

論文・解説

# 14 マルチホールインジェクタを用いた成層直噴ガソリンエンジン Stratified Lean Direct Injection Spark Ignition Using Multi-hole Injector

山下 洋幸<sup>\*1</sup> 瀬戸 祐利<sup>\*2</sup> 永澤 健<sup>\*3</sup>  
Hiroyuki Yamashita Masatoshi Seto Takeshi Nagasawa  
山本 博之<sup>\*4</sup>  
Hiroyuki Yamamoto

## 要 約

ウォールガイド直噴エンジンに対し、燃費低減および出力改善を実現するため、マルチホールインジェクタを適用したサイド噴射方式スプレーガイド直噴ガソリンエンジン (SGDI) のコンセプト検討を行った。CFDを用い、軽負荷域における点火近傍の可燃混合気滞留性および、全負荷域における混合気均質性の観点から噴霧パターンを選定した。得られた噴霧パターンにて実機評価を行った結果、成層運転域の安定燃焼を確保し、低燃費、低NOxおよび高出力化が実現できることを確認した。

## Summary

Concept of the spray guided direct injection spark ignition (SGDI) was studied to improve fuel economy from wall-guided direct injection. By using Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling, spray pattern was selected in the viewpoint of ignitable mixture existence around the spark plug in light load and homogeneity in full load. Fuel economy and emissions for a stratified mixture and full load performance were also confirmed by dynamometer evaluation.

## 1. はじめに

近年の省資源化や環境問題から自動車に対する高効率低エミッション化への要求はますます高まっている。この対策として直噴技術におけるリーン燃焼技術は、ポンピングロス低減効果に加え、比熱比向上による熱効率改善効果が得られることから有効な手段である。これまで市場導入されたリーン燃焼技術のうち大半はウォールガイド直噴であった。著者らも当コンセプトを検証しており<sup>(1)</sup>、ピストンキャピティで混合気をトラップし着火させるため、過早燃焼や未燃損失悪化が発生し、リーン化による燃費改善効果は十分引き出せていなかった。また、年々厳しくなるエミッション規制対応により市場において縮小傾向にあった。しかしながら、近年の燃料噴射系の進化により、燃焼時期の最適化や、壁面付着量低減による燃費、エミッション低減が可能となるスプレーガイド直噴が実用化され、再び注目されている<sup>(2)(3)</sup>が、これらは微粒化特性の優れたピエゾインジェクタをセンターに配置している。

本報では、信頼性面やバルブサイズ確保、既存生産設備活用の面で優れるサイド噴射方式を前提に、安価なソレノイド形インジェクタを用いて、SGDIの優れた燃費・トルク特性の実現性検討を行った。

## 2. サイド噴射方式SGDIのコンセプト検討

### 2.1 CFDモデルと評価項目

サイド噴射方式のSGDI実現性検討にはCFDを用いた。計算には、流動解析コードとして脇坂らが開発したGTT法、噴霧モデルとしてはKIVAコードで用いられている離散液滴モデル、それぞれに改良を加えたもの<sup>(4)</sup>を用いた。噴霧モデルの合わせ込みには、二波長レーザー吸収散乱法 (Laser Absorption Scattering : LAS法)<sup>(5)</sup>より、単噴口ホールノズルの高温高压容器下での蒸気相当量比および液相当量比分布を計測した結果を用いた。

噴霧レイアウトの選定指標としては、リーン燃焼実現と高出力化の主な要件となる混合気形成に着目し、(1)圧縮行程噴射時における成層運転の可否を左右する着火安定性、

\*1~4 技術研究所  
Technical Research Center

- (2)燃費、エミッションに影響をおよぼす成層混合気均質性、
- (3)出力性能に影響をおよぼす吸気行程噴射時の混合気均質性、の観点から検討を行った。

検討インジェクタとしては、安価でありながら、噴霧形状の自由度が高く、背圧変化に対し安定した噴霧形状を有するマルチホールインジェクタ<sup>6)</sup>を用いた。

