

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

噴霧燃焼の燃焼形態に与える液滴の大きさと数密度の影響に関する数値解析

Numerical Study on Influence of Size and Number Density of Droplet on Spray Combustion Mode

萩原 康太・山下 博史*・山本 和弘

HAGIHARA, Kouta, YAMASHITA, Hiroshi*, and YAMAMOTO, Kazuhiro

名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

2009年2月23日受付; 2009年6月6日受理/Received 23 February, 2009; Accepted 6 June, 2009

Abstract : The spray combustion is applied to various practical combustors such as a diesel engine, a gas turbine, etc. However, the spray combustion is the very complicated, unsteady two-phase reactive physicochemical phenomenon composed of preheating, evaporation, mixing, ignition, combustion and quenching, etc. Chiu et al. have considered the spray combustion field with the concept of group combustion, and proposed that the group combustion can be classified into four modes in terms of group combustion number G . In this paper, using the numerical analysis with PSI-CELL model, we examined combustion process in three-dimensional heterogenous combustion field of fuel droplets and air, so as to improve Chiu's group combustion mode. We arranged many fuel droplets using random variables, and changed the size and the number density of droplets. We obtained the following results; 1) The group combustion is classified into six modes. 2) The initial equivalence ratio ϕ is needed to consider the influence of oxygen existing initially in the combustion field. 3) The group combustion mode can be organized by the initial equivalence ratio ϕ when the size of fuel droplet is small, while it can be organized by group combustion number G when the size of fuel droplet is large.

Key Words : Spray Combustion, Group Combustion, Ignition, Numerical Analysis

1. 緒言

噴霧燃焼は液体燃料を燃焼させる方法として直噴系エンジンやガスタービンなどの実用的な燃焼器で広く用いられている。しかし噴霧燃焼は、液体燃料の微粒化、気相中への分散、液滴の蒸発、酸化剤との混合、着火、燃焼という素過程が互いに相互作用を及ぼしながら、同時に進行する複雑な反応性二相流非定常現象であり、その解明は非常に困難である[1]。

噴霧燃焼の研究例としては、単一液滴や液滴列の蒸発、着火、火炎伝播についての実験が多く行われている[2-6]。しかし、噴霧燃焼では非常に多数の液滴からなる液滴群としての数密度や分布の不均一性が燃焼機構に大きく関与しており、群挙動を考慮に入れて燃焼過程の検討を行うことが重要であることが知られている。Chiuらは液滴燃焼の理論解析を行い、群燃焼数という指標により単滴燃焼、内部群燃焼、外部群燃焼および外殻燃焼の4つの群燃焼モード

を提唱した[7-9]。

現在ではコンピュータの性能の向上により数値解析による研究[10-14]においても、液滴群燃焼の詳細な議論がなされるようになってきているが、各種パラメータが燃焼形態に与える影響についての系統的な検討は必ずしも十分とはいえない。そこで本研究では、Chiuらが提唱した群燃焼の形態を数値解析により検討することを目的とし、燃焼の形態を決定する要因、およびその影響を調べる。特に、Chiuらの研究では液滴群領域内部の燃料液滴の配置は一律であると仮定されている点について検討するため、蒸発後の液滴群を気相の不均一濃度・温度場でモデル化した場合については、榎山らが数値解析により火炎の着火・干渉挙動に重点を置いて詳細な群燃焼挙動を検討している[15]。しかし燃料液滴の群燃焼は、群中心部の酸欠に伴う反応抑制、蒸発潜熱に伴う温度低下、および燃料蒸気濃度の上昇に伴う蒸発速度の抑制などが絡み合って起こる現象であるため、群燃焼挙動を議論するうえで、燃料液滴の蒸発を考慮することは非常に重要である。そこで今回は、さらに液滴の予熱・蒸発過程も含めて群燃焼挙動を模擬するために、

* Corresponding author. E-mail: yamashita@mech.nagoya-u.ac.jp

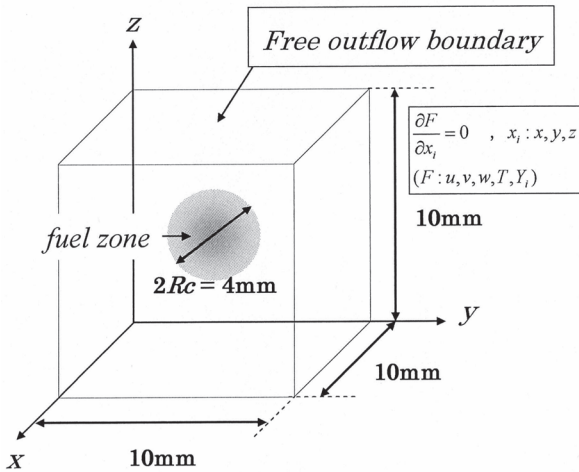


Fig.1 Analytical model

Crowe ら[16]の PSI-CELL モデルを用い、液滴の蒸発の効果を考慮して噴霧燃焼過程を検討した[17]. また、燃料液滴の配置箇所に関しては、乱数を用いて空間にランダムに燃料を配置することで空間的不均一性をモデル化した.

2. 解析モデルおよび計算方法

2.1. 解析モデルおよび初期条件・境界条件

本研究で用いた解析モデルを Fig.1 に示す. 計算領域は $x = 0 \sim 10$ mm, $y = 0 \sim 10$ mm, $z = 0 \sim 10$ mm の 1 辺 10 mm の立方体である. 境界条件としては、計算領域である立方体のすべての側面において流れが自由に流出するものとする. 初期時刻には、圧力 1 atm, 温度 1000 K の静止空気が充填されており、中央の半径 $R_c = 2$ mm の球体内部を「燃料液滴配置範囲」とし、一様乱数を用いてこの領域内の計算格子点をランダムに選択して多数の燃料液滴を配置した. なお、この燃料液滴は初期時刻にはまだ蒸発しておらず、気相においては燃料濃度はゼロである. 液滴の直径 d は一定とした. また、配置した燃料液滴は軽油とするが、蒸発後の気相は燃焼反応の簡単化のためにメタンとして扱うこととした. このような仮想的なモデルを用いても現象の本質には関係しないと考えるが、より精密なモデル化については今後の課題と考える. 燃料液滴の初期温度は軽油の沸点である 500 K, 蒸発潜熱は軽油の 250 kJ/kg, 密度は軽油の 860 kg/m^3 とした[18].

2.2. 支配方程式および PSI-CELL モデル

本研究では、以下の仮定を適用した.

- (1) 混合気は理想気体とする.
- (2) Soret 効果, Dufour 効果および圧力拡散の効果は無視する.
- (3) 外力の影響は考慮しない.
- (4) エネルギー方程式において粘性散逸項および圧力仕事項は無視する.

これら仮定を用いると、気相に対する支配方程式は以下のようなになる. なお、これらの式で用いられている記号は、混合気の密度 ρ , 粘度 μ , 定圧比熱 c_p , 化学種 i の質量分率 Y_i , 分子量 m_i , 拡散係数 D_i , エンタルピー h_i , 質量生成速度 w_i , 速度ベクトル \mathbf{v} , 速度成分 $u_1=u, u_2=v, u_3=w$, 温度 T , 時間 t , 直角座標 $x_1=x, x_2=y, x_3=z$ である.

