

特集：新型MAZDA3

4

## SKYACTIV-Xを実現する燃焼技術

### The Combustion Technology

### Enabling the SKYACTIV-X Performance

漆原 友則* <sup>1</sup> Tomonori Urushihara	松本 浩太* <sup>2</sup> Kota Matsumoto	末岡 賢也* <sup>3</sup> Masanari Sueoka	井上 淳* <sup>4</sup> Atsushi Inoue
丸山 慶士* <sup>5</sup> Keiji Maruyama	山口 直宏* <sup>6</sup> Naohiro Ymaguchi	森本 博貴* <sup>7</sup> Hiroki Morimoto	松尾 佳朋* <sup>8</sup> Yoshitomo Matsuo

## 要 約

SKYACTIV-Xではこれまでに例を見ない高圧縮比を採用した。これにより、部分負荷運転時に圧縮自己着火燃焼を発現させることによって、高希釈／希薄燃焼を可能とし、実用運転時の燃費を改善することができた。他方、高負荷条件においては高圧縮比に伴い、伝ば燃焼に引き続き発生する自己着火燃焼が大きく生じる傾向となる。SKYACTIV-Xでは全負荷の自己着火燃焼を穏やかにかつ安定的に発生させることにより、高圧縮比下でも十分な軸トルクを発生させることができた。

部分負荷並びに全負荷で実施したこの火炎伝ばと自己着火の併用燃焼をSPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) と呼び、本報ではSPCCI燃焼をどのように実現したかを報告する。

## Summary

The Skyactiv-X has made extra-high compression ratio possible compared with conventional gasoline fueled engines. Under a part-load condition, highly diluted/lean mixture combustion was realized with the assistance of compression ignition combustion, resulting in a great improvement in vehicle fuel economy. In the meantime, under a full-load condition, strong auto-ignition tends to occur with the employment of a higher compression ratio. The Skyactiv-X attained sufficient output torque, even with a high compression ratio, with the help of mild and stable auto-ignition combustion under a full-load condition.

The compression ignition combustion triggered by flame propagation, which occurred under both part-load and full-load conditions, has been named SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition). In this article, we describe in detail how the SPCCI combustion has been realized.

**Key words** : Spark Ignition Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, New Combustion Model /New Combustion Model Engine, Performance/Fuel Economy/Efficiency, Mixture Formation/Gas Flow, SPCCI

## 1. はじめに

HCCI (homogeneous charge compression ignition) 燃焼に代表される圧縮自己着火燃焼は伝ば燃焼限界空燃比を超える希薄／希釈混合気を燃焼させることができるため、次世代の高熱効率燃焼として期待されてきた。一方、圧縮自己着火燃焼を引き起こすためには高い圧縮開始温度や高い圧縮比が必要である。圧縮自己着火燃焼のために高い圧縮比を採用する場合には、全負荷時にノッキングに代表さ

れる異常燃焼を回避する何等かの方策が必要である。圧縮開始温度を高める方策を採用する場合には、HCCI燃焼の燃焼開始時期が圧縮開始時点の温度圧力等の混合気条件で決定されるため、高度な可変動弁系で内部EGR量を連続可変とする等、圧縮開始温度の緻密な制御が必要であった。

今回開発したSKYACTIV-Xでは火花点火伝ば燃焼によって圧縮自己着火を制御する新しい燃焼方式SPCCI (Fig. 1)を採用することによって、部分負荷ではHCCI燃焼に必要な圧縮比より低い圧縮比で自己着火燃焼の利点を活用する

\*1~8 エンジン性能開発部  
Engine Performance Development Dept.

一方、高圧縮比を採用した際に問題となる全負荷での異常燃焼を抑制することができた。合わせて、部分負荷での自己着火時期制御の課題をシンプルな構成で克服することが可能となった。

本報では部分負荷並びに全負荷で採用した、SPCCI燃焼をどのように実現させたかを詳述するとともに、SPCCI燃焼で得られた性能諸特性を報告する。

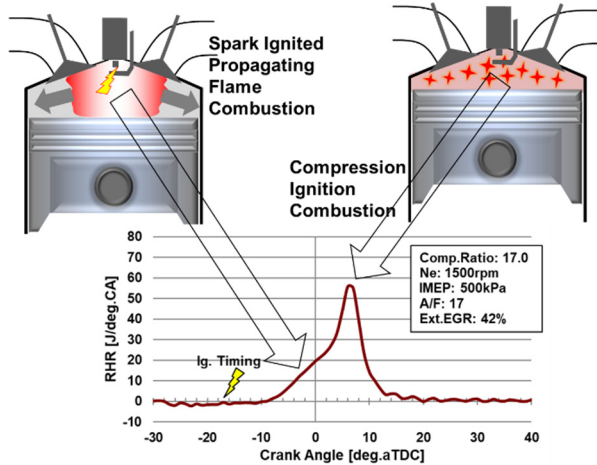


Fig. 1 Schematic of the SPCCI Combustion Concept and the Typical Heat Release Curve

