

特集：新型CX-5

7 新型ガソリンエンジン「SKYACTIV-G 2.5気筒休止」の開発 Newly Developed Gasoline Engine “SKYACTIV-G 2.5 with Cylinder Deactivation”

野田 明裕*¹ 荒川 博之*² 居軒 年希*³
Akihiro Noda Hiroyuki Arakawa Toshiaki Inoki
山本 賢宏*⁴ 本瓦 成人*⁵ 西本 敏朗*⁶
Takahiro Yamamoto Narihito Hongawara Toshiaki Nishimoto

要 約

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、走る歓びと環境性能を高次元で両立させた「SKYACTIV-G」を開発し、市場で好評を得ている。一方で、他社はカタログ上の燃費と出力性能を向上させたダウンサイジングエンジンを量産し、SKYACTIV-Gの優位性をカタログ上で脅かしている。このたび、意のままの走りと実用運転での燃費の良さを追求する「ライトサイジング」の考え方を進化させた新型エンジンを開発し、新型CX-5に搭載した。新型エンジンは、SKYACTIV-Gの燃焼技術／抵抗低減技術の進化に加え、気筒休止技術を採用することで、全ての負荷領域でダウンサイジングエンジンの熱効率を上回り、走り（余裕駆動力）と低燃費を更に高次元で両立させた。本稿では、このエンジンのコンセプトと導入した新技術について、気筒休止技術を中心に紹介する。

Summary

Mazda had developed “SKYACTIV-G” based on its long-term vision, “Sustainable Zoom-Zoom”. The engine has achieved both driving dynamics that offer drivers the opportunity to celebrate driving and excellent environmental performance, and received a favorable reception from the market. On the other hand, Downsized engines mass-produced by other OEMs have become a competitive threat to SKYACTIV-G. Mazda has therefore developed a new engine based on the “Rightsizing” concept evolved to pursue highly responsive driving and good real-world fuel economy, and installed it in the All-New CX-5. The new engine, which has adopted cylinder deactivation system as well as the combustion technologies and friction-reducing technologies evolved from SKYACTIV-G, has excelled down-sized engines in thermal efficiency over the entire load range and further enhanced the balance between driving dynamics and low fuel consumption. This paper introduces the concept of the engine and the adopted technologies with a focus on cylinder deactivation system.

1. はじめに

マツダは、優れた環境性能と走行性能を高次元でバランスさせることで「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」を具現化した「SKYACTIV-G」を開発し、お客様に提供し好評を得てきた⁽¹⁾ ⁽²⁾ ⁽³⁾。一方、他社からはダウンサイジングエンジンが市場投入され、競合環境が激しくなっ

ている。

この競合環境の中でSKYACTIV-Gの優位性を保つため、新型CX-5のパワーソースとして、2.5L SKYACTIV-Gの優れた基本性能をベースに更なる進化を織り込んだ新型エンジンを開発した。本稿では、新型エンジンの開発コンセプトとその実現のために導入した新技術を気筒休止技術に焦点を当てて紹介する。

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

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

*4 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

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

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

2. エンジン開発コンセプト

カタログ燃費を測定する走行モードは比較的軽負荷の使用頻度が高いが、実際のお客様の使われ方は多様で、軽負荷から高負荷、全開域まで幅広く使用する。マツダは、お客様の使われ方を想定した“実用燃費”と“意のままの走り”を両立させるため、適切な排気量を確保してきた（ライトサイジング）。しかしながら、排気量の大きさゆえに軽負荷域の燃費効率では、他社ダウンサイジングエンジンに劣る領域がある。また、冷間時にはSKYACTIV-Gの持つ高い効率を十分に発揮できず、カタログ燃費との乖離を生んでいる。

これらの現状認識を踏まえ、全てのシーンで優れた燃費と意のままの走りを実現するため、以下のコンセプトを掲げて既存エンジンを進化させた。

- ✓ 耐ノック性改善による高負荷域の更なる燃焼改善
- ✓ 高負荷域の優れた燃焼を軽負荷域でも実現することによる劇的な燃費改善
- ✓ 暖機促進による冷間時の燃費改善

加えて、高価な後処理システムに頼ることなく、今後一層の厳しさを増すエミッション規制に対応するため、SKYACTIV-Gで培ってきた筒内空気流動や燃料噴射技術の更なる進化を実現した。