連続方程式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = Z_F$$

運動方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} u_m) - \nabla \cdot (\mu \nabla u_m) \\ = -\frac{\partial P^0}{\partial x_m} + \left(-\frac{\partial \mu}{\partial x_m} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_m} \right) \quad m = 1, 2, 3 \end{aligned}$$

エネルギー方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) - \frac{1}{c_p} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \\ = \frac{1}{c_p} \frac{Dp}{Dt} - \frac{1}{c_p} \sum_i h_i w_i - \frac{\rho}{c_p} \sum_i (c_{p,i} Y_i V_i \cdot \nabla T) + \frac{Z_T}{c_p} \end{aligned}$$

各化学種の連続方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) - \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) = w_i + \delta_{F_i} Z_F \\ i = F(\text{CH}_4), \text{O}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} \end{aligned}$$

ここで、 δ_{F_i} はクロネッカーのデルタであり、 i が F の場合だけ 1 となり、それ以外は零である. なお、各化学種の内、 N_2 については解かず次式で与える.

$$Y_{\text{N}_2} = 1 - \sum_{i \neq \text{N}_2} Y_i$$

状態方程式:

$$p = \rho R^0 T \sum_i \frac{Y_i}{m_i}$$

これらの気相の支配微分方程式のうち、連続方程式、エネルギー方程式および各化学種(メタンのみ)の連続方程式に対して、Crowe ら[16]の PSI-CELL (Particle-Source-in-Cell) モデルを適用する. すなわち、これらの微分方程式を離散化した方程式において、気相計算格子上での検査体積 (CELL) 内に液滴が配置された場合には、燃料液滴群の蒸発による効果を生成項として組み込む. なお、本研究では、燃料液滴が初期に配置されてから蒸発し尽くすまでの間の空間移動量は小さいものとして無視した[15].

これらの生成項 Z_F および Z_T は、静止空気中における単

一液滴の蒸発に関する理論解析結果[22-24]を適用し、一つのセルに多数個の液滴が存在することを燃料液滴の局所数密度 n を用いて考慮し、以下のように評価した。

$$Z_F = \frac{h(T-T_0)}{L_h} S n, \quad Z_T = h(T-T_0) S n$$

ここで、 S は液滴の表面積 $S = \pi d^2$ 、 L_h は燃料液滴の潜熱である。また、本計算では、簡単のために、以下の近似を用いている。

① Spalding の熱伝達数は 1 に比べて小さいとみなし、対数が式に現れるのを避けている。これによる誤差はあるが、現象の本質には関係しない。

② h は液滴表面の熱伝達率であり、液滴周りの流体は静止しているものと考え、ヌセルト数 $Nu = 2.0$ として与えた。このとき、熱伝達率 λ と燃料液滴直径 d を用いて熱伝達率 h は次式で与えられる。

$$h = \frac{2\lambda}{d}$$

③ 液滴が蒸発しても熱伝達率は初期液滴直径に対応する値で一定とする。

④ 初期時刻には周囲雰囲気である空気の温度 T は燃料液滴の沸点よりも十分高く設定し、液滴温度 T_0 は常に沸点であるとす。これにより、液滴表面の蒸気の質量分率は 1 に保たれ、飽和蒸気圧曲線を考慮する必要が無い。

⑤ 燃料蒸気の定圧比熱と空気の定圧比熱を同じと近似している。

なお、各瞬間における CELL の周囲雰囲気温度 T と燃料蒸気であるメタンの質量分率には、気相の支配方程式から求めた各格子点における値を用いる。したがって、燃料液滴の蒸発が激しく起こり、メタンの質量分率が 1 になった場合には、その CELL の周囲雰囲気温度を沸点に設定し、燃料液滴の蒸発を停止させる操作を行った。また、その CELL の蒸発速度を時間について積算し、その CELL に初期に存在した液滴の総質量を超えた場合には、その CELL 内の液滴はすべて蒸発したものと考え、生成項をゼロと設定した。

なお、本研究の解析モデルにおいて、上述以外にも、燃料液滴配置範囲の大きさがやや小さいこと、燃料液滴の直径をすべて同一とし粒度分布を与えていないことなどの問題点があるが、これらの点については今後の課題と考える。

2.3. 熱力学定数

各化学種の定圧比熱 $c_{p,i}$ は、一定圧力下で、温度のみの関数と仮定し、JANAF table [19]の値に対し、適当な温度範囲で最小二乗近似を施した温度の多項式で与えられ、以下の式より算出する。これらの式の係数には CHEMKN データベース[20]を用いる。

$$\frac{c_{p,i} m_i}{R^0} = a_{1i} + a_{2i} T + a_{3i} T^2 + a_{4i} T^3 + a_{5i} T^4$$

エンタルピー h_i は定圧比熱より次式で算出する。

$$h_i = h_i^0 + \int_{T_0}^T c_{p,i} dT$$

$$\frac{h_i m_i}{R^0 T} = a_{1i} + \frac{a_{2i}}{2} T + \frac{a_{3i}}{3} T^2 + \frac{a_{4i}}{4} T^3 + \frac{a_{5i}}{5} T^4 + \frac{a_{6i}}{T}$$

2.4. 輸送係数

輸送係数については、Smooke らの Simplified Transport Model [21]を適用する。すなわち、混合気体の有効熱伝達率 λ に対し、燃焼場で通常もっとも多く存在する窒素分子に対する近似式を用いる。

$$\frac{\lambda}{c_p} = A \left(\frac{T}{T_0} \right)^r,$$

$$A = 2.58 \times 10^{-4} \text{ g/(cm} \cdot \text{s)}, \quad r = 0.7, \quad T_0 = 300\text{K}$$

各化学種の有効拡散係数 D_i は、ルイス数を各化学種で一定として次式で近似する。

$$\rho D_i = \frac{1}{Le_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \right)$$

混合気体の有効粘度は、プラントル数をすべての化学種に対して一定として次式で与える。

$$\mu = Pr \left(\frac{\lambda}{c_p} \right), \quad Pr = 0.75$$

空気は窒素がほとんどを占めているので、プラントル数には窒素の値を用いる。

2.5. 化学反応機構

本研究では、簡単のために、化学反応機構としては Coffee らのメタン・空気系の総括一段不可逆反応[25]を用いた。

2.6. 数値計算方法

保存方程式の離散化には有限体積法を用いる。対流項の離散化には一次風上差分法を、時間展開には完全陰解法を用いた。圧力と速度の構成には Patanker の SIMPLE 法[26]を用いた。時間刻みは 1.0×10^{-7} s とした。各時間ステップにおいて SOR 法による繰り返し計算を行った。

計算格子は、 x 方向、 y 方向、 z 方向にそれぞれ 100 分割の等間隔とし、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1$ mm とした。

2.7. 計算条件

本研究では、体積 V の「燃料液滴配置範囲」において、初期に配置する燃料液滴の直径 d と平均数密度 $\bar{n} = N/V$ (全液滴数 N) を変化させた。

計算結果の整理には、以下のように表される初期当量比

ϕ と群燃焼数 G を用いた、初期当量比 ϕ は初期時刻における燃料配置範囲内の燃料と酸素の総質量 $G_{CH_4,0}$ と $G_{O_2,0}$ を用いると次式のように定義できる。

$$\phi \equiv \frac{G_{CH_4,0} j}{G_{O_2,0}} = \frac{N \rho_{liq}}{Y_{O_2,0} \rho_{air}} \frac{4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 j}{3 R_c^3} = \frac{\pi}{6} \frac{j}{Y_{O_2,0} \rho_{air}} \frac{\rho_{liq}}{\bar{n} d^3}$$