## 2. SKYACTIV-Xにおける燃焼課題

### 2.1 部分負荷での要求圧縮比

火花点火伝ば燃焼に頼らないHCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) 燃焼では圧縮上死点付近において自己着火に至らしめるために、内部EGRを使用しない場合、高い圧縮比を要求することが知られている<sup>(1)</sup>。

Fig. 2は圧縮上死点にて自己着火を発生させるために必要な有効圧縮比を計算で求めたものである。例えば機関速度2000rpm部分負荷BMEP200kPaにおいては20程度の圧縮比が必要であることがわかる。圧縮比をこのような高い値から下げようとする場合には、圧縮開始温度を上げるために内部EGRを利用する必要があり、任意量の内部EGRを導入するための高度な連続可変動弁系が必要となる。SKYACTIV-Xでは複雑な可変動弁系を採用せず、圧縮比を高める方策を採用することとした。

### 2.2 全負荷での要求圧縮比

他方、Fig. 2から、機関速度2000rpm 全負荷BMEP1300kPaにおいては、圧縮比約15にて点火せず圧縮自己着火することがわかる。このことはノック等の異常燃焼なく全負荷を運転できる圧縮比と、部分負荷で圧縮自己着火燃焼を活用できる圧縮比との間に大きな乖離があることを示している。

近年部分負荷での高い熱効率要求から、ガソリンエンジンの圧縮比は上昇傾向にある。マツダでは複数のノッキング抑制技術<sup>(2)</sup>を投入することによって、自然吸気ガソリン

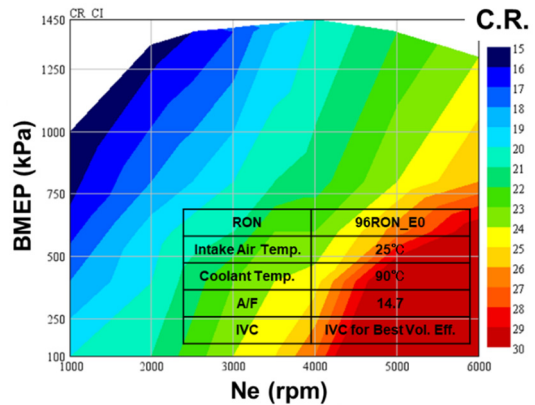


Fig. 2 Required Compression Ratio for the Auto-ignition at Compression TDC

エンジンSKYACTIV-Gにて既に圧縮比14を実用化している (Fig. 3)。しかしながら、部分負荷での圧縮自己着火燃焼で必要とされる高い圧縮比を採用するためには、これまでに開発したノック抑制技術に加えて、さらなる新しい方策を導入することが必要であった。

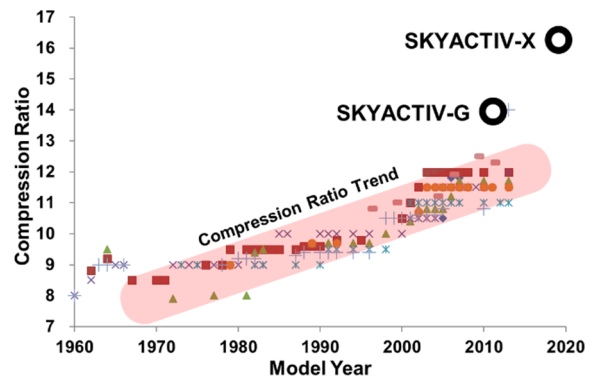


Fig. 3 The History of Compression Ratio Improvement

### 2.3 燃焼課題のまとめ

部分負荷からの圧縮比要求と全負荷からの圧縮比要求は相反する。圧縮自己着火を応用する部分負荷性能と全負荷性能を両立させることが最大の燃焼課題である (Fig.4)。

