DME 圧縮点火機関の低圧縮比化に関する研究*

小熊光晴^{*1}, 町田英之^{*2}, 嶺岸澄貴^{*3}
金野満^{*4}, 梶谷修一^{*4}

A Study of Low Compression Ratio Dimethyl Ether (DME) Diesel Engine

Mitsuharu OGUMA, Hideyuki MACHIDA, Kiyotaka MINEGISHI,
Mitsuru KONNO and Shuichi KAJITANI^{*5}^{*5} Ibaraki University, Dept. of Mechanical Engineering,
4-12-1, Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511 Japan

The possibility of low compression ratio (CR) for dimethyl-ether (DME) diesel engines was investigated experimentally. The CR was altered by changing the top clearance volume from the original 17.7 CR to 10.16. The main results are summarized below: (1) The lowest CR for easy start and stable combustion is around 12. (2) At CRs from 17.7 to 12.36, the brake thermal efficiency of a DME engine is almost the same. (3) The aggravations of THC, CO emissions and noise of DME engine are extremely low. (4) The high combustion efficiency and the increased degree of constant volume of DME engine within the above CR range enables operation with high brake thermal efficiency.

Key Words: Diesel Engine, Compression Ratio, Thermal Efficiency, Combustion Efficiency, Alternative Energy, Dimethyl Ether, Critical Pressure

1. ま え が き

ジメチルエーテル[(CH₃)₂O, 以下DMEと略記]は、自着火温度が508 K {235°C}と低いこと、無煙燃焼すること、沸点が248.1 K {-24.9°C}と低いこと、天然ガスおよび石炭などから安価に大量生産可能なプロセスが開発されたこと⁽¹⁾などから、圧縮点火機関の代替燃料として近年注目され、その有用性が、報告されている。例えば、Kapus⁽²⁾, Fleisch⁽³⁾, Sorenson⁽⁴⁾, Kajitani⁽⁵⁾らは、それぞれ、DMEを単体で圧縮点火機関の燃料として採用し、熱効率が軽油と同程度でかつ無煙運転が可能であることを明確にした。またDMEが炭化水素系の燃料と任意の割合で溶解する特質を利用し、例えばDMEにプロパンを溶解することで低発熱量を増加させ、プロパン混合割合で約40%まで圧縮点火運転が可能であることを示した⁽⁶⁾。さらにDMEに軽油を混合することによりDMEの低粘度性を改善し潤滑向上剤の添加を不要にし、さらに燃料リ

ーク量の低減、噴霧の微粒化効果が得られることを先に報告した⁽⁷⁾。

これらのDME機関に関する報告は、圧縮比が17~21の範囲である。高圧縮比機関では機械損失や冷却損失等の増加が考えられる。DMEの特質を利用すると低圧縮比での運転が可能と考えられる。

本報告ではDMEを燃料としたときの圧縮比の低下が機関性能、燃焼および排気特性に及ぼす影響を検討した。

Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

* 原稿受付 1999年10月20日。

^{*1} 茨城大学大学院 (〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)。^{*2} 日野自動車工業(株) (〒191-8660 東京都日野市日野台3-1-1)。^{*3} 東北電力 (〒980-8550 仙台市青葉区一番町3-7-1)。^{*4} 正員, 茨城大学工学部。

E-mail: kajitani@mech.ibaraki.ac.jp

2. 供試機関および供試燃料

図1に実験装置の概略図を示す。供試機関は、ヤンマーディーゼル(株)製の横形水冷単気筒直接噴射式ディーゼル機関(NFD 13)で、オリジナル圧縮比は17.7, Bore×Stroke 92×96 mm, 行程容積 0.638 l, 定格出力 8.45 kW/2 600 rpm である。静的噴射開始時期は上死点前 17° CA, ノズル開弁圧は DME 運転時が 8.83 MPa, 軽油運転時は 19.6 MPa である。

圧縮比の変更は上死点かんげきをシリンダヘッドガasketの厚さにより調整した。

表1に DME および比較燃料である JIS-No.1 軽油の物性値を示す。DME は自着火温度が 508 K {235°C}, 沸点が -248.1 K {24.9°C} と低く、酸素を質量割合で 34.8% 含んでいるのが特徴である。また、自己潤滑性に乏しいため、潤滑向上剤を 500 ppm 添加した。

