

# 建築空間における初期火災拡大性状予測に関する研究

新谷 祐介

## 目次

1. 序論	
1. 1. 背景	1-1
1. 2. 建築物内での火災の進展	1-3
1. 3. 既往の研究	1-4
1. 4. 本研究の目的	1-6
1. 5. 本論文の構成	1-8
2. 可燃物間の延焼拡大予測モデル	
2. 1. はじめに	2-1
2. 2. 延焼拡大予測モデルの構築に必要な物理現象と本モデルでの取り扱い	2-2
2. 3. 計算手順	2-6
2. 4. 物理現象の定式化	2-7
2. 5. 液体燃料を用いた延焼拡大実験との比較	2-16
2. 6. 本章の結論	2-22
3. 火炎からの放射熱	
3. 1. はじめに	3-1
3. 2. 火炎から射出される放射熱の計算方法	3-2
3. 3. 天井下、煙層下空間での火炎からの放射熱の測定	3-5
3. 4. 本章の結論	3-13
4. 外部放射を受ける固体可燃物の燃焼性状	
4. 1. はじめに	4-1
4. 2. 外部放射を受ける固体可燃物の燃焼実験	4-3
4. 3. 外部放射を受ける固体可燃物の燃焼モデルの提案と実験との比較	4-33
4. 4. 結論	4-48
5. 固体可燃物間の延焼拡大実験	
5. 1. 実験の目的	5-1
5. 2. 実験概要	5-1
5. 3. 実験結果	5-7
5. 4. 実験結果の考察	5-31
5. 5. 本章の結論	5-45

6. 固体可燃物間の延焼拡大予測モデルの提案と延焼拡大実験との比較	
6. 1. はじめに	6-1
6. 2. 固体可燃物間の延焼拡大予測モデルの提案	6-2
6. 3. 固体可燃物間の延焼拡大実験との比較	6-5
6. 4. 本章の結論	6-8
7. 結論	
7. 1. 本研究の結論	7-1
7. 2. 今後の課題	7-3

# 第 1 章

## 序論

## 第 1 章の目次

1.	序論.....	1 - 1
1. 1.	背景～火災性状予測の必要性.....	1 - 1
1. 2.	建築物内での火災の進展.....	1 - 3
1. 3.	本研究に関連する既往の研究.....	1 - 5
1. 4.	本研究の目的.....	1 - 6
1. 5.	本論文の構成.....	1 - 7

## 1. 序論

### 1. 1. 背景～火災性状予測の必要性

建築物に必要な機能の一つとして、その建築物の利用者に対して、必要な環境を作り出すことが挙げられる。例えば、夏の暑い時期や冬の寒い時期でも、建築物内では快適な温熱環境を確保することや、地震や火災などの災害に対して建築物利用者の安全性を確保することなどが挙げられる。

建築物の火災に対する安全性の現状を見てみると、図 1-1 に示すように、建物火災の発生件数は 1984 年以降減少している傾向があるが、死者数については、横ばいかやや増加傾向にある。

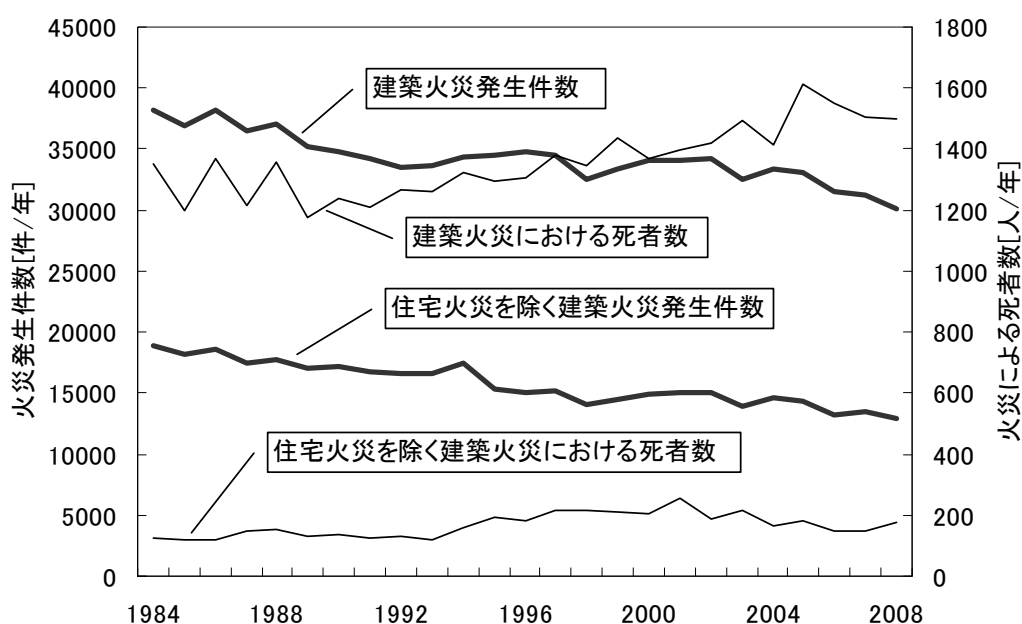


図 1-1 近年の建物火災件数と死者数（消防白書より）

近年に発生した非住宅火災において複数の死者が出た火災の一例を表 1-1 に示す。2001 年 9 月に発生した新宿歌舞伎町の雑居ビルでの火災<sup>1)</sup>や 2004 年 12 月に発生した埼玉の物販店舗火災<sup>2)</sup>、2006 年 1 月に発生した長崎のグループホームの火災<sup>3)</sup>、2007 年 1 月に発生した宝塚のカラオケボックスでの火災<sup>4)</sup>、2008 年 10 月に発生した難波の個室ビデオ店での火災<sup>5)</sup>、2009 年 11 月に発生した高円寺の雑居ビルでの火災のように複数人の死亡者が出るような火災が発生している。火災の発生した原因は放火など様々ではあるが、死亡者が出るほどの火災となった原因の一つには建物の使用・管理の問題がある。つまり、万が一、建築物内で火災が発生した場合に非常に危険になりうる状況のままで使用されているケースが多い。消防法などの法律により建物の使用・管理面からの規制がなされているが、条文からは規制の意味・効果を把握することは難しく、イメージはわきにくい。ニュ

ースなどでほとんどの人が火災の映像を見たことがあると考えられるが、それは建物が激しく燃えている様子を外から見ているだけで、その映像から建物内部での火災の進展を想像することは難しい。

一方で、地震については、震度という比較的分かりやすい尺度があり、その揺れの体感したり、家具などが転倒する映像を見たことがある人が多く、地震が起こるとどうなるかというイメージはわきやすい。地震の危険性を比較的容易に認識できるため、必要な対策がとられることが多いものと考えられる。

このように、火災の危険性を容易に認識できるようにすることが、必要な火災対策をとるひとつのきっかけとなる。火災の危険性を認識するためには、建築物内での火災の進展（以下、火災性状とする）を予測する手法の構築が必要である。

**表 1-1 近年の非住宅火災以外の死者数の多い火災**

文献	日時	場所	用途	被害
1)	2001年9月	新宿	雑居ビル	44名死亡
2)	2004年12月	さいたま	物販量販店	3名死亡
3)	2006年1月	大村	社会福祉施設	7名死亡
4)	2007年1月	宝塚	カラオケボックス	3名死亡
	2008年3月	名古屋	雑居ビル	3名死亡
	2008年4月	札幌	雑居ビル	3名死亡
	2008年6月	綾瀬	社会福祉施設	3名死亡
5)	2008年10月	難波	雑居ビル	15名死亡
	2009年7月	此花	雑居ビル	4名死亡
	2009年11月	浜松	雑居ビル	3名死亡
	2009年11月	高円寺	雑居ビル	4名死亡

建築物の設計という点においても、火災性状を予測する必要性はある。2000年に建築基準法、2003年に消防法が改正され、火災安全設計においても性能設計の考え方が導入されている。具体的には、設計する建築物内で発生が予見される火災（設計火源）に対して、安全に避難できる（避難安全性能）、建築物の主要構造部が耐力を保持する（耐火性能）、消防隊が安全に救助・消火活動を実施できる（消防活動支援性能）ことを確認することによって多様な設計が可能になった。

現状の火災性状に対する知見では、建築物内で発生が想定される火災の精緻な予測ができないため、性能設計においては、多くの安全率を見込んだ設計火源を使用している。そのため、耐火被覆や排煙設備などの火災安全に対する対策を建築物に過剰に設置している可能性がある。火災性状を正確に予測することが可能であれば、安全性を確保するために必要な対策を、本当に必要な分だけ設置することにより、より合理的な設計で安全性の高い空間を実現することが可能になる。

## 1. 2. 建築物内での火災の進展

建築物内で発生が予想される火災の一例を図 1-2 に示す。

例えば、たばこがゴミ箱に落下したことで火災が始まることを考えると、ゴミ箱に落下したタバコはゴミ箱内で炎を挙げずにくすぶるように燃焼し、その後、ゴミ箱内の可燃物、ゴミ箱、隣接して設置された棚などが一つの可燃物の塊として燃焼する（a) 単体可燃物の燃焼）。この時可燃物上部には煙層が形成され、可燃物は煙層からの放射を受ける。

燃焼が激しくなると、火炎が大きくなることや上部に形成される煙層が高温になるためこれらから周囲に射出される放射熱も増加し、少し離れた位置にある椅子や机の表面温度が上昇し、延焼拡大が生じる（b) 隣接可燃物への延焼拡大）。

また、壁の内装材料にも延焼し、延焼した部分の燃焼により形成される炎が内装材料の未燃部分を加熱することで内装の燃え広がりが生じる（c) 内装の燃え広がり）。

これらの燃焼により生じた煙は天井の下に蓄積し、煙層を形成する。また、壁の内装材料から天井の内装材料への燃え広がりにより天井面下に火炎が形成される、あるいは、煙層の温度が高温になると、室内の未燃の可燃物に入射する放射熱が増加し、室内の全ての可燃物が一斉に着火し、発熱速度や区画内の温度が上昇（d) フラッシュオーバー）し、部屋全体で激しく燃焼する盛期火災となる。このような激しい火災が室内のすべての可燃物が燃え尽きるまで継続し、その後鎮火に至る。

このような一連の火災の進展の中で、フラッシュオーバーの発生までを初期火災、フラッシュオーバー発生後の火災を盛期火災と定義する。初期火災においては、一例に示したように、単体可燃物の燃焼、隣接可燃物への放射熱による延焼拡大、内装材の燃え広がり、煙流動など多くの物理現象が複雑に絡み合っている。本研究ではこのうち、単体可燃物の燃焼から隣接する可燃物への延焼拡大過程までを対象とし、内装材の燃え広がりについては考慮しない。



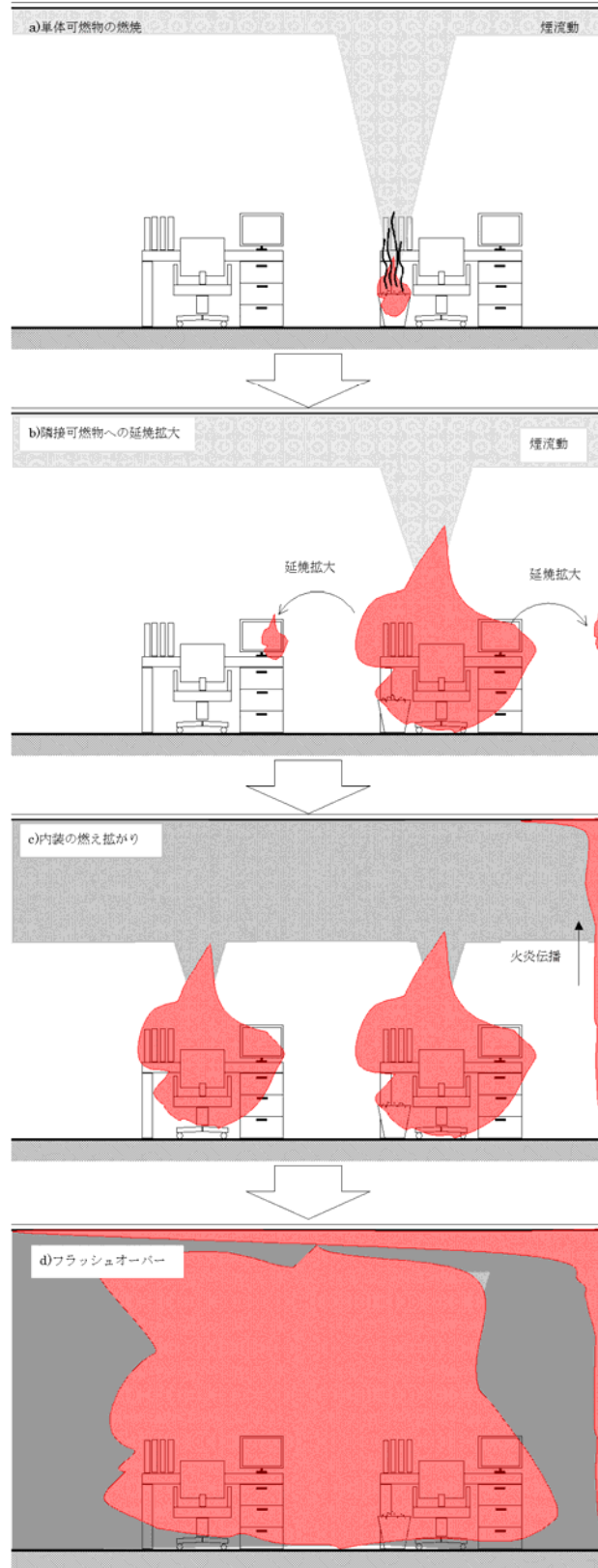


図 1-2 火災進展の一例

### 1. 3. 本研究に関連する既往の研究

本研究の対象とする単体可燃物の燃焼性状、隣接する可燃物への延焼拡大に関する既往の研究をまとめる。さらに、両者に影響を与える煙流動に関する既往の研究についてもまとめる。

#### (1) 単体可燃物の燃焼性状

自由空間での可燃物の燃焼性状については、日本火災学会 局所火災に対する耐火設計WG<sup>6)</sup>では、国内外で得られた274件の発熱速度曲線を整理している。また、アメリカのNISTや、スウェーデンSPでは、ホームページ上で様々な可燃物の自由空間での発熱速度曲線のデータベースを公開している。これらの実験データを整理する方法の一例として、発熱速度曲線をくん焼期間、成長期間、定常期間、減衰期間に分割し、火災成長率や最大発熱速度等の物品名称ごとの平均値や、標準偏差等を整理している。

また、佃ら<sup>7)</sup>は大きさの異なるウレタンブロックの燃焼実験の結果から燃焼面積と単位面積あたりの発熱速度について整理し、燃焼面ごとに両者を掛け合わせることで各時間の発熱速度を予測する方法を提案している。

一方、建築空間における火災では、可燃物の上部に形成された煙層や天井下を展炎する火炎、周辺で燃焼する他の可燃物の火炎などから放射熱を受けて燃焼する。周囲から放射熱を受ける可燃物は自由空間で燃焼する場合よりも発熱速度が増加することが報告されている。

Friedman<sup>8)</sup>は、区画内で燃焼するPMMAの燃焼速度は自由空間で燃焼する場合の約3倍になるとしている。Takeda<sup>9)</sup>らは、小模型の中でメタノールを燃焼させた時の発熱速度が最大で自由空間で燃焼する場合の7倍になるとしている。若月ら<sup>10)</sup>は自由空間およびルームコーナー試験に用いられる区画の中で座椅子および二人がけのソファの燃焼実験を行い、区画内での燃焼時には最大発熱速度が1.3倍に増加することを明らかにした。

#### (2) 隣接する可燃物への延焼拡大を含めた初期火災性状

Emmons<sup>11)</sup>は室内での単体可燃物の隣接する可燃物への延焼拡大までの火災性状の予測モデルを提案し、実大空間で行ったウレタンフォーム間の延焼実験と比較している。このモデルでは、任意の火災成長率を与える火源、定常のプール火源、スラブ状のポリウレタンの燃焼速度の実験式を与える火源の三つの火源を想定している。燃焼速度からプルーム、開口流による熱、物質の移動、放射や対流による熱移動を考慮して煙層温度を計算している。

Mitler<sup>12)</sup>は、Emmonsが提案した初期火災モデル<sup>11)</sup>のうち、想定する火源等を改良したFifth Harvard Fire Codeを提案している。プール火源を適用する場合に、Emmonsのモデルでは、定常状態の火源の適用が可能であったが、このモデルでは、火炎や煙層、温められた壁か

らの放射熱により単位面積あたりの発熱速度が増加することを考慮して燃焼速度を求めている。さらに、Mittler<sup>13)</sup>は Fifth Harvard Fire Code を改良した初期火災モデルである FIRST を提案している。このモデルでは、スラブ状の可燃物の燃焼速度が、火炎や煙層からの放射熱により指数関数的に増加することを考慮している。

Poon<sup>14)</sup>は室内で出火した可燃物から隣接する可燃物への延焼拡大過程を予測方法を提案し、住宅の一室を模した実大空間での燃焼実験と比較を行っている。出火した可燃物および延焼した可燃物の発熱速度は時間の二乗に比例するとし、出火した可燃物の火炎や煙層、天井ジェットから隣接する可燃物の表面に入射する放射熱によりその表面温度を計算し、着火温度との比較により延焼時間を計算している。各可燃物の発熱速度の計算においては、換気量により燃焼が制限される影響を考慮している。提案したモデルを実大の小部屋を模した空間に複数の可燃物を設置して行った 2 種類の実験と比較し、煙層温度の実験結果と計算結果が一致することを明らかにしている。

抱ら<sup>15)</sup>は延焼拡大過程を燃焼物からの熱放出、未着火可燃物表面への熱伝達、未着火可燃物の温度上昇による着火の 3 段階に分類し、各現象をモデル化することによる延焼拡大モデルを提案している。隣接可燃物への延焼拡大については、出口ら<sup>16)</sup>は自由空間でのクリブを用いた延焼拡大実験を基に、クリブの燃焼により生じる火炎を放射源とした延焼拡大モデルを提案している。

### (3) 煙流動

初期火災における建築空間内の煙流動予測については、日本では田中ら<sup>17)</sup>による二層ゾーンモデルが広く使用されている。これは、室内の気体を煙のたまる上部層と、下部層の 2 つに分割し、各層のエネルギー収支と質量収支および室体積が一定であることから、各層の温度と体積、室内圧力を計算するものである。その他にも、鈴木ら<sup>18)</sup>は空間を複数の層分割した多層ゾーンモデルを提案しており、また、CFD による煙流動<sup>19)</sup>予測も行われている。

## 1. 4. 本研究の目的

本研究では、区画内での初期火災における物理現象において、単体可燃物の燃焼から隣接する可燃物への放射熱による延焼拡大の過程を予測する方法を提案する。特に、煙層や展炎、暖められた区画壁から燃焼物表面への放射熱（以下、外部放射とする）が単体可燃物の燃焼や隣接する可燃物への延焼拡大過程に与える影響を定量化し、発熱速度や延焼時間を予測する物理モデルを提案することを目的とする。

単体可燃物の燃焼性状については、前節に示したように、区画内で燃焼する可燃物が自由空間で燃焼する場合よりも発熱速度が増加することが定性的には明らかであるが、定量的な予測方法については提案されていない。そこで本研究では、区画内での固体可燃物の燃焼実験を行い、外部放射が燃焼速度に与える影響を定量化するとともに、燃焼速度の予

測モデルを提案する。

隣接する可燃物への延焼拡大については、前節で示したように、Mittler ら<sup>13)</sup>が提案している予測モデルでは、外部放射により単位面積あたりの燃焼速度が増加することを考慮しているが、その効果は実験により検証されていない。そこで、本研究では区画内で複数の立体的な固体可燃物を用いた延焼実験により、延焼時間や延焼後の可燃物の燃焼性状を把握するとともに、外部放射を考慮した延焼拡大過程の予測モデルを提案する。

## 1. 5. 本論文の構成

本論文の構成を図 1-3 に示す。

第1章では、序論として本研究の背景、既往の研究、目的について述べる。

第2章では、田中ら<sup>17)</sup>が提案した二層ゾーンモデルをベースに、外部放射を考慮した可燃物間の延焼拡大予測モデルの骨格を提案し、液体燃料を用いた延焼拡大実験と比較する。

第3章では、2章の延焼モデルの一部である火炎から射出される放射熱の計算方法を、実験結果と比較する。実験は天井高さをパラメーターとして、ガスバーナーを用いた火源上に形成される火炎から射出され床面に入射する放射熱を測定する。

第4章では、外部放射を受ける固体可燃物単体の燃焼性状を明らかにするため、煙層下でのウレタンブロックの燃焼実験を行った。さらに、佃ら<sup>7)</sup>が提案した自由空間でのウレタンブロックの燃焼速度に外部放射の影響を組み込んだ燃焼速度予測モデルを提案し、実験結果と比較する。

第5章では、固体可燃物間の延焼拡大性状を把握するため、複数のウレタンブロックを用いた煙層下での延焼拡大実験を実施し、固体可燃物間の延焼メカニズムや延焼後の燃焼性状を調べる。

第6章では、第2章で提案した延焼拡大モデルに、第4章の燃焼予測モデルと第5章の実験から知見を得た予熱の効果を加えて、固体可燃物間の延焼拡大予測モデルを提案し、第5章の実験結果と比較する。

第7章では、本論文の結論を示す。

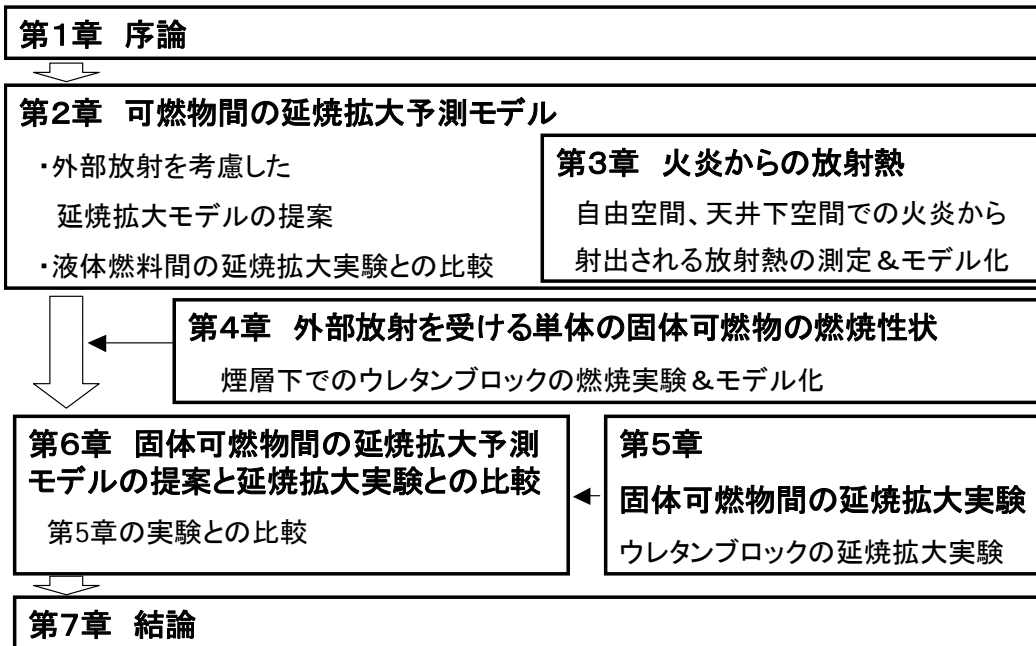


図 1-3 本論文の構成

[参考文献]

- 1) 火災誌編集小委員会: 新宿・歌舞伎町明星 56 ビル火災, 火災, 51(5), pp.5-11, 2001
- 2) 火災誌編集小委員会: 2004 年末に起きた重大火災 2 件, 火災, 55(1), pp.5-8, 2005
- 3) 火災, 56(1), pp.59, 2006
- 4) 火災, 57(1), pp.63, 2007
- 5) 水野雅之: 大阪市個室ビデオ店火災と仙台市老人介護施設火災について, 火災, 58(6), pp.32-34, 2008
- 6) 日本建築学会 局所火災に対する耐火設計 WG, シンポジウム「局所火災に対する耐火設計を考える」資料, 2005
- 7) 佃めぐみ: 周辺からの熱フィードバックを考慮した 3 次元可燃物の発熱速度予測モデルの提案, 日本火災学会研究発表会概要集, 2009
- 8) Friedman R.: Behavior of fires in compartment, International Symposium on Fire Safety of Combustible Materials, pp.100-113, 1975
- 9) Takeda H., Akita K.: Critical phenomena in compartment fires with liquid fuels, 18<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion, pp.519-527, 1981
- 10) 若槻薫, 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
- 11) Emmons H.W.: The Prediction of fire in buildings, Symposium (International) on Combustion, Volume 17, Issue 1, pp.1101-1111, 1979
- 12) Mitler H.E.: The Harvard Fire Model, Fire Safety Journal, Vo.9, pp.7-16, 1985
- 13) Mitler H.E., Rockett J.A.: User's Guide to FIRST, A comprehensive single-room fire model, NBSIR 87-3595, 1987
- 14) Poon L.: Modeling Fire Development for Fire Engineering Design, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, pp.264-275, 2002
- 15) 抱憲誓, 原田和典, 銚井修一, 高田暁: 複数可燃物間の燃焼拡大モデル, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.225-228, 2003
- 16) 出口嘉一, 河野守, 辻本誠, 五頭辰紀: 可燃物配置の不規則性を考慮した実験にもとづく火災延焼モデル, 日本建築学会環境系論文集, 第 594 号, pp.1-6, 2005.8
- 17) 田中哮義, 中村和人: 建築研究報告 No.123<二層ゾーンモデルの概念に基づく>建築内煙流動予測計算モデル, 建設省建築研究所, 1989
- 18) 鈴木圭一, 田中哮義, 原田和典, 吉田治典: 火災空間における垂直温度分布の予測モデル 多層ゾーン煙流動モデルの開発その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 582 号, pp.1-7, 2004.08
- 19) McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R., Mell W., McDermott R.: Fire Dynamics Simulator (Version5) Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1018-5, 2009

## 第2章

### 可燃物間の延焼拡大予測モデル

## 第2章の目次

2.	可燃物間の延焼拡大予測モデル .....	2-1
2. 1.	はじめに.....	2-1
2. 2.	延焼拡大予測モデルの構築に必要な物理現象と本モデルでの取り扱い	2-2
2. 3.	計算手順.....	2-6
2. 4.	物理現象の定式化.....	2-7
2. 4. 1.	ゾーン方程式.....	2-7
2. 4. 2.	発熱速度.....	2-8
2. 4. 3.	火炎からの直接放射.....	2-9
2. 4. 4.	壁表面からの直接放射.....	2-13
2. 4. 5.	煙層および空気層からの直接放射.....	2-13
2. 4. 6.	壁表面での反射成分.....	2-14
2. 4. 7.	対流による熱伝達.....	2-15
2. 4. 8.	壁の表面温度.....	2-15
2. 4. 9.	周辺可燃物の延焼条件.....	2-15
2. 5.	液体燃料を用いた延焼拡大実験との比較.....	2-16
2. 5. 1.	実験概要.....	2-16
2. 5. 2.	計算条件.....	2-17
2. 5. 3.	計算結果.....	2-18
2. 6.	本章の結論.....	2-22

### <本章の概要>

本章では、建築空間内で離散的に配置された複数の可燃物が放射熱により延焼する現象の予測モデル（以下、延焼拡大予測モデル）の骨格を提案した。初期火災における煙流動性状を二層ゾーンモデルで表し、壁要素を可燃物と同程度の大きさに分割しすることで放射熱の取り扱いを正確にし、さらに、外部放射により燃焼する可燃物の発熱速度が増加する効果を考慮した。本モデルを液体燃料を入れた火皿間の延焼拡大実験と比較した。

可燃物が単独で燃焼する場合については外部放射の影響は比較的小さいが、延焼拡大が進み、煙層の温度が上昇するに従って影響は大きくなる傾向を明らかにした。たれ壁深さが低くなるに従い、燃焼面積が一定の可燃物間の延焼時間や燃焼継続時間が短くなる傾向を、単位面積あたりの燃焼速度が外部放射により増加することを考慮することで定量化した。



## 2. 可燃物間の延焼拡大予測モデル

### 2. 1. はじめに

本章では、建築空間内で離散的に設置された複数の可燃物が放射熱により延焼する現象の予測モデル（以下、延焼拡大予測モデル）を提案した。延焼拡大予測モデルは燃焼による発熱、生じた熱や質量の移動を計算する複数のサブモデルから構成される。延焼拡大予測モデルは以下の条件の下に構築した。

- (1) 室を構成する床、天井、壁は火災による破壊や脱落、燃え抜けなどがなく、当初の形状を保つ。
- (2) 壁、床、天井の内装材や下地材などは燃焼しない。ただし、火災の熱をうけて、躯体の温度上昇は生じる。
- (3) 設置される可燃物の形状や着火に関わる熱物性値、自由空間での燃焼性状は既知である。
- (4) 火災時に区画内は高温の煙からなる煙層と温度の低い空気層の二層状態となる。

本章ではまず、延焼拡大モデルの構築に必要な物理現象を列挙し、その後、各現象の詳細な計算方法を述べる。

## 2. 2. 延焼拡大予測モデルの構築に必要な物理現象と本モデルでの取り扱い

本節では、延焼拡大予測モデルの構築に必要な物理現象をゾーン方程式、物質の移動、熱の移動、可燃物の燃焼性状、延焼条件の 5 つに分類し、本モデルでのそれぞれの取り扱いについて述べる。

延焼拡大予測モデルの概要を図 2-1 に示す。図中で物質の移動はブロック矢印 ( $\blacktriangleright$ ) で、熱の移動は矢印 ( $\rightarrow$ ) で表す。

室内の空間を上下の二層（煙層と空気層）に分割し、層（ゾーン）間の物質の移動、熱の移動を表したものをゾーンモデルと呼ぶ<sup>1)</sup>。ただし、火炎からの放射熱については、詳細に取り扱うため、別途火炎モデルとする。また、可燃物の燃焼性状は燃焼モデル、延焼条件は着火モデルとする。

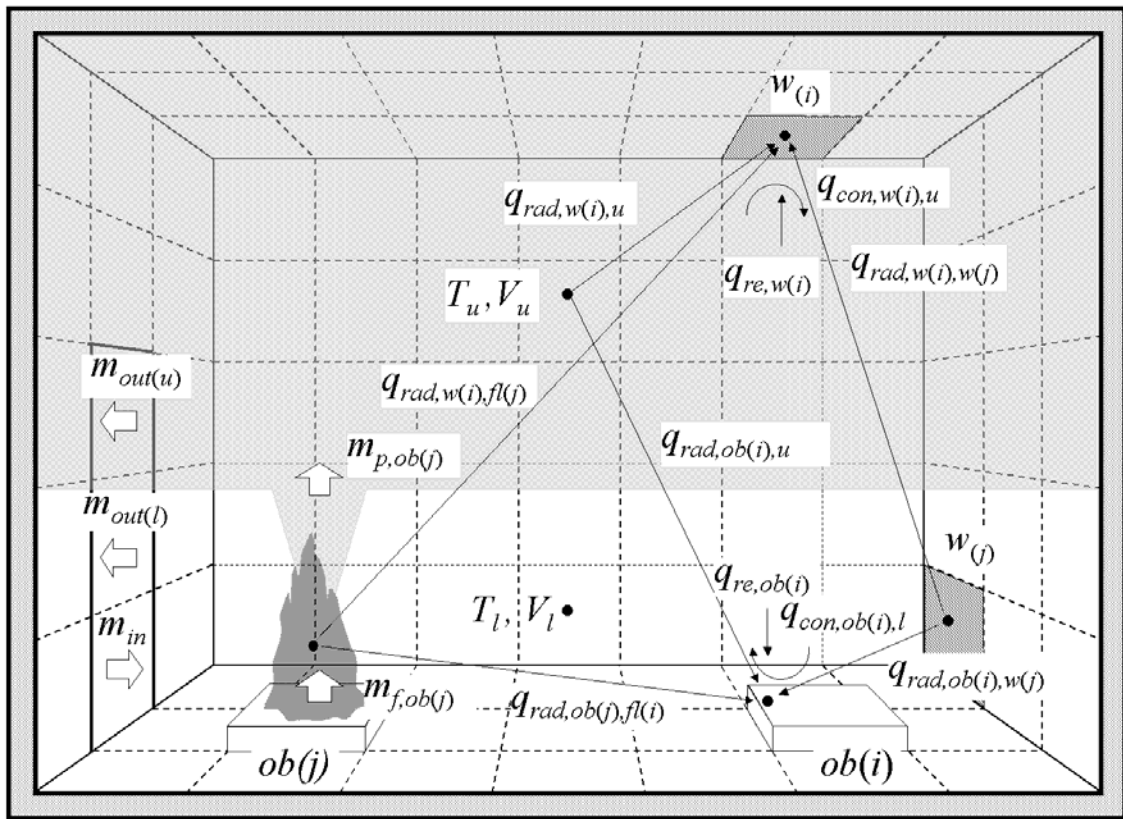


図 2-1 モデルの概要

### (1) ゾーン方程式

田中により定式化された二層ゾーンモデル<sup>1)</sup>の考え方にに基づき、煙層および空気層の境界面の高さ（煙層下端高さ）および二つの層の温度を求めた。ただし、発熱速度の取り扱いについては、対流と放射成分を分離し、別々に計算した（詳細については、(3) 熱移動を参照）。

### (2) 物質の移動

図 2-2 に物質の移動を示す。延焼拡大予測モデルにおいて、物質の移動は、可燃物の燃焼により生じるプルーム流量  $m_p$  と開口流出入量  $m_{in}, m_{out}$ 、可燃性ガスの発生量  $m_f$  を考慮した。

プルーム流量については、Heskestad の実験式<sup>2)</sup>から煙層に貫入する流量の予測が可能なたためその成果を活用した。

開口流についても同様に、田中らの研究成果<sup>1)</sup>から開口部での流出入量の予測が可能なたためその成果を活用した。

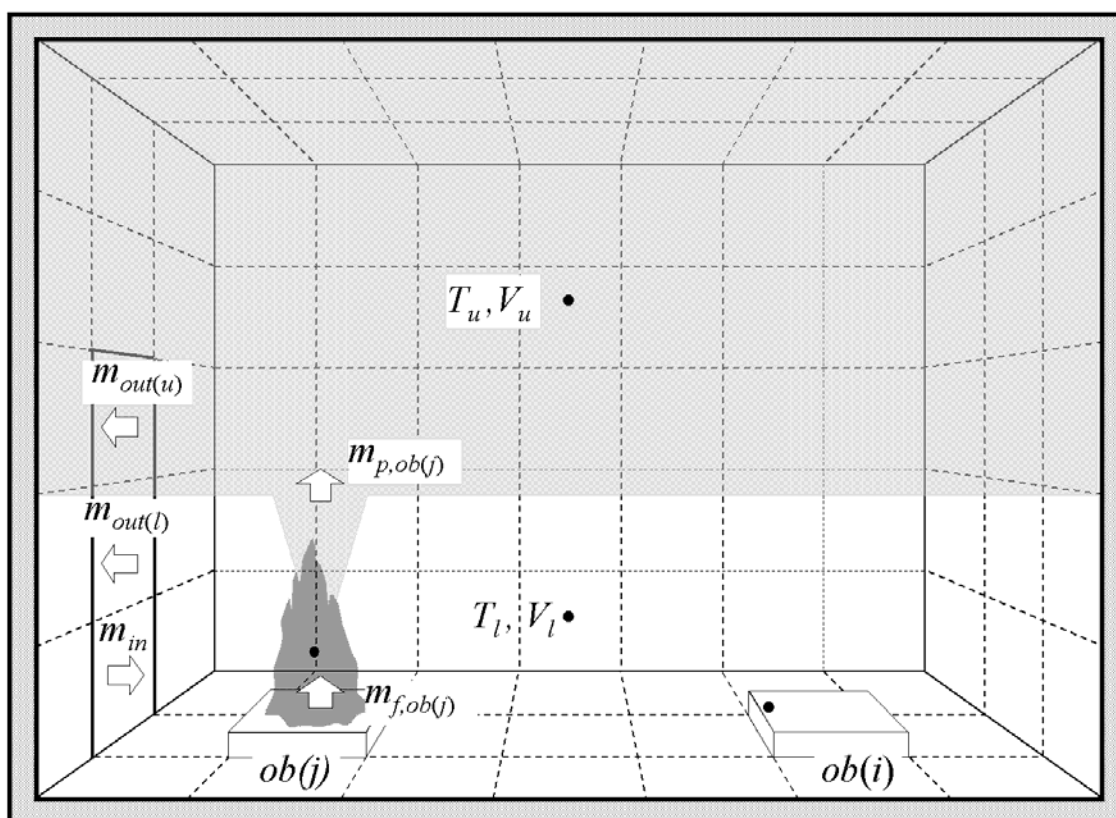


図 2-2 物質の移動のモデル化

### (3) 熱の移動

図 2-3 に熱移動を示す。延焼拡大予測モデルにおいて、熱の移動は火炎からの直接放射、煙層からの直接放射、区画壁表面からの直接放射、区画壁表面での直接放射の反射、区画壁表面と煙層または空気層との対流熱伝達、区画壁および可燃物内の熱伝導を考慮した。また、田中らの提案する二層ゾーンモデル<sup>1)</sup>では燃焼に燃焼により生じた発熱は全て煙層に吸収されるとしているが、本モデルでは、対流成分と放射成分に分割した。対流成分は全て煙層に吸収されるとし、放射成分（火炎からの直接放射）は2.4.3節に示すように火炎を円柱で近似し、その形態係数に応じて壁や可燃物、煙層に吸収されるとした。

煙層からの放射熱、区画壁からの放射熱については、田中ら<sup>1)</sup>が提案した方法と同様に計算した。ただし、煙層の有効吸収係数の算出方法については、独自の考え方を導入する。また、対流熱伝達の計算にあたり、山田ら<sup>3)</sup>が提案する対流熱伝達率を用いた。個体内の熱伝導は非定常の一次元熱伝導方程式により計算した。

開口部は外気温度と同等の壁とすることにより、開口部からの放射による熱損失を考慮した。

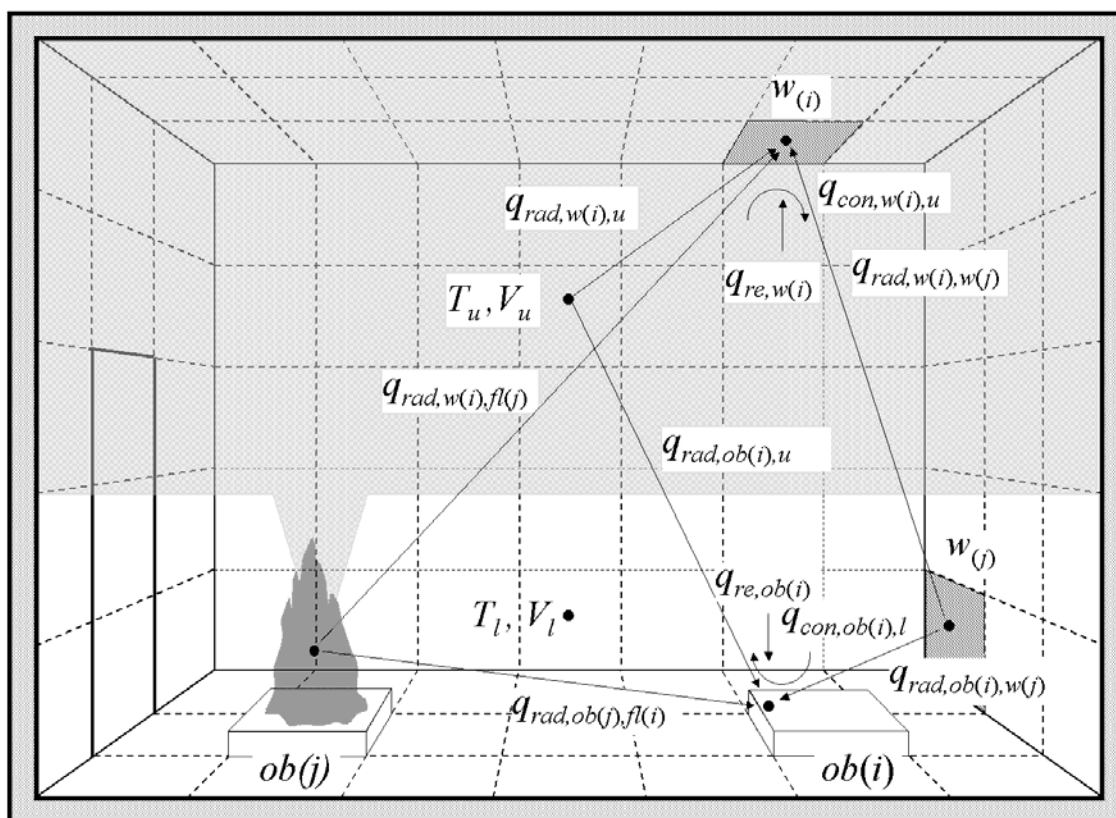


図 2-3 熱移動のモデル化

#### (4) 可燃物の燃焼性状

可燃物の燃焼性状は、最初に着火した可燃物（以下、加熱側可燃物）の燃焼性状と延焼した可燃物（以下、受熱側可燃物）の燃焼性状の二つに大きく分けることができる。

加熱側可燃物の燃焼性状については、モデル化の条件として自由空間での発熱速度が既知であるとする。ただし、本モデルでは出火室内での延焼拡大を対象としているため、高温の煙層や他の燃焼物からの放射熱を受ける。周囲から放射熱を受ける場合には、自由空間で燃焼する場合よりも発熱速度が増加することが定性的には知られているため<sup>4)</sup>、この効果（以下、フィードバック効果）を考慮したモデル化を行った。

受熱側可燃物の燃焼性状については、既往の知見が乏しいため、本章では出火可燃物と同様に取り扱った。

#### (5) 可燃物の延焼条件

煙層、火炎、および温められた周壁から火炎表面への放射熱により周囲の可燃物の表面温度が上昇し、材料の熱分解が生じる。この時、熱分解が生じている部分の近傍に、火炎片が届いた段階で延焼すると考えた。

### 2. 3. 計算手順

延焼拡大予測モデルの計算の手順を図 2-4 に示す。

まず、前の時間ステップでの可燃物の表面温度と着火温度の比較により、各可燃物の延焼判定を行う (①可燃物の延焼条件)。次に、燃烧する可燃物に入射する放射熱と自由空間での発熱速度 (入力値) から発熱速度 (燃烧速度に単位発熱量を乗じたもの) を計算する (②可燃物の燃烧性状)。次に、前の時間ステップでの壁体表面および可燃物表面に入射する熱流束から非定常一次元熱伝導方程式により壁体および可燃物の表面温度を計算する (③壁体内および可燃物内の熱伝導)。前のステップの煙層温度、壁体および可燃物の表面温度、発熱速度 (火炎からの放射熱の計算に使用する) から各表面間の放射熱伝達を計算する (④室表面間の放射熱伝達)。次に、前のステップの煙層温度、空気層温度、可燃物および壁体の表温度から対流熱伝達を計算する (⑤煙層、空気層と固体表面間の対流熱伝達)。最後に、発熱速度、放射および対流による熱伝達から、煙層温度、空気層温度、煙層下端高さを計算する (⑥ゾーン方程式)。この手順をすべての可燃物が燃え尽きるまで繰り返す。

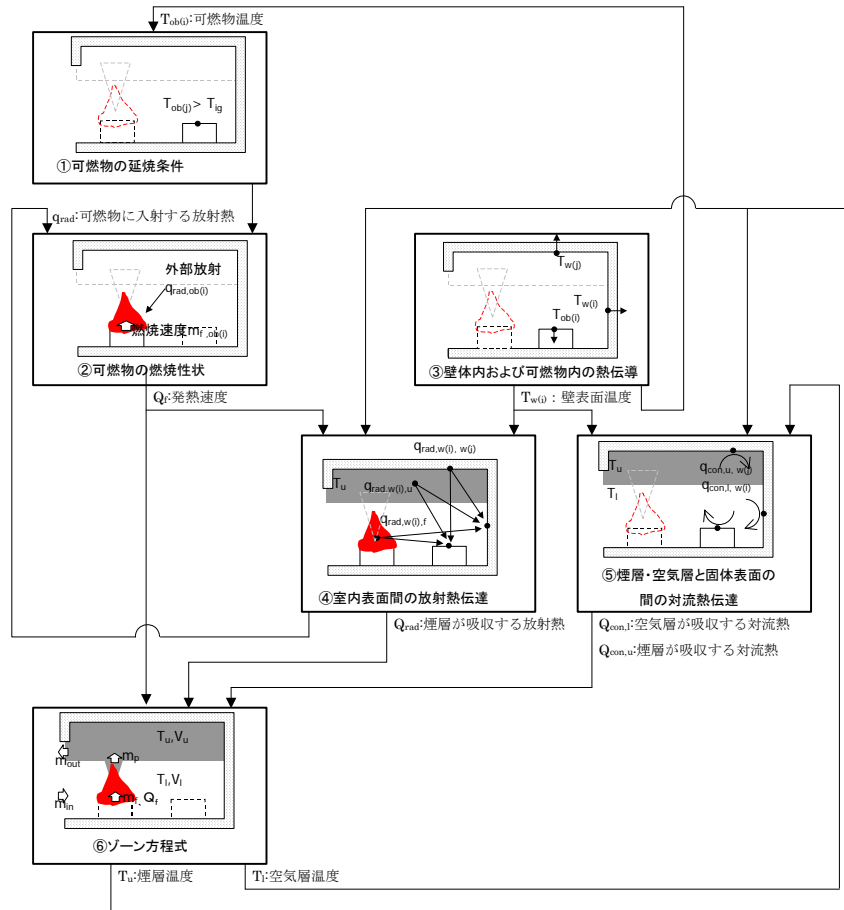


図 2-4 延焼拡大予測モデルの計算手順

## 2. 4. 物理現象の定式化

### 2. 4. 1. ゾーン方程式

田中ら<sup>1)</sup>が提案したゾーン方程式から発熱速度を対流成分と放射成分に分離する点のみを変更したゾーン方程式を(2-1)～(2-5)に示す。区画内の気体を煙層と空気層の二層に分割し、各層のエネルギー、質量の収支および区画の容積が一定であることから導出した。

$$\begin{aligned} \frac{d(C_p \rho_u V_u T_u)}{dt} = & \sum_j^{nb} (1 - \chi) Q_{ob(j)} + Q_u \\ & + \sum_j^{nb} C_p (m_{p,ob(j)} - m_{f,ob(j)}) T_l - C_p m_{out(u)} T_u \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(C_p \rho_l V_l T_l)}{dt} = & Q_l - \sum_j^{nb} C_p (m_{p,ob(j)} - m_{f,ob(j)}) T_l \\ & + C_p m_{in} T_\infty - C_p m_{out(l)} T_l \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$\frac{d(\rho_u V_u)}{dt} = \sum_j^{nb} m_{p,ob(j)} - m_{out(u)} \quad (2-3)$$

$$\frac{d(\rho_l V_l)}{dt} = \sum_j^{nb} m_{f,ob(j)} - \sum_j^{nb} m_{p,ob(j)} + m_{in} - m_{out(l)} \quad (2-4)$$

$$\frac{dV_u}{dt} + \frac{dV_l}{dt} = 0 \quad (2-5)$$

ここで、区画内部への流入質量  $m_{in}$ 、煙層からの流出質量  $m_{out(u)}$ 、空気層からの流出質量  $m_{out(l)}$  の計算方法は文献<sup>1)</sup>に従った。可燃物  $ob(j)$  の燃焼により生じるプルームの流量  $m_{p,ob(j)}$  は、火炎が煙層に貫入する状況では Heskestad<sup>2)</sup>式の使用が渡部<sup>5)</sup>により推奨されているので、本研究でも Heskestad 式を用いる。

可燃物  $ob(j)$  の燃焼により生ずる発熱速度  $Q_{ob(j)}$  は放射成分  $\chi Q_{ob(j)}$  と対流成分  $(1 - \chi) Q_{ob(j)}$  とに分離した。対流成分は、煙層に貫入して温度を直接上昇させる。放射成分は、火炎表面から射出された後に、煙層、壁表面（可燃物表面を含む）の何れかに吸収される。

煙層および空気層が熱伝達により吸収する熱量  $Q_u$  および  $Q_l$  は、式(2-6)および(2-7)から算出した。ここで、 $Q_{rad,u,w}$  は壁からの煙層への直接放射、 $Q_{rad,u,fl}$  は火炎からの直接放射、 $Q_{re,u}$  は区画壁表面での反射成分のうち上部層に吸収される熱流、 $Q_{con,u}$ 、 $Q_{con,l}$  は対流による煙層、空気層への熱伝達を示す。ただし、空気層の放射率は簡単のため 0 とした。各項の具体的な計算方法は 2.4.3～2.4.節に示す。

$$Q_u = Q_{rad,u,w} + Q_{rad,u,fl} + Q_{re,u} + Q_{con,u} - A_u \varepsilon_u \sigma T_u^4 \quad (2-6)$$

$$Q_l = Q_{con,l} \quad (2-7)$$

## 2. 4. 2. 発熱速度

可燃物  $ob(j)$  の燃焼により生じる発熱速度  $Q_{ob(j)}$  は可燃物表面に入射する熱流束などから可燃性ガスの発生速度  $m_{f,ob(j)}$  を計算し、単位重量当たりの発熱量  $\Delta H_{c,ob(j)}$  を乗じて計算した。

プール火源のように、燃焼中に燃焼面積や燃焼面の高さが変化しない可燃物  $ob(j)$  が、煙層や火炎、壁からの放射熱  $q_{rad,ob(j)}$  を受ける場合の可燃性ガスの発生速度  $m_{f,ob(j)}$  を式(2-8)を用いて算出した。ただし、自由空間での可燃性ガスの発生速度  $m_{f,ob(j),\infty}$  が測定等により既知であるとした。

$$m_{f,ob(j)}(t) = m_{f,ob(j),\infty}(t_{eq}) + \frac{(1 - \varepsilon_{fl(j)}) (q_{rad,ob(j)}(t) - \varepsilon_{\infty} \sigma T_{\infty}^4) A_{ob(j)}}{\Delta H_{v,ob(j)} + C_{p,ob(j)} (T_{b,ob(j)} - T_{\infty})} \quad (2-8)$$

ここで、 $t_{eq}$  は外部放射を受ける場合の可燃性ガス発生量の積算値が自由空間での積算値と等しくなる時間とした (図 2-6 参照)。これは、外部放射により発熱速度が増加した分だけ、可燃物の燃焼の進行が早く進むと考えたためである。