ここで、 ρ_{liq} は液滴の密度 ($= 0.86 \text{ g/cm}^3$)、 ρ_{air} は空気の密度 (初期温度 $T = 1000 \text{ K}$)、 j は量論燃料酸素質量比 ($= 4$)、 $Y_{O_2,0}$ は空気中の酸素の質量分率 ($= 0.232$)、 R_c は燃料液滴配置範囲半径である。 ϕ は液滴数密度に比例するので、燃料液滴の密集度合の指標として使用する。なお、燃料液滴配置範囲の体積は $V = (4/3)\pi R_c^3$ と表される。

また、Chiu ら[7-9]の群燃焼数 G は液滴群内部における燃料の総蒸発速度 \dot{G}_V と液滴群内部への酸素の拡散速度 \dot{G}_D の比として、これらが時間的には変化せず一定と考えて定義されており、次式のように表され、燃料液滴の直径と平均数密度の積に比例する。

$$G \equiv \frac{3 \dot{G}_V}{4 \dot{G}_D} = \frac{1}{2} \pi \cdot Nu \cdot Le \cdot \bar{n} \cdot d \cdot R_c^2$$

ここで、 Le はルイス数である。Chiu らはこの群燃焼数 G だけを用いて噴霧燃焼の火炎の燃焼形態を単滴燃焼 (モード A: $G < 10^2$)、内部群燃焼 (モード B: $10^2 < G < 10^0$)、外部群燃焼 (モード C: $10^0 < G < 10^2$) および外殻燃焼 (モード D: $10^2 < G$) の4つのモードに分類した。

3. 計算結果および検討

3.1. 燃料液滴の数密度が燃焼場に与える影響

まず液滴直径を $d = 0.01 \text{ mm}$ に固定し、初期当量比 ϕ を変化させることで液滴の数密度が燃焼場に与える影響について観察した。計算開始後、着火条件の良い箇所より自発着火し周囲に伝播する。計算開始から $200 \mu\text{s}$ までの燃焼過程を観察した。

3.1.1. 最高温度の時間変化

初期当量比 $\phi = 0.0735, 1.00, 13.8$ の場合について、計算領域全体の最高温度 T_{MAX} の時間変化を Fig.2 に示す。最高温度は、初めは初期温度 1000 K を保っているが、燃料液滴が着火した瞬間に急激に上昇する。この上昇する時間は初期当量比 ϕ が大きいほど早い。これは初期当量比が大きいほど、蒸発した燃料の濃度勾配が大きく、燃料が液滴群を取り巻く高温の周囲空気中へ拡散し、着火し易くなるためと考えられる。

3.1.2. 燃焼形態

燃料液滴直径 $d = 0.01 \text{ mm}$ とし、初期当量比 $\phi = 0.0735, 0.182, 0.674, 2.06, 6.84$ および 13.8 の場合について、 $z =$

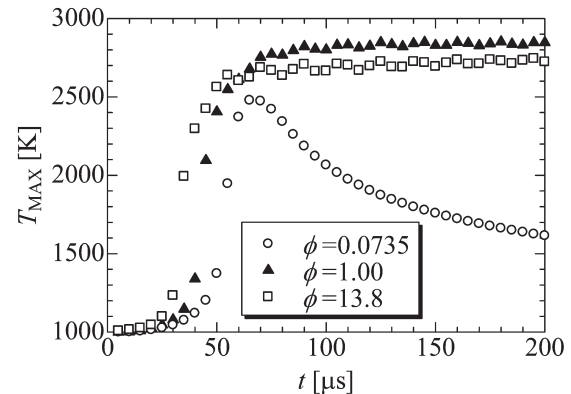


Fig.2 Time history of maximum temperature

5 mm の xy 断面上における温度分布の時間変化を Fig.3(a)-(f) に示す。燃料液滴の着火の瞬間に対応する熱発生速度が最大となる時間 $t = t_{QMAX}$ を基準として、Fig.3 (a), (b) では燃料が希薄なため反応が緩やかなので、 $t = t_{QMAX}, t_{QMAX}+25 \mu\text{s}, t_{QMAX}+50 \mu\text{s}$ の時間について、Fig.3 (c)-(f) では燃焼反応が激しいので、 $t = t_{QMAX}, t_{QMAX}+10 \mu\text{s}, t_{QMAX}+20 \mu\text{s}$ の時間について示した。また、平均数密度 \bar{n} 、群燃焼数 G 、後に説明する $Ro_2|_{RCH_4=1}$ の値も示した。

ϕ が小さい場合は、個々の燃料液滴が単独に着火し燃焼するが、 ϕ が大きくなると、液滴が連結した火炎となる。 ϕ が量論予混合気に対応する 1 付近では、着火後燃料液滴配置範囲全体に火炎が伝播するような形態となる。さらに ϕ が大きくなると、空間的に酸素が十分に存在する領域でしか着火が起こらなくなり、遂には燃料液滴配置範囲内に存在する酸素の量が可燃範囲外となり、外周部からのみ燃焼する。最終的に、 ϕ が極端に大きくなると、燃料液滴配置範囲内の燃料液滴全体が液相のまま存在することになる。

蒸発後の液滴群を気相の不均一濃度・温度場でモデル化した場合については、椋山ら[15]により燃焼形態は 5 つのモードに分類されているが、本研究ではこれを燃料液滴の蒸発過程を組み入れて改良したものになっている。本解析の結果、外殻燃焼に相当するモードが加わり、以下のような 6 つのモードに分類できることが分かった。なお、初期当量比が大きくなるにしたがい、大きい番号のモードに移り変わる。

・モード I : 単滴着火・燃焼 \leftrightarrow 「Chiuらの単滴燃焼」

それぞれの燃料液滴間距離が大きく、各燃料液滴はその周囲の高温空気からの伝熱で蒸発するが、燃料液滴配置範囲全体としては非常に燃料希薄な状態である。各燃料液滴は蒸発しながら単独に着火・燃焼する。

・モード II : 一部連結着火・燃焼

モード I よりも密に燃料液滴が配置されると、高温空気からの伝熱で蒸発するが、燃料液滴配置範囲全体としてはかなり燃料希薄な状態である。しかしながら、確率的に燃料液滴間距離が一部で小さくなるものが現れ、これらの隣

接した燃料液滴が蒸発しながら互いに連結して着火・燃焼する。

・モードⅢ：内部着火・燃焼

さらに燃料液滴が密に配置されると、高温空気からの伝熱で蒸発し、燃料液滴配置範囲全体として初期当量比 ϕ が1付近になる。そのため、燃料と酸素のバランスが丁度良く、燃料液滴配置領域内部で着火・伝播し、いくつもの小さな火炎群が形成され、燃料液滴配置範囲全体で燃焼反応が進行する。なお、液滴直径が大きいつきには、液滴数が相対的に小さくなり、燃料濃度が集中しやすく、より大きな当量比でこのモードが実現される。

