

■原著論文／ORIGINAL PAPER■

メタン - 空気混合気の三次元不均一濃度・温度場での燃焼過程の数値解析

Numerical Study on Combustion Process in Three-Dimensional Inhomogeneous Concentration and Temperature Fields of Methane-Air Mixture

楳山 由貴・山下 博史*・山本 和弘

MOMIYAMA, Yoshitaka, 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

2007年2月17日受付; 2007年8月20日受理 / Received 17 February, 2007; Accepted 20 August, 2007

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 and inhomogeneous physicochemical phenomenon composed of preheating, evaporation, mixing, ignition, combustion and quenching, etc. Chiu et al. 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. In this paper, we examined to improve Chiu's group combustion mode using the numerical analysis on gas phase combustion process in three-dimensional inhomogeneous concentration and temperature fields of methane-air mixture. We arranged many fuel points using random variables instead of fuel droplets, and changed the initial equivalence ratio and fuel point diameter. We obtained the following results; 1) The group combustion is classified into five modes in terms of the initial equivalence ratio and fuel point diameter. 2) The ignition occurs in each fuel point when the mixture gas is lean, while the ignition occurs in the area with fuel point closely spaced when the mixture gas is rich. 3) "The initial equivalence ratio / fuel point diameter" is the appropriate parameter of the group combustion of gas phase.

Key Words : Methane-Air Mixture, Spray Combustion, Group Combustion, Ignition, Numerical Analysis

1. 緒論

液体燃料は液相のまま燃焼することではなく、必ず蒸発現象を経て気体となり、その後周囲の酸素等の酸化剤と混合してから燃焼反応を起こす。この際、燃料を高圧の噴射弁などにより微粒化し、噴霧状態にして気化を促進するという方法がよく用いられている。この噴霧燃焼はディーゼルエンジンやガスタービンなど現在の様々な実用燃焼器で使われている燃焼方法である。しかし、噴霧燃焼では個々の微粒子について予熱、蒸発、混合、着火、燃焼、消炎という多くの物理・化学的素過程が平行して進行するため、空間的に不均一、かつ時間的に非定常な過程となっている。液滴同士の干渉を検討するために、数個の液滴を対象にした研究は行われるようになったが[1-5]、噴霧燃焼の複雑さのために、極めて多数の微粒子を含む噴霧を対象とした数値解析はほとんど行われていなかったが、最近、Croweら[6]のPSI-CELLモデルを用いて、液滴の予熱・蒸発の効果

を気相の質量、運動量およびエネルギーの保存方程式の各検査体積における生成項として扱い、液滴がどの検査体積に存在するかを多数の液滴の運動をラグランジュ的に追跡する数値解析が行われるようになった[7-11]。

噴霧燃焼の現象論的な分類に関しては、Chiuらにより液滴群燃焼理論[12,13]が提唱されている。それによると噴霧燃焼は各々の液滴が単独で燃焼するだけではなく、複数の液滴が同時に燃焼する群燃焼が燃焼過程を支配し、その液滴群燃焼の形態は次の4つのモードに分類できるとされている。すなわち、単滴燃焼、内部群燃焼、外部群燃焼および外殻燃焼である。

前述の数値解析研究[7-11]においても、液滴群燃焼の詳細な議論がなされているが、Chiuらが提唱した群燃焼のモードとは異なる新たなモードの可能性については言及されていない。また、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も必ずしも十分とはいえない。そこで、本研究では、第1段階として、非常に多数の燃料点を配置しても計算負荷が極めて小さく考えられる「全ての液滴が蒸発した後の過程」を模擬することと

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

し, すべての液滴が蒸発した後, 周囲空気と混合することによって形成される不均一な濃度・温度場での非定常な燃焼過程について数値解析を行い, 燃焼形態を決定するパラメータの影響について系統的に検討する. すなわち, 噴霧燃焼のすべての素過程をすべて考慮して数値解析することは過大な計算負荷となるので, 予熱と蒸発を除いた, 混合, 着火および燃焼という素過程のみに注目して検討する.

不均一な濃度・温度場を模擬するために, 気体の「燃料点」を乱数によって空間にランダムに配置した. すでに, 著者らは二次元場については数値解析を行い, いくつかの知見を得ているが[14], 本報ではこれをより現実的な三次元場に拡張して検討を行った. 特に, 初期に配置する燃料点の個数とその大きさ, および周囲空気の温度を変化させ, これらのパラメータが燃焼形態に与える影響について検討した. また, 燃料点を規則正しく配置した場合と比較し, 燃焼過程の違いについても検討した. これらの結果より, Chiu らの群燃焼形態との関係について比較検討した. さらに, 燃焼場は統計的には球対称的なものとなるので, その対称性を考慮した平均化操作を行い, 本研究で得られた各モードにおける燃焼場の特性を説明することを試みた.

