

14

ロードスター専用新開発SKYACTIV-G 2.0技術紹介 Newly Developed Gasoline Engine “SKYACTIV-G 2.0” for Roadster

村中 宏彰* ¹	迫川 茂博* ²	志村 直紀* ³
Hiroaki Muranaka	Shigehiro Sakogawa	Naoki Shimura
朝倉 浩之* ⁴	鈴木 陽平* ⁵	小池 和哉* ⁶
Hiroyuki Asakura	Yohei Suzuki	Kazuya Koike

要 約

マツダが一貫して追求している「走る喜び」、その象徴ともいえるロードスターのパワーユニットを進化させ、より多くの方々に人生の輝きを感じていただきたい、という気持ちを込めてエンジンの開発を行った。走る喜びと環境性能を高次元で両立することを目指して開発した高効率直噴ガソリンエンジン「SKYACTIV-G」に燃焼改善、機械抵抗低減、サウンド進化の新技术を投入し、パフォーマンスフィールドの理想を追求したエンジンを新開発した。本稿では、この開発コンセプトとその実現のため採用したブレークスルー技術について紹介する。

Summary

The Roadster can be regarded as a symbol of “driving pleasure” that Mazda has been consistently pursuing. The company has recently evolved the power unit of the Roadster in the hope of bringing brightness to the lives of many more people with it.

To develop a new engine that pursues the ideal performance feel, new technologies to improve combustion, reduce mechanical friction and enhance engine sound have been incorporated into “SKYACTIV-G”, a highly efficient direct-injection gasoline engine that the company previously developed with the aim of offering driving pleasure as well as outstanding environmental performance. This paper introduces the development concept of the new engine and the breakthrough technologies adopted to realize the concept.

1. はじめに

ロードスターは初代から一貫して心の通った馬を操るように駆ける「人馬一体」の楽しさを純粋に追求し開発されてきた。スポーツカーにふさわしいリニアで高回転域までストレスなく吹き上がる気持ちの良さ、ドライバーの意図に素直に自動車が反応する心地良さを高める、運転の楽しさをより進化させるパワーユニットを開発した。

本稿では、理想のパフォーマンスフィールドを実現するために高回転・高出力化し、その性能にふさわしいサウンドに進化を遂げた「ロードスター専用新型SKYACTIV-G 2.0」（以下新型）の開発コンセプトとその実現のため採用した新技术について紹介する。



Fig. 1 New SKYACTIV-G 2.0 for Roadster

*1, 3, 5, 6 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

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

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

2. コンセプトと性能

2.1 コンセプト

2016年12月から日本国内に導入したロードスターRFには、優れた環境性能と走行性能を高次元でバランスさせたSKYACTIV-G 2.0をFR搭載しトルクフルで余裕のある走りを実現した（以下旧型）⁽¹⁾。新たに搭載するエンジンとして、「走る歓び」の更なる進化のために、以下のコンセプトの実現に重点を置き開発に取り組んだ。

- ・スポーツカーにふさわしい高回転まで気持ちの良い理想の伸び感
- ・日常でより気持ち良く加速できる軽快感
- ・新開発エンジンにふさわしい環境性能
- ・ドライバーの意図にリニアに応答するレスポンスとサウンド

2.2 出力性能

SKYACTIV-G 1.5のロードスターで好評の高回転まで加速が続いていくような伸び感の実現をねらい、最高回転数を7500rpmとした⁽²⁾。トップエンドまでスムーズに加速の伸びを感じるために、最大トルクからヤクドが一定以上となり高回転で落ち込みの少ないなだらかなトルク特性を目標とした⁽³⁾。そのために6000rpmでは旧型比5%トルクを改善し最高出力は7000rpmで135kWとした。

高回転化による伸び感だけではなく、日常の気持ち良さも高めるために低中速トルクの改善も図った。市街地走行などにおいて使用頻度の高い1500rpmで7%のトルクを改善し、最大トルクは205Nmに改善した。2000rpmから7000rpmまで最大トルクの90%以上を発揮する、どの運転シーンでアクセルを踏んでも楽しめるワイドでトルクフルな特性を作りこんだ（Fig. 2）。

