



Title	メタノールおよびエタノール開放拡散火炎の火炎長
Author(s)	立田, 節雄; Tatsuta, Setsuo; 伊藤, 献一 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 112, 15-24
Issue Date	1983-01-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41767">https://hdl.handle.net/2115/41767</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	112_15-24.pdf



## メタノールおよびエタノール開放拡散火炎の火炎長

立田 節雄\* 伊藤 献一

(昭和57年9月30日受理)

### Open Diffusion Flame Heights of Vaporized Methanol and Ethanol

Setsuo TATSUTA and Kenichi ITO

(Received September 30, 1982)

#### Abstract

Open diffusion flame heights of vaporized methanol and ethanol were measured photographically, and were compared with those of LPG and city gas (6C) at room temperature. The effects of varying vapor temperature in the range of 80-140 °C and water addition of 0-30 wt% were also examined.

The heights of laminar flames were independent of vapor temperature at a constant mass flow rate. For water added fuels, the heights decreased with the increasing water concentration. The most dominant factor was the net flow rate of fuel vapor. The heights per heat release rate of both alcohol fuels were in no cases larger than those of LPG and city gas.

#### 1. 緒 言

液体燃料の燃焼方式の1つに、蒸発燃焼がある。この方式は、おもに軽油以上の軽質油を対象とするもので、燃焼火炎形成前に燃料蒸気と空気を予混合することにより、均質系の燃焼に近い状態で、熱負荷を高めることができる<sup>1)</sup>。石油代替燃料として最近注目されているアルコールは揮発性の単一成分の燃焼であり、沸点が比較的低いことから、蒸発燃焼に適した燃料である。このアルコールの蒸発燃焼は、まず比較的小規模な燃焼装置、たとえば暖房用燃焼器機、温水器などに利用されるであろう。その場合、燃焼室の熱負荷および形状寸法を決定するための基礎的資料として、アルコール火炎の空間熱発生率、火炎形状、排ガス特性、熱放射特性および火炎安定限界などが必要となるが、これらに関する報告はきわめて少なく、今後、アルコール燃焼の実用化に先立ちこの分野における研究が促進されるものとみられる。

本研究は、アルコール火炎の特性値の1つである火炎長に関する基礎資料を得ようとするものである。メタノールおよびエタノール蒸気を燃料とし、静止大気中に形成される開放拡散火炎の火炎長を層流域に重点を置いて測定した。気体炭化水素を燃焼とする拡散火炎の火炎長に関する研究は、理論および実験の両面から数多くなされている。Burke と Schumann<sup>2)</sup> は、層流域の同軸拡散火炎において、燃料と酸化剤の相互拡散により量論混合気が形成される位置に火炎面ができると仮定し、軸対称2次元の拡散方程式を解くことにより火炎形状を予測し、この理論解が実験結果と定性的に一致することを示した。Hottelら<sup>3-4)</sup>、および Wohlら<sup>5)</sup> は、同様の解析を開放拡散火炎へ拡張するとともに、実験的には、層流域の火炎長はノズル径とは無関係に燃料の体積流量のみに依存し、一方、乱流域の火炎長は体積流量によらずノズル径に比例して増大し、火炎長とノズル径の比は燃料の種類により決定されることを報告している。

本報では、火炎長におよぼす蒸気温度および燃料への水混合の影響を検討し、LPG および都市ガスと発生熱量あたりの火炎長を比較した。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置概要

アルコール（メタノールおよびエタノール、JIS 1 級品）および含水アルコールを円筒容器（容積20～200 ml, 注射器）にたくわえ、パルスモータでピストンを移動させ、気化室へ燃料液を供給する。容器出口での燃料温度を測定し、密度とピストン移動速度から燃料の質量流量を求めた。最大燃料供給量は0.31 ml/sであり、パルス周波数およびピストン径を変えることにより任意の流量を設定できる。

図1に燃料気化室の概略を示す。気化室は円筒状であり、内容積は272mlである。底部に設けられた電熱ヒータ上に厚さ2mmのガラスウールを敷き、そこへ燃料液を注入する。内径0.9mmの燃料注入管の先端には、黄銅製フランジ（厚さ4mm, 直径60mm）が取付けられており、その下面には蒸気流出用に12本のV溝が放射状に刻られている。蒸気中へ液滴が混入することの防止、気化室内温度の均一化、および蒸気噴出速度 $V_g$ の脈動の緩和を目的として、気化室内に仕切板を設けた。気化室の上下を結ぶ通路の直径は、蒸気流量に応じて1.0, 2.0あるいは3.0mmとした。気化室全体を断熱材で覆った。気化室の中央で、C-A熱電対（素線径 $\phi 0.5$ ）を用いて蒸気温度 $T_g$ を測定した。あらかじめ、気化室内蒸気温度の均一性、および測温位置において平均温度の得られることを確認した。なお、 $T_g$ は80～160℃の範囲に設定することができる。