2.2 サイド噴射の混合気形成

(1) マルチホールインジェクタの噴霧レイアウト検討

安定した着火性確保のため着火用の噴霧を3本とし、これをプラグ周りに集めたV字レイアウトとした。また、V字レイアウトの効果を明らかにするため、横一列噴霧計算結果を示した。レイアウトをFig.1に示す。噴口数は6とし、計算条件は着火性が最も厳しいアイドルとした(Table 1)。点火位置は始動時のプラグ濡れを回避するため、インジェクタの噴霧バラツキ等を考慮し、最も点火プラグに隣接する噴霧の軸芯から6.5deg.オフセットした稜線上とした。Fig.2に点火プラグ近傍の局所混合気濃度の比較を示す。V字型は横一列型に比べて、標準点火位置での混合気濃度が高くなっている。また流動等の外乱による混合気分布の変動を考慮して、点火プラグ突出し量を±2mm変化させた場合の混合気濃度変化を比較した。横一列型のプラグ近傍A/Fは大きく変化するのに対し、V字型では突出し量を2mm低減させた場合も、着火可能なA/F範囲にある。噴霧レイアウトによる点火近傍の濃度差の要因分析のため、筒内の流速分布および、混合気濃度分布の履歴をFig.3に示す。

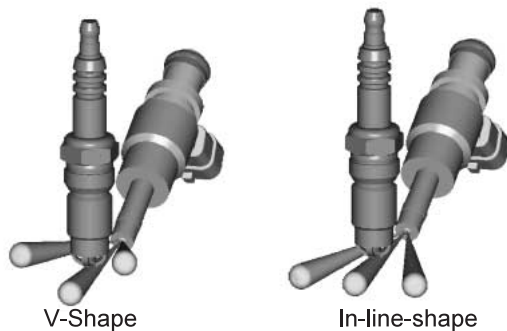


Fig.1 Spray Layout for Ignition

Table 1 Engine Specifications & Calculation Condition

Engine Specifications	
Bore [mm]	87.5
Stroke [mm]	83.1
Compression ratio	11.2
Displacement [cm <sup>3</sup> ]	499.7
Calculation Conditions	
Engine speed [rpm]	750
MAP [kPa]	81.3
Number of holes	6
Fuel pressure [MPa]	15
Injection mass [mm <sup>3</sup> /st]	5.331
Pulse width [msec]	0.427
Injection timing [deg. ATDC]	335

横一列型噴霧レイアウトでは、噴霧によって逆タンプル流が誘起され、これが幾何学的に点火プラグ方向に向かう噴霧を下方に押し下げてしまう。これに対してV字型噴霧レイアウトでは、点火プラグ横の2本の噴霧によって逆タンプル流が抑制され、点火位置近傍に広く混合気が輸送されていることがわかる。

Fig.3で示した混合気形成の差異により、V字型の噴霧配置は、噴霧のサイクル変動、経時変化や点火ギャップ位置のばらつき等に対してロバスト性が高いことを示している。

(2) 着火安定性

サイド噴射の実現性を判断するため、センター噴射との比較を行った。センター噴射においても、サイド噴射と同様にプラグ近傍に複数の噴霧を集めてロバスト性を高める手段が考えられる。しかしながら噴口と点火プラグ間距離が近いため、V字型では2本の噴霧がマイナス電極に衝突してしまう。また対策として噴孔数を増す場合は、噴孔径縮小に伴うカーボン詰まりの懸念がある。従って本報では、成層燃焼時の噴霧間の火炎伝播性や全負荷時の混合気均質

