

1. 研究の背景と目的

火災初期の煙流動を予測するために、二層ゾーン建物内煙流動モデル予測計算プログラム BRI2002¹⁾ が用いられている。このモデルは建物条件（室と開口の形状、周壁材料の熱物性）と火源（燃焼物）の発熱速度を入力して、煙層温度と煙層下端高さを予測するプログラムであり、発熱速度は何らかの情報を手がかりにしてユーザーが予め準備しておく必要がある。しかし、室火災では、室上部の煙層や、天井および壁面に沿った展炎部、天井および壁の高温部分等から発した放射熱が可燃物表面へフィードバックされて燃焼が加速するため、発熱速度を事前に想定することが難しい。これに対処するため、放射熱のフィードバックを考慮して、自由空間での燃焼による発熱速度の時間的変化から、可燃物の燃え広がりを予測するモデルが提案されている。²⁾³⁾⁴⁾

李ら⁴⁾はこのモデルを組み込んだ二層ゾーンモデルを用いて、模型室内におけるウレタンマットの燃焼実験⁵⁾において、模型室内では自由空間と比べて発熱速度の最大値が約2倍大きくなることを計算で再現した。ただし、この実験では平均火炎高さの最大値が僅かに天井に届く程度で条件で行われているので、天井に展炎する条件については、計算値と実験値の比較が不十分であった。また、実験値との一致のため以下を仮定しているが、その物理的根拠は明らかでない。

- 1) 火炎プルームから射出される放射熱が周壁で全て反射して、可燃物の燃焼面へと入射する。（間接放射）
- 2) 火炎プルームから燃焼面へ直接入射する内部放射熱流に、補正係数(=0.6)を乗じている。

本研究では、先行研究による実験⁵⁾と同様に、模型箱内でのポリウレタンフォームの燃焼実験を実施した。平均火炎や連続火炎が天井下に展炎する条件についても実験を行い、煙層や周壁、天井下面の展炎部が燃焼性状に及ぼす影響について検討した。

既存の燃え広がりモデルにおける火炎からの放射熱の計算方法について検討を行い、燃え広がりモデルを改良する。これを二層ゾーンモデルに組み込み、室内における燃え広がり性状を予測することが目的である。

2. 燃え広がりモデルについての既往研究

2. 1. 火炎プルームからの内部放射

新谷ら³⁾のモデルでは、火炎プルームから床面への入射熱流は、円筒に近似した火炎からの放射として次式

で与えられる。

$$q_f = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc} + (1 - \varepsilon_c) \varepsilon_c E_{ci} F_{ci} \quad (1)$$

ただし、 ε_c は火炎円筒部の放射率[-]、 E_{cc} (=80.5 kW/m²)、 E_{ci} (=51.2 kW/m²)は火炎円筒部の連続、間欠火炎領域の放射発散度、 F_{cc} 、 F_{ci} は受熱面から火炎円筒部の連続、間欠火炎領域を見た時の形態係数[-]である。

火炎円筒部の放射率 ε_c は、火源の発熱速度 Q [kW]のうち放射で放散する成分が火炎表面から射出される放射熱流と等しいと仮定し、次式で計算する。

$$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc} E_{cc} + A_{ci} E_{ci}} \quad (2)$$

ただし、 A_{cc} 、 A_{ci} は火炎円筒部の連続、間欠火炎領域の表面積[m²]である。 χ は火源の発熱速度のうち放射性分の割合[-]で、McGrattanらの提案式⁶⁾を適用し、次式で求める。

