



研究論文

対向流バーナを用いた燃料過濃液滴混在予混合気火炎の観察と燃焼速度測定

Observations and Burning Velocity Measurements of a Fuel Rich Flame of Fuel Vapor-Air Premixture Containing Fine Fuel Droplets Using a Counterflow Burner

及川 尚樹,
(Naoki OIKAWA)
日本大学
(Nihon Univ.)

野村 浩司,
(Hiroshi NOMURA)
日本大学
(Nihon Univ.)

氏家 康成
(Yasushige UJIIE)
日本大学
(Nihon Univ.)

A uniform spray counterflow burner was developed to perform a fundamental study on partially-prevaporized spray combustion. Condensation method was applied to generate partially-prevaporized spray streams. A laser sheet technique was used for observations of droplet behavior in a flame. Droplet velocity upstream of the leading edge of a blue flame was measured with a particle tracking velocimetry (PTV). A flame was observed with a color CCD camera. Flame observations and burning velocity measurements were performed for spray streams with mean droplet diameters between 16 and 29 μm and strain rate of about 300 s^{-1} (281 to 338 s^{-1}). Total equivalence ratio was varied from 1.2 to 1.6 and liquid equivalence ratio was set at about 0.2 and 0.3. Ethanol as a volatile fuel and n-decane as a low-volatile fuel were employed. A flame could not be stabilized below 1.2 in the total equivalence ratio. For both fuels, it was found that droplets existed in a blue flame when the mean droplet diameter was larger than 19 μm . In the case of n-decane spray streams, envelope flames around a droplet which passed through a blue flame were observed. Burning velocity of ethanol spray flames of 0.2 and 0.3 in the liquid equivalence ratio increases with the increase in the total equivalence ratio. The burning velocity of n-decane spray flame took the maximum value at 1.3 in the total equivalence ratio when the liquid equivalence ratio was 0.2. For spray streams of 0.2 in the liquid equivalence ratio, burning velocity of spray flame of low-volatile n-decane was larger than that of volatile ethanol in the total equivalence ratio range from 1.2 to 1.4. The results suggested that droplet evaporation in a blue flame decreased flame temperature and led to slow combustion.

Keywords: Spray combustion, Burning velocity, Volatility, Counterflow, PTV

1. はじめに

部分予蒸発燃料噴霧の燃焼機構を解明することは、ディーゼル機関のノッキング制御やガソリン機関の燃焼における残留燃料液滴の影響解明、予蒸発希薄予混合ガスタービンの予蒸発管における逆火防止などに有用な知見が得られると考えられる。噴霧燃焼の研究において、液滴直径分布を極力狭くした燃料液滴群を実験対象とするアプローチは、実験結果の考察を容易にする有効な手段である。凝縮法を利用して燃料蒸気-空気予混合気中に均一な燃料液滴群を生成し、部分予蒸発予混合燃料噴霧の基礎的な燃焼実験を行う試みは、HayashiとKumagai⁽¹⁾によって始められた。著者らは、均一燃料液滴-蒸気-空気混合気（以下、液滴混在予混合気）の球状火炎伝播を対象とした研究を行った⁽²⁾⁽³⁾。その結果、平均液滴直径が小さい場合、液滴混在予混合気（燃料希薄液滴混在予混合気）では火炎伝播速

度が大きくなり、総当量比が1を上回る液滴混在予混合気（燃料過濃液滴混在予混合気）では逆に小さくなることわかった。また、火炎と燃料液滴の干渉を詳細に観察することを目的とし、均一液滴混在予混合気バーナを用いて液滴混在予混合気流中に火炎を定在させ、液滴の挙動観察や燃焼速度の測定を行った⁽⁴⁾。その結果、平均液滴直径および流れの伸長率が液滴の火炎貫通度に及ぼす影響や、液滴混在予混合気流の伸長率と燃焼速度の関係が明らかになった。これまで、本研究では斜め平面火炎を液滴混在予混合気中に保炎して実験を行ってきた。しかしながら、保炎が安定して行える液滴混在予混合気流の条件が総当量比で0.7~1.0の範囲に限られており、流れの伸長率も大きく変化させることができなかった。これは、斜め平面火炎の場合、火炎の部分ごとに伸長率が異なるため、火炎中に燃焼速度の差が生じ、その差が限界を超えたことが原因であると推察された。そこで、火炎のほぼ全域で伸長率が同一になるよう、対向流れ場に平面火炎を保炎する装置への改良を行った。同時に、15 s程度であった液滴混在予混合気流の生成持続時間を無制限にする改良も施した。これまで火炎が不安定で実験が行えなかった過濃液滴混在予混合気流中に平面火炎を定在させ、燃料液滴が

原稿受付：2009年4月30日

液滴混在予混合気の燃焼速度に及ぼす影響を調べた。また、揮発性の高い燃料の実験結果と低い燃料の実験結果を比較することにより、燃料液滴の反応帯における蒸発が燃焼速度に及ぼす影響を考察した。

対向流場を利用した噴霧燃焼の実験的基礎研究は 1960 年頃より数多く行われている⁽⁹⁾。流れの中軸付近の軸方向流速分布や温度分布などを軸方向座標のみの関数として表すことが可能であり、実験結果の解析的考察が容易であるのが大きな理由である。さらに現象を単純化するために、噴霧の液滴直径分布幅を狭め、かつ液滴を空間的に均一に分散させる取り組みもなされている。Chen と Gomez⁽⁶⁾ は静電霧化装置を対向流噴霧燃焼装置に採用し、単純化した噴霧の拡散火炎における液滴速度・直径分布を調べている。対向流場を利用した予混合噴霧の燃焼に関する実験的研究も数多く行われている(例えば文献 7~9)が、液滴直径分布幅を狭めて現象を単純化する取り組みは若林ら⁽¹⁰⁾の他にはなされていないようである。逆火が起こった場合に繊細な均一霧化装置が破損してしまうおそれがあるためだと考えられる。彼らの実験においては、液滴空間分布の均一化は図られていない。本報では、燃料蒸気-空気予混合気中に燃料液滴が分散している部分予蒸発予混合噴霧の単純モデルを研究対象とし、前述の凝縮法を用いて液滴直径分布幅が極力狭く、かつ液滴空間分布が均一な液滴群を生成することを試みた。凝縮法を用いることで気相の燃料蒸気は常に飽和蒸気圧となるため、液滴混在予混合気の温度から気相の当量比が同定できる点も液滴群の生成に凝縮法を採用する長所である。

2. 実験装置および方法

2.1 液滴混在予混合気流の生成原理

予混合気中に燃料液滴を均一に分散させる方法として、凝縮法を採用した。これは、飽和燃料蒸気-空気混合気を冷却することで燃料蒸気の一部を多数の液滴に凝縮させる方法である。この液滴群生成法の原理は Wilson の霧箱と同じであり、液滴直径分布幅が狭く、空間的に均一な液滴群を生成することが可能である。連続的に飽和燃料蒸気-空気混合気を生成・冷却することにより、時間的に安定した層流の液滴混在混合気流を実現した。

2.2 実験装置

実験装置全体の概略を図 1 に示す。実験装置は主に対向流均一噴霧バーナ、制御装置および計測装置から構成される。対向流バーナの概略を図 2 に示す。対向流バーナは、均一噴霧生成部と対向流用円筒管から構成される。上部円筒管出口および均一噴霧生成部ノズル出口の内直径は 8 mm である。両出口間隔は 15 mm とした。上部円筒管からは窒素を供給した。均一噴霧生成部は、主に蒸発部、加熱部、冷却部およびノズルから構成される。燃料ポンプより供給された燃料を蒸発部で全て蒸発させ、同じ流路を流れる純空気に混合させることで、長時間、安定した燃料蒸気-空気予混合気の生成が可能である。揮発性の低い燃料での実験に対応させるため、本実験では蒸発部電気ヒータを高出力なものに変更した。蒸発部で生成された燃料蒸気-空気予混合気は、保温された配管を通して過熱部に導かれる。過熱部で燃料蒸気-空気予混合気の過熱度を制御することで、予混合気の冷却部滞在時間を一定とした場合の凝縮時間を変化させ、液滴混在予混合気流の平均液滴直径を制御した。冷

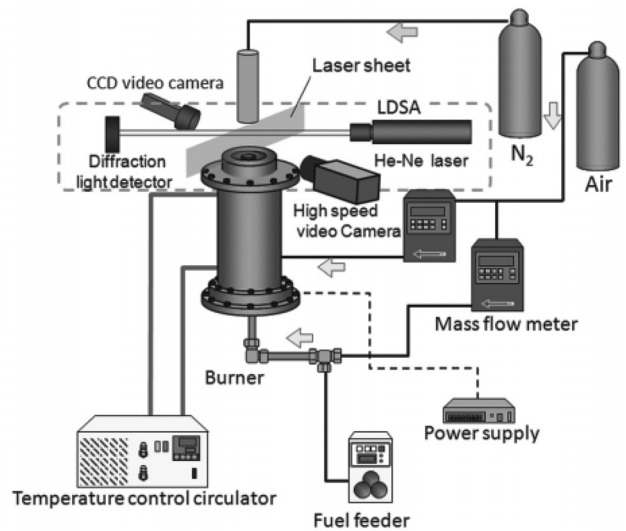


Fig. 1 Experimental apparatus.

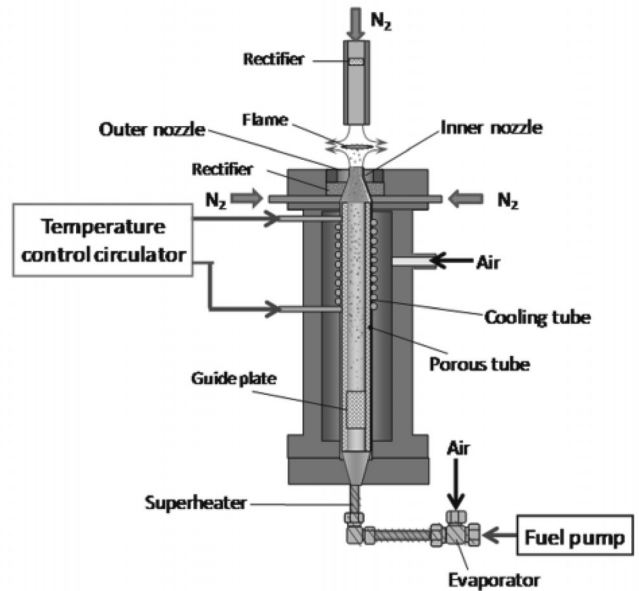


Fig. 2 Partially-prevaporized-spray burner for counterflow.

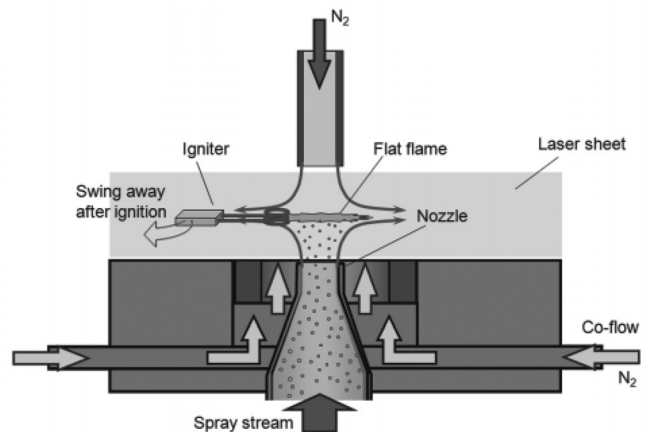


Fig. 3 Detail illustration of flame holding part.

却部管内壁には多孔質円筒を用い、冷却された空気を多孔質円筒から燃料蒸気-空気予混合気流に供給・混合することで燃料蒸気-空気予混合気を冷却した。冷却空気は主として冷却部入り口付近で燃料蒸気-空気予混合気流に供給し、中央・出口付近では多孔質円筒内壁に液滴が付着しない程度に微量供給した。冷却部の内径は 26 mm であり、長さは 200 mm である。生成された液滴混在予混合気は、ノズルより噴出される。ノズル内壁面で燃料蒸気が凝縮するのを防ぐため、ノズル外壁に電気ヒータを巻き、ノズルを保温した。図 3 に、保炎部詳細を示す。ノズルは同軸流ノズルであり、周囲流を流す外ノズルの出口内径は 20 mm である。周囲流は、周囲空気中の酸素が予混合気流の燃焼に及ぼす影響を排除することが目的であり、周囲流気体には窒素を用いた。流路には整流器を設けた。周囲流速は 0.1 m/s とした。点火用電熱線により液滴混在予混合気流を点火し、対向流中に平面火炎を保炎させた。点火終了後、速やかに点火用電熱線を退避させた。ノズル出口における半径方向燃料濃度の均一性に関しては、ノズル出口に予混合円錐火炎を保炎し、角度法で燃焼速度を半径方向に計測して確認した。液滴直径および速度の均一性に関しては、位相ドップラー流速計を用い、ノズル中心から半径 2.5 mm の範囲で液滴直径・速度が均一であることが確認された⁽¹⁾。

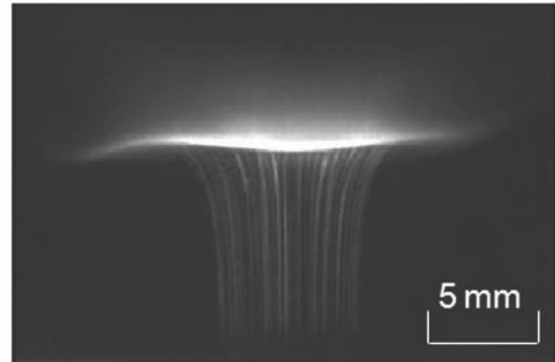
計測装置は、レーザ光散乱方式粒度分布測定装置 (LDSA)、Particle Tracking Velocimetry (PTV)、CCD ビデオカメラ、質量流速計測・制御装置、白金測温抵抗体である。LDSA は液滴混在予混合気流の液滴直径および液滴直径分布の計測に、質量流速計測・制御装置は空気流量の計測に、白金測温抵抗体は蒸発部、過熱部出口、およびノズル出口での混合気の温度計測に用いた。LDSA による液滴直径分布計測は、液滴混在予混合気流に点火を行う直前の非燃焼時に行った。ノズル出口上方 5 mm の位置で液滴混在予混合気流の中心軸と直径 6 mm の He-Ne レーザ光の中心軸を直交させ、LDSA で液滴群からの回折光を計測した。液滴混在予混合気流中の液滴挙動は、YAG レーザ (中心波長: 532 nm, 出力: 0 ~ 1 W) を光源とするレーザシート法によりイメージインテンシファイア付き高速度カメラ (画像寸法: 252 × 188 pixels または 256 × 512 pixels, フレームスピード: 2000 fps または 1900 fps, 露光時間: 30 μs) を用いて観察した。イメージインテンシファイアのゲインと YAG レーザの出力は、液滴と青炎が同時に記録できるように設定した。レーザシートは、ノズル中心軸を含むように照射した。レーザシート面における液滴速度のノズル軸方向 (y 軸方向) 成分 v_{iy} の分布を PTV (ライブラリー社製, Flow-PTV) によって計測した。ノズル中心軸を中心とした幅 0.4 mm, y 軸方向 0.25 mm の矩形領域で約 250 ms 間に計測された液滴速度 y 軸方向成分の 5 ~ 100 データの平均値 (4 データ以下の場合は無効) を、矩形領域の中心の v_{iy} とした。データ数が少なかった計測矩形領域は予熱帯内である。また、燃焼速度を算出する際に必要となる青炎前縁位置は、約 250 ms 間のレーザシート画像を重ね合わせた画像から求めた。未燃混合気側から輝度が急激に増大する y 座標を求め、青炎の前縁位置とした。液滴混在予混合気流全体はレーザシート法により、保炎された火炎は直接写真法により、1 台の CCD ビデオカメラ (フレームスピード: 30 fps, 露光時間: 1/30 s) で同時に撮影した。

2.3 実験パラメータ

燃料には、揮発性の高い燃料としてエタノール (純度

Table 1 Set values of experimental parameter.

Fuel	P [MPa]	ϕ_t	ϕ_l	d_m [μm]	α [s ⁻¹]	v_0 [m/s]
ethanol	0.1	1.2, 1.3, 1.4	0.2, 0.3	~20	300	1.0-1.52
decane	0.1	1.2, 1.3, 1.4, 1.6	0.2, 0.3	~20	300	1.0-1.43



$$\phi_t = 1.2, \phi_l = 0.18, d_m = 25 \mu\text{m}$$

Fig. 4 Laser-sheet image of an ethanol droplet-vapor air stream.

99.5%) および揮発性の低い燃料として正デカン (純度 99%) を使用した。酸化剤には純空気 (G3) を使用した。平均液滴直径にはザウタ平均粒径 d_m を用いた。総当量比 ϕ_t は、蒸発部と冷却部に供給した空気の総供給流量と燃料供給流量から決定した。本実験装置では、液滴混在予混合気流の気相では燃料蒸気が飽和状態になっているので、気体当量比 ϕ_g はノズル出口の混合気温度から求めた。液体当量比 ϕ_l は、 $(\phi_t - \phi_g)$ と定義した。燃焼実験はすべて 0.10 MPa の圧力条件で行った。総当量比は 1.2 から 1.6 の範囲で変化させ、液体当量比は約 0.2 および 0.3 とした。液滴混在予混合気流のノズル出口平均流速 v_0 は 1.0 から 1.52 m/s の範囲で変化させた。実験パラメータの設定値をまとめると、表 1 のようになる。

3. 実験結果および考察

3.1 エタノールを用いた実験

揮発性の高い燃料としてエタノールを用い、液滴混在予混合気の燃焼実験を行った。図 4 に、対向流れ場に保炎させた平面火炎を CCD ビデオカメラで撮影した画像を示す。液滴混在予混合気流の条件は、 $\phi_t = 1.2$, $\phi_l = 0.18$, $d_m = 25 \mu\text{m}$ である。ノズルから噴出する液滴混在予混合気流が安定した層流であり、液滴が偏りなく分散していることが確認できる。この液滴混在予混合気流の液滴直径分布を LDSA により計測した結果を図 5 に示す。比較的液滴直径が大きく、直径分布幅が狭い液滴混在予混合気の生成に成功したことが確認できた。この程度の平均液滴直径と液体当量比の条件では、燃料希薄液滴混在予混合気流では保炎が困難であったため、燃料過濃液滴混在予混合気流で燃焼実験を行った。

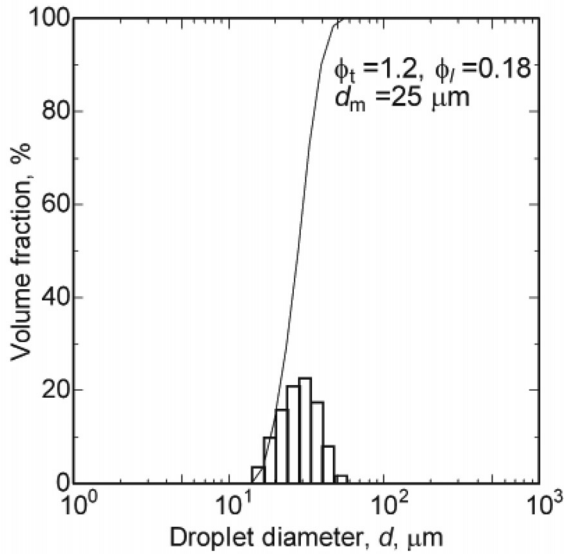


Fig. 5 Typical of droplet diameter distribution.

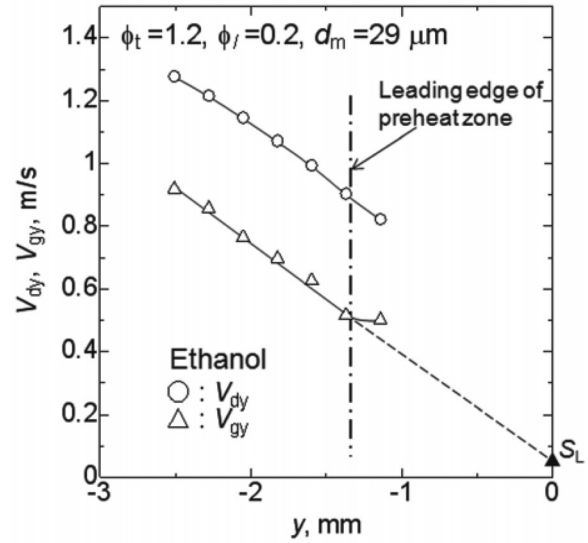


Fig. 6 Droplet and gas velocity profiles along y-axis.

図6に、 $\phi_t = 1.2$, $\phi_l = 0.2$, $d_m = 29 \mu\text{m}$ の液滴混在予混合気において、火炎上流ノズル中心軸付近の v_{dy} および、気体速度 y 軸方向成分 v_{gy} の分布を調べた結果を示す。気体流速は、液滴速度データと液滴の運動方程式から求めた⁽²⁾。その際の液滴直径には、算術平均直径 d_{10} を使用した。グラフの横軸は y 座標、縦軸は液滴速度および気体速度である。ノズル中心軸上の青炎前縁の位置を $y = 0 \text{ mm}$ とし、液滴混在予混合気流の流れ方向を y 軸の正の向きとした。青炎に近づくにしたがって、 v_{dy} は傾きが徐々に急になりながら減少していることがわかる。 v_{gy} は青炎に一番近いプロットを除いてほぼ直線的に減少していることがわかる。この直線部の傾きの絶対値を流れの伸長率 a とした。また、 y が -1.4 mm を超えるとデータ点が直線から外れることより、 $y = -1.4 \text{ mm}$ 付近が火炎の予熱帯前縁であると考えられる。

図7に青炎に突入する液滴の画像を示す。液滴混在予混合気流の条件は、 $\phi_t = 1.2$, $\phi_l = 0.20$, $d_m = 28 \mu\text{m}$ である。画像は、50 ms 間のレーザシート画像 100 枚を重ね合わせた画像である。白い点として写っているのが液滴であり、青炎は背景が若干明るい灰色になっている部分である。画像には青炎の前縁およびおおよその後縁位置を破線で示した。多くの液滴が青炎に突入していること、青炎を突き抜ける液滴は少ないことなどがわかる。

図8に、 $\phi_t = 1.2$ から 1.4 の液滴混在予混合気流について、層流燃焼速度の総当量比依存性を調べた結果を示す。燃焼速度 S_L は、予熱帯前縁での v_{gy} を上流の勾配で青炎前縁まで外挿した値(図6参照)とした⁽¹²⁾。液体当量比は 0.20 および 0.30、平均液滴直径は $23 \mu\text{m}$ ($21 \sim 27 \mu\text{m}$)、流れの伸長率は約 300 s^{-1} で一定である。図のプロットは、それぞれ 2~5 個のデータの平均値である。最大値と最小値をエラーバーで示した。いずれの液体当量比においても、総当量比の増大に伴って燃焼速度は増大した。これは、平均液滴直径が大きいために液滴が予熱帯でほとんど蒸発しておらず、初期の気体当量比に強く依存して燃焼速度が増大したと考えられる。液滴混在予混合気中の球状火炎伝播を対象として行った過去の実験⁽²⁾では、平均液滴直径が 7.5 および $11 \mu\text{m}$ の場合、火炎伝播速度は総当量比が 1 以下の範囲で最大値を示した。これは、球状火炎伝播に

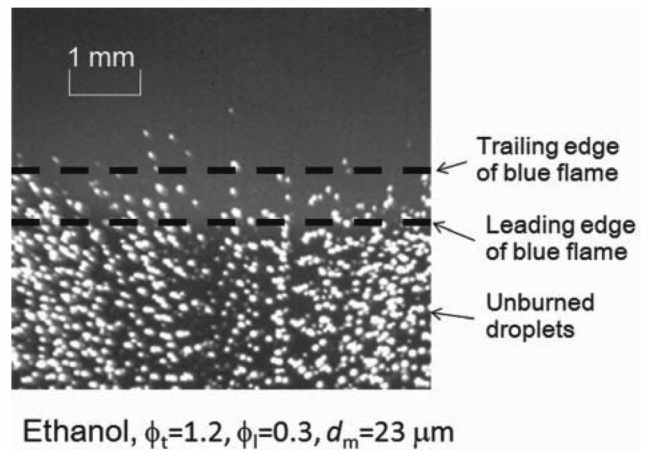


Fig. 7 Superposed laser-sheet image of a blue flame in an ethanol droplet-vapor air stream (duration: 50 ms).

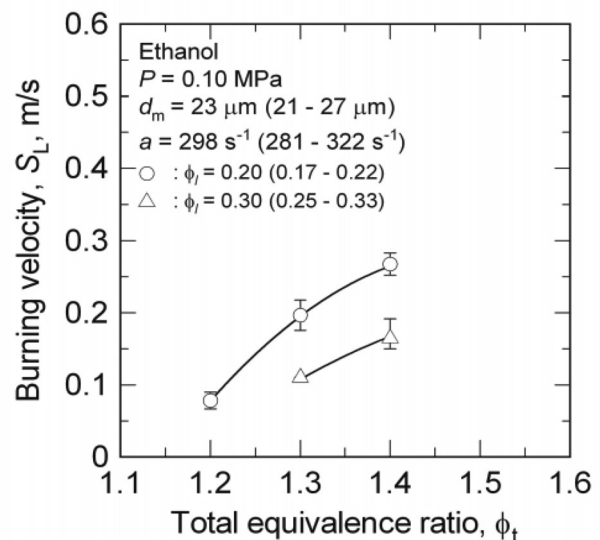


Fig. 8 Burning velocity of ethanol droplet-vapor-air mixture as a function of total equivalence ratio.

ともなう火炎前縁の伸長流れによって起こる燃料液滴と気相の相対速度（スリップ速度）によって予熱帯前縁の局所総当量比が増大し、予熱帯で液滴が蒸発することにより反応帯前縁の局所気体当量比が増大したからだと推察された。また、総当量比が0.8の場合、液滴混在予混合気平均液滴直径を増大させると、火炎伝播速度は平均液滴直径が約12 μm 付近で最大値を示し、その後単調に減少して同一当量比の予混合気火炎伝播速度を下回ることが明らかになった。これは、平均液滴直径の増大により、予熱帯前縁での局所総当量比は増大するが、液滴の蒸発が遅く、反応帯前縁の局所気体当量比が初期気体当量比に近づくこと、反応帯での液滴蒸発による火炎温度低下が原因と推察された。本報で使用した液滴混在予混合気平均液滴直径は23 μm であり、燃焼速度も初期の気体当量比に強く依存する条件であると考えられる。Hayashi と Kumagai⁽¹⁾ の報告によれば、エタノール蒸気-空気予混合気の燃焼速度は、当量比1.2付近で最大値を示す。液体当量比が0.2の液滴混在予混合気の場合、総当量比が1.4の条件では初期の気体当量比が1.2である。よって、さらに総当量比を増大させると、すなわち初期の気体当量比を増大させると、燃焼速度は減少すると予想される。文献2において火炎伝播速度が総当量比1以下の範囲で最大値を示し、本報において燃焼速度が総当量比1.4以上の範囲で最大値を示すのは、前者の液滴混在予混合気平均液滴直径が火炎伝播速度にスリップ速度が強く影響を及ぼす範囲にあり、後者の場合は初期の気相当量比に燃焼速度が強く依存する範囲にあるからだと推察される。

また、液滴が反応帯前縁で蒸発を完了せずに青炎に突入していること、火炎伸長により火炎が冷却されていることから、本条件の液滴混在予混合気火炎では断熱火炎温度からの大幅な温度低下が起こっていると考えられる。総当量比を1.2から減少させると、いずれの液体当量比の液滴混在予混合気流においても火炎を保炎することができなかつたのは、この火炎温度低下が原因であると推察される。液体当量比が燃焼速度に及ぼす影響については、液体当量比が大きい0.30の条件の方が、0.20の条件よりも燃焼速度が小さいことがわかる。総当量比が一定の場合、液体当量比が大きい液滴混在予混合気流の方が初期の気体当量比が小さい。結果として、予混合気最大燃焼速度を示す当量比以下の気体当量比である本実験条件では、燃焼速度が減少したと考えられる。

3.2 正デカンを用いた燃焼実験

燃料の揮発性が燃焼速度に及ぼす影響を調べるために正デカンを用いて同様な実験を行った。燃料に正デカンを用いた場合でも、凝縮法により噴霧を生成することができた。生成された液滴混在予混合気流の直径分布幅はエタノールの場合とほぼ同じであった。図9にエタノールおよび正デカンの液滴混在予混合気流のレーザーシート撮影画像を示す。白い点として写っているのが液滴であり、灰色の雲のように写っているのが青炎である。エタノールを燃料とした場合の青炎が、下流側（画像上方）に不鮮明に厚く広がっているのに対し、正デカンを燃料とした場合の青炎は比較的厚みが薄いことがわかる。また、図の液滴混在予混合気流条件では、正デカンを燃料とした場合、青炎を通過した後の液滴周囲にエンベロープ火炎（画像右上）が観察された。初期の気体当量比が1.1を超えるとエンベロープ火炎は現れなかつた。燃料がエタノールの場合、青炎中で蒸発した燃料が初期状態で気体だった燃料の形成する火炎の後縁で連続

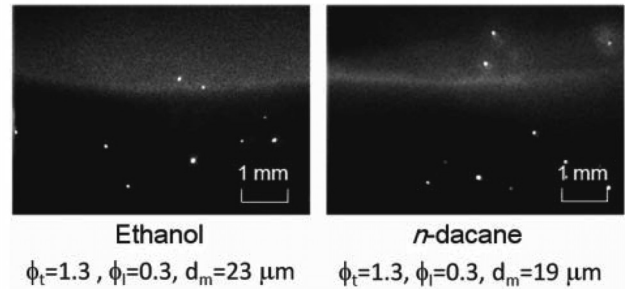


Fig. 9 Laser-sheet images of a blue flame.

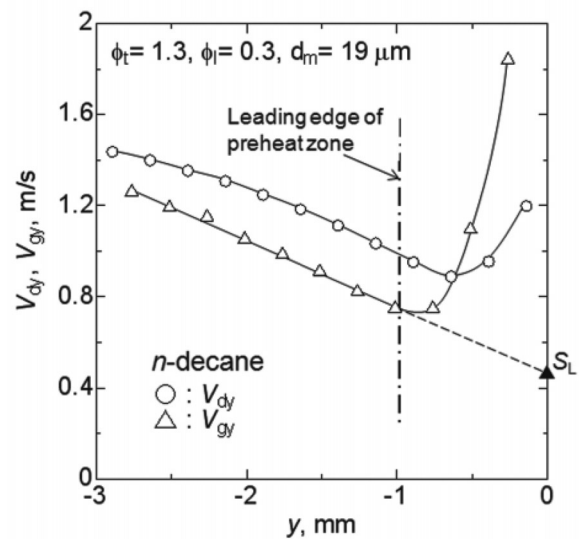


Fig. 10 Droplet and gas velocity profiles along y-axis.

的に燃焼していると考えられる。一方、燃料が正デカンの場合、液滴の燃焼速度定数がエタノールより小さいため、液滴の蒸発速度が移動速度に対して相対的に遅く、青炎中もしくは既燃ガス中で点火した液滴が酸素の残留している既燃ガス中でエンベロープ火炎を形成して燃焼していると考えられる。初期の気体当量比が1である本条件で既燃ガス中に酸素が残留している理由は现阶段ではわからないが、青炎内に液滴が存在することにより予混合燃焼反応が不完全になっている、あるいは液滴が青炎を通過する際に液滴周囲で消炎が起こっているなどの可能性があると考えている。

図10に $\phi_t = 1.3$, $\phi_l = 0.30$, $d_m = 19 \mu\text{m}$ の液滴混在予混合気において、 v_{dy} および v_{gy} の分布を調べた結果を示す。 v_{gy} には、 $y = -0.8 \text{ mm}$ 付近で直線から外れるプロットが現れることがわかる。このことから、 $y = -1.0 \text{ mm}$ 付近が火炎の予熱帯前縁であると考えられる。予熱帯で気体が加速し、それに伴って液滴が加速されるのがよくわかる。

図11に青炎に突入する液滴の重ね合わせ画像を示す。液滴混在予混合気流の条件は、 $\phi_t = 1.3$, $\phi_l = 0.30$, $d_m = 21 \mu\text{m}$ である。50 ms間のレーザーシート画像100枚を重ね合わせた。青炎後縁に明るい灰色の領域が広がっているように見えるのは、エンベロープ火炎の画像が重ね合わされた結果であって、初期気体燃料が形成する青炎が広がっているのではない。エタノールの場合と比較して多くの液滴が青炎を通過しており、2 mm程度青炎後縁から離れたところまで液滴が存在していることがわ

かる。

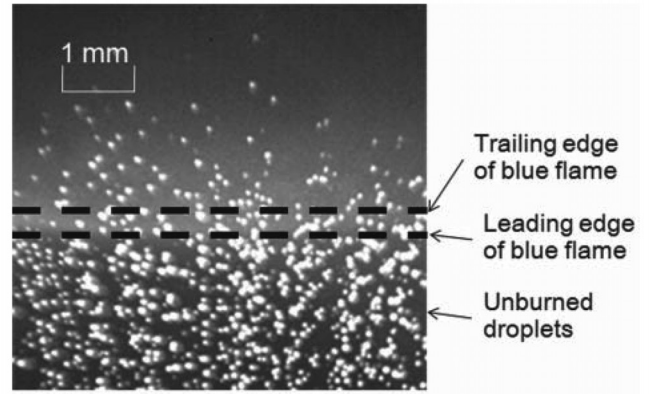
正デカンの液滴混在予混合気について燃焼速度を調べた結果を、エタノール液滴混在予混合気の燃焼速度と比較し、図 12 に示す。総当量比 1.2 ~ 1.4, 液体当量比 0.21, 伸長率約 300 s⁻¹ の条件において、エタノールよりも正デカンの液滴混在予混合気の方が燃焼速度が大きくなった。エタノール液滴混在予混合気の場合、反応帯前縁で蒸発を完了せずに青炎に突入した液滴が、反応帯内部で蒸発する。その結果、蒸発潜熱により火炎温度の低下が起こり、燃焼速度が小さな値を示したと考えられる。一方、正デカン液滴混在予混合気の場合、ほとんど蒸発せずに燃料液滴は反応帯を通過しているために、蒸発潜熱による火炎温度低下があまり起こっていないと推察される。また、燃焼速度の総当量比依存性が、初期の気体当量比に強く支配されていることから、燃料液滴が予熱帯でほとんど蒸発しておらず、燃料液滴から発生する蒸気が燃焼速度に影響を及ぼしていないことが示唆される。

4. 結 言

1. 実験装置を対向流バーナに改良した結果、エタノールおよび正デカン液滴混在予混合気流中に平面火炎を安定して保炎させることができ、流れの伸長率および燃焼速度の計測を行うことができた。液滴混在予混合気の直径分布形状はエタノールの場合も正デカンの場合もほぼ同じであった。
2. 液体当量比 0.2 および 0.3, 平均液滴直径約 20 μm, 流れの伸長率約 300 s⁻¹ のエタノール液滴混在予混合気流では、液滴が蒸発を完了せずに青炎に突入し、青炎内で多くの液滴が消滅する。総当量比の増大、すなわち気体当量比の増大に伴って燃焼速度が増大した。液体当量比の増大、すなわち気体当量比の減少に伴って燃焼速度が減少した。総当量比が 1.2 を下回ると、火炎を保炎することができなかった。
3. 平均液滴直径約 20 μm の正デカン液滴混在予混合気青炎厚みは、エタノール液滴混在予混合気のそれより薄く、多くの液滴が火炎を貫通する。気体当量比が 1.1 以下の場合、火炎を通過した液滴がエンベロップ火炎を伴って既燃ガス中で燃焼する現象が観察された。
4. 総当量比 1.2 ~ 1.4, 液体当量比 0.2, 平均液滴直径約 20 μm, 流れの伸長率約 300 s⁻¹ の条件において、正デカン液滴混在予混合気流の燃焼速度は、同一総当量比のエタノール液滴混在予混合気流の燃焼速度より大きかった。正デカン液滴混在予混合気流の燃焼速度は、総当量比 1.3 で最大値を示した。

文 献

- (1) Hayashi, S. and Kumagai, S.: Flame Propagation in Fuel Droplet-Vapor-Air Mixtures, Proc. Combust. Inst. 15 (1975), 445-452.
- (2) Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., and Ujiie, Y.: Microgravity Experiments of Flame Propagation in Ethanol Droplet - Vapor - Air Mixture, The Proc. Combust. Inst., 28(2001), 999-1005.
- (3) Nomura, H., Hamasaki, T., et al.: Fundamental Study on Effects of Residual Fuel Droplets on Flame Propagation



n-decane, $\phi_t=1.3, \phi_l=0.3, d_m=21 \mu\text{m}$

Fig. 11 Superposed laser-sheet image of a blue flame in a *n*-decane droplet-vapor air stream (duration: 50 ms).

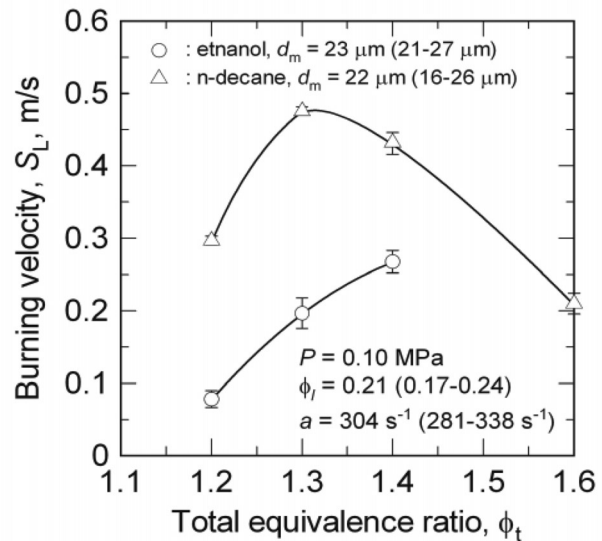


Fig.12 Burning velocity of droplet-vapor-air mixture of ethanol and *n*-decane as a function of total equivalence ratio.

In SI Engines, SAE Transactions Journal of Engines, Section 3, 112(2004), 843-850.

- (4) Nomura, H., Hayasaki, M., and Ujiie, Y.: Effects of fine fuel droplets on a laminar flame stabilized in a partially-prevaporized spray stream, The Proc. Combust. Inst., 31 (2007), 2265-2272.
- (5) Li, S. C.: Spray Stagnation Flames, Prog. Energy Combust. Sci., 23(1997), 303-347.
- (6) Chen, G. and Gomez, A.: Counterflow Diffusion Flame of Quasi-Monodisperse Electrostatic Sprays, The Proc. Combust. Inst., 24 (1992), 1531-1539.
- (7) Li, S. C. and Williams, F. A.: Experimental and Numerical Studies of Two-Stage Methanol Flames, The Proc. Combust. Inst., 26 (1996), 1017-1024.
- (8) Berta, P., Puri, I. K., and Aggarwal, S. K.: Structure of partially premixed *n*-heptane-air counterflow flames,

Proc. Combust. Inst., 30 (2005), 447-453.

- (9) Mikami, M., Mizuta, Y., Tsuchida, Y., and Kojima, N.: Flame Structure and Stabilization of Lean-Premixed Sprays in a Couterflow with Low-Volatility Fuel, The Proc. Combust. Inst., 32 (2009), 2223-2230.
- (10) 若林 卓, 水谷幸夫, 香月正司, 中部主敬, 赤松史光: 対向流を用いた噴霧火炎の観察, 第13回燃焼シンポジウム, 1993年11月22-24日, 横浜, pp. 519-521.
- (11) 及川尚樹, 小田桐祥子, 野村浩司, 氏家康成: 噴霧燃焼基礎研究のための連続大粒径噴霧バーナの開発, 日本機械学会関東支部第14期総会講演会, 2008年3月14, 15日, 東京, pp. 265-266.
- (12) Deshaies, B., Cambray, P. : The velocity of a premixed flame as a function of the flame stretch, Combust. Flame, 82(1990), 361-375.



及川 尚樹
日本大学生産工学研究科
〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1
Tel. 047-474-2323
Fax. 047-474-2349
e-mail: c71060@cit.nihon-u.ac.jp

略歴: 2007年 日本大学大学院生産工学研究科博士前期課程入学. モデル噴霧の燃焼研究と微小重力環境用実験装置開発に従事. 2009年 株式会社 IHI 検査計測に入社.



野村 浩司
日本大学生産工学部 教授
〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1
Tel. 047-474-2356
Fax. 047-474-2349
e-mail: nomura.hiroshi@nihon-u.ac.jp

略歴: 1992年 東京大学大学院工学系研究科航空学専攻博士課程修了. 同年日本大学生産工学部勤務. 液滴燃焼, 噴霧燃焼, および火花点火機関の点火・燃焼機構に関する基礎研究に従事.



氏家 康成
日本大学生産工学部 教授
〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1
Tel. 047-474-2323
Fax. 047-474-2349
e-mail: ujii.yasusige@nihon-u.ac.jp

略歴: 1973年 日本大学大学院生産工学研究科修士課程修了. 同年日本大学生産工学部勤務. ベーンポンプ, 火花点火機関および圧縮点火機関の点火・燃焼機構に関する基礎研究に従事.