

大型DMEトラックの開発プロジェクト（第1報）

- プロジェクトの概要と開発状況 -

環境研究領域 佐藤 由雄 高柳 智光 李 晟旭 鈴木 央一 安 乗一
日産ディーゼル工業株式会社 中村 明 土屋 孝幸 戸田 憲二

1. はじめに

大都市地域を中心にSPM, NO₂等による大気汚染は依然として厳しい状況にある。特に、沿道汚染に関しては自動車排ガスの影響が大きい。自動車から排出されるNO_xとPMを車種別にみるとディーゼル車の割合が高く、なかでも普通トラックの寄与率が高い。(図1) しかも、普通トラックの保有台数は全体の数パーセントにしかすぎず、その中でも大型車の割合が高いため、このクラスの排出ガス対策が重要である⁽¹⁾。これまで、重量車用ディーゼルエンジンに対しては排出ガス規制が段階的に強化され、2005年新長期排出ガス規制後の新たな規制強化についても検討が始まっている。同時に、低公害車の導入も必要とされているが、大型低公害車の開発には開発コストが大きい、市場が限定的などの理由で小・中型トラックのように低公害車の開発・実用化が進んでいない。そのため、大型車分野については新燃料や新技術の積極的な活用を含め、排出ガスがゼロまたはゼロに近い次世代型の低公害車の技術開発が急務とされている⁽²⁾。

こうした状況を背景に、国土交通省は2002年度より3ヶ年の計画で次世代低公害大型車の開発事業に着手し、そのプロジェクトの一環としてジメチルエーテル(DME)を燃料とする大型トラックの開発が開始された。本稿では現在進められている大型DMEトラックの開発プロジェクトの概要と現在(2004年9月)までの開発状況について報告する。

2. 開発プロジェクトの概要

2.1. 開発の経緯

2001年5月、国土交通省では「環境にやさしい自動車」の開発・導入・普及に関する総合戦略を策定

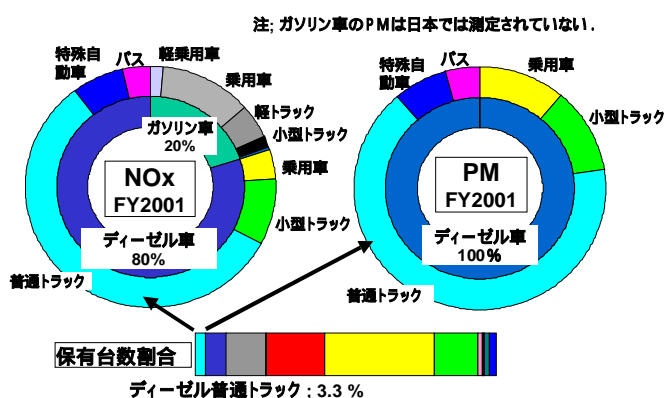


図1 車種別のNO_x, PM寄与率

するため「環境自動車開発・普及総合戦略会議」を設置した。同年12月、同会議内に設けられた「次世代低公害車ワーキンググループ」の報告書⁽³⁾を受け、国土交通省は現行の大型ディーゼル車に代替可能で排出ガス性能目標としてNO_xについては「ゼロに近い」レベル(2005年新長期排ガス規制値の1/10レベル以下)、PMについては排出「ゼロ」または「ゼロに近い」レベルを目指した次世代の大型低公害車の早期開発・実用化を促進することを決定した。2002年4月には「次世代低公害車開発促進プロジェクト」を発足させ、開発途上にある次世代低公害車の5車種⁽⁴⁾を対象として、2002年度から2004年度の3ヶ年で、独立行政法人交通安全環境研究所を中核的研究機関として、産官学の連携により次世代の低公害車両等の開発を行うとともに、安全上・環境保全上の技術基準及び評価方法を策定し、次世代低公害車の実用化・普及のための環境を整備する計画が決定された。

