

特集：解説

15

高圧縮比ガソリンエンジンにおける 触媒早期暖機のための燃焼技術開発

Development of Combustion Technology for Reducing Catalyst Warm-Up Time in a High-Compression-Ratio Gasoline Engine

藤川 竜也*¹ 内田 健児*² 中山 佳映*³
Tatsuya Fujikawa Kenji Uchida Yoshiteru Nakayama
山川 正尚*⁴
Masahisa Yamakawa

要 約

火花点火ガソリンエンジンにおいて、高圧縮比化は熱効率の改善に有効な手段である。しかしながら、高い熱効率ゆえに排ガス温度が低下し、冷間始動時の触媒暖機時間が長くなる。更に高トルク化をねらって掃気効果を持つ排気系は、一般的にロング排気系となり触媒上流の熱容量が増加し、ますます触媒暖機時間が長期化する。そこで、本研究では高圧縮比エンジンで触媒早期暖機に有効な排ガス温度上昇を実現する燃焼技術を開発した。

Summary

The high compression ratio is effective in improving the thermal efficiency for a spark-ignited gasoline engine. However, the exhaust emissions are deteriorated by the increased catalyst warm-up time, which results from (1) the reduced exhaust gas temperature caused by the elevated expansion ratio and (2) the elongated exhaust pipe for increasing the engine torque. The technology development was conducted for retarding the combustion phasing. The results show that high environmental performances are achieved.

1. まえがき

これまでのエンジンに加え、ハイブリッドやモーターを用いた自動車の研究開発が近年盛んに行われている。しかしながら、燃費改善効果予測⁽¹⁾では2020年のCO₂削減目標25%の中で11%をエンジンが担い、2050年の削減目標78%の中で21%をエンジンが担うなど、長期的な視点においてもエンジンの燃費改善が負うところは非常に大きい。とりわけ、台数、モデル数の多いガソリンエンジンの燃費改善はCO₂削減及び国際競争力強化の観点から極めて重要である。そこで、マツダはガソリンエンジンの熱効率を向上させるために高圧縮比化に取り組み、それに伴い現れる点火前の低温酸化反応に新たに着目し、従来からのノッキング改善手法である急速燃焼と混合気冷却のための新たな技術を導入することでガソリンエンジンの高圧縮比化を実現した⁽²⁾。

しかし、高圧縮比ガソリンエンジンでは高い熱効率ゆえに排気損失が低下、すなわち排ガス温度が低下し、冷間

始動時の触媒暖機時間が長くなる課題がある。また、高圧縮比ガソリンエンジンにおいて、更なる高トルク化の実現手段としては残留ガスの掃気でノッキングを回避しつつ体積効率を向上させることが有効である⁽³⁾が、このような排気系は一般的にロング排気系となり触媒上流の熱容量が増加し、更に触媒暖機時間が長期化してしまう。そこで、本研究では高圧縮比ガソリンエンジンにロング排気系を装着しても短時間で触媒暖機可能とする燃焼技術を開発した。

2. 供試機関及び実験条件

本研究に用いた供試エンジン仕様をTable 1に示す。直噴ガソリンエンジンをベースに圧縮比を14まで高め、燃焼室形状はキャビティ付き燃焼室とした。また、インジェクターには噴射方向に自由度のあるマルチホールインジェクターを用いた。Fig. 1に燃焼室形状を示す。実験条件は冷間からの始動を想定し、冷却水温40℃、エンジン回転速度1200rpm、正味平均有効圧 (BMEP) 100kPaとした。

*1,2,4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

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

Table 1 Engine Specifications

Engine Type	In-line 4, DOHC
Bore X Stroke	87.5mm X 83.1mm
Displacement	1998.8cm ³
Combustion Chamber	Pent-roof
Compression Ratio	14
Fuel System	Direct Injection
Injector Type	Multi Hole Injector
Number of holes	6 holes
Fuel Pressure	13MPa

