

室内における可燃物の燃焼拡大に関する研究

崔宜萌

室内における可燃物の燃焼拡大に関する研究

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 既往研究.....	2
1.2.1 外部放射による燃焼速度の増加.....	2
1.2.2 固体可燃物の燃え広がり.....	3
1.2.3 既存の区画内燃焼性状の予測モデル.....	4
1.3 研究の目的.....	4
1.4 研究の構成.....	5
【第1章参考文献】.....	7
第2章 単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルの構築.....	9
2.1 予測モデルの概要.....	9
2.1.1 前提条件.....	9
2.1.2 予測モデルの流れ.....	9
2.2 燃え広がりモデル.....	10
2.2.1 火炎形状の分類.....	10
2.2.2 火炎形状による放射熱の計算方法.....	11
2.2.2.1 内部放射の放射熱（円筒部）の計算方法.....	11
2.2.2.2 外部放射の放射熱の計算方法.....	13
2.2.3 単位面積当たりの発熱速度と火炎伝播速度.....	25
2.2.3.1 単位面積当たりの発熱速度.....	25
2.2.3.2 火炎伝播速度.....	26
2.2.4 換気支配における燃焼面の形状.....	27
2.2.5 燃え尽き開始時間と燃え尽き面拡大速度.....	29
2.2.6 最大燃焼直径.....	29
2.2.7 燃焼面積と発熱速度.....	30
2.3 二層ゾーンモデルの改良.....	31
2.3.1 二層ゾーンモデルの概要.....	31
2.3.1.1 ゾーンの保存式.....	32
2.3.1.2 開口流量.....	33
2.3.1.3 プルーム質量流量.....	40
2.3.2 壁面温度.....	41
2.3.2.1 壁の熱伝導方程式.....	41

2.3.2.2 壁の熱伝導率.....	43
2.3.3 火炎からの放射熱.....	44
2.3.4 熱伝達によりゾーンが得る熱量.....	46
2.3.4.1 概要	46
2.3.4.1 対流熱伝達によりゾーンが得る熱量.....	47
2.3.4.1 放射熱伝達によりゾーンが得る熱量.....	49
2.3.5 燃え拡がりモデルで必要な物理量.....	57
2.3.5.1 上部層温度	57
2.3.5.2 下部層温度	57
2.3.5.3 上部層高さ	58
2.3.5.4 下部層壁面に入射する放射熱流.....	58
2.4 計算プログラムの概要.....	59
2.4.1 計算のアルゴリズム.....	59
2.4.2 プログラムへの入力.....	61
2.4.3 プログラムの出力.....	63
2.5 本章の結論.....	64
【第2章参考文献】	64
第3章 単一の固体可燃物の燃え拡がり予測モデルの精度の検証.....	66
3.1 自由空間燃焼実験による物性値の抽出.....	66
3.1.1 自由空間燃焼実験の概要.....	66
3.1.2 自由空間における単位質量当たりの発熱量の抽出.....	67
3.1.3 自由空間における火炎伝播速度の抽出.....	67
3.1.4 自由空間における $\Delta H/L$ の抽出.....	67
3.2 赤尾による模型室内実験との比較.....	68
3.2.1 実験概要.....	68
3.2.1.1 測定項目	70
3.2.1.2 実験条件	71
3.2.2 計算条件の設定.....	71
3.2.3 予測結果と考察.....	72
3.2.3.1 垂れ壁なしの予測結果と考察.....	72
3.2.3.2 垂れ壁ありの予測結果と考察.....	81
3.2.3.3 全実験における発熱速度の比較.....	91
3.3 李実験との比較.....	93
3.3.1 実験概要.....	93
3.3.1.1 測定項目	95

3.3.1.2 実験条件	95
3.3.2 計算条件の設定	95
3.3.3 予測結果と考察	96
3.3.3.1 実験 MB-1	96
3.3.3.2 実験 MB-2	98
3.3.3.2 実験 MB-3	100
3.4 予測精度の分析	101
3.4.1 発熱速度の最大値	101
3.4.2 上部層温度の最大値	102
3.4.3 下部層温度の最大値	102
3.4.4 上部層壁面温度の最大値	103
3.4.5 水平方向火炎伝播速度の平均値	103
3.4.6 下部層壁面に入射する熱流の最大値	104
3.5 本章の結論	105
【第3章参考文献】	105
第4章 壁際および隅角部における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデル	106
4.1 概要	106
4.2 壁際および隅角部における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデル	106
4.2.1 壁際における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデル	106
4.2.1.1 壁際における火炎高さ	106
4.2.1.2 壁際における火炎の放射率の計算	107
4.2.1.3 壁際におけるプルーム質量流量	116
4.2.2 隅角部における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデル	117
4.2.2.1 隅角部における火炎高さ	117
4.2.2.2 隅角部における放射率	118
4.2.2.3 隅角部におけるプルーム質量流量	128
4.3 予測結果と実験結果の比較	128
4.3.1 実験概要（東京理科大学共同利用実験）	128
4.3.1.1 測定項目	129
4.3.1.2 実験レイアウト	129
4.3.2 計算条件の設定	130
4.3.2.1 模型室および可燃物に関する定数と初期値の設定	130
4.3.2.2 壁際および隅角部における角度 θ_c の設定	132
4.3.3 予測結果と考察	132
4.3.3.1 中央部の計算結果（実験 Comp 1）	132

4.3.3.2 壁際の計算結果（実験 Comp 3）	134
4.3.3.3 隅角部の計算結果（実験 Comp 2 と Comp 4）	136
4.3.3.4 可燃物の位置による発熱速度の計算結果のまとめ	137
4.3.3.5 可燃物の位置による平均火炎高さの計算結果のまとめ	138
4.4.3.6 可燃物の位置による上部層温度の計算結果のまとめ	139
4.4 本章の結論.....	139
【第 4 章参考文献】	140
第 5 章 同時燃焼を考慮した複数の固体可燃物の燃え広がり予測モデル.....	142
5.1 概要	142
5.2 予測モデル.....	142
5.2.1 隣の火炎からの放射熱.....	142
5.2.1.1 円筒部の放射率.....	143
5.2.1.2 隣の火炎からの形態係数.....	144
5.2.1.3 各火炎形状における隣の火炎からの放射熱	145
5.2.2 同時燃焼を考慮した単位面積当たりの発熱速度と火炎伝播速度	164
5.2.2.1 相互予熱効果を考慮した単位面積当たりの発熱速度	164
5.2.2.2 相互予熱効果を考慮した火炎伝播速度.....	165
5.2.3 同時燃焼における二層ゾーンモデルの修正	166
5.3 予測結果と実験結果の比較.....	167
5.3.1 実験概要（理科大共同利用実験）	167
5.3.1.1 測定項目	167
5.3.1.2 実験条件	167
5.3.2 計算条件の設定.....	168
5.3.3 予測結果と考察.....	168
5.3.3.1 実験 Comp 5.....	168
5.3.3.2 実験 Comp 6.....	171
5.3.3.3 実験 Comp 10.....	173
5.4 本章の結論.....	175
【第 5 章参考文献】	176
第 6 章 各種条件が燃焼拡大性状に及ぼす影響	177
6.1 単一の固体可燃物における感度分析	177
6.1.1 計算条件の設定.....	177
6.1.2 感度分析の結果.....	177
6.1.2.1 試験体厚さの影響.....	177
6.1.2.2 天井高さの影響.....	178

6.1.2.3 開口高さの影響.....	179
6.1.2.4 可燃物の位置の影響.....	180
6.2 複数の固体可燃物における感度分析.....	181
6.2.1 計算条件の設定.....	181
6.2.2 感度分析の結果.....	181
6.2.2.1 試験体間の距離の影響.....	181
第7章 結論.....	183
7.1 本研究の結論.....	183
7.2 今後の課題.....	185
発表論文一覧.....	187
謝辞.....	189

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、都市化の進展や建築物の高層化に伴い、建築火災は依然として社会の安全を脅かす深刻な問題となっている。日本では、総務省消防庁の統計[1]によると、令和5年の総出火件数は38,672件であった。そのうち建物火災が20,974件で約54.2%を占めている。建築火災による死者が1,200人、その約93.9%が住宅火災に関連している。一方、中国では、国家消防救援局[2]の統計によると、2023年1月～6月中国での総出火件数は約55.1万件、そのうち住宅火災が16.7万件、約30.3%を占めている。住宅火災による死者は682人で、火災による総死者数の69%を占めている。これらのデータにより、建築火災による人の被害と経済の損失は毎年多く報告されている。

現代の建築物には大量の可燃性材料や家具・内装材が使用されており、火災発生時には燃焼の拡大とともに、煙や有毒ガスが大量に発生する。特に、高層ビルや商業施設のような不特定多数の人が集まる建築物では、人員構成の多様化、避難距離の長さ、そして煙による視野不良が重なることで、避難活動と消火活動がより困難になる。このような現状を踏まえると、建築物の設計段階において、火災時の被害を最小限に抑えるための火災安全設計が必要である。

建築物の火災安全設計とは、避難経路の確保、構造部材の耐火性能、延焼の防止、煙と熱の制御等、複数の要素を考慮して、建築物の構造や設備を科学的に設計することである。その中で、建築火災のメカニズムをより深く理解し、室内における可燃物の燃焼拡大性状を対象として予測することは、火災危険の正確な評価と、合理的な防火対策の策定に不可欠な基盤となる。

室火災の進展はくん焼期、初期成長期、火盛り期、減衰期の四つの段階に分けて考えることができる[3]。くん焼期には火炎が生じておらず、可燃物から煙が生じる。くん焼が持続すると火炎が生じる。そして、火炎が可燃物表面に沿って広がって、ある程度大きくなると、周辺の可燃物へ燃え広がっていく。この段階を初期成長期と呼ぶ。初期成長が進むと、ある時点で室内の可燃物が一斉に着火する。この現象はフラッシュオーバー(F.O.)と呼ばれる。F.O.が起これば室内の温度が急上昇し、扉や窓等の開口部から火炎が噴出し、出火室の周辺の室へ延焼し、危険な状態になる。F.O.以後の火災は火盛り期(盛期火災)と呼ばれる。火盛り期が継続すると可燃物が燃え尽きて、減衰期になる。この時期は、ほとんどの可燃物が燃え尽き段階で燃焼が緩慢になり、室内の温度も下がり始める。フラッシュオーバーが早期に発生すると、避難や消火活動が著しく困難になるため、建物内の人命を守るためには、フラッシュオーバーに至る前の段階で火災を早期に発見し、適切に制御・消火することが重要である。従って、本研究は初期火災の燃焼性状に着目し、フラッシュオーバーするまでの火災性状を考察する。

初期火災では、建築物内には様々な可燃物が存在しており、その燃焼の激しさは発熱速度（燃焼により単位時間あたりに発生する熱量、単位 kW）で表す。発熱速度が分かれば、燃焼性状や室内の温度等の安全設計に必要な値を予測できる。実務的な火災安全設計においては、発熱速度は時間の二乗で近似されることが多いが、実際の火災では可燃物の形状、位置、火災室の寸法等、多様な要因によってその挙動が複雑に変化する。従って、実火災の燃焼性状を簡易にかつ精度良く予測するモデルの構築が求められている。また、可燃物の燃焼の激しさは材質に大きく依存する。建築物内には木材だけでなくウレタンフォーム、ポリスチレンフォーム等のプラスチック等の様々な種類の可燃物が存在する。その中でもウレタンフォームは燃焼性が高く、かつソファやマットレス等の家具に広く使用されている。

以上の背景を踏まえ、本研究では代表的な可燃物としてウレタンフォームを対象に取り上げ、着火から初期火災を経てフラッシュオーバーまでの燃焼性状を簡易に精度良く予測することを目的としている。

1.2 既往研究

1.2.1 外部放射による燃焼速度の増加

自由空間においては、可燃物の燃焼によって発生した煙は蓄積せず、煙や壁などからの熱フィードバックも存在しない。しかし、室内での火災では高温の煙層が室の上部に形成され、火災の拡大に伴い、火炎が天井に接触し、天井下に展炎する可能性がある。展炎部、周壁および煙層、ならびに火炎が接する天井部からの放射および火炎からの間接放射は、外部放射と呼ばれる。若月ら[4]は座椅子・ソファを使用して室内での燃焼実験を行った。研究結果は、煙層や区画壁・天井からの熱フィードバックによる熱流束の増加が原因で、区画内の最大発熱速度が自由空間に比べて 1.3 倍に増加したことを示している。これは、室内での可燃物が外部放射を受けて、自由空間より燃焼が加速するためである。この現象は多くの研究者[5][6]により自由空間と室内燃焼実験の比較を通じて検証されている。

外部放射の影響を定量化するためには、外部放射の熱流束の計算が不可欠である。Rew ら[7] は、風のある条件でのプール火災において、火炎形状をモデル化し、火炎高さ、火炎の放射率等の計算方法を提案して燃料に入射する放射熱流束を予測した。He ら[8]は、円筒と円錐を用いて天井下のジェット火炎の形状を近似し、天井や床面への放射熱流束を予測した。Lattimer ら[9]は廊下状天井、大空間天井、隅角部天井での火炎高さと放射熱流束の予測方法を提案した。新谷ら[10]は、室内での燃焼実験を行って、連続火炎領域および間欠火炎領域の温度を測定した。そして、火炎が天井下に展炎する時、火炎本体を円筒形、展炎部を円盤形に近似し、それぞれの部分から床面へ入射する熱流束を計算するモデルを提案した。

可燃物は外部放射を受けると、燃焼速度が増加する。Nasr[11]らは、燃料表面のエネルギー保存式に基づいて、対流熱流と放射熱流を考慮し、密閉空間におけるプール火災の燃料燃焼速度を予測した。彼らのモデルは、酸素不足の状況を考慮し、液体燃料の質量損失速度を

精度よく予測した。研究結果では、自由空間での大規模プール火災においては、放射熱流が支配的な熱流メカニズムであることを示している。一方で密閉空間では、放射熱流だけでなく、対流熱流の影響も考慮する必要があることを示している。

換気支配の場合は、室内の酸素濃度不足により燃焼が抑制される。Utiskul ら[12]は小規模なヘプタプール火災実験を行い、限定的な通風条件下での燃焼速度等の燃焼性状を研究した。そして、換気支配、外部放射を考慮して、区画火災における液体燃料の質量損失速度のモデルを提案した[13]。このモデルでは、外部放射による燃焼速度の増加分を、外部放射の放射熱を分解潜熱で割ることによって計算した。さらに、火炎温度が臨界温度（1300℃）以下であれば、火炎が消滅するとした。実験結果および予測結果によると、酸素不足の条件では、液体および固体可燃物の燃焼面積はいずれも減少する傾向が見られた。これは酸素不足により発熱速度が低下し、それに伴って外部放射も減少することで、燃え広がり速度が減少したためであると考えられる。Wade ら[14]は、Utiskul らのモデル[12]に基づき、換気支配における燃焼速度の低下を考慮し、ソファの燃焼における質量損失速度および発熱速度を予測した。室内の酸素濃度を自由空間の酸素濃度で除算することにより、酸素不足が燃焼速度に与える影響を定量化した。さらに、酸素不足における燃焼面積の計算方法も提案している。実験値との比較によると、全体的に発熱速度の予測値は実験値よりかなり大きくなった。

1.2.2 固体可燃物の燃え広がり

固体可燃物の燃え広がりとは可燃物の物性値、火炎伝播方向、風の影響等の複数の要因により支配される。燃え広がり速度は火災の危険性評価において重要なパラメータであるが、その挙動は極めて複雑であり、定量的に解析することは非常に困難である。Quintiere [14]は、代表的な可燃物における火炎伝播速度の典型値を提示している。例えば、厚い固体可燃物における水平方向の火炎伝播速度は約 0.1 cm/s であり、薄い固体可燃物における垂直上方の火炎伝播速度は 1～100 cm/s の範囲にある。

さらに、Quintiere[15]は、固体可燃物表面における火炎伝播速度を予熱長さと着火時間の比率として定量化している。この式によると、火炎伝播速度は火炎から予熱面への熱流に依存する。熱的に薄い固体可燃物（厚さ<2mm）においては、火炎伝播速度は予熱面への熱流束に比例し、熱的に厚い固体可燃物においては、予熱面への熱流束の二乗に比例するとされている。特に室内火災においては、煙等からの放射熱流の影響により、火炎伝播速度が増加する傾向がある。

火炎伝播速度を計算するためには、可燃物の物性値が必要である。この物性値には、着火温度、熱慣性等の火炎伝播パラメータが含まれる。長谷見ら[16]は、いくつかの代表的な材料に関する物性値を SFPE ハンドブック中に示している。しかし、実際の建築火災では多様な可燃物が関与するため、実物における燃え広がりに関する研究は依然として不十分であり、実用の可燃物に対する火炎伝播速度を正確に評価するには、実験によって物性値を正確に測定する必要がある[17]。

本研究では、実火災における燃え広がり現象に着目し、建築の室内で最も一般的に使用される可燃物であるウレタンフォームを対象としている。ウレタンフォームに関しては、先行研究においてすでに各種物性値が実験を通じて測定されており、本研究ではそれらのデータを用いて解析を行なう。

1.2.3 既存の区画内燃焼性状の予測モデル

Wade ら[14]は二層ゾーンモデルに基づき、煙層からの外部放射の影響を考慮した燃焼速度モデルを構築し、さらに実物のソファに対する単位質量あたりの発熱量 $\Delta H[\text{MJ/kg}]$ を実験的に測定した。最後に、燃焼速度に単位質量あたりの発熱量を乗じることで、室内におけるソファ燃焼時の発熱速度の時間変化を簡易的に予測した。しかし、このモデルでは展炎を考慮しておらず、火炎の大きさやその変化を予測することはできない。

赤尾ら[18]は火炎形状を円筒形と円盤形に近似し、外部放射を考慮して、燃え広がりモデルを提案した。しかし、赤尾モデルの計算値と実験値との整合性には以下の課題が考えられる。

①展炎半径

火炎高さが天井高さの 0.9 倍に達する時点で、火炎が 0.1H 伸長して天井に吸い付き、展炎が開始すると仮定した。この仮定により、展炎の開始時間が早くなった。また、モデルでは展炎半径を Faeth の式[19]で求めた後、さらに燃焼半径 $D/2$ を加えて次式で算出している。このことによって展炎半径が過大に計算される。以上の 2 点の理由により、赤尾モデルは外部放射を過大評価していると考えられる。

②火炎伝播速度

火炎伝播速度は自由空間燃焼実験のデータを用いて、Quintiere[14]の式で計算された。自由空間燃焼実験で測定された火炎伝播速度 $v_{f,free}$ は約 0.0035m/s であるが、計算プログラムでは 0.0040m/s で計算した。これにより、燃え広がりが速くなった。

以上の点を総合すると、既存モデルには外部放射に関する放射熱の算出精度が不十分であり、外部放射の影響が過大に評価されるという問題がある。その結果、モデルの精度が十分ではない。また、既存モデルは単一可燃物の予測に限定されており、適用範囲が限られているという問題も存在する。

1.3 研究の目的

単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルは、火炎自身からの内部放射だけでなく、展炎部、火炎と接する天井面、周壁および煙層、火炎の間接放射による外部放射も考慮する。これにより、室内固体可燃物の燃え広がり予測の再現性を高め、より正確な発熱速度の推定を可能にする。本研究は、先行研究の自由空間燃焼実験のデータを基に、先行研究の燃え広がりモデルを改良して、室内可燃物の発熱速度、区画内温度等の燃焼性状を精度良く予測することを目的とする。

更に本研究は、改良した単一の固体可燃物の予測モデルを基に、可燃物と壁面との位置関係に応じた火炎高さ等の変化、および複数可燃物間の相互加熱作用を考慮して、燃え広がり予測モデルの適用範囲を拡大する。

1.4 研究の構成

本論文は6章で構成され、三種類の予測モデルを構築した。研究の流れを図1に示す。

第1章では、本研究の背景、既往研究と目的について述べた。

第2章では、単一の固体可燃物の予測モデルの構成および計算プログラムについて述べる。予測モデルでは、主として自由空間で用いられる単一可燃物の燃え広がりモデルを基として、これに外部放射の影響を加えたものである。外部放射の強さを求めるために、天井下への展炎と煙層および周壁からの放射を考慮する。そのため、二層ゾーンモデルによる煙層温度計算と連立して解析を行う方法を示す。本章ではそれぞれのモデルについて説明する。

第3章では、第2章のモデルの予測結果と実験結果の比較検証について述べる。本章で使用する実験結果は既存の模型室燃焼実験(12回の赤尾実験および3回の李実験)である。本章では、これらの実験の概要について概要を述べ、実験条件を参考して、モデルの予測結果と実験結果を比較する。

第4章では、第2章の予測モデルを基に、異なる位置における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルを構築して、既存の実験結果(東京理科大学共同利用実験)と比較する。本章では、試験体を模型室の中央、壁際および隅角部に配置する場合の燃焼性状の違いを検討する。

第5章では、第2章と第4章の予測モデルを基に、同時燃焼を考慮した固体可燃物の燃え広がり予測モデルを構築して、既存の実験結果(東京理科大学共同利用実験)と比較する。ここでは、2個の試験体を模型室に設置する場合の燃焼性状について検討する。

第6章では、これらの予測モデルを用いて、各種条件が燃焼性状に及ぼす影響を検討する。単一の固体可燃物において、試験体厚さ、天井高さ、開口高さ、可燃物位置を変更して、計算を行い、燃焼性状に及ぼす影響を検討する。また、2個の固体可燃物において、試験体間の距離を変更して、計算を行い、燃焼性状に及ぼす影響を検討する。

第7章では、本論文の結論を示す。

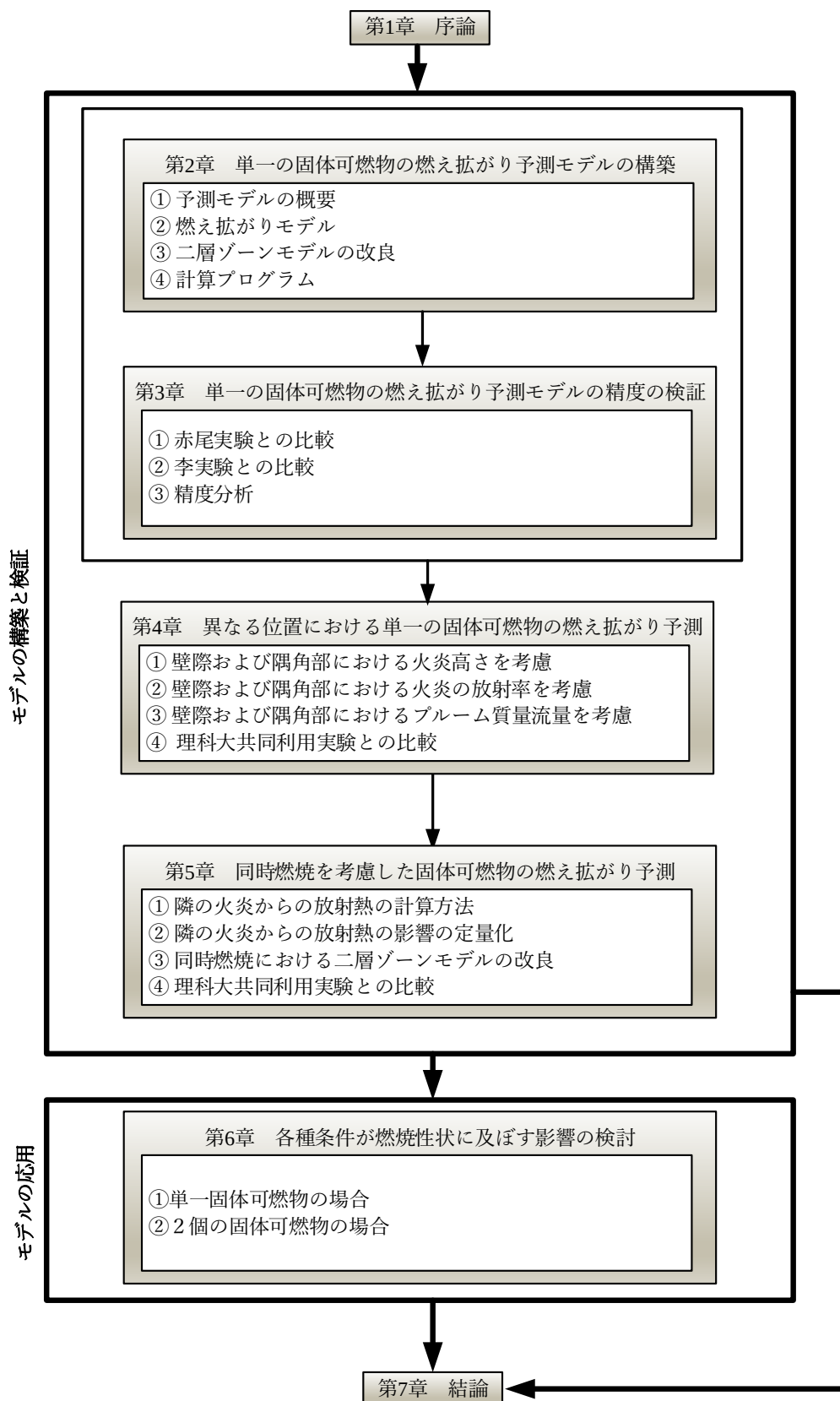


図1 研究の流れ

【第1章参考文献】

- [1] 総務省消防庁, 令和5年(1月~12月)における火災の状況(確定値)について,
<https://www.fdma.go.jp/pressrelease/statistics/>
- [2] 国家消防救助局, 「2023年上半年全国日均火災3000件を超える」
<https://www.119.gov.cn/qmxfkg/sjtj/2023/38420.shtml> (In Chinese)
- [3] 原田和典, 建築火災のメカニズムと火災安全設計, 日本建築センター, 2007
- [4] 若月薫, 抱憲誓, 城明秀, 織戸貴之, 大宮喜文, 区画火災における可燃物への熱フィードバックが及ぼす発熱速度への影響, 消防研究所報告第103号, 2007.09, pp. 9-18.
- [5] J.B.M. Pierce and J.B. Moss (2007) Smoke production, radiation heat transfer and fire growth in a liquid-fuelled compartment fire, *Fire Safety Journal* 42: 310-320.
- [6] Annemarie Poulsen, Grunde Jomaas, Experimental Study on the Burning Behavior of Pool Fires in Rooms with Different Wall Linings, *Fire Technology*, 48, 419-439, 2012.
- [7] P. J. Rew, W.G. Hulbert and D. M. Deaves, "Modelling of thermal radiation from external hydrocarbon pool fires, *Process Safety and Environmental Protection*", 75(B2), 81-89 (1997).
- [8] Qing He, Mingyan Gu, Fei Tang, Xiepeng Sun and Yang Wang, "Ceiling radiation heat flux and downward received radiation heat flux of methane jet fire with hydrogen addition", *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 741-753 (2024).
- [9] B. Y. Lattimer, C. Mealy and J. Beitel, "Heat Fluxes and Flame Lengths from Fires Under Ceilings", *Fire Technology*, 49, 269-291 (2013).
- [10] Y. Shintani, T. Nagaoka, Y. Deguchi and K. Harada, "Simple Method to Predict Downward Heat Flux from Flame to Floor", *Fire Science and Technology*, Vol.33, No.1 (2014).
- [11] A. Nasr, S. Suard, H. El-Rabii, L. Gay, and J.-P. Garo, Fuel mass-loss rate determination in a confined and mechanically ventilated compartment fire using a global approach, *Combustion Science and Technology*, 183:1342-1359, 2011.
- [12] Yunyong Utiskula, James G. Quintiere, Ali S. Rangwalaa, Brian A. Ringwelskia, Kaoru Wakatsukia, Tomohiro Naruse, Compartment fire phenomena under limited ventilation, *Fire Safety Journal* 40 (2005): 367-390.
- [13] Yunyong P. Utiskul and James G. Quintiere, An Application of Mass Loss Rate Model with Fuel Response Effects in Fully-Developed Compartment Fires, *Fire Safety Science Proceedings of the Ninth International Symposium*, pp.827-838, 2008
- [14] Colleen Wade, Charles Fleischmann, Michael Spearpoint, Anthony Abu, Prediction model for compartment effects on burning upholstered furniture, *International Conference on Research and Advanced Technology in Fire Safety*, pp. 315-330, 2017.
- [15] James G. Quintiere, *Principles of Fire Behavior*, pp. 84-100, 1998.
- [16] The SPFE handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition, pp.705-723, 2016.
- [17] 建築物の火災荷重および設計火災性状指針, 日本建築学会, pp.67, 2022.

- [18] 赤尾 捷, 原田 和典, 仁井 大策, 室内の熱フィードバックを考慮した可燃物の発熱速度, 日本火災学会研究発表会, pp.190-191, 2018
- [19] You, H. Z. and Faeth, G. M., “Ceiling Heat Transfer during Fire Plume and Fire Impingement”, Fire and Materials, Vol.3, No.3, pp.140-147, 1979.

第2章 単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルの構築

2.1 予測モデルの概要

本章では、既存モデル[1]を改良して作成した室内における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルの詳細および計算プログラムの概要を記述する。なお、本章の内容の一部は、International Journal of Fire Science and Engineering に投稿した内容をもとに再構成したものである。

2.1.1 前提条件

固体可燃物には底面が正方形のウレタンフォームを用いた。点火位置は試験体上面の中心点と仮定した。図 2.1 に単一固体可燃物が自由空間で燃焼する概要を示す。自由空間での燃焼の場合、可燃物の燃焼によって発生する煙は蓄積せず、熱のフィードバックはない。そのため、可燃物表面への放射熱は火炎からの内部放射熱のみとなる。

図 2.2 に単一固体可燃物が室内で燃焼する場合の概要を示す。可燃物は火災室の中央に設置されていると仮定した。室内での燃焼の場合、可燃物表面への放射熱は、火炎からの内部放射だけでなく、天井下の展炎部から、火炎が接する天井部から、周壁および煙層から、火炎の間接放射からの外部放射も含まれる。先行研究[1]によって、外部放射により燃焼が加速することが示されている。本章では、外部放射の影響を定量化して、室内における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルを構築する。このとき必要な物性値は、先行研究[1]の自由空間燃焼実験のデータを用いて求めた。

また、周壁および煙層からの放射熱を計算するため、二層ゾーンモデルが使用される。二層ゾーンモデルでは、火源の発熱速度を用いて、上部層高さ、上部層および下部層温度、下部層壁面に入射する放射熱流を計算する。本章では、火炎からの放射熱に関して、従来の二層ゾーンモデルを改良し、外部放射の計算を可能とする。

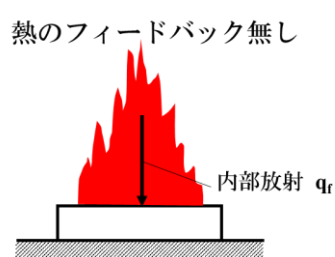


図 2.1 自由空間での燃焼の概要図

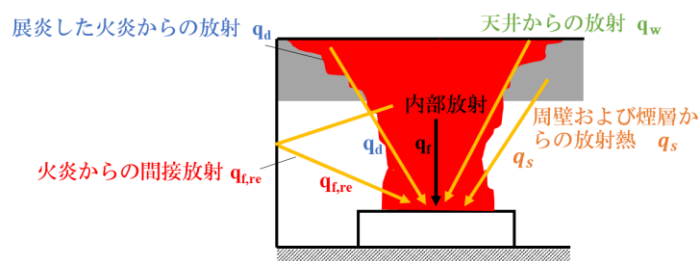


図 2.2 室内での燃焼の概要図

2.1.2 予測モデルの流れ

図 2.3 に予測モデルの計算の流れを示す。本モデルは燃え広がりモデルと二層ゾーンモデルで構成される。第 2.2 節は燃え広がりモデルの詳細を記述し、第 2.3 節は二層ゾーンモデルの概要と改良点を記述する。また、本研究では Python を使って、モデルの計算プログラ

ムを作成した。第 2.4 節では、計算プログラムの入力値および出力値を述べる。

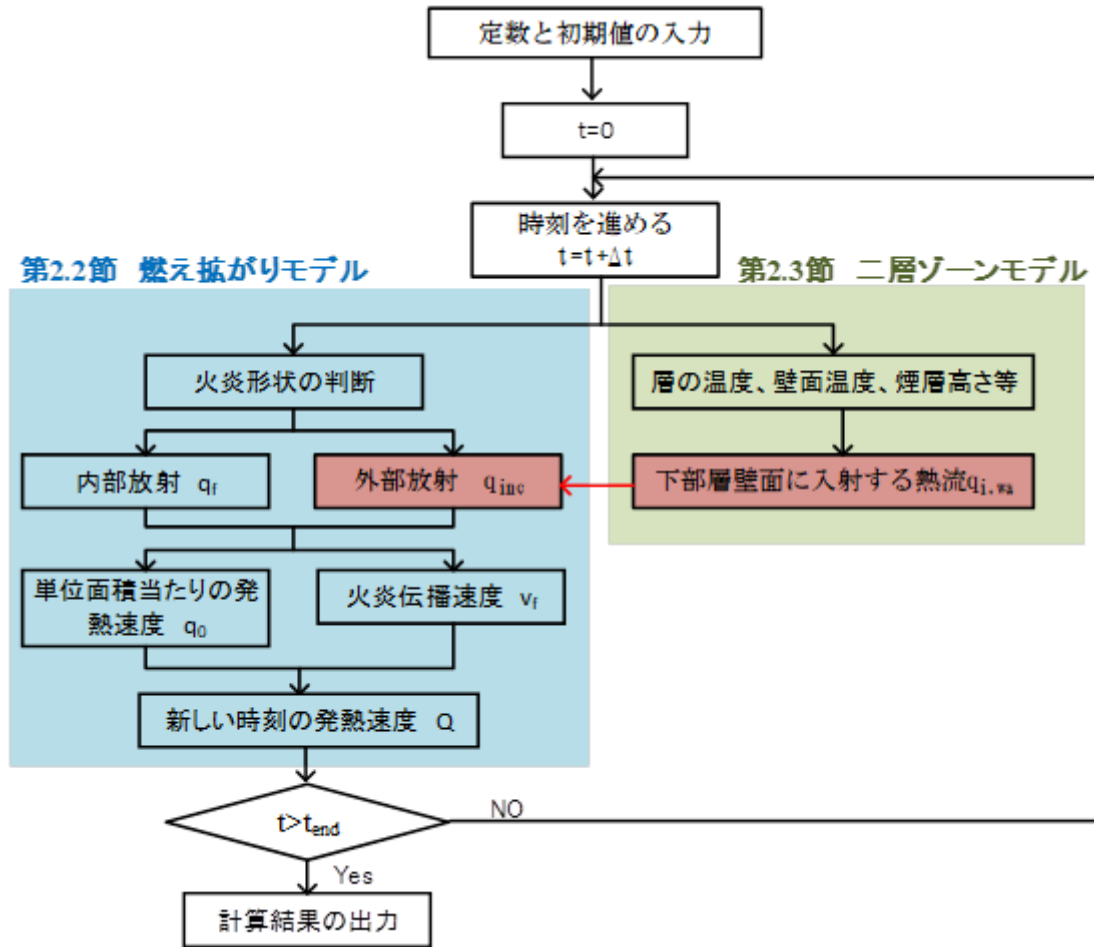


図 2.3 単一固体可燃物の燃え拡がりモデルの計算流れ

2.2 燃え拡がりモデル

2.2.1 火炎形状の分類

図 2.4 に天井下における火炎形状の分類を示す。火炎本体を円筒形、展炎部を円盤形に近似した。実際の火炎を可能な限り再現するために、本モデルは火炎を連続火炎領域（陰影部）と間欠火炎領域（空白部）に分けている。

火炎長さは自由空間における火炎長さで近似され、自由空間の火炎長さは Zukoski^[2]によって提案された式を用いて算出する。自由空間における平均火炎高さは次式で与えられる。

$$L_{m,free} = 3.4Q_D^{*n}D_f \quad (2.2.1)$$

自由空間における連続火炎高さは次式で与えられる。

$$L_{c,free} = 1.8Q_D^{*n}D_f \quad (2.2.2)$$

ただし、

$$Q_D^* = \frac{Q}{c_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} D_f^{5/2}} \quad (2.2.3)$$

$$n = \begin{cases} 2/3 & (Q^* < 1) \\ 2/5 & (1 < Q^*) \end{cases} \quad (2.2.4)$$

ただし、 D_f は火炎直径（円筒部の直径）(m)、 Q_D^* は無次元発熱速度(-)、 Q は発熱速度(kW)、 c_p は空気の比熱(kJ/kg.K)、 ρ_0 は空気密度(kg/m³)、 T_0 は空気温度(K)、 g は重力加速度(m/s²)である。

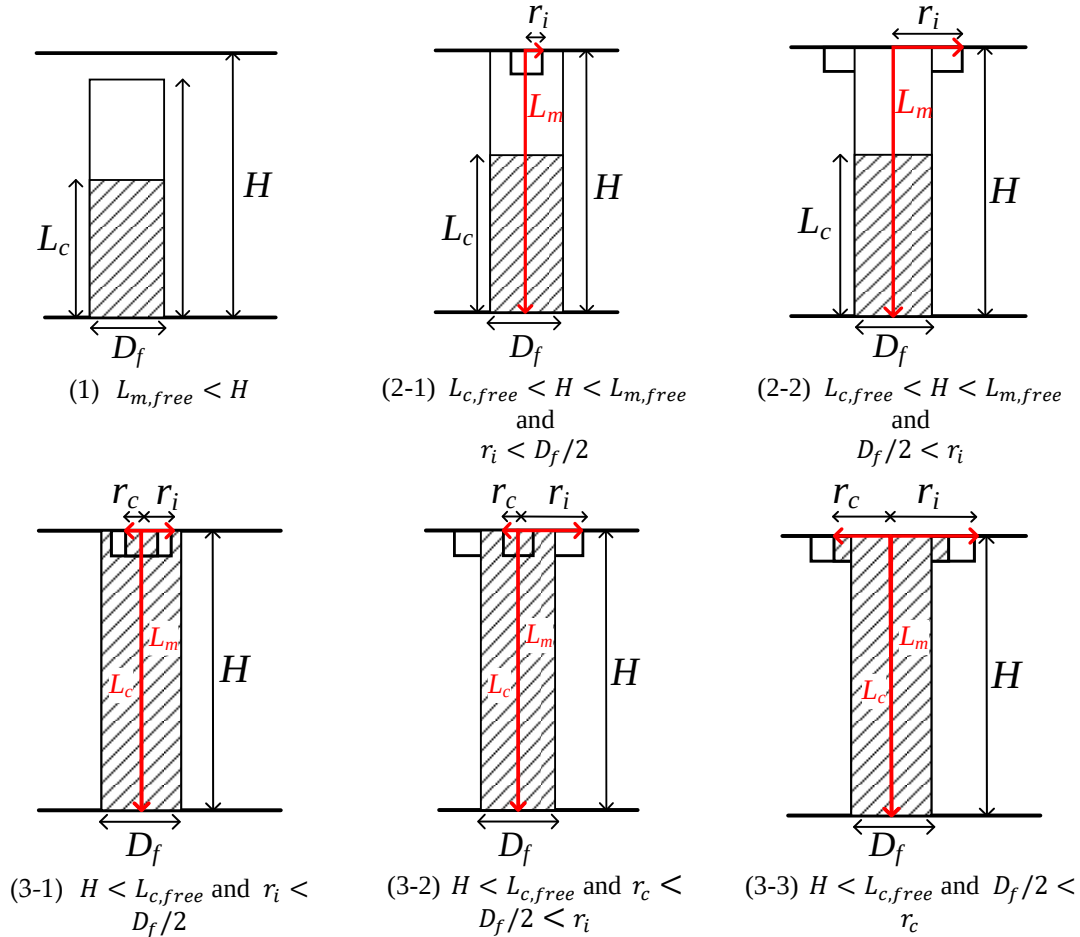


図 2.4 天井下における火炎形状の分類

2.2.2 火炎形状による放射熱の計算方法

本節では、全ての火炎形状について、内部放射と外部放射の放射熱の計算方法を記述する。

2.2.2.1 内部放射の放射熱（円筒部）の計算方法

連続火炎が展炎し、かつ $D_f/2 < r_c$ の場合を一例として、内部放射の放射熱の詳細な計算方法について述べる。ただし、 D_f は燃焼直径[m]、 r_c は連続火炎の展炎半径[m]である。図 2.5 に連続火炎が展炎し、かつ $D_f/2 < r_c$ の場合の内部放射の概要を示す。連続火炎が展炎する時、円筒部には間欠火炎領域がないため、内部放射の放射熱は円筒部連続火炎領域からの放射熱のみである。

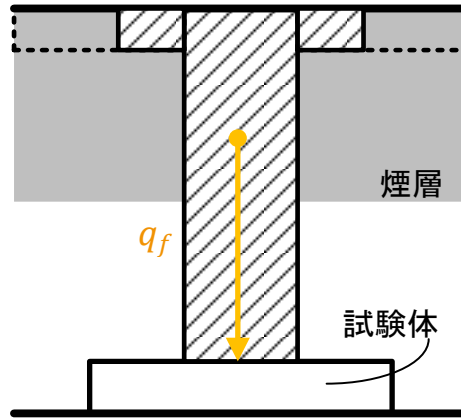


図 2.5 連続火炎が展炎するか $D_f/2 < r_c$ 場合の内部放射の放射熱

(1)展炎半径と火炎長さ

自由空間における連続火炎高さ $L_{c,free}$ が天井高さ H に達すると、連続火炎が展炎する。Faeth^[3]の式によると、間欠火炎の展炎半径 r_i は、連続火炎高さ $L_{m,free}$ のうち高さ H を超える部分の約半分とされ、式(2.2.5)で与えられる。同様に、連続火炎の展炎半径 r_c は式(2.2.6)で与えられる。

$$r_i = \frac{(L_{m,free} - H)}{2} \quad (2.2.5)$$

$$r_c = \frac{(L_{c,free} - H)}{2} \quad (2.2.6)$$

平均火炎長さ L_m と連続火炎長さ L_c は次式で計算する：

$$L_m = r_i + H \quad (2.2.7)$$

$$L_c = r_c + H \quad (2.2.8)$$

(2)火炎の放射率

自由空間では、火源の発熱速度 Q [kW]のうち放射で放散する成分が円筒部連続火炎領域と円筒部間欠火炎領域から射出される放射熱流と等しい。本モデルは、室内における火炎円筒部の放射率 ε_c は、自由空間における火炎の放射率と等しいと仮定し、次式で計算する。

$$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,free}E_{cc} + A_{ci,free}E_{ci}} \quad (2.2.9)$$

ただし、 $A_{cc,free}$ 、 $A_{ci,free}$ は自由空間における火炎円筒部のうちの連続火炎領域、間欠火炎領域の表面積[m²]、 $E_{cc}(= 80.5\text{kW/m}^2)$ 、 $E_{ci}(= 51.2\text{kW/m}^2)$ は火炎円筒部の連続火炎領域、間欠火炎領域の放射発散度^[9]である。 χ は火源の発熱速度のうち放射成分の割合[-]で、McGrattan らの提案式^[4]を適用し、燃焼直径 D_f [m]を用いて次式で求める。

$$\chi = 0.35\exp(-0.05D_f) \quad (2.2.10)$$

室内では、次式に示すように、火源の発熱速度 Q のうち放射で放散する成分が円筒部連続火炎領域、円筒部間欠火炎領域、円盤部連続火炎領域および円盤部間欠火炎領域から射出される放射熱流と等しい。

$$\varepsilon_c A_{cc} E_{cc} + \varepsilon_c A_{ci} E_{ci} + \varepsilon_d A_{dc} E_{dc} + \varepsilon_d A_{di} E_{di} = \chi Q \quad (2.2.11)$$

上式を整理すると、火炎円盤部の放射率は次式で与えられる：

$$\varepsilon_d = \frac{1 - \frac{A_{cc} E_{cc} + A_{ci} E_{ci}}{A_{cc, free} E_{cc} + A_{ci, free} E_{ci}}}{A_{dc} E_{dc} + A_{di} E_{di}} \cdot \chi Q \quad (2.2.12)$$

ただし、 $E_{dc}(= 80.5\text{kW/m}^2)$ は火炎円盤部の連続火炎領域の放射発散度、 $E_{di}(= 47.7\text{kW/m}^2)$ は火炎円盤部の間欠火炎領域の放射発散度である。 A_{cc} 、 A_{ci} は火炎円筒部連続火炎領域、円筒部間欠火炎領域の表面積 $[\text{m}^2]$ 、 A_{dc} 、 A_{di} 火炎円盤部連続火炎領域、円盤部間欠火炎領域の表面積 $[\text{m}^2]$ 次式で与えられる。

$$A_{cc} = 2 \cdot \frac{\pi}{4} D_f^2 + \pi D_f 0.9H \quad (2.2.13)$$

$$A_{ci} = 0 \quad (2.2.14)$$

$$A_{dc} = 2(\pi r_c^2 - \frac{\pi}{4} D_f^2) \quad (2.2.15)$$

$$A_{di} = 2(\pi r_i^2 - \pi r_c^2) + 2\pi r_i(0.1H) \quad (2.2.16)$$

(3)形態係数

円筒部連続火炎領域の底面は燃焼面であるため、燃焼面から円筒部連続火炎領域を見た時の形態係数 F_{cc} は1である。

$$F_{cc} = 1 \quad (2.2.17)$$

円筒部は間欠火炎領域が存在しないため、燃焼面から円筒部間欠火炎領域を見た時の形態係数 F_{ci} は0である。

$$F_{ci} = 0 \quad (2.2.18)$$

(4)放射熱

円筒部は間欠火炎領域が存在しないため、内部放射の放射熱は次式で計算する。

$$q_f = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc} \quad (2.2.19)$$

2.2.2.2 外部放射の放射熱の計算方法

図 2.6 に連続火炎が展炎し、かつ $D_f/2 < r_c$ 場合の外部放射の概要図を示す。外部放射には、展炎部からの放射熱、火炎が接する天井部からの放射熱、周壁および煙層からの放射熱と火炎からの間接放射が含まれる。

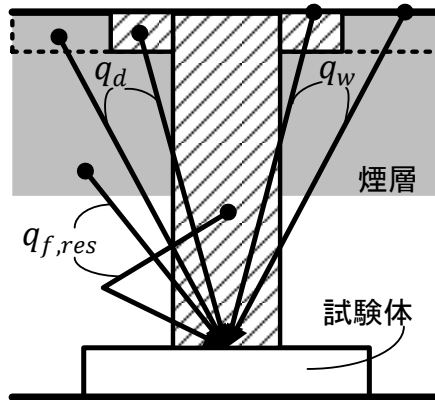


図 2.6 連続火炎が展炎するかつ $D_f/2 < r_c$ 場合の外部放射の放射熱

(1) 展炎部からの放射熱

図 2.7 に燃焼面から展炎部分の円盤部連続火炎領域を見た時の形態係数 F_{dc} を示す。 F_{dc} は次式で計算する：

$$F_{dc} = \frac{1}{2} \left[X_4 - \sqrt{X_4^2 - 4 \left(\frac{R_4}{R_2} \right)^2} \right] - \frac{1}{2} \left[X_3 - \sqrt{X_3^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_2} \right)^2} \right] \quad (2.2.20)$$

ただし、

$$R_2 = \frac{D_f/2}{0.9H} \quad R_4 = \frac{L_c-H}{0.9H} \quad X_4 = 1 + \frac{1+R_4^2}{R_2^2} \quad X_3 = 1 + \frac{1+R_2^2}{R_2^2} \quad (2.2.21)$$

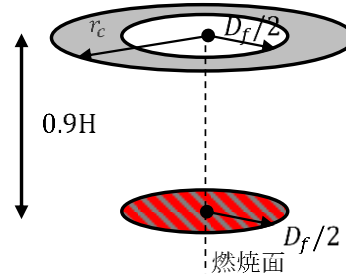


図 2.7 燃焼面から円盤部連続火炎領域を見た時の形態係数 F_{dc}

図 2.8 に燃焼面から円盤部間欠火炎領域を見た時の形態係数 F_{di} を示す。 F_{di} は次式で計算する：

$$F_{di} = \frac{1}{2} \left[X_2 - \sqrt{X_2^2 - 4 \left(\frac{R_3}{R_2} \right)^2} \right] - F_{dc} - \frac{1}{2} \left[X_3 - \sqrt{X_3^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_2} \right)^2} \right] \quad (2.2.22)$$

ただし、

$$R_2 = \frac{D_f/2}{0.9H} \quad R_3 = \frac{L_m-H}{0.9H} \quad X_2 = 1 + \frac{1+R_3^2}{R_2^2} \quad X_3 = 1 + \frac{1+R_2^2}{R_2^2} \quad (2.2.22)$$

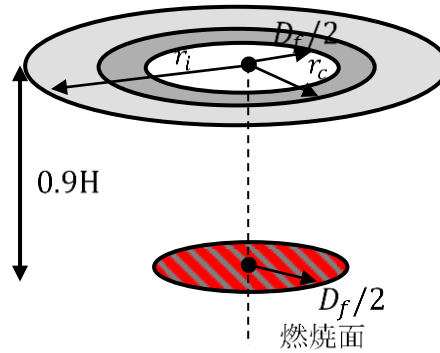


図 2.8 燃焼面から円盤部間欠火炎領域を見た時の形態係数 F_{di}

展炎部からの放射熱は次式で計算する：

$$q_d = \varepsilon_d E_{dc} F_{dc} + \varepsilon_d E_{di} F_{di} \quad (2.2.23)$$

(2) 火炎が接する天井部からの放射熱

円盤部の形態係数と同様に、燃焼面から連続火炎が接する天井部を見た時の形態係数 $F_{w,cc}$

は次式で計算する：

$$F_{w,cc} = \frac{1}{2} \left[X_7 - \sqrt{X_7^2 - 4 \left(\frac{R_7}{R_5} \right)^2} \right] \quad (2.2.24)$$

ただし、

$$R_7 = \frac{r_c}{H} \quad X_7 = 1 + \frac{1+R_7^2}{R_5^2} \quad (2.2.25)$$

燃焼面から間欠火炎が接する天井部を見た時の形態係数 $F_{w,di}$ は次式で計算する：

$$F_{w,di} = \frac{1}{2} \left[X_6 - \sqrt{X_6^2 - 4 \left(\frac{R_6}{R_5} \right)^2} \right] - F_{w,cc} \quad (2.2.26)$$

$$R_6 = \frac{r_i}{H} \quad X_6 = 1 + \frac{1+R_6^2}{R_5^2} \quad (2.2.27)$$

火炎が接する天井部からの放射熱は次式で計算する：

$$q_w = \varepsilon_w \sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc} + (1 - \varepsilon_d) \varepsilon_w \sigma T_{w,di}^4 F_{w,di} \quad (2.2.28)$$

ただし、 ε_w は天井部の放射率（=0.9）である。 $T_{w,cc}$ は連続火炎が接する天井部の温度、 $T_{w,di}$ は間欠火炎が接する天井部の温度、次式で与えられる。

$$T_{w,cc} = 0.67 \times (T_{cc} - T_\infty) + T_\infty \quad (2.2.29)$$

$$T_{w,di} = 0.67 \times (T_{di} - T_\infty) + T_\infty \quad (2.2.30)$$

ただし、 T_{cc} は円筒部連続火炎の温度（=1093K）、 T_{di} は円盤部間欠火炎の温度（=960K）、 T_∞ は空気温度（=293K）である。

(3) 周壁および煙層からの放射熱、火炎からの間接放射

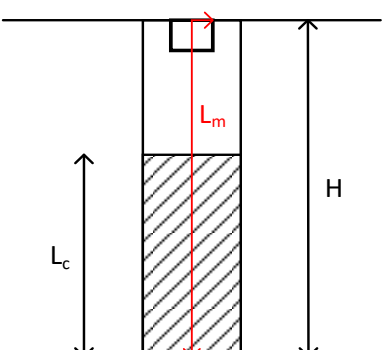
本モデルでは、周壁および煙層からの放射熱と火炎からの間接放射の和 $q_{f,res}$ は下部層壁面に入射する放射熱流 $q_{i,wa}$ に等しい。 $q_{i,wa}$ は二層ゾーンモデルで計算できる。

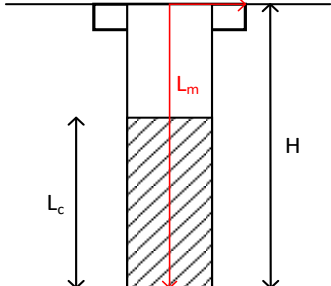
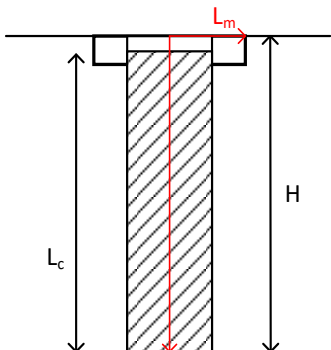
$$q_{f,res} = q_{i,wa} \quad (2.2.31)$$

更に、表 2.3 に全ての火炎形状ごとの展炎半径、放射率、形態係数、放射熱の計算式を示す。

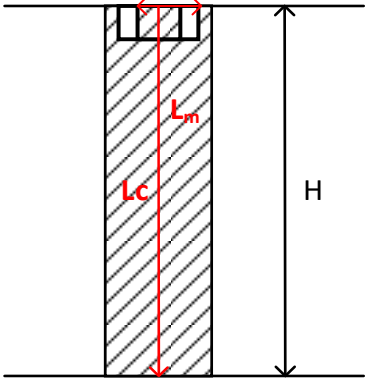
表 2.3 全ての火炎形状ごとの展炎半径、放射率、形態係数、放射熱の計算式

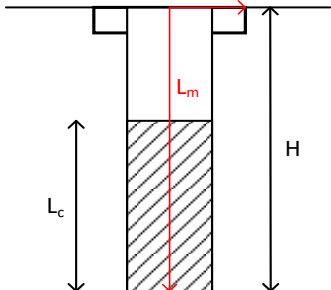
火炎形状	計算項目	部位	火炎領域	計算式
(1)展炎しない時 $L_{m,free} < H$	展炎半径	円盤部	連続火炎領域	$r_c = 0$
			間欠火炎領域	$r_i = 0$
	放射率	円筒部	全て	$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}$ $A_{cc,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D L_{c,free},$ $A_{ci,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D (L_{m,free} - L_{c,free})$
		円盤部	全て	$\varepsilon_d = 0$
	形態係数	円筒部	連続火炎領域	$F_{cc} = 1$
			間欠火炎領域	$F_{ci} = \frac{1}{2} \left[X_1 - \sqrt{X_1^2 - 4 \left(\frac{R_1}{R_1} \right)^2} \right]$ $R_1 = \frac{D/2}{L_c}, \quad X_1 = 1 + \frac{1+R_1^2}{R_1^2}$
		円盤部	連続火炎領域	$F_{dc} = 0$
			間欠火炎領域	$F_{di} = 0$
	内部放射	円筒部	全て	$q_f = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc} + (1 - \varepsilon_c) \varepsilon_c E_{ci} F_{ci}$
	外部放射	円盤部	全て	$q_d = 0$
		天井部	全て	$q_w = 0$

火炎形状	計算項目	部位	火炎領域	計算式
(2)間欠火炎が展炎する $L_{c,free} < H < L_{m,free}$ (2-1)円盤部が円筒部に含まれる $r_i < \frac{D}{2}$ 	展炎半径	円盤部	連続火炎領域	$r_c = 0$
			間欠火炎領域	$r_i = \frac{(L_{m,free} - H)}{2}$
	放射率	円筒部	全て	$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}$ $A_{cc,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D L_{c,free},$ $A_{ci,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D (L_{m,free} - L_{c,free})$
		円盤部	全て	$\varepsilon_d = 0$
	形態係数	円筒部	連続火炎領域	$F_{cc} = 1$
			間欠火炎領域	$F_{ci} = \frac{1}{2} \left[X_1 - \sqrt{X_1^2 - 4 \left(\frac{R_1}{R_1} \right)^2} \right]$ $R_1 = \frac{D/2}{L_c} \quad X_1 = 1 + \frac{1+R_1^2}{R_1^2}$
		円盤部	連続火炎領域	$F_{dc} = 0$
			間欠火炎領域	$F_{di} = 0$
		天井部	間欠火炎領域	$F_{w,ci} = \frac{1}{2} \left[X_5 - \sqrt{X_5^2 - 4 \left(\frac{R_5}{R_5} \right)^2} \right]$ $R_5 = \frac{D/2}{H} \quad X_5 = 1 + \frac{1+R_5^2}{R_5^2}$
	内部放射	円筒部	全て	$q_f = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc} + (1 - \varepsilon_c) \varepsilon_c E_{ci} F_{ci}$
	外部放射	円盤部	全て	$q_d = 0$
		天井部	全て	$q_w = \varepsilon_w \sigma T_{w,ci}^4 F_{w,ci}$

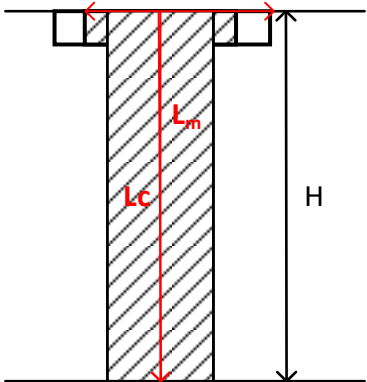
火炎形状	計算項目	部位	火炎領域	計算式
(2)間欠火炎が展炎する $L_{c,free} < H < L_{m,free}$ (2-2)円盤部展炎する $\frac{D}{2} < r_i$  そのうち、 $0.9H < L_{c,free} < H$ の時 	展炎半径	円盤部	連続火炎領域	$r_c = 0$
			間欠火炎領域	$r_i = \frac{(L_{m,free} - H)}{2}$
	放射率	円筒部	全て	$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}$ $A_{cc,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D L_{c,free},$ $A_{ci,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D (L_{m,free} - L_{c,free})$
		円盤部	全て	$\varepsilon_d = \frac{1 - \frac{A_{cc} E_{cc} + A_{ci} E_{ci}}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}}{A_{dc} E_{dc} + A_{di} E_{di}} \cdot \chi Q$ 円筒部連続火炎領域表面積 $A_{cc} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D \times \min(L_{c,free}, 0.9H)$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{ci} = \frac{\pi}{4} D^2 + \max[0, \pi D(0.9H - L_c)]$ 円盤部連続火炎領域表面積 $A_{dc} = 0$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{di} = 2(\pi r_i^2 - \frac{\pi}{4} D^2) + 2\pi r_i(0.1H)$
	形態係数	円筒部	連続火炎領域	$F_{cc} = 1$
			間欠火炎領域	$F_{ci} = \frac{1}{2} \left[X_1 - \sqrt{X_1^2 - 4\left(\frac{R_1}{R_1}\right)^2} \right]$

				$R_1 = \frac{D/2}{L_c} \quad X_1 = 1 + \frac{1+R_1^2}{R_1^2}$
		円盤部	連続火炎領域	$F_{dc} = 0$
			間欠火炎領域	$F_{di} = \frac{1}{2} \left[X_2 - \sqrt{X_2^2 - 4\left(\frac{R_3}{R_2}\right)^2} \right] - \frac{1}{2} \left[X_3 - \sqrt{X_3^2 - 4\left(\frac{R_2}{R_2}\right)^2} \right]$ $R_2 = \frac{D/2}{0.9H} \quad R_3 = \frac{L_m - H}{0.9H}$ $X_2 = 1 + \frac{1+R_3^2}{R_2^2} \quad X_3 = 1 + \frac{1+R_2^2}{R_2^2}$
		天井部	円筒部間欠火炎領域と接する	$F_{w,ci} = \frac{1}{2} \left[X_5 - \sqrt{X_5^2 - 4\left(\frac{R_5}{R_5}\right)^2} \right]$ $R_5 = \frac{D/2}{H} \quad X_5 = 1 + \frac{1+R_5^2}{R_5^2}$
			円盤部間欠火炎領域と接する	$F_{w,di} = \frac{1}{2} \left[X_6 - \sqrt{X_6^2 - 4\left(\frac{R_6}{R_5}\right)^2} \right] - F_{w,ci}$ $R_6 = \frac{r_i}{H} \quad X_6 = 1 + \frac{1+R_6^2}{R_5^2}$
	内部放射	円筒部	全て	$q_f = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc} + (1 - \varepsilon_c) \varepsilon_c E_{ci} F_{ci}$
	外部放射	円盤部	間欠火炎領域	$q_d = \varepsilon_d E_{di} F_{di}$
		天井部	全て	$q_w = \varepsilon_w \sigma T_{w,ci}^4 F_{w,ci} + (1 - \varepsilon_d) \varepsilon_w \sigma T_{w,di}^4 F_{w,di}$

火炎形状	計算項目	部位	火炎領域	計算式
(3) 連続火炎が展炎する $H < L_{c,free}$ (3-1) 円盤部が円筒部に含まれる。 $r_i < \frac{D}{2}$ 	展炎半径	円盤部	連続火炎領域	$r_c = \frac{(L_{c,free} - H)}{2}$
			間欠火炎領域	$r_i = \frac{(L_{m,free} - H)}{2}$
	放射率	円筒部	全て	$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}$ $A_{cc,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D L_{c,free},$ $A_{ci,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D (L_{m,free} - L_{c,free})$
		円盤部	全て	$\varepsilon_d = 0$
	形態係数	円筒部	連続火炎領域	$F_{cc} = 1$
			間欠火炎領域	$F_{ci} = 0$
		円盤部	連続火炎領域	$F_{dc} = 0$
			間欠火炎領域	$F_{di} = 0$
		天井部	連続火炎領域と接する	$F_{w,ci} = \frac{1}{2} \left[X_5 - \sqrt{X_5^2 - 4 \left(\frac{R_5}{R_5} \right)^2} \right]$ $R_5 = \frac{D/2}{H} \quad X_5 = 1 + \frac{1+R_5^2}{R_5^2}$
	内部放射	円筒部	連続火炎領域	$q_f = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc}$
	外部放射	円盤部	/	$q_d = 0$
		天井部	連続火炎領域	$q_w = \varepsilon_w \sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc}$

火炎形状	計算項目	部位	火炎領域	計算式
(3) 連続火炎が展炎する $H < L_{c,free}$ (3-2) 円盤部連続火炎領域が円筒部に含まれる。$r_c < \frac{D}{2} < r_i$ 	展炎半径	円盤部	連続火炎領域	$r_c = \frac{(L_{c,free} - H)}{2}$
			間欠火炎領域	$r_i = \frac{(L_{m,free} - H)}{2}$
	放射率	円筒部	全て	$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}$ $A_{cc,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D L_{c,free},$ $A_{ci,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D (L_{m,free} - L_{c,free})$
				$\varepsilon_d = \frac{1 - \frac{A_{cc} E_{cc} + A_{ci} E_{ci}}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}}{A_{dc} E_{dc} + A_{di} E_{di}} \cdot \chi Q$ 円筒部連続火炎領域表面積 $A_{cc} = 2 \times \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D 0.9H$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{ci} = 0$ 円盤部連続火炎領域表面積 $A_{dc} = 0$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{di} = 2(\pi r_i^2 - \frac{\pi}{4} D^2) + 2\pi r_i (0.1H)$
		円盤部	全て	
	形態係数	円筒部	連続火炎領域	$F_{cc} = 1$
			間欠火炎領域	$F_{ci} = 0$
		円盤部	連続火炎領域	$F_{dc} = 0$
			間欠火炎領域	$F_{di} = \frac{1}{2} \left[X_2 - \sqrt{X_2^2 - 4 \left(\frac{R_3}{R_2} \right)^2} \right] - \frac{1}{2} \left[X_3 - \sqrt{X_3^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_2} \right)^2} \right]$ $R_2 = \frac{D/2}{0.9H}, R_3 = \frac{L_m - H}{0.9H}, X_2 = 1 + \frac{1 + R_3^2}{R_2^2}, X_3 = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_2^2}$
		天井部	円筒部連続火炎領域と接する	$F_{w,cc} = \frac{1}{2} \left[X_5 - \sqrt{X_5^2 - 4 \left(\frac{R_5}{R_5} \right)^2} \right]$

				$R_5 = \frac{D/2}{H} \quad X_5 = 1 + \frac{1 + R_5^2}{R_5^2}$
			円盤部間欠火炎 領域と接する	$F_{w,di} = \frac{1}{2} \left[X_6 - \sqrt{X_6^2 - 4 \left(\frac{R_6}{R_5} \right)^2} \right] - F_{w,cc}$ $R_6 = \frac{r_i}{H} \quad X_6 = 1 + \frac{1 + R_6^2}{R_5^2}$
	内部放射	円筒部	連続火炎領域	$q_f = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc}$
	外部放射	円盤部	間欠火炎領域	$q_d = \varepsilon_d (1 - \varepsilon_c) E_{di} F_{di}$
		天井部	全て	$q_w = \varepsilon_w \sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc} + (1 - \varepsilon_d) \varepsilon_w \sigma T_{w,di}^4 F_{w,di}$

火炎形状	計算項目	部位	火炎領域	計算式
(3) 連続火炎が展炎する $H < L_{c,free}$ (3-2) $\frac{D}{2} < r_c$ 	展炎半径	円盤部	連続火炎領域	$r_c = \frac{(L_{c,free} - H)}{2}$
			間欠火炎領域	$r_i = \frac{(L_{m,free} - H)}{2}$
	放射率	円筒部	全て	$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}$ $A_{cc,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D L_{c,free}$ $A_{ci,free} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D (L_{m,free} - L_{c,free})$
		円盤部	全て	$\varepsilon_d = \frac{1 - \frac{A_{cc} E_{cc} + A_{ci} E_{ci}}{A_{cc,free} E_{cc} + A_{ci,free} E_{ci}}}{A_{dc} E_{dc} + A_{di} E_{di}} \cdot \chi Q$ 円筒部連続火炎領域表面積 $A_{cc} = 2 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D 0.9H$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{ci} = 0$ 円盤部連続火炎領域表面積 $A_{dc} = 2(\pi r_c^2 - \frac{\pi}{4} D^2)$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{di} = 2(\pi r_i^2 - \pi r_c^2) + 2\pi r_i(0.1H)$
		円筒部	連続火炎領域	$F_{cc} = 1$
	形態係数	円筒部	間欠火炎領域	$F_{ci} = 0$
		円盤部	連続火炎領域	$F_{dc} = \frac{1}{2} \left[X_4 - \sqrt{X_4^2 - 4 \left(\frac{R_4}{R_2} \right)^2} \right] - \frac{1}{2} \left[X_3 - \sqrt{X_3^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_2} \right)^2} \right]$ $R_2 = \frac{D/2}{0.9H} \quad R_4 = \frac{L_c - H}{0.9H} \quad X_4 = 1 + \frac{1+R_4^2}{R_2^2} \quad X_3 = 1 + \frac{1+R_2^2}{R_2^2}$
		円盤部	間欠火炎領域	$F_{di} = \frac{1}{2} \left[X_2 - \sqrt{X_2^2 - 4 \left(\frac{R_3}{R_2} \right)^2} \right] - F_{dc} - \frac{1}{2} \left[X_3 - \sqrt{X_3^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_2} \right)^2} \right]$

				$R_2 = \frac{D/2}{0.9H} \quad R_3 = \frac{L_m - H}{0.9H} \quad X_2 = 1 + \frac{1+R_3^2}{R_2^2} \quad X_3 = 1 + \frac{1+R_2^2}{R_2^2}$
		天井部	円盤部連続火炎領域と接する	$F_{w,cc} = \frac{1}{2} \left[X_7 - \sqrt{X_7^2 - 4 \left(\frac{R_7}{R_5} \right)^2} \right]$ $R_7 = \frac{r_c}{H} \quad X_7 = 1 + \frac{1+R_7^2}{R_5^2}$
			円盤部間欠火炎領域と接する	$F_{w,di} = \frac{1}{2} \left[X_6 - \sqrt{X_6^2 - 4 \left(\frac{R_6}{R_5} \right)^2} \right] - F_{w,cc}$ $R_6 = \frac{r_i}{H} \quad X_6 = 1 + \frac{1+R_6^2}{R_5^2}$
	内部放射	円筒部	連続火炎領域	$q_f = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc}$
	外部放射	円盤部	全て	$q_d = \varepsilon_d E_{dc} F_{dc} + \varepsilon_d E_{di} F_{di}$
		天井部	全て	$q_w = \varepsilon_w \sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc} + (1 - \varepsilon_d) \varepsilon_w \sigma T_{w,di}^4 F_{w,di}$

2.2.3 単位面積当たりの発熱速度と火炎伝播速度

2.2.3.1 単位面積当たりの発熱速度

自由空間では、燃焼面に入射する放射熱流束は火炎からの内部放射のみである。従って、自由空間における単位面積当たりの燃焼速度は次式で計算する：

$$\dot{m}''_{free} = \frac{q_{f,free}}{L} \quad (2.2.32)$$

ただし、 $q_{f,free}$ は自由空間における火炎からの放射熱流束[kW/m²]、 L は材料の分解潜熱[kJ/kg]である。

室内では、燃焼面は内部放射と外部放射を受けて、燃焼速度が増加する。図 2.9 に燃焼面に入射する放射熱流束を示す。室内における単位面積当たりの燃焼速度は次式で計算する：

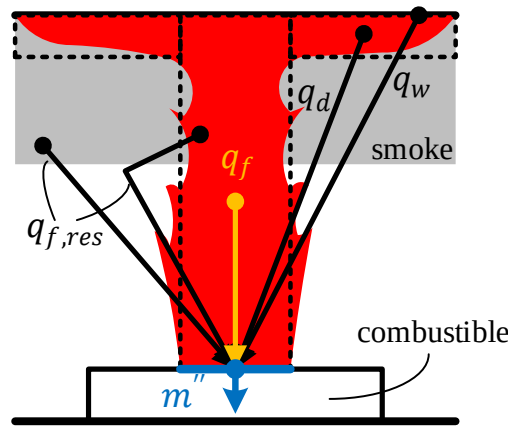


図 2.9 外部放射による燃焼速度の増加

$$\dot{m}'' = \frac{q_f + q_{inc}}{L} \quad (2.2.33)$$

ただし、 q_f は室内における内部放射の放射熱[kW/m²]、 q_{inc} は外部放射の放射熱[kW/m²]である。 q_{inc} は展炎部からの放射熱 q_d 、火炎が接する天井部から放射熱 q_w 、周壁および煙層からの放射熱と火炎からの間接放射 $q_{f,res}$ の和で与えられる：

$$q_{inc} = q_d + q_w + q_{f,res} \quad (2.2.34)$$

式(2.2.32)を式(2.2.33)で割り、整理すると、室内における単位面積あたりの燃焼速度 $\dot{m}''$ [kg/m².s]は次式で表される：

$$\dot{m}'' = (q_f + q_{inc}) \cdot \frac{\dot{m}''_{free}}{q_{f,free}} \quad (2.2.35)$$

