

メタデータ	言語: jpn					
	出版者: 室蘭工業大学					
	公開日: 2014-07-08					
	キーワード (Ja):					
	キーワード (En):					
	作成者: 澤, 則弘, 林, 重信					
	メールアドレス:					
	所属:					
URL	http://hdl.handle.net/10258/3473					

沢 則 弘*·林 重 信

On the Characteristic of Liquid Surface Combustion under the Forced Convective Diffusion

Norihiro Sawa and Shigenobu Hayashi

Abstract

To investigate the fundamental characteristic and construction of the liquid surface evaporatingcombustion, we measured mainly the fuel consumption, the distribution and maximum value of combustion flame temperature, and the flame height and took the photograph of flame-shape and sketched the construction of combustion flame.

These experiments are carried out with the liquid surface combuster of 20 mm diameter changing the velocity of supplid air, the depth of liquid surface in combustion cup, the distance from the cup end to the exit of supplying air tube, and the depth of the combustion cup.

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

I. 緒 言

自由液面における液体燃料の蒸発燃焼は、石油火災や、ボット式石油ストーブの特別な場 合に関係しており、その燃焼速度は空気と燃料蒸気との混合拡散に強く支配されるので、物理 的条件すなわち火炎から液面えの熱伝達量、燃焼用空気の流れ状態に左右されるであろう。従 来、液面燃焼の燃焼速度や火炎構造などに関する理論的および実験的研究も数多く見受けられ るが、強制対流下における液面燃焼に関しては比較的少ない。

また,室蘭港におけるタンカー(ヘイム・ワイルド号)の火災やポット式石油ストーブ内に おける火炎の挙動等にみられるように不明の点も多いようである。かかる観点から強制対流下 の液面燃焼における火炎特性に注目し,その第1段階として,火炎と平行に強制送風させた場 合について,燃焼容器の深さ,油面深さ,送風状態などの火炎構造に及ぼす影響について実験 的に調べたので報告する。

II. 実験装置および方法

実験装置の写真を図-1(a),(b)に,配置系統図を図-2に,供試燃焼器の詳細を図-3に示

* 茨城大学工学部教授

す。すなわち、市販の薄肉パイプ (内径 20 mm ϕ) を利用して、 深さ l = 5 mm, 10 mm および 35 mm の燃焼容器 (3 種類計7個;図-3(a) 参照)と強制送風管(図-3(b) 参照)を製作し、燃焼 容器を強制送風管に挿入して両管先端の距離(h)を任意に設定し(h=40, 20, 0, -20 および



 \mathbf{Z} —1 (a)



図—1 (b)







図-2 実験装置



-40 mm),強制送風式液面燃焼器とした。この際,燃料には灯油1号を用い,燃料タンクから 容積型流量計(図-2,⑦),液面調正用浮子室⑥を経て燃焼容器に供給する。これに対し,強制 送風用空気は空気圧縮機から流量調整用コック④,流量測定用の管内丸型オリフィス⑨,強制 送風管内の整流装置を経て,燃焼容器外周から火炎に平行に送風する。なお,空気流速の測定 には丸型オリフィスの他にサーミスタ風速計をも使用した。燃焼時の液温は予め燃焼容器に取 付けた C・C 熱電対④で(図-4参照),燃焼火炎の温度分布や最高温度の測定は二次元微動装置 に固定した A・C 熱電対③で,その最高温度の生ずる箇所や火炎長さ(L)はカセトメーター⑤ を用いて測定した。また,火炎形状の記録はカラー写真撮影,シュリーレン撮影(図-1(b)参 照)およびスケッチによった。なお強制送風流速 $v_a = 0$ のときは強制送風管②の底部を開放 して自然通風が行なわれるようにした

