ジメチルエーテル拡散火炎の消炎特性に関する研究*
(第1報, 消炎特性に及ぼす平衡温度及び火炎構造の影響)田上 公俊^{*1}, 森 秀芳^{*2}
田尻 隆之^{*3}, 嶋田 不美生^{*4}Study of Extinction Properties in Dimethyl Ether Diffusion Flames
(1st Report, Effects of Equilibrium Flame Temperature and
Flame Structure on Extinction Properties)Kimitoshi TANOUE^{*5}, Shuho MORI,
Takayuki TAJIRI and Fumio SHIMADA^{*5} Department of Mechanical Engineering, Oita University,
700 Dannoharu, Oita-shi, Oita, 870-1192 Japan

Recently many issues related to automotive engineering, such as the environment and energy problems have gained attention. These social-related issues are giving impetus to the adoption of urgent measures such as alternative fuels and new combustion techniques for the internal combustion engines. In this context, dimethyl ether is thought to be a potential alternative to diesel fuel, as it has lower overall pollutant emissions and better economy. On the other hand, oxygen-enriched combustion has been gaining acceptance as an environmental friendly combustion, because this can reduce soot and NO_x emission. The purposes of this paper are to examine the extinction properties of DME flames and the feasibility concerning the application of oxygen-enriched combustion to DME flames using a counterflow burner. Firstly, the strain rate at extinction is measured for dimethyl ether and propane flames as a function of equilibrium flame temperature under the same flame structure. Secondly, the strain rate at extinction is also measured under the condition that the flame structures are changed, but the equilibrium flame temperatures are not varied. In addition, numerical calculations are also performed using detailed chemical-kinetic mechanism to obtain value for extinction and compared with measurements.

Key Words: Diffusion Combustion, Extinction, Flame, Flammability Limit, DME

1. 結 論

現在の内燃機関の燃焼技術には, 社会的背景として省エネルギー化を目的とした熱効率の向上と, 二酸化炭素 CO₂ の温室効果ガスや窒素酸化物 NO_x などの環境汚染物質排出量の低減が求められている⁽¹⁾。また, 内燃機関の燃料には, エネルギー資源枯渇問題と排気ガスのクリーン化の観点からさまざまな代替燃料が検討されている。とりわけ, ジメチルエーテル⁽²⁾ (以下, DME と記す) は, 最も低分子のエーテルであり, 毒性もメタノールに比べてかなり低く, 低排出ガス性と良好な経済性から軽油代替燃料として近年注目されて

いる⁽³⁾⁽⁴⁾。DME の主な利点は, セタン価が 55 から 60 であり, 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。また, 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であり, 同時に排気ガス再循環 (EGR) による燃焼温度制御により NO_x の削減も期待できる。

一般にディーゼルエンジン内の燃焼は, 拡散燃焼が支配的なため, 軽油代替燃料を実機に適用する場合, その拡散燃焼特性を把握する必要がある。中でも消炎特性は, 燃料の高温酸化反応を体現した現象であるため, 反応機構・燃焼モデルの構築および検証のための重要な基礎データとなる⁽⁶⁾。さらに出力, 燃費, 排気ガス特性などのエンジン特性に大きな影響を及ぼすことから, エンジン性能向上のためには消炎特性の把握および耐消炎特性の高い燃焼手法の開発が求められる。

* 原稿受付 2008 年 4 月 4 日。

^{*1} 正員, 大分大学工学部 (〒870-1192 大分市旦野原 700)。^{*2} 正員, 大分大学大学院環境工学専攻。^{*3} 学生員, 大分大学大学院機械・エネルギーシステム工学専攻。^{*4} 大分大学工学部。

E-mail: tanoue@cc.oita-u.ac.jp

層流拡散火炎は、拡散燃焼場での流れの特性時間 τ_f と化学反応の特性時間 τ_c の比で示されるダムケラー数 $Da (= \tau_f/\tau_c)$ が大きい場合、反応物は完全に消費される。しかしながら、気流(火炎伸張率)が増すと、流れの特性時間が短くなり、ダムケラー数は減少する。ダムケラー数が減少すると、反応物は完全に消費されないため、火炎温度は低下する。さらにダムケラー数が減少し、ある臨界ダムケラー数 Da_q に達すれば、不完全反応によりついには消炎に至る⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この場合、 Da_q は火炎の耐消炎特性の程度を代表する値と考えることができる。

