

予混合圧縮着火ディーゼル燃焼の適用領域拡大

Research on Expansion of Premixed Charge Compression Ignition (PCCI) Diesel Combustion Operation Range

畑 野 潤 一*
Junichi HATANO
小 林 広 樹*
Hiroki KOBAYASHI

原 田 丈 也*
Takeya HARADA
松 井 竜 太*
Ryuta MATSUI

松 井 一 博*
Kazuhiro MATSUI

要 旨

ABSTRACT

ディーゼルエンジンは、燃焼を改善することにより NOx と Soot を低減させることが求められている。予混合圧縮着火燃焼 (PCCI) は、NOx と Soot を画期的に低減できる燃焼方式として期待されている。しかし、本燃焼方式は、エンジン負荷の増加に伴い着火遅れ期間の確保が困難になること、および燃焼騒音が増加するため適用できる運転領域が低回転低負荷に限定されていた。

本稿では、PCCI の適用運転領域を拡大するために、Exhaust Gas Recirculation (EGR) の冷却性能を向上させること、および低圧縮比化を試みた。その結果、欧州の NEDC モードおよび北米の FTP75 モードにおける使用運転領域をほぼ網羅するまで PCCI の適用領域を拡大できる可能性を示すことができた。

In the area of diesel engines, the reduction of soot and NOx emissions is demanded through the achievement of increased combustion performance. High expectations are placed on premixed charge compression ignition (PCCI) combustion as a combustion method that will achieve breakthrough reductions in NOx and soot emissions. However, the use of this combustion method is restricted to the low-speed, low-load range because it becomes challenging to realize an ignition delay and combustion noise increases as the engine load increases.

The research discussed in this paper attempted to expand the range of application of PCCI combustion by increasing exhaust gas recirculation (EGR) cooling performance and employing a low compression ratio. The results of the research indicated that it was possible to extend the application of PCCI combustion to virtually the entire operating range employed in the European NEDC and North American FTP75 modes.

1. ま え が き

世界規模で環境問題への関心が高まる中で、CO₂ 削減効果が大きく、かつ高い動力性能を有するディーゼルエンジンの需要がここ数年で欧州を中心に高まっている。

しかし、ディーゼルエンジンは大気汚染物質、特に Soot と NOx の低減が課題であり、今後の排出ガス規制の強化に対応するためには NOx 吸蔵還元触媒^{(1), (2)}や SCR システム⁽³⁾が有効と考えられている。ところが、後処理システムを付加すると製造コストの増加、車両重量の増加、尿素補充のためのインフラ構築等、経済的な負担の増加が避けら

れないため、可能な限り燃焼を改善することにより NOx と Soot を同時に低減する技術を確認することが必要である。

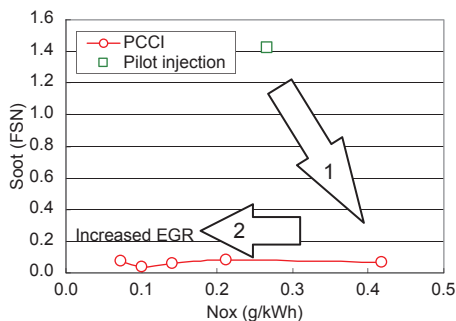
このような背景の中、PCCI は NOx および Soot を低減できる燃焼方式として、各自動車メーカーおよび研究機関において盛んに研究されている^{(4), (5)}。しかし、適用運転領域が低負荷域に限定されていることや過渡運転時の燃焼安定性の観点から実用化にはまだ多くの課題が残されている。

本稿では、PCCI の実用化にあたり課題の一つである低回転低負荷域に限定されていた適用運転領域を拡大し、広い範囲で NOx と Soot を低減する試みについて報告する。

