

特集：新型MAZDA3

3

新世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xの紹介 New-Generation Gasoline Engine “SKYACTIV-X”

磯部 利太郎*¹
Ritaro Isobe遠藤 孝次*²
Koji Endo末岡 賢也*³
Masanari Sueoka

要 約

SKYACTIV-Xは、SKYACTIV-Gから始めた理想の内燃機関追求のゴールに向けた第2弾である。2nd Stepでは熱効率向上として比熱比の改善を取り上げた。具体的にはリーン燃焼に取り組み、その実現のために圧縮着火を取り入れた。圧縮着火をさまざまな環境条件で成立させるためには多くの課題に対してのブレークスルーが必要であった。

主要課題は、圧縮着火燃焼範囲を拡大しつつ、燃焼の切り替えを完全に制御することであり、この課題をブレークスルーしたのが燃焼方式SPCCI（「火花点火制御圧縮着火」の略）で、圧縮着火燃焼を火花点火で制御した燃焼である。商品化にあたってはSPCCI燃焼技術を日常の使われ方の中で、いかに多くの場面で使えるようにするかが重要であり、燃焼制御、熱マネージメント技術やNV対応技術に関しても多くの新しい技術を取り入れた結果、SKYACTIV-G比、全域で約10%以上のトルク改善を図りつつ、NEDCモード燃費で前モデルに対し約30%の燃費改善を図った。

Summary

Skyactiv-X is a gasoline engine developed in the second step of Mazda's quest for the ideal internal combustion engine which started with Skyactiv-G. The focus of the second step was to improve specific heat ratio to achieve higher thermal efficiency. In particular, Mazda delved into lean combustion and adopted compression ignition (CI) to realize it. In our efforts to make the CI feasible under various environmental conditions, we had a number of challenges to overcome.

One of the major challenges was to expand the CI operating range while fully controlling switchover between CI and spark ignition. The enabler for this complete control of CI and spark ignition is SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition). In its commercialization process, SPCCI combustion technology had to be made usable in as many situations as possible in everyday usage, and therefore a number of new technologies were adopted for combustion control, thermal management and NV reduction. As a result, Skyactiv-X has increased torque by more than 10% compared to the current Skyactiv-G gasoline engine in the entire operating range, and the vehicle equipped with Skyactiv-X has improved fuel economy in NEDC by around 30% compared to the previous model.

Key words : Heat Engine, New Combustion Model, New Combustion Model Engine, Performance, Fuel Economy, Efficiency, New-Generation Gasoline Engine “SKYACTIV-X”

1. はじめに

新技術開発長期ビジョン「サステナブル “Zoom-Zoom” 宣言2030」の発表と同時に、内燃機関の次なる革新であるSKYACTIV-Xを発表した。

SKYACTIV-Xは、SKYACTIV-Gから始めた理想の内燃機関追求のゴールに向けた2nd Stepとなる、新しい燃焼技術を導入したエンジンである。

Fig. 1のロードマップに示すように、1st Stepで取り組ん

だ高圧縮比化に加え、2nd Stepでは比熱比向上、具体的にはリーン燃焼に取り組み、その実現のために圧縮着火を取り入れた。圧縮着火には数々の課題があるが、それらの課題をマツダ独自の技術でブレークスルーし、量産ガソリンエンジンとしては世界で初めて市場導入することになる。

本稿では、SKYACTIV-Xの開発で取り組んだ燃焼技術を主に、日常の使われ方の中で多くの場面で使えるように同時に開発した燃焼制御、熱マネージメント技術やNV対応技術等について、技術コンセプトを中心に紹介する。

*1～3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

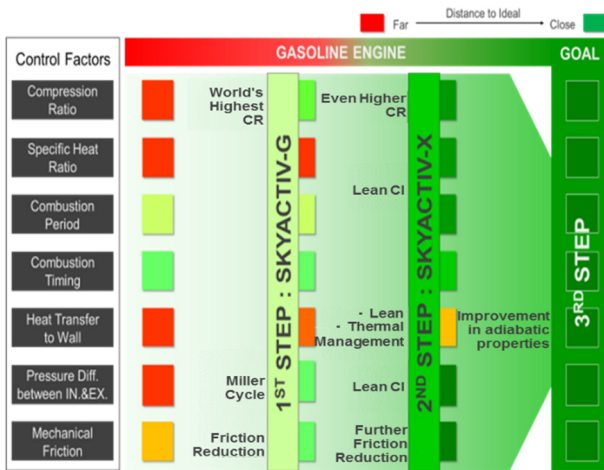


Fig. 1 Roadmap to Goal of ICE

2. SKYACTIV-Xのねらい

2.1 比熱比改善のためのリーン燃焼について

オットーサイクルの理論式であらわされるように、熱効率向上の視点は圧縮比と比熱比である (Fig. 2)。右のグラフは圧縮比・比熱の変化と熱効率の関係を表すが、比熱比を高くすることで熱効率が大きく改善することが分かる。