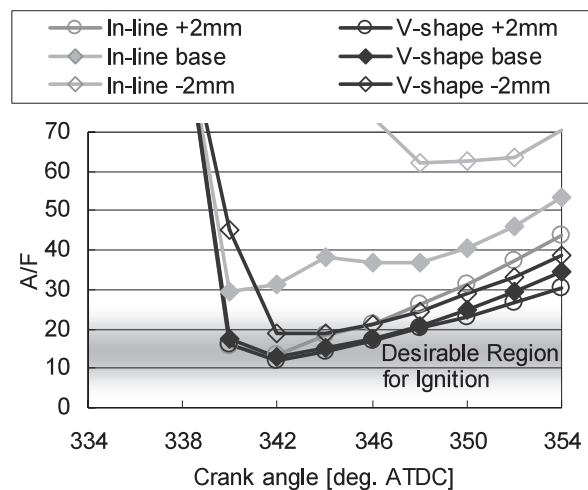


Fig.2 Effect of Spray Layout around Main Spray for Ignition in Side Injection

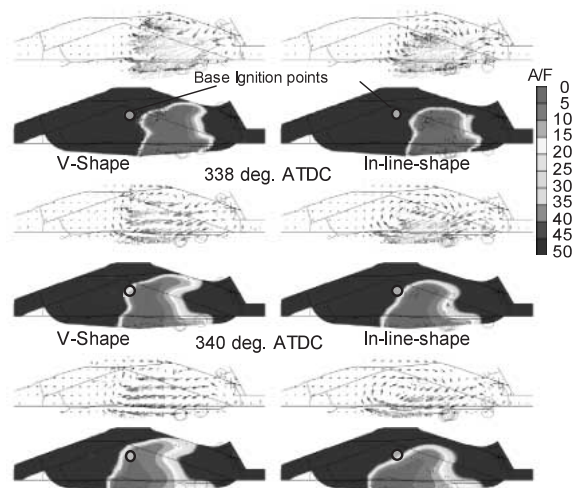


Fig.3 Flow Velocity and A/F Distribution

性および、信頼性を優先しFig.4のように6本の噴霧を等間隔に配したセンター噴射方式を比較対象とした。

Fig.5にセンター/サイド噴射における混合気濃度の時間変化を示す。センター噴射の点火位置についても、液滴燃料を回避するためサイドと同一条件の噴霧軸中心から6.5deg.オフセットした稜線上とした。また、噴口から点火プラグまでの距離はセンター噴射15mm, サイド噴射35mmとした。

サイド噴射では、噴霧到達時に着火が容易な混合気濃度域となっており、オーバリッチ領域が見られない。また、噴霧到達後も緩やかに希薄化している。センター噴射では、噴霧到達直後(336deg.ATDC)にオーバリッチから着火が容易な濃度にシフトし、その後急激に希薄化している。更に点火突き出し量を2mm低減させた場合は、ピーク濃度が大幅に希薄化しており、噴霧半径方向に急激に混合気が希薄化していることがわかる。

一方、点火位置における過度な流速は消炎の懸念があるため点火位置および点火位置-2mmのポイントにて流速の履歴比較を行った(Fig.6)。サイド噴射では、噴霧到達時に10m/sと初期火炎の消炎の懸念が低い流速域に減衰されていることがわかる。一方センター噴射では噴霧により誘発される15m/s超の流動が混合気到達初期に見られ、また空間的な流速勾配も高い。

(3) 成層混合気の均質性

スプレーガイド直噴において、成層燃焼時の混合気は、点火近傍に理論空燃比付近のコンパクトな混合気を形成

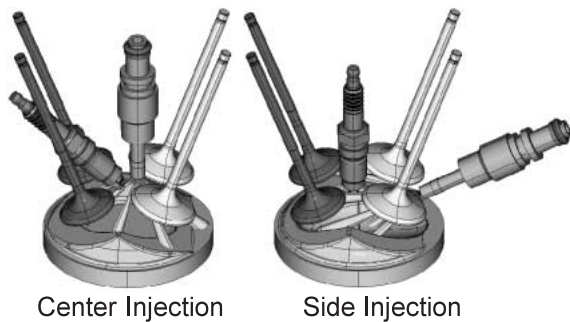


Fig.4 Injector Layouts

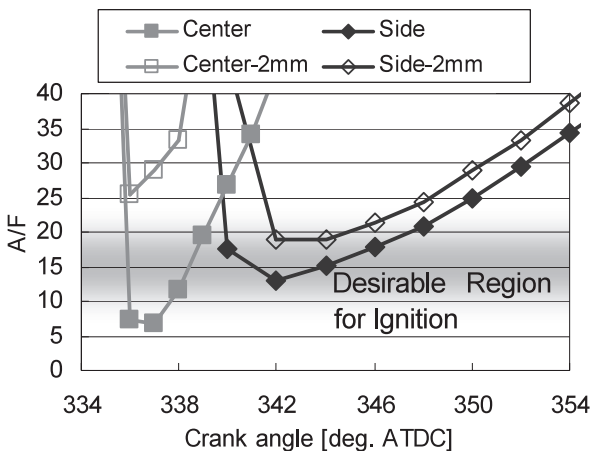


Fig.5 A/F History around Spark Plug

し、負荷増大に伴い体積増加することが、燃焼安定性、燃費、エミッションの観点から望ましいと考えられる。

そこで、圧縮行程噴射時の、混合気分布解析を行った。ここでは、点火時期を想定し、点火位置の混合気がA/F=10~20の範囲で最もリッチとなるクランク角とした。サイド噴射は342deg. ATDC, センター噴射は338deg.

