

特集：新型ロードスター

7

新型ロードスターのパワートレインの紹介 Introduction of All-New Roadster Powertrain

若狭章則*¹ 今村善彦*² 矢嶋綱夫*³
 Akinori Wakasa Yoshihiko Imamura Tsunao Yajima
 松尾直也*⁴ 西村克典*⁵ 藤富哲男*⁶
 Naoya Matsuo Katsunori Nishimura Tetsuo Fujitomi

要約

新型ロードスター/MX-5は、たった5m走っただけで、これこそ新型ロードスターと分かるパフォーマンスフィールを実現していると確信する。これはMZR2.0Lエンジンや6速トランスミッションなどの新開発にこだわりを持って取り組み、多くの困難を乗り越えたことによるものである。本稿では、そのパワートレインを紹介する。

Summary

We believe that we have developed New Roadster / MX-5 capable of enjoying such an excellent performance feel that it will be figured out easily with a just five-meter drive. You will immediately feel that this is exactly what New Roadster's performance is. This has been achieved by working toward new technology developments with firm intention, especially focusing on the MZR2.0L engine and the 6-speed transmission and by overcoming various barriers with utmost efforts. This paper will introduce such new Powertrain technologies.

1. はじめに

新型ロードスターは、初代の「人馬一体」コンセプトを受け継ぎ、更に進化させている。「人馬一体」とは、乗り手と馬が心を通い合わせて走る一体感を意味し、ドライバが車とコミュニケーションしながら機敏に楽しく運転できることである。車を愛着のわく生き物に例え、その心臓となる新開発パワートレインを紹介する。

2. 新型ロードスターのパワートレイン

2.1 パワートレインの目指したもの

「人馬一体」を具現化するパフォーマンスフィールとは、レーストラックなどの加速タイムの追求に主眼を置くのではなく、一般のどんな走行シーンでも常に楽しく運転できるようにすることにある。このために目標としたパフォーマンスフィールは、きびきび軽快（ライブリー）でリニアな感覚を高めてゆくことである。そのために、エンジンの

出力性能によって車の加速度を高めるだけでなく、サウンド、シフトなどの操作系のフィーリングなど、感性に繋がる領域を総合的に進化させることを目指した。一方で燃費や排気ガスに代表される環境問題にも積極的に対応することは必然の使命と考えている。

2.2 パワートレイン展開

新型ロードスターでは卓越したパフォーマンスフィールを実現するために、2代目ロードスターの1.8L/1.6Lから排気量をアップして、2.0L/1.8Lの2つのエンジン、また6MT/5MT/6ATの3つのトランスミッションを、各国のニーズに合わせてラインナップしている（Table 1）。

Table 1 Powertrain Line-up

Engine	Transmission	JPN	N. America	Europe	Australia
2.0L	6MT	●	●	●	●
	5MT	●	●	●	—
	6AT	●	●	—	●
1.8L	5MT	—	—	●	—

*1, 6 パワートレイン開発推進部

Powertrain Development Promotion Dept.

*2 第1エンジン開発部

Engine Development Dept. No.1

*3 パワートレインシステム開発部

Powertrain System Development Dept.

*4 第3エンジン開発部

Engine Development Dept. No.3

*5 ドライブトレイン開発部

Drivetrain Development Dept.

2.3 パワートレインの重点開発項目

重点開発項目は、以下のライブリーやリニアの構成要素である。

(1) きびきびしたダイレクトレスポンスの実現

ダイレクトレスポンスとは、アクセルを踏み込んだ瞬間の応答の良さ、加速度上昇、最大加速度以降の収束の良さとして定義している。これを表す指標を、Fig.1に示す。

- TG : アクセル踏み込み後に体感Gが発生する時間
- G : 加速度上昇の傾き
- G_Ave : 収束過程の加速度の平均値
- AC : 加速度変動が収束する時間

