学位論文

避難路の安全性評価に資する

可搬可燃物の

着火性と火災成長モデルに関する研究

2014年1月

東京理科大学

国際火災科学研究科

長岡 勉 (学籍番号 K112705)

目次	

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
1.2 既往の研究と本研究の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
1.3 論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
第2章 着火性状による可搬可燃物の火災危険評価	13
2.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
2.2 着火の試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
2.3 着火モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	18
2.4 木材の着火時間・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
2.4.1 木材の着火時間モデルの考え方・・・・・・・・・・・・	21
2.4.2 実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
2.4.3 着火時間の予測モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
2.5 木材着火時間に基づく可搬可燃物の評価・・・・・・・・・・	27
2.6 本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
第3章 指数関数による火災成長モデルの提案	32
3.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
3.2 指数関数による火災成長モデルの導出・・・・・・・・・・・	35
3.3 検証実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
3.3.1 実験概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
3.3.2 着火源・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
3.3.3 ウレタンフォームの仕様・・・・・・・・・・・・・・・	41
3.3.4 実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	41
3.4 指数 n の決定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	43
3.5 指数関数による火災成長モデルの火災成長率γ・・・・・・・・・	46
	53
3.7 二次関数による火災成長モデルとの比較・・・・・・・・・・・	54
	55
	57
	57
	58
	50 7/
	/4
3.10 平早のまと② ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	δI

第4章	指数関数による火災成長モデルによる可搬可燃物の避難安全性の評価	83
4. 1	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	84
4. 2	単体可燃物の最大発熱速度・・・・・・・・・・・・・・・・・	84
4.3	複数の可搬可燃物が設置された場合の火災成長モデルの考え方・・	87
4.4	可搬可燃物群が離れて設置された場合の延焼予測・・・・・・・	89
4.5	指数関数による火災成長モデルの適用範囲・・・・・・・・・	92
4.6	指数関数による火災成長モデルを用いた避難安全性の評価方法・・	93
4. 7	避難安全性の評価における初期発熱速度 ${ m Q}_{ m 0}$ の設定方法・・・・・	95
4.8	本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	96
第5章	可搬可燃物の設置に対する避難路の安全性評価のケーススタディ	98
5. 1	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99
5. 2	可搬可燃物の評価方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・	100
5.3	劇場ホワイエを対象としたケーススタディ・・・・・・・・・	102
5.3	3.1 建物モデルと可搬可燃物の種類と配置・・・・・・・・・・	102
5.3	3.2 着火性状の評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	104
5. 3	3.3 延焼予測によるグループ化・・・・・・・・・・・・・・・	104
5. 3	3.4 避難時間と煙降下時間の予測・・・・・・・・・・・・・・	109
5. 3	3.5 避難時間と煙降下時間の比較による避難安全性の評価・・・・	114
5.5	本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	115
第6章	総括・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	117

第1章

序論

1.1 研究の背景と目的

火災は、初期には家具などの可搬可燃物が燃焼し、その周辺の可燃物や内装材に延焼し、 やがてフラッシュオーバーして盛期火災に至るといったシナリオをたどることが多い。特 に避難が行われる段階では、家具等の可搬可燃物の燃焼が中心であり、可搬可燃物が在館 者の避難安全に与える影響は極めて大きい。本論では、建物の避難安全に対する可搬可燃 物の影響について検討する。

ここで建物内の火災避難について考えると、屋外に直接避難できない居室の避難者は居 室から他の室や廊下、階段などを経由して避難する。この時、図 1.1-1 のように、ホテルの ロビー、オフィスの受付、劇場や集会場のホワイエのように居室に付随して前室が設けら れることがある。これらの室は、待ち合わせや、受付、一時的な休憩といった、短時間使 用される用途として利用され、椅子やテーブル、カウンター、装飾といった可搬可燃物が 置かれることが多い。

防災計画の基本として避難動線は出来る限り日常動線に合わせて計画するとよいとされ ている。これは、日常動線は在館者の認知度が高く火災時に真っ先に避難路として選択さ れる可能性が高いためである。先に記述したロビー等は日常動線として使われることが多 く、当然、火災時に避難路としての利用が予想される。一方、これらの室に可搬可燃物が 置かれている場合には、万一、これらが出火し、急激に大きな火災に拡大すると、避難者 は火災の熱や煙で避難路を失い、極めて深刻な人的被害が発生する恐れがある。これを防 止するため、ロビー等の避難路に設置される可搬可燃物の着火性や、可搬可燃物が燃焼し た際に生じる煙により避難安全性に支障をきたさないかを慎重に検討する必要があり、そ のための客観的評価手法が望まれる。

2000年に建築基準法に避難安全検証法¹⁾が規定された。この検証法は、標準的な火源を 想定し、煙等降下時間を算定して、これが避難時間より短いことを、工学的手法を用いて 検証するものであるが、建築基準法は建築物の構造や仕様を規定する法令であり、本論が 扱う可搬可燃物を規制するような仕組みを持っていない。また、消防法は防火対象物やそ こに持ち込まれる物品の維持管理も対象としており、昭和44年に防炎規制が規定され、消 防法第8条の3において不特定多数の人が出入りする施設・建築物で使用されるカーテン・ じゅうたんや劇場の舞台幕等は「防炎物品」とすることが義務付けられた²⁾。しかし、これ は劇場におけるどん帳などの面的に広い物品が対象であり、本論で問題とするような、避 難路に置かれる可搬可燃物は対象としていない。

こういった背景を鑑みると、建物の内装や排煙設備等は厳しく制限されているが、一方 で可搬可燃物は何ら制限されていない。しかし、可搬可燃物の燃焼性状は、内装や排煙設 備と同等以上に火災安全に与える影響が大きい。一般の事務室や会議室といった、可搬可 燃物を管理しきれない室については、統計的な手法により標準火源を想定して建物を規制 する方法が合理的であるが、建物管理者が可搬可燃物を選択・管理することが可能なロビ ー等の避難路に対しては、より合理的に可搬可燃物を管理し、避難安全性を高める方法が 有効であると考えられる。



