予混合気中に分散させた燃料液滴の燃焼促進効果*

浜崎 豊 宏^{*1}, 野村 浩 司^{*2}
氏 家 康 成^{*2}, 佐藤 順 一^{*3}Acceleration Effects of Fuel Droplets on Flame Propagation
in Partially-Prevaporized Fuel SprayToyohiro HAMASAKI, Hiroshi NOMURA^{*4},
Yasushige UJIIE and Jun'ichi SATO^{*1} Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University,
1-2-1 Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba, 275-8575 Japan

Fundamental studies on combustion of fuel droplet-vapor-air mixtures have been performed using a static fuel droplet cloud dispersed in fuel vapor-air premixture. Fuel droplet clouds were generated by the condensation method using rapid expansion of saturated ethanol vapor-air mixtures. Flame speed and maximum burning pressure were measured with a constant volume combustion chamber. The flame speed and the maximum burning pressure of partially-prevaporized fuel sprays are larger than those of premixtures with the same equivalence ratio on fuel-lean side. The ratio of fuel vapor and liquid in partially-prevaporized fuel sprays affects the flame speed and the maximum burning pressure. A simple one-dimensional flame propagation model was applied to explain the results. It was found that the slip velocity between fuel droplets and unburned gas and the concentration distribution of fuel vapor formed by fuel droplets play important roles in determining the flame speed.

Key Words: Partially-Prevaporized Spray, Constant-Volume Combustion, Flame Speed, Maximum Burning Pressure, Ethanol

1. 緒 言

噴霧燃焼は、これまでディーゼル機関やジェット機関などに使われており、数多くの研究がなされている^{①-④}。高効率化を目的とした筒内直噴ガソリン機関が開発・実用化され、ガソリン機関においても燃料液滴が燃焼に及ぼす影響に興味が持たれる。しかしながら、その燃焼機構は非常に複雑で未だ解明されていない点が多い。噴霧燃焼を複雑にしている要因は多く、噴霧中の複雑な流れ、燃料液滴と空気の相対速度、液滴の偏在、液滴直径分布の幅広さなどが挙げられる^⑤。伝播火炎に及ぼす微小燃料液滴の影響を把握するため、燃料蒸気-空気混合気混合気中に直径分布幅の狭い静止燃料液滴群を分散させた混合気（以下、液滴混在混合気）の燃焼研究が行われてきた^{⑥-⑧}。定圧燃焼実験において、液滴混在混合気の火炎伝播速度が同一当量比の燃料蒸気-空気予混合気の火炎伝播速度より速くなる条件が存在するなどの知見が得られている^{⑦,⑧}。

本研究では、得られる知見の実機への応用を考慮し、液滴混在混合気の定容燃焼実験を行った。予混合気中に存在する燃料液滴が火炎伝播速度および最大燃焼圧力に及ぼす影響を調べた。

2. 実験装置および方法

2-1 液滴混在混合気生成法の原理 本実験では、加圧した燃料蒸気-空気飽和混合気を急速膨張させることにより温度を急速に下げ、混合気を過飽和状態にし、燃料蒸気の一部を凝集させて液滴混在混合気を生成する。この方法は Wilson の霧箱における霧生成原理と同じである。混合気の急速膨張を高圧容器に取り付けられたバルブを開放することにより行うため、減圧比の調節が容易、作動時の振動が小さいおよび装置を小型にできるなどの長所がある。

2-2 噴霧生成・燃焼装置 実験装置の概略を図 1、燃焼容器の詳細を図 2 に示す。実験装置は燃焼容器、温度制御装置および点火装置からなる噴霧生成・燃焼装置と、光学計測装置、測温抵抗体、R 種熱電対および圧力センサからなる計測装置に大別される。燃焼室は円筒形（直径 40 mm、高さ 40 mm）であり、窓枠の窪みなども含めて容積は 66 cc である。燃焼室に

* 原稿受付 2003 年 10 月 20 日。

^{*1} 石川島検査計測(株) (☎ 235 8501 横浜市磯子区新中原町 1)。^{*2} 正員、日本大学生産工学部 (☎ 275-8575 習志野市泉町 1-2-1)。^{*3} 正員、石川島播磨重工業(株) (☎ 100 8182 東京都千代田区大手町 2-2-1)。

E-mail: nomura@cit.nihon-u.ac.jp

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

は、直径 20 mm の 2 対の観察用窓を設けた。燃焼室に高圧の燃料蒸気-空気飽和混合気を充填し、配管の一部に設けた排気タンクに低圧の空気を充填する。燃焼室と排気タンクの間に設けた 2 つの電磁弁を開くことにより、燃焼室内を急速減圧させ、液滴混在混合気を生成させた。初期減圧速度は生成される液滴混在混合気の平均液滴直径に強く影響を及ぼす。燃焼室と排気タンクの間に設けた流量調節弁により、初期減圧速度を変化させることで、生成される液滴混在混合気の平均液滴直径を制御した。減圧速度減少による減圧時間増大を防ぐため、減圧開始 1 s 後にパルスモータで流量調節弁を全開するように設定した。

図 3 は、液滴混在混合気の空間的均一性を調べた結果の一例である。生成された液滴混在混合気にレーザーシートを照射した。シートと直角方向からレーザーの散乱光を撮影し、燃焼室の軸に平行な幅 0.5 mm の直線上の輝度分布を計測した。液滴が存在しない部分の輝度を零とし、輝度の平均値を 1 として示した。横軸の原点は燃焼室中心付近である。散乱光強度が液滴数密度に比例するとすれば、液滴数密度の空間的偏差は 1.25% であった。

全ての実験について点火直前圧力 P_0 は 0.2 MPa で一定とし、減圧終了 1 s 後に点火用電熱線に通電した。点火用電熱線は、燃焼容器のほぼ中央に設置されている。火炎の伝播挙動観察には影写真法を用い、噴霧の平均液滴直径の計測には、レーザー光散乱方式粒度分布測定装置 (LDSA) を用いた。LDSA は、レーザー光の散乱を利用して液滴の粒度分布を測定する計測器である。デフォグを観察用窓に設置することにより、窓の曇りを抑制し、LDSA の計測を安定させた。燃焼室壁冷却装置は、減圧中の燃焼室壁から混合気への熱流入を抑制することを目的として設置した。冷媒には、フロン 134a を用いた。液化されたフロンが、燃焼室

Fig. 2 Combustion chamber and high pressure chamber.

Fig. 3 Intensity profile of scattered laser light from droplets along with the line parallel to the combustion chamber axis.

と高圧容器の間のジャケット部に導かれる。ジャケット部へ噴射されたフロンが気化することにより、燃焼室壁を急速に冷却することができる。

燃料には、揮発性が適当であること、燃焼によるすすの発生が少ないことなどの理由により、純度 99.5 vol% のエタノールを用い、1 回の実験で 200 ml 使用した。また酸化剤には、組成が明確でボンベごとの変動が少ない純空気 (露点 $< -60^{\circ}\text{C}$) を用いた。

3. 計測項目

3.1 当量比 混合気における燃料と空気の割合は、当量比を用いて示した。液滴で存在する燃料のみで計算した当量比を液体当量比 ϕ_l 、蒸気で存在する燃料のみで計算した当量比を気体当量比 ϕ_g 、両者を合わせて計算した当量比を総当量比 ϕ と定義した。よって、 $\phi = \phi_g + \phi_l$ の関係が成立する。本研究では減圧前の燃料蒸気-空気飽和混合気の ϕ_g が点火時での ϕ に

なる。点火直前の温度、圧力から ϕ_0 を求め、 ϕ_1 から差し引くことによって、 ϕ_1 を求める。総当量比および液体当量比を変化させるために点火直前の燃焼室温度を290.0 Kから311.5 Kの範囲で変化させたが、上限・下限温度とも火炎温度に比べて十分に低いため、燃焼室温度の変化が結果に与える影響は微小であると考え、無視した。

3.2 液滴混在混合気の平均液滴直径 液滴混在混合気の平均液滴直径 d_m には、ザウダー平均直径(SMD)を用いた。累積体積がそれぞれ10%および90%になる液滴直径を種々の条件で調べた結果、累積体積10%は平均液滴直径の30%、累積体積90%は+50%ではば一定であった。

3.3 火炎伝播速度 火炎伝播速度は、影写真法により高速度カメラで撮影した画像から、火炎半径の時間変化を測定することにより求めた。火炎半径計測方法を図4に示す。火炎半径は、点火用電熱線を中心に燃焼室軸方向を0 degとして、-30 degから30 degの範囲で、15 degおきに5方向測定し、その平均値とした。測定した火炎半径の時間変化を多項式で近似し、その時間微分値を火炎の移動速度とした。図5は、火炎半径の時間変化の例を、燃料蒸気-空気予混合気と液滴混在混合気について示している。時刻の原点は、点火用電熱線に通電した時刻である。火炎は、自立火炎が成立するまでの遅れ時間を経た後、加速しながら伝播し、伝播速度が一定の期間を経た後、燃焼室壁の影響を受けて減速する。火炎伝播速度が伝播中変化するので、点火用電熱線と燃焼室壁の中間点に火炎が達する火炎半径が10 mmの時点での火炎の移動速度を代表火炎伝播速度として使用した。火炎がしわ状になるような条件では、5方向の火炎伝播速度にばらつきが生じるが、その偏差は5%を超えることがなかった。球形火炎と同様な方法で火炎伝播速度を求めた。

3.4 最大燃焼圧力および燃焼時間 燃焼時の圧力履歴の測定にはダイナミック圧力計を用いた。圧力履歴測定は10 kHzで行い、計測した圧力履歴から、最大燃焼圧力、燃焼時間を算出した。燃焼時間は、自立点火を確認してから、最大燃焼圧力にいたるまでの時間と定義した。

4. 火炎伝播モデル

球状火炎伝播の場合、火炎前縁で未燃混合気が加速するので、火炎前縁で未燃混合気と液滴の間に相対速度(スリップ速度)が生じる。Sun, 土橋らが行った鉄粉粒子噴霧中を伝播する火炎に関する研究において、液滴と液滴周囲の混合気のスリップ速度によって、火

Fig. 4 Flame radius measurement.

Fig. 5 Temporal variations of flame radius.

Fig. 6 Flame propagation model.

炎前縁における粒子の数密度が増大するという報告がなされている⁹⁾。液滴混在混合気における球対称火炎伝播においても、液滴-混合気間のスリップ速度は依存すると考えられる。

単純な一次元火炎伝播モデルを図6に示す。火炎が V_f で移動しているのに対して、未燃混合気は V_g で、液滴は V_d の速度で、火炎から遠ざかる向きに運動する。ただし、 V_g および V_d は、予熱帯前縁での速度とする。火炎から見た相対座標系でみると、火炎に向う方向を正にとつて、燃料蒸気-空気混合気の流れ速度 V_g' と液滴の速度 V_d' は

$$V_g' = V_f - V_g = S_L, \quad V_d' = V_f - V_d \quad (1)$$

となる。ここで、 S_L は層流燃焼速度である。単位時間あたりに燃料蒸気-空気混合気が予熱帯に突入する体積は、図における A に相当するのに対して、単位時間あたりに予熱帯に突入する液滴群が占める空間の体積は、図における B に相当する。スリップ速度が存在しない場合、単位時間あたりに予熱帯に突入する液滴群が占める体積は、燃料蒸気-空気混合気と同じ A である。スリップ速度が存在する場合、液滴群は、燃料蒸気-空気混合気よりも (B - A) の体積分だけ多く予熱帯に突入する。予熱帯に突入する燃料液滴-蒸気-空気混合気の液体当量比を V_d' と V_g' の速度比を用いて表すと、 $\phi_l V_d' / V_g'$ となる。よって、反応帯に入る燃料液滴-蒸気-空気混合気の局所総当量比 ϕ_l' は

$$\phi_l' = \phi_g + \phi_l \frac{V_d'}{S_L} \quad (2)$$

となる。スリップ速度 V_s は

$$V_s = V_d' - V_g' = V_d' - S_L \quad (3)$$

であり、式(2)および(3)から

$$\phi_l' = \phi_g + \phi_l \left(1 + \frac{V_s}{S_L} \right) \quad (4)$$

を得る。平均液滴直径が増大すると液滴の慣性が強くなり、 V_d が減少するため、 V_s が増大する。式(4)から、 V_s の増大に伴って ϕ_l' が増大することがわかる。また、 ϕ_l の増大によっても ϕ_l' が増大する。

平均液滴直径の増大に伴う液滴群の総蒸発面積の減少によって、単位時間あたりに液滴から蒸発する総燃料蒸気量が減少する。液滴群が予熱帯で蒸発する割合を考慮すると、(4)式は

$$\phi_g' = \phi_g + K \phi_l \left(1 + \frac{V_s}{S_L} \right) \quad (5)$$

となる。ここで、 ϕ_g' は反応帯における局所気体当量比、 K は蒸発割合である。液滴群が予熱帯で完全に蒸発する場合、 K は 1 であり、全く蒸発しない場合、零である。 K の減少により、 ϕ_g' は減少する。また、初期気体当量比 ϕ_g の減少によっても、 ϕ_g' は減少する。

5. 実験結果および考察

5.1 火炎伝播挙動 図7および8に、 $\phi_1 = 0.9$ および 1.4 の液滴混在混合気を伝播する火炎の連続撮影写真を示す。比較のため、燃料蒸気-空気予混合気を伝播する火炎の写真も同時に示した。 $\phi_1 = 0.9$ では、燃料蒸気-空気予混合気の火炎と液滴混在混合気の火炎には、ほとんど違いがない。 $\phi_1 = 1.4$ の条件では、液滴混在混合気の火炎がしわ状火炎になっていることがわかる。 ϕ_1 が増大すると、このようなしわ状火炎になりやすい傾向にある。しわ状火炎を形成する要因として、選択拡散が考えられる。選択拡散は気体分子の拡散速度が異なることに起因し、燃料および酸化剤の拡散速

$P_0 = 0.2 \text{ MPa}$, $\phi_1 = 0.9$

(a) Ethanol vapor-air premixture

(b) Ethanol droplet-vapor-air mixture, $\phi_l = 0.19$, $d_m = 6.5 \mu\text{m}$

Fig. 7 Flame propagation behavior on fuel-lean side.

$P_0 = 0.2 \text{ MPa}$, $\phi_1 = 1.4$

(a) Ethanol vapor-air premixture

(b) Ethanol droplet-vapor-air mixture, $\phi_l = 0.20$, $d_m = 6.6 \mu\text{m}$

Fig. 8 Flame propagation behavior on fuel-rich side.

Fig. 9 Effect of total equivalence ratio on flame speed.

Fig. 10 Effect of total equivalence ratio on average flame speed.

度の差が大きいと選択拡散の効果が大きいとされている。液滴混在混合気の場合、燃料蒸気の一部が液化したことにより、燃料の拡散は遅くなる。よって、燃料と酸化剤の拡散速度の差が大きくなるため、しわ状火炎を形成すると考えられる。火炎凸部には酸化剤が燃料より多く拡散し、凹部の局所総当量比が増大するため、過濃側ではしわ状火炎が発生しやすいと考えられる。

5.2 燃料液滴が火炎伝播速度に及ぼす影響 図9に、平均液滴直径を約 $7.6 \mu\text{m}$ 、液体当量比を 0.21 および 0.29 で一定とし、総当量比を変化させた場合の燃料蒸気—空気予混合気および液滴混在混合気の火炎伝播速度を示す。 d_m に $5.9 \sim 9.9 \mu\text{m}$ の幅があるが、この範囲での d_m の変化が火炎伝播に与える影響は比較的少ない⁽⁹⁾。液滴混在混合気を伝播する火炎の速度は、燃料蒸気—空気予混合気の火炎伝播速度の場合と同様に、 ϕ_t が増大するのに伴って増大し、最大値をとった後、減少する。火炎伝播速度が最大になる ϕ_t は燃料蒸気—空気予混合気の場合と比較して小さくなり、液体当量比 0.21 の場合は $\phi_t = 0.9$ 付近で、液体当量比 0.29 の場合は $\phi_t = 1$ 付近である。液滴混在混合気の火炎伝播速度の最大値が燃料蒸気—空気予混合気の火炎伝播速度の最大値より希薄側に移動するのは、スリップ速度の影響により火炎面の局所気体当量比が増大したためと考えられる。液体当量比 0.21 の場合と 0.29 の場合を比較すると、 $\phi_t < 1.3$ の範囲では液体当量比 0.21 の火炎伝播速度が液体当量比 0.29 の火炎伝播速度を上回り、 $\phi_t > 1.3$ では大小関係が逆転する。また、液体当量比 0.29 の最大火炎伝播速度は液体当量比 0.21 のそれと比較して値が小さい。これらの事実より、液体当量

比の増大に伴う蒸発潜熱の増大によって火炎温度が低下していること、および初期気体当量比の減少によって反応帯前縁での局所気体当量比が減少していることが示唆される。

5.3 燃料液滴が燃焼時間に及ぼす影響 図10に、図9と同一実験において燃料蒸気—空気予混合気および液滴混在混合気の燃焼時間を計測した結果を示す。考察を行いやすくするため、燃焼時間の逆数に燃焼室容積と同じ容積を持つ球の半径 ($= 25 \text{ mm}$) を掛けた値、即ち平均火炎伝播速度を燃焼時間の代わりに用いることにする。液滴混在混合気の場合と同様に、 ϕ_t が増大するに伴って増大し、最小値をとった後、減少する。平均火炎伝播速度が最大となる ϕ_t は、燃料蒸気—空気予混合気の場合と比較して小さくなる。図9および図10から、燃料蒸気—空気予混合気の場合も液滴混在混合気の場合も、火炎半径 10 mm の時点での火炎伝播速度増大がそのまま平均火炎伝播速度の増大、即ち燃焼時間の短縮に結びつくことがわかる。

5.4 燃料液滴が最大燃焼圧力に及ぼす影響 図11に、図9と同一実験で得られた燃料蒸気—空気予混合気および液滴混在混合気の場合の最大燃焼圧力と総当量比の関係を示す。最大燃焼圧力は、最大燃焼圧力 P_{max} を点火直前圧力 P_0 で除した無次元量で表した。液滴混在混合気の場合と同様に、 ϕ_t が増大するに伴って増大し、最大値をとった後、減少する。最大燃焼圧力比が最大となる ϕ_t は、燃料蒸気—空気予混合気の場合と比較して小さくなる。最大燃焼圧力の最大値は、燃料蒸気—空気予混合気と比較して 9% 程度大きくなる。液滴混

Fig. 11 Effect of total equivalence ratio on dimensionless maximum burning pressure.

在混合気の最大燃焼圧力が同一当量比の燃料蒸気—空気予混合気と異なっているのは、燃料の一部が液化したことおよび初期温度が低いことによる容積効率の増大と、燃焼時間の変化による熱損失の変化が要因と考えられる。ここでの容積効率は、同一総当量比・圧力の燃料蒸気—空気予混合気の場合に比較して何倍の空気が燃焼室内に充填されているかを示している。液体当量比一定の場合、容積効率は総当量比の増大に伴って減少する。液体当量比 0.21 の場合、容積効率の増大により液滴混在混合気の最大燃焼圧力は同一当量比の燃料蒸気—空気予混合気と比較して 3~5% (全データ平均で約 4.1%) 増大する。液体当量比 0.29 の場合、4~8% (平均約 5.5%) 増大する。一方、熱損失はほぼ燃焼時間により決定されると考えられる。燃料蒸気—空気予混合気と液滴混在混合気の燃焼時間を比較すると、希薄側では、液滴混在混合気の燃焼時間が燃料蒸気—空気予混合気に対して減少し、過濃側では増大する。以上より、液滴混在混合気の最大燃焼圧力の総当量比依存性を示す曲線は、燃料蒸気—空気予混合気の曲線に比べて希薄側で増大、過濃側で減少した曲線となり、容積効率増大の効果が加わることによって、その曲線が全体的に上に移動したと考えられる。

同一当量比の燃料蒸気—空気予混合気に対する最大燃焼圧力の増大率 R_{MBP} と平均火炎伝播速度の増大率 R_{AFS} の相関を図 12 に示す。液滴混在混合気の最大燃焼圧力については、容積効率増大の補正を行い、燃料蒸気—空気予混合気と液滴混在混合気の最大燃焼圧力と条件をそろえた。 R_{MBP} と R_{AFS} の間に強い相関があることがわかる。最大

Fig. 12 Correlation of the increasing ratios of flame speed and maximum burning pressure.

燃焼圧力が正味発熱量 (= 燃焼による発熱から熱損失を差し引いた値) に比例し、熱損失が燃焼による発熱量と燃焼時間に比例すると仮定すると、 R_{MBP} と R_{AFS} の間には次の関係が成り立つ。

$$R_{MBP} = \frac{\Delta h_S (1 - a R_{AFS}^{-1})}{\Delta h_P (1 - a)} \quad (6)$$

ここで、 a は熱損失と発熱量の比であり、 Δh_S と Δh_P はそれぞれ液滴混在混合気および燃料蒸気—空気予混合気の燃焼熱である。 R_{MBP} は同一総当量比の液滴混在混合気と燃料蒸気—空気予混合気の最大燃焼圧力の比であり、体積効率の変化の補正も行っているため、 Δh_S と Δh_P は等しいとして次式を得る。

$$R_{MBP} = \frac{1 - a R_{AFS}^{-1}}{1 - a} \quad (7)$$

a を未知定数として全データから最小自乗法により求めた結果が、図中に示された曲線である。非常に単純化された熱損失モデルではあるが、実験結果の大まかな傾向を説明していることがわかる。 R_{AFS} が最も大きいデータ点が曲線上にのらないのは、火炎伝播速度が非常に遅いため、ここで用いた熱損失モデルが適用できないからだと考えられる。以上より、液滴混在混合気と燃料蒸気—空気予混合気との最大燃焼圧力が同一当量比の燃料蒸気—空気予混合気とを比較して増減する要因が、燃焼時間の減少・増大による熱損失の減少・増大であることがわかった。また、 R_{AFS} が 1 より大きい領域、即ち液滴混

Fig.13 Effect of liquid equivalence ratio on flame speed.

Fig.14 Effect of liquid equivalence ratio on average flame speed.

在混合気の平均火炎速度が燃料蒸気—空気予混合気のそれを上回る領域では、スリップ速度の効果がより強く現れる $\phi_t = 0.29$ のデータ点の方が $\phi_t = 0.21$ のデータ点より若干上方に分布していることがわかる。液滴混在混合気の場合、スリップ速度の効果により、火炎伝播後期の反応帯局所総当量比は前期に比較して希薄側に移行する。 R_{AFS} が1より大きくなるような希薄液滴混在混合気の場合、燃焼室壁付近で燃焼室中心より希薄燃焼することが熱損失を低減している可能性が示唆される。

5・5 液体当量比が火炎伝播速度に及ぼす影響
総当量比を0.8および1.4、平均液滴直径を約7 μm で一定とし、火炎伝播速度の液体当量比依存性を調べた結果を図13に示す。液体当量比が零の火炎伝播速度は、同一総当量比の燃料蒸気—空気予混合気の数値である。総当量比0.8の場合、液体当量比の増大に伴って火炎伝播速度は増大し、その後減少する。一方、総当量比1.4の場合、火炎伝播速度は液体当量比の増大に伴って減少し、その後増大する。4章に示した式(5)では、同一総当量比・液滴直径の条件では、液体当量比が増大すると単純に局所気体当量比も増大する結果となる。しかしながら、本結果は火炎前縁での局所気体当量比が液体当量比の増大に伴い増大し、その後減少することを示唆した。液体当量比増大に伴う局所気体当量比の減少の原因は、燃料蒸気の拡散速度が有限であることによって反応帯燃料蒸気濃度の不均一性が液体当量比の増大により強くなり、液滴間を満たす混合気の当量比が減少したからと推察される。

Fig.15 Effect of liquid equivalence ratio on dimensionless maximum burning pressure.

5・6 液体当量比が燃焼時間に及ぼす影響 図14に、図13と同一実験から得られた液滴混在混合気の燃焼時間液体当量比依存性を示す。図10の場合と同様、燃焼時間の逆数に比例する平均火炎伝播速度で結果を示した。液体当量比の増大に伴い、希薄液滴混在混合気の場合、平均火炎伝播速度は増大し、その後減少する。過濃液滴混在混合気の場合、平均火炎伝播速度は減少し、その後増大する。極大値・極小値を示す液体当量比が若干異なっているが、総当量比を変化させた場合と同様に液体当量比を変化させた場合も、

火炎半径 10 mm における火炎伝播速度の増大が燃焼時間の短縮に結びつくことがわかる。

5.7 液体当量比が最大燃焼圧力に及ぼす影響

図 15 に、図 13 と同一実験から得られた液滴混在混合気の最大燃焼圧力を示す。最大燃焼圧力 $P_{\max}$ は、容積効率増大の補正を行い、図 11 と同様、点火直前圧力 P_0 で除した無次元量で表した。最大燃焼圧力の液体当量比依存性は、変動割合は小さいが、平均火炎伝播速度が液体当量比に対して示す依存性と同じであり、燃焼時間が減少したことによって熱損失が減少したと考えられる。

6. 結 言

予混合気中に分散させた燃料液滴の燃焼促進効果について、定容燃焼容器を用いて燃焼実験を行った。総当量比および液体当量比を変化させ、部分予蒸発噴霧を伝播する火炎の速度と最大燃焼圧力の計測を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 液滴混在混合気の火炎は、総当量比の増大に伴ってしわ状になる傾向がある。
- (2) 燃料蒸気の一部を液化することにより、希薄領域において火炎伝播速度および最大燃焼圧力は同一当量比の燃料蒸気—空気予混合気より増大する。本報告の実験条件では、希薄領域全般で燃焼促進効果が認められた。
- (3) 液滴混在混合気の火炎伝播速度および最大燃焼圧力は、液体当量比に依存する。両者の液体当量比依存性は定性的に一致する。
- (4) 液滴混在混合気の最大燃焼圧力が同一当量比の燃料蒸気—空気予混合気のそれと比較して増減する要因は、燃焼時間の減少・増大による熱損失の減少・増大であることがわかった。

謝 辞

本研究は、(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地上研究公募」プロジェクト

トの一環として行ったものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) Tushima, S., Saito, H., Akamatu, F., and Katuki, M., Journal of JSME, Vol. 66, p. 2734 (2000).
- (2) Yoshida, H., Arai, M., Hiroyuki, H., and Yokoya, H., Journal of JSME, Vol. 57, p. 2416 (1991).
- (3) Burgoyne, J. H. and Cohen, L., Proc. Roy. Soc., Vol. A225, p. 375 (1954).
- (4) Hayashi, S., Ohtani, T., Iinuma, K., and Kumagai, S., The Combust. Inst., Vol. 18, p. 361 (1981).
- (5) 新井雅隆・天谷賢児ら, アドマイゼーション・テクノロジー, 森北出版(株), 東京 (2001).
- (6) Hayashi, S. and Kumagai, S., The Proc. Combust. Inst., Vol. 15, p. 445 (1975).
- (7) Nomura, H., Izawa, I., Ujiie, Y., Sato, J., Marutani, Y., Kono, M., and Kawasaki, H., The Proc. Combust. Inst., Vol. 27, p. 2667 (1998).
- (8) Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., Ujiie, Y., Sato, J., Kono, M., and Yoda, S., The Proc. Combust. Inst., Vol. 28, p. 999 (2000).
- (9) Sun, J., Dobashi, R., and Hirano, T., Seventeenth International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Heidelberg, Germany, (1999).
- (10) Nomura, H., Hamasaki, T., Kawasumi, I., Ujiie, Y., and Sato, J., SAE Paper, #2003-01-0628 (2003).