

直噴ディーゼルエンジンの Euro IV対応燃焼技術

Combustion Technologies for Euro IV-compliant Direct Injection Diesel Engine

神田 智博*

Tomohiro KANDA

松井 竜太*

Ryuta MATSUI

小林 慎一*

Shinichi KOBAYASHI

園 比呂志*

Hiroshi SONO

要 旨

ABSTRACT

Hondaは、2003年秋に乗用車用ディーゼルエンジンを欧州市場へ投入した。このエンジンの開発にあたり、低燃費、高静粛性、およびエミッション低減が可能な燃焼技術の研究をおこなった。

パイロット噴射を導入し、主燃焼の着火時期を進角することにより低燃費化と低騒音化は達成されるが、その際に悪化するエミッションの低減が課題となった。この課題を解決するため混合気の拡散促進、および拡散時間の拡大によって局所空燃比の希薄化を図った。

その結果、燃焼騒音を悪化させることなくエンジン単体での燃費、およびエミッションを低減することができた。また排出ガス後処理システムと併せて等価慣性重量(IW; Inertia weight) 1590kgの車両にて欧州 2005年排出ガス規制に適合し、高静粛性と 5.4L/100kmの低燃費を実現した。

In fall 2003, Honda introduced a passenger vehicle diesel engine to the European market. During the development of this engine, research was conducted on combustion technologies to reduce fuel consumption, combustion noise and emissions.

By adopting the pilot injection while also advancing the start of main combustion event, fuel consumption and combustion noise are both lowered, but emissions performance was not improved. Dispersion of the air-fuel mixture and the extension of the appropriate period for dispersion ensured a lean local air-fuel ratio and resolved the emissions issue.

The use of these combustion technologies has enabled fuel consumption and emissions out of engine to be reduced with no increase in combustion noise. Fitted in a 1590 kg equivalent inertia class vehicle in combination with the catalyst, the vehicle satisfied the 2005 European diesel exhaust emissions standards (EURO IV), and achieved a low fuel consumption of 5.4L / 100 km and superb quietness.

1. まえがき

直噴高速ディーゼルエンジンは、その低燃費性だけでなく、低速領域から発生する大トルク、および近年の技術進化による燃焼騒音の改善によって欧州において広く支持を受け、年々そのシェアは増大し 2010年には 50%にも近づくとされている。その排出ガスは規制の強化にともない年々クリーン化しているが、今後も排出ガスの改善が求められ、後処理システムの開発⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、および燃焼改善⁽⁵⁾⁻⁽¹¹⁾の両面から技術開発が活発におこなわれている。しかし、い

ずれも燃費悪化をとまなうなど課題も多い。

このエンジンの開発にあたり、ディーゼルエンジンの存在価値である低燃費をより一層改善し、高静粛性、およびエミッション低減が可能な燃焼改善をおこなった。

2. 実験装置

2.1. 供試エンジン

Table 1 に実験に使用した Accord i-CTDi ディーゼルエンジン⁽¹²⁾の主要諸元を示す。

* 栃木研究所

Table 1 Main specifications of Accord i-CTDi diesel engine

Cylinder configuration	Inline 4
Displacement volume	2200cm ³
Bore × Stroke	85.0mm × 97.1mm
Compression ratio	16.7
Fuel injection equipment	Common rail (Max. pressure 160MPa)
Nozzle type	Micro mini-sack
Turbocharger	With variable nozzle
Swirl control valve	Continuously variable
EGR valve	Electric control
EGR cooler	Without bypass valve

2.2. 燃焼室内可視化装置と3次元 CFD コード

可視化装置としてエンドスコープシステムを用いて Fig. 1に示すようにシリンダヘッド直上から燃焼室内の噴霧、および輝炎燃焼の観察をおこなった。また、Image Intensifier(I.I.)を用いて 3000 倍に増幅し、不輝炎燃焼、および高温領域の観察もおこなった。さらに、3次元CFDコードを用いて噴霧、および混合気の挙動も推定した。

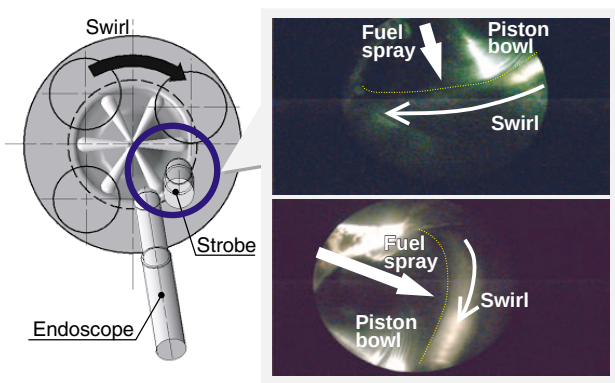


Fig. 1 Experimental setup for observation manuscript

3. 燃焼改善のアプローチ

3.1. パイロット噴射を用いた低燃費と高静粛性の両立

Fig. 2 に燃料量、EGR 率、および主噴射時期を変化させた場合の Brake specific fuel consumption(BSFC) と筒内圧力変化率の最大値($dP/d\theta_{max}$)の関係を示す。また、BSFC と NOx の関係を Fig. 3 に示す。BSFC は着火時期の影響を強く受け、所定の着火時期で最小値となる。本稿ではこの着火時期を θ_{min_bsfc} と定義する。