3. 実験結果および考察

3.1 低圧縮比 DME 機関の機関性能および燃焼特性 供試機関の圧縮比を変化させたときの、モータリング時のシリンダ内平均ガス温度(上死点)は最も圧縮比の低い $\epsilon=10.19$ で 655.1 K であり、DME の自着火温度 508 K {235°C} を超え、残留ガスを考慮しなくても運転可能と考えられる。そこで圧縮比を

Table 1 Properties of the test fuels

	Unit	DME	Gas oil(JIS-No.1)
Chemical structure		(CH ₃) ₂ O	CnH _{1.87} n
Boiling Point	K	248.1	453 - 643
Self ignition temperature	K	508	523
Stoichiometric A/F	kg/kg	8.96	14.37
Low heating value	kJ/kg	28430	43200
C ratio	% wt.	52.5	86
H ratio	"	13	14
O ratio	"	34.8	0

Fig.2 The vapour pressure curve and pressure of working gas at TDC for various temperature

17.7, 16.87, 16.12, 13.89, 13.08, 12.36, 11.16, 10.19 と変化させて機関を運転した。機関回転速度は 960 rpm 一定である。予想したようにいずれの圧縮比でも運転可能であった。しかし、圧縮比 11.16, 10.19 では始動に約 60 s 程度必要なことから本報ではそのデータは除外した。図2は DME の蒸気圧線図と上死点における温度と圧力の関係をプロットしたグラフである。いずれの圧縮比でも上死点では DME の臨界圧力 5.309 MPa {52.4 atm} 以下であることから、噴射開始時期における DME 噴霧は、いわゆる減圧沸騰状態を示すと考えられる。

図3(a)に圧縮比を変化させた際の DME および軽油運転時のインジケータ線図の一例を示す(機関運転条件 960 rpm, 正味平均有効圧力 $P_{me}=0.6$ MPa), 他の P_{me} もほぼ同様な傾向であることから省略する。DME 運転時は噴射ノズル開弁圧が軽油運転時より低いため実質噴射開始時期が早くなること、DME の沸点が 248.1 K {-24.9°C} と低く着火遅れ期間の微粒化、気化時間は無視できること、自着火温度が 508 K {235°C} と低いことなどから、軽油より早く燃焼が開

Fig.3 Effect of CR on (a) the pressure time histories, (b) the heat release curves and (c) the ignition lag

始する。図 3(b)に熱発生率の一例を、図 3(c)に噴射ノズルリフトの立上りクランク角と、熱発生率の立上りクランク角の差から求めた着火遅れ期間をそれぞれ示す。DME、軽油運転時ともに圧縮比が低下するにつれて予混合燃焼割合が増加する。しかし DME 運転時のほうがその増加割合が比較的小さい。また DME 運転時は圧縮比によらず軽油運転時より着火遅れは短い。これは DME の沸点および自着火温度が軽油より低いと考える。また圧縮比をオリジナルの 17.7 から 12.36 まで低下させたときの着火遅れの増加も、軽油の 6.8°CA に対し DME は 5.9°CA と約 1°CA 小さく、これにより低圧縮比での予混合燃焼割合の増加が、軽油と比較し DME 運転時のほうが小さくなると推測される。

図 4(a)に圧縮比と最大圧力上昇率 $(dP/d\theta)_{\max}$ の関係を示す。軽油運転時と比較し、DME 運転時は予混合燃焼割合の増加が少ないことから、 $(dP/d\theta)_{\max}$ は低圧縮比でも小さい。これは図 4(b)に示す騒音レベルで DME 運転時のほうが軽油運転時よりも低く、機関騒音低減の観点からも有用であることがわかる。図 4(c)に圧縮比と燃焼期間の関係を示す。燃焼期間は熱発生率を積分し、その最大値の 5% までのクランク

Fig. 4 Effect of CR on (a) the $(dP/d\theta)_{\max}$, (b) the sound pressure level and (c) the combustion duration

