

模型実験による燃焼率の推定

開口の少ない区画火災の燃焼率と火災温度

中村 正寿^{*1}・道越 真太郎^{*1}・坂本 成弘^{*2}・長谷見 雄二^{*3}

Keywords : compartment fire, combustion efficiency, temperature in fire compartment, scale test, one zone model

区画火災, 燃焼率, 火災室温度, 模型実験, 一層ゾーンモデル

1. はじめに

自然換気下の火災室への流入空気は開口の大きさで制限されるため、可燃物量に対して開口が少ない室では、燃焼に必要な空気(酸素)が不足し、可燃物から発生した可燃性ガス全てが火災室内で燃焼するとは限らない¹⁾²⁾。一方、耐火設計実務においては、可燃性ガスの発生量に対する実際の燃焼量の割合(燃焼率)は考えず、収納可燃物の完全燃焼を前提とすることが多い。

例えば、耐火設計ではオフィスビルのコア周りの倉庫等がしばしば非常に厳しい火災想定となる場合がある。この主原因は可燃物が大量であることであるが、開口が少ないことによる燃焼率の低下を考慮しないために火災室温度の予測が実際より高めとなることも影響しているだろう。燃焼率低下を考慮して火災室温度を予測できればより妥当な評価が可能になると思われるが、現在、燃焼率を定量的に把握できる有力な手法は見当たらない。

区画火災での燃焼率の低下については、Tewarson³⁾が木材を火源とした既往実験結果と自身の実験結果を併せて整理し、空気過剰率に対する相関性を確認している。また、成瀬ら⁴⁾は、当量比(正規化燃料/空気比, 空気過剰率の逆数)を変数とするモデルで燃焼率を予測し、実験値と良く一致する結果を得ており、燃焼率に対して空気過剰率・当量比が支配的な影響を持つことは明らかである。

一方、既往実験結果を概観すると燃焼率は幾分のばらつきを示す。例えば Tewarson³⁾の結果では、同一の空気過剰率に対して燃焼率に理論上の最大値の 20%程度の幅が確認できる。また、その他の既往実験¹⁾²⁾⁸⁾⁹⁾を

比較すると、空気過剰率・当量比が同一であっても必ずしも燃焼率は一致しないようである。

長岡ら²⁾は、 $0.86 \times 0.86 \times 0.85\text{m}$ と $3.55 \times 4.75 \times 0.4\text{m}$ の形状の大きく異なる 2 つの模型区画を用いて燃焼率を計測しているが、同じ当量比であっても 2 つの模型区画の燃焼率が一致しない結果を示しており、上述の燃焼率のばらつきには区画形状の違いが影響した可能性があると思われる。また、区画形状が異なれば、区画への流入空気の平均滞留時間や火災温度も変化するが、Takeda ら⁵⁾、Beyler⁶⁾、Gottuk ら⁷⁾は、これらが一酸化炭素の燃焼に影響を与えることを示しており、区画形状が燃焼率に影響すると推測される。

一方、Heskestad¹⁰⁾、Croce¹¹⁾、斉藤ら¹²⁾は幾何学的に相似で大きさの異なる区画模型で、火源の重量減少速度(燃焼速度)、区画内部の温度、ガス濃度について相似を確認している。区画内部のガス濃度には火源の燃焼状態が反映されるが、特に Heskestad¹⁰⁾、Croce¹¹⁾の実験では、酸素、二酸化炭素、一酸化炭素濃度が相似模型間で概ね一致しており、燃焼速度を任意に制御できない木クリブを火源に使用したことによる影響を差し引いて考えれば、燃焼状態—燃焼率—は幾何学的に相似な区画において同一になることが期待できる。

以上のことから、既往実験結果に見られる燃焼率のばらつきは、区画の幾何学的条件の違いによるものであり、Heskestad¹⁰⁾、Croce¹¹⁾、斉藤ら¹²⁾に倣った幾何学的に相似な模型であれば燃焼率は一致すると考えられる。この予想が正しければ、実火災の燃焼率は当該火災室と幾何学的に相似な縮小模型で推定でき、その燃焼率を考慮して火災室温度を予測可能となる。特に、火災想定が厳しくなりやすい開口の少ない室について

