

燃料液滴列の火炎伝ば

IINUMA, Kazuo / 飯沼, 一男

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

2

(開始ページ / Start Page)

27

(終了ページ / End Page)

36

(発行年 / Year)

1965-05

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004281>

燃料液滴列の火炎伝ば

教授 飯 沼 一 男 (機械工学科)

Flame Propagation in Liquid Fuel Droplet Arrays

Kazuo Inuma, *Professor*

1. ま え が き

燃料噴霧の着火および燃焼については、オイル・バーナーやディーゼル機関、ガスタービンあるいはロケットなどにおける燃焼の問題に関連して、かなり多くの研究が行なわれており、蒸発、拡散、混合などの物理的な過程が化学的過程とともに現象を支配する重要な因子であることが知られている。筆者もこれらの問題について一連の研究を行ってきたが、燃料噴霧の火花点火の研究において、噴霧中の1点で点火した場合の火炎の拡がり方が条件によって特徴的な相違を示し、噴霧全体がごく短時間に爆発的に燃えたり、比較的緩慢な火炎伝ばが見られたり、あるいは噴霧の一部しか燃えずに終ったり、いろいろな燃え方をすることが観察された¹⁾。Burgoyne および Cohen がテトラリンの噴霧について行なった実験によると、室温において粒径が 10μ 以下の噴霧では混合気同様の火炎伝ばが行なわれ、 40μ 以上では液滴のまわりに生じた火炎によって隣接する液滴が着火するという機構で火炎が拡がるということであるが、また大きな粒子の方が燃焼下限の濃度は小さく、燃焼速度も大きいことが報告されており²⁾、実用的な面からも興味深い。噴霧内の火炎伝ばを支配する因子としては、燃料液滴の平均粒径と粒径分布、その空間的密度、燃料の気化性、まわりの空気温度、液滴と空気との相対速度などが考えられるが、現象が極めて複雑で満足すべき解析は行なわれていない。筆者はこの問題の解明への手がかりとして、まず等間隔にならべた比較的大きな液滴列の火炎伝ばについて調べることにした。

このような液滴列の火炎伝ばについては、すでに Penner らが室温の静止空气中で実験を行っており、直径 $1\sim 2\text{mm}$ 程度の正オクタンの液滴列においては、液滴間の平均火炎伝ば時間 τ は、未燃液滴が隣接する燃焼液滴のまわりに生ずる高温ガス中に没入する深さ d だけの函数となり、つぎのような関係がなりたつことを見出した³⁾。

$$\tau d^{1.5} = c$$

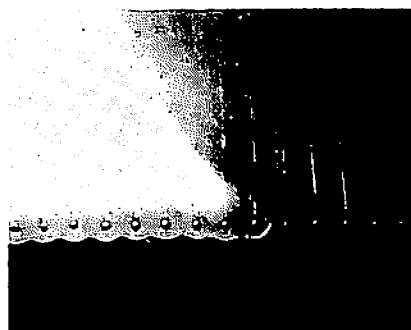
ここに c は実験的にきめられる定数である。

このような関係がなりたつことは、Penner らが簡単な定性的解析を加えて述べているように、液滴が隣接する燃焼液滴からの伝熱によって着火することを意味しており、火炎の影響をうけない液滴からの蒸発拡散が十分小さい場合に当てはまるものと考えられる。しかし噴霧において認

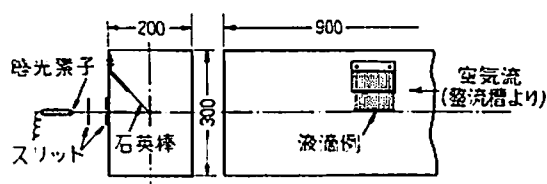
められる前述の事実を考えると、液滴列においても蒸発拡散が十分大きい条件のもとでは、未燃液滴のまわりに前もって可燃混合気層が形成され、その中を一様な速度で火炎が伝ばすることが予想される。したがって燃料液滴列の火炎伝ば機構にも二つの極端な場合があって、そのどちらが支配的になるかということは、液滴直径、液滴間隔、燃料の気化性、空気流速、空気温度などの条件によってきまるものと思われる。本研究はまずこれらの点を明らかにする目的で、気化性の異なる数種の燃料を用い、火炎伝ば時間に及ぼす上記の諸因子の影響を実験的に調べて、液滴列の火炎伝ば機構についての検討を行なったものである。

