



## 強制対流拡散下の液面燃焼特性について(続報)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-07-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 林, 重信, 澤, 則弘 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3534">http://hdl.handle.net/10258/3534</a>

# 強制対流拡散下の液面燃焼特性について (続報)

林 重信・沢 則弘\*

## On the Characteristic of Liquid Surface Combustion under the Forced Convective Diffusion (2nd Report)

Shigenobu Hayashi and Norihiro Sawa

### Abstract

To investigate the fundamental characteristic and construction of the liquid surface evaporating combustion, we measured mainly the fuel consumption, the distribution and maximum value of combustion flame temperature, and the flame height and took photographs of the flame-shape and sketched the construction of the combustion flame. These experiments are carried out with the liquid surface combustor changing the velocity and the temperature of supplied air, the diameter of the combustion cup, the velocity of the side air flow.

This paper presents the results obtained from experiments as mentioned above.

### I. 緒 言

前報<sup>1)</sup>(室工大研報第6巻3号)において、石油火災やポット式石油ストーブ等自由液面の燃焼についての基礎的研究として、強制対流下の液面燃焼をとりあげ、燃焼火炎と平行に強制送風を行なった場合の、送風流速と燃焼火炎の挙動や構造などの関係、円筒型燃焼容器(直径 $d=20\text{ mm}\phi$ )の長さ、液面の深さなどの影響について実験的に調査してきた。

今回は3種類( $l=35\text{ mm}$ ,  $d=30, 40, 53\text{ mm}\phi$ )の燃焼容器を追加して、燃焼容器の直径および強制送風空気の温度が火炎構造や燃焼速度などに及ぼす影響について明らかにした。

また、港湾火災にみられる海面上での液面燃焼に相当するものとして、火炎に横風をあてその流速の及ぼす影響をも調べたのでその結果について報告する。

### II. 実験装置及び実験方法

実験装置の配置系統図を図-1に示す。強制送風空気温度を任意(室温 $\sim 100^\circ\text{C}$ )に変えるため、前報<sup>1)</sup>の装置に市販の空気加熱器⑱及び送風管にニクロム線⑳を巻きつけ、スライダック㉑によって空気加熱を行なった。空気温度はC-C熱電対を用いて測定をした。さらに、横風( $V_h$ )をあてるため、空気圧縮機及び流量測定装置や整流器など一連の装置㉒ $\sim$ ㉖を付け

\* 茨城大学工学部 教授

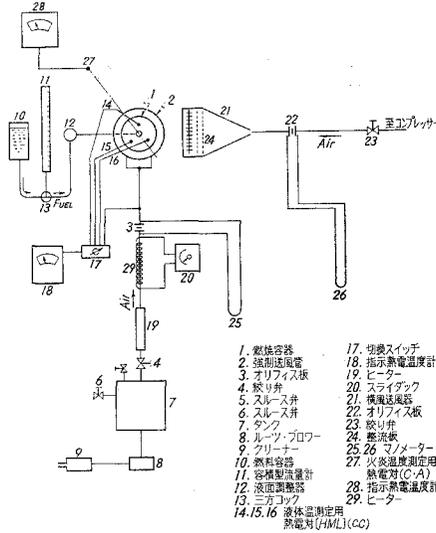


図-1 実験装置系統図

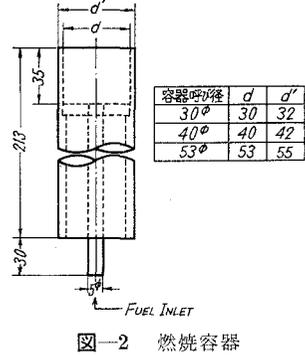


図-2 燃焼容器

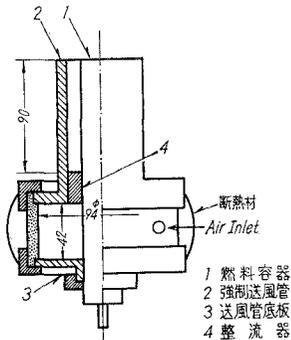


図-3 燃焼器略図

表-1 燃焼容器

燃焼容器内径	燃焼容器外径	送風管内径	送風管外径	D/d
d mm	d' mm	D mm	D' mm	
30	32	52.9	60.5	1.653
40	42	67.9	76.3	1.617
53	55	80.7	89.1	1.467

加えたものである。燃焼器及び送風管の構造（図-2，図-3 参照）は前報のものと同様であり，その代表寸法は表-1 のとおりである。

いずれの燃焼容器も液面から 1 mm, 17.5 mm, 33.5 mm の位置に C-C 熱電対が取り付けられ，燃焼容器内の燃料温度分布を計測した。さらに，燃焼火炎中の一酸化炭素 (CO) 及び炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) をガスクロマトグラフィ (日立 K-23) を用いて分析計量した。実験は主として，燃料消費量，火炎の温度分布 (火炎最高温度)，燃料温度分布の測定及び火炎形状の写真撮影に重点をおき，その実験方法は前報の場合と同じである。