* 1 技術センター建築技術研究所防災研究室

* 2 技術センター建築技術開発部ニューフロンティア技術開発室

* 3 早稲田大学 理工学術院

耐火性能をより妥当に評価可能になると期待される。

そこで本研究では、開口の少ない室に焦点を当て、幾何学的に相似で縮尺の異なる 2 つの区画模型を用いた実験で、区画形状の違いによる燃焼率への影響を確認すると共に、原型（縮尺の大きい模型）と縮小模型（縮尺の小さい模型）とで燃焼率を比較し、縮小模型による燃焼率の推定が可能であることを確認した。また、計測された燃焼率に基づいて一層ゾーンモデルを用いた計算を行い、燃焼率の考慮が火災室温度の予測に与える効果を確認した。

2. 相似則

本研究では、燃焼による実際の発熱速度（実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} ）や完全燃焼を仮定した燃料の発熱速度（公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} ）に対する実効発熱速度の比（燃焼率）について、幾何学的に相似で縮尺の異なる 2 つの区画模型で火源にも同じ燃料を用いることで、相似が成立するか否かを検討した。時間、燃焼速度、温度、ガス濃度など、その他の主要な物性値については Heskestad¹¹⁾や斉藤ら¹³⁾によって確認された以下の相似関係（相似則）に従う。

$$\text{時間} : \sqrt{L}/t = \sqrt{L'}/t' \quad (1)$$

$$\text{燃焼速度} : L^{2.5}/\dot{m}_b = L'^{2.5}/\dot{m}'_b \quad (2)$$

$$\text{温度} : (\text{原型と模型の対応する点で}) T = T' \quad (3)$$

$$\text{ガス濃度} : (\text{原型と模型の対応する点で}) C_i = C'_i \quad (4)$$

(L は代表長さ、 t は時間、 \dot{m}_b は燃焼速度、 T は温度、 C_i は化学種 i の濃度、縮尺の小さい模型の物性値には「'」を添える、以降同じ)

実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} は、燃焼生成物の発生量を \dot{N}_i (mol/s)、生成熱を ΔH_i (kJ/mol) として以下のように表せる。

$$\dot{Q}_{eff} = \sum \dot{N}_i \Delta H_i \quad (5)$$

ここで、式(3)(4)により、縮尺の異なる 2 つの模型で同じ温度・ガス濃度環境となることで燃焼性状も同じになると仮定して、可燃物単位重量あたりの各燃焼生成物の発生量が以下のように表せるとする。

$$\dot{N}_i/\dot{m}_b = \dot{N}'_i/\dot{m}'_b \quad (6)$$

以上の仮定が正しければ、式(2)(5)(6)と化学種ごとに ΔH_i が決定されることより、実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} および燃焼率 $\dot{Q}_{eff}/\dot{Q}_{nom}$ について原型と模型とで以下の相似関係が成り立つと考えられる。本研究では、縮尺の異なる 2 つの区画模型を用いて式(7)(8)で示される相似関係を確認した。

$$L^{2.5}/\dot{Q}_{eff} = L'^{2.5}/\dot{Q}'_{eff} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{eff}/\dot{Q}_{nom} = \dot{Q}'_{eff}/\dot{Q}'_{nom} \quad (8)$$

Heskestad¹⁰⁾は、式(3)のように区画内温度を一致させるためには、模型周壁（壁・天井・床）の材質・厚さを縮尺に応じて変える必要があることを示し、Croke¹¹⁾はそれに従って周壁材質・厚さを選定し、縮尺の異なる区画模型の温度を一致させた。しかし、実在の材料で、相似則を満たすものを得るのは必ずしも容易ではない。