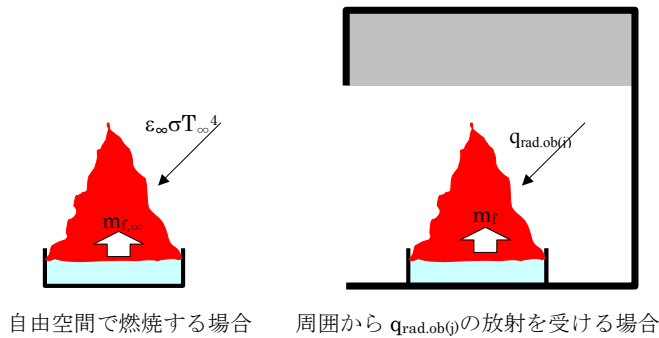


図 2-5 可燃性ガスの発生速度の計算のイメージ

可燃物  $ob(j)$  に入射する熱流束  $q_{rad,ob(j)}$  は周りの火炎からの直接放射 (2.4.3 節)、壁からの直接放射 (2.4.4 節)、煙層からの直接放射 (2.4.5 節) の和とし、この値の自由空間で燃焼する場合に受ける熱流束からの増分を外部放射と呼ぶ。また、可燃物表面に入射せずに火炎で吸収される熱流  $\varepsilon_{fl(j)} q_{rad,ob(j)} A_{ob(j)}$  については、火炎からの放射熱として再び周囲に放出されるとした。

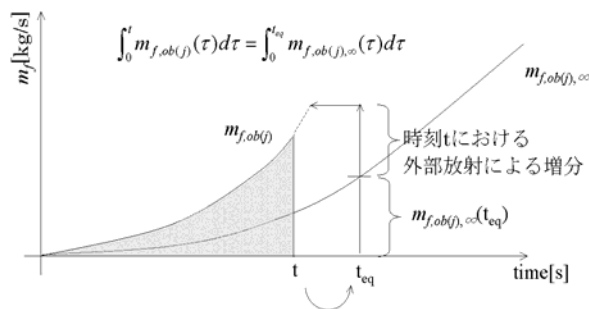


図 2-6 可燃性ガスの速度の計算方法



### 2. 4. 3. 火炎からの直接放射

#### (1) 火炎形状の近似

火炎を図 2-7 に示すように、連続火炎高さ  $L_c$  までの円柱（火炎温度  $820^\circ\text{C}$ ）と平均火炎高さ  $L_m$  までの円柱（火炎温度  $704^\circ\text{C}$ ）<sup>注1</sup> の二つで近似する。

火炎が天井に展炎しない場合には、長谷見ら<sup>6</sup>が提案する式(2-9)、(2-10)を用いて連続火炎高さと平均火炎高さを計算した。

$$L_c / D = 1.8 \times \begin{cases} Q^{*2/3} & (Q^* < 1) \\ Q^{*2/5} & (Q^* \geq 1) \end{cases} \quad (2-9)$$

$$L_m / D = 3.4 \times \begin{cases} Q^{*2/3} & (Q^* < 1) \\ Q^{*2/5} & (Q^* \geq 1) \end{cases} \quad (2-10)$$

火炎が天井に展炎する場合は、図 2-7 に示すように展炎部を加えて三つの円柱で近似する。展炎長さ  $L_r$  は You ら<sup>7</sup>が提案する式(2-11)を用いて計算した。ここで、 $L_f$  は自由空間での火炎長さを表す。

$$L_r / D = 0.50 \left[ (L_f - H) / D \right]^{0.96} \quad (2-11)$$

ただし、展炎長さ  $L_r$  が火源半径より大きくなる場合のみ展炎部分を考慮した。展炎部分の火炎の厚みについては、知見が乏しいがここでは火源径の半分  $D/2$  とする。

火炎が煙層に含まれる場合には煙層に含まれる部分と含まれない部分に分割し計算した。ここで、連続火炎高さよりも煙層下端高さが低くなると、煙層の酸素濃度が低下して不完全燃焼となるため、火炎形状は図 2-7 で近似できなくなるが、現状では知見が不足しているため今後の課題とする。

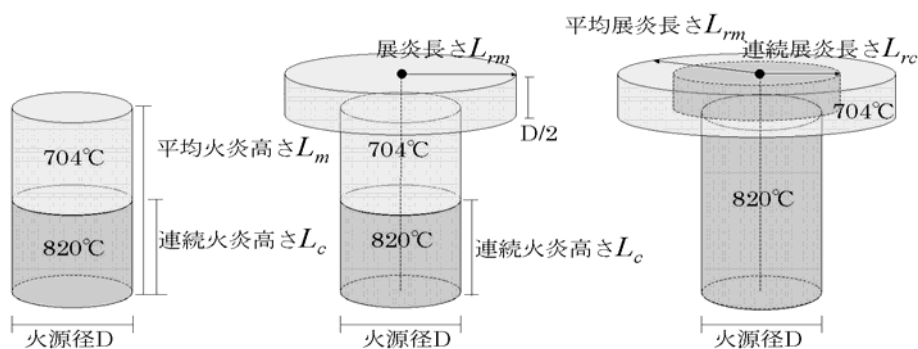


図 2-7 火炎形状の近似

(2) 火炎からの放射発散度

発熱速度のうちの放射で放散する熱量は、火炎表面から射出される放射熱流と等しいので次式が成り立つ。

$$\chi Q_{ob(j)} = \varepsilon_{fl(j)} (E_{820} A_{820(j)} + E_{704} A_{704(j)}) \quad (2-12)$$

ここで、 $E_{820}$ 、 $E_{704}$  は 820°C および 704°C の黒体の放射発散度 ( $E_{820}=81\text{kW/m}^2$ 、 $E_{704}=52\text{kW/m}^2$ )、 $A_{820(j)}$ 、 $A_{704(j)}$  は可燃物  $ob(j)$  上に生ずる火炎の表面積であり図 2-7 の火炎形状から求める。McCafferey<sup>7)</sup> によると、発熱速度のうちの放射成分の割合  $\chi$  は、火源径が 0.25m 以下であればほぼ一定となるため<sup>注 2</sup>、式(2-12)を用いて各時間での火炎の放射率  $\varepsilon_{fl(j)}$  を算出することができる。

また、2.4.2 節において述べたように、外部放射の一部は燃焼中の可燃物表面に入射する直前に火炎部分で吸収される。吸収された放射熱は、火炎表面から均一に再放射されると近似すると再放射による放射発散度  $E_f$  は次式から求めることができる。

$$E_{f(j)} = \frac{\varepsilon_{fl(j)} q_{rad,ob(j)} A_{ob(j)}}{A_{820(j)} + A_{704(j)}} \quad (2-13)$$

火炎からの放射発散度は、式(2-13)により求めた放射発散度  $E_{f(j)}$  と式(2-12)より求めた 820°C および 704°C のガス体から射出される放射発散度の和とした。

(3) 壁表面への放射熱流

火炎が天井に展炎せず、煙層下端が連続火炎高さと平均火炎高さの間に存在する（火炎温度 704°C の部分が一部煙層内に存在する）場合には、可燃物  $ob(j)$  の燃焼により生じる火炎  $fl(j)$  から煙層に接する壁  $w(i)$  に入射する直接放射  $q_{rad,w(i),fl(j)}$  は次の式から求めることができる。

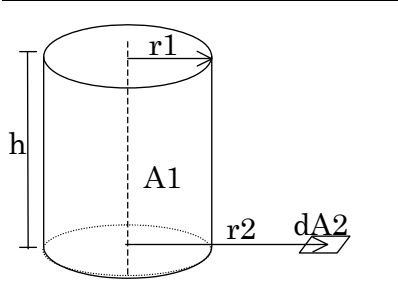
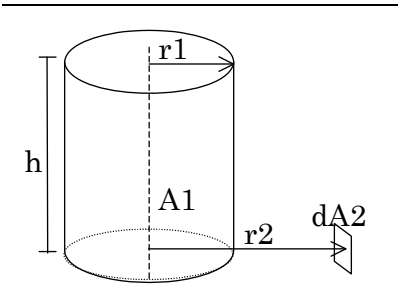
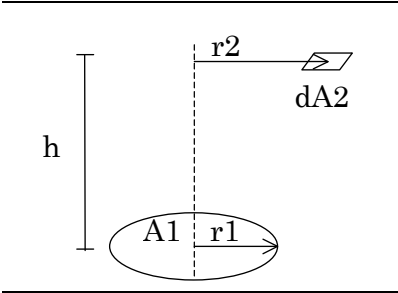
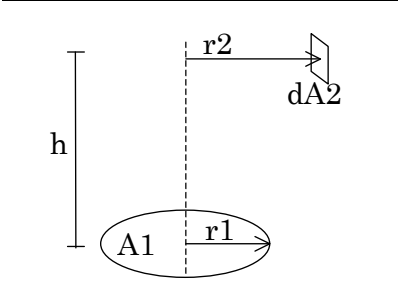
$$\begin{aligned} q_{rad,w(i),fl(j)} = & F_{w(i),820l(j)} (\varepsilon_{fl(j)} E_{820} + E_{f(j)}) (1 - \varepsilon_u) \\ & + F_{w(i),704l(j)} (\varepsilon_{fl(j)} E_{704} + E_{f(j)}) (1 - \varepsilon_u) \\ & + F_{w(i),704u(j)} (\varepsilon_{fl(j)} E_{704} + E_{f(j)}) (1 - \varepsilon_u) \end{aligned} \quad (2-14)$$

ただし、煙層の放射率は  $\varepsilon_u$ 、空気層の放射率は 0 と近似した。 $F_{w(i),820l(j)}$  は壁要素  $w(i)$  に対する火炎温度が 820°C で空気層に含まれる部分の形態係数、 $F_{w(i),704l(j)}$  は壁要素  $w(i)$  に対する火炎温度が 704°C で空気層に含まれる部分の形態係数、 $F_{w(i),704u(j)}$  は壁要素  $w(i)$  に対する火炎温度が 704°C で煙層に含まれる部分の形態係数である。形態係数の計算に使用した式を表 2-1 に示す。

式(2-14)は煙層での吸収を考慮しているが、火炎のうち空気層に含まれる部分から空気層に接する壁への放射熱伝達のように、煙層を透過しない場合については、途中の経路での吸収は考慮しない。また、壁要素  $w(i)$  と火炎の間に別の火炎がある場合には、遠方の火炎からの放射熱の一部が手前側の火炎により吸収されるが、この影響については本モデルでは考慮しないものとする。

火炎が天井に接炎する場合には、図 2-7 の中央または右側の火炎形状を仮定して同様の計算を行う。詳細は第 3 章で検討する。

表 2-1 形態係数の計算式<sup>9)10)</sup>

	$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} R$ $+ \frac{1}{\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \right) - \frac{1+L^2-R^2}{X} \tan^{-1} \left( \frac{X \tan(0.5 \cos^{-1} R)}{1+L^2+R^2-2R} \right) \right]$ $R = r1/r2, L = h/r2, X = \sqrt{(1+L^2+R^2)^2 - 4R^2}$
	$F_{d1-2} = \frac{1}{\pi H} \tan^{-1} \left( \frac{L}{\sqrt{H^2-1}} \right)$ $+ \frac{L}{\pi} \left[ \frac{X-2H}{H\sqrt{XY}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} - \frac{1}{H} \tan^{-1} \sqrt{\frac{H-1}{H+1}} \right]$ $L = h/r1, H = r2/r1, X = (1+H)^2 + L^2, Y = (1-H)^2 + L^2$
	$F_{d1-2} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1+H^2-R^2}{\sqrt{Z^2-R^2}} \right)$ $H = h/r2, R = r1/r2, Z = 1+H^2+R^2$
	$F_{d1-2} = \frac{H}{2} \left( \frac{Z}{\sqrt{Z^2-4R^2}} - 1 \right)$ $H = h/r2, R = r1/r2, Z = 1+H^2+R^2$

(4) 煙層に吸収される放射熱流

燃焼している各火炎から全ての壁要素への放射熱伝達の和をとることにより、煙層に吸収される熱流を次式で計算した。

$$Q_{rad,fl,u} = \sum_i^{mw} \sum_j^{nb} Q_{rad,w(i),fl(j),u} \quad (2-15)$$

可燃物  $ob(j)$  の燃焼により生じる火炎  $fl(j)$  から煙層に接する壁要素  $w(i)$  への放射による熱移動の過程で、煙層に吸収される熱流は次式により表すことができる。

$$\begin{aligned} Q_{rad,w(i),fl(j),u} = & A_{w(i)} F_{w(i),820l(j)} (\varepsilon_{fl(j)} E_{820} + E_{f(j)}) \varepsilon_u \\ & + F_{w(i),704l(j)} (\varepsilon_{fl(j)} E_{704} + E_{f(j)}) \varepsilon_u \\ & + F_{w(i),704u(j)} (\varepsilon_{fl(j)} E_{704} + E_{f(j)}) \varepsilon_u \end{aligned} \quad (2-16)$$

煙層の放射率  $\varepsilon_u$  は次の式から算出した。

$$\varepsilon_u = 1 - e^{-k_u L_{mb,u}} \quad (2-17)$$

ここで、 $k_u$  は煙層の有効吸収係数、 $L_{mb,u}$  は煙層の平均行路長さである。平均行路長さは煙層の体積  $V_u$  と表面積  $A_u$  から  $L_{mb,u} = 3.6V_u/A_u$  として計算した。

火炎および煙などのガス体において放射を吸収するのはスス、二酸化炭素、水蒸気であるので、煙層の有効吸収係数は次のように表すことができる。

$$k_u = k_{soot} + k_{CO_2} + k_{H_2O} \quad (2-18)$$

二酸化炭素と水蒸気の吸収係数を逐一計算するのは煩雑であるが、Orloff<sup>11)</sup>によると、煙層の有効吸収係数はススのみを考慮した場合の概ね 2 倍となるので、ここでは簡単のため次のように近似する。

$$k_u = 2k_{soot} \quad (2-19)$$

また、ススのみを考慮した場合の有効吸収係数  $k_{soot}$  はススの体積分率  $f_v$  に比例し、次のような関係がある<sup>12)</sup>。

$$k_{soot} = \frac{7}{0.94 \times 10^{-6}} f_v \quad (2-20)$$

煙層のススの体積分率  $f_{v,u}$  は煙層内のススの収支式(2-21)から計算した。

$$\frac{d(\rho_{soot} f_{v,u} V_u)}{dt} = \sum_j^{nb} m_{soot,ob(j)} - \frac{\rho_{soot} f_{v,u} m_{out(u)}}{\rho_u} \quad (2-21)$$

可燃物  $ob(j)$  の燃焼により生じるススの発生量  $m_{soot,ob(j)}$  は、火炎中のススの体積分率  $f_{v,f}$  および可燃ガスの発生速度  $m_{f,ob(j)}$  に比例すると仮定して次式で表す。<sup>注3</sup>

$$m_{soot,ob(j)} = (Cf_{v,f}) m_f \quad (2-22)$$

ここで、火炎中のススの体積分率  $f_{v,f}$  は式(2-12)で求めた火炎の放射率  $\varepsilon_{fl(j)}$  から有効吸収係数  $k_{fl(j)}$  を式(2-23)から求め、さらに式(2-20)の関係を用いて逆算した。

$$\varepsilon_{fl(j)} = 1 - e^{-k_{fl(j)} L_{mb(j)}} \quad (2-23)$$

また、火炎の平均行路長さ  $L_{mb(i)}$  は次式で計算した<sup>13)</sup>。

$$L_{mb(j)} / D_{ob(j)} = 0.81 \left( 1 - e^{-1.8 L_{m(j)} / D_{ob(j)}} \right) \quad (2-24)$$

ここで、 $L_{m(j)}$  は平均火炎高さ、 $D_{ob(j)}$  は可燃物  $ob(j)$  の火源径である。

#### 2. 4. 4. 壁表面からの直接放射

壁からの直接放射は、図 2-3 に示すように壁表面を可燃物の主な受熱面と大きさがほぼ等しい  $n_w$  個の長方形要素に分割し、要素間の相互放射による熱伝達を計算した。図 2-3 に示す壁要素  $w(j)$  から壁要素  $w(i)$  に入射する熱流束  $q_{rad,w(i),w(j)}$  は煙層を透過するので、その放射率  $\varepsilon_u$ 、 $w(i)$  に対する  $w(j)$  の形態係数  $F_{w(i),w(j)}$ 、要素  $w(j)$  の放射率および表面温度  $T_{w(j)}$  を用いて、次のように表すことができる。

$$q_{rad,w(i),w(j)} = F_{w(i),w(j)} \varepsilon_{w(j)} \sigma T_{w(j)}^4 (1 - \varepsilon_u) \quad (2-25)$$

ここで、 $F_{w(i),w(j)}$  は各要素に含まれる微小要素  $dA_{w(i)}$ 、 $dA_{w(j)}$  とその中心を結ぶ線の長さ  $S$ 、その線とそれぞれの面の法線がなす角  $\beta_{dA_{w(i)}}$ 、 $\beta_{dA_{w(j)}}$  を用いて次の式から計算した。

$$F_{w(i),w(j)} = \frac{1}{A_{w(i)}} \int_{A_{w(i)}} \int_{A_{w(j)}} \frac{\cos \beta_{dA_{w(i)}} \cos \beta_{dA_{w(j)}}}{S^2} dA_{w(i)} dA_{w(j)} \quad (2-26)$$

また、壁要素  $w(j)$  から  $w(i)$  に至る経路で煙層に吸収される熱流  $Q_{rad,w(i),w(j),u}$  は次の式で表すことができる。

$$Q_{rad,w(i),w(j),u} = F_{w(i),w(j)} \varepsilon_{w(j)} \sigma T_{w(j)}^4 \varepsilon_u A_{w(i)} \quad (2-27)$$

分割した全要素間の放射熱伝達を考慮することで煙層に吸収される熱流  $Q_{rad,u,w}$  を次の式から計算した。

$$Q_{rad,u,w} = \sum_i^{n_w} \sum_{j,j \neq i}^{n_w-1} Q_{rad,w(i),w(j),u} \quad (2-28)$$

#### 2. 4. 5. 煙層および空気層からの直接放射

煙層から射出された後、空気層に接する壁要素  $w(i)$  に入射する熱流束  $q_{rad,w(i),u}$  は次の式から計算した。

$$q_{rad,w(i),u} = F_{w(i),u} \varepsilon_u \sigma T_u^4 \quad (2-29)$$

ここで、 $F_{w(i),u}$  は要素  $w(i)$  に対する煙層の下面の形態係数で壁の要素間の形態係数と同様に計算した。煙層から煙層に接する要素  $w(j)$  に入射する熱流束  $q_{rad,w(j),u}$  についても同様に計算

した。

#### 2. 4. 6. 壁表面での反射成分

放射熱のうち壁面での反射成分は直接放射（火炎からの直接放射、壁からの直接放射、煙層からの直接放射の和）よりも一桁ほど小さなオーダーなので、簡略化して計算する。空間の壁を煙層に接する壁  $wu$  と空気層に接する壁  $wl$  の二つに分割して相互反射計算を行った。

煙層に接する壁  $wu$  の放射率を  $\varepsilon_{wu}$  とすると、そこに入射する放射熱流束  $q_{wu}$ （直接放射の計算では壁を細分しているため、各壁要素に入射する直接放射の平均値）のうち、 $\varepsilon_{wu}q_{wu}$  が壁に吸収され、残りの  $(1-\varepsilon_{wu})q_{wu}$  は反射することになる。この反射成分  $(1-\varepsilon_{wu})q_{wu}$  のうち壁  $wu$  および空気層に接する壁  $wl$  に入射する熱流束は次の式で表すことができる。

$$q_{rel,wl,wu} = (1-\varepsilon_{wu})q_{wu}F_{wl,wu}(1-\varepsilon_u) \quad (2-30)$$

$$q_{rel,wu,wu} = (1-\varepsilon_{wu})q_{wu}F_{wu,wu}(1-\varepsilon_u) \quad (2-31)$$

また、この際に煙層に吸収される熱流  $Q_{rel,u,wu}$  は次の式で表すことができる。

$$Q_{rel,u,wu} = (1-\varepsilon_{wu})q_{wu}F_{wl,wu}\varepsilon_u A_{wl} + (1-\varepsilon_{wu})q_{wu}F_{wu,wu}\varepsilon_u A_{wu} \quad (2-32)$$

ここで、 $F_{wl,wu}$  は壁  $wl$  に対する壁  $wu$  の形態係数、 $F_{wu,wu}$  は壁  $wu$  に対する壁  $wu$  の形態係数、 $A_{wu}$  は壁  $wu$  の表面積、 $A_{wl}$  は壁  $wl$  の表面積を表す。同様に壁  $wl$  での 1 回目の反射成分についても計算を行い、煙層に接する壁  $wu$  および空気層に接する壁  $wl$  に入射する熱流束はそれぞれ、 $q_{rel,wu,wl}$ 、 $q_{rel,wl,wl}$  とする。また、2 回目の反射、3 回目の反射についても同様に計算し、各記号の添え字の  $rel$  をそれぞれ  $re2$ 、 $re3$  と変えて表す。通常の建築部材の放射率は 0.9 程度なので、3 回反射すると、初期値の 1% 以下となるため、ここでは反射の計算は 2 回までとし、3 回目ですべて壁に吸収されるとした。

3 回までの反射で壁要素  $w(i)$  に入射する熱流束の和は次のように表すことができる。

$$q_{re,w(i)} = \begin{cases} \varepsilon_{w(i)}(q_{rel,wu,wu} + q_{rel,wu,wl} + q_{re2,wu,wu} + q_{re2,wu,wl} \\ \quad + q_{re3,wu,wu} + q_{re3,wu,wl} & (w(i) \text{ が上部層に接する場合}) \\ \varepsilon_{w(i)}(q_{rel,wl,wu} + q_{rel,wl,wl} + q_{re2,wl,wu} + q_{re2,wl,wl} \\ \quad + q_{re3,wl,wu} + q_{re3,wl,wl} & (w(i) \text{ が下部層に接する場合}) \end{cases} \quad (2-33)$$

また、煙層に吸収される熱流の和  $Q_{re,u}$  は次の式で表すことができる。

$$Q_{re,u} = Q_{rel,u,wu} + Q_{rel,u,wl} + Q_{re2,u,wu} + Q_{re2,u,wl} \\ + Q_{re3,u,wu} + Q_{re3,u,wl} \quad (2-34)$$

#### 2. 4. 7. 対流による熱伝達

対流熱伝達により煙層から煙層に接する壁要素  $w(i)$  に伝達する熱流束を  $q_{con,w(i),u}$ 、空気層から空気層に接する壁要素  $w(j)$  に入射する熱流束を  $q_{con,w(j),l}$  とすると、山田ら<sup>3)</sup>が提案している対流熱伝達率  $h_{in}$  を用いて次の式で表すことができる。

$$q_{con,w(i),u} = h_{in} (T_u - T_{w(i)}) \quad (2-35)$$

$$q_{con,w(j),l} = h_{in} (T_l - T_{w(j)}) \quad (2-36)$$

また、煙層に吸収される熱流  $Q_{con,u}$  は煙層に接する壁要素  $w(i)$  との熱伝達の和として次の式で表すことができる。

$$Q_{con,u} = \sum_i h_{in} (T_{w(i)} - T_u) A_{w(i)} \quad (2-37)$$

同様に、空気層に吸収される熱流についても、空気層に接する壁要素  $w(j)$  との熱伝達の和として次のように表すことができる。

$$Q_{con,l} = \sum_j h_{in} (T_{w(j)} - T_u) A_{w(j)} \quad (2-38)$$

#### 2. 4. 8. 壁の表面温度

一次元熱伝導方程式により、壁の表面温度を計算した。区画内部側および外部側の境界条件を式(2-39)、(2-40)に示す。ここで  $x$  は壁の厚さ方向にとり、 $x=0$  は壁の室内側表面、 $x=dw$  は壁の外部側表面を示す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{w(i)} \left( \sum_j^{nb} q_{rad,w(i),l(j)} + \sum_j^{mw} q_{rad,w(i),w(j)} + q_{rad,w(i),u} - \sigma T_{w(i)}^4 \right) \\ + q_{re,w(i)} + q_{con,w(i)} = -\lambda \frac{dT_{w(i)}}{dx} \Big|_{x=0} \end{aligned} \quad (2-39)$$

$$h_{out} (T_{w(i)} - T_{\infty}) = -\lambda \frac{dT_{w(i)}}{dx} \Big|_{x=dw} \quad (2-40)$$

#### 2. 4. 9. 周辺可燃物の延焼条件

可燃物表面についても、壁と同様に 2.4.8 節の方法で表面温度を計算し、これが着火温度に達した時に延焼が生じるとした。

## 2. 5. 液体燃料を用いた延焼拡大実験との比較

### 2. 5. 1. 実験概要

図 2-8 に示すように、1800mm×1200mm の床面に灯油を 200ml 入れたステンレス製火皿を、中心間距離が 250mm となるように直線状に 5 つ配置し、中央の火皿（図 4 中の No.3）に着火して延焼時間を測定した実験<sup>14)</sup>の結果と比較した。

煙層が形成されるように、高さ 700mm の位置に固定した天井の端部に垂れ壁（無し、深さ 300mm、400mm、500mm、600mm の 5 条件）を設置している。

中央の火皿から 160mm(図 2-8 中の HF1)、250mm(図 2-8 中の HF2)および 729mm(図 2-8 中の HF3)離れた位置の床面に鉛直上向きに熱流計を設置した。また、模型の端部に床から 100mm 間隔で 6 点および天井下 30mm の高さ 1 点の計 7 点に熱電対を設置し、鉛直温度分布を測定した。測定した鉛直温度のうち、目視により煙層に含まれると判断した熱電対の平均温度から煙層温度を算出した。

着火にあたっては、火皿の中央にブランケット片を設置し、ライターにより点火した。点火後しばらくはブランケット片に染み込んだ灯油のみが燃烧し、その後火皿内の液面全体が燃烧した。図 2-9 以降に示す実験結果は液面全体が燃烧し始める時間をゼロとして表示している。

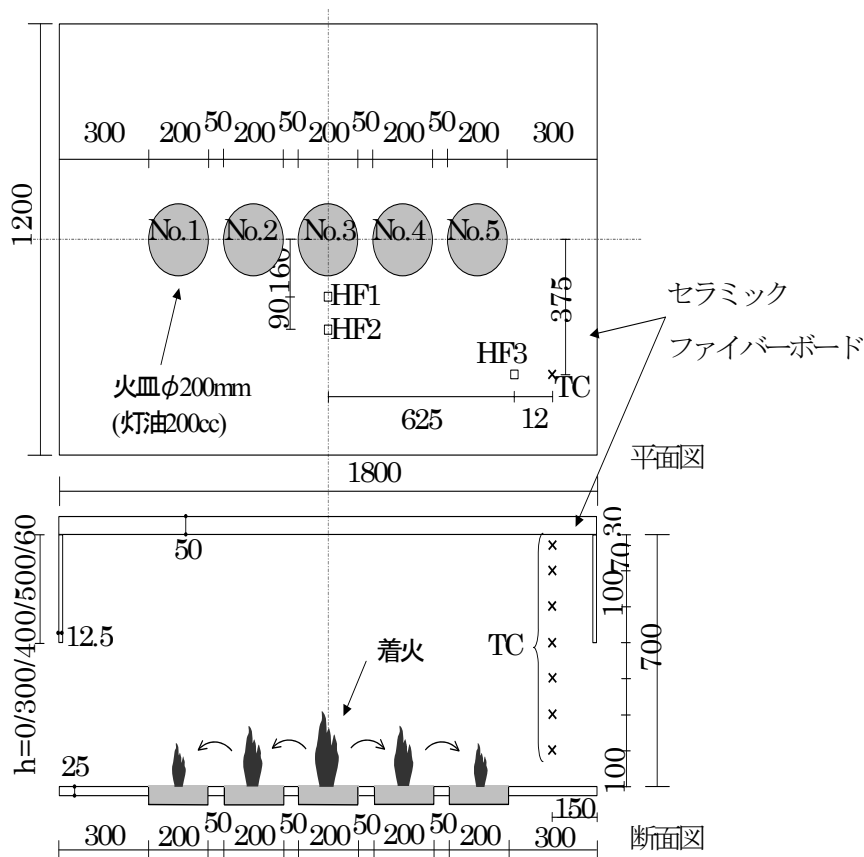


図 2-8 実験概要



実験では中央の火皿（図 2-8 中の No.3 の火皿）に着火後、火皿上に火炎が形成され、火炎および煙層からの放射熱により隣接する火皿（図 2-8 中の No.2,4 の火皿）の灯油の表面温度が引火温度以上に上昇し、燃焼する火皿からの火炎片が灯油表面に触れたタイミングで延焼した。No.2,4 の火皿に延焼すると、両端の火皿（図 2-8 の No.1,5 の火皿）に入射する熱流束も増加するため、No.1,5 の火皿へと延焼し、中央の火皿から順次燃え尽きた。

各火皿の着火時間を垂れ壁深さに対してプロットした結果を図 2-14 に示す。条件毎に複数回の実験を行っているので、平均値と最小値、最大値を併せて示している。垂れ壁深さが各火皿の着火時間に与える影響は大きく、垂れ壁が最も浅い場合(h=300mm)でも、火皿 No.2,4 への着火時間は垂れ壁がない場合 (h=0mm) よりも 3 割短い。また、垂れ壁が深くなっても火皿 No.2,4 への着火時間はあまり変化せず、煙層の影響は火皿 No.2,4 への延焼に対しては小さい。また、垂れ壁なしの条件は他の条件よりも延焼時間のばらつきが大きい。これは、煙層からの放射熱が小さく、火炎のゆらぎによる延焼の頻度が大きいためと考えられる。垂れ壁深さが増加するに従って、煙層からの放射熱が延焼を支配するようになるため延焼時間のばらつきは小さくなる。

各火皿の燃焼継続時間の実験結果を図 2-14 右に示す。垂れ壁深さが中央の火皿の燃焼継続時間に与える影響は小さいが、両隣および両端の火皿の燃焼継続時間に対する影響は大きく、垂れ壁深さが短くなるほど燃焼継続時間が短くなっている。これは煙層や周囲の火炎からの放射熱により燃焼速度が増加しているためだと考えられる。

各条件で行った複数の実験での煙層温度、発熱速度<sup>注4</sup>、また、各条件における代表的な実験での床面への熱流束の実験値を図 2-9～図 2-13 に示す。

## 2. 5. 2. 計算条件

計算に使用した物性値等を表 2-2、表 2-3 に示す。自由空間中の燃焼速度については、同じ火皿を単独で自由空間中において燃焼させた時の測定値<sup>注5</sup>を用いた。

表 2-2 計算に使用した物性値

	灯油	セラミックファイバーボード
熱伝導率 $\lambda$ [kW/(m·K)]	$0.112 \times 10^{-3}$	$0.12 \times 10^{-3}$
比熱 $C_p$ [kJ/(kg·K)]	2.13	0.92
密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	803	250
放射率 $\varepsilon$ [-]	0.9	0.9
単位発熱量 $\Delta H_c$ [MJ/kg]	43.1	—
蒸発潜熱 $\Delta H_v$ [kJ/kg]	290.8	—
着火温度 $T_{ig}$ [°C]	100	—
沸点 $T_b$ [°C]	250	—

表 2-3 計算に使用した数値

発熱速度のうち放射成分の割合 $\chi$ [-]	1/3
外気温度 $T_{\infty}$ [°C]	20
外気側の総合熱伝達率 $h_{out}$ [kW/(m $\cdot$ K)]	0.008

### 2. 5. 3. 計算結果

垂れ壁深さ (h=0 mm、300 mm、400 mm、500 mm、600mm) ごとに発熱速度と煙層温度について、外部放射を考慮した場合と考慮しなかった場合 (式(2-8)の右辺第 2 項を 0 とする) の計算を行った。外部放射を考慮した場合の床面への熱流束の計算値を実験値と併せて図 2-9～図 2-13 に示す。

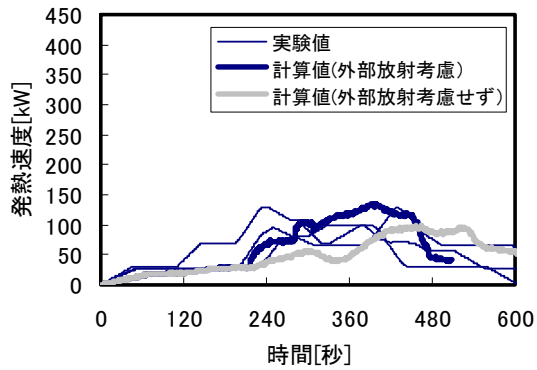
#### (1) 発熱速度

図 2-10 左に示すように外部放射を考慮した場合の発熱速度の計算値は、中央の火皿 (図 2-8 中の No.3) から隣接する火皿 (図 4 中の No.2,4) へと延焼後、発熱速度が急激に増加するという実験の傾向をよく再現できている。一方、外部放射を考慮しない場合の発熱速度の計算値は隣接する火皿への延焼後も発熱速度がなだらかに増加しており、実験値と大きく異なっている。中央の火皿のみが燃焼する時間帯については、いずれの計算値もほぼ等しくなっており、外部放射の影響は小さい。

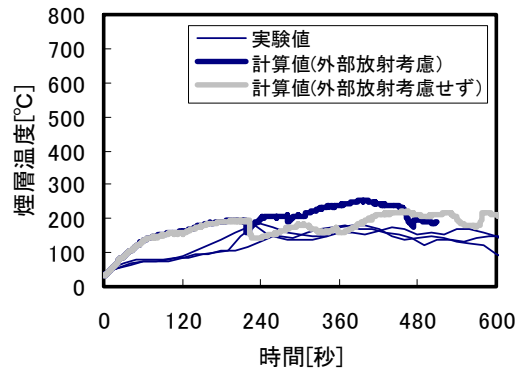
図 2-13 左に示すように、垂れ壁深さ 600mm の条件においては、実験値は 250kW 程度で頭打ちになっているのに対して、外部放射を考慮した場合の計算値は増加し続け 500kW 以上になっている。これは実験では全ての火皿が燃焼している時間帯には、噴出火炎が観察されるなど換気支配型の燃焼となっていたため、区画内での発熱速度が頭打ちになっていたが、本モデルでは全ての発熱が区画内で生じるとして計算しているため、煙層の温度、発熱速度が連鎖的に増加している。

#### (2) 煙層温度

図 2-10 左に示すように、外部放射を考慮した場合の煙層温度の計算値は発熱速度と同様に、隣接する火皿に延焼後急激に上昇する傾向を再現している。ただし、定量的に見ると、発熱速度の実験値と計算値が概ね一致しているにも関わらず、煙層温度の計算値は実験値よりも高くなっており、本モデルでは壁・天井からの熱損失、または、煙の流出による熱損失、あるいはこれら両方を過小に計算しているものと考えられる。

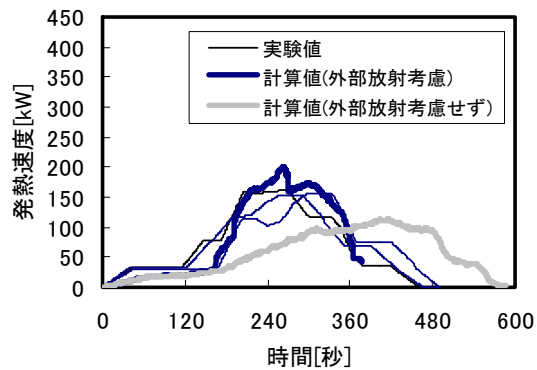


a) 発熱速度

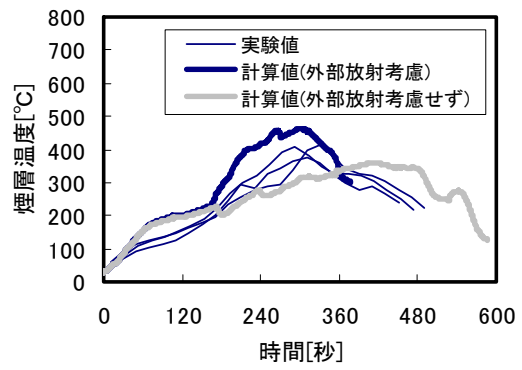


b) 煙層温度

図 2-9 実験値と計算値の比較 (垂れ壁深さ  $h=0\text{mm}$ )

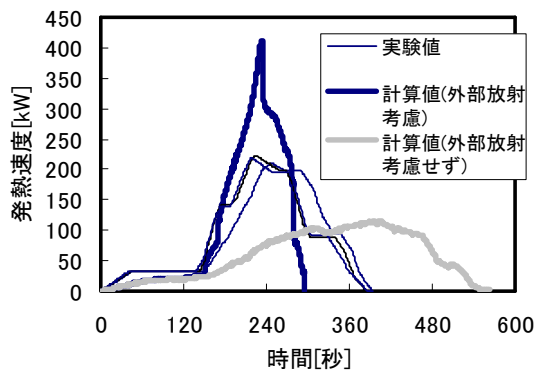


a) 発熱速度

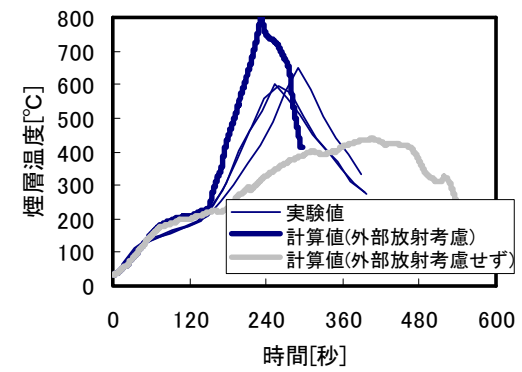


b) 煙層温度

図 2-10 実験値と計算値の比較 (垂れ壁深さ  $h=300\text{mm}$ )

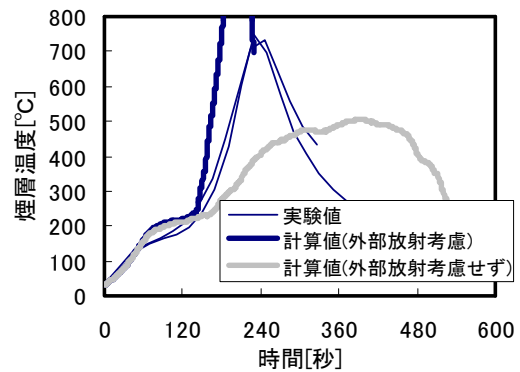
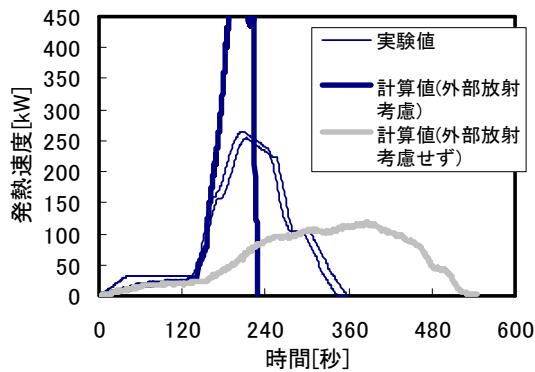


a) 発熱速度



b) 煙層温度

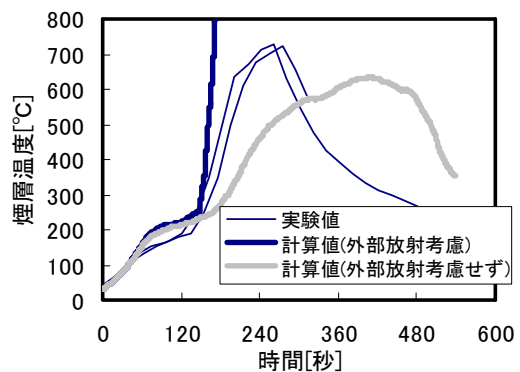
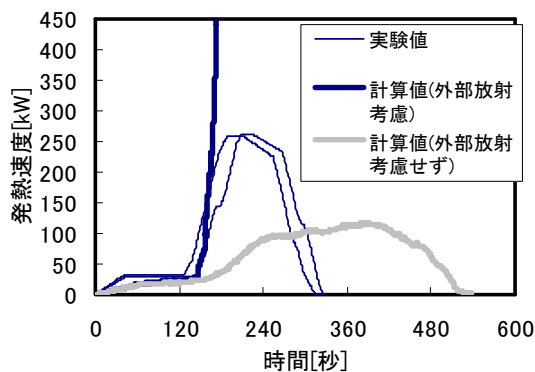
図 2-11 実験値と計算値の比較 (垂れ壁深さ  $h=400\text{mm}$ )



a) 発熱速度

b) 煙層温度

図 2-1 2 実験値と計算値の比較 (垂れ壁深さ h=500mm)



a) 発熱速度

b) 煙層温度

図 2-1 3 実験値と計算値の比較 (垂れ壁深さ h=600mm)

### (3) 各火皿への延焼時間

外部放射を考慮した場合（計算値：外部）と考慮しなかった場合（計算値）の各火皿の延焼時間の計算値を実験値と併せて図 2-1 4 左に示す。

隣接する火皿（No.2,4）への着火時間は外部放射を考慮した場合も考慮しなかった場合も大きな差はなく、実験結果と概ね一致している。

両端の火皿（No.1,5）の着火時間については、外部放射を考慮した場合には実験値の各条件での最小値に、外部放射を考慮しなかった場合には実験値の最大値に近く、本モデルでは外部放射により可燃性ガスの発生速度が増加する効果をやや過剰に評価しているものと考えられる。例えば、本モデルでは、燃料表面に入射する放射熱はすべて可燃性ガスの発生速度の増加に寄与しているが、実験では火皿の裏面からの熱損失などが生じており、必ずしも全てが寄与するわけではないことが考えられる。

### (4) 各火皿の燃焼継続時間

各火皿の燃焼継続時間の実験値と計算値についても同様にプロットした結果を図 2-1 4 右に示す。実験値と計算値を比較すると、外部放射を考慮しない場合には、いずれの条

件でも自由空間の燃焼継続時間と等しくなるため、約 360 秒で一定となり、実験値とは大きく異なっている。一方、外部放射を考慮した場合については、垂れ壁深さが大きくなるに従い燃焼継続時間が短くなる傾向を再現できたが、垂れ壁深さが大きい条件では計算値が実験値よりも短くなった。

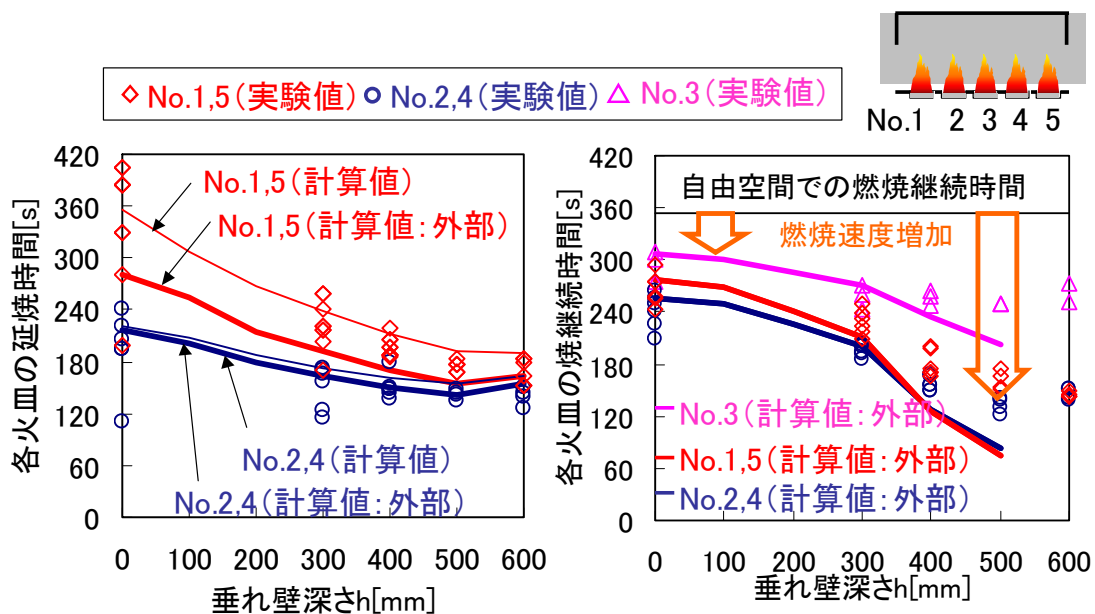


図 2-14 各火皿への延焼時間（左）と燃焼継続時間（右）の実験結果と計算結果の比較

## 2. 6. 本章の結論

第2章では、開口を有する室内に、液体燃料のように燃焼中に燃焼面積が変化しない可燃物間が複数設置されていることを想定した延焼拡大モデルを提案した。室内の煙層の温度と高さは、既存の二層ゾーンモデルを基に定式化を行ったが、発熱速度を放射成分と対流成分に分離するとともに、火炎や煙層および壁等の固体表面間の放射熱伝達の計算については、壁等を可燃物と同程度の大きさの要素に分割し、要素間の相互放射熱伝達を考慮した。可燃物の燃焼速度の計算では、煙層や火炎、壁要素から燃焼物表面への放射熱により単位面積あたりの燃焼速度が増加することを考慮した。

模型内に灯油を満した火皿を複数設置し、一つの火皿に着火後、他の火皿へと延焼させる実験の結果と延焼拡大モデルの計算結果を比較した。たれ壁深さが低くなるに従い、可燃物間の延焼時間や延焼した可燃物の燃焼継続時間が短くなる傾向を、単位面積あたりの燃焼速度が煙層や隣接する火炎、温められた壁等からの放射熱により増加することを考慮することで再現した。

【本章の参考文献】

- 1) 田中哮義, 中村和人 : 建築研究報告 No.123<二層ゾーンモデルの概念に基づく>建築内煙流動予測計算モデル, 建設省建築研究所, 1989
- 2) Heskestad G : Fire Plume Air Entrainment According to Two Competing Assumptions, 21st Symposium (International) on Combustion, pp.111-120, 1986
- 3) 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, 日本建築学会計画系論文集, 第 495 号, pp.1-8 , 1997.5
- 4) Friedman R.: Behavior of fires in compartment, International Symposium on Fire Safety of Combustible Materials, pp.100-113, 1975
- 5) 渡部勇一, 松島早苗, 山田常圭 : 中型火災室模型を用いた加圧防排煙に関する実験的研究(2)- 間欠火災領域におけるプルーム流量を基にした高温層下端高さの予測方法-, 日本火災学会論文集, Vol.51, No.2, pp.41-50, 2001
- 6) Hasemi Y., Tokunaga T. : Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames, Fire Science and Technology, Vol.4, No.1, pp.15-26
- 7) You H.Z., Feath G.M. : Ceiling Heat Transfer during Fire Plume and Fire Impingement, Fire and Materials, Vol.3, pp.140-147,1979
- 8) McCaffrey B.J. : Some Measurements of the Radiative Power Output of Diffusion Flames, WSS/CI 81-15, Western States Section, Combustion Institute, Pittsburgh, 1981
- 9) NFPA : THE SFPE HANDBOOK of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, 2002
- 10) 田中哮義 : 改訂版 建築火災安全工学入門, 日本建築センター
- 11) ORLOFF L. : Radiation from Smoke layers, symposium on combustion, 17, 1979, pp.1029-1038
- 12) Hottel H.C., Sarofim A.F. : Radiative Transfer, McGraw-Hill, New York, 1967, Ch.6, pp.199,246
- 13) 荒巻陽子 : 可燃物と壁及び天井との位置関係を考慮した火災拡大予測モデル, 京都大学修士論文, 2008
- 14) 新谷祐介, 原田和典, 抱憲誓, 土橋常登, 田中義昭 : 可燃物間の延焼拡大性状に関する研究, 日本火災学会発表会概要集, pp.510-517, 2005

【本章で使用した記号】

$A$ : 表面積[m<sup>2</sup>]

$C$ : 比例定数[-]

$C_p$ : 比熱[kJ/(kg·K)]

$D$ : 火源径[m]

$E$ : 放射発散度[kW/m<sup>2</sup>]

$F$ : 形態係数[-]

$H$ : 天井高さ[m]

$L_c$ : 連続火炎高さ[m]

$L_f$ : 自由空間での火炎高さ[m]

$L_m$ : 平均火炎高さ[m]

$L_{mb}$ : 平均行路長さ[m]

$L_{rc}$ : 連続展炎長さ[m]

$L_{rm}$ : 平均展炎長さ[m]

$Q$ : 発熱速度 or 熱流[kW]

$Q^*$ : 無次元発熱速度[-]

$S$ : 微小要素を結ぶ線分の長さ[m]

$T$ : 温度[K]

$T_b$ : 沸点[K]

$T_{ig}$ : 引火温度[K]

$V$ : 体積[m<sup>3</sup>]

$d_w$ : 壁の厚み[m]

$f_v$ : ススの体積分率[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$h_{in}$ : 内部側の対流熱伝達率 [kW/m<sup>2</sup>]

$h_{out}$ : 外気側の対流熱伝達率[kW/m<sup>2</sup>]

$k$ : 有効吸収係数

$m_f$ : 可燃ガスの発生速度[kg/s]

$m_{in}$ : 外部から空気層に流入する質量[kg/s]

$m_{out(u)}$ : 煙層から流出する質量[kg/s]

$m_{out(l)}$ : 空気層から流出する質量[kg/s]

$m_p$ : プリュームの流量[kg/s]

$q$ : 熱流束[kW/m<sup>2</sup>]

$t$ : 時間[s]

$\Delta H_c$ : 単位発熱量[kJ/kg]

$\Delta H_v$ : 燃料の蒸発潜熱[kJ/kg]

$\beta$ : 微小要素の法線と微小要素を結ぶ線分のなす角度[rad]



$\chi$ : 発熱速度のうちの放射成分の割合[-]

$\varepsilon$ : 放射率[-]

$\sigma$ : ステファンボルツマン係数[kW/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)]

$\rho$ : 密度[kg/m<sup>3</sup>]

