[Review Paper]

Research and Development towards Utilization of DME Powered Diesel Engines

Mitsuharu OGUMA^{†1)*}, Shinichi GOTO^{†1)}, Shinichi SUZUKI^{†2)}, and Shigemichi YUKI^{†3)}^{†1)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-2-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564, JAPAN^{†2)} Japan Oil, Gas and Metals National Corp. (JOGMEC), 1-2-2 Hamada, Mihama-ku, Chiba 261-0025, JAPAN^{†3)} Iwatani International Corp., 3-21-8 Nishi-shinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-8458, JAPAN

(Received January 17, 2008)

A series of research developments are summarized based on the research and development of a dimethyl ether (DME) medium-duty truck as below.

- Examination of lubricity improvement which is an important fuel characteristic,
- Engine and vehicle development,
- Evaluation of the emission characteristics including trace levels of harmful substances,
- Vehicle field test.

Evaluation of lubricity used newly developed equipment to evaluate the effects of lubricity improvers. Checking the correlation between the durability of the injection pump and lubricity on fuel, and normalizing the equipment, allowed standardization of the evaluation method of lubricity for DME.

Investigation of trace level emissions found that the unique fuel properties of DME affect the emission levels, so DME has great potential for satisfying more severe emission regulations compared to conventional diesel fuel.

In vehicle and field testing, the overall quality of the DME truck was improved by solutions for the problems that occurred during the field tests.

Keywords

Diesel engine, Alternative fuel, Performance, Standard, DME, Diesel fuel

1. 緒 言

近年、燃料の多様化と大都市部における大気汚染対策の一つとして、DME（ジメチルエーテル）の製造技術や利用技術の研究開発が精力的に行われている^{1)~6)}。合成燃料であるDMEは、天然ガスや石炭から安価に大量生産する技術はほぼ確立し、実証段階に入っており、さらにWell to TankでのCO₂（二酸化炭素）排出量に対しても優位性を確保しようと、バイオマスからの製造技術開発に関しても検討が始まりつつある。DMEの特徴としては、LPガスと同様、数気圧の加圧で液体状態での取扱いが可能であること、含酸素物質で炭素間結合がないため燃焼してもすすを発生しづらいこと、およびセタン価が軽油同等以上あることなどから、とりわけ軽油代替ディーゼル自動車用燃料としての関心と期待は非常に高い。一方、DMEの欠点には、自己潤滑性や体積弾性率が低いといった燃料物性的に克服すべき点はあるものの、添加剤や噴射システムの最適化で、DME自動車は実用レベルに近い状態まで技術が進みつつある^{3),6)}。DMEを軽油の代替としてディーゼル自動車に用いた場合、すすやスモークレベルでのいわゆる吐煙はなく、その排気対策をEGR（Exhaust Gas Recirculation）の強化によるNO_x（窒素酸化物）の低減と酸化触媒程度の後処理技術によるCO（一

酸化炭素）、THC（Total Hydro-Carbon、全炭化水素）の低減に集中できるのが、DMEディーゼルエンジンの最大のメリットといえる。

著者らはこれまでに、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、天然ガス開発利用促進型特別研究の「中大型DME自動車の実用化研究開発（平成14～15年度）」、および「DME自動車の実用化フリート試験研究開発（平成15～16年度）」両プロジェクトに参加し、コープ低公害車開発(株)らとともに車両総重量8トン（最大積載量3.3トン）のDME中型トラックを開発した。本報では、同DME中型トラックの研究開発を通じて得られた知見を基に、燃料特性の大きな課題である潤滑性改善に関する検討、エンジンおよび車両開発、微量成分を含む排出ガス特性の評価および車両走行試験と得られた結果について、一連の研究開発に対する集大成としてまとめる。

2. 総重量8トンDMEトラックの開発**2.1. DMEトラックの開発コンセプト**

本DMEトラックを開発するにあたり、目標としたコンセプトを下記に記す。

- ・開発車両のベースとする軽油仕様の車両と、同等の熱量を同等の噴射期間で噴射可能な燃料噴射ポンプの性能を確保する。
- ・エンジン回転数によらずベースの軽油仕様と同等以上の出力を確保する。
- ・ベースの軽油仕様と遜色のない熱効率が得られる。

* To whom correspondence should be addressed.

* E-mail: mitsu.oguma@aist.go.jp

- ・酸化触媒程度の後処理装置まで使用可能とし、排出ガス性能として新短期規制値をクリアする(開発着手時の次期規制値)。
 - ・一充填での航続距離 500 km を確保する。
 - ・耐久性も考慮した車両システムとしてまとめ上げる。
- すなわち、市場導入可能なレベルの DME トラックを開発することを目標とした。

2.2. DME トラック車両システムの概要

Table 1 に車両およびエンジンの諸元を、Fig. 1 に各構成部品の配置概略図を、および Fig. 2 に車両外観をそれぞれ示す。

2.2.1. 燃料噴射装置

本 DME トラックに搭載した噴射システムは、列型 Jerk 式噴射ポンプをベースとし、ボッシュ(株)が DME 専用燃料供給系を含めて研究開発中のものである。本 DME 用噴射システム⁵⁾の主要諸元をベースの軽油噴射系との比較で Table 2 に示す。DME の体積弾性率や発熱量の低さを補うだけの噴射量を確保し得るべく、プランジャ径、リード、プランジャ駆動用カムブ

ロフィル、およびインジェクター噴孔径等の最適化が施されている。また、電子ガバナによる噴射量の制御と大進角メカタイマーも組み合わせ、DME の低発熱量を補うべく軽油の 2 倍の噴射量(体積割合)を、エンジン回転数によらず軽油同等のタイミングと噴射期間で噴射することを可能とした。さらに、エンジン運転時にプランジャ部からギャラリー室に一部リークする DME を再度液化しリターンラインに戻すためのコンプレッサー(以下、再液化コンプレッサーと記述)を、噴射ポンプ側面に備え持つ。再液化コンプレッサーの駆動源はプランジャを駆動するカム軸で、同コンプレッサーは後述するバージ機能に対するバージされた気相 DME の再液化と、次のバージに備えたバージタンクの減圧機能も担当する。

2.2.2. 燃料供給系

低圧側燃料供給系では、二段のフィードポンプにより燃料タンクから DME を噴射ポンプへ供給している。一段目のアシス

Table 1 Vehicle and Engine Specifications⁷⁾

Vehicle	
Vehicle model	Forward (modified FRR35J4S)
Gross vehicle mass	7940 kg
Engine	
Base engine model	6HL1
Cylinder disposition and number	In-line, 6 cylinders
Bore × Stroke	115 mm (dia.) × 115 mm
Displacement	7166 cc
Air intake system	Naturally aspirated
Injection pump type	In-line Jerk type
Injection opening pressure	14.7 MPa
Injection method	Direct injection
Ignition method	Compression ignition
Compression ratio	18.5

Fig. 2 Photograph of the Completed DME Medium-duty Truck

Fig. 1 Schematic Diagram of Device Layout of the DME Vehicle

トフィードポンプは燃料タンクに内蔵されているインタンクポンプで、二段目のメインフィードポンプ間までの圧送とその間のキャビテーション防止を目的として設置した。両フィードポンプにより毎分5 l、約 $\Delta 0.7$ MPa の昇圧状態で DME を燃料タンクから噴射ポンプまで循環している。これにより噴射ポンププランジャ部を燃料によって直接冷却可能で、プランジャ部での DME の気化を防ぐために重要な機能となっている。