パイロット噴射なしの場合、 θ_{min_bsfc} において $dP/d\theta_{max}$ は高くなり、静粛性が悪化する。したがって、従来のディーゼルエンジンの着火時期は θ_{min_bsfc} に対し遅角されていた。

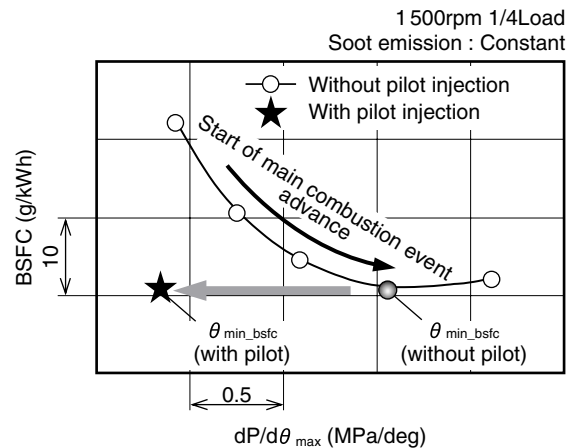
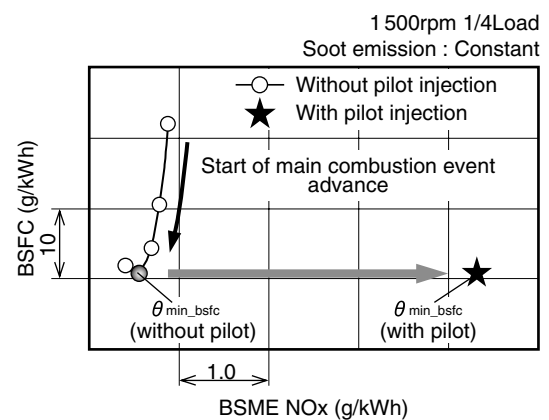
Fig. 2 Effect of pilot injection on $dP/d\theta_{max}$ and BSFC

Fig. 3 Effect of pilot injection on NOx and BSFC

パイロット噴射を採用し、着火時期が θ_{min_bsfc} になるように主噴射時期を調整した場合の BSFC、 $dP/d\theta_{max}$ および NOx を★印で示す。パイロット噴射なしの場合と同等の BSFC において $dP/d\theta_{max}$ は改善するが、不可溶性有機物質(Soot)一定にて NOx は大幅に増加する。

以上のように、パイロット噴射の採用と着火時期の θ_{min_bsfc} 設定により低燃費と高静粛性は同時に達成することがわかった。以降は、課題であるエミッション低減手法について述べる。

3.2. 混合気の拡散促進によるエミッション低減

ピストンボールに対するノズルコーン角が排出ガス特性に及ぼす影響を調べた。

実験に使用した燃焼室形状、およびノズル諸元を Fig. 4 に示す。ピストンボール形状はボール壁面に衝突した噴霧の貫通力を有効に利用し、燃料噴霧への空気導入を促進させる諸元としている。また、ノズル諸元については、噴霧のバラツキが小さく、サックボリュームからの燃料の後だれを最小におさえたマイクロサックノズルとし、全負荷出力を達成可能なノズル噴孔面積を確保した。

ノズルコーン角 α に対し7deg広げた場合、および10deg狭めた場合の同一 Soot における NOx 排出量を Fig. 5 に示す。結果としてコーン角 α にて NOx は最も低減する。

この現象を解析するため、シミュレーションおよび筒内可視化をおこなった。Fig. 6に各ノズルコーン角における混合気挙動のシミュレーション結果を示す。また、Fig. 7 にコーン角 α 、および $\alpha - 10\text{deg}$ の可視化結果を示す。

