

噴霧燃焼シミュレーションにおける初期条件の検討

Study of Initial Conditions for Numerical Prediction of Spray Combustion

安田俊彦, 香月正司, 赤松史光
 (Toshihiko YASUDA) (Masashi KATSUKI) (Fumiteru AKAMATSU)
 日立造船株式会社 大阪大学大学院 大阪大学大学院
 (HitachiZosen Corp.) (Osaka Univ.) (Osaka Univ.)

Because the calculation load in the numerical prediction of the spray combustion increases generally compared with the case of the gas combustion, the technique that can decrease the calculation load is strongly demanded especially for practical use.

The statistical method authors proposed is effective to the decrease of the calculation load in comparison with the conventional stochastic methods. However, it is necessary to examine the setting of the initial conditions that are another important factor related to the calculation load.

In this study, we tried to simplify the initial conditions of droplets with essence of targeted spray combustion keeping. As a result, the appropriate representative value was acquired as simplified initial conditions.

Key words: Spray combustion, Numerical prediction, Initial condition

1. まえがき

数値シミュレーションについては、計算対象と目的に応じて十分な計算精度が要求されるのはもちろんであるが、噴霧燃焼の数値シミュレーションについては、通常ガス燃焼等の計算に比べて計算負荷が増大することから、特に費用対効果の要求が厳しい実用向けでは、計算負荷が小さく、短時間で結果を得ることができる手段が常に要求される。

著者らが提案した統計的乱流拡散噴霧モデル⁽¹⁾⁽²⁾は、気相中の液滴の挙動をラグランジュ型の支配方程式で追跡する離散粒子モデル⁽³⁾の範疇に属するが、精度向上のために積分時間を自在に短縮できる、気相計算の空間分解能に相間交換量分布が影響され難いなど、同じく離散粒子モデルに属し、現在多く用いられている確率過程のモデルに比べて、計算精度を保ったまま負

荷を低減することが可能であるという特徴を有する。しかしながら、この特徴は初期条件を一にする液滴パーセルの挙動追跡に関してであって、計算負荷に関わるもう一つの要因、すなわち初期条件そのものをどれぐらい詳細に設定すべきであるかということについては、このモデルのみならず、どのようなモデルを使用するにあたっては検討しなければならない問題である。例えば、液滴径や噴霧方向は噴霧燃焼場に大きく影響を及ぼす初期条件であるが、単純な単孔圧力噴霧ノズルの場合でも、液滴径は単一ではなくかなりの広がりを持った分布を有しているし、またホロコーン噴霧であっても、噴霧方向は噴霧角方向の唯一ではなく幾分かの広がりはある。それゆえ極めて多くのパーセルを用いて、広がりのある初期条件を網羅すれば、完全なる予測が可能であると言えるが、現実には必要とする結果に応じて、条件を選定しなければならない。

本研究では、噴霧燃焼の数値シミュレーションにおける初期条件、具体的には液滴径と噴霧方向の選定について、噴霧燃焼状況を再現するという観点から検討

を行い、適切な代表値を定めると共に、燃焼器形式などの影響を確認したので、ここに報告する。

2. 計算条件と手法

2.1 対象燃焼器と条件

本研究で検討の対象とした燃焼器は長さ 500mm、直径 200mm の縦型断熱円筒燃焼器で、噴霧ノズル、および保炎用バッフルを装備したものである。この概略形状を Fig.1 に示す。噴霧ノズルは単孔圧力噴霧で、噴孔を燃焼器中心軸と一致させ、燃焼器の頂部に下向きに配置されている。燃料は灯油で、燃焼量は 4.275l/h (3.321kg/h)、供給温度は 283.15K である。液滴径はザウテル平均径 (SMD) を $d_{32}=60\mu\text{m}$ とし、標準的な抜山-棚沢の分布関数⁽⁴⁾に従うものと想定した。また液滴の初期速度は 10m/s であるとした。噴霧パターンは、噴霧角 (中心軸となす角) を 27.5° とするホロコーンである。燃焼用空気は、直径 50mm のポートから一様流速で供給され、直径 40mm のバッフルとの隙間を通過して燃焼室に流入する。供給流量は空気比 $\lambda=1.2$ に相当する 45.22Nm³/h、供給温度は 283.15K で、供給流速は 7.895m/s となる。

2.2 計算手法

計算は軸対象円筒二次元座標系の下での定常計算である。座標系は噴孔を原点とし、軸方向鉛直下方を x 方向、半径方向を r 方向とした。用いた計算格子は x

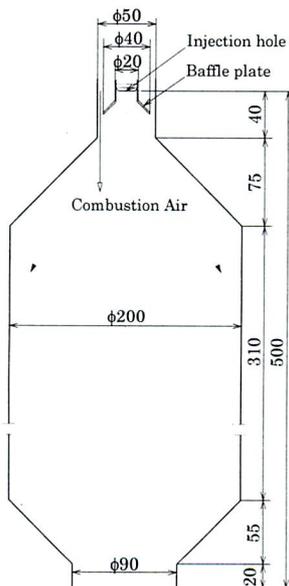


Fig.1 Test combustor

$\leq 40\text{mm}$, $r \leq 25\text{mm}$ までは間隔を 1mm とする等間隔、両軸ともそれ以降は等比級数的に間隔が広がる不等間隔格子である。

解析に供した支配方程式は、密度加重平均を施した非圧縮性の連続の式、運動方程式、エネルギー方程式、化学種の保存式、ならびに乱流モデルのための付加方程式である。乱流モデルとしては、Launder-Spalding の標準的な $k-\epsilon$ 二方程式モデルを採用するが、その生成項中には密度変動に関する項を付加している。支配方程式の離散化は有限体積法、対流項の定式化にはベキ乗スキーム、圧力場の解法には、スタッガード格子の下での SIMPLE アルゴリズムを用いた。物性値については、密度は温度に依存するものとして理想気体の状態方程式から算出した。単成分ごとの比熱、粘性係数は温度依存性を考慮して与え、熱伝導率は Eucken の相関式⁽⁵⁾により算出した。また混合気体の輸送係数は Wilke の式⁽⁶⁾で推算した。なお本計算では放射伝熱は考慮していない。

燃焼反応については、燃料である灯油の分子式を $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$ とし、式(1)に示す不可逆総括一段反応を仮定した。