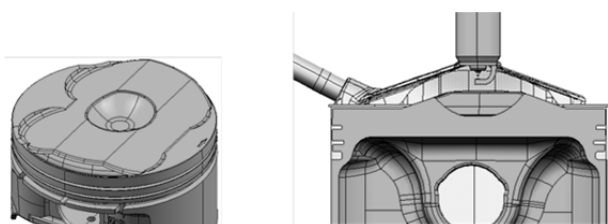


Fig. 1 Shape of Piston Top

3. 高圧縮比に伴う触媒暖機への影響

はじめに高圧縮比とロング排気系による排ガス温度低下を把握した。Fig. 2に従来圧縮比エンジンCompression Ratio=11.2 (CR11.2)と高圧縮比エンジンCompression Ratio=14 (CR14.0)における触媒暖機試験の同一点火時期での排ガス温度を示す。高圧縮比エンジンの排気ポートでの排ガス温度は高圧縮比化により排気損失が低減したため従来圧縮比エンジンに比べ30℃低下している。排ガス浄化の観点から主流となっている4-1集合タイプの排気系では触媒までの距離が短いため排気ポート温度に対して触媒入口温度はほとんど変化しないが、ロング排気系の触媒位置を想定した750mm下流の点においては更に80℃低下している。したがってロング排気系を用いた高圧縮比エンジンで従来圧縮比エンジン以上の触媒早期暖機を実現するには、冷間始動時に合計110℃以上の大幅な排ガス温度上昇が必要なることがわかった。

4. 触媒早期暖機のための成層燃焼コンセプト

排ガス温度を上げる手段として一般的には点火時期リタードをしている。点火時期リタードは同時に燃焼安定性を損なうため、点火時期大幅リタード時でも安定した燃焼を実現できる手段として成層燃焼が有効である。従来の成層燃焼コンセプトは、一塊のリッチ混合気を点火プラグ周辺に滞在させるようにピストン上部に比較的大型のキャビティを形成することで安定したリタード燃焼を実現している⁽⁴⁾。しかし、高圧縮比エンジンでは高い圧縮比を得るために燃焼室設計の自由度が低く従来のコンセプトをそのまま適用することは困難である。更に、高効率、高出力を実

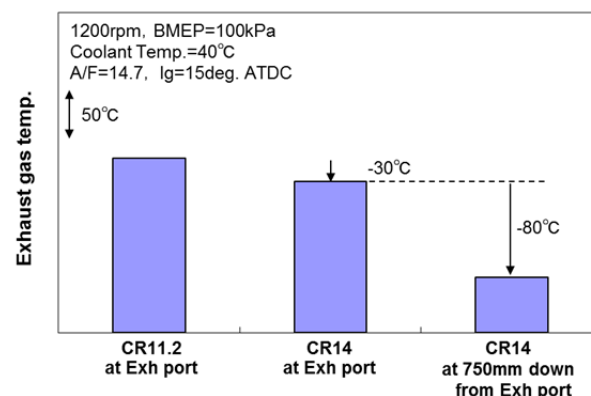


Fig. 2 Comparison of Exhaust Gas Temperatures

現するためにピストンキャビティやマルチホールインジェクターの機能を開発しており、これらの機能と両立できる新たな成層燃焼コンセプトを構築する必要があった。

そこで、本研究ではFig. 3に示すような新しい成層燃焼コンセプトに取り組んだ。新成層燃焼コンセプトのポイントは、マルチホールインジェクターを使って点火プラグ周りに長期間安定して可燃範囲の混合気を供給し続け、かつ、くすぶりの原因となる点火プラグへの液滴飛散を防ぐことである。