本 DMEトラックでは、エンジン停止時における高圧の液相

Table 2 Comparison of the Diesel-based Engine Injection System and the DME Injection System⁷⁾

		Diesel based engine injection system	DME injection system
Injection pump type		PE-6MD	Modified PE-6AD
Plunger			
Diameter	[mm]	10.5	10.5
Lead		25 lead	30 lead
Delivery valve			
Type		CPV	STD
Opening pres.	[MPa]	0.49, 5.9 (Ball Po)	2.04
Cam			
Lift	[mm]	11	11
Profile		PEA-U-55	PEA-U-103
Injection pipe			
Inner dia.	[mm]	2.2	2.2
Length	[mm]	600	600
Nozzle			
Type		DLA-S	DLA-S
Orifice number		7	7
Orifice dia.	[mm]	0.18	0.34
Opening pres.	[MPa]	16.2/19.6 (2 spring)	14.7 (STD)

DME を燃料タンクに引き戻し、燃料管内を蒸気圧程度の気相 DME に置換するバージ機能を持つ。エンジン停止時はフィードポンプにより加圧された DME が低圧側燃料管内に、また噴射ポンプからインジェクターまでの高圧側燃料管内には噴射圧に近い（運転条件によって ~ 30 MPa）状態の DME が残留する。このバージ機能では、エンジンを停止するとフィードポンプによる燃料流路がタンクへと短絡し、その間に設置されたアスピレーターによって液相の DME が燃料タンク内に引き戻される。また、同時に燃料タンクから気相の DME を導入し燃料管内が気相の DME で置換される。さらに、取り残した DME があることを考慮し、エンジン運転時に再液化コンプレッサーにより減圧しておいたバージタンクへ吸引することでバージが完了する。ただし、本バージ機能はその必要性も含め、公道やテストコースによる走行試験により、省略の可能性を検討していく。

Fig. 3 にトラック搭載の燃料系統図を示す。一充填での航続距離 500 km を目標として、135 l の燃料タンクを車両の両側の一つずつ搭載した。メインフィードポンプは左右のタンク直近にそれぞれ装備し、左右の燃料系統の切り替えはコックと電気系統切り替えスイッチによる手動とした。すなわち、片方の燃料を使い切った後に左右を切り替え、もう一方の燃料を使う方式を採る。燃料配管はステンレス製のパイプとメタルシールタイプの継ぎ手を使用し、振動対策の必要な部位は同フレキシブルチューブを使用した。

2.2.3. 車両制御系

本トラックは、車両制御システムを三つのコントロールユニットに分割している。一つは燃料噴射ポンプを制御する電子ガバナコントロール用 ECU (Electric Control Unit)、一つはベース車両既設の EGR 制御用 ECU、またこれらに追加し、DME の燃料供給系、すなわちフィードポンプや燃料流路に設置され

Fig. 3 Schematic Diagram of Devices Layout of the DME Vehicle

Table 3 Breakdown of Vehicle Mass⁷⁾

	Front axle [kg]	Rear axle [kg]	Total [kg]
Chassis with cab (without DME fuel supplying device)	2000	895	2895
DME fuel supplying device	150	265	415
Full cargo	160	1060	1220
Vehicle mass	2310	2220	4530

ている電磁弁などをキーオンからキーオフまで順次制御するシーケンスコントロールユニットの三つにより車両制御システムが成り立っている。それぞれが独立した制御システムとなっておりシステム間の通信機能およびデータの共有はないが、エンジン回転パルス等、一部の入力信号は共有している。燃料供給系の制御に関して、動作シーケンスには、エンジン始動シーケンス（エンジンキーオン操作時シーケンス）、エンジン停止シーケンス（エンジンキーオフ時シーケンス）、および異常時シーケンスの3モードが用意されている。車両システムとしての完成度を向上するには、一つのECUに制御系を統一すべきであり、また統一することでコスト低減も可能と考えられるが、一方、後付け可能な今回のようなシステムは、使用過程車の改造対応といった面では有効な手段ともいえる。

2.2.4. その他

その他、触媒はベース車両に搭載されていたものより酸化性能を強化するため、パラジウム30%+白金70%とし、コンバーターを新規に作成した。EGRはベース車両の装置をそのまま使用し、制御範囲を高負荷側まで拡大した。したがって、EGRクーラーは装着されていない。

2.2.5. 車両重量

車両重量の内訳をTable 3に示す。DME用の燃料装置（規定量充填済みの燃料タンク、配管、その他構成部品）による重量増は415 kgとなった。これにベース車両となるキャブ付きシャシー（DME燃料装置含まず）の2895 kgと架装一式の1220 kgを合計し、車両重量は4530 kgとなる。車両重量に加え乗車定員2名分の重量を含めた車両総重量は8000 kg未満であることから、最大積載量は3300 kgとした。

2.3. 開発車両の各種性能

2.3.1. エンジン出力性能

Fig. 4にDME運転時のエンジン全負荷性能を、軽油と比較し示す。DMEは過剰に燃料を噴射しても全くすすを出さないため、軽油と同様の吐煙限界を設定する必要がない。ただし、すすの代わりにCO排出量が増加するため、ここでは吐煙限界の代わりにCO限界を設定した。CO限界はエンジンアウトで500 ppmを超えた場合か、または急激にCO濃度の悪化が始まる場合とし、その手前の出力を最大出力とした。この結果、DME運転の場合、全回転数域にて軽油運転の軸トルクおよび軸出力を上回る性能が得られ、最大軸トルクでは25.9 N・mの増加、最大軸出力では8.2 kWの増加が得られた。

2.3.2. 排出ガス性能

上記の全負荷性能において、中負荷域までのEGRと、酸化触媒を採用し、新型自動車審査基準のディーゼル自動車13モード排出ガス試験方法（TRIAS 24-5-1999、以下D13モードと記

Fig. 4 Engine Performance Curves of the Test Engine Operated with DME and Diesel Fuel

Table 4 Results of Japanese Diesel 13-mode Emission Test⁷⁾

	CO	HC	NO _x	PM
Japanese 2003 regulation	2.22	0.87	3.38	0.18
Diesel fuel operation	3.17	0.89	4.26	0.17
DME operation (compared to Japanese 2003 regulation)	0.117 (-95%)	0.222 (-74%)	2.479 (-27%)	0.0102 (-94%)

Fig. 5 The DME Vehicle Exhaust Emissions Compared to the Base Vehicle and the Japanese 2003 Regulations

述)⁸⁾による排出ガス性能データを取得した。結果をTable 4およびFig. 5に示す。新短期規制値に対し、COは95%減、HC（Hydro-Carbon、炭化水素）は74%減、NO_xは27%減、およびPMは94%減の低公害性が得られた。NO_xの低減率が他の成分よりやや小さいが、これはベースエンジンのEGR装置のみで対応可能な範囲でEGRを行ったためである。すすの発生

Fig. 6 Results of Exhaust and Pass-by Noise Tests

Fig. 7 Concept of HFRR Test Method

がないDMEの特徴を利用し、大量にEGRがかけられるようEGRパイプの拡大やEGRクーラーの採用により、さらなる低減が可能と考えられる。

2.3.3. 自動車騒音性能

新型自動車審査基準の自動車騒音試験方法 (TRIAS 20-1996)⁹⁾に則り、DMEトラックの近接排気騒音、定常走行騒音および加速走行騒音の大きさを計測した。計測結果をFig. 6に示す。いずれの騒音もベース車両軽油運転時のカタログ値よりも低い値であった。これは、DMEの蒸発特性および着火性の良さから着火遅れ期間が短縮することで急激な燃焼が抑えられ、エンジン騒音が減少することにより結果として各自動車騒音が低減したと示唆される。