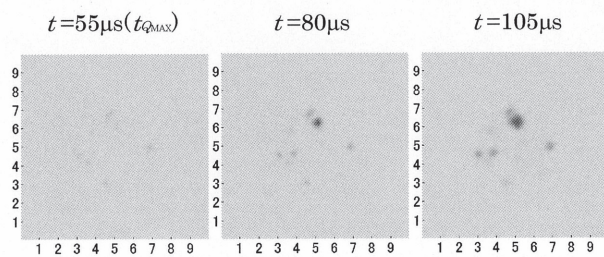
・モードⅣ：内部着火かつ外周部着火・燃焼

さらに燃料液滴が密に配置されると、高温空気からの伝

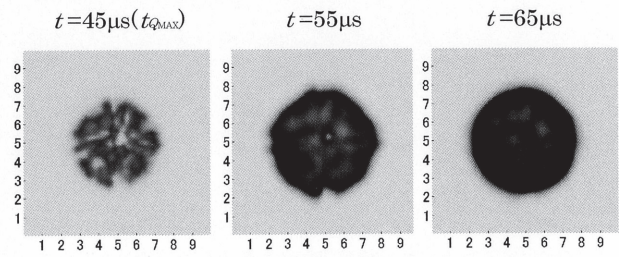
熱で蒸発するが、燃料液滴配置範囲全体としてはやや燃料過濃な状態となる。そのため、燃料液滴配置範囲内で酸素がある程度存在する位置では着火するものの、その火炎は燃料過濃な状態となっている燃料液滴配置範囲内部にはほとんど伝播しない。一方、燃料液滴配置範囲の外周部では、その外側に十分な酸素が存在するため、ここでは着火・燃焼が進行する。

・モードⅤ：外周部着火・燃焼 ↔ 「Chiuらの外部群燃焼」

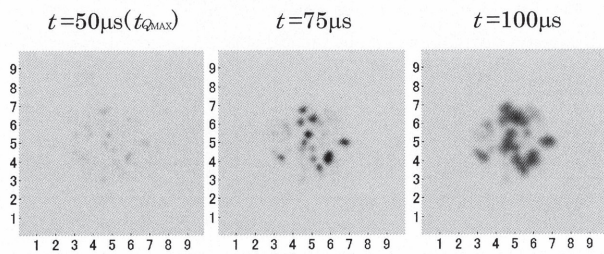
さらに燃料液滴が密に配置されると、高温空気からの伝熱で蒸発するが、燃料液滴配置範囲全体として可燃限界を越える燃料過濃な状態となり、燃料液滴配置範囲内では着火・燃焼はほとんど起こらない。一方、燃料液滴配置範囲の外周部ではモードⅣと同様、着火・燃焼が進行する。



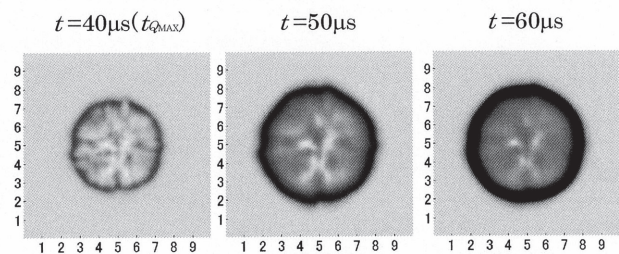
(a) Mode I: $\bar{n} = 3.31 \text{ mm}^{-3}$ ($N = 111$)
 $\{\phi = 0.0735, G = 0.404, R_{O_2|_{R_{CH_4}=1}} = 0.032\}$



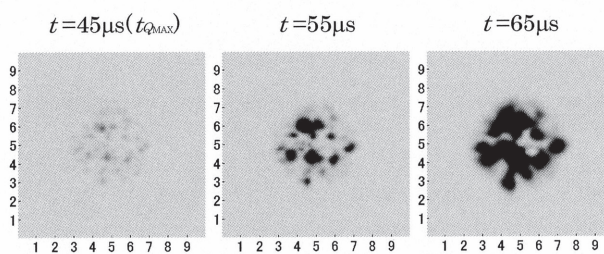
(d) Mode IV: $\bar{n} = 92.7 \text{ mm}^{-3}$ ($N = 3107$)
 $\{\phi = 2.06, G = 11.3, R_{O_2|_{R_{CH_4}=1}} = 0.032\}$



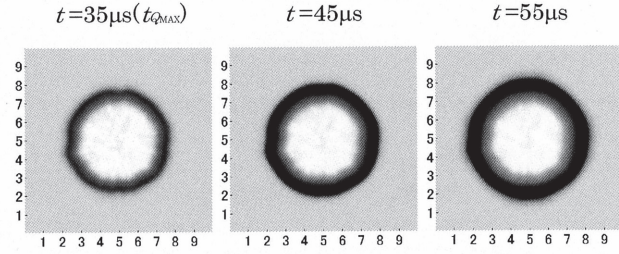
(b) Mode II: $\bar{n} = 8.21 \text{ mm}^{-3}$ ($N = 275$)
 $\{\phi = 0.182, G = 1.00, R_{O_2|_{R_{CH_4}=1}} = 0.032\}$



(e) Mode V: $\bar{n} = 308 \text{ mm}^{-3}$ ($N = 10328$)
 $\{\phi = 6.84, G = 37.6, R_{O_2|_{R_{CH_4}=1}} = 0.032\}$



(c) Mode III: $\bar{n} = 30.3 \text{ mm}^{-3}$ ($N = 1017$)
 $\{\phi = 0.674, G = 3.70, R_{O_2|_{R_{CH_4}=1}} = 0.032\}$



(f) Mode VI: $\bar{n} = 622 \text{ mm}^{-3}$ ($N = 20848$)
 $\{\phi = 13.8, G = 75.8, R_{O_2|_{R_{CH_4}=1}} = 0.032\}$

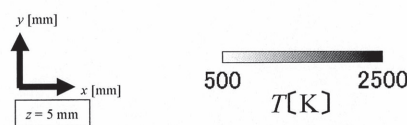
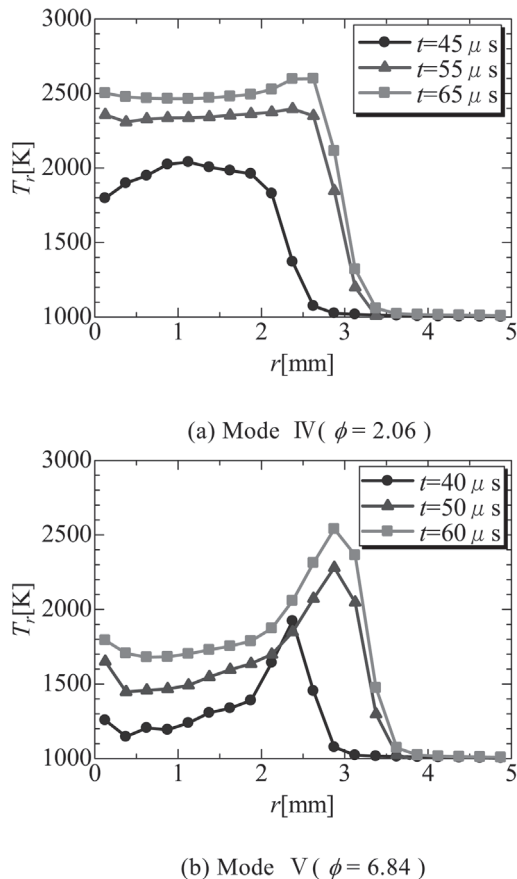


Fig.3 Effect of droplet number density on temperature profile ($d = 0.01 \text{ mm}$)

Fig.4 Distribution of T_r in radial direction ($d = 0.01\text{mm}$)