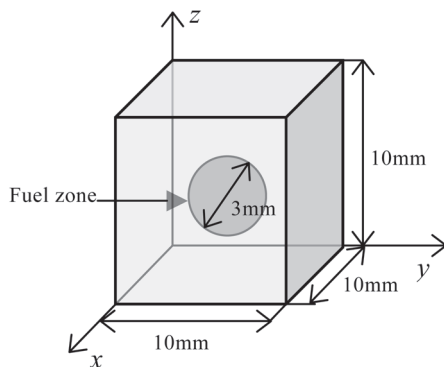


Fig.1 Analytical model

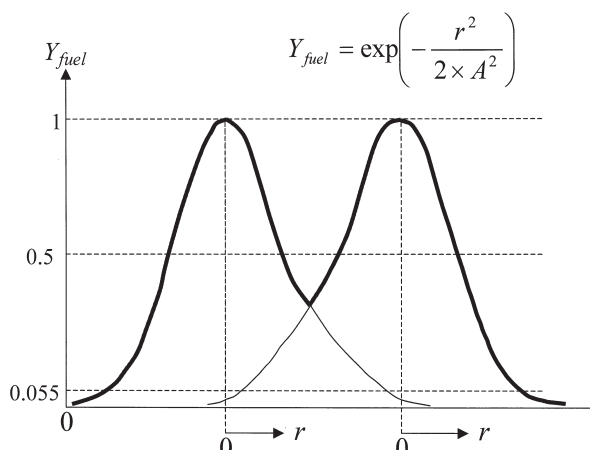


Fig.2 Initial fuel concentration profile near fuel point

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

本研究で用いた気相のみによる群燃焼に対する解析モデルの概略を Fig.1 に示す. 座標系は三次元デカルト座標系 (x, y, z) とした. 計算領域は, x, y, z 方向についてすべて $0 \sim 10 \text{ mm}$ の立方体とする. 初期条件は, 計算領域全体で静止状態, 初期圧力 1 atm とし, 領域中央の直径 3 mm の球内に燃料点が多数集まって燃料点塊を形成しているとする. この燃料点塊の体積を V , その内部に配置された燃料点の個数を N とする. 燃料としては, 本研究の第 1 段階として著者らが従来から取り扱っているメタンを考えるが, 炭化水素系液体燃料の蒸気とメタンではルイス数が大きく異なるため, 今後の課題である. 計算領域の立方体のすべての側面ではすべての物理量について自由流出条件とする.

この燃料点は一様乱数を用いて燃料点塊内の格子点を選択し, その格子点を基準にしてすべての格子点に対して, 燃料の質量分率を Fig.2 のような分布で与える. この図は 2 個の燃料点が隣接する例であり, r は基準となる格子点からの距離である. また, A は燃料の大きさを決めるためのパラメータであり, 燃料濃度が半値になる r の値にほぼ等しいので, この A の値を燃料点の大きさを表す「燃料点半径」と呼ぶことにする. なお, 燃料であるメタン濃度が量論値 $Y_{\text{fuel}} = 0.055$ となる位置に火炎が形成されると考えると, 火炎直径はほぼ $4.8A$ となる. すなわち, 次式のように表される.

$$r|_{Y_{\text{fuel}}=0.5} = 1.17A, \quad r|_{Y_{\text{fuel}}=0.055} = 2.4A$$

この燃料配置操作を任意の回数 (N 回) 繰り返すことにより, 多数の燃料点を燃料点塊内に配置する. この際, 一つの格子点に対して, 複数の燃料点からの燃料質量分率が与えられるが, Fig.2 に示すように, 最も大きいものを採用することとする. 燃料以外の質量分率は空気の組成割合で酸素と窒素の質量分率を与える. また, 燃料点塊外側の周囲部分はすべて空気であるとする. このようにして初期状態で与えた燃料点の数に対応して, 直径 3 mm の気体燃料点塊全体における平均的な当量比が決まるが, これを初期当量比 ϕ と呼ぶことにする.

なお, 燃料が非常に希薄な ϕ が 0.55 以下の場合には, 燃料点塊内部の燃料点間 (一部連結した燃料点間) の距離が大きくなり, 燃料点同士の相互作用が無視できる. すなわち, 個々の燃料点は多量の酸化剤に囲まれて独立に燃焼することになるので, 燃料点塊としてのまとまった群燃焼挙動は存在しない. したがって, 全計算領域に燃料点を配置しても同様な傾向を示すものと考えられる. そこで, 配置する燃料点数が著しく減ってしまうことを防ぐために, 燃料点塊内部にだけ燃料点を配置するのではなく, 全計算領域に燃料点を配置することとする.

初期温度は純燃料点 ($Y_{\text{fuel}} = 1$) においては T_{fuel} , 純空気点 ($Y_{\text{fuel}} = 0$) においては T_{air} として, その他の点では燃料質量分率と空気質量分率の比にしたがって, 線形的に与えることにした. 例えば, 燃料質量分率 0.5 の点では温度 $T = (T_{\text{fuel}} + T_{\text{air}}) / 2$ となる.

初期時刻以降, 燃焼条件が整った位置より自発着火し, その後, 火炎は燃料点塊の内外部に伝播し, 燃焼反応が進行する.

2.2. 物性値

各化学種の定圧比熱を温度のみの関数と仮定し, JANAF table[15]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る. また, 各化学種のエンタルピも定圧比熱から算出される.

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

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

輸送係数に対しては, Smooke らの Simplified Transport Model[16]を適用する. すなわち, 混合気体の有効熱伝導率 λ に対しては次の近似式を用いる.

$$\frac{\lambda}{c_p} = A \left(\frac{T}{T_0} \right)^r, \quad A = 2.58 \times 10^{-4} \text{ g / (cm} \cdot \text{s)} \quad , \quad r = 0.7$$

各化学種の有効拡散係数 D_i に対しては, ルイス数が各化学種で一定として次式で近似する.

$$\rho D_i = \frac{1}{Le_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \right) = \left(\frac{2.58 \times 10^{-4}}{Le_i} \right) \left(\frac{T}{298} \right)^{0.7}$$

混合気体の有効粘度に対しては, 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.