一方、本研究の焦点である実効発熱速度や燃焼率への影響が大きいと考えられる物理量で温度の影響を受けるものは、流入空気量 \dot{m}_a や燃焼速度 \dot{m}_b （可燃物の熱分解量）であるが、流入空気量は 300℃ 以上であれば温度依存性は大きくなく¹³⁾、また、本研究では流量制御された気体燃料を火源とするので燃焼速度への配慮も必要ない。実効発熱速度の低下に伴って発生する一酸化炭素の燃焼に温度依存性があることにも注意が必要であるが、Heskestad¹⁴⁾の模型実験では、約 150K の温度差がある条件でも一酸化炭素濃度は概ね一致しており、温度差を当該値程度に抑えることで実効発熱速度への影響を少なくできる可能性がある。ある温度における燃焼率の把握が必要であっても、周壁の断熱性のある程度確保した上で、加熱を当該温度に到達するまで継続すれば良く、特に火源に気体燃料を使用できれば容易に対応できる。

これらの根拠と前述の材料選定の困難さから、本実験では、周壁からの熱損失についての相似則を考慮しない代わりに、周壁に耐火断熱材を用いて当該熱損失の影響が小さくなるよう留意した。

3. 実験方法

3.1 区画模型と実験条件

本実験では、図-1 の幾何学的形状が相似な 2 つの区画模型を用いて、表-1 に示すように開口形状や火源位置を変えた 6 実験を行い、前述の実効発熱速度・燃焼率の相似関係が成り立つかを確認した。

本研究で使用した模型の 1 つは間口 1,200mm、奥行き 1,800mm、室高さ 1,200mm の模型（「大模型」）で、もう 1 つは、これに対する縮尺が 1/2 となる、間口 600mm、奥行き 900mm、室高さ 600mm の模型（「小模型」）である。周壁は、実験 6-S-2 を除き、厚さ 3mm の鋼板を下地として、大模型で 100mm、小模型で 50mm のセラミックファイバーボード（CBD）を内貼りしたものである。但し、正面と背面の壁は、大模型

では鋼製アングルで補強した CBD を、小模型では CBD を直接、模型本体に取り付けた。実験 6-S-2 の周壁は、厚さ 3mm の鋼板の下地に、内側・外側それぞれ厚さ 50mm, 75mm のセラミックファイバーブランケット (CBL) を施した。但し、正面および背面の壁の下地は厚さ 5mm のけい酸カルシウム板とした。火源は長方形あるいは正方形の燃焼面積を有するガスバーナーで、燃料にプロパンを使用した。

実験 1～3 では開口形状が燃焼率の相似性に与える影響を確認するために、大模型、小模型それぞれで開口因子を一定に保ちながら、スリット形、長方形、正方形の 3 種類の開口で実験した。燃料の流量と供給時間が大区画と小区画で式(1)(2)を満たすように、開口因子から算定される区画内への流入空気量のすべてが燃焼に寄与した場合の発熱速度 \dot{Q}_{\max} ($=1500AH^{0.5}$, $AH^{0.5}$: 開口因子, A : 開口面積, H : 開口丈) の 50, 75, 100% に相当する燃料を段階的に増加するように供給した。実

験 6-S-2 を除き、実験 4～6 でも同様の燃料供給とした。

実験 3～5 では、同一の開口形状で、火源位置を開口近傍、区画中央、区画奥の 3 箇所に移動させて、火源位置の影響を検討した。

実験 6 は、開口因子を他の実験の 2/3 とした。火源形状は正方形で、長方形の火源を用いた他の実験とは異なる。当該実験では、他の実験と同様に大模型と小模型の比較を行う以外に、条件 6-S-2 で、 \dot{Q}_{\max} のおよそ 60, 90, 110, 120, 130% に相当する燃料を供給し、公称発熱速度が \dot{Q}_{\max} を超える場合の燃焼率を観察した。

3.2 計測方法

計測装置の概要を図-2 に示す。本実験では、区画模型から流出する燃焼ガスを集煙フードで収集し、排煙ダクト内で流量、温度、酸素・二酸化炭素・一酸化炭素の濃度を計測し、これらの値から酸素消費法¹⁵⁾に基づいて発熱速度を計測した。

