ジメチルエーテル圧縮着火機関の燃焼特性*

金 野 満^{*1}, 梶 谷 修 一^{*1}
陳 之 立^{*1}, 渡 部 泰 幸^{*2}Combustion Characteristics of a Compression Ignition Engine
Fueled with Dimethyl EtherMitsuru KONNO^{*3}, Shuichi KAJITANI,
Zhili CHEN and Hiroyuki WATANABE^{*3} Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

The Combustion characteristics of a direct injection C.I. engine fueled with dimethyl ether (DME) were investigated. The in-cylinder observation of combustion process was conducted using high-speed video camera. The concentration change of principal intermediate combustion products was traced by gas sampling. As the results, DME combustion was found to be non-luminous because polycondensation reaction over C2 would not proceed. It was also found that ignition occurred in the down stream of the spray, where DME was perfectly gasified. DME evaporated immediately after injection, and in the evaporating zone low temperature oxidation reaction actively took place.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Gaseous Fuel, Combustion, DME, Spray, Gas Sampling

1. 緒 論

石油資源の有効利用ならびに大気環境の改善の観点から、内燃機関に対してよりいっそうの排気清浄性と高効率化が求められている。ジメチルエーテル(DME)は、高当量比においても吐煙を生成しないことや着火性が良好なことから上記の要求にこたえ得る次世代の燃料として注目されている。低潤滑性と常温で気体であることが欠点であるが、潤滑向上剤の添加や燃料供給系の高圧化により対処することが可能である⁽¹⁾⁽²⁾。

実機実験によりDMEを圧縮着火機関に適用した場合の基本性能については明らかにされつつある。すなわち、熱効率は軽油機関と同等であり、吐煙はまったく排出されず、未燃成分の排出量も少ない。NO_xは同等か若干低い程度であるが、噴射時期の遅延やEGRによって高熱効率を維持したまま削減可能である^{(1)~(4)}。

DMEの燃料性状はいくつかの点で軽油と異なっ

ているが、特に沸点および理論空気量の違いは噴霧燃焼の形態に少なからず影響を与えると思われる。定容容器等を用いたDME噴霧の観察結果から、軽油噴霧に比べて噴霧角が大きく、到達距離が短いことがわかっている^{(5)~(7)}。したがって、噴霧への空気導入や噴霧内燃料濃度分布が軽油噴霧と異なり、着火およびその後の燃焼過程が通常の軽油噴霧と異なっている可能性があるが、その詳細は明らかにされていない。

本研究では、実機におけるDME噴霧の着火および燃焼の拡大過程を高速度撮影により観察するとともに、ガスサンプリングを行って圧縮および燃焼中の分解・酸化過程を調べることによって、DME噴霧燃焼の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 供試燃料、実験装置および実験方法

2・1 供試燃料 供試燃料にはDMEのほかに比較対象として軽油を用いた。両燃料の主要諸元を表1に示す。大気圧におけるDMEの沸点は-24.9°Cと低く、標準状態では気体である。また、分子中に酸素を含むことから理論空気量および発熱量は軽油の約2/3である。セタン価は正確に測定されていないが、実機における着火遅れから軽油と同等以上と見積もられている。

* 原稿受付 2001年3月23日。

^{*1} 正員、茨城大学工学部(〒316-8511日立市中成沢4-12-1)。^{*2} 学生員、茨城大学大学院。

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

2・2 供試機関 供試機関には横形水冷単気筒の直接噴射式ディーゼル機関を用いた。主要諸元を表2に示す。機関回転速度は960 rpm, 燃料噴射時期は上死点前12°CAに設定した。

DMEを液体に保つため燃料タンクから噴射ポンプまでの燃料供給系を高圧の窒素ガスにより3.5 MPaに加圧した。また、低体弾性率に起因する噴射圧の低下に対応して、ノズル開弁圧を軽油の場合の21 MPaから8.5 MPaに下げた。噴射ノズルには軽油の場合と同一の $\phi 0.23 \times 4$ 噴孔のホールノズルを用いた。

Table 1 Properties of test fuels

Fuel	DME	Light Oil
Chemical Formula	$\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$	-
Stoich. A/F Ratio	9.0	≈ 14.6
Lower Heating Value (kJ/kg)	28430	42700
Boiling Point		
@0.101MPa (deg. C.)	-24.9	180-370
Liquid Density	668	840
@20deg.C. (kg/m ³) (saturated liquid)		
Cetane Number	>>55	~60

Table 2 Engine specifications

Type of engine	Direct-injection single cylinder 4cycle diesel engine
Bore×stroke	$\phi 92 \times 96\text{mm}$
Compression ratio	17.0
Injection pump	Bosch type