可搬可燃物を燃焼試験の結果から規制しようという試みとしては、米国カリフォルニア 州の Technical Bulletin 133³⁾が知られている。これは椅子やベッド等の試験であり、実際 の可燃物を燃焼させ、その発熱速度等が一定値を超えないことを確認している。主に公共 施設に適用して、そこに設置される家具の規制に用いられる。しかし、その基準は一律で あり、室の天井高さや容積など用途以外の建物条件を反映した評価にはなっていない。一 方、我国においては前述したように可搬可燃物に対する客観的な評価方法は未だ整備され ていない。 文献⁴⁾によると、火災フェーズは、ごく初期火災、初期火災(局所火災)、盛期火災(全体 火災)の3つに大別される。

この内、盛期火災となった後には室内を経由して避難することはできないので、本論で は、盛期火災を除く、ごく初期火災と初期火災のフェーズを対象とする。

ごく初期火災のフェーズは可燃物が出火する状況を示しており、出火防止が火災安全設計の目標とされている⁴。出火防止対策には、火元となりうる機器故障の防止や、日常の見まわりや啓蒙活動といったソフト面の対策、出火の危険のある可燃物を減らす等があげられる。機器やソフト面の日常対策は別途行うとして、建物の維持管理において根本的な出火防止対策は重要な避難路から出火の危険の高い可搬可燃物を排除することである。建物内に持ち込まれる可搬可燃物の代表的なものは木材である。また、木材は我国において建物や家具に伝統的に使用されてきた材料であり、木材を主な対象として防火対策がなされ、子供のころからの教育により木材に囲まれた中でも安全な生活を送るための習慣を身に着け、それが基盤となり現在の火災安全が成り立っている。こういった視点に立ち、着火性に関しては木材を中心に検討する。

また、これに続く初期火災のフェーズは可燃物の有炎燃焼が拡大する状況を示しており、 避難安全性が火災安全設計の目標とされている 4。このフェーズでは、可搬可燃物の成長の 早さが避難安全性能に大きな影響を与える。避難安全検証法の考え方を用いれば可搬可燃 物の避難安全性に対する影響を評価することができる。避難安全検証法では、火災成長の 早さは火災成長モデルで表され、火災成長モデルを基に室に溜まる煙の性状を予測し、こ れと避難性状を比較して避難安全性を確認している。避難安全検証法において火災成長モ デルとして用いられているのは、発熱速度が時間の2乗に比例するとした「二次関数によ る火災成長モデル」である。しかし、この火災成長モデルは出火直後のような小さな領域 から、避難に支障が生じるような大きな領域までの広い範囲の発熱速度を精度良く表現で きないといった問題がある 5。火災成長モデルは煙性状予測の根幹を成すものであり、その 精度は避難安全性の評価に大きな影響を与える。そこで、本論では火災成長モデルの関数 形の見直しを行い、より広い範囲の発熱速度をモデル化できる火災成長モデルを提示する ことを目的として、研究を行う。

図 1.1-2 に本論で取り扱う評価対象空間の避難安全性に対する考え方を示す。本論で取り 扱う対象は可搬可燃物が設置された避難路である。可搬可燃物としては固体可燃物を評価 の対象としており、液体可燃物は適用範囲外である。また、火災成長モデルは煙層が高温 となったり火炎が天井に到達する以前の状態を対象としている。適用範囲内で日常的に触 れる代表的な可燃物である木材より着火しやすい可搬可燃物が避難路に設置されることは、 出火の危険性を高めるため危険であると考える。また、可搬可燃物が燃焼した際に生じる 煙が避難路に溜まると避難できなくなるため危険であると考える。本論では、この両者を 避難安全性を阻害する事柄と考え、適用範囲内でこれらの和集合を除いた領域を避難安全 性が満たされる領域とする。



図 1.1-2 可搬可燃物の置かれた評価対象空間の避難安全性

1.2 既往の研究と本研究の関係

本論では主に可燃物の「着火」と、可搬可燃物の「火災成長」、さらに複数の可搬可燃物 への「延焼」に関する研究を行っているが、これらそれぞれに関する主要な既往研究につ いて以下にまとめる。

可燃物の着火性状に関する主な既往研究は、藤田、長谷見、原田などにより行われている。

藤田 6,7),8),9),10),11),12)は、第二次世界大戦中から戦後にかけて行われた我国の着火に関する 草分け的な研究を行っており、東京大学内にガス炉を用いた放射パネル等を自作し、木造 家屋外壁の下見板張り等への延焼実験を実施した。その結果、木材が着火する際の表面温 度はほぼ一定であることを見出した。

長谷見 ¹³は、放射を受けた可燃物の一次元熱伝導方程式から、放射強度が一定の場合に 可燃物表面が着火温度に至るまでの時間(すなわち、着火時間)を求めると、誤差関数を 含んだ解となるが、建物火災における実用的な範囲において、この解はべき乗関数と四則 演算のみで表される比較的簡易な式に近似できることを見出した。この式(着火時間)は 誤差関数を含んでおらず演算やその後の式展開も容易であるにも関わらず、誤差の範囲が 数%であり、本論においても着火時間に関して「長谷見の近似式」を用いることとした。 本論では、この式を元に特に木材に注目して、その着火時間を求めた。

原田 ¹⁴は、木材の着火性状、燃焼性状、難燃化に関する実験的研究を行っている。特に、 着火については、放射強度が同じであっても木材の密度が異なる場合には着火時間が異な ることを示し、実験結果を放射強度ごとに一次関数と二次関数を用いて回帰した。

本論では、木材の着火時間の予測式を求める。すでに、原田 140により、木材の密度と着 火時間の間に相関があることは示されているが、実験結果を回帰したのみであり、異なる 放射加熱を同時に説明できる予測式を導出するには至っていない。一方で、長谷見 130によ り、熱伝導方程式から一般的な可燃物の着火時間予測式が求められた。本論では、この式 を基に木材の密度と放射強度と着火時間の関係を求める。原田 140との違いは、実験を回帰 する過程において、単なる回帰でなく、基本式を基にしてその係数を求め、その結果、放 射強度と木材の密度と着火時間の3つの物理量の関係を示している点にある。

可搬可燃物の火災成長モデルに関する主な既往研究は、Heskestad、高橋、名取、八重樫 ら、Friedman らにより行われた。また、可搬可燃物の代表的な試験法に California Technical Bulletin 133 に採用された方法がある。

文献^{15),16)}によると、1970年代に Hedkestad が可燃物の燃焼速度等の時間変化を近似する数式モデル(火災成長モデル)として、一次関数、二次関数、三次関数を提案した。後に、 固体の一般的可燃物の火災成長モデルとして二次関数モデル **Q**=αt² が使われるようにな った。

