能は維持した上で、コストと重量を適正に機能配分する必要がある。

モータなど対象となる部品数を 3 部品と仮定しても、クロスチェックの繰り返しは 3 回となり、シミュレーションの実行回数は 6,000 を超える。1 回のシミュレーション時間を 18,000 秒つまり 5 時間とした場合、30,000 時間が必要となり机上検証段階で全ての評価を完了することは困難である。

このモデルを用いることで、確実にウインドウガラスが昇降する商品性と、挟み込みを検知しウインドウガラスの上昇を停止し反転する安全性を、実機が存在しない開発の初期段階から検証し、目標性能を満足する仕様を短期開発の中で決定することができた (Fig.8)。

これにより、製品製作前に性能検証を完了させる開発スタイルを具体化することができた (Fig.9)。

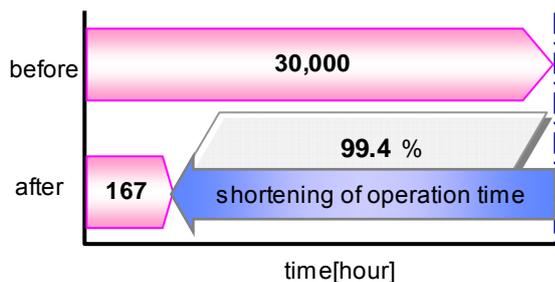


Fig.8 Comparison at Operation Time

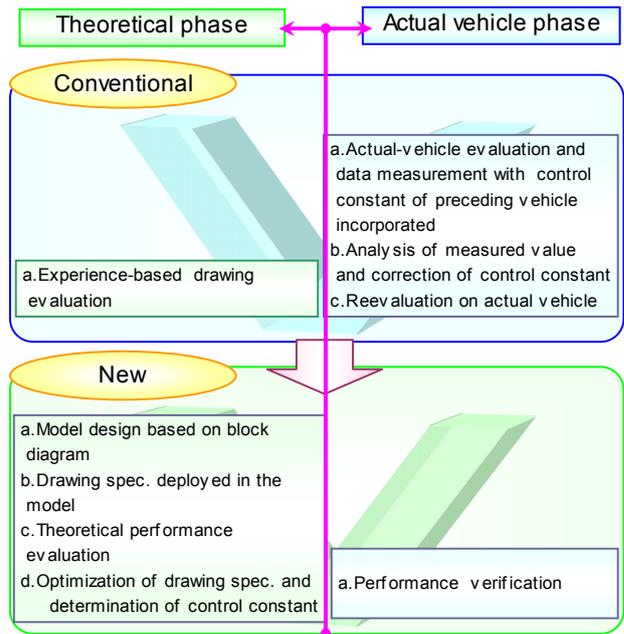


Fig.9 Innovation of Window Glass System Development Process

7. まとめ

本稿で紹介したモデルは、動力源からの駆動力をギヤ、ワイヤなどを經由して対象物を駆動させる機構や、挟み込みを検知して反転する制御など、基本的な構成が酷似していることもあり、三次元形状と部品特性と制御の入れ替えにより、短時間で電動スライドドアのシステム開発へ展開することもできた。更に劣化後の部品特性と入れ替えることで劣化後の挙動も再現でき信頼性領域の机上評価も行った。このように高い汎用性と拡張性を有している。

自動車には同様の基本構成を持つシステムが多く存在するため、この技術を広く展開することで、将来的には車両総合システムとして稼働させて、よりよい製品を、より早くより求めやすい価格で提供していくことに貢献したいと考えている。

参考文献

(1) 長松晶男ほか:製品開発のための新しいモデル化手法 (機能モデルの基本概念), 日本機械学会論文集 C 編, 64 巻, 622 号, pp.131-138 (1998)

■ 著 者 ■



徳光 文広



田中 松広

論文・解説

40

マツダのライフサイクルアセスメント (第3報) - CX-5 - Mazda Life Cycle Assessment (3rd report) - CX-5 -

新田 茂樹*1
Shigeki Nitta

森口 義久*2
Yoshihira Moriguchi

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さまに「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を提供することを宣言している。

この度、革新的な新世代技術「SKYACTIV 技術」を採用した CX-5 は、上質で気持ちのよい走りと、優れた燃費性能を両立させている。

この新世代技術「SKYACTIV 技術」の環境面での改善効果を、Life Cycle Assessment (以下LCA) で確認した。その確認には、革新的な技術を評価するための新たな評価手法を用いたので、その手法とともに結果を報告する。CX-5 は、従来型相当車に比べCO₂排出量で、28%の削減が確認された。

Summary

Mazda announced the Sustainable Zoom-Zoom long-term vision for technology development to provide all customers who purchase Mazda vehicles with driving pleasure and outstanding environmental safety performance.

The CX-5 adopts the innovative new-generation technology, SKYACTIV TECHNOLOGY, achieving both pleasant and refined driving performance and excellent fuel efficiency.

The improvement effect of the SKYACTIV TECHNOLOGY on environment was confirmed by Life Cycle Assessment (LCA). In the assessment, a new method was used, which is reported in this paper. CO₂ emission of the CX-5 was decreased from the equivalent of predecessor by 28%.

1. はじめに

マツダは、サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言のもと、さまざまな領域においてCO₂削減など環境負荷の低減活動を行っている。その中で、自動車の製造段階、お客さまの使用段階、使用後の廃棄までのライフサイクルを通して環境負荷を定量化し、自動車の環境負荷削減を目指している。

その定量化の手法としてLCAに着目し、2010年の新型プレマシー以降の新型車では、特定の燃費向上デバイスを搭載したグレードだけでなく全グレードでLCAを実施し、販売台数の加重平均値で評価を実施した⁽¹⁾⁽²⁾。また、水素を燃料としたRX-8 ハイドロジェンREでは、クリーンエネルギー車の新しいLCA手法を提案し、実施した⁽²⁾。2011年の新型アクセラでは、温暖化、酸性雨や光化学スモッグなど

の主要原因物質を特定し、CO₂, SO_x, NO_x, NMHCについて評価を実施した⁽³⁾⁽⁴⁾。今回、CX-5では、革新的な新世代技術「SKYACTIV 技術」の評価手法と、最新の使用実態を反映したLCAを実施したので紹介する。

2. LCAの手法

2.1 目的

コンパクトクロスオーバー SUV に採用された革新的な新世代技術の従来技術に対する環境改善効果を、確認することである。

2.2 インベントリ分析手法

従来モデルチェンジ前後の車種で比較していたが、従来の方法では諸元の変更、新技術、仕様変更を一体で評価して

*1, 2 技術企画部
Technology Planning Dept.

いた。本稿では新世代技術と従来技術とを比較評価するため新しい手法を用いた。具体的には、CX-5は新開発のコンパクトクロスオーバーSUVなので、既存クロスオーバーSUVであるCX-7をベースにCX-5同等のモデル車（以下CX-7（改））を仮定し、比較対象とすることとした。これは、諸元、仕様が同等の比較対象車種を設定する方法である。以下に、比較する従来型相当車CX-7（改）の諸元、仕様の設定方法、およびライフサイクルの各段階の分析手法を述べる。なお、新しい手法については、第3者（LCAの学識経験者）のレビューを受け、妥当と認められた。

(1) 比較する従来型相当車CX-7（改）の諸元、仕様の設定

乗用車には、SUVの他、セダン、ミニバン、スポーツカーなどのカテゴリがあるが、同一カテゴリとした上で同等の車両諸元、仕様を設定した。

[CX-7（改）の諸元、仕様]

- ・自動車の使用目的がCX-5と同一のクロスオーバーSUVである。
- ・乗車定員、荷物の積載量がCX-5と同等である。
- ・車両寸法（全長、全幅、全高）、エンジン排気量がCX-5と同等である。
- ・車両質量は、車両投影面積から設定する。同一カテゴリ車（SUV）であれば、車両質量が車両投影面積に比例することがわかっており、自社SUV、他社SUVのデータから設定した。

(2) ライフサイクル各段階の分析手法

1) 製造段階（材料製造、車両製造）

日本自動車工業会のマテリアルプロセス手法^③を採用した。製造段階での環境負荷は、各部品構成材料ごと、質量に比例する。CX-7（改）は、エンジン、トランスミッションについては同等の既存ユニットを用い、その他のユニットについては、CX-7の材料構成を用い、スケールダウンした。

2) 使用段階

モード燃費値より求められる生涯使用燃料の量から、燃料精製時、燃料燃焼時の環境負荷を算出する。燃費への影響要因には、ころがり抵抗、加速抵抗、空気抵抗などがあるが、日本のモード燃費は比較的低速で加減速が多いため、加速抵抗が大きいと考えられる。加速抵抗が支配的であれば、モード燃費と車両質量が反比例の関係があり、実データ^④で示されている。本稿では、燃費への影響要因をなるべく合わせるため、従来SUV車の車両質量と燃費から求めた。

3) メンテナンス段階

自動車の使用期間および生涯走行距離に必要な交換部品を設定し、それらを製造することによる環境負荷を算出した。具体的には、タイヤやエンジンオイルなどを交換部品として設定した。

4) 廃棄段階

廃棄段階は、シュレツダ処理、シュレツダダストサーマルリサイクル、埋め立て処分での投入量より環境負荷を算出した。例えば、埋め立て処理では、管理型最終処分場での油圧ショベル軽油消費量より算出した。

2.3 環境負荷項目

自動車の重要環境側面を地球温暖化と大気汚染と捉えた。地球温暖化の主要排出項目は、CO₂であることが判明している^⑤。酸性化の主要排出項目は、NO_x（窒素酸化物）、SO_x（硫黄酸化物）、光化学オゾン生成の主要排出項目は、NMHC（非メタン炭化水素）であることが判明している^④。加えて、規制対象項目のPM（粒子状物質）とした。

2.4 機能単位とシステム境界

従来、生涯を10年間で10万km走行するとしてきたが、新世代技術を評価するにあたっては最新の統計^⑥により、5人乗りのSUVが、その全生涯13年間で11万kmを走行する際に提供する機能を本調査の機能単位とした。走行モードは新しいJC08モードとした。

自動車のライフサイクルを資源採掘から廃棄までとし、材料製造、車両製造、使用、メンテナンス、廃棄の5段階で設定した。

2.5 市場実態を反映した評価方法

マツダ車をご購入いただいたすべてのお客さまに「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を提供するという考えのもと、1台当たりの環境負荷に、式(1)に示すように、各グレードの普及の実態を反映した。

$$LE_{average} = \sum_{i=1}^m LE_i \times \left(V_i / \sum_{i=1}^m V_i \right) \quad (1)$$

ここで、

- $LE_{average}$: 車種1台当たりのライフサイクル環境負荷、
- LE_i : グレード*i*のライフサイクル環境負荷、
- V_i : グレード*i*の販売台数、
- i : 全グレード数*m*のうち、*i*番目であることを示す

3. 結果と考察

3.1 評価対象

(1) CX-5

CX-5 (Fig.1) は、グローバルに販売されるコンパクトクロスオーバー SUV で、当社の革新的な新世代技術である「SKYACTIV 技術」をガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、トランスミッション、ボデー、シャシーに採用し、画期的な燃費向上・軽量化を達成している。



Fig.1 CX-5

(2) CX-7 (改)

1) 従来型相当車 (CX-7 (改)) の車両質量

縦軸に車両質量、横軸に車両投影面積をとり、現在販売中の従来型SUVについて自銘柄および他銘柄をプロットし、投影面積に対する車両質量の散布図をFig.2 に示す。決定係数 R^2 は、0.969 であり高い相関を示す。CX-5 の投影面積からCX-7 (改) の車両質量を設定した。車両質量は、ボデーやシャシー剛性の要件から単純に諸元に比例するものではないがFig.2 を見るとその影響が小さいことがわかる。

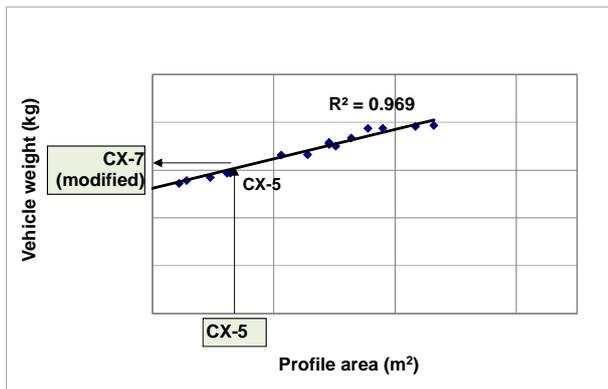


Fig.2 Profile Area vs Vehicle Weight of Conventional SUV

2) 従来型相当車 (CX-7 (改)) の燃費の設定

縦軸に燃費の逆数、横軸に車両質量をとり、現在販売中の従来型SUVについて自銘柄および他銘柄をプロットし、車両質量に対する燃費の逆数の散布図をFig.3 に示す。決定係数 R^2 は、0.758 であり比較的高い相関を示す。CX-7 (改) の車両質量から燃費の逆数を求め、燃費値を設定した。

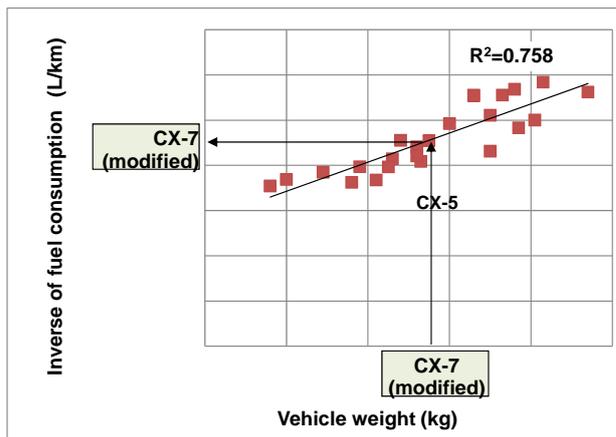


Fig.3 Vehicle Weight vs Inverse of Fuel Consumption

3.2 環境負荷のインベントリ分析結果

① CO₂排出量

CO₂排出量 (質量) について、CX-5 とCX-7 (改) を比較して示したのが、Fig.4 である。CX-5 のCO₂排出量は、CX-7 (改) に比べ、ライフサイクルトータルで 28%の削減が確認された。これは、主として大幅な燃費性能の向上が寄与しており、エンジンの熱効率向上、トランスミッションのフルレンジロックアップの実現、走行抵抗の低減に加え、i-stop (アイ・ストップ) の採用等によるものである。また、車両の軽量化やボデーシェルのプレス工程での歩留まり向上による投入材料削減も貢献している。

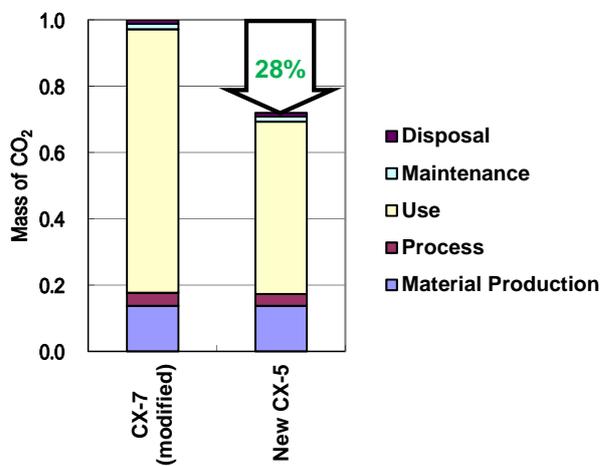


Fig. 4 Comparison of CO₂ Emissions Between Predecessor and New CX-5

② NO_x, NMHC, PM, SO_x 排出量

酸性雨や大気汚染の要因になるCO₂以外の項目の排出量 (質量) について、CX-5 とCX-7 (改) を比較して示したのがFig.5 である。CX-7 (改) のSO_x排出量を 1.0 とした場合の相対値を示している。CX-5 のNMHC, およびSO_x 排出量は、CX-7 (改) に比べ 32%, 23%削減していることが確認された。NMHC, SO_x について、大幅に排出量が削減しているのは、燃費改善による生涯燃料使用量削減、

および、軽量化や歩留まり向上による投入材料削減によるものである。NOx, PMについては、ディーゼル車も含まれているが、CX-5は、CX-7 (改) とほぼ同等である。

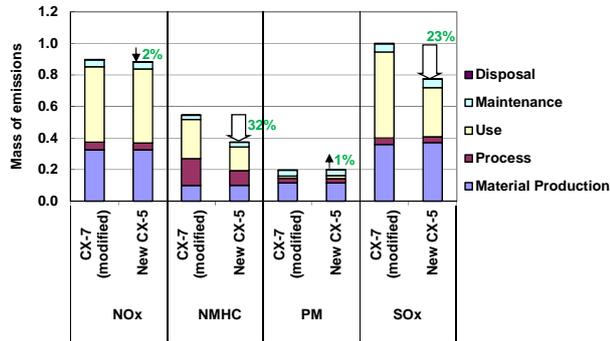


Fig.5 Comparison of NOx, NMHC, PM, and SOx Emissions between Predecessor and New CX-5

4. 結論

マツダでは、LCA に関する国際基準 (ISO 14040 / 14044) のプロセスに則って LCA を実施しており、「マツダ CX-5 (新型乗用車)」として第三者認証を取得した (Fig. 6)。

本稿では、革新的な新世代技術を評価するLCA手法を確立し、CX-5 について、特定の燃費向上デバイスを搭載したグレードだけでなく全グレードのLCA (販売台数の加重平均値) を評価した。CX-5 は、大幅な燃費向上により従来型と比較して、CO₂排出量で 28%削減、NMHC排出量で 32%削減、SOx排出量で 23%の削減、NOx排出量、PM排出量で同等であることが確認できた。



Fig.6 Certificate of ISO 14040 / 14044

5. おわりに

今後、マツダのビルディングブロック戦略に基づき、電気デバイスの段階的実用化に向け、減速エネルギー回生、ハイブリッドシステムなどのモータ駆動技術を導入していく。これらの新技術や新製造工程においても、ライフサイクル全体での環境負荷を低減するための車づくりが重要になると考える。引き続き、ライフサイクルを通じた環境負荷低減効果が定量的に見えるよう評価を続けていく。

参考文献

- (1) 新田茂樹, 森口義久: マツダのライフサイクルアセスメント, マツダ技報, 28号, pp.75-79 (2010)
- (2) Nitta, S., Moriguchi, Y.: New Methodology of Life Cycle Assessment for Clean Energy Vehicle and New Car Model, Proceeding of SAE International 2011 World Congress (April 2011)
- (3) Nitta, S., Moriguchi, Y.: New Life Cycle Assessment Process for Strategic Reduction of Environmental Burdens, Design for Innovative Value towards a Sustainable Society, 2012, 280-283, DOI: 10.1007/978-94-007-3010-6_54, SpringerLink
- (4) Nitta, S., Moriguchi, Y.: A General Method of Life Cycle Assessment, SAE Technical Paper 2012-01-0649, 2012, doi: 10.4271/2012-01-0649
- (5) Junichi Kasai et al, Activities Done by the LCA Committee, JAMA-LCI Data Collection and "LCI GUIDE", International conference of Eco Balance, 2004, S1-7-4
- (6) 安田武夫, 素材分野から見た車体軽量化と環境性能向上, JAMAGAZINE, 2010年11月号 (2010)
- (7) 使用期間: 「2011年版日本の自動車工業」日本自動車工業会 (2011年)
- (8) 走行距離: 「自動車産業関連統計第12集」日本自動車工業会 (2010年)

■ 著 者 ■



新田 茂樹



森口 義久

論文・解説

41

走行場を学習し判断する創発型制御システムの研究

Study on Emergent Control System to Learn and Judge the Driving State

古郡 了*1 Satoru Furugori	山崎 卓*2 Taku Yamazaki	黒田 康秀*3 Yasuhide Kuroda	農沢 隆秀*4 Takahide Nouzawa
末富 隆雅*5 Takamasa Suetomi	氏家 良樹*6 Yoshiki Ujiie	中澤 和夫*7 Kazuo Nakazawa	松岡 由幸*8 Yoshiyuki Matsuoka

要約

自動車自体に高度な知能を持たせることにより、走行場の状態を判断し、適切な制御や情報表示を行う未来の乗り物の機能を検討している。本稿で提案する創発型制御システムは、未知の場であっても、その状態を判断し獲得する機能を持ち、様々な走行場に対応した新しい制御を創発していくシステムである。ドライバの意思に沿った制御をしていく新しいロジックにより、従来に比べリアルタイムの走行場推定が可能で走行状態の時間軸変化に細やかに対応できるので、より一層の安全性能・エネルギー効率の向上が期待できる。今回、ハイブリッド自動車の低燃費化とバッテリー寿命の長寿命化に適用し、効果を確認した。

Summary

We have been studying the future mobility in which the vehicle itself, with a high-level of intelligence given, judges the driving state and exercises appropriate control and information display. The emergent control system proposed here is a system to learn and judge the driving state even in an unknown location and create a new control algorithm that can meet various driving states. New logic which enables vehicle control along the driver's intention, allows the real-time estimation of the driving state. Accordingly the system makes it possible to correspond to the change of time axis finely and will be expected further improvement of safety performance and energy efficiency. This time we applied it to the engine control of a hybrid vehicle with a view to improving the fuel economy and the battery life and confirmed a greater effect than the ordinary control system does.

1. はじめに

走行場を学習し、運転者の潜在的な要求をリアルタイムに判断する技術を開発することにより、①運転者の要求に対応した適切な情報を提示する、②適切なタイミングで警報を与え注意を喚起する、③制御を介入させ事故防止や環境負荷低減を図る、ことが可能となる。また、本技術は、安全・環境面での実利的な付加価値を向上させるだけでなく、運転者と車が意思疎通を図れ、愛着が増加するといった精神的な付加価値を向上させることが期待できる。しか

し、覚醒低下や焦り運転など正常でない運転心理状態のために運転者の潜在的な要求が適切でない場合は、自動車自体が何らかの判断基準を持ち、自動車・運転者系全体の総合的な評価が高くなるように制御介入する必要がある。そのためには、あたかも、助手席に着座している乗員が運転者の運転に異常がないかを見守っているような機能を持つ高度な知能システムを自動車に搭載する必要がある。高度な知能システムがリアルタイムに機能するようになれば、より一層の安全性能、エネルギー効率の向上が期待できる。

近年、周辺環境や運転者の状態を計測する多数のセンサ

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

*6~8 慶應義塾大学
Keio Univ.