反応速度 R_r については渦消散モデルによる乱流混合速度 R_m とアレニウス型 R_c の化学反応速度のうち、小さいものに依存するとして式(2)のように与えた。

$$R_r = -M_f \min(R_c, R_m)$$

$$R_c = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left[\frac{\rho m_f}{M_f}\right]^{0.25} \left[\frac{\rho m_o}{M_o}\right]^{1.5} \quad (2)$$

$$R_m = 4.0\rho \frac{k}{\epsilon} \left(\frac{m_f}{1.0M_f}, \frac{m_o}{17.75M_o}\right)$$

ここで ρ は密度、 m_f , M_f は燃料の質量分率と分子量、 m_o , M_o は酸素の質量分率と分子量であり、 A は頻度因子で $2.587 \times 10^9 \text{kmol/m}^3\text{s}$ 、 E は活性化エネルギーで $1.256 \times 10^8 \text{J/kmol/K}$ とした。

3. 詳細設定計算による場の状況

本研究では、噴霧燃焼解析における液滴径と噴霧方向の選定について、その設定数低減のための検討を行うが、ここでは基本とする詳細に設定した条件とその場合の状況について記す。

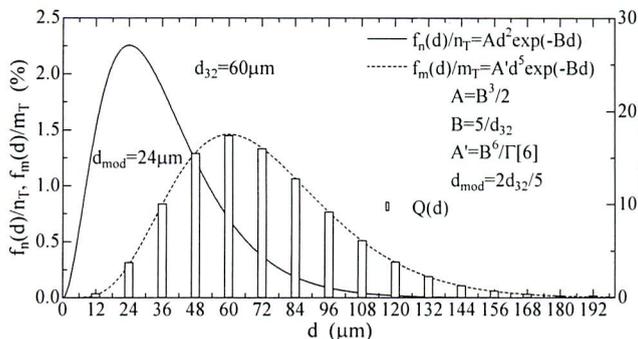


Fig.2 Distribution profile of Drop diameter

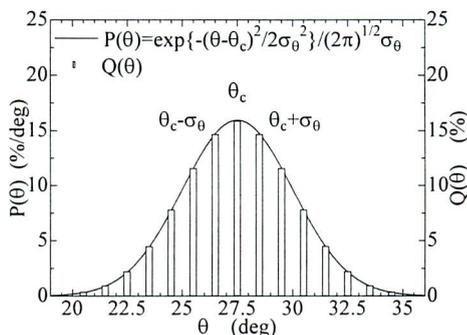


Fig.3 Distribution profile of Spray direction

3.1 条件の設定

燃焼器内での噴霧挙動は、統計的乱流拡散噴霧モデルを用いる Lagrange 的追跡により予測するが、本研究では初期条件の影響を明らかにするために、乱流変動の影響を考慮せず、平均流場での挙動を追跡し、気相-液滴間交換量は液滴通過点にのみ与えるものとした。この場合、パーセル毎に与えなければならない初期条件は、液滴径、噴霧方向、平均速度、位置、温度である。これらの条件のうち、本研究では液滴径と噴霧方向について検討するので、詳細設定としては、それらの分布の特徴を損なわぬものとした。

まず液滴径については、標準的な抜山一棚沢の分布関数に従うとしているので、粒度分布関数 $f_n(d)$ 、噴霧質量分布関数 $f_m(d)$ は、Fig.2 に示すようになる。ここで n_T 、 m_T は総液滴数と総噴霧質量である。これらの関数は何れも 0 に漸近するとはいえ、無限に正値を有するので、設定としてはその上限を定める必要がある。ここで噴霧質量 $f_m(d)$ についてみると、累積質量が $157\mu\text{m}$ で 99% を上回ることから、十分に余裕を見込

んで $d=192\mu\text{m}$ まで考慮するものとした。また、分割幅は分布が損なわれないこととともに、液滴数の最頻値である $d_{\text{mod}}=24\mu\text{m}$ 、SMD の $d_{32}=60\mu\text{m}$ を含むよう $12\mu\text{m}$ とした。結果として採用した液滴径は $12\mu\text{m}$ から $192\mu\text{m}$ まで $12\mu\text{m}$ 刻みの 16 種で、それぞれの噴霧質量割合 $Q(d)$ は Fig.2 に柱状グラフで示されたものとなる。

次に噴霧方向については、噴霧質量分布が噴霧角 $\theta_c=27.5^\circ$ を中心とし、標準偏差 σ_θ を 2.5° とするガウス分布をなすものと考えた。Fig.3 にその配分確率密度関数 $P(\theta)$ を示す。条件設定のためには、液滴径の場合と同様に範囲を定める必要があるが、この場合、分布関数がガウス分布であるので、 $\theta_c \pm 2.57 \times \sigma_\theta$ の範囲をとると噴霧質量の 99% 以上を占め得る。そこで液滴径の場合と同様十分な余裕を見込むものとして $\theta_c \pm 2.8 \times \sigma_\theta$ の範囲を採用するものとした。また分割幅については 1° とした。結果として採用した噴霧方向は 20.5° から 34.5° まで 1° 刻みの 15 種で、それぞれの噴霧質量割合 $Q(d)$ を Fig.3 に柱状グラフで示す。な

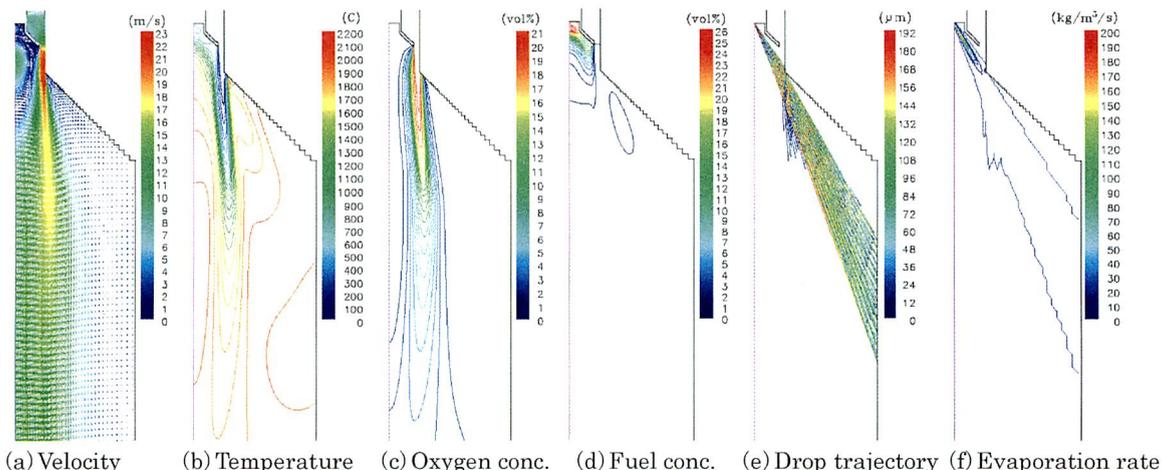


Fig.4 Calculation result with strict set initial conditions of spray

お本研究では、諸量の分布を表現するために、噴霧角の中心、すなわち $\theta_c=27.5^\circ$ 方向の噴孔からの距離を l とする。

3.2 計算結果

Fig.4に計算結果を示す。図は (a) に色彩とベクトル長さで流速を示す流速分布、温度、酸素及び燃料蒸気濃度分布を (b) (c) (d) に、色彩で液滴径を示す液滴軌跡を (e) に、液滴の単位時間単位体積あたりの蒸発率分布を (f) に示している。