高橋¹77は、二次関数による火災成長モデル **Q**=αt²に関して、室内に置かれた可燃物の単 位床面積当たりの燃焼発熱量と火災成長率αの関係を提案した。我国において 2000 年に施 行された避難安全検証法にこの研究成果が採用された。

名取 ¹⁸は、二次関数による火災成長モデル Q=αt²に関して、国内外の可搬可燃物の燃焼 実験に関する 45 件の文献から 274 件の発熱速度のデータを収集し、その火災成長率αを求 めた。

しかし、八重樫ら⁵は、二次関数による火災成長モデル **Q**=αt²に関して、可搬可燃物の 発熱速度を小さな領域から大きな領域まで同じ火災成長率αで表すには無理があり、発熱 速度が小さい領域と大きい領域とで火災成長率を変えるべきだと指摘した。

Friedman¹⁹は、本論第3章で展開する指数関数による火災成長モデルを提案し、避難安 全に対する可燃物の評価方法を提案した。しかし、実際の燃焼発熱速度について実験によ る検証は行っていない。

California Technical Bulletin 133³は、米国カリフォルニア州における、公共施設に設置される家具の規制に関する通知である。この中で、ファニチャーカロリーメータを用いた家具等の燃焼試験方法と、さらに、その許容値として最大発熱速度、総発熱量、煙濃度、一酸化炭素濃度を提示している。

本論では、指数関数による火災成長モデルについて研究を行う。Hekestad、高橋 17、名 取 18)は時間の二次関数による火災成長モデルを提案、研究しており、近年の避難安全検証 法においても二次関数による火災成長モデルが採用されている。しかし、八重樫ら 5は、二 次関数による火災成長モデルの限界を指摘した。また、Fredman¹⁹)は指数関数による火災 成長モデルを提案したが、実験による検証は行っていない。そこで、本研究ではウレタン フォームの燃焼実験を実施して、指数関数による火災成長モデルを検証する。さらに、実 際の可搬可燃物の燃焼発熱速度も指数関数でモデル化できることを示す。特に、本論で取 り扱うような初期の火災成長が問題となる場合には、発熱速度が小さな領域から精度よく 再現できる指数関数を用いる方が望ましいと考えられる。

可燃物の延焼予測に関する主な既往研究は、出口ら、新谷らにより行われている。

出口ら^{20),21)}は、複数の可燃物が配置された場合の延焼予測モデルを作成した。モデルで は、燃焼している可燃物の連続火炎の形状を円柱に近似して、連続火炎から未燃可燃物が 受け取る放射を予測し、放射の2乗の時間積分が一定値となった時点で延焼するとされた。 9個のクリブの延焼実験を4ケース実施してモデルの改良を行い、全体の発熱速度時間変化 に関して実験とシミュレーション結果がおおむね対応した。簡易な方法であるが、可燃物 の分布特性による延焼性状の差異を検討できるなどの利点がある。

新谷ら²²⁾は、複数の可燃物が配置された場合の延焼予測モデルを作成した。モデルでは、 燃焼している可燃物の連続火炎の形状を円柱に近似し、さらに天井に展炎する部分も薄い 円柱に近似し、火炎から未燃可燃物が受け取る放射を求め、さらに加熱された壁・天井か ら受け取る放射を求め、1次元の熱伝導解析により未燃可燃物の表面温度が着火温度になっ た時点で延焼するとされた。垂壁付きの天井を有する模型内に置かれた 5 個のアルコール パンの延焼実験を 5 ケース実施してモデルの検証を行い、実験とシミュレーションは発熱 速度時間変化に関しておおむね一致することを示した。固体可燃物による検証はなされて いないが、壁・天井からの熱のフィードバックを考慮できるなどの利点がある。

本論の指数関数による火災成長モデルは、これらの複数の可燃物の延焼予測モデルにも 適用可能と考える。ただし、本論第5章のケースステディにおいては、検討の内容が理解 しやすいよう簡易な延焼予測方法を用いて、評価の具体例を示す。

1.3 論文の構成

本論は、避難路でありながら可搬可燃物が設置される室における、可搬可燃物の火災安 全に与える影響を評価する手法を示すことを目的としている。

本論は、図 1.3・1 に示すように全体を 6 章で構成する。第 2 章では、コーンカロリー試験 結果を用いて外部加熱を受ける木材の着火時間を明らかにし、さらに木材の着火時間を基 準として可搬可燃物の着火性を判別することを提案し、可搬可燃物の燃焼で生じる煙によ り避難に支障が生じるものは危険な可搬可燃物として排除するための評価法を示す。第 3 章では、可搬可燃物の火災成長モデルは指数関数で表されることを示し、ウレタンフォー ムの燃焼実験や実際の椅子とクリスマスツリーの燃焼実験結果をもとに、モデルが実験結 果を良く再現できることを確認する。第 4 章では、複数の可搬可燃物が置かれる場合の火 災成長モデルの考え方について示した後に、指数関数による火災成長モデルを用いて避難 安全性を評価する方法について述べる。第 5 章では、モデルプランを用いて可搬可燃物が 設置された避難路の避難安全性の評価のケーススタディを行い、評価の具体を示した。第 6 章では、この論文で得られた知見を総括としてまとめる。



図 1.3-1 本論文の構成

以下に、各章の概要を示す。

第1章では、研究の背景と目的を記すとともに、着火性状、火災成長モデル、延焼予測 に関する既往の研究について整理する。

第2章では、可燃物の着火性状を明らかにし、その評価方法を述べる。火災安全対策の 第一は出火防止である。出火は、家具などの可搬可燃物から発生する場合が多いため、着 火性状を評価し、可搬可燃物を規制することは出火防止対策として有効であると考える。 可燃物の着火に関する試験は、すでに多くの方法が提案されている。主要なものでは、消 防法の防炎製品試験、電子デバイスに対するグローワイヤー試験、ISO 5657(JIS A 9521,9523 準拠)着火性試験等がある。ISO5657 着火性試験と類似した試験装置に ISO5660 発熱性試験(コーンカロリー試験)がある。この試験は、我が国では建築基準法に規定される 防火材料等(不燃、準不燃、難燃)に対する発熱性試験に採用されており、装置の普及が 進んでいる。そこで、ISO5660 のコーンカロリー試験装置の使用を前提とする着火性状の 評価を提案する。可燃物の着火は可燃物表面が着火温度に達すると発生すると仮定して着 火モデルを導き、それをもとに木材の着火条件を明らかにする。これを基準として、可搬 可燃物の表面材の着火性状を評価する方法を提案し、日常的に触れる代表的な可燃物であ る木材より着火しやすい可搬可燃物が避難路に設置されることは、出火の危険性を高める ため、これを排除すべく、特に木材の着火性状を明らかにする。