*5 電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office

が市販車にも搭載され始めた。運転者の脇見を検出するシステム、居眠り運転や疲労を検知するシステム、ステレオカメラで前方障害物を検出し衝突しないように急ブレーキをかけるシステムなどが市販され、着実に自動車の知能化は進化してきた。しかし、これらのシステムは、限定された周辺環境条件において作動するシステムであり、通常のあらゆる運転場面をシームレスに見守るシステムにはなっていない。

運転場面を限定しない通常の運転行動への支援を対象とした研究も行われている⁽¹⁾が、まだ実証データが乏しく、基礎研究の蓄積が期待される。また、人間と機械が協調した未来システムの実現のためには、人間の可塑性（経験が蓄積され同じ状態に戻らない性質）や非定期的な時間軸変動を考慮した新しいデザイン方法論の適用が必要である⁽²⁾といわれている。そこで、基礎研究データの蓄積と方法論検討を目的とし、未知の走行場を走行した場合でも学習し判断することによりリアルタイムに走行場を推定し、推定した走行場に対応した制御を進化学習させる創発型制御システムを考案した。また、試作した車載可能な創発型制御システムを、ハイブリッド車両の低燃費化とバッテリー寿命の長寿命化に適用し、効果の検証を行った。

2. 走行場推定技術の検討

2.1 走行場推定の考え方

従来の自動車において、周辺車両との関係、車両挙動、運転者状態は独立に計測され、個別の支援システムが搭載されてきた。従って、それらの相互作用がある場合の支援ができず、あらゆる走行場面への適用拡大が難しかった。

そこで今回、走行場は、①周辺環境（道路形状、勾配、交通標識・信号、他車両、歩行者など）、②車両挙動（自車両速度、加速度、ステアリング操舵量、ペダル操作量など）、③運転者状態（覚醒状態、疲労状態、脇見、リスク感など）、といった3種類の要因から推定されるものとする。従って、推定される走行場は、例えば高速道路・交差点といった地理的条件のみで決定されるものではなく、同一運転者が同じ道路を走行したとしても走行ごとに異なる。人間は機械システムのように同じ条件で入力を与えたときに、同じ出力が返ってくるのではなく、過去の経験の積み重ねが運転行動に影響を与え、同じ道路環境で走行しても、同じ運転行動をとることはない。そういった人間の可塑性な性質を考慮して走行場推定システムの基本フレームを考えることにした。つまり、すべての走行場が既知であり整理分類されたデータテーブルとして準備できるものではなく、走行するごとに、未知の走行場であるか、既知の走行場であるか判定し、未知の走行場ならば新たな走行場であると学習し記憶していくものとした。

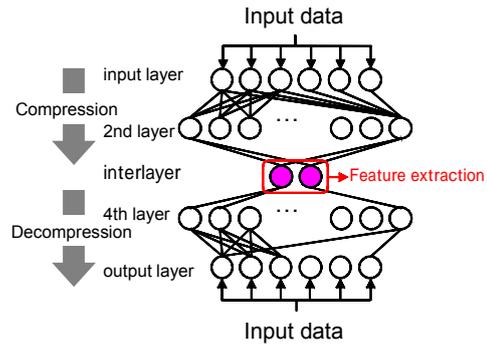


Fig.1 Identity Mapping Model

2.2 走行場推定アルゴリズム

周辺環境、車両挙動、運転者状態を入力として走行場の基本因子を抽出するアルゴリズムを考える。入力は、必ずしも線形データではないので、非線形データの次元圧縮手法として、ニューラルネットワークの一種である恒等写像モデル⁽³⁾を用いる。恒等写像モデルの構成をFig.1に示す。恒等写像モデルでは、入力層のデータを中間層で圧縮し、出力層で復元する。入力層と出力層の値が等しくなるように学習を行うことにより、中間層には入力層に含まれる必要な情報がコンパクトに表現される。第2層および中間層のニューラルネット数は、出力層で復元したときの入力層との誤差に基づき決定される。中間層のパラメータ値から走行場を判定する。走行場を判別するためのパラメータ値の閾値は固定値ではなく、走行場データの蓄積に伴い変化させる変数とする。

3. 創発型制御システムの検討

3.1 創発型制御の考え方

(1) 創発型制御の必要性

創発とは、部分の性質の単純な総和にとどまらない性質が、全体として現れることである。また、ここでいう制御は、エンジンやモータ等を制御することだけでなく、運転者への情報提示の種類やタイミングを決定することを含む。自動車が、周辺環境、車両挙動および運転者状態に基づき、最適な制御を決定しても、人間が生来保有する可塑性のために、運転者は決定された制御に対して一定の操作を繰り返すことはない。自動車は、変化した運転者に対し更に学習し、制御を変化させていくが、運転者は変化した制御も経験として取り込んで、新たな適応を求める。このように、自動車が運転者に適応すると同時に、運転者も自動車に適応する双方向性の適応系においては、系全体として現れる性質を制御する必要があると考えられる。運転者が適応を繰り返す理由として、

- ①多様な走行場への運転経験や知識の蓄積により効率的な運転行動へ変化したが
- ②運転中の制御目標が事故防止などの生命を維持する目標から、楽しく運転するなどの自己実現の目標まで多

階層であり、価値観や状況に応じて目標が変動する

- ③単調な作業の繰り返しによる飽きや覚醒低下を防止するために、適応目標を自ら変動させている

などが考えられ、「場や価値観の多様性とそれらの時間軸変動」へ対応可能な創発型制御のシステム検討が必要である。創発型制御を搭載した自動車は市販化されておらず、挑戦的な取り組みとなる。

(2) タイム軸・デザインの必要性

運転者の運転中の潜在的な要求には、時間スケールの異なる要求が混在している。例えば、周辺車両と衝突しそうな緊急事態には、事故回避のために秒スケールの要求が発生する。また、通常運転時には、渋滞回避やエコ運転支援など分・時間スケールの要求が発生する。更に、長期間愛着を持って運転してきた自家用車を故障しないように労わって乗りたいときには、月・年スケールの要求が発生する。次にどのような制御をするか決定する際には、タイムスケールの異なるそれぞれの要求の強さが比較評価され、総合的な満足度が高くなるように制御が決定されるべきである。そこで、創発型制御システムは、秒・分レベルのショートタイムスケールの要求、時間・日レベルのミディアムタイムスケールの要求、および月・年レベルのロングタイムスケールの要求の相互影響を考慮したタイム軸・デザイン⁴⁾の考え方を取り入れたアルゴリズムを開発することにした。

3.2 創発型制御システム

(1) 基本構成

開発した創発型制御システムの基本構成を Fig.2 に示す。周辺車両、車両挙動、運転者状態を入力として、走行場を推定する。推定した走行場が既知の場合は、メモリに記憶してある制御アルゴリズムから、走行場に対応したアルゴリズムを選択実行することにより制御量に変換し、情報表示または制御を行う。走行場が未知の場合は制御アルゴリズムを創発し、創発したアルゴリズムを実行することにより制御量に変換し、情報表示または制御を行う。

(2) 全体アルゴリズム

創発型制御システムの基本アルゴリズムを Fig.3 に示す。ショートタイムスケールでは、メモリに蓄積された学習済みの走行場と比較することにより、走行場が既知であるか未知であるかの判断を行う。既知の場合は対応する制御アルゴリズムを選択し、未知の場合は近似する走行場に対応する制御アルゴリズムを選択し、制御量に変換を行う。ショートタイムスケールの処理では、入力データに対して、既知か未知かのタグ付けと、選択する制御アルゴリズムの紐付けがされるだけなので、リアルタイムの処理が可能である。近似する走行場で制御を行っていた未知の走行場は、ミディアムタイムスケールで、将来に備えて既知の走行場への変換と制御アルゴリズムの創発を行う。制御アルゴリズムは、ロングタイムスケールでメモリに蓄積され、既知

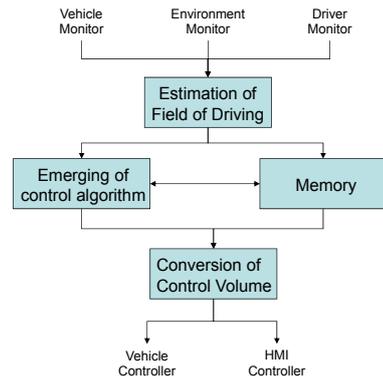


Fig.2 Block Diagram of Emergent Control System

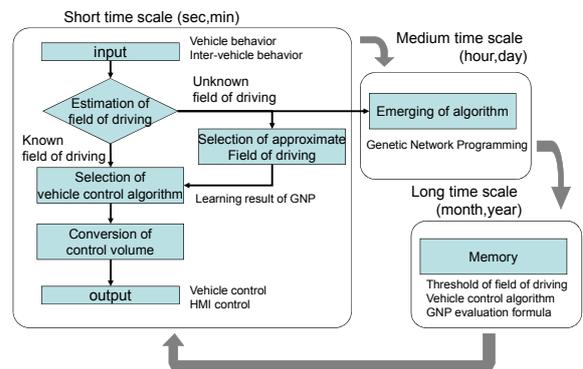


Fig.3 Flowchart of Emergent Control System

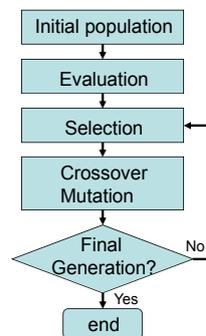


Fig.4 Basic Algorithm of GNP

に変換された走行場と創発された走行場を判別するための閾値は更新される。

(3) 創発アルゴリズム

制御アルゴリズムを創発する方法として、遺伝的ネットワークプログラミング (GNP) を適用する。GNP は、遺伝アルゴリズム (GA) の拡張であり、基本アルゴリズムは Fig.4 に示すとおり同様である。評価値は個体の適合度や有効性を数値化したものであり、その値は評価関数によって求められる。交叉や突然変異を実行し、世代を進化させることにより評価値の最適化が行われる。Fig.5 に GNP の基本構成を示す。個体では、状態が各ノード上を遷移していき、ノード関数を逐一実行していく。ノード関数には、If-then 文による条件判定のみを行う判定ノード、処理内容

を実行する処理ノード、状態を遷移させるのみのフラグノードがある。基本アルゴリズムを実行することにより、接続先ノードの変更、ノード内容の変更が行われ、準最適解が探索される。

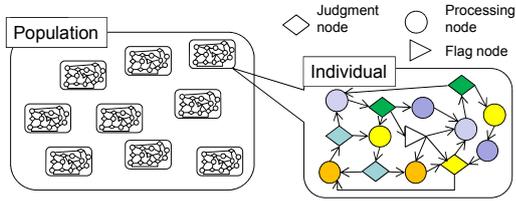


Fig.5 GNP Configuration

4. 創発型制御システムによる低燃費制御

4.1 検討モデルと条件

創発型制御システムが、どんな運転者に対しても優れた環境安全性能を発揮することを確認したい。今回は、昨今特に脚光を浴びている環境性能に着目し、効果の確認を行った。具体的には、Fig.6 に示すシリーズ型のハイブリッド車両のバッテリー走行とエンジン走行を切り替えることにより、バッテリー劣化量と燃料消費の合計コストを低減できるか検討した。また、走行場を学習し判断することで制御アルゴリズムを切り替えることが、合計コスト低減効果として反映されるか検討した。更に、個人の走行特性を学習させた場合の効果も検討した。

ここで、バッテリー劣化量と燃料消費の合計コストとして、(1)式を用いた。

$$cost = \frac{C_{battery} \times \frac{E_{Bmax}}{1000}}{X} \times d + \frac{C_{fuel}}{F_l} \quad (1)$$

t_{drive}

ただし、 $C_{battery}$ [¥/kWh] はバッテリーコスト、 E_{Bmax} [Wh] はバッテリー容量、 X [day] はバッテリー寿命予測日、 t_{drive} [day] は走行時間、 d [km] は走行距離、 C_{fuel} [¥/l] は燃料コスト、 F_l [km/l] は燃費である。

(1) 車両モデル

車両モーションを再現できるドライビングシミュレータに車両モデルを構築し、シミュレータで走行データを取得し、創発型制御システムの検証を行う。車両重量 1.5t、バッテリー容量 4 kWh、エンジン Max パワー 80kW とし、エンジンモデルとバッテリーモデルは以下のように設定した。

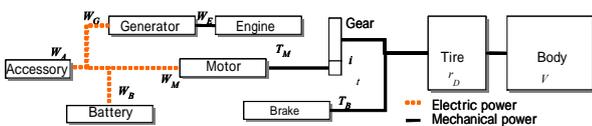


Fig.6 Series Hybrid Vehicle System

(a)エンジンモデル

発電量 W_G [W] は式(2)により求める。

$$W_G = \eta_G W_E \quad (2)$$

ただし、 W_E [W] はエンジン出力、 η_G は発電機の発電効率である。 W_E は、トルク T_E [Nm] と回転数 ω [rpm] によって(3)式で表される。

$$W_E = T_E \cdot \omega \quad (3)$$

エンジン出力変更時は、あらかじめ求められた最適なエンジントルクと回転数に収束するよう、PID制御を行う。燃料消費率 F_E [g/kWh] は、トルク・回転数からの燃料消費換算テーブルより求める。1秒当たりの燃料消費量 F_C [g/s] は(4)式より求める。 F_C と時間との積算により燃料消費量が得られ、これを積分したものが総燃料消費量となる。

$$F_C = W_E \cdot F_E / 1000 / 3600 \quad (4)$$

(b)バッテリーモデル

バッテリー残容量 E_B [Wh] は式(5)より求める。

$$\dot{E}_B = W_B - \left(\frac{W_B}{V_B} \right)^2 R_B \quad (5)$$

$$W_B = W_G - W_M - W_A \quad (6)$$

ただし、 W_B [W] はバッテリー入出力量、 V_B [V] はバッテリー内部電圧、 R_B [mΩ] はバッテリー内部抵抗である。また、等価燃料消費量 F_B [g] は式(7)より求める。等価燃料消費量とは、走行終了後にエンジンを稼働させて、バッテリー残量 SOC を初期の状態に戻すために必要とする燃料消費量である。

$$F_B = -\Delta SOC \cdot E_{Bmax} \cdot F_E / \eta_G / 1000 \quad (7)$$

ただし、 ΔSOC [%] は走行終了時と開始時のバッテリー残量 SOC との差である。

バッテリーの劣化量 Y は \sqrt{t} 時間に比例し、その傾きとなる劣化係数 k は放置時とサイクル時によって異なる。劣化係数は温度 T [K]、平均電流 I_{rms} [A] によって決まる。本研究では、充放電電流と温度とから劣化量を算出する実験式を用いた。

(2) シミュレータ走行条件

100km/h の平坦走行、上り走行、下り走行、および 40km/h 以下の前方車両追従の渋滞走行の 4 種類のモードの走行データを取得した。各モードの走行時間は 5 分とし、3名の被験者データを取得し、2名分を学習に 1名を検証に用いた。制御条件として以下の 4 条件の評価を実施した。

① 未学習

バッテリー残量 SOC が 70%以上でエンジンを停止しバッテリー電力で走行。40%以下でエンジンを稼働させバッテリー充電を行う。

② 固定学習

1 つの GNP (平坦走行) により創発された制御アルゴリズムにより制御。

③ 走行場適合学習

推定された走行場ごとに GNP を切り替える制御。

④ 走行場・個人適合学習

検証に用いる 1 名の走行データにより、走行場推定閾値と走行場ごとの GNP を個人適合させた制御。運転者個人の潜在的な要求 (速度制御にエンジンプレーキを使用したいかなど) を取り込んだ制御である。

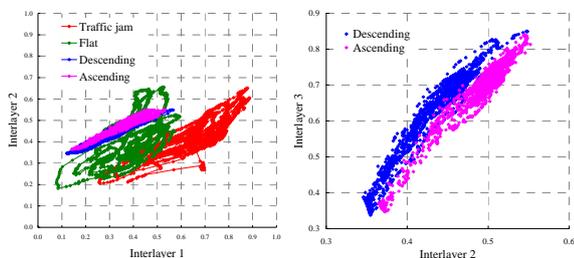
4.2 結果

(1) 走行場の推定結果

恒等写像モデルにおける中間層出力の一例を Fig.7 に示す。非線形情報圧縮された中間層 1 と 2 で平坦、渋滞と上り/下り走行場、中間層 2 と 3 で上りと下り走行場を分離できることがわかった。

(2) 創発型制御による合計コスト低減効果

4 つの制御に対する合計コストを Fig.8 に示す。未学習、固定学習、走行場適合学習、走行場・個人適合学習という順序で高度な創発制御になるほど合計コスト低減効果が大きくなることがわかった。



(a) Interlayer 1-2 (b) Interlayer 2-3
Fig.7 Estimation of Driving Situation

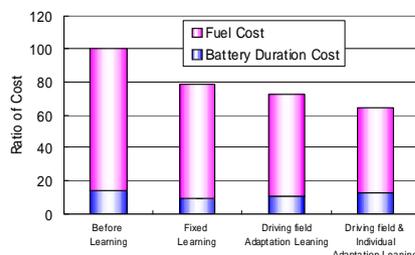


Fig.8 Improvement of Total Cost by Control Types

5. まとめ

未知の走行場に遭遇しても学習し判断する創発型制御システムの考え方と基本構成を示した。創発型制御システムを用いて、ハイブリッド車両のシステム制御を行うことに

より、燃料消費量とバッテリー劣化量の合計コストを低減できること、運転者個人の潜在的な要求を取り込むと効果が最大になることが示された。このように、走行場を推定しながら制御を変更していくことが、新たな価値を創成する可能性があることを示唆している。

今後の課題として、走行場推定に運転者状態を入力として取り入れた場合の研究事例蓄積を行いたい。更に、運転者の行動を蓄積し利用することにより、時間軸変動に対応して運転者に適応するシステムが、運転者の好みの特性に近づき、自動車と運転者がともに成長していくような特性を有することで、自動車に対する深い愛着を創発するといった、精神価値増大の可能性を検討していきたい。

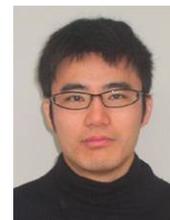
参考文献

- (1) 手塚ほか:進化的予防安全システムの開発, スバル技報, No.35, p.151-157 (2008)
- (2) 松岡由幸:タイムアクシス・デザインの世界—やさしい国のモノ・コトづくり—, 丸善出版 (2012)
- (3) 柳沼義典ほか:砂時計型ニューラルネットワークを用いたセンサ情報融合による内部表現の自動獲得, ファジシステムシンポジウム講演論文集, 11, p.715-718, (1995)
- (4) 松岡由幸:タイムアクシス・デザインの概念, 横幹, Vol.6, No.1, p.9-16 (2012)

■ 著 者 ■



古郡 了



山崎 卓



黒田 康秀



農沢 隆秀



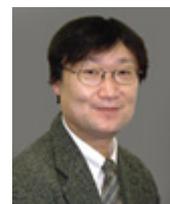
末富 隆雅



氏家 良樹



中澤 和夫



松岡 由幸

論文・解説

42

高圧縮比化と冷却損失低減による内燃機関の高効率化

High Efficiency of Internal Combustion Engine by High Compression Ratio and Cooling Loss Reduction

藤本 昌彦*1
Masahiko Fujimoto
山本 博之*4
Hiroyuki Yamamoto

藤本 英史*2
Hidefumi Fujimoto

山下 洋幸*3
Hiroyuki Yamashita

要約

内燃機関の熱効率向上を目指し、0次元燃焼と1次元熱伝導の連成解析を用いて冷却損失低減手法を検討した。その手法としてエンジン諸元の最適化や燃焼室壁への断熱材適用を想定し、冷却損失や熱効率へ及ぼす影響を調べた。その結果、低熱伝導率と低比熱を両立する断熱材を用い、ガス温度に高応答で追従して燃焼室表面温度を変化させることで、図示熱効率を大きく向上できることが明らかとなった。また超高圧縮比・リーン燃焼との組み合わせで飛躍的な熱効率向上の可能性があることが分かった。

Summary

To improve thermal efficiency of internal combustion engines, methods of cooling loss reduction were studied using CAE analysis coupling a 0-D combustion and a 1-D heat conduction. As the methods, the engine specifications optimization and heat-insulation materials on the combustion chamber were assumed. And the influence of their parameters on the cooling loss and the thermal efficiency was investigated. As a result, it was found that the indicated thermal efficiency improved drastically by applying the lower heat conductivity and the lower heat specific materials for combustion chamber coating shifting the surface temperature of the combustion chamber responding to the gas temperature. It was also revealed that there was an opportunity to further improve the thermal efficiency by the combination of an extremely high compression ratio and a lean burn.

1. はじめに

世界全体の温室効果ガス排出量を2050年までに少なくとも50%削減するとの目標が、2008年の北海道洞爺湖サミットで合意され、世界がエネルギーの活用による環境負荷を抑える「低炭素化社会」の実現に向けて動いている。こうした中、自動車の動力源への要求は、地球上の地域差、車両特性、エネルギー事情（コスト、セキュリティ）などさまざまな側面で多様化しており、将来的にも複数の選択肢（マルチソリューション）を持つことが重要である。

経済産業省が2010年4月に取りまとめた「次世代自動車戦略2010」では、2020年時点の新車販売台数で80%の「先進環境対応車」の普及を目指すとしている⁽¹⁾。そのう

ち、「次世代自動車」は20~50%が政府目標であり、残りの30~60%は高効率な内燃機関を必要とする「従来車」となる。「次世代自動車」でも、例えばHEV（Hybrid Electric Vehicle）の燃費性能向上を図るには、内燃機関の効率向上が大きく寄与することを考えれば、内燃機関の果たすべき役割は極めて大きい。マツダでは自動車の段階的な電動化（ビルディングブロック戦略⁽²⁾）を進めるとともに、Fig.1に示すように、そのベース技術となる内燃機関の将来目標設定を行い、継続的な進化⁽³⁾を目指している。

内燃機関の理論熱効率向上策として高圧縮比化がよく知られている。しかし、圧縮比を高くすると冷却損失が増大

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

するため、熱効率が低下するとの報告⁽⁴⁾がある。これは異常燃焼などの燃焼上の課題や機械抵抗増などの構造上の課題をすべて解決しても、熱効率の限界が存在することを意味する。そこで本研究では、内燃機関の熱効率向上、冷却損失の大幅低減を目的として、燃焼室壁面へ断熱材をコーティングし、熱特性や基本エンジン諸元が、冷却損失や図示熱効率へ及ぼす影響について、0次元燃焼解析と1次元熱伝導解析の連成解析手法⁽⁵⁾を用いた基礎的な検討を行った。

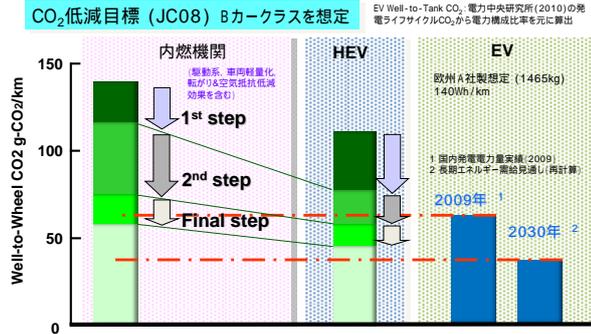


Fig.1 CO₂ Goal Setting of Internal Combustion Engine⁽³⁾

2. 計算解析手法

Fig.2 に本研究で使用した連成計算モデルを示す。シリンダ内ガスは理想気体を仮定した。燃焼室はシリンダヘッド、ライナ、ピストンの3部位に分割し、各壁面は厚さ方向のみ考慮した。連成計算では、シリンダ内ガスと燃焼室壁面間の接触面の温度差による熱移動のみ考慮した。

2.1 気相 (シリンダ内ガス) 計算手法

シリンダ内ガスは理想気体で、温度 T 、圧力 p はシリンダ内で均一であるとした。 dp は全微分形式の気体状態方程式から、下式で表される。

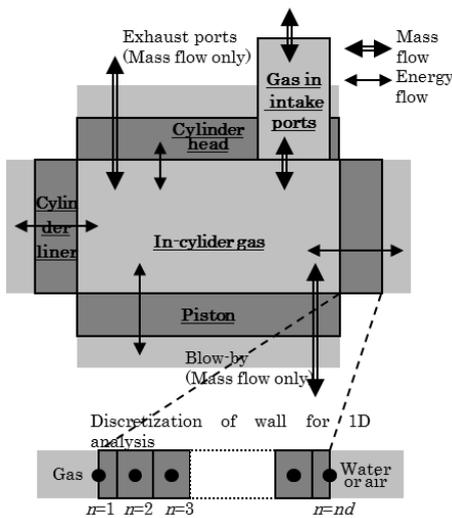


Fig.2 Calculation Model

$$dp = p \left(\frac{dm}{m} + \frac{dR}{R} + \frac{dT}{T} - \frac{dV}{V} \right) \quad (1)$$

質量変化率 dm は吸排気、燃焼等による組成変化から計算した。燃焼による組成変化率計算は Wiebe 関数を使用し、燃焼以外の影響を検討するため、変化率はすべての条件で一定とした。 dT はエネルギー変化率 dQ から以下で表される。

$$dT = \frac{dQ - \sum_{j=1}^{ns} u_j dm_j}{mCv} \quad (2)$$

$$dQ = dQ_{\text{piston_work}} + dQ_{\text{fuel_latent_heat}} + dQ_{\text{cooling_loss}} + dH_{\text{blowby}} + dH_{\text{chemical_reaction}} + dH_{\text{gas_in_and_out}} + dH_{\text{fuel_injection}} \quad (3)$$

$$dQ_{\text{cooling_loss}} = \sum_{m=1}^{nw} \alpha S_m (T_{m,n-1} - T) \quad (4)$$

熱伝達係数 α は以下の Woschni 熱伝達モデル⁽⁶⁾を使用した。

$$\alpha = 0.013 \cdot D^{-0.2} p^{0.8} T^{-0.53} w^{0.8} \quad (5)$$

$$w = 2.28c_{mp} + 0.00324(p - p_{\text{motoring}}) V_h \frac{T_r}{p_r V_r}$$

2.2 熱伝導計算手法

燃焼室形状は円柱とし、壁面はシリンダヘッド、シリンダライナ、ピストンの3部位に分割する (Fig.2)。各壁面は厚み方向のみ nd 個に分割し、非定常熱伝導方程式を使用して各格子点の温度 $T_{m,n}$ を計算した。

$$dT_{m,n} = \frac{dQ_{m,n}}{S_m \delta_{m,n} C_m \rho_{m,n}} \quad (6)$$

以上の p 、 T 、 m 、 $T_{m,n}$ に関する常微分方程式を、VODE Solver⁽⁷⁾ を使用して解き、冷却損失や壁面温度等が収束するサイクルまで繰り返し計算を行った。

Table 1 Specifications of Coating

NM	Heat conductivity	Specific heat
	No coating	
VM1	Al × 0.01	Al × 1
VM2	Al × 0.001	Al × 1
VM3	Al × 0.01	Al × 0.01
VM4	Al × 0.001	Al × 0.01
VM5	Al × 1	Al × 0.01