Fig. 6 のシミュレーション結果より、 $\alpha - 10\text{deg}$ の場合、噴射された燃料噴霧の大半がピストンボール内にとどまる

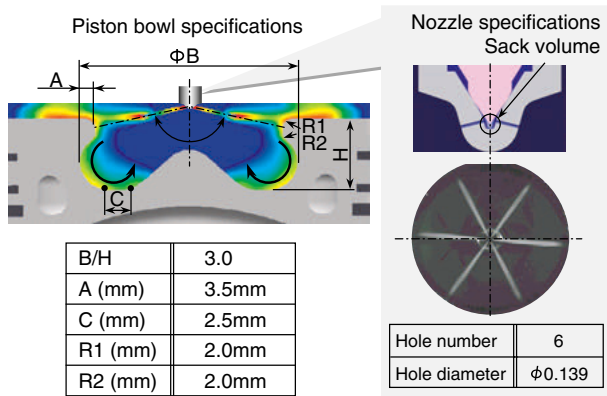


Fig. 4 Specifications of piston bowl and nozzle

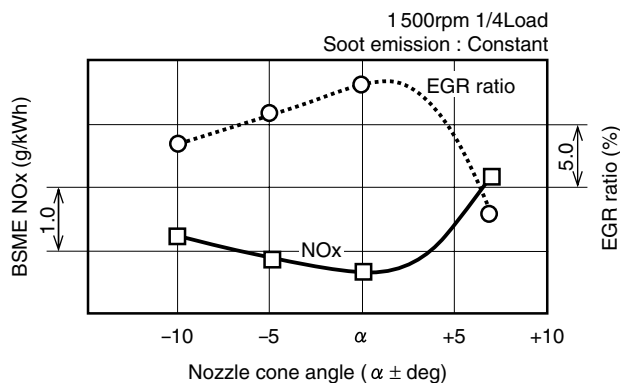


Fig. 5 Effect of nozzle cone angle on NOx

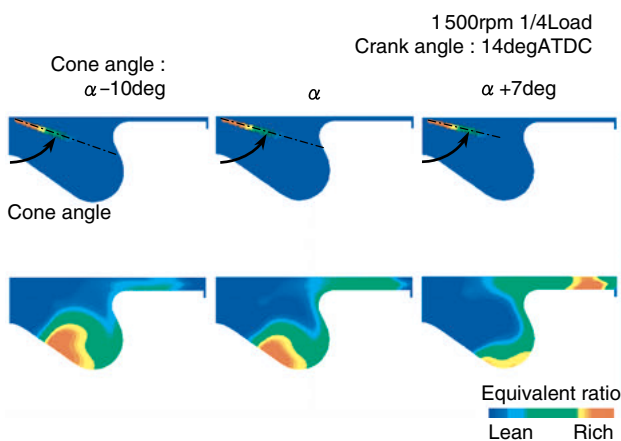


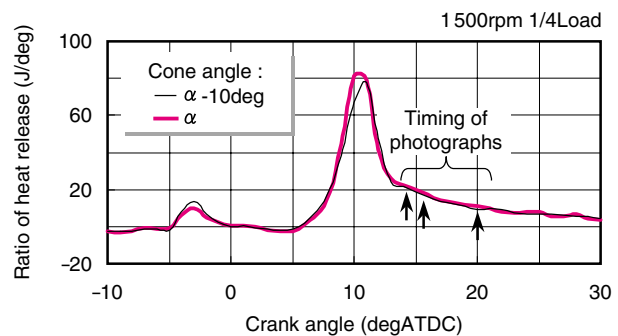
Fig. 6 Effect of nozzle cone angle on mixture distribution

のに対し、コーン角 α では噴霧がピストンボール壁面衝突時にボール外へ流出し、 $\alpha + 7\text{deg}$ ではその比率が増大している。つまり過度のノズルコーン角の狭角化はボール内にて過濃混合気の形成を招く。また、過度のノズルコーン角の拡大はピストンボール外にて過濃混合気の形成を招く。これに対しコーン角 α ではボール内外ともに最も混合気分布が適切になっている。そのため、EGR増量が可能となりNOxが低減したと考えられる。

Fig. 7 の筒内可視化結果から $\alpha - 10\text{deg}$ ではボール内にてSootを多く含んだ暗い輝炎の発生がみられる。以上の結果よりボール内に過濃混合気が形成され燃焼していることがうかがえる。

これに対して、コーン角 α ではボール外へ輝炎が流出しボール内の火炎の輝度が高くなっている。また、熱発生率も活発になっていることからボール外への混合気の流出によりボール内の混合気濃度が薄くなりボール内にて良好な燃焼をしているとみられる。

従来、ボール内で燃焼させるほうがエミッション低減のために好ましいと考えられていたが、本実験結果よりボール外への燃料噴霧の流出により適度なボール内外の混合気バランスを得るほうがエミッション低減に効果的であることがわかった。



Cone angle : $\alpha - 10\text{deg}$



Cone angle : α



Fig. 7 Effect of nozzle cone angle on flame behavior (CCD camera)

3.3. 混合気の拡散期間の拡大によるエミッション低減

Soot 一定にて EGR 量を増加し, NOx を低減するためには, 主燃焼にさらされる燃料噴霧の量を低減することが必要である. そこで, Fig. 8 に示すように主燃焼の開始以降に噴射される燃料量の指標として $\theta_{\text{eoi-soc}}$ を定義する.