消炎は、上述のような化学反応と気流(火炎伸張率)の相対的關係だけではなく、ルイス数⁽⁷⁾で代表される分子レベルの熱・物質拡散が大きな影響を及ぼす複雑な現象であるため、これまで基礎研究には、実験が比較的容易で、明確な定量化が可能な対向流拡散火炎が広く用いられてきた⁽⁸⁾。

対向流拡散火炎の消炎に関する研究は、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 と C_3H_8 に関する Humer ら⁽⁹⁾の研究、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 と C_3H_8 に関する Chen ら⁽¹⁰⁾の研究、および CH_4 - O_2 - N_2 に関する Du ら⁽¹¹⁾の研究、 CH_4 に関する石塚ら⁽¹²⁾や C_3H_8 に関する Puri ら⁽¹³⁾の研究など、これまで多くの研究がなされているが、DME 拡散火炎の消炎特性に関する研究は見受けられない。

以上の背景から本研究は、対向流バーナによる実験と詳細な化学反応を考慮した数値計算により、DME 拡散火炎の基礎的な消炎特性を解明するとともに、高い耐消炎特性を有する新燃焼法を検討する。本論文ではまず、DME の消炎特性に及ぼす平衡温度および火炎構造の影響を詳細に調べる。ここでは C_3H_8 の実験結果と比較して DME の消炎特性を明らかにする。また、高効率・環境低負荷な新燃焼法の一つとして提案されている酸素富加燃焼⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を DME に適用することを想定し、この場合に形成される火炎の火炎構造が DME の消炎特性に及ぼす影響を調べ、その燃焼機構を詳細に調べる。

2. 実験装置および方法

2.1 対向流バーナ実験装置および実験方法 図1に本研究で用いる対向流バーナの概略図を示す。対向流バーナは過去の研究⁽⁹⁾⁽¹⁶⁾と同じであり、図1に示すように上下2本のダクトから構成されており、ダクト1からは燃料と窒素 N_2 を、ダクト2からは酸素と窒素 N_2 を噴出する。周囲空気の影響を阻止するために、各ダクトを囲んで窒素 N_2 のカーテン流が燃料流および酸化剤流と平行に流れる。実験での燃料、酸化剤およ

Fig. 1 Schematic Illustration of the Counterflow Configuration

び窒素 N_2 の流量は、コンピュータ制御のマスフローコントローラ (Advanced Energy FC-780) で制御する。マスフローコントローラの測定精度は $\pm 1\%$ 以下である。また、本研究の場合、ダクト間の距離 L は 8 mm とした。図1において Y_F 、 Y_{O_2} はそれぞれ燃料と酸素の質量分率、 V は流速、 T は温度、 ρ は密度であり、添字 1, 2 はそれぞれダクト 1, ダクト 2 の物理量に対応する。本研究ではダクト出口での接線方向流れはないもの (Plug-flow boundary condition) と仮定し、両ダクト出口流速 V は体積流量とダクト出口面積の比から算出した。

実験は大気圧下で行い、両ダクト間の中央部付近でよどみ面を形成させ、この近傍に伸張のある火炎が形成される。このとき、火炎伸張率 a_2 は次式から求める⁽¹⁷⁾。

$$a_2 = \frac{2|V_2|}{L} \left(1 + \frac{|V_1|\sqrt{\rho_1}}{|V_2|\sqrt{\rho_2}} \right) \quad (s^{-1}) \quad (1)$$

