

論文・解説

27

# ディーゼル機関における多量EGRと吸気冷却による エミッション低減

## EM Reduction by Large Amount of EGR and Cooled Intake Gas in Diesel Engine

藤本昌彦<sup>\*1</sup> 志茂大輔<sup>\*2</sup> 片岡一司<sup>\*3</sup>

Masahiko Fujimoto Daisuke Shimo Motoshi Kataoka

藤本英史<sup>\*4</sup> 山本博之<sup>\*5</sup>

Hidefumi Fujimoto Hiroyuki Yamamoto

### 要約

ディーゼルエンジンの大幅なエミッション低減と燃費改善を両立するため、着火制御性向上と低スモークの両立に主眼をおいた、ITIC-PCI ( Intake Temperature and Injection Controlled-Premixed Compression Ignition ) 燃焼法を開発した。本コンセプトは、従来の局所当量比の希薄化や燃焼温度の低温化に基づくすすの生成抑制だけに頼ったアプローチとは異なり、大幅な吸気冷却により多量EGR下でも余剰酸素量を維持することですすの酸化反応を促進するものである。本報告では、3D-CFDを用いた計算解析によりエミッション変化の理論的検証を行うことで本燃焼コンセプトの特徴を明らかにするとともに、台上性能検証によりその有効性を実証した。

### Summary

ITIC-PCI ( Intake Temperature and Injection Controlled - Premixed Compression Ignition ) that realizes ignition control by fuel injection and low smoke was developed to improve exhaust emission and fuel consumption. Unlike the suppression of soot formation based on lean local equivalence ratio or low combustion temperature, this concept is to promote the soot oxidation by a large amount of oxygen with super cooled intake gas under heavy EGR operation. The characteristic and availability of the concept in this study was cleared to analyze the change of exhaust emission by the theoretical 3D simulation and to estimate the effect of an amount of EGR and intake gas temperature on combustion performance.

## 1. はじめに

ディーゼル燃焼の主要課題の一つは、本来の良好な燃費を維持したまま、今後強化が予想される排出ガス規制に適合することである。本研究では、上死点付近への着火コントロール性向上と低スモークの両立に主眼をおいた新しい燃焼コンセプトの開発を試みた。局所当量比の希薄化<sup>(1)(2)(3)</sup>や燃焼温度の低温化<sup>(4)</sup>に基づくすす(以下Soot)生成抑制だけに頼ったアプローチとは異なり、大幅な吸気冷却により多量EGR下でも余剰酸素を多く残すことでSoot酸化反応を促進するという点が、従来の低エミッション(以下EM)燃焼法にない特徴である<sup>(5)</sup>。本報告では3D-CFDと当量比-温度(以下  $\phi$ -T)マップを用いた計算解析により吸気温度がEMに及ぼす影響の理論的検証を行い、本コンセプトの

特徴について述べる。また台上検証により、その性能改善効果を明らかにする。

## 2. 吸気冷却によるEM低減コンセプト

### 2.1 目指すべき筒内ガス状態と代表的燃焼法の違い

Fig.1は  $\phi$ -Tマップ<sup>(6)</sup>上に代表的な燃焼法の筒内ガス状態の概略を模式的に示したものである。神本らの高温燃焼法(A)Desirable Path<sup>(6)</sup>はNOx, Soot両生成領域の間隙を利用する理想的なコンセプトであるが実現手段が難しい。秋浜らの(B)無煙低温燃焼法<sup>(5)</sup>は、多量EGRにより極度に燃焼温度を低下させることでSoot生成領域の低温側までガス温度を低下させ、NOx, スモークの同時低減を達成するものである。しかし局所当量比がリッチな混合気の極低温燃焼はCO, HC増加<sup>(7)</sup>により燃費の悪化は避けられない。予混

\*1~5 技術研究所  
Technical Research Center

合圧縮着火 (Premixed Compression Ignition, 以下PCI) 燃焼法<sup>(1)(2)(3)</sup>は、多量EGRにより着火遅れを増大させ、局所当量比を希薄化することで(B)のエリアの低当量比側 (<2) を積極的に利用した燃焼法と考えられる。そのためには少なくとも着火までに全燃料を噴射させ、かつスモーク低減に十分な希薄化を実現する長い予混合期間が必要であり、燃費面で最も効率の良い上死点付近へ常に着火時期を制御することが難しい。