Fig. 9 に Soot 一定の条件下で EGR 率, パイロット噴射量, パイロットおよび主噴射のタイミングを変化させた場合の $\theta_{\text{eoi-soc}}$ と NOx の関係を示す. この結果より $\theta_{\text{eoi-soc}}$ が短くなると, EGR 率を増加することができるため, NOx は低減する.

Fig. 10 には同一実験におけるパイロット熱発生比率(パイロット燃焼の熱発生量と全熱発生量の比)と $dP/d\theta_{\text{max}}$ の関係を示す.

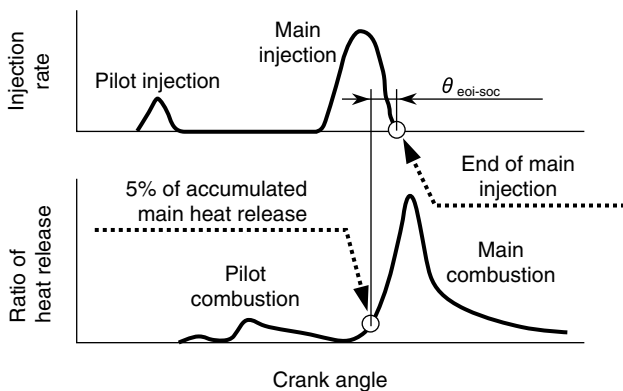


Fig. 8 Definition of $\theta_{\text{eoi-soc}}$

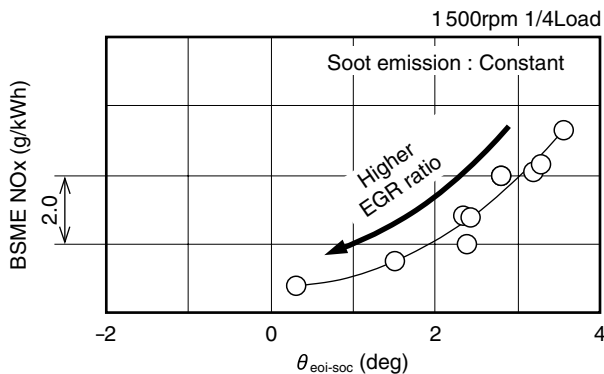


Fig. 9 Effect of $\theta_{\text{eoi-soc}}$ on NOx

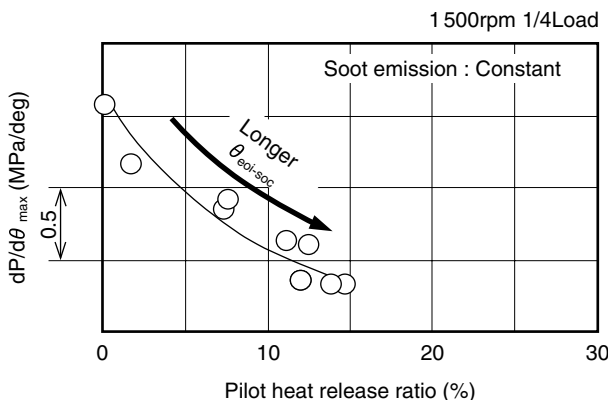


Fig. 10 Effect of pilot heat release ratio on $dP/d\theta_{\text{max}}$

パイロット熱発生率を大きくすると $dP/d\theta_{\text{max}}$ は小さくなるが, その際 $\theta_{\text{eoi-soc}}$ が長くなってしまふ. つまりパイロット熱発生率と $\theta_{\text{eoi-soc}}$ は相反する関係にある.

パイロット熱発生比率を大きくした状態で $\theta_{\text{eoi-soc}}$ を短くするためには筒内の温度低下が有効であると考えた. そこで, Table 2 に示した圧縮比および EGR クーラの組み合わせにおいてパイロット噴射量および噴射時期を変化させ実験をおこなった. その際, 燃費を維持するために主燃焼の着火時期が一定になるように主噴射時期を調整した. また, Soot が一定となるように EGR 率を調整した.

実験結果を Fig. 11 に示す. 圧縮比が低く, EGR クーラ効率が高いほど, 同一パイロット熱発生比率における $\theta_{\text{eoi-soc}}$ が短くなる. その結果, Fig. 12 に示すように同一 $dP/d\theta_{\text{max}}$ における NOx は低減した.