本実験では区画模型の開口が小さいため分析対象となる燃焼ガスが少量であり、ガス分析装置の計測誤差

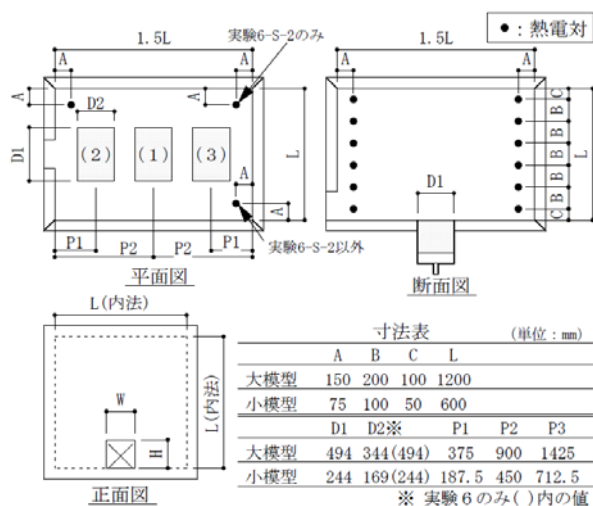


図-1 区画模型

Fig.1 Diagram of experimental compartment

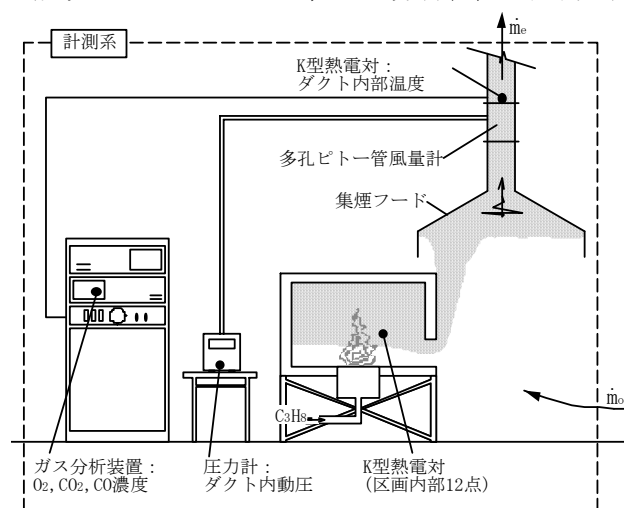


図-2 計測装置概要

Fig.2 Schematic of measuring system

表-1 実験条件

Table1 Experimental conditions

実験	個別名称	区画模型	開口				火源位置	公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} [kW]	周壁材質 (厚さ [mm])
			形状	幅 [mm]	丈 [mm]	開口因子 $m^{2.5}$			
1	1-L	大	スリット	26	1200	0.0342	1	25.5 38.2 50.7	CBD(100)+Steel(3)
	1-S	小		13	600	0.0060		4.5 6.8 8.9	CBD(50)+Steel(3)
2	2-L	大	長方形	91	516	0.0337	1	25.5 38.0 50.8	CBD(100)+Steel(3)
	2-S	小		46	258	0.0060		4.5 6.7 9.0	CBD(50)+Steel(3)
3	3-L	大	正方形	258	258	0.0338	1	25.6 38.2 50.8	CBD(100)+Steel(3)
	3-S	小		129	129	0.0060		4.5 6.7 8.8	CBD(50)+Steel(3)
4	4-L	大	正方形	258	258	0.0338	2	25.6 38.2 50.4	CBD(100)+Steel(3)
	4-S	小		129	129	0.0060		4.5 6.8 8.8	CBD(50)+Steel(3)
5	5-L	大	正方形	258	258	0.0338	3	25.6 38.0 50.8	CBD(100)+Steel(3)
	5-S	小		129	129	0.0060		4.5 6.8 8.8	CBD(50)+Steel(3)
6	6-L	大	正方形	220	220	0.0227	1	10.9 16.4 21.8	CBD(100)+Steel(3)
	6-S-1	小		110	110	0.0040		1.9 2.9 3.9	CBD(50)+Steel(3)
	6-S-2	小		110	110	0.0040		2.4 3.4 4.3 4.6 4.9	CBL(50)+Steel(3)+CBL(75)

※ 火源位置の番号の意味は次の通り 1: 区画中央 2: 開口近傍 3: 区画奥 (詳細は図1参照)