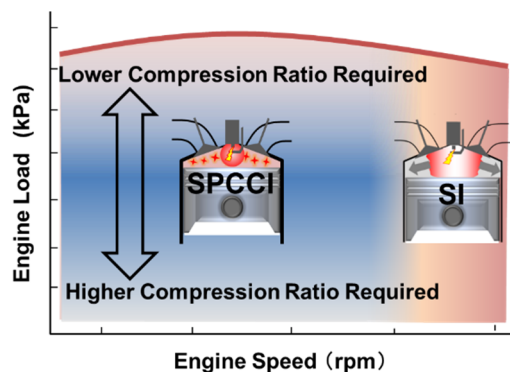


Fig. 4 Conflict in Compression Ratio Requirements

### 3. 機関諸元

SKYACTIV-Xでは部分負荷性能と全負荷性能の両立性をかんがみ、ガソリンエンジンとしてこれまでに例のない高圧縮比16.3を採用した。

SKYACTIV-Xの諸元を燃焼開発のために使用した単気筒エンジンの諸元と合わせてTable 1に示す。燃焼室形状をFig. 5に示す。

以下の各章において、部分負荷並びに全負荷の燃焼について詳述してゆく。

Table 1 Specification of the tested Engines

Engine Type	Single Cylinder	Inline 4cylinder
Displacement (cc)	500	2000
Bore*Stroke (mm)	83.5 * 91.2	83.5 * 91.2
Compression Ratio	17	16.3
Valve Mechanism	Fully Variable Hydraulic Valve Actuation	Sequential Valve Timing on Intake and Exhaust
Fuel Injection System	Multi hole Central Direct Injection	Multi hole Central Direct Injection
Maximum Injection Pressure (MPa)	100	70
Fuel Octane Number	RON95	RON95
Air Supply System	External Supercharger	Roots Supercharger

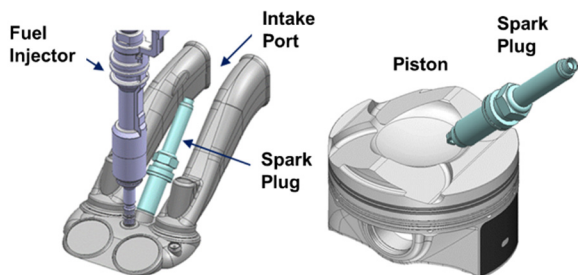


Fig. 5 Combustion Chamber Geometry

### 4. SPCCI燃焼の部分負荷への適用

#### 4.1 HCCI燃焼の特性と課題

良く知られているように、HCCI燃焼の燃焼位相は吸気弁閉時期の温度、圧力及び混合気組成で決定される。このため吸気温度に対する燃焼位相の変化は大きい。Fig. 6は吸気温度を変化させたときのHCCI燃焼の位相変化を示したものである。吸気温度を低下させると燃焼位相が大きく遅角することがわかる。

#### 4.2 SPCCI燃焼の特性

Fig. 7は火花点火伝ば燃焼を先行させて自着火燃焼を発生させるSPCCI燃焼において、同じく吸気温度を低下させた場合の熱発生率の変化を示す。図から明らかなように、SPCCI燃焼では吸気温度による燃焼位相への影響が緩和

されていることがわかる。

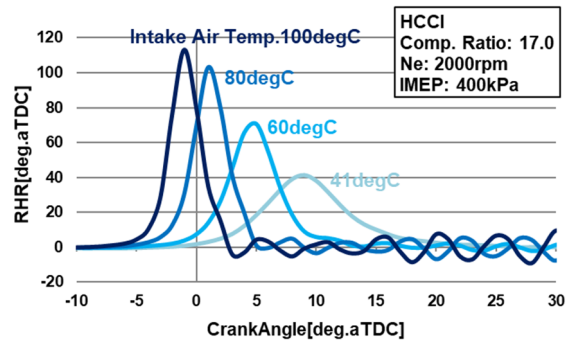


Fig. 6 Effect of Intake Air Temperature on HCCI Combustion

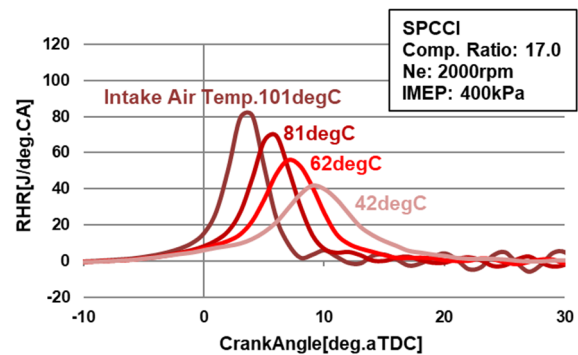


Fig. 7 Effect of Intake Air Temperature on SPCCI Combustion

Fig. 8は以上の結果を吸気温度を横軸に取り、燃焼位相に対する影響を示したものである。吸気温度に代表される外乱に対するロバスト性が改善されていることがわかる。

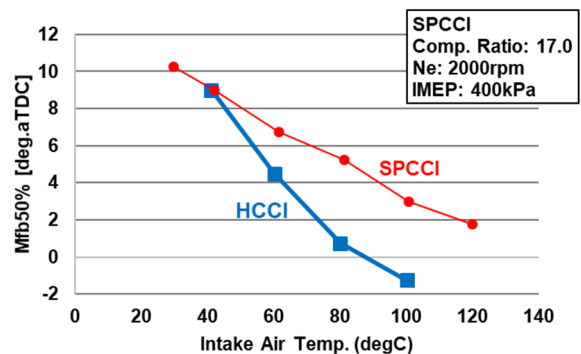


Fig. 8 Comparison among Intake Air Temperature Sensitivities of HCCI and SPCCI

SPCCI燃焼のもう一つの利点は点火時期によって自己着火燃焼の位相を制御できることである。Fig. 9は吸気温度が変化したときの燃焼位相の変化を示す。同条件にて、吸気温度ごとに点火時期を変化させて燃焼位相をMBTに制御