上記の現象を解析するため圧縮比 18.0 EGR クーラ効率 39%, および圧縮比 16.7 EGR クーラ効率 50% の場合の燃焼可視化およびシミュレーションをおこなった. その際,

Table 2 Compression ratio and EGR cooler efficiency

NO.	Compression ratio	EGR cooler efficiency (%)
1	18.0	39
2	16.7	50
3	15.5	50
4	14.5	50

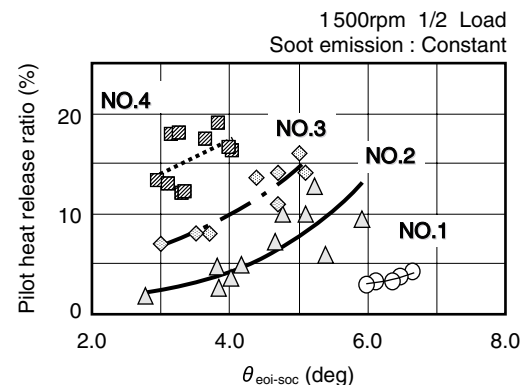
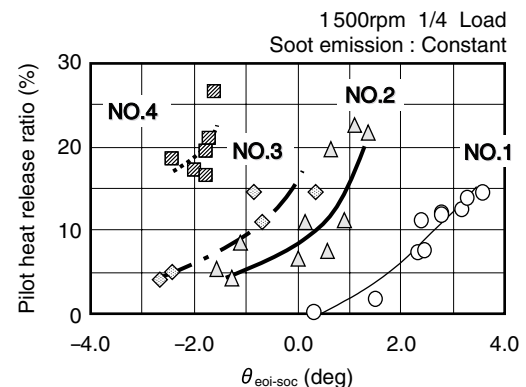


Fig. 11 Effect of compression ratio and EGR cooler efficiency

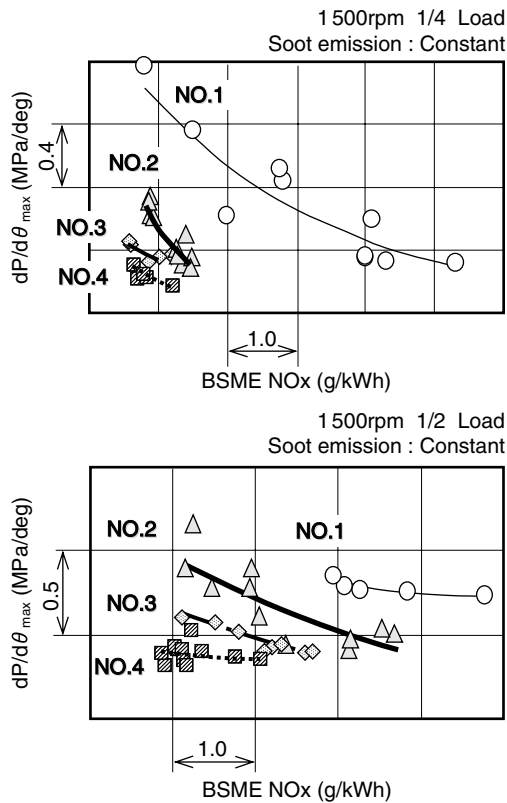


Fig. 12 Effect of compression ratio and EGR cooler efficiency on NOx and $dP/d\theta_{max}$

それぞれの Soot および $dP/d\theta_{max}$ が等しくなるように EGR および噴射時期を調整した。

両者の CCD カメラによる観察結果を Fig. 13(a) および Fig. 14(a) に、CCD カメラに I.I. を装着した場合の観察結果を Fig. 13(b) および Fig. 14(b) に、また噴霧挙動のシミュレーション結果を Fig. 13(c), および Fig. 14(c) に示す。

圧縮比 18.0 EGR クーラ効率 39%では、パイロット噴霧は燃焼室壁面付近にて着火し、わずかに輝炎をともない燃焼している。I.I. を使ってパイロット燃焼を撮影した結果では、燃焼室壁面から中央に向かって活発な不輝炎燃焼がみられる。続く主噴霧は燃焼室壁面へ衝突するタイミングにおいてノズルからピストンボール壁面の中央にて着火し、輝炎におおわれている。これはパイロット燃焼により形成させた高温雰囲気中へ主噴霧が突入したため主噴霧の着火が早まったためと考えられる。

これに対して圧縮比 16.7 EGR クーラ効率 50%の場合には、パイロット噴霧は燃焼室壁面に衝突後に壁面付近にて弱い不輝炎燃焼が見られ、続く主燃焼では主噴霧が完全に見られなくなってから輝炎が発生している。この現象はパイロット噴霧が壁面近傍で低温燃焼したことにより、主噴霧の着火遅れが拡大したため生じたものとみられる。