室内における単位面積当たりの発熱速度 q_0 [kW/m²]は、燃焼速度と単位質量当たりの発熱量の積であり、次式で表される：

$$q_0 = (q_f + q_{inc}) \cdot \frac{\dot{m}''_{free}}{q_{f,free}} \cdot \Delta H = (q_f + q_{inc}) \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (2.2.36)$$

ただし、 $\frac{\Delta H}{L}$ は一定値であり、自由空間燃焼実験により求めることができる。

外部放射が燃焼面に到達するためには、火炎円筒部を透過する必要があることを考慮す

ると、補正された単位面積あたりの発熱速度は次式で表される：

$$q_0 = (q_f + \tau_c q_{inc}) \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (2.2.37)$$

ただし、 τ_c は火炎円筒部の透過率[-]であり、次式で計算する：

$$\tau_c = (1 - \varepsilon_c) \times f \quad (2.2.38)$$

ただし、 ε_c は火炎円筒部の放射率であり、第 2.2.2.1 節の式(2.2.9)で計算する。また、 ε_c は火炎全体の平均放射率であるが、火炎基部では粒子密度が高く透過率が低いため、減衰係数 f を導入する。本研究では、 f の数値を 0.8 としている。

2.2.3.2 火炎伝播速度

自由空間では、予熱面に入射する熱流は火炎からの内部放射のみである。自由空間における火炎伝播速度として、次式が提案されている^[5]。

$$v_{f,free} = \frac{\delta_f}{t_{ig}} = \left[\frac{4\delta_f}{\pi k \rho c (T_{ig} - T_0)^2} \right] q_{fl,free}^2 \quad (2.2.39)$$

ただし、 δ_f は予熱長さ[m]、 $k\rho c$ は材料の熱慣性[kWs^{1/2}/(m²・K)]、 T_{ig} は可燃物の着火温度[K]、 T_0 は初期温度[K]、 q_{fl} は火炎から予熱面への入射熱流[kW/m²]である。ここで、式(2.2.39)において、[]で囲まれた部分は可燃物の材質によって決まる物性値であるため、定数で近似できる。

室内では、予熱面は内部放射と外部放射を受けて、火炎伝播速度が増加する。図 2.10 に予熱面に入射する放射熱流束を示す。室内における火炎伝播速度は次式で計算する：

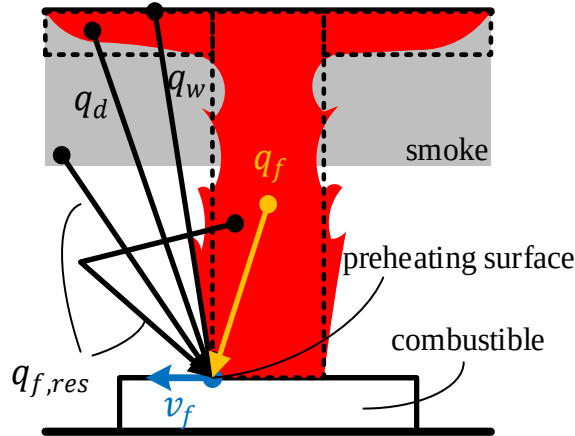


図 2.10 外部放射による火炎伝播速度の増加

$$v_f = \left[\frac{4\delta_f}{\pi k \rho c (T_{ig} - T_0)^2} \right] (q_{fl} + q_{inc,l})^2 \quad (2.2.40)$$

ただし、 q_{fl} は予熱面に入射する内部放射[kW/m²]、 $q_{inc,l}$ は予熱面に入射する外部放射[kW/m²]である。式(2.2.39)を式(2.2.40)で割ることにより、室内における火炎伝播速度は次式で与えられる：

$$v_f = \left(\frac{q_{fl} + q_{inc,l}}{q_{fl,free}} \right)^2 v_{f,free} \quad (2.2.41)$$

予熱面から円筒部を見た時の形態係数は 0.5 となるため、自由空間と室内における円筒部から予熱面への入射熱流は次式で与えられる：

$$q_{fl,free} = 0.5q_{f,free} \quad (2.2.42)$$

$$q_{fl} = 0.5q_f \quad (2.2.43)$$

外部放射に関しては、 q_d 、 q_w と $q_{f,res}$ を考慮した。火炎形状によって、 q_d と q_w の一部は円筒部を透過するが、残りは透過しない。この割合は火炎形状に依存し、正確な計算は複雑となる。そのため、本研究では、70%の q_d と q_w が円筒部を透過し、30%が透過しないと仮定した。更に、火炎基部に温度の高い炎があるため、全ての外部放射が火炎基部を通過して予熱面に到達するのは困難であると考えられる。そのため、外部放射の半分のみが予熱面に到達すると仮定した。従って、予熱面に入射する外部放射は次式で与えられる：

$$q_{inc,l} = 0.5[0.3(q_d + q_w) + 0.7\tau_c(q_d + q_w)] + 0.5q_{f,res} \quad (2.2.44)$$

また、本モデルは鉛直下向きの火炎伝播速度も考慮している。燃え広がり先端が可燃物上面の端部に到達した後は、可燃物の側面の鉛直下方に沿って広がる。実験によると、鉛直下方の火炎伝播速度は水平方向火炎伝播速度の約半分である。これより、火炎伝播速度は次式で与えられる：

$$v_f = \begin{cases} \left(\frac{0.5q_f + q_{inc,l}}{0.5q_{f,free}} \right)^2 v_{f,free} & D_f \leq W_u \\ 0.5 \left(\frac{0.5q_f + q_{inc,l}}{0.5q_{f,free}} \right)^2 v_{f,free} & D_f > W_u \end{cases} \quad (2.2.45)$$

$$W_u = \sqrt{4A_{top}/\pi} \quad (2.2.46)$$

ただし、 D_f は燃焼直径[m]、 W_u は試験体の上面における等価直径[m]、 A_{top} は試験体上面の面積[m²]である。本研究では、試験体上面は正方形であるため、 W_u は試験体の幅と等しい。

2.2.4 換気支配における燃焼面の形状

火災室の開口が小さい場合には、可燃物に十分な酸素が供給されず、燃焼が抑制される。この場合は、室内で燃焼可能な発熱速度の上限は次式で与えられる。本モデルでは、 Q_{vent} [kW]を発熱速度の最大値として設定する。

$$Q_{vent} = 1500B_oH_o\sqrt{H_o} \quad (2.2.47)$$

ただし、 B_o は火災室の開口幅[m]、 H_o は開口高さ[m]である。

(1) 燃え尽きが始まる前

燃え尽きが始まる前の火炎伝播速度を図 2.11 に示す。時刻 t における燃焼半径を r_f [m]、燃え広がり先端の高さを z_f [m]とする。1 秒後、燃え広がり先端は水平方向に v_f 、鉛直下方に v_d 広がるとする。時刻 0 から t までの総発熱量は、試験体が厚さ z_f まで燃焼した場合の総発熱量に等しい。従って、 z_f は次式で与えられる。

$$z_f = \frac{\int_0^t q_0(t) dt}{\rho_u \Delta H} \quad (2.2.48)$$

ただし、 q_0 は単位面積当たりの発熱速度[kW/m²]、 ρ_u は試験体の密度[kg/m³]、 ΔH は赤尾ら[3]が測定した単位質量当たりの発熱量(=29,410kJ/kg)である。

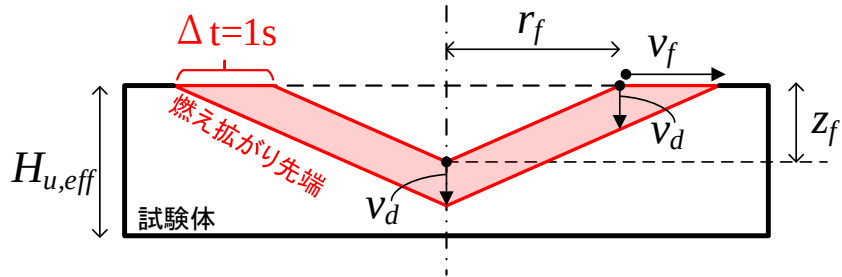


図 2.11 燃え尽きが始まる前の火炎伝播速度

同様に、換気支配時において、1 秒間の発熱量は厚さ v_d [m]の試験体が燃焼した場合の発熱量に等しい。この時、 v_d は次式を用いて求めることができる。

$$v_d = \frac{Q_{vent}}{A_f \rho_u \Delta H} \quad (2.2.49)$$

ただし、 A_f は燃焼面積[m²]である。

図 2.11 に示す三角形の相似則を用いることで、水平方向の火炎伝播速度 v_f [m/s]を次式により求めることができる。

$$v_f = v_d \frac{r_f}{z_f} \quad (2.2.50)$$

(2) 燃え尽きが始まった後

燃え尽きが始まった後の火炎伝播速度を図 2.12 に示す。換気支配型燃焼の場合、発熱速度の最大値は Q_{vent} になる。従って、次式に示すように、試験体が 1 秒間に燃焼して放出する熱量は Q_{vent} となる。

$$V_u \rho_u \Delta H = Q_{vent} \quad (2.2.51)$$

ただし、 V_u は試験体が 1 秒間に燃焼する体積(図 2.12 の赤色部分の体積)式(2.2.55)で与えられる。

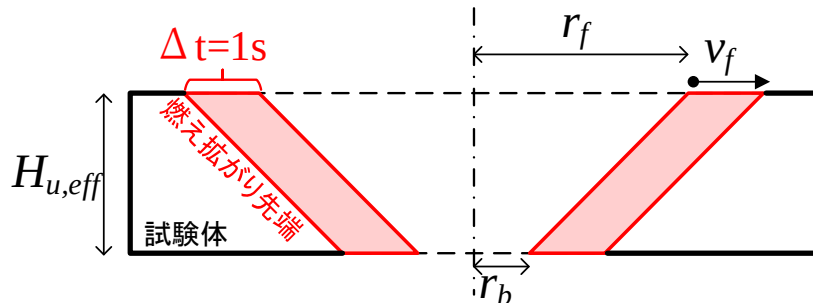


図 2.12 燃え尽きが始まった後の火炎伝播速度

赤色部分の上面の面積(ドーナツ形状)は

$$\pi(r_f + v_f)^2 - \pi r_f^2 = 2\pi r_f v_f + \pi v_f^2 \quad (2.2.52)$$

赤色部分の底面の面積（ドーナツ形状）は

$$\pi(r_b + v_f)^2 - \pi r_b^2 = 2\pi r_b v_f + \pi v_f^2 \quad (2.2.53)$$

となる。上面と底面の面積の平均値は

$$\pi(r_f + r_b)v_f + \pi v_f^2 \quad (2.2.54)$$

となる。従って、試験体が1秒間に燃焼する体積 V_u 次式で近似できる。

$$V_u = \{\pi(r_f + r_b)v_f + \pi v_f^2\}H_{u,eff} \quad (2.2.55)$$

式(2.2.55)を式(2.2.51)に代入して、整理すると、燃え尽きが始まった後の火炎伝播速度は次式で与えられる。

$$v_f = \sqrt{\frac{Q_{vent}}{\pi H_{u,eff} \rho \Delta H} + \left(\frac{r_f + r_b}{2}\right)^2} - \frac{r_f + r_b}{2} \quad (2.2.56)$$

換気支配時には、室内の発熱速度が最大値 Q_{vent} なので、発熱速度を燃焼面積で割って単位面積当たりの発熱速度を求める。

$$q_0 = \frac{Q_{vent}}{A_f} \quad (2.2.57)$$

2.2.5 燃え尽き開始時間と燃え尽き面拡大速度

図 2.13(a)に示すように、試験体上面の中心点から着火した後は、燃焼面が水平方向に広がると同時に、鉛直方向にも広がる。火炎の燃え広がり先端が試験体の底面に辿り着くと、燃え尽きが始まる。燃え尽き開始時間 t_b は次式で与えられる。

$$\int_0^{t_b} [q_0(t) \Delta t] dt = h \Delta H \rho_u \quad (2.2.58)$$

ただし、 q_0 は単位面積当たりの発熱速度[kW/m²]、 ΔH は試験体単位質量当たりの発熱量[kJ/kg]、 ρ_u は試験体の密度[kg/m³]である。

図 2.13(b)に示すように、燃え尽き面の拡大速度は燃焼面の拡大速度と等しいとすると燃え尽き直径 D_b は次式で与えられる。

$$D_{b(t)} = \begin{cases} 0 & t < t_b \\ D_{f(t-t_b)} & t \geq t_b \end{cases} \quad (2.2.59)$$

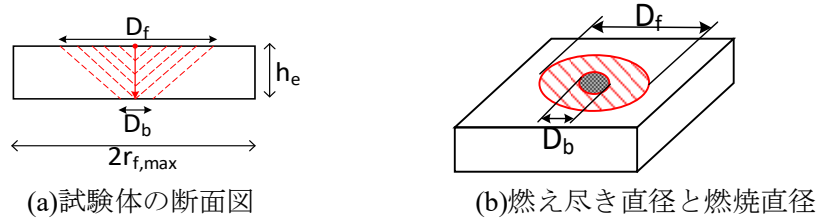


図 2.13 燃え尽きが始まる後の火炎伝播速度

2.2.6 最大燃焼直径

本研究では、全ての可燃物の底面が正方形の直方体である。直方体の可燃物が燃焼する際、最大燃焼面積は可燃物の上面の面積と見なされることが多い。しかし、最大燃焼時には、側面も燃焼する。図 2.14(a)に示すように、元の燃焼面の形状では、上面と側面の一部が燃焼する。計算の簡便化のため、図 2.14(b)に示すように、側面の燃焼面を上面に移し、上面のみが

燃焼すると仮定した。この時、上面の面積は図 2.14(a)における上面と側面の燃焼面積の和である。可燃物の体積を一定に保つように厚さが設定され、可燃物の有効長さ $W_{u,eff}$ (=有効幅 $D_{u,eff}$)、有効高さ $H_{u,eff}$ 、最大燃焼直径 $D_{f,max}$ は次式で与えられる。

$$W_{u,eff}^2 = W_u D_u + 2W_u h_f + 2D_u h_f \quad (2.2.60)$$

$$H_{u,eff} = \frac{W_u D_u H_u}{W_{u,eff} D_{u,eff}} \quad (2.2.61)$$

$$D_{f,max}^2 = W_{u,eff}^2 + D_{u,eff}^2 \quad (2.2.62)$$

ただし、 h_f は試験体側面燃焼高さの最大値[m]である。実験によって、 h_f は次式で近似できる。

$$h_f = \min(0.2, 0.6h) \quad (2.2.63)$$

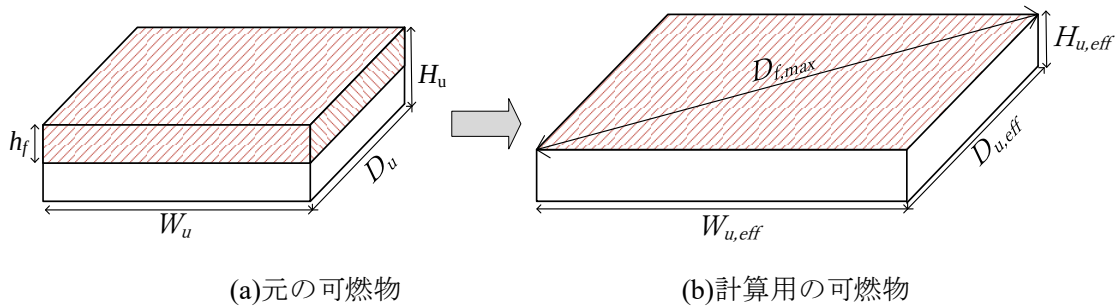


図 2.14 燃え尽きが始まる後の火炎伝播速度

2.2.7 燃焼面積と発熱速度

燃焼面は中心点を基準にして、円形に広がるので、燃焼面積は円形として計算した。図 2.15(b)に示すように、燃焼面積は燃え広がり先端が端部に到達した後は、正味の面積(赤色部の面積)とした。その後、図 2.15(c)に示すように、燃焼面積は変化せず、上面の面積と同じである。燃焼面積 A_f の計算式を次式に示す。

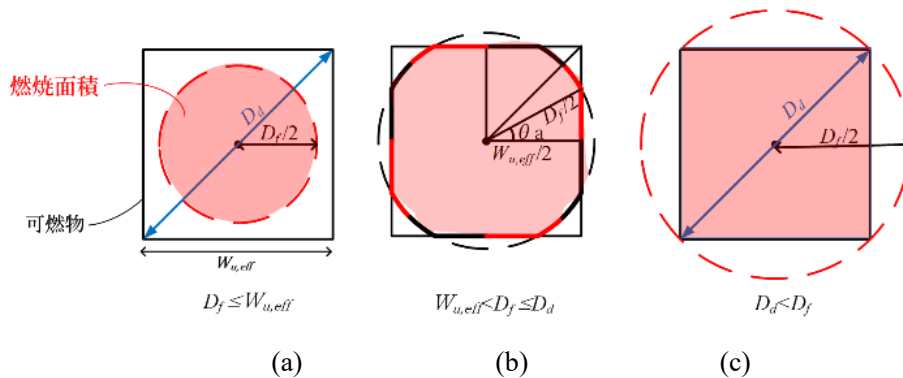


図 2.15 燃え尽きが始まる後の火炎伝播速度

$$A_f = \begin{cases} \frac{\pi}{4} D_f^2 & D_f \leq W_{u,eff} \\ \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{4} - \theta_a \right) \frac{D_f^2}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{W_{u,eff}}{2} \times \frac{D_f}{2} \sin \theta_a \right] \times 8 & W_{u,eff} < D_f \leq D_{f,max} \\ W_{u,eff} \times D_{u,eff} & D_{f,max} < D_f \end{cases} \quad (2.2.64)$$

$$D_d = D_{f,max} \quad (2.2.65)$$

ただし、

$$D_d = 2\sqrt{\left(\frac{W_{u,eff}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{u,eff}}{2}\right)^2} \text{ , 対角線の長さ}$$

$$\theta_a = \cos^{-1}\left(\frac{W_u}{D_f}\right) \text{ ,}$$

D_f は燃焼直径である。

以上のことより、新しい時刻の発熱速度は次式で計算して更新する。

$$Q = q_0 A_f \quad (2.2.66)$$

2.3 二層ゾーンモデルの改良

2.3.1 二層ゾーンモデルの概要

初期火災の問題を扱う場合、室の上部に高温の煙層が、室の下部に低温の空気層が形成されると見なす二層ゾーンモデル^[6]がしばしば使われる。二層ゾーンモデルの概要図を図 2.16 に示す。火災空間では、燃焼により熱が与えられることによって気体の温度が上昇し、周壁との間には熱伝達による熱の移動が生じる。また、開口を通した温度差による換気により、隣接空間との間に気体と熱の移動が生じる。

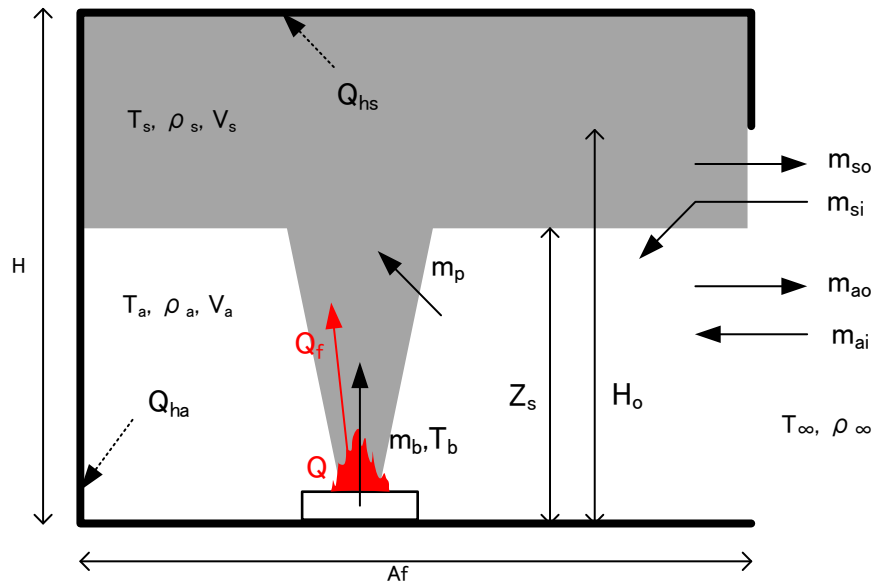


図 2.16 二層ゾーンモデルの概要図

ここで、 T_s ：上部層(煙層)の気体の温度[K]

T_a ：下部層(空気層)の気体の温度[K]

T_∞ ：室外温度（＝初期温度）[K]

ρ_s ：上部層(煙層)の気体の密度[kg/m³]

ρ_a ：下部層(空気層)の気体の密度[kg/m³]

ρ_{∞} : 室外の気体の密度[kg/m³]
 V_s : 上部層(煙層)の体積[K]
 V_a : 上部層(空気層)の体積[K]
 Q : 発熱速度[kW]
 Q_f : 火災プルームが火炎から得る熱量[kW]
 Q_{hs} : 熱伝達により上部層(煙層)が得る熱量[kW] (放射+対流)
 Q_{ha} : 熱伝達により下部層(空気層)が得る熱量[kW] (放射+対流)
 m_p : プルームに巻き込まれる質量流量[kg/s]
 m_b : 可燃物の燃焼速度[kg/s]
 m_{ao} : 開口を通じて下部層から流出する流量[kg/s]
 m_{ai} : 開口を通じて下部層に流入する流量[kg/s]
 m_{so} : 開口を通じて上部層から流出する流量[kg/s]
 m_{si} : 開口を通じて上部層に流入する流量[kg/s]

である。

2.3.1.1 ゾーンの保存式

ゾーンモデルでは、上部層温度、下部層温度、境界面の位置（煙層高さ）を計算する。これらは、ゾーンの質量、熱エネルギー、化学種の保存式から導かれる。以下の式において、考えているゾーンは i で識別するが、表記上の簡潔さのため流入を区別する必要のある開口流量以外は添え字の i を省略している。

(1) 質量の保存

ゾーンの中では、燃焼反応が起こっているが、化学反応では質量は変化しないので、ゾーン中の気体の質量は、ゾーンの境界を通しての流れに伴う質量の出入りによってのみ変化する。

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = \sum_j (-m_{ij} + m_{ji}) \quad (2.3.1)$$

ここで、 ρ : ゾーンの気体の密度[kg/m³]

V : ゾーンの体積[m³]

m_{ij} : ゾーンの境界を通して流出する気体の質量流量[kg/s]

m_{ji} : ゾーンの境界を通して流入する気体の質量流量[kg/s]

である。 $\sum_j$ は隣接するゾーンに対して流入と流出の和をとることを意味する。これらの質量の流出入は、開口を通る気体の移動、火災プルームに伴って発生する。

(2) 熱エネルギーの保存

各ゾーンの熱エネルギーの保存は次のように表される。

$$\frac{d}{dt}(c_p \rho V T) = \dot{Q}_f + \dot{Q}_h + \sum_j c_p (-m_{ij} T + m_{ji} T_j) \quad (2.3.2)$$

ここで、
 T : ゾーンの温度[K]
 T_j : 隣接するゾーンの温度[K]
 $\dot{Q}_f$: ゾーンが火災プルームから得る熱量[kW]
 $\dot{Q}_h$: ゾーンが周壁との熱伝達により得る熱量[kW]
 c_p : ゾーンの気体の定圧比熱[kJ/kg·K]

である。

(3) 化学種の保存

各ゾーン中の特定の化学種 l の量の変化は、境界を通じて流出入する気体中の化学種 l の濃度が異なること、ゾーン内の化学反応（燃焼）によって化学種 l が発生または消費されることによって起こる。従って、 Y_l を化学種 l の質量分率[kg/kg]とすると、化学種の保存は次式で表せる。

$$\frac{d}{dt}(Y_l \rho V) = \sum_j (-Y_l \dot{m}_{ij} + Y_l \dot{m}_{ji}) + \Gamma_l \quad (2.3.3)$$

また、 Γ_l はゾーンでの化学種 l の生成速度[kg/s]であり、次式で与えられる。

$$\Gamma_l = \frac{(v_l'' - v_l') M_l}{v_f' M_f} \dot{m}_b \quad (2.3.4)$$

ただし、
 $\dot{m}_b$: 燃焼速度[kg/s]
 M_f : 燃料の分子量[-]
 M_l : 化学種 l の分子量[-]
 v_l' : 原系の化学種 l の化学量論係数[-]
 v_l'' : 生成系の化学種 l の化学量論係数[-]

である。

2.3.1.2 開口流量

(1) 中性帯高さ

開口流量を圧力の関数で表す際、中性帯高さを用いると分かりやすい。ここでは、室内に二層の温度分布が存在し、室外の温度が一様である場合について考える。

室内外の高さ z での圧力 $p_{in}(z)$ 及び $p_{out}(z)$ はそれぞれ次式で表される。

$$p_{in}(z) = \begin{cases} p_{in}(0) - \rho_a g z & (z \leq Z_s) \\ p_{in}(0) - \rho_a g Z_s - \rho_s g (z - Z_s) & (z > Z_s) \end{cases} \quad (2.3.5)$$

$$p_{out}(z) = p_{out}(0) - \rho_{\infty} g z \quad (2.3.6)$$

中性帯高さは、式(2.3.5)と式(2.3.6)を等置することにより、次のように得られる。

$$Z_{na} = \frac{p_{out}(0) - p_{in}(0)}{(\rho_{\infty} - \rho_a) g} \quad (2.3.7)$$

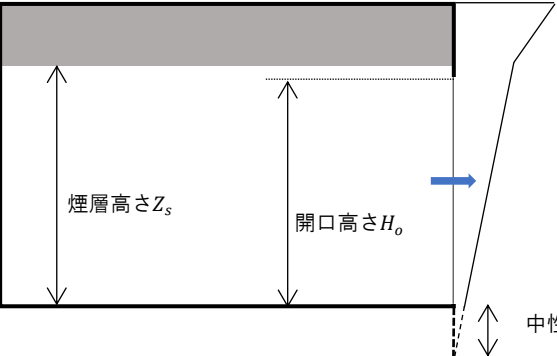
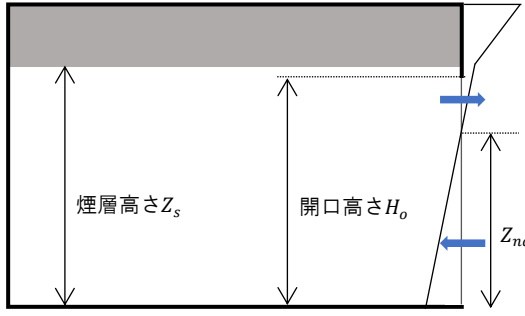
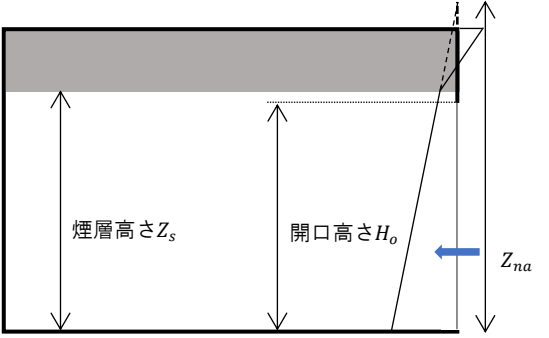
$$Z_{ns} = \frac{p_{out}(0) - p_{in}(0)}{(\rho_{\infty} - \rho_s)g} + \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_{\infty} - \rho_s} Z_s \quad (2.3.8)$$

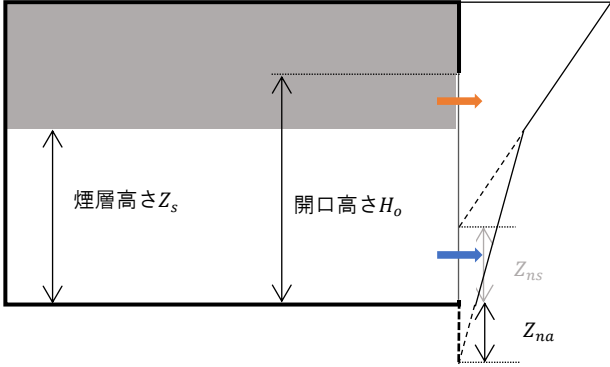
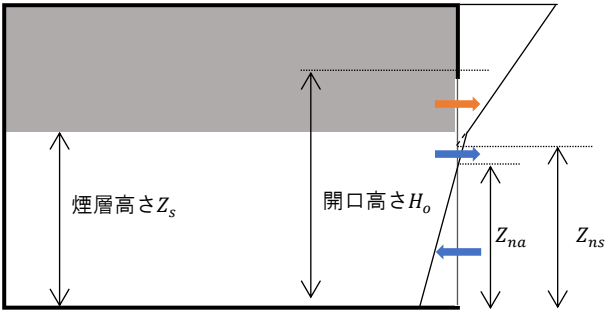
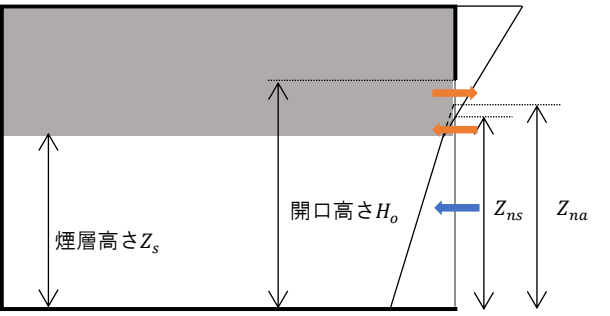
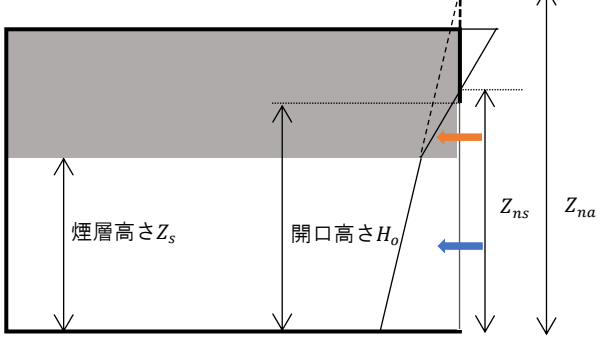
表記の簡単のため、これ以降、 $p_{out}(0) - p_{in}(0) = \Delta p$ とする。また、計算の際には、 T_s, T_a が T_{∞} と非常に近い値の時は、数値的不定を避けるため T_s, T_a を $T_{\infty}+0.1^{\circ}\text{C}$ とする。

(2)圧力差分布

池松ら^[7]に従い、火災室を想定した $T_{\infty} < T_a < T_s$ の場合、圧力差分布と開口流量の向きの関係として以下の7つの場合が考えられる。

表 2.4 外気温<下部層温度<上部層温度($T_{\infty} < T_a < T_s$)の場合の圧力差分布

煙層高さ(z_s)と 中性帯高さ(z_{na}, z_{ns}) による場合分け	圧力差分布と開口流量の向き
(a) $z_s \geq H_o$ $z_{na} < 0$	 煙層高さz_s 開口高さH_o 中性帯高さz_{na} 下部層から流出
(b) $z_s \geq H_o$ $0 \leq z_{na} < H_o$	 煙層高さz_s 開口高さH_o z_{na} 下部層で流出入
(c) $z_s \geq H_o$ $z_{na} \geq H_o$	 煙層高さz_s 開口高さH_o z_{na} 下部層に流入

(d) $z_s < H_o$ $z_{na} < 0$	 煙層高さ z_s 開口高さ H_o 上部層から流出 下部層から流入 z_{ns} z_{na}
(e) $z_s < H_o$ $0 \leq z_{na} < z_s$	 煙層高さ z_s 開口高さ H_o 上部層から流出 下部層で流入 z_{na} z_{ns}
(f) $z_s < H_o$, $z_{na} \geq z_s$ かつ $z_{ns} < H_o$	 煙層高さ z_s 開口高さ H_o 上部層から流出 上部層を通して下部層に流入 下部層に流入 z_{ns} z_{na}
(g) $z_s < H_o$ $z_{na} \geq z_s$ かつ $z_{ns} \geq H_o$	 煙層高さ z_s 開口高さ H_o 上部層を通して下部層に流入 下部層に流入 z_{ns} z_{na}

(3) 開口流量の計算式

本節ではそれぞれの場合の開口流量の計算式を示す。開口流量は中性帯高さをを用いて表すことができる。

以下では、

α : 流量係数[-]

B : 開口の幅[m]

m_{ao} :開口を通じて下部層から流出する流量[kg/s]

m_{ai} :開口を通じて下部層に流入する流量[kg/s]

m_{so} :開口を通じて上部層から流出する流量[kg/s]

m_{si} :開口を通じて上部層に流入する流量[kg/s]

とする。

(a) $Z_s \geq H_o, Z_{na} < 0$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ao} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_a(\rho_\infty - \rho_a)} \int_0^{H_o} \sqrt{z - Z_{na}} dz \\ &= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_a(\rho_\infty - \rho_a)} \left\{ (H_o - Z_{na})^{3/2} - (-Z_{na})^{3/2} \right\} \end{aligned} \quad (2.a1)$$

$$\dot{m}_{ai} = 0 \quad (2.a2)$$

$$\dot{m}_{so} = 0 \quad (2.a3)$$

$$\dot{m}_{si} = 0 \quad (2.a4)$$

(b) $Z_s \geq H_o, 0 \leq Z_{na} < H_o$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ao} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_a(\rho_\infty - \rho_a)} \int_{Z_{na}}^{H_o} \sqrt{z - Z_{na}} dz \\ &= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_a(\rho_\infty - \rho_a)} (H_o - Z_{na})^{3/2} \end{aligned} \quad (2.b1)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ai} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} \int_0^{Z_{na}} \sqrt{Z_{na} - z} dz \\ &= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} Z_{na}^{3/2} \end{aligned} \quad (2.b2)$$

$$\dot{m}_{so} = 0 \quad (2.b3)$$

$$\dot{m}_{si} = 0 \quad (2.b4)$$

(c) $Z_s \geq H_o, Z_{na} \geq H_o$

$$\dot{m}_{ao} = 0 \quad (2.c1)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ai} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} \int_0^{H_o} \sqrt{Z_{na} - z} dz \\ &= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} \{ -(Z_{na} - H_o)^{3/2} + Z_{na}^{3/2} \} \end{aligned} \quad (2.c2)$$

$$\dot{m}_{so} = 0 \quad (2.c3)$$

$$\dot{m}_{si} = 0 \quad (2.c4)$$

(d) $Z_s < H_o, Z_{na} < 0$

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{ao} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_a(\rho_\infty - \rho_a)} \int_0^{Z_s} \sqrt{z - Z_{na}} dz \\
&= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_a(\rho_\infty - \rho_a)} \{(Z_s - Z_{na})^{3/2} - (-Z_{na})^{3/2}\}
\end{aligned} \tag{2.d1}$$

$$\dot{m}_{ai} = 0 \tag{2.d2}$$

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{so} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_s(\rho_\infty - \rho_s)} \int_{Z_s}^{H_o} \sqrt{z - Z_{ns}} dz \\
&= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_s(\rho_\infty - \rho_s)} \{(H_o - Z_{ns})^{3/2} - (Z_s - Z_{ns})^{3/2}\}
\end{aligned} \tag{2.d3}$$

$$\dot{m}_{si} = 0 \tag{2.d4}$$

(e) $Z_s < H_o$, $0 \leq Z_{na} < Z_s$

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{ao} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_a(\rho_\infty - \rho_a)} \int_{Z_{na}}^{Z_s} \sqrt{z - Z_{na}} dz \\
&= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_a(\rho_\infty - \rho_a)} (Z_s - Z_{na})^{3/2}
\end{aligned} \tag{2.e1}$$

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{ai} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} \int_0^{Z_{na}} \sqrt{Z_{na} - z} dz \\
&= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} Z_{na}^{3/2}
\end{aligned} \tag{2.e2}$$

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{so} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_s(\rho_\infty - \rho_s)} \int_{Z_s}^{H_o} \sqrt{z - Z_{ns}} dz \\
&= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_s(\rho_\infty - \rho_s)} \{(H_o - Z_{ns})^{3/2} - (Z_s - Z_{ns})^{3/2}\}
\end{aligned} \tag{2.e3}$$

$$\dot{m}_{si} = 0 \tag{2.e4}$$

(f) $Z_s < H_o$, $Z_{na} \geq Z_s \rightarrow Z_{ns} < H_o$

$$\dot{m}_{ao} = 0 \tag{2.f1}$$

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{ai} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} \int_0^{Z_s} \sqrt{Z_{na} - z} dz + \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_s)} \int_{Z_s}^{Z_{ns}} \sqrt{Z_{ns} - z} dz \\
&= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} \{-(Z_{na} - Z_s)^{3/2} + Z_{na}^{3/2}\} \\
&\quad + \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_s)} (Z_{ns} - Z_s)^{3/2}
\end{aligned} \tag{2.f2}$$

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{so} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_s(\rho_\infty - \rho_s)} \int_{Z_{ns}}^{H_o} \sqrt{z - Z_{ns}} dz \\
&= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_s(\rho_\infty - \rho_s)} (H_o - Z_{ns})^{3/2}
\end{aligned} \tag{2.f3}$$

$$\dot{m}_{si} = 0 \quad (2.f4)$$

(g) $Z_s < H_o$, $Z_{na} \geq Z_s$ かつ $Z_{ns} \geq H_o$

$$\dot{m}_{ao} = 0 \quad (2.g1)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ai} &= \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} \int_0^{Z_s} \sqrt{Z_{na} - z} dz + \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_s)} \int_{Z_s}^{H_o} \sqrt{Z_{ns} - z} dz \\ &= \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_a)} \{-(Z_{na} - Z_s)^{3/2} + Z_{na}^{3/2}\} \\ &\quad + \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_\infty(\rho_\infty - \rho_s)} \{-(Z_{ns} - H_o)^{3/2} + (Z_{ns} - Z_s)^{3/2}\} \end{aligned} \quad (2.g2)$$

$$\dot{m}_{so} = 0 \quad (2.g3)$$

$$\dot{m}_{si} = 0 \quad (2.g4)$$

(4)開口流量の計算の流れ

開口流量を求める際には、圧力差を仮定し、開口流量が満たすべき条件式を使って反復計算で開口流量を求める。従来のモデルは、ニュートン法を用いて反復計算を行っていたが、ニュートン法では数値的に収束できないことがあるため、本モデルは割線法を用いて計算を行った。計算手順を以下に示す。

①室内外の床面圧力差 Δp の初期値を仮定する：

$$\Delta p_1 = 10 \quad (2.3.9a)$$

$$\Delta p_2 = 9 \quad (2.3.9b)$$

②下部層中性帯高さ Z_{na} と上部層中性帯高さ Z_{ns} を Δp で表す。

$$Z_{na} = \frac{\Delta p}{(\rho_\infty - \rho_a)g} \quad (2.3.10)$$

$$Z_{ns} = \frac{\Delta p}{(\rho_\infty - \rho_s)g} + \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_\infty - \rho_s} Z_s \quad (2.3.11)$$

③本モデルの圧力差分布は七つの場合があり、場合分けに従って開口流量を求める。

④仮定した Δp から得られた開口流量を使って、残差を計算する：

$$R(\Delta p) = Q_f + Q_h - c_p m_{ao} T_a + c_p m_{ai} T_\infty - c_p m_{so} T_s + c_p m_{si} T_\infty \quad (2.3.12)$$

この式は室内の熱収支の式であり、 $R = 0$ となれば室内の熱収支が満たされる。

⑤新しい Δp を仮定する：

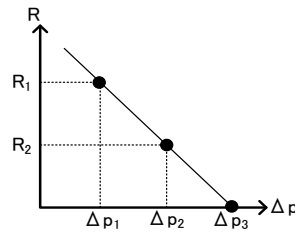


図 2.17 割線法で新しい Δp を仮定する

仮定した Δp_1 と Δp_2 を用いて、新しい Δp_3 を次式で計算する：

$$\Delta p_3 = \Delta p_2 - \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{R_1 - R_2} \times R_2 \quad (2.3.13)$$

⑥ Δp を更新する：

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 \quad (2.3.14)$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_3 \quad (2.3.15)$$

⑦収束を判断する：反復計算を行い、残差が十分に小さくなった時点で、室内の熱収支が満たされると判断し、その時の圧力差 Δp を正解とする。

$$|R| < 10^{-8} \quad (2.3.16)$$

⑧正しい床面圧力差 Δp_2 を用いて開口流量を計算する。

2.3.1.3 火災プルームの質量流量

火災プルームは下部層の気体を連行しながら上昇し、空間の上部に燃焼ガスと空気との混合ガスよりなる上部層を形成する。火災プルームによる上昇気流の質量流量は、火炎高さに関係する三つの領域（初期領域、乱流火炎領域、プルーム領域）で異なることが知られている。また、固体可燃物が燃焼する際、発熱源は点熱源ではないため、仮想点熱源の利用が提案されている。Zukosiki らのプルームモデルに基づいて、これらの領域ごとの流量は式(26)(27)(28)で計算する。

火災プルーム流量を求めるためには、先ず無次元発熱速度 Q_x^* を次のように定義する。

$$Q_x^* = \frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g x} x^2} \quad (2.3.17)$$

ただし、 Q ：火源の発熱速度[kW]

ρ_∞ ：外部空気の密度[kg/m³]

c_p ：空気の定圧比熱[kJ/kg・K]

T_∞ ：外部空気の温度（=293 K）

g ：重力加速度

である。なお、 x は平均火炎高さ Z_{fl} または最大火炎高さ Z_{flm} を表す。

本研究では、平均火炎高さ Z_{fl} は次式で与えられる：

$$Z_{fl} = L_{m,free} \quad (2.3.18)$$

最大火炎高さ Z_{flm} は次式で計算する：

$$Z_{flm} = \begin{cases} 1.4Z_{fl} & (Q_D^* \leq 1) \\ Z_{fl} + \frac{D_f}{2} (1.44 \frac{Z_{fl}}{D_f} - 0.13)^{1/2} & (Q_D^* > 1) \end{cases} \quad (2.3.19)$$

仮想点熱源距離を用いて、 m_1 、 m_2 および m_3 を

$$m_1(Z_s) = 0.447 \rho_\infty D_f Z_s^{3/4} \quad (2.3.20)$$

$$m_2(Z_s) = 0.21 \rho_\infty \sqrt{g Z_v} Z_v^2 Q_{Z_{vf}}^{*1/3} \quad (2.3.21)$$

$$m_3(Z_s) = 0.21\rho_\infty\sqrt{gZ_v}Z_v^2Q_{Z_v}^{*1/3} \quad (2.3.22)$$

と定義する。次に Z_v および Z_{vf} は次のように求める。まず、仮想点熱源の距離 Z_0 を

$$Z_0 = 0.5D_f - 0.33Z_{fl} \quad (2.3.23)$$

として求め、 Z_v および Z_{vf} を

$$Z_v = Z_s + Z_0 \quad (2.3.24)$$

$$Z_{vf} = Z_{flm} + Z_0 \quad (2.3.25)$$

とする。

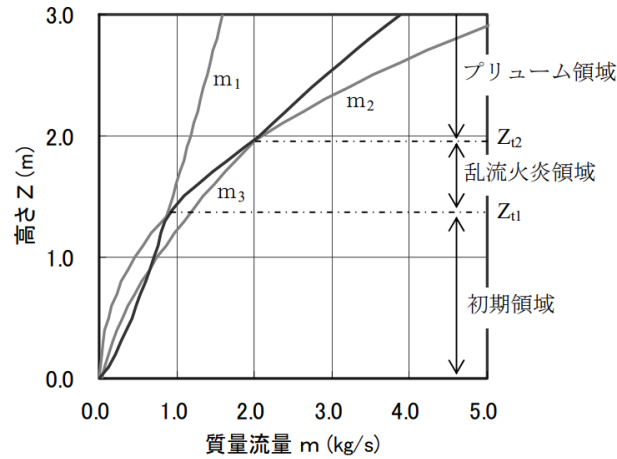


図 2.18 火災プルーム流量の計算例

本モデルでは、初期領域の質量流量 (m_1) を考慮しない。この時火災プルーム流量 m_p は次のように与えられる。

$$m_p(Z_s) = m_{23}(Z_s) = \min [m_2(Z_s), m_3(Z_s)] \quad (2.3.26)$$

2.3.2 壁面温度

2.3.2.1 壁の熱伝導方程式

壁面温度は、層と周壁との間の熱伝達を決定するため重要となる。本節では、一次元非定常熱伝導方程式を前進差分法（陽解法）により解くことで、壁面温度を計算する。図 2.19 に格子の分割を示す。本モデルは壁を厚さ方向に 5 個のコントロールボリューム（以下、CV）に分割し、温度はそれらの CV の中心において定義する。

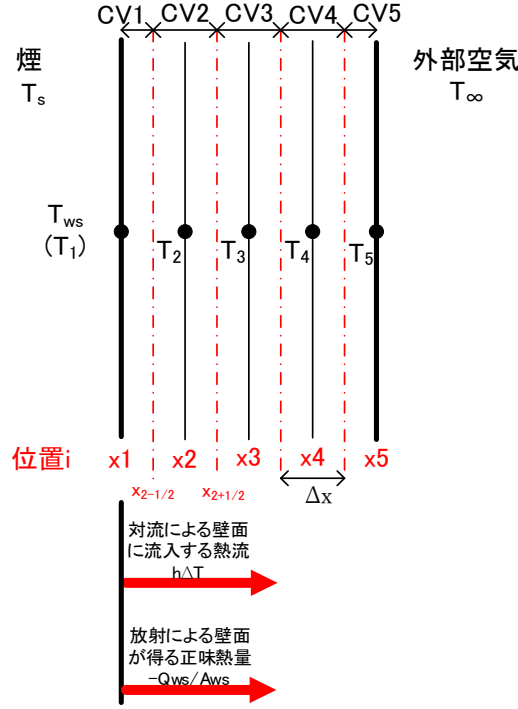


図 2.19 壁の CV 分割と熱の流入出

一次元非定常熱伝導方程式：

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.3.27)$$

を用いて壁内部温度を計算するためには、先ず熱伝導方程式を CV2 で積分する：

$$\int_{x_{2+\frac{1}{2}}}^{x_{2-\frac{1}{2}}} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dx = \int_{x_{2+\frac{1}{2}}}^{x_{2-\frac{1}{2}}} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (2.3.28)$$

隣接点の温度 T_1 と T_3 を用いて CV2 の境界における勾配を表す：

$$c\rho \frac{\partial T_2}{\partial t} \Delta x = \frac{k_{2-\frac{1}{2}}(T_1 - T_2)}{(\delta x)_{2-\frac{1}{2}}} - \frac{k_{2+\frac{1}{2}}(T_2 - T_3)}{(\delta x)_{2+\frac{1}{2}}} \quad (2.3.29)$$

そして、上式を時間 $j \sim j + \Delta t$ で積分する：

$$\int_j^{j+\Delta t} c\rho \frac{\partial T_2}{\partial t} \Delta x dt = \int_j^{j+\Delta t} \left[\frac{k_{2-\frac{1}{2}}(T_1 - T_2)}{(\delta x)_{2-\frac{1}{2}}} - \frac{k_{2+\frac{1}{2}}(T_2 - T_3)}{(\delta x)_{2+\frac{1}{2}}} \right] dt \quad (2.3.30)$$

上式を前進差分法（陽解法）で離散化すると、上部層壁の内部温度 T_2 は：

$$c\rho \Delta x \frac{T_{2,j+1} - T_{2,j}}{\Delta t} = \frac{k_{2-\frac{1}{2}}}{\Delta x} (T_{1,j} - T_{2,j}) - \frac{k_{2+\frac{1}{2}}}{\Delta x} (T_{2,j} - T_{3,j}) \quad (2.3.31)$$

である。以下、 $T_3 \sim T_4$ も同様である。時刻 t の温度を知れば、 $t + \Delta t$ 時刻の温度が求められる。

図 2.19 に示すように、室内側から壁面（CV1）に流入する正味の熱流は対流・放射による壁面に流入する熱流上部層壁面に入射する熱流の和で与えられる。二層ゾーンモデルでは、

放射による壁面に流入する熱流束は上部層からの放射熱だけでなく、上部層壁面から、下部層から、下部層壁面から、火炎からの放射熱も含まれる。従って、放射による壁面に流入する正味の熱流束は Net-radiation 法により算出した $\frac{Q_{ws}}{A_{ws}}$ で与えられる。CV1 の境界条件が分かれば、熱伝導方程式を同様に CV 1 と時間 $j \sim j + \Delta t$ で積分し、離散化すると、上部層壁表面温度 T_{ws} は次式で計算できる：

$$c\rho \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{ws,j+1} - T_{ws,j}}{\Delta t} = h_{0,j}(T_{s,j} - T_{ws,j}) - \frac{Q_{ws}}{A_{ws}} - \frac{k_{1+\frac{1}{2},j}}{\Delta x/2} (T_{ws,j} - T_{2,j}) \quad (2.3.32)$$

ただし、 Q_{ws} は上部層壁面から失われる正味の熱量、 c は壁材料の比熱 ($= 1.13 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)、 ρ は壁の密度 ($= 250 \text{ kg}/\text{m}^3$)、 Δx は格子の幅 0.0125 m 、 k は壁の熱伝導率 [$\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$]、 h は対流熱伝達率 [$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] である。

2.3.2.2 壁の熱伝導率

本モデルで使用する壁材質は断熱材セラミックファイバーボードであり、図 2.20 に製造業者が提供した熱伝導率を示す。600K～1200K の範囲内で、温度と熱伝導率が概ね正比例の直線関係になる。ただし、600K 以下のデータが提供されていないため、本モデルは温度が 600K 未満の場合は熱伝導率を 600K の熱伝導率と同じと仮定した。図 2.20 によって、セラミックファイバーボードの熱伝導率の回帰式は次式で与えられる：

$$k = 2 \times 10^{-7} \max(T, 600) - 3 \times 10^{-5} \quad (2.3.33)$$

ただし、 k は熱伝導率 [$\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$]、 T は温度 [K] である。

均一な材質であっても、熱伝導率の温度依存性のために、温度分布により熱伝導率が変わることもある。境界面における熱伝導率 $k_{i+\frac{1}{2}}$ は次式で与える。

$$k_{i+\frac{1}{2}} = \frac{k_i k_{i+1}}{(k_i + k_{i+1})/2} \quad (2.3.34)$$

ただし、 k_i は位置 i の熱伝導率、 k_{i+1} は位置 $i+1$ の熱伝導率である。上式は $k_{i+\frac{1}{2}}$ が k_i と k_{i+1} の調和平均であることを示している。

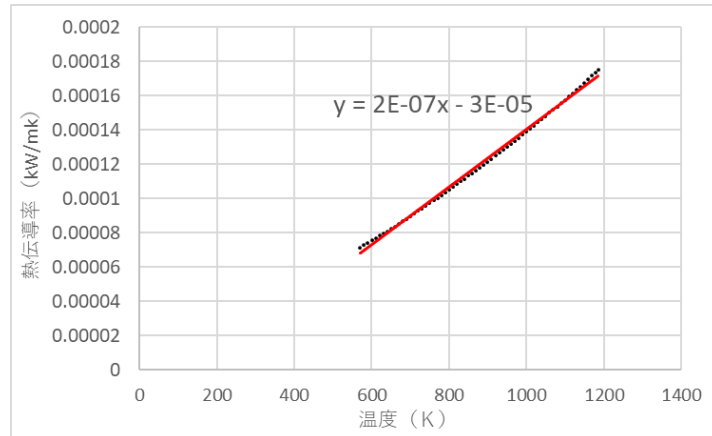


図 2.20 セラミックファイバーボードの熱伝導率^[8]

2.3.3 火炎からの放射熱

本モデルで想定した模型室は開口部があるため、火炎からの放射熱は全部が上部層と下部層に流入する訳ではなく、一部が開口を通じて外部に流出することが考えられる。この比率は開口部の寸法、位置等によって異なる。本研究では、赤尾実験の模型室の寸法に基づき、開口部面積と模型室の内表面積の比率は約 0.2 となるため、本研究は 20%の火炎からの放射熱が開口を通じて外部に損失すると仮定する。火炎からの室内への放射熱 $Q_{\text{frad,burner}}$ は次式で与えられる：

$$Q_{\text{frad,burner}} = 0.8\chi Q \quad (2.3.35)$$

ただし、 χ は火炎の放射性分の割合[-]、 Q は発熱速度[kW]である。

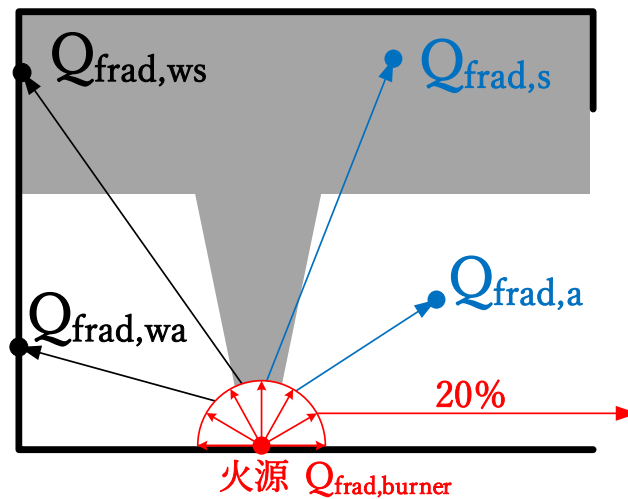


図 2.21 火炎からの放射熱

$Q_{\text{frad,burner}}$ のうち上部層へ向かうものの割合を $f_{s,\text{burner}}$ 、下部層へ向かうものの割合を $f_{a,\text{burner}}$ とする。火源から室内への放射熱が隅角部の点から半球面上に均等に射出されると

考える。また、図 2.22 に示すように、上部層に向かうものは煙層の端と火源中心点で定められる θ_b の角度で決まる平面で切断された球冠の表面を通過する分である。従って、各層壁面に向かう放射の割合は次のように求めることができる。

$$f_{s,burner} = \frac{\frac{1}{2}\pi(h^2+r^2)}{\pi R^2} = \frac{\pi(R^2(1-\cos\theta_b)^2+R^2\sin^2\theta_b)}{2\pi R^2} = \frac{((1-\cos\theta_b)^2+\sin^2\theta_b)}{2} \quad (2.3.36)$$

$$f_{a,burner} = 1 - f_{s,burner} \quad (2.3.37)$$

ただし、 $\tan\theta_b = \frac{(w+b)/2}{z_s}$ である。

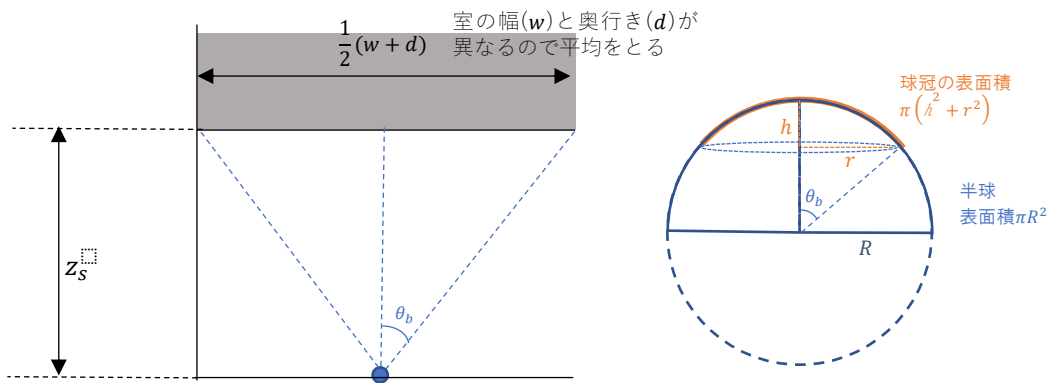


図 2.22 バーナー火炎からの放射の向き

火炎からの放射は前述の $f_{s,burner}$ 、 $f_{a,burner}$ の割合で上部層壁面と下部層壁面に向かって射出される。図 2.23 に示す経路で、各ゾーンの気体で吸収を受け、残りが各層の壁に到達する。

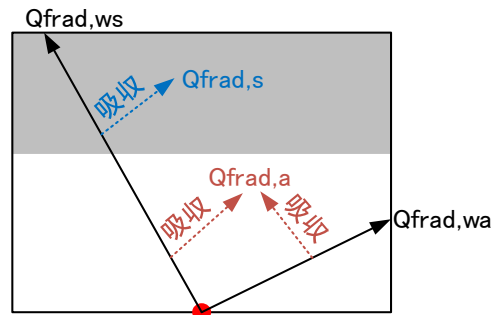


図 2.23 火炎放射の経路

(1) 火炎放射のうち壁面へ入射するもの

火炎放射のうち f_s が上部層壁面に向かう際、気体を通過するとき吸収を受け、残りが壁面へと到達する。従って、火炎放射のうち上部層壁面に入射する合計の熱流[kW]は、

$$\dot{Q}_{frad,ws} = (1 - \varepsilon_a)(1 - \varepsilon_s)f_{s,burner}\dot{Q}_{frad,burner} \quad (2.3.38)$$

となる。

同様に、火炎放射のうち下部層壁面に入射する合計の熱流[kW]は、

$$\dot{Q}_{frad,wa} = (1 - \varepsilon_a) f_{a,burner} \dot{Q}_{frad,burner} \quad (2.3.39)$$

となる。

(2) 火炎放射のうち層が吸収するもの

火炎放射のうち上部層が吸収する合計の熱流[kW]は、

$$\dot{Q}_{frad,s} = \varepsilon_s (1 - \varepsilon_a) f_{s,burner} \dot{Q}_{frad,burner} \quad (2.3.40)$$

となる。

同様に、火炎放射のうち下部層が吸収する合計の熱流[kW]は、

$$\dot{Q}_{frad,a} = \varepsilon_a \dot{Q}_{frad,burner} \quad (2.3.41)$$

となる。

2.3.4 熱伝達によりゾーンが得る熱量

2.3.4.1 概要

火源からの熱により温度上昇した上部層と下部層は、相互間および周壁との間で熱伝達を発生する。図 2.24 のような上部層における熱伝達として、ゾーンの気体と壁面の間の対流熱伝達 Q_{cs} および放射熱伝達 Q_{rs} がある。上部層では、上部層壁面から、下部層壁面から、下部層空気から、火炎からの放射を吸収し、上部層自身から放射する。放射熱伝達による上部層が得る熱量 Q_{rs} は式(2.3.43)で計算する。

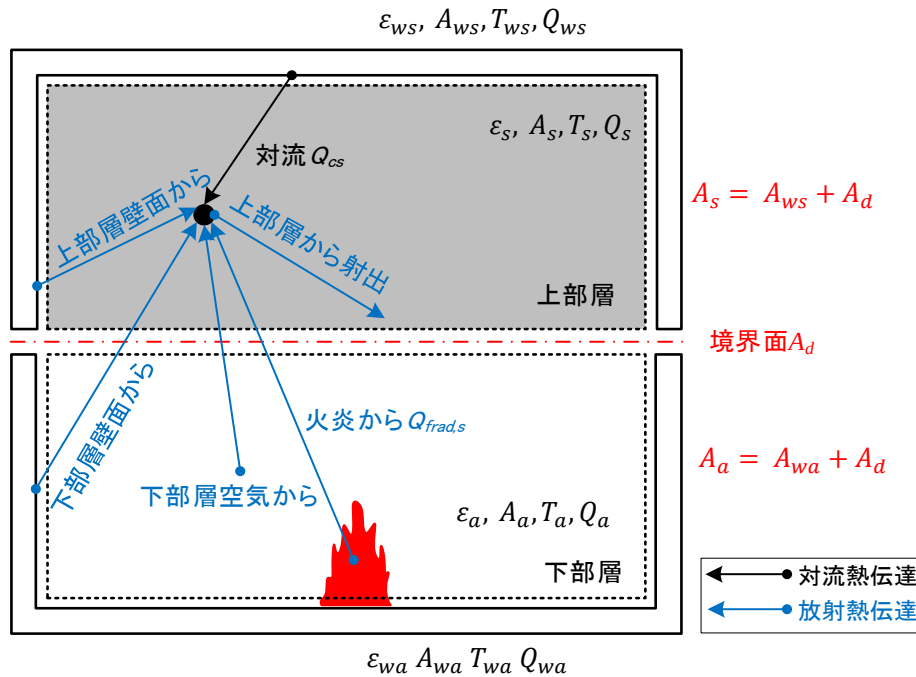


図 2.24 熱伝達による上部層が得る熱量 Q_{hs}

$$Q_h \left\{ \begin{array}{l} \text{上部層が得る熱量 } Q_{hs} \left\{ \begin{array}{l} \text{対流 } Q_{cs} = h_s A_{ws} (T_{ws} - T_s) \\ \text{放射 } Q_{rs} = \varepsilon_s (\varepsilon_a \sigma T_a^4 F_{a,s} A_a + q_{o,ws} F_{ws,s} A_{ws} + (1 - \varepsilon_a) q_{o,wa} F_{wa,s} A_{wa}) \\ \quad + Q_{frad,s} - \varepsilon_s \sigma T_s^4 A_s \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2.3.42)$$

$$(2.3.43)$$

$$Q_h \left\{ \begin{array}{l} \text{下部層が得る熱量 } Q_{ha} \left\{ \begin{array}{l} \text{対流 } Q_{ca} = h_a A_{wa} (T_{wa} - T_a) \\ \text{放射 } Q_{ra} = \varepsilon_a (\varepsilon_s \sigma T_s^4 F_{s,a} A_s + q_{o,wa} F_{wa,a} A_{wa} + (1 - \varepsilon_s) q_{o,ws} F_{ws,a} A_{ws}) \\ \quad + Q_{frad,a} - \varepsilon_a \sigma T_a^4 A_a \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2.3.44)$$

$$(2.3.45)$$

ここで、

- Q_{cs} : 対流による上部層の正味受熱量[kW]
 Q_{rs} : 放射による上部層の正味受熱量[kW]
 Q_{ca} : 対流による下部層の正味受熱量[kW]
 Q_{ra} : 放射による下部層の正味受熱量[kW]
 $Q_{frad,s}$: 火炎放射のうち上部層が吸収する熱量[kW] (検討中)
 $Q_{frad,a}$: 火炎放射のうち下部層が吸収する熱量[kW] (検討中)
 Q_{ws} : 上部層壁面から失われる熱量[kW]
 Q_{wa} : 下部層壁面から失われる熱量[kW]
 $Q_{frad,ws}$: 火炎放射のうち上部層壁面に入射する合計熱量[kW] (検討中)
 $Q_{frad,wa}$: 火炎放射のうち下部層壁面に入射する合計熱量[kW] (検討中)
 $q_{o,ws}$: 上部層壁面から出ていく放射熱流束[kW/m²]
 $q_{o,wa}$: 下部層壁面から出ていく放射熱流束[kW/m²]
 h_s : 上部層の対流熱伝達率[kW/m²]
 h_a : 下部層および非火災室の対流熱伝達率[kW/m²]
 ε_s : 上部層の放射率[-]
 ε_a : 下部層の放射率[-]
 ε_{ws} : 上部層壁面の放射率[-]
 ε_{wa} : 下部層壁面の放射率[-]
 σ : ステファン・ボルツマン定数[=5.67×10⁻¹¹ kW/(m²K⁴)]
 T_s : 上部層温度[K]
 T_a : 下部層温度[K]
 T_{ws} : 上部層壁面温度[K]
 T_{wa} : 下部層壁面温度[K]
 A : 面積[m²]
 F : 形態係数[-]

である。

2.3.4.1 対流熱伝達によりゾーンが得る熱量

上部層が対流熱伝達による受け取る熱量 Q_{cs} :

$$Q_{cs} = h_s A_{ws} (T_{ws} - T_s) \quad (2.3.46)$$

下部層が対流熱伝達による受け取る熱量 Q_{ca} :

$$Q_{ca} = h_a A_{wa} (T_{wa} - T_a) \quad (2.3.47)$$

ここでは、ゾーンが受け取る熱量を正で表すことにする。

上部層の対流熱伝達率 $h_s[kW/m^2]$ は次式で計算する^[11]：

$$h_s = \begin{cases} 8.3 \times 10^{-3} & Q^* < 2 \times 10^{-3} \\ 0.1Q^{*2/5} & 2 \times 10^{-3} < Q^* < 0.1 \\ 40 \times 10^{-3} & 0.1 < Q^* \end{cases} \quad (2.3.48)$$

ただし、 Q^* は次式で定義される無次元発熱速度である。

$$Q^* = \frac{Q}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g L_1 L_2}^2} \approx 0.9 \times 10^{-3} \frac{Q}{\sqrt{H A}} \quad (2.3.49)$$

ここに、 Q は火源の発熱速度 $[kW]$ 、 $L_1 L_2$ は火災室のスケール $[m]$ 、 H は火災室の天井高さ $[m]$ 、 A は火災室の床面積 $[m^2]$ である。

下部層温度が低いため、下部層の対流熱伝達率 $h_a[kW/m^2]$ は次の一定値で近似する：

$$h_a = 8.3 \times 10^{-3} \quad (2.3.50)$$

2.3.4.1 放射熱伝達によりゾーンが得る熱量

(1)壁面から失われる正味の熱量 (net-radiation 法)

放射熱伝達により上部層壁面から失われる熱量 $Q_{ws}[kW]$ (上部層壁面のエネルギー保存) は次式で与えられる。

$$Q_{ws} = (q_{o,ws} - q_{i,ws})A_{ws} \quad (2.3.51)$$

ただし、 $Q_{ws} < 0$ の場合は上部層壁面が熱量を得ることを意味する。

上部層壁面から出て行く放射熱 $q_{o,ws}[kW/m^2]$ は、壁体自身から射出するものと壁面への入射のうち反射したものの和である。

$$q_{o,ws} = \varepsilon_{ws}\sigma T_{ws}^4 + (1 - \varepsilon_{ws})q_{i,ws} \quad (2.3.52)$$

図 2.24 に示すように、上部層壁面に入射するものには、下部層壁面からの放射、下部層からの放射、上部層壁面からの放射、上部層からの放射、火炎からの放射がある。各放射はゾーンの気体を通過する際に吸収を受ける。上部層壁面に入射する放射熱 $q_{i,ws}[kW/m^2]$ は、

$$q_{i,ws} = (1 - \varepsilon_a)(1 - \varepsilon_s)q_{o,wa}F_{ws,wa} + (1 - \varepsilon_s)q_{o,a}F_{ws,a} + (1 - \varepsilon_s)q_{o,ws}F_{ws,ws} + q_{o,s}F_{ws,s} + \frac{Q_{frad,ws}}{A_{ws}} \quad (2.3.53)$$

式(2.3.48)を式(2.3.47)に代入すると、

$$Q_{ws} = A_{ws} \frac{\varepsilon_{ws}}{1 - \varepsilon_{ws}} (\sigma T_{ws}^4 - q_{o,ws}) \quad (2.3.54)$$

式(2.3.49)を式(2.3.47)に代入すると、

$$Q_{ws} = A_{ws} \left\{ q_{o,ws} - (1 - \varepsilon_a)(1 - \varepsilon_s)q_{o,wa}F_{ws,wa} - (1 - \varepsilon_s)q_{o,a}F_{ws,a} - (1 - \varepsilon_s)q_{o,ws}F_{ws,ws} - q_{o,s}F_{ws,s} - \frac{Q_{frad,ws}}{A_{ws}} \right\} \quad (2.3.55)$$

を得る。ただし、 $F_{A,B}$ は面Aから面Bを見たときの形態係数である。

下部層についても同様の式を書くことができる。下部層壁面から失われる熱量 $Q_{wa}[kW]$ は

$$Q_{wa} = A_{wa} \frac{\varepsilon_{wa}}{1 - \varepsilon_{wa}} (\sigma T_{wa}^4 - q_{o,wa}) \quad (2.3.56)$$

$$Q_{wa} = A_{wa} \left\{ q_{o,wa} - (1 - \varepsilon_a)(1 - \varepsilon_s)q_{o,ws}F_{wa,ws} - (1 - \varepsilon_a)q_{o,s}F_{wa,s} - (1 - \varepsilon_a)q_{o,wa}F_{wa,wa} - q_{o,a}F_{wa,a} - \frac{Q_{frad,wa}}{A_{wa}} \right\} \quad (2.3.57)$$

となる。

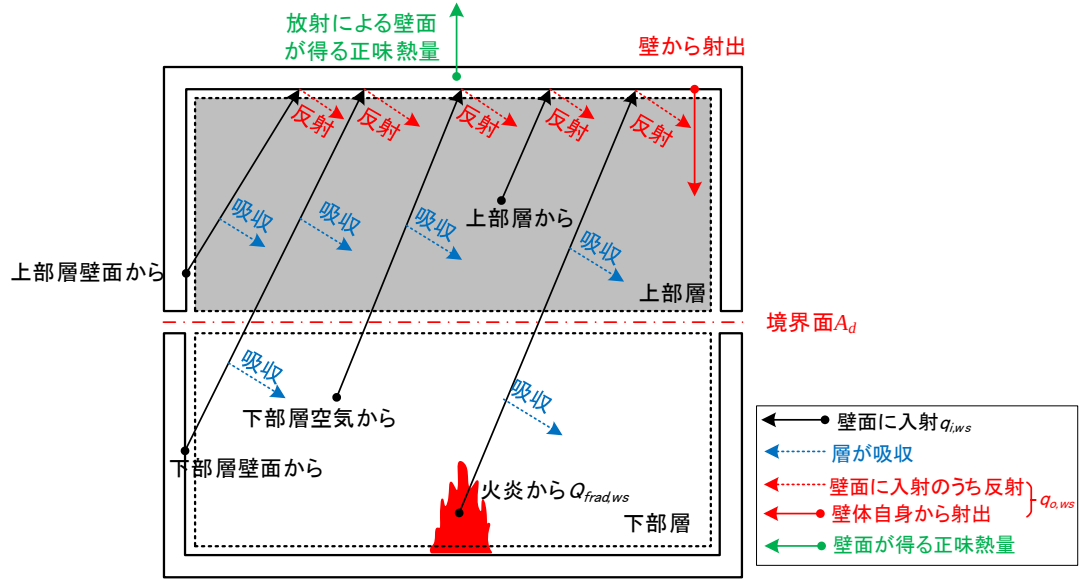


図 2.24 上部層壁面に流出入する放射熱

二元一次方程式：

$$\begin{cases} a_1x + b_1y = c_1 \\ a_2x + b_2y = c_2 \end{cases} \quad (2.3.58)$$