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

2.3. 支配方程式

本解析で使った支配方程式を以下に示す.
連続方程式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

運動方程式:

$$\frac{\partial (\rho u_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} u_m) - \nabla \cdot (\mu \nabla u_m)$$

$$= - \frac{\partial P}{\partial x_m} + \left(- \frac{\partial \mu}{\partial x_m} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_m} \right)$$

エネルギー方程式:

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) - \frac{1}{c_p} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = - \frac{1}{c_p} \sum_i h_i w_i$$

各化学種の連続方程式:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) - \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) = w_i \quad i = 1, \dots, N$$

状態方程式:

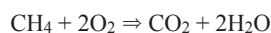
$$p = \rho R^0 T \sum_i \frac{Y_i}{m_i}$$

本研究では, 物性値に関するもの以外では, 次のような仮定を適用した.

- (1) 混合気は理想気体とする.
- (2) Soret 効果および Dufour 効果, また圧力拡散の効果は無視する.
- (3) 重力, その他の外力は考慮しない.
- (4) エネルギー方程式において, 粘性散逸および Dp/Dt を無視する.

2.4. 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 Coffee ら[17]のメタン・空気系の総括一段不可逆反応を用いた.



この反応の反応速度式はアレニウス式によって表される.

$$k = AT^n \exp\left(-\frac{E}{R^0 T}\right)$$

ここで, A は頻度因子, E は活性化エネルギー, n は温度次数であり, R^0 は一般気体定数である.

2.5. 数値解析の手法

保存方程式の離散化には有限体積法を用い, 対流項には一次風上法を, 時間展開には陰解法を用いた. 圧力と速度の連成には Patanker の SIMPLE 法[18]を用いた. 時間刻みは, $\Delta t = 1.0 \times 10^{-6} \text{ s}$ とした. 各時間ステップにおいて, SOR 法による繰返し計算を行った.

計算格子は x, y, z 方向についてすべて 100 分割の等間隔とし, 格子間隔は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1 \text{ mm}$ とした.

2.6. 計算条件

本研究では, 燃料点の個数とその大きさを変化させたが, パラメータとしては初期当量比 ϕ と燃料点半径 A をとった. 初期当量比 ϕ は 0.046 ~ 14.2 の範囲で変化させた. 純粋燃料点での温度 T_{fuel} は 350 K とし, 周囲の雰囲気温度すなわち純粋の空気温度 T_{air} は 1000 K とした. このように, 燃料点の温度のほうを雰囲気温度よりもかなり低く設定し

た. なお, 比較のために, 雰囲気温度 T_{air} が 1200 K の場合, および燃焼点を規則的に配置した場合についても計算した.

3. 計算結果および考察

3.1. 初期当量比が燃焼形態に与える影響

3.1.1. 燃焼形態の分類

燃料点半径を $A = 0.1$ mm と固定し, 初期当量比 $\phi = 0.046$ ~ 8.30 における, $z = 5$ mm の xy 断面上における温度分布の時間変化を Fig.3(a)~(e) に示した. 時刻は (e) 以外は左から順に, 50 μ s, 100 μ s, 150 μ s であり, (e) のみ 100 μ s, 150 μ s, 200 μ s である. なお, Fig.3(a) と (b) では全計算領域に燃料点を配置している. ϕ が小さい場合は, 個々の燃料点が単独に着火し燃焼するが, ϕ が増加するにしたがい, 燃料点が連結した火炎となる. また, Fig.3(c) に示す ϕ が量論比 1 付近では, 着火後燃料点塊全体が火炎に包まれ, 予混合燃焼のような形態となる. さらに ϕ が増加すると, 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る. そして最終的には燃料点塊内にほとんど酸素が存在しなくなり, 外周部のみで燃焼する. このように, 燃焼形態は下記の 5 つのモードに分類でき, 初期当量比が大きくなると, 大きい番号のモードに移り変わる.

- I : 燃料点が個々に着火, 燃焼
- II : 燃料点が個々, または一部で連結して着火し, 連結火炎を形成
- III : 燃料点の密集度の低い部分にて着火, 内部で火炎伝播し, 燃料点塊全体で反応が進行
- IV : 燃料点の密集度の低い部分にて着火, 内部にはほとんど火炎伝播せず, 外周部より反応が進行
- V : 外周部のみで着火, 燃焼

モード I は Chiu の「単滴燃焼」と同じであり, V は「外部群燃焼」と同じである. 本研究では Chiu の「内部群燃焼」に対応するモードは現れなかった. このモードでは, 燃料点塊の内部にある程度の大きさの過濃状態領域が形成され, その外周に火炎が形成され, さらにその外側に「単滴燃焼」が形成されるという複雑な構造を有しており, このようなモードが実現するためには, 燃料点塊自体がかなり大きくなければならないと思われる. 大きな燃料点塊の場合には, 確率的に燃料点塊の内部で燃料点の密集した部分が存在し, そのような領域ではいくつかの燃料点同士が連結して過濃状態となることができると考えられる. 例えば, モード II では, 燃料点塊の一部で連結して着火し, 連結火炎を形成する (ただし, この場合には, 連結火炎の外側が「単滴燃焼」にはなっていない). Chiu の「外殻燃焼」は V で中央部の温度がほとんど上昇していない場合に相当すると考えられる. このように, Chiu の「単滴燃焼」と「外部群燃焼」のモードの間には, 実際には本研究で示された II ~ IV のようなモードが存在すると考えられる.

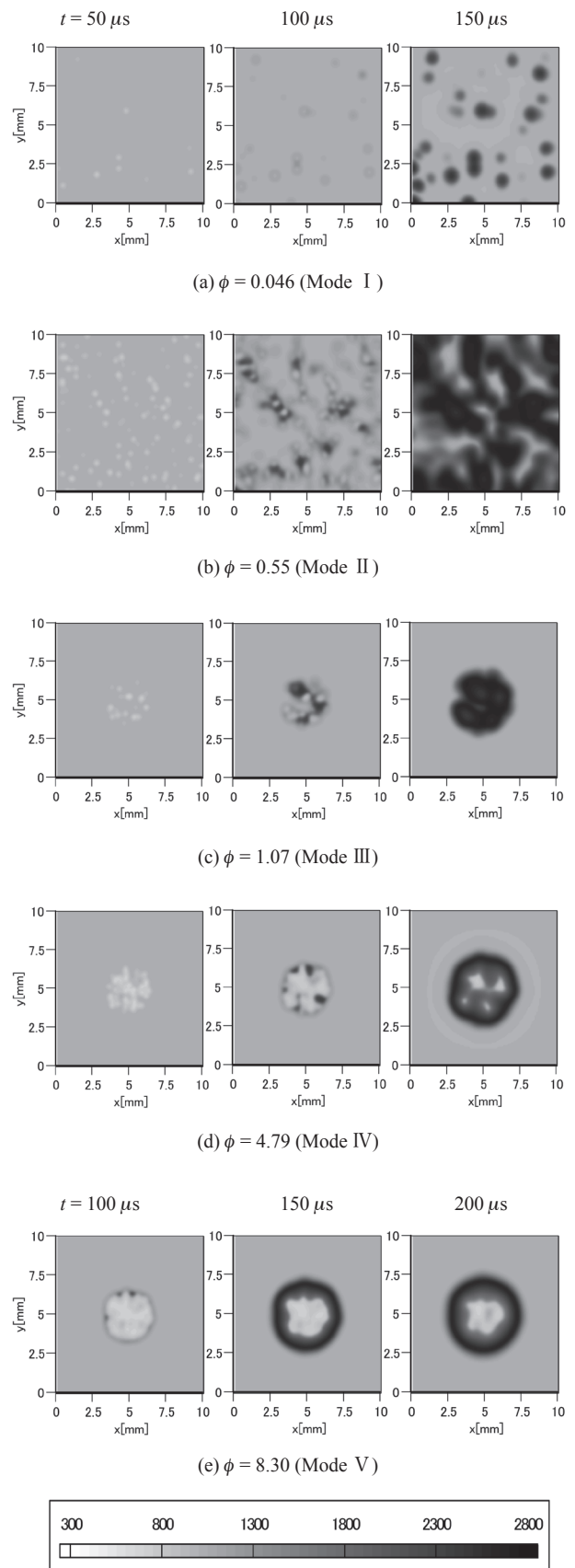


Fig.3 Time history of temperature
($A = 0.1$ mm, $T_{air} = 1000$ K)

Table 1 Relation between ϕ and L
($A = 0.1$ mm, $T_{air} = 1000$ K)

ϕ	0.046	0.55	1.07	4.79	8.30
L [mm]	1.882	0.794	0.625	0.371	0.297

3.1.2. 燃料点間距離と燃焼形態の関係

燃焼形態の判断はこれまでは視覚的に行ったが、ここでは、燃料点同士の干渉に注目して検討する。そのために、燃焼点同士がどれくらい離れているかを示す指標である燃料点間距離 L を、前述の燃料点塊の体積 V とその内部に配置された燃料点の個数 N を用いて次式で定義する。

$$L = \left(\frac{V}{N} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Table 1 に Fig.3 における各々の初期当量比と上式で求めた燃料点間距離を示す。

Table 1 より $\phi = 0.046$ の場合、燃料点間距離は 1.882 mm である。2.1 節で述べたように、 $A = 0.1$ mm の場合、単独の燃料点の火炎直径は 0.5 mm 程度であることを考えると、この燃料点間距離は十分に大きく、隣り同士の単独火炎が連結する確率は低いと考えられる。 $\phi = 0.55$ の場合には燃料点間距離は 0.794 mm であり、この場合には着火や燃焼終了までに、燃料点が連結し、様々な場所にて連結火炎が形成されると考えられる。 $\phi = 1.07$ の場合には燃料点間距離は火炎直径とほぼ同じであり、初期時刻に燃料点の少なかった領域より着火し、燃料点塊全体に伝播すると考えられる。 $\phi = 4.79$ の場合には、燃料点間距離は火炎直径よりも小さく、燃料点密度の低い領域でのみ着火するが、燃料点塊全体に伝播することではなく、燃料点塊の外周部を中心に反応が進行する。 $\phi = 8.30$ の場合には燃料点間距離は火炎直径よりかなり小さく、燃料点塊内部には酸素がほとんど存在しないため、燃料点塊全体が大きな燃料点であるかのように外周部より反応が進行する。

群燃焼場における流れの挙動の例として、Fig.3(b) および (c) の $t = 100 \mu\text{s}$ の場合について、この断面内の速度ベクトルを Fig.4(a) および (b) に示す。モード II の場合には群燃焼場の複雑な流れ場が示されている。また、モード III の場合には燃料点塊全体として外側に膨張する流れ場が示されている。これらの燃焼による膨張によって生じる流れは、速度の大きさが 10 m/s 程度であり、着火の瞬間の非常に短い時間範囲 $20 \mu\text{s}$ 程度でのみ現れる。これによる燃料点等の移動はほとんどない。

3.1.3. 燃焼場の球対称性に基づく統計処理による平均温度

燃焼場の球対称性を考慮し、任意の物理量について統計処理を行う。すなわち、任意の物理量 $X(x_i, y_i, z_i)$ の燃料点塊中心点からの距離 $r \sim r + dr$ における平均量 X_r を次式で定義する。

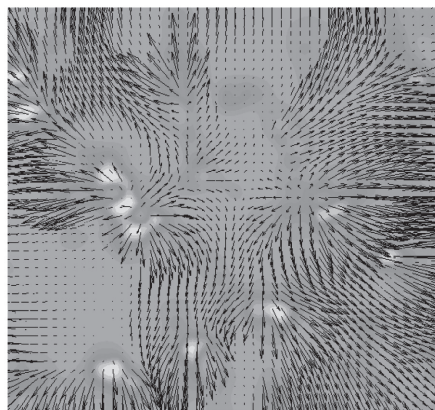


Fig.4(a) Velocity vector distribution
(Fig.3(b): $\phi = 0.55$ (Mode II); $t = 100 \mu\text{s}$)

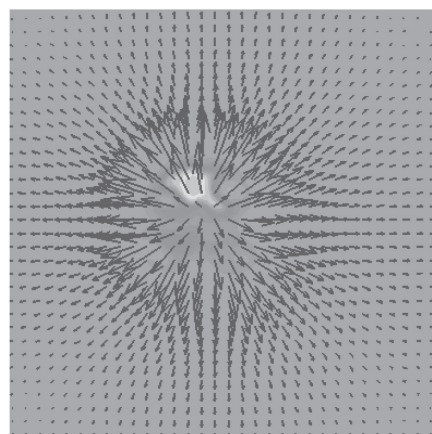
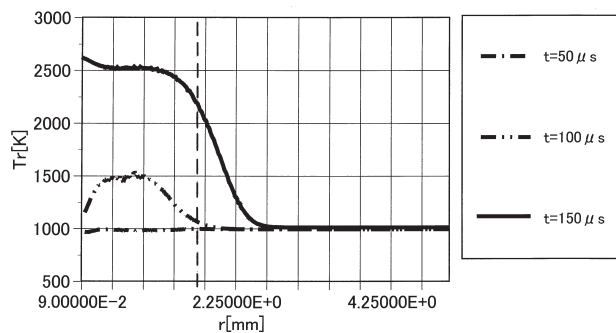
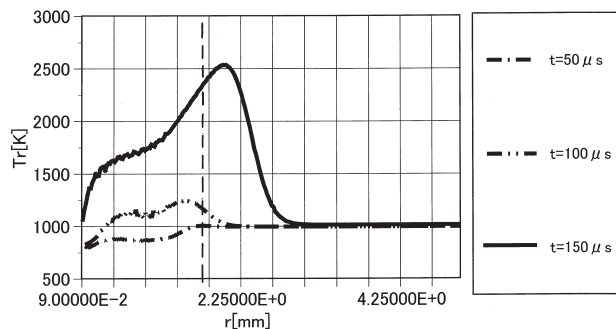


Fig.4(b) Velocity vector distribution
(Fig.3(c): $\phi = 1.07$ (Mode III); $t = 100 \mu\text{s}$)



(a) $\phi = 1.07$ (Mode III)



(b) $\phi = 4.79$ (Mode IV)

Fig.5 Distribution of T_r in radial direction

$$X_r = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} X(x_i, y_i, z_i)}{N_r}$$

ここで, N_r は $r \sim r + dr$ に存在する格子点 (x_i, y_i, z_i) の個数である. Fig.5(a) と Fig.5(b) にモード III と IV の場合における T_r の時間変化を示す. なお, 破線は燃料点塊外周位置 ($r = 1.5 \text{ mm}$) を示している.

これらの図を比較すると, $t = 100 \mu\text{s}$ 付近で双方とも着火し, 燃料の存在する範囲で温度の立ち上がりが見られる. しかし, $t = 150 \mu\text{s}$ のとき, モード III では燃料点塊全体で反応が進行して温度が上昇しているのに対し, モード IV では内部では酸素の不足から反応が進行せず, 燃料点塊の外周部にて反応が進行しているのが分かる. さらに, モード V の場合には, Fig.3(e) から分かるように, 内部に酸素がほとんど存在せず, 着火も燃料点塊外周部で起こり, 燃料点塊全体が大きな燃料点であるかのように外周部より反応が進行する.

Fig.6 に Fig.3 の各々の場合における燃料点塊中の全格子点での平均温度の時間変化を示す. 初期当量比 $\phi = 0.55 \sim 1.07$ となる燃料希薄側から量論状態を少し超えた付近まで, 温度の立ち上がり速度も最高温度も上昇する. 初期当量比が量論状態を超えてさらに大きくなると, 温度の立ち上がり速度も最高温度も低下する. また, 温度の上昇が飽和しておらず, 反応にかかる時間が長くなっている. このように, 初期当量比がやや過濃側でもっとも良好な燃焼状態となるが, これは燃料点塊の外側の周囲部分はすべて空気であるためと考えられる.

Fig.6 では燃料点塊中の全格子点に対しての平均温度を用いたので, Fig.5 に示されているように, 内部の未だ燃焼していない部分の温度の影響が含まれている. そこで, 火炎温度の時間変化を調べるために, 各時刻における T_r の半径方向最大値の時間変化を Fig.7 に示す. この図より, どの初期当量比の場合にも, 火炎温度はほぼ同じであることが分かる.