<添字>

con: 対流

fl: 火炎

l: 空気層

nb: 燃焼している可燃物の数

nw: 壁の分割数

ob: 可燃物

rad: 直接放射

re: 反射成分

soot: スス

u: 煙層

w: 壁

wu: 煙層に接する壁

wl: 空気層に接する壁

$\infty$ : 外気

【注】

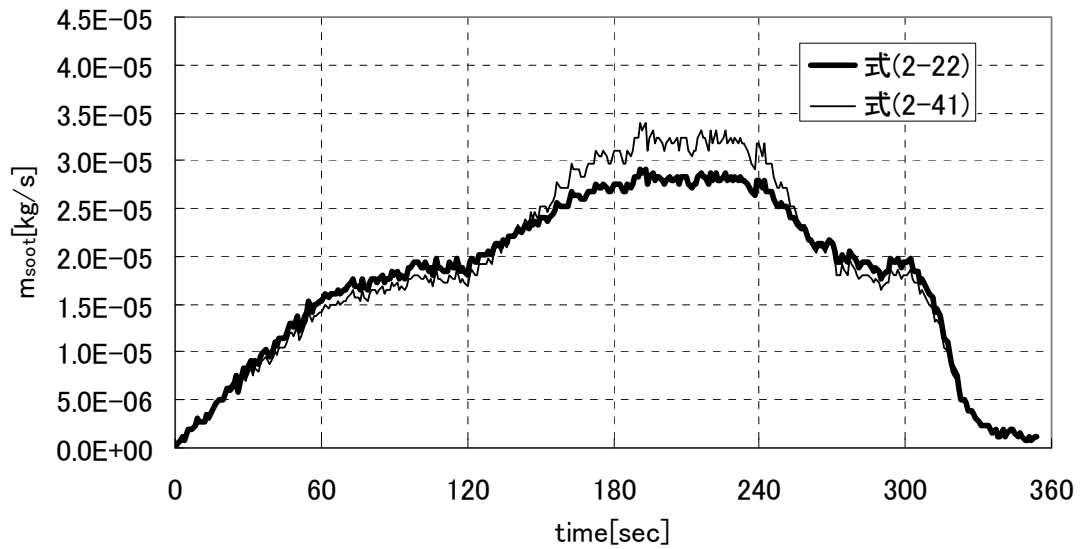
注 1)連続火炎高さでの温度 (820℃) と平均火炎高さでの温度 520℃について絶対温度で 4 乗平均した温度

注 2) 文献では自由空間での実験が行われているだけだが、ここでは天井に展炎する場合や煙層内で燃焼する場合についても適用した。

注 3)式(2-41)から算出した自由空間でのすすの発生速度と概ね一致するように比例定数 C (=136000) を算出した。

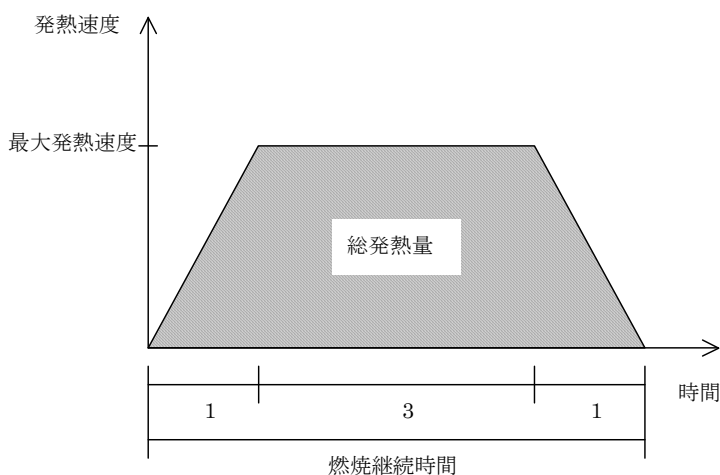
$$m_{soot} = y_{soot} m_f = 0.042 m_f \quad (2-41)$$

付図 2 に示す自由空間での灯油の発熱速度の測定結果を用いて式(2-22)および式(2-41)で計算したすすの発生速度を付図 1 に示す。



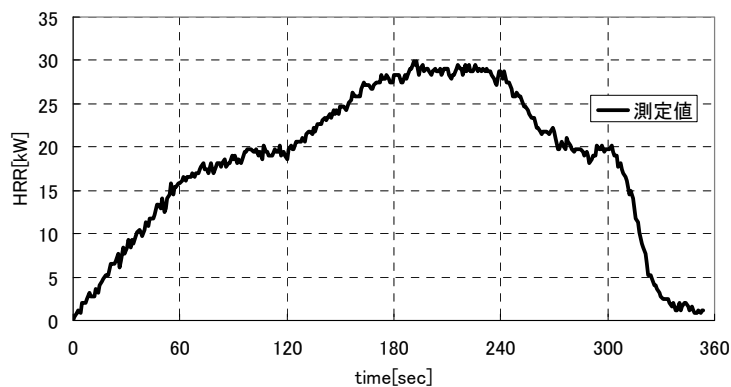
付図 1 すすの発生速度の比較

注 4) 実験では、発熱速度の測定を行わなかったため、各火皿の燃焼継続時間と総発熱量から発熱速度を近似的に求めた。各火皿の発熱速度の時間変化を台形に近似し、燃焼継続時間の測定値を 1:3:1 に分割し、最初の時間帯は線形に増加し、二つ目の時間帯は最大発熱速度で一定、三つ目の時間帯は線形に減少するとし、総発熱量が一致するように最大発熱速度を算出した。図 2-9～図 2-13 の実験値はこの方法で求めた値である。



付図 2 発熱速度推定の概念図

注 5) 自由空間での発熱速度が解析の入力条件となるので、本文中で示した実験とは別に、同じ火源を用いて自由空間での発熱速度を測定した。測定結果を付図 3 に示す。発熱速度はロードセルにより測定した重量減少速度に灯油の単位発熱量(43.1MJ/kg)を乗じて求めた。



付図 3 自由空間での発熱速度

## 第3章

### 火炎からの放射熱

## 第3章の目次

3.	火炎からの放射熱.....	3-1
3. 1.	はじめに.....	3-1
3. 2.	火炎から射出される放射熱の計算方法.....	3-2
3. 2. 1.	計算方法の概要.....	3-2
3. 2. 2.	火炎高さ・展炎長さ.....	3-3
3. 2. 3.	放射率.....	3-4
3. 2. 4.	放射熱.....	3-4
3. 3.	天井下、煙層下空間での火炎からの放射熱の測定.....	3-5
3. 3. 1.	実験条件.....	3-5
3. 3. 2.	実験装置の概要.....	3-5
3. 3. 3.	測定項目.....	3-6
3. 3. 4.	実験方法.....	3-7
3. 3. 5.	実験結果.....	3-8
3. 3. 6.	火炎からの放射熱の計算値と実験値の比較.....	3-11
3. 4.	本章の結論.....	3-13

### <本章の概要>

第2章の延焼拡大予測モデルの一部である火炎から射出される放射熱の計算方法について、自由空間および天井下空間において床面に入射する熱流束の測定値との比較により予測精度を確認した。

火炎を連続火炎高さまでの円柱と平均火炎高さまでの二つの円柱で近似し、さらに、展炎する場合には展炎部分を円盤で近似し、その放射発散度を $\chi$ （発熱速度のうち放射成分の割合）から定め、これらの形態係数を用いて放射熱を計算すると、平均で約3割の誤差で予測可能であった。

### 3. 火炎からの放射熱

#### 3. 1. はじめに

離散的に配置された可燃物間の延焼は、燃焼により生じる火炎や煙からの放射熱が未燃の可燃物表面に流入し、表面温度が着火温度に達することで生じる。そのため、火炎から射出される放射熱を精緻に把握することは、延焼拡大を予測する上で非常に重要な要素の一つである。

長谷見ら<sup>1)</sup>は直径 0.2~0.5m の拡散火炎バーナーを用いてプロパンガスを燃焼させ、発熱速度 40~80kW の火炎から射出される放射熱の測定を行い、発熱速度のうち放射熱として射出される割合  $\chi$  はバーナーの径、発熱速度によらず約 0.35 となることを明らかにしている。この時、連続火炎の中心からの離隔距離が火源径の 5 倍の位置で放射熱流は次式で予測できるとしている。

$$q = \frac{\chi Q}{4\pi r^2} \quad (3-1)$$

また、Modak ら<sup>2)</sup>は厚み 51mm、一辺の長さ 25mm~1220mm の PMMA を用いて火炎から射出される放射熱の測定を行い、発熱速度のうち放射熱として射出される割合  $\chi$  は辺の長さによらず約 0.42 となることを明らかにしている。

さらに、McCaffery<sup>3)</sup>は 1 辺の長さ 0.3m のバーナーを用いて、メタンガス、天然ガス、プロパンガスを燃焼させ、発熱速度 10~60kW の火炎から射出される放射熱の測定を行い、発熱速度が 30kW 以上の範囲では、0.2 (メタン)、0.22 (天然ガス)、0.3 (プロパン) でほぼ一定となることを明らかにしている。

このように、発熱速度のうち放射熱として射出される割合は可燃物が同じであればほぼ一定であるため、火炎の中心から火源径の 2 倍以上離れた位置であれば、式(3-1)を用いて火炎から射出される放射熱を求めることができるとされている<sup>4)</sup>。しかし、可燃物間の延焼拡大においては、火炎近傍の固体表面に入射する放射熱を予測する必要がある。式(3-1)は、火炎形状や火炎の温度分布を考慮していないため、火炎近傍での放射熱を正確に予測することはできない。そのため、本章では火炎を放射発散度の異なる二つの円柱で近似し (天井に展炎する場合には展炎部分は円盤で近似)、発熱速度のうちの放射成分が一定であると仮定してそれぞれの放射発散度を求め、受熱面から円柱を見た時の形態係数を用いて、受熱面に入射する放射熱を計算する方法を提案し、実験と比較して精度を確認する。

### 3. 2. 火炎から射出される放射熱の計算方法

#### 3. 2. 1. 計算方法の概要

火炎の放射発散度の分布を考慮しない場合（方法 1、2）と考慮する場合（方法 3）の 3 ケースについて検討を行った。第 2 章で提案した延焼拡大予測モデルでは方法 3 を用いた。

いずれの方法でも、火炎が天井に展炎しない場合には、既往の火炎高さの実験式から火炎長さを計算し、図 3-1 に示すように円柱で火炎形状を近似する。発熱速度の放射成分の割合  $\chi$  は発熱速度  $Q$  によらず一定と考える。 $\chi Q$  と火炎の表面から射出される放射熱が等しくなることから火炎面の放射発散度を求め、受熱面に対する形態係数を乗じて受熱面に入射する熱流束を計算した。

火炎形状と温度分布については、次に示す 3 つの方法について検討した。

方法 1 : 火炎は高さ  $L_c$  (連続火炎高さ) の円柱であり、その表面温度は  $820^{\circ}\text{C}$  の黒体に均一な放射率を乗じた放射発散度を持つものとする。

方法 2 : 火炎は高さ  $L_m$  (平均火炎高さ) の円柱であり、その表面温度は  $820^{\circ}\text{C}$  の黒体に均一な放射率を乗じた放射発散度を持つものとする。

方法 3 : 火炎は高さ  $L_m$  (平均火炎高さ) の円柱であり、火炎表面のうち連続火炎領域は  $820^{\circ}\text{C}$ 、間欠火炎領域は  $704^{\circ}\text{C}$  の黒体に均一な放射率を乗じた放射発散度を持つものとする。なお、 $704^{\circ}\text{C}$  は連続火炎温度  $820^{\circ}\text{C}$  と平均火炎高さ上端の温度  $520^{\circ}\text{C}$  の 4 乗平均である。

火炎が天井面下を展炎する場合には、天井高さまでの部分を円柱で近似し、展炎部分は円盤で近似し、これらの組み合わせで火炎形状を近似した。展炎部分の円盤の半径は既往の実験式から計算した展炎長さとし、厚みは火源径の  $1/10$  とした。

火炎長さおよび展炎長さの計算方法は次節に示す。

	$L_c < L_m < H$	$L_c < H < L_m$	$H < L_c < L_m$
方法 1			
方法 2			
方法 3			

図 3-1 火炎形状の近似方法

### 3. 2. 2. 火炎高さ・展炎長さ

長谷見ら<sup>4)</sup>によると自由空間での連続火炎高さ  $L_c$  および平均火炎高さ  $L_m$  は次の式で表すことができる。

$$L_c / D = 1.8 \times \begin{cases} Q^{*2/3} & (Q^* < 1) \\ Q^{*2/5} & (Q^* \geq 1) \end{cases} \quad (3-1)$$

$$L_m / D = 3.4 \times \begin{cases} Q^{*2/3} & (Q^* < 1) \\ Q^{*2/5} & (Q^* \geq 1) \end{cases} \quad (3-2)$$

ここで、 $Q^* = Q / 1116D^{5/2}$  である。

Youら<sup>5)</sup>によると、展炎長さ  $L_r$  は自由空間での火炎長さ  $L_f$  と天井高さ  $H$  から次のように表すことができる。

$$L_r / D = 0.50 \left( (L_f - H) / D \right)^{0.96} \quad (3-3)$$

連続展炎長さ  $L_{rc}$  は式(3-3)の  $L_f$  に式(3-1)で計算した  $L_c$  を代入して計算し、平均展炎長さ  $L_{rm}$  は式(3-3)の  $L_f$  に式(3-2)で計算した  $L_m$  を代入して計算した。



### 3. 2. 3. 放射率

火炎温度  $T_f$  が  $820^{\circ}\text{C}$  および  $704^{\circ}\text{C}$  での放射発散度  $E_{820}$ 、 $E_{704}$  は、次の値となる。

$$E_{820} = \sigma T_f^4 = 5.67 \times 10^{-11} \times (820 + 273)^4 = 81 \text{ kW} / \text{m}^2 \quad (3-4)$$

$$E_{704} = \sigma T_f^4 = 5.67 \times 10^{-11} \times (704 + 273)^4 = 52 \text{ kW} / \text{m}^2 \quad (3-5)$$

火炎の表面積を火炎の側面、底面、上面(展炎が無い場合は円柱の上面、展炎がある場合は円盤の下面)の面積のを合計してを求めた。特に、方法3の場合は、温度が異なる連続火炎領域( $820^{\circ}\text{C}$ )と平均火炎領域( $704^{\circ}\text{C}$ )の2つの部分に分けて表面積を求めた。

$820^{\circ}\text{C}$ の部分の表面積を  $A_{820}$ 、 $704^{\circ}\text{C}$ の部分を  $A_{704}$  とすると(方法1、2の場合は  $A_{704}=0$ )、火源の発熱  $Q$  のうち放射成分の割合を  $\chi (=0.4)$  とすると、次の式が成り立つ。

$$\chi Q = \varepsilon (A_{820} E_{820} + A_{704} E_{704}) \quad (3-6)$$

式(3-6)から放射率  $\varepsilon$  を求めると式(3-7)となる。

$$\varepsilon_{fl} = \frac{\chi Q}{(A_{820} E_{820} + A_{704} E_{704})} \quad (3-7)$$

### 3. 2. 4. 受熱面に入射する放射熱

火炎温度  $820^{\circ}\text{C}$  の部分の円柱(展炎がある場合には展炎部分の円盤を含む。ただし、円柱と円盤の包含部分の削除は行わなかった図 3-2 参照。(以下同様))の受熱面に対する形態係数を  $F_{820}$ 、火炎温度  $704^{\circ}\text{C}$  の部分の円柱(展炎がある場合には展炎部分の円盤を含む)の受熱面に対する形態係数を  $F_{704}$  とすると、受熱面に入射する放射熱  $q''$  は、次のように表すことができる。

$$q'' = \varepsilon_{fl} (F_{820} E_{820} + F_{704} E_{704}) \quad (3-8)$$

ここで、 $\varepsilon$  は式(3-1)~(3-7)を用いて火源発熱速度  $Q$  と火源半径  $D$ 、天井高さ  $H$  から求めることができ、 $E_{820}$ 、 $E_{704}$  は定数、 $F_{820}$  と  $F_{704}$  は火炎表面と受熱面との幾何学的な関係から求めることができる。

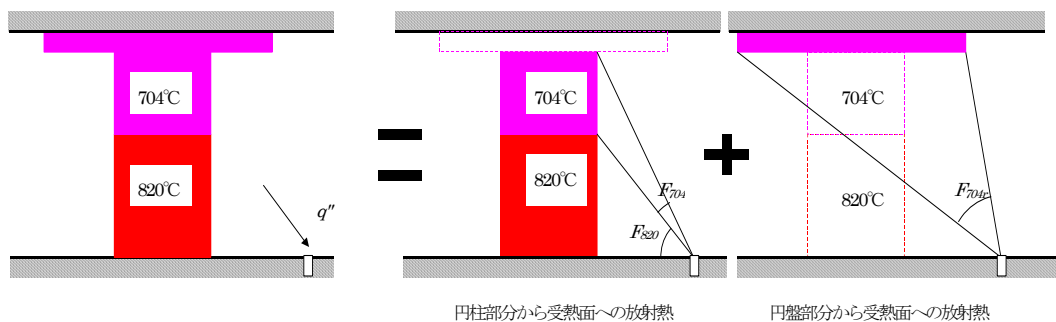


図 3-2 展炎時の受熱面に入射する放射熱の計算方法

### 3. 3. 天井下、煙層下空間での火炎からの放射熱の測定

#### 3. 3. 1. 実験条件

実験は自由空間、火源上部に天井を設置した天井下空間、火源上部に煙層が形成されるように垂れ壁を有する天井を設置して煙層下空間の三種類で行った。各実験での条件を表 3-1 に示す。

自由空間で 1 ケース、天井下空間では天井高さを変えて 4 ケース、煙層下空間では、天井高さおよび垂れ壁深さを変えて 9 ケースで実験を行った。

表 3-1 実験条件一覧

空間の種類	凡例の標記	天井高さ (mm)	垂壁深さ (mm)
自由空間	自由空間	—	—
天井下空間	CH1200	1200	—
	CH 760	760	—
	CH 560	560	—
	CH 360	360	—
煙層下空間	CH 1200+600	1200	600
	CH 1200+450		450
	CH 1200+300		300
	CH 1200+150		150
	CH 760+450	760	450
	CH 760+300		300
	CH 760+150		150
	CH 560+300	560	300
	CH 560+150		150

#### 3. 3. 2. 実験装置の概要

実験装置の概要を図 3-3 に示す。試験装置は 2700mm×2700mm の床およびその中央部に上端が床面と同一になるように設置した 250mm×250mm の拡散火炎バーナー（都市ガス 13A）からなる。天井下空間での実験では、床の上部に床と同じ大きさの天井を設置し、煙層下空間での実験では、四周に垂れ壁を有する天井を設置した。床、天井、垂れ壁はいずれも厚さ 25mm のセラミックファイバーボードで構成されている。

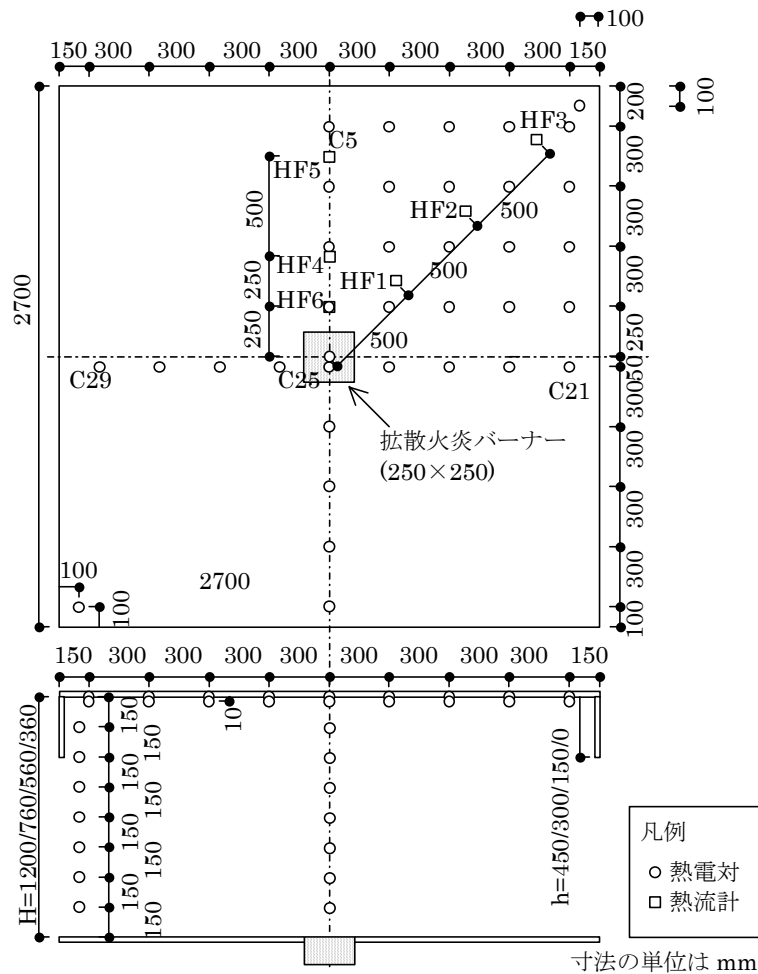


図 3-3 実験装置概要

### 3. 3. 3. 測定項目

各実験において、ガスの供給量、実験装置内の鉛直温度分布、天井表面温度、天井流温度、床面に入射する熱流束を測定するとともに、正面からビデオカメラにより火炎形状を記録した。温度と熱流束はデータロガーにより 1 秒間隔で記録した。

#### (1) ガスの供給量

ガスバーナーに供給した都市ガスの流量をマスフローメーターにより測定した。

#### (2) 鉛直温度分布

実験装置内の鉛直温度分布を測定するため、実験装置の対角する二隅に熱電対ツリーを設置した。熱電対ツリーは、150mm 間隔で設置した 0.32mm φ の K 型熱電対により構成した。

また、火源の軸上温度分布を測定するために、ガスバーナーの中心軸上にも熱電対ツリーを設置した。熱電対ツリーは K 型のシース熱電対により構成した。

### (3) 天井表面および天井流温度

実験装置の 4 分の 1 の平面において、天井表面および天井流の温度分布を測定するために、300mm 間隔で素線の太さ 0.32mm の K 型熱電対を設置した。天井表面温度の測定では、天井面の下端と熱電対の先端が一致するように、天井流温度の測定では、天井面から 10mm 下の位置に熱電対を設置した。天井表面温度と天井流温度は平面上は同じ位置で測定した。

### (4) 床面に入射する熱流束

火源の中心から北西に 500mm(図 3-3 の HF1)、1000mm(図 3-3 の HF2)、1500mm(図 3-3 の HF3)、および西側に 500mm(図 3-3 の HF4)、1000mm(図 3-3 の HF5)の位置の床面に床面と熱流計の測定面の高さが一致するように鉛直上向きに水冷式熱流計を設置した。

## 3. 3. 4. 実験方法

発熱速度を 5 分毎に 24.9~140.6 kW まで 8 段階で階段状に変化させた。なお、この発熱速度はマスフローメーターで測定した都市ガス 13A (単位発熱量 41.549 kJ/L) の流量から完全燃焼を仮定して設定した。

測定データとしては、火源の各ステップの 4 分から 4 分 30 秒の 30 秒間の測定データ (31 個) の平均値を各ステップの代表値とした。

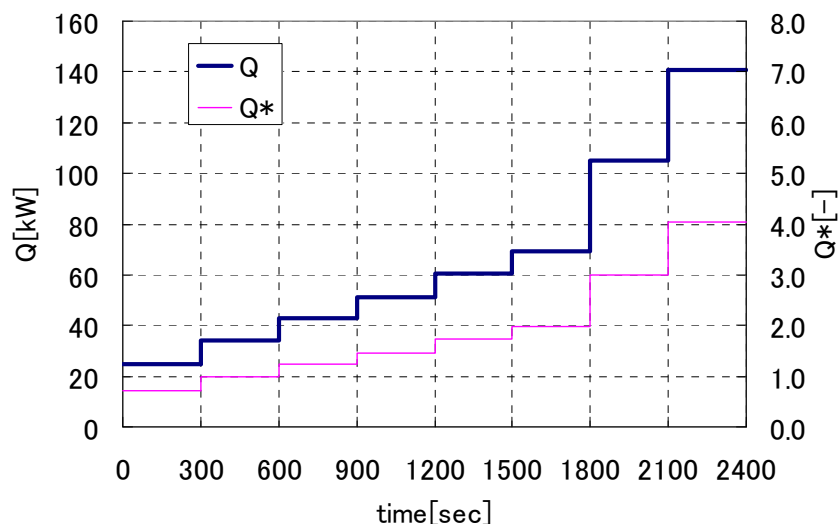


図 3-4 発熱速度の時間変化

### 3. 3. 5. 実験結果

#### (1) 天井下空間

横軸に発熱速度、縦軸に火源近傍の床面に設置した熱流計 HF1（火源中心から 500mm）、HF2（火源中心から 1000mm）の測定値をとり、天井下空間での実験結果を、自由空間での実験結果と併せてプロットした結果を図 3-5 に示す。ここで、発熱速度はガス流量から完全燃焼を仮定して算出した値である。

HF1、HF2 のいずれの測定位置においても、床面に入射する熱流束は発熱速度に概ね比例して増加した。また、床面に入射する熱流束は天井なしの条件よりも、天井ありの条件のほうが大きい。さらに、同じ天井ありの条件でも天井高さが低いほど、大きくなっている。特に、ほとんどの時間帯で火炎が連続的に展炎した天井高さ 360mm の条件では、床面に入射する熱流束が自由空間の 5 倍以上になっており、天井高の影響が顕著であった。

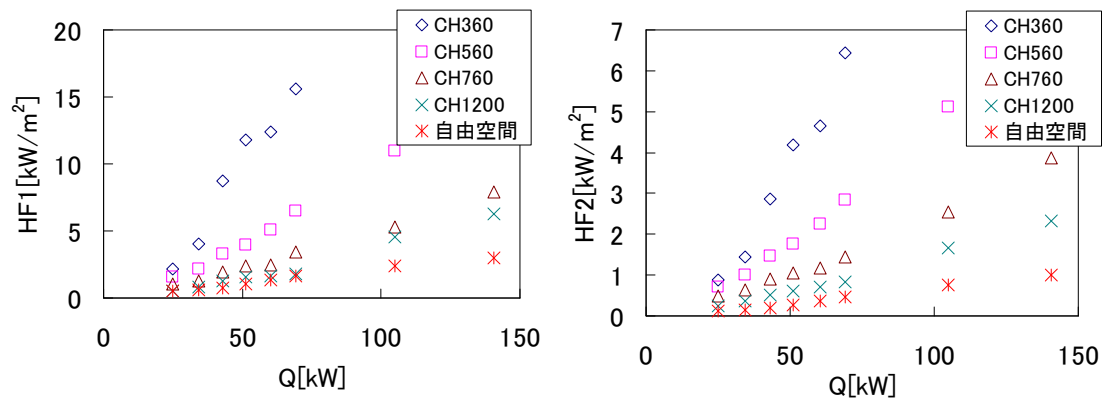


図 3-5 天井下空間での床面に入射する熱流束（左：HF1、右：HF2）

(2) 煙層下空間

横軸に発熱速度、縦軸に火源近傍の床面に設置した熱流計 HF1 (火源中心から 500mm) の測定値をとり、煙層下空間での実験結果を、おなじ天井高さの条件での天井下空間での実験結果と併せてプロットした結果を図 3-6 左～図 3-8 左に示す。同様に、煙層温度をプロットした結果を図 3-6 右～図 3-8 右に示す。ここで、煙層温度は、図 3-3 に示す二隅の熱電対ツリーの内、垂壁下端よりも高い位置に設置された熱電対の平均温度とした。

図 3-6 左に示すように、天井高さ 1200mm の条件では床面に入射する熱流束は、発熱速度が大きくなるに従い増加した。発熱速度が小さい範囲においては、垂れ壁深さの影響は小さいが、発熱速度が大きくなるに従い、垂れ壁深さの影響は大きくなっており、特に発熱速度が最も大きい約 140kW の条件では、垂れ壁が最も深い 600mm の条件での床面に入射する熱流束は、垂れ壁なしの条件の倍程度になっている。この時、煙層温度は約 400°C であった。

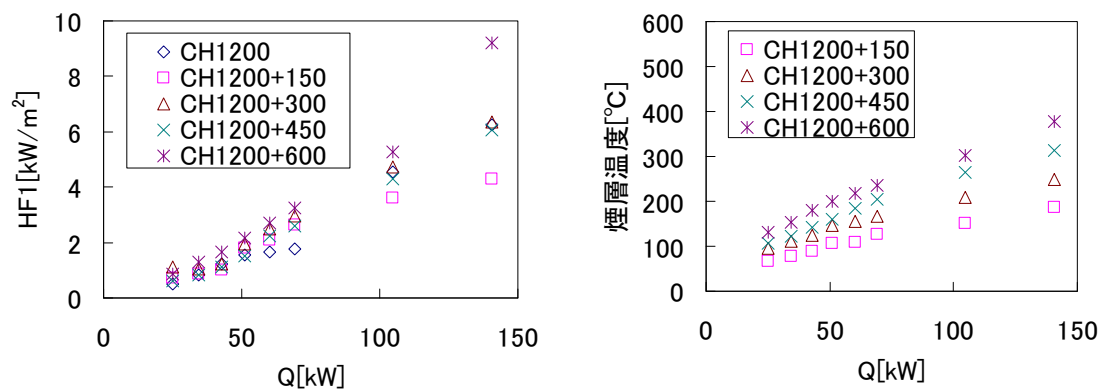


図 3-6 煙層下空間での床面に入射する熱流束 HF1 (左) と煙層温度 (右) : 天井高さ 1200mm

図 3-7 左に示すように、天井高さ 760mm の条件においても、床面に入射する熱流束は発熱速度が大きくなる従い、また、垂れ壁が深くなるに従い大きくなっている。天井高さが 1200mm の条件と比較すると、発熱速度が小さい範囲でも、垂れ壁深さの影響が大きく現れている。これは、図 3-7 右に示すように、天井高さ 1200mm の条件よりも煙層温度が高く、また、煙層下端高さが低くなっており、熱流計に対する煙層の形態係数が約 1.3 倍と大きくなっているためだと考えられる。

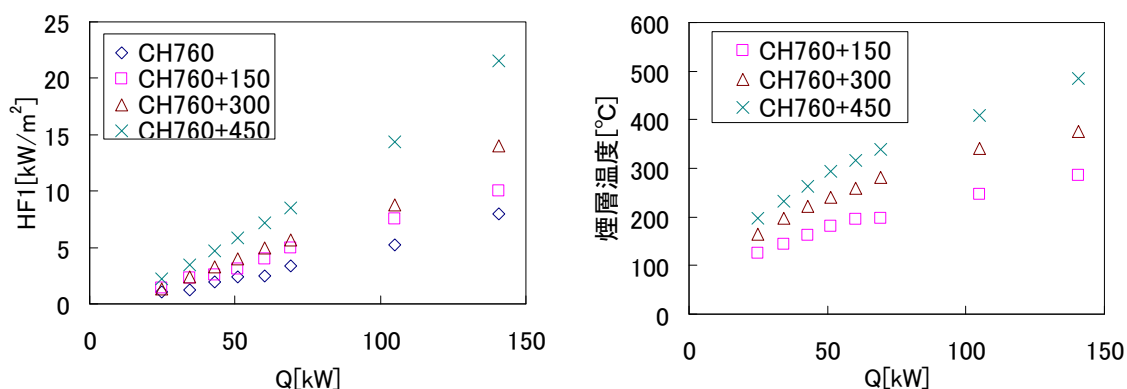


図 3-7 煙層下空間での床面に入射する熱流束 HF1 (左) と煙層温度 (右) : 天井高さ 760mm

図 3-8 左に示すように、天井高さ 560mm の条件においても、床面に入射する熱流束は発熱速度が大きくなる従い、また、垂れ壁が深くなるに従い大きくなっている。

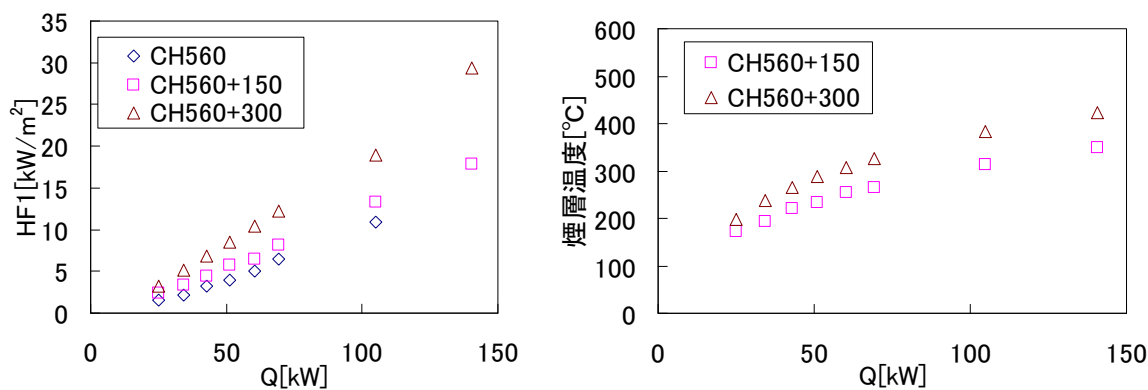


図 3-8 煙層下空間での床面に入射する熱流束 HF1 (左) と煙層温度 (右) : 天井高さ 560mm

### 3. 3. 6. 火炎からの放射熱の計算値と実験値の比較

実験計測した床面5点(H1~H5)における放射熱 $q$ を、方法1から3のモデルで予測し、実験結果と計算値の比較をそれぞれ図3-9~図3-11に示す。

方法2および方法3は、実験値と計算値は概ね一致しているが、天井高さが低くなるに従い、実験値よりも計算値が大きくなる傾向が見られた。一方、方法1は、全体的に計算値は実験値よりも大きく、特に天井高さが低くなるに従い、この傾向は顕著であった。

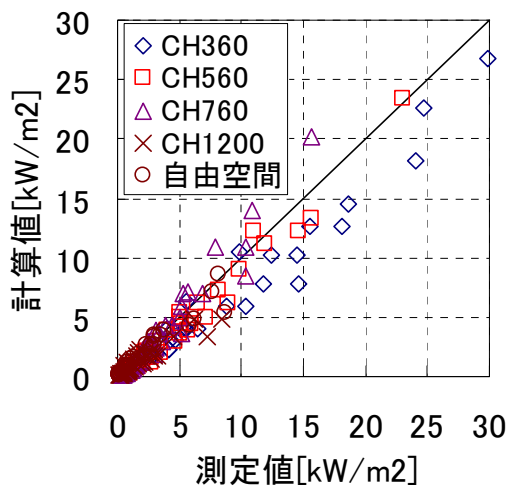


図 3-9 方法1の実験と予測の比較

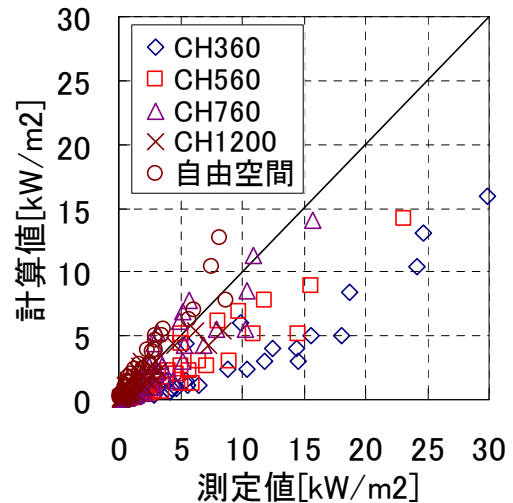


図 3-10 方法2の実験と予測の比較

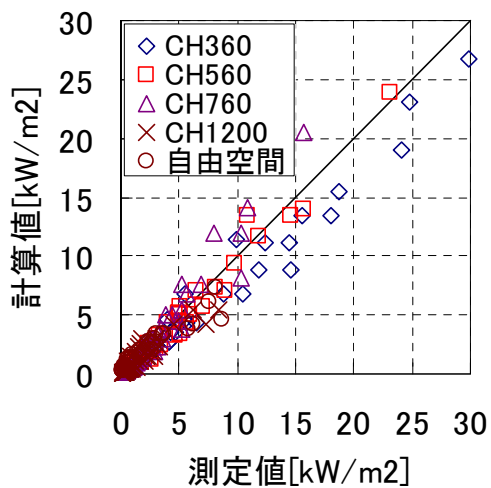


図 3-11 方法3の実験と予測の比較



天井高さごとに、展炎が有る場合と無い場合に分け、式(3-9)で計算した放射熱の実験値  $q_e$  と計算値  $q$  の差異を表 3-2 に示す。

$$\sum_N \frac{|q - q_e|}{q_e} / N \quad (3-9)$$

表 3-2 によると、天井がある場合は方法 2 と 3 はほぼ同等の差異である。しかし、自由空間では方法 2 は著しく差異が大きく、方法 3 は少ない。

図 3-1 2、図 3-1 3 に方法 2 と 3 の天井なしの条件での放射熱が小さいレンジ(1kW/m<sup>2</sup>以下)の実験結果と計算値の比較を示す。放射熱が小さいレンジは火炎から遠い場合である。方法 2 と 3 はこのレンジでは大きく異なっている。火炎近傍では床面が受ける放射熱は火炎の下部の影響が支配的であるが、火炎から遠い場合には相対的に火炎上部の影響が大きくなる。方法 2 は火炎全域の温度を 820℃としており、火炎の温度分布(言い換えれば放射発散度の分布)を無視した仮定としており、その結果、入射熱を過剰に評価する。

表 3-2 実験と予測値の差異

天井高	展炎	方法 1	方法 2	方法 3
CH360	あり	0.747	0.226	0.296
	無し	0.682	-	-
CH560	あり	0.657	0.246	0.305
	無し	0.604	-	-
CH760	あり	-	0.248	0.246
	無し	0.457	0.344	0.386
CH1200	あり	-	0.345	0.351
	無し	0.420	0.305	0.341
自由空間	あり	-	-	-
	無し	0.508	0.551	0.159
平均	あり	0.702	0.266	0.299
	無し	0.573	0.400	0.296

※ 「-」は該当するデータがないことを示す。

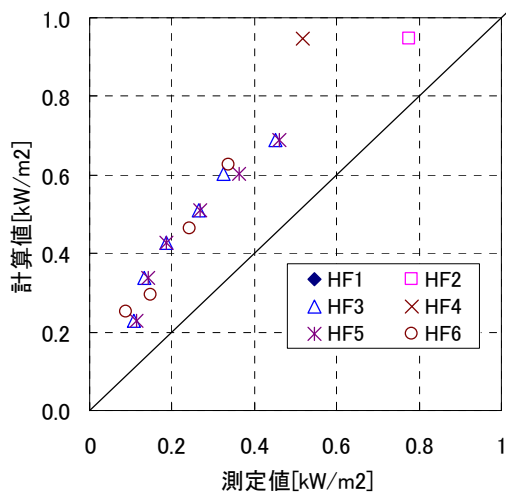


図 3-1 2 方法 2(天井無し)の  
実験と予測の比較

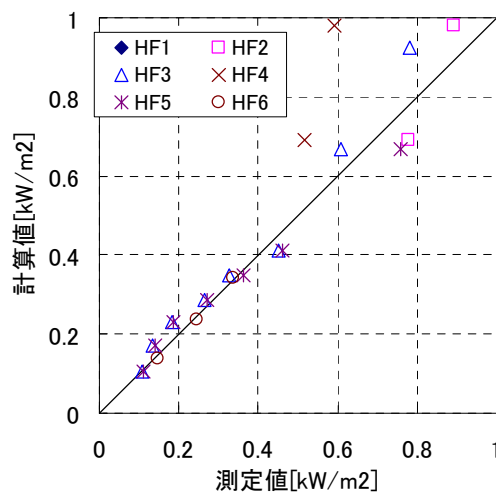


図 3-1 3 方法 3(天井無し)の  
実験と予測の比較

### 3. 4. 本章の結論

自由空間および天井下空間において、床面に入射する熱流束の計算方法を 3 種類検討し、測定値との比較により予測精度を比較した。

火炎を連続火炎高さまでの円柱と平均火炎高さまでの二つの円柱で近似し、さらに、展炎する場合には連続火炎と間欠火炎の各々について、展炎部分を円盤で近似した。火炎表面からの放射発散度を  $\chi$  (発熱速度のうち放射成分の割合) から定め、これらの形態係数を用いて放射熱を計算すると測定値との差は平均で約 3 割であった。

#### 【本章の参考文献】

- 1) Hasemi Y., Deterministic Modeling of Unconfined Turbulent Diffusion Flames, Journal of heat transfer, 108, 1986
- 2) Modak A.T., Plastic Pool Fires, Combustion and Flame, 30, 1977
- 3) McCaffrey B.J. : Some Measurements of the Radiative Power Output of Diffusion Flames, WSS/CI 81-15, Western States Section, Combustion Institute, Pittsburgh, 1981
- 4) 田中哮義: 改訂版建築火災安全工学入門
- 5) 横林優, 長谷見雄二, 若松高志, 若松孝旺: 局部火災加熱に暴露される平坦な天井面の過熱性状-局部火災加熱に暴露される構造部材の火災安全設計に関する研究・序説-, 日本建築学会構造系論文集, 第 484 号, pp.149-156, 1996.6
- 6) Hasemi Y., Tokunaga T. : Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames, Fire Science and Technology, Vol.4, No.1, pp.15-26
- 7) You H.Z., Feath G.M. : Ceiling Heat Transfer during Fire Plume and Fire Impingement, Fire and Materials, Vol.3, pp.140-147,1979

【本章で使用した記号】

$A$ : 表面積[m<sup>2</sup>]

$D$ : 火源径[m]

$E$ : 放射発散度[kW/m<sup>2</sup>]

$F$ : 形態係数[-]

$H$ : 天井高さ[m]

$L_c$ : 連続火炎高さ[m]

$L_f$ : 自由空間での火炎高さ[m]

$L_m$ : 平均火炎高さ[m]

$L_c$ : 連続展炎長さ[m]

$L_{rm}$ : 平均展炎長さ[m]

$Q$ : 発熱速度 [kW]

$Q^*$ : 無次元発熱速度[-]

$T$ : 温度[K]

$q$ : 熱流束[kW/m<sup>2</sup>]

$r$ : 距離[m]

$\chi$ : 発熱速度のうちの放射成分の割合[-]

$\varepsilon$ : 放射率[-]

$\sigma$ : ステファンボルツマン係数[kW/(m<sup>2</sup>・K<sup>4</sup>)]

$\rho$ : 密度[kg/m<sup>3</sup>]

<添字>

fl : 火炎

## 第4章

### 外部放射を受ける固体可燃物の燃焼性状

## 第4章の目次

4.	外部放射を受ける固体可燃物の燃焼性状 .....	4-1
4. 1.	はじめに.....	4-1
4. 1. 1.	背景.....	4-1
4. 1. 2.	既往の研究.....	4-1
4. 1. 3.	本章の目的.....	4-2
4. 2.	外部放射を受ける固体可燃物の燃焼実験.....	4-3
4. 2. 1.	実験の目的.....	4-3
4. 2. 2.	実験装置の概要.....	4-3
4. 2. 3.	測定項目.....	4-4
4. 2. 4.	実験条件.....	4-5
4. 2. 5.	実験方法.....	4-6
4. 2. 6.	実験結果.....	4-6
4. 2. 7.	実験結果の考察.....	4-20
4. 2. 8.	まとめ.....	4-32
4. 3.	外部放射を受ける固体可燃物の燃焼モデルの提案と実験との比較... ..	4-33
4. 3. 1.	はじめに.....	4-33
4. 3. 2.	自由空間における燃焼モデルの概要.....	4-34
4. 3. 3.	外部放射の考慮方法.....	4-41
4. 3. 4.	外部放射を考慮した燃焼モデルと実験結果との比較.....	4-44
4. 4.	結論 .....	4-48

### <本章の概要>

室内での可燃物の燃焼は、自由空間での燃焼よりも発熱速度が増加することは定性的には知られている。その原因としては、室上部に形成される煙層や壁面からの外部放射により単位面積あたりの燃焼速度が増加することや燃焼面積の拡大速度が増加すること等が考えられる。

そこで、本章では可燃物上部に煙層が形成される空間で固体可燃物の燃焼実験を行い、単位面積あたりの燃焼速度と燃焼面積の拡大速度に煙層からの外部放射が及ぼす影響を実験的に確かめ、これを定量化した。この関係をもとに、佃らにより提案された自由空間での燃焼予測モデルに修正を加えて計算を行い、実験値と比較した。その結果、天井が低くなるに従い、ウレタンブロックの燃焼速度が増加する傾向を定量的に説明できた。

## 4. 外部放射を受ける固体可燃物の燃焼性状

### 4. 1. はじめに

#### 4. 1. 1. 背景

煙層などからの外部放射（自由空間で燃焼する際に受ける熱流束からの増分）が可燃物に加わると、発熱速度が自由空間で燃焼する場合よりも増加することが定性的には知られている<sup>1)</sup>。外部をうける可燃物の発熱速度が増加すると、煙層温度が上昇するため、外部放射がさらに増加し、発熱速度がさらに増加する。このように、燃焼している可燃物への外部放射は室内での火災の成長の大きな要因の一つであり、延焼拡大を検討する上では無視できない現象である。

#### 4. 1. 2. 既往の研究

放射熱を受ける可燃物の燃焼性状については、1970年代に Tewarson A.ら<sup>2)</sup>が面積 60cm<sup>2</sup>～100cm<sup>2</sup>、厚さ 3～5cm の試験体に図 4-1 に示すように、外部放射を与えて PMMA やポリスチレンなどの熱可塑性プラスチックの燃焼速度を測定し、燃焼速度  $m_f$  は外部放射  $q_E$  を用いて次のように表せるとしている。

$$m_f'' = \frac{q_T + q_E - q_L}{L_G} \quad (4-1)$$

ここで、 $q_T$  は火炎から可燃物表面に入射する熱流束、 $q_L$  は可燃物表面からの失熱、 $L_G$  は可燃物の気化熱を表す。

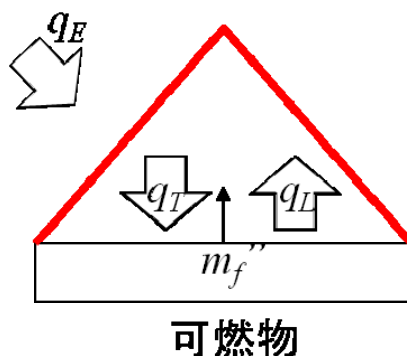


図 4-1 外部放射を受ける可燃物の燃焼速度

式(4-1)は燃焼面積が一定のまま燃焼する可燃物の燃焼速度を予測するには有用であるが、一般的には燃え広がりにより可燃物の燃焼面積は変化する。このような場合には式(4-1)のみでは、燃焼速度を予測には不十分である。

実際の可燃物を自由空間および区画内で燃焼させ燃焼速度を比較する研究も行われている。池畠ら<sup>3)</sup>はオフィスチェアの外部放射の有無による燃焼性状の違いを調べるための実験を行っており、外部放射を受ける場合には発熱速度の最大値が大きくなり、発熱速度が最

大となる時間が早くなることを明らかにしている。また、城ら<sup>4)</sup>は自由空間およびルームコーナー試験に用いられる区画の中でソファや座椅子の燃焼実験を行い、区画内での燃焼時には火災成長率や最大発熱速度が大きくなることを明らかにしている。区画内では燃焼速度が増加することが確認されているが、定量化には至っていない。

#### 4. 1. 3. 本章の目的

固体可燃物の中でも、一つの物質からなり、可燃物ごとのばらつきが小さいウレタンブロックを用いて外部放射を受ける条件での燃焼実験を行い、外部放射が燃焼速度に与える影響を定量化することを目的とする。一方で、先行研究として佃ら<sup>5)</sup>により自由空間中でのウレタンブロックの燃焼予測式が提案されている。本研究ではこの燃焼予測式に外部放射を考慮して燃焼速度を予測できるよう修正を行う。

## 4. 2. 外部放射を受ける固体可燃物の燃焼実験

### 4. 2. 1. 実験の目的

外部放射が固体可燃物の燃焼速度に与える影響を定量的に把握するため、煙層上部にが形成される空間でのウレタンブロック単体の燃焼実験を行った。ウレタンブロックの大きさと天井高さを実験のパラメーターとすることで、外部放射量を変化させた。

### 4. 2. 2. 実験装置の概要

実験装置の概要を図 4-2 に示す。試験装置は 2700mm×2700mm の床および四周に深さ 300mm のたれ壁を設置した天井からなる。床、天井、垂れ壁はいずれも厚さ 25mm のセラミックファイバーボードで構成されている。床面の中央には、可燃物（ウレタンブロック）を設置した。厚さ 8mm の珪酸カルシウム板に厚さ 6mm ブランケット、アルミ箔を重ね、その上に試験体を設置した。

