

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：33603

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22310105

研究課題名（和文） 高速で噴出する拡散火炎（バックドラフト時の火炎）の性状の計測とモデリング

研究課題名（英文） Flame Behavior and Thermal Properties of a Jet Flame with a High Initial Discharging Velocity

## 研究代表者

須川 修身（SUGAWA OSAMI）

諏訪東京理科大学・システム工学部・教授

研究者番号：60162856

研究成果の概要（和文）：区画火災時に火災室内でフラッシュオーバーやバックドラフトが起こると、800°C 近い高温の火炎および熱気流が窓などの開口部から噴出する。このときの火炎は瞬間的には 50~100m/s 程度の比較的大きな初速度を持って火災室から水平に打ち出される。火炎高さに関して断片的な知見しか得られておらず、延焼危険性の評価も経験則に依っているところが多い。そこで本研究は、高速で噴出する拡散火炎の性状を把握することを目的として研究を行った。火炎噴射装置から発生させた火炎の高さ、温度および放射熱を計測した。燃料として、液体燃料を用いた。ノズル径と不活性ガスの圧力の組合せにより発熱速度を制御した。噴射装置架台は 0°~90°（0°：噴射方向が水平方向）の範囲で任意に傾きを設定した。その結果、90°の場合、火炎高さは、 $Q^* > 10^6$  の範囲でも、無次元数  $R_M$  の値が 0.1 より小さい場合は、火炎高さは  $Q^{*2/5}$  に比例して高くなった。また火炎中心軸上の温度減衰を、McCaffrey モデル（低速拡散火炎）と比較すると、本実験では温度減衰の開始点が  $z/Q^{*2/5} = 0.15\sim 0.20$  付近であり、McCaffrey モデルよりも遠くなった。しかし、温度減衰が始まると、温度は距離に対して McCaffrey モデルよりも急速に低下する傾向を示した。一方で、高速で噴出する拡散火炎の中心軸上の温度減衰、水平方向の温度分布、熱流束の水平分布は、いずれも発熱速度の変化に対して相似性が保存されていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate flame behavior and thermal properties of the jet flame with comparatively high initial velocity, a series of experiments was carried out. The jet flame was made vertically in the present experiment, and to investigate the influence of the flame formation direction on the flame behavior and thermal properties, present experimental datum were compared with the datum of the flame length and temperature of hydrogen jet flame in reference. The fuel releasing time and the mass flow rate of fuel were varied as experimental conditions. At least one second is necessary to reach a quasi steady state for the height of the jet flame with comparatively high initial velocity, and at least three seconds is necessary for the temperature around the jet flame. The range that the flame height (flame formation direction: vertical) and/or flame length (flame formation direction: horizontal) depend on the  $Q^{*2/5}$  and the range that the flame height and/or flame length don't depend on the heat release rate can be divided by the range of  $R_M$  which implies the ratio of the gas release momentum to the momentum generated by a purely buoyant diffusion flame, regardless of the range of  $Q^*$ . The temperature along the central axis of the jet flame maintains similarity with the change of the heat release rate. The starting point of the temperature decrease was moved further position from the fire source which was the outlet of the fuel releasing nozzle. But once the temperature decrease starts, the temperature decreased more rapid than McCaffrey's relation. The empirical formulae on the temperature along the central axis of the jet flame were developed which can predict regardless of the formation direction of the jet flame.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2012年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、社会システム工学・安全システム