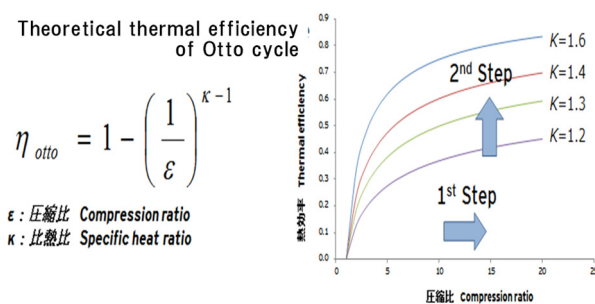


Fig. 2 Further Thermal Efficiency Improvement

比熱比向上は同じ燃料に対して空気量を増やすリーン燃焼によって実現できる。リーン燃焼によって何故熱効率が上がるのか、メカニズムを簡単に説明する。

Fig. 3に示す左が従来の燃焼で、右がリーン燃焼を表している。従来の燃焼は燃料と空気中の酸素が反応して、火炎が伝ばしながら燃え広がる燃焼方式で、燃えながら広がるので燃焼のエネルギーは、熱とピストンを押し下げる仕事に変わる。それに対してリーン燃焼は、同じ量の燃料に空気を多く押し込むため、N₂やO₂といった動きやすい2原子分子が、従来よりも相対的に多く使われるようになるために、燃焼エネルギーの圧力への変換率が増す。その結果、同じ量の燃料を燃やした際の圧力上昇率が高くなり、取り出せる仕事量が増えることで熱効率が高くなる。

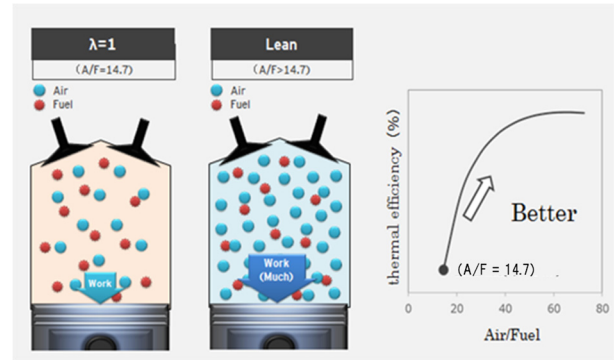


Fig. 3 Concept of Lean Combustion

また、Fig. 4に示すように、燃焼温度が低いほうが、比熱比は上がる。温度が高いと分子が移動したり、分子が分解するのにエネルギーを取られるため、温度を低くした方が比熱比は上がるのである。燃料に対したくさんの空気やガスを入れて燃焼させると、結果的に温度が下がるため比熱比が上がることになる。

わずかなリーン燃焼では燃焼温度が高くなり、NO_xの発生も多くなるが、通常の火炎伝ば燃焼ではまともに燃えないぐらい大幅なリーン燃焼を行えば燃焼温度は下がり、NO_xの発生は抑えられると同時に熱効率は大きく改善する。

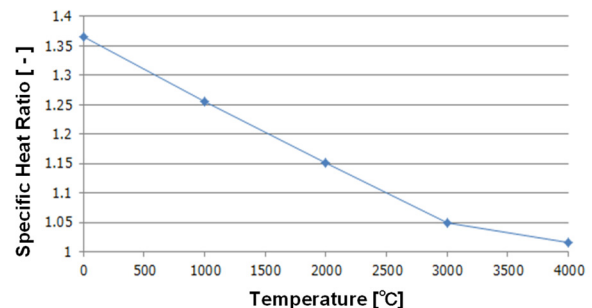


Fig.4 Relation between Temperature and Specific Heat Ratio

リーン燃焼の効能をまとめると以下のようなになる。

- ① 燃料に対する空気の比率を高めて燃やすリーン燃焼にすると比熱比は高まり、同時に燃焼温度低下でも比熱比は高まる。
- ② 更に燃焼温度が低下すると、ガス温と壁温の差が小さくなることによって熱移動量が小さくなり冷却損失が低減する。
- ③ リーン燃焼ではλ=1運転に比べて、同一トルク点での吸入空気量が大いため、スロットルによる絞り損失（ポンプ損失）が低減する。

このように相乗効果で熱効率が飛躍的に向上する。

2.2 リーン燃焼の課題

火花点火を用いるリーンバーンエンジンも過去商品化されたが、理論空燃比の1.5倍程度でしかなかったため、燃費改善効果はそれほど大きくはなかった。Fig. 5に示すように、NO_xの発生を抑えつつ比熱比を大きく設定できるのは、理論空燃比の2倍以上、空燃比で30以上の設定が必要である。

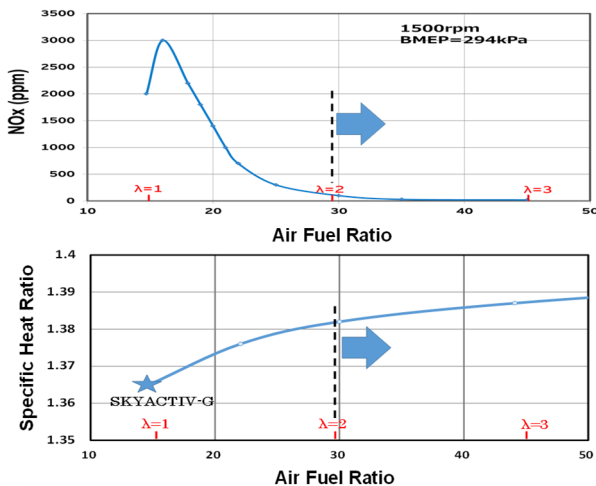


Fig. 5 Relation between Air Fuel Ratio and Specific Heat Ratio

しかし、このレベルの空燃比となると火炎伝ば燃焼では燃焼速度低下によって燃焼安定性を悪化させる。

燃費と燃焼安定性のトレードオフの関係をブレークスルーするためには、燃えにくい薄い空燃比でも安定して短時間に燃焼を完結させる手段が必要となり、そのための有効な手段が、火炎伝ばに依らず温度と圧力で燃焼反応を起こす圧縮着火である。圧縮着火でなら飛躍的な熱効率向上が図れるだけのリーン燃焼が可能となっているところをFig. 6に示す。火花点火（以下SI）燃焼ではNO_xがほぼ発生しない理論空燃比の2倍近い空燃比では火炎が燃え広がらないが、圧縮着火（以下CI）では燃焼できることが分かる。

