

## ■原著論文/ORIGINAL PAPER■

## 対向流における予混合正デカン噴霧火炎の構造と定在性に関する一考察

## Study on Flame Structure and Stabilization of Premixed n-Decane Spray in Counterflow

三上 真人\*・水田 好実・土田 祐己・小嶋 直哉

MIKAMI, Masato\*, MIZUTA, Yoshimi, TSUCHIDA, Yuki, and KOJIMA, Naoya

山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1  
Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611, Japan

2007 年 11 月 20 日受付 ; 2008 年 4 月 3 日受理 / Received 20 November, 2007; Accepted 3 April, 2008

**Abstract** : An experimental study was performed on combustion of lean-and stoichiometric-premixed sprays in counterflow. N-decane was used as a liquid fuel with low volatility. Flame structure and stabilization are discussed based on the flame-spread mechanism of droplet array with a low-volatility fuel. Both blue flame and yellow flame were established near the stagnation region. The flame spread among droplets and group flame formation were observed on the premixed spray side. Envelope flames were also observed on the approach air flow side. The blue-flame region consisted of the propagating premixed flame, the envelope diffusion flame around each droplet, the group diffusion flame at the initial stage, and the envelope flame around droplets passing through the group flame. The flame was stabilized within a specific range of the mean droplet diameter through the balance between the droplet velocity and flame-spread rate of the premixed spray.

**Key Words** : Spray Combustion, Premixed Spray, Flame Structure, Flame Stabilization, Counterflow

## 1. 緒言

対向流中における噴霧燃焼により、噴霧火炎構造や消炎条件に与える流れ場のひずみ効果を調べることができる [1-10]。対向流中における噴霧燃焼に関する研究は非予混合噴霧および予混合噴霧の両者について、実験的に [1-4]、数値計算により [5-7]、また解析的に [8] 研究がなされてきている。Continillo・Sirignano [5] は空気と予混合された単分散正オクタン噴霧流と空気とが対向する流れ場における燃焼について数値計算を行った。その研究では、予混合噴霧火炎が予混合燃焼的な反応帯と拡散燃焼的な反応帯との二つの反応帯から成っていることが示された。Li・Williams [6] は空気流と対向する過濃予混合メタノール噴霧の燃焼における反応機構の詳細を実験と数値計算により調べ、予混合的炎と拡散的炎からなる二重構造火炎について報告している。これらの対向流における予混合噴霧燃焼の研究では、多くの場合揮発性の高い燃料を用いている [5-8]。そのような噴霧火炎は一般に気体燃料の火炎に近い性質を有している。予混合噴霧火炎の数値計算におけるモデルでは [5-8]、噴霧における各液滴まわりの燃料濃度不均一性につ

いては考慮されていない。Nakamura ら [9] および Watanabe ら [10] は予混合噴霧と希薄予混合気または空気が対向する場における燃焼の 2 次元数値計算を行った。低揮発性燃料の正デカンを燃料として用い、直接数値計算を行うことにより、濃度不均一性を考慮した解析を行い、噴霧の群燃焼特性について議論を行っている。

本研究では、対向流中での予混合噴霧の燃焼挙動を、揮発性の低い燃料である正デカンを用いて実験的に調べる。特に群火炎の発生に到る火炎前縁付近の不均一構造を詳細に調べるとともに、火炎の構造と定在性について低揮発性燃料を用いた場合の燃料液滴列の燃え広がり機構に基づいて議論を行う。

## 2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験装置の概略を示す。本研究で用いた対向流予混合噴霧バーナは基本的に文献 4 の対向流噴霧拡散火炎の実験で用いたものと同じである。上下円筒管はともに二重円筒管であり、上側の内側円筒管からは空気が供給され、下側の内側円筒管からは空気を搬送気体とする予混合噴霧流が供給される。上下円筒管端間隔は 15 mm である。外側円筒管からは窒素が供給され、内側円筒からの流れと周囲

