

## 天井下面への展炎部と天井表面を考慮した放射熱の予測方法 その 2

正会員 ○井戸和彦\*1 同 原田和典\*1 同 新谷祐介\*2  
同 出口嘉一\*2 同 長岡勉\*2

## 4. 環境工学—8. 熱

## 火炎長さ 展炎 連続火炎 間欠火炎

## 1. はじめに

既報<sup>1)</sup>では、出口ら<sup>2)</sup>の天井下での展炎実験をベースとして連続、平均、間欠火炎長さを求め、床面への熱流束を予測する方法を提案した。このとき、多くの実験では無次元発熱速度( $\dot{Q}_D^*$ )が1を超える強いプルームであったため、火炎長さは火源径への依存性を無視して天井高さを代表寸法とする無次元発熱速度  $\dot{Q}_H^*$  を用いて表していた。

一方、 $\dot{Q}_D^*$  が1未満の弱いプルームでは横林らの提案式<sup>3)</sup>が良く用いられる。実験結果は横林式の適用範囲外であるが、横林式で予測される値よりも明らかに小さかった。また、連続火炎が天井に届かないときと比べて、天井に届いたときには発熱速度による連続火炎長さの増加率が強くなる傾向が見られた。この傾向は平均火炎には見られず、発熱速度が大きくなると連続火炎が平均火炎よりも長く計算されるという問題がある。

本報では、既報の提案式と横林式の不連続を解消して火炎長さを求める計算式について考察した。また、連続火炎が展炎する場合の火炎長さの増加率について文献データを収集して検討を行った。

## 2. 既往の実験データの収集

天井下に火炎を展炎させる実験を行った文献を収集して分析を行った。そのうち、火炎長さの測定値が判別できるものは You *et al*<sup>4)</sup>、Kokkala<sup>5)</sup>、Heskestad<sup>6)</sup>、横林ら<sup>7)</sup>の4編であった。このうち連続火炎長さと間欠火炎長さの測定値が揃うのは Kokkala のみであり、他は平均火炎長さのみが記載されている。図1に文献データにおける無次元発熱速度( $\dot{Q}_D^*$ )と無次元天井高さ( $H/D$ )の範囲を示す。

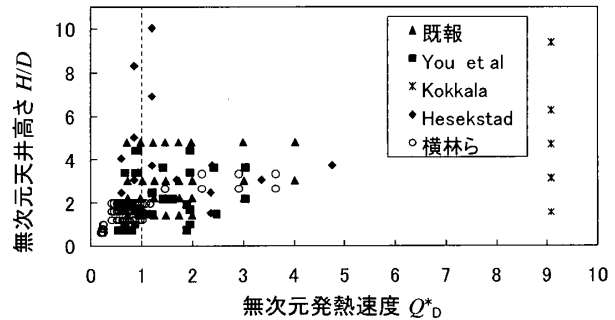


図1 文献データにおける実験条件

## 3 既往の式の適用範囲に関する考察

## 3.1 横林式との比較

天井下に展炎する火炎の平均火炎長さ予測式としては横林式<sup>3)</sup>がしばしば使われる。横林式は図1に示すように、主として弱いプルーム ( $\dot{Q}_D^* < 1$ ) を対象としている。横林式の  $\dot{Q}_{DH}^*$  ( $=Q/1116D^2H^{1/2}$ ) を天井高さをを用いた無次元発熱速度  $\dot{Q}_H^*$  に変形すると次式となる。

$$L_m/H = 2.6\dot{Q}_{DH}^{*2/5} = 2.6(H/D)^{2/5}\dot{Q}_H^{*2/5} \quad (1)$$

すなわち、横軸を( $H/D$ )、縦軸を  $L_m/(\dot{Q}_H^{*2/5}H)$  としてデータをプロットすれば、両対数グラフ上で傾きが 0.4 の直線となるはずである。

そこで、図1の文献データを  $\dot{Q}_D^*$  が1より大きいかどうかで場合分けを行った上で比較する。図2に結果を示す。白抜き記号は  $\dot{Q}_D^*$  が1未満かつ  $L_m/H > 1$  のデータ、塗りつぶしは  $\dot{Q}_D^*$  が1以上のデータを示す。直線は式(1)である。