CI（圧縮着火）はディーゼルエンジンで採用される燃焼方式であるが、これをガソリンに適用したものがいわゆるHCCI（予混合（燃料）圧縮着火）と呼ばれている燃焼方式である。

この燃焼は、ガソリンと空気を完全に混ぜて、圧縮により上昇した温度と圧力で着火させるという方式であり、火花点火では燃えないような薄い混合気、つまりリーンな状態でも、綺麗にすばやく燃焼することで熱効率の向上とNO_x発生量が少なくなるという利点を持っている。

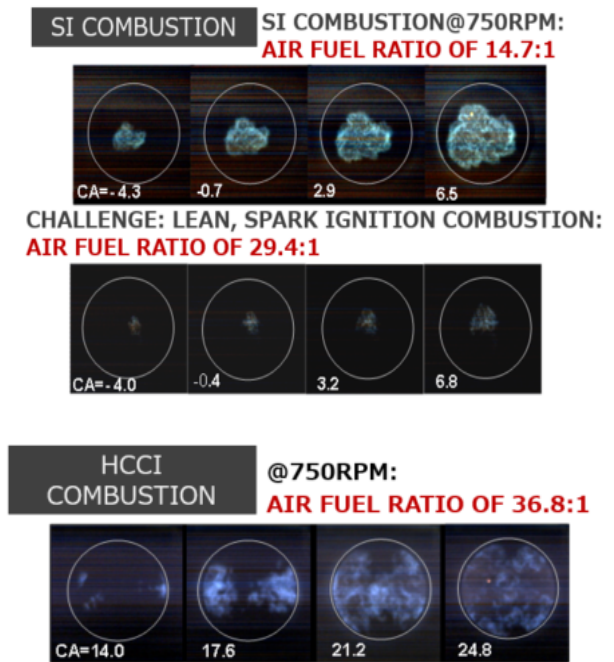


Fig. 6 Comparison between SI and CI Combustion

一方、HCCI燃焼には大きな課題がある。

(1) まず成立範囲（回転・負荷）が狭いことである。

Fig. 7はエンジン筒内の温度を変化させた時の熱発生位置を調べたものである。熱発生位置が早すぎると燃焼騒音が悪化し、遅すぎると燃焼安定性が悪化する。燃焼安定性と燃焼騒音を満足できる温度の範囲が非常に狭いことが分かる。温度と圧力を高めることで圧縮着火は可能となるが、燃焼安定性と燃焼騒音を満足させる要求温度範囲の3℃以内に制御することは非常に難しい。

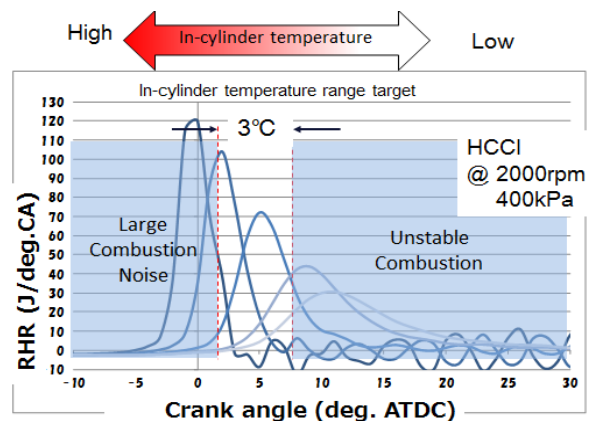


Fig. 7 Relation between Cylinder Temperature and Change in Combustion

(2) HCCIは成立範囲が狭いがゆえに、Fig. 8に示すような従来のSI燃焼との併用が必要となるが、HCCIの可燃範囲は外気温度、気圧など大気状態の変化や燃料オクタン価

の変化で拡大縮小する。また時々刻々と環境条件が変化する自動車に適用するには、過渡時やさまざまな環境下において、安定してSI燃焼⇔HCCI燃焼の切り替えが必要となるが、これらの制御が非常に難しいため、いまだに実用化に至っていないと考えられる。

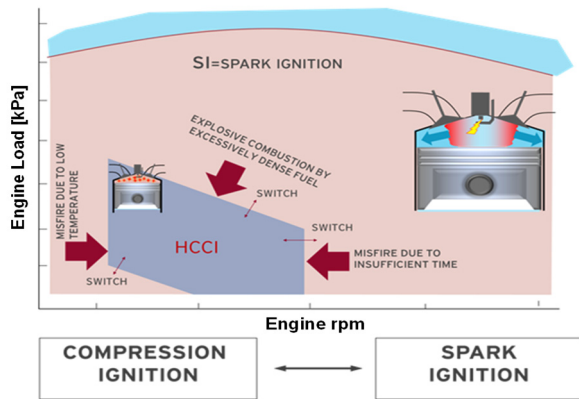


Fig. 8 Technical Problem of HCCI

また、圧縮着火の制御因子である温度圧力を直接制御するのはほぼ不可能である。圧縮比で制御しようとする、Fig. 9に示すように広い運転領域で圧縮着火させるには、圧縮比15~30という大幅な圧縮比の変化が瞬時に必要となるが、実現できる機構は現時点では存在しない。