つまり、これまで現実的に行われてきた燃焼改善は、EGR量により低温化と希薄化をバランスさせてNOx、Soot生成領域を回避した(B)のエリアに筒内ガス状態を制御したコンセプトと理解できる。しかし多量EGRだけでは同時に空気過剰率 (酸素濃度)も低下するため、Soot酸化が期待できない。仮に多量EGR下で高を実現できれば、燃費や着火制御性の悪化につながる過度な燃焼温度低下や長い予混合期間を抑制できる可能性がある。

そこで我々は多量EGR下でを制御する手段として吸気冷却を活用することを考えた。吸気冷却により吸気密度を高くすれば、余剰酸素が多くなり、混合促進とSoot酸化、両面からスモーク低減が期待できる。-Tマップ上において(C)目指すべき燃焼はNOx生成領域 (以下NOx領域) より低温で、かつSootの酸化が活性な温度域を使わねばならない。燃焼中期 (破線) に一時的にSoot生成領域 (以下Soot領域) に入っても燃焼後期 (実線) にはこれを脱し、Soot酸化が活性な希薄域 (<1) を多く含ませ、かつCO、HCが生成しやすい低温過濃領域を回避する。すなわち秋浜らの(B)無煙低温燃焼法よりも高温希薄側に位置し、神本らの(A)Desirable Pathを多く含む領域である。

2.2 EGR, 吸気温度による筒内ガス状態の変化

本節では、3D-CFDと-Tマップを用いた計算解析によ

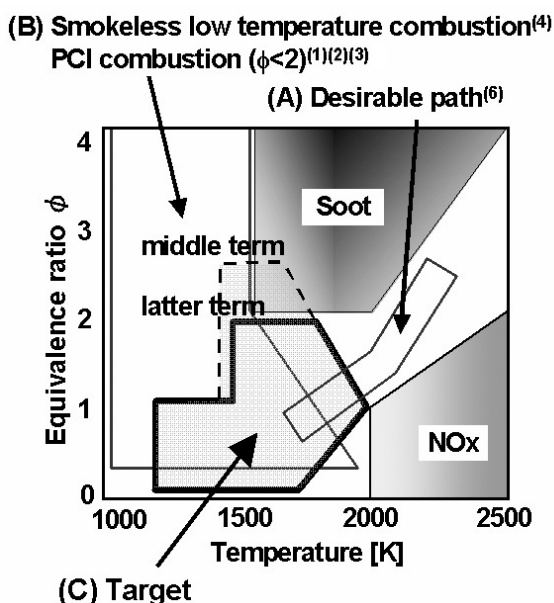


Fig.1 Combustion Target of In-Cylinder Gas Characteristics on -T Map

り、吸気温度とEGR量を変化させた特徴的な燃焼における筒内ガス状態の変化を比較することで、本燃焼コンセプトの妥当性を検証する。

3D-CFDツールには脇坂らのGTTコード<sup>(8)</sup>を用いた。機関主要諸元をTable 1, 計算条件をTable 2に示す。吸気温度とEGR量をパラメータに3つの燃焼を検討した。Case-1 (吸気温度In-T = 70 )は通常のディーゼル燃焼でスモークが悪化しない程度にEGR付加, Case-2 (In-T = 70 )は一般的なPCI燃焼を想定し、NOx、スモークが十分低減するまでEGR量を増加、最後にCase-3は吸気温度を40 まで大幅に冷却し、Case-2と同様NOx、スモークが十分低減するまでEGR量を増加した条件である。いずれも熱炎着火がTDCとなるように噴射時期を設定した。

その時の熱発生をFig.2に示す。

Fig.3に -Tマップ解析の結果を示す。-Tマップ上のコンターは計算セルの頻度であり、混合気と燃焼ガスの局所状態の分布を表している。

Case-1 (Fig.3最上段)では、燃焼中期以降で燃焼混合気がNOx領域に大きく入り込む。熱炎着火直前には <6

Table 1 Engine Specifications

Displacement (ml)	1998
Number of cylinder	4
Bore x Stroke (mm)	86 x 86
Injection system	Common rail
Combustion type	Direct injection
Valve system	4 valve
Compression ratio	16.7
Supercharger system	VGT