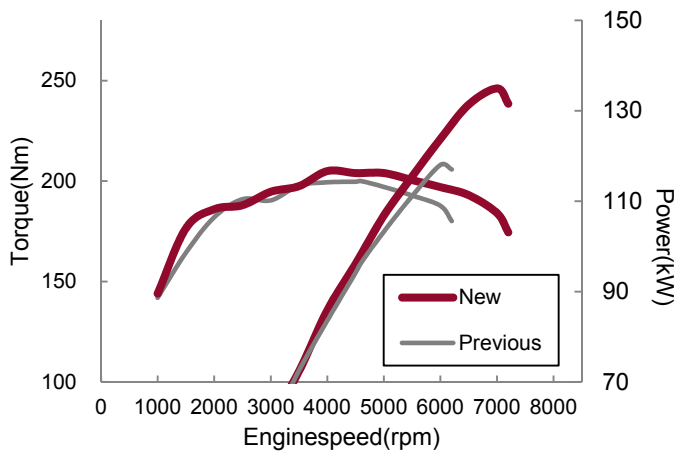


Fig. 2 Engine Performance

高回転域のトルクは吸入空気量の増加とポンピングロ

スの低減に加え、燃焼改善と機械抵抗の低減により実現した。具体的には、吸気量を増加するために、スロットル、インテークマニフォールド、吸気ポートの通気抵抗を低減し吸気バルブの径を拡大した。ポンピングロス低減には、排気の開弁角と排気バルブを拡大し、排気ポートとエキゾーストマニフォールド、メインサイレンサーの排気抵抗を低減した。機械抵抗は、主運動系を改良し低減した。燃焼改善は、吸排気ポートと燃焼室の改良と燃料噴射系の変更によって実現した。低中速域は燃焼改善の効果によって耐ノッキング性を大幅に高めることでトルクを向上した。

2.3 燃費性能

パフォーマンスフィールドの向上だけではなく環境性能も改善した。エンジンを高回転型にするとバルブスプリングの張力増加など機械抵抗が増加し燃費悪化を招く。主運動系の機械抵抗の低減と燃焼改善技術によって、軽負荷から高負荷まで全域で燃費率を改善し、2000rpmでは最大5%の改善を実現した（Fig. 3）。

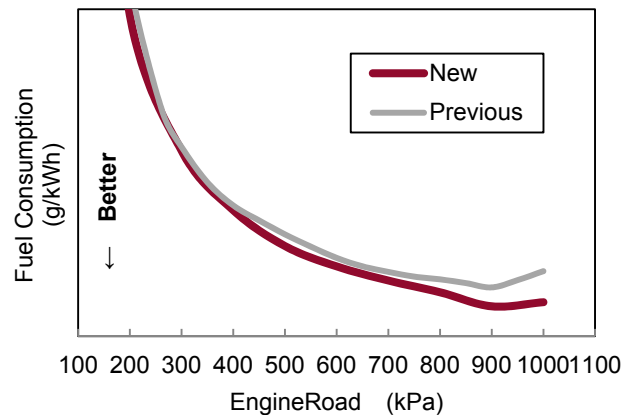


Fig. 3 Fuel Consumption

2.4 サウンド、レスポンス

トルク特性の改良に加えて、サウンドでよりドライビングを楽しめるようにした。トップエンドまで加速するようなシーンではエンジン回転にリンクしたリニアにサウンドとした。日常においてはアクセル操作に応じたフィードバックが感じられるように作り込み、車との一体感を高めた。

サウンド作りのために、ノイズ低減も行った。シリンダーヘッドの剛性改善と主運動系を軽量化で高回転域のエンジン振動を低減した。また、クランクシャフトの回転振動が駆動系に伝わりマニュアルトランスミッションから発生するノイズを低減するために、デュアルマスフライホイールを新開発した。メカニカルノイズに加え、排気音に含まれるノイズ成分も抑え、聞かせたい音をリニアに表現できるサイレンサーを新開発した。