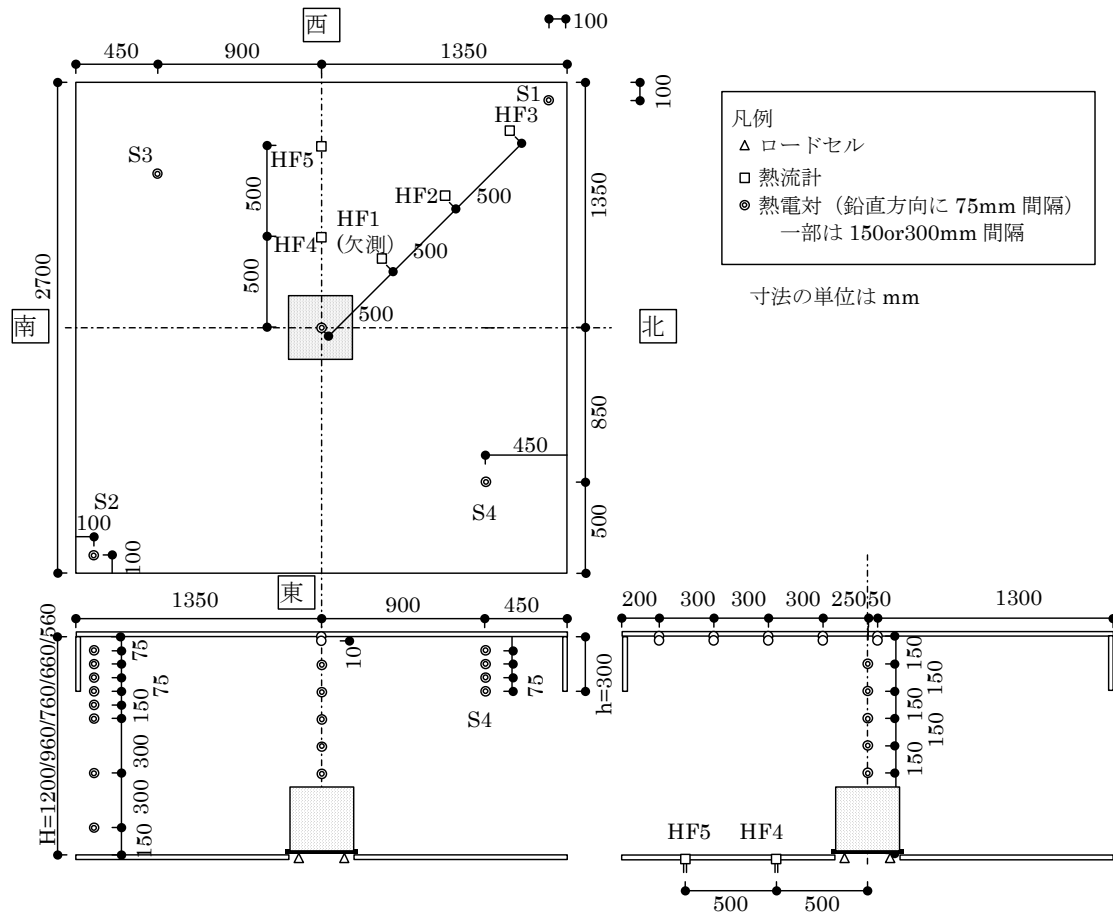


図 4-2 実験装置の概要



#### 4. 2. 3. 測定項目

各実験において、試験体の重量、実験装置内の温度分布、床面に入射する熱流束を測定した。また、実験装置の東側からビデオカメラにより燃焼性状を撮影した。

##### (1) 試験体重量減少

可燃物を設置した珪酸カルシウム板を定格 5kg のロードセルで 3 点支持し、ウレタンブロックの重量減少を測定した。

##### (2) 鉛直温度分布

煙層温度を測定するため、実験装置の対角する 2 箇所の隅角部において、隅角部から東西方向および南北方向にそれぞれ 100mm 内側の位置(図 4-2 の S1、S2)、また残りの 2 箇所の隅各部から東西方向に 500mm、南北方向に 450mm 内側の位置(図 4-2 の S3、S4)に、天井から垂れ壁下端までは鉛直方向に 75mm 間隔で K 型熱電対 (ガラス被覆、素線の太さは 0.32mm) を設置した。また、床面までの鉛直温度分布を把握するため、S1 と S2 の位置では、垂れ壁下端より低い部分についても、熱電対を 150mm～300mm 間隔で設置した。S1、S2 と S3、S4 の隅角部からの位置を変えているのは、水平方向の分布の影響を把握するためである。

##### (3) 床面に入射する熱流束

火源の中心から北西に 500mm(図 4-2 の HF1)、1000mm(図 4-2 の HF2)、1500mm(図 4-2 の HF3)、および西側に 500mm(図 4-2 の HF4)、1000mm(図 4-2 の HF5)の位置の床面に、床面と熱流計の測定面の高さが一致するように鉛直上向きに水冷式熱流計を設置した。ただし、HF1 は計測不良のため結果の考察からは除外した。

#### 4. 2. 4. 実験条件

ウレタンブロックの大きさと天井高さをパラメーターとして実験を行った。実験条件一覧を表 4-1 に示す。

ウレタンブロックはほぼ同じ密度で大きさの異なる 2 種類（W350mm×D350mm×H350mm：以下 U350、W600mm×D600mm×H350mm：以下 U600）を用いた。また、天井高さを 1200mm、960mm、760mm、660mm、560mm と変化させた実験を行うとともに、自由空間でも実験を行った。

U350 の実験については、同一条件で 2 回ないし 3 回実験を行い、同一条件内での実験結果のばらつきを調べた。

表 4-1 実験条件一覧

	可燃物の種類	寸法	天井高さ CH					自由※
			1200	960	760	660	560	
U350 : 1 回目	ポリウレタン	350×350×350mm	○	○	○	○	○	○
U350 : 2 回目			○	○	○	○	○	—
U350 : 3 回目			—	○	○	○	—	—
U600		600×600×350mm	○	○	○	—	—	○

※天井がない場合

各実験に使用したウレタンの重量および密度を表 4-2 に示す。実験に供したウレタンの密度は 16.0～17.5kg/m<sup>3</sup> と 1 割弱のばらつきがある。

表 4-2 各試験体の質量（上段：単位 g）および密度(下段：単位 kg/m<sup>3</sup>)

	CH1200	CH 960	CH 760	CH 660	CH 560	自由
U350 : 1 回目	750.5 (17.5)	750.2 (17.5)	741.2 (17.3)	742.6 (17.3)	744.1 (17.4)	690.3 (16.1)
U350 : 2 回目	750.2 (17.5)	693.6 (16.2)	688.9 (16.1)	688.5 (16.1)	693.2 (16.2)	—
U350 : 3 回目	—	691.3 (16.1)	690.0 (16.1)	693.6 (16.2)	—	—
U600	2015.2 (16.0)	2042.3 (16.2)	2014.2 (16.0)	—	—	2036.2 (16.2)

#### 4. 2. 5. 実験方法

実験ではウレタンの水平面中央に重さ約 2g の脱脂綿を置き、脱脂綿にガスライターを用いて着火した。

実験データはデータロガーにより 1 秒間隔で測定した。重量減少速度は測定ノイズの除去するため、前後 30 秒の平均値とした。そのため、実験結果の燃焼速度曲線（重量減少速度）は、実際よりも滑らかになっているものと推定される。

#### 4. 2. 6. 実験結果

本節では実験結果の概要を示す。

##### (1) 燃焼性状

各天井高さの条件で代表的な実験について、ビデオカメラにより撮影したウレタンブロックの燃焼の様子を 1 分ごと（一部 30 秒ごと）にまとめたものを表 4-3、表 4-4 に示す。

表 4-3 に示すように、天井なしの条件では U350 (W350mm×D350mm×H350mm) は、水平面（上面）中央に着火後、水平方向に火炎伝播し、着火後 1 分では、水平面の端部まで燃焼面が拡大した。その後、鉛直面（側面）の上端から鉛直下向きに燃え下がり、着火後 4 分では鉛直面の下端まで燃え下がり、水平面（上面）および鉛直面の全面が燃焼した。その後、水平面および鉛直面が徐々に燃え尽き、着火後 7 分でほぼ鎮火した。

天井高さが U350 のウレタンの燃え拡がりに与える影響を見ると、いずれの天井高さでも着火後 1 分で水平面の端部まで燃え拡がっており、天井高さが水平面の燃焼面の拡大に与える影響が小さかった。鉛直面の燃え下がり着火後 2 分や 3 分で比較すると、天井高さが低くなるに従い鉛直面の燃え下がり先端が低くなった。












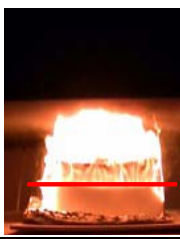











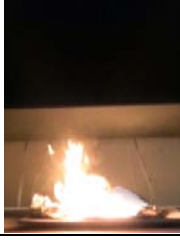
表 4-4 に示すように、U600 (W600mm×D600mm×H350mm) についても、U350 と同じ順序で燃焼するが、水平面の面積が大きいため、水平面端部まで燃え広がる時間が 1 分 30 秒程度とやや長くなっている。一方で、鉛直面の燃え下がり、U350 のウレタンよりも早くなっている。また、着火後 6 分でほぼ鎮火するなど、ウレタンの寸法は大きくなったにも関わらず、燃焼継続時間が短くなっていることから燃焼速度が大きくなっているものと考えられる。

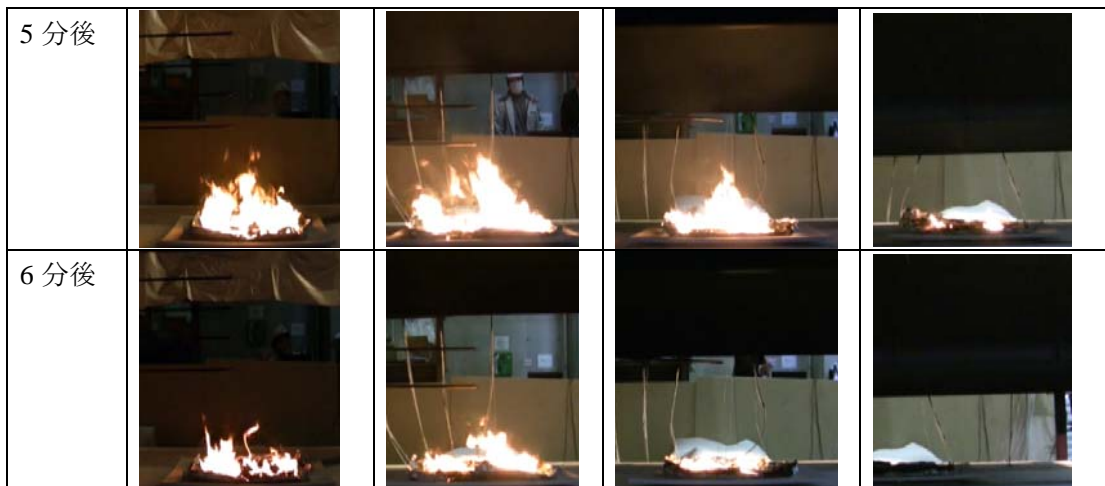
水平面の燃え拡がりは U350 と同様に天井高さの影響は小さいが、鉛直面の燃え下がりと同じ時間で比較すると、天井高さが低くなるに従い鉛直面の燃え下がり先端が低くなった。

表 4-3 U350 の燃焼性状

	天井なし	CH1200	CH960	CH760	CH660	CH560
1 分後						
2 分後						
3 分後						
4 分後						
5 分後						
6 分後						
7 分後						

表 4-4 U600 の燃焼性状

	天井なし	CH1200	CH960	CH760
1 分後				
1 分 30 秒後				
2 分後				
2 分 30 秒後				
3 分後				
4 分後				



ビデオ画像から読み取った鉛直面の燃え下がり開始時間  $t_{vs}$  および、鉛直面の燃え下がり終了時間  $t_{ve}$  および、燃烧速度の測定値（次節参照）が最大となる時間  $t_{max}$  を天井高さに対してプロットした結果を図 4-3 に示す。

鉛直面の燃え下がり開始時間は、U350、U600 のいずれでも天井高さによらずほぼ一定となり、それぞれ約 65 秒、85 秒であった。一方、鉛直面の下端まで燃え下がる時間および燃烧速度が最大となる時間については、天井高さが低くなるほど短くなっており、天井高さが低くなるほど、燃烧面の拡大速度が大きくなった。また、鉛直面の燃え下がり終了時間よりも、燃烧速度が最大となる時間が 30~60 秒程度遅くなっている。鉛直面の燃え下がり終了後は、燃え尽きにより燃烧面積が減少するが、燃烧速度はこの時間以降に最大となることから、鉛直面の燃え下がり終了後から燃烧速度が最大となる時間帯にかけて、水平面または鉛直面、あるいはこの両面の単位面積あたりの燃烧速度が増加しているものと考えられる。

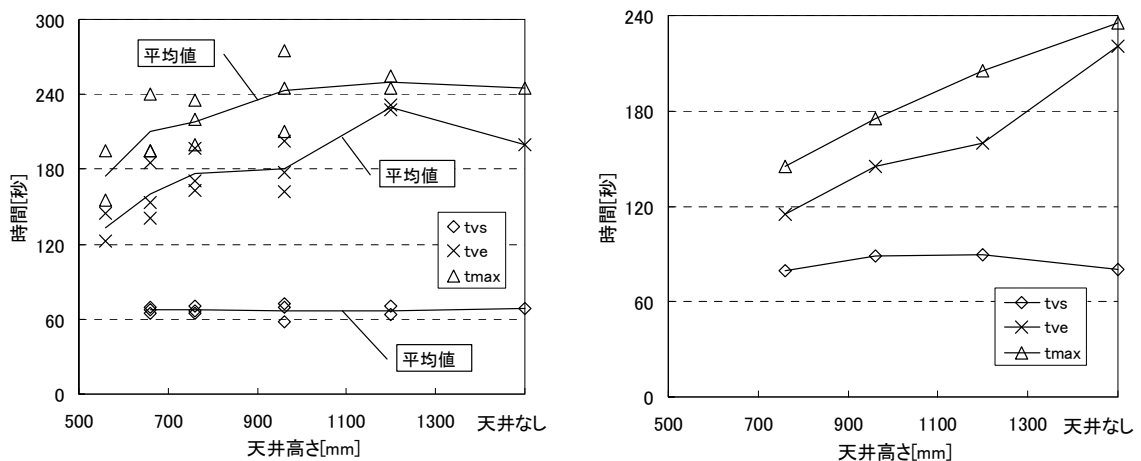


図 4-3 天井高さと燃烧速度が最大となる時間などの関係（左：U350、右：U600）

## (2) 燃焼速度と煙層温度

横軸に着火からの経過時間、縦軸にロードセルで測定した重量から算出した燃焼速度をとり、実験値をプロットした結果を図 4-4 に示す。

図 4-4 左に示すように、U350 の燃焼速度は天井なしの条件では、着火した水平面全体が燃焼する 70 秒程度までは下に凸の形で燃焼速度が増加する。その後、燃焼速度は穏やかに増加し、約 240 秒で燃焼速度が最大値 3.5g/s となった。その後、燃焼速度は指数関数的に減衰し、約 480 秒で鎮火した。

天井高さが 1200mm の条件では、天井なしの条件とほぼ同様に推移した。天井高さが 960mm の条件では、天井なしの条件よりも燃焼速度はやや大きく、天井高さが 760mm 以下の条件では天井高さの影響が顕著に表れており、特に、天井高さが最も低い 560mm の条件では、最大燃焼速度が約 2 倍になった。

図 4-4 右に示すように、U600 の燃焼速度は、天井なしの条件では着火後 90 秒程度までは下に凸の形で燃焼速度が増加し、120 秒程度でほぼ一定となった後に、再び増加し、最大燃焼速度は約 11g/s であった。

天井高さ 1200mm の条件では、120 秒程度までは天井なしとほぼ同様に推移したが、その以降の時間帯では、天井なしの条件よりも燃焼速度が大きくなった。天井高さ 960mm、760mm の条件でも、着火後しばらくは天井なしの条件とほぼ同様に推移したが、天井高さが低くなるに従い、燃焼速度の増加速度が大きく、また、最大燃焼速度そのものも大きくなった。

以上述べたように、U600 を用いた実験では、U350 を用いた実験よりも燃焼速度が大きくなるため、煙層温度が高くなり、外部放射が増加するため、同じ天井高さでも、天井の影響が大きくなった。

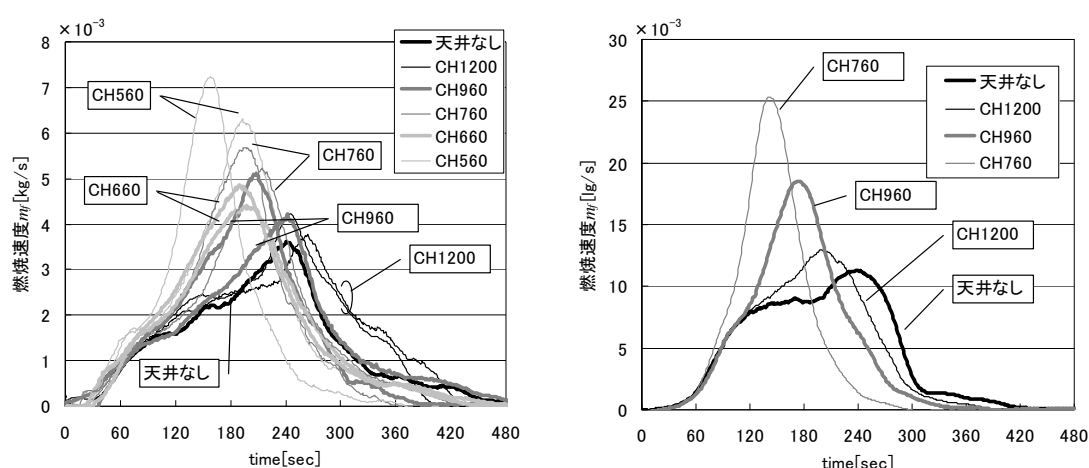


図 4-4 燃焼速度の時間変化 (左 : U350、右 : U600 )

縦軸に煙層温度をとり、実験値をプロットした結果を図 4-5 に示す。ここで、煙層温度

は垂れ壁下端よりも高い部分に設置した熱電対の測定値を時刻毎に平均した値である。

図 4-5 左に示すように、U350 を用いた実験での煙層温度は、天井高さが低くなるに従い高くなった。図 4-4 に示したように、燃焼速度に天井高さの影響が生じたのは天井高さが 960mm よりも低い場合であったが、この条件での煙層温度の最大値は約 200℃を超えていた。また、図 4-5 右に示すように、U600 を用いた実験でも、煙層温度は天井高さが低くなるに従い高くなった。図 4-4 に示したように、燃焼速度に天井高さの影響が生じたのは天井高さ 1200mm の条件では、着火後 120 秒以降でありこの時の煙層温度は約 200℃であった。

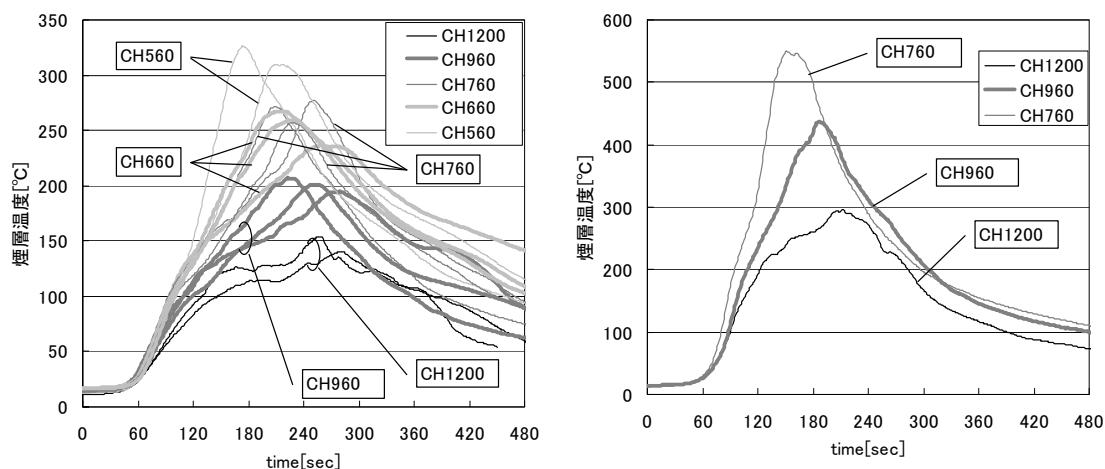


図 4-5 煙層温度の時間変化（左：U350、右：U600）

#### (4) 床面に入射する熱流束

床面に設置した4点（HF2～HF5）の熱流計の測定値を着火からの経過時間に対してプロットした結果を図 4-6～図 4-9 に示す。前述のように、HF1 は計測不良のため実験結果からは除外した。

図 4-6 左に示すように、U350 を用いた実験での HF2 の測定位置での床面に入射する熱流束の最大値は、天井なしの条件では約 1kW/m<sup>2</sup>、天井高さ 1200mm の条件で約 2kW/m<sup>2</sup>、天井高さ 960mm の条件で約 3kW/m<sup>2</sup>、天井高さ 760mm の条件で約 6kW/m<sup>2</sup>、天井高さ 660mm の条件で約 7kW/m<sup>2</sup>、最も低い天井高さ 560mm の条件で約 14kW/m<sup>2</sup> と、天井高さが低くなるに従い、床面に入射する熱流束も増加した。



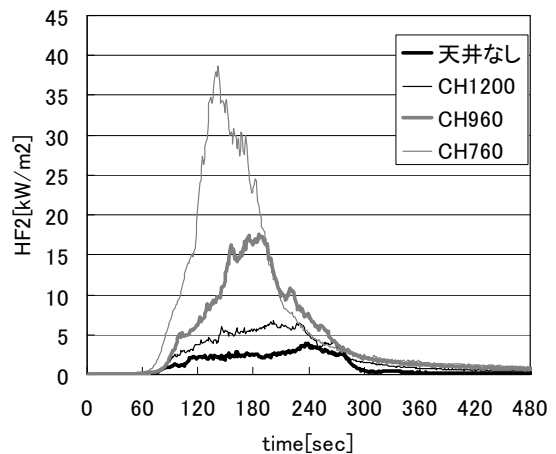
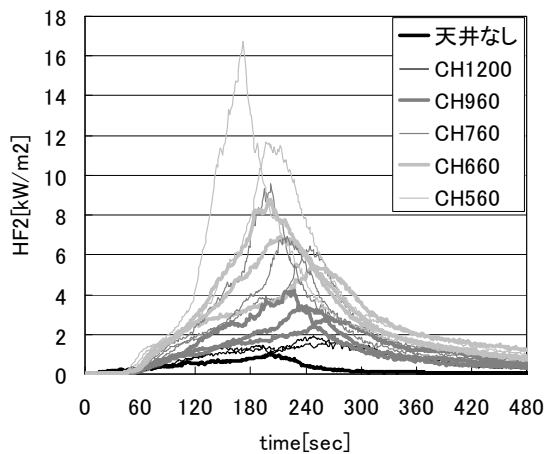


図 4-6 床面への熱流束 (HF2: 火源中心から 1000mm) の時間変化 (左: U350、右: U600)

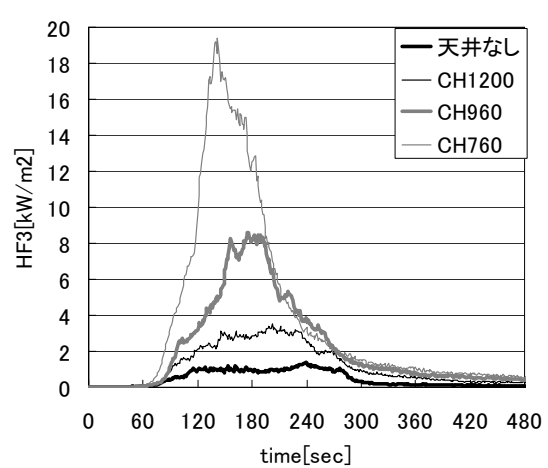
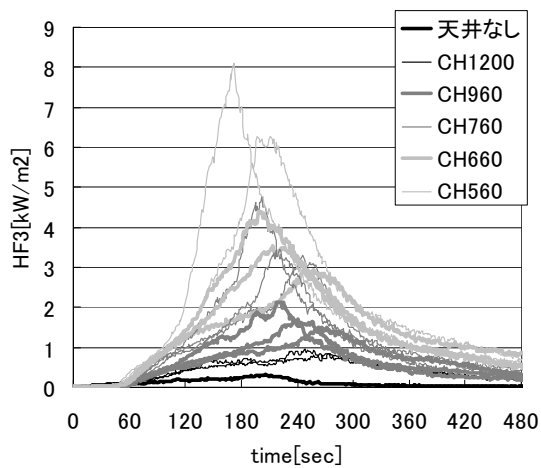


図 4-7 床面への熱流束 (HF3: 火源中心から 1500mm) の時間変化 (左: U350、右: U600)

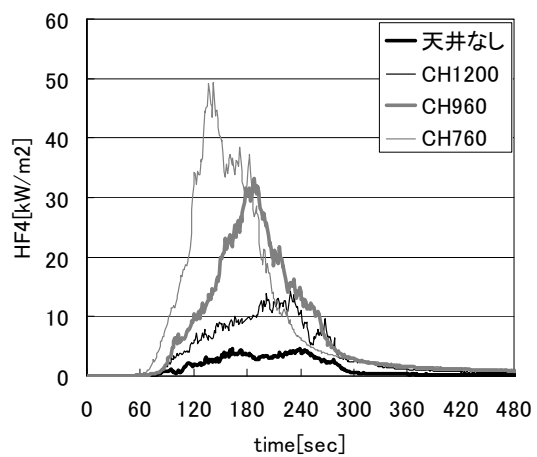
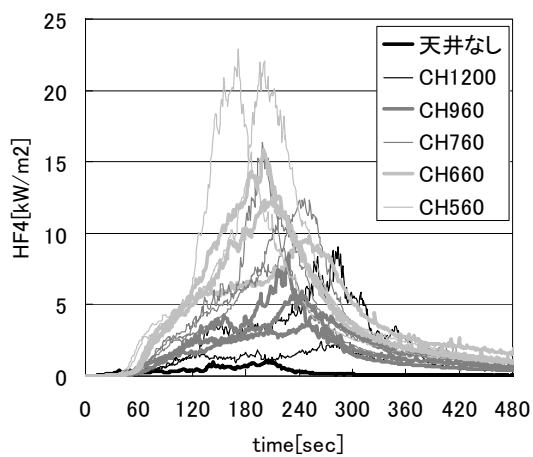


図 4-8 床面への熱流束 (HF4: 火源中心から 500mm) の時間変化 (左: U350、右: U600)

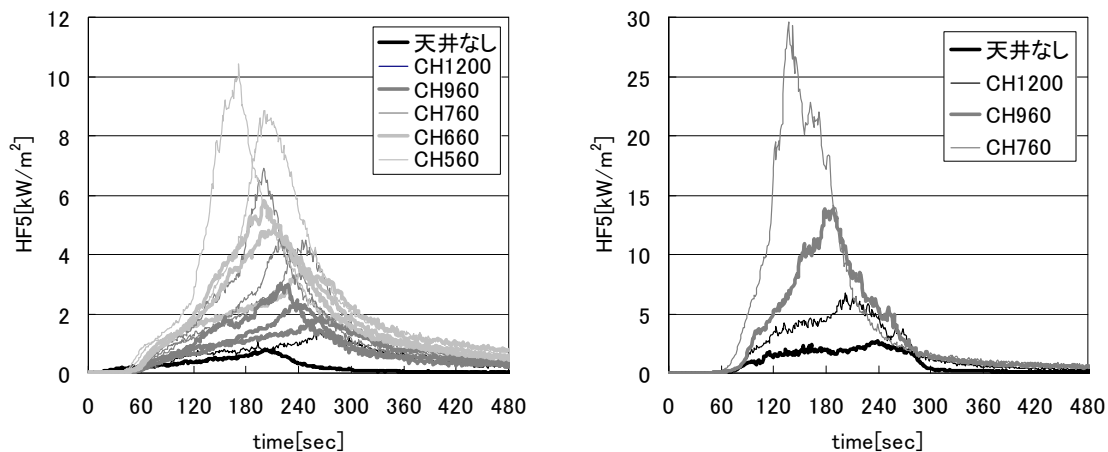


図 4-9 床面への熱流束 (HF5 : 火源中心から 1000mm) の時間変化 (左 : U350、右 : U600 )

(5) 燃焼速度が最大となる時間帯での燃焼性状

U350 での燃焼速度が最大となる時間帯での燃焼の様子とその時間、および最大燃焼速度を表 4-5 に示す。同様に、U600 を用いた実験についても、表 4-6 に示す。いずれの実験でも、燃焼速度が最大となる時間帯では、鉛直面下端まで燃え下がっており、表面の州全てが燃焼している。

U350 および U600 の最大燃焼速度を天井高さに対してプロットした結果を図 4-10 左に示す。同様に、最大燃焼速度となる時間での煙層温度を天井高さに対してプロットした結果を図 4-10 右に示す。天井なしの条件では、外気温度をプロットした。U350、U600 のいずれについても、天井高さが低くなるに従い、煙層温度が高くなった。そのため、天井高さが低くなるに従い、外部放射が増加し、最大燃焼速度も増加したものと考えられる。U600 を用いた実験では、同じ天井高さでも U350 を用いた実験よりも煙層温度が高くなっているため、最大燃焼速度に対する天井高さの影響が顕著に生じたものと考えられる。

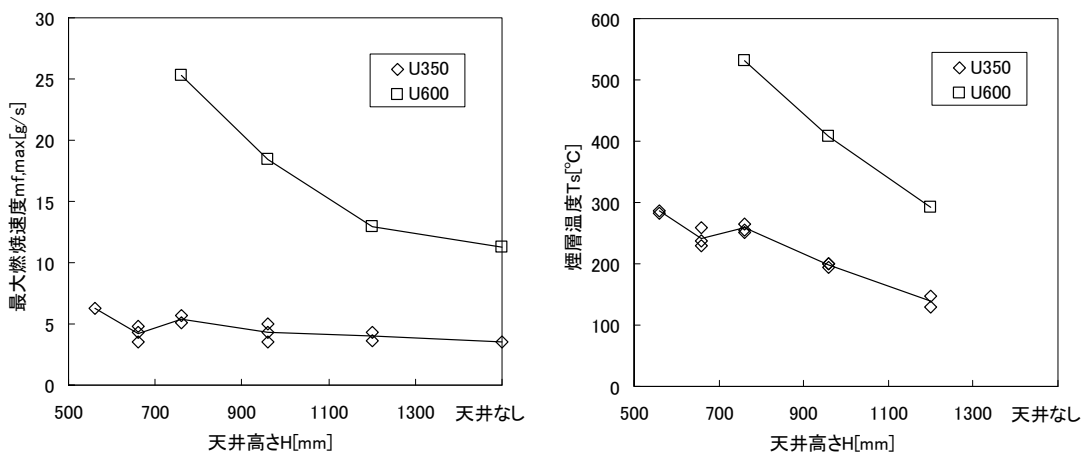


図 4-10 天井高さと最大燃焼速度 (左)、煙層温度の関係

表 4-5 U350 の燃焼速度が最大となる時間帯での燃焼の様子とその時間帯および燃焼速度






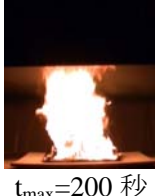

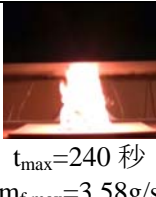

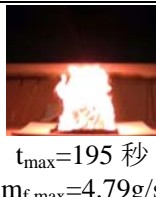
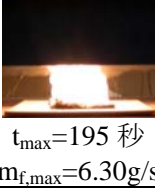
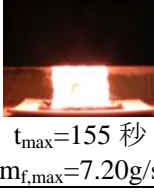




	1 回目	2 回目	3 回目	平均値
天井なし	 $t_{\max}=245$ 秒, $m_{f,\max}=3.51\text{g/s}$	—	—	$t_{\max}=245$ 秒 $m_{f,\max}=3.51\text{g/s}$
CH1200mm	(データ欠損)	 $t_{\max}=255$ 秒 $m_{f,\max}=3.66\text{g/s}$	—	$t_{\max}=255$ 秒 $m_{f,\max}=3.66\text{g/s}$
CH960mm	 $t_{\max}=275$ 秒 $m_{f,\max}=3.55\text{g/s}$	 $t_{\max}=210$ 秒 $m_{f,\max}=4.99\text{g/s}$	 $t_{\max}=245$ 秒 $m_{f,\max}=4.30\text{g/s}$	$t_{\max}=243$ 秒 $m_{f,\max}=4.28\text{g/s}$
CH760mm	(データ欠損)	 $t_{\max}=200$ 秒 $m_{f,\max}=5.66\text{g/s}$	 $t_{\max}=220$ 秒 $m_{f,\max}=5.11\text{g/s}$	$t_{\max}=210$ 秒 $m_{f,\max}=5.39\text{g/s}$
CH660mm	 $t_{\max}=240$ 秒 $m_{f,\max}=3.58\text{g/s}$	 $t_{\max}=195$ 秒 $m_{f,\max}=4.34\text{g/s}$	 $t_{\max}=195$ 秒 $m_{f,\max}=4.79\text{g/s}$	$t_{\max}=210$ 秒 $m_{f,\max}=4.24\text{g/s}$
CH560mm	 $t_{\max}=195$ 秒 $m_{f,\max}=6.30\text{g/s}$	 $t_{\max}=155$ 秒 $m_{f,\max}=7.20\text{g/s}$	—	$t_{\max}=175$ 秒 $m_{f,\max}=6.75\text{g/s}$

表 4-6 U600 の燃焼速度が最大となる時間帯での燃焼の様子とその時間帯および燃焼速度

	燃焼の様子	最大燃焼速度と時間
天井なし		$t_{\max}=243$ 秒 $m_{f,\max}=11.2\text{g/s}$
CH1200mm		$t_{\max}=204$ 秒 $m_{f,\max}=12.6\text{g/s}$
CH960mm		$t_{\max}=177$ 秒 $m_{f,\max}=18.4\text{g/s}$
CH760mm		$t_{\max}=145$ 秒 $m_{f,\max}=25.2\text{g/s}$

#### (6) 水平面の燃え拡がり速度

自由空間（天井なし）で行った実験での、水平面を燃え拡がる時間帯での実験の様子を図 4-1 1 に示す。水平面の中央に着火後、燃焼により生じた火炎からの放射熱により、未着火部分の表面温度が上昇し、着火温度に達した時点で水平方向へと燃焼面が拡大していく。このとき、着火した中央の位置から図 4-1 1 中で右側の燃焼面の先端までの距離を  $r_1$ （以下、燃え拡がり半径とする）、左側の燃焼面の先端までの距離を  $r_2$  とする。自由空間での実験の燃え拡がり半径の着火からの時間変化を図 4-1 2 に示す。燃え拡がり半径  $r_1$ 、 $r_2$  はいずれも時間と線形の関係であった。この傾きが水平方向の燃え拡がり速度であり、最小二乗法により一次式で近似して計算すると、 $0.0029$  であった。

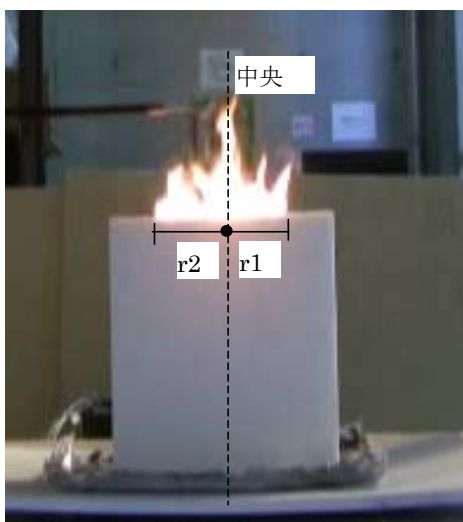


図 4-1 1 水平面を燃え拡がる状況

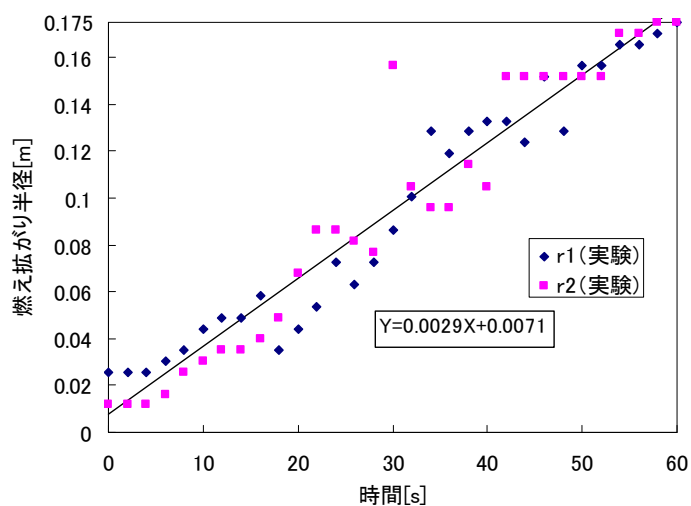


図 4-1 2 燃え拡がり半径の時間変化

### (7) 鉛直面の燃え下がり速度

鉛直面が燃え下がっている時間帯での実験の様子を図 4-1 3 に示す。鉛直面上端が燃焼すると、燃焼により生じた火炎からの放射熱により、未着火部分の表面温度が上昇し、着火温度に達した時点で下方へと燃焼面が拡大していく。この時の燃焼面先端の床面からの高さを燃焼面下端高さ  $h_l$  とする。一方、ウレタンが燃え尽きていく面の高さを燃焼面上端高さ  $h_u$  とする。ウレタンの燃焼性状に関する既往の研究<sup>5)</sup>では、熔融したウレタンが鉛直面から滴下し、滴下した位置から上方や側方へと燃え広がる現象が報告されているが、今回の実験では、ウレタンの高さが低いこともあり滴下の現象は生じなかった。



図 4-1 3 鉛直面が燃え下がっている状況

各実験において、ビデオ画像から 8 秒間隔で読み取った燃焼面下端高さと燃焼面上端高さの時間変化を図 4-1 4、図 4-1 5 に示す。燃焼面上端は、ビデオから見た時に鉛直面の燃焼により生ずる火炎の奥側にあるため、その高さを読み取ることができない場合もあった。

U350 の燃焼面下端高さは実験条件により傾きが異なるものの、いずれも時間に比例して燃焼面の高さが減少している。また、燃焼面下端高さが低下し始める時間帯（鉛直面の燃焼が始まる時間帯）は実験条件によらずほぼ一定であるが、燃焼面が床面に到達する時間については、天井高さが低くなるほど早くなっている。U600 (350) の燃焼面下端高さは U350 の場合と同様に、時間に比例して燃焼面下端高さは低下しており、天井ありの条件では、燃え下がり速度は非常に大きくなった。

燃焼面上端高さについては、U350、U600 のいずれの実験でも、天井高さによらずほぼ一定の速度で燃え下がった。

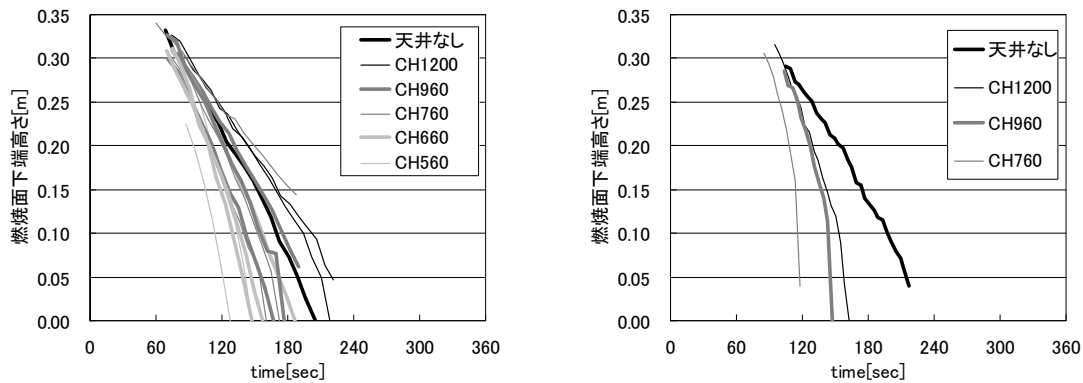


図 4-14 燃焼面下端高さの時間変化 (左 : U350、右 : U600 )

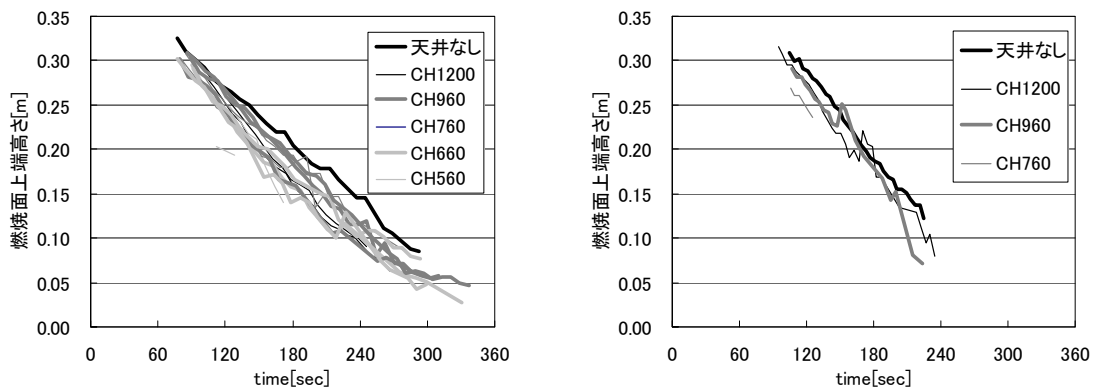


図 4-15 燃焼面上端高さの時間変化 (左 : U350、右 : U600 )

いずれの実験でも燃焼面の高さはほぼ時間に比例して減少することから、燃焼面の高さの時間変化を最小二乗法により一次式で近似し、その傾きを速度とする。燃焼面下端高さの減少速度を下方火炎伝播速度、燃焼面上端高さの減少速度を下方燃え尽き速度とする。横軸に、天井高さを取り、縦軸にそれぞれの速度を取り、実験値をプロットした結果を図 4-16 および図 4-17 に示す。

図 4-16 に示すように、U350、U600 のいずれでも、下方火炎伝播速度は外部放射による予熱の効果により、天井高さが低くなるほど伝播速度が増加した。U600 の下方火炎伝播速度は同じ天井高さの U350 の下方火炎伝播速度より大きい。これは、図 4-5 に示したように同じ天井高さでも、U600 の煙層温度は U350 より高く、外部放射が大きくなるためだと考えられる。

図 4-17 に示すように、U350 および U600 の下方燃え尽き速度は天井高さに依存せず、その平均値は U350 では 0.00117m/s、U600 では 0.00164m/s であった。下方燃え尽き速度はウレタンブロックの水平面に入射する放射熱に比例すると考えられるが、この実験結果で

はその影響は明らかでない。

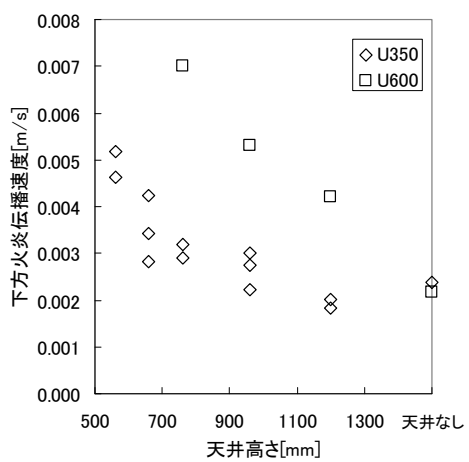


図 4-16 下方火炎伝播速度

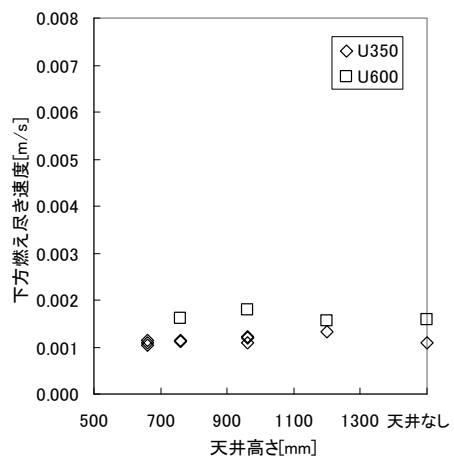


図 4-17 下方燃え尽き拡大速度



#### 4. 2. 7. 実験結果の考察

前項では、空間上部に煙層が形成される条件では、天井高さが低くなるに従って、煙層からの放射熱が増加するため、燃焼速度  $m_f$  が増加することを実験結果として示した。燃焼速度が増加する要因として、燃焼面積の拡大速度が増加することと、単位面積あたりの燃焼速度が増加することの二つの効果が考えられる。

そこで、本節では、燃焼面積の拡大速度と単位面積あたりの燃焼速度のそれぞれについて、外部放射との関係について考察を行った。ここで、外部放射  $q_e$  は自由空間で燃焼する際に受熱面に入射する熱流束からの増分と定義する。

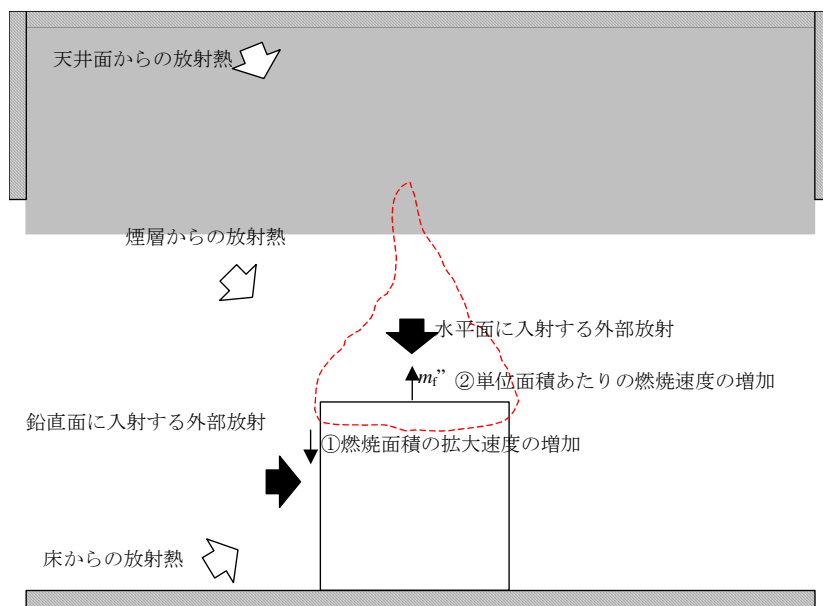


図 4-18 外部放射の影響の模式図

### (1) 外部放射の計算方法

本実験での放射源としては、煙層からの放射  $E_s$  や展炎した火炎から射出される放射熱  $E_{fs}$ 、天井面および垂れ壁表面から射出される放射熱  $E_w$ 、煙層下端より下部の火炎から射出される放射熱  $E_f$ 、床面から射出される放射熱  $E_{floor}$  が考えられるが、このうち外部放射となるのは煙層からの放射  $E_s$  や展炎した火炎からの放射  $E_{fs}$ 、天井面および垂れ壁からの放射  $E_w$ 、床面からの放射  $E_{floor}$  である。煙層からの放射、展炎した火炎からの放射、天井面および垂れ壁からの放射はいずれも煙層下端を透過するため、これらを一体で考え、煙層下端から射出される放射熱  $E_{sj}$  とする。燃烧物表面に入射する外部放射は、煙層下端から射出される放射熱から計算した煙層下端からの外部放射と、床表面からの外部放射の和とした。

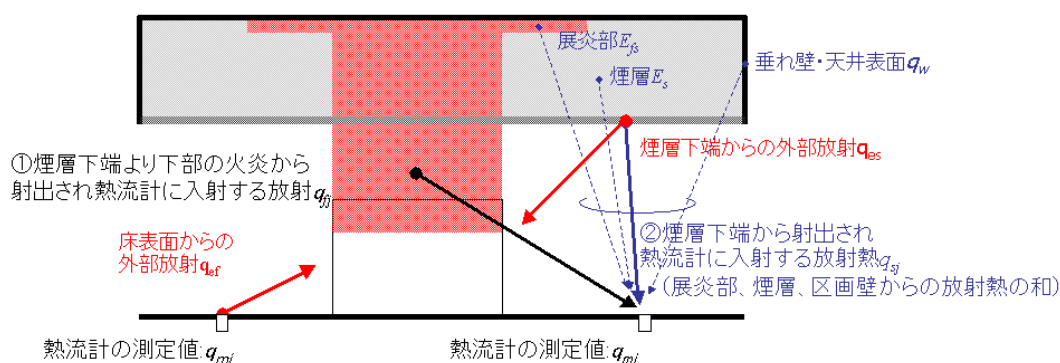


図 4-19 外部放射の計算方法

#### (1-1) 煙層下端からの外部放射

煙層下端から射出される放射熱から煙層下端からの外部放射を求めた。煙層下端から射出され床面に設置した熱流計  $j$  に入射する放射熱  $q_{sj}$  は、熱流計  $j$  の実測値  $q_{mj}$  から煙層下端より下部の火炎から射出され熱流計に入射する放射熱  $q_{fj}$  を引くことで算出した。この値を熱流計を設置した位置に対する煙層下端の形態係数  $F_{sj}$  で割ることで、煙層下端の放射発散度  $E_{sj}$  を算出し、これに燃烧する可燃物表面に対する形態係数  $F_e$  を乗じて煙層下端からの外部放射  $q_{esj}$  を計算した。

$$q_{esj} = F_e E_{sj} = F_e \frac{q_{sj}}{F_{sj}} = F_e \frac{q_{mj} - q_{fj}}{F_{sj}} \quad (4-2)$$

##### (1-1-1) 煙層下端より下部の火炎から熱流計への放射熱

3章に示した方法を用いて火炎から射出される放射熱を計算した。各時間での燃烧面下端高さ、発熱速度の実験結果から円柱状の火炎を想定し、火炎表面の放射熱の収支からその放射発散度を求め、これに受熱面に対する形態係数を乗じて、床面に入射する放射熱を計算した。この時、発熱速度のうちの放射成分の割合  $\chi$  を定める必要がある。そのため、自

由空間での実験にびて床面に入射する熱流束の測定値と計算値が一致するように  $\chi$  を求めたところ、0.45 となった。実験値と計算値の比較結果を図 4-20 に示す。

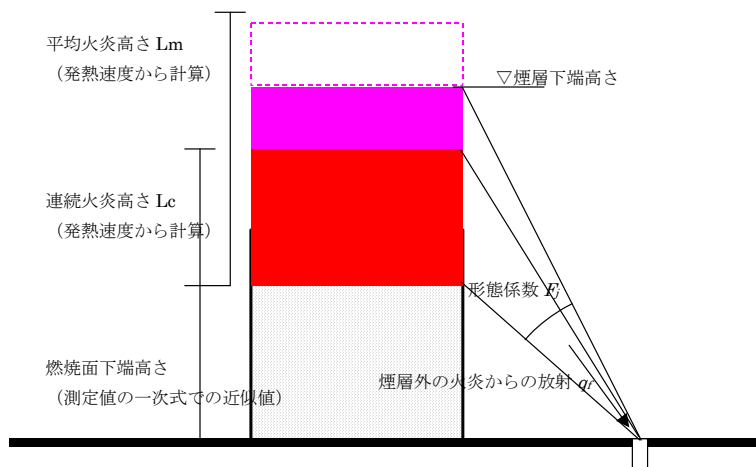


図 4-20 ウレタンブロックの燃焼時の $\chi$ の推定

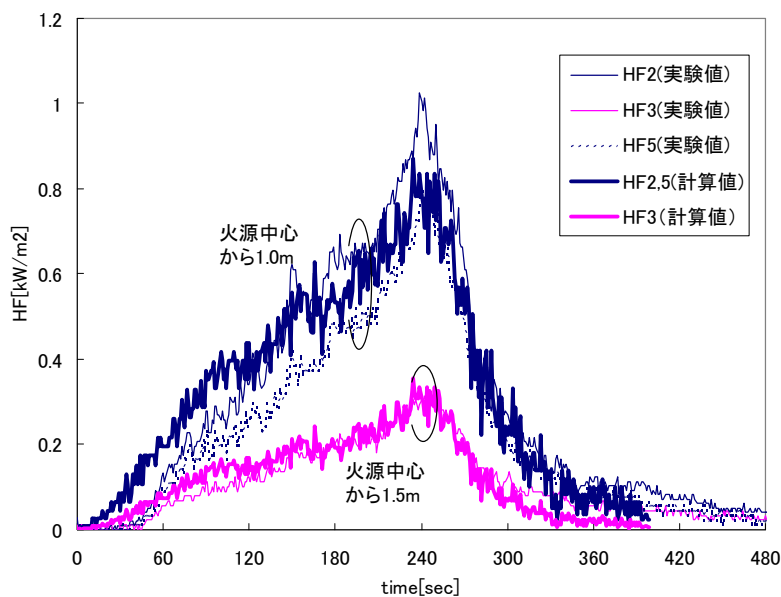


図 4-21 ウレタンブロックの $\chi$ の推定

#### (1-1-2) 煙層下端の放射発散度

床面で測定した熱流束の測定値  $q_{ej}$  から、(1-1-1) の方法で計算した火炎からの放射熱を除いた値を煙層から入射する熱流とした。これを熱流計設置位置から煙層下端を見た時の形態係数で除して、煙層下端の放射発散度  $E_s$  を求めた。熱流計 HF2、HF3、HF5 についてそれぞれ放射発散度を算出することができるので、それぞれ  $E_{s2}$ 、 $E_{s3}$ 、 $E_{s5}$  と表記する。また、煙層温度の測定値から算出した放射発散度  $E_s(=\sigma T_s^4)$  と併せて、各天井高さでの放射発散度の時刻歴を図 4-22～図 4-24 に示す。