2. 実験装置と方法

直径 0.4 ± 0.02 mm、長さ約 100 mm の石英棒の先端を直径 1.0 ± 0.02 mm の球状につくり、他端部を等間隔の溝をつけたプラスチック板に固定することによって、先端部を一直線上に等間隔に配置し、それぞれの先端に一定量の燃料液滴を懸垂する方法で液滴列をつくった。第1図に火炎伝ば中の液滴列の写真の一例を示す。液滴量を一定にするためには1目盛 0.0001 ml のマイクロシリンジを用いたが、15~20 個の液滴をつけるのに 30~40 sec を要するので、蒸発速度が大きい条件のもとでは点火時の液滴直径が等しくなるように量の調整が必要であった。各条件ごとに写真測定を行った結果、液滴直径および液滴間隔に対してそれぞれ $\pm 3\%$ および $\pm 5\%$ 以内の誤差におさえることができた。液滴は完全な球形ではなく多少縦長であるが、液滴列中心軸上の直径をもって液滴直径とした。空気流速の影響を調べるために第2図に示すような透明プラスチック板の矩形断面の風洞を用い、液滴列がその中心軸上にならぶように前



第1図 燃料液滴列の火炎伝ば状況



第2図 風洞内の液滴列の配置

記のプラスチック板を鉛直方向とほぼ 45° の角度で固定した。空気流速は送風機の回転速度を変えることによって変化させ、熱線風速計を用いて測定したが、速度分布から算出した流量と上流部に設けた絞り流量計で得られた値を比較

した結果、 $\pm 10\%$ 程度の誤差はまぬがれなかった。空気温度を変えるために整流室の上流にニクロム線を挿入して空気を加熱した。空気流速が比較的低いために風洞内の温度分布は一様にならなかったが、その影響はあまり大きくないと思われたので、中心軸上での測定値をもって空気温度とした。

火炎伝ば時間の測定には、はじめ Fastax を用いて毎秒 400 駒程度でシュリーレン写真を撮り、フィルムに印加した時間マークから液滴の 10 間隔を火炎が伝ばする時間をもとめて 1 間隔

あたりの平均伝ば時間を決めたが、後にはフォトランジスタまたは硫化カドミウムセルと電子管式カウンタを用いて簡単に測定できるようにした。すなわち、第2図に示したように液滴の正面に 3×5 mm のスリットを設けてその液滴の火炎による光だけが感光素子に入るようにしたものを 10 間隔おいて2個所に設け、それぞれの信号でカウンターを始動、停止させることによって伝ば時間を直読した。燃料によって火炎の色や輝度が異なるので、カウンターの始動、停止が確実に行なわれるように増幅度を適当に加減した。理想的には燃料によって感光素子を整色し、液滴が着火した瞬間に感光するように調整することが望ましいが、本実験ではそこまでの考慮は払わなかった。しかし液滴がほぼ同じ条件で着火するものとすれば、信号に多少の遅れを生じても相殺されるので、大きな誤差は生じないものと思われる。火炎伝ばにおける端部効果を極力少なくして定常的な火炎伝ば時間を得るために、測定部の 11 個の液滴の前後にも 2~10 個の補助的な液滴をならべて、その一端で点火するようにした。

上流端で点火する場合には、なるべく気流を乱さないように小さな火花電極を設けて電気火花で点火したが、酸化性の悪い燃料では着火しにくいので、一番端に酸化性のよい燃料の液滴をおいて点火した。下流端で点火する場合は主としてニクロム線のガスライターを使用した。

平均伝ば時間の測定値は多くの場合 $\pm 5\%$ 程度の偏差内におさまり、再現性も十分であるが、条件によっては $\pm 30\%$ に達することもあり、この種の現象においては本質的に避けられないことなので、同一条件で最低 5 回、最高 20 回の測定を行ない、その算術平均をとって測定結果とした。

シュリーレン写真撮影には直径 152 mm, 焦点距離 1067 mm の凹面鏡 2 個を用い、光源には炭素アーク灯を使用した。

用いた燃料は正オクタン, イソオクタン, 正ヘプタン, イソプロピルアルコール, イソブチルアルコールの 5 種で、液滴直径は 1.6~2.0 mm, 液滴間隔は 4.0~6.4 mm, 空気流速は 0~40 cm/sec, 空気温度は 10~50°C の範囲で測定を行なった。第1表に使用燃料のおもな性質を示す。

第1表 使用燃料の性質

	温 度 °C	比 重		蒸 発 潜 熱 kcal/kg	沸 点 °C 1 atm.	蒸 気 圧 mmHg				
		15	25			10	20	30	40	50
正ヘプタン		0.688	87.2		98.4	20.6	35.4	58.4	92.5	141.6
正オクタン		0.707	86.8		125.7	5.6	10.5	18.5	31.1	50.4
イソオクタン		0.696	73.5		99.2	22.9	38.6	62.4	97.2	146.5
イソプロピルアルコール		0.789			82.5	16.8	32.0	58.2	101.9	171.8
イソブチルアルコール					108.0	4.5	9.1	17.4	31.4	55.0