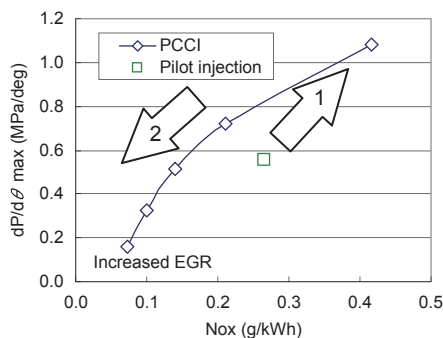
*四輪 R&D センター

2. 従来の PCCI 適用可能領域

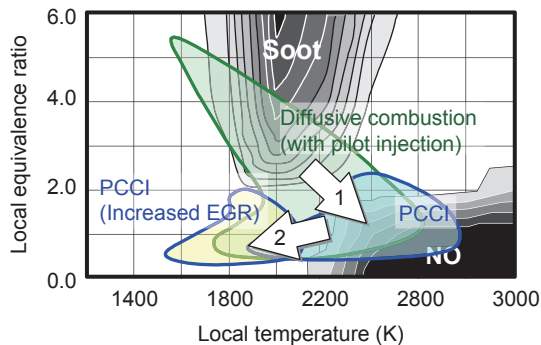
PCCI のメカニズムについて 1500 rpm, 25% Load の燃焼挙動を元に説明する。Fig. 1 に Pilot 噴射を用いた従来の拡散燃焼と PCCI を比較した結果を示す。Fig. 1 (a) には NO_x と Soot の排出挙動, Fig. 1 (b) には燃焼騒音 ($dP/d\theta$ max) の挙動を, そして Fig. 1 (c) には局所当量比と温度の分布を示す。PCCI は比較的早期に燃料を噴射することで着火遅れ期間を確保して燃料と空気の混合を促進し, 従来燃焼に比べて Soot の生成を抑制することができる。しかし, 着火時に当量比 1.0 近傍の混合気が増加することにより燃焼が急峻になり NO_x と $dP/d\theta$ max の増加を伴う (矢印 1)。そこで, EGR を大量に導入することにより急峻な燃焼を抑制し, NO_x と $dP/d\theta$ max を低減している⁽⁶⁾ (矢



(a) NO_x and soot emissions



(b) NO_x and $dP/d\theta$ max



(c) Local temp. and local equivalence ratio

Fig. 1 Comparison between diffusive combustion and PCCI on soot, $dP/d\theta$ max and Φ -T map

印 2)。このように低回転低負荷域においては $dP/d\theta$ max を上昇させることなく NO_x と Soot を同時に低減することが可能である。

しかし, エンジン負荷の増加および高回転化に伴い着火遅れ期間の確保が困難になる。また, 投入燃料量の増加に伴い当量比 1.0 近傍の混合気が増加することで, 燃焼速度が速くなり $dP/d\theta$ max が高くなるため, 適用運転領域の拡大は困難であった。Fig. 2 に北米の FTP75 モードおよび欧州の NEDC モードを走行した場合の使用運転領域を示す。グラフ上部の曲線は各回転における全負荷曲線を示したものである。上記の理由により PCCI はその適用領域が低回転低負荷の一部に限定されており, さらなる適用運転領域の拡大が望まれている。

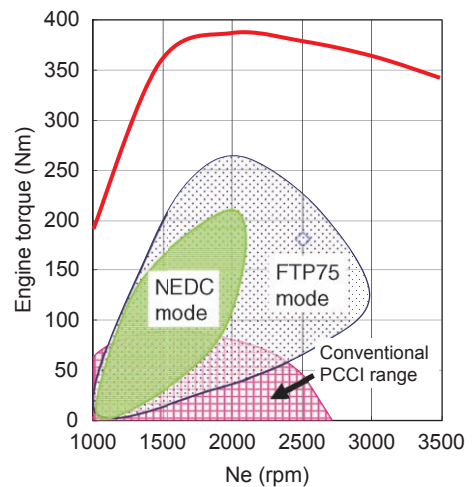


Fig. 2 Conventional PCCI combustion application range

3. PCCI 領域拡大へのアプローチ

前述のように PCCI の適用領域を拡大するためには着火遅れ期間を確保すること, および燃焼速度をコントロールすることが必要である。着火遅れ期間を確保するためには, 圧縮端温度を下げるのが効果的である。そこで, EGR クーラの冷却性能の向上, および低圧縮比化により着火遅れ期間を拡大し, EGR を増量することによる燃焼速度コントロールを試みた^{(6), (7)}。

4. 供試エンジン, 供試燃料, 実験条件

Table 1 に実験に使用したディーゼルエンジンの主要諸元を示す。基本骨格は 2.2 L 試作ディーゼルエンジンを使用した。実験条件は, FTP75 と NEDC の両モードをほぼ全域網羅するために代表的な運転条件として 1500 rpm, 140 Nm および 2500 rpm, 180 Nm とした。

Table 1 Test engine specifications

Cylinder configuration	In line 4
Bore × stroke (mm)	85 × 96.8
Displacement (cm ³)	2197
Compression ratio	17.2, 16.2
Valve train	DOHC 4 valves
Fuel injection system	180 MPa common rail
Nozzle type	7 holes 680 cm ³ /sec
Intake system	Turbocharged, inter-cooled system
EGR cooling capacity	3.0 kW or 6.3 kW at 2500 rpm 180 Nm
Fuel properties	Cetane number: 44 Sulfur: 11.5 ppm

