

外部加熱を受ける高分子材料の燃焼性状

その2 区画内燃焼における煙層からの放射熱による燃焼性状のモデル化

防火-火災性状

準会員 ○ 伊東 俊介^{*1}準会員 小山 陽一郎^{*1}正会員 松山 賢^{*2}正会員 原田 和典^{*3}

火炎形状 入射熱流束 放射率

〃 佃 めぐみ^{*4}〃 抱 憲誓^{*5}

外部加熱 火災成長率 煙層

〃 大宮 喜文^{*6}

1 背景と目的

可燃物の燃焼性状を把握することは、建築防火において重要な意味を持つ。また、性能規定による設計手法においても可燃物燃焼性状の把握は重要な課題である。

本研究では近年建築内に多く持ち込まれるようになったウレタンフォームを対象として、燃焼実験を実施し可燃物情報の収集を行った。その結果、可燃物情報として代表的な発熱速度をはじめ入射熱流束などのウレタンブロックの燃焼性状に関する知見を得た。その1では、それらの実験結果を示した。また、区画内で行った実験では自由空間に比べ最大発熱速度を上回り、燃え尽きるのに要する時間が短くなった。これは、区画内燃焼によって生じた高温の煙層や壁体からの放射熱による影響であることが考えられる。

本研究では区画内において外部から試験体へ入射する熱量を2つの手法で検討すると共に、火炎性状に関する知見の収集を目的とする。

2 乱流火炎の性状

火炎が発生した場合、火源から周辺への放射によって火炎が拡大することが考えられる。ウレタンフォームは、燃焼により気化し形状が経時的に変化する。このように形状が変化する可燃物からの放射熱量を予測する際、重要となる火炎高さ及び火炎温度について考察を行った。

これら火炎性状から予測した火炎からの放射熱と熱流束計による実測値との整合性を検討し、火炎の放射率を算出した。

2.1 乱流火炎における火炎形状

火炎規模が大きくなると、発熱に伴い上昇気流が発生するが、大きな発熱により気流が乱れ振動するような火炎形状となる。このような火炎は乱流火炎と呼ばれ、一般に建築火災で発生する火炎は乱流火炎であると言える。したがって、本研究におけるウレタンブロック燃焼実験

で発生した火炎も乱流火炎である。

図1に、ウレタンブロック(寸法:500×500×500mm)の拡散火炎を一定間隔で連続的に撮影した様子を示す。この図から示されるとおり、拡散火炎には以下の3つの領域が存在する。