第3章では、可燃物が有炎燃焼する際の火災成長モデルについて述べる。現在、可搬可 燃物の燃焼発熱速度のモデルとして一般的に用いられているのは、発熱速度が時間の二乗 に比例するとした二次関数モデル(Q=α t 2)である。二次関数を用いた火源モデルについて は、八重樫らのは可搬可燃物の発熱速度を小さな領域から大きな領域まで同じ火災成長率で 表すには無理があり、発熱速度が小さい領域と大きい領域とで火災成長率を変えるべきだ と指摘している。そこで本論では、「燃焼により発生した発熱速度 Q のうち、可燃物に戻る熱は まず Q の n 乗に比例し、かつ、その単位時間当たりの増加量(以下、増加率)も発熱速度 Q の n 乗 に比例」「未燃部分での受熱量に対する可燃物の気化の割合が一定」と仮定し、ウレタンフ オーム上面の燃焼実験結果から n=1 を算出して、指数関数による火災成長モデルを導出す る。さらに、ウレタンフォームの燃焼実験データを基に、指数関数モデルと二次関数モデ ルを比較して、指数関数モデルの方が広い範囲の発熱速度において実験結果とよく一致す ることを示す。さらに、実在の可搬可燃物である椅子やクリスマスツリーの燃焼実験の結 果を整理して、指数関数モデルの火災成長率γを求める。

第4章では、指数関数による火災成長モデルを用いた避難安全性評価の方法について述べる。本論の対象は可搬可燃物であり、建物利用者により移動される可能性がある。移動

を制限しない場合には、可搬可燃物間の隔離距離が確保される保証はなく、安全側の評価 として複数の可搬可燃物を一体の可燃物と想定し、その火災成長モデルの設定方法につい て述べる。一方、建物管理者が維持管理により隔離距離を確保できる場合には、その隔離 距離を条件として延焼予測を行い、火災成長モデルを設定する。可搬可燃物の可搬という 特徴を考えると、管理すべき隔離距離と管理しない部分を明確に区別しながら、可搬可燃 物が避難安全性に与える影響を客観的に評価する方法を提案する。

第5章では、可搬可燃物が設置された避難路の避難安全性評価のケーススタディにより、 評価の具体的な方法を示す。ケーススタディの対象は劇場ホワイエとし、2種類の椅子の 配置に関してスタディする。

第6章は、以上の結果をまとめ、本研究の成果を統括する。

文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課他編集:2001 年版 避難安全検証法の解説及び計算例と その解説、海文堂出版、2001.3
- 2) 「防炎物品いりいろパンフレット」、公益財団法人日本防炎協会発行、2012年2月、 http://www.jfra.or.jp/member/pdf/buppin_pamphlet_etc.pdf
- State of California: Flammability Test Procedure for seating Furniture for Use in Public Occupancies, Technical Bulletin 133, 1991.1
- 4) 日本建築学会:建築物の火災荷重および設計火災性状指針(案)、ISBN978-4-8189-2710 -0 C3052、2013.3
- 5) 八重樫 他:家具の火災成長率 a について、日本火災学会研究発表会、C25、2001.5
- 6) 藤田金一郎:輻射熱による杉下見板張り(新材)の着火及び発炎(大型試験)、日本建築学会大会論文集、pp. 301-307、1943.5
- 7) 藤田金一郎:輻射熱による杉板(新材)の着火(小型試験)、日本建築学会大会論文集、 pp. 308-314、1943.5
- 8) 藤田金一郎: 火炎輻射熱延焼に対する安全限界距離、日本建築学会論文集、Vol. 43、 pp. 83-101、1951. 7. 30
- 藤田金一郎:火炎輻射熱標準曲線加熱をうける杉板の温度上昇、日本建築学会論文集、 Vol. 48、pp. 110-120、1954. 3. 30
- 10)藤田金一郎:輻射熱をうける下見板の延焼安全限界、日本建築学会論文集、Vol.49、 pp.143-150、1954.9
- 11)藤田金一郎:輻射熱をうける板壁の延焼安全限界、日本建築学会論文集、Vol. 50、 pp. 124-132、1955. 3. 30
- 12)藤田金一郎 他:下見板貼壁の火炎輻射熱により引火限界について再論、日本建築学 会論文報告集、Vol.88、pp.421、1963.9
- 13)長谷見雄二 吉田正志:可燃材料表面の着火性状予測評価手法、日本建築学会関東支 部研究報告集、1986
- 14) 原田寿郎:木材の燃焼性および耐火性能に関する研究、京都大学学位論文、1997.3
- Morgan J. Hurley, Richard W. Bukowski: Fire Hazard Analysis Techniques, NFPA, Fire Protection Handbook, Section3, Chapter7 pp. 121-134, 2003
- 16) David W. Stroup, David D. Evans: Use of Computer Fire Models for Analyzing Thermal Detector Spacing, Fire Safety Journal, vol. 14, pp. 33-45, 1988
- 17) 高橋済:建築の火災安全性能評価のための火源設定に関する研究、東京理科大学学位 論文、2000.7
- 18) 名取晶子:耐火設計における目標安全水準の分析と表現方法に関する研究、東京理科 大学学位論文、2008.3
- R. Friedman: Quantification of Threat from Rapidly Growing Fire in Terms of Relative Material Properties, Fire and Materials, Vol. 2, No1, pp. 27-33, 1978
- 20) 出口嘉一、辻本誠、河野守:可燃物の分布特性が火災初期発熱性状に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集、Vol.580、pp.9-14、2004.6
- 21) 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、Vol. 594、pp. 1-6、2005.8
- 22) 新谷祐介、原田和典:熱のフィードバック効果を考慮した延焼拡大モデル、日本建築 学会環境系論文集、Vol.641、pp.759-766、2009.7

第2章

着火性状による可搬可燃物の火災危険評価

2.1 はじめに

日々の暮らしの中で接する機会の多い可搬可燃物の着火性状は火災の発生と直結してお り、安全な室環境を維持するには、その着火性を室の特性に見合ったものとすべきである。 特に、不特定多数の人が利用する室においては、一度火災が発生すると多くの人が被害を 受けるため、可搬可燃物の着火性状を制限すべきである。