Table 1 Specifications

Engine	Previous	New
Max Power(JIS net)	116kW(158PS) /6,000rpm	135kW(184PS) /7,000rpm
Max Torque(JIS net)	200Nm/4,600rpm	205Nm/4,000rpm
Max Engine speed(rpm)	6800	7500
Bore×Stroke(mm)	φ83.5 x 91.2	←
Displacement(cc)	1,997	←
Compression ratio	13.0	←
Int-valve event angle	258°	←
Exh-valve event angle	241°	254°
Fuel Pressure	20MPa max	30MPa max
Fuel Injector	DI (6holes)	DI (6holes) w./short penetration
Throttle Dia(mm)	55	60
Fly Wheel	Solid Type	Dual Mass Type
Water Jacket Specer	w/o.	w/.
Oil Cooler	w/o.	w/.(MT)

3. ブレークスルー技術

3.1 燃焼改善技術

高回転域と低中速域のトルク改善の両立、更に燃費改善も実現した一番のブレークスルー技術が燃焼改善である。シリンダーヘッドの吸排気ポートと燃焼室の見直し、燃料システムを高圧化することで実現した。特に吸気ポートは、高出力化のための吸気抵抗の低減と、燃焼改善に必要な吸気流動の強化という二律背反の機能の両立を必要とした (Fig. 4)。

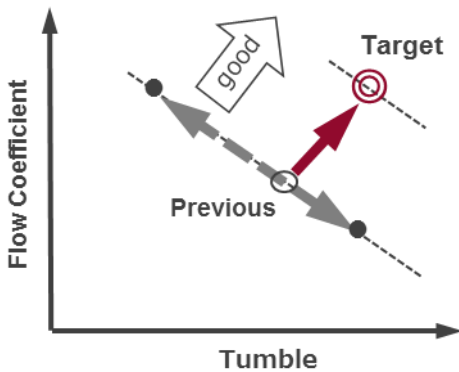


Fig. 4 Target Flow Performance

旧型では、強い筒内流動の生成に有利な独立ポートを採用していたが、新型では抵抗が低いコモンポートを採用し断面積を17%拡大した。面積を拡大しコモンポートにするとポート内の流速が落ち筒内流動の低下を招く。そのため、流れの指向性を強めるようにポート下部のエッジ角度をより寝かせ、ポートの分岐位置と断面積を最適化、更に吸気バルブ周りの燃焼室内の段差を排除する改良をすることで旧型比27%高いタンブル比を実現した (Fig. 5)。

加えて、圧縮工程中にタンブルを加速するようにピス

トン頭頂部を最適化した。その結果、燃焼期間の短縮に必要な圧縮上死点での乱流エネルギーを旧型比50%高めた。

燃料系は、2018年2月導入の新型CX-5から採用している高圧噴射システムを活用し強化したタンブル流と合わせミキシングを促進した。

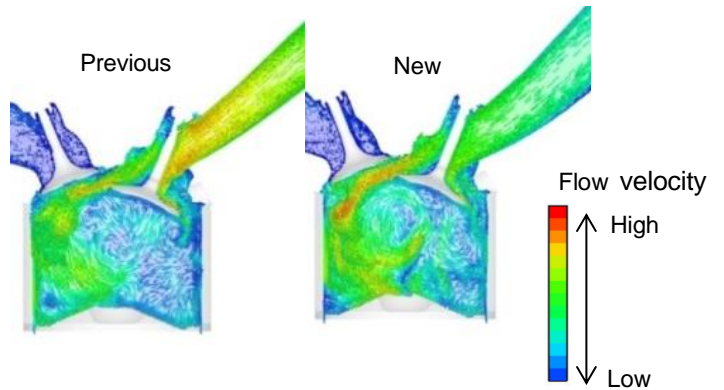


Fig. 5 Charge Motion

筒内残留ガスの排出性を改善するために、排気ポートの形状を見直した。ガス流れの剥離を抑制することで有効断面積を拡大し、ガス流量を18%向上させポンピングロス低減と掃気性改善を実現した (Fig. 6)。