### III. 実験結果及び考察

#### III-1 燃焼容器直径 (d) の影響

3 種類の燃焼容器 (l=35 mm, d=30, 40 及び 53 mmφ) を準備し，強制送風空気の温度

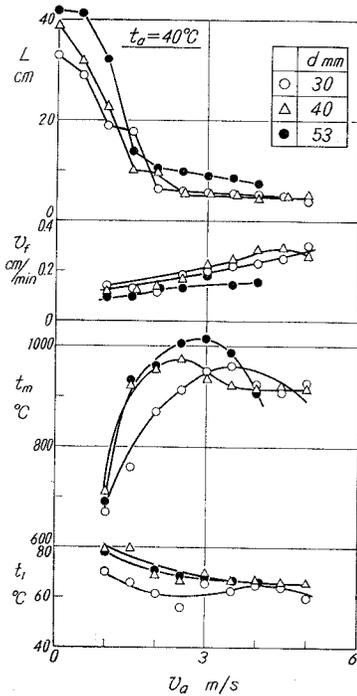


図-4

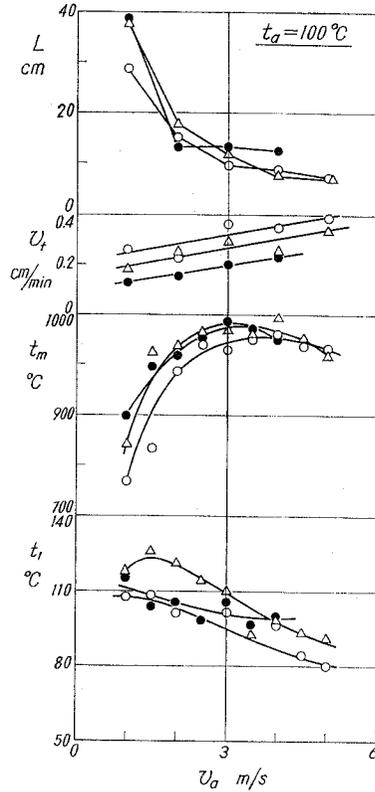


図-5

表-2

$d$	53 mmφ	40 mmφ	30 mmφ	20 mmφ
$L/d$	8.0	9.75	11.0	12.0

を一定に保ちながら、空気流速 ( $v_a$ ) を無風状態 ( $v_a = 0$  m/s) から徐々にたかめていくと、燃焼火炎はいわゆる層流火炎から遷移域を経て、乱流火炎に移行し、やがて吹き消えを生ずる。

この際、火炎長さ ( $L$ ) も順次短くなり、乱流火炎になるとその長さはほぼ一定となる (図-4 及び 図-5 参照)。かかる、燃焼火炎形状の変化する様相は、前報で詳述したのと同様である。しかし、燃焼容器の直径 ( $d$ ) が大きくなると、その2乗に比例して蒸発面積が比例して増加するので、各点からの均一な蒸発が困難になる。このため、火炎形状が早目に不安定領域に達する傾向が認められる。なお、無風状態 ( $v_a = 0$ ) の液面燃焼火炎は表面が滑らかな円錐状の層流火炎で、橙色を呈し、激しく煤を発生し燃焼速度 ( $v_f$ ) も低い。かかる層流火炎の長さ ( $L$ ) は燃焼容器直径 ( $d$ ) が大きくなるほど拡散速度が低下するので  $d$  に比例して長くなる (図-4 参照)。この際燃焼速度 ( $v_f$ ) は逆に低下しているが燃料消費量は増加する。これらの事実は V. I.

Blinov<sup>2)</sup> の実験結果と定性的に一致している。また、火炎長さを燃焼容器径で割った値 ( $L/D$ ) も V. I. Blinov の結果と同様に燃焼容器直径 ( $d$ ) に逆比例して減少している (表-2)。但し、数値的には幾分高い値を示しておりその原因については燃焼容器の構造の相違によるものと考えられる。かかる燃焼容器直径 ( $d$ ) の影響も、乱流火炎になるとほとんど認められなくなる。しかし、燃焼速度 ( $v_f$ ) に対する影響は明らかに認められ、空気温度がたかいほど、その影響割合は大きい。

なお、火炎最高温度は空気流速をたかめると、最初は上昇するが、空気による冷却作用の効果があらわれ、 $v_a=3$  m/s 付近から逆に低下する傾向を示す。

これに対し液面温度は燃料の蒸発量が増加し、火炎の底部に未燃ガス層が形成されるので順次低下するようになる。しかし、液面上 10 mm 及び最高温度が得られる点 (火炎中心部) におけるガス分析結果によると (図-6 参照)、一酸化炭素 (CO) が 5~10% にも達する。しかし、空気流速が増加するにつれて順次減少し、 $v_a=5$  m/s では CO=1~2% となり、かなり良好な燃焼状態を呈していることがわかる。

