ジメチルエーテル(DME)を燃料とした圧縮点火直接噴射機関の
性能と排気特性*

(第1報, レトロフィット時の機関性能および排気特性)

陳 之 立^{*1}, 金 野 満^{*1}, 梶 谷 修 一^{*1}Performance and Emissions of DI Compression Ignition Engines Fueled
with Dimethyl Ether

(1st Report, Performance and Emissions in Retrofitted Engines)

Zhili CHEN, Mitsuru KONNO and Shuichi KAJITANI

Engine performance and exhaust gas characteristics of a direct injection CI engine were investigated with neat dimethyl-ether (DME), an alternative fuel being considered for attaining low emissions. The study was conducted by comparing with conventional gas oil. Results from the present work include: (1) It was necessary to add a small amount of lubricating additives to DME for achieving satisfactory engine operation, to minimize some excessive wear in the injection nozzle. (2) Engine performance for both fuels were comparable. (3) Although negligible amounts of soot and very low THC emissions were measured, NO_x emission was about the same as in gas-oil operation. (4) The reduction of NO_x emission by retarding the injection timing was highly significant with DME. (5) The NO_x emission from the retrofitted engine could be further reduced by dissolving CO₂ in DME.

Key Words: Diesel Engine, Alternative Fuel, Oxygenated Fuel, Emission, particulate/Dimethyl Ether, Soot-free Combustion

1. ま え が き

圧縮点火機関の新しい代替燃料としてジメチルエーテル(Dimethyl Ether CH₃OCH₃, 以降DMEと略記する)が注目されている。DMEは当初, フロン代替物質として, その毒性⁽¹⁾, 物性⁽²⁾が調べられ, 人体および環境に対する安全性が高いことから現在, 世界中で広くプロペラントとして利用されている。

DMEの内燃機関への適用はメタノールから容易に製造でき, その沸点が-25°Cと低いことからメタノール火花点火機関の始動補助燃料として着目された⁽³⁾⁽⁴⁾。次に, DMEの自着火温度が235°Cと低いこと(セタン価≧55)からメタノール圧縮着火機関の着火および燃焼促進剤として検討された^{(5)~(9)}。最近, 天然ガスから安価にDMEを製造するプロセスが開発されたこと⁽¹⁰⁾から, 単体での利用が検討されて^{(11)~(15)}, その排気清浄性の高さが脚光を浴びている。これはDMEがメタノールと同様にC-C結合がないことから無煙燃焼が可能なこと, したがって容易にEGRを行うことでULEVの規制をクリアすることによる⁽¹³⁾。しかしながら, 燃料供給方法, 燃焼特性など不明の点も多

い。本研究では市販エンジンの改造を最小にした際の機関性能, 燃焼特性, 排気特性について検討を加えた。以下その結果を述べる。

2. 供試機関および供試燃料供給系統

DMEは動粘性係数が非常に小さく, 潤滑性に乏しいため, 燃料供給系に摩耗, 漏れ, 圧送不良などの問題が起こる可能性がある。そこで, これらの問題を明確にする意味から実験に使う機関を新たに設置した。供試機関はヤンマーディーゼル(株)製横形水冷単気筒直接噴射式機関(NFD 13)でその主要諸元はボア 92 mm, ストローク 96 mm, 行程容積 0.638 l, 圧縮比 17.7, 定格出力 8.45 kW/2 600 rpmである。

燃料供給系統を図1に示す。内容積 1 l の燃料缶にあるDMEは窒素ガスで加圧され噴射ポンプ, 噴射ノズルへ導かれる。噴射ノズルにはリフトセンサを組み込み, 噴射開始時期の計測を行った。リターンはそのまま大気へ放出し, 漏れ量の計測が行えるようにしてある。なお燃料缶内圧力は1.96~4.41 MPaまで変化した。

噴射ノズルにリフトセンサを組み込むための加工とノズル開弁圧を最低 6.86 MPaに設定できるようにした以外, 供試機関に特別の改造は加えていない。推奨

* 原稿受付 1997年9月20日。

*¹ 正員, 茨城大学工学部 (☎ 316-8511 日立市中成沢町4-12-1)。

Fig. 1 Schematic diagram of fuel system

Fig. 2 Scarred surface of injection pump plunger (operated with neat DME for 40 hours)