3. エンジン諸元とシステム

マツダは究極の内燃機関を目指し、Fig.1に示した7つの制御因子を理想状態に近づける取り組みを進めている。

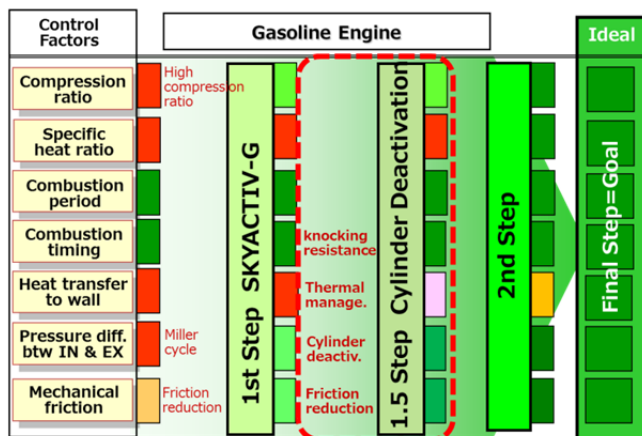


Fig. 1 Vision for Evolution of Internal Combustion Eng

新型エンジンは、このロードマップに従いFig.2に示す新技術を採用した。SKYACTIV-Gは高圧縮比化に代表される燃焼技術の革新により、燃料消費率を大幅に低減し

た。新型エンジンでは、この強みを更に進化させるべく、ポートやピストン形状の工夫により耐ノック性を向上させ、高負荷域の燃料消費率を改善した。そして、この優れた燃焼を軽負荷域でも実現させるため「気筒休止システム」を採用した。更に「非対称ピストンリング」や「可変容量オイルポンプ」により機械抵抗を低減させることで、全ての負荷領域でダウンサイジングエンジンを凌駕する燃料消費率を達成し（Fig. 3）、かつ出力性能を改善した（Fig. 4）。

また、エンジン始動直後の冷えた状態では燃料が気化しにくいため余分な燃料が必要になる。新型エンジンは、「冷却水制御バルブ」の採用により、冷却水の循環経路を適切に切り替えることでエンジン暖機を促進し、冷間時の余分な燃料を大幅に低減した。

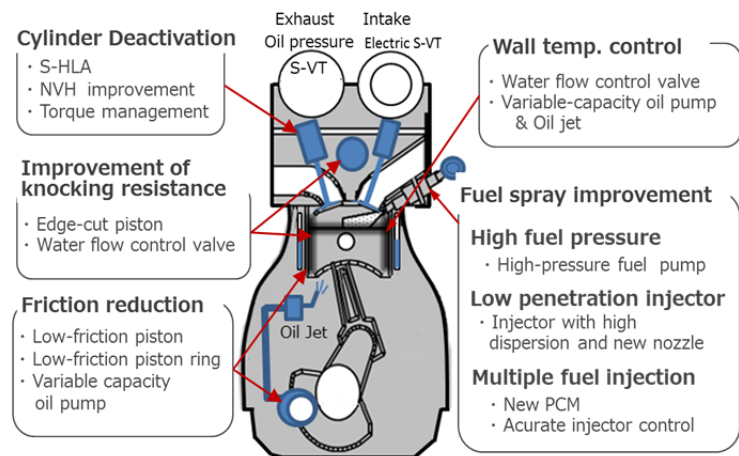


Fig. 2 SKYACTIV-G 2.5 with Cylinder Deactivation

Table 1 Specifications

Engine	SKYACTIV-G 2.5	SKYACTIV-G 2.5 Cylinder Deactivation
Engine Type	In-Line 4	←
Displacement	2488cm ²	←
Bore x Stroke	89mm x 100mm	←
Compression Ratio	13	←
Fuel Injector	DI 6 holes	DI 6 holes w/short penetration
Fuel Pressure	20MPa max	30MPa max
Valve Train	HLA ^(*) + Roller follower	#1/4: S-HLA + Roller follower #2/3: HLA + Roller follower
Oil Pump	Electric control 2 stage	Electric control Variable
Coolant Flow Control	w/o	w/

