

ジメチルエーテルによる予混合圧縮着火機関の 連続運転に関する研究

嶽間沢秀孝*, 平野裕也**, 廣安博之***

A Study of Continuous Operation of HCCI Engine Operated on Dimethyl Ether

Hidetaka GAKUMASAWA, Yuya Hirano
and Hiroyuki HIROYASU

Synopsis

It converted so that a small engine could be operated by Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion with dimethyl ether (DME). It is difficult to control auto-ignition timing and combustion duration. The performances and the exhaust characteristics of compression ignition combustion engine fueled with DME and diesel fuel were investigated. As a result, it succeeded in continuous smokeless operation of an efficient internal combustion engine by DME homogeneous charge system.

Key Words : Compression Ignition Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, Dimethyl Ether

1. はじめに

ディーゼル機関は高い熱効率と耐久性を併せ持つため、小型機関から大型機関まで広く利用されている。しかし、断熱圧縮中の燃焼室に軽油や重油などの燃料を噴射しながら不均一な拡散燃焼を行うため、燃料濃度が希薄な領域と過濃な領域で、それぞれ NO_x と黒煙・微粒子 (PM) が生成排出される。近年、ディーゼル機関搭載車両に対する排気浄化、とりわけ黒色排気中の黒煙・微粒子低減が求められ厳しい規制¹⁾ が設けられている。高効率の維持と排気浄化という背反する目標を同時に達成する一つの手段として代替燃料を用いる方法がある。軽油代替燃料として、GTL (Gas To

Liquid)²⁾ やジメチルエーテル (DME)^{3) 4)} が注目されている。DME は、常温常圧では無色無臭の気体だが、加圧すると容易に液化するLPGに似た性状を示す物質で、これまで主に、塗料や農薬、化粧品用のスプレー用噴射剤として利用されてきた。

これまでに DME を燃料に用いたディーゼル機関の研究・開発⁵⁾ が各所で活発に行われ、トラック・バスなどが試作・実用化されている。しかし、これらの研究・開発は、いずれも DME 運転専用の燃料噴射ポンプ、燃料噴射弁を使用した DME 燃料専用機関を対象としたもので、車両搭載用機関としては比較的大型のものが中心である。これ

*近畿大学工学部システムデザイン工学科

Department of System Design Engineering, School of Engineering,
Kinki University

**近畿大学大学院工業技術研究科

Graduate School of Industrial Technology, Kinki University

***近畿大学工業技術研究所

Research Institute of Industrial Technology, Kinki University

表1 DME と他の燃料の物性値

	DME	メタン	プロパン	メタノール	軽油
化学式	CH ₃ OCH ₃	CH ₄	C ₃ H ₈	CH ₃ OH	-
沸点 (°C)	-25.1	-161.5	-42	64.6	180~360
液密度 (g/cm ³ , 20°C)	0.67	-	0.49	0.79	0.84
ガス比重 (対空気比)	1.59	0.55	1.52	-	-
飽和蒸気圧 (atm, 25°C)	6.1	-	9.3	-	-
自然発火温度 (°C)	235	650	470	450	250
セタン価	55~60	0	5	5	40~55
低発熱量 (kJ/kg)	28.9	50.2	46.4	20.1	42.7

らの背景から、本研究では汎用小型ディーゼル機関をDMEで簡単に運転する方法を検討してきた。その結果、低公害排出ガス性および高効率を有する予混合圧縮着火(HCCI)燃焼方式^{6) 7)}による連続無煙運転に成功したので、その運転特性や排気特性について一部紹介する。