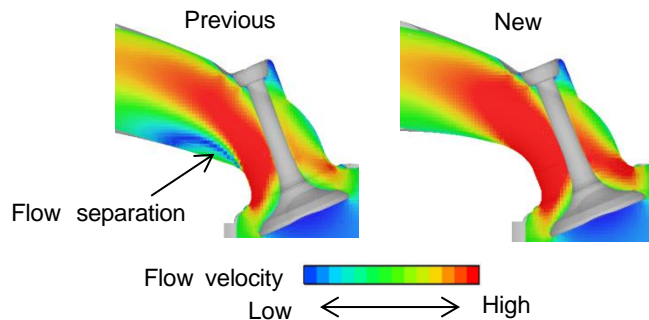


Fig. 6 Gas Flow in Exhaust Port

これらの効果により、燃焼期間を短縮し耐ノック性を大幅に改善した (Fig. 7)。

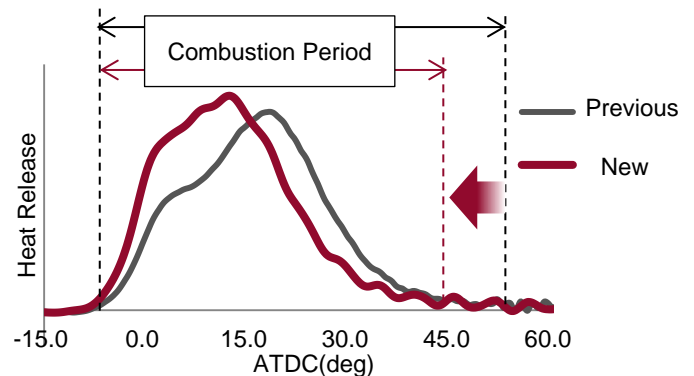


Fig. 7 Heat Release

3.2 機械抵抗低減技術

高回転化に伴い増加する往復系の慣性力を最小化し、重量低減とエンジン振動低減、更に機械抵抗低減を実現するブレイクスルー技術として主運動系部品を新開発した。特にピストンの慣性力はコンロッドとクランクシャフトに掛かるためピストン単体は10%以上の軽量化を実現し主運動系全体の軽量化を図った。

ピストンは、スカートの面積を旧型比30%小さくしながらシリンダー内のピストンの傾き運動を抑えるスカートプロファイルを新開発した。加えて、薄肉で高い剛性となるように燃焼室面裏とピストンピンボスを一体構造として最適化をすることで、燃焼室側の肉厚は最大38%薄くし1個当たり27gの軽量化を実現した (Fig. 8)。



Fig. 8 Piston

コンロッドは、新開発の高強度コンロッドボルトを採用した。また、軽量ピストンに合わせて各部形状を最適化し高回転で必要な剛性を確保しつつ軽量化を実現した。

クランクシャフトは、高強度材へ変更し、製造時の抜き勾配の縮小と最適なウェイトの配置により効率よくバランスさせる改良を加えた。主運動系全体の改良でシステム合計の重量を旧型同等に抑えた。(Fig. 9)

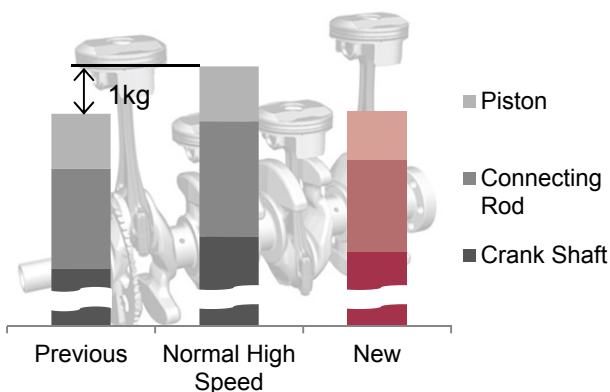


Fig. 9 Weight of Main Motion System

高回転化するとピストンリングの摺動速度が上がりシリンダーライナーとの間に発生する油膜圧力が上昇する。その結果、リングが搔き落としせなくなるオイル量が増えオイル消費が増加する。通常は高回転時に適正な油膜厚さとなるようにピストンリングの張力を高め対応するが

