

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：33603
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2011～2012
課題番号：23710196
研究課題名（和文） 傾斜面上における火炎及び熱気流の形成メカニズムの解明と工学的モデリング
研究課題名（英文） Investigation and Engineering Modeling of Flame and Hot Current Behaviors formed on Slope Ground
研究代表者 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

研究成果の概要（和文）：傾斜地における火炎及び熱気流性状は、火災安全工学上、最も基本的な性状の1つである。火炎及び熱気流性状に及ぼす発熱速度および傾斜角度の影響を明らかにし、工学的モデルを構築するための一連の実験を行った。火炎長さ L_f 、斜面付着距離 L_a 、火炎高さ H_f 及び火炎傾斜角度 θ_2 を取り上げ、火源形状及び発熱速度、傾斜角度によらず火炎高さ H_f を1つの関係式で表現できる無次元数 Q_{slope}^* を提案した。

研究成果の概要（英文）：Flame behavior on the slope ground is one of the most important property for the fire safety engineering. We conducted a series of experiment to clarify the influence of the heat release rate and slope angle on the behaviors of flame and hot current and to develop the engineering model. We focused on the flame length (L_f), the flame attachment length (L_a), flame tilt angle (θ_2), and flame standing height (H_f). We developed new dimensionless heat release rate (Q_{slope}^*), which can arrange the relation between flame standing height and heat release rate by a simple relation regardless of the shape of fire source and slope angle.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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・事故，傾斜地，火炎，熱気流

1. 研究開始当初の背景

火炎形状や温度・速度性状などに代表される火炎プルーム性状は、消防戦術策定や避難計画等の防火対策立案にあたって最も基礎となる性状である。そのため、火炎プルーム税上の定量的な把握が必須であり、多くの研究者によって精力的な研究が実施されてきた。これにより、無風、有風を問わず体系的な知見が報告され、実用的な予測モデルも提案されている[1]。

しかしながら、例えば林野火災や階段室火災，斜路トンネル内での火災などでは、傾斜を持った平面上に形成された火炎プルームが対象になる場合がある。これについての研

究報告はいくつかあるが[2-4]、水平面上での火炎プルーム並みに性状が解明されているとは言い難い。

2. 研究の目的

本研究では上記の背景に鑑み、傾斜地における火炎プルーム性状を定量的に明らかにすることを目的とする。まず、その第一歩として、傾斜面上に定常的に形成された火炎の形状につき、実験に基づいた定量的な解析にて、これを支配する無次元数の導出を試みた。

3. 研究の方法

本研究は主として実験に基づき行った。以

表 1 実験条件

	Square fire source	Rectangle fire Source	Line fire source
Aspect ratio	1:1 (100 mm x 100 mm)	1:6 (100 mm x 600 mm)	1:60 (10 mm x 600 mm)
HRR (kW)	2.3, 3.0, 3.8, 4.5	13.5, 18.0, 22.5, 27.0	7.5, 12.0, 19.5, 27.0
Non-dimensional HRR (-)	0.64, 0.85, 1.06, 1.28	0.64, 0.85, 1.06, 1.28	11.2, 17.9, 29.1, 40.3

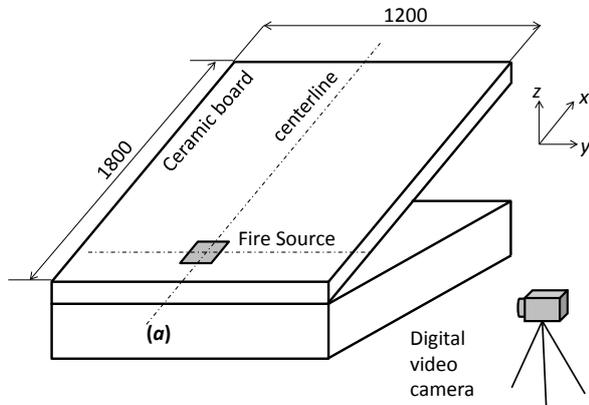


図 1 実験装置 (単位: mm)