周壁材質の記号の意味は次の通り CBD: セラミックファイバーボード, CBL: セラミックファイバーブランケット, Steel: 鋼板

(スパントリフト)の影響に配慮する必要があった。そこで実験の前後や実験中に、燃焼ガスに替えて新鮮空気をガス分析装置に導入して得た新鮮空気濃度を用いて、煙濃度計測値の補正を行った。その為、以降で示す実験結果には実効発熱速度が0kWとなる部分が存在する。

また、区画模型内部の温度を計測するために、図-1中に示す位置にK型熱電対(計12点)を設置した。

4. 実験結果と考察

実験 1-L と 3-S の発熱速度及び区画内温度の計測結果を一例として図-3 に示す。また、各実験ごとに大模型と小模型で計測された燃焼率 $\dot{Q}_{eff}/\dot{Q}_{nom}$ を図-4 に示す。同図の横軸は等量比 ($\dot{Q}_{nom}/\dot{Q}_{max}$) であるが、ここでは公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} を、開口因子から算定される区画内への流入空気量のすべてが燃焼に寄与した場合の発熱速度 \dot{Q}_{max} で除した値とした。なお、燃焼率は燃料供給量(公称発熱速度)を変更する直前の計測値の平均としており、例えば実験 1-L, 3-S では図-3 中に“○”で表した値から算出した。

図-3 の通り、本研究の一連の実験では火源の燃料供給量、即ち、公称発熱速度を段階的に増加させ、実効発熱速度を計測した。図-4 のように、全実験条件共通の傾向として、公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} の増加に伴って燃焼率が低下することが言える。

本実験では、周壁からの熱損失に関する相似則を考慮しない代わりに、模型間での温度差が既往実験¹⁴⁾を

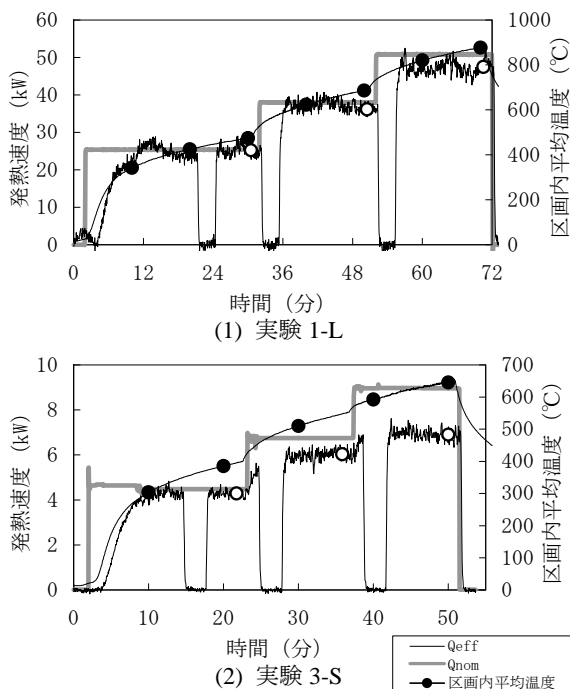


図-3 実験結果の一例
Fig.3 Example of experimental results

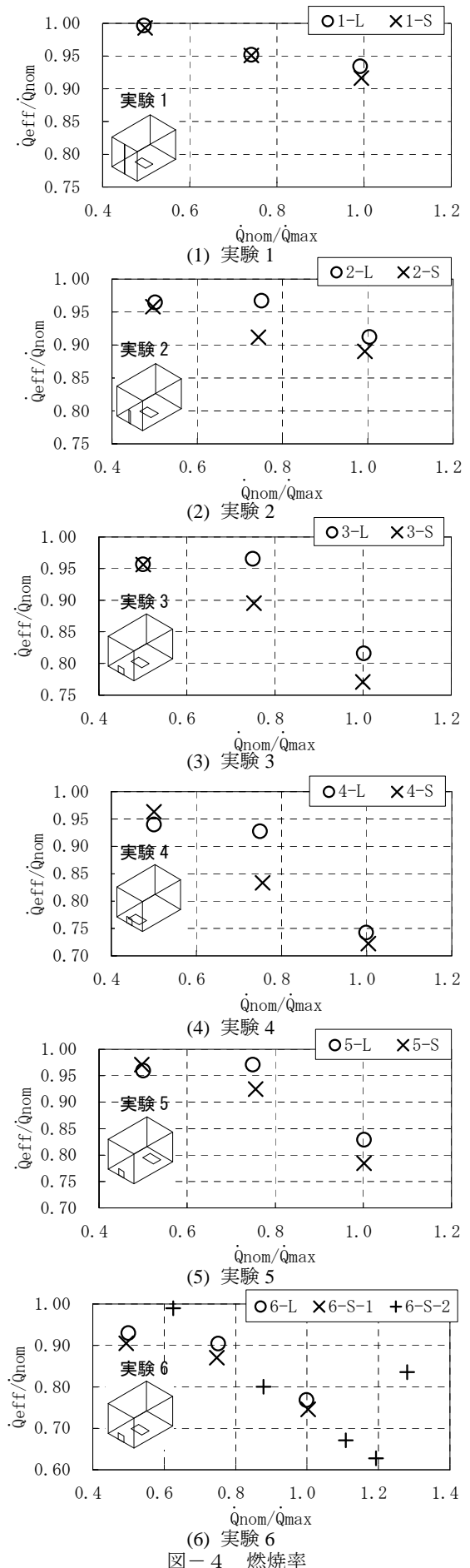


図-4 燃焼率
Fig.4 Combustion Efficiency

参考に 150℃程度に抑えられるよう、周壁に耐火断熱材を用いて周壁からの熱損失の影響が少なくなるよう配慮した。その結果、温度差は最大 180～200℃程度で、目標値 (150℃程度) と大きくは異ならなかった。

実験 4-L, 4-S で公称発熱速度が $1.0\dot{Q}_{\max}$ のときと、6-S-2 で $1.3\dot{Q}_{\max}$ のときのみ、明確な開口噴出火炎が確認された。特に、6-S-2 は、燃焼率の計測結果 (図-4 (6)) に開口噴出火炎の影響が明確に確認できる。

4.1 燃焼率への区画形状の影響

区画の幾何学的条件の違いが燃焼率に与える影響を確認するために、実験 1～3 では大模型・小模型それぞれで開口因子を一定に保ちながら開口形状を変化させ、実験 3～5 では火源位置を変更した。また、実験 3 と 6 は両方とも正方形の開口で火源位置もほぼ同等であるが、開口因子は実験 3 が実験 6 の 1.5 倍となっている。

図-4 の通り、開口因子が異なり、その他の条件はほぼ同じである実験 3 と実験 6 では燃焼率の低下に大きな差は見られなかったが、実験 1～3、実験 3～5 では燃焼率に区画形状の違いによる影響が確認される。一方、大模型と小模型の燃焼率を比較すると概ね一致しており、これらの燃焼率への影響は縮尺に関係なく発生すると考えられる。以上より、開口因子を同一としても、開口形状や火源位置など幾何学的条件の違いによる影響を受けて燃焼率は変化すると言えるだろう。

4.2 燃焼率の推定への模型実験の有効性

大模型と小模型の燃焼率を比較すると、幾つかの実験で等量比が 0.75 の時に比較的大きな差が見られたり、全体的に小模型の方が大模型より幾分小さめの値であったりするが、実験毎の幾何学的条件の違いによる差に比べて良く一致する結果となった。特に、等量比 1.0 では、大区画と小区画は 0.04 未満の差で一致しており、開口が少なく換気支配型となる火災の燃焼率の推定に幾何学的に相似な縮小模型実験が有効であると考えられる。また、実験 4 の等量比 1.0 では、大模型・小模型共に明確な開口噴出火炎が発生した状態で燃焼率が良く一致したことから、幾何学的に相似な縮小模型を用いることで、区画内だけでなく、開口噴出火炎も含めて燃焼率を推定できることが示唆される。