Table 2 Base Engine Specifications

Compression ratio (ϵ)	20.0
Cylinder volume (V_h)	500 [cm ³]
Bore × Stroke	86×86 [mm]
Connecting rod length	146.25 [mm]
Inlet valve timing	IVO: 8 [deg. BTDC] IVC: Variable
Exhaust valve timing	EVO: 52 [deg. BTDC] EVC: 18 [deg. ATDC]
Inlet and Exhaust valve lift	8 [mm]
Number of valves	Intake: 2, Exhaust: 2
Diameter of intake port	40 [mm]
Diameter of exhaust port	30 [mm]
Engine speed	2500 [rpm]
Intake air temperature	293.15 [K]
Intake air pressure	1.01325×10 ⁵ [Pa]
Target indicated mean effective pressure (P_i)	400 [kPa]
Excess air ratio (λ)	4
Start of injection	60 [deg. BTDC]
Injection duration	10 [deg.]
Calculation method of reaction rate	Wiebe

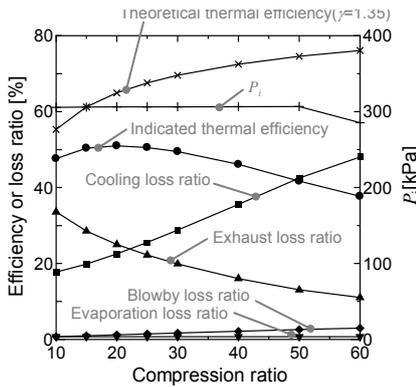


Fig.3 Influence of Compression Ratio (2,500[rpm], $P_i=300$ [kPa], $\lambda=4$)

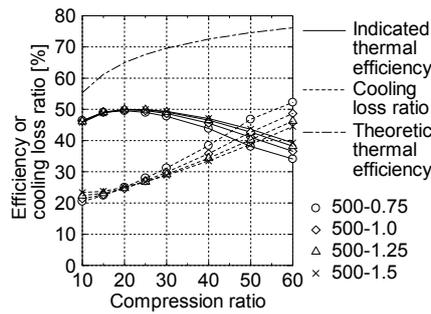


Fig.4 Influence of SB Ratio (2,500[rpm], $P_i=400$ [kPa], $\lambda=3$)

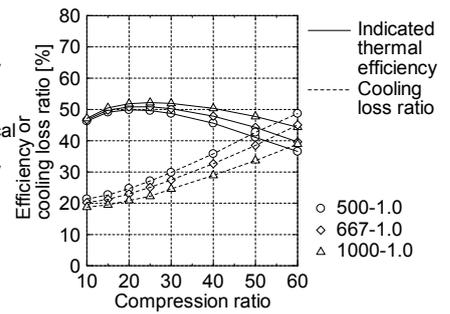


Fig.5 Influence of Cylinder Volume (2,500[rpm], $P_i=400$ [kPa], $\lambda=3$)

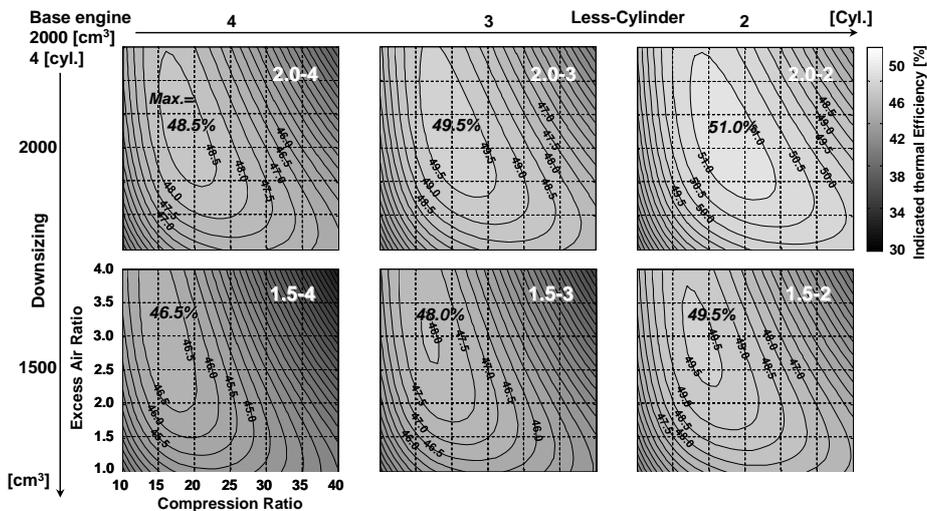


Fig.6 Influence of Engine Less-Cylinder and Engine Downsizing on Indicated Thermal Efficiency (2,000[rpm], $P_i=400$ [kPa])

3. ベースエンジン諸元および計算条件

計算は、熱特性（熱伝導率，比熱）を変更した仮想断熱材（VM1～VM5）を Fig.2 のシリンダライナ以外の燃焼室壁面に 1 [mm]コーティングしたとして解析した。計算で使った断熱材の熱特性（熱伝導率と比熱のアルミニウムに対する比率）を Table 1 にまとめる。また Table 2 にベースエンジンの諸元と計算条件を示す。基本的にエンジン負荷（吸気量）は吸気弁閉じ時期（IVC）で調整した。

4. 計算解析結果

4.1 節では，“ストローク／ボア”（以下 SB 比），行程容積の冷却損失，熱効率へ及ぼす影響を基礎的に解析し，エンジン形式として減筒化や過給ダウンサイジング化の効果を調べる。4.2 節では，断熱材の熱特性（熱伝導率，比熱）の影響を調べ，各エンジン形式において断熱材を組み合わせ，熱効率の飛躍的改善の可能性を考察する。

4.1 エンジン諸元の影響

ベースエンジンにおける圧縮比 ϵ と図示熱効率，各損失の関係性を調べた。その結果を Fig.3 に示す。オットーサイクルの理論熱効率（比熱比 $\gamma=1.35$ として計算）は圧縮比と

ともに大きくなるが，冷却損失割合も大きくなるため，図示熱効率は $\epsilon=20$ で最大となる。冷却損失割合が高圧縮比で増加するのは，ガス温度の上昇に加え，圧縮圧力の増加により式(5)の熱伝達率が大きくなるためである。

SB 比を変更した時の，圧縮比と図示熱効率，冷却損失割合，および理論熱効率の関係を Fig.4 に示す。 $\epsilon=20$ 以上では SB 比を大きくするほど，すなわちロングストローク化することで，冷却損失が低減し，図示熱効率が向上する。

“表面積／体積”（以下 SV 比）は，行程容積（ V_h ）と SB 比で表すと下式となる。

$$(S/V)_{TDC} = \sqrt[3]{\frac{2\pi}{V_h} \cdot \frac{\epsilon + 2 \cdot SB - 1}{SB^{2/3}}} \quad (7)$$

式(7)から算出される SV 比改善率は，SB 比 1.0 から 1.5 にすることにより 16.7% ($\epsilon=10$) ～ 22.4% ($\epsilon=60$) となるが，冷却損失割合低減率は，この値以下となっている。これは，圧縮比が低い方が SV 比改善率は小さくするとともに，ボア径（ D ）と平均ピストン速度（ c_{mp} ）の関係から，小ボアほど式(5)の熱伝達率が増加するためと考えられる。

Fig.5 は行程容積の影響を示した結果である。行程容積を大きくすることで冷却損失が低減，図示熱効率が改善するとともに，最高効率が得られる圧縮比が高圧縮比側に移

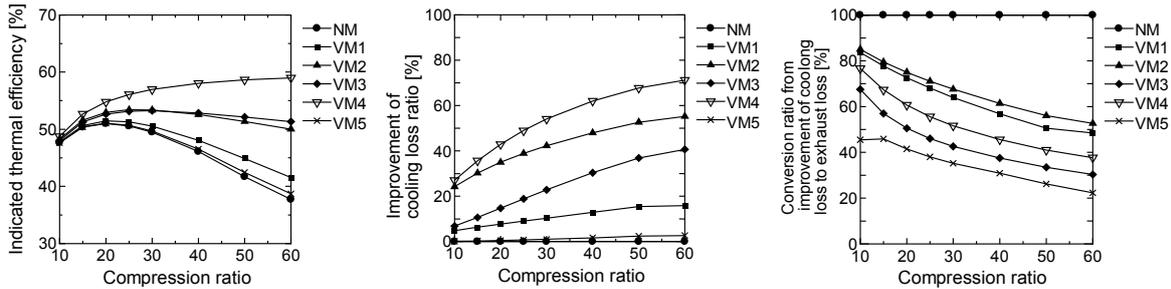


Fig.7 Influence of Insulation Coat on Efficiency, Cooling Loss Ratio and Exhaust Loss Ratio (2,500[rpm], $P_i=300$ [kPa], $\lambda=4$)

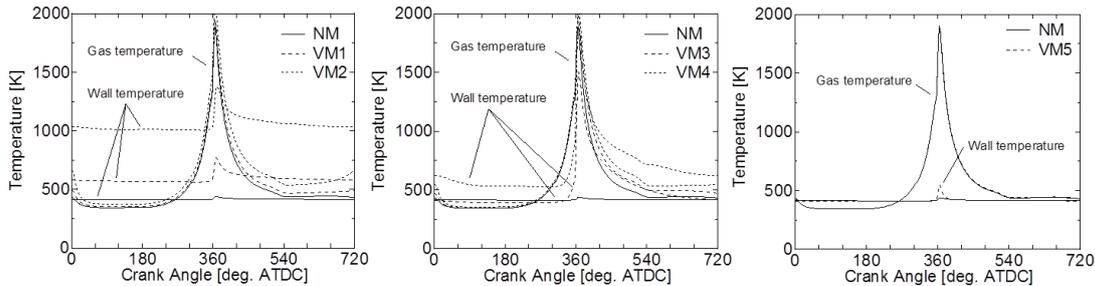


Fig.8 Time History of Gas Temperature and Wall Surface Temperature ($\epsilon=60$, 2,500[rpm], $P_i=600$ [kPa], $\lambda=3$)

動して $\epsilon=25$ となる。行程容積の増加で冷却損失が低減するのは、式(7)から分かるように V_h が大きくなることによりSV比が小さくなるためである。

次に、減筒（以下、レスシリンダ）化と過給ダウンサイジング化の影響を調べるため、圧縮比と空気過剰率の等図示熱効率線図を比較した。その結果を Fig.6 に示す。計算は単シリンダのみだが、Table 2 のエンジン諸元は、4気筒の場合、総排気量 2.0 [L]となる。これを一定として気筒を減じ、行程容積を拡大したものをレスシリンダ、また総排気量を縮小し、同一トルクになるよう過給したものをダウンサイジングとした。負荷は吸気圧力で調整し、図示熱効率はグロス値である。

ベースに対し、ダウンサイジングで最高図示熱効率は低下し、その効率を示す圧縮比が低圧縮比側へ移動する。逆にレスシリンダ化では、最高図示熱効率は向上し、その圧縮比が高圧縮比側へ移動する。低圧縮比・理論空燃比では、ダウンサイジング化の図示熱効率への影響は小さいが、高圧縮比・リーン化が進んだ場合、その低下が無視できなくなる。その場合、レスシリンダ化と組み合わせれば、図示熱効率の悪化を抑制し、ダウンサイジングの長所（機械抵抗低減による正味熱効率向上やダウンスピーディングによる燃料消費量削減）を活かすことが期待できる。

4.2 断熱材の影響

Fig.7 に、断熱材を使用した時の圧縮比と図示熱効率、冷却損失低減率、低減した冷却損失が排気損失へ転換する割合（冷却損失低減の内、熱効率向上に寄与しない割合）の関係を示す。また Fig.8 に、断熱材別の筒内平均ガス温度とシリンダヘッド表面温度の変化を示す。

Fig.7 から断熱材により図示熱効率が向上しており、最高図示熱効率が得られる圧縮比が高圧縮比側に移動すること

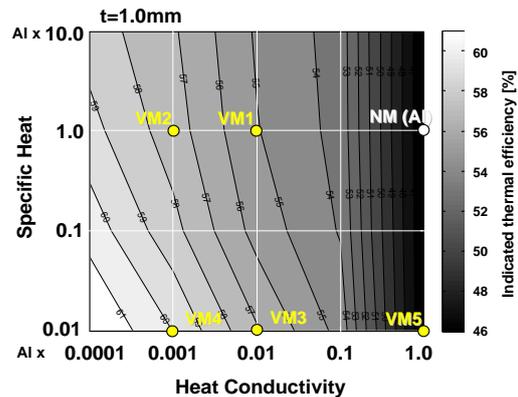


Fig.9 Influence of Heat Conductivity and Specific Heat ($\epsilon=40$, 2,500[rpm], $P_i=600$ [kPa], $\lambda=4$)

が分かる。これは冷却損失が低減するためだが、図示熱効率改善の寄与率に大きな違いがある。例えば、図示熱効率の最大値は VM2（熱伝導率 1/1,000）と VM3（熱伝導率 1/100、比熱 1/100）で同等だが、冷却損失改善率とその改善分が排気損失で失われる割合が VM2 の方が大きい。

Fig.8 のガス温度と壁表面温度の時間変化から、VM3 では上死点付近のみ壁面温度が上昇して冷却損失が低下するのに対し、VM2 では壁面温度が一樣に上昇してガス温度との差が小さくなり、冷却損失が低下している。壁の温度が 1 サイクルで一律上昇することは、吸気・圧縮行程ではガスが壁から受熱し、冷却損失の低減が、内部エネルギーと排気損失の増大という別の損失へ転換される割合が大きいと考えられる。つまり VM2 のように、壁の熱容量が大きいまま熱伝導率のみ低減しても、ガスから冷却水への冷却損失を抑制するだけで、1 サイクルを通して見ると、ガスと壁の間で、依然として熱の授受が活発に行われている。Fig.9 に断熱材の熱伝導率と比熱の等図示熱効率線図を示す。熱伝導率が小さいほど、比熱の影響が大きくなり、

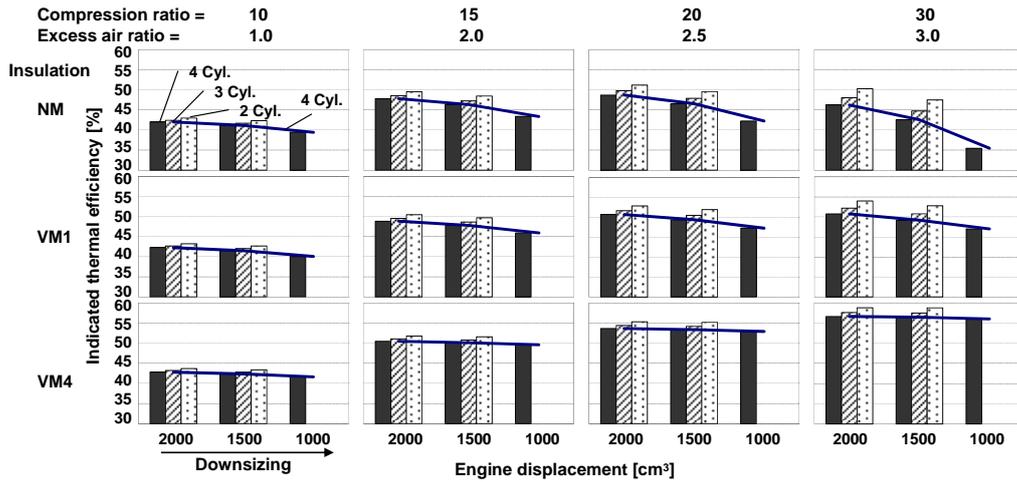


Fig.10 Influence of Insulation Coat on Indicated Thermal Efficiency Under Various Engine Specification (2,000[rpm], $P_i=400$ [kPa])

冷却損失を低減するほど、熱効率向上にとって断熱材の比熱を下げるのが重要になる。

NM, VM2, および VM4 において“圧縮比”と“空気過剰率”の組み合わせを 4 ケースに分け, “排気量”と“気筒数”ごとに図示熱効率(グロス値)を比較し, まとめた結果を Fig.10 に示す。高圧縮比・リーン条件になるに従い, ダウンサイジング化するほど図示熱効率が低下するようになり, 同一排気量でレスシリンダー化するほど図示熱効率が向上する。断熱レベルが上がると, 高圧縮比・リーンでもダウンサイジングの図示熱効率低下を少なくすることができ, 断熱材を用いない低圧縮比・理論空燃比と比較して図示熱効率を大幅に向上することが可能になる。

5. おわりに

“断熱”というとガスの熱が壁を通して冷却水へ逃げることがを防ぐことが目的と考えがちだが, 実はそれは本質ではない。熱効率向上にとって重要なことは, ガスがどれだけピストンに仕事をするかということであり, 内燃機関にとっての理想的な冷却損失低減=“断熱”とは, 1 サイクルを通してガスと壁の間の熱交換を遮断することにある。それはエンジンではなく, ガスを“断熱”することに他ならず, ガス温の変化に高応答に壁表面の温度を追従させるため, 低熱伝導率と低比熱を両立する断熱材が有効である。以上の“断熱”と超高圧縮比・リーン燃焼の組み合わせで飛躍的な熱効率向上の可能性がある。

参考文献

- (1) 笠間：次世代自動車戦略について, 自動車技術, Vol.66, No.4, pp.11-17 (2012)
- (2) 鈴木ら：次世代パワートレイン開発コンセプト「マツダSKYコンセプト」, マツダ技報, No.28, pp. 33-38 (2010)
- (3) 人見：内燃機関の将来展望, 第 21 回内燃機関シンポジウム基調講演資料, pp.10 (2010)

- (4) 徐ら：高効率化のための超高圧縮比燃焼エンジンシステムに関する基礎研究(第1報), 第20回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20090071, pp.1-6 (2009)
- (5) Fujimoto, H., et al : A Study on Improvement of Indicated Thermal Efficiency of ICE Using High Compression Ratio and Reduction of Cooling Loss, SAE 2011-01-1872, (2011)
- (6) Woschni, G. : A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in Internal Combustion Engines, SAE 6700931, (1967)
- (7) Brown, P. N. : <http://pitagora.dm.uniba.it/~testset/testset/solvers/vode.php>

DEFINITIONS

c_{mp} : mean piston speed	[m/s]	T : temperature	[K]
D : bore diameter	[m]	V : volume	[m ³]
H : enthalpy	[J]	δ : thickness	[m]
m : mass	[kg]	ε : compression ratio	[-]
p : pressure	[Pa]	κ : heat conductivity	[W/m/K]
Q : energy	[J]	ρ : density	[kg/m ³]
R : gas constant	[J/K/kg]	λ : excess air ratio	[-]
S : surface Area	[m ²]	C_v specific heat capacity	[J/kg/K]
		<i>lower</i>	
j : species (1~ns)		m : wall (1~nw)	
n : wall depth (1~nd _m)		r : value at IVC	

■ 著 者 ■



藤本 昌彦



藤本 英史



山下 洋幸



山本 博之

論文・解説

43

ウェルドボンド用接着剤の市場劣化推定技術の開発

Development of Technology to Estimate Deterioration of Structural Adhesives in Market

氷室 雄也*1

Katsuya Himuro

住田 弘祐*4

Hirosuke Sumida

定井 麻子*2

Asako Sadai

山本 研一*5

Kenichi Yamamoto

松井 恵子*3

Keiko Matsui

要約

接着とスポット溶接を併用したウェルドボンドは、構造の連続化による剛性、NVH性能の向上手段として適用が拡大している。しかし、ウェルドボンドに適用されるエポキシ系接着剤は、長期信頼性を確保していくうえで、特に吸水による経時劣化を抑制する必要がある。そこで、ウェルドボンド用接着剤の化学変化と接着強度の関係に着目し、吸水による経時劣化現象の定量化に取り組み、加水分解度合いという指標を新たに定義することで、市場での経時劣化の推定を可能にした。

Summary

Applications of weldbonding, in which adhesive bonding and spot welding are combined, have been expanding as a means to improve stiffness and NVH performance. The epoxy-type adhesive applied to weldbonding, however, has the possibility of aged deterioration caused by water absorption. This may stand in the way of ensuring long-time reliability. With the focus placed on the relationship between chemical changes of structural adhesives and its bonding strength, the aged deterioration caused by water absorption has been quantified and a technology to estimate the strength deterioration of structural adhesives in market has been established by using the degree of hydrolysis as an indicator.

1. はじめに

CO₂の排出規制から、自動車の質量軽減、とりわけ車体に要求される軽量化目標は高くなっている。接着とスポット溶接を併用したウェルドボンドは、車体剛性、NVH性能の改善に有効であることから、鋼板の薄肉化が可能となり、車体の軽量化にも有効である。そのため、欧州メーカーを中心にウェルドボンドの適用が拡大している。SKYACTIV-ボデーにおいても、構造の「連続化」の実現手段の一つとしてウェルドボンドを採用している (Fig.1 青線部)。

一方で、ウェルドボンドに適用されるエポキシ系構造用接着剤は、長期信頼性を確保していくうえで、特に吸水による経時劣化を抑制する必要がある。これまで、吸水量の増加に伴う接着剤あるいは接着継手の強度低下⁽¹⁾や、吸水

による接着剤の成分の溶出に伴う欠陥の発生や材料特性の変化が起こることが報告されているが⁽²⁾、市場での経時劣化に関する報告はほとんどない。また、被着体の板厚、材質が違えば接着強度が異なるため、市場から回収してきた車両からウェルドボンド適用部位を切り出して、接着強度を測定しても経時劣化度合いを把握することは難しい。

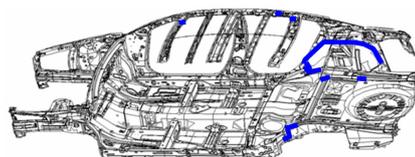


Fig.1 An Example of Application of Weld Bonding

*1~5 技術研究所
Technical Research Center

そこで本研究では、構造用接着剤の化学変化と接着強度の関係に着目し、吸水による経時劣化現象の定量化に取り組んだ。その結果、吸水による接着強度の経時劣化と加水分解度合いに相関があること、および加水分解度合いを指標として用いることで市場での経時劣化を推定できることを確認した⁹⁾。

2. 接着剤の経時劣化

まず、接着剤の吸水による経時劣化現象を解明するため、吸水の過程と、これに伴う接着強度低下および化学的な変化を調べた。

2.1 吸水過程

水分 (H₂O) は接着剤と同じ軽元素で構成され、かつ透明であるため、接着層内での水分拡散を検出することは困難である。そこで、蛍光トレーサとして一般的に用いられるローダミンBによる水分拡散の可視化を試みた。

Fig.2 に吸水処理方法を示す。接着継手試験片は、1.0 mm の鋼板を接着厚さ 0.1 mm で接着した後、幅 3 mm の短冊状に切断して作製した。作製した試験片は、80 °C に加温したローダミン B 2 mass% 水溶液に所定日数浸漬した。その後、試験片を切断し、光学顕微鏡にて断面観察した。

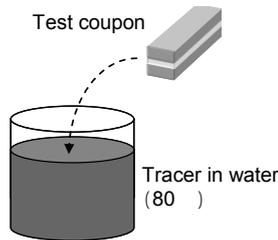


Fig.2 Test Method

Fig.3 に吸水後の接着継手断面の光学顕微鏡像を示す。水分とともにローダミン B が接着層内部に拡散し (赤色の領域)、水分拡散の進展状況が可視化できている。吸水日数が経過するに従い、水分は接着端面から層内に均一拡散していることがわかる。

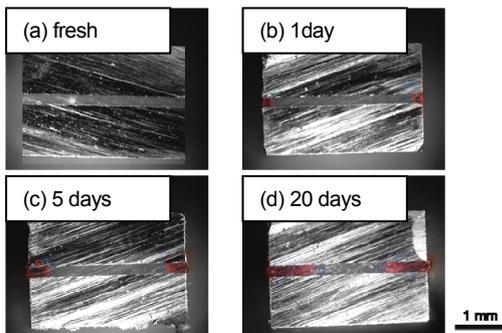


Fig.3 Image of Test Coupons After Water Absorption at 80

2.2 接着強度

吸水による接着剤の強度劣化を把握するため、吸水処理時間による接着強度の変化を評価した。Fig.4 に試験片形状を示す。被着体には、厚さ 1.0 mm の非めっき冷延鋼板 (SPCC) を用いた。接着剤は、Table 1 に示すように機械的特性の異なる一液熱硬化型のエポキシ系構造用接着剤 A, B の 2 種類を使用した。接着厚みはガラスビーズで 0.25 mm に調整し、所定の温度と時間で接着剤を加熱硬化した。吸水による経時劣化は、Table 2 に示す条件で高温高湿環境下、または水中に浸すことで行った。

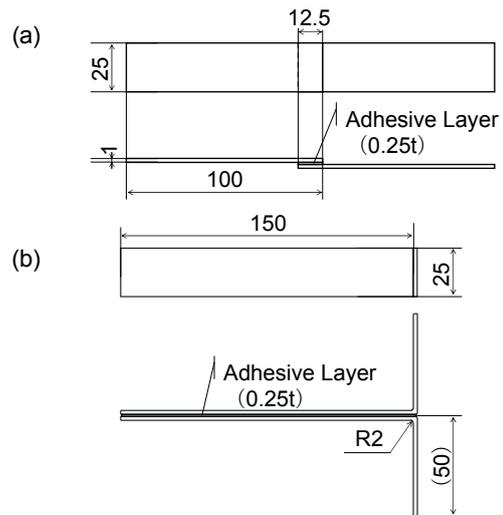


Fig.4 Geometry of Test Coupon (a) lap Shear Joint, (b) T-Peel Joint (unit: mm)