5. 高回転高負荷領域への PCCI 領域拡大

5.1. EGR 冷却の効果

Fig. 3 に 2500 rpm, 180 Nm における吸気温度違いでの PCCI と拡散燃焼の $dP/d\theta$ を比較した結果を示す。拡散燃焼では Pilot 噴射によって主燃焼の燃焼速度を抑制することができるが、PCCI では燃焼速度が急峻になる。Fig. 3 において、シリンダ吸気温度が低下すると燃焼速度が緩慢になり、 $dP/d\theta$ max は低くなっている。Fig. 4 にシリンダ吸気温度と燃焼速度（燃焼速度の指標として質量燃焼割合

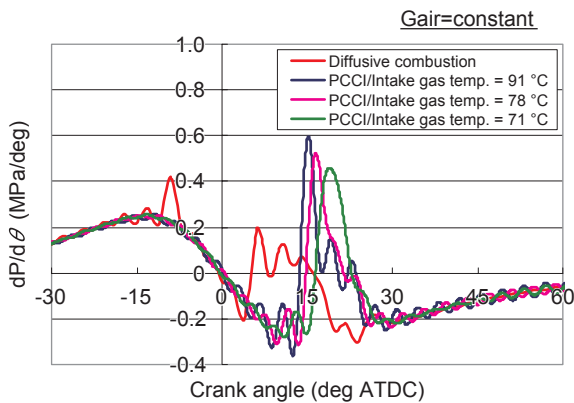
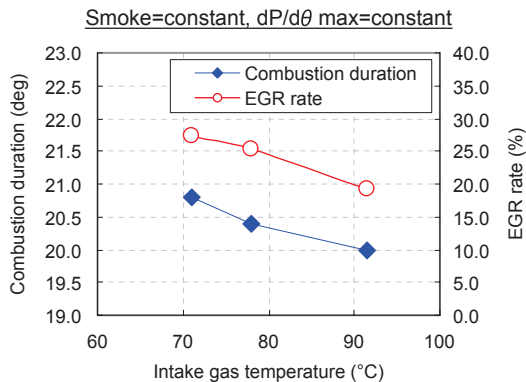
Fig. 3 Effect of intake gas temperature on $dP/d\theta$ 

Fig. 4 Effect of intake gas temperature on combustion duration and EGR rate

合 5 % から 90 % までの燃焼期間を用いる) および EGR 率の関係を示す。EGR クーラの冷却性能を向上させることで、筒内に導入される EGR の質量流量が増加したこと、および吸入ガス温度の低下に起因した着火遅れ期間（噴射終了から質量燃焼割合 5 % までの期間とする）の拡大に伴い Soot 排出量が低下するため、同一 Soot 排出量までさらに EGR を増加させることができたことにより、燃焼速度が緩慢になることがわかる。

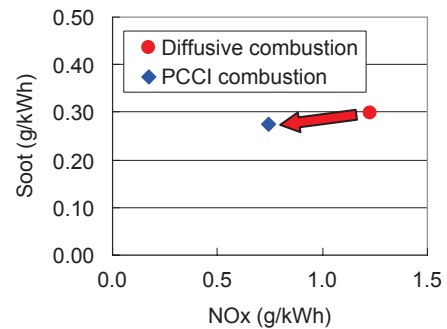
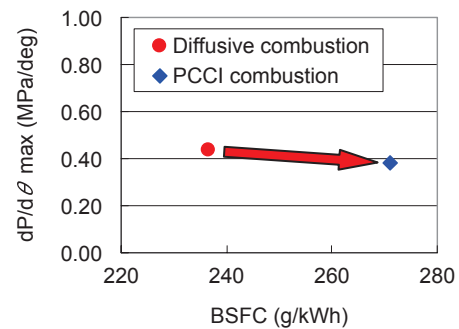
Fig. 5 に EGR を冷却した際の Soot と NO_x および燃費と $dP/d\theta$ max の関係を示す。PCCI の効果により同一 Soot での NO_x 排出量を 39% 低減できている。但し、 $dP/d\theta$ max の上昇を抑制するために噴射時期をリタードせざるを得ないため燃費の低下を伴う。

