

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：33603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25750139

研究課題名(和文) 傾斜地における火炎・熱気流性状の熱流束予測モデルへの展開

研究課題名(英文) Development of prediction model of heat flux on slope surface considering behaviors of flame and hot current

研究代表者

今村 友彦 (IMAMURA, Tomohiko)

諏訪東京理科大学・工学部・講師

研究者番号：50450664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

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。本研究では、まず火炎ブルーム中心軸を定義して、中心軸上の温度と火源からの距離の関係について検討した。その結果、傾斜角度 10° を境にその性状が大きく変化し、傾斜角度が大きくなるにつれて間欠火炎領域とブルーム領域の区別が温度的につかなくなることを示した。またx方向およびz方向の温度分布については、傾斜角度 10° を境に性状が大きく異なり、z方向の温度分布は傾斜角度が大きくなるにつれてその幅を狭める反面、x方向へはその幅を広げる性状が確認されたとともに、斜面上での温度分布が対数正規分布を仮定して整理できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：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 to develop the prediction model of heat fluxes as the final goal. The temperature decreasing mode along the central axis changed drastically with 10 degrees of inclination angle as a threshold. In the region where the inclination angle is more than 10 degrees, temperature decreasing property which is significant in the intermittent region and it in the plume region could not be distinguished. For the temperature distribution in x-direction and z-direction, behaviors of it also changed drastically with 10 degrees of inclination angle. The width of temperature distribution in z-direction became narrow with the increase of inclination angle, on the other hand, it in x-direction became wider. Furthermore, the experimental data suggested that the temperature distribution in x-direction can be expressed by the lognormal distribution.

研究分野： 燃焼工学

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

消防活動・被害予測・避難計画など、火災安全に関わる全ての分野で、火災及びその上方に形成される高温熱気流（火災プルーム）の形状、温度・速度性状、空気連行挙動等は、その根底をなす基本性状である。そのため、既に理論的・実験的な研究が多数行われ、体系的に確立された知見が得られ、これをもとにした延焼予測モデルもいくつか開発されている。しかし、その多くは平地での火災が対象となっており、斜面上の火災については、主に延焼速度を評価したものがほとんどである。斜面上の火災及び熱気流の形状や周囲の温度場、熱流束分布、空気連行挙動等については未解明の点が多い。

2. 研究の目的

本研究では上記の背景に鑑み、傾斜地における火災プルーム性状について、斜面上の火炎が下流側へ及びす熱流束を予測可能とするモデルを構築することを最終目的とした。そのために、①傾斜面上における火災プルーム中心軸の定義とそれに沿った温度減衰性状、②傾斜面上における火災プルームの温度分布の解明を目標として一連の実験的研究を行った。さらに、熱流束を滞留由来成分と放射由来成分に分離して測定し、実験データの蓄積を目標とした。

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° ～ 80° 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、従来の正方形（100 mm×100 mm）、線形（10 mm×600 mm）、矩形（100 mm×600 mm）に加え、円形（直径 150mm）を使用した。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に加え、円形火源では放射熱流束と対流熱流束を新たに計測した。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

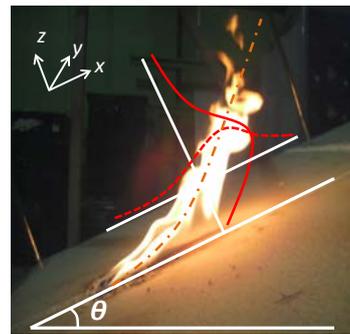


図1 座標系および温度分布の方向の定義

対（φ0.65 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。発熱速度と傾斜角度を実験条件として変化させた。

3.2 諸定義

(1) 火災プルームの中心軸

図1において、各 x 位置における z 方向の温度の最大値を含む3点および、各 z 位置における x 方向の温度の最大値を含む2点から2次関数の頂点の値を求め、その位置を等温度線図上にプロットした。このうち、等温度線図上から読み取れる火災プルーム中心軸の位置におおむね一致するものを、火災プルーム中心軸上の温度 ΔT_{max} 及びその呈示位置の代表値として採用した。