の解は、以下の公式を用いて計算できる。

$$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{c_1b_2 - b_1c_2}{a_1b_2 - b_1a_2} \quad (2.3.59)$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{a_1c_2 - c_1a_2}{a_1b_2 - b_1a_2} \quad (2.3.60)$$

式(2.3.54)(2.3.55)(2.3.56)(2.3.57)を式(2.3.58)の形に整理すると、式(2.3.61)(2.3.62)になる。

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[(1 - \varepsilon_s)F_{ws,ws} - \frac{\varepsilon_{ws}}{1 - \varepsilon_{ws}} - 1 \right] q_{o,ws} + [(1 - \varepsilon_s)(1 - \varepsilon_a)F_{ws,wa}]q_{o,wa} \\ & = -(1 - \varepsilon_s)\varepsilon_a\sigma T_a^4 F_{ws,a} - \varepsilon_s\sigma T_s^4 F_{ws,s} - \frac{\dot{Q}_{rad,ws}}{A_{ws}} - \frac{\varepsilon_{ws}}{1 - \varepsilon_{ws}}\sigma T_{ws}^4 \end{aligned} \right. \quad (2.3.61)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & [(1 - \varepsilon_s)(1 - \varepsilon_a)F_{wa,ws}]q_{o,ws} + \left[(1 - \varepsilon_a)F_{wa,wa} - \frac{\varepsilon_{wa}}{1 - \varepsilon_{wa}} - 1 \right] q_{o,wa} \\ & = -(1 - \varepsilon_a)\varepsilon_s\sigma T_s^4 F_{wa,s} - \varepsilon_a\sigma T_a^4 F_{wa,a} - \frac{\dot{Q}_{rad,wa}}{A_{wa}} - \frac{\varepsilon_{wa}}{1 - \varepsilon_{wa}}\sigma T_{wa}^4 \end{aligned} \right. \quad (2.3.62)$$

ただし、 $x = q_{o,ws}$ 、 $y = q_{o,wa}$

$$a_1 = (1 - \varepsilon_s)F_{ws,ws} - \frac{\varepsilon_{ws}}{1 - \varepsilon_{ws}} - 1$$

$$b_1 = (1 - \varepsilon_s)(1 - \varepsilon_a)F_{ws,wa}$$

$$c_1 = -(1 - \varepsilon_s)\varepsilon_a\sigma T_a^4 F_{ws,a} - \varepsilon_s\sigma T_s^4 F_{ws,s} - \frac{\dot{Q}_{rad,ws}}{A_{ws}} - \frac{\varepsilon_{ws}}{1 - \varepsilon_{ws}}\sigma T_{ws}^4$$

$$a_2 = (1 - \varepsilon_s)(1 - \varepsilon_a)F_{wa,ws}$$

$$b_2 = (1 - \varepsilon_a)F_{wa,wa} - \frac{\varepsilon_{wa}}{1 - \varepsilon_{wa}} - 1$$

$$c_2 = -(1 - \varepsilon_a)\varepsilon_s\sigma T_s^4 F_{wa,s} - \varepsilon_a\sigma T_a^4 F_{wa,a} - \dot{Q}_{rad,wa}/A_{wa} - \frac{\varepsilon_{wa}}{1 - \varepsilon_{wa}}\sigma T_{wa}^4$$

従って、式(2.3.57)と式(2.3.58)の解は以下になる：

$$x = q_{o,ws} = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} \quad (2.3.59)$$

$$y = q_{o,wa} = \frac{a_1 c_2 - c_1 a_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} \quad (2.3.60)$$

$q_{o,ws}$ と $q_{o,wa}$ を式(2.3.43)と式(2.3.45)に代入して、 Q_{rs} と Q_{ra} を求めることができる。

(2)煙層の放射率

ウレタンフォームが燃えると、発生ガスの成分には煤の固体粒子、二酸化炭素、一酸化炭素と水蒸気等が含まれ、これらが放射の媒体となって、上・下部層相互間および周壁表面間で放射熱伝達が起こる。表 2.5 にウレタンフォームの燃焼生成物を示す。表 2.5 のデータによると、1g のウレタンフォームが燃焼すると、平均して 0.536g の CO_2 および 0.286g のCOが生成される。二層ゾーンモデルでは、燃焼によって生成されたガスは全てが上層に流入すると仮定する。従って、上部層における CO_2 とCOの生成速度は式(2.3.61)と式(2.3.62)で求めることができる。

表 2.5 ウレタンフォームの燃焼生成物

ホリウレタンフォームの燃焼生成物 (燃焼ガス mg/試料1g)							
燃焼条件		文献A	文献B	文献C*1	文献D		
燃焼条件		700	500	800	350	500	750
空気供給量		100	13.2	-			
		l/hr					
		l/min	(1.7)	0.22	-	4.0	4.0
燃 焼 ガ ス	CO2	666	88	320	264	644	1236
	CO	173	57	970	26	138	353
	HCN	3.3	<2	8	1	6	8
	メタン	21	4.6				
	エチレン	43					
	アセチレン	14	3.9	120			
	エタン		1.3				
	プロピレン		29				
	ブテン		0.38				
	アセトアルデヒド*		32				
	アセトン		13				

*1: 5Lフラスコ中

出典：火災便覧 第3版1997, 共立出版 火災学会編集

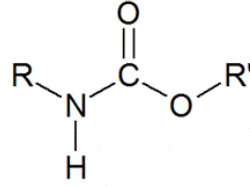
上部層 CO_2 生成速度[kg/s]：

$$\Gamma_{CO_2,s} = 0.536m_b \quad (2.3.61)$$

上部層CO生成速度[kg/s]：

$$\Gamma_{CO} = 0.286m_b \quad (2.3.62)$$

ただし、 m_b はウレタンフォームの燃焼速度[kg/s]である。



ウレタン結合

図 2.25 ウレタンフォーム分子

ウレタン結合を図 2.25 に示す。R の分子式は C_nH_{2n+1} である。n が十分大きい場合、ウレタンフォームの分子式は C_nH_{2n+1} と近似できる。ウレタンの燃焼における化学反応式を次式に示す。



化学反応式から、生成される二酸化炭素（または一酸化炭素）と水蒸気の実モル比は 1 : 1 であることが分かる。二酸化炭素および一酸化炭素の生成率が既知である場合、上部層での水蒸気の生成速度[kg/s]は式(2.3.64)によって表すことができる：

$$\Gamma_{H_2O,s} = \Gamma_{CO_2,s} \frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} + \Gamma_{CO} \frac{M_{H_2O}}{M_{CO}} \quad (2.3.64)$$

ただし、 $M_{CO_2}, M_{CO}, M_{H_2O}$ は CO_2, CO, H_2O の分子量[-]である。

(2-1) 煙層内のガスによる放射率

煙層内のガスによる放射率を求めるためには、ゾーン中の特定の化学種 l の濃度を知る必要がある。 Y_l を化学種 l の質量分率[kg/kg]とすると、化学種の保存は次式で表せる。

$$\frac{d}{dt}(Y_l \rho V) = \sum_j (-Y_l m_{ij} + Y_l m_{ji}) + \Gamma_l \quad (2.3.65)$$

また、 Γ_l はゾーンでの化学種 l の生成速度[kg/s]である。

ゾーンの中では、燃焼反応が起こっているが、化学反応では質量は変化しないので、ゾーン中の気体の質量は、ゾーンの境界を通しての流れに伴う質量の出入りによってのみ変化する。上部層の質量の保存式は次式で表せる。

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = -m_{so} + m_p + m_b \quad (2.3.66)$$

ゾーン中の特定の化学種 l の量の変化は、境界を通じて流出入する気体中の化学種 l の濃度が異なること、ゾーン内の化学反応（燃焼）によって化学種 l が生成または消費されることによって起こる。従って、 Y_l を化学種 l の質量分率[kg/kg]とすると、上部層の化学種の保存は次式で表せる。

$$\frac{d}{dt}(Y_{l,s}\rho_s V_s) = -Y_{l,s}m_{so} + Y_{l,a}m_p + \Gamma_l \quad (2.3.67)$$

式(2.3.67)の左辺を展開すると、式(2.3.67)は式(2.3.68)になる：

$$\rho_s V_s \frac{dY_{l,s}}{dt} + Y_{l,s} \frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = -Y_{l,s}m_{so} + Y_{l,a}m_p + \Gamma_l \quad (2.3.68)$$

となる。 $Y_{l,s}$ ×式(2.3.66)を計算すると：

$$Y_{l,s} \frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = -Y_{l,s}m_{so} + Y_{l,s}m_p + Y_{l,s}m_b \quad (2.3.69)$$

となる。式(2.3.68)から式(2.3.69)を引くとと化学種濃度を計算する式を得る。

$$\rho_s V_s \frac{dY_{l,s}}{dt} = (Y_{l,a} - Y_{l,s})m_p + \Gamma_l - Y_{l,s}m_b \quad (2.3.70)$$

ただし、

$Y_{CO_2,s}$ ：上部層 CO_2 濃度(質量分率)

$Y_{CO_2,\infty}$ ：外部空気 CO_2 濃度(質量分率), 0.03%

$Y_{H_2O,\infty}$ ：外部空気 H_2O 濃度(質量分率), 1.3%

m_{so} ：上部層から外部に流出する質量流量

である。

化学種濃度が判れば、上部層の CO_2 及び H_2O の放射率[-]は、

$$\varepsilon_{CO_2,s} = 0.7(p_{CO_2,s}L_s)^{1/2} / \left(\frac{T_s}{100}\right)^{1/2} \quad (2.3.71)$$

$$\varepsilon_{H_2O,s} = 7.0(p_{H_2O,s}L_s)^{4/5} / \left(\frac{T_s}{100}\right) \quad (2.3.72)$$

で求めることができる。

ただし、 $p_{CO_2,s}$ ：上部層気体の CO_2 分圧[-]

$p_{H_2O,s}$ ：上部層気体の H_2O 分圧[-]

L_s ：上部層気体塊の平均光路長[m]

である。

建築火災では、温度上昇に伴い圧力が変化するが、多くの場合はその変化は大気圧 $P(=1 \text{ atm})$ に比べると十分に小さい。ゾーンの気体を理想気体とみなすと、 CO_2 及び H_2O 分圧は、全圧に体積分率(=モル分率)をかけたものに等しい。

CO_2 及び H_2O 分圧は

$$p_{CO_2,s} = P \cdot Y_{CO_2,s} \cdot \frac{1/M_{CO_2}}{1/M_a} \quad (2.3.73)$$

$$p_{H_2O,s} = P \cdot Y_{H_2O,s} \cdot \frac{1/M_{H_2O}}{1/M_a} \quad (2.3.74)$$

ただし、 P ：大気圧(= 1 atm)

M_a : 空気分子量(= 28.8)

また、平均光路長は次の式で与えられる。

$$L_s \approx 4 \frac{V_s}{A_s} \quad (2.3.75)$$

(2-2) 煙層内の煤による放射率

煤粒子による吸収係数を $k_{soot}[\text{m}^{-1}]$ とすると、煙層の放射率 $\varepsilon_{soot}[-]$ は、

$$\varepsilon_{soot} = 1 - e^{-k_{soot}L_e} \quad (2.3.76)$$

ここで、 L_e は平均自由行路

$$L_e = 3.6V_s/A_s \quad (2.3.77)$$

である。ただし、

V_s : 煙層の体積 $[\text{m}^3]$

A_s : 煙層の表面積 $[\text{m}^2]$ である。

煤の吸収係数は、体積分率 f_v を用いて次式で与える。

$$k_{soot} = \frac{7.0f_v}{0.94 \times 10^{-6}} \quad (2.3.78)$$

煤の体積分率は、煙層の密度と煤の質量分率を用いて次式で与える。

$$f_v = \frac{\rho_s Y_{soot}}{\rho_{soot}} \quad (2.3.79)$$

ただし、 ρ_s : 煙層の気体密度 $[\text{kg}/\text{m}^3] = 353/T_s$

ρ_{soot} : 煤粒子の密度 $(2000\text{kg}/\text{m}^3)$ である。

煤の質量分率は、煙層の煤粒子の収支式から求める。

$$\frac{\partial Y_{soot}}{\partial t} = \frac{-Y_{soot}m_{so} + \Gamma_{soot,s}}{\rho_s A_f (H - Z_s)} \quad (2.3.80)$$

ただし、煤生成速度 $\Gamma_{soot,s}$ は、燃烧速度 $Q/\Delta H[\text{kg}/\text{s}]$ に比例する

$$\Gamma_{soot,s} = \frac{Q}{\Delta H} \eta = \eta m_b \quad (2.3.81)$$

ここで、

Q : 発熱速度 $[\text{kW}]$

ΔH : 単位燃烧熱 (=29.4MJ/kg)

η : 煤生成率であり、ポリウレタンでは約 0.2 である。

式(2.3.80)を差分化すると、煤の濃度は次式で計算することができる。

$$\frac{Y_{soot,s}(t+\Delta t) - Y_{soot,s}(t)}{\Delta t} = \frac{-Y_{soot,s}(t)m_{so} + \Gamma_{soot,s}}{\rho_s A_f (H - Z_s)} \quad (2.3.82)$$

(2-3) 混合気体の放射率

混合気体の放射率は、概ね CO_2 、 H_2O および煤の放射率を加えた値になる。従って、上部層の放射率は:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{\text{CO}_2,s} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},s} + \varepsilon_{soot,s} \quad (2.3.83)$$

で求めることができる。

(3)形態係数

室を図 2.26 のように層の境界で分割し、境界面を面 d とし、その面積を $A_d[\text{m}^2]$ とする。上下層をまたぐ形態係数は面 d との形態係数を介して計算できる。

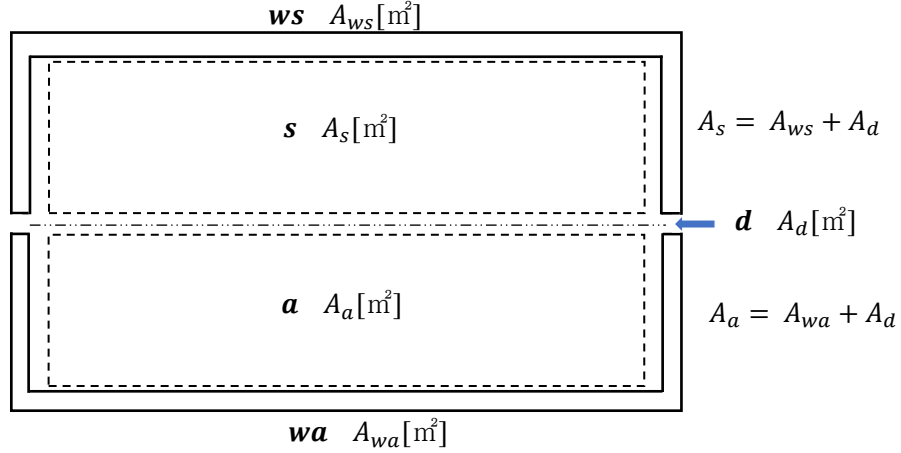


図 2.26 室の面の構成

(3-1)面同士の形態係数

上部層壁面 ws と境界面 d に関する形態係数は、形態係数の一般的関係から

$$F_{d,d} + F_{d,ws} = 1, \quad F_{ws,d} + F_{ws,ws} = 1 \quad (\text{総和関係}) \quad (2.3.84)$$

$$A_d F_{d,ws} = A_{ws} F_{ws,d} \quad (\text{相反関係}) \quad (2.3.85)$$

$$F_{d,d} = 0 \quad (\text{平面の自己形態係数}) \quad (2.3.86)$$

の3つの式が得られるので、全ての形態係数求めることができる。

$$F_{d,ws} = 1 \quad (2.3.87)$$

$$F_{ws,d} = A_d / A_{ws} \quad (2.3.88)$$

$$F_{ws,ws} = 1 - A_d / A_{ws} \quad (2.3.89)$$

同様に、下部層壁面 wa と境界面 d に関する形態係数は、

$$F_{d,d} = 0 \quad (2.3.90)$$

$$F_{d,wa} = 1 \quad (2.3.91)$$

$$F_{wa,d} = A_d / A_{wa} \quad (2.3.92)$$

$$F_{wa,wa} = 1 - A_d / A_{wa} \quad (2.3.93)$$

上部層壁面 ws から下部層壁面 wa を見たときの形態係数 $F_{ws,wa}$ は、上部層壁面 ws から面 d を見たときの形態係数 $F_{ws,d}$ に等しい。(面 d から下部層壁面 wa を見たときの形態係数 $F_{d,wa}$ が1であるため) 従って、

$$F_{ws,wa} = F_{ws,d} \times F_{d,wa} = A_d / A_{ws} \quad (2.3.94)$$

である。同様に、 $F_{wa,ws}$ は

$$F_{wa,ws} = F_{wa,d} \times F_{d,ws} = A_d/A_{wa} \quad (2.3.95)$$

である。

(3-2)面と気体の形態係数

灰色ガス体は凸な体積と考えると、

$$F_{ss} = 0 \quad (2.3.96)$$

である。ガス体が室に充満している状態を考えると、面から層の気体への形態係数は1である。

$$F_{d,s} = 1 \quad (2.3.97)$$

$$F_{d,a} = 1 \quad (2.3.98)$$

これら3つの関係と形態係数の相反関係を使うと

$$F_{s,d} = A_d/A_s \quad (2.3.99)$$

$$F_{a,d} = A_d/A_a \quad (2.3.100)$$

となる。

上部層気体sから下部層気体aを見たときの形態係数 $F_{s,a}$ は、上部層気体sから面dを見たときの形態係数 $F_{s,d}$ に等しい。(面dから下部層気体aを見たときの形態係数 $F_{d,a}$ が1であるため)従って、

$$F_{s,a} = F_{s,d} \times F_{d,a} = A_d/A_s \quad (2.3.101)$$

$$F_{a,s} = F_{a,d} \times F_{d,s} = A_d/A_a \quad (2.3.102)$$

となる。同様の考え方で、

$$F_{ws,a} = F_{ws,d} = A_d/A_{ws} \quad (2.3.103)$$

$$F_{wa,s} = F_{wa,d} = A_d/A_{wa} \quad (2.3.104)$$

となる。

上部層壁面wsから上部層気体sを見たときの形態係数 $F_{ws,s}$ は、

$$F_{s,ws} + F_{s,d} = 1 \quad (2.3.105)$$

$$F_{s,ws}A_s = F_{ws,s}A_{ws} \text{ (相反関係)} \quad (2.3.106)$$

より、式(2.3.106)を式(2.3.105)に代入すると、

$$F_{ws,s} = \left(1 - \frac{A_d}{A_s}\right) \frac{A_s}{A_{ws}} = 1 \quad (2.3.107)$$

同様の考え方で、

$$F_{wa,a} = \left(1 - \frac{A_d}{A_a}\right) \frac{A_a}{A_{wa}} = 1 \quad (2.3.108)$$

を得る。

2.3.5 燃え拡がりモデルに必要な物理量

2.3.5.1 上部層温度

上部層熱エネルギーの保存：

$$\frac{d}{dt}(c_p \rho_s V_s T_s) = \dot{Q}_f + \dot{Q}_{hs} + c_p(-m_{so}T_s + m_p T_a + m_b T_b) \quad (2.3.109)$$

ただし、 T_b は熱分解ガスの温度[K]で着火温度と等しいとする。ゾーンの気体の組成は燃焼ガスと新鮮空気の混合具合などにより異なるが、いずれの場合にも窒素が主成分であることなどから、比熱 c_p [kJ/kg·K]は一定値で近似する。

式(2.3.109)の左辺を展開し、

$$c_p \rho_s V_s \frac{dT_s}{dt} + c_p T_s \frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = \dot{Q}_f + \dot{Q}_{hs} + c_p(-m_{so}T_s + m_p T_a + m_b T_b) \quad (2.3.110)$$

上部層質量の保存

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = -m_{so} + m_p + m_b \quad (2.3.111)$$

を式(2.3.110)に代入して、上部層の温度：

$$c_p \rho_s V_s \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_f + \dot{Q}_{hs} + c_p m_p (T_a - T_s) + c_p m_b (T_b - T_s) \quad (2.3.112)$$

について整理すると、温度を陽に計算する式が得られる。

式(2.3.112)左辺の微分を差分に書き換えると、

$$\frac{T_s(t+\Delta t) - T_s(t)}{\Delta t} = \frac{\dot{Q}_f + \dot{Q}_{hs} + c_p m_p (T_a - T_s) + c_p m_b (T_b - T_s)}{\rho_s c_p A_f (H - Z_s)} \quad (2.3.113)$$

となり、現在時刻の温度から次の時刻の温度を計算できる。

建築火災では、温度上昇に伴い圧力が変化するが、多くの場合はその変化は大気圧 P に比べると十分に小さい。ゾーンの気体の組成がいずれの場合にも窒素が主成分であることなどから、平均の分子量 M も空気の分子量 M_a と同一と近似できる。従って、

$$\rho T = \rho_\infty T_\infty = \frac{PM_a}{R} = \text{const}(\approx 353) \quad (2.3.114)$$

の関係が成立する。上式により、上部層の気体密度 ρ_s は

$$\rho_s = \frac{\rho_\infty T_\infty}{T_s} = \frac{353}{T_s} \quad (2.3.115)$$

である。

2.3.5.2 下部層温度

同様に、下部層エネルギーの保存により、下部層温度 T_a は：

$$c_p \rho_a V_a \frac{dT_a}{dt} = \dot{Q}_{ha} + c_p m_{ai} (T_\infty - T_a) + c_p m_{si} (T_\infty - T_s) \quad (2.3.116)$$

となる。上式の左辺の微分を書き換えて表すと：

$$\frac{T_a(t+\Delta t)-T_a(t)}{\Delta t} = \frac{\dot{Q}_{ha}+c_p m_{ai}(T_\infty-T_a)+c_p m_{si}(T_\infty-T_s)}{\rho_a c_p A_f Z_s} \quad (2.3.117)$$

となり、現時刻の温度から次の時刻の温度を計算できる。また、式(2.3.114)より、下部層空気密度 ρ_a は

$$\rho_a = \frac{\rho_\infty T_\infty}{T_a} = \frac{353}{T_a} \quad (2.3.118)$$

である。

2.3.5.3 上部層高さ

上部層エネルギーの保存から、上部層の体積は

$$c_p \rho_\infty T_\infty \frac{dV_s}{dt} = \dot{Q}_f + \dot{Q}_{hs} + c_p (-m_{so} T_s + m_p T_a + m_b T_b) \quad (2.3.119)$$

となり、体積が陽に与えられる。

また、上部層の体積は煙層高さによって決まり、次式で与えられる。

$$V_s = A_f (H - Z_s) \quad (2.3.120)$$

式(2.3.120)を式(2.3.119)に代入して、煙層高さ Z_s を求める形に直すと

$$c_p \rho_\infty T_\infty A_f \frac{d(H-Z_s)}{dt} = \dot{Q}_f + \dot{Q}_{hs} + c_p (-m_{so} T_s + m_p T_a + m_b T_b) \quad (2.3.121)$$

を得る。

式(2.3.121)を整理すると、

$$\frac{d(H-Z_s)}{dt} = \frac{\dot{Q}_f + \dot{Q}_{hs} + c_p (-m_{so} T_s + m_p T_a + m_b T_b)}{\rho_\infty T_\infty c_p A_f} \quad (2.3.122)$$

となる。左辺の微分を書き換えて表すと、

$$\frac{Z_s(t+\Delta t)-Z_s(t)}{\Delta t} = \frac{-\dot{Q}_f - \dot{Q}_{hs} - (-c_p m_{so} T_s + c_p m_p T_a + c_p m_b T_b)}{\rho_\infty T_\infty c_p A_f} \quad (2.3.123)$$

のようになり、現在時刻の煙層高さから次の時刻の煙層高さを計算できる。

ここで、火災プルーム質量流量は

$$\dot{m}_p = 0.076 Q^{1/3} Z_s^{5/3} \quad (2.3.124)$$

で与えられる。また、 A_f は床面積[m²]、 $\dot{Q}_f$ は上部が火災プルームから得る熱量[kW]で、火炎の発熱から放射分を差し引いたものである。

$$\dot{Q}_f = (1 - \chi) Q \quad (2.3.125)$$

ただし、 Q は可燃物の発熱速度の合計[kW]、 χ は火炎の放射比率[-]である。

2.3.5.4 下部層壁面に入射する放射熱流

図 2.27 に下部層壁面に流出入する放射熱流の概要を示す。二層ゾーンモデルの放射伝熱計算によって $q_{o,wa}$ [kW/m²]は既知、下部層壁から射出する熱流 $q_{o,wa}$ [kW/m²]は入射のうち反射した熱流と下部層壁自身から射出する熱流の和で与えられる。この関係から $q_{i,wa}$ は次式

で求められる。

下部層壁に入射する熱流 $q_{i,wa}$ [kW/m²]は：

$$q_{o,wa} = \varepsilon_{wa}\sigma T_{wa}^4 + (1 - \varepsilon_{wa})q_{i,wa} \quad (2.3.126)$$

となる。上式を整理すると、下部層壁に入射する熱流 $q_{i,wa}$ は

$$q_{i,wa} = \frac{q_{o,wa} - \varepsilon_{wa}\sigma T_{wa}^4}{1 - \varepsilon_{wa}} \quad (2.3.127)$$

となる。上式で算出された $q_{i,wa}$ を用いて、外部放射の放射熱流 $q_{f,res}$ を計算することができる。すなわち、下部層壁面に入射する熱流 $q_{i,wa}$ は $q_{f,res}$ と等しいと考える。

$$q_{f,res} = q_{i,wa} \quad (2.3.128)$$

ただし、 $q_{f,res}$ は周壁および煙層からの放射熱と火炎からの間接放射の和[kW/m²]である。

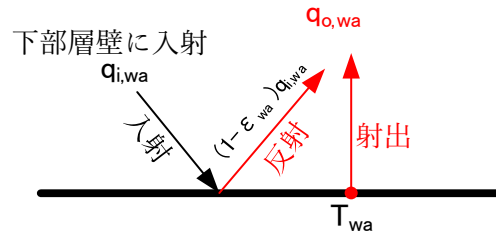


図 2.27 下部層壁面に流出入する放射熱流

2.4 計算プログラムの概要

2.4.1 計算のアルゴリズム

計算プログラムのフローチャートを図 2.28 に示す。本モデルは主に二つの部分に分けることができる。第一部分は二層ゾーンモデルを用いて煙層温度、煙層高さ等を計算する。第二部分は二層ゾーンモデルの計算結果と燃え広がりモデルを用いて発熱速度を予測する。

2.4.2 プログラムへの入力

2.4.2.1 模型室に関する入力

表 2.6 に模型室の壁に関する入力値を示す。

表 2.6 模型室に関する入力値

必要な入力値		変数名	単位	備考
模型室の寸法	長さ	W_m	m	
	幅	D_m	m	
	天井高さ	H	m	
	開口高さ	Ho	m	
	開口幅	B	m	
	開口数量	n	個	
壁	厚さ	xw	m	
	密度	rho_w	kg/m ³	
	比熱	cp_w	kJ/kg・K	
	天井部放射率	e_w	-	壁の材質と同じ
	上部層壁面の放射率	e_ws	-	
	下部層壁面の放射率	e_wa	-	

2.4.2.2 可燃物に関する入力

表 2.7 に可燃物に関する入力値を示す。

表 2.7 可燃物に関する入力値

必要な入力値		変数名	単位	備考
可燃物の寸法	長さ	W_u	m	
	幅	D_u	m	
	厚さ	h	m	
可燃物の物性値	密度	p_u	kg/m ³	

2.4.2.3 外部空気に関する入力

表 2.8 に外部空気に関する入力値を示す。

表 2.8 外部空気に関する入力値

必要な入力値		変数名	単位	備考
外部空気	温度	T0	K	
	密度	rho_0	kg/m ³	

	定圧比熱	cp	kJ/kg・K	
	大気圧	P	1atm	

2.4.2.4 初期値および定数の入力

表 2.9 に初期値の入力を示す。

表 2.9 初期値の入力

初期値		変数名	値	単位
上部層（煙層）	上部層温度	Ts	293.2	K
	上部層高さ	Zs	H-0.01	m
	壁面温度（室内側）	Tws	293	K
	壁面温度（外気側）	T5	293	K
	壁の内部温度	T2~T4	293	K
	CO ₂ 濃度	Yco2s	0.0003	-
	H ₂ O濃度	Yh2os	0.013	-
	煤の濃度	Ysoots	0	-
	煤の密度	rho_soot	2000	kg/m ³
下部層（空気層）	下部層温度	Ta	293.1	K
	壁面温度（室内側）	Twa	293	K
	壁面温度（外気側）	T2a~T4a	293	K
	壁の内部温度	T5a	293	K
	CO ₂ 濃度	Yco20	0.0003	-
	H ₂ O濃度	Yh2o0	0.013	-
燃焼	燃焼直径	Df	0.03	m
	燃え尽き直径	Db	0.03	m
	発熱速度	Q	0.132	kW

表 2.10 に定数の入力を示す。燃焼終了時間は、十分に長い時間に設定する必要がある。着火温度、単位質量当たりの発熱量、火炎伝播速度等は自由空間燃焼実験によって測定する必要がある。また、新谷ら^[9]に倣い火炎の放射発散度は一定値で近似した。

表 2.10 定数の入力

定数		変数名	値	単位
時間	開始時間	t	0	s
	終了時間	t_end	800	s
	時間間隔	dt	0.1	s
燃焼	着火温度	Tb	自由空間燃焼実験によって測定する	K
	ΔH	delta_H		kJ/kg
	$\Delta H/L$	delta_H_L		
	自由空間における火炎伝播速度	vf_free		m/s
放射発散度 ^[9]	円筒部連続火炎領域	Ecc	80.5	kW/m ²
	円筒部間欠火炎領域	Eci	51.2	kW/m ²
	円盤部連続火炎領域	Edc	80.5	kW/m ²
	円盤部間欠火炎領域	Edi	47.7	kW/m ²

2.4.3 プログラムの出力

計算プログラムで得られた各時刻の発熱速度、展炎半径、煙層温度等の結果を csv ファイルに出力する。表 2.11 にプログラムの出力値を示す。

表 2.11 プログラムの出力値

出力値		変数名	単位
発熱速度		Q	kW
単位面積当たりの発熱速度		q0	kW/m ²
燃焼直径		Df	m
燃え尽き直径		Db	m
燃焼面積		Af	m ²
燃え尽き面積		Afb	m ²
自由空間における火	平均火炎高さ	Lm_free	m

炎高さ	連続火炎高さ	Lc_free	m
展炎半径	間欠火炎領域	ri	m
	連続火炎領域	rc	m
内部放射の放射熱	円筒部から	qf	kW/m^2
外部放射の放射熱	展炎部から（円盤部）	qd	kW/m^2
	火炎が接する天井部から	qw	kW/m^2
	周壁および煙層からの放射熱と火炎からの間接放射の和	qf_res	kW/m^2
上層部	上部層温度	Ts	$^{\circ}C$
	上部層壁面温度	Tws	$^{\circ}C$
	上部層高さ	Zs	m
下部層	下部層温度	Ta	$^{\circ}C$
	下部層壁面温度	Twa	$^{\circ}C$

2.5 本章の結論

本章では、既存モデルを改良して、単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルを構築した。本モデルは燃え広がりモデルと二層ゾーンモデルを連成して、室内における単一の固体可燃物の燃焼性状を解析する方法を提案した。

燃え広がりモデルについては、展炎半径と燃焼半径の関係に基づき、従来の3種類の火炎形状を6種類に拡張することで、外部放射による放射熱のより正確な算出が可能となった。また、外部放射が燃焼加速に及ぼす影響を評価する式（単位面積あたりの発熱速度および火炎伝播速度の式）を改良した。従来のモデルでは換気支配型燃焼を考慮していなかったが、本研究ではこれを考慮に入れている。

更に、従来の二層ゾーンモデルは火炎からの放射熱が全部上部層に流入すると仮定していた。本研究は火炎からの放射熱の一部が開口を通じて流出し、残りが下部層と上部層に流入すると仮定した。

その結果、本モデルを用いることで、模型室の形状や可燃物の物性値・寸法などを入力すれば、可燃物の発熱速度や燃焼半径などの時間変化を簡便に予測することを可能とした。

【第2章参考文献】

[1] 赤尾 捷, 原田 和典, 仁井 大策, 室内の熱フィードバックを考慮した可燃物の発熱速

- 度, 日本火災学会研究発表会, pp.190-191, 2018
- [2] E.E. Zukoski, B.M. Cetegen and T.K. Kubota, "Visible structure of buoyant diffusion flames", Symp. (Int.) on Combustion, 20, pp. 361-366 (1984).
- [3] You, H. Z. and Faeth, G. M., "Ceiling Heat Transfer during Fire Plume and Fire Impingement", Fire and Materials, Vol.3, No.3, pp.140-147, 1979
- [4] McGrattan, B., K., Baum, R., H. and Hamins, A., "Thermal Radiation from Large Pool Fires", NISTIR 6546, 2000
- [5] ASTM Committee E-5 on Fire Standards, "Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties", E 1321 – 93, 1993
- [6] T. Tanaka and S. Yamada, "BRI2002: TWO LAYER ZONE SMOKE TRANSPORT MODEL", Fire Science and Technology, Volume 23 Issue 1, Tokyo University of Science (2004).
- [7] 池松由良, 内装材料の燃え広がり予測に関する研究－燃え広がり予測モデルも改良及び燃焼実験との比較検討－, 京都大学修士論文, 2023.
- [8] ISOLITE insulating products Co. Ltd., The thermal conductivity of ceramic fiber board, https://www.isolite.co.jp/products/rcf/isowool-board/?doing_wp_cron=1717681052.0726940631866455078125. (In Japanese)
- [9] Y. Shintani, T. Nagaoka, Y. Deguchi and K. Harada, "Simple Method to Predict Downward Heat Flux from Flame to Floor", Fire Science and Technology, Vol.33, No.1 (2014).
- [10] KYLE NOVAK, Numerical Methods for Scientific Computing, Second Edition, 2022.
- [11] 山田茂, 田中哮義, 吉野博熱伝達率と発熱速度及び区画規模との関係 小規模区画における火災初期の対流熱伝達 その 2, 日本建築学会計画系論文集, 第 495 号, 1-8, 1997.

第3章 単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルの精度の検証

本章では、単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルの精度の検証を行う。なお、本章の内容の一部は、International Journal of Fire Science and Engineering に投稿したものをもとに再構成したものである。

3.1 自由空間燃焼実験による物性値の抽出

室内での燃え広がり予測する前提として、自由空間での燃焼実験結果を考察し、計算に必要な物性値を抽出しておく。

3.1.1 自由空間燃焼実験の概要

赤尾ら^[4]は自由空間におけるウレタンフォーム燃焼実験を行った。自由空間の実験では、集煙フード下に設置したロードセル上で試験体を燃焼させて質量減少速度と発熱速度を測定した。試験体は軟質ポリウレタンフォームで、平均密度は約 15.84kg/m^3 である。着火は上面の中心点にアルコールを含浸させたティッシュペーパーへ点火して行った。実験条件の一覧を表 3.1 に示す。自由空間燃焼実験は o1~o4 の 4 条件で試験体厚さのみを変更して行なわれた。

表 3.1 自由空間燃焼実験の実験条件

実験			NO.	o1	o2	o3	o4
試験体重量				0.586kg	0.802kg	0.391kg	0.201kg
試験体寸法	厚さ	h		0.15 m	0.2 m	0.1 m	0.05 m
	長さ×幅	$D_u \times W_u$		0.5 × 0.5 m			

図 3.1 に発熱速度の実験値を示す。試験体厚さが厚くなるほど、発熱速度の最大値は大きくなり、最大値に達する時間は遅くなる。最も厚い 200mm の試験体を燃焼させた実験 o2 では、約 200kW まで発熱速度は増加した。

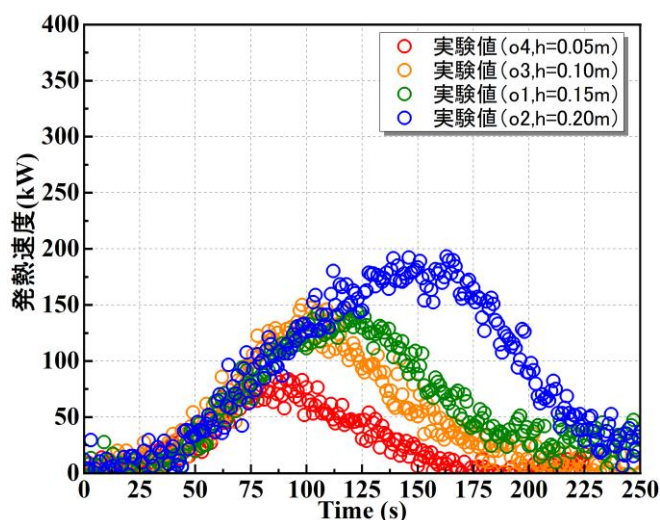


図 3.1 自由空間燃焼実験における発熱速度の実験値

3.1.2 自由空間における単位質量当たりの発熱量の抽出

実験 o1～o4 までの総発熱量、試験体の質量、単位面積当たりの発熱量を表 3.2 に示す。それぞれの実験における平均と標準偏差として、次式を得た。

$$\Delta H = 29.4 \pm 0.62 \text{ (MJ/kg)} \quad (3.1.1)$$

表 3.2 単位質量当たりの発熱量の計算

実験 No.	総発熱量 $THR[\text{MJ}]$	試験体の質量 $w[\text{g}]$	単位質量当たりの発熱量 $\Delta H[\text{MJ/kg}]$
o1 (厚さ 150mm)	17.5	586.3	29.1
o2 (厚さ 200mm)	23.3	801.8	29.9
o3 (厚さ 100mm)	11.7	390.5	30.0
o4 (厚さ 50mm)	5.8	200.8	28.7

3.1.3 自由空間における火炎伝播速度の抽出

図 3.2 に自由空間燃焼実験における燃焼半径の実験値を示す。燃焼半径はビデオカメラで撮影した動画より、ウレタンフォーム上面の中心点から上下左右 4 方向の燃え広がり先端までの距離を測定した。各実験で測定された燃焼半径はほぼ同じである。試験体上面の辺長が 0.5m であることから、測定可能な燃焼半径の上限は 0.25m に制限される。ただし、燃え広がり先端が上面の端に到達した後も側面の鉛直下方へ広がる。従って、実際の燃焼半径の最大値は 0.25m を上回ると考えられる。実験によると自由空間における火炎伝播速度は一定値 0.0035m/s である。

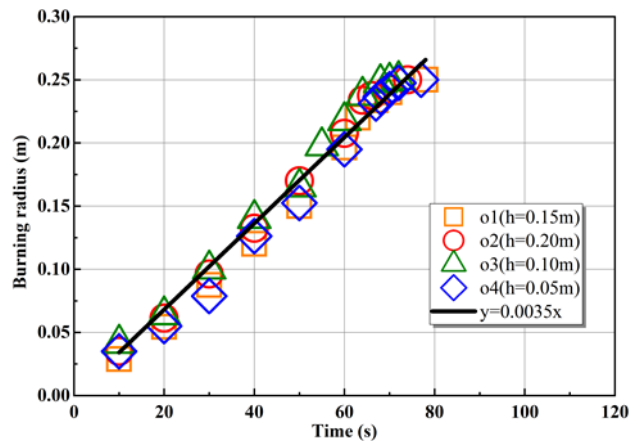


図 3.2 自由空間燃焼実験における燃焼半径の実験値

3.1.4 自由空間における $\Delta H/L$ の抽出

単位質量当たりの発熱量と熱分解潜熱の比 $\Delta H/L$ を導出するため、発熱速度および燃焼半径の実験値を用いた。単位面積当たりの発熱速度 q_0 は、発熱速度を燃焼面積で除することにより、式 (3.1.2) により求められる。

$$q_{0,free} = Q/\pi r_f^2 \quad (3.1.2)$$

燃焼面に入射する放射熱流束は、自由空間の火炎形状を考慮して、式(3.1.3)により算出される。

$$q_{f,free} = \varepsilon_c E_{cc} F_{cc} + \tau_c \varepsilon_c E_{ci} F_{ci} \quad (3.1.3)$$

ただし、 ε_c は火炎円筒部の放射率[-]、 τ_c は火炎円筒部の透過率[-]、 E_{cc} は円筒部連続火炎領域の放射発散度 (kW/m^2)、 E_{ci} は円筒部間欠火炎領域の放射発散度 (kW/m^2)、 F_{cc} は燃焼面から円筒部連続火炎領域を見た時の形態係数[-]、 F_{ci} は燃焼面から円筒部間欠火炎領域を見た時の形態係数[-]である。

火炎の放射発散度は次式で計算する：

$$E_i = \sigma(T_i^4 - T_0^4) \quad (3.1.4)$$

ただし、 σ はステファン・ボルツマン定数[$5.67 \times 10^{-11} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]、 T_i は火炎の温度[K]($i=cc, ci, dc, di$)である。火炎温度は新谷らに倣い、円筒部連続火炎領域温度 $T_{cc} = 1093\text{K}$ 、円筒部間欠火炎領域温度 $T_{ci} = 977\text{K}$ 、円盤部連続火炎領域温度 $T_{dc} = 1093\text{K}$ 、円盤部間欠火炎領域温度 $T_{di} = 960\text{K}$ とした。

燃焼面における熱収支より、単位質量当たりの発熱量と熱分解熱の比 ($\Delta H/L$) は、単位面積あたりの発熱速度と燃焼面に入射する放射熱流束との比 ($q_{0,free}/q_{f,free}$) として近似される：

$$\Delta H/L = q_{0,free}/q_{f,free} \quad (3.1.5)$$

図 3.3 に $q_{0,free}$ と $q_{f,free}$ の実験値の比を示す。この比率は試験体の厚さに依存せず一定であり、その定数値は17.2 であることが確認された。

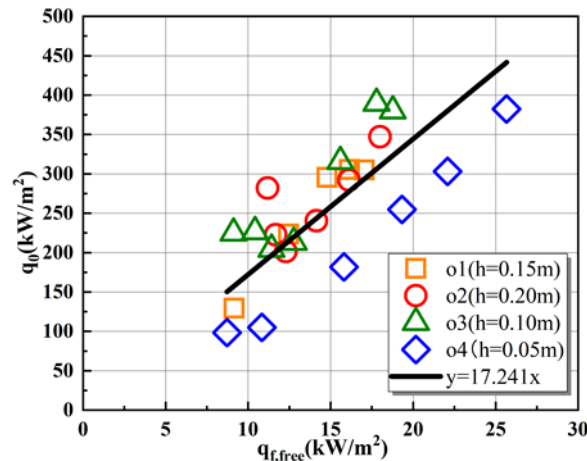


図 3.3 自由空間燃焼実験における $q_{0,free}$ と $q_{f,free}$ の実験値の比

3.2 赤尾による模型室内実験との比較

3.2.1 実験概要

赤尾ら^[1]は、模型室で燃焼実験を行った。模型室の断面図を図 2.3、平面図を図 2.4、実験の写真を図 2.5 に示す。模型室の内寸（平面形）は $1.7 \times 0.9\text{m}$ であり、そのうち中央部の $0.55 \times 0.85\text{m}$ の部分に架台および試験体を設置し、試験体と床面の間にはアルミ箔を敷いた。

模型室の手前と奥に開口を設置した。模型室の壁、天井と床は全てセラミックファイバーボード (厚さ 50mm、密度 250kg/m^3) 製である。自由空間実験と同様に、試験体は軟質ポリウレタンフォームで、寸法は大きさを $0.5\times 0.5\text{m}$ で固定し、厚さを $0.05\sim 0.15\text{m}$ で変化させた。着火は試験体上面中心点にアルコールを含浸させたティッシュペーパーへ点火して行った。

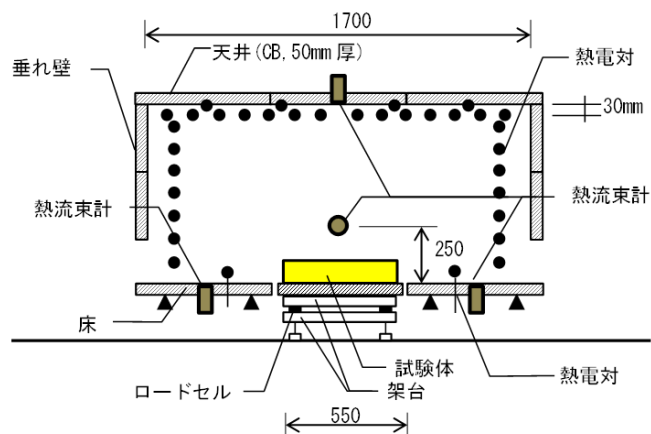


図 3.4 模型室の断面図

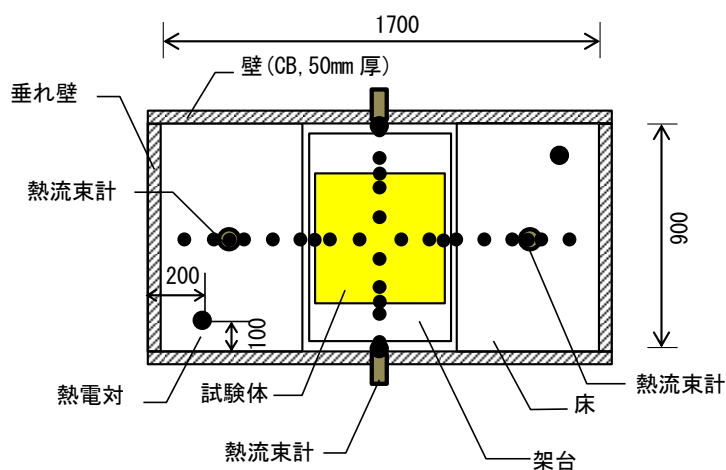


図 3.5 模型室の平面図



図 3.6 模型室燃焼実験の写真（実験 b6）

3.2.1.1 測定項目

赤尾実験の測定項目を表 3.3 に示す。自由空間における燃焼実験では、試験体の質量減少速度、発熱速度および燃焼半径が測定された。模型室における燃焼実験では、これらに加えて室内温度、壁面温度、天井・側壁・床面への入射熱流束を測定した。本研究では、発熱速度および燃焼半径に主に着目して解析を行う。また、入射熱流束では床面への入射熱流束に着目する。

表 3.3 赤尾実験の測定項目

No.	測定項目	測定装置	測定装置の設置位置	測定方法
1	発熱速度	集煙フード	試験体上部	酸素消費法（自由空間）
		ロードセル	試験体下部	質量法（模型室）
2	燃焼半径	ウェブカメラ	試験体上部	燃焼面の中心点から4方向について約 10 秒毎に測定した火炎の燃え広がり先端までの距離
3	上部層温度	鉛直方向の熱電対ツリー	開口付近 2 ヶ所	N%法（N=10） 手前と奥の平均値
4	下部層温度	鉛直方向の熱電対ツリー	開口付近 2 ヶ所	N%法（N=10） 手前と奥の平均値
5	天井流温度	熱電対	天井 3cm に長手方向および短手方向	測定された温度の平均値
5	上部層壁面温度	熱電対	天井表面（火源直上から 250mm、550mm）	2 ヶ所で測定された温度の平均値
6	上部層高さ	鉛直方向の熱電対ツリー	開口付近 2 ヶ所（図 2.3）	N%法（N=10） 手前と奥の平均値
7	床面への入	熱流束計	床面 2 ヶ所（図 2.3）	2 ヶ所で測定された熱流

	射熱流束			束の平均値
--	------	--	--	-------

3.2.1.2 実験条件

模型室における燃焼実験では、試験体の厚さ、天井高さ、開口高さを変更し、計 12 回の実験を実施した。実験条件を表 3.4 に示す。天井高さは 0.4～0.8 m、開口高さは 0.2～0.8 m の範囲で変更された。試験体の厚さは 0.05～0.20 m の範囲で変更された。天井高さと開口高さが等しい場合（実験 b1、b2、b4、b8、b11）には垂れ壁は存在しない。

表 3.4 赤尾による模型室燃焼実験の実験条件

実験 No.	天井高さ H (m)	開口高さ H _o (m)	試験体厚さ h (m)	垂れ壁
b1	0.80	0.80	0.05	なし
b2 / b3*	0.80	0.80	0.10	
b4	0.80	0.80	0.15	
b8	0.62	0.62	0.10	
b11	0.40	0.40	0.05	
b5	0.80	0.50	0.10	あり
b6	0.80	0.50	0.05	
b7	0.80	0.20	0.10	
b9	0.62	0.32	0.10	
b10	0.62	0.32	0.05	
b12	0.40	0.20	0.05	

*実験 b2 と実験 b3 の実験条件は同様である。

3.2.2 計算条件の設定

図 3.7 に計算に用いた模型室の寸法を示す。開口部の幅は室内幅と同じである。模型室の壁はセラミックファイバーボードである。本節では表 3.4 の実験条件を参考して、計算条件を設定する。

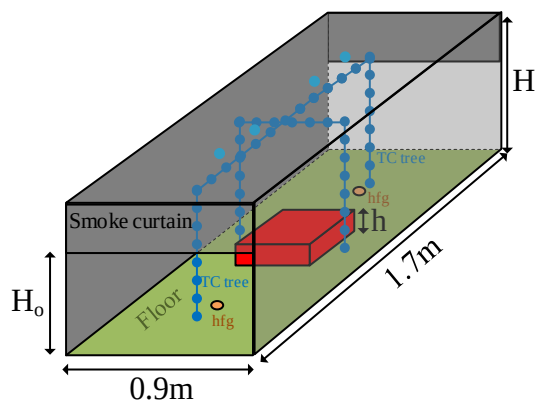


図 3.7 赤尾実験に用いた模型室の寸法

使用した物性値および各種定数を表 3.5 に示す。壁の熱伝導率は、メーカーから提供されたデータ^[2]に基づいて第 2.3.2.2 節の式(2.3.33)で算出した。ウレタンフォームの着火温度は、樽本ら^[3]の実験値を参照した。 ΔH と $\Delta H/L$ は第 3.1 節の自由空間燃焼実験から抽出した値である。測定された。外部空気温度は基準温度として設定した。

表 3.5 物性値と定数の入力

分類	項目	記号	値
壁	材質		セラミックファイバーボード
	厚さ	x	0.05 m
	密度	ρ_w	250 kg/m ³
	比熱	c	1.13 kJ/(kg · K)
	放射率	ε_w	0.9
	熱伝導率[2]	k	$k = 2 \times 10^{-7} \max(T, 600) - 3 \times 10^{-5}$ [kW/(m · K)]
試験体	材質		ウレタンフォーム
	幅×長さ	$D_u \times W_u$	0.5 × 0.5 m
	着火温度 [3]	T_b	481K (208°C)
	単位質量当たりの発熱量	ΔH	29410 kJ/kg
	単位質量当たりの発熱量/分解潜熱	$\Delta H/L$	17.24
	自由空間における火炎伝播速度	$v_{f,free}$	0.0035 m/s
外部空気	温度	T_∞	293K
	対流熱伝達率	h_∞	0.0083 kW/(m ² · K)

3.2.3 予測結果と考察

本節の構成は次の通りである。

第 3.2.3.1 節 垂れ壁なしの予測結果と考察（実験 b1、b2、b4、b8、b11）

第 3.2.3.2 節 垂れ壁ありの予測結果と考察（実験 b5、b6、b7、b9、b10、b12）

第 3.2.3.3 節 全実験における発熱速度の比較

第 3.2.3.1 節および第 3.2.3.2 節では、それぞれ垂れ壁がない場合とある場合における計算値と実験値の比較を詳細に示した。比較項目は 6 つあり、発熱速度、燃焼半径、上部層および下部層の温度、上部層および下部層の壁面温度、上部層高さ、下部層壁面に入射する放射熱流束である。この部分では、実験値との比較を通じて、本モデルの精度を検証する。

第 3.2.3.3 節では、自由空間、垂れ壁がない場合、垂れ壁がある場合のそれぞれにおける発熱速度の比較を行った。この部分では、試験体の高さ、開口高さ、天井高さが燃焼に及ぼす影響についても予備的に考察する。

3.2.3.1 垂れ壁なしの予測結果と考察

(1) 実験 b1

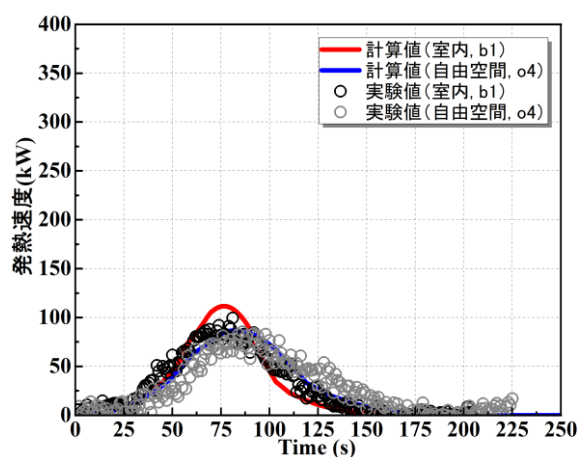
図 3.8(a)に実験 b1 と実験 o4 の発熱速度の計算値と実験値を示す。実験 b1 は室内燃焼実

験、模型室の天井高さは 0.8m、試験体厚さは 0.05m である。実験 o4 は自由空間燃焼実験で、試験体厚さは 0.05m である。室内の最大発熱速度は自由空間よりもやや高くなる傾向が実験と計算ともに現れている。

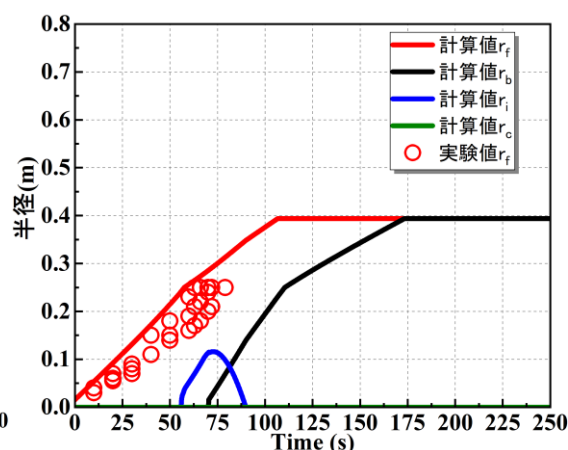
図 3.8(b)に実験 b1 における燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径の計算結果を示す。丸マーカは燃焼半径の実験値を示し、その傾きは燃え広がり速度を表す。赤色線は燃焼半径の計算値、黒色線は燃え尽き半径の計算値、青色線と緑色線は間欠火炎展炎半径と連続火炎展炎半径の計算値である。計算値によると、燃焼半径は最初は時間と共に線形的に増加する。約 53 秒で火炎伝播の方向が水平から鉛直下方に変わり、これにより燃え広がり速度が減少する。約 52～88 秒の間に天井下で間欠火炎の展炎が確認された。約 52 秒時点で火炎が展炎し、外部放射が増加して、発熱速度が急に上昇した。なお、連続火炎展炎半径は 0 のため、連続火炎が展炎することはなかった。

図 3.8(c)に上部層と下部層温度の計算値と実験値を示す。黒い丸マーカは、天井流温度の実験値を示している。全体的に、上部層の計算値は実験値より高い。下部層温度の計算値はかなり小さい、これは下部層の放射率を 0 にしたため、下部層は放射熱を吸収しない設定になっているためと考えられる。赤尾実験では下部層壁面温度を測定しなかったため、図 3.8(d)の実験値は上部層壁面温度のみである。実験値では上部層壁面温度と上部層温度の差が 80℃で、計算値では上部層壁面温度と上部層の差が 100℃である。

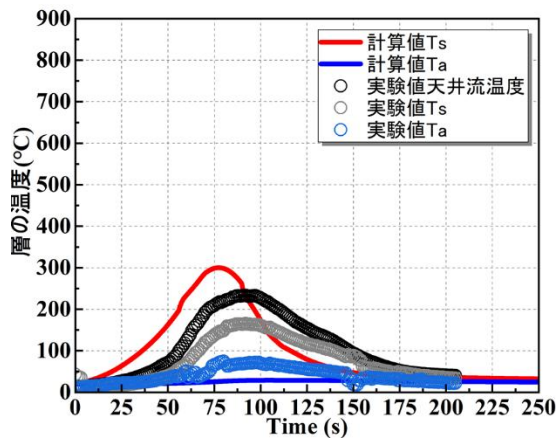
図 3.8(e)(f)に上部層高ささと下部層壁面に入射する熱流を示す。全体的に、計算値は実験値と一致している。単位面積あたりの発熱速度および火炎伝播速度を計算する際、分母となる q_f の値が燃焼初期および後期において極端に小さくなることで、計算に大きな誤差を生じる。本モデルでは数値安定性を確保するため、 q_f に対して最小値 (10kW/m²) を設定した。



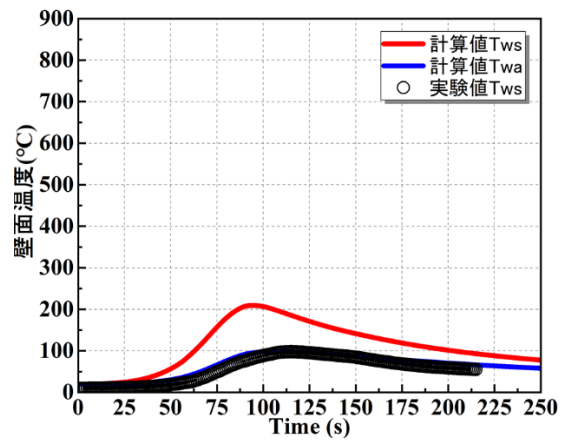
(a)発熱速度



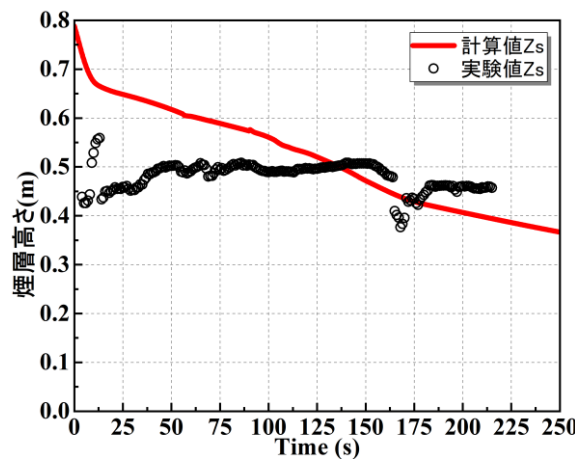
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



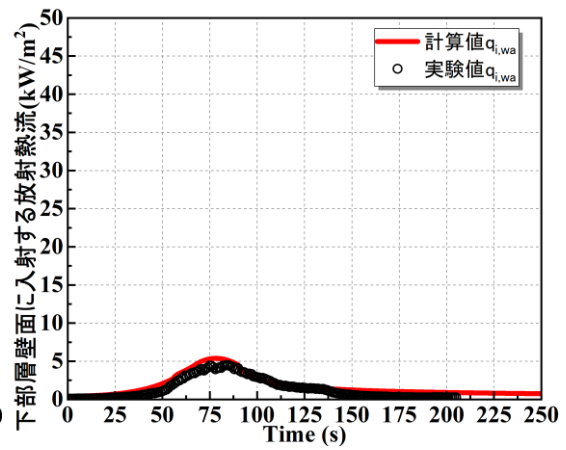
(c)層の温度



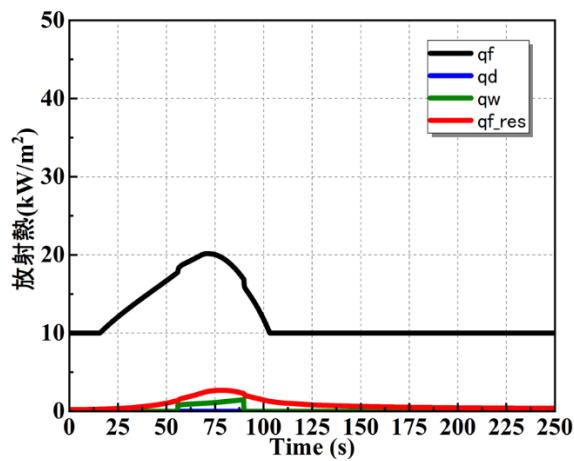
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 3.8 実験 b1 の計算値と実験値の比較

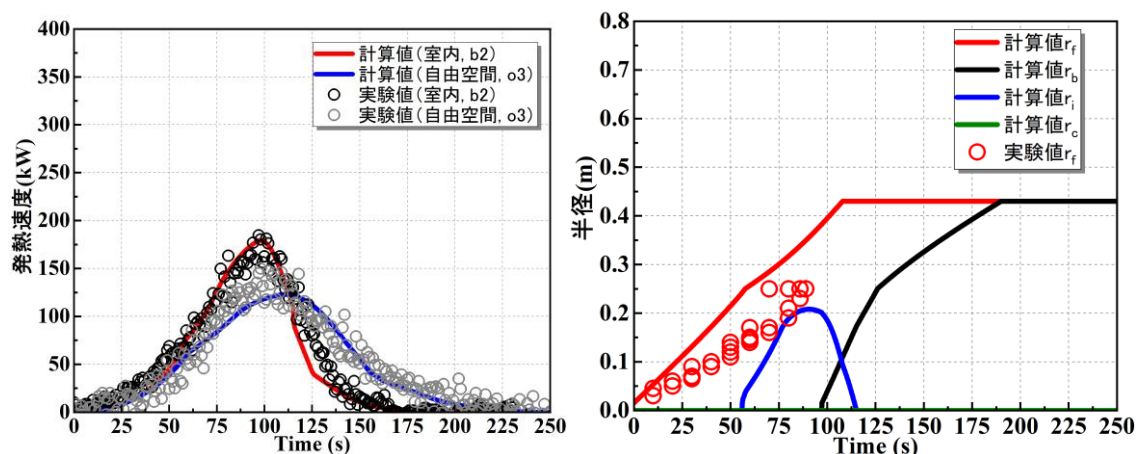
(2)実験 b2

図 3.9(a)に実験 b2 と実験 o3 の発熱速度の計算値と実験値を示す。実験 b2 は、実験 b1 と

同一の模型室を用いており、試験体の厚さのみが 0.10 m に増加した。一方、実験 $\alpha 3$ は、同一の試験体を自由空間で燃焼させた条件で実施されたものである。いずれの条件においても、発熱速度の計算値は実測値と良好に一致しており、室内での燃焼の方が発熱速度が大きくなる傾向が再現されている。

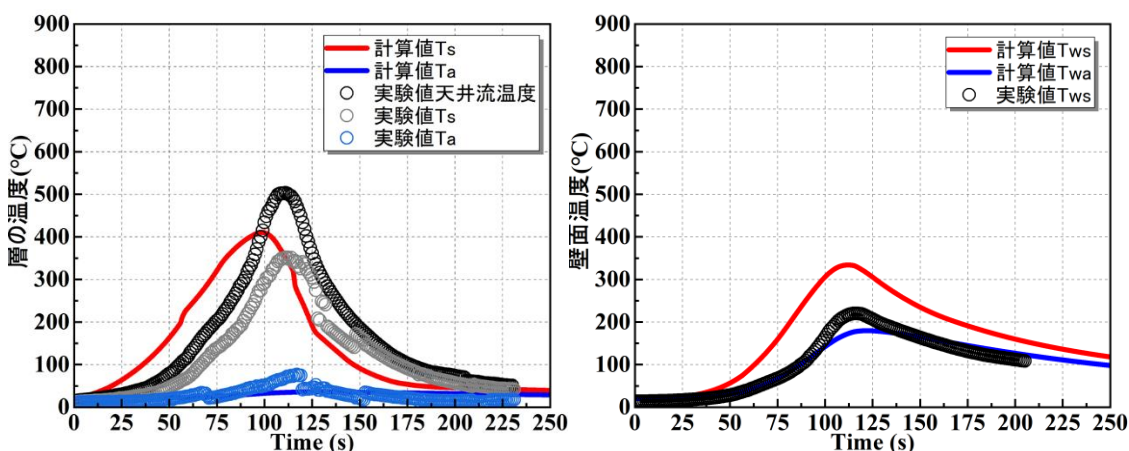
図 3.9 (b) に実験 $b2$ における燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径の計算結果を示す。計算値によると、約 53 秒で火炎伝播の方向が水平から鉛直下方に変わり、これにより火炎伝播速度が減少する。約 52～113 秒の間に天井下で間欠火炎の展炎が確認された。約 52 秒時点で火炎が展炎し、外部放射が増加して、発熱速度が急に上昇した。実験 $b1$ と同様に、連続火炎展炎半径は 0 のため、連続火炎が展炎するには至らなかった。

上部層温度、上部層壁面温度は実験値より大きく、下部層壁面に入射する熱流は小さかった。一方で、燃焼半径と上部層高さは実験値を下回った。燃焼半径および上部層高さで実験値との差が大きい原因としては実験値の誤差の影響である可能性が考えられる。燃焼半径はビデオカメラで撮影した動画を目視で測定した値であり、上部層高さは煙層境界の明確な判別が困難であることから、いずれも測定誤差が生じやすい項目である。



(a) 発熱速度

(b) 燃焼半径燃、燃え尽き半径、展炎半径



(c) 層の温度

(d) 壁面温度

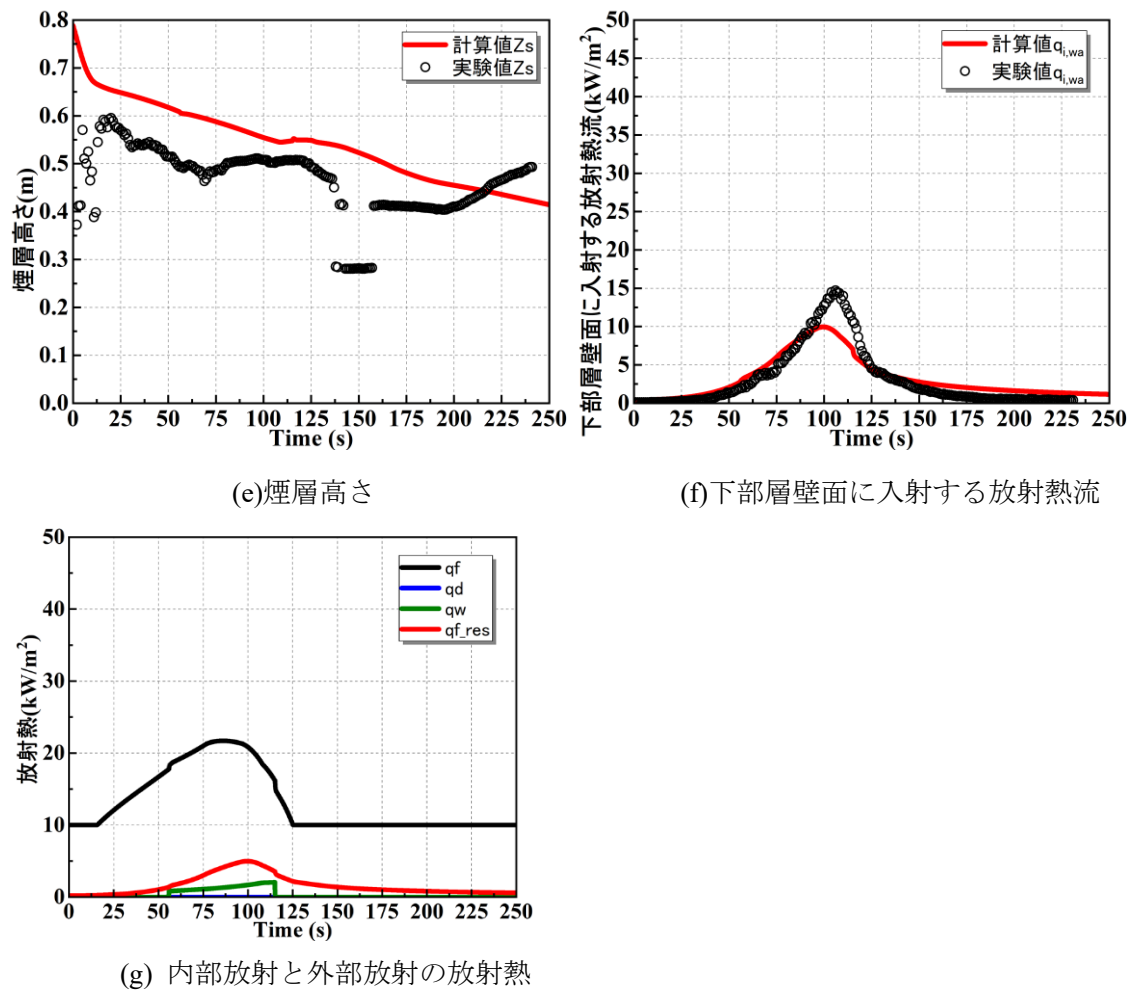


図 3.9 実験 b2 の計算値と実験値の比較

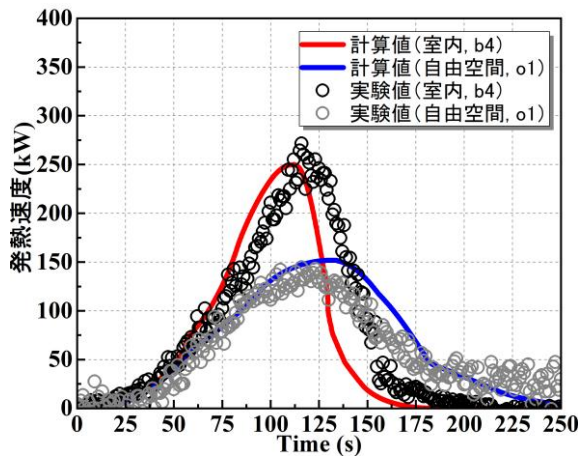
(3) 実験 b4

図 3.10(a)に実験 b4 と実験 o1 の発熱速度の計算値と実験値を示す。実験 b4 は、実験 b1 と同一の模型室を用いており、試験体の厚さのみが 0.15m に増加した。一方、実験 o1 は、同一の試験体を自由空間で燃焼させた条件で実施されたものである。いずれの条件においても、発熱速度の計算値は実測値と良好に一致している。また、室内での燃焼における発熱速度の増加が顕著である。