III. 実験結果および方法

III・1 火炎形状および燃焼速度

3 種類の燃焼容器 (l=5, 10 および 35 mm)を用い,任意の容器高さ(h),液面深さ(d)に 設定し強制送風の流速 (v_a)を無風状態($v_a = 0$)から徐々に増加させた場合の実験結果(火炎長 さ(L),燃焼速度(v_f))の代表例を図-5,6,7,8に示す。また,図中,a,b,c,…,A,B,…など に対応する燃焼火炎のカラー写真、シュリーレン写真およびスケッチ図を図-9,10に示す。 まず,図-5,図-9 および 図-10 において、無風状態($v_a=0$)における液面燃焼の火炎は表面が 滑らかな円錐状の橙色火炎で、その底部は燃焼容器の縁に覆いかぶさって、Blue flame となっ ている。

これはよく知られている代表的層流火炎である (図-9(a) 参照, ここでは A 型火炎という)。 この場合, 激しい煤の発生が認められ, 燃焼速度も低い。この燃焼速度 (v_f) および火炎長さ (L) は v_f =0.1~0.15, L/D=4.5~8.5 (D: 容器直径) で, Blinov の実験値¹, v_f =0.2 cm/min, L/D=7~8 とかなりよく近似している。しかし, いずれも燃焼容器の深さ (l) によって大幅に変っ ている。従来, 液面燃焼の燃焼速度は燃焼容器の直径に左右されることが指摘されており, た とえば H. C. Hottel²) は

$v_f = \frac{1}{\rho H} \cdot \frac{4q}{\pi D^2}$

ρ:液体の密度, H:蒸発熱, q:熱面の熱吸収速度, D:容器直径

の関係を与えて、燃焼速度(v_f)を支配する熱面の熱吸収速度(q)は火炎と燃料液面との間の熱 伝導、熱対流および熱輻射の和で求められ、それら各因子の寄与の大きさが容器径(D)により 変化するという考えのもとに実験結果を説明している。同様に、供試燃焼容器では直径が比較 的小さいので、容器の縁を介しての熱伝導の寄与が大きく、その値が容器深さ(l)によって異な 沢 則弘・林 重信



図─5 火炎長さ,燃焼速度と空気流速 (h=0, d=0)



図—6 火炎長さ,燃焼速度と空気流速 (h=0, d=2)



図-7 火炎長さ,燃焼速度と空気流速 (h=0, d=4)



図-8 火炎長さ,燃焼速度と空気流速 (h=40, d=0)



図—9(a)



937

2—9 (**b**)



----9(c)

図―9(**d**)

ł. I_{-}



図—9 (e)

図—9 (f)



図—9 (g)

(333)

י י י

るために生じた現象と思われ る。なお、この場合の火炎長 さ (L) は燃焼容器 l=5, 10 お よび 35 mm に対し, それぞれ L=126, 172 および 87 mm, そのときの燃焼速度 (v_f) は 1.1, 1.55 および 0.85 cm/min となり、火炎長さ (L) と燃焼 速度 (v_f) との間には直線的比



例関係があることがわかる。 この結果は, K. Wohl³⁾ や Hottel⁴(らがバーナー層流拡散炎から 求めた関係

 $L = V \cdot D^2 \cdot \theta_f / 4Q$

V: ガス出口から x における流速, θ_f : 無次元量, D: 管径, Q: 拡散係数 と全く同一の傾向である。このように,本実験と K. Wohl らの研究とでは燃料の供給形式が 違うが同一の法則に支配されているものと考えられる。次に,強制送風の空気流速を徐々に増 加させていくと,まず火炎底部の Blue flame が燃焼容器から離れはじめ (図-10 (A) および (B) 参照),つづいて浮き上り,全体としての火炎長さは急激に短縮し (燃焼速度も僅かながら低下 するか,ほとんど変らない),空気流速 $v_a = 1.8$ m/s 附近までは円錐状火炎である。この場合 Blue flame の厚さは不安定であるが,全体としては層流火炎に近い (図-10 (C) 参照 B 型火炎 とする)。このように燃焼火炎の乱れは液面深さが d=0 の場合には火炎の底部から始まるがさ らに, $v_a = 2$ m/s となると火炎長さ (L) は最小 (L/D = 1.0~1.2, 図-5 参照) になるとともに層 流火炎でみられた滑らかな橙色部分は消え,火炎先端部は青紫色に変り,シュリーレン写真や 肉眼でも明確に観察できるが火炎が渦状に巻き込まれるいわゆる乱流火炎に移行する (図-9 (b) および 図-5b 印,図-10 (D) 参照, C 型火炎とする)。この際,燃焼速度 (v_f) も増加している。