Table 1 Mechanical Characteristic of Adhesives

	Young's modulus	Strength	Elongation
Adhesive A	1500 MPa	35 MPa	~10 %
Adhesive B	2200 MPa	40 MPa	~1 %

Table 2 Condition of Water Absorption

	Condition	Time
Humidity	50, 60, 70, 80 95 %RH (RH:Relative humidity)	1, 5, 20 days
Immersion	50, 60, 70, 80	

構造用接着剤 A の 80 °C での吸水処理時間による接着強度の変化を Fig.5 に示す。比較として、図中には熱処理のみの場合のデータも示している。熱処理のみの場合は、引張せん断、T 型はく離ともに強度の低下はほとんど起こらない。これに対し、吸水処理を行った場合は高温高湿中でも温水中でも同様に、引張せん断、T 型はく離ともに吸水

処理の初期から強度が低下し、5日後で約15%、20日後には約20%低下する。

Fig.6に80℃、95%RHでの引張せん断試験時の荷重-変位曲線の変化の代表例を示す。荷重付加直後の曲線がほぼ一致することから、継手としての弾性率はほとんど変化していないことがわかる。

なお、吸水処理による接着強度の低下は、構造用接着剤Bにおいても同様に認められた。

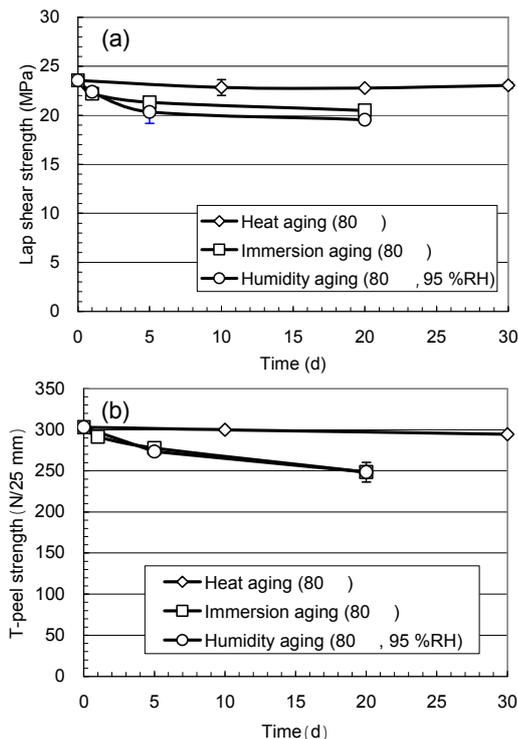


Fig.5 Change of Bonding Strength of (a) Lap Shear Joint, (b) T-Peel Joint of Adhesive A

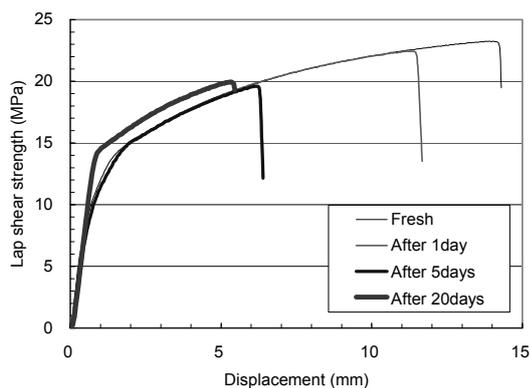


Fig.6 Change of Relation between Lap Shear Strength and Displacement of Adhesive A After Water Absorption at 80°C Under 95%RH

2.3 化学結合状態

吸水前後の構造用接着剤の化学結合状態の変化を試験片の接着破面をフーリエ変換赤外分光分析計 (FT-IR, パーキンエルマー製 Spotlight 400) を用い、全反射測定

(ATR) 法にて調べた。測定スポット径は約 0.1 mmである。吸水処理後の試験片の接着剤層のFT-IRスペクトルの経時変化をFig.7に、構造用接着剤A, BそれぞれのFig.7の四角部の拡大をFig.8に示す。エポキシ樹脂由来のピークには変化が見られないことから、主剤であるエポキシ樹脂自体には変化がないと考えられる。一方、吸水処理時間の経過に伴い、1,648 cm⁻¹に見られるアミド基由来のピークは強度が減少し、1,730 cm⁻¹に見られるカルボキシル基由来のピークは強度が増加している。

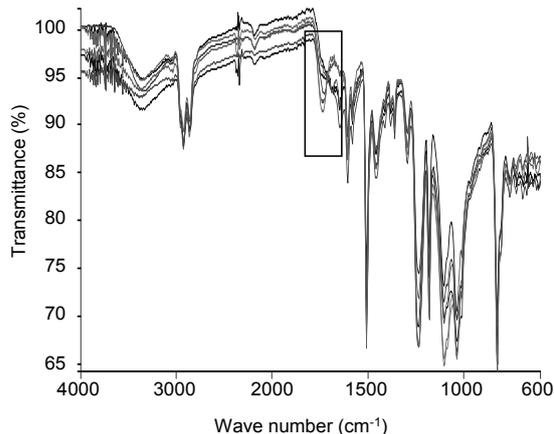


Fig.7 Change of FT-IR Spectra of adhesive Layer After Water Absorption at 80°C Under 95%RH

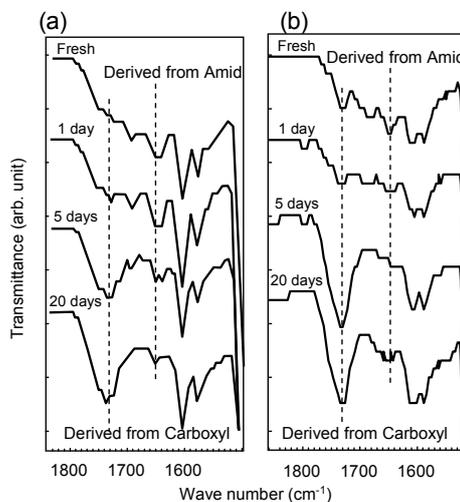


Fig.8 Magnified Figures of Square Place in Fig.8 (a) Adhesive A, (b) Adhesive B

吸水処理により、アミド基由来のピークは強度が減少し、カルボキシル基由来のピークは強度が増加した原因として、Fig.9に示すように接着剤中のウレタン成分とエポキシ樹脂間の結合が加水分解したことが考えられる。一般的にエポキシ系の接着剤には、柔軟性を付与する目的でウレタン成分 (ウレタンゴムなど) が添加されている。吸水前は、エポキシ樹脂のヒドロキシル基とウレタンのイソシアネート基がウレタン結合しており、この結合に含まれるアミド基により、アミド基由来のピークが確認された。吸水後は、

ウレタン結合の加水分解によりカルボキシル基が生成し、カルボキシル基由来のピークが確認されたと考える。

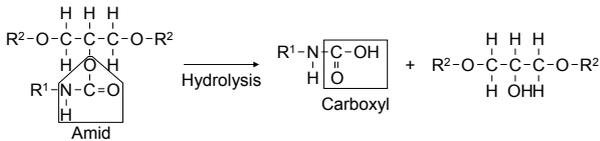


Fig.9 Inference of Chemical Reaction

他の原因として、自動車技術会 疲労信頼性部門委員会 接合構造疲労評価W/G接着サブW/Gにおける構造用接着剤の吸水劣化現象の調査では、1,648 cm⁻¹のピーク強度の減少と 1,730 cm⁻¹のピーク強度の増加は、①尿素結合、②アミド結合の加水分解のいずれかに起因すると推定されている。加水分解反応の序列から尿素結合が加水分解を受けた可能性が高いと結論づけられている⁽⁴⁾。

どちらの場合も、接着強度の低下は、樹脂の架橋構造が加水分解によって切断され、接着剤バルクの強度が低下したことに起因すると考えられる。

3. 劣化指標

本研究では、ピーク強度の変化を定量化するため、(1)式のようにカルボキシル基由来のピーク強度 (I_c) とアミド基由来のピーク強度 (I_a) の比をとり、フレッシュ試験片のピーク強度比の値 (構造用接着剤Aで $I_{c0}/I_{a0}=0.58$, Bで $I_{c0}/I_{a0}=0.54$) を減じた値を加水分解度合い (D_h) と定義する。通常FT-IRのピーク強度では測定サンプル間の直接比較は困難であるが、このようにピーク強度比で定義することで、測定サンプル間の比較が可能となる。

$$D_h = \left(\frac{I_c}{I_a} \right) - \left(\frac{I_{c0}}{I_{a0}} \right) \quad (1)$$

構造用接着剤 A, B において、50 °Cから 80 °C, 95% RH の高温高湿環境下で吸水処理を行ったときの加水分解度合いの時間変化をそれぞれ Fig.10, 11 に示す。どの温度でも時間の経過とともに加水分解は進んでいるが、温度が高いほうが顕著に進んでいることがわかる。

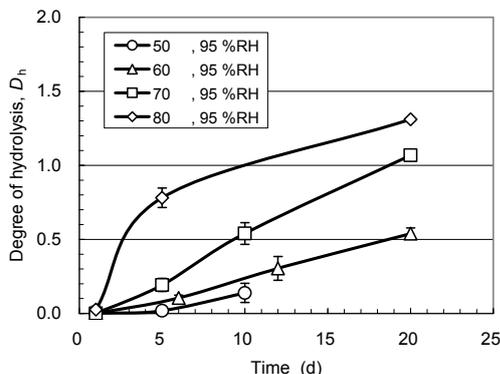


Fig.10 Change of Degree of Hydrolysis of Adhesive A

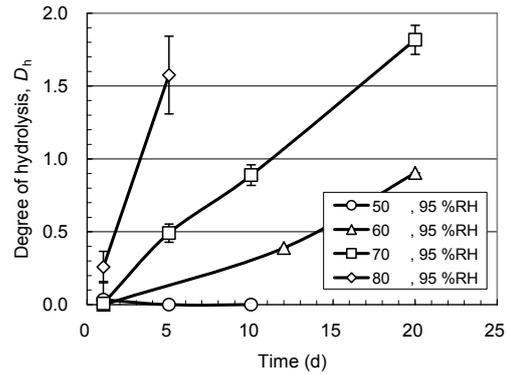


Fig.11 Change of Degree of Hydrolysis of Adhesive B

構造用接着剤 A, B の加水分解度合いと接着強度の関係を Fig.12, 13 にそれぞれ示す。一般的に、引張せん断の場合は、被着体である鋼板と接着剤の界面端部に応力が集中し、そこが起点となり破断に至る。そこで、加水分解度合いは破壊の起点となる接着剤界面端部で評価した値を使用した。加水分解度合いと接着強度は対数で回帰すると高い相関がある。このことから、加水分解度合いは接着強度の劣化指標として用いることができると考える。

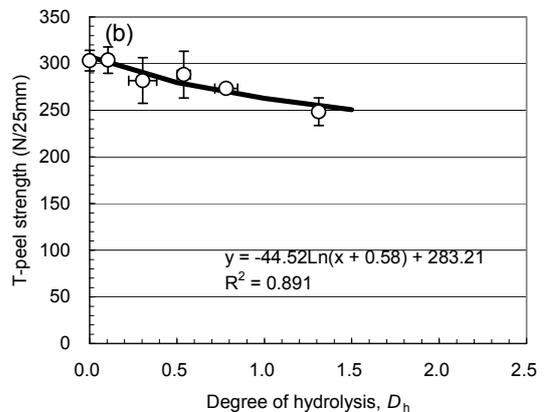
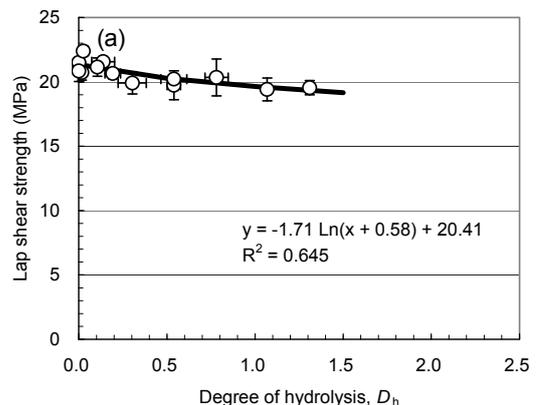


Fig.12 Relationship between Degree of Hydrolysis and (a) Lap Shear Strength, (b) T-Peel Strength of Adhesive A

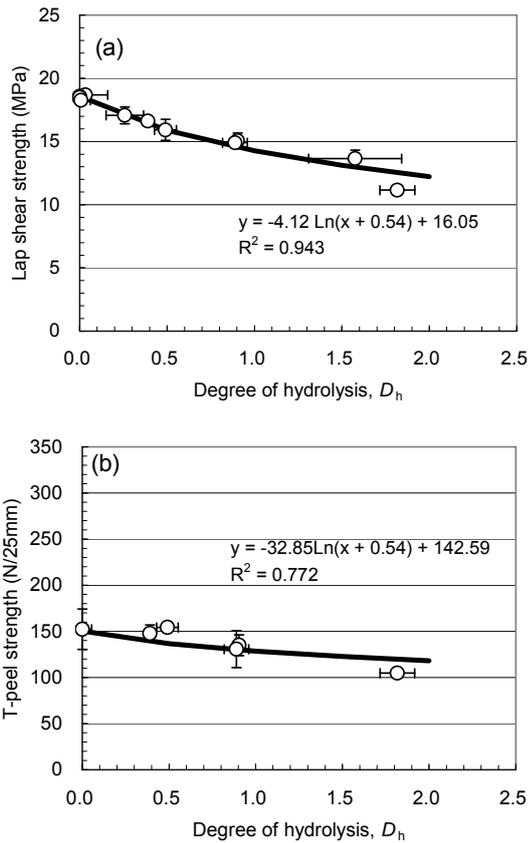


Fig.13 Relationship between Degree of Hydrolysis and (a) Lap Shear Strength, (b) T-peel Strength of Adhesive B

4. 市場劣化の推定

今回評価した構造用接着剤と同じ接着剤を使用した中古車両を市場から回収し、FT-IRスペクトルを測定した結果をFig.14に示す。この車両は高温多湿地域で7年間走行したものである。Fig.9の結果と同様、1,648 cm⁻¹に見られるアミド基由来のピークは強度が減少し、1,730 cm⁻¹に見られるカルボキシル基由来のピークは強度が増加していることが確認できる。

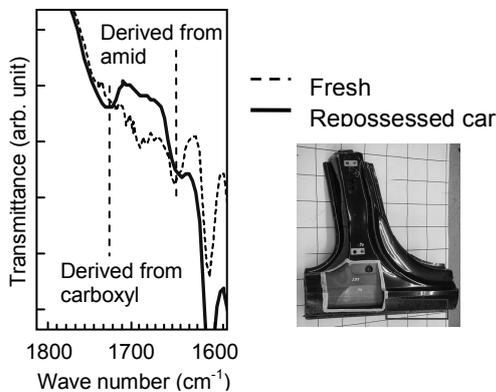


Fig.14 An Example of FT-IR Spectra of Adhesive Layer of Weld-Bonding Part

Fig.14 で示した市場回収車両の加水分解度合いは 0.64 となり、Fig.12 に当てはめると、本研究に用いた条件（厚さ 1.0mm の SPCC）において、引張せん断、T 型はく離強度とも約 10%の接着強度低下に相当する。また、この 1 台の結果からであるが、Fig.10 に当てはめると高温多湿地域で 7 年相当の加速試験条件は、70 °C、95%RH で約 12 日、80 °C、95%RH で約 4 日に相当すると考えらえる。

5. まとめ

一液熱硬化型のエポキシ系構造用接着剤を対象に、吸水劣化現象を定量化し、市場での経時劣化の推定を可能にした。すなわち、構造用接着剤の吸水による経時劣化は、加水分解度合い（FT-IR のカルボキシル基とアミド基のピーク強度比）を用いることで、接着強度と相関をもって把握できる。

最後に、本研究開発を進めるにあたり多大なご協力をいただいた東京工業大学 佐藤千明准教授に深くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 佐藤千明ほか：自動車構造用接着接合部の吸水劣化，日本接着学会第 48 回年次大会公演論文集，p.199-202 (2010)
- (2) 加藤晴也ほか：耐衝撃性構造用接着剤の開発，自動車技術会学術講演会前刷集 No.134-08, p.5-7 (2008)
- (3) 氷室雄也ほか：構造用接着剤の吸水劣化メカニズムの解明，自動車技術会論文集 Vol.43, No.2, p.543-548 (2012)
- (4) 山本研一ほか：構造用接着剤の吸水劣化現象の調査，自動車の強度信頼性の明日を担う接合技術と実験技術，p.58-63 (2010)

■ 著 者 ■



氷室 雄也



定井 麻子



松井 恵子



住田 弘祐



山本 研一

論文・解説

44

耐熱性と低温活性を両立した貴金属シングルナノ触媒 PGM Single-Nano Size Catalyst with High Thermal Stability and Low-Temperature Activity

赤峰 真明*1
Masaaki Akamine
住田 弘祐*4
Hirosuke Sumida

岩国 秀治*2
Hideharu Iwakuni
重津 雅彦*5
Masahiko Shigetsu

國府田 由紀*3
Yuki Koda
高見 明秀*6
Akihide Takami

要約

本研究では、耐熱性と低温活性の両立を狙い、貴金属の凝集抑制に優れた貴金属シングルナノ材料を微粒子化させ、この微粒子を耐熱性の高い酸化物上に分散担持させた新規触媒について検討した。本触媒は、耐久前後にて従来触媒と比較してガス浄化反応に重要な貴金属粒子数が増加していた。更に、エンジン耐久後の実車エミッション試験では、エンジン排気マニホールド直結位置 (Hot End) にて、本触媒は従来触媒よりも約 30%少ない貴金属使用量で、同等浄化性能を示した。耐久後の酸素吸蔵放出性能についても従来触媒よりも優れており、レアアース (セリア材) 削減の可能性が示唆された。

Summary

Aiming to achieve both thermal stability and low-temperature activity, a study on a new catalyst was pursued. PGM (Precious Group Metals)-single-nano-material which excels in controlling the sintering of the PGM was made into fine particles, which were dispersed on a thermostable oxide. Compared to the current catalyst, the new catalyst showed the increase in number of the PGM particles after a durability test, which are important for gas purification reactions, and at the vehicle emission test after the dynamometer aging test, it achieved the same level purification performance by 30% less amount of the PGM in the closed-coupled layout (Hot End). Oxygen storage capacity after the durability test was also larger than that of the current catalyst, suggesting the possibility of reduction in the use of rare earth (Ceria material).

1. はじめに

これまでガソリンエンジン搭載車に対して、大気のクリーン化とCO₂低減を実現するため、三元触媒 (TWC) の高性能化、精密エンジン制御システムの構築、エンジンの高効率化など、様々な開発がなされてきた。今後も、グローバルに排出ガス規制及び燃費規制強化が計画されており、新興国成長等による市場拡大、希少資源の枯渇などを考慮すると、ガソリン用TWCに対しては、レアメタル (貴金属) やレアアース (セリア材) といった希少元素の使用量を低減した上で、優れた触媒性能を発揮させることが必須である。そこで、各自動車メーカーは、少ない貴金属使用量で、十分な触媒性能を発揮させるため、触媒劣化抑制技術

の開発に注力している^{(1)・(3)}。

ガソリンエンジンから排出される有害なガスのほとんどは、エンジン冷間時の始動直後に排出されるため、各社とも短時間で TWC の機能が発現する温度に昇温させるために有利なエンジン排気マニホールド直結位置 (Hot End) へ触媒を配置している場合が多い。この場合、触媒が 800°C を超える高温にさらされる頻度が増加し、長時間走行後に、ガス浄化反応に重要な役割を果たす貴金属が凝集 (シンタリング) し、劣化するため触媒性能が大幅に悪化する。従って、直結位置の触媒は、使用過程時の劣化分をあらかじめ考慮して貴金属使用量を増やして対応している。すなわち、直結位置において、少ない貴金属使用量で優れ

*1~6 技術研究所
Technical Research Center

た触媒性能を発揮するには、低温からの触媒活性と高い耐熱性を有す触媒材料が必要となる。

本稿では、貴金属の凝集抑制に有効な貴金属シングルナノ触媒技術⁽⁴⁾⁽⁵⁾を進化させ、研究を行った結果、直結位置 (Hot End) でも少ない貴金属使用量で、耐熱性と低温活性を両立させた触媒技術を開発したので報告する。

2. 開発コンセプト

熱による貴金属の凝集抑制に優れた貴金属シングルナノ触媒技術のポイントは、ガス浄化反応に重要な浄化機能を有す貴金属を酸化物 (サポート材) の結晶粒子間に配置し、適度な結合力で固定化することで、浄化性能を保持したまま貴金属の移動を抑制できるというものである。そのため、耐久前後で貴金属の凝集によるサポート材表面の貴金属粒子数の減少はほとんどなく、触媒性能の劣化は少ない。

しかし、直結位置で優れた触媒性能を発揮させるためには、耐熱性に加え、更なる低温活性の向上が必要となってくる。そこで、Fig.1 のような開発コンセプトを構築した。

まず、貴金属シングルナノ材料のサポート材酸化物を微粒子化し、使用した貴金属の多くを材料表面へ高分散化させ、ガス浄化反応に有効な貴金属粒子数を増加させることで、低温からの反応性を向上させる。

次に、微粒子化した貴金属シングルナノ触媒サポート材が、表面活性エネルギーの増加により、熱より凝集しやすくなっており、そのままだと耐久後には増加した活性点の増加効果が失われる。そこで、耐熱性が高い酸化物 (本開発ではアルミナを使用) 上に微粒子を担持することで、耐久後もサポート材微粒子同士の距離を離すことが可能な材料構造を得ることを考えた。これにより、サポート材微粒

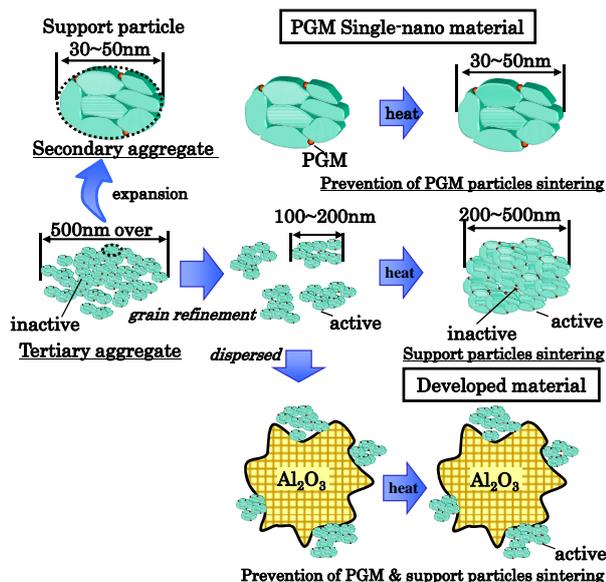


Fig.1 Concept of Small Particles Sintering Prevention

子化により増加した材料表面の排ガスとの反応に有効な貴金属粒子数がサポート材微粒子の凝集により減少することなく維持され、耐久後も優れた低温活性を発揮できる。

本開発では、この構造を有した触媒材料を得ることにより耐熱性と低温活性を両立させることを開発の目標とした。

3. 実験

3.1 物性解析

開発材料は、Rhを含有したCeO₂-ZrO₂系の貴金属シングルナノ材料 (Rh-Ce-Zr-X-O) を用い、微粒子化技術の適用前をCatalyst A、適用後をCatalyst Bとした。微粒子の凝集抑制効果の検証には、Catalyst A mixed with Al₂O₃, Catalyst B dispersed on Al₂O₃ (Catalyst A (B) : Al₂O₃=1:9) とし、物性解析には粉末を用いた。エージング条件は、初期条件が 500°C, 2hr, Air, 長期使用後条件が、1,000°C, 24hr, 2%O₂ 10%H₂O/N₂ balanceであった。

(1) 材料構造解析

サポート材の比表面積は BET 一点法、三次凝集粒子の粒子径はレーザ回折式粒度分布測定装置により評価した。微細構造・結晶構造の解析は、透過型電子顕微鏡 (TEM) と X 線回折装置 (XRD) により評価した。

(2) 材料表面の貴金属粒子数の定量

初期の材料表面の貴金属 (Rh) 粒子数の測定は X 線光電子分光法 (XPS)、エージング後の材料表面 Rh 粒子数は、CO 吸着法を用いて評価した。いずれも含有他元素との関係、検出性を考慮し、選択した。