CH1200 の条件での熱流計の測定値から計算した放射発散度は、測定不良であった  $E_{s5}$  を除き煙層温度から算出した放射発散度とよく一致している。CH960 の条件では、熱流計の測定値から算出した放射発散度は、煙層温度から算出した放射発散度よりも全体的に高くなっている。また、可燃物に近い位置に設置した熱流計の測定値から算出した放射発散度  $E_{s2}$  は遠い位置に設置した熱流計の測定値から算出した放射発散度  $E_{s3}$ 、 $E_{s5}$  よりも大きくなっている。この傾向は天井高さが低いほど顕著になっており、展炎した火炎からの放射熱の影響によるものと考えられる。

煙層下端からの外部放射は  $E_{s2}$  の結果を用いて算出した。

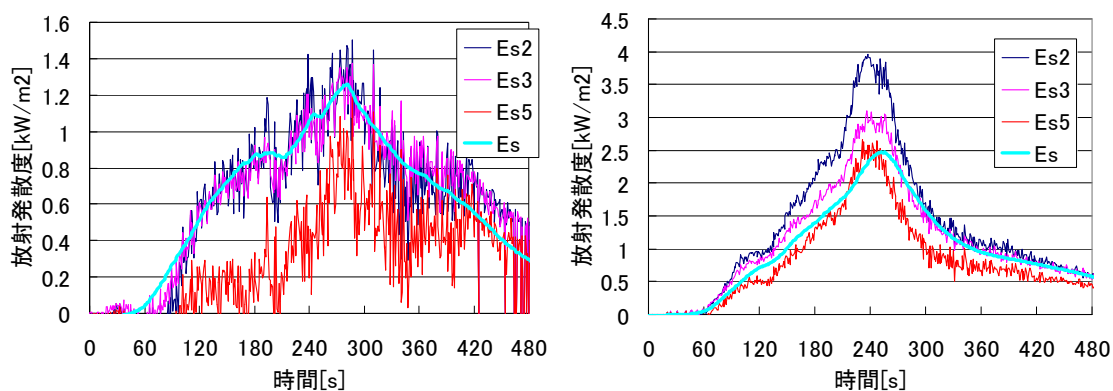


図 4-2 2 煙層下端の放射発散度 (U350 : CH1200、CH960)

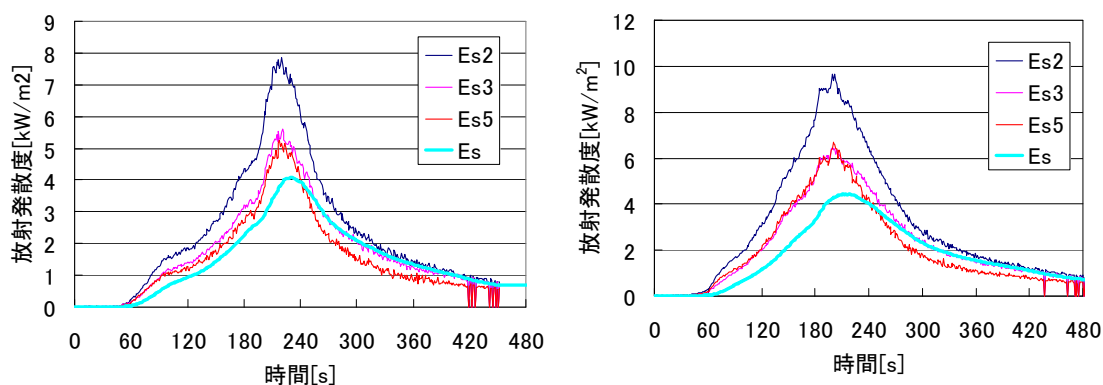


図 4-2 3 煙層下端の放射発散度 (U350 : CH760、CH660)

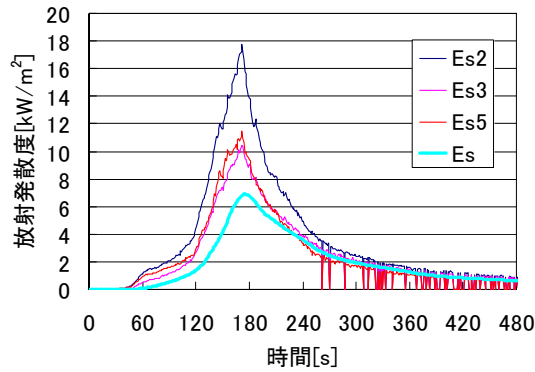


図 4-24 煙層下端の放射発散度 (U350 : CH560)

(1-2) 床表面からの外部放射

床表面からの外部放射は、床面に設置した熱流計 HF2 の測定値  $q_{m2}$  から非定常の熱伝導解析により床の表面温度  $T_{floor}$  を計算し、表面温度から床面の放射発散度  $E_{fi}$  を求め、これに燃焼する可燃物表面に対する形態係数  $F_f$  を乗じて床表面からの外部放射  $q_{efi}$  を計算した。

$$q_{efi} = F_f E_{fi} = F_f \sigma (\varepsilon_{floor} T_{floor}^4 - T_a^4) \quad (4-3)$$

床の表面温度は、床の 4 分の 1 平面のほぼ中央で測定した熱流計 HF2 の測定値  $q_{m2}$  から、一次元の非定常熱伝導解析により求めた。床面の上面と下面の境界条件を式(4-4)、(4-5)に示す。ここで、 $x$  は床の厚み方向にとり、 $x=0$  は床の上面、 $x=df$  は床の下面を示す。また、計算に使用した条件を表 4-7 に示す。

$$\varepsilon_w q_{m2} - h(T_{floor} - T_a) = -\lambda \left. \frac{dT_{floor}}{dx} \right|_{x=0} \quad (4-4)$$

$$h(T_{floor} - T_a) = -\lambda \left. \frac{dT_{floor}}{dx} \right|_{x=df} \quad (4-4)$$

表 4-7 計算条件一覧

項目	値
総合熱伝達率 $h$	0.0083 kW/m <sup>2</sup> K
雰囲気温度 $T_a$	14°C
床の熱伝導率 $\lambda$	0.12 × 10 <sup>-3</sup> kW/mK
床の比熱 $c$	0.92 kJ/kgK
床の密度 $\rho$	250 kg/m <sup>3</sup>
床の放射率 $\varepsilon$	0.9
床の厚み $df$	0.025 m

横軸に時間、縦軸に床表面温度をとり、計算結果をプロットした結果を図 4-25 に示す。U350 の天井高さ 1200mm の条件では、着火後 60 秒から表面温度がなだらかに上昇し、300 秒で最高値 70℃となり、その後、なだらかに低下した。天井高さが低くなるに従って、床表面温度の計算結果は高くなっており最も天井高さが低い 560mm の条件では、表面温度の最高値は約 370℃であった。

U600 でも、天井高さが低くなるに従って、床表面温度の計算結果は高くなっており、天井高さが最も低い 760mm の条件では、表面温度の最高値は約 800℃であった。

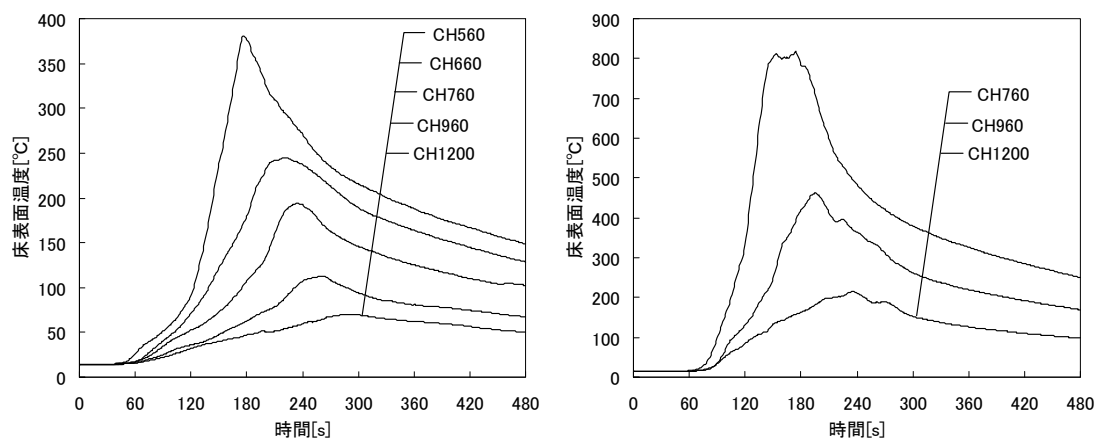


図 4-25 床表面温度の計算結果 (左 : U350、右 : U600)

(2) 外部放射が水平面の燃焼性状に与える影響

(2-1) 水平面に入射する外部放射の計算方法

可燃物の中心から 1000mm の位置に設置した熱流計 HF2 の測定値から算出した放射発散度  $E_{s2}$  の値を次式に用いて、水平面に入射する外部放射を算出した。

$$q_{eh} = F_h E_{s2} \quad (4-3)$$

ただし、 $F_h$  は水平面の中心に対する煙層下端の形態係数  $F_h$  である。

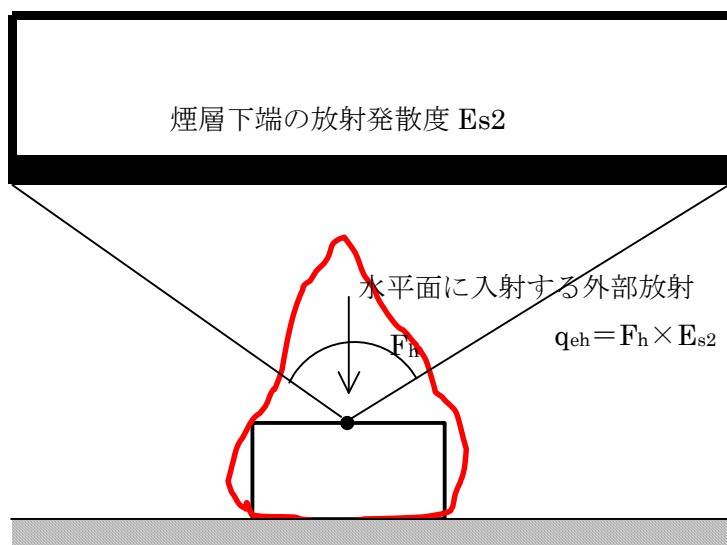


図 4-26 外部放射の模式図

## (2-2) 水平面上の燃焼面の拡大速度

今回の実験では、自由空間（天井なし）で実施した実験を除き、可燃物の上方に煙層があるため水平面の燃焼面の拡大速度を観察することができなかった。そこで、図 4-3 に示したウレタン鉛直面上端の燃焼開始時間  $t_{ss}$ （ウレタン水平面端部までの燃え拡がり時間と等しい）を、着火したウレタン中央からウレタン端部までの距離を割ることにより算出した平均水平火炎伝播速度  $v_{mh}$  と水平面に入射する外部放射  $q_{eh}$  との関係について検討を行った。横軸に水平面に入射する外部放射  $q_{eh}$ 、縦軸に平均水平火炎伝播速度  $v_{mh}$  をとり、実験値をプロットした結果を図 4-27 に示す。ここで、外部放射は着火から水平面の端部まで燃焼面が拡大するまでに要した時間（図 4-3 で示した  $t_{ss}$  と等しい）までの外部放射の平均値を示す。

U350 および U600 のいずれのウレタンにおいても、今回実験した範囲では、水平平均火炎伝播速度  $v_{mh}$  は自由空間（外部放射が 0）での値とほぼ等しく、外部放射が水平面の燃焼面積の拡大速度に与える影響は小さかった。これは、水平面の燃焼面積の拡大は着火から 1 分程度までに生じる現象のため、煙層温度が 30~100℃ と低く、外部放射の値が 0.5kW/m<sup>2</sup> 未満と非常に小さいためだと考えられる。

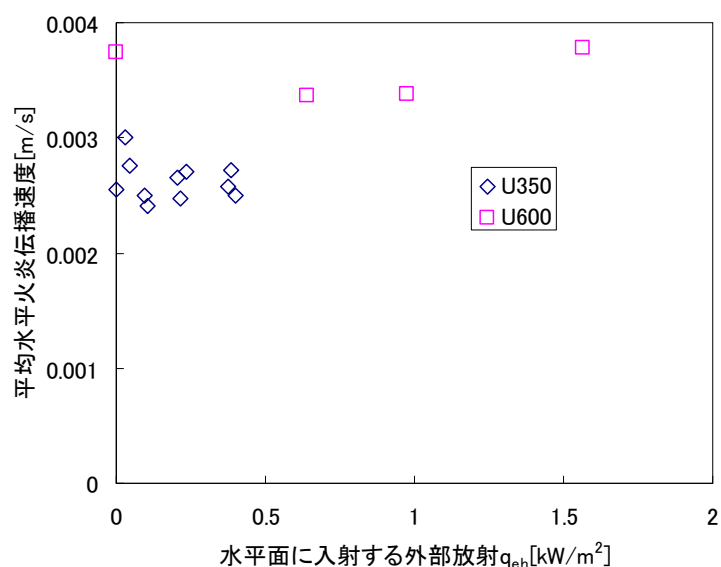


図 4-27 平均水平火炎伝播速度と水平面に入射する外部放射の関係



(2-3) 水平面の単位面積あたりの燃焼速度

水平面の単位面積あたりの燃焼速度  $m''_{fu}$  [kg/s] は、燃焼面水平面の降下速度である下方燃え尽き拡大速度  $v_{cd}$  [m/s] の測定値を用いて次式から求めた。

$$m''_{fu} = v_{cd} \times \rho_u \quad (4-2)$$

ここで、 $\rho_u$  はウレタン試験体の密度 [kg/m<sup>3</sup>] である。

図 4-17 に示した下方燃え尽き拡大速度から算出した燃焼速度をウレタン水平面への外部放射に対してプロットした結果を図 4-28 に示す。ここで外部放射は、ウレタンの燃焼速度が最大となる時間での煙層温度を用いて算出した。

U350 および U600 のいずれのウレタンにおいても、今回実験した範囲では、ばらつきはあるものの、外部放射が水平面の単位面積あたりの燃焼速度に与える影響は見られなかった。これは、水平面の上部には燃焼により生じる火炎が火炎高さの厚みを持って形成されるため、火炎の放射率が比較的高く、外部放射が火炎に吸収されるためと考えられる。

U600 の単位面積あたりの燃焼速度は、U350 よりも大きくなった。これは、U600 の水平面の面積は U350 より大きいため、水平面全体が燃焼した時の発熱速度が大きく、火炎高さも高くなり、それに伴い火炎の放射率が大きくなり、水平面に入射する熱流束が増加するためと考えられる。

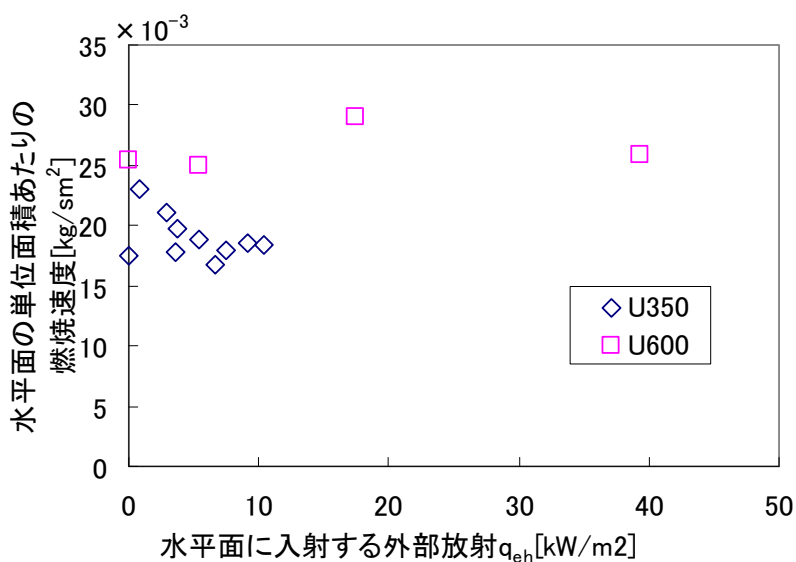


図 4-28 ウレタン水平面の単位面積あたりの燃焼速度と水平面に入射する外部放射の関係

(3) 外部放射が鉛直面の燃焼性状に与える影響

(3-1) 鉛直面に入射する外部放射の計算方法

可燃物の中心から 1000mm の位置に設置した熱流計 HF2 の測定値から算出した煙層下端の放射発散度  $E_{s2}$  および熱流計 HF2 の測定値から算出した床表面の放射発散度  $E_{fl}$  の値を次式に用いて、鉛直面に入射する外部放射  $q_{ev}$  を算出した。

$$q_{ev} = F_{sv} \times E_{s2} + F_{fv} \times E_{fl} \quad (4-4)$$

ここで、 $F_{sv}$  は鉛直面の中心に対する煙層下端の形態係数、 $F_{fv}$  は鉛直面の中心に対する床面の形態係数である。

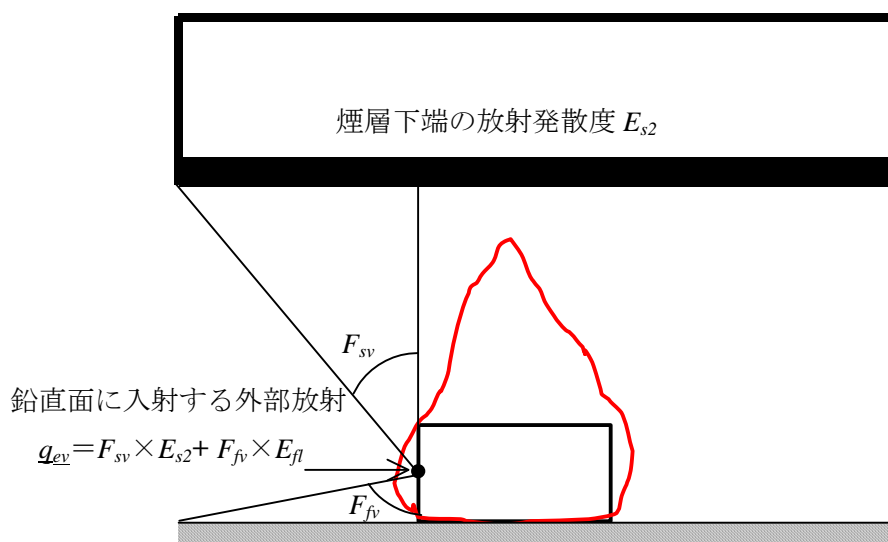


図 4-29 鉛直面に入射する外部放射の模式図

(3-2) 鉛直面の燃焼面積の拡大速度

鉛直面の燃焼面積の拡大速度は図 4-16 に示した下方火炎伝播速度から求めることができる。本項では、下方火炎伝播速度と外部放射の関係について考察を行った。外部放射は、ウレタン鉛直面上端の燃焼開始時間からウレタン鉛直面の下端まで燃え下がった時間までの外部放射の平均値とする。

下方火炎伝播速度をウレタン鉛直面への外部放射に対してプロットした結果を図 4-30 に示す。今回実験した範囲においては、下方火炎伝播速度は外部放射にほぼ比例した。外部放射により、ウレタンの未燃部分が温められ表面温度が上昇するため、表面温度が着火温度に達する時間が短くなり、火炎伝播速度が増加したものと考えられる。

一方、下方燃え尽き拡大速度については、外部放射の影響は見られなかった。下方燃え尽き拡大速度は燃焼面水平面高さの降下速度であるが、燃焼面水平面に入射する熱流束は燃焼面水平面に形成される火炎からの放射熱の影響が大きく、外部放射の影響が相対的に小さいためと考えられる。

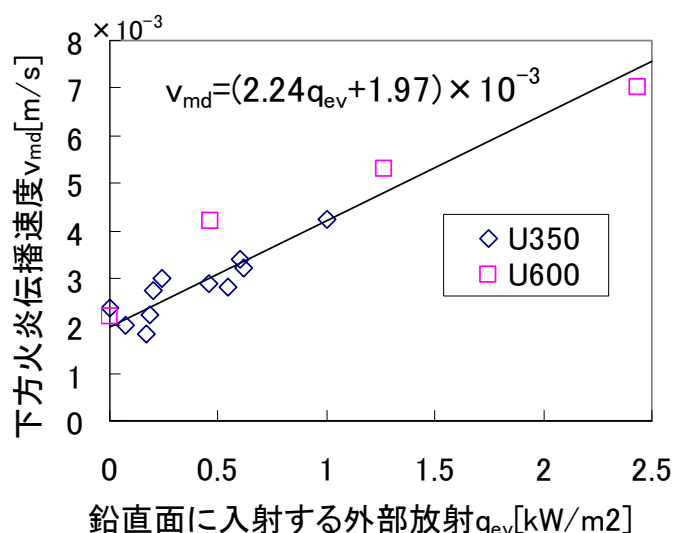


図 4-30 下方火炎伝播速度と外部放射の関係

(3-3) 鉛直面の単位面積あたりの燃焼速度

鉛直面の単位面積あたりの燃焼速度  $m''_{fs}$  は次の式から算出した。

$$m''_{fs} = \frac{m_f - m''_{fu} D^2}{4D(h_u - h_l)} \quad (4-5)$$

ここで、 $m_f$  はロードセルで測定した燃焼速度、 $m''_{fu}$  は式(4-2)で算出した水平面の単位面積

あたりの燃焼速度、 $D$  はウレタン水平面の一辺の長さ、 $h_u$  および  $h_l$  はそれぞれ燃焼面上端高さおよび燃焼面下端高さを表す。燃焼面上端高さおよび下端高さについては、すべての時間帯ではビデオ画像から読み取ることが出来なかったため、実験値を一次式で近似することで各時間帯での燃焼面上端および下端高さを求めた。

鉛直面の単位面積あたりの燃焼速度をウレタン鉛直面への外部放射に対してプロットした結果を図 4-3 1 に示す。ここで、燃焼速度および外部放射のいずれも、燃焼速度が最大となる時間を含んだ 10 秒間の平均値である。

鉛直面の単位面積あたりの燃焼速度は外部放射に概ね比例しており、最小二乗法により一次式で近似した結果を式 (4-6) に示す。

$$m_{fs}'' = \frac{1}{1.18} q_{ext} + 10.36 \quad (4-6)$$

式(4-1)と式(4-3)を比較すると、外部放射の比例係数の逆数はウレタンの気化熱の逆数である。文献<sup>6)</sup>によると、軟質ウレタンフォームの気化熱は 1.22kJ/g であるので、今回の実験値と概ね一致した。

また、佃ら<sup>5)</sup>によると、自由空間でのウレタンブロックの鉛直面の単位面積あたりの発熱速度は 200kW/m<sup>2</sup> としている。ウレタンの単位発熱量を 25kJ/g<sup>7)</sup> とすると、自由空間 (外部放射が 0) での鉛直面の単位面積あたりの発熱速度を式(4-3)を用いて算出すると、259kW/m<sup>2</sup> となり、佃らの実験値より 3 割程度大きくなった。

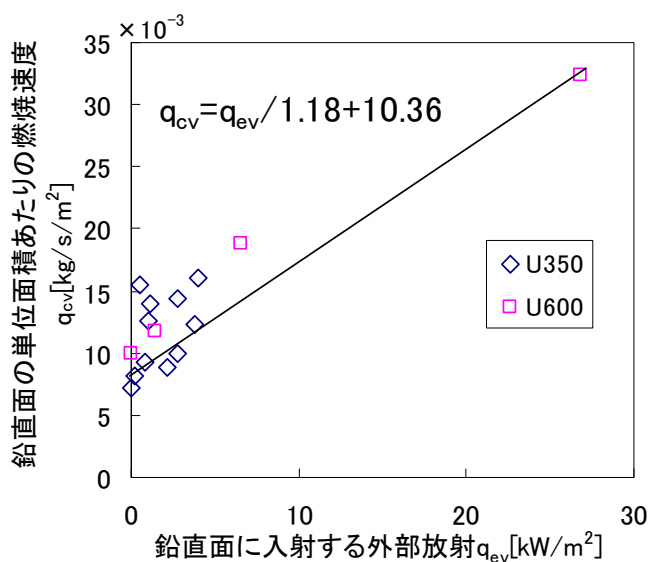


図 4-3 1 外部放射と鉛直面の単位面積あたりの燃焼速度の関係

#### 4. 2. 8. まとめ

ウレタンブロックの上部に煙層が形成される条件で燃焼実験を行い、以下の知見を得た。

- 外部放射により燃焼速度が増加する現象は、燃焼面積の拡大速度が増加することと、単位面積当たりの燃焼速度が増加することの二つから説明することができる。
- 本実験のように、水平面に着火する条件では水平面の燃焼面積の拡大速度や単位面積あたりの燃焼速度に対する外部放射の影響は小さい。
- 鉛直面の燃焼面積の拡大速度と単位面積あたりの燃焼速度に対する外部放射の影響は大きく、本実験では外部放射の強度ほぼに比例した。

### 4. 3. 外部放射を受ける固体可燃物の燃焼モデルの提案と実験との比較

#### 4. 3. 1. はじめに

本節では、外部放射を受ける固体可燃物（ウレタンブロック）の燃焼モデルを提案し、提案した燃焼モデルを前節の実験結果と比較する。固体可燃物の燃焼モデルは、佃ら<sup>5)</sup>が提案した自由空間中でのウレタンブロック単体での燃焼予測モデルに、外部放射により燃焼面の拡大速度と単位面積あたりの発熱量の増加を考慮して修正したものである。

鉛直面の燃焼面の拡大速度および単位面積あたりの燃焼速度は、前節で得られた実験式に外部放射を代入して算出した。前節で実験式を得られなかった水平面の燃焼面の拡大速度および単位面積あたりの燃焼速度については、佃ら<sup>5)</sup>が提案した式に外部放射の項を加えた式とした。

固体可燃物の各面に入射する外部放射として、煙層からの放射、火炎の展炎部からの放射、高温の壁や天井、床といった固体表面から可燃物の各面に放射を考慮した。これらの外部放射は第2章で提案した予測モデルを用いて計算した。

#### 4. 3. 2. 自由空間における燃焼モデルの概要

本項では、佃らにより提案された自由空間でのウレタンブロックの燃焼モデル<sup>5)</sup>の概要を示す。この燃焼モデルは可燃物の水平面と鉛直面のそれぞれの燃焼面積と単位面積あたりの発熱速度を時刻毎に算出し、それらを掛け合わせて発熱速度を算出するものである。

前節に示したように、ウレタンブロックの水平面の中央に着火すると、火炎は水平面を同心円状に燃え広がり（水平面の燃え広がり）、燃焼面が端部まで達すると、鉛直面の上端から燃え下がっていく（鉛直面の燃え下がり）。鉛直面が端部まで燃え下がった後に、鉛直面を側方へと燃え広がっていく（鉛直面の側方への燃え広がり）。また、鉛直面を燃え下がっている途中に、溶融物が滴下して最下部に着火すると、鉛直面の燃え上がりと側方への燃え広がりが起こる。これらの燃え広がり、燃え尽きと並行して生じており、（1）水平面の燃え広がり、燃え尽き、（2）鉛直面の燃え下がり、燃え尽き、（3）鉛直面の側方への燃え広がり、燃え尽きの3つに分類し、それぞれに生じている現象をモデル化している。

##### （1）水平面の燃え広がり、燃え尽き

水平面が燃焼する時には、図 4-3 2 に示すように、ウレタン表面の燃え広がり、中心部からの燃え尽きが同時に生じている。燃え広がり、燃焼により生じる火炎からの放射熱により燃焼面先端から予熱長さ $\delta_f$ だけ離れた位置の温度が着火温度まで上昇した時点で着火することにより生じ、このときの燃え広がり面の水平方向の拡大速度（水平火炎伝搬速度）を $v_{mh}$ としている。

一方、燃え尽きについては、火炎からの放射熱により試験体が溶融し、図 4-3 2 に示すような溶融コアを形成する。溶融コアの水平方向への拡大は、火炎からの放射熱により溶融コア端部の表面が加熱されて溶融することにより拡大する。下方への拡大はコア底部に溜まった溶融ウレタンが気化することによる。この時の溶融コアの水平方向の拡大速度を $v_{ch}$ 、下方の拡大速度を $v_{cd}$ としている。

##### （1-1）燃え広がり面の水平方向の拡大速度

燃え広がり面の水平方向の拡大速度は、Quintiere ら<sup>8)</sup>が提案する火炎伝播速度式により次のように表すことができるとしている。

$$v_{mh} = \left[ \frac{4\delta_f}{\pi(k\rho c)(T_{ig} - T_o)^2} \right] q_f^2 \quad (4-4)$$

ここで、 $T_{ig}$  は着火温度[K]、 $T_o$  はウレタンブロックの初期温度[K]、 $k$  は熱伝導率[kW/mK]、 $c$  は比熱[kJ/kgK]、 $\rho$  は密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\delta_f$  は予熱長さ[m]、 $q_f$  は火炎から予熱長さ位置に入射する放射熱である。 $q_f$  以外は、可燃物の材質によって決まる物性値であり、 $\delta_f$  も可燃物の材質に依存する定数なので、水平火炎伝播速度は、火炎から予熱長さ位置に入射する放射熱の二乗に比例する。火炎から予熱長さ位置に入射する放射熱 $q_f$  は次の式から算出した。

$$q_f = F_f \varepsilon_f \sigma T_f^4 \quad (4-5)$$

ここで、 $F_f$ は予熱長さ位置に対する火炎の形態係数であり、火炎の形状を半径を燃え拡がり半径  $r_m$ 、高さを連続火炎高さ  $L_c$  とする円柱で近似して計算する。 $\varepsilon_f$ は火炎の放射率で次の式により算出している。

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-k_f \bar{L}} \quad (4-6)$$

ここで、 $\bar{L}$ は火炎柱の平均行路長さ[m]であり、( $\bar{L} = 3.5V / A$ 、 $V$ は火炎柱体積、 $A$ は火炎柱表面積)、 $k_f$ は放射吸収係数(=2m<sup>-1</sup>)である。

#### (1-2) 熔融コアの水平方向拡大速度および下方拡大速度

熔融コアの水平方向の拡大速度は、図 4-3 2 に示す微小面に火炎柱から入射する熱流束  $q_{fc}$  を用いて次の式から算出している。

$$v_{ch} = \frac{q_{fc}}{\rho [L_m + c(T_b - T_o)]} \quad (4-7)$$

ここで、 $T_b$ は融点[K]、 $T_o$ はウレタンブロックの初期温度[K]、 $c$ は比熱[kJ/kgK]、 $\rho$ は密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $L_m$ はウレタンブロックの熔融熱[kJ/kg]である。 $q_{fc}$ は次式から算出している。

$$q_{fc} = \varepsilon_f \sigma T_f^4 \quad (4-8)$$

火炎の放射率は、式(4-6)から算出し、火炎温度  $T_f$ は 800°Cとしている。

また、熔融コアの下方拡大速度は、図 4-3 2 に示す微小面に火炎から入射する熱流束  $q_{fc}$  を用いて次の式から算出している。

$$v_{cd} = \frac{q_{fc}}{\rho [L_v + c(T_{ig} - T_o)]} \quad (4-9)$$

ここで、 $T_{ig}$ は着火温度[K]、 $T_o$ はウレタンブロックの初期温度[K]、 $c$ は比熱[kJ/kgK]、 $\rho$ は密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $L_v$ はウレタンブロックの気化熱[kJ/kg]である。

熔融コアの水平方向の拡大は固体のウレタンブロックが熔融することで生じ、下方拡大は熔融したウレタンが気化することで生じるとしている。



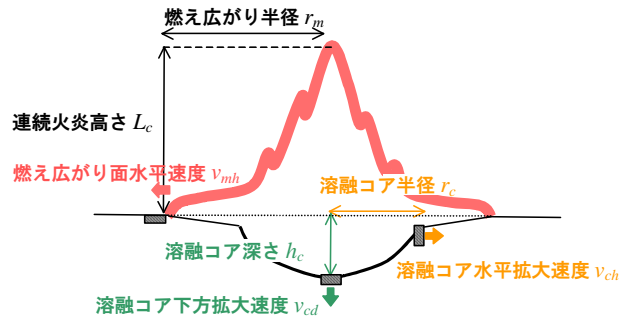


図 4-32 水平面燃焼時の燃焼面の断面図(文献 8 より転載、一部加筆)

(1-3) 水平面の単位面積あたりの発熱速度

水平面の単位面積あたりの発熱速度  $q_{ch}$  は、溶融コアの下方拡大速度  $v_{cd}$  を用いて次の式から算出している。

$$q_{ch} = v_{cd} \rho \Delta H_c \quad (4-10)$$

(2) 鉛直面の燃え下がりと燃え尽き

(2-1) 鉛直面の下方拡大速度

鉛直面の下方への燃え下がりについても、Quintiere ら<sup>8)</sup>が提案する火炎伝播速度式により次のように表すことが出来るとしている。ただし、外部放射がない場合には、燃え下がり方向への入射熱はあまり変化しないと考えられるので、鉛直面の燃え下がり速度（下方火炎伝播速度）を一定値で与えている。

$$v_{md} = \left[ \frac{4\delta_f}{\pi(k\rho c)(T_{ig} - T_o)^2} \right] q_f^2 \quad (4-11)$$

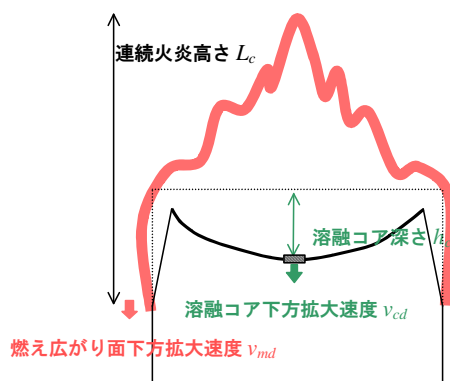


図 4-33 鉛直面燃焼時の燃焼面の断面図

(2-2) 鉛直面の単位面積あたりの発熱速度  $q_{cd}$

鉛直面の単位面積あたりの発熱速度は、自由空間での単体での燃焼実験の結果から一定値 ( $200\text{kW/m}^2$ ) を与えている。

(3) 鉛直面の側方への燃え広がり と 燃え尽き

鉛直面の側方への燃え広がりについても、Quintiere ら<sup>8)</sup>が提案する火炎伝播速度式により次のように表すことが出来るとしている。ただし、外部放射がない場合には、側方への入射熱はあまり変化しないと考えられるので、側方への燃え広がり速度（側方火炎伝播速度）を一定値で与えている。

$$v_{ml} = \left[ \frac{4\delta_f}{\pi(k\rho c)(T_{ig} - T_o)^2} \right] q_f^2 \quad (4-12)$$

また、燃え尽き面の側方拡大速度は、鉛直面の単位面積あたりの燃焼速度  $q_{cd}$  (2-2 参照) を用いて次の式から算出している。

$$v_{cl} = \frac{q_{cd}}{\rho\Delta H_c} \quad (4-13)$$

ここで、 $\rho$  は密度[kg/m<sup>3</sup>],  $\Delta H_c$  はウレタンブロックの単位発熱量[kJ/kg]である。

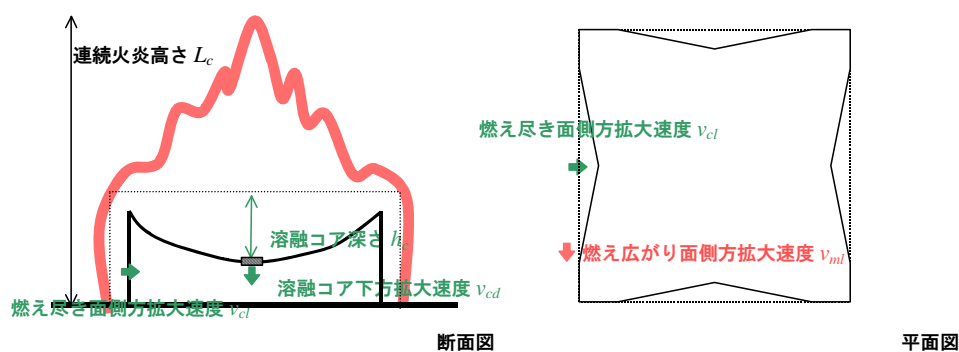


図 4-34 鉛直面の側方へ燃え広がり時の燃焼面の断面図および平面図

(4) 燃焼拡大に関するパラメーターのまとめ

燃焼モデルに必要な火炎伝播速度や単位面積あたりの発熱速度などの入力パラメーターは実験データ<sup>5)</sup>から定めている。佃ら<sup>5)</sup>により整理されたパラメーターの一覧を表 4-8に示す。

表 4-8 パラメーター一覧

パラメーター	値または計算式
水平火炎伝播速度[mm/s]	$v_{mh}=0.0133(q_f)^2+2.6626$
下方火炎伝播速度[mm/s]	$v_{md}=1.97$
側方火炎伝播速度[mm/s]	$v_{ml}=2.91$
水平燃え尽き速度[mm/s]	$v_{cd}=q_{fc}/\rho(L_b+C_p(T_b-T_a))$
下方燃え尽き速度[mm/s]	$v_{cd}=q_{fc}/\rho(L_v+C_p(T_{ig}-T_a))$
側方燃え尽き速度[mm/s]	$v_{cl}=q_{cd}/\rho\Delta H_c$
水平面の単位面積あたりの発熱速度[kW/m <sup>2</sup> ]	$q_{ch}=v_{cd} \rho\Delta H_c$
鉛直面の単位面積あたりの発熱速度[kW/m <sup>2</sup> ]	$q_{cd}=200$

#### (5) 既往の燃焼モデルと実験結果の比較

4.2節に示したウレタンブロック単体の燃焼実験の結果のうち、天井なしの条件(U350:天井なし)での実験の発熱速度と既往の燃焼モデルの解析結果を比較し、モデルの検証を行う。

燃え拡がり半径の拡大開始時間の実験値と計算値が概ね一致するように、解析の基準時間を調整した(実験での着火後5秒と解析の0秒が同じ)。天井なしの条件でU350を用いた実験での、図4-12に示した水平面の燃え拡がり半径の実験結果と解析結果を図4-35に示す。

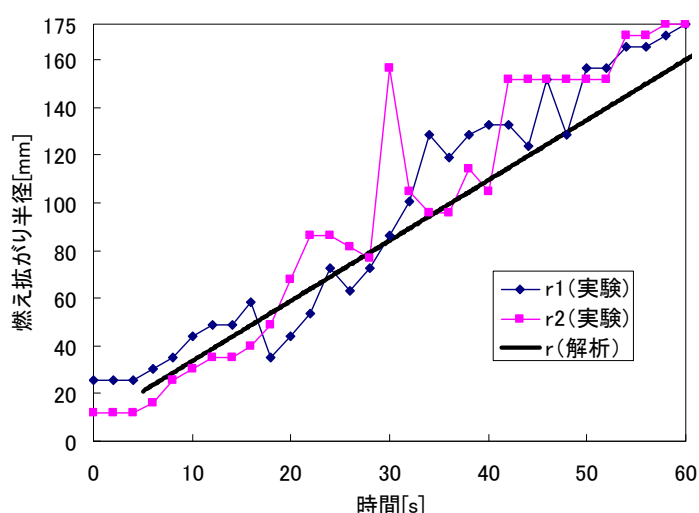


図 4-35 燃え拡がり半径の実験結果と解析結果の比較

W350×D350×H350のウレタン(U350)およびW600×D600×H350のウレタン(U600)の発熱速度の実験結果と解析結果を図4-36に示す。発熱速度の実験結果は図4-4に示した燃焼速度の実験結果に単位発熱量25MJ/kgを乗じたものである。U350およびU600のいずれにおいても、発熱速度の解析結果は実験結果よりも全体的に大きくなっている。佃らの研究<sup>5)</sup>においても、解析結果は実験結果を包含するように全体的に大きくなっていることから、この燃焼モデルに固有の誤差特性と考えられる。

本研究において、外部放射の影響を佃ら<sup>5)</sup>が提案した燃焼モデルに組み込む際には、発熱速度の計算結果が実験結果と最も良く一致するように、発熱速度の計算結果を0.7倍する。した値を用いて外部放射を計算する。本モデルで用いる0.7倍した発熱速度の時間履歴を図4-36に示す。

本モデルでは、0.7倍した発熱速度を用いて煙層温度、煙層下端高さ、壁等の表面温度を計算した。(1)で示したように、ウレタンブロックの火炎伝搬速度や単位面積あたりの発熱速度の計算にも発熱速度は用いられるが、これらの計算では発熱速度は0.7倍しなかった。

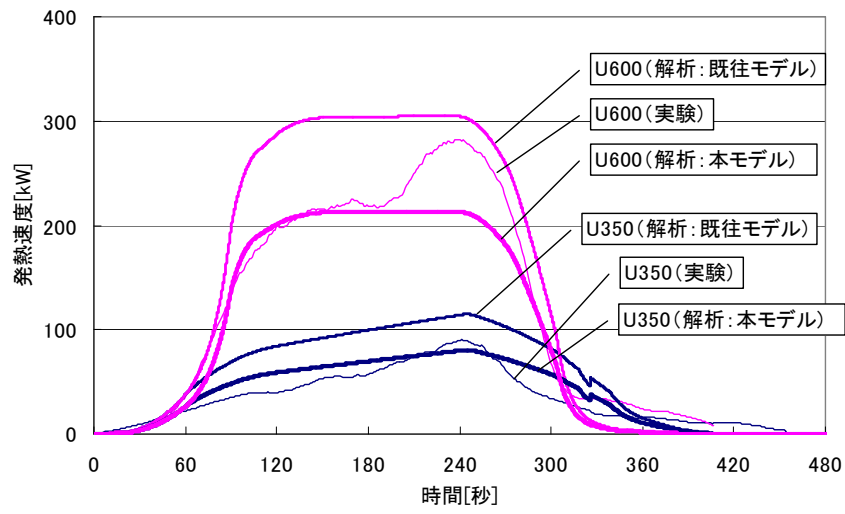


図 4-36 外部放射なしの条件でのウレタンの発熱速度の実験結果と解析結果の比較

#### 4. 3. 3. 外部放射の考慮方法

前項に示した既往の燃焼予測モデルのうち、燃焼拡大に関するパラメーターに外部放射の影響を明示的に加えることで、外部放射を考慮する。

(1) 水平面の燃え拡がり と 燃え尽き

(1-1) 水平面の水平方向の燃え拡がり速度

式(4-4)に示したように、水平面の燃え拡がり速度  $v_{mh}$ [mm/s]は燃焼面の先端に入射する熱流束の二乗に比例する。前項で示した燃焼モデルでは、燃焼面の先端に入射する熱流束として火炎からの放射熱  $q_f$  を考慮していたが、ここに水平面に入射する外部放射  $q_{eh}$  の項を加えて、次の式から算出する。外部放射の一部は火炎を透過した後に燃焼面先端に到達し ( $F_f(1-\varepsilon_f)q_E$ )、一部は直接燃焼面先端に入射する ( $(1-F_f)q_E$ )。

$$v_{mh} = 0.0133(q_f + (F_f(1-\varepsilon_f) + (1-F_f))q_{eh})^2 + 2.6626 \quad (4-14)$$

ここで、 $F_f$ は燃焼面先端に対する火炎の形態係数である。

(1-2) 溶融コアの水平方向の拡大速度および下方拡大速度

式(4-7)に示したように溶融コアの水平方向の拡大速度  $v_{ch}$ [m/s]は、溶融コアの先端に入射する熱流束  $q_{fc}$  に比例する。前項で示した燃焼モデルでは、燃焼面の先端に入射する熱流束として、火炎からの放射熱  $q_{fc}$  を考慮したが、ここに水平面に入射する外部放射  $q_{eh}$  のうち、火炎を透過して入射する項  $(1-\varepsilon_f)q_{eh}$  を加えて、次の式から算出する。

$$v_{ch} = \frac{q_{fc} + (1-\varepsilon_f)q_{eh}}{\rho[L_m + C_p(T_b - T_o)]} \quad (4-15)$$

同様に溶融コアの下方拡大速度  $v_{cd}$ についても、水平面に入射する外部放射  $q_{eh}$  を考慮し、次の式から算出する。

$$v_{cd} = \frac{q_{fc} + (1-\varepsilon_f)q_{eh}}{\rho[L_v + C_p(T_{ig} - T_o)]} \quad (4-16)$$

(1-3) 水平面の単位面積あたりの発熱速度

水平面の単位面積あたりの発熱速度  $q_{ch}$  は、式(4-10)に示すように溶融コアの下方拡大速度を用いて算出する。下方拡大速度の算出において外部放射を既に考慮しているため、水平面の単位面積あたりの発熱速度の計算式は変更しない。

$$q_{ch} = v_{cd}\rho\Delta H_c \quad (4-10)\text{再掲}$$

(2) 鉛直面の燃え下がり と燃え尽き

(2-1) 鉛直面の燃え下がり速度と

鉛直面の燃え下がり速度  $v_{md}$  は、図 4-28 に示したように外部放射に比例する。よって、外部放射を考慮した時の鉛直面の燃え下がり速度（下方火炎伝搬速度）は、自由空間での燃え下がり速度  $v_{md,free}$ （下方火炎伝搬速度）を用いて次の式から算出する。

$$v_{md} = 2.24q_{ev} + v_{md,free} \quad (4-17)$$

(2-2) 鉛直面の単位面積あたりの発熱速度

鉛直面の単位面積あたりの発熱速度は、図 4-31 に示したように外部放射に比例して増加する。よって、外部放射の影響を考慮した時の鉛直面の単位面積あたりの発熱速度  $q_{cd}$  は次の式から算出する。ここで  $\Delta H_c$  はウレタンの単位発熱量で 25kJ/g とした。

$$q_{cd} = \left( \frac{q_{ev}}{1.18} + 10.36 \right) \Delta H_c = 21.2q_E + 259 \quad (4-18)$$

(3) 鉛直面の側方への燃え拡がり と燃え尽き

外部放射を受けるウレタンブロックの鉛直面の側方への燃え拡がりについては、今回の実験結果からはデータが得られなかったため、外部放射が側方への燃え拡がり速度  $v_{ml}$  に与える影響は、外部放射が下方への燃え下がり速度  $v_{md}$  に与える影響と等しいと仮定し、自由空間での側方への燃え拡がり速度  $v_{ml,free}$  を用いて次の式から算出した。

$$v_{ml} = 2.24q_{ev} + v_{ml,free} \quad (4-19)$$

また、燃え尽き面の側方拡大速度  $v_{cl}$  は、外部放射がない場合と同様に、式 (4-13) を用いて算出する。

$$v_{cl} = \frac{q_{cd}}{\rho \Delta H_c} \quad (4-13) \text{再掲}$$

(4) 燃焼拡大に関するパラメーターのまとめ

本モデルで使用するパラメーターの一覧を表 4-9 に示す。

表 4-9 パラメーター一覧

パラメーター	値または計算式
水平火炎伝播速度[mm/s]	$v_{mh}=0.0133(q_f+(F_f(1-\varepsilon_f)+(1-F_f))q_e)^2+2.6626$
下方火炎伝播速度[mm/s]	$v_{md}=2.24q_e+v_{md,free}$
側方火炎伝播速度[mm/s]	$v_{ml}=2.24q_e+v_{ml,free}$
水平燃え尽き速度[mm/s]	$v_{ch}=(q_{fc}+(1-\varepsilon_f)q_e)/\rho(L_m+C_p(T_b-T_o))$
下方燃え尽き速度[mm/s]	$v_{cd}=(q_{fc}+(1-\varepsilon_f)q_e)/\rho(L_v+C_p(T_{ig}-T_o))$
側方燃え尽き速度[mm/s]	$v_{cl}=q_{cd}/\rho\Delta H_c$
水平面の単位面積あたりの発熱速度 [kW/m <sup>2</sup> ]	$q_{ch}=v_{cd}\rho\Delta H_c$
鉛直面の単位面積あたりの発熱速度 [kW/m <sup>2</sup> ]	$q_{cd}=21.2q_e+259$



#### 4. 3. 4. 外部放射を考慮した燃焼モデルと実験結果との比較

前項で示した燃焼モデルを用いて、4. 2 節で示したウレタンブロックの燃焼実験 (U350 および U600) の解析を行い、実験結果と比較した。

##### (1) U350 を用いた実験と解析の比較

U350 を用いた実験について、発熱速度と煙層温度の実験結果と解析結果を比較する。横軸に時間、縦軸に発熱速度をとり、実験結果と解析結果をプロットした結果を図 4-3 7 に示す。発熱速度の実験結果は図 4-4 に示した燃焼速度の実験結果に単位発熱量 25MJ/kg を乗じたものである。天井なし、CH1200、CH960 の 3 条件では、図 4-3 7 左に示すように、最大発熱速度や燃焼が終了する時間は実験値と解析値は概ね一致しているが、発熱速度が最大となる時間については、解析結果は実験結果よりも早くなっている。CH760、CH660、CH560 の 3 条件では、図 4-3 7 右に示すように発熱速度の最大値は解析結果よりも大きく、発熱速度が最大となる時間や燃焼が終了する時間については、解析結果は実験結果よりも短くなっている。いずれの条件でも、天井高さが低くなるほど、最大発熱速度が大きくなり、発熱速度が最大となる時間が短くなるという実験の傾向を再現している。