さらに流速が増すと (v_a =3 m/s), 火炎全体が Blue flame となり, その浮上り高さも増加 する。このため,火炎長さ (L) も僅かに高くなる傾向を示す (L/D=1.5~2.0, 図-9(c) および 図-5 C 印参照, D 型火炎とする)。さらに空気流速 (v_a) が増加すると 図-9(e) および (g) のよう に火炎の一部が吹き消えを開始し (F 型火炎および J 型火炎),このため燃焼速度 (v_f) が低下す る傾向さえ示す (図-5参照)。かかる燃焼火炎形状発生と空気流速 (v_a) との関係は概略 図-11 のとおりであり,その場合の設定条件 (燃焼容器の種類 (l),容器の位置 (h) および液面深さ (d) は 表-1 のとおりである。このように燃焼火炎の形状は気流の状態に強く支配されるので,火 炎底部の燃焼容器えの覆いかぶさりや、高流速時の巻き込みを防く意味で燃焼容器の液面を下 げると無風状態 (v_a =0) における火炎長さ (L) も短かく、空気流速 (v_a) の増加による層流火炎

941

(335)



図-11 焰形状と風速の関係

表-1 燃焼容器の種類

	設		定		条	ť	ŧ	
l	h	d	l	h	d	l	h	d
5	-40	-2	10	-40	-2	35	-40	-4
5	20	-2	10	-20	-2	35	-20	-4
5	0	-2	10	0	-2	35	0	-4
5	+20	-2	10	+20	-2	35	+20	-4
						35	+40	-4

長さの減少もいちじるしく、しかも空気流速 $v_a = 2 \text{ m/s}$ 附近における火炎長さ (L) の最少値 は顕著に短かくなる (図-6 および 図-7 参照)。 さらに、 高流速領域の火炎長さ (L) は急激に増

150

L

mm

100

50

0

0.4

Ψf

Cny. Min

0.2

Л

0

ℓ = 10 mm

h = 0

॑ d=0

4 .

 \bigtriangleup 2

▲ 6

Va Ms

速度と空気流速

(l=10, h=0)

8

4

図-15 火炎長さ,燃焼

加する傾向を示し d=0 の場合とかなり様相が異なる。 この場合燃料蒸気の拡散混合が悪化するので燃焼速度 (vf) も低く,吹消えを生ずる空気流

速 (vα) も順次低くなる (図-12, 13, 14 および 図-15 参照)。また, これに応じて火炎形状も変っ てくる。たとえば液面深さ d=4 mm の状態で強制送風燃焼をさせた場合に例をとると、図-16 に示すように空気流速 (v_a) に応じて変化する。すなわち、 $v_a = 0$ の場合 (図-16(a)参照) には 火炎長さ (L) は短かいが d = 0 のときと同様に円錐状の層流火炎である。しかし、火炎底部の

150

L

mт

ℓ= 35 mm

h=-20mm

○ d = 0

 \triangle 2

• 4

覆いかぶさりや煤の発生などはほとんど認め られない。この状態で、徐々に送風空気量を 増加させると火炎の先端は急激に短かくなり





(図-16 (b), (c) 参照), $v_a = 1.0 \sim 1.2$ m/s 附近で 図-17 に示すような梯形型の非常に短かい火炎 (P 型 火炎) となる。 この火炎がきれいな梯形型となり (図-16 (d), $v_a = 1.9$ m/s および 図-9 (f) 参照; G 型 火炎とする), さらにこれが段々と乱れ始め (図-16 (e) および (f)), $v_a = 2.6 \sim 4.8$ の範囲では丸味を おびたいわゆる Q 型火炎 (図-17 参照) となる。 さらに空気流速 (v_a) が増加すると先に 図-9 で示 した E, F, J 型火炎えと移行する。かかる燃焼火 炎の発生と空気流速 (v_a) との関係は 図-18 のとお