キーワード：火災、バックドラフト、噴出時火炎、乱流拡散火炎、火炎性状、物理モデル、噴出角度、液体燃料

1. 研究開始当初の背景

- (a) 近年、住宅の気密性、断熱対策や窓材料性能の向上により、窓ガラスや窓枠の強度が増してきている。そのため、火災室内でフラッシュオーバーが発生したり、窓が割れ火炎が噴射するバックドラフトが生じることがある。バックドラフト直後は、水平もしくは水平から斜め上に放出する火炎が発生し、この場合火炎長は5~10m程度となり、隣接家屋への延焼の危険性が高まる。現在、バックドラフトやフラッシュオーバーの発生機構に関する研究(科研費課題番号：03F03246、09650643など)や、開口部からの噴出火炎が建物壁に沿って上階延焼する現象に関する研究(科研費課題番号：07650694など)は多数行われている。しかし、バックドラフト直後に形成される高速噴出火炎による隣接家屋への熱的影響については、検討しきれていない)。
- (b) ガス管や石油パイプラインなどのような可燃性ガス輸送設備に亀裂や破断が起きた場合、燃料が高圧で噴射し、これが着火するとBLEVEとなる場合があり、高速で噴出された拡散火炎が形成され大きな被害をもたらす。例えば、2005年2月に東京都北区の温泉掘削現場で発生した天然ガスの火災では、鎮火まで24時間以上を要し、この間高速で噴出する拡散火炎が形成し続け、火炎の長さは最高で20mにも達し、消火は困難をきわめた。
- (c) 火炎の形状については、プール火炎からジェット火炎まで様々な研究がなされている。温度分布、速度分布については、プール火炎の場合について以前から多数の研究が成されており、モデル化もされている。しかし、高速噴出の拡散火炎の温度および速度分布については研究されておらず、それらの性状については不明である。
- (d) 高速噴出の拡散火炎形状に関する研究は過去に実施されているが、プロパンまたは水素ガスのように噴出後はガスとなる物質を対象としたものや、エンジンフレーム

などのように、制御可能なジェット火炎を対象としたものが殆どである。

- (e) 高速で噴出する拡散火炎は、有効に制御することにより、乾燥蒸発工程など工業的に幅広い分野への応用が可能である。さらに、舞台などの演出効果としても幅広く利用されている。

2. 研究の目的

可燃性液体および圧縮気体を燃料とし、高速で噴出される乱流拡散火炎(以下、高速噴出火炎と表記する)の形状、温度、形成位置、周囲への熱負荷などといった挙動について詳細な実験的かつ理論的な研究を実施する。これにより火災安全性を高めると共に、高速噴出火炎を有効に制御し安全に利用する技術の構築をめざし、高速噴出火炎性状のモデリングを行う。さらに、燃料ガスの噴出角度が火炎形状に及ぼす影響にも着目し、実験的に検討を行う。

3. 研究の方法

3.1 実験装置および実験方法

(1) 火炎発生機器

火炎は、実際に舞台演出において使用されている機器を用いて発生させた。この機器は燃料を不活性ガスで押し出す構造になっており、押し出す不活性ガス(窒素ガス)の圧力とノズル径の組み合わせによって噴射流量の調節が可能である。使用した燃料はイソパラフィン系溶剤(密度0.789 kg/m<sup>3</sup>, 引火点86℃, 低位発熱量47.1×10<sup>3</sup> kJ/kg)とした。火炎発生機器は、噴射角度を0~90°(0°:噴射方向が水平方向)の範囲で人に傾斜させることができる。着火は、ノズル出口上部3cmの位置に取り付けた電気スパークにより行った。

(2) 火炎形状の計測

火炎形状(火炎高さ)を計測するために、高速度デジタルビデオカメラ(SANYO製 Xacti, HD1010)を用いて、フレーム速度300fps(15万画素)にて火炎を撮影した。さらに、赤外線サーモカメラ(NEC Avio製サーモ

トレーサ TH9100WB)にて火炎および火炎周囲の熱画像を取得した。

### (3) 温度および熱流束の計測

火炎周囲の温度を、線径 0.32 mm の K 型熱電対にて 41 点、熱流束を Vatell 社製サーモゲージ (TG-2000) 7 点及び MEDTHERM 社製熱流計 (MODEL32-5-18) 5 点を用いて計 12 点、それぞれ計測した。火炎発生機器の燃料噴射ノズルの位置を基準として、水平方向に 3 m、高さ方向に 5 m の範囲を計測範囲とした。

熱電対および熱流束センサー類は、鉄筋棒および番線の所定の位置に取り付けて支持した。熱電対および熱流束センサーからの出力値は、横河電機製データコレクタ MW100 を用いて記録した。記録間隔は 500 ms (温度) および 50 ms (熱流束) とした。

### 3.2 実験条件

実験条件として燃料の噴射流量と噴射時間を変化させた。噴射流量は燃料の噴射圧力によって調節した。噴出圧力を 0.4, 0.8, 1.2, 1.5 MPa の 4 段階、噴射角度を 0°, 30°, 45°, 60°, 90° の 5 段階に変化させた。

### 3.3 発熱速度の算出法

噴射された燃料の発熱速度は、ベルヌーイの定理に基づいて(1)式により求めた。

$$Q = \Delta h_c \cdot \rho \cdot q_v = \Delta h_c \cdot \rho \cdot C_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

ただし、 $C_0$ : 流量係数 [-],  $d$ : ノズル直径 [m],  $h_c$ : 燃料の単位重量当たり発熱量 [kJ/kg],  $p$ : 噴射圧力 (ゲージ圧) [Pa],  $Q$ : 発熱速度 [kW],  $q_v$ : 体積流量 [m<sup>3</sup>/s],  $\rho$ : 燃料の密度 [kg/m<sup>3</sup>]である。

## 4. 研究成果

### 4.1 角度 90° の場合

#### (1) 火炎高さ

高速度デジタルビデオカメラにて撮影した動画を静止画像に分解し、火炎高さが準定常状態とみなせる時間帯の連続した 10 フレームの画像から火炎高さを読み取った。図 1 に火炎画像の一例を示す。噴射時間が 1 秒以上あれば、火炎はほぼ棒状に形成され、その高さは噴射時間に依存せず発熱速度ごとにほぼ一定であった。

一般に火炎高さは無次元発熱速度  $Q^*$  に比例する。ただし本実験での  $Q^*$  の値は  $Q^* > 10^6$  の範囲であり、この領域では火炎高さは  $Q^*$  に依存せずほぼ一定になることが示され

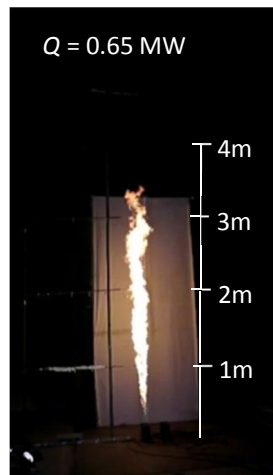


図 1 火炎形状

ている[1]。本実験での火炎高さ  $L_M$  の値を、火炎高さと  $Q^*$  に関する既存の関係図[1]上にプロットしたものが図 2 である。これから明らかなように、文献[1]の関係に反して、本実験で得られた火炎高さは  $Q^{*2/5}$  に比例し、破線で示したように  $Q^* < 10^6$  の範囲での火炎高さと  $Q^*$  の関係がそのまま継承されると読み取れる。

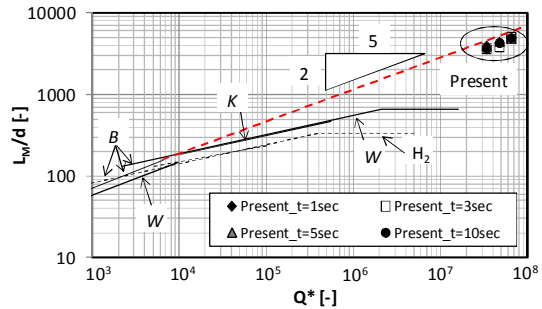


図 2 火炎高さと無次元発熱速度の関係  
W: Hawthorne et al [2], B: Becker and Liang [3], K: Kalghatgi [4]

