

スーパークリーンディーゼルエンジンの開発プロジェクト（第2報）

- これまでの成果概要と実用化に向けた課題 -

環境研究領域 石井 素、鈴木 央一、川野 大輔、後藤 雄一
(株)新エィシーイー 青柳 友三

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、大都市地域において改善すべき状況にある浮遊粒子状物質(SPM)および窒素酸化物(NOx)の排出への寄与が依然として大きいとされており、平成17年4月には中環審より平成21年規制についての答申が出され、非常に厳しい規制値が示されている⁽¹⁾。

輸送手段としての大型車は必要不可欠なものであり、軽油を燃料とするディーゼルエンジンから代替燃料を燃料とするエンジン等に置き換えられるまでにはまだ相当の時間を要すると考えられる。したがってディーゼルエンジンの排出ガス低減は緊急を要する重要な課題である。

平成14年度より平成16年度まで、次世代低公害車開発促進プロジェクトの一環としてスーパークリーンディーゼルエンジン(以下、「SCD」という)の開発が進められてきた。本開発促進プロジェクトは、ポスト新長期規制以降の技術的な方向性を示すことなど、成果の波及効果が大きいものと期待される。

本報告においては、SCDの開発を通して得られた成果の概要と今後の課題等について報告する。

2. 開発のコンセプト

次世代低公害開発促進プロジェクトでのSCDは、

軽油を燃料としたディーゼルエンジンで、平成22年以降に実用化されると予測される各種要素技術により可能な限りの低エミッションを実現しようとするものである。

排出ガスの目標については、D13モードで後処理装置の浄化率を80%と仮定し、

NOx 0.20 g/kWh (新長期規制値の1/10レベル)

PM 0.013 g/kWh (新長期規制値の1/2レベル)

を目標として設定した。開発においては限られた予算の中で最大限の開発効果を得られるように開発対象とする要素技術を選択し、特にエンジンアウトのエミッション低減に着目し、NOxは1.0 g/kWh、PMについては0.07 g/kWhを目標とした。本目標値達成のためには、個々の要素技術を磨き上げることが必要となる。Table 1に開発試作したエンジンの諸元、Fig.1にそのエンジンの概観を示す。車両総重量25tの大型車への搭載を想定して設計したものである。

上記目標達成のための、エンジン燃焼コンセプトとしては、低負荷領域ではHCCI(予混合圧縮着火燃焼)によりNOxを改善し、高負荷領域では高過給と多量EGR(排気再循環)によってNOxとPMの低減を図った。SCDではEGRを全負荷まで用いること

Table 1 Engine specification

Bore [mm]		122	
Stroke [mm]		150	
Displacement [L]		10.52	
Type		L6	
Target	Max Output	Engine Speed [rpm]	2000
		Output [kW]{PS}	298{405}
		BSFC [g/kWh]	190
	Max Torque	Engine Speed [rpm]	1400
		Torque [Nm]{kgm}	1842{188}
		BSFC [g/kWh]	1805



Fig.1 Picture of SCD

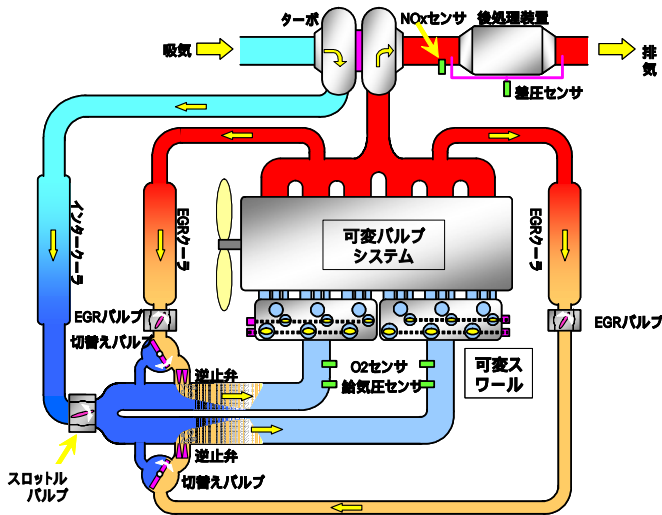


Fig.2 Schematic of SCD

とした。この燃焼コンセプト実現のためにSCDに盛り込まれた各種要素技術は、高過給ターボチャージャー、電子制御高圧燃料噴射装置、可変バルブタイミング機構、高効率EGRクーラー、電子制御EGRバルブ、可変スワール機構、吸気絞りによる吸入空気量コントロールである。エンジンシステムの概要をFig.2に示す。多量EGRを用いるためEGRガスの十分な冷却を考慮し、6気筒を3気筒ずつに分割しEGRの経路を2系統設けている。また、ピストン等も高過給に耐えられるものを投入した⁽²⁾。