2. 代替軽油燃料としてのDMEの特性

表1にDMEの物性値を代表的な炭化水素燃料の物性値と比較して示す。DMEはセタン価(圧縮着火性)が軽油よりも高いため、圧縮着火機関のディーゼルエンジンの代替軽油燃料として期待されている。また、含酸素燃料(CH₃-O-CH₃)で、炭素間の直接結合がないため、高当量比で燃焼してもPMとすすを発生しないという利点を持っている。DMEは常温常圧では気体であるが、6気圧程度の加圧、あるいは-26°C以下の冷却のいずれかによって、簡単に液化するため、天然ガスやLPガスと同様に貯蔵、運搬が可能であり、それらのインフラも利用可能である。

その一方、DMEは無潤滑性、低粘度、低体積弾性のため、そのまま軽油用のディーゼル機関に使用すると、燃料ポンプシリンダー内の摩擦により燃料漏れ引き起こす危険があり、自己潤滑性ポンプを利用するか、潤滑性向上剤の添加が必要となる。しかし、予混合圧縮着火(HCCI)燃焼方式を採用することで、この短所は回避できる。

3. 実験装置と運転方法

本実験に使用したディーゼルエンジンの仕様を表2に、装置の概略を図1に示す。このエンジンは4サイクル単気筒水冷638ccの汎用小型ディーゼルエンジンで、主に農業用機械の動力として用いられるものである。そのため定常負荷での運転に適して、馬力よりもトルクを重視した仕様になっている。図1のポンペ内のDMEは6気圧以上に加圧されて液化している。このポンペはサ

表2 供試ディーゼルエンジンの仕様

形式	横型水冷4サイクルディーゼルエンジン
燃焼室形式	直接噴射式
シリンダー数	1
シリンダー内径×行程 [mm]	92×96
総行程容積 [l]	0.638
最大出力 [PS/rpm]	12.5/2400
冷却方式	ラジエータ式
潤滑油容量 [l]	2.8
燃料タンク容量 [l]	11.0
冷却水容量 [l]	2.3
機関重量 [kg]	103.0

イフォン管の排出口から液の状態DMEを取り出すことができる。ポンペから出たDMEは流量計で流量を測定され、切り換えバルブ、流量調節バルブを経てノズルより噴出する。なお、流量計には水用の浮き子式のものを比重補正して用い、流量調節バルブにはSUS製のニードルバルブを使用した。

図2にDME噴射ノズルの取り付け部を示す。噴射ノズルには、内径0.5mmのステンレス管を

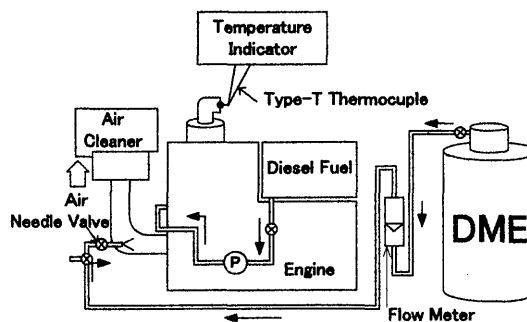


図1 実験装置の概略

使用し、エアクリナー下流の吸気管（内径：約40mm）のエルボ部分に穴を開け取り付け、吸気中に DME を直接噴射する。噴孔近傍のノズルの温度を測定用に、DME 噴射ノズル噴孔近傍の外周に、直径 0.5mm の Type-T 熱電対を張り付け、排気温度測定用に排気管出口中央に同熱電対を設置した。

エンジンの起動には常に市販の JIS 2 号軽油を使用した。十分な暖気運転後に、DME の噴射を開始し、軽油の供給を停止することで、DME による HCCI 燃焼方式の運転に移行させた。なお、今回の実験ではいずれもエンジンを無負荷の状態での運転した。