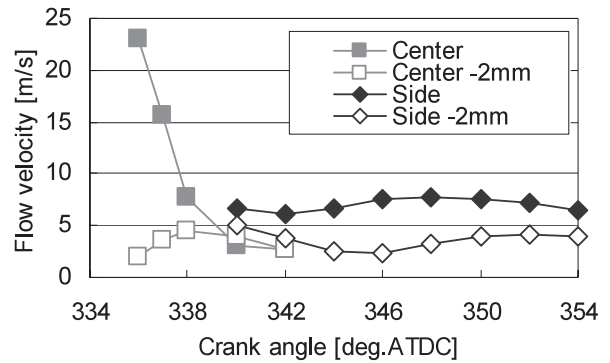


Fig.6 Flow Velocity around Spark Plug

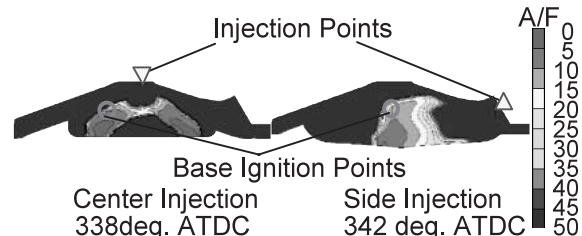


Fig.7 Mixture Distribution in Vertical Cross-section, Including Assumed Ignition Points

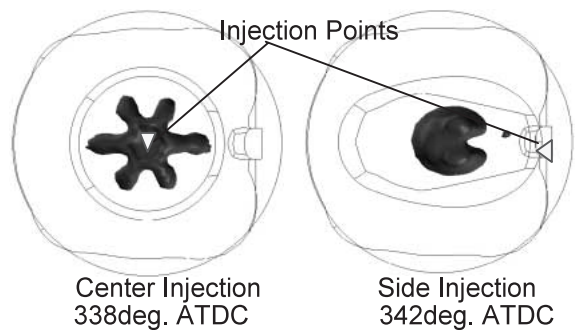


Fig.8 Top View of Isosurface at A/F = 20

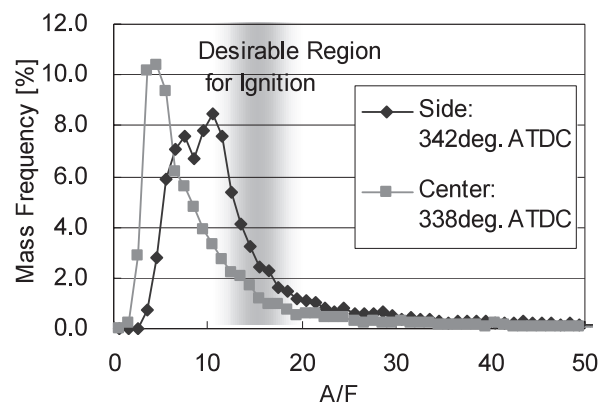


Fig.9 Total Fuel Mass Frequency

ATDCにおける点火ポイントを含む鉛直断面の混合気濃度分布をFig.7に示す。また、Fig.8にA/F=20となる混合気濃度等値面を示す。

サイド噴射の場合、混合気が連続かつコンパクトに点火位置周辺に集まっている。センター噴射では、噴霧先端部において各噴霧が連続しておらず、火炎伝播が阻害されると考えられる。

センター噴射において噴霧の連続性を確保するためには、(i)コーン角を変えずに噴霧数を増やす、(ii)噴霧間隔を狭めコーン角を狭角化する方法がある。しかしながら前述したように噴射率を維持したまま噴霧数を増やすと噴口径が小さくなりインジェクタの耐デポジット性の悪化が懸念される。また噴霧数を同数のまま狭角化するとピストン頂面への燃料付着量が増加することと、点火プラグを突き出さなければ着火可能位置に届かなくなる等の問題が考えられる。従って、センター噴射では噴霧の連続性、壁面付着低減およびインジェクタ耐デポジット性の両立が課題であると推定される。

次に混合気全体の均質性を検証するために、混合気濃度分布を調査した。比較は点火時期を想定し、サイド噴射とセンター噴射のそれぞれの着火性評価点濃度が可燃範囲内でピークとなるクランク角338deg. ATDC, 342deg. ATDC

で行った。Fig.9に各クランク角における混合気濃度(A/F)の質量割合を示す。サイド噴射(342deg. ATDC)の点火想定時期での濃度分布をみると、可燃範囲内の質量割合が多く分布していることがわかる。これに対して、センター噴射(338deg. ATDC)では、濃度過濃領域に質量割合のピークがシフトしており、過濃領域の低減が課題と考えられる。

(4) 全負荷域混合気均質性

吸気行程噴射による均質運転時は燃焼室全体に均一な混合気を形成することが望ましい。そこで、全開運転時を想定した吸気行程噴射時の混合気濃度計算を行った。Table 2 に計算条件を示す。

Fig.10に1,500rpmおよび6,000rpmにおける当量比分布の比較を示す。1,500rpmにおいては、センター噴射とサイド噴射とも当量比1近傍にピークが見られ、同等の混合気濃度分布を有していると考えられる。6,000rpmにおいては、サイド噴射では当量比のレンジが広がり、混合気の偏在が生じており、改善の余地が残る。

3. 実機評価結果

CFD解析により、成層燃焼時の着火安定性、混合気形成の観点からスペック選定を行ったサイド噴射SGDIについて、CFDと同一主要諸元(Table 1)の4気筒実機エンジンにより成層性能、および全開出力性能評価を行った。

成層運転条件および全開運転条件をTable 3に示す。

3.1 着火安定性

(1) 燃焼安定範囲

点火時期と噴射時期をパラメータに燃焼安定範囲を調査した。Fig.11に安定した成層燃焼が最も困難なアイドル状態でのIMEPの標準偏差SDが14kPa以下となる安定燃焼領域を示す。点火には燃焼安定性改善策として多重点火を導入しており、EGR39%導入時においても、安定燃焼領域は噴射時期で10deg.以上、点火時期で30deg.以上の幅を有することを確認した。

(2) 空間的燃焼安定性

次に、点火プラグを噴霧から3.5mm遠ざけ、点火位置が燃焼安定性に与える影響を調査した。Fig.12は噴射時期25.5deg. BTDCにおいてSD 14kPaとなる点火時期の範囲Tab.4 Test Conditionを、Fig.13には同一条件下における着火遅れ期間(Ig-5% mass burn rate)を示す。噴霧と点火プラグの距離を離れた場合においても同等の安定燃焼領域

Table 2 Calculation Conditions for Full Load

Engine speed [rpm]	1500	6000
MAP [kPa]	101.3	101.3
Fuel pressure [MPa]	15	20
Injection Quantity [mm <sup>3</sup> /st]	57	61
Pulse width [msec]	4.96	4.80
Injection timing [deg. BTDC]	320	360