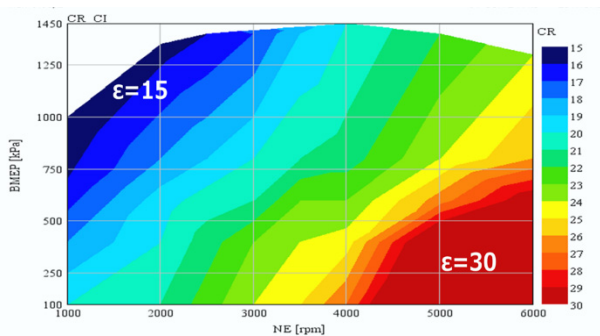


Fig. 9 Compression Ratio Required for Autoignition

3. SPCCI燃焼の紹介

HCCIの課題は、圧縮着火燃焼範囲を拡大しつつ、CIとSIの燃焼の切り替えをスムーズに行うことである。

つまりCIを制御（コントロール）する技術「CCI=Controlled Compression Ignition」、この制御技術がブレークスルーであり、マツダが保有する独自技術のポイントになる。

全域で安定した燃焼を実現するためには、どうしてもSIとCI領域の切り替えが必要であることから、HCCIエンジンとはいえ、スパークプラグをもつ構造とすることを選択した。「スパークプラグを圧縮着火の制御因子、コントロール手段として活用する」という考えにより、一部の冷

間時をのぞくほぼ全域で、圧縮着火CI燃焼の実現を可能とした。以下このブレークスルー技術コンセプトを説明する。

SKYACTIV-XではFig. 10に示すようにハードウェアによるベース圧縮比16.3に対し、スパークプラグの点火による膨張火炎球が、第二のピストン（エアピストン）のように、燃焼室内の混合気を追加圧縮し、瞬時にCIに最適な温度圧力を形成する、いわば「可変圧縮比機能」を実現している。

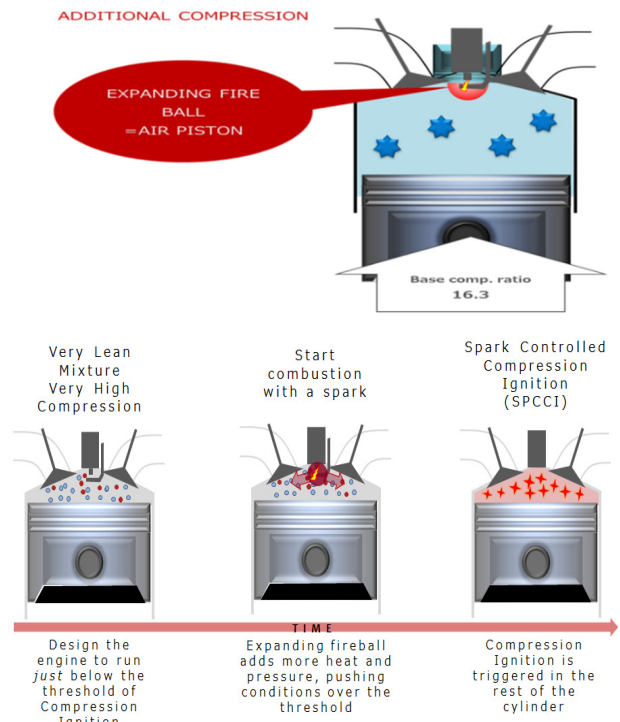


Fig. 10 Breakthrough Solution for CCI

Fig. 11にSPCCIの熱発生率を示す。適度に高圧縮比化しておけば途中でCIが起きる、つまり初期火炎伝播に十分な空燃比を選べばSIを使ってCIをコントロールすることが可能になる。更にFig. 12に示すように、SI燃焼、CI燃焼の比率をコントロールすることで、エンジンの運転状態に応じて制御されたSPCCI燃焼を実現している。

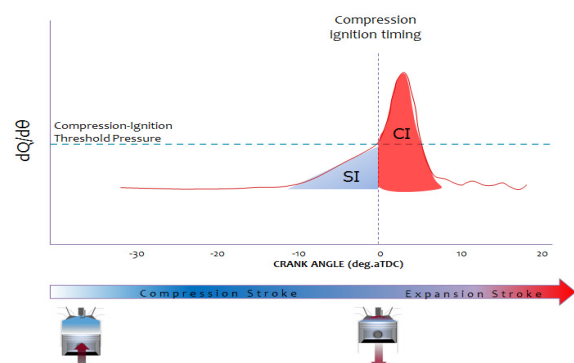


Fig. 11 SPCCI Concept

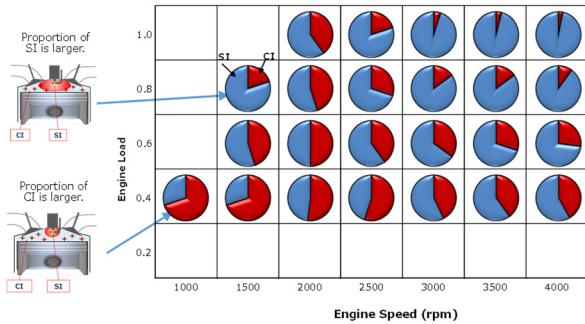


Fig. 12 Controlled Compression Ignition Combustion over Wide Range of Operating Conditions