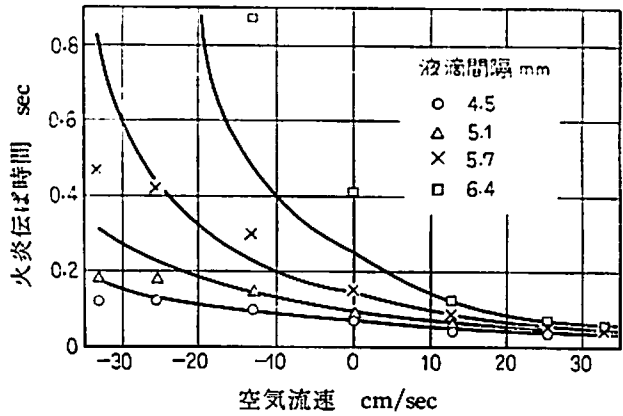
(日石中央技研 高橋猛夫氏の御厚意による)

3. 実験結果と考察

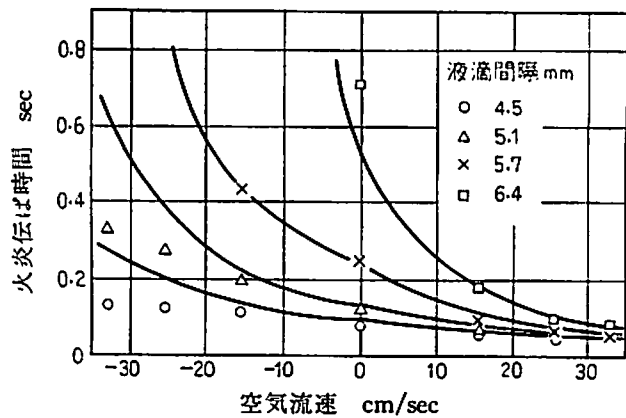
(1) 正オクタン液滴列の実験

直径および間隔の異なる正オクタン液滴列について、火炎伝ばと同じ方向(+とする)および逆方向(-とする)の空気流速を与えた場合の平均火炎伝ば時間の測定結果を第3図と第4図に示す。液滴間隔が小さければ逆方向の空気流速がかなり大きくても火炎は伝ばするが、液滴間隔が大きくなると、ある流速以上では伝ば不能となる。また液滴直径が小さいほどこの限界流速も小さい。

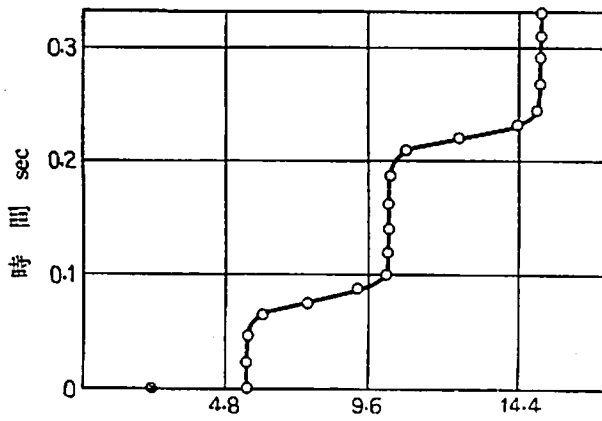
シュリーレン写真の動きを観察すると、強制空気流のある場合でも火炎伝ばは第5図に示すように明らかに断続的に行なわれており、液滴が高温ガスからの伝熱によって蒸発着火するという Penner らの伝ば機構が支配的であることが裏書きされる。しかし没入深さ、したがって火炎伝ば時間が液滴間隔や液滴直径のどのような函数であ



第3図 正オクタン液滴列の火炎伝ば時間
液滴直径 2.0 mm, 空気温度 25°C (曲線は計算値)



第4図 正オクタン液滴列の火炎伝ば時間
液滴直径 1.76 mm, 空気温度 15°C (曲線は計算値)

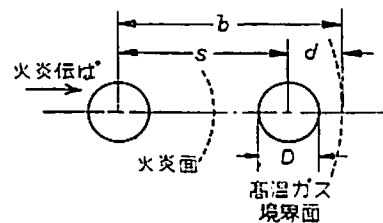


高温ガス境界面の位置 mm (液滴中心線上)