することが可能である。Fig. 10はこの結果を示したものである。

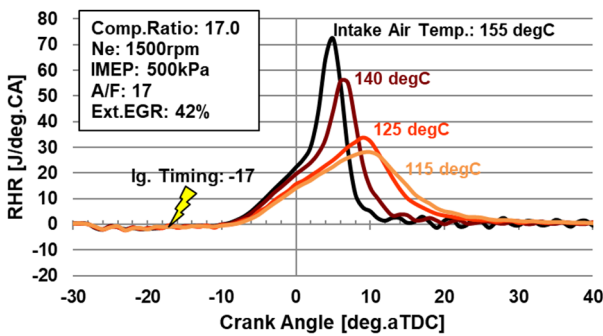


Fig. 9 Effect of Intake Air Temperature on SPCCI Combustion Phasing under Fixed Spark Ignition Timing

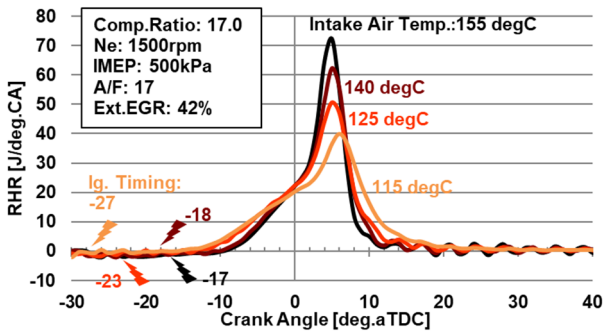


Fig. 10 Temperature Compensation by Spark Ignition Timing

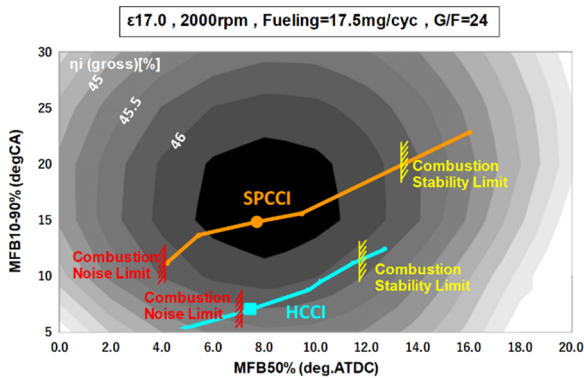


Fig. 11 Comparison between HCCI and SPCCI Operating Region on the Combustion Phasing - Combustion Duration Plane

Fig. 11は燃焼位相－燃焼期間 平面上において、HCCIとSPCCIの比較を行ったものである。背景の等高線は0次元計算で求めた図示熱効率である。図中HCCIのカーブは、わずかにA/Fを変化させることによって生じた燃焼位相、燃焼期間の変化を示す。SPCCIのカーブは点火時期を変化させることによって生じた同変化を示す。SPCCI燃焼においてはHCCI燃焼と比較し、燃焼騒音と燃焼安定度に

挟まれる運転可能領域が広いことがわかる。また、燃焼期間が長いことによって熱効率においても有利であることがわかる。

次にSPCCI燃焼による要求圧縮比の緩和作用について示す。Fig. 12は火花点火伝ば燃焼の開始時期を横軸に、圧縮比を縦軸に取り、自己着火燃焼割合がどのような割合になるかをShell modelを用いて計算したものである。伝ば燃焼開始時期を遅らせた状態 (-10degATDC) では圧縮比17でも自己着火燃焼は発生しないが、伝ば燃焼開始時期を-30degATDCまで進角すると圧縮比16程度で自己着火燃焼の割合が50%に達することがわかる。