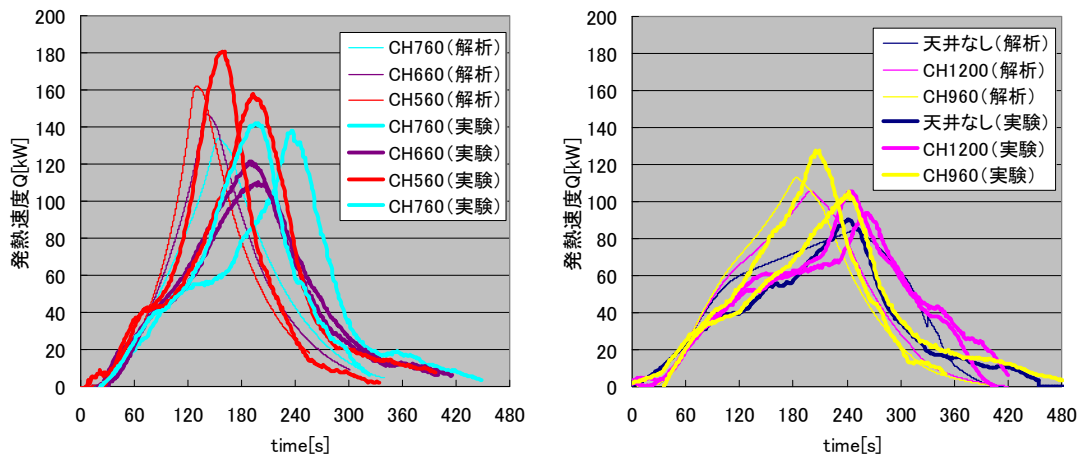


図 4-3 7 発熱速度の実験結果と解析結果の比較 (U350)

煙層温度の実験結果と解析結果をプロットした結果を図 4-3 8 に示す。煙層温度の実験結果は図 4-5 に示したものと同一である。図 4-3 8 左に示すように、CH1200、CH960 の 2 条件では、煙層温度の最大値の解析結果は実験結果と概ね一致しているが、解析結果は着火後 30 秒程度から上昇しているのに対して、実験結果は 60 秒後から上昇しており、煙層温度が上昇するタイミングが異なっている。図 4-3 7 左に示したように発熱速度については、実験結果と解析結果が概ね一致していることから、煙層の熱収支において、火災初期の壁からの失熱のモデル化に問題があると考えられる。図 4-3 8 右に示すように、CH760、CH660、CH560 の 3 条件では、解析結果は実験結果より煙層温度が上昇するタイミングが早く、最大値も大きくなった。図 4-3 7 左に示したように解析結果の発熱速度の最

大値は、実験結果とほぼ等しいことから、煙層からの失熱を過小に計算していると考えられる。

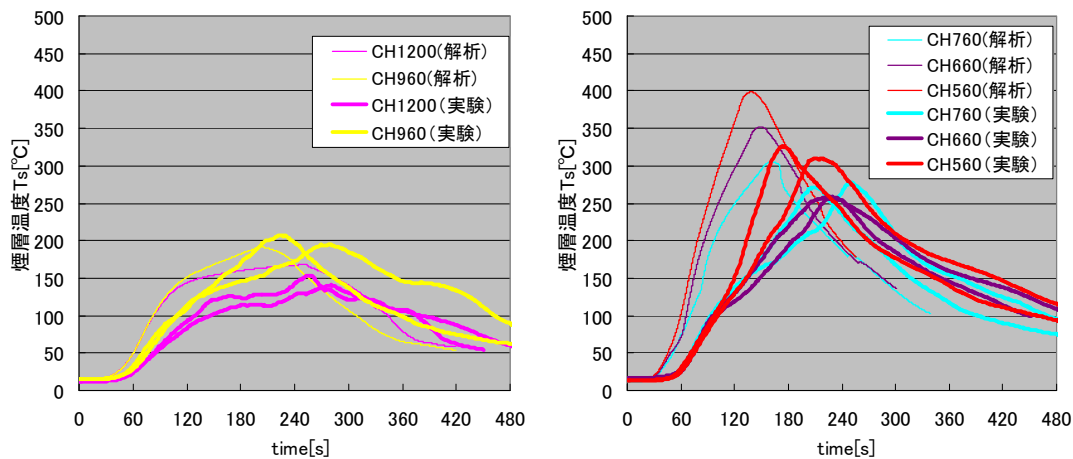


図 4-38 煙層温度の実験結果と解析結果との比較 (U350)

鉛直面の燃焼面下端高さの実験結果と解析結果をプロットした結果を図 4-39 に示す。鉛直面の燃焼面下端高さの実験結果は図 4-14 に示したものと同一である。図 4-39 の左に示すように、天井なしの条件では、燃焼面下端高さの解析結果は実験よりも遅く降下しているが、CH1200 の条件では、解析結果は実験結果よりも遅く降下しているが、それ以外の条件では、解析結果は実験結果と一致している。

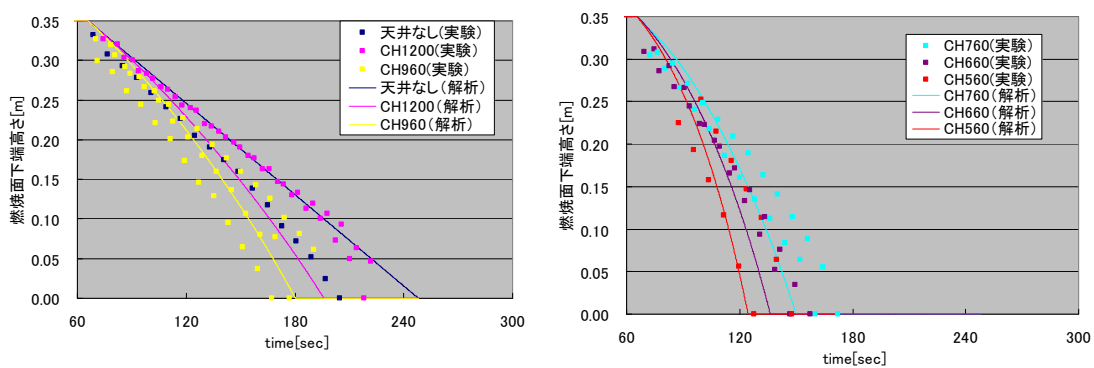


図 4-39 鉛直面の燃焼面下端高さの実験結果と解析結果との比較 (U350)

## (2) U600 を用いた実験と解析の比較

U600 を用いた実験について、発熱速度と煙層温度の実験結果と解析結果を比較する。横軸に時間、縦軸に発熱速度をとり、実験結果と解析結果をプロットした結果を図 4-40 左に示す。同様に煙層温度をプロットした結果を図 4-40 右に示す。発熱速度の実験結果は図 4-4 に示した燃焼速度の実験結果に単位発熱量 25MJ/kg を乗じたものである。煙層温度の実験結果は図 4-5 に示したものと同一である。

図 4-40 左に示すように発熱速度の解析結果は、CH1200~CH960 の条件では、最大発熱速度の解析結果は実験結果と概ね一致したが、発熱速度が最大となる時間の解析結果は実験結果よりもやや早くなった。

図 4-40 右に示すように、煙層温度の解析結果は実験結果よりも全体的に大きくなった。U350 でも同様の傾向が見られたことから、煙層の熱収支の計算で煙層からの失熱を過小に計算していると考えられる。

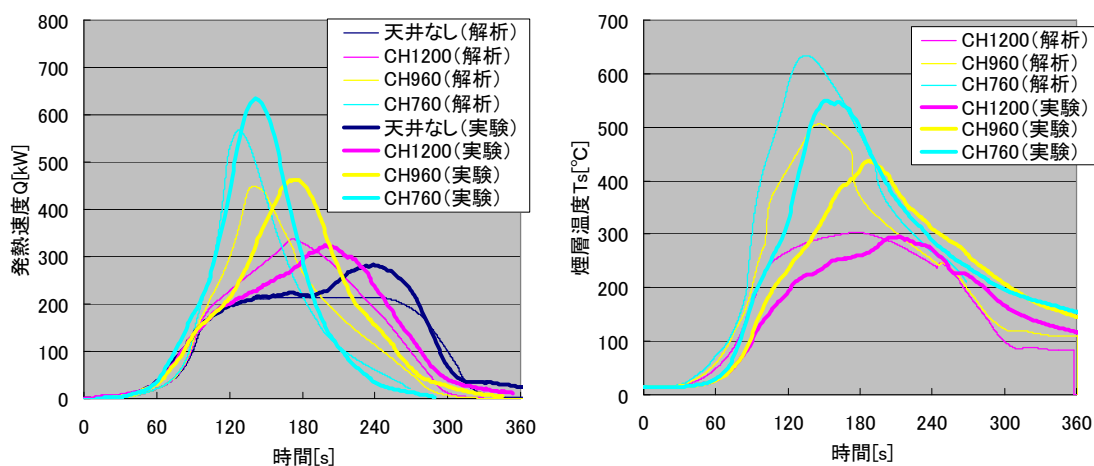


図 4-40 発熱速度 (左)、煙層温度 (右) の実験結果と解析結果との比較 (U600)

鉛直面の燃焼面下端高さの実験結果と解析結果をプロットした結果を図 4-41 に示す。鉛直面の燃焼面下端高さの実験結果は図 4-14 に示したものと同一である。天井なしの条件では、燃焼面下端高さの解析結果は実験結果よりも遅く降下した。CH1200 の条件および CH760 の条件では解析結果は実験結果と概ね一致し、CH960 の条件では解析結果は実験結果よりも早く降下した。天井高さが低くなるほど、燃焼面下端高さの降下が早くなるという実験の傾向を再現した。

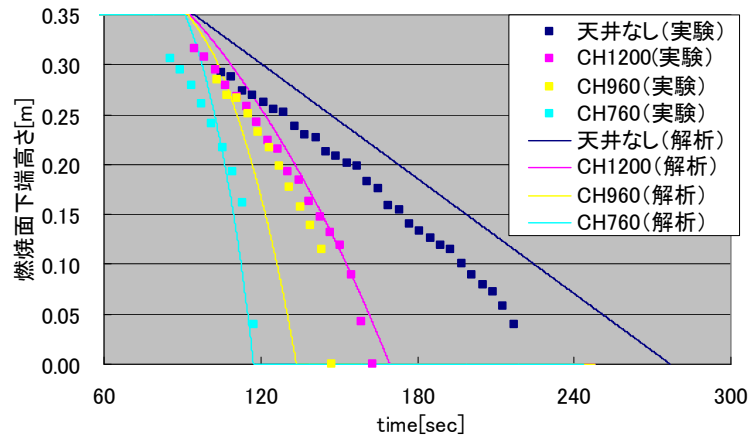


図 4-4 1 燃焼面下端高さの実験結果と解析結果との比較 (U600)

#### 4. 4. 結論

本章では、上部に煙層が形成される空間でウレタンブロック単体の燃焼実験を行うとともに、既往の燃焼予測モデルに外部放射を考慮する修正を加えて、実験結果と比較した。

実験では、可燃物として 350mm 角および 600mm×600mm×350mm のウレタンブロックを用い、天井高さは 560mm～1200mm および天井なしの条件とした。実験の結果、天井高さが低くなるに従い、鉛直面の下方火炎伝搬速度と単位面積あたりの燃焼速度が増加するため、燃焼速度が増加することを明らかにし、両者と鉛直面に入射する外部放射との関係を定量化した。

解析では、既往の自由空間でのウレタンブロックの燃焼速度予測モデルをベースに、実験から得られた外部放射による火炎伝搬速度と単位面積あたりの増加を考慮したモデルを提案した。実験結果と解析結果との比較により、天井高さが低くなるに従い燃焼速度が増加するという実験の傾向を再現することができた。

【本章の参考文献】

- 1) Friedman R.: Behavior of fires in compartment, International Symposium on Fire Safety of Combustible Materials, pp.100-113, 1975
- 2) Tewarson A., Pion R.F.: Flammability of Plastics, Combustion and Flame, 26, pp.85-103, 1976
- 3) 池島由華、笠原勲、佐藤博臣、栗岡均、矢代嘉郎、掛川秀史、若松孝旺、須川修身: 代表的な家具の燃焼実験 事務所の避難安全設計火源に関する研究—その2—, 平成14年度日本火災学会研究発表会概要集, 2002.5
- 4) 城明秀, 織戸貴之, 抱憲誓, 大宮喜文, 若月薫: 区画内および自由空間における実大可燃物の燃焼性状, 日本建築学会学術講演梗概集, A-2 防火, pp.201-202, 2007
- 5) 佃めぐみ: 周辺からの熱フィードバックを考慮した3次元可燃物の発熱速度予測モデルの提案, 日本火災学会研究発表会概要集, 2009
- 6) 田中哮義: 改訂版 建築火災安全工学入門, 日本建築センター
- 7) 小山陽一郎, 伊東俊介, 松山賢, 原田和典, 佃めぐみ, 抱憲誓, 新谷祐介, 大宮喜文: 区画内外におけるウレタンフォームの燃焼性状に関する実験的研究 その1 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A2, pp.343-344, 2009
- 8) Quintirere, J.: Measurement of Material Flame Spread Properties, Combustion Science and Technology, Vol.32, pp67-89, 1983

【本章で使用した記号】

$A$ : 表面積[m<sup>2</sup>]

$C_p$ : 比熱[kJ/(kg·K)]

$D$ : 火源径[m]

$E$ : 放射発散度[kW/m<sup>2</sup>]

$F$ : 形態係数[-]

$H$ : 天井高さ[m]

$L_c$ : 連続火炎高さ[m]

$L_G$ : 可燃物の気化エネルギー[kJ/kg]

$L_m$ : 平均火炎高さ[m]

$Q$ : 発熱速度 or 熱流[kW]

$Q^*$ : 無次元発熱速度[-]

$T$ : 温度[K]

$V$ : 体積[m<sup>3</sup>]

$m_f$ : 可燃ガスの発生速度[kg/s]

$q$ : 熱流束[kW/m<sup>2</sup>]

$t$ : 時間[s]

$\Delta H_c$ : 単位発熱量[kJ/kg]

$\Delta H_v$ : 燃料の蒸発潜熱[kJ/kg]

$\chi$ : 発熱速度のうちの放射成分の割合[-]

$\varepsilon$ : 放射率[-]

$\sigma$ : ステファンボルツマン係数[kW/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)]

$\rho$ : 密度[kg/m<sup>3</sup>]

<添字>

$\infty$ : 外気

## 第5章

### 固体可燃物間の延焼拡大実験



## 第5章の目次

5.	固体可燃物間の延焼拡大実験 .....	5-1
5. 1.	実験の目的.....	5-1
5. 2.	実験概要.....	5-1
5. 2. 1.	実験装置の概要.....	5-1
5. 2. 2.	実験条件.....	5-3
5. 2. 3.	測定項目.....	5-6
5. 2. 4.	実験方法.....	5-6
5. 3.	実験結果.....	5-7
5. 3. 1.	延焼拡大の様子.....	5-7
5. 3. 2.	延焼直前の熱画像.....	5-12
5. 3. 3.	延焼時間.....	5-14
5. 3. 4.	発熱速度と煙層温度.....	5-17
5. 3. 5.	加熱側ウレタンの発熱速度.....	5-21
5. 3. 6.	受熱側ウレタンの発熱速度.....	5-23
5. 3. 7.	受熱側ウレタンに入射する熱流束.....	5-25
5. 3. 8.	床面に入射する熱流束.....	5-29
5. 4.	実験結果の考察.....	5-31
5. 4. 1.	延焼時間.....	5-31
5. 4. 2.	受熱側ウレタンの燃焼性状.....	5-40
5. 5.	本章の結論.....	5-45

### <本章の概要>

本章では、可燃物上部に煙層が形成される空間において、複数のウレタンブロック間の延焼拡大実験を行った。天井高さおよびウレタンブロック間の離隔距離をパラメーターとし、両者が延焼時間や発熱速度等の火災性状に与える影響について検討した。

離隔距離が小さい場合には火炎が未着火の可燃物表面に接炎して延焼し、離隔距離が大きい場合には可燃物表面から発生した可燃ガスに引火して延焼した。接炎で延焼する場合には天井高さの影響が小さく、引火で延焼する場合には天井高さが低いほど未着火の可燃物表面に入射する熱流束が増加するため延焼時間が短くなった。延焼した側のウレタンブロックでは、延焼前の予熱の影響と延焼後の外部放射の影響により、発熱速度が大きく増加した。

## 5. 固体可燃物間の延焼拡大実験

### 5. 1. 実験の目的

固体可燃物間の延焼拡大には、最初に着火した可燃物の燃焼性状、可燃物間の離隔距離、煙層の高さや温度、壁や天井との離隔距離、受熱側可燃物の着火性など多くの要素が関与する。本章ではこのうち、延焼拡大に与える影響が大きいと考えられる可燃物間の離隔距離、煙層高さ、可燃物の密度を変えることで、その燃焼性状と着火性をパラメーターとして実験（実験 A）を行った。

また、壁際に可燃物を設置した場合（実験 B）、隅角部に可燃物を設置した場合（実験 C）、コの字型に壁を配置した場合（実験 D）についても実験を行い、ウレタンブロックと壁との位置関係が延焼拡大性状に与える影響についても検討を行った。

### 5. 2. 実験概要

#### 5. 2. 1. 実験装置の概要

実験 A で使用した装置の概要を図 5-1 左に、実験 B で使用した装置の概要を図 5-1 右に、実験 C で使用した装置の概要を図 5-2 左に、実験 D で使用した装置の概要を図 5-2 右に示す。実験は実験装置の壁の設置パターンにより、大きく 4 種類に分類できる。実験 A は、天井からの垂れ壁のみで壁を設置しないパターン、実験 B は 1 面に壁を設置するパターン、実験 C は 2 面に壁を設置するパターン、実験 D は 3 面に壁を設置するパターンとした。

実験 A で使用した装置は、2700mm×2700mm の床および四周に深さ 300mm の垂れ壁を設置した天井から構成されている。床、天井、垂れ壁はいずれも鉄製のフレームに固定した厚さ 25mm のセラミックファイバーボードを使用し、床の中央部には可燃物として 2 個または 3 個のウレタンブロックを設置した。ウレタンブロックは厚さ 8mm の珪酸カルシウム板の上に厚さ 6mm のブランケット、アルミ箔を重ね、その上に設置した。

実験 B で使用した装置は、実験 A で使用した装置に壁を 1 面追加し、壁際の空間を再現した。壁の中央部には、可燃物として 2 個のウレタンブロックを壁との間に 50mm の隙間を設けて設置した。

実験 C で使用した装置は、実験 A で使用した装置に壁を 2 面追加し、隅角部を再現した。隅角部を中心に、可燃物としてウレタンブロックを壁との間に 50mm の隙間を設けて 3 個設置した。

実験 D で使用した装置は、実験 A で使用した装置に壁を 3 面追加し、コの字型の空間を再現した。実験装置の床の中央部には可燃物として 3 個のウレタンブロックを設置した。

実験 B～D において追加した壁は、実験 A で使用したものと同一厚さ 25mm のセラミックファイバーボードである。また、ウレタンブロックも実験 A と同様に珪酸カルシウム板等の上に設置した。

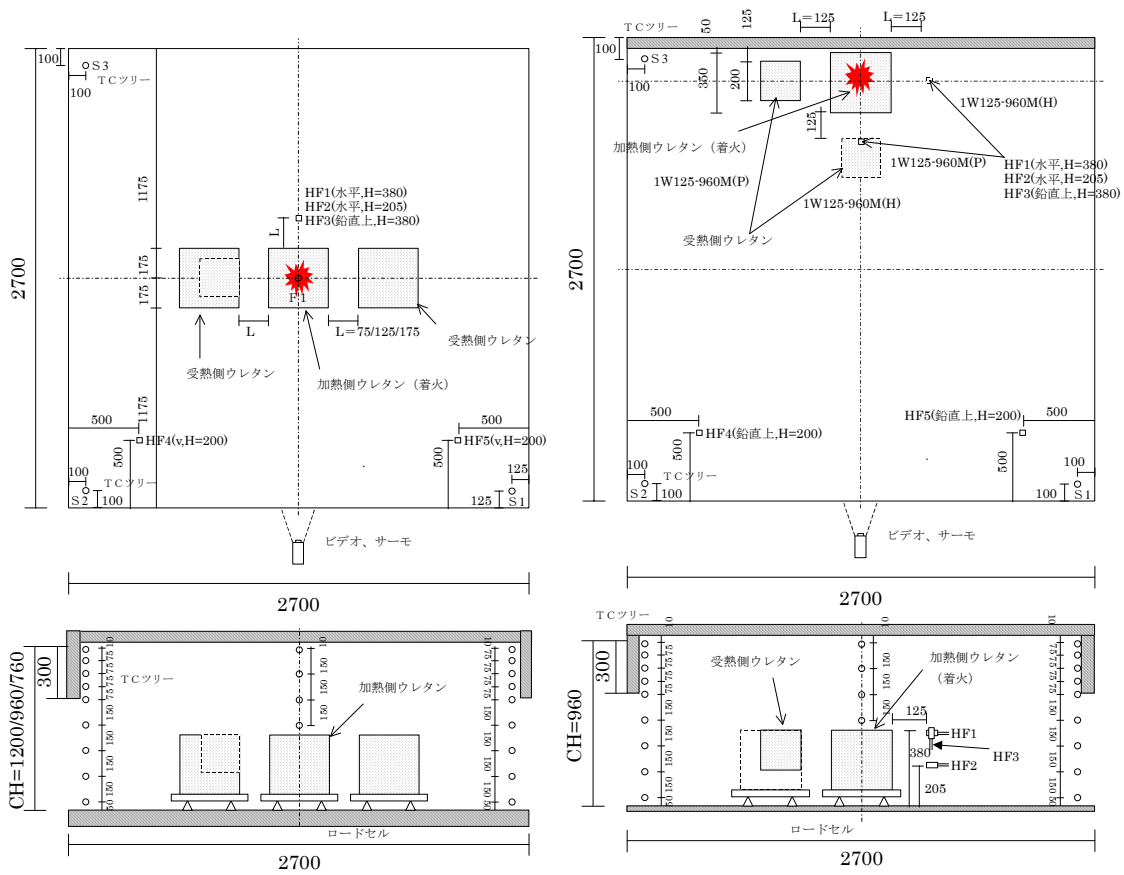


図 5-1 実験装置の概要 (左：実験 A、右：実験 B)

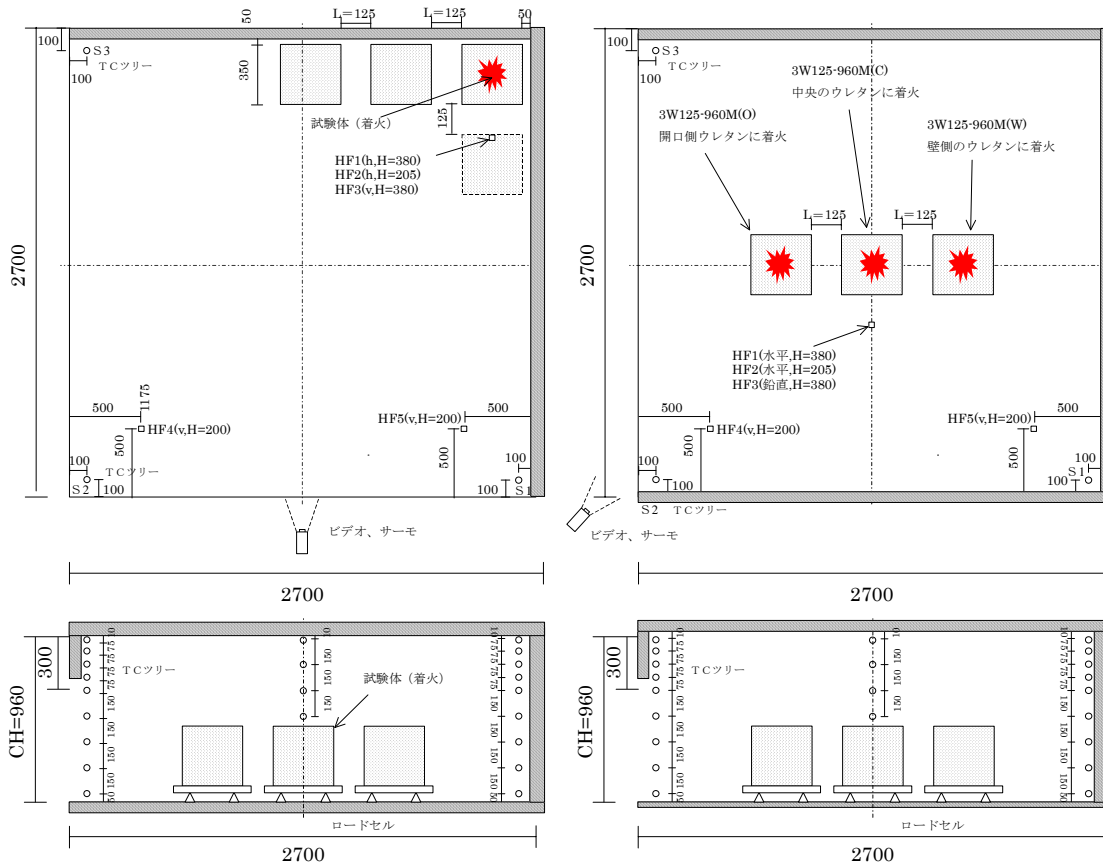


図 5-2 実験装置の概要 (左：実験 C、右：実験 D)

## 5. 2. 2. 実験条件

実験条件の一覧を表 5-1 に示す。

実験 A は、試験体として用いるウレタンブロックにより 3 条件に分類できる。実験 A 1 では、寸法が  $W350\text{mm} \times D350\text{mm} \times H350\text{mm}$  で普通密度 ( $15.4 \sim 16.1\text{kg/m}^3$ ) のウレタンブロックを用いた。実験 A 2 では、寸法が  $W350\text{mm} \times D350\text{mm} \times H350\text{mm}$  で高密度 ( $32.9 \sim 33.6\text{kg/m}^3$ ) のウレタンブロックを用いた。実験 A 3 では、加熱側 (最初に着火した側) のウレタンは実験 A 1 と同じであるが、受熱側 (延焼を受ける側) は、寸法が  $W200\text{mm} \times D200\text{mm} \times H200\text{mm}$  で普通密度 ( $15.4 \sim 16.1\text{kg/m}^3$ ) のウレタンブロックを用いた。ここで、受熱側のウレタンブロックは図 5-3 に示すようにセラミックファイバーボードで作成した枠の中に入れて、加熱側のウレタンブロックと水平面が一致するように設置した。

実験 A 1 ~ A 3 は、ウレタンブロック間の離隔距離  $L$  を  $75\text{mm}$ 、 $125\text{mm}$ 、 $175\text{mm}$  の 3 通り、天井高さ  $CH$  を  $760\text{mm}$ 、 $960\text{mm}$ 、 $1200\text{mm}$  の 3 通りの計 9 条件で実験を行った。

実験 B では、壁に平行にウレタンブロックを 2 個設置した実験 ( $1W125-960Mm$ ) と壁に垂直にウレタンブロックを 2 個設置した実験 ( $1W125-960Mm$ ) の 2 通りで実験を行った。この時、加熱側のウレタンブロック (実験開始時に着火するウレタンブロック) には  $350\text{mm}$

×350mm×350mm のものを用いたが、受熱側のウレタンブロック（延焼される側のウレタンブロック）には、200mm×200mm×200mm のものを用いた。200mm×200mm×200mm のウレタンは図 5-3 に示すように、かさ上げして設置した。

実験 C では、隅角部から壁に沿って両側にウレタンブロックを設置した実験（2W125-960M(L)）と片側の壁に平行に 3 個設置した実験（2W125-960M(P)）の 2 通りで実験を行った。いずれの実験でも普通密度の 350mm×350mm×350mm のウレタンブロックを用いた。

実験 D では、床の中央部分に 3 個のウレタンブロックを設置し、実験開始時に開口側のウレタンブロックに着火する場合（3W125-960M(O)）、中央のウレタンブロックに着火する場合（3W125-960M(C)）、壁側のウレタンブロックに着火する場合（3W125-960M(W)）の 3 通りで実験を行った。いずれの実験でも普通密度の 350mm×350mm×350mm のウレタンブロックを用いた。

一部の実験では同一条件で 2 回の実験を行ったが、基本的には各条件で 1 回実験を実施した。

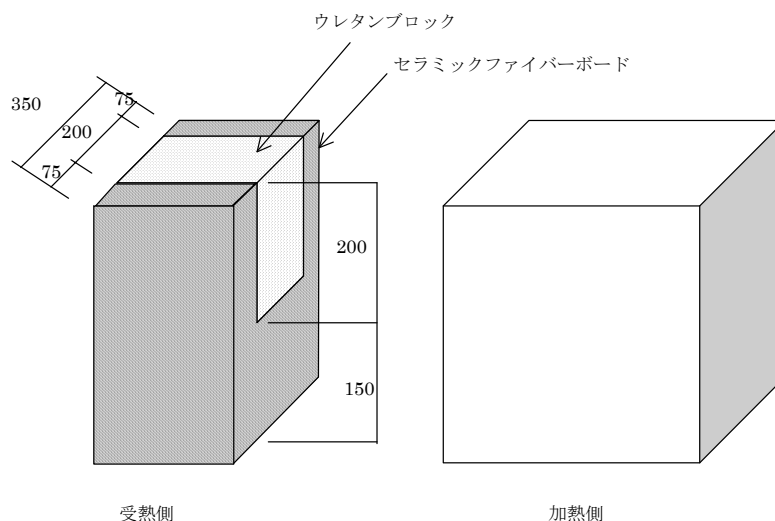


図 5-3 ウレタンブロックのかさ上げ方法

表 5-1 実験条件一覧

	実験 No.	壁の パターン	加熱側ウレタン	受熱側ウレタン	離隔距離 L[mm]	天井高さ CH[mm]	実験 回数	
実験 A 1	0W75-760M	垂れ壁 のみ	普通密度 350×350×350mm	普通密度 350×350×350mm	75	760	1	
	0W75-960M					960	1	
	0W75-1200M					1200	1	
	0W125-760M				125	760	1	
	0W125-960M					960	1	
	0W125-1200M					1200	1	
	0W175-760M				175	760	1	
	0W175-960M					960	1	
	0W175-1200M					1200	1	
実験 A2	0W75-760H		垂れ壁 のみ	高密度 350×350×350mm	高密度 350×350×350mm	75	760	1
	0W75-960H						960	1
	0W75-1200H						1200	1
	0W125-760H					125	760	1
	0W125-960H						960	1
	0W125-1200H						1200	1
	0W175-760H					175	760	1
	0W175-960H						960	1
	0W175-1200H						1200	1
実験 A3	0W75-760Mm	垂れ壁 のみ	普通密度 350×350×350mm	普通密度 200×200×200mm	75	760	1	
	0W75-960Mm					960	1	
	0W75-1200Mm					1200	1	
	0W125-760Mm				125	760	2	
	0W125-960Mm					960	2	
	0W125-1200Mm					1200	2	
	0W175-760Mm				175	760	1	
	0W175-960Mm					960	1	
	0W175-1200Mm					1200	1	
実験B	1W125-960Mm(P)		1面壁	普通密度 350×350×350mm	普通密度 200×200×200mm	125	960	1
	1W125-960Mm(V)							1
実験C	2W125-960M(L)		2面壁	普通密度 350×350×350mm	普通密度 350×350×350mm	125	960	1
	2W125-960M(P)							1
実験D	3W125-960M(O)		3面壁	普通密度 350×350×350mm	普通密度 350×350×350mm	125	960	1
	3W125-960M(C)							2
	3W125-960M(W)							2

※ 普通密度のウレタンブロック：15.4～16.1kg/m<sup>3</sup>

※ 高密度のウレタンブロック：32.9～33.6kg/m<sup>3</sup>

### 5. 2. 3. 測定項目

#### (1) 鉛直温度分布

実験装置内の鉛直温度分布を測定するため、図 5-1、図 5-2 に示す位置に 3 本の熱電対ツリーを設置した。各々の熱電対ツリーは、垂れ壁下端より高い部分では 75mm 間隔に、垂れ壁下端より低い部分では 150mm 間隔に設置した K 型熱電対（素線の太さは 0.32mm）により構成した。

#### (2) 熱流束

火炎や煙層から射出される熱流束を測定するため、図 5-1、図 5-2 に示す位置に 5 点のゴードン式水冷熱流計を設置した。加熱側ウレタンの近傍に設置した 3 点の熱流計（HF1～3）の測定値が受熱側のウレタン鉛直面中央の上端に入射する熱流束の水平成分（HF1）、鉛直下向きの成分（HF3）、受熱側のウレタン鉛直面の中心部分に入射する熱流束の水平成分（HF2）とほぼ等しくなるように、ウレタンブロック間の離隔距離  $L$  と等しい距離で、ウレタンブロックを設置した方向とは直交する方向に熱流計を設置した。さらに、床面に入射する熱流束を測定するために 2 点の熱流計（HF4、HF5）を実験装置の 2 隅に設置した。

#### (3) ウレタンブロックの重量減少速度

各ウレタンブロックの重量減少速度を測定するために、ウレタンブロックを設置した珪酸カルシウム板の下に定格重量 5kg のロードセルを 3 点設置した。

#### (4) 受熱側ウレタンの表面温度

受熱側のウレタンブロックの表面温度を測定するために、受熱側のウレタンブロックの鉛直面をサーモカメラにより撮影した。ウレタンブロックの表面の放射率は、延焼直前の表面温度が、別途熱電対により測定した温度（約 350℃）と一致するように 0.74 に設定した。

#### (5) 実験の様子

2 台のビデオカメラで実験装置の正面から実験装置全体と、受熱側ウレタンブロックの鉛直面を中心に、燃焼拡大性状を記録した。

### 5. 2. 4. 実験方法

いずれの実験でも加熱側のウレタンブロック水平面の中心に設置した脱脂綿にガスライターで着火させることで実験を開始した。実験装置内の鉛直温度分布、熱流束、重量減少速度は 1 秒間隔でデータロガーにより記録し、受熱側ウレタンの表面温度はサーモカメラにより 5 秒間隔で記録した。

### 5. 3. 実験結果

#### 5. 3. 1. 延焼拡大の様子

実験 A1 での、離隔距離 125mm、天井高さ 1200mm の条件(0W125-1200M)での燃焼性状を図 5-4 に示す。中央のウレタンの水平面の中心に着火した直後は、水平面を同心円状に燃焼面が拡大していく。着火後 1 分程度で、水平面の端部まで燃焼範囲が拡大すると、鉛直面上部から下端に向けて燃え下がっていく。中央のウレタンの鉛直面がやや燃え下がった 1 分 37 秒で、左側のウレタンの鉛直面上部が熱分解し、発煙が観察された。その後、左右のウレタンの熱分解範囲が拡大し、鉛直面全体から発煙した。3 分 53 秒で左側のウレタンに、3 分 59 秒で右側のウレタンに延焼し、両隣に延焼後の 4 分 11 秒で発熱速度が最大となった。その後、中央のウレタンが 5 分 38 秒で燃え尽き、着火後約 8 分で全体の燃焼がほぼ終了した。

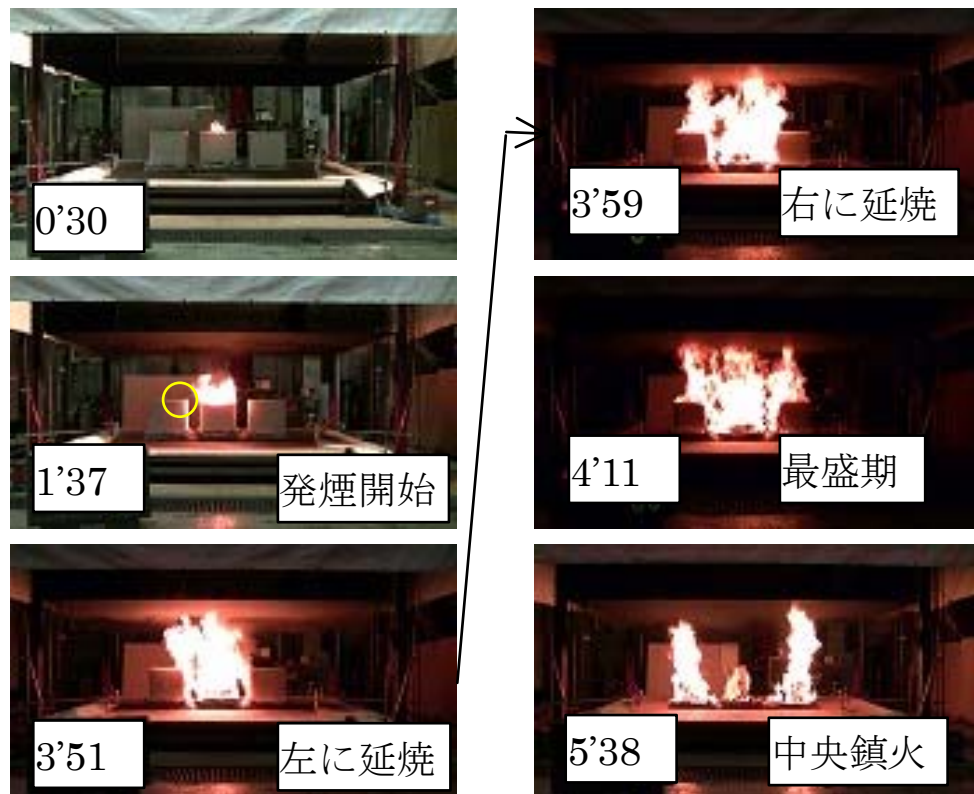


図 5-4 延焼拡大の様子 (0W125-1200M)

実験条件による延焼拡大性状の違いを把握するため、実験条件ごとに実験装置の正面から記録したビデオ画像を 1 分（一部 30 秒）ごとに示す。



	離隔距離 L=75mm			離隔距離 L=125mm			離隔距離 L=175mm		
	0W75-760M	0W75-960M	0W75-1200M	0W125-760M	0W125-960M	0W125-1200M	0W175-760M	0W175-960M	0W175-1200M
60 秒									
90 秒									
120 秒									
150 秒									
180 秒									
210 秒									
240 秒									
300 秒									
360 秒									

図 5-5 実験 A1 の延焼拡大（普通密度ウレタンから普通密度ウレタンへの延焼）の様子

	離隔距離 L=75mm			離隔距離 L=125mm			離隔距離 L=175mm		
	0W75-760H	0W75-960H	0W75-1200H	0W125-760H	0W125-960H	0W125-1200H	0W175-760H	0W175-960H	0W175-1200H
60 秒									
12 0 秒									
18 0 秒									
24 0 秒									
30 0 秒									
36 0 秒									
42 0 秒									
48 0 秒									
54 0 秒									

図 5-6 実験 A 2 (高密度ウレタンから高密度ウレタンへの延焼) の延焼拡大の様子



	離隔距離 L=75mm			離隔距離 L=125mm			離隔距離 L=175mm		
	0W75-760Mm	0W75-960Mm	0W75-1200Mm	0W125-760Mm	0W125-960Mm	0W125-1200Mm	0W175-760Mm	0W175-960Mm	0W175-1200Mm
60 秒									
120 秒									
180 秒									
240 秒									
300 秒									
360 秒									
420 秒									

図 5-7 実験 A3 の延焼拡大（普通密度ウレタンから普通密度ウレタン小への延焼）の様子





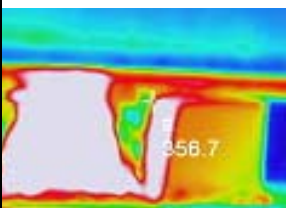

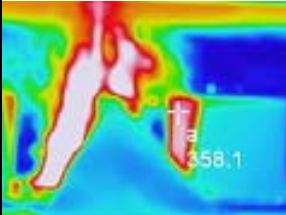
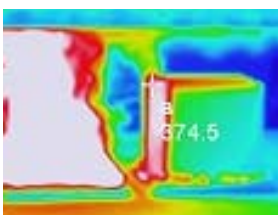
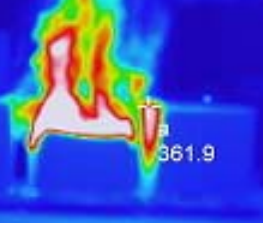
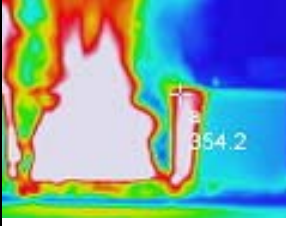
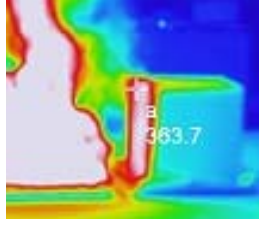
図 5-8 実験 B~D の延焼拡大の様子

### 5. 3. 2. 延焼直前の熱画像

受熱側のウレタンへの延焼が生じる直前でのサーモカメラで測定した熱画像を表 5-2 および表 5-3 に示す。いずれも、図中の左側が実験開始時に着火した中央のウレタン（加熱側ウレタン）で、右側が加熱側ウレタンに隣接して設置され、延焼が生じたウレタン（受熱側ウレタン）である。受熱側のウレタンは鉛直面を中心に 350℃を超えており、この部分で熱分解が生じている。


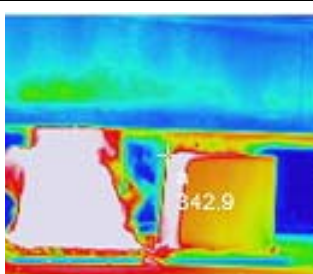

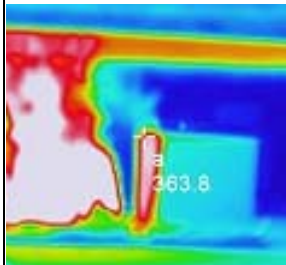
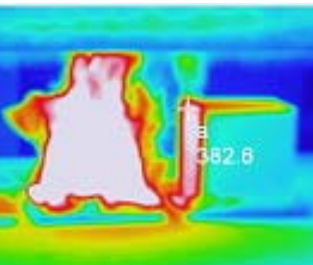
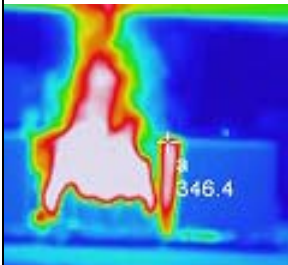
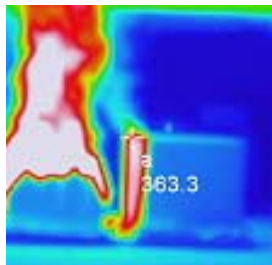
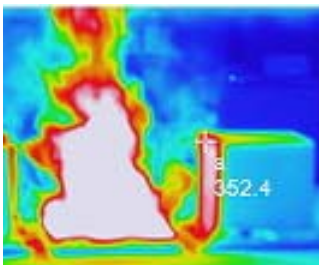
表 5-2 に示すように実験 A1 では、離隔距離 75mm、天井高さ 1200mm（0W75-1200M）の条件では、受熱側ウレタン鉛直面の上部のみで熱分解しているが、それ以外の条件では、鉛直面全体が熱分解している。離隔距離 75mm、天井高さ 1200mm の条件では、早い段階で延焼したため、受熱側ウレタンの表面温度は全体的に低い。一方、離隔距離 125mm、天井高さ 760mm の条件では、熱分解面以外の面も表面温度が高くなっており、延焼が生じる前に煙層などからの放射熱により予熱されていると考えられる。

表 5-2 延焼直前の熱画像（実験 A1）

	離隔距離 75mm	離隔距離 125mm	離隔距離 175mm	
天井高さ 760mm	—	 (185 秒)	—	
天井高さ 960mm	—	 (200 秒)	 (210 秒)	
天井高さ 1200mm	 (145 秒)	 (230 秒)	 (250 秒)	

実験 A2 では、表 5-3 に示すように、離隔距離が小さい 75mm では、受熱側ウレタンの加熱側ウレタン側の鉛直面は上端から 3 分の 2 程度が熱分解しているが、離隔距離が大きい 175mm では、鉛直面全体が熱分解している。天井高さが 760mm の条件では、受熱側ウレタンの水平面のうち、加熱側ウレタンに近い部分でも、熱分解が生じている。受熱側ウレタンの加熱側ウレタン側以外の鉛直面の表面温度は、離隔距離が同じであれば、天井高さが低くなるに従い表面温度が高くなっており、煙層などからの放射熱により予熱されている。

表 5-3 延焼直前の熱画像 (実験 A2)

	離隔距離 75mm	離隔距離 125mm	離隔距離 175mm	
天井高さ 760mm	 (235 秒)	—	 (265 秒)	
天井高さ 960mm	—	 (275 秒)	 (315 秒)	
天井高さ 1200mm	 (270 秒)	 (275 秒)	 (360 秒)	



### 5. 3. 3. 延焼時間

#### (1) 実験 A1、実験 A2

各実験での加熱側ウレタンから受熱側ウレタン) への延焼時間を天井高さに対してプロットした結果を図 5-9 に示す。

実験 A1 では図 5-9 左に示すように、ウレタンブロック間の離隔距離が 125mm と 175mm の条件では、延焼時間にはほとんど差がなかった。両者とも天井高さが低くなるに従い延焼時間が短くなる傾向が見られた。一方、離隔距離が 75mm の条件では明らかに延焼時間が短く、天井高さの影響は相対的に小さい。

実験 A2 では図 5-9 右に示すように、延焼時間は全体的に実験 A1 よりも長くなっている。これは主としてウレタンの密度の違いによるものである。天井高さの影響は離隔距離が 175mm の時に明瞭に現れており、その感度は実験 A1 よりも高い。

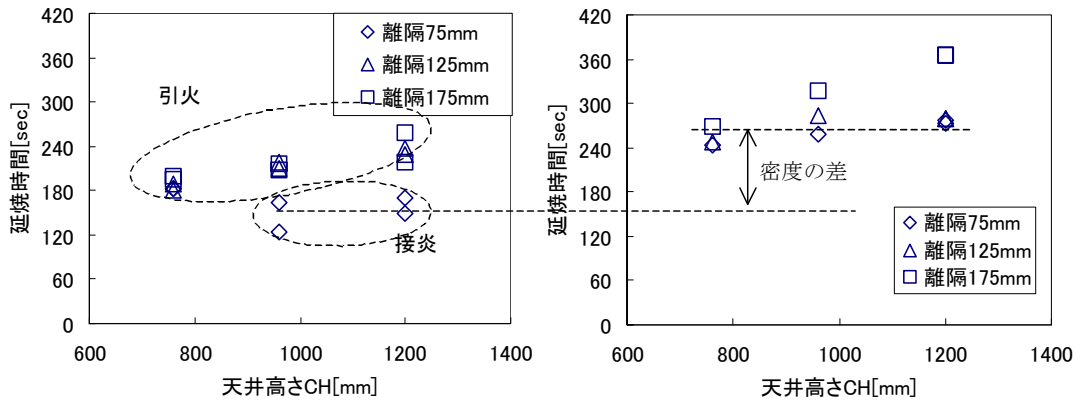


図 5-9 実験 A1 (左図) および実験 A2 (右図) における延焼時間と天井高さの関係

## (2) 実験 A3

実験 A3 における加熱側ウレタンから受熱側ウレタンへの延焼時間を天井高さに対してプロットした結果を実験 A1 の結果と併せて図 5-10 に示す。実験 A3 では、図 5-10 に示すように、延焼が生じた実験では、天井高さが等しければ、実験 A1 の延焼時間と概ね等しくなった。ただし、一部の実験では、延焼しなかった。

天井高さの条件ごとに詳しく見てみると、天井高さ 760mm、1200mm の条件では、離隔距離の最も大きい 175mm の条件で延焼しなかったが、他の条件では延焼した。天井高さ 960mm の条件では、2 回実施した離隔距離 125mm の条件での実験のうち、1 回は延焼しなかったが、他の条件では延焼が生じた。

実験 A3 では、実験 A1 よりも受熱側ウレタンの寸法が小さいため、受熱側ウレタン鉛直面からの熱分解ガスの発生量が少なくなるため、特に離隔距離が大きくなる場合で延焼が生じにくくなっているものと考えられる。

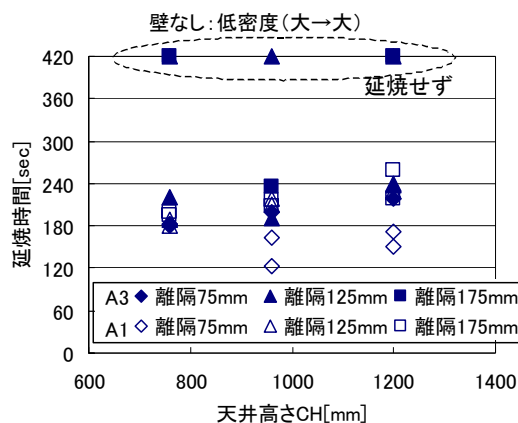


図 5-10 実験 A1 および A3 における天井高さと延焼時間の関係

## (3) 実験 B～D

実験 B～D での延焼時間を、使用したウレタン、離隔距離、天井高さの等しい条件で実施した実験 A1 の結果と併せて表 5-4 に示す。

実験 B では、壁と平行な方向に延焼する場合は、壁に直交する方向に延焼する場合よりも延焼時間はやや短くなった。また、いずれの条件でも可燃物の周囲に壁のない条件で実施した実験 A1 よりも、延焼時間がやや短く、壁の影響により延焼時間が短くなった。

実験 C では、L 字に配置した場合も、直線状に配置した場合も延焼時間は 120～140 秒程度で、離隔距離、天井高さの条件が等しい実験 A の実験結果と比較すると、延焼時間が 90 秒程度短くなり、隅角部ではさらに延焼時間が短くなった。


実験 D では、開口側から開口の反対側への延焼時間は、その逆方向の延焼時間よりも短くなった。実験中に目視で観察した範囲では、開口流による火炎の顕著な傾きは観察されなかったが、実験装置内では、開口側から奥側への流れが生じ、延焼時間が短くなったも



のと考えられる。

表 5-4 実験 A1、B～D の延焼時間一覧 (普通密度、天井高さ 960mm、離隔距離 125mm)

実験 A1 (垂れ壁のみ)	 0W125-960M		
実験 B (1面壁)	 1W125-960Mm(P)	 1W125-960Mm(V)	
実験 C (2面壁)	 2W125-960M(P)	 2W125-960M(L)	
実験 D (3面壁)	 3W125-960M(O)	 3W125-960M(C)	 3W125-960M(W)