### III・2 強制送風空気温度 ( $t_a$ ) の影響

石油表面上の燃焼に関する De Ris の解析<sup>3)</sup> によると、火炎伝播速度は主流の大きさに支配されるのは勿論のこと、火炎の温度と外周温度の差によることが指摘されている。いま、燃料消費量 (燃焼速度) の促進を目的とすると、蒸発速度の増加、したがって強制送風空気を予熱することが考えられる。かかる観点から、強制送風空気を 40°C から 20°C おきに 100°C まで予熱し、同様の実験を実施した。その実験結果の代表例を図-7、図-8 及び 図-9 に示す。図において、供給温度 ( $t_a$ ) がたかくなると、火炎長さ ( $L$ ) が増大するにもかかわらず、燃焼速度 ( $v_f$ ) も直線的に上昇しており、燃焼速度 ( $v_f$ ) を促進する手段として供給温度の予熱が有効なことがわかる。この原因は、当然のことながら、空気による火炎の冷却が減少し、燃料の気化が促進されて発生蒸気濃度の増加、したがって拡散速度の上昇をもたらす反応時間も短縮する。その結果、火炎温度もたかくなり、火炎から液面への伝熱の促進、容器を介しての熱伝達の増加を招き燃料全体の温度もたかまり、蒸発がより助長されるためと考えられよう。かかる予熱の効果は、空気流速 ( $v_a$ ) がたかくなるほど低下する。例えば  $v_a=2$  m/s 付近の火炎を比較すると、底部付近で空気を巻き込もうとする渦流が認められ、火炎の浮き上りも生じているが、同

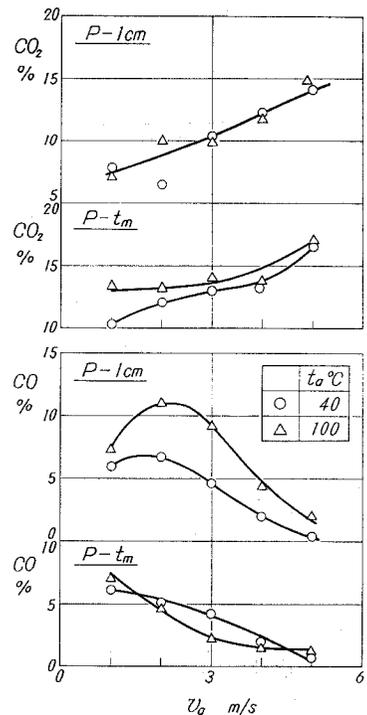


図-6

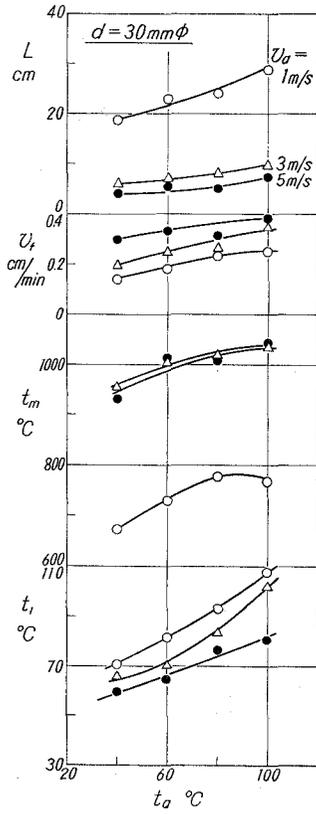


図-7 送風空気温度の影響

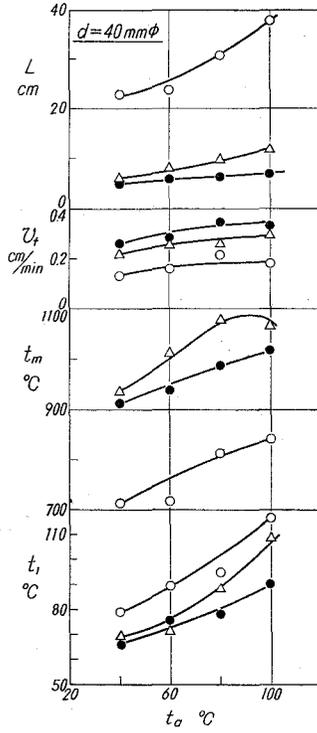


図-8 送風空気温度の影響

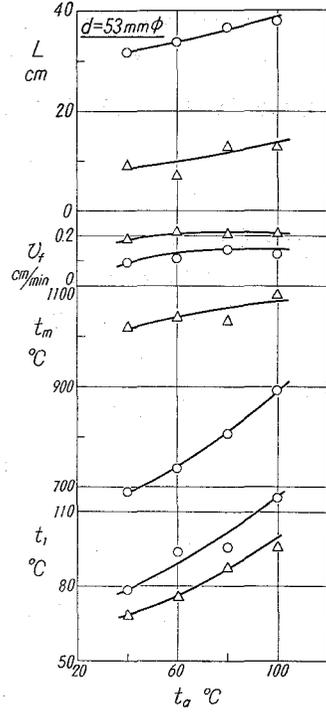


図-9 送風空気温度の影響



図-10(a) 強制送風温度の影響

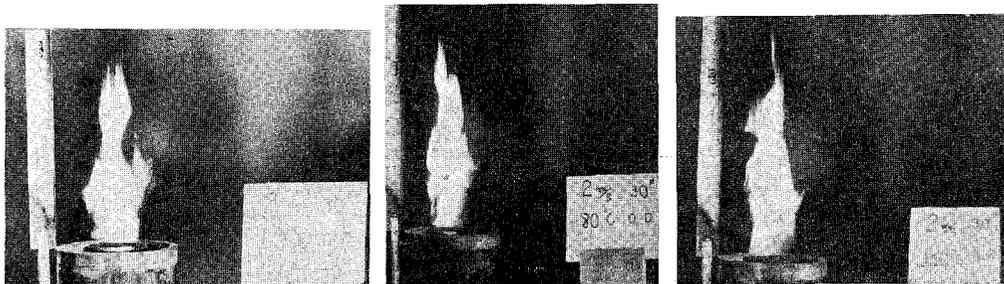


図-10(b) 強制送風温度の影響

一条件で予熱温度をたかめても渦の位置はほとんど変化せず、従って浮き上りたかさもほとんど同じであり、僅か上部の輝炎部分がたかくなるに過ぎない (図-10 参照)。

次に予熱効果の度合を明らかにするため、強制送風空気予熱所要熱量 ( $Q_a$ ) と燃焼速度の上昇にともなう発生熱量の増加との割合は、発熱量 ( $H_u$ )、燃料の比重量 ( $\tilde{r}_f$ )、空気の比重量 ( $\tilde{r}_a$ ) 及び定圧比熱 ( $C_p$ ) が一定であれば

$$\frac{Q}{Q_a} = \frac{H_u \cdot \tilde{r}_f}{C_p \cdot \tilde{r}_a \{(D/d)^2 - 1\}} \cdot \frac{(v_f - v_{f0})}{(t_a - t_{a0}) v_a} = \frac{k}{\{(D/d)^2 - 1\} v_a} \cdot \frac{(v_f - v_{f0})}{(t_a - t_{a0})}$$

で与えられる。

そこで、実験結果から  $(v_f - v_{f0})$  cm/min,  $(v_f - v_{f0})/v_a(D^2/d^2 - 1)$  などを概算してみると表-3のよ

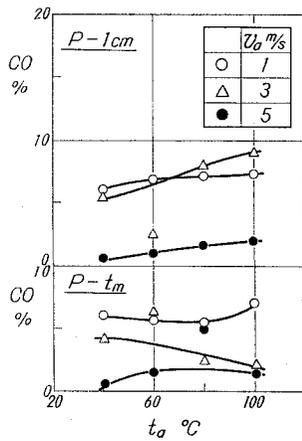


図-11(a)

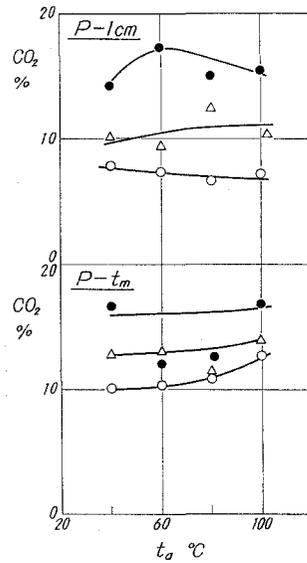


図-11(b)

表-3

$d$	$(D/d)^2 - 1$	$v_a$	$v_f - v_{f0}$	$(v_f - v_{f0})/v_a(D^2/d^2 - 1)$
30 mmφ	1.73	1 m/s	0.11	0.0637
		2 m/s	0.16	0.0462
		3 m/s	0.08	0.0154
40 mmφ	1.62	1 m/s	0.08	0.0495
		2 m/s	0.08	0.0247
		3 m/s	0.11	0.0226
53 mmφ	1.15	1 m/s	0.05	0.0435
		2 m/s	0.04	0.0174
		3 m/s		

うな結果が得られる。すなわち、燃焼容器の直径 ( $d$ ) が小さく、強制送風空気温度が低いほど  $Q/Q_a$  の値は大きくなることがわかる。このように、燃焼速度に対する予熱効果が顕著に認められるが、予熱しても一酸化炭素 (CO) は減少しない (図-11 参照)。

### III・3 横風流速 ( $v_h$ ) の影響

今まで、供給空気が燃焼火炎と同方向に流れる場合につき、一般的傾向について取り扱ってきた。次に、燃焼火炎に対して側面から空気流を与えたときの火炎挙動についての実験を行なった。かかる現象は石油火災に相当するもので、これを明らかにすることは重要な意義のあるものと考ええる。

#### III・3-1 燃焼火炎の形状

まず横風をあてた場合の燃焼火炎の写真を図-12、図-13 及び 図-14 に示す。

a) 横風流速  $v_h=1$  m/s (図-12(a);

$d=30$  mm $\phi$ ;  $v_a=0$  m/s)

燃焼火炎はある程度安定しているが、火炎底部が燃焼容器の全周に接しているときと、横風方向に全周の約 1/2 程度移動する場合とが見受けられ、それらが脈動的に変動している。この現象は、気体燃料の拡散燃焼においてもガス流量が多いときに認められるもので、液面燃焼の場合には可燃性混合気層が乱流によって乱されるとともに燃料表面温度が変動するために生ずるものと考えられる。