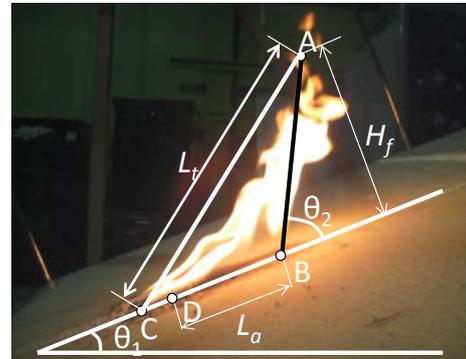


図 2 火炎形状を表すパラメータの定義

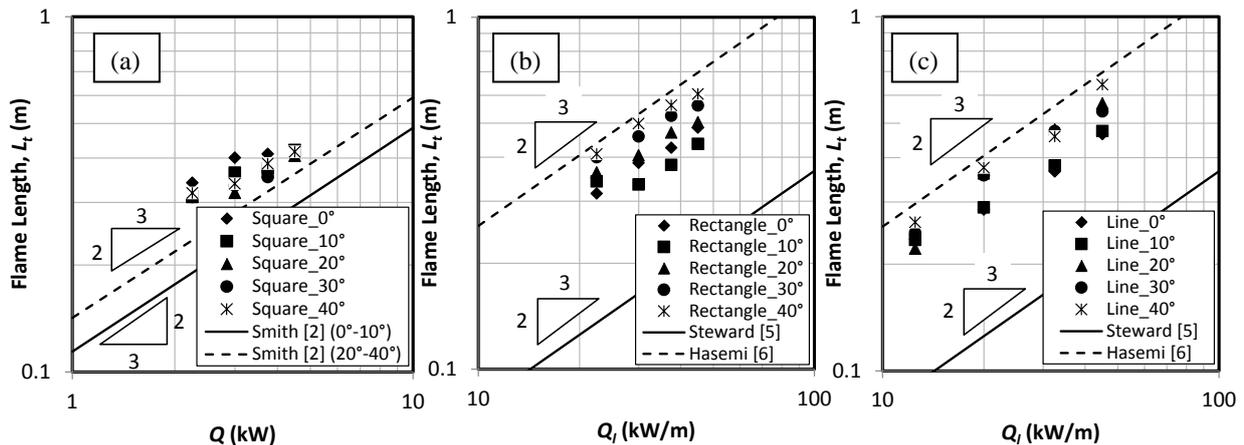


図 3 火炎全体長さ L_t と発熱速度の関係

下、実験方法の詳細について述べる。

3.1 実験装置

H21~22 年度科研費 (研究活動スタート支援, 課題番号 21810032) の援助を受けて製作した、1800 mm×1200 mm の広さを持ち、傾斜角度を $0^\circ \sim 80^\circ$ の範囲で任意に設定できる傾斜架台を用いた。火源には後述の 3 種類の平面ガスバーナーを使用し、火源周囲に断熱セラミックボードを敷き詰めた。火源表面とセラミックボード表面は同じ高さとした。火源としたバーナーの形状は、正方形 (100 mm×100 mm)、線形 (10 mm×600 mm)、矩形 (100 mm×600 mm) である。線形及び矩形火源を使用した実験では、火源中心部付近の火炎が大きく倒れ込み、火源端部付近の火炎が立ち上がるといった 3 次元形状が見られたが、この挙動は非常に複雑であるため、本研究で

はまず 2 次的に形成された火炎を対象とするために、火源端部に 100 mm×600 mm の耐熱ガラスを設置した。

計測項目は、火炎形状及び火炎・熱気流が作り出す温度場とした。火炎形状は、火炎が準定常状態となった時間帯に、デジタルビデオカメラ (SANYO Xacti) にて撮影した。温度場は、3 枚の金網に K 型熱電対 ($\phi 0.65$ mm) を取り付けて、0.9 m (x)×0.6 m (y)×0.7 m (z) の範囲を測定した。なお x, y, z 方向は図 1 に示すとおりに定義する。

実験条件として、発熱速度、傾斜角度を表 1 に示す通り設定した。

3.2 火炎形状の定義

図 2 に示すように、火炎の全体長さ L_t 、火炎附着長さ L_a 、火炎傾斜角度 θ_2 、及び火炎立ち上がり高さ H_f を、火炎形状を表すパラメー

タとして取り上げた。なお、図中 A 点は火炎先端位置、B 点は火炎が斜面から立ち上がる地点、C 点は火源中心、D 点は火源の下流側端部を表し、これらの位置は画像から直接決定した。