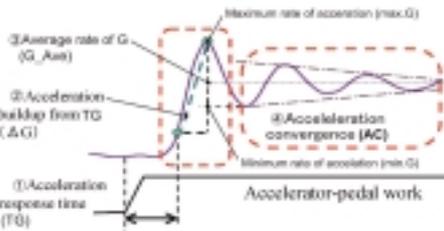


Fig.1 Specific Evaluation Indices for Response

(2) リニアな伸び感の実現

伸び感とは、低回転から高回転までストレスなくエンジンを使い切れる良さと定義している。指標としては、レッドゾーンまでの加速度の維持率と考えた。

(3) 心地よいスポーツサウンドの実現

走行シーンに応じてドライバーが心地よいと感じられる音に主眼を置いて詳細目標を設定して取り組むことにした。

(4) 軽快なシフトフィールの実現

意のままにスポーツ走行が楽しめるシフトフィールに主眼を置いて詳細目標を設定して取り組むことにした。

3. エンジンの詳細

3.1 エンジン開発コンセプト

排気量をアップしてもライトウエイトスポーツに関わる質量と、環境に及ぼす燃費やエミッションは2代目以上に改善したパッケージングを前提に、以下に注力する。

- (1) 期待にマッチした加速応答レスポンスの実現
- (2) 高くフラットなトルク特性の実現
(常用域ではMax.90%以上~トップエンドでは95%以上)
- (3) 心地よいスポーツサウンドの実現

3.2 エンジンの概要

エンジン本体は、他機種FF用で好評のMZRエンジンを、FRフロントミッドシップに搭載するためにFig.2に示す領域を新開発した。

左右方向のエンジン搭載レイアウトは、スペースを有効活用し右側に10度スラントした。吸気側はエンジン上部のスペースを広く確保して、長い吸気管と管長の切替え装置(VIS)を実現。排気側はエンジン下方にスペースを維持し、長いマニホールドの4-1排気システムを搭載できるよ

うにしてトルクを確保するとともに、大型キャタリストのレイアウトを可能にして、モデルサイクル中の排気ガス規制強化に備えている (Fig.3)

軽量/コンパクト化では、アルミシリンダブロック、プラスチックインテークマニホールドなどで軽量化を図り、2代目に比べ19.1kgの質量低減を実現している。

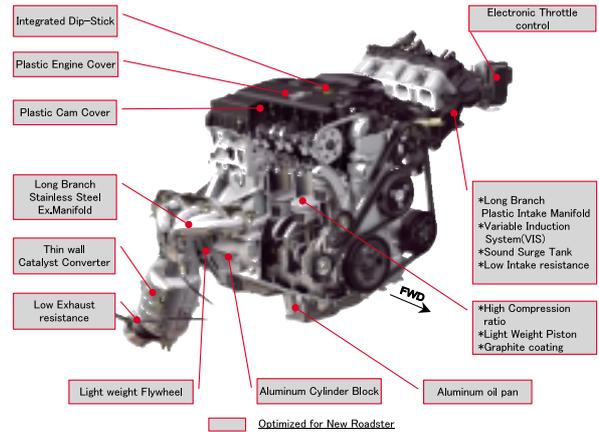


Fig.2 MZR Engine Key Feature

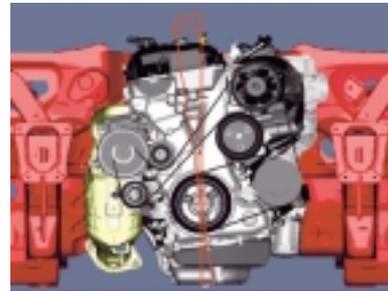


Fig.3 Longitudinally Mounted with a 10° Slant

エンジンの主要諸元をTable 2に示す。

Table 2 Engine Main Specifications (MZR2.0L)

Engine		MZR 2.0
Cylinder and layout		water-cooled; four cylinders; in-line; longitudinally mounted
Displacement(cm ³)		1998
Bore x Stroke(mm)		87.5 x 83.1
Valve mechanism		DOHC 16 Valve
Valve diameter(mm)	In.	35
	Ex.	30
Compression ratio		10.8
Fuel supply		Electric Fuel Injection
Max.Power(manual transmission)		125kw/6,700rpm(JPN)
Max.Power(Activematic transmission)		122kw/6,700rpm(JPN)
Max.torque(manual transmission)		189Nm/5,000rpm(JPN)
Max.torque(Activematic transmission)		189Nm/5,000rpm(JPN)