具体的には、上段噴霧①をキャビティに入れるように配置し、排気側のキャビティ側面を利用して点火プラグ方向に噴霧を巻き上げる。中段噴霧②、③は吸気バルブ下の斜面に衝突させ、斜面に沿って点火プラグの方向に噴霧を運ぶ。下段噴霧⑥は吸気側の平面に衝突させ、中段噴霧②、③に追従して点火プラグ周りに混合気を補充する。このように噴霧を三つの塊に分割して時間差で混合気を点火プラグに到達させることで、点火プラグ周りに上死点 (TDC) 後長い期間安定した可燃混合気を存在させることを可能にする。

また、点火プラグくすぶりに対しては、吸気バルブ下の斜面を延長した線と点火プラグの距離を確保することにより、点火プラグへの液滴飛散を防止する。

5. 実機検証

5.1 点火プラグ型A/Fセンサーによる検証

本研究では、点火プラグ周りの混合気形成と液滴飛散有無を検証するため、実機エンジンに大きな改造なしで取り付けることができる赤外線吸収法を利用した点火プラグ型A/Fセンサー (LaVision製) を用いた。点火プラグ型A/Fセンサーの計測部分をFig. 4に示す。点火プラグの横に計測部を設け、サファイアファイバーを用いて光源からの光を導き、サファイアガラス窓を介して計測部に入射しミラーで反射させて再度サファイアファイバーを通じて受光部に導かれる。

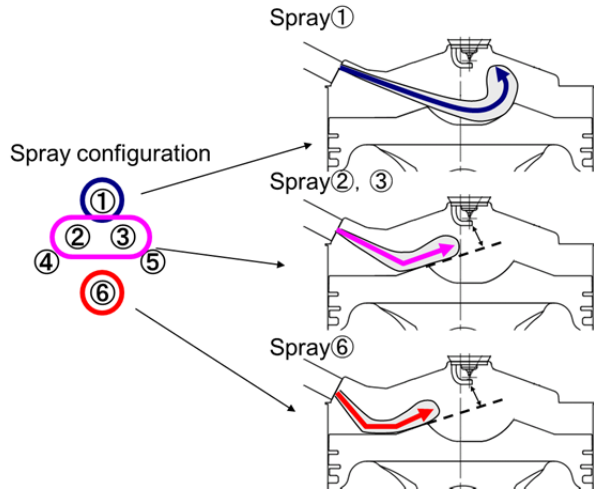


Fig. 3 Conceptual Schematic of Charge Stratification

(1) 点火プラグ近傍A/Fの計測原理

計測部に燃料蒸気が存在すると燃料の炭素と水素結合の振動による光の吸収により透過光が減衰する。この減衰の度合いから式(1)に示すBouguer-Lambert-Beerの法則により燃料の炭化水素分子のモル濃度を算出できる⁽⁵⁾。ここで、 C はモル濃度[mol/l]、 I_0 は計測部に燃料蒸気が存在しないときの透過光強度、 I は燃料蒸気が存在するときの透過光強度、 ϵ_λ はモル吸光係数[l/(mol·cm)]、 L は光路長[cm]である。

$$C = \frac{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\epsilon_\lambda \cdot L} \quad (1)$$

また、筒内ガスの状態方程式(2)において、一般的にガソリンエンジンでは筒内の燃料炭化水素のモル数 n_f [mol]は空気のモル数 n_a [mol]に比べ微少であることから n_f を消去して式(1)に代入することにより式(3)が導かれる。なお、使用する燃料の ϵ_λ が未知であるため、あらかじめ均質混合気を供給してキャリブレーションすることで ϵ_λ を求め点火プラグ近傍の相対的なA/Fを算出した。

$$p \cdot V = (n_a + n_f) \cdot R \cdot T \quad (2)$$

$$A/F \propto \frac{n_a}{n_f} = \frac{\frac{p}{T} \cdot \epsilon_\lambda \cdot L}{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \cdot R} \quad (3)$$

ここで p は筒内圧力[Pa]、 V は燃焼室容積[m³]、 T は筒内温度[K]、 R は気体定数[J/(K·mol)]