この結果についてまず気相の状況を見ると、高速の燃焼用空気流を境としてその内外両側に循環流領域が形成されており、それらを端緒として高温域が現れることがわかる。詳しく見て行くと、空気流の内側では、まず噴霧ノズル傍に極めて燃料濃度の高い小さな領域が形成されている。そして、その下流にバッフルから中心軸に沿って逆流する循環流領域があり、その部分で燃料濃度が減少してゆく。この領域には酸素がほとんどないことから、この領域の火炎は輝炎であり、燃焼の進行について酸素の供給が律速となっていることがうかがえる。一方空気流の外側では内側のように燃料が濃厚な領域は見られない。しかし本研究で採用している反応式では、両論混合気中の燃料蒸気濃度が1.16vol%であることを考えると、上流部ではその程度の燃料蒸気濃度域が存在するので、単に高温ガスの逆流だけではなく燃焼反応も生じていると考えられる。

次に液滴軌跡を見ると、大部分の液滴が初期の噴霧方向を維持したまま飛行することがわかる。詳細に見ると、初期液滴径が $36\mu\text{m}$ までの液滴は、方向によらず $\phi 50$ のバーナ部を出る前に全て蒸発すること、バーナ壁に衝突する噴霧方向が 31.5° 以上の液滴を除き、 $48\mu\text{m}$ から $72\mu\text{m}$ の液滴は高速の空気流に干渉されて若干中心軸側に向きを変え、 $108\mu\text{m}$ までの液滴は、飛行中に蒸発を完了するが、 $120\mu\text{m}$ 以上の液滴は $\phi 200$ の燃焼器壁に衝突してしまうことがわかる。

液滴の蒸発率については液滴軌跡に沿って値を示す

が、最大値をとるのはバッフルの基部あたりである。先に記した気相の状況と液滴の状況は互いに影響を及ぼし合った結果であるが、具体的に両者の橋渡しをするのが気相-液滴間交換量であり、その中でも直接的に燃焼状況に関与するのが質量交換量に相当するこの液滴の蒸発率である。

4. 単一噴霧方向における液滴径の検討

前章では液滴径、噴霧方向を共に詳細に設定した場合について述べたが、ここでは噴霧方向の影響を排除して、液滴径のみが及ぼす影響を抽出する。すなわち、本章では噴霧方向を $\theta_c=27.5^\circ$ のみの単一とし、液滴径を詳細に設定した場合に対して、単一の液滴径で噴霧を代表する場合と二種の液滴径で代表する場合についての比較検討を行った。

4.1 単一の液滴径で噴霧を代表する場合

噴霧を代表する単一液滴径として、 $d=24, 48, 60, 72, 84, 96, 120\mu\text{m}$ とした場合の計算を実施した。Fig.5は (a) に液滴径を詳細に設定した場合、(b) ~ (d) はそれぞれ $d=48\mu\text{m}, 72\mu\text{m}, 84\mu\text{m}$ 、の単一の液滴径で噴霧を代表する場合について、左に色彩で温度、ベクトル長さで流速を示す温度-流速分布、右に燃料蒸気濃度分布の燃焼器上流部の計算結果を示している。液滴径を $84\mu\text{m}$ 以上の単一の値で代表した場合については収束解が得られず、いずれも振動燃焼的な非定常燃焼が生じているものと推察される。それゆえ図は収束解ではなく、ある瞬間の状況を示している。液滴径が大きくなるほど上流側で温度上昇が見られるが、これは気体燃料濃度が低下して量論混合気濃度に近づいてゆき、燃焼形態も輝炎を伴うような拡散燃焼から予混合燃焼的なものに変化しているためと考えられる。燃焼形態はどうあれこのような設定では詳細な液滴径分布を設定した場合のような安定燃焼が得られないので、単一の大きな液滴径を液滴径分布の代表として選

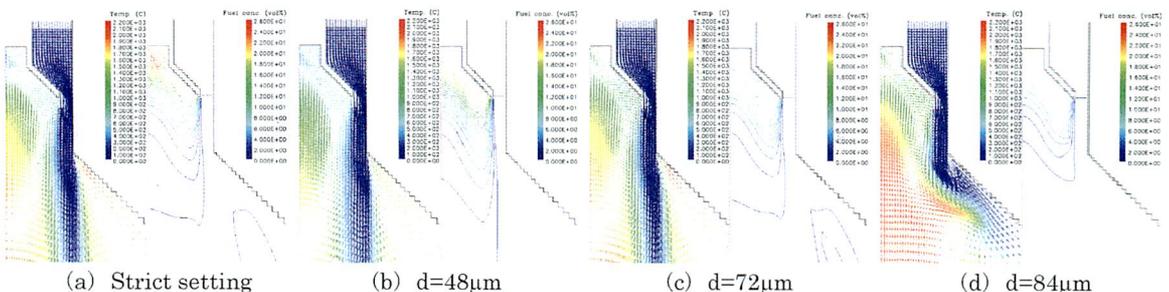


Fig.5 Velocity-Temperature profiles and Distributions of Fuel concentration

ぶことはできない。

液滴径が 48 μm 以下と小さい場合には、空気流の外側、特に内側での温度上昇が鈍い。これは液滴の蒸発が速く、循環流量域で燃料が過濃すぎて確実な保炎ができないためである。この場合、安定燃焼場は得られるが、燃焼器全体での燃焼の起源となる保炎領域での状況が正確に予測できないことから、このような小さな液滴径も液滴径分布の代表として選ぶことには無理がある。