横林式はほぼデータの上限に対応し、 $\dot{Q}_D^* < 1$  のデータと良く一致する。しかし、強いプルームに対しては平均火炎長さを過大に予測してしまう。

## 3.2 Zukoski 式との比較

自由空間中の平均火炎長さ予測に広く用いられている Zukoski 式<sup>8)</sup>では、プルームの強弱を考慮して無次元発熱速度の指数を変更している。 $\dot{Q}_D^* > 1$  ではベ

き乗が  $2/5$  となり、火炎長さは火源直径に依存しなくなる。オリジナルの Zukosi 式では天井の影響は考えられていないが、強いプルームでは天井と無関係に火炎長さが決まると考えてデータを整理してみる。

Zukoski<sup>8)</sup>式を変形し、 $Q_D^*$ の代わりに $Q_H^*$ で表すと式(2)となる。式(2)の係数は $Q_D^*$ が1未満のとき $H/D$ に依存している。

$$L_m/H = \begin{cases} 3.3(H/D)^{2/3} Q_H^{*2/3} & (Q_D^* \leq 1) \\ 3.3Q_H^{*2/5} & (Q_D^* \geq 1) \end{cases} \quad (2)$$

横軸を  $H/D$ 、縦軸を  $L_m/(Q_H^{*n}H)$  ( $Q_D^*$ が1未満で $n=2/3$ 、 $Q_D^*$ が1以上で $n=2/5$ )として図3に実験データをプロットした。白抜きは $Q_D^*$ が1未満、塗りつぶしは $Q_D^*$ が1以上のデータを示す。

$Q_D^* < 1$ のとき、文献データは式(2)の第1式と傾向が一致するが、図2よりもばらつきが大きい。 $Q_D^* > 1$ のとき、Kokkala のデータ以外は式(2)の第2式と傾向は一致する。Kokkala のデータは、 $Q_D^* > 1$ 以上でも $H/D$ に依存して増加する傾向が見られた。

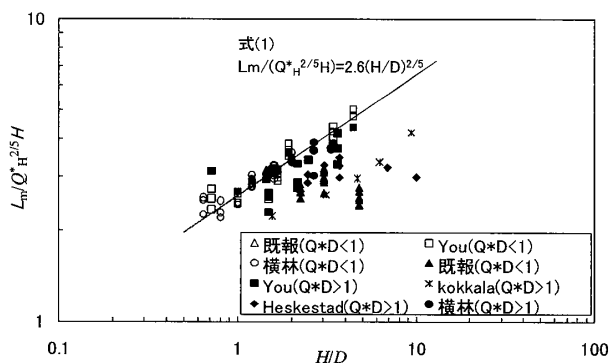


図2 横林式と文献データとの比較

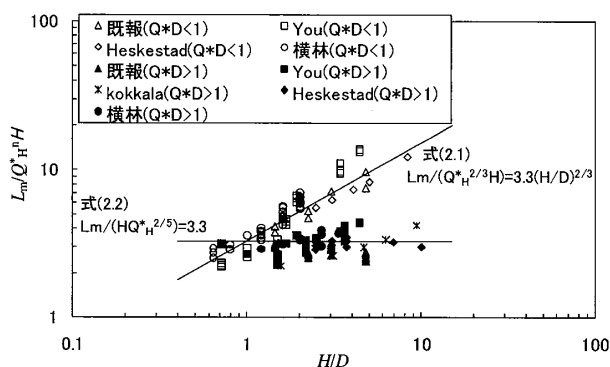


図3 Zukoski 式の係数と  $H/D$  の関係

#### 4. $Q_D^*$ の影響を考慮した天井下の平均火炎長さ

##### 4.1 $Q_D^*$ による係数と指数の変化

天井に展炎するときの平均火炎長さは、 $Q_D^*$ が1より小さければ横林式で精度良く表すことができ、 $Q_D^*$ が1以上のときZukoski式でおおむね表せる。しかし、2つの式は滑らかに接続しない。そこで $Q_D^*$ が1を少し超える領域で $L_m/(Q_H^{*2/5}H)$ と $H/D$ の関係が $Q_D^*$ によってどのように変化するかを検討する。

