

2.0L 直噴ガソリンエンジンの燃焼室形状の最適化

Optimization of Combustion Chamber for 2.0L Direct-Injection Gasoline Engine

阿部 晋也*

Shinya ABE

武田 真明*

Naoaki TAKEDA

石川 直宏*

Naohiro ISHIKAWA

秋元 茂*

Shigeru AKIMOTO

要 旨

本直噴エンジンは高圧インジェクタを燃焼室の中心に配置したセンタインジェクション方式を採用することにより、直噴層状吸気(以下DISC: Direct Injection Stratified Charge)領域での燃費、エミッション性能を大幅に向上した。DISC領域において安定した燃焼をおこなうためには、適正なタイミングにおいて点火プラグ近傍への可燃混合気の安定形成が最も重要な因子である。開発においてはLaser Induced Fluorescence(LIF)による可視化技術や赤外吸収法による点火プラグ近傍空燃比計測などの混合気濃度分布計測法、CFDシミュレーションによる混合気濃度分布解析と筒内流動解析によりこの過程の現象を解析し評価した。その結果、センタレイアウトの高圧インジェクタ噴霧特性に合わせた独自のピストンキャビティ形状の設定ができた。これにより点火プラグ近傍にコンパクトな可燃混合気の安定形成と保持を実現でき、成層燃焼における高い希薄燃焼限界を達成し、燃料消費率の大幅低減を可能とした。

ABSTRACT

A center injection system in which a high-pressure fuel injector is located in the center of the combustion chamber has been employed in a direct-injection engine, significantly improving fuel economy and emissions performance in the direct injection stratified charge (DISC) range. Ensuring the stable formation of a combustible mixture around the spark plug at the appropriate time is the most important element in achieving stable combustion in the DISC range. During the development of the engine, a variety of methods were used to measure mixture distribution, including visualization using Laser Induced Fluorescence (LIF) and infrared absorption analysis to measure the air-fuel ratio around the spark plug, and CFD simulations were conducted to analyze mixture distribution and in-cylinder flow, enabling analysis and evaluation of the combustion process. These analyses enabled the design of an original piston cavity form with reference to the fuel spray characteristics of the center-positioned high-pressure injector. This has ensured the stable formation and maintenance of a compact combustible mixture around the spark plug, enabling the achievement of a high lean combustion limit in stratified combustion and significantly reducing fuel consumption.

1. まえがき

近年、地球規模での環境問題の高まりに対し自動車においても低燃費・低エミッション化が求められている。特に筒内直噴エンジンによる成層燃焼は火花点火内燃機関の燃費改善技術として有効であり、様々な形式の直噴エンジン⁽¹⁾⁻⁽³⁾が各社より研究、開発され市場に導入されている。今回 Honda においても、初の 2.0L i-VTEC I 直噴ガソリンエンジンを開発した。本エンジンは独自のセンタイン

ジェクション方式による成層燃焼手法により、直噴ガソリンエンジンでは困難と考えられていた超希薄成層燃焼による燃費改善と排ガスエミッション低減の両立を達成した。成層燃焼においては点火プラグ近傍への可燃混合気の安定供給が必要不可欠であり、そのためには混合気の形成過程を明らかにすることが重要である。本稿ではセンタインジェクションに適した燃料噴霧性状と燃焼室形状などの諸因子の違いによる混合気形成過程の差異を解析し、キャビティ形状の最適化をおこなったので報告する。

* 栃木研究所

2. エンジンの概要と主要諸元

Table 1 に開発した K20B エンジンの主要諸元を、Fig. 1 に燃焼室形状を示す。超希薄成層燃焼を実現するためには、可燃混合気の形成と保持性の確保、および着火後の急速燃焼の実現が課題となる。本エンジンはセンタインジェクションレイアウトを採用し、高ペネトレーションインジェクタによる燃料噴霧特性⁽⁴⁾(Table 1)と深皿キャビティピストンによる噴霧流動により、点火プラグ近傍への可燃混合気の安定形成と保持を達成することをねらいとした。また、着火後は 1 バルブ休止 VTEC 機構によるスワールを利用した急速燃焼をねらいとした。本コンセプト実現のためにはキャビティ形状の選定が重要であり、中でもキャビティ底面傾斜角、キャビティ容積比(総燃焼室容積に対するキャビティ容積の比)、キャビティ偏向角が安定燃焼のためのプラグ近傍への可燃混合気の形成に最も影響を及ぼす因子である。本研究の目的は、成層燃焼領域において高い希薄燃焼限界を持し、負荷・回転方向にバランスのとれたキャビティ形状の諸因子を探求し、最適化^{(5), (6)}を図ることである。Fig. 2 にピストンキャビティの形状を示す。

Table 1 Engine specifications

Engine code	K20B
Cylinder configuration	In-line 4-cylinder
Bore × Stroke (mm)	86 × 86
Displacement (cm ³)	1 998
Compression ratio	10:1
Valvetrain	DOHC VTEC
Number of valves	4 per cylinder
Fuel injection pressure (MPa)	8 – 10.5
Fuel spray angle (deg)	25
Penetration (mm)	73 (1msec after start of injection)
Fuel spray particle size (μm)	11.4 (Sauter mean diameter) at 10MPa fuel pressure