3.2 触媒性能評価

(1) 酸素放出特性

開発材料 (粉末) の酸素放出特性は、水素 (H₂) を還元剤とした昇温還元脱離法 (TPR) を用いて評価した。現行量産三元触媒をベースに開発材料を導入した開発三元触媒の酸素吸蔵放出性能は、固定床流通式反応装置を用い、触媒担体前後にリニア酸素センサを配置し、リッチ、リーン切り替え時の応答差から算出した。

(2) ラボ触媒性能評価と実車評価

ラボにおける三元触媒の浄化性能は固定床流通式反応装置で行った (耐久条件: 台上実機エンジン 900°C, 50hr)。

実車エミッション試験は、直列 4 気筒 2.0L のガソリンエンジンを搭載した車両を用い、EU モード走行時の排出ガス量を測定し、行った。評価触媒は、担体容量: 1.0L, 担体セル密度: 3.5mil/600cpsi であった (耐久条件: 台上実機エンジン 900°C, 100hr)。

4. 結果と考察

4.1 微粒子化技術の適用効果

貴金属シングルナノ材料に微粒子化技術を適用した場合の粒度分布を Fig.2 に示す。微粒子化前の平均三次粒子径は約 700nm であった。これに対し、微粒子化後の平均三次粒子径は約 150nm で、約 1/4 のサイズとなっていることを確認した。

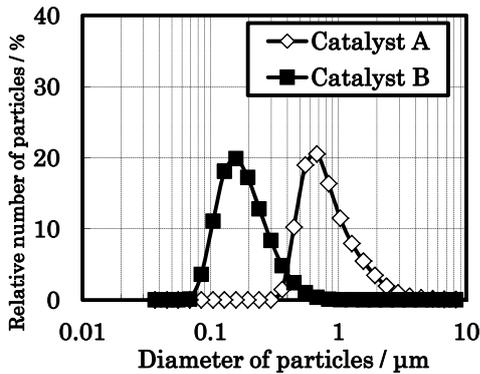


Fig.2 Diameter of Particles at Fresh (500 °C, 2hr, Air)
Catalyst A : Before grain refinement
Catalyst B : After grain refinement

4.2 微粒子化した貴金属シングルナノ材料のエージングによる比表面積及び材料構造への影響

貴金属シングルナノ材料に微粒子化技術を適用した場合の比表面積をTable 1, TEM観察の結果をFig.3, X線回折の結果をFig.4 にそれぞれ示す。Fig.3-aにおいて、微粒子化前後(初期)を比べると、従来粒子(Catalyst A)が一つの凝集体を形成しているのに対し、微粒子化したCatalyst Bは粒子間に空隙が存在し、三次凝集体が解砕された状態であると推測する。しかし、Catalyst Bは、エージングによる比表面積の大幅な低下(Table 1 ; 約 70m²/g → 約 5m²/g)、サポート材粒子の凝集(Fig.3-a)、及び結晶構造の分相(Fig.4 ; 2θ=34°付近のピークに(110) tetragonal相が存在)がそれぞれ認められた。Catalyst Aには、同様の変化が認められないことから、微粒子化時にサポート材粒子に強い物理的なエネルギーが加えられたこと

Table 1 Comparison of B.E.T. Surface Area at Fresh (500°C, 2hr, Air) and Aged (1,000°C, 24hr, 2%O₂, 10%H₂O/N₂ Balance)

Catalyst	Grain refinement treatment	B.E.T. Surface area (m ² /g)	
		Fresh	Aged
Catalyst A	not	74.8	39.3
Catalyst B	done	68.6	5.6
Catalyst A mixed Al ₂ O ₃ ^{*1}	not	163.4	112.2
Catalyst B dispersed on Al ₂ O ₃ ^{*2}	done	168.3	111.1
Ref. Al ₂ O ₃	-	167.7	121.0

*1 : Ratio of Catalyst A : Al₂O₃ = 1 : 9

*2 : Ratio of Catalyst B : Al₂O₃ = 1 : 9

で、表面活性エネルギーが高くなり、微粒子そのものだけでは、十分な耐熱性を有していないことが確認できた。

そこで、微粒子の凝集を抑制するため、微粒子を耐熱性の高いアルミナ表面上に分散担持した開発材料 : Catalyst B dispersed on Al₂O₃について、同様の解析を行い、効果を検証した。比表面積は微粒子化前の材料とアルミナの混合物 : Catalyst A mixed Al₂O₃とほぼ同等 (Table 1)、結晶相は、微粒子のみの場合に認められたtetragonal相は検出されなかった (Fig.4)。また、Fig.3-bからエージング後の微粒子の凝集も抑制されていた。以上から、耐熱性の高いアルミナ上へ微粒子を分散担持させることで、微粒子の分散性が向上し(微粒子間の距離が充分確保され)、微粒子の凝集が抑制されたと推測する。

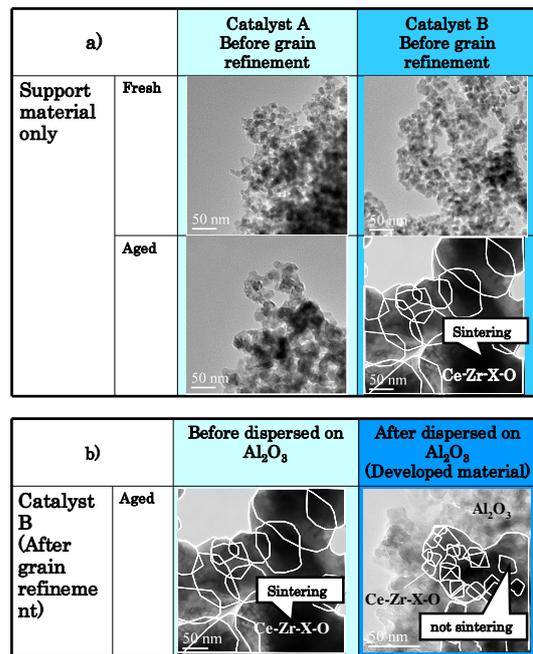


Fig.3-a Comparison of Secondary Particles of PGM Single-Nano Material Before or After Grain Refinement Treatment, 3-b Before Or After Dispersed on Al₂O₃

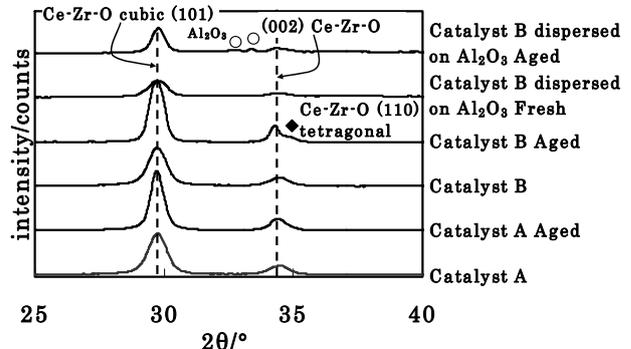


Fig.4 Comparison of Crystalline Structure of Developed Material (XRD)

Sample information (Fig.3, 4)

Catalyst A; Before grain refinement, Catalyst B; After grain refinement, Ratio of material composition; Catalyst B: Al₂O₃ = 1 : 9, Aging condition; Fresh : 500°C, 2hr, Air, Aged : 1,000°C, 24hr, 2%O₂, 10%H₂O/N₂ balance

4.3 微粒子化した貴金属シングルナノ材料サポート材表面における貴金属粒子数の解析

(1) 使用初期の粒子表面 Rh 粒子数

貴金属シングルナノ材料を微粒子化した場合の使用初期時の材料表面における貴金属粒子数の XPS による測定結果を Fig.5 に示す。微粒子化した貴金属シングルナノ材料は、微粒子化前と比較して、材料表面の Rh 粒子数が約 1.6 倍に増加していることが認められた。これは、微粒子化により貴金属シングルナノ三次凝集体がほぐれ、表面積が増加したことによって、結晶子間に存在する Rh 粒子の露出量が増加したためと考えられる。

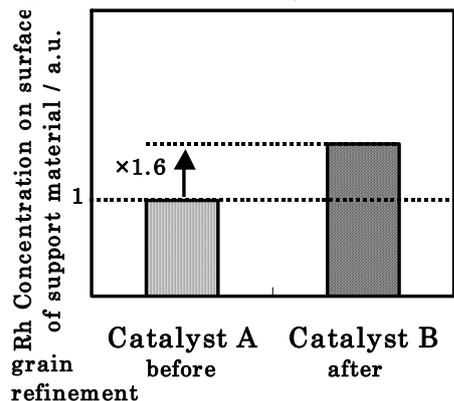


Fig.5 Rh Concentration on Surface of Particles at Fresh (500°C, 2hr, Air)

(2) エージング後の粒子表面 Rh 粒子数

開発材料 (Catalyst B dispersed on Al₂O₃) のエージング後の材料表面Rh粒子数は、検出性や含有する他元素の影響を考慮し、COパルス吸着法を用いて測定した (Fig.6)。初期時と同様、エージング後においても、開発材料は、従来材料 (Catalyst A mixed with Al₂O₃) よりも、材料表面のRh粒子数が約 30%増加した。これは、微粒子化により解砕されたサポート材粒子がAl₂O₃上に分散し、加熱時においても凝集せず、初期時に増加したRh粒子数を維持していることが示唆された。

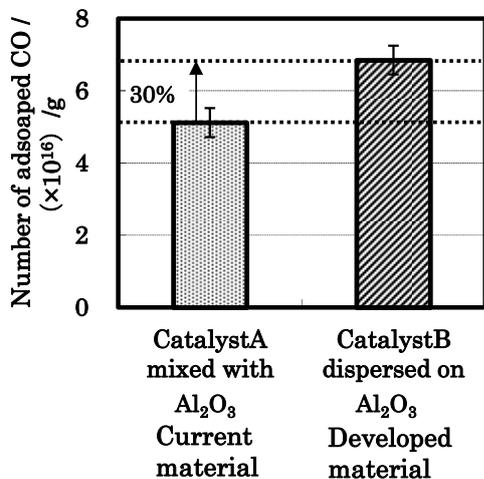


Fig.6 Numbers of Rh Particles after Aging (1,000 °C, 24hr, 2%O₂, 10%H₂O/N₂ Balance)

4.4 開発材料の酸素吸蔵放出特性

微粒子化した貴金属シングルナノ材料をアルミナ表面上に分散担持した触媒の室温~600°Cの範囲における酸素放出量を Fig.7 に示す。比較のため、現行量産触媒に含まれる Rh 担持材料 (Catalyst C) とアルミナの混合品のデータも合わせて示した。エージング後における酸素放出量は、低い順に Catalyst C とアルミナの混合品、従来貴金属シングルナノ材料 (Catalyst A) とアルミナの混合品、開発材料 (Catalyst B) のアルミナ上高分散品の序列であり、本開発材料が最も高いことが認められた。これは、微粒子化により材料表面の Rh 粒子数が増加したことに加え、エージング後の微粒子の分散性が維持されたことによって、貴金属を介してサポート材から放出される酸素量が増加したためと考えられる。すなわち、本開発材料は、同じレアアース量で、酸素放出量を 70%向上できることから、要求される酸素放出量が同じであれば、レアアースの使用量を低減できる可能性が示唆された。

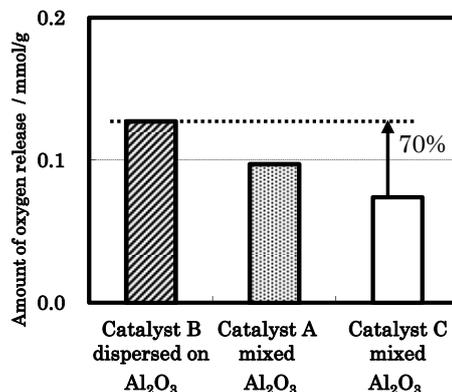


Fig.7 Amount of Oxygen release for TPD After Aging Measurement temp.; r. t.-600

Catalyst A; Before grain refinement, Catalyst B; After grain refinement, Catalyst C; Rh loaded Ce-Zr-X-O
Ratio of material composition; Catalyst A (B, C): Al₂O₃=1:9
Aging condition; 1000 °C, 24hr, 2%O₂, 10%H₂O/N₂ balance

4.5 開発三元触媒の浄化特性及び酸素吸蔵放出特性

現行量産触媒をベースに開発材料を適用したモノリス触媒 (開発三元触媒) を作製し、ガス浄化性能を評価した結果を Fig.8 に示す。開発三元触媒は、現行の三元触媒より、

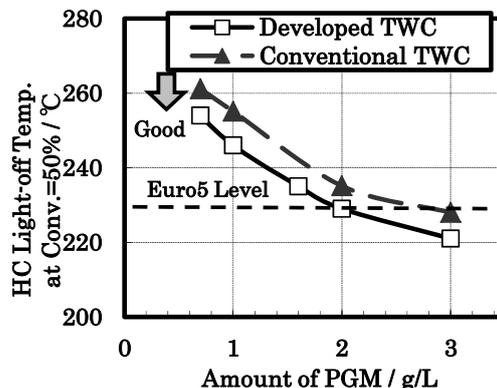


Fig.8 Light-off Performance of Developed TWC After Dynamometer Aging (900°C, 50hr)

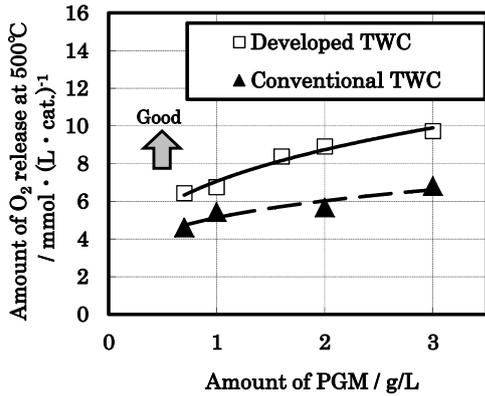


Fig.9 Amount of Oxygen Release of Developed TWC at 500°C After Dynamometer Aging (900°C, 50hr)

Euro5 規制レベルにおいても、約 30%少ない貴金属量で、同等以上の浄化性能を示した。耐久条件、要求浄化特性によっては約 30~50%の貴金属量低減可能な結果を得ている。

同様に、酸素吸蔵放出性能の評価結果を Fig.9 に示すが、開発三元触媒は、現行量産三元触媒と比較して、少ない貴金属担持量で同等以上となった。

4.6 開発三元触媒の実車エミッション性能

Fig.10 に示すように、直列 4 気筒エンジンの直結位置に、加速耐久後の開発三元触媒を取り付け、EU モード走行時の触媒後のエミッション排出量（量産三元触媒の排出量を 100 とする）を Fig.11 に示す。

量産三元触媒と比較した結果、本開発材料を導入した開発三元触媒は、少ない貴金属量でも同等のエミッション浄化性能を有していることが確認できた。

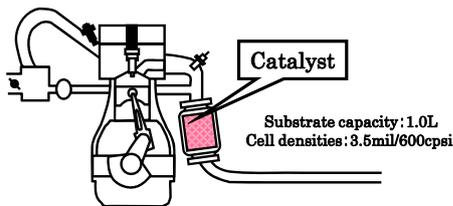


Fig.10 Catalyst Layout in Exhaust System for Emission Test

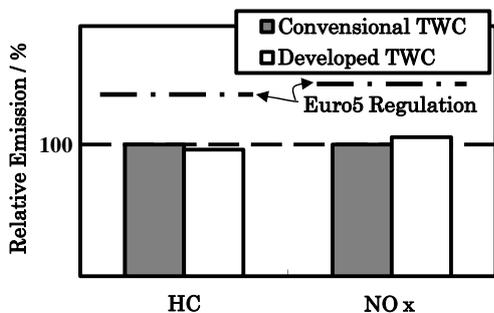


Fig.11 Result of Emission Test on the Vehicle in EU Mode Test
Amount of PGM; Conventional TWC = 1.0g/L, Developed TWC = 0.7g/L

5. まとめ

本開発の検討結果より、以下の知見が得られた。

- (1) 貴金属シングルナノ触媒技術を適用したサポート材の平均三次粒子径を約 150nm レベルまで微粒子化した結果、材料表面の Rh 粒子数が増加した。
- (2) 貴金属シングルナノ材料の微粒子をアルミナ上に分散担持させることで、微粒子の凝集が抑制できた。
- (3) 開発技術は、セリア材量一定で、酸素吸蔵放出量を従来材料よりも約 70%向上した。
- (4) 開発材料を適用した三元触媒は、量産車種に展開され、従来触媒と比較して約 30~50%の貴金属量低減を達成している。

本開発触媒は、SKYACTIV エンジン搭載のデミオを皮切りに、順次グローバルに導入されている。

参考文献

- (1) 中村雅紀ほか：触媒中の貴金属使用量半減を可能とする超微細貴金属触媒の開発，自動車技術会論文集，Vol. 40, No.4, p. 985-990 (2009)
- (2) Nobuyuki Takagi, et.al : Sintering Mechanism of Platinum Supported on Ceria-Based Oxide for Automotive Catalysts, SAE Paper, No.2006-01-0413 (2006)
- (3) 高見明秀ほか：シングルナノテクノロジーを活用した貴金属微粒子含有三元触媒，自動車技術，Vol. 63, No.11, pp. 54-59 (2009)
- (4) 三好誠治ほか：優れた耐熱性を有する貴金属微量担持三元触媒の開発，自動車技術会論文集，Vol.39, No.5, pp. 139-144 (2008)
- (5) Hideharu Iwakuni, et.al : Development of PGM Single Nano Catalyst Technology, SAE Paper, No.2009-01-1079 (2009)

■ 著 者 ■



赤峰 真明



岩国 秀治



國府田 由紀



住田 弘祐



重津 雅彦



高見 明秀

論文・解説

45

世界初の廃車バンパから新車バンパへのマテリアルリサイクル World's First Material Recycling of ELV Bumpers into New Vehicle Bumpers

新田 茂樹*1 Shigeki Nitta	伊東 加奈子*2 Kanao Ito	森脇 健二*3 Kenji Moriwaki	古田 和広*4 Kazuhiro Furuta
田中 宣隆*5 Nobutaka Tanaka	松田 祐之*6 Yushi Matsuda	山崎 和重*7 Kazushige Yamasaki	小出 朋之*8 Tomoyuki Koide

要約

マツダ（株）（以下マツダ）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、マツダ車をご購入して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。このビジョンの下、燃費向上などの地球温暖化抑制とともに、資源循環にも積極的に取り組んでいる。

マツダは廃棄処分された使用済自動車のバンパ（廃車バンパ）を新車バンパの材料としてリサイクルする技術を世界で初めて実用化（2011年8月現在 マツダ調べ）し、2011年8月21日生産分よりピアンテのリヤバンパ用として使用を開始した。

これは、1990年代から取り組んできたリサイクルしやすい設計、廃車バンパの効率的な回収、塗膜除去率向上技術などを組み合わせること、で達成した。

Summary

Under the “Sustainable Zoom-Zoom” long-term vision for technology development, Mazda announced it would provide all customers who purchase Mazda vehicles with driving pleasure as well as outstanding environmental and safety performance. Based on this vision, Mazda has been making active efforts to reduce global warming, such as improving the fuel economy, and also working on cyclical use of resources.

Mazda developed and put into practical use the world's first technology to recycle scrapped bumpers from end-of-life vehicles (ELVs) into a raw material for new vehicle bumpers (As of August 2011; Mazda data). This technology was first translated into practical applications on August 21, 2011 to produce rear bumpers for the Mazda Biante.

The practical application of bumper recycling technology was realized in combination of numerous techniques, including the engineering technique that makes the recycling easier, efficient collection of ELVs' scrapped bumpers, and the paint film removal technique.

1. はじめに

マツダは、サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言のもと、さまざまな領域においてCO₂削減など環境保護活動を行っている。その中で、限りある資源を有効に活用するため徹底した再資源化と廃棄物削減に取り組んでいる。

マツダは、自動車のライフサイクル全過程において資源循

環の取り組みを行っている。その中で、使用済み部品の回収・リサイクルでは、系列ディーラーから回収した損傷バンパから新車バンパへのリサイクルを業界に先駆けて推進してきた。この度この損傷バンパのリサイクルで培った技術を廃車バンパに応用し新車バンパの材料としてリサイクルすることを可能にした。

本稿では、マツダの資源循環の概要と世界初の新車バンパ

*1,2 技術企画部
Technology Planning Dept.

*7 第1車両製造部
Vehicle Production Dept. No.1

*3,4 技術研究所
Technical Research Center

*8 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

*5,6 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

リサイクルの取り組みについて紹介する。

2. マツダにおける資源循環と廃棄物削減の取り組み

最初にマツダにおける自動車のライフサイクル全過程における資源循環⁽¹⁾の取り組みを述べる。

2.1 開発・設計

新車のリサイクル性を向上させるため、以下の取り組みを進めている。

(1) 解体・分解容易な車両の設計, 解体技術の研究

1990年代よりリサイクル可能な部品や素材を回収しやすくすることに取り組んできた。例えば、バンパでは解体時に短時間に一体で取り外せる構造を追求してきた。2008年発売のアクセラからは、バンパ下部の締結部分に、強く引くと外れやすくなる薄肉構造を採用し、バンパ開口部には引っ張り時にバンパが破断せず一体で外せるよう補強した。インストルメントパネルでは、締結部を離脱させやすい構造とすることで、解体時に引っ張ると容易に外れるよう工夫している。ハーネスのアース端子は、引き抜く際に端子部がちぎれ、ハーネスが残りにくい構造にしている。

(2) リサイクルしやすい樹脂材料の採用

ASR (Automobile Shredder Residue:自動車シュレツダダスト) の構成重量の多くを占める樹脂についてリサイクルしやすい材料を採用している。例えば、AT シフトノブにはオレフィン系熱可塑性エラストマ (TPO) を採用し、ダッシュインシュレータは、遮音材を同素材の熱可塑性フェルトに統一している。

2.2 生産

2008年度に本社(広島)、三次事業所、防府工場 西浦地区、防府工場 中関地区(開発など間接領域も含む)の国内主要4拠点で全埋め立て廃棄物量の完全ゼロを達成し、以降もこれを継続している。これは、副生物・廃棄物の発生量削減と分別・リサイクル強化を進めることによって達成した。

2.3 物流

容器のリターナブル化や包装仕様の簡素化、資材の再利用などのマツダの物流領域で3R活動(リユース, リデュース, リターナブル)を推進している。2011年度は、1990年度比40%以上削減の目標に対して、梱包・包装資材使用量を43.4%削減した。

2.4 使用済自動車の回収とリサイクル

(1) 日本での使用済自動車のリサイクル

日本の自動車リサイクル法に基づき指定3品目(フロン類, エアバッグ類, ASR)を適切に処理するだけでなく、独自の技術や取り組みにより、積極的にリサイクルを行っている。特にASRについては、日産自動車(株)、三菱自動車

(株)など13社で設立した「ART (Automobile shredder residue Recycling promotion Team)」を通じて法令順守とリサイクル率向上を推進している。また、販売会社ではリサ

イクル料金の受け取り、使用済自動車の最終所有者からの引き取りと処理業者への引渡しについても適切に進めている。

(2) 海外(欧州・台湾・中国)での使用済自動車のリサイクル

海外でも各国・各地域の法律に基づいて自動車のリサイクルを推進している。欧州では、EU指令に基づき、リサイクル業者への解体マニュアルの提供および最終所有者から無償で廃車を回収するネットワークを構築している。台湾では、2008年からスタートした自動車リサイクルの自主取り組みに対応するため、販売店を通じて、リサイクル業者向けに解体マニュアルの提供などの活動を推進している。中国では、自動車リサイクル法の施行対応に向け、詳細情報を調査している。

(3) 使用済部品のリサイクル

マツダグループでは、認定解体業者と提携し、リユース部品の販売を行っている。また、販売会社で修理の際に交換したエンジンやトランスミッションを回収し、補修整備して、リビルド部品として販売している。2011年リビルド部品販売実績は、エンジン1,217台、トランスミッション1,333台であった。また、使用済バンパのリサイクルを行っており、次章に詳細を述べる。

(4) 非鉄金属・貴金属のリサイクルの取り組み

2009年から広島県の関連業者と共同で、自動車に使用されているハーネスや基板など希少価値の高い非鉄金属・貴金属を国内で資源循環する活動に取り組んでいる。更に、2011年度からは、モータ類からのレアアースのリサイクルや、使用済自動車の資源を国内で備蓄・循環する仕組みづくりに関連業者と共同で取り組んでいる。

3. 廃車バンパリサイクルの取り組み

3.1 バンパリサイクルの取り組み経緯

従来からマツダは国内販売会社の交換バンパ(以下市場損傷バンパ)の新車バンパへの材料の水平リサイクル(元と同等の部品/商品に使用)に積極的に取り組んでいる。修理・交換によって発生した市場損傷バンパは2011年度に79,575本(回収率79%相当)を回収し、新車の樹脂材料としてリサイクルした。