※  延焼方向および時間

#### 5. 3. 4. 発熱速度と煙層温度

本節では、発熱速度と煙層温度の実験結果を示す。発熱速度はロードセルで測定した各ウレタンの重量減少速度に、単位発熱量  $25\text{MJ/kg}^9$  を乗じて算出した値の合計である。煙層温度は、3 隅で測定した熱電対ツリーのうち、垂れ壁下端より高い位置に設置した熱電対の測定値の平均値である。

##### (1) 実験 A1

実験 A1 での発熱速度の時刻歴を図 5-1 1 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

各実験において、着火直後は、発熱速度はなだらかに上昇するが、ある時点で急激に上昇している。これは受熱側ウレタンに延焼し、同時に燃烧するウレタンブロックの数が増加したためである。最大発熱速度は、天井高さが低いほど、また、離隔距離が小さくなるほど増加した。このうち天井高さの影響は大きく、天井高さが 760mm の条件では、天井高さが 1200mm の条件の 2 倍程度になった。

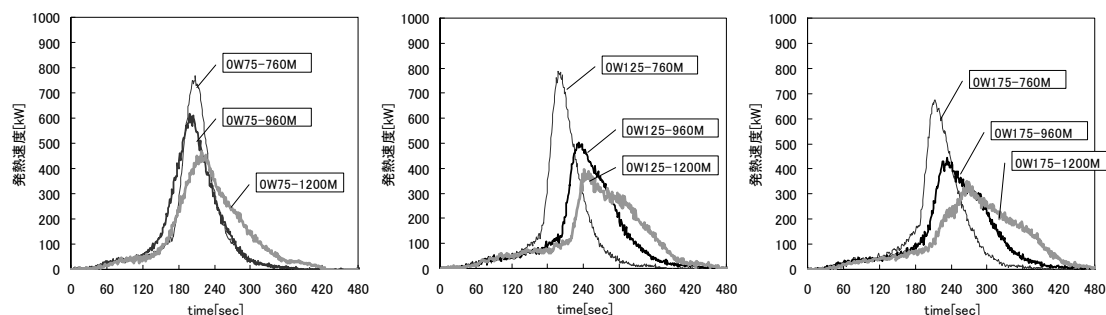


図 5-1 1 実験 A1 での各ウレタンブロックの発熱速度の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

煙層温度の時刻歴を図 5-1 2 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。煙層温度についても、発熱速度と同様の傾向が見られ、離隔距離が大きい場合に天井高さの影響が明瞭になる。

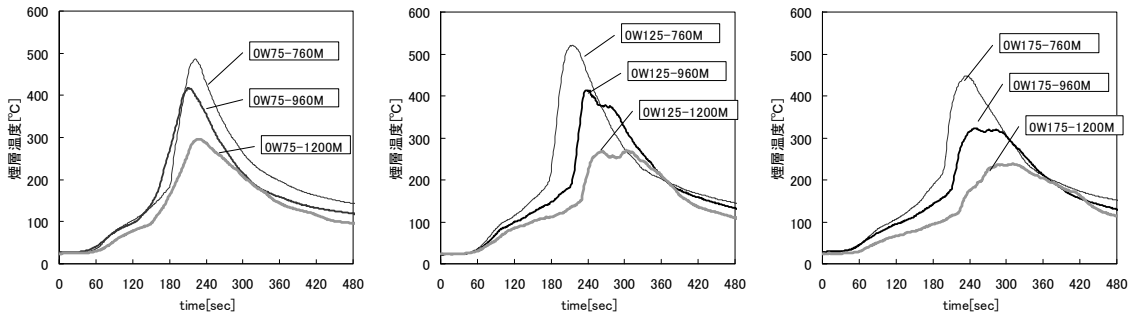


図 5-1 2 実験 A1 での煙層温度の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

(2) 実験 A2

実験 A2 での発熱速度の時刻歴を図 5-1 3 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。いずれにおいても、天井高さ 1200mm の条件では、ウレタン 3 個を用いた延焼実験の結果、960mm、760mm の条件ではウレタン 2 個を用いた延焼実験の結果であり、実験に供したウレタンの個数が違うため、天井高さ 1200mm の結果は比較から除外する。

各実験において、着火後、発熱速度はなだらかに上昇するが、ある時点で急激に上昇している。これは受熱側のウレタンに延焼し、同時に燃焼するウレタンの数が増加したためである。いずれの離隔距離においても、天井高さ 760mm の条件では、天井高さ 960mm の条件よりも最大発熱速度は 1.5 倍程度になった。

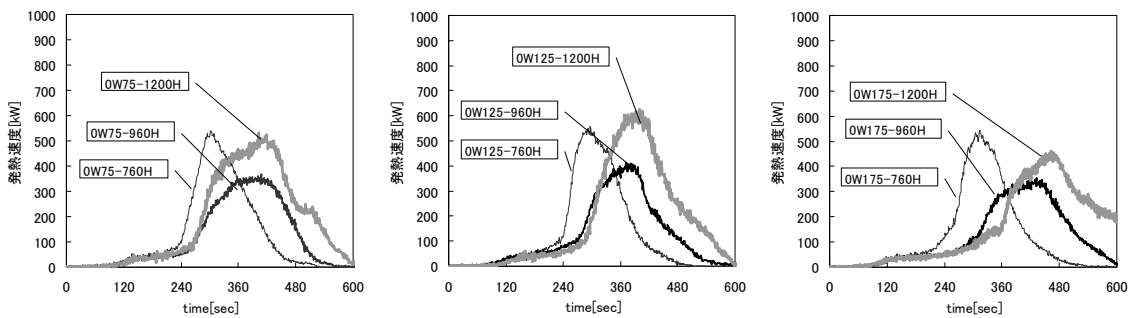


図 5-1 3 実験 A2 での各ウレタンブロックの発熱速度の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

煙層温度の時刻歴を図 5-1 4 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結

果である。煙層温度についても、発熱速度と同様の傾向が見られる。

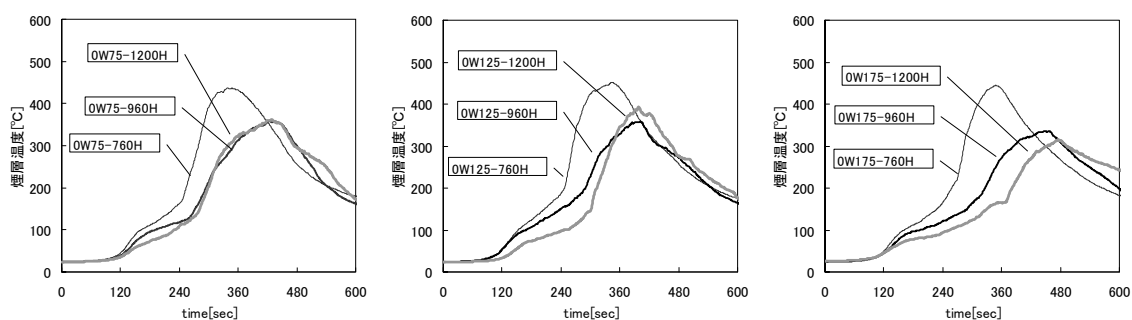


図 5-14 実験 A2 での煙層温度の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

#### (4) 実験 C

実験 C での発熱速度の時刻歴を同じ離隔距離、天井高さの条件での垂れ壁なしでの実験 (実験 A : 0W125-960M) の結果と併せて図 5-15 に示す。

2面に壁を設置した条件 (実験 C) では、中央図に示すように離隔距離、天井高さが同じ垂れ壁のみの条件よりも最大発熱速度が約 2 倍、発熱速度が最大となる時間も早くなった。

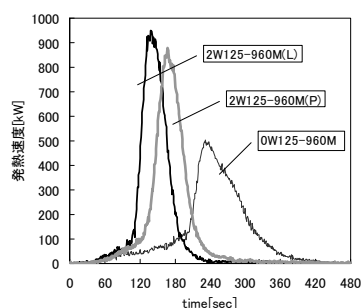


図 5-15 各ウレタンブロックの発熱速度の時刻歴 (実験 C)

実験 C での煙層温度の時刻歴を同じ離隔距離、天井高さの条件での垂れ壁なしでの実験 (実験 A : 0W125-960M) の結果と併せて図 5-15 に示す。

2面に壁を設置した条件では、離隔距離、天井高さが同じ垂れ壁のみの条件よりも煙層温度が 2 割ほど高くなった。

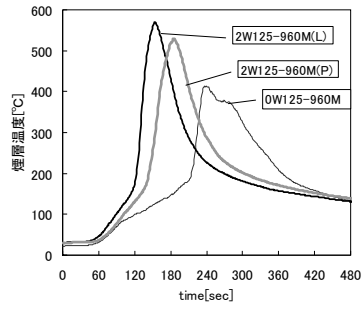


図 5-16 煙層温度の時刻歴 (実験 C)

### 5. 3. 5. 加熱側ウレタンの発熱速度

本項では、各実験条件における加熱側ウレタンの発熱速度の測定値を示す。加熱側ウレタンの発熱速度はロードセルで測定した加熱側ウレタンの重量減少速度に単位発熱量（前項と同じ 25MJ/kg）を乗じて算出したものである。

#### (1) 実験 A1

実験 A1 での加熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴を図 5-17 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

実験 A1 での加熱側ウレタンの発熱速度は、単独で燃焼している時間帯については、天井高さや離隔距離によらずほぼ同じであるが、延焼後の時間帯については、天井高さが低くなるに従って、発熱速度は大きくなってた。特に離隔距離の大きい 125mm の条件では天井高さの影響が顕著であり、天井高さが 760mm の条件では、天井高さが 960mm の条件の約 1.5 倍まで増加し、発熱速度が最大になるまでの時間も短くなった。

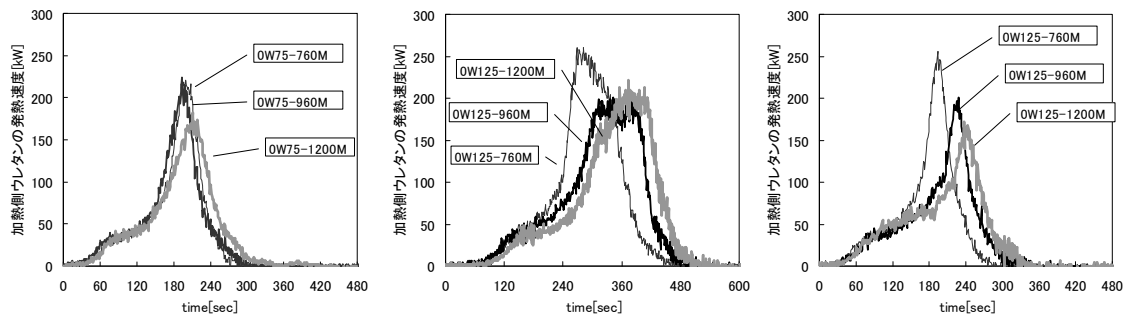


図 5-17 実験 A1 での加熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

#### (2) 実験 A2

実験 A2 での加熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴を図 5-18 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

実験 A2 での加熱側ウレタンの発熱速度は、いずれの離隔距離でも天井高さが 1200mm、960mm の条件ではほぼ等しく、天井高さ 760mm の条件では、全ての天井高さにおいて最大発熱速度が他の条件よりも大きくなった。

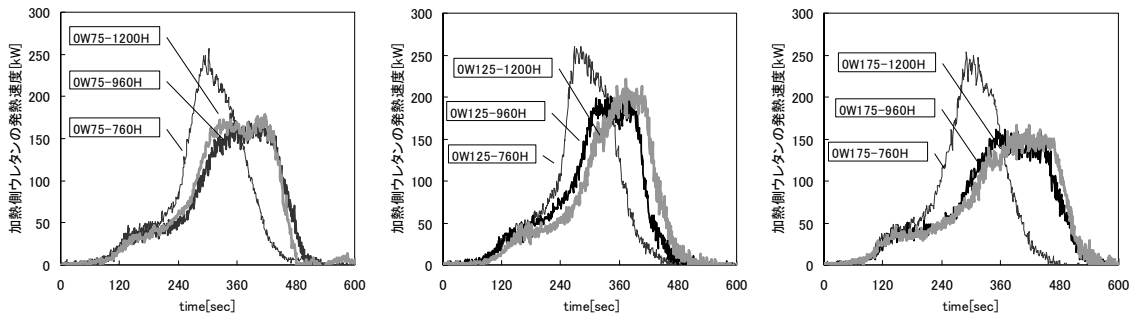


図 5-18 実験 A2 での加熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

(3) 実験 C

実験 C での加熱側ウレタンの時刻歴を同じ離隔距離、天井高さの条件での垂れ壁なしでの実験（実験 A：0W125-960M）の結果と併せて図 5-19 に示す。

2 面に壁を設置した条件では、離隔距離、天井高さが同じで垂れ壁のみの条件（0W125-960M）よりも 3 割ほど発熱速度が大きくなった。

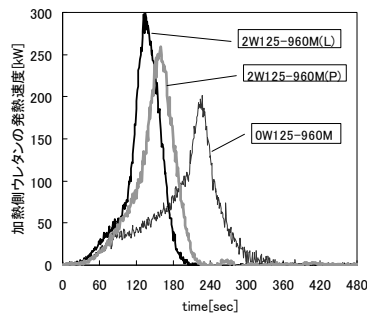


図 5-19 加熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴（実験 C）

### 5. 3. 6. 受熱側ウレタンの発熱速度

本項では、各実験条件での受熱側ウレタンの発熱速度の測定値を示す。受熱側ウレタンの発熱速度はロードセルで測定した受熱側ウレタンの重量減少速度に単位発熱量（前項と同じ 25MJ/kg）を乗じて算出したものである。

#### (1) 実験 A1

実験 A1 での受熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴を図 5-20 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。ここで、時間軸は延焼した時間を 0 としている。

受熱側のウレタンの最大発熱速度は、天井高さが低いほど、また、離隔距離が小さいほど大きくなっている。特に天井高さの影響が大きく、天井高さが 760mm の条件では、天井高さが 1200mm の条件に 2 倍以上になった。図 5-17 に示した加熱側のウレタンの発熱速度と比べると天井高さの影響が大きい。

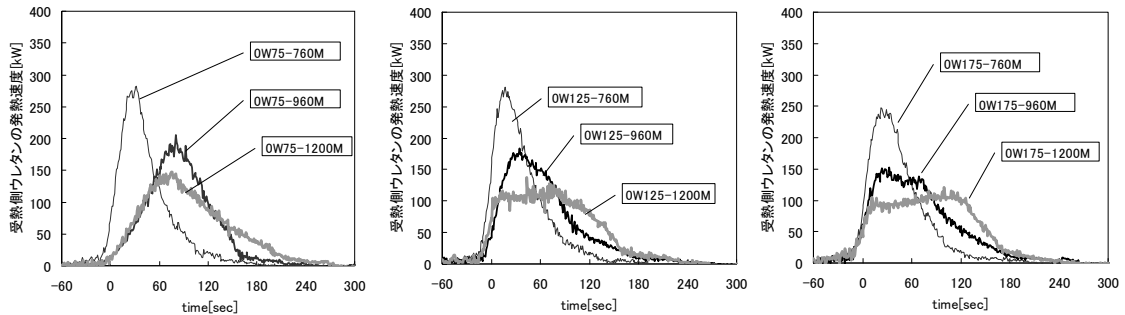


図 5-20 実験 A1 での受熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)



## (2) 実験 A2

実験 A2 での受熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴を図 5-2 1 に示す。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

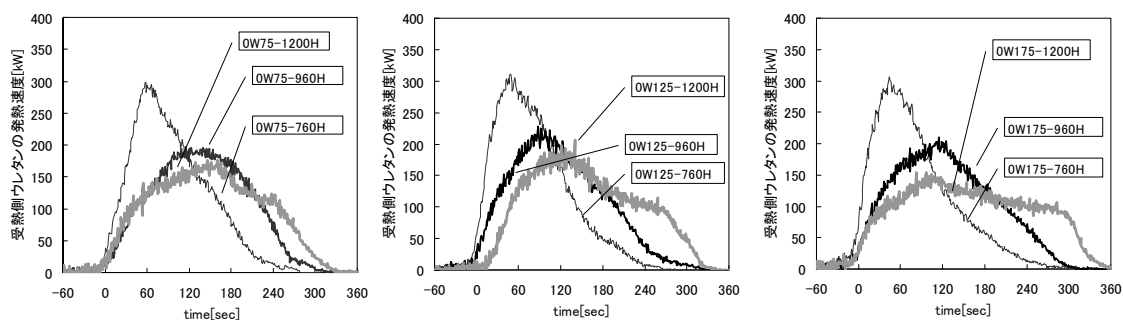


図 5-2 1 実験 A2 での受熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

## (3) 実験 C

実験 C での加熱側ウレタンの時刻歴を同じ離隔距離、天井高さの条件での垂れ壁なしでの実験 (実験 A : 0W125-960M) の結果と併せて図 5-2 2 に示す。

実験 A の天井高さ、離隔距離が等しい場合 (0W125-960M) よりも、最大発熱速度が約 2 倍となり、発熱速度が最大となるまでの時間もわずかであるが短くなった。

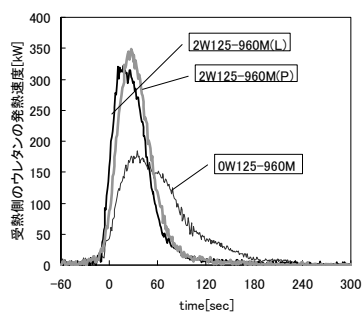


図 5-2 2 受熱側ウレタンの発熱速度の時刻歴 (実験 B~D)

### 5. 3. 7. 受熱側ウレタンに入射する熱流束

本項では、受熱側ウレタンに入射する熱流束の実験結果を示す。受熱側ウレタン表面に入射する熱流束そのものを測定することはできないため、加熱側ウレタンから生じる火炎と煙層からの放射熱に装置の中央を基準とする対称性があると仮定し、ウレタン鉛直面上端から90°回転された位置に設置した熱流計（図 5-1、図 5-2 の HF1~3）の測定値をウレタンに入射する熱流束とした。

#### (1) 実験 A1

実験 A1 での HF1 の測定値（受熱側ウレタンの鉛直面上端に入射する熱流束）の時刻歴を図 5-2 3 に示す。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

いずれの離隔距離においても、受熱側ウレタンの鉛直面上端に入射する熱流束は加熱側ウレタンが単独で燃焼する時間帯では、離隔距離が同じであれば天井高さによらずほぼ同じであった。これは、煙層からの放射熱が小さく、火炎からの放射熱が支配的であるためと考えられる。一方、受熱側ウレタンへ延焼した後は、燃焼するウレタンブロックの個数が増加するため測定値も増加し、その最大値は天井高さが低くなるに従い増加した。

同様に、HF2 の測定値（受熱側ウレタンの鉛直面中央に入射する熱流束）の時刻歴を図 5-2 4 に示す。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

HF3 の測定値（受熱側ウレタンの水平面端部に入射する熱流束）の時刻歴を図 5-2 5 に示す。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

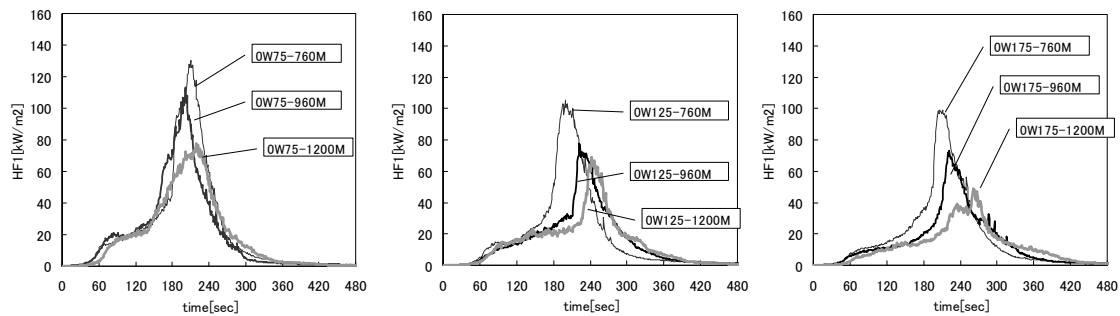


図 5-2 3 実験 A1 での HF1 の測定値の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

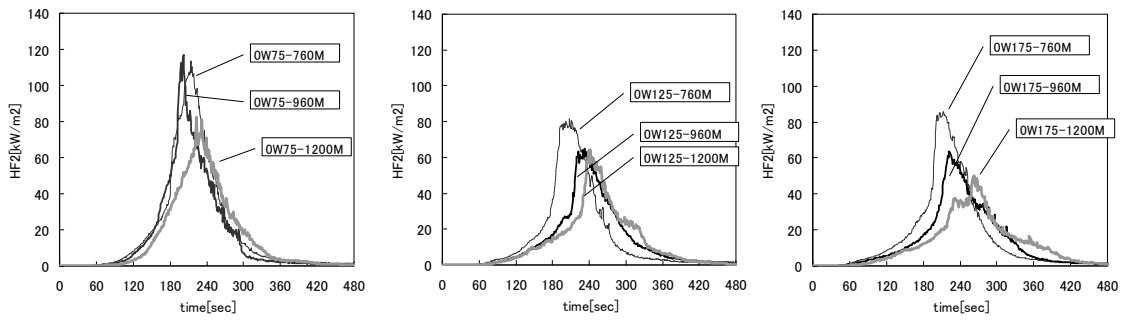


図 5-24 実験 A1 での HF2 の測定値の時刻歴

(左 : 離隔距離 75mm、中央 : 離隔距離 125mm、右 : 離隔距離 175mm)

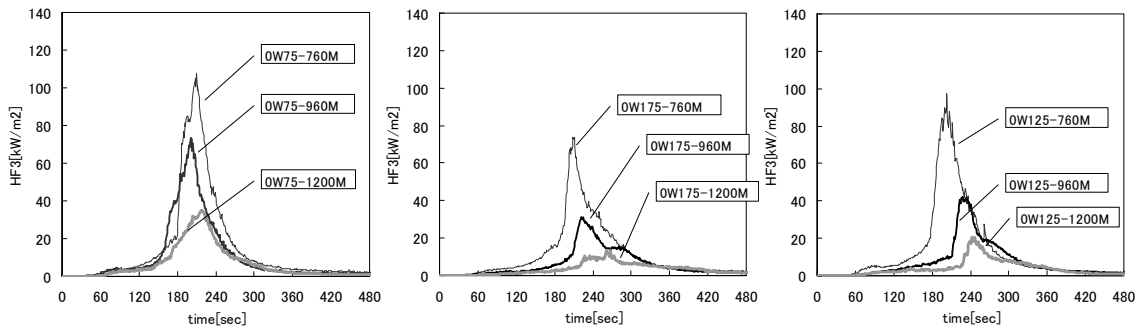


図 5-25 実験 A1 での HF3 の測定値の時刻歴

(左 : 離隔距離 75mm、中央 : 離隔距離 125mm、右 : 離隔距離 175mm)

## (2) 実験 A2

実験 A2 での HF1 の測定値（受熱側ウレタンの鉛直面上端に入射する熱流束）の時刻歴を図 5-26 に示す。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

同様に、HF2 の測定値（受熱側ウレタンの鉛直面中央に入射する熱流束）の時刻歴を図 5-27 に示す。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

同様に、HF3 の測定値（受熱側ウレタンの水平面端部に入射する熱流束）の時刻歴を図 5-28 に示す。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

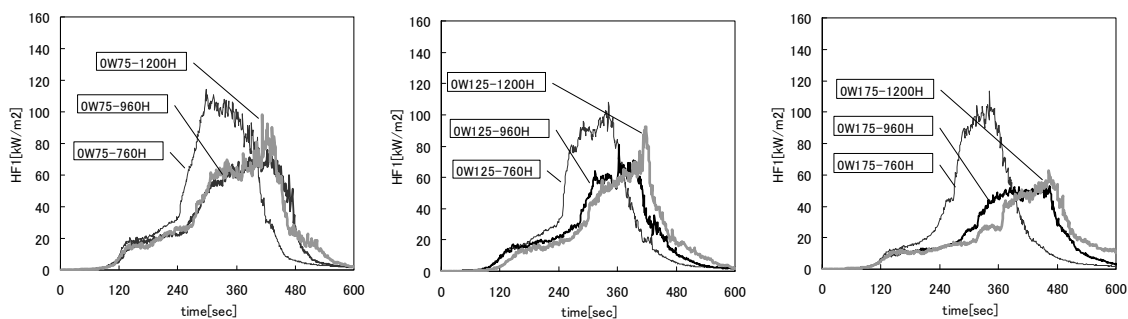


図 5-26 実験 A2 での HF1 の測定値の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

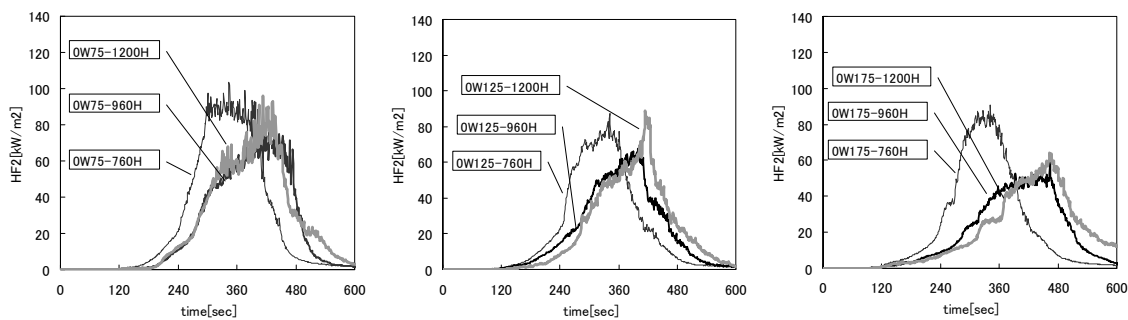


図 5-27 実験 A2 での HF2 の測定値の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

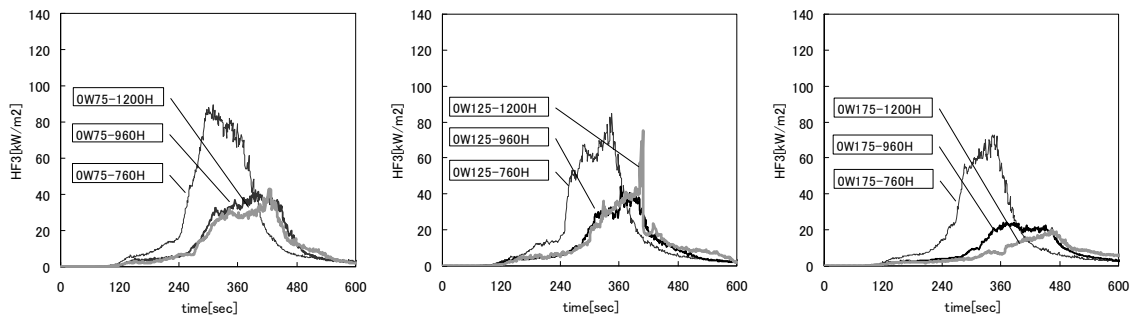


図 5-28 実験 A2 での HF3 の測定値の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

### 5. 3. 8. 床面に入射する熱流束

本項では、実験装置の隅で測定した鉛直下向きの熱流束の実験結果を示す。

#### (1) 実験 A1

実験 A1 での HF4 の測定値の時刻歴を図 5-29 に示す。HF4 は実験装置の角から中央にむけて 100mm 内側に入った位置での床面から 100mm の高さに鉛直上向きに設置した熱流計である。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

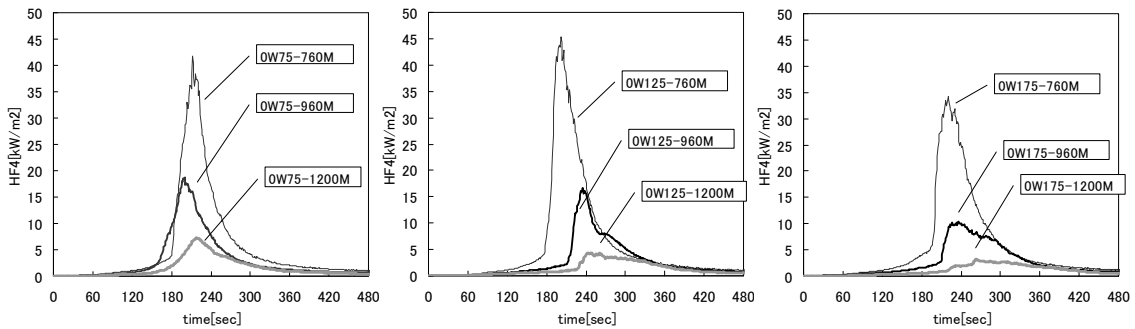


図 5-29 実験 A1 での HF4 の測定値の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

実験 A1 での HF5 の測定値の時刻歴を図 5-30 に示す。HF5 は HF4 と実験装置の中心に対して対称の位置に設置した熱流計である。左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

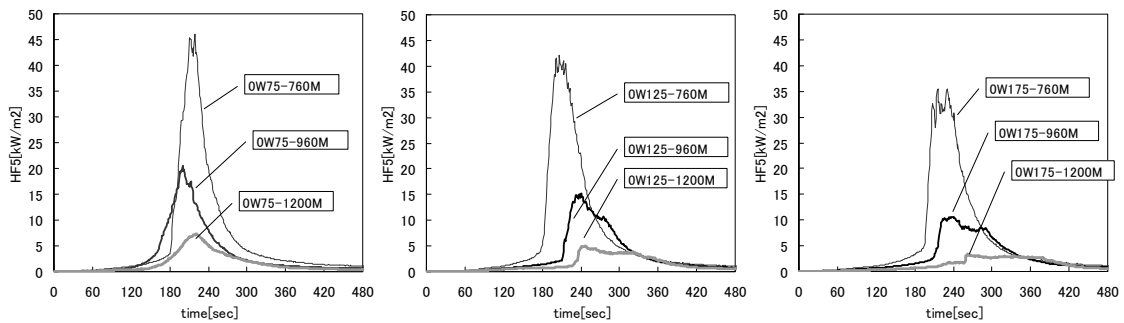


図 5-30 実験 A1 での HF5 の測定値の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

## (2) 実験 A2

実験 A2 での HF4 の測定値の時刻歴を図 5-3 1 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

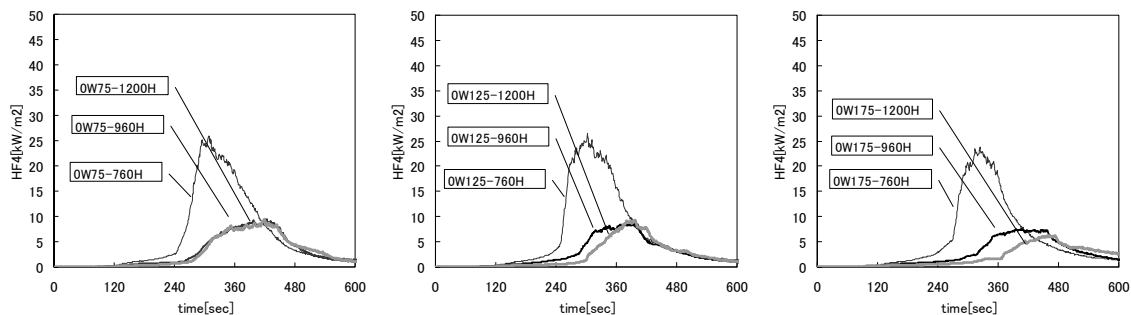


図 5-3 1 実験 A2 での HF4 の測定値の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

実験 A2 での HF5 の測定値の時刻歴を図 5-3 2 に示す。ここで左図は離隔距離 75mm の条件での実験結果、中央図は離隔距離 125mm の条件での実験結果、右図は離隔距離 175mm の条件での実験結果である。

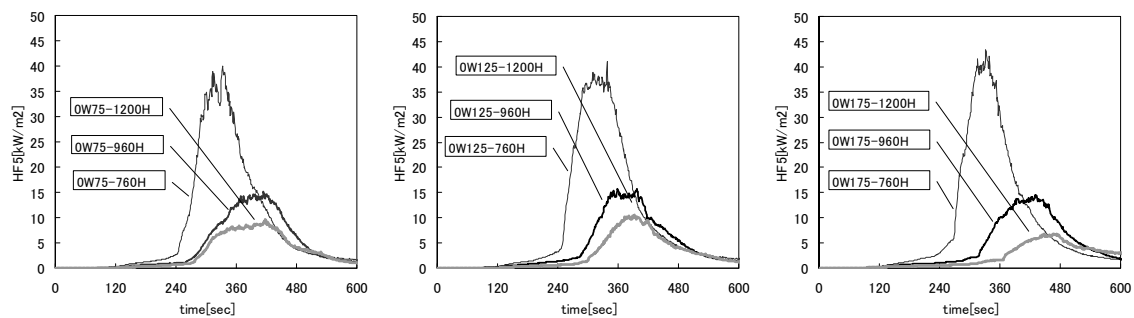


図 5-3 2 実験 A2 での HF5 の測定値の時刻歴

(左：離隔距離 75mm、中央：離隔距離 125mm、右：離隔距離 175mm)

#### 5. 4. 実験結果の考察

本節では、ウレタンブロック間の延焼時間と受熱側ウレタンの延焼後の発熱速度の影響について考察を行った。

##### 5. 4. 1. 延焼時間

延焼時間は、延焼メカニズム、受熱側、加熱側の性状によって決まるため、各項目について考察を行った。

###### (1) 延焼メカニズム

今回の実験では、図 5-33 に示す二つの延焼メカニズムが観察された。

一つ目は、図 5-33 左に示すように受熱側ウレタンの鉛直面の上部のみが熱分解した段階で、加熱側ウレタンからの火炎が受熱側のウレタン鉛直面上部に直接接触し、延焼したものである。このメカニズムを接炎による延焼と呼ぶ。

二つ目は、図 5-33 に示すように受熱側ウレタン鉛直面が激しく熱分解して大量の可燃ガスが発生し、充満したガスに引火して延焼したものである。このメカニズムを引火による延焼と呼ぶ。

実験 A の離隔距離 75mm では、天井高さが 960mm と 1200mm の条件で接炎により延焼し、他の実験では引火により延焼した。離隔距離が小さい 75mm の条件では、離隔距離よりも火炎の揺らぎ幅のほうが大きいため、接炎による延焼が生じる可能性が大きい。ただし、離隔距離が 75mm でも引火により延焼した実験があったことから、受熱側のウレタンに火炎が直接接触しなければ、最終的には引火により延焼するものと考えられる。

延焼メカニズムと延焼時間の関係を見ると、図 5-9 に示すように引火により延焼する場合には、離隔距離の影響は小さく、天井高さが低くなるに従い、延焼時間が短くなる傾向が見られた。一方、接炎により延焼する場合には、天井高さが 960mm の条件では、天井高さによる有意な差は見られなかった。



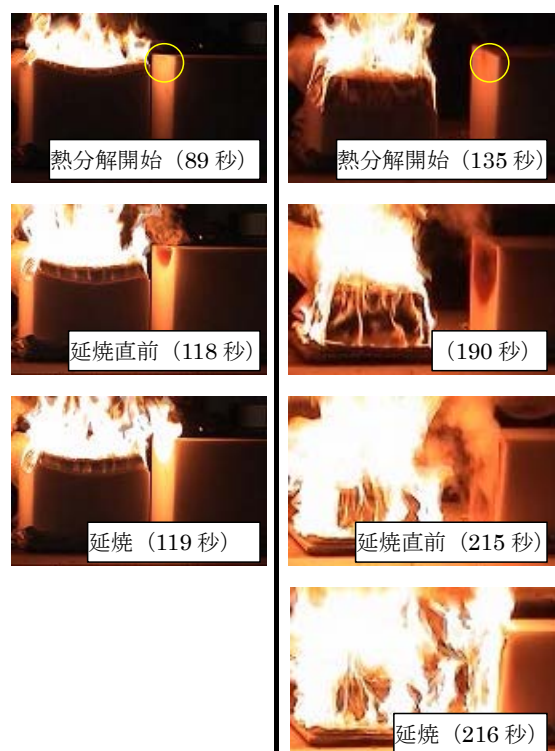


図 5-33 延焼メカニズムの違い (左: OW75-960M、右 OW175-960M)

(2) 受熱側の性状

(2-1) 受熱面上端の温度変化

受熱側のウレタンの鉛直面の温度上昇について、サーモカメラでの温度の測定値から検討を行った。実験 A1 での受熱側ウレタン鉛直面上端の位置でのサーモカメラで測定した表面温度の時刻歴および各実験での目視観察から定めた熱分解開始時間を図 5-3 4 に示す。ここで、ウレタン表面の放射率は、延焼直前の表面温度が、別途、シーブ熱電対を用いて測定した温度 (約 350°C) と一致するように 0.74 とした。

受熱側ウレタンの鉛直面上端の表面温度は、加熱側ウレタンの鉛直面の燃焼が始まる着火後 1 分程度から上昇し、約 350°C のほぼ一定値で推移した。その後、延焼が生じると、サーモカメラは炎の温度を測定するため急激に上昇した。

ビデオ画像から定めた鉛直面上部の熱分解開始時間での表面温度は、260°C~300°Cであった。また、いずれの実験においても、延焼が生じる時間での表面温度は概ね一定で約 350°Cであった。

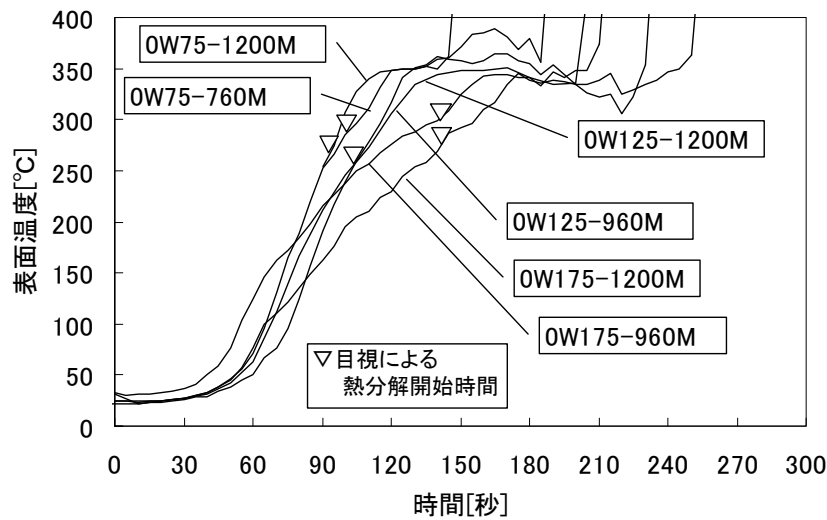


図 5-34 サーモカメラで測定した受熱側ウレタン鉛直面の温度（実験 A1）

実験 A2 での受熱側のウレタン鉛直面上端の位置でのサーモカメラで測定した表面温度の時刻歴および各実験での目視観察から定めた熱分解開始時間を図 5-3 4 に示す。実験 A1 の 2 倍程度の密度のウレタンブロックを使用した実験 A2 では、延焼直前の受熱側ウレタンの表面温度は 350°C 程度、熱分解開始時の表面温度は 240~300°C 程度と実験 A1 と同程度であった。着火直前の表面温度はいずれの実験でもほぼ等しく、今回実験した密度が異なる二種類のウレタンブロックでは、延焼が生じる時の表面温度に大差がないことを確認した。（以下、この温度を着火温度と呼ぶ）。

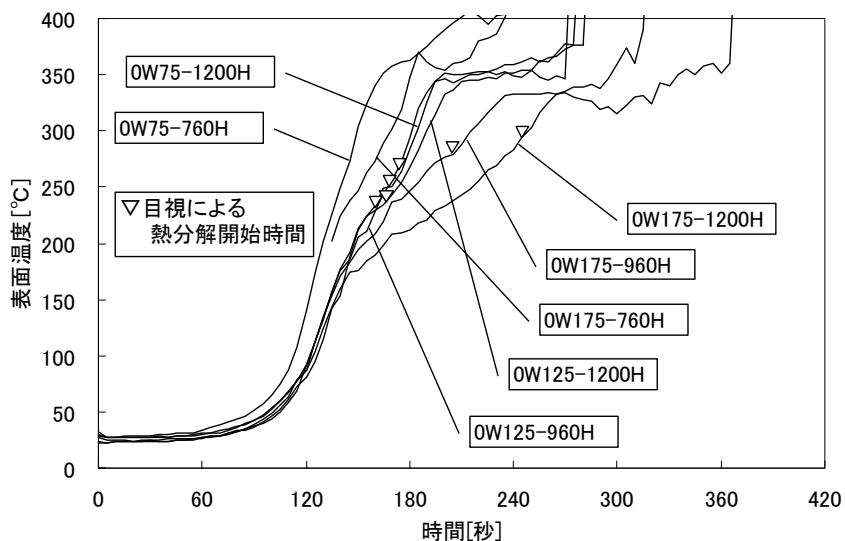


図 5-35 サーモカメラで測定した受熱側ウレタン鉛直面の温度（実験 A2）

## (2-2) 受熱面の上下方向の温度分布

(2-1) に示したように、受熱側のウレタンのうち最も早く温度が上昇する鉛直面上端の温度が着火温度に達した直後に延焼せずに、1～2分程度は一定となる時間が続く。この間に、熱分解領域が下方へと拡大していき、鉛直面全体で熱分解が起こっている状態で延焼が生じる（引火により延焼する場合）。そこで、サーモカメラにより測定した実験 A1 でのウレタン鉛直面上端、中央の高さ、下端の表面温度の時刻歴を表 5-5 に示す。

いずれの実験でも、上端、中央、下端の順に表面温度が上昇している。これは、加熱側ウレタンの鉛直面が燃え下がることにより、受熱側ウレタンに入射する熱流束が上端から順に増加しているためだと考えられる。離隔距離 75mm、天井高さ 1200mm の条件では、110 秒程度で上端、中央の温度が 350℃に達し、140 秒で延焼した。この時、下端の温度は 100℃以下と低く、鉛直面全体が熱分解するには至っていない。それ以外の実験では、延焼が生じた時間には、上端から下端まですべての温度が 350℃を超えており、鉛直面全体が熱分解した状態で延焼が生じた。

実験 A2 での受熱側ウレタンの鉛直面上端、中央、下端の表面温度の時刻歴を同様に表 5-6 に示す。実験 A1 と同様に、上端、中央、下端の順に温度が上昇しているが、上端の温度上昇開始時間と下端の温度上昇開始時間の差が、実験 A1 よりも大きい。これは、加熱側のウレタンの燃え下がり速度が実験 A1 よりも遅いためだと考えられる。

表 5-5 実験 A1 の受熱側ウレタンの表面温度

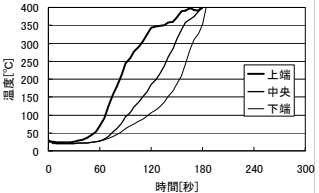
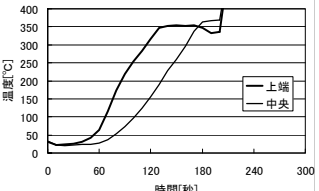
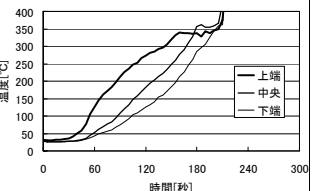
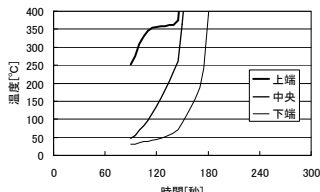
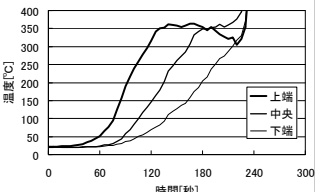
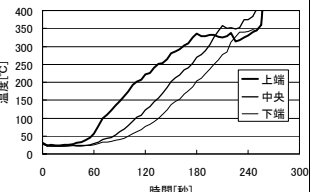
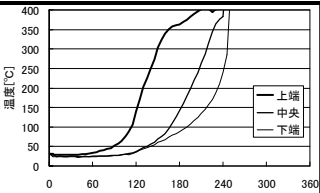
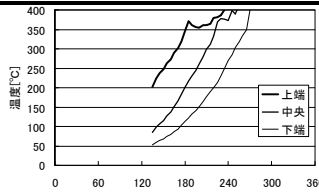
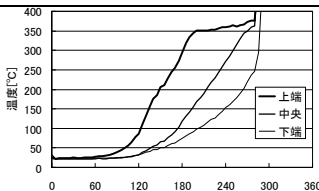
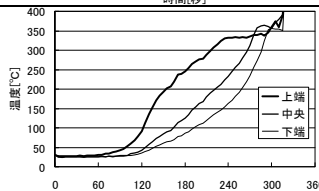
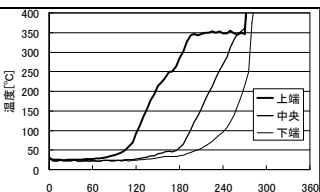
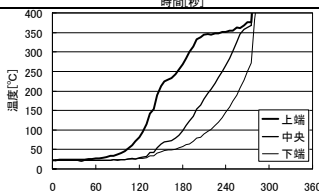
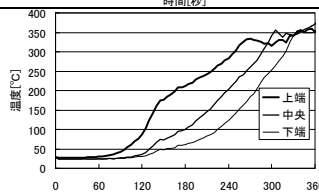
	離隔距離 75mm	離隔距離 125mm	離隔距離 175mm
CH 760mm	— (データ欠損)		— (データ欠損)
CH 960mm	— (データ欠損)		
CH 1200mm			

表 5-6 実験 A2 の受熱側ウレタンの表面温度

	離隔距離 75mm	離隔距離 125mm	離隔距離 175mm
CH 760mm		— (データ欠損)	
CH 960mm	— (データ欠損)		
CH 1200mm			

(2-3) 受熱側ウレタンに入射する熱流束

受熱側のウレタンの鉛直面に入射する熱流束についての検討を行った。放射源としては、ここでは煙層および火炎からの放射熱を考慮する。

受熱側ウレタンの表面に入射する熱流束そのものを測定することはできないため、加熱側ウレタンの炎および煙層からの放射熱に装置の中央を基準とする対象性があると仮定し、ウレタン鉛直面の上端から 90°回転された位置に設置した熱流計 (図 5-1 の HF1~3) の測定値を受熱側ウレタンに入射する熱流束と等しいと考える。

(2-3-1) 煙層から受熱側ウレタン鉛直面への入射熱流束

煙層から射出され、受熱側のウレタン鉛直面に入射する熱流束について検討を行った。煙層から受熱側のウレタン鉛直面に入射する熱流束  $q_s$  を次の式から算出した。

$$q_s = F_s \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (5-1)$$

ここで、 $F_s$  は熱流計を設置した位置に対する煙層下面の形態係数で、熱流計を設置位置を微小面として、文献 1) に従い計算した。実際には受熱面に対して、煙層と火炎が一部重なるため、式(5-1)による計算値は実際よりも形態係数を過剰に評価している。また、 $\sigma$  はステファンボルツマン係数、 $T_s$  は図 5-1 2 に示した煙層温度であり、実験で煙層は黒煙だったため、放射率  $\varepsilon$  は 1 とした。

離隔距離 175mm、天井高さ 1200mm の条件 (OW175-12 00M) での、熱流計を設置した HF1 および HF2 の位置での熱流束の測定値と式(5-1)を用いて計算した煙層からの放射熱の計算値  $q_s$  を図 5-3 6 に示す。

いずれの実験でも煙層からの放射熱の計算値は、HF1、HF2 の測定値よりも著しく小さい。このことから、今回の実験では、延焼直前までは、煙層から射出され受熱側のウレタンの鉛直面に入射する熱流束が延焼時間に与える影響は小さい。このことから、受熱側ウレタンの鉛直面に入射する熱流束は、火炎から射出される放射熱が主体的である。

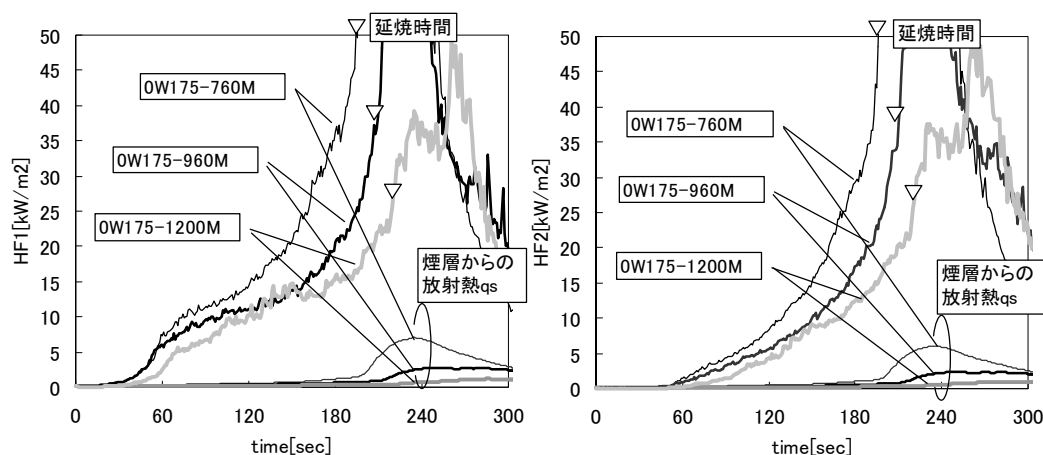


図 5-3 6 受熱側ウレタン鉛直面に入射する熱流束 (左図: HF1、右図: HF2)

### (2-3-2) 火炎から受熱側ウレタン鉛直面への入射熱流束

受熱側ウレタンの鉛直面に入射する熱流束は火炎からの放射熱が主体的であることから、図 5-3 6 に示した受熱側ウレタン鉛直面に入射する熱流束の増加は加熱側のウレタン鉛直面の燃え下がりにより、受熱側のウレタンに対する火炎の形態係数が増加したためと考えられる。そこで、加熱側のウレタンの鉛直面の燃え下がり considering 火炎からの放射熱を計算し、実験値との比較を行った。

離隔距離 175mm、天井高さ 960mm の条件 (0W175-960M) での、ビデオ画像から読み取った燃焼面下端高さの時刻歴を図 5-3 7 に示す。燃焼面下端高さはほぼ一定の速度で降下している。そこで、燃焼面下端高さの時刻歴を時間の一次式で近似した結果も図 5-3 7 に示す。