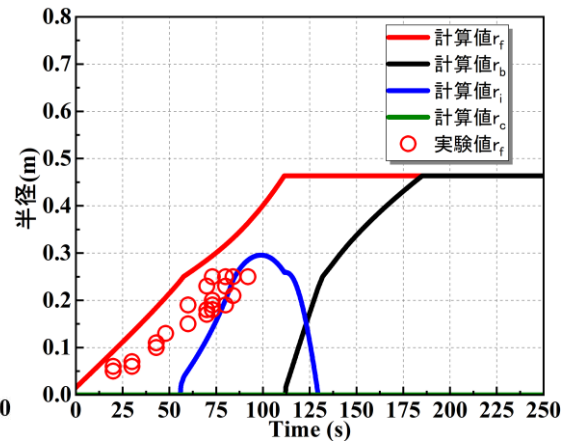
図 3.10(b)に実験 b4 における燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径の計算結果を示す。計算値によると、約 53 秒で火炎伝播の方向が水平から鉛直下方に変わり、これにより火炎伝播速度が減少する。約 52～127 秒の間に天井で間欠火炎の展炎が確認された。実験 b1 および b2 との比較により、試験体の厚さが増加するにつれて、発熱速度が増加し、展炎が発生する時間も長くなる傾向が確認された。

上部層温度と上部層壁面温度の最大値は実験値に近いが、最大値に達する時間は実験値よりも早い傾向がみられた。上部層高さは実験値と良好に一致している。図 3.10(f)に下部層

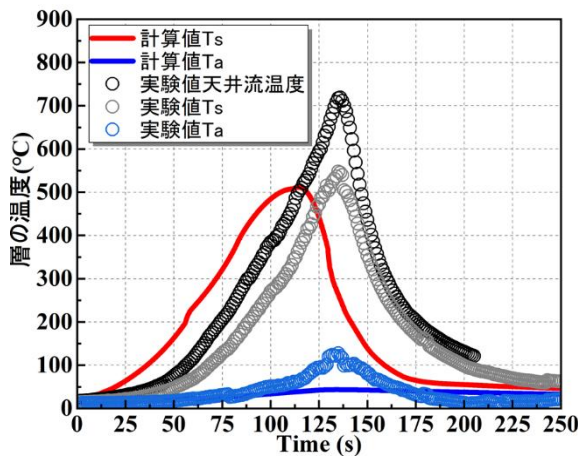
壁面に入射する熱流束 $q_{i,wa}$ の計算値と実験値の比較を示す。 $q_{i,wa}$ は実験値よりも小さい。これは、火炎が熱流束計に近く、測定値には火炎からの直接放射熱も含まれているためである。一方、計算された $q_{i,wa}$ は、下部層壁面に入射する平均熱流束である。



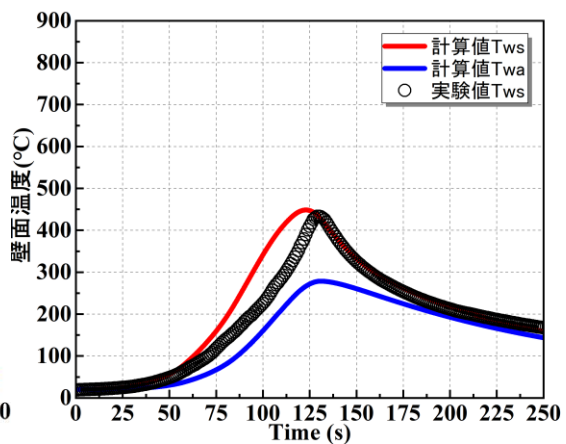
(a)発熱速度



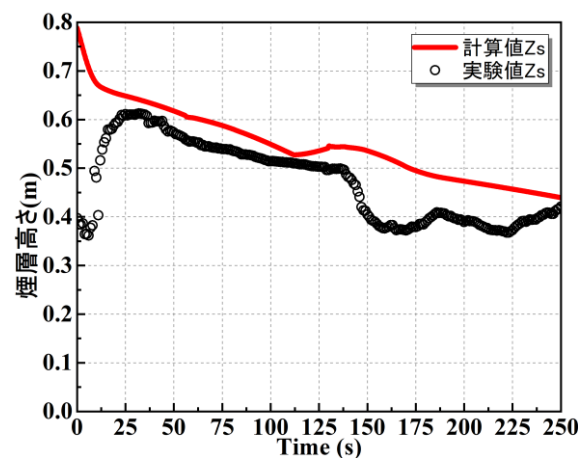
(b)燃焼半径燃、え尽き半径、展炎半径



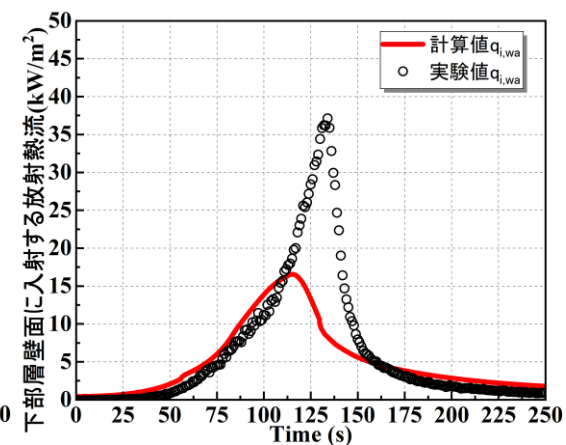
(c)層の温度



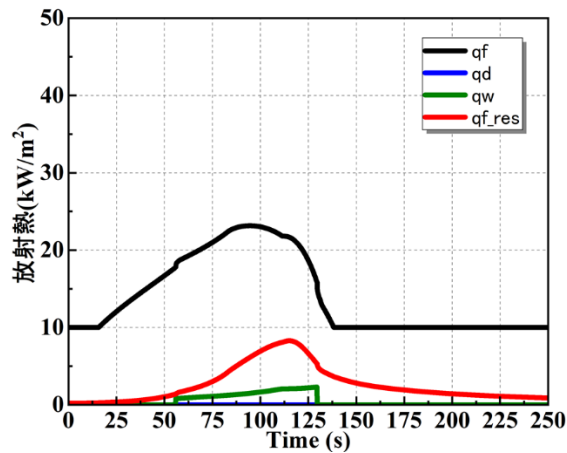
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

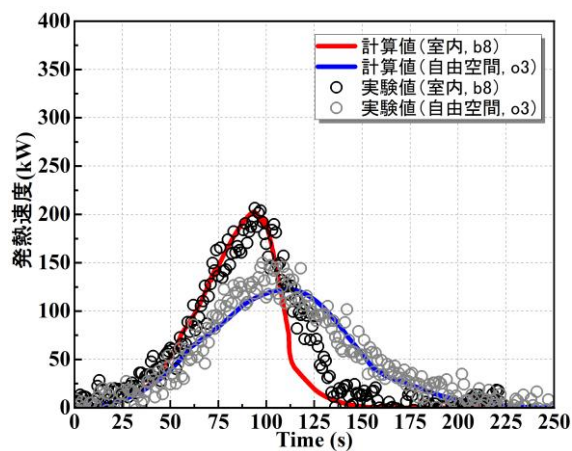
図 3.10 実験 b4 の計算値と実験値の比較

(4) 実験 b8

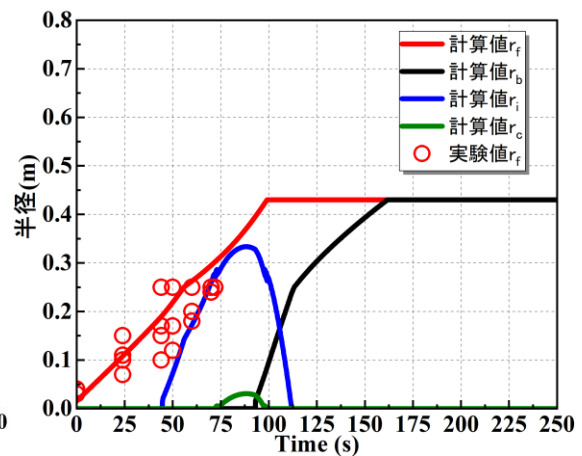
図 3.11 に実験 b8 の計算値と実験値の比較を示す。実験 b8 では天井高さが 0.62m に低くしており、試験体の厚さは実験 b2 と同様に 0.10m である。

図 3.11(a)に実験 b8 と実験 o3 の発熱速度の計算値と実験値を示す。発熱速度は実験値と良好に一致している。図 3.11 (b)に実験 b8 における燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径の計算結果を示す。燃焼半径は実験値に近い。計算結果では 65 秒から連続火炎が展炎する、間欠火炎と連続火炎展炎半径が燃焼半径より小さいため、円盤部が円筒部に含まれる。第 90 s で燃え尽きが始まって、第 165 秒で燃焼が終了する。

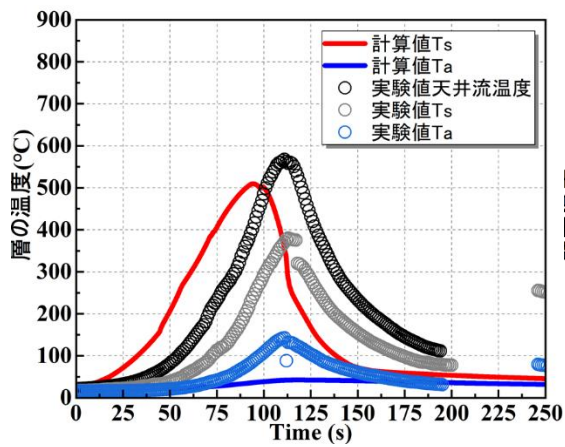
上部層温度と上部層壁面温度は実験値より高く、最大値に達する時間は実験値よりも早い傾向がみられた。上部層高さは実験値と大体一致している。一方で、下部層壁面に入射する熱流は実験値より小さい。



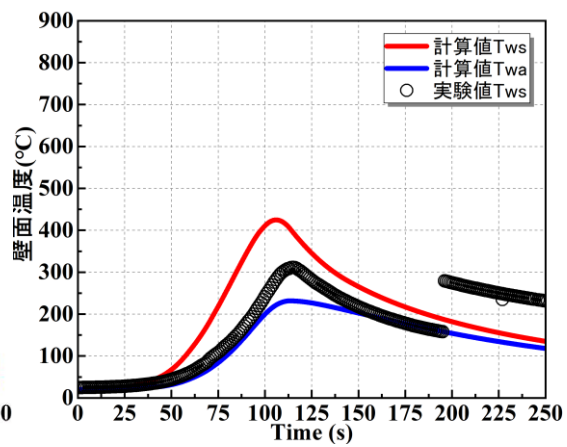
(a) 発熱速度



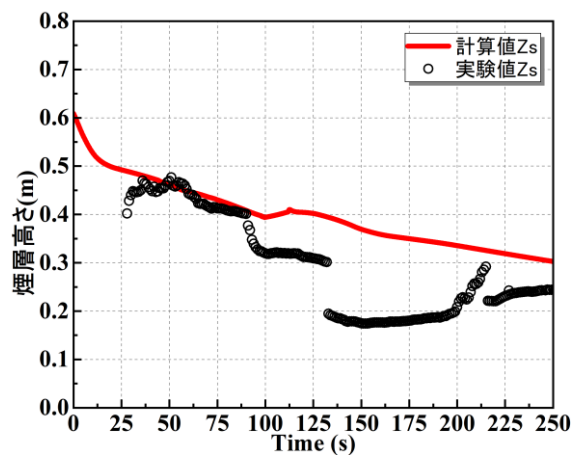
(b) 燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



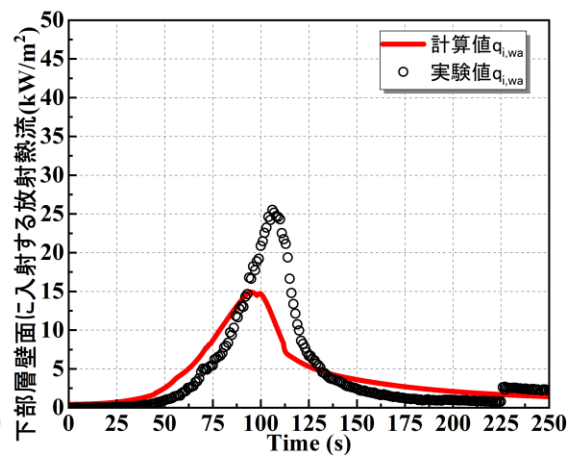
(c)層の温度



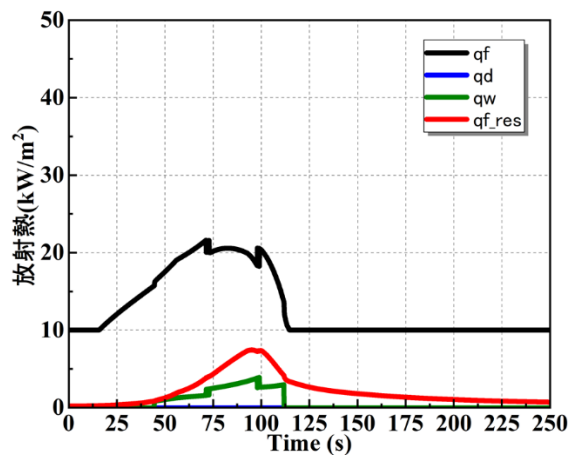
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

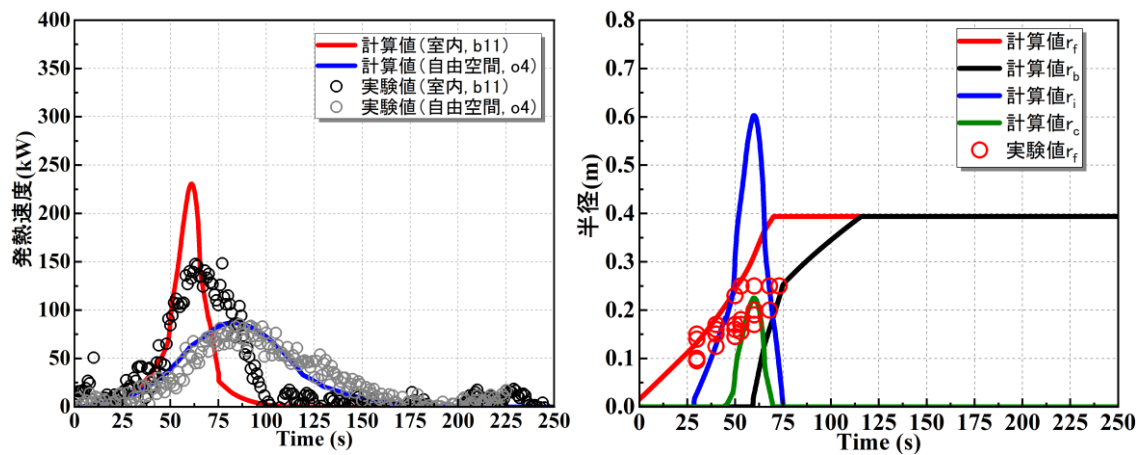
図 3.11 実験 b8 の計算値と実験値の比較

(5)実験 b11

図 3.12 に実験 b11 の計算値と実験値の比較を示す。実験 b11 の天井高さが更に低くなり、0.4 m となっている。

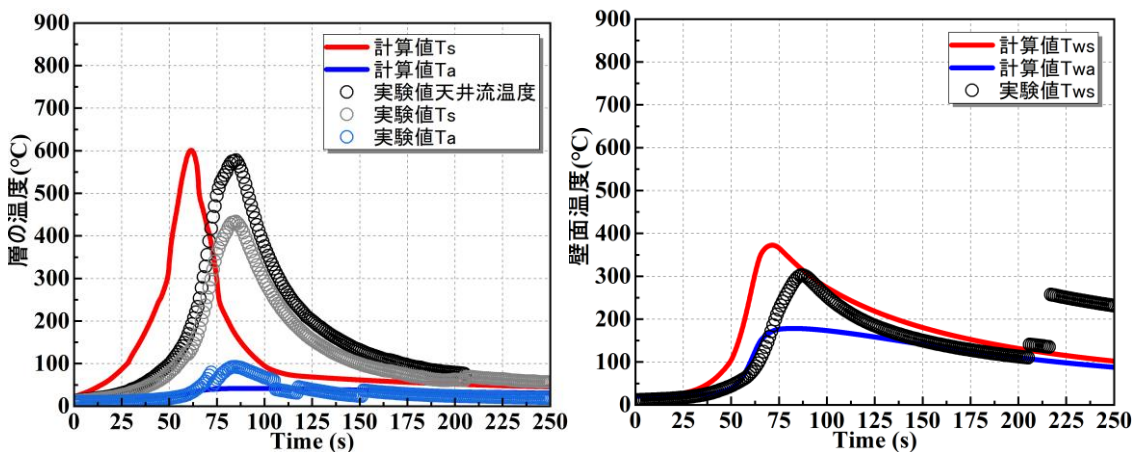
図 3.12(a)に実験 b 11 と実験 o4 の発熱速度の計算値と実験値を示す。最大値に達する時間は実験とほぼ一致しているが、計算値の最大値は実験値よりも明らかに大きく、燃え尽き速度も速い。これは、天井高さが非常に低い場合に火炎の展炎半径が大きくなり、外部放射の放射熱が過大に計算されるためと考えられる。その結果、燃え広がり速度および単位面積当たりの発熱速度が過大に計算されたと考えられる。

上部層温度および上部層壁面温度においては、最大値に達する時間が実験値よりも早く、かつ最大値も実験値より高くなっている。これは、発熱速度が過大に評価されたためである。上部層高さは実験値と良好に一致している。一方で、下部層壁面に入射する熱流は実験値より小さい。



(a)発熱速度

(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



(c)層の温度

(d)壁面温度

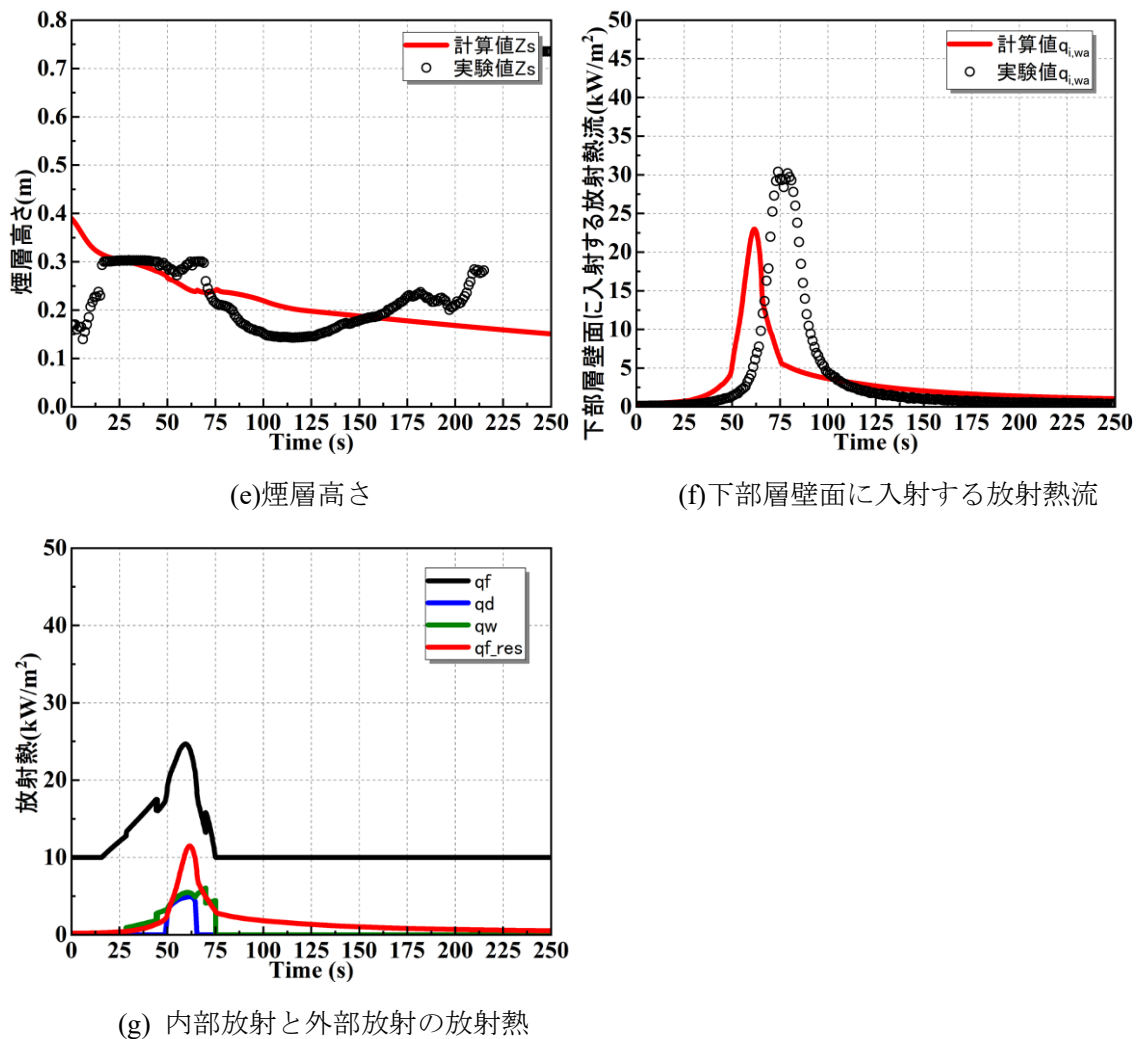


図 3.12 実験 b11 の計算値と実験値の比較

3.2.3.2 垂れ壁ありの予測結果と考察

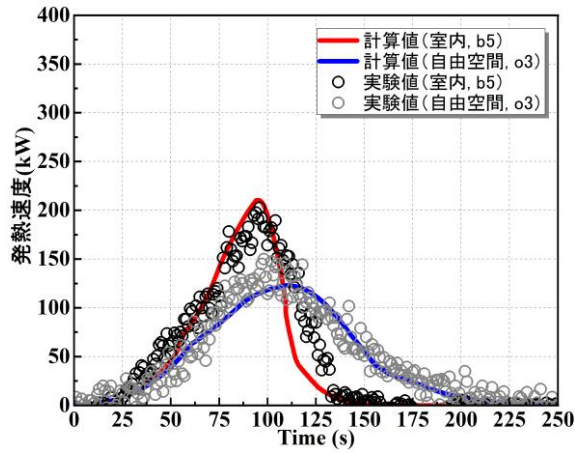
(1) 実験 b5

実験 b5 では、模型室の天井高さは 0.8m、開口高さは 0.5m、試験体厚さは 0.10m である。実験 o3 は自由空間燃焼実験で、試験体厚さは 0.10m である。図 3.13(a)に実験 b5 と実験 o3 の発熱速度の計算値と実験値を示す。発熱速度は実験値と良好に一致している。実験 b2 と比較して、実験 b5 では開口高さが低くなっている。図 3.9(a)と比較すると、実験 b2 の最大発熱速度は約 190 kW であるのに対し、実験 b5 は約 210 kW である。開口高さが低くなると、最大発熱速度が大きくなる傾向が見られる。

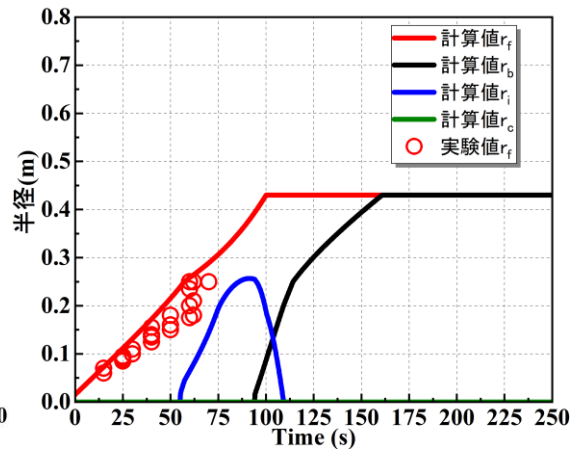
図 3.13 (b)に実験 b5 における燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径の計算結果を示す。燃焼半径は実験値に近い。計算結果では 55 秒で間欠火炎が展炎する、間欠火炎展炎半径は燃焼半径より小さいため、円盤部は円筒部に含まれる。90 秒で燃え尽きが始まって、165 秒で燃

焼が終了する。

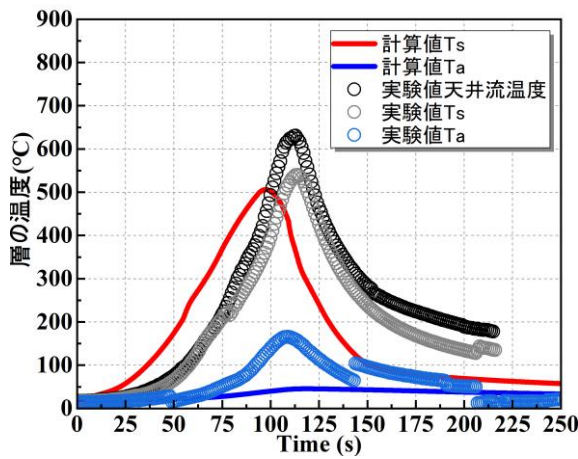
上部層温度と上部層壁面温度は実験値に近い。上部層高さは実験値と良好に一致している。一方で、下部層壁面に入射する熱流は実験値より小さい。



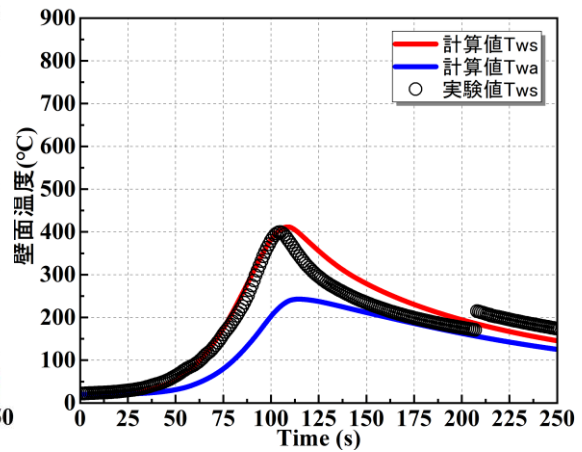
(a)発熱速度



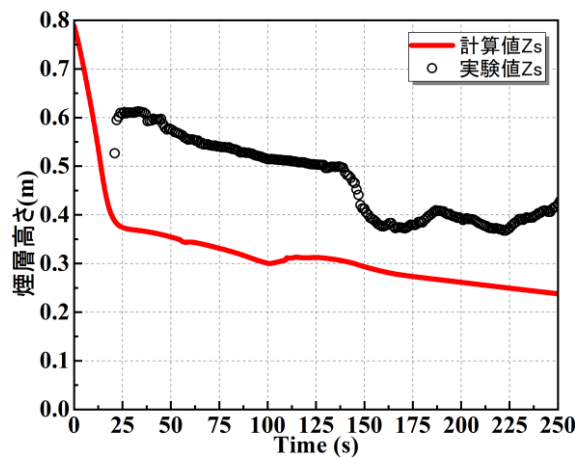
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



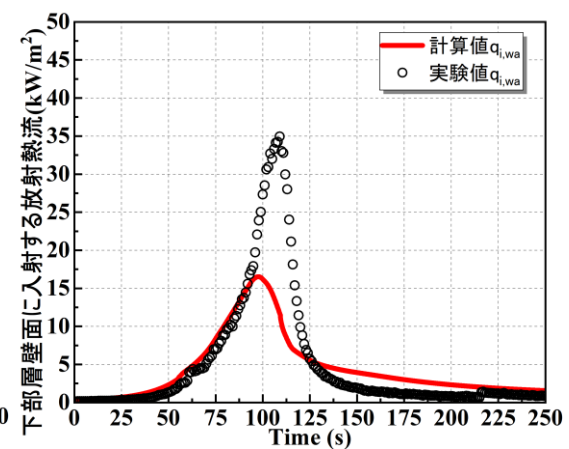
(c)層の温度



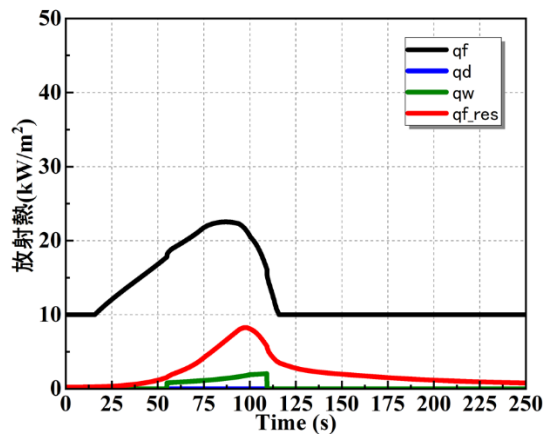
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



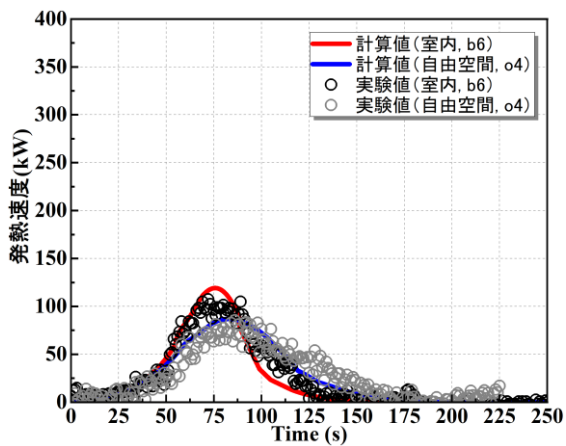
(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 3.13 実験 b5 の計算値と実験値の比較

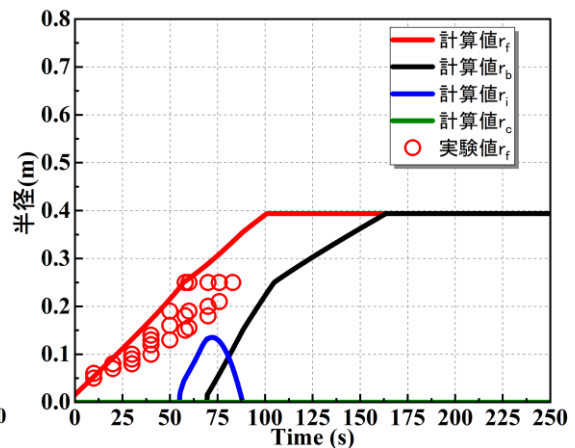
(2)実験 b6

図 3.14 に実験 b6 の計算値と実験値の比較を示す。実験 b5 と比べて、実験 b6 の天井高さと開口高さは同じであるが、試験体厚さが小さくなっている。

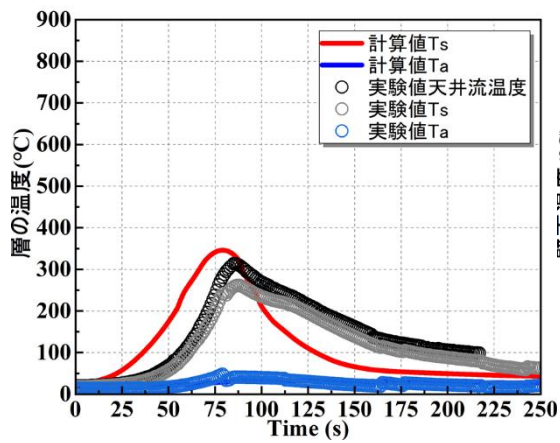
図 3.14(a)に実験 b6 と実験 o4 の発熱速度の計算値と実験値を示す。発熱速度の計算値は実験値と良好に一致している。燃焼半径、下部層温度、上部層高さ、下部層壁面に入射する熱流は実験値と大体一致している。上部層温度、上部層壁面温度は実験値よりやや高い。図 3.14(b)の計算値から、火炎が展炎するものの、円盤部が円筒部に含まれるので展炎部からの外部放射は 0 である。



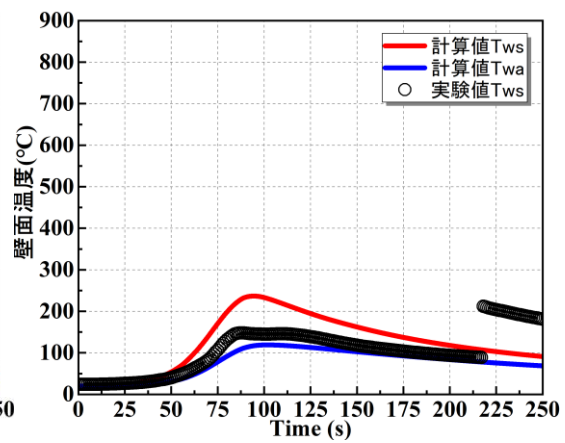
(a)発熱速度



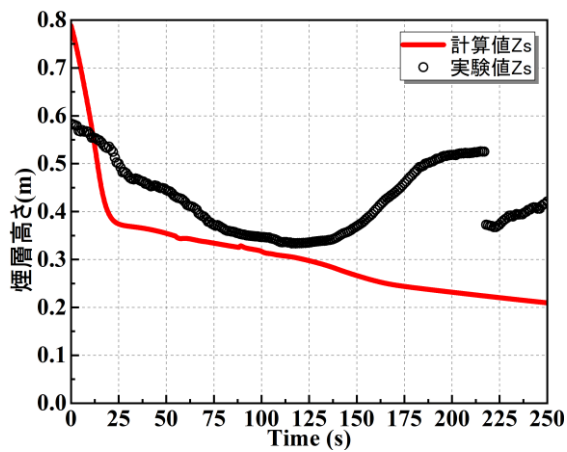
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



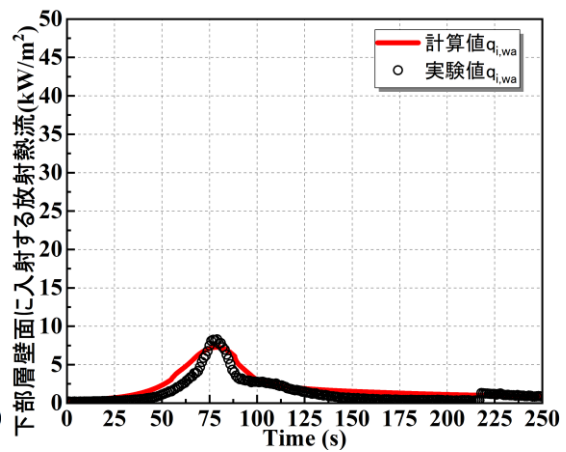
(c)層の温度



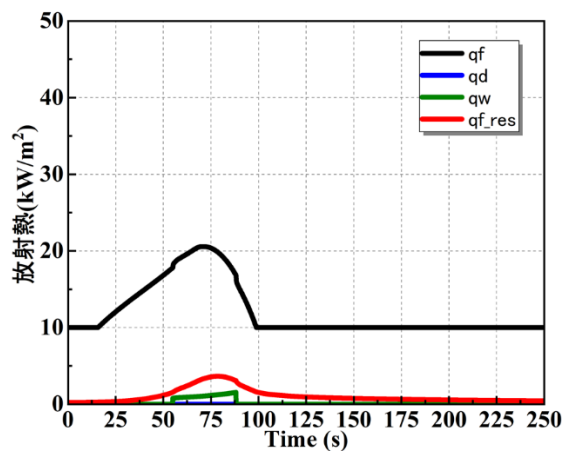
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



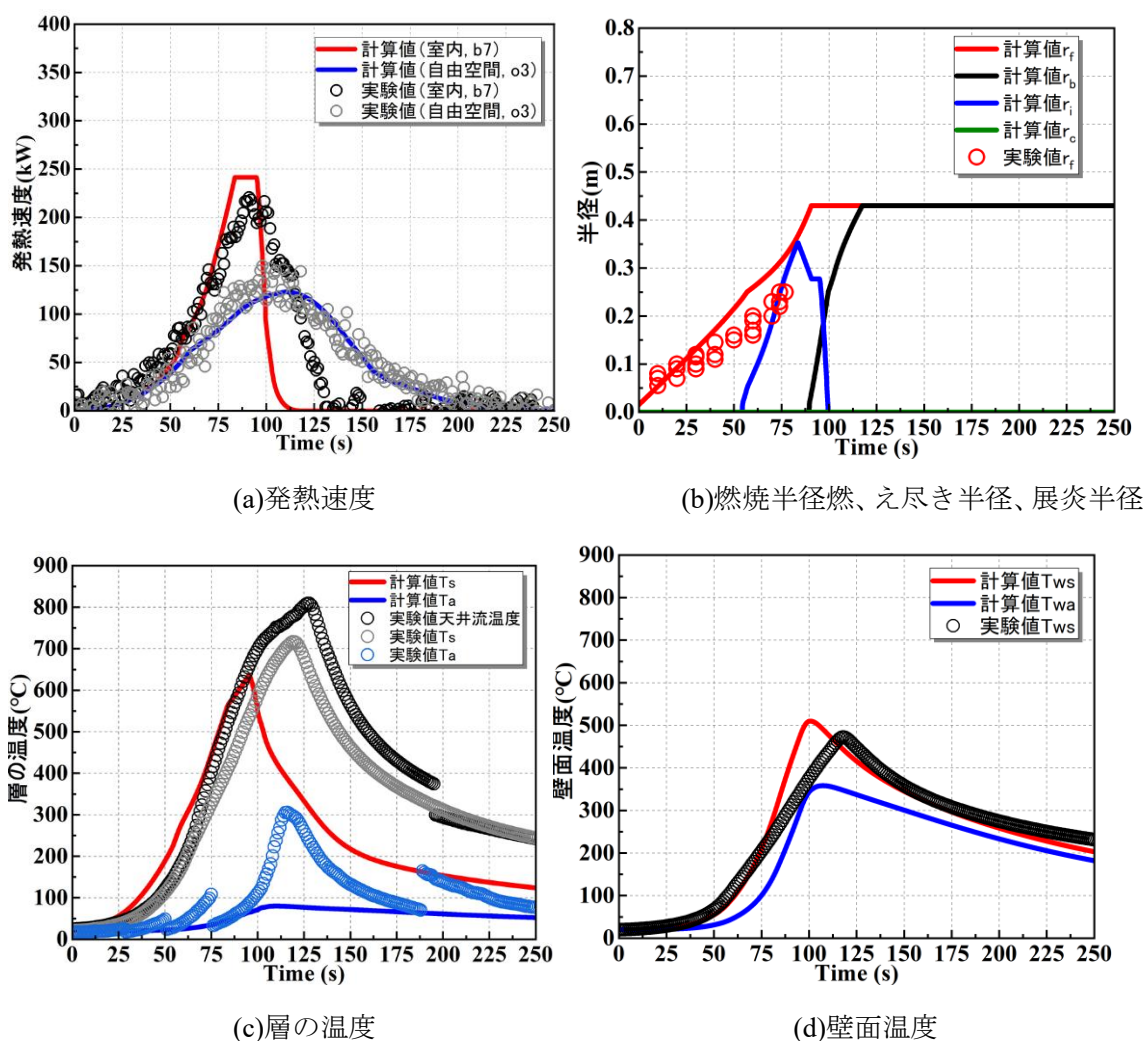
(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 3.14 実験 b6 の計算値と実験値の比較

(3)実験 b7

図 3.15 に実験 b7 の計算値と実験値の比較を示す。実験 b7 の天井高さは 0.8m、開口高さは 0.2m、試験体厚さは 0.1m である。

図 3.15(a)に実験 b7 と実験 o3 の発熱速度の計算値と実験値を示す。開口高さが 0.2 m と非常に低く開口部が小さいため、約 80 秒頃に換気支配の臨界発熱速度に達した。本モデルでは換気支配の臨界発熱速度を発熱速度の上限値として設定しているため、80~95 秒の間に発熱速度は上限値で一定値に維持されている。上部層温度、下部層温度、上部層の高さおよび下部層壁面に入射する熱流は実験値より著しく低く、上部層壁面温度も実験値をやや下回っている。



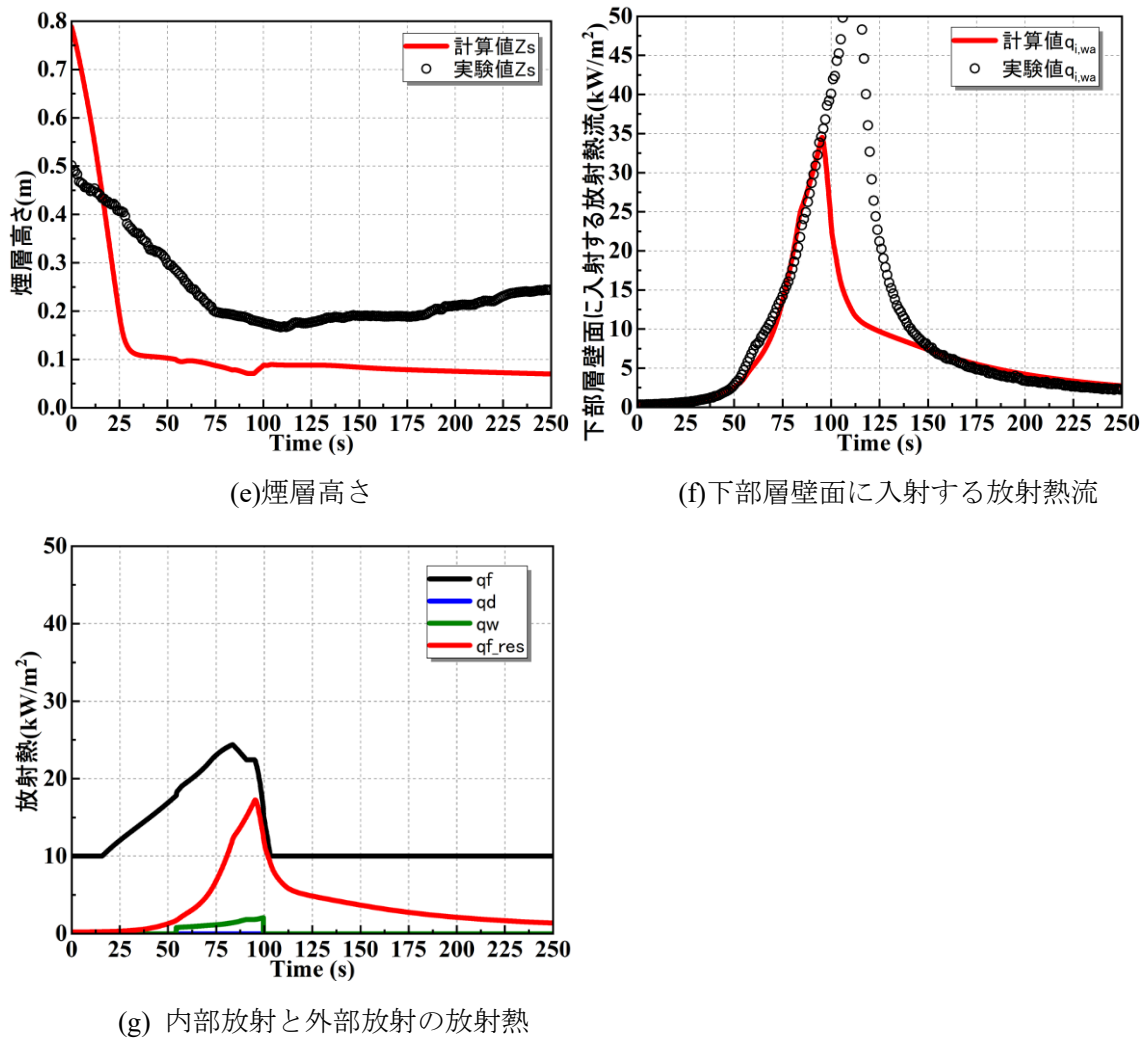
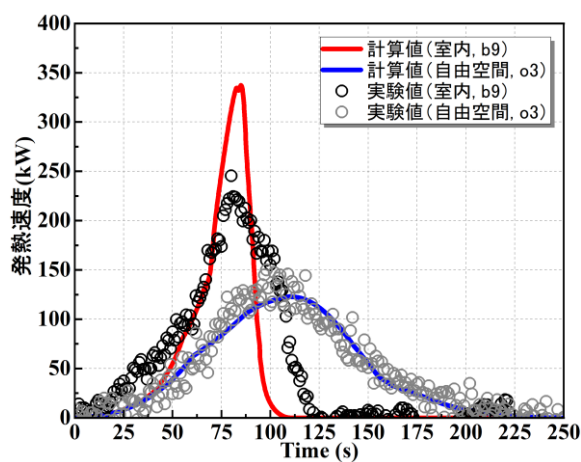


図 3.15 実験 b7 の計算値と実験値の比較

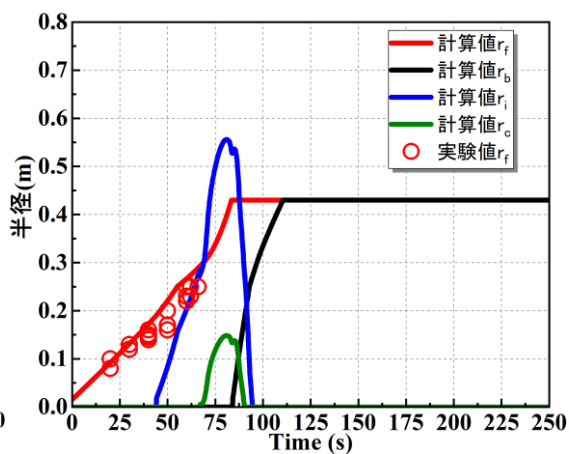
(4) 実験 b9

図 3.16 に実験 b9 の計算値と実験値の比較を示す。実験 b7 の天井高さは 0.62m、開口高さは 0.32m、試験体厚さは 0.1m である。

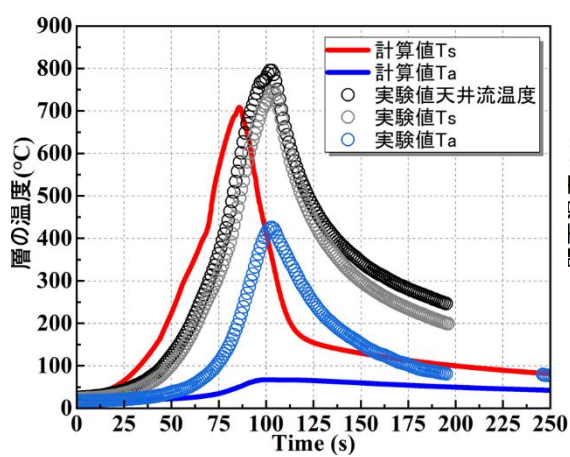
図 3.16(a) に実験 b9 と実験 o3 (試験体厚さ 0.1m) の発熱速度の計算値と実験値を示す。最大発熱速度は実験値よりも大きい、最大値に達する時間は実験値と一致している。図 3.16(b) の計算結果からは、間欠火災および連続火災が展炎することが確認できる。特に約 70 秒付近では、間欠火災の展炎半径が燃焼半径を上回っており、この展炎部からの放射熱の影響により、火災の伝播速度および発熱速度が顕著に増加している。上部層温度、上部層壁面温度、上部層の高さおよび下部層壁面に入射する熱流は実験値よりやや低い。



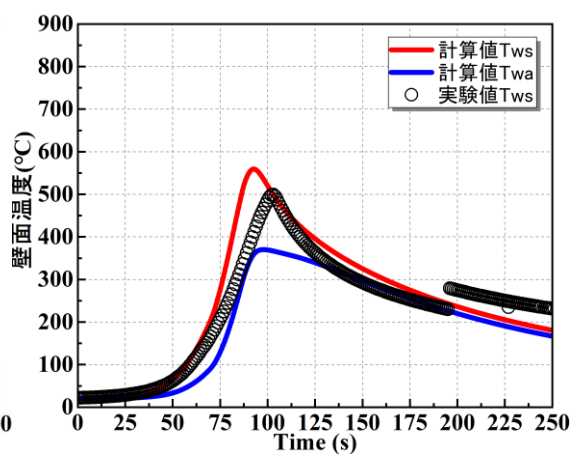
(a)発熱速度



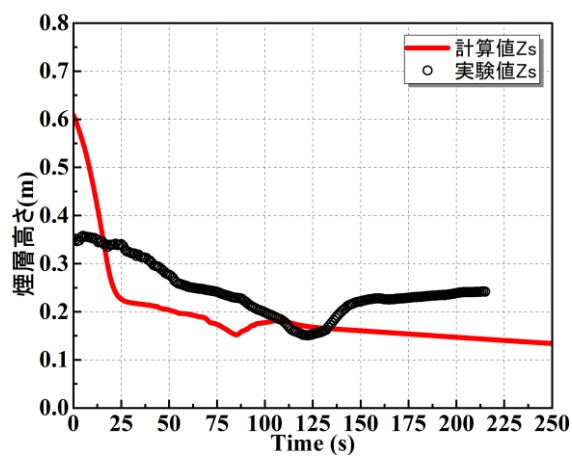
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



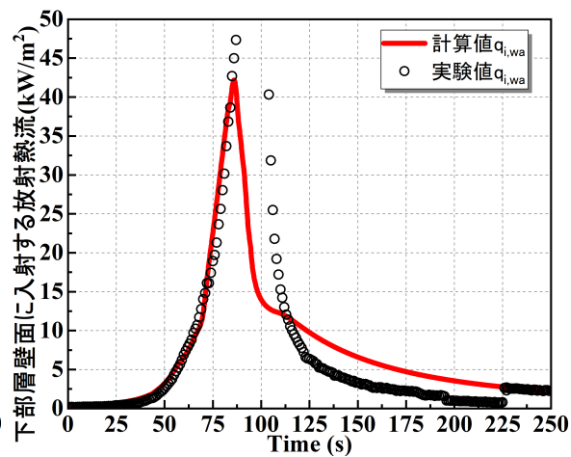
(c)層の温度



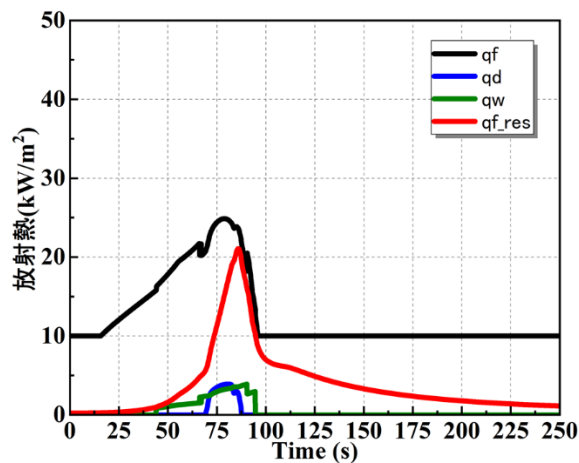
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

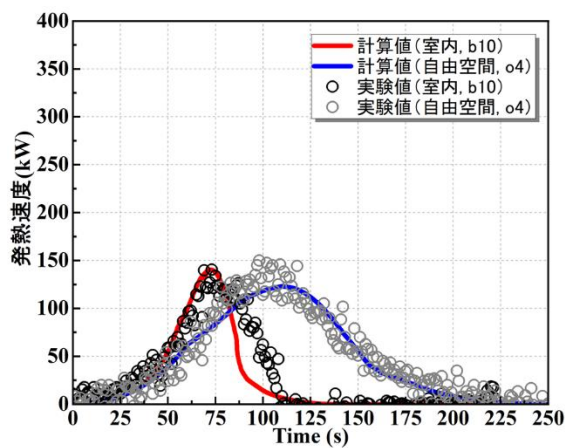
図 3.16 実験 b9 の計算値と実験値の比較

(5) 実験 b10

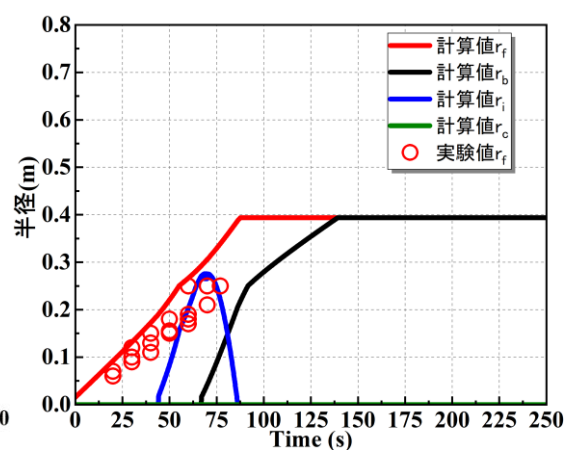
図 3.17 に実験 b10 の計算値と実験値の比較を示す。実験 b10 は、天井高さおよび開口高さが実験 b9 と同じであるが、試験体厚さが 0.05 m と小さくなっている。

図 3.17(a)に実験 b10 と実験 o4 の発熱速度の計算値と実験値を示す。発熱速度は実験値と良好に一致している。自由空間と比較して、室内での最大発熱速度の増加幅は小さいものの、最大値に達するまでの時間は明らかに短くなっている。実験 b9 の最大発熱速度の実験値は約 250 kW であるのに対し、実験 b10 では約 150 kW であり、試験体の厚さが小さいほど、最大発熱速度が顕著に低下することが分かる。

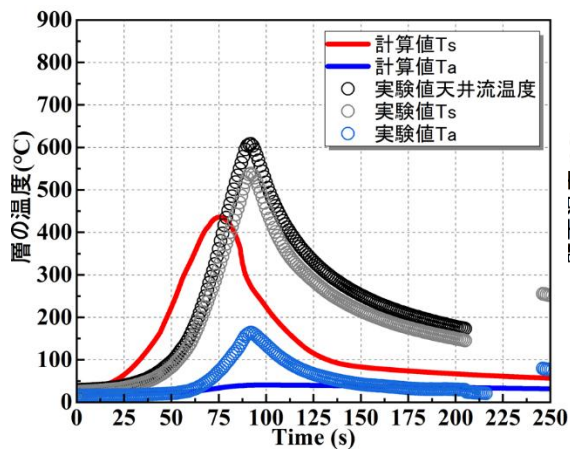
上部層温度および下部層壁面に入射する熱流は実験値より著しく低く、燃焼半径、上部層壁面温度および上部層高さは実験値に近い。



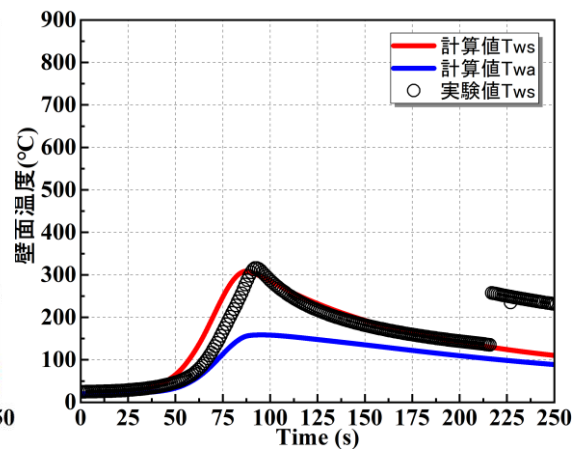
(a) 発熱速度



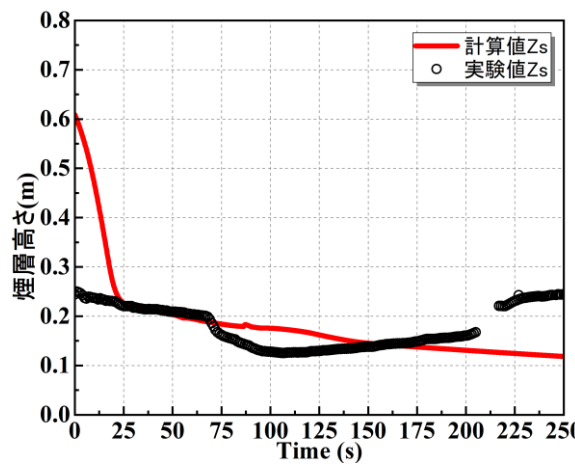
(b) 燃焼半径、えんき半径、展炎半径



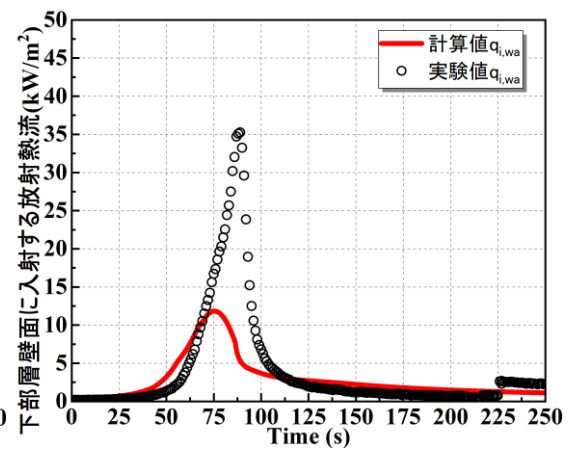
(c)層の温度



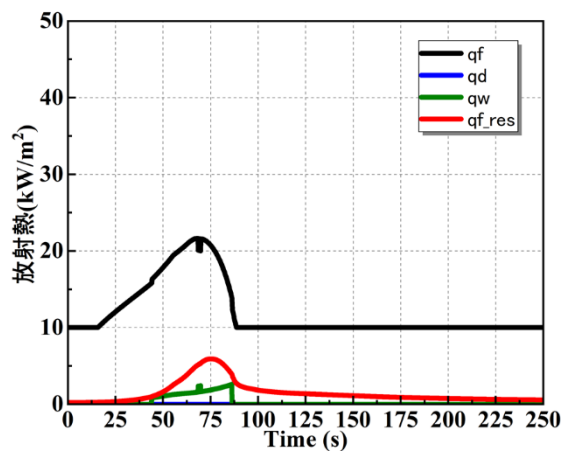
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

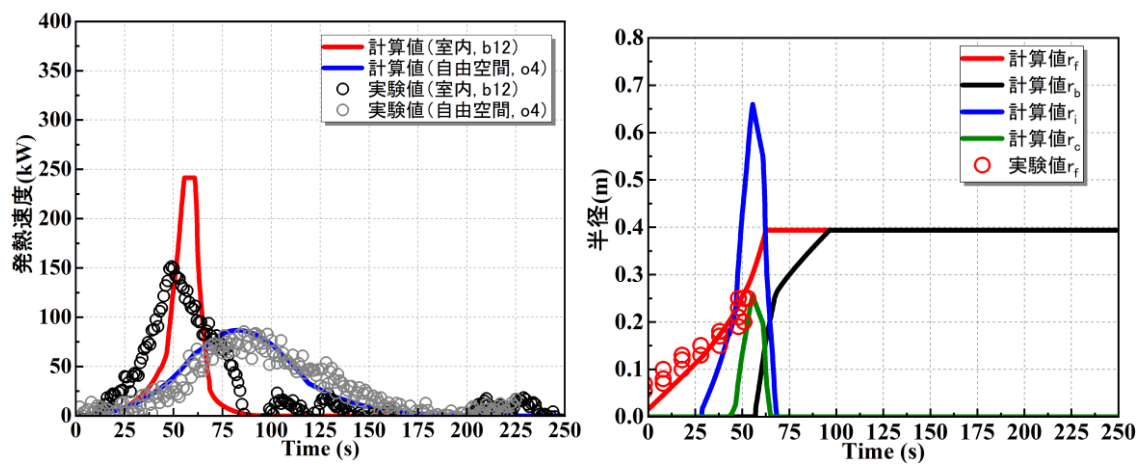
図 3.17 実験 b10 の計算値と実験値の比較

(6)実験 b12

図 3.18 に実験 b12 の計算値と実験値の比較を示す。実験 b12 の天井高さは 0.4m、開口高さは 0.2m、試験体厚さは 0.05m である。

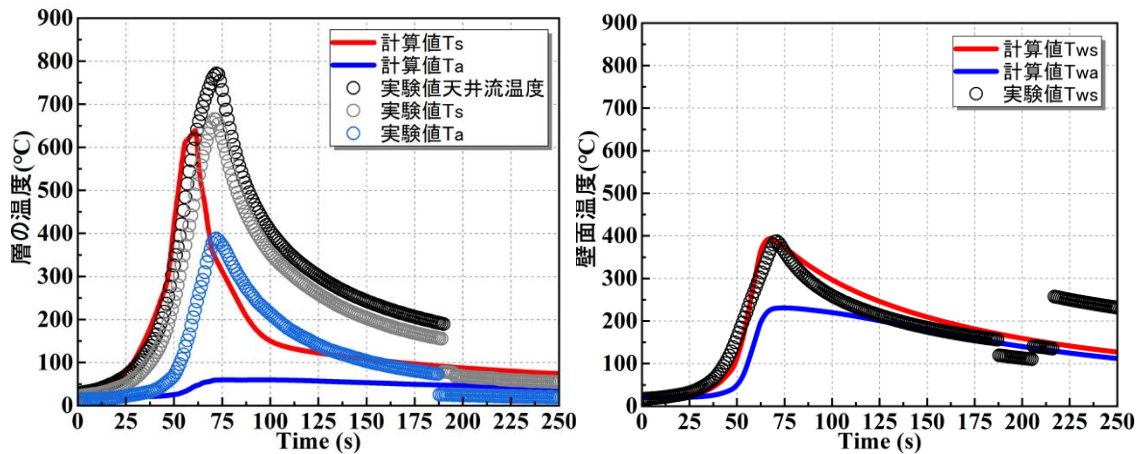
図 3.18(a)に実験 b12 と実験 o4 (試験体厚さ 0.05m) の発熱速度の計算値と実験値を示す。最大発熱速度は実験値よりも著しく大きい、最大値に達する時間は実験値に近い。図 3.16(b)の計算結果からは、間欠火炎および連続火炎が展炎することが確認できる。特に約 50 秒付近では、間欠火炎の展炎半径が燃焼半径を上回っており、この展炎部からの放射熱の影響により、火炎の伝播速度および発熱速度が増加している。

燃焼半径、上部層温度、上部層壁面温度は実験値に近く、上部層高さおよび下部層壁面に入射する熱流は実験値より低い。



(a)発熱速度

(b)燃焼半径燃、え尽き半径、展炎半径



(c)層の温度

(d)壁面温度

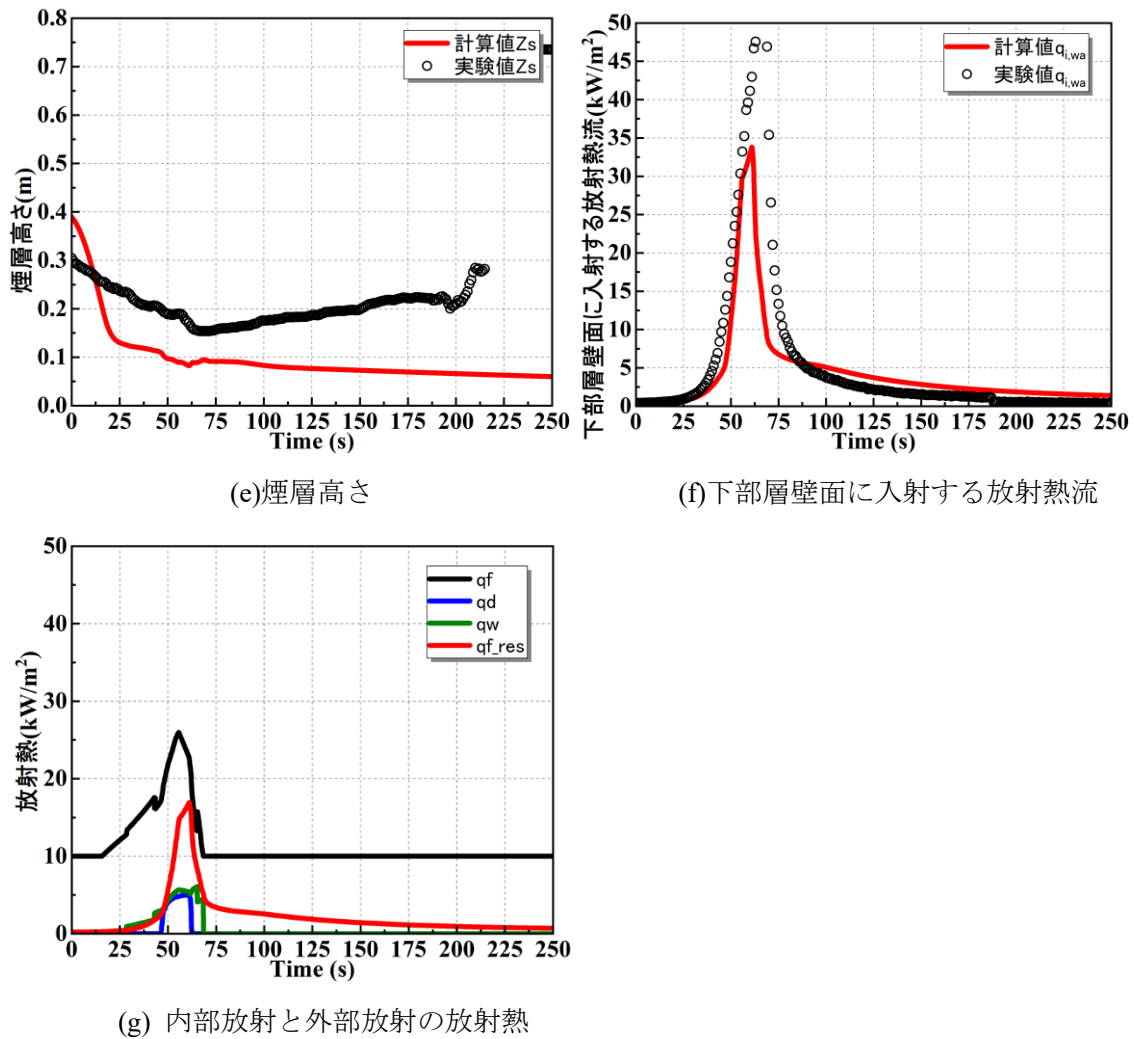
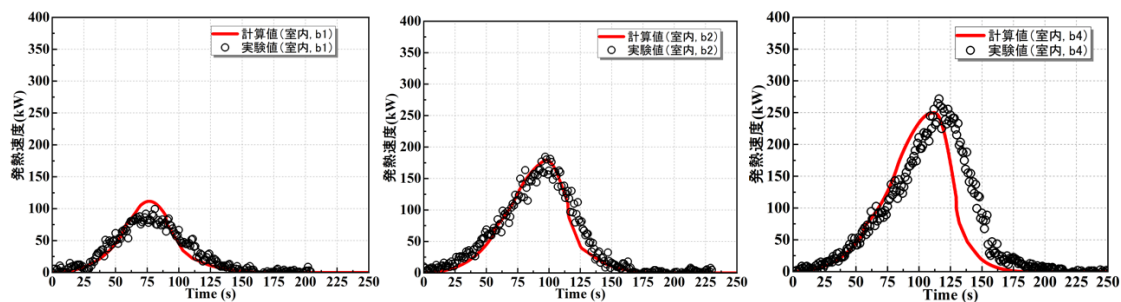


図 3.18 実験 b12 の計算値と実験値の比較

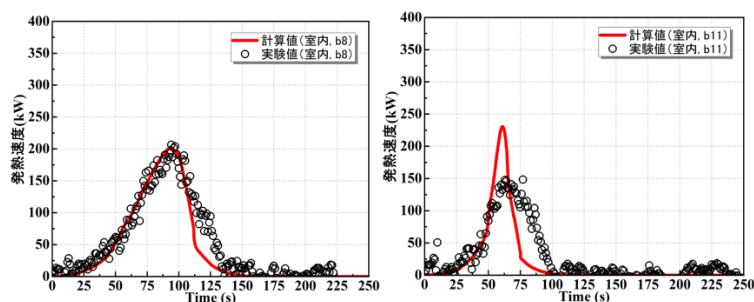
3.2.3.3 全実験における発熱速度の比較

(1) 模型室での燃焼（垂れ壁なし）

図 3.19 に、垂れ壁のない場合における発熱速度の計算値と実験値を示す。全体として、計算値は実験値とよく一致している。しかし、実験 b11 においては、最大値に達する時間は実験値と近いものの、その最大値は実験値よりも大きく評価されている。これは、実験 b11 では天井高さが非常に低く、火炎が大きく展炎したことにより、外部放射が過大評価されたためと考えられる。また、実験 b1 と b2 の比較から、試験体の厚さが厚いほど最大発熱速度が大きくなる傾向が確認された。



(a)b1($H=0.8\text{m}, H_o=0.8\text{m}, h=0.05\text{m}$) (b)b2($H=0.8\text{m}, H_o=0.8\text{m}, h=0.1\text{m}$) (c)b4($H=0.8\text{m}, H_o=0.8\text{m}, h=0.15\text{m}$)



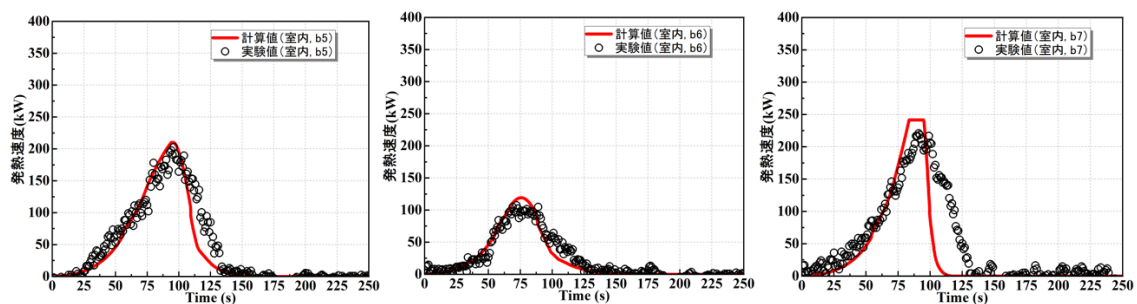
(d)b8($H=0.62\text{m}, H_o=0.62\text{m}, h=0.1\text{m}$) (e)b11($H=0.4\text{m}, H_o=0.4\text{m}, h=0.05\text{m}$)

図 3.19 模型室における発熱速度の計算値と実験値の比較（垂れ壁なし）

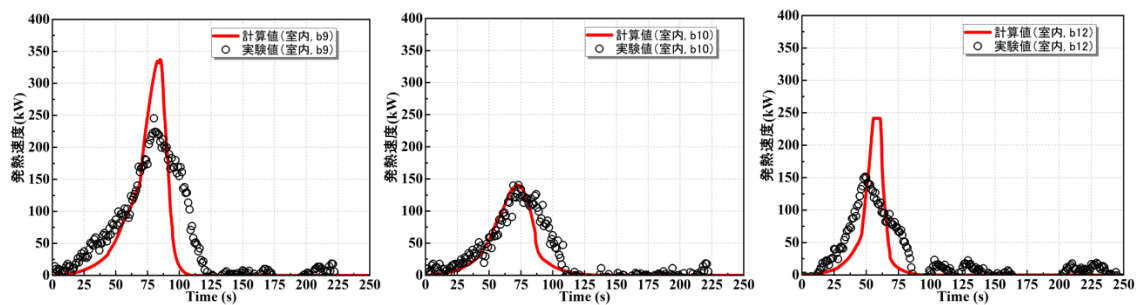
(3)模型室での燃烧（垂れ壁あり）

図 3.20 に垂れ壁がある場合の発熱速度の計算値と実験値を示す。全体として計算値は実験値と良く一致しているが、天井高さと開口高さが極めて小さい場合（例えば、実験 b12、 $H=0.4\text{m}$ 、 $H_o=0.2\text{m}$ ）には計算誤差が大きくなる傾向があった。天井高さが非常に低く、火炎が大きく展炎したことにより、外部放射が過大評価された。開口高さが小さい場合、室内の酸素供給が不十分となる。燃烧は燃料支配型から換気支配型へと移行し、未燃の可燃性ガスが開口部から火炎として噴出する可能性がある。

