噴霧火炎の火炎片特性*

(第2報, 噴霧粒径, 当量比および燃料種の影響)

渡邊 裕章^{*1,*2}, 黒瀬 良一^{*2}, 黄 承 敏^{*1}中村 摩理子^{*3}, 赤松 史光^{*4}

Characteristics of Flamelet in Spray Flames

(2nd Report, Effects of Spray Droplet Size, Equivalence Ratio and Fuel)

Hiroaki WATANABE^{*5}, Ryoichi KUROSE, Seung-Min HWANG,
Mariko NAKAMURA and Fumiteru AKAMATSU^{*5} Energy Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry,
2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 240-0196 Japan

Characteristics of flamelet in spray flames in a laminar counterflow are investigated by a two-dimensional DNS in terms of mixture fraction and scalar dissipation rate. The motion of spray droplets is calculated by the Lagrangian method without parcel model. Decane and heptane are targeted as a fuel. The results show that for both fuels, temperature and mass fractions of chemical species cannot be clearly identified by mixture fraction and scalar dissipation rate by themselves. This behavior is caused by the fuels' evaporation in the spray flame, and becomes marked in the smaller droplet size condition due to its higher evaporation rate and in the higher equivalence ratio condition due to its larger evaporation amount.

Key Words: Combustion, Multi-phase Flow, Spray Flame, Numerical Analysis, Flamelet

1. 結 言

噴霧火炎中では, 液体燃料の微粒化, 油滴の気相への分散, 蒸発, 燃料蒸気の空気との混合といった多くの過程が同時に進行しながら燃焼反応が起こるため, その火炎構造は極めて複雑であり, 依然不明な点が多い。これまで著者らは, 実験と数値解析により, 噴霧火炎は噴霧の不均一性により形成される油滴群の時間的, 空間的变化に強く影響を受けること, またその火炎構造が油滴量や噴霧特性に強く依存することを明らかにしてきた⁽¹⁻⁶⁾。

計算機性能の飛躍的な進歩にともない, 最近では特に燃焼場の Large eddy simulation (LES) が注目を集めている。ガス燃焼の LES では, 燃焼モデルとして, 比較的負荷の低い火炎片 (flamelet) モデル^(7,8)を用いる手法が主流になりつつある^(9,12)。これは, 物理空間で連続の式, 運動量保存式, および混合分率 (Z) の保存式のみを解き, 各位置における化学種濃度やエンタルピの値は chemtable と呼ばれるデータベースから Z とスカラー消散率 (χ) をパラメータとして抽出する方法である⁽¹³⁾。

しかし, 液体燃料や固体燃料からなる混相燃焼を対象とした LES はこれまでほとんど行われていない^(3,14,15)。

この理由の1つとして, 混相燃焼場における Z と χ の挙動が解明されていないことが挙げられる⁽³⁾。

著者らは前報⁽⁶⁾において, 層流対向流場に形成される噴霧火炎を対象に2次元直接数値計算 (Direct numerical simulation, DNS) を試み, 噴霧火炎では, ガス拡散火炎とは大きく異なり, Z と χ によって火炎温度や化学種の質量分率などの物理量を一意に整理し得ないことを示した。また, こうした特性への伸張率の影響についても明らかにした。本報では, 噴霧粒径, 当量比および燃料種をパラメータとした2次元 DNS を行い, これらが噴霧火炎の火炎片挙動に及ぼす影響を明らかにする。

おもな記号

D_z	: 混合分率の拡散係数
m_i	: 油滴質量
S_z	: 混合分率の生成項
T	: 気相温度
u	: 気相速度ベクトル
Y_k	: k 成分化学種の質量分率
Z	: 混合分率
ギリシャ文字	
χ	: スカラー消散率
ρ	: 混合気の密度
ϕ	: 燃料の酸化剤に対する量論比
ϕ_l	: 油滴の供給当量比

2. 計算方法

図1に本報で対象とした流れ場の概略を示す。流れ場を平面2次元とし, x - y 座標の原点を上側ポート出口

* 原稿受付 2005年12月28日。

^{*1} 正員, (財)電力中央研究所エネルギー技術研究所(〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1)。^{*2} 正員, 京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。^{*3} 正員, (株)神鋼環境ソリューション技術研究所(〒651-2241 神戸市西区室谷1-1-4)。^{*4} 正員, 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。