この際、よどみ平面が両ダクト間の中央付近に形成されるように、両ダクト出口での流体の運動量を以下のように等しくした。

$$\rho_1 V_1^2 = \rho_2 V_2^2 \quad (2)$$

実験は、上下のダクトから酸化剤、燃料を噴出し点火させ、火炎を形成後、火炎伸張率 a_2 を変化させながら、火炎を観察し、消炎する条件を特定した。

2.2 火炎パラメータ 拡散燃焼場では、火炎構造の指標になる混合層 (mixing layer) 内の相対的な位置は、以下の mixture fraction, Z により表すことができる⁽⁶⁾。

$$Z = \frac{Y_F/W_F \nu_F + (Y_{O_2,2} - Y_O)/W_O \nu_O}{Y_{F,1}/W_F \nu_F + Y_{O_2,2}/W_O \nu_O} \quad (3)$$

ここで、 Y は質量分率、 W は分子量、 ν は化学量論時のモル数である。添字 O, F は、酸化剤と燃料それぞれを示す。 Z は混合層の酸化剤側が 0, 燃料側が 1 になる。酸化剤ダクト出口での質量分率を $Y_{O_2,2}$, 燃料ダクト出口での質量分率 $Y_{F,1}$ とする。このとき、火炎構造を特徴付ける火炎位置は、以下の stoichiometric mixture fraction, Z_{st} で表される⁽⁶⁾。

$$Z_{st} = \left(1 + \frac{Y_{F,1} W_O \nu_O}{Y_{O_2,2} W_F \nu_F} \right)^{-1} \quad (4)$$

2.3 数値計算手法 本研究では、数値計算手法として、西岡らが開発した 1 次元対向流火炎の計算コード CFF⁽¹⁸⁾ を用いた。本計算コードは Sandia National Laboratories で開発された CHEMKIN⁽¹⁹⁾ のサブルーチンを用い詳細な化学反応機構を用いた解析を行うことができる。本研究では、本コードを用いて、Flame-controlling continuation method から消炎条件を特定した。支配方程式、解法などの詳細は文献(18)を参照。支配方程式中の DME の反応機構は 351 種類の素反応と 80 種類の化学種を含んだ Curran らの詳細反応機構⁽²⁰⁾を用いた。また、火炎温度の算出のための平衡計算には Reynolds などによって開発された STANJAN に基づく EQUIL⁽¹⁹⁾を用いて計算した。さらに、本研究で用いた各熱物性値および輸送係数は CHEMKIN から算出した。

2.4 混合気の設定 本研究では燃料に DME と C_3H_8 を用いて、2 種類の実験により消炎に及ぼす平衡温度、火炎構造の影響を調べた。希釈剤として窒素 N_2 を用い、消炎実験は以下の手順で行った。すなわち、実験 I は消炎に及ぼす平衡温度の影響を調べるために、火炎構造を一定にし、平衡温度を変化させて消炎条件を特定した。実験 II は消炎に及ぼす火炎構造の影響を調べるために、平衡温度を一定にし、火炎構造を変化させて消炎条件を特定した。

3. 結果及び考察

3.1 消炎に及ぼす平衡温度の影響 (実験 I)

まず、本研究では DME と C_3H_8 を用いて火炎構造を一定(Z_{st} を一定)にし、平衡温度を変化させた場合の消炎特性を調べた。 Z_{st} を一定にするため、図 1 に示す酸化剤側および燃料側に、それぞれの窒素量 N_2 を $Y_{F,1}/Y_{O_2,2}$ = 一定になるように調節して、 Z_{st} が 0.1 になるように組成を特定した。

図 2(a)に、 $Z_{st}=0.1$ の場合の酸化剤側の酸素の質量分

(a) Oxygen Mass Fraction, as a function of the Strain Rate at Extinction

(b) Equilibrium Flame Temperature, as a function of the Strain Rate at Extinction

Fig. 2 Oxygen Mass Fraction and Equilibrium Flame Temperature, in the oxidizer stream, as a function of the Strain Rate at Extinction