第5図 正オクタン液滴列の火炎伝ば
液滴直径 2.0 mm, 液滴間隔 4.8 mm,
空気流速 -30 cm/sec

● は時刻 0 における火炎面の位置

るかについては何も示されていないので、その点を明らかにするため強制空気流のある場合をふくめて第6図に示すような単純化した模型を考え、没入深さの概念の妥当性と、どの程度の流速まで適用できるかの



第6図 液滴列の火炎伝ば模型

限界を調べてみた。第6図において、 b を燃焼液滴の中心から高温ガス境界までの半径、 s を液滴間隔、 d を没入深さ、 D を液滴直径とすれば、

$$d = b - s$$

また空気流速の小さな範囲では、流速 $v = 0$ のときの b を b_0 とするとき

$$b = b_0(D) + kv$$

という関係がなりたつものと仮定すれば

$$\tau = \frac{c}{(b_0 + kv - s)^{1.5}}$$

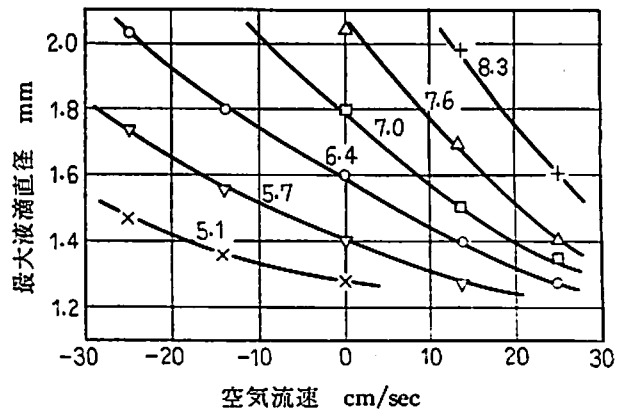
となり、燃料の性質および液滴直径 D によってきまる b_0 , k および c の値が与えられれば、液滴間隔および空気流速の任意の値に対して火炎伝ば時間を算出することができる。 k の値はシュリーレン写真から得られる着火時の b の値を流速 v に対してプロットすることによってもとめられるわけであるが、強制空気流が大きくなると高温ガス境界があまり明確でなくなるので、つぎに示す方法でもとめることにした。すなわち、火炎が伝ば不能になる限界は、実際には $\tau = \infty$ ということではなくて、 τ がある一定の大きさになったとき、したがって没入深さがある最小値 d_{\min} になったときと考えられるので、一定の液滴直径および空気流速に対して火炎が伝ば不能となる限界液滴間隔 s_{crit} を流速をかえて測定すれば、

$$s_{crit} = b - d_{\min} = (b_0 - d_{\min}) + kv$$

の関係からその直径の液滴に対する k の値が得られる。実際には測定の便宜上、一定の液滴間隔と空気流速に対して火炎伝ば不能な最大液滴直径をもとめると第7図に示すようになり、その結果をプロットしなおしたのが第8図である。

最大液滴直径としては、液滴量を 0.25×10^{-3} ml ずつ減らしていった5回の試行中1回でも火炎伝ば不能となったときの直径をとった。

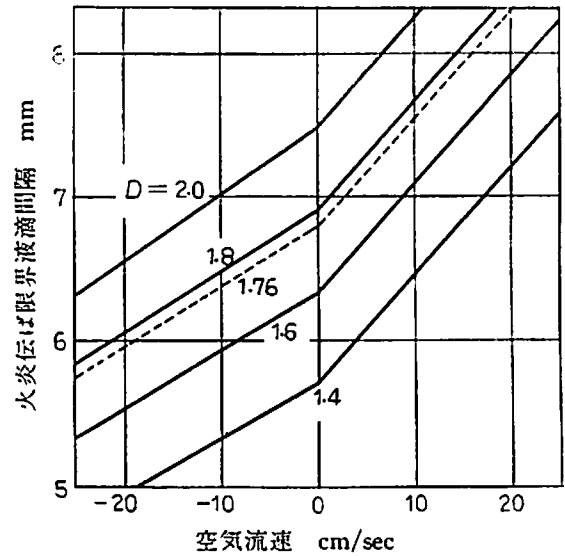
第8図は上式の関係を示しており、 k の値をもとめると、逆方向気流の場合は液滴直径によって多少異なり、2.0 mm で 4.8×10^{-3} , 1.76 mm では 4.2×10^{-3} sec となるが、同方向気流の場合には直径によらず 7.2×10^{-3} sec となる。また k の値は空気流速には依存せず、測定した範囲内では前述の仮定が十分なりたつことがわかる。 d_{\min} の値は強制空気流がない場合のシュリーレン写真から 0.5 mm と推定されるので、第8図から得られる $b_0 - d_{\min}$ の値を用いて、直径 2.0 および 1.76 mm の液滴に対する b_0 の値はそれぞれ 8.0 および 7.3 mm となるが、これらはシュリーレン写真で得られる値とほぼ一致する。また b_0/D の値をもとめて