ジメチルエーテル(DME)を燃料とする自動車はディーゼル車と同等の燃費が見込まれかつ黒煙を全く排出しないという特徴から次世代低公害車の

候補として選ばれ、2002年7月、他の4車種と並んでその開発がスタートした。

2.2. 実施体制と開発目標

開発車種は長距離・高速輸送用の大型トラック（積載量10トン）と決定され、エンジン及び車両の設計・製作を日産ディーゼル工業（株）が行い、交通安全環境研究所では排気後処理システムの開発、試作エンジンの性能評価、車両試験及び全体のとりまとめを行う。プロジェクトの排出ガス低減目標（JE-05試験での評価）及びエンジン・車両性能目標を表1に示す。排出ガス低減目標は2005年のプロジェクト終了時点でのプロトタイプ車の値であり、NOxは新長期規制値の1/4、PMについてはほぼゼロのレベルである。また、2010年以前の可能な限り早い時期にNOxについては新長期規制値の1/10レベルに低減することが戦略目標とされている。

表1 開発目標

排出ガス性能	NOx	0.5g/kWh以下	新長期排出ガス規制値の1/4以下
	NMHC	0.17g/kWh以下	新長期排出ガス規制値
	CO	2.22g/kWh以下	新長期排出ガス規制値
	PM	0.0g/kWh(ほぼゼロ)	黒煙排出なし
エンジン性能	燃費	ベースのディーゼルエンジンと同等レベル	
車両性能	出力	ベースのディーゼルトラックなみを確保することを目指す	
	航続距離	ベースのディーゼルトラックなみを確保することを目指す	
	積載量	ベースのディーゼルトラックなみを確保することを目指す	

排出ガスの評価試験モードは [JE-05モード] (過渡運転)
 排出ガス低減目標は2005年のプロジェクト終了時点でのプロトタイプ車の値
 戦略目標としては2010年以前の可能な限り早い時期にNOxについては新長期規制値の1/10レベルに低減

2.3. エンジン性能開発とNOx低減の考え方

本プロジェクトで開発するDMEエンジンは、大型で長距離を走行する車両に搭載するものである。そのため、ベースエンジンとしては、排気量6.9L、直列6気筒、ターボインタークーラ式ディーゼルエンジンを使用した。開発するDMEエンジンの諸元を表2に示す。

エンジン性能開発においては、DMEに適した専用燃料噴射装置の開発と燃焼改善を行い、ディーゼルエンジンとしての高効率性を活かして低燃費の実現をはかる。また、DMEは燃焼時に黒煙を生成しないことに加えて、燃料中に硫黄分を含まない。こうした特長を活かして、大量EGRと高性能NOx触媒⁽⁵⁾を

適用ことで大幅なNOx低減をはかる。NOx低減の考え方を図2に示す。

表2 開発目標

型式	FE6T改
種類	4サイクル水冷
弁形式	OHV式(吸気弁1、排気弁1)
燃料供給方式	筒内直接噴射式
使用燃料	DME
着火方式	圧縮着火
シリンダ数・配置	直列6気筒・縦置
内径×行程	108×126mm
排気量	6.925リットル
吸気方式	ターボインタークーラ
目標最高出力	199kW(270ps) / 2700rpm
目標最大トルク	716Nm(73kgm) / 1400rpm

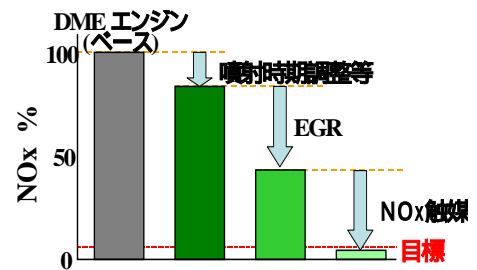


図2 NOx低減の考え方

3. 開発状況

3.1. エンジンシステム

3.1.1. 燃料噴射システム

DMEの体積当たりの発熱量は軽油の半分程度しかないことから、シリンダ内への燃料噴射量をおよそ2倍に高める必要がある。また、DMEは軽油に比べて体積弾性率が低く、圧縮されやすいことから、ディーゼルエンジンの燃料噴射装置として一般的な、列型ポンプと自動弁式インジェクターの組み合わせ（ジャーク式）では、高速運転領域側で燃料噴射開始時期が遅れることが指摘されている⁽⁶⁾。

そのため、DMEエンジンの燃焼を最適化するための燃料噴射装置としては、燃料の噴射時期、期間を任意に制御可能な電子制御式インジェクターを用いるコモンレール式噴射システムが適すと考えられる。DMEエンジンのコモンレール式噴射システムの構成を図3に示す。