率 $Y_{O_2,2}$ と、消炎時の火炎伸張率 $a_{2,E}$ の関係を、 C_3H_8 に関する Humer らの実験結果⁽⁹⁾および計算結果とともに示す。また、図 2(b)には、組成を基に平衡計算から求めた平衡温度 T_{eq} と、図 2(a)の実験結果に対応した消炎時の火炎伸張率 $a_{2,E}$ の関係を示す。図 2(a)から、 C_3H_8 の本実験結果を Humer らの実験結果と比較すると、両者の実験結果はよく一致することから、本実験の結果は再現性を有し一般性があると考えられる。DME の実験結果と計算結果を比較するとよく一致することが分かる。このことから $Z_{st}=0.1$ の場合、Curran らの反応機構は DME の消炎をよく再現していることが分かる。また、図 2(a)から、酸素濃度の低下にとも

ない、DME、 C_3H_8 ともにより低い伸張率で消炎に至ることが分かる。これは図 2(b)から分かるように、 $Y_{O_{22}}$ の減少に伴い平衡温度が下がることで、化学反応の特性時間 τ_c が長くなり、ダムケラー数 Da は相対的に小さくなる。これにより消炎しやすくなったものと推察される。このことから、火炎構造が一定の場合、平衡温度は消炎特性に影響を及ぼすと言える。さらに、DME と C_3H_8 の消炎条件を比較すると、酸素の質量分率が等しい場合、または同一平衡温度の場合、DME より C_3H_8 の方がより低い伸張率で消炎に至る。これにより、DME は C_3H_8 よりも消炎しにくいことが分かる。

3・2 消炎に及ぼす火炎構造の影響 (実験Ⅱ) 次に、本研究では、DME と C_3H_8 を用いて平衡温度を一定にし、 Z_{st} を変化させた場合の消炎特性を調べた。本研究ではまず、燃料側に窒素 N_2 を添加して平衡温度 T_{eq} を変化させた 5 種類の基準混合気を作成した。表 1 に基準混合気の組成と平衡温度を示す。

基準混合気に対して平衡温度を一定にして Z_{st} を変化させるため、酸化剤側の窒素を取り除き (酸素富加な状態)、燃料側に酸化剤側からの窒素を添加することで、火炎位置において、表 1 の各混合気の組成が保持される。この場合、各成分の流量はそれぞれ以下の式で表される。

$$\frac{Q_{N_2,O}}{Q_O} + \frac{Q_{N_2,F}}{3Q_F} = \text{constant} \quad \text{for DME} \quad (5)$$

$$\frac{Q_{N_2,O}}{Q_O} + \frac{Q_{N_2,F}}{5Q_F} = \text{constant} \quad \text{for } C_3H_8 \quad (6)$$

ここで、 Q_F 、 Q_O はそれぞれ燃料と酸化剤の体積流量であり、 $Q_{N_2,F}$ 、 $Q_{N_2,O}$ はそれぞれ燃料または酸化剤側の窒素流量である。ここで、酸素濃度が空気より多い酸化剤を用いた燃焼は「酸素富加燃焼」と定義される。同一組成の場合、酸化剤側の酸素濃度 (酸素富加な状態) が増加すると、より Z_{st} が増加することから、同一組成の火炎に対して Z_{st} は酸素富加燃焼の程度を表す指標となる。

図 3 に火炎温度を一定のまま Z_{st} を変化させた場合の消炎時の火炎伸張率 a_{2E} の関係を、DME の実験結果

(a) DME

(b) C_3H_8

Fig. 3 Strain Rates at Extinction as a function of Stoichiometric Mixture Fraction, all with the same Equilibrium Flame Temperature

(図 3(a)) と C_3H_8 の実験結果 (図 3(b)) および基準混合気 DN2 の計算結果とともに示す。図 3(a) から、DN2 火炎の実験結果と計算結果を比較すると、両者は一致していることが分かる。このことから、Curran らの反応機構は DME の消炎をよく再現していることが分かる。また図 3(a)(b) から、 C_3H_8 では Z_{st} の増加にともない a_{2E} はほぼ単調に増加するが、DME では a_{2E} は $Z_{st}=0.5$ 付近まで若干減少し、その後、大きく増加している。このことから、両燃料とも酸素富加燃焼により、耐消炎特性は向上するが、この傾向は C_3H_8 より顕著になることが分かる。