Table 2 Conditions of CFD Analysis

	Combustion	In-T [deg.C]	EGR [%]	λ [-]
Case-1	Diesel (High-NOx)	70	45	1.71
	Diesel (High-Smoke)	100	57	1.28
Case-2	PCI	70	63	1.14
Case-3	Target	40	61	1.41

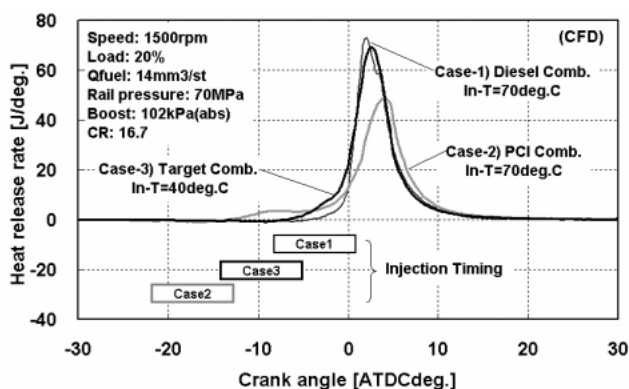


Fig.2 Comparison of Heat Release Rate by CFD

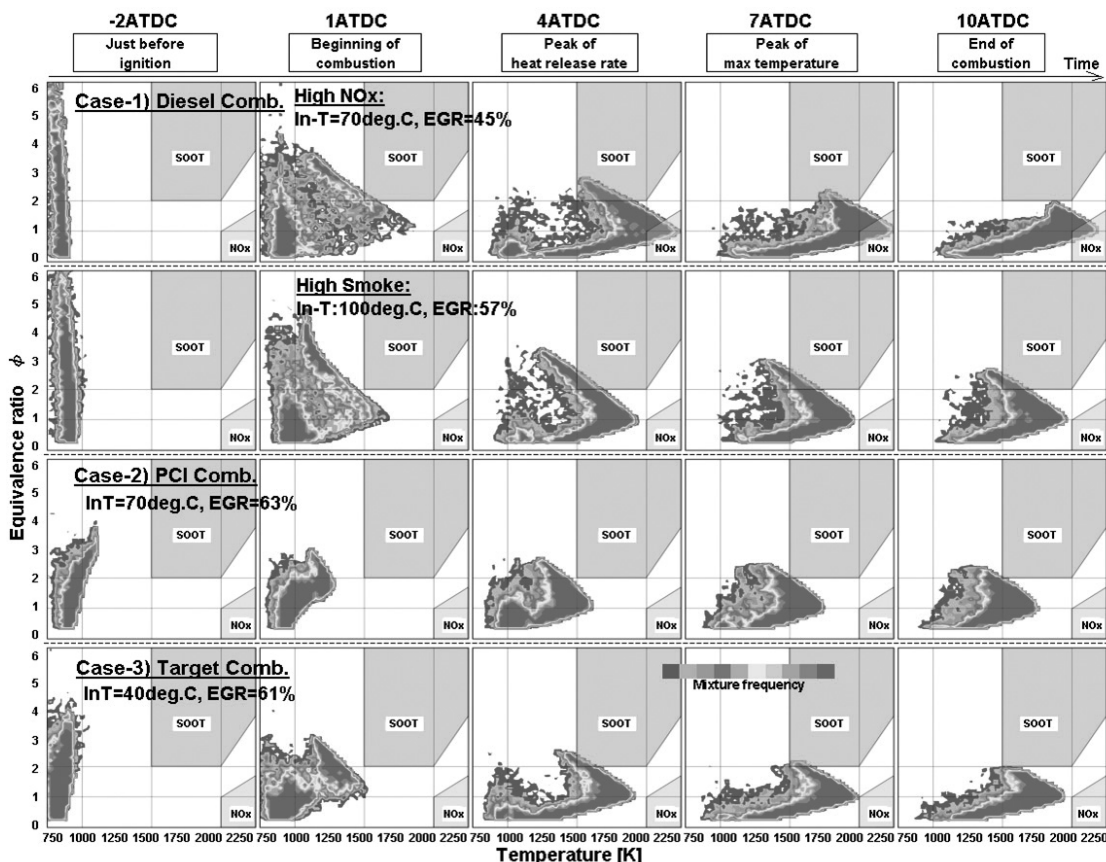


Fig.3 Effect of EGR Amount and Intake Temperature on -T Map History by CFD Analysis (Speed:1,500rpm, Qfuel = 14mm<sup>3</sup>/st, Rail Pressure:70MPa, Boost:102kPa ( abs. ) Hot Flame Ignition: Near TDC)

