無重力下での高圧雰囲気中における燃料液滴列の火炎伝ば*

吉田茂徳^{*1}, 原人志^{*2}, 岡島敏^{*3}

Flame Propagation in Liquid-Fuel Droplet Arrays at Elevated Pressure under Microgravity

Shigenori YOSIDA, Hitoshi HARA, and Satoshi OKAJIMA

Experiments were conducted to study the combustion behavior of a fuel droplet array under microgravity. The effect of the ambient pressure on the flame propagation was investigated. Also the fundamental characteristics such as the flame propagation velocity and its mechanism were obtained. The results show that there are three different patterns of flame propagation, which depend on the ambient pressure and droplet spacing, as follows: 1) The flame propagates smoothly along a fuel droplet array. 2) The flame propagates intermittently. 3) The flame propagates in an extremely intermittent manner, where two adjacent unburnt fuel droplets are ignited at almost the same time. In every case, the flame propagation velocity can be calculated and it is found that it continues to decrease rapidly with increasing ambient pressure.

Key Words: Combustion, Flame Propagation, Fuel Droplet Arrays, Boundary of Hot Gas, Microgravity

1. 緒 言

燃料液滴列火炎伝ばに関する研究は、単一燃料液滴の燃焼に関する研究と合せて、噴霧燃焼の研究の一環として、数多くの研究者によって行われている⁽¹⁾。著者らも、以前に自由落下する燃焼容器中の無重力下の浮力の影響をほとんど無視できる状態で燃料液滴列の火炎伝ばに関する実験を、周囲圧力が0.1 MPaのもとで行い、火炎伝ば速度およびそれに及ぼす液滴間隔、燃料の気化性および雰囲気温度の効果を調べた⁽²⁾。

次の段階として本研究は、同様に自由落下する燃焼容器中の無重力下で圧力が0.1~0.5 MPaにおける正ヘプタン、エタノールおよび正ウンデカン液滴列の火炎伝ばを直接流し写真で観察し、液滴間隔をパラメータとして圧力が伝ば速度や区間伝ば時間に及ぼす影響を調べ、さらに、燃焼液滴が隣接未燃液滴を点火するときの機構の検討を行った。

2. 実験装置および方法

無重力状態を実現するために、本実験では自由落下法が用いられる。落下塔は、高さ約5 m、横断面は700×900 mmの長方形である。落下装置本体(図1)は、落下の際の空気抵抗の影響を除くために、空気抵抗遮断箱の中で互いに接触しない距離を保って落下させられ⁽³⁾、その形状は、450×350×370 mmの直方体の鋼製箱である。落下装置本体の中には、燃焼室、点火装置、ドラムカメラおよびシンクロモータなどが搭載されており、全重量は約32 kgである。燃焼室(図2)は、180×124×170 mmのジュラルミン製で、そのほぼ中央には、液滴懸垂用石英糸(直径0.3 mm、長さ35 mm)が一例一直線上に10本、回転腕に取付けられている。また、液滴の懸垂は、回転腕を回転し燃料タンクの下にある注射針に形成された液滴に石英糸を接触させ、その石英糸の先端に付着した液滴を回転腕を用いて、もとの位置にもどすことによって行われる。容器内圧力のセッティングは、その操作の後に行われ、この全操作に要する最大時間は25 s程度である。

本実験に使用される制御系を図3に示す。最初に落下と同時に、落下装置本体上部にあるフォトランジスタが作動し、それによってカメラスタートとタイマ

* 昭和63年11月25日 関西支部第248回講演会において講演、原稿受付 昭和63年4月8日。

^{*1} 学生員、法政大学工学部 (〒184 小金井市梶野町3-7-2)。

^{*2} 正員、(株)ノーリツ (〒192 八王子市石川町728-8)。

^{*3} 正員、法政大学工学部。

が動作する。次に、そのタイマによって液滴直下にセッティングされた直径 0.4 mm, 長さ 6 mm の点火用ニクロム線に AC 55 V の電流が約 0.2 s 間流され、第 1 番めの燃料液滴の点火が行われる。また、それと同時に動作したカメラスタートによりカメラシャッタが約 1 s 間開かれ、液滴列火炎伝ば観察のための写真撮影が行われる。火炎伝ばの観察は、直接流し写真(図 4)によって行われ、その回転周速度は 26.5 cm/s で、倍率は 0.5 である。