我国における着火性状に関する工学的な研究は藤田 ^{1),2),3),4),5),6),)により第二次世界大戦中 に始められた。当時は、市街地における延焼防止を目的として木造家屋の板張り外壁の着 火性状が主な研究対象であった。藤田は、瓦斯溶融炉等を用いて輻射パネルを自作し、輻 射パネルから一定距離離れた板張り外壁の着火温度や着火時間を測定した。その結果から、 木材の状態や放射量等によって若干の違いはあるが口火有の着火温度は概ね 200~350℃ (473.15~623.15K)であり、さらに、「木材が引火するのは板表面における噴出可燃ガスの 濃度によると考えられ、それは板表面が 250~260℃(523.15~533.15K)以上になる時であ り、厚さ方向の温度分布を解けばよい」としている。すなわち、木材表面温度が 250~260℃ (523.15~533.15K)になった時点で、着火が発生するとした。}

着火温度が一定であると仮定すると、着火時間を一次元の熱伝導方程式をもとに予測す ることが可能になる。一次元の熱伝導方程式から導いた着火時間の理論式は誤差関数を含 んでいるが、長谷見ら®は建物内で一般的に着火時間が問題となるような領域において誤差 関数を近似して、着火時間の予測式を提案した。長谷見の近似式は四則演算とべき乗の組 み合わせで表されており演算が極めて容易であるが、熱伝導方程式から導いた理論式との 誤差が少ない。

本報でも、長谷見の導出した着火時間予測式を用いるが、特に木材に関してコーンカロ リー試験装置(ISO5660発熱性試験)を用いて着火時間を測定し、その結果を整理して、木材 の密度と放射加熱のみから着火時間を予測できることを見出す。これにより、木材であれ ば試験を行うことなく着火性を把握できるようになる。

一方、可搬可燃物の材料は樹脂など多様である。一般に、出火防止は子供のころからの 教育や生活習慣によって維持されている部分が大きいため、日常我々が触れている材料を 基準として制限をかけることが合理的だと考えられる。我国において、最も伝統的に利用 されてきた可燃物は木材である。そこで本章では、木材を基準にして可搬可燃物の着火性 状を制限することを提案する。

14

2.2 着火の試験方法

着火試験は古くからさまざまな分野で実施されており、その方法も多様である。ここで は、これら試験のうち代表的なものを取り上げ、その特徴を述べる。

日本防炎協会が実施する「防炎製品」試験は、布張りの家具などを対象としている。試 験体により評価基準が異なるが、試験体にバーナーやたばこ等で着火し、残炎時間、残じ ん時間、炭化面積、炭化長さなどを計測している。すなわち「防炎製品」試験は着火性の 試験と誤解されることが多いが、現象としては着火後の燃えにくさ(自消性)の試験であ り、着火を評価する試験ではない。

電子デバイスの分野の「グローワイヤー試験」(JIS C 60695-2-10)では、一定温度に加熱 された電熱線を試験体に押し当て、着火に至る際の電熱線の温度を計測している。「グロー ワイヤー試験」は、着火温度を評価する試験である。

また、「ISO 着火性試験」(ISO5657) はコーン状の電熱パネルで試験体に放射加熱を与え、 炎をロ火として着火時間を計測している。これは着火性の試験であり、放射加熱を変えた 時の着火時間の違いを計測できるといった優れた特徴を持っている。

「コーンカロリーメータ(燃焼発熱性試験)」(ISO5560)は、現在の我国の建築基準法の防 火材料等の認定にかかる性能評価方法の試験方法(不燃、準不燃、難燃)として採用されてい る。「コーンカロリーメータ」では、コーン状の電熱パネルで試験体に放射加熱を与え、電 熱スパークをロ火として着火させ、その後の燃焼発熱速度を酸素消費法により計測してい る。この試験では、着火時間と燃焼熱を計測できる。

着火性能を分析するには、試験体に安定した加熱を加えた状態で着火を確認する必要が ある。特に解析的な手法を取り入れて着火現象を取り扱うためには、一定の加熱を与えら れる試験装置が望ましい。そういった意味で、「コーンカロリーメータ」や「ISO 着火性試 験」は制御性の良い電熱パネルで加熱を行っており、境界条件としての加熱条件が明確で、 物理的な「着火モデル」と関連付けることが容易である。また、「コーンカロリーメータ」 は我国の建築基準法の防火材料等(不燃、準不燃、難燃)の試験に採用され、広く普及してお り、汎用試験方法として適切であると考えられる。そこで、本論では「コーンカロリーメ ータ」での試験を前提とした、着火性状の評価方法を提案することとする。

試験名	防炎製品試験	グローワイヤー	着火性試験	コーンカロリー メータ
規定等	防炎製品認定委 員会の認定基準	JIS C 60695-2-10 (IEC 60695-2-10)	ISO5657	ISO5660
試験概要	試験体を 45° に 設置 バーナーで着火	高温の電熱線を 押し当てる	電熱パネルによ る放射加熱 ロ火は生火	電熱パネルによ る放射加熱 ロ火は電気スパ ーク
計測値	火炎伝播距離	電熱線の温度	着火時間	着火時間
利用分野	消防庁等の指導	電子デバイス	国際標準試験	建築基準法

表 2.2-1 着火試験方法



主要箇所

4 基台 5 おもり

Ⅰ 試験庁保持身	具
----------	---

- 2 運台 3 引きひも
- 7 炎高さ測定用目盛板 8 侵入深さ調節用目盛板

6 ストッパ

- 9 グローワイヤ
 10 試験片から落下する小片用基台開口部

11 グローワイヤ取り付け支柱

12 低摩

13 指定の敷物

図 2.2-1 グローワイヤー試験装置



写真 2.2-1 防炎製品試験装置



写真 2.2-2 コーンカロリーメータ試験装置

2.3 着火モデル

一般的な固体可燃物の着火は、外部からの加熱により可燃物の温度が上昇し、固体有機 物が気化(可燃物の種類によっては溶融後に気化)して可燃ガスとなり、周囲の酸素と混 合し、適切な混合比となった後に、炎や電気スパーク等の点火エネルギーが加えられるこ とにより発生する。これら可燃物、酸素、エネルギーは、着火の三要素と言われている。 この内、建物内での一般的な火災について考えると、酸素は可燃物の周囲に常に存在して おり、また、可燃物の温度を上昇させるには相応の高いエネルギーをもった源が近くにあ る場合が多いと考えられる。したがって、前述の三要素のうち可燃物、すなわち可燃ガス が発生するかどうかが着火を左右する最も重要な要素であると考えられる。

このような考えに基づき、文献 ⁹に示された「材料表面に放射加熱 *q*"。が加えられたこと により、表面温度が着火温度に達すると着火に至る」の仮定に従い、着火の問題を熱伝達 の問題に単純化した。ここで、木材表面において支配的な熱移動は、材料表面への放射加 熱による熱入力、材料表面から周囲への熱放出、材料内部への熱伝導である。放射加熱に よる熱入力は放射熱量を qe"とし、材料表面の放射率 *ε*を掛けて ε·q"で表される。周囲への 熱放出は対流熱伝達と放射の 2 つがあるが、これら 2 つを合わせたものとして熱損失係数 *h*を用いて *h*(*Ts*-*Ta*) と表せると仮定する。平らな材料に均一に放射加熱が与えられた場 合は、材料表面温度はほぼ均一となるため、横方向への熱移動はなく、材料の厚み方向の みの熱伝導となる。そこで、材料の厚み方向への一次元の熱伝導方程式と材料表面での境 界条件から着火時間を求める。



図 2.3-1 着火モデル

(一次元の熱伝導方程式)

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T_{X}(t,x)}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^{2} T_{X}(t,x)}{\partial x^{2}}$$
(受熱面(材料表面)での境界条件)

(2-1)

$$k \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} T_{x}(t, x) \right]_{x=0} = \varepsilon \cdot \dot{q}_{e}^{"}(t) - h \cdot (T_{s}(t) - T_{0})$$
(2-2)

$$T_{s}(t) = T_{x}(t, 0)$$

$$c : 試験体の比熱(kJ/kgK)$$

$$h : 試験体の熱伝導率(kW/m2K)$$

$$k : 試験体の熱伝導率(kW/mK)$$

$$\dot{q}_{e}^{"}(t) : 時間 t における試験体表面への放射加熱(kW/m2)$$

$$T_{x}(t, x) : 時間 t, 厚 > x における試験体の温度(K)$$

$$T_{0} : 雰囲気温度および試験体の初期温度(K)$$

$$t : 時間(s)$$

$$x : 試験体の表面からの距離(m)$$

$$\epsilon : 試験体の放射吸収率(-)$$

ρ :試験体の密度(kg/m³)

式(2-2)を境界条件として式(2-1)の微分方程式を表面温度について解くと、

$$T_{s}(t) = T_{0} + \int_{0}^{t} \varepsilon \cdot \dot{q}_{e}^{"}(s) \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot c \cdot (t - s)}} - \frac{h}{k \cdot \rho \cdot c} \exp\left\{\frac{h^{2} \cdot (t - s)}{k \cdot \rho \cdot c}\right\} \cdot \operatorname{erfc}\left\{\frac{h^{2} \cdot (t - s)}{k \cdot \rho \cdot c}\right\}^{\frac{1}{2}}\right] ds$$

$$(2-3)$$

となる。 $^{\pm 1}$ $\epsilon \cdot \mathbf{q}$ "が一定として積分すると、

$$T_{s}(t) = T_{0} + \frac{\varepsilon \cdot \dot{q}_{e}^{"}}{h} \cdot \left[1 - \exp\left\{\frac{h^{2}}{k \cdot \rho \cdot c} \cdot t\right\} \cdot \operatorname{erfc}\left\{\frac{h^{2}}{k \cdot \rho \cdot c} \cdot t\right\}^{\frac{1}{2}} \right]$$
(2-4)

となる。着火時間を t=t_{ig}、その際の着火温度を T(t_{ig})=T_{ig} として式(2-4)に代入し、簡単な変 形を施すと、

$$\frac{\varepsilon \cdot \dot{q}_{e}''}{h \cdot (T_{ig} - T_{0})} = \frac{1}{1 - \exp\left\{\frac{h^{2}}{k \cdot \rho \cdot c} \cdot t_{ig}\right\} \cdot \operatorname{erfc}\left\{\frac{h^{2}}{k \cdot \rho \cdot c} \cdot t_{ig}\right\}^{\frac{1}{2}}}$$
(2-5)

となる。式(2-5) を、横軸を $\zeta = 1/\sqrt{\frac{h^2}{k \cdot \rho \cdot c} \cdot t_{ig}}$ に、縦軸を($\epsilon \cdot \dot{\mathbf{q}}_e$ ")/{ $\mathbf{h} \cdot (\mathbf{T}_{ig} - \mathbf{T}_0)$ }として図 2.3-2 に図示する。

注 1) 式(2-3)の s は時間を表す変数であり、積分項の中の(t-s)は時刻 s で放射加熱を受けて からの経過時間を意味する。



図 2.3-2 式(2-5) と近似式の関係

式(2-5)は指数関数と相補誤差関数を含んでおり、 t_{ig} について陰の関数形になっているが、 図 2.3-2 に示すように、試験体表面における熱入力と熱損失の比が $\epsilon \cdot q$ "/ $h \cdot (T_{ig} - T_0) \leq 10$ の範囲においてほぼ直線となっている。そこで長谷見ら ⁸は、一次式でこれを近似すること とし、縦軸の切片を1とし、上記の範囲のほぼ中央で交わるように傾きを 1/1.18 とし、式 (2-6)の近似式を得た。

$$\frac{\varepsilon \cdot \dot{q}_{\rm e}^{"}}{h \cdot (T_{\rm ig} - T_0)} = \frac{1}{1.18} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2}{k \cdot \rho \cdot c} \cdot t_{\rm ig}}} + 1$$
(2-6)

図 2.3-2 に式(2-6)の近似式を重ねて表すと、式(2-6)は式(2-5)に比べくが 0 付近で誤 差+8%、くが 10 で誤差-2%であり、実用上問題のない誤差となっている。

式(2-6)を解くと、着火時間 tig は式(2-7)となる。

$$t_{ig} = \left[\frac{\sqrt{k \cdot \rho \cdot c} \cdot (T_{ig} - T_0)}{1.18 \cdot \varepsilon \cdot \left(\dot{q}_{e}'' - \frac{h \cdot (T_{ig} - T_0)}{\varepsilon}\right)}\right]^{2}$$
(2-7)