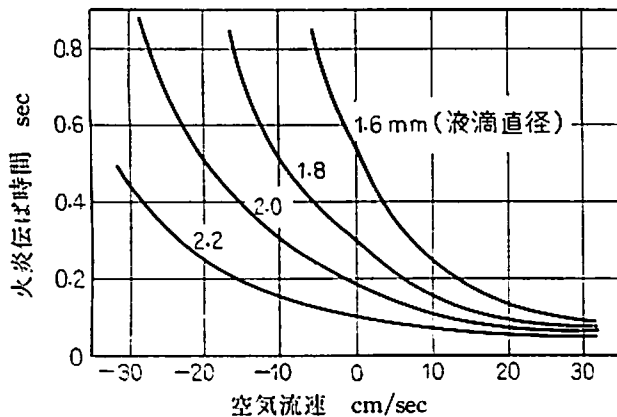
第7図 火炎伝ば不能な最大液滴直径 (正オクタン) 数字は液滴間隔 mm

ず、測定した範囲内では前述の仮定が十分なりたつことがわかる。 d_{\min} の値は強制空気流がない場合のシュリーレン写真から 0.5 mm と推定されるので、第8図から得られる $b_0 - d_{\min}$ の値を用いて、直径 2.0 および 1.76 mm の液滴に対する b_0 の値はそれぞれ 8.0 および 7.3 mm となるが、これらはシュリーレン写真で得られる値とほぼ一致する。また b_0/D の値をもとめて

みると、液滴直径 2.0~1.4 mm に対して 4.0~4.45 となり、直径が小さくなるにつれて漸増することがわかる。以上の a および b_0 の値と、静止空気中の正オクタン液滴列についての Penner らの実験結果から得られる c の値 $0.48 \text{ sec} \cdot \text{mm}^{1.5}$ を用いて前記の式から算出される火炎伝ば時間 τ を図示すると、第3図および第4図の曲線のようになり、測定値とだいたい一致する。第9図は液滴間隔 6.0 mm の場合について、火炎伝ば時間の計算結果を例示したものである。以上のことから、測定した条件のもとでは強制気流のある場合でも火炎伝ば時間が液滴の高温ガスへの没入深さに支配され



第8図 火炎伝ば限界液滴間隔 (正オクタン)
D: 液滴直径 mm



第9図 正オクタン液滴列の火炎伝ば時間
(液滴間隔 6 mm に対する計算値)

ることが明らかにされたが、第3図および第4図の実測値と曲線を比較すると、液滴間隔が小さくて逆方向の空気流速が大きい場合には明らかに違った傾向を示しており、そのような条件のもとでの火炎伝ばは前述のモデルによる伝ば機構だけでは説明できないことを意味している。第5図に示した火炎伝ば状況は実はそのような条件の場合で、断続的ではあるが液滴の中間部では明らかに 50 cm/sec 程

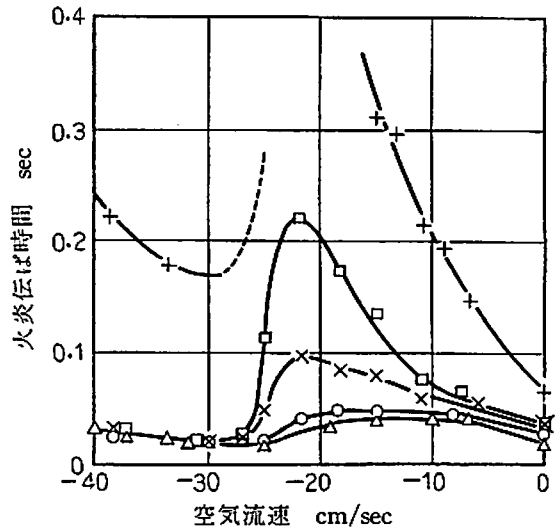
度の火炎伝ばが認められる。したがって火炎伝ば時間が計算値よりも目立って短くなるのは、空気流速の増大とともに液滴からの蒸発拡散が促進されて可燃混合気が液滴間を埋めることによると考えられるので、酸化性の大きな燃料を用いて調べてみることにした。

(2) イソオクタン液滴列の実験

正オクタンについて行なったと同様の測定をイソオクタン液滴列について行なった結果を第10図に示す。ただし同方向空気流の場合は伝ば時間が著しく短くなって測定精度が低くなるので逆方向空気流の場合だけについて実験した。結果は予想されたように正オクタンの場合と著しい相違を示し、空気流速が増すとともにはじめは伝ば時間が増大するが、-20 cm/sec 附近で極大となり、それ以上に流速が増すと逆に伝ば時間は短くなり、-30 cm/sec 附近からふたたび徐々に増大する。しかも -30 cm/sec 以上の流速では、液滴間隔があまり大きくないかぎり、