(a)連続火炎域:火炎が常に存在している領域

(b)間歇火炎域:連続火炎域の上にあり、火炎の有無が周期的に繰り返している領域

(c)浮力プリューム領域:間歇火炎域の上にあり、火炎が存在しない領域

このような領域は、乱流火炎で見られる普遍的な傾向であり、燃焼性状を解明する上で重要となる。図2に目視により計測した連続火炎高さと軸上温度の関係図を示す。

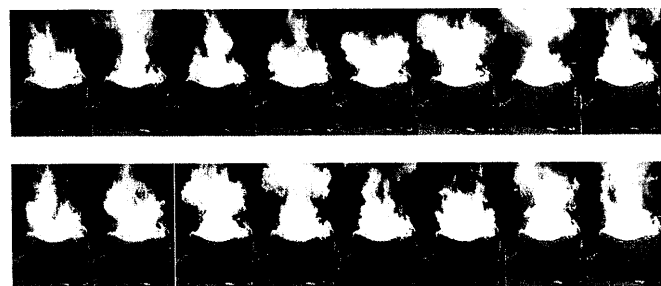


図1 ウレタンブロックの拡散火炎

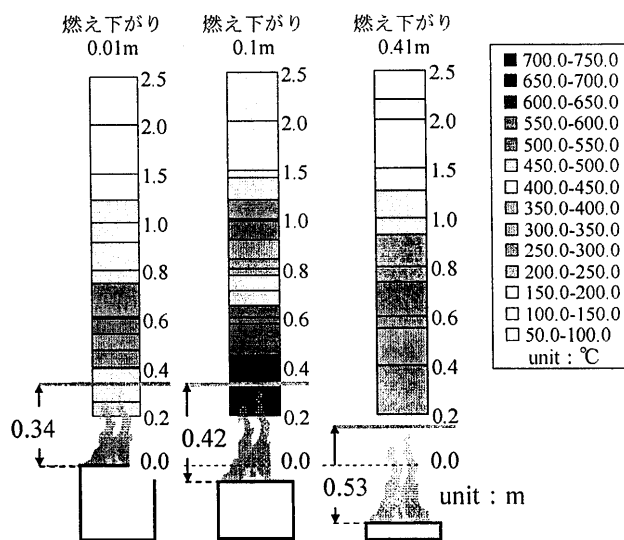


図2 連続火炎高さと軸上温度

2.2 火炎からの入射熱流束

2.2.1 周辺可燃物への入射熱量

火炎高さ及び火炎温度から、周辺への入射熱量を予測し、測定した入射熱流束との整合性を検討した。連続火炎域及び間歇火炎域の高さを求め、火炎域を円柱に近似し、仮想放熱面を設定、それぞれからの入射熱量を算出した。また、簡略化のため受熱面を微小面積とし、仮想放熱平面と微小面積の形態係数を算出した。火炎面想定方法の概念図を図3に示す。

仮想放熱面を黒体と仮定すると、ステファン・ボルツマンの法則により放射面から放射される放射エネルギーは式(1)で与えられる¹⁾。

$$q_b = \sigma T^4 \quad (1)$$

ここで、 q_b は放射面からの全放射能である。したがって、放射面を黒体面であると仮定すると、受熱面への入射熱流束は式(2)で与えられる²⁾。

$$q_{in} = F_{con} \sigma T_{con}^4 + F_{int} \sigma T_{int}^4 \quad (2)$$

連続火炎域では火炎温度は高さによらず一定と仮定し、連続火炎域温度を $T_0+800^\circ\text{C}$ とした。また、間歇火炎の先端の高さを $T_0+500^\circ\text{C}$ と仮定し、高さ方向の温度分布を考慮して、 $T_0+500^\circ\text{C}$ と連続火炎域温度との4乗平均した温度を間歇火炎域温度とした。また、連続火炎高さ、及び間歇火炎高さは試験体軸上温度から読み取った。

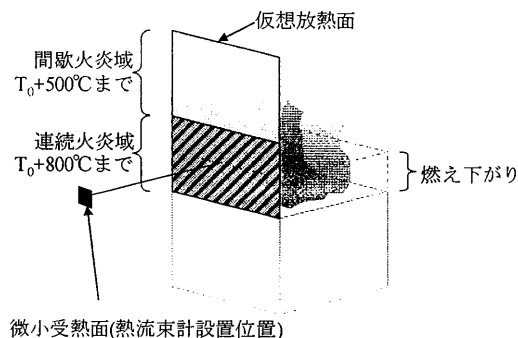


図3 放射面の設定方法

2.2.2 入射熱流束モデルのケーススタディ

図4に、実験1での入射熱流束計と予測値の比較を示す。同様に、図5に実験1-2、図6に実験2の比較した図を示す。

図より、計算値が実測値と相関性を持っていることが確認できる。これは、本研究では放射率を1として考えているため、実際の放射熱量よりも大きく評価していると考えられる。したがって、逆算することにより仮想放熱面の放射率をおおよそ予測できると考えられる。

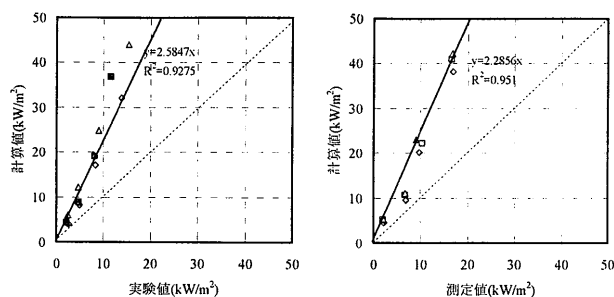


図4 入射熱量(実験1) 図5 入射熱量(実験1-2)

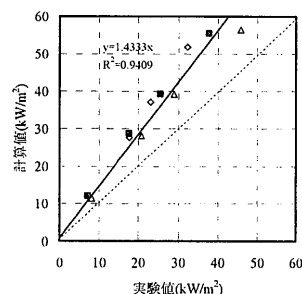


図6 入射熱量(実験2)