された慣らし運転時間を軽油運転で終了した後、以下の実験を行った。

3. 実験結果および考察

最初に潤滑向上剤の添加なしに機関を運転した。燃料缶からの供給圧は 1.96 MPa、ノズル開弁圧は 7.84 MPa⁽¹¹⁾ とした。始動後 30 min 過ぎから回転速度、出力とも変動し、出力低下が起こり、その後は始動も不可能となった。新しいノズルチップに二度交換して実験したが、同じ現象が起こることを確認した。噴射ノズルを分解したところニードルに摩耗の跡が見られた。このような摩耗はノズル以外に噴射ポンプのプランジャ(図2)にも確認された。そこで DME に潤滑向上剤(HiTEC 580)を添加した。最大 1 500 ppm から順次濃度を下げて運転を行い、運転可能な時間を調べた結果潤滑向上剤濃度 100 ppm 以下では極端に運転時間が短縮することがわかった。今回は排出 HC などへの影響を最小にする意味で潤滑向上剤の濃度は 100 ppm とした。当然運転時間が長くなると問題が生ずる恐れはある。

3・1 レトロフィット機関の DME 供給量 図3に噴射量最大で運転したときの機関回転速度に対する出力とトルクを示す。DME 運転のときのほうが出力、トルクとも小さく、さらに回転速度が高くなるに従い、出力の低減が大きくなり、定格回転速度(2 600 rpm)の 70% で出力は軽油運転の 60% に低減する。これは表 1

Table 1 Properties of the test fuels

	DME	Diesel
Lower Calorific Value (MJ/kg)	28.8	42.5
Density (kg/m ³)	668	840
Cetane Number	>>55	40-55
Autoignition Temperature (°C)	235	250
Liquid Viscosity (kg/ms)	0.15	2-4
Boiling Point (°C)	-25	180-360
Stoich. A/F Ratio	9	14.6
Modulus of Elasticity (N/m ²)	6.37E+8	1.49E+9

Fig. 3 Brake power and torque curves for the engine operating with DME and diesel at maximum injection

Fig. 4 Relationship between needle lift and temperature (960 rpm, inject in atmosphere)

に示すように DME の発熱量および密度が軽油に比べて小さいこと、ならびに DME の体積弾性係数は軽油の約 2/3 であるため回転速度の増加によって送油量が低減することなどに起因すると思われる。さらに DME の蒸気圧が 20°C で 0.53 MPa であるが、120°C ではその約 10 倍の 4.90 MPa になることも影響していると考えられる。図4はノズル開弁圧 8.82 MPa、燃料供給圧 3.43 MPa に設定し、噴射ノズル全体を油の中で加熱し、DME を噴射した際の噴射弁リフトである。図4に示されるようにノズル全体の温度増加に伴って、噴射開始時期は遅くなることから蒸気圧の影響が大きいと推定できる。高負荷になるに従い噴射ポンプ内部での温度上昇も考えられ、これらはレトロフ

ット機関では今後検討すべき事項である。

3.2 ノズル開弁圧と DME の漏れ量 先に述べたよう DME の沸点は -25°C と低く、燃焼室内ではすぐに沸騰、気化すると考えられる。図 5 に DME および軽油の噴射ノズルからの漏れ量を正味平均有効圧力 P_{me} に対しプロットした結果を示す。ノズル開弁圧は 8.82 MPa である。軽油の漏れ量が全供給量の $1\sim 4\%$ であるのに比較し DME では $7\sim 10\%$ の漏れ量となる。この漏れ量に開弁圧が高い場合に顕著で、図 6 に示すように軽油と同じノズル開弁圧ではその値は約 30% に達する。一方、ノズル開弁圧が低く 6.86 MPa とすると噴射終了時に不整噴射が観測された。そこで本実験ではノズル開弁圧 8.82 MPa で実験を行った。なお、このリターンからの漏れは燃料供給系統に戻すこと (以降リターン加圧と呼ぶ) になるが、ニードル端部に燃料供給圧と同じ圧力がかかり、初期噴射率および噴射時期に影響を及ぼすことになる。このリターンからの漏れ量は体積法で計測し、燃料消費量の補正を行っている。なお、噴射ポンププランジャからの漏れ量は開弁圧 8.82 MPa の場合、いずれの負荷においてもノズル漏れの $1/10$ 以下 (全噴射量の 1% 以下) であるので、燃料消費量計測への影響が小さいと考え、本実験では補正を行わなかった。また、DME の燃料消費量を計測するとき、加圧用窒素の質量の補正も行っ

