

# 特集 DME の噴射ノズル内の流動特性\*

## A Study of the Flow of Dimethyl Ether (DME) in Diesel Nozzles

加藤 正明

Masaaki KATO

竹内 久晴

Hisaharu TAKEUCHI

本江 勇介

Yusuke HONGO

関島 仁

Hitoshi SEKIJIMA

Dimethyl ether (DME) holds promise as an alternative to diesel fuel. However, its physical properties are not similar to those of conventional diesel fuel. The P-V, bulk modulus and viscosity of DME are derived as a function of temperature and pressure. As a result, the Weber and Reynolds numbers of DME are very large compared to those of diesel fuel. Therefore, the spray characteristics of DME differ from those of liquid spray and are more similar to those of gas spray. The spray formation is significantly affected by the flow of fuel in the nozzle. Computational Fluid Dynamics (CFD) and experiments were examined to analyze the flow of fuel in the nozzle. The DME physical properties cause some differences in the flow of fuel in the nozzle, in comparison with diesel fuel.

**Key words:** Dimethyl ether, DME, Alternative fuel, Fuel flow, Diesel nozzle

### 1. はじめに

ジメチルエーテル (DME) は、ディーゼル機関、発電、燃料電池、都市ガス用などへの適用が有望な非常にクリーンな代替燃料である。しかも、天然ガス、石炭、炭層メタン、バイオマス等種々のエネルギー源から製造可能である。中国では、2010年上海万博を機に都市内交通バスにDMEを導入し、大気環境を改善すると共に石油輸入を抑制しエネルギーの多様化を図ろうとしている。しかし、DMEをディーゼル機関に適用するには、DMEの物理特性が従来のディーゼル燃料とは異なるため、種々解明すべき課題が残されている。特に、燃焼を左右する噴霧において、DMEの噴霧特性は液体より気体噴霧に近いとされ、混合気形成に課題が残されている<sup>1)</sup> 噴射エネルギーを噴霧に変換するノズル内の流れが、DMEの物性により軽油と比較していかなる特性となるか、実験と数値解析を用いて解析し噴霧形成に与える影響について考察することは重要である。そのために、コモンレール噴射装置を用いて噴射特性を計測し、ノズル内流れを可視化できる流れ拡大ノズル模型による実験、及び数値解析で、燃料としてDMEのノズル内流れが軽油と比較しいかなる特性を示すか解析を行った。

### 2. DMEの物性

DMEを軽油と比較すると、噴射に大きな影響を与える物性値のなかで、沸点が $-25^{\circ}\text{C}$ 、臨界点が $5.24\text{ MPa}$ 、 $400\text{ K}$ と低く、一方、蒸気圧が $20^{\circ}\text{C}$ で $530\text{ kPa}$ と高いことなどがある。実機関の筒内条件は、燃料噴射中に容易に先の臨界点を超え、噴射された燃料が臨界状態で噴

霧が形成される過程が報告されている。また、単位容積当たりの発熱量が軽油の約6割と低いため、高噴射率が必要とされる<sup>2)5)</sup> ここでは噴射過程のノズル内、特にサック及び噴孔内において、DMEの挙動を解析した結果を述べる。

#### 2.1 DMEの圧力-比容積 (P-V) 線図

Fig. 1のDMEのP-V線図は、Soave式に基づき導入される<sup>6)</sup> この図からノズル内及び燃焼室での噴射燃料の状態変化はおおよそ推定できる。

#### 2.2 圧力-温度 (P-T) 線図、蒸気圧、密度、弾性係数、粘度

ディーゼル機関の負荷と圧縮比を変化させた際のFig. 2に示す燃焼室内P-T線図から、噴射はDMEの臨界以下で開始し、負荷及び圧縮比の増加とともに、燃焼後期の筒内圧力はDME臨界点を越える超臨界状態の筒内に噴射される期間が増加する。インジェクタ内燃料が臨界状態にあるとき、超臨界域への噴射は蒸発現象を伴わず、気体噴射と同じような過程をたどる。それ故、DMEの物理特性は重要になる。蒸気圧については、既に報告されており<sup>7)8)</sup> 通常の噴射条件では容易にノズル内でcavitationの発生が予測される。また、液体DMEの密度<sup>9)</sup> 弾性係数は圧力と温度の関数として、また粘度は温度関数で表され、それぞれ圧力と温度により大きく変化する<sup>9)</sup>