バーナノズルは肉厚0.5mm, 内径 $D_N=1.10, 2.05$ および3.03mmのステンレス引抜管であり、ノズル長さを $D_N$ の100倍とした。ノズルの周囲を真ちゅう丸棒で覆い、さらにその周囲に均一に捲き付けたシリコンヒータでノズル壁面温度を蒸気温度と同じに保った。ノズルの先端には、周囲空気が予熱されることを防ぐため、直径60 $D_N$ のベークライト円板を取付けた。火炎の周囲を除風わくで囲み、静止大気状態を得た。

### 2.2 火炎長の測定方法

火炎長の測定方法としては、(1)目視観察による方法<sup>2-5)</sup>、(2)写真観察による方法<sup>6)</sup>、(3)火炎軸上の成分ガス組成の分析結果より、局所空気比が1.0となる位置を火炎先端と定義する方法<sup>7)</sup>などが一般に採られている。(1)の方法では、火炎先端位置がゆらぎにより時間的に変動する場合に測

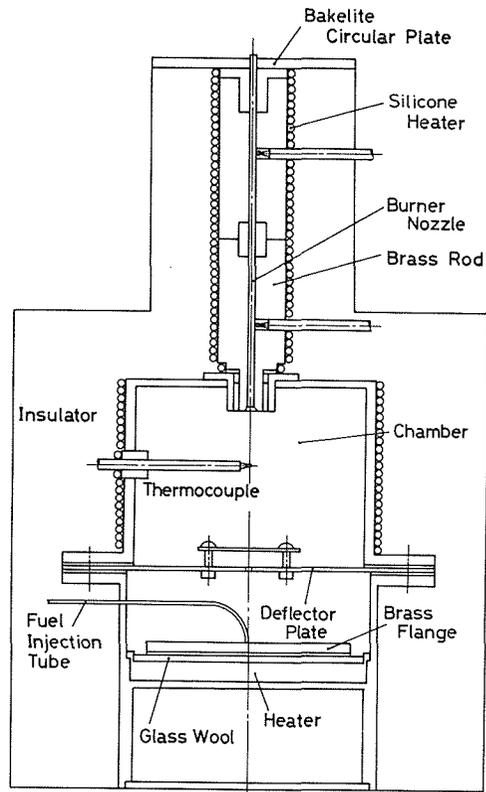


図1 燃料気化室概要

定誤差を生じやすく、(3)の方法では、分析操作に多くの時間を必要とし、多数のデータの測定には適さないとの理由から、ここではモノクロームスチール写真撮影による画像から火炎長を求めた。

火炎の写真撮影中は火炎以外の光源はないようにし、各測定条件において5枚の火炎写真を撮り、それより求まる火炎長の算術平均値をその条件での火炎長 $\bar{h}$ とした。撮影には焦点距離50mmの標準レンズを用い、火炎軸からレンズまでの距離を0.7mとした。用いたフィルムはASA400である。撮影フィルムは同一条件のもとで現像した。エタノール火炎は輝炎であり、水混合した場合であっても輝度は幾分減少するにもかかわらず、火炎先端は明瞭である。しかし、青色の不輝炎であるメタノール火炎では、発光帯の終点がやや不明瞭であり、測定値は露光量に影響される。

とくに、 $D_N = 1.10\text{mm}$ の火炎では先端が細長く尖っているため、露光不足で撮影した場合、その部分が像として現われず、その結果、目視測定による火炎長よりも小さな値を得ることになる。

図2は、レンズの絞りをf1.4に保ち、露光時間を変えて、露光量と $\bar{h}$ との関係を調べた結果である。露光時間を1/30~1/8秒として撮影した場合、 $\bar{h}$ は目視測定により得られる火炎長とほぼ一致する。しかし、写真測定におい

て露光時間を長くすると、最大長に近い値を測定値とするおそれがあるので、メタノール火炎では幾分露光不足となるが、露光時間を1/125秒として撮影した。各測定条件に対して5枚の写真から $\bar{h}$ を求めたが、層流域では36枚の写真から得られた値とさほど違いがなかったため、ほぼ妥当な撮影枚数であると判断した。

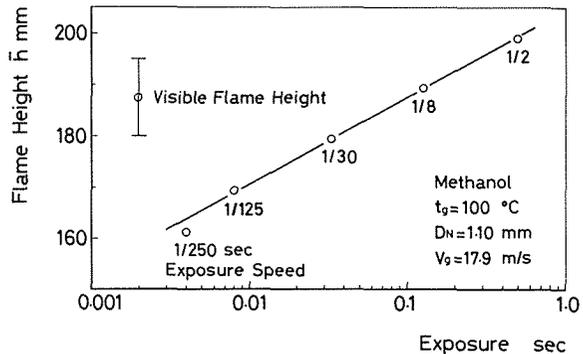


図2 露光量と火炎長 $\bar{h}$ の関係

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 火炎先端位置の変動

火炎長の測定値にばらつきを生ずる原因をまず検討しておく。ばらつきを示す例として、任意に撮影した36枚の写真より求まる平均火炎長 $\bar{h}$ で、火炎長の変動量 $h' (= h - \bar{h})$ を除いた値 $h'/\bar{h}$ のヒストグラムを図3(a)~(f)に示す。測定した火炎は、いずれも層流火炎である。図中の $\bar{h}'$ は変動量のRMS値であり、 $N$ は個数を示す。

