



新世代技術「SKYACTIV パワートレイン」

石野 勅雄

「SKYACTIV TECHNOLOGY (スカイアクティブ テクノロジー)」とは、エンジン・トランスミッションをはじめ、ボデー・シャシーを含めたマツダの新世代技術の総称である。マツダはこの新世代技術を全ての商品に今後導入していく。SKYACTIV TECHNOLOGY を実現させているのは、固定概念にとらわれず、相反する課題を同時に解決する「ブレイクスルー」という考えである。本稿では、SKYACTIV パワートレインユニットの紹介を通して各ブレイクスルーを説明する。SKYACTIV-G (スカイアクティブ ジー) では、これまでにない高い圧縮比により燃費改善とトルクの向上を実現した。SKYACTIV-D (スカイアクティブ ディー) では、低圧縮比によってクリーン燃焼を実現しながら、これまでのディーゼルエンジンの燃費を更に改善した。SKYACTIV-DRIVE (スカイアクティブ ドライブ) では、走行状態のほぼ全域にわたりロックアップ領域を拡大させ、燃費改善とダイレクトなシフトフィールを実現した。
 キーワード：自動車，パワートレイン，エンジン，ガソリン，ディーゼル，トランスミッション

1. はじめに

2010年10月、マツダは新世代技術として「SKYACTIV」を発表した。SKYACTIVとは、技術開発の長期ビジョン「サステナブル “Zoom-Zoom” 宣言」に基づいて、「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を高次元で両立させる新世代技術の総称である。SKYACTIVは、「ビルディングブロック戦略」(図-1)によって展開される全ての技術を包含している。ビルディングブロック戦略とは、自動車の基本である「ベース技術」の上に、段階的にi-stop (アイ・ストップ：マツダ独自のアイドリングストップ&スタート技術) からハイブリッドシステム等の電気デバイスを導入していくという戦略である。マツダは、この戦略の基盤であるベース技術の開発を最優先で行っていく。ベース技術は、パワートレインの革新的技術と、ボデーおよびシャシーの基本性能を向上させながら軽量化する総合的軽量化技術からなる。この中から、今回はSKYACTIV パワートレインの革新的技術について紹介する。

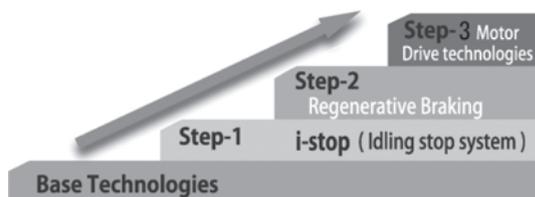


図-1 ビルディングブロック戦略

2. ブレイクスルー

SKYACTIVを貫いているのは「ブレイクスルー」という考えである。例えば、燃費改善とトルクの向上など、相反する課題のベストバランスを狙うのではなく、技術革新によって2つの課題を同時に解決し、性能を飛躍的に向上させる考えである(図-2)。今回、パワートレインとプラットフォームを同時に刷新したので、固定概念にとらわれず車両全体最適の観点から理想の追求を行うことができた。そのことがブレイクスルー実現の可能性を大きくした。以下では、SKYACTIV パワートレインにおける具体的なブレイクスルーを述べる。