中間的な液滴径、すなわち SMD である 60 μm 、またその 1.2 倍の 72 μm を噴霧を代表する単一の液滴径とした場合には、詳細液滴径分布を設定した場合に近い温度場が得られている。この場合の詳細を検討するために、中心軸上の温度分布と噴霧方向の燃料蒸気濃度と蒸発率分布を調べた。これを Fig.6, Fig.7 に示す。Fig.6 を見ると明らかなように、 $x=20\text{mm}$ から 180mm の主要な温度上昇域で、72 μm の単一の液滴径で噴霧を代表した場合が特に詳細液滴径分布を設定した場合

に近い温度分布を呈している。また Fig.7 を見ると、蒸発率についてはいずれの単一液滴径を採用しても詳細液滴径の場合に近い分布は見られないが、燃料蒸気濃度については $l=30\text{mm}$ 以降で 72 μm の単一液滴径で代表した場合が詳細液滴径の場合とほぼ一致している。一般に燃焼場を大きく支配するのは反応率分布であり、またそれは混合気の形成状況に支配される。さらに混合気の形成は、酸素の供給を支配する流れ場がほぼ同じであるとする、燃料の蒸発率分布に大きく支配されるはずである。噴霧燃焼では燃料蒸気は液滴軌跡上から供給されるので、その燃料軌跡にほぼ等しい噴霧方向線上での流れ場を見ると、詳細液滴径分布を設定した場合は、 $l=30\text{mm}$ を境としてそれより上流では内から外へ、また下流では外から内への流れになっている。したがって、保炎に関する循環流領域の混合気は、 $l=30\text{mm}$ 以降の燃料濃度が支配することになる。それゆえ、72 μm の単一の液滴径で噴霧を代表した場合の循環流領域内の混合状況が最もよく詳細液滴径分布を設定した場合の状況を再現しているものと思われる。なお、なお燃料供給域での燃料蒸気濃度については、当然その起源である蒸発率に大きく左右されるはずである。しかし本結果のような流れ場の場合、その部分の燃料蒸気濃度は、その点の蒸発率のみならず、その上流での状況にも支配される。したがって、本結果のように、蒸発率分布が完全に一致しなくても近い状況の燃焼場を得ることは可能である。

以上のように単一液滴径で噴霧を代表させる場合には、SMD の 1.2 倍程度の液滴径を採用することが適当であると言える。しかし詳細に結果をみると、ノズル近傍では燃料濃度が低く、おそらく詳細液滴径分布を設定した場合のように過濃になりすぎないため、燃焼が進行し温度が上昇している。したがって、ノズル近傍の正確な予測が重要な場合には単一液滴径で噴霧を代表させる設定では十分に表現しきれないと言える。

4.2 二種の液滴径の組み合わせで噴霧を代表する場合

詳細液滴径分布を設定した場合に対して、単一の液滴径で噴霧を代表させるモデルではノズル近傍で違いが生じるため、二種の液滴径の組み合わせで噴霧を代表による改善を試みた。

液滴径の組み合わせとしては、単一径による検討結果から、主体を SMD をやや上回る液滴とし、それに早期の蒸発が期待される小径の液滴を組み合わせた。二種の液滴の質量配分については、いかなる組み合わせも可能であるが、ここでは、もとの液敵群の特性を

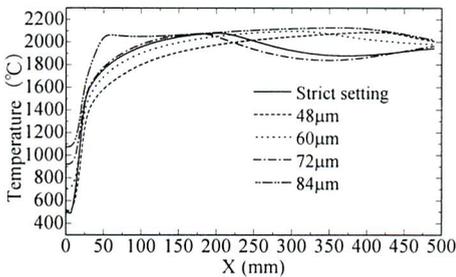


Fig.6 Temperature profiles on center-line of the combustor

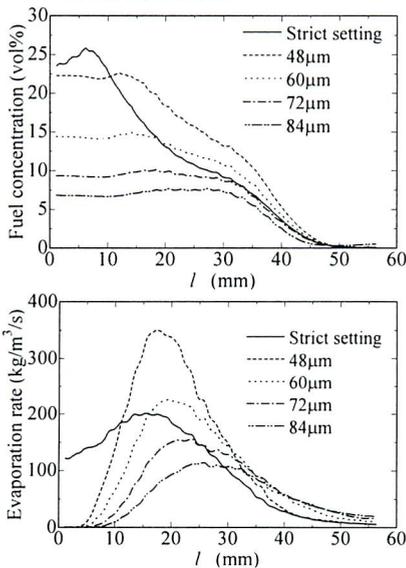


Fig.7 Fuel concentrations and Evaporation rate profiles of direction of center of spray angle

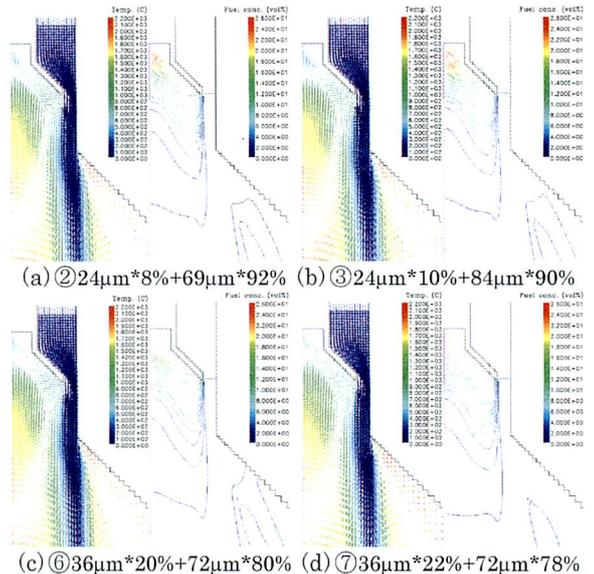
Table 1 Combination cases of two drop diameters

No.	Drop 1		Drop 2		SMD (μm)
	Dia. (μm)	Weight ratio (wt%)	Dia. (μm)	Weight ratio (wt%)	
①	24	5.71	66	94.29	60.00
②	24	8.00	69	92.00	60.00
③	24	10.00	72	90.00	60.00
④	24	16.00	84	84.00	60.00
⑤	30	14.29	72	85.71	60.00
⑥	36	20.00	72	80.00	60.00
⑦	36	22.00	72	78.00	59.02