また、本モデルでは、換気支配型火災の臨界発熱速度 Q_{vent} を発熱速度の上限値として設定している。従って、実験 b7 と実験 b12 では、発熱速度が最大に達した後、しばらくの間そのまま維持された。



(a)b5($H=0.8\text{m}, H_o=0.5\text{m}, h=0.1\text{m}$) (b)b6($H=0.8\text{m}, H_o=0.5\text{m}, h=0.05\text{m}$) (c)b4($H=0.8\text{m}, H_o=0.2\text{m}, h=0.1\text{m}$)



(d)b10($H=0.62\text{m}$, $H_o=0.32\text{m}$, $h=0.05\text{m}$) (e)b12($H=0.4\text{m}$, $H_o=0.2\text{m}$, $h=0.05\text{m}$)

図 3.20 模型室における発熱速度の計算値と実験値の比較（垂れ壁あり）

3.3 李実験との比較

3.3.1 実験概要

李ら^[4]も自由空間と模型室での燃焼実験を行った。李実験は赤尾実験の先行実験であり、両実験は同様の試験体を用い、実験手法も概ね同じである。ただし、李実験に用いた模型室の寸法は、赤尾実験よりも大きい。李実験の概要図を図 3.21 に示す。ISO 17431 に規定する模型箱試験[3]の模型室を用いた。模型室の寸法は $W840\text{mm} \times D1680\text{mm} \times H840\text{mm}$ である。開口は寸法が $W300\text{mm} \times H670\text{mm}$ を 1 つ設置されている。模型室の天井と壁体の材料は厚さが 25mm であるセラミックファイバーボード（密度 250kg/m^3 ）を使用した。試験体上面の中心点に点火した。

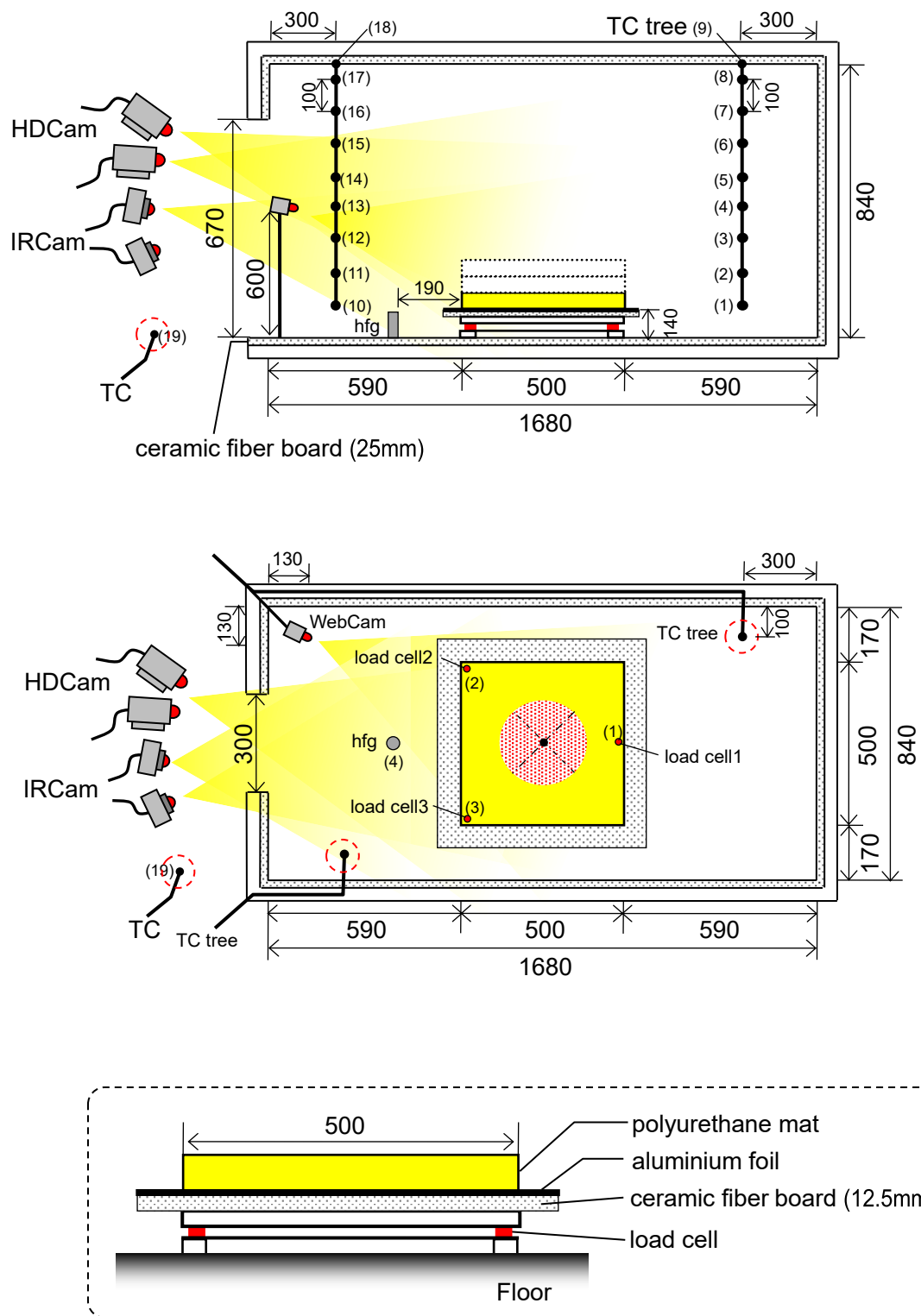


図 3.21 李実験の概要図

3.3.1.1 測定項目

李実験の測定項目を表 3.6 に示す。測定項目は赤尾実験と同じである。ただし、李実験では、自由空間と模型室の発熱速度は酸素消費法により測定した。区画室の実験の場合は、開口から煙が放出されるまでのタイムラグが発生するので、発熱速度の測定値では 20 秒のずれを補正した。

表 3.6 赤尾実験の測定項目

No.	測定項目	測定装置	測定装置の設置位置	測定方法
1	発熱速度	集煙フード	試験体上部	酸素消費法
2	燃焼半径	ウェブカメラ	試験体上部	燃焼面の中心点から約 10 秒から 20 秒ごとに測定した火炎の燃え拡がり先端までの距離
3	上部層温度	鉛直方向の熱電対ツリー	手前と奥 2 ヶ所 (図 3.19)	N%法 (N=10) 手前と奥の平均値
4	下部層温度	鉛直方向の熱電対ツリー	手前と奥 2 ヶ所 (図 3.19)	N%法 (N=10) 手前と奥の平均値
5	上部層壁面温度	熱電対	天井表面	測定失敗
6	上部層高さ	鉛直方向の熱電対ツリー	手前と奥 2 ヶ所 (図 3.19)	N%法 (N=10)
7	床面への入射熱流束	熱流束計	床面 1 ヶ所 (図 3.19)	熱流束計で測定された熱流束

3.3.1.2 実験条件

李実験は試験体の厚さのみを変更して、区画内実験を 3 回(MB-1~MB-3)を行った。実験条件の一覧を表 3.7 に示す。試験体はウレタンフォームで、密度は約 16kg/m³ である。

表 3.7 李実験の実験条件

No.	天井高さ H (m)	開口高さ H ₀ (m)	試験体厚さ h (m)	垂れ壁の有無
MB-1	0.84	0.67	0.05	
MB-2	0.84	0.67	0.10	あり
MB-3	0.84	0.67	0.15	

3.3.2 計算条件の設定

李実験を参考にして、試験体厚さを変更して、3 種類の計算条件を設定した。試験体の厚さは表 3.7 と同様に設定する。本実験で使用したモデル室および可燃物の材料は同一である

ため、物性値および定数の設定は赤尾実験と同様である。物性値と定数の入力値を表 3.8 に示す。

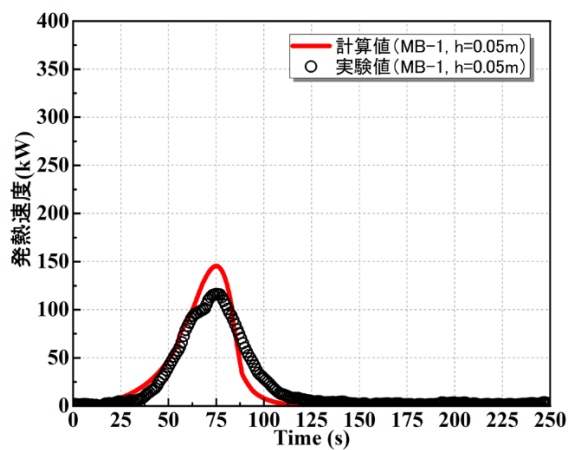
表 3.8 物性値と定数の入力

分類	項目	記号	値
模型室	材質	セラミックファイバーボード	
	幅×長さ×高さ	$D_m \times W_m \times H$	$0.84 \times 1.68 \times 0.84 \text{ m}$
	開口高さ	H_o	0.67 m
	開口幅	B	0.3 m
	厚さ	x	0.025 m
	密度	ρ_w	250 kg/m ³
	比熱	c	1.13 kJ/(kg · K)
	放射率	ε_w	0.9
	熱伝導率[4]	k	$k = 2 \times 10^{-7} \max(T, 600) - 3 \times 10^{-5}$ [kW/(m · K)]
試験体	材質	ウレタンフォーム	
	幅×長さ×高さ	$D_u \times W_u$	$0.5 \times 0.5 \text{ m}$
	着火温度 [5]	T_b	481K
	単位質量当たりの発熱量	ΔH	29410 kJ/kg
	単位質量当たりの発熱量/分解潜熱	$\Delta H/L$	17.24
	自由空間における火炎伝播速度	$v_{f,free}$	0.0035 m/s
外部 空気	温度	T_∞	293K
	対流熱伝達率	h_∞	0.0083 kW/(m ² · K)

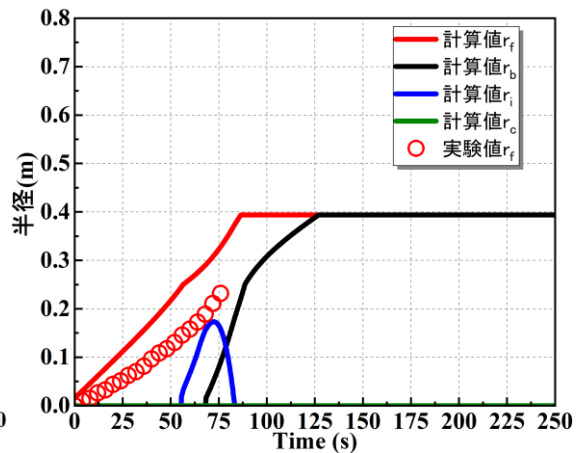
3.3.3 予測結果と考察

3.3.3.1 実験 MB-1

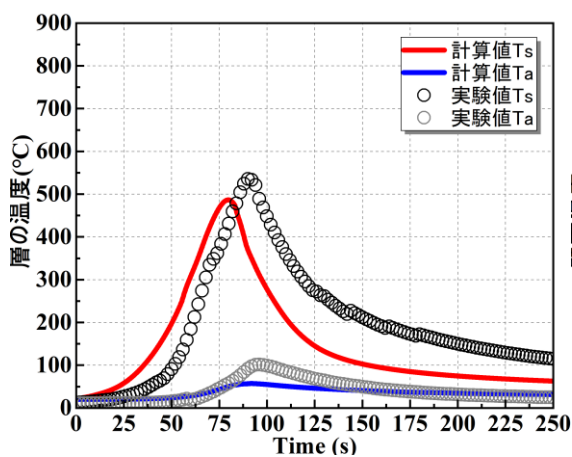
図 3.22 に実験 MB-1 における計算結果と実験結果の比較を示す。発熱速度については、計算値は実測値と良好に一致している。燃焼半径の計算値は実験値より大きい。上部層温度および下部層温度の最大値は実験値よりやや低いが、変化傾向は大体一致している。李実験では、下部層壁面温度が測定されなかった。上部層壁面温度については、実験上の問題により最初の 60 秒間のデータしか取得できなかったが、この期間における計算値は実験値と一致している。また、上部層高さおよび下部層壁面に入射する熱流束についても、計算値は実験値を下回った。熱流束の計算値と実験値との間に大きな差異が生じた要因としては、熱流束計が火源の近傍に設置されているため、実験値には火炎からの直接放射が多く含まれている可能性がある。



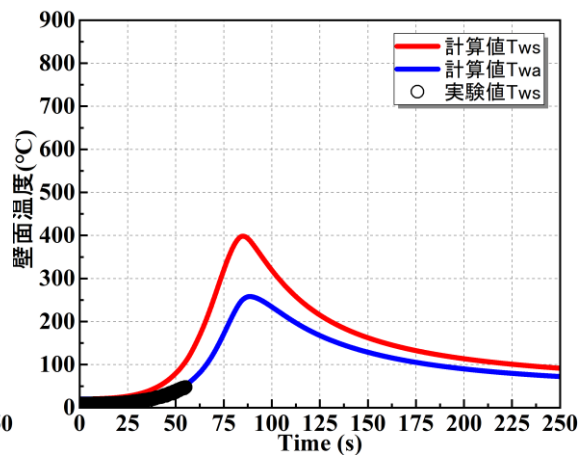
(a)発熱速度



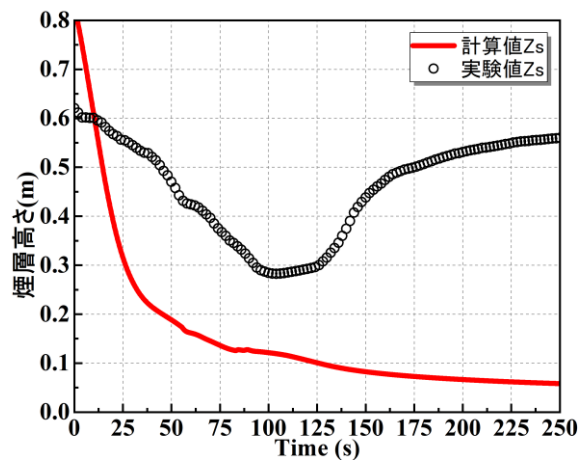
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



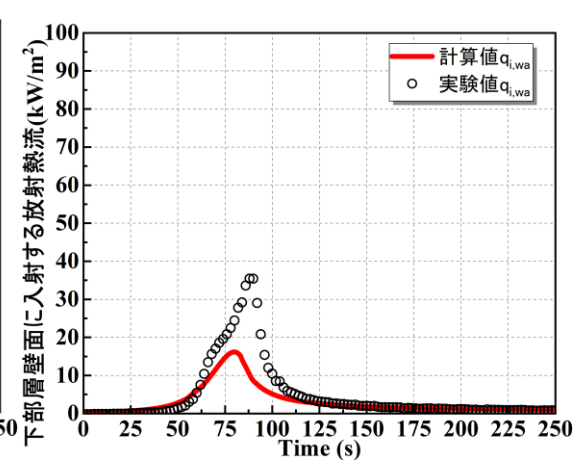
(c)層の温度



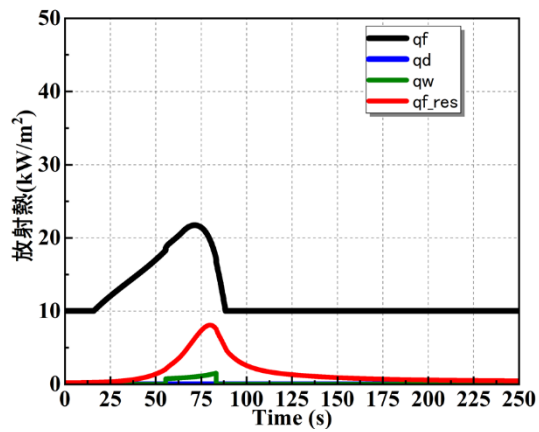
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



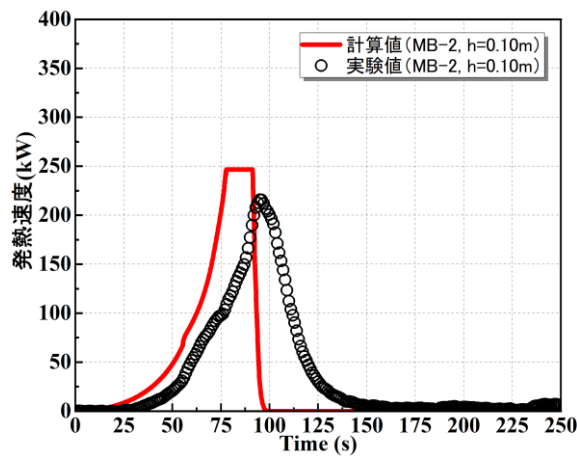
(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 3.22 実験 MB-1 の計算値と実験値の比較

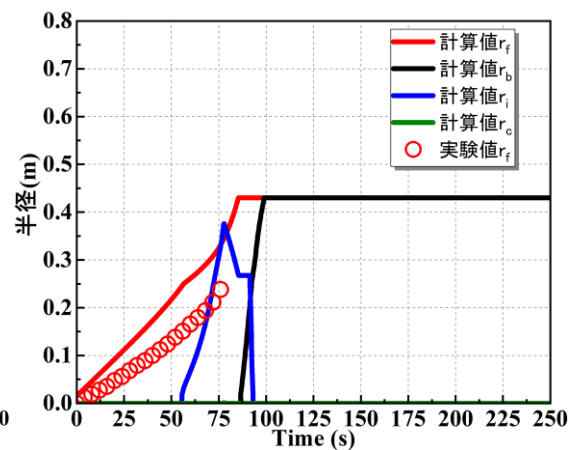
3.3.3.2 実験 MB-2

図 3.23 に実験 MB-2 における計算結果と実験結果の比較を示す。図 3.21(a) に示すように、計算された発熱速度は実験値よりやや高く、最大値に達する時間と燃焼終了時間は実験値より早い。発熱速度は 75～90 秒の間で一定値を示しており、これは換気支配型燃焼における発熱速度の上限に達したためである。

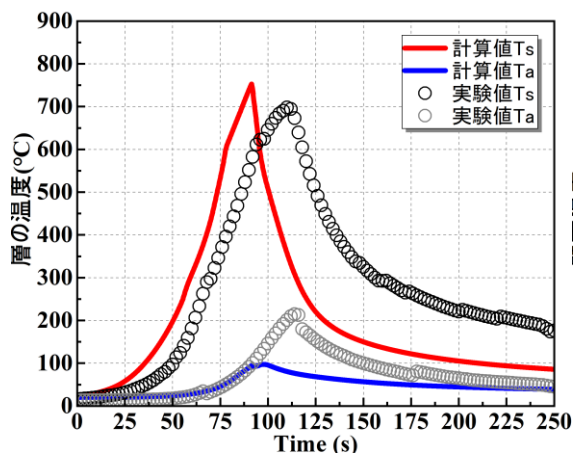
また、実験 MB-1 と同様に、計算された燃焼半径は実測値よりも大きく、下部層温度、上部層高さ、下部層壁面に入射する熱流束については、計算値が実測値を下回る結果となった。



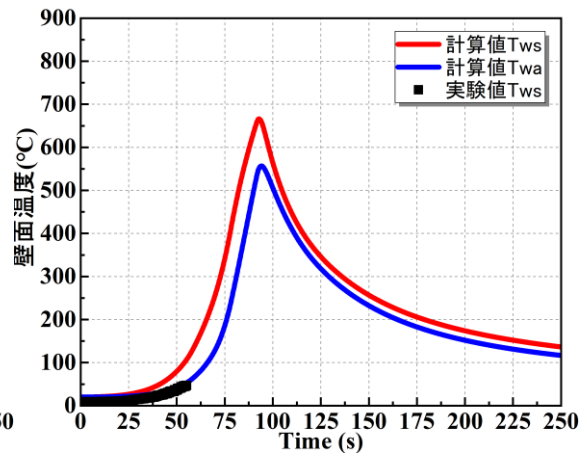
(a) 発熱速度



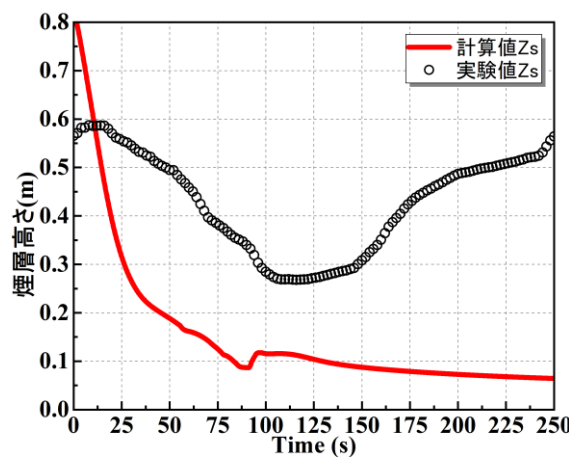
(b) 燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



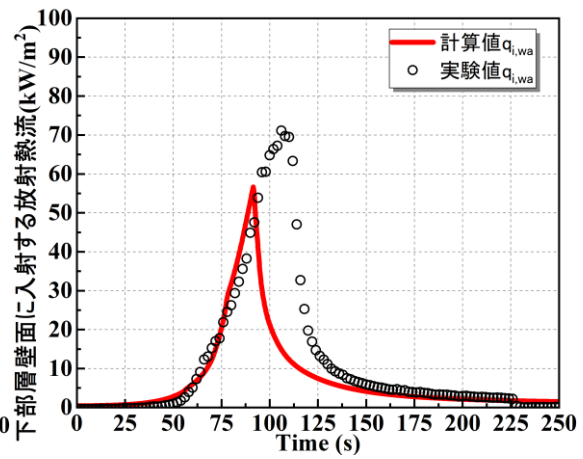
(c)層の温度



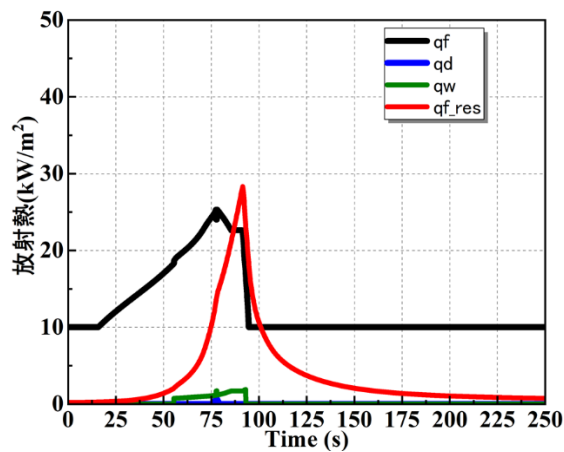
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



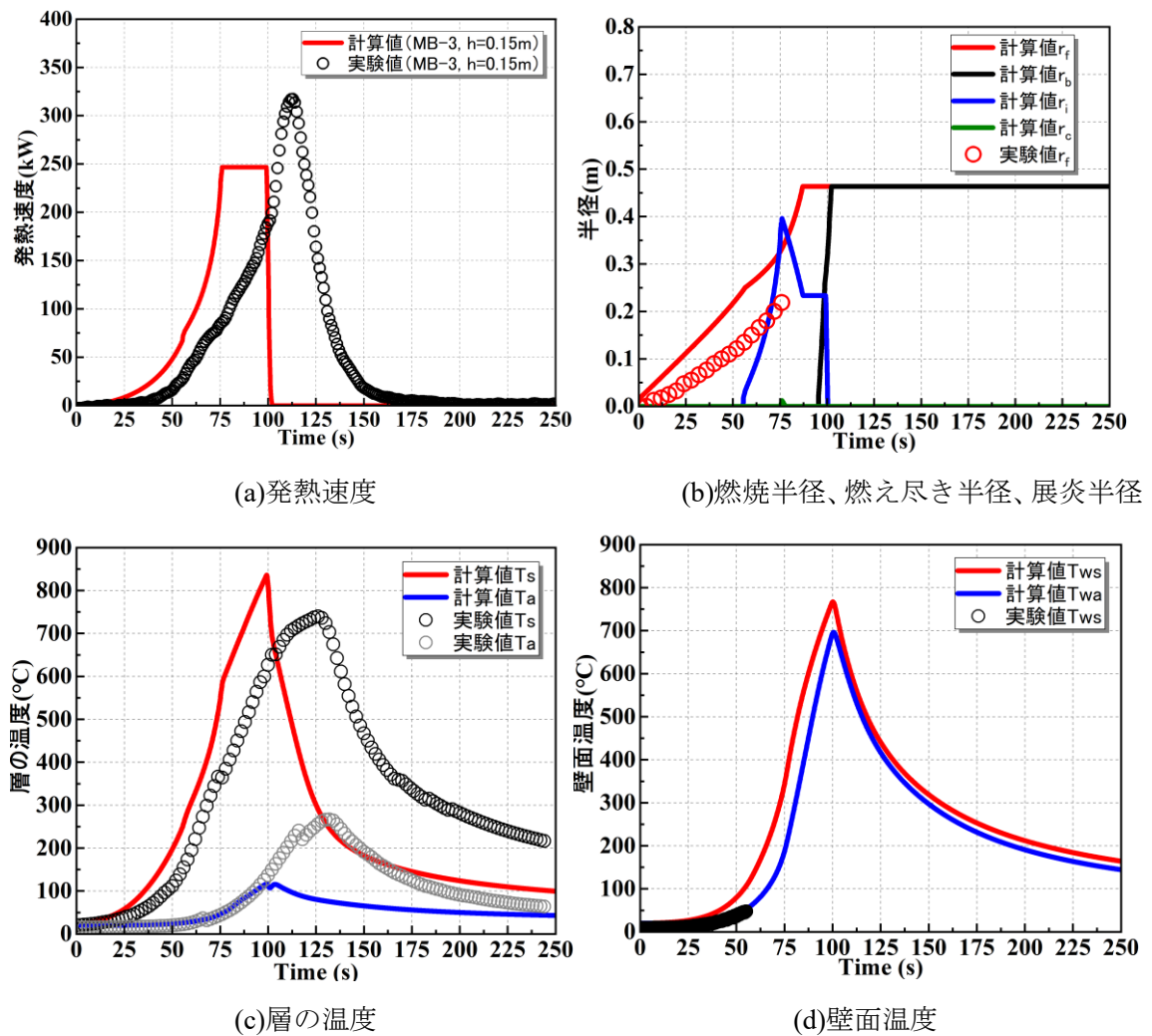
(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 3.23 実験 MB-2 の計算値と実験値の比較

3.3.3.2 実験 MB-3

図 3.24 に実験 MB-3 における計算結果と実験結果の比較を示す。計算結果では、発熱速度は約 75 秒で換気支配型燃焼の上限に達し、その後急激に減少し、燃焼は実験よりも早く終了する結果となった。上部層温度、上部層壁面温度、下部層壁面に入射する熱流は実験値に近い。一方で、燃焼半径と煙層高さは実験値を下回った。

また、この三つの実験を比較すると、試験体厚さが増加するにつれて、最大発熱速度、上層温度、上層壁面温度、熱流束は増加し、上部層高さは低くなる傾向が確認された。



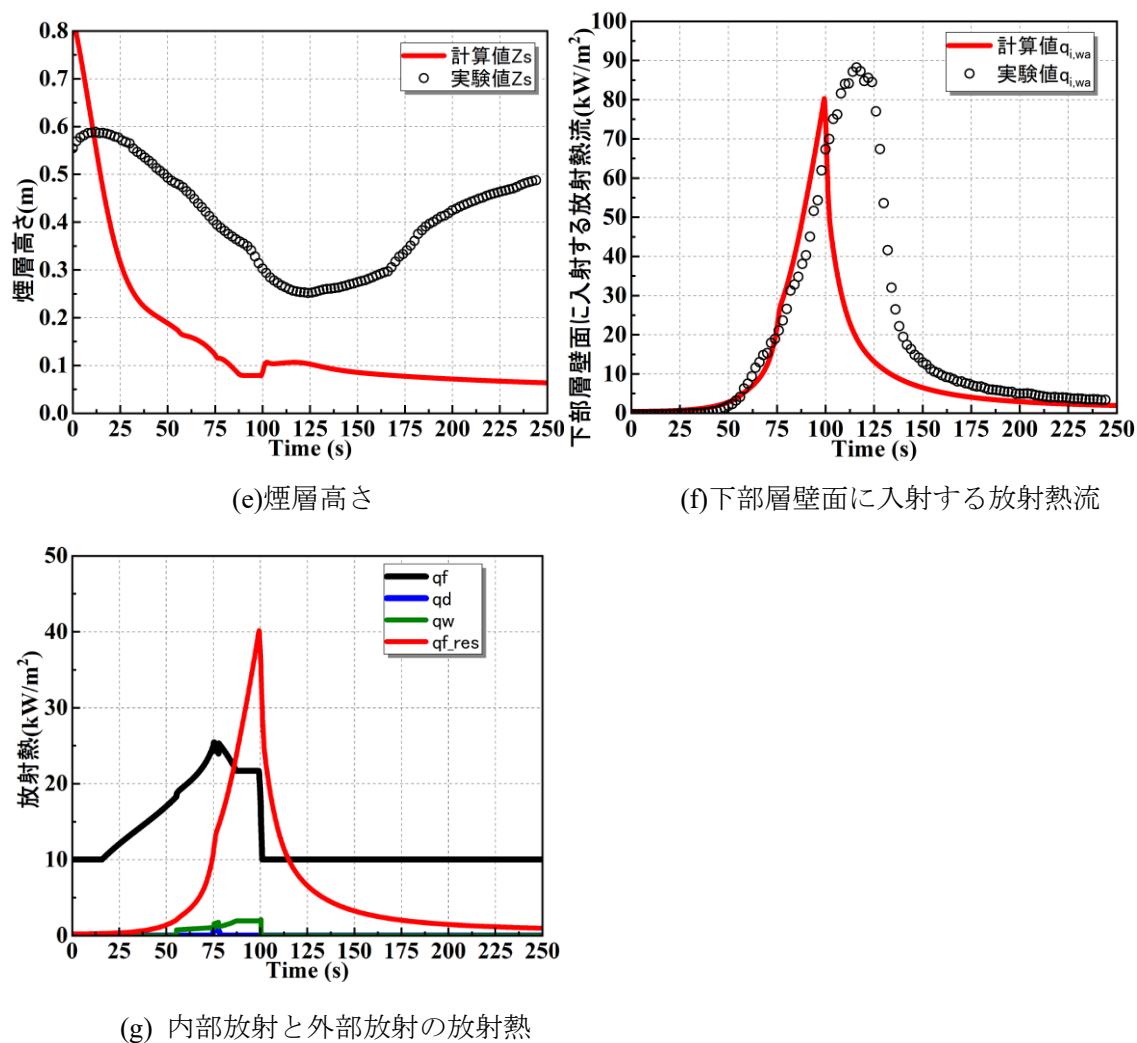


図 3.24 実験 MB-3 の計算値と実験値の比較

3.4 予測精度の分析

3.4.1 発熱速度の最大値

すべての実験における最大発熱速度の計算値と実験値の比較を図 3.25 に示す。回帰曲線の回帰係数は 1.02 であり、計算による最大発熱速度は実験結果と平均的にはよく一致していることを示している。しかし、ばらつきは大きい。計算値と実験値の間の二乗平均誤差 (RMSE) は、次式により 0.20 と算出された。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\frac{Q_{meas}}{Q_{calc}} - 1)^2}{n}} \quad (3.4.1)$$

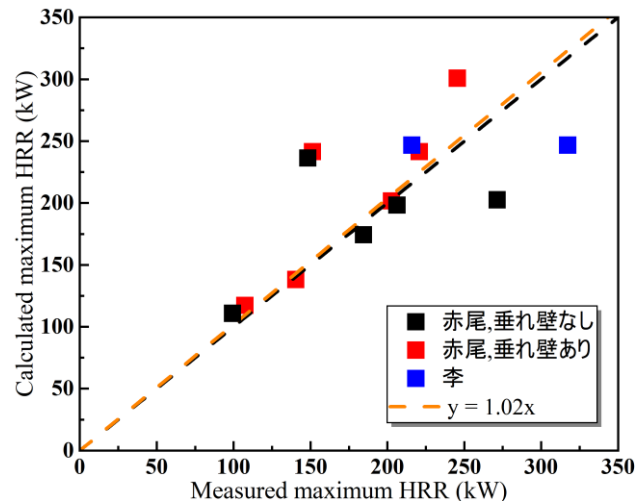


図 3.25 最大発熱速度の計算値と実験値の比較

3.4.2 上部層温度の最大値

図 3.26 に上部層温度の最大値の計算値と実験値の比較を示す。全体的に、上部層温度の計算値は実験値よりやや低くなっている。実験時において上部層と下部層の境界を正確に判断するのは困難であるため、天井流温度を上部層温度として取り扱った。そのため、図の実験値は実際の上部層温度よりも高く評価される傾向がある。計算された上部層温度は実験値よりも低く、その誤差（RMSE）は 0.34 であった。

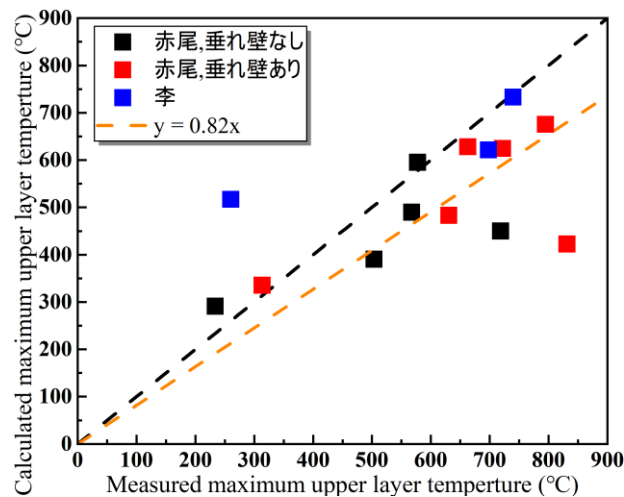


図 3.26 上部層温度の最大値の計算値と実験値の比較

3.4.3 下部層温度の最大値

図 3.27 に下部層温度の最大値の計算値と実験値の比較を示す。計算された最大下部層温度は実験値よりもかなり低く、これは二層ゾーンモデルの誤差によるものと考えられる。二層ゾーンモデルにおいて、下部層の空気の放射率が 0 に設定されているため、下部層は火炎からの放射熱を吸収しない。この仮定により、下部層の温度が実際よりも過小に評価された可能性がある。上部層と下部層のガスの界面での混合を考慮していないことも誤差の原因

の一つである可能性がある。

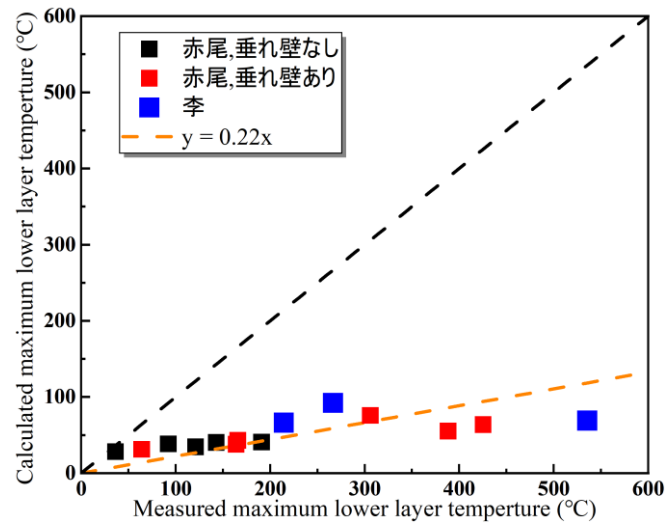


図 3.27 下部層温度の最大値の計算値と実験値の比較

3.4.4 上部層壁面温度の最大値

図 3.28 に上部層壁面温度の最大値の計算値と実験値の比較を示す。上部層壁面温度は、天井に設置された熱電対によって測定された。李実験ではこのデータは計測されていないため、赤尾の実験結果のみを用いて比較を行った。計算された上部層壁面温度は実測値よりやや高く、RMSE は 0.22 であった。

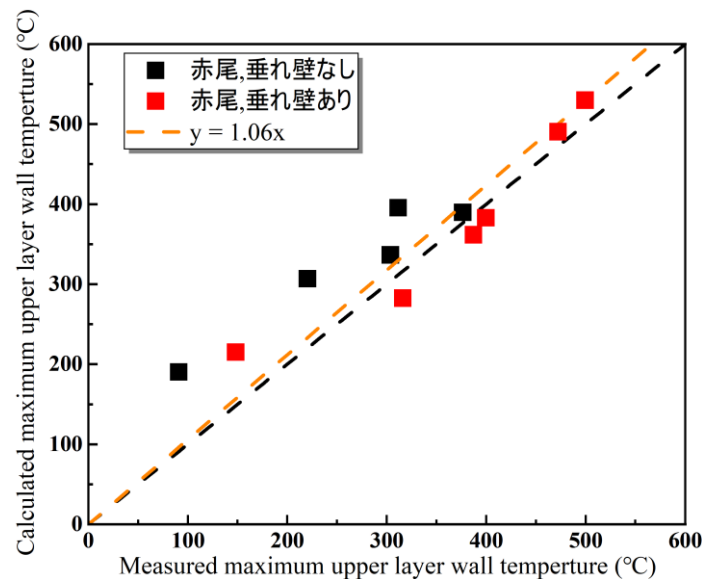


図 3.28 上部層壁面温度の最大値の計算値と実験値の比較

3.4.5 水平方向火炎伝播速度の平均値

図 3.29 に上部層壁面温度の最大値の計算値と実験値の比較を示す。火炎伝播速度は、試験体上方に設置されたカメラで記録された映像を基に測定されたため、水平方向の火炎伝播速度のみを比較する。計算値は実験値より大きく、その誤差を示す RMSE は 0.26 となっ

た。

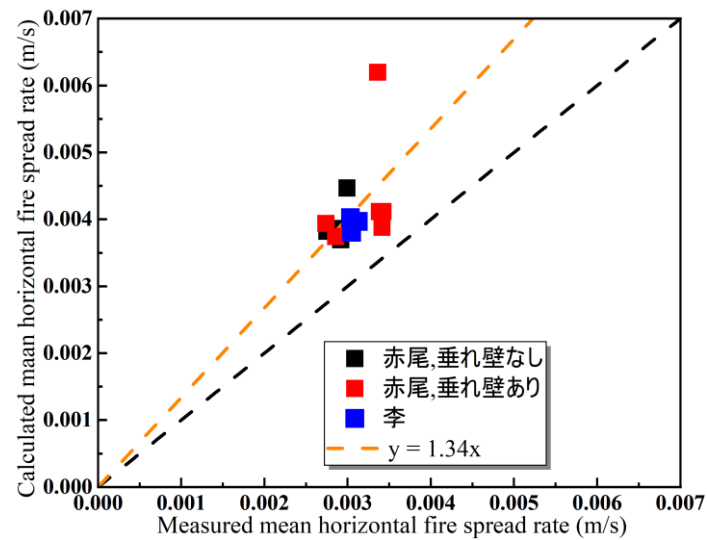


図 3.29 水平方向火炎伝播速度の平均値の計算値と実験値の比較

3.4.6 下部層壁面に入射する熱流の最大値

図 3.30 に下部層壁面に入射する熱流の最大値の計算値と実験値の比較を示す。下部層壁面に入射する熱流は、試験体の隣に設置した熱流束計を用いて測定した。計算値は実験値より小さく、これは計算値が下層壁面全体の平均熱流束であるのに対し、実験値は火源近くでの熱流束を示すためである。火炎からの直接放射が実験値に多く含まれている可能性がある。

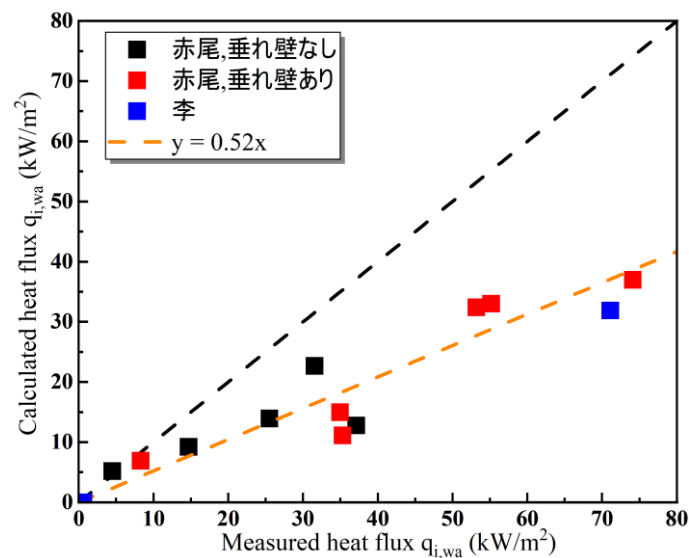


図 3.30 下部層壁面に入射する熱流の最大値の計算値と実験値の比較

3.5 本章の結論

本章では、赤尾実験と李実験を参考して、第2章のモデルの精度を検証した。赤尾実験および李実験で使用された模型室と試験体の材質は同一であるものの、模型室と試験体の寸法には若干の相違が存在する。まず、赤尾実験の自由空間燃焼実験データを用いて、単位質量当たりの発熱量、火炎伝播速度等のウレタンフォームの物性値を抽出した。そして、赤尾実験および李実験の実験条件を基に計算条件を設定し、天井高さ、開口高さ、試験体厚さの異なる条件下で、合計14回の計算を行った。本章では、発熱速度、燃焼半径、層の温度、壁面温度、上部層高さ、下部層壁面に入射する熱流について、計算結果と実験結果をそれぞれ比較・検討した。

多くの場合、発熱速度および上層壁面温度は実験値と良好に一致した。しかし、天井高さが低い場合、計算値は過大評価される傾向があり、これは展炎部からの外部放射の影響を過大に評価したためと考えられる。開口高さが低い場合にも、計算値が過大に評価される傾向が見られた。これは、開口が小さいことにより室内の酸素供給が不十分となり、未燃の可燃性ガスが開口部から火炎として噴出する可能性があるためと考えられる。上部層温度、下部層温度、下部層壁面に入射する熱流に関しては、一般的に実験値よりも低い結果が得られ、特に下部層温度の誤差が最も顕著である。このことから、二層ゾーンモデルにはさらなる改善の余地があることが示唆される。

全ての実験条件を比較した結果、天井高さ、開口部の高さおよび試験体の厚さが、室内における固体可燃物の燃焼性状に大きな影響を与えることが明らかとなった。具体的にどの要因が燃焼性状に最も大きな影響を及ぼすかについては、6章で検討する。

【第3章参考文献】

- [1] Sho Akao, Kazunori Harada, Daisaku Nii, Sungchan Lee, Junghoon Ji, Tsuneto Tsuchihashi, Burning of a Polyurethane Slab in Open and in Room Environments, proceedings of 11th Asia-Oceania Symposium on Fire science and Technology (Taipei, 2018), pp. 577- 590, Springer, 2019.
- [2] タクミ産業, セラミックファイバーボード,
https://www.takumisangyou.jp/ceramic_fiber/board.html.
- [3] ISO 17431 Fire tests — Reduced-scale model box test, 2006
- [4] Tatsuya Tarumoto, Junghoon Ji, Tsuneto Tsuchihashi, Kazunori Harada, Woon-Hyung Kim, Kye-Won Park, and Jong-Hoon Kim, A Procedure for Measuring Flame Spread Properties of Materials by Cone Calorimeter, Fire Science and Technology 2015, DOI 10.1007/978-981-10-0376-9_60.
- [5] Sungchan Lee, Junghoon Ji, Tsuneto Tsuchihashi, Shingo Takayama and Kazunori Harada (2015) Burning behavior of polyurethane mat in model scale compartment, Proc. of JAFSE annual symposium, pp. 114-115, Japan Association for Fire Science and Engineering (in Japanese)

第4章 壁際および隅角部における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデル

4.1 概要

長谷見ら^[1]によると、発熱速度が同じであれば、自由空間<壁際<隅角部の順で火炎高さが高くなる傾向が見られ、火源と周壁の位置関係が火炎性状に影響することが示されている。本章では、第2章の単一固体可燃物の燃え広がりモデルを基に、可燃物の位置（壁際、隅角部）が燃焼性状に及ぼす影響を考慮して、予測モデルを拡張する。過去に行われた東京理科大学共同利用実験^[2,3]と比較して、モデルの精度を検証する。

4.2 壁際および隅角部における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデル

第2章のモデルは、可燃物が壁面から十分離れた位置、すなわち模型室の中央部に設置された場合にのみ適用可能であった。本節では、第2章のモデルを基に、壁際における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルを構築した。本モデルの計算方法および計算手順は第2章と基本的に同様であるが、火炎高さ、火炎の放射率、およびプルーム質量流量について修正を加える必要がある。修正方法は以下の通りである。

4.2.1 壁際における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデル

4.2.1.1 壁際における火炎高さ

火源が壁際にある場合、自由空間と比べて火炎高さはわずかに伸張する。そのため、壁際には式(4.2.1)を用いる。

壁際における平均火炎高さ：

$$L_{m,wall} = 3.5Q_D^{*n}D_f \quad (4.2.1)$$

壁際における連続火炎高さ：

$$L_{c,wall} = 2.2Q_D^{*n}D_f \quad (4.2.2)$$

$$Q_D^* = \frac{Q}{c_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} D_f^{5/2}} = \frac{Q}{1116 D_f^{5/2}} \quad (4.2.3)$$

ただし、 D_f は燃焼半径[m]、 Q_D^* は無次元発熱速度[-]である。ただし、べき乗 n については自由空間と同様に、 $Q_D^* < 1$ の時は $n=2/3$ 、 $Q_D^* > 1$ の時は $n=2/5$ とした。既往の文献^[4-7]における壁際の火炎高さの相関を図4.1に示す。

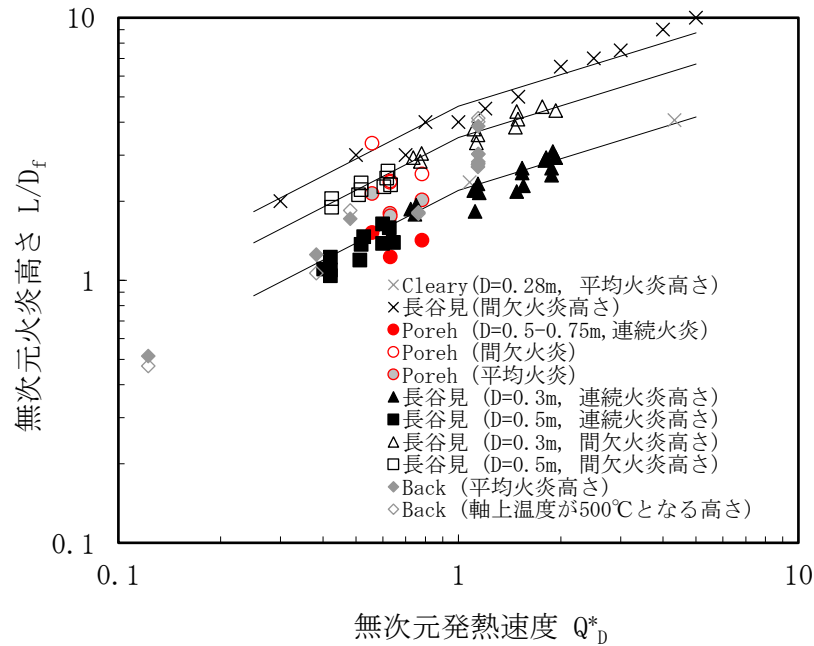


図 4.1 壁際における火炎高さの測定データと相関式

4.2.1.2 壁際における火炎の放射率の計算

図 4.2 に壁際における火炎の放射熱伝達を示す。壁際で燃焼する場合、火炎が壁に接触するため、火炎の放射熱の一部が壁に一度吸収された後に再放射されて再び火炎に戻る。その割合を正確に決定することは困難であるが、本研究では壁に火炎が接触する部分の角度 θ_c を仮定し、露出した火炎の表面積に基づいて外部へ放射する熱流を算出する。内部放射と外部放射の熱流束は第 2 章の表 2.3 と同様に、6 つの火炎形状により計算する。熱流束の計算式は同じであるが、放射率の計算が異なるため、本節では各火炎形状による放射熱の計算方法を記述する。

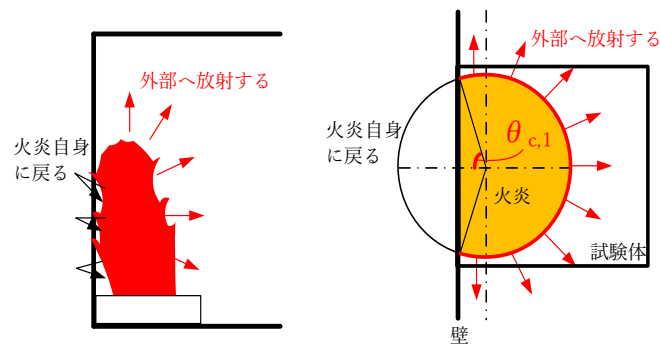


図 4.2 壁際における火炎の放射熱

(1) 火炎が展炎しない場合 $L_{m,wall} < H$

図 4.3 に火炎が展炎しない時の壁際空間での火炎形状を示す。火炎は円筒形で近似しており、連続火炎領域と間欠火炎領域に分けられる。火炎から燃焼面への内部放射は連続火炎領

域と間欠火炎領域からの放射熱の和で与えられる。形態係数と放射熱の計算式は第 2 章の表 2.3 に示した式と同様であるが、放射率のみが異なる。放射率の計算方法を以下に示す。

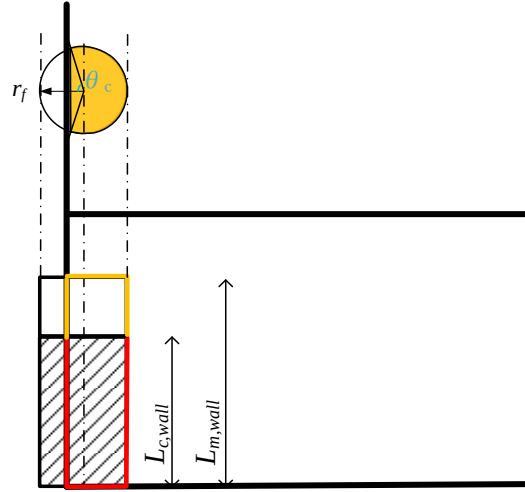


図 4.3 展炎しない場合の壁際空間における火炎形状

$$\text{壁際空間における間欠火炎展炎半径} : r_i = 0 \quad (4.2.4)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎展炎半径} : r_c = 0 \quad (4.2.5)$$

$$\text{壁際空間における平均火炎高さ} : L_m = L_{m,wall} \quad (4.2.6)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎高さ} : L_c = L_{c,wall} \quad (4.2.7)$$

円筒部放射率：

$$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,wall}E_{cc} + A_{ci,wall}E_{ci}} \quad (4.2.8)$$

ただし、 $E_{cc}(= 80.5\text{kW/m}^2)$, $E_{ci}(= 51.2\text{kW/m}^2)$ は火炎円筒部の連続火炎領域、間欠火炎領域の放射発散度^[9]である。 χ は火源の発熱速度のうち放射性分の割合[-]で、第 2 章の式(2.2.10)で計算する。 $A_{cc,wall}$, $A_{ci,wall}$ は壁際空間における火炎円筒部のうちの連続火炎領域、間欠火炎領域の表面積[m²]で、次式で計算する。

天井がない時、壁際空間における円筒部連続火炎領域の表面積(側面+下面)

$$A_{cc,wall} = 2\pi r_f \times \frac{2\pi - 2\theta_c}{2\pi} \times L_{c,wall} + \pi r_f^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_c}{2\pi} + \frac{r_f^2 \sin\theta_c \cos\theta_c}{2} \times 2 \quad (4.2.9)$$

天井がない時、壁際空間における円筒部間欠火炎領域の表面積(側面+上面)

$$A_{ci,wall} = 2\pi r_f \times \frac{2\pi - 2\theta_c}{2\pi} \times (L_{m,wall} - L_{c,wall}) + \pi r_f^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_c}{2\pi} + \frac{r_f^2 \sin\theta_c \cos\theta_c}{2} \times 2 \quad (4.2.10)$$

ここで、 θ_c は図 4.2 に示すように、火炎が壁に接触する部分の角度である。角度 θ_c は実験との比較により、適切な値を 4.3.2 節で定める。

円盤部がないため、この時の円盤部の放射率は 0 とする。

$$\varepsilon_d = 0 \quad (4.2.11)$$

(2)間欠火炎が展炎する場合 $L_{c,wall} < H < L_{m,wall}$

(2-1)円盤部が円筒部に含まれる場合 $r_i < \frac{D_f}{2}$

図 4.4 に間欠火炎が展炎するか円盤部が円筒部に含まれる場合の壁際空間での火炎形状を示す。

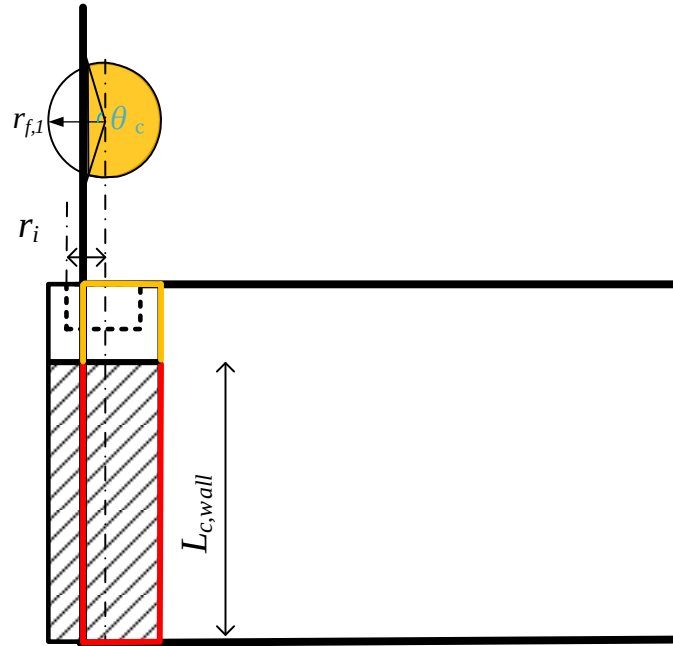


図 4.4 間欠火炎が展炎し、円盤部が円筒部に含まれる場合の壁際空間の火炎形状

$$\text{壁際空間における間欠火炎展炎半径} : r_i = \frac{(L_{m,wall} - H)}{2} \quad (4.2.12)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎展炎半径} : r_c = 0 \quad (4.2.13)$$

$$\text{壁際空間における平均火炎高さ} : L_m = r_i + H \quad (4.2.14)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎高さ} : L_c = L_{c,wall} \quad (4.2.15)$$

円筒部放射率： ε_c は式(4.2.8)と同様に計算する。

$$\text{円盤部放射率} : \varepsilon_d = 0 \quad (4.2.16)$$

(2-2)円盤部が展炎する場合 $\frac{D_f}{2} < r_i$

図 4.5 に間欠火炎が展炎し、円盤部が円筒部から突出する場合の壁際空間の火炎形状を示す。

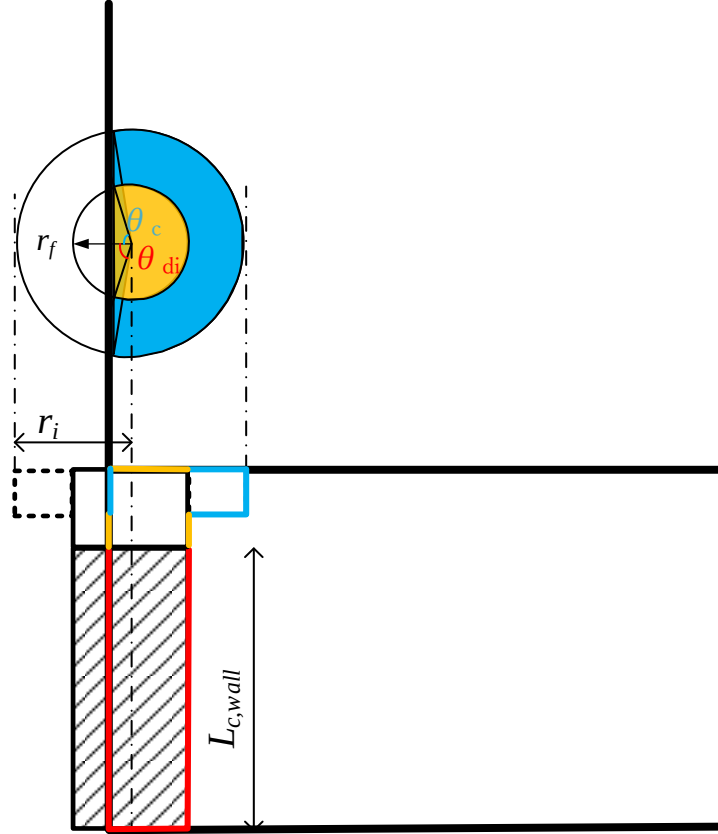


図 4.5 間欠火炎が展炎し、円盤部が円筒部から突出する場合の壁際空間の火炎形状

$$\text{壁際空間における間欠火炎展炎半径} : r_i = \frac{(L_{m,wall} - H)}{2} \quad (4.2.17)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎展炎半径} : r_c = 0 \quad (4.2.18)$$

$$\text{壁際空間における平均火炎高さ} : L_m = r_i + H \quad (4.2.19)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎高さ} : L_c = L_{c,wall} \quad (4.2.20)$$

火炎の円筒部放射率： ε_c は式(4.2.8)と同様に計算する。

火炎の円盤部放射率：

$$\varepsilon_c A_{cc} E_{cc} + \varepsilon_c A_{ci} E_{ci} + \varepsilon_d A_{dc} E_{dc} + \varepsilon_d A_{di} E_{di} = \chi Q \quad (4.2.21)$$

上式を整理すると、火炎 1 の円盤部放射率は次式で計算する：

$$\varepsilon_d = \frac{1 - \frac{A_{cc} E_{cc} + A_{ci} E_{ci}}{A_{cc,wall} E_{cc} + A_{ci,wall} E_{ci}}}{A_{dc} E_{dc} + A_{di} E_{di}} \cdot \chi Q \quad (4.2.22)$$

ただし、

壁際空間における円筒部連続火炎領域の表面積

$$\text{側面：} A_{cc,side} = 2\pi r_f \times \frac{2\pi - 2\theta_c}{2\pi} \times L_{c,wall}$$

$$\text{下面：} A_{cc,lower} = \pi r_f^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_c}{2\pi} + \frac{r_f^2 \sin\theta_c \cos\theta_c}{2} \times 2$$

$$\text{合計：} A_{cc} = A_{cc,side} + A_{cc,lower}$$

壁際空間における円筒部間欠火炎領域の表面積

$$\text{側面：} A_{ci,side} = 2\pi r_f \times \frac{2\pi - 2\theta_c}{2\pi} \times (0.9H - L_{c,wall})$$

$$\text{上面：} A_{ci,upper} = \pi r_f^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_c}{2\pi} + \frac{r_f^2 \sin\theta_c \cos\theta_c}{2} \times 2$$

$$\text{合計：} A_{ci} = A_{ci,side} + A_{ci,upper}$$

壁際空間における円盤部連続火炎領域の表面積 $A_{dc} = 0$

壁際空間における円盤部間欠火炎領域の表面積

$$\theta_{di} = \cos^{-1} \left[\frac{r_f \cos\theta_c}{r_i} \right]$$

$$\text{側面：} A_{di,side} = 2\pi r_i \times \frac{2\pi - 2\theta_{di}}{2\pi} \times 0.1H$$

$$\text{上面：} A_{di,upper} = \pi r_f^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{di}}{2\pi} + \frac{r_{f,1} \cos\theta_c r_i \sin\theta_{di}}{2} \times 2 - A_{ci,upper}$$

$$\text{下面：} A_{di,lower} = A_{di,upper} = \pi r_f^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{di}}{2\pi} + \frac{r_f \cos\theta_c r_i \sin\theta_{di}}{2} \times 2 - A_{ci,upper}$$

$$\text{合計：} A_{di} = A_{di,side} + A_{di,upper} + A_{di,lower}$$

(3)連続火炎が展炎する場合 $H < L_{c,wall}$

(3-1)円盤部が円筒部に含まれる場合 $r_i < \frac{D_f}{2}$

図 4.6 に連続火炎が展炎し、円盤部が円筒部に含まれる場合の壁際空間の火炎形状を示す。

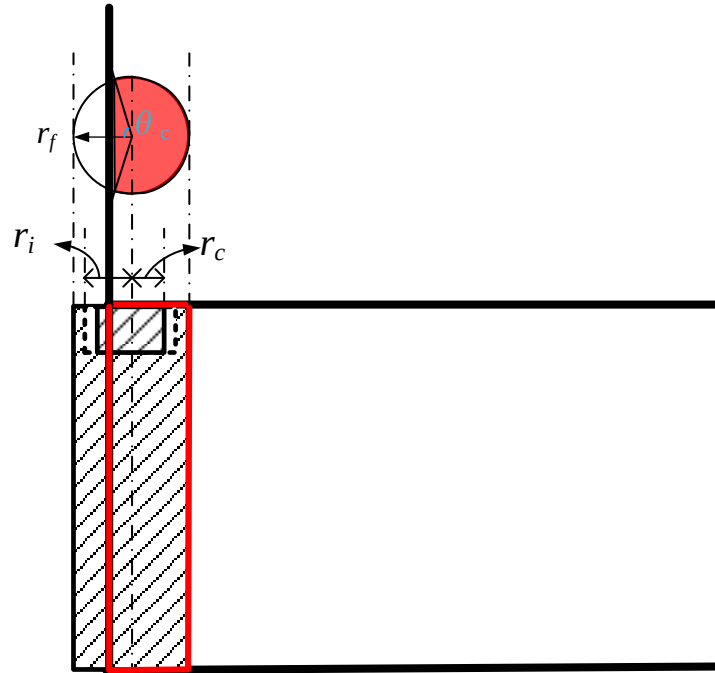


図 4.6 連続火炎が展炎し、円盤部が円筒部に含まれる場合の壁際空間の火炎形状

$$\text{壁際空間における間欠火炎展炎半径} : r_i = \frac{(L_{m,wall} - H)}{2} \quad (4.2.23)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎展炎半径} : r_c = \frac{(L_{c,wall} - H)}{2} \quad (4.2.24)$$

$$\text{壁際空間における平均火炎高さ} : L_m = r_i + H \quad (4.2.25)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎高さ} : L_c = r_c + H \quad (4.2.26)$$

火炎 1 の円筒部放射率 : ε_c は式(4.2.8)と同様に計算する。

$$\text{火炎 1 の円盤部放射率} : \varepsilon_d = 0 \quad (4.2.27)$$

(3-2)円盤部連続火炎領域が円筒部に含まれる。 $r_{c,1} < \frac{D_{f,1}}{2} < r_{i,1}$

図 4.7 に連続火炎が展炎し、円盤部間欠火炎領域が円筒部から突出する場合の壁際空間の火炎形状を示す。

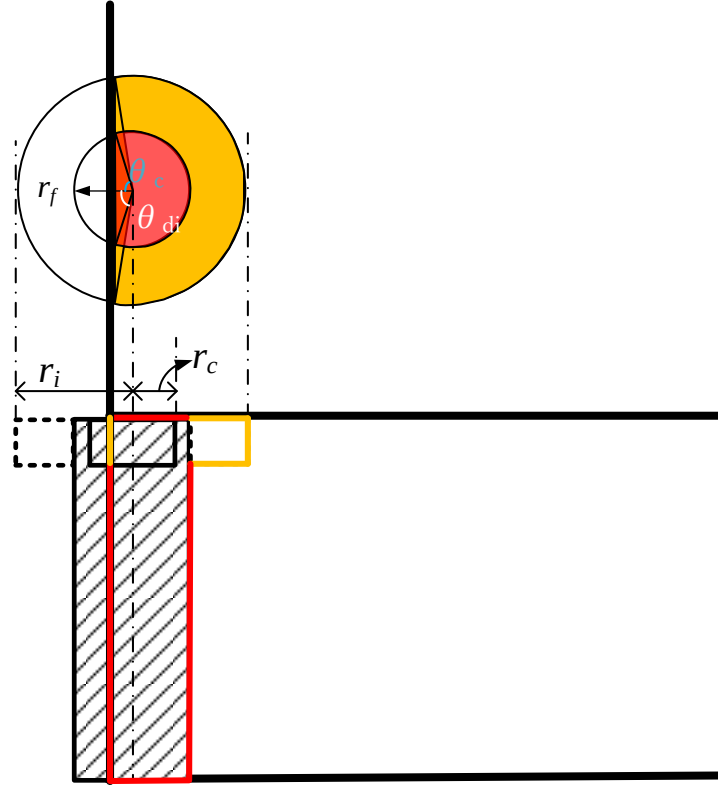


図 4.7 連続火炎が展炎し、円盤部間欠火炎領域が円筒部から突出する場合の壁際空間の火炎形状

$$\text{壁際空間における間欠火炎展炎半径} : r_{i,1} = \frac{(L_{m,wall,1} - H)}{2} \quad (4.2.28)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎展炎半径} : r_{c,1} = \frac{(L_{c,wall,1} - H)}{2} \quad (4.2.29)$$

$$\text{壁際空間における平均火炎高さ} : L_{m,1} = r_{i,1} + H \quad (4.2.30)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎高さ} : L_{c,1} = r_{c,1} + H \quad (4.2.31)$$

火炎の円筒部放射率： ε_c は式(4.2.8)と同様に計算する。

火炎の円盤部放射率：

$$\varepsilon_{c,1}A_{cc,1}E_{cc} + \varepsilon_{c,1}A_{ci,1}E_{ci} + \varepsilon_{d,1}A_{dc,1}E_{dc} + \varepsilon_{d,1}A_{di,1}E_{di} = \chi_1 Q_1 \quad (4.2.32)$$

式(4.2.8)を式(4.2.32)に代入して、式を整理すると、火炎 1 の円盤部放射率は式(5)で計算できる：

$$\varepsilon_{d,1} = \frac{1 - \frac{A_{cc,1}E_{cc} + A_{ci,1}E_{ci}}{A_{cc,wall,1}E_{cc} + A_{ci,wall,1}E_{ci}}}{A_{dc,1}E_{dc} + A_{di,1}E_{di}} \cdot \chi_1 Q_1 \quad (4.2.33)$$

ただし、

壁際空間における円筒部連続火炎領域の表面積

$$\text{側面：} A_{cc,1,side} = 2\pi r_{f,1} \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,1}}{2\pi} \times 0.9H = 0.583 \times 2\pi r_{f,1} \times 0.9H$$

$$\text{上面：} A_{cc,1,upper} = \pi r_{f,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,1}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin\theta_{c,1} \cos\theta_{c,1}}{2} \times 2$$

$$\text{下面：} A_{cc,1,lower} = A_{cc,1,upper} = \pi r_{f,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,1}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin\theta_{c,1} \cos\theta_{c,1}}{2} \times 2$$

$$\text{合計：} A_{cc,1} = A_{cc,1,side} + A_{cc,1,upper} + A_{cc,1,lower}$$

壁際空間における円筒部間欠火炎領域の表面積 $A_{ci,1} = 0$

壁際空間における円盤部連続火炎領域の表面積 $A_{dc,1} = 0$

壁際空間における円盤部間欠火炎領域の表面積

$$\theta_{di,1} = \cos^{-1} \left[\frac{r_{f,1} \cos\theta_{c,1}}{r_{i,1}} \right]$$

$$\text{側面：} A_{di,1,side} = 2\pi r_{i,1} \times \frac{2\pi - 2\theta_{di,1}}{2\pi} \times 0.1H$$

$$\text{上面：} A_{di,1,upper} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{di,1}}{2\pi} + \frac{r_{f,1} \cos\theta_{c,1} r_{i,1} \sin\theta_{di,1}}{2} \times 2 - A_{cc,1,upper}$$

$$\text{下面：} A_{di,1,lower} = A_{di,1,upper} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{di,1}}{2\pi} + \frac{r_{f,1} \cos\theta_{c,1} r_{i,1} \sin\theta_{di,1}}{2} \times 2 - A_{cc,1,upper}$$

$$\text{合計：} A_{di,1} = A_{di,1,side} + A_{di,1,upper} + A_{di,1,lower}$$

(3-3)連続火炎が展炎し、円盤部連続火炎が円筒部から突出する場合 $\frac{D_f}{2} < r_c$

図 4.8 に連続火炎が展炎し、円盤部連続火炎が円筒部から突出する場合の概要図を示す。連続火炎が展炎する時、円筒部は間欠火炎領域がないため、内部放射の放射熱は円筒部連続火炎領域からの放射熱のみである。