この式(2-7)は、外部から試験体表面に定常の放射熱量が与えられた場合の着火時間を陽 に示している。

2.4 木材の着火時間

2.4.1 木材の着火時間モデルの考え方

木材の着火時間の予測には、木材の組成や構造、熱的な物性などの多くの物性値が必要 とされるが、これらを全て測定することは容易でない。そこで、本論では、木材の最も代 表的な物性値である密度に着目し、密度から着火時間を予測する方法について実験的な研 究を行う。密度という単一の物性によって木材の着火に関係する全ての物性を代替するこ とは不可能である。しかし、密度は木材の他の各物性に強い関係を持つと同時に、入手し やすい情報であり、それにより着火時間がある程度推定できるのであれば、可搬可燃物の 着火性の把握において有益である。

本節では、「表面温度が着火温度に達すると着火に至る」の仮定に従って導かれた式(2-7) をもとに着火時間予測式の簡易化を図る。文献 ⁹によると、木材の熱伝導率 k と密度の間に 一定の関係があることが報告されている。さらに木材の比熱と着火温度に関しては、樹種 によらず概ね一定であることが報告されている。また、放射吸収率については表面の色や 光沢による影響が大きく、熱損失については表面の粗さの影響が大きいとされているが、 木材であれば基本的な成分や構成は同じであり、色や光沢、表面の粗さに着火時間を左右 するような大きな差はないと仮定して支障ないと考えられる。このような仮定を行うと、 式(2-7)の中で木材の種類により異なるパラメータは密度だけであるといえる。したがって、 7種の無垢木材を用いてコーンカロリーメータ試験を実施して、その実験結果から回帰直線 を求めて式(2-7)の定数を定め、一定の放射加熱を受ける密度 ρ の木材の着火時間予測式を 求める。さらに、既往文献 ¹⁰⁰の実験結果を用いて、予測式を検証する。

2.4.2 実験

2.4.2.1 試験体

表 2.4-1 のように、試験体の樹種は無垢木材 7 種、塗装木材 1 種の計 8 種とする。樹種は 国産・外国産、広葉樹・針葉樹を取り混ぜて構成する。G(スギ)は板目で、それ以外は柾目 とする。密度が最小なものはG(スギ)で 362kg/m³、最大はC(ナラ)で 751kg/m³で約 2 倍の 差がある。塗装木材 H は A と同種の木材に一般に施工されているごく薄いウレタン塗装を 施したものである。各樹種ともそれぞれ 6 体ずつ試験体を作成する。試験体寸法は 100mm ×100mm×厚 25mm で、着火に至るまでの短時間に影響があるのは厚さ数 mm であり、 試験体は熱的に十分に厚いといえる。なお、試験前に試験体を温度 20°C(293.15K)、湿度 50%の養生室において 2 週間以上保管した。文献¹¹⁾によれば、このときの平衡含水率は 9% と推定される。

記	樹種		放射加熱 30kW/m ²		放射加熱 50kW/m ²			亚均	
号			1	2	3	4	(5)	6	19
А	オーク	北米産広葉樹	652	650	646	640	650	640	646
В	セン	国産広葉樹	378	431	422	430	440	420	420
С	ナラ	国産広葉樹	762	748	746	750	750	750	751
D	サクラ	国産広葉樹	666	684	667	680	660	670	671
Е	ベイマツ	北米産針葉樹	616	584	596	590	610	590	598
F	ラワン	南洋産針葉樹	490	505	511	500	510	510	504
G	スギ	国産針葉樹	357	368	355	370	370	350	362
Н	オーク ウレタン塗装	北米産広葉樹	649	647	667	650	660	670	657

表 2.4-1 試験体の種類及び密度

単位:kg/m³

2.4.2.2 コーンカロリーメータ試験方法

ISO5660 のコーンカロリーメータ装置を用いて木材の着火時間を測定する。コーンカロ リーメータとは、試験体を放射により加熱し、着火時間と燃焼発熱速度を測定する装置で ある。図 2.4・1 に表わすように、装置はコーン型電気ヒーターと着火用のスパークプラグ、 試験体ホルダー、フレームなどによって構成されている。コーン型電気ヒーターは下部内 径 160mm、上部内径 80mm で高さ 65mm であり、ヒーター下端から 25mm 離して試験体 を、試験体とヒーターのほぼ中間に着火用のスパークプラグを設置する。あらかじめ試験 体表面への放射加熱が設定値となるようにコーン型電気ヒーターの出力を調整しておき、 試験直前にヒーター下部に遮熱板を挿入し、ホルダーに装着した試験体を所定の位置にセ ットし、試験開始で遮熱板を取り去り、同時に電気スパークを連続発火させる。目視によ り試験体が着火する時間を測定し、酸素消費法により発熱速度を測定する。

本論の実験では、放射加熱は 30kW/m² と 50kW/m²の2水準とし、各3体ずつ実験する。 表 2.4-2に実験で得られた着火時間を表わす。

また、試験体の表面に切り込みを入れ、その切り込みに ϕ 0.1mm の CA 熱電対を先端が 僅かに見える程度に埋め込み、表面温度を測定する。

22



図 2.4-1 コーンカロリーメータの概要

試験体	放射加熱 30kW/m ²			放射加熱 50kW/m ²		
	(1)	2	3	4	5	6
А	127.9	119.6	94.1	26.8	23.1	24.4
В	50.4	61.3	60.4	17.7	16.9	17.8
С	126.6	124.8	107.6	31.6	29.7	30.8
D	123.7	121.7	120.5	31.9	31.9	29.9
Е	111.9	107.4	105.0	25.5	28.7	25.0
F	59.9	62.1	66.6	17.8	16.2	15.8
G	54.3	59.9	61.8	12.6	13.6	9.3
Н	66.3	63.3	64.5	19.8	20.0	18.8