(2) 対象とした温度分布

火災プルームは傾斜の効果によって斜面方向へ倒れ込むので、傾斜した火災プルームを x 軸及び z 軸で切断した断面は、火災プルームの半径方向への広がりをとらえるものではない。従って、無風時に水平面上で形成された火災プルームのように、温度分布が正規分布に従うと仮定する手法は厳密には適用できないと考えられるが、斜面上の観測点から見れば、図1のように座標軸を取って z 方向及び x 方向の温度分布を考える方が工学的に利用しやすい。そこで、 $x-z$ 平面における z 方向及び x 方向の温度分布に注目した。

4. 研究成果

4.1 火炎形状と温度分布

図2は、測定した温度をもとに描いた等温度線図上に、定常的に形成されていた時間帯の火炎の瞬間画像を重ね合わせたものである。いずれの傾斜角度においても、火炎の領域は $\Delta T = 200 - 300$ K の等温度線が示す領域におおむね一致した。この傾向は、水平面上での火炎においても確認されている[1]。

火炎面と空気の境界付近では、空気の巻き込みに伴い、Ito らの結果[2]にもあるように渦が形成される。水平面上で静穏な環境下に火災プルームが形成された場合は、渦は軸対称に形成されるので、図2(a)に示すように等温度線の形状も概ね軸対称の形状を保っていると思われる。しかし火源面が傾斜すると、火炎に生じる慣性力の影響に伴い、火炎は斜

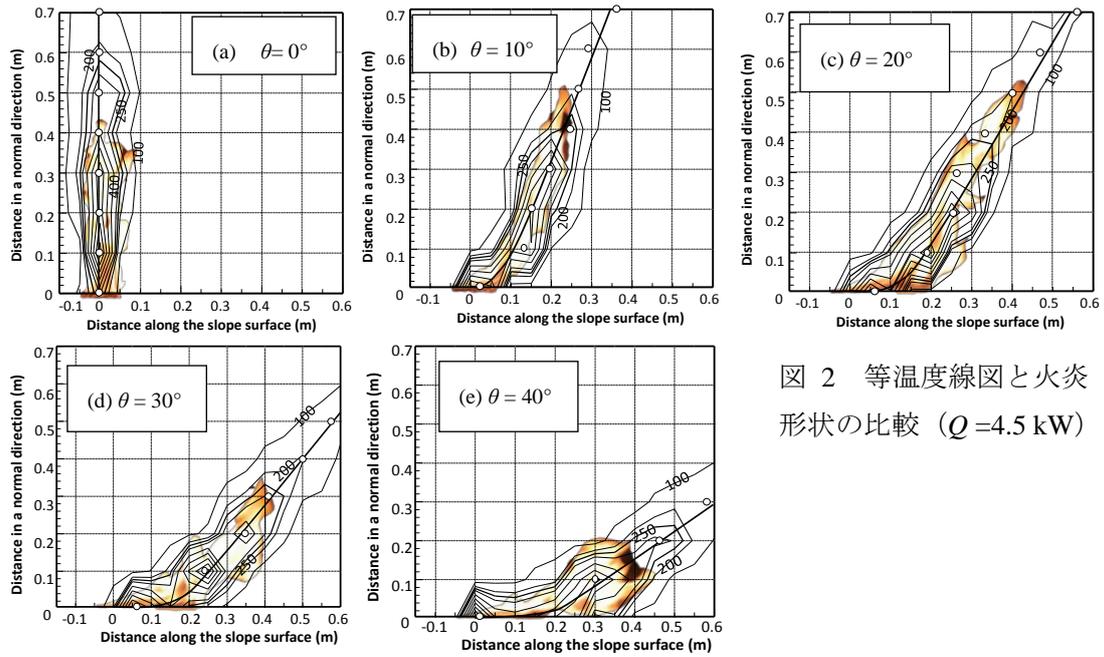


図 2 等温度線図と火炎形状の比較 ($Q = 4.5 \text{ kW}$)