以上のことから、EGR 冷却性能向上は PCCI 適用領域を拡大するために有効な手法と考えられる。

5.2. 低圧縮比化

低圧縮比化によって圧縮端温度を低減することができるので、着火遅れ期間が拡大することが期待される。Fig. 6 に 2500 rpm, 180 Nm において圧縮比を変えたときの $dP/d\theta$ を示す。低圧縮比のほうが着火遅れ期間を確保できており、 $dP/d\theta$ max の低い緩慢な燃焼が実現できている。

Fig. 7 に 2500 rpm, 180 Nm における圧縮比と着火遅れ期間および EGR 率との関係を示す。また、Fig. 8 に低圧縮比化によるエミッションと燃費、 $dP/d\theta$ max の関係を示

(a) NO_x and soot emissions(b) BSFC and $dP/d\theta$ maxFig. 5 Effect of combustion pattern on emissions, BSFC and $dP/d\theta$ max

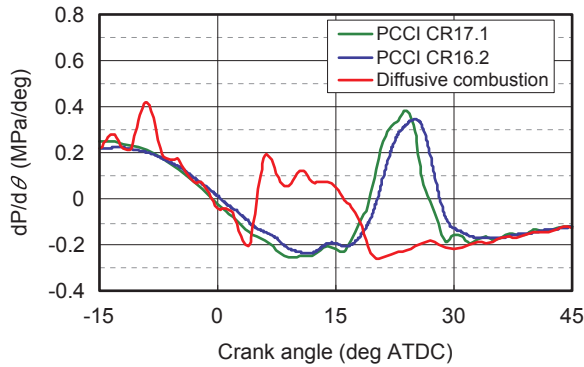
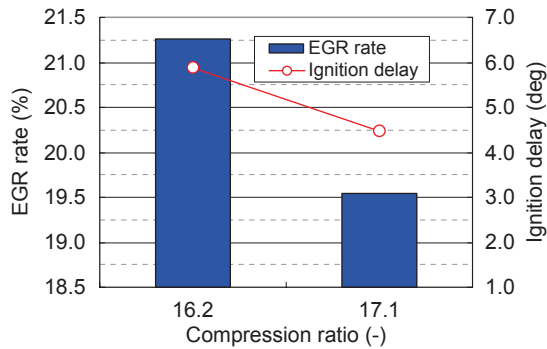
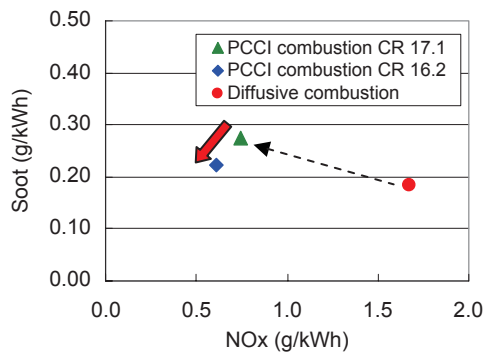
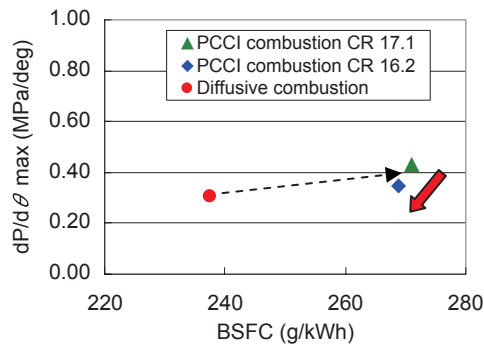
Fig. 6 Effect of compression ratio on $dP/d\theta$ 

Fig. 7 Effect of compression ratio on ignition delay and EGR rate



(a) NOx and soot emissions

(b) BSFC and $dP/d\theta$ maxFig. 8 Effect of combustion pattern and compression ratio on emissions, BSFC and $dP/d\theta$ max

す。圧縮比を下げると着火遅れ期間が拡大して燃料と空気の混合が促進され Soot 排出量が低減できている。これにより、同一 Soot 排出量まで EGR を増加させることができるため NOx と $dP/d\theta$ max を低減させることができる。