図 4 に DN2 火炎のときの $Z_{st}=0.277, 0.561, 0.832$ の消炎直前の火炎温度と主な化学種のモル分率分布を示す。図 4 から Z_{st} が増加するにつれて、火炎はよどみ面に向かって移動し、さらには酸化剤側から燃料側に移動することが分かる。また、図 4 から、 Z_{st} が増加するにつれて (酸素富加燃焼)、高温帯内の酸素の相対

Table 1 Flame considered for Experiment II

Name	Compositions	T_{eq} [K]
DN 1	DME + $3N_2 + 3(O_2 + 3.76N_2)$	2109
DN 2	DME + $4N_2 + 3(O_2 + 3.76N_2)$	2050
DN 3	DME + $5N_2 + 3(O_2 + 3.76N_2)$	1992
PN 1	$C_3H_8 + 2N_2 + 5(O_2 + 3.76N_2)$	2193
PN 2	$C_3H_8 + 3N_2 + 5(O_2 + 3.76N_2)$	2152

Fig. 4 Major Species Profiles and Temperature near Extinction for DME flames (DN2 flame)

量は増加し、逆に DME の量は減少することが分かる。以上のことから酸化剤側の酸素濃度を増やす（酸素富

Fig. 5 Lewis Number and Effective Lewis Number, as a Function of Stoichiometric Mixture Fraction, All with Same Equilibrium Flame Temperature for DME (DN2 Flame)

加) ことで Z_{st} は増加 (火炎が燃料側に移動) し、火炎構造は変化する。このように Z_{st} を増加させる (火炎を燃料側に移動させる) ことで、図 3 に示すように耐消炎特性の高い火炎が形成できることが分かる。すなわち火炎組成が一定の場合でも酸素富加燃焼により耐消炎特性を向上させることができる。

以下では、図 3 に見られるような Z_{st} の変化による消炎特性の変化 (a_{2E} の変化) に関してダムケラー数、ルイス数及び、詳細な火炎反応の観点から段階的に消炎機構を検討した。

表 1 に示す各基準混合気では、火炎位置での組成が一定となることから、化学反応の特性時間 τ_c 及び臨界ダムケラー数 Da_q (火炎の耐消炎特性値) は一定であると仮定すると、 Z_{st} の変化による a_{2E} の変化は説明できない。この場合、何らかの付加的な効果により、 τ_c 及び (又は) Da_q が変化したものと推察される。この要因として本研究ではまず、分子レベルの熱・物質拡散の不均衡 (Preferential diffusion) に起因するルイス数効果⁽⁶⁾⁽⁷⁾を考える。

図 5 に DN2 火炎 ($T_{eq}=2050[K]$) に対して、 Z_{st} を変化させたときの燃料側のルイス数 Le_F 、酸化剤側のルイス数 Le_O 変化をそれぞれ示す。図 5 から、ルイス数 Le_F 、 Le_O は、 Z_{st} の増加により変化しないことから燃料側、酸化剤側の単独のルイス数効果では現象を説明できない。図 4 から分かるように、消炎近傍では、燃料、酸化剤は完全には消費されず、反応帯を通過し、拡散火炎内に「予混合燃焼領域」⁽⁹⁾ が形成される。この領域での現象は、燃料側、酸化剤側それぞれ単独のルイス数では説明できず、「予混合燃焼領域」における不足成分を考慮した重み付き有効ルイス数を考慮する必要があることが指摘されている⁽²¹⁾⁽²²⁾。本研究では以下

で有効レイス数効果により検討する。Kim と Lee の理論的研究⁽²³⁾から、消炎近傍の予混合燃焼領域に適用できる有効レイス数 Le_e は、以下の式で示される。

$$Le_e = \frac{Le_F + A_F Le_O}{1 + A_F} \quad (7)$$

式中のパラメータ A_F は、次式で定義される。

$$A_F = \nu' \frac{Y_F}{Y_O} \quad (8)$$

ここで、 ν' は化学量論での酸化剤と燃料の質量比 (DME の場合は、96/46=2.087)、 Y_F 、 Y_O はそれぞれ燃料の質量分率、酸化剤の質量分率である。