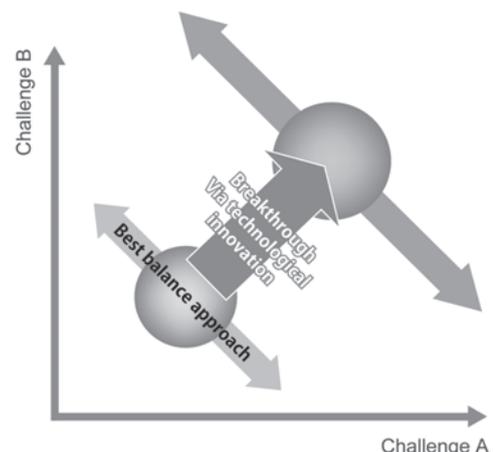


図-2 ブレイクスルー

3. SKYACTIV エンジンの取り組み

内燃機関は図-3に示すように、燃焼によって発生する熱エネルギーの内、ほとんどの部分が排気損失、冷却損失、ポンピング損失、機械抵抗損失という4つの損失となって捨てられている。内燃機関の熱効率改善とは、この4つの損失を低減することであり、更に、この損失を低減するために具体的に制御できる要素(因子)、膨張比(圧縮比)、空燃比、燃焼期間、燃焼タイミング、ポンプ損失(吸気量)、機械抵抗(摩擦抵抗)の6つの制御因子を理想に近づけていくことに他ならない(図-4)。上記の6つの制御因子の中で、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンともに鍵となった因子が圧縮比である。

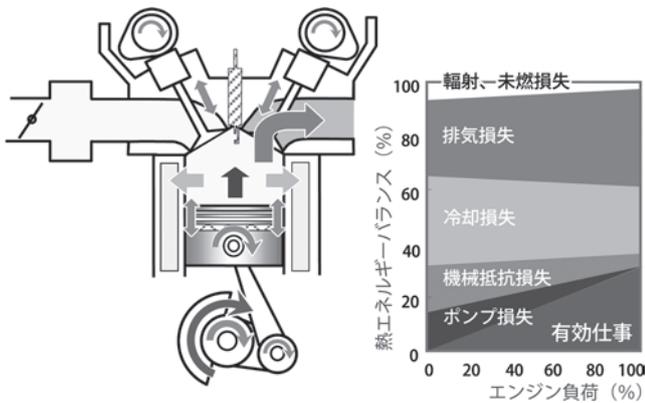


図-3 エンジンのエネルギーバランス

低減すべき損失		対応策	制御可能な因子	
エンジン熱効率改善	図示熱効率	排気損失	大きく圧縮=大きく膨張	圧縮比
		冷却損失	燃料に対し空気量を多く	空燃比
	機械効率	ポンピング損失	より速く燃やす	燃焼期間
		機械抵抗損失	良いタイミングで燃やす	燃焼タイミング
		空気の吸い込み・排気を楽に	ポンピング損失	
		荷重・摩擦を小さく	機械抵抗	

図-4 エンジンの熱効率改善

4. 新世代ガソリンエンジン：SKYACTIV-G

ガソリンエンジンでは、圧縮比を大幅に高め、低中速トルクを改善させるとともに、燃費は現行ディーゼルエンジン並みまで改善させた(図-5, 6)。

(1) ブレークスルーポイント (SKYACTIV-G)

理論的には、圧縮比を高くすると燃費と出力を改善できる。例えば、圧縮比を11.2から15まで高めると、

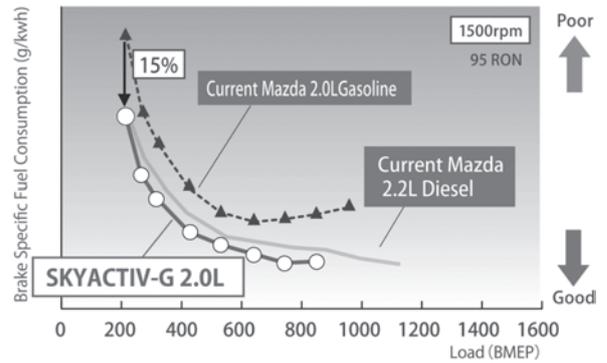


図-5 SKYACTIV-G 燃費改善

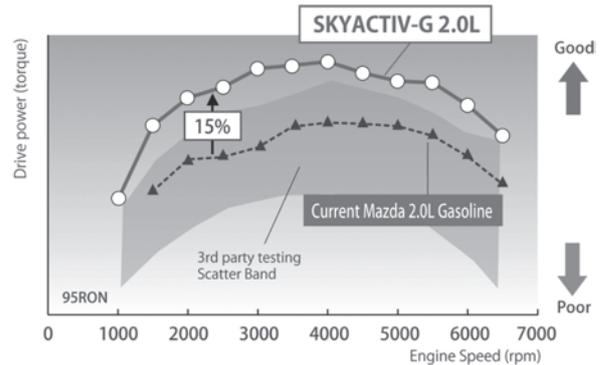


図-6 SKYACTIV-G トルク改善

約7%熱効率を改善できる。それにもかかわらず、これまでガソリンエンジンの高圧縮比化がさほど進んでいない理由の1つは、高圧縮比にするとノッキングが発生しやすくなり、その対応によって出力が下がるためである(図-7)。高圧縮比化による本来の性能向上を実現させるためには、ノッキング発生抑制という課題をブレークスルーする必要がある。

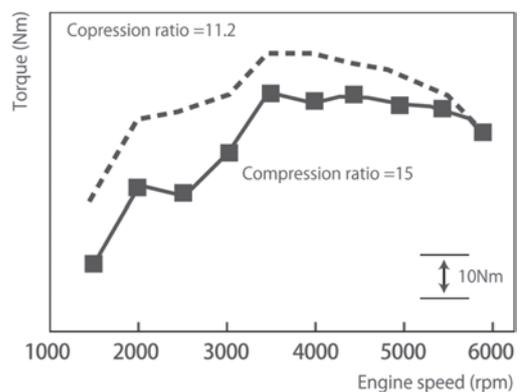


図-7 高圧縮比化と出力低下

(2) 課題と対応 (SKYACTIV-G)

圧縮比を高めると、圧縮上死点の温度と圧力が高くなる。燃料と空気の混合気がこの条件に一定時間さらされると、ノッキングが発生しやすくなる。ノッキングの主な発生要因である温度と圧力は、圧縮比によってほぼ決まってしまうが、温度については別の因子に

よっても制御可能であると考えた。それは、完全に排気されずに残ってしまう高温の残留ガスの量によって圧縮上死点温度が大きく変化するということである。

例えば、圧縮比が10、排気ガス温度が750℃、吸気温度が25℃のとき、排気ガスが10%シリンダ内に残留ガスとして残ってしまうと、圧縮前のシリンダ内の温度は約70℃上昇し、圧縮上死点温度は約160℃上昇する。このような温度上昇がノッキング発生に大きな影響を与える。この温度変化を、圧縮比による温度変化と併せて考えると次のようになる。例えば、残留ガスを8%から4%に半減させることができれば、圧縮比を3上げてても圧縮上死点温度は圧縮比を上げる前と同じに保つことができる(図-8)。SKYACTIV-Gでは、このような残留ガスの低減によって、圧縮上死点温度を下げ高圧縮比化を実現した。

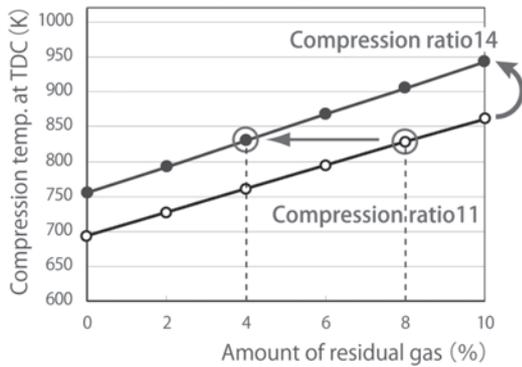


図-8 残留ガス低減の効果

(3) 適用技術 (SKYACTIV-G)

(a) 4-2-1 排気システム

残留ガスを大幅に低減する技術として、排気経路の長い4-2-1排気システムを採用した。排気経路が短い従来の排気システムでは図-9に示すように、例えば3番気筒の排気バルブが開いた直後に発生する高圧の排気圧力波が、排気バルブが閉じる前の1番気筒に到達する。このため1番気筒では、一度排出された排気ガスが再び燃焼室内に押し戻されてしまい、多量の