程度の過濃な混合気が形成され、燃焼混合気は熱発生率ピークでSoot領域に突入して一時的に多量のSootが生成すると考えられる。しかし  $\phi$  が高く余剰酸素も多いため燃焼後半には脱し、高温領域に到達して酸化される。Fig.3中上段は、Case-1でNOxが十分低減するまで更にEGRを増加した結果で、 $\phi$  が低いために過濃部の分散が進まない。熱発生ピーク時から燃焼終了時まで、燃焼混合気はSoot領域に停滞する。つまりCase-1はEGR量でNOx、スモークがトレードオフ関係にある。

Case-2 (Fig.3中下段)では、多量EGRによる極度の低温化により、燃焼混合気は最大燃焼温度はNOx領域から低温側に大きく分離している。一方、長い予混合期間による混合促進の効果で、熱炎着火直前の混合気は  $\phi < 3$ 程度まで希薄化される。熱発生ピーク以降、Soot生成温度を超える部分はSoot領域を希薄側に、Soot生成当量比より過濃な部分はSoot領域の低温側に分布しており、PCI燃焼 (Fig.1 (B),  $\phi < 2$ )に類似している。

一方、Case-3 (Fig.3最下段)では、Case-2よりも短い着火遅れ期間で着火直前の混合気は  $\phi < 4$ とややリッチ側に分布しており、また燃焼後期の燃焼混合気高温部は約2,000Kと比較的高い。このため熱発生ピーク時から最高燃焼温度時にかけて燃焼混合気の過濃側はSoot領域に到達するが、燃焼終了時にはSoot領域を脱しており、Case-1 (Fig.3最上

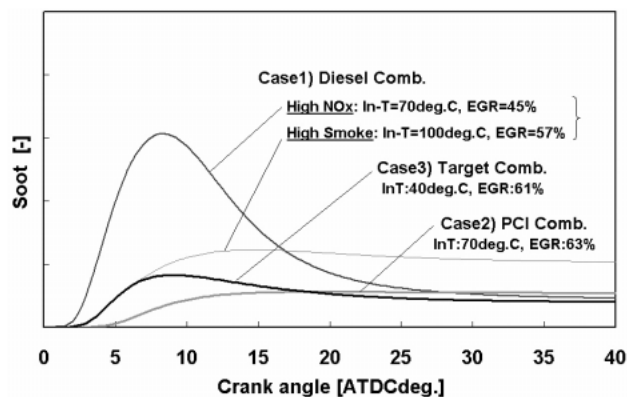


Fig.4 Comparison of Soot Amount History

段)と似たような挙動を示す。またCOとHCが生成されやすい低温過濃領域 ( $T < 1,400K$ ,  $\phi > 1$ )<sup>7)</sup>がCase-2と比較して少ないことも特徴といえる。

Fig.4は廣安の簡易モデル<sup>9)</sup>によるSoot量変化を予測したものである。Case-1 (High NOx)は一時的にSoot量が大幅に増加するが、Soot酸化反応により急速に減少に転じている。Case-2は生成量こそ最も少ないものの、Soot酸化がほとんど見られない。Case-3は一時的に増加傾向を示すがCase-1と同様にSoot酸化により減少していることがわかる。以上のように多量EGRと大幅な吸気冷却を組み合わせることで、狙い通りの筒内ガス状態 (Fig.1 (C))が実現できると考えられる。