Fig. 5 Relationship between leakage and load (960 rpm, injector opening pressure for DME= 8.82 MPa , for diesel= 20.09 MPa)

Fig. 6 Relationship between leakage and injector opening pressure for DME (960 rpm)

た。

3.3 レトロフィット DME 機関の機関性能 機関運転条件は 960 rpm 一定とし負荷は $0.3\sim 0.6\text{ MPa}$ の間で変化させた。なお供試機関の噴射ポンプは機関に組み込まれているため任意のクランク角で噴射はできないが、ポンプ駆動歯車の組合せを 1 歯変えることで 12°CA 遅らせることができ、静的噴射開始時期は 17 と 5 deg.BTDC となる。軽油運転の際のノズル開弁圧は 20.58 MPa 、DME 運転時のノズル開弁圧は 8.82 MPa 、燃料供給圧は 3.43 MPa である。

図 7 に正味平均有効圧力 $P_{me}=0.5\text{ MPa}$ における指圧波形の一例を示す。図 7 に示されるように同一圧送開始時期にもかかわらず、DME の実際噴射時期は軽油より約 4 deg.CA 早くなったため、着火時期は、リターン開放 DME 運転、リターン加圧 DME 運転、軽油運転の順番に早くなっている。これは DME 運転では加圧送油していること、ノズル開弁圧が軽油の 45% と低いことが DME の体積弾性係数が軽油より小さいことの効果を上回った結果と考えられる。さらに DME の実質噴射開始時期が早いにもかかわらず、着火性のよさで圧力上昇率は軽油運転より小さいが、最大圧力は高くなる。しかし、噴射開始時期を 5 deg.BTDC と遅くすることで DME 運転の最高圧力は軽油運転の際より低減する。

図 8 に P_{me} に対する熱消費率を示す。噴射開始時期 17 deg.BTDC の場合の熱消費率は DME と軽油がほぼ同等なレベルにある。特に注目すべき点は 5 deg.BTDC の遅い噴射開始時期にもかかわらず、DME の熱消費率が減少し、また増加しても、その増加が極めて小さいことである。この際リターン加圧を行ったほうが熱消費率は高くなり、同時に 0.5 MPa 以上の出力を得ることができなくなった。これは初期噴射量の

Fig. 7 In-cylinder pressure history ($P_{me}=0.5\text{ MPa}$)

Fig. 8 Energy Consumption

Fig. 9 Heat Release Rate ($P_{me}=0.5$ MPa)

低減, 実質噴射開始時期の遅延およびニードル移動速度低減による噴射量の低減などが原因と考えられる。当然ノズル噴孔径の増加で出力増加は可能であろう。

レトロフィット機関では細かい噴射開始時期の変更は不能であったが, 以上のことから熱消費率の観点からの最適噴射開始時期は 17 と 5 deg. BTDC の間に存在すると考えられる。

3・4 レトロフィット DME 機関の燃焼特性 図 9 に図 7 の指圧線図を解析した結果を示す。DME 運転で特徴的なことは, いわゆる予混合燃焼がほとんどないことである。さらに大部分が拡散燃焼であるにもかかわらず燃焼期間は軽油運転と同等かやや短いことである。DME の着火温度が 235°C (セタン価 55 以上) と低いこと, 沸点が -25°C と低いこと, および発熱量が小さいことで噴射期間が長くなり (約 2 倍), 燃焼領域に引き続き噴射される DME による乱れエネルギーの増加効果などが影響し, 燃焼期間の短縮になったと考えられる。今後 DME に適した燃焼方式の検討も必要になる。

3・5 レトロフィット DME 機関の排気特性 図 10(a) に P_{me} に対する吐煙濃度を示す。先に述べた

Fig. 10 Exhaust emissions with DME operation

ようにメタノールと同様 C-C 結合のない DME は完全な無煙燃焼が実現している。したがって吐煙低減のための特別の燃焼方式の検討は不要になる。図 10(b), (c), P_{me} に対する THC 濃度 ppm, g/kWh を示す。図 10(b), (c) に示されるようにいずれの噴射時期でも軽油運転の際約 1/2 の排出濃度である。表 2 にガスクロマトグラフで測定した排気の分析結果 (C4 以下) の一例を示す。HCHO は還元 FID 法で測