3. 実験装置

SCDの排出ガス等の評価実験は交通安全環境研

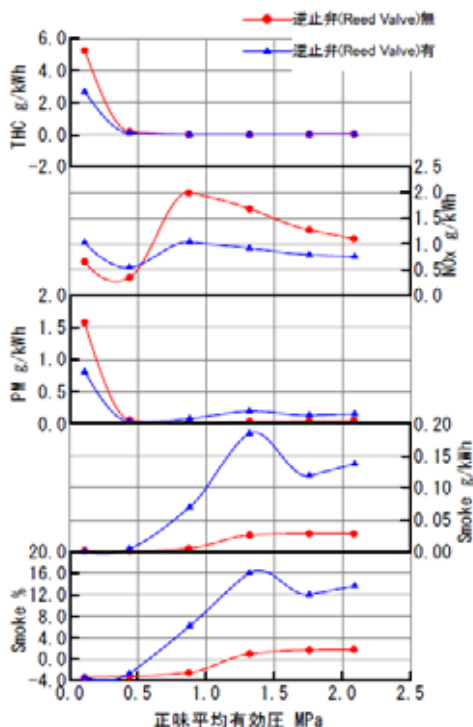


Fig.3 Effect of reed valve (1200rpm 60%)

究所の大型ディーゼルエンジン実験棟において行った。実験に当たっては、エンジン計測システム等の改造を施した。また、前述のようにSCDは高負荷、高過給下においてもEGRを使用するため、分析計に関してもこれらの条件での給排気のCO₂計測ができるように、4bar(ゲージ圧力)まで対応できる高圧対応型分析計を使用した。また、実験棟の希釈トンネルの容量が不十分であったため、PMはマイクロトンネルにより測定し、各種排出ガスは直接測定法を採用することとした。

4. 実験結果および考察

SCDにおいては、前述のように多くの新しい機構を盛り込んでおり、排出ガス目標達成のためにはそれらの最適化が必要となる。しかしながら、多気筒エンジンにおいては、排気圧力の変化が過給機の仕事およびEGR率双方に影響するなど、1変数の影響が多岐に及ぶため解析は容易ではない。本報では、いくつかのパラメータについて、PMを増加させることなくNO_xを極限まで低減することを試みた結果を示す。

4.1. 逆止弁(リードバルブ)の影響

SCDでは、吸気圧力が高い運転領域でも排気の脈動によりEGRガスを吸気側に環流できるようにFig.2に示したように逆止弁を設けている。VGT(Variable Geometry Turbo、可変ノズルターボ)のタービンノズル開度および燃料噴射圧力の排出ガス等への影響

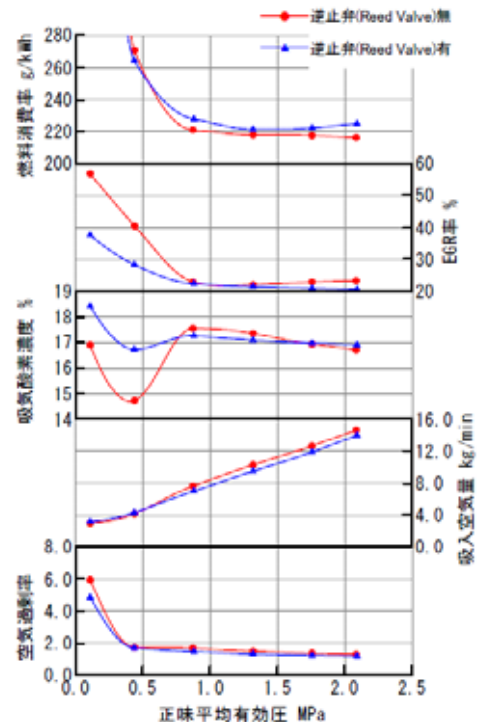


Fig.4 Effect of reed valve (1200rpm 60%)