スパークプラグを制御因子とした圧縮着火を行うにあたって、以下の課題のブレークスルーが必要となった。

(1) 常に安定した火種を作る

常に安定した火種を作るためには点火時期での混合気の分布の制御が必要であった。CCIに必要な膨張火炎球生成に要求される、点火時の混合気濃度分布をFig. 13に示す。

全体はCI燃焼のためのリーンな混合気を分布させた上で、プラグ周辺にのみ火花点火可能で、しかもNO_xが激しく発生しない程度の濃度の混合気を燃料噴射の工夫と流動の組合せで実現した。点火時期と噴射時期の同期制御を可能にした結果、安定した火花点火～安定燃焼を実現できた。

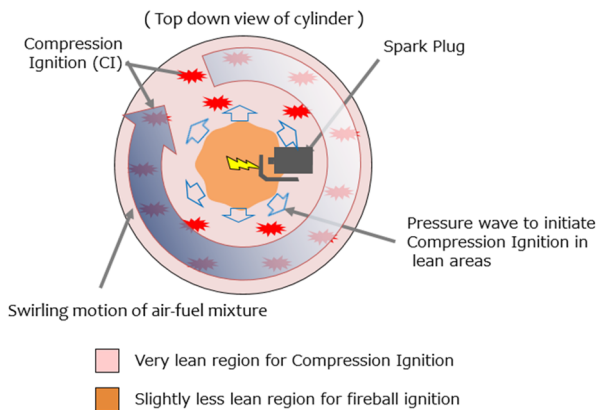


Fig. 13 Concept of Air-Fuel Mixture Control

(2) プリイグ・異常燃焼制御

従来高圧縮比エンジンでは負荷を上げるために空気量を増やすと圧縮端圧力が高くなり自着火しやすくなるためにプリイグという現象が発生しやすくなる。この現象は、高圧縮比でかつ予混合がゆえに生じていた課題である。この課題に対しては、Fig. 14に示すように圧縮行程での燃料噴射で着火遅れ時間を制御することで対応した。具体的には分割噴射を採用し、負荷増大に合わせて圧縮行程噴射の割合を増やし、未燃混合気が圧縮される時間を最小化することでプリイグを回避させた。更に圧縮行程で噴射するとプリイグは回避できるが、燃料と空気が混ざる時間が少な

くなるので煤が出やすくなるという新たな問題が出る。この課題の解決のために、超高燃圧の燃料噴射システムと燃焼室中心に配置された小径多噴孔をもつ燃料噴射弁を開発した。超高圧噴射は、微粒化を促し、気化霧化を促進することに加えて、エンドゾーンまで活用した燃料配置の最適化を実現した。また、SPCCIでは火炎伝ばによる圧縮効果を利用することで、筒内温度・圧力制御のための圧縮比依存度を下げ、圧縮比を適正化できたことも異常燃焼の抑制に有効に作用している。

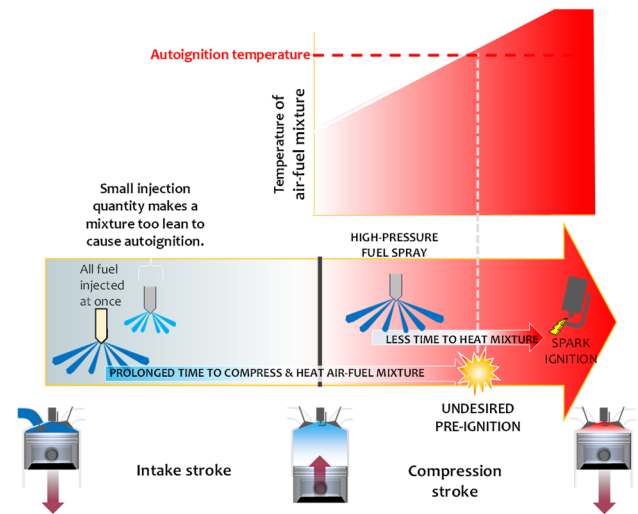


Fig. 14 Higher Pressure and Split Fuel Injection Strategy

(3) 燃焼状態監視制御

前述した異常燃焼の回避技術に加え、それら制御が正しい燃焼を導いていることを常に答え合わせをする、つまり意図と結果のずれをリアルタイムに補正し、常にありたい燃焼とするために、筒内圧センサーによる監視制御を実行している。吸気温度の変化に対し、点火時期を制御することにより目標の燃焼状態に制御可能であることをFig. 15に示す。

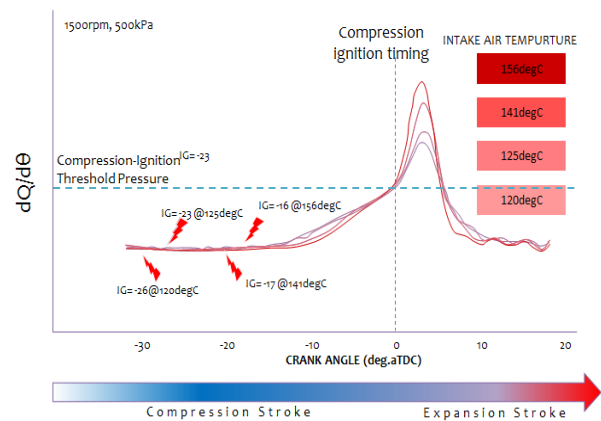


Fig. 15 Concept of Combustion Monitoring Control

以上のような取り組みにより、圧縮着火領域を全負荷領域まで拡大できた。

SPCCIとは、単に火花点火で圧縮着火をアシストするだけではなく、筒内温度／圧力、更には燃料噴射による混合気分布濃度／EGRの制御を含む、総合的な燃焼制御技術である。この完全に制御された圧縮着火、火花点火を実現したのがマツダ独自の燃焼方式SPCCIで、圧縮着火燃焼を火花点火で制御した燃焼である。