$D_N = 1.10\text{mm}$ の火炎(a), (b)はきわめて安定な火炎で、ゆらぎを生じておらず、火炎はシャープな形状となっている。燃料供給量が非常に少量であるため、気化室へ燃料を供給する際の脈動により、火炎先端がわずかに上下に移動する。しかし、それによる火炎長の変動は無視できる程度である。 $D_N$ が大きくなり、火炎が長くなるほど、ゆらぎによる変動が増大する。 $D_N = 3.03\text{mm}$ 、 $\bar{h} = 335\text{mm}$ のエタノール火炎(d)の場合には、 $h'/\bar{h}$ が8.9%にも達している。

本実験装置は、燃料を気化したのち直接ノズルから噴出させる構造となっているので、ゆらぎ以外の変動原因として、燃料供給時の脈動や加熱面での不安定な蒸発が原因となって燃料蒸気噴出速度 $V_g$ が変動することも考えられる。ゆらぎを生じている場合、 $V_g$ の変動が火炎長におよぼす影響を単独に定量化することは困難である。そこで、 $V_g$ を一定に保つことが可能な常温の都市ガ

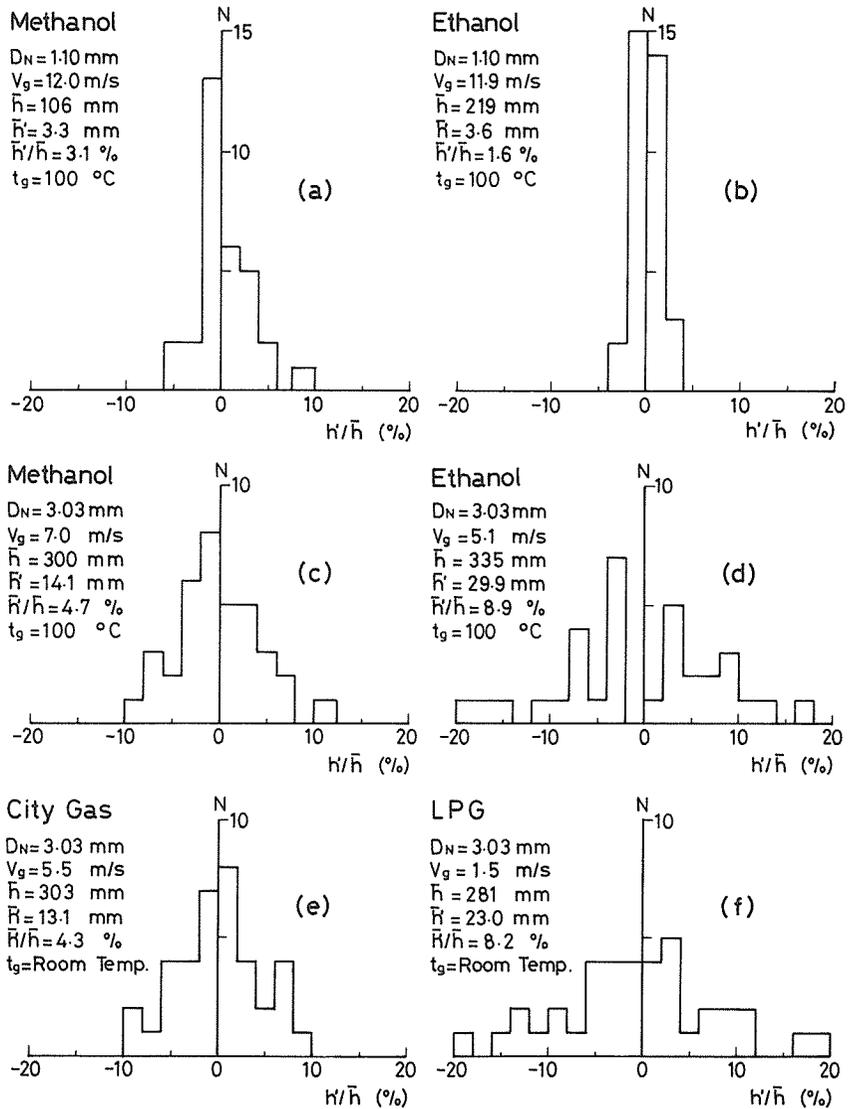


図3 火炎長のヒストグラム

スおよびLPGのほぼ同等の $\bar{h}$ におけるヒストグラム(e)および(f)とアルコール火炎とを比較すると、ひん度分布および $h/\bar{h}$ の値が類似していることがわかる。したがって、本実験装置におけるアルコールの蒸発過程では変動が少なく、 $V_g$ の変動も少ないものと考えられ、ここで観察される火炎長の変動は、おおむねゆらぎに起因するものと推察される。