を実験後⁽³⁾、逆止弁の影響について実験を行った。Fig.3 に、エンジン回転数 1200rpm において、燃料噴射時期を上死点、EGR バルブを全開とし、逆止弁を用いた場合において、負荷を変化させた場合の THC、NOx、すすの排出率、すす濃度の変化を示す。Fig.4 には同じく燃料消費率、EGR 率、吸気酸素濃度、吸入空気量、空気過剰率を示す。BMEP (正味平均有効圧力) 0.88MPa 以上では、逆止弁がある場合の吸入空気量が少ないことから、EGR 環流ガスを大きくすることができることがわかる。これより低負荷領域では、逆止弁がかえって抵抗となり EGR 環流ガス量は低下する。これを大きくすることができる領域については、すすは増加するものの NOx を低減できる。

Fig.5 には、エンジン回転数 1200rpm(60%)、トルク 1343Nm(負荷率 80%)において、逆止弁使用時に VGT タービンノズル開度を变化させた場合の、NOx 排出率に対する VGT タービンノズル開度、燃料消費率、THC 排出率、PM 排出率、すすの排出率、すすの濃度を示した。なお、すすの排出率は計算により求められたものであり⁽³⁾、VGT タービンノズル開度は全開を 0、全閉を 800 とした相対的な値である。

また、Fig.6 に NOx 排出率に対する EGR 率、吸気酸素濃度、タービン入口圧力、給気圧力、吸入空気量、空気過剰率を示す。なお、図中の圧力はゲージ圧とな

っている。

Fig.5 において、逆止弁有無の条件で同一 NOx 排出率の場合を比較すると、逆止弁を使用することにより、タービンノズル開度を約 730 から約 710 に開けることが可能となっている。このとき、Fig.6 に示すように、逆止弁を使用した場合は使用しない場合に比べて、タービン入口圧力が約 15kPa 低減になっているのに対して給気圧力の低下は約 4kPa に収まっている。タービン入口圧力の低下の方が大きいにもかかわらず、NOx を同一に保つために十分な EGR が行われていることから、これは排気脈動を利用して EGR ガスの環流が行われていることによると考えられる。また、同様にこの条件においては、PM 排出率についても逆止弁のない場合と同レベルに保つことができた。これは、吸入空気量は減少するものの PM 排出率が極端に悪化するほどではなく、十分に確保されているためと考えられる。

4.2. スワールの影響

燃料噴射時期を TDC、EGR バルブ全開とした条件においての可変スワール試験を行った。スワールについては、Fig.7 に示すように、2 つ吸気ポートのうちの 1 つを 2 分割し、計 3 つとなるインテークマニフォールドのブランチ 2 つに設けたバタフライバルブの開度により可変スワールを可能とした⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

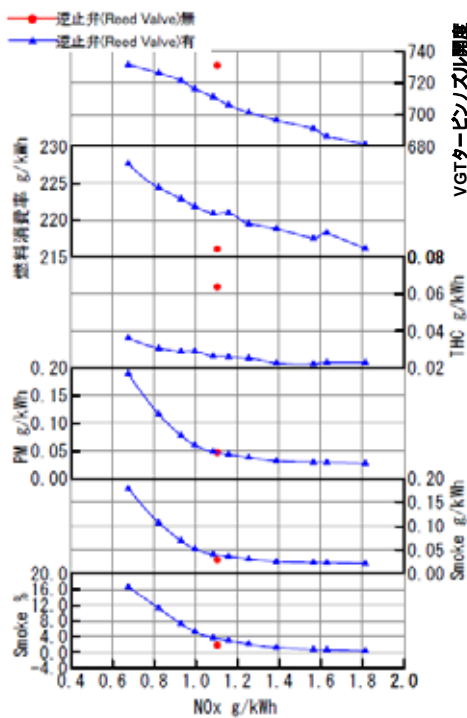


Fig.5 Effect of reed valve and VGT (1200rpm 60%, 1467Nm 80%)

