

# Dimethyl ether (DME)の燃焼特性の解明に関する研究

Studies on the clarification of fundamental combustion properties of Dimethyl ether (DME)

田上 公俊, 大分大学工学部, 助教授

Kimitoshi Tanoue, Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Oita University

要旨: 地球規模での環境問題や資源枯渇問題解決のため, ディーゼルエンジンにおいても大気汚染の主な原因である窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) および微粒子 (PM) の低減が強く求められている. その有力な解決手法として低エミッション代替燃料の利用が挙げられる. 取り分け DME は高セタン価を有し圧縮自着火運転が可能であり, かつ軽油運転時と同程度の熱効率を維持しつつ無煙運転が可能なることから軽油代替燃料として近年注目されている. しかしながら DME の燃焼は軽油とは異なるため, 実用低公害エンジンの効率的な開発のためにはその基礎的な燃焼特性を把握する必要があるが, これまで世界的にもそのような研究は少ない. そこで本研究では2種類の燃焼器を使用し, DME 燃料の基礎燃焼特性を詳細に調べる. 最終的に本研究で得られた基礎データを用いることで高効率・低公害な DME 燃焼器の効率的な開発が期待できるものとする.

Abstract: Recently there have been many problems related with automotive engineering, such as environmental issues and energy problems. These social circumstances motivate the adoption of urgent measures such as alternative fuel and new combustion techniques for the internal combustion engine. In this context, dimethyl ether (DME) is thought to be a potential alternative to diesel fuel due to lower overall pollutant emissions and more excellent fuel economy. DME has no carbon-carbon bonds and lowest possible carbon to hydrogen ratio after methane. Several recent publications have already presented results from diesel engines operated on pure DME. These experiments showed that DME is an excellent diesel fuel with a high cetane number. This fuel produces very low particulate emissions, while the NO<sub>x</sub> emissions are similar to those from current diesel fuel under the same engine operating conditions. This allows the engine operating conditions to be adjusted to reduce NO<sub>x</sub> without an accompanying increase in particular emissions. The purpose of this study is to measure the burning velocities of DME-air flames, which should be useful data for combustion modeling and simulation, using the spherical bomb that can embody the real engine conditions.

## 1. 研究目的

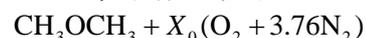
地球規模での環境問題や資源枯渇問題解決のため, ディーゼルエンジンにおいても大気汚染の主な原因物質である窒素酸化物, 及び微粒子の低減が強く求められており, その有力な解決手法として低エミッション代替燃料の利用が挙げられる. 取り分けジメチルエーテル (以下 DME) は軽油代替燃料として近年注目されている. DME の主な利点は, (1) 含酸素燃料であることと炭素同士の結合がないことから無煙な燃焼と耐 EGR 性能向上の実現 (2) セタン価が 55 以上あり, また沸点が -25°C であることから早い混合気形成, 着火遅れの低減, 良好な始動性の実現が挙げられる. DME の内燃機関への適用はこれまでメタノール火花点火機関の始動補助燃料やメタノール圧縮着火機関の着火及び燃焼促進剤として検討されてきたが, 近年, 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に伴い, 単体での利用が検討されている. しかしながら DME の燃焼は軽油とは異なるため, 実用低公害エンジンの効率的な開発のためにはその燃焼特性および反応過程を調べる必要がある. DME の基礎的な燃焼特性に関しては不明な点が多く, 層流燃焼速度に関してバーナ火炎を用いた Gibbs らのデータ, 定容燃焼器を用いた Daly らのデータがある程度であるが, 前者は多くの誤差要因を含んでいることが指摘されている. 本研究では実際のエンジンを模した定容燃焼器による実験と詳細な化学反応を考慮した数値解析により DME 火炎の層流燃焼特性, 火炎伸張の影響及び, 乱流燃焼特性を詳細に検討した. 本報告書では特に層流燃焼特性について報告する.

## 2. 研究経過

本研究ではまず定容燃焼器を使用して層流燃焼特性を調べた。本実験に用いた燃焼装置は、上下2面に直径92mmの多孔板を、他の4面には直径92mmの観測窓を配置した内径が約100mmの球形に近い定容燃焼器である。図1に燃焼室の外観を示す。2個の多孔板の後方にそれぞれ独立に駆動される遠心ファンがあり多孔板中心付近の穴から混合気を噴出させ、容器中心部にほぼ一様な乱れ場を作る。本研究では分圧により所定の組成で混合気を充填し、ファンにより攪拌した後、時間をおいて電極により中心点火して実験を行った。また、本研究ではキセノン放電管を備えたストロボスコープを光源とし、高速度カメラ(フotron社 FASTCAM-NETにて1/1000秒間隔での撮影)を用いたシュリーレン法により伝ば火炎の可視化を行った。得られたデジタル画像をそのままPCに送り画像処理ソフトにより火炎半径を算出した。各画像は縦横比で72mm×77mm(240pixel×256pixel)の視野と0.3mm/pixelの解像度を持つ。本研究で得られた火炎半径は最小で約3mm, 最大で35mmであることから、測定精度は誤差1%~10%以内であると考えられる。