図 5 に DN2 火炎 ($T_{eq}=2050[K]$) に対して、 Z_{st} を変化させたときの有効レイス数 Le_e の変化を示す。図 5 から、有効レイス数 Le_e は、 Z_{st} の増加とともに増加する。これは Z_{st} が増加すると燃料側の燃料濃度が低下するため、 Le_e の算出において、燃料側のレイス数 Le_F の重みが増加するためである。 Z_{st} の増加による有効レイス数 Le_e の増加は相対的に物質拡散より熱拡散の方が大きくなり消炎しやすくなることを意味する。これは、図 3 の実験結果と矛盾するため、本実験結果を式(7)で定義される有効レイス数では説明できないことが分かる。これは式(7)の導出において、火炎位置の変化が考慮されていないためと考えられる。すなわち、同一組成の火炎で Z_{st} が変化する場合には、「予混合燃焼領域」を考慮したレイス数効果の議論は適用できないと言える。このことから、 Z_{st} が変化する場合には、詳細な素反応に基づいて議論する必要がある。そこで以下では、詳細化学反応を考慮した計算結果から消炎特性を検討する。

3.3 消炎に及ぼす活性化学種の影響 上述のように平衡温度が一定の場合でも Z_{st} すなわち、火炎構造の変化が消炎特性に影響を及ぼすことが分かる。以下ではこのメカニズムについて活性化学種 OH 基生成の観点から考察する。

図 6 に DN2 火炎のときの $Z_{st}=0.277$, 0.561, 0.832 の場合、消炎直前の OH 基の反応速度と火炎温度の変化を示す。図 6 から、 Z_{st} の増加とともに、OH 基の生成場所が酸化剤側から燃料側に移動していることが分かる。ここで特に消炎特性に影響を及ぼす以下の反応に着目する。

反応 R1 は活性化エネルギーが大きいことから、

(1) 高い温度と (2) 高い酸素濃度を必要とする。

図 6(a) から $Z_{st}=0.277$ の場合、反応 R1 の最大値の場所 (以下では radical pool) は最高温度点より酸化剤側に位置している。これは図 4(a) から分かるように最高温

(a) diluted DME/air ($Z_{st}=0.277$)
 $a_2=344[1/s]$

(b) diluted DME/oxygen-enriched air ($Z_{st}=0.561$)
 $a_2=308[1/s]$

(c) diluted DME/oxygen ($Z_{st}=0.832$)
 $a_2=408[1/s]$

Fig. 6 Reaction Rate Profiles for the Primary Radical Production reactions and Temperature for DME Flames (DN2 flame)

度点の酸素濃度が少ないためである。一方、 Z_{st} を増加させると図 4(b) から分かるように最高温度の場所での

Fig. 7 Temperature at the Radical Production Zone for Flames near Extinction

酸素濃度が増加するため、radical pool が最高温度の場所に近づく (図 6(b), $Z_{st}=0.561$)。しかしながら OH 基の生成速度は減少し、図 3(a)のように火炎は若干消炎しやすくなっている。図 3(b)から C_3H_8 ではこのような傾向が少なくことから、これは含酸素燃料特有の現象と考えられる。すなわち、DME は燃料中に酸素を有するため、図 4(b)から分かるように、高温領域での燃料濃度が相対的に低下することで、反応 R1 も減少したものと考えられる。

さらに Z_{st} を増加させると高温領域は広くなり、radical pool は燃料側に移動するが、最高温度の場所とは一致している (図 6(c), $Z_{st}=0.832$)。OH 基の生成速度は大きく増加し、図 3(a)から分かるように火炎は消炎しにくくなっている。これは、図 4(c)から燃料中の酸素濃度低下を上回る酸素濃度が高温領域に存在するためと考えられる。