図1のデータから $Q_D^*$ が約1、2、2.4、3のデータを抽出して図4に示す。直線は各 $Q_D^*$ 毎の回帰式を示す。 $Q_D^*$ が1から3まで増加すると、 $(H/D)$ の指数が次第に小さくなる傾向がある。これを定量化するため、回帰式の係数と指数を $Q_D^*$ に対して示すと図5を得る。

指数については、 $Q_D^*$ が1から3まで増加すると指数はほぼゼロとなる。3以上では分析対象となるデータはないが、強いプルームの性質が保持されると考えれば、3以上では指数はゼロを保つと考えられる。係数は $Q_D^*$ によって多少変化するが、横林式の係数2.6と大きく変わらない。

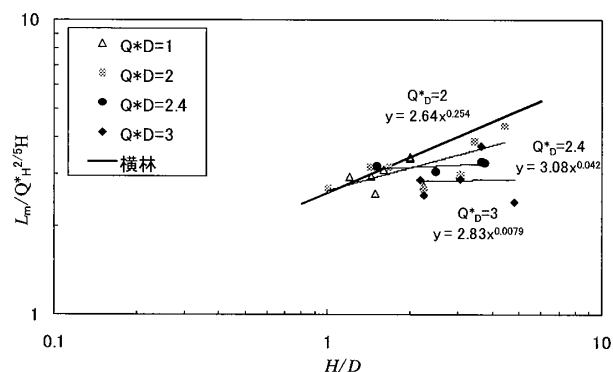


図4  $Q_D^*$ による係数の変化

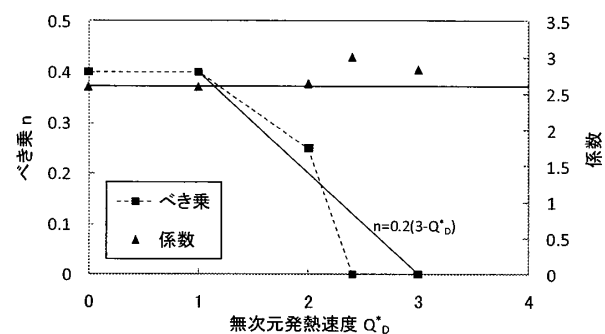


図5  $Q_D^*$ による係数と指数の変化

図5に示すように、 $\dot{Q}_D^*$ が1~3の範囲で $H/D$ の指数が線形的に変化すると仮定すれば、平均火炎長さは次式で計算できる。

$$\frac{L_m}{H} = 2.6 \begin{cases} (H/D)^{2/5} \dot{Q}_H^{*2/5} & (\dot{Q}_D^* \leq 1) \\ (H/D)^{0.2(3-\dot{Q}_D^*)} \dot{Q}_H^{*2/5} & (1 \leq \dot{Q}_D^* \leq 2.4) \\ \dot{Q}_H^{*2/5} & (2.4 \leq \dot{Q}_D^* \leq 4.8) \end{cases} \quad (3)$$

## 4.2 火炎長さ計算式の精度

式(3)から求めた計算値と文献データとを比較する。図6に既報の計算式との比較を、式(3)との比較を図7に示す。 $\dot{Q}_D^* < 1$ では、ばらつきが小さくなり、文献データとの一致は改良された。 $\dot{Q}_D^*$ が1~3のとき、既報の方法では文献データより少し小さかった。式(3)によるとばらつきは大きくなるが、平均値を良く予測している。 $\dot{Q}_D^*$ が3以上のデータに対しては、計算値はほとんど変化しなかった。