(2) 飛散液滴の計測原理

点火プラグ型A/Fセンサーの計測原理から点火プラグへの液滴飛散有無が計測できると考えられる⁽⁶⁾。すなわち燃

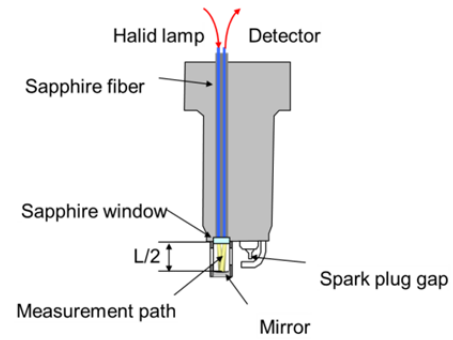


Fig. 4 Schematic of Spark Plug A/F Sensor

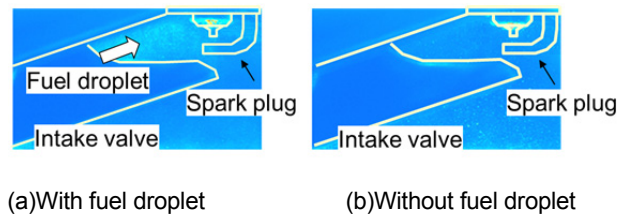


Fig. 5 Images with and without Fuel Droplet Obtained in Optical Research Engine

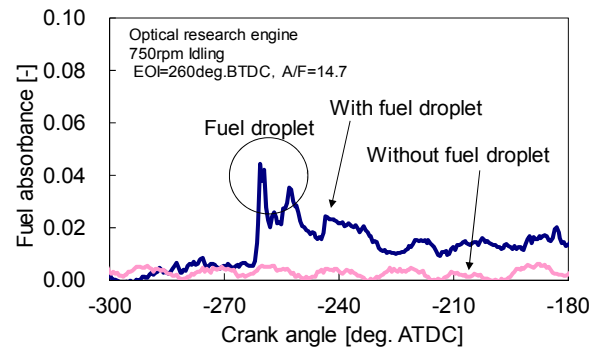


Fig. 6 Fuel Absorbance for with and without Droplet

料液滴が計測部を通過すると燃料液滴の散乱により透過光が不連続に大きく減衰し、吸光度にスパイク状の波形となって現れると予想される。よって、サイクルごとに吸光度のスパイク状の波形を観察することで点火プラグ型A/Fセンサーで液滴飛散有無を検証できると考えた。そこで、事前に可視化エンジンを用いて点火プラグ型A/Fセンサーによる吸光度の計測と噴霧の挙動撮影を同時に行うことで、液滴飛散の計測可能性を判断した。Fig. 5に噴霧の散乱光撮影画像、Fig. 6に点火プラグ型A/Fセンサーで計測した吸光度を示す。その結果、噴霧を吸気バルブに衝突させ点火プラグに液滴を飛散させた条件では吸光度にスパイク状の信号が見られ、点火プラグ型A/Fセンサーで点火プラグへの液滴飛散が計測できることが確認できた。