定した。分析条件はプリカラム Porapak PS (1 m), メインカラム Gaskuropap 54 (2 m), Ni 触媒温度 440°C, H₂ 供給圧 0.127 MPa, 30°C から 180°C の昇温分析である。

C4 以下の未燃炭化水素 (HC) ではあるが, 軽油運転に比較し DME 運転の際の排気は非常に清浄で, C4 以下では未燃焼 DME が大部分であり, 同じ無煙燃焼するメタノール機関にあったホルムアルデヒド (HCHO) の排出がほとんどないことが特色である。自動車用排気ガス分析計で測定した THC の値との差があるのは, 潤滑油, あるいは潤滑向上剤の希釈に用いた灯油などの分解成分と考えられるがその詳細は不明である。

図 10(d), (e) にそれぞれ P_{me} に対する NO_x 濃度 ppm, g/(kWh) を示す。DME 機関の NO_x 排出は先に示した指圧線図から予測されるように 17 deg. BTDC の噴射では軽油運転より高くなるが, 5 deg. BTDC と遅くすることで約 1/3 の排出濃度にできる。また先に述べたように無煙燃焼であることから容易に EGR が可能であり, ULEV の規制を満足できる⁽¹³⁾。

3・6 CO₂ の溶解が排気浄化に及ぼす効果 DME は基本的に CO と H₂ から合成でき, 大量に低価格で製造するには石炭および天然ガスが検討されている。石炭から DME を合成する際の化学式と反応熱は以下である⁽¹⁶⁾。

また天然ガスから DME を製造する際の化学式と反応熱は以下である⁽¹⁰⁾。

Table 2 Results of exhaust gas Analysis by gas chromatograph

Species	DME	Diesel
CH ₄	0	34
C ₂ H ₆	0	10
C ₂ H ₂ +C ₂ H ₄	1	238
C ₃ H ₈	0	68
C ₃ H ₆	0	4
i-C ₄ H ₁₀	0	0
n-C ₄ H ₁₀	0	9
HCHO	0	3
CH ₃ OH	0	6
CH ₃ OCH ₃ (DME)	17	0
MEXA (THC)	96	775

これらは製造するプロセスおよび触媒の違いを反映しているものと考えられるが, いずれも精製前の粗 DME (あるいは燃料 DME) には H₂O, CH₃OH, CO₂ が含まれている。そこでレトロフィット機関で EGR と同等の効果を達成させるため, DME に CO₂ が溶けている燃料での NO_x 低減の可能性を検討した。DME に CO₂ は質量比で 1:1 以上溶けるが, 本報告では質量割合 $17.6\% = G_{\text{CO}_2} / (G_{\text{CO}_2} + G_{\text{DME}}) \times 100\%$ で, 噴射開始時期 5 deg. BTDC の結果を述べる。機関運動条件は先の実験と同じで, リターン加圧を行っている。図 11(a) に CO₂ 溶解を行った際の指圧線図を示す。また図 11(b) には図 11(a) の指圧線図から求めた熱発生率を示す。CO₂ 溶解ではやや着火遅れが長くなり, 燃焼がやや遅いクランク角で発生し, 期待したように NO_x 濃度の低減が得られた (図 12)。しかし, 不活性物質 CO₂ の増加は供給熱量の低減となり機関出力の低下をもたらした。

図 13 に熱消費率と NO_x の関係を示す。なんら最適化されていない機関であっても軽油運転に比較して DME 運転は, NO_x 濃度の低減と, 熱消費率の低減が同時に得られる。今後, 燃料供給方法, 燃焼室形状, さらに噴霧内における EGR 的效果などをより詳細に検討する必要があると考えられる。

4. 結 論

機関構造の変更を最小にした直接噴射式圧縮点火機関に DME を供給した際の機関性能, 燃焼特性, 排気

Fig. 11 Cylinder pressure history (a) and heat release rate (b) ($P_{me}=0.5$ MPa, 5 deg. BTDC)

Fig. 12 NO_x concentration (5 deg. BTDC)

特性について検討を加えた結果、以下のことが明らかになった。

(1) DME 単味では噴射系統の摩耗で円滑な運転は不可能であるが、潤滑向上剤の添加でその問題は回避できると考えられる。

(2) 機関性能はほぼ軽油と同等であり、特に噴射開始時期を遅らせた際の熱消費率の増加が極めて小さい。

(3) 噴射時期遅延で NO_x 濃度を軽油運転の約 1/3 に低減することが可能である。ただし、この NO_x 濃度の低減は軽油の噴射時期遅延効果と同等である。