りである。なお,全体として空気流速 $v_a=0~1.5 \text{ m/s}$ の範囲では層 流火炎のままで,火炎長さ (L) が減少する。これは,無風状態 ($v_a=$ 0) では,バーナー火炎で燃料ガスに流速を与えた場合と密接な関係 があったにも拘わらず,バーナー火炎の場合と全く逆の傾向であ る。しかし,この場合火炎自体は対流による上昇流をもっており, 最初のうちは燃焼火炎と空気流速との相対速度が空気流速の増加に つれて順次減少するためと考え,相対速度がほとんど零になったと ころで燃焼も不安定となり,その速度も最小で液面上に炭素粒の堆 積さえ生ずる。層流火炎から乱流火炎えの遷移域を経て,再び相対 速度が増加するため火炎長さ (L) および燃焼速度 (v_f) が増大すると 考えるならば,バーナー火炎の考察が液面燃焼にも拡張できること になる。次に乱流火炎の長さ (L) は燃焼容器の種類 (l) によってあ まり変らない (図-5 参照),しかし燃焼速度 (v_f) は $v_a=3 \text{ m/s}$ を境に して逆の関係にあり,その交叉点は液面深さ (d) が増加すると低空 気流速側に移行し (図-6 参照) 興味ある現象を呈している。また燃







沢 則弘・林 重信



焼容器が高くなると ($h = -40 \rightarrow 0 \rightarrow 40$), とくに層流火炎の長さ (L) は短かく ($v_a = 0$), 乱流火炎 においても同様の傾向が認められる (図-19 参照)。これは空気流の外側えの拡散に影響され, 燃焼火炎も 図-9 (h) に示したように逆梯形型 (K型火炎) に変形するものと思われる。 とくに h = 40 mm ともなると,強制送風管出口近傍では空気の乱れも小さいが,燃焼容器附近ではか なり激しく乱れており,気流の拡がりが大きくなることがわかる。

III・2 火炎温度および液温

燃焼容器 (l=10) による代表的な燃熟火炎について,各点の温度を測定しその温度勾配を もとに等温線を画くと 図-20 (h=0, d=0, $v_a=0$, A 型火炎),図-21 (h=0, d=0, $v_a=3$, D 型 火炎),図-22 (h=0, d=0, $v_a=5$, E 型火炎),図-23 (h=0, d=2, $v_a=8$, E 型火炎) および 図-24 (h=4.0, d=0, $v_a=3.5$, K 型火炎) のようになる。図において,空気流速 $v_a=0$ の層流 火炎 (A 型火炎) では中心部に最高値をもつなだらかな層状の温度分布であり,燃料蒸気は燃 焼に基づく自然対流のため,周囲の空気と混合しながら燃熟し上昇していくことがわかる。こ れらの測定結果によると,比較的径の大きい C・A 熱電対を使用したことや,燃焼容器自体が 小さいなどの理由のために火炎の最高温度が予想以上に低く720°C 程度である (図-20 参照)。 これが,空気流速 (v_a)が増すと,その温度分布は乱れて渦状となり,燃料蒸気と空気との拡散 混合も活発化し火炎温度は全般的に高く1020°C 程度までにあがる (図-21, 22 参照)。このよう に温度分布からも乱流火炎であり,燃焼ガスの流動模様がよくわかる。また,火炎温度は液面 深さ (d)が大きく (図-23 参照),燃焼容器の位置 (h)が高いほど (図-24 参照) 火炎温度は低くな る。これらは,いずれも先に示した燃焼速度との間に相関関係があることを示すものである。