本研究で使用した混合気はDME/Air混合気であり、組成は以下の式で表される。



ここで $X_0$ は酸素のモル数であり、また空気の組成は $\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$ と仮定した。この場合、当量比は $\phi = 3/X_0$ で計算できる。また本研究ではDME/Air火炎の燃焼特性を明確にするため、他の炭化水素系燃料と比較検討した。ここで比較対象として $\text{CH}_4/\text{Air}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{Air}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8/\text{Air}$ 混合気を使用した。この場合、当量比はそれぞれ $\phi = 2/X_0$ ,  $\phi = 3.5/X_0$ ,  $\phi = 5/X_0$ で算出できる。表1に本研究で使用した混合気の物性値を示す。表中、 $\rho_b/\rho_u$ は平衡計算により算出した既燃ガス、未燃ガスの密度比、 $\alpha$ は温度伝導率、 $S_u^0$ は実験によって得られた層流燃焼速度、 $L_u$ ,  $Ma$ はそれぞれ実験により得られたマークシュタイン長さ、マークシュタイン数である。また $Le$ は不足成分の拡散係数に基づくルイス数であり、火炎厚さは $\delta_f^0 = \alpha/S_u^0$ により算出した。以降の研究結果では特にDME/Air火炎の結果のみを示す。詳細は発表論文参照。

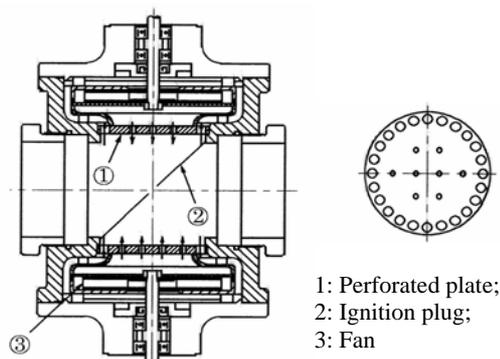


Fig.1 Combustion Chamber

Table1 Properties of mixtures

	$\phi$	$\rho_b/\rho_u$	$\alpha$ [mm <sup>2</sup> /s]	$S_u^0$ [cm/s]	$L_u$ [mm]	$Ma$	$Le$
DME/Air	0.8	0.136	20.3	36.3	0.2258	4.04	1.61
	0.9	0.127	20.1	43.3	0.2026	4.05	1.60
	1	0.121	19.9	46.1	0.1763	4.07	1.60
	1.1	0.119	19.8	46.9	0.1327	3.15	1.02
	1.2	0.119	19.6	42.8	0.1044	2.28	1.02
	1.3	0.120	19.4	36.7	0.0763	1.44	1.01
	1.4	0.121	19.3	31.5	0.0506	0.83	1.01
	1.5	0.122	19.1	21.1	0.0025	0.03	1.00
	1.6	0.124	18.9	16.3	-0.0347	-0.30	1.00
	1.7	0.125	18.8	11.1	-0.0720	-0.42	0.99
CH <sub>4</sub> /Air	0.7	0.163	21.1	15.9	0.0568	0.43	0.96
	0.8	0.150	21.3	23.9	0.0981	1.10	0.96
	0.9	0.140	21.4	30.8	0.1208	1.74	0.95
	1	0.134	21.3	33.2	0.1465	2.28	0.95
	1.1	0.133	21.5	33.7	0.1917	3.00	1.10
	1.2	0.135	21.6	26.6	0.2935	3.61	1.10
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /Air	0.8	0.144	21.0	28.6	0.1951	2.66	1.45
	1	0.128	20.8	36.9	0.1654	2.94	1.06
	1.1	0.126	20.7	37.4	0.1381	2.50	1.06
	1.2	0.127	20.6	34.4	0.1024	1.71	1.06
	1.4	0.132	20.4	19.6	0.0349	0.34	1.05
	1.6	0.137	20.2	8.4	-0.0524	-0.06	1.05
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> /Air	0.8	0.142	21.0	29.2	0.3848	5.34	1.87
	1	0.126	20.8	39.0	0.2336	4.38	1.05
	1.1	0.124	20.6	39.6	0.1851	3.55	1.05
	1.2	0.125	20.5	36.5	0.1157	2.06	1.05
	1.4	0.129	20.3	20.6	-0.0053	-0.05	1.04
	1.6	0.134	20.1	13.2	-0.0854	-0.56	1.03
	1.8	0.139	19.9	4.5	-0.1357	-0.31	1.02
	2	0.145	19.6	2.8	-0.1578	-0.23	1.02