### 3.2 メタノールおよびエタノールの火炎長

図4および5は、 $t_g = 100^\circ\text{C}$ において、 $V_g$ と $\bar{h}$ の関係を、 $D_N$ をパラメタとして調べた結果である。気体炭化水素を燃料とした場合の傾向<sup>3)</sup>と同様に、層流域では $\bar{h}$ が $V_g$ とともに増大し、乱流域では測定値にばらつきがみられるが、 $\bar{h}$ は $V_g$ によらずほぼ一定の値となる。このことは、メタノールおよびエタノール蒸気を用いる開放拡散火炎の火炎長を支配する要因は、気体炭化水素のそれと本質的に変わらないものであることを示唆している。火炎が層流から乱流へと遷移するとき

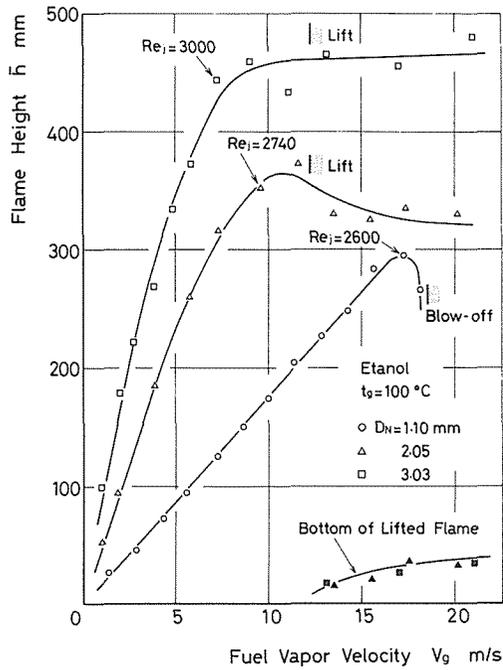


図4 メタノール火炎の火炎長  $\bar{h}$  と蒸気噴出速度  $V_g$  の関係

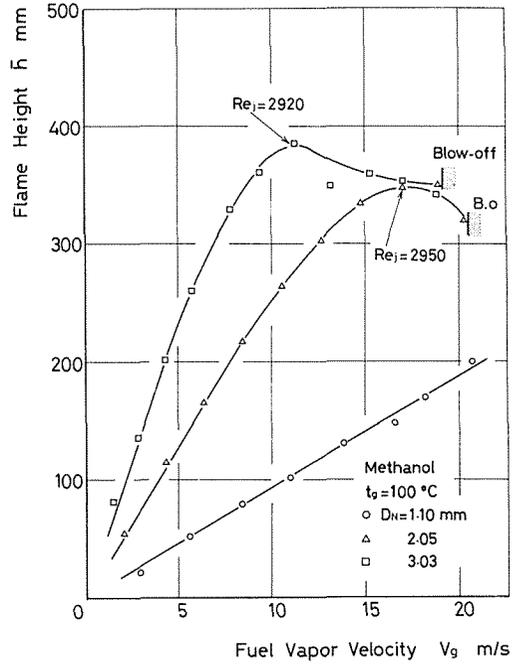


図5 エタノール火炎の火炎長  $\bar{h}$  と蒸気噴出速度  $V_g$  の関係

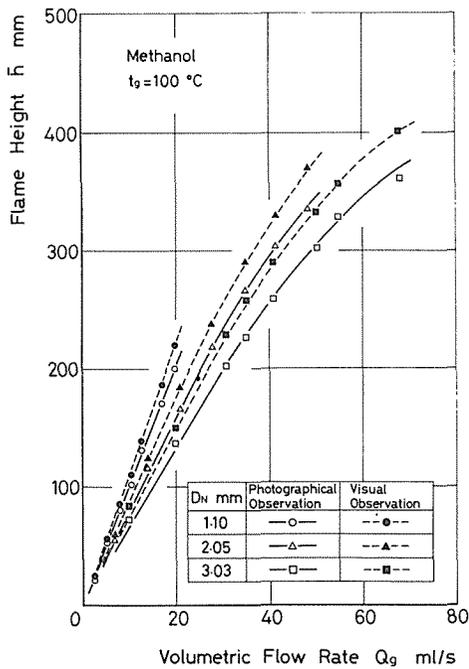


図6 メタノール火炎の火炎長  $\bar{h}$  と燃料蒸気流量  $Q_g$  の関係

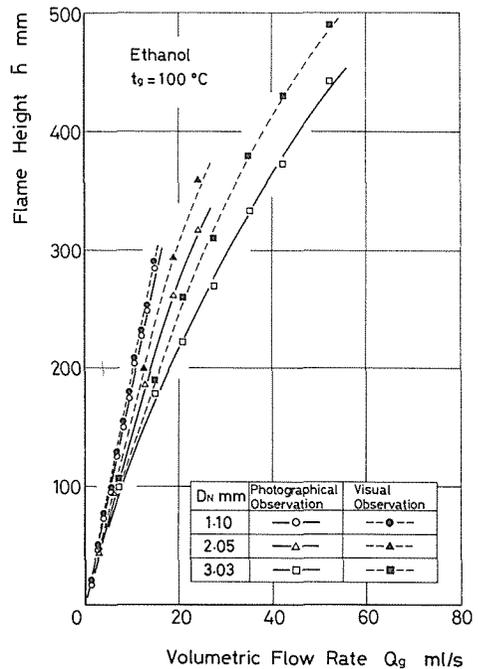


図7 エタノール火炎の火炎長  $\bar{h}$  と燃料蒸気流量  $Q_g$  の関係

の噴流レイノルズ数  $Re_f (= D_N V_g / \nu_{fuel})$  を実験結果から明確に判断することは困難であるが、メタノールではおおよそ  $Re_f = 2,700 \sim 3,000$ 、エタノールでは  $Re_f = 2,600 \sim 3,000$  となっている。乱流域の火炎長を  $D_N$  で除した値は、 $D_N$  によらず燃料の種類によって決定されるといわれているが<sup>4-5)</sup>、本実験の結果からは、メタノールに対し、 $\bar{h}/D_N = 115$ 、エタノールで155となり、目視測定の数値からも、それぞれ135、175となり、燃料による違いが認められる。なお、エタノール火炎では乱流火炎になると、火炎はリフトするようになる。

図6および7は、上図の層流域におけるデータを蒸気体積流量  $Q_g$  で整理した結果である。図中、目視による測定結果を破線で示してある。両火炎とも  $Q_g$  を一定としたときの  $\bar{h}$  は、 $D_N$  が大きくなるほど減少している。 $D_N = 1.10\text{mm}$  では、 $\bar{h}$  と  $Q_g$  が比例関係にあるのに対し、 $D_N = 2.05$  および  $3.03\text{mm}$  では、火炎が長くなるほど  $\bar{h}$  の増加率は減少する傾向にある。Hottel ら<sup>3)</sup>、および Wohl ら<sup>5)</sup> の研究によると、目視測定における都市ガス（常温）の火炎長は、 $D_N$  に依存せず  $Q_g$  のみの関数となる。ところが、本研究の場合は、 $Q_g$  一定のとき、火炎長はおよそ  $\sqrt{D_N}$  に反比例する傾向をみせており、従来の報告とは異なった結果となっている。この  $D_N$  依存の原因としては、燃料の特性、温度の違い、あるいは、 $D_N$  が小さいことによる2次元拡散の影響、同伴空気流の影響などが考えられるが詳細は明らかではない。

### 3.3 蒸気温度の影響

図8は、 $D_N = 2.05\text{mm}$  のノズルを用いて  $t_g$  を約  $80 \sim 140^\circ\text{C}$  の範囲で変え、 $\bar{h}$  におよぼす  $t_g$  の影響を層流域について調べた結果である。蒸気質量流量  $G$  が一定の条件では、両火炎とも  $t_g$  によらず  $\bar{h}$  はほぼ一定値となっている。層流拡散火炎の火炎長  $\bar{h}$  と、 $Q_g$  および燃料の拡散係数  $D$  との間には、次の関係が成立する<sup>8)</sup>。

$$\bar{h} \propto Q_g / D$$

したがって、 $G$  を一定に保って  $t_g$  を増大すると、 $Q_g$  と  $D$  の両方が増大し、結局  $\bar{h}$  は一定値をとると考えられる。ただし、上の関係は火炎内のいたる所で、拡散係数の値がノズル出口の値と等しいとの仮定のもとに導びかれている。実際の火炎内では、蒸気温度の上昇に伴い実質的な拡散係数は著しく増大する。

拡散係数におよぼす温度と圧力の影響は、次の実験式で表わされる<sup>9)</sup>。

$$D = D_0 (T/T_0)^n (P_0/P)$$

ここで、 $D_0$  は標準状態 ( $T_0 = 273\text{K}$ ,  $P_0 = 1\text{atm}$ ) における拡散係数、 $D$  は絶対温度  $T$ 、圧力  $P$  における拡散係数である。メタノールおよびエタノール蒸気の拡散係数の温度指数  $n$  は、空気に対して2.0である<sup>9)</sup>。蒸気の絶対温度を  $T_g$  とすると、ノズル出口での蒸気の拡散係数は  $T_g^2$  に比例する。また、 $G$  が一定では、 $Q_g$  は  $T_g$  に比例するので、 $\bar{h} \propto 1/T_g$  となり、図8の実験結果とは異なる関係を示す。

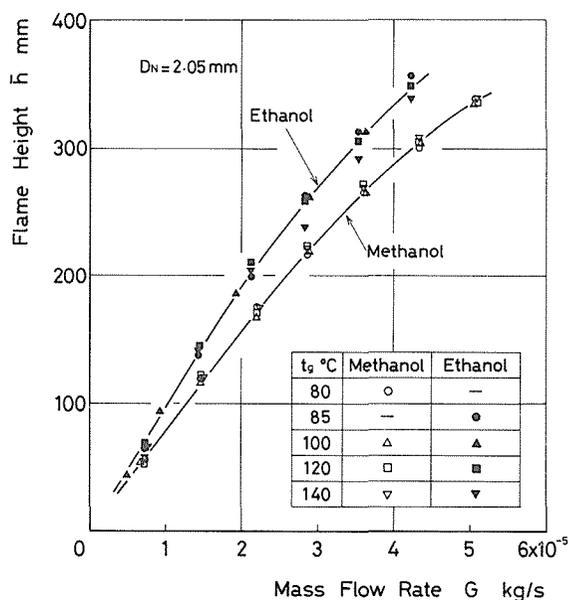


図8 蒸気温度の影響

このことは、ノズル出口での蒸気の拡散係数のみで火炎長を議論することは困難であり、火炎内の温度分布等から決定される実質的な拡散係数が重要となることを示している。蒸気温度のこの程度（60℃）の変化では火炎温度がさほど変化しないことが予想され、そのために実質的な拡散係数が変わらないものと考えられる。

### 3.4 水混合の影響

メタノールおよびエタノールの製造過程あるいは貯蔵中に、水の混入は避け難い。また、コスト面から含水アルコールのまま使用することが考えられる。図9および10は、 $D_N = 2.05\text{mm}$ の