マツダのバンパリサイクル活動をTable 1に示す。

Table 1 Mazda Technology Development and Implementation on Bumper Recycling

Year	Contents
1992	Recycling damaged bumper to undercover was commenced.
2001	Recycling damaged bumper to bumper reinforcement was commenced.
2002	Recycling damaged bumper to grained bumper surface was commenced.
2003	A technology to recycle damaged bumper to smooth bumper surface was developed
2005	Continued recycling damaged bumper to smooth bumper surface was commenced

1992 年販売会社を通じて市場損傷バンパを回収し、アンダーカバーなどへの再生利用を開始した⁽²⁾。2001 年、機械式の塗膜除去技術を活用し、市場損傷バンパリサイクル材を新材と同等レベルの強度に高め、バンパ補強用部品への再利用を開始した。2002 年、塗膜除去条件を最適化し、塗膜除去率を 98.5%まで向上させ、同年 7 月からボンゴフレンドィのシボ面バンパへの再生利用を開始した⁽³⁾。2003 年、(株)サタケと共同で光学選別技術を組み合わせた新しい塗膜除去技術を開発し、リサイクル材の塗膜除去率を 99.85%へと高め強度・品質とも高い要件が求められる通常の塗装バンパへの再生利用が可能な技術を確認した^{(4),(5)}。2005 年、それまでの技術確立を基に、市場損傷バンパを新車のバンパ材料として継続的に再利用することを開始した。これらの活動や技術開発がベースとなって、廃車バンパリサイクルにつながった。

3.2 廃車バンパから新車バンパへのリサイクルの課題

廃車バンパは製造から 10 年以上経過したものも多く、素材となるポリプロピレン材の物性や塗膜との密着性が現在の

新車バンパの材料と異なり、材料品質の確保に課題があった。また、廃車からのバンパの解体・回収に加え、フォグランプや締結用金属部品など異材質部品の分解除去にも工数がかかり、採算性の確保にも課題があり、新材に置換して利用することが難しい状況であった。

マツダは上述の課題に取り組み、世界で初めて廃車バンパの新車バンパへの再生利用を可能とした。具体的には Table 1 に示す技術開発や取組みの実績をベースにして、バンパ材料の品質管理手法としくみを構築し、経済性を考慮した効率的な廃車バンパの回収を実現したことである。これらをバンパが解体して分別しやすい設計構造を織り込んだ廃車が増加して来たタイミングを捉えて実施した。Fig. 1 に廃車バンパリサイクルのプロセスを示す。バンパ材料の品質確保および廃車バンパ回収の経済性の実現について以下に述べる。

3.3 バンパ材料の品質確保の取組み

(1) リサイクル材混入基準の設定

Table 2 に示すように、バンパ材料はアンダーカバー材料等とは異なり耐衝撃性や外観品質の要求が高い。そのためバンパは性能を確保するために、アンダーカバーよりも一層留意してリサイクル材に新材を混合することが必要である。製造時期が比較的新しい市場損傷バンパの場合は、リサイクル材の混入率を 30%としていた。廃車バンパは、市場損傷バンパよりも古い材料が多くなるので、これまでと同等の品質を確保するためには許容混入率を見直す必要があった。混入率を変えて実験をした結果、外観品質、成形時の収縮率、剛性などの要件を満足できるよう、廃車バンパのリサイクル材の混入率を 10%とした。

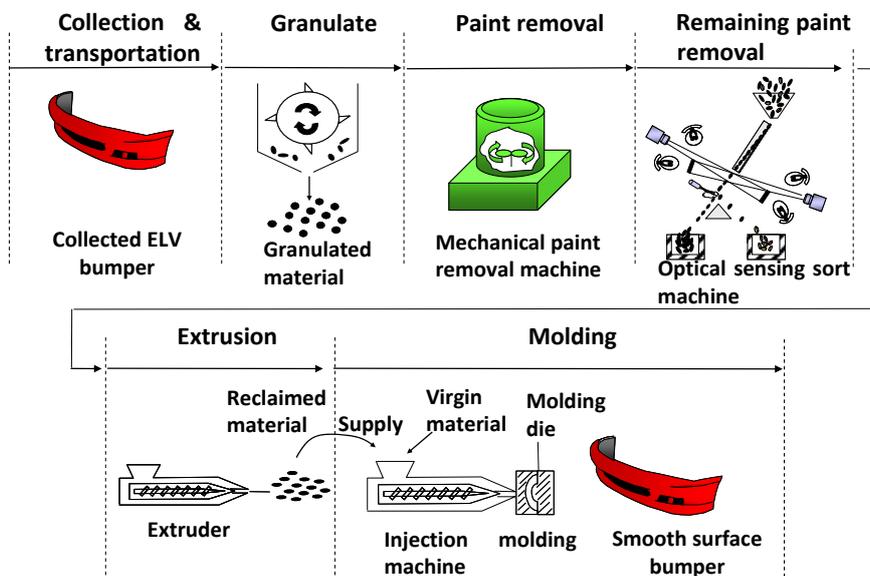


Fig. 1 Recycle Process of Bumper

Table 2 Application for the Reclaimed Material from Bumpers and Requirements⁽³⁾

:Full requirement, ◯:Partial requirement, ×:No requirement

Requirements Applications for the reclaimed	Strength Rigidity	Dimensional stability	Paint quality	
			Paint film performance	Surface appearance
Undercover. etc			×	×
Bumper reinforcement			×	×
Grain surface				
Bumper (without grain)				

(2) 塗膜除去目標および塗膜剥離

市場損傷バンパリサイクルで開発された塗膜剥離技術 (Fig.1 ③) が、廃車バンパリサイクルで活用できるか確認した。塗装されたバンパの粉碎材には塗料が存在し、鏡面バンパに適用するには外観品質の問題が生じるので、塗膜除去レベルをより厳しくする必要がある。鏡面バンパへのリサイクル材利用のため、塗膜除去率の目標は、市場損傷バンパの場合と同等の 99.85% に設定した (Table 3)。

Table 3 Setup a Target of the Paint Removal Rate⁽³⁾

:Paint surface appearance meets the requirement.
 ◯:Paint surface appearance does not meet the requirement.

Mixing rate into virgin material (%)	Remaining paint rate (%)	
	Present	Target
1		◯
3	0.045%	◯
10		●
20		●
30		●
5	5	5
100	1.500%	0.150%
Paint removal	98.50%	99.85%

Fig.1 ③に示す機械式塗膜剥離装置だけでは、この目標を達成できないので、Fig.1 ④光学式選別技術を用いた。

(3) 塗膜残存粉碎材の選別

市場損傷バンパリサイクルで開発した光学式選別技術が活用できるか確認した。Fig.1 ③に示す機械式塗膜剥離装置で塗膜剥離を実施した時の塗膜残存の構成率をFig.2 に示す。これを見ると、塗膜残存の無い粉碎材の構成率は 86%、10mm²未満の面積の塗膜が付着した粉碎材の構成率は 10%であった。また 10mm²以上塗膜が残存している粉碎材の構成率は 4%であった。この結果から 10mm²以上塗膜が残存した粉碎材を除去できれば、目標とした塗膜除去率 99.85%を達成できることが分かった。そこで、粉碎し塗膜除去した粉碎材を、Fig.1 ④に示す (株) サタケと共同開発した光学選別装置によって、塗膜が残存した粉碎材を除去した。

この選別機は、バンパ粉碎後に塗膜剥離処理した粉碎材を、選別機のホッパに投入し、シュータを通過後、所定の位置で

光と CCD センサにより、粉碎材を認識する。粉碎材に塗膜が付いていると、その色は塗膜残存無しの粉碎材 (黒色) よりも強い反射強度を放出するため、これを検知し、その直後

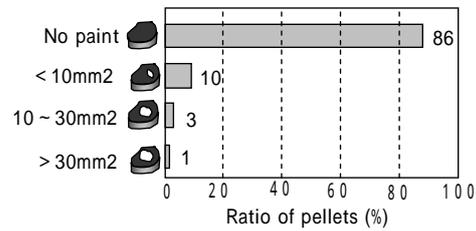


Fig.2 Remaining Paint Area on Pellets Processed for 65 Minutes in Present Paint Removal Process and Ratio of the Size⁽³⁾

にエアエジェクタにより、選別・除去するというものである。

この技術により選別された廃車バンパの粉碎材を、目標の 10%混入しても新車バンパとしての性能および外観品質目標を確保できることを確認した。なお、除去された塗膜付の粉碎材は、アンダーカバー等の性能要件が厳しくない部品にリサイクルし有効に活用している。

(4) リサイクル材の造粒

回収されるリサイクル材の場合、バンパとして古いもの、材料グレードの異なるもの等、多種多様なものが入ってくるため、これらを均一化させる必要がある。そのため、本リサイクル工程でも、事前にタンブラという機械の中に粉碎品を入れて、攪拌し、均一化している。その後、大きさを均一にするため、押出機を用いて材料を熔融混練させ、ペレットと呼ばれる米粒状の成形素材に加工している。

(5) バンパ材料の品質管理

前述のように、廃車バンパは製造時期が古いことに加え、製造時期により使用されている材料の物性も異なるので物性のバラツキが懸念される。そこでリサイクル材の流動性や強度・剛性などの主要物性を回収ロットごとに測定するとともに、万が一極端に物性が低い材料が入ったときは物性に応じて生産工場側で混入率を調整し品質保証するしくみとした。Fig.3 は、リサイクル材の曲げ弾性率とリサイクル材の新材への上限混入率を示している。Fig.4 は、リサイクル材の熔融流動率とリサイクル材の新材への上限混入率を示している。上限混入率が 10%までとなっているのは、成形時の収縮率など他の要件によるものである。回収ロットごとに、曲げ弾性係数と熔融流動率を測定し、Fig.3 および Fig.4 により、リサイクル材の混入率を管理することによって品質保証が可能となった。

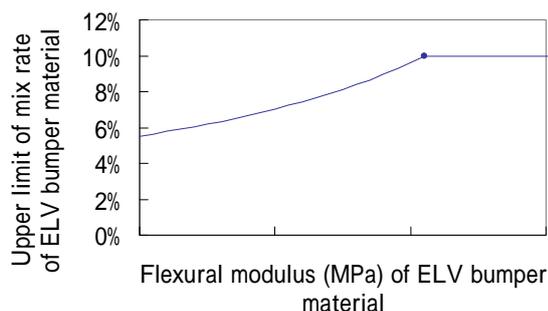


Fig. 3 Mix Rate of ELV Bumper Material by Flexural Modulus

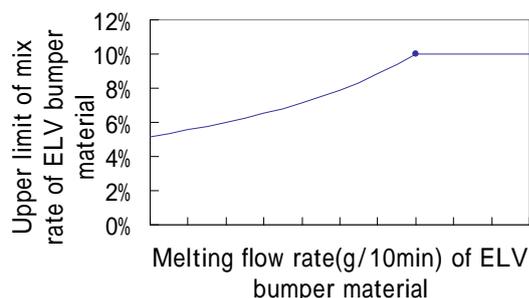


Fig. 4 Mix Rate of ELV Bumper Materials by Melting Flow Rate

(6) 成形

新材タンクと、リサイクル材タンクから、成形機の上に設けている計量混合機により所定の混入率でペレットを混合している。混合したペレットを、大型の射出成形機を用いて再び熔融して金型に射出し、バンパに成形している。

3.4 廃車バンパ回収の経済性の実現

(1) バンパ解体工数の削減

バンパにはラジエータグリル、フォグランプ、ブラケットなどバンパフェースと材質の異なる多くの部品がアセンブリされており、廃車からバンパを取り外したあと、それらの部品をバンパから除去するのに多くの費用がかかる。そこで廃車バンパリサイクル材の早期導入を目指し、リサイクルしやすい設計が織り込まれた車種を選定し、アセンブリ部品の少ないバンパに限定して回収することでリサイクルコストを下げることにした。

(2) 輸送手段の効率化

廃車解体拠点からリサイクル拠点への廃車バンパ輸送は、バンパ粉碎・再生を担当する高瀬合成化学(株)が、リサイクル材をバンパ製造拠点に運搬するトラックの帰り便を用いることで、効率良く輸送できるようにした。

4. まとめ

広島地区にて、マツダ車の廃車バンパを回収し、新車バンパの材料に約10%混入して再生利用するところからスタートした。現在、廃車から排出されるプラスチック、ゴムなどからなるASRは、車両重量全体の約20%であり、そのほとん

どが、サーマルリサイクルされている。中でもバンパは、樹脂部品の中では大きな部品であり、廃車バンパの回収・マテリアルリサイクルにより、ASRの削減と資源の有効利用が可能となる。

マツダは、現在の広島地区に限定した「廃車バンパ to 新車バンパ」リサイクルの他地域への拡大や、バンパをはじめとする先進的なリサイクル技術の開発を進めることで、サステナブルな未来に向けた誠実かつ着実な取り組みを続けていく。

参考文献

- (1) マツダ(株) : マツダサステナビリティレポート2012, pp.52-54 (2012)
- (2) 森脇健二, 藤和久, 中村浩一郎 : 機械式工法により塗膜剥離した市場回収PPバンパリサイクル材の物性とその適用開発, 成形加工シンポジウム'01, pp.91-92 (2001)
- (3) 森脇健二, 藤和久 : プラスチックバンパの塗膜除去技術の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.99-03, pp.17-20 (2003)
- (4) 森脇健二, 藤和久, 田中宣隆, 中村浩一郎, 相澤誠 : バンパの塗膜除去技術の開発, マツダ技報No.23, pp.125-129 (2005)
- (5) マツダ(株) : マツダ, 廃車バンパから新車バンパへのリサイクルを世界で初めて実現, プレスリリース, 2011年8月24日, <http://www.mazda.co.jp/corporate/publicity/release/2011/201108/110824a.html>, (2011)

■ 著 者 ■



新田 茂樹



森脇 健二



古田 和広



田中 宣隆



松田 祐之



山崎 和重

塗布型制振材の高精度塗布工法

Highly-accurate Application System of Liquid Sound Deadener

高崎 政憲*1
Masanori Takasaki

河瀬 英一*2
Eiichi Kawase

高場 宣弘*3
Nobuhiro Takaba

要約

自動車の環境性能と静粛性を向上させるためには、軽量かつ振動の少ないボデーが必要であるが、振動は重量による減衰効果が大きいために、軽量化と静粛性は相反しやすい。塗装工程では、ロードノイズ減衰のために、数 kg の制振シートを車室内に貼り付けており、軽量化に加え、ゴミなどの生産性の観点からも、課題であった。

CX-5 では、軽量の塗布型制振材を採用し、必要最小限の塗布仕様の開発と、それを正確に塗布する工程開発を行い、軽量化/静粛性/生産性を高次元で成立させた。塗布精度を飛躍的に向上させた塗布工法の開発を中心に、この技術を紹介する。

Summary

To improve environmental performance and quietness of vehicle, light weight and vibration absorbed body structure is required. However, weight has large effect for vibration absorbance, there is confliction between weight reduction (WR) and quietness. In paint shop, several kg of damping sheet is applied into inside of cabin for Road Noise (R/N) absorbance, and it has difficulty not only with WR but also productivity, such as dirt defect.

We developed technology of application design optimization and accurate application system for LSD (Liquid Sound Deadener), and implemented to RX-5 to achieve simultaneous improvement of WR / quietness/ productivity. This report introduces these technologies, focusing on application system development which significantly improved accuracy of application position and amount.

1. はじめに

自動車に求められる環境性能向上の観点から、車体の軽量化による燃費向上の重要性が増しているが、一方で、高級感や快適性の要素である室内静粛性に対する期待も高く、重量による振動減衰の効果が大きいために、重量増加の傾向と相反し、軽量かつ静粛性の高いボデー構造が求められている。音の発生源は、エンジン音、ボデーの風切音、タイヤと路面で発生するロードノイズ（以下 R/N）、などがあるが、一つの音の静粛性を向上させると他の音に気づきやすくなる。例えばエンジン振動のない電気自動車は、よりハイレベルな風切音、R/N 対策が求められることになり、

軽量化と静粛性を両立させる技術の重要性は、今後の自動車性能の進歩に欠かせない要素技術である。

2. ボデーでの R/N 対策と課題

2.1 塗装工程での制振シート

塗装工程では、一般的に、車室内に伝わってきた R/N 振動を重量で減衰させるために、Fig.1 のように、数 kg 程度の制振シートをフロアパネルに貼り付けている。制振シートは、アスファルトと比重の重い無機物を主成分とした粘性のある材料であり、積み重ねて保管する間にシート同士が張り付くのを防止するために付着防止粉がまぶして

*1~3 車両技術部
Painting, Trim&Final Assembly Engineering Dept.

あるため、ボデーに貼り付け後の外板塗装時に粉が飛散してゴミ不良の起因になる。また、重い制振シートをキャビン内に前屈姿勢で貼り付ける作業は、エルゴノミクスの重筋作業であり、塗装工程の生産性の観点からも課題の多い工程である。

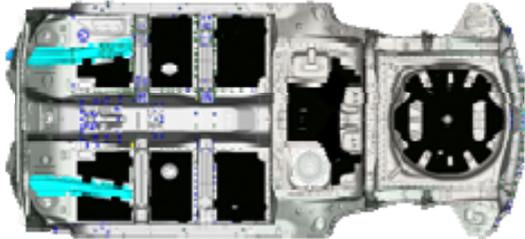


Fig.1 Damping Sheet

2.2 塗布型制振材

制振シートの問題を解決する技術の一つとして、塗布型制振材の適用が拡大しつつある。この材料は、強度の高いアクリル樹脂と、振動を摩擦熱に変換するための無機粒子を主成分とした液体塗料であり、重量だけではなく塗膜強度と熱エネルギーへの変換で振動を減衰させることで、Fig.2のように、軽量で高い制振性を持っている。また、この塗料をロボットで自動塗布することで従来の制振シートの生産性の課題を同時に解決できる材料である。

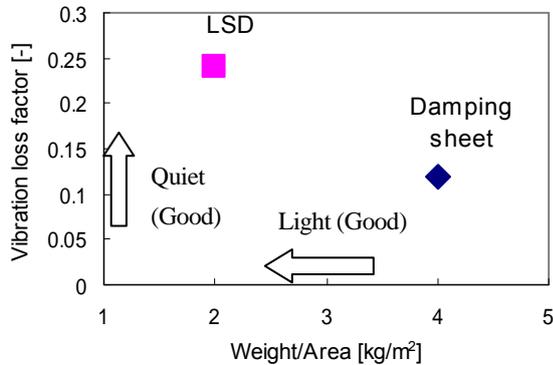


Fig.2 Weight and Vibration Loss Factor

2.3 塗布型制振材の課題

一般的な塗布工法はスリット塗布工法であるが、膜厚分布の均一性や塗布位置の正確性に課題があり、部位ごとの最低塗布量を確保するために過剰な塗布をしている。一方、塗布仕様は、既存車種での制振シートの仕様のコピーをベースにして、工法の塗布精度のリカバリーを含めた塗布仕様で実車を作成し、音響評価結果を元に最終仕様を決定する結果、Fig.3のように、過剰な塗布による重量増が起きている。

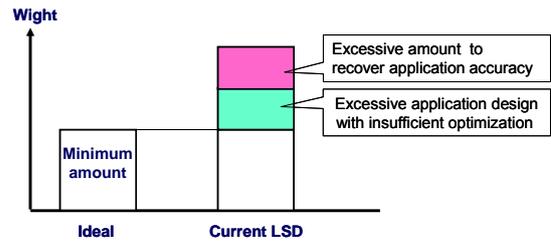


Fig.3 Excessive Application of LSD

上記の課題は、塗布工法と車両設計が相互影響しているため、CX-5の開発では、車両開発の初期段階から開発部門と生産部門が協調し、塗布精度を飛躍的に向上させる塗布工法と、振動シミュレーションを活用した塗布仕様の最適化ソフトを平行して開発して適用することで、軽量化と静粛性を同時に実現する取り組みを行った。

3. 高精度塗布工法の開発

3.1 スリット塗布工法の現状と課題

一般的なスリット塗布工法は、Fig.4のように、ブースタポンプで塗料を圧送し、ロボットアーム先端にあるスリットノズルから高圧で塗料を吐出させて広げて、ノズルの移動速度で膜厚を制御するシステムである。

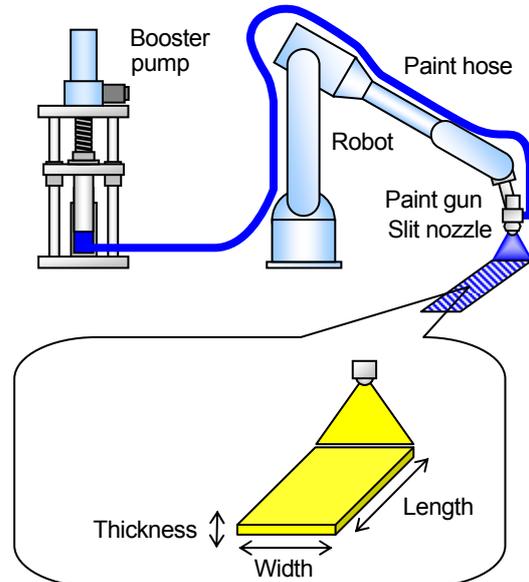


Fig.4 Paint System for Slit Nozzle

しかし、実際の塗布では、塗料の広がりパターンは、Fig.5のように不均一であり、かつ、ガン先でのバルブON/Off時に塗料圧力が安定しないために、過剰な塗布が必要である。

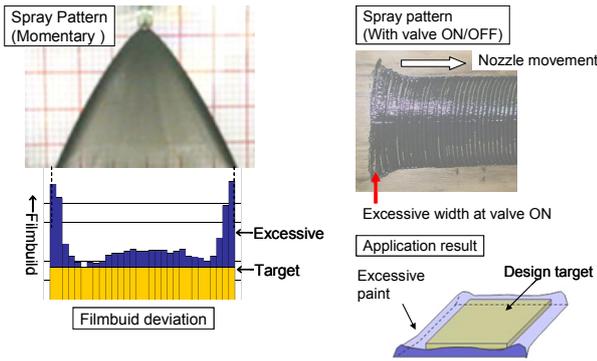


Fig.5 Paint System for Slit Nozzle

また、厚みを一定にするためには、ノズルの移動速度が一定であることが必要であるが、実際のロボットは慣性力があるために、Fig.6のようにロボットアームの移動速度は加減速し、速度が遅い間の塗布での厚みは過剰になる。この加減速は、ボデー曲面に沿わせて複雑な動きをさせる場合は増大する。

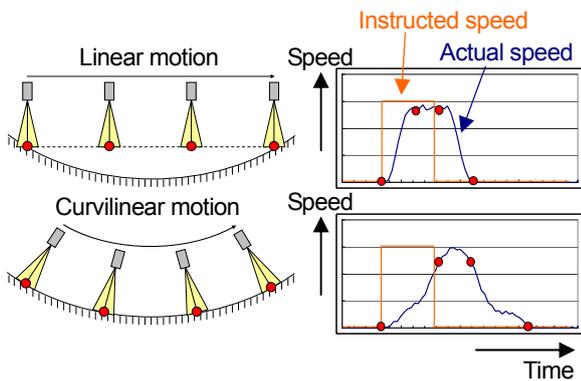


Fig.6 Actual Gun Speed In Different Motions of Robot

3.2 新しい塗布工法

上述の問題を解決する塗布工法の要件は以下である。

- ① 圧力で吐出パターンを広げる ⇒ 直進吐出させ、ガン距離依存性をなくした吐出パターン
- ② 塗料を止める／動かす塗料供給制御 ⇒ 塗料を止めない塗料供給制御
- ③ ロボットアーム速度が変動 ⇒ ボデーに沿わせずロボットアームを直線運動で定型化

上記の要件を満たすシステムとして、塗布システム開発を行った(Fig.7)。

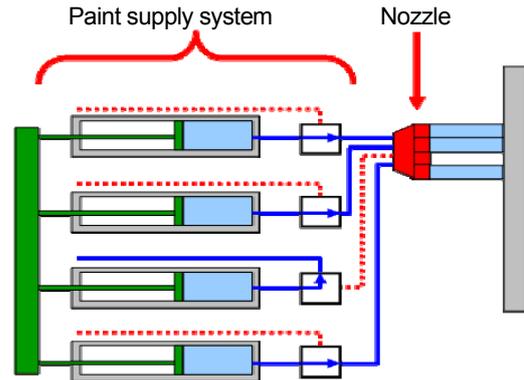


Fig.7 Sketch of High-Response Paint System

4. 新しい塗布工法の開発

4.1 課題解決する塗布工法の実現

(1) 塗布ノズル

塗装距離依存性から脱却し、パターン形成の応答性を向上させるため、微細な円の隙間から塗料を棒状に出し、複数を並べることで塗布幅を作るノズルを採用した。

高い吐出応答で平滑な塗膜を得るため、1本の棒状流れから形成される塗着幅に対して、平均吐出流速・ガン速度・ノズル径を因子として、検証実験を行った。例えばFig.8に示すようにノズル口径が小さいほど平滑性は向上する。しかしながらあまり小さな径のノズルは量産工程での維持・管理の面で不利である。