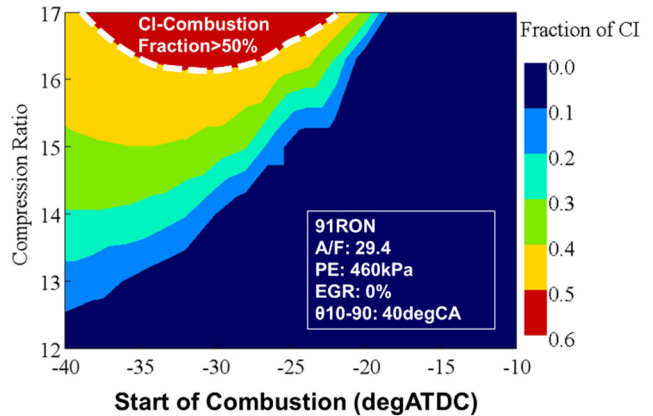


Fig. 12 Auto-Ignition Combustion Fraction as a Function of Compression Ratio and the Propagating Combustion Phasing

以上をまとめるとSPCCI燃焼の特長として以下の3点を挙げる事ができる。

- ① 吸気温度等の外乱による燃焼位相への影響が小さい。
- ② 吸気温度等の外乱による燃焼位相への影響を点火時期で打ち消すことができる。
- ③ 低い圧縮比で自己着火燃焼を発生させることができ、希薄燃焼限界とEGR限界を高くすることができる。

### 4.3 A/FリーンスPCCIの燃焼特性

SPCCI燃焼では自己着火燃焼を発生させるため伝ば燃焼を利用する。伝ば燃焼はHCCI燃焼に比べて濃い混合比を要求するため、排出NO<sub>x</sub>濃度が高くなる事が懸念される。また、NO<sub>x</sub>を下げるために点火点近傍の空年比を薄くすると伝ば燃焼速度のサイクル変動が大きくなり、後続する自己着火燃焼の発生タイミングが変動する原因となる。伝ば燃焼速度のサイクル変動を抑制することがSPCCI燃焼を成立させるために重要な要素となる。

Fig. 13は図中に示した運転条件においてSPCCI燃焼を行った際のNO<sub>x</sub>-BSFCトレードオフ線を示したものである。A/F30で燃焼安定度を確保するためには、圧縮行程で燃料を噴射することによって混合気を成層化する方法がある。

この場合、図中◆で示す高い排出NO<sub>x</sub>濃度が発生する結果となった。

伝ば燃焼の安定度を高めるためにスワールコントロールバルブを閉じて乱流を形成させると、混合気の成層化に依存する必要性が小さくなり、NO<sub>x</sub>-BSFCトレードオフ線は大きく改善することができる(図中■)。

更に、燃料噴射を2回に分割し、混合気の最適配置を図ることでNO<sub>x</sub>-BSFCトレードオフは更に改善する(図中▲)。

Fig. 14は、DOE (Design of Experiment, 実験計画法)を使用して最終的なキャリブレーションを導いた過程を示す。Fig. 14中の白破線はFig. 13中の▲のトレードオフ曲線に相当し、最終的に白丸で示す燃料噴射時期並びに分割比を採用した。

Fig. 15は同じくDOEを使用して導いた、希薄燃焼域高負荷での噴射キャリブレーションに対応する燃焼室内混合気分布(CFD計算結果)を示す。希薄燃焼域高負荷では複数の噴射を組み合わせることによりおおむね均質の混合気を形成している。また、点火プラグ周辺には燃焼安定化のため、やや濃い混合気が準備されていることがわかる。

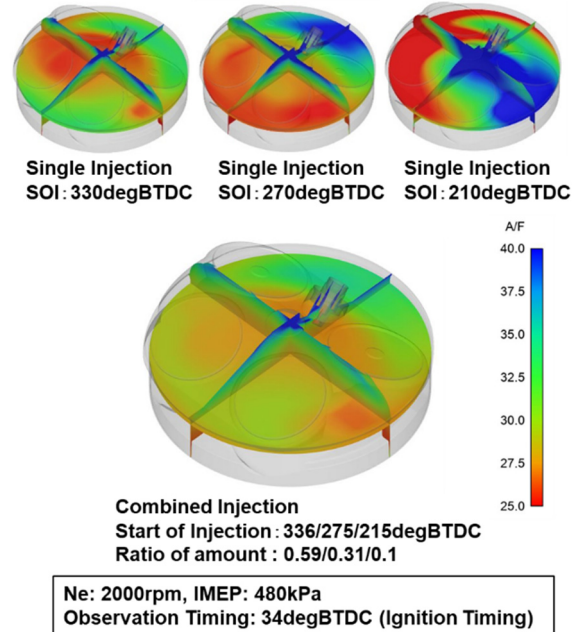


Fig. 15 An Example of the Attained Mixture Distribution through DOE Approach

## 5. SPCCI燃焼の全負荷への適用

### 5.1 全負荷でのSPCCI燃焼課題

部分負荷SPCCI燃焼では自己着火燃焼を誘発するために火花点火伝ば燃焼を利用した。逆に、全負荷では自己着火燃焼の抑制と緩慢化が必要となる。火花点火伝ば燃焼速度のサイクル変動は自己着火燃焼の位相変動を引き起こし、自己着火燃焼割合の変動や自己着火燃焼に伴うCPL (Cylinder Pressure Level) の悪化を招いてしまう。このため、伝ば燃焼の安定が重要である点は部分負荷SPCCIと同様である。