E-mail: whiroaki@criepi.denken.or.jp

中心に置く。x 座標は上側ポートから鉛直下向きにとり、y 座標は x 軸に直交する方向にとる。

燃料は n-デカン ($C_{10}H_{22}$) をベースとし、燃料種の影響を検討する際には n-ヘプタン (C_7H_{16}) の計算を行う。考慮した化学種は、 O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , $C_{10}H_{22}$ (n-ヘプタンの場合は、 C_7H_{16}) の 5 つであり、気相化学種の熱力学データと輸送係数は CHEMKIN^(17,18) により求める。液相 n-デカンおよび n-ヘプタンの物性値は、温度依存性を考慮して、密度は Gunn-Yamada 式、熱伝導率は Sato-Riedel 式、定圧比熱は Sterning-Brown 式による推算値を使用する⁽¹⁹⁾。

考慮した支配方程式は、1) 質量保存式、2) 運動量保存式、3) エネルギー保存式、4) 化学種保存式、および以下の、5) 混合分率保存式である^(4,5,16)。混合分率 Z の保存式、および Z の定義⁽⁸⁾ を次式 (1), (2) に示す。

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Z) = \nabla \cdot (\rho D_Z \nabla Z) + S_Z \quad (1)$$

$$Z = \frac{\phi Y_F - Y_{O_2} + Y_{O_2,air}}{\phi Y_{F,fuel} + Y_{O_2,air}} \quad (2)$$

このとき Z の生成項 S_Z は、次式で示される。

$$S_Z = -\frac{\phi}{\phi + Y_{O_2,air}} \left(\frac{1}{\Delta V} \sum^N \frac{dm_i}{dt} \right) \quad (3)$$

ここで、 $Y_{O_2,air}$ は空气中酸素の質量分率、 ΔV はセル体積、 N はセル中に存在する油滴の数である。また、 Z の拡散係数 D_Z には、混合気の拡散係数を与える。

スカラー消散率 χ は、次式で定義される^(20,21)。

$$\chi = 2D_Z \nabla Z \cdot \nabla Z \quad (4)$$

油滴と気相との熱、物質および運動量の交換には PSI-Cell (Particle-Source-In Cell) モデル⁽²²⁾ を使用する。1 タイムステップ間の油滴と気相との相互干渉項は、油滴移動後の位置で考慮する。

油滴の衝突、分裂は無いとし、気相中の油滴の挙動は、粒子の質量、速度、および温度についての方程式をラグランジュ的に解くことにより求める。油滴の蒸発モデルには、非平衡 Langmuir-Knudsen モデル^(23,24) を用いる。

以上の支配方程式および計算手法の詳細については、文献 (4) および (5) を参照されたい。

本報では、燃焼種が火炎片特性に及ぼす影響を調べるため、燃焼反応には、n-デカンと n-ヘプタンの一段

Fig. 1 Schematics of the flow field

Fig. 2 Droplet size distribution

総括反応⁽²⁵⁾を用いる。

これらの総括反応の反応速度は、次のアレニウス型の反応速度式で与えられる。

$$\frac{\dot{m}_F}{W_F} = A \cdot T^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(\frac{\rho Y_F}{W_F}\right)^a \left(\frac{\rho Y_{O_2}}{W_O}\right)^b \quad (7)$$

ここで、 $\dot{m}_F$ は燃料の反応速度、 W_F と W_O は燃料および酸化剤の分子量である。頻度因子 A 、活性化エネルギー E 、反応の次数 n , a , b は、n-デカンに対しては、 $A = 3.8 \times 10^{11}$, $E = 1.256 \times 10^5$ J/mol, $n = 0$, $a = 0.25$, $b = 1.5$ を与え、n-ヘプタンに対しては、 $A = 5.1 \times 10^{11}$, $E = 1.256 \times 10^5$ J/mol, $n = 0$, $a = 0.25$, $b = 1.5$ を与える⁽²⁵⁾。

上下両側のポート $-0.5L_p \leq y \leq 0.5L_p$ の領域からは常温常圧の空気 (300 K, 0.1013 MPa, 酸素質量分率 = 0.2375) が流入する。噴霧の供給は、上側ポートの $-0.15L_p \leq y \leq 0.15L_p$ の領域から行う。噴霧の粒径分布は、PDA 計測によって得られた分布より、SMD (Sauter