(4) DME に CO₂ が溶け込んだ粗 DME では NO_x 濃度の低減が可能であり、レトロフィット機関への適用を考えると参考になると思われる。

(5) DME 機関の問題点はほぼ噴射系統に集中し、DME の無潤滑性に起因する噴射系の摩耗、常温で気体でありまた液化しても体積弾性係数が低いことによる供給系統の圧力伝ばの問題、配管の耐圧性、気密性、発熱量が小さいことによる噴射量増加、さらには高負荷、連続運転時のノズルおよびポンプ部の温度制御など解決すべき問題が多いと考えられる。

潤滑添加剤は(株)エチルコーポレイション・ジャパンから提供していただいたこと、実験には茨城大学大学院博士前期課程学生である嶺岸澄貴君、町田英之君の、排気ガスの分析には中村篤君の協力があつたことを記して謝意を表す。

文 献

- (1) Bohnen, L. J. M., DME-A Promising Alternative Propellant in the Fluorocarbon Crisis, *Aerosol Rep.*, 18(3) (1979), 90.
- (2) Holldorff, H., ほか 1 名, Vapor Pressure of N-Butane, Dimethyl Ether, Methyl Chloride, Methanol and Vapor-Liquid Equilibrium of Dimethyl Ether-Methanol, *Fluid Phase Equilibria*, 40 (1988), 113.
- (3) Kozole, K. H., ほか 1 名, The Use of Dimethyl Ether as a Starting Aid for Methanol-Fueled SI Engines at Low

Fig. 13 NO_x and energy consumption tread-off (5 deg. DTDC)

- Temperatures, *SAE Paper*, 881677, (1988).
- (4) Karpuk, M. E., ほか 1 名, On Board Dimethyl Ether Generation to assist Methanol Engine Cold Starting, *SAE Paper*, 881678, (1988).
 - (5) Galvin, M. P., Aspirated Ether Ignition System for Methanol Fueled Diesel Engines, *Proc. 8th ISAF*, (1988) 601-606.
 - (6) Cipolat, D., Methanol/Dimethyl Ether Fueling of a Compression Ignition Engine, *Proc. 11th ISAF*, (1991) 411-416.
 - (7) Karpuk, M. E., ほか 3 名, Dimethyl Ether as an Ignition Enhancer for Methanol Fueled Diesel Engines, *SAE Paper*, 912420 (1991).
 - (8) Murayama, T., ほか 3 名, A Study of a Compression Ignition Methanol Engine with converted Dimethyl Ether as Ignition Improver, *SAE Paper*, 922212 (1992).
 - (9) Guo, T., ほか 3 名, Improvement of Performance and Emissions of a Compression Ignition Methanol Engine with Dimethyl Ether, *SAE Paper*, 941908 (1994).
 - (10) Hansen, J. B., A Large Scale Manufactured of Dimethyl Ether-A new Alternative Diesel Fuel From natural Gas, *SAE Paper*, 950063 (1995).
 - (11) Sorenson, S. C., ほか 1 名, Performance and Emissions of a 0.273 Litter Direct Injection Diesel Engine Fueled with Neat Dimethyl Ether, *SAE Paper*, 950064 (1995).
 - (12) Fleish, T., ほか 7 名, A New Clean Diesel Technology: Demonstration of ULEV Emissions on a 1994 Model Diesel Engin Using Dimethyl Ether, *SAE Paper*, 950061 (1995).
 - (13) Kapus, P. E., ほか 1 名, ULEV potential of DI/TCI Diesel Passenger car engine operated on Dimethyl Ether, *SAE Paper*, 952754 (1995).
 - (14) Kapus, P., Herwig Ofner, Development of Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether, *SAE Paper*, 950062 (1995).
 - (15) Glensvig, M. and Sorenson, S. C., High Pressure Injection of Dimethyl Ether, ICE-27-3, *Proc. Fall Tech. Conf.*, 3 (1996) 57-62.
 - (16) 大野陽太郎, 石炭からの新クリーン燃料-ジメチルエーテル-, 日本学術振興会石炭利用技術第 148 委員会第 56 会研究資料, (1996).