本研究ではこのような活性化学種の生成場所 (radical pool) と火炎位置 (最高温度点) の相関が消炎特性に影響を及ぼしていると考え、消炎時における反応 R1 の温度特性を調べた。図 7 に消炎近傍での radical pool における火炎温度を示す。図 7 から、 Z_{st} に関係なくほぼ 1550 K の一定値を示すことが分かる。すなわち、DME 火炎では radical pool での火炎温度が 1550 K 以下になった場合、消炎に至ることが分かる。 Z_{st} が小さい場合、図 6 に見られるように radical pool と火炎位置 (最高温度点) に差異があるため radical pool での火炎温度が 1550 K 付近で消炎を迎える場合、消炎時の最高温度はこれより高い温度で消炎に至る。より高い火炎温度で消炎を迎えることから、相対的に消炎しやすい火炎になっている。一方、 Z_{st} が増加し、0.8 近傍では、radical pool での火炎温度と最高温度が一致するため、より低い温度まで消炎しないことから、相対的に消炎しにくい火炎になったものと推察される。

4. 結 論

本研究では、火炎構造を一定にして平衡温度を変化させた場合と、平衡温度を一定にして火炎構造を変化させた場合の 2 種類の実験を行い、DME 拡散火炎および C_3H_8 拡散火炎の消炎特性を調べ、以下の結果を得た。

火炎構造を一定にし、平衡温度を変化させて消炎特性を調べた実験において、

- (1) DME の実験結果と計算結果を比較すると、 $Z_{st}=0.1$ の場合、Curran らの反応機構は、DME の消炎をよく再現していることが分かった。
- (2) 酸素濃度の低下にともない、DME、 C_3H_8 ともに低い伸張率で消炎した。すなわち、酸素濃度の低下によって平衡温度が下がり、消炎しやすくなったものと推察される。このことから、火炎構造が一定の場合、平衡温度は消炎特性に影響を及ぼすことが分かった。
- (3) DME と C_3H_8 の消炎条件を比較すると、酸素の質量分率が等しい場合、または同一平衡温度の場合、DME より C_3H_8 の方がより低い伸張率で消炎に至る。これにより、DME は C_3H_8 よりも消炎しにくいことが分かった。

平衡温度を一定 (組成を一定) にし、火炎構造を変化させて消炎特性を調べた実験において、

- (4) C_3H_8 では Z_{st} の増加にともない a_{2E} はほぼ単調に増加するが、DME では a_{2E} は $Z_{st}=0.5$ 付近まで若干減少し、その後、大きく増加した。このことから、両燃料とも酸素富加燃焼により、耐消炎特性は向上するが、この傾向は C_3H_8 でより顕著になることが分かった。すなわち火炎組成が一定の場合でも酸素富加燃焼により耐消炎特性を向上させることができる。
- (5) 詳細化学反応を考慮した数値解析により、消炎特性に及ぼす活性化学種の影響を調べた。その結果、活性化学種の生成場所 (radical pool) と火炎位置 (最高温度点) の相関が消炎特性に影響を及ぼしていることが分かった。

本研究の一部は平成 18 年度科学研究費補助金若手研究(B)(No.16760159)、造船学術研究推進機構の助成により行われた。本研究の遂行にあたり、UCSD の Seshadri 教授、Seiser 博士には実験全般をアドバイスいただき、筑波大学の西岡先生には数値解析コードを