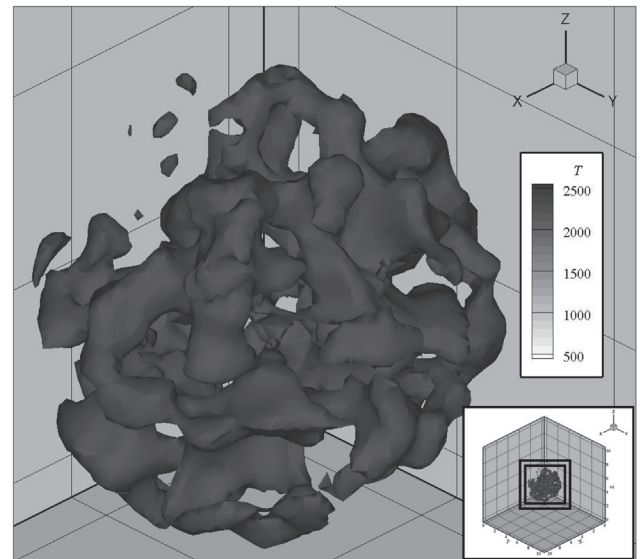
・モードVI：外殻燃焼 ⇔ 「Chiuらの外殻燃焼」

最終的に燃料液滴が非常に密に燃料が配置されると、高温空気からの伝熱も蒸発には十分でなくなり、燃料液滴配置範囲内の燃料液滴全体が液相のまま存在することになる。そのため、燃料液滴配置範囲内部全体に液相を保持したまま燃料液滴配置範囲の外周部でのみ、蒸発しながら着火・燃焼が進行する。液滴直径が大きいつき、初期時刻に液滴のごく一部が周囲の酸素と反応して燃焼することもあるが、液滴配置範囲内部では直ぐに酸素は消費され尽くし、燃焼は停止してしまう。

ただし、Chiuらの燃焼モードの分類で示される「内部群燃焼」は今回の計算条件では現れなかった。これは初期に液滴群内に酸素が存在するような場合にはこのモード自体が存在し難いこと、また燃料液滴配置範囲の大きさが十分には大きくないことのためと考えられる。

また、Chiuらによる分類では $1 < G < 10^2$ は本研究のモードVに相当する外部群燃焼になるはずであるが、Fig.3(a)~(f)から分かるようにChiuらの分類とはずれが生じた。

モードIVとモードVはどちらも最終的に外周部において火炎が形成され、その相違が判りにくい。このため、液滴群燃焼現象の球対称性に基づき、燃料液滴配置範囲の中心部から球殻領域について平均した温度 T_r を求め、領域中心

Fig.5 Three dimensional structure of combustion mode (Temperature contour of $T = 2200\text{K}$)

から半径方向分布を Fig.4(a) および (b) に示す。モードIVの場合には燃え拡がり初期において液滴燃料配置範囲内部で高温になっているため、液滴燃料配置範囲内部でも十分に着火しているが、モードVの場合には外周部側で温度が高くなっていることから、着火・燃焼は主に外周部側で起きていることがよく分かる。

なお、一例として燃料液滴配置範囲近傍における燃焼モードIVの燃焼形態の三次元構造を温度の等値面 (2200K) を用いて Fig.5 に示す。この図の断面 $z = 5\text{mm}$ における分布は Fig.3(d) の $t = t_{\text{QMAX}}$ における二次元分布に対応している。燃料液滴配置範囲の内部で、連結した液滴群が部分的に着火している様子が可視化できている。

3.2. 燃料液滴の大きさが燃焼場に与える影響

次に燃料の初期当量比を $\phi = 1.0$ と固定し、燃料液滴直径 $d = 0.020, 0.015, 0.010$ および 0.005mm の場合について、 $z = 5\text{mm}$ における xy 断面の温度分布を Fig.6(a)~(d) に示す。液滴直径によらず、同じ初期当量比 $\phi = 1.0$ での燃焼モードは同一でモードIIIとなった。

さらに、Chiuらの提唱する群燃焼数 $G = 10.0$ に固定し、燃料液滴直径 $d = 0.020, 0.015, 0.010$ および 0.005mm の場合について、 $z = 5\text{mm}$ における xy 断面の温度分布を Fig.7(a)~(d) に示す。この場合には、同一の群燃焼数であるにもかかわらず、燃料液滴の直径が小さくなるにつれて、モードVIからIIへとより低位のモードに変化した。

また、燃料液滴直径 $d = 0.080\text{mm}$ の場合について、 $z = 5\text{mm}$ における xy 断面の温度分布を Fig.8(a)~(c) に示す。この場合には平均数密度が大きくなるに従い、モードI、II およびVIへと変化した。

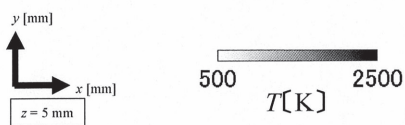
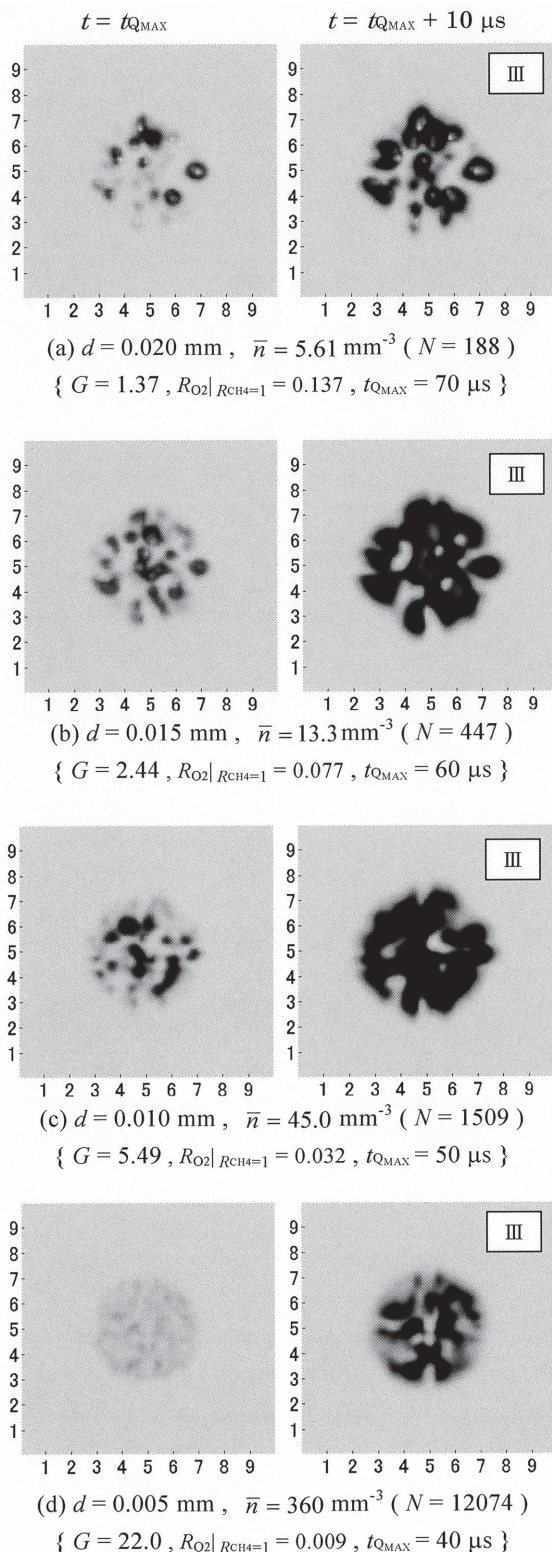