3.1.2. 高圧ポンプ

DMEを高圧供給するサプライポンプは、Bosch製PE-6ADS型をベースに、燃料供給能力の向上と制御性向上をはかるため、下記の構造変更を実施した。

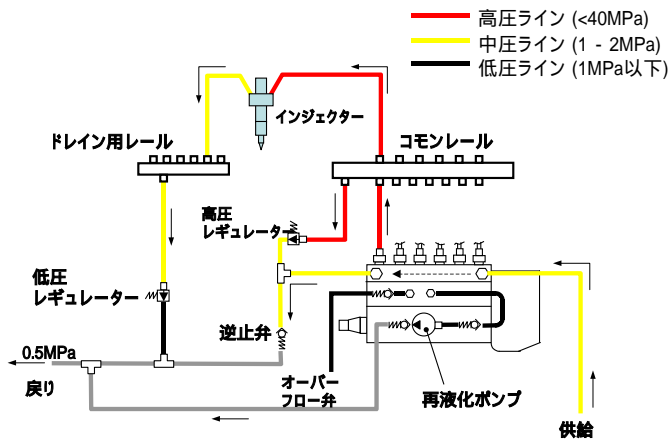


図3 DMEエンジンの燃料噴射システム

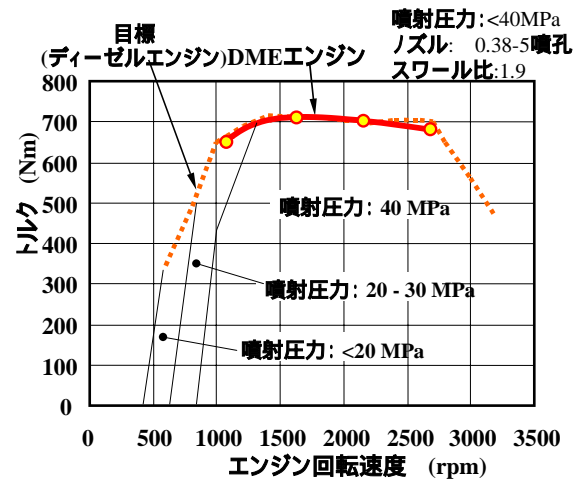


図5 DMEエンジンの全負荷動力性能

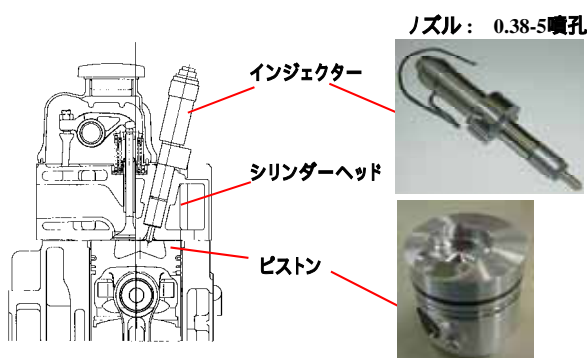


図4 DMEエンジンの燃焼系の構成

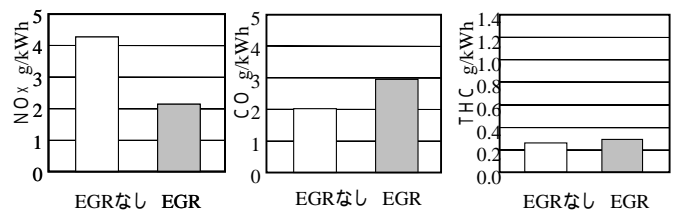


図6 DMEエンジンの排出ガス性能(D-13モード)

- プランジャ径拡大
- 圧送ストローク増大
- カムプロファイル変更
- ガバナの電子制御化

また、本ポンプは、ポンプカム室内に漏洩するDMEを液化回生するための再液化ポンプを装着するとともに、潤滑油をエンジンから分離し、専用潤滑油を封入式とすることで、エンジンオイルへのDME混入を防止した。

3.1.3. インジェクター

インジェクターは主弁の圧力バランスを制御することで燃料の噴射開始・終了時期を任意に変更できる電子制御式である。図4には、電子制御式インジェクターをシリンダヘッドに搭載したDMEエンジンの燃焼系の断面構造を示す。大流量に対応した専用インジェクターをシリンダヘッドに装着するため、ベースエンジンに対してシリンダヘッドを2弁式(吸気1, 排気1)とする構造変更を行い、インジェクターの搭載性を確保した。