まとめると、全負荷SPCCI燃焼においては

- ① 自己着火燃焼の緩慢化
- ② 自己着火燃焼の安定化 (伝ば燃焼の安定化)
- ③ 自己着火燃焼の抑制

の3つが重要な課題となる。

### 5.2 SPCCI燃焼の特性

Fig. 16(a)は、図示の運転条件にてEGR無でプレイグニッション限界の充填効率で運転したときの熱発生率を10サイクル分重ねて示したものである。伝ば燃焼が早く急激な自己着火燃焼を伴うサイクルと伝ば燃焼が遅く熱発生率が緩慢すぎるサイクルとが混在していることがわかる。点火進角は、伝ば燃焼が早く急激な自己着火燃焼を伴うサイクルで発生する高いCPL (Cylinder Pressure Level) によって実質的に制限される。

自己着火燃焼の抑制と緩慢化のためには外部EGRが有効である。Fig. 16(b)は、9%の外部EGRを加えたときの熱発生波形の重ね書きを示す。なお、充填効率と同じくプレイ

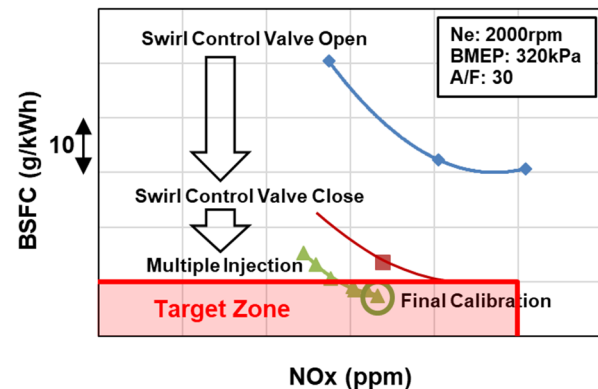


Fig. 13 NO<sub>x</sub>-BSFC Tradeoff in SPCCI Combustion and Its Improvement

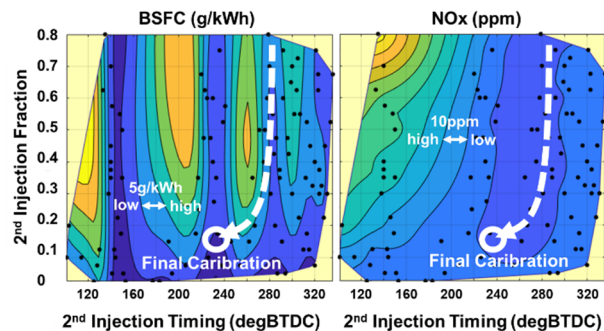
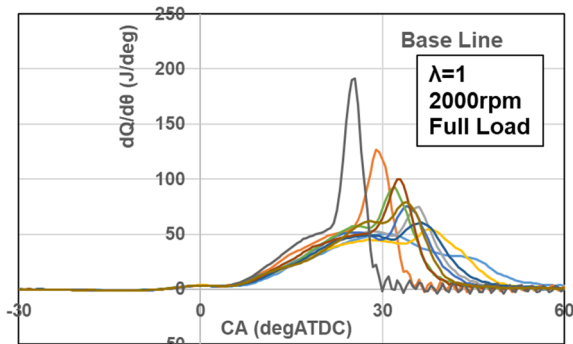


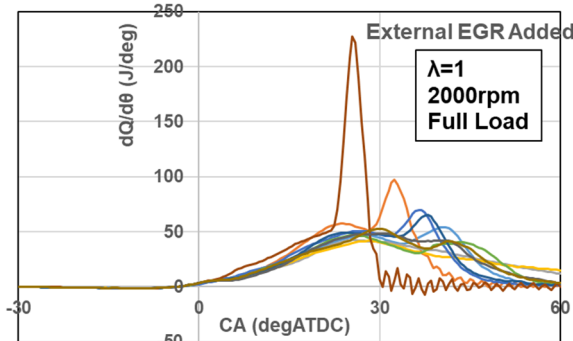
Fig. 14 NO<sub>x</sub>-BSFC Tradeoff Improvement by DOE Approach

グニッション限界にセットしている。Fig. 17は外部EGRを加える等の改善策を施したときのプレイグニッション限界充填効率を示す。外部EGRを加えることによって充填効率を10%改善することができている。しかしながら、外部EGRを加えることによって自己着火が抑制され充填効率を向上させることができたものの、熱発生量のばらつきは一層悪化していることがわかる。