Fig.6 Effect of droplet size on temperature profile ($\phi = 1.0$)

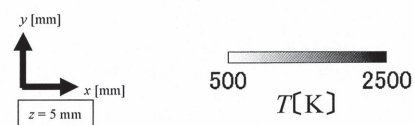
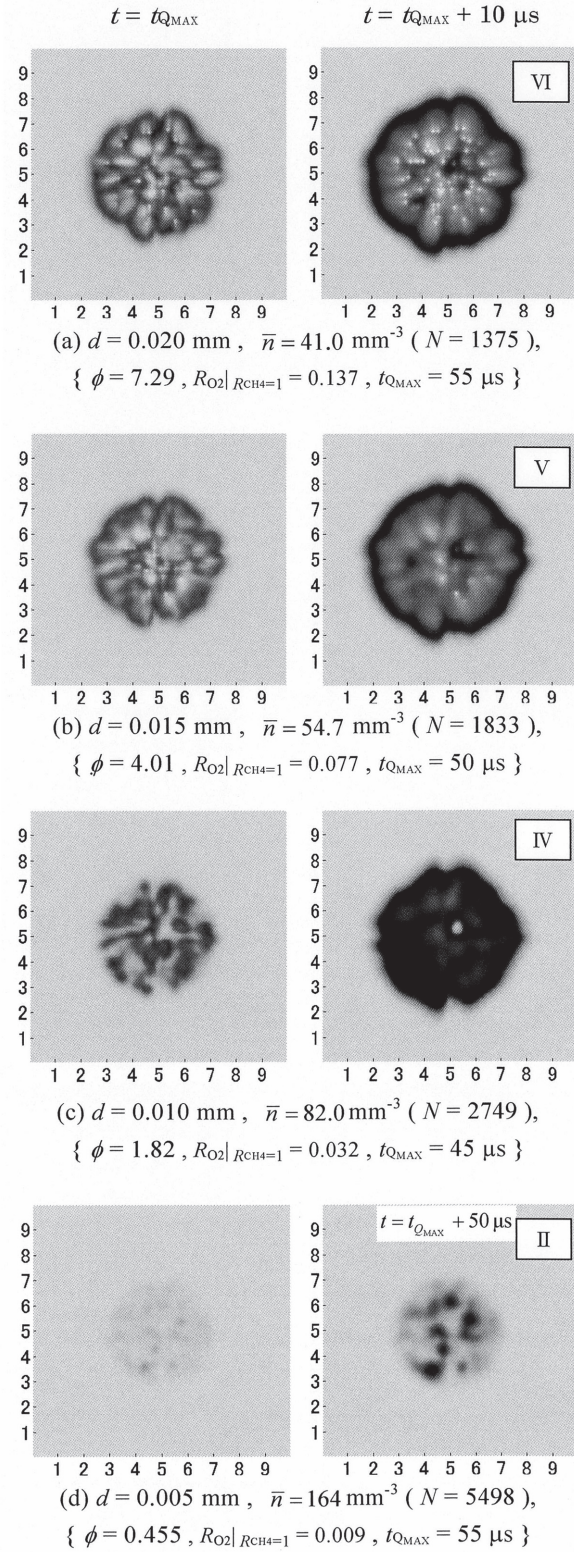


Fig.7 Effect of droplet size on temperature profile ($G = 10.0$)

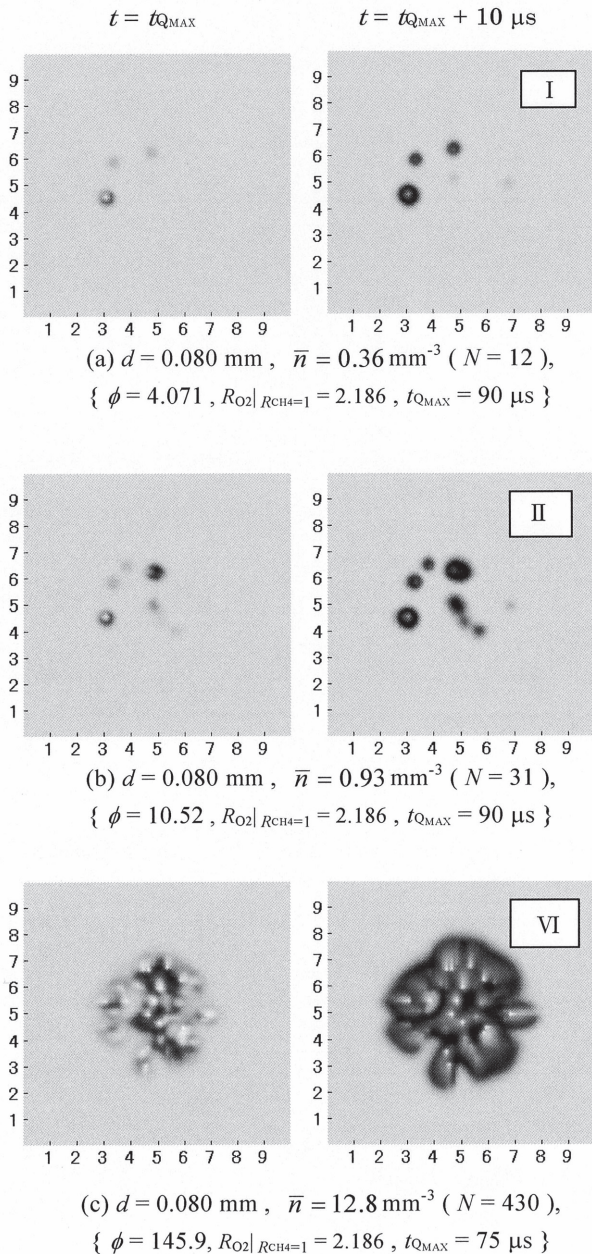


Fig.8 Effect of droplet size on temperature profile

3.3. 燃焼モードの整理

3.1 節および 3.2 節の結果を踏まえて、横軸に燃料液滴直径 d 、縦軸に平均数密度 \bar{n} をとって燃焼モードの移り変わりを Fig.9 のように整理した。本研究で得られた燃焼モード I ~ VI、および対応する Chiu らの燃焼モード A (単滴燃焼: $G < 10^2$)、C (外部群燃焼: $10^0 < G < 10^2$) および D (外殻燃焼: $10^2 < G$) を図中右上の記号で示した。また、図中に G と ϕ が一定値となる直線も示した。

この図より、燃料液滴直径が小さいときにはモードの境

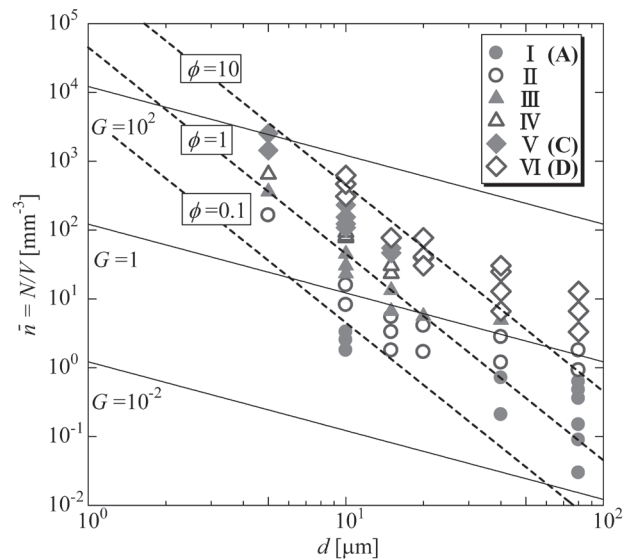


Fig.9 Spray combustion diagram (Random arrangement of droplets)

