

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

高籾 達也*4

Tatsuya Takahata

草開 良治*2

Yoshiharu Kusabiraki

中原 康志*5

Yasushi Nakahara

平岡 哲男*3

Tetsuo Hiraoka

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。)

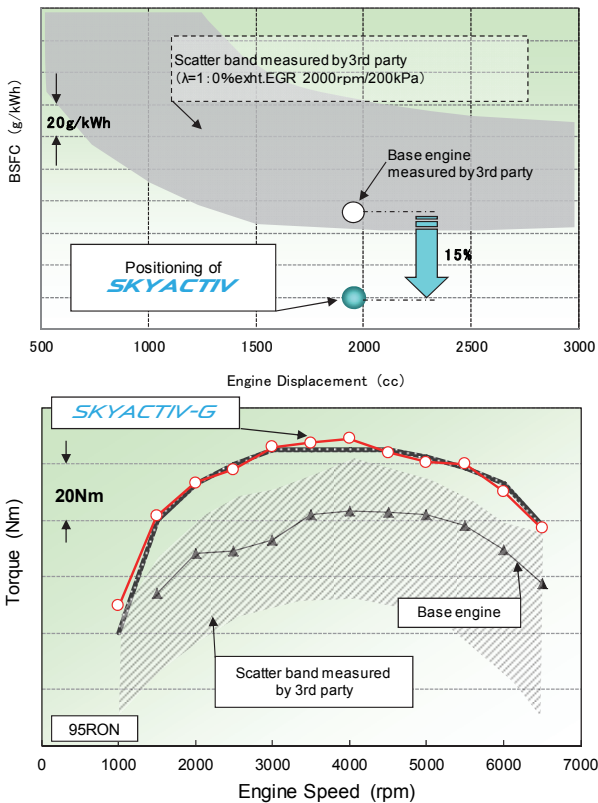


Fig.1 Positioning of SKYACTIV-G⁽¹⁾

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。

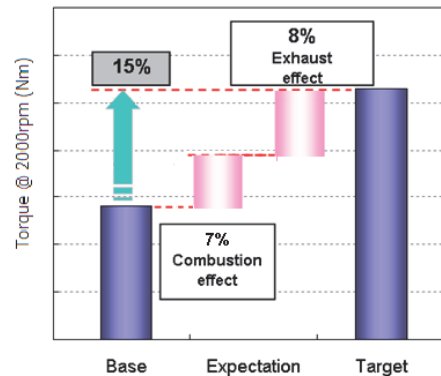


Fig.2 Roadmap to Achieve the Torque Target⁽²⁾

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⁾。

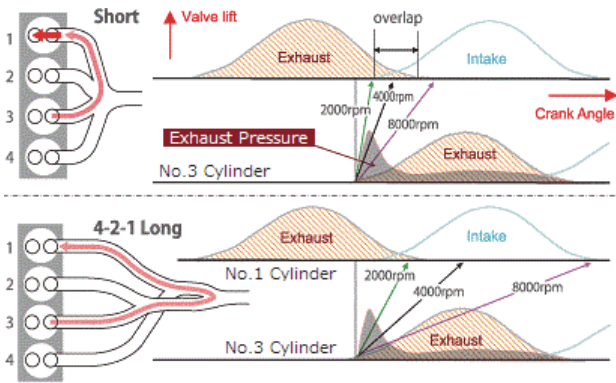


Fig.3 Advantages of 4-2-1 Exhaust System⁽²⁾

(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)。

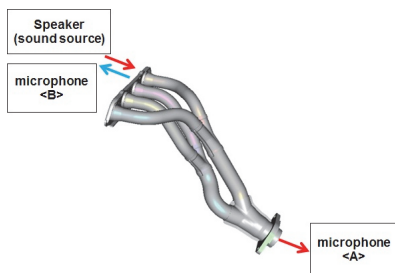


Fig.4 Image of Acoustic Excitation Test

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。

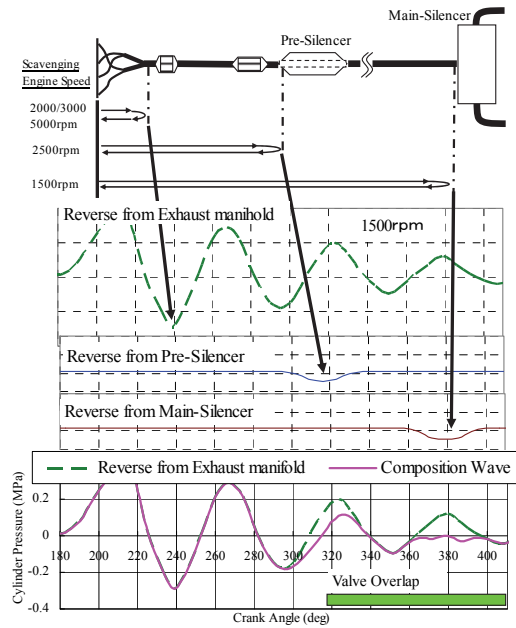


Fig.5 Optimization of Exhaust Pulsation by Silencers

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）。

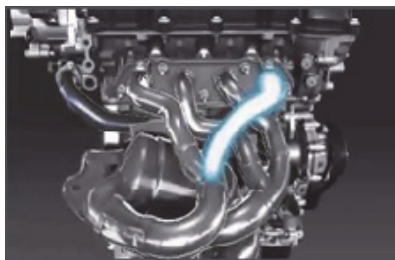


Fig.6 “Loop type” 4-2-1 Exhaust System

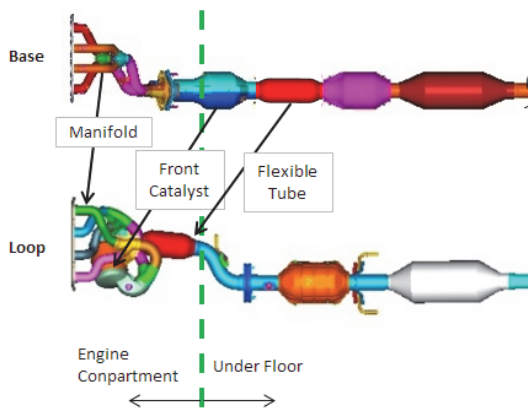


Fig.7 Packaging Breakthrough by Loop Type Exhaust System

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。

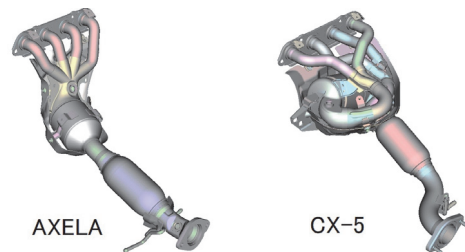


Fig.8 Exhaust Manifold of New AXELA and CX-5

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。

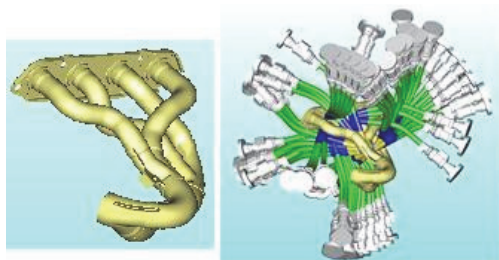


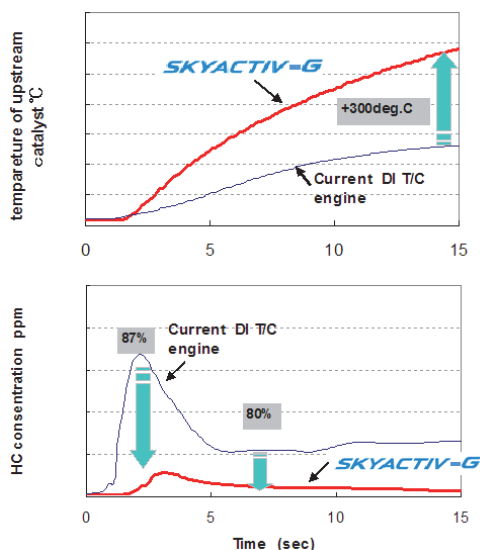
Fig.9 Investigation of Welding Torch Accessibility

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こと、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) 石野勅雄ほか：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