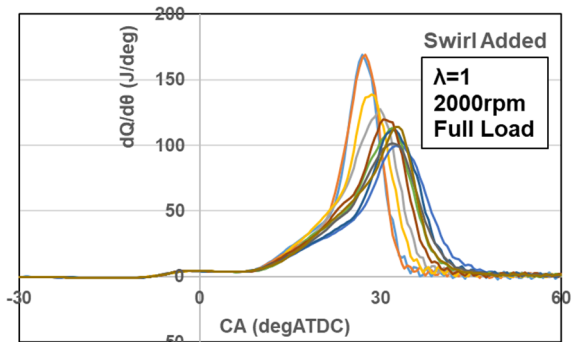
Fig. 16(c)は、外部EGRを付与した上で、スワールコントロールバルブを閉じることによってスワールを付与した場合の熱発生率を示す。伝ば燃焼のサイクル変動が低減され、それにもなつて自己着火燃焼の時期・量ともに安定する。急激な熱発生が抑制されると同時に燃焼が緩慢すぎるサイクルを削減することができていることがわかる。



(a) Baseline Heat Release



(b) Moderation of Auto-ignition Combustion by EGR Addition



(c) Stability Improvement by Swirl Addition

Fig. 16 Heat Release Curve of SPCCI Full-Load Combustion

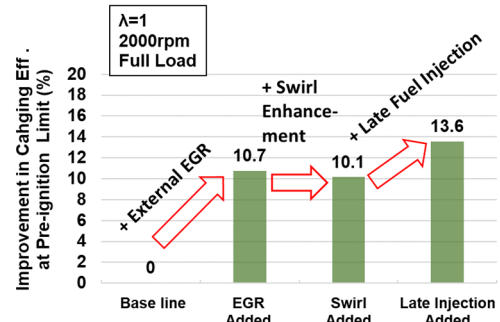


Fig. 17 Maximum Charging Efficiency Limited by Pre-ignition

次に一層の自己着火抑制のための圧縮行程燃料噴射の効果について説明する。自己着火の抑制のためにはエンドガスの冷却が有効である。エンドガスを冷却するための手段として濃い燃料を燃焼室周辺部に配置し、燃料の気化潜熱によって局所の混合気温度を下げる手段が考えられる。

SKYACTIV-Xでは燃焼室中心に配置された直接式燃料噴射弁とスワール流動、そして圧縮行程の適切な時期の燃料噴射との組み合わせによって、燃焼室周辺部に円環状の濃い混合気を配置することが可能である。

Fig. 18はTable 2 に示す計算条件にて、筒内混合気の当量比分布を計算したものである。燃料噴射時期を適切に選択することによって、燃焼室周辺のエンドガス部に濃い混合気を配置できていることがわかる。

Table 2 Calculation Condition

Engine Speed	2000 rpm
Charging Eff.	114%
Ext. EGR	9 %
Swirl Control Valve Position	15 %
Overall A/F	12.8
Fuel Pressure	30 MPa
Start of Injection	270 / 90 degBTDC
Injection Amount	9:1

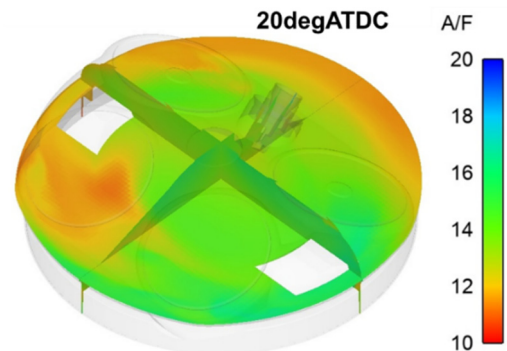


Fig. 18 Mixture Equivalence Ratio Distribution in Combustion Chamber Aimed for End Gas Cooling

Fig. 19 はこれまでに述べた、外部EGR、スワール流動の付与、圧縮行程噴射によって達成できた機関性能、すなわち、プレイグニッション限界充填効率とその時の図示平均有効圧力の変動の推移を示す。圧縮行程噴射を組み合わせることによって、一層の充填効率の向上と燃焼安定度の改善が図れていることがわかる。