Figs. 1&2及び上記に示すように、DMEの物理特性は圧力と温度に影響される。つまり、DMEの噴霧、噴射特性は筒内の動作ガス状態、ノズル温度によっ

\* (社)日本機械学会講習会 (No.06-100) 教材より、一部加筆して転載

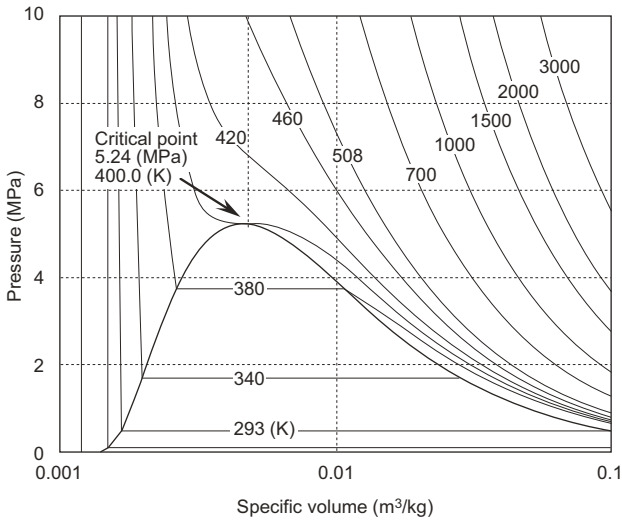


Fig. 1 P-V diagram

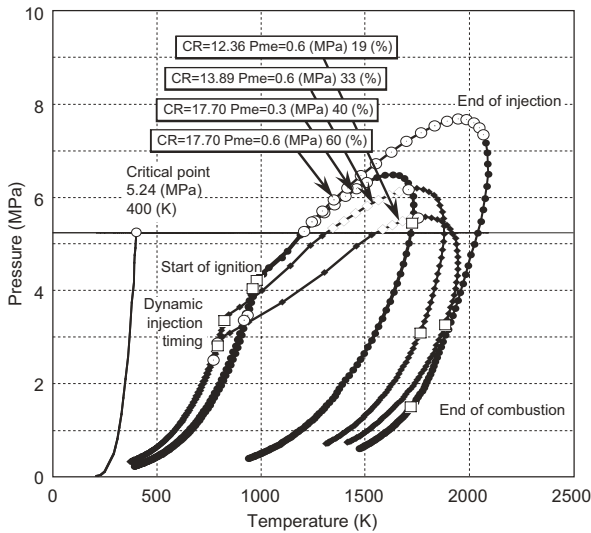


Fig. 2 P-T diagram of DME in combustion chamber

が影響を受ける。また、DMEのWeber数は軽油のWeber数の数十倍から数百倍になり、DME噴霧の液滴は球形を維持できない。さらに、Reynolds数はDMEにおいては低噴射圧でもその粘度の低さから軽油の10倍程度になり、またcavitation数は蒸気圧の高さから軽油より小さい。従ってDMEのノズル内の流れと噴霧は軽油と大きく異なることが予測される。その差を、噴射系実験と拡大模型での流れ観測及び数値解析を実施して、ノズル内流れを解析しDME物性が流れに与える影響を推定する。

3. 実験

3.1 実験装置

噴射及びノズル内流れ実験を以下に示すコモンレール噴射装置、単気筒機関、流れ拡大模型で実験し解析した。

(1) コモンレール噴射システム

使用したコモンレール噴射装置、及び機関を Fig. 3 に示す。タンク内燃料は1 MPaに調圧し、空気式ポンプにより噴射圧力は10から25 MPaに制御できる。噴射時期と噴射期間はともに電子制御される。ノズルはφ0.35の4孔ノズルを使用した。機関の仕様は、ボア×ストローク=φ92×96、排気量638 cm<sup>3</sup>の単気筒機関である。この装置を使用して噴射特性、及び筒内特性を実験評価する。

(2) 温度計測

DME物性の温度依存性の高さから、燃料温度の計測が必要であり、Fig. 4に示す熱電対を埋め込んだインジェクタにて、ノズルサック内の燃料温度と燃焼特性差を解析するノズルボデー表面の温度を計測する。Fig. 4右のノズル先端の拡大図に示す範囲が本研究の解析対象である。

(3) 流れ拡大模型

ノズル内流れを観測する実ノズルの40倍の拡大模型を Fig. 5に示す<sup>9)</sup>。模型は、流れの相似則として Reynolds数とcavitation数CNを合わせる。CN = (Po - Pv) / (Pi - Po) であり、実験条件とDME蒸気圧Pvで算出される数値に合うように、模型内部でのcavitation

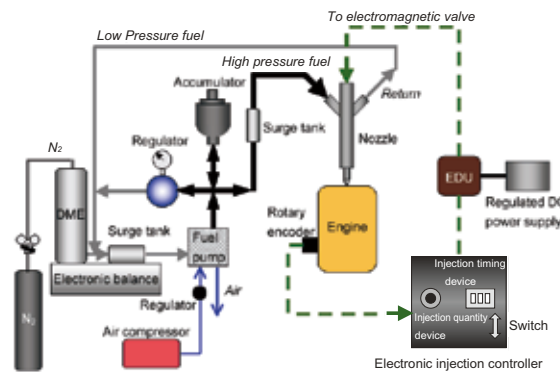


Fig. 3 Schematic diagram of the common rail injection system

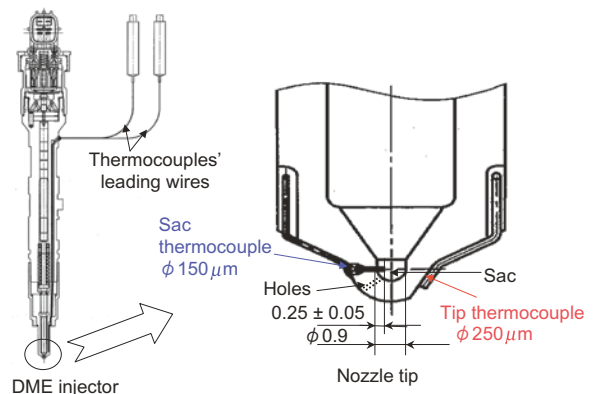


Fig. 4 Nozzle tip for temperature measurement

発生部位の圧力を、導入空気圧を調節する方法で実施している。ここで  $P_i$  はノズル入口圧、 $P_o$  はノズル出口背圧である。相似則を成立させるには、Mach 数 (= 流速 / 音速) も一致させることが望ましい。しかし、DME の実機噴射圧 10 から 25 MPa、80 °C 付近では、Mach 数は 0.3 程度であり非圧縮性流体として取り扱える。そのため、Mach 数は一致しなくとも、相似則が成立するとして実験は実施する。軽油では、例えば圧力が 100 MPa 以上の実験条件で Mach 数は 0.3 程度になる。参考までに、模型では、Mach 数は  $6 \sim 10 \times 10^{-3}$  程度である。

実機と模型の相似則は Table 1 に示す。模型は観測を容易にするために噴孔は 2 孔としてある。Reynolds 数は同じに、cavitation 数はほぼ一致させて、影写真で流れと cavitation の状況、PIV (Particle Imaging Velocimetry) により流速と渦度を観測、各部圧力をマノメータで計測、流量はメスシリンダにて計測する。この模型での流れ観測結果と数値解析 CFD の結果よりノズル内流れを解析する。

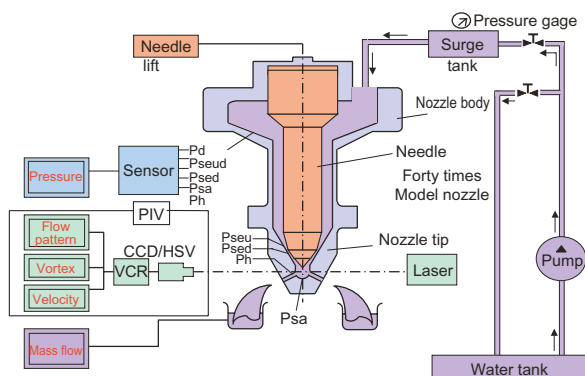


Fig. 5 Flow visual enlarged nozzle model

Table 1 Comparison actual & model nozzle on similarity properties

Property	Model nozzle (Water)	Actual Nozzle (DME)
Reynolds Number	$1.1 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$
Cavitation number	0.32	0.36
Temperature (°C)	30	10
Kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)	$8 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$
Density (kg/m <sup>3</sup> )	997	692
Nozzle hole diameter (mm)	$\phi 14$	$\phi 0.35$
Nozzle hole numbers	2	4
Needle lift (mm)	4	0.1
Nozzle inlet pressure (MPa)	0.175	14
Sac pressure (MPa)	0.159	6.9
Back pressure (MPa)	0.1	4
Vapor pressure (MPa)	0.076 (set up)	0.383

### 3.2 実験条件

機関回転数 960 r/min、噴射圧 25 MPa、噴射量 56 mg/st、燃料温度はインジェクタ入口で 40 °C である。拡大模型では、装置耐圧限界から実噴射圧 20 MPa 以下相当に相似させて実験した。これら以外の実験及び計算条件はそれぞれ図中に記述した。

### 3.3 実験結果

#### (1) 噴射特性

Fig. 3 の噴射装置で噴射特性として噴射圧と噴射率を測定した結果から、DME は噴射率が軽油のそれより高い。ニードルリフトが 0.35 mm の最大リフト時の流量係数を計算すると、軽油噴射時には 0.70 で、DME 噴射時は 0.67 となる。噴射率が高いにもかかわらず DME、流量係数が低くなる。これは、DME の低密度から容積噴射率は軽油より大きくなることと、また弾性係数が小さいことから圧力の変動周期が軽油より長く、サック室圧が高くなることによる。すなわち、噴射期間中の圧力変化は少なく、容積噴孔流量は大きくなるのが DME の特徴である。