## 3. 研究成果

### 3.1. 球状火炎における伝ば特性

図2に高速度カメラによる球状伝ば火炎の画像から得られた点火からの経過時間  $t$  と火炎伝ば速度  $dr/dt$  の関係を示す。図から希薄側(ルイス数が大きい混合気)では、燃焼初期(火炎伸張が強い時)の伝ば速度は遅く、時間の経過と共に(火炎伸張が弱くなり)徐々に加速していくが、過濃側(ルイス数が小さい混合気)においては燃焼初期の伝ば速度は速く、次第に減速していくことが分かる。このような球状火炎の

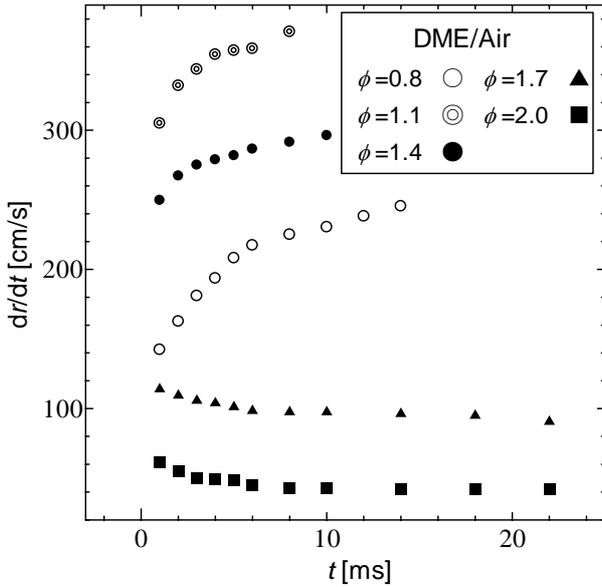


Fig.2 Variations of  $dr/dt$  with  $t$

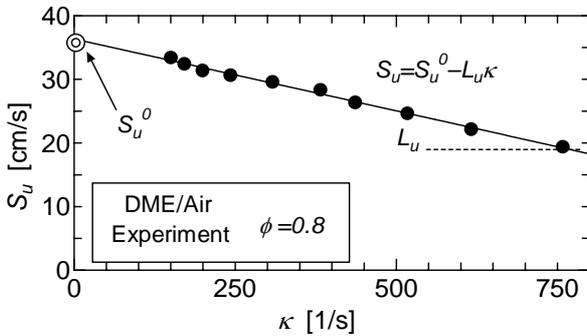


Fig.3 Variations of  $S_u$  with  $\kappa$

伝ば特性は火炎伸張とルイス数効果の相互作用により説明されたこれまでの実験結果と定性的傾向は一致する。即ち、ルイス数が1以下の混合気は火炎伸張により燃焼速度が増加するため、燃焼初期（火炎伸張が強い領域）に伝ば速度が大きくなり、逆にルイス数が1以上の混合気は火炎伸張により燃焼速度が低下するため、燃焼初期に伝ば速度が小さくなったと考えられる。

### 3.2. 層流燃焼速度

次に本研究では燃焼速度に及ぼす火炎伸張の影響の定量化を試みた。予混合層流火炎に対する火炎伸張の影響に関してはこれまで多くの研究がなされている。火炎伸張の燃焼速度への影響に関しては Markstein による理論を拡張し、Clavin らは漸近解析により火炎伸張と燃焼速度の間の線形関係を導出した。

$$S_u = S_u^0 - L_u \kappa \quad (1)$$

ここで  $S_u^0, S_u$  はそれぞれ、伸張のない場合、伸張を受けた場合の層流燃焼速度、 $\kappa$  は火炎伸張、 $L_u$  はマークシュタイン長さである。式 (1) を無次元化すると以下の式が得られる。