3.3 エンジンの主要開発内容

(1) きびきびしたダイレクトレスポンス

ダイレクトレスポンスの実現を目指し、エンジンでは加速応答レスポンスとトルク特性を作り込んだ。

TG目標の達成のためには慣性モーメントの低減が必要になり、新型ロードスター用にユニークとなる軽量フライホイールを開発した。このことで2代目に比べて、TGは8.6%の短縮を実現した。Fig.4に、フライホイールの軽量

化手法を示す。

G/G_Aveの達成には、高くフラットなトルク特性を追求した。高圧縮比、シーケンシャルバルブタイミング(S-VT)、バリアブルインダクションシステム(VIS (Fig.10))などを採用。また、吸気/排気系の改善 (Fig.5) やエレキスロットルでの緻密なチューニングを行ったことも大きく貢献している。Gについては、従来比6.8%の向上を実現した。これらによって、前述で定義しているダイレクトレスポンスの、のMax.Gまでの目標を達成した。残る、は後述(P-6)する。

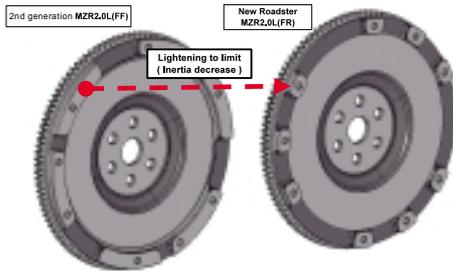


Fig.4 Flywheel Comparison

(2) リニアな伸び感

常用域(2,500rpm以上)ではMax.90%以上に加えて、トップエンドで95%以上のトルクを達成するために、吸気抵抗の低減/排気系の圧力損失の低減 (Fig.5) を行い、リニアな伸び感を実現した。トルク特性をFig.6に示す。

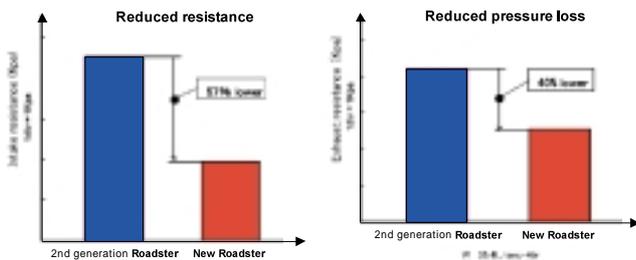


Fig.5 Improved Air Intake and Exhaust System

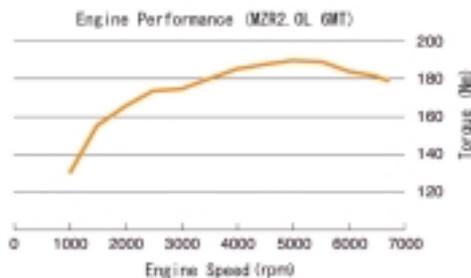


Fig.6 Engine Performance

(3) 心地よいスポーツサウンド

スポーツサウンドの目標は、走行シーンに応じて細かく目標を設定して取り組んだ。Fig.7にサウンド目標を示す。

常用域ではリニアで伸びやかな音質、高回転域ではリニアで力強い音質、そしてパーシャル域ではアクセルワークに応じて少し力強さのある音質目標を設定した。サウンド

作りは、不快な音は低減して特定周波数を出して強調することが有効であり、多くのエンジンデバイスのチューニングに取り組んだ。

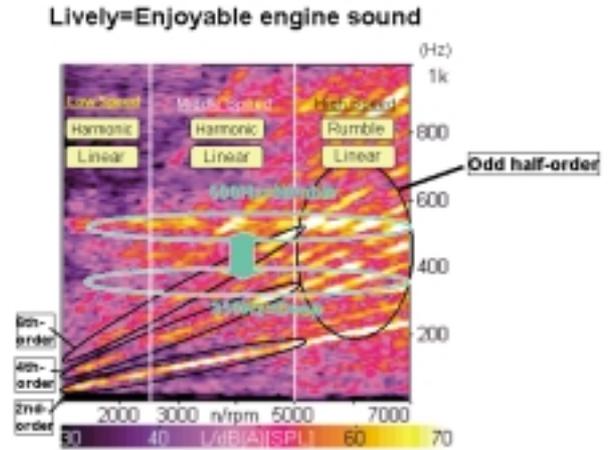


Fig.7 A Color Map of the ArtemiS-generated Proposal

① 常用域でのリニアで伸びやかな音質

まずエンジン本体からの不快な音の低減を図った。エンジン放射音は、鋳鉄製シリンダライナーを組み込んだ軽量コンパクトなアルミシリンダブロックやエンジンカバーで低減した。パワープラントベンディングで発生する音は、高剛性アルミオイルパンやエアコンプレッサの締結剛性を高めて低減した (Fig.8)。