#### (2) 温度計測結果

Fig. 4 のインジェクタとノズルで、Fig. 3 の機関を運転し温度を測定した結果を、熱電対の時定数補正し、Fig. 6 に示す。DME は、臨界点を越えたサック内温度で噴射開始し、噴射の継続とともに臨界温度以下に低下する。着火後、筒内温度と圧力の上昇に従い温度、圧力ともに再び臨界点を越える。軽油と DME の違いによるサック内温度変化の差は、噴射開始からの温度低下が DME は 200 °C あるのに対し、軽油は 120 °C と温度変化幅が少ない。DME が蒸発し気化潜熱を奪っていることによると推定される。

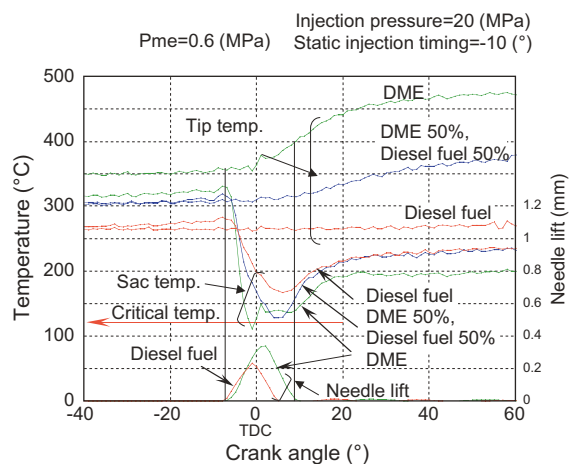


Fig. 6 Temperature of various fuel in sac & on nozzle tip

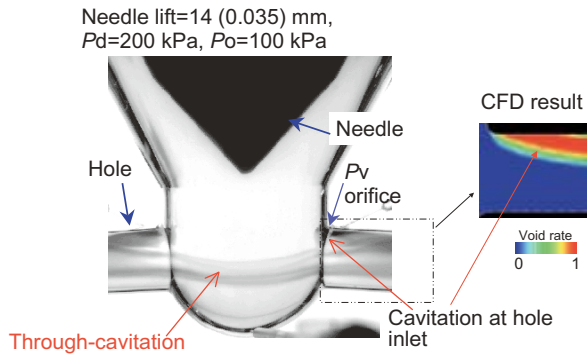


Fig. 7 DME cavitation in enlarged model nozzle and CFD

(3) 流れ観測

ノズル模型内の流れの影写真を Fig. 7 に示す。噴孔入口上部の剥離分及び、サックと2噴孔を貫通する cavitation が観測される。これは、剥離、あるいは縮流によるものではなく旋回流による空洞に見える。これを貫通空洞 through cavitation と呼ぶ。Arcoumanis 等は string cavitation と呼称している。<sup>10)</sup> Arcoumanis の軽油での高圧 (100 MPa) 実験と本研究 DME の低圧 (10-25 MPa) の実験は、Reynolds 数はそれぞれ  $3 \times 10^4$  と  $1 \times 10^5$  と大きく、空洞が同じように発生している。何故、旋回流が発生するかは後述する。

4. 数値解析

ノズル内流れを、気液2相流モデルを用い解析した。

(1) 計算モデルと条件

ノズル内流れを、Fig. 8 に示す気液2相流解析モデル FIRE により数値解析した。計算範囲はシート上流から噴孔出口まで、1/8 軸対称モデルで計算メッシュ数は 30,400 である。初期条件をニードルリフト 0.1 と 0.35 とし定常流、境界条件を入口圧 25 MPa、背圧 4 MPa、温度は燃料とニードルを 80 °C、ノズルポデーを 200 °C とし計算した。

(2) 計算結果

Void 率、圧力の計算結果を Fig. 9 に示す。

DME で cavitation の発生を示す Void 率が高いことは予想どおりで、噴孔入口及びシート下流で発生し、有効噴孔面積を減少させている。一方、軽油でも噴孔入口に Void が発生しているが、DME より Void 率が低く範囲が狭い。

圧力は DME が噴孔面積を減少させているため、噴孔入口から軽油より高圧を維持している。結果として、速度も噴孔出口において DME が軽油より速い。

数値解析結果から流量係数を算出し Fig. 10 に示す。DME ではいずれのニードルリフトでも軽油より流量

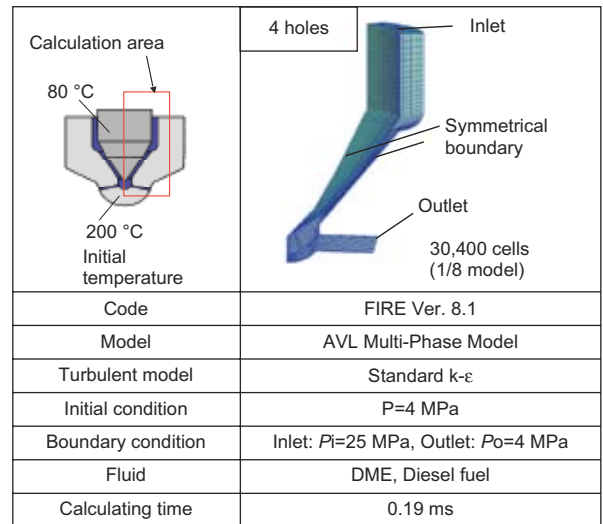


Fig. 8 CFD model of nozzle

係数が低下している。Fig. 3 の装置での実験結果、リフト 0.35 mm での軽油噴射時には 0.70 で、DME 噴射時には 0.67 となった結果とほぼ一致する。