目がなす傾きは Chiu らの群燃焼数 G が一定の直線の傾きとはかなり異なることがわかる。この群燃焼数という概念には初期酸素量の効果が含まれておらず、Chiu らの分類では初期酸素量の影響が考慮されていない。このため燃焼形態のモードの傾向が異なったものと思われる。このことを明確にするために、初期時間から存在している酸素の影響を考慮するパラメータについて検討する。

本研究では、この初期時間から存在している酸素量の影響を評価するために、燃焼過程の進行とともに液滴群内部へ周囲空気から拡散してくる酸素量との比を考えた。しかしながら、前者は「絶対量」であるのに対し、後者は「速度」で表されている。このため、液滴燃焼の開始時刻からの経過時間を導入する必要がある。そこで、次式で表される任意の経過時間 Δt における液滴群内部への酸素の総拡散質量 $\dot{G}_D \Delta t$ と初期時間に存在する酸素の総質量 $G_{O_2,0}$ の比 R_{O_2} を考えた。

$$R_{O_2} \equiv \frac{\dot{G}_D \Delta t}{G_{O_2,0}}$$

上式における任意の経過時間 Δt を特定するために、任意の経過時間 Δt までに蒸発する総燃料量 $\dot{G}_D \Delta t$ と液滴配置領域内に初期に配置した燃料液滴量 $G_{CH_4,0}$ の比

$$R_{CH_4} = \frac{\dot{G}_D \Delta t}{G_{CH_4,0}}$$

を考え、この比が 1 となる経過時間、すなわち、初期に配置した燃料がすべて蒸発し終わる時間を代表経過時間 $\Delta t|_{R_{CH_4}=1}$ と定義した。

$$\Delta t|_{R_{CH_4}=1} = \frac{G_{CH_4,0}}{\dot{G}_D}$$

これにより、すべての燃料液滴が蒸発した時間における $R_{O_2}|_{R_{CH_4}=1}$ は初期当量比 ϕ 、群燃焼数 G を用いて以下のように表すことができる。

$$R_{O_2}|_{R_{CH_4}=1} \equiv \frac{\dot{G}_D \Delta t|_{R_{CH_4}=1}}{G_{O_2,0}} = \frac{G_{CH_4,0} \dot{G}_D}{G_{O_2,0} \dot{G}_V} = \frac{j \frac{G_{CH_4,0}}{G_{O_2,0}} \frac{3}{4}}{j \frac{3 \dot{G}_V}{4 \dot{G}_D}}$$

$$= \frac{3}{4} \frac{\phi}{jG} \propto d^2$$

初期当量比 ϕ および群燃焼数 G は次式で表される。

$$\phi \equiv \frac{G_{CH_4,0}}{G_{O_2,0}} j \propto d^3 \bar{n}, \quad G \equiv \frac{3 \dot{G}_V}{4 \dot{G}_D} \propto d \bar{n}$$

このため $R_{O_2}|_{R_{CH_4}=1}$ は d^2 に比例する。したがって、 $R_{O_2}|_{R_{CH_4}=1}$ は燃料液滴直径 d が小さいときには小さくなり、燃料液滴直径 d が大きいときには大きくなる。つまり燃料液滴の大きさが小さいときには周囲から流入してくる酸素の割合が小さく、初期に燃料液滴配置範囲内に存在する酸素が燃焼形態に与える影響が大きい。一方、燃料液滴直径が大きくなると、周囲から流入してくる酸素の割合が大きくなり、初期に燃料液滴配置範囲内に存在する酸素が燃焼形態に与える影響は小さくなる。そのため、燃料液滴直径が大きくなるにしたがってモードが移り変わる傾きは G のそれに近づき、群燃焼数で整理できるようになる。

また、今回の結果と Chiu らの提唱する群燃焼数 G の範囲と比較すると、縦軸方向に縮まった形となったが、これは燃料の種類、燃料の初期温度、雰囲気の状態（初期温度、酸素の割合）などによって変化するものと考えられる。

3.4. 燃料液滴を規則的に配置した場合との比較

本研究では、乱数を用いて燃料液滴をランダムに空間中に配置することにより噴霧燃焼における不均一性をモデル化した。この不均一性の影響を確認するために、本節では燃料液滴を規則的に一定間隔で配置した場合と比較する。

燃料液滴を規則的に配置した場合について、燃料液滴間距離 $L = 0.5, 0.4, 0.3, 0.2$ および 0.1 mm における各時刻の温度分布の時間変化を Fig.10(a)~(e) に示す。なお、燃料液滴直径 $d = 0.010$ mm とし、各 CELL には燃料液滴を 1 個ずつ配置している。規則的に燃料液滴を配置したことにより、燃焼が均一に起こることが確認できる。Fig.10(a) から分かるように、 $L = 0.5$ mm の場合には温度はほとんど上昇せず、最高熱発生速度も他のより大きな燃料液滴間距離の場合と比較すると、1/50 くらいまでしか上がっていなかった。燃料液滴間距離が一定であるので、ランダムに配置した場合に見られた一部の燃料液滴が連結して着火・燃焼するという現象は起こらない。したがって、モード II~III は存在せず、モード IV の代わりに液滴群内部着火・外周部燃焼（モード IV'）という燃焼形態が現れる。また、Fig.9 の噴霧燃焼ダイヤグラム上に、規則的に配置した場合の結果を重ねて示