一方、等量比が 0.75 のときには、大模型と小模型の燃焼率に比較的大きな差が見られるが、加えて、例えば実験 2 や実験 3 で火災形状に明確な差 (大模型：区画奥に向けて床を這うような火炎、小模型：幾分後方に傾きつつ立ち上がり煙層に貫入する火炎) が確認されたことから、燃焼性状も相似でなかったと考えられる。この原因として、等量比 0.75 は火災初期のような

燃料支配型の状態 (等量比 0.5) から換気支配型の火災盛期の状態 (等量比 1.0) に変化する段階であり、縮尺や温度などの影響により、小模型では前者寄り、大模型では後者寄りの性状となりやすかったことが考えられる。以上のように、等量比 0.75 程度では火災性状が変化しやすい可能性があるため、本実験手法で燃焼率を推定するのは難しいと思われる。

4.3 燃焼率を考慮した火災室温度の推定

燃焼率の考慮が火災室温度の予測結果に与える効果を確認するために、実験 6-L と実験 6-S-1 を対象に、燃焼率を考慮して一層ゾーンモデルで求めた温度計算値と、燃焼率を無視した計算値とを比較した。

計算結果を、図-5 に示す。発熱速度は、燃焼率を考慮する計算では公称発熱速度に燃焼率実測値 (図 6(6)) を乗じた値とし、燃焼率を考慮しない計算では公称発熱速度を使用した。なお、燃焼率を考慮するときの入力値を、実効発熱速度の実測値としなかったのは、公称発熱速度の増加直後は、模型内のガス濃度が上昇する途中であるため、燃焼で発生するガスよりも模型開口から流出するガスの濃度が低く、酸素消費法の計測値が実際の値を下回ると考えたためである。

区画開口部の流量係数は 0.7 とし、周壁 (CBD) の熱物性は以下の通りとした。

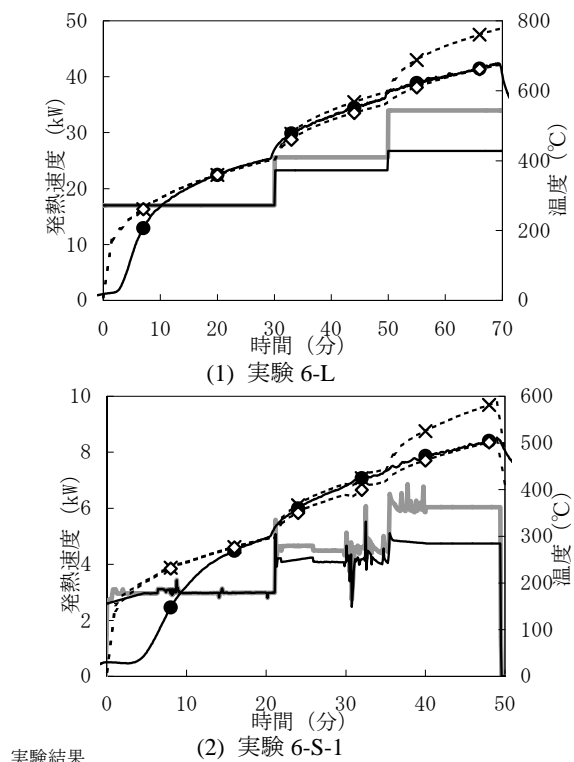


図-5 一層ゾーンモデルによる温度予測結果
Fig.5 Temperatures predicted by one-zone model

密度：230kg/m³ 比熱：1.13kJ/kg/K 放射率：0.7
熱伝導率：0.071(200℃), 0.081(400℃), 0.107(600℃)
0.142(800℃), 0.191(1000℃) W/m/K ()内は温度

図-5 では燃焼率の有無に関わらず 15 分迄は計算値と実測値の差が大きい。この原因は、実験ではバーナー内部が燃料で充満する迄は区画内部への燃料供給は十分でないが、この燃料供給の時間遅れを計算では無視したためである。

図-5 の通り、実験 6-L・6-S-1 共に、燃焼率を考慮した計算結果は実測値と良く一致し、一方、燃焼率を無視した場合には、発熱速度が $1.0\dot{Q}_{\max}$ のときに(図 9(1)：50 分以降、(2)：35 分以降)、計算値は実測値より高くなっており、燃焼率の考慮によって火災室温度が精度良く予測可能であることが確認できた。以上の結果から、本研究で扱ったような開口が少ない室を耐火設計するには、本検討のように燃焼率を考慮して火災室温度を予測することでより妥当な評価が可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究では、可燃物量に対して開口が少ない室の火災における燃焼率と火災室温度の推定を可能にするために、幾何学的形状が相似で縮尺の異なる 2 つの区画模型を用いて実験を行い、燃焼率推定への縮小模型実験の有効性、および火災室温度予測への燃焼率考慮の効果について以下の結論を得た。

- ① 開口因子が同一であっても、開口形状や火源位置など火災室の幾何学的条件の違いによる影響で燃焼率が変化する。
- ② 換気支配型火災の燃焼率の推定に幾何学的形状が相似な縮小模型による実験が有効である。
- ③ 開口の少ない室の火災室温度は燃焼率を考慮することで良い精度で予測できる。

今後は、コア回りの居室・倉庫等の換気開口の小さい室の合理的設計への本推定手法の適用へ向けて検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 中村正寿, 上川大輔, 長谷見雄二：区画火災の燃焼率(その 1, 2)と実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 225-228, 2006.
- 2) 長岡勉, 出口嘉一, 新谷祐介, 原田和典：換気支配燃焼の燃焼効率, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.227-230, 2008.
- 3) Tewarson, A. : Fully Developed Enclosure Fires of Wood Cribs, Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1555-1566, 1984.
- 4) 成瀬友宏, 菅原進一：木材の発熱量の予測 - 火災区画内の発熱量の予測その 1 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 513 号, pp.189-194, 1998.11.
- 5) Takeda, H. and Akita, K. : New Modeling of Liquid or Thermoplastic Pool Fires in Compartment, Nineteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.897-904, 1982.
- 6) Beyler, C.L. : Major Species Production by Solid Fuels in a Two Layer Compartment Fire Environment, First International Symposium on Fire Safety Science, pp.431-440, 1985.
- 7) Gottuk, D.T., Roby, R.J. and Beyler, C.L. : The Role of Temperature on Carbon Monoxide Production in Compartment Fires, Fire Safety Journal, vol.24, pp.315-331, 1995.
- 8) Yamada, T., Takanashi, K., Yanai, E., Suzuki, T. and Sekizawa, A. : An Experimental Study of Ejected Flames and Combustion Efficiency, The Seventh International Symposium on Fire Safety Science, pp.903-914, 2002.
- 9) Gottuk, D.T. : Generation of Carbon Monoxide in Compartment Fires. National Institute of Standards and Technology, Report NBS-GCR-92-619, 1992.
- 10) Heskestad, G. : Physical Modeling of Fire, J. Fire and Flammability, Vol.6, pp.253-273, 1975.7.
- 11) Croce, P.A. and Xin, Y. : Scale Modeling of Quasi-Steady Wood Crib Fires in Enclosures, Progress in Scale Modeling (Edit. Saito, K.), pp.121-132, 2008.
- 12) 齊藤孝三, 江守一郎：鉄道車両火災の模型実験と相似則, 日本機械学会論文集 (B 編), 46 巻 407 号, pp.1348-1354, 1980.7.
- 13) Nakaya, I., Tanaka, T. and Yoshida, M. : Doorway Flow Induced by a Propane Fire, Fire Safety Journal, Vol.10, pp.185-195, 1986.
- 14) Heskestad, G. : Modeling of Enclosure Fires, Fourteenth Symposium (International) on Combustion, pp.1021-1030, 1973.
- 15) 田中孝義, 吉田正志：模型箱試験の開発と酸素消費法, GBRC, vol.10, No.4, pp.59-68, 日本建築総合試験所, 1985.
- 16) 大宮喜文, 田中孝義, 若松孝旺：可燃物条件を考慮した区画火災性状予測モデルの構築, 日本建築学会計画系論文集, 第 487 号, pp.1-8, 1996.