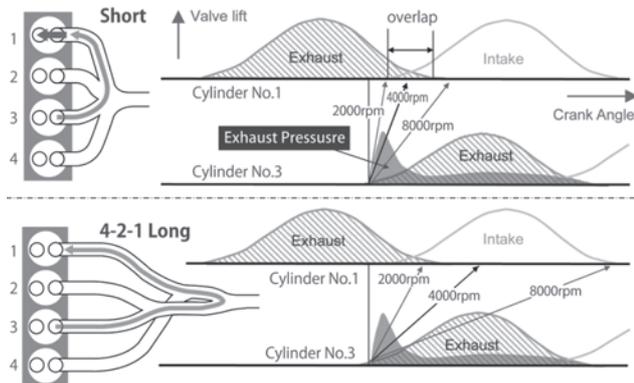


図-9 4-2-1 排気システムの効果

残留ガスとなる。そしてこの現象は、経路が短いため低回転から高回転まで継続して発生する。経路の長い4-2-1排気システムでは、排気圧力波が1番気筒に到達した時にすでに排気バルブは閉じており排気ガスの押し戻しは起こらない。この効果は、経路が長い低回転以外のほぼ全回転速度域に及ぶ。また、経路の長い4-2-1排気システムでは、集合部での反転負圧によるシリンダ内の排気ガスの吸い出し効果が実用回転域で期待できる。実用回転域でその効果を出すには、600 mm 超という長い管長が必要になるが、新設計のループ型排気管を採用することで、長い管長を確保しながらも小型化することができた。

4-2-1排気システムの問題は、集合部にある触媒までの距離が長いこと触媒に到達する排気ガスの温度が低下し、始動直後の触媒を早期活性化できないことである。対策として、点火時期を遅らせ排気ガス温度を上昇させることで、触媒の早期活性化を促す方法がある。しかし、点火次期を遅らせ過ぎると燃焼が不安定となるため、触媒の後方配置には限界があった。SKYACTIV-Gでは、マルチホールインジェクターにより燃料噴射を最適化し、プラグ周りに少し濃い目の混合気生成されるようにした。その結果、点火時期を大幅に遅らせても燃焼が不安定とならず、4-2-1排気システムでの触媒後方配置を実現できた。

(b) 燃焼速度の向上

燃焼速度を高めれば、エンドガス(点火プラグから遠い場所にある未燃焼の混合気)が高温状態にさらされる時間を短縮でき、ノッキングが発生する前に正常燃焼を完了させることができる。SKYACTIV-Gでは、空気流動の強化、燃料噴射圧力の強化、噴霧特性改善などにより、均質で流動の強い混合気を生成し燃焼速度を高めた。また、従来の高圧縮比ピストンでは盛り上がった頭頂部に点火後の初期火炎が当たり、火炎の成長が阻害され燃焼速度が落ちるといった問題があった。これに対して、SKYACTIV-Gでは、図-10に示すようなキャビティーをピストン頭頂部に設けることで、初期火炎の形成を保護して燃焼速度を高めた。

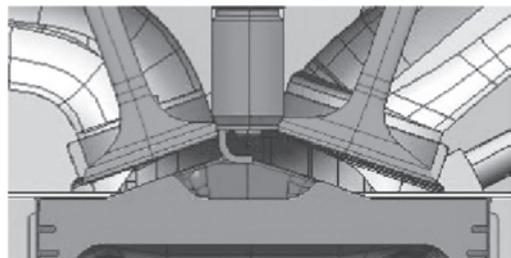
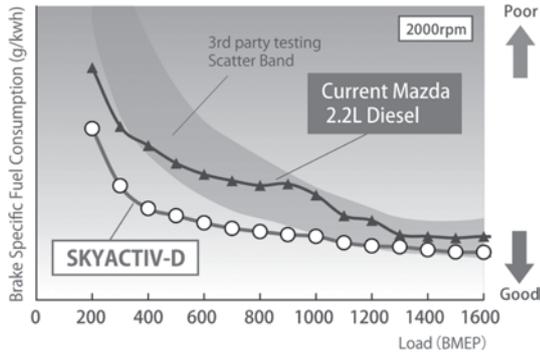


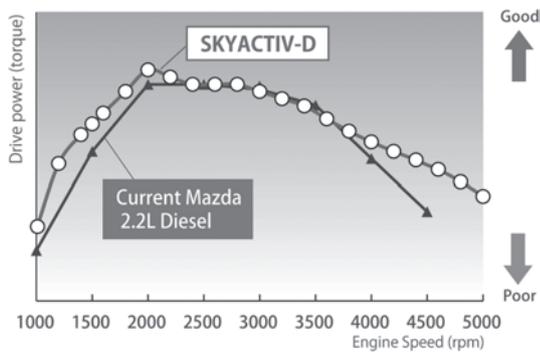
図-10 ピストンキャビティー

5. 新世代ディーゼルエンジン：SKYACTIV-D

ディーゼルエンジンでは、大幅に圧縮比を下げ、クリーンな燃焼をさせながら燃焼タイミングの最適化と機械抵抗低減を達成し、大幅に燃費を改善させた（図—11, 12）。



図—11 SKYACTIV-D 燃費改善



図—12 SKYACTIV-D トルク改善

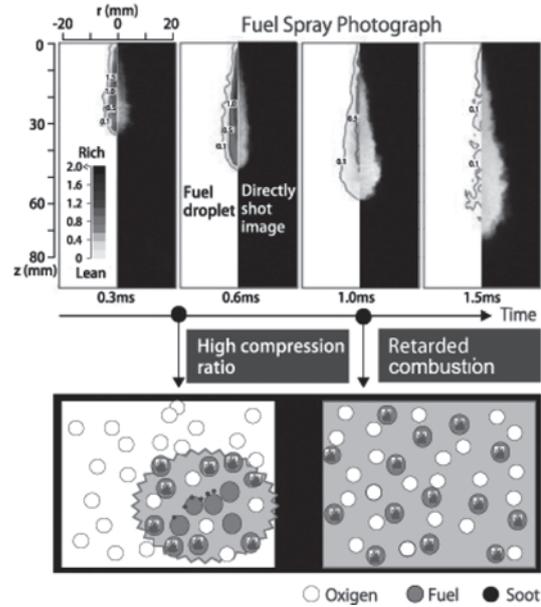
(1) ブレークスルーポイント（SKYACTIV-D）

ディーゼルエンジンは、高温高压の空气中に燃料を噴射し自己着火させる機関であるため、高温高压に圧縮する必要がある。高温高压にするために圧縮比が高く、このため本来高効率である。しかし、高い圧縮比に耐えるために一般的にピストンなど往復・回転部品は高剛性で重く、ガソリンエンジンに比べ機械抵抗が大きい。更に、近年のNOx（窒素酸化物）やススの厳しい排出ガス規制に対応するために、最適燃焼タイミングでの燃焼が困難となってきており、効率面での優位性が減少している。そこで、最適燃焼タイミングでのクリーンな燃焼と機械抵抗の大幅な低減という課題をブレークスルーする必要がある。

(2) 課題と対応（SKYACTIV-D）

圧縮比の高いディーゼルエンジンのピストン上死点付近で燃料が噴射された場合、高温高压であるため、空気と十分に混ざる前の燃料が偏在している状態で自

己着火し、局所的な燃焼となる。この結果、局所高温領域ではNOxが生成し、燃料の濃い酸素不足領域ではススが発生する。近年の厳しい排気ガス規制の下では、NOxやススの発生を極力抑える必要がある。そのために、高温高压の上死点付近での噴射（燃焼）タイミングを遅らせ効率を犠牲にし、圧力と温度が下がった状態で燃料を噴射し空気と十分に混ぜてクリーンな燃焼をさせることが従来の高圧縮ディーゼルであった（図—13）。