以上のことから、低圧縮比化も PCCI 適用領域を拡大するために有効な手法と考えられる。

6. 低回転高負荷領域への PCCI 適用領域拡大

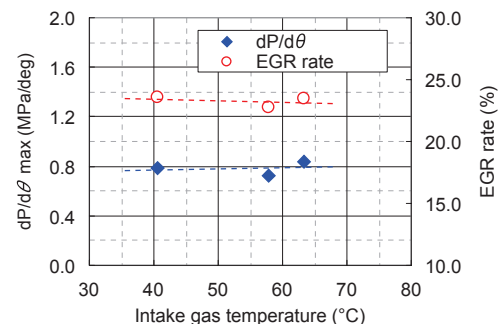
6.1. 低回転高負荷における PCCI 適用の課題

前述の手法により、2500 rpm, 180 Nm に代表される高回転高負荷領域まで $dP/d\theta$ max を上昇させることなく PCCI の適用領域を拡大し Soot, NOx のトレードオフが改善できる見通しが得られた。しかし、低回転高負荷領域は $dP/d\theta$ max の抑制が依然として難しい。Fig. 9 に 1500 rpm, 140 Nm におけるシリンダ吸気温度と EGR 率の関係を示す。EGR クーラの冷却能力を上げてても $dP/d\theta$ max はほとんど変わらず、EGR 率も微増するに留まる。

この理由の一つとして、低回転域ではピストンスピードが相対的に遅いので、単位クランク角度あたりに投入する燃料が多くなる高負荷領域ほど $dP/d\theta$ max が必然的に高くなり、燃焼が緩慢になりにくくなるという時間的な要素が考えられる。また、本研究に使用したターボチャージャでは、低回転高負荷領域において十分に過給できなかったため空燃比がリッチになりやすく、EGR の増加に対して Soot 排出量が顕著に増加する特性を有する。したがって、このような領域においては EGR を増量し緩慢な燃焼を実現することは困難であり、Pilot 噴射の適用が必要と考えられる。

6.2. Pilot 噴射を用いた燃焼改善

低回転高負荷領域において EGR 冷却性能の向上と低圧縮比化によって PCCI の領域拡大を図ったが、単段噴射では $dP/d\theta$ max の低減が困難である。この課題を解決するためには Pilot 噴射を付与することが最も効果的であるが、PCCI のように着火遅れ期間を十分確保できない上、高負荷領域での Pilot 噴射を伴う燃焼は EGR 率が高

Fig. 9 Effect of intake gas temperature on $dP/d\theta$ max and EGR rate

いほど Soot 排出量が多くなる。そこで、Soot 排出量を従来の Pilot 噴射よりも低減することができる近接 Pilot 噴射を採用し、Soot、NOx のトレードオフを改善することを試みた。

6.2.1. 近接 Pilot 噴射による Soot 低減メカニズム

Fig. 10 に 1500 rpm, 140 Nm における Pilot インターバルの変化に伴う熱発生率および噴射率を、Fig. 11 に NOx と Soot 排出量を示す。拡散燃焼時は Pilot 噴霧が主燃焼に先立って燃焼し、筒内の雰囲気温度および雰囲気圧力が上昇することによって主燃焼の着火が促されるのに対して、近接 Pilot 噴射では Pilot 噴霧の着火が主燃焼と重なるように着火する。しかし、主燃焼の着火時期は Pilot インターバルに因らずほぼ同じ位置であるため、近接 Pilot 噴射によって主燃焼の着火遅れ期間は拡大しない。にもかかわらず、Fig. 11 に示すように近接 Pilot 噴射を適用することで Soot 排出量は従来に比べて低減する。これは、Soot の低減メカニズムが 2 章で述べたように着火遅れ期間の拡大であることのほかにも存在することを示唆するものである。

ここで、その理由を解析するために 3D-CFD(KIVA-3V コード)を用いて解析をおこなった。結果を Fig. 12 および Fig. 13 に示す。Fig. 12 では各クランク角度における筒内の局所当量比分布が示されており、数値が高いほど燃料の占める割合が多く、数値の低下に伴い空気との混合割合が

増加し、均質化が進んでいることを表している。Pilot インターバルが 1500 μs の条件においては Pilot の燃焼が終了した後に主燃焼が起こっている様子がわかる。1000 μs においても同様の燃焼がみられるが、1500 μs に比べて局所当量比が高く分布しており、Fig. 11 に示した Soot 排出量の増加を裏付けている。350 μs では Pilot 燃焼の終了を待たずに主燃焼が続き、局所当量比は最も低い。

Pilot インターバルの違いで局所当量比に差が出る理由を解析するために、4 degATDC における筒内の既燃ガスを示す CO_2 濃度とその分布を計算し、Fig. 13 に示す。1500 μs に比べ 1000 μs は CO_2 濃度が高く分布も広範囲にわたっている。4 degATDC における CO_2 濃度は主燃焼開始近傍の筒内ガス組成の一部であるため、既燃ガスが多いと燃料と酸素の接触確率が下がり Soot の排出量が多くなるものと考えられる。したがって、350 μs まで Pilot インターバルを縮めると Pilot 燃焼と主燃焼が連続しているにもかかわらず、主燃焼開始時に存在する既燃ガスが少ないために Soot の排出が抑えられているものと考えられることができる。