4. 研究成果

4.1 傾斜面上での火炎形状

4.1.1 火炎全体長さ L_f

図 3 に、各火源形状における、火炎全体長さ L_f と発熱速度の関係を示す。正方火源の場合 (図 3(a)) は、Smith[2]の結果を比較のために同じグラフに載せてある。本実験での L_f は Smith の結果よりも若干大きな値を示しているものの、発熱速度に対する依存度は Smith のそれとほぼ同等で、 L_f は Q の 2/3 乗に概ね比例している。また、Smith の結果は、傾斜角度 20° 以上の領域では傾斜角度が大きくなるにつれて L_f も伸びる傾向が報告されているが、本実験での結果は必ずしもそうではなかった。これは、Smith の実験とは発熱速度の規模が 1 桁程度異なることが原因の 1 つ

と考えられる。

これに対して、線形及び矩形火源 (図 3(b), (c)) では、傾斜角度 20° を境に、 L_f が傾斜角度に依存して大きくなる傾向が見られた。これは正方火源の場合とは対照的である。Steward[5](傾斜角度 0° に対応) 及び Hasemi[6](傾斜角度 90° に対応) の結果と比較すると、今回の結果は発熱速度に対する依存度は両者とほぼ同じで、絶対値はほぼ両者の間に位置した。

4.1.2 火炎付着長さ L_a

図 4 に、各火源形状における、火炎付着長さ L_a と傾斜角度の関係を示す。比較のため、Wu ら[4]が断熱パネルを傾斜面として使用した実験の結果も合わせて示した。まず正方火源の場合 (図 4(a)) についてみると、 L_a は本研究での発熱速度の範囲内 (2.25-4.5 kW) では、傾斜角度が大きくなるにつれて単調に伸びる傾向を示し、発熱速度にはほとんど依存しなかった。しかし線形及び矩形火源の場合 (図 4(b), (c)) では、特に傾斜角度が 20° よりも大きな領域で、 L_a は傾斜角度のみでなく発

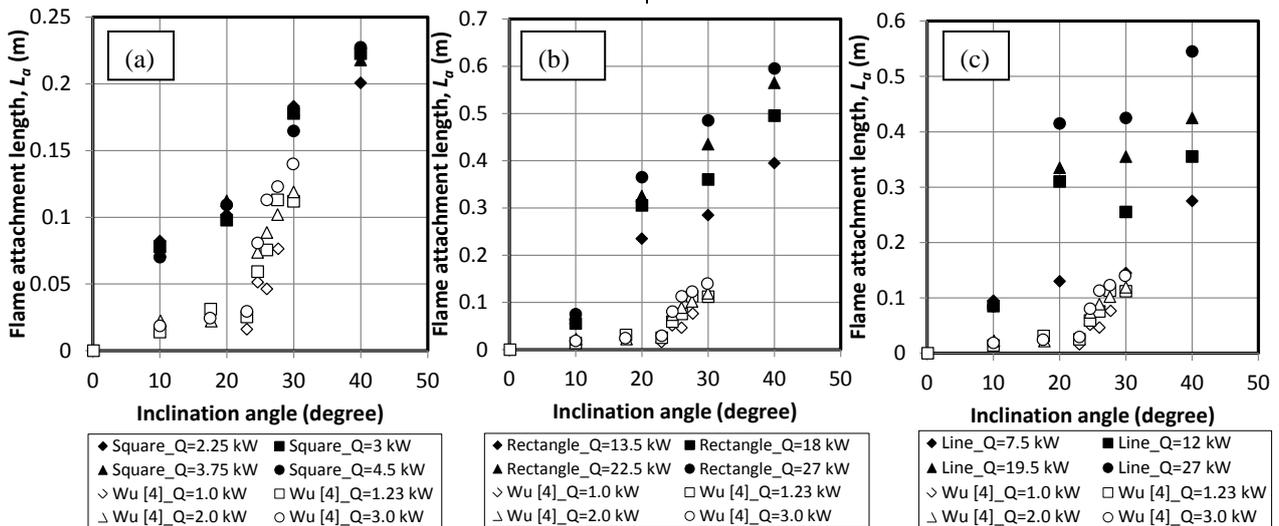


図 4 火炎付着長さ L_a と架台傾斜角度の関係

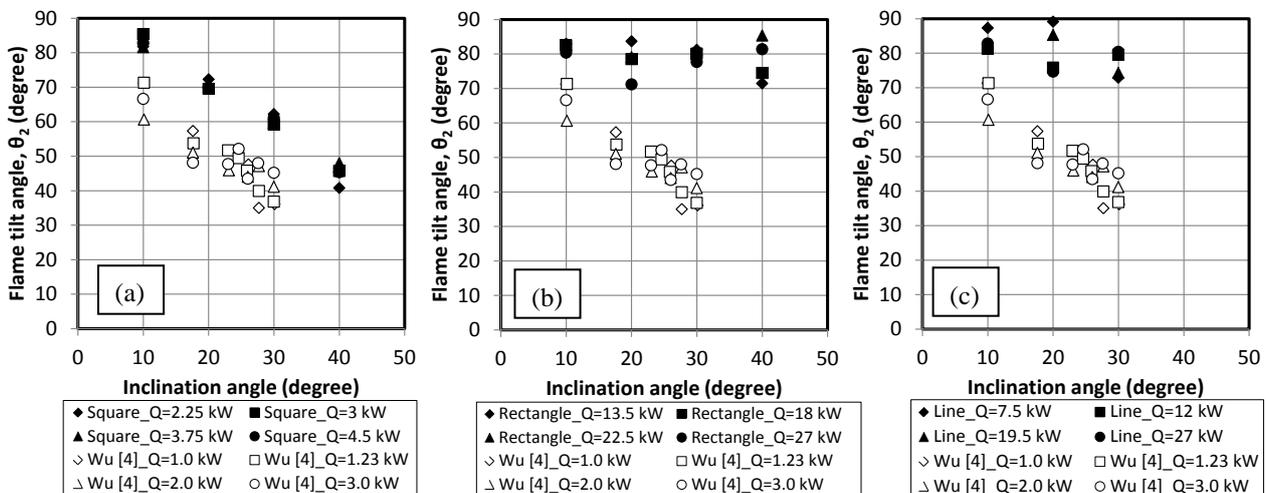


図 5 火炎傾斜角度 θ_2 と架台傾斜角度の関係

熱速度にも依存する傾向が見られた。Wu らは、傾斜角度が 15°を超えると、 L_a が傾斜角度の増加につれて伸びるようになり、特に傾斜角度 24°を超えると、傾斜角度の増加に対する L_a の増分が急激になることを報告している。Drysdale と Macmillan[3]も、PMMA を火源とした実験で、傾斜角度 15°-20°で急激に延焼速度が加速する傾向を報告している。本実験での結果は、これらの傾向すなわち傾斜角度が 15°-20°よりも大きくなると、火炎挙動が大きく変化するという傾向を支持するものと考えられる。

4.1.3 火炎傾斜角度 θ_2

図 5 に、火炎傾斜角度 θ_2 と架台傾斜角度の関係を示す。図 5 にも比較のために Wu ら[4]の結果をプロットしてある。正方火源の場合 (図 5(a)) は、本実験の結果も Wu らの結果と同様に、架台傾斜角度が大きくなるにつれて小さく (すなわち火炎が倒れて) なっていて、発熱速度にはほとんど依存していない。しかしながら線形及び矩形火源の場合 (図 5(b), (c))、火炎傾斜角度は架台傾斜角度にすらほとんど依存していない。これは、Wu らが等温壁を傾斜面として使用した場合の結果と同様の傾向である。

4.1.4 火炎立ち上がり高さ H_f

傾斜面上の火炎の形状は、斜面上下での圧力差に由来して火炎が斜面方向へ倒されるが、これを、あたかも水平面で火炎が横風を受けて吹き倒される場合と類似した性状と考え、水平面上で横風を受けた火炎形状に関する Oka ら[7]の結果と比較することとした。図 6 は火炎立ち上がり高さ H_f を火源寸法 D で無次元化した値 H_f/D と無次元発熱速度 Q^* 及び Q^*_{rec} との関係を示したものである。 Q^*

