

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15日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760446

研究課題名（和文） 新たな火炎放射モデルに関する研究

研究課題名（英文） A Study on New Flame Heat Transfer Model

研究代表者

上川 大輔（KAMIKAWA DAISUKE）

独立行政法人森林総合研究所・木材改質研究領域・主任研究員

研究者番号：30409651

研究成果の概要（和文）：

赤外分光分析装置によりプロパンガス、ブタノール、木材クリブそれぞれを燃料とする火炎の放射スペクトル分析を行い、放射計算に用いるべき火炎温度を明らかにした。さらに各火炎を透過する赤外線放射スペクトルを計測し、火炎の吸収係数、光路長分布を把握し、火炎放射率算出に必要な情報を整備した。これら情報と、赤外熱画像から導いた火炎の放射輝度分布により、火炎からの放射を予測するための火炎モデルを提案した。

研究成果の概要（英文）：

Thermal emission spectrums from propane, butanol and wood crib flames were measured with infrared spectroscopic analysis, and the flame temperatures for radiative calculation were demonstrated. The radiations that transmitted through across a flame were measured. The absorption coefficient and length of light path for radiative calculation were demonstrated. The rational flame model was derived from these data and radiance distribution.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2012年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築環境・設備

キーワード：赤外分光分析、火炎温度、赤外熱画像装置、火炎の放射率

1. 研究開始当初の背景

火炎からの熱移動は、火災初期での火災成長、部材の加熱、人体への加害性、隣棟や上階への延焼、市街地や森林火災の延焼範囲・速度などの重要な支配要因であり、その支配要因は火炎温度、放射率、火炎形状、加熱を受ける物との位置関係などである。これらについて文献1～4など、多くの研究

がなされ、その結果を基に図1のような火炎モデルが使われている。しかしこれらの基となる研究は、モデル化を前提としていないものがほとんどであり、モデル化の際に必要な検証がなされていない部分も多い。具体的には、温度計測に伴う誤差や、スケール・燃料の違いによる差などに対する処置や検証が不十分なものがある。

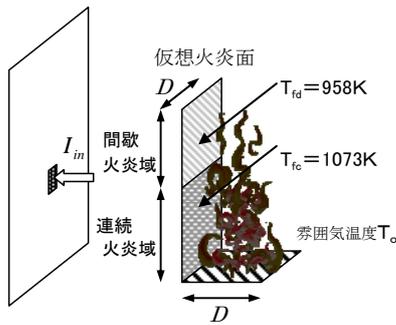
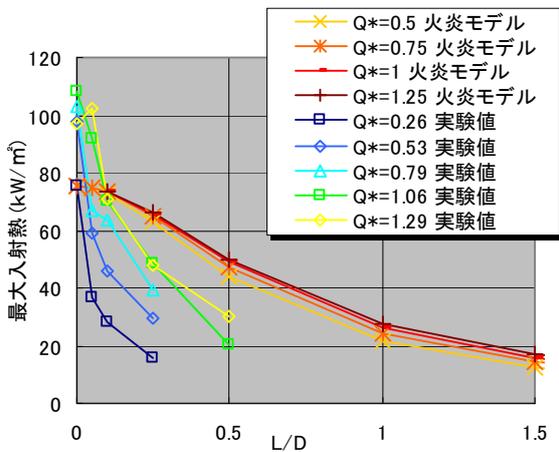


図1 現状の火炎モデル例概念図

$$I_{in} = \varphi_{fc} \varepsilon_{fc} T_{fc}^4 + \varphi_{fd} \varepsilon_{fd} T_{fd}^4 + (1 - \varphi_{fc} - \varphi_{fd}) T_o^4 \dots (1)$$

$\varphi_{fc}, \varphi_{fd}$: 連続、間歇火炎域の形態係数
 ε_f : 火炎の放射率、 $\varepsilon_f = (1 - e^{-kl})$
 k : 減衰係数 l : 光路長



L: 火源一部分材間距離、D: 火源寸法

図2 火源一部分材間距離と最大入射熱の関係

実際に火炎の放射強度について、実験計測値と上記モデルからの予測値とは大きな乖離が見られる (図2 参照)。性能規定化の導入でより合理的な火災安全性評価方法が求められる昨今においては、その原因の解明と修正が急務である。