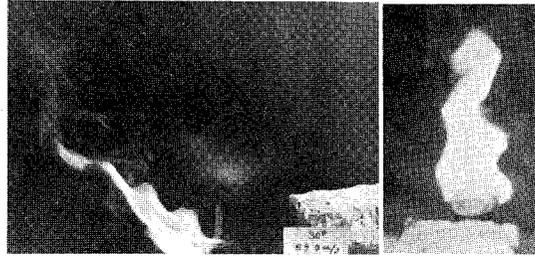


図-12(a)

$v_a=0$  m/s  
 $v_h=1$  m/s



図-12(b)

$v_a=0$  m/s  
 $v_h=1.5$  m/s



図-12(c)

$v_a=0$  m/s  
 $v_h=2$  m/s

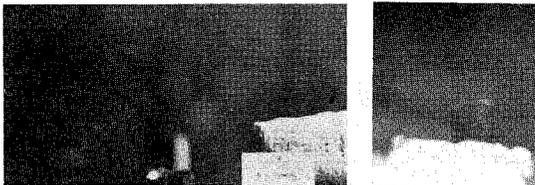


図-12(d)-1

$v_a=0$  m/s  
 $v_h=2.5$  m/s

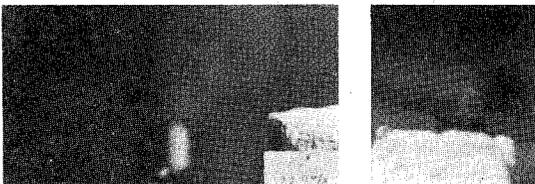


図-12(d)-2

$v_a=0$  m/s  
 $v_h=2.5$  m/s



図-13 (a)

$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 1 \text{ m/s}$

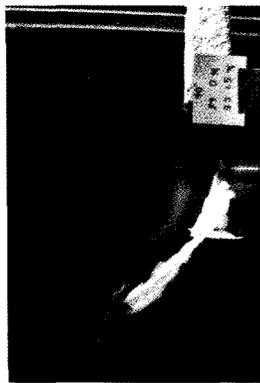


図-13 (b)

$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 1.5 \text{ m/s}$



図-13 (c)

$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2 \text{ m/s}$

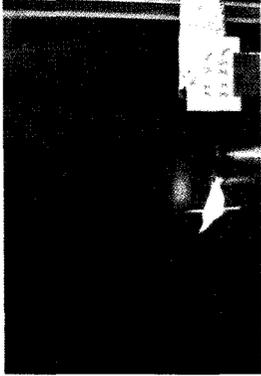


図-13 (d)-1

$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2.5 \text{ m/s}$



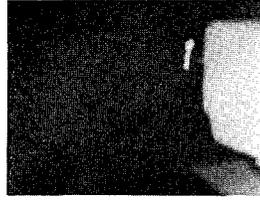
図-13 (d)-2

$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2.5 \text{ m/s}$



図-13 (d)-3

$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2.5 \text{ m/s}$



$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2.5 \text{ m/s}$



$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2.5 \text{ m/s}$

b)  $v_h = 1.5 \text{ m/s}$  (図-12-b)

燃焼火炎の底部は液面上を約 2/3 程度横風方向に迂り、しかも振動火炎となるが比較的安定である。

c)  $v_h = 2.0 \text{ m/s}$  (図-12-c)

液面上に燃焼火炎はほとんど存在せず、燃焼容器の上端に付着している状態を呈している。このあたりから燃焼火炎中に小さな塊状の橙色火炎が現われるが、これは横風流速 ( $v_h$ ) による液面からの燃料液滴が飛散しているものと考えられる。しかし、時間の経過と共に液面上の伝達熱量も減少してやがて火炎は消滅する。

d)  $v_h = 2.5 \text{ m/s}$  (図-12-d)

$v_h = 2.0 \text{ m/s}$  の場合と同様であるが、写真でみられるように (図-12-d-1, 2) 僅か上端に燃焼火炎が付着しているのみであり、やがて横風による液体表面温度の低下から燃料の蒸発量も減少し、消滅する。

このように燃焼火炎の形状が横風によって変化する過程は燃焼容器直径 ( $d$ ) を変えても同じであり、ただ火炎上端部の乱れ形状が大きくなることおよび消炎までに至る横風流速が違うだけである (図-13 及び 図-14 との比較)。

e) 強制送風時に横風を与えた場合 (例えば 図-15, 図-16;  $v_a = 3 \text{ m/s}$ )

$v_a = 0 \text{ m/s}$  の場合と較べて火炎の傾きは減少し、 $v_h = 1 \text{ m/s}$ ,  $2 \text{ m/s}$  では火炎全体が青色炎で強制送風のみを行なった場合とほとんど変わらないが、 $v_h = 3 \text{ m/s}$  以上になると火炎の傾きが大きくなってくる。このように、火炎の変化する過程は本質的には  $v_a = 0 \text{ m/s}$  の場合と同じである。

本来、燃焼火炎の傾きは強制送風流速 ( $v_a$ ) と横風流速 ( $v_h$ ) とによって規定されるものである。燃焼火炎は常に振動しているが、写真と形状観察から火炎の高さ ( $L$ ) 及び横方向の長さ ( $L_h$ ) を求め、両者の比 ( $L_h/L$ ) を横風流速 ( $v_h$ ) についてプロットしてみると 図-17 となる。データはかなりばらついているものの、 $L_h/L$  と  $v_h$  との間には直線的関係が成り立つことがわかる。なお Abbott の point Fire に関する研究によると  $L_h/h$  は

$$L_h/L = 1.33 (v_h^2/gL)^{5/12}$$

で与えられることを示しているが近似的 ( $5/12 \doteq 1/2$ ) には本実験の場合と定性的 ( $L_h/L \propto v_h$ ) 一致をみる事がわかる。



図-14(a)



$v_a = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 1 \text{ m/s}$



図-14 (b)

$v_c = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2 \text{ m/s}$

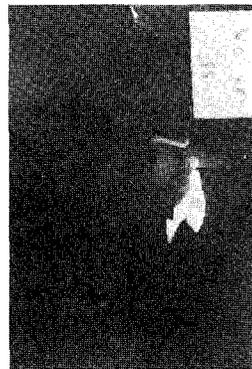


図-14 (c)

$v_c = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2.5 \text{ m/s}$

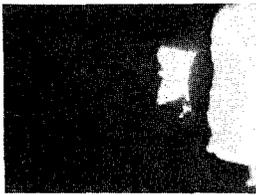


図-14 (d)-2

$v_c = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 3 \text{ m/s}$

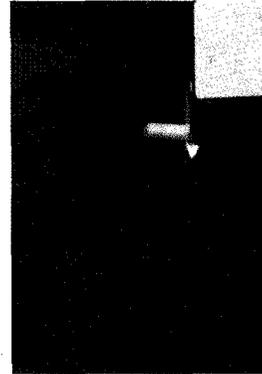


図-14 (d)-3

$v_c = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 3 \text{ m/s}$

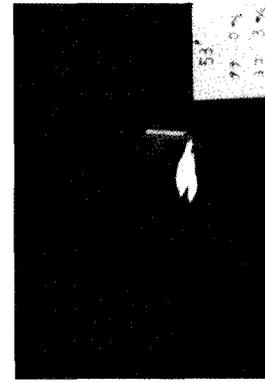


図-14 (d)-1

$v_c = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 3 \text{ m/s}$

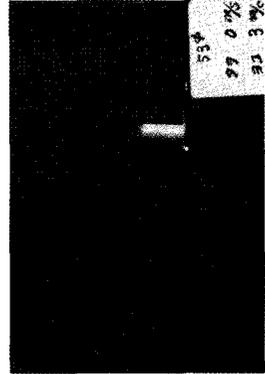


図-14 (d)-4

$v_c = 0 \text{ m/s}$   
 $v_h = 3 \text{ m/s}$

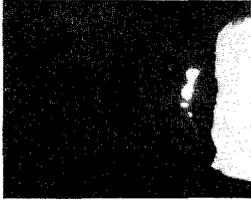




図-15(a)

$v_a = 3 \text{ m/s}$   
 $v_h = 1 \text{ m/s}$

図-15(c)

$v_a = 3 \text{ m/s}$   
 $v_h = 3 \text{ m/s}$

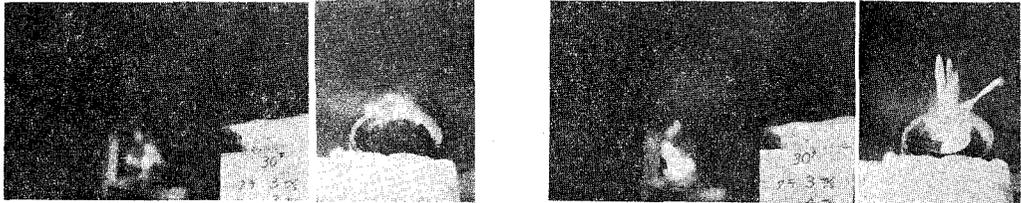


図-15(b)

$v_a = 3 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2 \text{ m/s}$

図-15(d)

$v_a = 3 \text{ m/s}$   
 $v_h = 4 \text{ m/s}$

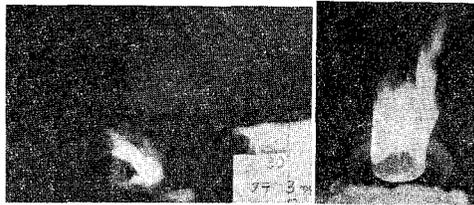
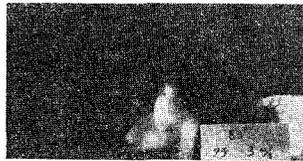


図-15(e)

$v_a = 3 \text{ m/s}$   
 $v_h = 5 \text{ m/s}$

図-16(a)



$v_a = 3 \text{ m/s}$   
 $v_h = 1 \text{ m/s}$

図-16(b)



$v_a = 3 \text{ m/s}$   
 $v_h = 2 \text{ m/s}$

図-16(c)