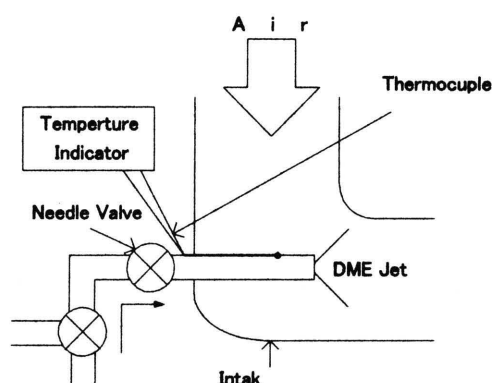


図2 DME 噴射ノズル

4. 結果と考察

4.1 DME 噴射ノズルの温度変化

本実験に使用したノズルを用いて、大気中に DME を連続噴射した場合の噴霧の写真を図3に示す。DME は噴孔から噴出後、直ちに激しく蒸発し、噴孔から 50mm の位置では、白い霧が消えほぼ完全に気化している。このとき、DME は周囲から熱を奪うため噴孔付近のノズルの温度は低下し、空気中の水分が白く凍結しているのがわかる。なお、この写真撮影後凍結がさらに進行し、安定な噴射が維持できなくなった。

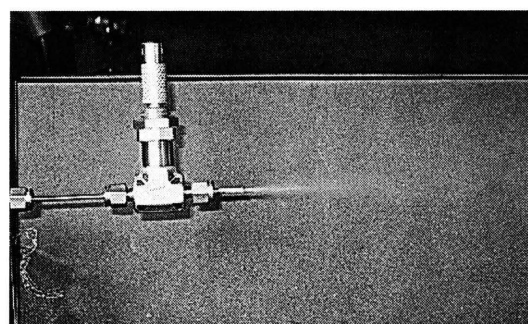


図3 DME の連続噴射（大気中）

図4に DME 噴射ノズルに取り付けた熱電対（図2参照）で測定した温度を、DME 運転と軽油運転とで比較して示す。なお、軽油運転時には DME の供給は行っていない。そのため、軽油運転の温度は、吸気温度と吸気管エルボ部の温度の中間となるため、計測温度は 17~18℃と安定している。しかし、DME 運転では、DME 噴出後の急激な気化により、ノズル温度が -5℃以下に低下している。このときエンジンの回転数は、いずれの回転数域でも安定しており、噴孔の凍結は生じていないと考えられる。よって、吸気管内に DME 噴射ノズルを設置することにより、エンジン燃焼の熱が熱伝導で供給され、DME 噴射ノズルの凍結を防ぐことができ、ヒーターなどの凍結防止装置を備え付けなくても、安定な連続運転が可能になることがわかる。2000rpm 程度の中回転域で、温度が最も低くなるのは、DME の気化量と吸気量、エンジン燃焼の発熱の関係が、最も悪条件となるためと考えられる。

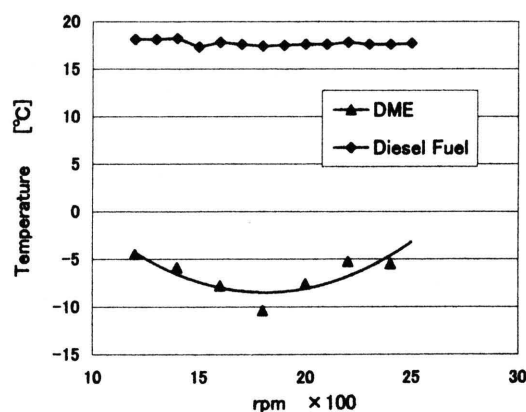


図4 DME 噴射ノズルの温度

4.2 DME と軽油の燃料消費率

図5に DME 運転と軽油運転の体積燃料消費率を示す。いずれの燃料を用いた運転でも、回転数の増加につれて燃料消費率は増加し、各回転数における DME と軽油の燃料消費量もほぼ同じ値に

なった。圧縮着火機関では、燃焼によりシリンダー内に生じた水蒸気は利用されずに、そのまま排出ガスと共に排出されるので、水分の蒸発熱は利用ないので、低発熱量使用して両燃料の発熱量を比較する。表1に示すように、DME の低発熱量は 28.9MJ/kg で、軽油の低発熱量 42.7MJ/kg の