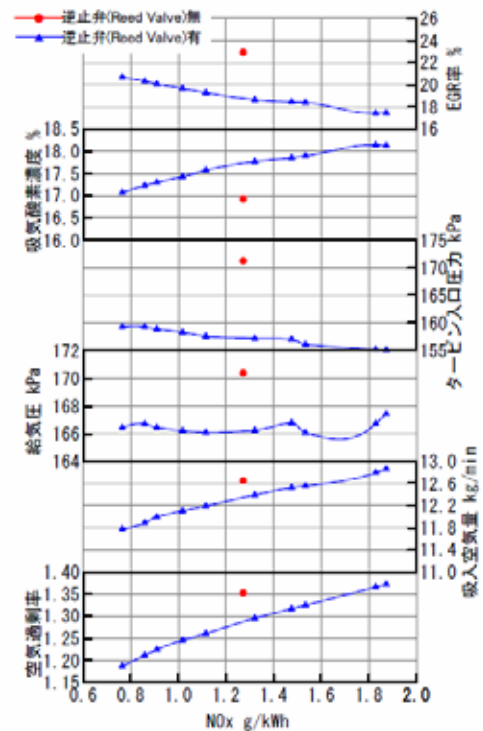


Fig.6 Effect of reed valve and VGT (1200rpm 60%, 1467Nm 80%)

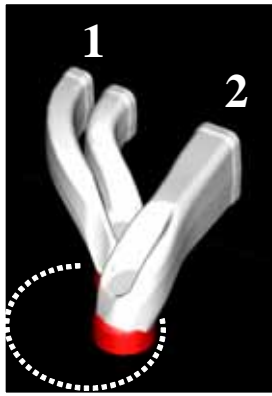


Fig.7 Variable swirl valves

実験は、まずスワールバルブ 2 を 20%ずつ閉じ、次にスワールバルブ 2 が全閉の状態にしてスワールバルブ 1 を 20%ずつ閉じた。これらバルブ開度は全開が 100%、全閉が 0%である。

Fig.8 に、エンジン回転数 1200rpm(60%)、トルク 1030Nm(60%)のときの、スワール比に対する、空気過剰率、燃料消費率、THC 排出率、NOx 排出率、PM 排出率、すすの排出率、すす濃度を示す。また、Fig.9 には同様に横軸にスワール比をとり、スワールバルブ 2 の開度スワールバルブ 1 の開度、吸気酸素濃度、吸気温度、タービン入口温度、タービン膨張比、コンプレッサ圧力比、吸入空気量を示す。なお、ここでのスワール比は、スワール比 1, 3, 9 の実測結果と各

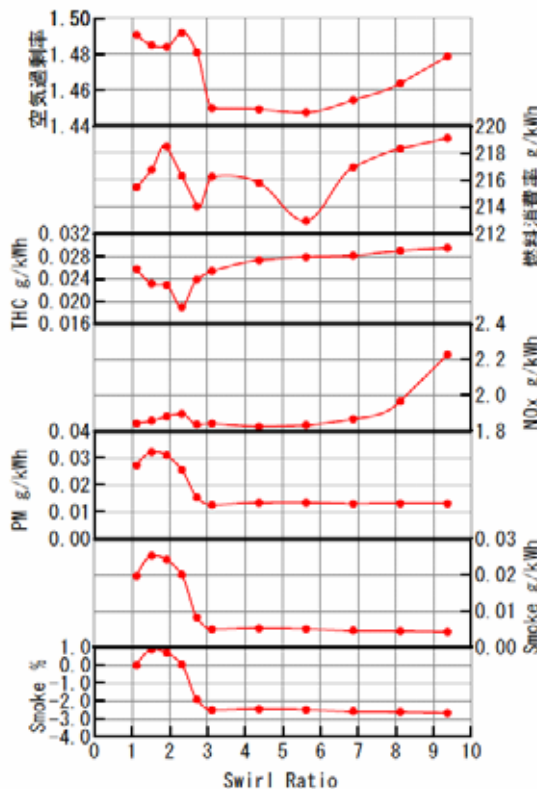


Fig.8 Effect of swirl ratio (1200rpm 60%, 1100Nm 60%)

スワールバルブの開度から比例計算で求めたものである。両図よりスワールバルブ 2 を全閉にしたスワール比 3 においてはすすが改善される上に、NOx 排出率の悪化は認められない。すすが改善されるのは、スワール比 3 では吸入空気量若干が低下するが、スワール比が大きくなることにより燃料噴霧と空気との混合が促進されたためと考えられる。スワールバルブ 1 および 2 を全閉にしたスワール比 9 においては、すすの発生は見られず、NOx 排出率および燃料消費率が悪化した。燃料消費率が悪化は、2つのスワールバルブの両方を閉じることにより、吸排気の仕事量が大きくなり、タービン入口温度が上昇およびコンプレッサ圧力比および吸入空気量が増大したため、強いスワールのためすすの発生がないと考えられる。