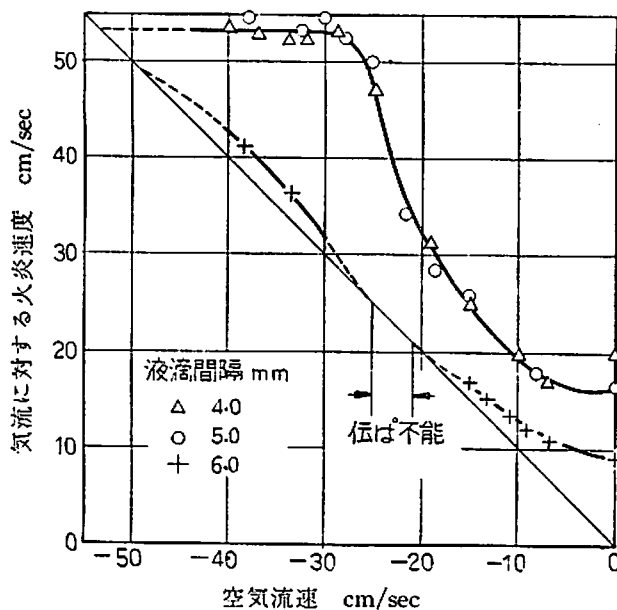
火炎伝ば時間は液滴直径や液滴間隔にほとんど無関係となる。これらの事実は室温でイソオクタンが正オクタンの数倍の蒸気圧をもつことを考えれば、流速の増大とともに火炎伝ばに先立って液滴からの蒸発拡散が盛んになり、ついには可燃混合気が液滴列をほとんど完全に蔽ってその中を火炎がほぼ連続的に伝ばする結果と考えられる。実際、高速度写真の動きを観察すると、流速の大きな場合には正オクタンの場合と違ってほとんど一様な速さで火炎が伝ばすることが認められる。

第10図の結果から空気流に対する火炎速度をもとめて空気流速との関係を図示すると第11図のようになり、流速 -30 cm/sec 以上では火炎速度がほぼ一定となっていることがわかる。この事実も液滴のまわりに生じた混合気内



第10図 イソオクタン液滴列の火炎伝ば時間 (空気温度 18°C)

液滴直径	液滴間隔
Δ 2.0 mm	4.0 mm
\circ 2.0	5.0
$+$ 2.0	6.0
\times 1.7	5.0
\square 1.6	5.0



第11図 イソオクタン液滴列の火炎速度 (液滴直径 2.0 mm, 空気温度 18°C)

が得られた。両者の気化性に大きな違いがないことからみて前述の考察どおりの結果であるが、また両者の着火温度が著しく異なることを考えると、液滴列の火炎伝ばは着火温度にはほとんど影響されることなく、もっぱら蒸発速度によって支配されることがわかる。したがって前に述べた c の値は主として燃料の蒸発に関する特性値によってきまる定数と考えられる。また流速

を火炎が伝ばすることを裏書きしており、 53 cm/sec という伝ば速度も、ある程度の乱れを伴う混合気中の火炎伝ば速度として妥当な値である。この結果からイソオクタン液滴列では流速 -55 cm/sec 以上になると、火炎伝ばは不能ということになるが、微小液滴の場合でも空気流との相対速度がある程度になれば逆方向への火炎伝ばはできなくなると考えられる。

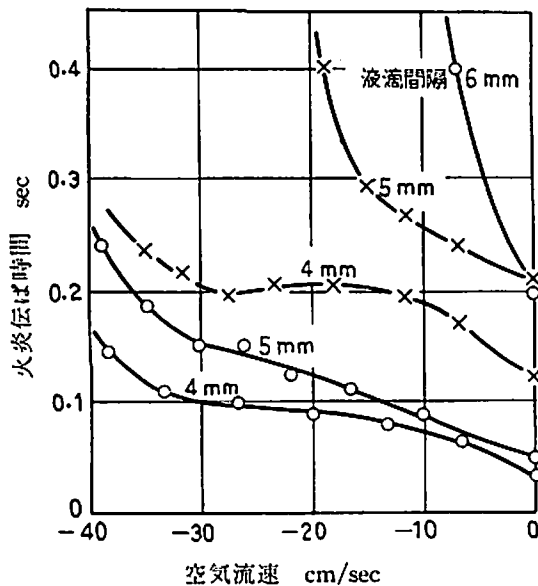
(3) 正ヘプタン液滴列の実験

正ヘプタンについて行なった測定結果の一部を示せば第12図のようになり、イソオクタンの場合とだいたい同様な値

が大きく蒸発拡散によって液滴のまわりに混合気がつくられる場合の空気流に対する火炎速度をもとめてみると 56 cm/sec となり、イソオクタンよりやや大きいことも妥当である。