ご提供いただきました。また、千葉大学の森吉先生、茨木大学の金野先生、陳先生には DME に関する貴重なアドバイスをいただきました。付記して感謝いたします。

文 献

- (1) Heywood, J.B. "Internal Combustion Engine Fundamentals". McGraw-Hill Science Engineering, (1988), 930p.
- (2) Troy, A.S., Rondney, L.B. and Howard, L.G. "Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel". *Journal of Power Sources*. vol.156, (2006), p.497-511.
- (3) Fleisch, T.H. and Meuer, P.C. "DME : The Diesel Fuel for the 21th Century ?". *Proc. Conf. Program Int. Congress Engine and the Environment*. Graz, Austria, (1995), p.24-25.
- (4) Chen, Z., Konno, M. and Kajitani, S. "Performance and Emissions of DI Compression Ignition Engines Fueled with Dimethyl Ether (Performance and Emissions in Retrofitted Engines)". *JSME Internal Journal Series B*. vol.43, no.1, (2000), p.82-88.
- (5) Kajitani, S. "A Study of Low Compression Ratio Diesel Engines Operated with Neat Dimethyl Ether (DME)". *JSME TED Newsletter*. no.42, (2004), 12p.
- (6) F.A., Williams. "Progress in knowledge of flamelet structure and extinction". *Progress in Energy and Combustion Science*. vol.26, (2000), p.657-682.
- (7) Liñán, A. "The asymptotic structure of counterflow diffusion flames for large activation energies". *Acta Astronaut.* 1, (1974), p.1007-1039.
- (8) Tsuji, H. "Counterflow Diffusion Flames". *Progress in Energy and Combustion Science*. vol.8, (1982), p.93-119.
- (9) Humer, S., Seiser, R. and Seshadri, K. "Non-premixed and Premixed Extinction and Autoignition of C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 and C_3H_8 ". *Twenty-Ninth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute. (2002), p.1597-1604.
- (10) Chen, R. and Axelbaum, R.L. "Scalar dissipation rate at extinction and the effects of oxygen-enriched combustion". *Combustion and Flame*. vol.142, (2005), p.62-71.
- (11) Du, J. and Axelbaum, R.L. "The effects of flames structure on extinction of CH_4 - O_2 - N_2 diffusion flames". *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, (1996), p.1137-1142.
- (12) Isizuka, S. and Tsuji, H. "An Experimental Study of Effect of inert Gases on Extinction of Laminar Diffusion Flames". *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, (1981), p.695-703.
- (13) Puri, I.K. and Seshadri, K. "Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air". *Combustion and Flame*. vol.65, (1986), p.137-150.
- (14) Poola, R.B., Ng, H.K., Sekar, R.R., Baudino, J.H. and Colucci, C.P. "Utilizing Intake-Air Oxygen-Enrichment Technology to Reduce Cold-Phase Emissions". *SAE Technical Paper* 952420, Warrendale, PA, (1995).
- (15) C.E., Baukal, Jr., "Oxygen-Enhanced Combustion". CRS Press, 1998, 369p.
- (16) Seiser, R. "Ignition and Extinction of Nonpremixed Flames". Technical University of Graz, (2000), Ph.D Thesis.
- (17) Seshadri, K. and Williams, F.A. "Laminar Flow between Parallel Plates with Injection of a Reactant at High Reynolds Number". *International Journal of Heat Mass Transfer*. vol.21, (1978), p.251-253.
- (18) Nishioka, M., Law, C.K. and Takeno, T. "A Flame-Controlling Continuation Method for Generating S-Curve Responses with Detailed Chemistry". *Combustion and Flame*. vol.104, (1996), p.328-342.
- (19) Kee, R.J., Rupley, F.M. and Miller, J.A., et al. CHEMKIN Collection, Release 3.7, Reaction Design, Inc., San Diego, CA, (2003).
- (20) Curran, H.J., Fischer, S.L. and Dryer, F.L. "The Reaction Kinetics of Dimethyl Ether : Low-Temperature Pyrolysis and Oxidation in Flow Reactions". *International Journal of Chemical Kinetics*. vol.32, (2000), p.741-759.
- (21) Chen, R.-H., Mitchell, G.B. and Rooney, P.D. "Diffusive-Thermal Instability and Flame Extinction in Nonpremixed Combustion". *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute. (1992), p.213-221.
- (22) Chaos, M. and Chen, R.-H. "An Experimental Study of Pulsating Instability in near-limit Laminar Nonpremixed flames". *Combustion Science and Technology*. vol.176, (2004), p.1191-1215.
- (23) Kim, J.S. and Lee, S.R. "Diffusional-thermal instability in strained diffusion flames with unequal Lewis numbers". *Combust. Theory Modelling*. vol.3, (1999), p.123-146.