Fig.8 Power-plant Bending CAE

そしてフレッシュエアダクトからの吸気音はダクトの長さをチューニングし、350Hzの音質を強調した。サイレンサは、デュアルテールパイプを採用し、59仕様におよぶ音色を評価 (Fig.9) して200Hz以下の低周波を作り込んだ。



Fig.9 Exhaust Sound Tuning

② 高回転域でのリニアで力強い音質

VIS (Fig.10) を活用して、インテークマニホールドの

管長を活用して音質を作った。低中速回転では長いマニホールドを等長にセットして基本次数成分によるハーモニックなサウンドを出す。高速回転になるとVISで短いポートに切り替えるが、そのマニホールドは不等長にセットして、奇数次数、ハーフ次数成分の音を発生させて、力強いスポーツサウンドを演出した (Fig.7)。これは、車からドライバに高回転で走行していることを知らせるものである。

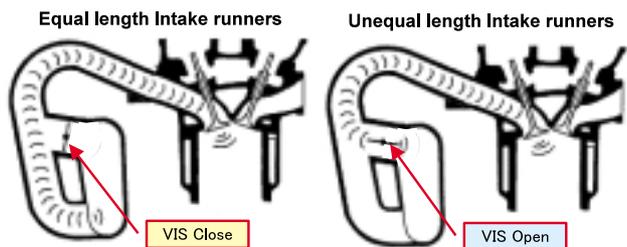


Fig.10 VIS Integrated Plastic Intake Manifold

③ アクセルワークに応じたパーシャル回転域の音質

パーシャル走行時も、スポーツサウンドを楽しめるように、少し力強い1500Hzをユニークな手段で演出した。通常であれば抑えるべきサージタンクからの放射音をタンク壁肉厚や形状をチューニングして鼓動のようなサウンドを作り出した (Fig.11)。

以上のように、スポーツサウンド作りは、不快な音を下げ、数種類の装置を使い、数々の心地よい周波数を強調して実現した。このことは、静かなホールで、管楽器や打楽器など数多くの楽器の音色を楽しませるオーケストラを連想させたので、オーケストラサウンドともいえると思われる。

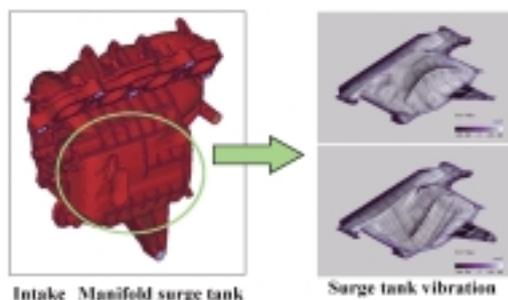


Fig.11 Tuning on Intake Manifold Surge Tank

3.4 エミッション、燃費改善技術

新型ロードスターは、地球環境に及ぼすエミッション、燃費のために、下記の改善技術を採用している。各国のエミッション対応は、Table 3のように訴求している。

Table 3 Emission Regulation Compliance

Destination	Compliance Emission	Engine
Japan	U-LEV(★★★)	2.0L
N.A.(Green States)	ULEV2	2.0L
N.A.(Federal States)	Tier2 Bin5	2.0L
Europe	Stage4	1.8-2.0L
Australia	Stage3	2.0L

(1) フリクションロスの低減

新形状のグラフィイトコーティングを施した軽量ピストン、低張力ピストンリングを採用し、エンジン内フリクションロスを低減し燃費改善を図った。

(2) ポンピングロスの低減

吸気側S-VTは低中負荷での運転時には、吸気バルブのオープンタイミングを早くしてオーバーラップ量を拡大し、残留ガス (内部EGR: 排気循環) の量を増大させた。また、EGRシステムを全エンジンに採用。これにより、ポンピングロスを低減し、燃費やNOx低減に貢献している。