4. SPCCIの制御

SKYACTIV-Xでは3つの基本となる燃焼モード (Layer) を設定している。

- ① Layer 1 : SI燃焼。極冷間や高地の条件で使うほか、システムに異常が起こった時に、安定した運転ができるモードとして使用する。
- ② Layer2 : 大量のEGRを導入したG/FリーンSPCCI燃焼。外部、内部EGRを用いて低燃費を実現。冷間時、及び中負荷領域に適用。
- ③ Layer3 : EGRの少ない、A/F30を超えるA/FリーンSPCCI燃焼。軽負荷領域を大A/Fで低燃費を実現。

各燃焼モードは成立条件がそれぞれ異なるために、実際の使い方においてはエンジン回転、負荷、さまざまな環境条件 (温度、気圧、etc) に対して燃焼モードを切り替えるように制御している。

Fig. 16にエンジン回転、負荷に対する各燃焼モードの領域を、またFig. 17に吸気温度や燃焼室壁面温度の変化に対しての各燃焼モードの制御を示す。

A/FリーンSPCCI燃焼モードを運転中に成立条件から外れると、G/FリーンSPCCI燃焼モード、SI燃焼モードに切り替える制御を行う。

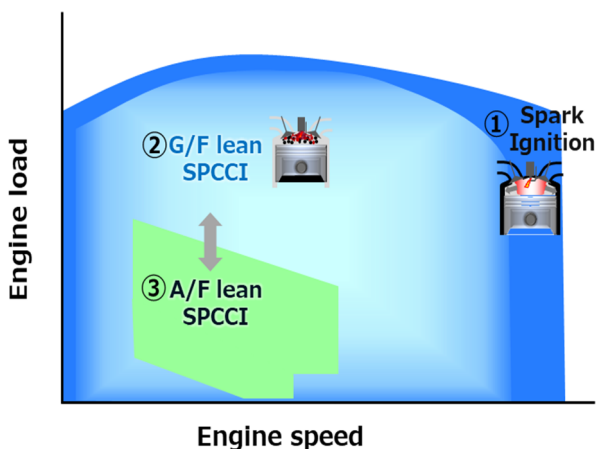


Fig. 16 Control for Combustion Modes (Engine Speed and Engine Load)

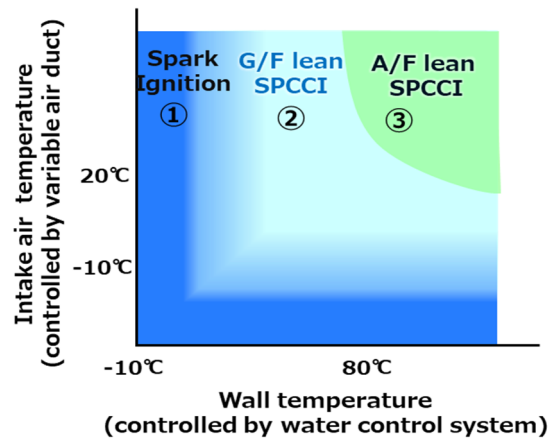


Fig. 17 Control for Combustion Modes (Intake air and combustion chamber wall temperatures)

5. SPCCI燃焼の活用拡大

5.1 SPCCI燃焼へ移行するための早期暖気の概要⁽¹⁾

SKYACTIV-Xの熱マネジメントは、従来よりも少なく限られた熱エネルギーをいかに有効に活用するかをコンセプトに開発した。

(1) 水流制御

SPCCI燃焼は、筒内の温度を一定値以上に高めなければならない。一晚駐車した後の走行時等は、局所的に温度を高め、エンジン全体の構造体や冷却水及び潤滑油に熱が拡散しないようにしている。具体的には、燃焼時の発熱量が冷却水を介して循環され、各部へ拡散していく為、始動後の発熱量と構造体の熱容量を元に、燃焼室周りの壁温を予測し、信頼性や快適性 (暖房性) から許容できる数分間は冷却水の流れを止め、筒内の暖機を向上させている。また、冷却水を流し始めても、発熱量と放熱量のバランスを確認しながら、SPCCI燃焼が実現できる状態を維持すべく冷却水の流量を、流調弁を用いて制御し、燃焼室の入口と出口の水温をモニターし筒内を適温に保っている。燃焼室周りの水温の上昇を大幅に早め、燃焼効率の高い状態へ早期に移行できる様に水流を制御している。

(2) エンジンカプセル化

エンジン燃焼室温度を適温に保ち、かつ燃焼音に寛容なエンジン環境を整えることで、SPCCI燃焼頻度を上げる技術としてエンジンカプセル化を採用している。

エンジンカプセルは、Fig. 18に示すようにカプセルカバー、エンジン直貼り、アクティブエアシャッター、アンダーカバー、スプラッシュシールドで構成され、エンジン周りにホットゾーン空間を形成し、エンジンの熱を逃がさず、温かい空気を溜め、かつエンジンから放射される音を吸音する機能を適正機能配分で実現している。