実験値とモデル値とは、以下の点で差異が見られる。すなわち、①火炎直近において実験での最大入射熱が火炎モデル予測を大きく上回っている、②ある程度水平距離が離れ

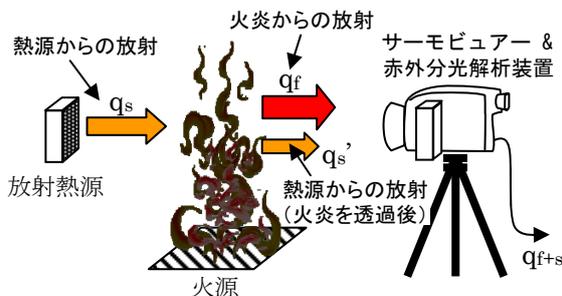


図3 実験イメージ

ると ($L/D > 0.2$ 程度)、モデル予測値のほうが実験値を上回っている、③実験では発熱速度ごとの段階的な差の有無、などである。これらの差異が生じてしまう原因として、以下のようなモデルの諸設定の問題があると考えられる。①火炎温度が低く想定されている、②火炎の形態係数大きく想定されている、③火炎面の想定に問題がある、④火炎形状の変化を反映できていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、検証が必要な火炎の諸性状を実験により把握し、実際の伝熱を再現しうる新たな火炎モデルの構築をめざす。

火炎温度の計測を火炎の放射強度から逆算する手法、ならびに放射強度の計測に赤外線画像装置を用いる方法を提案し、その方法を用いて火炎の諸性状を把握する。最終的な出力情報である火炎モデルは、燃え広がり等の火災性状予測や、建築部材の耐火性能予測など、火災安全工学上の様々な分野に大きく寄与するものである。

3. 研究の方法

実火炎の放射強度とモデルとの差異に最も影響していると思われるものは火炎温度である。熱画像装置を用いて火炎の実際の温度分布を把握するためには、火炎の吸収係数と光路長に支配される火炎放射率を把握する必要がある。まず数種類の燃料の火炎について火炎の形状 (光路長) を把握し、さらに火炎中を透過する放射の減衰を計測することで火炎の吸収係数を求める。これにより火炎の放射率分布を明らかにする。さらに各火炎からの放射を熱画像装置で計測した温度計測値から火炎の放射強度分布を導き、これと放射率分布から火炎の温度分布 (放射計算) を明らかにする。これらにより火炎モデル検証のために必要な諸性状が一通り明らかになる。

次の段階として、把握した火炎の諸性状をもとに、より簡易に火炎からの放射強度を予測するためのモデル化を検討する。以上が研究全体の流れである。以下に具体的な実験方法を記載する。

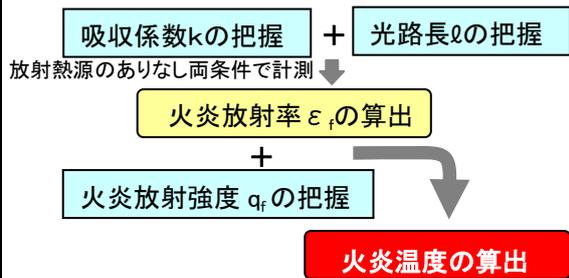


図4 火炎温度算出のプロセス



写真1
ブタノール火源



写真2
クリブ火源 (2×2)

・火炎の諸性状についての実験

プロパンガス、ブタノール、クリブ（ベイマツを井形に組んだもの）それぞれを燃料とする火源について、分光放射計測装置および赤外線画像装置による計測を行った。

プロパンガス火源においては、0.5 m 角の拡散ガスバーナーを用い、プロパンガスの流量を 66 L/min (100 kW) とした。ブタノール火源においては、水を適宜張った 0.5 m 角のオイルパンに 2 L のブタノールを入れ点火した。クリブ火源においては、20×20×250 mm のベイマツ角材 7 本を 5 段交互に直行させ重ねた物を 1 セットとし、これを単独で燃やしたもの、2 個並べたもの、縦横 2 個（計 4 個）並べたものそれぞれについて計測を行った。1 セットのクリブの重量は、およそ 1600 g であった。点火にはメタノールを含浸させた MDF を用いた。

分光放射計測装置を用いた計測では、火炎後方に放射熱源として黒体炉（800℃）を設置し、①火炎のみ、②恒温炉のみ、③両方の 3 条件で放射スペクトル解析を行った。計測には SR5000 (CI SYSTEMS 社製) を用いた。計測は波長 1.3~14.5 μm の範囲について 4 s/回×20 回行い、平均値を計測値とした。赤外線画像装置として Avio PE Professional (アビオニクス社製) を用い、火炎の温度（計測器内部の対象放射率=1 と設定してあるため、見かけ上の温度）を 10 秒ごとに計測した。プロパンガス火源およびブタノール火源においては火炎が安定する点火後 2 分経過時から各計測を行い、クリブ火源においては 5 分経過後から計測を行った。