*1: Hydraulic Lash Adjuster

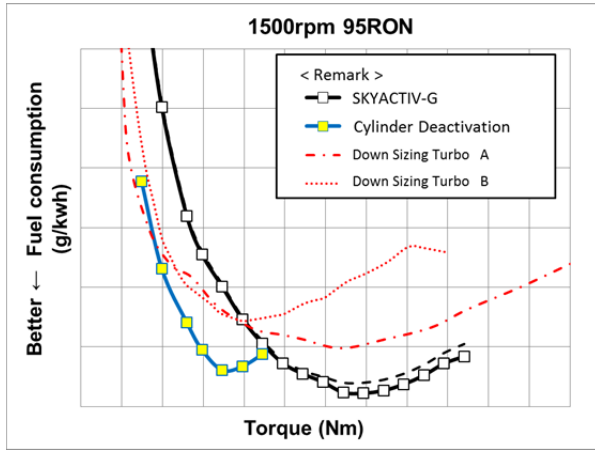


Fig. 3 Fuel Consumption Characteristics

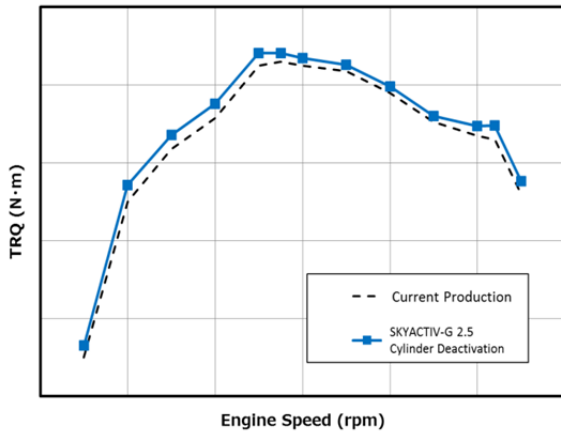


Fig. 4 Engine Performance

Fig. 5 に回転数とトルク軸での燃費率マップを示す。色が薄いほど燃費が良いことを示している。軽負荷域の燃費を改善することで、燃費同等のまま高速低負荷を使用できるため、ギア比の選択自由度が拡大する。つまり、気筒休止技術を走りの改善に活かすことができる。

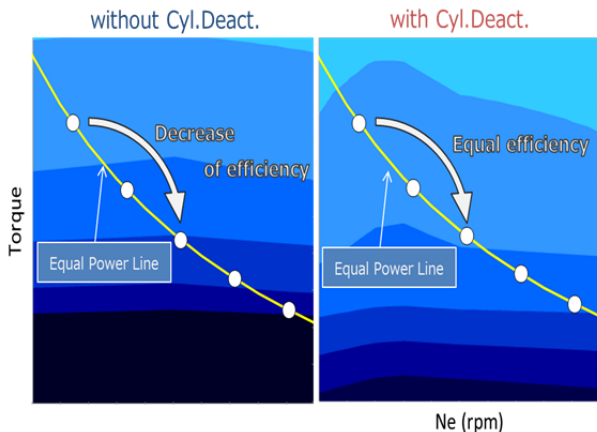


Fig. 5 Fuel Consumption Map

4. ブレークスルー技術

4.1 バルブ停止機構

吸排気バルブの作動を停止し、ガス交換をなくすことで気筒休止を実現する。動弁システムにスイッチャブル・ハイドロリック・ラッシュアジャスタ（以下 S-HLA）を採用することで、ガス交換をなくした。通常は S-HLA が支点、バルブが作用点となりバルブが作動する。これに対し、油圧により S-HLA のロックピンを解除することで、S-HLA が作用点となりバルブの作動を停止させることができる (Fig. 6, 7)。

ロックピンを速く確実に解除することが重要であり、切り替え用の油路形状を造り込むことで、オイル中に混入する空泡の影響を最小化した。

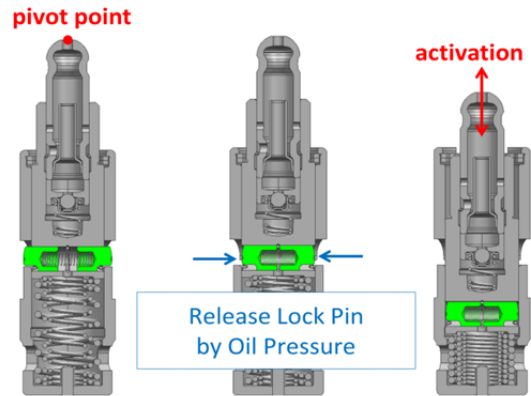


Fig. 6 S-HLA

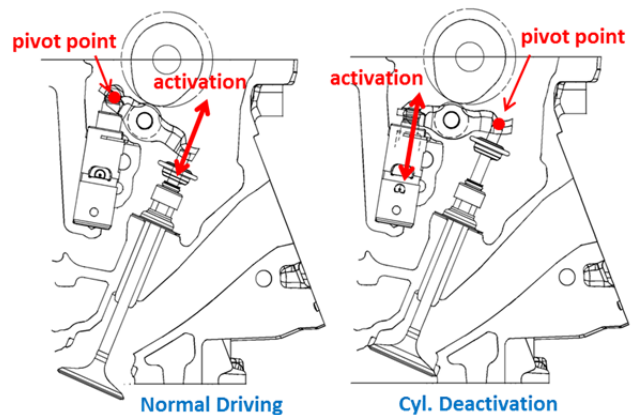


Fig. 7 Cylinder-Head with S-HLA

4.2 トルクのつなぎ

気筒休止運転をする範囲をFig. 8 に示す。Fig. 3 の燃費特性を基に2気筒運転/4気筒運転の燃費の良い方で運転している。

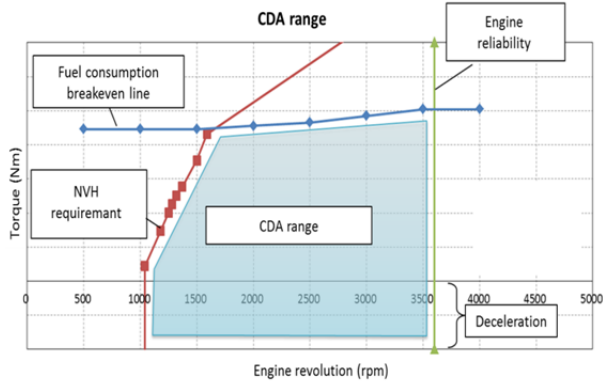


Fig. 8 Driving Area of Deactivation

切り替え制御

気筒休止状態から4気筒運転へ移行するときの制御ロジックを以下に示す。

- A) 休止していた気筒のバルブ駆動を再開するとともに燃料噴射を開始する。
 - B) 4気筒運転再開直後は空気量過多であり、適正な空気量になるよう空気量を絞っていく。また空気量過多に対し、点火時期を制御し目標トルクを維持する。
- 逆に4気筒運転から休止するときには、B) 空気量調整と点火時期調整によるトルク制御、A) バルブ作動と燃料噴射の停止、の順に制御する。

4気筒運転移行時のスムーズな切り替えの実現

休止している気筒は、筒内に閉じ込めている空気が徐々にクランクケースに抜けていくため、Fig. 9 に示すとおり気筒休止継続時間に応じて筒内圧力が下がっていく。筒内が負圧になることで4気筒移行時に排気バルブが開くと同時に大量の排気ガスを吸い込み、その結果次の吸気工程で吸い込む空気量が低下する (Fig. 10)。このメカニズムにより気筒休止中の燃焼気筒と休止気筒では4気筒運転への移行直後の筒内状態量が大きく異なる。状態量の差により Fig. 11 に示すように、点火時期遅角時の燃焼安定性を低下させ、点火時期とトルクの関係が崩れるが、トルクショックのないスムーズな切り替えを実現するため、以下の制御を織り込み、各気筒の筒内状態に応じた適正な燃焼を実現した。

(1) 休止気筒の筒内状態推定

吸入空気量と温度から気筒休止移行瞬間の初期の筒内圧を決定する。その後、気筒休止中のエンジン回転やクランクケース内の圧力などを用いて休止気筒の筒内圧をリアルタイムに推定し、この推定筒内圧と吸排気バルブタイミングやインテークマニホールド圧力などから4気筒運転移行時の休止気筒内の排気ガス量と空気量を正しく推定する。

(2) 筒内状態に応じた適切な点火時期の決定

Fig. 10 の特性をもとに、燃焼安定性限界を超えない範囲内で要求トルクを実現できる点火時期を決定する。

これらの制御を採用することで、Fig. 12 に示したようにエンジン回転数の変動を抑制するとともに車両前後方向の加速度変動を抑制することができた。

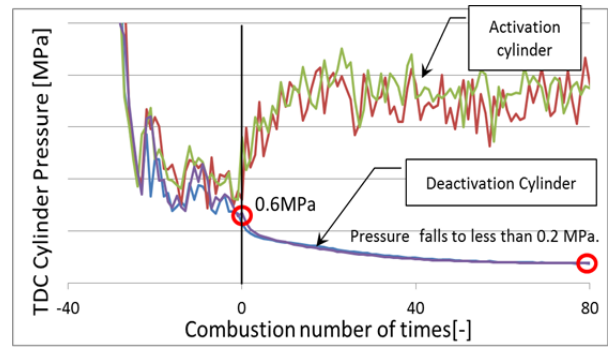


Fig. 9 Cylinder Pressure after Deactivation

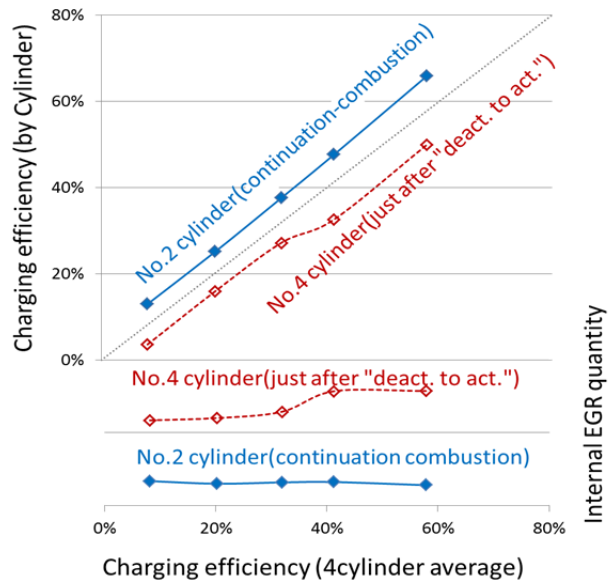


Fig. 10 Charging Efficiency at just after "Deact. to Act."

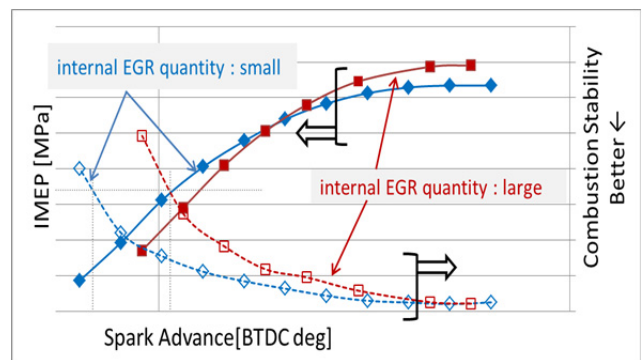


Fig. 11 EGR Influence on Combustion Characteristics

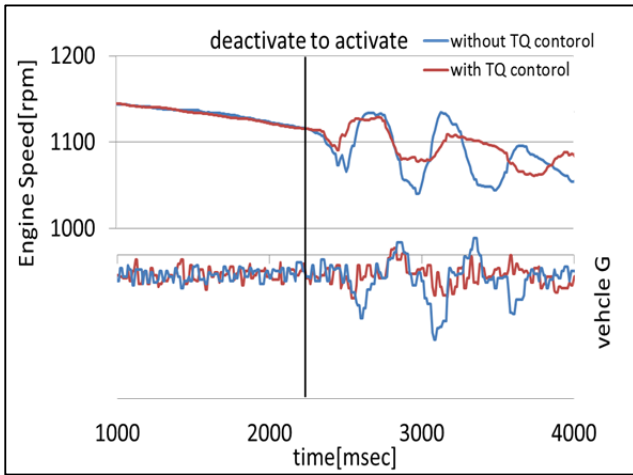


Fig. 12 Effect of Torque Control Strategy

4.3 NVHの造り込み

気筒休止運転をすることで、エンジンとしてのトルクは同じでも単気筒当たりの燃焼加振力が大きくなり、また、燃焼間隔が長くなる (Fig. 13)。それによりエンジン振動が大きくなり、車室内のフロア振動が悪化する。その悪化をリカバリーするための造り込み事例を紹介する。