このように、近接 Pilot 噴射により主噴霧への Pilot 既燃ガスの導入量が減少することで混合気の局所的なりッチ化が抑制され、Soot が低減したと考えることができる。

6.2.2. 近接 Pilot 噴射適用による効果

低回転高負荷領域において近接 Pilot を適用した結果に

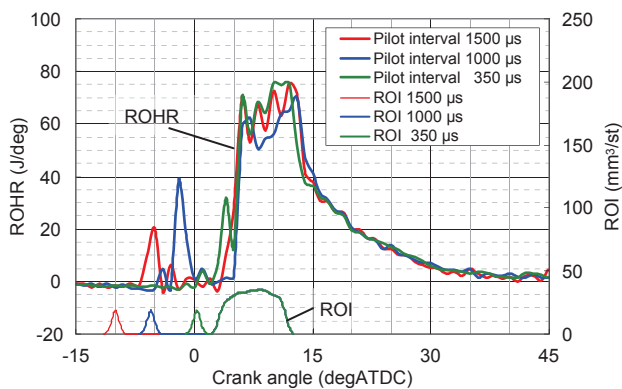


Fig. 10 Effect of pilot interval on rate of heat release and rate of injection

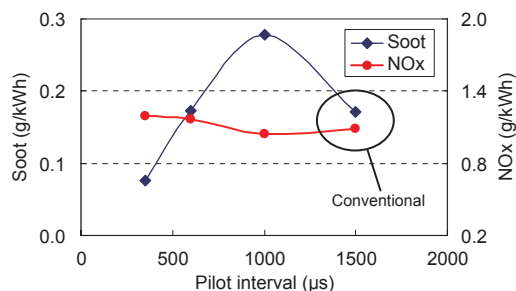


Fig. 11 Effect of pilot interval on NOx and soot emissions

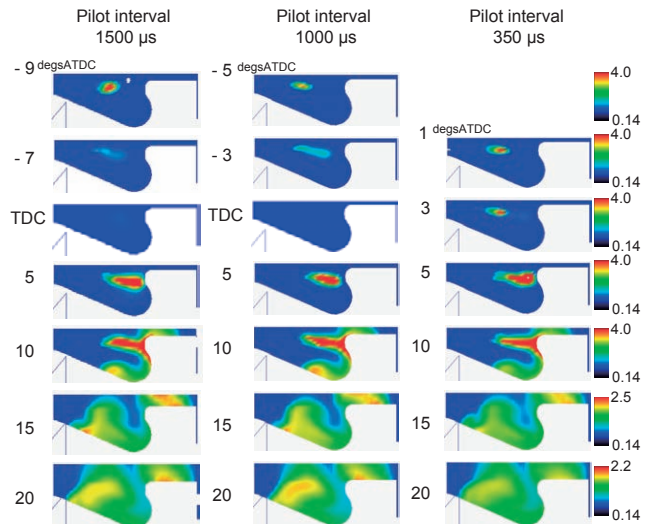


Fig. 12 Effect of pilot interval on local equivalence ratio in piston bowl

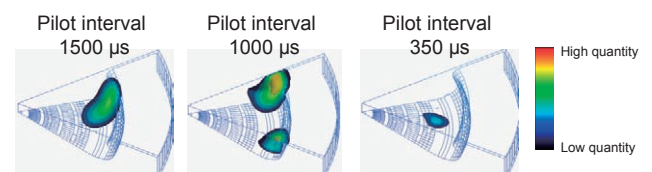


Fig. 13 Effect of pilot interval on CO_2 in piston bowl at 4 degATDC

ついて以下に示す。Fig. 14 に 1500 rpm, 140 Nm における各燃焼パターンでの熱発生率を比較する。また, Fig. 15 に燃費と $dP/d\theta$ max を示す。単段噴射の PCCI による熱発生率は噴射タイミングをリタードしても急峻な熱発生が抑えられず, $dP/d\theta$ max を満足することはできない。一方, 近接 Pilot 噴射による熱発生率は主燃焼の熱発生率が PCCI の約半分であり, $dP/d\theta$ max および燃焼速度を低く抑制できている。

Fig. 16 に Soot と NOx 量について示す。EGR 冷却の効果と近接 Pilot 噴射による低 Soot 燃焼の組み合わせにより, PCCI に劣るものの, 拡散燃焼に比べ Soot, NOx のトレードオフ改善が可能である。