Fig.10 にスワール比 1, 3, 9 それぞれの筒内圧波形および熱発生率等を示す。スワール比を大きくしていくことで燃焼期間が長くなる。このことも、スワール比 9 においてタービン入り口温度が上昇する一因と思われる。

4.3. 絞り(スロットル)の影響

燃料噴射時期を TDC、EGR バルブ全開とし、VGT タービンノズル開度 615、燃料噴射圧力を 250 MPa とした条件で、空気過剰率を 1.4 よりも高く保ち吸気

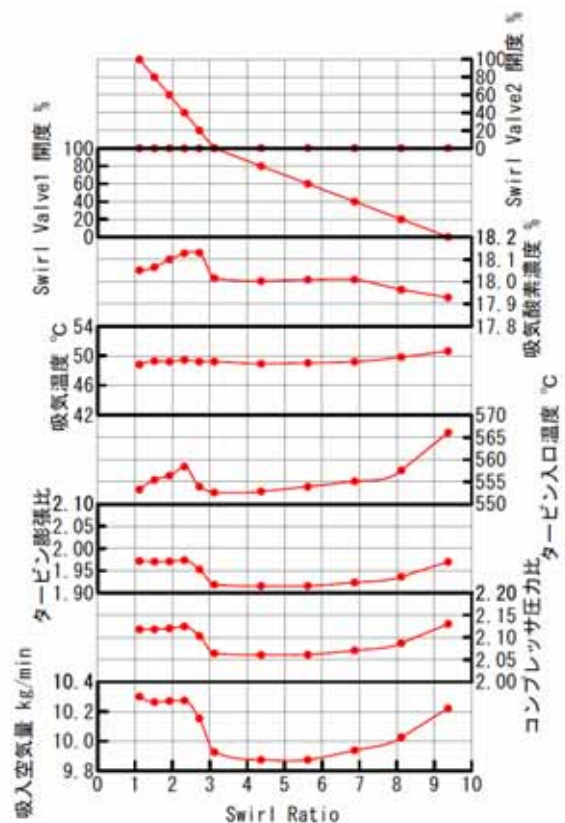


Fig.9 Effect of swirl ratio (1200rpm 60%, 1100Nm 60%)

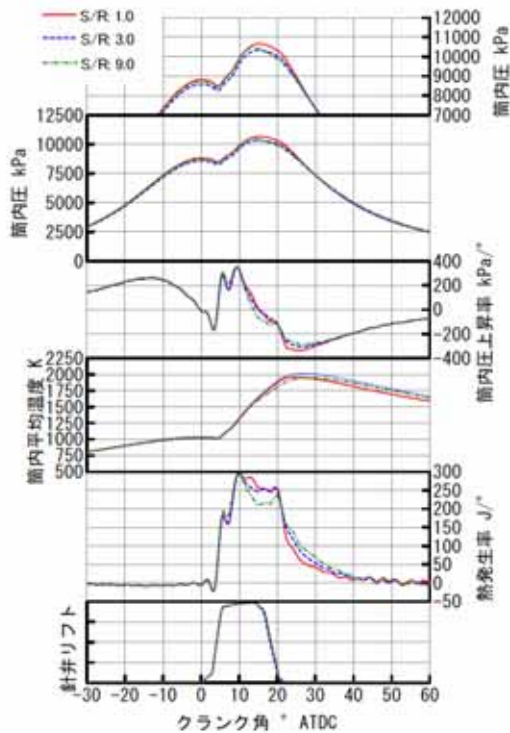


Fig.10 Effect of swirl ratio
(1200rpm 60%, 1100Nm 60%)

絞り試験を実施した。吸気絞りは、EGR を吸気側に還流する部分より上流にあるスロットルバルブ開度を20%ずつ閉めることで行った。

Fig.11 に、エンジン回転数 1200rpm(60%)、トルク 733Nm(40%)のときの、吸入空気量に対する、EGR 率、空気過剰率、燃料消費率、THC 排出率、NOx 排出率、PM 排出率、すすの排出率およびすす濃度を示す。吸気を絞ることにより、吸入空気量の減少と同時に EGR 率が上昇する。NOx の排出量は吸気を絞ることによって減少するが、燃料消費率は、吸気を絞ることで吸排気仕事の増加により悪化する。PM と NOx に着目すると、空気過剰率が 1.45 まで下げることにより、PM を悪化させることなく NOx を低減することが可能である。