$$\chi = 0.35 \exp(-0.05D) \quad (3)$$

ただし、 D は火源の直径[m]である。

2. 2. 可燃物へ入射する外部放射

可燃物へ入射する外部放射は、周壁および煙層からの放射熱、天井下の展炎部からの放射熱、火炎からの間接放射の和で与える。

2. 2. 1. 周壁および煙層からの放射熱

二層ゾーンモデルの公開版プログラム⁷⁾では、室を高温の上部層と、低温の下部層の二層に分け、下部層に接する周壁の正味の受熱量 $Q_{wa,rad}$ [kW/m²]が、下部層に接する壁体表面への入射熱流 q_s [kW/m²]を用いて式(4)で計算される。 q_s について整理すると、煙層および周壁から床面へ入射する放射熱流として、式(5)となる。

$$Q_{wa,rad} = \varepsilon_{wa} q_s - \varepsilon_{wa} \sigma T_{wa}^4 \quad (4)$$

$$q_s = \frac{Q_{wa,rad} + \varepsilon_{wa} \sigma T_{wa}^4}{\varepsilon_{wa}} \quad (5)$$

ただし、 ε_{wa} は下部層に接する周壁の放射率[-]、 σ はシュテファン・ボルツマン定数[kW/(m²・K⁴)]、 T_{wa} は下部層に接する周壁の表面温度[K]である。

2. 2. 2. 天井下の展炎部からの放射熱

天井下に展炎する場合、火炎形状を円筒と円盤で近似する。円盤で近似した火炎表面の放射射出量が、天井のない自由空間における火炎において、天井より高い部分から射出される放射熱と等しいと仮定すると、火炎円盤部の放射率 ε_d [-]は次式で計算される。

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_c (A_{cc}^* E_{cc} + A_{ci}^* E_{ci})}{(A_{dc} E_{dc} + A_{di} E_{di})} \quad (6)$$

ただし、 E_{dc} (=80.5kW/m²)、 E_{di} (=47.7kW/m²)は火炎円盤部の連続、間欠火炎領域の放射発散度、 A_{cc}^* 、 A_{ci}^* は自由空間において高さ0.9H（Hは燃焼面から天井までの距離[m]）以上の火炎円筒部の連続、間欠火炎領域の表面積[m²]、 A_{dc} 、 A_{di} は火炎

円盤部の連続、間欠火炎領域の表面積[m²]である。

天井下展炎部からの放射熱流 $q_{d,w}$ [kW/m²]は次式になる。ここで、第一項は展炎した火炎からの放射熱、第二項は展炎部が接する天井表面からの放射熱である。

$$q_{d,w} = (E_{dc}F_{dc} + E_{di}F_{di})\varepsilon_d + (1 - \varepsilon_d)(E_{wc}F_{dc} + E_{wi}F_{di})\varepsilon_w \quad (7)$$

ただし、 $E_{wc}(= 27\text{kW/m}^2)$ 、 $E_{wi}(= 16\text{kW/m}^2)$ は火炎円盤部の連続、間欠火炎領域に接する天井の放射発散度、 F_{dc} 、 F_{di} は受熱面から火炎円盤部の連続、間欠火炎領域を見た時の形態係数[-]、 ε_w は天井の放射率[-]である。

2. 2. 3. 火炎からの間接放射

火源の発熱速度 Q [kW]のうち放射比率に相当する放射熱流が室内の表面で一回反射した後に多重反射して最終的には内表面に均等に吸収されると仮定すると、火炎からの間接放射 $q_{f,re}$ [kW/m²]は次式になる。

$$q_{f,re} = (1 - \varepsilon_{wall})\chi Q/A_T \quad (8)$$

ただし ε_{wall} は周壁の放射率[-]、 A_T は室内の内表面積[m²]である。

2. 3. 外部放射による火炎伝播速度の増加

図1のように、室内で可燃物が燃烧するとき、火炎からの内部放射 q_f に加えて、外部放射 q_{inc} も可燃物表面の予熱面へ入射して、火炎伝播速度を増加させる。自由空間での火炎伝播速度 $v_{f,free}$ の提案式⁷⁾と、式(9)で計算される外部放射から、室内の火炎伝播速度 v_f [m/s]は式(10)で計算される。

$$q_{inc} = q_s + q_{d,w} + q_{f,re} \quad (9)$$

$$v_f = \left(1 + \frac{q_{inc}}{0.5q_f}\right)^2 v_{f,free} \quad (10)$$

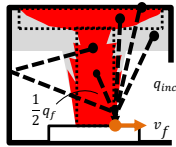


図1 予熱面への外部放射による火炎伝播速度の増加

2. 4. 外部放射による燃焼速度の増加

図2に示すように、燃焼面への外部放射 q_{inc} は火炎を透過するので、内部放射 q_f に加えて $(1 - \varepsilon_c)q_{inc}$ が燃焼面へ入射して、単位面積当たりの燃焼速度を増加させる。従って、室内での燃焼速度 $\dot{m}''_{con,m}$ [kg/(m²·s)]は、自由空間における燃焼速度 $\dot{m}''_{con,m,free}$ からの割り増しを考えると次式で計算される。

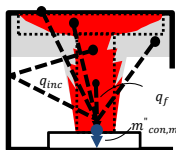


図2 燃焼面への外部放射による燃焼速度の増加

$$\dot{m}''_{con,m} = \left[1 + \frac{(1 - \varepsilon_c)q_{inc}}{q_f}\right] \dot{m}''_{con,m,free} \quad (11)$$

3. 自由空間と模型室内におけるポリウレタンフォームの燃焼実験

3. 1. 実験の目的

自由空間と模型室内で同一の可燃物を燃焼させて、発熱速度および火炎伝播速度がどれほど増加するかを調べるために実験を行った。

3. 2. 実験方法

3. 2. 1. 試験体

試験体は、軟質ポリウレタンフォーム（密度：15.2～16.3kg/m³）で、寸法は500×500mm、厚さは50, 100, 150, 200mmの4種類とした。

3. 2. 2. 自由空間実験での装置および測定方法

集煙フード下に設置したロードセル(50kN×3)上で試験体を燃焼させ、質量減少と発熱速度を同時に測定した。着火は上面中央のアルコールを含浸させたティッシュペーパーへ点火して行った。また、実験の様子をビデオカメラで撮影し、火炎の伝播速度を測定した。

3. 2. 3. 模型室実験での装置および測定方法

図3に模型室の断面図を、図4に平面図を示す。内寸は1700×900mmであり、中央部の550×850mmの部分にロードセル(50kN×3)を設置し、自由空間実験で測定した単位質量あたりの発熱量(29.4MJ/kg)を掛けて発熱速度とした（質量法と呼ぶ）。天井高さは800、620、400mmの3段階で、前後の開口面には200～600mmの垂れ壁を設置した。周壁は全てセラミックファイバーボード製（厚さ50mm、密度250kg/m³、熱伝導率0.12W/(m·K)、熱容量1.13kJ/(kg·K)⁸⁾である。

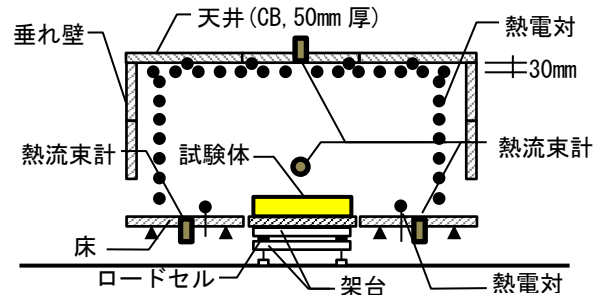


図3 模型室（断面図）

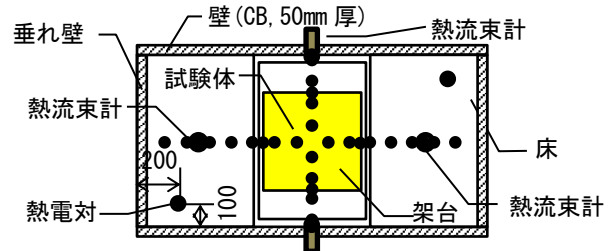


図4 模型室（平面図）

煙層高さや温度の測定のため、前後2カ所に熱電対を高さ100mm間隔で鉛直に設置した。また、天井下の展炎温度分布を測定するため、熱電対を天井下3cmに長手方向および短手方向に設置した。水冷式熱流束計(測定レンジ50または100kW/m²)を火源直上の天井面1カ所、側壁面2カ所、床面2カ所に設置した。また、ビデオカメラと必要に応じてウェブカメラを設置して、火炎の伝播速度を測定した。

3. 2. 4. 実験条件

実験条件を表1に示す。実験o1~o4は自由空間での燃焼、実験b1~b12は模型室内での燃焼である。

表1 実験条件

実験 No.	天井高さ H(mm)	開口高さ h(mm)	試験体厚さ h _s (mm)	試験体重量 w(g)
o1	-	-	150	586.3
o2	-	-	200	801.8
o3	-	-	100	390.5
o4	-	-	50	200.8
b1	800	800	50	203.2
b2	800	800	100	388.6
b3	800	800	100	387.8
b4	800	800	150	601.1
b5	800	500	100	379.0
b6	800	500	50	197.7
b7	800	200	100	405.1
b8	620	620	100	400.6
b9	620	320	100	388.3
b10	620	320	50	197.7
b11	400	400	50	203.6
b12	400	200	50	195.9

3. 3. 実験結果

3. 3. 1. 発熱速度の時間変化

試験体厚さ50mmの実験における発熱速度の時間変化を図5に示す。天井高さと開口の高さが低いほど、発熱速度の最大値は増加した。開口高さよりも天井高さが低い場合に天井下を展炎する影響が大きかった。

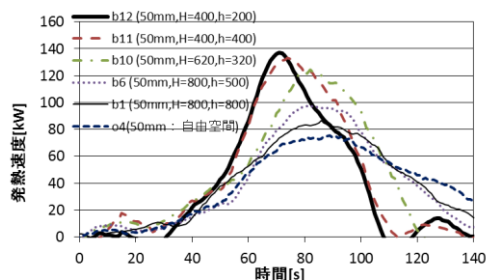


図5 発熱速度の時間変化 (h_s=50mm)

3. 3. 2. 天井高さと火災成長率

試験体厚さ50mmの実験における天井高さと火災成長率の関係を図6に示す。図中の火災高さは、着火後60秒における自由空間での発熱速度から計算した火災高さである。平均火災ではなく連続火炎の展炎が火災

成長率を大きく増加させた。

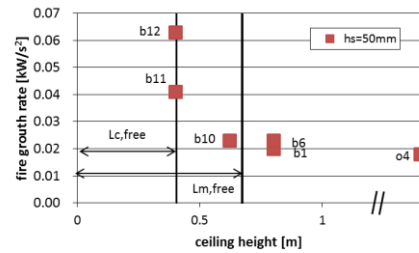


図6 天井高さと火災成長率の関係 (h_s=50mm)

4. 燃え拡がりモデルの改良

4. 1. 既存の燃え拡がりモデルの問題点と修正方法

4. 1. 1. 周壁および煙層からの放射熱の計算

式(5)から基準温度における黒体放射 σT_0^4 (=0.4(kW/m²))を差し引くように修正した。

4. 1. 2. 展炎発生条件と展炎半径の計算

自由空間における平均火炎高さ $L_{m,free}$ [m]はHeskestad⁹⁾による次式で計算される。

$$L_{m,free} = 0.23Q^{2/5} - 1.02D \quad (12)$$

$L_{m,free}$ が燃焼面から天井までの高さ H の0.9倍に届くと、円筒部の間欠火炎領域は $0.1H$ だけ伸長して天井に吸い付き展炎すると考え、間欠火炎の展炎半径 r_i [m]は、 $L_{m,free} + 0.1H$ が H を越える部分に対してFaeth¹⁰⁾の式を適用し、さらに火源半径を足して次式で与えるように修正した。

$$r_i = 0.5D \left[\frac{(L_{m,free} + 0.1H) - H}{D} \right]^{0.96} + D/2 \quad (13)$$

4. 1. 3. 形態係数の計算

燃焼面から火炎円筒部を見たときの形態係数が、展炎後の火炎長さの全長から計算されていたが、円筒部の高さ(H が上限)から計算するように修正した。

火炎円盤部を見たときの形態係数は、微小要素から見たときの形態係数が用いられていたが、燃焼面全体から見たときの形態係数を与えるように修正した。

4. 2. 計算条件

4. 2. 1. 区画および試験体条件

実験b1(H=800mm, h=800mm, h_s=50mm)の条件で計算を行った。室形状と試験体の物性値は図3.4と表1に示した通りである。

4. 2. 2. 初期温湿度条件

室内および外気の初期温度は実験b1における着火前60秒間の測定温度の平均値(=10.3°C)を用いた。湿度はプログラムのデフォルト値(=50%)を用いた。

4. 2. 3. 燃え拡がりモデルへの入力値

単位発熱量 ΔH [kJ/kg]は、自由空間における実験(o1~o4)の平均値(=29410kJ/kg)を用いる。

自由空間における単位面積当たりの発熱速度

$q_{0,free}$ [kW/m²]は、同じ寸法の可燃物を自由空間で燃焼させた実験 o4 における質量法による発熱速度 Q [kW] と時刻毎の燃焼面積 A_b [m²] との関係から次の値とした。

$$q_{0,free} = \frac{Q}{A_b} = 365.8 \text{ kW/m}^2 \quad (14)$$

自由空間における火災成長率 α も、実験 o4 での質量法による発熱速度から求め、 $\alpha = 0.018 \text{ kW/s}^2$ とした。

自由空間における単位面積当たりの燃焼速度 $m''_{con,m,free}$ [kg/(s·m²)] は、単位面積当たりの発熱速度を単位発熱量で割って、次式で求めた。

$$m''_{con,m,free} = \frac{q_{0,free}}{\Delta H} = \frac{365.8}{29410} = 0.0124 \text{ kg/(s·m}^2) \quad (15)$$

自由空間における火災伝播速度 $v_{f,free}$ [m/s] は、測定値ではなく火災成長率と単位面積当たりの発熱速度から逆算して設定した。

$$v_{f,free} = \sqrt{\frac{\alpha}{q_{0,free}\pi}} = \sqrt{\frac{0.018}{365.8 \times 3.14}} = 0.0040 \text{ m/s} \quad (16)$$

4. 3. 修正前後の計算値と実験値の比較

以下では外部放射の影響を考慮した場合を「加速あり」、考慮しない場合を「加速なし」とし、修正前と修正後の計算値を比較してモデル修正の影響を考察した。

4. 3. 1. 発熱速度

発熱速度の計算値と測定値の比較を図 7 に示す。修正後の加速ありでは、修正前よりも短時間で急増した。これは、火炎円盤部の形態係数の増加とそれに伴う天井下展炎部からの放射熱の増加の影響と考える。