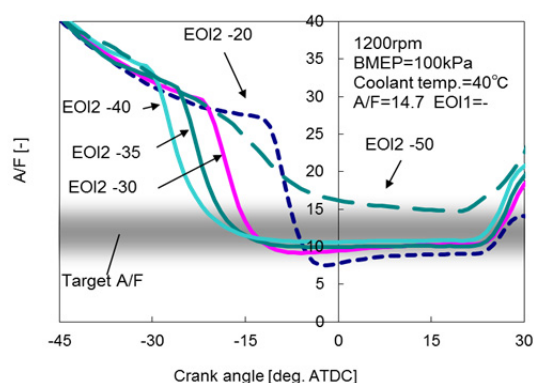


Fig. 7 Measured Air-Fuel Ratios for Different Timings of EOI2

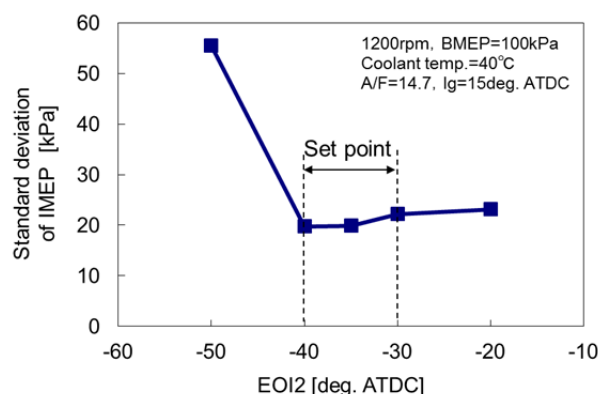


Fig. 9 Standard Deviation

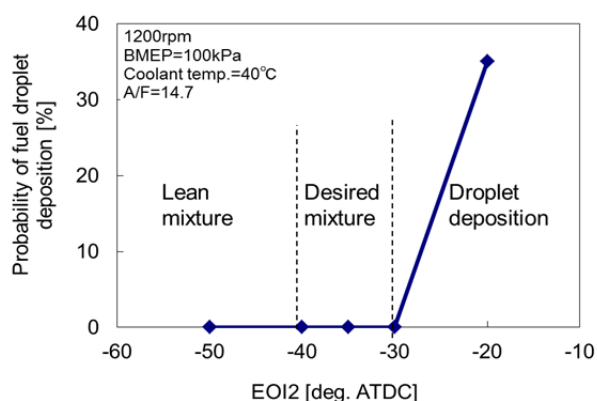


Fig. 8 Probability of Fuel Droplet Deposition

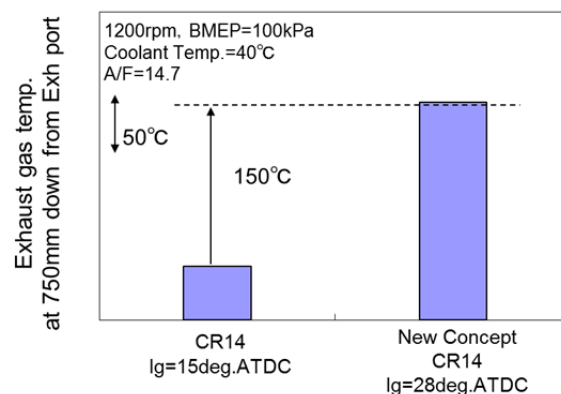


Fig. 10 Improvement of Exhaust Gas Temperatures for New Concept of Charge Stratification

5.2 点火プラグ型A/Fセンサーによるコンセプトの検証
 点火プラグ型A/Fセンサーを用いて新成層燃焼コンセプトでねらいどおりの混合気形成ができていないか検証した。

Fig. 7に触媒暖機試験条件における点火プラグ近傍A/Fの計測結果を示す。試験では噴射量割合1:1で吸気行程と圧縮行程に分割噴射を行った。圧縮行程の噴射終了時期(EOI2)-50deg.ATDCでは上段の噴霧がキャビティの上を通過し、キャビティでトラップすることができずに点火プラグ近傍A/Fが薄くなったと考える。

一方、EOI2 -40~-20deg.ATDCにおいては、それぞれ噴射終了15deg.後から25deg.ATDC程度まで安定して可燃混合気が供給されており、ねらいどおりの混合気が点火プラグに供給できたことが確認できた。

点火プラグのくすぶり懸念に対して、点火プラグへの液滴飛散を確認した。ここでは点火プラグ型A/Fセンサーで計測した吸光度に前項で述べたスパイク状の波形が見られたサイクルを液滴飛散サイクルとして、計測した連続300サイクルに対する液滴飛散サイクルの割合を液滴飛散率と定義した。Fig. 8に各EOI2における点火プラグへの液滴