Mean Diameter) = 30, 74.2, 106.7, 137.6 μm の4 ケースとした(図2(a)～(d)). 噴霧の供給当量比 ϕ_l は、上側ポートから供給される空気量と噴霧供給量によって規定し、 $\phi_l = 0.42, 0.84, 1.26, 5.00$ の4 ケースとした。いずれのケースにおいても、上下両側のポートから流入する気体の流速を 0.4 m/s (伸張率 $a = 40 \text{ s}^{-1}$) とした。これらに加え、燃料種の影響を調べるため、 n -ヘプタン (C_7H_{16}) について、伸張率 $a = 40 \text{ s}^{-1}$ 、噴霧粒径 $\text{SMD} = 106.7 \mu\text{m}$ 、および供給当量比 $\phi_l = 1.26$ について計算を行い、 n -デカンの噴霧火炎と比較する。本報における検討ケースを表1にまとめる。また、油滴の初期位置は一樣乱数を用いて決定し、その速度は気相の流入速度に等しいとした。

計算領域は、縦 $20 \text{ mm} \times$ 横 40 mm の領域を 200×400 の等間隔格子 (コントロールボリュームの寸法 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$) に分割した。支配方程式の解法には、有限体積法に基づく SIMPLE 法⁽²⁶⁾を採用した。離散化の際の空間差分には4次精度中心差分を、時間差分には完全陰解法を用いた。また、油滴に関する時間差分は、2次精度 Adams-Bashforth 法を用いて解いた。

タイムステップは、気相に対しては 0.1 ms とした。油滴計算のタイムステップ Δt_l は、熱に関する緩和時間 τ を $\tau = 3 \text{Pr} c_p \tau_l / (\text{Nuc}_p f_2)$ と定義し、 $\Delta t_l / \tau < 0.001$ を満たすように決定した⁽⁴⁾。ただし、 c_p は油滴の比熱、 τ_l は粒子緩和時間、 c_p は混合ガスの比熱、 f_2 は油滴の蒸発に関わるパラメータである。

下側ポートからの予混合ガスにより形成される平面火炎に、上側ポートからの噴霧を突入させて着火させた後、下側ポートからの予混合ガスの供給を停止し、噴霧火炎のみの状態で 300 ms ($0.1 \text{ ms} \times 3000$ タイムステップ) まで計算を行った。

3. 結果および考察

3.1 噴霧粒径の影響 図3に、噴霧粒径を変化させた際の x 軸上の噴霧火炎温度 T の分布を示す。一般的に油滴粒径が小さいほど蒸発速度が速いことから、噴霧粒径の最も小さい DS1 が最も早く着火する。DS1 では、ピーク温度が他と比較して低いが、これは蒸発が早く完了し、気相デカンが外側に流れるため、総発熱量が低くなることによる。その他の条件では、噴霧粒径が小さいほど高いピーク温度をもつ。

図4に、各条件の T の分布を左半面に、混合分率 Z の分布を右半面に示す。また、あわせて油滴の分布も示す。なお、油滴の色は、油滴質量を表す。さらに、図中の Z 分布には、量論混合分率 ($Z_{st} = 0.062$) を白線で示す。図3でも見られたように、噴霧粒径が増加するに従い、油滴の蒸発速度が遅くなるため着火は遅れ、よどみ平面

Table 1 Tested cases in this work

Case	Fuel	$a \text{ s}^{-1}$	SMD μm	ϕ_l -
DS1	n-decane	40.0	30.0	1.26
DS2			74.2	
DS3(=DE3)			106.7	
DS4			137.6	
DE1	n-decane	40.0	106.7	0.42
DE2				0.84
DE3(=DS3)				1.26
DE4				5.00
H1	n-heptane	40.0	106.7	1.26

Fig. 3 Temperature distributions on x axis with various droplet size distributions.