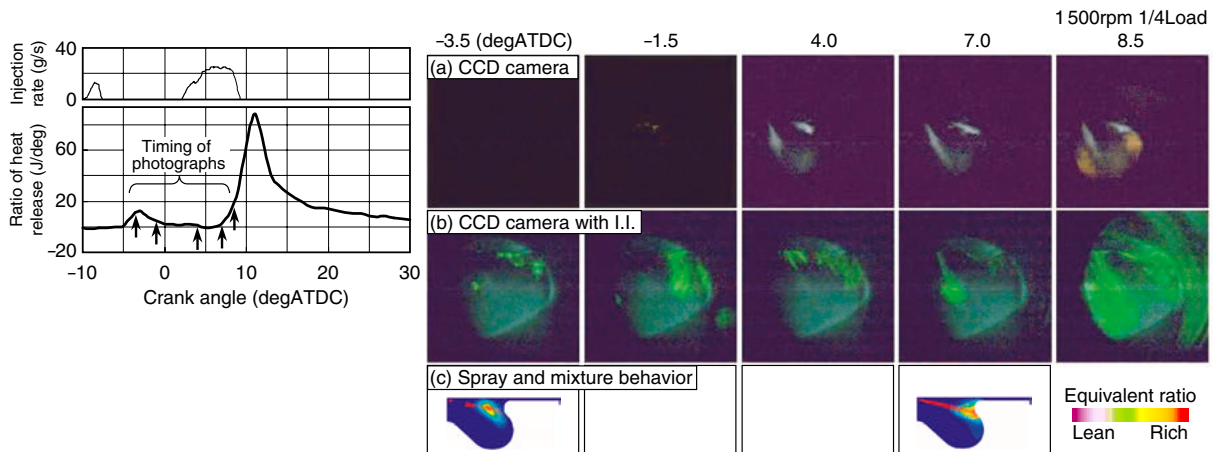


Fig. 13 $\epsilon 18.0$ flame behavior (CCD camera only and CCD camera with I.I.)

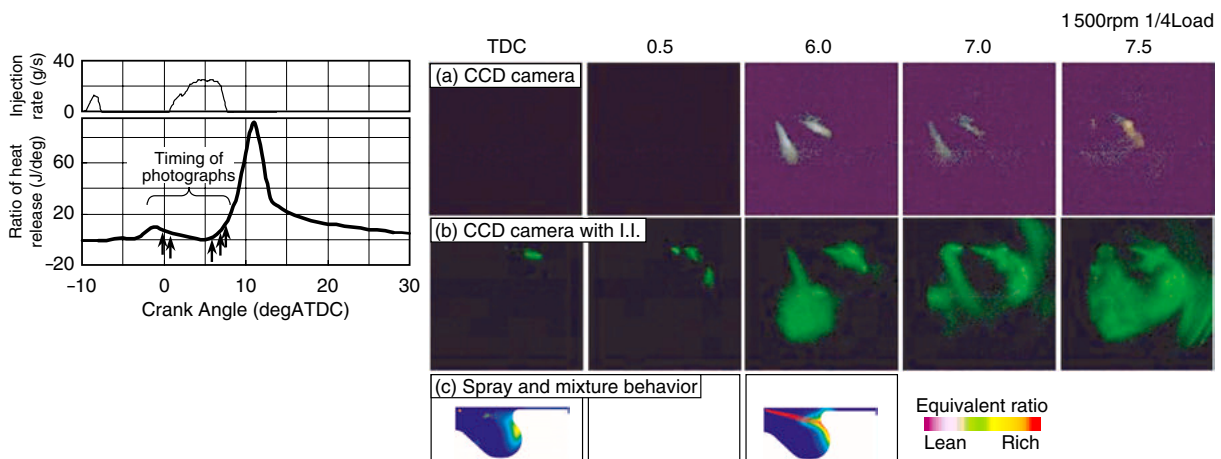


Fig. 14 $\epsilon 16.7$ flame behavior (CCD camera only and CCD camera with I.I.)