2.4. 大臣認定によるナンバープレートの取得

前述の各種車両性能データや、1周3.2 kmのオーバルテストコースによる走り込みの実績をもとに、試験自動車として同開発車両の認定を平成16年8月4日に申請し、同年10月7日付けで道路運送車両の保安基準第56条第4項の規定による試験自動車の認定 (通称大臣認定) が国土交通省大臣から下り、同年同月20日にナンバープレートを取得した。

3. 自動車用DME燃料の潤滑性評価

DMEは潤滑性に乏しく、ディーゼル燃料として使用するには潤滑性向上剤の添加が不可欠である。

従来、軽油の潤滑性は、石油学会規格 (JPI-5S-50-98) によるHFRR (High-Frequency Reciprocating Rig) 試験機を使用し評価されるのが一般的である。Fig. 7にHFRRの概念を、Table 5に試験条件をそれぞれ示す。燃料浴内で金属製のテストディスクとテストボールをTable 5に示す条件にてこすり合わせ、テストボールに生じた摩耗痕径をFig. 7に示すXおよびYにつ

Table 5 HFRR Test Conditions

Conditions		
Fuel temperature	[°C]	60
Pressure	[MPa]	ambient
Load	[N]	1.96
Test duration	[min]	75
Stroke	[μm]	1000
Frequency	[Hz]	50
Fuel volume	[cm ³]	2

いて計測し、その平均値を摩耗痕径 (WSD: Wear Scar Diameter) として評価する。国際標準規格 (ISO12156-2) ではこの摩耗痕径が460 μm以下となるよう市販軽油の潤滑性を規定している。国内では、この摩耗痕径に関してJPI規格に明記されていないが、460 μm以下であることが一つの指標となると認識されている。従来、軽油の場合はこのHFRR試験機による評価結果と実機耐久性はおおよそ良い相関が得られているとされている。一方、DMEの潤滑性を評価する場合、液化ガスのDMEは常温常圧では気体であるため、大気圧下で液体試料の潤滑性を評価する従来のHFRR試験機を使用することができない。すなわち、DMEの潤滑性を評価するには、(1) 液化ガスに対応させた特殊なHFRR試験機によりDMEを用いて直接評価する方法と、(2) DMEの燃料特性に似た常温常圧で液体の代替物質を選定し、従来型HFRR試験機により間接評価する方法が想定される。前者は直接評価可能なため結果を理解しやすい一方、装置が特殊なため手段としての一般化は難しいといえる。後者は間接評価のため得られた結果とDMEそのものの現象理解の相関が課題であるが、装置は既に一般化されているため汎用性はあるといえる。本研究では双方の課題点を把握した上で、それぞれの方法による潤滑性評価方法の検討を行った。

3.1. DMEによる直接評価方法

DMEの潤滑性を直接評価するため、液化ガスに対応させたMPT-HFRR試験機 (Multi-Pressure/Temperature High-Frequency Reciprocating Rig)¹¹⁾を製作し使用した。同試験機は、密閉された容器内で従来のHFRR試験機と同一の試験原理を達成したものである。Fig. 8に装置外観を、Table 6に従来型HFRR試験機との仕様比較を示す。

特殊な装置であるため、まず、その性能が従来型HFRRと同等にあるか否か、妥当性の評価を前述の石油学会規格にて規定されている標準試料および評価方法を用いて行った。Table 7およびFig. 9にMPT-HFRR試験機による低潤滑性標準試料および高潤滑性標準試料の試験結果を示す¹⁰⁾。低潤滑性標準試料では測定値が許容範囲内に、高潤滑性標準試料では許容範囲相当であった。すなわち、本MPT-HFRR試験機においても、従来型HFRR試験機と同等の評価原理が確保されていると見なすことが確認できた。

同MPT-HFRR試験機を用いたDME燃料の潤滑性評価試験結果をFig. 10に示す。潤滑性向上剤は、低硫黄軽油用に開発された脂肪酸系のもの、およびいわゆるバイオディーゼル燃料のパーム油メチルエステル (以下、エステル系と記す) の二種類を用いた。エステル系の場合、軽油相当の摩耗痕径 (WSD)

を得るには3000 ppmの添加量が必要であったが、脂肪酸系では25 ppm程度の添加量で軽油レベルを満たすことが可能であった。

境界潤滑モードでは、極性を持たない潤滑剤の物理吸着による無極性潤滑と、極性をもつ潤滑剤の化学吸着も生じる極性潤滑、さらに高温の摩擦面と化学反応を生じる極圧添加剤による潤滑に分類される¹²⁾。脂肪酸やエステルは長い炭素結合の一端に別の極性基をもつ極性添加剤であるが、特に脂肪酸は極性基に-COOH（カルボキシル基）を持ち、添加剤分子が固体表面に良い吸着膜を形成する代表的な極性添加剤である¹¹⁾。脂肪酸系の潤滑性向上剤はこの極性基の効果で、わずかな添加量で境界潤滑により軽油相当の潤滑性を得られていると考えられる。

3.2. DME 代替物質による間接評価方法

DMEの代替物質選定において重要なことは、その代替物質に潤滑性向上剤を添加し得られる添加濃度と潤滑性向上効果の相関が、実際のDMEにその潤滑性向上剤を添加して得られる相関とはほぼ近似していることにある。すなわち、添加剤の溶解性がDME相当の物質を選定する必要がある。ここでは溶解性の指標に物質の溶解度（SP値）を使用した。SP値とは凝集エネルギー密度（CED: Cohesive energy density）、すなわち一分子の単位体積あたりの蒸発エネルギーを1/2乗したもので、単位体積あたりの極性の大きさを示す数値である。SP値の定義をEq. (1)に示す。

$$(SP)^2 = CED = \frac{\Delta E}{V} = \frac{\Delta H - RT}{V} = \frac{d}{M}(\Delta H - RT) \quad (1)$$

ここで

ΔE : 蒸発エネルギー (cal/mol)

d : 密度 (g/cm³)

V : モル容積 (cm³/mol)

M : グラム分子量 (g/mol)

ΔH : 蒸発潜熱 (cal/mol)

T : 絶対温度 (K)

R : ガス定数 [1.987 cal/(mol·K)]

(なお、1 cal = 4.186 J)

Table 7 Test Result of Standard Fuels with MPT-HFRR¹⁰⁾

		Tolerance level	Test result
Low lubricity standard fuel	[μm]	633 ± 55	646.75
High lubricity standard fuel	[μm]	403 ± 34	440.91

Fig. 9 Wear Scar Images of Standard Fuel with MPT-HFRR

Fig. 8 MPT-HFRR

Fig. 10 Effect of DME Lubricant Concentration on Wear Scar Diameter, as Measured by MPT-HFRR

Table 6 Specification of MPT-HFRR Compared to Standard HFRR¹⁰⁾

		STD (JPI)	Standard HFRR ^{a)}	MPT-HFRR
Fuel volume	[cm ³]	2 ± 0.20	←	500
Stroke	[μm]	1000 ± 30	20-2000	1000-5000
Frequency	[Hz]	50	10-200	10-50
Load	[N]	1.96 ± 9.81 × 10 ⁻³	0.98-9.8	←
Surface area of fuel bath	[cm ²]	6 ± 1	←	113
Fuel temperature	[°C]	60 ± 2	ambient-150	max 100
Pressure	[MPa]	ambient	←	max 10
Test duration	[min]	75 ± 0.1	←	←

a) produced PCS instruments.