角を燃焼開始、最大値の 95% までのクランク角を燃焼終了と定義した。DME 運転時は、圧縮比が低下するにつれて燃焼期間は短くなる傾向がみられる。ここで、圧縮比の変化による燃焼雰囲気の違いについて考察する。

図 5 に一例として圧縮比 17.7, 13.89 および 12.36 における DME 運転時のシリンダ内圧力と平均ガス温度の関係を示す。図 5 中、蒸気圧線図は DME である。またそれぞれの圧縮比の曲線で黒塗りのマークは燃焼期間を表す。DME 運転時の燃料噴射終了は曲線

Fig. 5 The vapour pressure curve of DME and pressure of working gas for various temperature

Fig. 6 The vapour pressure curve of Propane and pressure of working gas for various temperature

上の★印で、およそ上死点后 10°CA である。圧縮比 17.7 では着火からおよそ 3°CA でシリンダ内圧力は DME の臨界圧力を超え、この領域で燃料の噴射が終了する。すなわち燃料噴射および燃焼の大半は超臨界状態である。圧縮比 12.36 での燃料噴射はほぼ臨界圧力以下であり、燃焼も燃料噴射後半も臨界圧力以下であるために減圧沸騰と考えられ、気化が促進され、燃焼期間を短縮していると推測される。そこで、減圧沸騰効果を軽油-プロパンブレンド燃料運転時の吐煙濃度によって考察した。吐煙濃度は、噴霧の微粒化や含酸素燃料によって低減可能であるが、ここでは酸素を含まず沸点が $230.9 \text{ K } \{-42.1^\circ \text{C}\}$ と低いプロパンを軽油にブレンドし、噴霧の微粒化効果に着目した。図 6 は軽油に質量割合で約 20% のプロパンをブレンドした燃料を用いて、圧縮比 17.7 および 12.36 により機関を運転した結果である。図 6 中、プロパンの飽和蒸気曲線も示す。DME 運転時と同様に圧縮比 17.7 ではプロパンの臨界圧力を超えた雰囲気中で燃焼し、圧縮比 12.36 は燃焼の大半が臨界圧力以下である。このと

きの吐煙濃度を図 7 に示す。軽油単味運転では圧縮比の低下により吐煙濃度は増加する。ブレンド燃料中のプロパンが噴射直後に減圧沸騰を起こしていれば、噴霧の微粒化効果により吐煙濃度は軽油単味運転時よりも減少すると思われる。しかし圧縮比 17.7 では吐煙濃度は増加した。一方圧縮比 12.36 では吐煙濃度は 36.7% まで低減した。すなわち、圧縮比を低下させ燃焼雰囲気プロパンの臨界圧力以下にすることによって、プロパンの減圧沸騰による噴霧の微粒化効果で吐煙濃度が低減したと思われる。したがって DME 単味運転でも同様の現象が起こり、低圧縮比化し、燃焼雰囲気を DME の臨界圧力以下に抑えることによって燃料噴霧は減圧沸騰し、気化が促進されていると考えられる。しかしながら超臨界滴群と空気導入率等不明な点が多い。以上より DME の特性を生かすには、高圧縮比よりむしろ低圧縮比のほうが有益である場合があると考えられる。

3.2 低圧縮比 DME 機関の排気特性および各種効率の検討 図 8(a) に圧縮比と正味熱効率の関係を示す。軽油では圧縮比が 17.7 から 12.36 へと低下すると正味熱効率は約 14% 低下するが、DME 運転時はほぼ一定である。これは DME 運転による圧縮比の低

Fig. 7 Effect of blend fuel on the smoke emissions

Fig. 8 Effect of CR on (a) the brake thermal efficiency and (b) the mechanical efficiency

Fig. 9 Effect of CR on (a) the THC emission, (b) the CO emission and (c) the combustion efficiency

下による理論熱効率の減少を、他の効率および損失が相殺していると考えられる。

各種効率および損失の関係は、以下の式で表される⁽⁸⁾。

$$\eta_e = \eta_{th} \eta_{gth} \eta_u (1 - \phi_w) \eta_m \dots\dots\dots (1)$$

ここで

η_e : 正味熱効率

η_{th} : オットーサイクルの理論熱効率

$$(\eta_{th} = 1 - 1/\epsilon^{\kappa-1})$$

η_{gth} : 等容度

η_i : 図示熱効率

η_u : 燃焼効率

ϕ_w : 熱損失割合

η_m : 機械効率

ϵ : 圧縮比

κ : 比熱比

である。圧縮比と機械効率の関係を図 8(b) に示す。機械効率は動力計の読みから算出した正味出力を、シリンダ内圧力波形の積分値から求めた図示出力で除して算出した。低圧縮比側で若干機械効率は高くなっているが、DME 運転時と軽油運転時の差はほとんどない。次に燃焼効率、冷却損失および等容度などが正味

Fig. 10 Effect of CR on (a) the loss to cooling water, (b) the degree of constant volume and (c) the exhaust gas temperature

熱効率に与える影響について、DME 運転時と軽油運転時を比較する。

図 9(a), (b) に圧縮比と全炭化水素(THC)および一酸化炭素(CO)濃度の関係を示す。オリジナル圧縮比 17.7 において、DME 運転では THC, CO 濃度が軽油運転より低く、圧縮比が低下してもその値はほとんど変化していない。DME は沸点が低いために燃料噴霧は燃焼室内に噴射された直後気体となる。このため噴霧角は広がり、噴霧到達距離は比較的短くなると考えられる。また自着火温度が低いため、低圧縮比でも着火性がよい。これら DME の燃料特性が THC および CO の排出量を圧縮比によらず低くしていると考えられる。

これら不完全燃焼生成物から求めた燃焼効率を図 9(c) に示す。軽油運転の燃焼効率は圧縮比 12.36 で約 87% と、オリジナル圧縮比と比較しおよそ 12% 悪化する。一方 DME 運転は圧縮比によらず THC および CO 排出量が少なく、いずれの圧縮比でも 99% 以上

Fig. 11 Effect of CR on brake thermal efficiency and theoretical thermal efficiency

Fig. 12 Effect of CR on (a) the NO_x emission and (b) the smoke emission

の燃焼効率である。

図 10(a) に圧縮比と冷却水への熱損失割合の関係を示す。熱損失割合は冷却水の入口、出口温度を測定し、その温度差から損失熱量を求め、これと機関に供給された熱量との比率として求めた。DME 運転は軽油運転と比べ、熱損失割合が低い。これは DME が無煙燃焼することから、例えば微粒子からの放射による熱損失が少ないためと考えられるが、さらに検討する必要がある。

図 10(b) に圧縮比と等容度の関係を示す。圧縮比の低下で軽油運転の等容度は減少し、DME 運転は圧縮比 14 付近まで増加している。DME 運転は着火遅れ期間が軽油と比較し短いが、圧縮比が低くなるにつれて燃焼開始時期は遅れる。そこで低圧縮比運転時の噴射開始時期を進め、等容度を増加させることが今後必要と考えられる。

図 10(c) に圧縮比と排気温度の関係を示す。低圧縮比でも DME 運転時は燃焼効率および等容度が高いため、軽油運転時と比較し排気温度の増加が少ない。

図 11 に圧縮比と理論熱効率および実験値の正味熱効率の関係を、オリジナル圧縮比 17.7 運転時に対するそれぞれの比率で表したものを示す。低圧縮比化による正味熱効率は DME 運転時はほぼ一定であり、軽油運転時は理論熱効率の低下(約 8%)よりさらに減少(約 14%)していることがわかる。以上より、DME はその燃料特性から、高い燃焼効率を維持し、また放射による冷却損失が少ないことから冷却水への損失熱量が比較的低く、さらに本実験での燃料噴射開始時期では DME 運転時の等容度が増加することなどが、圧縮比の低下による理論熱効率の減少を相殺していると推定される。

図 12(a) に圧縮比と窒素酸化物(NO_x)濃度の関係を示す。どの圧縮比でも、DME 運転時の NO_x 濃度は軽油運転時より高い。しかし、圧縮比を低下することによって NO_x 濃度は減少し、圧縮比 12.36 付近では、オリジナル圧縮比 17.7 における軽油運転時と同程度の排出濃度まで低減することが可能である。また、図 12(b) に示す圧縮比と吐煙濃度の関係より、DME は圧縮比によらず無煙運転が可能であることから容易に EGR が可能であり、さらなる NO_x 濃度低減の可能性が期待できる。ディーゼル機関の最大の欠点は、すすと窒素酸化物のトレードオフの関係である。吐煙を排出しない DME はディーゼル機関にとって大きな利点となり得る。

以上、DME を圧縮点火機関の燃料とする場合、その燃料特性から圧縮比を低下させても高圧縮比機関と

同等の熱効率、排気特性および騒音レベルが得られることがわかり、DME はきわめて有用性の高い燃料であるといえる。

4. 結 論

圧縮点火機関において DME を燃料としたときの圧縮比の低下がエンジン性能、燃焼および排気特性に及ぼす影響を実験的に解明した。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 圧縮比 12 近傍まで始動性に問題なく運転可能である。

(2) DME 機関の正味熱効率は低圧縮比においても、ほぼ一定である。

(3) DME 機関の低圧縮比における正味熱効率維持は(i)燃焼効率の高さ、(ii)冷却水への熱損失の低さ、(iii)等容度の増加が主因である。

(4) 低圧縮比 DME 機関は、DME の臨界圧力以下に燃焼雰囲気を作ることによって減圧沸騰を起こす。これにより低圧縮比ほど燃焼期間は短縮する。

(5) DME 機関の THC および CO 排出量はオリジナル圧縮比 17.7 でも軽油より少なく、圧縮比が低下してもその値は変化しない。また圧縮比の低下による騒音レベル悪化がきわめて少ない。

(6) DME 機関の NO_x 排出量は圧縮比の低下により低減するが、圧縮比によらず無煙燃焼するため EGR 等の効果が期待できる。

(7) DME 機関の低圧縮比化は、筒内噴射成層燃焼火花点火機関側からのアプローチを可能とし(軽量化、噴射系の小形、低価格化、三元触媒の利用可能性等)、ガソリン機関とディーゼル機関を融合させた新たな原動機の可能性を示す。

実験にあたり陳之立助手、森智哉君、野内忠則君らの協力があつたことを記して謝意を表す。

文 献

- (1) Hansen, J. B., Voss, B. and Joensen, F., Ing Dora Siguroardrottir, Large Scale Manufacture of Dimethyl Ether-a New Alternative Diesel Fuel from Natural Gas, *SAE Paper*, 950063 (1995).
- (2) Kapus, P. and Ofner, H., Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether, *SAE Paper*, 950062 (1995).
- (3) Fleisch, T., McCarthy, C., Basu, A., Udovich, C., Charbonneau, P., Slodowske, W., Mikkelsen, S. and McCandless, J., A New Clean Diesel Technology: Demonstration of ULEV Emissions on a Navistar Diesel Engine Fueled with Dimethyl Ether, *SAE Paper*, 950061 (1995).
- (4) Sorenson, S. C. and Mikkelsen, S.-E., Performance and

- Emissions of a 0.273 Liter Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Neat Dimethyl Ether, *SAE Paper*, 950064 (1995).
- (5) Kajitani, S., Chen, Z., Konno, M. and Rhee, K. T., Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct Injection Diesel Engine Operated with DME, *SAE Paper*, 972973 (1997).
- (6) Kajitani, S., Chen, C. L., Oguma, M., Alam, M. and Rhee, K. T., Direct Injection Diesel Engine Operated with Propane-DME Blended Fuel, *SAE Paper*, 982536 (1998).
- (7) Chen, Z., Kajitani, S., Minegisi, K. and Oguma, M., Engine Performance and Exhaust Gas Characteristics of a Compression Ignition Engine Operated with DME blended Gas Oil Fuel, *SAE Paper*, 982538 (1998).
- (8) 深沢正一・村山正・宮本登・神尾正志, 低圧縮比ディーゼル機関に関する研究 (第1報, 低圧縮比採用における問題点), 機論, (1972), 37-299.
-