約 68%である。体積当りに換算すると、DME は約 19.4kJ/cm³、軽油は約 35.8kJ/cm³となり、DME は軽油と同じ発熱量を得るためには、約 1.8 倍の体積が必要と考えられる。本実験では無負荷運転であったため、各燃料の消費率に差異が生じなかったが、負荷を加えた運転ではDMEの燃料消費率が大きくなると予測される。

4. 3 DME と軽油の排気温度

図 6 に DME 運転と軽油運転の排気温度を示す。回転数を増加するにつれて、いずれの排気温度も単調に増加する。1,000rpm 程度の低回転数域では、燃料による排気温度の差はほとんど無い。1,200rpm~2,000rpm の回転数域で、回転数を増加すると徐々に差が現れ、6.7~13.5℃ DME の排気温度が軽油の排気温度よりも低くなる。2,200rpm 以上の回転数域では、DME と軽油の排気温度の差はさらに広がり 20℃以上になる。これには、1) DME 運転では吸気管内に直接DME を連続噴射しているため、DME の気化熱により吸気温度が低下する、2) 燃焼室内に均一な混合気が供給されるため、燃焼むらが起こらない、などの理由が考えられる。

DME による HCCI 運転では、燃料成分中に酸素を含むためPMを発生せず、均一な燃焼が行われる。そのため軽油に比べて燃焼温度が低下し、NO_xの発生を抑制できることが予測される。

4. 4 DME 運転と軽油運転の黒煙

図 7 に DME 運転と軽油運転を行った場合の濾過式スモークメーターによる黒煙量を示す。1,000rpm~1,800rpm の回転数範囲では、各燃料における運転で黒煙は検出されなかった。軽油運転の場合、1,900rpm で黒煙の排出が始まり、2,300rpm まで回転数増加とともに黒煙量は2~6%に緩やかに増加する。最大出力を得る2,400rpm 以上の回転数にすると、黒煙量は14%以上に急激に増加した。しかし、DME 運転では2,500rpm 以下の回転数では、黒煙は全く検出されなかった。

軽油運転では、高回転になるほど、圧縮着火中の燃焼室に噴射される燃料が増加し、空気と燃料の混合がさらに不均一になり、大量の黒煙を発生する。今回の実験は、無負荷で行ったため黒煙排出量が少なかったが、負荷をかけた運転では、低回転数域から黒煙が検出されると考えられる。一方、DME は成分中に酸素を含み、炭素間の直接結合がないため、燃焼してもCO₂などは排出するが、PM を生成しななので黒煙を排出しない。さらに、DME 運転では、噴射ノズルから噴出した

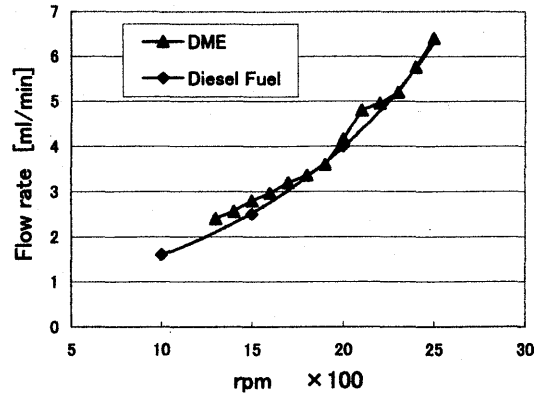


図 5 DME と軽油の燃料消費率

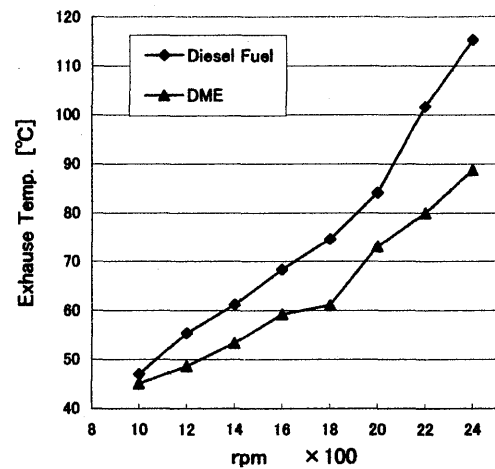


図 6 排気温度特性

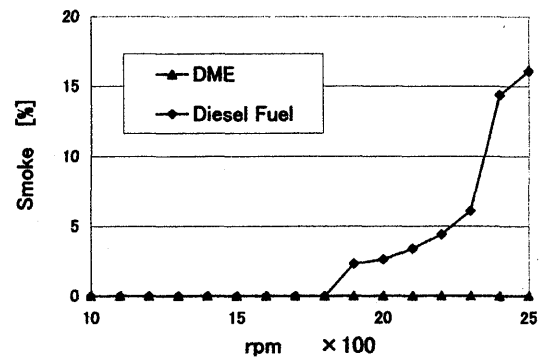


図 7 燃料による黒煙の比較

直後から DME が激しく気化するため、燃焼室に入る以前に空気と均一に混ざり、良好な予混合圧縮燃焼を行うことができると考えられる。

5. 結 言

汎用のディーゼル機関を DME による予混合圧縮燃焼機関に改造し、DME による連続無煙運転に成功した。その際、以下の知見を得た。

(1) 噴射ノズルから DME を連続噴射すると、DME の急激な気化で噴孔が凍結し、安定な噴射を維持できない。

(2) 機関燃焼の熱で高温になる吸気管に DME 噴射ノズルを設置することで、ヒーターなどの凍結防止装置を備え付けなくても、噴射ノズルの凍結を防止でき、安定な連続運転ができる。

(3) 吸気に DME を連続噴射すると、燃焼室に入る以前に空気と均一に混ざり、良好な予混合圧縮燃焼を行うことができる。

本実験では吸気中に DME を連続噴射し、予混合圧縮着火(HCCI)燃焼方式でエンジンを運転している。この燃焼方式には、自着火時期制御が困難であるという問題があり、自動車のような変動負荷運転には適さないと考えられる。しかし、一定負荷運転では、HCCI 燃焼法と DME を組み合わせることにより、排気特性に優れ、高効率な機関が実現できる可能性がある。現在、この機関に交流発電機を取り付け、低回転・低負荷域における機関性能を調査している。今後は、さらにクリーンで高効率なエンジンシステムの運用方法について検討する予定である。

参 考 文 献

- (1) 小高松男, “新規エミッション規制と自治体における自主基準の動向”, 自動車技術, vol. 57, No.9, pp.4-10, 2003.
- (2) 塚崎之弘, “GTL 燃料利用技術の研究開発動向”, 自動車技術, vol.55, No.5, pp.67-72, 2001.
- (3) 小田裕司, 遠藤浩之, 梶谷修一, 鈴木信市, “DME ディーゼルエンジンの噴霧形成特性と燃焼特性”, 第 17 回内燃機関シンポジウム講演論文集, pp.29-34, 2002.
- (4) 梶谷修一, “DME (ジメチルエーテル) 燃料利用システムの研究開発動向”, 自動車技術, vol.55, No.5, pp.50-54, 2001.
- (5) 木下幸一・他 6 名, “DME ディーゼルエンジンの性能と排気”, 第 17 回内燃機関シンポジウム講演論文集, pp.35-39, 2002.
- (6) Chen Z., Konno M., Oguma M. Yanai T.,

“Experimental Study of CI Natural-Gas/DME Homogeneous Charge Engine”, SA E paper 2000-01-0329

- (7) 五十嵐哲也, 飯田訓正, “予混合圧縮着火エンジンにおける DME および n-Butane 燃料の自己着火・燃焼過程”, 機論 (B 編), vol.64, no.618, pp. 605-612, 1998.