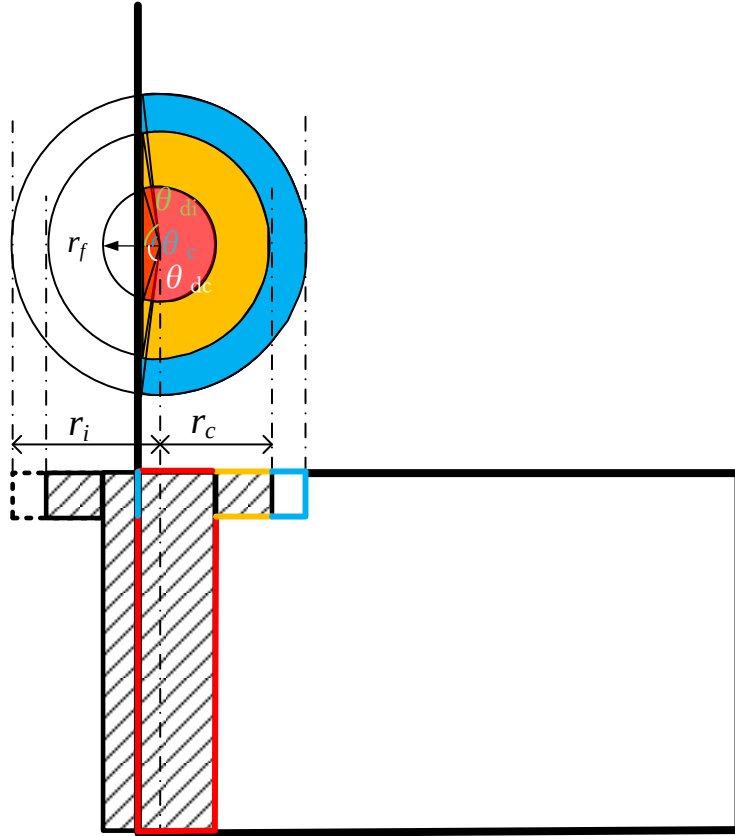


図 4.8 連続火炎が展炎し、円盤部連続火炎が円筒部から突出する場合の壁際空間の火炎形状

$$\text{壁際空間における間欠火炎展炎半径} : r_{i,1} = \frac{(L_{m,wall,1} - H)}{2} \quad (4.2.34)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎展炎半径} : r_{c,1} = \frac{(L_{c,wall,1} - H)}{2} \quad (4.2.35)$$

$$\text{壁際空間における平均火炎高さ} : L_{m,1} = r_{i,1} + H \quad (4.2.36)$$

$$\text{壁際空間における連続火炎高さ} : L_{c,1} = r_{c,1} + H \quad (4.2.37)$$

火炎の円筒部放射率： ε_c は式(4.2.8)と同様に計算する。

火炎の円盤部放射率：

$$\varepsilon_{c,1} A_{cc,1} E_{cc} + \varepsilon_{c,1} A_{ci,1} E_{ci} + \varepsilon_{d,1} A_{dc,1} E_{dc} + \varepsilon_{d,1} A_{di,1} E_{di} = \chi_1 Q_1 \quad (4.2.38)$$

式(4.2.8)を式(4.2.38)に代入して、式を整理すると、火炎 1 の円盤部放射率は式(5)で計算できる：

$$\varepsilon_{d,1} = \frac{1 - \frac{A_{cc,1}E_{cc} + A_{ci,1}E_{ci}}{A_{cc,wall,1}E_{cc} + A_{ci,wall,1}E_{ci}}}{A_{dc,1}E_{dc} + A_{di,1}E_{di}} \cdot \chi_1 Q_1 \quad (4.2.39)$$

ただし、

壁際空間における円筒部連続火炎領域の表面積

$$\text{側面} : A_{cc,1,side} = 2\pi r_{f,1} \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,1}}{2\pi} \times 0.9H$$

$$\text{上面} : A_{cc,1,upper} = \pi r_{f,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,1}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin\theta_{c,1} \cos\theta_{c,1}}{2} \times 2$$

$$\text{下面} : A_{cc,1,lower} = A_{cc,1,upper} = \pi r_{f,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,1}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin\theta_{c,1} \cos\theta_{c,1}}{2} \times 2$$

$$\text{合計} : A_{cc,1} = A_{cc,1,side} + A_{cc,1,upper} + A_{cc,1,lower}$$

壁際空間における円筒部間欠火炎領域の表面積 $A_{ci,1} = 0$

壁際空間における円盤部連続火炎領域の表面積

$$\theta_{dc,1} = \cos^{-1} \left[\frac{r_{f,1} \cos\theta_{c,1}}{r_{c,1}} \right]$$

$$\text{側面} : A_{dc,1,side} = 0$$

$$\text{上面} : A_{dc,1,upper} = \pi r_{c,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{dc,1}}{2\pi} + \frac{r_{f,1} \cos\theta_{c,1} r_{c,1} \sin\theta_{dc,1}}{2} \times 2 - A_{cc,1,upper}$$

$$\text{下面} : A_{dc,1,lower} = A_{dc,1,upper} = \pi r_{c,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{dc,1}}{2\pi} + \frac{r_{f,1} \cos\theta_{c,1} r_{c,1} \sin\theta_{dc,1}}{2} \times 2 - A_{cc,1,upper}$$

$$\text{合計} : A_{dc,1} = A_{dc,1,side} + A_{dc,1,upper} + A_{dc,1,lower}$$

壁際空間における円盤部間欠火炎領域の表面積

$$\theta_{di,1} = \cos^{-1} \left[\frac{r_{c,1} \cos\theta_{dc,1}}{r_{i,1}} \right]$$

$$\text{側面} : A_{di,1,side} = 2\pi r_{i,1} \times \frac{2\pi - 2\theta_{di,1}}{2\pi} \times 0.1H = (2\pi - 2\theta_{di,1})r_{i,1} \times 0.1H$$

$$\text{上面} : A_{di,1,upper} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{di,1}}{2\pi} + \frac{r_{c,1} \cos\theta_{dc,1} r_{i,1} \sin\theta_{di,1}}{2} \times 2 - (A_{dc,1,upper} + A_{cc,1,upper})$$

$$\text{下面} : A_{di,1,lower} = A_{di,1,upper} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{di,1}}{2\pi} + \frac{r_{c,1} \cos\theta_{dc,1} r_{i,1} \sin\theta_{di,1}}{2} \times 2 - (A_{dc,1,upper} +$$

$$A_{cc,1,upper})$$

$$\text{合計} : A_{di,1} = A_{di,1,side} + A_{di,1,upper} + A_{di,1,lower}$$

4.2.1.3 壁際におけるブルーム質量流量

図 4.9 に示すように、壁際のブルーム質量流量を求めるには、まず、火源が壁に対して対

称的であると仮定し、壁面を挟んで鏡像的に配置された2つの火源（実火源と仮想火源）を考慮し、仮想火源も含めた発熱速度を用いてプルームの質量流量 m_p を計算する。その後、実際の壁際におけるプルーム質量流量はこの仮想火源も含めたプルーム流量の半分とする。

$$\text{発熱速度： } Q_{wall} = 2Q \quad (4.2.40)$$

$$\text{燃焼面積： } A_{f,wall} = 2 \times \frac{\pi D_f^2}{4} \quad (4.2.41)$$

$$\text{燃焼直径： } D_{f,wall} = \sqrt{2}D_f \quad (4.2.42)$$

$$\text{壁際のプルーム質量流量： } m_{p,wall} = \frac{1}{2} m_p \quad (4.2.43)$$

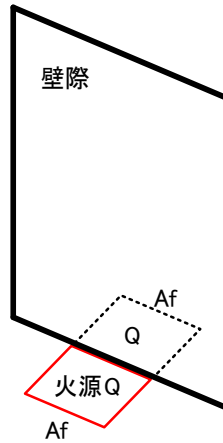


図 4.9 壁際におけるプルーム質量流量の計算

4.2.2 隅角部における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデル

本節では、第2章のモデルを基に、隅角部における単一の固体可燃物の燃え広がり予測モデルを構築した。本モデルの計算方法および計算手順は第2章と基本的に同様であり、基本的な修正の考え方は第4.2.1節で述べた壁際空間と同じである。

4.2.2.1 隅角部における火炎高さ

火炎高さは、可燃物と周壁の位置関係により異なる。隅角部では式(4.2.44)を用いる^[8]。

隅角部における平均火炎高さ：

$$L_{m,corner} = 4.3Q_D^{*n}D_f \quad (4.2.44)$$

隅角部における連続火炎高さ：

$$L_{c,corner} = 0.6L_{m,corner} \quad (4.2.45)$$

ただし、べき乗 n については壁際と同様に、 $Q_D^* < 1$ の時は $n=2/3$ 、 $Q_D^* > 1$ の時は $n=2/5$ とした。図 4.10 に既往の文献^[4,5,6,9,10,11]における隅角部の火炎高さの測定値と式(4.2.44)を比較して示す。

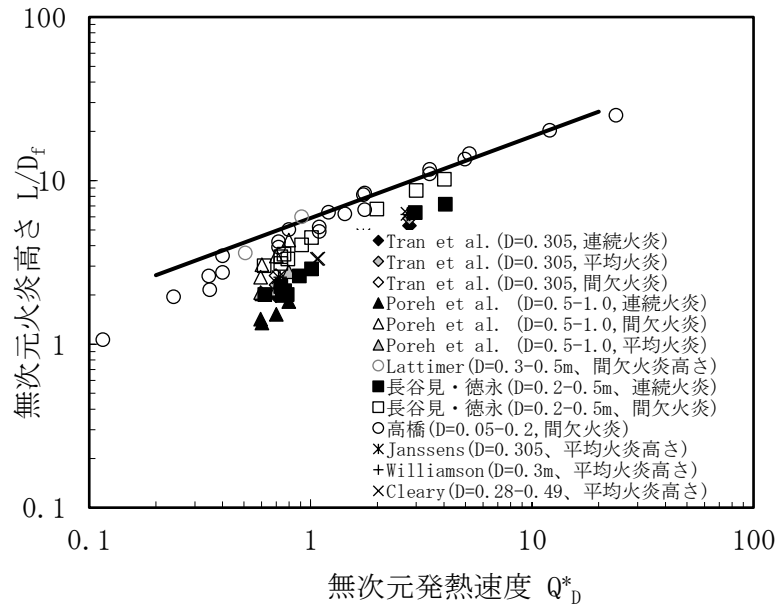


図 4.10 隅角部における火炎高さの測定データと相関式

4.2.2.2 隅角部における放射率

隅角部の計算は壁際と同様に、火炎が外部へ放射する熱流は火炎が隅角部の壁と接する角度 θ_c を仮定して計算する。形態係数と放射熱の計算式は第 2 章の表 2.3 に示した式と同様であるが、放射率のみが異なる。放射率の計算方法を以下に示す。

(1) 火炎が展炎しない場合 $L_{m,corner,1} < H$

図 4.11 に火炎が展炎しない場合の隅角部空間の火炎形状を示す。

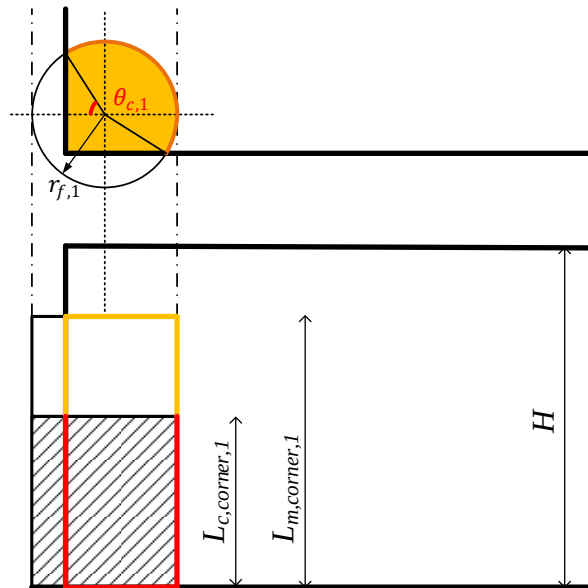


図 4.11 火炎が展炎しない場合の隅角部空間の火炎形状

$$\text{隅角部における間欠火炎展炎半径：} r_i = 0 \quad (4.2.46)$$

$$\text{隅角部における連続火炎展炎半径：} r_c = 0 \quad (4.2.47)$$

$$\text{隅角部における平均火炎高さ：} L_m = L_{m,corner} \quad (4.2.48)$$

$$\text{隅角部における連続火炎高さ：} L_c = L_{c,corner} \quad (4.2.49)$$

火炎の円筒部放射率：

$$\varepsilon_c = \frac{\chi Q}{A_{cc,corner} E_{cc} + A_{ci,corner} E_{ci}} \quad (4.2.50)$$

ただし、 $E_{cc}(= 80.5\text{kW/m}^2)$, $E_{ci}(= 51.2\text{kW/m}^2)$ は火炎円筒部の連続火炎領域、間欠火炎領域の放射発散度^[12]である。 χ は火源の発熱速度のうち放射性分の割合[-]で、第2章の式(2.2.10)で計算する。 $A_{cc,wall}$, $A_{ci,wall}$ は壁際空間における火炎円筒部のうちの連続火炎領域、間欠火炎領域の表面積[m²]で、次式で計算する。

天井がない時、隅角部における円筒部連続火炎領域の表面積(側面+下面)

$$A_{cc,corner} = 2\pi r_f \times \frac{(\frac{\pi}{2} - \theta_c) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times L_{c,corner} + \pi r_f^2 \times \frac{(\frac{\pi}{2} - \theta_c) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_f^2 \sin \theta_c \cos \theta_c}{2} \times 2 + r_f^2 \cos \theta_c^2 \quad (4.2.51)$$

天井がない時、隅角部における円筒部間欠火炎領域の表面積(側面+上面)

$$A_{ci,corner} = 2\pi r_f \times \frac{(\frac{\pi}{2} - \theta_c) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times (L_{m,corner} - L_{c,corner}) + \pi r_f^2 \times \frac{(\frac{\pi}{2} - \theta_c) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_f^2 \sin \theta_c \cos \theta_c}{2} \times 2 + r_f^2 \cos \theta_c^2 \quad (4.2.52)$$

$$\text{火炎の円盤部放射率：} \varepsilon_d = 0 \quad (4.2.53)$$

(2)間欠火炎が展炎する場合 $L_{c,corner,1} < H < L_{m,corner,1}$

(2-1)円盤部が円筒部に含まれる場合 $r_{i,1} < \frac{D_{f,1}}{2}$

間欠火炎が展炎し、かつ円盤部が円筒部に含まれる場合の隅角部空間での火炎形状を図4.12に示す。

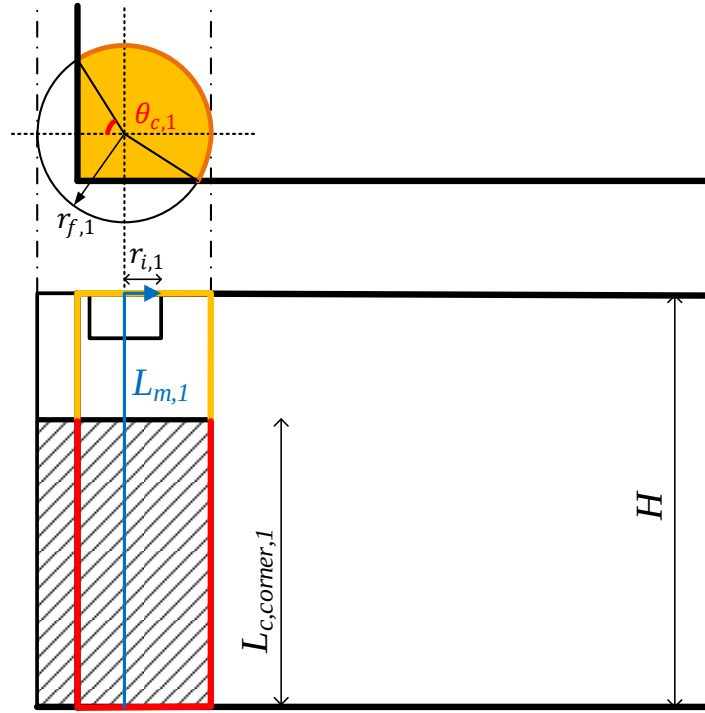


図 4.12 間欠火炎が展炎し、かつ円盤部が円筒部に含まれる場合の隅角部空間での火炎形状

$$\text{隅角部における間欠火炎展炎半径} : r_i = \frac{(L_{m,corner} - H)}{2} \quad (4.2.54)$$

$$\text{隅角部における連続火炎展炎半径} : r_{c,1} = 0 \quad (4.2.55)$$

$$\text{隅角部における平均火炎高さ} : L_m = r_i + H \quad (4.2.56)$$

$$\text{隅角部における連続火炎高さ} : L_c = L_{c,corner} \quad (4.2.57)$$

火炎の円筒部放射率 : ε_c は式(4.2.50)と同様に計算する。

$$\text{火炎の円盤部放射率} : \varepsilon_d = 0 \quad (4.2.58)$$

(2-2)円盤部が展炎する場合 $\frac{D_{f,1}}{2} < r_{i,1}$

間欠火炎が展炎し、円盤部が円筒部から突出する場合の隅角部空間の火炎形状を図 4.13 に示す。

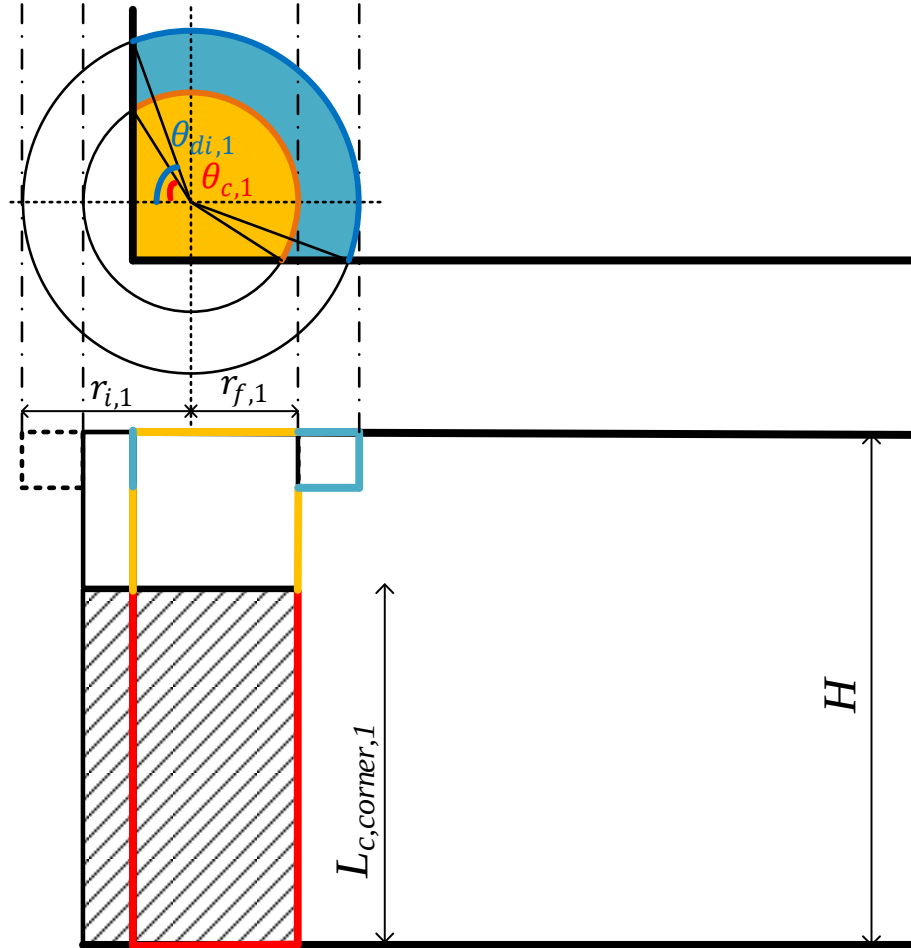


図 4.13 間欠火炎が展炎し、円盤部が円筒部から突出する場合の隅角部空間の火炎形状

$$\text{隅角部における間欠火炎展炎半径} : r_{i,1} = \frac{(L_{m,corner,1} - H)}{2} \quad (4.2.59)$$

$$\text{隅角部における連続火炎展炎半径} : r_{c,1} = 0 \quad (4.2.60)$$

$$\text{隅角部における平均火炎高さ} : L_{m,1} = r_{i,1} + H \quad (4.2.61)$$

$$\text{隅角部における連続火炎高さ} : L_{c,1} = L_{c,corner,1} \quad (4.2.62)$$

火炎の円筒部放射率 : ε_c は式(4.2.50)と同様に計算する。

火炎の円盤部放射率 :

$$\varepsilon_{c,1} A_{cc,1} E_{cc} + \varepsilon_{c,1} A_{ci,1} E_{ci} + \varepsilon_{d,1} A_{dc,1} E_{dc} + \varepsilon_{d,1} A_{di,1} E_{di} = \chi_1 Q_1 \quad (4.2.63)$$

式(4.2.8)を式(4.2.63)に代入して、式を整理すると、火炎 1 の円盤部放射率は式(4.2.64)で計算できる :

$$\varepsilon_{d,1} = \frac{1 - \frac{A_{cc,1}E_{cc} + A_{ci,1}E_{ci}}{A_{cc,corner,1}E_{cc} + A_{ci,corner,1}E_{ci}}}{A_{dc,1}E_{dc} + A_{di,1}E_{di}} \cdot \chi_1 Q_1 \quad (4.2.64)$$

ただし、

隅角部における円筒部連続火炎領域の表面積

$$\begin{aligned} \text{側面：} A_{cc,1,side} &= 2\pi r_{f,1} \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times L_{c,corner,1} \\ \text{下面：} A_{cc,1,lower} &= \pi r_{f,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin \theta_{c,1} \cos \theta_{c,1}}{2} \times 2 + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} \\ \text{合計：} A_{cc,1} &= A_{cc,1,side} + A_{cc,1,lower} \end{aligned}$$

隅角部における円筒部間欠火炎領域の表面積

$$\begin{aligned} \text{側面：} A_{ci,1,side} &= 2\pi r_{f,1} \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times (0.9H - L_{c,wall,1}) \\ \text{上面：} A_{ci,1,upper} &= \pi r_{f,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin \theta_{c,1} \cos \theta_{c,1}}{2} \times 2 + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} \\ \text{合計：} A_{ci,1} &= A_{ci,1,side} + A_{ci,1,upper} \end{aligned}$$

隅角部における円盤部連続火炎領域の表面積 $A_{dc,1} = 0$

隅角部における円盤部間欠火炎領域の表面積

$$\begin{aligned} \theta_{di,1} &= \cos^{-1} \left[\frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1}}{r_{i,1}} \right] \\ \text{側面：} A_{di,1,side} &= 2\pi r_{i,1} \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times 0.1H \\ \text{上面：} A_{di,1,upper} &= \pi r_{i,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1} r_{i,1} \sin \theta_{di,1}}{2} \times 2 \\ &\quad + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} - A_{ci,1,upper} \\ \text{下面：} A_{di,1,lower} &= A_{di,1,upper} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \\ &\quad + \frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1} r_{i,1} \sin \theta_{di,1}}{2} \times 2 + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} - A_{ci,1,upper} \\ \text{合計：} A_{di,1} &= A_{di,1,side} + A_{di,1,upper} + A_{di,1,lower} \end{aligned}$$

(3)連続火炎が展炎する場合 $H < L_{c,corner,1}$

(3-1)円盤部が円筒部に含まれる場合 $r_{i,1} < \frac{D_{f,1}}{2}$

連続火炎が展炎し、円盤部が円筒部に含まれる場合の隅角部空間での火炎形状を図 4.14 に示す。

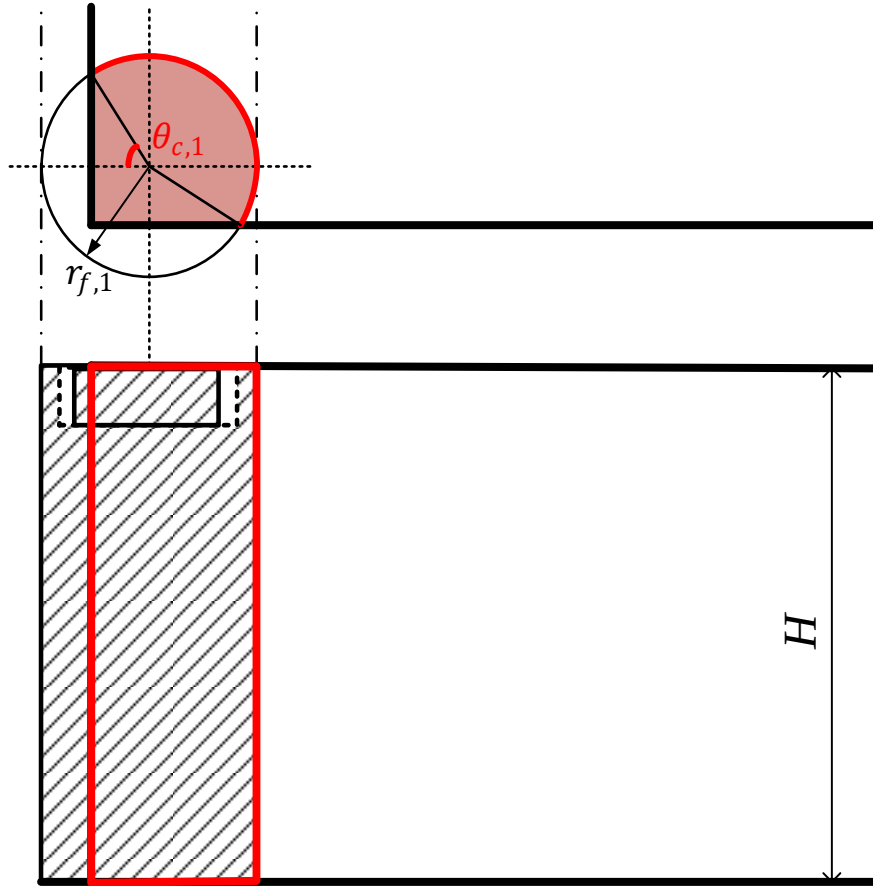


図 4.14 連続火炎が展炎し、円盤部が円筒部に含まれる場合の隅角部空間での火炎形状

$$\text{隅角部における間欠火炎展炎半径} : r_{i,1} = \frac{(L_{m,corner,1} - H)}{2} \quad (4.2.65)$$

$$\text{隅角部における連続火炎展炎半径} : r_{c,1} = \frac{(L_{c,corner,1} - H)}{2} \quad (4.2.66)$$

$$\text{隅角部における平均火炎高さ} : L_{m,1} = r_{i,1} + H \quad (4.2.67)$$

$$\text{隅角部における連続火炎高さ} : L_{c,1} = r_{c,1} + H \quad (4.2.68)$$

火炎の円筒部放射率 : ε_c は式(4.2.50)と同様に計算する。

$$\text{火炎 1 の円盤部放射率} : \varepsilon_{d,1} = 0 \quad (4.2.69)$$

(3-2)円盤部連続火炎領域が円筒部に含まれる。 $r_{c,1} < \frac{D_{f,1}}{2} < r_{i,1}$

連続火炎が展炎し、円盤部間欠火炎が円筒部から突出する場合の隅角部空間での火炎形状を図 4.15 に示す。

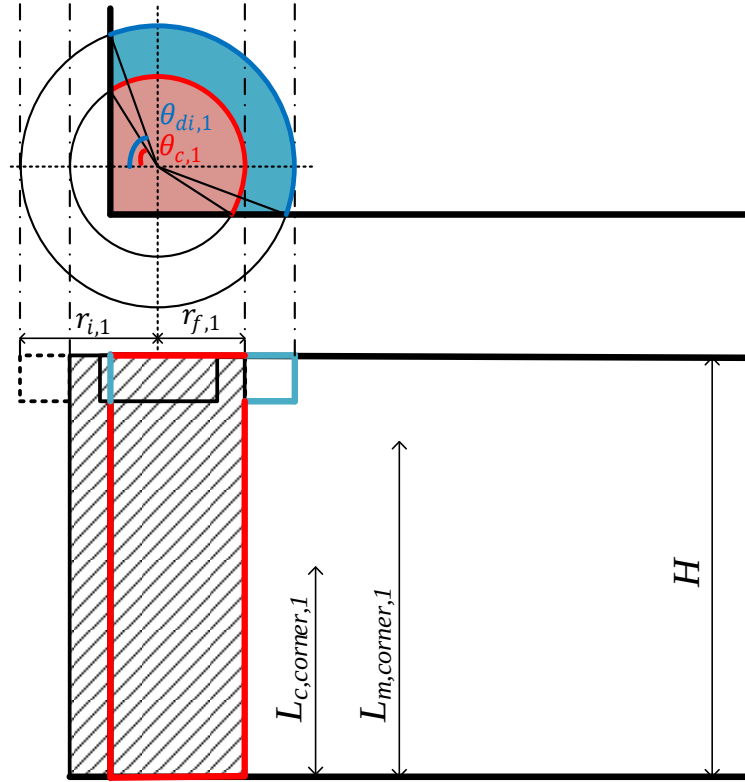


図 4.15 連続火炎が展炎し、円盤部間欠火炎が円筒部から突出する場合の隅角部空間での火炎形状

$$\text{隅角部における間欠火炎展炎半径} : r_{i,1} = \frac{(L_{m,corner,1} - H)}{2} \quad (4.2.70)$$

$$\text{隅角部における連続火炎展炎半径} : r_{c,1} = \frac{(L_{c,corner,1} - H)}{2} \quad (4.2.71)$$

$$\text{隅角部における平均火炎高さ} : L_{m,1} = r_{i,1} + H \quad (4.2.72)$$

$$\text{隅角部における連続火炎高さ} : L_{c,1} = r_{c,1} + H \quad (4.2.73)$$

火炎の円筒部放射率： ε_c は式(4.2.50)と同様に計算する。

火炎の円盤部放射率：

$$\varepsilon_{c,1}A_{cc,1}E_{cc} + \varepsilon_{c,1}A_{ci,1}E_{ci} + \varepsilon_{d,1}A_{dc,1}E_{dc} + \varepsilon_{d,1}A_{di,1}E_{di} = \chi_1 Q_1 \quad (4.2.74)$$

式(4.2.8)を式(4.2.74)に代入して、式を整理すると、火炎 1 の円盤部放射率は式(4.2.75)で計算できる：

$$\varepsilon_{d,1} = \frac{1 - \frac{A_{cc,1}E_{cc} + A_{ci,1}E_{ci}}{A_{cc,corner,1}E_{cc} + A_{ci,corner,1}E_{ci}}}{A_{dc,1}E_{dc} + A_{di,1}E_{di}} \cdot \chi_1 Q_1 \quad (4.2.75)$$

ただし、

隅角部における円筒部連続火炎領域の表面積

$$\text{側面} : A_{cc,1,side} = 2\pi r_{f,1} \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times 0.9H$$

$$\text{上面} : A_{cc,1,upper} = \pi r_{f,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin \theta_{c,1} \cos \theta_{c,1}}{2} \times 2 + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1}$$

$$\text{下面} : A_{cc,1,lower} = A_{cc,1,upper} = \pi r_{f,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin \theta_{c,1} \cos \theta_{c,1}}{2} \times 2 + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1}$$

$$\text{合計} : A_{cc,1} = A_{cc,1,side} + A_{cc,1,upper} + A_{cc,1,lower}$$

隅角部における円筒部間欠火炎領域の表面積 $A_{ci,1} = 0$

隅角部における円盤部連続火炎領域の表面積 $A_{dc,1} = 0$

隅角部における円盤部間欠火炎領域の表面積

$$\theta_{di,1} = \cos^{-1} \left[\frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1}}{r_{i,1}} \right]$$

$$\text{側面} : A_{di,1,side} = 2\pi r_{i,1} \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times 0.1H$$

$$\text{上面} : A_{di,1,upper} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1} r_{i,1} \sin \theta_{di,1}}{2} \times 2 r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} - A_{cc,1,upper}$$

$$\text{下面} : A_{di,1,lower} = A_{di,1,upper} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi}$$

$$+ \frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1} r_{i,1} \sin \theta_{di,1}}{2} \times 2 r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} - A_{cc,1,upper}$$

$$\text{合計} : A_{di,1} = A_{di,1,side} + A_{di,1,upper} + A_{di,1,lower}$$

(3-3)連続火炎が展炎するか $\frac{D_{f,1}}{2} < r_{c,1}$ 時

連続火炎が展炎し、円盤部連続火炎が円筒部から突出する場合の隅角部空間での火炎形状を図 4.16 に示す。

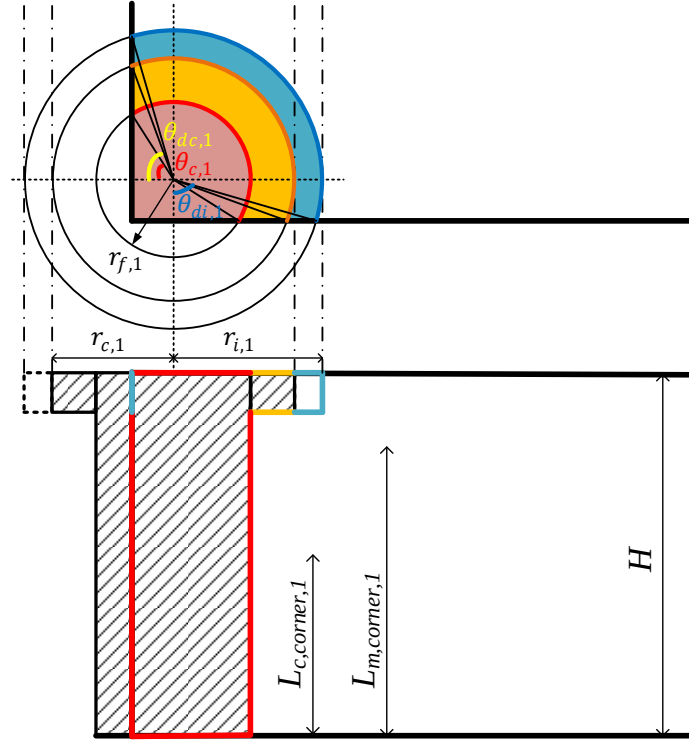


図 4.16 連続火炎が展炎し、円盤部連続火炎が円筒部から突出する場合の隅角部空間での火炎形状

$$\text{隅角部における間欠火炎展炎半径} : r_{i,1} = \frac{(L_{m,corner,1} - H)}{2} \quad (4.2.76)$$

$$\text{隅角部における連続火炎展炎半径} : r_{c,1} = \frac{(L_{c,corner,1} - H)}{2} \quad (4.2.77)$$

$$\text{隅角部における平均火炎高さ} : L_{m,1} = r_{i,1} + H \quad (4.2.78)$$

$$\text{隅角部における連続火炎高さ} : L_{c,1} = r_{c,1} + H \quad (4.2.79)$$

火炎の円筒部放射率： $\varepsilon_{c,1}$ は式(4.2.50)と同様に計算する。

火炎の円盤部放射率：

$$\varepsilon_{c,1}A_{cc,1}E_{cc} + \varepsilon_{c,1}A_{ci,1}E_{ci} + \varepsilon_{d,1}A_{dc,1}E_{dc} + \varepsilon_{d,1}A_{di,1}E_{di} = \chi_1 Q_1 \quad (4.2.80)$$

式(4.2.8)を式(4.2.80)に代入して、式を整理すると、火炎 1 の円盤部放射率は式(5)で計算できる：

$$\varepsilon_{d,1} = \frac{1 - \frac{A_{cc,1}E_{cc} + A_{ci,1}E_{ci}}{A_{cc,corner,1}E_{cc} + A_{ci,corner,1}E_{ci}}}{A_{dc,1}E_{dc} + A_{di,1}E_{di}} \cdot \chi_1 Q_1 \quad (4.2.81)$$

ただし、

隅角部における円筒部連続火炎領域の表面積

$$\text{側面：} A_{cc,1,side} = 2\pi r_{f,1} \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times 0.9H$$

$$\text{上面：} A_{cc,1,upper} = \pi r_{f,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin \theta_{c,1} \cos \theta_{c,1}}{2} \times 2 + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1}$$

$$\text{下面：} A_{cc,1,lower} = A_{cc,1,upper} = \pi r_{f,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{c,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1}^2 \sin \theta_{c,1} \cos \theta_{c,1}}{2} \times 2 + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1}$$

$$\text{合計：} A_{cc,1} = A_{cc,1,side} + A_{cc,1,upper} + A_{cc,1,lower}$$

隅角部における円筒部間欠火炎領域の表面積 $A_{ci,1} = 0$

隅角部における円盤部連続火炎領域の表面積

$$\theta_{dc,1} = \cos^{-1} \left[\frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1}}{r_{c,1}} \right]$$

$$\text{側面：} A_{dc,1,side} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{上面：} A_{dc,1,upper} = \pi r_{c,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{dc,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1} r_{c,1} \sin \theta_{dc,1}}{2} \times 2 \\ + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} - A_{cc,1,upper} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{下面：} A_{dc,1,lower} = A_{dc,1,upper} = \pi r_{c,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{dc,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \\ + \frac{r_{f,1} \cos \theta_{c,1} r_{c,1} \sin \theta_{dc,1}}{2} \times 2 + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} - A_{cc,1,upper} \end{aligned}$$

$$\text{合計：} A_{dc,1} = A_{dc,1,side} + A_{dc,1,upper} + A_{dc,1,lower}$$

隅角部における円盤部間欠火炎領域の表面積

$$\theta_{di,1} = \cos^{-1} \left[\frac{r_{c,1} \cos \theta_{dc,1}}{r_{i,1}} \right]$$

$$\text{側面：} A_{di,1,side} = 2\pi r_{i,1} \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \times 0.1H$$

$$\begin{aligned} \text{上面：} A_{di,1,upper} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{c,1} \cos \theta_{dc,1} r_{i,1} \sin \theta_{di,1}}{2} \times 2 \\ + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} - (A_{dc,1,upper} + A_{cc,1,upper}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{下面：} A_{di,1,lower} = \pi r_{i,1}^2 \times \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{di,1}\right) \times 2 + \frac{\pi}{2}}{2\pi} + \frac{r_{c,1} \cos \theta_{dc,1} r_{i,1} \sin \theta_{di,1}}{2} \times 2 \\ + r_{f,1}^2 \cos^2 \theta_{c,1} - (A_{dc,1,upper} + A_{cc,1,upper}) \end{aligned}$$

$$\text{合計：} A_{di,1} = A_{di,1,side} + A_{di,1,upper} + A_{di,1,lower}$$

4.2.2.3 隅角部におけるプルーム質量流量

図 4.17 に示すように、壁際のプルーム質量流量を求めるには、まず、火源が隅角部に対して対称的であると仮定し、壁面を挟んで鏡像的に配置された四つの火源を考える。仮想火源（実火源の 4 倍）の発熱速度を用いてプルームの質量流量 m_p を計算する。その後、実際の壁際におけるプルーム質量流量はこの仮想系の 1/4 とする。

隅角部のプルーム質量流量を計算する際には、

$$\text{発熱速度： } Q_{\text{corner}} = 4Q \quad (4.2.82)$$

$$\text{燃焼面積： } A_{f,\text{corner}} = 4 \times \frac{\pi D_f^2}{4} \quad (4.2.83)$$

$$\text{燃焼直径： } D_{f,\text{corner}} = 2D_f \quad (4.2.84)$$

$$\text{隅角部のプルーム質量流量： } m_{p,\text{corner}} = \frac{1}{4} m_p \quad (4.2.85)$$

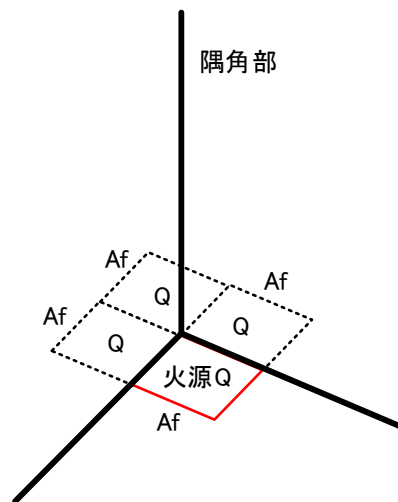


図 4.17 隅角部におけるプルーム質量流量の計算

4.3 予測結果と実験結果の比較

4.3.1 実験概要（東京理科大学共同利用実験）

原田ら^[2,3]はルームコーナー試験区画内でのウレタンフォームブロックの燃焼実験を実施した。実験に用いた模型室を図 4.18 および図 4.19 に示す。模型室の寸法は 2300mm(幅) × 3500mm(奥行き) × 2250mm(高さ) である。開口部は一つで、大きさは 850mm(幅) × 2100mm(高さ) である。周壁と天井は全てセラミックファイバー製である。

試験体はウレタンフォームブロックを用いた。寸法は 500 × 500 × 500mm、密度は 15.6kg/m³ である。全ての実験では試験体上面の中央に点火された。

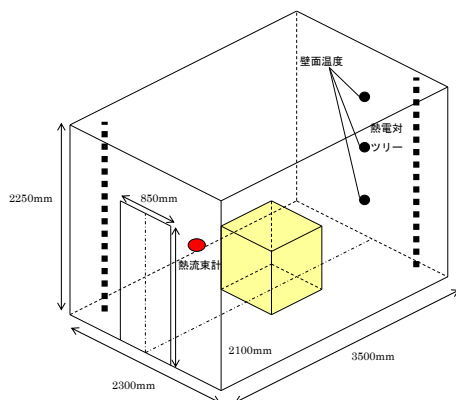


図 4.18 実験装置



図 4.19 実験 C1 の写真

4.3.1.1 測定項目

実験の測定項目を表 4.1 に示す。発熱速度は開口部から排出されるガスを収集して酸素消費法で測定された。試験体の燃焼性状は模型室の四隅に設置されたビデオカメラで記録された。上部層高さ、上部層温度および下部層温度は、手前と奥に設置された熱電対ツリーによって測定され、N%法 (N=10) を用いて計算された。壁面温度は、壁に設置された熱電対によって測定された。下部層壁面に入射する熱流は試験体から 1m 離れた位置での熱流束計 (熱流束計の高さは試験体上面の高さと一致) によって測定された。

表 4.1 実験の測定項目

測定項目	測定装置	測定位置
発熱速度	酸素消費法	/
試験体の燃焼性状	ビデオカメラ	模型室の四隅
上部層温度、下部層温度、上部層高さ	熱電対ツリー	手前と奥
上部層壁面温度	熱電対	H=1800mm
下部層壁面温度	熱電対	H=200mm
下部層壁面に入射する熱流	熱流束計 hfg1 (試験体向き) 熱流束計 hfg2 (上向き)	試験体から 1m

酸素消費法では、燃焼によって発生した煙が点火直後から測定システムに収集されるまでに一定の時間差が生じるため、実験値に対して遅れ時間補正を行う必要がある。本研究では、実験 1 から 4 の実験値に対して 30 秒の遅れ時間補正を行った。

4.3.1.2 実験レイアウト

実験レイアウトを図 4.20 に示す。実験 C1~C4 では、試験体の位置を変えて燃焼させ、その位置が燃焼性状に与える影響を検討した。

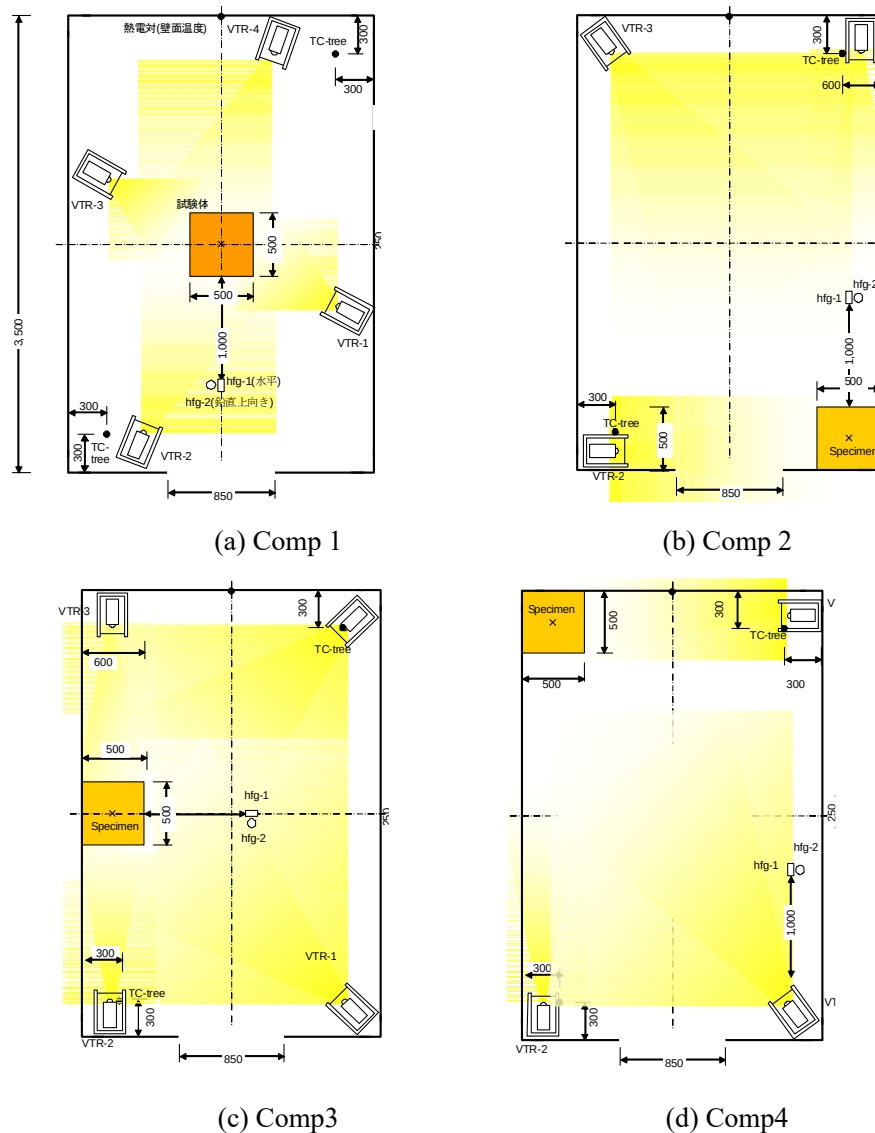


図 4.20 東京理科大学共同利用実験の実験条件

4.3.2 計算条件の設定

4.3.2.1 模型室および可燃物に関する定数と初期値の設定

実験条件を参考にして、可燃物の設置位置の違いに基づき、中央、壁際、隅角部の3種類の計算条件を設定した。模型室および可燃物の設置を図 4.21 に示す。すべての計算条件において、模型室および可燃物の寸法は同一であり、異なるのは可燃物の設置位置のみである。なお、実験 C2 および C4 はともに隅角部での燃焼であり、実験結果から両者に大きな差が見られなかったため、計算時にはこれら2つの隅角部での燃焼を特に区別せず、同一の計算条件および方法を用いている。

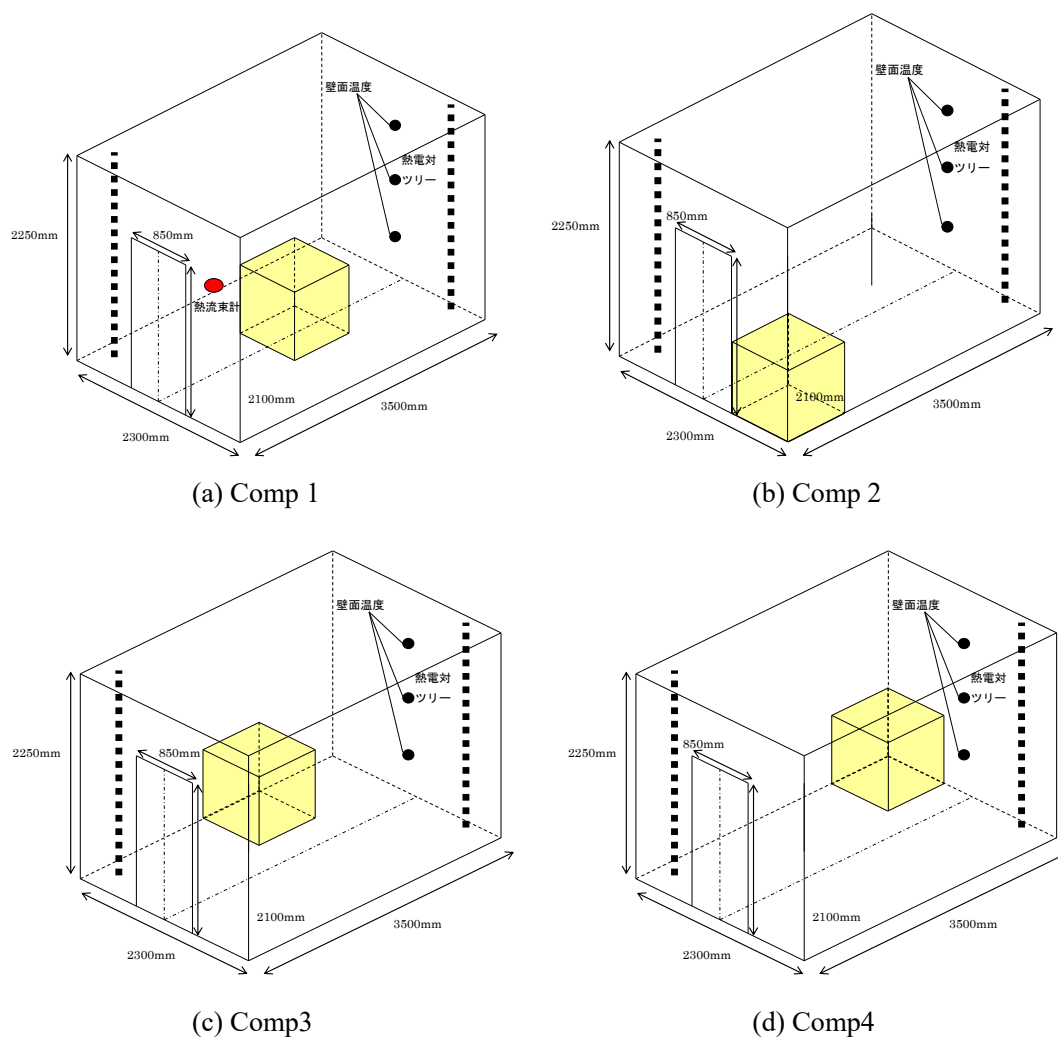


図 4.21 壁際空間と隅角部の計算条件の設定

本実験で使用したモデル室および可燃物の材料は同一であるため、物性値および定数の設定は第 3 章の赤尾実験と同様である。物性値と定数の入力値を表 4.2 に示す。

表 4.2 物性値と定数の入力

分類	項目	記号	値
模型室	材質		セラミックファイバーボード
	幅×長さ×高さ	$D_m \times W_m \times H$	$3.5 \times 2.3 \times 2.25 \text{ m}$
	開口幅	H_o	2.1 m
	開口高さ	B	0.85 m
	厚さ	x	0.05 m
	密度	ρ_w	250 kg/m^3
	比熱	c	$1.13 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
	放射率	ε_w	0.9
	熱伝導率[20]	k	$k = 2 \times 10^{-7} \max(T, 600) - 3 \times 10^{-5}$ [kW/(m · K)]
試験体	材質		ウレタンフォーム
	幅×長さ×高さ	$D_u \times W_u \times h$	$0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}$

	着火温度 [21]	T_b	481K
	単位質量当たりの発熱量	ΔH	29410 kJ/kg
	単位質量当たりの発熱量/分解潜熱	$\Delta H/L$	17.24
	自由空間における火炎伝播速度	$v_{f,free}$	0.0035 m/s
	側面燃焼高さ	h_f	0.02 m
外部空気	温度	T_∞	293K
	対流熱伝達率	h_∞	0.0083 kW/(m ² · K)

4.3.2.2 壁際および隅角部における火炎と壁面が接触する角度 θ_c の設定

4.2.2 節で述べたように、中央部での燃焼と比較して、壁際や隅角部での燃焼では火炎が傾斜し、壁側に傾く傾向がある。そのため、本モデルでは一定の角度 θ_c を導入した。火炎が壁と接する角度 θ_c の最適値を決定するために、本節では多数の角度 ($\theta_c = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$) における計算値を算出し、実験値と比較した。

図 4.22(a)に壁際の計算結果を示す。火炎と壁面が接触する角度 θ_c によって、発熱速度の計算結果は大きく変化する。 $\theta_{c,1} = 75^\circ$ の場合、最大発熱速度は実験値に近いが、燃焼終了時間は大幅に早い。 $\theta_c = 65^\circ$ の場合、最大発熱速度は実験値より小さいものの、燃え尽きに至る変化パターンは実験値に近い。

図 20(b)に隅角部の計算結果を示す。実験結果によると、実験 C2(手前の隅角)と実験 C4(奥の隅角)の発熱速度はほぼ同じである。自由空間と比較すると、中央部の最大発熱速度は約 100 kW 大きく、壁際では約 150 kW、隅角部では約 200 kW 大きい。

壁際と隅角の計算結果のうち、実験値と全般的に最も一致しているのは $\theta_c = 60^\circ$ の場合であった。従って、以下では火炎と壁面が接触する角度 θ_c を 60° とする。

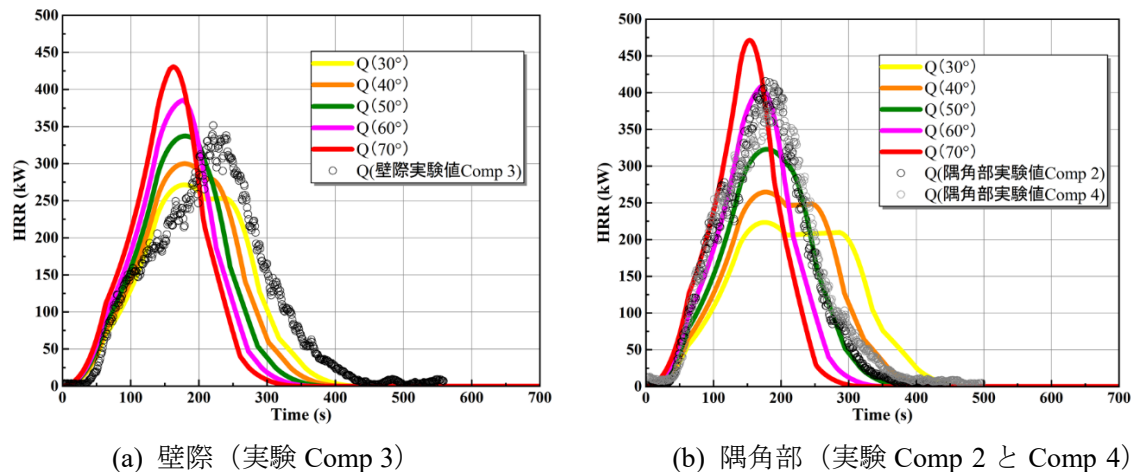


図 4.22 様々な火炎と壁面が接触する角度 θ_c における発熱速度の計算値と実験値の比較

4.3.3 予測結果と考察

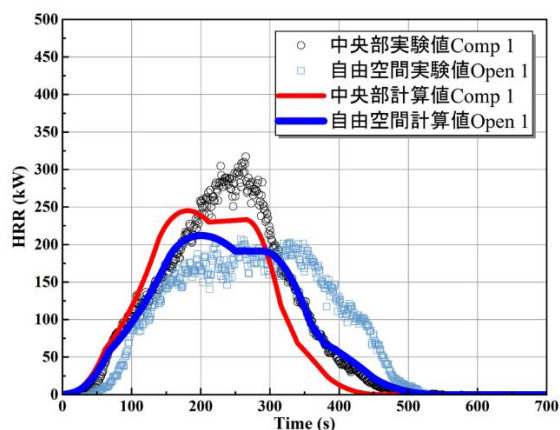
4.3.3.1 中央部の計算結果 (実験 Comp 1)

図 4.21 に試験体が中央に配置された場合の計算結果を示す。図 4.23(a)に示す自由空間実

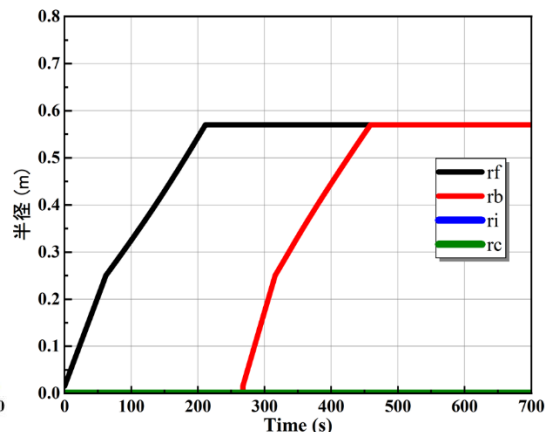
験値は、同一の試験体(h=500mm)が自由空間で燃焼する際に測定された発熱速度である。自由空間での最大発熱速度は実験値と一致しているが、室内での最大発熱速度は実験値より小さい。また、最大発熱速度に達する時間は実験値より早い。

図 4.23(b)に燃焼半径、展炎半径と燃え尽き半径の計算値を示す。展炎半径が 0 であり、火炎は展炎しない。約 260 秒で燃え尽きが始まり、約 450 秒で燃焼が終了する。火炎が展炎しないため、図 4.23(g)に示すように、外部放射の放射熱は煙層および周壁からの放射熱と火炎からの間接放射のみである。

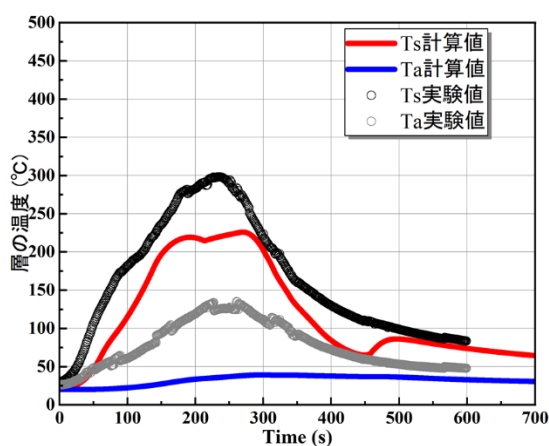
上部層温度、下部層温度、上部層壁面温度、下部層壁面温度、および下部層壁面に入射する熱流は、いずれも実験値より低いものの、その変化傾向は概ね一致している。上部層高さは実験値とよく一致しており、計算結果からは上部層高さが最終的に開口高さ 2.1m で安定することが確認された。



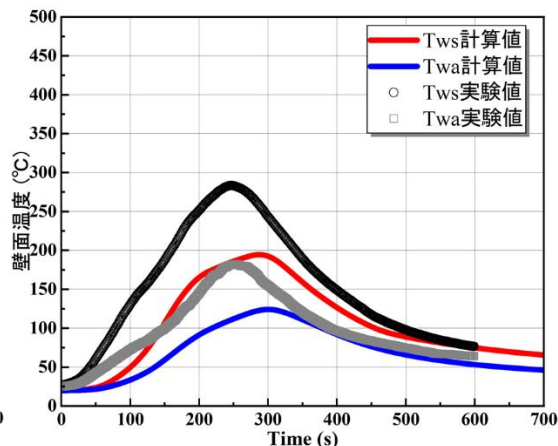
(a)発熱速度



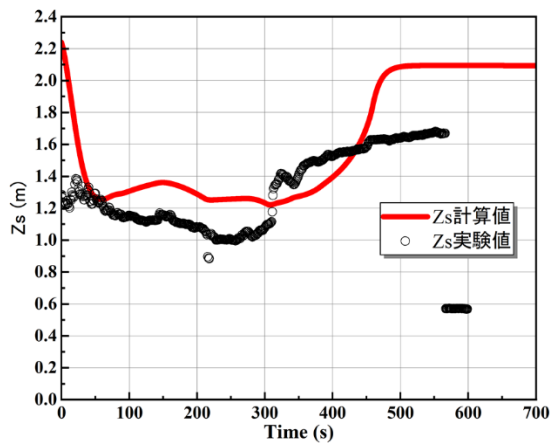
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



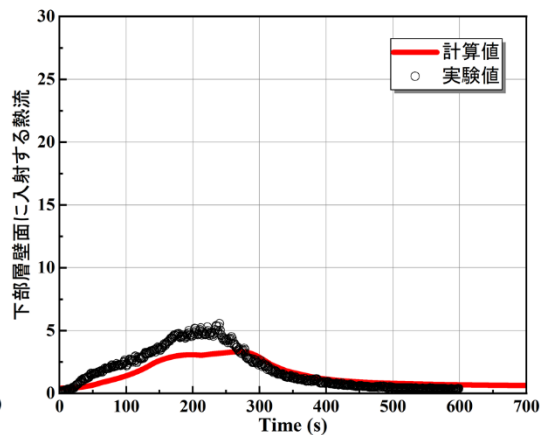
(c)層の温度



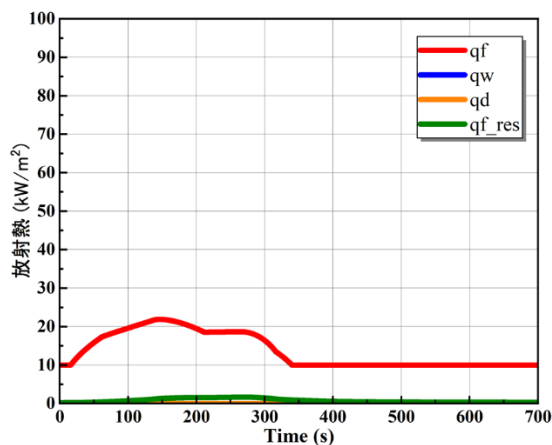
(d)壁面温度



(e) 煙層高さ



(f) 下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

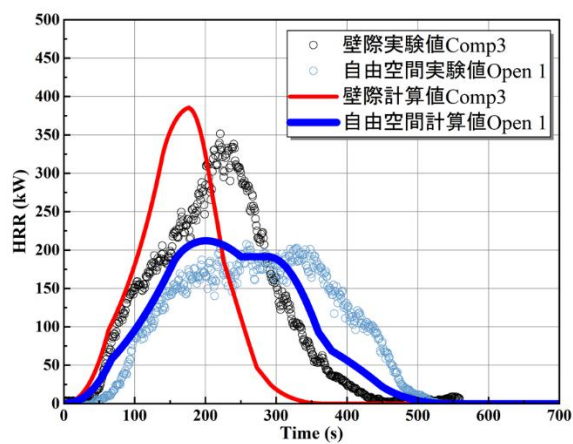
図 4.23 中央部における発熱速度の計算値と実験値の比較

4.3.3.2 壁際の計算結果（実験 Comp 3）

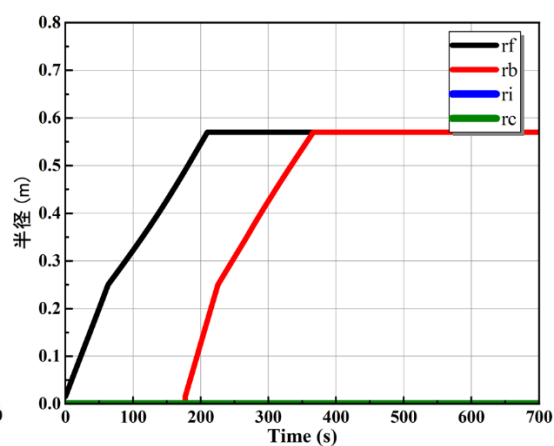
図 4.24 に試験体が壁際に配置された場合の計算結果を示す。図 4.22 (a)に示すように、室内での最大発熱速度は実験値より大きく、最大発熱速度に達する時間と燃焼終了時間は実験値より早い。

図 4.24 (b)の計算値によると、火炎が展炎しない。約 250 秒で燃え尽きが始まり、約 440 秒で燃焼が終了する。

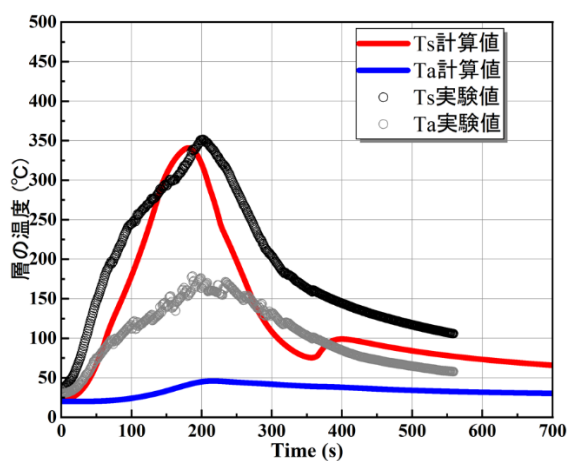
上部層温度と上部層高さは実験値に近いものの、下部層温度、上部層壁面温度、下部層壁面温度、および下部層壁面に入射する熱流は、実験値よりも低い。また、内部放射の放射熱は外部放射よりもはるかに大きく、内部放射の影響がより大きいことが分かった。



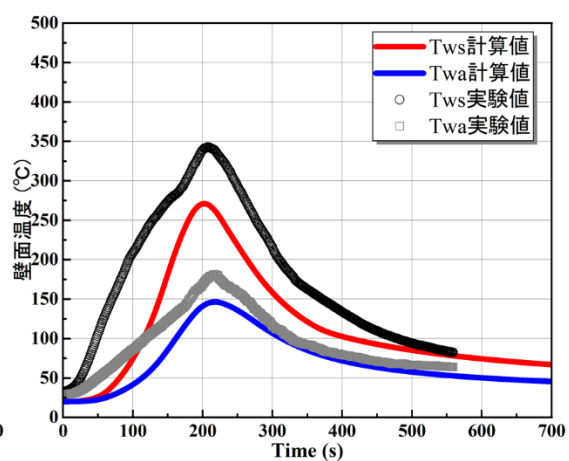
(a)発熱速度



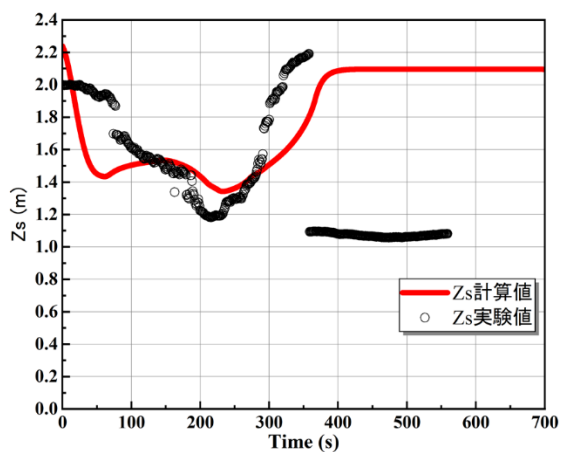
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



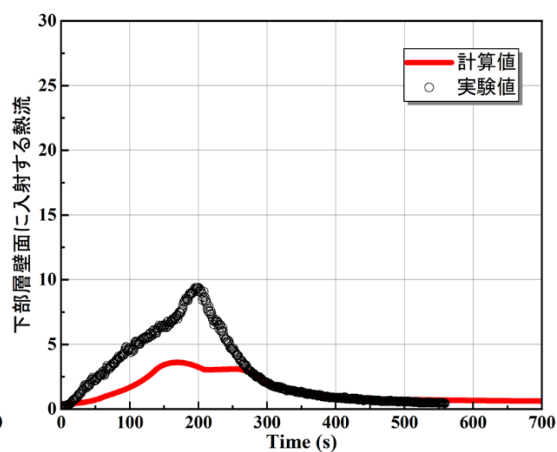
(c)層の温度



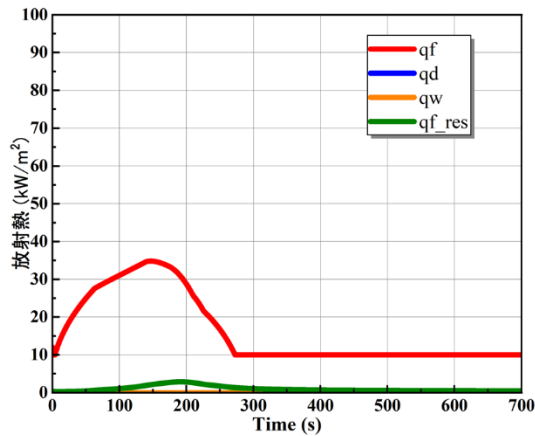
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 4.24 壁際における発熱速度の計算値と実験値の比較

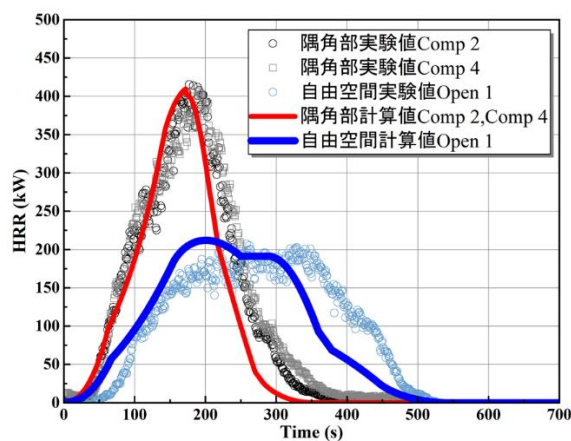
4.3.3 隅角部の計算結果（実験 Comp 2 と Comp 4）

図 4.23 に試験体が隅角部に配置された場合の計算結果を示す。図 4.25(a)に示すように、実験 C2 と C4 で測定された発熱速度はほぼ同じであるが、図 4.25 (f)に示す実験 C4 の壁面温度は実験 C2 よりも高い。これは、実験 C4 の試験体が壁面温度測定用の熱電対により近かったためである。

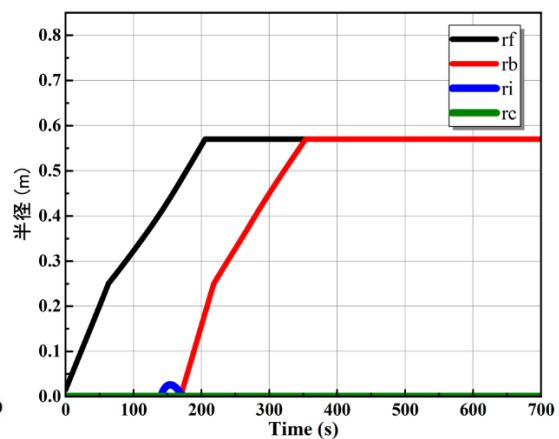
図 4.25(a)によると、隅角部の発熱速度は実験値と良好に一致している。

図 4.25 (b)の計算値によると、間欠火災が展炎する。約 160 秒で燃え尽きが始まり、約 340 秒で燃焼が終了する。

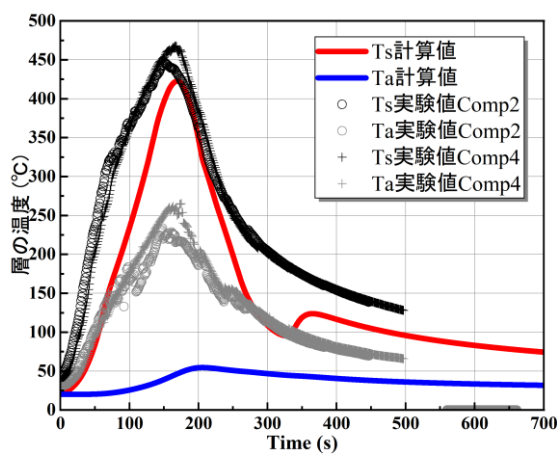
上部層温度、上部層壁面温度、下部層壁面温度と上部層高さは実験値に近いものの、下部層温度と下部層壁面に入射する熱流は、実験値よりも低い。