4.4. 噴射時期の影響

軽負荷における THC の排出率の低減と燃費消費率の向上を図るために、燃料噴射時期を進角し、この進角による NOx の排出量増加を、VGT タービンノズル開度を閉める方向に設定して実験を行った。これにより、EGR 率を増加させて NOx と PM のトレードオフ関係の改善を目指した。

Fig.12 に、エンジン回転数 1200rpm(60%)、トルク 367Nm(20%)のときの NOx 排出率に対する、EGR 率、吸気酸素濃度、空気過剰率、燃料消費率、THC 排出率、PM 排出率、すすの排出率およびすす濃度につ

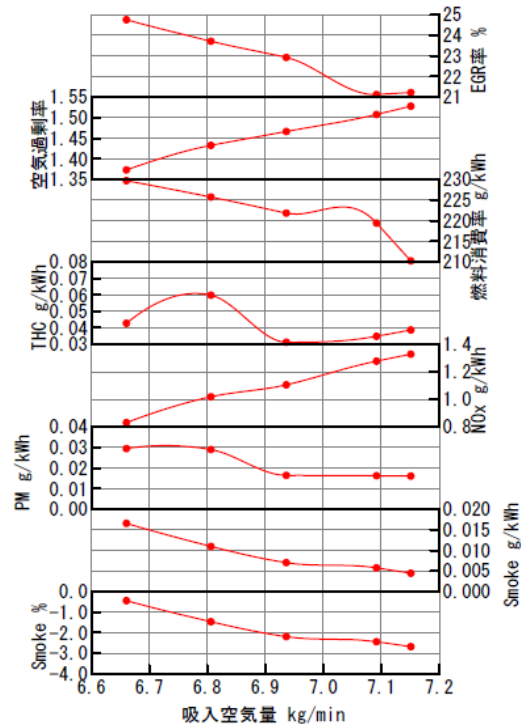


Fig.11 Effect of throttle valve
(1200rpm 60%, 733Nm 40%)

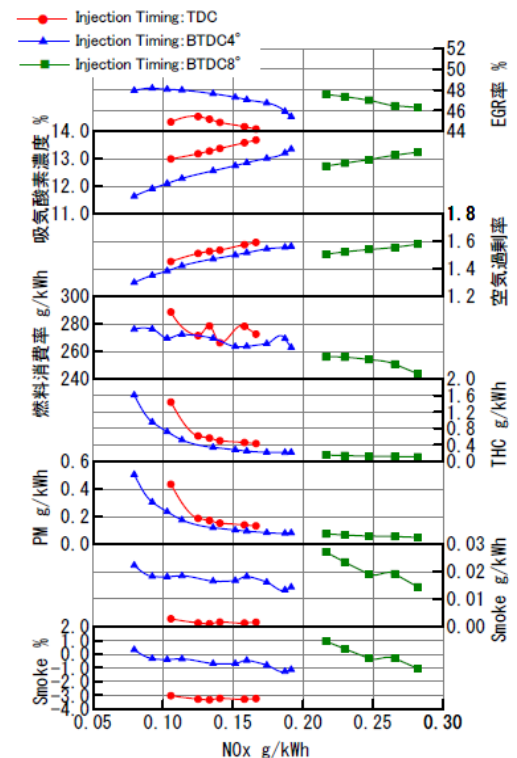


Fig.12 Effect of start of fuel injection
(1200rpm 60%, 367Nm 20%)

いて示す。燃料噴射時期は TDC をベースとし、BTDC4°、BTDC8°に進角させた。

噴射時期を BTDC4°に進角した場合、燃料消費率、THC 排出率および PM 排出率が改善される。EGR ガス量を増加することで NOx とのトレードオフ関係の

の改善が可能である。しかし、噴射時期を BTDC8° 間で進角した場合には NOx の増加が大きく、トレードオフ関係の改善を図ることができない。

4.5. 排出ガス実験結果 (D13モード)