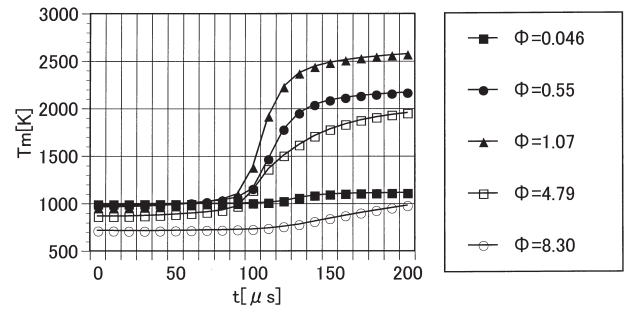
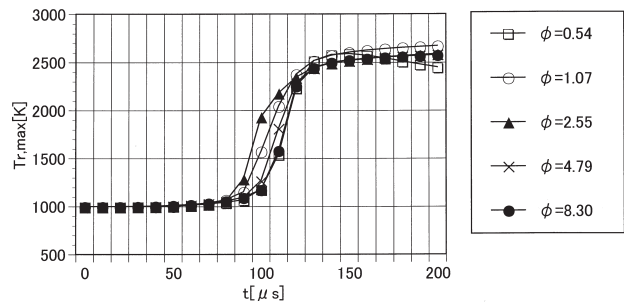
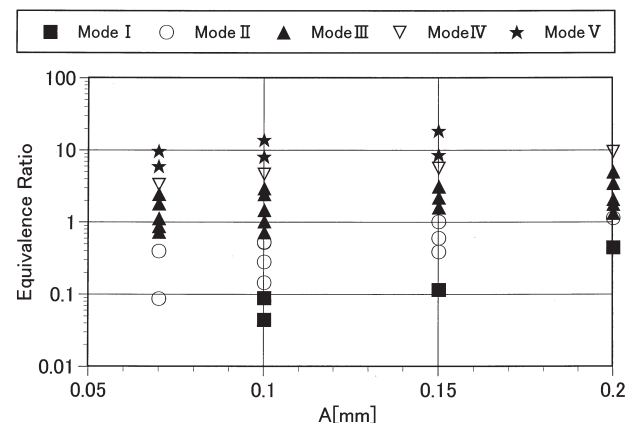


Fig.6 Time history of mean temperature


 Fig.7 Time history of $T_{r,max}$

 Fig.8 Classification of combustion mode (by ϕ)
($T_{air} = 1000 \text{ K}$)

3.2. 燃料点の大きさが燃焼形態に与える影響

初期当量比 ϕ を量論比程度に固定して, 燃料点半径 A を変化させた場合の平均温度の時間変化についても調べたが, 燃料点半径が小さいほうが温度の立ち上がりやや早いという結果になった. これは燃料点半径が小さい方が, 酸化剤と触れる面積が多くなることにより, より速やかに反応が進行しているためと考えられる. なお, 燃料点半径が異なる場合でも, 初期当量比が燃焼形態に与える影響はほぼ同様であったが, これについては次節でまとめて検討する.

3.3. 燃焼形態の整理

初期当量比 ϕ と燃料点半径 A を変化させたときの燃焼形態の移り変わりを Fig.8 に示す. どの燃料点半径においても, 初期当量比が増加するにしたがって, 燃焼モードが I

から V へと変化する. また, 燃料点半径が増加するにしたがって, 小さな当量比で燃焼モードの変化が起こる. したがって, モードの境界線は右上がりの線となる. これは燃料点半径が大きくなると, 配置される燃料の個数が少なくなるためである. 燃料が希薄な場合には, 燃料点同士の距離が十分に大きくなり, 火炎の連結が起こりにくくなる. 逆に, 燃料が過濃な場合には, 燃料点半径が小さいときよりも燃料が一箇所に集中する分, 酸素が十分に存在する領域が存在し, 内部での着火が起こり易くなるためである.

Fig.8 から推察して, 燃焼形態の境界線が水平になるようなパラメータとして ϕ / A を考え, これを縦軸として燃焼形態を整理し Fig.9 に示す. 確かに, 燃料点半径 A が 0.2 mm の場合を除いて, 燃焼形態の境界線がほぼ横一線に

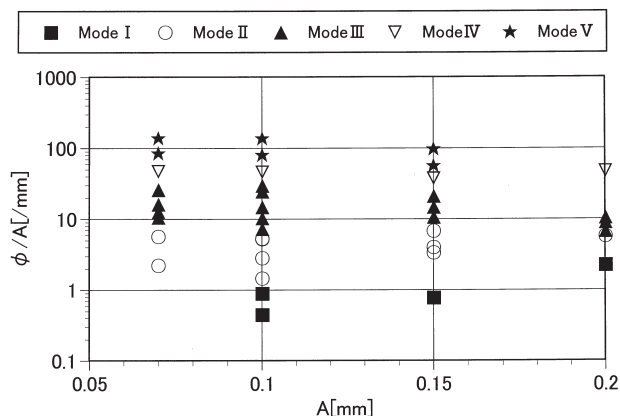


Fig.9 Classification of combustion mode (by ϕ / A)
($T_{air} = 1000$ K)

なっている。燃料点半径 A が 0.2 mm の場合により一致が得られなかったのは、配置される燃料点の個数が他の場合と比べて著しく少ないためであると思われる。初期当量比は近似的には

$$\phi \propto N \times A^3$$

と考えられるので、 ϕ / A は次式のように近似できる。

$$\frac{\phi}{A} \propto N \times A^2$$

すなわち、 ϕ / A は配置された全燃料点の表面積に比例すると考えられる。この全燃料点の表面積は、着火する前には熱伝導や物質移動の拡散場を支配し、着火した後は全火炎面積に対応し、燃焼場を支配すると考えられる。このことを考慮すると、 ϕ / A は群燃焼過程を決定するパラメータとして妥当な物理量であると考えられる。

ここで提案したパラメータ ϕ / A と Chiu らが提唱している群燃焼数 G [7,8]との関係について検討した。群燃焼数は液滴の個数 N 、液滴直径 d および液滴間距離 L を用いて次式のように表される。

$$G \propto N^{\frac{2}{3}} \frac{d}{L} \propto Nd$$

本研究の ϕ / A とは、 N に対する依存性は同一であるが、燃料点の大きさを表す A と対応する d の依存性は異なる。これはやはり相変化の有無と関係しているように思われる。

3.4. 燃料点を規則的に配置した場合との比較

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

Fig.10(a) および (b) に燃料を規則的に配置した場合の、

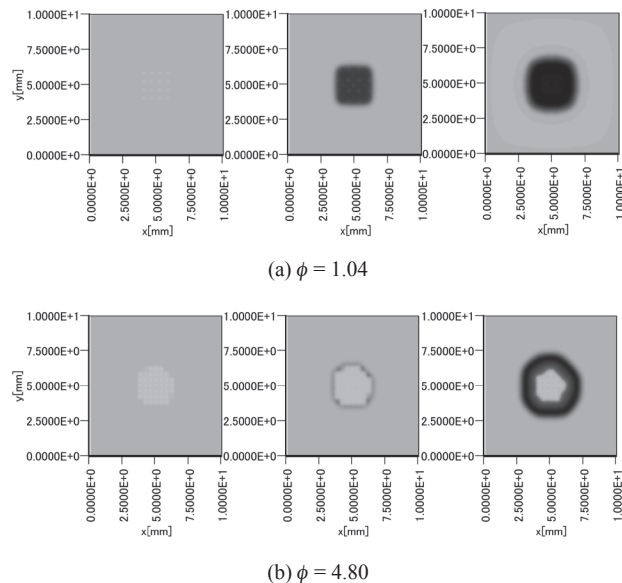


Fig.10 Time history of temperature
(Regularly distributed, $A = 0.1$ mm, $T_{air} = 1000$ K)

初期当量比 1.04 および 4.80 における各時刻の温度分布の時間変化を示す。時刻は左から順に、 $50 \mu s$, $100 \mu s$, $150 \mu s$ である。

規則的に燃料を配置したことにより、燃焼が均一に起こっていることが確認できる。希薄状態では、各燃料点間の距離が一定であるので、ランダムに配置した場合に比べ、特定の燃料点同士だけが連結するというだけではなく、初期当量比が大きくなり連結が生じるような場合には同時にすべての燃料点が連結することになる。また、過濃状態では、ランダムに配置した場合のように局所的に酸素の十分に存在する領域が存在するということはないため、内部で局所的に着火することではなく、外周部だけでの燃焼となる。したがって、規則的な配置ではモード II とモード IV が存在しない。また、燃焼形態の移り変わりが量論比に近いところで速やかに起こる。

Fig.11 に燃料点をランダムに配置した場合と規則的に配置した場合の過濃混合気 ($\phi = 4.80$) の燃焼過程について、燃料点塊中の全格子点に対しての平均温度 T_m の時間変化を示す。この図より燃料点をランダムに配置した場合の方が規則的に配置した場合よりも温度上昇が早いことが分かる。これは燃料点をランダムに配置した場合には、内部に局所的に酸素の十分存在する領域ができ、その部分より早く着火することで規則的に配置した場合より反応が速く進行しているからであると考えられる。

以上の結果から、群燃焼における燃料点の配置の不均一さは、燃焼形態のモードの種類や移り変わり、また、着火のし易さなどに影響を与えることが分かった。

3.5. 初期雰囲気温度を変化させた場合

Fig.12(a) および (b) に初期雰囲気温度 T_{air} を 1200 K とし

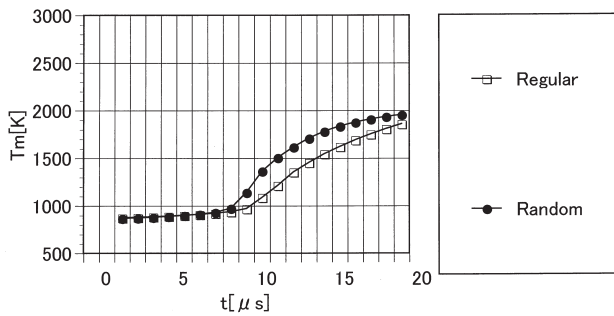


Fig.11 Time history of mean temperature
(Comparison between regular and random distributions)

た場合の, $\phi = 1.12$ および 8.70 における燃焼過程の温度分布の時間変化を示す。時刻は左から順に, $10 \mu\text{s}$, $20 \mu\text{s}$, $30 \mu\text{s}$ である。雰囲気温度 1000 K の場合に比べ, 燃焼過程が著しく早く進行することが分かる。また雰囲気温度を上げたことにより反応性が増したため, 雰囲気温度 1000 K では燃料低密集部着火 (モード III) であった当量比でも, 燃料点において着火し, 連結火炎 (モード II) となっている。また過濃状態においては, 雰囲気温度 1000 K では外周部着火 (モード V) であった場合でも, 内部での着火が起こっている (モード IV) ことが確認できる。このように, 雰囲気温度を上げた場合, 燃焼モードの変化がより大きい当量比でしか起こらないようになる。