機械抵抗の増加を招く。新型では、上下非対称形状を採用しオイル搔き落とし機能を高めたことで旧型比38%低い張力とし、抵抗低減とオイル消費低減の両立を実現した。

3.3 駆動系振動低減技術

エンジンの高回転化により往復慣性力が高まり、クランク軸上の回転変動は増大する。また、低中速トルクの充実化により燃焼加振力は大きくなる。いずれの場合もトランスミッションへ入力されるトルク変動は増加し、駆動系異音の低減が課題となる。高回転・高出力化に伴って増大する駆動系異音の抑制と、スポーツカーにふさわしいパフォーマンスフィール性能 (軽快レスポンス) 維持という背反のブレイクスルーのため、マニュアルトランスミッション車用に低イナーシャデュアルマスフライホイール (以下、低イナーシャDMF) を新規開発した。(Fig. 10)

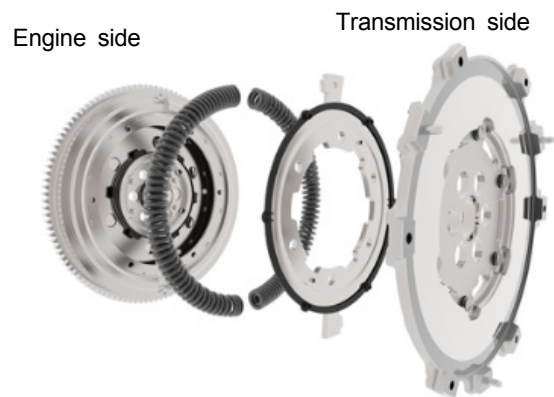


Fig. 10 Small Inertia DMF

一般に、トランスミッション歯打音に代表されるねじり系異音の応答レベルを低減する手段として、起振力低減 (エンジン回転系マス増加)、あるいは駆動系パネの剛性低減が挙げられる。しかし、いずれの手段もアクセル操作に対する車両加速応答の鈍化と駆動系振動の収束性の悪化を伴いレスポンス性能との背反を生じる。背反関係にある両性能を駆動系のねじり共振周波数をコントロールし両立を図った。具体的には、駆動系の振動収束性を支配するねじりの1次共振は旧型同等の周波数とし、駆動系異音を支配する2次共振は低周波化することで振動減衰性を向上させた。(Fig. 11)

1次共振は、エンジン側マスのイナーシャを最小化しフライホイール全体イナーシャを旧型同等に抑え周波数低下を抑制した。エンジン側イナーシャ低減に際しては、フライホイールの回転慣性エネルギーを蓄積するという基本の機能が減少する。MBDを活用してあらゆる運転シーンの検証を行い、部品仕様の選定とエンジン制御の

最適化を行った。

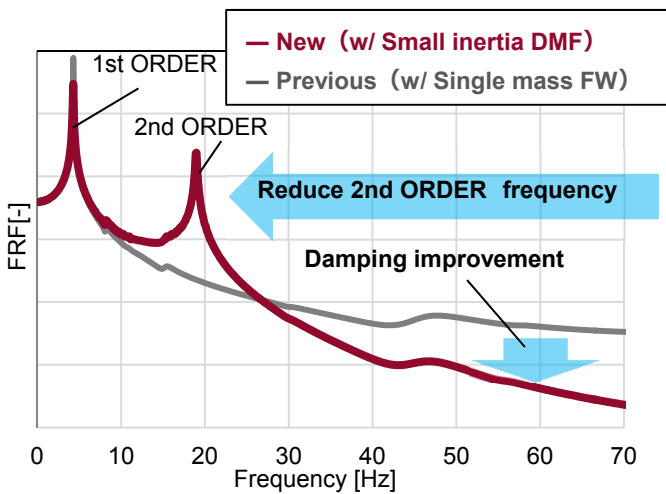


Fig. 11 Drivetrain Frequency Comparison

結果として、乗用車用の従来DMFと比較した場合は全体イナーシャが40%低減となる、ソリッドフライホイール同等の低イナーシャを実現した。

2次共振の周波数においては、トランスミッション側マスのイナーシャを最適化し低周波化を図った。トランスミッション側マスの設計にあたっては、ハウジング内部の風流れを考慮の上、クラッチ熱容量から必要最低限の追加マスとなるよう徹底した軽量化を施した。その結果、歯打ち音の応答レベルを旧型比で約75%の低減を実現した。本技術の採用により、旧型同等のパフォーマンスフィール性能を維持しつつ、静粛性の大幅向上を可能とした (Fig. 12)。

Rattle noise (3rd WOT)

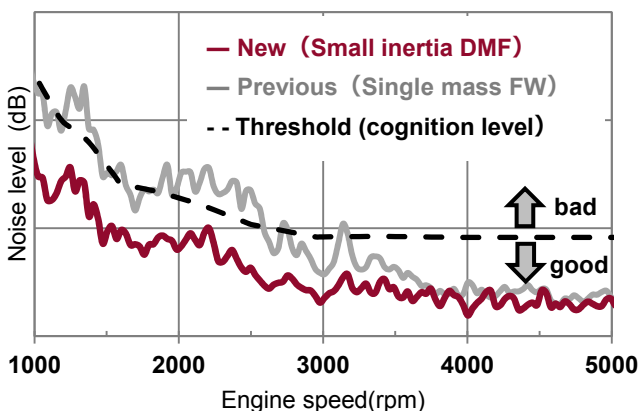


Fig. 12 Noise Improvement Comparison

3.4 排気サウンドの作りこみ

旧型の排気サウンドは、ロードスター用1.5Lエンジンと同様に、軽快な排気サウンドとしていた。新型では、ロードスター用1.5Lのキャラクターに対峙して、パワフルな特性を余すことなく表現するように開発をした。

パワフルなサウンドの主体となるエンジンの次数音をクリアに奏でるため、ガスが排気管を流れる際に生じる高周波音を消音する吸音室を設定し音の質感を高めた。

回転数に応じてリニアに音圧が大きくなる排気サウンドを基本とし、ドライビング視点で音圧が大きくなる領域を設定した。日常の運転シーンではエンジン回転3000rpm以下の使用頻度が高いため、排気サウンドはエンジンの基本次数である2次を中心に3000rpm以下でもエンジン回転の変化が分かりやすいように、リニアリティを失わない範囲で音圧を上げた (Fig. 13)。

回転数に応じてリニアに音圧が大きくなる排気サウンドを基本とし、ドライビング視点で音圧が大きくなる領域を設定した。日常の運転シーンではエンジン回転3000rpm以下の使用頻度が高いため、排気サウンドはエンジンの基本次数である2次を中心に3000rpm以下でもエンジン回転の変化が分かりやすいように、リニアリティを失わない範囲で音圧を上げた (Fig. 13)。

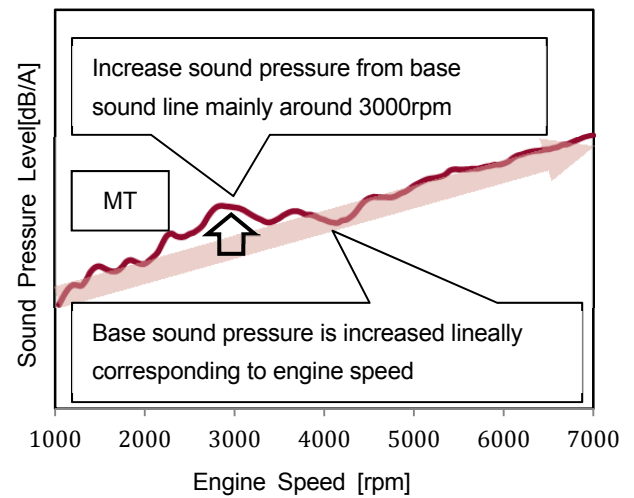


Fig. 13 Exhaust Sound at Tail-Pipe

その結果、アクセルワークに対するサウンドのフィードバックが高まり、ドライバーはエンジンの状態をサウンド(聴覚)で的確に把握できるようになり、スムーズで正確なギアシフト操作が容易になる。また繊細なアクセルの踏み込みに対してもフィードバックが得やすく、前車への追従加速や交差点右左折の徐行などのシーンでも思い通りのドライビングをサポートできるように開発した。

排気サウンドのフィードバック向上のために音圧を意図して高めたが、心地良いサウンド実現に向け、“ドライビングに必要な音圧”と“うるさく感じない音圧”の見極めと両立に注力した。ドライバーが意図して変速をするMT車と、車の変速するAT車では、能動的か受動的かの違いで「うるさい」と感じるレベルとシーンが異なる。MT車とAT車でそれぞれ使用領域を検証し、マフラーの拡張室/レゾネータのチューニングを変え、バストな排気サウンドが体感できるように造り込んだ (Fig. 14)。

排気サウンドの繊細な調律のためには複雑な構造が必要となるが、ガスが流れる経路に直接掛からないように細心の注意を払い設計し排気損失の低減を図った。ガス

の流れをコントロールすることで、ねらいの排気サウンドを得ながらも、低圧損となる理想の構造を得た (Fig. 15)。

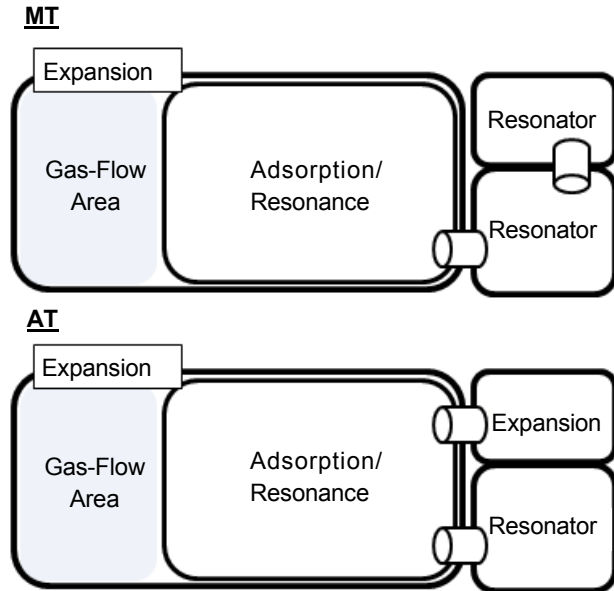


Fig. 14 Concept of Main Muffler for AT and MT

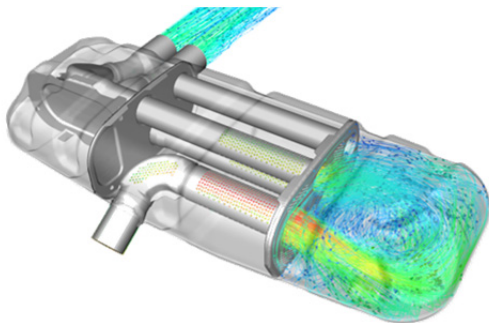


Fig. 15 Gas Flow in Main Muffler

4. おわりに

ロードスター専用の新開発SKYACTIV-G 2.0の主な採用技術について紹介した。紹介した以外にも吸排気系、動弁系、冷却系など専用部品を新設計し、あらゆるシーンでいつでも走りが楽しめるエンジンに仕上げることができた。新型エンジンを搭載したロードスターに込めた「走る歓び」の思いをより多くの方々感じていただき、一人でも多くの方に人生の輝きが届けられたら幸いである。

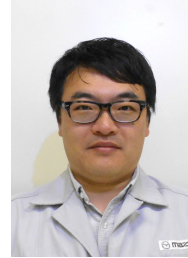
参考文献

- (1) 中山ほか：ロードスターRFの紹介, マツダ技報, No. 34, pp.47-51 (2017)
- (2) 星野ほか：新型ロードスターのエンジン技術, マツダ技報, No.32, pp.124-127 (2015)
- (3) 兼為ほか：新型ロードスターのパフォーマンスフィール, マツダ技報, No.32, pp.114-118 (2015)

■ 著 者 ■



村中 宏彰



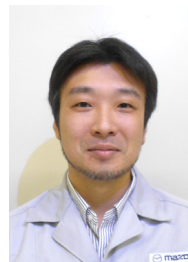
迫川 茂博



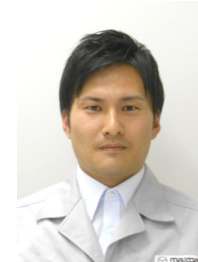
志村 直紀



朝倉 浩之



鈴木 陽平



小池 和哉