維持するために、基本として SMD を一致させるように定めた。具体的な液滴径の組み合わせと噴霧量配分を Table 1 に示す。

Fig.8 に得られた結果の例を示す。図は左が色彩で温度を表す流速ベクトル分布、右が燃料蒸気濃度分布である。また Fig.9 に中心軸上の温度分布、Fig.10 に噴霧方向の燃料蒸気濃度と蒸発率分布を示す。Fig.8 を Fig.5 (a) に示した詳細液滴分布を設定した場合と比較すると、流速-温度分布はいずれも大差なく、二種の液滴径で噴霧を代表した場合でも詳細液滴分布を設定した場合の予測結果を表現しうることがわかる。また Fig.8 を見ても、先の単一の液滴径で代表した場合と比べ、各組み合わせ毎の差異は小さく、さらに単一径では難かったノズル近傍の予測精度もかなり改善されている。したがって SMD からやや上回る程度の液滴径と小径の組み合わせは、基本的に燃焼場の表現に有効であると言える。

しかしながら更に詳細に見ると各組み合わせによ



(a) ②24μm*8%+69μm*92% (b) ③24μm*10%+84μm*90%

(c) ⑥36μm*20%+72μm*80% (d) ⑦36μm*22%+72μm*78%

Fig.8 Velocity-Temperature profiles and Distributions of Fuel concentration

ては予測精度に優劣が見られる。まず小径側を抜山一棚沢分布関数の最頻値 d_{mod} である 24μm 固定して大径側を変化させた場合の①~④を見ると、中心軸上の温度分布は②が全域にわたって極めて詳細液滴径分布を設定した場合に近い。次に大径側を 72μm に固定し、小径側を変化させた③、⑤、⑥、さらに SMD が変化してしまうが小径側の噴霧量配分を若干増加させた⑦では、⑥が②と同程度に予測できている。噴霧方向の燃料蒸気濃度を見てみると、この②と⑥では $l=30mm$ 以降の値が極めて詳細液滴径分布を設定した場合に近

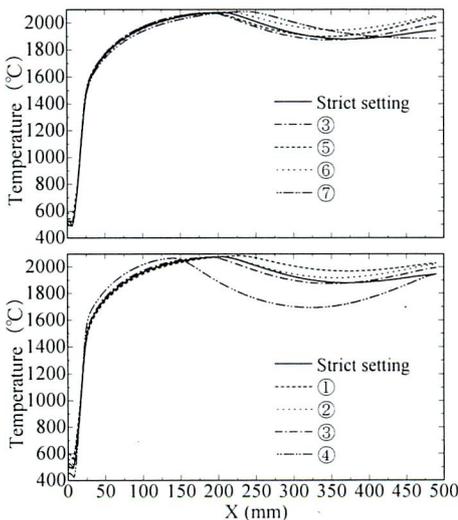


Fig.9 Temperature profiles on center-line of the combustor

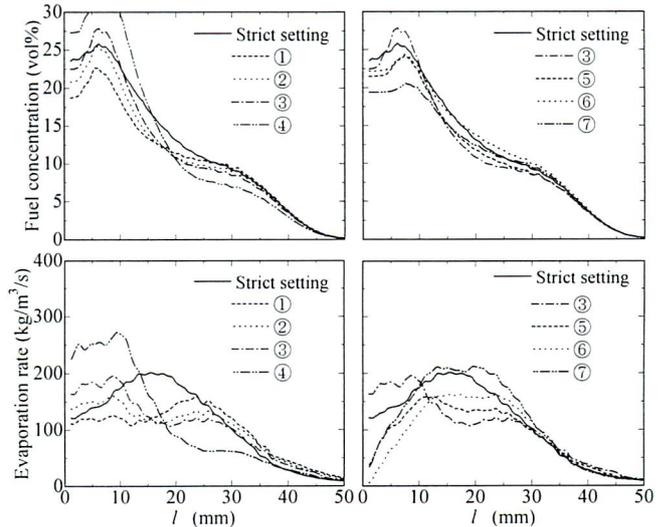


Fig.10 Fuel concentrations and Evaporation rate profiles of direction of center of spray angle

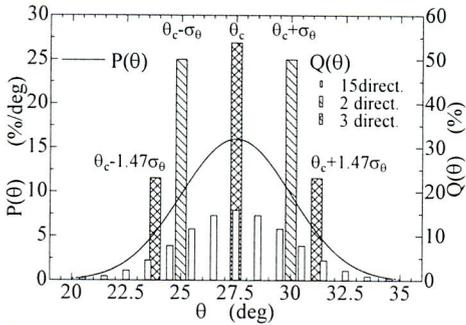


Fig.11 Distribution profile of Spray direction

い。分布全般としては⑦の方が近いと考えられるにもかかわらず、②や⑥の方が的確に温度分布を表現できることを考えると、やはり保炎部への燃料供給状況を精度よく予測することが重要であるといえる。

5. 噴霧方向と液滴径の検討

前章では噴霧方向を単一方向として液滴径設定数の低減を検討した。本章は噴霧方向の影響を把握した上で更に液滴径の検討を行った。

5.1 詳細液滴径分布による噴霧方向の検討

本研究では、噴霧方向について $\theta_c \pm 2.8 \times \sigma_\theta$ の範囲を分割幅 1° の 15 方向とするものを基本の詳細設定としているが、ここでは噴霧方向分割数を少なくした場合、すなわち 3、2、さらには単一方向としたものの比較検討を行った。それぞれの具体的な設定としては、まず単一方向は、先にも示しているように噴霧方向を $\theta_c = 27.5^\circ$ のみとした。2、3方向については、もとの分布の特徴を損なわぬよう、噴霧質量分布の中心と標準偏差を維持するものとした。すなわち2方向は $\theta_c \pm \sigma_\theta$ に噴霧質量の50%ずつを、3方向では θ_c と $\theta_c \pm 1.47 \times \sigma_\theta$ に53.762%、23.119%を配分した。それぞれの噴霧質量割合 $Q(\theta)$ を Fig.11 に柱状グラフで示した。

Fig.12 に燃焼器中心軸上の温度分布を、Fig.13 に噴霧方向の燃料濃度と蒸発率分布を示す。これらを見ると、噴霧方向の分割数を減らして簡略化しても、温度分布や燃料蒸気濃度分布は、詳細設定時とほとんど差異がないことがわかる。これは、対象としたのがホロコーン噴霧であるために元々噴霧の広がりがないことが主因であるが、基本的には保炎領域に燃料を供給する部分での燃料蒸気濃度が燃焼状況を支配しているためである。すなわち Fig.13 で明らかなように、噴霧方向に直接影響される蒸発率分布は、噴霧方向の分割数によって多少異なるが、 $l=30\text{mm}$ 付近において、

流線が噴霧軌跡と交差しているため、多少蒸発率分布が変わっても、結果として保炎領域に入る燃料濃度には大きな違いが生じないためである。したがってこのようなホロコーン噴霧では、温度分布等の燃焼状況を予測するためには噴霧方向を単一としてもそれほど支障はなく、蒸発率分布の一致まで求める場合でも、3方向に分割すれば十分であると言える。

5.2 簡略液滴径の検討

前節の検討からここで対象とする燃焼器では、噴霧方向分割数を減らしても影響は小さいことがわかったが、本節では、詳細液滴径分布に代わって前章で検討した単一液滴径で噴霧を代表する場合や、二種の液滴径の組み合わせで噴霧を代表する場合でも噴霧方向の分割数の影響は小さいことを確認するために、単一の液滴径として $60\mu\text{m}$ と $72\mu\text{m}$ で噴霧を代表する場合、二種の液滴径の組み合わせでは、Table 1 に示す②、⑥、⑦について噴霧方向を15分割に設定した場合に

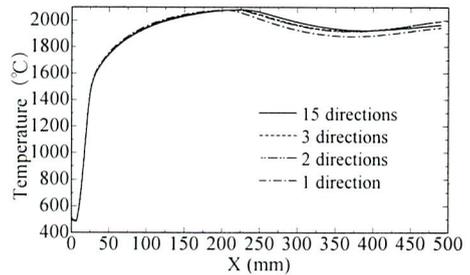


Fig.12 Temperature profiles on center-line of the combustor

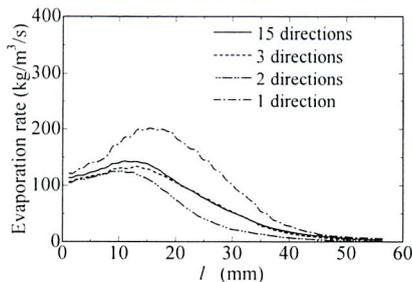
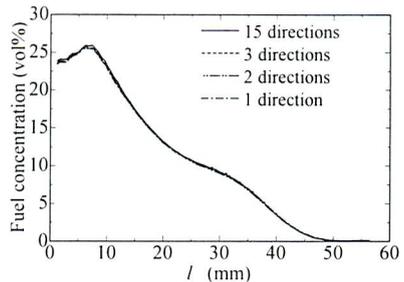


Fig.13 Fuel concentrations and Evaporation rate profiles of direction of center of spray angle

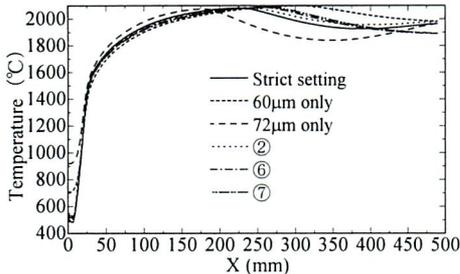


Fig. 14 Temperature profiles on center-line of the combustor

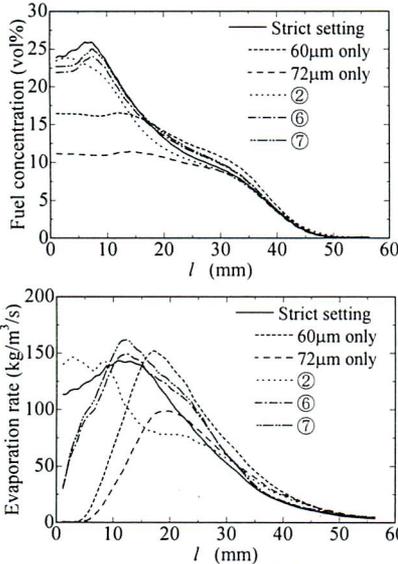


Fig. 15 Fuel concentrations and Evaporation rate profiles of direction of center of spray angle

ついて検討を行うものとした。

Fig.14に燃焼器中心軸上の温度分布を, Fig.15に噴霧方向の燃料蒸気濃度と蒸発率分布を示した。これらを見ると, 基本的には噴霧方向を単一とした場合に良好に詳細液滴径設定時の状況を予測できる液滴径で噴霧を代表した場合には, 噴霧方向に分布を与えた場合でも同様に良好に予測できることがわかる。すなわち

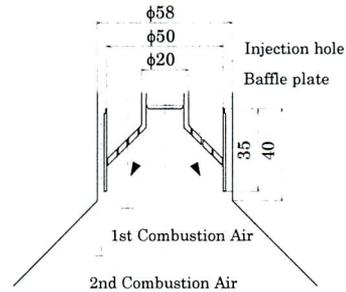


Fig. 16 Test combustor (Air-staged type)

二種の液滴径を組み合わせた噴霧では②, ⑥が単一方向の場合と同様に予測結果がよく, 中心軸上温度分布で見ると, ②, すなわち SMD の 0.4 倍と SMD の 1.15 倍の液滴を, SMD を維持するような噴霧質量配分で用いるのが詳細径分布を設定した場合に極めて近い分布を呈している。また単一液滴径の場合では 60µm, 72µm は単一方向の場合と同程度の予測結果が得られている。二種の液滴径を組み合わせた噴霧の場合, 噴霧方向線上 $l=30\text{mm}$ 以降の燃料蒸気濃度に関して, ②が詳細液滴径分布を設定した場合に最も近いことから, この結果は理解できる。

5.3 計算負荷の低減効果

前節までの検討で, 噴霧の初期条件として, 液滴径については 2 種, 噴霧方向については 1 方向まで削減しても, 詳細設定計算時とほぼ同じ結果が得られることを確認した。そこでこの削減による計算時間の削減効果を調べた。

第 3 章に記す詳細設定計算では, 16 種の液滴径と 15 種の方向を採用しており, それぞれを 1 つのパーセルで代表しているので, $16 \times 15 = 240$ のパーセルを用いて計算している。計算の過程では, 気相の計算 1 イタレーションについて 1 回の噴霧計算を行っているので, 計算に要する時間の比は, 気相:液滴=1:2.3 程