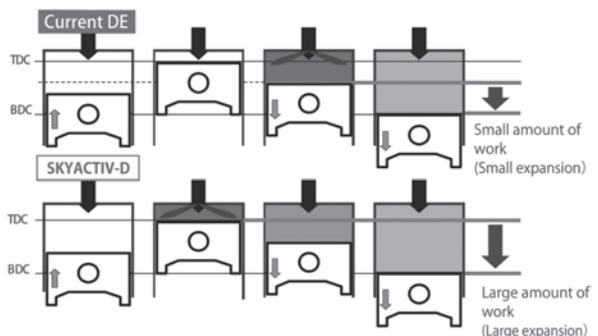
図—13 圧縮比とディーゼル燃焼

SKYACTIV-Dでは、最適燃焼に影響する温度と圧力を一度に下げることができる低圧縮比に着目した。圧縮比を低くすることで、燃焼タイミングの最適化とNOxやススの発生の大幅低減を可能にした。

(3) 適用技術（SKYACTIV-D）

(a) 低圧縮化による燃焼タイミングの最適化

圧縮比を下げた場合は、ピストン上死点付近における圧縮温度・圧力は低くなる。この状態では、噴射後の燃料は空気と十分に混ざってから燃焼する。よって、

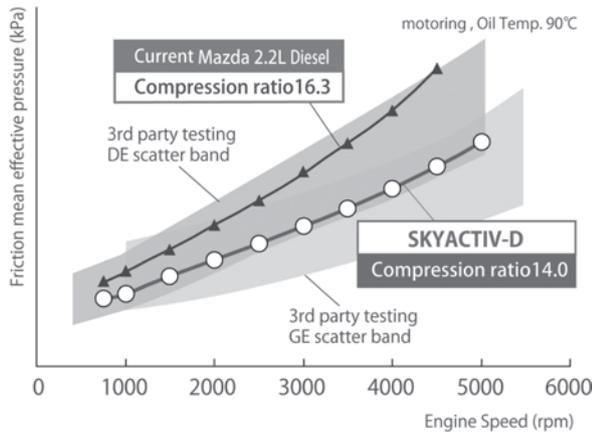


図—14 低圧縮比による高膨張比

より均質な燃焼となり局所的高温や酸素不足が回避され、NO_x やススの発生量は大幅に低減される。その結果、各国の厳しい排気ガス規制にNO_x 触媒なしで対応可能なほど、クリーンな燃焼を実現できた。また上死点付近での燃焼が可能であるため、実質の仕事量（膨張比）は高圧縮比のクリーンディーゼルエンジンよりも大きくとれて高効率化を実現できた（図—14）。

(b) 低圧縮化による軽量化と機械抵抗低減

低圧縮化によって、従来のディーゼルエンジンより最大シリンダ内圧力が下がり、ピストンやコンロッドなどの往復・回転部品の剛性最適化によって大幅な軽量化と低抵抗化が実現できた。この結果、SKYACTIV-Dは平均的なガソリンエンジン並みの低い機械抵抗を実現した（図—15）。



図—15 低圧縮化による機械抵抗低減

(c) 始動性確保

このようなメリットにもかかわらず、従来、ディーゼルエンジンの低圧縮比化が進まなかった要因は主に2つある。1つは、極低温時の圧縮温度が下がりすぎることによって着火性に問題が生じること。2つ目は、着火後の暖機運転中に、圧縮温度不足による半失火など不安定燃焼が発生してしまうことである。SKYACTIV-Dでは、マルチホールピエゾインジェクターにより燃料噴射パターンの自由度を拡大し、混合気濃度制御の精度を上げ低温着火性を確保した。着火後の暖機運転中の圧縮温度上昇のために排気 VVL (Variable Valve Lift: 可変バルブリフト機構) を採用した。一度着火し燃焼が起これば、排気ガス温度は高くなる。そこで、吸気行程中に排気 VVL を作動させわずかに排気バルブを開き、排気ポート内の高温の排気ガスをシリンダ内に少し逆流させる。これにより、圧縮時の温度上昇を促進し、冷間時の圧縮温度不足による半失火を防ぎ、燃焼の安定性を向上させた。

6. 新世代オートマチックトランスミッション: SKYACTIV-DRIVE

現在普及しているオートマチックトランスミッション(AT)は構造の違いにより、ステップAT(多段オートマチックトランスミッション)、CVT(無段変速トランスミッション)、デュアル・クラッチ・トランスミッションと、大きく3つに分類できる。市場の要求に対する各ATの特徴をまとめると、一般的に図—16のようになりそれぞれに優劣がある。SKYACTIV-DRIVEでは、全てのタイプの利点を集約した理想のATを目指し、ステップATをベースに、「燃費の良さ」、「ダイレクト感」、「なめらかな変速」を徹底的に追求した。

Technology		CVT	DCT	Step AT	SKYACTIV-Drive
Good Fuel Economy	FE at low speed	+	+	o	+
	FE at high speed	-	+	+	+
Easy start up (Launch feel)		+	-	+	+
Easy start up on hill (Creep)		+	-	+	+
Direct feel		-	+	o	+
Smooth shifting (Shifting Quality)		+	o	o	+

+: Better
 o: Average
 -: Worse

Important in Japanese market (CVT)
 Important in European market (DCT)
 Important in NA market (Step AT)
 Ideal for global market (SKYACTIV-Drive)

図—16 各オートマチックトランスミッションの特徴

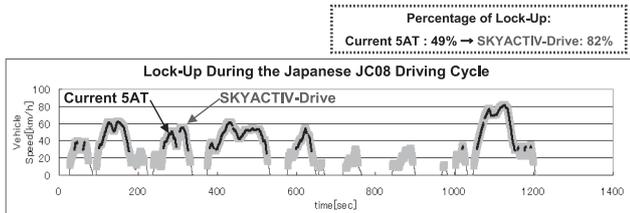
(1) ブレークスルーポイント (SKYACTIV-DRIVE)

ステップATは、スムーズな発進と変速が利点であるトルクコンバータを持っている。一方で、トルクコンバータには、流体継手の滑りによる動力伝達ロスが生じることや、加速時のエンジン回転の変化に遅れて車速が変化するというダイレクト感不足の問題もある。この対策として、機械的にエンジンとトランスミッションを直結し滑りをなくすロックアップを使用し、燃費とダイレクト感を向上させてきた。しかし、燃費とダイレクト感を更に向上させるためには、ロックアップ領域を可能な限り広くする必要がある。ロックアップ領域拡大はダイレクト感を増加させる一方で、NVH(騒音や振動)の悪化、ロックアップクラッチの信頼性不足などの問題もある。このため、あらゆる場面で確実にロックアップさせながら、NVHの抑制などの課題をブレークスルーする必要がある。

(2) 課題と対応 (SKYACTIV-DRIVE)

これまでは、スムーズ性を重視しショックを吸収する流体継手を主体とした動力伝達機構を使用してきた。しかし、滑りを縮小させるためには、ロックアップクラッチを主体とした動力伝達機構に切り替える必要がある。そのために、ロックアップクラッチ、ト

ラス（流体継手），ダンパの機能を基本から見直した新トルクコンバータを開発した。その上で，NVHに関してはトランスミッション単体のみならず，車両全体の改善によって対応し克服した。その結果，図一17に示すように，これまでのステップATに比べ格段にロックアップ領域が拡大し，低車速領域を除くほぼ全域でのロックアップが可能になった。



図一17 SKYACTIV-DRIVE と従来 5AT のロックアップ領域の比較

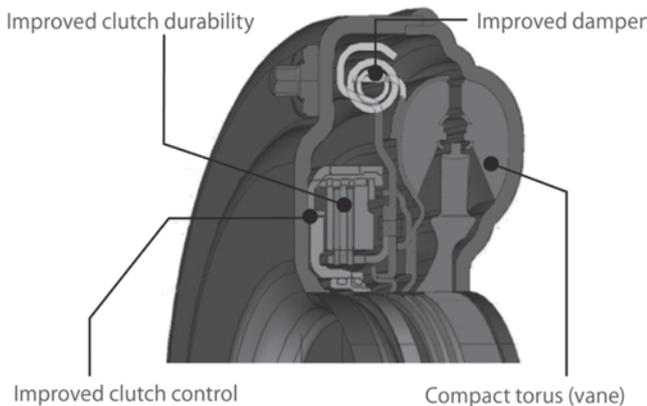
(3) 適用技術 (SKYACTIV-DRIVE)

(a) 新開発トルクコンバータ (図一18)

ロックアップ領域拡大時の NVH の改善のためには，ロックアップクラッチとダンパの性能を大幅に上げる必要がある。そのために，これまでのトーラス（流体継手）主体の構造を転換し，可能な限りトーラスを小型化することでクラッチとダンパのスペースを確保し，そこに制御性の良い多板クラッチを採用した。その上で，多板クラッチの特性を活かし，応答性を向上させロックアップ制御の緻密化を実現し，優れたダイレクト感と NVH 性能改善を達成した。更に，このロックアップ制御とオイルの流れ改善による冷却性能アップによってクラッチ表面のスリップ時の熱発生を抑え，信頼性も格段に改善することができた。

(b) 総合振動制御

車内の NVH の改善のためには，加振源の対策と同時に伝播経路における振動抑制が重要な要素となる。ロックアップ領域拡大時の NVH 課題に対して，CAE を活用し全体最適を行った。加振源であるエンジン，

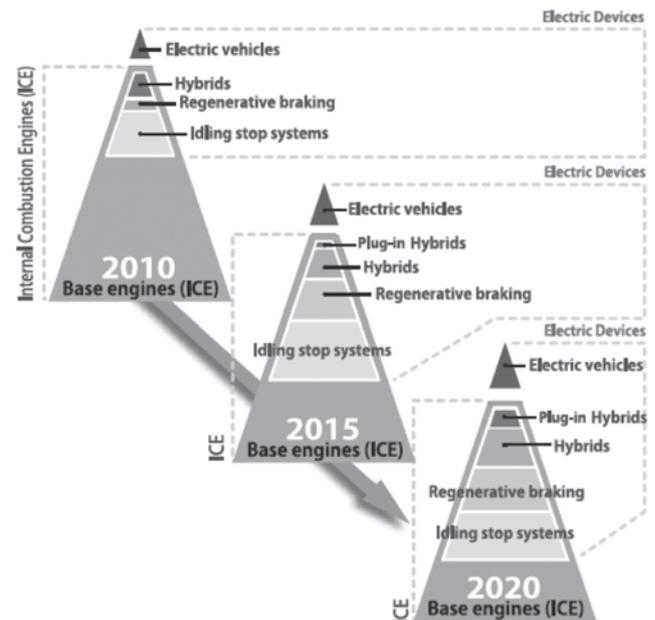


図一18 新開発トルクコンバータ

SKYACTIV-DRIVE の制御システムと振動伝播のマウント，車体などの振動特性制御システムを網羅した大規模システム解析を駆使し，車両としての総合振動制御にて広範囲に課題を克服した。

7. おわりに

今回紹介した SKYACTIV パワートレインは，ビルディングブロック戦略の基盤を構成するものである。そして，今後も，電気デバイスの割合は増えていくが内燃機関と電気デバイスの組み合わせがパワートレインの主流であり続けると予測される（図一19）。電気デバイスとの組み合わせにおいては，内燃機関の不得手な領域をモータが受け持っている。この電気デバイスを小型化するためにも内燃機関の更なる改善には意義がある。内燃機関の熱効率を極限まで高め，シンプルで高効率なトランスミッションを組み合わせた究極のパワートレインを追求していく。理想のパワートレインと小型・軽量電気デバイスとの組み合わせによって，マツダらしい走る欲びと優れた環境性能を提供し続けることが可能となる。



図一19 環境技術の拡大予測

J C M A

[筆者紹介]
石野 勲雄 (いしの ときお)
マツダ株
パワートレイン開発本部