3. 実験結果および考察

本実験は、室温($20 \pm 0.1^\circ\text{C}$)下で行われ、使用燃料は正ヘプタン(C_7H_{16})、エタノール($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)および正ウンデカン($\text{C}_{10}\text{H}_{22}$)であり、それらの純度はともに 99.9% である。液滴の初期直径は、 $D_0 = 1.8 \pm 0.1 \text{ mm}$ である。液滴間隔 L は、3~6 mm, 周囲圧力 P は、0.1~0.5 MPa である。図 4 の写真において、縦方向が

図 1 落下装置本体

図 2 燃焼室

伝ば方向とその距離、横方向が時間をそれぞれ示すので、火炎伝ば速度は、おのこの液滴の点火点を結ぶ線の傾きより算出され、それらの平均を平均火炎伝ば速度 S_p と定義する。この写真(C)から、正ヘプタンでは液滴間隔が 5 mm, 周囲圧力が 0.4 MPa 程度になると、連続的な火炎伝ばは観察されず、隣り合った 2 液滴がほぼ同時に点火する断続的な火炎伝ばを繰返しながら伝ばしていることがわかる。そこで、この場合の

図 3 制御系

図 4 液滴列火炎伝ばの直接流し写真

平均火炎伝ば速度は、便宜上、伝ば距離を観測時間で割ることにより算出される。

図5、6および図7にはそれぞれ無重力下での圧力に対する正ヘプタン、エタノールおよび正ウンデカンの平均火炎伝ば速度 S_p を示し、また、図8、9および図10には、同様に無重力下での圧力に対する液滴間火炎伝ばの区間時間 t_b を示す。これらの図から、どの液滴間隔でも平均火炎伝ば速度は圧力の上昇とともに減少し、また、区間伝ば時間は、どの液滴間隔でも圧力上昇とともに直線的に増加し、その直線の傾きは、液滴間隔の増大とともに増加する傾向にあることがわかる。これらの現象は、圧力が上昇するに伴って液滴の周りに形成される火炎直径が減少する⁽⁴⁾ために、燃焼液滴から隣接未燃液滴への伝熱量が減少することにより起因すると考えられる。また、同一条件での火炎伝ば速度は正ヘプタン、エタノールおよび正ウンデカンの順に大きく、これは、各燃料の蒸発定数の大きさ⁽⁴⁾に対応している。

図4の正ヘプタン液滴列の(A)、(B)および(C)の写真から周囲圧力や液滴間隔などの条件によって3種類の火炎の伝ば様式があることがわかる。すなわち、(1)火炎が互いに接触して連続的にその伝ばが行われる場合で、液滴間隔が比較的狭く、かつ周囲圧力が低いときに生ずる伝ば形態(Case A)、(2)火炎が互いに接触せず断続的かつ均一な時間間隔でその伝ばが行われる場合で、火炎の周りに形成される高温ガス層が隣接未燃液滴の点火に重要な役割を演じると思われる伝ば形態(Case B)、(3)ほぼ同時に隣接未燃液滴2個が点火されるような極めて断続的かつ時間間隔が一定せずにその伝ばが行われる場合で、液滴間隔が広く、

周囲圧力が比較的高いときに生ずる伝ば形態(Case C)である。以上のような伝ば形態をとる領域を、図8に破線で示す。なお、本実験範囲内では、正ウンデカンおよびエタノール液滴列については正ヘプタン液滴列で生ずるような極めて区間時間の不均一な火炎伝ば(Case C)は観察されない。

火炎伝ばの区間時間は、ある液滴の周囲に形成された可燃混合気層の一部が発炎するまでの点火遅れ時間 t_d と、発炎点から可燃混合気を火炎が伝ばし、液滴火炎が形成されるまでの火炎伝ば時間 t_f とからなるので、

$$t = t_d + t_f \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここで、 t_d はさらに物理的遅れ t_p と化学的遅れ t_c とからなり、したがって式(1)は、

図6 火炎伝ば速度(エタノール)

図5 火炎伝ば速度(正ヘプタン)

図7 火炎伝ば速度(正ウンデカン)

$$t = t_p + t_c + t_f \dots \dots \dots (2)$$

として表すことができる。そこで、 t_p 、 t_c および t_f の大小について、(1) $t_c \gg t_f + t_p$ の場合、すなわち化学的遅れが火炎伝ばを支配するとき、伝ば火炎の区間時間は化学的点火遅れ特有の統計的変動を示し⁽⁵⁾、特に火炎が伝ばできる最大液滴間隔近傍で生ずる。(2) $t_f \gg t_p + t_c$ の場合、火炎は連続的に伝ばし Case A に対応する。(3) $t_p + t_c \gg t_f$ の場合、火炎は断続的に伝ばし Case B および Case C に対応する。表 1 には正ヘプタン液滴列の各火炎伝ばにおける t_p 、 t_c および t_f の値を示す。

以上の結果より液滴間火炎伝ばにおいて、特に火炎伝ば形態、Case B および Case C に対応する場合、燃

焼液滴から隣接未燃液滴への熱伝導が大きな役割を演じていることが予想される。そこで、式(3)に示す球対称熱伝導方程式を解くことにより、液滴の火炎の周りの温度分布および高温ガスの挙動を調べ、その考察を試みた。

球対称熱伝導方程式は、

$$(1/\alpha)(\partial T/\partial t) = (\partial^2 T/\partial r^2) + (2/r)(\partial T/\partial r) \dots (3)$$

ここで、初期条件(I.C.)および境界条件(B.C.)は、

$$I. C. \quad T(r_f, 0) = 2223K$$

$$T(r > r_f, 0) = 293K$$

$$B. C. \quad T(r_f, t) = 2223K$$

$$T(r = \infty, t) = 293K$$

$$\alpha = k/\rho c$$

とし、物性値、 k (熱伝導率)、 ρ (密度)および c (比熱)は、平均ガス温度における空気の数値が採用される。一例として、周囲圧力が 0.5 MPa の状態での正ヘプタン液滴の火炎の周りの温度分布を図 11 に示し、さらに、高温ガス層の境界の温度を 470 K⁽⁶⁾としたときの液滴の点火からの時間に対する高温ガス層の半径を図 12 に示す。また、伝ば形態(Case C)の正ヘプタン液滴列の発炎点も示されている。図 12 より、燃焼液滴に隣接する第 1 番めの液滴は高温ガスにより点火を促されるが、第 2 番めの隣接液滴は、高温ガスの影響を直接被ることなくほとんど同時に点火している。しかし、第 1 番めの隣接未燃液滴が発炎したとき、第 2 番めの液滴の中心温度は、液滴間隔が 4, 5 mm および 6 mm のときそれぞれ 410, 398 K および 339 K である。したがって、初期温度 293 K から次第にこれらの温度に至ることを考慮すると、正ヘプタンのように蒸発定数の大きい燃料では液滴の周りに可燃混合気形成される

図 8 区間伝ば時間(正ヘプタン)

図 9 区間伝ば時間(エタノール)

図 10 区間伝ば時間(正ウンデカン)

ことは可能であり、第1番めの隣接液滴の点火による急激な加熱によって、第2番めの液滴がその直後に発炎に至ることが予想される。さらにこのことから、第2番めの隣接液滴の発炎後に、それまではほとんど温度上昇のなかった第3番めの液滴が、今度は第2番めの燃焼液滴の作る高温ガスで、加熱および着火に至る。すなわち、あたかも第1番めおよび第2番めの隣接液滴の加熱と同様に第3番めおよび第4番めの隣接液滴もそれぞれ加熱されるので、前述のような区間時間の不均一な伝ば機構が周期的に繰返されると考えられる。

4. 結 論

本研究は自由落下する燃焼容器中の無重力下の浮力の影響をほとんど受けない状態で、燃料液滴列火炎伝ばに関する実験を行い、得られた結論は次のとおりである。

(1) 本実験で用いられた3種類の燃料での火炎伝ば速度は、周囲圧力の上昇とともに、また液滴間隔が増大するとともに低下する。同じく火炎伝ばの区間時間はどの液滴間隔においても、圧力の上昇とともに直線的に増大し、その増加の割合は液滴間隔が大きいほど顕著である。これらは、蒸発定数の大きい燃料ほど同一条件では、火炎伝ば速度は大きく、火炎伝ばの区

間時間は小さい。

(2) 無重力下での正ヘプタン燃料液滴列の火炎伝ばは、低下下では比較的連続に行われるが、圧力上昇に伴い断続的になり、ある圧力を超えると2液滴がほぼ同時に点火されるような極めて断続的な伝ばを示すようになる。また、その伝ばが現れる圧力は、液滴間隔が増大するほど低下する。しかし、本実験範囲内においては、正ウンデカンおよびエタノール液滴列では、2液滴がほぼ同時に点火されるような断続的な火炎伝ばは観察されない。これは、落下塔の高さの制限、すなわち無重力状態の実現可能な時間の制限による狭い実験範囲にも原因があると思われるが、正ウンデカンやエタノール液滴列での燃焼液滴に隣接する第2番めの隣接未燃液滴の周りにできる混合気の状態を与えた場合、第1番めの隣接未燃液滴が点火して第2番めの液滴付近の温度が急激に上昇しても、それまでに液滴の周りの混合気が発炎に至るほど十分に形成されていないため、区間時間の不均一な伝ば形態が観察されなかったものと考えられる。

(3) 燃料液滴列火炎伝ばにおいて、液滴の周囲の可燃混合気層が発炎するまでの点火遅れ時間と発炎点から液滴火炎が形成されるまでの火炎伝ば時間の概念を導入することによって、その伝ばの形態をCase A, BおよびCと3種類に分類することができる。さらに、Case Cの火炎伝ばにおいては、球対称熱伝導方程式を解くことによって液滴の火炎の周りの温度分布を調べ、それに基づいて伝ば機構を予測することができ

表 1 火炎伝ばの区間時間

L mm	Propagation time t ms														
	t_f					$t_p + t_c$					t				
	P=0.1 MPa	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
3	9	13	16							21	27	9	13	16	21
4	18	25						34	39	76 or 17 *47	18	25	34	39	47
5	30					43	61	146 or 28 *87	196 or 17 *107	30	43	61	87	107	
6	47					73	95	227 or 23 *125	294 or 21 *158	47	73	95	125	158	

*: mean

図 11 燃焼液滴の周りの温度分布

図 12 火炎伝ばにおける高温ガスと液滴点火の関係

る。しかし、この検証のためには高温ガス層の挙動、圧力の増大による物性値の変化あるいは第2番めの液滴の発炎に至るまでの温度分布等の研究を実験的に確かめる必要があり、現在その研究を進めている。

文 献

- (1) 例えば, Williams, A., *Combustion of Droplets of Liquid*

Fuels: A Review, Combust Flame 21 (1973), 1-31.

- (2) 岡島・ほか3名, 機論, 47-422, B (昭56), 2058.

- (3) Okajima, S. and Kumagai, S., *Proc. Fifteenth Sympo. Int. Combust.* Combustion Institute, (1971), p. 799.

- (4) Okajima, S., ほか2名, *Archiv. Combust.*, 6-1 (1986), 51.

- (5) 酒井・斉藤, 機械の研究, 9-1051 (昭32).

- (6) Okajima, S. and Kumagai, S., *Archiv. Termodyn. i Spalania*, 7-Nr 1. (1976).

討 論

〔質問〕 角 田 敏 一 (広島工業大学工学部)

絶妙な方法により興味ある新しい知見を得られたことに敬意を表す。下記の点につきご教示願いたい。

- (1) 初期火炎核の出現位置は液滴側面上流側か。

- (2) 火炎温度2223 Kとした根拠および圧力依存性。

- (3) 1244 ページ右欄, 液滴中心温度の決定方法。

- (4) 1244 ページ左欄, (a)の条件は表1のどの部分に相当するか。

- (5) 1244 ページ右欄, 2番めの液滴の着火が高温ガスによる点火でなく“急激な加熱”としているが具体的にどのような機構を考えているか。

- (6) 高圧下ではすすの多量発生による放射伝熱が無視できないのではないかと。

〔回答〕 (1) 本実験の液滴列火炎伝ばの流し写真から判断すると, 様式A, BおよびCとも隣接未燃液滴の燃焼液滴側, すなわち上流側で火炎の出現による発光を確認することができる。これはどの様式でも, 隣接未燃液滴の周囲に形成される混合気の着火が, その伝ばに対して支配的要因であることを示している。

- (2) 火炎温度2223 K {1950°C} は, 無重量下で50 μ m の Pt-PtRh 熱電対を用いて測定した結果である(未発表)。火炎温度の圧力依存性については, まだ検討していないので, 研究が進みしだいで発表したい。

- (3) 本研究での燃焼液滴の温度分布の計算においては, 隣接未燃液滴の影響は全く考えていない。したがってこの液滴中心温度と記述した意味は, ただ単に未燃液滴周囲のガスの温度を示し, 第1近似として液滴もこの温度にあるとしているということである。

- (4) 本文で示したように(a)の場合は, 火炎伝ばができる最大液滴間隔近傍で生ずると考えられ, 本研究での液滴間隔が比較的狭い範囲では, そのような火炎伝ばは観察されない。したがって表1には記述されていない。しかし, 重力場での液滴列火炎伝ばでは, 自

然対流によって高温ガスが上方に押し上げられるため, 未燃液滴への伝熱量が減少するので, (a)のような現象は容易に起こりうると考えられる。

- (5) 正ヘプタン未燃液滴周囲で数十°C程度の温度上昇がある場合, 燃料の揮発性を考慮すれば, 2番めの未燃液滴の周囲には, 1番めの未燃液滴が着火に至るまでに, ある程度の可燃性混合気が形成されると考えられる。すなわち第1番めの未燃液滴の着火時には第2番めの未燃液滴の周囲には可燃性混合気が存在していると考えられる。したがって, 結果的には第1番めの液滴の火炎が第2番めの液滴を直接点火すると考えられる。

- (6) ご指摘のとおり, 高圧になればなるほど, 多量のすすが発生し, 火炎伝ばに及ぼす放射伝熱の影響は無視できなくなることは当然のことである。このすすによる熱放射の影響に関しては, 未燃液滴の詳細な着火機構と同時に, 現在検討中である。

〔質問〕 水 谷 幸 夫 (大阪大学工学部)

- (1) 様式Cのような火炎伝ばが観察されるためには, 隣接油滴が着火する際に第2隣接油滴が物理的遅れ時間を終わっている必要があると思われる。このことが解析的に確かめられるのか。

- (2) 貴研究のような理想的な条件での火炎伝ばの知見は, 重力場の中で大小の油滴が混在し, 乱流混合が生じている実際的な状況に, どのように適用できるのか。

〔回答〕 (1) ご指摘のように著者らもそのように考えている。しかし, 本研究における液滴周囲の温度分布の計算は, 様式Cのような極めて断続的な伝ば形態の推測を, 第1近似として検討するために行ったもので, 第2番めの液滴の物理的遅れを明確に示すまでには至っていない。将来の問題として, 第2番めの液滴の存在を考慮し, 液滴周囲の温度分布を求め, それを推測することは大変複雑であるが不可能ではないと思っている。著者らは現在, 無重量下で Pt-PtRh 熱

電対を用いて周囲温度分布および液滴中心温度を測定し、その解明に対して実験的に取り組んでいる。

基本的な情報を得るために実験を進めており、この意味において十分に意義があると思う。

(2) 本研究は、噴霧燃焼を理解する上での1つの