である。この Eq. (1) で求められる DME の SP 値は 6.6 である。この値に近い物質の一つに SP 値が 6.9 の ETBE (Ethyl Tertiary Butyl Ether) があり、ETBE を疑似 DME の一つとして選定し、以下の検討を行った。

Fig. 11 (a) および (b) に、二つの脂肪酸系潤滑性向上剤 (脂肪酸系①および②と標記) について得られた試験結果を示す。いずれの図中も●は従来型 HFRR、○は MPT-HFRR での結果を示す。また、実線は評価燃料に疑似 DME として ETBE を、破線は評価燃料に DME を使用した結果を示す。ETBE による条件設定は石油学会規格 JPI-5S-50-98 に準拠し、DME による条件設定は前述の MPT-HFRR による試験と同一である。両グラフで $WSD=460\text{ }\mu\text{m}$ で破線が入っているのは、このライン以下の WSD を示す場合に潤滑性が十分確保できるという基準値を示している (ISO12156-1)。脂肪酸系①において、MPT-HFRR にて直接 DME にて評価した場合、およそ 25 ppm で基準値以下となる。このとき、ETBE での試験結果は、従来型 HFRR および MPT-HFRR ではおよそ 50～100 ppm にて基準値を下回る。脂肪酸系②の場合も同様に、MPT-HFRR にて直接 DME にて評価した場合はおよそ 25 ppm、ETBE を用い従来型 HFRR および MPT-HFRR で評価した場合はともに約 100 ppm で基準値以下となる。

ETBE による試験結果では、DME の場合に必要な添加量よ

Fig. 11 Relationship between the Results of Direct and Indirect Evaluation Methods

りも多い量が必要となる結果であった。すなわち、ETBE で試験を行い十分な潤滑性が得られる添加量では DME の場合も十分な潤滑性向上効果が得られると判断できる。一方、ETBE では必要最小限の添加量を精度良く評価するには至っていない。しかし、現在の DME ディーゼルエンジンの利用形態として、その多くが安全率を上げるべく 100～1000 ppm の添加量にて使用している現状を鑑みると、ETBE での評価は添加量がやや多く要する、すなわち安全サイドの結果となることから、当面の評価には使用可能といえる。

以上の結果から、低硫黄軽油用の脂肪酸系潤滑性向上剤を約 25 ppm 添加することで DME の潤滑性は確保できると考えられる。この結果は、あくまでも軽油用 HFRR 試験方法に基づく方法で DME を評価した場合の結果であり、DME ディーゼルエンジンとしての耐久性に関連付けての必要添加量ではない現状であることを注記する。すなわち、耐久性との相関が取れていないことから、本研究では安全率を大きく取り DME に 500 ppm の脂肪酸系潤滑性向上剤を添加し、前述のエンジン性能データも含む各種試験に使用することとした。潤滑性評価方法と実機耐久性の相関検証は今後の課題である。

4. DME 直噴ディーゼルエンジンの微量排気成分の計測

DME はその物性から低炭素、含酸素、高揮発性など、従来の軽油とは大きく異なる特殊性を持ち、規制排気成分以外の微量排気成分の排出特性を評価することは、その燃焼特性の解明にもつながる。さらに、DME 特有の物性から潤滑性向上剤の添加が必須で、同添加剤の種類および添加量が規制・未規制排出ガス成分に影響する可能性もある。本項では、DME ディーゼルエンジンから排出される微量排気成分の計測を行った。

4.1. 実験装置および実験方法

テストエンジンは、開発した DME トラックに搭載されているエンジンと同一とした。実験条件を Table 8 に示す。脂肪酸系潤滑性向上剤 500 ppm 添加 DME は酸化触媒の有無の影響を、脂肪酸系潤滑性向上剤 50 ppm 添加 DME は潤滑性向上剤添加量の影響を、エステル系 3000 ppm は潤滑性向上剤種類の影響を確認するための条件設定である。なお、同エンジンの燃料噴射系を軽油仕様に戻し、軽油運転でのデータも比較のため取得した。

微量排気成分の計測はフーリエ変換赤外分光法 (FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy) による排ガス分析計 (堀場製作所製 MEXA-4000FT) を用いた。エンジン運転条件は定格回転数の 60% であるエンジン回転数 1740 rpm 一定のもと、正味軸出力を 50 から 400 N・m まで変更する部分負荷性能試験とした。

Table 8 Experimental Cases¹³⁾

Case	Fuel	Lubricant	Oxidation catalyst	EGR
Reference	Diesel fuel	—	—	O
Case 1	DME	500 ppm, fatty acid type	—	—
Case 2	DME	500 ppm, fatty acid type	Pd/Pt: 3/7	—
Case 3	DME	50 ppm, fatty acid type	—	—
Case 4	DME	3000 ppm, ester type	—	—

Fig. 12 Comparison of (a) NO_x, (b) NO, (c) NO₂ Contents and (d) NO/NO_x Ratio in the Exhaust Emissions

4.2. 実験結果および考察

Fig. 12に排ガス中の (a) NO_x, (b) NO, (c) NO₂濃度および (d) NO/NO_x濃度比をそれぞれ示す。図中に「+catalyst」標記のないものは全てエンジンアウトの排ガスを示す。NO_x排出濃度はいずれもほぼ同レベルにあるが、本供試エンジンおよびDME噴射システムでは、NO_x中に占めるNOの割合が、特に低中負荷域でDME運転時の方が軽油よりも大きいという傾向であった。NO濃度は、酸化触媒使用時は50 N・mの負荷運転条件以外低下していることがわかる。これは、**Fig. 12 (c)**に示すように、酸化触媒によりNOがNO₂に酸化されている影響である。

Fig. 13に排ガス中の (a) THC, (b) メタン, (c) NMHC (Non-Methane Hydro-Carbon: ノンメタンハイドロカーボン) 濃度および (d) NMHC/THC濃度比をそれぞれ示す。添加剤その

Fig. 13 Comparison of (a) THC, (b) Methane, (c) Non-methane Hydro-carbon (NMHC) and (d) NMHC/THC Ratio in the Exhaust Emissions

他の条件によらずDME運転時の特徴として、メタン濃度は軽油の3~4倍の濃度で排出されるが、THC濃度は軽油よりも運転条件によらず低下する。すなわち、新長期規制から炭化水素排出量に適用されるNMHCで見ると、DMEは軽油と比較してさらに優位である。また、本試験で使用している酸化触媒はメタンの低減効果はほとんどなく、NMHCに対して良好な低減率が得られていた。

Fig. 14に排出ガス中の水分濃度を示す。添加剤その他の条件によらずDME運転時の特徴として、中高負荷運転条件にて水分の排出濃度が軽油と比較して増加する。これは、燃料中のH/C比が軽油の~1.9:1と比較しDMEが3:1と大きいためである。

Fig. 15に、アルデヒド類の特性として (a) ホルムアルデヒドおよび (b) アセトアルデヒド濃度をそれぞれ示す。含酸素

Fig. 14 Comparison of Water Contents in the Exhaust Emissions

Fig. 15 Comparison of (a) Formaldehyde and (b) Acetaldehyde Contents in the Exhaust Emissions