結果として Soot の発生が抑制され EGR 率の増加が可能となるため、NOx が低減したと考えられる。また、主噴霧の先端にて着火し、火炎は上流へと広がっていくため急速な燃焼が抑制され $dP/d\theta_{max}$ が維持できたものと推定される。

以上のように、圧縮比の低減と EGR クーラ効率の向上により $dP/d\theta_{max}$ を悪化させずに NOx の低減が可能であることがわかった。ただし、過度の低圧縮比化は低温白煙の発生、冷間時の HC、CO の増加、および燃費悪化を招くため、本エンジンでは 16.7 とした。

4. 新開発エンジンの性能

前章までの結果よりエンジンの主要諸元を Table 1 のように決定した。本エンジンの全負荷性能を Fig. 15 に示す。また、Fig. 16, 17 に部分負荷における燃費、燃焼騒音および排出ガス特性を示す。参考として比較には市販の欧州車 (Modern European diesel engine) を用いた。燃焼騒音は同等であり、燃費およびエミッションは低減している。

また、本エンジンは昨年秋に欧州 Accord に搭載された。

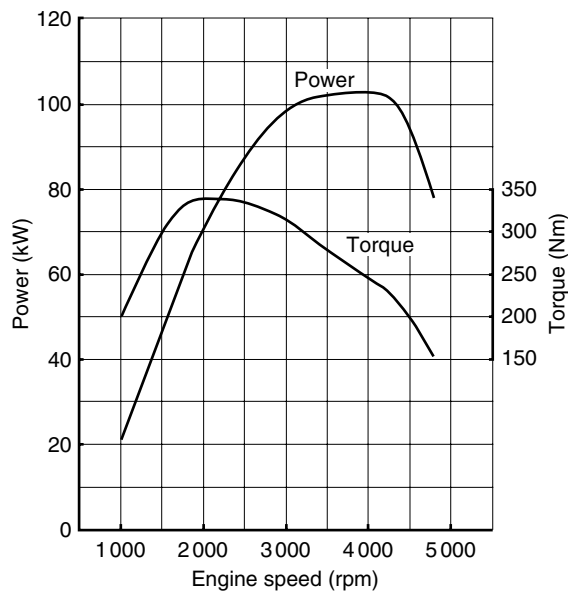


Fig. 15 Full load performance

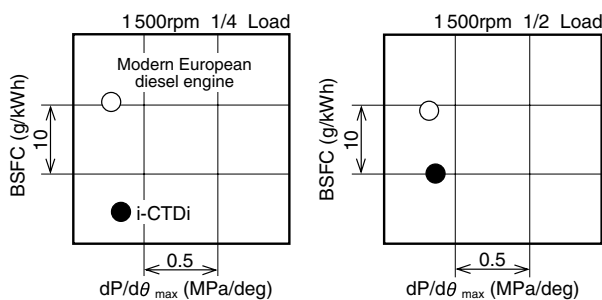


Fig. 16 BSFC and $dP/d\theta_{max}$ under partial load

燃費、排出ガス、および動力性能を Fig. 18, 19 に示す。これまで述べたエミッションの低減に加え、直下および床下に配置された後処理システムにより欧州 2005 年排出ガス規制に適合している。同時に、IW 1590kg でありながら、C カテゴリー乗用車並の低燃費 5.4L/100km を達成している。