付近にのみ高温の領域が形成される。噴霧粒径の最も大きい DS4 では、蒸発が完了せずに、よどみ平面の高温の領域を通過する粒子が見られる。油滴の蒸発とともに Z が生成されるため、 T と Z は似た分布形状をもつ。

DS1 ～ DS4 の火炎構造を調べるため、火炎の flame index を計算した。ここで、flame index (FI) は、次式で定義される⁽²⁷⁾。

$$FI = \nabla Y_{\text{C}_{10}\text{H}_{22}} \cdot \nabla Y_{\text{O}_2} \quad (8)$$

FI は、正であれば火炎は予混合火炎、負であれば拡散火炎となる。図5に、各条件における flame index の分布を示す。油滴は、上側ポートから流入した後、蒸発を開始するが、この蒸発により着火前には見かけ上、流れ方向に対する気相デカンの濃度勾配 (正) と酸素の濃度勾配 (負) が逆転するので、まず拡散的な特徴が現れる。その後、着火とともに双方の質量分率の勾配は負に転じ、予混合的な火炎構造を示す⁽⁴⁾。これらの特徴は、着火前の蒸発量が多い DS1 でより顕著に現れる。一方、噴霧粒径が大きくなるに従い、油滴の蒸発は主によどみ平面付近の高温の領域において起こるため、予混合的な火炎構造は弱まり、高温の領域には大きく環状の拡散火炎帯が形成される。

一般的に火炎片モデルで使用される chemtable は、様々な歪みをもつ火炎片の Z 空間における1次元物理量分布から構成される。そこで、各物理量の Z に対する特性を調べるため、各条件における T 、気相デカン質量

Fig. 4 Distributions of temperature and mixture fraction with various SMDs.

Fig. 5 Distributions of flame index with various SMDs.

 Fig. 6 Profiles of temperature, mass fraction of decane and scalar dissipation rate in Z space with various SMDs.

分率 $Y_{C_{10}H_{22}}$ および χ の x 軸上の値を Z に対してプロットした。この結果を図6に示す。なお、(b)図は、(a)図の低 Z 領域を拡大したものである。また、図中には比較のため、層流対向流ガス拡散火炎(酸素質量分率 0.2375, 伸張率 $a = 40 \text{ s}^{-1}$) の1次元方程式を物理空間で解いた結果を実線で示す。DS1 では、前述のように x 軸上の総発熱量が低くなるため、他の条件と比較して、ピーク温度は低く、 Z に対する特性も大きく異なる。粒径が大きくなるに従い、蒸発および着火が遅れるため、DS2 のピーク温度が最も高く、DS4 のそれが最も低くなる。

図6の各条件の T , $Y_{C_{10}H_{22}}$ および χ の分布はガス拡散火炎の結果と一致せず、特に T のピーク値は大幅に高い値を示す。これは、前報⁽⁶⁾で示されたように、 χ の値が小さいことと、予混合火炎が混在する火炎構造をもつことに起因する。また、これらの物理量は、ガス拡散火炎のそれらとは異なり、 Z に対して一意に定まらず、2つの値をもつ。これは、前報⁽⁶⁾で示されたように、油滴の蒸発、つまり Z の生成に起因する挙動である。噴霧火炎内部での蒸発量 (Z のピーク値) がほぼ等しい DS3 と DS4 では、蒸発速度 (Z の生成速度) がより速い DS3 の方がこの傾向が顕著に現れる。

さらに、これら物理量の χ に対する依存性も調べるため、 T を χ の微少な検査区間毎に整理し、 Z に対してプロットした。このうちの DS3 と DS4 における1例を図7に示す。DS3 と DS4 の双方において、 χ がほぼ同じ値をもつ場合でも、 Z に対して T が一意に定まらない。また、図6において上流側と下流側により大きな差異をもつ DS3 の方が、 T の差異が大きくなることからわかる。本来、ガス拡散火炎を基にした chemtable は、 T や各化学種質量分率 Y_k などの物理量と Z が1対1に対応するように整理されている。従って、噴霧粒径に大きく依存するこれらの結果は、噴霧火炎にこうした chemtable を適用する際には注意が必要であることを示している。これについては、未燃域と既燃域を分別可能な Flamelet/progress-variable approach⁽²⁸⁾ が提案されているが、この手法の有効性についても別途検討が必要だと思われる。

3・2 当量比の影響 図8に、供給当量比 ϕ_f を変化した際の x 軸上の噴霧火炎温度 T の分布を示す。図より、 ϕ_f の増加に従い燃料の着火位置は上側ポートへ移動し、高温領域も広がる。火炎温度のピーク値は、 ϕ_f の最も小さい DE1 が最も低く、DE2 で最も高い値を示し、DE3, DE4 の順に低下していく。 ϕ_f が大きい DE3 や DE4 でピーク温度が低下するのは、蒸発潜熱の影響であり、よどみ点付近で T が極小値をもつのは、Kurose ら⁽³⁾ や Nakamura ら⁽⁴⁾ により詳細が明らかにされた、噴霧火炎内部の群燃焼挙動、つまり、低酸素濃度による緩慢な

Fig. 7 Trend of temperature in Z space in χ control sections.

