

### 無重力状態下での燃料液滴列の火炎伝ばに関する実験的研究

山口, 修次 / YAMAGUCHI, Shuji / ABE, Kazutoshi / KIMOTO, Tetsuro / OKAJIMA, Satoshi / 岡島, 敏 / 木本, 哲郎 / 阿部, 和利

(出版者 / Publisher)

社団法人日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

日本機械学会論文集. B編

(号 / Number)

422

(開始ページ / Start Page)

2058

(終了ページ / End Page)

2065

(発行年 / Year)

1981-10-25

## 無重力状態下での燃料液滴列の火炎伝ばに関する実験的研究\*

岡島 敏\*\*, 木本 哲郎\*\*\*  
Satoshi OKAJIMA, Tetsuro KIMOTO  
阿部 和利\*\*, 山口 修次\*\*  
Kazutoshi ABE, Syuji YAMAGUCHI

## 1. 緒 論

実際の燃料噴霧の燃焼において、その噴霧を構成している燃料液滴の直径は、燃料の種類とか霧化の方法によって異なるけれども一般には数十から数百 $\mu\text{m}$ 程度であり、それらの個々の燃焼過程を微視的に観察すればそれらにおよぼす自然対流の影響はほとんど無視できることが知られている。また、噴霧燃焼では、液滴直径、空間密度、液滴間隔、燃料の気化性、ふん囲気組成、温度および圧力などの諸因子が火炎伝ばに大きく影響し、条件によっては予混合気同様の火炎伝ばが、あるいは個々の液滴が独立に燃焼し微小な拡散火炎の集合体として断続的な火炎伝ばが行われることが認められている<sup>(1)</sup>。

以前に、ペナーらは単一液滴の燃焼過程を基礎として、噴霧燃焼における火炎伝ばの基本的な挙動を調べる目的で、直径1mm程度の液滴から構成される燃料液滴列の燃焼に関する実験を行い、火炎伝ば速度およびその伝ばに果たす高温ガス層の役割について調べている<sup>(2)</sup>。しかし、それは標準重力状態下での実験であり、液滴直径も2mm位で比較的大きいので、当然、その燃焼過程は自然対流の影響を強く受け得られた結果は定量的にはもちろんのこと定性的にも明確な意味をもつとはいえないものがある。

このような理由から、本研究では噴霧を構成しているような微小液滴について、それらの間の火炎伝ばの基本的な挙動を実験室スケールの比較的大きな液滴で観察するために、自然対流の影響を受けない自由落下する燃焼容器中の無重力状態のもとで1列一直線上に等間隔で配置された10数個程度の液滴から構成される液滴列の火炎伝ばについての実験を行い、火炎伝ば速度およびそれにおよぼす液滴間隔、燃料の気化性およびふん囲気温度などの効果を調べ、ついで、燃焼液滴

列のまわりの高温ガス層の挙動の時間的変化を観察して燃焼液滴が隣接未燃液滴を点火するときの機構を明らかにし、その基本的性質を解明した。

## 2. 実験装置および方法

無重力状態のもとで燃料液滴列の火炎伝ばの様子を観察するために、本実験では自由落下法がもちいられる。図1は、本実験にもちいられた落下塔の概略図である。この塔は高さ5m、横断面は700×900mmの長方形である。その上部には、ポリプロピレンリボンによってつり下げられた落下装置本体および抵抗しゃ断箱を落下させるための切断機が装備されており、また、その下端には、それらの落下の際の衝撃を吸収するための高さ0.5mのクッションが配してある<sup>(3)</sup>。

落下装置本体(図2)は、375×676×340mmの直方体の鋼製箱で、その中には燃焼室、シュリーレン光学系、点火装置、ドラムカメラおよび同期電動機など

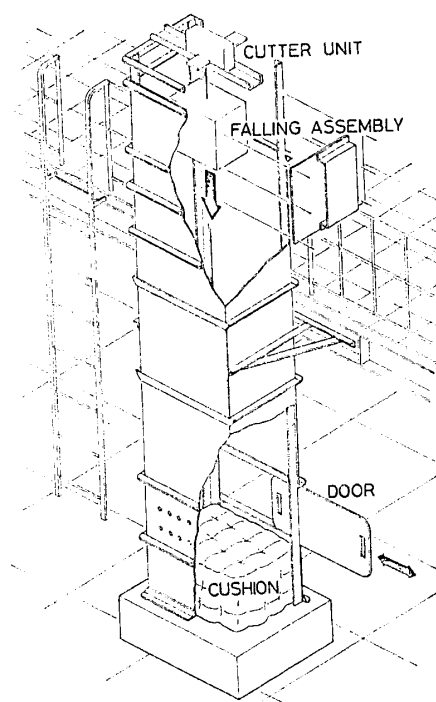


図1 落下塔

\* 昭和55年9月2日 北陸信越支部北陸地方講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和55年4月15日。