$$\frac{S_u}{S_u^0} = 1 - Ma \times Ka \quad (2)$$

ここで  $Ma, Ka$  はそれぞれマークシュタイン数 ( $Ma \equiv L_u / \delta_T^0$ )、カルロビッツ数 ( $Ka \equiv \kappa / (S_u^0 / \delta_T^0)$ )、 $\delta_T^0$  は火炎厚さである。マークシュタイン数は火炎伸張に対する層流火炎の応答特性を示し、乱流火炎のモデリングで重要なパラメータである。球状火炎の場合、火炎伸張は  $\kappa = 2/r \times dr/dt$  であり、またその時の層流燃焼速度も密度変化を考慮して  $S_u = \rho_b / \rho_u \times dr/dt$  により算出できることから図2より  $\kappa$  と  $S_u$  の関係が得られる。図3に得られた結果の一例を示す。本研究では図のように両者の関係が線形関係を示したことから式 (1) を適用して線形補外することにより  $S_u^0$  を、また、直線の傾きにより  $L_u$  を算出した。図4に線形補外により得られた  $S_u^0$  (記号◎) をPREMIXによる計算結果及びDalyらの実験結果と共に示す。(ここで  $S_L$  (記号○) はガス圧力から算出した層流燃焼速度。詳細は発表文献参照) 図から、Dalyらの結果とはよく一致するが、計算結果は希薄側で若干低くなるのが分かる。このことからCurranらの反応機構には改善の余地があると考えられる。なお、Dalyらは感度解析によって methyl radical と formyl radical に関連した反応の反応定数を少し変化させることで、計算値が実験値に近づくことを示

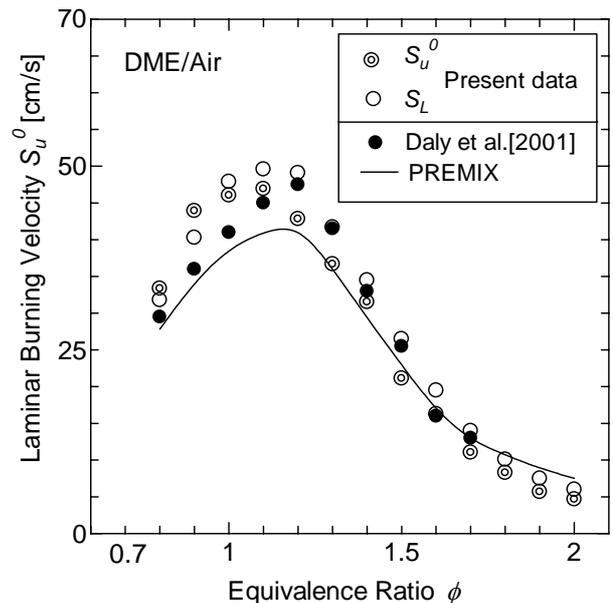


Fig.4 Variations of  $S_u^0$  with  $\phi$

している。

#### 4. 今後の課題と発展

本研究では定容燃焼器と対向流バーナーの2種類の燃焼器を用いて DME の燃焼特性及び火炎構造の把握を目的としている。その結果、定容燃焼器を用いた実験により大気圧下での燃焼特性が定量的に整理できた。また、実験結果を基に現在 DME 火炎の反応機構として一般的に使用されている Curran の反応機構の改良を提案した。現在、貴財団の援助にて製作中の対向流バーナーを用いて自己着火・消炎条件の特定および詳細な火炎構造を調べている。以上のことから本研究は計画当初の目的を達成しつつある。今後の課題は高圧下での燃焼特性の解明である。エンジン内の燃焼は高圧であるが、実験的困難さから燃焼特性に関する研究は大気圧下で行われるものがほとんどである。近年、Bradley らは[Combust. Flame, 2002]、火炎不安定化などの高圧下特有の現象を実験的に見いだしたが、現象の複雑さ故、そのメカニズムは明らかになっていない。高圧下での燃焼は実用上の重要性と研究データの少なさから国際燃焼シンポジウムにおいても注目される研究テーマと

なっている。本研究は定容燃焼器と対向流バーナーを高圧燃焼実験が可能な装置に改造し、高圧下における DME の燃焼特性及び火炎構造の把握を目的とする。

#### 5. 発表論文リスト

1. K.Tanoue, F.Shimada, Study of Burning Velocities of Dimethyl Ether-Air Flames, Proceedings of the International Symposium COMODIA 2004, 2004
2. K.Tanoue, F.Shimada, Studies of Combustion Properties of Dimethyl Ether flames, Review of Automotive Engineering, Vol.26, No.2, 2005 (印刷中)
3. 田上公俊、嶋田不美生、廣田浩之、河野圭太、ジメチルエーテル火炎の燃焼特性に関する研究,自動車技術会論文集, Vol.36, No.2, (pp.7-12), 2005.
4. 田上公俊、嶋田不美生、廣田浩之、河野圭太、ジメチルエーテル火炎の燃焼特性に関する研究,自動車技術会春季大会講演論文集, Paper20045041, 2004