燃料であるDMEは軽油運転時よりもホルムアルデヒドの排出が増加し、負荷によっては最大で約30 ppmの濃度で排出された。ただし、酸化触媒を装着することで、その排出量はほぼゼロまで抑えることが可能であった。また、アセトアルデヒドは酸化触媒による低減効果が小さい。

Fig. 16に排ガス中の(a)エチレン(C_2H_4), (b)エタン(C_2H_6)および(c)トルエン(C_7H_8)の濃度をそれぞれ示す。DME運転時のエチレン、エタンおよびトルエン排出濃度はいずれも軽油運転時よりも減少する。これらの炭化水素はPMの核となり得る物質であり¹⁴⁾、PMを形成しづらいDMEの特性を裏付けるデータといえる。

5. PM 排出特性の評価

DMEディーゼルエンジンはすすやスモークレベルでのいわゆる吐煙はなく、その排気対策をEGRの強化による NO_x の低減と酸化触媒程度の後処理技術によるCO, THCの低減に集中できるのが、最大のメリットといえる。一方、PMレベルでの排出量は完全にゼロではなく、2章で示したように、D13モー

Fig. 16 Comparison of (1) Ethylene, (b) Ethane and (c) Toluene Contents in the Exhaust Emissions

ド試験等では微量の排出が確認されている。そこで、DMEディーゼルエンジンのナノ粒子排出特性を明確に理解するため、フィルター捕集によるSOF (Soluble Organic Fraction: 可溶性有機成分) 分のガスクロマトグラフ分析結果と、粒子径個数濃度分布の計測を行った。

5. 1. 実験装置および実験方法

5. 1. 1. 供試エンジンおよび運転条件

テストエンジンはトラックに搭載されているエンジンと同一である。なお、通常のディーゼルエンジンでは、エンジンの潤滑系統と噴射ポンプの潤滑系統を分割することなく、一系統のみで同一の潤滑油を供給する。一方、DME用の本テストエンジン(噴射システム)は噴射ポンプ内のプランジャギャラリ室でプランジャ部からリークするDMEが潤滑系に進入し、エンジン側へ流入するのを防ぐ特殊な機能を持たせている。すなわち、エンジン潤滑系統と噴射ポンプ潤滑系統を分割し、それぞれ別の潤滑油を使用し双方が混ざり合わない構造となっている。双方のオイルは、エンジン潤滑系統にはディーゼマルチCF10W-30(富士興産)を、DME燃料と直接オイルが触れる噴射ポンプ潤滑系統にはDMEおよび潤滑性向上剤との相性を考慮したDelvac Syn 5W-40(Mobil)を使用している。

5. 1. 2. PMのフィルター捕集方法

PM捕集時のエンジン運転条件は、DME運転時のエンジン

性能曲線による定格回転数の60%回転数でのおよそ60%トルク、すなわちそれぞれ1740 rpm、300 N・mとした。また、同一エンジン噴射システムをベースエンジンのものに戻すことで軽油運転も可能とし、同一条件にて軽油運転時のPMも捕集し、比較対象とした。いずれの燃料による運転時もEGRの作動は停止し、DME運転時に装着している酸化触媒は取り外し、これらによるPM生成への影響を排除した。

PMの捕集はミニダイリュショントンネル（小野測器製、分流式希釈トンネルPPFT）を使用した。PM捕集フィルターは、ディーゼル自動車13モード排出ガス測定技術基準⁸⁾で規定されている炭化フッ素被膜ガラス繊維フィルター（PALLFLEX, TX40HI-20-WW）を使用し、同技術基準に則りPMを捕集した。捕集後は規定時間内のソーク後に重量を計測し、シャーレに入れたPM捕集フィルターを脱空気バックにてパッケージングし、-25℃で冷凍保存した。

5.1.3. PMのガスクロマトグラフ分析方法

PMサンプルの抽出方法は、まずPM捕集後の炭化フッ素被膜ガラス繊維フィルター1～3枚をソックスレー抽出用円筒ろ紙（THIMBLE FILTER 86R, 35 mm×120 mm, アドバンテック東洋製）に詰め、ジクロロメタン200 mlを溶媒として1時間に6回転する条件で2時間のソックスレー抽出を行った。抽出されたジクロロメタン抽出溶液は、窒素パーズ濃縮装置を用いて水浴40℃で窒素ガスを緩やかに吹き付けながら抽出液が5 ml程度になるまで溶媒を揮散させ、さらに*n*-ノナン溶媒を100 μl添加後、濃縮、ジクロロメタン溶媒が揮散し*n*-ノナンだけ残った約100 μlの濃縮液をガスクロマトグラフ（GC）分析用試料とした。

また、リファレンスデータとしての軽油、潤滑油およびDME添加用潤滑性向上剤は、*n*-ヘキサンを用いて段階的に希釈し、最終的に187.5倍に希釈したものをGC分析用試料とした。

ガスクロマトグラフはHEWLETT PACKARD製5890（検出器：FID）で、カラムは同じくHEWLETT PACKARD製Ultra キャピラリーカラム（100% Dimethyl polysiloxane; non-polar, 25 m×0.20 mm ID, コーティング厚0.25 μm）を使用した。注入口温度および検出器温度はそれぞれ310℃および320℃で、注入方式はスプリット（スプリット比1:50）とした。カラム温度は80℃から320℃まで毎分10℃にて昇温し、その後15分間320℃を保持、さらに325℃まで同速度にて昇温後、10分間保持した。

5.1.4. PM粒子径個数濃度分布の計測方法

PM粒子径分布の計測は、自動車排ガス超微粒子測定装置（ワイコフ科学製、MD-A1）を使用した。DMA分級器、中和器、ファラデーカップおよびプリアンプ等で構成される分級部によって、電界中における粒子の電気移動度と粒子径の関係から粒子径分布が計測される。また、排出ガスの希釈は前述のミニダイリュショントンネルを使用し、希釈排ガス流量を2 m³/minとした。このときの希釈率は、エンジン回転数1740 rpmでおよそ25:1である。

5.2. 実験結果および考察

5.2.1. PMに含まれるSOF分の成分分析

(1) リファレンスデータ（潤滑性向上剤のクロマトグラム）

Fig. 17 Reference Gas Chromatogram of Lubricity Improver (LI: fatty acid type and ester type)

Fig. 17に、脂肪酸系およびエステル系潤滑性向上剤のクロマトグラムを示す。脂肪酸系潤滑性向上剤はC21付近に一つだけ強度の大きなピークが、エステル系潤滑性向上剤はC19とC21付近に二つの大きなピークが存在する。

軽油および潤滑油のクロマトグラムはここでは割愛し、次項のPM分析結果とあわせて示すこととする。

(2) DMEディーゼルエンジンのPM成分分析

Fig. 18に、軽油運転時のクロマトグラムを軽油およびエンジン潤滑用オイルのリファレンスデータとともに示す。GC分析に用いたPMは、1740 rpmエンジン回転、300 N・mトルク運転時に5分間捕集したPMを2サンプル分、まとめてソックスレー抽出したものである。PM捕集重量はマイクロ天秤による測定値の合計で1.045 mgである。分析結果から、C15～36の間にクロマトグラムの強度が分布するが、C17～24近傍における強度が大きく、その後C32近傍までなだらかに分布する。また、単一炭素数による強度のピークが数点存在していることが特徴で、これは軽油のリファレンスデータともよく類似する。また、炭素数C26以上では単一炭素数による強度のピークは減少し、ブロードな分布となる。これは、エンジン潤滑用オイルのリファレンスデータの分布と類似する。軽油のリファレンスデータでは分布が極大となるのはC15～19近傍であり、必ずしも捕集PMの分布と明確に一致しない。以上を鑑みると、炭素数C19～24では軽油成分中の炭素数の大きな同C19～24の成分が、それ以上の炭素数ではエンジン潤滑用オイルが核となりPMの生成に至ったと考えられ、その割合は燃料由来が大きいといえる。