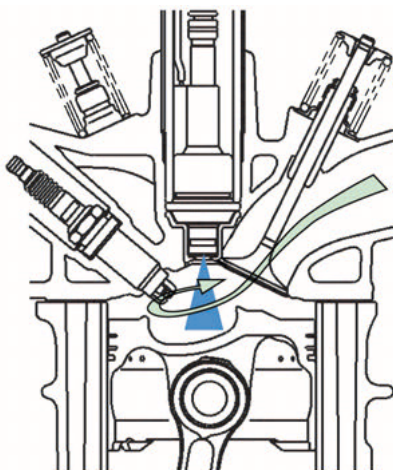


Fig. 1 Combustion chamber configuration

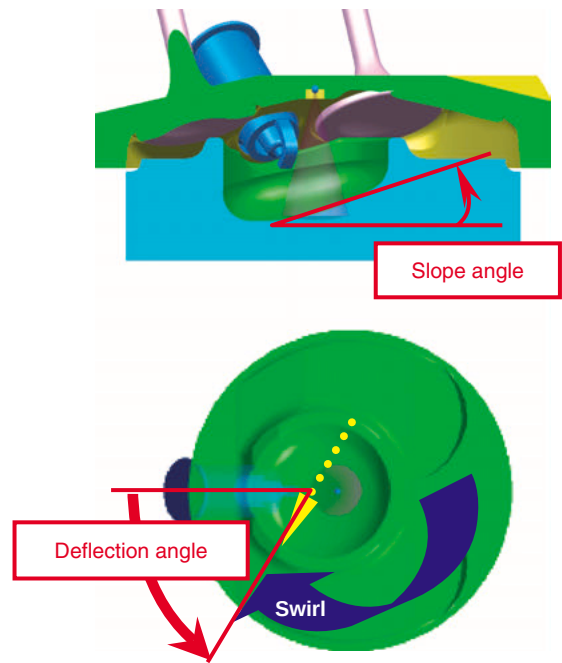


Fig. 2 Form of piston cavity

3. キャビティ形状の最適化

3.1. 混合気分布の可視化とシミュレーションの相関

キャビティ形状の最適化においては、パラメータが多く実機テストにより諸因子を設定することは困難であるため、シミュレーション解析による諸因子の絞込みが有効である。そこで、シミュレーション解析の前段階としてLIFを用いた可視化テストをおこない筒内の混合気分布の形態をCFD シミュレーション結果と比較し、その相関の確認をおこなった。可視化計測では単気筒可視化エンジンを用い、成層燃焼による着火運転時の筒内混合気分布を観察した。Fig. 3 に LIF による可視化試験装置の概略図を示す。励起光源としてシート厚さ 1 mm のエキシマレーザを注入し、燃料に添加された 3-ペンタノンの蛍光を可視化エ

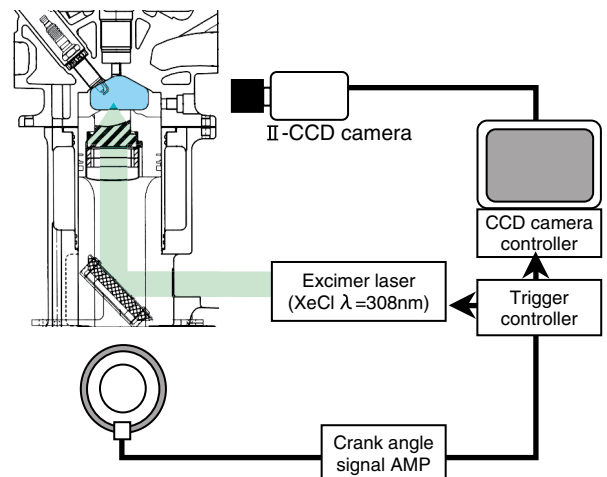


Fig. 3 LIF system for fuel distribution visualization

エンジン観察窓からイメージインテンシファイアと CCD を同期させ撮影した。

Fig. 4 にエンジン回転数 1500rpm 図示平均有効圧 (IMEP) 267kPa, 噴射時期 40° BTDC の可視化により得られた燃焼室内の混合気分布と、同条件でのシミュレーション結果を比較して示す。可視化結果より噴射時期 40° BTDC の場合、15° BTDC から 20° においてプラグ近傍に当量比 1.0 以上の成層化された混合気が最もよく集約していることがわかる。また、点火プラグ近傍の混合気濃度分布の形態や点火プラグと反対方向に現われる混合気の分布範囲と濃度などが圧縮上死点に向かう過程で可視化結果とシミュレーション結果でよく一致することが確認された。これにより CFD シミュレーションによりキャビティ形状の検討が可能であることがわかった。

3.2. 筒内流動，混合気濃度分布解析

次に、燃焼室形状を最適化するためにシミュレーションにより燃焼室形状の違いによる筒内流動と混合気濃度分布解析をおこなった。

3.2.1. 筒内流動結果比較

Table 2 に 2 種類のキャビティ仕様 A, B (キャビティ容積比, 傾斜角, 偏向角) を示す。

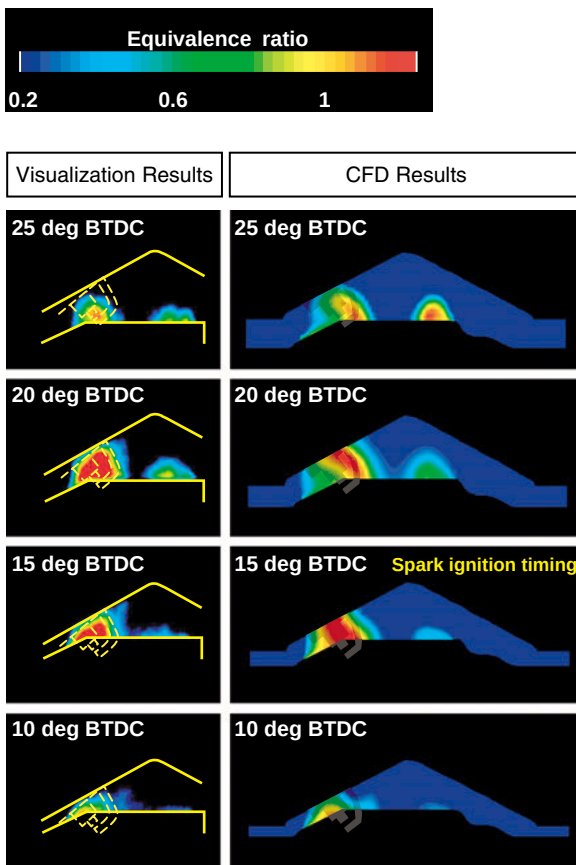
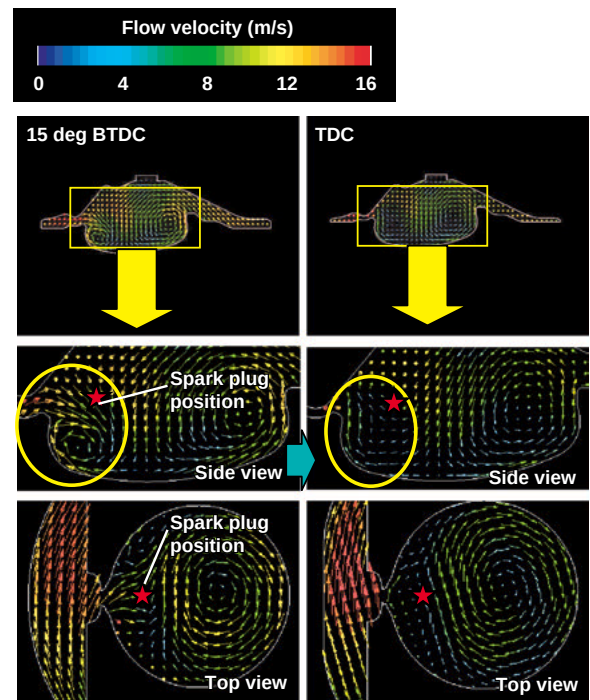


Fig. 4 Comparison of mixture distributions in CFD simulations and measurements

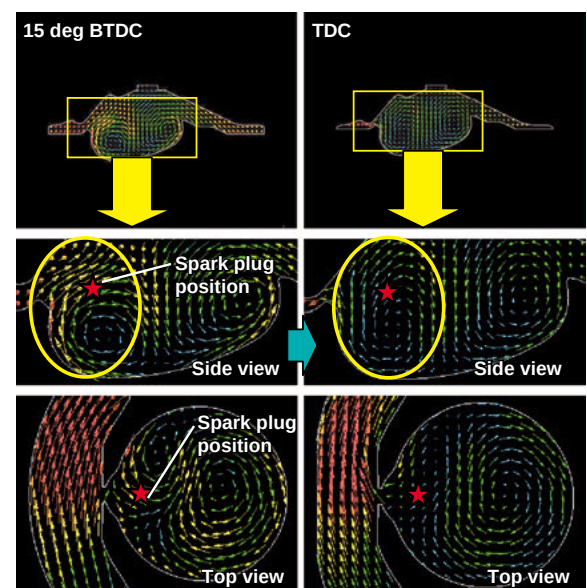
Fig. 5 にエンジン回転数 1500rpm IMEP 267kPa 噴射時期 40° BTDC のキャビティ A, B 仕様における筒内流動のシミュレーション結果を比較して示す。燃焼室縦断面のシミュレーション結果より、15° BTDC においてキャビティ

Table 2 Cavity pattern A, B

Type	Cavity volume ratio (%)	Slope angle (deg)	Deflection angle (deg)
A	28.9	10	60
B	26.4	15	30



(a) Cavity A



(b) Cavity B

Fig. 5 CFD results for flow velocity in piston cavity

Bは、キャビティAに対して点火プラグ下に発生した縦渦が高さ方向に高く速度成分も大きい。キャビティAにおいてはキャビティ外側から着火位置への空気の流入が認められるが、キャビティBにおいては空気の流入は無い。燃焼室横断面の結果からもキャビティBにおいてベクトルの方向性より下側から点火プラグ方向への強い湧き上がりの流れが確認でき、キャビティ内方向への空気の流動は無い。これに対してキャビティAはキャビティ内に外側からの流入が発生している。この違いは、点火プラグ下の縦渦の強度と大きさの差により生じている。また、キャビティBは上死点に至るまでキャビティ外側からの空気の流入は無く、縦渦は上死点まで保存され点火プラグ方向に伸びた大きな渦となっている。この結果よりキャビティBは点火プラグ近傍に混合気を安定供給し保持するのに適していることがわかる。また、どちらのキャビティにおいてもキャビティ内にスワールによる大きな渦が確認され、VTEC による筒内全体のスワール流がキャビティ内にも伝播し保存されていることがわかる。このスワールの筒内流動により着火後の急速燃焼効果が期待できる。

3.2.2. 混合気分布結果比較

Fig. 6 にエンジン回転数 1500rpm, IMEP 267kPa, 噴射時期 40° BTDC のキャビティ A, B 仕様における混合気濃度分布のシミュレーション結果を比較して示す。燃焼室縦断面の結果より、キャビティ B は 15° BTDC において点火プラグ下に当量比 1.0 以上の成層化された混合気を形成し、混合気濃度が高い分布が点火プラグ方向に伸びていることがわかる。これはシミュレーションで確認された筒内流動の結果から、縦渦により燃料噴霧が集約し点火プラグ方向に運ばれたものであることがわかる。また、成層化された混合気は上死点まで保存され成長し、より領域が大きくなっている。これはキャビティ外側からのキャビティ内部への空気の流入が無いためである。キャビティ A においてはプラグ下の混合気の成層化領域が二つに分断されている。これはキャビティ内部へキャビティ外部からの空気の流入が起こっているためである。また混合気の濃度も希薄である。縦渦の速度成分が小さく混合気を集約形成する流動が得られていないためである。燃焼室横断面の結果より、キャビティ B はプラグ近傍に当量比 1.0 以上相当の混合気分布が形成されており上死点まで保存されていることがわかる。キャビティ A は、濃い混合気が点火プラグの着火位置よりスワール上流側に停滞しプラグ近傍には希薄な混合気しか存在しない。これはキャビティ外側からの空気が流入していること、その流れにより点火プラグ近傍へ可燃混合気が進行するのを制限しているためである。

これらのシミュレーションによる混合気解析結果からキャビティ傾斜角の差異はキャビティ内の縦渦の強度と大きさに影響があり、容積比の差異は混合気の集約性に影響があることがわかる。また、キャビティ B は点火プラグ近傍

の混合気の濃度が高く、またその混合気の保持性も高いことがわかる。

Fig. 7 にエンジン回転数 1500rpm, DISC 運転時の同一負荷におけるのスロットル絞り量に対するキャビティ A, B の希薄燃焼限界特性を比較して示す。キャビティ B においては、スロットルを開け筒内全体の空気量を増加させても、図示燃料消費率 (ISFC), 燃焼変動ともに急激に悪化する事は無く、空燃比 80 近辺まで安定していた。これはス

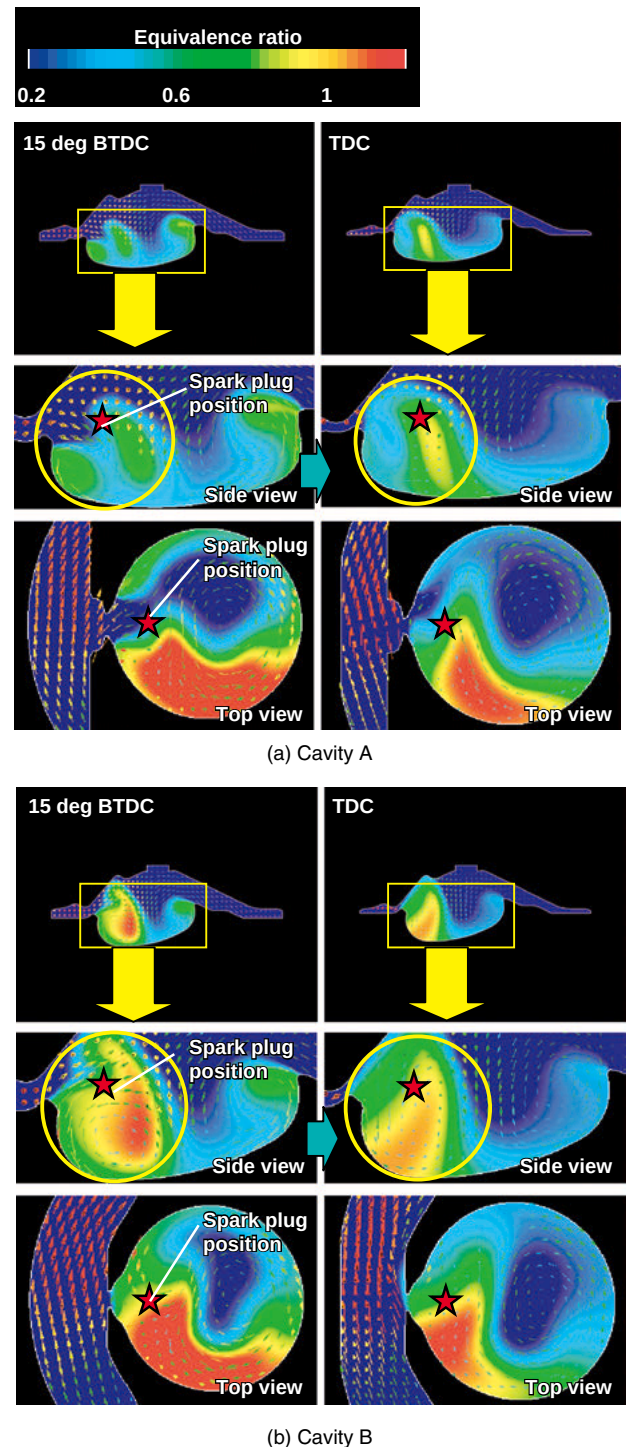


Fig. 6 CFD results for stratified mixture formation in piston cavity

ロットルを開け筒内への空気流入量が大きくなってもキャビティ内に可燃混合気を成層化し保持できていることを示している。一方、キャビティ A は吸入管圧力-20kPa で ISFC は最小となり、さらにスロットルを開けると ISFC、燃焼変動ともに急激に悪化する傾向を示した。これはキャビティ内に混合気を保持できず、流入した空気により点火プラグ近傍の混合気濃度が薄くなっていることを示している。ま

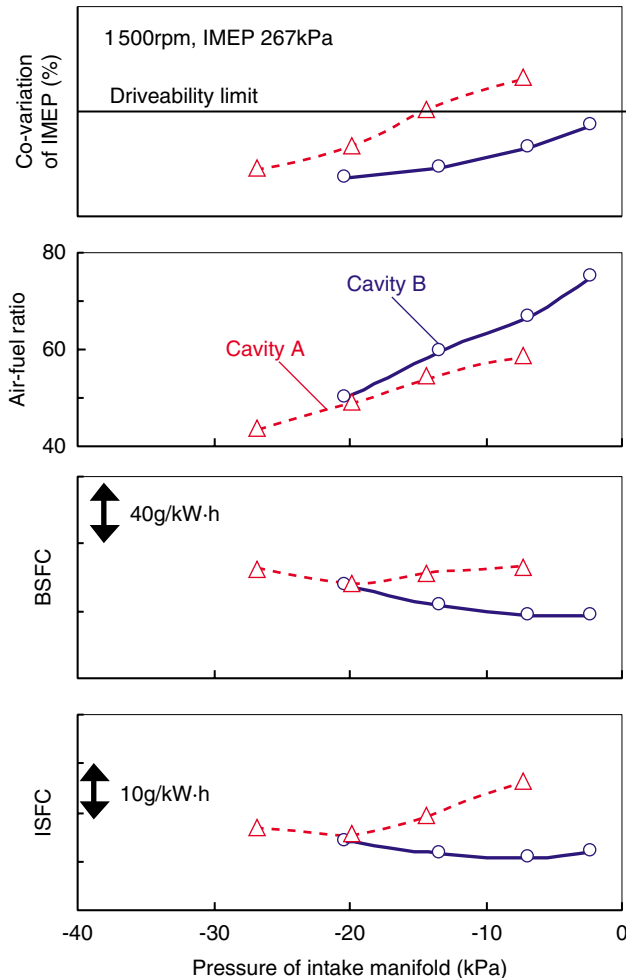


Fig. 7 Influence of pressure of intake manifold on combustion characteristics and lean combustion limit

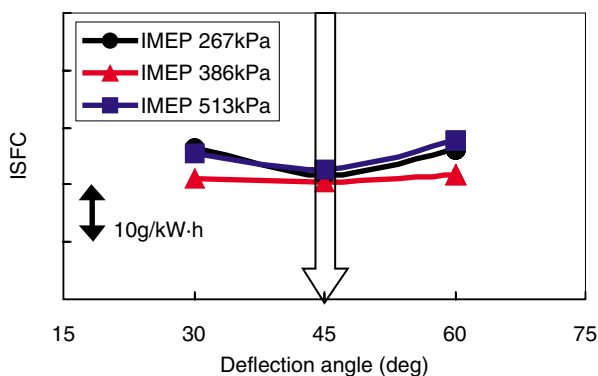


Fig. 8 Influence of deflection angle on ISFC

た、キャビティ A、B では同一吸入管圧力における ISFC、空燃比、燃焼変動の絶対値にも大きく差があることがわかった。これはシミュレーション結果に見られた縦渦の強度によるキャビティ内へ空気流入の有りの筒内流動結果と混合気濃度分布結果の傾向と一致した。

以上のシミュレーションによる混合気解析と実機の希薄燃焼限界の結果よりキャビティ B の方が A に対して希薄燃焼限界の高い混合気形成がなされており、ポンピングロスの低減により正味燃料消費率 (BSFC) を大幅に低減でき、また燃焼変動においても優れている仕様であることがわかった。

そこで、キャビティ傾斜角と容積比をキャビティ B 仕様と同値に固定し、さらに偏向角の設定を最適化するため、偏向角を変更した仕様にて性能確認試験をおこなった。エンジン回転数 1500rpm, IMEP 267, 386, 513kPa におけるキャビティ偏向角違いによる ISFC を Fig. 8 に示す。

偏向角違いの影響は低負荷と高負荷時に顕著となり、偏向角の設定はスワール強度との適合性から 45° の位置において ISFC が最良となることがわかった。この結果より、キャビティ仕様を Table 3 のように設定した。

Table 3 Optimized cavity specifications

Cavity volume ratio (%)	Slope angle (deg)	Deflection angle (deg)
26.4	15	45

4. 点火プラグ近傍空燃比

最適化したキャビティ形状において赤外吸収法を用いて成層燃焼時における点火プラグ近傍の空燃比を計測し⁽⁷⁾、⁽⁸⁾、混合気形成の過程と安定性について確認をおこなった。測定装置の構成を Fig. 9 に示す。He-Ne レーザから発振された波長 3.392 μm の赤外光を光ファイバにより

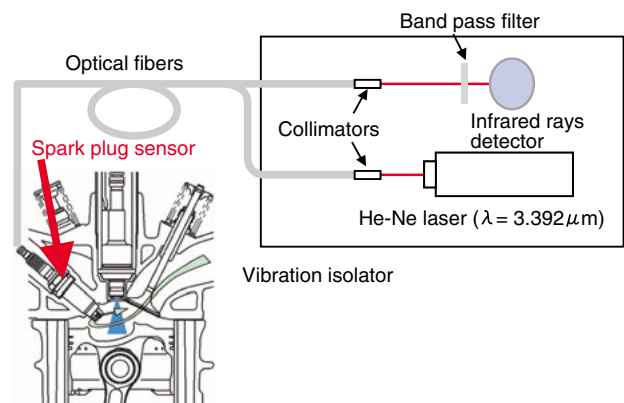


Fig. 9 Experimental setup for concentration measurement in direct injection engine

点火プラグの測定部へと導いた。測定部を通過し、ガソリンによって吸収され減衰した光をもう一方の光ファイバを介して検出部へ導入し透過率を測定した。Fig. 10 に測定部の構成を示す。

計測はエンジン回転数 1500rpm, IMEP 270kPa, 平均空燃比 45, 点火時期 15° BTDC 固定の運転条件でおこなった。噴射時期 50°, 40°, 30° BTDC における 100 サイクル平均の点火プラグ近傍空燃比計測結果とその標準偏差を Fig. 11 に示す。いずれの噴射時期においても噴射終了後約 20° で点火プラグ近傍空燃比が理論空燃比に到達し、その後 10 程度まで濃くなり、一定期間空燃比 10 程度の混合気を保持していることがわかった。点火時期における点火プラグ近傍の空燃比は、噴射時期 30° では可燃混合気が形成されておらず、噴射時期 40° と 50° ではともに 10 程度でありあまり差は見られなかった。Fig. 12 に各噴射時期における空燃比変動と燃焼変動を示す。点火時期における空燃比変動と燃焼変動には相関があり、40° の方が空燃比変動が安定しており、燃焼変動も小さくなった。また、Fig. 13 の点火時期における点火プラグ近傍空燃比と着火遅れ(点火から質量燃焼割合 10% までの期間)の関係においても 40° の方が着火遅れが短く燃焼が速いことを示しており、噴射時期 40° の設定が最適であった。

同一エンジン回転数, 同一負荷における実機の噴射時期特性を Fig. 14 に示す。それぞれの噴射時期に対して, ISFC 最小となるよう最適な点火時期を設定した。保持性の高いピストンキャビティ形状とセンタインジェクション方式の採用により噴射時期 20° BTDC から 50° にかけて幅広く安定した燃焼が得られていることが確認された。特に 40° から 50° において ISFC は最小となり, NO_x 排出量, HC 排出量, 燃焼変動から 40° が最適な噴射時期であることが性能テスト結果からも確認された。このように設定したキャ

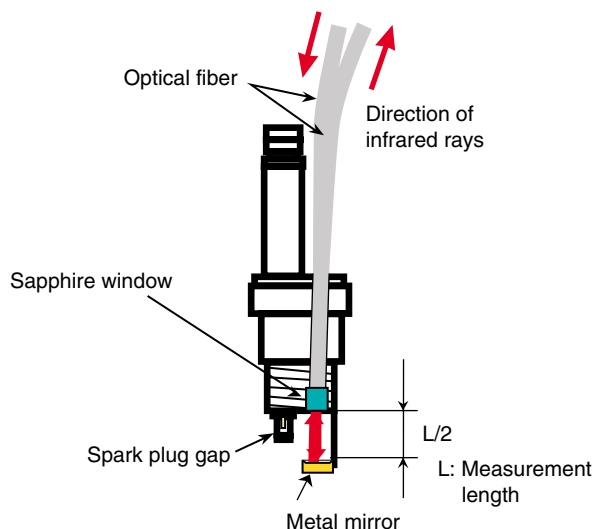


Fig. 10 Schematic of measuring probe

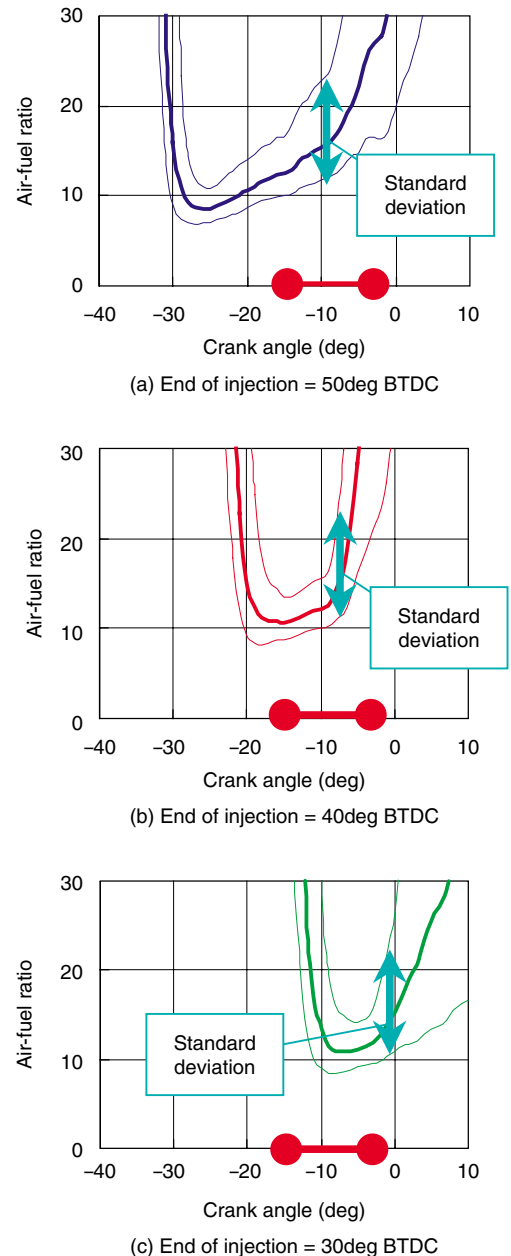


Fig. 11 Air-fuel ratio at spark plug

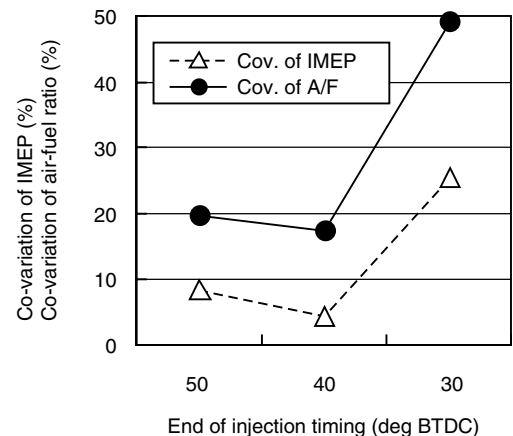


Fig. 12 Influence of injection timing on coefficient of variation in air-fuel ratio at spark plug and coefficient of variation in IMEP

ベティ仕様は、赤外吸収法結果と性能テスト結果からねらい通りの混合気形成が実現できていることが確認され、高い希薄燃焼限界と大幅な燃費低減を可能とした。

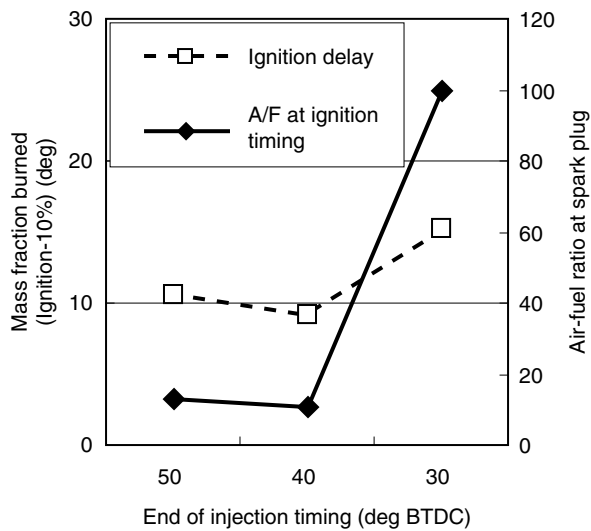


Fig. 13 Influence of injection timing on air-fuel ratio at spark plug and ignition delay

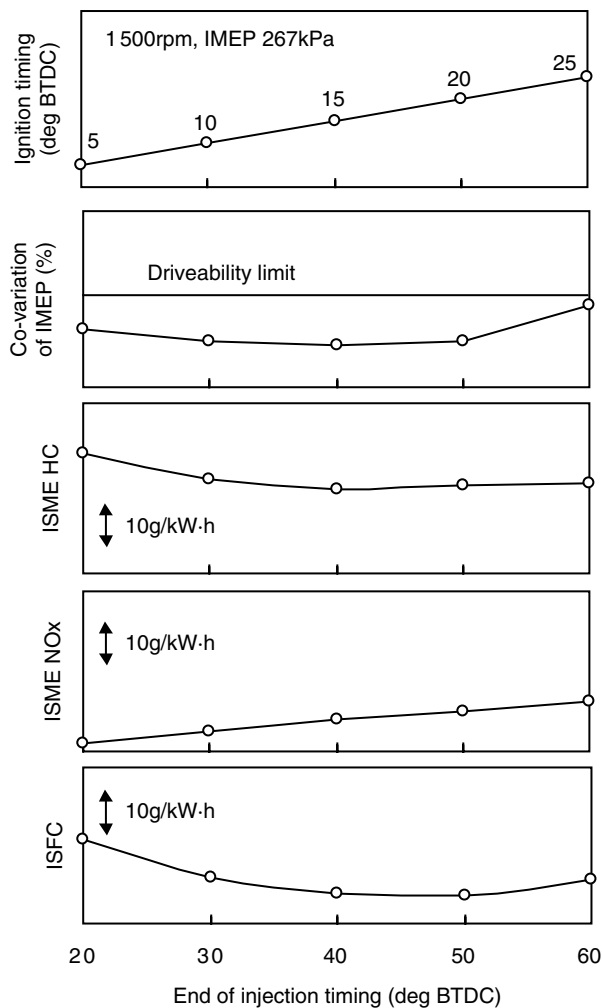


Fig. 14 Influence of injection timing on combustion characteristics

5. まとめ

ピストンキャビティ形状最適化のための筒内流動、混合気濃度分布解析、赤外吸収法による点火プラグ近傍空燃比計測およびテスト結果により、以下の知見を得た。

- (1) キャビティ傾斜角、容積比、偏向角を最適化することで、センタインジェクション方式の高いペネトレーションの噴霧によりキャビティ内に強い縦渦を生成させ、プラグ近傍への混合気の集約と保持を高次元で成立させることができた。
- (2) 最適化したキャビティは、空燃比 70 程度で ISFC が最良となり、空燃比 80 程度まで燃焼変動が安定燃焼範囲内にあるなど高い希薄燃焼限界性能を得ることができ、BSFC の大幅な低減を達成した。
- (3) CFD シミュレーションによりキャビティ仕様違いによる筒内流動、混合気濃度分布の違いが確認でき、テスト結果と一致することを確認した。
- (4) 赤外吸収法によるプラグ近傍空燃比計測、性能テスト結果から、最適化したキャビティ仕様はプラグ近傍への速やかな混合気の成層化と、安定保持を達成していることが確認でき、噴射時期設定に対しても幅広く安定していることを確認した。

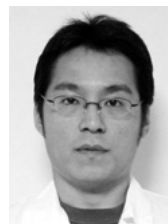
参考文献

- (1) 小池誠, 斎藤昭則, 沢田大作, 石川友二: 新コンセプト直噴ガソリンエンジン, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.69-99, JSAE9939596
- (2) 神田睦美, 清水里欧, 小林辰夫, 松下宗一, 小池誠, 斎藤昭則: 新コンセプト直噴ガソリンエンジン, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.69-99, JSAE9939604
- (3) 安部静生, 佐々木康一, 梅花豊一, 中島樹志, 藤城修: 新型 L4 直噴ガソリンエンジンの燃焼解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.78-00, JSAE20005524
- (4) 後藤博之, 広瀬研二, 斎藤正美, 松本誠司, 飯高智, 高芝和弘: 直噴ガソリンエンジン用高圧燃料システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.47-54
- (5) 甲田豊, 菅波友二, 小林裕幸, 小川賢: 高性能・低エミッション 2.0L 直噴ガソリンエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.39-46
- (6) 甲田豊, 後藤博之, 小林裕幸, 堀江薫: 低燃費低エミッション直噴ガソリンエンジンの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.19-04, JSAE20045178
- (7) Nishiyama, A., Kawahara, N., Tomita, E., Fujiwara, M., Ishikawa, N., Kamei, K., Nagashima, K.: In-Situ Fuel Concentration Measurement near Spark Plug by 3.392 μ m Infrared Absorption Method-

Application to a Port Injected Lean-Burn Engine,
SAE Paper 2004-01-1353

- (8) 山口浩一, 角方章彦, 福田隆, 漆原友則, 伊東輝行:
直噴ガソリンエンジンの混合気形成過程の解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.77-01, JSAE20005524

■ 著 者 ■



阿部 晋也



石川直宏



武田真明



秋元 茂