(3) 浄化性能の改善

厳しい排気ガス規制をクリアするために、排気ポート直下に触媒を設定し、燃焼室から触媒までの距離を程よく短くした。また、薄壁の触媒担体も採用し、触媒の早期活性化を促し浄化性能を向上させている。

(4) 制御の最適化

エンジン制御システムには、過渡の追従性が早くなり加減速時の空燃比変動を最小限に抑えられるリニアO₂センサシステムを、マツダ初で採用した。これによって最適な空燃比コントロールを可能にし、エミッション、燃費を低減した。

4. ドライブトレインの詳細

4.1 トランスミッション開発コンセプト

新型ロードスターのトランスミッションは、意のままの走りを楽しむスポーツカー用として、以下を基本コンセプトに開発した。

(1) 新開発6MT

- ベストインクラスのシフトフィールの実現
- 競合力ある静粛性の実現
- 高性能にも適用できるトルクキャパ (300Nm) と最高回転数 (8,500rpm) の実現

(2) 熟成開発5MT

- 定評あるシフトフィールの更なる熟成
- 2.0Lエンジンに適用するトルクキャパ (189Nm)

(3) 新開発6AT

- スポーツ走行と燃費の両立化
- 小気味良い変速フィーリングの実現

4.2 トランスミッションの概要

(1) 新開発6MTは、中ノ関工場のR1-5MTユニットの設備を有効活用した高性能かつ低コストのユニットである。基本設計構想図をFig.12に示す。

(2) 5MTは、シフトフィールに定評のある2代目のM型に1, 2速にトリプルコーンシンクロ、3速にダブルコーンシンクロ、4速にカーボンタイプシンクロを新採用して進化させ、トルクキャパの向上はカウンタシャフトと3速ギヤの強化で実現した。

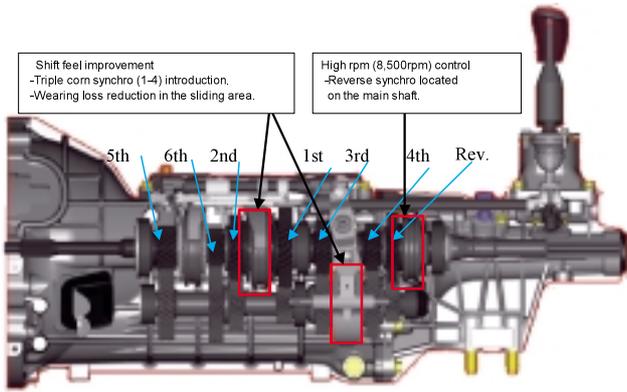


Fig.12 6MT Design Concept

(3) AT車は、2代目の4速ATに代えてマツダ初（FR）の6ATを採用した。アイシン・エイ・ダブリュ(株)製の購入ユニットであるが、新型ロードスター専用のスポーツカーチューニングを行っている。Fig.13に6ATの断面図を示す。

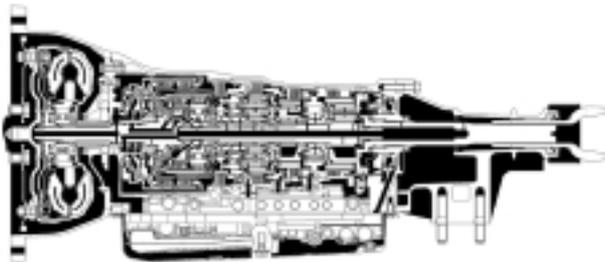


Fig.13 Six-Speed Activematic Transmission

それぞれのギヤ比をTable 4に示す。

Table 4 Transmission Gear Ratio

Market	T/M	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Rev.	FGR
JPN/USA	6MT	3.815	2.260	1.640	1.177	1.000	0.832	3.603	4.100
EU/ADR	6MT	3.709	2.190	1.536	1.177	1.000	0.832	3.603	3.727
ALL	5MT	3.136	1.888	1.330	1.000	0.814	-	3.758	4.100
ALL	6AT	3.538	2.060	1.404	1.000	0.713	0.582	3.168	4.100