かかる関係をより明確にするため、火炎の最高温度に注目し、図-5~12に示した火炎長さ(L) や燃焼速度(vf)の実験結果と同一実験において測定した火炎最高温度(tm)を示したのが図-25~33 である。 同図には燃料液面の温度 (t) および燃料液中温度(t) をも併記している。 ま ず, 燃焼容器の種類(1)の火炎温度や液面温度に及ぼす影響をまとめた 図-25, 26, 27 および 28 によると、h=0, d=0の場合 (図-25)には燃焼容器の如何に拘わらず火炎最高温度 (t_m) は一つ の曲線上によく揃っており、その影響が認められない。しかし、d=2,4mmのように液面が 低い場合 (図-26, 27) や燃焼容器位置が高く h=40 mm の場合 (図-28) には、それらによる差 位が明らかに認められ、図-6~8に示した燃焼速度(v)と比例関係にあることがわかる。なお、 火炎最高温度曲線は空気流速 (va) が増加すると一度低下し、 va≒1m/s 附近でもっとも低く、 次に順次増大し、 $v_{\alpha}=4\sim5$ m/s で最高となり、その値を $v_{\alpha}>6$ m/s まで持続するか再び低下す る。かかる火炎最高温度 (t_m) と空気流速 (v_a) との関係も燃焼速度 (v_f) の場合と相似しており, 燃焼速度に関する考察の裏付けとなる。したがって、火炎最高温度(tm)の測定から燃焼速度 (v_t) ,ひいては燃焼状態の推定が可能と云えよう。これに対して、液面温度 (t_i) は層流火炎 (v_a) =0) でもっとも高く、100~130℃ となっている (点火後約 10 分を要する)。しかし、空気流速 の増加に伴って、その温度(ti)は急激に増加し、va>3m/sの範囲では灯油の引火温度(30~ 40°C)より僅かに高い一定値(約50°C)になる。もちろん、液面温度を規定するのは、火炎温 度,火炎からの熱伝達および燃料の気化潜熱,空気流速による冷却,火炎の浮上りなどであり,







図-34 液面温度と燃焼速度

空気流速の増加にもとづく熱伝達形式の変化や後三者の増加のため、液面温度(t_1)は低下するが乱流火炎となると、熱伝達の増加がもたらされ液面温度が一定値を示すものと思われる。次に液中温度(t_2 ,図中黒印)は燃料の熱伝導性⁵⁾に支配されるので、液面温度(t_1)と同様の経過をたどることがわかる。かかる火炎最高温度(t_m)は無風状態($v_a=0$)では燃料蒸気と空気の拡散混合が自然対流により行なわれるため、設定条件によらずほぼ一定値をとる。しかし乱流火

炎領域では、液面深さ(*d*)が大きいほど(図-29, 30, 31 および 32 参照)、燃焼容器の位置(*h*)が高いほど火炎温度は低い(図-33 参照)。しかし火炎最高温度曲線そのものの空気流速(*v*_a)に対する傾向は、図-25 の場合と同じであるがその値は火炎最高温度の場合とは逆に、燃焼容器す度(*l*)が小さく、液面深さ(*d*)が大きく、燃焼容器位置(*h*)が高いほどたかくなる。しかも、液面深さ $d = 4 \sim 6$ mmの場合には、空気流速(*v*_a)の増加とともに、低下していた火炎最高温度(*t*_m)が再び上昇する傾向を示すようになる。いま、先に示した燃焼速度(*v*_f)の実験値(図-5,燃焼容器 *l*=10, *h*=0, *d*=0)を、そのときの温面温度(図-25)でプロットしてみると図-34のような関係が求まる。同図には強制送風しない場合の液面温度(*t*₁)と燃焼速度(*v*_f)との関係を想定し、点線で示したが、もし液面温度の低下が無視できるような場合には、空気流速(*v*_a)の燃焼速度(*v*_f)の大きくなることがわかる。