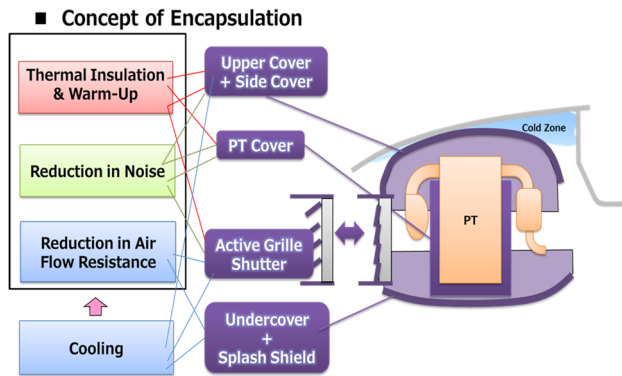


Fig. 18 Concept of Encapsulation

5.2 SPCCI燃焼を実現するNV対応技術の概要⁽²⁾

SPCCI燃焼はこれまでのSI燃焼と比較すると、Fig. 19に示すように熱発生率の勾配が大きくなるために高周波の燃焼起振力が増加し、エンジンからの放射音が大きくなる。

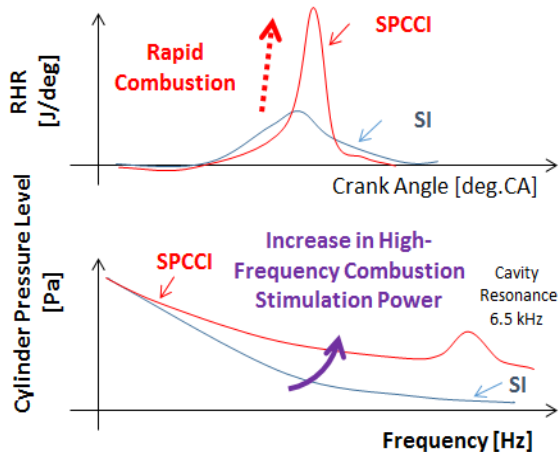


Fig. 19 Characteristic of Cylinder Pressure Level

この課題に対してもSPCCI燃焼の頻度を高めるために、燃焼制御、遮音、伝達しにくくする等の機能配分を行い、車内音は普通の車両と変わらないように対応した。

(1) 燃焼制御

筒内圧センサーによる燃焼制御で燃焼圧のコントロールを行う。常時、燃焼状態は監視しているので燃焼音からの限界値内で熱発生が起きるように点火時期を制御し、燃焼のフィードバック制御を行っている。

(2) 遮音

前述したエンジンカプセルで遮音機能を併用している。

(3) 伝達しにくくするための手段

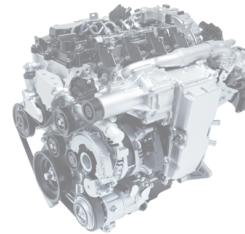
ピストン、コンロッドの共振を防ぐ手段として、ディーゼルエンジンでも採用しているナチュラルサウンドスーマーで4kHzあたりの低減を図った。

6. エンジン諸元とユニット性能

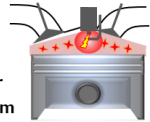
エンジンの主要諸元と主要なコントロールシステムをFig. 20に示す。

SKYACTIV-X

Hardware specifications



- SPCCI
 - ・Cylinder pressure sensor
 - ・High pressure fuel system
 - ・Air supply (supercharger)
 - ・S-VT system
 - ・SCV



■ Base engine

- ・Displacement : 1997cm³
- ・Bore x Stroke : 83.5 x 91.2
- ・Compression Ratio : 16.3
- ・Low pressure EGR system