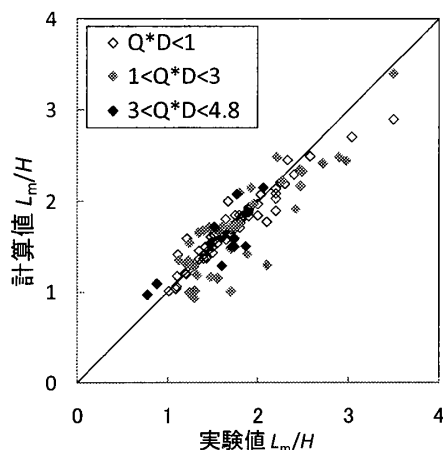


図6 既報での計算値と文献値の比較

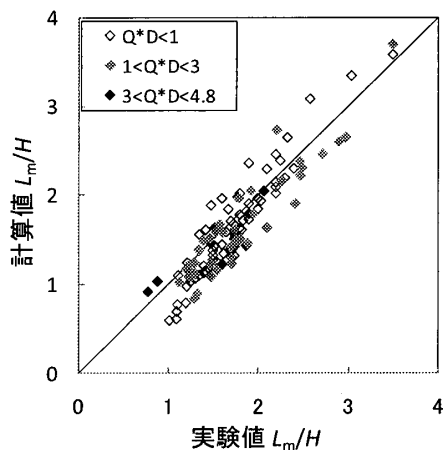


図7 作成した計算式による値と文献値の比較

## 4.3 連続火炎長さおよび間欠火炎長さ

連続および間欠火炎長さも平均火炎長さと同様、 $\dot{Q}_D^*$ によって係数が変化すると考えられる。しかし、連続および間欠火炎長さの文献データが少ないため、前節と同様の方法で計算式を作成することは困難である。そのため実験データから平均火炎長さと連続・間欠火炎長さそれぞれの比率を求めておく。

既報の実験データおよびKokkalaの文献データから連続および間欠火炎長さと平均火炎長さを抽出し、ブルームの強弱、天井への接炎の有無に応じてグループ分けして図8に示す。

ここで、Kokkalaのデータは $\dot{Q}_D^*$ が極めて大きく、噴流の様相を示すのでここでの検討からは除外し、既報の実験データから連続および間欠火炎長さと平均火炎長さとの比率を決定する。プロット結果では4つのグループ間に大きな差はなく、連続火炎は平均火炎の0.6倍の長さ、間欠火炎は平均火炎の1.4倍の長さと考えておく。

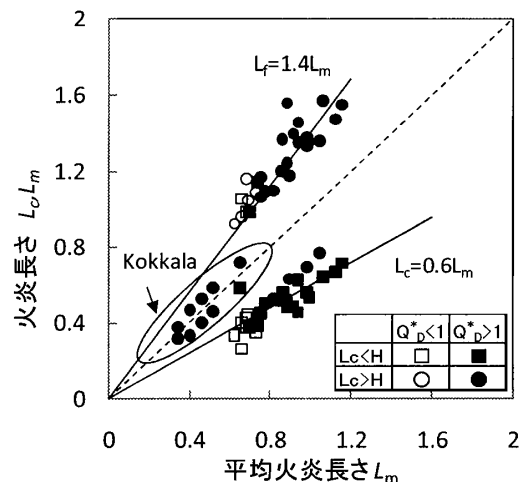


図8 平均火炎長さとの比率

## 5. 火炎からの放射熱流束の計算

既報<sup>1)</sup>では、表1に示す条件で天井に展炎する火炎から床面への入射熱流束の計算を行っている。そこで用いた計算方法のうち、連続および平均火炎長さを式(3)に置き換えて計算を行ない、計算精度を検討した。

表1：計算条件

|                        |      |
|------------------------|------|
| 火源径 $D$ [m]            | 0.25 |
| 天井高さ $H$ [m]           | 0.56 |
| 火源中心から測定点までの距離 $R$ [m] | 1.0  |

図9に平均火炎長さ、図10に熱流束の計算結果を示す。波線は既報の計算値、実線は式(3)による計算値である。

既報の計算値は、連続火炎が天井に展炎するときに折れ曲がった。式(3)を用いると $Q_D^*$ が1付近で滑らかに接続している。しかし、 $Q_D^*$ が3のときに不自然な折れ曲がりが生じている。

式(3)と火炎長さの実験値を比較すると、全般的に2割ほど大きな値になる。特に発熱速度が小さいとき、式(3)では火炎長さが実験値よりも大きくなり、展炎部からの放射を過剰に計算することになる。そのため、熱流束は実験値より少し過剰に計算されている。