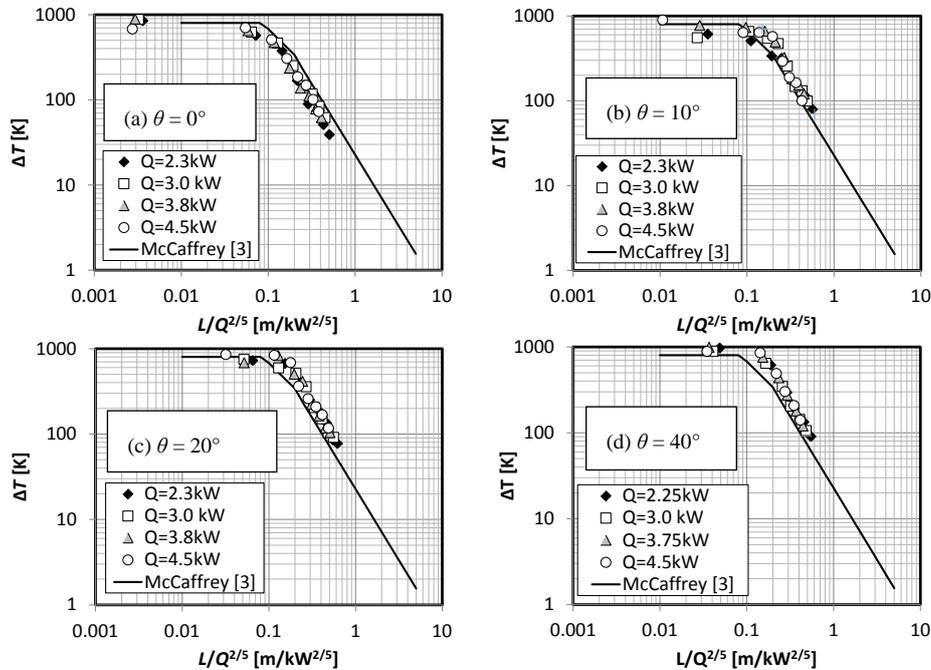


図 3 各傾斜角度における火炎プルーム主軸上の温度減衰

面上方向へ向かって倒れ込むため、上流側と下流側とで空気の巻き込み挙動が異なる。そのため火炎プルーム主軸を中心として非対称な流れ場となり、特に火炎が斜面から離れる領域付近において、図 2(d), (e) でみられるような、渦形状をした高温領域が形成されたものと考えられる。

図 2 中には、火炎プルーム主軸を各等温度線の先端を結んだ曲線で、最高温度呈示位置を○印でそれぞれ示してある。最高温度呈示位置は概ね火炎プルーム主軸に一致している。そこで、傾斜面上の火炎プルームの温度分布を、火炎プルーム主軸の温度を基準にして評価するために、まず火炎プルーム主軸の温度分布に着目した。

4.2 火炎プルーム主軸の温度減衰性状

図 3 は、図 2 中に示した最高温度呈示位置における温度を、火源中心からの距離に対してプロットしたものである。火源中心からの距離 L は、火源中心から最高温度呈示位置までを直線で結んだ長さで表している。これを $Q^{2/5}$ にて規格化し、比較のために McCaffrey の関係式[3]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° の場合は、温度減衰の開始点及び温度減衰率 b (図中の傾き) とともに 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 ($L/Q^{2/5} = 0.15$ 付近まで) 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。つまり、傾斜角度が大きくなると、火炎が上方向に倒れるために、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。

より定量的に調べるために、温度減衰を示している領域を領域 A と領域 B の 2 領域 (それぞれ McCaffrey の定義した間欠火炎およびプルーム領域におおむね相当) に分けて、温度減衰率 b を読み取った。これを傾斜角度に対してプロットしたものが図 4 である。傾斜角度 0° の場合は、文献値[3]を載せてある。傾斜角度 10° までは、 b の値は傾斜角度に対して単調増加の傾向を示した。すなわち、距離に対する温度減衰が緩慢になることを意味する。傾斜角度 10° を境に b の値は減少に転じ、 30° では領域 A と B の b の値がほぼ等しくなった。つまり、 10° までは温度が低下しにくくなるが、傾斜角度がそれ以上に大きくなると、火炎が斜面上に張り付くために距離に対する温度低下は急速になり、 30° 以上ではもはや間欠領域とプルーム領域が一体化して、区別できなくなること示唆している。

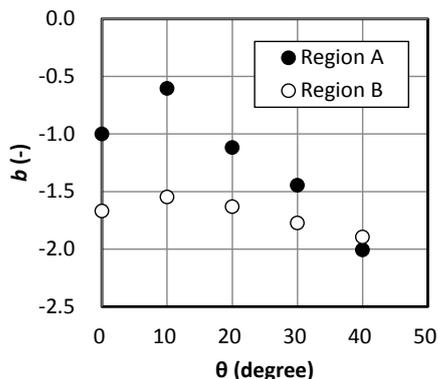


図 4 火災プルーム中心軸上温度の距離に対する減衰率 b と傾斜角度の関係 (正方火源)