\* Corresponding author. E-mail: mmikami@yamaguchi-u.ac.jp

空気とのせん断を抑制するとともに, 予混合噴霧流と周囲空気との間での燃焼も抑制している. 内側円筒管の内径および長さはそれぞれ 23 mm および 700 mm である. 液体燃料は下側の内側円筒管下部に設置された二流体噴射弁 (1/8 type, Spraying Systems Co. Ltd.) により微粒化される. 二流体噴射弁に供給される微粒化用空気の流量により噴霧のザウタ平均液滴径を変化させた. 微粒化空気流量を変化させても下側円筒管に供給される総空気量が  $Q_{Air} = 18 \text{ L/min}$  と一定となるよう, 補助空気も内側円筒管内に供給した. 上側円筒管から供給される空気流量も 18 L/min である. 空気流のみによる対向流場でのひずみ速度は  $193 \text{ s}^{-1}$  である. ひずみ速度の算出方法は文献 4 と同様の方法で行った. 燃焼場へ供給される燃料流量  $Q_F$  は, 一定時間に噴射弁に供給される燃料量からドレイン量を差し引いて求めた. 燃焼の開始は, まず空気流と対向して予混合噴霧流を供給し, 次によどみ領域に小型のボタンバーナ火炎を挿入することで

行った. 燃料には低揮発性の正デカンを用いた. 大気圧, 300 K の空気中における正デカン液滴表面の気相側当量比は約 0.1 であり, 希薄可燃限界より十分小さい[11].

燃焼挙動の撮影は, 撮影速度 30 fps のデジタルビデオカメラ (DCR-PC100, SONY) および高速度ビデオカメラ (Phantom Ver.9.0, Vision Research, Inc.) により行った. 高速度ビデオカメラにはイメージインテンシファイア (C6653MOD, Hamamatsu Photonics) を装着して撮影を行った. 液滴径および液滴速度は位相ドップラー粒子分析計 (PDPA) (2D-PDPA/RSA, TSI/Aerometrics) により計測を行った. 噴霧を代表する平均液滴径として, 下側円筒管出口から 1 mm 上方において PDPA により計測した非燃焼時の

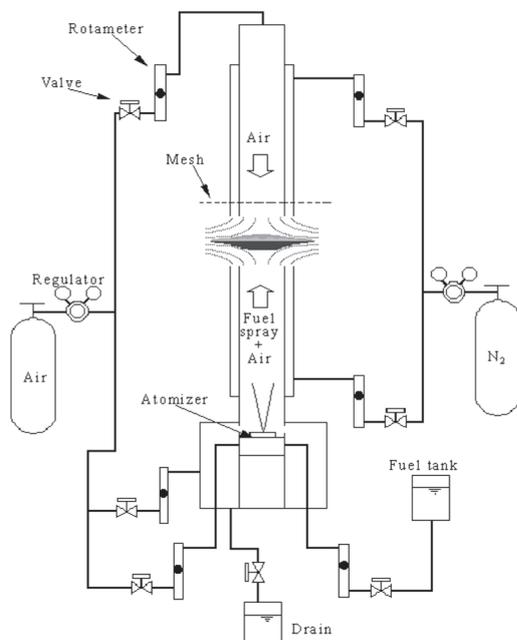


Fig.1 Counterflow premixed-spray burner.

ザウタ平均液滴径  $d_{32}$  を用いた. この計測点は本実験では PDPA を用いた場合に計測可能な最も上流の位置である. その点から軸方向に 1 mm 間隔で非燃焼時の噴霧特性計測を行ったが, 計測点の移動時には, PDPA のトランスミッタおよびレシーバをそれぞれステッピングモータ駆動の移動ステージで移動させた. 各計測点での液滴の最大サンプリング数は 10,000 であり, 最大計測時間は 1 分である. 計測した液滴径範囲は  $0.8\text{-}276 \mu\text{m}$  である.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 火炎構造

図 2 および図 3 にそれぞれ予混合噴霧の総当量比が  $\phi = 1.0$  および  $0.85$  の場合の代表的な火炎の写真を異なるザウタ平均液滴径  $d_{32}$  に対して示す. 写真の上下端はそれぞれおよそ上下円筒管出口に相当している. これらの写真より, 予混合噴霧火炎は平均液滴径の影響を受けて変化することがわかる. いずれの場合にも, 火炎は青炎と輝炎とから成っている. 火炎の予混合噴霧側 (下側) は青色であり, 黄色の輝炎は火炎中央部から上部に存在している. これらの写真からはわかりにくいですが, 輝炎の上部には細い青炎が多くみられた.  $\phi = 1.0$  では図 2(b)-(d) の場合, また,  $\phi = 0.85$  では

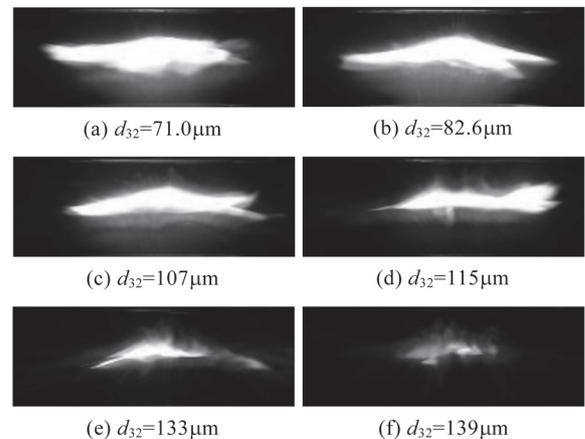


Fig.2 Burning premixed sprays for different atomization conditions ( $\phi = 1.0$ ).