Fig. 8 Temperature distributions on x axis with various equivalence ratios.

燃焼と蒸発潜熱に起因する cooling effect だと思われる。

図9に、各条件における T , 混合分率 Z , および油滴の分布を示す。また、混合分率の図中には、量論混合分率 ($Z_{st} = 0.062$) を白線で示す。燃料供給量が少ない DE1 では、高温の領域が狭いため、下側ポート近傍まで到達する油滴が多い。 ϕ_f が増加するに従い、蒸発量が増え、高温の領域は広がる。 ϕ_f が最も高い DE4 では、非常に広い範囲に高温領域が広がるものの、中心付近では温度の低下が見られる。これは、上述のように cooling effect によるものである。 Z の分布に注目すると、 T の分布と同様に ϕ_f の増加に従い、 Z の高い領域が広がり、DE4 では Z_{st} の領域がよどみ平面全体を覆うようになる。

図10に、各条件における flame index の分布を示す。DE1 では、高温の領域が狭く蒸発速度が遅いため、油滴はよどみ平面を通過し下側ポート近傍にまで達する。このため、よどみ平面上側のみならず、下側においても、蒸発による気相デカンの濃度増加と酸素濃度の見かけ上の減少にともなう着火前の拡散的特徴と、着火後の予混合的炎の二層構造が現れる。 ϕ_f が増加するに従い、油滴からの蒸発量が増え、高温の領域が拡大するため、よどみ平面付近の拡散火炎の帯が成長する。

図11に、各条件における T , 気相デカン質量分率

Fig. 9 Distributions of temperature and mixture fraction with various equivalence ratios.

Fig. 10 Distributions of flame index with various equivalence ratios.

Fig. 11 Profiles of temperature, mass fraction of decane and scalar dissipation rate with various equivalence ratios.

Fig. 12 Trend of temperature in Z space in χ control sections ($\phi_i = 0.84$).

Fig. 14 Distributions of temperature and mixture fraction of n-heptane's spray flame.

Fig. 15 Distributions of flame index of n-heptane's spray flame.

$Y_{C_{10}H_{22}}$ および χ の x 軸上の値を Z に対してプロットしたものを示す。 Z , $Y_{C_{10}H_{22}}$ および χ のピーク値は、油滴の蒸発量に依存するため、 ϕ_i に比例して増加する。各条件の T , $Y_{C_{10}H_{22}}$ および χ は、蒸発量の低い DE1 を除き、 Z に対して一意に決まらず、2 つの値をもつ。この傾向は、 ϕ_i が増加するに従い、顕著となる。

さらに、図 7 と同様に、 χ の微小区間毎に、 Z に対する T をプロットした。このうちの DE2 の代表例を図 12 に示す。図 7(a) の DS3 (= DE3) と図 12 との比較から、双方とも χ に対しても T が一意に定まらない傾向を示すが、これはより ϕ_i の大きい DE3 において顕著である。

3・3 燃料種の影響 図 13 に、 n -デカン (DS3) と n -ヘプタン (HI) の x 軸上の噴霧火炎温度 T の分布を示す。 n -ヘプタンの方が n -デカンよりも蒸発速度が速いため、HI は DS3 よりも上側ポート寄りに着火位置が存在する。双方のピーク温度は、ほぼ同じである。

図 14 に、HI の T の分布を左半面に、混合分率 Z の分布を右半面に示す。あわせて油滴の分布も示す。なお、油滴の色は、油滴質量を表す。さらに、図中の Z 分布には、 n -デカンの量論混合分率 ($Z_{st} = 0.062$) を白線で示す。図 13 で見たように、 n -ヘプタンの方が蒸発速度が速いため、図 4(c) の DS3 と比較すると、HI の方が広い高温領域を形成する。また、DS3 では高温領域を通過する粒子が見られるが、HI ではほぼ高温領域内で蒸発が完了する。 Z の分布も T と同様、HI の方が Z の高い領域が大きく広がる。