以上示したように、全負荷においてもSPCCI燃焼を使用することによって目標性能を達成することができた。

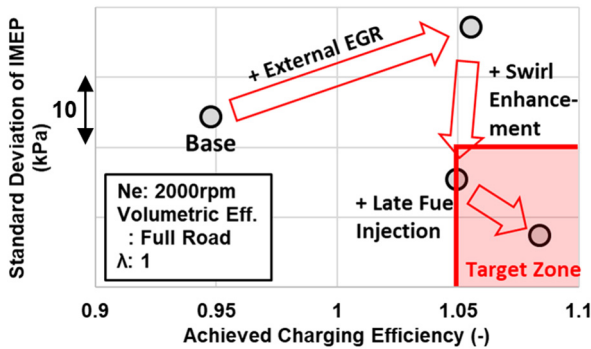


Fig. 19 Achieved Charging Efficiency and Combustion Stability at Full Load

### 6. SPCCI燃焼の適用結果

Fig. 20 は機関速度2000rpmにおいて低負荷から高負荷に至る各負荷の熱発生率の変化を示したものである。充填効率70%までのおおむねMBTを維持しながら希薄燃焼を実現し、充填効率70%以上ではCPL (Cylinder Pressure Level) を許容値に抑えるために燃焼位相をリタードしながら、安定した自己着火燃焼を伴って運転できていることがわかる。

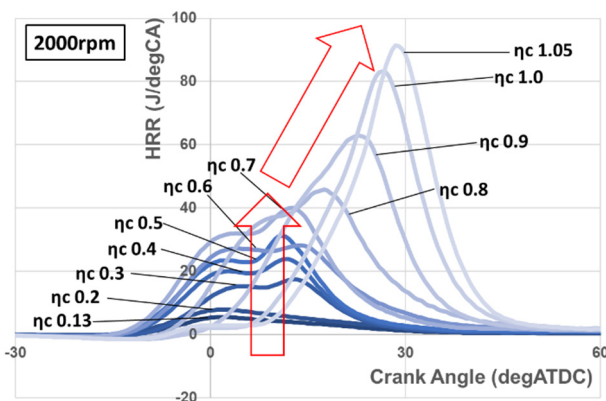


Fig. 20 SPCCI Heat Release Development with the Engine Load Increase

Fig. 21 は最終的に達成された燃費率を示す。これまでのエンジンに対して大幅な燃費率改善を行うことができた。

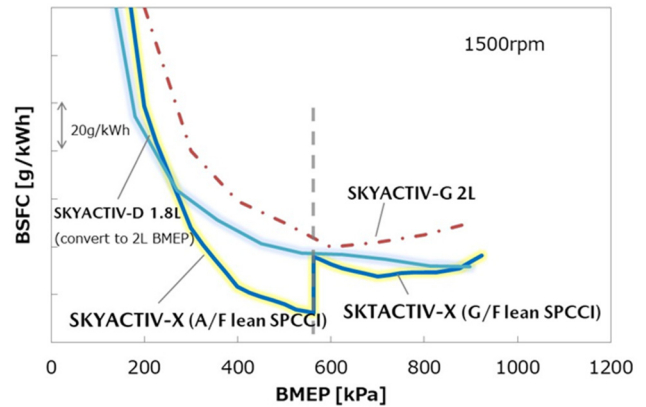


Fig. 21 Achieved Specific Fuel Consumption at 1500 rpm

### 7. まとめ

SKYACTIV-Xではガソリンエンジンとしてこれまでに例のない高圧縮比16.3を採用した。

火花点火伝ば燃焼後に、圧縮自己着火燃焼を発生させること (SPCCI) によって、部分負荷運転時に高希釈/希薄燃焼を可能とした。更に、火花点火伝ば燃焼を併用することの効果により、温度圧力等に対するロバスト性を改善することが可能となった。

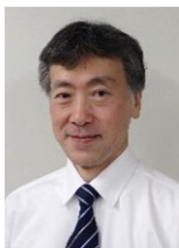
高負荷条件においては、自己着火燃焼を緩慢にかつ安定的に発生させることが可能となり、高圧縮比でも十分な軸トルクを発生させることができた。

以上のように、SKYACTIV-Xでは内燃機関の理想に向けた歩みを更に進めることができた。今後は「優れた環境性能」と「走る歓び」のために高圧縮比技術と希薄燃焼技術の開発を一層前進させることによって、豊かな社会の実現に貢献していく。

### 参考文献

- (1) Koji Hiraya et al. : A Study on Gasoline Fueled-Compression Ignition Engine ~ A Trial of Operation Region Expansion, SAE Paper 2002-01-0416 (2002)
- (2) Masahisa Yamakawa et.al: Combustion Technology Development for a High Compression Ratio SI Engine, SAE Paper 2011-01-1871

■ 著 者 ■



漆原 友則



松本 浩太



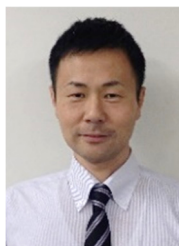
末岡 賢也



井上 淳



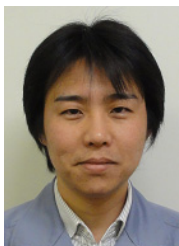
丸山 慶士



山口 直宏



森本 博貴



松尾 佳朋