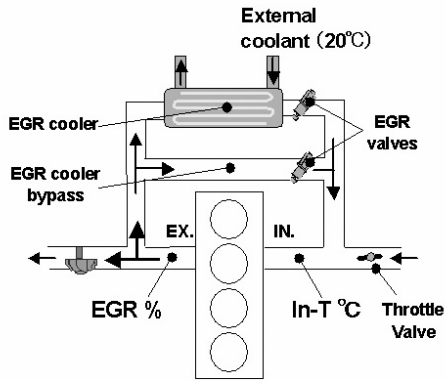


Fig.5 EGR System with Ext. Coolant

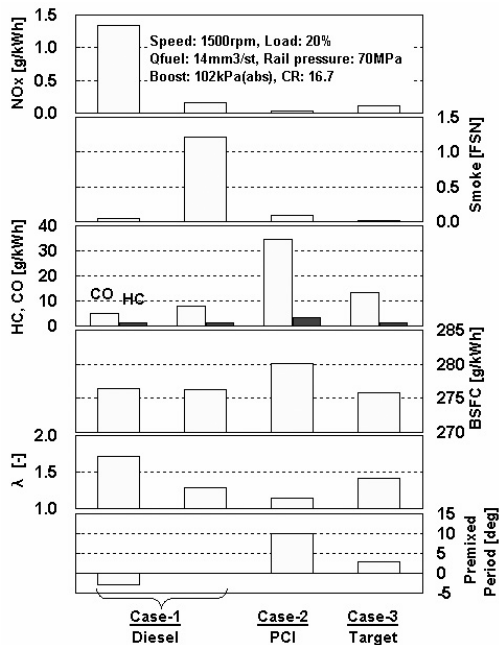


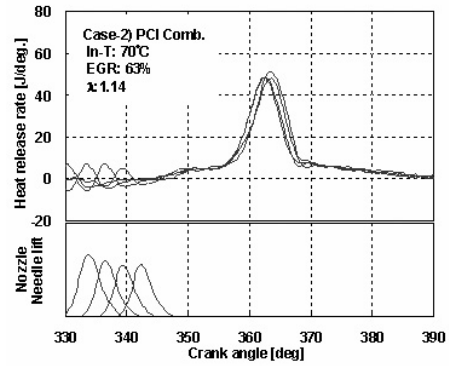
Fig.6 Combustion Performance

### 3. 吸気冷却による燃焼性能改善効果

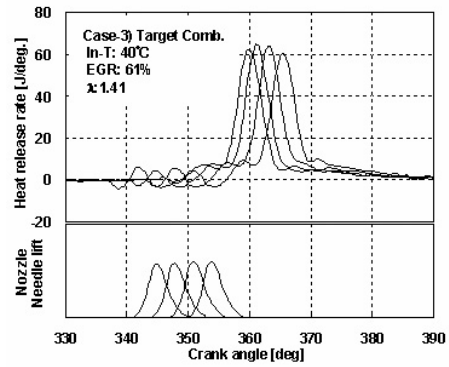
#### 3.1 多量EGRと吸気冷却の燃焼性能の特徴

前章の解析結果を検証するため、欧州Stage4規制に適合させた量産ディーゼルエンジン (Table 1) からFig.5に示す外部冷却水と大容量EGRクーラ、およびクーラバイパスを用いてEGRガス混合後の吸気温度を任意に変更し、吸気冷却の効果を台の上にて検証した。

Fig.6は回転数1,500rpm, 負荷20%において、前章の計算解析条件 (Case-1~3) の諸性能を比較したものである。なお図中の予混合期間は、噴射終了から熱炎着火までのクランク角と定義した。噴射終了後の着火が基本コンセプトである点はPCI燃焼 (Case-2) と同様だが、吸気冷却 (In-T=40) により高い  $\lambda$  を維持することで短い予混合期間でも低スモークが成立する点、CO, HC悪化が少なく燃費悪化がない点がCase-3の特徴である。またFig.7は予混合期間の大きく異なるCase-2とCase-3の熱発生率と針弁リフトで、噴射時期を変化させた波形を重ねて表示している。Case-2では噴射時期を変化させても熱炎着火は同等だが、



(1) Case-2) PCI Comb.



(2) Case-3) Target Comb.

Fig.7 Ignition Controllability by Fuel Injection

予混合期間の短いCase-3では、噴射時期に対してほぼニアに熱炎着火が変化するようになり、通常のディーゼル燃焼のように燃料噴射で着火をコントロールできる。

Fig.8は (EGR) を変化させ、吸気温度 (In-T = 40, 70, 100) が諸性能へ及ぼす影響を詳細に調べたものである。いずれの吸気温度でもNOxは  $\lambda$  を低くすると単調に減少するが、吸気温度が低いほど、低NOx領域が高  $\lambda$  側へ拡大する。一方、スモークは吸気温度により傾向が異なる。100  $\lambda$  では  $\lambda$  を低くするとスモークは単調に増加するが、70  $\lambda$  では  $\lambda = 1.3$  付近で極大値を示し、低  $\lambda$  ではほとんど排出されなくなる。これは秋浜らの低  $\lambda$  領域でスモークが減少する現象<sup>(5)</sup>と推察される。更に40  $\lambda$  まで冷却するとに関わらずスモークはほとんど排出されない。すなわちNOx, スモークを同時低減できる  $\lambda$  は70  $\lambda$  の時はスモークの山のリッチ側 ( $\lambda = 1.1$ 以下) でしか成立しないのに対して、吸気温度を40  $\lambda$  まで冷却すると高  $\lambda$  領域 ( $\lambda = 1.4$ 以下) まで使えるようになる。

高  $\lambda$  でNOx, スモークの同時低減が成立することは、主として2つ利点がある。1点目は燃費である。CO, HCは  $\lambda$  を低くすると  $\lambda = 1.3$ までは緩やかに増加し、 $\lambda = 1.3$ 以下では急激に増加する。燃費も同様の傾向を示しており、 $\lambda$  を高くすると未燃損失が低減され、燃費が改善すると考えられる。2点目は着火制御性である。  $\lambda$  が増加すると噴射時期が遅角する傾向を示すが、熱炎着火はTDC付近としているので予混合期間が短くなるということである。こ

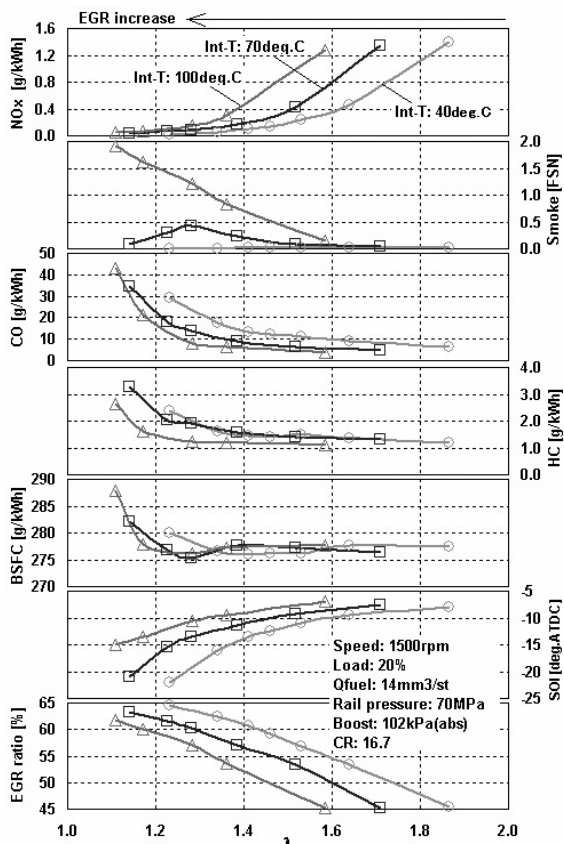


Fig.8 Effect of Excess Air Ratio (EGR) and Intake Gas Temperature on Emission Characteristics

のことは吸気温度が十分に下げれば、短い予混合期間でも低スモークとなることを示している。

以降、大幅な吸気冷却によるFig.1(C)の燃焼をITIC (Intake Temperature and Injection Controlled) -PCI燃焼と称する。

3.2 ITIC-PCI燃焼の運転領域拡大

ITIC-PCI燃焼では、多量EGRと吸気冷却による高余剰酸素下での予混合燃焼により -Tマップの高温希薄領域を利用して、Soot生成抑制と酸化促進を両立させることが重要である。しかしながら負荷が高くなると、燃料噴射量の増加にともない、 $\lambda$ が低下することは否めない。

そこでITIC-PCI燃焼を中負荷でも成立させるため、時間、空間的な混合の工夫により、Soot生成抑制と酸化促進を維持できないか試みた。一つは低圧縮比化により着火遅れを延長して要求EGR量を減らし、負荷増加に対するバルクの  $\lambda$ 低下を抑制すること、もう一つは早期噴射とメイン噴射に分割することで、空気利用率の向上を図り、局所的な  $\lambda$ 低下を抑制することである。

吸気温度40℃、回転数2,000rpm、負荷40%において熱発生率と針弁リフトを比較した結果をFig.9に示す。早期噴射とメイン噴射に分割することで、熱炎着火直前の噴射終了が早くなり、単発噴射と比較して予混合期間が大きくなっている。Fig.10は噴射終了直後の当量比分布をCFDにより比較した結果で、早期噴射によりキャピティ外の空気

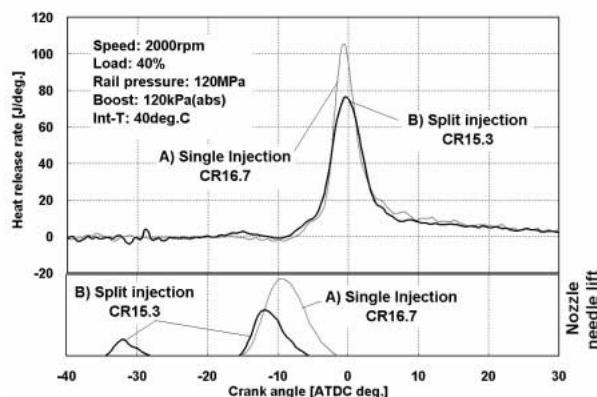


Fig.9 Effect of Split Injection on Heat Release Rate

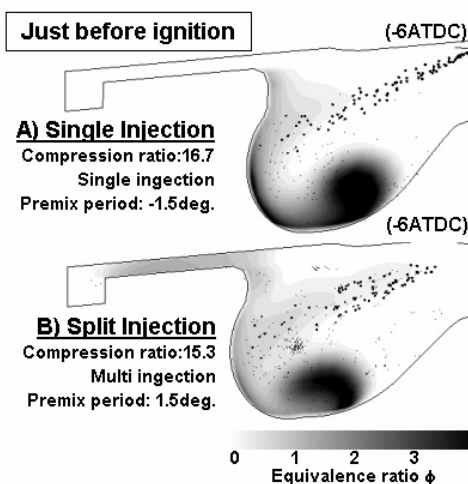


Fig.10 Mixture Distribution Just before Ignition

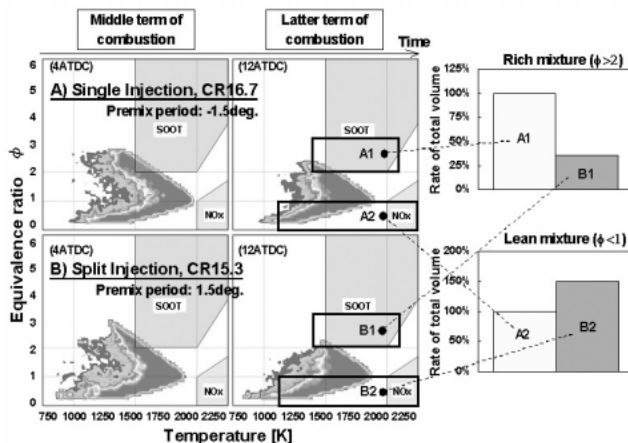


Fig.11 Effect of Low Compression Ratio and Split Injection on In-Cylinder Gas of -T Map

を有効活用するとともに、メイン噴射終了を早期化させることで、着火直前における当量比は全体的に希薄化が進んでいる。Fig.11は燃焼中盤～後半の筒内ガス状態を -Tマップで比較した結果である。 -Tマップ中の四角で囲ったエリア内の  $\phi > 2$ と  $\phi < 1$ の混合気体積を比較したFig.11右図から、燃焼後半 (ATDC10°) ではSoot領域にかかるリッチ燃焼混合気が減少し、酸化が促進される希薄燃焼混合気が増加することが確認できた。