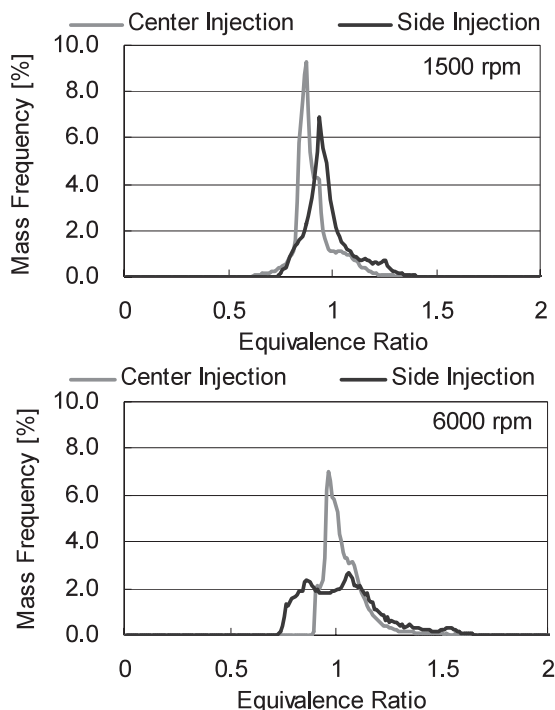


Fig.10 Mass Frequency of Equivalence Ratio

Table 3 Stratified and Full Load Operation Conditions

	Engine Speed [rpm]	BMEP [kPa]	Fuel Pressure [MPa]
Part load	750	50	15
	1500	100	20
	2000	400	20
Full load	1000-6000	-	15-20

を確保できている。また着火遅れ期間の差もわずかで、空間的に広い領域で可燃混合気を形成し、着火安定性を確保していることが確認できた。

3.2 燃費, エミッション性能

Fig.14に成層燃焼時の燃費, エミッション性能を示す。燃費は理論空燃比で吸気行程噴射を行った場合からの改善率で示した。ウォールガイド直噴(WGDI)の性能を併記し, SGDIとの性能比較を行った。アイドル(750rpm, BMEP=50kPa)で31%, 中速中負荷(2,000rpm, BMEP=400kPa)で13%の燃費改善効果を得られた。NOxインデックスはアイドルで1.0以下, 中速中負荷で2.0以下, Smokeはアイドル, 中速中負荷ともに0.1FSN以下とWGDI比で大幅に抑えられ

ることを確認できた。また, Fig.15に各運転条件における熱発生率を示す。一般的にウォールガイド直噴では, 熱発生ピークは低速軽負荷運転時では5deg. BTDCから10deg. BTDCに位置し<sup>(1)</sup>, 低速軽負荷になる程, 進角する傾向がある。一方, サイド噴射スプレーガイド直噴では回転, 負荷によらず熱発生ピークがTDC近傍に位置し, 高効率な燃焼が実現されていることがわかる。

3.3 全開出力性能

CFD結果より, サイド噴射では高速域のミキシング不良が懸念されたため, 実機エンジンにはミキシング改善策

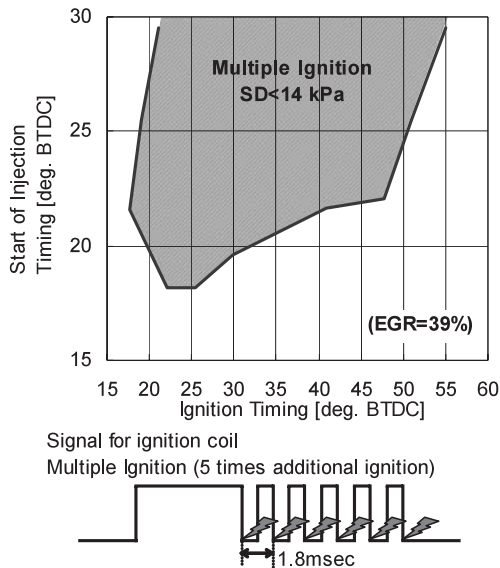


Fig.11 Stable Combustion Window with Multiple Ignition (750rpm, BMEP = 50 kPa, MAP = 97kPa, EGR = 39%)