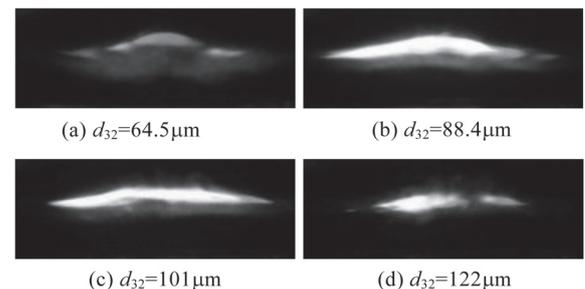


Fig.3 Burning premixed sprays for different atomization conditions ( $\phi = 0.85$ ).

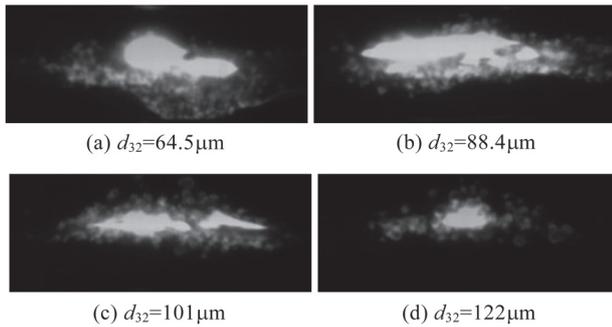


Fig.4 Intensified high-speed video images of burning premixed sprays for different atomization conditions ( $\phi = 0.85$ , 3900 fps).

$d_{32} = 88.4 \mu\text{m}$  の図 3(b) の場合、火炎は変動しながらよどみ領域に長時間定在化された。図 2(a) の  $\phi = 1.0$ ,  $d_{32} = 71.0 \mu\text{m}$  および図 3(a) の  $\phi = 0.85$ ,  $d_{32} = 64.5 \mu\text{m}$  の場合、着火後青炎の一部は何度か下側円筒管方向へ伸び、逆火に到達した。図 2(e) の  $\phi = 1.0$ ,  $d_{32} = 133 \mu\text{m}$  および図 3(c) の  $\phi = 0.85$ ,  $d_{32} = 101 \mu\text{m}$  の場合には、火炎が定在化される場合と火炎が吹き飛ばす場合とが見られた。図 2(f) の  $\phi = 1.0$ ,  $d_{32} = 139 \mu\text{m}$  および図 3(d) の  $\phi = 0.85$ ,  $d_{32} = 122 \mu\text{m}$  の場合には、着火後数秒で火炎の吹き飛びが生じた。

図 4 に高速度ビデオカメラで撮影した  $\phi = 0.85$  の火炎の代表的な写真を示す。写真の上下端はそれぞれおおよそ上下円筒管出口に相当している。白く連続して見える領域は図 3 において見られた黄色の輝炎に相当している。この輝炎を取り囲んで群火炎が存在しているが、その下部および上部には小さい球状のエンベロープ炎が多数存在していることがわかる。これらのエンベロープ炎の存在は、その領域では個々の液滴が単独で燃焼していることを示している。火炎上部、つまり対向する空気流側でのエンベロープ炎と同様の火炎は、対向流における多分散正ヘプタン噴霧拡散火炎において噴霧内液滴のストークス数が比較的大きく、蒸発ダムケラー数(蒸発特性時間に対する流れ場の特性時間の比)が比較的小さい場合に見られている[4]。つまり、貫通力が大きく、蒸発に時間のかかる液滴は群火炎を超え、対向する酸化剤中でエンベロープ炎を伴い単独燃焼を行う。今回用いた燃料は低揮発性の正デカンであり、未燃液滴はよどみ領域の火炎に近づくまで蒸発活性化がなされない。そのため蒸発ダムケラー数は極めて小さい。また、本対向流での液滴のストークス数は直径  $100 \mu\text{m}$  の液滴では  $St = 3.9$  であり、また直径  $200 \mu\text{m}$  の液滴では  $St = 16$  であり、大きな貫通力を持っていることがわかる。

火炎下部つまり火炎前縁付近の燃焼挙動の詳細を図 5 に示す。各画像の縦方向の幅は  $3 \text{ mm}$  に相当している。これより、火炎前縁付近では未燃液滴へ燃え移ることによりエンベロープ炎が形成され、その後エンベロープ炎が群火炎に取り込まれている様子がわかる。このような予混合噴霧流中に定在化された火炎の前縁付近の特性は静止予混合噴霧中における燃え広がり火炎の特性を通して理解できるも

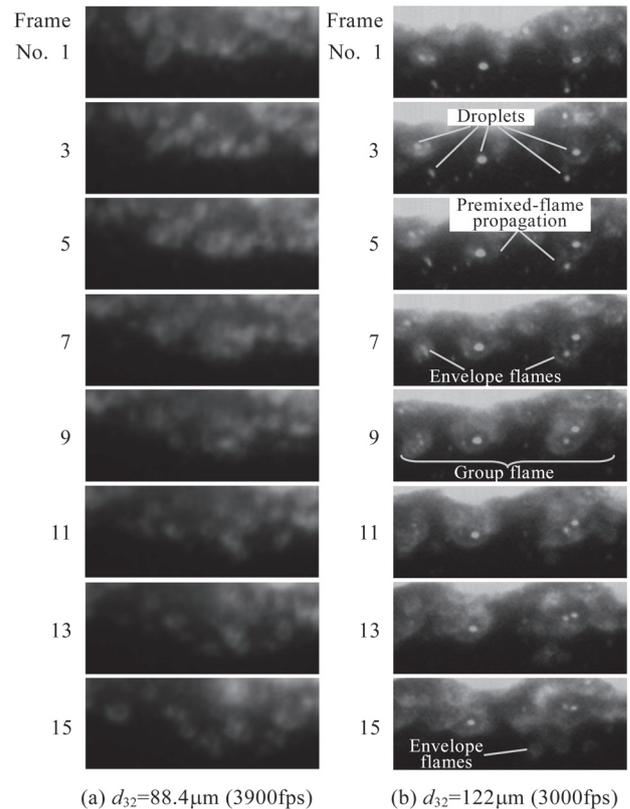


Fig.5 Intensified high-speed video images showing flame spread to droplets in lower parts of the premixed-spray flame ( $\phi = 0.85$ ).

のと考えられる。以下では、燃え広がりを示す最も基本的な多液滴系である直線液滴列の燃え広がりに関する知見を考慮して、対向流における予混合噴霧火炎の前縁付近の構造について議論を行う。

図 6(a) に液滴列の燃え広がり概念図を示す。ここでは、低揮発性燃料を用いた場合の燃え広がり液滴間隔の比較的大きい場合を示している。液滴列の燃え広がり機構は以下の通りである。未燃液滴が火炎前縁から熱伝導により加熱され、液滴周りに可燃性混合気層が形成される。可燃性混合気層において着火が生じ、予混合火炎が混合気層を伝播し、最終的に液滴周りにエンベロープ拡散火炎が形成される。液滴間隔がある程度以上近い場合にはエンベロープ炎は直前の拡散火炎と結合し、集合火炎を形成する。正デカンを用いた場合、大気圧、 $300 \text{ K}$  における液滴表面の気相側当量比は約  $0.1$  と希薄可燃限界より十分小さいため、未燃液滴に燃え広がるためには図 6(a) と同様に直前の拡散火炎からの加熱が必要である[11]。これと同様の現象が、対向流中に定在化された予混合正デカン噴霧火炎の前縁部においても生じていると考えられる。

図 6(b) に上記の液滴列の燃え広がり機構に基づいた予混合噴霧燃焼概念図を示す。低揮発性燃料を用いた場合、未燃液滴は拡散火炎から熱伝導により加熱され、各液滴周りに可燃性混合気層が形成される。混合気層内で着火が生じ、予混合火炎が混合気層内を伝播し、液滴周りに青色の

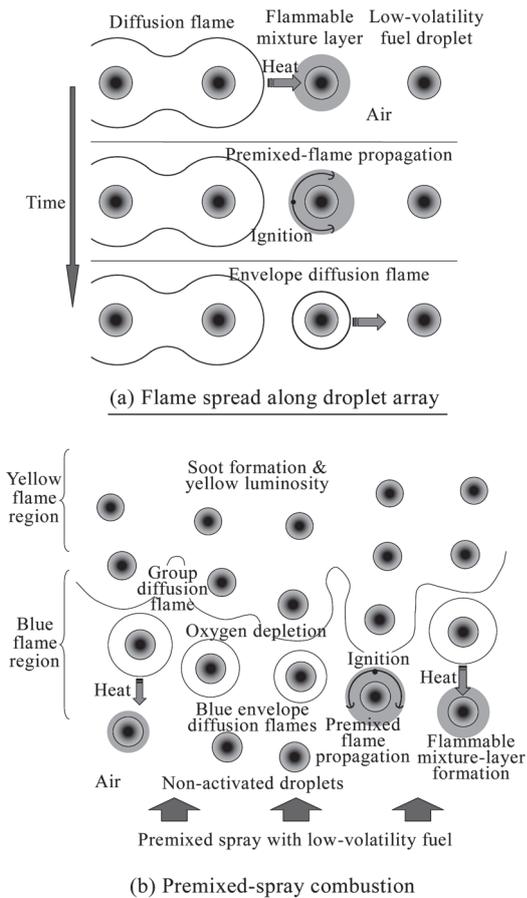


Fig.6 Schematics of flame spread along a linear droplet array and premixed-spray combustion with a low-volatility fuel.

エンベロープ拡散火炎が形成される。このような液滴周りにおける予混合火炎伝播は図 5(b) において明確に見られており、図 5(a) の条件においても見られた。液滴直径が着火限界直径より小さい場合にはその液滴周りにはエンベロープ炎は形成されないため、複数液滴から成るクラスター回りにおいて初期の予混合火炎伝播および拡散火炎形成が可能となると考えられる。エンベロープ火炎の直径は時間とともに増大する。拡散火炎間で過度の酸素不足が生じると個々の液滴周りに形成されていたエンベロープ炎は結合し、液滴クラスター回りに群火炎を形成する。群火炎内の燃料過濃領域で滞留時間が十分長い領域ではすす生成が生じ、すすの発光による黄色の輝炎が生じる。対向流においては、よどみ領域に近づくにしたがって、液滴の軸方向速度は低下するため、また、貫通力の大きな液滴はよどみ領域を通過後押し戻されるため、よどみ領域付近には液滴が集積し、すす生成が生じやすい。先述のとおり群火炎を貫通するほど大きな液滴は群火炎上部の空気内で青色のエンベロープ炎として燃焼する。以上から、予混合噴霧火炎の前縁付近の青炎領域は液滴周りの可燃性混合気層を伝播する予混合火炎、液滴周りに形成されるエンベロープ拡散火炎、液滴クラスター周りに形成される群火炎のうちすす生成の

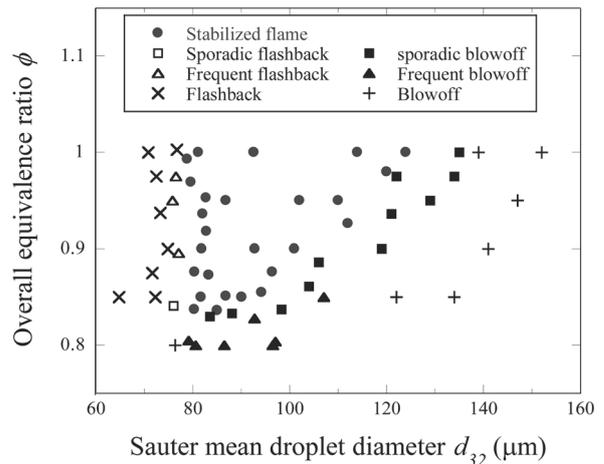


Fig.7 Combustion map of premixed-spray flame in counterflow.

生じていない領域から成るといえる。

### 3.2. 火炎の定在性

図 7 に対向流における予混合噴霧の燃焼状態を予混合噴霧総当量比および非燃焼時のザウタ平均液滴径を軸とする平面に示す。各条件において着火後 1 分間の燃焼状態を 10 回観察し、図 7 に示した。吹き飛びまたは逆火が生じる場合には、各状態が 5 回以下の頻度で生じる場合 (sporadic)、5 回以上 9 回以下の頻度で生じる場合 (frequent)、および常に生じる場合とに区別している。図 7 よりわかるとおり、火炎の吹き飛び条件は平均液滴径と総当量比との両方に依存している。総当量比が小さいほど火炎が定在化される平均液滴径の最大値は小さくなり、ある総当量比以下では定在化されなくなることがわかる。一方、逆火の発生条件は吹き飛びの場合ほど総当量比に依存していない。

図 5 に示されたとおり、予混合噴霧火炎の前縁付近では未燃液滴への燃え広がりが生じていた。このことから、予混合噴霧火炎は軸方向の平均液滴速度と平均燃え広がり速度が釣り合った場合に定在化されると予想される。図 8 に定在化機構の概念図を示す。微小重力場における正デカン液滴列の燃え広がり実験によると、無次元燃え広がり速度  $Vd/a$  はある無次元液滴間隔  $S/d$  において最大値を示す [11]。ここで、 $S$  は液滴間隔、 $d$  は液滴直径、 $a$  は空気の温度伝導率である。対向流において噴霧中の軸方向の平均液滴間隔  $S/d$  は液滴がよどみ領域に近づくにつれて小さくなる。そのため、図 8 に示すように、軸方向の平均燃え広がり速度  $V_f$  はよどみ領域に近づくにつれ一旦増大し、最大値をとった後、減少する。燃え広がり速度とは異なり、平均液滴速度  $V_d$  はよどみ領域に近づくにつれて減少する。よって、下側円筒管出口とよどみ領域の間には平均液滴速度  $V_d$  と燃え広がり速度  $V_f$  が安定して釣り合う点が存在し、これにより火炎が定在化されるといえる。Mikami ら [11] によれば液滴列の燃え広がり速度は基本的に液滴直径に反比例す

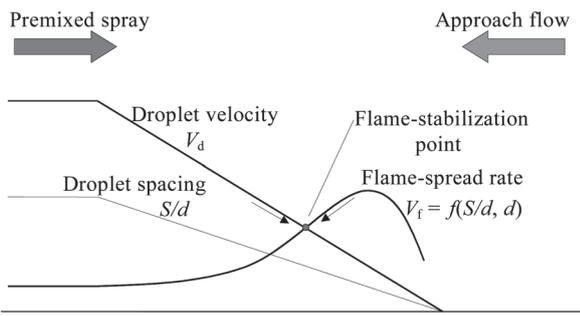


Fig.8 Stabilization mechanism of premixed-spray flame with less-volatile fuel in counterflow.

るため、噴霧の平均液滴径が大きいほど燃え広がり速度  $V_f$  は低下し、 $V_d$  と  $V_f$  の交点が存在しなくなると吹き飛びが生じると考えられる。逆に液滴径がある程度以上に小さくなると  $V_d$  と  $V_f$  の交点は円筒管出口に達し、 $V_f$  が  $V_d$  を上回ると逆火を生じると考えられる。また、総当量比を増大させると、平均液滴間隔が減少することから、燃え広がり速度が最大値をとる位置もより下側円筒管寄りに移動し、逆火および吹き飛びはともに生じやすくなる。よって図 8 の定在化機構は定性的に図 7 の実験結果を説明可能である。

平均燃え広がり速度を以下のとおり推算する。Mikami ら[11]によれば、液滴列の無次元燃え広がり速度  $V_{fd}/a$  は反応律速でなければ液滴直径には依存せず、無次元液滴間隔  $S/d$  のみの関数である。よって、 $S/d$  および  $d$  が既知であれば  $V_f$  を知ることができる。ここで、下側円筒管出口における予混合噴霧を格子点間隔  $S$  の正方形の格子点に直径  $d$  の液滴が配置された空気中の液滴群で近似し、格子内の空気と液滴との体積比を予混合噴霧流における空気と燃料の流量比  $Q_{Air}/Q_F$  と等置することにより、下側円筒管出口における無次元平均液滴間隔  $(S/d)_0$  は

$$(S/d)_0 = \left\{ \frac{\pi}{6} \left( \frac{Q_{Air}}{Q_F} + 1 \right) \right\}^{1/3} \quad (1)$$

と表わされる。この液滴群は下側円筒管出口において平均液滴速度  $V_{d0}$  であり、液滴は平均時間間隔  $\Delta t$  毎に円筒管出口を通過すると考える。よどみ領域に近づくにつれ液滴の噴流軸方向の平均速度  $V_d$  は減少する。 $\Delta t$  間の  $V_d$  の変化を無視するとある軸方向位置における軸方向の平均液滴間隔  $S$  は  $S = V_d \Delta t$  と表わせるため、 $V_d$  の減少に伴い、 $S$  も減少する。よって、液滴直径  $d$  が変化しない非蒸発の場合、ある軸方向位置における無次元平均液滴間隔  $S/d$  は、その位置における平均液滴速度  $V_d$ 、下側円筒管出口における平均液滴速度  $V_{d0}$  および平均液滴間隔  $(S/d)_0$  を用いて以下のように求められる。

$$S/d = \frac{V_d}{V_{d0}} (S/d)_0 \quad (2)$$

本実験では、円筒管出口での平均液滴速度  $V_{d0}$  には、下

側円筒管出口から 1 mm 上方において PDPA により計測した非燃焼時の液滴平均速度を用いた。各点における  $V_d$  も同様に PDPA を用いて非燃焼時に計測を行った。この  $S/d$  に対応する平均燃え広がり速度  $V_f$  は Mikami ら[11]による微小重力場での 300 K 雰囲気における正デカン液滴列の燃え広がり速度  $V_{fd}$  から求めた。ただし、その際に必要となる液滴径  $d$  には、各位置において PDPA により計測した非燃焼時のザウタ液滴平均径  $d_{32}$  を用いた。Aggarwal [12]は多分散予混合噴霧の燃え広がりを数値計算により解析し、燃え広がり特性を表す代表液滴径としてザウタ平均液滴径が適しているとしている。

本実験条件における軸方向の平均液滴速度  $V_d$  と推算した平均燃え広がり速度  $V_f$  を図 9 に示す。これより、どの条件においても  $V_d$  と  $V_f$  が釣り合う点がよどみ領域に存在していることがわかる。図中には定在化された火炎前縁位置の変動範囲(標準偏差)も合わせて示している。火炎前縁の平均位置は  $V_d$  と  $V_f$  のつり合い位置より 2 mm 程度上流に位置しているが、その平均液滴径への依存性は定性的に一致している。本研究では 1 次元液滴列の燃え広がり結果を用いて議論を行ったが、実際の噴霧では液滴がランダムに空間に分散しており、燃え広がり経路も直線的ではなく複雑である。定量的な予測のためにはこのような液滴のランダム分散性などの噴霧の 3 次元性の考慮、また、気液相対速度の影響の考慮なども必要であると考えられる。

平均液滴径  $d_{32} = 122 \mu\text{m}$  の場合には、着火後図に示される範囲で火炎前縁位置は変動した後吹き飛びに到った。図 10 に吹き飛びが生じる直前の火炎の代表的な画像を示す。この画像の中央部付近にはエンベロープ火炎間の間隔が大きく空いた領域が生じているが、この火炎はこの後、画像上では中央部から左右に分離して流され、吹き飛びが生じ

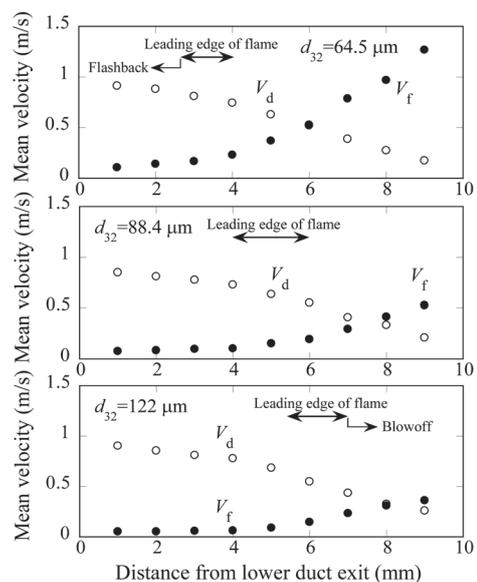


Fig.9 Measured mean droplet velocity  $V_d$  and estimated mean flame-spread rate  $V_f$  for different atomization conditions ( $\phi = 0.85$ ).

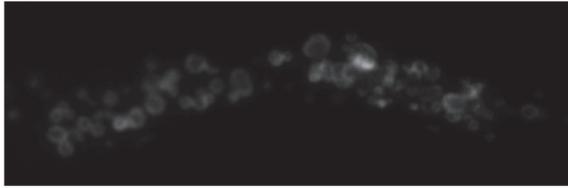


Fig.10 Intensified high-speed video image of a burning premixed spray just before blowoff ( $\phi = 0.85$ ,  $d_{32} = 122\mu\text{m}$ , 3900 fps).

た. 実際の噴霧は多分散であり, 液滴径によって局所燃え広がり速度は異なる. また, 局所の液滴間隔も等間隔ではない. このため,  $V_d$  と  $V_f$  のつり合い位置は常に変動し, 一度つり合い条件が保てなくなると吹き飛びが生じるといえる.

平均液滴径  $d_{32} = 64.5 \mu\text{m}$  の場合には, 着火後図9に示される範囲で火炎前縁位置は変動した後逆火に到った.  $d_{32} = 64.5 \mu\text{m}$  の場合の逆火の発生も, このつりあい位置の変動が起因となっていると考えられる. ただし, 式(1)により求めた円筒管出口における無次元平均液滴間隔は  $(S/d)_0 = 17.8$  であり, 300 Kにおける正デカン液滴列の燃え広がり限界間隔の  $(S/d)_{\text{limit}} = 14$  [11]より大きく, 噴霧の3次元性を考慮しても円筒管内の定常的な燃え広がりが不可能である可能性が高い. 燃え広がり限界は温度により増大することが液滴列の実験により知られており[11], このことから, 逆火が生じるためには, 変動により火炎の温度境界層が下側円筒管に達し, それにより円筒管から供給される噴霧の温度が上昇したことが原因であると考えられる. Nunomeら[13]は微小重力実験により希薄予混合正デカン噴霧の燃え広がり実験を行い, 総当量比一定のもとでは燃え広がり速度はある液滴径で最大値をとり, それより液滴径が小さいほど燃え広がり速度が低下することを示した. 図7においても  $\phi = 0.80$ ,  $d_{32} = 76.5 \mu\text{m}$  では吹き飛びが見られたことから, 上流部での加熱が生じない場合には吹き飛びが生じる可能性が考えられる.

#### 4. 結言

対向流中での予混合噴霧の燃焼挙動を, 揮発性の低い燃料である正デカンを用いて実験的に調べた. 火炎の構造と定在性について低揮発性燃料を用いた場合の燃料液滴列の燃え広がり機構に基づいて議論を行った. 得られた結論は以下のとおりである.

1. 予混合噴霧火炎の前縁付近では未燃液滴への燃え広がりが生じることによりエンベロープ炎が形成され, それらが干渉し, 結合することで群火炎が形成されている.
2. 予混合噴霧火炎はある平均液滴径範囲内で定在化される. その範囲より大きい平均液滴径の場合には火炎が吹き飛び, 小さい場合には逆火または吹き飛びが生じる. また, 吹き飛び限界を示す平均液滴径は総当量比が小さ

いほど小さい.

3. 火炎は液滴速度と予混合噴霧の燃え広がり速度とのつり合いにより定在化されると考えられる. 1次元液滴列の燃え広がり速度を用いて求めた火炎位置の平均液滴径への依存性は実際の火炎の依存性と定性的な一致を示した.

#### 謝辞

本研究の一部は(財)日本宇宙フォーラムが推進している宇宙環境利用に関する公募地上研究プロジェクトの一環として行われた. また, 本研究を行うにあたり本学大学院生の菊池雄太君および仲地脩烈君の多大な協力を得たことに謝意を表す.

#### References

1. Lacas, F., Darabiha, N., Versaevl, P., Rolon, J. C. and Candel, S., *Proceedings of the Combustion Institute* 24: 1523-1539 (1992).
2. Chen, G. and Gomez, A., *Proceedings of the Combustion Institute* 24: 1531-1539 (1992).
3. Li, S. C., Libby, P. A. and Williams, F. A., *Combustion and Flame* 94: 161-177 (1993).
4. Mikami, M., Miyamoto, S. and Kojima, N., *Proceedings of the Combustion Institute* 29: 593-599 (2002).
5. Continillo, G. and Sirignano, W. A., *Combustion and Flame* 81: 325-340 (1990).
6. Li, S. C. and Williams, F. A., *Proceedings of the Combustion Institute* 26: 1017-1024 (1996).
7. Gutheil, E. and Sirignano, W. A., *Combustion and Flame* 113: 92-105 (1998).
8. Greenberg, J. B., Sarig, N., *Combustion and Flame* 104: 431-459 (1996).
9. Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R., Katsuki, M., *Physics of Fluids* 17: 123301 (2005).
10. Watanabe, H., Kurose, R., Hwang, S. M., Akamatsu, F., *Combustion and Flame* 148: 234-248 (2007).
11. Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Kikuchi, M., Wakashima, Y., Yoda, S., *Combustion and Flame* 146: 391-406 (2006).
12. Aggarwal, S. K., *Journal of Propulsion and Power* 4: 14-21 (1988).
13. Nunome, Y., Kato, Y., Maruta, K., Kobayashi, H., Niioka, T., *Proceedings of the Combustion Institute* 29: 2621-2626 (2002).