ところで、Heskestad [5]は初速度が殆どなく浮力駆動で立ち上がる火炎について構築した火炎高さと発熱速度の関係に、ガスの噴出に伴う運動量と浮力による運動量の比を表す無次元数  $R_M$

$$R_M = 1.36 \left[ \frac{T_\infty}{T_L} \right] \cdot \left[ \frac{c_p \Delta T_L}{(H_c/r)} \right]^{4/5} \cdot \left[ \frac{\rho_\infty / \rho_s}{r^2} \right] \cdot N^{2/5} \quad (2)$$

$$\text{ただし、} N = \left[ \frac{c_p T_\infty}{g \rho_\infty^2 (H_c/r)^3} \right] \cdot \frac{Q^2}{d^5} \quad (3)$$

を導入し、初速度を持つ火炎の高さと浮力駆動火炎の火炎高さの比が無次元数  $R_M$  にて整理できることを示している。そこで、本実験で得られた火炎高さを、 $R_M$  に対してプロットしたものが図 3 である。図 3 の縦軸は噴出時火炎の高さ  $L_M$  を同じ発熱速度における浮力駆動の火炎の高さ  $L_B$  にて規格化した値であり、 $L_B$  は Heskestad [6]の式

$$L_B/d = -1.02 + 15.6N^{1/5} \quad (4)$$

にて求められる。

図 3 で、無次元数  $R_M$  の値が大きくなることは、噴射された燃料の運動量が大きくなることを意味するが、 $R_M > 0.1$  の範囲では  $L_M/L_B$  の値が  $R_M$  に対して -1/2 乗に比例して減衰している。これは式(2)~(4)から、 $L_M/d$  が発熱速度に依存せず一定値を保つことと同値であるから、図 3 は燃料の流速の増加に伴い運動量が大きくなると、火炎高さがほぼ一定になることを示しており、図 2 の  $Q^* > 10^6$  の範囲での従来の性状に一致する。 $R_M < 0.1$  の範囲では、 $R_M$  の値の変化に

対して  $L_M/L_B$  の値はほぼ一定値を示しているが、式(1)~(3)から、このとき  $L_M \propto Q^{*2/5}$  となり、図2の  $Q^* < 10^6$  での火炎高さと  $Q^*$  の関係に一致する。本実験での結果は、図3に示したように  $R_M < 0.1$  の範囲にあり、図2のように  $L_M$  は  $Q^{*2/5}$  に比例したから、 $Q^* > 10^6$  であっても  $R_M$  値の採る範囲によっては、 $L_M/d$  は一律に一定ではなく、 $Q^*$  に依存することが実験・次元解析の両面から示されたことになる。

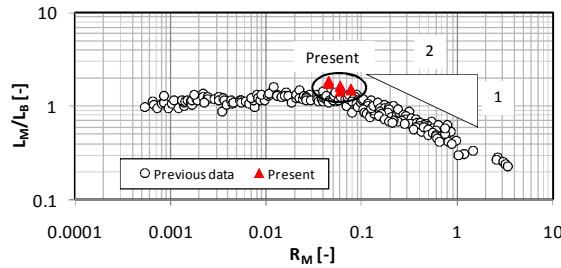


図3 火炎高さと無次元数  $R_M$  の関係

本研究で使用した噴射ノズルは、既往の実験よりも比較的小さいため、 $Q^*$  が大きいても実際に噴射された燃料の質量流量（すなわち発熱速度）は同じ  $Q^*$  値を採る従来の実験よりも小さい。このため噴射された燃料の運動量は、既往の実験に比べて小さくなり、 $R_M = 0.1$  に達しなかったために、火炎高さが  $Q^{*2/5}$  に比例する  $Q^* < 10^6$  での性質がまだ継承されていたと考えられる。噴出ノズルの径が非常に小さい場合、噴出方向（鉛直方向）以外の領域への燃料の拡散が比較的小さいと考えられることも、火炎高さが発熱速度に依存して高くなった1つの要因と考えられる。