4. 研究成果

・分光放射計測結果

図 5 に各火源における放射スペクトル分布を示す。全ての波長域で放射率が 1 である黒体からの放射スペクトルは、プランクの式にて表され、図中点線のラインのような分布となる。一般的な物質では、波長ごとに放射率は異なり、特にガス体では特定の波長をのぞ

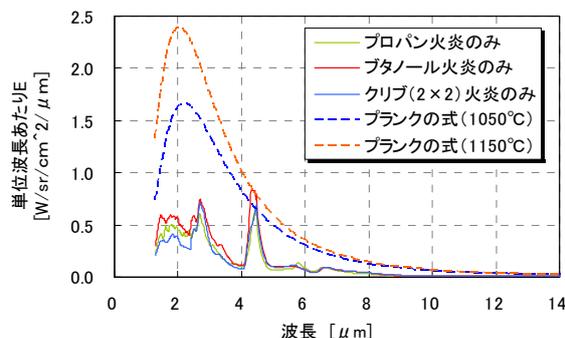


図 5 各火源の放射スペクトル分布

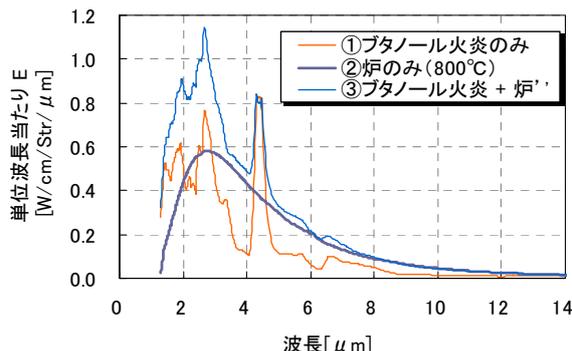


図 6 各条件の放射スペクトル分布
(ブタノール火炎の場合)

いて放射率は低くなる。しかし、どの波長においても物質の温度に沿ったプランク式の値以上の放射は生じないため、特定の物質の実際の温度はその放射スペクトル分布を包括するプランク式ライン以上の温度となる。

各火源からの放射スペクトル分布と、それを包括するプランク式のラインを比較すると、いずれの火源のものについても波長 4~5 μm 付近を除きプランク値よりも小さくなっている。このピークとなっている波長域は、H₂O および CO₂ の放射が顕著となる波長域と一致する。

また、それぞれの放射スペクトルから推測される火炎温度は、ブタノールにおいて 1150℃、プロパンとクリブにおいて 1050℃程度であった。この値は予測通り、既往文献にある火炎温度よりかなり高くなっている。

図 5 の波長ごとの放射エネルギーを全波長について積算したものが、全輻射能であり、黒体を想定したプランクの式の積分値との比がトータルの放射率となる。これらから各火源における火炎放射率を計算すると、プロパン：0.277、ブタノール：0.268、クリブ：0.259 となった（いずれも火源寸法 500×500mm、火炎高さ 200mm 火炎中央での値）。この図 5 より推定した放射率と、計測光路の長さから、各火炎の吸収係数 k を計算すると、プロパン：、ブタノール：、クリブ：となった。

図 6 にブタノール火源における、各条件(①

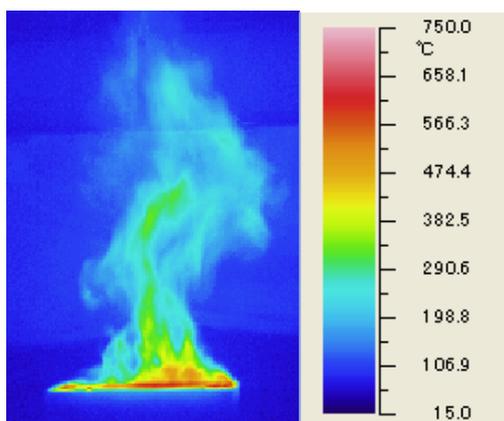


図7 熱画像装置による計測例
(プロパン火炎)