Fig. 19に、DME運転時（脂肪酸系潤滑性向上剤500 ppm添加）のクロマトグラムを、エンジン潤滑用オイルおよび噴射ボ

Fig. 18 Gas Chromatogram of PM Emitted from Diesel Engine Using Standard Diesel Fuel

Fig. 20 Gas Chromatogram of PM Emitted from Diesel Engine Using DME Fuel (LI: ester type 3000 ppm)

Fig. 19 Gas Chromatogram of PM Emitted from Diesel Engine Using DME Fuel (LI: fatty acid type 500 ppm)

ンブ潤滑用オイルのリファレンスデータとともに示す。GC 分析に用いた PM は、1740 rpm エンジン回転、300 N・m トルク運転時に 30 分間捕集した PM を 3 サンプル分、まとめてソックスレー抽出したものである。PM 捕集重量はマイクロ天秤による測定値の合計で 1.068 mg で、1 サンプル分の平均重量は 0.356 mg である。分析結果から、軽油運転時よりもやや炭素数で大きい方に分布が移行し、C22～32 近傍の強度が極大となる。軽油運転時の PM に見られた単一炭素数による強度のピークは激減し、見られるピークもブランクおよびバックグラウンドデータで検出されたピークと一致するため、DME 運転時に生成された PM の影響ではないと示唆される。エンジン潤滑用オイルのリファレンスデータの分布と比較すると、同リファレンスデータの極大値以後（リテンションタイムで 25 min 以後）の分布が DME 運転時の分布と完全に一致している。また、噴射ポンプ潤滑用オイルのリファレンスデータの分布と比較すると、同リファレンスデータの極大値近傍は DME 運転時の分布の極大値近傍とよく一致していることがわかる。すなわち、DME 運転時における PM は、エンジンおよび噴射ポンプを潤滑するオイルが核となり生成されるものが大部分を占めている

ことが明らかとなった。一方、脂肪酸系潤滑性向上剤のリファレンスデータでは、C21 近傍に大きなクロマトグラムの強度が存在しており、この潤滑性向上剤による PM 生成の影響も想定していたが、本分析結果からは明確な影響の存在が確認できなかった。

Fig. 20 に、DME 運転時（エステル系潤滑性向上剤 3000 ppm 添加）のクロマトグラムをエステル系潤滑性向上剤のリファレンスデータとともに示す。GC 分析に用いた PM は、1740 rpm エンジン回転、300 N・m トルク運転時に 30 分間捕集した PM を 3 サンプル分、まとめてソックスレー抽出したものである。PM 捕集重量はマイクロ天秤による測定値の合計で 1.077 mg で、1 サンプル分の平均重量は 0.359 mg である。おおよその分布は脂肪酸系潤滑性向上剤 500 ppm 添加、および潤滑性向上剤添加なしの DME 運転時のクロマトグラム分布と同等であり、そのほとんどがオイル由来の PM であると考えられる。一方、炭素数 C19 および C21 付近に他の DME 運転時には存在しない強度が確認された。これは、エステル系潤滑性向上剤のリファレンスデータにも存在しており、この 3000 ppm 添加したエステル系潤滑性向上剤が核となって生成された PM であることが示唆される。ただし、マイクロ天秤による PM 捕集重量計測結果からは脂肪酸系 500 ppm およびエステル系 3000 ppm 間の差は微小であり、捕集重量に影響を及ぼすほどの添加量ではないと考えられる。

5.2.2. DME ディーゼルのナノ粒子排出特性

Fig. 21 に、DME 運転によるエンジン負荷が PM 粒子径分布に及ぼす影響を示す。図中の点線は、燃料噴射をせず動力計でエンジンを駆動しているいわゆるモータリング状態であり、オイル上がりにより排出された揮発性炭化水素成分による個数濃度分布を示す。定格トルクの 20% 負荷運転では、10 nm 強にピークを持つ 5～12 nm の個数濃度分布となり、負荷が増すに従いピーク値も増加する。その分布は 40% 負荷では一時的に粒子径が大きな方へ移動するが、その後負荷の増加に従い粒子径の小さな方へと移行する。全負荷時には 8 nm 付近にピークを持つ大きな分布となる。

中野らの報告によると、軽油ディーゼルの無負荷条件（アイドリング）では 30 nm 以下と 70 nm 近傍にピークを持つ Bi-

Fig. 21 Effect of Engine Load on PM Size Distribution with DME

Fig. 23 Effect of Oxidation Catalyst on PM Size Distribution with DME

Fig. 22 Effect of Engine Load on PM Size Distribution with Diesel Fuel

Fig. 24 Effect of EGR on PM Size Distribution with DME

modal の分布を示し、30 nm 以下の nuclei mode のナノ粒子は無負荷条件にて Thermodenuder 温度を上昇するにつれて、個数濃度が低下すること、また負荷の増加により 60 nm 近傍にピークをもつ log-normal 形状となることが確認されている¹⁷⁾。Fig. 22 は比較のため計測した供試エンジンによる軽油運転時の結果であるが、低負荷時に nuclei mode の分布が残存するものの、中野らの報告と同様、負荷の増加に従い同分布は減少および消滅する。本報告による装置の設定条件では 65 nm が計測可能粒子径の上限であるため、accumulation mode のピークを計測するに至っていないが、軽油運転時には 20 nm 近傍より accumulation mode の分布の立ち上がりが見られ、負荷を増すごとにその個数濃度が増していることがわかる。すなわち、軽油運転時には負荷の増加に伴い排気温度が上昇し、揮発性炭化水素起因ナノ粒子が蒸発する、あるいはそれらが核となり凝縮-凝集されて accumulation mode の粒子へと移行する等により減少する。一方、DME 運転時には、軽油運転時の nuclei mode と同等の粒子径近傍に分布は存在するが、負荷の増加に従いその分布のピーク値は逆に増加する傾向を示した。

Fig. 23 は酸化触媒を装着し、Fig. 21 と同様の運転条件にて DME 運転を行った結果である。点線で示すモータリング時(燃料無噴射)の分布は酸化触媒の有無によらず同等の分布を示したが、これは排気温度が低く、酸化触媒が機能していないためである。負荷が 20% 程度かかると排気温度が 180℃ 程度と上昇し、触媒が機能し始めることにより Fig. 21 で排出されたナノ粒子の多くは触媒により浄化された。一方、負荷によらず

2~10 nm のナノ粒子が依然として残存していることも確認された。

Fig. 24 に、DME 運転時 60% 負荷において、EGR 率がナノ粒子排出特性に及ぼす影響を示す。供試エンジンに標準装備されている二つの EGR バルブと吸気シャッターの組合せにより、EGR 率 0, 15.9, 24.0 および 27.4% の 4 設定にて調査した。なお、EGR クーラーは装備されていない。この結果より、EGR の有無で分布に大きな違いが生じたが、EGR 率には依存しないことが確認された。すなわち、EGR なしの状態から EGR をかけることで個数濃度分布は微小側へ若干移動し、ピーク値も増加するが、その後 EGR 率を増加させてもその分布に影響しないことが確認された。