Fig.13 に、これまで述べてきた各種燃焼制御因子を変化させて D13 モード運転をした場合の NOx および PM の値を示す。

VGT のタービンノズル開度の制御のみでは、ノズル開度を絞った場合に吸入空気量および吸気酸素濃度が減少し、NOx 減少のメリットより、PM 増加のデメリットの方が大きくなる。次に、逆止弁を用いた場合には、VGT のタービンノズル開度を最適化することによりタービンノズル開度の制御のみより PM の増加を抑えることができる。さらに、スワール比を適切に大きくすることにより、気筒内での空気と燃料との混合を促進されて NOx の排出量は同等で、PM の排出を低減されることができる。これに加えて、吸気を絞ることにより EGR 率を適切に増加させることができ、PM の悪化を抑えつつ、NOx の低減が可能である。また、軽負荷において燃料噴射時期をある程度の進角することは、NOx と PM のトレードオフ関係改善に有効であるという結果が得られた。最終的には、VGT のタービンノズル開度および EGR バルブの開度を最適化することにより、NOx が 0.98 g/kWh、PM が 0.068 g/kWh のまで低減することができた。

5. 今後の課題

以上の実験により、高過給と広域多量 EGR 等を組み合わせることによって、定常の条件においてはプロジェクト開始時と比較しても大幅な排出ガス低減の方向性を示すことができた。

しかしながら、本報告には示さなかったが、高負荷においては燃料噴射時期を進角することにより過給機の仕事量が十分に得られず、すすの発生する運転条件が存在した。

また、平成 17 年 10 月より新長期規制が開始され、試験モードがより実車走行状態を反映した JE05 モードのトランジェントモードに移行する。SCD は定常モードにおいては大幅な排出ガス低減を達成することができたが、トランジェントモードにおいては、高過給、多量 EGR を用いた場合に、負荷の急変時の過給機のレスポンスの遅れ等により吸気管内における酸素濃度が低下し、すすが発生する場合が考えられる。したがって、今後は吸気内酸素濃度をフィー

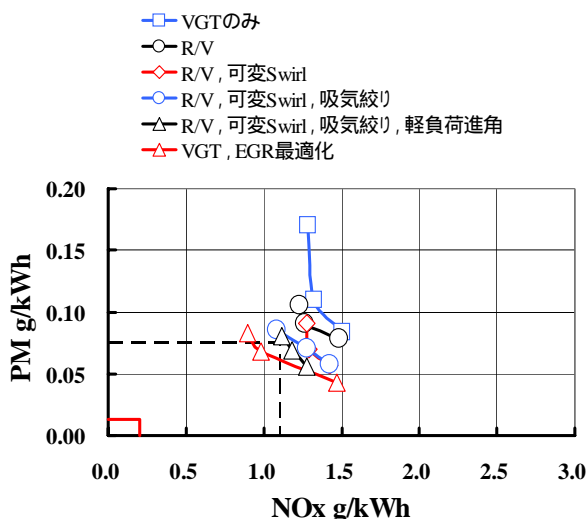


Fig.13 Results of NOx and PM (Japanese 13mode) ドバック要素とした VGT タービンノズル、EGR のクローズドループ制御を行った場合における NOx およびすすの改善効果等の把握が必要となる⁽⁶⁾。

6. まとめ

平成 14 年度より平成 16 年度まで 3 年に次世代大型低公害車開発促進プロジェクトの一つであるスーパークリーンディーゼルエンジンの開発の成果について報告した。

ディーゼルエンジンに、各種の磨き上げられた要素技術を盛り込むことにより、定常状態ではあるがプロジェクト開始当初は不可能と思われたエンジンアウトの排出ガスレベルを達成することができた。

今後の課題については、平成 17 年度から 3 年計画で開始された次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクトにおいて解決策を見いだしていく計画である。

参考文献

- (1) 環境省中央環境審議会、「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について(第八次答申)」, 2005 年 4 月.
- (2) 長田他、自動車技術会学術講演会前刷集 No.137-05, pp.1-6, 2005.
- (3) 三沢他、自動車技術会学術講演会前刷集 No.23-05, pp.7-12, 2005.
- (4) 三沢他、自動車技術会学術講演会前刷集 No.79-04, pp.13-18, 2004.
- (5) 石井他、平成 16 年度交通安全環境研究所研究発表会講演概要, pp23-28, 2005.
- (6) 小林他、自動車技術会学術講演会前刷集 No.133-05, pp.13-18, 2005