\*\* 正員、法政大学工学部(〒184 小金井市掘野町3-7-2)。

\*\*\* 正員、日本電信電話公社(〒730 広島市中区基町6-14)。

が装備されており、その装備重量は約 35 kg である。燃焼室 (図 3) は、190×150×175 mm のアルミニウム製の箱で、その中央には回転腕に固定された液滴懸垂用石英糸 (直径 0.2 mm, 長さ 35 mm) が 1 列一直線上に等間隔で 10 数本配置されている。また、この石英糸列に液滴を付着させる液滴付着装置 (燃料タンクを兼ねる) の下端面には石英糸と同数の注射針がやはり 1 列一直線上に配置されている。液滴付着装置のコックを回転すると、液滴付着装置の内部が大気に開放され、下端面の注射針列の先端にほぼ均一の大きさの液滴ができる。このとき、回転腕を回転させて石英糸の先端をこれらの液滴に接触させてからもとの位置にもどすと、液滴を各石英糸の先端に同時に付着させることができる。この操作に用する時間は約 3 秒間で、液滴初期直径の相違は最大でも 2% 以内である。

光学系は、凹面鏡 (焦点距離 150 mm)、半透明鏡、超高圧水銀燈、ナイフエッジおよびドラムカメラなどから構成されており、それは落下装置本体の限られた空間内でシュリーレン写真撮影が可能となるように、かつフィルム面上に二重像が出現しないような配置となっている。また、写真をドラムカメラに対してこま撮りもできるようにピンホール直前にチョッパが設けられている。

点火には約 3 mm の火花間げきを作るように配置された針端の電気火花電極が使用され、ネオンランプは火炎伝ば時間測定のためのタイムマークとして燃焼室内に配置されている。また、液滴の中心温度の測定には裸の  $P_t/P_tR_h$  熱電対をもちいて行われ、その信号は増幅器を通して電磁オンログラフによって記録される。その素線直径は約 25  $\mu\text{m}$  で接点は直径約 40  $\mu\text{m}$  の球形である。

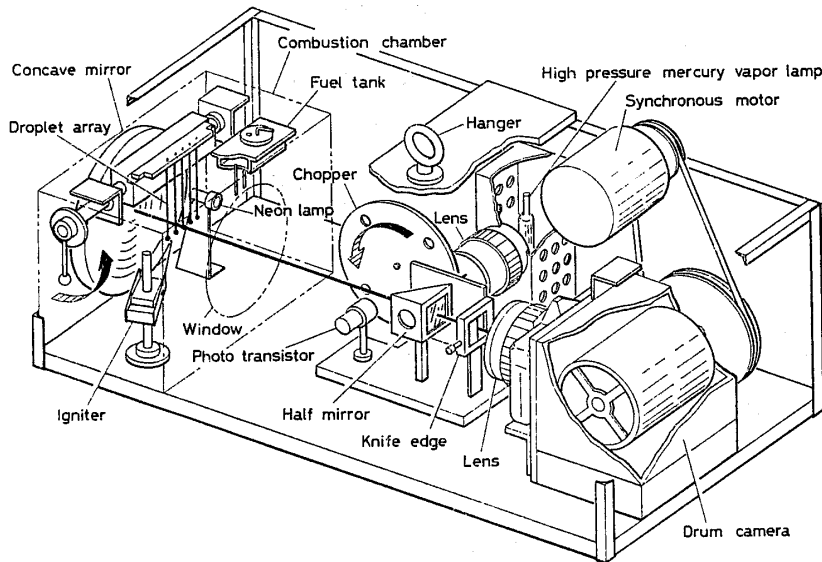


図 2 落下装置本体

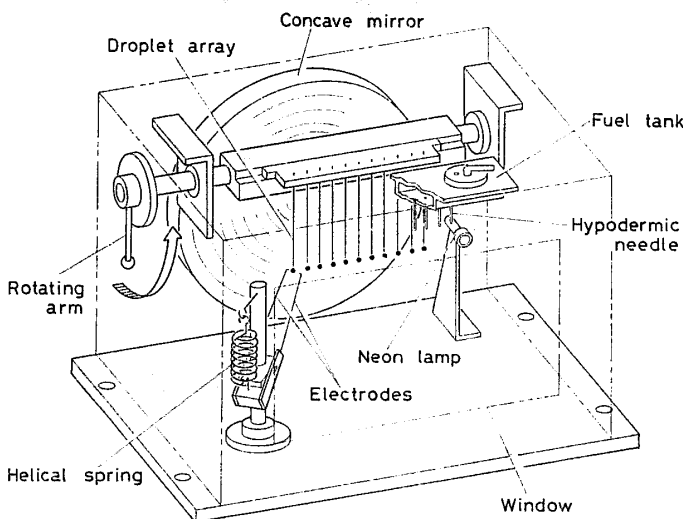


図 3 燃焼室

図 4 は、この装置の全制御系を示す。実験に際して、落下装置本体および抵抗シャ断箱はそれぞれ切断機を介したポリプロピレンリボンによって落下塔の上端につり下げられる。ドラムカメラのシャッターは、切断機によってポリプロピレンリボンが切断されると、カメラ起動装置内のコイルばねが動作し、それによって作動する仕掛けになっている。また、このカメラシャッターは点火コイルの一次電流をシャ断するためのリレーとも連動するようになっている。

図 5 には、自由落下する燃焼容器中の無重力状態のもとで種々の液滴間隔における正ヘプタン [図 (a)] およびベンゼン液滴列 [図 (b)] において、その一端で点火した場合の火炎伝ばの様子を直接流し写真によって観察したものを、図 6 には、正ヘプタン液滴列における高温ガス層の伝ばの様子を間欠シュリーレン法によって観察したものを示す。また、ある液滴間隔に対する実験回数 は 10 回程度である。

### 3. 実験結果

実験は、大気圧下でふん囲気温

度が 21°C および 28°C の場合について行われ、使用燃料は正ヘプタン (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>)、ベンゼン (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)、エタノール (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) の 3 種類である。液滴初期直径  $D_0$  は、正ヘプタン、ベンゼン および エタノール液滴でそれぞれ、 $D_0=1.42\pm 0.02$  mm,  $D_0=1.57\pm 0.01$  mm および  $D_0=1.22\pm 0.01$  mm である。図 5 の写真において、縦方向が火炎伝ばの方向とその距離、横方向が時間をそれぞれ示すので、おのおのの液滴の点火の瞬間を連ねた線の傾斜が平均火炎伝ば速度  $s_p$  を示す。また、燃料液滴列の火炎伝ばにおける端部効果の影響を排除するために、火炎伝ば時間  $t_p$  (火炎が液滴列の液滴 2 個間を伝ばするのに要する時間) および火炎伝ば速度の算出の際には両端の液滴を除き測定が行われる。図 5 の写真からもわかるように、本実験におけるふん囲気温度の範囲内での燃料液滴間の火炎伝ばは、どの燃料とも液滴間隔  $L$  が小さければ比較的連続的に行われるが、これに対して液滴間隔が液滴初期直径の 4 倍程度になると燃焼液滴の火炎は、隣接未燃液滴を直接覆うことは観察されず、その火炎の接近をまたずに未燃液滴は点火し、断続的な火炎伝ばが行われることが観察される。この後者の事実、燃焼液滴の高温ガス層は隣接未燃液滴の点火に重要な役割を果たしていることを意味している。

**3.1 火炎伝ば速度および時間** 図 7 は、図 5 の写真より算出されたふん囲気温度が 21°C における各液滴間隔に対する火炎伝ば速度を示す。本実験における

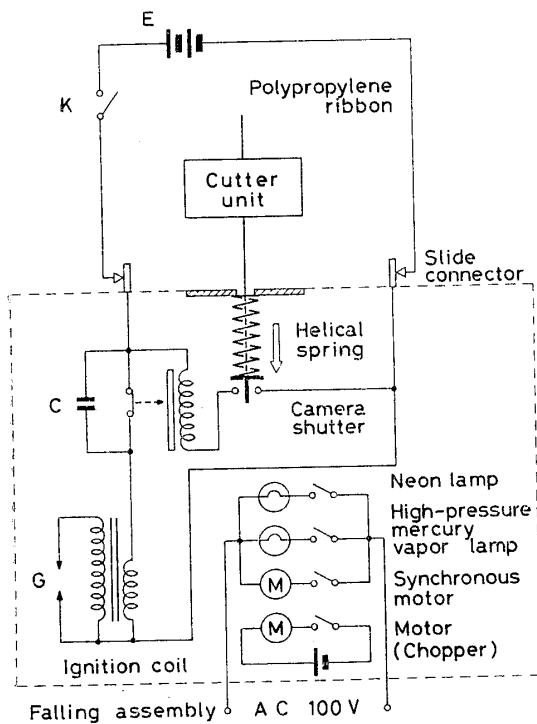


図 4 制御系

最小液滴間隔  $L=3$  mm における火炎伝ば速度は、正ヘプタンでは 31.0, ベンゼンでは 34.6 および エタノールでは、8.8 cm/s 程度である。また、液滴間隔が増大するにしたがって火炎伝ば速度は減少するが、その割合は液滴間隔が 3 mm の場合と 8 mm の場合とを比較すると、正ヘプタン、ベンゼンおよびエタノール液滴でそれぞれ 74.6, 74.0 および 56.0% であり、蒸発熱の大きいものほど火炎伝ば速度におよぼす液滴間隔の影響が小さいことがわかる。図 8 には、ふん囲気温度が 28°C の場合の液滴間隔と火炎伝ば速度との関係を示す。図 7 および図 8 から、ふん囲気温度が高くなるにつれて火炎伝ば速度は増大するけれど、それ