$v_a = 3 \text{ m/s}$   
 $v_h = 3 \text{ m/s}$

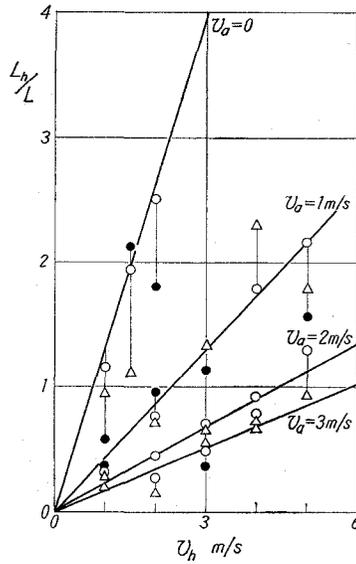


図-17 横風の影響

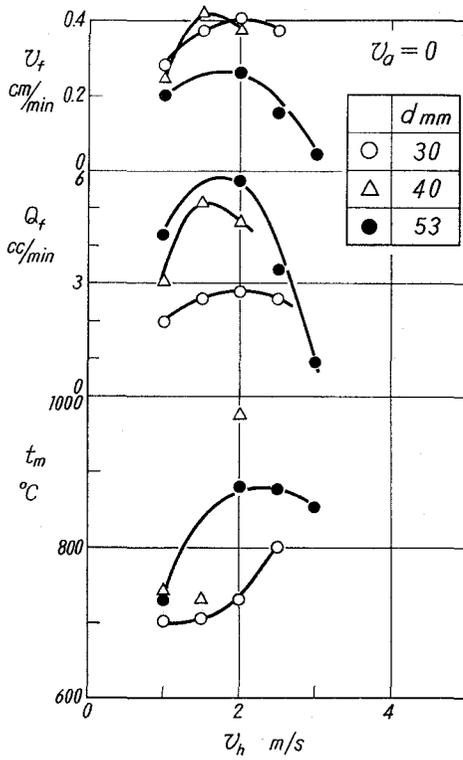


図-18 横風の影響

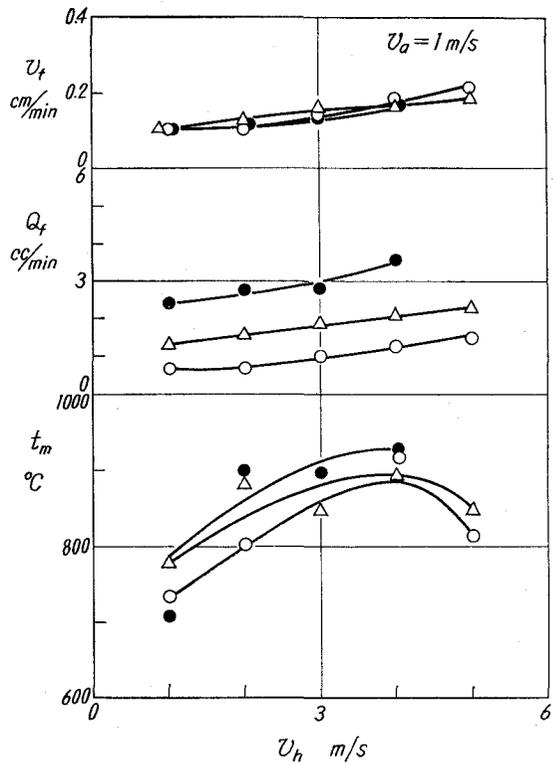


図-19 横風の影響

III・3-2 燃焼速度 ( $v_f$ ) 及び火炎温度 ( $t_m$ )

燃焼速度 ( $v_f$ ), 燃料消費量 ( $Q_f$ ) 及び燃焼火炎の最高温度 ( $t_m$ ) の実験結果を図-18, 図-19, 図-20 及び 図-21 に示す。

a)  $v_a=0$  m/s の場合 (図-18)

横風流速 ( $v_h$ ) に比例して, 燃焼速度 ( $v_f$ ) 及び燃焼火炎の最高温度 ( $t_m$ ) は増加する。しかし,  $v_h \geq 2$  m/s となると前節で述べたように燃焼火炎が燃焼容器上に存在せず横風方向に這べりを生ずる。このため火炎からの輻射伝熱および容器壁からの熱伝導が減少するので液体温度の低下を招き, 燃料蒸気の発生がおさえられ, 燃焼速度 ( $v_f$ ), 燃焼火炎温度 ( $t_m$ ) も低下している。

b)  $v_a=1$  m/s ~ 3 m/s (図-19 ~ 図-21)

この場合には乱流火炎となり火炎長さ ( $L$ ) も短かく,  $v_a=0$  m/s の場合のような傾向が認められず, 本実験範囲では, いずれも燃焼速度 ( $v_f$ ) は横風流速 ( $v_h$ ) にほぼ直線的に増加している。しかし強制送風流速 ( $v_a$ ) が大きくなるほど, 燃焼容器径 ( $d$ ) が大きくなるほど横風流速 ( $v_h$ ) の影響は小さく,  $v_f$  の値は,  $v_h=1$  m/s の場合が最も低いことがわかる。