4. 結論

本研究では, 噴霧燃焼における噴霧蒸発後の不均一な温度・濃度場の燃焼場を, 気体の燃料点を一様乱数を用いて空間にランダムに配置することによってモデル化し, その燃焼過程を数値解析により検討した。なお, 数値計算負荷を軽減するために液滴の蒸発の効果を考慮していないが, ある程度は群燃焼で起こる現象を捉えることができ, 定性的には有益な知見が得られていると考える。得られた結論を以下に示す。

- (1) 燃焼形態は下記の 5 つのモードに分類できる。
 - モード I : 燃料点単独着火・燃焼
 - モード II : 燃料点一部連結着火・燃焼
 - モード III : 燃料点低密集度部着火・内部火炎伝播
 - モード IV : 燃料点低密集度部着火・外周部燃焼
 - モード V : 外周部着火・燃焼
- (2) 着火は, 燃料が希薄な場合には個々の燃料点にて, 過濃な場合には燃料点密集度の小さい領域にて起こる。
- (3) どの燃料点半径でも当量比が大きくなるにつれて, 燃焼モードが I ~ V へと変化するが, 燃料点半径が小さいほど小さな当量比で変化が生じる。
- (4) 全燃料点の表面積に相当する「初期当量比÷燃料点半径」という量で燃焼形態を整理することができる。
- (5) 燃料点の配置の不均一さは, 燃焼形態のモードの種類

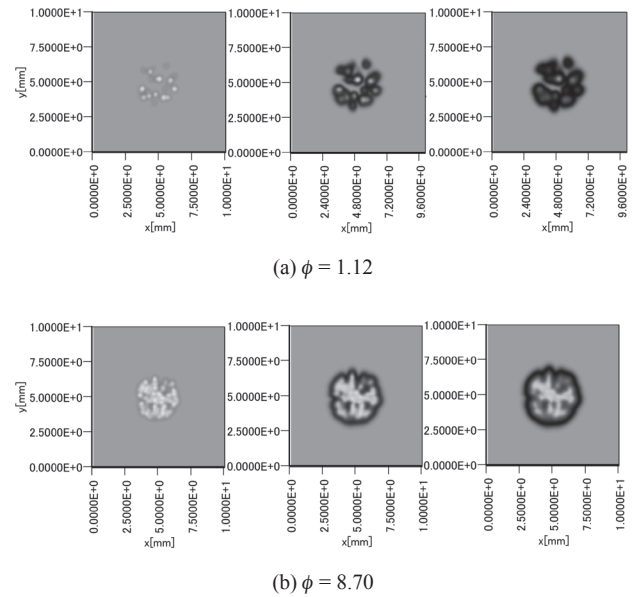


Fig.12 Time history of temperature
($A = 0.1 \text{ mm}$, $T_{\text{air}} = 1200 \text{ K}$)

- や移り変わり, また, 着火のし易さなどに影響を与える。
- (6) 初期雰囲気温度を上昇させた場合は, 燃焼形態の変化がより大きい当量比で起こるようになる。

References

1. Mikami, M., Kono, M., Sato, J. and Dietrich, D. L., *27th Symposium (International) on Combustion*, 2643-2649 (1998).
2. Hara, H. and Kumagai, S., *23th Symposium (International) on Combustion*, 295-309 (1990).
3. Umemura, A., *JSME Trans. (in Japanese)*, Vol.68, No.672, Ser. B, 254-267 (1990).
4. Aggarwal, S.K. and Sirignano, W.A., *20th Symposium (International) on Combustion*, 1773-1780 (1984).
5. Dwyer, H.A., Stapf, P. and Maly, R., *Combustion and Flame*, Vol.121, 181-194 (2000).
6. Crowe, C. T., Sharma, M. P., Stock, D. E., *Trans. ASME, J. of Fluids Eng.*, 99, 325 (1977).
7. Baba, Y., Akamatsu, F., *Web Journal of Japan Society of Computational Fluid Dynamics*, (in Japanese), 11-4 (2003).
8. Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R., Katsuki, M., *Phys. Fluids*, 17, 123301 (2005).
9. Reveillon, J., Vervisch, L., *J. Fluid Mech.* 537, 317-347 (2005).
10. Domingo, P., Vervisch, L., Reveillon, J., *Combustion and Flame* 140, 172-195 (2005).
11. Watanabe, H., Kurose, R., Hwang, H.-S., Akamatsu, F., *Combustion and Flame* 148, 234-248 (2007).
12. Chiu, H.H. and Liu, T.M., *Combust. Sci. Tech.*, Vol.17,

- 127-142 (1977).
13. Chiu, H.H. Kim, H.Y. and Croke, E.J., *19th Symposium (International) on Combustion*, 971-980 (1982).
 14. Yamada, M., Yamashita, H., *Proc. 41st, Symp. (Japanese) on Combust.* (in Japanese), 457-458 (2003).
 15. Kee, R.J., et. al., *CHEMKIN-II*, SAND89-8009 (1989).
 16. Smooke, M.D., *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, Springer-Verlag (1991).
 17. Coffee, et. al., *Combustion and Flame.*, Vol.58, 59-67 (1984).
 18. Patanker, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill (1980).