2.2.3 火炎の放射率、実効吸収係数

入射熱流束モデルにより算出した入射熱量と実験により得た入射熱量を比較することにより放射率を予測し、ウレタンブロックの実効吸収係数を求めた。

放射率は気炎放射を想定し、放射率について実効吸収係数及び光路長をまとめた式(3)を用いた³⁾。

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-k\ell} \quad (3)$$

式(3)より実効吸収係数についての式を算出すると式(4)を得る。

$$k = -\frac{\ln(1 - \varepsilon_f)}{\ell} \quad (4)$$

ここで光路長は受熱面から正対して火炎を見たときの火炎の奥行き方向の厚さを光長 ℓ の代表値とした。実験1、実験1-2、実験2のケースで式(4)を用いて算出した仮想放熱面の実効吸収係数を表1に示す。

この図より本実験の範囲内で火炎の放射率は概ね0.4~0.7、実効吸収係数は概ね1.0~1.2となり、すべてほぼ等しいことを確認した。

表1 放射率及び光路長より算出した実効吸収係数

	放射率[-]	光路長[m]	実効吸収係数[m ⁻¹]
実験1	0.387	0.5	0.98
実験1-2	0.438	0.5	1.15
実験2	0.698	1	1.19

3 煙層からの放射を考慮した燃焼性状

3.1 可燃性固体の燃焼性状

可燃性固体、特に有機高分子材料などが熱源から熱を受け気化し固体から離れていく。このとき、固体の燃焼速度、熱収支はそれぞれ一般に式(5)及び式(6)で与えられる¹⁾。

$$m_b = \frac{Q_{net}}{Lv} \quad (5)$$

$$Q_{net} = Q_F - Q_L + Q_{EX} \quad (6)$$

本研究では、ロードセルにより測定された試験体の重量変化から燃焼速度を算出する際、試験体上面が全て発炎してからの測定データを計算対象とした。また簡略化のため、試験体は上面が発炎した後、どの側面も均等に燃え落ちていくと仮定した。図7に、本研究で仮定した試験体燃焼の概念図を示す。

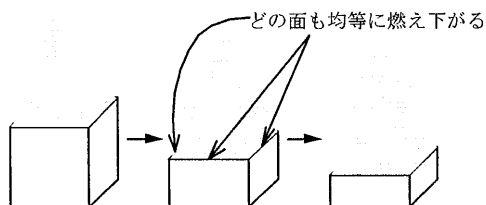


図7 試験体の燃え下がり設定の概念図

3.2 自由空間における燃焼速度

まず、外部加熱がない状態を考える。自由空間上では、外部からの入射熱を考えないものとする、 $Q_{EX}=0$ となり火災からの入射熱及び表面失熱のみを考えればよい。自由空間上でのウレタンブロックの燃焼速度はTewarsonの値¹⁾を用いれば $m_b=0.022\text{kg/m}^2\text{s}$ となる。また、3.1 で述べた仮定を用いれば各試験体の燃焼速度を求めることができる。

表2に、ロードセルにより測定された重量減少から求めた試験体燃焼速度の平均値、及びTewarsonの値から求めた燃焼速度の比較を示す。各試験体燃焼速度については、燃焼実験結果のモデル化として一般的とされている式(7)により与えられる火災成長率 α を用いた t^2 火源を採用した。⁴⁾

$$Q(t) = \alpha(t - t_0)^2 \quad (7)$$

これにより、最大発熱速度 Q_{max} の9割以上を持続する時間を最大規模燃焼時間と定義し、この区間での燃焼速度の平均値とした。表3に、火災成長率、各試験体燃焼における最大発熱速度 Q_{max} 、また火災成長率算出に必要な

Q_{max} の1割及び9割に達した時刻を示す。この結果より、燃焼速度は概ね一致することが確認できた。測定値が計算値に比べ若干値が大きくなるのは、3.1 に記した仮定により、燃焼面積が常に試験体上面の面積と等しいと評価し、液垂れによる燃焼面積増加の影響を無視した結果であると思われる。

表2 試験体燃焼速度(自由空間)

実験番号	Q_{max} kW	90% Q_{max} kW	最大規模燃焼時間 sec	燃焼速度(計測値) kg/s	燃焼速度(計算値) kg/s
1	208.46	187.62	183	0.0063	
1-2	215.81	194.23	102	0.0067	0.0055
2	968.88	871.99	149	0.0373	0.0220
3	1230.08	1107.08	119	0.0675	0.0373
4A	499.03	449.13	37	0.0179	
4B	485.66	437.10	76	0.0169	0.0110
4C	466.31	419.68	69	0.0166	
4D	376.21	338.59	85		

表3 火災成長率

実験番号	HRR(kW)	Time(sec)	10% Q_{max}	Time(sec)	90% Q_{max}	Time(sec)	火災成長率
	Q_{max}		0.1 Q_{max}	T1	0.9 Q_{max}	T2	α
1	208.5	212	20.8	86	187.6	201	0.0063052
1-2	215.8	298	21.6	78	194.2	254	0.0027869
2	968.9	294	96.9	116	872.0	223	0.0338502
3	1230.1	239	123.0	104	1107.1	221	0.0359437
4A	499.0	268	49.9	72	449.1	249	0.0063715
4B	485.7	293	48.6	76	437.1	253	0.0062008
4C	466.3	256	46.6	80	419.7	231	0.0081805
4D	376.2	395	37.6	82	338.6	339	0.0022784

3.3 外部からの放射熱

区画内燃焼の場合、熱が発散する自由空間とは違い外部からの放射熱が存在すると考えることができる。本研究では、外部からの入射熱 Q_{EX} を煙層からの放射熱と仮定し煙層からの放射熱のモデル化を試みた。

3.3.1 熱収支による放射熱の算定

試験体への外部からの入射熱流束を算出するため、燃焼速度実測値を用い、式(8)に示す燃焼面の熱収支式を用いて Q_{EX} を算出した。図8に概念図を示す。

$$Q_{EX} = \frac{m_b Lv}{A} - (Q_F - Q_L) \quad (8)$$

ここで、 A は試験体の燃焼面積であり、本研究では3.1の仮定を用いて燃焼面積を試験体上面面積とした。

燃焼速度は、3.2と同様に、最大発熱速度の9割以上を維持する時間に着目した。表4に区画内実験での燃焼速度の結果を示す。表から、区画内では自由空間と比べて燃焼速度が大きくなる傾向が確認できる。最大発熱速度についても同様の知見が得られる。これは、外部加熱によって熱分解が促進されたためだと考えられる。

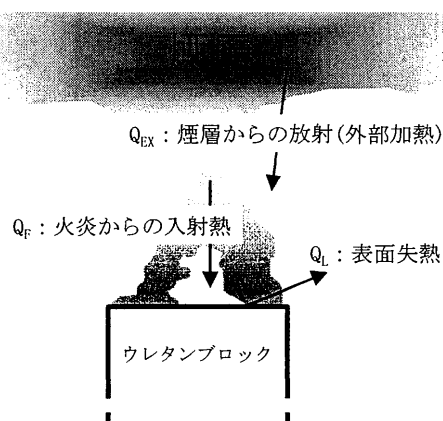


図8 区画火災における熱収支の概念図

表4 試験体燃焼速度(区画内)

実験番号	Q _{max} kW	90%Q _{max} kW	最大規模燃焼時間 sec	燃焼速度(計測値) kg/s	燃焼速度(計算値) kg/s
5A	304.92	274.43	27	0.0093	0.0055
5B	243.42	219.07	56	0.0082	
5C	155.00	139.50	98	0.0071	
6A	1275.89	1148.31	24	0.0262	0.0110
6A-2	793.03	713.73	32	0.0298	
6B	641.90	577.71	59	0.0244	
6C	556.25	500.63	45	0.0219	