5.2.3. DME ディーゼルにおける PM 形成に関する考察

DME ディーゼルの PM 形成についてオイルに起因する揮発性炭化水素と DME の不完全酸化物、およびその他の要因に分けて考察する。

DME ディーゼルも軽油ディーゼルと同様、オイルに起因する揮発性炭化水素が核となる nuclei mode の粒子形成は存在すると考えられる。5.2.1. 項の PM 分析によると、希釈トンネル後にフィルターで捕集される DME 運転時の PM は、その約 90% は SOF 分であり、この SOF 分のクロマトグラムは噴射ポンプおよびエンジン潤滑に使用しているオイルのクロマトグラムとほぼ一致する。すなわち、軽油ディーゼル無負荷条件同様に、オイルに起因する nuclei mode の粒子の形成は存在すると

Fig. 25 Relationship between Mean Excess Air Ratio and CO Emission with Variable Operating Conditions

いえる。一方、負荷が増すにつれて軽油ディーゼルでは蒸発または凝縮-凝集による粒径の粗大化により大きく減少するはずの nuclei mode が、DME ディーゼルでは増加傾向を示す。これは、DME ディーゼルでは核となった10 nm 近傍のナノ粒子が凝縮-凝集することなく同粒径近傍で停滞しているためと考えられる。

また、負荷の増加に伴って nuclei mode が減少しないのは、燃料すなわち DME に起因する不完全酸化物の影響と考えられる。特に、高負荷条件では局所的に過濃な状態での噴霧燃焼となり、DME が不完全酸化の状態で核形成しナノ粒子状物質として存在するため、負荷の増加とともに個数濃度も増加していると考えられる。Fig. 21 に示す DME ディーゼル 80% および 100% 負荷運転条件では、平均空気過剰率が 2 に達せず（それぞれ 1.69, 1.35）、より酸化しづらい状態であるといえる。さらに、Fig. 24 に示す EGR ありの個数濃度分布は Fig. 21 の DME 運転時負荷 80% 以上の分布と酷似している。これらの条件もまた平均空気過剰率が 2 未満（EGR 率の小さい方から 1.79, 1.64, 1.15）となる。Fig. 25 に PM 粒子径個数濃度分布計測時の平均空気過剰率と CO 排出濃度の関係を、EGR の有無および酸化触媒装着時ごとにそれぞれ示す。負荷 80% 以上および EGR 15.9% 以上で平均空気過剰率が 2 未満になるとともに、CO 排出濃度の急激な増加が見られる。従来の軽油ディーゼルでは、過濃な運転条件ではすすの排出が顕著となるが、同様の運転条件に入った時にすすの排出がなく CO 排出濃度が増加するのは、DME ディーゼル特有の特性である。過濃または低酸素濃度燃焼条件での DME ディーゼル燃焼時における不完全酸化物の解析が DME ディーゼルのナノ粒子排出特性解明の課題といえる。

最後に、その他の要因として、水分が影響する可能性を挙げておく。4章の Fig. 14 に示すように、燃料の H/C 比から DME ディーゼル排ガス中には軽油よりも水分が多く含まれる。また、負荷が増すにつれてその差は大きくなる傾向が見られる。すなわち、水蒸気を核とする粒子状物質、あるいは水蒸気そのものを荷電粒子として検知し、個数濃度としてカウントしている可能性もあると考えられる。

6. 開発車両によるフリート試験

ここでは実際の開発車両を使用した実証走行試験について記

Fig. 26 Field Test Area and Route of the Medium Duty DME Truck

述する。

DME 自動車走行試験用燃料充填システムが設置されているつくば市、新潟市および横浜市を拠点とし、長距離運転時の車両システムの評価を実施した。長距離公道走行試験の走行エリアイメージを Fig. 26 に示す。

平成 16 年 12 月 15～17 日の第 1 回つくば-新潟間（約 400 km）長距離公道走行試験では、常磐道-外環道-関越道-北陸道の経路にて途中燃料を補給することなく無事走破し、このときの燃料タンク残量から、500 km の燃料無補給走行は可能と判断した。

また、平成 17 年 4 月 18, 19 日の第 3 回つくば-新潟間長距離公道走行試験では、フル積載量である 3.3 トンのダミーウェイトを積み、燃料無補給でつくば-新潟間を完走した。

Table 9 に走行条件が燃費に及ぼす影響を示す。括弧内は発熱量を軽油と同等と見なした場合の燃費（以下、軽油換算燃費と記載）を示す。テストコース走行時の燃費が最も悪く、軽油換算で 4 km/l 弱であった。高速道路を中心に走行する長距離公道走行試験では 4 km/l をやや超える燃費が得られ、市街地のみを走行したデータでは 5 km/l を超える高燃費を示した。また、3.3 トンフル積載の場合も大きな燃費悪化はない。ただし、高速道路での燃費は走行状態により大きく左右される。Table 10 に示す燃費は常時およそ 100 km/h での走行状態の平均値であるが、平成 17 年 5 月 13～16 日につくば-名古屋を往復した際には約 80 km/h での走行とし、5.75 km/l を超える燃費が得られていることを注記する。

テストコースによる走行試験および長距離公道走行試験により確認された開発車両の不具合とその対策を Table 10 に示す。いくつかの不具合発生とその改善を重ね、平成 19 年春、20,000 km の総走行距離を達成し、一連の走行試験を終了した。その間、耐久性に関する重大な不具合はなく、現在も継続して走行可能な状態である。

7. 結 言

本報では、DME を燃料とする中型トラックの研究開発を通じて得られた知見を基に、燃料特性の大きな課題である潤滑性

改善に関する検討、エンジンおよび車両開発、微量成分を含む排出ガス特性の評価および車両走行試験結果についてまとめた。

潤滑性評価方法の検討では、既存の軽油用試験方法を基に新しい装置を導入し、液化ガスである DME の潤滑性能と潤滑性向上剤の効果を数値として表現することを可能とした。今後、実機耐久性との相関を評価し、より一般化し得るシステムとすることで、DME 燃料の潤滑性評価方法の標準化も可能になると思われる。

PM を含む微量排気成分の排出特性評価では、DME の物性的特異性との関連が明確となり、厳格化する排出ガス規制に対してクリーン化が進む軽油ディーゼル排気よりも優位に立てるポテンシャルは大きいといえる。

車両開発および実証走行試験では、実際にシステムとしてまとめ上げ、公道走行試験により課題抽出とその改善を重ねることで完成度を向上することができた。

本開発車両は国内で4台目の国土交通省大臣認定 DME 自動車であるが、本格的な公道走行試験を実施し、総走行距離 10,000 km を超えた、先駆けとなる最初の一台である。他のプロジェクト等により大臣認定による DME 自動車の試験走行台数も増え、交通安全環境研究所では「次世代低公害車開発促進事業（2002～2004年度）」¹⁹⁾や、他プロジェクトの成果車両数台を含む5台の車両を用いて、「次世代低公害車実用化促進事

業」として DME 自動車の公道走行試験車両の開発と走行試験を実施中である¹⁹⁾。これらの実績を踏まえ、国土交通省では交通安全環境研究所とタイアップし、DME 自動車の車両技術基準の作成に着手している¹⁹⁾。

新潟では三菱ガス化学(株)らによる燃料用 DME の商用製造プラント（最大年産10万トン）が完成し、2008年内にも燃料用 DME の製造が開始される²⁰⁾。ISO では一般的な燃料用および自動車用 DME 燃料の標準化の作業を2007年より開始した。関連する法令・規格やインフラ整備が期待される中、DME 自動車は実用化への階段を着実に上りつつある。