図 15 に、HI における flame index の分布を示す。図 5(c) の DS3 と比較すると、 n -ヘプタンの方が蒸発速度が速いため、燃料油滴からの蒸発による気相燃料濃度の増加と酸素濃度の見かけ上の減少による拡散的特徴を示す領域と、着火後の予混合的の火炎の存在する領域が広い範囲に存在する。また、DS3 におけるよどみ平面付近の拡散火炎の帯の下側には、蒸発速度が遅いため高温領域を通過した粒子の蒸発にともなう火炎が存在するが、 n -ヘプタンには存在しない。

図 16 に、DS3 と HI における T 、それぞれの気相燃料の質量分率 Y_{FUEL} ($Y_{C_{10}H_{22}}$ と $Y_{C_7H_{16}}$)、および χ の x 軸上の値を Z に対してプロットしたものを示す。図より、 n -ヘプタンの方が蒸発速度が速いため、 Z の増加にともなう T の上昇が速く、ピーク温度も高い。また一方で、 n -ヘプタンの分子量は n -デカンのそれよりも小さいことから、 Z や Y_{FUEL} の最大値は、HI の方が小さくなる。また、図 6 に見たように、DS3 ではこれらの物理量は、 Z に対して一意に定まらないが、この傾向は HI においても現れる。

さらに、図 7 と同様に、 χ の微小区間毎に、 Z に対する T をプロットした。このうちの HI の代表例を図 17 に示す。

Fig. 13 Temperature distributions on x axis in decane and heptane spray flames.

Fig. 16 Profiles of temperature, mass fraction of fuel and scalar dissipation rate in decane and heptane spray flames.

Fig. 17 Trend of temperature in Z space in χ control sections.

図より、図 7(a) の DS3 と同様に、HI においても χ に対して T が一意に定まらない傾向を示すことがわかる。

4. 結 論

層流の 2 次元対向流場に形成された噴霧火炎に対して直接数値計算を実施した。得られた主な知見は、以下の通りであった。

(I) 噴霧火炎における混合分率 Z は、油滴の蒸発、つ

まり Z の生成により火炎内部にピーク値をもつ。また、この Z のピーク値の上流側と下流側における火炎温度や化学種の質量分率は、それぞれ異なる値をもち、 Z とスカラー消散率 χ に対して一意に定まらない。この上流側と下流側における物理量の値の差異は、上流側における油滴の蒸発速度、すなわち Z の生成速度と下流側における Z の移流・拡散速度のバランスに依存する。この差異は、蒸発速度が速い小粒径の条件ほど(火炎内部での蒸発量が同じ場合に限る)、また、火炎内部での蒸発量が多い高当量比の条件ほど、顕著になる。

- (2) n -ヘプタンは n -デカンに比べて蒸発速度が速いため、予混合的火炎が顕著になる。また、その火炎温度や化学種の質量分率などの物理量は、 n -デカンのそれらと同様に、 Z と χ に対して一意に定まらない。
- (3) 噴霧火炎の火炎片特性は、ガス拡散火炎のそれとは大きく異なり、かつ、その差異も噴霧粒径、当量比、および燃料種などの条件に大きく依存するため、ガス拡散火炎の火炎片方程式に基づくchemtableを噴霧火炎に適用する際には、それらの特性を十分に把握しておく必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、大阪大学大学院工学研究科馬場雄也氏には有益な助言をいただいた。ここに記して深く謝意を表す。

文 献

- (1) F. Akamatsu, Y. Mizutani, M. Katsuki S. Tsushima and Y. D. Cho, "Measurement of the local group combustion number of droplet clusters in a premixed spray stream," *Proc. Combust. Inst.*, 26 (1996) pp.1723-1729.
- (2) S. Tsushima, H. Saitoh, F. Akamatsu and M. Katsuki, "Observation of combustion characteristics of droplet clusters in a premixed-spray flame by simultaneous monitoring of planar spray images and local chemiluminescence," *Proc. Combust. Inst.*, 27 (1998) pp.1967-1974.
- (3) R. Kurose, O. Desjardins, M. Nakamura, F. Akamatsu and H. Pitsch, "Numerical simulations of spray flames," *Annual Research Briefs-2004*, Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford Univ. (2004), pp.269-280.
- (4) M. Nakamura, F. Akamatsu, R. Kurose and M. Katsuki, "Combustion mechanism of liquid fuel spray in a gaseous flame," *Phys. Fluids*, 17 (2005), 123301.
- (5) M. Nakamura, F. Akamatsu, R. Kurose and M. Katsuki, "Combustion Mechanism of Liquid Fuel Spray Entering Gaseous Flame Front," *Trans. JSME Series B*, 71-707 (2005), pp.1921-1928 (in Japanese).
- (6) F. Akamatsu, Y. Mizutani, M. Katsuki, S. Tsushima, Y. D. Cho, K. Nakabe, "Group combustion behavior of droplets in a premixed-spray flame," *Atomization and Sprays*, 7-2 (1997), pp. 199-218.
- (7) N. Peters, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-premixed Turbulent Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 10 (1984), pp.319-339.
- (8) N. Peters, "Turbulent Combustion," Cambridge University