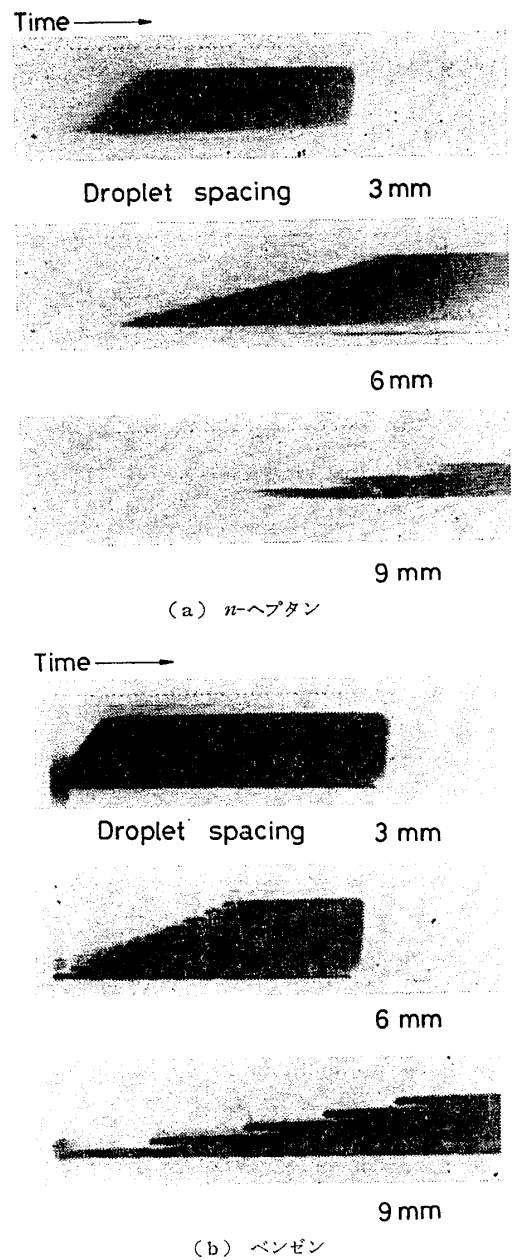


図 5 液滴間火炎伝ばにおける直接流し写真 (ふん囲気温度 21°C, タイムマーク 20ms)

は液滴間隔が3~6 mmと比較的小さい場合に特に顕著であり、それ以上の液滴間隔になると21°Cおよび28°Cの場合における火炎伝ば速度の値は大差なくなる。このことは、液滴間隔が大きいと、ある液滴の燃焼によってその隣接未燃液滴の蒸発が盛んになり、これによって火炎伝ばが行われるのに対して、液滴間隔が小さくなれば可燃性混合気があらかじめ液滴間を埋め、その中を火炎が伝ばするので、燃料蒸気量、すなわち温度の変化を敏感に受けることによるものと考えられる。また、図8には、標準重力場のもとで観察されるエタノール液滴列の火炎伝ば速度も同時に示され

ている。この図から、標準重力状態下では液滴間隔の増大にともなう火炎伝ば速度の減少は無重力状態下でのそれよりも著しく大きいことがわかる。

図9は、ふん囲気温度が28°Cのときの火炎伝ば時間を液滴間隔に対して示したもので、液滴間隔の増大は火炎伝ば時間を加速的に増加させることがわかる。

**3.2 高温ガス層** 図6に示す写真から、燃焼液滴の高温ガス層は時間の経過とともにその大きさを増し、隣接未燃液滴はその範囲内に没入してから点火することが観察される。図10は、火花点火からの時間

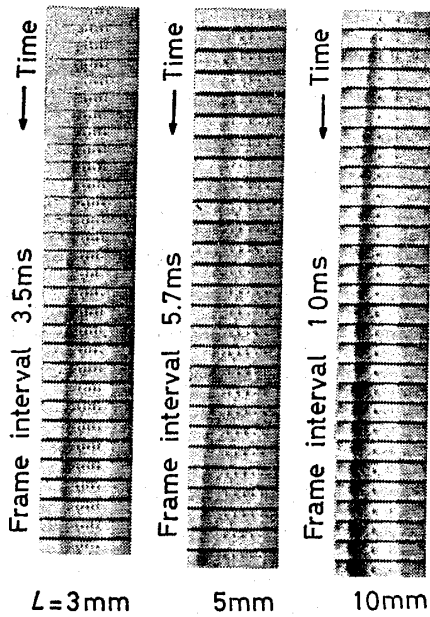


図6 液滴間火炎伝ばにおける間欠シュリーレン写真 (ふん囲気温度 21°C)