#### (2) 火炎中心軸に沿った温度減衰

浮力駆動の火炎における、火源中心軸に沿った温度減衰の整理手法にならって、 $z/Q^{2/5}$  にて火源中心軸上温度  $T_0$  との関係を整理した結果を図4に示す。比較のため、McCaffreyにより報告されている関係式[7]を併記した。発熱速度の大小に関係なく、温度上昇が1つの曲線上に集まった。従って初速度を持った火炎の、火源中心軸に沿った温度上昇と距離の関係は、発熱速度が変化しても相似性が保存されていることが分かる。

McCaffrey の関係と比較すると、本実験では温度減衰の開始点が  $z/Q^{2/5} = 0.15 \sim 0.20$  付近であり、McCaffrey の結果よりも遠くなった。しかし、ひとたび温度減衰が始まると、温度は距離に対して McCaffrey の関係よりも急速に低下する傾向を示した。これは、浮力駆動の火炎に比べて、火源近傍での燃料の慣性力が大きくなるために、連続火炎領域が拡大し、間歇火炎領域が縮退したためと考えられる。

図5は噴射時間3秒における火源中心軸から水平方向への温度分布を示したものである。噴射時間3秒以上では、プロットがほぼ1つの曲線上に集まり、水平方向の温度分布に対しても、発熱速度の変化に対して相似性が保存されていることが確認できた。  $T/T_0 > 1$  となるプロットが数点あるが、これは  $z = 5$  m の場合のものであり、火炎の揺らぎ等によって火源中心軸から水平方向へ25 cm離れた地点の温度が高くなったためである。ただしこの高さでの  $T_0$  は最大でも80 K程度であった。

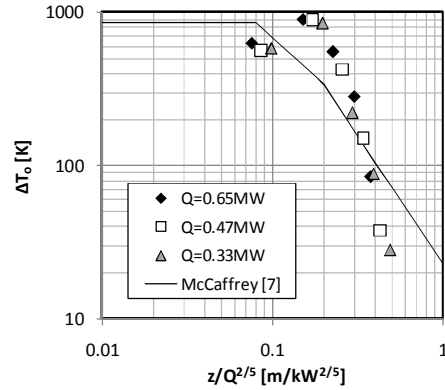


図4 火源中心軸に沿った温度減衰

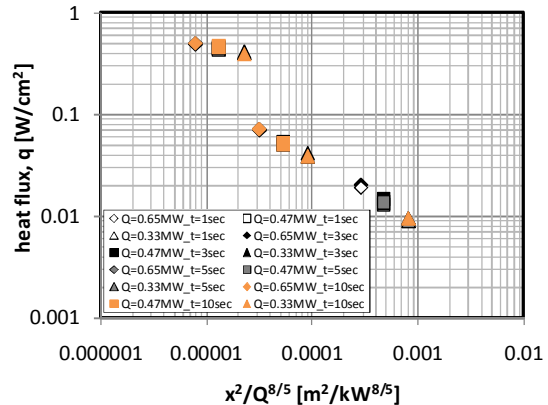
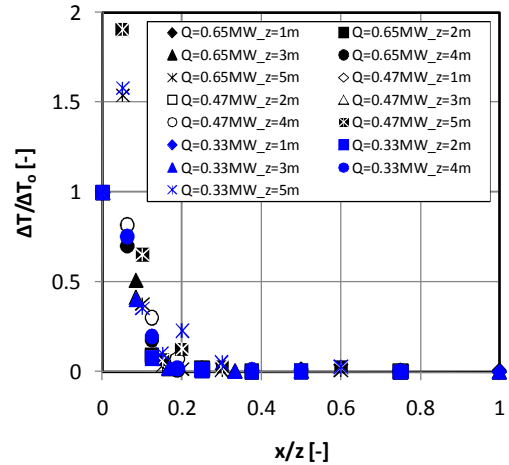


図6 水平方向の熱流束分布 ( $z = 1$  m)

### (3) 熱流束性状

高さ  $z = 1 \text{ m}$  における水平方向の熱流束分布を、水平方向への距離を  $x^2/Q^{0.5}$  にて整理した結果が図 6 である。発熱速度に依存せず 1 つの曲線上にプロットが集まった。すなわち、熱流束の水平分布についても発熱速度の変化に依存せず相似性が保持されていることが分かった。この性状は、いずれの高さでも確認できた。

### 4.2 角度と火炎形状の関係

噴射角度が  $90^\circ$  (鉛直上方) 未満の場合、液体燃料を使用した場合の火炎は、図 7 に示すように、噴射速度と液滴径に依存する慣性力によって噴射された燃料液滴が、

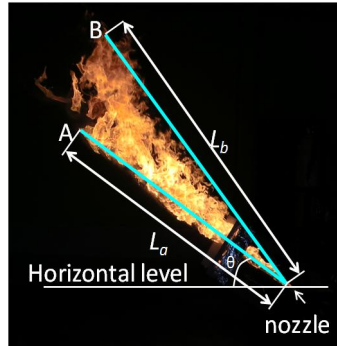


図 7 火炎形状の定義

噴射方向へ直線的に火炎を形成する領域と、燃焼によって生じた鉛直上向きの浮力によって、慣性力と浮力の合力方向へ湾曲する領域とが、分離して現れる。そこで、図 7 に示したように、ノズルから A 点及び B 点までの長さ  $L_a$ ,  $L_b$  を、それぞれ慣性力優位領域の火炎長さ、浮力優位領域の火炎長さとして便宜的に呼ぶことにする。噴射角度  $90^\circ$  の場合は、燃料液滴の慣性力と浮力の向きが同じなので、火炎長さは  $L_a$  と  $L_b$  の相互作用によって決まる。

図 8 に、 $L_a$ ,  $L_b$  と無次元発熱速度  $Q^*$  の関係を示す。噴射角度  $90^\circ$  での火炎長さ  $L_{f,90^\circ}$  は、便宜的に  $L_a$  のグラフに掲載した。

$L_a$ ,  $L_b$  ともに、昨年度の結果 (噴射角度  $90^\circ$  のみ実施) と同様に、発熱速度が大きくなるに従って伸びているが、 $L_a$  は、 $Q^* < 10^6$  の範囲での性状を受け継いで、 $Q^{*2.5}$  に比例しているのに対し、 $L_b$  は、 $Q^{*2.3}$  に比例した。これは、噴射角度に依らず認められた。

図 9 は、 $L_a$ ,  $L_b$  と噴射角度の関係を示したものである。まず、 $L_a$  についてみると、全体的には、噴射角度が大きくなるに従って、 $L_a$  が伸びている傾向が見られた。ただし、噴射圧力  $0.4 \text{ MPa}$  の場合は、噴射角度  $45^\circ$  までは角度に依存せずほぼ一定値をとり、 $45^\circ$  より角度が大きくなるにつれて伸びる傾向を示しているが、噴射圧力  $1.5 \text{ MPa}$  の場合には、噴射角度  $30^\circ$  までは伸びが認められるものの、 $30^\circ \sim 60^\circ$  で、ほぼ一定値をと

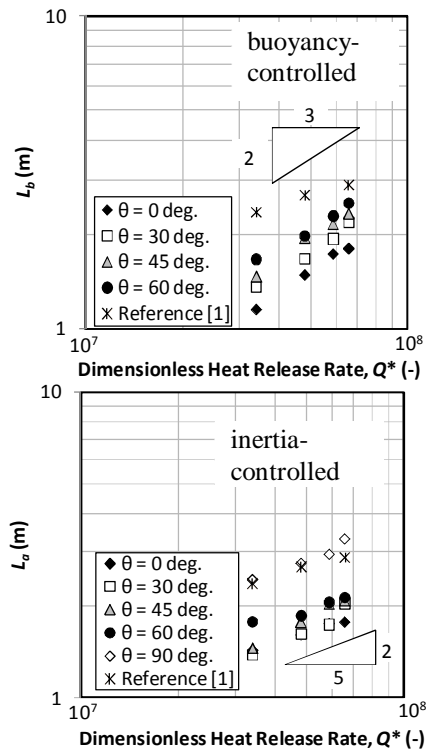


図 8 火炎長さと発熱速度の関係

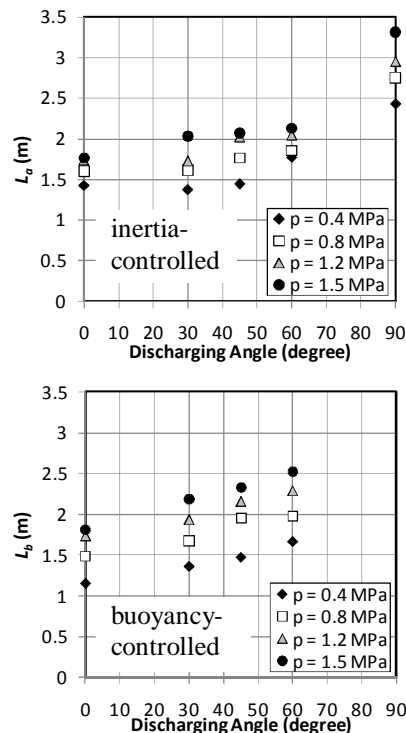


図 9 火炎長さと噴射角度の関係

るなど、噴射圧力によって噴射角度への依存性に相違が見られる。 $L_b$  については、いずれの噴射圧力 (発熱速度) の場合も、噴射角度が大きくなるに従って単調に伸びる傾向が認められた。

本研究で着目した  $L_a$  及び  $L_b$  は、それぞれ慣性力優位、浮力優位の火炎長さではあるが、それぞれ相互作用を受けていると考え

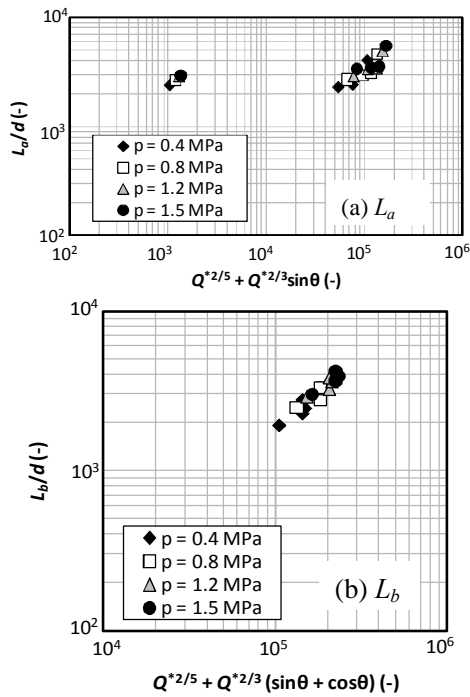


図 10  $L_a/d, L_b/d$  と組み合わせ関数の関係られる。火炎に働く慣性力は、本実験系では理論的には噴射圧力（発熱速度）のみに依存する。図 8 の結果と併せて考えると、 $L_a$  と  $Q^*$  の間に以下の関係が成り立つと推測される。なお一般化のため、 $L_a$  をノズル径  $d$  で規格化した。

$$L_a/d \propto Q^{*2/5} \quad (5)$$

$L_b$  は  $L_a$  を底辺とする線火源上に形成された火炎とみなすと、 $L_a$  の法線方向には、 $Q^{*2/3}$  に比例する浮力が発生していると考えられる。この浮力成分により、慣性力優位領域の火炎が浮力優位領域の火炎方向へ引っ張られると考えると、 $L_a$  は (5) 式を考慮して