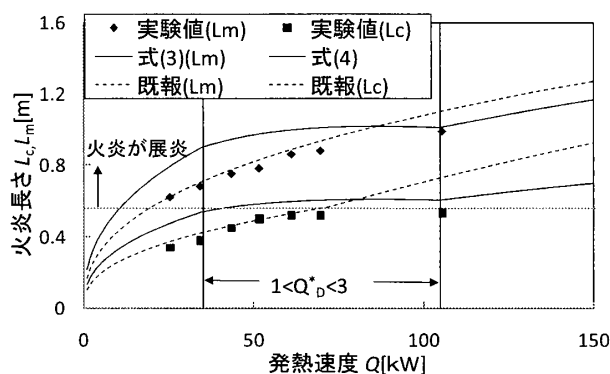


図9 平均火炎長さの計算結果

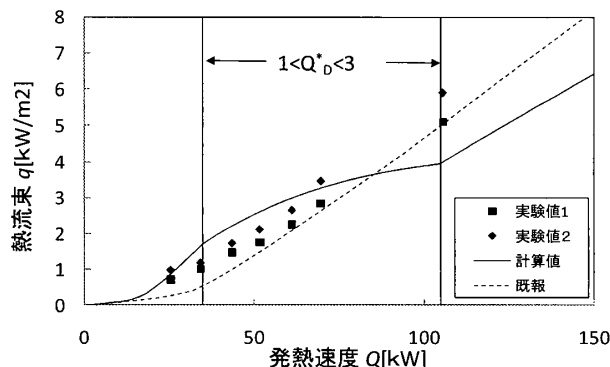


図10 熱流束の計算結果

## 6 結論

本研究では、天井下に展炎する場合の火炎長さについて既報の実験データおよび文献データを用いて予測式を提案した。そのため、横林式を弱いプルームに、Zukoski 式を強いプルームに適用することとし、その両者の接続領域について係数および指数を無次元発熱速度に応じて連続的に変化させた。

既報の実験結果と比較すると、無次元発熱速度が2程度までは滑らかに変化する計算結果が得られた。既報の実験結果と比較すると火炎長さおよび熱流束とも少し過剰な値となった。

## 記号一覧

$D$ : 火源直径[m],  $H$ : 天井高さ[m],  $L_c$ : 連続火炎長さ[m],  $L_m$ : 平均火炎長さ[m],  $L_f$ : 間欠火炎長さ[m],  $Q$ : 発熱速度[kW],  $Q_D^*$ : 火源直径で無次元化した発熱速度( $=Q/1116D^{5/2}$ )[-],  $Q_H^*$ : 天井高さで無次元化した発熱速度( $=Q/1116H^{5/2}$ )[-],  $Q_{DH}^*$ : 火源直径と天井高さで無次元化した発熱速度( $=Q/1116D^2H^{1/2}$ )[-],  $q$ : 熱流束[kW/m²]

## 参考文献

1. 井戸和彦, 原田和典, 新谷祐介, 出口嘉一, 長岡勉: 初期火災における天井下での火炎からの熱流束予測, 日本火災学会研究発表会梗概集, pp352-353, 2010.05
2. 出口嘉一, 新谷祐介, 長岡勉, 原田和典: 火炎からの放射熱の測定(その1、その2), 日本火災学会研究発表会梗概集, pp.88-91, 2009.5
3. 横林優, 長谷見雄二, 若松高志: 局部火災加熱に暴露される平坦な天井面の加熱性状-局部火災加熱に暴露される構造部材の火災安全設計に関する研究・序説-, 日本建築学会構造系論文集 第484号, pp.149-156, 1996.6
4. H. Z. You, G. M. Faeth, Ceiling Heat Transfer during Fire Plume and Fire Impingement, Fire and Materials Vol.3 No.3, 1979
5. Kokkala: Heat Transfer to and Ignition of Ceiling by an Impinging Diffusion Flame, VTT Research Reports, 1989
6. Heskestad, Hamada: Ceiling Jets of Strong Fire Plumes, Fire Safety Journal 21, pp.69-82, 1993
7. Zukoski, Kubota, Cetegen: Entrainment in Fire Plumes, Fire Safety Journal 3, pp107-121, 1980

\*1 京都大学工学研究科

\*2 (株)竹中工務店 技術研究所

Graduate school of engineering, Kyoto University

Takenaka Research & Development Institute