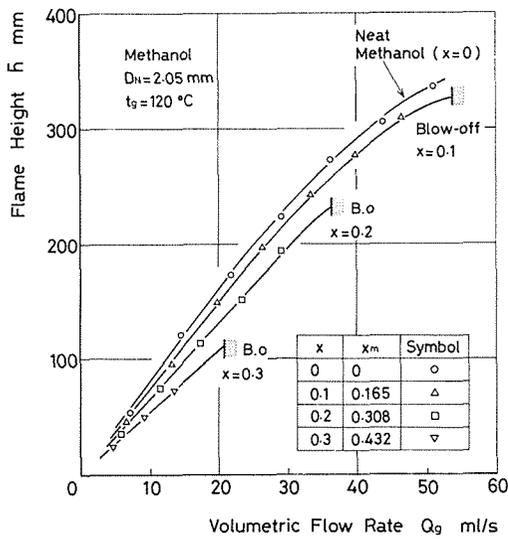


図9 水混合の影響（メタノール）

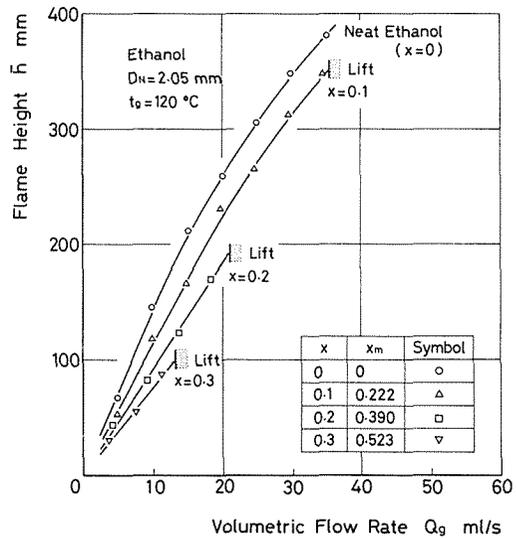


図10 水混合の影響（エタノール）

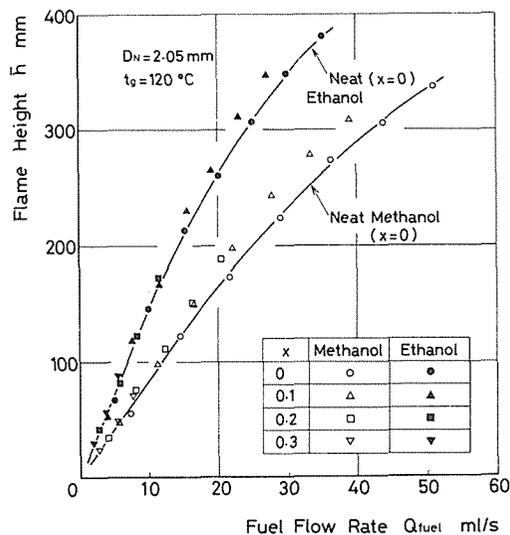


図11 水混合の影響（ $Q_{fuel}$ による整理）

ノズルで  $t_g$  を  $120^\circ\text{C}$  に保ち、燃料中に含まれる水の質量割合  $x$  を 0, 0.1, 0.2, 0.3 と変化させ、 $\bar{h}$  におよぼす水混合の影響を層流域について調べた結果である。図中の  $x_m$  は、水のモル分率を示す。含水率が増すほど  $Q_g$  あたりの  $\bar{h}$  は減少し、安定限界が狭くなる。 $\bar{h}$  と  $Q_g$  が比例する範囲で、単味アルコールと  $x=0.3$  の含水アルコールの  $\bar{h}$  を比較すると、メタノールでは約33%、エタノールでは約44%の減少が認められる。 $x$  が同じ場合、 $\bar{h}$  の減少は分子量の大きいエタノールで顕著となっている。

図11は、図9および図10に示したデータをアルコール蒸気の正味体積流量  $Q_{fuel}$  で整理した結果である。 $\bar{h} < 200\text{mm}$  の範囲で、 $\bar{h}$  は含水率によらず  $Q_{fuel}$  に依存してほぼ直線的に増大する。

表1 含水アルコールの量論混合比  $\phi$  とアルコールのモル分率  $(1-x_m)$

$x$	Methanol		Ethanol	
	$\phi$	$(1-x_m)$	$\phi$	$(1-x_m)$
0	7.14	1.0	14.3	1.0
0.1	5.95	0.835	11.1	0.778
0.2	4.94	0.692	8.71	0.610
0.3	4.06	0.568	6.81	0.477

すなわち、 $Q_{fuel}$  一定の条件では、水蒸気の添加量を変えても  $\bar{h}$  は変化しないことになり、含水アルコールの火炎長を支配する要因は、 $Q_g$  よりも  $Q_{fuel}$  であることがわかる。

表1に、含水アルコールの量論混合比  $\phi$  とアルコールのモル分率  $(1-x_m)$  を示す。ここで、水蒸気を反応に関与しない不活性ガスと考え、 $\phi_{neat}$  を単味アルコールの量論混合比とすると、含水アルコールの量論混合比  $\phi$  は  $\phi_{neat}(1-x_m)$  となる。また、 $Q_g = Q_{fuel}/(1-x_m)$  との関係より、 $Q_{fuel}$  が一定のとき、それに添加する水蒸気量を増加した場合、 $Q_g$  は  $1/(1-x_m)$  に比例して増大し、 $\phi$  は  $(1-x_m)$  に比例して減少する。含水率が異なることによる含水アルコール蒸気の物性値の違いが無視でき、 $\phi$  と  $\bar{h}$  が比例するなら、水蒸気添加による  $Q_g$  の増大を  $\phi$  の減少が打消すことになり、その結果、 $Q_{fuel}$  一定のとき、含水率によらず火炎長は一定値をとることになる。

### 3.5 LPGおよび都市ガスとの比較

アルコール燃料で用いたものと同一のノズルで、常温のLPG( $\text{C}_3\text{H}_8$ :98.5vol%)および都市ガス6Cの火炎長を測定し、発生熱量  $H$  あたりの火炎長をアルコール燃料と比較した。

図12は、 $D_N = 1.10\text{mm}$  のノズルで、 $\bar{h}$  と  $H$  の関係を調べた結果である。 $H$  を計算する際、燃料はすべて完全燃焼すると仮定し、 $t_g = 100^\circ\text{C}$  のメタノールおよびエタノール蒸気、常温 ( $20^\circ\text{C}$ ) のLPGおよび都市ガスの低発熱量を、それぞれ676.5, 1295.0, 2045.0<sup>10)</sup>, 468.9 (MJ/kmol) とした。メタノール、エタノール

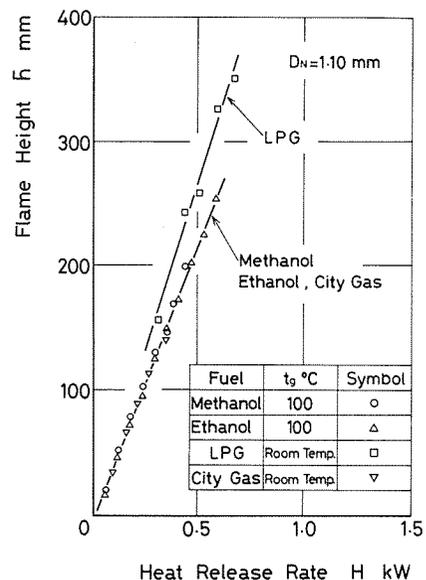


図12 LPGおよび都市ガスとの比較 ( $D_N = 1.10\text{mm}$ )

ルおよび都市ガスは、 $\bar{h}$  と  $H$  の関係が一本の直線で表わされる。LPG の直線のこの配は、これらの燃料よりも約1.25倍大きい。図13は、 $D_N = 3.03\text{mm}$ での同様の結果である。 $D_N = 1.10\text{mm}$ の場合とは異なり、 $H$ あたりの $\bar{h}$ は都市ガス、メタノール、エタノールの順に大きくなり、これらの関係を一本の直線で表わすことはできない。LPGは都市ガスとメタノールのほぼ中間の値となっている。

このように、 $D_N$ によって傾向は異なるが、アルコール燃料の発生熱量あたりの火炎長は、LPGおよび都市ガスよりも大きくなることはなかったことから、これらの気体炭化水素を拡散燃焼させる既存の燃焼器にアルコール蒸気を用いたとしても、燃焼室寸法を大幅に変更することなく、同等あるいはそれ以上の熱負荷を得ることが可能である。

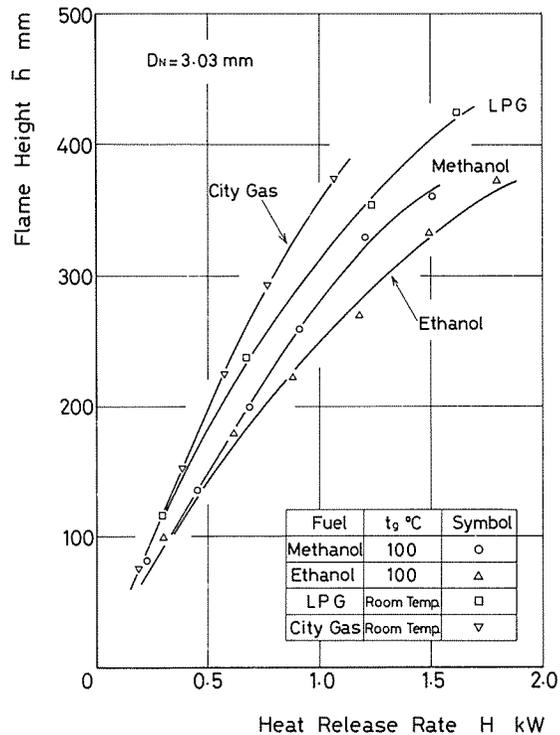


図13 LPG および都市ガスとの比較 ( $D_N = 3.03\text{mm}$ )

#### 4. 結 言

メタノールおよびエタノール蒸気を燃料とする開放拡散火炎の火炎長に関して、明らかとなった点を要約すると次のとおりである。

- (1) メタノールおよびエタノールの火炎長を支配する要因は、気体炭化水素の場合と本質的に同じと考えられる。ただし、層流域での火炎長は、蒸気体積流量のみならず、ノズル径に対しても若干の依存性を示す。
- (2) 蒸気温度が100°Cにおける遷移レイノルズ数は、メタノールではおおよそ2,700~3,000、エタノールで2,600~3,000となる。乱流域の火炎長をノズル径で除した値は、メタノールで約115、エタノールで約155となる。
- (3) 蒸気質量流量が一定の条件では、火炎長は蒸気温度によらず一定値となる。
- (4) 含水アルコールの体積流量あたりの火炎長は、含水率が増すほど減少する。アルコール蒸気の正味体積流量が一定の場合には、それに添加する水蒸気量を変えても、量論混合比と体積流量とのバランスにより火炎長は一定値となる。
- (5) 発生熱量あたりの火炎長は、LPGあるいは都市ガスよりも大きくなることはない。したがって、これらの気体炭化水素を拡散燃焼させる既存の燃焼器にアルコール蒸気を代用したとしても、燃焼室寸法を大幅に変更することなく、同等、あるいはそれ以上の熱負荷を得ることが可能である。

## 参 考 文 献

- 1) 辻正一：燃烧機器工学（1971），p. 13，日刊工業新聞社。
- 2) Burke, S. P. and Schumann, T. E. W. : 1st and 2nd Symp. (Int.) on Comb., (1965), p. 2~11.
- 3) Hottel, H. C. and Hawthorne, W. R. : 3rd Symp. (Int.) on Comb., (1949), p. 254~265.
- 4) Hawthorne, W. R., et. al. : 3rd Symp. (Int.) on Comb. (1949), p. 266~288.
- 5) Wohl, K., et. al. : 3rd Symp. (Int.) on Comb., (1949), p. 288~300.
- 6) 水谷幸夫，ほか2名：日機論，44-385，(1978)，p. 3177~3189.
- 7) 徳本恒徳：第18回燃烧シンポジウム前刷集，(1980)，p. 82~84.
- 8) Lewis, B. and von Elbe, G. : Combustion, Flames and Explosion of Gases (1961), p. 468, Academic Press.
- 9) 佐藤一雄：物性定数推算法（1968），p. 129，丸善。
- 10) 水谷幸夫：燃烧工学（1977），付録C，森北出版。