及び Q^*_{rec} の定義は文献[8]に記載してある。

いずれの火源形状においても、 H_f は発熱速度に依存して長くなり、傾斜角度に依存して短くなっていることが読み取れる。発熱速度に対する依存度は Oka らの結果とほぼ同様であった。正方火源の場合 (図 6(a))、傾斜角度 30°における H_f は、Oka らの横風速度 0.6 m/s での結果におおむね一致した。矩形火源の場合は (図 6(b))、本実験での結果は Oka らの横風速度 2.0 m/s の結果よりも短かった。線形火源の場合 (図 6(c)) は、Oka らの横風速度 0.6 m/s の結果が、本実験での傾斜角度 10°と 20°の間に位置し、横風速度 2.0 m/s での結果が、傾斜角度 40°での結果にほぼ一致した。矩形火源での結果のみ、その他の火源の場合に比べて Oka らの結果より特異的に短くなった理由は現在のところ明確にできていないが、傾斜面での火炎挙動が横風を受けた火炎の挙動と同様の取り扱いで整理できる可能性があることが分かった。

ところで、図 2 に示すように、傾斜面上での火炎は、実際の火源寸法 D と火炎付着長さ L_a を一辺とする見かけ上の火源から発生したものと考え、新たな無次元発熱速度 Q^*_{slope} が以下のように定義できる。

$$Q^*_{slope} = \frac{\dot{Q}}{C_p \rho T_\infty \sqrt{g \cdot (D + L_a)} \cdot D \cdot (D + L_a)} \quad (1)$$

ここで C_p : 比熱[kJ/(kgK)], D : 火源寸法 (矩形・線形火源においては火源短辺) [m], g : 重力加速度[m/s²], T_∞ : 外気温度[K], \dot{Q} : 発熱速度[kW], ρ : 密度[kg/m³]である。これを用いると、火炎立ち上がり高さ H_f は以下のように表せる。