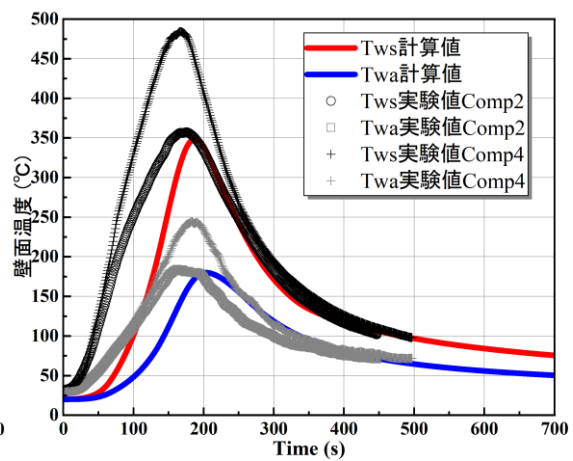
(a) 発熱速度



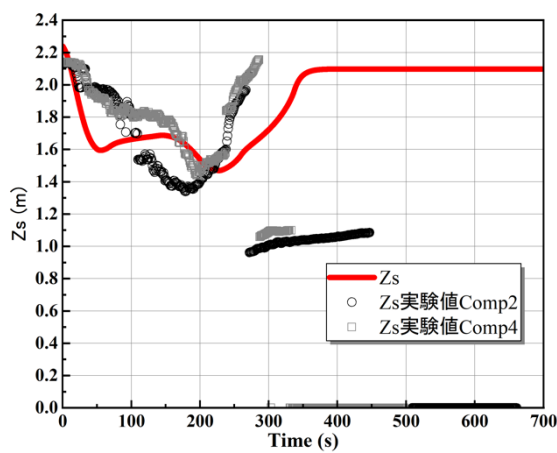
(b) 燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



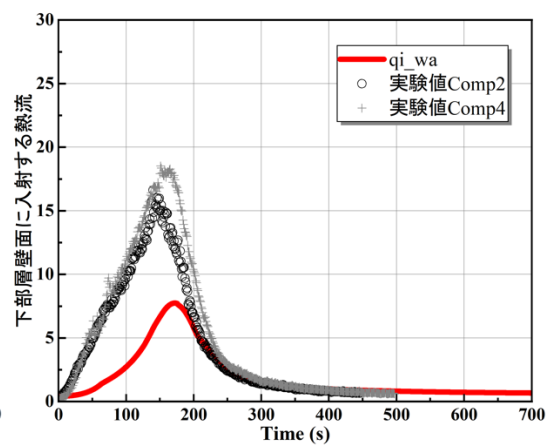
(c)層の温度



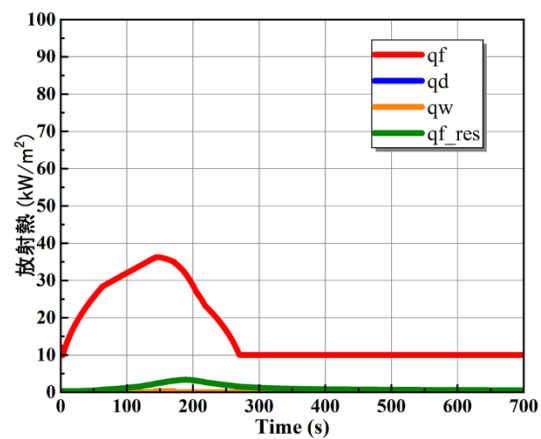
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 4.25 隅角部における発熱速度の計算値と実験値の比較

4.3.3.4 可燃物の位置による発熱速度の計算結果のまとめ

図 4.26 に可燃物の位置による発熱速度の計算値と実験値の比較を示す。実験結果より、

最大発熱速度は自由空間、中央部、壁際、隅角部の順に大きくなり、燃焼終了時間はこの順に早まる傾向が確認された。計算結果もこの傾向を再現している。中央部においては、発熱速度の計算値が実験値よりも小さい結果となった。原因として、本モデルでは、側面の最大燃焼高さ h_f の設定が過小評価されたことが考えられる。本章において使用した試験体の厚さは0.5mであり、実験によれば、厚さが大きい場合には、ウレタンが溶融して滴下し、試験体の足元に新たな着火点が形成され、側面の燃焼面積の拡大により、側面の等価最大燃焼高さが増加した。しかし、本モデルでは側面の最大燃焼高さを0.02mに設定しており、これは実験で観察された実際の値よりも小さかったためと考えられる。

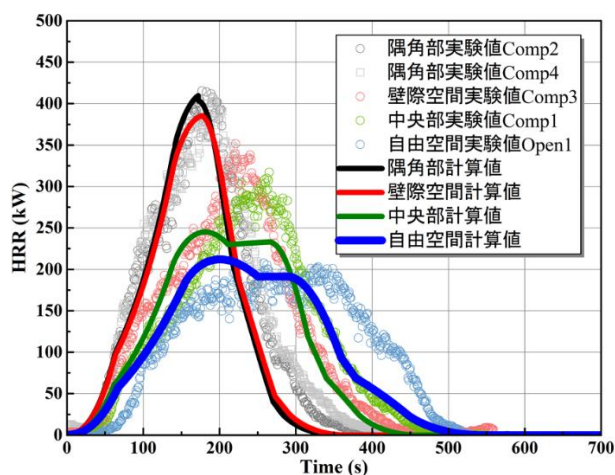


図 4.26 可燃物の位置における発熱速度の計算値と実験値の比較

4.3.3.5 可燃物の位置による平均火炎高さの計算結果のまとめ

図 4.27 に可燃物の位置による平均火炎高さの計算値の比較を示す。平均火炎高さは中央部、壁際、隅角部の順に大きくなった。

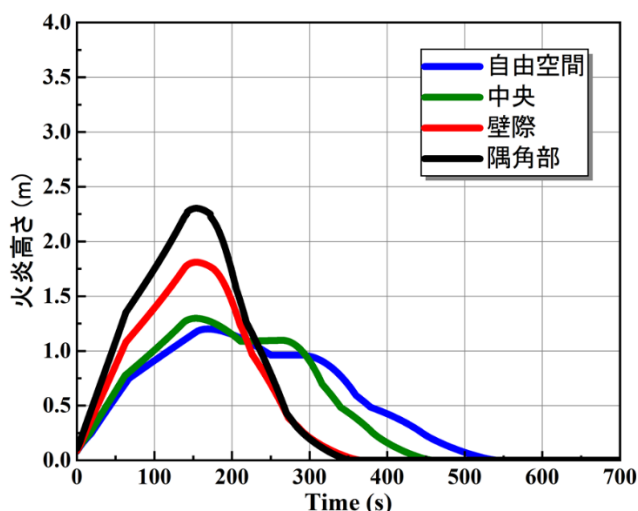


図 4.27 可燃物の位置の違いによる平均火炎高さの計算値の比較

4.4.3.6 可燃物の位置による上部層温度の計算結果のまとめ

図 4.28 に可燃物の位置による上部層温度の計算値と実験値の比較を示す。上部層温度の最大値は発熱速度と同様に、自由空間、中央部、壁際、隅角部の順に高くなる。計算結果もこの傾向を再現した。全ての計算条件において、燃焼終了直後に上部層温度の計算値が一時的に上昇する傾向が見られた。これは、燃焼終了時にプルーム質量流量が計算上は急に 0 となり、上部層へ流入する冷気流が急になくなったためと考えられる。加えて、この時点では上部層壁面温度が依然として高いことから、上部層壁面からの対流熱により上部層が加熱されたことが原因である。

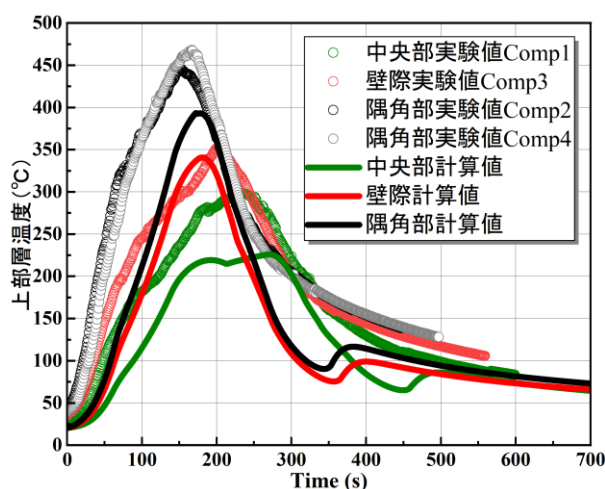


図 4.28 可燃物の位置における上部層温度の計算値の比較

4.4 本章の結論

本章では、第 2 章で構築した単一固体可燃物の燃え広がりモデルを基に、可燃物の位置が燃焼性状に及ぼす影響を考慮して、壁際および隅角部における固体可燃物の燃え広がり予測手法を提案した。そして、ルームコーナー区画内でのウレタンフォームの燃焼実験（東京理科大学共同利用実験）の実験結果と比較して、モデルの精度を検証した。以下に本章の主な成果をまとめる。

本章では、火炎高さ、火炎の放射率、プルーム質量流量の改良により、壁際および隅角部における燃え広がりモデルを構築した。既往研究により、火炎高さは自由空間、壁際、隅角部の順に高くなることが知られている。第 2 章のモデルでは自由空間における火炎高さをを用いていたが、本章のモデルでは壁際および隅角における火炎高さを使用した。また、火炎が壁に近づくと壁側へ傾斜する傾向があるため、本研究では火炎の傾斜を考慮するために火炎と壁面が接触する角度 θ_c を導入した。さらに、火炎の放射率の計算においては、火炎が壁面に非常に近いことにより、壁側の火炎の放射熱はほぼすべてが壁で吸収されて再放射されて火炎に戻ると考えられるため、外部へ放射する円筒部と円盤部の面積の算出においてこの影響を考慮した。プルーム質量流量については、第 2 章では火源が室内中央にある場

合に適用可能な計算式を用いていたが、本章ではその式を基に、火源の対称性を考慮すること、壁際や隅角部にも適用可能な簡易的な計算手法を提案した。

東京理科大学共同利用実験の実験条件を参考にして計算条件を設定し、可燃物の設置位置によって、それぞれの計算結果と実験結果を比較した。全体的に、計算結果は実験結果と一致した。発熱速度、平均火炎高さおよび上部層温度の計算値についても、自由空間、中央部、壁際、隅角部の順に高くなる傾向が再現された。しかし、中央部および壁際における最大発熱速度が小さく評価された。原因として、溶融したウレタンの滴下による側面燃焼面積の拡大が考慮されていなかった可能性が考えられる。特に厚みのある試験体においては、滴下によって側面の燃焼面積が増加する傾向が見られるため、今後の課題としてはこの点を考慮する必要がある。

【第4章参考文献】

- [1] Y. Hasemi, T. Tokunaga: Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames, Fire Science and Technology, Vol.4, No.1, pp.15-26,1984.
- [2] Kazunori Harada, Ken Matsuyama, Kazuhiko Ido, Masaki Noaki, Sungchan Lee, Jeayoung Lee, Burning of Polyurethane Foam Block in ISO Room Compartment, IFireSS - International Fire Safety Symposium, 2015.
- [3] 井戸和彦, 原田和典, 松山賢, 野秋政希, 区画内におけるウレタンブロックの燃焼実験, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.244-245, 2013
- [4] Cleary, T, unpublished data, National Institute of Standards and Technology, 1989 (reviewed by Quintiere J. G., Cleary T. G., Heat flux from flames to vertical surfaces, Fire Technology, vol. 30(2), pp. 209-231, 1994
- [5] Poreh M., Garrad G., A study of wall and corner fire plumes, Fire Safety Journal, vol. 34, pp. 81-98, 2000
- [6] Hasemi Y, Tokunaga T., Some experimental aspects of turbulent diffusion flames and buoyant plumes from fire sources against a wall and in a corner of walls, combustion Science and Technology, vol. 40, pp. 1-17, 1984
- [7] Back G., Beyler C., DiNenno P., Tatem P., "Wall Incident Heat Flux Distributions Resulting from an Adjacent Fire", Fire Safety Science - proc. 4th Symp., pp.241-252, 1997
- [8] Brian Y. Lattimer, Sean P. Hunt, Mark Wright, and Craig Beyler, CORNER FIRE GROWTH IN A ROOM WITH A COMBUSTIBLE LINING, Fire Safety Science, January 2003:419-430.
- [9] Tran, H., Janssens, M., Modeling the burner source used in the ASTM room fire test, J. of Fire Protection engineering, vol. 5(2), pp. 53-66, 1993
- [10] Lattimer, B., Sorathia U., Thermal characteristics of fires in a noncombustible corner, Fire Safety Journal, Vol. 38, pp, 709-745, 2003
- [11] Janssens, M., Fundamental thermophysical characteristics of wood and their role in enclosure fire

growth, University of Ghent, 1991[12] Shintani Y., Nagaoka T., Deguchi Y., Harada K., "Simple Method to Predict Downward Heat Flux from Flame to Floor", Fire Science and Technology, Vol.33, No.1 (2014).

第5章 同時燃焼を考慮した複数の固体可燃物の燃え広がり予測モデル

5.1 概要

第2章および第4章では、単一可燃物が室中央、壁際、隅角部に設置された場合の燃え広がりモデルを提案した。モデルの適用範囲をさらに拡張するために、本章では、これらのモデルを基に、2つの可燃物が同時に燃焼する場合の燃焼拡大性状を予測するモデルを提案する。そして、モデルの予測結果を東京理科大学共同利用実験^[1,2]の結果と比較して、モデルの精度を検証する。

5.2 予測モデル

本モデルでは、2個の可燃物は同一の寸法・材質とし、可燃物上面の中心点から同時に着火するものと仮定する。室内において2つの可燃物が同時に燃焼する場合、図5.1に示すように、各燃焼面は隣の火炎からの放射熱を受ける。そのため本モデルでは、展炎部から q_d 、火炎が接する天井部から q_w 、周壁および煙層からの放射熱 q_s および火炎からの間接放射 $q_{f,re}$ に加え、隣の火炎の円筒部からの放射熱 $q_{c,1\rightarrow2}$ [kW/m²]、隣の展炎部からの放射熱 $q_{d,1\rightarrow2}$ [kW/m²]、さらに隣の火炎が接する天井部からの放射熱 $q_{w,1\rightarrow2}$ [kW/m²]も考慮する。

本モデルの計算方法および計算手順は第2章と基本的に同様である。本節では、隣の火炎からの放射熱の計算方法に加え、単位面積当たりの発熱速度と火炎伝播速度の計算式、二層ゾーンモデルにおける修正点について述べる。

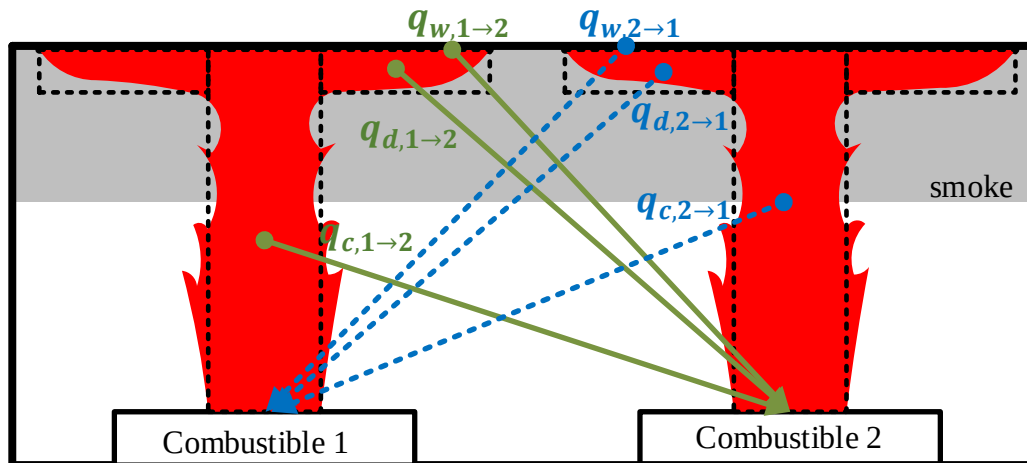


図 5.1 相互予熱効果を受ける固体可燃物の燃焼

5.2.1 隣の火炎からの放射熱

展炎部から q_d 、火炎が接する天井部から q_w 、周壁および煙層からの放射熱 q_s および火炎からの間接放射 $q_{f,re}$ の計算方法については第2章で詳述したため、本節では隣の火炎からの放射熱の計算方法のみを記述する。

5.2.1.1 円筒部の放射率

(1)可燃物が中央に設置された場合

可燃物が中央に設置された場合、可燃物が壁面から十分に離れているため、火炎高さは自由空間の火炎高さをを用いる。火炎高さに基づき、火炎の放射率は以下の式で算出される。以下の式において、添え字 i は各可燃物を識別する番号を表す。

$$\varepsilon_{c,i} = \frac{\chi_i Q_i}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}} \quad (5.2.1)$$

ただし、 Q_i は火源 i の発熱速度[kW]、 $E_{cc}(= 80.5\text{kW/m}^2)$ 、 $E_{ci}(= 51.2\text{kW/m}^2)$ は火炎円筒部の連続火炎領域、間欠火炎領域の放射発散度である。 $A_{cc,free,i}$ 、 $A_{ci,free,i}$ は自由空間における火炎円筒部のうちの連続火炎領域、間欠火炎領域の表面積[m²]であり次式で計算する。

$$A_{cc,free,i} = \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2 + \pi D_{f,i} L_{c,free,i} \quad (5.2.2)$$

$$A_{ci,free,i} = \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2 + \pi D_{f,i} (L_{m,free,i} - L_{c,free,i}) \quad (5.2.3)$$

ただし、 $D_{f,i}$ は火炎 i の燃焼直径[m]である。 $L_{m,free,i}$ 、 $L_{c,free,i}$ は自由空間における火炎 i の平均火炎高さ、連続火炎火炎高さ[m]で、次式で計算する。

$$L_{m,free,i} = 3.4 Q_{D,i}^{*n} D_{f,i} \quad (5.2.4)$$

$$L_{c,free,i} = 1.8 Q_{D,i}^{*n} D_{f,i} \quad (5.2.5)$$

ただし、

$$Q_{D,i}^{*} = \frac{Q_i}{c_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} D_{f,i}^{5/2}} \quad (5.2.6)$$

$$n = \begin{cases} 2/3 & (Q^{*} < 1) \\ 2/5 & (1 < Q^{*}) \end{cases} \quad (5.2.7)$$

である。

(2)可燃物が壁際に設置された場合

可燃物が壁際に設置された場合、火炎高さは壁際における火炎高さとして式(4.2.1)および(4.2.2)を用いる。火炎高さに基づき、火炎の放射率は以下の式で算出される。

$$\varepsilon_{c,i} = \frac{\chi_i Q_i}{A_{cc,wall,i} E_{cc} + A_{ci,wall,i} E_{ci}} \quad (5.2.8)$$

ただし、 Q_i は火炎 i の発熱速度[kW]、 $E_{cc}(= 80.5\text{kW/m}^2)$ 、 $E_{ci}(= 51.2\text{kW/m}^2)$ は火炎円筒部の連続火炎領域、間欠火炎領域の放射発散度である。 $A_{cc,wall,i}$ 、 $A_{ci,wall,i}$ は壁際における火炎円筒部のうちの連続火炎領域、間欠火炎領域の表面積[m²]であり次式で計算する。

$$A_{cc,wall,i} = 2\pi r_{f,i} \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,i}}{2\pi} \times L_{c,wall,i} + \pi r_{f,i}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,i}}{2\pi} + \frac{r_{f,i}^2 \sin\theta_{c,i} \cos\theta_{c,i}}{2} \times 2 \quad (5.2.9)$$

$$A_{ci,wall,i} = 2\pi r_{f,i} \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,i}}{2\pi} \times (L_{m,wall,i} - L_{c,wall,i}) + \pi r_{f,i}^2 \times \frac{2\pi - 2\theta_{c,i}}{2\pi} + \frac{r_{f,i}^2 \sin\theta_{c,i} \cos\theta_{c,i}}{2} \times 2 \quad (5.2.10)$$

ただし、 $D_{f,i}$ は火炎 i の燃焼直径[m]、 $\theta_{c,i}$ は第 4.3.2.2 節において設定された火炎と壁が接する角度(=60°)である。 $L_{m,wall,i}$ 、 $L_{c,wall,i}$ は壁際における火炎 i の平均火炎高さ、連続火炎

火炎高さ[m]であり、次式で計算する。

$$L_{m,wall,i} = 3.5Q_{D,i}^{*2/5}D_{f,i} \quad (5.2.11)$$

$$L_{c,wall,i} = 2.2Q_{D,i}^{*2/5}D_{f,i} \quad (5.2.12)$$

ただし、

$$Q_{D,i}^* = \frac{Q_i}{c_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} D_{f,i}^{5/2}} \quad (5.2.13)$$

である。

5.2.1.2 隣の火炎からの形態係数

図 5.2 に示すように、燃焼面から隣の円筒部を見た時の形態係数は微小要素から円筒を見た時の形態係数の計算式^[3]を用いる。形態係数は次式で計算する。計算式は複雑であるため、本研究では形態係数を関数で表す。

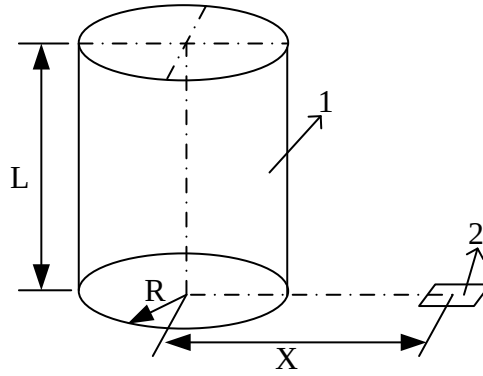


図 5.2 燃焼面から隣の円筒部を見た時の形態係数

$$f_{cyl-h}(l, x) = \frac{1}{\pi} \left[\tan^{-1} \sqrt{\frac{x+1}{x-1}} - \frac{l^2 + x^2 - 1}{\sqrt{l^2 + (x+1)^2} \sqrt{l^2 + (x-1)^2}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{x+1}{x-1}} \sqrt{\frac{l^2 + (x+1)^2}{l^2 + (x-1)^2}} \right) \right] \quad (5.2.14)$$

ただし、

$$l = \frac{L}{R} \quad (5.2.15)$$

$$x = \frac{X}{R} \quad (5.2.16)$$

である。

図 5.3 に示すように、燃焼面から隣の火炎が接する天井部を見た時の形態係数は微小要素から円形を見た時の形態係数の計算式^[3]を用いる。形態係数は次式で計算する。

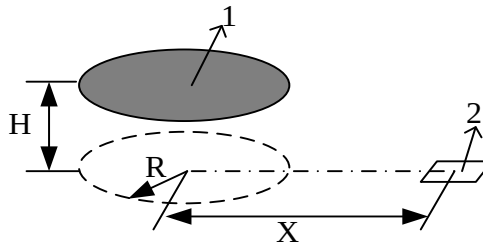


図 5.3 燃焼面から隣の火炎が接する天井部を見た時の形態係数

$$f_{cir-h}(h, x) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h^2 + x^2 - 1}{\sqrt{(h^2 + x^2 + 1)^2 - 4x^2}} \right) \quad (5.2.17)$$

ただし、

$$h = \frac{H}{R} \quad (5.2.18)$$

$$x = \frac{X}{R} \quad (5.2.19)$$

である。

5.2.1.3 各火炎形状における隣の火炎からの放射熱

第2章では、火炎高さおよび展炎半径に基づき、火炎形状を6種類に分類した。本章では、2つの可燃物は寸法・材質が同一であり、かつ同時に着火するものと仮定しているため、両火炎は形状において対称であるものとする。可燃物が同時に燃焼する場合においても、火炎形状は6種類に分類されることから、本節では、試験体が室中央に設置された場合、それぞれの火炎形状における隣の火炎からの放射熱の計算方法について詳述する。

試験体が壁際空間に設置された場合においても、同様の式で計算が可能であるが、火炎円筒部の放射率および火炎高さについては、式(5.2.8)および式(5.2.11)を用いて計算する必要がある。同様に、試験体が隅角部に設置された場合について理論上は同様に計算可能であるものの、二個の試験体が隅角部に設置された場合の実験データが不足しており、モデルの精度検証が困難である。したがって、本章では隅角部における計算手法の記述は行っていない。

(1) 火炎が天井に展炎しない場合 $L_{m,free,i} < H$

図 5.4 に火炎が天井に展炎しない場合の火炎形状を示す。この時、隣の火炎からの放射熱は円筒部からの放射熱のみである。計算方法を表 5.1 に示す。ただし、 H は天井高さ[m]、 X_f は二つの可燃物の中心点の距離[m]、 $F_{cc,1 \rightarrow 2}$ 、 $F_{ci,1 \rightarrow 2}$ は火炎 2 の燃焼面から火炎 1 の円筒部連続火炎領域、間欠火炎領域を見た時の形態係数[-]、 $F_{cc,2 \rightarrow 1}$ 、 $F_{ci,2 \rightarrow 1}$ は火炎 1 の燃焼面から火炎 2 の円筒部連続火炎領域、間欠火炎領域を見た時の形態係数[-]である。添字 1 と 2 は火炎の番号を表す。

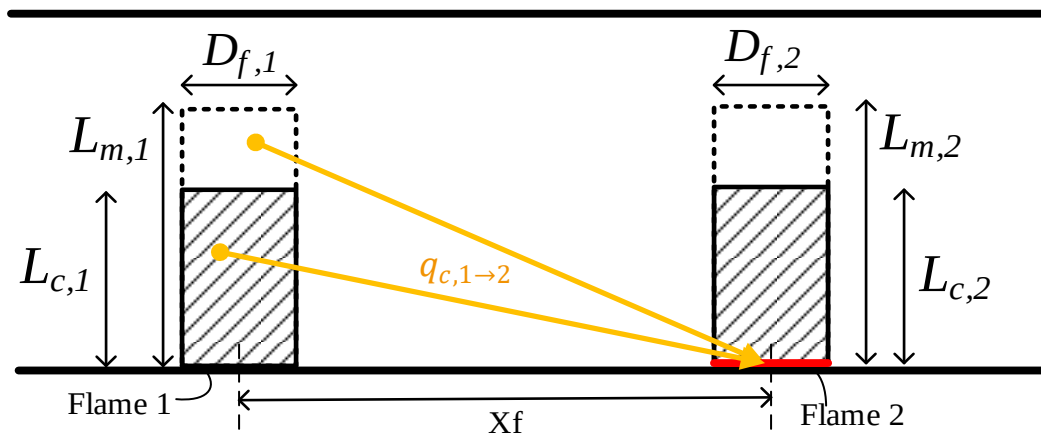


図 5.4 火炎が天井に展炎しない場合の火炎形状

表 5.1 火炎が天井に展炎しない場合の隣の火炎からの放射熱の計算式

計算項目	部位		火炎領域	計算式
火炎長さ			連続火炎領域	$L_{c,i} = L_{c,free,i}$
			間欠火炎領域	$L_{m,i} = L_{m,free,i}$
展炎半径	円盤部		連続火炎領域	$r_{c,i} = 0$
			間欠火炎領域	$r_{i,i} = 0$

放射率	円筒部		全て	$\varepsilon_{c,i} = \frac{\chi_i Q_i}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}}$
	円盤部		全て	$\varepsilon_{d,i} = 0$
形態係数	隣の円筒部から	1→2	連続火炎領域	$F_{cc,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2})$
			間欠火炎領域	$F_{ci,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{L_{m,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2}) - f_{cyl-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2})$ $+ f_{cir-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2})$
		2→1	連続火炎領域	$F_{cc,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$
			間欠火炎領域	$F_{ci,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{L_{m,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2}) - f_{cyl-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$ $+ f_{cir-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$
	隣の展炎部から	1→2	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	/
		2→1	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	/
	隣の火炎が接する天井部から	1→2	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	/
		2→1	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	/
隣の火炎からの放射熱	隣の円筒部から	1→2	全て	$q_{c,1 \rightarrow 2} = \varepsilon_{c,1} E_{cc} F_{cc,1 \rightarrow 2} + \varepsilon_{c,1} E_{ci} F_{ci,1 \rightarrow 2}$
		2→1	全て	$q_{c,2 \rightarrow 1} = \varepsilon_{c,2} E_{cc} F_{cc,2 \rightarrow 1} + \varepsilon_{c,2} E_{ci} F_{ci,2 \rightarrow 1}$

	隣の展炎部から	1→2	全て	$q_{d,1\rightarrow2} = 0$
		2→1	全て	$q_{d,2\rightarrow1} = 0$
	隣の火炎が接する天井部から	1→2	全て	$q_{w,1\rightarrow2} = 0$
		2→1	全て	$q_{w,2\rightarrow1} = 0$

(2)間欠火炎が展炎する場合 $L_{c,free,i} < H < L_{m,free,i}$

(2-1)円盤部が円筒部に含まれる場合 $r_{i,i} < \frac{D_{f,i}}{2}$

図 5.5 に間欠火炎が展炎し、円盤部が円筒部に含まれる場合の火炎形状を示す。この時、隣の火炎からの放射熱は円筒部からの放射熱と火炎が接する天井部からの放射熱で構成される。計算方法を表 5.2 に示す。

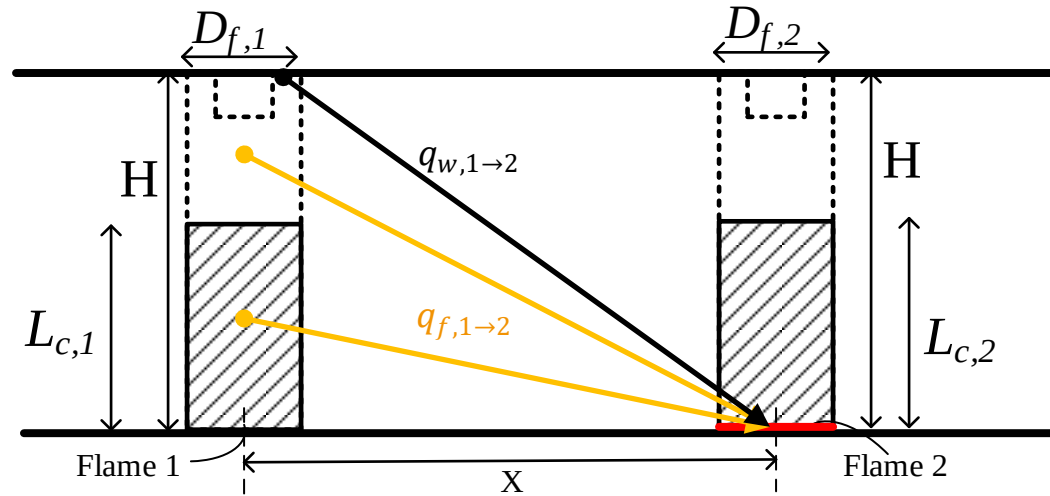


図 5.5 間欠火炎が展炎する場合の火炎形状

表 5.2 間欠火炎が展炎する場合の隣の火炎からの放射熱の計算式

計算項目	部位		火炎領域	計算式
火炎長さ			連続火炎領域	$L_{c,i} = L_{c,free,i}$
			間欠火炎領域	$L_{m,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2} + H$
展炎半径	円盤部		連続火炎領域	$r_{c,i} = 0$
			間欠火炎領域	$r_{i,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2}$
放射率	円筒部		全て	$\varepsilon_{c,i} = \frac{\chi_i Q_i}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}}$
	円盤部		全て	$\varepsilon_{d,i} = 0$
形態係数	隣の円筒部から	1→2	連続火炎領域	$F_{cc,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2})$
			間欠火炎領域	$F_{ci,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}) - f_{cyl-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2})$ $+ f_{cir-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2})$
		2→1	連続火炎領域	$F_{cc,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$
			間欠火炎領域	$F_{ci,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}) - f_{cyl-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2})$ $+ f_{cir-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2})$
	隣の展炎部から	1→2	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	/

			間欠火炎領域	/
		2→1	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	/
	隣の火炎が接する天井部から	1→2	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	$F_{w,ci,1\rightarrow2} = f_{cir-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2})$
		2→1	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	$F_{w,ci,2\rightarrow1} = f_{cir-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2})$
隣の火炎からの放射熱	隣の円筒部から	1→2	全て	$q_{c,1\rightarrow2} = \varepsilon_{c,1}E_{cc}F_{cc,1\rightarrow2} + \varepsilon_{c,1}E_{ci}F_{ci,1\rightarrow2}$
		2→1	全て	$q_{c,2\rightarrow1} = \varepsilon_{c,2}E_{cc}F_{cc,2\rightarrow1} + \varepsilon_{c,2}E_{ci}F_{ci,2\rightarrow1}$
	隣の展炎部から	1→2	全て	$q_{d,1\rightarrow2} = 0$
		2→1	全て	$q_{d,2\rightarrow1} = 0$
	隣の火炎が接する天井部から	1→2	全て	$q_{w,1\rightarrow2} = (1 - \varepsilon_{c,1})\varepsilon_w\sigma T_{w,ci}^4 F_{w,ci,1\rightarrow2}$
		2→1	全て	$q_{w,2\rightarrow1} = (1 - \varepsilon_{c,2})\varepsilon_w\sigma T_{w,ci}^4 F_{w,ci,2\rightarrow1}$

(2-2)円盤部が展炎する場合 $\frac{D}{2} < r_i$

図 5.6 に間欠火炎が展炎する場合の火炎形状を示す。この時、隣の火炎からの放射熱は円筒部からの放射熱、展炎部からの放射熱と火炎が接する天井部からの放射熱で構成される。計算方法を表 5.3 に示す。

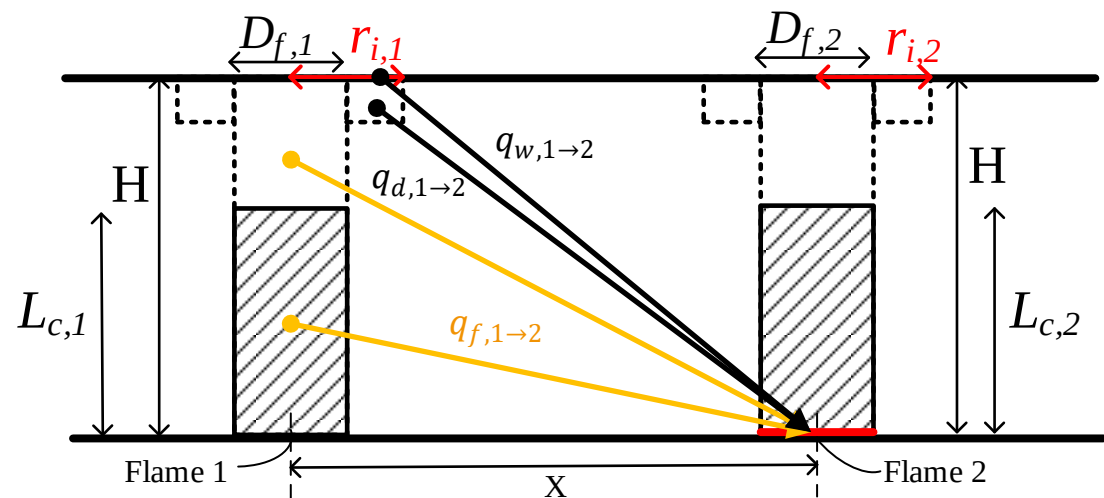


図 5.6 間欠火炎が展炎する場合の火炎形状

表 5.3 間欠火炎が展炎する場合の隣の火炎からの放射熱の計算式

計算項目	部位		火炎領域	計算式
火炎長さ			連続火炎領域	$L_{c,i} = L_{c,free,i}$
			間欠火炎領域	$L_{m,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2} + H$
展炎半径	円盤部		連続火炎領域	$r_{c,i} = 0$
			間欠火炎領域	$r_{i,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2}$
放射率	円筒部		全て	$\varepsilon_{c,i} = \frac{\chi_i Q_i}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}}$

	円盤部		全て	$\varepsilon_{d,i} = \frac{1 - \frac{A_{cc,i}E_{cc} + A_{ci,i}E_{ci}}{A_{cc,free,i}E_{cc} + A_{ci,free,i}E_{ci}}}{A_{dc,i}E_{dc} + A_{di,i}E_{di}} \cdot \chi_i Q_i$ 円筒部連続火炎領域表面積 $A_{cc,i} = \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2 + \pi D_f L_{c,i}$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{ci,i} = \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2 + \pi D_f (0.9H - L_{c,i})$ 円盤部連続火炎領域表面積 $A_{dc,i} = 0$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{di,i} = 2(\pi r_{i,i}^2 - \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2) + 2\pi r_{i,i} (0.1H)$
形態係数	隣の円筒部から	1→2	連続火炎領域	$F_{cc,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2})$
			間欠火炎領域	$F_{ci,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}) - f_{cyl-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2})$ $+ f_{cir-h}(\frac{L_{c,1}}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2})$
		2→1	連続火炎領域	$F_{cc,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$
			間欠火炎領域	$F_{ci,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}) - f_{cyl-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2})$ $+ f_{cir-h}(\frac{L_{c,2}}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2})$
	隣の展炎部から	1→2	連続火炎領域	/

			間欠火炎領域	$F_{di,1\rightarrow 2} = f_{cyl-h}\left(\frac{H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right) - \left[f_{cyl-h}\left(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}\right) \right] + \left[f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right) - f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}\right) \right]$
		2→1	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	$F_{di,2\rightarrow 1} = f_{cyl-h}\left(\frac{H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right) - \left[f_{cyl-h}\left(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}\right) \right] + \left[f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right) - f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}\right) \right]$
		隣の火炎が接する天井部から	1→2	連続火炎領域
	間欠火炎領域			$F_{w,ci,1\rightarrow 2} = f_{cir-h}\left(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}\right)$ $F_{w,di,1\rightarrow 2} = f_{cir-h}\left(\frac{H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right) - f_{cir-h}\left(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}\right)$
	2→1		連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	$F_{w,ci,2\rightarrow 1} = f_{cir-h}\left(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}\right)$ $F_{w,di,2\rightarrow 1} = f_{cir-h}\left(\frac{H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right) - f_{cir-h}\left(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}\right)$
	隣の円筒部から	1→2	全て	$q_{c,1\rightarrow 2} = \varepsilon_{c,1}E_{cc}F_{cc,1\rightarrow 2} + \varepsilon_{c,1}E_{ci}F_{ci,1\rightarrow 2}$

隣の火炎からの放射熱		2→1	全て	$q_{c,2→1} = \varepsilon_{c,2}E_{cc}F_{cc,2→1} + \varepsilon_{c,2}E_{ci}F_{ci,2→1}$
	隣の展炎部から	1→2	間欠火炎領域	$q_{d,1→2} = [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,1})]\varepsilon_{d,1}E_{di}F_{di,1→2}$ *右の半分が火炎1の円筒部を透過しない、左の半分が透過する。
		2→1	間欠火炎領域	$q_{d,2→1} = [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,2})]\varepsilon_{d,2}E_{di}F_{di,2→1}$
	隣の火炎が接する天井部から	1→2	全て	$q_{w,1→2} = (1 - \varepsilon_{c,1})\varepsilon_w\sigma T_{w,ci}^4 F_{w,ci}$ $+ [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,1})](1 - \varepsilon_{d,1})\varepsilon_w\sigma T_{w,di}^4 F_{w,di,1→2}$
		2→1	全て	$q_{w,2→1} = (1 - \varepsilon_{c,2})\varepsilon_w\sigma T_{w,ci}^4 F_{w,ci}$ $+ [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,1})](1 - \varepsilon_{d,1})\varepsilon_w\sigma T_{w,di}^4 F_{w,di,1→2}$

(3)連続火炎が展炎する場合 $H < L_{c,free}$

(3-1)円盤部が円筒部に含まれる場合 $r_i < \frac{D}{2}$

図 5.7 に連続火炎が展炎し、円盤部が円筒部に含まれる場合の火炎形状を示す。この時、隣の火炎からの放射熱は円筒部からの放射熱と火炎が接する天井部からの放射熱で構成される。計算方法を表 5.4 に示す。

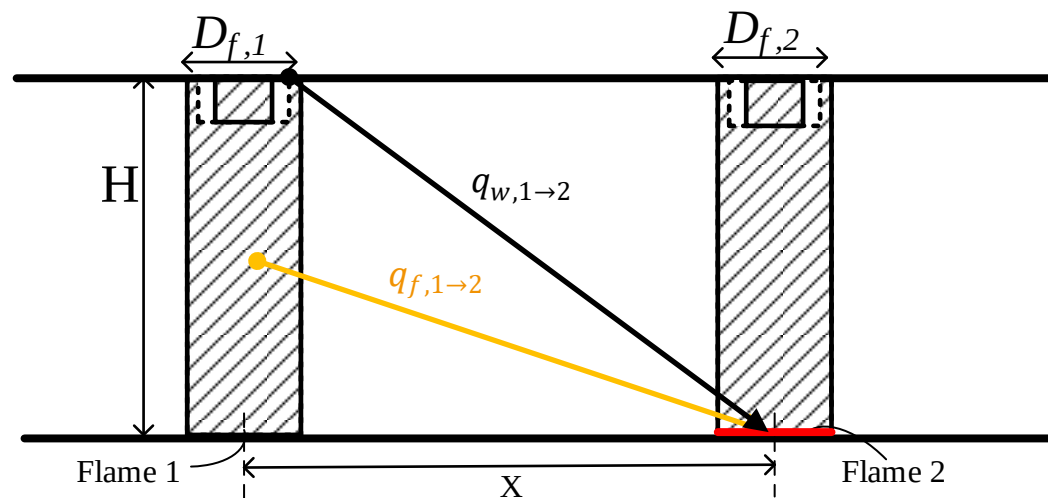


図 5.7 連続火炎が展炎する場合の火炎形状(円盤部が円筒部に含まれる場合)

表 5.4 連続火炎が展炎する場合の隣の火炎からの放射熱(円盤部が円筒部に含まれる場合)の計算式

計算項目	部位		火炎領域	計算式
火炎長さ			連続火炎領域	$L_{c,i} = \frac{(L_{c,free,i} - H)}{2} + H$
			間欠火炎領域	$L_{m,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2} + H$
展炎半径	円盤部		連続火炎領域	$r_{c,i} = \frac{(L_{c,free,i} - H)}{2}$
			間欠火炎領域	$r_{i,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2}$
放射率	円筒部		全て	$\varepsilon_{c,i} = \frac{\chi_i Q_i}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}}$

	円盤部		全て	$\varepsilon_{d,i} = 0$
形態係数	隣の円筒部から	1→2	連続火炎領域	$F_{cc,1\rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2})$
			間欠火炎領域	/
		2→1	連続火炎領域	$F_{cc,2\rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$
			間欠火炎領域	/
	隣の展炎部から	1→2	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	/
		2→1	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	/
	隣の火炎が接する天井部から	1→2	連続火炎領域	$F_{w,cc,1\rightarrow 2} = f_{cir-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2})$
			間欠火炎領域	/
		2→1	連続火炎領域	$F_{w,cc,2\rightarrow 1} = f_{cir-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$
			間欠火炎領域	/
隣の火炎からの放射熱	隣の円筒部から	1→2	連続火炎領域	$q_{c,1\rightarrow 2} = \varepsilon_{c,1} E_{cc} F_{cc,1\rightarrow 2}$
		2→1	連続火炎領域	$q_{c,2\rightarrow 1} = \varepsilon_{c,2} E_{cc} F_{cc,2\rightarrow 1}$
	隣の展炎部から	1→2	全て	$q_{d,1\rightarrow 2} = 0$
		2→1	全て	$q_{d,2\rightarrow 1} = 0$
		1→2	連続火炎領域	$q_{w,1\rightarrow 2} = (1 - \varepsilon_{c,1}) \varepsilon_w \sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc,1\rightarrow 2}$

	隣の火炎が接する天井部から	2→1	連続火炎領域	$q_{w,2 \rightarrow 1} = (1 - \varepsilon_{c,2}) \varepsilon_w \sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc,2 \rightarrow 1}$
--	---------------	-----	--------	--

(3-2)円盤部連続火炎領域が円筒部に含まれる場合 $r_c < \frac{D}{2} < r_i$

図 5.8 に連続火炎が展炎し、円盤部連続火炎領域が円筒部に含まれる場合の火炎形状を示す。この時、隣の火炎からの放射熱は円筒部からの放射熱、展炎部からの放射熱と火炎が接する天井部からの放射熱で構成される。計算方法を表 5.5 に示す。

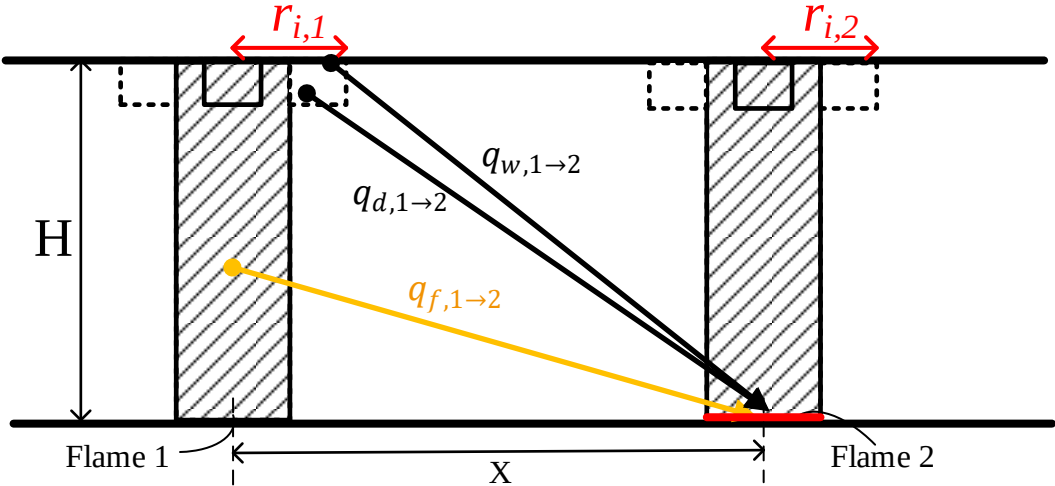


図 5.8 連続火炎が展炎する場合の火炎形状（円盤部連続火炎領域が円筒部に含まれる場合）

表 5.5 連続火炎が展炎する場合の隣の火炎からの放射熱（円盤部連続火炎領域が円筒部に含まれる場合）の計算式

計算項目	部位	火炎領域	計算式
火炎長さ		連続火炎領域	$L_{c,i} = \frac{(L_{c,free,i} - H)}{2} + H$

			間欠火炎領域	$L_{m,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2} + H$
展炎半径	円盤部		連続火炎領域	$r_{c,i} = \frac{(L_{c,free,i} - H)}{2}$
			間欠火炎領域	$r_{i,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2}$
放射率	円筒部		全て	$\varepsilon_{c,i} = \frac{\chi_i Q_i}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}}$
	円盤部		全て	$\varepsilon_{d,i} = \frac{1 - \frac{A_{cc,i} E_{cc} + A_{ci,i} E_{ci}}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}}}{A_{dc,i} E_{dc} + A_{di,i} E_{di}} \cdot \chi_i Q_i$ 円筒部連続火炎領域表面積 $A_{cc,i} = 2 \times \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2 + \pi D_f 0.9H$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{ci,i} = 0$ 円盤部連続火炎領域表面積 $A_{dc,i} = 0$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{di,i} = 2(\pi r_{i,i}^2 - \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2) + 2\pi r_i (0.1H)$
形態係数	隣の円筒部から	1→2	連続火炎領域	$F_{cc,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2})$
			間欠火炎領域	/
		2→1	連続火炎領域	$F_{cc,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$
			間欠火炎領域	/
	隣の展炎部から	1→2	連続火炎領域	/

			間欠火炎領域	$F_{di,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}) - f_{cyl-h}(\frac{0.9H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}) - \left[f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}) - f_{cyl-h}(\frac{0.9H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}) \right] + \left[f_{cir-h}(\frac{0.9H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}) - f_{cir-h}(\frac{0.9H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}) \right]$
		2→1	連続火炎領域	/
			間欠火炎領域	$F_{di,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}) - f_{cyl-h}(\frac{0.9H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}) - \left[f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}) - f_{cyl-h}(\frac{0.9H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}) \right] + \left[f_{cir-h}(\frac{0.9H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}) - f_{cir-h}(\frac{0.9H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}) \right]$
	隣の火炎が接する天井部から	1→2	連続火炎領域	$F_{w,c,1 \rightarrow 2} = f_{cir-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2})$
			間欠火炎領域	$F_{w,i,1 \rightarrow 2} = f_{cir-h}(\frac{H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}) - f_{cir-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2})$
		2→1	連続火炎領域	$F_{w,c,2 \rightarrow 1} = f_{cir-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2})$
			間欠火炎領域	$F_{w,i,2 \rightarrow 1} = f_{cir-h}(\frac{H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}) - f_{cir-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2})$
隣の火炎からの放射熱	隣の円筒部から	1→2	全て	$q_{c,1 \rightarrow 2} = \varepsilon_{c,1} E_{cc} F_{cc,1 \rightarrow 2}$
		2→1	全て	$q_{c,2 \rightarrow 1} = \varepsilon_{c,2} E_{cc} F_{cc,2 \rightarrow 1}$
	隣の展炎部から	1→2	全て	$q_{d,1 \rightarrow 2} = [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,1})] \varepsilon_{d,1} E_{di} F_{di,1 \rightarrow 2}$

	隣の火炎が接する天井部から	2→1	全て	$q_{d,2 \rightarrow 1} = [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,2})]\varepsilon_{d,2}E_{di}F_{di,1 \rightarrow 2}$
		1→2	全て	$q_{w,1 \rightarrow 2} = (1 - \varepsilon_{c,1})(1 - \varepsilon_{d,1})\varepsilon_w\sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc,1 \rightarrow 2} + [0.5$ $+ 0.5(1 - \varepsilon_{c,1})](1 - \varepsilon_{d,1})\varepsilon_w\sigma T_{w,di}^4 F_{w,di,1 \rightarrow 2}$
		2→1	全て	$q_{w,2 \rightarrow 1} = (1 - \varepsilon_{c,2})(1 - \varepsilon_{d,2})\varepsilon_w\sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc,2 \rightarrow 1} + [0.5$ $+ 0.5(1 - \varepsilon_{c,2})](1 - \varepsilon_{d,2})\varepsilon_w\sigma T_{w,di}^4 F_{w,di,2 \rightarrow 1}$

(3-3)円盤部連続火炎が展炎する場合 $\frac{D}{2} < r_c$

図 5.9 に連続火炎が展炎する場合の火炎形状を示す。この時、隣の火炎からの放射熱は円筒部からの放射熱、展炎部からの放射熱と火炎が接する天井部からの放射熱で構成される。計算方法を表 5.6 に示す。

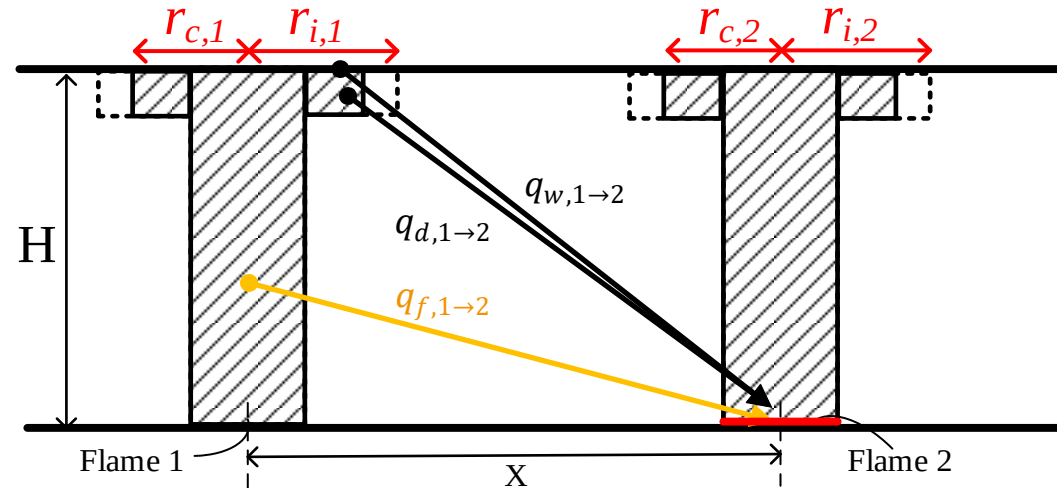


図 5.9 連続火炎が展炎する場合の火炎形状

表 5.6 連続火炎が展炎する場合の隣の火炎からの放射熱の計算式

計算項目	部位		火炎領域	計算式
火炎長さ			連続火炎領域	$L_{c,i} = \frac{(L_{c,free,i} - H)}{2} + H$
			間欠火炎領域	$L_{m,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2} + H$
展炎半径	円盤部		連続火炎領域	$r_{c,i} = \frac{(L_{c,free,i} - H)}{2}$
			間欠火炎領域	$r_{i,i} = \frac{(L_{m,free,i} - H)}{2}$
放射率	円筒部		全て	$\varepsilon_{c,i} = \frac{\chi_i Q_i}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}}$
	円盤部		全て	$\varepsilon_{d,i} = \frac{1 - \frac{A_{cc,i} E_{cc} + A_{ci,i} E_{ci}}{A_{cc,free,i} E_{cc} + A_{ci,free,i} E_{ci}}}{A_{dc,i} E_{dc} + A_{di,i} E_{di}} \cdot \chi_i Q_i$ 円筒部連続火炎領域表面積 $A_{cc,i} = 2 \cdot \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2 + \pi D_f 0.9H$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{ci,i} = 0$ 円盤部連続火炎領域表面積 $A_{dc,i} = 2(\pi r_{c,i}^2 - \frac{\pi}{4} D_{f,i}^2)$ 円盤部間欠火炎領域表面積 $A_{di,i} = 2(\pi r_{i,i}^2 - \pi r_{c,i}^2) + 2\pi r_{i,i}(0.1H)$
形態係数	隣の円筒部から	1→2	連続火炎領域	$F_{cc,1 \rightarrow 2} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X_f}{D_{f,1}/2})$
			間欠火炎領域	/
		2→1	連続火炎領域	$F_{cc,2 \rightarrow 1} = f_{cyl-h}(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X_f}{D_{f,2}/2})$

			間欠火炎領域	/
隣の展炎部から	1→2	連続火炎領域	連続火炎領域	$F_{dc,1\rightarrow 2} = f_{cyl-h}\left(\frac{H}{r_{c,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{r_{c,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right)$ $- \left[f_{cyl-h}\left(\frac{H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}\right) \right]$ $+ \left[f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{r_{c,1}}, \frac{X}{r_{c,1}}\right) - f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{D_{f,1}/2}, \frac{X}{D_{f,1}/2}\right) \right]$
				$F_{di,1\rightarrow 2} = f_{cyl-h}\left(\frac{H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right)$ $- \left[f_{cyl-h}\left(\frac{H}{r_{c,1}}, \frac{X}{r_{c,1}}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{r_{c,1}}, \frac{X}{r_{c,1}}\right) \right]$ $+ \left[f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}\right) - f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{r_{c,1}}, \frac{X}{r_{c,1}}\right) \right]$
		連続火炎領域	連続火炎領域	$F_{dc,2\rightarrow 1} = f_{cyl-h}\left(\frac{H}{r_{c,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{r_{c,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right)$ $- \left[f_{cyl-h}\left(\frac{H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}\right) \right]$ $+ \left[f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{r_{c,2}}, \frac{X}{r_{c,2}}\right) - f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{D_{f,2}/2}, \frac{X}{D_{f,2}/2}\right) \right]$
				$F_{di,2\rightarrow 1} = f_{cyl-h}\left(\frac{H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right)$ $- \left[f_{cyl-h}\left(\frac{H}{r_{c,2}}, \frac{X}{r_{c,2}}\right) - f_{cyl-h}\left(\frac{0.9H}{r_{c,2}}, \frac{X}{r_{c,2}}\right) \right]$ $+ \left[f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}\right) - f_{cir-h}\left(\frac{0.9H}{r_{c,2}}, \frac{X}{r_{c,2}}\right) \right]$

	隣の火炎が接する天井部から	1→2	連続火炎領域	$F_{w,cc,1\rightarrow2} = f_{cir-h}(\frac{H}{r_{c,1}}, \frac{X}{r_{c,1}})$
			間欠火炎領域	$F_{w,di,1\rightarrow2} = f_{cir-h}(\frac{H}{r_{i,1}}, \frac{X}{r_{i,1}}) - f_{cir-h}(\frac{H}{r_{c,1}}, \frac{X}{r_{c,1}})$
		2→1	連続火炎領域	$F_{w,cc,2\rightarrow1} = f_{cir-h}(\frac{H}{r_{c,2}}, \frac{X}{r_{c,2}})$
			間欠火炎領域	$F_{w,i,2\rightarrow1} = f_{cir-h}(\frac{H}{r_{i,2}}, \frac{X}{r_{i,2}}) - f_{cir-h}(\frac{H}{r_{c,2}}, \frac{X}{r_{c,2}})$
隣の火炎からの放射熱	隣の円筒部から	1→2	全て	$q_{c,1\rightarrow2} = \varepsilon_{c,1} E_{cc} F_{cc,1\rightarrow2}$
		2→1	全て	$q_{c,2\rightarrow1} = \varepsilon_{c,2} E_{cc} F_{cc,2\rightarrow1}$
	隣の展炎部から	1→2	全て	$q_{d,1\rightarrow2} = [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,1})] \varepsilon_{d,1} E_{di} F_{di,1\rightarrow2}$
		2→1	全て	$q_{d,2\rightarrow1} = [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,2})] \varepsilon_{d,2} E_{di} F_{di,1\rightarrow2}$
	隣の火炎が接する天井部から	1→2	全て	$q_{w,1\rightarrow2} = (1 - \varepsilon_{c,1})(1 - \varepsilon_{d,1}) \varepsilon_w \sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc,1\rightarrow2} + [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,1})] (1 - \varepsilon_{d,1}) \varepsilon_w \sigma T_{w,di}^4 F_{w,di,1\rightarrow2}$
		2→1	全て	$q_{w,2\rightarrow1} = (1 - \varepsilon_{c,2})(1 - \varepsilon_{d,2}) \varepsilon_w \sigma T_{w,cc}^4 F_{w,cc,2\rightarrow1} + [0.5 + 0.5(1 - \varepsilon_{c,2})] (1 - \varepsilon_{d,2}) \varepsilon_w \sigma T_{w,di}^4 F_{w,di,2\rightarrow1}$

5.2.2 同時燃焼を考慮した単位面積当たりの発熱速度と火炎伝播速度

5.2.2.1 相互予熱効果を考慮した単位面積当たりの発熱速度

図 5.10 に可燃物 2 の燃焼面に入射する内部放射と外部放射を示す。可燃物 2 の燃焼面に入射する内部放射 $q_{f,2}$ [kW/m²]は火炎 2 の円筒部からの放射熱である。可燃物 2 の燃焼面に入射する外部放射 $q_{inc,2}$ [kW/m²]は展炎部からの放射熱 $q_{d,2}$ 、火炎が接する天井部から放射熱 $q_{w,2}$ [kW/m²]、周壁および煙層からの放射熱および火炎からの間接放射 $q_{f,res}$ [kW/m²]、火炎 1 の円筒部からの放射熱 $q_{c,1\rightarrow2}$ [kW/m²]、火炎 1 の展炎部からの放射熱 $q_{d,1\rightarrow2}$ [kW/m²]、火炎 1 が接する天井部から放射熱 $q_{w,1\rightarrow2}$ [kW/m²]の和で与えられる：

$$q_{inc,2} = q_{d,2} + q_{w,2} + q_{f,res} + q_{c,1\rightarrow2} + q_{d,1\rightarrow2} + q_{w,1\rightarrow2} \quad (5.2.20)$$

同様に、可燃物 1 の燃焼面に入射する外部放射は次式で与えられる：

$$q_{inc,1} = q_{d,1} + q_{w,1} + q_{f,res} + q_{c,2\rightarrow1} + q_{d,2\rightarrow1} + q_{w,2\rightarrow1} \quad (5.2.21)$$

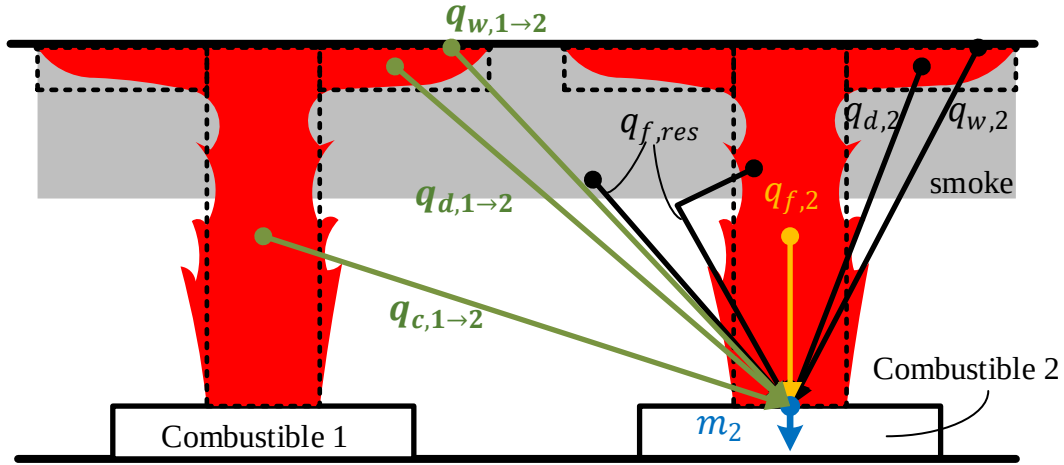


図 5.10 火炎 2 の燃焼面に入射する内部放射と外部放射

外部放射が燃焼面に到達するためには、火炎円筒部を透過する必要があることを考慮し、補正された可燃物 2 の単位面積当たりの発熱速度は次式で表される：

$$q_{0,2} = (q_{f,2} + \tau_{c,2}q_{inc,2}) \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (5.2.22)$$

可燃物 1 の単位面積当たりの発熱速度は次式で計算する。

$$q_{0,1} = (q_{f,1} + \tau_{c,1}q_{inc,1}) \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (5.2.23)$$

ただし、 $\tau_{c,i}$ は火炎円筒部の透過率であり、次式で計算する：

$$\tau_{c,i} = (1 - \varepsilon_{c,i}) \times f \quad (5.2.24)$$

ただし、 $\varepsilon_{c,i}$ は火炎円筒部の放射率であり、第 2.2.2.1 節の式(5.2.1)で計算する。また、 ε_c は火炎全体の平均放射率であるが、火炎基部では火炎粒子が濃く放射透過率が低いため、減衰係数 f を導入する。第 2 章と同様に、 f の数値を 0.8 とする。

5.2.2.2 相互予熱効果を考慮した火炎伝播速度

図 5.11 に可燃物 2 の予熱面に入射する内部放射と外部放射を示す。可燃物 2 の予熱面に入射する外部放射 $q_{inc,2}$ には隣の火炎からの放射熱 $q_{c,1\rightarrow2}$ 、 $q_{d,1\rightarrow2}$ 、 $q_{w,1\rightarrow2}$ を考慮した。図 5.11 に示すように、火炎基部付近では火炎粒子が濃いため、外部放射が火炎基部を透過して予熱面に到達することは困難である。例えば、可燃物 2 においては、外部放射は左側の予熱面には直接に到達できるが、右側の予熱面には火炎基部による遮蔽により到達しにくい。このため、理論的には左側の火炎伝播速度が右側よりも大きくなる傾向があると考えられる。本研究では計算の簡便化のため、左右の火炎伝播速度を等しいものと近似し、いわゆる燃焼面は常に正円形に広がるものとする。したがって、本研究では、予熱面に入射する外部放射において、火炎基部による遮蔽効果を考慮し、外部放射のうち予熱面に到達するのは全体の半分であると近似して計算を行う。

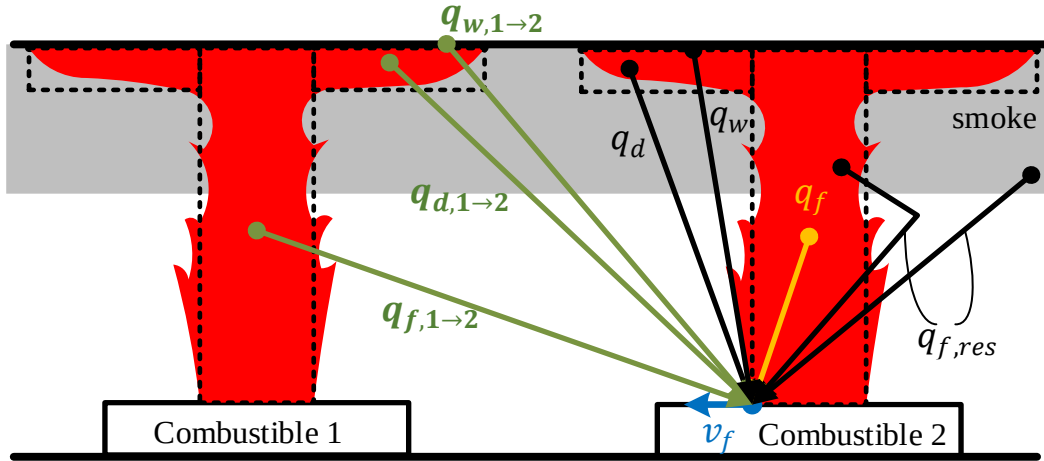


図 5.11 可燃物 2 の予熱面に入射する内部放射と外部放射

可燃物 2 の予熱面に入射する外部放射は次式で計算する。

$$q_{inc,l,2} = 0.5[0.3(q_{d,2} + q_{w,2}) + 0.7\tau_{c,2}(q_{d,2} + q_{w,2})] + 0.5(q_{f,res} + q_{f,1\rightarrow2} + q_{d,1\rightarrow2} + q_{w,1\rightarrow2}) \quad (5.2.25)$$

可燃物 1 の予熱面に入射する外部放射は次式で計算する。

$$q_{inc,l,1} = 0.5[0.3(q_{d,1} + q_{w,1}) + 0.7\tau_{c,2}(q_{d,1} + q_{w,1})] + 0.5(q_{f,res} + q_{f,2\rightarrow1} + q_{d,2\rightarrow1} + q_{w,2\rightarrow1}) \quad (5.2.26)$$

予熱面に入射する外部放射により火炎伝播速度が増加する。可燃物 2 の火炎伝播速度は次式で計算する。

$$v_{f,2} = \begin{cases} \left(\frac{0.5q_{f,2} + q_{inc,l,2}}{0.5q_{f,free,2}} \right)^2 v_{f,free} & D_{f,2} \leq W_{u,2} \\ 0.5 \left(\frac{0.5q_{f,2} + q_{inc,l,2}}{0.5q_{f,free,2}} \right)^2 v_{f,free} & D_{f,2} > W_{u,2} \end{cases} \quad (5.2.27)$$

可燃物 1 の火炎伝播速度は次式で計算する。

$$v_{f,1} = \begin{cases} \left(\frac{0.5q_{f,1} + q_{inc,l,1}}{0.5q_{f,free,1}} \right)^2 v_{f,free} & D_{f,1} \leq W_{u,1} \\ 0.5 \left(\frac{0.5q_{f,1} + q_{inc,l,1}}{0.5q_{f,free,1}} \right)^2 v_{f,free} & D_{f,1} > W_{u,1} \end{cases} \quad (5.2.28)$$

ただし、 $q_{f,free,1}$ は自由空間における火炎円筒部からの放射熱[kW/m²]、 $v_{f,free}$ は自由空間における水平方向火炎伝播速度[m/s]、 $D_{f,i}$ は燃焼直径[m]である。 W_u は試験体の上面における等価直径[m]次式で計算する。

$$W_{u,i} = \sqrt{4A_{top,i}/\pi} \quad (5.2.29)$$

ただし、 $A_{top,i}$ は試験体上面の面積[m²]である。本研究では、試験体上面は正方形であるため、 $W_{y,i}$ は試験体の幅[m]である。

5.2.3 同時燃焼における二層ゾーンモデルの修正

火炎からの間接放射と周壁および煙層からの放射熱 $q_{f,res}$ を求めるためには、煙層温度等が必要である。そのため、二層ゾーンモデル^[9]を用いて上部層および下部層の気体温度および壁面温度を求めた。図5に同時燃焼における二層ゾーンモデルの概要図を示す。上部層がブルームから対流により得る熱量は：

$$Q_f = (1 - \chi_1)Q_1 + (1 - \chi_2)Q_2 \quad (5.2.30)$$

ただし、 x_1 は火炎1の放射性分の割合[-]、 x_2 は火炎2の放射性分の割合[-]、 Q_1 は火炎1の発熱速度[kW]、 Q_2 は火炎2の発熱速度[kW]である。

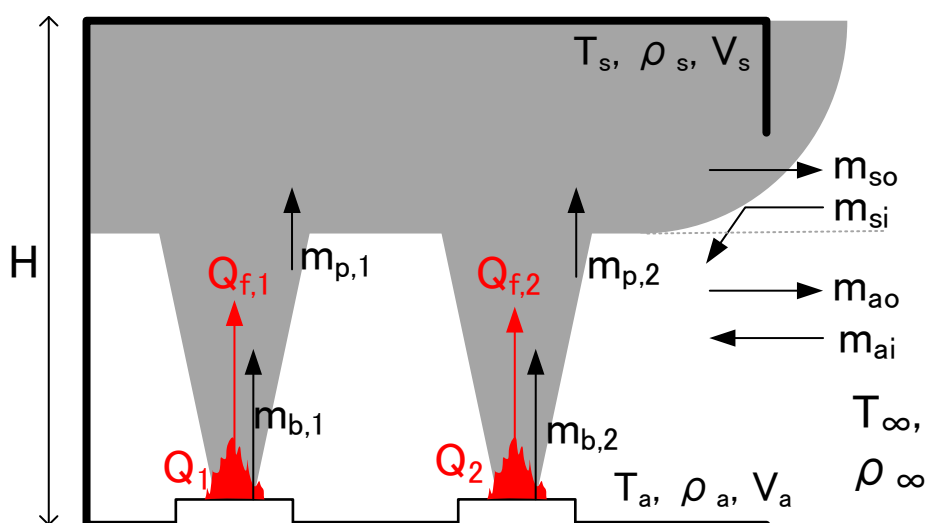


図 5.12 同時燃焼における二層ゾーンモデルの概要図

図 5.13 に火炎からの放射熱を示す。第 2 章と同様に、火炎からの対流熱は全部上部層に流入し、放射熱の 2 割が開口を通じて外部に損失し、残り 8 割が上部層または下部層に流入すると仮定する。火源は二つあるため、火炎から上部層と下部層に入射する放射熱は次式で表す：

$$Q_{frad,burner} = 0.8(\chi_1 Q_1 + \chi_2 Q_2) \quad (5.2.31)$$

また、本章では、試験体が室中央に設置されるため、二層ゾーンモデルに関する計算方法は第2章と同じである。一方、試験体が壁際に設置される場合、プルーム質量流量については