3.1.4. 燃焼室, スワール比

燃焼室形状はトロイダル型とし、圧縮比はベースエンジンと同一の17.5とした。尚、燃焼室口径の選定にあたっては、ノズルの噴孔数、スワール比等とのマッチングを考慮し、口径58とした。

3.1.5. EGRシステム

DMEエンジンは、排気ガス中に黒煙を含まないという特徴がある。そのため、噴射時期の最適化に加えて、EGRによる大幅なNOx低減が可能と考えられる。EGRシステムはより大量のEGRガスを戻すことができるようにするため、ターボチャージャーのタービン入口の排気マニホールドより取り出した排気ガスを、ターボチャージャーのコンプレッサ上流に戻すEGR方式とした。EGR配管には、ガス温度を最適化するため水冷式EGRクーラを設置した。

3.1.6. コモンレール式DMEエンジンの性能

図5には、コモンレール式噴射システムを適用した場合のDMEエンジンの全負荷性能を示す。ここでは、最適ノズルとして噴孔径0.38の5噴孔、スワール比は1.9とした。燃料噴射圧は昇圧能力が不足する低速運転領域を除き、40MPa一定とし、各運転領域での噴射時期を最適化した。DMEには潤滑添加剤(LZ539ST)を800ppm程度添加した。その結果、

最大トルクおよび最高出力はベースのディーゼルエンジンと同等のレベルを達成できることが分かった。また、EGRにより燃費の大幅な悪化なくNOxを半減することが可能であり、その際のCO、THCの悪化も少ない。

図6には、触媒を使用しない状態でのD-13モードにおけるEGR有無での排出ガス性能を示す。

3.1.7. ジャーク式の適用可能性検討

DMEエンジンはコモンレール式噴射システムにより燃焼系を最適化することで目標動力性能を達成でき、低排出ガスのポテンシャルがあることが把握できた。しかしながら、現時点では車両搭載用エンジンの燃料噴射システムとして十分な作動信頼性を確立するには至っていない。そこで、燃料システムの構成がよりシンプルで、基本的な作動信頼性が高いと考えられるジャーク式の燃料噴射システムの適用可能性を検討した。ジャーク式噴射システムの構成を図7に示す。インジェクターは機械式の自動弁とし、高圧ポンプの能力との兼ね合いからノズルの総噴孔面積を決定し、これに合わせてノズルのシート径を拡大している。ノズルは2段階弁圧式(12-15MPa)とすることで、アイドリングなどの軽負荷運転時の噴射安定性を確保した。また、高圧ポンプはコモンレール式に対してカムプロフィールを変更した。DMEによるジャーク式特有の噴射時期の遅れについては、機械式タイマーによる進角特性を最適化した。尚、ジャーク式の場合、出力点付近の燃料噴射圧力は32MPaであり、コモンレール式に対して若干劣る。そこで、ジャーク式に合わせた燃焼系の最適化をはかり、ノズルを0.37の6噴孔とするとともに、ターボチャージャーを変更し、過給度を高めることで高速・高負荷運転領域での燃焼改善をはかった。

その結果、ジャーク式噴射装置においてもベースエンジンと同等以上の動力性能を確保できることが分かった(図8)。

図9には、D-13モードにおいてEGRによりコモンレール式とほぼ同等のNOxとした場合の排出ガスの比較を示す。ジャーク式はインジェクターのノズルシート形状変更によるサックボリューム増加に起因すると考えられる未燃ガスの排出レベルが高い。