(4) アルコール液滴列の実験

さらに以上の考察を確かめるために、気化性の異なる数種のアルコールを用いて測定を行なった結果の一部を第 13 図に示す。メチルアルコールやエチルアルコールのように気化性のよいものでは、イソオクタンや正ヘプタンと同様

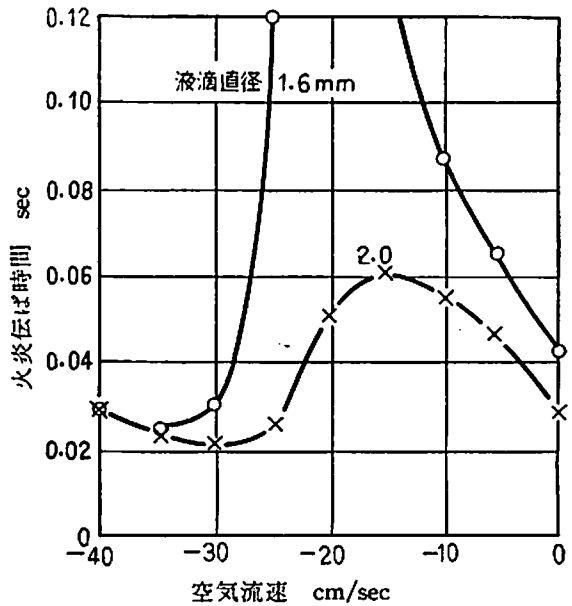


第 13 図 アルコール液滴列の火炎伝ば時間 (液滴直径 2.0 mm, 空気温度 16°C)

○ イソプロピルアルコール
× イソブチルアルコール

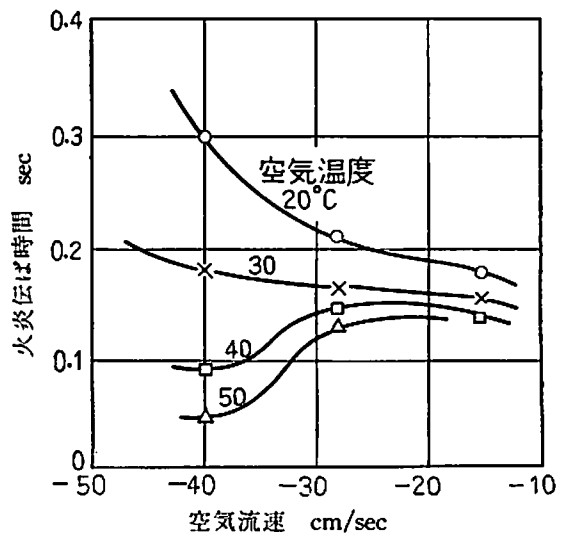
る蒸発拡散の影響は認められない。

燃料液滴からの蒸発は当然空気温度によって大いに变化し、空気温度が高くなれば常温で気化性の悪い燃料でも液滴のまわりに可燃混合気が形成されるはずである。そのことを確かめるために、直径 1.9 mm, 間隔 4.0 mm のイソブチルアルコール液滴列について空気温度を 20°C から 50°C まで変えて測定した結果を第 14



第 12 図 正ヘプタン液滴列の火炎伝ば時間 (液滴間隔 5.0 mm, 空気温度 18°C)

の結果が予想され、実際にも定性的には確かめられたが、火炎の輝度が小さいために測定が不正確となり、定量的な値は得られなかった。イソプロピルアルコールは蒸気圧は高いが気化潜熱も大きいので結果は正オクタンに近い値を示しており、間隔 6 mm 以上では完全に断続的な火炎伝ばとなる。イソブチルアルコールは気化性がさらに低く、間隔 5 mm でも空気流によ



第 14 図 イソブチルアルコールの火炎伝ば時間 (液滴直径 1.9 mm, 液滴間隔 4.0 mm)