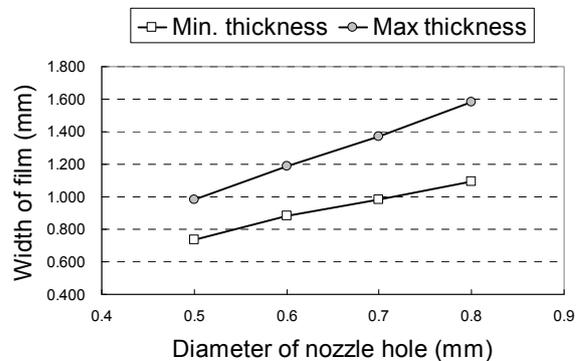


Fig.8 Verification of Nozzle Hole

平均吐出流速は、Fig.9の様に、大きいほど塗着幅の広がり鈍化してくることから、小さいほうが薄膜化や平滑性の向上に有利である。しかしながら、吐出流速は吐出応答に関わっており、一方で一定量をボデーに塗着させるためにはガン速度と連動させる必要がある。ガン速度は生産タクトに関わる因子であり、極端に遅くすると工程としての生産効率が落ちる。このように車両性能に必要な塗布重量と塗布工程の生産性から、最適な吐出流速を決定した。

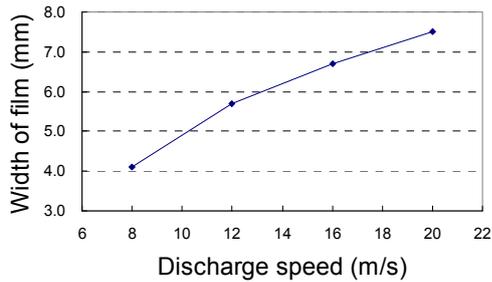


Fig.9 Verification of Discharge Speed

以上のように塗膜品質と生産効率やメンテナンス性を考慮した上で各因子を決定し、最適化を行った結果、平滑性においては $\pm 10\%$ 以下を実現することができた。

このようにしてノズル孔単体の吐出条件を決定した上で、ガン 1 個に対して複数個のノズル孔を設けた構造とした。高粘度流体のため、複数個のノズル孔から吐出される塗料の等量性、直進性が課題である。これに対し、Fig.10 のような 3D の流体シミュレーションと基礎実験から、ノズル内部の流れ、吐出後の流れを解析し、ノズルの内部構造を最適化することで、各孔における塗料流量の等量性および吐出後の直進性を確保した。

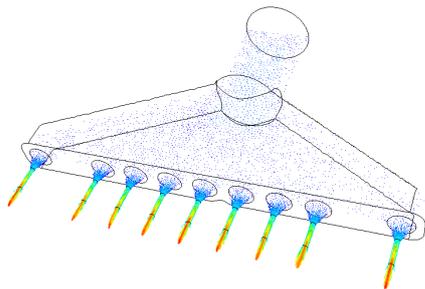


Fig.10 3D-Simulation for Inner Flow Of Nozzle

以上のように複数孔から吐出される塗料を、ボデーに衝突させることで、Fig.11 のように平滑な塗膜を得られるノズルを開発した。

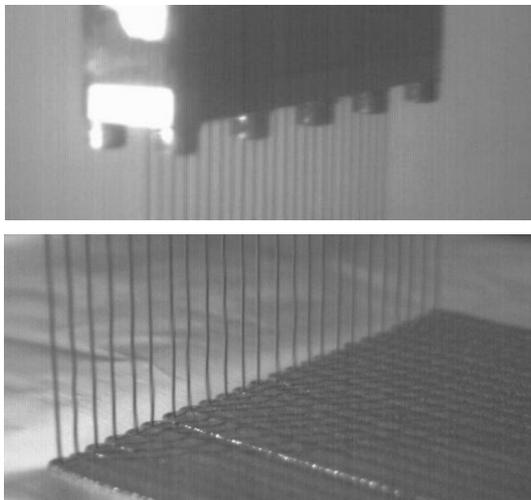


Fig.11 Discharged Flow and Applied Film by New Nozzle

(2) 塗料供給システム

流れをとめずに流体を制御する身近な例は、水が出る／出ないという変化を短時間に行う噴水であり、これはポンプから送られてくる水の流路を 3 方弁で切り替えることで実現している。今回のシステムでも、この原理を応用し、Fig.12 に示すような塗料供給システムを開発した。

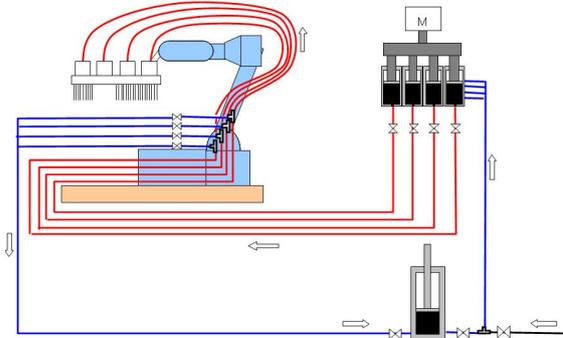


Fig.12 High-Response Paint Supply Diagram

ノズルから吐出される塗料の量の精度を向上させるためには、頻繁に開閉を繰り返すガン内部の圧力をいかに一定に保つかが重要である。従来のシステムでは、ガンの開閉に同期してポンプの駆動/停止を行うため、圧力は常に変動している。そのうえ、一般に制振材塗料は高粘度であるため、塗料を動かすためには高い動圧が必要になる。ゆえにガン内部の圧力を一定にすることは難しく、結果的に吐出する量がばらついたり、塗着位置がずれたりする。

これに対して本システムは、常に一定速度でポンプを駆動させ続け、ガン側と戻り配管側の瞬間的な経路変更をさせることにより、経路全体の動圧を一定に保つ。その上で、戻り配管側の背圧を適切に調整する機構を設け、両経路の圧力損失を等しくすることで、物理的にデッドエンド区間となるガン側ホース内の圧力を保つ。

逆にいえば、本システムにおける精度を決定するのは、唯一の変動機会である瞬間的な経路変更の応答性と両経路の圧力損失差であり、これを適切に制御する必要がある。

経路変更の応答性は、バルブの開閉速度に依存しており、厳密にはバルブ内のピストンを空気で押し引きする速度である。ゆえに、開閉速度を高めるためには、力を大きくするかピストンの質量を小さくするかのどちらかである。今回は、ガンの内部部品構造とピストン駆動エア圧の両方を最適化することで、数ミリ秒での開閉を可能にした。

両経路の圧力損失については、経路の分岐後に、背圧を調整する抵抗を設け、この抵抗を調整することで、ガン側と戻り側の圧力損失を同じにすることができた。

以上の結果、微小な時間間隔でガンを開閉させても、塗布開始から終了まで圧力は一定となり、流れを止めないコンセプトの具現化により、圧力変動を極小化することができた。これにより Fig.13 に示すように、平滑かつ一定幅の塗膜を微小な塗分けで塗布することができた。

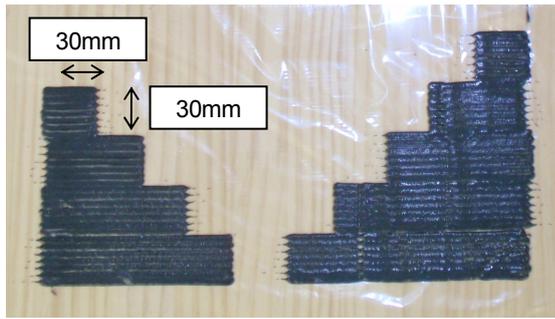


Fig.13 Applying Trial by Developed Method

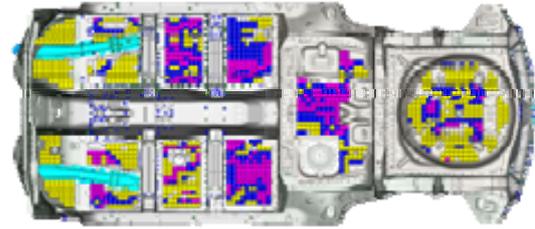


Fig.15 Applying Area Based on Vibration Analysis

(3) ロボット制御

ロボットでの塗布では、移動しながら作業することからロボットアームの移動速度が一定であることが求められる。一定量をボデーに塗布するという目的から考えると、塗料吐出量とガン速度を追従して制御するという考え方もできるが、本件にて開発している塗料の流れを変化させないコンセプトとは矛盾しており、やはりその応答性が問題となる。本工法ではいかに移動速度を一定にするかを追求し、ロボットの動作特性を検証した。その結果、ガンの角度を変化させず、等速直線運動を教示することが最も意図どおりに一定速度で動くということがわかった (Fig.7)。

以上より、微小な塗分けに対しても一定量の塗料をノズルから吐出させ、等速で移動することによって、精度良く一定量をボデーに塗布する工法が構築できた。

4.2 塗布仕様の最適化

上記の塗布工法の精度を基に、車両開発における塗布仕様の最適化を実施した。Fig.14 に示すようにパネル振動が音に変換されるメカニズムを明らかにし、それに基づいたパネル振動シミュレーションを実用化した。このシミュレーションでは、工法の塗布精度を前提に、30mm 角の塗布位置数万点×塗布厚み 3 段階の膨大な組み合わせの中から、最適解を探索するアルゴリズムを構築し、Fig.15 に示すような最少量の塗布仕様を決定した。

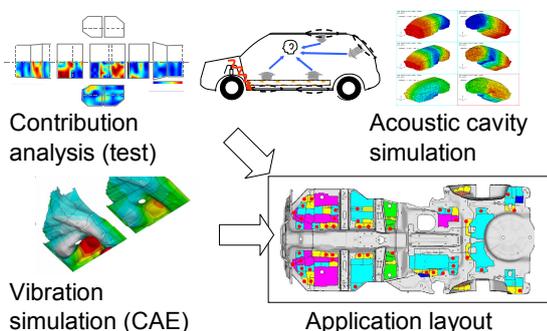


Fig.14 Optimization of LASD Application Layout

4.3 成果

以上のような工法開発により、当初の開発目標値を達成し、制振性能と軽量化・コストを両立する制振材塗布工程を実現した。

この塗布工程を 2011 年 11 月にマツダ宇品第 2 工場に導入し、SKYACTIV ボデー第 1 段となる CX-5 へ適用した。

Fig.16 に CX-5 での塗布状態を示す。



Fig.16 Result of Application For Floor Panel of CX-5

CX-5 では、従来の制振シートによる重量に比べ、台あたり 30%の軽量化を実現し、同時に 12%のコスト改善を達成した。また同工場で生産中のプレマシーにも続けて適用完了し、同工場においては制振シートの貼り付け工程廃止を達成した。また 2012 年 11 月発売の新型アテンザにも適用されており、今後、他車種への展開を予定している。

5. おわりに

今回の技術開発は、車両構造、工法、材料の面から要求機能を徹底的に追求し、課題をブレイクスルーし、「ものづくり革新」できた案件であると確信している。

本工法開発にあたっては、共同開発先である(株)安川電機殿に機器の提供ならびに種々の御助言を賜り、実現できました。ここに謝意を示します。

参考文献

- (1) 中村哲也ほか:高粘度塗料のダストレス塗布工法の開発,
[マツダ技報, No.23, pp.165-170 \(2005\)](#)

■ 著 者 ■



高崎 政憲



河瀬 英一



高場 宣弘

社外への発表論文一覧表 (2011年1月～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
2011.4.12-14	SAE International SAE 2011 World Congress	New Methodology of Life Cycle Assessment for Clean Energy Vehicle and New Car Model	新田 茂樹 森口 義久	技術企画部 同上
2011.5.1-6	The Electrochemical Society 219th ECS Meeting	Performance and Energy Efficiency of a Single Microtubular Anode Supported Cell	鈴木 俊男 杉原 真一 濱本 孝一 山口十志明 藤代 芳伸	産業技術総合研究所 技術研究所 産業技術総合研究所 同上 同上
2011.6.28-29	Europe Plastic News Advanced Moulding Technologies Conference	Core Back(Expansion) Moulding Process	金子 満晴	技術研究所
2011.6.28-30	R&D Management The R&D Management Conference 2011	Volatility valuation of advanced sustainable technology value under uncertainty	新田 茂樹	技術企画部
2011.8.30-9.2	JSAE/SAE International 2011 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants	Combustion Technology Development for a High Compression Ratio SI Engine	山川 正尚 養祖 隆 藤川 竜也 西本 敏明 和田 好隆 佐藤 圭峰 横畑 英明	パワートレイン技術開発部 同上 同上 エンジン設計部 エンジン性能開発部 同上 同上
		Fuel Economy Saving by Improvement of Internal Combustion Engine and Transmission	工藤 秀俊	エンジン性能開発部
		A Study on Improvement of Indicated Thermal Efficiency of ICE Using High Compression Ratio and Reduction of Cooling Loss	藤本 英史 山本 博之 藤本 昌彦 山下 洋幸	技術研究所 同上 同上 同上
2011.9.5-9	JSAE First International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident	Changes of Driver Behavior by Rear-end Collision Prevention Support System in Poor Visibility	岩下 洋平 石橋 基範 三浦 泰彦 山本 雅史	技術研究所 同上 同上 同上
		Detection of Road Surface Condition using Gabor Filter	田中 宙夫 森江 隆 岩瀬 耕二 久米 孝則 松岡 悟 山本 康典	九州工業大学 同上 技術研究所 車両システム開発部 技術研究所 同上
2011.10.6-8	SAE India 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference	Thermal Fluid Analysis by a Mesh Free Simulation - Part 1 Analysis of the Thermal Fluid Field in a Headlamp Based on the Real 3D-CAD Model	佐藤 晴美 中村 貴樹 井上 実 尾関 義一 斎藤 恒洋	エンジニアリングシステム部 同上 装備開発部 旭硝子(株) 同上
		Thermal Fluid Analysis By a Mesh Free Simulation - Part 2 Analysis of the Indoor Climate in a Vehicle Cabin Based on the 3D-CAD Model	井上 実 増岡 宏明 中村 貴樹 尾関 義一 斎藤 恒洋	装備開発部 同上 エンジニアリングシステム部 旭硝子(株) 同上
2011.10.7	EMCoS EMCoS User's Meeting	Windshield antenna performance analysis with EMC-STUDIO	浜田 康	電子開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2011.10.7	EMCoS EMCoS User's Meeting	Windshield antenna performance analysis with EMC-STUDIO	浜田 康	電子開発部
2011.10.10-12	Institute of Automotive Engineering(ika)/Institute for Combustion Engines (vka) 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology	Mazda SKYACTIV-G 2.0 Gasoline Engine Mazda SKYACTIV-D 2.2 Diesel Engine	工藤 秀俊 廣瀬 一郎 木原 龍博 山川 正尚 人見 光夫 迫野 隆 中井 英二 片岡 一司 高松 宏志 寺沢 保幸	エンジン性能開発部 エンジン設計部 パワートレインシステム開発部 パワートレイン技術開発部 パワートレイン開発本部 エンジン設計部 同上 エンジン性能開発部 パワートレインシステム開発部 エンジン性能開発部
2011.10.18-20	Automotive Circle International EuroCarBody 2011 13th Global Car Body Benchmarking Conference	Car Body Technology of Mazda the new CX-5	松岡 秀典 藤原 邦洋	ボデー開発部 車体技術部
2011.11.1-2	Institute of Automotive Engineering(ika)/Institute for Combustion Engines (vka) 2011 Aachen Colloquium China Automobile and Engine Technology	Mazda SKYACTIV-G 2.0 Gasoline Engine	廣瀬 一郎	パワートレイン開発本部
2011.11.30-12.2	Union of EcoDesigners EcoDesign 2011: 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing	New Life Cycle Assessment Process for Strategic Reduction of Environmental Burdens	新田 茂樹 森口 義久	技術企画部 同上
2011.12.5-6	ESI Group PUCA Japan Forum	電磁界シミュレーションの自動車開発への適用事例 Electromagnetic Simulation for the Vehicle Development	浜田 康 鶴長真里絵	電子開発部 同上