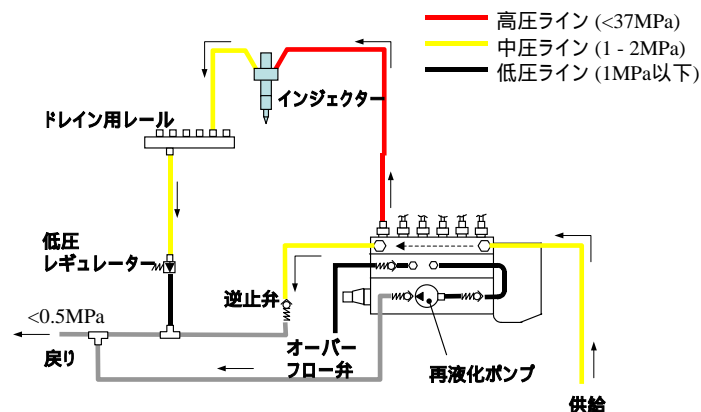


図7 ジャーク式噴射システムの構成

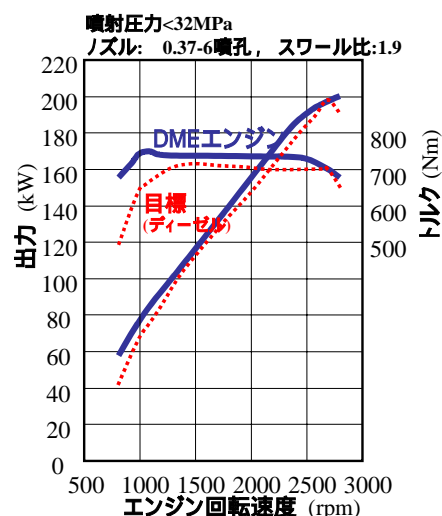


図8 ジャーク式エンジンの全負荷動力性能

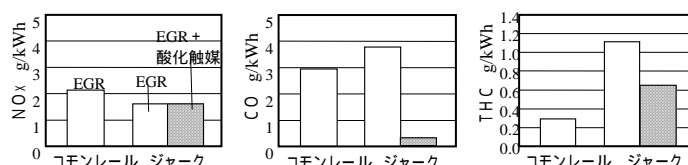


図9 コモンレール式との排出ガス性能比較(D-13モード)

そこでターボチャージャーのタービン出口直下に酸化触媒を装着し、COは十分に浄化できることが分かったが、THCについては十分な浄化性能が得られていない。THCの内訳としては比較的DMEが多いと考えられ、DME浄化に適した触媒仕様の改良が必要であると考えられる。

3.2. NOx低減触媒システム

3.2.1. 触媒システムの構成

還元剤にDMEを用い、還元触媒としては選択還元型と吸蔵還元型の2種類のうち排出ガス中の水分影響やNOxの還元効率、燃費への影響等の点で比較的

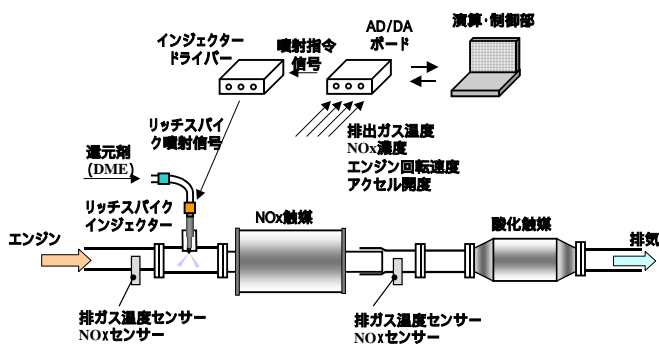


図 10 NOx低減触媒システムの構成

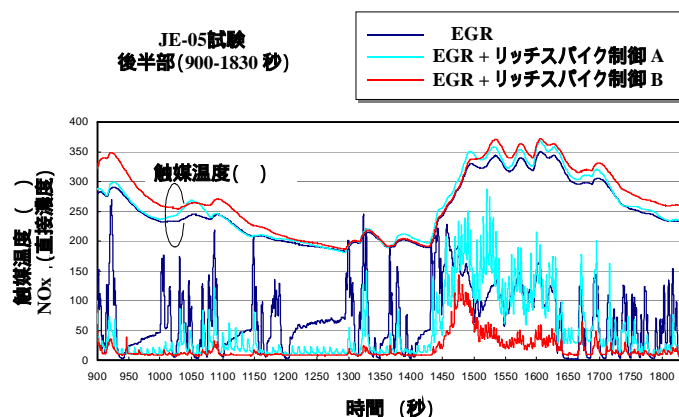


図 11 触媒システムによるNOxの低減

有利と考えられる吸蔵還元型の触媒システムを採用した。

図10にエンジンベンチ試験用のNOx低減触媒システムの構成を示す。DMEは沸点が低く蒸発性が良いためNOx触媒の直前にリッチスパイクを形成するためのインジェクターを装着した。NOx触媒の出口側には還元剤噴射にともなうHCのスリップ防止用として酸化触媒を装着した。NOx触媒の入口と出口にはNOx濃度センサーと温度センサーを取り付け、エンジン回転速度とアクセル開度とともにリッチスパイク制御用の入力信号として使用した。