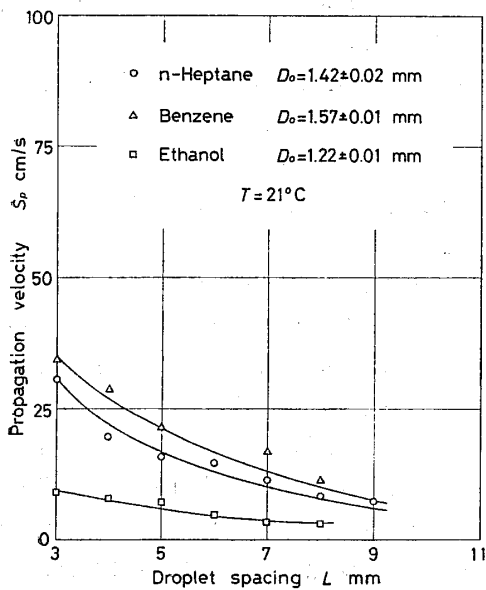


図7 火炎伝ば速度

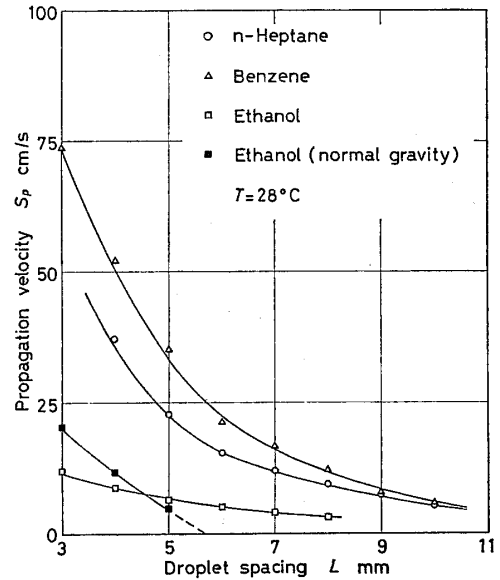


図8 火炎伝ば速度

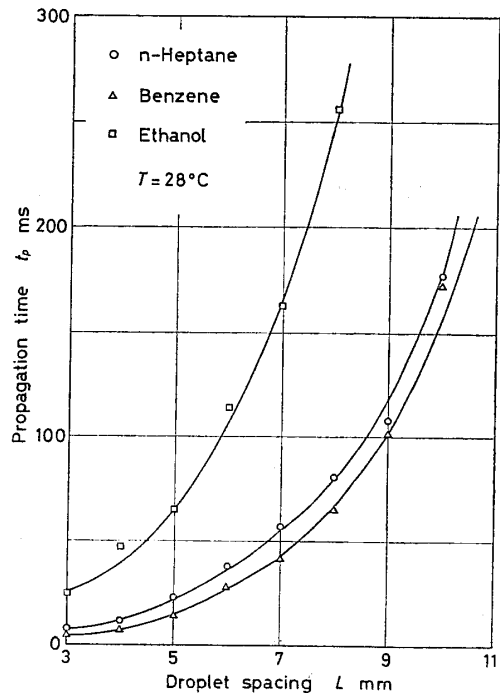


図9 火炎伝ば時間

表 1 火炎伝ば限界距離

		n-Heptane	ベンゼン	エタノール
		標準重力状態	$L_m$ mm	6.5
	$L_m/D_0$	4.6	4.0	3.3
無重力状態	$L_m$ mm	15.2	14.2	10.8
	$L_m/D_0$	10.7	9.0	8.8

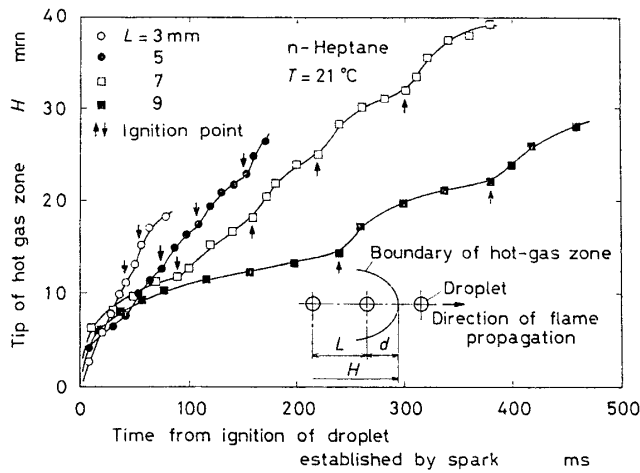


図 10 高温ガス層

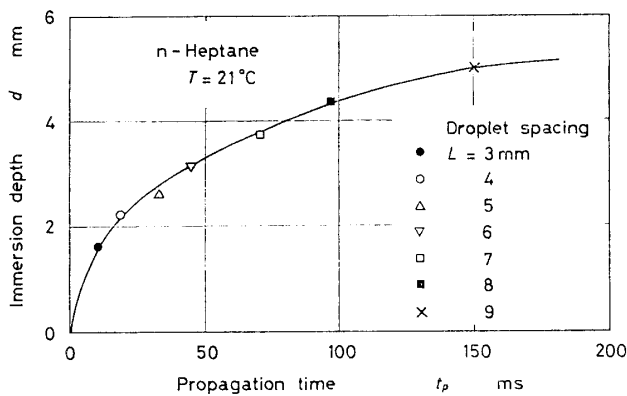


図 11 液滴間火炎伝ば時間と点火時の没入深さとの関係

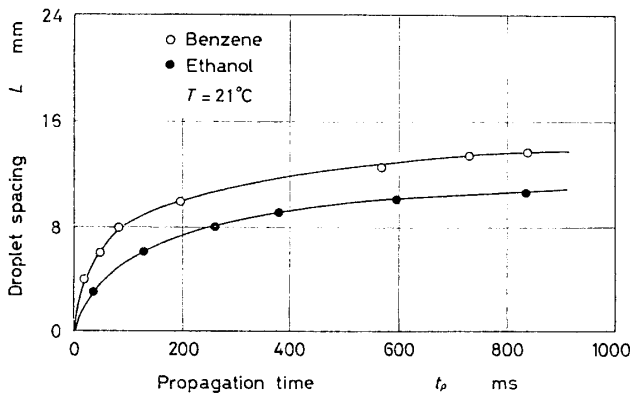


図 12 無重力状態下での火炎伝ば限界距離の決定法

の経過に対する高温ガス層の大きさ  $H$  の変化を示す。ここで、 $H$  は液滴の中心を連ねた中心線上における火花点火液滴の中心から高温ガス層の外縁までの距離である。また、矢印は液滴が点火された瞬間を示す。この図から、火花電極による最初の液滴の点火直後においては、端部効果および電極などの影響のために高温ガス層の成長は比較的不規則であるが、隣接未燃液滴への点火後は比較的規則的な火炎伝ばが行われていて、液滴間隔が 3, 5, 7 および 9 mm における正ヘプタンの高温ガス層の平均伝ば速度は、 $21^\circ\text{C}$  においてそれぞれ 31.0, 16.0, 11.0 および 6.0 cm/s 程度であり、液滴間隔が小さいほど大きくなっており、これらの値は各液滴間隔における火炎伝ば速度にほぼ等しいことがわかる。また、この図から、点火時における液滴の高温ガス層中に没入している距離、すなわち没入深さ  $d$  を容易にもとめることができる。

図 11 は、点火時における燃料液滴の高温ガス層中への没入深さ  $d$  と各液滴間隔における火炎伝ば時間との関係を示したものである。この図から液滴間隔が増大して火炎伝ば時間が増加すれば隣接未燃液滴を点火温度にまで到達させるのにより大きな没入深さを必要とすることを示していることがわかる。

また、 $d$  と  $t_p$  との関係から

$$d \propto \sqrt{t_p}, \text{ すなわち } d^2 t_p^{-1} = \text{const.}$$

という実験式を誘導することができる。しかし、前述のように連続あるいは断続的の火炎伝ば領域において、その点火の機構は若干異なるので上式は全領域にわたって一様に適合はせず、 $t_p \cong 40$  ms 程度までの連続的の火炎伝ば領域においてやや誤差が生じている。

**3.3 火炎伝ば限界距離** 液滴間隔を増大していくと、燃焼液滴から隣接未燃液滴へ火炎が伝ばできなくなる距離が存在する。この距離を火炎伝ば限界距離  $L_m$  と定義する。無重力状態下での燃料液滴の燃焼では、燃焼の進行とともに高温ガス層は増大するので<sup>(4)</sup>、火炎伝ば限界距離の決定には燃料液滴が燃えつきるまで観察することが必要である。しかし、本実験での液滴初期直径の大きさでは、落下時間中にその条件を満たすことはできないので、図 12 に示すようにその落下時間中において液滴間隔と火炎伝ば時間との関係をプロットしてみると、それらの傾向から火炎伝ば限界距離を推定することができる。表 1 には、無重力および標準重力状態下での燃料液滴列におけるふ

ん囲気温度が  $21^{\circ}\text{C}$  の場合の火炎伝ば限界距離を示す。この表から、無重力状態および標準重力状態下における火炎伝ば限界距離は、蒸発熱の大きいものほど小さく、それは無重力状態下では標準重力状態下における値よりも約2倍以上大きいことがわかる。この後者の事実、標準重力状態下では自然対流の影響のために燃焼液滴のまわりに形成される高温ガス層は上方に押し流されるので、比較的小さな液滴間隔でも隣接未燃液滴は直接高温ガス層に覆われることはなく、したがって隣接未燃液滴に伝達される伝熱量は液滴間隔の増大ともなっていて著しく減少することに起因していると考えられる。また、図8に示したように標準重力状態下での液滴間隔の増大による火炎伝ば速度の減少割合が無重力状態下でのそれよりも大きいのもこの理由によるものと考えられる。

**3.4 液滴の中心温度** 図13は、ベンゼン液滴列において、液滴が無重力状態下で点火されてから隣接液滴の中心における温度変化を液滴間隔をパラメータとして時間に対して示したものであり、矢印は隣接液滴が点火された瞬間を示す。また、図中には同時に液滴中心温度を測定するための熱電対の配置も示されている。

この図から、隣接未燃液滴が燃焼液滴からの伝熱によって点火されると、その中心温度は急激に上昇し、その後、火炎伝ばが進行するにつれて燃料の沸点よりも約  $7^{\circ}\text{C}$  低い値でほぼ一定値に達する。この温度の時間的变化は正ヘプタンおよびエタノール液滴列においても同様の傾向を示し、その中心温度は燃料によって若干相違するけれども沸点よりもやや低いところで一定値に達する。

#### 4. 結 言

燃料液滴間の火炎伝ばに関する基礎的な性質を明らかにする目的で、本研究では自由落下する燃焼容器中の無重力状態のもとで1列一直線上に配置された燃料液滴列の火炎伝ばに関する実験を行い、得られた結論はつぎのとおりである。

(1) 火炎伝ばの様子は液滴間隔が小さければ比較

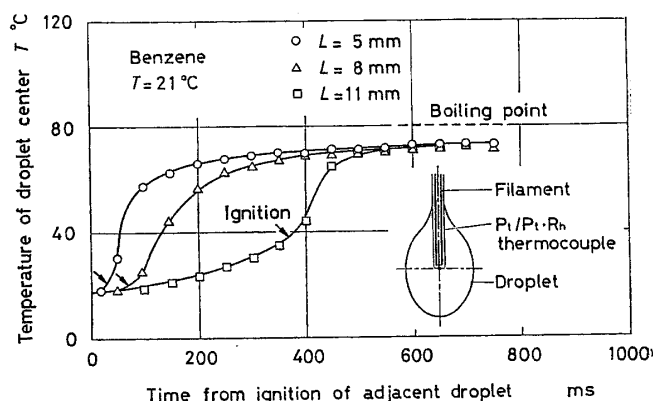


図 13 液滴の中心温度

的連続的に行われるが、それが大きくなると断続的となり、高温ガス層の火炎伝ばに果たす役割は大きくなる。

(2) 液滴間隔が増大するにしたがって火炎伝ば速度は減少するが、その割合は蒸発熱の大きい燃料ほど小さい。

(3) ふん囲気温度の火炎伝ば速度におよぼす影響は、液滴間隔が小さいほど顕著であるが、それが増大して液滴初期直径の4~5倍程度になるとその影響は著しく小さくなる。

(4) 液滴間隔が増大して火炎伝ば時間  $t_p$  が増加すると、隣接未燃液滴を点火温度にまで到達させるのにより大きな没入深さ  $d$  を必要とし、それらの間には、 $d^2 t_p^{-1} = \text{const.}$  なる関係式が実験的に成立する。

(5) 火炎伝ば限界距離は蒸発熱の大きい燃料ほど小さく、かつ無重力状態下におけるその値は標準重力状態下における値よりも2倍位大きい。

(6) 燃料液滴の中心温度は点火と同時に急激に上昇し、その後、火炎伝ばが進行するにつれて沸点よりもやや低い値で一定値に達する。

#### 文 献

- (1) Burgoyne, J.H. and Cohen, L., *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, **225** (1954), 375.
- (2) Reichenbach, R., ほか2名, *Proc. 8th Symp. (Int.) on Comb.*, (1962), 1068.
- (3) Kumagai, S., ほか2名, *Proc. 13th Symp. (Int.) on Comb.*, (1971), 779.
- (4) Okajima, S. and Kumagai, S., *Proc. 15th Symp. (Int.) on Comb.*, (1974), 401.

#### 討 論

〔質問〕 角田 敏一 (広島大学工学部)

(1) 液滴間隔  $L$  が大きくなり合う液滴が別々に燃焼している場合の火炎直径はいくらか。これと連続

火炎伝ばから断続的の火炎伝ばへ移行する場合の  $L$  との関係があればお示し願いたい。

(2) 結論(2)において蒸発熱と火炎伝ば速度の

減少割合を結びつけていることについて  $L$  が大きいときの火炎伝ば機構は、燃焼液滴より生じた高温ガスにより液滴周囲の燃料蒸気濃度が高くなると同時に加熱され、自発火が起こることかと思われる。この場合、圧力一定だから、着火以前の混合気の濃度、温度履歴が重要かと思われる(付1)。また液滴加熱のための顕熱等も考慮する必要があると思われる。このような複雑な現象が蒸発熱で整理できる積極的理由があればお示し願いたい。また、この場合の蒸発熱とは単位質量当たり、モル当たりいずれの値か。また、図13に見られるように、沸点よりかなり低いところで着火しているが、どの温度における蒸発熱で比較されたのか。図7の測定データのばらつきはどの程度か。とくに、74.6 ( $n$ -ヘプタン) と 74.0 (ベンゼン) との差の有意性の関連性についてお示し願いたい。

(3) 火炎伝ば限界距離について この決定方法が明確でないが、本文中の定義からして、つぎのようにして求めたものと思われる。すなわち、図12において液滴燃焼時間=火炎伝ば時間  $t_p$  としてこの  $t_p$  に相当する  $L$  を限界距離とするというものである。この場合、液滴燃焼時間はいくらにされたのか。単一液滴の燃焼速度定数(無重力場)を用いた推定によると  $n$ -ヘプタンの場合4秒程度となるが、これに対して測定時間は装置の制約上1秒以下となる。1秒以下の測定時間で得られた値を4倍程度の範囲にまで外そうすることはきわめて危険であると思われる。これをあえて行くと、表1の値より40~50%大きめの値となり、表1の信頼性が疑問となる。また、この値は液滴直径により大きく変化すると思われる。図12には  $n$ -ヘプタンのデータが示されていないが、図9によると、 $T=28^\circ\text{C}$  の場合、ベンゼン、 $n$ -ヘプタン、エタノールの順に  $L_m$  が小さくなるのが予想されるがいかか。もしそうだとすると、 $21^\circ\text{C}$  と  $28^\circ\text{C}$  の場合で結果が異なり、結論(5)は一般性に欠けるのではないかと思われる。