飛散率を示す。EOI2 -50~-30deg.ATDCでは点火プラグに液滴飛散は認められない。これはピストンの吸気バルブ下の斜面の延長線と点火プラグの距離が確保できているため液滴飛散が防止できたと考える。一方、EOI2 -20deg.ATDCまでリタードするとピストンが上昇し吸気バルブ下の斜面の延長線と点火プラグが近接するため、点火プラグに液滴飛散するサイクルが発生したと考えられる。これらの結果から、新成層燃焼コンセプトが成立するEOI2 -40~-30deg.ATDCで安定して可燃混合気を点火プラグ周りに供給できており、かつ液滴飛散がないことが確認できた。

5.3 燃焼安定性と排ガス温度上昇の検証

新成層燃焼コンセプトを適用した大リタード燃焼の実現性を実機運転により確認した。Fig. 9に触媒暖機試験でEOI2を-50~-20deg.ATDCまで変化させた際の燃焼安定性を示す。点火プラグ型A/Fセンサーの計測結果のとおり新成層燃焼コンセプトが成立するEOI2 -40~-30deg.ATDCにおいて良い燃焼安定性を示している。また、

Fig. 10に燃焼安定性の確保できているEOI2 - 35deg.ATDCにおいて、点火時期をリタードした際の排ガス温度を示す。成層燃焼していない点火時期15deg.ATDCに対して新成層燃焼コンセプトにより点火時期28deg.ATDCまでの大幅なリタード燃焼を可能とし150℃以上の昇温を実現できている。これらの結果から、高圧縮比エンジンでロング排気系を使用しても従来圧縮比エンジン以上の触媒早期暖機を実現できる燃焼技術が確立できた。

6. 結論

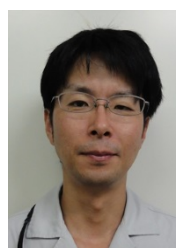
高圧縮比エンジンで冷間始動時の触媒早期暖機を実現する燃焼技術の開発を行った結果、以下の結論を得た。

1. リタード成層燃焼技術の開発において、点火プラグ型A/Fセンサーを用いることで実機エンジンに大きな改造を施すことなく成層燃焼時の混合気形成と点火プラグへの液滴飛散の有無を同時に計測できることを確認した。
2. 混合気を3段階に点火プラグ周りに送り込む新しい成層燃焼コンセプトにより、大幅なリタード燃焼を実現し高圧縮比でロング排気系を採用したエンジンで触媒早期暖機が可能な燃焼技術を確立した。

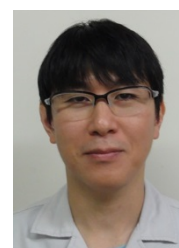
参考文献

- (1) 環境対応車普及方策検討会：環境対応車普及によるCO₂削減予測、環境対応車普及戦略, p.129 (2010)
- (2) 山川ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発、自動車技術会学術講演会前刷集, No.27-11, pp.11-16 (2011)
- (3) 佐々木ほか：高圧縮比エンジンの出力改善技術について、第21回内燃機関シンポジウム講演論文集, No.10-17, pp.99-104 (2010)
- (4) 山本ほか：直噴ガソリンエンジンの混合の自由を活用したコールドエミッション低減のための燃焼制御、自動車技術会学術講演会前刷集, No.2-01, pp.5-8 (2001)
- (5) Alexander Grosch, et al.: Crank Angle Resolved Determination of Fuel Concentration and Air/Fuel Ratio in a SI-Internal Combustion Engine Using a Modified Optical Spark Plug, SAE Paper 2007-01-0644 (2007)
- (6) 山川ほか：ガソリン噴霧内混合気濃度分布計測のための2波長レーザー吸収散乱(LAS)法、日本液体微粒化学会誌, vol.11, pp.142-150 (2002)

■ 著 者 ■



藤川 竜也



内田 健児



中山 佳映



山川 正尚