第 4.2.1.3 節に示した方法に基づいて算出する必要がある。

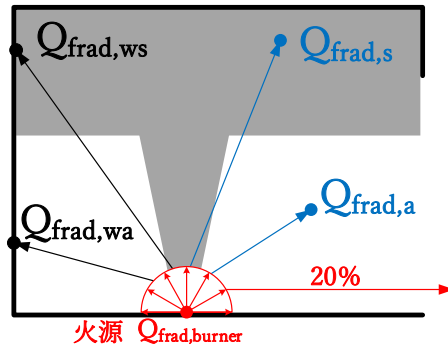


図 5.13 火炎からの放射熱

5.3 予測結果と実験結果の比較

5.3.1 実験概要（東京理科大学共同利用実験）

原田ら^[1,2]は区画内でのウレタンフォームブロックの燃焼実験を実施した。模型室の寸法は 2300(W)×3500(D)×2250(H)mm、周壁および天井はセラミックファイバーボードである。開口は一個で、幅は 850 mm である。試験体はウレタンフォーム、寸法は 500mm×500mm×500 mm、密度は 15.6kg/m³ である。

本章で扱う実験は、第 4 章で述べた実験と同一系列に属するものである。したがって、実験装置および実験方法は第 4 章と共通であり、詳細な内容については第 4.3.1 節に示したものと同一である。

5.3.1.1 測定項目

実験の測定項目を表 5.7 に示す。

表 5.7 実験の測定項目

測定項目	測定装置	測定位置
発熱速度	酸素消費法	/
試験体の燃焼性状	ビデオカメラ	模型室の四隅
上部層温度、下部層温度、上部層高さ	熱電対ツリー	手前と奥
上部層壁面温度	熱電対	H=1800mm
下部層壁面温度	熱電対	H=200mm
下部層壁面に入射する熱流	熱流束計 hfg1（試験体向き） 熱流束計 hfg2（上向き）	試験体から 1m

5.3.1.2 実験条件

実験条件を図 5.14 に示す。実験 Comp 5 と Comp 6 の開口高さは 2.1m、実験 Comp10 の開口高さは 0.5m である。すべての実験において、2 個の試験体の上面中心点に同時点火を行った。

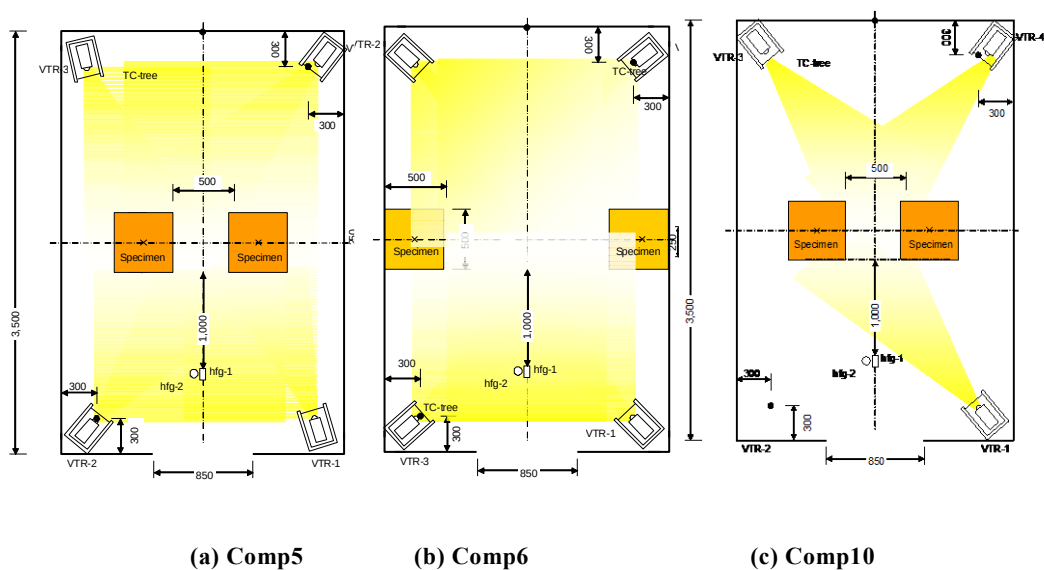


図 5.14 実験条件

5.3.2 計算条件の設定

本章では、上述の実験を参考して計算条件を設定した。計算条件を表 1 に示す。同時燃焼と単独燃焼の差異を検討するため、本章では、第 4 章で示した実験 Open 1、Comp 1 および Comp 3 との比較も併せて行った。

表 5.8 計算条件

実験 No.	開口高さ (m)	試験体の数量 (個)	試験体の位置
Open 1	/	1	自由空間
Comp 1	2.1	1	中央
Comp 3	2.1	1	壁際
Comp 5	2.1	2	中央
Comp 6	2.1	2	壁際
Comp 10	0.5	2	中央

5.3.3 予測結果と考察

5.3.3.1 実験 Comp 5

図 5.18 に実験 Comp 5 の計算値と実験値の比較を示す。

図 5.18(a)に実験 Open 1、Comp 1、Comp 5 の発熱速度の計算値と実験値を示す。Open 1 は一つの試験体が自由空間で燃焼する場合、Comp 1 は一つの試験体が燃焼する場合である。比較のため、図 5.18(a)の Open 1 と Comp 1 の計算値と実験値を 2 倍にした。実験 Comp 5 の発熱速度は室内における総発熱速度を表しており、二個の試験体の発熱速度の和として定義される。実験 Comp 5 における最大発熱速度の計算値は、実験値より小さい結果となった。これは、実験 Comp 1 における発熱速度が過小評価された場合と同様に、ウレタンの滴下現象が考慮されていないことが一因である可能性がある。Comp 5 においては試験体間の距離がより近いため、ウレタンの滴下現象

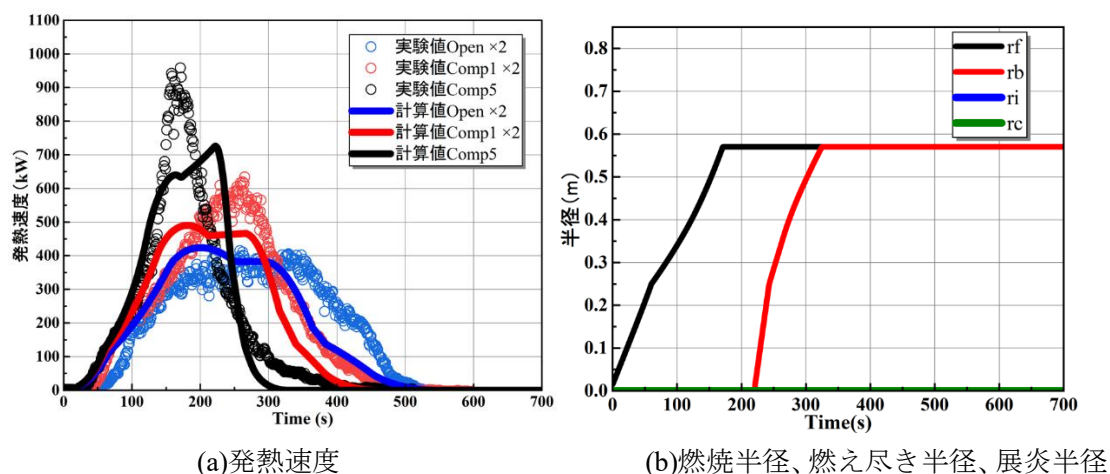
および相互予熱効果により燃焼面の拡大が促進され、実際の最大燃焼面積がより大きくなるべきである。しかし、本モデルでは試験体側面の最大燃焼高さを 0.20m に設定しているため、最大燃焼面積が制限されることとなった。図 5.19 の実験写真からも確認できるように、実際の試験体側面の最大燃焼高さは 0.20m を大きく上回っている。

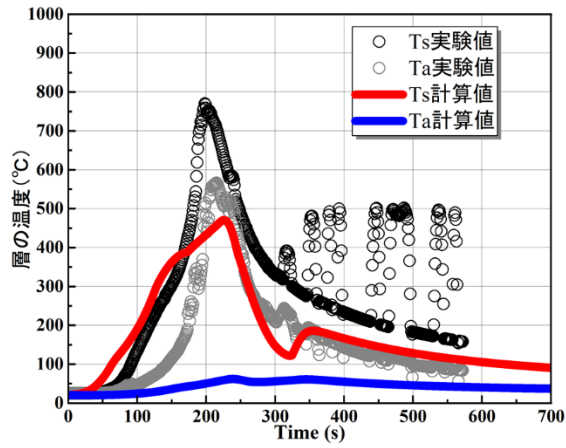
また、同時燃焼の最大発熱速度は単独燃焼の 2 倍よりも大きいことが確認された。これは試験体同士の相互予熱効果の影響が大きいと考えられる。更に、同時燃焼の場合、燃え尽きが実験より早いことが分かった。

図 5.18(b)に燃焼半径、展炎半径と燃え尽き半径の計算値を示す。2 つの試験体は寸法・材質ともに完全に一致しており、同一条件下で同時に着火されたことから、両火炎の形状は全く同一である。そのため、各火炎における燃焼半径 r_f 、燃え尽き半径 r_b および展炎半径も一致する。図 5.18(b)に示されている計算値は、一方の火炎に対する代表値である。 r_i 、 r_c は間欠火炎の展炎半径、連続火炎領域の展炎半径である。展炎半径が 0 であるため、火炎は展炎しない。約 210 秒で燃え尽きが始まり、約 310 秒で燃焼が終了する。火炎が展炎しないため、隣の火炎からの外部放射は円筒部からの放射熱のみである。

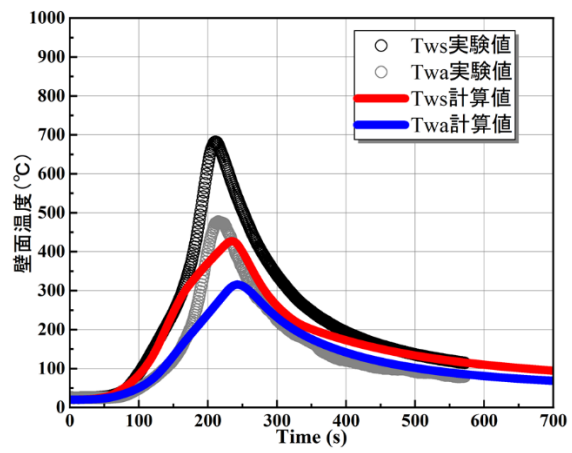
図 5.18(c)に上部層温度と下部層温度の計算値と実験値を示す。上部層温度が過小評価された原因は、主に発熱速度の過小評価に起因していると考えられる。一方、下部層温度の過小評価については、発熱速度に加えて空気層の放射率の影響も関与している。本研究では、下部層空気の放射率を 0 と設定しているため、下部層による放射熱の吸収は考慮されていない。

図 5.18(d)、(e)、(f)に実験 Comp5 の壁面温度、上部層高さ、下部層壁面に入射する熱流の計算値と実験値の比較を示す。煙層高さの実験値は N%法 (N=10%) を用いて求めた値である。燃焼後期においては煙層が不安定になるため、上部層と下部層の境界を明確に分別ことが困難であり、その結果として上部層高さの実験値に振動が見られる。上部層高さは実験値に近く、壁面温度と下部層壁面に入射する熱流は実験値より小さいことが分かった。熱流束の計算値と実験値との間に大きな差異が生じた要因としては、実験では熱流束計が火源の近傍に設置されているため、実験値には火炎からの直接放射が多く含まれているためであろう。

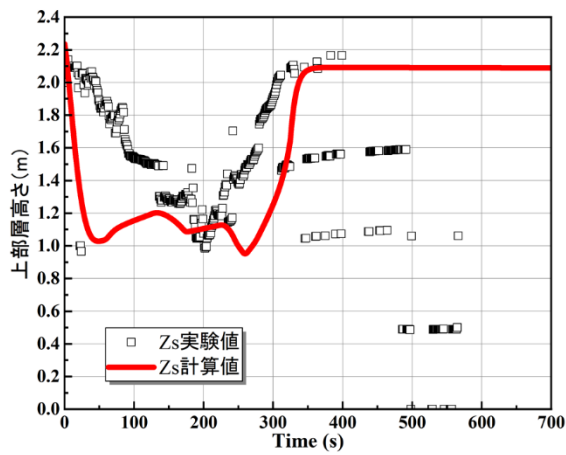




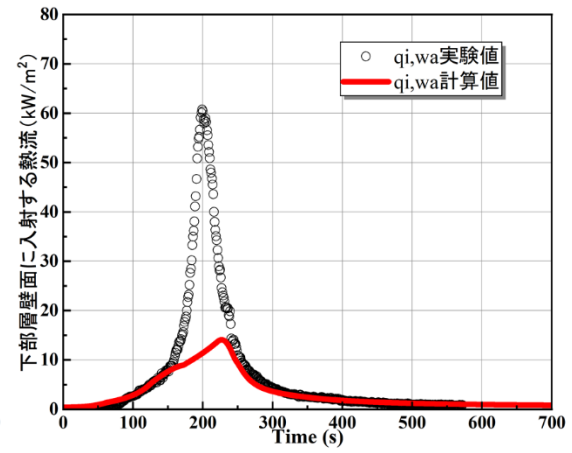
(c)層の温度



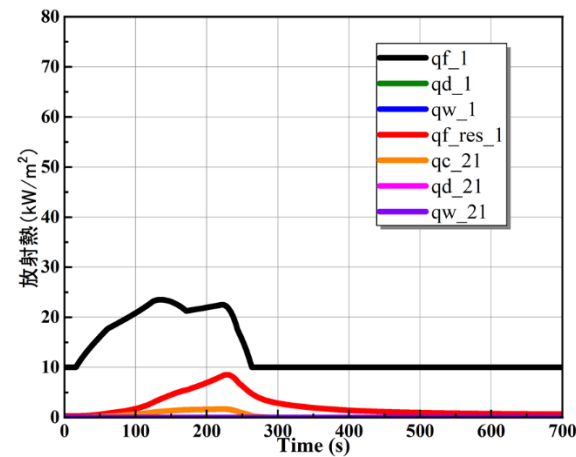
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 5.18 実験 Comp5 の計算値と実験値の比較



図 5.19 2 個の試験体が室中央で燃焼している様子（実験 Comp 5, 180 秒時点）

5.3.3.2 実験 Comp 6

図 5.20 に実験 Comp 6 の計算値と実験値の比較を示す。

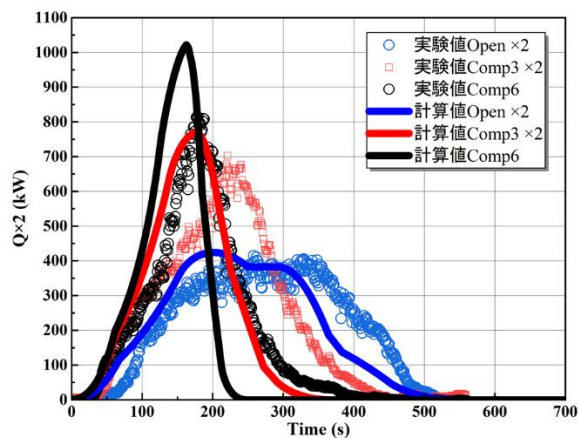
図 5.20(a)に実験 Open 1、Comp 3、Comp 6 の計算値と実験値を示す。比較のため、Open 1 と Comp 3 の計算値と実験値を 2 倍にした。Open 1 の最大発熱速度は実験値に近いが、Comp 3 と comp 6 の最大発熱速度は実験値よりも大きい。発熱速度の最大値に関しては、自由空間＜単独燃焼＜同時燃焼という傾向が再現された。また、単独燃焼時の最大発熱速度の 2 倍は約 700 kW であるのに対し、同時燃焼時の最大発熱速度は約 800 kW となり、単独燃焼の 2 倍より少し大きいことが確認された。これは相互予熱効果の影響によるものである。

さらに、実験 Comp 5（中央）と比べて、壁際では試験体同士の距離が大きいため、相互予熱効果が小さくなり、最大発熱速度は実験 Comp 5 より小さい。しかし、計算値では実験 Comp 6 の最大値は Comp 5 より大きい。これは主に、Comp 5 の発熱速度が過小に評価されたことによるものである。

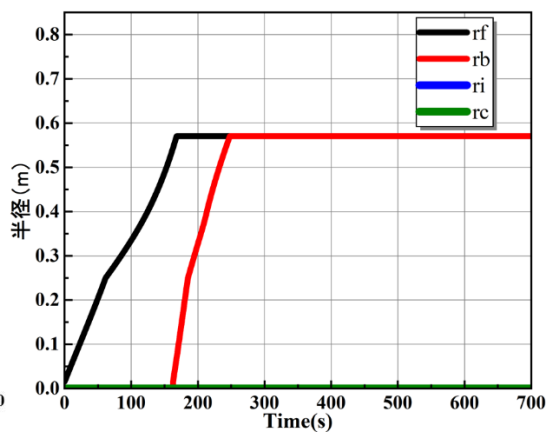
図 5.20(b)に燃焼半径、展炎半径と燃え尽き半径の計算値を示す。 r_i 、 r_c は間欠火炎領域の展炎半径、連続火炎領域の展炎半径である。展炎半径の計算値によると、火炎が展炎しない。約 160 秒で燃え尽きが始まり、約 250 秒で燃焼が終了する。火炎の円盤部が円筒部に含まれるため、隣の火炎からの放射熱は隣の火炎の円筒部からの放射熱と火炎が接する天井部から放射熱のみである。

図 5.20(c)に上部層温度と下部層温度の計算値と実験値を示す。上部層温度は実験値よりやや小さいが、実験 Comp 5 より実験値に近い。

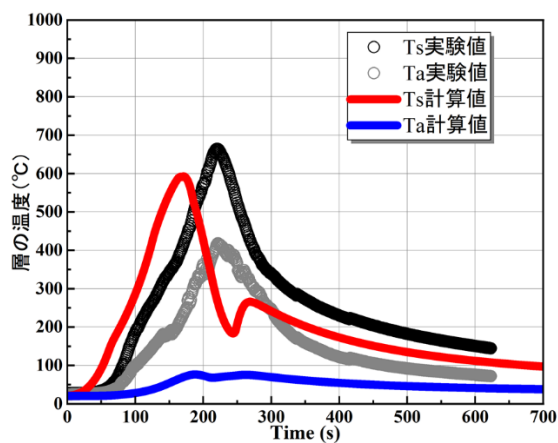
図 5.20(d)、(e)、(f)に実験 Comp 6 の壁面温度、上部層高さ、下部層壁面に入射する熱流の計算値と実験値の比較を示す。上部層高さや壁面温度は実験値に近いが、下部層温度と下部層壁面に入射する熱流は実験値より小さいことが分かった。



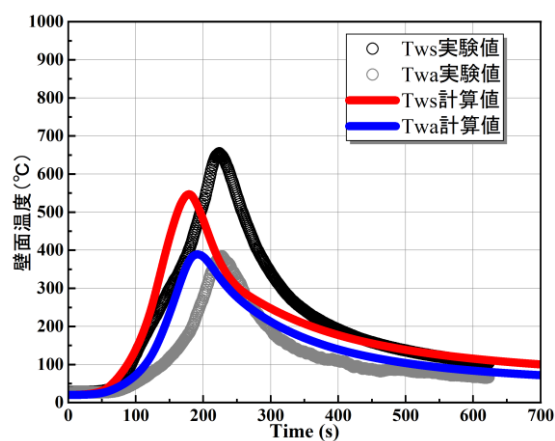
(a)発熱速度



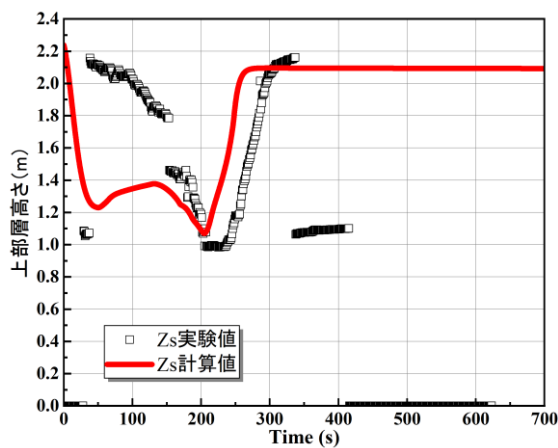
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



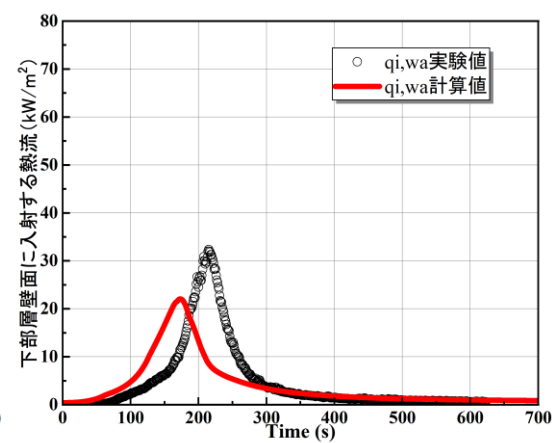
(c)層の温度



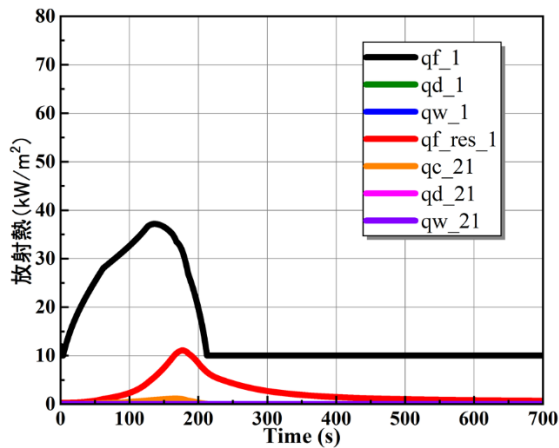
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

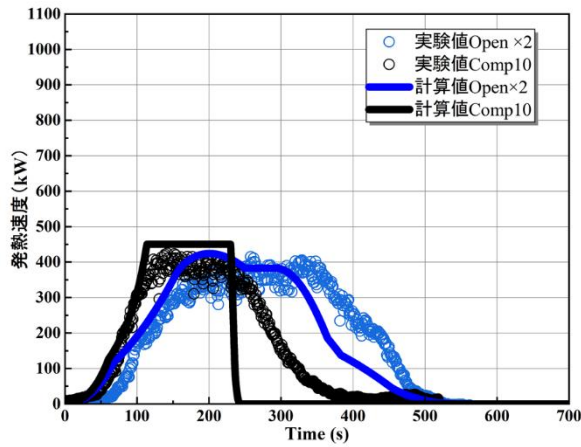
図 5.20 実験 C6 の計算値と実験値の比較

5.3.3.3 実験 Comp 10

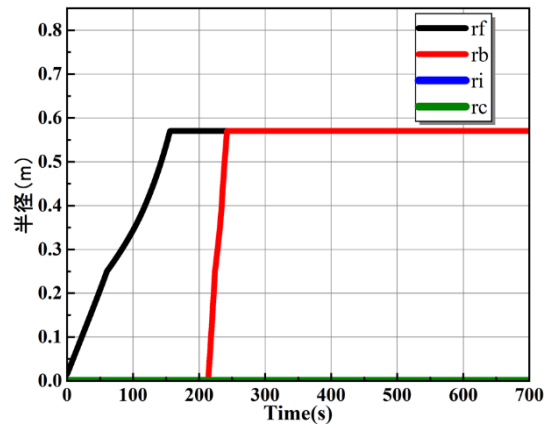
実験 Comp 10 と Open 1 の発熱速度の計算値と実験値を図 5.21(a)に示す。比較のため、Open 1 の計算値と実験値を 2 倍にして表示している。発熱速度の計算結果によると、およそ 105 秒付近で発熱速度が最大値に達し、その後は一定の値で推移している。これは、Comp10 の開口面積が小さいため、105 秒時点で換気支配となる臨界発熱速度に達したためと考えられる。自由空間の計算値と実験値は一致しており、室内の最大発熱速度も実験値に近い。しかし、室内の燃え尽きは実験値よりも早い。また、実験値によると、室内での総発熱量は自由空間より少ない。これは、模型室の開口が小さく、試験体の燃焼効率が低下したためと考えられる。

図 5.21(b)に実験 Comp 10 の試験体の燃焼半径と燃え尽き半径の計算結果を示す。60 秒付近で、燃焼半径の勾配に急激な変化が見られる。これは、火炎伝播が水平方向から鉛直下方へ変化したためである。約 215 秒で燃え尽きが始まり、242 秒で燃焼が終了する。

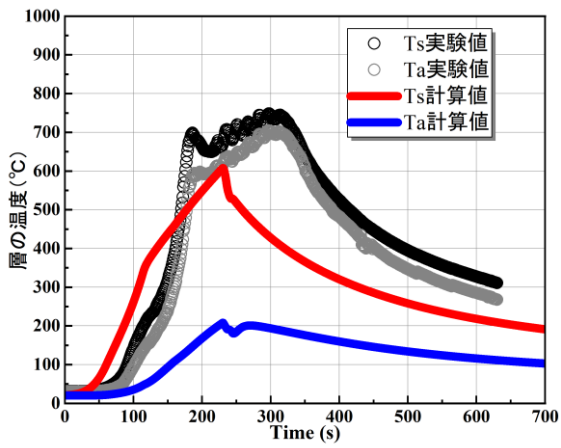
図 5.21(c)に実験 Comp 10 の層の温度の計算値と実験値を示す。上部層温度は実験値に近いが、空気層温度は実験値より低い。図 5.21(d)、(e)、(f)に実験 Comp 6 の壁面温度、上部層高さ、下部層壁面に入射する熱流の計算値と実験値の比較を示す。上部層高さ、壁面温度および下部層壁面に入射する熱流も実験値より小さい。



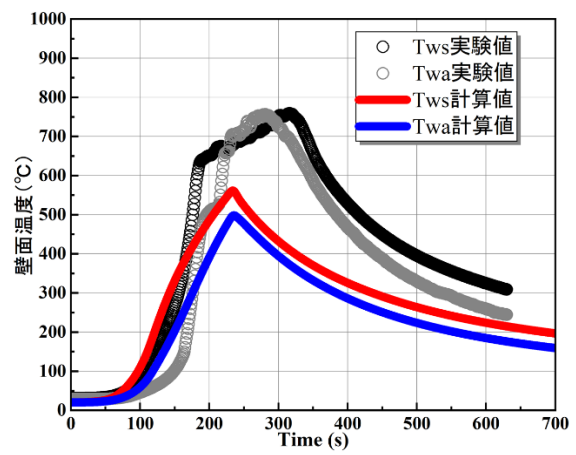
(a)発熱速度



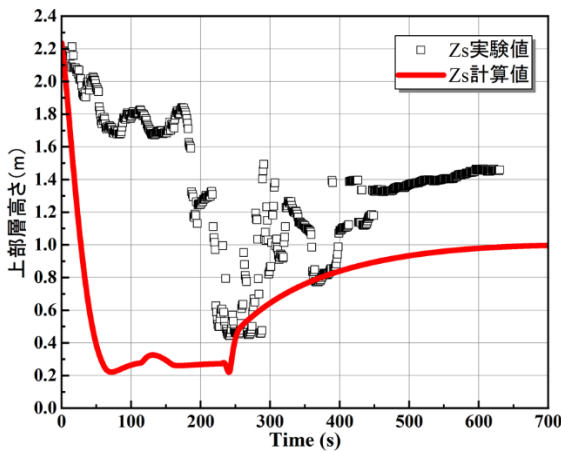
(b)燃焼半径、燃え尽き半径、展炎半径



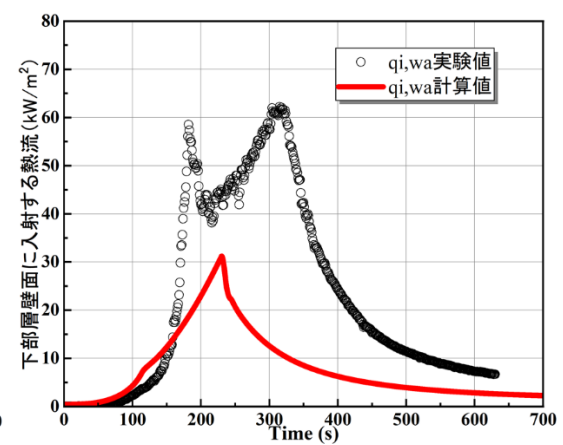
(c)層の温度



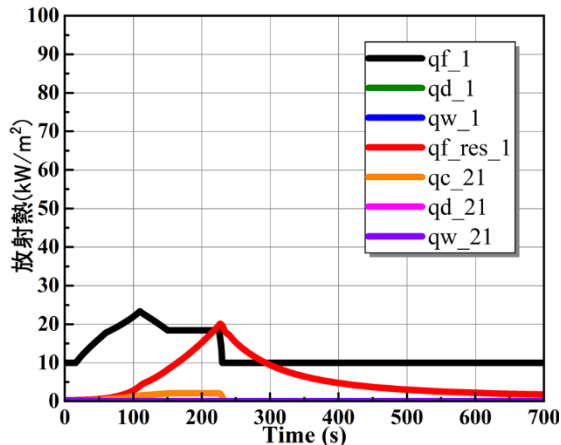
(d)壁面温度



(e)煙層高さ



(f)下部層壁面に入射する放射熱流



(g) 内部放射と外部放射の放射熱

図 5.21 実験 Comp 10 の計算値と実験値の比較

5.4 本章の結論

既往研究^[4]においては、単一の固体可燃物の燃焼性状を予測するモデルが提案されているが、可燃物の数量を考慮しておらず、汎用性に欠けていた。本章では、複数の固体可燃物が同時燃焼する場合における燃焼性状の予測を目的として、第 2 章と第 4 章で構築した単一固体可燃物の燃え広がりモデルを基に、試験体間の相互予熱作用を考慮した燃え広がりモデルを構築した。また、モデルの精度を検証するため、発熱速度、層の温度、壁面温度、上部層高さ、下部層壁面に入射する熱流において、既往の実験結果との比較を行い、モデルの有効性を確認した。

単独燃焼と比べて、同時燃焼の場合には、可燃物の燃焼面に入射する外部放射は、隣の火炎からの放射熱が加わるため、燃焼が促進される。本章では、6 種類の火炎形状における隣の火炎からの放射熱の計算方法を提案した。さらに、外部放射の増加が単位面積あたりの発熱速度および火炎伝播速度に与える影響についても考慮した。また、煙層からの放射熱の計算には二層ゾーンモデルが必要であることから、本章では、二つの火源に対応可能となるよう二層ゾーンモデルを改良した。

実験条件が限られているため、本章では、二個の試験体を室中央に設置した場合、壁際空間に設置した場合、および室中央に設置し開口が小さい場合の三つの条件のみを比較対象とした。試験体間の距離が小さいほど、相互予熱の効果が高まり、発熱速度が増加し、燃焼がより激しくなる。実験結果と計算結果によって、2 個の試験体の総発熱速度は、単独燃焼時の 2 倍を上回っており、試験体間の相互予熱が燃焼に大きな影響を及ぼしていることが示された。換気支配となる条件での計算では、発熱速度の最大値は実験値とよく一致した。しかし、試験体の総発熱量は自由空間の場合より少なく、これは開口部が非常に小さいために酸素供給が不十分となり、燃焼効率が低下し、未燃焼の可燃性ガスが開口部を通じて室外へ流出したことを示している。

実験との比較から、本章のモデルも発熱速度が過小評価される傾向が確認された。これは第4章と同様に、試験体の滴下現象が考慮されていないことが主な原因である。また、本章のモデルでは、相互予熱効果が単位面積当たりの発熱速度および火炎伝播速度に及ぼす影響を考慮しているが、実験結果からは、隣の火炎からの放射熱によって試験体の対向面が先に燃えて、側面燃焼面積が増加する様子が確認された。従って、厚みのある試験体においては、ウレタンの滴下現象および相互予熱効果が試験体の鉛直面の燃焼面積に及ぼす影響を考慮することが重要であり、今後の課題の一つである。

なお、本モデルは2つの試験体が同時に燃焼する場合にのみ適用可能であるが、試験体の数が増加すると、計算量も指数関数的に増加する。さらに、試験体の配置位置の相対関係に応じて、隣の火炎と燃焼面との形態係数の計算方法も異なり、計算は非常に複雑になる。実際の室火災では、多数の可燃物が存在し、その配置も多様であることが多いため、アルゴリズムの最適化を通じて、多数の試験体の同時燃焼を考慮したモデルを一般化することは、今後の重要な課題である。

【第5章参考文献】

- [1] Kazunori Harada, Ken Matsuyama, Kazuhiko Ido, Masaki Noaki, Sungchan Lee, Jeayoung Lee, Burning of Polyurethane Foam Block in ISO Room Compartment, IFireSS - International Fire Safety Symposium, 2015.
- [2] 井戸和彦, 原田和典, 松山賢, 野秋政希, 区画内におけるウレタンブロックの燃焼実験, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.244-245, 2013
- [3] ISO 24678-7:2019, Fire safety engineering — Requirements governing algebraic formulae Part 7: Radiation heat flux received from an open pool fire
- [4] 赤尾 捷, 原田 和典, 仁井 大策, 室内の熱フィードバックを考慮した可燃物の発熱速度, 日本火災学会研究発表会, pp.190-191, 2018

第6章 各種条件が燃焼拡大性状に及ぼす影響

6.1 単一の固体可燃物における感度分析

本節では、単一の固体可燃物における試験体厚さ、天井高さ、開口高さ、試験体の位置が燃焼性状に及ぼす影響について検討する。

6.1.1 計算条件の設定

図 6.1 に模型室および試験体の寸法を示す。ほとんどの計算条件は3章で示した赤尾実験を参考して設定した。模型室の長さとは幅は $0.9\text{m} \times 1.7\text{m}$ であり、幅 0.9m の開口部が2箇所設けられている。試験体はウレタンマットレスを用いた。試験体の長さとは幅は $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ である。

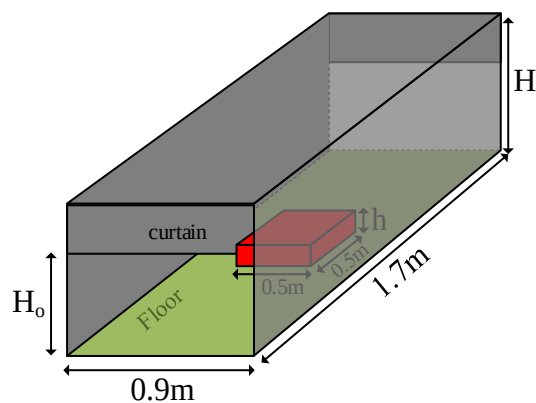
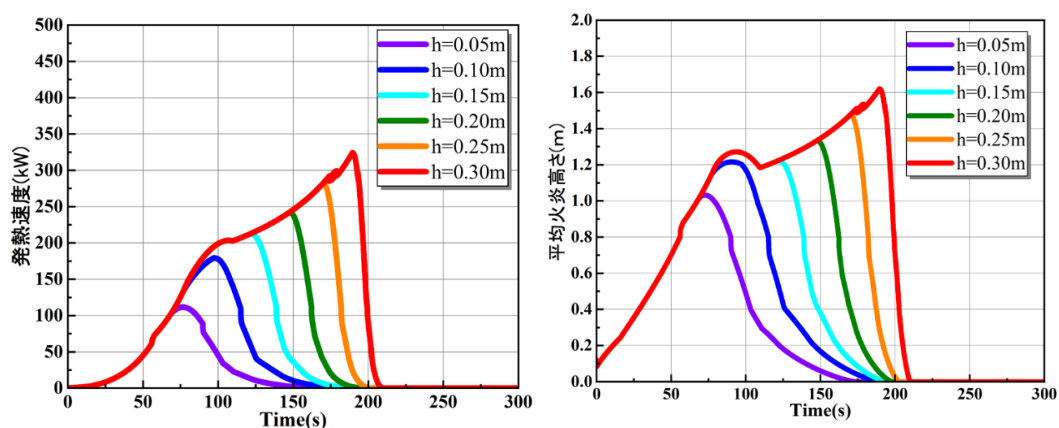


図 6.1 模型室及び試験体の設定

6.1.2 感度分析の結果

6.1.2.1 試験体厚さの影響

試験体厚さの影響を検討するため、天井高さとは開口高さは 0.8m に固定した。試験体厚さは 0.05m から 0.30m まで変更させた。図 6.2 に異なる試験体厚さにおける計算結果を示す。試験体厚さの増加に伴い、最大発熱速度、最大平均火炎高さ、最高上部層温度は増加し、燃焼継続時間も長くなる。



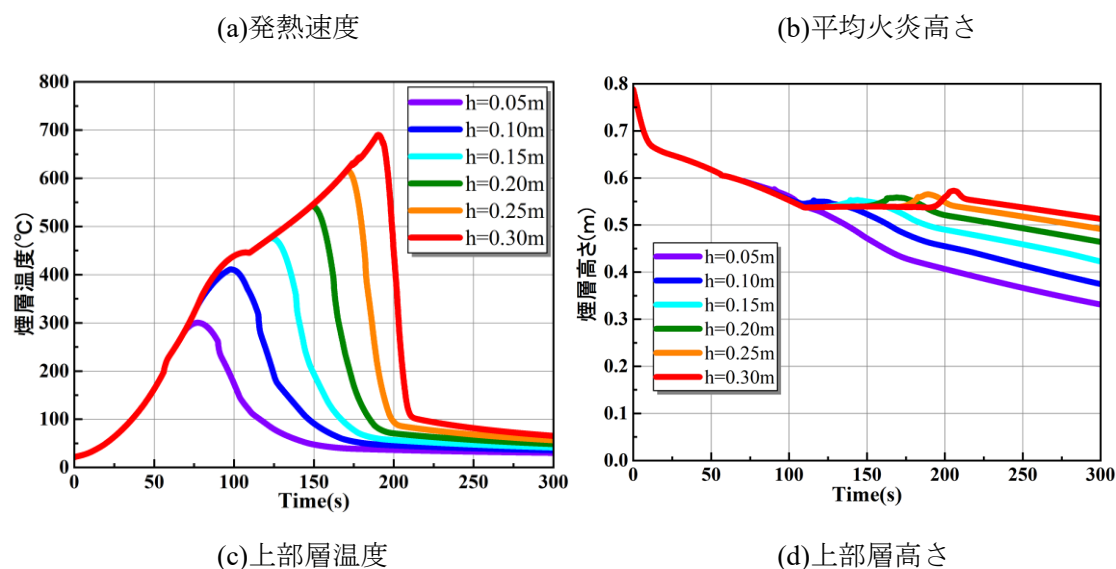
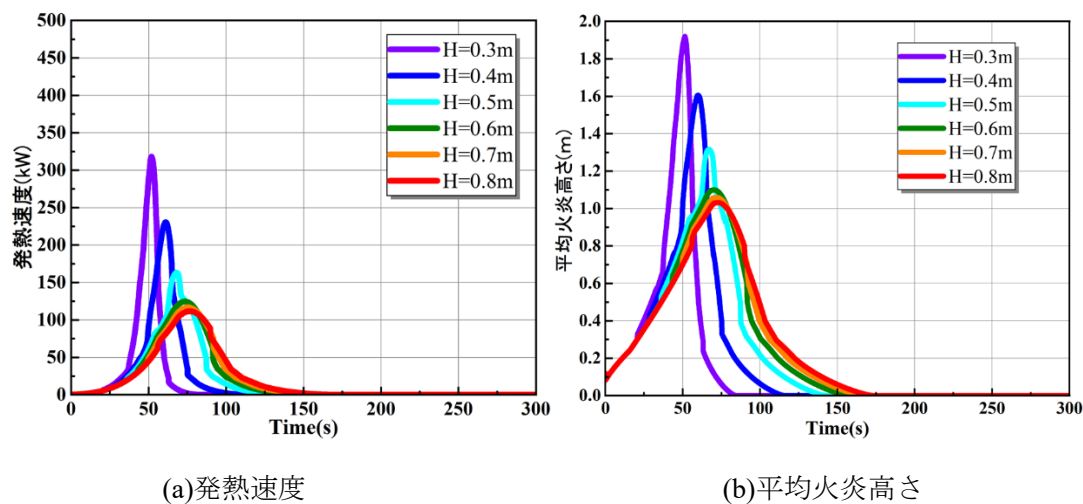


図 6.2 異なる試験体厚さにおける計算結果

6.1.2.2 天井高さの影響

天井高さ H の影響を検討するため、試験体厚さは 0.05m に固定した。垂れ壁を設置せず、天井高さは 0.3m から 0.8m まで変更させた。図 6.3(a)に異なる天井高さにおける発熱速度の計算結果を示す。天井が低くなるほど発熱速度は増加し、特に $H \leq 0.5\text{m}$ では、発熱速度は急激に増加する。これは火炎が展炎して、外部放射が増加するためである。

天井高さが低いほど、平均火炎高さは高くなり、上部層の温度も高くなる傾向が見られる。



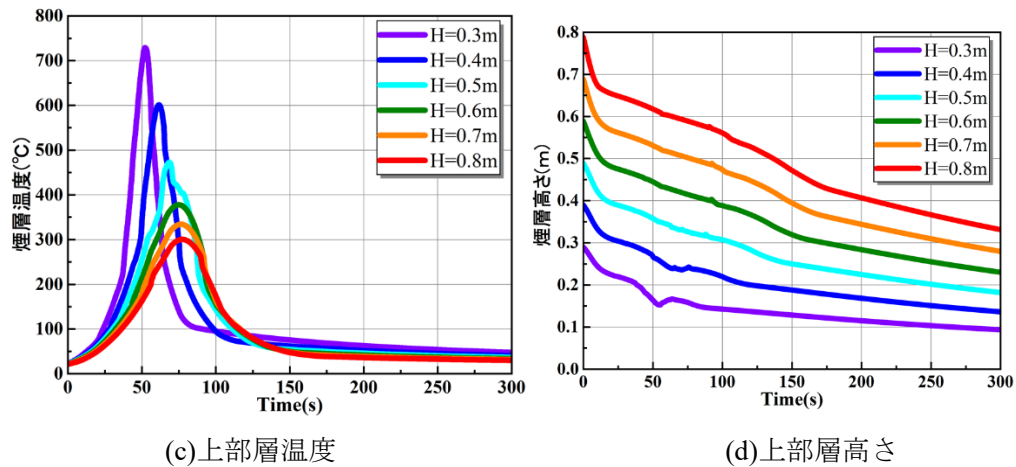
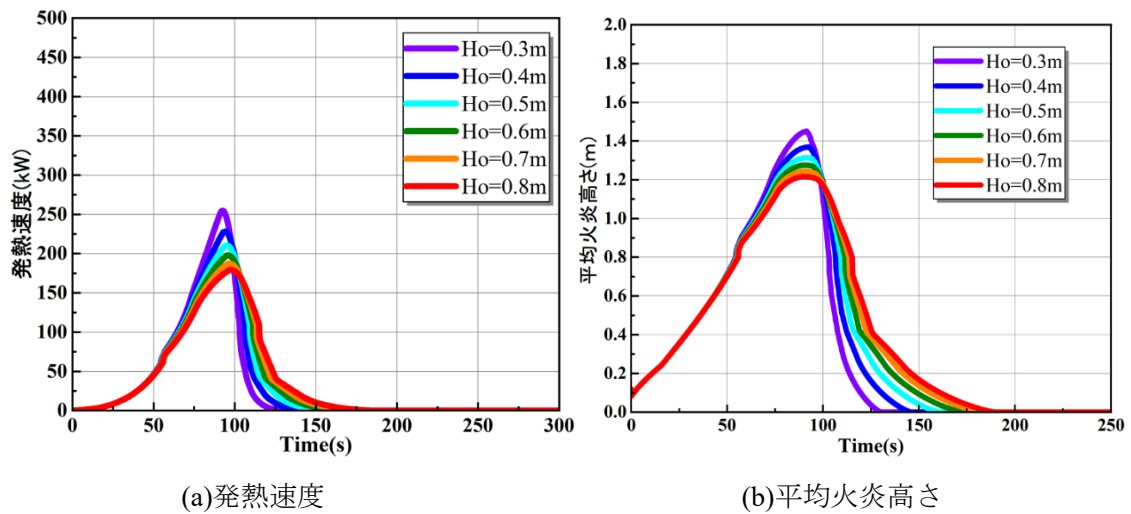
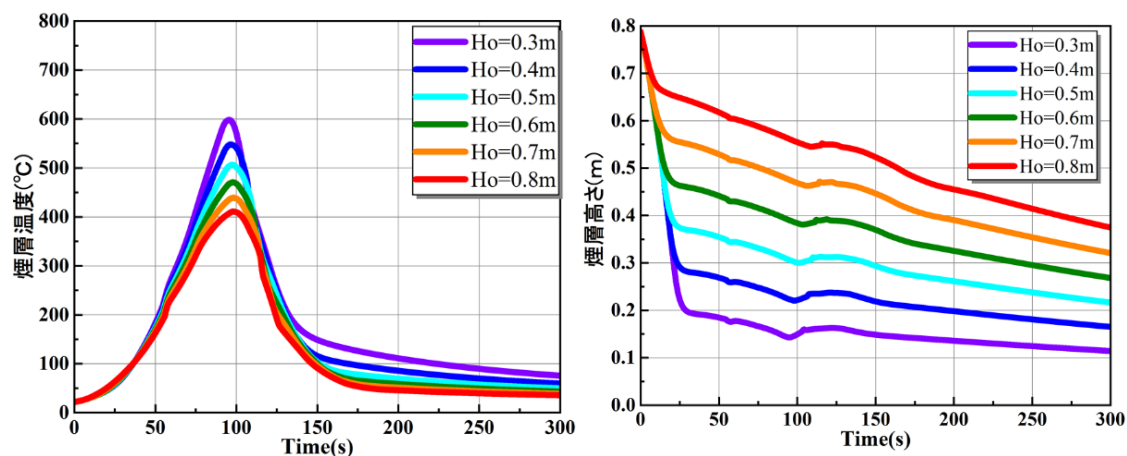


図 6.3 異なる天井高さにおける計算結果

6.1.2.3 開口高さの影響

開口高さ H_o の影響を検討するため、試験体厚さは 0.1m 、天井高さは 0.8m に固定した。開口高さは 0.3m から 0.8m まで変更させた。図 6.4 に異なる開口高さにおける計算結果を示す。開口高さが低く、すなわち開口面積が小さいほど、最大発熱速度が増加し、平均火炎高さが高くなる。また、上部層の温度は上昇し、上部層の高さは低下する傾向がある。ただし、天井高さと比べて、開口高さが燃焼性状に及ぼす影響は相対的に小さい。





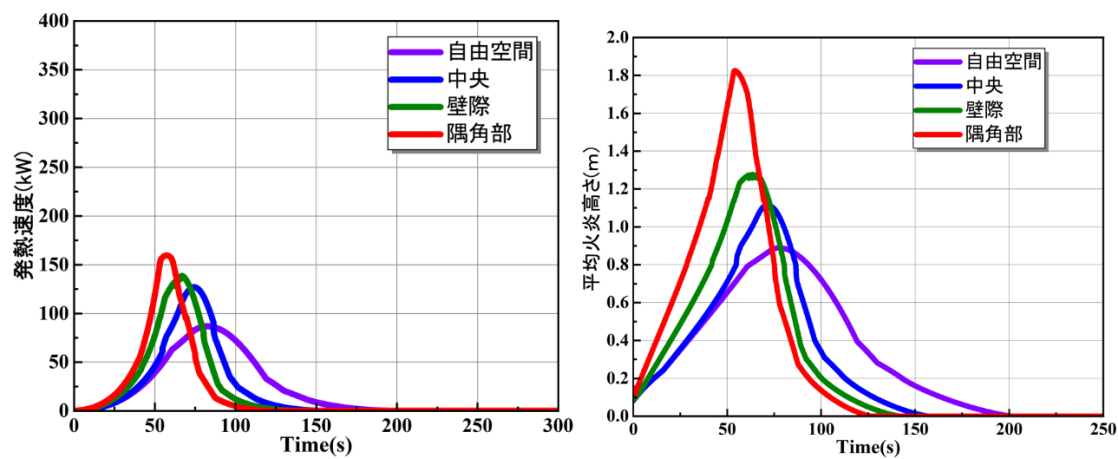
(c) 上部層温度

(d) 上部層高さ

図 6.4 異なる開口高さにおける計算結果

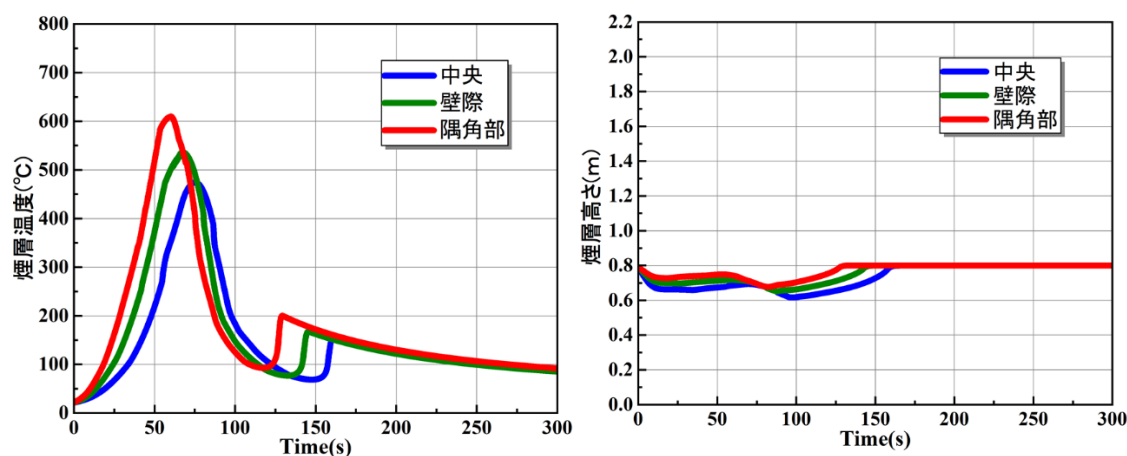
6.1.2.4 可燃物の位置の影響

可燃物の位置の影響を検討するため、試験体厚さは 0.05m、天井高さは 0.8m、開口高さは 0.8m に固定した。試験体は自由空間、模型室の中央、壁際、隅角部に設置した。図 6.5 に異なる試験体の位置における計算結果を示す。最大発熱速度と最高上部層温度は、自由空間、中央、壁際、隅角部の順に増加する。可燃物の位置によって、平均火炎高さは大きく変化するものの、上部層高さには顕著な変化は見られなかった。



(a) 発熱速度

(b) 平均火炎高さ



(c) 上部層温度

(d) 上部層高さ

図 6.5 異なる試験体の位置における計算結果

6.2 複数の固体可燃物における感度分析

6.2.1 計算条件の設定

図 6.7 に模型室および試験体の寸法を示す。東京理科大学共同利用実験を参考して計算条件を設定した。模型室の寸法は 2300mm(幅)×3500mm(奥行き)×2250mm(高さ) である。開口部は一つで、大きさは 850mm(幅)×2100mm(高さ) である。周壁と天井は全てセラミックファイバー製である。試験体はウレタンフォームブロックを用いた。寸法は 500×500×500mm、密度は 15.6kg/m³ である。X_f は二つの試験体の中心点間の距離である。

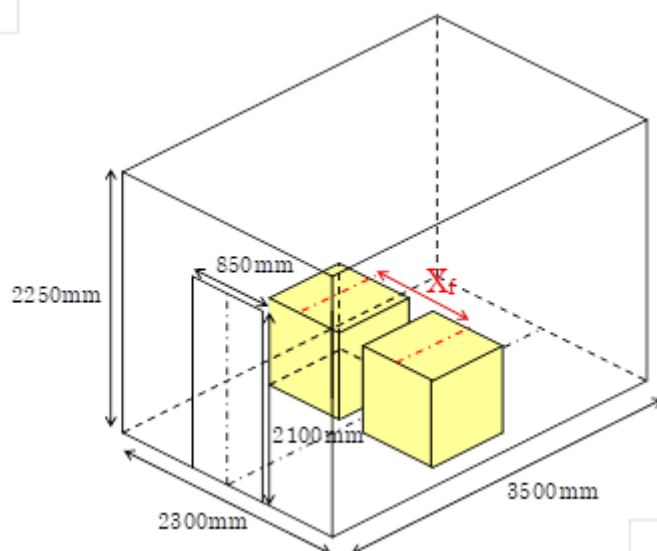


図 6.7 模型室及び試験体の寸法の設定

6.2.2 感度分析の結果

6.2.2.1 試験体間の距離の影響

試験体間の距離の影響を検討するため、X_f は 0.6m から 1.2m まで（離隔距離 0.1m から

0.7m まで) の範囲で変更した。図 6.8 に異なる試験体間の距離における計算結果を示す。試験体間の距離が小さいほど、相互加熱の効果が強まり、その結果、最大発熱速度も大きくなる。発熱速度の増加により、平均火炎高さ、上部層温度、および上部層高さも上昇する。さらに、試験体間の距離が短くなるほど、発熱速度等の増加率がより顕著になることが確認された。

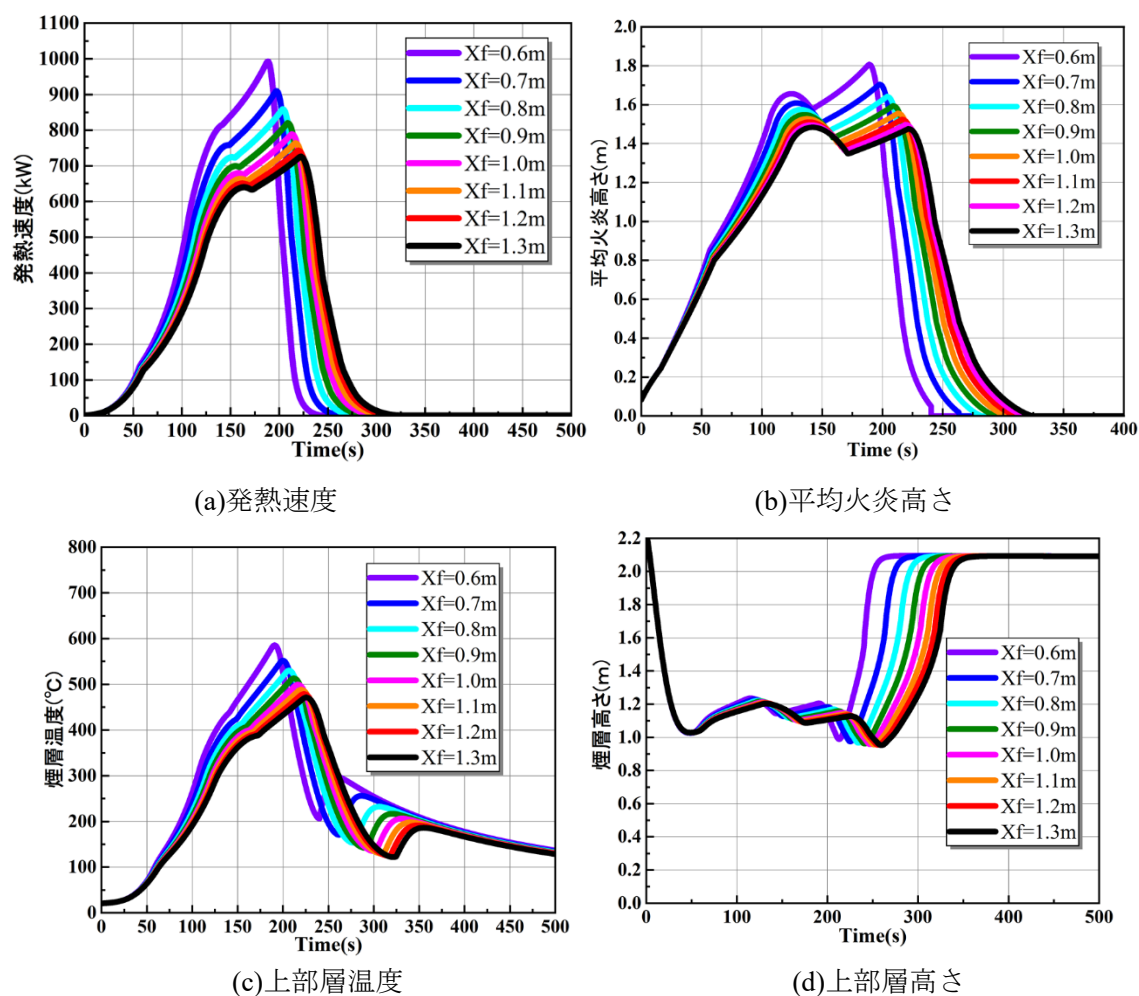


図 6.8 異なる試験体間の距離における計算結果

第 7 章 結論

7.1 本研究の結論

本研究では、自由空間での燃焼実験のデータを用いて、室内における固体可燃物の燃焼性状を予測するモデルを提案した。まず、既存の単一固体可燃物の燃え広がりモデルを改良して、モデルの精度を向上させた。次に、予測モデルの適用範囲を拡張するため、単一固体可燃物の燃え広がりモデルを基に、可燃物の位置と数量に着目して、壁際および隅角部における単一固体可燃物の燃え広がりモデルと複数の固体可燃物の燃え広がりモデルを構築した。これらのモデルの精度を検証するため、既往の実験結果と比較した。

第 1 章では、本研究の背景を説明し、外部放射による燃焼速度の増加、固体可燃物の燃え広がり、既存の燃え広がりモデルに関する既往研究を概説し、本研究の目的と構成を述べた。

第 2 章では、室内における単一固体可燃物の燃え広がりモデルを構築した。予測モデルは、火炎自身からの内部放射だけでなく、展炎部、火炎と接する天井、周壁および煙層、火炎からの間接放射による外部放射も考慮した。これにより、室内固体可燃物の燃え広がり性状の正確な予測を可能にした。本モデルの独自性は以下に示す点である。

(1) 既往研究では 3 種類に分類されていた火炎形状を 6 種類に拡張した。火炎形状の精緻化により、内部放射と外部放射の放射熱をより正確に算出し、予測精度を向上させる。

(2) 外部放射の影響を定量化するための計算式を改良した。外部放射が燃焼面と予熱面に入射して、単位面積当たりの発熱速度と火炎伝播速度が増加する。しかし、火炎基部は輝炎のため外部放射が透過しにくく、放射率が低くなる。この点を従来モデルでは考慮しておらず、平均放射率を用いていたのに対し、本モデルでは減衰係数 $f = 0.8$ を導入することで対応した。

(3) 従来のモデルでは換気支配型燃焼を考慮していなかったが、本研究では室内で燃焼可能な発熱速度の上限を換気支配の臨界発熱速度とした。臨界発熱速度から火炎伝播速度および単位面積発熱速度を逆算する手法を作成した。

(4) 従来の二層ゾーンモデルでは火炎からの発熱が全部上部層に流入すると仮定していた。本研究は火炎からの放射熱の一部が開口を通じて損失し、残りが下部層と上部層に分かれて流入すると仮定した。

第 3 章では、第 2 章モデルの予測結果を既往の小規模区画内でのウレタンマットレス燃焼実験（赤尾実験、李実験）と比較して、モデルの精度を検証した。実験を模擬するため天井高さ、開口高さ、試験体厚さを変更して、合計 14 回の計算を行った。多くの場合、発熱速度および上層壁面温度は実験値と良好に一致した。しかし、天井高さが低い場合、計算値

は過大評価される傾向があり、これは展炎部からの外部放射の影響を過大に評価したためと考えられる。開口高さが低い場合にも、計算値が過大に評価される傾向が見られた。これは、開口が小さいことにより室内の酸素供給が不十分となり、未燃の可燃性ガスが開口部から火炎として噴出する可能性があるためと考えられる。

異なる実験における発熱速度を比較した結果、天井高さが低いほど、試験体の高さが高いほど、また開口高さが低いほど、発熱速度が大きくなる傾向が再現された。

第4章では、第2章で構築した単一固体可燃物の燃え広がりモデルを基に、火炎高さ、火炎の放射率、プルーム質量流量の改良により、壁際および隅角部における固体可燃物の燃え広がりモデルを提案した。

(1) 火炎高さについては、既往研究により、火炎高さは自由空間、壁際、隅角部の順に高くなることが知られている。従来のモデルでは、可燃物が室中央に配置されたため、火炎高さは自由空間における火炎高さを用いていた。本モデルは壁際および隅角部における火炎高さを使用した。

(2) 火炎の放射率の改良については、壁際における火炎から外部へ放射される熱流束の割合を評価するため、火炎と壁が接する角度 θ_c を新たに導入した。そして、角度 θ_c を 60° とすることで、火炎の表面積に基づいて火炎の放射率を計算した。

(3) プルーム質量流量の改良については、従来のプルーム質量流量の計算式を基に、火源の対称性を考慮することで、壁際や隅角部にも適用可能な簡易的な計算手法を提案した。

ルームコーナー試験区画内でのウレタンブロックの燃焼実験（東京理科大学共同利用実験）の結果と比較したところ、予測モデルは発熱速度、火炎高さ、上部層温度の変化傾向（中央部<壁際<隅角部）を再現した。中央部および壁際における最大発熱速度が過小に評価された。原因として、試験体のウレタンが熔融下して最下部に新たに着火する現象を考慮していないことが考えられる。

第5章では、第2章と第4章で構築した単一固体可燃物の燃え広がりモデルを基に、試験体間の相互予熱作用を考慮した燃え広がりモデルを構築した。

(1) 隣の火炎からの放射熱の計算手法を提案した。隣の火炎からの放射熱には、隣の火炎の円筒部からの放射熱、隣の火炎の展炎部からの放射熱、隣の火炎が接する天井部から放射熱が含まれる。本章では、6種類の火炎形状における円筒部の放射率、円盤部の放射率、形態係数等の計算方法を整理した。

(2) 外部放射の増加が単位面積あたりの発熱速度および火炎伝播速度に与える影響についても考慮した。単独燃焼と比べて、同時燃焼の場合には、可燃物の燃焼面に入射する外部放射に、隣の火炎からの放射熱が加わるため、燃焼が促進される。本章では、隣の火炎からの放射熱を考慮して、単位面積あたりの発熱速度と火炎伝播速度の式を改良した。

(3) 二つの火源に対応可能となるよう二層ゾーンモデルを改良した。

ルームコーナー試験区画内でのウレタンブロックの燃焼実験（東京理科大学共同利用実験）の結果と比較したところ、二個の試験体の合計の発熱速度が単独燃焼時の2倍を超え、相互予熱が燃焼に大きな影響を与えていることが確認された。一方、発熱速度は過小評価される傾向が見られた。その主な原因は第4章と同様に試験体のウレタンが溶融下して最下部に新たに着火する現象を考慮していないことである。

第6章では、本研究で構築した三種類の燃え広がりモデルを用いて、試験体の厚さ、天井高さ、開口高さ、可燃物の設置位置および試験体間の距離を変更して、計算を行い、これらのパラメータが燃焼性状に及ぼす影響を検討した。

検討の結果、試験体が厚くなるほど、天井が低くなるほど、開口が小さくなるほど、また試験体間の距離が近づくほど、発熱速度が増大し、燃焼はより激しくなる。特に天井高さの影響が顕著である。同一の試験体において、天井高さが火炎の展炎の発生の有無を直接左右し、展炎の有無が外部放射の強さに直接に影響するためである。展炎により外部放射が増加すると、燃焼は激しくなる。

複数の試験体の場合、試験体間の距離が近いほど、発熱速度が増加し、燃焼は激しくなる傾向を再現した。

7.2 今後の課題

今後の課題として、以下のことが挙げられる。

(1) 厚みのある試験体におけるウレタンの溶融滴下を考慮する。

本研究のモデルは、試験体が薄い場合には高い精度を示すが、厚さが大きい場合、例えば試験体の厚さが0.5mのときには、予測結果が実験結果を下回る傾向がある。厚みのある試験体では、燃焼時にウレタンが溶融して滴下が発生し、側面の燃焼面積が拡大することが確認された。この現象を定量的にモデルに反映させることで、予測結果の過小評価の問題を解決する必要がある。

(2) 換気支配における燃え広がり速度の予測

開口が小さい時、試験体の総発熱量は自由空間の場合より少なくなる。これは開口部が非常に小さいために酸素供給が不十分となり、室内での燃焼が制限される。この時の燃え広がり速度の予測精度を改良する必要がある。

(3) 可燃物数の増加に伴う計算量の増加

試験体の数が増えると計算量は指数関数的に増大し、さらに配置位置の違いにより計算が複雑化する。アルゴリズムの最適化を通じて複数の固体可燃物の同時燃焼を考慮した燃え広がりモデルを一般化することは、今後の重要な課題である。

(4) 複数の可燃物からの火炎

複数の可燃物が同時燃焼する時、二つの火炎が融合して大きい火炎が生じる。可燃物の距離が近い場合には、火炎融合を考慮すべきである。

(5) モデル適用範囲の拡張

本モデルの検証はウレタンフォームのみに限られており、実際の建築火災では多様な可燃物が存在する。したがって、本モデルを実際の建築火災予測に応用するためには、他の種類の固体可燃物への適用性をさらに検証する必要がある。

発表論文一覧

査読付き論文（予定を含む）

- 1) Yimeng Cui, Kazunori Harada, Daisaku Nii, A Simple Model for Predicting Fire Growth Behavior of Flexible Polyurethane Slab in a Compartment, International Journal of Fire Science and Engineering, 2025;39(2):63-81. DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.c289449e>
- 2) Yimeng Cui, Kazunori Harada, Daisaku Nii, Experimental Verification and Sensitivity Analysis of a Fire Growth Model for Flexible Polyurethane Slab in a Compartment, submitted to Fire Safety Journal (15th IAFSS special issue).
- 3) Yimeng Cui, Kazunori Harada, Daisaku Nii, (仮題) Prediction of the Burning Behavior of Flexible Polyurethane Slab Near Room Walls and Corners（室の壁際および隅角部におけるウレタンフォームの燃焼性状予測，投稿準備中）
- 4) Yimeng Cui, Kazunori Harada, Daisaku Nii, (仮題) Prediction of the Burning Behavior of Multiple Combustible Materials with Consideration of Mutual Preheating Effects（複数可燃物の同時燃焼における相互予熱効果を考慮した燃え広がり予測，投稿準備中）

学会発表（口頭発表、フルペーパー査読付）

- 1) Yimeng Cui, Kazunori Harada, Daisaku Nii, A Simple Model for Predicting Fire Growth Behavior of Flexible Polyurethane Slab in a Compartment, AOSFST 2024 - 13th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 2024/10

学会発表（口頭発表、査読なし）

- 1) 崔宜萌，原田和典，仁井大策，室内可燃物における燃え広がりモデル，日本火災学会研究発表会概要集，pp. 9-10，弘前市（弘前大学），2023 年 5 月 27～28 日
- 2) 崔宜萌，原田和典，仁井大策，室内可燃物における燃え広がりモデル，令和 5 年度 日本建築学会 近畿支部研究発表会，環境系，pp. 201-204，2023 年 6 月 24～25 日
- 3) 崔宜萌，原田和典，仁井大策，天井高さが異なる室内における可燃物の燃え広がり予測，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），防火，pp. 47-48，2023 年 9 月 12～15 日
- 4) 崔宜萌，原田和典，仁井大策，室内可燃物における燃え広がりモデル，日本火災学会研究発表会概要集，pp. 27-28，野田市（東京理科大学），2024 年 5 月 25～26 日
- 5) 崔宜萌，原田和典，仁井大策，室内可燃物における燃え広がりモデル，令和 6 年度 日本建築学会 近畿支部研究発表会，環境系，pp. 145-148，2024 年 6 月 22～23 日
- 6) 崔宜萌，原田和典，仁井大策，外部放射を考慮した室内における可燃物の燃え広がり予測，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），防火，pp.17-18，東京（明治大学），2024 年 8 月 27～30 日
- 7) 崔宜萌，原田和典，仁井大策，異なる位置における単一の個体可燃物の燃え広がり予

測, 2025 年度日本火災学会研究発表会 (豊橋) 概要集, pp. 153-154, 2025 年 5 月 24~25 日

8) 崔宜萌, 原田和典, 仁井大策, 室内の固体可燃物の同時燃焼を考慮した燃え広がり予測, 令和 7 年度 日本建築学会 近畿支部研究発表会, 環境系, 2025 年 6 月 28~29 日

9) 崔宜萌, 原田和典, 仁井大策, 換気支配を考慮した室内における可燃物の燃え広がり予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), 投稿済, 2025/9 (発表予定)

謝辞

本論文を無事に完成することができたのは、多くの方々のご指導、ご支援のおかげです。ここに心より感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科建築学専攻の原田和典教授に、心より深く感謝申し上げます。原田先生には、研究の方向性から論文の構成に至るまで、常に的確なご指導と温かい励ましをいただきました。研究が行き詰まった際にも、先生の助言と励ましに支えられ、困難を乗り越えることができました。来日当初は日本語力が十分でなく、論文執筆にも苦勞しましたが、その際にも原田先生は文法面に至るまで丁寧にご指導くださり、大変助けられました。改めて、深く感謝申し上げます。

同専攻 仁井大策准教授には、院ゼミや学会発表の場において、多くの貴重なご助言をいただきました研究を進める上でも多くの建設的なご意見を頂戴し、大変参考になりました。心より感謝申し上げます。

学位論文の審査において、同専攻 石田泰一郎教授、大谷真教授には、貴重なご意見、ご助言を頂きました。また、ドクターセミナーの場では、同専攻 小椋大輔教授、西野智研准教授をはじめ、多くの先生方から建設的なご助言と活発な意見交換の機会を頂きました。これらの経験は、本研究を推進するうえで大きな励みとなりました。心より感謝申し上げます。

同じく留学生であり、同専攻の孫安陽助教（元・京都大学博士後期課程）には、日本に来たばかりの頃、生活面や学習面で多大なご支援をいただきました。さらに、院内ゼミにおいても本研究に対して多くの有益なご意見をいただきました。ここに心より感謝申し上げます。

原田・仁井研究室の皆様には、日々の交流の中で日本語を教えていただき、言語面でも大変助けられました。また、院内ゼミにおいても貴重なコメントや質問をいただき、研究を進めるうえで大きな支えとなりました。心より感謝申し上げます。

この三年余りの留学生活の中で、多くの中国人留学生の友人と出会うことができました。彼らのおかげで、楽しく充実した日々を過ごすことができ、かけがえのない思い出となりました。ここに感謝の意を表します。

最後に、博士課程在学中は研究に専念し、なかなか帰国することができませんでした
が、そのような状況でも常に私を理解し、支えてくれた両親に心より感謝申し上げます。

崔 宜萌

2025 年 6 月