$$L_a/d \propto Q^{*2/5} + Q^{*2/3} \sin\theta \quad (6)$$

と書ける。 $L_b$  については、 $L_a$  を底辺とする浮力によって上方向へ伸びると考えると、 $L_a$  と線分 AB の和として表せるので、(2) 式から、

$$L_b/d \propto Q^{*2/5} + Q^{*2/3} (\sin\theta + \cos\theta) \quad (7)$$

と書ける。図 10 は、 $L_a/d, L_b/d$  をそれぞれ (6) 式及び (7) 式で得た組み合わせ関数に対してプロットしたものであり、概ね 1 つの関係上にプロットが集まってきた。このことから、簡易的には、(5) ~ (7) 式の関係を用いて高速噴出時火炎の長さを整理できることが示唆された。ただし、例えば図 10(a) で、 $Q^{*2/5} + Q^{*2/3} \sin\theta = 1000$  付近に、その他のグループから大きく離れてプロットされているのは、 $\theta = 0^\circ$  でのデータであるが、これは、火炎長さに及ぼす慣性力と浮力の寄与度を厳密に分離できていないためであると考えられ、更なる検討が必要である。ま

た、厳密に求めるためには、液滴径や液滴の粘度、比熱等を考慮したモデルを構築する必要がある。

参考文献

- [1] McCaffrey, B.J.: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Section 2, 1995.
- [2] Hawthorne, W.R., Weddell, D.S. and Hottel, H.C.: Proc. of Third Int'l. Symp. on Combustion, Flame and Explosion Phenomena, pp.266-288, 1949.
- [3] Becker, H.A. and Liang, D.: Combustion and Flame, Vol.32, pp.115-137, 1978.
- [4] Kalghatgi, G.T.: Combustion Science and Technology, Vol.41, pp.17-29, 1984.
- [5] Heskestad, G.: Combustion and Flame, Vol.118, pp.51-60, 1999.
- [6] Heskestad, G.: Fire Safety Journal, Vol.5, pp.103-108, 1983.
- [7] McCaffrey, B.J.: NBSIR79-1910, 1979.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Tomohiko Imamura, Osami Sugawa, Kyoko Kamiya, Yasushi Oka, Tosimitsu Suzuki and Yutaka Yamamoto :  $\delta$ Flame Height of a Turbulent Diffusion Jet Flame with a Comparatively High Initial Discharging Velocity, Journal of Fire Science and Technology, Vol.29, pp. 15-26, 2011.
- ② Tomohiko Imamura, Osami Sugawa, Kyoko Kamiya, Yasushi Oka, Tosimitsu Suzuki and Yutaka Yamamoto :  $\delta$ Flame Behavior and Thermal Properties of a Jet Flame with a High Initial Discharging Velocity, Proceedings of 8th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, CD-ROM, 2011.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 須川修身, 今村友彦, 上矢恭子, 鈴木俊光, 山本豊 :  $\delta$ 比較的大きな初速度を持つ噴出時火炎の性状その 1 実験概要, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.216-217, 2010.
- ② 今村友彦, 須川修身, 上矢恭子, 鈴木俊光, 山本豊 :  $\delta$ 比較的大きな初速度を持つ噴出時火炎の性状その 1 実験結果及び考察, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.218-219, 2010.
- ③ 今村友彦, 塚原瑞貴, 石川亮, 須川修身, 上矢恭子 : “高速噴出時火炎の形状に及ぼす噴出角度の影響”, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.314-315, 2011.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

須川 修身 (SUGAWA OSAMI)

諏訪東京理科大学・システム工学部・教授  
研究者番号 : 60162856

### (2) 研究分担者

今村 友彦 (IMAMURA TOMOHIKO)

諏訪東京理科大学・システム工学部・助教  
研究者番号 : 50450664