4.3 6MTの主要開発内容

(1) きびきびしたダイレクトレスポンス

新開発6MTのギヤ比は、スポーツ走行に最適なクロスギヤレシオに設定した。ダイレクトレスポンスに求められる各ギヤ段での高い駆動力と、ギヤシフト時のスムーズな駆動力の繋がりを追求し、ギヤ比はTable 4のように、各国の市場要件に合わせて最適なセッティングを行った。

(2) 心地よいスポーツサウンド

トランスミッションでは、不快な音を低減してサウンドの演出に貢献した。トランスミッションから発生するギヤノイズは噛み合い起振力の解析により、歯面6特性のチューニングを行って最適化した。またケース放射音については、CAE解析によって効果的なリブ補強を設定し、軽量化を図りながら静粛性を実現した。

(3) 軽快なシフトフィール

ショートストロークでクイックかつ、節度感のあるシフトフィールを実現するため、ストロークはエルゴノミクス評価を行い最適値で設定、更に以下の構造による改善策を織込むとともに、匠ともいえる細部のチューニングを行って、新型ロードスターに相応しいシフトフィールを実現した。

- ・1, 2, 3, 4速にトリプルコーンシンクロを採用
- ・3, 4速シンクロをカウンタ軸上に配置
- ・シフトリンク機構をユニット化 (Fig.14)
- ・シフトロッド支持部へ低摩擦プッシュを採用
- ・チェンジガイドプレートを採用

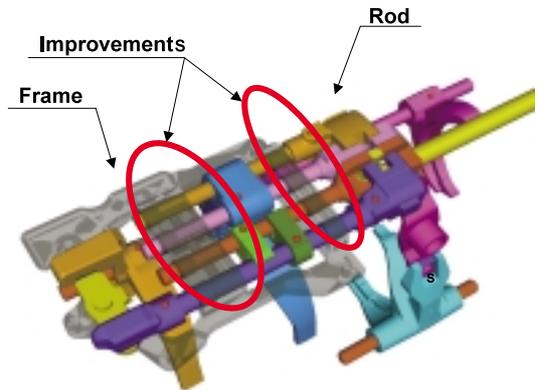


Fig.14 Single Unit Shift Link

また、素早いリバースシフトのため、リバース位置を従来の6速の隣から1速の隣へと移動し、更にミスシフトを防止するためレバプッシュ方式を採用している。

(4) 軽快なクラッチフィール

操作系フィールを軽快なフィールで統一させるため、クラッチフィールの作り込みも注力した。統一感タスク活動で作成したメトリクスを基にアクセル踏力22N/20mmに対応し、クラッチ踏力を最大110Nなど、フィードバック感を含めた特性カーブとして目標設定 (Fig.15) し、ダイヤフラムスプリングやクッションングプレートの特性をチューニングして実現した。また、クラッチのねじり特性を広角化してNVH性能を高めるなど細やかに作り込んだ。

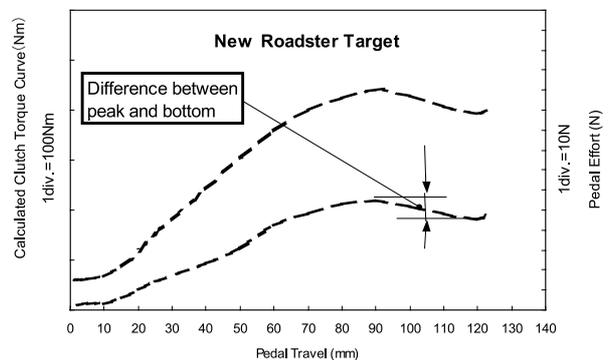


Fig.15 Clutch Characteristic Target

4.4 6ATの主要開発内容

(1) きびきびしたダイレクトレスポンス

新開発の6ATのギヤ比は、従来型に比べ1速は30.8%低速化し低速側ギヤ段で高い駆動力を発揮してダイレクトレスポンスや発進加速性能に大きく貢献した。一方、トップギヤは20.5%高速化というワイドギヤレシオに設定し、高速側ギヤ段での低燃費化を図り、走りと燃費を両立した。