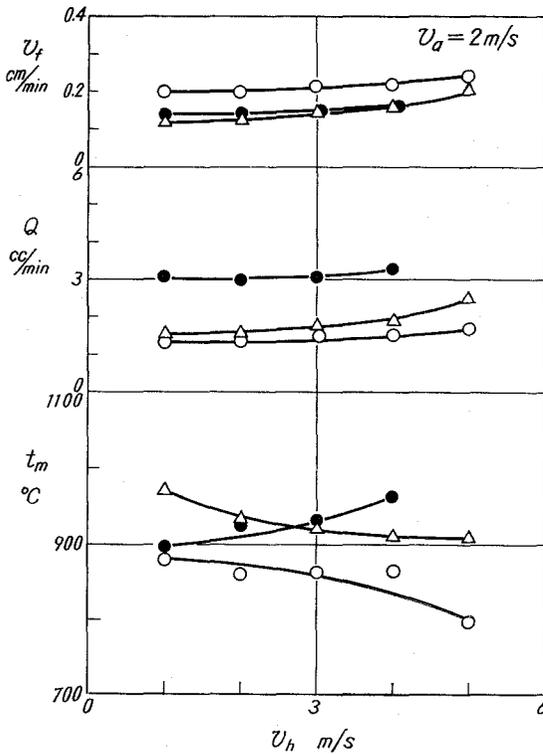


図-20 横風の影響

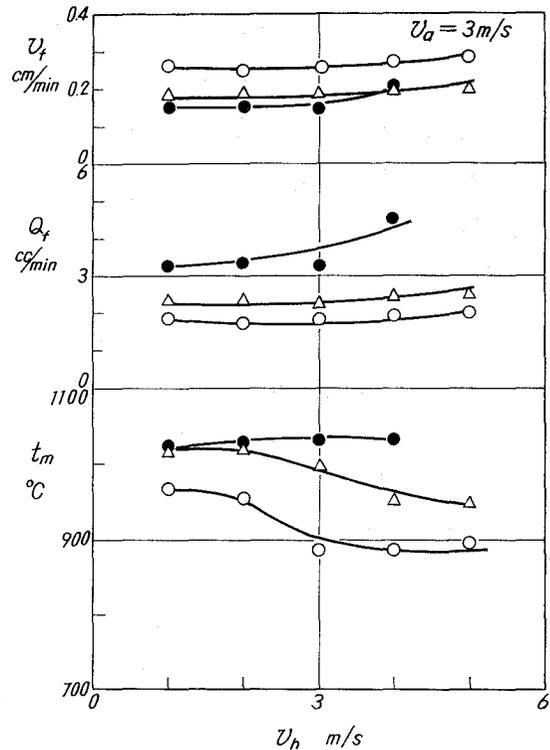


図-21 横風の影響

## IV. 結 言

以上、液面燃焼に関する基本的実験を行ない、定性的考察を試みたが要約すると次のとおりである。

- 1) 燃焼容器の直径 ( $d$ ) が大きくなるほど燃焼速度 ( $v_f$ ) は減少する (但し燃料消費量は増加する)。燃焼火炎の長さ ( $L$ ) は、層流火炎の場合燃焼容器の直径 ( $d$ ) に比例して増加する ( $L/d$  は直線的に低下)。しかし、乱流火炎の場合には燃焼容器直径の影響はほとんど認められない。
- 2) 燃焼容器の直径を変えても ( $d=29\sim 53\text{ mm}\phi$ )、空気流速 ( $v_a$ ) による燃焼火炎の変化過程は本質的には変わらない。
- 3) 強制送風空気の前熱温度をたかめると、燃焼速度 ( $v_f$ ) は直線的に比例して増大する。しかも、燃焼容器の直径 ( $d$ ) が小さいほどその効果は大きい。
- 4) 燃焼火炎に横風をあてると、燃焼火炎は傾き、しかも液面上を横風方向に走る。燃焼火炎の傾き ( $L_h/L$ ) は横風流速 ( $v_h$ ) と直線的比例関係にある。これは point-Source Theory から得られた結果と定性的によく一致する。
- 5) 燃焼速度 ( $v_f$ ) は横風流速 ( $v_h$ ) に比例して増加する。しかし、 $v_a=0\text{ m/s}$  の場合には、 $v_h\geq 2\text{ m/s}$  になると逆に  $v_f$  は低下し、やがて吹き消えを生ずる。

終わりにのぞみ、日頃御指導頂いている東京大学宇宙航空研究所浅沼強教授、北海道大学工学部深沢正一教授、斎藤武教授、村山正教授ならびに実験装置の製作を担当した本学福島和俊教官、及び卒業研究として実験を担当した大西実、森紀雄の両君に感謝の意を表す。

(昭 46. 5. 20 受理)

## 文 献

- 1) 沢・林：室工大研報. Vol. 6, No. 3, 327 (1969).
- 2) V. I. Blinov: Acad. Nauk. SSSR Doklady 113, 1094 (1957).
- 3) H. L. De Ris: 11th Symposium on Combustion (1966).
- 4) Abbott A. Putnam: 10th Symposium on Combustion, 1039 (1965).