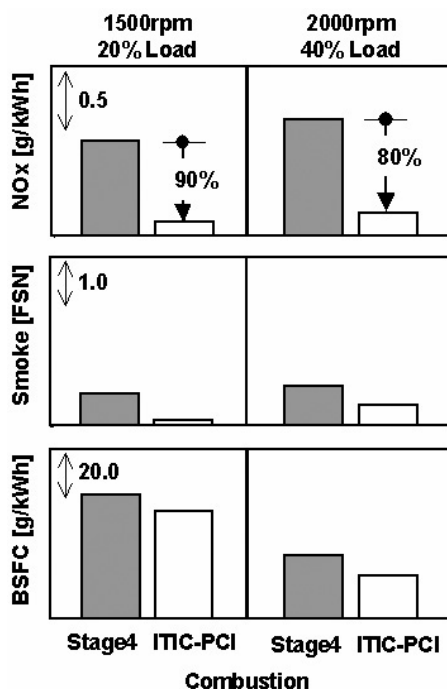


Fig.12 Comparison of Engine Performance between ITIC-PCI and Stage4 Combustion

3.3 ITIC-PCI燃焼のEM性能改善効果

Fig.12はITIC-PCI燃焼のEM性能を台上検証した結果である。Stage4適合燃焼よりもスモークを低減した上で、軽負荷で約90%，中負荷で約80%，NOx低減可能なことを確認した。またStage4適合燃焼は噴射リタードによりEMを改善しているが、ITIC-PCI燃焼ではTDC付近へ着火時期を適正化することによる燃費改善効果も確認できた。

4.まとめ

多量EGRと吸気冷却を組み合わせることで、大幅にEMを低減した上で、燃料噴射によりTDC付近へ着火制御可能で、かつ低燃費なITIC-PCI (Intake Temperature and Injection Controlled-PCI) 燃焼法を開発した。その特徴は下記の通りである。

- (1) 多量EGR下でも、の低下を抑えながら着火遅れが確保される。燃焼中期に生成されたSootを燃焼後期に酸化可能であり、スモーク低減に過度の燃焼温度の低下や予混合期間を必要としない。
- (2) 要求予混合期間が短いため、燃料噴射による着火制御が可能である。また燃焼混合気を過度に低温化せず、余剰酸素が多いことで低温過濃領域を回避し、CO，HCが抑制され、燃費悪化がない。
- (3) 低圧縮比化による着火遅れ期間拡大，および分割噴射による時間・空間的な混合促進を組み合わせ、本燃焼を中負荷まで成立可能である。

なお、本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「次世代低公害車技術開発プログラム」<sup>(10)</sup> 研究開発の助成の下で行った。

参考文献

- (1) 島崎ほか：上死点近傍燃料噴射による予混合ディーゼル燃焼コンセプト，自動車技術会論文集，Vol.36，No.3，p.31-36 (2005)
- (2) 村田ほか：可変バルブタイミングによる予混合ディーゼル燃焼の中速中負荷への適用，自動車技術会論文集，Vol.36，No.6，p.73-78 (2005)
- (3) 椎野：将来に向けた予混合燃焼技術，自動車技術，Vol.60，No.9，p82-88 (2006)
- (4) Akihama, K., et al. : Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature, SAE paper, No.2001-01-0655 (2001)
- (5) Shimo, D., et al. : EM Reduction by a Large Amount of EGR and Excessive Cooled Intake Gas in Diesel Engines, Proceedings of 31st FISITA World Automotive Congress, F2006P372 (2006)
- (6) Kamimoto, T. et al. : High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines, SAE paper, No.880423 (1988)
- (7) Golovitchev, V., et al. : Towards A New Type of Hybrid Engine : The Two-Stroke Free-Piston Compression Ignited Engine, Proceedings of 31st FISITA World Automotive Congress, F2006P421 (2006)
- (8) 金ほか：高圧噴射2段燃焼ディーゼル機関における燃焼数値解析への遺伝的アルゴリズムの応用，自動車技術会論文集，Vol.36，No.3，p.37-43 (2005)
- (9) Hiroyasu, H., et al. : Models for Combustion and Formation of Nitric Oxide and Soot in Direct Injection Diesel Engines, SAE paper, No.760129 (1976)
- (10) 大坪ほか：NEDOクリーンディーゼルプロジェクト，自動車技術，Vol.60，No.9，p.12-21 (2006)

著者



藤本昌彦



志茂大輔



片岡一司



藤本英史



山本博之