(2) 軽快なシフトフィール

AT車では、切れの良い素早い変速とスムーズなシフトクオリティとの両立を追求した。この6ATユニットは他社ではラグジュアリーカーに適用され、ゆったりとしたシフトフィールを備えているが、スポーツカーに相応しい味付けを作り出すために、シフトクオリティの目標だけでなく、変速特性や変速時間を細かに目標設定した。シフトタイムラグ短縮を目的とするリアルタイムエンジントルク制御を採用。リニアなパフォーマンスフィールを損なう変速ショックを確実に低減するため、エンジンとAT間のきめ細かいコミュニケーションによって、走行状態や回転数に応じて燃料噴射量や点火タイミングを制御し、最適トルクにアジャストしている。そして、サプライヤと合同検証評価会を密に開催して作り込み、小気味よいレスポンスとリニアリティともに満足するシフトフィールを実現した。

4.5 ドライブラインの開発内容

ドライブラインでは、スーパーLSDのトルクバイアスレシオを最適にチューニングして、操縦安定性、発進性、直進走行性を向上させるなど、全ての部品を新開発して目標のパフォーマンスフィールを訴求した。

(1) きびきびしたダイレクトレスポンス

ドライバがアクセルを踏み込むと発生したトルクは、トランスミッション、プロペラシャフト、デファレンシャル(以下デフ)、ドライブシャフト、タイヤに伝達する。この過程でそれぞれの部品に、ねじれと戻りの力が発生するため、車両が最大加速度を得た後に、車両の加速度が前後に変動して収束してゆきダイレクトな感覚を損なっていることをCAE (Fig.17) によって定量的に把握できた。

この対策は、2代目に対しプロペラシャフトのねじり剛性を24%アップ、最も寄与度の高いドライブシャフト (Fig.16) は中空構造によって107%アップした。中実構造に対しては12%の軽量化を実現。これにより前述 (P-2) で定義したダイレクトレスポンスの、目標を達成し、全体としてすっきりダイレクトなレスポンス感覚を実現した。

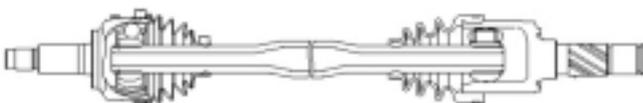


Fig.16 Drive Shaft

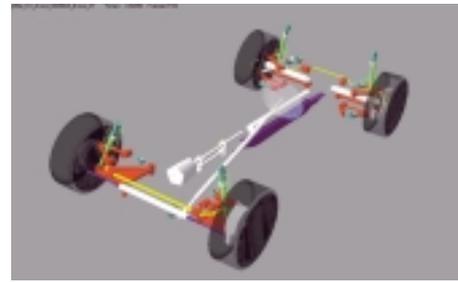


Fig.17 Directness CAE Model

(2) 心地よいスポーツサウンド

デフから発生する音も静粛化してサウンド作りにも貢献している。新開発高剛性/静粛性向上のデフを新開発した。デフキャリアをバンジョウタイプからビルトインタイプに変更しファイナルギヤの支持剛性をアップし、高負荷時のファイナルギヤ噛合い歯当たり変化を抑制。また、ファイナルギヤは新開発など高歯諸元のハイポイドギヤを採用し静粛性を向上した。

これらの、こだわり技術によって、人馬一体に相応しい機敏で楽しく運転できるパフォーマンスフィールを実現した。

5. おわりに

本稿では同じ小見出しが何度も現れる結果となった。このことは新型ロードスターのパワートレイン開発に関わった全ての部門メンバが同じベクトルで開発を進めたことを象徴していると思う。その成果として、23年ぶりに「2005-2006日本カー・オブ・ザ・イヤー」を受賞することができた。これはサプライヤも含め、この開発に関わった全ての関係者が高いモチベーションで取り組んで、こだわりを結晶させたことによるものであり、全員で喜びを分かち合いたい。

著者



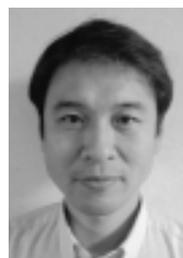
若狭章則



今村善彦



矢嶋綱夫



松尾直也



西村克典



藤富哲男