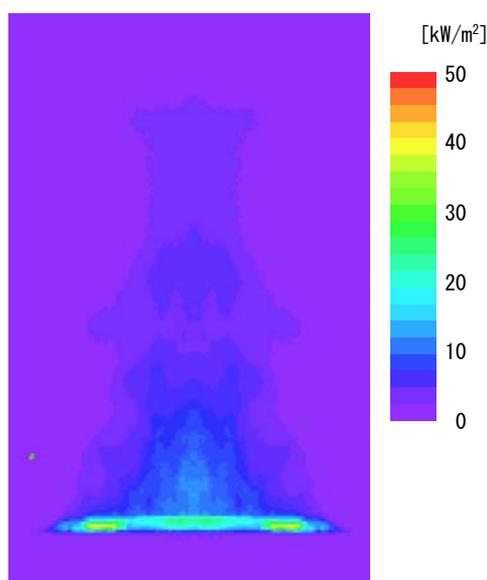


図8 火炎の平均放射輝度分布
(プロパン火源)

火炎のみ、②黒体炉のみ、③両方の3条件)の放射スペクトル分布を示す。①の火炎のみからの放射に、火炎中を透過した黒体炉からの放射の合計値が③の値となる。波長 $4\sim 5\ \mu\text{m}$ のピーク付近を見ると、①と③はほぼ同じ値となっている。これは即ちこの波長においては黒体炉からの放射がほぼ透過していない、即ち火炎の放射率が1に近いことを示している。このことから図5についての考察での温度推定値がほぼ実際の火炎温度といえる。

図7は赤外線画像装置での計測結果の一例で、放射率1を想定した出力温度値である。本実験の火炎幅程度では放射率は1よりも

小さいため、実際のガス体の温度はその分高温なはずである。そこで、まずは計測器の内部設定値より計測された放射輝度を温度出力値より算出する。また、火炎は周期的に伸縮を繰り返すため、ある位置での温度やガ

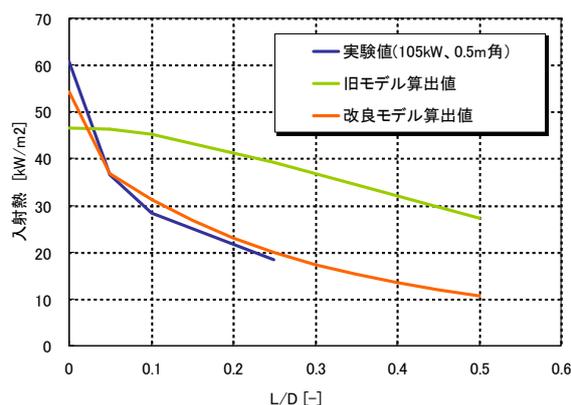


図9 新旧火炎モデル比較

ス成分等も周期的に変化する。そのため、ここでは10秒間隔で撮影した30コマについて、それぞれ温度出力値から放射輝度への変換を施し、火炎の平均放射強度分布を求めた(図8)。これを見ると、火炎の放射輝度が強い部分はかなり狭い範囲となっていることが分かる。

分光放射計測結果から導いた火炎の見かけ上の放射率と、分光放射計測位置での火炎幅から、火炎の放射吸収係数を計算すると、 $1.16[1/\text{m}]$ となった(プロパン火源)。この値と、火炎の光路長情報から、火炎各部位の放射率が明らかとなった。

把握した諸性状をそのまま放射強度予測に用いるのは非常に煩雑である。モデルを用い加熱強度を予測する作業を簡略化するためには、現状のモデルと同様に火炎面を想定し、いくつかの領域ごとに各値の代表値を与える必要があるであろう。そこで実験を行った条件での加熱強度をより合理的に再現しうる火炎面、各代表値の設定法を検討した。その結果、火炎面を幅 $0.2\text{D}\times 0.33\text{L}_f$ 、火炎温度 $1150\text{ }^\circ\text{C}$ とし、火炎の放射吸収係数 $1.16[1/\text{m}]$ と光路長 $0.5\text{D}[\text{m}]$ として火炎放射率を算出するモデルにより、実験で計測した熱流束値とよく一致することを明らかにした。図9にプロパンガスを燃料とした実験での熱流束計測値と、新旧火炎モデルより算出した値を示す。これにより実験条件での放射強度を再現する火炎モデルが構築された。

【文献】

- 1 J. M. Beer, C. R. Howarth : 12th Symposium on Combustion (1969)
- 2 B. J. McCaffrey : NBSIR 79-1910 (1979)
- 3 長谷見雄二 : 日本火災学会論文集, 31 (2) (1981)
- 4 横井鎮男 : 日本火災学会論文集, 10 (1) (1961)
5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上川 大輔 (KAMIKAWA DAISUKE)

独立行政法人森林総合研究所・木材改質

研究領域・主任研究員

研究者番号：30409651