また、Fig. 7 の模型内の流れと比較すると、ノズル噴孔入口上部での cavitation 発生状況がよく一致している。しかし、模型で観られる噴孔を貫通する空洞は、数値解析では表現されていない。

5. 実験及び計算結果解析

以上の実験、計算結果を解析する。

5.1 噴射特性

DME は、噴射中のコモンレール圧力の降下が少ない。これは体積弾性係数が小さく流量に対する圧力変化が小さいからで、噴孔流量係数が低いことと合わせて、サック室圧が軽油より高圧に維持される。さらに、DME は密度が小さいことから、流量係数低下はあっても容積噴射率は高くなる。しかし、単位容積の発熱量の低さから、軽油の2倍の容積噴射率を要求されると圧力低下は大きくなり、DME 用に噴射系の適合が必要となる。

5.2 流れ特性

模型と数値解析の定常流を観測すると、さらに DME では噴孔に cavitation が多く発生し、有効噴孔面積を低減させていることで流量係数を低下させるが、サック室圧と噴孔内の圧力も高く維持され、出口流速も高い。流量係数は低くても、サック室圧、噴孔内圧が高圧を維持し、かつ DME の低密度が高容積噴射率へ寄与することは噴射系実験結果と同じである。

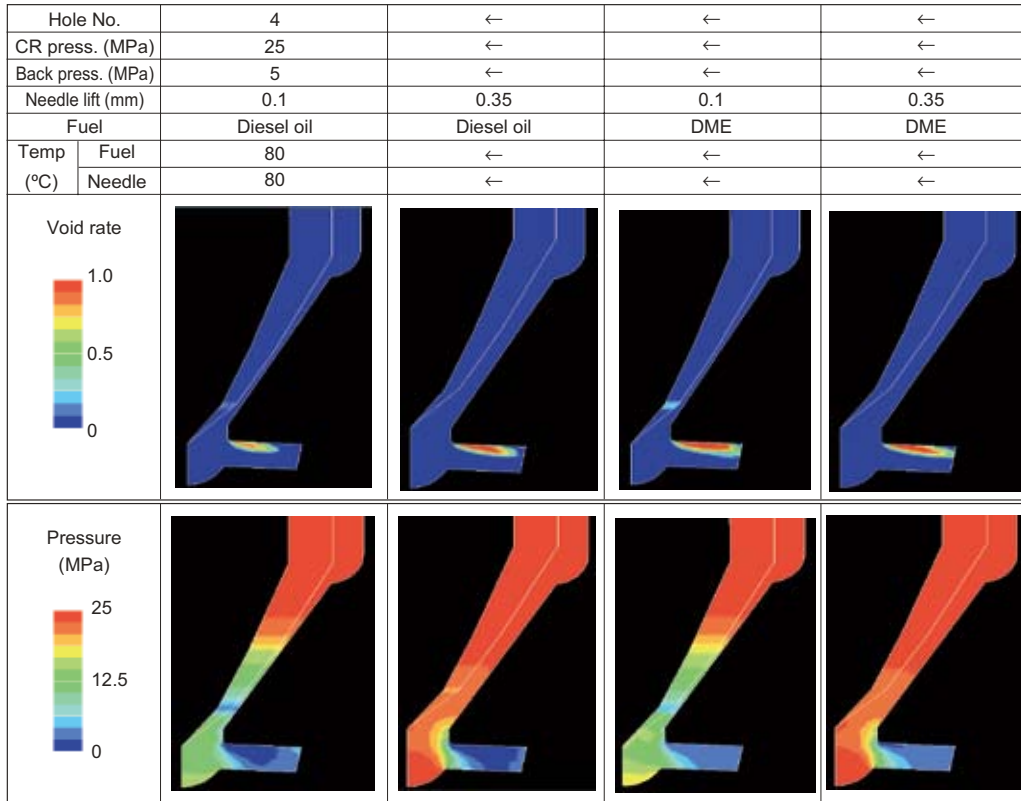


Fig. 9 CFD result of void & pressure in nozzle

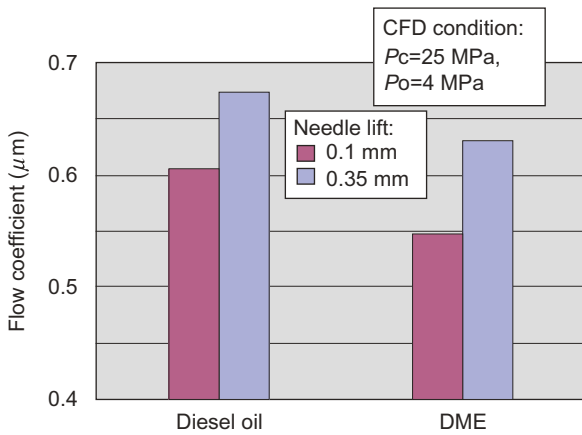


Fig. 10 CFD result of flow coefficient

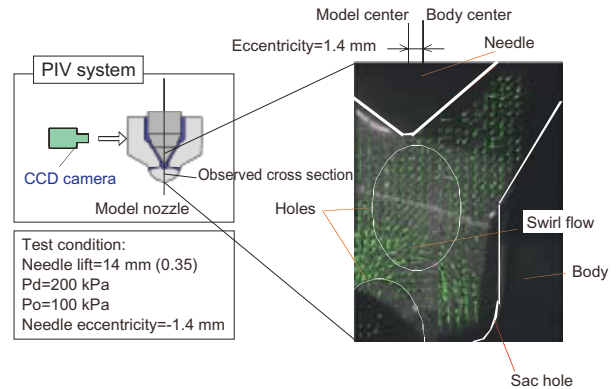


Fig. 11 Swirl flow in nozzle sac

貫通空洞は (Fig. 7), ニードルの偏芯によりニードル周囲の流れが偏りサック内に旋回流が生じることで発生する現象である。模型でニードルを偏芯させた流れの観測結果 (Fig. 11) が、これを裏付けている。模型での貫通空洞の大きさは Fig. 12 に示すように、ニードルリフト 4 mm (実機 0.1 mm 相似) では、ニードルの偏芯量に従い変化する。つまり、偏芯量が大きいと貫通空洞径も大きくなる。リフト 14 mm (0.35 mm) では、ニードル偏芯量によらず空洞が発生している。こ

れは、高リフト時の大流量が、模型では設定できないわずかなニードル偏り、あるいは流入流れの偏りでもサック内流れの偏りを起こすためと考えられる。<sup>10-13)</sup>

数値解析で軸対称 1/8 分割モデルでなく、1/2 モデルに偏芯量を与えて計算した結果を Figs. 13&14 に示す。圧力と Void 率の分布を観ると貫通空洞が存在する可能性を示している。

流量係数が偏芯によりさらに小さくなることはこの結果からも予測される。<sup>10)11)</sup>

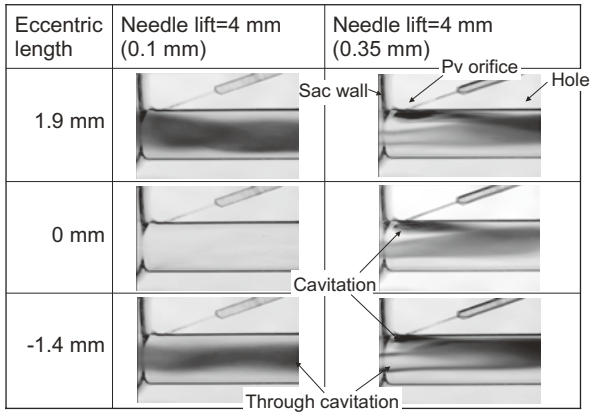


Fig. 12 Effect of needle eccentricity on through cavitation

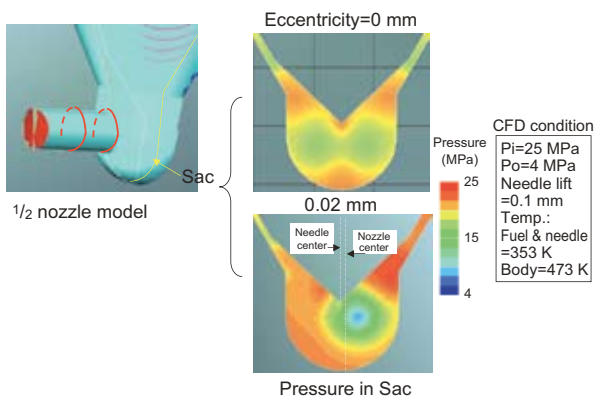


Fig. 13 CFD result of pressure with and without needle eccentricity

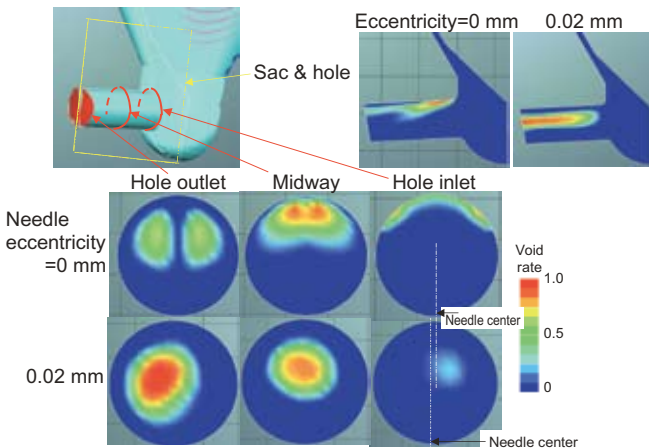


Fig. 14 CFD diagram of DME in combustion chamber & sac

### 5.3 サック内温度特性と DME 相変化

上記の噴射系、流れ観測と数値解析では、実噴射にて起こるであろう DME の相変化が表現されていない。サック内の温度測定結果から (Figs. 4&6), 実機関の筒内温度は 600 °C 以上となり、サック内は高温高压の空気が入り、噴射前に温度は 300 °C 程度になる。サック内温度圧力変化は、当然 DME の相変化はサック内でも起き得ることを示す。以下、考察する。

噴射開始後、燃料はサック内高温空気を冷却排出していく過程で気化し、あるいは超臨界状態になる。その後、気化熱で冷却され、流入燃料の温度近くまで低下し、流入 DME は液体を維持する。続いて燃焼が開始されると燃焼熱を伝えられ、燃料温度低下は止まる。噴射終了により温度が上昇する。燃焼終了後は筒内残留ガス等の熱を受けて、徐々に温度が上昇して、再び 300 °C 近くになると考えられる。

次に、サック室圧力を別計測の噴射率と圧力、ニードルリフトからシート開孔面積を与え計算して、Fig. 6 の計測サック温度と計算サック圧力の変化を Fig. 2 の P-T 線図上にプロットすると Fig. 15 の赤色の実線になる。

この実線をたどると、DME は噴射開始時では気体条件であり、液体で噴射されてもサック内で気化していると考えられる。噴射された DME の気化潜熱でサック内温度は低下し、また、サック圧はコモンレール圧に近づくように上昇し、超臨界域に入る。引き続きサック圧の上昇と燃料温度の低下で液体条件に入り液体のまま噴射される。そして着火燃焼による筒内温

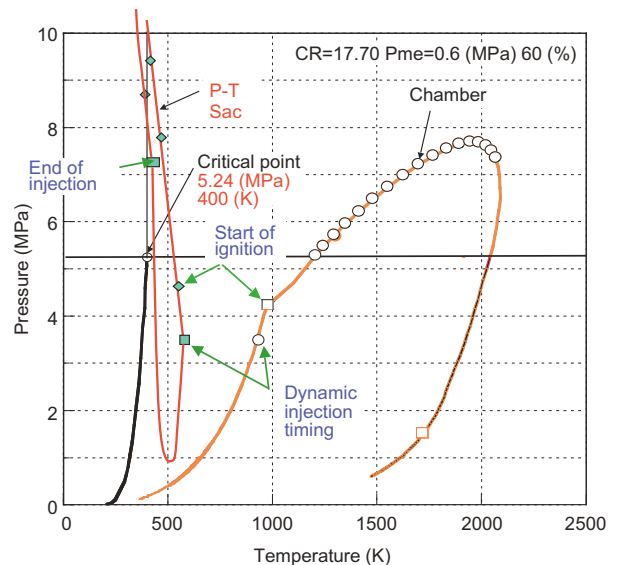


Fig. 15 PT diagram of DME in combustion chamber & sac

度の上昇による受熱でサック内温度も上昇すると、再び高温高压の超臨界状態になる。<sup>3)-5)</sup>つまり、筒内圧と噴射期間によるが、DMEはサック内で気体、超臨界、液体、再び、超臨界の順に相変化しながら噴射していることが予測される。<sup>12)-14)</sup>

## 6. まとめ

噴射時のノズル内 DME の流動特性を、DME の物性と実験結果及び数値解析を適用し解析した結果、

- (1) 軽油との比較で、低粘度の DME は Reynolds 数が大きく、高蒸気圧故に cavitation 数が小さい。
- (2) その結果ノズル内の流れに、DME は cavitation を容易にかつ広い範囲に発生させ、噴孔流路面積を減少させる。
- (3) DME は cavitation 発生により流量係数は小さいが、噴孔入口圧力は軽油より高くなり、かつ DME の低密度により容積噴射率は高くなる。
- (4) ニードルの偏芯により、DME は強い旋回流をサック内に形成し、噴孔を貫通する空洞を発生する。
- (5) 噴射期間中 DME は、サック内温度とサック圧の変化を追うと、噴射率とサック圧及び燃焼熱と筒内圧の影響を受け相変化しながら噴射していると推定される。DME はサック内で噴射開始初期は、気体に続いて超臨界、継続する噴射により液体、燃焼による温度上昇から再び超臨界と相変化する。
- (6) 上記 (4)、(5) より気体及び超臨界の DME 噴霧は噴霧角が広がり噴霧到達距離が不足する。液体で噴射する場合にも、高 Weber 数により分裂しやすく、また気化しやすいことから噴霧到達距離は短くなり、空気との混合が遅れると考えられる。これらより、DME は軽油よりノズル周辺で燃焼が盛んになり、ノズル先端壁面の温度上昇をもたらしていると考えられる。

以上より、DME は cavitation、貫通空洞の発生、そして相変化もノズル内で起こしており、軽油とはかなり異なる流動特性を示していることが分かる。ディーゼル機関に DME を適用する場合には、サック内の旋回流を押さえることと、相変化を起こす温度上昇を抑制することができれば、必要以上の高压化、噴孔径の拡大が避けることができる。DME のように低粘度、低臨界点、低密度の燃料には、その物性に適したノズルに仕様があることを示す。

## <参考文献>

- 1) 若井謙介, 西田恵哉, 吉崎拓男, 廣安博之: 直接噴射ディーゼルノズルから噴射された DME の噴霧特性に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.30, No1, (January 1999), pp. 41-47.
- 2) 瀬戸雄史, 柳澤直樹, 西頭昌明, 徳丸武志, 城田和彦: ジメチルエーテル自動車の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.48-02, JSAE20025112.
- 3) 梶谷修一, 陳之立, 久保田俊一, 金野満, 綿引猛, 加藤英人, 小田裕司: ジメチルエーテル圧縮点火期間の研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.48-02, JSAE20025032.
- 4) 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特性と燃焼特性, 第 17 回内燃機関シンポジウム, No.20026071, 2002.10.9-11.
- 5) S. Kajitani, L. Chen Zhili, S. Kubota, H. Kato, M. Kato: Fundamental research of DME diesel engine operated with a common rail injection system, International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XIV) (2002).
- 6) Reid C. Robert, Prausnitz M. John, Poling E. Bruce: The properties of GASES & LIQUIDS, McGraw Hill International Editions, Chemical Engineering Series, Fourth Edition.
- 7) Ho Teng, James C. McCandless, & Jeffery B. Schneyer: Thermochemical Characteristics of Dimethyl Ether-An Alternative Fuel for Compression-Ignition Engines, SAE Paper 2001-01-0154.
- 8) Ho Teng, James C. McCandless, & Jeffery B. Schneyer,: Viscosity and Lubricity of (Liquid) Dimethyl Ether -An Alternative Fuel for Compression-Ignition Engines, SAE Paper 2002-01-0862.
- 9) M. Kato, K. H. Kano, K. Date, T. Oya, K. Niizuma: Flow Analysis in Nozzle Hole in Consideration of Cavitation, SAE Paper 970052.
- 10) C. Arcoumanis, H. Flora, M. Gavaises, N. Kampanis, & R. Horrocks : Investigation of Cavitation in a Vertical Multi-Hole Injector, SAE Paper 1999-01-0524.
- 11) 千田二郎, 葛綿秀雄, 藤本元: ディーゼル燃料噴射ノズルにおける内部流動が噴霧の微粒化に与える影響, 微粒化, Vol.11, No.34 (2002), pp. 12-22.
- 12) M. Kato, H. Takeuchi, K. Koie, H. Sekijima, S.

Kajitani, Z. L. Chen, S. Hashimoto: A Study of Low Critical Fuel Flow in Nozzle, SAE2003-01-1923, JSAE20030079.

13) M. Kato, H. Takeuchi, K. Koie, H. Sekijima, S. Kajitani, Z. L. Chen, S. Hashimoto: A Study of Dimethyl Ether (DME) Flow in Diesel Nozzle, SAE 2004-01-0081.

14) Ho Teng, James C. McCandless: Comparative Study

of Characteristics of Diesel-Fuel and Dimethyl-Ether Sprays in the Engine, SAE 2005-01-172.



<著者>



加藤 正明  
(かとう まさあき)  
パワトレイン機器事業グループ  
特定開発室  
代替燃料噴射系の開発に従事



竹内 久晴  
(たけうち ひさはる)  
パワトレイン機器事業グループ  
特定開発室  
代替燃料噴射系の開発に従事



本江 勇介  
(ほんごう ゆうすけ)  
パワトレイン機器事業グループ  
特定開発室  
ディーゼル将来噴射系の開発に従事



関島 仁  
(せきじま ひとし)  
パワトレイン機器事業グループ  
特定開発室  
ディーゼル将来噴射系の開発に従事