IV. 結 言

以上,液面燃焼に関する基本的実験を行ない,得られた現象につき定性的考察を試みたが 要約すると次のとおりである。

1) 無風状態 ($v_a = 0$) の液面燃焼では, 温度分布がなめらかな層状であり, 火炎温度は設定条件 (h, d) が変ってもほぼ一定である。燃料蒸気と空気との拡散は自然対流によるため速や

(341)

948

かに進行せず燃焼速度が遅く、反応帯(炎)を通過する時間も長いため火炎も長くなる。この火 炎長さは燃焼容器の種類(l)、高さ(h)、液面深さ(d)の影響を受けるが、燃焼速度との間には直 線的な比例関係がある。また、火炎の底部が容器の縁に附着し、そこからの熱伝導が多いので 液面温度は高い($t_1=100\sim130^{\circ}$ C)。

2) 空気流速 $v_a = 1 - 2$ m/s 附近で層流火炎から乱流火炎えの遷移域が生じ、この範囲で は火炎の最高温度の低下、火炎長さの短縮、燃焼速度の減少をきたし、燃焼容器内に固体炭素 の沈澱をみる。これは、火炎による燃料蒸気の上昇速度と空気流速の相対速度が小さくなり、 拡散速度も減少し燃焼状態の悪化をもたらしたためと考えられる。

また,この遷移域においては火,炎の底部が燃焼容器から浮き上り始め,液面の加熱は熱 伝導から対流および輻射伝熱に移行するので液面温度も低下する。

3) 空気流速 v_a=3~6 m/s の間では乱流火炎となり,空気流が火炎底部に巻き込み,拡散 が均一となり最適な混合比が得られるので燃焼速度も増加し,火炎最高温度が最大となる。乱 流火炎のため対流熱伝達の増加をもたらし,燃料の蒸発の潜熱および火炎の浮上り高さの増大 にも拘わらず液面温度は一定となる。

4) 空気流速 $v_a = 6 \text{ m/s}$ になると、火炎の一部が吹消えを生じ、燃焼速度、最高温度は低下する傾向を示す。

5) 液面を下げるほど,燃焼速度の低下,火炎長さの短縮,火炎最高温度の低下がみられる。これは燃焼容器の外壁が燃料蒸気と空気との拡散を防げ,燃焼を低下させるためと考えられる。しかし,燃焼容器からの熱伝導率が増加するため液面温度は高く,とくに空気流速 v_a= 2~4 m/s で顕著である。

6) 従来, 燃焼容器の直径によって燃焼速度や火炎長さが変化することが知られている が, 容器の長さによっても同様の変化が認められる。

7) 燃焼容器と強制送風管出口との相対的距離(*h*)も燃焼状態に或る程度影響し*h*=40 mmにおいては空気流の拡散作用の影響を受けて火炎が横に拡がる。

8) 強制送風空気流速により燃焼状態(燃焼速度,温度分布)は大幅に変化し,それに応じて燃焼火炎の形状(火炎長さ,形態)も変わる。また,液面深さ,燃焼容器の位置(h)によっても火炎形状の変化が認められる。

終りにのぞみ,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,北海道大学深 沢正一教授,斎藤武教授,村山正助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, 早川友吉技官,および卒業研究として実験を担当された浅野雄一,大道寺健司,柳沢弘幸の諸 君に感謝の意を表する。

(昭和44年4月30日受理)

文 献

1) V. I. Blinov: Acad Nauk. SSSR Doklady 113, 1094 (1957).

- 2) H. C. Hottel: Fire Res. Abst. Rev. 1, 41 (1959).
- 3) K. Wohl: 3rd Symp. on Combustion, p. 288 (1949).
- 4) H. C. Hottel: 3rd Symp. on combustion, p. 254 (1949).
- 5) W. P. Reid: J. phys chem, 59, 242 (1953).