3.2.2. 触媒システムによるNOxの低減

DMEエンジン(ジャーク式噴射システム, EGR有り)を用いてJE-05試験モードを運転した場合の排出ガス挙動(試験の後半部分)を図11に示す。EGRのみの場合, NOx濃度(直接濃度)は平均して100ppm程度まで減少する。排出ガス温度は150から350の間にある。リッチスパイク制御を行った場合, 制御方法Aの場合はアイドル及び低負荷時は比較的高いNOx浄化性能を示しているが, 1450秒以降の高速

運転時にはEGRのみの場合を上回るNOxが排出されるモード運転全体のNOx浄化率を低下させている。これに対しリッチスパイクの制御方法を見直し, モード全体で適正化したBではほとんどの運転域においてNOxは50ppm以下まで減少し, モード全体で高い浄化性能が得られた。

3.2.3. 排出ガス性能の達成状況

図12にJE-05試験を行いNOx触媒と後段の酸化触媒の組合せによる排出ガス低減効果を調べた結果を示す。NOxについてはEGRによる低減レベルから更に80%程度のNOx低減効果が得られ新長期規制値の1/4以下の目標が達成できた。COはEGRを行うとやや増加したがNOx触媒と後段の酸化触媒で浄化され目標値を十分に下回る。NMHCについてはリッチスパイクを適正に制御することにより還元剤によるスリップ分は抑制できることがわかった。しかし, 目標を下回るにはエンジンアウトのNMHC分を含めての対策を行う必要がある。

一方, PMに関しては新長期規制値の1/10(ほぼゼロ)の目標が達成された。

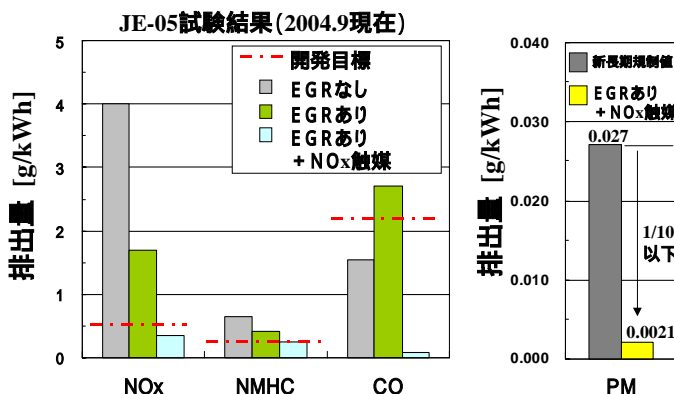
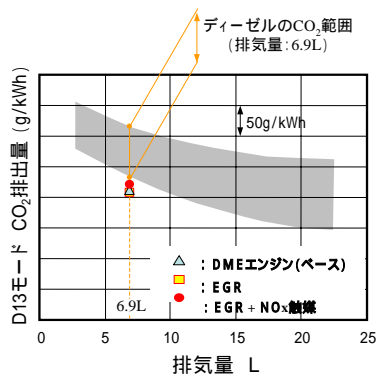


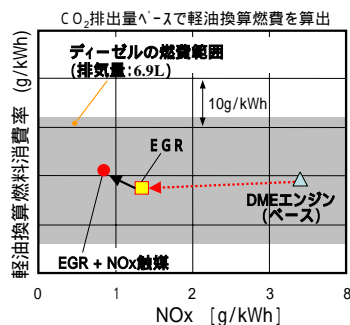
図 12 排出ガス性能の達成状況

3.2.4. CO₂低減と燃費性能

図13に各ディーゼルエンジンのD-13モード試験におけるCO₂排出量の範囲とそれをもとに算出したD-13モード燃費の範囲を示す。開発したDMEエンジンのCO₂は排気量6.9Lクラスのディーゼルエンジンの範囲を下回った。また, 燃費は同クラスのディーゼルエンジンの燃費性能が達成された。また, NOx触媒システムを用いた場合でもリッチスパイクによる燃費への影響は少ない。