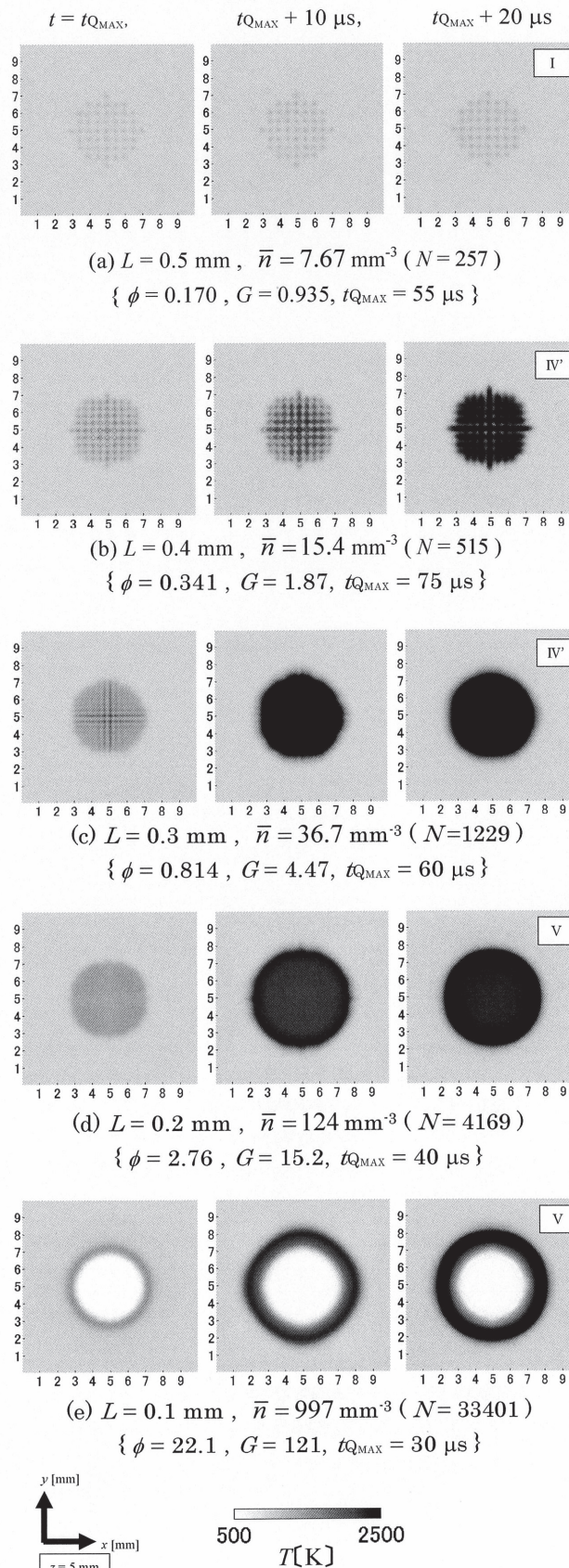


Fig.10 Temperature profile (Regular arrangement of droplets, $d = 0.010$ mm)

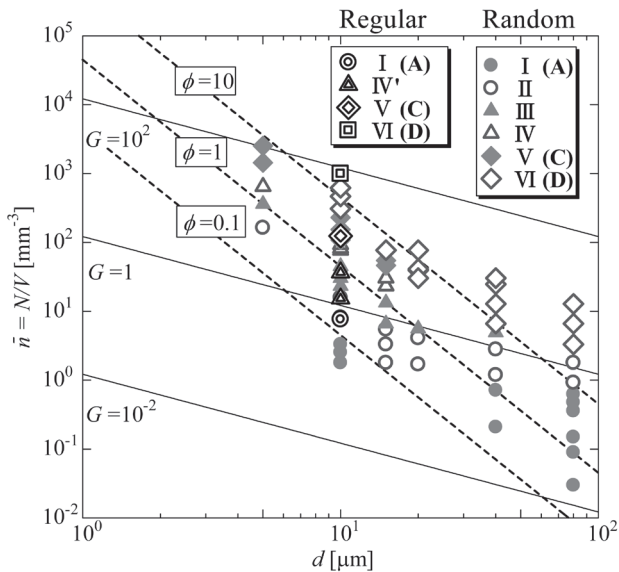


Fig.11 Spray combustion diagram (Regular and random arrangements of droplets)

すと Fig.11 のようになる。図からも分かるように、ランダムに配置したときにはモードIIおよびIIIとなる平均数密度において、規則的に配置した結果はモードIV'になっている。

以上より、噴霧燃焼における燃料の集まり具合の不均一さは、噴霧燃焼の燃焼形態を変化させる大きな要因となっていると言える。

4. 結言

Chiu らが提唱した群燃焼の形態を数値解析により検討し、噴霧燃焼のメカニズムを解明するために三次元空間内にランダムに燃料液滴を配置し、着火・燃焼過程を数値解析することによって以下の知見を得た。

- (1) PSI-CELL モデルにより、非常に多数の燃料液滴からなる群燃焼の詳細な燃焼過程を模擬することができ、既報の燃焼過程に蒸発現象が加わり、Chiu らの提唱する群燃焼数 G との比較が可能になった。
- (2) 既報の5つの燃焼モードに加えて、新たに外殻燃焼が存在することを示し、6つの燃焼モードに分類することができた。
- (3) 燃料液滴直径が小さいときには燃料液滴群内部に初期に存在する酸素量の影響が大きく、燃焼モードは初期当量比 ϕ によって分類できる。また、燃料液滴直径が大きくなると、初期に存在する酸素量の影響が小さくなり、群燃焼数 G によって分類できることを明らかにした。
- (4) 噴霧燃焼における燃料の集まり具合の不均一さは、噴霧燃焼の燃焼形態を変化させる大きな要因となる。

References

1. Arai, M., in: Honda, N. (Ed.), *New Combustion Engineering in Global Environment* (Ed.), Fuji-Techno System, 29-47, (1999).
2. Mikami, M., Kono, M., Sato, J. and Dietrich, D. L., *27th Symposium (International) on Combustion*, 2643-2649, (1998).
3. Hara, H. and Kumagai, S., *23th Symposium (International) on Combustion*, 295-309, (1990).
4. Umemura, A., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series B*, Vol.73, 68-672, 254-267 (2002).
5. Aggarwal, S.K. and Sirignano, W.A., *20th Symposium (International) on Combustion*, 1773-1780, (1984).
6. Dwyer, H.A., Stapf, P. and Maly, R., *Combustion and Flame*, Vol.121, 181-194, (2000).
7. Chiu, H.H. and Liu, T.M., *Combust. Sci. Tech.*, 17, 127-142, (1977).
8. Chiu, H.H., Kim, H.Y. and Croke, E.J., *Proc. of the Combustion Institute*, Vol.19, 971-980, (1982).
9. Suzuki, T., and Chiu, H. H., *Proceeding of The Ninth International Symposium on Space Technology and Science*, 145-154 (1971).
10. Baba, Y., Akamatsu, F., *Web Journal of Japan Society of Computational Fluid Dynamics*, (in Japanese), 11-4 (2003).
11. Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R., Katsuki, M., *Phys. Fluids*. 17(2005), 123301.
12. Reveillon, J., Vervisch, L., *J. Fluid Mech.* 537(2005), 317-347.
13. Domingo, P., Vervisch, L., Reveillon, J., *Combustion and Flame*. 140(2005), 172-195.
14. Watanabe, H., Kurose, R., Hwang, H.-S., Akamatsu, F., *Combustion and Flame*. 148(2007), 234-248.
15. Momiyama, Y., Yamashita, H. and Yamamoto, K., *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.49, No.150, 258-266, (2007).
16. Crowe, C.T., Sharma, M.P., Stock, D.E., *Trans. ASME, J. of Fluids Eng.*, 99, 325, (1977).
17. Baba, Y., Kurose, R., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series B*, Vol.73, 74-737, 204-211, (2008).
18. Kimura, I., Sakai, T., *Nainenkikan*, Maruzen, 203-211, (1980).
19. *JANAF thermochemical tables*, Third Edition, (1985).
20. Kee, R.J., et al., *CHEMKIN- II : A FORTRAN Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas -Phase Chemical Kinetics-*, SAND89-8009, (1989).
21. Smooke, M.D., *Reduced Kinetic Mechanism and Asymptotic Approximation for Methane-air Flames*, Springer-Verlag,

(1991).

22. Katto, Y., *Dennetsugairon*, Youkendou, (1964).
23. The Japan Society of Mechanical Engineers, *Dennetsu Kougaku Siryou Ver.4*, The Japan Society of Mechanical Engineers, (1986).
24. Kanury, M. A., *Introduction to Combustion Phenomena*, Gordon And Breach Science Publishers, 142-194, (1975)
25. Coffee, et al., *Combustion and Flame*, Vol.58, 59-67, (1984).
26. Patanker, S.V., *Numerical Heat Transfer And Fluid Flow*, McGraw-Hill, (1980).