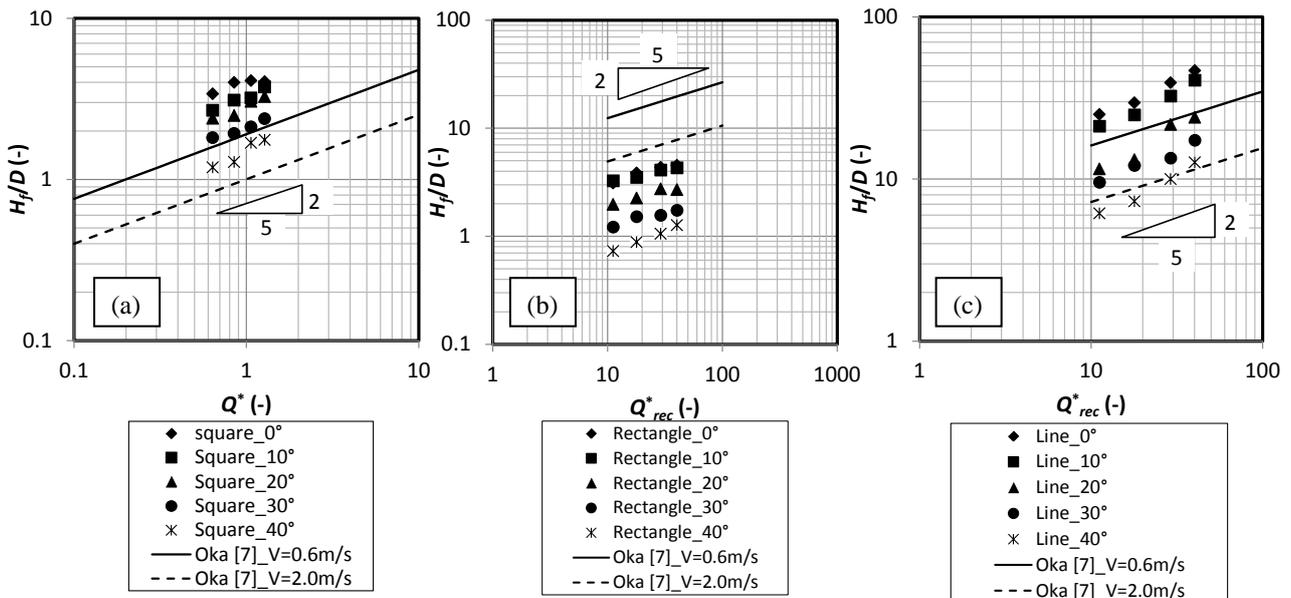


図 6 火炎立ち上がり高さ H_f と無次元発熱速度の関係

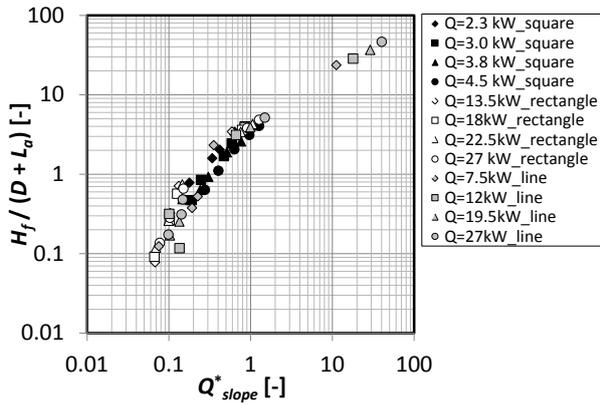


図7 無次元発熱速度 Q^*_{slope} と火炎立ち上がり高さ H_f の関係

$$\frac{H_f}{D+L_a} \propto Q^*_{slope} \quad (2)$$

図7は式(2)に基づき実験データを整理した結果を示したもので、火源形状や傾斜角度に依存せず整理できることがわかる。式(2)を用いて火炎立ち上がり高さ H_f を予測するには、 L_a と発熱速度および傾斜角度の関係をモデリングすることが必要であり、これは今後の課題である。