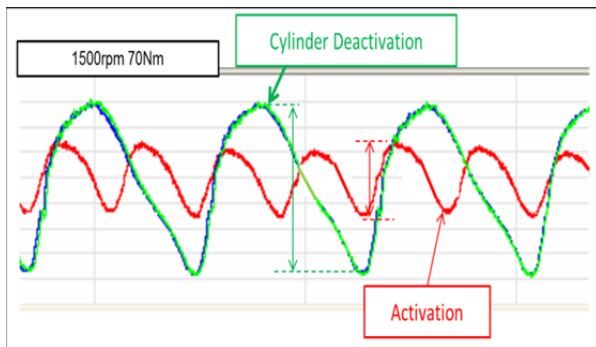


Fig. 13 Comparison of Crank Torsional Vibration

休止気筒の選定 ～1番/4番気筒休止

1番気筒はフライホイールからの距離が遠く、燃焼圧によりクランクシャフトのねじり振動が励起されやすい。更に、フライホイールに最も近い4番気筒は1番気筒とのクランクシャフトねじれ量の差が大きいため、2番/3番気筒を休止し、1番/4番気筒のみで運転すると不快なハーフ次数の振動を引き起こす。よって、新型エンジンは、1番/4番気筒を休止し、2番/3番気筒を燃焼する方式を選定した。これにより、車内こもり音の原因となるマウント振動を抑制した。

これに加え、エンジンの剛性を向上させることで、気筒休止切り替え時に発生する振動の変化を抑制し、違和感のない切り替えを実現した (Fig. 14)。

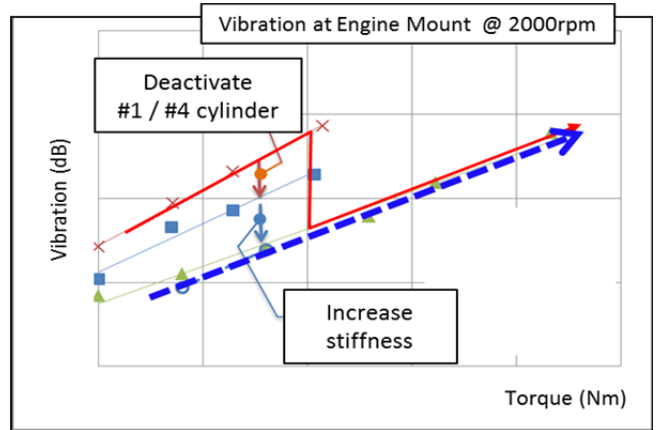
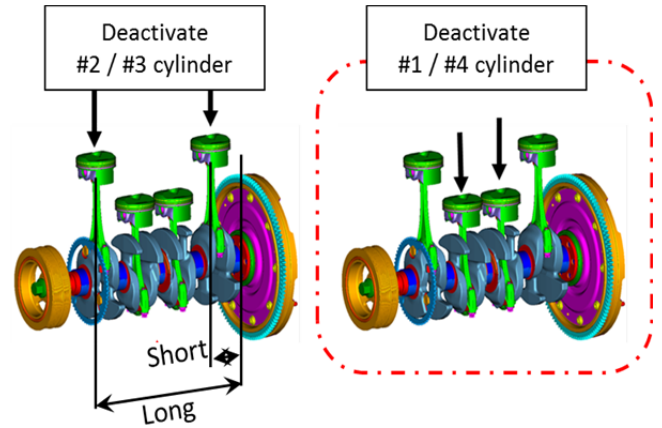


Fig. 14 Vibration Characteristics of "Deactivation to Activation"

振り子ダンパー

エンジン気筒休止時のNVH性能確保のため、トルクコンバーターに遠心振り子ダンパー (CPA : Centrifugal Pendulum Absorber) を採用した。

エンジンの燃焼によるトルク変動がトランスミッション、ドライブシャフトを通して駆動系ねじり振動として車両に入力され、こもり音やフロア振動としてドライバーに伝わることから、通常はトルクコンバーターの振りダンパーの剛性低減、またはイナーシャ追加をすることで、不快感がないレベルまで振動減衰させている (Fig. 15)。

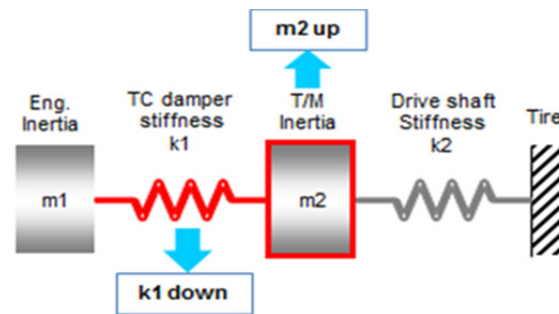


Fig.15. Torsional Vibration Model of Drivetrain

これに対して、気筒休止時は4気筒運転時と比較してト

ルク変動が大幅に増加することから、従来の剛性低減やイナーシャ追加のアプローチでは大幅な変更が必要になり、いずれもマツダの目指す走り性能（アクセル操作に対する応答性）を満足することができない。そのため振動減衰デバイスとして、エンジン振動に対して逆位相に振れることで振動を減衰する「遠心振り子ダンパー」を採用した（Fig. 16）。