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
2011.1.11-12	日本セラミックス協会基礎科学部会 第49回セラミックス基礎科学論会	6核モリブデンクラスター化合物のイオン伝導特性	神田 大輝 犬丸 啓 甲斐 裕之	広島大学 同上 技術研究所
2011.1.12-13	日本エネルギー学会 第6回バイオマス科学会議	木質バイオマスのガス化メタノール合成 ーバイオプラスチック合成前処理の検討ー	藤村 壮 吉田 拓也 松村 幸彦 中山 祐正 中島田 豊 美濃輪智明 一原 洋平	広島大学 同上 同上 同上 同上 産業技術総合研究所 技術研究所
2011.2.17	自動車技術会 第5回アクティブセイフティ部門 委員会	プローブカーのヒヤリハットデータを活用した危険経 路の推定	山崎 慎也	技術研究所
2011.2.18	自動車技術会 第6回ドライバ評価手法検討部門 委員会	人間工学研究のための倫理指針 ー背景・概要・運用の私見ー	石橋 基範	技術研究所
2011.2.21-22	電子情報通信学会 電気情報通信学会 ITS研究会	車載カメラ画像のガボールフィルタ処理による自動 車前方路面の乾湿判定	田中 宙夫 森江 隆 松岡 悟 岩瀬 耕二 山本 康典	九州工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
2011.2.22	山口県産業技術センター 山口県産業活性化人材養成事業 セミナー	市場回収バンパーのリサイクル技術	森脇 健二	技術研究所
2011.3.8	日本分析化学会中国四国支部 広 島地区分析技術研究会 広島地区分析化学講演会	自動車用触媒材料の分析技術	国府田由紀	技術研究所
2011.3.14	日本計算工学会 ものづくりのための計算工学研究会	モデルベース開発がめざすもの、とその課題	矢野 康英	パワートレインシステム開発部
2011.4.22	自動車技術会 第7回ドライバ評価手法検討部門 委員会	プローブカーのヒヤリハットデータを活用した危険 経路の推定	山崎 慎也	技術研究所
2011.5.18-20	自動車技術会 2011年春季大会 フォーラム	自動車設計を支える衝突安全シミュレーション技術	花田 裕 江頭 裕二	NVH性能・CAE技術開発部
2011.5.18-20	自動車技術会 2011年春季大会 学術講演会	将来のパワートレインのあるべき姿とその方向	人見 光夫	パワートレイン開発本部
2011.5.18-20	自動車技術会 2011年春季大会 学術講演会	新型ガソリンエンジン技術の開発	富澤 和廣 後藤 剛 室谷 満幸 大槻 健 松尾 佳朋 上月 正志	エンジン設計部 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 パワートレイン企画部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発	山川 正尚 養祖 隆 藤川 竜也 西本 敏朗 和田 好隆 佐藤 圭峰 横畑 英明	パワートレイン技術開発部 同上 同上 エンジン設計部 エンジン性能開発部 同上 同上
		ハイブリッド車における軽負荷燃費改善と電動化デバイスの小型化	細谷 英生 大住 敏彦 金石 純司 加藤也寸彦 中川 正 山本 博之	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
		貴金属シングルナノ触媒技術のPM燃焼特性	岩国 秀治 原田浩一朗 馬場 誉士 高見 明秀	技術研究所 同上 同上 同上
		構造用接着における接合強度調査	浅田 好克 花井 洋志 鈴木 康次 梅村 俊文 山本 研一 杉浦 裕 伏谷 裕士 井口 博行 西川 出 佐藤 千明	トヨタ自動車(株) 関東自動車工業(株) トヨタ車体(株) 同上 技術研究所 サンスター技研(株) 富士重工業(株) トヨタ自動車(株) 大阪工業大学 東京工業大学
2011.5.19-20	全国IBMユーザー研究会連合会 第49回IBMユーザーシンポジウム	メインフレームとオープンシステム間の データレプリケーション環境の構築	錦織 和子	システム企画統括部
2011.5.21	日本機械学会 エンジンシステム部門 第21回研究会 「持続可能な社会のためのエンジン技術研究会」	SKYACTIV エンジン技術コンセプトの紹介	鈴木 敬	パワートレイン開発本部
2011.6.10	自動車技術会 第3回自動車工学中級講座 「環境規制とディーゼル技術の過去・現在・未来」	新型ディーゼルエンジンのコンセプトと実用化技術	寺沢 保幸	エンジン性能開発部
2011.6.10	アルテアエンジニアリング(株) HYPERWORKSテクノロジー カンファレンス	HyperWorksを用いたPOST自動処理と統合管理 システムの紹介	川口 克也	NVH性能・CAE技術開発部
2011.6.17	溶接学会 第93回軽構造接合加工研究委員会	ホットワイヤ・レーザ溶接法による高張力薄鋼板広間 隙重ね溶接技術の開発	門井 浩太 山本 元道 篠崎 賢二 深堀 貢 北原陽一郎	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上
2011.6.21-22	型技術協会 第25回型技術者会議2011	CAEを用いた射出成形金型設計の最適化	古川 智司 岩本 道尚 志水 克教 熊井 克明	車両技術部 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2011.6.22-23	品質工学会 第19回品質工学研究発表大会	日本でのものづくりと型づくりの追究 ～「手のひらキャピティ」構想による生産革新～	長藤 則政 河野 一郎 大塚 真 青田 巖	パワートレイン技術部 同上 同上 同上
		ロボット搬送ラインの量産スピードアップに向けた 量産準備プロセスの構築	山野 哲司 木村 敬 岩崎 彩 松田 武 大中 雅博	車体技術部 同上 同上 同上 同上
		大物プレス金型形状加工の品質改善の取り組み	西本 光毅 宇都 宮誠 藤川 宏明	ソーリング製作部 同上 同上
		溶接集積機に向けた最適溶接条件の構築	尾浜 春樹 大塚 宏明 木下 光雅 福本 康博	ソーリング製作部 同上 同上 パワートレイン技術部
		Tig溶接における溶接外観評価と強度の関係	大塚 宏明 尾浜 春樹 木下 光雅 福本 康博	ソーリング製作部 同上 同上 パワートレイン技術部
2011.6.22-24	リードエグジビションジャパン(株) 第22回設計・製造ソリューション展	ブレーキAssyねじ締付け条件の最適化	岡田 敏揮	パワートレイン技術部
		マツダにおけるCAEの取り組み	花田 裕	NVH性能・CAE技術開発部
2011.7.12	自動車技術会 中部支部 第28回 技術交流会	次世代エンジンコンセプト 「SKYACTIV 技術」	工藤 秀俊	エンジン性能開発部
2011.8.1	広島県音振動技術研究会 平成23年度第2回音・振動研究会	ロードノイズ吸音技術の開発	萬 菜穂子	技術研究所
2011.8.22	計測自動制御学会 先端電子計測部会講演会	運搬支援研究におけるドライバ属性の計測と活用	石橋 基範	技術研究所
2011.8.26	自動車技術会 関東支部 第3回講演会 「自動車エンジンの最新技術と 今後の発展の展望」	新型ディーゼルエンジン SKYACTIV-D 2.2 の開発	寺沢 保幸	エンジン性能開発部
2011.8.27	自動車技術会 関西支部 第1回講習会 「革新し続ける内燃機関技術！ 最新エンジン技術とその動向」	ガソリンエンジンの高圧縮比化技術等による燃費低減	工藤 秀俊	エンジン性能開発部
2011.8.30-9.1	電気学会 電力・エネルギー部門 (B部門) 平成23年電力・エネルギー部門大会	交通行動調査を考慮した電気自動車の充電制御を 用いた周波数制御に関する研究	造賀 芳文 塚井 誠人 出口翔太郎 谷脇 誉崇 餘和野直人 佐々木 豊 坂本 和夫 福庭 一志	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2011.9.12	(株)サイバネットシステムズ Mathematics for Industry シンポジウム	マツダでの自動車に関する技術開発での数値技術活 用事例の紹介	中本 尊元	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2011.9.20-22	日本化学会 第108回触媒討論会	ZrNd酸化物におけるPr添加量のPM燃焼性能への影響	馬場 誉士 原田浩一郎 岡本 謙治 山田 啓司 重津 雅彦 高見 明秀	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
2011.9.21	広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター 平成23年度広島県技術者研修 「板材成形技術研修」	自動車を取り巻く環境と材料製造技術	深堀 貢	技術研究所
2011.9.28	広島県立総合技術研究所 広島県技術者研修 組み込みシステムの安全設計と 自動車用機能安全規格	機能安全規格「ISO26262」策定の背景と規格の概略	久保 敬也	車両システム開発部
2011.10.4-5	伊藤忠テクノソリューションズ(株) CAE Power2011	SKYACTIV-G の開発に用いたCAE	横畑 英明	エンジン性能開発部
2011.10.12-14	自動車技術会 2011年秋季大会 学術講演会	而燃性と低温活性を両立させた直結用貴金属 シングルナノ触媒の開発	赤峰 真明 岩国 秀治 國府田由紀 住田 弘祐 重津 雅彦 高見 明秀	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
		SEAと実験のハイブリッド化による車室内高周波 空気伝播音予測技術の開発	伊藤 美和 福原 千絵 萬 菜穂子	NVH性能・CAE技術開発部 同上 技術研究所
		統計的機械学習を用いたプローブカーデータからの ヒヤリハット発生形態の推定	森村 哲郎 谷澤 悠輔 山崎 慎也 井手 剛	日本IBM(株) 東京基礎研究所 技術研究所 同上 日本IBM(株) 東京基礎研究所
		Development and Amelioration of Combustion of Hydrogen Rotary Engine	J. ニザル 向井 学 香川 良二 中倉 陽巳 森上 修 村瀬 英一	パワートレイン技術開発部 同上 同上 九州大学 同上 同上
		高圧縮比ガソリンエンジンの掃気性改善と触媒早期 暖機のための燃焼技術開発	藤川 竜也 養祖 隆 内田 健児 中山 佳映 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上
		新型エンジンの制御系仮想開発環境	寺岡 陽一 彌生 啓介 小谷 和也 小森 賢	パワートレインシステム開発部 同上 同上 同上
		新型直噴ガソリンエンジンの制御技術の開発	津村雄一郎 東尾 理克 桑原 一徳 戸田 泰蔵 拜崎 幸雄	パワートレインシステム開発部 同上 エンジン性能開発部 同上 パワートレインシステム開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		パワーウィンドウのシステム開発へのMBD適用事例	徳光 文広	車両実研部
		脇見時間と操舵角情報による車載情報機器操作性の評価	太田 浩司 島田 高志 上村 裕樹 沖山 浩 田中 松広	車両実研部 同上 同上 同上 同上
		ロードノイズ性能のためのサスペンション振動特性分析技術	木下 浩志 中野 伸一 村田統一朗 海老野寛道 須磨 達也	NVH性能・CAE技術開発部 同上 同上 (株) エステック 同上
		SEAと実験のハイブリッド化による車室内高周波空気伝播音予測技術の開発	伊藤 美和	NVH性能・CAE技術開発部
2011.10.17-20	電気化学会 電池技術委員会 第52回 電池討論会	小粒径カーボン粒子のリチウムイオン二次電池負極特性	對尾 良則 甲斐 裕之 住田 弘祐 玉井 久司 小林 誠	技術研究所 同上 同上 広島大学 同上
2011.10.18	エルエムエスジャパン(株) LMSコンファレンス2011	パワーウィンドウのシステム開発へのMBD適用事例	徳光 文広	車両実研部
2011.10.19-22	名古屋見本市委員会 次世代ものづくり基盤技術産業展	マツダクリーンディーゼルエンジンへの取り組み	人見 光夫	パワートレイン開発本部
2011.10.22	電気・情報関連学会各中国支部 平成23年度(第62回)電気・情報 関連学会中国支部連合大会	電気自動車の充放電制御を用いた周波数制御に関する研究	造賀 芳文 塚井 誠人 出口翔太郎 谷脇 誉崇 餘和野直人 佐々木 豊 坂本 和夫 福庭 一志	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2011.10.30-11.3	日本トライボロジー学会 国際トライボロジー会議 広島 2011	マツダ SKYACTIVエンジンの紹介と内燃機関の将来	人見 光夫	パワートレイン開発本部
2011.11.10-11	石油学会 第41回石油・石油化学討論会	NOx 吸蔵還元用Pt-Rh-アルカリ土類金属/希土類酸化物の触媒劣化に関する検討	牟禮 辰洋 山田 啓司 高見 明秀 西口 宏泰 永岡 勝俊 瀧田 祐作	大分大学 技術研究所 同上 大分大学 同上 同上
2011.11.12-13	軽金属学会 第121回秋季大会	AZ61マグネシウム連続铸造王延合金板の組織形態が機械的性質に及ぼす影響	木村 貴広 小田 信行 洪水 雅俊 佐々木 元	技術研究所 同上 広島大学 同上
2011.11.14	自動車技術会 動力伝達系部門委員会 CVT・ハイブリッド部門委員会 シンポジウム 「動力伝達系の最新技術2011」	MAZDA SKYACTIV-DRIVEの紹介	土井 淳一 鎌田 真也 丸末 敏久 坂 時存 三谷 明弘	ドライブトレイン開発部 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2011.11.15	(株)日経BP 発行直前！ISO26262最新動向 セミナー	ISO26262の日本導入における課題と対応	久保 敬也	車両システム開発部
2011.11.15-16	色材協会 2011年度色材研究発表会	光輝材の高輝度化技術	中野さくら 久保田 寛 山根 貴和	技術研究所 同上 同上
2011.11.16-18	組込みシステム技術協会 Embedded Technology 2011 基調講演	SKYACTIV TECHNOLOGYの誕生を支えた モデルベース開発	原田 靖裕	パワートレイン開発本部
2011.11.17	広島市産業振興センター 次世代自動車産業創出に向けたもの づくり 技術高度化のための人材 育成プログラム	水素自動車の現状と将来	森本 賢治	技術研究所
2011.11.17	日本機械学会 No.11-116 講習会 「とことんわかる自動車のモデリ ングと制御2011」	マツダ スカイアクティブ技術について	原田 靖裕	パワートレイン開発本部
2011.11.18	情報処理学会中国支部 講習会	自動車設計におけるIT技術の高度な活用	松岡 正樹	エンジニアリングシステム部
2011.11.18	中国地区化学工学懇話会 セミナー「次世代の環境・革新的 新エネルギー技術」	新世代エンジン SKYACTIV エンジンの開発について	石野 勅雄	パワートレイン企画部
2011.11.19	早大モビリティ研究会 早大モビリティシンポジウム	ガソリンエンジン限界への挑戦と新型ディーゼルエ ンジン ～SKYACTIV-D 2.2の紹介～	中井 英二	エンジン性能開発部
2011.11.21	自動車技術会 第4回自動車工学中級講座 「環境規制とディーゼル技術の 過去・現在・未来」	新型ディーゼルエンジンのコンセプトと実用化技術	寺沢 保幸	エンジン性能開発部
2011.11.21	広島大学大学院国際協力研究科 「アジア・アフリカ科学技術協力の 戦略的推進」プログラム	環境問題と自動車の取り組み	佐々木圭太	技術研究所
2011.11.22	(株)ダッソー・システムズ・シムリア SIMULIA解析ソリューションセ ミナー ～詳細CAEソリューション～	Isightを用いた車体構造の複合領域板厚・材質最適化	小平 剛央	技術研究所
2011.11.22	石油エネルギー技術センター 第5回月例報告会	ガソリンエンジンの限界への挑戦	赤木 裕治	パワートレイン技術開発部
2011.11.25	潤滑油協会 平成23年度 潤滑油製造業 地方研修会	マツダ新世代パワートレインコンセプトの紹介	鈴木 敬	パワートレイン開発本部
2011.11.25	島根大学 セミナー 「産業界とスーパーコンピュータ」	自動車設計におけるスーパーコンピュータの役割	松岡 正樹	エンジニアリングシステム部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属		
2011.11.26	人間工学会中国・四国支部／九州・沖縄支部 日本人間工学会合同開催支部大会	立体擬音警報が危険回避時の認知判断特性に及ぼす影響の考察	米澤 泰延 新部 忠幸 山本 康典	技術研究所 同上 同上		
		自動車の室内寸法に対する人間の知覚能力の解析	大黒谷陽子 武田 雄策 山中 僚子 岡本 宜久 大坪 智範 橋本 悟 沖山 浩 岸 篤秀	技術研究所 同上 同上 同上 車両実研部 同上 同上 技術研究所		
		自動車室内空間における広々感の評価手法	大坪 智範 武田 雄策 岸 篤秀 沖山 浩	車両実研部 技術研究所 同上 車両実研部		
		自動車乗降性についての評価手法の提案	橋本 悟 大坪 智範 武田 雄策 岸 篤秀 沖山 浩	車両実研部 同上 技術研究所 同上 車両実研部		
		感性工学を用いた金属加飾の質感メカニズムの解明	森重 領介 平山 和幸 福井 信行 田中 松広	車両実研部 同上 同上 同上		
		人間特性に基づく姿勢支持を考慮した自動車用シートの開発	鈴木 崇 竹内 良敬 内川 竜一 小倉 由美 藤田 悦則 杉本 栄治 上野 義雪 金子 成彦	装備開発部 同上 (株)デルタツーリング 同上 同上 デルタ工業(株) 千葉工業大学 東京大学大学院		
		2011.11.29-12.1	日本機械学会 第22回内燃機関シンポジウム	SKYACTIV-G 2.0 新型ガソリンエンジンの紹介	廣瀬 一郎 工藤 秀俊 木原 龍博 山川 正尚 人見 光夫	エンジン設計部 エンジン性能開発部 パワートレインシステム開発部 パワートレイン技術開発部 パワートレイン開発本部
				新型ディーゼルエンジンのアイドルリングストップ技術	中本 仁寿 山内 健生 田賀 淳一 志茂 大輔 金 尚奎 細谷 英生	技術研究所 同上 パワートレインシステム開発部 エンジン性能開発部 同上 技術研究所
				燃焼室壁に衝突するディーゼル噴霧による縦渦形成と燃焼過程	志茂 大輔 加藤 雄大	エンジン性能開発部 広島大学
				一二次元ピストンキャビティを用いた容器実験と数値解析によるEGG 燃焼室コンセプト	金 尚奎 宮崎 正浩 神崎 淳 西田 恵哉	エンジン性能開発部 同上 同上 広島大学

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		ホールインジェクタから噴射したエタノール/ ガソリン混合燃料の噴霧発達と混同気形成	佐藤 圭峰 福田 英 茶藤 雅晴 藤川 竜也 北光 健太 西田 恵哉	エンジン性能開発部 広島大学 同上 エンジン性能開発部 (株)マツダE&T 広島大学
		急速圧縮装置を用いたロータリエンジンの着火 に関する基礎研究	松坂 直樹 神原 伸司 香川 良二 橋本 英樹 森山 修 村瀬 英一	九州大学 パワートレイン技術開発部 同上 九州大学 同上 同上
		図示熱効率向上への高圧縮比化と冷却損失低減の 効果に関する研究	藤本 英史 山本 博之 藤本 昌彦 山下 洋幸	技術研究所 同上 同上 同上
2011.11.30-12.2	九州大学・マス・フォア・インダス トリー研究所 平成23年度数学・数理学と諸科 学・産業技術の連携研究のための ワークショップ ー数理モデルの夢ー	マツダでの研究・開発に対する数理技術活用事例	中本 尊元	技術研究所
2011.12.2	自動車技術会 生産加工部門委員 会 シンポジウム 「これからの自動車の姿～環境・ 安全安心を支える技術～」	ガソリンエンジンの限界への挑戦 (SKYACTIV-G)	赤木 裕治	パワートレイン技術開発部
2011.12.3	日本設計工学会 中国支部 第35回講習会 「ものづくりのためのモデルベー ス開発」	SKYACTIV 技術とモデルベース開発	原田 靖裕	パワートレイン開発本部
2011.12.7-8	(株)JSOL JMAGユーザ会	マツダ デュアル モード ドライブ システムの開発 (電動車のMBDにおけるJMAG-RTの活用)	米盛 敬 板坂 直樹	技術研究所 同上
2011.12.9	砥粒加工学会 HEAT専門委員会 第25回研究・見学会	新世代内燃機関「SKYACTIV エンジン」について	伊藤あずさ	パワートレイン企画部
2011.12.12	産業総合研究所 中国センター 産総研 本格研究ワークショップ in 東広島	マツダの再生可能エネルギーへの期待	高見 明秀	技術研究所
2011.12.12-13	(株)シーディー・アダプコ・ジャパン CDAJ CAEカンファレンス2011	SKYACTIV-Gの開発に用いたCAEと開発効率化	横畑 英明	エンジン性能開発部
		SKYACTIV 技術までの開発の経緯とCAEの貢献	人見 光男	パワートレイン開発本部
2011.12.14	自動車技術会 ガソリン機関部門委員会 シンポジウム 「更なる進化を求めるガソリン エンジン技術」	SKYACTIV-G 燃焼技術	養祖 隆	パワートレイン技術開発部
2011.12.14	中国経済産業局 医工連携拠点活用セミナー	SEAと実験のハイブリッド化による車室内高周波 空気伝播音予測技術の開発	伊藤 美和	NVH性能・CAE技術開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属	
2011.12.16	LCA日本フォーラム 第8回LCA日本フォーラム表彰 表彰式・記念講演	市場の普及実態を反映した自動車のLCA手法	新田 茂樹	技術企画部	
2011.12.16	MathWorks Japan MATLAB EXPO in 大阪 2011	マツダにおける実機レス開発の実践と、その効果 ～品質向上と開発期間短縮の実現	徳光 文広	車両実研部	
2011.12.19	自動車技術会 第6回自動車工学中級講座 「燃費規制とガソリン技術の過 去・現在・未来」	最新のガソリンエンジンとその燃費性能	磯部利太郎	エンジン性能開発部	
2011.12.19	(株)日経BP 「エンジン技術大全」発行記念 セミナー 30km/Lを目指すエンジンのつく り方 ～開発者が語る設計と思想～	SKYACTIV ガソリンエンジンについて	人見 光夫	パワートレイン開発本部	
2011.12.19-20	日本液体微粒化学会 第20回微粒化シンポジウム	高圧縮比直噴ガソリンの触媒受機領域における 噴霧・燃焼コンセプト (赤外線吸収法を用いた実機検証)	藤川 竜也 内田 健児 中山 佳映 佐藤 圭峰 和田 好隆 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術開発部	
		高圧縮比直噴ガソリンの触媒受機領域における 噴霧・燃焼コンセプト (CFDによる燃料噴霧の壁面衝突挙動解析)	松本 有平 佐藤 圭峰 藤川 竜也 茶藤 雅青 北光 健太 西田 恵哉	エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術開発部 広島大学 (株)マツダE&T 広島大学	
		直噴ガソリン機関用ホールノズルから噴射した 燃料噴霧の点火、燃焼過程に及ぼす混合気特性の影響	佐藤 圭峰 福田 英 茶藤 雅青 藤川 竜也 北光 健太 西田 恵哉	エンジン性能開発部 本田技研工業(株) 広島大学 パワートレイン技術開発部 (株)マツダE&T 広島大学	
		直噴ガソリン機関用ホールノズルから噴射した エタノール/ガソリン混合燃料噴霧の蒸発と混合気 形成過程	茶藤 雅青 福田 英 佐藤 圭峰 西田 恵哉	広島大学 本田技研工業(株) エンジン性能開発部 広島大学	

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.65, No.1, pp.25-32	ガソリンエンジン設計を支えるシミュレーション技術 (特集 自動車設計を支えるシミュレーション技術)	島崎 勇 葭原 泰司 鶴島 理史 高岸 広 中間健二郎 田中 大 横畑 英明	トヨタ自動車(株) 同上 日産自動車(株) (株)本田技術研究所 スズキ(株) 三菱自動車工業(株) エンジン性能開発部
Vol.65, No.1, pp.59-65	自動車設計を支える衝突安全シミュレーション技術	横山 敦士 江頭 裕二 水野 良造	京都工芸繊維大学 NVH性能・CAE技術開発部 スズキ(株)
Vol.65, No.3, pp.26-31	次世代パワートレインの紹介 (特集 最近のパワートレイン制御技術)	鈴木 敬 石野 勲雄 伊藤あずさ	パワートレイン企画部 同上 同上
Vol.65, No.3, pp.43-47	乗用車用尿素SCRシステムの開発 (特集 最近のパワートレイン制御技術)	石原 力 勝田 真斗	パワートレインシステム開発部 走行・環境性能開発部
Vol.65, No.7, pp.81-85	車室内VOCの測定方法と自動車開発への適用	市川 智士	技術研究所
Vol.65, No.8, pp.24-26	自動車と資源エネルギー	野村 誠治	技術研究所
Vol.65, No.9, pp.22-26	新型2.0Lガソリンエンジン開発 (特集 進化を続けるパワートレイン技術)	高木 章智 山口 直宏 清水 幸一 西村 和浩 迫川 茂博	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 同上
自動車技術会論文集 Vol.42, No.2, pp.639-644	ブロープカーのヒヤリハットデータを活用した危険経路の推定	山崎 慎也 舟久保 晃 谷澤 悠輔	技術研究所 同上 同上
Vol.42, No.4, pp.867-872	予混合型ディーゼル燃焼による排気と燃費の低減 (第1報) —吸気温度と燃焼噴射時期制御による燃焼コンセプト (ITIC-PCI)の基本的検証—	志茂 大輔 金 尚奎 片岡 一司 福田 大介 西田 恵哉	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 広島大学
Vol.42, No.4, pp.867-872	予混合型ディーゼル燃焼による排気と燃費の低減 (第2報) —吸気温度と燃焼噴射時期制御による燃焼コンセプト (ITIC-PCI)の実用的検証—	志茂 大輔 片岡 一司 前川 耕太 末岡 賢也 藤本 昌彦 西田 恵哉	エンジン性能開発部 同上 パワートレインシステム開発部 エンジン性能開発部 技術研究所 広島大学
Vol.42, No.5, pp.1169-1174	半溶融射出成形を適用したマグネシウム合金鑄造鍛造材の強度特性に及ぼす内部欠陥と熱処理条件の影響	山本 幸男 坂手 宣夫 坂本 和夫	技術研究所 同上 同上
自動車技術会 学術講演会前刷集 (秋季) 20115687 No.104-11 pp.9-12	Application of MBD to Power Window System Development	徳光 文広	車両実研部
20115774 No.100-11 pp.19-22	An Evaluation on Operability for In-vehicle Information System using Eye Off the Road Time and Steering Angle Information	太田 浩司 島田 高志 上村 裕樹 沖山 浩 田中 松広	車両実研部 同上 同上 同上 同上

寄稿誌名 巻・号・ページ	題 目	発表者	所 属
人間工学会 中国・四国支部 九州・沖縄 支部 合同開催支部大会 講演論文集 pp.90-91	An Evaluation Method for a Spacious Feel in Vehicle Interior	大坪 智範 武田 雄策 岸 篤秀 沖山 浩	車両実研部 技術研究所 同上 車両実研部
pp.92-93	The proposal of one evaluation technique about automobile ingress and egress	橋本 悟 大坪 智範 武田 雄策 岸 篤秀 沖山 浩	車両実研部 同上 技術研究所 同上 車両実研部
pp.102-103	The elucidation of the texture mechanism for the metal decoration applying KANSEI-engineering	森重 領介 平山 和幸 福井 信行 田中 松広	車両実研部 同上 同上 同上
自動車技術会関西支部ニュース 第39号	ロードノイズ吸音技術の開発	村澤 英治 萬 菜穂子	技術研究所 同上
第39号,pp.2-3	新型AM/FMラジオ用ガラスアンテナの開発	重田 一生	電子開発部
第39号,pp.4-5	キーレスエントリー受信感度バーチャル評価技術の開発	浜田 康	電子開発部
日本機械学会論文集 A編 Vol.77,No.775,pp.573-581	Al-Zn系マグネシウム合金の鋳造鍛造法の実部品への適用性 (強度特性に及ぼす結晶粒径の影響)	山本 幸男 坂手 宣夫 坂本 和夫	技術研究所 同上 同上
Vol.77,No.777,pp.892-901	半溶融射出成形法を適用したAl-Zn系マグネシウム合金の鋳造鍛造法の実用性検討	山本 幸男 坂手 宣夫 坂本 和夫	技術研究所 同上 同上
Vol.77,No.780,pp.1388-1397	半溶融射出成形法を適用したAl-Ca系マグネシウム合金の鋳造鍛造法の実用性検討	山本 幸男 坂手 宣夫 坂本 和夫	技術研究所 同上 同上
近畿大学次世代基盤技術研究所報告 Vol.2,2011,pp.67-72	水素ロータリエンジンのガス燃料噴流と燃焼火炎の可視化計測	田端 道彦 香川 良二	近畿大学 パワートレイン技術開発部
日本燃焼学会誌 第54巻,168号,pp.22-31	筒内直噴エンジンの計測技術および制御系開発環境について	矢野 康英 村上 康 寺岡 陽一 中川 正 山本 博之 今田 道宏	パワートレインシステム開発部 技術研究所 パワートレインシステム開発部 技術研究所 同上 パワートレインシステム開発部
国際交通安全学会誌 Vol.36,No.1,pp.33-41	運転支援のヒューマンファクタ研究におけるドライバー特性の活用 —広島地区DSSS実証実験での人間工学的評価を事例として—	石橋 基範 三浦 泰彦	技術研究所 同上
ヒューマンインタフェース学会誌 2011,Vol.13,No.4,pp.357-364	信号待ち車両への追突防止支援システムの人間工学的評価	奥田 一之 石橋 基範 三浦 泰彦	技術研究所 同上 同上

寄稿誌名 巻・号・ページ	題 目	発表者	所 属
月刊型技術誌 6月号	ハイサイクル成形に向けた製品板厚の高精度化	熊井 克明	車両技術部
月刊誌「インダスト」 10月号	廃車バンパー to バンパーリサイクル	藤 和久 森脇 健二	技術研究所 同上
高分子情報雑誌"Polyfile" 12月号	バンパー to バンパーリサイクルの開発と実用化	森脇 健二 松田 祐之 藤 和久	技術研究所 同上 同上
第19回品質工学研究発表大会論文集 19th,pp.26-29	溶接巣撲滅に向けた最適溶接条件の構築	尾浜 春樹 大塚 宏明 木下 光雅 福本 康博	ツーリング製作部 同上 同上 パワートレイン技術部
19th,pp.130-133	Tig溶接における溶接外観評価と強度の関係	大塚 宏明 尾浜 春樹 木下 光雅 福本 康博	ツーリング製作部 同上 同上 パワートレイン技術部
19th,pp.134-137	ブレーキAssyねじ締付け条件の最適化	岡田 敏揮	パワートレイン技術部
溶接学会論文集 第29巻,第3号(2011),pp.58s-61s	Development of Hot-wire Laser Welding Method for Lap Joint of Steel Sheet with Wide Gap	山本 元道 篠崎 賢二 門井 浩太 藤田 大悟 井上 豪 深堀 貢 北原陽一郎	広島大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
Automotive Circle International EuroCarBody 2011 前刷 2011年10月,pp.149-192	Car Body Technology of Mazda the new CX-5	松岡 秀典 藤原 邦洋	ボデー開発部 車体技術部
SAE Technical Papers 2011-01-0851	New Methodology of Life Cycle Assessment for Clean Energy Vehicle and New Car Model	新田 茂樹 森口 義久	技術企画部 同上
R&D Management Conference 2011	Volatility valuation of advanced sustainable technology value under uncertainty	新田 茂樹	技術企画部
Design for innovative value toward a sustainability society ISBN:978-94-007-3010-6,pp.280-283	New Life Cycle Assessment Process for Strategic Reduction of Environmental Burdens	新田 茂樹 森口 義久	技術企画部 同上
Journal of Power Sources Vol.196, Issue 13, pp.5485-5489	Energy efficiency of a microtubular solid-oxide fuel cell	鈴木 俊男 杉原 真一 濱本 孝一 山口十志明 藤代 芳伸	産業技術総合研究所 技術研究所 産業技術総合研究所 同上 同上
Heterocycles Vol.82,Issue2,pp.1317-1325	Synthesis and Properties of N 1-(3-Methoxypropyl)-N 3-methylimidazolium Salts	宮碕 栄吾 甲斐 裕之	広島大学 技術研究所

寄稿誌名 巻・号・ページ	題 目	発表者	所 属
Industrial laser solutions Web公開 http://www.industrial-lasers.com/articles/2011/07/hotwire-laser-welding.html	Hotwire laser welding for automotive	北原陽一郎 深堀 貢 田中 力 篠崎 賢二 山本 元道	技術研究所 同上 同上 広島大学 同上
MTZ Motortechnische Zeitschrift September 2011, pp.660-666	The New MAZDA Four-Cylinder Diesel Engine	寺沢 保幸 中井 英二 片岡 一司 迫野 隆	エンジン性能開発部 エンジン設計部 エンジン性能開発部 エンジン設計部

編 集 委 員 会

委員長	小島 岳二	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
	吉村 康志	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
	岡本 哲	車両開発本部 車両実験部
	井上 実	車両開発本部 装備開発部
	末次 元	パワートレイン開発本部 パワートレインシステム開発部
	坂本 和夫	技術研究所
	杉山 裕基	技術本部 生産企画部
	高岡 啓喜	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30号

発行 2012年11月
発行人 金澤 啓隆
編集人 小島 岳二
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(565)2198

Mazda Technical Review No.30

November 2012
Publisher Hiroataka Kanazawa
Editor Takeji Kojima
Bureau Masashi Ohmori
Publishing office Technology Planning Dept.
Product Strategy Div.
Mazda Motor Corporation
3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,
Hiroshima 730-8670, Japan

©2012 マツダ株式会社 (禁無断転載)