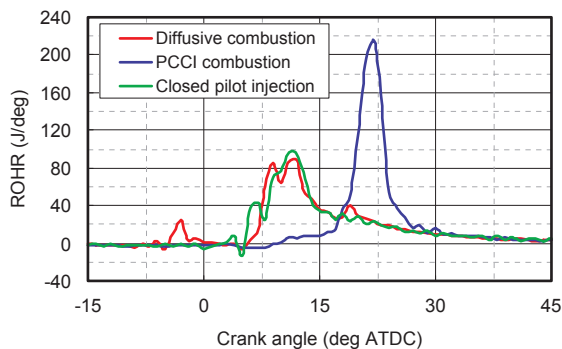


Fig. 14 Rate of heat release by each combustion pattern

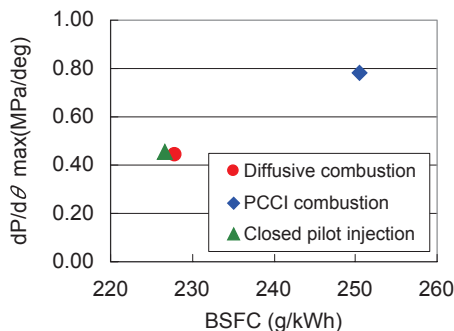


Fig. 15 Effect of combustion pattern on BSFC and $dP/d\theta$ max

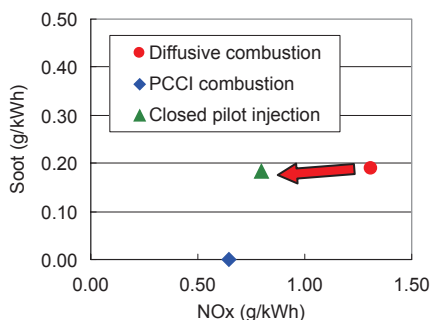


Fig. 16 Effect of combustion pattern on emissions

7. PCCI 領域拡大の効果

PCCI の適用領域拡大のためには着火遅れ期間を確保することが必要であり, これらを具現化する手法として, EGR 冷却性能の向上と低圧縮比化を試みた。定常状態において高回転高負荷領域まで $dP/d\theta$ max の上昇を伴わずに PCCI の適用範囲を拡大することができた。一方, 低回転高負荷領域は $dP/d\theta$ max を抑制することが難しいため, 上記の手法に加え近接 Pilot 噴射を適用させることで $dP/d\theta$ max を上昇させることなく Soot, NOx のトレードオフを改善することができた。なお, 本研究では取り組みなかったが, 低回転域で過給性能を向上させることにより, 低回転高負荷域まで PCCI の適用領域を拡大できた可能性も残されていると考える。

いずれにしても欧州の NEDC モードおよび北米の FTP75 モードにおける使用運転領域をほぼ網羅する領域で PCCI を適用できる可能性を示すことができた (Fig. 17)。

PCCI 領域拡大によって得られた Soot, NOx 排出量の低減効果と燃費影響について Fig. 18 に示す。これまで低回転低負荷領域に限られていた NOx および Soot の低減効果が高回転高負荷にまで及んでいることがわかる。

低回転高負荷では近接 Pilot 噴射を適用しているため, Soot の低減率は高回転高負荷領域に劣るものの, NOx 低減率は拡散燃焼に比べ約 30% 低減できている。

また, 高回転高負荷領域では燃焼音を抑制するために主噴射時期をリタードしていることから燃費性能の低下が認められるが, 低回転低負荷領域では燃焼が緩慢化するため主燃焼を進角することができるので燃費が改善されている。

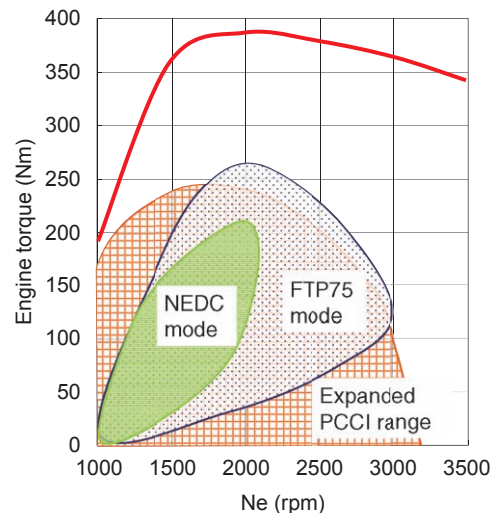


Fig. 17 PCCI combustion application range

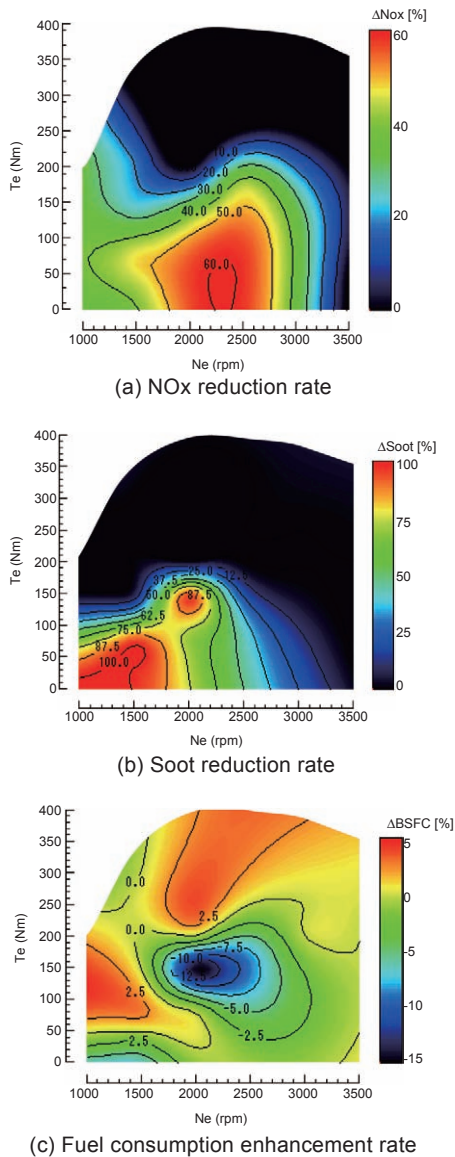


Fig. 18 Effect of PCCI combustion on emissions and fuel efficiency

8. まとめ

PCCIの適用領域の拡大に関して以下の知見を得た。

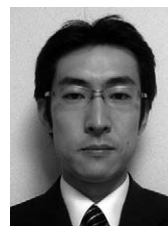
- (1) PCCIの適用領域拡大には着火遅れ期間の確保と燃焼速度のコントロールが必要であり、その具現化手法としてEGR冷却性能の向上と低圧縮比化が有効である。
- (2) EGRの導入が制限されるため燃焼速度のコントロールが難しい低回転高負荷領域は近接 Pilot 噴射による燃焼改善により、 $dP/d\theta \max$ を上昇させることなく Soot, NOx のトレードオフを改善することができる。
- (3) PCCIの適用領域拡大により、定常状態において NOx および Soot の同時低減を FTP75 および NEDC モードのほぼ全域まで拡大することができる可能性を示すことができた。

今後、実用化へ向けては過渡状態でのリアルタイムな燃焼制御技術の構築が必要である。

参考文献

- (1) Morita, T., Suzuki, N., Satoh, N., Wada, K., Ohno, H.: Study on low NOx emission control using newly developed lean NOx catalyst for diesel engines: SAE paper, 2007-01-0239(2007)
- (2) Wada, K., Suzuki, N., Satoh, N., Morita, T., Yamaguchi, S., Ohno, H.: Study on emission-reducing method with new lean NOx catalyst for diesel engines: SAE paper, 2007-01-1933(2007)
- (3) Murata, Y., Komiya, R., Kaneko, A., Daisho, Y., Suzuki, H., Ishii, H.: A study on the improvement of NOx reduction efficiency for a urea SCR system (Third report) - High NOx reduction efficiency mechanism at transient operation with low exhaust gas temperatures: JSAE paper, 20085846(2008)
- (4) Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., Aiyoshizawa, E.: Ultra-Clean combustion technology combining a low-temperature and premixed combustion concept for meeting future emission standards: SAE paper, 2001-01-0200(2001)
- (5) Akihama, K., Sasaki, S.: Mechanism of smokeless rich diesel combustion by reducing temperature: SAE paper, 2001-01-0655(2001)
- (6) Kanda, T., Hakozaki, T., Uchimoto, T., Hatano, J., Kitayama, N., Sono, H.: PCCI operation with early injection of conventional diesel fuel: SAE paper, 2005-01-0378(2005)
- (7) Kanda, T., Hakozaki, T., Uchimoto, T., Hatano, J., Kitayama, N., Sono, H.: PCCI operation with fuel injection timing set close to TDC: SAE paper, 2006-01-0920(2006)

著者



畑野潤一



原田丈也



松井一博



小林広樹



松井竜太