3.3.2 煙層温度による放射熱の算定

温度 $T[K]$ の放熱面からの放射熱流束は式(1)で与えられるため、煙層温度から試験体への入射熱流束を求めた。

試験体上面中央を煙層からの放射熱の受熱面として代表させると仮定すると、煙層からの放射熱は式(9)で与えられる。

$$q_m = F_{\text{smoke}} \sigma T_{\text{smoke}}^4 \quad (9)$$

また、煙層温度として試験体上部より 150cm の位置の温度を採用した。試験体上部から見た煙層の形態係数を求める際、試験体上端と煙層までの距離を映像より求めた。

3.3.3 煙層からの入射熱流束

図9に、熱収支から求めた外部から試験体への入射熱流束と煙層温度から算出した試験体への放射熱を比較した図を示す。

この図から、煙層からの放射熱と燃焼速度から算出した入射熱量は概ね一致することが確認できる。この図では、可燃物に煙層がかかっていないケースについて取り上げているが、そのような状況下では可燃物の燃焼を促進させる外部加熱は、煙層からによる放射が支配的であることを確認した。

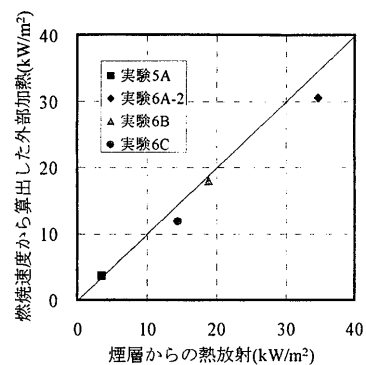


図9 試験体入射熱流束比較

4 まとめ

自由空間における火炎からの放射熱量において、本研究では実験値と計算値から放射率を求めた。本実験の範囲では、火炎の放射率は概ね 0.4~0.7 になり、各放射率において実効吸収係数は概ね 1.0~1.2 となり、ほぼ一致することを確認した。

自由空間と区画内とで燃焼速度を比較した場合、区画内燃焼の方が同条件での自由空間における値を上回ることが確認でき、外部加熱による燃焼の促進が確認できた。また、煙層が試験体にかからない範囲内で、区画内燃焼において燃焼を促進させる外部加熱は煙層からの放射熱が支配的であることが確認できた。今後、周壁の放射や周辺空気からの熱入射を考慮し、さらに精緻に区画内燃焼性状を予測する必要があると思われる。

<凡例>

q_b : 黒体の全放射能[kW/m²]、 σ : ステファン・ボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-11}$) [kW/m²K⁴]、 T : 黒体温度[K]、 q_{in} : 検査面への入射熱流束[kW/m²]、 F_{cont} : 検査面から連続火炎域を見たときの形態係数[-]、 T_{cont} : 連続火炎域温度[K]、 F_{int} : 検査面から間歇火炎域を見たときの形態係数[-]、 T_{int} : 間歇火炎域温度[K]、 T_0 : 雰囲気温度[°C]、 ϵ_f : 放射率[-]、 k : 実効吸収係数[m⁻¹]、 l : 光路長[m]、 m_b : 燃焼速度[kg/s]、 Q_{net} : 可燃物への正味の入射熱流束[kW/m²]、 Q_F : 火炎からの入射熱[kW/m²]、 Q_L : 表面失熱[kW/m²]、 Q_{EX} : 外部からの入射熱流束[kW/m²]、 $Q(t)$: 発熱速度[kW]、 α : 火災成長率[-]、 t : 時間[s]、 t_0 : 遅延時間[s]、 Q_{MAX} : 最大発熱速度[kW]、 L_v : 気化エネルギー[kJ/kg]、 A : 燃焼面積[m²]、 F_{smoke} : 試験体上面中心から煙層を見たときの形態係数[-]、 T_{smoke} : 煙層温度[K]

<参考文献>

- 1) 田中孝義: 改訂版建築火災安全工学入門、日本建築センター、H14年度
- 2) 鋼構造耐火設計指針、日本建築学会、H20年度
- 3) 庄司正弘: 東京大学機械工学伝熱工学、東京大学出版会、2001
- 4) 局所火災に対する耐火設計を考える-魅力ある耐火設計に向けて、日本建築学会 局所火災に対する耐火設計 WG、2005

- *1 東京理科大学理工学部建築学科4年
- *2 東京理科大学総合研究機構火災科学研究所 工博
- *3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻准教授 工博
- *4 京都大学大学院工学研究科建築学専攻修士2年
- *5 鹿島技術研究所 工博
- *6 東京理科大学理工学部建築学科准教授 工博