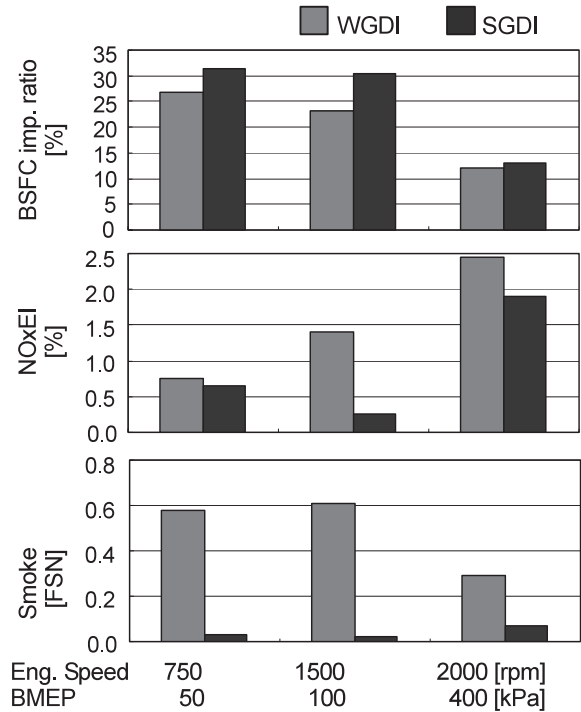


Fig.14 BSFC and Emissions

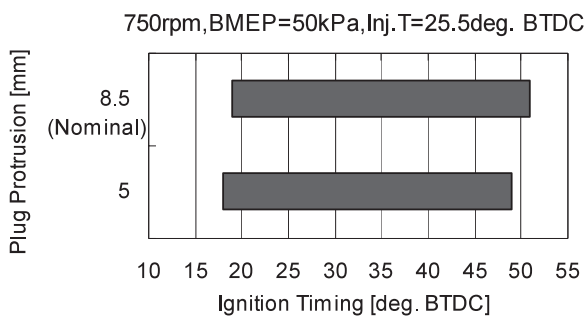


Fig.12 Effect of Spark Plug Protrusion

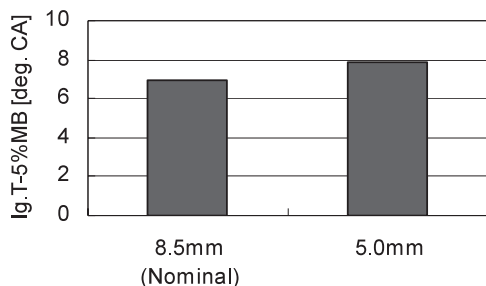


Fig.13 Effect of Spark Plug Protrusion

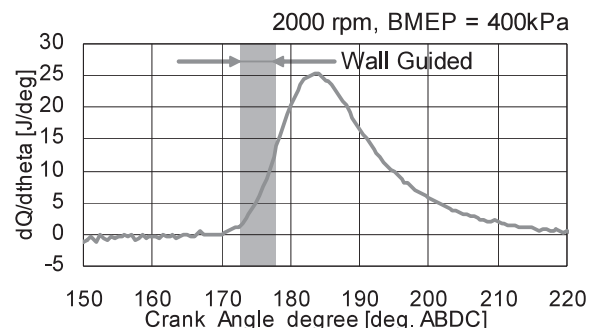
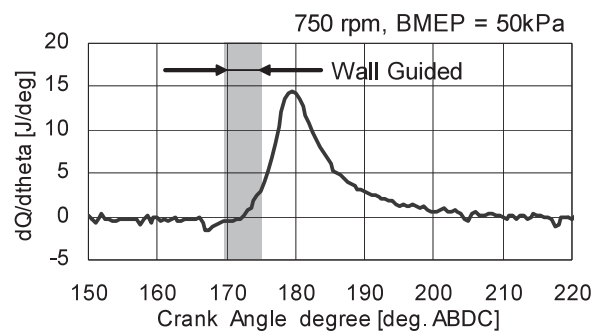


Fig.15 Rate of Heat Release

を織り込んだ。ミキシングの指標として排ガス中の酸素濃度を確認した。

Fig.16に低速および高速域のPFIからのトルク改善率を示す。また、Fig.17に酸素濃度を示す。トルク改善率は低速域が高くなっているが、これは一般に低速域では耐ノック性が厳しいため、直噴化した際の筒内冷却効果により耐ノック性が改善したためと考えられる。排ガス中の酸素濃度は低速、高速域とも大差はなく、Hanらの報告でみられるスプレーガイド直噴の0.2%前後<sup>(7)</sup>に対して同等以下を示しており問題のないレベルとなっていることを確認した。

#### 4. まとめ

マルチホールインジェクタを用いたスプレーガイド直噴の実現性を検討した結果、以下の点が明らかになった。

- (1) サイド噴射はプラグ周りの噴霧をV字配置することにより、プラグ近傍に時間的、空間的に安定した可燃混合気を形成することが可能である。
- (2) サイド噴射はプラグ近傍に火炎伝播が容易なコンパクトな混合気を形成することが可能である。
- (3) サイド噴射スプレーガイド直噴において実機評価を行い、アイドルで点火30deg.以上噴射10deg.以上の安定した着火性、燃費31%改善、NO<sub>x</sub>インデックス1.0%以下を確認した。
- (4) サイド噴射は混合気均質性において高速高負荷域において排気中の酸素濃度はセンター噴射と同レベルでありPFI比5%の最高出力向上が得られることがわかった。
- (5) 以上により、サイド噴射スプレーガイド直噴は燃焼コンセプトとして成立する可能性が高い。

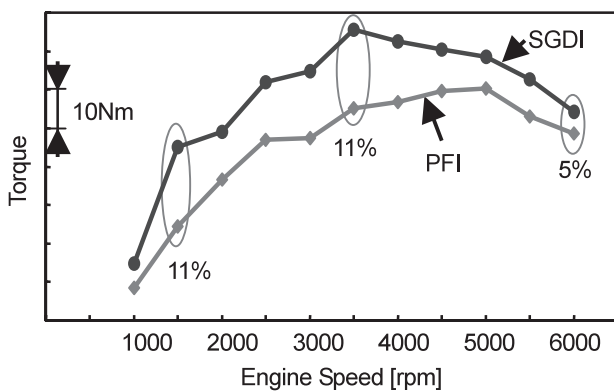


Fig.16 Torque Improvement Ratio Against PFI

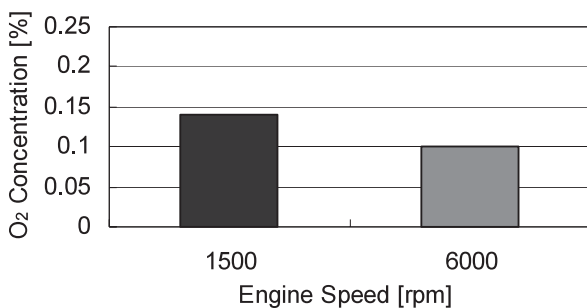
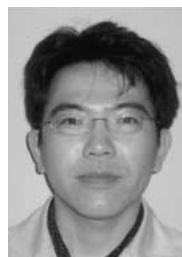


Fig.17 Exhaust Oxygen Concentration

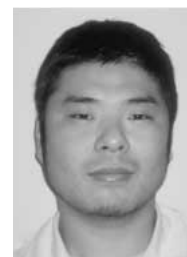
#### 参考文献

- (1) Yamashita, H. et al.: Mixture formation of direct gasoline injection engine-in cylinder gas sampling using fast flame ionization detector, JSAE Review, Vol.20 No.1, p.23-29 (1999)
- (2) Kannenberg, D. et al.: The Efficient Dynamic Strategy with the New BMW Four Cylinder Engines from the 1-Series to 5-Series Vehicles, 16th Aachener Kolloquium, p.95-114 (2007)
- (3) Schaupp, U. et al.: Thermodynamic Potential of the Spray-Guided Combustion System for Gasoline Engines at Mercedes-Benz, 16th Aachener Kolloquium, p.1109-1134 (2007)
- (4) Aoki, O. et al.: An evaluation method for quality of air-fuel mixture distribution and movement in combustion chamber of DISI engine using CFD, JSAE Review 24, p.25-31 (2003)
- (5) Yamakawa, M. et al.: Quantitative Measurement of Liquid and Vapor Phase Concentration Distributions in a D.I. Gasoline Spray by the Laser Absorption Scattering (LAS) Technique, SAE Trans. J. Engine, Vol.111, No.3, pp.2194-2206 (2002)
- (6) Stach, T et al.: New Generation Multi-hole Fuel Injector for Direct-Injection SI Engines-Optimization of Spray Characteristics by Means of Adapted Injector Layout and Multiple Injection, SAE paper, 2007-01-1404 (2007)
- (7) Han, Z et al. : Development of a New Light Stratified-Charge DISI Combustion System for a Family of Engines With Upfront CFD Coupling With Thermal and Optical Engine Experiments, Proceedings of SAE, 2004-01-0545, pp.1-25 (2004)

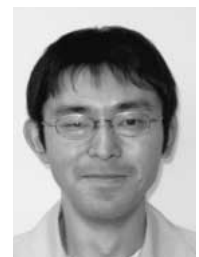
#### 著者



山下洋幸



瀬戸祐利



永澤 健



山本博之