- Press, (1990).
- (9) H. Pitsch and H. Steiner, "Large-eddy simulation of a turbulent piloted methane/air diffusion flame (Sandia flame D)," *Phys. Fluid*, 12 (2000), pp.2541-2554.
- (10) Y. Huang, H.-G. Sung, S.-Y. Hsieh and Y. Yang, "Large-eddy simulation of combustion dynamics of lean-premixed swirl-stabilized combustor," *J. Propul. Power*, 19 (2003) pp.782-794.
- (11) C. D. Pierce and P. Moin, "Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion," *J. Fluid Mech.*, 504 (2004) pp.73-97.
- (12) L. Selle, G. Lartigue, T. Poinso, R. Koch, K.-U. Schildmacher, W. Krebs, B. Prade, P. Kaufmann and D. Veynante, "Compressible large eddy simulation of turbulent combustion in complex geometry on unstructured meshes," *Combust. Flame*, 137 (2004), pp.489-505.
- (13) Y. Baba, R. Kurose and F. Akamatsu, "A study on numerical method and solution behavior of laminar diffusion flamelet equation," Submitted to *Trans. JSME Series B* (in Japanese).
- (14) R. Kurose and H. Makino, "Large eddy simulation on a solid-fuel jet flame," *Combust. Flame*, 135 (2003), pp.1-16.
- (15) F. Ham, S. V. Apte, G. Iaccarino, X. Wu, M. Herrmann, G. Constantinescu, K. Mahesh and P. Moin, "Unstructured LES of reacting multiphase flows in realistic gas turbine combustors," *Annual Research Brief-2003*, Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford Univ., (2003), pp.139-159.
- (16) H. Watanabe, R. Kurose, S.-M. Hwang and T. Akamatsu, "Characteristics of flamelet in spray flames, Part 1: General feature and effects of strain rate," Submitted to *Trans. JSME Series B* (in Japanese).
- (17) R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, "A fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multicomponent transport properties," *SANDIA Report*, SAND86-8246 (1986).
- (18) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin-II: A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics," *SANDIA Report*, SAND89-8009B, (1989).
- (19) M. Hirata and R. C. Reid, "The properties of gases and liquids, 3rd ed.," McGraw-Hill (1985).
- (20) H. Pitsch and N. Peters, "A Consistent Flamelet Formulation for Non-premixed Combustion Considering Differential Diffusion Effects," *Combust. Flame*, 114 (1998), pp.26-40.
- (21) H. Pitsch, "Unsteady Flamelet Modeling of Differential Diffusion in Turbulent Jet Diffusion Flames," *Combust. Flame*, 123 (2000), pp.358-374.
- (22) C. T. Crowe, M. P. Sharma and D. E. Stock, "The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows," *Trans. ASME, J. of Fluids Eng.*, 99 (1977), pp.325-332.
- (23) R. S. Miller, K. Harstad and J. Bellan, "Evaluation of equilibrium and non-equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations," *J. Multiphase Flow*, 24 (1998), pp.1025-1055.
- (24) R. S. Miller and J. Bellan, "Direct numerical simulation of a confined three-dimensional gas mixing layer with one evaporating hydrocarbon-droplet-laden stream," *J. Fluid Mech.*, 384 (1999), pp.293-338.
- (25) C. K. Westbrook and F. L. Dryer, "Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion," *Prog. Eng. Combust. Sci.*, 10 (1984), pp.1-57.
- (26) S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw-Hill, (1980).
- (27) H. Yamashita, M. Shimada and T. Takeno, "A Numerical Study on Flame Stability at Transition Point of Jet Diffusion Flames," *Proc. Combust. Inst.*, 26 (1996), pp.27-34.
- (28) C. D. Pierce and P. Moin, "Progress-variable for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion," *J. Fluid Mech.*, 504 (2004), pp.73-97.