Control System

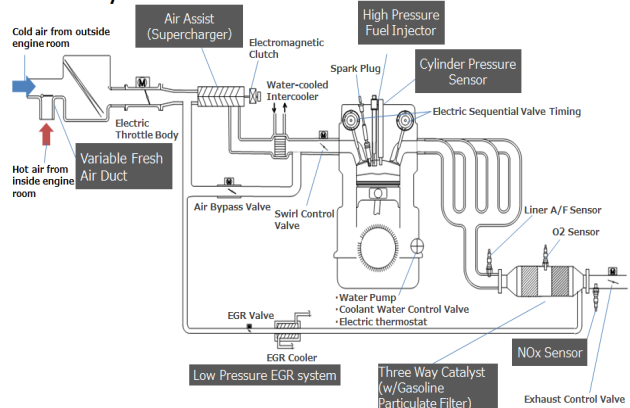


Fig. 20 SKYACTIV-X Hardware Specifications

6.1 出力性能とレスポンス

SKYACTIV-XのトルクカーブをFig. 21に示す。

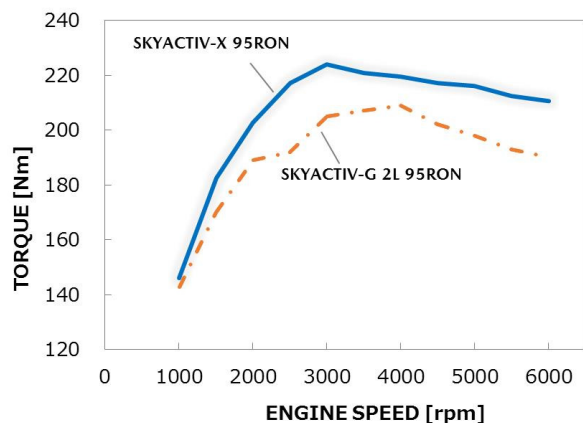


Fig. 21 Torque

SPCCI燃焼とエアサプライの組み合わせにより、SKYACTIV-G に対し全域で約10%以上の大幅なトルク向上を実現した。

SKYACTIV-Xの提供価値にレスポンスの良さがある。圧縮着火をするために、空気を押し込んでいる状態であることから吸気の遅れが少なく、また熱効率が良いため、同じ空気に対して大きなトルクを出せることがレスポンスの良い理由である。お客様が一定の速度で走っている状態から、アクセルペダルを踏み込む状況において、同じ圧縮着火のディーゼルエンジンと同じような良好な初期レスポンスを感じられる。また、ガソリンエンジンの良さである高回転時の伸びやかさは、ディーゼルエンジンに対して優位性を持っており、この点においても、走る歓びを提供することができると考えている (Fig. 22)。

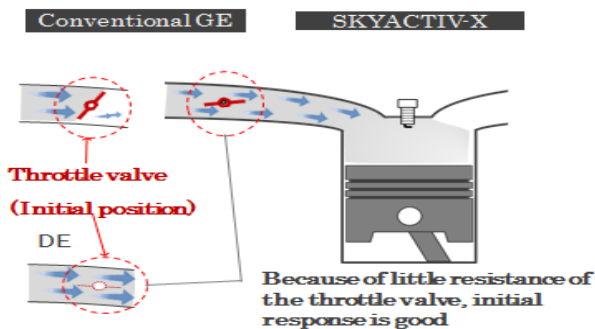


Fig. 22 Advantage of SPCCI

6.2 燃費性能

燃費に関しては2つの進化をさせた。まず第一に、燃費率の大幅な改善である。エンジンの燃料消費率については、現行エンジンのSKYACTIV-G比で平均して10%改善、更に低車速での使用頻度の高い領域ではスーパーリーン燃焼の活用により最大で約20%以上改善し、最新のディーゼルエンジンSKYACTIV-Dと同等以上の燃費率を実現している (Fig. 23)。

また、NEDCモード車両燃費では、車両の走行抵抗低減を行い、M Hybridも活用しながら前モデルに対し約30%の燃費改善を図った。

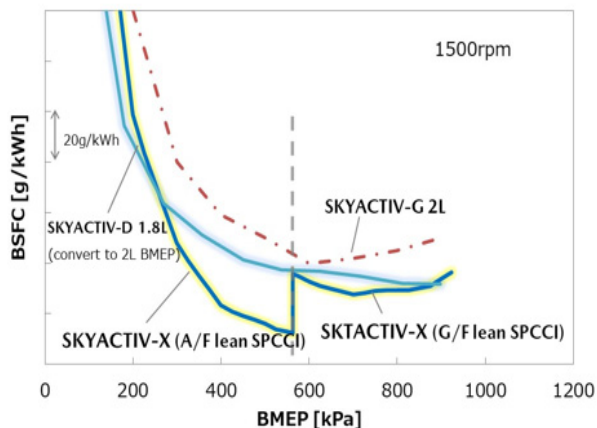


Fig. 23 Fuel Consumption(BSFC)

次にフラットな燃料消費率特性の実現である。Fig. 24にSKYACTIV-XとSKYACTIV-Gの燃費率マップの比較を示す。リーンSPCCI燃焼により、これまであまり燃費が良くなかった特に軽負荷域の燃費が大幅に改善したため、実用走行において低燃費の領域を広く使うことが可能となり、実用燃費の大幅な改善が図れた。特に軽負荷域の燃費改善率が大きいので、“大排気量＝燃費が悪い”という既成概念を完全にブレークスルーしている。

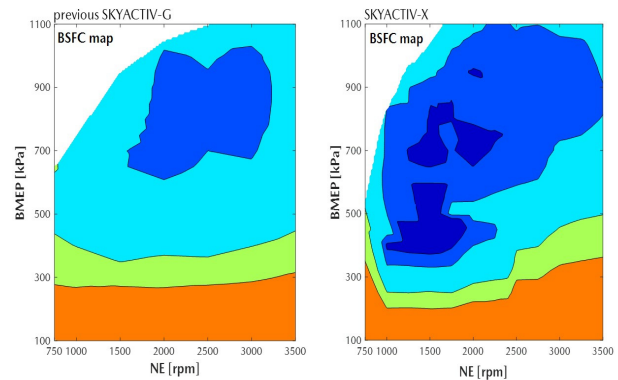


Fig. 24 Fuel Consumption Map

7. おわりに

「SKYACTIV-X」は、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの特徴を融合した新しいマツダ独自の内燃機関であり、優れた環境性能と出力・動力性能を妥協なく両立するとともに、マツダが目指す人馬一体の走りをフルにサポートする、地球と人に寄り添うエンジンである。今後は、2.0Lの優れた特性を他の排気量に効率的に転写し、主要市場に導入することで、人・地球・社会の課題を走る歓びで解決するというサステナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030のコンセプトに貢献していきたい。

参考文献

- (1) 幸徳ほか：SKYACTIV-X用熱マネジメント技術，マツダ技報，No.36，pp.32-37 (2019)
- (2) 神田ほか：SKYACTIV-X NVH技術，マツダ技報，No.36，pp.38-43 (2019)

■ 著 者 ■



磯部 利太郎



遠藤 孝次



末岡 賢也