4.3 z 方向の温度分布

図 5 は一例として正方火源、傾斜角度 30° の条件における、 z 方向の温度分布を示したものである。 $r/L = 0$ は火災プルームの中心軸上を表し、正の値は z 軸上方向、負の値は z 軸下方向を表す。 z 軸下方向では斜面からの照り返しを受けるので、発熱速度によりプロットがばらついてはいるが、 z 軸上方向では、おおむね発熱速度によらず 1 つの曲線上にプロットが集まっている。この傾向はほかの傾斜角度の条件でも見られた。

ここで、火災プルームの温度分布が正規分布

$$\Delta T / \Delta T_{\max} = \exp\left\{-\beta^2 \cdot (r/L)^2\right\} \quad (1)$$

に従うと仮定して、温度分布の広がり幅を示す指標 β の値と $\tan\theta$ の関係を表したものが図 6 である。 β の値は傾斜角度が大きくなるに

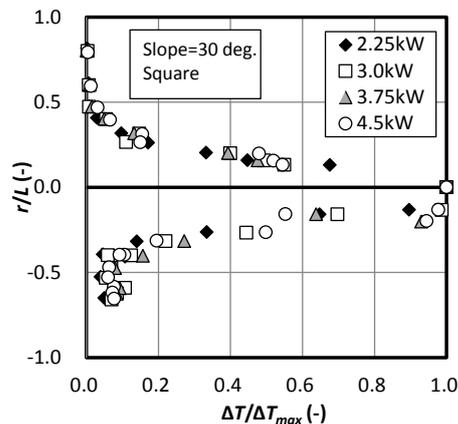


図 5 各 x 位置における z 方向の温度分布の一例 (正方火源、傾斜角度 30°)

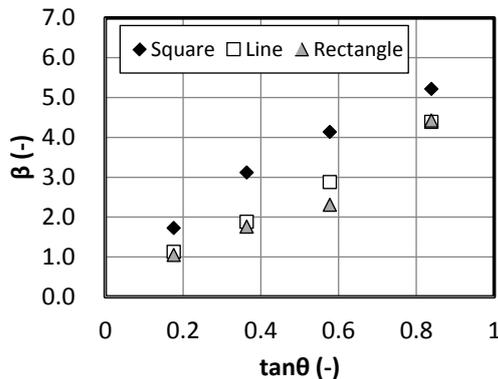


図 6 β 値 (z 軸上方向) と傾斜角度の関係 つれて単調に増加した。すなわち、温度分布幅が狭まることを示している。傾斜角度が大きくなると火炎が斜面側に倒れこむので、 z 軸上方向への温度の広がりが抑えられるためと考えられる。これらの傾向は火源形状に依存しなかった。

4.4 x 方向の温度分布

図 7 は一例として正方火源、傾斜角度 20° の場合における x 方向の温度分布を示したものである。正の値は下流方向 (上方向)、負の値は上流方向 (下方向) を表す。 z 方向と同様、発熱速度によらずほぼ 1 つの曲線上にプロットが集まった。 x 方向の温度分布は、火炎が斜面方向へ倒れこむため、火炎からの照り返し熱の影響が火災プルーム中心軸を基準として上流側と下流側で異なると推測される。そのため、温度分布形状は単純な正規分布形状ではなく、対数正規分布を仮定して表現する必要があると思われる。そこで、図 7 の横軸について対数をとって整理した結果が図 8 である。ただし、 $r/L < 0$ の範囲では $\ln(r/L)$ を求めることができないが、図 7 の結果から、 $r/L = -1$ では $\Delta T / \Delta T_{\max} < 0.05$ となっており、火災安全上重要となる温度範囲を網羅するには、 $-1 < r/L < 1$ の範囲に注目すれば十分と考えて、 $r/L + 1$ により正の値に変換し、これの対数を横軸にとって整理した。その結果、図 8 に示すように発熱速度によらず温度分布を 1 つの曲線で表現できることから、対数正規分布による近似が有効であることが