[回答] (1) 本実験は液滴間における火炎伝ば機構をはあくすることを主目的として行われており、各条件下における個々の液滴の火炎直径  $D_f$  に対する正確な測定は行っていないので厳密にはいえないが、それはおおよその実験条件の範囲内では、最大でも、 $L=6\text{ mm}$  では  $D_f \approx 11\text{ mm}$ 、 $L=8\text{ mm}$  では  $D_f \approx 10\text{ mm}$  程度である。

また、次の問題としての液滴間干渉効果については、連続火炎伝ばから断続火炎伝ばへ移行する場合の質量燃焼率とか火炎直径などを含めて種々の主要デー

タについて落下装置本体に16mmシネカメラをとう載して現在調べているところである。

(2) 各液滴間隔における火炎伝ばの挙動は、ご指摘のとおり種々の因子によって支配され、またそれらは複雑にからみ合っているのでもいちがいに最も支配的因子を簡単に見い出すことは容易ではないが、本実験の場合のように点火時の初期条件をほぼ均一に保った場合、液滴間隔が増大するにつれて高温ガス層からの伝熱が隣接未燃液滴の着火に重要な役割を果たすようになり、高温ガス層に没入した隣接未燃液滴から発生する蒸気量は、液滴周囲の可燃性混合気の形成に寄与しかつその着火過程に大きく影響するので、燃料蒸気の発生量の一つの目安となる蒸発熱がこのような条件下で、特に断続的伝ば領域においては、火炎伝ばを支配する一つの大きな因子であると考えられる。

また、図13は液滴の中心温度を示したもので、定性的説明のために付表1に示す値を採用した(付2)。

つぎに、図7におけるデータは各液滴間隔において測定回数が10回程度の平均値であり、各実験ごとの初期条件が均一になるように十分な配慮のもとで測定されたが、各測定値のばらつきの程度は7%位である。従って、正ヘプタンとベンゼンとでは蒸発熱の値にはほとんど相違がないので、この実験における誤差範囲を考えれば両者の測定値(74.6%と74%)を蒸発熱でもって厳密に比較することは困難であると思われる。しかし、エタノールとの比較においては蒸発熱に大きな差異が存在するので、それは各液滴間火炎伝ばの挙動を調べる一つの因子として有意義であると考えている。

(3) ご指摘のとおり、この実験設備の範囲内で液滴間火炎伝ば限界距離を正確にもとめようとすれば多少無理があるかもしれない。

しかし、液滴間隔が大きくなると液滴の着火は高温ガス層にかなり没入してから発生することが観察される。そこで、著者らの単一液滴の場合の計算によれば(付3)、正ヘプタンの場合でもこの程度の液滴直径においては、高温ガス層の直径はその燃焼末期においても50mmを越えることはなく、またこの直径はそ

付表 1

燃 料	温 度 K	蒸 発 熱 kJ/mol
$\text{C}_7\text{H}_{16}$	372	31.6
$\text{C}_6\text{H}_6$	298	31.7
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	352	38.6

(付2) 日本化学会編, 化学便覧, (昭53), 916, 丸善。

(付3) Okajima, S. and Kumagai, S., *Archivum Termodinamiki i Spalania*, 7 (1976), 41.

(付1) 角田・ほか2名, 機論, 41-348 (昭50), 2475.



の体積増大との関係から、燃焼時間の経過に対して直線的に増大するのではなく1秒程度でその発達はほとんど終了して、その後はほぼ飽和状態に近い挙動を呈する。そこで、図12における傾向と上述の液滴の着火に重要な役割を果たす高温ガス層の挙動とから、 $t_p \approx 1$  s以上経過すると火炎伝ばの継続が不可能になると考えられるので、その値をもって火炎伝ば限界距離とした。

つぎに、図7 (21°C) および図8 (28°C) において、 $L/s_p$  が火炎伝ば時間  $t_p$  を示すが、特に図9は図8における測定値から算出したもので、この傾向は図7の21°Cの場合でも同様であり、結論(5)の一般性は失われたいと思われる。ただ、図7および図8の傾向からもわかるように、この実験における誤差範囲を

考えても、液滴間隔が増大するにつれてベンゼンおよび正ヘプタン液滴列の火炎伝ば時間は著しく接近し、 $L=9\sim 10$  mm程度で両者の火炎伝ば時間はほぼ同一の値を示すようになる。さらに液滴間隔を増して火炎伝ば限界距離付近になると正ヘプタン液滴列の火炎伝ば時間はベンゼン液滴列のそれよりも若干短くなる傾向を示し、付表1のような測定結果が得られる。これは高温ガス層および液滴の温度分布、燃料蒸気の拡散とか種々の物性値の温度依存性などを非定常的に考慮しなければ解決できない問題であると同時に液滴初期直径の影響とか石英糸の熱的効果も考える必要があり、現象の複雑性のためにその説明の積極的理由はまだ見い出してはいない。