図に示す。40° および 50°C においては空気流速の増大とともにイソオクタンや正ヘプタンと同様の傾向を見せ、明らかに可燃混合気の生成を示している。しかも以上の結果を比較してみると、逆方向空気流速の増大とともに火炎伝ば時間が短くなり始める流速は、燃料の種類や空気温度によらずだいたい 20 cm/sec 附近であり、このことは空気流の影響が蒸発の促進よりもむしろ蒸気と空気との拡散混合に寄与することを意味する。すなわち燃料の気化がある程度活発に行なわれる場合、液滴間隔があまり大きくないかぎり、空気流速がある大きさになると拡散混合が促進されて可燃混合気が液滴間を埋めるようになるものと考えられる。この考えを確かめるために、イソブチルアルコールの液滴列について、空気温度と空気流速をかえて液滴からの蒸発速度係数を写真撮影によってもとめた結果は第2表に示すとおりで、蒸発速度におよぼす空気流速の

第2表 イソブチルアルコール液滴列の蒸発速度係数
($\times 10^{-3}$ mm²/sec)

空気流速 cm/sec		13.8	26.8	39.3
空気温度 °C	10	2.23	2.58	3.09
	20	4.72	4.83	5.22
	30	7.28	7.57	8.38

影響はそれほど大きくないこと、また温度が高くなって蒸発が盛んになるほど流速の影響は小さくなる傾向にあることを示しているが、このことは単一液滴の場合とは液滴附近の流速分布も異なり、また液滴のまわりに蒸気が停滞する量も多くなるためと考えられる。したがって空気流速の影響は主として液滴のまわりに生じた蒸気と空気との拡散混合によるもので、恐らく液滴の背後に循環領域が形成されて可燃混合気の生成に与るものと思われる。

4. 結 び

燃料液滴列の火炎伝ばについての実験的研究を行ない、その機構に二つの極端な場合があることを確かめて、それぞれの場合について考察した。一つは隣接する液滴の燃焼による蒸発が支配的な場合で、断続的な火炎伝ばとなり、もう一つは火炎の接近をまたずに十分な可燃混合気が液滴間を埋め、その中を火炎がほぼ一樣な速度で連続的に伝わる場合である。前者については、強制空気流が存在する場合をふくめて、Penner らの没入深さの概念を拡張、単純化することによってその機構が説明できる。すなわち火炎伝ばが可能であるためには没入深さにある最小の限界値があって、液滴直径に比べて液滴間隔が大きすぎたり、また逆方向の空気流速があまり大きくなったりすると火炎は伝ばできなくなるが、没入深さがその限界値以上であれば、伝ば時間、したがってまた伝ば速度はそれぞれ没入深さの 1.5 乗に逆比例 および 比例して増減することが確かめられた。比例定数が定量的に燃料の性質とどのような関係をもつかについての解析までは行なわなかったが、定性的には Penner が述べている加熱時間の考えで一応説明がつくと思われる。

またもう一方の伝ば機構については、蒸発速度が十分大きくしかも空気流によって空気との拡散混合が促進されて、液滴の間が少なくとも理論混合比に近い混合気層で埋められるようになれば、液滴直径や液滴間隔には無関係に、燃料の種類や乱れの程度できまる一定の速度で火炎伝ばが行なわれるものとして説明できる。その場合蒸発がある程度盛んであることは不可欠の条件で、燃料の性質と空気温度によってきまる。以上の両極端の中間の場合として、蒸発や拡散混合が不十分のときは、形成される混合気層が局部的に過薄となったり隣接液滴の燃焼の影響をうけたりして、伝ば時間は液滴直径や液滴間隔にも依存するようになるが、その定量的な検討は困難であろう。

この研究で得られた結果をそのまま燃料噴霧中の火炎伝ばに結びつけることにはいろいろ問題もあるが、まえがきにも述べたように、噴霧の場合にも明らかにここに述べたと同様な両極端の火炎伝ばが認められるので、問題解決への一つの手がかりとなるものと思われる。

終りに本研究をはじめると同時に実験の機会を与えていただいたカリフォルニア大学の S. S. Penner 教授、および測定の後半を全面的に担当して本研究に協力された当時の本学学生、畠野尚昭、馬場保利、平田泰敏、山梨英雄の諸君ならびに実験の準備について協力された当研究室の金宮錫採君に深い謝意を表す。

(昭和 39 年 7 月 15 日)

文 献

- 1) 飯沼・山崎, 燃料噴霧の火花点火, 日本機械学会論文集, 26 卷 168 号 (昭和 35 年), 1151 頁.
- 2) J. H. Burgoyne and L. Cohen, The Effect of Drop Size on Flame Propagation in Liquid Aerosols, Proc. Roy. Soc. A 225 (1954), p. 375.
- 3) R. Reichenbach, D. Squires and S. S. Penner, Flame Propagation in Liquid-Fuel Droplet Arrays, Eighth Symposium on Combustion (1962), Williams and Wilkins, p. 1068.