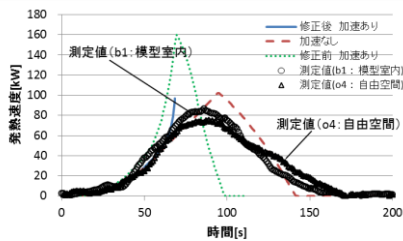


図 7 発熱速度

4. 3. 2. 火炎円盤部の形態係数

発熱速度と火炎円盤部の形態係数の計算値を図 8 に示す。修正後の加速ありでは、間欠火災領域の形態係数は、修正前よりも 2 倍以上に大きくなった。

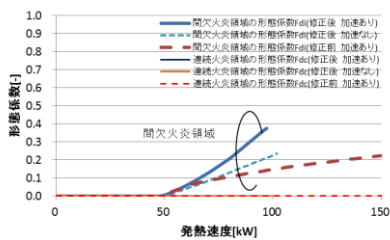


図 8 発熱速度と火炎円盤部の形態係数

4. 3. 3. 燃焼面への熱流束

修正後の燃焼面への熱流束の計算値と床面への熱流束の測定値を図 9(a)、修正前を図 9(b)に示す。修正後の外部放射の合計値は修正前よりも急増した。これは、火炎円盤部の形態係数が 2 倍以上に大きくなったことにより、展炎部からの放射が増加したためと考える。

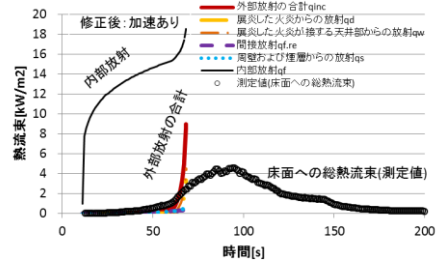


図 9(a) 燃焼面へ入射する熱流束(修正後:加速あり)

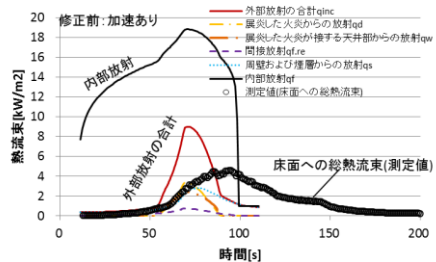


図 9(b) 燃焼面へ入射する熱流束(修正前:加速あり)

5. 結論

自由空間と模型室内におけるウレタンフォームの燃焼実験を実施した。既存の燃え拡がりモデルを組み込んだ二層ゾーンモデルの問題点を修正し、修正前と修正後のモデルで計算すると、修正後の外部放射は修正前よりも短時間で急増した。これは、火炎円盤部の間欠火災領域の形態係数が 2 倍以上に大きくなったためと考えた。この影響により、修正後の発熱速度も修正前よりも短時間で増加して、実験との乖離が生じた。

参考文献

- 1) 田中喙義他, BRI2002: 二層ゾーン建物内煙流動予測モデルと予測計算プログラム, (社)建築研究振興協会, 2003
- 2) 谷道雄太他, 二層ゾーン火災モデルの数値安定化と可燃物の燃え拡がりモデルの導入, 日本建築学会近畿支部研究報告集 第 55 号 pp.149-152, 2015
- 3) Y. Shintani, T. Nagaoka, Y. Deguchi and K. Harada, "Simple Method to Predict Downward Heat Flux from Flame to Floor", Fire Science and Technology, Vol.33, No.1, 2014
- 4) 李成臻, "区画火災におけるフラッシュオーバー発生限界と可燃物の燃焼拡大に関する研究", 京都大学博士論文, 2017
- 5) 李ソクチャン他, "模型箱試験区画内におけるウレタンマットの燃焼性状", 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 55 号, pp.305-308, 2015
- 6) McGrattan, B., K., Baum, R., H. and Hamins, A., "Thermal Radiation from Large Pool Fires", NISTIR 6546, 2000
- 7) ASTM Committee E-5 on Fire Standards, "Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties", E 1321 - 93, 1993
- 8) 中央技研株式会社ホームページ, <http://www.tyuo-giken.co.jp/scburannketokararogu.html>, 閲覧日 2017 年 11 月 21 日
- 9) Heskestad, G., "Luminous Heights of Turbulent Diffusion Flames", Fire Safety Journal, Vol.5, pp.103-108, 1983
- 10) You, H. Z. and Faeth, G. M., "Ceiling Heat Transfer during Fire Plume and Fire Impingement", Fire and Materials, Vol.3, No.3, pp.140-147, 1979