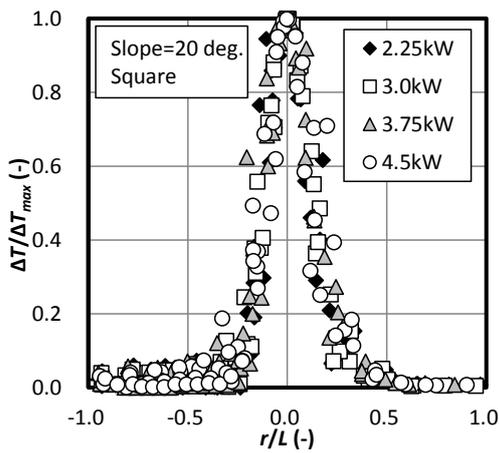


図7 各z位置におけるx方向の温度分布の一例(正方火源, 傾斜角度20°)

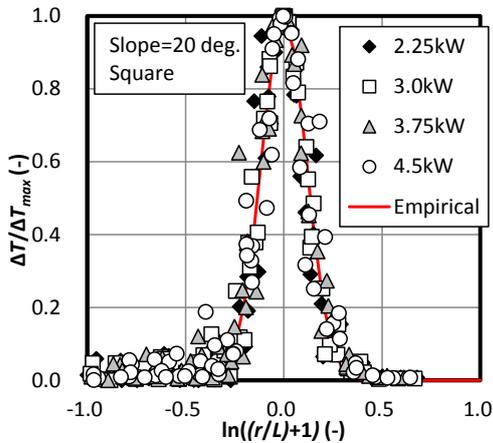


図8 対数正規分布を仮定したx方向の温度分布の一例(正方火源, 傾斜角度20°)

分かった。z方向の場合と同様にして、 β の値(ここでは β' と表記する)を求め、 $\tan\theta$ に対してプロットしたものが図9である。 β' の値は10°まではほぼ一定であるが、10°以上の領域では傾斜角度に依存して単調に減少する傾向を示した。すなわち温度分布が広がる傾向を示すことになる。傾斜角度が大きくなるにつれて、z方向の温度分布の広がりが小さくなること、火災プルーム中心軸の温度が低下しやすくなることに伴い、x方向に広がることでエネルギーが保存されているものと推測される。

4.5 まとめ

(1) 傾斜面上の火災プルーム中心軸上の温度と移動距離の関係を整理した。その結果、傾斜面上の火災プルームは、傾斜角度が大きくなるにつれて簡潔火炎領域とプルーム領域の区別が、温度的にもつかなくなるのが分かった。

(2) z方向への温度分布は、傾斜角度が大きくなるにつれてその幅を狭める。これに伴い、x方向へはその幅を広げる。

(3) x方向への温度分布は、対数正規分布により表現できる可能性が示された。

(参考文献)

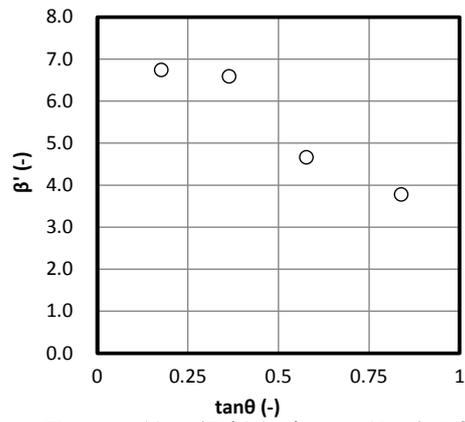


図9 β' 値と傾斜角度の関係(正方火源)

[1] Oka, Y., Sugawa, O., Imamura, T. and Matsubara, Y.: "Effect of Cross-Winds to Apparent Flame Height and Tilt Angle from Several Kinds of Fire Source", Proc. of 7th International Symposium on Fire Safety Science, 915-926, 2002.

[2] Ito, A., Konishi, T. and Saito, K.: "Scale Effects on Flame Structure in Medium-Size Pool Fires", Progress in Scale Modeling, pp.99-107, 2008.

[3] McCaffrey, B.J.: "Purely Buoyant Diffusion Flame -Some Experimental Results-", NBSIR79-1910, 1979.

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 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, pp.543-552, 2013. [学会発表] (計3件)

1) 今村友彦, 関 佳郎, 須川修身: "傾斜面上に形成された火災プルームの温度分布性状", 平成26年度日本火災学会研究発表会, 東京, 2014.5.

2) 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.

3) Imamura, T., Sugawa, O. and Kamiya, K., "Flame Behaviour on a Plane Slope Ground", 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Providence, US, 2013.5.

[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・工学部・講師

研究者番号: 50450664

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし