

建築火災の燃焼率の定量的推定のための
模型実験に関する研究

Reduced Scale Test for Quantitative Prediction of
the Combustion Efficiency in Building Fires

2017年2月

中村 正寿

Masatoshi NAKAMURA

建築火災の燃焼率の定量的推定のための
模型実験に関する研究

Reduced Scale Test for Quantitative Prediction of
the Combustion Efficiency in Building Fires

2017年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

中村 正寿

Masatoshi NAKAMURA

目次

第 1 章 序論	1
1.1. 研究背景.....	3
1.2. 既往研究.....	6
1.2.1. 燃焼率の低下と空気量との関係	6
1.2.2. 区画の幾何学的形状が燃焼率に与える影響.....	8
1.2.3. 換気量に関する研究	9
1.3. 研究目的.....	11
1.4. 研究フロー	12
参考文献.....	14
第 2 章 燃焼率に関する相似則の検討	17
2.1. はじめに.....	19
2.2. 相似則の導出.....	20
2.3. 実験および計算方法.....	24
2.3.1. 実験における火災の想定	24
2.3.2. 当量比	25
2.3.3. 実験方法.....	26
2.3.3.1. 実験条件および区画模型.....	26
2.3.3.2. 計測装置の概要	30
2.3.3.3. 小型集煙フード	33
2.3.3.4. 実効発熱速度および燃焼率の計測方法.....	35
2.3.3.5. 一酸化炭素発生量の計測方法	36
2.3.4. 区画内温度の計算方法.....	38
2.3.4.1. 放射熱伝達の設定.....	41
2.4. 実験結果.....	48
2.5. 考察.....	53
2.5.1. 相似則の妥当性.....	53
2.5.2. 燃焼率を考慮した区画内温度の推定.....	53
2.5.2.1. 検討方法	53
2.5.2.2. 実験 1-Q-1 の計算	54
2.5.2.3. 実験 1-H の計算	56
2.6. まとめ	58
参考文献.....	59

第 3 章 可燃物配置・開口条件の燃焼率への影響の検討	61
3.1. はじめに.....	63
3.2. 実験方法.....	64
3.2.1. 区画模型.....	64
3.2.2. 実験条件.....	66
3.2.2.1. 開口形状の影響を把握する実験（実験 2～4）.....	67
3.2.2.2. 火源位置の影響を把握する実験（実験 4～6）.....	68
3.2.2.3. 開口因子・流入空気の平均滞留時間の影響を把握する実験（実験 4）.....	68
3.2.3. 計測方法.....	69
3.3. 実験結果.....	73
3.3.1. 計測結果の概要と全体的傾向.....	73
3.3.2. 開口形状を変えた実験.....	79
3.3.3. 火源位置を変えた実験.....	80
3.3.4. 開口因子を変えた実験.....	82
3.4. 考察.....	83
3.4.1. 区画内温度の影響.....	83
3.4.2. 開口形状の影響.....	86
3.4.3. 火源位置の影響.....	87
3.4.4. 相似則の妥当性.....	88
3.5. まとめ.....	90
参考文献.....	92
第 4 章 天井高さの換気量および燃焼率への影響の検討	93
4.1. はじめに.....	95
4.2. 火炎部分に働く浮力の仕事は換気量に及ぼす影響の考え方.....	97
4.2.1. 想定する火災および換気.....	97
4.2.2. 火炎部分の浮力の仕事を考慮した換気量の計算方法.....	98
4.3. 実験概要.....	100
4.3.1. 実験条件および区画模型.....	100
4.3.2. 計測方法.....	103
4.4. 実験結果.....	106
4.4.1. 区画内温度.....	111
4.4.2. 換気量.....	112
4.4.3. 燃焼率.....	113
4.5. 考察.....	114
4.5.1. 火炎浮力の仕事による換気量への影響.....	114

4.5.1.1.	火炎浮力を考慮した換気量の計算値と実験値の間の差の原因	116
4.5.2.	天井高さと燃焼率との関係	117
4.5.3.	模型実験における天井高さに関する留意点.....	118
4.6.	まとめ	119
	参考文献.....	120
第 5 章	実規模実験による相似則の検証.....	121
5.1.	はじめに.....	123
5.2.	相似則	124
5.3.	実験概要.....	126
5.3.1.	火災の想定.....	126
5.3.2.	実験条件.....	126
5.3.3.	火災区画および実験方法	127
5.3.4.	計測方法.....	133
5.4.	実験結果.....	134
5.5.	考察.....	140
5.5.1.	実験 4-F, 実験 4-H および実験 4-Q の比較.....	140
5.5.2.	実験 7-F と実験 7-Q の比較.....	141
5.5.3.	相似則の妥当性.....	142
5.6.	まとめ	145
	参考文献.....	146
第 6 章	結論	147
6.1.	研究成果の総括.....	149
6.1.1.	各章の検討内容と成果.....	150
6.1.1.1.	第 2 章「燃焼率に関する相似則の検討」について	150
6.1.1.2.	第 3 章「可燃物配置・開口条件の燃焼率への影響の検討」について	151
6.1.1.3.	第 4 章「天井高さの換気量および燃焼率への影響の検討」について	152
6.1.1.4.	第 5 章「実規模実験による相似則の検証」について.....	153
6.1.2.	燃焼率に関する相似則の要点.....	154
6.2.	今後の展望	157
	参考文献.....	158
記号一覧	159
謝辞および本論文に関わる研究業績	165
謝辞	167
本論文に関わる研究業績	169

第1章 序論

第1章 序論

1.1. 研究背景

現在、日本国内では年に2万5千件ほどの建物火災（建物又はその収容物が焼損した火災）が発生している¹⁾。この中には、例えば、火災としてはごく初期の段階で鎮火して小火（ぼや）で済むものもあれば、火災室の至る所に燃え広がり、激しい燃焼とそれに伴う高温状態が継続してしまうものもある。後者は「盛期区画火災」あるいは単に「盛期火災」などと呼ばれ、人命はもちろん、建物構造の健全性にも被害を及ぼす危険性が高いことから、火災安全対策上の重要性が高く、研究も古くから行われてきた。しかし、未だ不明な点も存在する。その一つが燃焼率であり、今のところ定量的に推定する手法は存在しない。

なお、本論文において燃焼率とは、完全燃焼時の発熱速度（公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} ）に対する実際の発熱速度（実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} ）の割合であり、記号 η で表し、下式で定義する。

$$\text{燃焼率 } \eta = \frac{\dot{Q}_{eff}}{\dot{Q}_{nom}} \quad \text{式 1-1}$$

盛期火災での燃焼率の低下を推定する手法がないことは、どのような問題となるのか？火災の根本的現象が燃焼であるだけに、燃焼率は火災安全の色々な事柄に関係するが、実務面からは、耐火性能検証などでの区画内温度予測が挙げられる。

平成12年の建築基準法の性能規定化により、主要構造部の耐火設計について従来からあった仕様設計に加えて性能設計（耐火性能設計）を選択できるようになった。仕様設計では階数と柱・梁といった部材種類毎に要求される耐火時間が決まっているのに対して、性能設計では建物内の部屋（区画）毎に出火から火災終了までの区画内温度を予測し、その火災に部材が耐えられるかの検証（耐火性能検証）を行う。個々の室の火災性状に応じて耐火部材を選択できる点において、性能設計は仕様設計より合理的な方法であると言える。性能設計を行った結果、仕様設計より耐火仕様が重厚になる室もあれば、軽減される室もある。前者では、耐火性能の不足の解消、後者では余分の削減であり、その結果、耐火性能の最適化や建設費用の削減が可能になる等のメリットがある。また、このメリットを享受するために研究・開発が進められ、火災安全技術の高度化に繋がるという副産物的効果も期待される。

耐火性能検証は区画内温度予測に基づくため、検証結果は区画内温度の予測結果に影響される。その区画内温度は、火災室内部の燃焼発熱と失熱のバランスから予測されるので、燃焼発熱量の設定によって結果が左右される。結局、耐火性能検証の結果として部材への要求性能がどうなるのか、どの程度のメリットが生まれるかといったことに、火災室内の燃焼発熱量の設定が影響するのである。

安全な建物を作るためには最も厳しい状態の火災に耐えられる必要があるので、耐火性能検証では盛期火災を想定するのが一般的である。ところで、盛期火災では燃焼率が低下する可能性がある（詳細は次節で述べる）。火災室内で完全燃焼まで至らなかった可燃性ガスは図 1-1(1)のように、噴出火炎として火災室外で燃焼したり、未燃のまま火災室外に流出したりして、火災室の温度上昇に対して殆ど寄与することはない。しかし、今のところ燃焼率の低下を定量的には推定できない。そこで耐火性能検証ではどのように対応するかというと、不確実なものには最も厳しい条件を想定して検討すれば、確実に安全な結果が得られる、ということで、燃焼率の低下を無視して、図 1-1(2)のように火災室内の可燃物から発生した可燃性ガスは火災室内で完全燃焼すると仮定するのが普通である。

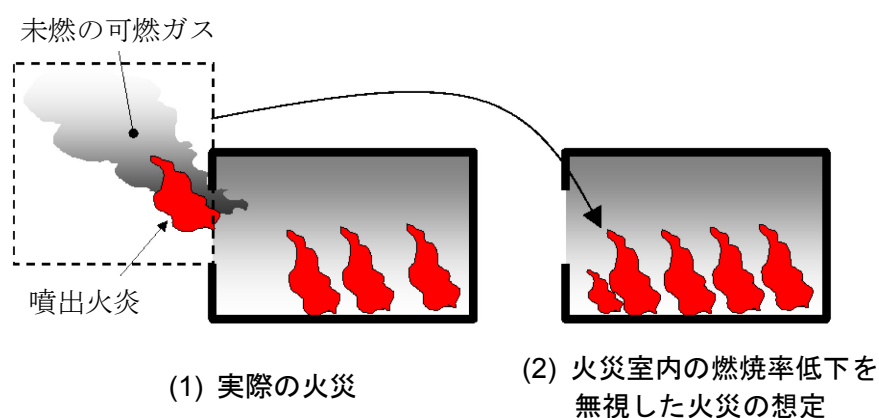


図 1-1 耐火性能設計での燃焼率の取り扱い

完全燃焼を仮定した分、火災室内の燃焼発熱量が大きめの設定となるので、区画内温度予測結果は高めに、部材への要求耐火性能も高めになる。これは前述の耐火性能設計のメリットが目減りしていることになるが、それでもなおメリットがあれば良い。時には、建物の大部分でメリットが見込めるとしても、一部の室での要求耐火性能が大変高く（長時間の耐火性能が要求され）、採用可能な耐火仕様が事実上ないために、性能設計そのものを諦めざるを得ないような場合もある。そして、このような室はコア周りの居室など、有効な換気開口が設けられない或いは極めて小さい室、すなわち、火災時に換気量が不足して燃焼率が低下しやすいと考えられる室であることが多い。もし、燃焼率が定量的に推測できるようになり、燃焼率の低下を考慮した耐火性能検証が可能になれば、コストメリットが大きくなると共に、性能設計自体の機会が増えて火災安全技術の高度化も促されるはずである。

以上は耐火性能設計についてであるが、燃焼率の低下は火災室外への未燃ガスの流出も意味することから、隣棟・上階延焼で重要であり未だ不明な点の多い開口噴出火炎にも関わるし、一酸化炭素等の毒性の高い中間生成物が燃焼率の低下に伴って大量発生し、それ

らが火災室から建物内の隣接空間に流出する恐れを考えると避難安全にも関係するなど、火災安全の広範に関係する基礎的な指標と言える。

耐火性能設計のように、完全燃焼を仮定して危険側を想定した条件設定が可能であればまだ良いが、開口噴出火炎や隣接空間への一酸化炭素等の流出などの問題ではそうもいかない。もし、不明確な要素（燃焼率）が結果を左右しないように検討条件を考えるなら、例えば「火災室内では全く燃焼しないで、火災室外に火炎あるいは有毒ガスの形で全て流出する」というように過剰になってしまう。この様にならないためには、火災室内での燃焼率の低下を妥当に設定できる必要がある。

また、これらの現象も含め火災安全上の課題の解決のためには、まず現象の理解が必要であり、実験はその有効な手段であるが、やはり燃焼率が関係する。実際の現象を精度良く再現するという点で言えば、実規模実験が理想的である。しかし「火災を実規模で」となると実験は大きくならざるを得ないのが難点である。大きな実験をしたくても、そもそも実験施設の規模や排煙能力等による限度がある上に、長期の準備期間が必要、計測が難しい、安全面や費用面といった問題も付いてくるので、よっぽど恵まれてでもない限り、おいそれとは実施できない。

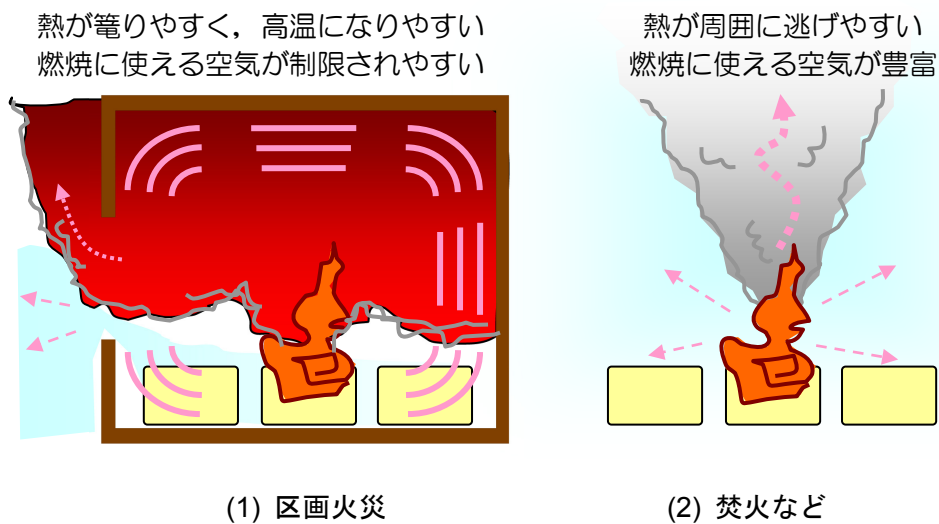
とすれば、少なくとも試行錯誤段階では小規模実験に拠らざるを得ない。小規模実験は、実規模実験に比べて実施するのが格段に容易であるが、実験規模を小さくしたことの影響（スケール効果）が顕れる心配がある。そして、燃焼率にスケール効果がどのように働くかは今のところ不明である。燃焼率が火災安全に関して基礎的な指標であることを考えると、小規模実験で得られた燃焼率が実規模でどのようになるのか推定できれば、より効率的な実験が可能になる他に、これまでに公表されている沢山の小規模実験の結果をより効果的に活用することも可能になるなど、火災安全工学の発展への多少の貢献も期待できる。

以上のように、燃焼率を定量的に推定できるようにすることが、より合理的な耐火性能設計を可能にするだけでなく、避難安全や、今後の研究が期待される開口噴出火炎による上階延焼など火災安全の広範に関係すること、および、それらの効率的な実験実施への寄与も期待できることから、本研究にて取り組むこととした。

1.2. 既往研究

1.2.1. 燃焼率の低下と空気量との関係

本論文において「燃焼率」とは、火災時に燃料（火災空間内の可燃物など）が燃焼・発熱した割合を表す。具体的には、燃料が完全燃焼したときの発熱速度に対する実際の発熱速度の割合である。建築物等の室内の火災は、「区画火災」「室火災」などと呼ばれる。これは、壁・床・天井（以降「周壁」）によって囲まれていることやそれに由来する特徴が多いことによるが、燃焼率の低下もその特徴の一つである。区画火災の燃焼率の低下については、図 1-2 のように、焚火やキャンプファイヤーなどのように周壁が無い場合との違いを想像すると解り易い。



(1) 区画火災

(2) 焚火など

図 1-2 区画火災と焚火などとの違い

燃焼には酸素が必要である。酸素が燃料に対して不足すると、燃料の一部が燃えることができなくなり、燃焼率が低下する。火災の場合、空気中の酸素が使われるので、どれだけ新鮮な空気があるかが燃焼率に影響する。区画火災では、図 1-2(1)のように空気の流入経路は窓などの開口に限定されるため、区画の大きさに対して開口が小さい場合には、必ずしも同図(2)の焚き火などのように燃焼部分の周囲に豊富に空気（酸素）があるとは限らず、区画内部の燃焼率が低下する可能性がある。

火災はその進展状況に応じて、初期、成長期、盛期、減衰期に分けられるが、以上のような空気不足による燃焼率の低下は盛期火災で発生しやすい。その理由は、盛期火災では他の時期より盛んな燃焼が継続し、区画内温度が高くなるため、可燃物の熱分解による可燃性ガス発生量が増加し、それに伴って火災室内の燃焼に必要な酸素量が増加するためである。開口が小さく流入空気量が少ない室で盛期火災に至ると、増加した可燃性ガス発生量に対して室内の酸素量が不足しやすく、燃焼率の低下が発生しやすい。

以上のような、区画火災での燃焼率の低下と空気量の関係については、Tewarson²⁾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、Beyler^{3,4)}は、火災室内に煙と空気の2層が形成された状態（以降「2層状態」）を想定した実験を行い、燃焼生成物の発生率や酸素の消費率が燃空比や当量比に相関することを示すと共に、単位酸素消費量あたりの発熱量が一定であると仮定した場合に完全燃焼時を1として正規化した酸素の消費率は燃焼率を表すと述べたうえで、酸素の消費率および二酸化炭素・水・炭化水素の発生率が、当量比を引数とする簡易式と概ね一致することを示している。近年では、成瀬ら^{5,6)}は、当量比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いる。このように、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にされている。

なお、当量比、空気過剰率および燃空比は燃料と空気の混合比を示す指標であり、以下の式で表される。

当量比 : 化学量論比の状態での1になるように正規化した燃空比

$$\phi = \frac{m_b}{\xi_{stoich} m_o} \quad \text{式 1-2}$$

空気過剰率 : 化学量論比の状態での1になるように正規化した空燃比、当量比の逆数

$$\lambda = \frac{\xi_{stoich} m_o}{m_b} \quad \text{式 1-3}$$

燃空比 : 燃料の質量と空気の質量の比

$$\xi = \frac{m_b}{m_o} \quad \text{式 1-4}$$

ここで、

m_b : 燃料と酸化剤の混合気体中の燃料の質量[kg]

m_o : 燃料と酸化剤の混合気体中の空気の質量[kg]

ξ_{stoich} : 量論燃空比（化学量論的混合状態における燃空比）

本研究の実験では、火災室内の気体をひとつの混合気とみなし、火災室に流入する空気量に対する可燃性ガス量の多寡を示す指標として当量比 ϕ を以下のように定義する。

$$\phi = \frac{\dot{m}_b}{\xi_{stoich} \dot{m}_o} \quad \text{式 1-5}$$

ここで、

\dot{m}_b : 火災室内の可燃性ガスの発生量[kg/s]

\dot{m}_o : 火災室に流入する空気量[kg/s]

当量比が大きいほど、区画内の酸素量に対して可燃性ガス量が多いので、燃焼率が低下しやすい。逆に、当量比が小さければ、燃焼率は低下しにくい。可燃性ガス発生量や換気量（および火災室形状、火災室周壁の断熱性）の条件が同じであれば、燃焼率が高いほど区画内温度は高温となる。しかし、燃焼率が高い（低下しにくい）、すなわち、当量比が小さいのは、火災の初期や可燃物量がそもそも少ないような場合であり、このようなときの区画内温度は比較的高温になりにくい。区画内温度がより高温となりやすいのは、当量比が高く、火災室内に供給される空気量の全て（または、殆ど）を消費し尽くすほどの可燃性ガスが発生する場合である。従って、耐火性能検証等で部材への要求耐火性能が高くなるのも当量比が大きい場合が多い。

1.2.2. 区画の幾何学的形状が燃焼率に与える影響

一方、空気過剰率・当量比が支配的であるとして、他の影響因子が存在する可能性がある。というのは、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からである。例えば前述の **Tewerson**²⁾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^{7),8),9),10)}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せず、ばらつきが見られる。この原因としては以下のように、区画の幾何学的形状の違いによる影響が考えられる。

長岡ら⁸⁾の実験では、 $0.86 \times 0.86 \times 0.85\text{m}$ と $3.55 \times 4.75 \times 0.4\text{m}$ の形状の大きく異なる2つの模型区画における燃焼率が、同じ当量比であっても一致しない結果を示している。この結果から、空気過剰率・当量比のほかに、模型区画の幾何学的形状の違いが燃焼率に影響した可能性があると考えられる。

また、**Takeda**ら¹¹⁾は区画に流入した空気の平均滞留時間への燃焼率の依存性を想定したモデルで燃焼速度を計算し、実測値と良好に一致する結果を得ている。**Beyler**^{3),4)}、**Gottuk**ら¹²⁾は、火災室内に煙と空気の2層が形成された状態（以降「2層状態」）を想定した実験で、煙層内の燃焼について、流入空気の平均滞留時間や区画内温度が一酸化炭素の燃焼量、或いは、燃焼率に影響を与えることを示している。これらについても、空気の平均滞留時間が（換気量のほかに）区画容積によっても変わることを見ると、区画の幾何学的形状の違いによる燃焼率への影響が推測される。

ちなみに、盛期火災は、**Beyler**^{3),4)}、**Gottuk**ら¹²⁾のような明確な2層状態というよりは、室の殆どが煙で充満している状態に違いが、室上部で煙濃度が高くなる点は同じであることから、盛期火災においても、室上部の煙濃度の高い領域内で燃焼率が下がりやすい可能性が考えられる。また、長谷見ら¹³⁾の天井面下に広がる火災に関する実験においても、自由空間中の火災と比べて天井面火災では大幅に燃焼率が低下することが確認されている。より天井が低いほど、室上部・天井面近傍に流れ込む未燃ガスがより増えると考えられるが、これらの実験を考慮すると、より燃焼率が低下する可能性が考えられる。

ここまでは区画の幾何学的形状の違いによって燃焼率が変化したと考えられる事例であ

るが、反対に、区画が幾何学的に相似な場合はどのようなになるのか？

Heskestad¹⁴⁾, Croce¹⁵⁾, 齊藤ら¹⁶⁾の模型実験では、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則が確認されている。特に Heskestad¹⁴⁾, Croce¹⁵⁾の実験で、酸素、二酸化炭素および一酸化炭素濃度が相似模型間で概ね一致していることから、区画内部のガス濃度に燃焼状態が反映されると考えれば、燃焼率も幾何学的に相似な模型間で概ね一致していたと推測される。

以上のように、既往実験結果に見られる燃焼率のばらつきは、区画の幾何学的形状の違いによる可能性があり、そして、幾何学的に相似な模型であれば燃焼率を検討対象と一致させられる可能性があると考えられる。

1.2.3. 換気量に関する研究

換気量は燃焼率に密接に関わる。換気量は開口形状などによって決まるとされているが、区画のほかの部分の形状の違いが換気量に影響する可能性に注意して既往研究をしてみる。

盛期火災時の換気量の予測に関する先駆的研究は、関根・川越による耐火造室内の火災性状に関する研究の中でなされた。彼らは、燃焼速度への火災室の換気量の影響を着想し、火災室内部のガス密度を一様と仮定し、開口部を挟んだ内側と外側の圧力差（開口部差圧）にベルヌーイ式を適用して換気量を計算するモデルを示し¹⁷⁾、さらに、当該換気モデルによる計算結果が 600～900℃の区画内温度では温度依存性が無視できて開口因子 $A_w\sqrt{H_w}$ (A_w :開口面積, H_w :開口丈) に比例することを示した¹⁸⁾*。その後、換気量と開口因子の比例関係については Rockett¹⁹⁾が区画内温度が 150℃以上で温度依存性が小さくなることを予想し、Nakaya ら²⁰⁾は 300℃以上で成立することを実規模実験で確認した。

火災室内外のガス密度差に基づく開口部差圧から換気量を求める考え方は火災室内のガス密度が高さ方向に変化する場合にも適用され、Steckler ら^{21),22)}と Nakaya ら²⁰⁾によって初期火災および盛期火災の実規模実験が行われ妥当性が示された。

近年では Quintiere ら²³⁾がドア・窓の開口を考慮して理論的検討を踏まえて実験式を提案し、既往実験結果との良い一致を示している。また Yii²⁴⁾は開口幅が壁面の全幅にわたる場合について理論式を提案している。これらの予測式は、必ずしも区画内を一様と見なさず、高温の上部層と比較的低温の下部層とに分かれた状態を考慮している点に特徴がある。

実際の火災では開口条件や可燃物等の配置に応じて火炎が偏在するため、ガス密度の分布は水平方向で多少なりとも変化する。

火炎などガス密度が周囲より小さい部分には浮力が働く。火炎部分の浮力と区画内を巡る換気の流れとで方向が一致する場合、当該浮力が換気を促進する可能性が考えられる。火災室内の換気の流れは換気開口の数や位置などの条件によって変わるので、全ての火災

* ちなみに、川越邦雄博士は「大賞受賞によせて」（建築雑誌, Vol.109, No.1361, p.82, 1994年8月号）のなかで「燃焼速度が $A\sqrt{H}$ に比例する簡略化および火災温度の熱収支による追跡は、実験を共にした関根孝の慧眼によるものでした。」と述べている。

にこの予想を当てはめられるとは限らないが、例えば、図 1-3 のように、外壁に開口が設けられ、かつ、室の奥に火炎が存在する火災の場合には、この予想が成立する可能性が高いだろう。さらに、火炎の高さの最大値が天井高さで決まることを考慮すれば、天井が高いほど換気が促進される可能性も考えられる。

燃焼率と密接に関わることから、火炎部分の浮力が盛期火災の換気量に影響しうるのか確認することが望まれる。しかし、前述の通り、既往研究では、区画内一様とみなすか高さ方向の変化のみを考慮することが多く、当該影響についての検討は殆ど行われていない。また、この検討には天井高さを変えるなどにより火炎部分が占める鉛直方向の高さを変えた実験が有効と考えられるが、そのような実験報告は見当たらない。

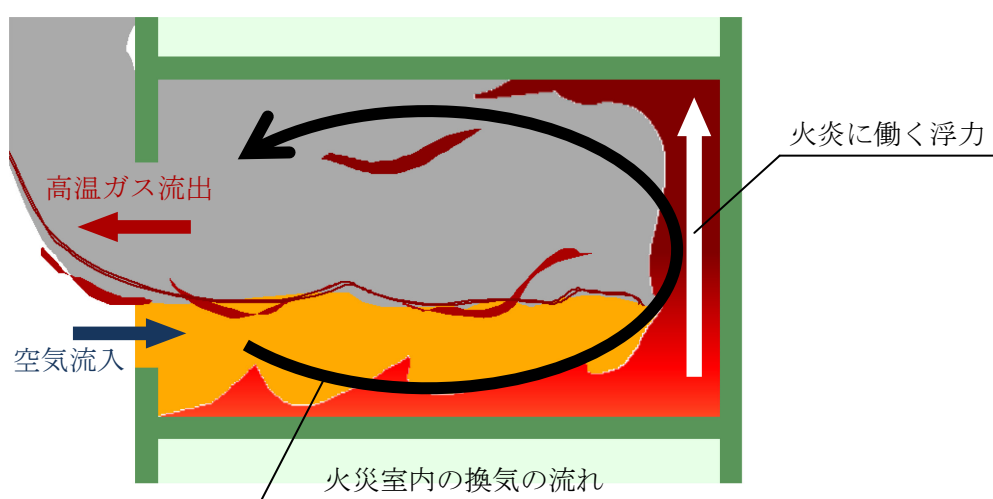


図 1-3 火炎の部分に働く浮力と換気の流れの方向が一致する火災の例

1.3. 研究目的

室容積に対して開口が小さい室（以下、「小開口区画」）で盛期火災に至ると、燃焼に必要な空気が不足して燃焼率が低下することが考えられる。今のところ燃焼率の定量的推定手法は無いが、もし推定できるようになれば、燃焼率が関係する火災安全設計の精度向上に繋がるだけでなく、火災現象の把握手法として未だ有力な小規模実験の燃焼率と実現象との関係も明確になり、今後の火災研究への寄与も期待される。

既往実験を概観すると、燃焼率には当量比・空気過剰率つまり、燃料供給量と空気量のバランスが支配的に影響すると考えられるが、火災区画の幾何学的形状の違いに起因すると予想されるばらつきも存在する。燃焼率を定量的に推定できるようにするには、このばらつきを解決する必要があるが、その方法として幾何学的に相似な模型を用いた実験（模型実験）が有力であると考えられる。

そこで本研究では、燃焼率が低下しやすいと考えられる小開口区画の盛期火災を対象として、既往知見を拡張して燃焼率の相似則を導くと共に、それに基づいた模型実験手法を開発することにより、燃焼率を定量的に推定できるようにすることを目的とする。

なお、小開口区画の開口条件については、耐火性能設計で長時間耐火になって実務上の問題となりやすいコア周りの居室など、有効な換気開口が少ない室を想定して、平成12年度建設省告示1433号「耐火性能検証に関する算出方法等を定める件」²⁶⁾に記載されている開口部が極端に少ない室の条件を参考に、有効開口因子を $A_r\sqrt{H_r}/70$ (A_r : 室の床面積, H_r : 室高さ) 以下として検討する。

1.4. 研究フロー

本論文の研究フローを図 1-4 に示す。本論文は 6 章で構成され、第 1 章にて研究背景・目的、第 2 章にて燃焼率推定のための相似則の導出、第 3 章・第 4 章では区画形状の違いが燃焼率に与える影響を検討すると共に相似則の汎用性と模型実験での留意点の把握を行い、第 5 章で相似則を実規模実験により検証し、最後に第 6 章にて研究全体の総括を行う。以降に、各章の内容を述べる。

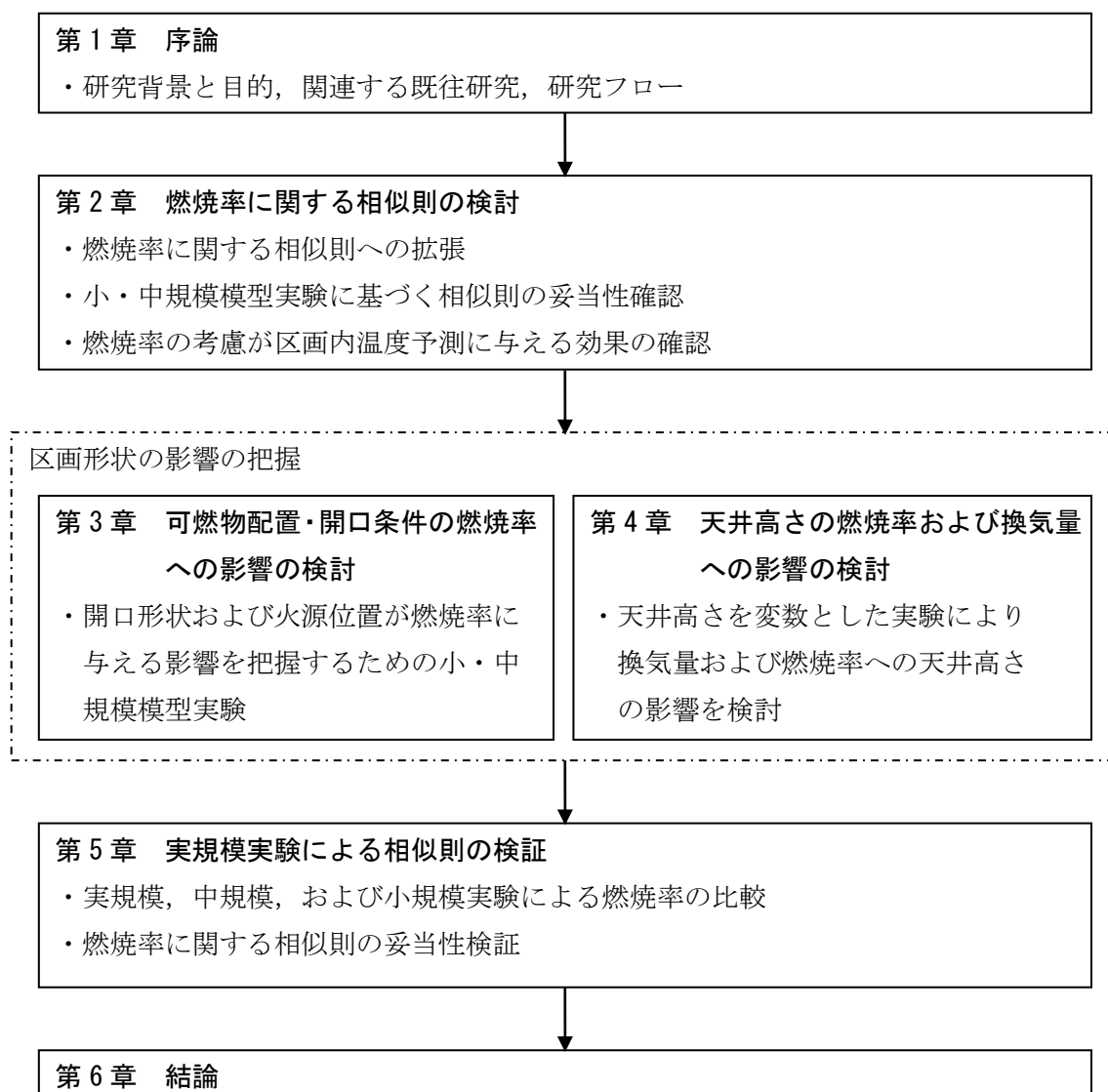


図 1-4 研究フロー

第 1 章： 本章では本研究の背景，関連する既往研究，そして本研究の目的として，小開口区画の盛期火災を対象に，燃焼率を定量的に推定できるようにするために，燃焼率の相似則とそれに基づいた模型実験手法を開発することを述べた。

第 2 章： 小開口区画における盛期火災の燃焼率に関する相似則を得るために既往の相似則を拡張する。そして，得られた相似則の成否を確認するために，幾何学的形状が相似で大きさが異なる 2 つの区画模型の燃焼率を計測および比較する。また，本研究の目標—燃焼率を定量的に推定できるようにして火災安全の検討に反映できるようにすること—が有意であることを確認するために，燃焼率の実測値を用いて区画内温度の計算を行い，燃焼率の考慮することによって計算結果がどのように改善されるのか検討する。

第 3 章： 相似則が汎用的に開口の小さい区画に適用できることを確認するには，区画の幾何学的形状を変えた実験が必要である。そこで本章では，開口形状や火源位置を変えた条件で，大きさの異なる 2 つの区画模型の燃焼率を比較する。これは，本研究の根本的な考え方—区画形状が燃焼率に影響する—が正しいか否かの確認にもなる。また，実験結果から，模型実験で燃焼率を推定するための要件・留意点を考察する。

第 4 章： 前章につづいて区画形状の影響に関する検討を行う。前述（1.2.2 および 1.2.3, P.8）のように，天井高さが変わると燃焼率や換気量が変わる可能性があり，当該現象の把握が望まれる。しかし，これまで当該現象を取り扱った研究は見当たらない。そこで本章では，燃焼率の相似則の成否からは一旦離れ，燃焼率および換気量への天井高さの影響が存在するか否かを確認することに重点を置いて，当該影響が顕れやすいように配慮した区画模型で天井高さを変えた実験を行う。そして，実験結果から，燃焼率に関する模型実験を実施する際に天井高さに関して注意すべき点についても考察する。

第 5 章： 実験施設の規模や能力，安全および経済的な理由により模型規模が制限されるため，検討対象が大きくなるほど模型の縮尺は小さくなる。また，一般論として，模型縮尺が過度に小さくなると相似が成り立たなくなる恐れがある。従って，燃焼率の推定手法として模型実験を活用するためには，より小さな模型縮尺での相似則の成立が確認されているのが望ましい。また，そもそも，実規模と縮小規模とで支配的に働く物理法則が異なる可能性もある²⁵⁾ため，実用のためには実規模実験での検証が必要である。

そこで本章では，実規模の実験を実施し，幾何学的に相似な縮小規模の実験と比較することで，前章までより小さな模型縮尺，かつ，実規模火災を対象（原型）とする場合においても，本研究の相似則が成立し，模型実験により燃焼率を推定できることを検証する。

第 6 章： 本研究の成果を総括し，今後の検討課題および展望について述べる。

参考文献

- 1) 消防庁：平成 26 年度版 消防白書，
<http://www.fdma.go.jp/html/hakusho/h26/h26/index3.html>, 2015-12-16 閲覧
- 2) Tewarson, A. : Fully Developed Enclosure Fires of Wood Cribs, Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1555-1566, 1984.
- 3) 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.
- 4) Beyler, C.L. : Major Species Production by Diffusion Flames in a Two-layer Compartment Fire Environment, Fire Safety Journal, vol.10, pp.47-56, 1986.
- 5) 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.
- 6) 成瀬友宏, 菅原進一：火災区画内発熱量に係わる燃料の違い - 火災区画内の発熱量の予測 その 2 - , 日本建築学会構造系論文集, 第 521 号, pp.157-161, 1999.7.
- 7) 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp. 225-228, 2006.
- 8) 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, A-2, pp.227-230, 2008.
- 9) 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.
- 10) Gottuk, D.T. : Generation of Carbon Monoxide in Compartment Fires. National Institute of Standards and Technology, Report NBS-GCR-92-619, 1992.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 長谷見雄二, 吉田正志：天井面下に拡がる火炎の構造と熱伝達性状, 日本建築学会計画系論文集, 第 550 号, pp.1-6, 2001.12.
- 14) Heskestad, G. : Physical Modeling of Fire, J. Fire and Flammability, Vlo.6, pp.253-273, 1975.7.
- 15) 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.

- 16) 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.
- 17) Kunio Kawagoe : Fire Behavior in Rooms, Report of the Building Research Institute, No.27, pp.1-73, The Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan, 1958.9.
- 18) 関根孝:耐火造室の火災最盛期の温度, 日本火災学会論文集, 第8巻, 第2号, pp.32-35, 1959.3.
- 19) John A. Rockett : Fire Induced Gas Flow in an Enclosure, Combustion Science and Technology, Vol.12, pp.165-175, 1976.
- 20) Nakaya, I., Tanaka, T., Yoshida, M. and Steckler, K. : Doorway Flow Induced by a Propane Fire, Fire Safety Journal, Vol.10, pp.185-195, 1986.
- 21) K. D. Steckler, J. G. Quintiere and W. J. Rinkinen : Flow Induced by Fire in a Compartment, Nineteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.913-920, 1982.
- 22) K. D. Steckler, H. R. Baum and J. G. Quintiere : Fire Induced Flows through Room Openings - Flow Coefficients, Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1591-1600, 1984.
- 23) J. G. Quintiere and Lei Wang : A General Formula for the Prediction of Vent Flows, Fire Safety Journal, Vol.44, pp.789-792, 2009.
- 24) Ee H. Yii : Vent Flows in Fire Compartments with Large Openings, Journal of Fire Protection Engineering, Vol.17, 2007.8.
- 25) 江守一郎 : 模型実験の理論と応用 第二版, 技報堂出版, 1985.7.
- 26) 平成12年度建設省告示1433号「耐火性能検証に関する算出方法等を定める件」

第2章 燃焼率に関する相似則の検討

第 2 章 燃焼率に関する相似則の検討

2.1. はじめに

火災安全上の課題を実験的に検討する場合、特に試行錯誤段階では、実験施設の規模・安全性・コストなどの制約から小規模実験が採用されることが多い。一方、燃焼率は火災安全に広く関係する基礎的な指標である。しかし、現在のところ小規模実験で燃焼率を定量的に推定できる有力な手法は見当たらない。

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既往研究^{1),2),3),4),5)}から明らかである。しかし、既往実験結果^{1),6),7),8),9)}を概観すると燃焼率は幾分のばらつきを示しており、空気過剰率・当量比が同一であっても、必ずしも燃焼率が一致するとは限らない。この原因として、模型区画の幾何学的形状の違いが影響したことが考えられる。

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燃焼率が反映されることを考えれば、これらの実験では燃焼率も相似模型間で概ね一致していたと推測される。

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が、区画の幾何学的形状の違いによるものであるとすれば、幾何学的に相似な模型であれば燃焼率を検討対象と一致させられる可能性がある。

そこで本章では、燃焼率が低下しやすいと考えられる火災一室容積に対して開口の小さい区画における盛期火災一を対象に、幾何学的に相似な模型実験を燃焼率の定量的推定手法とすることを目標として、そのために必要な相似則を既往の相似則^{10),12)}から拡張して導く。そして、幾何学的に相似で縮尺の異なる 2 つの区画模型で燃焼率を計測し、これらを比較することで、この相似則の成否を確認する。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、縮小模型での実測値を用いることで原型の区画内温度を予測できること、および、燃焼率の考慮が区画内温度予測に与える効果を確認する。

なお、「原型」「模型」など模型実験に関する本論文中の用語の定義は以下の通りとする。

- 原型 : 模型実験によって物理量を把握したい現象や物体のもともとの姿。
- 模型 : 時間・幾何学的寸法・熱・温度・質量などの物理量が相似則に従って原型と対応している現象や物体。幾何学的な大きさが原型より小さい場合、縮小模型と呼ぶ。
- 模型実験 : 原型の物理量を相似則に従った模型を使用して把握する実験。模型が原型より小さい場合、縮小模型実験と呼ぶ。
- 小規模実験 : 規模が実大より小さい実験。模型実験であるか否かは関係ない。
- 実規模実験 : 規模が実大の実験。

2.2. 相似則の導出

本研究では、フルード数の保存などから導かれた相似則^{10),12)}を基本として、室容積に対して開口の小さい区画における盛期火災の実際の発熱速度（実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} ）や燃料が完全燃焼した場合の発熱速度（公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} ）に対する実効発熱速度の比（燃焼率）に関する相似則を考える。Heskestad¹⁰⁾や齊藤ら¹²⁾によれば、原型と幾何学的に相似な模型とで、それぞれの時間と燃焼速度（単位時間当たりの燃料の消費量）は以下の相似則に従う。

$$\text{時間} : \frac{\sqrt{L}}{t} = \frac{\sqrt{L'}}{t'} \quad \text{式 2-1}$$

$$\text{燃焼速度} : \frac{L^{2.5}}{\dot{m}_b} = \frac{L'^{2.5}}{\dot{m}'_b} \quad \text{式 2-2}$$

ここで、 L ：火災区画の代表長さ（m） t ：時間（s） \dot{m}_b ：燃焼速度（kg/s）
縮尺の小さい模型の物性値に「'」を添えた。以降同様に表記する。

また、温度とガス濃度は、式 2-3、式 2-4 のように、原型と模型の対応する点で一致すると仮定する^{10),12)}。

$$\text{温度} : (\text{原型と模型の対応する点で}) T = T' \quad \text{式 2-3}$$

$$\text{ガス濃度} : (\text{原型と模型の対応する点で}) C_i = C'_i \quad \text{式 2-4}$$

ここで、 T ：温度（K） C_i ：化学種 i の濃度（%）

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

$$\dot{Q}_{eff} = \sum \dot{G}_i \Delta H_i \quad \text{式 2-5}$$

また、式 2-3、式 2-4 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すれば、可燃物単位重量あたりの各燃焼生成物の発生量は以下のように一致することになる。

$$\frac{\dot{G}_i}{\dot{m}_b} = \frac{\dot{G}'_i}{\dot{m}'_b} \quad \text{式 2-6}$$

以上の仮定が正しければ、式 2-2、式 2-5、式 2-6 および化学種ごとに ΔH_i が決定されることより、実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} 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。

$$\text{実効発熱速度} : \frac{L^{2.5}}{\dot{Q}_{eff}} = \frac{L'^{2.5}}{\dot{Q}'_{eff}} \quad \text{式 2-7}$$

また、公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} が燃焼速度 \dot{m}_b に比例することと式 2-2 により、式 2-7 は以下のよう
に燃焼率 $\eta = \dot{Q}_{eff} / \dot{Q}_{nom}$ に関する表現に書き換えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}_{eff}}{L^{2.5}} \cdot \frac{L^{2.5}}{\dot{m}_b} &= \frac{\dot{Q}'_{eff}}{L'^{2.5}} \cdot \frac{L'^{2.5}}{\dot{m}'_b} \\ \frac{\dot{Q}_{eff}}{\dot{m}_b} &= \frac{\dot{Q}'_{eff}}{\dot{m}'_b} \\ \frac{\dot{Q}_{eff}}{\dot{Q}_{nom}} &= \frac{\dot{Q}'_{eff}}{\dot{Q}'_{nom}} \end{aligned}$$

すなわち

$$\text{燃焼率} : \eta = \eta' \quad \text{式 2-8}$$

Takeda ら¹³⁾や Beyler²⁾に拠れば、区画内へ流入した空気の平均滞留時間 t_R と空気と燃料との混合に必要な時間 t_M ^{※1}の比 (t_R/t_M) に応じて一酸化炭素等の燃焼量が増加し、燃焼率が高くなる。 t_R が区画容積 (V) / 空気流入量で見積もれるとすれば、空気流入量は開口因子 $A_w\sqrt{H_w}$ (A_w :開口面積, H_w :開口丈) に比例するとして、 $t_R \propto V/A_w\sqrt{H_w}$ となり、燃焼率は区画容積と開口因子の比によって変化する可能性が考えられる。もし、幾何学的形状が相似であれば $t_R \propto V/A_w\sqrt{H_w} \propto \sqrt{L}$ であるから、区画の規模が大きいほど t_R は大きくなり、一酸化炭素の燃焼量や燃焼率も高くなるとも考えられる。

一方、規模が異なっても幾何学的形状が相似の場合には、式 2-4 および式 2-8 に従って一酸化炭素等の濃度や燃焼率は一致しなければならない。一見、Takeda ら¹³⁾や Beyler²⁾の知見と矛盾するようであるが、以下のような場合を考えれば両立は可能であろう。

- ①区画内の一酸化炭素や酸素が最終的な状態に達するのに要する時間と比べて t_R が十分に大きい場合。

※1： 空気と燃料との混合に必要な時間 t_M について、Takeda ら¹³⁾は乱流渦(turbulent eddy)中における空気の分子拡散に関するとの考えから平均渦半径(Average eddy radius)の 2 乗を拡散係数で割った値を用いた。また、Beyler²⁾は一酸化炭素発生率の実測値を t_R の関数として整理したプロットから t_M を推定した。

②Takeda ら¹³⁾や Beyler²⁾は、 t_R/t_M を因数とする関数として燃焼率や一酸化炭素を表現しているが、区画の幾何学的形状の相似が保たれることによって t_R/t_M が一定となる場合。

本研究の対象である開口の小さい区画火災では、必然的に流入空気量が小さく、空気平均滞留時間は比較的大きいはずであるから、①の条件を満たす可能性が高い。また、 t_R や t_M は容易には実測できないから具体的な検討は困難であるが、どちらも気体運動に関する時間であるからフルード相似が適用できて式 2-1 の関係が成立するとすれば、②の条件を満たすことになる。以上の推察から t_R に依存したスケール効果は、少なくとも本研究で対象としている開口の小さい区画火災では現れないと予想される。

ところで、Heskestad¹⁰⁾は、式 2-3 のように区画内温度を一致させる為には、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、Croce¹¹⁾はそれに基づき周壁材質・厚さを選定し、縮尺の異なる区画模型の温度を一致させている。しかし、相似則を満たす材料を選定す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、流入空気量や燃焼速度である。流入空気量は 300°C 以上であれば温度依存性は小さくなく¹⁴⁾、また、(本研究のように) 流量制御された気体燃料を火源とすれば燃焼速度への配慮も必要ない。Gottuk ら¹⁵⁾の実験・解析で、区画の上部層温度が 900K (627°C) 以上になると一酸化炭素が反応して二酸化炭素になることが示されているように、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、Heskestad¹⁶⁾の模型実験では、約 150°C 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と考えられる。ある特定の温度における燃焼率の把握が必要であっても、周壁の断熱性を確保した上で、当該温度に到達するまで加熱を継続すれば良く、そのために長い加熱時間が必要でも、火源に気体燃料を使用できれば容易に対応できる。なお、着火からの経過時間は、区画内温度や（火源の燃料消費量を任意調整できない場合の）燃焼速度には関係するが、本研究の焦点である燃焼率や実効発熱速度に対しては直接関係しない。従って、区画内温度および燃焼速度について式 2-2 および式 2-3 で示される関係が成立するのであれば、経過時間に式 2-1 を適用する必要はない。

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。

模型の火源の燃焼速度（燃料供給量）は、式 2-2 より「原型の燃料供給量に模型縮尺の 2.5 乗 ($(L'/L)^{2.5}$) を掛けた値」とすればよい。例えば、火災実験でよく行われるように、火源の燃焼速度を開口因子 $A_w\sqrt{H_w}$ を基準にして $\dot{m}_b \propto A_w\sqrt{H_w}$ のように設定する場合には、

この条件が成立する。具体的には、 $A_w\sqrt{H_w} \propto L^{2.5}$ より $\dot{m}'_b/\dot{m}_b = A'_w\sqrt{H'_w}/A_w\sqrt{H_w} = L^{2.5}/L^{2.5}$,
すなわち $\dot{m}'_b = (L'/L)^{2.5}\dot{m}_b$ となる。

本章の実験 1-H および実験 1-Q-1 では、次節で述べるように $\dot{m}_b = 1500\phi A_w\sqrt{H_w}/\Delta H_b$ (式
2-14) かつ $\phi' = \phi$ とするため、 $\dot{m}'_b/\dot{m}_b = \phi'A'_w\sqrt{H'_w}/\phi A_w\sqrt{H_w} = A'_w\sqrt{H'_w}/A_w\sqrt{H_w} = L^{2.5}/L^{2.5}$ とな
り、先ほどと同様に $\dot{m}'_b = (L'/L)^{2.5}\dot{m}_b$ となり、模型の燃料供給量は原型の燃料供給量に模型
縮尺の 2.5 乗を掛けた値となる。

2.3. 実験および計算方法

本章では、前節で述べた相似則の妥当性を確認するために“室容積に対して開口の小さい区画”を想定して、幾何学的に相似な2つの縮小模型の燃焼率を計測・比較する。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、縮小模型実験に基づき原型の区画内温度を予測できること、および、燃焼率の考慮が区画内温度の予測に与える効果を確認する。本節では、これらの実験方法と計算方法について述べる。

なお、2.2で述べた通り、流入空気の平均滞留時間 t_R に依存したスケール効果は開口の小さい区画では発生しないことを前提としている。本章の実験では中模型と小模型の t_R の比は $t_R:t'_R = \sqrt{L}:\sqrt{L'} = \sqrt{2}:1$ である。検討対象の区画と模型との規模の差が大きい、すなわち $t_R:t'_R$ がより大きな場合における当該前提の妥当性の確認は第3章および第5章にて行う。

2.3.1. 実験における火災の想定

平成12年度建設省告示1433号「耐火性能検証に関する算出方法等を定める件」¹⁷⁾では、開口部が極端に少ない室の有効開口因子として $A_r\sqrt{H_r}/70$ (A_r :床面積, H_r :室高さ)を想定している。本章の実験では、より小さな開口を想定して、開口因子が当該値の2/3、すなわち、 $A_r\sqrt{H_r}/105$ となる区画を想定した。

火災性状については、川越¹⁸⁾によって木材等を燃料とした模型および実規模の耐火造室の火災実験結果から“盛期火災時の空気過剰率は0.8~1.2(当量比0.83~1.25)になる”との知見が得られており、本研究では盛期火災の当量比の想定はこれに従う。

ところで、大宮ら¹⁹⁾による区画内の燃焼速度と噴出火炎の発生限界に関する実験では、燃料供給量が化学量論比を超える全ての条件(当量比>1)で開口噴出火炎の発生が確認されている。このことから前述の当量比の想定範囲内では当量比1程度を境に開口噴出火炎の有無に違いが生じる可能性が考えられる。更に、開口噴出火炎について火災室内の燃焼率の把握の観点から注意すべき事柄として以下の2点が挙げられる。

- ①開口噴出火炎の発熱速度と本研究の焦点である流入空気量が制限された火災区画内における発熱速度とを個別に計測するのは困難であること。
- ②区画外へ流出した未燃ガスの燃焼である開口噴出火炎の有無が流出元である火災区画内の燃焼性状に及ぼす影響は小さいと考えられること。

これらを考慮して、本実験においては1条件を除き開口噴出火炎発生の可能性が低くなるように当量比1以下を実験条件とした。

2.3.2. 当量比

本論文の実験では、1.2.1 (P.6) にて述べたように、火災室内の気体をひとつの混合気とみなして以下のように当量比 ϕ を算出する。

化学量論比 ξ_{stoich} における可燃性ガス発生量(燃料供給量)と流入空気量をそれぞれ $\dot{m}_{b,stoich}$, $\dot{m}_{o,stoich}$ とおくと、化学量論費は以下のように表される。

$$\xi_{stoich} = \frac{\dot{m}_{b,stoich}}{\dot{m}_{o,stoich}} \quad \text{式 2-9}$$

また、完全燃焼時の単位重量当たりの燃料の発熱量を ΔH_b , 単位重量の空気が完全燃焼で消費された場合の発熱量を ΔH_o とすると下式が成り立つ

$$\Delta H_b \cdot \dot{m}_{b,stoich} = \Delta H_o \cdot \dot{m}_{o,stoich} \quad \text{式 2-10}$$

式 2-9 と式 2-10 より、本論文の実験における当量比 ϕ を表す式 1-5 は、以下のように変形できる。

$$\phi = \frac{\Delta H_b \cdot \dot{m}_b}{\Delta H_o \cdot \dot{m}_o} \quad \text{式 2-11}$$

上式右辺の分子 $\Delta H_b \cdot \dot{m}_b$ は燃料の公称発熱速度、分母 $\Delta H_o \cdot \dot{m}_o$ は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であるので、それぞれを \dot{Q}_{nom} , \dot{Q}_{max} で置き換えて以下の式となる。

$$\phi = \frac{\dot{Q}_{nom}}{\dot{Q}_{max}} \quad \text{式 2-12}$$

本実験では、式 2-12 を用いて当量比 ϕ を算定する。その際、 \dot{Q}_{max} は開口因子 $A_w \sqrt{H_w}$ (A_w : 開口面積[m²], H_w : 開口の丈[m]) から式 2-13 のように算定する。なお、同式中の 1500 は kW/m^{2.5} の次元を持つ係数である。

$$\dot{Q}_{max} = 1500 A_w \sqrt{H_w} \quad \text{式 2-13}$$

また、本実験では、任意の当量比 ϕ に対応する燃料流量は以下のように算定される。

$$\dot{m}_b = \phi \frac{\Delta H_o \cdot \dot{m}_o}{\Delta H_b} = \frac{\phi \dot{Q}_{max}}{\Delta H_b} = \frac{1500 \phi A_w \sqrt{H_w}}{\Delta H_b} \quad \text{式 2-14}$$

2.3.3. 実験方法

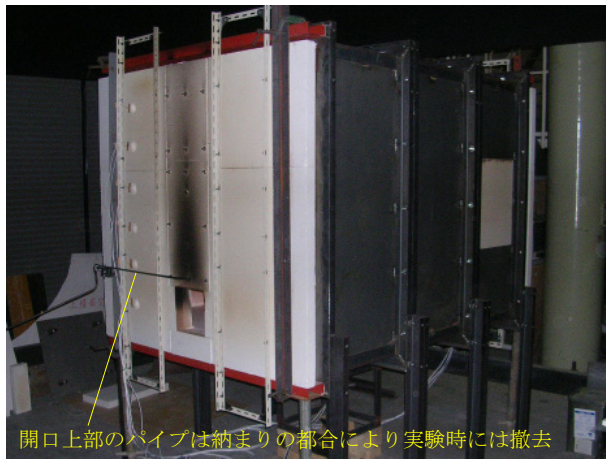
2.3.3.1. 実験条件および区画模型

前節の相似則の成否を確認するために幾何学的形状が相似な 2 つの区画模型の燃焼率を比較する実験を行った。本実験の実験条件を表 2-1 に、使用した模型を写真 2-1～写真 2-5 および図 2-1 に示す。

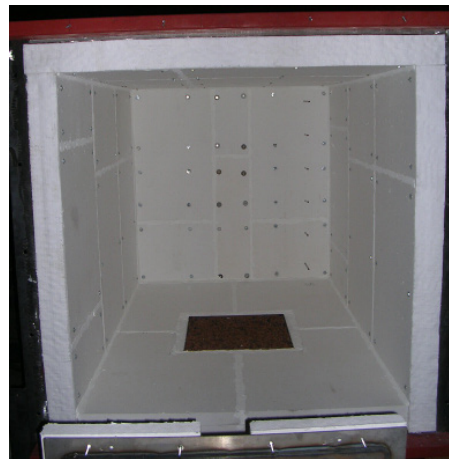
使用した 2 つの区画模型は大きさが異なり、以降では大きい方を「中模型」、小さい方を「小模型」と呼ぶ。表 2-1 のように、中模型で実験 1-H、小模型で実験 1-Q-1 および実験 1-Q-2 を行った。前述の通り、これらの実験は区画内部、開口形状、火源形状などの幾何学的形状が相似である。次章以降で、区画の幾何学的形状が燃焼率に与える影響を議論する際に、幾何学的に相似な実験をまとめて呼べると都合が良いので、本章の 3 つの実験を合わせて「実験 1」と呼ぶこととする。

表 2-1 実験条件 (実験 1)

実験 番号	個別 名称	区画 模型	開口			燃料(C ₃ H ₈)供給量		公称 発熱速度 \dot{Q}_{nom} [kW]	
			形状	幅 [mm]	丈 [mm]	開口因子 [m ^{2.5}]	\dot{m}_b [kg/s]		[slm]
1	1-H	中	正方形	220	220	0.0227	0.367×10^{-3}	10.90	17.0
							0.552×10^{-3}	16.40	25.6
							0.734×10^{-3}	21.80	34.1
	1-Q-1	小		110	110	0.0040	0.064×10^{-3}	1.91	3.0
							0.100×10^{-3}	2.97	4.6
							0.130×10^{-3}	3.87	6.1
	1-Q-2	小		110	110	0.0040	0.081×10^{-3}	2.41	3.8
							0.114×10^{-3}	3.39	5.3
							0.144×10^{-3}	4.28	6.7
							0.155×10^{-3}	4.60	7.2
							0.166×10^{-3}	4.94	7.7



(1) 外観



(2) 内部

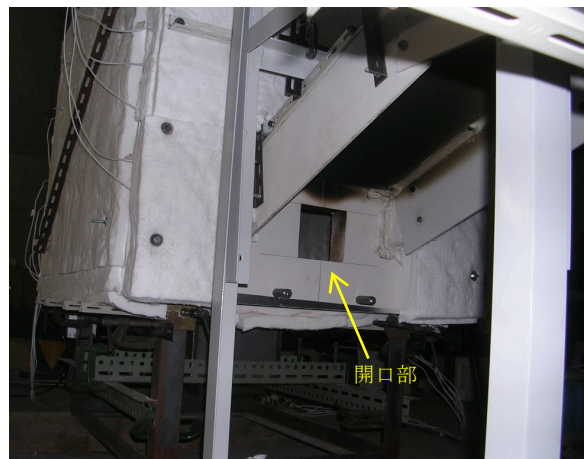
写真 2-1 中模型 (実験 1-H)



写真 2-2 小模型 (実験 1-Q-1, 正面壁設置前)



(1) 全景



(2) 開口部

写真 2-3 小模型 (実験 1-Q-2)

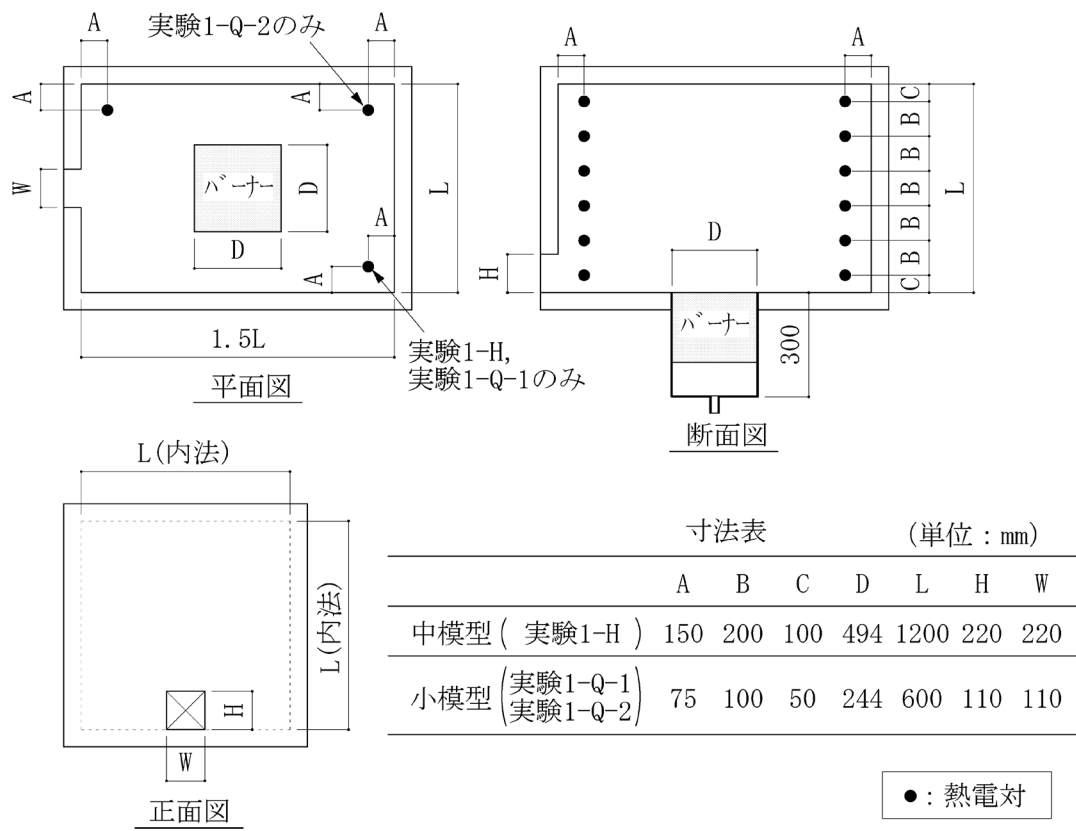


図 2-1 実験 1 の区画模型

区画模型の内部空間の大きさは、ISO9705 ルームコーナー試験装置と幾何学的に相似であり、同試験装置に対する縮尺は中模型で 1/2、小模型で 1/4 とした。中模型と小模型の区画寸法（間口×奥行き×室高さ）は、それぞれ 1,200mm×1,800mm×1,200mm と 600mm×900mm×600mm である（中模型に対する小模型の縮尺は 1/2）。

本研究では開口の小さい室の燃焼率低下を対象としているため、前述の通り、開口因子は $A_r\sqrt{H_r}/105$ と比較的小さな設定とした (A_r : 模型床面積, H_r : 模型の室高さ)。周壁は、実験 1-H および実験 1-Q-1 が同じ仕様で、実験 1-Q-2 のみ異なる。実験 1-H および実験 1-Q-1 の周壁は、厚さ 3mm の鋼鉄を下地として、中模型で 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、中模型では鋼製アングルで補強した CBD を、小模型では CBD 単体を、模型本体に取り付けた。実験 1-Q-2 の周壁は、厚さ 3mm の鋼鉄の下地に、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。

中模型・小模型ともに下地に鋼板を用いたのは、実験条件として設定した開口部以外からのガスの流入出を防ぐためである。同じ目的で、写真 2-1(2) および写真 2-3 に見られるように、セラミックファイバーキャストやアルミテープで周壁の目地処理を行った。火源

と区画模型との取り合い部分に隙間が発生すると、区画に流入する空気量への影響が大きい。そこで、区画模型は実験場の床面から十分高い位置に設置し、外部からも当該部分の目地を処理すると共に、隙間が発生していないことを実験中に目視確認できるようにした。

火源は、燃焼面形状が中模型・小模型それぞれで 494mm 四方・244mm 四方のガスバーナーである。燃焼面全体に燃料が拡散するように園芸用の発泡煉石（ハイドロボール）を充填した。燃料にはプロパンを使用した。プロパンの供給流量は、中模型ではマスフローコントローラーで制御し、小模型ではマスフローメーターで流量計測しながら手動で制御した。実験 1-H および実験 1-Q-1 では、当量比 ϕ が一致するように燃料流量を設定した。すなわち、 $\phi = 0.5, 0.75, 1.0$ として、 $\dot{m}_b = \phi \dot{Q}_{\max} / \Delta H_b$ (式 2-14, ただし $\Delta H_b = 46460$ [kJ/kg]) から求まる燃料流量を段階的に増加するように供給した。本研究では、前述のように盛期火災時の当量比を $\phi = 0.83 \sim 1.25$ と想定しており、 $\phi = 0.5, 0.75$ はこの範囲を外れるが、燃料に対して十分な空気がある条件から当該想定範囲までの当量比の変化が燃焼率に与える影響を把握することを意図している。以上の燃料流量は、2.2 にて述べたように $\dot{m}'_b = (L'/L)^{2.5} \dot{m}_b \approx 0.177 \dot{m}_b$ (模型縮尺 $L'/L = 0.5$) となり式 2-2 を満たしている。(ただし、実験 1-Q-1 では燃料流量制御の誤差により当量比は $\phi = 0.5, 0.77, 1.01$ となり、目標値を若干超えた。) また、燃料を供給する時間についても式 2-1 を満たすように $t'/t = \sqrt{L'/L} \approx 0.71$ とした。実験 1-Q-2 では、 $\phi = 0.63, 0.88, 1.11, 1.20, 1.28$ となるように燃料を供給した。なお、気体燃料の流量は slm (standard liter per minute : 1atm, 0°Cにおける体積流量 [L/min]) 単位で取り扱うことが多いので表 2-1 (P.26) の燃料流量の欄には slm での値も示した。

なお、実験 1-Q-1 は小模型を用いた最初の実験であった。前述の通り、小模型を用いた実験では燃料流量は手動で制御したが、当該実験では調節弁の精度が低いために供給量が安定せず、公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} が不安定な時期があった (図 2-9(2))。そこで、実験 1-Q-2 では、燃料流量の調節弁の精度を向上させたところ、図 2-9(3)のように流量制御が比較的安定した。また、実験 1-Q-1 の一酸化炭素発生量には、他の実験には見られないような直線的な増加と過大な値が確認された (図 2-10(2), 1800s-3000s)。この原因として実験上の過失を疑うと以下の①②が考えられる。

- ①周壁に用いた CBD などの材料に含まれる有機成分の熱分解により、想定を超える可燃性ガスが区画内に供給されたこと。
- ② (一酸化炭素発生量の上昇との時期の一致より,) 前述の公称発熱速度の乱れ (図 5(2)) が何らかの理由により影響したこと。

そこで、①への対応として、(以降の章も含め) 他の実験では、写真 2-4 のように実験実施に先立って区画模型を十分に加熱して有機成分を焼失させた。②への対応は前述の通り燃料流量の調節弁の精度を向上させた。

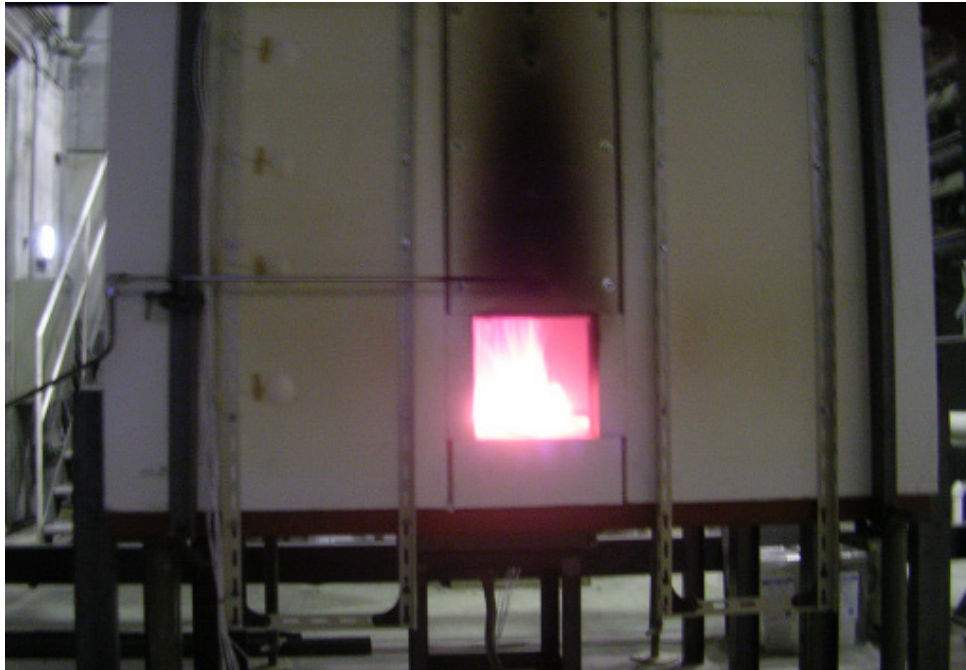


写真 2-4 事前加熱の様子（中模型）

2.3.3.2. 計測装置の概要

計測装置の概要を図 2-2 および写真 2-5 に、計測機器を写真 2-6～写真 2-8 に示す。区画模型から流出する既燃ガスを小型の集煙フード（以降、「小型集煙フード」）で収集し、排煙ダクト内に設置した複合ピトー管風量計でダクト内を流れるガスの動圧を計測し、当該風量計の下流で温度、酸素 O_2 ・二酸化炭素 CO_2 ・一酸化炭素 CO の濃度を計測し、これらの値から流量 m_e (kg/s)、実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} 、一酸化炭素発生量 \dot{G}_{CO} を算出した。また、区画内温度を、図 1 に示す位置で K 型熱電対(計 12 点)を用いて計測した。本実験の計測機器の仕様は以下の通りである。(以降、計測上限を FS で表す。)

- ・排煙ダクトおよび複合ピトー管風量計：円筒形 ϕ 200mm
- ・差圧計：測定範囲 0～200Pa(出力精度 1.5%FS)
- ・ダクト内熱電対：K 型，素線径 0.65mm
- ・ガス分析装置：全実験共通で以下の装置を使用した。

表 2-2 ガス分析装置の仕様

対象ガス	測定方式	計測範囲	繰返し性	直線性	応答速度
酸素	磁気力	0～25%	±0.5%FS	2%FS	2 秒以内
二酸化炭素	赤外線	0～10%	±0.5%FS	1%FS	15 秒以内
一酸化炭素	赤外線	0～2%	±0.5%FS	1%FS	15 秒以内

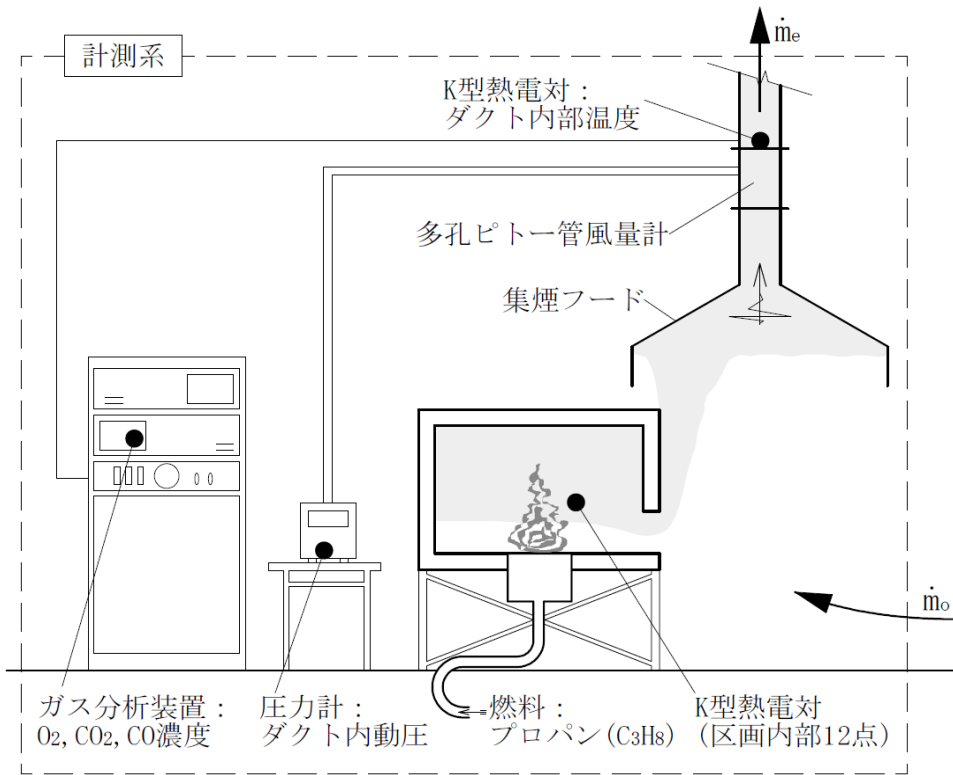


図 2-2 計測装置概要

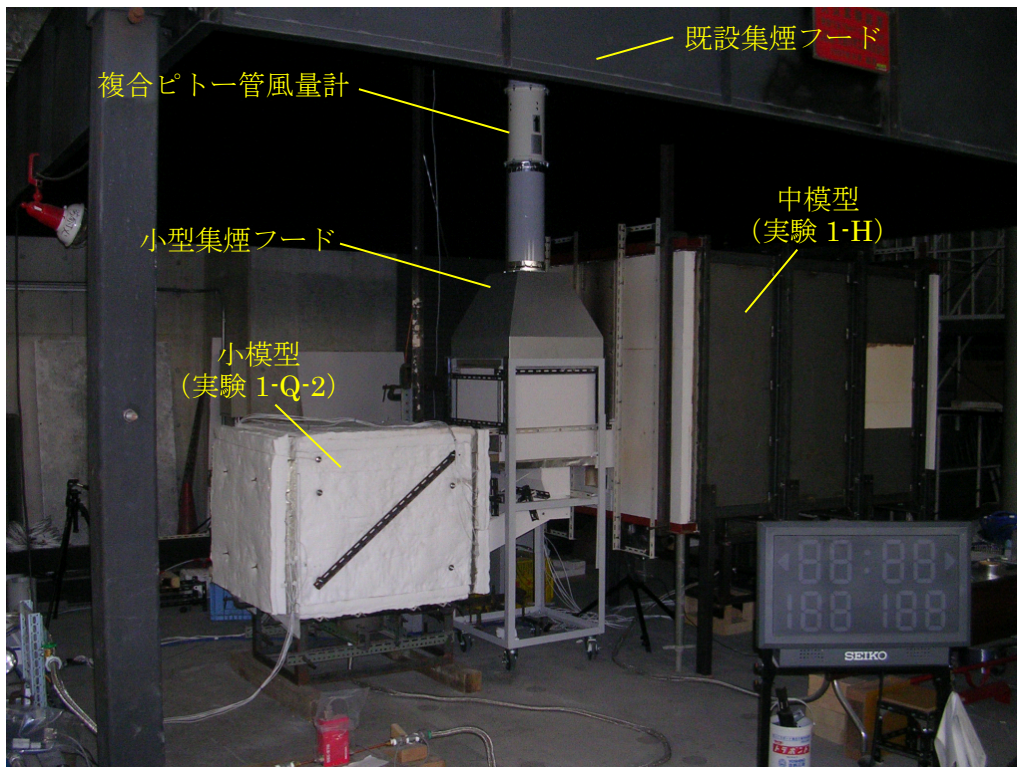
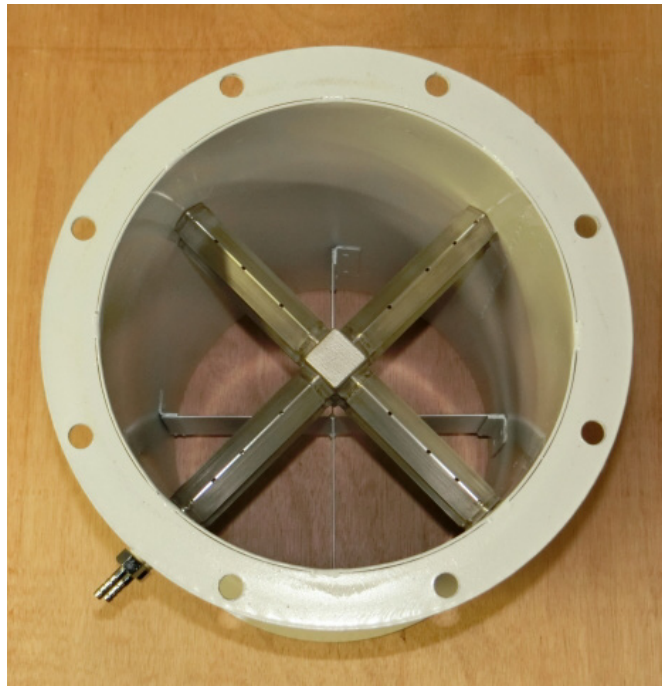


写真 2-5 区画模型と計測装置



(1) 外部

(2) 内部

写真 2-6 複合ピトー管風量計



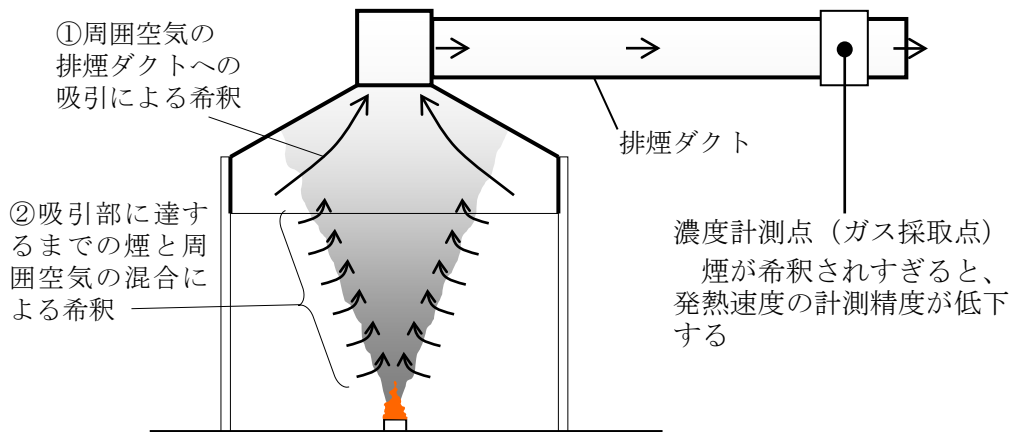
写真 2-7 差圧計測器



写真 2-8 ガス分析装置

2.3.3.3. 小型集煙フード

実験施設に既設された集煙フードの規模と排煙風量に対して、本実験の火源が小さかった。このような場合、図 2-3 に示すように排煙ダクトに設けられた濃度計測点に達するまでに燃焼ガスが過剰に希釈され、発熱速度の計測精度が低下してしまうという問題がある。そこで、図 2-4 に示すように、小型集煙フードを既設集煙フードの下部に設置し、区画模型の近くで燃焼ガスを収集することで、計測点に至るまでの燃焼ガスの希釈を軽減した。



排煙風量が過大であることや、燃焼反応が起きている場所と吸引部（集煙フード）までの距離が遠いことはそれぞれ①②を引き起こす。その結果、計測部における煙濃度が過剰に希釈され、発熱速度の計測精度が低下する。

図 2-3 小さな発熱速度を計測する際の問題

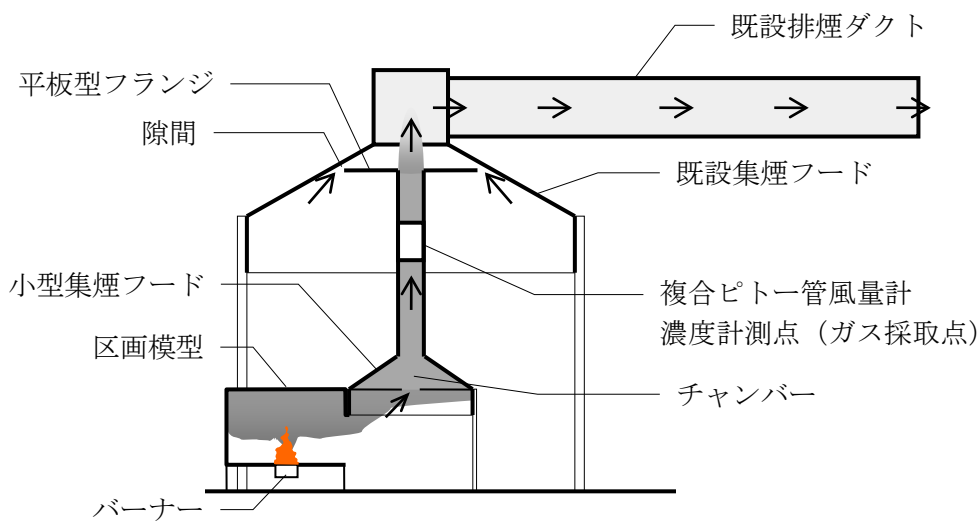
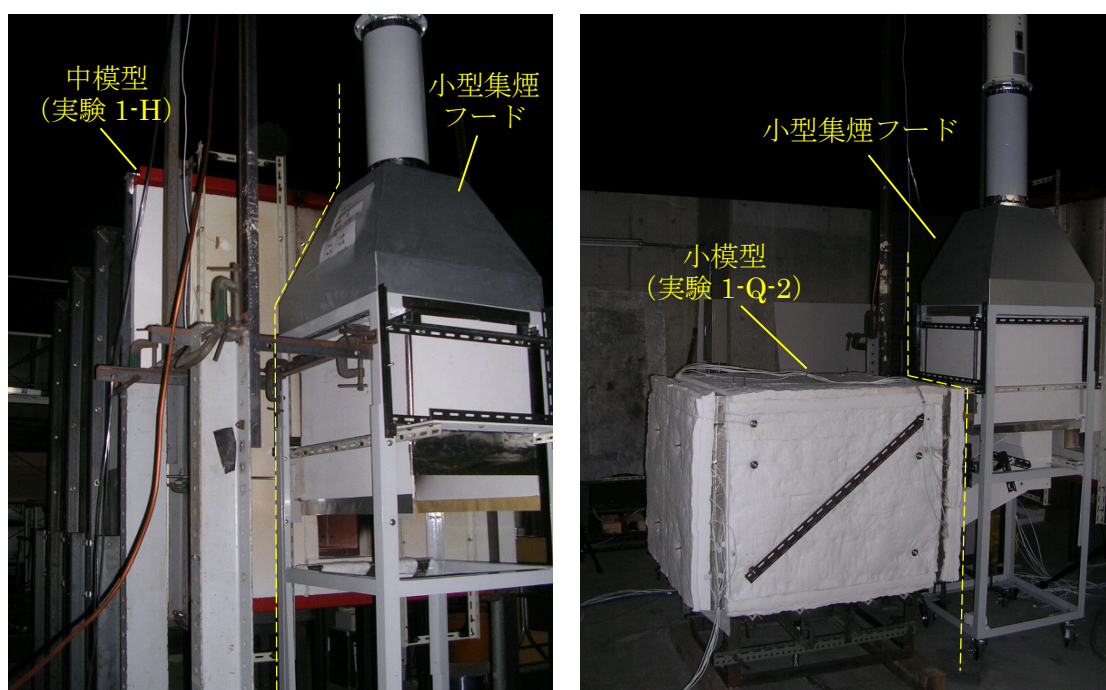


図 2-4 実験 1 における小型集煙フード、既設集煙フードおよび区画模型の配置

小型集煙フードは、既設集煙フードの吸引力を利用して排煙する。しかし、小型集煙フードの排煙ダクトと既設集煙フードの吸引口を直接接続してしまうと、排煙風量が過大になってしまう。そこで、図 2-4 のように、小型排煙フードの排煙ダクトの端部と既設集煙フードの間に隙間を設け、これを調節することで、小型集煙フードの排煙風量を減少させた。また、排煙ダクトを流れる燃焼ガスの濃度が均一になるように、写真 2-10 に示す仕切り板を用いて、排煙ダクトの手前にチャンバーを設けた。

小型集煙フードと区画模型は写真 2-9 のように近接させた。区画模型の開口から流出した燃焼ガスが当該フードに流入するように、開口からフードまで庇を設けた。



(1) 中模型 (実験 1-H)

(2) 小模型 (実験 1-Q-2)

写真 2-9 小型集煙フードと区画模型の接続状況



写真 2-10 小型集煙フードのチャンバーの仕切り板と開口 (フード下方から撮影)

2.3.3.4. 実効発熱速度および燃焼率の計測方法

実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} は、排煙フードで収集した模型開口部からの流出ガスから、酸素消費法²⁰⁾に基づき式 2-15～式 2-17 を用いて測定した。燃焼率 η は、式 1-1 (P.3) の通り、 \dot{Q}_{eff} を公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} で除した値とした。

$$\dot{Q}_{eff} = \left\{ EX_{O_2}^o - \frac{1 - X_{O_2}^o - X_{CO_2}^o - X_{CO}^o}{1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO}} \left(EX_{O_2} + \frac{E_{CO} - E}{2} X_{CO} \right) \right\} \frac{\dot{m}_o}{29} \times 10^{-3} \quad \text{式 2-15}$$

$$\dot{m}_o = \frac{\dot{m}_e}{1 + (\alpha_{ce} - 1)\beta} \quad \text{式 2-16}$$

$$\beta = \frac{X_{O_2}^o(1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2}(1 - X_{CO_2}^o - X_{CO}^o)}{(1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO})X_{O_2}^o} \quad \text{式 2-17}$$

E : 単位酸素消費量当りの発熱量。燃料がプロパンの場合は 409.6kJ/mol, メタノールの場合は 423.04 kJ/mol とした。

E_{CO} : CO が CO₂ となる時の単位酸素消費量当りの発熱量 566kJ/mol。

\dot{m}_o : 計測系に流入する空気量 (kg/s)

X_i : 排煙ダクト内を通過するガス中の化学種 i の濃度分析値

X_i^o : 計測系に流入する空気中の化学種 i の濃度分析値

α_{ce} : Chemical expansion factor²⁰⁾。周囲空気の酸素濃度を 20.95%として、プロパンで 1.0838, メタノールで 1.2095 とした。

β : 計測系に流入した酸素が消費される割合²⁰⁾

式 2-15 右辺の 29 は空気の平均分子量で、式 2-19～式 2-21 でも同様である。

本実験では、開口因子が小さいため分析対象となる既燃ガスが少量で、ガス分析装置の計測誤差(スバンドリフト)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既設集煙フードの外側の空気の酸素濃度を計測し、この酸素濃度計測値を用いて実験中の酸素濃度計測値の補正を行った。当該計測中は排煙ダクト内のガスの分析は中断される為、次節の図 2-9 および図 2-10 に示した実験結果では、当該計測時の実効発熱速度と一酸化炭素発生量は 0 となっている。

計測に使用した装置は 2.3.3.2 の通りである。装置全体としての精度を確認するために、自由空間下でのメタノールの発熱速度・総発熱量を当該装置を用いて酸素消費法で測定した値と、重量減少量から求めた値とを比較した。図 2-5 にその結果を示す。酸素消費法による計測値と重量減少から求めた値は全体的に良く一致した。着火から発熱速度が大きく低下し始める直前(720 秒)までの総発熱量は、重量減少法で 3224.5kJ, 酸素消費法で 3335.0kJ であった。これらの計測値から酸素消費法の計測誤差を計算すると、重量減少法

の計測値を基準として 3.4% となることから、当該計測装置を用いて概ね良い精度で計測できることを確認した。

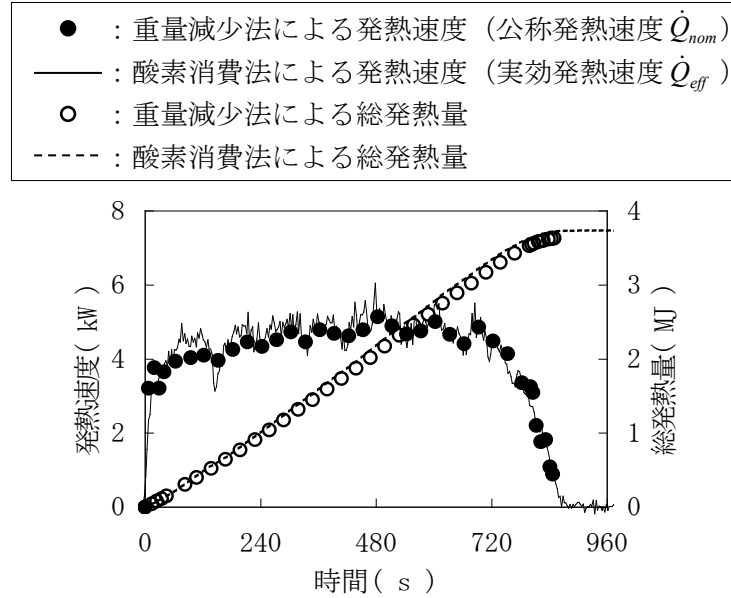


図 2-5 メタノールの発熱速度および総発熱量の計測値

2.3.3.5. 一酸化炭素発生量の計測方法

本研究では燃焼率の相似則が主題であるが一酸化炭素の発生量の計測も行う。この理由は、一酸化炭素の発生が燃焼率の低下を把握する目安となるためである。一酸化炭素発生量の計測方法を以下に述べる。

計測系への窒素流入量 $\dot{n}_{N_2}^o$ (mol/s) と系外への一酸化炭素流出量 \dot{n}_{CO} (mol/s) の関係は、ダクト内ガスの濃度分析値を用いて以下のように表される²¹⁾。

$$\frac{\dot{n}_{CO}}{\dot{n}_{N_2}^o} = \frac{X_{CO}}{1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO}} \quad \text{式 2-18}$$

雰囲気空気中の水分濃度は値が小さいので無視して、系に流入する空気が N_2 , O_2 , CO_2 , CO のみで構成されると仮定し、 O_2 , CO_2 , CO 分析値を用いて、計測系への窒素流入量を式 2-19 のように表す。

$$\dot{n}_{N_2}^o = (1 - X_{O_2}^o - X_{CO_2}^o - X_{CO}^o) \frac{\dot{m}_o}{29} \times 10^{-3} \quad \text{式 2-19}$$

式 2-18, 式 2-19 より、系外への一酸化炭素流出量 \dot{n}_{CO} は式 2-20 となる。

$$\dot{n}_{CO} = \frac{1 - X_{O_2}^o - X_{CO_2}^o - X_{CO}^o}{1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO}} \cdot \frac{X_{CO} \dot{m}_o}{29} \times 10^{-3} \quad \text{式 2-20}$$

燃焼による一酸化炭素発生量 \dot{G}_{CO} (mol/s)は、系外への流出分 \dot{n}_{CO} から系内への流入分 $\dot{n}_{CO}^o = X_{CO}^o \dot{m}_o \times 10^{-3}/29$ を差し引いて式 2-21 のように求められる。

$$\dot{G}_{CO} = \dot{n}_{CO} - \dot{n}_{CO}^o = \frac{(1 - X_{O_2}^o - X_{CO_2}^o)X_{CO} - (1 - X_{O_2} - X_{CO_2})X_{CO}^o}{1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO}} \cdot \frac{\dot{m}_o}{29} \times 10^{-3} \quad \text{式 2-21}$$

次節も含め本論文では、一酸化炭素の計測結果を燃料消費量に対する発生率 Y_{CO} (Species Yields) としても表している。化学種 i の発生率 Y_i は、化学種 i の分子量 M_i 、発生量 \dot{G}_i 、および燃料 (プロパン) の供給量 \dot{m}_b から以下のように計算する。なお、一酸化炭素の場合は $M_i = M_{CO} = 28$ である。

$$Y_i = \frac{M_i \dot{G}_i}{(\dot{m}_b \times 10^{-3})} \quad \text{式 2-22}$$

式 2-6 で表した仮定が正しければ、式 2-6 および式 2-22 から、原型と縮小模型 (本実験では、中模型と小模型) の化学種 i の発生率 Y_i の関係は以下で表される。

$$Y_i = Y_i' \quad \text{式 2-23}$$

なお、本研究は燃焼率を主題とするので、一酸化炭素の発生についても燃焼率への影響の大きさを基準として評価するのが良い。一酸化炭素が二酸化炭素に変化して発生量と燃焼率がそれぞれ $\Delta \dot{G}_{CO}$ 、 ΔY_{CO} 減少するとき、発熱量と燃焼率の変化は下式で表される。

$$\Delta \dot{Q}_{eff} = \frac{E_{CO}}{2} \Delta \dot{G}_{CO} \quad \text{式 2-24}$$

$$\Delta \eta = \frac{\Delta \dot{Q}_{eff}}{\dot{Q}_{nom}} = \frac{E_{CO} \Delta \dot{G}_{CO}}{2 \dot{Q}_{nom}} = \frac{E_{CO} \dot{m}_b \Delta Y_{CO}}{56 \dot{m}_b \Delta H_b} \times 10^3 = \frac{E_{CO}}{56 \Delta H_b} \Delta Y_{CO} \times 10^3 \quad \text{式 2-25}$$

燃焼率は小数点第 2 位まで有効であれば実用上十分な精度と言える。このとき $\Delta \eta < 0.005$ であれば許容誤差の範囲内となる。 $E_{CO} = 566$ [kJ/mol]、 $\Delta H_b = 46460$ [kJ/kg] として当該範囲に対応する ΔY_{CO} を求めると $\Delta Y_{CO} < 0.023$ となる。そこで本研究では原型と模型の一酸化炭素発生率 Y_{CO} の差が $\Delta Y_{CO} < 0.023$ となる場合は、 Y_{CO} は原型と模型とで一致したとみなすことにする。

2.3.4. 区画内温度の計算方法

2.5.2 (P.53) では実験結果に基づき区画内温度の計算を行い、模型実験結果から原型の区画内温度を予測できること、および、燃焼率を考慮することの効果を検討する。ここでは、当該計算の方法について述べる。

当該計算では、以下の点を除き、大宮ら²²⁾の一層ゾーンモデルに倣って計算した。

- ・質量保存式において、可燃物の燃焼速度（単位時間あたりの燃料の質量）を無視した。
- ・エネルギー保存式において、可燃物への伝熱量と熱分解ガスが区画内に持ち込む熱量を無視した。
- ・放射について、物体に吸収されない、かつ、開口から外部に出なかった成分は、再度、周囲の壁面・開口部・区画内のガスに吸収、透過、または反射されるものとし、これが無限回繰り返されると仮定した。詳細は 2.3.4.1 (P.41) で述べる。
- ・化学種については計算しない。
- ・ガスの放射率の算定の際、流入空気量＝流出空気量と仮定して流入空気量を設定した。

以降で使用する記号は以下の通り。

A_w : 開口面積 (m^2)	V : 区画内部の体積 (m^3)
A_{wall} : 室内側または室外側の周壁面積 (m^2)	W_w : 開口の幅 (m)
$F_{wall,o}$: 周壁から開口を見る形態係数 ($= A_w / A_{wall}$)	Z_n : 開口下端からの中性帯高さ (m)
H_w : 開口の丈 (m)	c_p : 空気の定圧比熱 ($= 1.009 \text{ kJ/kg/K}$)
\dot{m}_{in} : 流入空気量 (kg/s)	g : 重力加速度 ($= 9.8 \text{ m/s}^2$)
\dot{m}_{out} : 流出空気量 (kg/s)	
\dot{m}_b : 火源の燃焼速度 (kg/s)	α : 開口流量係数 ($= 0.65$)
\dot{Q}_{eff} : 実効発熱速度 (kW)	α_{wall} : 周壁表面の対流熱伝達率 ($\text{kW/m}^2/\text{K}$)
\dot{Q}_o : 区画内ガスから外部への放射による 伝熱量 (kW)	γ_b : 火源の量論空燃比 (プロパンは 15.6)
\dot{Q}_{wall} : 区画内ガスから周壁への伝熱量 (kW)	ε_r : 区画内ガスの放射率
$\dot{Q}_{wall,o}$: 周壁から外部への放射伝熱量 (kW)	ε_w : 周壁の放射率
S_r : 区画内ガスの表面積 (m^2)	ρ_o : 外気の密度 (kg/m^3)
T_o : 外気温度 (K)	ρ_r : 区画内ガスの密度 (kg/m^3)
T_r : 区画内ガスの温度 (K)	$\Delta\rho$: 区画内外の密度差 (kg/m^3)
T_{wall} : 周壁の室内側表面の温度 (K)	σ : ステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2/\text{K}^4$)

区画内ガスに関する質量保存式、エネルギー保存式、気体の状態式を以下のように設定

した。

(質量保存式)

$$\frac{d}{dt}(\rho_r V) = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad \text{式 2-26}$$

(エネルギー保存式)

$$\frac{d}{dt}(c_P \rho_r T_r V) = \dot{Q}_{eff} - \dot{Q}_{wall} - \dot{Q}_o - c_P \dot{m}_{out} T_r + c_P \dot{m}_{in} T_o \quad \text{式 2-27}$$

(気体の状態式)

$$\rho_r T_r = \rho_o T_o \quad \text{式 2-28}$$

開口部を通しての流入空気量 \dot{m}_{in} と流出空気量 \dot{m}_{out} は以下の式で求めた。

$$\dot{m}_{in} = \frac{2}{3} \alpha W_w (2g\rho_o |\Delta\rho|)^{\frac{1}{2}} Z_n^{\frac{3}{2}} \quad \text{式 2-29}$$

$$\dot{m}_{out} = \frac{2}{3} \alpha W_w (2g\rho_r |\Delta\rho|)^{\frac{1}{2}} (H_w - Z_n)^{\frac{3}{2}} \quad \text{式 2-30}$$

式 2-29 および式 2-30 中の Z_n は、開口下端を基準とする開口部の中性帯高さであり、式 2-27 および式 2-28 から導かれる式 2-31 からニュートン・ラフソン法を用いて求めた。

$$\frac{1}{c_P T_r} (\dot{Q}_{eff} - \dot{Q}_{wall} - \dot{Q}_o) + \frac{T_o}{T_r} \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \quad \text{式 2-31}$$

区画内ガスから周壁への伝熱量は、前述の通り、放射の透過・反射成分は再放射を繰り返すと仮定して、以下の式で求めた。なお、式 2-36 および式 2-40 でも同様に仮定した。

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_{wall}}{1 - (1 - F_{wall,o})(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{wall})} \quad \text{式 2-32}$$

$$\dot{Q}_{wall} = \varepsilon \sigma A_{wall} (T_r^4 - T_{wall}^4) + \alpha_{wall} A_{wall} (T_r - T_{wall}) \quad \text{式 2-33}$$

α_{wall} は対流熱伝達率である。大宮ら²²⁾ は文献²³⁾ を参考に以下のように設定しており、本計算でも同じ設定とした。

$$\alpha_{wall} = \begin{cases} 0.005 & (T \leq 300K) \\ (0.02T - 1) \times 10^{-3} & (300K < T \leq 800K) \\ 0.015 & (800K \leq T) \end{cases} \quad \text{式 2-34}$$

$$\text{ここで, } T = \frac{T_r + T_{wall}}{2} \quad \text{式 2-35}$$

周壁の温度 T_{wall} は、区画内ガスから周壁への伝熱量 \dot{Q}_{wall} から周壁から外部への放射伝熱量 $\dot{Q}_{wall,o}$ (式 2-36) を引いた値を周壁の区画内側表面への入射熱として、一次元熱伝導方程式を差分法で解いて求めた。この際、周壁の区画外側の表面の伝熱量は、外部空間の放射率を 1、対流熱伝達率を式 2-34 から求めた値として計算した (この際、 $T = (T_o + T_{wall})/2$ とした)。

$$\dot{Q}_{wall,o} = \frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r} \varepsilon \sigma A_w (T_{wall}^4 - T_o^4) \quad \text{式 2-36}$$

区画内ガスの放射率 ε_r について、大宮ら²²⁾ はすす等の煙粒子が影響する場合に文献²⁴⁾ を参考に式 2-37～式 2-39 で算定している。本計算でもこれらの式を用いて区画内ガスの放射率 ε_r を求めた。なお、 k_r を計算する際に必要となる \dot{m}_m は、 $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$ とみなして式 2-29 と式 2-30 から計算した。

$$\varepsilon_r = 1 - e^{-k_r L_r} \quad \text{式 2-37}$$

$$k_r = \frac{1.3 \dot{m}_b (\gamma_b + 1)}{\dot{m}_b + \dot{m}_{in}} \quad \text{式 2-38}$$

$$L_r = \frac{3.6V}{S_r} \quad \text{式 2-39}$$

区画内ガスから外部への放射による伝熱量 \dot{Q}_o は式 2-40 で求めた。

$$\dot{Q}_o = \left\{ \varepsilon_r + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{wall})}{\varepsilon_{wall}} \varepsilon \right\} \sigma A_w (T_r^4 - T_o^4) \quad \text{式 2-40}$$

式 2-26～式 2-28 より区画内温度 T_r の予測式は式 2-41 のように得られる。同式をルンゲ・クッタ法で計算して区画内温度 T_r を求めた。

$$\frac{d}{dt} T_r = \frac{T_r}{c_p \rho_o T_o V} (\dot{Q}_{eff} - \dot{Q}_{wall} - \dot{Q}_o) - \frac{T_r}{\rho_o T_o V} \dot{m}_m (T_r - T_o) \quad \text{式 2-41}$$

周壁（CBD）の熱物性は以下のように設定した。このうち、比熱と熱伝導率は当該材料のメーカーカタログ²⁵⁾を参照した。密度は、実験 1-Q-1 の区画内温度について計算値と実測値が一致するように調整したものである。この調整の詳細は次節にて述べる。放射率については、関ら²⁶⁾が加熱炉内の熱収支をモデル化し、炉内温度などについて実験値と良く一致した計算結果を得ていることから、当該計算における CBD の放射率設定値（0.75）を本計算でも用いることとした。

（周壁の熱物性）

比熱 : 1.13 kJ/kg/K
 熱伝導率: 0.071(200℃), 0.081(400℃), 0.107(600℃),
 0.142(800℃), 0.191(1000℃) W/m/K
 密度 : 230 kg/m³
 放射率 : 0.75

2.3.4.1. 放射熱伝達の設定

物体から発せられた放射は、周囲の物体に吸収・反射されたり、周囲の物体を透過したりする。吸収されなかった成分は、さらに周囲の物体の間で吸収、透過、反射を繰り返すと考えられる。このことを考慮して、放射による伝熱量に関係する式 2-33, 式 2-36 および式 2-40 を設定した。その詳細を以降に述べる。

本計算における、区画内ガスから発生した放射熱の想定を図 2-6 に示す。まず、区画内ガスの総表面積 $A_{wall} + A_w$ から $\varepsilon_r \sigma (A_{wall} + A_w) T_r^4$ (kW) の放射熱が発生すると考える。このとき、周壁に到達する放射熱は $\varepsilon_r \sigma A_{wall} T_r^4$ となり、このうち $\varepsilon_r \varepsilon_{wall} \sigma A_{wall} T_r^4$ は周壁に吸収され、 $(1 - \varepsilon_{wall}) \varepsilon_r \sigma A_{wall} T_r^4$ は反射される。一方、区画内ガスから開口部には $\varepsilon_r \sigma A_w T_r^4$ の放射熱が到達し、区画外に放出されるとする。

前述の周壁によって反射された放射熱 $(1 - \varepsilon_{wall}) \varepsilon_r \sigma A_{wall} T_r^4$ は、再度、区画内で吸収・反射、または区画外に放出される。すなわち、区画内ガスに $(1 - \varepsilon_{wall}) \varepsilon_r^2 \sigma A_{wall} T_r^4$ が吸収され、その残りの $(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{wall}) \varepsilon_r \sigma A_{wall} T_r^4$ は区画内ガスを透過し、その先にある周壁や開口部に到達する。このとき開口部に到達する放射熱は、周壁から開口部を見る形態係数 $F_{wall,o}$ を先ほどの透過成分の値に掛けて $(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{wall}) \varepsilon_r \sigma A_{wall} F_{wall,o} T_r^4$ となり、周壁から周壁に到達する放射熱は、周壁から周壁を見る形態係数 $1 - F_{wall,o}$ を用いて、 $(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{wall}) \varepsilon_r \sigma A_{wall} (1 - F_{wall,o}) T_r^4$ となる。今回も、開口部に到達した放射熱は外部に放出され、周壁に到達した放射熱は吸収・反射されるとする。ここで周壁に吸収される放射熱は $(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{wall}) \varepsilon_r \varepsilon_{wall} \sigma A_{wall} (1 - F_{wall,o}) T_r^4$ となり、反射される放射熱は $(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{wall})^2 \varepsilon_r \sigma A_{wall} (1 - F_{wall,o}) T_r^4$ となる。更に、この反射成分についても以上と同様のやり取り行なわれる、というように無限に繰り返されると考える。

以上と同じことを、周壁から発生した放射熱および開口部を介して外部から区画内に流入した放射熱に対しても考えることができ、それぞれの放射熱の行き先は図 2-7、図 2-8 のようになる。

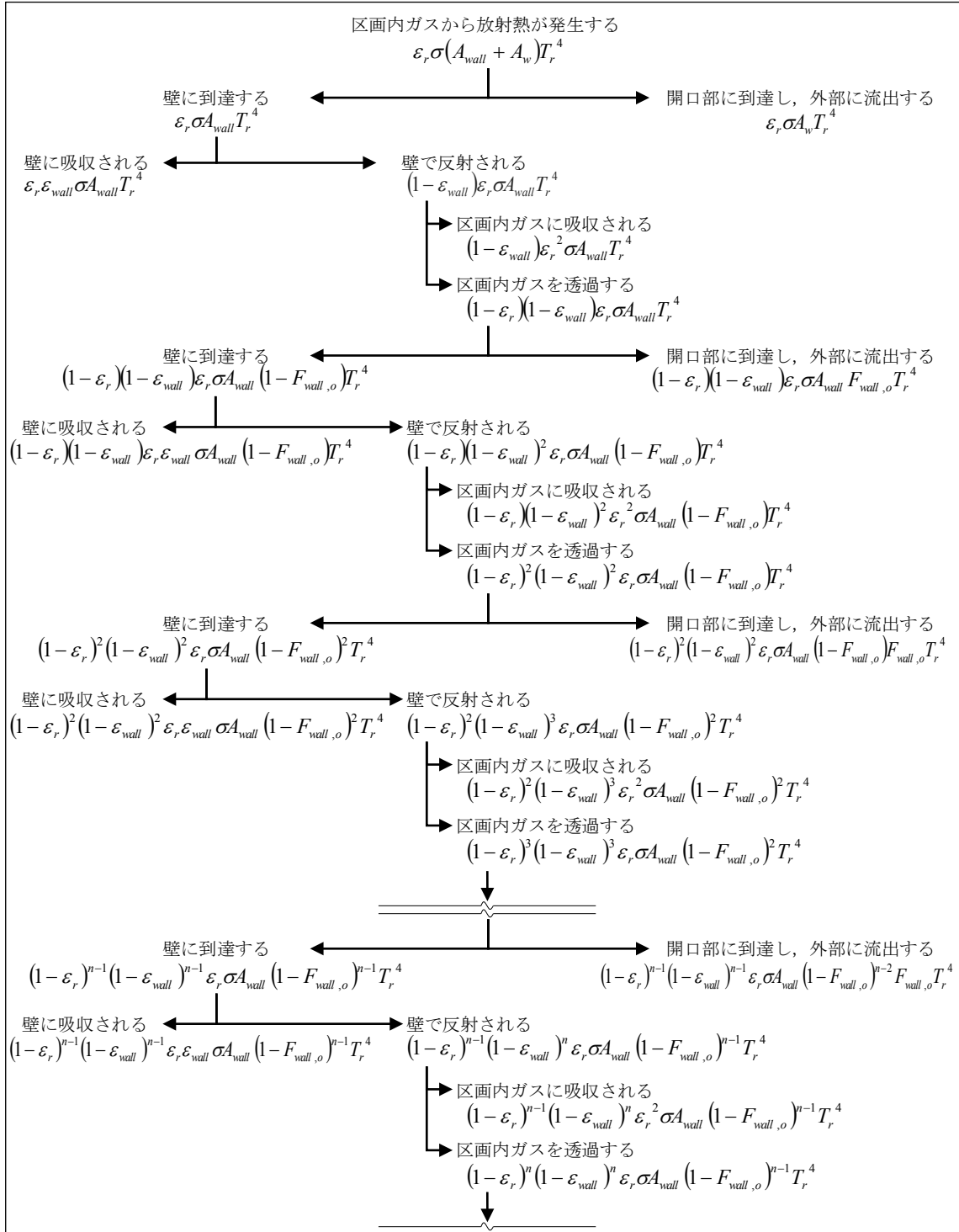


図 2-6 区画内ガスから発生した放射熱の行き先

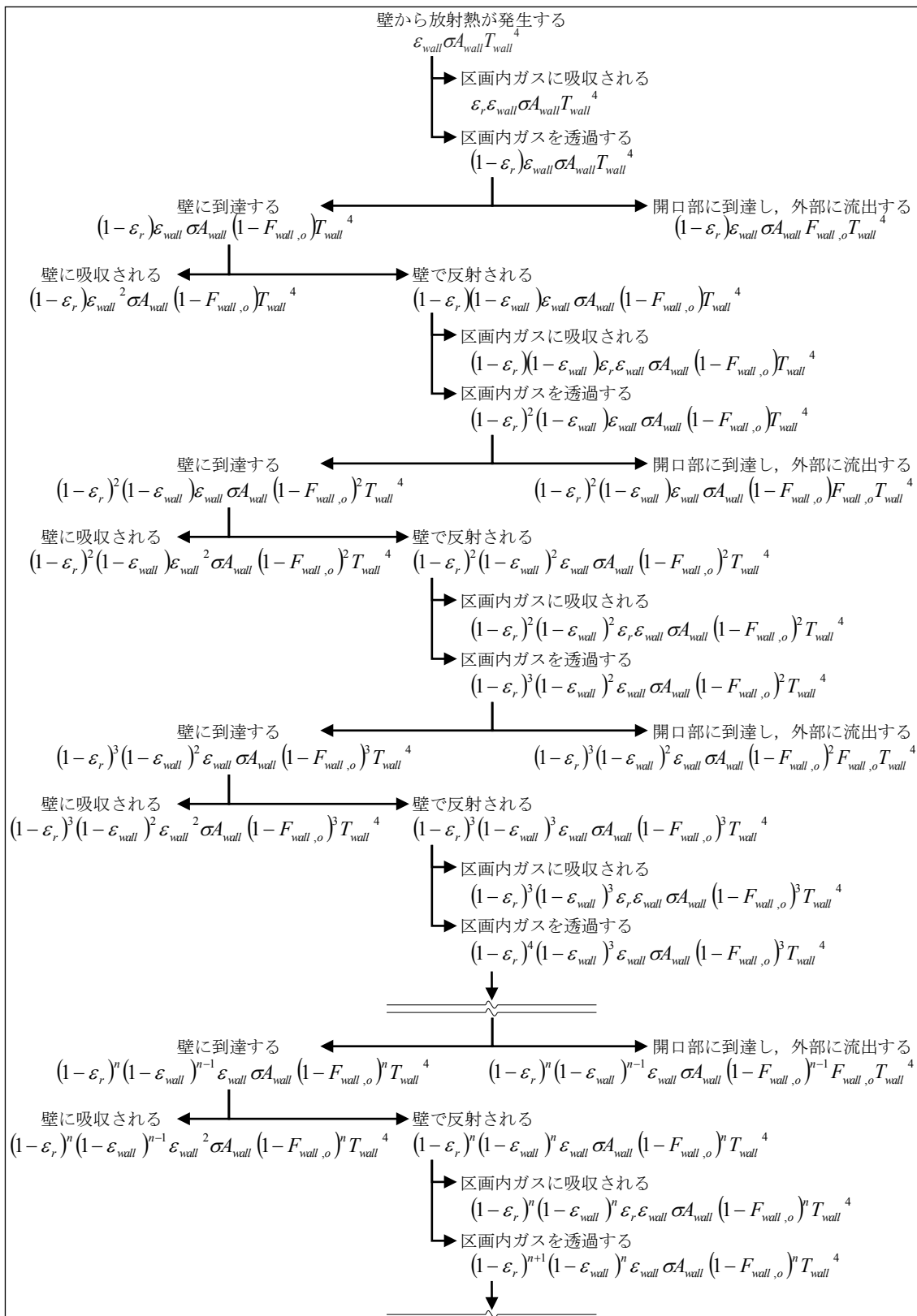


図 2-7 周壁から発生した放射熱の行き先

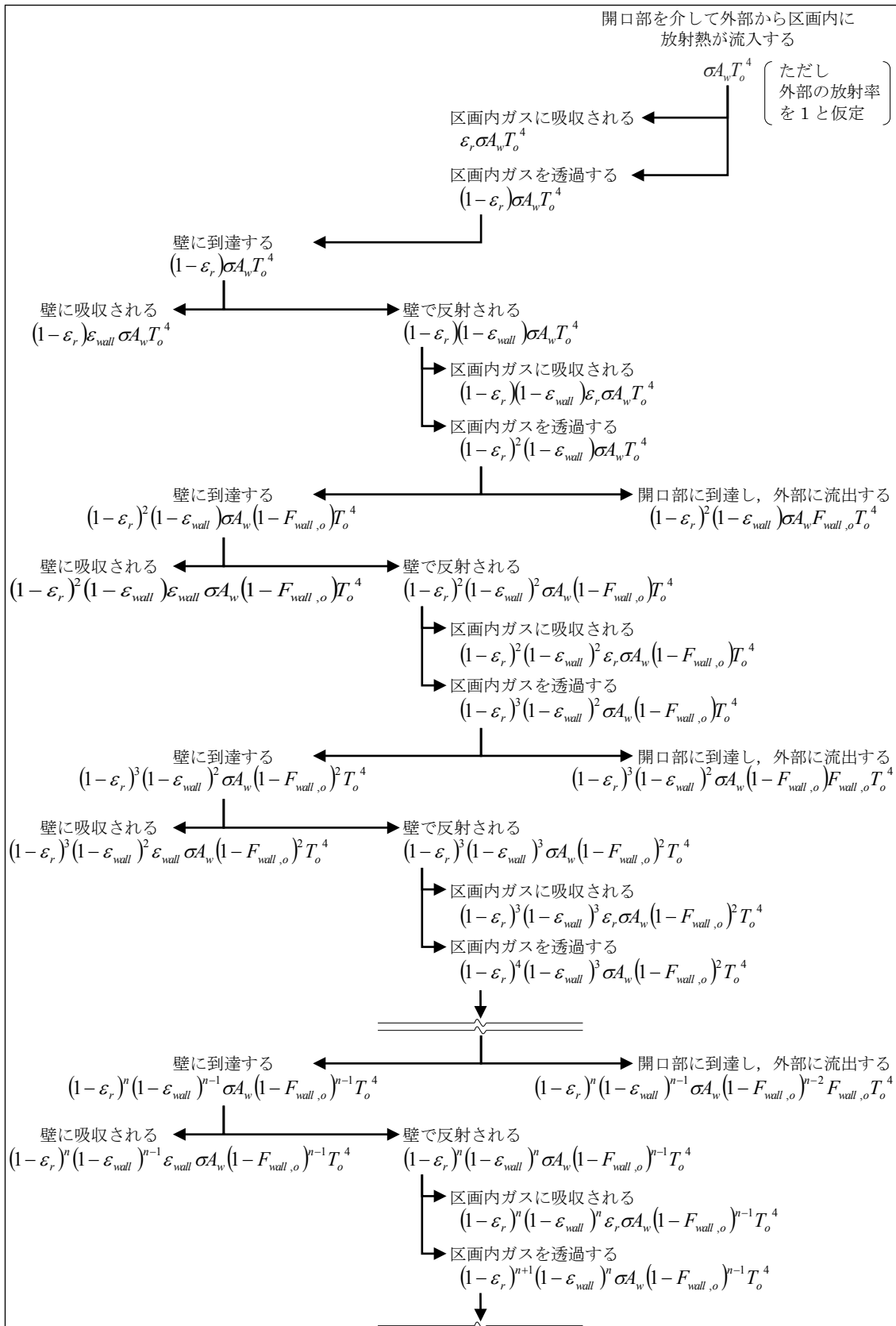


図 2-8 開口部を介して外部から区画内に流入した放射熱の行き先

図 2-6～図 2-8 に示された値を整理することによって、式 2-33、式 2-36 および式 2-40 の放射熱伝達に関する部分は以下のように導かれる。

まず式 2-33 は、右辺第 1 項が区画内ガスと周壁の間での放射伝熱量を表しており、区画内ガスから発生して周壁に移動する放射熱から周壁から発生し区画内ガスに移動する放射熱量の差である。図 2-6 を基に、区画内ガスから発生して周壁に移動する放射熱量を整理すると次のようになる。なお、以下の点線部分を式 2-32 のように ε で表した。

$$\begin{aligned}
 & \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} T_r^4 \\
 & + (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}}) \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o}) T_r^4 \\
 & + (1 - \varepsilon_r)^2 (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^2 \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o})^2 T_r^4 \\
 & \quad \vdots \\
 & = \sum_{n=0}^{\infty} (1 - \varepsilon_r)^n (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^n \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o})^n T_r^4 \\
 & = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}}}{1 - (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})(1 - F_{\text{wall},o})} \sigma A_{\text{wall}} T_r^4 \\
 & = \varepsilon \sigma A_{\text{wall}} T_r^4
 \end{aligned}$$

また、周壁から発生して区画内ガスに移動する放射熱量は図 2-7 より次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} T_{\text{wall}}^4 \\
 & + (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}}) \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o}) T_{\text{wall}}^4 \\
 & + (1 - \varepsilon_r)^2 (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^2 \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o})^2 T_{\text{wall}}^4 \\
 & + (1 - \varepsilon_r)^3 (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^3 \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o})^3 T_{\text{wall}}^4 \\
 & \quad \vdots \\
 & = \sum_{n=0}^{\infty} (1 - \varepsilon_r)^n (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^n \varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o})^n T_{\text{wall}}^4 \\
 & = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}}}{1 - (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})(1 - F_{\text{wall},o})} \sigma A_{\text{wall}} T_{\text{wall}}^4 \\
 & = \varepsilon \sigma A_{\text{wall}} T_{\text{wall}}^4
 \end{aligned}$$

以上より、式 2-33 の右辺第 1 項は次のように求められる。

$$\varepsilon \sigma A_{\text{wall}} T_r^4 - \varepsilon \sigma A_{\text{wall}} T_{\text{wall}}^4 = \varepsilon \sigma A_{\text{wall}} (T_r^4 - T_{\text{wall}}^4) \quad \text{式 2-33 右辺第 1 項}$$

式 2-36 は、周壁から外部への放射伝熱量を表しており、周壁から発生して外部に移動す

る放射熱量と外部から周壁に移動する放射熱量の差である。周壁から発生して外部に移動する放射熱量は図 2-7 より次のようになる。なお、途中で、 $F_{wall,o} = A_w/A_{wall}$ であることから $A_{wall}F_{wall,o}$ を A_w で置き換えている。

$$\begin{aligned}
& (1-\varepsilon_r)\varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}F_{wall,o}T_{wall}^4 \\
& + (1-\varepsilon_r)^2(1-\varepsilon_{wall})\varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}(1-F_{wall,o})F_{wall,o}T_{wall}^4 \\
& + (1-\varepsilon_r)^3(1-\varepsilon_{wall})^2\varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}(1-F_{wall,o})^2F_{wall,o}T_{wall}^4 \\
& \quad \vdots \\
& = \sum_{n=0}^{\infty} (1-\varepsilon_r)^{n+1}(1-\varepsilon_{wall})^n \varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}(1-F_{wall,o})^n F_{wall,o}T_{wall}^4 \\
& = \frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} \cdot \frac{\varepsilon_r\varepsilon_{wall}}{1-(1-\varepsilon_r)(1-\varepsilon_{wall})(1-F_{wall,o})} \sigma A_w T_{wall}^4 \\
& = \frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} \varepsilon \sigma A_w T_{wall}^4
\end{aligned}$$

また、開口部を介して外部から区画内に入り周壁に移動する放射熱量は図 2-8 より次のようになる。

$$\begin{aligned}
& (1-\varepsilon_r)\varepsilon_{wall}\sigma A_w T_o^4 \\
& + (1-\varepsilon_r)^2(1-\varepsilon_{wall})\varepsilon_{wall}\sigma A_w(1-F_{wall,o})T_o^4 \\
& + (1-\varepsilon_r)^3(1-\varepsilon_{wall})^2\varepsilon_{wall}\sigma A_w(1-F_{wall,o})^2T_o^4 \\
& \quad \vdots \\
& = \sum_{n=0}^{\infty} (1-\varepsilon_r)^{n+1}(1-\varepsilon_{wall})^n \varepsilon_{wall}\sigma A_w(1-F_{wall,o})^n F_{wall,o}T_o^4 \\
& = \frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} \cdot \frac{\varepsilon_r\varepsilon_{wall}}{1-(1-\varepsilon_r)(1-\varepsilon_{wall})(1-F_{wall,o})} \sigma A_w T_o^4 \\
& = \frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} \varepsilon \sigma A_w T_o^4
\end{aligned}$$

以上より、式 2-36 の右辺は以下のように求められる。

$$\frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} \varepsilon \sigma A_w T_{wall}^4 - \frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} \varepsilon \sigma A_w T_o^4 = \frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} \varepsilon \sigma A_w (T_{wall}^4 - T_o^4) \quad \text{式 2-36 右辺}$$

式 2-40 は、区画内ガスから外部への放射による伝熱量を表しており、区画内ガスから発生して外部に移動する放射熱量と外部から区画内ガスに移動する放射熱量の差である。区画内ガスから発生して外部に移動する放射熱量は図 2-6 より次のようになる。なお、途中で、 $F_{wall,o} = A_w/A_{wall}$ であることから $A_{wall}F_{wall,o}$ を A_w で置き換えている。

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_r \sigma A_w T_r^4 \\
& + (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}}) \varepsilon_r \sigma A_{\text{wall}} F_{\text{wall},o} T_r^4 \\
& + (1 - \varepsilon_r)^2 (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^2 \varepsilon_r \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o}) F_{\text{wall},o} T_r^4 \\
& \quad \vdots \\
& = \varepsilon_r \sigma A_w T_r^4 + \sum_{n=0}^{\infty} (1 - \varepsilon_r)^{n+1} (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^{n+1} \varepsilon_r \sigma A_{\text{wall}} (1 - F_{\text{wall},o})^n F_{\text{wall},o} T_r^4 \\
& = \varepsilon_r \sigma A_w T_r^4 + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \cdot \frac{\varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}}}{1 - (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})(1 - F_{\text{wall},o})} \sigma A_{\text{wall}} F_{\text{wall},o} T_r^4 \\
& = \varepsilon_r \sigma A_w T_r^4 + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \varepsilon \sigma A_w T_r^4
\end{aligned}$$

また、開口部を介して外部から区画内ガスに移動する放射熱量は図 2-8 より次のようになる。

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_r \sigma A_w T_o^4 \\
& + (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}}) \varepsilon_r \sigma A_w T_o^4 \\
& + (1 - \varepsilon_r)^2 (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^2 \varepsilon_r \sigma A_w (1 - F_{\text{wall},o}) T_o^4 \\
& + (1 - \varepsilon_r)^3 (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^3 \varepsilon_r \sigma A_w (1 - F_{\text{wall},o})^2 T_o^4 \\
& \quad \vdots \\
& = \varepsilon_r \sigma A_w T_o^4 + \sum_{n=0}^{\infty} (1 - \varepsilon_r)^{n+1} (1 - \varepsilon_{\text{wall}})^{n+1} \varepsilon_r \sigma A_w (1 - F_{\text{wall},o})^n T_o^4 \\
& = \varepsilon_r \sigma A_w T_o^4 + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \cdot \frac{\varepsilon_r \varepsilon_{\text{wall}}}{1 - (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})(1 - F_{\text{wall},o})} \sigma A_w T_o^4 \\
& = \varepsilon_r \sigma A_w T_o^4 + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \varepsilon \sigma A_w T_o^4
\end{aligned}$$

以上より、式 2-40 の右辺は以下のように求められる。

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_r \sigma A_w T_r^4 + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \varepsilon \sigma A_w T_r^4 - \left\{ \varepsilon_r \sigma A_w T_o^4 + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \varepsilon \sigma A_w T_o^4 \right\} \\
& = \left\{ \varepsilon_r + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \varepsilon \right\} \sigma A_w T_r^4 - \left\{ \varepsilon_r + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \varepsilon \right\} \sigma A_w T_o^4 \\
& = \left\{ \varepsilon_r + \frac{(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_{\text{wall}})}{\varepsilon_{\text{wall}}} \varepsilon \right\} \sigma A_w (T_r^4 - T_o^4)
\end{aligned}$$

式 2-40 右辺

2.4. 実験結果

発熱速度、一酸化炭素発生量および区画内温度の計測結果を表 2-3、図 2-9 (P.50) および図 2-10 (P.51) に示す。表 2-3 には、区画内平均温度 (区画内 12 点の平均温度) および開口噴出火炎の有無も示した。模型間 (中模型と小模型) で燃焼率と一酸化炭素発生率を比較するために、全実験の結果を図 2-11 (P.52) に示した。

表 2-3 および図 2-11 に示した計測値は、燃料供給量 (公称発熱速度) を変更する直前のおよそ 3 分間の計測値の平均であり、例えば、実効発熱速度や一酸化炭素発生量であれば、図 2-9 および図 2-10 に“○”で示した値とした。前節で述べた通り、実験 1-H と実験 1-Q-1 は時間について式 2-1 を満足しているが、これらの実験については表 2-3 および図 2-11 の計測値を取得したタイミングも同式を満たすようにした。

表 2-3 の開口噴出火炎の目視観察結果は、開口噴出熱気流が一般的な可燃ガスの燃焼に伴うような輝炎を含む状態を“○”で表した。なお、次章の実験では、開口噴出熱気流として赤味を帯びたガスが流出しているが、輝炎を含まない状態となった実験条件があったが、本実験では確認されなかった。

区画内温度は、小模型より中模型の方が高くなった。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、模型間で温度が一致、あるいは、その差を既往実験¹⁶⁾を参考に 150°C程度にするために、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、同一当量比での実験 1-H と実験 1-Q-1 の温度差は最大 172°Cであり、目標値 (150°C) を若干超えたが、概ね想定の範囲と言える。

表 2-3 計測結果

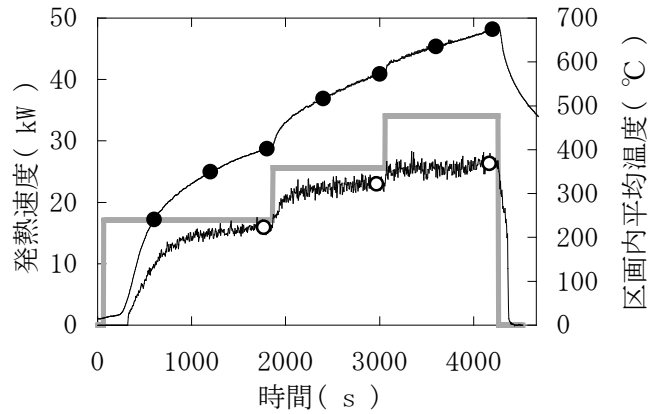
実験	個別名称	当量比 ^a ϕ	燃焼率 ^a η	一酸化炭素発生率 ^a Y_{CO}	区画内平均温度 ^b [°C]	開口噴出火炎 ^c
1	1-H	0.50	0.93	0.006	400	
		0.75	0.90	0.101	570	
		1.00	0.77	0.238	672	
	1-Q-1	0.50	0.91	0.012	288	
		0.77	0.84	0.169	427	
		1.01	0.74	0.559	500	
	1-Q-2	0.63	1.00	0.089	479	
		0.88	0.81	0.390	537	
		1.11	0.67	0.313	560	
		1.20	0.63	0.181	560	○
1.28		0.83	0.072	545	○	

a) 燃料供給量変更の直前約 3 分間での時間平均, b) 区画内 12 点の平均の, 燃料供給量変更の直前約 3 分間での時間平均, c) 明確な開口噴出火炎を確認した条件に○を記した。

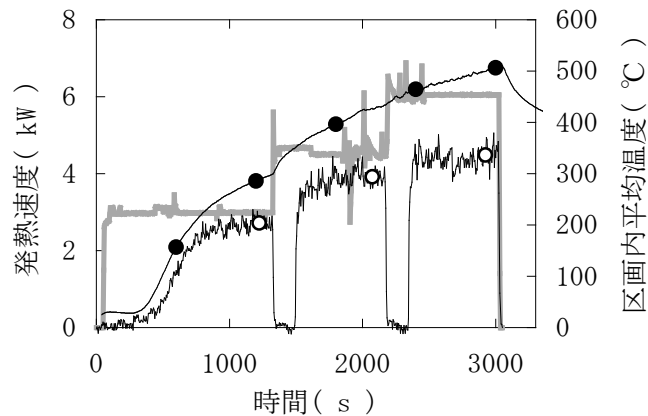
図 2-9 のように、本実験では火源の燃料供給量，即ち，公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} を段階的に増加させ、実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} を計測した。すべての実験条件で、公称発熱速度の増加に伴って公称発熱速度に比べて実効発熱速度が小さくなり、燃焼率 $\eta (= \dot{Q}_{eff} / \dot{Q}_{nom})$ の低下が確認された。

いずれの条件でも、燃料の供給開始直後は区画内温度の変化は小さく、数分後に温度上昇速度が大きくなっている。この傾向が顕著な実験 1-Q-1 では、区画内温度の上昇速度は 320 秒 (5.3 分) から大きくなっているが、このとき火源の火炎高さが大きくなったのが確認されている。以上の現象から、燃料供給開始直後から区画内温度の上昇速度が大きくなるまでは、火源の発熱速度は区画内温度に大きな影響を与えない程度の大きさであったと考えられる。また、その原因として、実験開始前からバーナー内に存在した空気により、燃料 (プロパン) が希釈され、火源面から噴き出す気体中の燃料濃度が低かったことが考えられる。

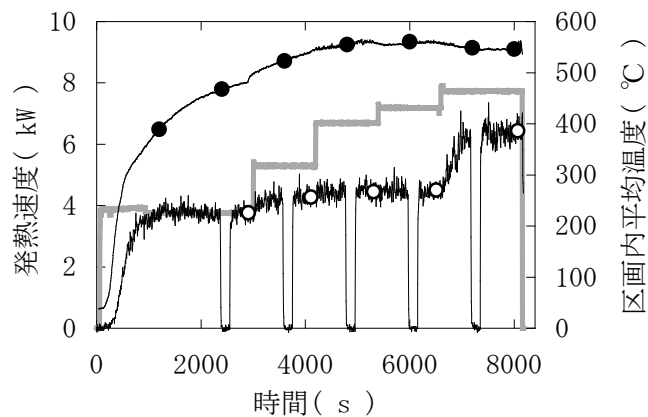
— : 実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} — : 公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} ● : 区画内平均温度



(1) 実験 1-H^{※1}



(2) 実験 1-Q-1



(3) 実験 1-Q-2

図 2-9 発熱速度と区画内平均温度^{※2}の測定結果

※1 実験 1-H の公称発熱速度のグラフはマスフローコントローラーの指示値の目視記録値である(実験 1-Q-1 と実験 1-Q-2 はマスフローメーターの出力信号の計測値)。

※2 図中の“○”は表 2-3 および図 2-11 に示した計測値の取得時期を示す。

図 2-10 のように、一酸化炭素発生量は、いずれの実験でも当量比 1.1 以下の条件では、公称発熱速度の増加に伴って増加した。実験 1-Q-2 の当量比 1.1 を超える条件で低めの値となったのは、開口噴出火炎に伴う燃焼により CO が CO_2 に変化したためと考えられる。

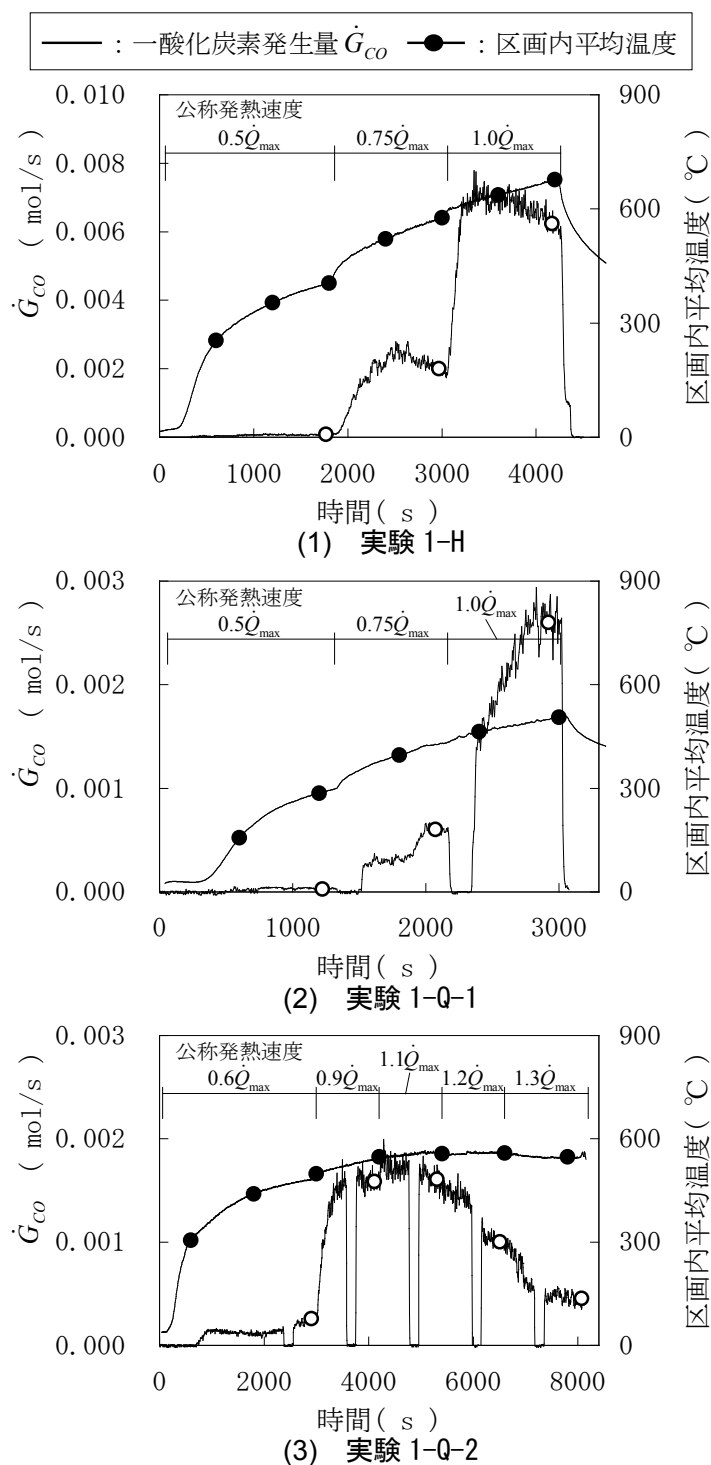
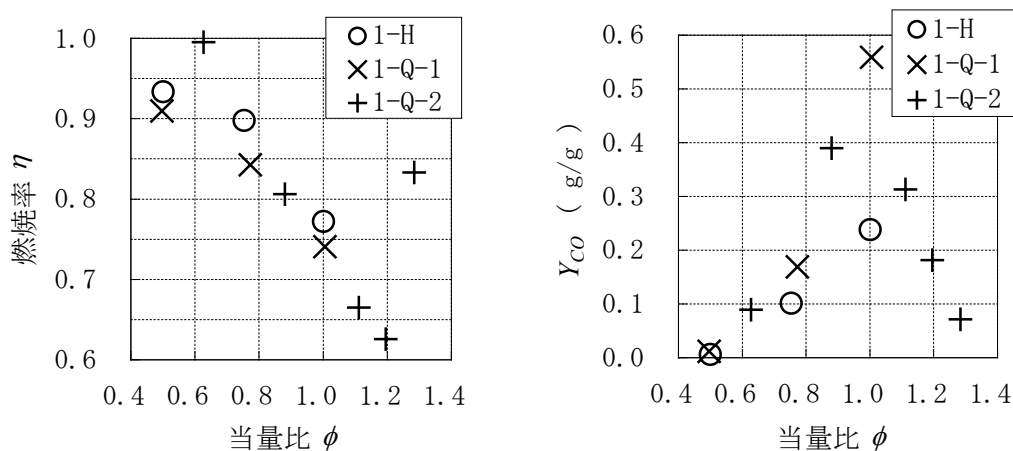


図 2-10 一酸化炭素発生量*の測定結果

* 図中の“○”は表 2-3 および図 2-11 に示した計測値の取得時期を示す。

図 2-11 のように、中模型の燃焼率は小模型よりやや高い値を示したが、模型間で燃焼率は概ね一致した。当量比の条件が同じである実験 1-H と実験 1-Q-1 を比較すると、その差は当量比 $\phi=0.5$ で 0.02、 $\phi=0.75$ で 0.06、 $\phi=1.0$ で 0.03 となった。

一酸化炭素については、前述 (2.3.3.1) のように実験 1-Q-1 は計測値が過大だった可能性がある。ただし、実験 1-Q-1 の一酸化炭素計測値が過大だとしても、区画形状が同一の実験 1-Q-2 (図 2-10(3)) との比較から過剰分は最大で 0.001mol/s 程度 (図 2-10 (2)2900s 付近) と推測され、これによる実効発熱速度(式 2-15)と燃焼率の変化はそれぞれ 0.078kW, 0.013 程度であり、実験結果への影響は少ないと言える。



(1) 当量比と燃焼率の関係

(2) 当量比と一酸化炭素発生率の関係

図 2-11 中模型と小模型の計測値の比較

なお、実験 6-2-S (図 2-9(3)) でのみ、当量比 ϕ が 1 を超える条件での燃焼率を計測した。同実験においては、 $\phi=0.88\sim 1.20$ ($\dot{Q}_{nom} = 5.3\text{kW}\sim 7.2\text{kW}$) で、実効発熱速度はほぼ一定値となった。また、 $\phi=1.20$ ($\dot{Q}_{nom} = 7.2\text{kW}$) では、時々、開口から火炎が噴出し、 $\phi=1.28$ ($\dot{Q}_{nom} = 7.7\text{kW}$) で、写真 2-11 に示すように連続した開口噴出火炎が確認された。この時、実効発熱速度が増加したが、これは区画内部で発生した発熱速度だけでなく開口噴出火炎の発熱速度も計測したためと考えられる。



写真 2-11 実験 1-Q-2 での開口噴出火炎

2.5. 考察

2.5.1. 相似則の妥当性

本章では、室容積に対して開口の小さい区画における盛期火災を想定した模型実験で、当量比の増加によって燃焼率が低下する関係が見られた。そして、計測された燃焼率は、幾何学的に相似な模型間で当量比 0.5 では 0.02、当量比 1.0 では 0.03 の差で一致した。本研究で提案する相似則の妥当性を評価するには、後述の検討が必要であるが、燃焼率の計測結果から判断すると、まず本実験の当量比 0.5 および 1.0 の条件において本相似則は妥当であると言える。耐火性能設計において当量比 1.0 の火災性状は重要であることを考えると、本結果の意味は大きい。

一方、以降の章で検討すべき課題として以下が考えられる。

本章の実験では区画の幾何学的形状の違いが燃焼率に影響すると考え、以上の通り、幾何学的に相似な模型間で燃焼率の一致を確認した。しかし、区画形状の違いが燃焼率に影響することを実験で確認できてはいない。課題の一つめとして、区画形状の異なる場合に燃焼率が変化するか、また、その時に本相似則が成立するか把握することが挙げられる。

当量比 0.75 では模型間の燃焼率の差は、当量比 0.5 および 1.0 に比べて大きかった。これについては、本実験では、前述 (2.2, P.20) の通り、区画内温度の条件を緩和しているため、区画内温度の影響を受けた可能性が考えられるが、模型間の区画内温度の差は当量比 0.5, 0.75, 1.0 でそれぞれ 112°C, 143°C, 172°C であり、当量比 0.75 で最大とはなっていない。これらを考慮すると、当量比 0.75 で模型間の燃焼率の差が比較的大きくなった原因として、燃焼率への区画内温度の影響が当量比 0.75 で大きかった可能性が考えられる。もし、この予想が正しければ、区画内温度を一致させることにより、当量比 0.75 においても原型と模型とで燃焼率を一致させることができるはずである。この区画内温度の影響については、以降の章にて検討する。

2.5.2. 燃焼率を考慮した区画内温度の推定

縮小模型実験結果を用いることで原型の区画内温度を予測できること、および、燃焼率の考慮が区画内温度の予測結果に与える効果を確認するために、一層ゾーンモデルを用いて区画内温度を計算する。

2.5.2.1. 検討方法

区画内温度の計算では、周壁の熱物性の設定は結果に直接影響し、使用材料のカタログ値を用いても実測値と一致する結果が得られるとは限らない。そこで、信頼できる実験結果等を試金石として使用材料の熱物性の設定値を調整し、計算の妥当性を確認する必要がある。そこで、まず本計算では実験 1-Q-1 の区画内温度を予測できるように周壁の熱物性値を調整する。次に、実験 1-Q-1 で得られた燃焼率の実測値と、前述のように当該実験結果を基に調整した熱物性値を用いて原型である実験 1-H の区画内温度を計算する。当該結

果から、模型実験結果を用いることで原型の区画内温度を予測できるか否かを判断する。

また、以上の計算では、発熱速度を燃焼率を考慮して計算する場合と燃焼率を無視した場合の 2 通りの条件で区画内温度を予測し、燃焼率の考慮が区画内温度の予測結果に与える効果を確認する。

なお、計算方法の詳細は 2.3.4 (P.38) を参照されたい。

2.5.2.2. 実験 1-Q-1 の計算

実験結果を良く再現する CBD の熱物性値を得るために、密度を変数とした計算を行った。当該計算における発熱速度の設定を図 2-12 に示す。発熱速度の設定値は、燃焼率を考慮するために、実験時の公称発熱速度に表 2-3 (P.48) に示した同実験の燃焼率実測値を乗じた値とした。また、2.4 (P.48) にて述べたように、実験開始から 320 秒 (5.3 分) までは、実験開始前からバーナー内に存在した空気の影響により火源面から噴き出す気流の燃料 (プロパン) 濃度が低く、火源の発熱速度が小さかったと考えられる。そこで、当該期間については、発熱速度を 0kW に設定した。なお、当該設定値として実効発熱速度の実測値を用いなかったのは、公称発熱速度の増加直後は、模型内は発熱速度増加前の既燃ガスで充満しており、これが発熱速度増加後に発生した既燃ガスで置換されるまでは、酸素消費法の計測値が実際の発熱速度を下回ることを考慮したためである。実測値に基づき、外気温度は 9.5°C に設定した。また、区画内温度および周壁温度の初期値は、0 秒～320 秒まで (火源の発熱速度が小さかったと考えられる期間) の区画内温度の実測値の平均である 28°C に設定した。

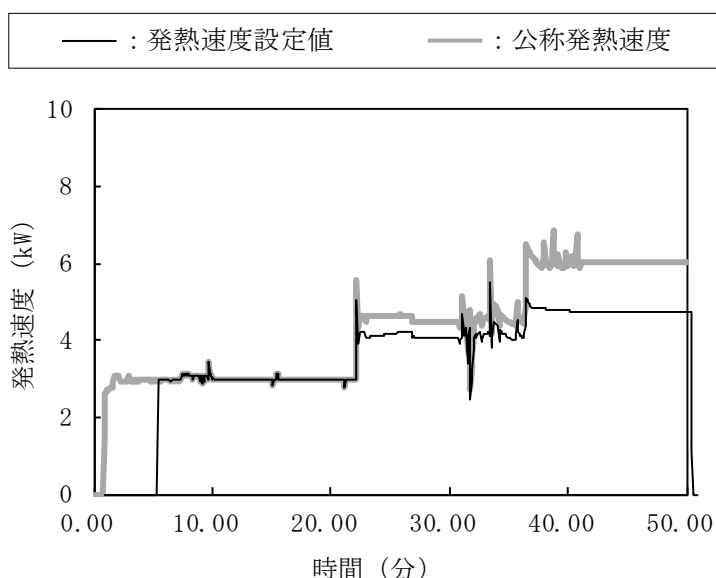


図 2-12 実験 1-Q-1 の計算における発熱速度の設定

周壁（CBD）の密度を 210kg/m^3 、 230kg/m^3 および 250kg/m^3 として計算した結果を図 2-13 に示す。周壁の密度を 230kg/m^3 とした計算値は、他の計算値と比べて、当量比 1.01（36 分以降）で実測値と良く一致した。本結果から、以降の計算では周壁の密度を 230kg/m^3 と設定することとした。

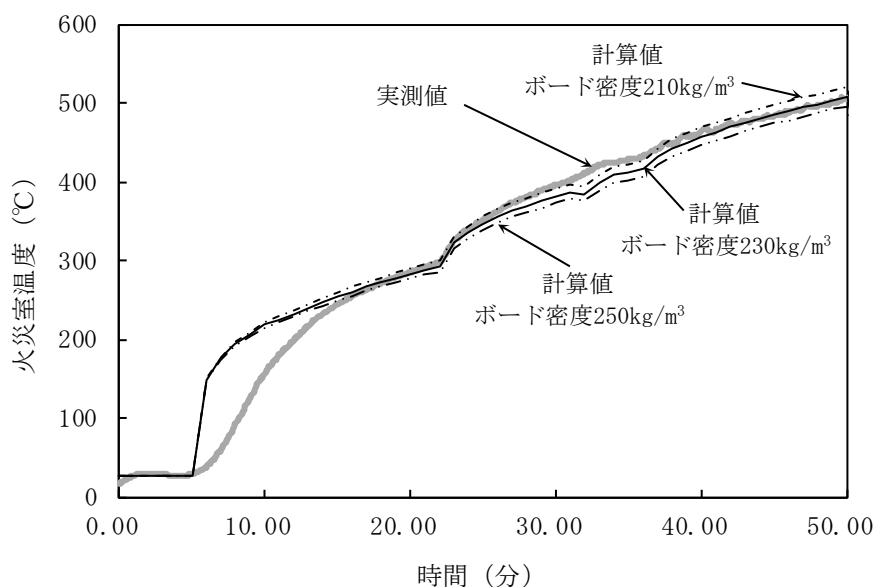


図 2-13 周壁の密度を 210kg/m^3 、 230kg/m^3 および 250kg/m^3 とした場合の
実験 1-Q-1 の区画内温度の計算結果

図 2-14 に、発熱速度を燃焼率を考慮して設定した計算と燃焼率を無視して設定した計算の結果を示す。燃焼率を考慮した計算では図 2-12 に示した発熱速度設定値を用いた。また、燃焼率を無視した計算では、実験時の公称発熱速度（図 2-12 の公称発熱速度）を用いて計算した。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、当量比が 1.01 のとき(36 分以降)に、計算値は実測値より高くなった。

なお、燃焼率の考慮の有無に関わらず 15 分迄は計算値と実測値の差が大きい。この原因として、区画内温度が上昇を始めた時点（5.3 分）においても、実験開始前からバーナー内に存在した空気が残存しており、これがプロパンによって全て置換されるまでは、火源面からは空気で希釈されたプロパンが流出するために、実際の発熱速度が公称発熱速度に達しなかったことが考えられる。但し、①計算が終盤に近づき発熱速度が大きくなるくほど、序盤の小さな発熱速度に対する設定誤差が引き起こす影響は小さくなること、および②20 分には計算と実験とで区画内温度が良く一致していることから、20 分以降の計算結果への当該影響は小さいと言える。

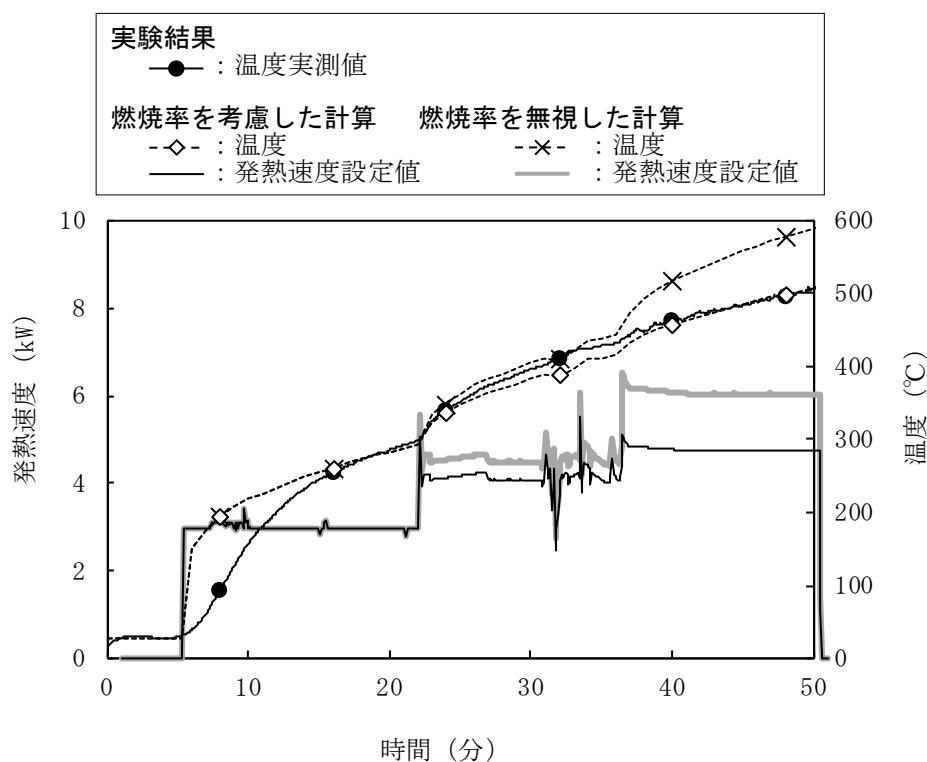


図 2-14 燃焼率を考慮した場合と燃焼率を無視した場合の
区画内温度の計算結果（実験 1-Q-1）

2.5.2.3. 実験 1-H の計算

実験 1-Q-1 で得られた燃焼率の実測値を用いて原型である実験 1-H の区画内温度を計算した。計算結果を図 2-15 に示す。燃焼率を考慮した計算の発熱速度の設定値は、実験 1-H の公称発熱速度に表 2-3 (P.48) に示した実験 1-Q-1 の燃焼率実測値を乗じた値とし、燃焼率を無視した計算では発熱速度は実験 1-H の公称発熱速度とした。ただし、実験 1-Q-1 の計算と同様に、区画内温度の実測値の変化が小さい 0 分～4 分については、火源の発熱速度が小さかったと考えられることから、発熱速度を 0kW に設定した。実測値に基づき、外気温度は 11°C に、区画内温度および周壁温度の初期値は、0 分～4 分まで（火源の発熱速度が小さかったと考えられる期間）の区画内温度の実測値の平均である 19°C に設定した。

実験 1-Q-1 の計算と同様に、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、当量比が 1.0 のとき(50 分以降)に、計算値は実測値より高くなった。開口が小さく燃焼率が低下しやすい室に関しては、燃焼率を考慮することで区画内温度を精度良く予測できると考えられる。

また、本計算では、縮小模型で得られた燃焼率を用いて原型の区画内温度を予測できたことから、燃焼率の推定手法として縮小模型実験が有効であると言える。更に、縮小模型の周壁を原型と同じ材料で製作することで、原型の区画内温度計算に必要な周壁の熱物性値を縮小模型実験結果から推定することも可能である。

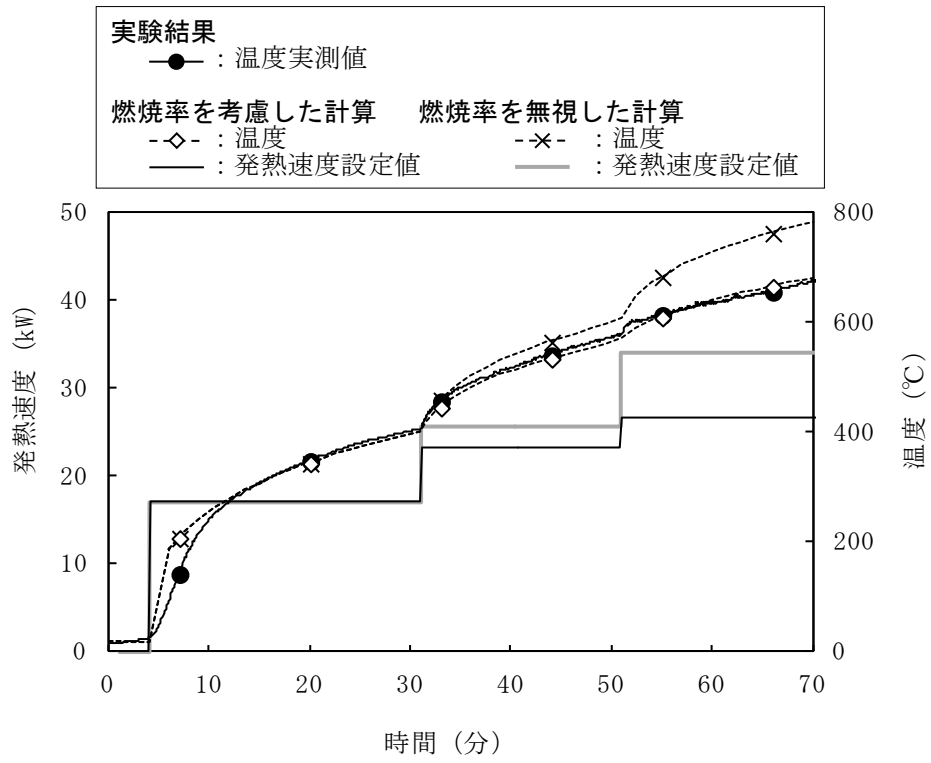


図 2-15 燃焼率を考慮した場合と燃焼率を無視した場合の
 区画内温度の計算結果 (実験 1-H)

2.6. まとめ

燃焼率は、火災安全に広く関係する基礎的な指標である。しかし、盛期区画火災の燃焼率を定量的に推定できる有力な手法は現在のところ見当たらない。一方、既往研究^{1),6)~12)}からは、燃焼率には当量比の他に区画の幾何学的形状の違いが影響し、幾何学的に相似なモデルであれば燃焼率を検討対象と一致させられる可能性があると考えられる。

そこで、本章では、燃焼速度、区画内温度、およびガス濃度に関する既往の相似則^{10),12)}を拡張して開口の小さい区画における盛期火災の燃焼率に関する相似則を考えた。この相似則では、以下の条件を満たすことで原型とモデルの燃焼率が一致する。

- ・原型とモデルとで幾何学的形状を相似にする
- ・原型とモデルとで燃料の種類は同じにする
- ・モデルの燃料供給量は、原型の燃料供給量にモデル縮尺の 2.5 乗を掛けた値とする
- ・原型とモデルとで区画内温度を同じにする。

相似則の妥当性を確認するために、幾何学的形状が相似で大きさが異なる 2 つの区画モデル（中モデルと小モデル、モデル間の縮尺 $L'/L=1/2$ ）で燃焼率を計測した。また、計測した燃焼率に基づき、燃焼率を考慮する場合としない場合との 2 通りで区画内温度を計算し、計算結果に与える影響を検討した。これらにより以下の知見が得られた。

- ① 本章では、開口の小さい室における盛期火災の燃焼率に関する相似則を提案した。当該相似則に従って、幾何学的に相似で縮尺の異なる 2 つの区画モデルで計測した燃焼率は当量比 0.5 および当量比 1.0 においてよく一致した。このことから、本実験の当量比 0.5 および当量比 1.0 の条件において当該相似則は妥当であると考えられる。
- ② 当量比 0.75 の条件では幾何学的に相似で縮尺の異なる 2 つの区画モデルで計測した燃焼率は、当量比 0.5, 1.0 に比べるとモデル間の差が大きかった。この原因として、当量比 0.75 では区画内温度の影響が大きかった可能性が考えられる。
- ③ 一層ゾーンモデルを用いてモデル実験の再現計算を行った。燃焼率の低下を無視した場合には、計算値は実測値より大きくなった。一方、実験で計測された燃焼率を考慮した場合には、計算値は実測値と良く一致した。開口が小さく燃焼率が低下しやすい室に関しては、燃焼率を考慮することで区画内温度を精度良く予測できることを確認した。

以上のように、本章では燃焼率に関する相似則を提案し、まず、一種類の区画形状に対しての妥当性を確認した。そのほかの条件にも適用できることを確認するには、本実験と区画形状の異なる場合や、検討対象とモデルとで規模の差・流入空気の滞留時間の差が大きい場合にも本相似則が成立すること、および、本相似則を適用可能な当量比の範囲などについて把握する必要がある。また、②の結果から、区画内温度の影響の検討も必要である。これらについては次章以降で検討する。

参考文献

- 1) Tewarson, A. : Fully Developed Enclosure Fires of Wood Cribs, Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1555-1566, 1984.
- 2) 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.
- 3) Beyler, C.L. : Major Species Production by Diffusion Flames in a Two-layer Compartment Fire Environment, Fire Safety Journal, vol.10, pp.47-56, 1986.
- 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) 成瀬友宏, 菅原進一 : 火災区画内発熱量に係わる燃料の違い - 火災区画内の発熱量の予測 その 2 - , 日本建築学会構造系論文集, 第 521 号, pp.157-161, 1999.7.
- 6) 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp. 225-228, 2006.
- 7) 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, A-2, pp.227-230, 2008.
- 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, Vlo.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) 斉藤孝三, 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 卷 407 号, pp.1348-1354, 1980.7.
- 13) 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.
- 14) Nakaya, I., Tanaka, T., Yoshida, M. and Steckler, K. : Doorway Flow Induced by a Propane Fire, Fire Safety Journal, Vol.10, pp.185-195, 1986.
- 15) 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.

- 16) Heskestad, G. : Modeling of Enclosure Fires, Fourteenth Symposium (International) on Combustion, pp.1021-1030, 1973.
- 17) 平成 12 年度建設省告示 1433 号「耐火性能検証に関する算出方法等を定める件」
- 18) 川越邦雄 : Fire Behaviour in Rooms, 建築研究報告, No.27, 建設省建築研究所, 1958.9.
- 19) 大宮喜文, 佐藤雅史, 田中哮義, 若松孝旺 : 区画内における可燃物の燃焼速度と噴出火炎の発生限界, 日本建築学会構造系論文集, 第 469 号, pp.149-158, 1995.3.
- 20) Parker, W.J. : Calculations of The Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications, J. Fire Sciences, Vol.2, pp.380-395, September/October, 1984.
- 21) 田中哮義, 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.
- 22) 大宮喜文, 田中哮義, 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, 1-8, 1996.
- 23) 田中哮義, 中村和人 : <二層ゾーンの概念に基づく>建物内煙流動予測計算モデル, 建築研究報告, No.123, 建設省建築研究所, 1989.11.
- 24) Quintiere, J.G. and McCaffrey, B.J. : The Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure - Volume 1 Final Report, National Bureau of Standards, 1980.11.
- 25) Ceramic Fiber IBI WOOL®, イビデン株式会社, 2009.4.
- 26) 関悠平, 長谷見雄二, 稲葉さとみ, 上川大輔, 遊佐秀逸, 須藤昌照, 安井昇 : 木質系部材の耐火構造試験方法に関する研究 (その 3) 放置中耐火炉内における熱収支特性の把握, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), pp.231-232, 2006.9.

第3章 可燃物配置・開口条件の燃焼率への影響の検討

第3章 可燃物配置・開口条件の燃焼率への影響の検討

3.1. はじめに

前章では、既往研究から室容積に対して開口の小さい区画における盛期火災を対象に、既往の相似則^{1),2)}から延長して燃焼率に関する相似則を考えた。そして、一種類の区画形状について、幾何学的に相似で縮尺の異なる2つの区画モデルの燃焼率が当量比0.5, 1.0で当該相似則に従ってよく一致することを確認した。ひとまず、燃焼率に関する相似則が成立することを確認したことになるが、それは前章の実験条件下に限定される。本相似則が汎用的に開口の小さい区画に適用できることを確認するには、区画の幾何学的形状を変えた実験が必要である。また、区画形状が燃焼率に影響するという本研究にとって根本的な考え方が正しいか否かも確認したい。

また、前章の実験では当量比0.75においては、当量比0.5, 1.0に比べてモデル間での燃焼率の差が大きかった。その原因として、当量比0.75において燃焼率への区画内温度の影響が大きかった可能性があるかと予想した。この予想が正しいならば、原型とモデルとで区画内温度を一致させることで燃焼率も一致すると考えられるため、燃焼率への区画内温度の影響の有無の確認も行いたい。

そこで、本章では、以上のことを確認することを目的として、開口形状や火源位置が異なる5つの条件について、前章と同様に、幾何学的に相似で縮尺の異なる2つのモデルの燃焼率等を計測・比較する。また、区画の幾何学的形状の違いが燃焼率に与える影響について検討し、縮小モデル実験で燃焼率を推定するための要件・留意点についても考察すると共に、実験結果から区画内温度と燃焼率との関係を確認する。なお、本実験では、流入空気の平均滞留時間 t_R を前章の実験と一致させないことで、前章の実験との比較により t_R が燃焼率に与える影響を検討できるようにする。

3.2. 実験方法

3.2.1. 区画模型

本実験では、前章と同様の火災 (P.24, 2.3.1) を想定する。本実験で使用した区画模型を図 3-1, 写真 3-1 および写真 3-2 に示す。前章同様、中模型と小模型を用いた。模型の内部の大きさも前章と同じく、中模型が ISO9705 ルームコーナー試験装置の 1/2 (1,200mm × 1,800mm × 1,200mm), 小模型が 1/4 (600mm × 900mm × 600mm) で、中模型に対する小模型の縮尺は 1/2 である。開口因子は、開口の小さい室相当で、かつ、実験 1 とは異なるように、 $A_r\sqrt{H_r}/70$ (実験 1 の 1.5 倍, A_r : 模型床面積, H_r : 模型の室高さ) とした。

区画模型の周壁の材質は、実験 1-H・実験 1-Q-1 と同仕様であり、周壁の熱損失に関する相似則を考慮しない代わりに、耐火断熱材を用いて熱損失の影響を軽減した。すなわち、床・天井・側壁は、厚さ 3mm の下地鋼板に、中模型で 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、正面と背面の壁は、中模型では鋼製アングルで補強した CBD を、小模型では CBD 単体を、模型本体に取り付けた。なお、材料中の有機成分を焼失させるために、写真 3-3 のように実験実施前に区画模型を十分に加熱した。

火源の形状は実験 1 と異なり長方形である。火源面には発泡煉石を充填した。燃料はプロパンで、中模型ではマスフローコントローラーで制御し、小模型ではマスフローメーターで流量計測しながら手動で制御した。燃料流量は、当量比 $\phi = 0.5, 0.75, 1.0$ として、 $\dot{m}_b = \phi \dot{Q}_{\max} / \Delta H_b$ (式 2-14, ただし $\Delta H_b = 46460$ [kJ/kg]) より求まる値を段階的に増加するように供給した。これらの流量は、前述 (2.2, P.20) の通り、中模型と小模型とで式 2-2 を満たしている。燃料の供給時間は式 2-1 を満たすように $t'/t = \sqrt{L'/L} \approx 0.71$ とした。

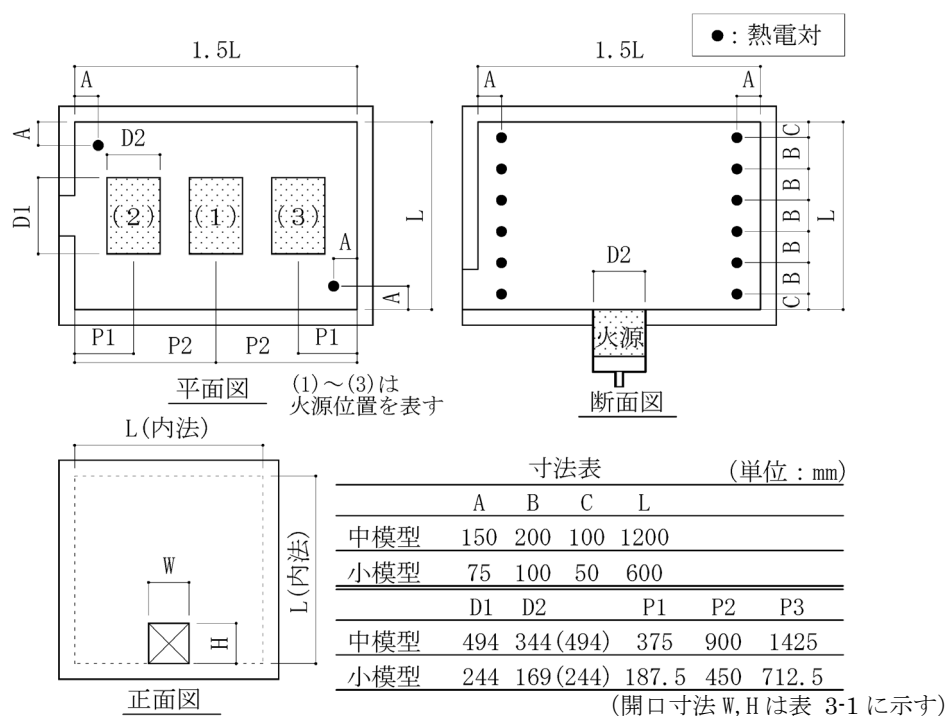
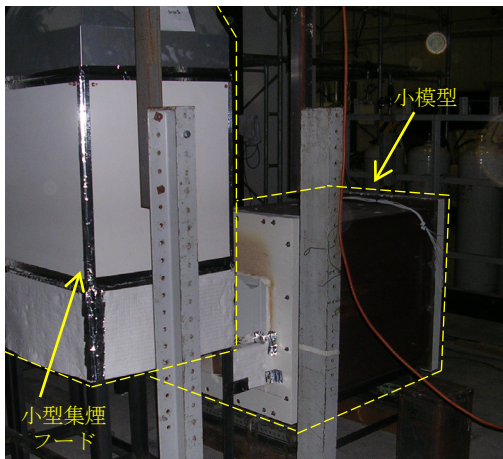


図 3-1 実験 2~6 の区画模型



写真 3-1 中模型 (実験 4-H)



(1) 外観



(2) 内部 (背面壁を外して撮影)

写真 3-2 小模型 (実験 4-Q)



(1) 中模型



(2) 小模型

写真 3-3 事前加熱の様子

3.2.2. 実験条件

実験条件を表 3-1 に示す。前章同様に、(P.26, 2.3.3.1), 幾何学的に相似な実験をまとめて「実験 2」のように番号付けして呼び、個別の実験を指すときは使用した区画に応じて、中模型なら「実験 2-H」、小模型なら「実験 2-Q」のように呼ぶ。なお、実験番号と個別名称は前章からの引き続きとした。

本章では、区画の幾何学的形状の違いによる燃焼率への影響を確認すると共に、そのような影響が現れる条件下で、幾何学的に相似な模型間で燃焼率に関する相似則の成否を確認したい。区画の幾何学的形状によって燃焼率が変化するときの本質的要因は、流入空気量の違いや、燃焼反応後のガス（既燃ガス）との混合による流入空気の濃度低下などであると予想される。また、本相似則で流入空気の平均滞留時間 t_R を無視したことの影響の確認も必要である。そこで、これらの要因が変化するように、開口形状と火源位置を変えた 5 種類の区画形状で実験条件を設定した。各条件の詳細は以降に述べる。

なお、模型間の温度差の目安を、前章と同様に 150°C 程度以内として実験を行い、その上で、計測値を区画内温度で整理して、燃焼率への区画内温度の影響について検討する。

表 3-1 実験条件 (実験 2~6)

実験 番号	個別 名称	区画 模型	開口				$A_r \sqrt{H_r}$ 70	火源 位置	燃料 (C ₃ H ₈) 供給量		公称 発熱速度 Q_{nom} [kW]
			形状	幅 [mm]	丈 [mm]	開口因子 [m ^{2.5}]			\dot{m}_b [kg/s]	[slm]	
2	2-H	中	スリット	26	1200	0.0342	0.0338	1	0.547 × 10 ⁻³	16.26	25.4
		0.820 × 10 ⁻³							24.35	38.1	
									1.096 × 10 ⁻³	32.56	50.9
	2-Q	小		13	600	0.0060	0.0060		0.097 × 10 ⁻³	2.89	4.5
									0.145 × 10 ⁻³	4.31	6.7
									0.194 × 10 ⁻³	5.77	9.0
3	3-H	中	長方形	91	516	0.0337	0.0338	1	0.547 × 10 ⁻³	16.26	25.4
		0.820 × 10 ⁻³							24.36	38.1	
									1.096 × 10 ⁻³	32.56	50.9
	3-Q	小		46	258	0.0060	0.0060		0.097 × 10 ⁻³	2.88	4.5
									0.145 × 10 ⁻³	4.31	6.7
									0.194 × 10 ⁻³	5.76	9.0
4	4-H	中	正方形	258	258	0.0338	0.0338	1	0.547 × 10 ⁻³	16.26	25.4
		0.820 × 10 ⁻³							24.36	38.1	
									1.096 × 10 ⁻³	32.56	50.9
	4-Q	小		129	129	0.0060	0.0060		0.097 × 10 ⁻³	2.88	4.5
									0.146 × 10 ⁻³	4.32	6.8
									0.193 × 10 ⁻³	5.74	9.0
5	5-H	中	正方形	258	258	0.0338	0.0338	2	0.547 × 10 ⁻³	16.26	25.4
		0.820 × 10 ⁻³							24.36	38.1	
									1.093 × 10 ⁻³	32.47	50.8
	5-Q	小		129	129	0.0060	0.0060		0.097 × 10 ⁻³	2.88	4.5
									0.146 × 10 ⁻³	4.34	6.8
									0.194 × 10 ⁻³	5.77	9.0
6	6-H	中	正方形	258	258	0.0338	0.0338	3	0.547 × 10 ⁻³	16.26	25.4
		0.820 × 10 ⁻³							24.35	38.1	
									1.096 × 10 ⁻³	32.56	50.9
	6-Q	小		129	129	0.0060	0.0060		0.096 × 10 ⁻³	2.86	4.5
									0.146 × 10 ⁻³	4.34	6.8
									0.194 × 10 ⁻³	5.76	9.0

3.2.2.1. 開口形状の影響を把握する実験（実験2～4）

火災室全体が高温であるときの流入空気量に関して、Nakaya³⁾らは、火災室（3.55×3.45×2.12m³）と隣室（3.45×3.45×2.17m³）の間に設けた扉開口（丈は1.6mまたは1.7m）を介した気体の流入出量を実測し、開口幅0.29～0.59mにおいて開口因子と流入空気量との比例関係を確認した一方、この比例係数が形状によって変化する可能性も述べている。本来、開口部を通過する気体の流量係数は、開口やその周辺の形状の影響を受けるので、これらが極端に異なれば、開口因子が同じでも流入空気量が変化すると考えられる。そして、当量比が大きく、火災性状が換気支配型となるような場合には、流入空気量が増えれば燃焼率も変化するはずである。

例えば、火災室天井近傍から開口を介して外部へ出る既燃ガスの流れに対して開口上部の垂れ壁が障害となるとすれば、開口因子が同じでも、開口上部の垂れ壁が大きくなることによって、流量係数・流入空気量が小さくなり、燃焼率がより低下する可能性があると考えられる。或いは、火災室の床近傍には、厚さは小さいけれども比較的温度の低い空気層が存在することを考慮すると、開口下端と床の高さが同じ場合、開口因子が変わらなくとも開口丈が小さくなるほど、開口丈に対する当該空気層の厚さの割合が大きくなる為に、開口部差圧が減少することで、流入空気量が減少し、燃焼率が低下することも考えられる。

開口の中性帯付近における流入空気と既燃ガスが接触することに注目すると、流入空気の一部が既燃ガスに巻き込まれ、燃焼に寄与しないまま区画外に流出する代わりに、既燃ガスの一部が流入空気に巻き込まれることによって、流入空気の酸素濃度が低下し、燃焼率が低下する可能性があると考えられる。開口因子が同じであれば、開口幅が大きくなって流入空気と既燃ガスとの接触面が大きくなるほど、流入空気量への既燃ガスの巻き込み量が多くなり酸素濃度が低下するために、燃焼率が低下しやすくなると予想される。

区画高さ・開口下端位置・開口因子が変化しなければ、開口丈が小さくなるほど、垂れ壁は大きく、開口幅は大きくなり、以上のいずれの予想でも燃焼率は低下することになる。

以上は、換気支配型火災を前提としているが、当量比が小さく燃料支配型火災に近い場合については別の予想が成り立つ。当量比が小さいほど、上部に煙層、下部に空気層というように区画内は2層に分かれた状態に近づきやすいと考えられる。そのような場合、開口の上端高さが低いほど、煙が区画外に流出しにくくなり、その結果、上部煙層が厚くなり、煙層に流入する未燃の可燃性ガス量が増え、燃焼率が低下しやすくなると予想される。

そこで、実験2～4では、中模型と小模型の両方について、実験間で開口因子を一定^{※2}と

※2：厳密には、実験2～4の開口因子には中模型で1.1%未満、小模型で1.4%未満のばらつきが存在する。実験4と開口形状が同じで開口因子が33%小さい実験1の燃焼率は表3-2(P.45)の通り実験4より0.04程低くなる結果が得られているが、仮にこの変化が全て開口因子の違いによるものだとしても開口因子1%の違いにつき燃焼率は $0.04/33=0.0012$ 変化するだけである。この値に基づいて実験2～4の開口因子のばらつきが燃焼率に与えた影響を求めると中模型で0.00132未満、小模型で0.00168未満であり、これらの実験間での燃焼率の差（中模型で0.12、小模型で0.14）と比べて無視できるオーダーと言える。従って実験2～4の開口因子のばらつきは結果に影響の無い範囲と考えてよい。

して、開口丈が床から天井のスリット開口（実験 2）から、開口丈が小さく、垂れ壁・開口幅の大きな正方形開口（実験 4）まで、開口の縦横比を変化させた。

3.2.2.2. 火源位置の影響を把握する実験（実験 4～6）

火源位置が火災性状に与える影響について、Hwang ら⁴⁾が、ルームコーナー試験装置で火源を区画中央または奥に設置した実験を行い、火災全体としての燃焼率に対して火源位置の違いが大きくは影響しない結果を得ているが、当量比が 2 程度で、本実験の火災想定（P.24, 2.3.1）とは異なる。また数値流体解析で求めた火炎形状は火源面から直接開口に向かって傾いて外部流出するものであった。一方、本実験のような当量比 1.0 前後の火災では区画内の気体の流れは、火源が区画の奥にある場合には図 3-2(1)のように、火炎は壁に貼りつき、火炎部分で浮力を受けた既燃ガスが開口に向かって流れるが、火源が開口に近づくと同図(2)のように、火炎は壁から離れて、ある程度の既燃ガスが区画奥に向って流れると予想される。

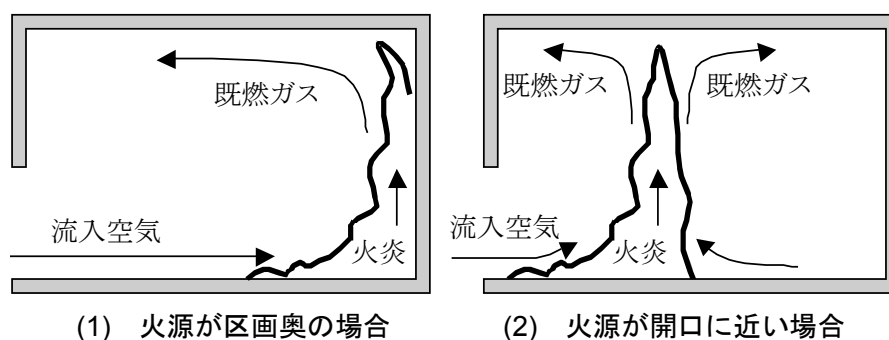


図 3-2 区画内における気体の流れのイメージ

図 3-2 において、火炎に巻き込まれる気体について考えると、区画奥に流れた既燃ガスが再び火炎に巻き込まれる分、同図(1)より同図(2)の方が、火炎に巻き込まれる気体の平均酸素濃度が低くなり、燃焼率が低下すると思われる。また、既燃ガスの運動量が換気に影響すると考えれば、開口に向う既燃ガスの量が少ない分、やはり同図(1)より同図(2)の方が、換気量が少なく、燃焼率が低下すると思われる。

以上のように本実験の当量比においては、火源が開口に近づくほど燃焼率が低下すると予想される。そこで、実験 4～6 では、火源位置を区画中央・開口近傍・区画奥と変化させて、火源位置による影響の有無を確認することとした。

3.2.2.3. 開口因子・流入空気の影響を把握する実験（実験 4）

2.2 (P.20) では、燃焼率や一酸化炭素の燃焼に対する区画内への流入空気の影響^{5),6)}について、開口の小さい区画火災では、幾何学的形状の相似性が保たればスケール効果は現れないと想定した。燃焼率に関する相似則の妥当性を確認するには、

この想定の妥当性を確認する必要がある。

そこで、実験 4 では開口因子を実験 1 の 1.5 倍とし、その他の主要な条件、すなわち、区画の大きさ、開口形状、火源位置は実験 1 と同一（区画模型への納まりの都合から火源形状は多少異なる）とすることで、 t_R の影響について、区画形状が類似した条件で実験 1 と比較できるようにした。なお、 t_R は空間容積と換気量の比と見なせることから、これらの実験の t_R を $t_R \propto V/A_w \sqrt{H_w}$ として見積れば、実験 4-Q を 1 として、実験 4-H : 1.4, 実験 1-H : 2.1, 実験 1-Q : 1.5 となる。

3.2.3. 計測方法

本実験では、実験 1 と同様の計測をした。計測装置の概要は図 2-2 (P.31) と基本は同じであるが、以降のように幾つかの点が異なる。

実験 2-H では、開口上端が小型集煙フードより高く、同フードでは燃焼ガスを収集できないため、既設集煙フードを用いることとし、写真 3-4 のように、燃焼ガスプルームのトラジェクトリが既設集煙フードの吸引口に当たるように模型の開口上部に庇を設け、燃焼ガスの希釈が少なくなるように配慮した。その他の実験では小型集煙フードを用いたが、排煙ダクトを流れる燃焼ガスの濃度をより均一にするために、図 3-3 および写真 3-5 のように同フードのチャンバー内にベーンを設置し、モーターで回転させた。

排煙ダクト内の流量 \dot{m}_e (g/s)、温度、酸素 O_2 ・二酸化炭素 CO_2 ・一酸化炭素 CO の濃度を計測し、これらの値から実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} 、一酸化炭素発生量 \dot{G}_{CO} を算出した。燃焼率、実効発熱速度、一酸化炭素発生量等の算出方法は 2.3.3.4 (P.35)、2.3.3.5 (P.36) の通りとした。また、区画内温度を、図 3-1 に示す位置で K 型熱電対(計 12 点)を用いて計測した。

本実験で使用した計測機器の仕様は、実験 2-H の排煙ダクト・複合ピトー管・ダクト内熱電対を除き、実験 1 (P.30, 2.3.3.2) と同じである。複合ピトー管を写真 3-6 に示す。実験 2-H では排煙ダクト・複合ピトー管は円筒形 $\phi 650\text{mm}$ 、ダクト内熱電対は K 型(素線径 1.6mm) を使用した。

以上のように実験条件に合わせて集煙フードや風量計を変更した。これらの変更が計測結果に与える影響を確認するために、自由空間下でのメタノールの発熱速度・総発熱量をそれぞれの計測装置を使って酸素消費法で測定した値と、重量減少量から求めた値とを比較した。酸素消費法による計測値と重量減少から求めた値は図 3-4 のように全体的に良く一致した。着火から発熱速度が大きく低下し始める直前(両装置共、480 秒)までの総発熱量は、実験 2-H の計測装置(既設集煙フードを使用)では重量減少法で 10962.4kJ、酸素消費法で 10946.5kJ となり、実験 2-H 以外で用いた計測装置(小型集煙フードを使用)では重量減少法で 2722.3kJ、酸素消費法で 2725.0kJ となった。これらの計測値から酸素消費法の計測誤差を求めると、重量減少法の計測値を基準として、実験 2-H の計測装置で -0.1%、実験 2-H 以外で用いた計測装置で 0.1% となることから、いずれの計測装置でも良い精度で計測できることを確認した。

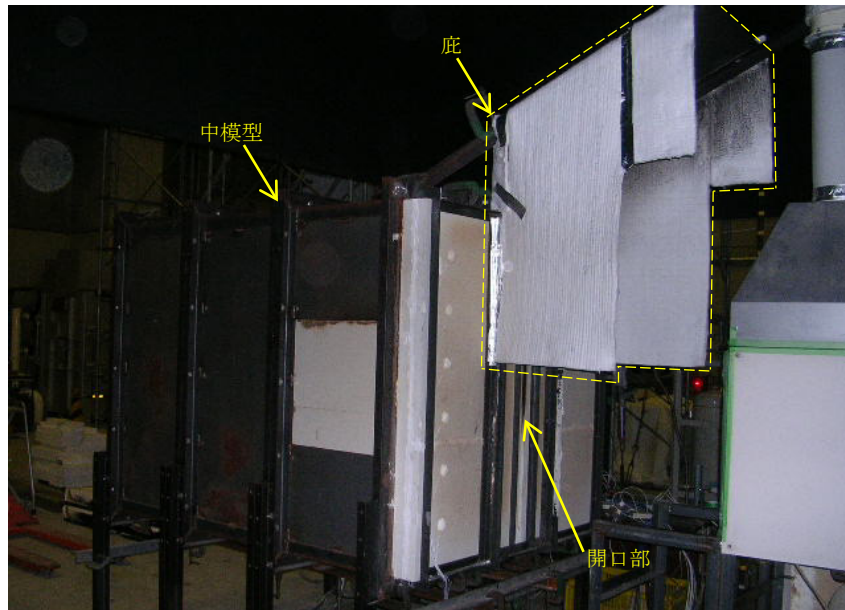


写真 3-4 実験 2-H における開口上部の底

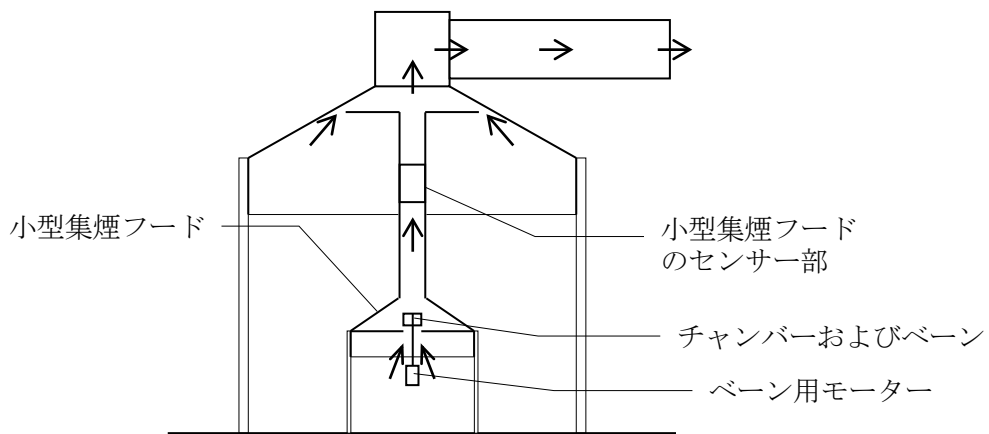
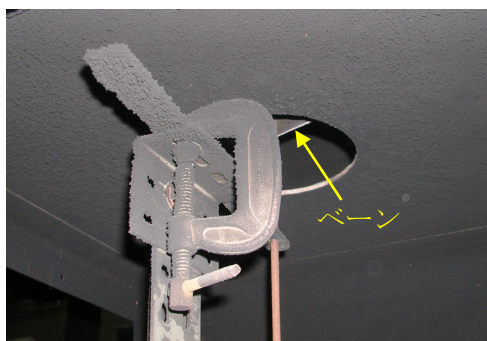
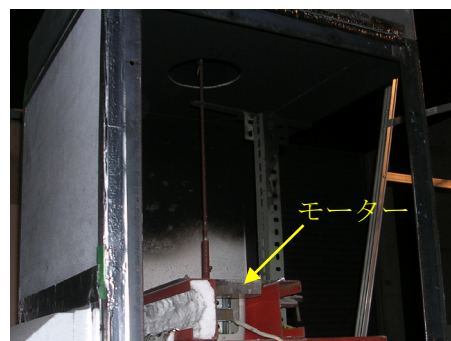


図 3-3 小型集煙フード（実験 2-H を除く実験 2~6）



(1) ベーン

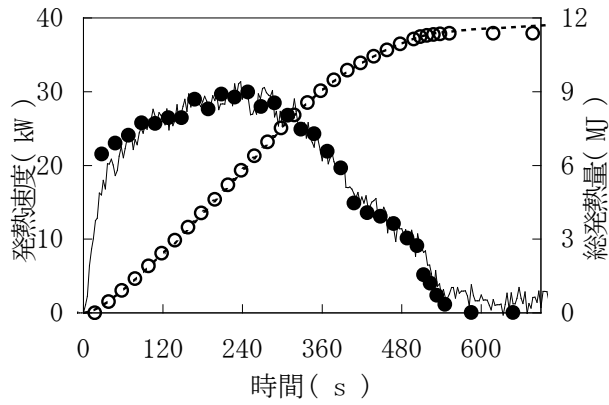
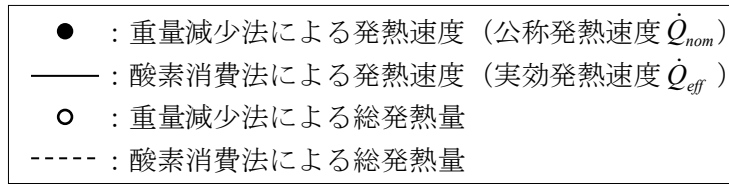


(2) モーター

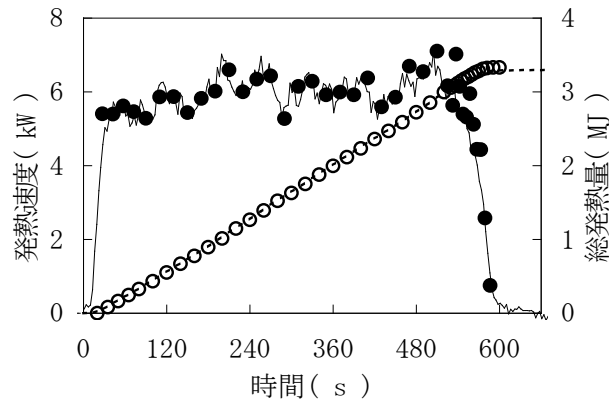
写真 3-5 小型集煙フードのベーンとモーター



写真 3-6 複合ピトー管



(1) 実験 2-H の計測装置 (既設集煙フードを使用)



(2) 実験 2-H 以外の実験の計測装置 (小型集煙フードを使用)

図 3-4 メタノールの重量減少量から求めた発熱速度・総発熱量と酸素消費法での計測値との比較

3.3. 実験結果

3.3.1. 計測結果の概要と全体的傾向

本実験の全体的な傾向を述べるため、一例として実験 4-Q における発熱速度、一酸化炭素発生量および区画内温度の計測結果を図 3-5 および図 3-6 に示す。全実験の当量比、燃焼率、一酸化炭素発生率、区画内平均温度（区画内 12 点の平均温度）および開口噴出火炎の有無を表 3-2 に示した。更に、燃焼率と一酸化炭素発生率について、中模型と小模型の比較を図 3-7～図 3-11 に示す。当量比は、第 2 章と同様に、式 2-12 (2.3.2, P.25) に従って算出した。表 3-2 や図 3-7～図 3-11 に示した計測値は、燃料供給量（公称発熱速度）を変更する直前のおよそ 3 分間の計測値の平均であり、例えば、実験 4-Q の実効発熱速度や一酸化炭素発生量であれば、図 3-6 に“○”で示した値とした。当該計測値を取得したタイミングは、中模型 (t) と小模型 (t') で式 2-1 に従って $t'/t = \sqrt{L'/L} \approx 0.71$ ($L'/L = 0.5$) を満たすようにし、かつ、模型規模が同じなら実験間で一致させたが、実験 3-H, 5-H, 及び 5-Q の当量比 1.0 (表 3-2, 図 3-8, 図 3-10) では、計測手順の都合により他の実験より遅くなった。これらの内、温度については他の実験と同じ時間に計測できているので、その値を表 3-2 に括弧書きした。表 3-2 の開口噴出火炎の目視観察結果は、赤味を帯びたガスが流出しているが、一般的な可燃ガスの燃焼に伴うような輝炎を含まない状態を“△”，輝炎を含む状態を“○”で表した。また、これ等の様子を写真 3-7 に示す。赤味を帯びたガス (△) は、照明をあてると目視できなくなったり白色になったりした。

図 3-6 のように、本研究では火源の燃料供給量、即ち、公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} を段階的に増加させ、実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} を計測した。全ての実験条件で、公称発熱速度の増加に伴って公称発熱速度より実効発熱速度が小さくなり、燃焼率 $\eta = \dot{Q}_{eff} / \dot{Q}_{nom}$ の低下が確認された。この燃焼率低下の程度は実験毎（区画の幾何学的条件毎）に異なり、実験 2～実験 6 の燃焼率を模型規模別に比較すると、各当量比における実験間での燃焼率の差は以下ようになった。

(実験 2～実験 6 の燃焼率の最大値と最小値の差)

$\phi = 0.5$ 中模型で最大 0.06 小模型で最大 0.04

$\phi = 0.75$ 中模型で最大 0.04 小模型で最大 0.12

$\phi = 1.0$ 中模型で最大 0.20 小模型で最大 0.19

一方、幾何学的に相似な中模型と小模型とで燃焼率を比較すると全体的に前者の方が高く、その差は以下ようになった。

(幾何学的に相似な中模型と小模型の燃焼率の差の最大値)

$\phi = 0.5$ 最大 0.03 (実験 5)

$\phi = 0.75$ 最大 0.09 (実験 5)

$\phi = 1.0$ 最大 0.04 (実験 4, 実験 6)

模型間の燃焼率の差が $\phi = 0.75$ で大きいのは、実験 1 (第 2 章) と共通している。当量比

$\phi = 0.5$ および 1.0 では、模型間の差は、実験間での差に比べて小さい。

一酸化炭素発生率は、同一模型では公称発熱速度の増加に伴って増加し、その程度は実験毎に異なった。 $\phi = 0.5$ で計測された一酸化炭素発生率の最大値は 0.015 と小さく、いずれの実験においても中模型と小模型とでよく一致した。一方、 $\phi = 0.75$ では実験 5 で 0.1、 $\phi = 1.0$ では実験 6 で 0.12 の差が中模型と小模型との間に見られた。

全実験で、区画内温度は小模型より中模型の方が高くなった。前章の実験（実験 1）と同様に、本実験でも、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、模型間で温度が一致、または、その差を既往実験 7 を参考に 150°C 程度にするために、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、各実験での模型間の温度差の最大値は、目標値（150°C 程度）を多少上回る、180~200°C 程度となった。

表 3-2 計測結果

実験	個別名称	当量比 ^a ϕ	燃焼率 ^a η	一酸化炭素発生率 ^a Y_{CO}	区画内平均温度 ^b [°C]	開口噴出火炎 ^c
2	2-H	0.50	0.99	0.012	470	
		0.74	0.95	0.004	682	
		0.99	0.93	0.008	873	△
	2-Q	0.50	0.99	0.004	371	
		0.74	0.95	0.001	526	
		1.00	0.91	0.013	674	
3	3-H	0.50	0.96	0.006	491	
		0.75	0.96	0.005	700	△
		1.01	0.90	0.041	897 (860)	△
	3-Q	0.50	0.95	0.004	377	
		0.75	0.91	0.013	530	
		1.00	0.89	0.035	673	
4	4-H	0.50	0.95	0.007	504	
		0.75	0.96	0.007	717	
		1.00	0.81	0.126	832	△
	4-Q	0.50	0.95	0.000	391	
		0.75	0.89	0.079	544	
		1.00	0.77	0.212	644	
5	5-H	0.50	0.93	0.015	494	
		0.75	0.92	0.054	694	
		1.00	0.73	0.193	774 (756)	○
	5-Q	0.50	0.96	0.006	387	
		0.76	0.83	0.154	516	△
		1.01	0.72	0.247	604 (591)	○
6	6-H	0.50	0.95	0.014	504	
		0.75	0.96	0.031	712	△
		1.00	0.82	0.114	835	△
	6-Q	0.50	0.97	0.000	387	
		0.76	0.92	0.048	535	
		1.00	0.78	0.234	642	

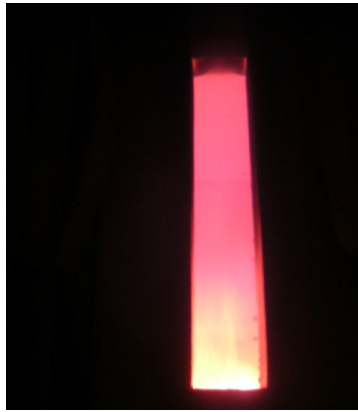
a) 燃料供給量変更の直前約 3 分間での時間平均

b) 区画内 12 点の平均の、燃料供給量変更の直前約 3 分間での時間平均

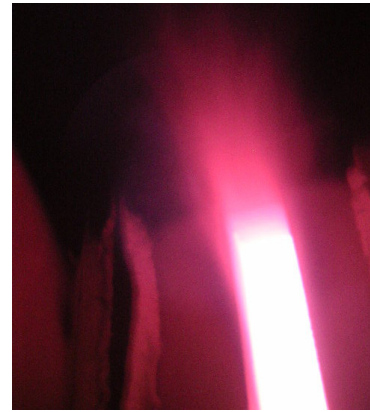
c) ○：明確な開口噴出火炎を確認 △：赤熱した煤の流出を確認



赤熱した煤が流出
(1) 実験 2-H [0.99, Δ]



流出気流がうっすらと
赤味を帯びていた
(2) 実験 3-H [0.75, Δ]



赤熱した煤が流出
(3) 実験 3-H [1.01, Δ]



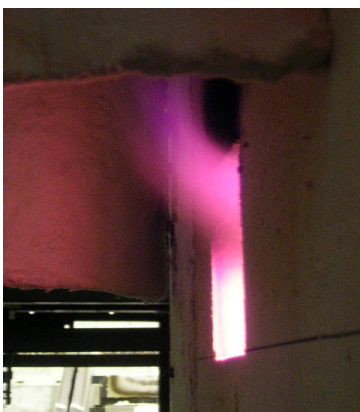
赤熱した煤が流出
(4) 実験 4-H [1.00, Δ]



間欠火炎の流出が継続, 開口右
上・左上はほぼ連続して火炎流出
(5) 実験 5-H [1.00, ○]



稀に赤熱した煤が
筋状に流出
(6) 実験 5-Q [0.76, Δ]



間欠火炎の流出を確認
(7) 実験 5-Q [1.01, ○]



うっすらと赤味を帯びた煙が流
出, 照明を当てると白く見えた
(8) 実験 6-H [0.75, Δ]



赤熱した煤が大量に流出
(9) 実験 6-H [1.00, Δ]

写真 3-7 開口から流出する熱気流の様子

([] 内の数字は当量比を表し, ○は「明確な開口噴出火炎」を, Δは「赤熱した煤の流出」を確認したことを表す。)

— : 実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} — : 公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} ● : 区画内平均温度

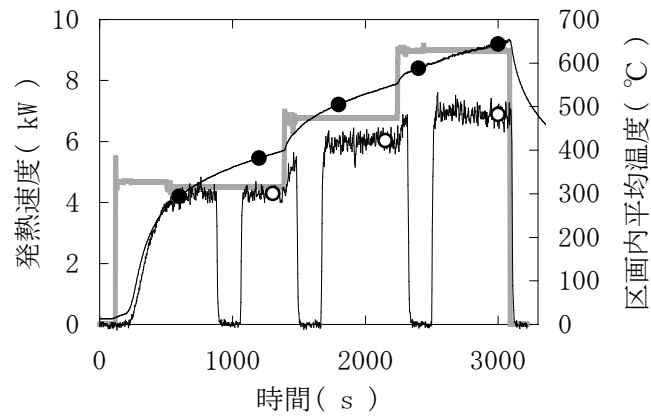


図 3-5 発熱速度と区画内温度の計測結果の一例 (実験 4-Q) ※

※ 図中の“○”は表 3-2 や図 3-7～図 3-11 に示した計測値の取得時期を示す。

— : 一酸化炭素発生量 \dot{G}_{CO} ● : 区画内平均温度

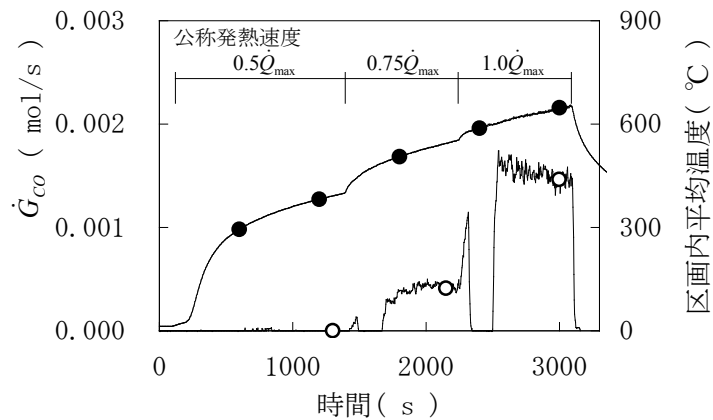
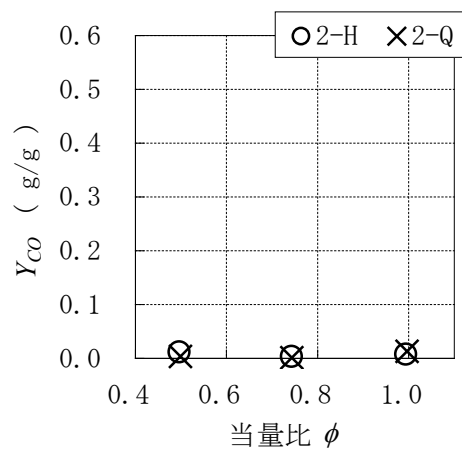
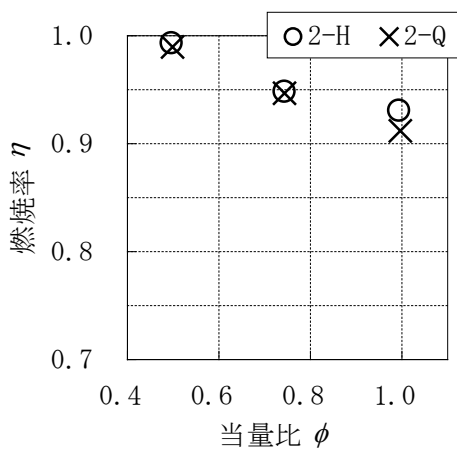


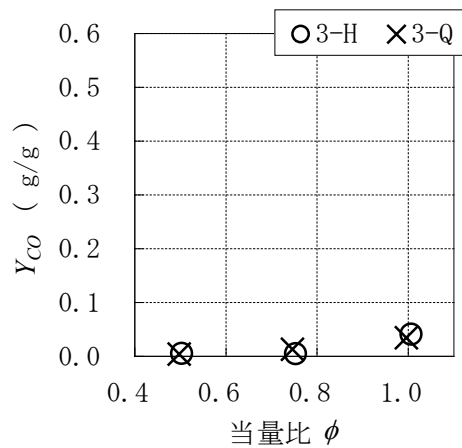
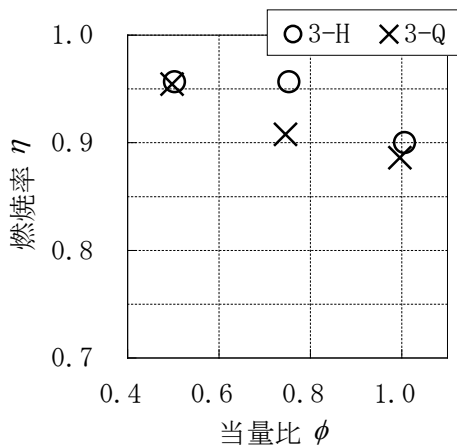
図 3-6 一酸化炭素発生量の計測結果の一例 (実験 4-Q) ※

※ 図中の“○”は表 3-2 や図 3-7～図 3-11 に示した計測値の取得時期を示す。



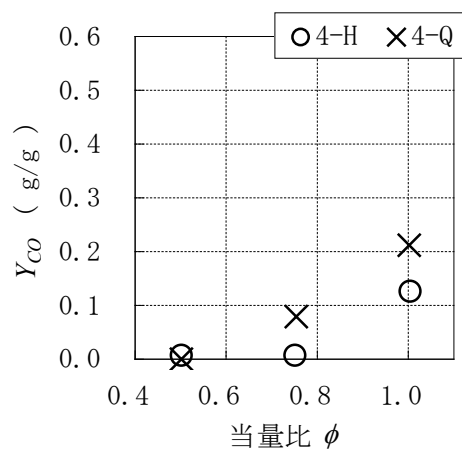
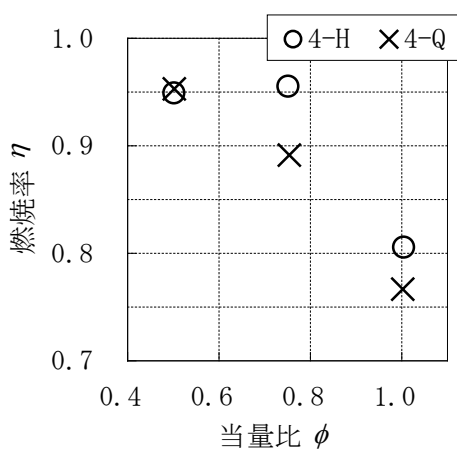
(1) 当量比と燃焼率の関係 (2) 当量比と一酸化炭素発生率の関係

図 3-7 実験 2 の中模型と小模型の計測値の比較



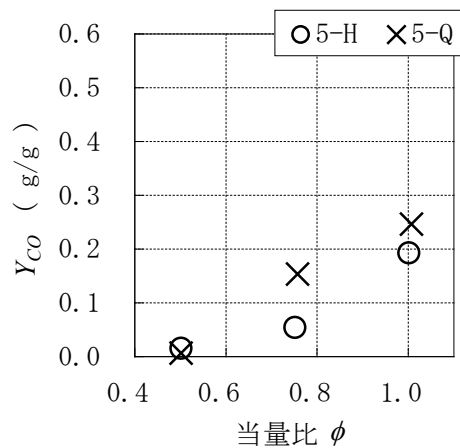
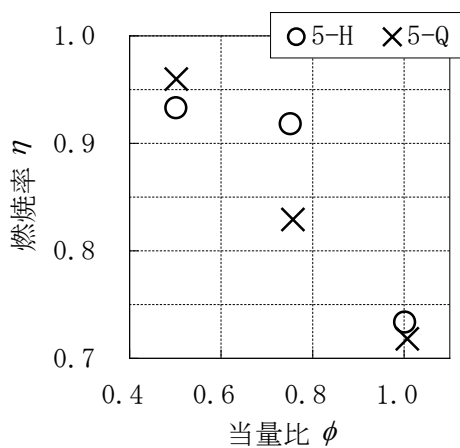
(1) 当量比と燃焼率の関係 (2) 当量比と一酸化炭素発生率の関係

図 3-8 実験 3 の中模型と小模型の計測値の比較



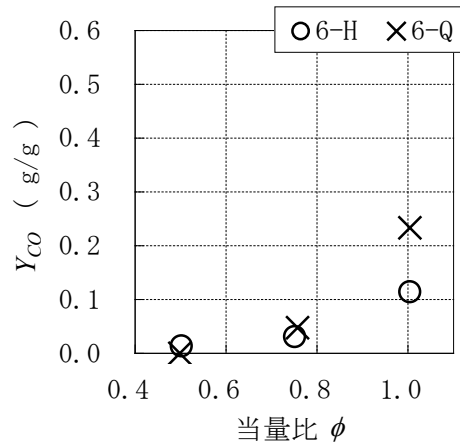
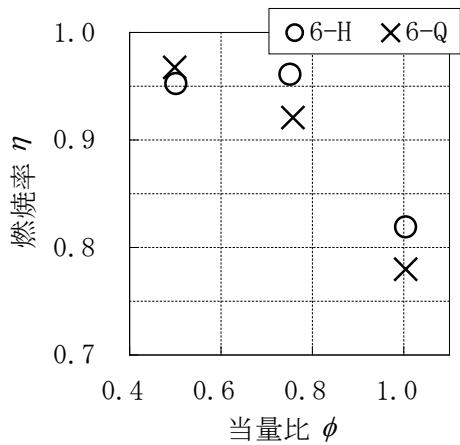
(1) 当量比と燃焼率の関係 (2) 当量比と一酸化炭素発生率の関係

図 3-9 実験 4 の中模型と小模型の計測値の比較



(1) 当量比と燃烧率の関係 (2) 当量比と一酸化炭素発生率の関係

図 3-10 実験 5 の中模型と小模型の計測値の比較

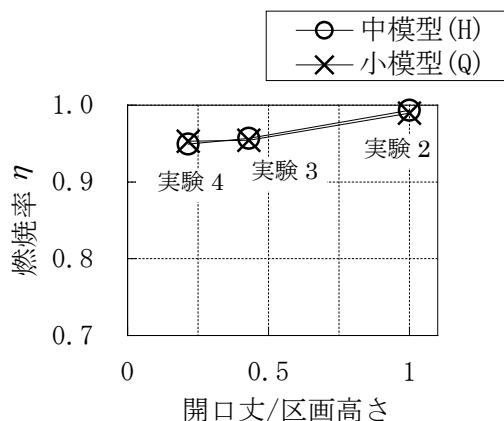


(1) 当量比と燃烧率の関係 (2) 当量比と一酸化炭素発生率の関係

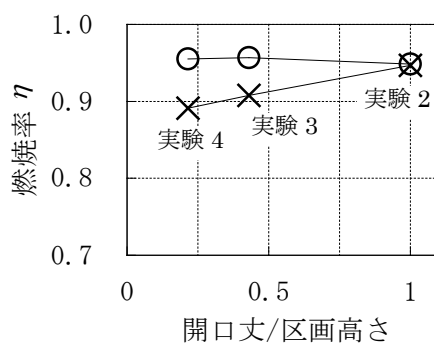
図 3-11 実験 6 の中模型と小模型の計測値の比較

3.3.2. 開口形状を変えた実験

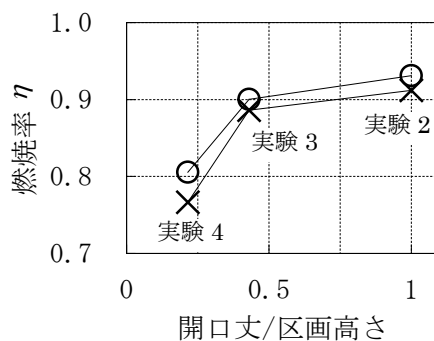
開口の縦横比を変えた実験 2~4 では、図 3-7~図 3-9 に示すように、燃焼率及び一酸化炭素発生率は実験毎に異なった。燃焼率と開口丈との関係は図 3-12 の通りで、同図(2)の $\phi=0.75$ の中模型を除き、開口丈が低いほど燃焼率は低下した。なお、同図横軸では、開口丈を区画高さに対する比で示した。区画内温度については、中模型の方が小模型より高くなり、実験間で比較すると、燃焼率と同じく、開口丈が低い実験ほど温度も低くなった。



(1) 当量比 $\phi=0.5$



(2) 当量比 $\phi=0.75$



(3) 当量比 $\phi=1.0$

図 3-12 開口形状と燃焼率の関係 (実験 2~4)

3.3.3. 火源位置を変えた実験

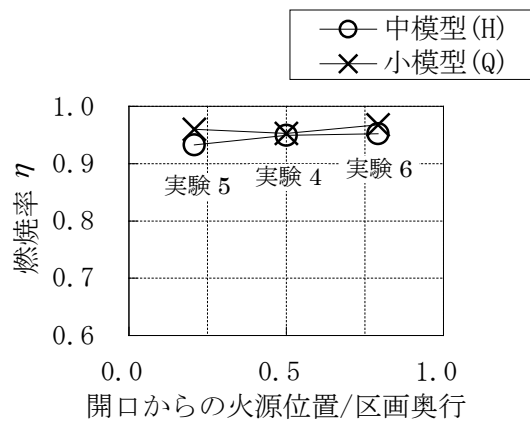
実験 4～6 では、火源位置の影響の有無を確認するため、火源を区画中央、開口近傍、区画奥の 3 箇所に移動した。燃焼率と一酸化炭素発生率は図 3-9～図 3-11 の通りである。

図 3-13 には燃焼率と火源位置との関係を示した。同図横軸の火源位置は、開口から火源中心までの距離の区画奥行きに対する割合で表した。 $\phi = 0.5$ では燃焼率への火源位置の影響は殆ど見られないが、 $\phi = 0.75$ および 1.0 では、開口近傍に火源を設置した実験 5 で最も燃焼率が低下した。また、火源位置が区画奥にある方が燃焼率は高くなったが、火源の移動による燃焼率の変化は、以下のように、開口近傍（実験 5）から区画中央（実験 4）に移動する場合より区画中央から区画奥（実験 6）に移動する場合の方が小さくなった。後者の燃焼率の変化は、 $\phi = 0.75$ の小模型で幾分大きい、概ね僅かであった。

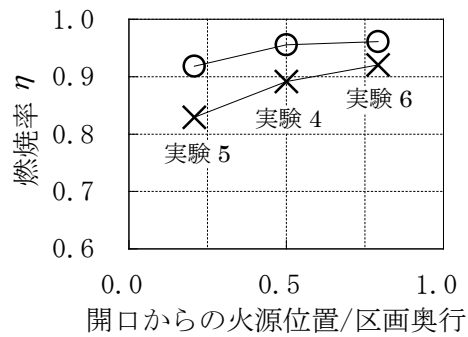
（火源の移動による燃焼率の変化（"→"は火源の移動方向を表す））

$\phi = 0.75$	中模型	開口近傍→区画中央	0.037	区画中央→区画奥	0.006
$\phi = 0.75$	小模型	開口近傍→区画中央	0.062	区画中央→区画奥	0.029
$\phi = 1.0$	中模型	開口近傍→区画中央	0.072	区画中央→区画奥	0.013
$\phi = 1.0$	小模型	開口近傍→区画中央	0.048	区画中央→区画奥	0.013

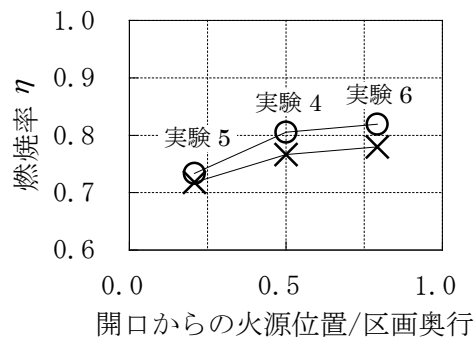
実験 5 では、中・小模型共に（5-H, 5-Q）、当量比 1.0 で開口噴出火炎が確認されたが、このときの燃焼率は当該当量比において全実験中で最低であった。区画内温度は、燃焼率と同様に、実験 4 と実験 6 がほぼ一致し、それらより実験 5 は低くなった。



(1) 当量比 $\phi = 0.5$



(2) 当量比 $\phi = 0.75$



(3) 当量比 $\phi = 1.0$

図 3-13 火源位置と燃焼率の関係 (実験 3~5)

3.3.4. 開口因子を変えた実験

実験 4 は，区画への流入空気の平均滞留時間 t_R の違いによる燃焼率等への影響の有無を実験 1（前章）との比較により検討できるように，実験 1 と区画容積，開口形状，火源位置などを同じにして開口因子の大きさを変えた。燃焼率・一酸化炭素発生率を t_R ($\propto V/A_w\sqrt{H_w}$) で整理した結果を図 3-14 に，区画内温度で整理した結果を図 3-15 に示す。なお，図 3-14 の横軸 t_R は実験 4-Q の値 ($t_{R,4-Q}$) に対する割合とした。

図 2-11(1) (P.52) および図 3-9(1) (P.77) の通り，開口因子の小さい実験 1 の方が実験 4 より燃焼率が低下した。計測値を t_R で整理すると，図 3-14 の通り， t_R と燃焼率・一酸化炭素発生率との間にあまり相関性は見られなかった。区画内温度の影響を考慮して，区画内温度が同等な実験 1-H と実験 4-Q（同図“□”，“△”）に着目しても， t_R との相関性は見られない。一方，図 3-15 のように区画内温度が高いほど，燃焼率は高く，一酸化炭素発生率は低くなる傾向が確認され，区画内温度に対する燃焼率の変化は当量比 0.5，0.75，1.0 では当量比 0.75 で最も大きくなった。

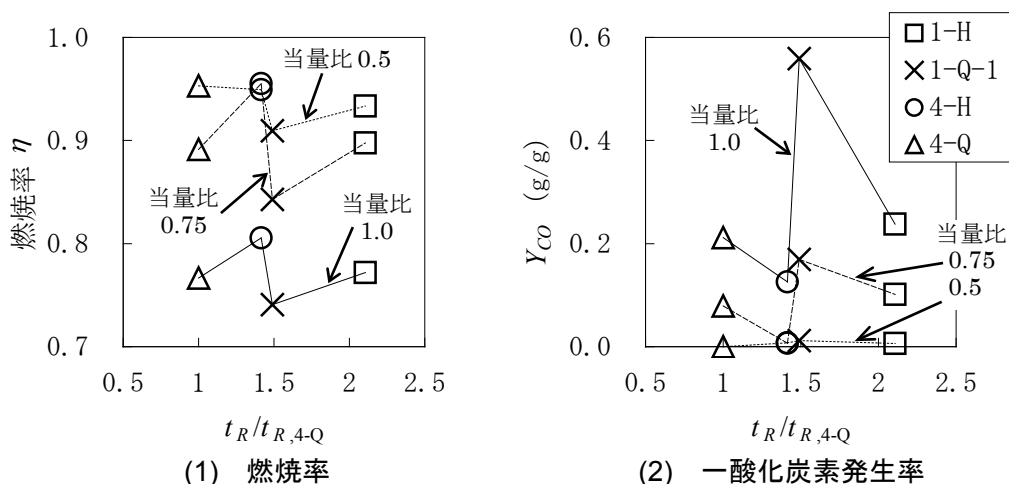


図 3-14 t_R と燃焼率・一酸化炭素発生率の関係（実験 1，実験 4）

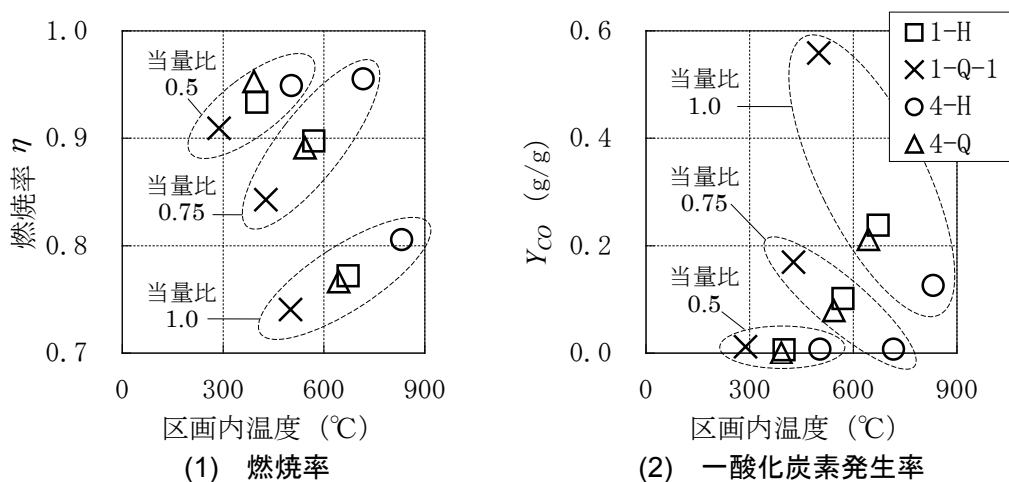


図 3-15 区画内温度と燃焼率・一酸化炭素発生率の関係（実験 1，実験 4）

3.4. 考察

本章では、室容積に対して開口の小さい区画における盛期火災を想定した模型実験で、当量比の増加によって燃焼率が低下する関係が見られた。開口形状、火源位置を変えたところ、燃焼率、一酸化炭素発生率が実験毎に異なったことから、幾何学的形状の違いによる影響が存在すると判断できる。また、2章で示した相似則では流入空気の平均滞留時間 t_R の影響を無視したが、開口因子を変えて t_R を変化させた実験で t_R と燃焼率との間に相関性は確認されなかったこと、及び、当量比0.5と当量比1.0では幾何学的形状の違いによる燃焼率の変化に比べ、中・小模型間の燃焼率の差が小さかったことから、本章および前章の実験の範囲（再現対象の火災規模が中模型程度まで、かつ模型縮尺1/2以上）において本相似則に基づく縮小模型実験が当量比0.5および当量比1.0における燃焼率の推定に有効であると考えて良い。一方、当量比0.75では中・小模型間の燃焼率の差は、図3-8～図3-11の通り、実験2を除く全ての実験で他の当量比より大きくなったが、図3-15のように区画内温度に対する燃焼率の変化も大きいことが確認されており、区画内温度の影響を考慮して相似則の妥当性を判断する必要がある。

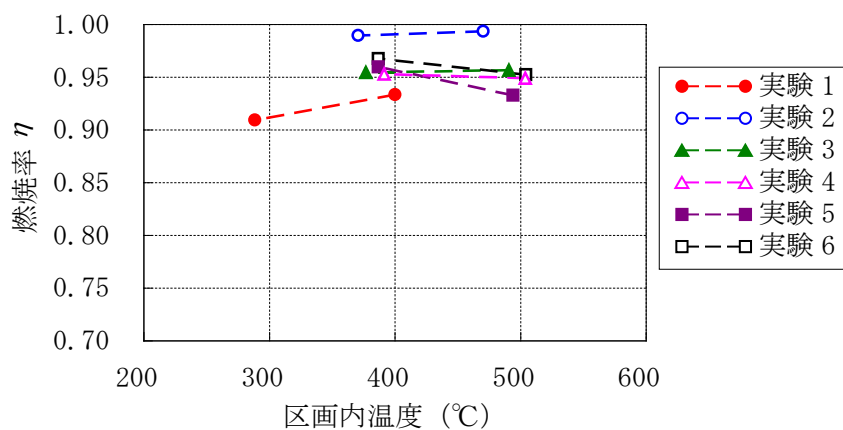
以降では、開口形状と火源位置による燃焼率への影響および区画内温度の影響を検討し、縮小模型実験で燃焼率を推定するための要件についても見通しを得ると共に、本研究で用いた相似則の妥当性について考察する。

3.4.1. 区画内温度の影響

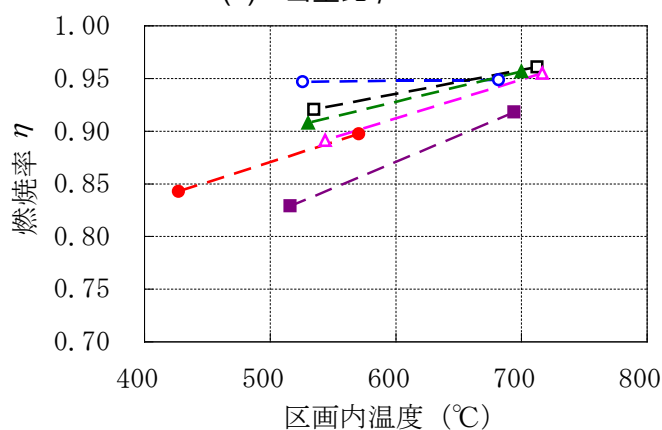
全実験に関係することから、区画内温度の影響から考察を行う。実験1～6（実験1-Q-2を除く）の燃焼率を区画内温度に対して整理した結果を図3-16に示す。同図では、区画内温度が中・小模型の燃焼率に与えた影響を把握するため、例えば実験1-Hと実験1-Qの様に、それぞれの実験について中模型と小模型のプロットを点線で結んだ。全ての実験で区画内温度は中模型の方が小模型より高かったので、同図では点線で結ばれた右端のプロットが中模型を、左端のプロットが小模型の計測値を表している。同図からは、当量比0.5を除く実験で、区画内温度が高くなると燃焼率も高くなる関係が確認できる。当量比0.5の燃焼率は、実験1～6を全体的に見ると、区画内温度400℃近辺を頂とする山なりの曲線を描くように変化している。また、開口因子を除き、区画模型の幾何学的形状が同等な実験1と実験4の計測値を区画内温度に対して整理すると、図3-15 (P.82)の通り、区画内温度と燃焼率・一酸化炭素発生率との間に直線的な関係が見られる。これらの結果は、燃焼率への区画内温度の影響を示唆する。

ところで、全実験で中模型の方が小模型より区画内温度が高かったので、区画内温度の他に区画模型の規模が影響した可能性がないか考える必要がある。もし、区画模型の規模が影響したとすると、その原因は2.2 (P.20)で述べたように t_R の違いによるものと考えられる。しかし、図3-14 (P.82)の通り、 t_R と燃焼率・一酸化炭素発生率の間には相関性がないため、ここでは、区画模型の規模や t_R の影響を考える必要はないと言える。

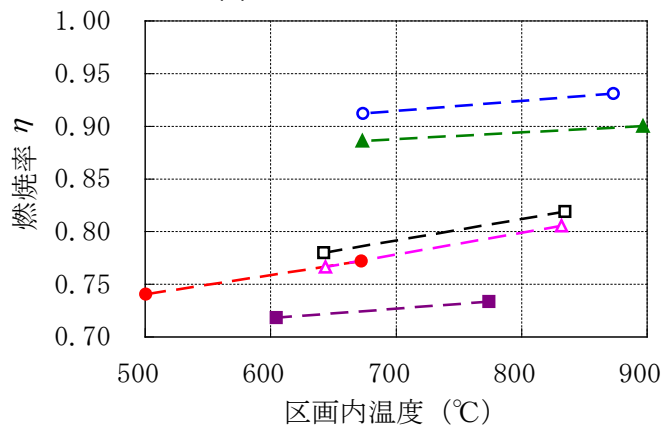
以上のことから、区画内温度が高くなった際の、当量比 0.5 の燃焼率の山なりの変化、および、当量比 0.75, 1.0 の燃焼率の直線的な上昇に対して、区画内温度が影響していると考えられる。区画内温度が燃焼率に影響する理由としては、温度上昇による燃焼反応の促進や、換気量の変化および当該変化に伴う区画内の酸素濃度分布の変化などを挙げることができるが、当量比 0.5 と当量比 0.75 以上とで区画内温度に対する燃焼率の変化が異なったことから、これらの要因が複合的に作用した可能性が考えられる。



(1) 当量比 $\phi = 0.5$



(2) 当量比 $\phi = 0.75$



(3) 当量比 $\phi = 1.0$

図 3-16 区画内温度と燃焼率との関係 (実験 1~6)

前章で予想したように、区画内温度の影響が当量比 0.75 で大きいと言えるか確認する。

実験 1, および, 開口因子を除く区画の幾何学形状が実験 1 と同等な実験 4 においては, 前述 (3.3.4 (P.82)) の通り, 区画内温度の影響は当量比 0.75 で大きかった。その他の実験について, 当量比別に区画内温度の影響の大きさを確認するために, 模型間の燃焼率の差 ([中模型の燃焼率]-[小模型の燃焼率]) を区画内温度の差 ([中模型の区画内温度]-[小模型の区画内温度]) で割った値を図 3-17 に示す。同図では, 実験 2 の当量比 0.75 の値が小さい。この理由は, 小模型でも燃焼率は 0.95 と高く, 中模型で小模型より区画内温度が高くなっても燃焼率がそれより上昇できなかったためと考えられる。従って, 当該実験結果は区画内温度の影響を示していないと考えられる。そこで, 実験 2 を除いて当量比 0.5, 0.75, 1.0 を比較すると, 区画内温度に対する燃焼率の変化量は当量比 0.75 で最も大きくなっており, 区画内温度の影響が当該当量比で大きくなると判断できる。

前章では当量比 0.75 で中・小模型間の燃焼率の差が大きくなった原因について, 当該当量比で区画内温度の影響が大きかった可能性があると考え, 本章にて以上のように確認した。本結果から, 幾何学的に相似な模型間で区画内温度を一致させることによって区画内温度の影響を無くせば, 当量比 0.75 においても燃焼率が一致すると考えられる。この確認には模型間で区画内温度を一致させた実験が必要であり, 第 5 章にて検討することとする。

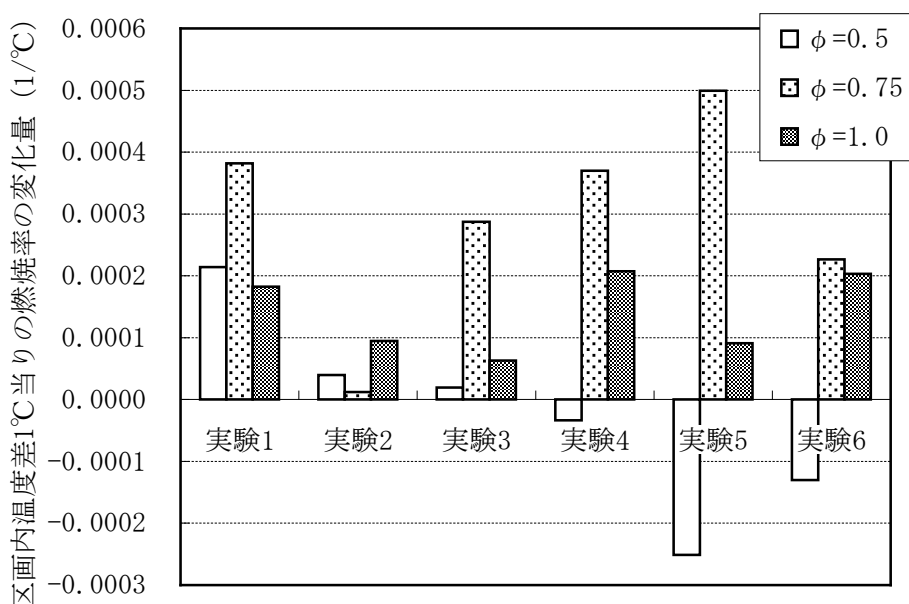


図 3-17 中・小模型間の区画内温度差 1°C 当りの燃焼率の変化量

なお, 図 3-17 の燃焼率の変化量から当量比別に最大値 (絶対値) を抽出すると以下のようになり, これらは区画内温度の影響の目安と考えることができる。

(区画内温度が 1°C 変化した場合の燃焼率の変化量の目安)

当量比 $\phi = 0.5$: 0.00025[1°C], $\phi = 0.75$: 0.00050[1°C], $\phi = 1.0$: 0.00021[1°C]

以降の 3.4.2 と 3.4.3 では、開口形状や火源位置の影響を検討するために、実験 2-H, 3-H, 4-H の比較、実験 2-Q, 3-Q, 4-Q の比較、実験 4-H, 5-H, 6-H の比較、実験 4-Q, 5-Q, 6-Q の比較を行う。これらの実験間での燃焼率の差、区画内温度差、および、当該区画内温度差による燃焼率の変化量の予想値を表 3-3 に示す。燃焼率の変化量の予測値は、同表の区画内温度差に上記の燃焼率の変化量の目安を掛けたものである。実験 2-H, 3-H, 4-H の当量比 0.75 の燃焼率の変化量予想値のみ実験間での燃焼率の差を上回っており、当該条件では検討項目である開口形状より、区画内温度の方が支配的に影響した可能性が考えられる。その他の条件では、燃焼率の変化量予測値は最大でも実験間の燃焼率の差の 1/4 程度であり、3.4.2 と 3.4.3 における比較検討への影響は小さいと言える。

表 3-3 3.4.2 および 3.4.3 にて比較検討する実験間における区画内温度の影響の予想値

検討項目	比較する実験	当量比	比較する実験間での差 (最大-最小)		区画内温度差から予想される燃焼率の変化量
			燃焼率の差	区画内温度差[°C]	
開口形状の影響	実験 2-H, 3-H, 4-H	0.5	0.044	34	0.0085
		0.75	0.008	35	0.0175
		1.0	0.125	65	0.0135
	実験 2-Q, 3-Q, 4-Q	0.5	0.037	20	0.0050
		0.75	0.055	18	0.0090
		1.0	0.145	30	0.0062
火源位置の影響	実験 4-H, 5-H, 6-H	0.5	0.019	10	0.0025
		0.75	0.043	23	0.0115
		1.0	0.085	61	0.0127
	実験 4-Q, 5-Q, 6-Q	0.5	0.015	4	0.0010
		0.75	0.091	28	0.0140
		1.0	0.062	40	0.0083

3.4.2. 開口形状の影響

図 3-12 の通り、同図(2)の当量比 $\phi = 0.75$ の中模型を除き、開口因子が同じであっても開口寸の減少によって燃焼率は低下した。この影響は $\phi = 1.0$ で顕著であり、開口形状の違いによる燃焼率の変化は中模型で 0.125、小模型で 0.145 であった。 $\phi = 1.0$ における燃焼率の変化の原因としては、3.2.2.1 (P.67) で述べた換気支配型火災を前提とした予想、すなわち、以下の 3 つが考えられる。

- ① 垂れ壁の影響による流入空気量の変化
- ② 区画床近傍の低温空気層の影響による流入空気量の変化
- ③ 既燃ガスの巻き込みによる流入空気の酸素濃度の変化

図 3-12(3)では、開口丈が $0.215H_r$ (実験 4, H_r : 区画高さ) と $0.43H_r$ (実験 3) で燃焼率の差が大きい一方、 $0.43H_r$ と $1.0H_r$ (実験 2) では中・小模型共に燃焼率の差は約 0.03 で大差はないという具合に、開口丈の大小によって燃焼率への影響の大きさが異なった。この理由として、①の考えでは、小さい垂れ壁は開口周辺のガスの流れに与える影響が小さく流入空気量にも影響しないこと、②の考えでは、低温空気層の厚さは小さいので開口丈が大きければ流入空気量への影響は無視できること、③の考えでは、開口丈が大きく開口幅が小さいと流入空気量に対して既燃ガスの巻き込み量が少なくなることが挙げられる。以上より、当量比 1.0 については、開口丈が小さいときには開口丈の変化が燃焼率に影響すること、及び、開口丈がある程度大きければ、開口丈の変化が流入空気量やその酸素濃度に与える変化 (①~③) が小さくなり、燃焼率への影響がなくなることが予想される。

一方、 $\phi=0.75$ の中模型を除き、 $\phi=0.5$ および 0.75 の条件においても、開口丈が大きくなるほど燃焼率は高くなった。これらの条件では開口丈と燃焼率との間に直線的な関係が見られる点が前述の $\phi=1.0$ の結果とは異っている。このことから、当該条件では、燃焼性状も $\phi=1.0$ とは異なっていたとすれば、3.2.2.1 (P.67) で予想したように、当該条件における燃焼率の変化の理由として、区画内が煙・空気の 2 層に分かれた状態に近く、開口丈が小さいほど煙層が厚くなり、煙層に流入する未燃の可燃性ガス量が増え、燃焼率が低下しやすかったと考えることができる。

$\phi=0.75$ の中模型では、開口丈の増加に対して燃焼率は殆ど変化しない。 $\phi=0.75$ における中模型の区画内温度 ($682^{\circ}\text{C}\sim 717^{\circ}\text{C}$) は、相似な小模型 ($526^{\circ}\text{C}\sim 544^{\circ}\text{C}$) より高く、前項 (3.4.1) の最終段落で述べたように、区画内温度が支配的に影響した可能性がある。これらのことから、 $\phi=0.75$ の中模型で、開口丈の影響が見られなかった理由として、開口丈が小さい条件 (実験 3, 4) において、区画内温度の影響 (燃焼率を上げる) が大きく、開口丈の影響 (燃焼率を下げる) が打ち消された可能性が考えられる。以上の様に、当量比 0.5 および 0.75 においても、開口丈が燃焼率に影響すること、および、当量比 0.75 で区画内温度が高い場合には、開口丈が低い条件でも燃焼率が低下しないことが予想される。

本実験でも同様であるが、流入空気量は実測が難しいため、しばしば、開口因子 $A_w\sqrt{H_w}$ 等から予測した流入空気量に基づいて当量比或いは空気過剰率を設定し、燃焼率の整理に用いる。もし、前述のように開口形状の違いが流入空気量に影響するのであれば、流入空気量予測値に基づく当量比等が実際の値と異なる可能性があり、既往の実験結果に見られる燃焼率のばらつきの原因の一つになっていると思われる。特に、区画火災を対象とした実験で開口丈が小さい場合には、燃焼率への影響に注意する必要があるだろう。

3.4.3. 火源位置の影響

実験 4~6 では図 3-13 (P.81) のように、当量比 1.0 および 0.75 において、火源が開口に近づくほど燃焼率が低くなることが確認された。このようになった理由は、前述 (P.68, 3.2.2.2) のように、①火炎に巻き込まれる気体の平均酸素濃度の影響、または、②既燃ガ

スの運動量の影響と思われる。当量比 0.5 では燃焼率への火源位置の影響は殆ど見られなかったが、この原因は、火源の発熱速度が小さいために、区画内の酸素濃度があまり低下しない上に燃焼に必要な酸素量も比較的少ないために①の影響が無視でき、かつ、既燃ガス量も比較的少ないために②の影響も無視できたためと考えられる。

当量比 1.0 および 0.75 では、3.3.3 (P.80) で述べた通り、火源の移動による燃焼率の変化は、開口近傍(実験 5) から区画中央(実験 4) に移動する場合より区画中央から区画奥(実験 6) に移動する場合の方が小さかった。また、後者の燃焼率の変化は、 $\phi = 0.75$ の小模型で幾分か大きい(0.029)が、 $\phi = 0.75$ の中規模、 $\phi = 1.0$ の中・小規模では小さかった(0.013 以下)。以上より、火源位置が開口からある程度離れていれば、火源位置に係わらず区画内の状況は図 3-2(1)のようになって、燃焼率にも影響が現れないと考えられる。

開口近傍に火源を設置した実験 5 の当量比 1.0 での燃焼率は、開口噴出火炎の影響で他の実験より高めであるにも係わらず、中・小模型それぞれで 0.73, 0.72 と全実験中で最低となっており、火源が開口に近づくことによる燃焼率低下への影響は大きいと考えられる。

以上の結果から、燃焼率が関係する縮小模型実験では、燃焼率の最低値を再現する必要がなければ、開口から離れた位置に火源を設置すれば良いと考えられる。一般的に、実際の可燃物配置を一意的に予測するのは困難であるので、このように火源配置を緩和できることは模型実験をする上で好都合である。

3.4.4. 相似則の妥当性

本研究の相似則 (P.20, 2.2) では、室容積に対して開口の小さい火災を対象とした幾何学的に相似な区画模型実験については、流入空気の平均滞留時間 t_R の燃焼率等へのスケール効果^{5),6)}は無視できると仮定した。 t_R による影響を検討するため、実験 4 は開口因子を変えることで t_R を実験 1 (前章) と異なる値にし、その他の区画形状は同等とした。(実験 2, 3, 5, および 6 は、開口因子・ t_R は実験 4 と同等であるが、区画形状が実験 1, 4 と異なる。) 実験 1 と実験 4 を比較して、図 3-14 (P.82) の通り、 t_R と燃焼率・一酸化炭素発生率との間に相関性は見られなかったことから、実験 1~6 の範囲では本相似則で t_R の影響を無視したことによる支障はなかったと考えられる。このことを含め、本章では次の事柄を確認できたことになる。

- ・ t_R と燃焼率との間に相関性が見られないこと。
- ・ 区画内温度差の影響を受けていると考えられるにも関わらず、①~③のように幾何学的に相似な中・小模型間の燃焼率が良く一致したこと。
 - ① 当量比 0.5 では中・小模型間の燃焼率の差は最大で 0.03 と小さかった。
 - ② 当量比 1.0 では中・小模型間の燃焼率の差は最大で 0.04 と小さかった。
 - ③ 当量比 1.0 の模型間の燃焼率の差 (最大 0.04) が、幾何学的形状の違いによる燃焼率の差 (最大 0.2) より十分小さくなった。

以上のことから、室容積に対して開口の小さい室における当量比 0.5 および 1.0 の火災については、本実験の範囲（再現対象の火災規模が中模型程度まで、かつ模型縮尺 1/2 以上）において本相似則（P.20, 2.2, 式 2-7, 式 2-8）は妥当だと判断できる。

当量比 0.75 については、実験 1（第 1 章）と同様に、殆どの実験で中・小模型間の燃焼率の差が当量比 0.5 および 1.0 より大きかったが、この原因は、区画内温度の燃焼率への影響が当量比 0.75 で大きかったためと考えられる。そして、模型間で区画内温度を一致させることによって当量比 0.75 でも燃焼率が一致すると予想される。この検討には模型間で区画内温度を一致させた実験が必要である。また、実規模火災を対象とする場合やより小さな模型縮尺における相似則の妥当性を検証するためには、実規模の実験と本実験とを比較する等の検討を行い t_R の影響やその他のスケール効果が現れないことを確認する必要がある。これらについては第 5 章（P.121）にて検討を行う。

3.5. まとめ

本章では、幾何学的形状が相似で大きさが異なる 2 つの区画模型（中模型と小模型、模型間の縮尺 $L'/L=1/2$ ）の燃焼率について開口形状、火源位置および開口因子の異なる実験を行った。前章の実験も含めた比較を行い以下の結果を得た。

- ① 開口形状、火源位置および開口因子といった区画の幾何学的形状が異なることによって燃焼率が変化した。その燃焼率の変化の大きさは、当量比 0.5 で最大 0.06, 当量比 0.75 で最大 0.12, 当量比 1.0 で最大 0.2 であった。幾何学的形状の違いによる影響が存在すると判断できる。
- ② 当量比 0.5 では幾何学的に相似な模型間で燃焼率は良く一致した。その模型間の燃焼率の差は最大 0.03 であった。
- ③ 当量比 0.75 では、当量比 0.5 および 1.0 に比べて、幾何学的に相似な模型間での燃焼率の差は大きく、最大 0.09 であった。模型間の燃焼率の差が大きくなった原因は区画内温度の影響 (⑤) であると考えられる。
- ④ 当量比 1.0 では幾何学的に相似な模型間の燃焼率の差は最大 0.04 となり、区画の幾何学的形状が異なることによる最大 0.2 の差より十分小さかった。
- ⑤ 全実験の燃焼率を区画内温度で整理したところ、当量比 0.5 の燃焼率のプロットは全体的に、区画内温度 400°C 付近を頂とする山なりの曲線を描き、当量比 0.75 と 1.0 では区画内温度に対して直線的な関係が見られた。この結果から、燃焼率に区画内温度が影響したと考えられる。
- ⑥ 当量比 0.75 の中模型での実験を除き、開口丈の増加に伴う燃焼率の上昇が確認された。原因として、開口丈の変化に起因した区画への流入空気量やその酸素濃度の変化、区画内の煙層厚さの変化が考えられる。
- ⑦ 当量比 0.75 の中模型での実験を除き、当量比 0.5 および 0.75 では、開口丈と燃焼率の関係は直線的であった。一方、当量比 1.0 では、開口丈の燃焼率への影響は、開口丈が小さい場合で大きく、開口丈が大きい場合で比較的小さかった。
- ⑧ 当量比 0.75 の中模型での実験では、開口丈の増加に対して燃焼率は殆ど変化しなかった。開口丈の低い条件で燃焼率が低下しなかった原因として、区画内温度の燃焼率への影響 (⑤) が考えられる。
- ⑨ 火源を開口近傍、区画中央、区画奥の 3 つの位置で移動させた場合、当量比 0.75 および 1.0 では燃焼率が変化した。火源が開口近傍に存在する場合に燃焼率は大きく低下した。一方、火源が開口から離れると燃焼率への火源位置の影響は小さくなった。

⑩ 火源を開口近傍，区画中央，区画奥の 3 つの位置で移動させても，当量比 0.5 では燃焼率は殆ど変化しなかった。

⑪ 開口因子を変えることで，流入空気の平均滞留時間 t_R を変えたが，燃焼率との相関性は確認されなかった。本研究の相似則で t_R を無視した影響は確認されなかった。

以上の実験的事実に基づいて本研究の相似則の妥当性を検討すると， t_R と燃焼率との間に相関性が見られなかったこと (⑩)，および，区画内温度差による影響を受けたと考えられる (⑤) にも係わらず，当量比 0.5 では幾何学的に相似な中・小模型間で燃焼率が良く一致し (②)，当量比 1.0 では幾何学的に相似な模型間で燃焼率が良く一致すると共に，その差が，幾何学的形状の違いによる差より十分小さくなったこと (④) から，開口の小さい室における当量比 1.0 程度の火災の燃焼率について，本実験の範囲 (再現対象の火災規模が中模型程度まで，かつ模型縮尺 1/2 以上) において本研究の相似則は妥当と考えられる。

当量比 0.75 については，模型間で区画内温度を一致させることによって当量比 0.75 でも燃焼率が一致すると予想される。この検討には模型間で区画内温度を一致させた実験が必要である。また，実規模火災を対象とする場合や本実験 ($L'/L=1/2$) より小さい模型縮尺では， t_R の違いによる影響やその他のスケール効果が働く可能性がある。このような場合の本相似則の妥当性に関して実規模の実験と本実験結果との比較などにより更に検討する必要がある。これらについては第 5 章 (P.121) にて検討する。

参考文献

- 1) Heskestad, G. : Physical Modeling of Fire, J. Fire and Flammability, Vlo.6, pp.253-273, 1975.7.
- 2) 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 卷 407 号, pp.1348-1354, 1980.7.
- 3) Nakaya, I., Tanaka, T., Yoshida, M. and Steckler, K. : Doorway Flow Induced by a Propane Fire, Fire Safety Journal, Vol.10, pp.185-195, 1986.
- 4) Hwang, C., Lock, A., Bundy, M., Johnsson, E. and Ko, G.H. : Effects of Fuel Location and Distribution on Full-Scale Underventilated Compartment Fires, J. Fire Sciences, Vol.29, pp.21-52, January 2011.
- 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) Heskestad, G. : Modeling of Enclosure Fires, Fourteenth Symposium (International) on Combustion, pp.1021-1030, 1973.

第4章 天井高さの換気量および燃焼率への影響の検討

第4章 天井高さの換気量および燃焼率への影響の検討

4.1. はじめに

本章では、天井高さが換気量や燃焼率に与える影響について検討する。また、火災室内部の火炎の部分に働く浮力を「火炎浮力」と呼ぶことにする。

燃焼率は換気量の影響を受ける。第1章で述べたように、盛期火災の換気量を考える場合には火災室内部のガス密度を一様と仮定することが多いが、実際には盛期火災でもガス密度に多少の偏りが存在する。その中でも最も密度が小さくなる火炎の部分には浮力が働くはずであり、この火炎浮力の仕事が換気量に影響する可能性が考えられる。前章の実験で、火源位置を変えることで燃焼率が変化したことも、火炎浮力の仕事による影響を示唆している。もし、このような影響が存在するなら、次節で述べるように、天井が高いほど換気量が増えると予想される。そして、換気量が増えれば燃焼率も高くなるはずである。

また、天井高さが変わることで燃焼率が変化することについては、他の可能性も考えられる。火災室内に煙と空気の2層が形成された状態（以降「2層状態」）において、上部の煙層の中で燃焼した場合に燃焼率が低下することは、Beyler^{1),2)}をはじめ、煙層内の燃焼による燃焼生成物に関する多くの研究によって示されている（なお、これらの研究についてはPitts³⁾のレビューが参考になる）。本研究で取り扱う盛期火災では煙と空気の境界は曖昧かもしれないが、煙は上に、空気は下の方を流動して、室上部に煙濃度の高い領域が形成されるという点では2層状態と変わらない。室上部の煙濃度の高い領域内では2層状態と同様に燃焼率が下がりやすいと予想される。また、長谷見ら⁴⁾の天井面下に広がる火炎に関する実験では、自由空間中の火炎と比べて天井面火炎では大幅に燃焼率が低下することが確認されている。

天井が十分に高ければ、図4-1のように天井付近に存在する火炎は少なく、逆に、天井が低くなると、天井に到達するまでに燃焼できなかつた未燃ガスの天井付近への流入量が増える。前述のように、室上部で燃焼率が低下しやすいとすれば、当該部分に流入する未燃ガス量が多い分、天井の低い場合は天井の高い場合より燃焼率が低下すると予想される。

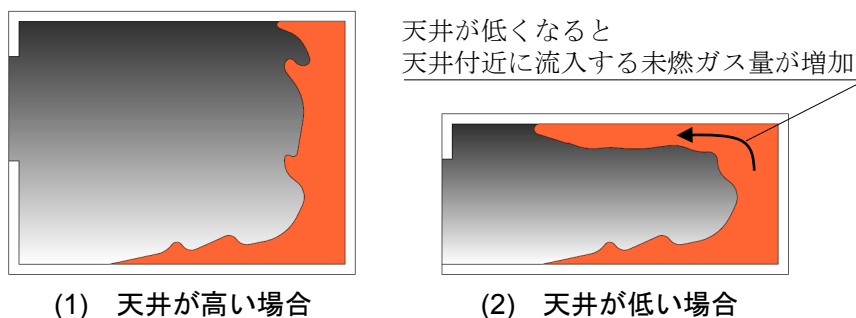


図 4-1 天井高さの違いによる天井付近への未燃ガス流入量の変化

以上のように、天井高さの違いによる換気量の変化、または、煙濃度の高い領域に流入する未燃ガス量の変化のどちらを仮定しても、天井高さの増加によって燃焼率は増加することになる。天井高さが燃焼率に影響を与えるか否かは、本研究の主題—模型実験による燃焼率の推定—にとっては、模型区画の天井高さを厳密に検討対象の室と同じにすることが必須なのか、それとも、何らかの緩和条件を考慮することができるのかに関係することであるため、当該現象が実際に起こりうるか確認が望まれる。そのためには、天井高さを変えるなどにより火炎部分が占める鉛直方向の高さ^{※3}・天井面下の火炎の長さを変えた実験が有効と考えられるが、そのような実験報告は見当たらない。

また、前述のように煙層内での燃焼率の低下については先行研究があるが、盛期火災時において火炎部分の浮力が換気量に与える影響については殆ど研究されていない。この換気量に与える影響の有無を確認することは、本研究に必要なのは勿論のこと、盛期火災性状を支配する重要因子の一つが換気量であることを考えると、今後の火災安全工学の深化に寄与するとも思われる。

そこで本章では、フラッシュオーバー後の盛期火災で火炎や燃焼反応後のガスなど（以降「高温ガス」）が床面の近くまで充満し、かつ火炎の分布に偏りがある状態を想定して、天井高さの違いが引き起こすと予想される2つの影響、すなわち、

①火炎浮力の仕事^{※3}が換気量に与える影響

②天井高さが燃焼率に与える影響

のうち、換気量・燃焼率の両方に関係することから、①が実際に存在するか否かを確認することを主目的として実験すると共に、②の有無についても確認したい。これらの目的の下、本章の実験では、縮小規模の区画模型を用いて、天井高さの異なる条件での換気量・燃焼率を計測する。天井高さを変えることは、①の検討のために火炎浮力の仕事を変化させることも意図している。火炎浮力の仕事の影響の有無を判別するために当該仕事を考慮した換気量の計算を考え、実測値と計算値との比較により、天井高さ・火炎浮力の仕事・換気量の間の影響を確認する。

※3：火炎部分が占める鉛直方向の高さに依存して火炎浮力の仕事が変わる。詳細は 4.2 参照。

4.2. 火炎部分に働く浮力の仕事が換気量に及ぼす影響の考え方

本章では、換気量に対して火炎浮力が影響するか或いは全く影響しないのかを確認したい。そこで、当該影響が顕れやすいと予想される火災を想定して実験を行い、換気量の変化の有無を確認する。また、実験値と当該影響を考慮した計算値とで実験条件が換気量に与える変化を比較して、実験条件間の差異が当該影響によるものか否かを検討する。以降で、これらの実験・検討における火災・換気の想定と火炎浮力の影響を考慮した換気量の計算について述べる。

4.2.1. 想定する火災および換気

本章で想定する火災と換気をモデル化して図 4-2 に示す。室内が高温のガスで充満した火災を想定する。更に、火災室の代表的な換気の流れとして、開口下部から始まり、床付近、火炎、天井付近そして開口上部までを一巡する流れを考えることとする。

自由空間中の火炎が自身より密度の大きい周囲空気から浮力を受けるように、火災室内の火炎も周囲ガスより高温で密度が小さいため浮力を受ける。この火炎部分の浮力が、前述の火災室内を一巡する換気の流れを促進する方向に働くことに着目して、この仕事が大きいほど換気量が増加する可能性があると考ええる。

この他に、従来の研究⁵⁾と同様に火災室内外のガス密度差に起因する開口部差圧も想定する。火災時のガス密度は絶対温度にほぼ反比例し温度差が一定であれば高温ほど変化は小さいので、火災室内の火炎の部分に働く浮力は開口部差圧に比べて小さくなるはずである。従って、本研究では、火災室の換気の主要な原動力として開口部差圧を、補助的なものとして火炎浮力の仕事を想定する。

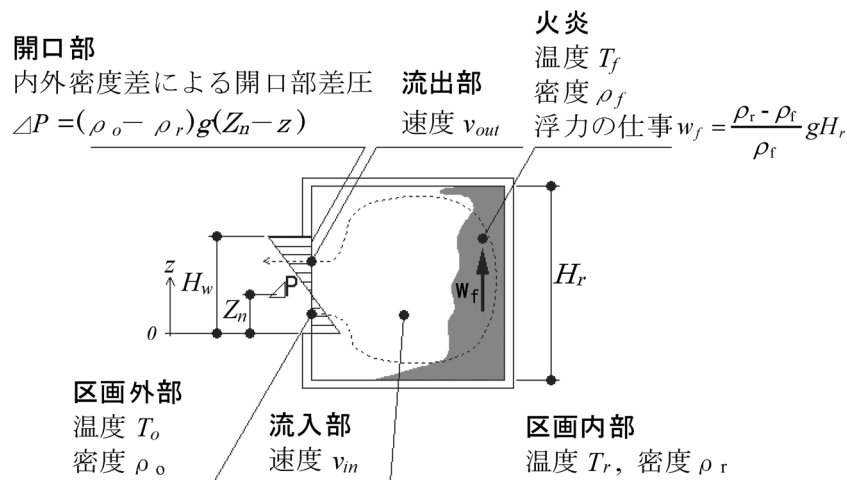


図 4-2 本章で想定する火災および換気モデル

4.2.2. 火炎部分の浮力の仕事を考慮した換気量の計算方法

次節以降では、天井高さを変えて換気量を計測し、火炎浮力が影響するか否かを判断することになる。そこで、火炎浮力の影響を考慮した盛期火災時の換気を理論的に考察するために、当該影響が顕著に顕れると予想される火災状況を想定して、換気量の計算式を導く。もし、計測値と当該計算値とで実験条件間での増減の傾向が一致し、かつ当該影響を無視すると一致しないのであれば、火炎浮力が換気量に影響したと判断して良いだろう。

次の7つの仮定をおいて図 4-2 のような火災室のモデルを考える。

仮定 1：火災室内部は定常状態に達しているものとする。

仮定 2：火炎を除いて区画内の温度は均一とする。

仮定 3：火炎内部の温度は均一とする。

仮定 4：火炎は天井に到達している。

仮定 5：区画に流入した空気は床付近から火炎に巻き込まれ天井まで連行される。

仮定 6：火炎部分の浮力の仕事により発生した全てのエネルギーは換気に使用される。

仮定 7：可燃ガスの発生量は換気量に比べて小さいため無視する。

なお、火炎は上昇に伴って周囲空気を巻き込むので、仮定 5 に従うと火炎の浮力の仕事が大きめに見積もられる。また、火炎浮力の仕事により発生したエネルギーは摩擦など換気以外でも消費されるが、仮定 6 ではこれを無視して当該仕事の換気への関与を大きく評価している。これらの仮定は、火炎浮力の仕事を強調することになるが、ここでの目的である定性的議論の支障にはならない。

2.3.1 の通り、火災室内外のガス密度差による開口部差圧 ΔP および単位重量の気体に対して働く火炎部分の浮力・重力の仕事 w_f （以降「火炎浮力の仕事」）により換気が行われると考える。

まず、 ΔP を式 4-1 で表す。密度 ρ は $\rho=353/T$ とする（以降、同じ）。

$$\Delta P = (\rho_0 - \rho_r)g(Z_n - z) \quad \text{式 4-1}$$

火炎の部分には単位体積当たりで浮力 $\rho_r g$ が上向きに、重力 $\rho_f g$ が下向きに働く。単位体積の気体が火炎の全長を移動する間にこれらの力から受ける仕事は、火炎高さを仮定 4 より H_r として $(\rho_r - \rho_f)gH_r$ となる。単位重量当たりの火炎浮力の仕事 w_f は下式となる。

$$w_f = \frac{\rho_r - \rho_f}{\rho_f} gH_r \quad \text{式 4-2}$$

w_f のうちで換気流入へ関与する分を $w_{f,in}$, 流出への分を $w_{f,out}$ とし, 仮定 6 より $w_{f,in}$ と $w_{f,out}$ の合計を w_f とする。

$$w_f = w_{f,in} + w_{f,out} \quad \text{式 4-3}$$

$w_{f,in}$ と $w_{f,out}$ を含めて, 文献 4 に倣って流入部と流出部の前後でベルヌーイ式を適用して式 4-4・式 4-5 を得る。

$$\frac{1}{2}v_{in}^2 = \frac{\Delta P}{\rho_o} + w_{f,in} \quad \text{式 4-4}$$

$$\frac{1}{2}v_{out}^2 = -\frac{\Delta P}{\rho_r} + w_{f,out} \quad \text{式 4-5}$$

開口流量係数が既知の値 α で与えられれば, 換気量は流入 \dot{m}_{in} ・ 流出 \dot{m}_{out} それぞれで式 4-6・式 4-7 のように表せる。

$$\dot{m}_{in} = \alpha \int_{S_{in}} \rho_o v_{in} dS = \alpha \int_{S_{in}} \sqrt{2\rho_o \Delta P + 2\rho_o^2 w_{f,in}} dS \quad \text{式 4-6}$$

$$\dot{m}_{out} = \alpha \int_{S_{out}} \rho_r v_{out} dS = \alpha \int_{S_{out}} \sqrt{-2\rho_r \Delta P + 2\rho_r^2 w_{f,out}} dS \quad \text{式 4-7}$$

定常状態 (仮定 1) かつ可燃ガスの発生量を見捨てる (仮定 7) として, 換気の質量流量 (換気量) は流入と流出で釣り合うと考える。

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \quad \text{式 4-8}$$

ここ迄で未知数より数式が一つ少ないため解は得られない。そこで中性帯高さ Z_n は火炎浮力より開口部差圧に強く支配されると考えて, Z_n の計算に限り区画内を一様, すなわち $\rho_r = \rho_f = \rho_{ave}$ として火炎浮力を無視 ($w_{f,in} = w_{f,out} = 0$) して式 4-1, 式 4-6, 式 4-7 および式 4-8 から Z_n を求める。

換気量 \dot{m}_v (および $w_{f,in}$, $w_{f,out}$) は得られた Z_n に基づいて式 4-3, 式 4-6, 式 4-7 および式 4-8 を解けば求められる。なお, 換気量の算出についても前述の Z_n と同様に $\rho_r = \rho_f = \rho_{ave}$ とすると, 火災室内部のガス密度を一様と仮定し, 開口部を挟んだ内側と外側の圧力差 (開口部差圧) にベルヌーイ式を適用して換気量を計算するモデル⁵⁾と実質的に等しくなる。

4.3. 実験概要

4.3.1. 実験条件および区画模型

実験条件を表 4-1 に、実験で用いた区画模型を図 4-3, 写真 4-1 および写真 4-2 に示す。本章の実験は天井高さをパラメーターとしていることに特徴があるので、他の章の実験と区別することも考えて、実験条件名は C と数字の組み合わせとした。

区画模型は間口 170mm, 奥行 1400mm で天井高さと同開口形状は実験条件によって異なる。当該区画模型は間口が狭いのが特徴的だが、これは模型内部の流れを二次元に単純化し、想定火災 (2.3.1) に近づけることを意図している。当該区画模型の壁、床および天井の構成材料は以下の通り。

- 壁 (正面) : セラミックファイバーボード(以降「CBD」) (厚さ 25mm)
- 壁 (背面) : CBD (厚さ 50mm(25mm×2 枚))
- 壁 (側面) : 鋼板 (厚さ 3mm, 下地) +セラミックファイバーブランケット (以降「CBL」) (厚さ 50mm, 上貼り)
- 床 : CBD (厚さ 25mm, 下地) +CBL (厚さ 25mm, 上貼り)
- 天井 : CBD (厚さ 50mm(25mm×2 枚))

表 4-1 実験条件

	実験番号	天井高さ [mm]	開口寸法 [mm]	燃料(C ₃ H ₈)供給量		公称 発熱速度 \dot{Q}_{nom} [kW]
				\dot{m}_b [kg/s]	[slm]	
単 一 開 口	C1	900	幅 170 丈 300	0.909 ×10 ⁻³	27	42.1
	C2	750				
	C3	600				
	C4	450				
二 開 口	C5	900	(上部) (下部)	0.707 ×10 ⁻³	21	32.8
	C6	750	幅 170 幅 170			
	C7	600	丈 100 丈 50			

(単位 mm)

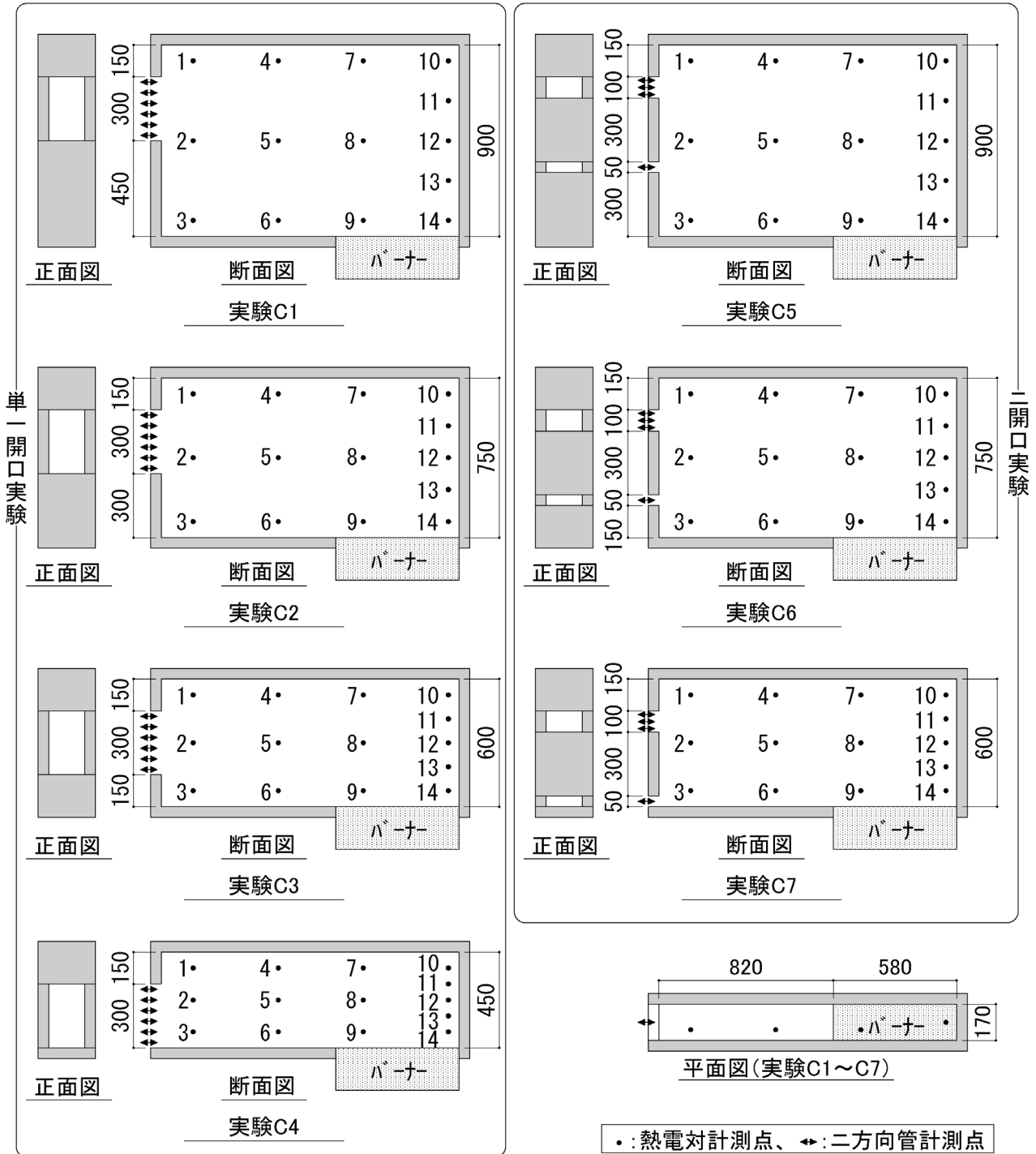


図 4-3 区画模型

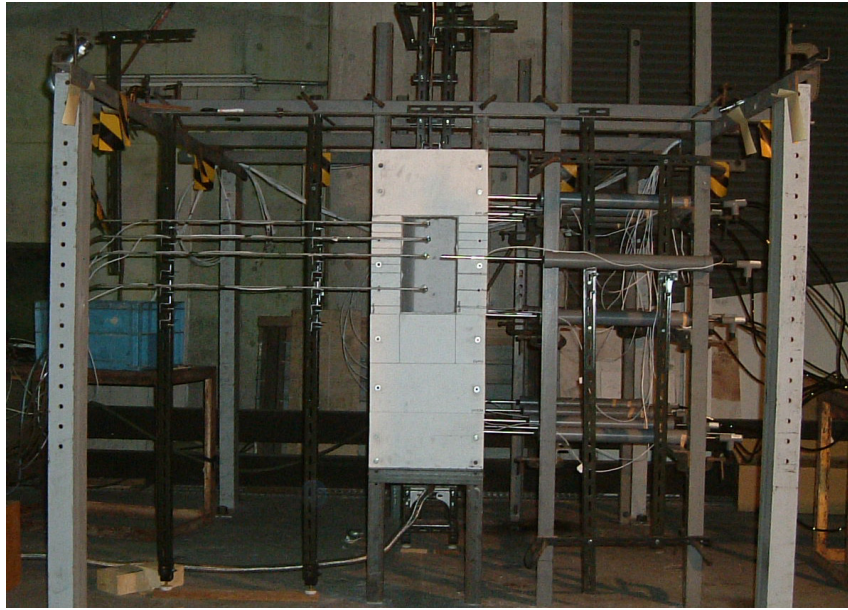


写真 4-1 単一開口実験の区画模型

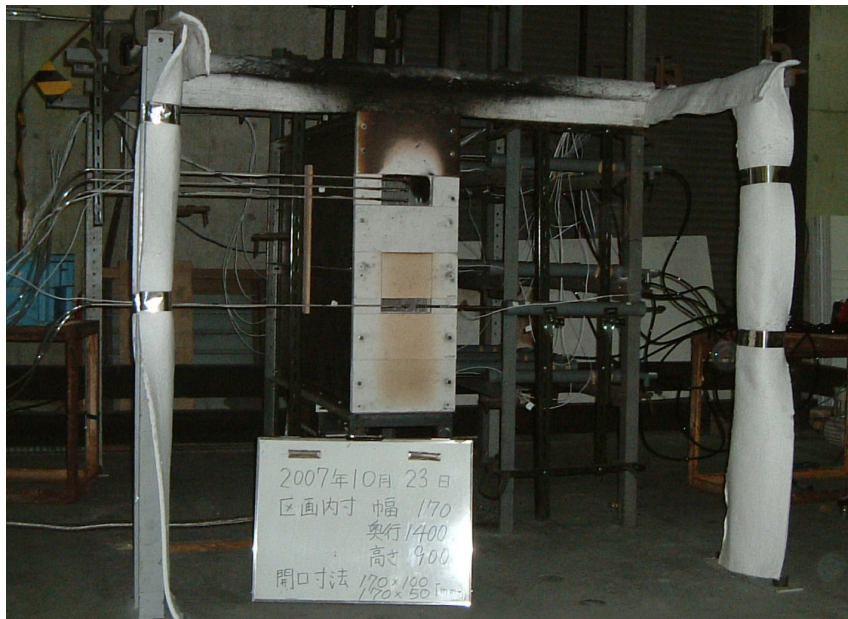


写真 4-2 二開口実験の区画模型

実験 C1～C4 は丈 300mm の開口が一つ、実験 C5～C7 は丈 100mm と丈 50mm の計 2 つの開口が上下に 300mm 離れて設けられている（以降、前者を「単一開口実験」、後者を「二開口実験」と呼ぶ）。開口幅は全て 170mm（区画幅と同じ）とした。なお、二開口実験で上下の開口面積が異なるのは中性帯を下部開口上端から上部開口下端までの間に位置させるためである。

火炎部分の浮力による仕事 w_f (式 4-2) が異なるときの換気量を計測するために、区画模型の天井高さ H_f を単一開口実験では 900, 750, 600, 450mm の 4 条件、二開口実験では

900, 750, 600mm の 3 条件で変化させた。なお、開口上部の垂れ壁の大きさは、既燃ガスの外部への流れ出し易さに影響すると考えて、150mm で統一した。

全実験共通で、火源は幅 170mm (区画幅と同じ) ×奥行 580mm の面積を有するガスバーナーで、火源面に発泡煉石を充填し、燃料にはプロパンを使用した。実験を本研究の火災想定に近づけること、および火炎とそれ以外の部分とを区別し易くなるように、当該火源を開口から見て区画奥に設置した。火源の公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} は単一開口実験で 42.1kW (0.909g/s, 27slm)、二開口実験で 32.8kW (0.707g/s, 21slm) である。これらは、開口因子から算定される区画内への流入空気量の全てが燃焼に寄与した場合 (当量比 $\phi = 1.0$) の発熱速度に相当するように、単一開口実験 (実験 C1~C4) では $1500 A_w \sqrt{H_w}$ (ここで A_w : 開口面積[m²], H_w : 開口丈[m]) とし、二開口実験 (実験 C5~C7) では下式で求めた流入空気量⁶⁾に単位重量当たりの空気の燃焼発熱量 3000kJ/kg を乗じた値となっている。

$$\dot{m}_{in} = \alpha A_a \sqrt{2\rho_o \Delta\rho g H_d} \left\{ 1 + \left(\frac{T}{T_o} \right) \left(\frac{A_a}{A_s} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 4-9}$$

ここで、 \dot{m}_{in} : 流入空気量[kg/s], α : 流量係数 0.65, A_a : 下部開口面積[m²], A_s : 上部開口面積[m²], $\Delta\rho$: 火災室内外密度差[kg/m³], T : 区画内温度 1273[K], T_o : 外部温度 293[K], H_d : 上部開口中心から下部開口中心までの距離[m]

燃料は、区画を予熱するために、各実験条件の目標の流量 (表 4-1) の 1/3 ずつ段階的に 14~16 分間隔で増加させ、その後、目標の流量での供給を 14 分間継続した。流量の制御にはマスフローコントローラーを使用した。

4.3.2. 計測方法

本実験では、換気量を計測するために区画内温度、開口部気流の動圧・温度および区画模型周囲の空気温度 (以降「外気温度」) を計測した。また、燃焼率 $\eta = \dot{Q}_{eff} / \dot{Q}_{nom}$ を把握するために、区画からの流出気流を収集して酸素消費法によって実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} を計測した。

区画内温度は図 4-3 に示す位置で K 型熱電対を用いて測定した。開口部気流の動圧と温度は図 4-3 および図 4-4 の位置で、K 型熱電対を取付けた二方向管を用いて計測した。以降で報告するこれらの計測値は、所定の燃料供給量に設定してから 12 分後のものである。但し、単一開口実験の開口部気流の動圧・温度については、計測点数に対して二方向管が不足していたため、当該時刻を境に B3・B4 を B3'・B4' に移動して計測した。これらについては移動前・後の計測値を以降の換気量の計算に用いた。

二方向管は、図 4-5 および写真 4-3 に示すプローブと微差圧トランスデューサ (Validyne, DP103-06) およびアンプライザ (クローネ, MS1001-4ch) で構成されており、フルスケール 22Pa, 計測精度はフルスケールの $\pm 0.25\%$ である。また、熱電対とプローブは接触させなかった。

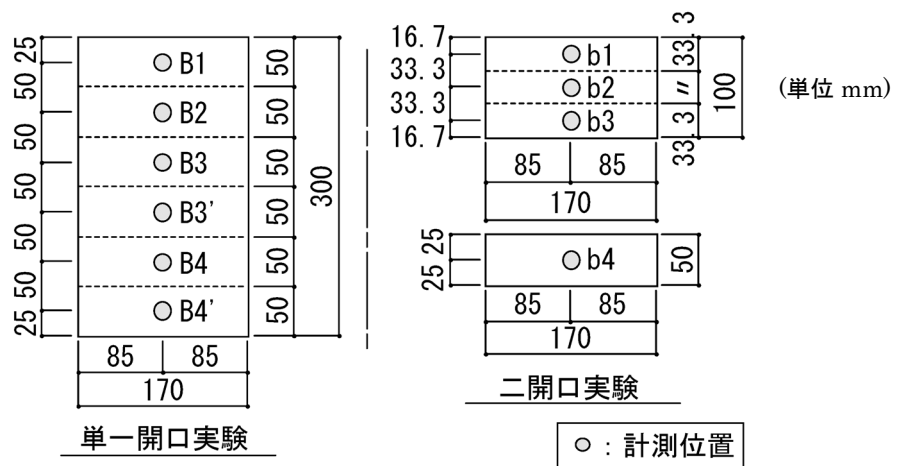


図 4-4 開口部の二方向管および熱電対

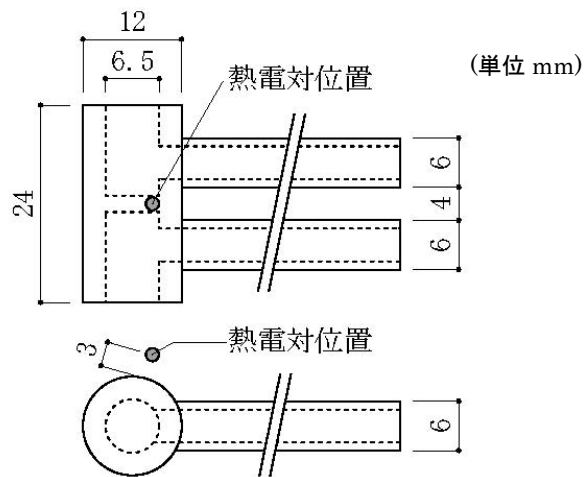


図 4-5 二方向管プローブ



写真 4-3 二方向管プローブと区画模型内部の様子

換気量は開口部で計測された動圧 $\Delta P_{b,i}$ と温度 $T_{b,i}$ から次のように算出した。まず計測点を含むように図 4-4 の点線のように分割した開口の各部分の流速 v_i を式 4-10 で求める。次に流速 v_i に気流密度 $\rho_{b,i}$ と各部分の面積 A_i を乗じて式 4-11 のように各部分での流出・流入量 \dot{m}_i を求める。最後に、各部分の流出・流入量 \dot{m}_i のうち流出量を合計して区画の換気量とした。

$$v_i = \sqrt{2\Delta P_{b,i} / \rho_{b,i}} \quad \text{式 4-10}$$

$$\dot{m}_i = \alpha \rho_{b,i} v_i A_i = \alpha A_i \sqrt{2\rho_{b,i} \Delta P_{b,i}} \quad \text{式 4-11}$$

但し、 $\alpha=0.65$, $\rho_{b,i}=353/T_{b,i}$ とした。

実効発熱速度は、所定の燃料流量に設定して 10 分経過した時点から 14 分までの 4 分間で計測した。ただし、いずれの実験条件でも当該計測の前に同一装置で区画内のガス濃度を計測したため、計測値が安定するための時間として最初の 3 分間を充て、最後の 1 分間（13 分～14 分）の計測値の平均を検討に用いることとした。また、前章までと同様に、実験前後および実験中の随時に集煙フードの外側の空気の酸素濃度を計測し、当該計測値を用いて酸素濃度計測値を補正した。

以上の他に、参考のため随時、区画内ガスを 0.001kg/s 以下で吸引しガス温度・濃度を計測した。また、吸引管の詰まりを除去するために瞬間的に空気を送り込んだ。これらの吸引・供給は流量が僅かであるうえに、本章に示す計測値とは計測時刻も異なっているため、本検討に与える影響は少ない。

4.4. 実験結果

計測結果を表 4-2 および表 4-3 に、開口から流出する熱気流の目視観察結果を表 4-4 に、各実験の様子を写真 4-4～写真 4-10 に示す。表 4-2 および表 4-3 の値は、燃焼率 η を除き、各条件の所定の燃料供給量に設定してから 12 分後の計測値である。区画内温度および外気温度は 1 分間の時間平均、開口部温度および動圧は 1.8 分間の時間平均である。燃焼率 η は各条件の所定の燃料供給量に設定してから 13.5 分を中心とした 1 分間 (13 分～14 分) の時間平均を示した。換気量は、前述 (4.3.2) の方法で計算した模型区画開口部からの流出ガス量 \dot{m}_{out} である。表 4-2 の火炎温度 θ_f は計測点 10～14 の平均、区画内雰囲気温度 θ_r は計測点 1～9 の平均、区画内平均温度 θ_{ave} は計測点 1～10・12・14 の平均である。なお、 θ_i は T_i をセルシウス度 (単位: °C) で表したものである。4.2 にて述べたように本研究で着目している区画奥の火炎に働く浮力の仕事 w_f (式 4-2) は浮力と気流の向きが一致する場所 (気流が上向きの場所) で発生することから、 θ_f の算出には奥壁近傍の点 10～14 の計測値を用いた。この他に計測点 4, 7, 8 も周囲と比べて計測値が高く、実際には火炎が存在したと思われるが、気流の向きについては、後述の通り計測点 4, 7 は水平に近いと考えられ、計測点 8 についても直下で火源に近い計測点 9 が計測点 8 より低温であることから鉛直方向に火炎は立ち上がっていないと判断されるため、 w_f には関与しないと考え θ_f の算出には用いなかった。

表 4-2 区画内温度の計測結果

	実験番号	天井高さ [mm]	区画内温度[°C]																火炎 θ_f ※1	雰囲気 θ_r ※2	平均 θ_{ave} ※3
			計測点 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
単一開口	C1	900	975	836	689	1076	930	695	1164	992	798	1163	1218	1213	1215	1193	1200	906	977		
	C2	750	975	834	684	1073	944	691	1180	1023	804	1181	1245	1264	1273	1226	1238	912	990		
	C3	600	976	856	645	1077	938	731	1179	1041	852	1199	1274	1303	1299	1263	1268	922	1005		
	C4	450	950	906	588	1052	955	775	1146	1060	942	1168	1195	1211	1197	1166	1187	930	993		
二開口	C5	900	915	844	701	1002	878	681	1110	947	761	1103	1152	1161	1153	1120	1138	871	935		
	C6	750	915	844	585	1004	898	677	1109	980	752	1114	1176	1201	1203	1125	1164	863	934		
	C7	600	918	880	808	1026	947	753	1142	1057	861	1180	1244	1274	1291	1292	1256	932	1012		

※1：計測点 10～14 の平均, ※2：計測点 1～9 の平均 ※3：計測点 1～10, 12 および 14 の平均

表 4-3 外気温度, 開口部温度・動圧および換気量の計測結果

	実験番号	外気温度 θ_o [°C]	開口部温度[°C]						開口部動圧[Pa](流出を+とする)						換気量 (流出量) \dot{m}_{out} [kg/s]	燃焼率 η
			B1 b1	B2 b2	B3 b3	B3'	B4 b4	B4'	B1 b1	B2 b2	B3 b3	B3'	B4 b4	B4'		
単一開口	C1	20.2	721	778	763	630	452	452	2.49	1.35	0.58	-0.06	-0.25	-0.60	0.0161	0.86
	C2	20.5	680	789	753	638	449	451	2.33	1.33	0.57	-0.06	-0.19	-0.50	0.0159	0.85
	C3	20.6	720	797	712	595	486	447	2.29	1.26	0.45	-0.11	-0.20	-0.46	0.0152	0.77
	C4	22.8	762	763	636	548	484	452	1.84	0.92	0.20	-0.09	-0.13	-0.22	0.0127	0.71
二開口	C5	20.3	691	770	778	-	137	-	2.57	2.13	1.52	-	-1.39	-	0.0132	0.92
	C6	21.0	685	768	745	-	134	-	2.35	2.08	1.59	-	-1.41	-	0.0131	0.87
	C7	20.1	684	779	737	-	152	-	2.33	1.99	1.45	-	-1.27	-	0.0128	0.84

表 4-4 開口から流出する熱気流の目視観察結果

	実験番号	開口からの噴出熱気流の様子
単一開口	C1	1～2回/分程度の頻度で開口から炎が流出する。
	C2	赤熱した煤が流出し, 稀に炎と思われるものが流出する。
	C3	赤熱した煤が流出する。
	C4	間欠的に火炎が流出する。
二開口	C5	赤熱した煤が流出する。
	C6	赤熱した煤が流出する。
	C7	赤熱した煤が盛んに流出するが, 火炎は出ていない。



写真 4-4 実験 C1 の様子



写真 4-5 実験 C2 の様子



写真 4-6 実験 C3 の様子

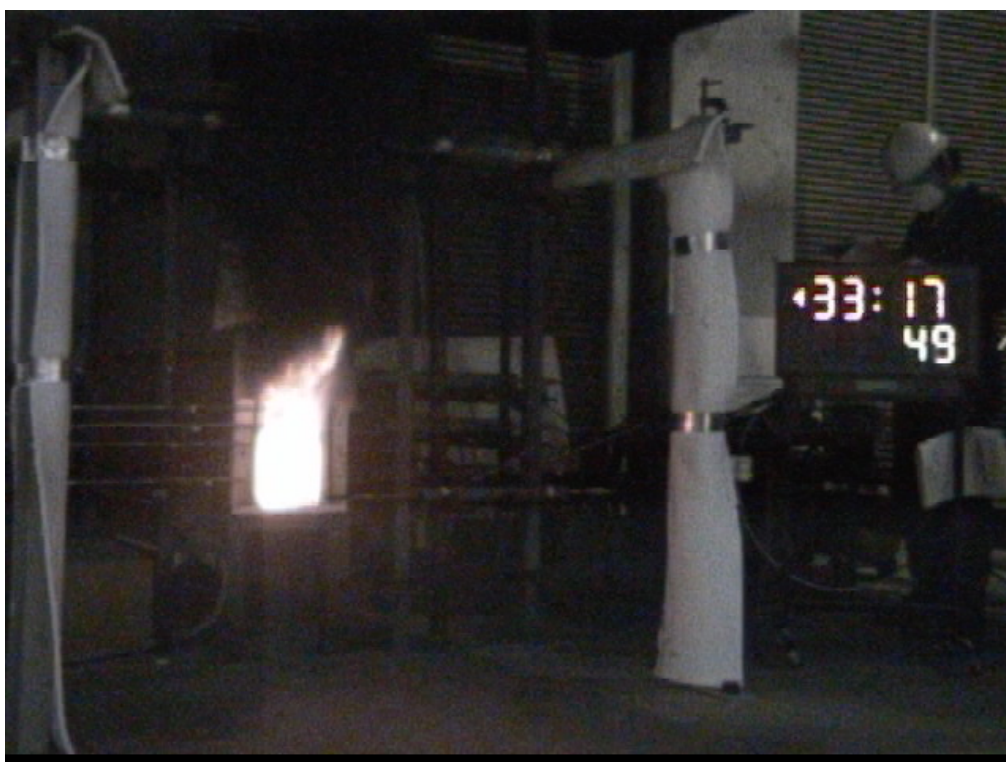


写真 4-7 実験 C4 の様子（開口噴出気流中に火炎が発生した瞬間）

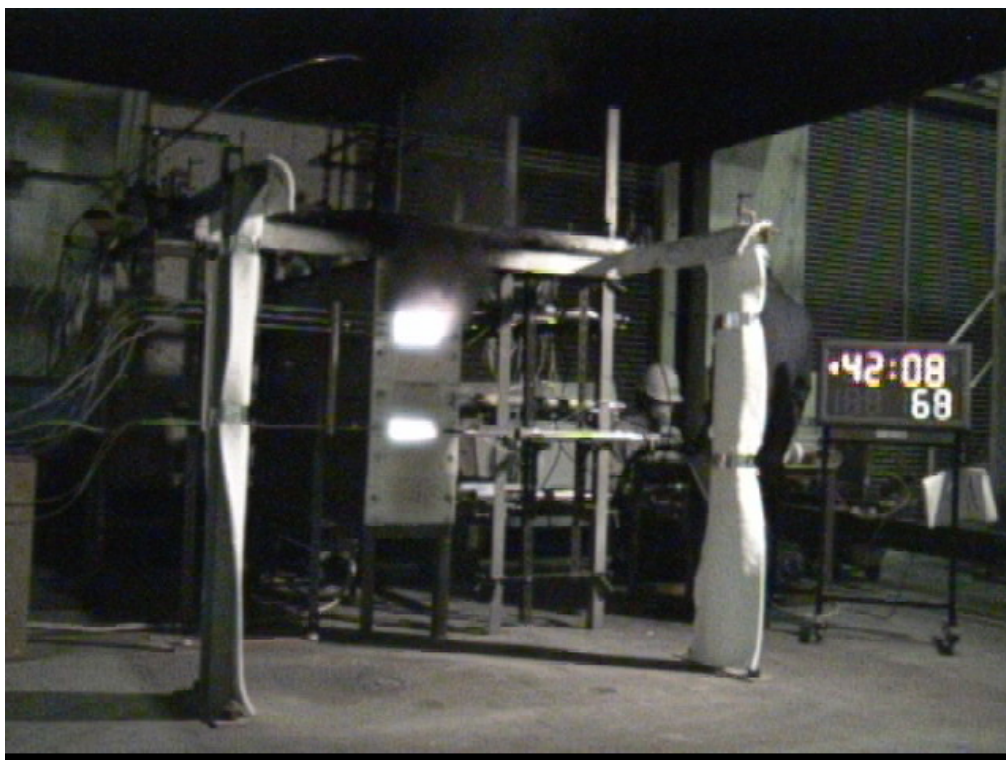


写真 4-8 実験 C5 の様子



写真 4-9 実験 C6 の様子

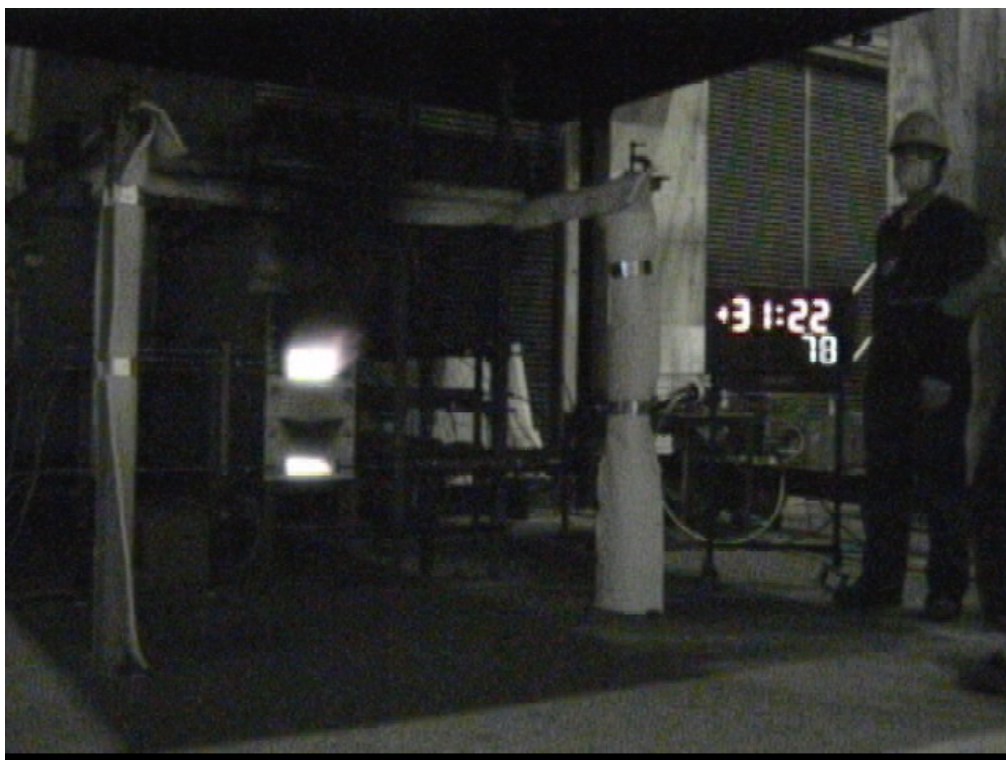


写真 4-10 実験 C7 の様子

4.4.1. 区画内温度

本章では、図 4-2 のように①室内が高温ガスで満たされ、かつ②換気の流れが室内を一巡する火災を想定している。実験がこの想定①、②を満足したのか確認するために区画内温度（表 4-2）の分布を図 4-6 に示す。同図(1)中の 1～14 の数字は計測点名称である。

区画内の 14 計測点の全実験を通じた最低値は 585℃（実験 C6 計測点 3）、 θ_{ave} の最低値は 934℃（実験 C6）であった。300℃以上の区画内温度下では換気量の温度依存性は大きくないことを考えると、換気量を対象とするうえでは本実験の区画内温度は十分高く、想定①を満足したと言える。また、全ての実験で奥壁近傍（計測点 10～14）が他の部分より高温で、天井直下（計測点 1, 4, 7）では区画奥から開口方向に温度が低下していることが図 4-6 から確認できる。これらは、火炎が奥壁近傍を上昇し、その後、天井直下を開口に向かって流れたことを示しており、想定②が満足されたと考えて良い。以上より、全実験で図 4-2 に示した火災の想定を満足したと言える。

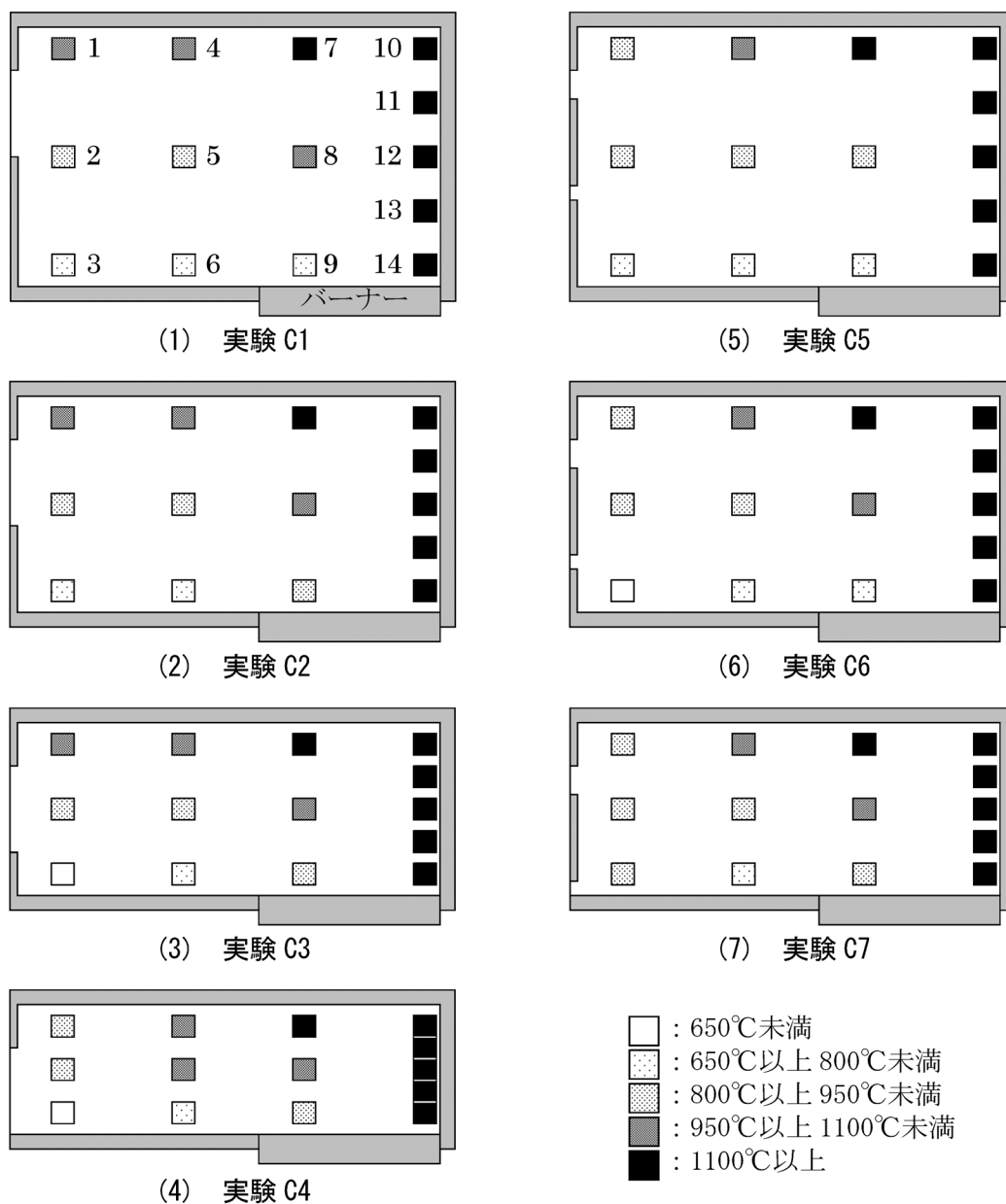


図 4-6 区画内温度分布

4.4.2. 換気量

全実験の換気量の計測結果を図 4-7 に示す。単一開口実験（実験 C1～C4）では天井高さが最小の実験 C4 が 0.0127kg/s で最小値となり、天井高さが最大の実験 C1 で最大値 0.0161kg/s となったように、天井高さが大きいほど計測値も大きくなった。また、最大値と最小値との差は最大値を基準として 20.7%と顕著である。一方、二開口実験（実験 C5～C7）の最大・最小値はそれぞれ 0.0132kg/s （実験 C5）・ 0.0128kg/s （実験 C7）でその差は 3%と小さいが、単一開口実験と同様に、天井高さの増加に伴って換気量が増加する傾向が確認された。

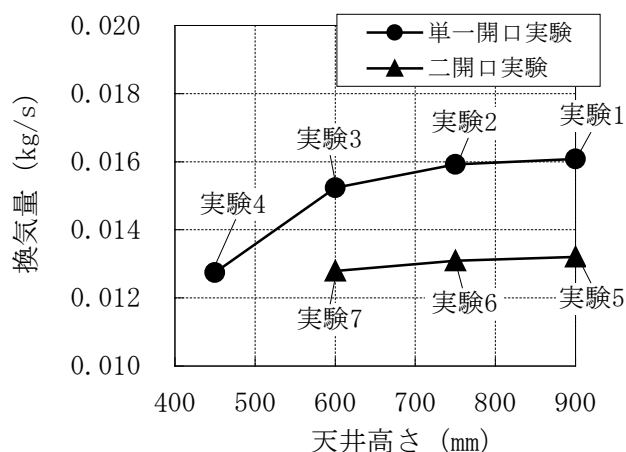


図 4-7 天井高さと換気量（流出量）の関係

4.4.3. 燃焼率

全実験の燃焼率 η の計測結果を図 4-8 に示す。燃焼率も、換気量と同様に、天井高さが大きいほど計測値が大きくなった。表 4-4 および写真 4-4～写真 4-10 の通り、開口噴出熱気流は、火炎が含まれることは少なく、火炎が最も多く見られた実験 C4 でも間欠的に火炎が流出する程度であった。実験 C4 は区画外の燃焼の影響が他の実験より大きい可能性があるが、いずれの実験も連続的な火炎の流出はなく、図 4-8 の燃焼率は殆ど区画内の燃焼に由来すると考えてよい。

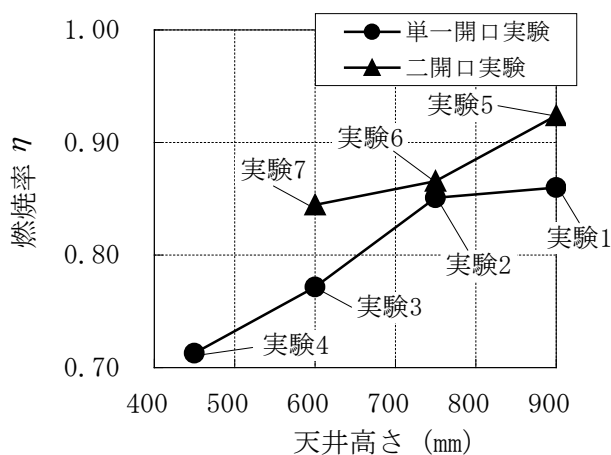


図 4-8 天井高さと燃焼率の関係

4.5. 考察

前節の通り、天井高さの増加に伴う換気量および燃焼率の増加が実験で確認された。本節では、当該実験結果について 4.2 で述べた換気量に対する火炎浮力の仕事の影響を検討すると共に、天井高さが燃焼率に及ぼす影響と模型実験を実施する際に注意すべき点についても考察する。なお、本節の各計算で必要となるガス密度の算出には表 4-2 の火炎温度 θ_f 、火災室雰囲気温度 θ_r 、火災室平均温度 θ_{ave} および表 4-3 の外気温度 θ_o を用いた。

4.5.1. 火炎浮力の仕事による換気量への影響

本実験の主目的である火炎浮力の仕事の影響について考察する。まず、各実験の換気量計測値（実験値）と火炎浮力の仕事 w_f との関係を図 4-9 に示す。 w_f は式 4-2 で計算した。同図からは、4.2.1 での予想のように w_f が大きいほど換気量が大きくなる関係が確認できる。

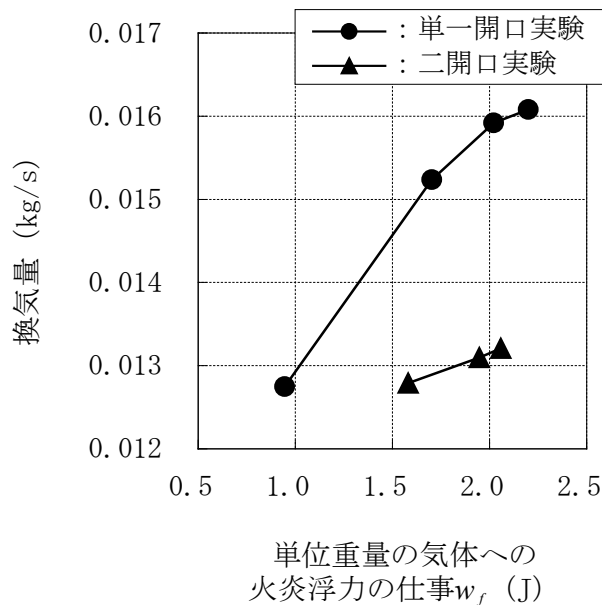
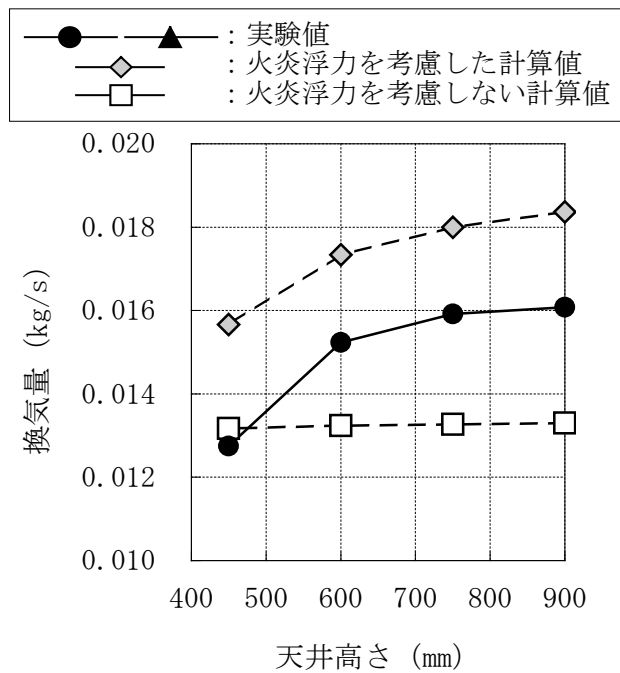


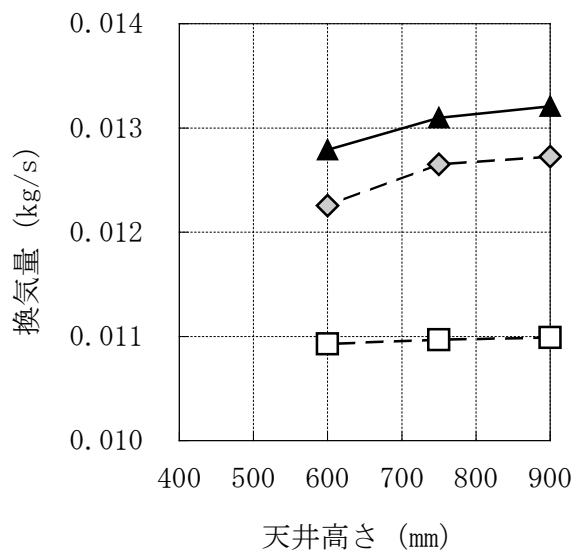
図 4-9 火炎浮力の仕事の計算値と換気量の実験値の関係

次に、火炎浮力の仕事を考慮する場合と火災室内を一様とみなして火炎浮力を無視する場合の 2 通りについて 4.2.2 で述べた方法で換気量を計算し実験値と比較する。計算結果を図 4-10 に示す。火炎浮力を無視した計算値は天井高さが異なっても殆ど変化しないが、火炎浮力を考慮した計算値は実験値とほぼ平行に変化しており、天井高さの変化に伴った増減が良く一致している。なお、計算値と実験値の間の差は、以降の 4.5.1.1 にて詳述するように、火炎浮力が換気量に与える影響の有無を判断する上で支障とはならない

以上より、本実験においては火災室（区画模型）内の火炎部分の浮力の仕事が換気量の増加に寄与したと判断できる。また 4.4 の通り区画内平均温度は 934°C 以上であり比較的低温な床面近傍の計測点でも 585°C 以上と十分高温であるから、高温ガスで充満した火災室の換気量に火炎浮力の仕事が影響することを確認したと言える。



(1) 単一開口実験



(2) 二開口実験

図 4-10 換気量の実験値と計算値の比較

なお、本実験で用いた区画模型は、換気量への火炎浮力の影響が大きくなるように意図されたものであり、建築物内の火災室として一般的な形状ではない。開口も含めた火災室の寸法や可燃物配置といった火災室の条件が異なれば、火炎浮力の仕事は換気量に影響する程度も異なると予想される。

本検討では、換気量の算定においてこれまで考慮されることのなかった火炎部分の浮力が換気量に影響しうることを確認したわけだが、以上のような火災室条件への当該影響の依存性の検討が今後の課題として挙げられる。

4.5.1.1. 火炎浮力を考慮した換気量の計算値と実験値の間の差の原因

図 4-10 では、火炎浮力の影響を考慮した計算値と実験値の間に差が見られる。この原因としては以下の3つが考えられる。

- ① 計算では火炎浮力の仕事を大きめに算定していること。
- ② 幅が狭く奥行きが大きい実験区画の壁面摩擦、火炎の上昇流の天井衝突やそれに伴う曲がりおよび流入気流と流出気流のように向きが異なる気流同士の干渉などによる圧力損失の影響を無視したこと。
- ③ 実験では区画内外からの放射の影響により熱電対による開口部気流温度の計測値に誤差が生じた可能性があること。

①の場合は4.2.2で述べた通り本考察のような定性的な比較では大きな支障とならない。

②については、壁や天井の形状や表面状態は全実験で同じであること、および、火炎の形状も4.4で述べたように実験毎で大きくは変わらないことから、壁面摩擦や火炎の天井衝突等による影響は全実験で同程度と考えられる。また、異方向の気流の干渉の影響は、換気の流入・流出の位置関係が異なる単一開口と二開口とで比較すれば異なるが、同一開口条件では同程度と考えられるので、本考察のように同一開口条件で比較するうえでは問題はない。

③は、二方向管の熱電対から区画内・外を見る形態係数と区画内温度に依存するが、区画内平均温度(934~1012℃)が実験条件であまり変化せず、同一開口条件での比較では形態係数は変わらないので当該計測誤差は支障とならないと考えられる。

以上の通り、①~③のいずれが原因だとしても、計算値と実験値との間の差は、火炎浮力が換気量に与える影響の有無を判断する上で支障とはならないと言える。

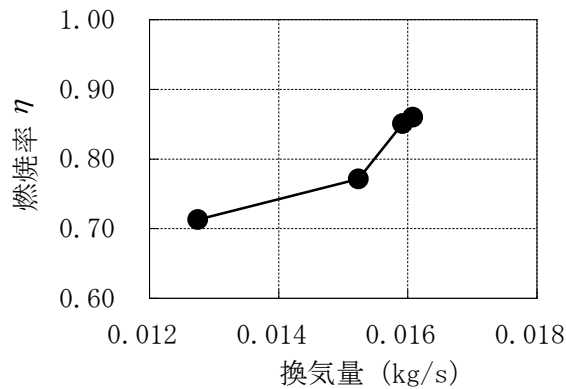
因みに、単一開口実験と二開口実験とで計算値と実験値の大小関係が異なる。この原因を把握するには更なる検討が必要であるが例えば以下の可能性を考えることができる。

- ・ 単一開口実験では換気の流入部と流出部が接近しており、上記②の流入気流と流出気流の干渉による圧力損失が大きかった。しかし計算値は圧力損失を考慮していないため実験値より大きくなった。一方、二開口実験は流入部と流出部が離れているため圧力損失の影響が小さく、計測値と実験値との差は比較的小さくなった。
- ・ 二開口実験では開口面積が小さいため、(開口面からやや外部よりに設置された)二方向管の熱電対から区画外を見る形態係数が比較的大きく、上記③について区画内からの放射より区画外からの放射の影響が大きかった。その結果、気流温度が実際より低く計測され、式(8)(9)から算出する実験値が大きくなったため、計算値は実験値よりやや小さな値(誤差4%未満)となった。

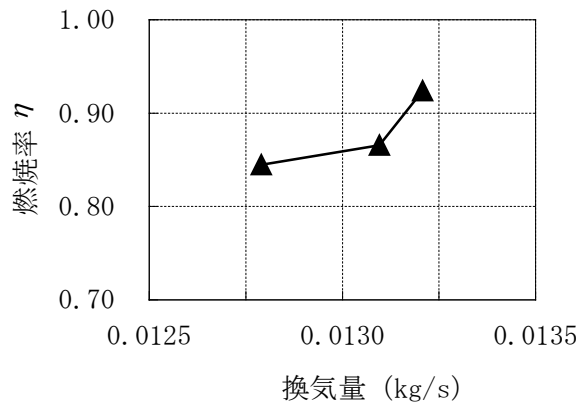
4.5.2. 天井高さと燃焼率との関係

本実験のもう一つの目的である、天井高さと燃焼率 η との関係については、4.4.3 (P.113)の図 4-8 の通り、燃焼率が天井高さの増加に伴って増加することが確認できた。また、燃焼率を換気量で整理すると図 4-11 のようになり、換気量が大きい条件で燃焼率も高くなったことが判る。このように燃焼率が変化することとしては、4.1 で述べたように以下の2つが考えられる。

- ① 換気量（燃焼に使用できる空気量・酸素量）が変化することで燃焼率が変化する。
- ② 天井高さの変化により、燃焼率が低下しやすいと考えられる天井付近に流入する未燃ガス量が増えることで燃焼率が変化する。



(1) 単一開口実験



(2) 二開口実験

図 4-11 換気量と燃焼率の関係

①のように空気量が増えれば燃焼率が増えるのは極めて自然であり、図 4-11 の結果からも妥当と考えてよい。一方、②については図 4-8 のように矛盾しない結果が得られたに過ぎない。しかし、図 4-8 と図 4-11 を比較すると、燃焼に消費される酸素量に実効発熱速度は比例することから、換気量で整理した図 4-11 は線形に近づくと予想されたが、むしろ、天井高さで整理した図 4-8 のほうが線形的な関係を示している。このこと

は、(換気量の変化などを介さずに)天井高さが直接的に燃焼率に影響する可能性を示すものとして興味深い。②の詳細を把握するには、一定の換気量のもと天井高さを変えた実験や、火災室内部のガス濃度分布の計測等が有効であると考えられるが、本研究の目的から外れるため今後の課題としたい。

4.5.3. 模型実験における天井高さに関する留意点

本実験では、以上のように天井高さの違いが換気量および燃焼率に影響することを確認した。従って、模型実験で燃焼率を精度よく推定したい場合には、模型区画の天井高さは検討対象となる火災室を基準として模型縮尺に丁度合うようにする必要がある。

一方、ある範囲で天井高さが増えるときの燃焼率の上・下限値を把握したい場合には、天井高さが高いほど燃焼率が高くなることから、本実験と同様に開口上部の垂れ壁の丈および開口寸法が変わらない(つまり、天井高さと同じだけ腰壁の丈が増える)のを前提として、上限値であれば天井高さを最も高い条件に、下限値であれば最も低い条件に合わせて模型区画を計画すれば良いだろう。天井高さの変化に伴って、開口や垂れ壁の寸法が変わる場合や、天井高さを大きく変えて、区画形状が通常の居室のような空間からアトリウムのような空間になるといったように極端に区画形状が変化する場合には燃焼率の変化は、本実験結果だけでは判断できない^{※4}。このような場合には、それぞれの区画形状に合わせた模型区画を用いて燃焼率を計測することが望ましい。

※4：天井高さの増加は燃焼率を高くし、垂れ壁丈の増加は3.4にて考察したように燃焼率を低下させると考えられるが、例えば、天井高さが増加に伴って垂れ壁丈が増加する場合には、これらは相反するように影響し、どちらが支配的に働くかは現段階では判断できない。

4.6. まとめ

本章では、高温ガスで充満した火災室を対象として、室内部の火炎の部分に働く浮力の仕事が換気量に与える影響および天井高さが燃焼率に与える影響の有無を確認するために、間口 170mm・奥行 1400mm の区画模型を用いて 2 種類の開口条件で天井高さを変えた実験で換気量および燃焼率を計測すると共に、換気量について火炎の部分に働く浮力の仕事を考慮した計算値との比較した。

当該実験により、区画模型の外壁に幅 170mm・丈 300mm の開口を設けた場合と、幅 170mm・丈 100mm と幅 170mm・丈 50mm の 2 つの開口を設けた場合のそれぞれで、天井高さの増加に伴って換気量および燃焼率が増加することを確認した。この結果に基づき以下の①～③を言える。

- ① 火炎部分に働く浮力の仕事を考慮した換気量計算値が、天井高さの変化に伴った増減について実験値と良く一致した。一方、当該影響を無視した計算値の増減は実験値と一致しなかった。このことから天井高さの増加に伴う換気量の増加は火炎部分の浮力の影響によるものであると考えられる。
- ② 天井高さの違いが換気量および燃焼率に影響することから、模型実験で燃焼率を精度よく推定するには、模型区画の天井高さは検討対象となる火災室を基準として模型縮尺に丁度合うように計画するのが望ましい。
- ③ 天井高さがある範囲で変化するときの燃焼率の上・下限値を模型実験で把握したい場合には、開口上部の垂れ壁の丈および開口寸法が変わらない（つまり、天井高さと同じだけ腰壁の丈が変化する）のを前提として、上限値であれば天井高さを最も高い条件に、下限値であれば最も低い条件に合わせて模型区画を計画すれば良いと本実験の結果から予想される。但し、開口や垂れ壁の寸法が変わる場合や、極端に区画形状が変化する場合は除く。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Beyler, C.L. : Major Species Production by Diffusion Flames in a Two-layer Compartment Fire Environment, Fire Safety Journal, vol.10, pp.47-56, 1986.
- 3) Pitts, W. M. : The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanisms of Carbon Monoxide in Enclosure Fires, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 21, pp.197-237, 1995.
- 4) 長谷見雄二, 吉田正志 : 天井面下に広がる火炎の構造と熱伝達性状, 日本建築学会計画系論文集, 第 550 号, pp.1-6, 2001.12.
- 5) Kunio Kawagoe : Fire Behavior in Rooms, Report of the Building Research Institute, No.27, pp.1-73, The Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan, 1958.9.
- 6) 田中哮義 : 改訂版建築火災安全工学入門, 日本建築センター, 2002.1.
- 7) Nakaya, I., Tanaka, T., Yoshida, M. and Steckler, K. : Doorway Flow Induced by a Propane Fire, Fire Safety Journal, Vol.10, pp.185-195, 1986.

第5章 実規模実験による相似則の検証

第5章 実規模実験による相似則の検証

5.1. はじめに

本研究では、ここまでのところで、模型実験によって燃焼率を推定できるようにするために、燃焼速度、区画内温度、およびガス濃度に関する既往の相似則^{1),2)}を拡張して開口の小さい区画における盛期火災の燃焼率に関する相似則を考え、その成否の確認を縮小規模の模型実験で検討してきた。その結果、当量比 0.5 および 1 において幾何学的形状が相似な原型と模型の燃焼率は良く一致し、当該実験の範囲において相似則の妥当性を確認できた。一方、以降の検討課題が残っている。

ここまでの実験では当量比 0.75 では幾何学的に相似な模型間の燃焼率に差が見られたが、模型間で区画内温度を一致させることにより燃焼率も一致すると予想され、実験による確認が望まれる。また、本研究で提案する相似則では、火災区画に流入した空気の滞留時間が燃焼率に与える影響^{3),4)}について、開口の小さい区画火災では無視できると仮定した。もし模型縮尺が過度に小さくなるとこの仮定が崩れ相似が成り立たなくなる恐れがある上に、模型実験の際には、実験施設の規模や能力、安全および経済的な理由により模型縮尺が制限されることから、より小さな模型縮尺での妥当性の検討が望まれる。また、前述の通り、本研究では、ここまで縮小規模での検討に留まっているが、実規模と縮小規模とで支配的に働く物理法則が異なる可能性がある⁵⁾ことから、実規模での検討が必要である。

そこで本章では、これまでの実験で相似則の成否を判断できなかった当量比 0.75 を含めて、原型に対する模型の縮尺がより小さい場合、および、実規模火災を対象（原型）とする場合における当該相似則を検証することを目的として、幾何学的形状が相似な実規模の火災区画と縮小規模の火災区画を用いて開口が単一かつ小さい条件での実験を行った。そして、実規模実験と縮小実験における燃焼率、一酸化炭素発生率および火災区画に流入した空気の滞留時間について比較検討を行った。当量比 0.75 を検討範囲に含めること、および、1.1 (P.3) にて述べたような耐火性能設計での燃焼率に関する問題を解決するには当量比 1.0 における燃焼率を予測可能にすることが重要であることから、実験時の当量比は 0.75 と 1.0 とした。

なお、本章においても、単位時間当たりの燃料の消費量を「燃焼速度 \dot{m}_b 」、燃料が完全燃焼した場合の発熱速度を「公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} 」、実際の発熱速度を「実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} 」、公称発熱速度に対する実効発熱速度の比を「燃焼率 η ($= \dot{Q}_{eff} / \dot{Q}_{nom}$)」、区画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} に対する公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} の比を「当量比 $\phi = \dot{Q}_{nom} / \dot{Q}_{max}$ 」、燃料重量に対する化学種 i の発生重量を「化学種 i の発生率 Y_i 」とする。また、開口因子とは $A_w \sqrt{H_w}$ (A_w : 開口面積, H_w : 開口丈) を表す。

5.2. 相似則

本章では、第2章および第3章と同様に、2.2 (P.20) の相似則に従って実験を行う。当該相似則を表 5-1 に再掲する。区画の代表寸法を L で表し、縮小模型の物性値に「'」を添えている。

表 5-1 相似則

物性値	相似則	
時間 t	$\sqrt{L}/t = \sqrt{L'}/t'$	式 2-1
燃焼速度 \dot{m}_b	$L^{2.5}/\dot{m}_b = L'^{2.5}/\dot{m}'_b$	式 2-2
温度 T	$T = T'$	式 2-3
化学種 i の濃度 C_i	$C_i = C'_i$	式 2-4
化学種 i の発生率 Y_i	$Y_i = Y'_i$	式 2-23
実効発熱速度 \dot{Q}_{eff}	$L^{2.5}/\dot{Q}_{eff} = L'^{2.5}/\dot{Q}'_{eff}$	式 2-7
燃焼率 η	$\eta = \eta'$	式 2-8

着火からの経過時間は、区画内温度や（火源の燃料消費量を任意調整できない場合の）燃焼速度には関係するが、本研究の焦点である燃焼率や実効発熱速度に対しては直接関係しない。従って、区画内温度および燃焼速度について原型と模型とで式 2-2 および式 2-3 の関係が成立するのであれば、経過時間に式 2-1 を適用する必要はない。そこで、本実験では、火源に気体燃料を用いて燃焼速度が式 2-2 を満たすように制御しながら区画内温度が式 2-3 を満たすように加熱時間を調整する。

なお、区画内温度の変化と着火からの経過時間（加熱時間）について原型と模型を式 2-1 および式 2-3 のように一致させるには、模型周壁（壁・天井・床）の材質・厚さを縮尺に応じて調整すれば良く^{1),6)}、燃料形状を原型と模型とで幾何学的に相似とすることで燃焼速度の時間変化が式 2-1 および式 2-3 を満たすことも確認されている²⁾。

式 2-1 は経過時間の他に火災室への流入空気の平均滞留時間 t_R に関係する。Takeda ら³⁾ や Beyler⁴⁾ に拠れば、 t_R と空気と燃料との混合に必要な時間 t_M の比 (t_R/t_M) に応じて一酸化炭素等の燃焼量が増加し燃焼率が高くなる。また、 t_R を区画容積/空気流入量とすれば、流入空気量と開口因子の比例関係から $t_R \propto V/A_w \sqrt{H_w} \propto \sqrt{L}$ と考えられる。これらのことか

ら、区画サイズが大きいほど t_R が大きくなり、燃焼率が高くなる可能性があるが、2.2 (P.20)の通り、開口の小さい区画火災では以下の①②により無視できると予想した。

- ① 開口の小さい区画火災では流入空気量が少なく、火災室内の一酸化炭素や酸素が最終的な状態に達するのに要する時間と比べて t_R が十分に大きいため、 t_R の違いによる影響がなくなると考えられる。
- ② 気体運動に関する時間である t_M についても式(1)の関係が成立すると考えれば、区画の幾何学的相似が保たれる場合には t_R/t_M は一定となる。

第2章および第3章の通り、以上の相似則が当量比0.5および1.0において妥当であること、および t_R と燃焼率に相関性が無いことを示す結果が得られている。しかし、当該実験は縮小規模で、模型縮尺も1/2に限定されており、前項で述べたように、実規模への適用性確認とより小さな縮尺での検討が望まれること、および、当量比0.75についても区画内温度を原型と模型とで一致させることで燃焼率に関して相似則が成立すると予想されることから、本章では、実規模実験を行い当該実験との比較を行う。

5.3. 実験概要

5.3.1. 火災の想定

火災の想定は第2章・第3章と同じく、室容積に対して開口が小さい室における盛期火災を想定する。木材等を燃料とした模型および実規模の火災実験⁷⁾から“盛期火災時の空気過剰率は0.8~1.2(当量比0.83~1.25)になる”という知見が得られていること、当量比が1を超えると開口噴出火災の発生⁸⁾により区画内の実効発熱速度の計測が困難になること、開口噴出火災の有無が区画内の燃焼性状に与える影響は小さいと考えられること、および、耐火性能設計での燃焼率に関する問題を解決するには当量比1.0における燃焼率を予測可能にすることが重要であることから、盛期火災に相当し、かつ開口噴出火災の発生の可能性が少なくなるように当量比1.0を実験条件とした。また、当量比0.75での相似則の妥当性を確認する必要があることから、当量比0.75も実験条件とした。なお、区画内温度の調整・参考データ取得のために実験7-Qでは当量比0.5での加熱・計測を行った。

本研究で対象としているコア周りの居室などの小開口区画は、小部屋であることが多い。本章では、ISO9705 ルームコーナー試験装置と同サイズの火災区画で実験を行うが、これは小部屋相当の規模を有しており、実規模火災とみなすことができる。

5.3.2. 実験条件

本章では、燃焼率の相似則や模型実験手法の妥当性について、第2章や第3章の実験より小さな縮尺(1/2未満)や実規模火災を原型とした条件で検討したい。そこで、小開口を有する実規模の火災区画(以降「原型区画」、詳細は次項で述べる)と、第2章・第3章と同じく中模型および小模型を用いて、表5-2に示した5条件を比較する。中模型と小模型はそれぞれ原型区画に対して縮尺1/2, 1/4である。本章では実験4-F, 実験7-F, および、実験7-Qを新規に実施し、実験4-Hおよび実験4-Qは第3章の実験を参照する。

表 5-2 実験条件

実験名称	区画					開口				燃料(C ₃ H ₈)供給量		公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} [kW]	当量比 ϕ
	名称	縮尺	間口 [mm]	奥行 [mm]	高さ [mm]	幅 [mm]	丈 [mm]	アスペクト比 (幅/丈)	開口因子 [m ^{2.5}]	\dot{m}_b [kg/s]	[slm]		
4-F	原型区画	1	2400	3600	2400	516	516	1.00	0.1913	4.638×10^{-3}	137.8	215.5	0.75
										6.195×10^{-3}	184.0	287.8	1.00
4-H	中模型	1/2	1200	1800	1200	258	258	1.00	0.0338	0.820×10^{-3}	24.36	38.1	0.75
										1.096×10^{-3}	32.56	50.9	1.00
4-Q	小模型	1/4	600	900	600	129	129	1.00	0.0060	0.146×10^{-3}	4.32	6.8	0.75
										0.193×10^{-3}	5.74	9.0	1.00
7-F	原型区画	1	2400	3600	2400	73	1900	0.038	0.1912	4.651×10^{-3}	138.2	216.1	0.75
										6.193×10^{-3}	184.0	287.7	1.00
7-Q	小模型	1/4	600	900	600	20	475	0.042	0.0065	0.107×10^{-3}	3.19	5.0	0.51
										0.159×10^{-3}	4.73	7.4	0.75
										0.213×10^{-3}	6.31	9.9	1.01

いずれの実験も開口の数は一つで、室容積に対して開口が小さい火災を想定していることから開口因子は $A_r\sqrt{H_r}/70$ と等しくした (A_r : 模型床面積, H_r : 模型の室高さ)。相似則等の妥当性確認には、燃焼性状がなるべく異なる条件で検討することが望ましい。そこで、開口の寸が燃焼率に影響すること (P.86, 3.4.2) から、2条件の開口形状を設定した。ひとつめは、燃焼率が低下しやすい条件として、第3章の実験 4-H および実験 4-Q と同形状、すなわち、開口のアスペクト比 (幅/寸) を 1.0 とした。実験 4-H および実験 4-Q では、当量比 1.0 の燃焼率が 0.8 程度に低下することを確認している。実験 4-F として原型区画を用いて当該条件を実施し、実験 4-H および実験 4-Q との比較を行う。ふたつめは、燃焼率が低下しにくい条件として、開口のアスペクト比を約 0.04 とした。当該条件で原型区画による実験 7-F と小模型による実験 7-Q を実施する。なお、施工誤差のため実験 7-Q の開口幅は設計値 18.3mm (実験 7-F の 1/4) より 1.7mm 大きく、実験 7-F と実験 7-Q の開口アスペクト比は若干異なる (7-F : 0.0384, 7-Q : 0.0421)。

次節・表 5-3 (P.135) に示す通り、実験 4-H と実験 4-Q の燃焼率には当量比 0.75 で 0.07、当量比 1.0 で 0.04 の差があり、その他の実験でも中・小模型間における燃焼率の差が当該当量比において比較的大きかったが、3.4.1 (P.83) で述べたように、この原因として区画内温度の違いによる影響が考えられる。また、前述の通り、当量比 0.75 での相似則の妥当性確認には区画内温度を原型と模型とで一致させる必要がある。そこで、実験 4-F では区画内温度を 4-H と 4-Q の中間とする。もし、燃焼率に関する相似則が成立し、かつ、区画内温度が燃焼率に影響するならば、(区画内温度を同程度にする予定の) 実験 7-F と実験 7-Q の燃焼率は一致し、実験 4-F は実験 4-H と実験 4-Q の中間となるはずである。

5.3.3. 火災区画および実験方法

本実験で使用した火災区画を図 5-1、写真 5-1～写真 5-6 に示す。これらの区画の内部形状は ISO9705 ルームコーナー試験装置と幾何学的に相似とした。

原型区画 (実験 7-F, 実験 4-F) は、角型鋼管および軽量鉄骨でできた外枠に、内部の大きさがルームコーナー試験装置と同じ 2400mm×3600mm×2400mm となるように、鉄板 (厚さ 0.6mm)、けい酸カルシウム板 (天井・壁: 厚さ 12mm を 2 枚 (計 24mm)、床: 厚さ 10mm を 2 枚 (計 20mm)) の順で留め付けて壁、天井および床を構成したものである。これらの構成材料の目地からの空気や既燃ガスの流入出を防ぐため、区画の外側から鉄板の目地にアルミテープを貼った。落下防止のため天井のけい酸カルシウム板の表面を厚さ 6mm のセラミックファイバークラウドで保護した。また、実験 7-F では、開口を設けた壁を除く床と壁にも同様の保護を施した。写真 5-1 の通り、原型区画は集煙フード (既設) の下に入らないため、写真 5-4 のように開口上部に庇を設けて、区画内部からの燃焼ガスを集煙フード下に流入させた。

小模型 (実験 7-Q, 実験 4-Q) と中模型 (実験 4-H) の内部の大きさは、これまでと同様に、それぞれ 600mm×900mm×600mm, 1200mm×1800mm×1200mm で、原型区画の

1/4, 1/2 となる。周壁は厚さ 3mm の鋼板を下地として小模型では 50mm, 中模型では 100mm のセラミックファイバーボード (CBD) を内貼りした。但し, 正面と背面の壁は, 小模型では CBD 単体を, 中模型では鋼製アングルで補強した CBD を区画本体に取り付けた。目地はアルミテープとセラミックファイバーキャストで塞いだ。

なお, 原型区画・小模型共に, 材料に含まれる有機成分を焼失させるために, 写真 5-7 のように実験実施の前に十分加熱した。

全ての実験で, 火源としてプロパンガスを燃料とするバーナーを区画の床面中央に設置した。火源面には写真 5-5 のように発泡煉石を充填した。燃料流量は, 実験 4-F および実験 7-F では当量比 $\phi = 0.75, 1.0$ として, $\dot{m}_b = \phi \dot{Q}_{\max} / \Delta H_b$ (式 2-14, ただし $\Delta H_b = 46460$ [kJ/kg]) より求まる値を段階的に増加するように供給した。これと同様に, その他の実験では当量比 $\phi = 0.5, 0.75, 1.0$ として燃料流量を供給した。これらの流量は, 前述 (2.2, P.20) の通り, 同一当量比において原型区画と模型との間で式 2-2 を満たしている。実験 4-Q および実験 7-Q ではマスフローメーターで流量計測しながら手動で制御し, それ以外の実験ではマスフローコントローラーで制御した。

前節で述べたように, 本実験では加熱時間の調整により原型と模型の温度を合わせる。実験 4-H と実験 4-Q は第 3 章にて実施済みであるので, これらの原型となる実験 4-F では, 区画内平均温度が実験 4-H, 4-Q の間に達するまで当量比 0.75 と 1.0 のそれぞれで加熱を継続した。実験 7-F および実験 7-Q では, 実験 4-H と実験 4-Q の温度を参考に, 当量比 0.75 で 550°C 程度を目安とし, 当量比 1.0 で 700°C を超えるまで加熱を継続した。

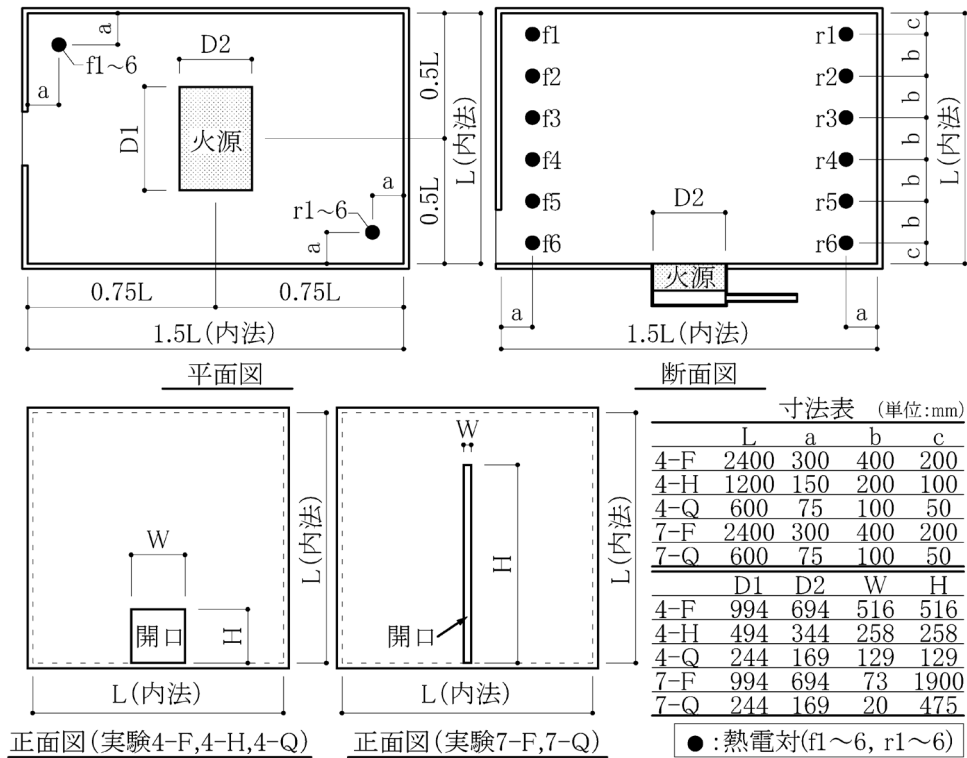


図 5-1 火災区画

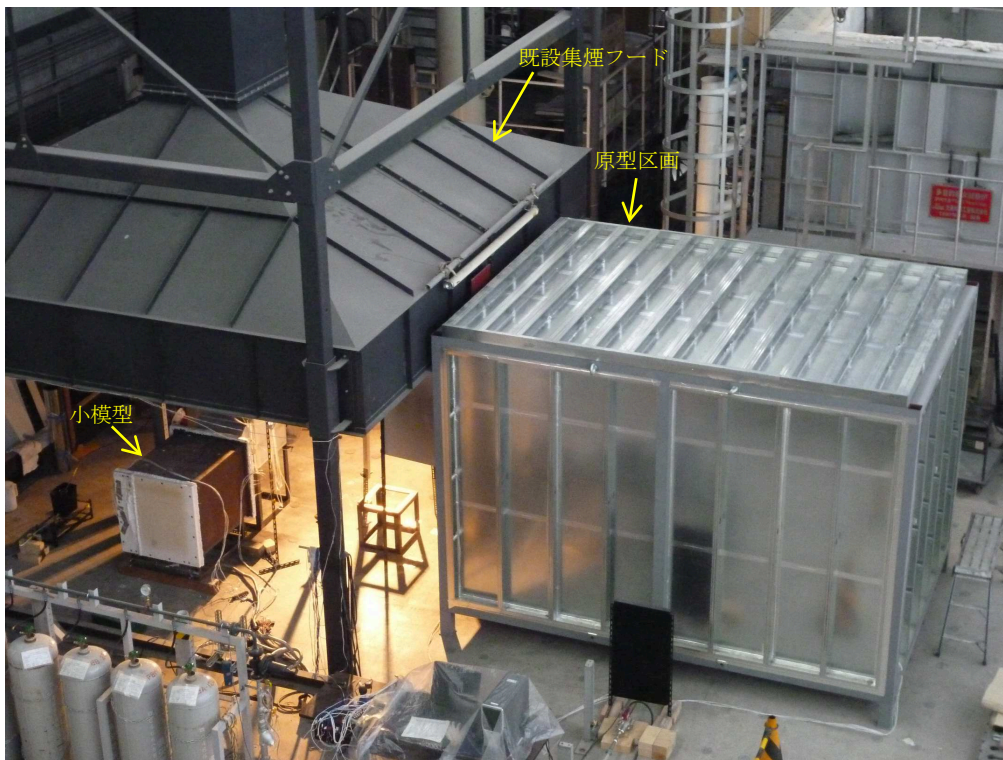


写真 5-1 原型区画，小模型および既設集煙フード

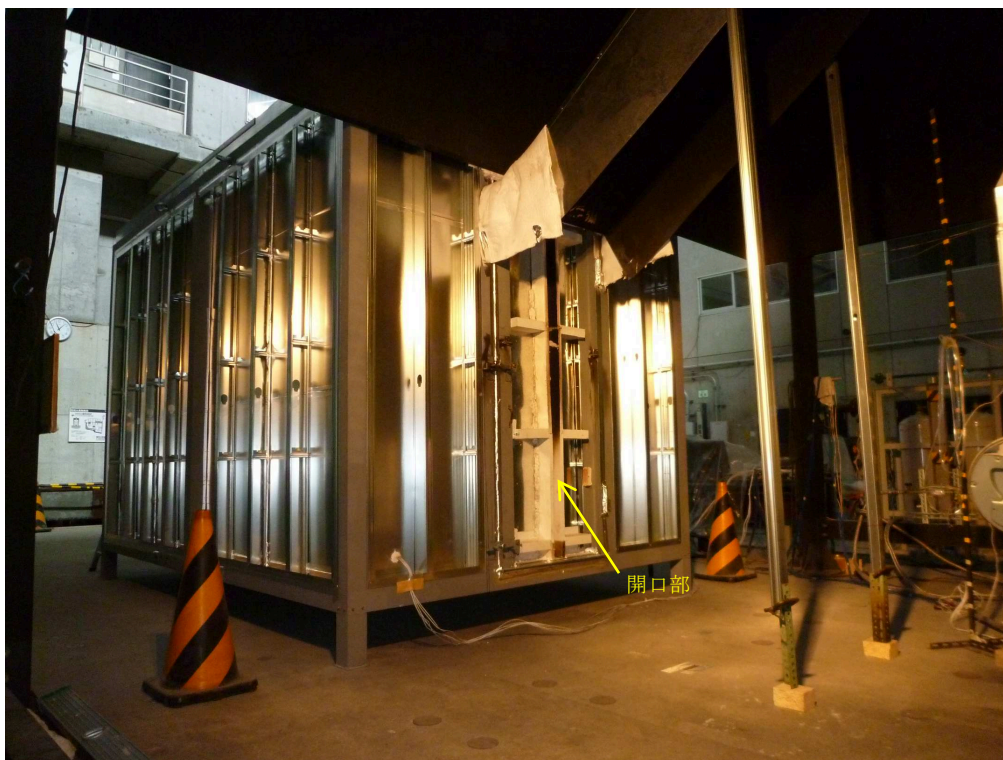


写真 5-2 原型区画の外観（実験 7-F）

（庇は実験時とは異なる。庇については写真 5-4 を参照のこと。）



写真 5-3 実験 4-F の開口



写真 5-4 原型区画の庇



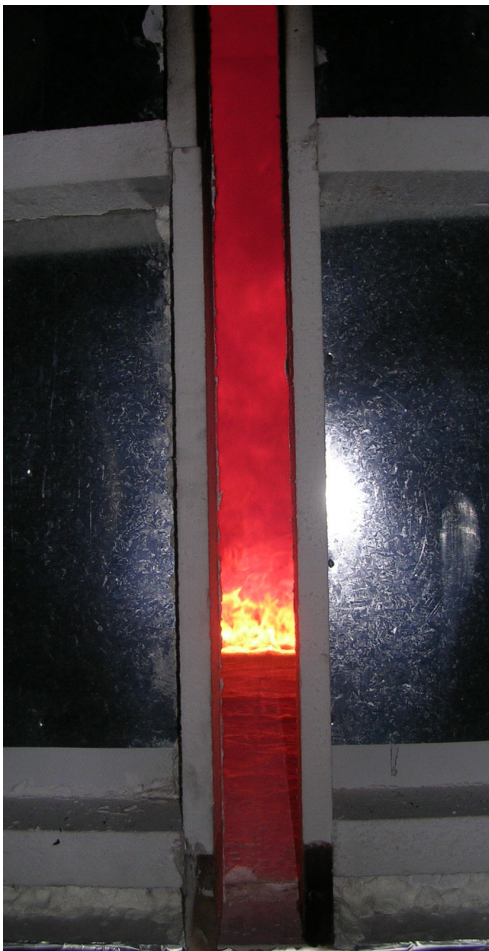
写真 5-5 原型区画の火源



写真 5-6 実験 7-Q の開口



(1) 実験 4-F



(2) 実験 7-F



(3) 実験 7-Q

写真 5-7 事前加熱の様子

5.3.4. 計測方法

本実験では、第 2 章・第 3 章と同様の計測を行った。計測装置の概要についても図 2-2 (P.31) と同様である。排煙ダクト内の流量 m_e (g/s), 温度, 酸素 O_2 ・二酸化炭素 CO_2 ・一酸化炭素 CO の濃度を計測し, これらの値から実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} , 一酸化炭素発生量 \dot{G}_{CO} を算出した。燃焼率, 実効発熱速度, 一酸化炭素発生量等の算出方法は 2.3.3.4 (P.35), 2.3.3.5 (P.36) の通りとした。また, 区画内温度を, 図 5-1 に示す位置で K 型熱電対(計 12 点)を用いて計測した。

実験 4-F および実験 7-F で使用した計測機器の仕様は, 実験 2-H (P.69, 3.2.3) と同じである。実験 7-Q は実験 4-H および実験 4-Q (P.69, 3.2.3) と同じである。実験 4-F・実験 7-F と実験 4-H・実験 4-Q・実験 7-Q とでの計測装置の違いは集煙フードの大きさ, 排煙ダクト・複合ピトー管の内径とダクト内熱電対の素線径である。発熱速度の計測精度は, 実験 4-F・実験 7-F は図 3-4(1) (P.72), 実験 4-H・実験 4-Q・実験 7-Q は同図(2)の通り確認されている。

なお, 本実験においても, 開口因子が小さく分析対象の既燃ガスが少量であるため, ガス分析装置の計測誤差 (ポイントリフト) の影響に配慮する必要がある。そこで実験の前後や実験中に既設集煙フードの外側の空気の酸素濃度を計測し, この酸素濃度計測値を用いて実験中の酸素濃度計測値の補正を行った。当該計測中は排煙ダクト内のガスの分析は中断される為, 次節・図 5-2 および図 5-3 では, 新鮮空気計測時の \dot{Q}_{eff} と Y_{CO} は 0 となっている。

5.4. 実験結果

実験 7-F, 実験 7-Q および実験 4-F の計測結果を示す。実験 4-H および実験 4-Q については 3.3 (P.73) を参照されたい。計測結果の一覧を表 5-3 に, 実験時の様子を表 5-4 および写真 5-8~写真 5-10 に, 発熱速度, 一酸化炭素発生率および区画内平均温度 (図 5-1, f1~6 と r1~6 の平均温度) の計測結果を図 5-2 および図 5-3 に, 当量比 0.75 および 1.0 での区画内温度分布を図 5-4 に示す。表 5-3 および図 5-4 の値は, 図 5-2 や図 5-3 に○で示した時点を中心とした 60 秒間の計測値の平均とした。

本実験では, 原型と模型の温度が合うように加熱時間を調整した (5.3.3 (P.127))。

実験 4-F では, 当量比 0.75 で区画内平均温度が 562°Cに達し, 実験 4-H (717°C) と実験 4-Q (544°C) の間の温度となった。温度分布も図 5-4(1)の様に実験 4-H と実験 4-Q の間に概ね収まった。また, 当量比 1.0 では区画内平均温度が 730°Cに達し, 実験 4-H と実験 4-Q の中間値 (738°C) にほぼ等しくなった。温度分布も図 5-4(2)の様に実験 4-H と実験 4-Q の間に収まった。

実験 7-F と実験 7-Q の区画内平均温度は, 当量比 0.75 でそれぞれ 544°C, 556°C, 当量比 1.0 でそれぞれ 713°C, 716°Cとほぼ等しく, 温度分布も図 5-4(3)(4)の様に概ね一致した。

5.3.2 (P.126) の通り, 実験 4-F では燃焼率が低くなるように, 実験 7-F と実験 7-Q では高くなるように開口形状を設定した。その結果, 当量比 1.0 での燃焼率は実験 4-F で 0.78, 実験 7-F および実験 7-Q で約 0.9 となった。当量比 1.0 での一酸化炭素発生率は, 燃焼率の低い実験 4-F で約 0.2 に達し, 実験 7-F と実験 7-Q では一桁小さい 0.01 程度となった。

表 5-3 の開口噴出火炎の欄と表 5-4 には, 開口からの流出気流の目視観察結果を示した。表 5-3 の記号は, “△” が「赤みを帯びたガスが流出するが, 一般的な可燃ガスの燃焼に伴うような輝炎を含まない状態」, “—” が「赤みも輝炎もない状態」を表す。実験 4-Q を除く全ての実験で当量比 1.0 において赤みを帯びたガスが流出した。なお, いずれの実験においても, 流出気流中に輝炎は発生しなかった。

表 5-3 計測結果一覧

実験名称	当量比 $\dot{Q}_{nom}/\dot{Q}_{max}$	燃焼率 $\dot{Q}_{eff}/\dot{Q}_{nom}$	CO発生率 Y_{CO}	区画内 平均温度 [°C]	開口噴出 火炎 ^b
4-F	0.75	0.91	0.087	562	—
	1.00	0.78	0.211	730	△
4-H ^a	0.75	0.96	0.007	717	—
	1.00	0.81	0.126	832	△
4-Q ^a	0.75	0.89	0.079	544	—
	1.00	0.77	0.212	644	—
7-F	0.75	0.89	0.015	544	—
	1.00	0.90	0.010	713	△
7-Q	0.51	0.94	0.001	385	—
	0.75	0.90	0.000	556	—
	1.01	0.89	0.008	716	△

a) 実験 4-H・実験 4-Q は 3.3 (P.73) からの再掲。

b) △は輝炎が無く赤みを帯びたガス，—は輝炎も赤みもないガスを表す。

表 5-4 開口から流出する熱気流の目視観察結果

実験名称	当量比	開口からの噴出熱気流の様子
4-F	1.00	赤熱した煤が流出する。
4-H	1.00	赤熱した煤が流出する。
7-F	1.00	薄らと赤味を帯びる。 照明を当てると目視できなくなる。
7-Q	1.01	よく見ると、薄らと赤味を帯びているのが確認できる。 照明を当てると目視できなくなる。



写真 5-8 実験 4-F の様子 (当量比 1.0)

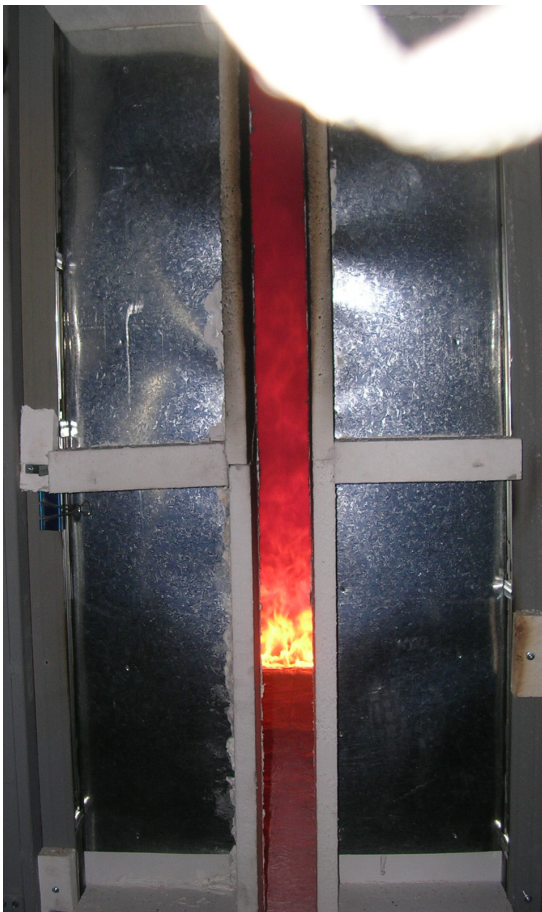
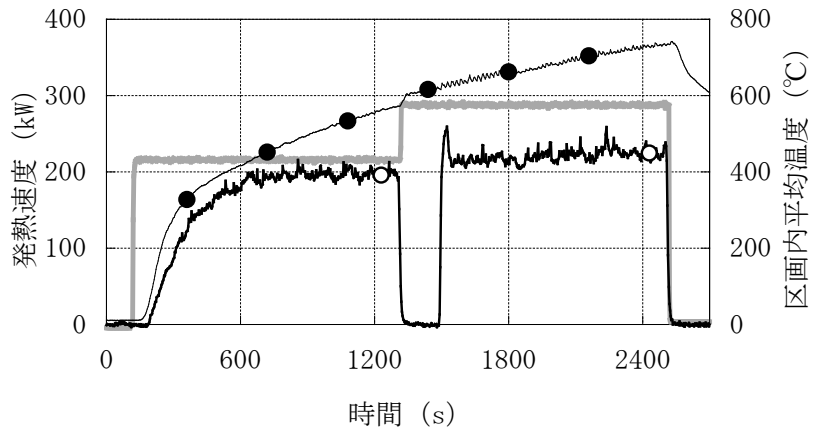


写真 5-9 実験 7-F の様子 (当量比 1.0)

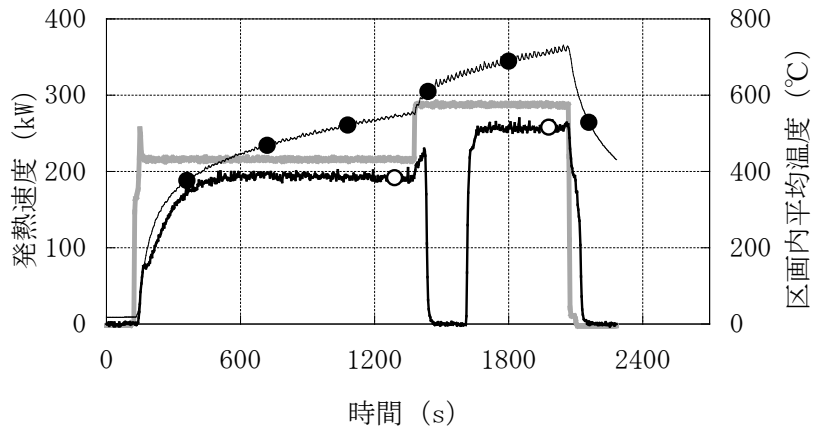


写真 5-10 実験 7-Q の様子 (当量比 1.0)

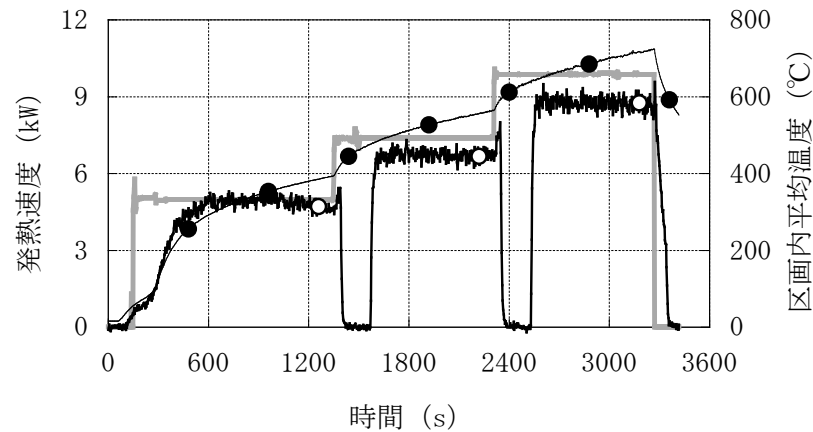
— : 実効発熱速度 \dot{Q}_{eff} — : 公称発熱速度 \dot{Q}_{nom} ● : 区画内平均温度



(1) 実験 4-F



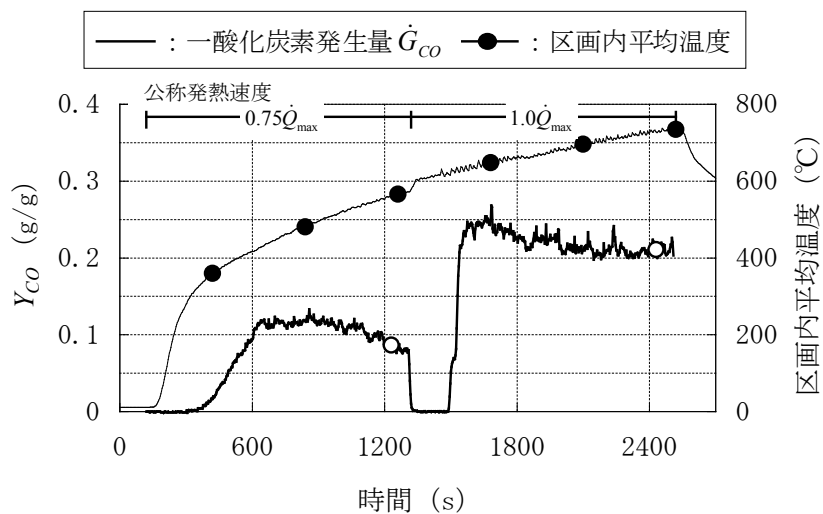
(2) 実験 7-F



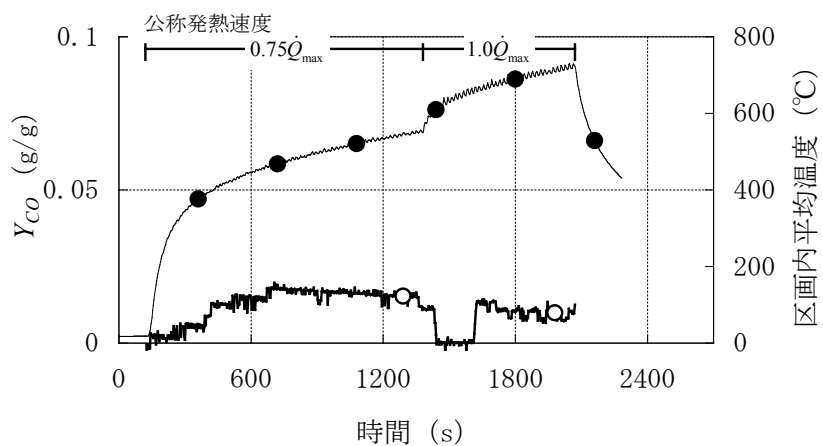
(3) 実験 7-Q

図 5-2 発熱速度と区画内温度の計測結果*

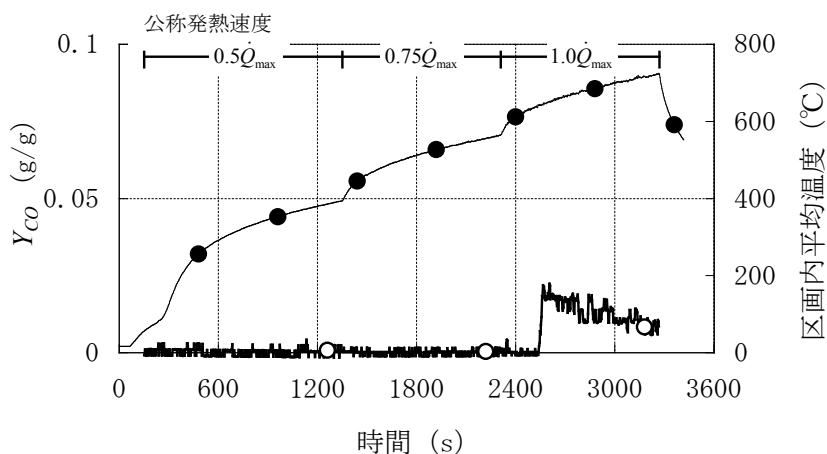
※ 図中の“○”は表 5-3 および図 5-4 に示した計測値の取得時期を示す。



(1) 実験 4-F



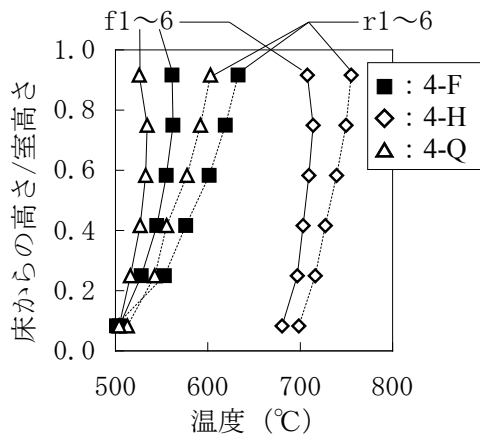
(2) 実験 7-F



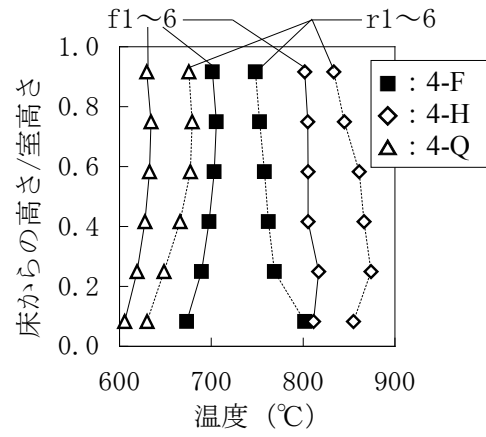
(3) 実験 7-Q

図 5-3 一酸化炭素発生率の計測結果*

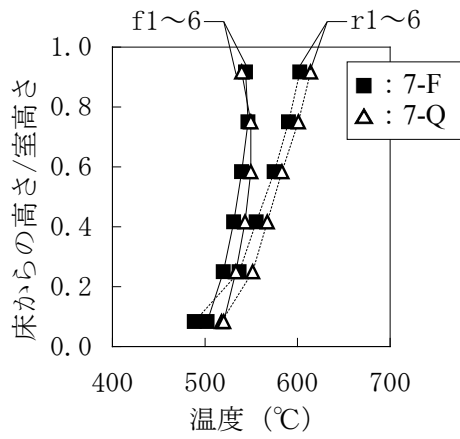
* 図中の“○”は表 5-3 および図 5-4 に示した計測値の取得時期を示す。



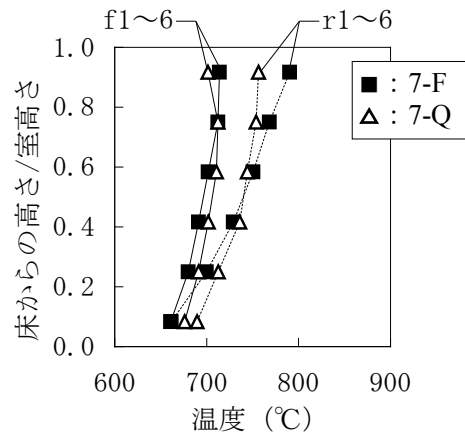
(1) 実験 4-F, H, Q (当量比 0.75)



(2) 実験 4-F, H, Q (当量比 1.0)



(3) 実験 7-F, Q (当量比 0.75)



(4) 実験 7-F, Q (当量比 1.0)

図 5-4 区画内温度分布

5.5. 考察

実規模の原型区画（4-F, 7-F）と縮尺 1/2 および 1/4 の模型区画（4-H, 4-Q, 7-Q）を比較し、燃焼率に関する相似則を検証する。

5.5.1. 実験 4-F, 実験 4-H および実験 4-Q の比較

まず、実験 4-F, 実験 4-H および実験 4-Q の比較を図 5-5 に示す。第 3 章で燃焼率に区画内温度が影響すること、および、当量比 0.75 では当該影響が大きいことを確認し、当量比 0.75 では当該影響により幾何学的に相似な模型間の燃焼率の差が比較的大きくなっており、模型間で区画内温度を一致させることで燃焼率も一致させられると予想した。そこで実験 4-F では、区画内温度を実験 4-H と実験 4-Q の中間にしたところ、図 5-5(1)の通り、燃焼率がこれらの実験の間に収まった。また、図 5-5(2)の通り、実験 4-F は Y_{CO} についても実験 4-Q と良く一致し、実験 4-H と実験 4-Q の範囲にほぼ収まったと言える。当量比 0.75 において、前述の予想の通り、図 5-4(1)のように区画内温度が概ね一致した実験 4-F と実験 4-Q とで燃焼率と Y_{CO} の両方についてよい一致が確認された。以上のように実験間で燃焼率が区画内温度と同じ大小関係となり、かつ概ね一致したことは、区画内温度の影響と本相似則の妥当性を示している。実験 4-F を含めた実験 4 および実験 1（開口因子以外の幾何学的条件が実験 4 と同等）について、燃焼率と Y_{CO} を区画内温度で整理した結果を図 5-6 に示す。同図からも、区画内温度と燃焼率・ Y_{CO} との相関性の高さを確認することができる。

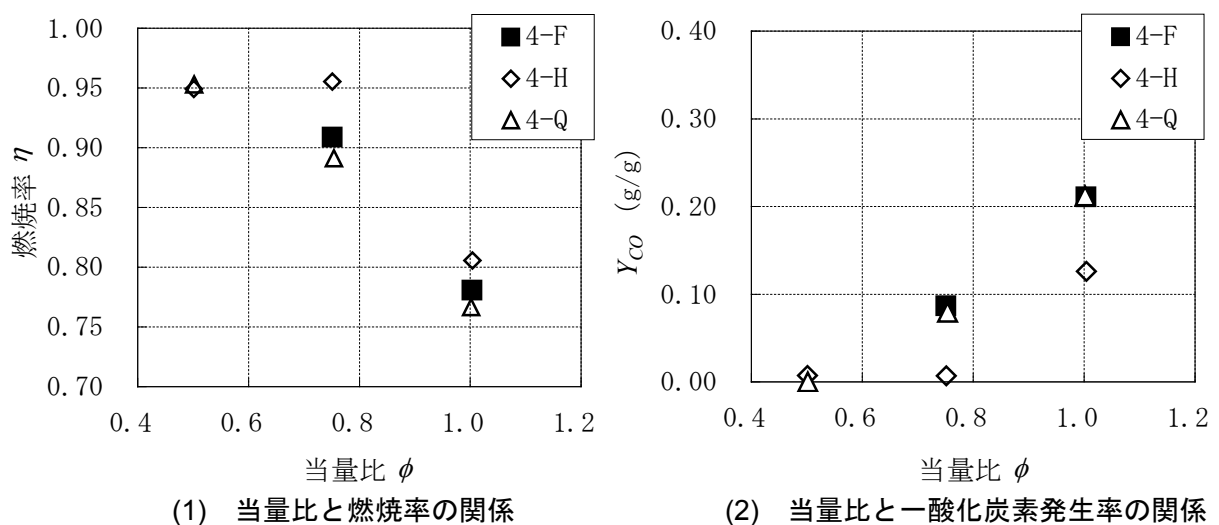


図 5-5 実験 4-F, 実験 4-H および実験 4-Q の比較

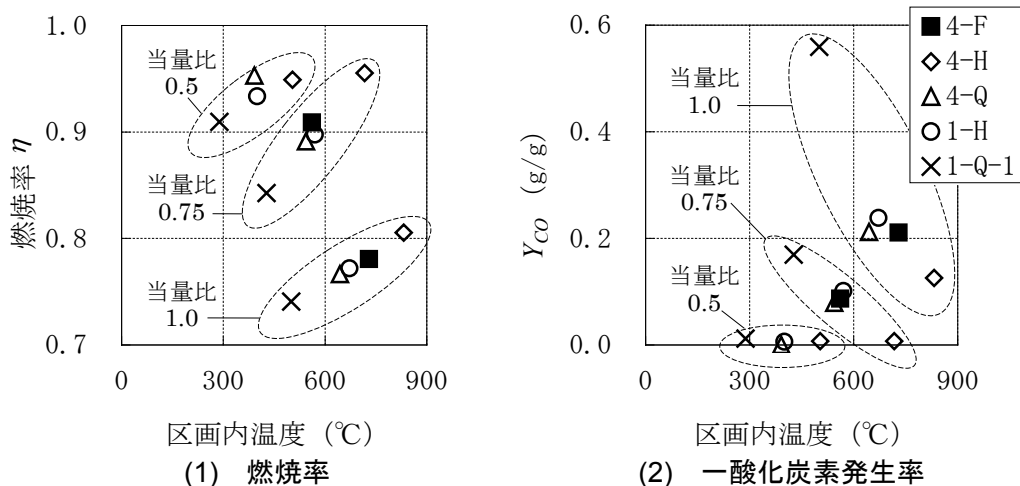


図 5-6 区画内温度と燃烧率・一酸化炭素発生率の関係（実験 1，実験 4）
（図 3-15（P.82）に実験 4-F の計測値を追加）

5.5.2. 実験 7-F と実験 7-Q の比較

実験 7-F と実験 7-Q の比較を図 5-7 に示す。燃烧率は、同図(1)のように当量比 0.75 と 1.0 のどちらにおいても良く一致した。2.3.3.5（P36）にて述べたように一酸化炭素発生率 Y_{CO} に 0.023g/g 未満の差があったとしても燃烧率に与える影響は小さい。同図(2)の通り当量比 0.75, 1.0 共に実験 7-F と実験 7-Q の Y_{CO} は、差が 0.023g/g 未満であり、一致したと言える。これらは燃烧率に関する相似則の妥当性を示す結果と言える。前述の通り、燃烧率は区画内温度の影響を受けると考えられるが、区画内温度が一致している実験 7-F と実験 7-Q の燃烧率がこのように良く一致したことは、原型と模型とで燃烧率を精度よく一致させるには区画内温度を式 2-3 のように一致させる必要があることを示している。

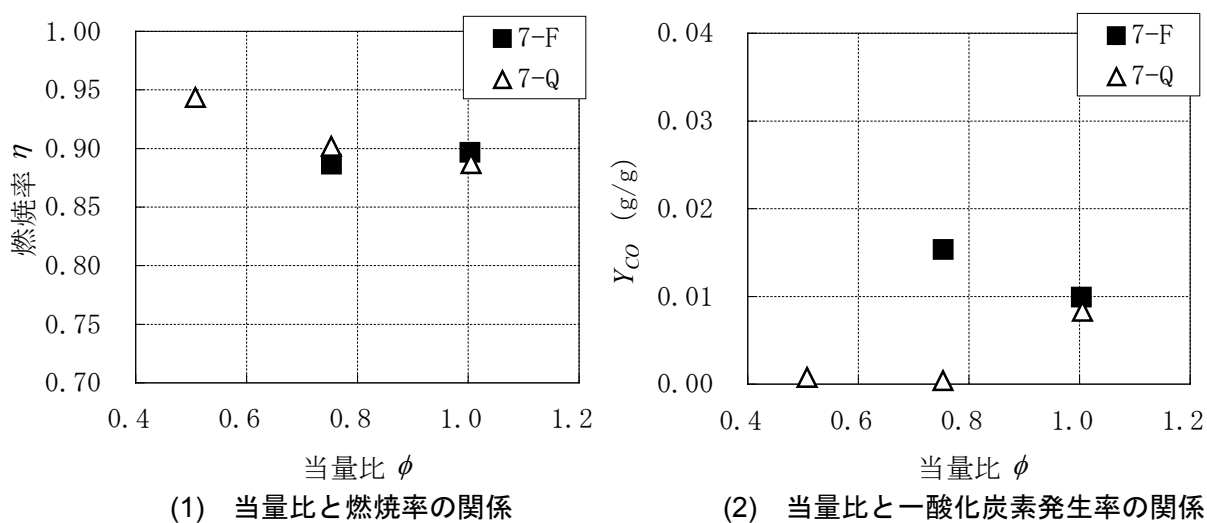


図 5-7 実験 7-F および実験 7-Q の比較

5.5.3. 相似則の妥当性

本章の全実験をまとめて、火災室への流入空気の平均滞留時間 t_R の影響を検討する。燃焼率・ Y_{CO} と t_R の関係を図 5-8 に示す。 $t_R \propto V/A_w\sqrt{H_w}$ とし、同図の横軸は原型区画 (4-F, 7-F) の $t_{R,F}$ に対する割合とした。5.2 (P.124) の通り、本相似則では t_R の影響は無視できると仮定した。もし当該影響が働くならば、 t_R の増加と共に燃焼率は増加、 Y_{CO} は減少するはずであるが、図 5-8 に示すように本実験の計測値にはそのような傾向は見られないことから、本実験の範囲では t_R の影響を無視したことによる支障はないと言える。

第 3 章では、燃焼率への区画内温度の影響と当該影響が当量比 0.75 で大きいことを確認した。そして、当該当量比で原型と模型の燃焼率の差が大きくなる傾向があるのは、当該影響によるものであると予想した。そこで本章で、原型と模型の区画内温度が同等になるように実験を行ったところ、実験 4-F と実験 4-Q、実験 7-F と実験 7-Q で当該当量比の燃焼率が原型と模型とで一致することを確認できた。この結果は、当量比 0.75 では区画内温

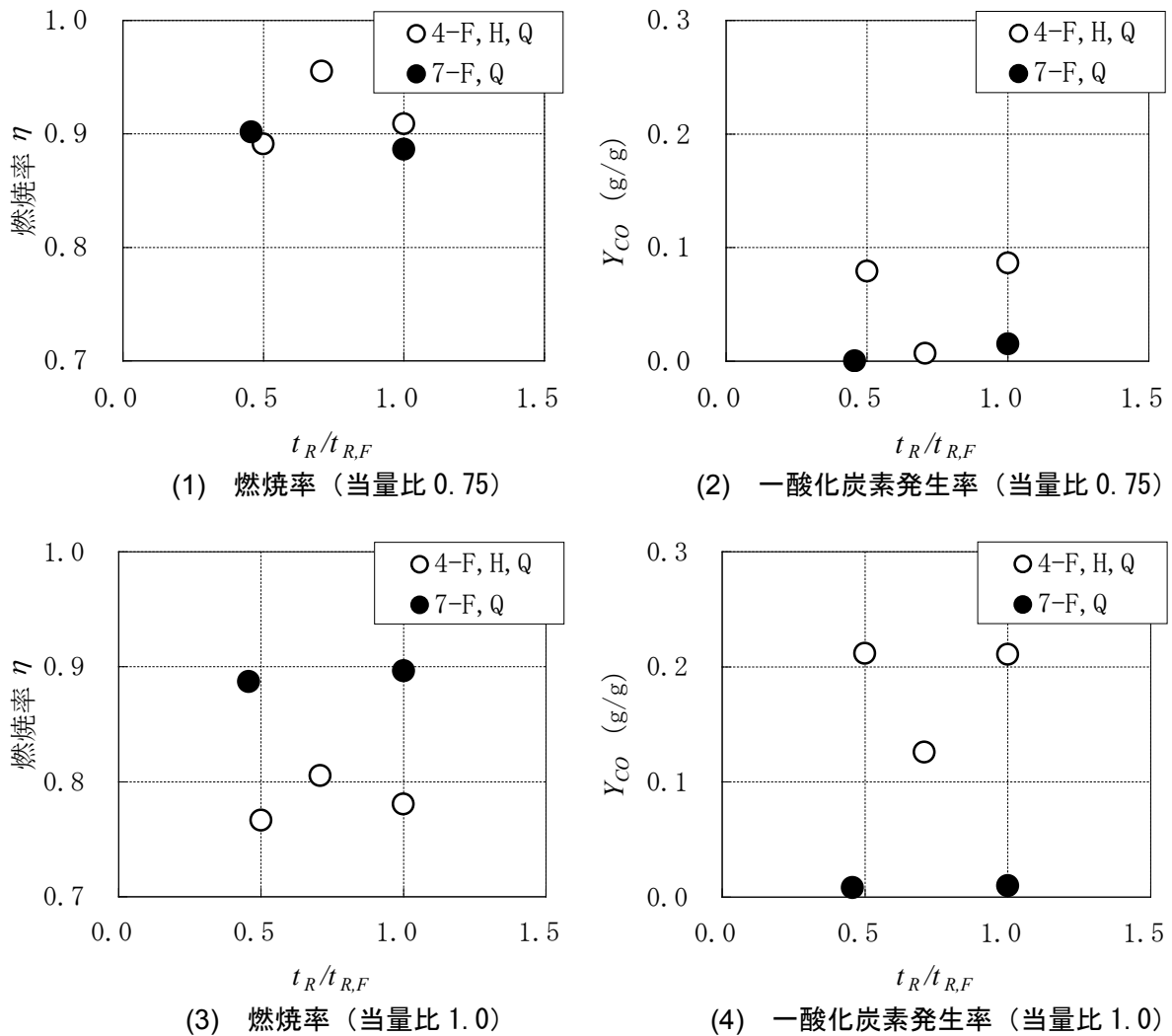


図 5-8 t_R と燃焼率・一酸化炭素発生率との関係

度の影響が強いが、原型と模型とで区画内温度を一致させることで燃焼率を一致させることが可能であることを示している。

以上のように、実規模の原型区画と縮小模型区画とを比較して、当量比 0.75 および 1.0 において燃焼率が良好に一致したこと、および、 t_R の影響が見られなかったことから、開口の小さい室における当量比 0.75 および 1.0 の実規模火災の燃焼率について、本実験条件（「模型の縮尺は 1/4 以上」「単一開口」「模型の開口寸法は横幅 20mm 以上・丈 129mm 以上」）において、本研究の相似則は妥当であると言える。

第 2 章、第 3 章および本章の結果を合わせて本相似則について考察する。本研究では、耐火性能検証で要求耐火性能が高くなりやすいコア周りの居室などを想定して小開口区画の燃焼率の相似則を提案し、その妥当性の検討を行った。相似則の妥当性は、当量比 0.5 については縮小規模の実験で、当量比 0.75 および 1.0 は実規模実験にて確認された。この結果から、本相似則は当量比 0.5~1.0 の実規模火災に対して成立すると考えられる。

耐火性能検証では当量比の最大値は通常 1.0 であり、小さい当量比では要求耐火性能は比較的高くなく燃焼率を考慮する必要が小さいことから、本研究では、耐火性能設計で実用するために十分な当量比の範囲で相似則の妥当性を確認したと言える。もし、当量比 1.0 を超える条件での耐火性能検証が必要な場合には、当量比が高いほど火災室内の燃焼率は低下すると考えてよいので、当量比 1.0 の燃焼率を用いれば安全側の検討結果が得られる。可能なら、本研究同様の実験で当量比 1.0 を超える条件での相似則の妥当性を確認するのが望ましい。ちなみに、本研究で開口噴出火災が発生する条件でも相似則が成立し、当量比 1.0 を超えることで相似則が成立しない理由が今のところないことから、当量比 1.0 を超える条件でも相似則は成立すると予想される。

火災室形状については、耐火性能検証では、本相似則で対象としている小開口区画の火災の有効開口因子は $A_r\sqrt{H_r}/70$ とみなしている¹⁰⁾。本研究ではこの想定に合致した実験条件で相似則の妥当性を確認している。また、火災室形状の違いは燃焼率に影響するがその本質的原因は空気と可燃ガスの混合などの気流性状と考えられることから、第 3 章では気流性状が異なるように開口条件や火源配置を変え、本報でも開口形状を変えた条件で相似則の妥当性を確認した。従って、堅穴やトンネル状の空間など本実験との違いが極端な場合を除き、小開口区画の火災を対象として、火災室形状が本実験と異なっても本相似則は成立すると考えてよい。

一方、本相似則の検討のために行った実験（実験 1~実験 7）ではいずれも開口を単一としたが、複数開口の場合、開口配置によっては火災性状が本実験と大きく異なる可能性があり注意を要する。また、模型が過度に小さいと、気体運動への粘性の影響が顕著になる可能性^{2),9)}や、原型と模型とで t_R の差が大きくなりスケール効果として働く可能性があるため、模型の縮尺や開口寸法が本実験より小さい場合にも注意を要する。

これらの場合や竪穴やトンネル状の空間など本実験との違いが極端な場合については、縮尺の違う複数模型の比較などにより妥当性を確認した上で本相似則を適用すべきである。また、そのような実験結果の蓄積により本相似則の適用範囲が広がることが望まれる。

なお、耐火性能検証などでの区画内温度予測で燃焼率を考慮する場合に、検討対象の室で予想される火災より燃焼率を低く設定してしまうと、区画内温度がその分低めに算定され、耐火部材への本来必要とされる要求耐火性能が確保されない恐れがある。これへの対策に燃焼率への区画内温度の影響が利用できる。耐火性能検証などで要求耐火性能が高いため燃焼率を考慮した検討が必要になるのは、当量比が比較的高い場合であり、当量比0.75~1.0の範囲で概ね包含されると考えられる。これらの当量比については、本研究で区画内温度が高くなると燃焼率も高くなる関係を確認していることから、模型実験で燃焼率を推定する際に、検討対象室で予想される温度より模型の区画内温度を高くした状態で計測することによって、安全側の評価を与える燃焼率が得られると考えられる。もし、当量比が低い火災を対象にするのであれば、幾つかの区画内温度で燃焼率を計測し、その中の最大値を用いれば良い。

5.6. まとめ

室容積に対して開口の小さい区画における盛期火災の燃焼率に関する相似則の妥当性について、第2章・第3章では縮小規模かつ縮尺 1/2 で検討した。本章では、実規模 (ISO9705 ルームコーナー試験装置と同規模) の区画火災実験と、これと幾何学的形状が相似で縮尺 1/2 および 1/4 の縮小模型実験とを比較し以下の結果を得た。

- ① 原型区画の区画内温度を 2 つの縮小模型区画の中間にしたところ、当量比 0.75 および当量比 1.0 の燃焼率について、原型区画は 2 つの縮小模型区画の中間の値となった。
- ② 原型区画と縮小模型区画の区画内温度を一致させることにより、原型区画と縮小模型区画の区画の燃焼率は当量比 0.75 および当量比 1.0 において良く一致した。
- ③ 第2章・第3章の実験では、燃焼率への区画内温度の影響と当量比 0.75 で当該影響が大きいことを確認した。また、当該当量比では相似模型間の燃焼率の差が大きかった。そこで本章では、原型と模型の区画内温度が同等になるように実験を行い、①②の結果を得た。このことから、当量比 0.75 では区画内温度の燃焼率への影響が強いが、原型と模型とで区画内温度を一致させることで燃焼率を一致させることが可能であることを確認した。
- ④ 火災室への流入空気の平均滞留時間による燃焼率・一酸化炭素発生率への影響は見られなかった。

以上の結果に基づき、開口の小さい室における当量比 0.75 および 1.0 の実規模火災の燃焼率について、「模型の縮尺は 1/4 以上」「単一開口」「模型の開口寸法は横幅 20mm 以上・丈 129mm 以上」の条件における、本研究の相似則の妥当性を確認した。

第2章および第3章にて当量比 0.5 で本相似則の妥当性を確認できていること、および、本結果より、本相似則は開口の小さい室における当量比 0.5~1.0 の実規模火災に対して成立すると考えられる。

また、本実験と幾何学的形状が異なる場合も相似則は成立すると考えられる。ただし、複数開口、模型が過度に小さい場合、区画形状が本実験と極端に違う場合には、実験等による妥当性確認が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Heskestad, G. : Physical Modeling of Fire, J. Fire and Flammability, Vlo.6, pp.253-273, 1975.7.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 江守一郎 : 模型実験の理論と応用 第二版, 技報堂出版, 1985.7.
- 6) 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.
- 7) Kunio Kawagoe : Fire Behavior in Rooms, Report of the Building Research Institute, No.27, The Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan, pp.1-73, 1958.9.
- 8) 大宮喜文, 佐藤雅史, 田中哮義, 若松孝旺 : 区画内における可燃物の燃焼速度と噴出火炎の発生限界, 日本建築学会構造系論文集, 第 469 号, pp.149-158, 1995.3.
- 9) 江守一郎, 齊藤孝三 : 火災における相似模型 (第 1 報, 定在火炎に関する相似則), 日本機械学会論文集 (B編), 51巻 466号, pp.1892-1898, 1985.6.
- 10) 平成 12 年度建設省告示 1433 号「耐火性能検証に関する算出方法等を定める件」

第6章 結論

第6章 結論

6.1. 研究成果の総括

建築物内の火災では、壁・床・天井などで囲われているため、燃焼に消費される空気の流入が窓などの開口部に限定される。そのため、開口が少なく空気流入量が少ないと可燃物から発生した可燃性ガスが完全には燃焼できず、燃焼率が低下することがある。燃焼率が低下すると、火災室内の可燃物が完全燃焼した場合より区画内温度は低下し、有害物質を含む未燃ガスが火災室外に流出する。燃焼率は、このように火災の物的・人的被害の要因である高温と有毒ガスの発生に密接に関係するなど、火災安全の広範に関係する基礎的指標であるが、定量的な予測手法は開発されていなかった。

そのため例えば、平成12年の建築基準法の耐火建築物性能規定化により、主要構造部の耐火性能設計が可能となったが、その際の耐火性能検証においては燃焼率の低下を無視、つまり完全燃焼を仮定するのが一般的である。燃焼率の定量的な推定が可能になれば、より合理的な検討が可能となり、その結果、性能設計により得られるコストメリットが大きくなるだけでなく、性能設計自体の機会が増えて火災安全技術の発達が促されることも期待される。

他にも、隣棟・上階延焼に関して重要な開口噴出火炎の適切な評価には、燃料となる未燃ガス流出量の設定が必要であり、それには火災室内の燃焼率の推定が不可欠である。更に、前述の通り、有毒ガスによる人的被害に関係することからも燃焼率の定量的な推定手法の開発が望まれる。

火災安全上の課題を検討する手段として小規模の実験は便利である反面、スケール効果を受ける可能性があるため、実現象を再現できるとは限らない。燃焼率が火災安全に関して基礎的な指標であることを考えると、小規模実験で得られた燃焼率が実規模でどのようになるのか推定できれば、より効率的な検討が可能になる他に、これまでに公表されている沢山の小規模実験の結果をより効果的に活用することも可能になるなど、火災安全工学の発展への貢献も期待できる。

このような背景のもと、本論文では、燃焼率が低下しやすい開口の小さい区画（小開口区画）の盛期火災を対象として、燃焼率に関する相似則の確立と模型実験手法の開発に取り組んだ。

燃焼率に関しては、当量比・空気過剰率が支配的に影響することなどが明らかであるが、既往研究^{1),2),3),4),5)}の燃焼率には当量比・空気過剰率が同じ条件であってもばらつきが存在する。燃焼率を定量的に推定できるようにするためには、このばらつきに結果を左右されない手法を考える必要があった。

幾つかの既往実験^{2),3),4),5)}を概観したところ、ばらつきの原因として、区画の幾何学的形

状の違いが考えられた。また、区画火災の相似則についての既往研究^{6),7),8)}では、幾何学的に相似で大きさの違う区画模型で燃焼率が一致していたことを示唆する結果が得られていた。これらのことから、燃焼率を知りたい区画火災に対して幾何学的に相似な模型を用いた火災実験が燃焼率の定量的な推定手法になると本研究では考えた。

そこでまず、フルード数の保存などから導かれた既往の相似則^{6),8)}を拡張して、小開口区画における火災（原型）の燃焼率と縮小実験（模型）の燃焼率の関係、すなわち燃焼率に関する相似則を導いた。次に縮小規模の実験により、「開口形状、火源位置および開口因子といった区画の幾何学的形状の違いによって燃焼率が変化する」という当初の予想が正しいことを確認すると共に、さまざまな区画形状に対して本研究で提案する相似則が成立することを確認した。また、天井高さを変えた区画模型実験により、天井高さの違いが換気量や燃焼率に影響することを明らかにした。区画形状と燃焼率との関係を示すこれらの実験結果から燃焼率に関する模型実験に必要な要件や緩和条件も示した。最後に、実規模実験およびそれと幾何学的に相似な縮小模型実験を実施・比較し、実規模火災に対して本研究の相似則が成立することを確認した。

以降に、本研究の検討内容と成果を章別に述べる。また、本研究によって明らかになった相似則の特徴についてのまとめを示す。

6.1.1. 各章の検討内容と成果

6.1.1.1. 第2章「燃焼率に関する相似則の検討」について

第2章では、燃焼速度、区画内温度、およびガス濃度に関する既往の相似則^{6),8)}を拡張して小開口区画における盛期火災の燃焼率に関する相似則を考えた。火災区画への流入空気平均滞留時間 t_R による燃焼率への影響^{9),10)}について、小開口区画の火災では流入空気平均滞留時間が十分長いために当該影響が顕れないと予想されること等を理由に、本相似則では無視できると仮定した。この緩和の影響は、スケール効果として顕れる可能性があり、第5章の実規模実験による検討に至るまで、本相似則の妥当性検証上の留意点となる。

当該相似則の妥当性を判断するために、幾何学的に相似で縮尺の異なる2つの模型—中模型（1,200mm×1,800mm×1,200mm）と小模型（600mm×900mm×600mm）—で燃焼率を計測した。区画形状は1種類のみである。その結果、模型間の燃焼率は当量比0.5および当量比1.0においてよく一致し、当該実験の条件では当量比0.5および当量比1.0で相似則は妥当であると判断できた。一方、当量比0.75では、模型間の燃焼率の差は比較的大きく、その原因として区画内温度が影響した可能性が考えられた。

計測した燃焼率に基づき、燃焼率を考慮する場合としない場合との2通りで区画内温度を一層ゾーンモデルで計算し、燃焼率が与える影響を検討した。燃焼率の低下を無視した場合には、計算値は実測値より大きくなった。一方、実験で計測された燃焼率を考慮した場合には、計算値は実測値と良く一致した。この結果から、小開口区画では、燃焼率を考慮することで区画内温度を精度良く予測できることを確認した。

以上のように、第 2 章では燃焼率に関する相似則を提案し、とりかかりの検討として、一種類の区画形状について当該相似則の妥当性を確認するとともに、燃焼率の考慮が区画内温度予測に関して意味があることを確認した。

6.1.1.2. 第 3 章「可燃物配置・開口条件の燃焼率への影響の検討」について

前章で、1 条件限定ではあるが、燃焼率に関する相似則が成立することを確認した。他の条件に対して汎用的に適用できることを確認するには、区画の幾何学的形状を変えた実験が必要である。また、区画形状が燃焼率に影響するという当初の予想も確認したい。

そこで、本章では、上記 2 点を確認すること、および、前章で示唆された区画内温度の影響の把握を目的として、開口形状や火源位置が異なる 5 つの条件について、幾何学的形状が相似で大きさが異なる 2 つの区画模型（中模型と小模型、模型間の縮尺 $L'/L=1/2$ ）を原型と模型として、燃焼率等を計測・比較した。なお、これらの実験条件は、区画形状による燃焼率の変化の本質的要因であると予想される流入空気量の違いや既燃ガスとの混合による流入空気の濃度低下が実験条件毎に異なるように配慮した。また、前章の実験から開口因子を変えることで流入空気の平均滞留時間 t_R を変えて、 t_R が燃焼率に与える影響を前章と比較できるようにした。実験の結果、以下のことが判った。

開口形状を変えた実験では、開口丈の高い順に、スリット形（床から天井まで達する）、長方形、および正方形の 3 種類の開口で燃焼率を計測した。その結果、燃焼率への区画内温度の影響が大きかったと考えられる実験を除き、当量比 0.5, 0.75, 1.0 において開口丈の増加に伴う燃焼率の上昇が確認された。この原因として、開口丈の変化に起因した区画への流入空気量の変化や既燃ガスの巻き込みによる酸素濃度の変化が考えられる。

火源位置を区画中央、開口近傍および区画奥とした 3 条件で実験した。当量比 0.5 では燃焼率への火源位置の影響は見られなかった。一方、当量比 0.75 および当量比 1.0 では火源が開口近傍に存在する場合に燃焼率は大きく低下した、火源が開口から離れると燃焼率への火源位置の影響は小さくなった。開口近傍に火源を設置した場合、当量比 1.0 では噴出火炎の影響で高めに計測されたはずであるのに、本章の実験中で最低の値（中・小模型それぞれ 0.73, 0.72）となった。これらの結果から、火源が開口に近づくことによる燃焼率低下への影響は大きいこと、および、火源位置が開口からある程度離れていれば、火源位置が燃焼率に与える影響が小さくなると考えられる。これらより、燃焼率に関する縮小模型実験では、燃焼率の最低値を再現する必要がなければ、火源は開口から離して設置すれば良いと考えられる。実際の可燃物配置を一意的に予測するのは難しいので、このように火源配置を緩和できることは実験するうえで好都合である。

以上の実験と前章の実験の燃焼率を区画内温度で整理し、区画内温度が燃焼率に影響すること、および、当該影響は当量比 0.75 で大きくなることを確認した。

以上の実験の当量比 1.0 では、区画形状の違いにより最大 0.2 の変化が燃焼率に現れた。これに対し、区画形状が同じであれば、幾何学的に相似な中・小模型間の差は最大で 0.04

と十分小さくなった。模型間でよく一致したと言えるものであった。また、当量比 0.5 でも中・小模型間で燃焼率は良く一致した（差は最大 0.03）。燃焼率が区画内温度の影響を受けていたと判断されることを考慮すると、前述の中・小模型間での燃焼率の一致はより高く評価できる。さらに、前章の実験と比較したところ、 t_R と燃焼率との相関性は確認されず、本研究の相似則で t_R を無視した影響は確認されなかった。これらの結果から、本章の実験の範囲内（再現対象の火災規模が中模型程度まで、かつ模型縮尺 1/2 以上）かつ当量比 0.5 または当量比 1.0 で、本研究の相似則は妥当であると判断した。前章では一つの区画形状に限定して同様の結論を得ていたが、本章では区画形状が異なっても成立することを示した。なお、本章においても、当量比 0.75 では、模型間での燃焼率の差が比較的大きくなったが、その原因は区画内温度の影響が当該当量比で大きいためであり、区画内温度を原型と模型で一致させることで燃焼率も一致すると予想した。その検討は第 5 章にて行うこととした。

6.1.1.3. 第 4 章「天井高さの換気量および燃焼率への影響の検討」について

第 4 章は、燃焼率と密接な関係にある換気量についての検討である。

火炎の部分に働く浮力（以降「火炎浮力」）が区画火災の換気量に影響する可能性があると考えた。そして、天井が高いほど、火炎の身長が高くなり、火炎浮力の仕事が増える結果、換気量が増えると予想した。当然、換気量が増えれば燃焼率も高くなるはずである。

また、室上部の煙層内での燃焼による燃焼生成物について行われた Beyler^{10,11)}をはじめとする幾つもの研究や、長谷見ら¹²⁾の天井火炎の実験結果から考えると、盛期火災でも天井付近で燃焼率が低下しやすいと予想される。そして、天井が低くなるほど（それに伴って、天井付近に流入する可燃ガス量が増えるほど）、燃焼率は低下すると予想される。

天井高さが燃焼率に影響するか否かは、本研究にとっては、模型実験で天井高さを厳密に設定する必要があるのか、それとも、何らかの緩和を考えることができるのかに係わる。また、天井高さが換気量に影響するならば、本研究だけでなく火災安全工学の他のテーマにも重要と思われる。当該現象の把握には、天井高さを変数とした実験が有効と考えられるが、そのような実験報告は見当たらない。

そこで本章では、火炎浮力の仕事が増える換気量に与える影響の有無の確認に重点を置きつつ、天井高さが燃焼率に与える影響も確認することを目的として、縮小規模の区画模型を用いて、天井高さの異なる条件での換気量・燃焼率を計測した。

実験に用いた区画模型は、間口 170mm・奥行 1400mm で、火炎浮力の影響が顕れやすいように配慮して、間口を狭くした。天井高さを変えて実験したところ、天井高さの増加に伴って換気量および燃焼率が増加することが確認された。

この換気量の変化が火炎浮力の仕事によるものか確認することを目的として、火炎浮力を考慮した換気量の計算式を導いた。火炎浮力の仕事を検討した計算値は、天井高さの変化に伴った換気量の増減が実験値と良く一致した。一方、火炎浮力を無視した計算値では一致しなかった。これらから、換気量の算定においてこれまで考慮されることのなかった

火炎部分の浮力が換気量に影響しうることを確認した。

以上の結果を考慮して、燃焼率に関する模型実験方法について以下の2点が考えられる。

- ・ 天井高さの違いが換気量および燃焼率に影響することから、模型実験で燃焼率を精度よく推定するには、模型区画の天井高さは検討対象となる火災室を基準として模型縮尺に丁度合うように計画するのが望ましい。
- ・ 区画形状が極端に変化しない範囲で天井高さが増えるときの燃焼率の上・下限値を模型実験で把握したい場合には、開口上部の垂れ壁の丈および開口寸法が変わらない（つまり、天井高さと同じだけ腰壁の丈が増える）のを前提として、上限値であれば天井高さを最も高い条件に、下限値であれば最も低い条件に合わせて模型区画を計画すれば良いと予想される。

6.1.1.4. 第5章「実規模実験による相似則の検証」について

ここまで、幾何学的に相似な模型実験によって燃焼率を定量的に推定できるようにするために、燃焼率に関する相似則を考え、縮小規模の原型とそれに対する縮尺が1/2の模型を用いて、当量比0.5および当量比1.0程度の小開口区画火災に対して当該相似則の妥当性を確認した。一方、当量比0.75では幾何学的に相似な模型間の燃焼率に比較的大きな差が見られた。そして、区画内温度の影響を原因と考え、模型間で区画内温度を一致させれば燃焼率も一致すると予想した。

ところで、模型縮尺には実験施設の規模・経済的理由により制限があるのが普通であるが、縮尺が過度に小さいと、当該相似則を求める際に無視した流入空気の平均滞留時間 t_R の影響^{9,10}が顕れる恐れがある。前章まででは縮尺1/2までの相似則の妥当性が確認されているが、以上のような制限を考えると、①なるべく小さな縮尺までの確認が望まれる。また、②実規模と縮小規模とで支配的に働く物理法則が異なる可能性¹³があるため、実規模火災にも当該相似則が当てはまること検証する必要がある。①を検討するには、原型を大きくするか模型を小さくすればよいが、②には実規模実験が必須なので、実規模実験を原型として縮小模型と比較するのが効率的である。

そこで本章では、これまでの実験で相似則の成否を判断できなかった当量比0.75を含めて①②の確認を行うことを目的として、実規模実験としてISO9705ルームコーナー試験装置と同じ大きさの区画（原型区画）を用いた実験を行い、原型区画に対する縮尺がそれぞれ1/2・1/4となる中模型・小模型の結果と比較した。実験条件間で燃焼性状がなるべく異なるほうが相似則の妥当性確認には適切である。そこで実験条件は、開口因子を一定として、燃焼率が低下しやすいように開口丈を低くした条件と、逆に燃焼率が低下しにくいように開口丈を高くした条件の2通りとした。前述の通り当量比0.75を検討範囲に含めること、および、耐火性能設計での燃焼率に関する問題を解決するには当量比1.0における燃焼率を予測可能にすることが重要であることから、実験時の当量比は0.75と1.0とした。

開口丈を低くした条件では、第3章で実施した中模型と小模型の結果と原型区画を比較

した。原型区画の温度を中・小模型の中間としたところ、当量比 0.75 および当量比 1.0 の燃焼率について原型模型は中・小模型の間に収まった。また、開口丈を高くした条件では、原型区画と小模型とで温度が一致するように実験したところ、当量比 0.75 および当量比 1.0 の燃焼率も良く一致した。この結果から、区画内温度の燃焼率への影響が強い当量比 0.75 においても、原型と模型とで区画内温度を一致させることで燃焼率を一致させることが可能であることを確認した。また、 t_R による影響の有無を確認するため、燃焼率および一酸化炭素発生率を t_R に対して整理した。その結果には相関性は見られず、本実験については t_R による影響は確認されなかった。

以上のように、当量比 0.75 および当量比 1.0 で、実規模実験と縮小実験の燃焼率が一致したこと、および、 t_R による影響も見られなかったことから、開口の小さい室における当量比 0.75 および 1.0 の実規模火災の燃焼率について、「模型の縮尺は 1/4 以上」「単一開口」「模型の開口寸法は横幅 20mm 以上・丈 129mm 以上」の条件における、本研究の相似則の妥当性を確認した。

第 2 章、第 3 章および本章の結果を合わせると、本相似則の妥当性は、当量比 0.5 については小規模実験で、当量比 0.75 および 1.0 は実規模実験にて確認されたことから、本相似則は当量比 0.5~1.0 の実規模火災に対して成立すると考えられる。

6.1.2. 燃焼率に関する相似則の要点

本研究の相似則は、開口の小さい区画における盛期火災の燃焼率に関するものであり、燃焼速度、区画内温度、およびガス濃度に関する既往の相似則^{6,8)}を拡張して導かれたものである。本研究の相似則では、以下の条件を満たすことで原型と模型の燃焼率が一致する。

- 条件 1： 原型と模型とで幾何学的形状を相似にする
- 条件 2： 原型と模型とで燃料の種類は同じにする
- 条件 3： 模型の燃料供給量は、原型の燃料供給量に模型縮尺の 2.5 乗を掛けた値とする
- 条件 4： 原型と模型とで区画内温度を同じにする。

区画形状と燃焼率の関係について、本研究の実験結果から得られた知見を以下に示す。条件 1 により、基本的に原型と模型は幾何学的に相似でなければならないが、これらの知見は条件の緩和に役立つと思われる。ただし、区画形状が、煙突状やトンネル状など本実験と極端に異なる場合は適用外とする。

- ・火災室の開口が単一の場合、火源が開口に近いほど燃焼率が低下しやすく、開口から火源を離すと火源位置の燃焼率への影響は小さくなる。一般的に、実際の可燃物配置を一意的に予測するのは困難であるが、燃焼率の最低値を把握する必要がないのであれば、火源を開口から離して配置すればよい。
- ・開口因子が同じであっても、開口丈が大きいほど燃焼率が高くなる。ただし、当量比

1.0 については、開口丈がある程度大きければ燃焼率への当該影響が小さくなることが、実験結果から予想される。

- ・開口形状と開口上部の垂壁の大きさが変化しない場合、天井が高くなると燃焼率と換気量が増加する。天井高さがある範囲で変化するときの燃焼率の上・下限値を模型実験で把握する場合には、開口上部の垂壁の丈および開口寸法が変わらないことを前提として、上限値であれば天井高さを最も高い条件に、下限値であれば最も低い条件に合せて模型区画を計画すれば良いことが、実験結果から予想される。

実際の火災では様々な物質が燃料となる可能性がある。そのため、条件 2 で規定するように、模型実験で使用する燃料を検討対象の火災と厳密に同じにするのは必ずしも容易ではない。しかし、耐火性能設計に用いるために燃焼率を予測する場合については、以下のような緩和が考えられる。

- ・耐火性能設計での区画内温度予測などでは、安全側の検討結果を得る観点から、燃焼率は実火災と同じかそれ以上となるよう設定する必要がある。これを達成するには、模型実験の使用燃料として、実火災の燃料より燃焼率が高くなりやすいものを選びたい。建築火災での主燃料は固体であると考えられる。また、一般的に、気体燃料は固体・液体燃料より完全燃焼しやすい¹⁴⁾。以上のことから、耐火性能設計用の燃焼率を計測するには、模型実験の燃料を気体燃料にすればよいと言える。

条件 3 は、火源の燃焼速度を規定している。火災実験でよく行われるように、燃焼速度を開口因子 $A_w \sqrt{H_w}$ を基準にして $\dot{m}_b \propto A_w \sqrt{H_w}$ のように設定する場合、当該条件は成立する。

条件 4 では区画内温度を規定する。燃焼率への区画内温度の影響について、本研究の実験では以下のような知見が得られた。

- ・当量比 0.5 では燃焼率は区画内温度の上昇に対して、区画内温度 400°C 付近を頂とする山なりの変化をすると考えられる。また、当量比 0.75, 1.0 では、区画内温度が高いほど燃焼率が高くなる。この区画内温度の影響の程度は当量比 0.5, 0.75, 1.0 で比較すると当量比 0.75 で大きい。
- ・本研究の実験結果から、以下の値が区画内温度が 1°C 変化した場合の燃焼率の変化量の目安になると考えられる。
当量比 $\phi = 0.5 : 0.00025[1/^\circ\text{C}]$, $\phi = 0.75 : 0.00050[1/^\circ\text{C}]$, $\phi = 1.0 : 0.00021[1/^\circ\text{C}]$
- ・当量比 0.75 では、区画内温度の影響が大きく、原型と模型の燃焼率を一致させるには区画内温度の一致を要する。

前述のように、本相似則は、耐火性能検証で要求耐火性能が高くなりやすいコア周りの居室などの小開口区画の当量比 0.5～1.0 の実規模火災に対して成立すると考えられる。この当量比の範囲は耐火性能検証で本相似則を実用する上で十分である。もし、当量比 1.0 を超える条件での耐火性能検証が必要な場合には、当量比が高いほど火災室内の燃焼率は低下すると考えてよいので、当量比 1.0 の燃焼率を用いれば安全側の検討結果が得られる。

火災室形状については、竪穴やトンネル状の空間など本実験との違いが極端な場合を除き、小開口区画の火災を対象として、火災室形状が本実験と異なっても本相似則は成立すると考えてよい。

ただし、複数開口の場合、模型縮尺や開口寸法が本実験より小さい場合、または、空間形状が本実験と大きく異なる場合については、縮尺の違う複数模型の比較などによる妥当性確認をすべきである。

6.2. 今後の展望

本研究では、耐火性能検証で長時間耐火になって実務上の問題となりやすいコア周りの居室などの開口の小さい室における火災を対象として、燃焼率に関する相似則を導き、何学的に相似な模型実験によって燃焼率を定量的に推定できることを示した。

本研究では、耐火性能設計で実用するために十分といえる当量比 0.5~1.0 の範囲で相似則の妥当性を確認した。また、耐火性能検証における小開口の区画火災の想定に合致した実験条件で、相似則の妥当性を確認しており、小開口の区画火災に適用可能である。また、前項に記したように燃焼率への開口丈の影響、火源位置の影響、天井高さの影響を明らかにした。これらを考慮することにより模型実験の条件を緩和することが可能である。

本手法では、検討対象に対して幾何学的に相似な模型を使用することから、火災区画の形状が異なる度に基本的には実験が必要になる。しかし、研究・実務を通して実験結果を蓄積することで、耐火上問題となりやすい条件を備えた室についてはそれまでに得られた実験結果を参照することが可能となり、実験をせずとも対応できるようになるはずである。また、このような蓄積により火災区画の条件と燃焼率との関係についての理解が深まり、本相似則の緩和条件や適用範囲が拡大され、模型実験が容易になることが期待される。

本研究の成果により、燃焼率を考慮することで、従来、高めに計算されていた区画内温度を実際に近づけ、これらの室への高い耐火要求の緩和に貢献することが期待される。また、本論文では燃焼率でも特に火災区画内のものに注目したが、開口噴出火炎により区画外で燃焼が発生する条件についても、相似模型間の燃焼率は大変良く一致する実験結果が得られており、噴出火炎部分の燃焼率を推定する手法への発展も考えられる。

燃焼は火災現象の根本であるが、その実際の燃焼量や燃焼率はこれまで定量的に推定することができなかった。本研究は、今のところ適用条件が限定されるものの、実火災の燃焼率を縮小模型実験で推定できるようにしたものであり、燃焼率を考慮した耐火設計・火災安全対策への端緒を開いたと言って良いと思う。今後、本手法の適用範囲を広げるべく研究を深めたい。

参考文献

- 1) Tewarson, A. : Fully Developed Enclosure Fires of Wood Cribs, Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1555-1566, 1984.
- 2) 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp. 225-228, 2006.
- 3) 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, A-2, pp.227-230, 2008.
- 4) 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.
- 5) Gottuk, D.T. : Generation of Carbon Monoxide in Compartment Fires. National Institute of Standards and Technology, Report NBS-GCR-92-619, 1992.
- 6) Heskestad, G. : Physical Modeling of Fire, J. Fire and Flammability, Vlo.6, pp.253-273, 1975.7.
- 7) 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.
- 8) 斉藤孝三, 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 卷 407 号, pp.1348-1354, 1980.7.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Beyler, C.L. : Major Species Production by Diffusion Flames in a Two-layer Compartment Fire Environment, Fire Safety Journal, vol.10, pp.47-56, 1986.
- 12) 長谷見雄二, 吉田正志 : 天井面下に拡がる火炎の構造と熱伝達性状, 日本建築学会計画系論文集, 第 550 号, pp.1-6, 2001.12.
- 13) 江守一郎 : 模型実験の理論と応用 第二版, 技報堂出版, 1985.7.
- 14) 最新 燃料便覧, 燃料協会編, コロナ社, 1984.3.30.

記号一覧

記号一覧

A_a	: 下部開口面積[m ²]
A_i	: 動圧計測点を一つ含むように開口を分割してできる部分のうち 動圧計測点 i を含むものの面積[m ²]
A_r	: 床面積[m ²]
A_s	: 上部開口面積[m ²]
A_w	: 開口面積[m ²]
A_{wall}	: 室内側または室外側の周壁面積[m ²]
C_i	: 化学種 i の濃度[%]
E	: 単位酸素消費量当りの発熱量[kJ/mol]
E_{CO}	: CO が CO ₂ となる時の単位酸素消費量当りの発熱量[kJ/mol]
$F_{wall,o}$: 周壁から開口を見る形態係数 (= A_w/A_{wall}) [-]
\dot{G}_i	: 燃焼生成物 i の発生量[mol/s]
H_d	: 上部開口中心から下部開口中心までの距離[m]
H_r	: 室高さ[m]
H_w	: 開口の丈[m]
L	: 長さ[m]
L_r	: 平均光路長[m]
M_i	: 化学種 i の分子量[-]
\dot{Q}_{eff}	: 実効発熱速度[kW]
\dot{Q}_{max}	: 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[kW]
\dot{Q}_{nom}	: 公称発熱速度[kW]
\dot{Q}_o	: 区画内ガスから外部への放射による伝熱量[kW]
\dot{Q}_{wall}	: 区画内ガスから周壁への伝熱量[kW]
$\dot{Q}_{wall,o}$: 周壁から外部への放射伝熱量[kW]
S	: 面積[m ²]
S_{in}	: 中性帯高さより下の開口面積[m ²]
S_{out}	: 中性帯高さより上の開口面積[m ²]
S_r	: 区画内ガスの表面積[m ²]
T	: 温度[K]
$T_{b,i}$: 動圧計測点 i における気体の温度[K]
T_f	: 火炎の温度[K]
T_o	: 外気温度[K]
T_r	: 区画内ガスの温度 (第4章以外), 火炎を除く区画内ガスの温度 (第4章) [K]
T_{wall}	: 周壁の室内側表面の温度[K]

V	: 室容積[m ³]
W_w	: 開口の幅[m]
X_i	: 排煙ダクト内を通過するガス中の化学種 i の濃度分析値[-]
X_i^o	: 計測系に流入する空気中の化学種 i の濃度分析値[-]
Y_i	: 燃料消費量に対する化学種 i の発生率[g/g]
Z_n	: 開口下端からの中性帯高さ[m]
c_p	: 空気の定圧比熱 (=1.009 kJ/kg/K)
g	: 重力加速度 (=9.8 m/s ²)
k_r	: 吸収係数[m ⁻¹]
m_b	: 燃料の質量[kg]
m_o	: 空気の質量[kg]
\dot{m}_b	: 火源の燃焼速度, 燃料供給量[kg/s]
\dot{m}_e	: 排煙ダクト内部のガス流量[g/s]
\dot{m}_i	: 動圧計測点 i 周囲の面積 A_i を通る気体の流入量または流出量[kg/s]
\dot{m}_{in}	: 外部から室に流入する空気量[kg/s]
\dot{m}_o	: 計測系に流入する空気量[g/s]
\dot{m}_{out}	: 室から外部に流出するガス量[kg/s]
\dot{n}_i^o	: 計測系への化学種 i の流入量[mol/s]
\dot{n}_i	: 計測系外への化学種 i の流出量[mol/s]
t	: 時間[s]
t_R	: 区画内へ流入した空気の平均滞留時間[s]
t_M	: 空気と燃料との混合に必要な時間[s]
v_i	: 動圧計測点 i における気体の速度[m/s]
v_{in}	: 開口の換気流入部での気体の速度[m/s]
v_{out}	: 開口の換気流出部での気体の速度[m/s]
w_f	: 単位重量の気体に対して働く火炎部分の浮力・重力の仕事[J]
$w_{f,in}$: w_f のうちで換気の流入へ関与する分[J]
$w_{f,out}$: w_f のうちで換気の流出へ関与する分[J]
z	: 開口下端からの鉛直距離[m]
$\Delta \dot{G}_{CO}$: 一酸化炭素発量の差・変化量[mol/s]
ΔH_b	: 完全燃焼時の単位重量当たりの燃料の発熱量[kJ/kg]
ΔH_i	: 燃焼生成物 i の生成熱[kJ/mol]
ΔH_o	: 単位重量の空気が完全燃焼で消費された場合の発熱量[kJ/mol]
ΔP	: 火災室内外のガス密度差による開口部差圧, 外部→内部の方向を正とする [Pa]

- $\Delta P_{b,i}$: 動圧計測点 i における動圧[Pa]
 $\Delta \dot{Q}_{eff}$: 実効発熱速度の差・変化量[kW]
 ΔY_{CO} : “燃料消費量に対する一酸化炭素の発生率”の差・変化量[g/g]
 $\Delta \rho$: 区画内外の密度差[kg/m³]
 $\Delta \eta$: 燃焼率の差・変化量[-]
- α : 開口流量係数 (=0.65) [-]
 α_{ce} : Chemical expansion factor[-]
 α_{wall} : 周壁表面の対流熱伝達率[kW/m²/K]
 β : 計測系に流入した酸素が消費される割合[-]
 γ_b : 火源の量論空燃比 (プロパンは 15.6)
 ε_r : 区画内ガスの放射率
 ε_w : 周壁の放射率
 η : 燃焼率[-]
 θ_{ave} : 区画内ガスの温度の平均値[°C]
 θ_f : 火炎の温度[°C]
 θ_r : 火炎を除く区画内ガスの温度[°C]
 λ : 空気過剰率[-]
 ξ : 燃空比[-]
 ξ_{stoich} : 量論燃空比 (化学量論的混合状態における燃空比)
 ρ : ガス密度[kg/m³]
 ρ_{ave} : 区画内ガスの密度の平均値[kg/m³]
 $\rho_{b,i}$: 動圧計測点 i における気体の密度[kg/m³]
 ρ_f : 火炎の密度[kg/m³]
 ρ_o : 外気の密度[kg/m³]
 ρ_r : 区画内ガスの密度 (第 4 章以外), 火炎を除く区画内ガスの密度 (第 4 章) [kg/m³]
 σ : ステファン・ボルツマン定数 (= 5.67 × 10⁻¹¹ kW/m²/K⁴)
 ϕ : 当量比[-]

謝辞および本論文に関わる研究業績

謝辞

本論文は、私が大成建設株式会社 技術センター 建築技術研究所 防災研究室 火災チームにて2009年から2015年に実施した研究内容をまとめたものです。また、第2章から第4章の実験は早稲田大学との共同研究として実施したものです。

本研究の実施並びに本論文をまとめるにあたり、早稲田大学理工学術院 長谷見雄二教授にご指導を賜りました。また、私の大学時代から現在に至るまでの19年間、研究方法や研究者の姿勢についての丁寧な教えと、研究や進路で悩みを抱えた際には暖かい言葉により、今日まで導いて頂きました。ここに深く感謝の意を表し、謹んで御礼申し上げます。

本論文の審査にあたり、早稲田大学理工学術院建築学科 田辺新一教授、高口洋人教授、東京理科大学理工学部建築学科 大宮喜文教授には、研究内容をより深化させる多くの貴重なご意見を賜りました。心より感謝申し上げます。

本研究を継続して遂行する機会を与えて頂きました大成建設（株）技術センターの皆様には謝意を示します。技術センター建築研究所所長 長島一郎氏には、本研究の実施に暖かい応援を賜り、その結果、第5章の実大実験の実施に至ることができました。防災研究室室長 坂本成弘氏には、本研究の円滑な実施へのご配慮とご助言を頂きました。火災チームリーダー 道越真太郎氏には、本研究の初期段階から防耐火実務の観点からのご助言を頂きました。また、火災チームの馬場重彰氏から、論文執筆中の業務遂行へのご配慮とご助力を頂いたことを始めとして、同チームの皆様のご理解とご協力により、本論文の執筆に集中する時間を頂くことができました。振動制御チームリーダーで大学の先輩でもある 欄木龍大氏には、実験実施当時から励ましの言葉を頂くと共に、論文執筆中も常に気に掛けて頂き、論文審査に関しても貴重なアドバイスを頂きました。皆様のご支援に御礼申し上げます。

本研究の実験実施にあたり、長谷見研究室の多くの仲間からご支援を頂きました。国立研究開発法人 建築研究所 鍵屋浩司氏には、第5章の実規模実験を実施する際に計測方法に関して貴重なご助言を頂きました。独立行政法人 森林総合研究所 上川大輔氏には、同氏が早稲田大学専任助手であったときに第4章の実験や本研究に関する一連の実験にご助力頂きました。火炎が盛期火災の換気量に影響するという同章の核となる着想は、実験時の同氏のご発言に端を発します。当時早稲田大学大学院理工学研究科及び理工学部建築学科 間瀬亮平氏、佐藤靖浩氏、山田香氏、中嶋慶朗氏とは、本研究に関する一連の実験を共同で行い、多大なるご協力を頂きました。皆様に感謝の意を表します。

最後に、大学院まで進学させてくれた父 憲夫、母 正子、そして、論文執筆に際して献身的に支えてくれた妻 仁美と良い子でがまんしてくれた息子 恒晴に心から感謝致します。

2017年2月 中村 正寿

本論文に関わる研究業績

日本建築学会論文集

- (1) 中村正寿・道越真太郎・長谷見雄二：小開口区画における火災の燃焼率に関する相似則の検証，日本建築学会環境系論文集，No.80，Vol.714，pp.621-627，2015.8.
- (2) 中村正寿・道越真太郎・上川大輔・長谷見雄二：火炎の浮力が盛期火災の換気量に及ぼす影響に関する基礎的検討，日本建築学会環境系論文集，No.79，Vol.705，pp.919-925，2014.11.
- (3) 中村正寿・道越真太郎・長谷見雄二：小開口区画における火災の燃焼率に関する実験研究，日本建築学会環境系論文集，No.78，Vol.690，pp.613-622，2013.8.

日本建築学会学術講演梗概集

- (4) 中村正寿・道越真太郎・坂本成弘・長谷見雄二：開口の少ない区画火災の燃焼率低下と火災室温度への影響 その2 開口形状と火源位置を変えた縮小模型実験，日本建築学会学術講演梗概集，A-2，pp.291-292，2011.8.
- (5) 中村正寿・道越真太郎・坂本成弘・長谷見雄二：開口の少ない区画火災の燃焼率低下と火災室温度への影響，日本建築学会学術講演梗概集，A-2，pp.211-212，2010.9.
- (6) 中村正寿・上川大輔・長谷見雄二：区画火災の換気量に対する火炎の浮力の影響 その2 幅の狭い区画模型を用いた火炎浮力の影響の把握，日本建築学会学術講演梗概集，A-2，pp.139-140，2009.8
- (7) 中村正寿・上川大輔・長谷見雄二：区画火災の換気量に対する火炎の浮力の影響，日本建築学会学術講演梗概集，A-2，pp.219-220，2007.8.
- (8) 中村正寿・上川大輔・間瀬亮平・長谷見雄二：区画火災の燃焼率（その1）実験概要，日本建築学会学術講演梗概集，A-2，pp.225-226，2006.9.
- (9) 上川大輔・中村正寿・間瀬亮平・長谷見雄二：区画火災の燃焼率（その2）実験結果とまとめ，日本建築学会学術講演梗概集，A-2，pp.227-228，2006.9.

特許

- (10) 中村正寿：特開2015-155762 集煙装置，2015.8.27.
- (11) 中村正寿：特開2014-029075 耐火設計方法および建築物，2014.2.13.
- (12) 中村正寿，道越真太郎，長谷見雄二：特開2012-149435 耐火設計方法および建築物，2012.8.9.

本論文に関連する表彰

- (13) 日本建築学会奨励賞（2015年）：受賞業績名「小開口区画における火災の燃焼率に関する実験研究」