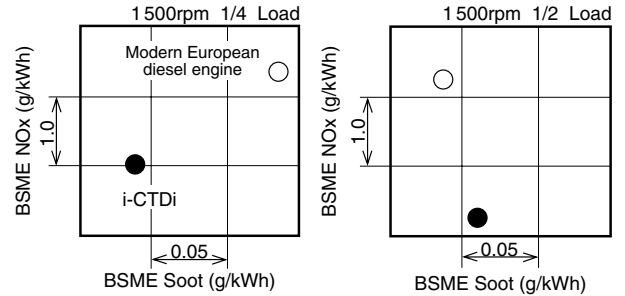


Fig. 17 NOx and soot under partial load

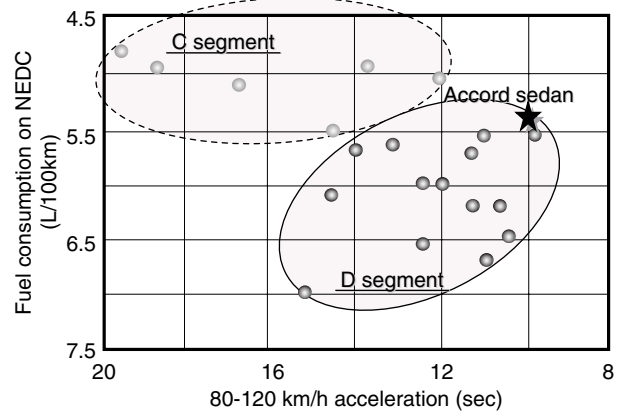


Fig. 18 Fuel consumption and performance of Accord sedan

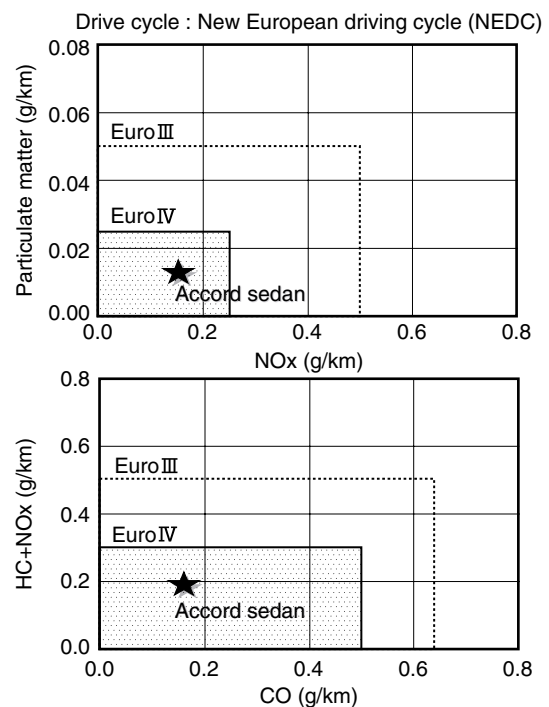


Fig. 19 Accord sedan emissions

5. まとめ

低燃費と高静粛性を前提条件として、欧州 2005 年排出ガス規制に適合できる燃焼技術に取り組んだ。そこで得られた知見を以下に要約する。

- (1) パイロット噴射の採用、および主燃焼の着火時期の進角によって低燃費と低燃焼騒音が両立する。その際に悪化する Soot は混合気の拡散を促進することにより低減することができる。
- (2) 混合気の拡散促進手法について
 - (a) 適度に燃焼室外へ噴霧を拡散させることにより混合気の局所空燃比が希薄化するため Soot が低減する。その結果、EGR の増加が可能になり、等 Soot における NOx は低減する。
 - (b) $\theta_{\text{eoi-soc}}$ が短いほど EGR 率の増加が可能になり、等 Soot における NOx は低減する。
 - (c) パイロット熱発生比率が大きいほど $dP/d\theta_{\text{max}}$ は低下する。しかし、 $\theta_{\text{eoi-soc}}$ が長くなるため、等 Soot における NOx は増加する。
 - (d) $\theta_{\text{eoi-soc}}$ の短縮とパイロット熱発生比率の増加を両立させるためには、低圧縮比化や EGR の冷却が有効である。
- (3) 本燃焼技術は欧州 Accord i-CTDi ディーゼルエンジンに採用され、IW 1590kg の車両にて欧州 2005 年排出ガス規制に適合し、高静粛性と 5.4L/100km の低燃費を実現した。

参考文献

- (1) Quigley, M., Seguelong, T. : Series Application of a Diesel Particulate Filter with a Ceria-based Fuel-Borne Catalyst, SAE paper 2002-01-0436
- (2) Nakatani, K., Hirota, S., Takeshima, S., Itoh, K., Dohmae, K. : Simultaneous PM and NOx Reduction System for Diesel Engines, SAE paper 2002-01-0957
- (3) McDonald, J., Bunker, B. : Testing of the Toyota Avensis DPNR at U.S. EPA-NVFEL, SAE paper 2002-01-2877
- (4) Walker, A. P., et al. : An Integrated SCR and Continuously Regenerative Trap System to Meet Future NOx and PM Legislation, SAE paper 2000-01-0188
- (5) Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., Aiyoshizaw, E. : Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Concept for Meeting Future Emission Standards, SAE paper 2001-1-0200
- (6) Hasegawa, R., Yanagihara, H. : HCCI Combustion in Diesel Engine, SAE paper 2003-01-0745
- (7) Akihama, K., Takatori, Y., Inagaki, K. : Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature, SAE paper 2001-01-0655
- (8) Shimazaki, N., Akagawa, H., Tsujimura, K. : An Experimental Study of Premixed Lean Diesel Combustion, SAE paper 1999-01-0181
- (9) Takeda, Y., et al. : Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion with Extremely Early Staged Fuel Injection, SAE paper 961163
- (10) Walter, B., Gatellier, B. : Development of the High Power NADITM Concept Using Dual Mode Diesel Combustion to Achieve Zero NOx and Particulate Emissions, SAE paper 2002-01-1744
- (11) Nandha, K. P., Abraham, J. : Dependence of Fuel-Air Mixing Characteristics on Injection Timing in an Early-Injection Diesel Engine, SAE paper 2002-01-0944
- (12) Kanda, T., Sono, H., et al. : Study on Euro IV Combustion Technologies for Direct Injection Diesel Engine, SAE paper 2004-01-0113

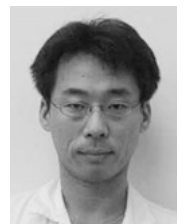
■ 著 者 ■



神田 智博



小林 慎一



松井 竜太



園比 呂志