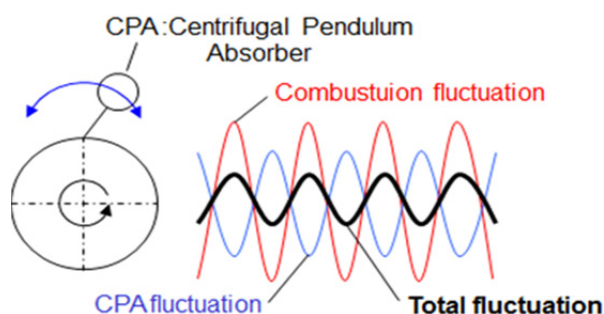


Fig.16 Damping Mechanism of CPA

遠心振り子ダンパーの採用により、固定イナーシャに対して約半分のイナーシャ追加で大幅な減衰性能改善が可能となる。これにより気筒休止の可能範囲拡大に貢献し、燃費性能、NVH性能、走り性能の全てを高いレベルで両立させることができた（Fig. 17）。

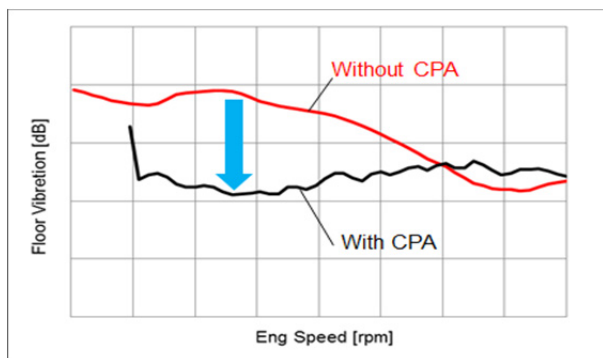


Fig.17 Vibration Improvement Effect

4.4 信頼性の造り込み

気筒休止状態で運転することで燃焼気筒と休止気筒間の温度差が拡大し、変形や熱応力が発生する。また、ピストンリングのすきまから筒内にオイルを吸い込むが、休止気筒ではそれを燃やすことができず、筒内に蓄積されていく、といった気筒休止に伴う懸念点を洗い出し、机上計算及び実機を使用し全ての課題の潰し込みを行った。

更に、万が一故障した時に重篤不具合に至る課題については、フェールセーフ制御を織り込んだ。例えば、燃焼している気筒の吸排気バルブが意図せず休止してしまうと、燃料が未燃のまま筒内に溜まりリキッドコンプレ

ッションによるエンジン破損に至る懸念がある。意図せず休止することはないことを確認しているが、万が一の場合でも、クランクの角速度変動をモニターすることで異常を察知し、燃料供給を止める制御を織り込んだ。

5. おわりに

SKYACTIV-G 2.5気筒休止エンジンの新技術について、気筒休止技術に焦点を当てて紹介した。気筒休止自体は従来からある技術だが、熱効率に優れたSKYACTIV-Gと組み合わせることで、全ての負荷領域でダウンサイジングエンジンを凌駕するエンジンに仕上げることができた。

コモンアーキテクチャ構想に基づき、本技術を排気量が異なるエンジンにも展開し、全てのお客様に優れた環境性能と走行性能をお届けしていく。

参考文献

- (1) 富澤ほか：新型デミオのエンジン技術，マツダ技報，No.29, pp.8-13 (2011)
- (2) 長谷川ほか：CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術，マツダ技報，No.30, pp.3-8 (2012)
- (3) 室谷ほか：新型ガソリンターボエンジンSKYACTIV-G 2.5Tの開発，マツダ技報，No.33, pp.16-22 (2016)

■ 著 者 ■



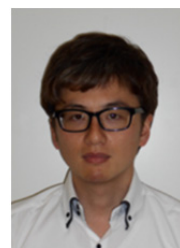
野田 明裕



荒川 博之



居軒 年希



山本 賢宏



本瓦 成人



西本 敏朗