図1に本研究で用いた実験装置の構成を示す。

2・3 燃焼観察方法 燃焼室キャビティ底面に観察用の合成石英窓を設け、燃焼室下方よりイメージインテンシファイア付高速ビデオカメラおよび紫外光透過率の高いUVレンズを用いて燃焼観察を行った。撮影条件を表3に示す。

2・4 ガスサンプリングおよびガス分析方法 ニードルタイプの高速度電磁弁をシリンダヘッドに取り付け、先端に装着した内径 $\phi 2\text{mm}$ のステンレス製パイプを介して所定の位置よりシリンダ内のガスをサンプリングした。図2に燃焼室形状および上死点におけるサンプリング位置を示す。サンプリング位置は、噴電中心軸上のノズルからの距離 $r=14, 19, 22\text{mm}$ とした。サンプリングは15サイクルに1回の割合で行い、電磁弁のリフト期間はクランク角で10°CAとした。なお、サンプリングの代表時期として弁リフトの最大時期を用いることとする。

採取したガスは、ガスクロマトグラフィー(日立G-3000形)により、CO, CO₂およびC1~C6の炭化水素成分を分析した。C7以上の成分は分析時間短縮

Table 3 The photographing condition

Camera	High speed video camera
Flame speed	9000 fps
Lens	105mm UV
IL Gate	25 (μs)
IL Gain	200

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

Sampling Position	a	b	c
r [mm]	14	19	22
h [mm]	3.5	5	6.8

Fig. 2 Gas sampling positions and combustion chamber configuration

のためアフタカットにより系外に排出した。アフタカット用のプリカラムにはGaskuropack 54(80/100 mesh, ID ϕ 3 mm $\times$ 2 m)を、またメインカラムにはPorapak N(100/150 mesh, ID ϕ 3 mm $\times$ 2 m)を用い、45°Cで12 min 保持した後、150°Cまで12°C/minで昇温分析を行った。

検出器にはFIDを用い、試料ガスに水素を添加してCを含むすべての成分をニッケル触媒でCH₄に還元したのちFIDで分析した。この還元FID法では、炭化水素成分、含酸素成分、およびCO、CO₂等の炭素原子を含む成分の同時分析が可能である。また、炭素含有成分がすべてCH₄として検出されるため、各成分の定量が容易である。

還元用ニッケル触媒の温度は440°Cとした⁽⁴⁾。この条件におけるCOおよびCO₂のCH₄への還元率はそれぞれ97%であった。還元されにくいCOおよびCO₂の還元率が十分高いことから判断してその他の成分についてはさらに高い還元率が得られていると考えられる。測定結果は最大3%小さくなるが、本研究ではこれを無視し、還元率100%と仮定して濃度を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 燃焼に及ぼす潤滑向上剤の影響 通常DMEを用いて性能試験を行う際には、低潤滑性に起因する燃料噴射ポンププランジャやノズル心弁の異常

摩耗や焼付きを防止するために高級脂肪酸の潤滑向上剤(Hitech 580)を体積割合で250 ppm添加しているが、これが燃焼に影響を及ぼす可能性がある。そこで、最初に可視化観察により潤滑向上剤の影響について調べた。

潤滑向上剤を250 ppm添加した状態では比較的強い輝炎が観察されたが、DMEのみで運転を行った場合には輝炎は観察されず、微弱な青色の不輝炎が観察された。この結果から潤滑向上剤がわずかでも含まれていると燃焼過程に影響を及ぼすことが示唆されたので、以後の実験は潤滑向上剤を添加せずに行った。プランジャおよびノズルチップの劣化に対しては、短時間で定期的に交換することに対応した。

3.2 DME噴霧燃焼の可視化観察 図3および図4に機関回転速度960 rpm、燃料噴射量をBMEP 0.4 MPa相当としたときの軽油噴霧およびDME噴霧の燃焼過程を示す。DME噴霧の場合は、上述のように発光がきわめて微弱であったため、イメージンシファイアを用いて観察した。

軽油噴霧では、噴射開始とともに噴霧が発達し、燃焼室キャビティ壁に衝突する様子が観察される。最初の着火は噴霧のノズル近傍で生じ、その後噴霧中流部のスワール下流域の数点でも独立して着火が生じる。火炎は噴霧の根本から先端部へ拡大していき、スワール下流域において拡散燃焼的に燃焼する。噴射が終了すると噴霧外縁部を包み込むように燃焼し、やがてスワールに流されながら燃焼室全体を火炎が覆う。その後も強い発光が長期間にわたって持続する。

一方、DME噴霧の着火およびその後の火炎の拡大過程を軽油噴霧と比較すると、次のような特徴がある。DME噴霧が観察されるのは噴孔から10 mm足らずであり、キャビティ壁面に達している様子は観察できない。直接撮影で観察できるのは散乱光の強い非蒸発部分と考えられるので、DMEは噴射後急速に蒸発していると考えられる。着火は噴霧先端部の完全蒸発部分において生じ、続いて燃焼室壁面に沿ってスワール下流方向に形成された混合気火炎が一気に拡大する。軽油の場合とは異なり、同一噴霧において多点での着火は認められない。

噴霧先端部の混合気全体に拡大した火炎は、次に噴霧をノズル側へ遡るように拡大し、発光はピークに達する。その後、スワールに流されながら周方向に移動し、発光は急速に減衰していく。着火から火炎が消滅するまでの期間は、軽油より15°CA程度短い。

3.3 DME噴霧の着火位置に関する検討 噴霧の準定常理論⁽⁸⁾によると、噴霧軸方向の当量比 ϕ_a は、

Fig. 3 Combustion process of light oil spray

Fig. 4 Combustion process of DME spray

式(1)に示すように理論空気量 L_{st} および燃料密度 ρ_f の $1/2$ 乗に比例する。

$$\phi_x = \frac{L_{st} \sqrt{c\sigma} d_0}{2x \tan \theta} \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma = \frac{\rho_f}{\rho_a}$$

ここで、

c : 収縮係数

ρ_f, ρ_a : 燃料および空気密度

d_0 : 噴口径

θ : 噴霧角

x : 軸方向距離

DME の理論空気量および飽和液密度はそれぞれ 9.0 および 668 kg/m^3 (@ 20°C) であり、軽油の値のそれぞれ約 60% および約 80% である。式(1)によれば、噴霧角が変わらないとしても噴霧軸方向の当量比は軽油の約 1/2 となり、軽油噴霧より希薄と考えられる。噴霧内への空気導入が相対的に軽油噴霧より盛んなことを考慮すると、着火は軽油噴霧より上流側で生じてよいはずである。しかし、上述のように燃焼観察においては軽油より下流側で着火が生じており、当量比の観点からは説明できない。この理由の一つとして DME は沸点が低く、噴射後直ちに蒸発するため、ノズル近傍の混合気温度が蒸発潜熱によって低下したこ

とが考えられる。

図5に燃焼観察から得られた軽油および DME 噴霧の非蒸発部分の発達状況を示す。軽油噴霧では非蒸発部分は時間の経過とともに発達し、燃焼室キャビティ壁まで達するのに対して、DME 噴霧では最大でもノズルから 7 mm までしか非蒸発部分が観察されない。すなわちノズルから 7 mm 進むまでのわずかな期間に噴射された燃料が蒸発を完了していることを意味しており、この蒸発が活発な領域では蒸発潜熱により温度が低下しているものと思われる。

3.4 ガスサンプリングによる DME 噴霧燃焼特性の検討 DME を燃料として正味平均有効圧 0.4 MPa で機関を運転した際の噴霧中心軸上の $r=14$, 19 mm および 22 mm における主要燃焼生成物の濃度履歴を図6に示す。なお、ノズルリフトから判断した燃料噴射期間は上死点前 12°CA ~ 上死点後 2°CA である。

$r=14 \text{ mm}$ では、DME 濃度は噴射開始とともに上昇し、噴射期間中期にピークとなった後、すぐに減少して上死点後はまったく検出されない。噴霧下流に行くほど DME 濃度は低くなり、 $r=22 \text{ mm}$ では噴射期間の中期にわずかに検出されるのみである。 $r=22 \text{ mm}$ に達する前に分解または酸化反応が急速に進んでいることがわかる。

CO_2 の立上りは $r=19 \text{ mm}$ がいちばん早く、次いで $r=22 \text{ mm}$ 、最後に $r=14 \text{ mm}$ となっている。すなわち、 $r=19 \text{ mm}$ 近傍で着火が生じ、続いて下流へ燃焼

Fig. 5 Comparison of non-evaporated spray penetration between DME and light oil

Fig. 6 Combustion products for DME spray combustion (Fuel injection timing of -12°CA ATDC, and BMEP = 0.4 MPa)

Fig. 7 Combustion products for light oil spray combustion (Fuel injection timing of -12 deg. CA ATDC, and BMEP = 0.4 MPa)

が拡大し、最後に噴霧上流部へ火炎が到達したことがうかがえ、燃焼観察の結果と一致する。

中間生成物について見てみると、噴霧上流の $r=14$ mm では、噴射開始から燃焼開始時にかけて HCHO 濃度が 1 000 ppm 強を示している。一方、噴霧中流、下流部の $r=19, 22$ mm では HCHO はほとんど検出されない。燃焼観察ならびに CO_2 の挙動から噴霧上流部では着火が生じないことがわかったが、HCHO が比較的多量に生成されていることから、この領域では低温酸化反応が活発に起こっていることが示唆される。噴霧上流部で蓄積した HCHO や過酸化物が下流に運ばれて高温酸化反応に至っていると考えられる。

燃焼開始後の上死点前 5° 以降では、CO, CH_4 が多量に生成され、その後それらが減少すると同時に CO_2 が増加し始める。この結果から DME の主要な高温酸化反応経路として CO, CH_4 を経て CO_2 に至る経路が浮かび上がる。ただし、DME の酸化に関する素反応モデル^{(9)~(11)}によると、主要な中間生成物は CO, CH_3 等であり、今回検出された CH_4 は、 CH_3 がサンプリングから測定に至る過程で CH_4 に変化したことも考えられる。

また、この時期に C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 等の熱分解、縮合成分が急速に生成される。DME は吐煙を出さないことが知られているが、燃焼過程において一時的に図 7 に示す軽油の場合と同程度の C2 成分を生成することが明らかである。ただし、軽油の場合はさらに縮重合化が進行して C_6H_6 を多量に生成するのに対し、

DME では C2 以上の縮重合化は起こらず、燃焼終了までに消費される。

4. 結 論

本研究では、高速度可視化観察およびガスサンプリングにより DME 圧縮着火機関の燃焼特性について検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 圧縮着火機関における DME 噴霧火炎は不輝炎である。
- (2) DME は噴射後直ちに蒸発し、非蒸発部分は燃焼室キャビティ壁に達しない。
- (3) 着火は噴霧先端部の完全蒸発部分で生じ、続いて火炎は燃焼室壁面近傍のスワール下流方向に形成された混合気拡大した後、噴霧をノズル側へ遡る。
- (4) 噴霧上流では低温酸化反応が活発に起こっており、ここで蓄積された HCHO や過酸化物が下流に運ばれて高温酸化反応に至っている。
- (5) 酸化過程において CO, CH_4 が多量に生成される。DME の主要な酸化経路として CO, CH_4 を経て CO_2 に至る経路が示唆された。

本研究を遂行するにあたり、日本機械学会 RC 174「低炭素含酸素型新燃料とその高効率利用技術に関する研究分科会」ならびにスズキ財団の助成を賜った。また実験機材に関しては(株)フォトロンのご協力を賜った。実験に際して茨城大学大学院学生 大

山和也君, 米田健児君, 平山雄一朗君の協力を得た。
ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) Sorenson, S. C. and Mikkelsen, S. E., Performance and Emissions of a 0.273 Litter Direct Injection Diesel Engine Fueled with Neat Dimethyl Ether, *SAE Paper*, No. 950064(1995).
- (2) Kajitani, S., Chen ZI. and Konno, M., Engine Performance and Emission Characteristics of Direct-Injection Diesel Engine Operated with DME, *SAE Paper*, No. 972973(1997).
- (3) Konno, M., Kajitani, S., Oguma, M., Iwase, T. and Shima, K., NO Emission Characteristics of a CI Engine Fueled with Neat Dimethyl Ether, *SAE Paper*, No. 1999-01-1116(1999).
- (4) Konno, M., Kajitani, S. and Suzuki, Y., Unburned Emissions from a DI Diesel Engine Operated with Dimethyl Ether, *Proc. 15th Int. Combust. Engine Symp.*, 9935167(1999) 69-74.
- (5) Glensvig, M., Sorenson, S. C. and Abata, D., High Pressure Injection of Dimethyl Ether, *ASME, ICE 27* 3(1996), *Proc. Fall Tech. Conf.*, 3(1996), 57-62.
- (6) 廣安博之・西田恵哉・吉崎拓男, Dimethyl Ether (DME) 噴霧の混合気形成と着火・燃焼特性, RC 151 研究報告書(最終), (1999) 60-67.
- (7) 陳 之立・梶谷修一, DME/DME ブレンド燃料の噴霧特性の観察, 機論第 75 期論文集III(1998), 527-528.
- (8) 和栗雄太郎・藤井勝・網谷竜夫・恒屋礼次郎, ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究, 機論(第 2 部), **25**-156(1959), 820-826.
- (9) 佐藤和孝・山根将嗣・樋高義昭, 高温気相中における低級鎖式エーテルの熱分解及び酸化反応の研究, 第 35 回燃焼シンポジウム講論集, (1997), 693-695.
- (10) Curran, H. J., A Wide Range Modeling Study of Dimethyl Ether Oxidation, *Int. J. Chem. Kinet.* **30** 3(1998), 229-241.
- (11) 飯田訓正, DME 空気予混合気の圧縮自己着火過程の素反応数値解析, RC 174 中間報告会資料, (2000).