各エンジンのCO₂排出量(D13モード)



DMEエンジンの燃費(D13モード)

図 13 CO₂ 低減結果と燃費性能



車両諸元

車両用途;	長距離走行用大型トラック
型式名;	PW25(ベースディーゼル車)
車両重量;	8,960kg
最大積載量;	10,850kg
車両総重量;	19,810kg
DME 容器;	171 リットル × 2個
航続距離;	627km

JE05モード試験結果より算出

図 14 DMEエンジン搭載車両の開発

4. まとめと今後の課題

4.1. エンジンシステム

DME エンジンではコモンレール式噴射システムを適用することにより目標動力性能を確保でき排出ガス低減においても高いポテンシャルがある。しかし、現時点では車両搭載エンジンとしての作動信頼性の向上が課題であり、安定した噴射性能が得られるコモンレール式噴射システムの開発が必要と考える。一方、ジャーク式噴射システムの作動信頼性は高く、ベースディーゼルエンジンと同等以上の動力性能が確保され、同一排気量クラスのディーゼルエンジンなみの燃費性能が得られたが、NMHC 排出量の低減が課題であり、触媒の最適化を含めた改善をはかる。

4.2. NOx 触媒システム

DME を還元剤とする NOx 吸蔵還元型触媒システムを開発し、大量 EGR に同システムを組み合わせ NOx 目標値を達成した。また、リッチスパイク制御を適正化することにより NMHC スリップや燃費ロスも抑制でき、ディーゼルエンジンと同等の燃費性能が確保された。

4.3. 車両開発

図14にはDMEエンジンを搭載した大型トラックを示す。本車両は車両総重量 20 t 級であり、十分な航続距離を確保するため、内容量 171L の DME 容器を 2 本搭載する。DME を安定供給するため、各燃料容器から取り出した DME はフィードポンプにより容器充填圧 + 0.5MPa 程度に加圧しながら、十分な燃料循環量を確保するとともに、クーラによる燃料冷却を行う。また、エンジン停止時には、エンジンのシリンダ内に DME が漏れないようにするため、燃料配管中の DME を排出・回収するためのパージシステム

を備える。開発した大型 DME トラックでは従来のディーゼルトラックと同等の積載量 (10t) と航続距離 (627km; JE-05 試験モードより算出) を確保できる見通しが得られた。

4.4. 「第 38 回東京モーターショー2004」

本プロジェクトで開発する大型 DME トラックは、本年 11 月に開催される「第 38 回東京モーターショー2004」に出展する計画である。会場では、国土交通省の「次世代低公害車開発促進プロジェクト」の取り組み、方針、位置づけなどを来場者、マスコミ、自動車関係者等に広く訴え、本開発プロジェクトの意義と成果について PR する予定である。

謝辞

噴射系の開発については (株) ボッシュオートモーティブシステムに、また、エンジン試験では小林啓樹氏および小島和夫氏には多大なる協力を頂きました。ここに記して感謝申し上げる次第です。

参考文献

- (1) 自動車排出ガス原単位及び総量に関する調査結果について、環境省、平成 10 年 3 月 26 日、<http://www.env.go.jp/press/press.php3?serial=349>
- (2) 低公害車開発普及アクションプラン、経済産業省・国土交通省・環境省、平成 13 年 7 月 11 日
- (3) 環境自動車開発・普及総合戦略会議報告書について、国土交通省・報道発表資料、平成 13 年 12 月 18 日、http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha01/09/091218_.html
- (4) 次世代低公害車開発促進プロジェクトの開発車種、国土交通省・報道発表資料、平成 14 年 7 月 26 日、http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/09/090726_.html
- (5) 李、佐藤、高柳、野田、山本：DME エンジンにおける吸蔵還元型触媒の NOx 低減に関する研究、自動車技術会春期学術講演会前刷集 No.14-04 (2004)
- (6) 牛山、野田、野崎、及川：列型 Jerk 式噴射系を用いた DME 噴射性能調査、自動車技術会春期学術講演会前刷集 No.49-03(2003)