発熱速度の測定値を長谷見ら<sup>2)</sup>が提案する実験式に代入して連続火炎高さを求め、連続火炎高さとウレタンブロックの幅 (350mm) の長方形で火炎面を近似し、その温度を 800℃として火炎から射出され受熱側ウレタン鉛直面に入射する熱流束  $q_{fi}$  を次の式を用いて計算した。(図 5-3 8 参照)

$$q_{fi} = F_i \varepsilon \sigma T_f^4 \quad (5-2)$$

ここで、 $F_i$  は熱流計  $i$  に対する火炎の形態係数で、微小面と長方形の火炎面の関係から文献 8) により算出した。また、 $\sigma$  はステファンボルツマン係数、 $T_f$  は火炎温度 (=800℃) を表し、放射率  $\varepsilon$  は測定値と計算値が一致するように 0.3 と定めた。火炎の放射率としては 0.3 と小さい値であるが、これは、鉛直面の燃焼により生じる火炎が薄いためだと考えられる。

熱流計 HF1、HF2 (図 5-1 参照) について、測定値と計算値をプロットした結果を図 5-3 9 に示す。HF1 の測定値が先に増加し、遅れて HF2 の測定値が増加するという測定値の傾向を再現することができた。このことから、受熱側ウレタンの鉛直面に入射する熱流束の増加は加熱側ウレタンの鉛直面の燃え下がりにより生じることが確認できた。

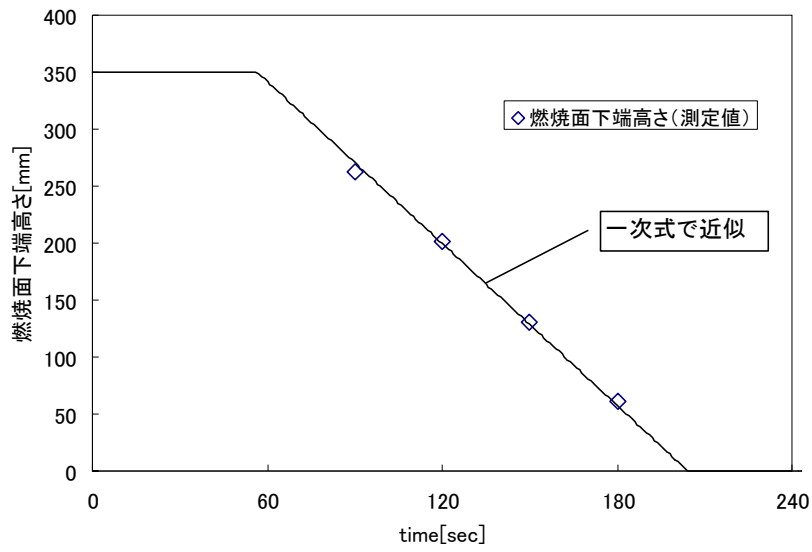


図 5-37 加熱側ウレタンの火炎高さの時刻歴

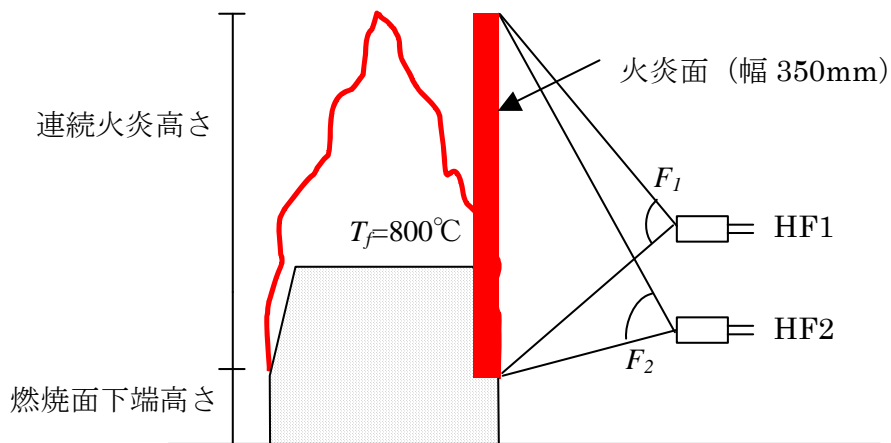


図 5-38 火炎からの放射熱計算の計算法

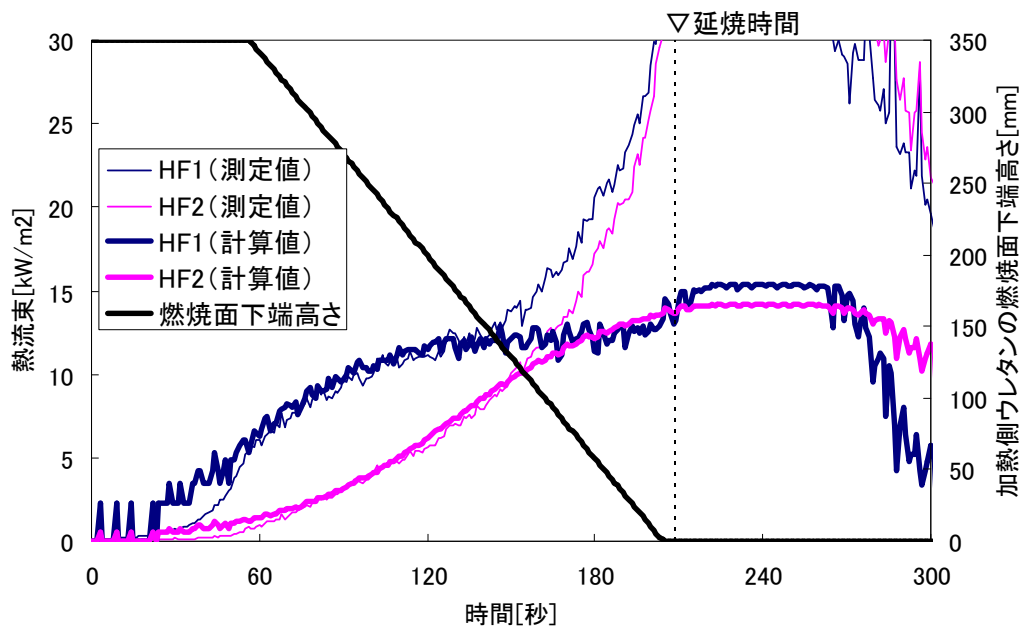


図 5-39 火炎からの放射熱の実験値と計算値の比較 (0W175-960M)




































#### 5. 4. 2. 受熱側ウレタンの燃焼性状

5. 3. 6 節に示したのように、受熱側ウレタンは、加熱側ウレタンの燃焼により生じる火炎や煙層からの放射熱により予熱され、表面温度が高くなっているため、自由空間で燃焼する場合よりも発熱速度が大きく、また、最大発熱速度に達する時間も短くなる。このことは、延焼が生じた後の室全体の燃焼性状に大きな影響を与える。そこで、本項では受熱側ウレタンの延焼後の燃焼性状について考察を行った。

##### (1) 受熱側ウレタンの燃焼性状

ビデオ画像から整理した受熱側ウレタンの延焼が生じた時間を起点とした燃焼性状の時刻歴を表 5-7 に示す。離隔距離はいずれも 175mm、天井高さは 760mm、960mm、1200mm の 3 種類である。いずれの実験でも、表中の正面の鉛直面（以下、鉛直面（正面）とする）の左端から右方向へと燃焼範囲が拡大している。天井高さ 760mm の条件では、延焼後 5 秒で鉛直面（正面）の中央まで燃焼範囲が拡大し、10 秒で右端まで到達している。10 秒後の燃焼範囲を天井高さにより比較すると、天井高さ 760mm では右端まで、天井高さ 960mm では中央部まで燃焼範囲が拡大しているが、天井高さ 1200mm ではほとんど燃焼範囲は拡大しておらず、天井高さが低いほど燃焼範囲が早く拡大している。

表 5-7 受熱側ウレタンの燃焼性状

	0W175-760M	0W175-960M	0W175-1200M
0 秒			
1 秒			
2 秒			
3 秒			
4 秒			
5 秒			
6 秒			
7 秒			
8 秒			
9 秒			
10 秒			

(2) 受熱側ウレタンの火炎伝播速度

受熱側ウレタンの火炎伝播の模式図を図 5-4 0 に示す。加熱側ウレタン側の鉛直面に着火後、水平面、鉛直面ともに水平方向に火炎伝播していく。ビデオ画像から燃烧面先端位置がよみとれる鉛直面（正面）について、左端から燃烧面先端までの距離  $x_f$  の時間変化を図 5-4 1 に示す。ここで時間は延焼時間を起点とした。

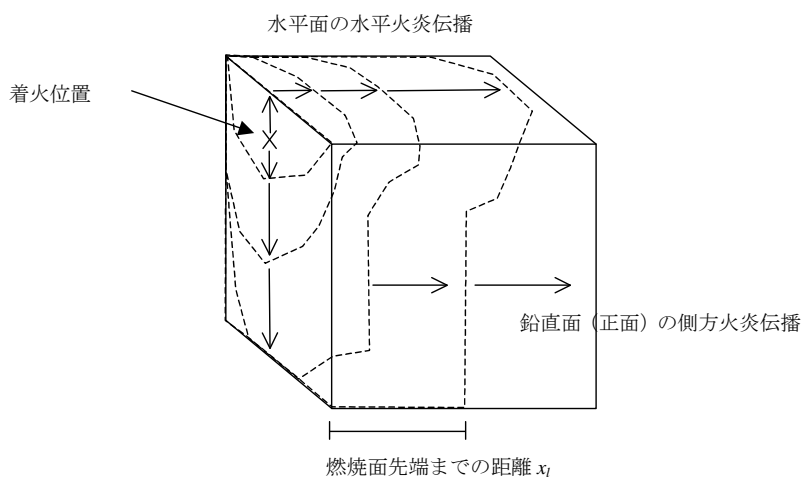


図 5-4 0 受熱側ウレタンの火炎伝播の模式図

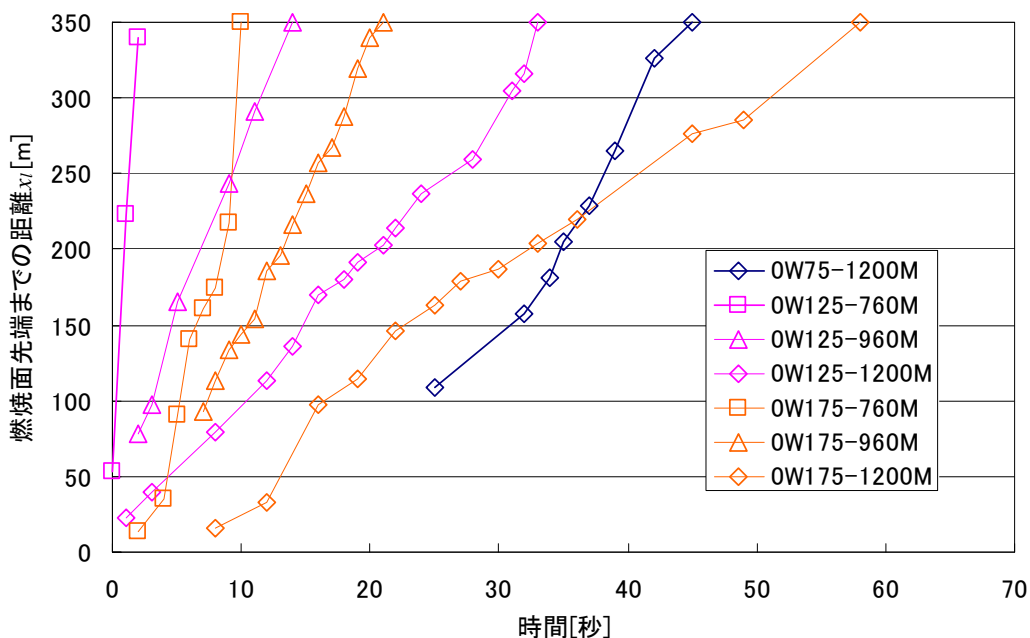


図 5-4 1 燃烧面先端までの距離の時間変化

図 5-4 1 に示すように、離隔距離 175mm、天井高さ 1200mm の条件では、燃焼面先端位置は時間に比例して増加しており、延焼後約 60 秒で燃焼面先端は鉛直面（正面）の右端まで到達している。他の条件でも、燃焼面先端までの距離は時間に比例して増加した。燃焼面先端までの距離を時間に対する一次式で最小二乗法により近似し、その傾きを鉛直面（正面）の側方火炎伝播速度とした。

各実験条件での、鉛直面（正面）側方火炎伝播速度を整理した結果を、延焼時間および延焼直前の鉛直面（正面）の表面温度と併せて離隔距離が同じ条件で比較すると、天井高さが低くなるほど延焼直前の表面温度は高く、火炎伝搬速度は大きくなった。火炎伝搬速度の増加は、予熱により延焼直前の表面温度が高くなっていることが原因の一つとして考えられるため、両者の関係について整理した。

表 5-8 に示す。ここで、延焼直前の鉛直面（正面）の表面温度はサーモカメラで測定した鉛直面表面温度の面内の平均温度である。離隔距離が同じ条件で比較すると、天井高さが低くなるほど延焼直前の表面温度は高く、火炎伝搬速度は大きくなった。火炎伝搬速度の増加は、予熱により延焼直前の表面温度が高くなっていることが原因の一つとして考えられるため、両者の関係について整理した。

表 5-8 鉛直面（正面）の側方火炎伝播速度

	延焼時間 [s]	鉛直面（正面）の 延焼直前の表面温度[K]	鉛直面（正面）の 側方火炎伝搬速度[mm/s]
0W75-760M	183	-	-
0W75-960M	124	-	-
0W75-1200M	150	44	13
0W125-760M	188	210	143
0W125-960M	210	101	23
0W125-1200M	237	93	10
0W175-760M	195	-	-
0W175-960M	216	131	19
0W175-1200M	258	101	6

※ 「-」はデータ欠損を表す。

Quintiere ら<sup>1)</sup>によると、定常状態での火炎伝播速度は次式で表すことが出来る。

$$v_p = \frac{4q^2\delta_f}{\pi k \rho c (T_{ig} - T_0)^2} \quad (5-3)$$

ここで、 $T_{ig}$ は着火温度[K]、 $T_0$ はウレタンブロックの初期温度[K]、 $k$ は熱伝導率[kW/mK]、 $c$ は比熱[kJ/kgK]、 $\rho$ は密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\delta_f$ は予熱長さ[m]、 $q_f$ は火炎から予熱長さ位置に入射する放射熱である。火炎伝搬速度は、ウレタンブロックの着火温度と初期温度（ここでは延焼直前の表面温度）の差の二乗に反比例することから、両者をプロットした結果を図 5-4 2 に示す。また、佃ら<sup>4)</sup>が測定した自由空間での側方火炎伝播速度も併せて示す。

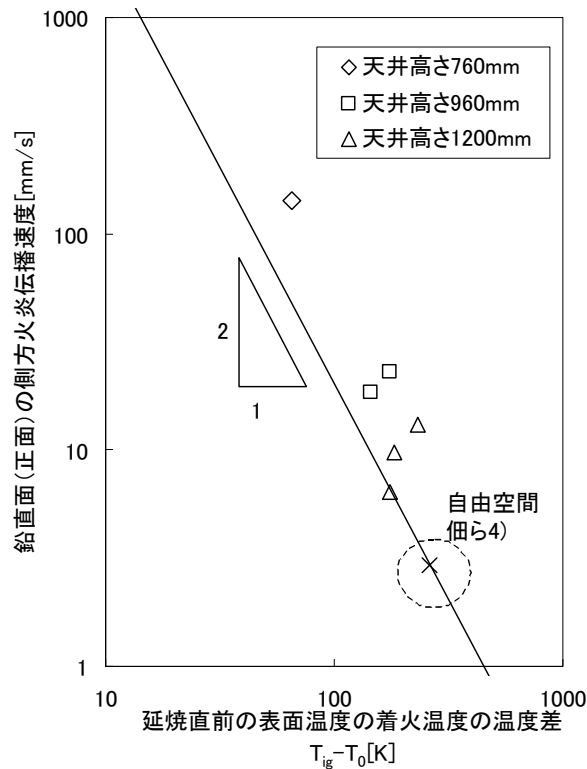


図 5-4 2 側方火炎伝播速度

鉛直面（正面）の側方火炎伝播速度は、延焼直前の表面温度と着火温度の差が小さくなるほど増加しており、予熱により表面温度が高くなるため、火炎伝搬速度が増加することが確認できた。

佃ら<sup>4)</sup>が測定した自由空間での側方火炎伝搬速度から表面の温度上昇を考慮して火炎伝搬速度を推定した（図 5-4 2 の直線）。実験での測定値は、推定値よりも高くなっており、予熱による表面の温度上昇だけでなく、受熱側ウレタンの鉛直面に入射する外部放射の影響も受けているものと推定される。

## 5. 5. 本章の結論

本章では、可燃物上部に煙層が形成される空間において、複数のウレタンブロック間の延焼拡大実験を行い、天井と周壁が延焼時間や発熱速度に与える影響を検討した。

離隔距離が小さい場合には火炎が隣接するウレタンブロックの表面に接炎して延焼し、離隔距離が大きい場合には加熱されるウレタンブロックから発生した可燃ガスに引火して延焼した。接炎で延焼する場合には天井高さの影響が小さく、引火で延焼する場合には天井高さが低いほど延焼時間が短くなった。これは、未着火の可燃物表面に煙層から入射する熱流束が増加するためと考えられる。

延焼後の燃焼性状は、予熱により着火後、急激に燃焼面が拡大するため、自由空間で自由空間で単独に燃焼する場合に比べて発熱速度が著しく増加することを明らかにした。

【本章の参考文献】

- 1) 田中哮義: 改訂版 建築火災安全工学入門, 日本建築センター
- 2) Hasemi Y., Tokunaga T. : Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames, Fire Science and Technology, Vol.4, No.1, pp.15-26
- 3) Quintirere,J.: Measurement of Material Flame Spread Properties, Combustion Science and Technology,1983,Vol.32,pp67-89
- 4) 佃めぐみ:周辺からの熱フィードバックを考慮した 3次元可燃物の発熱速度予測モデルの提案, 日本火災学会研究発表会概要集, 2009

【本章で使用した記号】

$c$ :比熱[kJ/(kg·K)]

$H$ :天井高さ[m]

$Q$ :発熱速度[kW]

$T$ : 温度[K]

$T_p$ : 熱分解温度[K]

$T_{ig}$ : 引火温度[K]

$k$ : 熱伝導率[kW/mK]

$q$ :熱流束[kW/m<sup>2</sup>]

$t$ :時間[s]

$\Delta H_c$ : 単位発熱量[kJ/kg]

$\rho$ : 密度[kg/m<sup>3</sup>]

<添字>

a:外気

## 第6章

# 固体可燃物間の延焼拡大予測モデルの提案と 延焼拡大実験との比較



## 第6章の目次

6.	固体可燃物間の延焼拡大予測モデルの提案と延焼拡大実験との比較 .....	6-1
6. 1.	はじめに.....	6-1
6. 2.	固体可燃物間の延焼拡大予測モデルの提案 .....	6-2
6. 3.	固体可燃物間の延焼拡大実験との比較.....	6-5
6. 4.	本章の結論.....	6-8

### <本章の概要>

本章では、2章で提案した延焼拡大モデルのうち、個々の可燃物の発熱速度を計算する部分を4章で提案した燃焼モデルに置き換え、さらに、未着火の可燃物への予熱の効果を考慮する改良を行った。改良したモデルを第5章で示した実験結果と比較した。

延焼前の予熱の効果と延焼後の外部放射を考慮することで、天井が低くなるに従い延焼後に発熱速度が急激に増加する傾向を定量化した。

## 6. 固体可燃物間の延焼拡大予測モデルの提案と延焼拡大実験との比較

### 6. 1. はじめに

本章では、第2章で提案した延焼拡大予測モデルのうち、燃焼速度モデルを4章で提案した外部放射を考慮した燃焼速度モデルに置き換え、さらに、未着火の可燃物への予熱の効果も考慮することで、固体可燃物の延焼拡大予測に適用可能なように変更を行った。このモデルを第5章で示した実験結果と比較した。

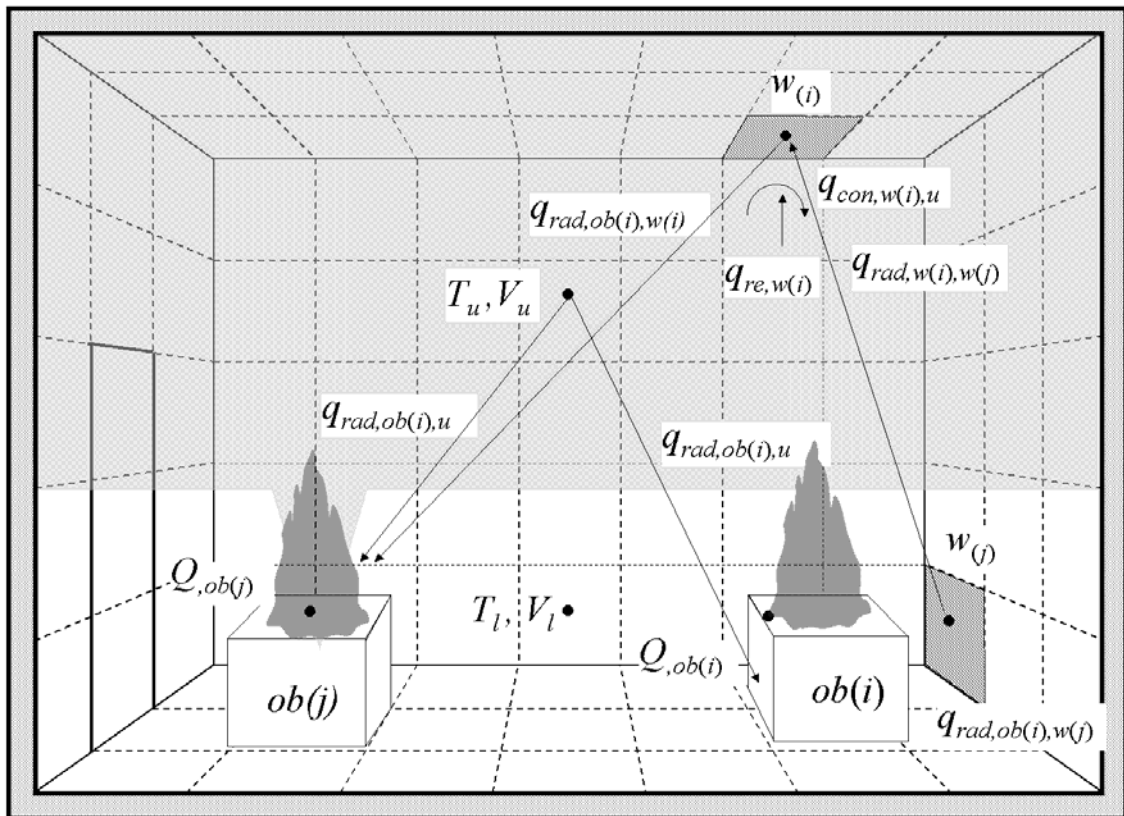


図 6-1 延焼拡大予測モデルの概要

## 6. 2. 固体可燃物間の延焼拡大予測モデルの提案

第2章で示した延焼拡大予測モデルのうち、火源径の変化、燃烧面高さの変化、外部放射の計算、着火判定、未着火の可燃物への予熱の影響の5点について修正した。

### (1) 火源径の変化

第2章で提案したモデルでは、各可燃物の火源径は一定として取り扱ったが、第4章で提案した燃烧モデルを組み込むことにより、各時間での火源径  $D$  の変化を算出する。着火した面全体が燃烧した場合には、ウレタンブロックを平面的に包含する円の直径を火源径とする。算出した火源径は火炎高さやプルーム流量の算出に使用する。

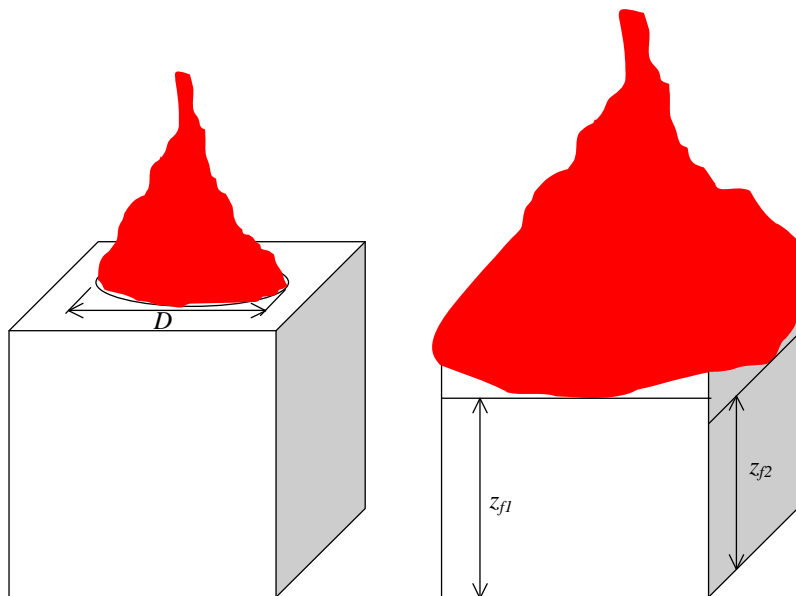


図 6-2 火源径、燃烧面高さの定義

### (2) 燃烧面高さの変化

第2章で提案した予測モデルでは、各可燃物の燃烧面の高さ  $z_f$  は一定として取り扱ったが、第4章で提案した燃烧予測モデルを組み込むことで、各時間での各可燃物の各面の燃烧面下端高さ  $z_{fi}$  を予測し、各面の燃烧面下端高さのうち、最も低い高さを可燃物の燃烧面下端高さ  $z_f$  とした。

### (3) 外部放射の考え方

第2章で提案したように、煙層、区画壁、火炎から射出され、受熱面に入射する熱流束の自由空間で入射する熱流束の増分を外部放射と定義する。各時間ステップにおいて、燃烧している可燃物の各面への外部放射を算出し、外部放射を受ける可燃物の燃烧性状を4章に示した方法により計算する。

#### (4) 着火判定

第5章に示したように各実験で延焼メカニズムが異なるため着火位置や着火するタイミングに違いが生じた。延焼メカニズムは、加熱側ウレタンの燃焼により生じる火炎の到達位置と受熱側ウレタンから発生する可燃ガスの到達位置に依存する。この両者を予測するには現状では知見が不足しているため、本研究では、サーモカメラで測定した受熱側ウレタンの鉛直面の温度履歴から、各実験での着火判定場所を表6-1に示すように定めた。

離隔距離が75mmで天井高さ760mmの場合には、未着火の可燃物の鉛直面の高さ175mmの位置の表面温度が着火温度(350℃)になった時点で延焼するとした。離隔距離75mmで、天井高さ960mm、1200mmの条件では、鉛直面の高さ300mmの位置の表面温度が着火温度になった時点で延焼するとした。離隔距離が125mmの場合には、高さ50mmの位置の表面温度が着火温度になった時点で延焼するとし、離隔距離が175mmの場合には高さ50mmの位置の表面温度が着火温度になってから15秒後に延焼するとした。

表 6-1 各実験での着火判定条件一覧

	離隔 75mm	離隔 125mm	離隔 175mm
天井高さ 760mm	H=175 (中央)	H=50 (下端)	H=50→15s (下端)
天井高さ 960mm	H=300 (引火：上端)		
天井高さ 1200mm			

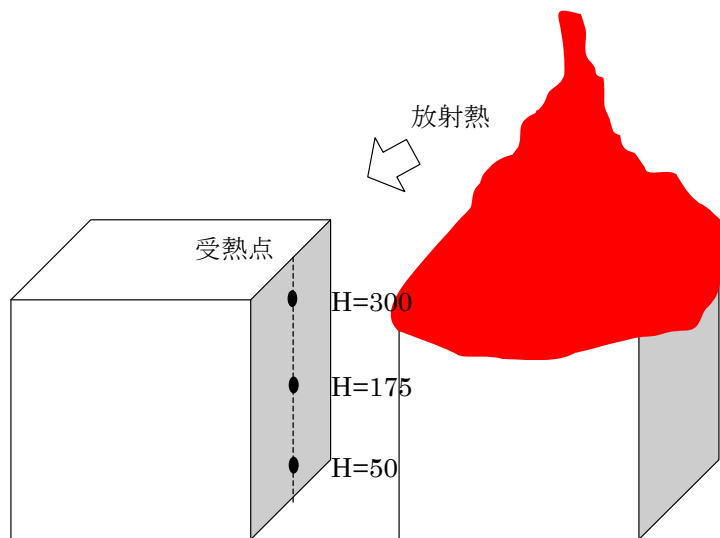


図 6-3 着火判定用の受熱点

#### (5) 未着火の可燃物への予熱の影響

第5章で示したように延焼後の受熱側ウレタンの燃焼性状には予熱の影響が考えられるため、受熱側ウレタンの火炎伝播速度について修正を行う。

熱的に厚い物質の定常状態での火炎伝播速度は、融点と表面温度の差の二乗に反比例する<sup>1)</sup>とされているため、予熱を考慮した場合の受熱側ウレタンの火炎伝播速度  $v_{m,ph}$ [m/s]を次式で計算した。

$$v_{m,ph} = \frac{(T_b - T_o)^2}{(T_b - T_{ph})^2} v_m \quad (6-1)$$

ここで、 $v_m$ は予熱がない場合の火炎伝播速度[m/s]、 $T_b$ はウレタンの融点[K]、 $T_o$ は初期温度[K]、 $T_{ph}$ は着火直前の各面の表面温度[K]であり、予熱により表面温度が高いほど、火炎伝播速度が大きくなる。

### 6. 3. 固体可燃物間の延焼拡大実験との比較

5章に示したウレタンブロックを用いた延焼拡大実験のうち、普通密度のウレタンを用いた延焼実験について、実験結果と計算結果の比較を行う。比較した実験の一覧を表 6-2 に示す。

表 6-2 実験結果と解析結果を比較した実験の一覧

	ウレタン間の離隔距離[mm]	天井高さ[mm]
0W75-760M	75	760
0W75-960M		960
0W75-1200M		1200
0W125-760M	125	760
0W125-960M		960
0W125-1200M		1200
0W175-760M	175	760
0W175-960M		960
0W175-1200M		1200

(1) 延焼時間の比較

横軸に天井高さ、縦軸に延焼時間を取り、実験結果と解析結果をプロットしたものを図 6-4 に示す。離隔距離 125mm、175mm の条件では、延焼時間の解析結果は天井高さが低くなるに従い、延焼時間が短くなるという傾向を再現できた。しかし、全体的に解析結果は実験結果よりも延焼時間が短くなった。

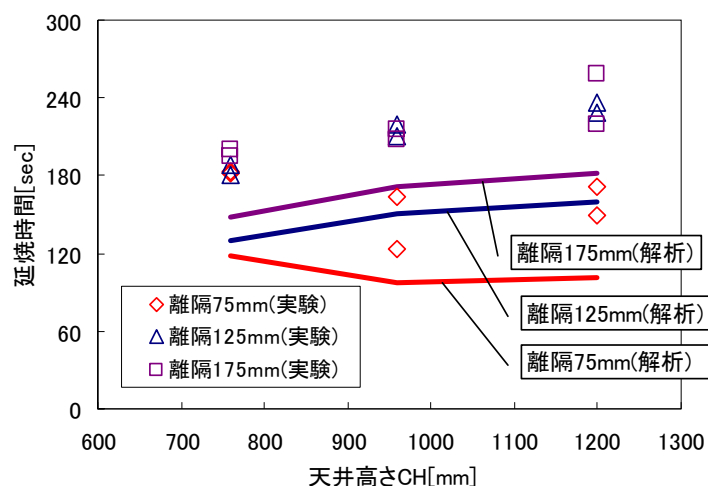


図 6-4 延焼時間の実験結果と解析結果の比較

離隔距離 125mm の条件での受熱ウレタンの鉛直面中心の表面温度の時刻暦の実験結果と解析結果を図 6-5 に示す。いずれの天井高さでも、表面温度の解析結果は、実験結果よりも 1 分程度早く上昇している。これは、解析では加熱側のウレタンの燃え下がりを実験よりも早く生じているためと考えられる。

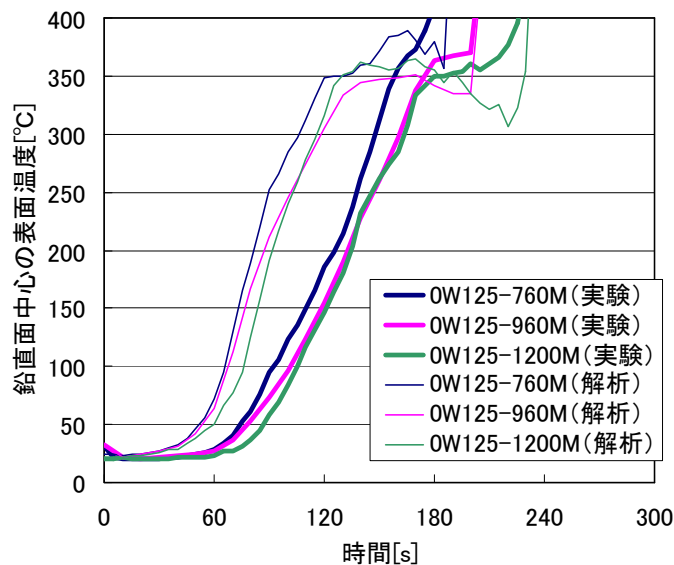


図 6-5 鉛直面中心の表面温度の時刻暦の実験結果かと解析結果の比較

## (2) 受熱側ウレタンの発熱速度の比較

予熱の効果を考慮した場合と考慮しない場合の解析を行い、両者を実験結果と比較し、予熱の効果の影響を検討した。

横軸に、受熱側ウレタンの着火からの経過時間、縦軸に発熱速度をとり、実験結果と解析結果をプロットした結果を図 6-6 に示す。ここで、左は予熱を考慮しなかった場合、右は予熱を考慮した場合である。図 6-6 左の予熱を考慮しない場合の解析結果は、延焼後の発熱速度の増加は小さく、実験結果との差が大きい。一方で、図 6-6 右の予熱を考慮した解析結果では、天井高さが低いほど、延焼後に発熱速度が急激に増加する傾向を再現できた。ただし、予熱の影響および外部放射の影響が実験よりもやや過剰に出ている。

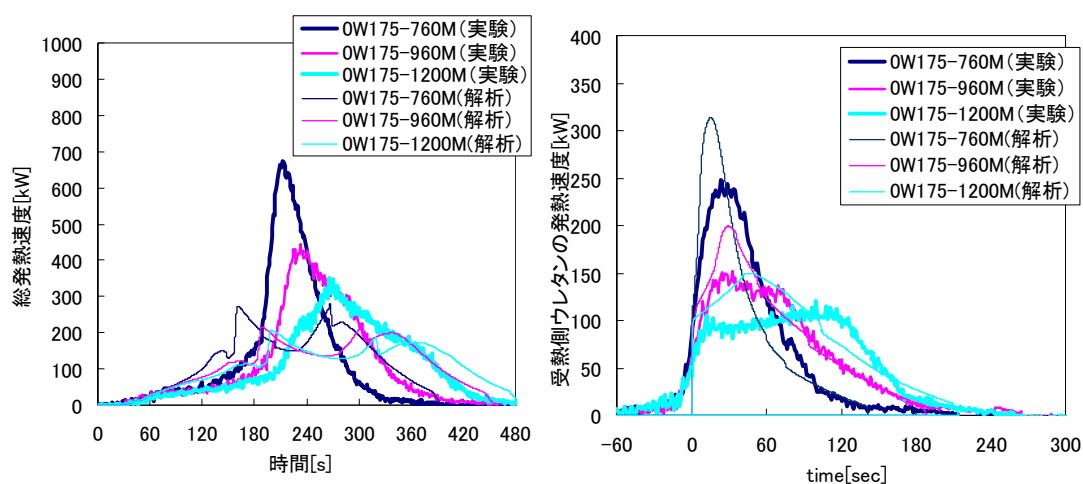


図 6-6 離隔距離 175mm での受熱側ウレタンの発熱速度の実験結果と解析結果の比較

(左：予熱考慮せず、右：予熱考慮)

## (3) 発熱速度

全てのウレタンブロックの発熱速度の合計の実験結果と解析結果（予熱を考慮した場合：左、考慮しない場合：右）を図 6-7 に示す。図 6-6 左の予熱を考慮しない場合の解析結果は、最大発熱速度が実験結果の半分程度であり、延焼後の発熱速度の増加は小さい。一方で、図 6-6 右の予熱を考慮した解析結果では、天井高さが低いほど、延焼後に発熱速度が急激に増加する傾向を再現できた。



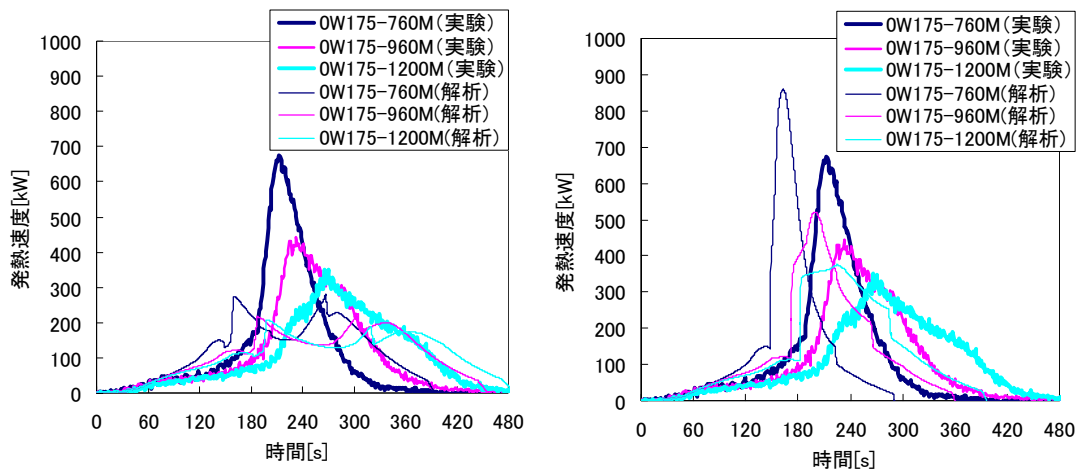


図 6-7 離隔距離 175mm での総発熱速度の実験結果と解析結果の比較

(左：予熱考慮せず、右：予熱考慮)

#### 6. 4. 本章の結論

第6章では、第2章で提案した延焼拡大モデルに、第4章の外部放射の効果と第5章の実験から得られた予熱の効果を加えた固体可燃物間の延焼拡大モデルを提案し、第5章で示した実験と比較した。延焼判定には、接炎と引火の延焼メカニズムの違いを考慮して着火位置を設定する方法を用いた。予熱の効果は、受熱側ウレタンの延焼直前の表面温度の計算結果に応じて、予熱がない場合の火炎伝搬速度から割り増すことで考慮した。

計算の結果、天井が低くなるに従い延焼直後にウレタンブロックの発熱速度が急激に増加する傾向を再現することができた。このことから、延焼前の予熱により延焼後の火炎伝播速度が増加することと、外部放射により単位面積あたりの燃焼速度と燃焼面積の拡大速度が増加することを考慮することで、複数の固体可燃物間の延焼拡大過程を予測することができることを明らかにした。

【本章の参考文献】

- 1) Quintirere, J.: Measurement of Material Flame Spread Properties, Combustion Science and Technology, 1983, Vol.32, pp67-89

【本章で使用した記号】

$D$ :火源径[m]

$T_b$ :ウレタンの融点[K]

$T_0$ :初期温度[K]

$T_{ph}$ :着火直前の表面温度[K]

$v_m$ :火炎伝播速度[m/s]

$v_{m,ph}$ :予熱を考慮した火炎伝播速度[m/s]

$z_f$ :燃焼面高さ[m]

## 第 7 章

### 結論

## 第7章の目次

7. 結論.....	7-1
7. 1. 本研究の結論.....	7-1
7. 2. 今後の課題.....	7-3

## 7. 結論

### 7. 1. 本研究の結論

本研究では、建築空間における初期火災性状予測するために、室と可燃物間の熱のフィードバックを考慮し、単体の可燃物の燃焼から隣接する可燃物への延焼拡大の過程を予測するモデルを提案した。

第2章では、開口を有する室内に、液体燃料のように燃焼中に燃焼面積が変化しない可燃物間が複数設置されていることを想定した延焼拡大モデルを提案した。室内の煙層の温度と高さは、既存の二層ゾーンモデルを基に定式化を行ったが、発熱速度を放射成分と対流成分に分離するとともに、火炎や煙層および壁等の固体表面間の放射熱伝達の計算については、壁等を可燃物と同程度の大きさの要素に分割し、要素間の相互放射熱伝達を考慮した。可燃物の燃焼速度の計算では、煙層や火炎、壁要素から燃焼物表面への放射熱により単位面積あたりの燃焼速度が増加することを考慮した。

模型内に灯油を満たした火皿を複数設置し、一つの火皿に着火後、他の火皿へと延焼させる実験の結果と延焼拡大モデルの計算結果を比較した。たれ壁深さが低くなるに従い、可燃物間の延焼時間や延焼した可燃物の燃焼継続時間が短くなる傾向を、単位面積あたりの燃焼速度が煙層や隣接する火炎、温められた壁等からの放射熱により増加することを考慮することで再現した。

第3章では、自由空間および天井下空間において、床面に入射する熱流束の計算方法を3種類検討し、測定値との比較により予測精度を比較した。

火炎を連続火炎高さまでの円柱と平均火炎高さまでの二つの円柱で近似し、さらに、展炎する場合には連続火炎と間欠火炎の各々について、展炎部分を円盤で近似した。火炎表面からの放射発散度を $\chi$ （発熱速度のうち放射成分の割合）から定め、これらの形態係数を用いて放射熱を計算すると測定値との差は平均で約3割であった。

第4章では、上部に煙層が形成される空間でウレタンブロック単体の燃焼実験を行うとともに、既往の燃焼予測モデルに外部放射を考慮する修正を加えて、実験結果と比較した。

実験では、可燃物として350mm角および600mm×600mm×350mmのウレタンブロックを用い、天井高さは560mm～1200mmおよび天井なしの条件とした。実験の結果、天井高さが低くなるに従い、鉛直面の下方火炎伝搬速度と単位面積あたりの燃焼速度が増加するため、燃焼速度が増加することを明らかにし、両者と鉛直面に入射する外部放射との関係を定量化した。

解析では、既往の自由空間でのウレタンブロックの燃焼速度予測モデルをベースに、実験から得られた外部放射による火炎伝搬速度と単位面積あたりの増加を考慮したモデルを提案した。実験結果と解析結果との比較により、天井高さが低くなるに従い燃焼速度が増

加するという実験の傾向を再現することができた。

第5章では、可燃物上部に煙層が形成される空間において、複数のウレタンブロック間の延焼拡大実験を行い、天井と周壁が延焼時間や発熱速度に与える影響を検討した。

離隔距離が小さい場合には火炎が隣接するウレタンブロックの表面に接炎して延焼し、離隔距離が大きい場合には加熱されるウレタンブロックから発生した可燃ガスに引火して延焼した。接炎で延焼する場合には天井高さの影響が小さく、引火で延焼する場合には天井高さが低いほど延焼時間が短くなった。これは、未着火の可燃物表面に煙層から入射する熱流束が増加するためと考えられる。

延焼後の燃焼性状は、予熱により着火後、急激に燃焼面が拡大するため、自由空間で自由空間で単独に燃焼する場合に比べて発熱速度が著しく増加することを明らかにした。

第6章では、第2章で提案した延焼拡大モデルに、第4章の外部放射の効果と第5章の実験から得られた予熱の効果を加えた固体可燃物間の延焼拡大モデルを提案し、第5章で示した実験と比較した。延焼判定には、接炎と引火の延焼メカニズムの違いを考慮して着火位置を設定する方法を用いた。予熱の効果は、受熱側ウレタンの延焼直前の表面温度の計算結果に応じて、予熱がない場合の火炎伝搬速度から割り増すことで考慮した。

計算の結果、天井が低くなるに従い延焼直後にウレタンブロックの発熱速度が急激に増加する傾向を再現することができた。このことから、延焼前の予熱により延焼後の火炎伝播速度が増加することと、外部放射により単位面積あたりの燃焼速度と燃焼面積の拡大速度が増加することを考慮することで、複数の固体可燃物間の延焼拡大過程を予測することができることを明らかにした。

## 7. 2. 今後の課題

今後の研究課題を、物理モデルの点とモデルの適用限界の点から述べる。

### 7. 2. 1. 物理モデル

物理モデルにおける今後の課題としては、延焼メカニズムの予測と予測制度の向上がある。

延焼メカニズムについては、今回の延焼拡大実験では炎が未着火の可燃物表面に接して延焼する場合と発生した可燃ガスに引火する場合の二つのケースが観察された。いずれの現象をモデル化する場合でも、燃焼する可燃物の火炎の到達範囲と未着火の可燃物表面から発生する可燃ガスの到達範囲の予測が必要である。

予測精度の向上については、本研究では全体的に外部放射や予熱の効果を過剰に評価しているため、発熱速度の計算結果は実験結果よりもやや大きくなっており、さらに精度を向上させる必要がある。

### 7. 2. 2. 適用限界

今回の研究では、可燃物の周囲に壁がない場合についてのみ、解析を行ったが、壁際や隅角部では壁からの放射熱により、壁がない場合よりも発熱速度が増加することが予想される。建築空間においては、可燃物の周囲には壁があることが多いので、壁や隅角部の影響についての検討が必要であると考えられる。

また、本研究で使用した可燃物は灯油とウレタンブロックであり、いずれも炭化層を形成しない可燃物である。建築空間においては木質系の可燃物など炭化する可燃物も多く、このような可燃物への適用可能性については、さらに検討が必要である。

## 本論文に関連した発表論文リスト

### <審査付論文>

- 1) Shintani, Y., Aramaki Y., Harada, K., Kakae N., Tsuchihashi T., Tanaka Y.: The Effects of Building Elements and Smoke Layer on Fire Spread Between Combustible Materials, Proceedings of the Seventh Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 2007 (アブストラクト査読)
- 2) 新谷祐介、原田和典：熱のフィードバックを考慮した延焼拡大モデル、日本建築学会環境系論文集、74(641)、pp.759-766、2009.7

### <シンポジウム論文>

- 1) 新谷祐介、原田和典、銚井修一、小椋大輔：建築空間における初期火災性状予測に関する研究、日本建築学会近畿支部環境工学シンポジウム、2009.11

### <学会発表>

- 1) 新谷祐介、土橋常登、田中義昭、抱憲誓、原田和典：可燃物間の延焼速度に及ぼす建築部材の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.355-356、2004
- 2) 新谷祐介、原田和典、抱憲誓、田中義昭、土橋常登：可燃物間の延焼拡大予測に関する研究（その1 自由空間における延焼拡大）、日本建築学会近畿支部研究報告集、環境系、pp.157-160、2005
- 3) 原田和典、新谷祐介、抱憲誓、田中義昭、土橋常登：可燃物間の延焼拡大予測に関する研究（その2 延焼拡大に与える建築部材の影響）、日本建築学会近畿支部研究報告集、環境系、pp.161-164、2005
- 4) 新谷祐介、原田和典、抱憲誓、田中義昭、土橋常登：可燃物間の延焼拡大予測に関する研究（その1 自由空間における延焼拡大）、日本火災学会研究発表会概要集、pp.510-513、2005
- 5) 原田和典、新谷祐介、抱憲誓、田中義昭、土橋常登：可燃物間の延焼拡大予測に関する研究（その2 延焼拡大に与える建築部材の影響）、日本火災学会研究発表会概要集、pp.514-517、2005
- 6) 新谷祐介、原田和典、抱憲誓、田中義昭、土橋常登：延焼拡大性状予測に関する研究（その1 自由空間での延焼拡大性状）、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.157-158、2005
- 7) 原田和典、新谷祐介、抱憲誓、田中義昭、土橋常登、大宮喜文、北堀純、高橋済：延焼拡大性状予測に関する研究（その2 延焼拡大に与える建築部材の影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.159-160、2005
- 8) 新谷祐介、原田和典：放射熱のフィードバックを考慮した可燃物間の延焼モデル、日本



建築学会大会学術講演梗概集、A-2、pp.235-238、2008

- 9) 出口嘉一、長岡勉、新谷祐介、原田和典：火炎からの放射熱の測定 その1 実験の概要と結果、日本火災学会研究発表会概要集、pp.88-89、2009
- 10) 長岡勉、出口嘉一、新谷祐介、原田和典：火炎からの放射熱の測定 その2 火炎モデルの検討、日本火災学会研究発表会概要集、pp.90-91、2009

## 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々からご指導、ご協力を賜りました。ここに深く館者の意を表します。

京都大学教授・銚井修一博士には、筆者が4回生として研究室に配属された頃からゼミ等を通して貴重なご意見を頂き、また、研究に対する姿勢・考え方まで多くのことを学ばせていただきました。ここに深く感謝の意を表します。

京都大学教授・田中哮義博士には、本論文をまとめるにあたり貴重なご助言を頂くとともに、新たに取り組むべき課題を示唆して頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

京都大学大学院准教授・原田和典博士には、4回生として研究室に配属された頃から修士を修了するまでご指導いただき、また、社会人となってからも、博士課程への進学をすすめていただき、さらに、博士課程でも非常に熱心なご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。

京都大学助教・小椋大輔博士にはゼミや研究室での会話を通じて、多くのことを学ばせていただきました。ここに感謝の意を表します。

京都大学技官・木内隆子氏をはじめとする銚井・原田研究室の皆様とともに楽しい研究生生活を送らせていただきました。特に、土橋常登氏、抱憲誓氏、仁井大策氏、荒巻陽子氏、佃めぐみ氏をはじめとする研究室の先輩・後輩には常に助けられました。本当にありがとうございました。

建築学会の火災荷重・設計火災性状WGの東京理科大学准教授・大宮喜文博士をはじめとする委員の皆様には、研究をすすめる上で火災性状に関する情報提供を頂きました。ここに感謝の意を表します。

本研究は、竹中工務店の研究開発テーマとして実施したものの一部であり、研究テーマを起案し、実施する際には竹中工務店TQM（品質経営）推進室長・上原茂男氏には大変お世話になりました。竹中工務店技術研究所 長岡勉氏には、常に研究の相談にのって頂き、さらに、研究をすすめる上で多大な支援を頂きました。大変感謝しております。竹中工務店技術研究所 大橋宏和氏、西村俊彦博士、井出義人氏、出口嘉一博士には多大な協力を頂きました。心より感謝致します。

なお、本研究の一部は、京都大学と竹中工務店の共同研究「区画火災性状予測に関する研究」として実施した。関係者に謝意を表す。