謝 辞

本研究は(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、天然ガス開発利用促進型特別研究の「中大型 DME 自動車の実用化研究開発」、および「DME 自動車の実用化フリート試験研究開発」両プロジェクトによる成果の一部である。プロジェクトチーム関係社（旧コープ低公害車開発(株)、伊藤忠エネクス(株)、三菱ガス化学(株)、JFE ホールディングス(株)、伊藤忠商事(株)、岩谷産業(株)、福山通運(株)、(株)小野測器、大野技術事務所、(有)テクノアシスト、(株)コモテック）各位のご尽力に謝意を表します。また、テストエンジンの設置および車両開発には(株)いすゞ中央研究所、DME 用燃料噴射システムはボッシュ(株)、実験に際しては当研究所新燃料自動車技術研究センター新燃料燃焼チーム日暮一昭氏の多大なるご協力があったことをここに記して、謝意を表します。

Table 9 Effect of Operating Conditions on Average Fuel Consumption¹⁷⁾

	Load [kg]	Average fuel consumption (equivalent fuel consumption) [km/l]
Public highway		
～ 100 km/h	—	2.27 (4.29)
	3300	2.16 (4.08)
～ 80 km/h	3300	3.04 (5.75)
Oval test course	—	1.98 (3.74)
(about 120 km/h)	3300	1.94 (3.67)
City area only	—	2.83 (5.36)

References

- 1) Documentation of First International DME Conference, (2004).
- 2) Ishiwada, A., Otsuka, H., Kobayashi, R., Ogawa, K., *Journal of JSAE*, **57**, (9), 28 (2003).
- 3) Seto, T., Tokumaru, T., Takase, S., *Proceedings of JSAE*, No. 47-03, 225, p. 21-24 (2003).
- 4) Kinoshita, K., Oguma, M., Goto, S., Sugiyama, K., Mori, M., Watanabe, T., *SAE Paper* 2003-01-3193 (2003).
- 5) Ushiyama, D., Noda, T., Nozaki, S., Oikawa, H., *Proceedings of JSAE*, No. 49-03, 232, p. 5-8 (2003).

Table 10 Issues Related to DME Fuel Subsystem of the DME Truck, with Date, Cause and Solutions¹⁷⁾

Device	Date of occurrence	Issue	Cause	Solutions Date of resolution
Injection pump	Prior to Aug. 4, 2004 ^{a)}	Excess wear of liquefaction compressor shaft	Lack of strength and lubricity	Different shaft material Before Aug. 4, 2004
	Dec. 15-17, 2004	Oil leakage from cover of plunger gallery	Lack of adherence of sealing rubber	Change plunger gallery cover design Jan. 13, 2005
Fuel supply system	Mar. 16-17, 2005	Loss of fuel supply system valve part	Screw vibrated loose	Use a screw lock compound Mar. 18, 2005
Fuel tanks	Prior to Aug. 4, 2004 ^{a)}	Poor refueling	Swelling rubber	Different rubber material Aug. 23, 2004
	Prior to Aug. 4, 2004 ^{a)}	Faulty operation of fuel level meter	Fuel level meter float sank due to permeation of DME	Change float material from resin to metal Aug. 23, 2004
	Dec. 15-17, 2004	Faulty operation of over charge check valve	Under investigation	Change the valve and tank system Apr. 25, 2006
	Feb. 15, 2005	Decreasing fuel flow rate from fuel tank	Under investigation	Change the valve and tank system Apr. 25, 2006

a) Before applying for special authorization to Minister of MLIT.

- 6) Oguma, M., Goto, S., Suzuki, S., Watanabe, T., *Transaction of JSAE*, **36**, (2), 31 (2005).
- 7) Goto, S., Oguma, M., Wakasa, R., Hayashi, H., Suzuki, S., Proceedings of JSAE, No. 41-05, 208, p. 19-24 (2005).
- 8) Engineering and Safety Department of Road Transport Bureau in Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism and National Traffic Safety and Environment Laboratory, "TRIAS," (2001), p. 1457-1467.
- 9) Engineering and Safety Department of Road Transport Bureau in Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism and National Traffic Safety and Environment Laboratory, "TRIAS," (2001), p. 1718-1740, p. 617-665.
- 10) Oguma M., Goto, S., *Journal of Japanese Society of Tribologists*, **52**, (9), 29 (2007).
- 11) Sugiyama, K., Kajiwar, M., Fukumoto, M., Mori, M., Goto, S., Watanabe, T., SAE Paper 2004-01-1865 (2004).
- 12) Tanaka, K., "Masatsu no Ohanashi," Japanese Standards Association, (2004), p. 189-209.
- 13) Oguma, M., Shiotani, H., Goto, S., Suzuki, S., SAE Paper 2005-01-2202 (2005).
- 14) e.g. "Measurement & Ecological Evaluation of Nano-particulate Matter Emitted from Vehicles and DEP," NTS, (2005).
- 15) Oguma, M., Tsujimura, T., Goto, S., Suzuki, S., *Transaction of JSAE*, **36**, (6), 91 (2005).
- 16) Oguma, M., Tsujimura, T., Goto, S., Nikolic, D., Proceedings of JSAE, No. 52-06, 252, p. 5-8 (2006).
- 17) Nakano, M., Kubo, S., Kondo, T., Yamamoto, M., Yamazaki, S., Tanaka, T., Proceedings of JSAE, No. 43-03, 201, p. 9-12 (2003).
- 18) Oguma, M., Goto, S., SAE Paper 2007-01-0032 (2007).
- 19) Sato, Y., "Commercialization Project of DME Vehicles," Proceedings of DME Seminar, (2007).
- 20) Yanagawa, T., *Petroleum and Natural Gas Review*, **41**, (3), 40 (2007).

要 旨

DME ディーゼルエンジンの実用化研究開発

小熊 光晴^{†1)}, 後藤 新一^{†1)}, 鈴木 信市^{†2)}, 結城 茂通^{†3)}

^{†1)} (独)産業技術総合研究所, 305-8564 茨城県つくば市並木1-2-1

^{†2)} (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 261-0025 千葉市美浜区浜田1-2-2

^{†3)} 岩谷産業(株), 105-8458 東京都港区西新橋3-12-8

本報では、DME (Dimethyl Ether) 中型トラックの研究開発を通じて得られた知見を基に、燃料特性の大きな課題である潤滑性改善に関する検討、エンジンおよび車両開発、微量成分を含む排出ガス特性の評価および車両走行試験と得られた結果について、一連の研究開発に対する集大成としてまとめる。

潤滑性評価方法の検討では、既存の軽油用試験方法を基に新しい装置を導入し、液化ガスである DME の潤滑性能と潤滑性向上剤の効果を数値として表現することを可能とした。今後、実機耐久性との相関を評価し、より一般化し得るシステムとす

ることで、DME 燃料の潤滑性評価方法の標準化も可能になると思われる。

PM (Particulate Matter) を含む微量排気成分の排出特性評価では、DME の物性的特異性との関連が明確となり、厳格化する排出ガス規制に対してクリーン化が進む軽油ディーゼル排気よりも優位に立てるポテンシャルは大きいといえる。

車両開発および実証走行試験では、実際にシステムとしてまとめ上げ、公道走行試験により課題抽出とその改善を重ねることで完成度を向上することができた。