4.2 火災プルームの温度場

図8は、測定温度をもとに定義した火災プルーム中心軸上の温度を、火源中心軸からの距離 L に対してプロットしたものである。な

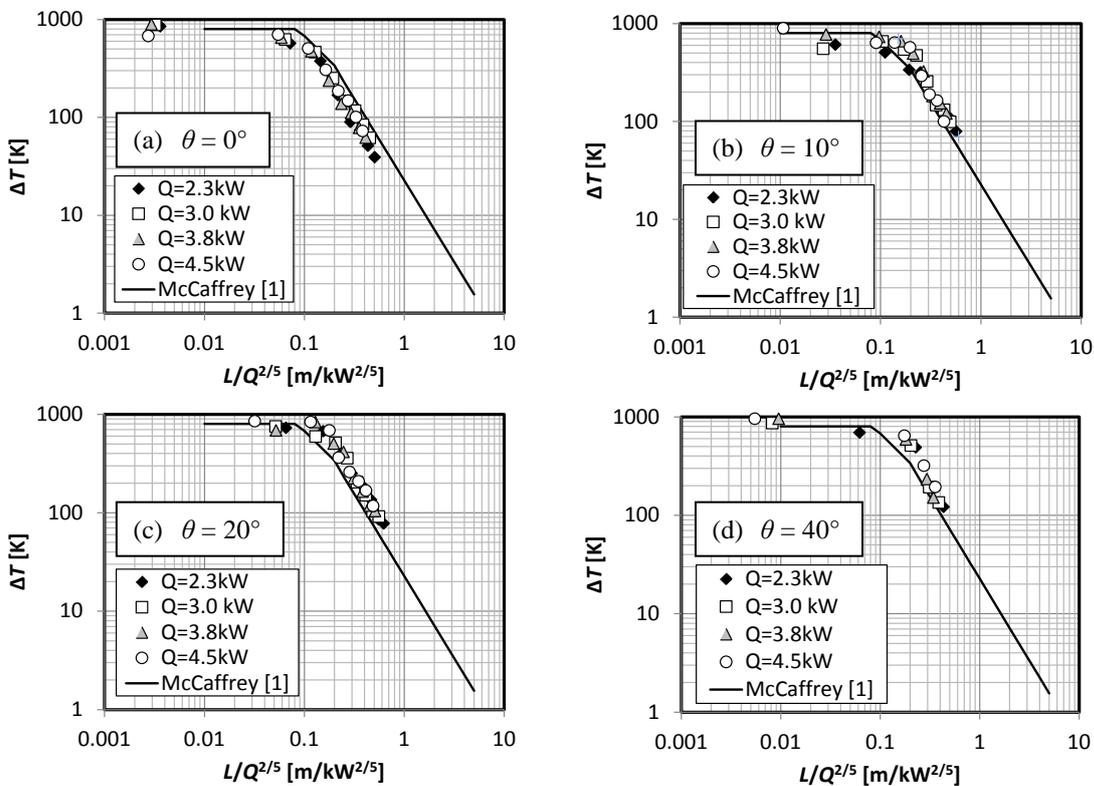


図8 火災プルーム中心軸上温度と距離の関係

お横軸は $Q^{2/5}$ で規格化しており、比較のために McCaffrey の関係[1]を合わせて示している。

いずれの傾斜角度の場合も、発熱速度によらずプロットが1つに集まっていることから、温度については発熱速度の規模に対して相似性が保持されていることがわかる。傾斜角度 0° の場合には、温度減衰の開始点及び温度減衰率ともに McCaffrey のそれによく似た傾向を示しているが、傾斜角度が大きくなるにつれて温度減衰の開始点が下流側に遠ざかる ($L/Q^{2/5} = 0.15$ 付近) 傾向が見られた。しかしこの場合にも、温度減衰率は McCaffrey のそれと大差ない。傾斜角度が大きくなると、火炎が上方に倒れるため、火炎が斜面から離れるまでは温度減衰が緩やかになるが、温度減衰開始後は、斜面の影響はあまり見られなくなると考えられる。

4.3 まとめ

(1) 火炎形状を表すパラメータとして L_f, L_a, θ_2, H_f を取り上げ、それぞれに及ぼす発熱速度および傾斜角度の影響を実験的に検討した。新たな無次元数 Q^*_{slope} を定義し、これにより火源形状や傾斜角度によらず、 H_f と Q^*_{slope} の関係を整理できることを示した。

(2) 測定温度をもとに火源中心軸上の温度上昇と火源中心からの距離の関係について検討した。その結果、傾斜角度が大きくなるにつれて温度減衰の開始点が下流側へ遠ざかること、温度減衰開始後の、温度の距離に対する依存度は水平地でのそれとほぼ同等

であることを明らかにした。

(参考文献)

- [1] 例えば, McCaffrey, B.J.: NBSIR79-1910, 1979.
- [2] Smith, D.A.: Fire Safety Journal, 18, 231-244, 1992.
- [3] Drysdale, D.D. and Macmillan, A.J.R.: Fire Safety Journal, 18, 245-254, 1992.
- [4] Wu, Y., Xing, H.J, and Atkinson, G.T.: Fire Safety Journal, 35, 391-403, 2000.
- [5] Steward, F.R: Combustion and Flame, 8, 171-178, 2964.
- [6] Hasemi, Y.: Fire Science and Technology, 4, 75-90, 1984.
- [7] Oka, Y., Sugawa. O., Imamura, T. and Matsubara, Y.: Proc. of 7th International Symposium on Fire Safety Science, 915-926, 2002.
- [8] Imamura, T., Sugawa, O. and Kamiya, K., Proc. of 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, 2013, in press.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- 1) Imamura, T., Sugawa, O., and Kamiya, K.: “Flame Behaviour on a Plane Slope Ground”, Proc. of the 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, pp.543-552, 2013.

〔学会発表〕(計6件)

- 1) 今村友彦, 須川修身, 山崎裕太: “傾斜面上の火災プルームが形成する温度場”, 平成25年度日本火災学会研究発表会, 熊本, 2013.6.
- 2) Imamura, T., Sugawa, O. and Kamiya, K: “Flame Behaviour on a Plane Slope Ground”, 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Providence, 2013.5.
- 3) 今村友彦, 山崎裕太, 上矢恭子, 須川修身: “傾斜面上に形成された火炎形状”, 平成24年度日本火災学会研究発表会, 宇都宮, 2012.5.
- 4) 山崎裕太, 今村友彦, 須川修身, 上矢恭子, 荻原慎二: “火炎性状に及ぼす火源形状及び傾斜角度の影響”, 第44回安全工学研究発表会, 米沢, 2011.12.
- 5) Yamazaki, Y., Imamura, T., Sugawa, O., Kamiya, K. and Ogihara, S.: “Influences of Fire Source Shapes and Slope Angle on Flame Behavior”, Asia Pacific Symposium on Safety 2011, Jeju, Korea, 2011.10.
- 6) 山崎裕太, 今村友彦, 須川修身, 上矢恭子: “傾斜地における火炎及び熱気流性状”, 平成23年度日本火災学会研究発表会, 東京, 2011.5.

〔その他〕

特記事項なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし