

特集：新型マツダデミオ

2

新型デミオのエンジン技術
Engine Technology for New Demio

富澤和廣^{*1} 松尾佳朋^{*2} 大槻 健^{*3}
Kazuhiro Tomizawa Yoshitomo Matsuo Ken Ohtsuki
室谷満幸^{*4} 後藤 剛^{*5} 上月正志^{*6}
Mitsuyuki Murotani Tsuyoshi Goto Masashi Kouzuki

要 約

SKYACTIV-Gは、内燃機関の効率を徹底的に追及し、相反する関係にあった燃費と出力の両方をブレークスルー技術で飛躍的に向上させている。その中で新型デミオに搭載のSKYACTIV-G 1.3Lエンジンは、特に燃費性能を重視し、走りを犠牲にすることなく、世界一の高圧縮比14.0とハイブリッド車並の30km/lという低燃費を実現した。本稿では、このエンジンの諸性能と採用技術について紹介する。

Summary

For the SKYACTIV-G engines, the efficiency of internal combustion has been pursued thoroughly, and both fuel consumption and torque, which conflict with each other, are being improved drastically by the use of breakthrough technologies. Among the SKYACTIV-G engines, fuel efficiency performance was especially valued for the SKYACTIV-G 1.3-liter engine mounted on New Demio. As a result, the world's highest compression ratio of 14.0 and the fuel consumption of 30 km per liter, which is as low as that of hybrid vehicles, were achieved without sacrificing driving performance. This article introduces the engine's performances and adopted technologies.

1. はじめに

近年ハイブリッド車や電気自動車の市場導入が活発化し、電気デバイスによる燃費改善技術の採用が進んでいるが、2020年時点でも自動車の多くは内燃機関を搭載していると考えられている¹⁾。ハイブリッド等の電気デバイスの効果を十分発揮させるには、そのベースとなる内燃機関の効率が高いことが重要である。それを具現化するSKYACTIVエンジンの第1弾として新型デミオに搭載され、世界一の圧縮比14.0とハイブリッド並みの30km/lという低燃費を実現した新開発1.3Lエンジンの諸性能と織り込み技術を紹介する。

2. 開発のねらい

SKYACTIV-Gは、マツダのブランドメッセージである、サステイナブルZoom-Zoomを具現化するエンジンとして、優れた環境性能と走る喜びを高次元で両立することを目指した。ガソリンエンジンを内燃機関の理想へと近づけるための

大きなステップとして、圧縮比やポンプ損失改善にメスを入れ、更にディーゼル比優れている機械抵抗の一層の低減をねらいとした。

本エンジンはその第1弾として、既存プラットフォームのデミオに搭載され、ハイブリッド並みの低燃費を実現したもの



Fig.1 SKYACTIV-G Engine

*1, 4, 5 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.
*6 パワートレイン企画部
Powertrain Planning Dept.

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

である。SKYACTIV-Gは、排気量や搭載車種によらず同体質の特性を持ったコモンアーキテクチャとするが、本エンジンは、その中でも特に燃費性能を重視したものである (Fig.2)。上記ねらいの実現のため、世界一の高圧縮比14.0としながら、燃焼期間を維持できる燃焼技術の確立と、ポンプ損失20%低減および、機械抵抗30%低減により、エンジンの燃費率を現行エンジン比12%低減することを目標とした。

3. エンジン諸元

SKYACTIV-Gは、高圧縮比での燃焼を実現する燃焼技術、ポンプ損失低減技術、機械抵抗低減技術を排気量や搭載車種によらず同体質で展開するコモンアーキテクチャとしているが、本エンジンでは更なる燃費改善技術として、Cooled EGRによる燃焼改善や、カムジャーナル鏡面加工などの機械抵抗低減技術を採用した (Table 1)。

4. 燃費改善技術

4.1 高圧縮比化

高圧縮比化による弊害は、高負荷時の耐ノック性悪化による点火タイミングの遅角化に伴うトルク低下や、高外気環境下および燃料オクタン価バラツキなどによるプリーグニッションの発生などである。これらの課題をブレイクスルーし、高圧縮比燃焼を実現した技術を以下に示す。

(1) ノックによる出力低下対応

ノックによる出力低下は、圧縮比上昇により、圧縮上死点での①筒内ガスの温度や圧力が上昇することでノックしやすくなり、ノック回避のため点火タイミングを遅角化して着火することで実質膨張比が低下するのに加え、②燃焼期間が長くなって熱効率が低下することが主な原因である。

① 筒内ガス温度低減技術

燃料粒子の微粒化と筒内への均等噴射により、燃料の気化潜熱による効果的な筒内ガス温度低減を狙い、6噴口マルチホールインジェクタ (MHI) を採用した (Fig.3)。更に、燃料のミキシング、気化を促進させるために、燃料噴射時期を吸気行程中2段階に分割した噴射制御とした。筒内温度分布の解析を実施し、分割噴射とすることで温度分布が改善し、混合気高温部のガス温度が6°C低減することを確認した。この温度低減は圧縮比0.5低減と同等の効果と考えられ、この効果により耐ノック性が改善し、1,500rpmの全開トルクは5.5%向上した。また、Cooled EGRシステム (Fig.4) を採用し、EGRクーラで冷却された排気ガスを吸気に還流させ、自己着火発生までの時間を長くすることでノックを抑制し、高負荷領域のトルクを向上させた。

② 燃焼期間短縮技術

高圧縮比化のためにピストン頭部形状を盛り上げる際、Fig.5 (a) に示すフラットピストンを用いると、燃焼速度が低下し熱効率は悪化する。これは、初期火炎面がピストンに干渉し、そこで火炎が冷却されて伝播が阻害されたためと考

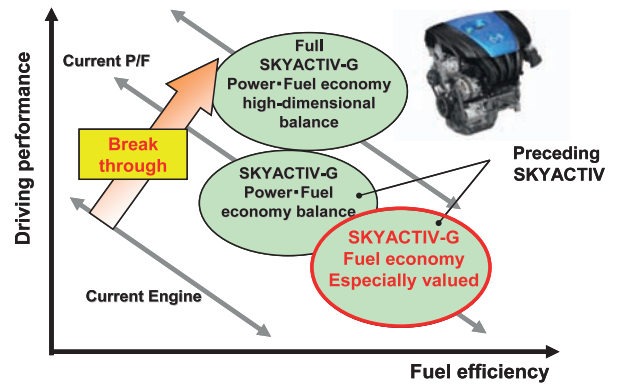


Fig.2 SKYACTIV-G Engine Development

Table 1 Principal Specification

Engine	Current 1.3L	SKYACTIV-G 1.3L
Max Power (JIS net)	66kW/6000rpm	62kW/5400rpm
Max Torque (JIS net)	120Nm/4000rpm	112Nm/4000rpm
Bore×Stroke (mm)	φ74 x 78.4	φ71 x 82
Displacement (cc)	1348	1298
Compression ratio	11.0	14.0
Intake-valve time	Open(BTDC)	-12~28
	Close(ABDC)	80~40
Exhaust - valve time	Open(BBDC)	31
	Close(ATDC)	-1
Fuel Injection	PFI	DI (6Hole Injector)
Combustion Chamber	Flat piston	Cavity piston
Cooled EGR	w/o.	w/.
Int.S-VT	Hydraulic	Electric
Ex.S-VT	w/o.	Hydraulic
Valve train	Direct	Roller follower
Tapet clearance adjustment	MLA	HLA
Camshaft journal finish	STD	mirror finish
Crank main/pin journal dia.	φ50/φ40	φ43/φ43
Chain type	Roller	Roller
	(STD)	(Low friction)
Oil Pump drive	Direct	Chain drive
Oil Pump Control	w/o.	Electric control (2-stage)
Accessory drive belt	Serpentine	Alternator belt + Water pump belt
Accessory drive belt tensioner	Mechanical	Hydraulic

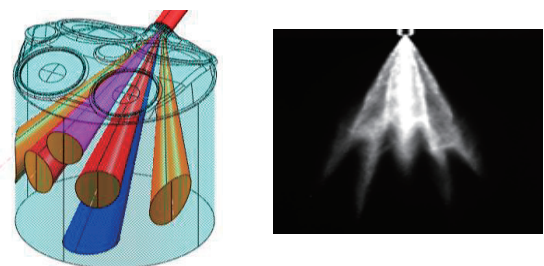


Fig.3 Multi Hole Injector

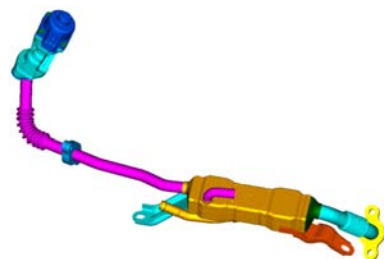
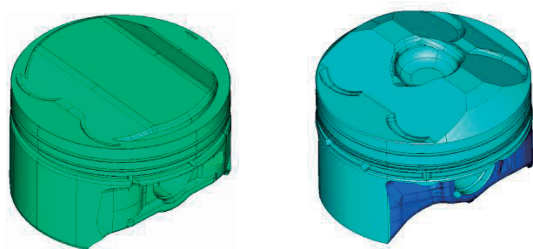
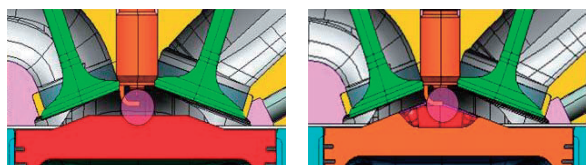


Fig.4 Cooled EGR

えられる。そこで初期火炎の伝播を妨げないピストン形状を狙って、Fig.5 (b) のようにピストン頂部に球形キャビティを設けることで燃焼速度の低下を抑制した⁽²⁾。これにより1,500rpm全開トルクは約4%向上した。更に、筒内流動を強めるために吸気ポート入射角、バルブ傘角などを最適化することでタンプル比 (Tr) : 2.25という高い値を実現した (Fig.6)。また、現行1.3Lエンジンに比べ、スモールポア化することで火炎伝播距離を短くし燃焼期間短縮を図った。これにより1,500rpm全開トルクを更に9%向上できた。



(a) Flat piston (b) Cavity piston
Fig.5 Configuration of Combustion Chamber

これらの技術の織込みにより、従来エンジン並みの燃焼速度を実現し、出力性能は回転上昇に対してフラットな特性とした (Fig.7)。この出力特性とエンジン制御およびCVT制御のチューニングにより、走り性能は現行デミオのレベルを維持しつつ、アクセル操作に対してリニアに加速してゆく上質な走り感を実現した。

(2) 異常燃焼発生に対するロバスト性

高圧縮比エンジンでは正常な火炎伝播前に圧縮着火による異常燃焼が生じるプリイグニッションなどの発生回避が重要になる。圧縮着火はオクタン価、圧力、温度、時間に依存し、低オクタン、高有効圧縮比、高温、低回転側で発生リスクが高くなる。SKYACTIV-Gは耐プリイグニッション限界を高めるため、吸気圧縮分割噴射を採用した。その結果、従来エンジンに比べ有効圧縮比を高く設定することが可能となり、低速トルクの向上が図れた。また、環境、劣化、燃料性状等の条件に対してロバストにするため、プリイグニッション予測制御を採用し、プリイグニッション限界に近づいた際は吸気バルブ閉時期 (IVC) を遅らせて有効圧縮比を下げることでプリイグニッション発生からの余裕度を確保している (Fig.8)。更に、万が一プリイグニッションが発生する条件に入った場合でも軽度の燃焼変化をイオン電流の変化として検出し、空燃比やIVCのコントロールによりプリイグニッション回避制御を行うロバストなシステムとした。

(3) 圧縮比向上による熱効率改善

開発初期段階において、圧縮比を13以上に上げて燃費改

善が頭打ちになる現象が発生した (Fig.9)。この原因は、プラグ付近の高温の既燃ガスがピストン頭部壁面に接触するこ

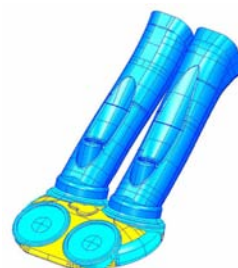


Fig.6 High Tumble Ratio Head Port

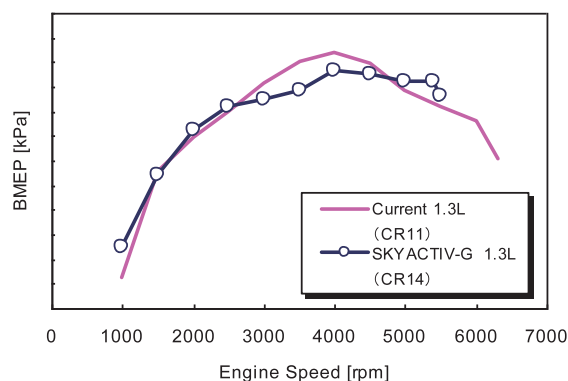
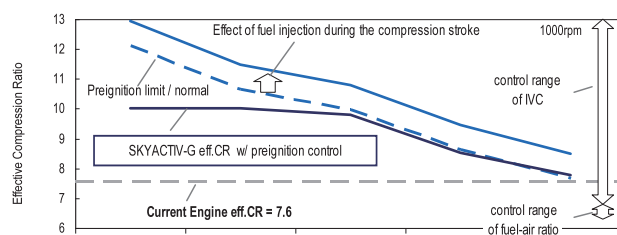


Fig.7 WOT Performance



NC Injection.T.	75	75	77	91	101
Injection.T.	Closed valve	Closed valve	Closed valve	Closed valve	Closed valve
Compression Ratio	Nominal	Nominal	Nominal	Bad	Worst
Fuel	Average	Average	Average	Average	Worst
Intake air temp.	Normal	High	High	Highest	Highest
Coolant temp.	Normal	Normal	High	High	Highest
atmosphere P.	Normal	Normal	Normal	Highest	Highest
Humidity	Normal	Normal	Low	Low	Lowest

Fig.8 Relation between Pre Ignition Limit and Effective Compression Ratio

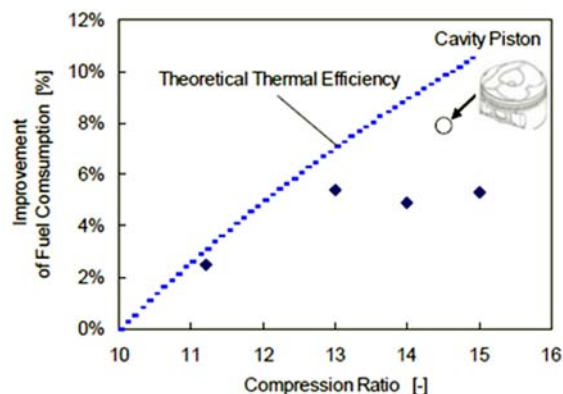


Fig.9 Relation between Compression Ratio and Fuel Consumption

とによる冷却損失の悪化が支配的であることが分かった⁽³⁾。前述の球形キャピティピストン (Fig.5 (b)) により既燃ガスがピストン壁面に接する面積を低減することで冷却損失を改善し、燃費向上度を理論値近くまで改善した。また新型デミオではStep ATと比較して低回転高負荷域の使用頻度が高いCVT (Fig.10) を採用している。Cooled EGRの採用により高負荷域のノッキング発生を回避することで高圧縮比本来の熱効率を実現したエンジンとCVTを組み合わせ、徹底的な熱効率の改善を追求した (Fig.11)。

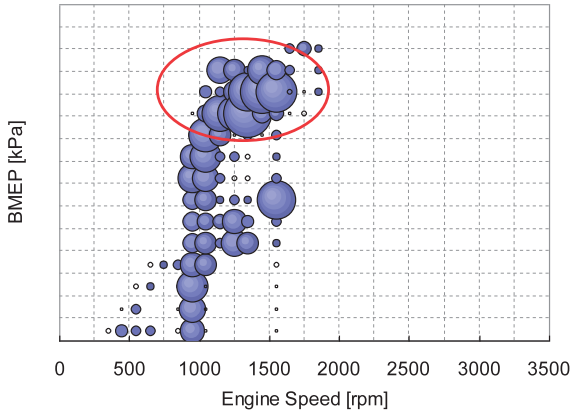


Fig.10 Engine Operating Frequency Map for CVT

4.2 ポンピングロス低減

ポンピングロスを低減するため、吸気バルブの閉時期をABDC105度まで遅くし、更にDual S-VT (Sequential Valve Timing) (Fig.12) の採用により内部EGRを制御することでポンピングロスを約20%低減した。従来、ここまで吸気遅閉じにすると有効圧縮比の低下による燃焼安定性悪化で燃費改善できなかったが、高圧縮比化により、遅閉じ量を増加しても有効圧縮比が維持できることから、燃焼安定性を確保しつつ大幅なポンピングロス低減が実現できた (Fig.13)。部分負荷運転では、吸気バルブ閉時期をABDC105度まで遅くしているが、スロットル全開時には即座に吸気バルブ閉時期を出力に有利なABDC36度まで動かす必要があり、素早い応答性を低回転から常に安定して確保できる電動式の吸気S-VTを採用した。この電動S-VTは前述のブリイグニッション回避のため吸気閉時期を素早く正確にコントロールする要求からも重要な部品となっている。

4.3 機械抵抗低減

以下技術の織込みにより、エンジン全体の機械抵抗を現行機種比30%低減した (Fig.15)。

- (1) 往復回転系：クランクジャーナル細軸化による回転抵抗低減や、ピストンスカート剛性適正化とリング張力低減によるシリンダライナの摩擦抵抗低減、ピストンやコンロッドの軽量化 (Fig.14) による往復慣性力の低減により、往復回転系の機械抵抗を20%低減した。
- (2) 動弁系：ローラフォロアの採用、カムリフトカーブの最適化によるバルブスプリング荷重低減、カムジャーナル鏡

面加工により動弁系の機械抵抗を54%低減した。

- (3) チェーン系：高剛性ストレートガイドの採用によるチェーンとガイド間の摩擦抵抗低減や、レバーに作用する荷重分担均等化によるチェーン挙動の安定化でチェーン張力を低減するとともに、チェーンリンク形状を見直しチェーンとガイド間の油膜形成を促進させた低フリクションチェーンの採用により、チェーン系の機械抵抗を30%低減した。

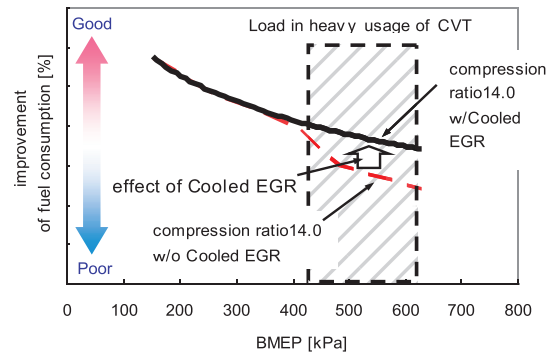


Fig.11 Improvement of Fuel Efficiency in Cooled EGR

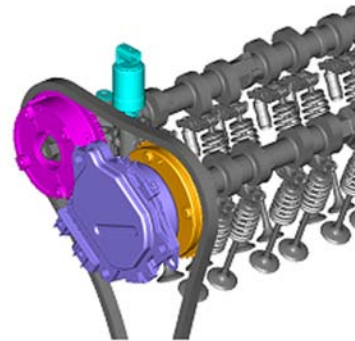


Fig.12 Dual S-VT

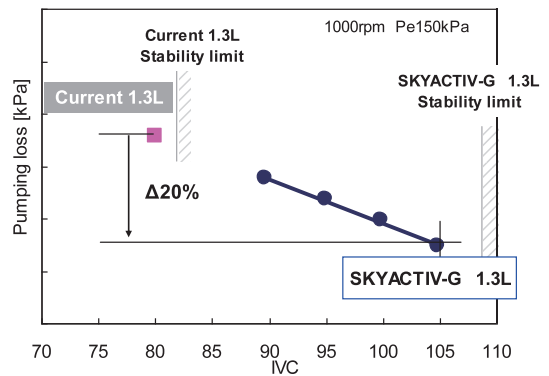


Fig.13 Pumping Loss Reduction

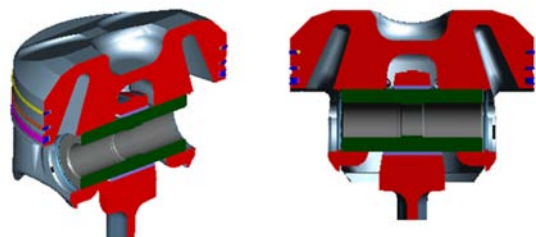


Fig.14 Light Weight Piston and Conrod

- (4) 冷却系：冷却水通路の抵抗低減によりウォーターポンプの仕事量を低減した上で、高効率樹脂インペラの採用によりウォーターポンプの効率を改善し、冷却系の機械抵抗を27%低減した。
- (5) 補機駆動系：ベルト張力を低減してもベルト振動の悪化を抑制できる最適補機配置を採用した上で、油圧式オートテンションナの採用によりベルト振動時のダンピング性を高めることでベルト張力を下げ、機械抵抗を13%低減した。
- (6) 潤滑系：オイルポンプ～各油圧デバイス間の経路シンプル化による圧力損失低減や、各油圧デバイスの要求油圧のMin化を行った。その上で、国内メーカ初となる油圧フィードバックと電子制御油圧切替え機構を搭載したオイルポンプ (Fig.16) の採用によりエンジンの運転状態に応じて必要な油圧にコントロールすることで、潤滑系の機械抵抗を57%低減した。

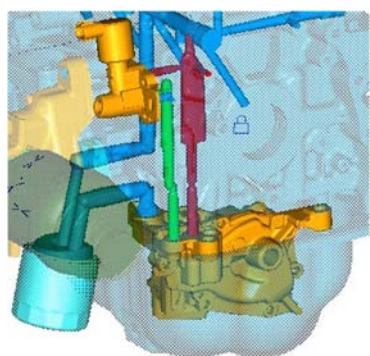


Fig.16 Oil Pump with Oil Pressure Control System

上記の技術により、エンジンの燃費改善目標を達成した (Fig.17)。

5. エミッション低減技術

HCは、エンジンおよびキャタリストが低温時にその多くが排出されるため、低減のためにはキャタリスト早期昇温とその活性開始前のエンジンからのHC排出量抑制が重要である。始動時のHCを低減するため、MHIを用いて始動燃圧を6MPaまで上昇させて燃料を微粒化すること (Fig.18) により、始動時のHC排出を約半分に低減した (Fig.19)。始動直後の早期キャタ昇温については、点火時期リタードにより排気ガス温度を上昇させる方法が知られているが、点火時期のリタードは、それに伴う燃焼安定性低下により制約を受ける。本エンジンでは、直噴の利点を活用し、プラグ周りに可燃混合気を形成し弱成層燃焼を行っている。この効果と、高圧縮比化による燃焼安定性向上効果により、燃焼安定性を確保しながら点火時期リタードによるガス温上昇を実現した。

6. エンジン音質

6.1 エンジンマウント振動低減

静粛かつ加速時のスポーティなエンジン音質を実現するため、

300Hz近傍のサウンドを際立たせるチューニングを実施し、軽量化・機械抵抗低減と静粛性の両立を実現した (Fig.20)。

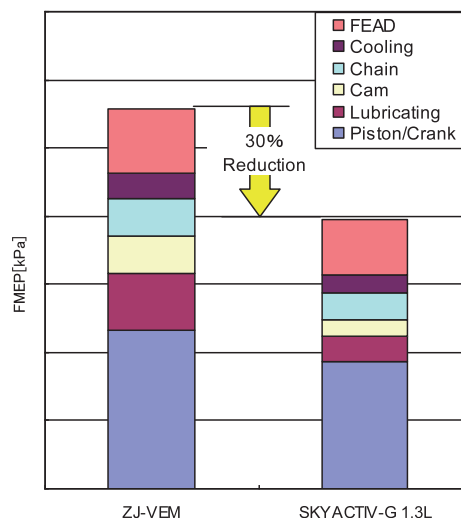


Fig.15 Reduction in Mechanical Resistance (1,500rpm)

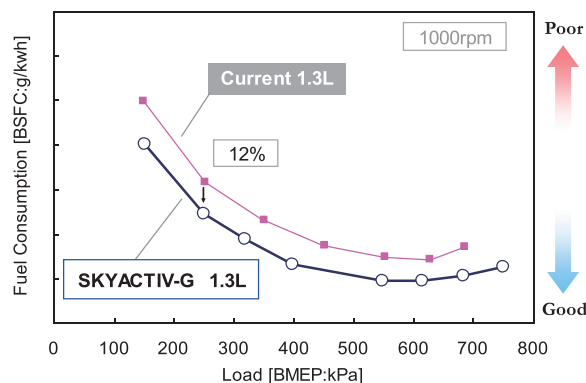


Fig.17 BSFC Curve

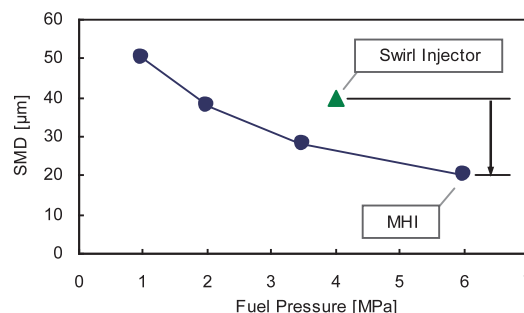


Fig.18 Relation between Fuel Pressure and Fuel Spray Dia

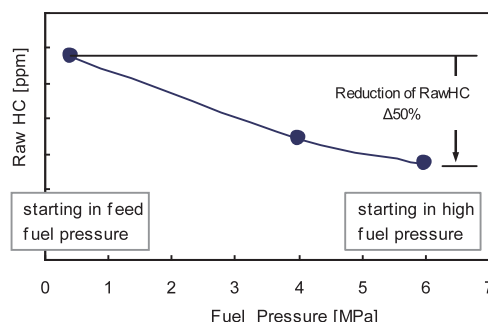


Fig.19 Relation between Fuel Pressure and RawHC

- ① 軽量・高剛性構造系：ロアブロック構造採用により主軸受け支持剛性とエンジンブロックねじり／横曲げ剛性を確保するとともに、パワープラント変形の節位置の最適化チューニングを実施し、軽量化と振動レベル低減を両立させた (Fig.21)。
- ② クランクシャフトねじり振動とパワープラント構造系の共振による振動レベルの増加を抑制するため、クランク系のねじり振動周波数とパワープラント周波数のチューニングを行い、クランク軸細軸化による機械抵抗低減と低振動を両立させた (Fig.22)。

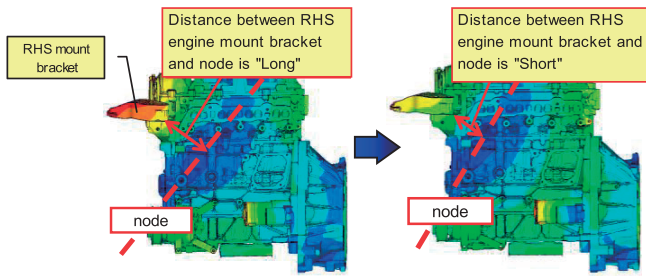


Fig.21 Tuning for Nodes of Power Plant Bending (PPB)

6.2 エンジン放射音低減

更に、CAEによる最適化解析により、静粛性に寄与の高い1~1.5kHzのエンジン放射音低減と軽量化の両立を図った。特にローラフォロア特有の振動入力低減のため、カム表面の加工うねり精度をローラフォロア径に合わせて最適化することで、シリンダヘッドへの振動入力を5~10dB低減した。またシリンダヘッドの点火コイル穴部にブリッジ構造 (Fig.23) を設けることで、主要な振動伝達系であるシリンダヘッドのねじり振動を1~2dB低減した。

7. まとめ

サステイナブルZoom-Zoomを具現化するSKYACTIVエンジンの第1弾である新開発1.3Lガソリンエンジンの織り込み技術を紹介してきた。SKYACTIVエンジンは今後、他排気量およびDEなどに同体質の技術を織り込んだエンジンが展開されてゆく予定であり、引き続きこれらのエンジンで走る喜びと優れた環境性を具現化する技術に磨きをかけるべく、努力を続けてゆきたい。

参考文献

- (1) 環境対応車普及方策検討会：環境対応車普及によるCO₂削減予測，環境対応車普及戦略，2010，p.129
- (2) 西田正美ほか：高圧縮比エンジンの燃費改善技術について，第21回内燃機関シンポジウム，p.539-544 (2010)
- (3) 山川正尚ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発 2011年5月18日自動車技術会春季学術講演会において発表

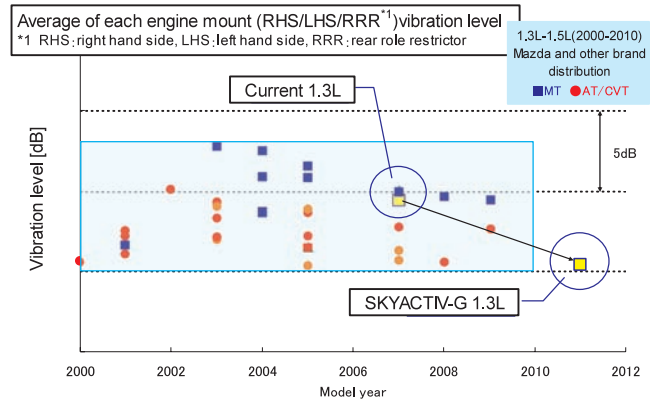


Fig.20 Engine Vibration Level (Middle Frequency) at WOT (Measuring Point: bases of Engine Mounting Brackets)

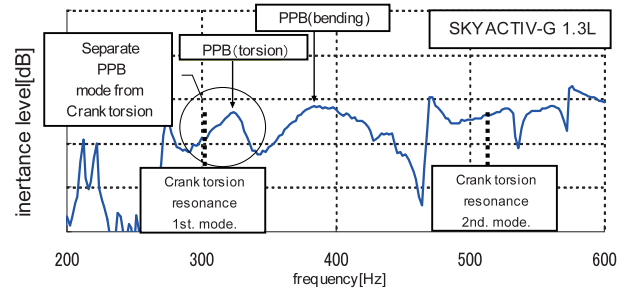


Fig.22 Relation between PPB Frequency and Crank Shaft Torsional Vibration Frequency

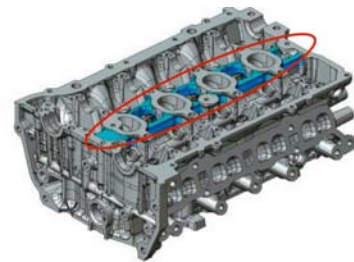
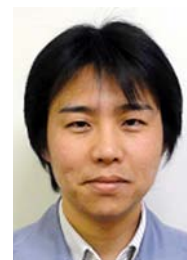


Fig.23 Stiffness Improvement Structure for Cylinder-Head

■ 著 者 ■



富澤和廣



松尾佳朋



大槻 健



室谷満幸



後藤 剛



上月正志