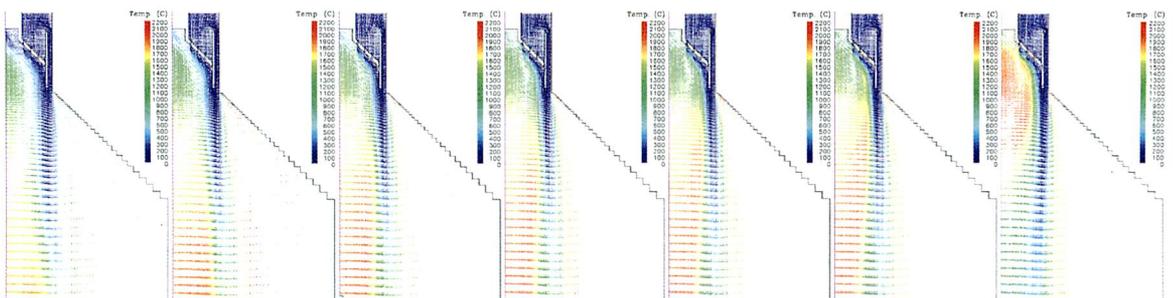


Fig.17 Velocity-Temperature profiles (Air-staged combustor, Strict setting)

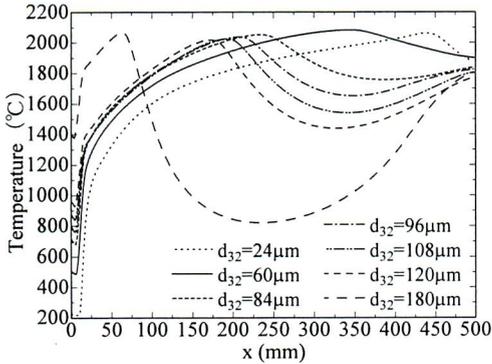


Fig.18 Temperature profiles on center-line of the combustor (Air-staged combustor, Strict setting)

度であった。これを液滴径を2種(②の組み合わせ)、方向を1方向のみとすると、計算に要する時間の比は、気相：液滴＝1：0.05程度となる。したがって計算1サイクル(気相の計算1イタレーション+1回の噴霧計算)に要する時間は3.3から1.05と68%程度削減される。

6. 燃焼器構造と液滴径の影響

対象としてきた燃焼器は、燃焼現象に影響を及ぼすパラメータを極力少なくするために燃焼用空気を一括して供給する構造となっている。しかしながら実用燃焼器では、保安性能の観点から燃焼用空気は分割して

供給するのが一般的であり、本研究でも、Fig.1に示す燃焼器ではSMDが80μm程度以上では安定な解が得られないことを確認している。そこで、本章では、二種の液滴径からなる噴霧を仮定した場合の予測精度について、SMDの影響を把握するために安定範囲を拡大させた燃焼器での検討を行うものとした。

Fig.16に新たな供試燃焼器を示す。この燃焼器は燃焼器長さや直径等の基本寸法は先の燃焼器と同じであるが、燃焼用空気供給ポート径を50mmから58mmに拡大し、半径25.5mmの位置に厚さ1mmの仕切りを設けて燃焼用空気を一次、二次に分割している。一次、二次空気の流量配分は3：7である。また一次空気は徐々に燃焼ガスと混合するよう、バッフルに設けた4ヶ所の0.5mm幅のスリットから燃焼室内に流入するようにした。なお流入流速は一次、二次共にこれまでの燃焼器とほぼ同じで、20m/s強である。

二種の液滴径で噴霧を代表した場合の予測精度の検討に先立ち、この燃焼器の性能を確認するために、いくつかのSMDについて詳細液滴径分布を設定した場合の計算を行った。燃料、および空気の条件は前節までと同じとし、噴霧方向配分も同じく15方向の詳細設定とした。

得られた結果をFig.17, Fig.18に示す。Fig.17に示す温度-流速分布からもわかるように、SMDが24μmから180μmの広い範囲で安定燃焼場が得られることを確認している。SMDが大きくなるにつれてノズル下流の循環領域は高温化してゆくが、これは液滴の蒸

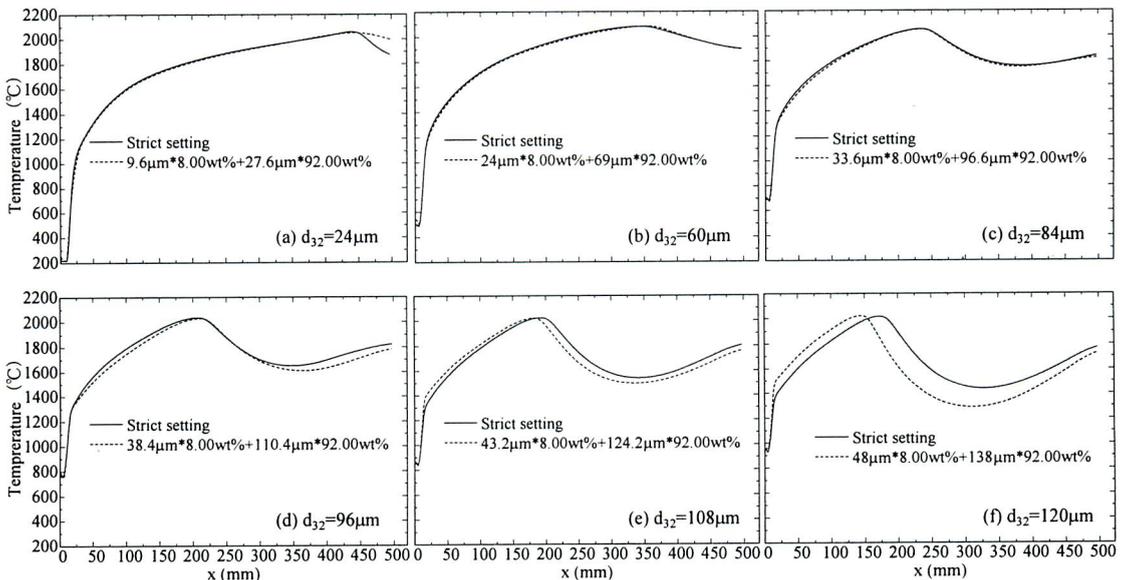


Fig.19 Temperature profiles on center-line of the combustor (Air-staged combustor)

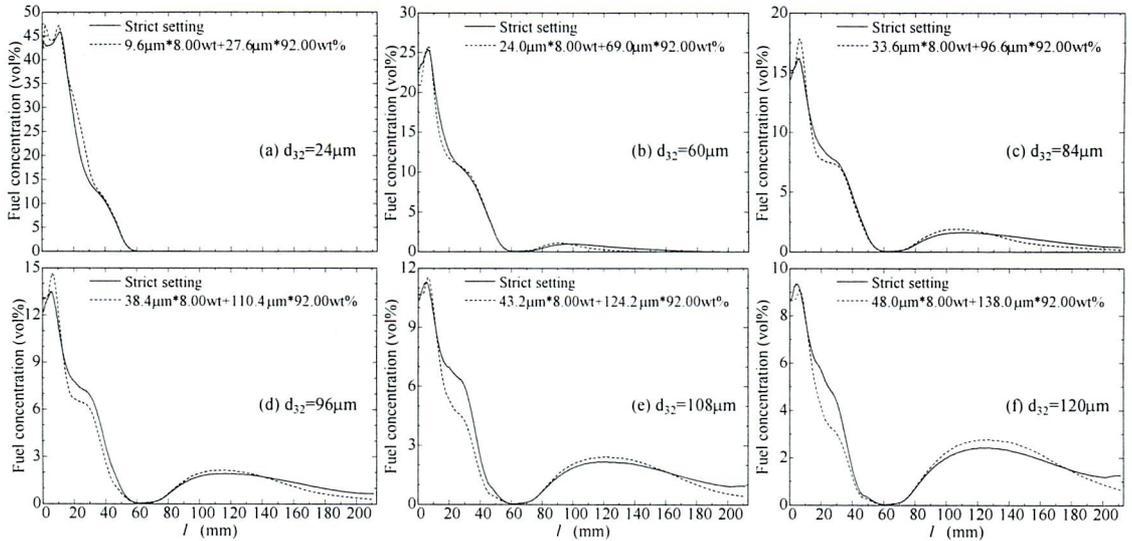


Fig.20 Fuel concentrations profiles of direction of center of spray angle (Air-staged combustor)

発は遅延するため、二次空気の内側の燃料濃度は低下してゆき、循環域の燃料濃度は量論に近づいてゆくためである。

次にそれぞれの SMD について二種の液滴径の組み合わせで噴霧を代表した場合の予測精度を調べてみた。採用する二種の液滴径としては、SMD の 0.4 倍と SMD の 1.15 倍とし、それを SMD を維持するような噴霧質量配分で用いた。この結果を Fig.19, 20 に示す。Fig.19 の燃焼器中心軸上温度分布をみると、SMD が 84 μm 以下では二種の液滴径で噴霧を代表した場合はほぼ完全に詳細液滴径分布を設定した場合の状況を再現しているが、SMD が大きくなると前半は詳細液滴径分布を設定した場合より高く、後半は低くなり、その差は SMD が大きくなるにつれて広がってゆく。これは Fig.20 からわかるように、基本的に SMD が大きくなると、二種の液滴径で噴霧を代表した場合は二次空気流の内側の燃料蒸気濃度が薄くなりすぎるためである。先にも述べたように SMD が大きくなると蒸発が遅延して上流部の燃料蒸気濃度は薄くなるが、詳細液滴径分布を仮定した場合にはその変化は連続的である。しかし二種の液滴径で噴霧を代表した場合は、SMD が 96 μm から 108 μm にもなると大きい方の液滴が二次空気流の内側ではほとんど蒸発せず、連続的なら幾分かはあった中間径液滴の寄与が内側では期待できなくなるためこのような差が生じるものと考えられる。実用的にはこの程度の燃焼量なら、SMD は大きくても 60 μm 程度なので問題はないが、二種の液滴径の組み合わせで噴霧を代表する場合には上記のような限界があることを踏まえておかねばならない。

7. 結論

噴霧燃焼の数値シミュレーションにおける計算負荷低減のためにはできるだけ少ない数の液滴についての計算結果から、噴霧全体が燃焼した際の状況を精度よく予測できることが求められる。液滴の初期条件のうち、液滴径分布と噴霧方向分布について、その分割数低減の検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 噴霧の液滴径分布を単一の液滴径で代表しようとする場合、その液滴径は、SMD の 1.2 倍程度が適当である。
- (2) 二種の液滴径を組み合わせた噴霧を用いれば、単一の液滴径で代表する場合には予測の難しいノズル近傍の状況も表現できる。組み合わせとしては、径が SMD の 0.4 倍と SMD の 1.15 倍の液滴を SMD を維持するような噴霧質量配分で用いるのが最適である。
- (3) ホロコーン噴霧では、噴霧方向は単一でも温度分布等の燃焼状況は表現できる。蒸発率分布の一致まで求められるような場合でも、噴霧方向を 3 分割すれば十分である。
- (4) 二種の液滴径を組み合わせた噴霧を用いた場合、実用燃焼装置に用いられる程度に SMD を変化させても詳細液滴分布を仮定した場合と同程度の結果を得ることができるが、SMD が大きくなると蒸発量に連続性がないことによる差が生じてくる。

文 献

- (1) Yasuda, T., Katsuki, M., Akamatsu, F. Mizutani, Y., Statistical Modeling of Droplet Behaviour for Spray Combustion, Proc. Int. Gas Turbine Cong., II, (1995), 303-308.
- (2) 安田俊彦, 香月正司, 赤松史光: 噴霧の乱流拡散の統計的取り扱いと噴霧燃焼モデル, 微粒化, 6-16 (1997), 164-178.
- (3) Feath, G.M., ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf., 2(1983), 517-534.
- (4) 抜山四郎, 棚沢泰: 液体微粒化の実験(第3報, 噴霧流内の粒の大きさの分布に就て), 機論, 5-18(1939), 131-135.
- (5) Hirschfelder, J.O. et al., Molecular Theory of Gases and Liquids., John Wiley & Sons., (1964).
- (6) Buddeberg, J.W., Wilke, C.R., Calculation of Gas mixture Viscosities, Ind. Eng. Chem., 41 (1949), 1345.



赤松 史光
大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻 助教授
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
電話 : 06-879-7253
Fax : 06-879-7247
Mail : akamatsu@mech.eng.osaka-u.ac.jp

略歴 : 1991年 大阪大学大学院工学研究科博士前期課程機械工学専攻修了, 博士(工学), 主として燃焼流の光学計測, 数値解析に関する研究に従事.



安田俊彦
日立造船株式会社 技術研究所
環境事業担当マネージャー
〒551-0022
大阪市大正区船町 2丁目 2番 11号
Tel : 06-6551-9621
Mail : yasuda_to@hitachizosen.co.jp

略歴 : 1985年 大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了. 同年日立造船株式会社に入社. 主として燃焼装置, 燃焼のシミュレーション技術の開発に従事.



香月 正司
大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻 名誉教授
〒565- 大阪府吹田市山田丘 2-1
電話 : 06-879-7252
Fax : 06-879-7247
Mai : katsuki@mech.eng.osaka-u.ac.jp

略歴 : 1965年 大阪大学基礎工学部機械工学科卒業, 博士(工学), 乱流燃焼の計測, モデリング, 数値解析に関する研究に従事.