表 2.4-2 コーンカロリーメータにおける着火時間

単位:s

2.4.3 着火時間の予測モデル

2.4.3.1 基本モデル

コーンカロリーメータはコーン型電気ヒーターで試験体を加熱し、試験体表面から発生 する可燃性ガスにスパークプラグで着火している。着火が生じるのは、可燃性ガスと酸素、 エネルギーの3条件が揃った時点であるが、コーンカロリーメータにおいては酸素は雰囲 気に十分に存在し、エネルギーもスパークプラグにより供給されるため、可燃性ガス濃度 が着火範囲となった時点で着火が生じる。可燃性ガスは試験体が一定の温度以上となった 時点で発生する。したがって「表面温度が着火温度に達すると着火に至る」の仮定に従う ことができる。また、一定の放射加熱をコーン型電気ヒーターにより試験体表面に与えて おり、図 2.3-1の着火モデルと同様の熱的条件が満たされており、式(2-7)を用いることが可 能である。したがって、本論では一般的な可燃物の着火時間予測式である式(2-7)を基に、 さらに簡易な木材の着火時間予測式を求める。

2.4.3.2 熱伝導率

文献⁹によると、Kollmann¹²は温度 27℃(300.15K)、含水率 10%、密度 200~800 kg/m³ の多くの樹種の熱伝導率を測定し、熱伝導率(繊維と直行方向)と密度の間に *k*=(0.1953 ρ + 25.5)×10⁻⁶の関係があるとした。本論の試験体の熱伝導率の測定結果を、表 2.4-3 と図 2.4-2 に表す。実線は回帰直線である。本論の測定は、迅速熱伝導率計(昭和電工製)を用いており 誤差が大きい。この結果が密度 600 kg/m³付近の値が回帰直線から大きく離れた測定点の原 因であると考えられる。本報では、誤差はランダムに発生するとして、回帰直線は変化し ないと扱っている。今回測定した熱伝導率も、Kollmannの直線と比較的良く一致する。

試験体	1	2	3	4	5	6
А	0.1340	0.1405	0.1400	0.2045	0.1425	0.1295
В	0.1000	0.1190	0.1220	0.1175	0.1285	0.1035
С	0.1755	0.1755	0.1720	0.1725	0.1745	0.1710
D	0.1375	0.1475	0.0810	0.1385	0.1520	0.1445
Ε	0.1095	0.0845	0.1260	0.1245	0.1235	0.1205
F	0.1070	0.1030	0.1070	0.1110	0.1095	0.1120
G	0.0825	0.0870	0.1310	0.0975	0.0845	0.1295
Н	0.1420	0.2265	0.1450	0.1425	0.1515	0.1520

表 2.4-3 試験体の熱伝導率の計測結果

単位:10⁻³kW/mK



図 2.4-2 木材の密度と熱伝導率の関係

2.4.3.3 着火温度

図 2.4-3 に密度と着火時点の表面温度の関係を表す。一部の実験において熱電対の浮き上がりなどにより着火温度を測定できなかったもの(30kW/m²で 5 例、50kW/m²で 18 例)が

あり、それらは除外する。同じ樹種でも試験体により着火温度に 50K 程度の差が見られる が、着火温度と密度の相関は見られない。



図 2.4-3 木材の密度と着火温度の関係

2.4.3.4 モデルの係数の決定

文献 ^{III}によると木材の比熱 c は樹種・密度による差はほとんどないとされており一定と いえる。また、放射吸収率 ϵ 、表面熱損失率 h も樹種・密度による差はなく一定だと考え られる。さらに上述のように熱伝導率を k=(0.1953 ρ +25.5)×10⁻⁶、着火温度 T_{ig}を一定と 仮定することにより、式(2-7)は定数 A、B を用いて式(2-8)のように単純化できる。

$$t_{ig} = \frac{A}{(\dot{q}_{e}^{"} - B)^{2}} \cdot \rho \cdot (0.1953 \cdot \rho + 25.5) \cdot 10^{-6}$$
(2-8)

この式は、放射加熱 \dot{q}_{e} "が与えられた際の着火時間 t_{ig} と、木材の密度 ρ の関係を表している。









コーンカロリーメータの結果を用いて、式(2-8)のA、Bを求める。本報では、図2.4-4~ 5、のように、横軸を ρ(0.1953 ρ + 25.5)×10⁻⁶、縦軸を着火時間として、放射加熱ごとに試 験結果を整理する。切片を0とした時の回帰直線の傾きから、

$$\frac{A}{(30-B)^2} = 1103.5$$

$$\frac{A}{(50-B)^2} = 274.03$$
(2-9)

の関係が得られ、

が求まる。したがって、着火時間は式(2-11)となる。

$$t_{ig} = 0.436 \cdot \frac{\rho \cdot (0.1953 \cdot \rho + 25.5)}{\left(\dot{q}_{e}^{"} - 10.1\right)^{2}}$$
(2-11)

このとき、B=10.1 は着火限界であり、一般的に言われている木材の着火限界の放射加熱 10kW/m²と良く一致する。

2.4.3.5 検証

図 2.4-6 に、横軸に式(2-11)から求めた着火時間、縦軸に実験の着火時間をとり、各試験 体の値をプロットする。式(2-11)は比較的良い精度で予測可能であるといえる。

さらに、吉田¹⁰らの試験データ(オーク、密度 800kg/m³、放射加熱 30,40,50kW/m²)を図 2.4-6 にプロットすると、非常に良い一致を表す。これらの試験データは、予測式を求める 際に使われていないが、ほぼ正確に着火時間を予測しており、式(2-11)は放射加熱が 30~ 50 kW/m⁰の範囲において無垢の木材の着火時間を正確に予測できることを示している。さ らにその後、菊池¹³により密度 330~820kg/m³の 227 個の試験体により、放射加熱 20、 30、40kW/m²において、式(2-11)の確認実験がなされており、放射加熱 20kW/m²では、含水 率の影響を強く受けるため式(2-11)から大きく外れるが、30、40kW/m²では式(2-11)で着火 時間の推定が可能であると報告されている。



2.4.3.6 塗装の影響

図 2.4-6 において、Hがウレタン塗装を施した試験体である。コーンカロリーメータの着 火時間は計算から求めた予測値より明らかに短く、塗装木材に対して本論の予測式をその まま適用することは難しいといえる。ウレタン塗装剤は着火時間を早める結果となったが、 不燃性の塗装剤などを用いた場合には着火時間が遅くなることも考えられるため、今後さ らに詳しい研究が必要である。

2.5 木材着火時間に基づく可搬可燃物の評価

我国の出火率はここ 20 年間 1 万人当たり 2~3 件/年で推移しているが、調理や暖房の ために建築物の中で日常的に火を利用していることを考えると、出火率が意外に小さいと いえる。これは、人は本能的に火事を恐れ、幼少のころより出火防止の教育を受け、さら には自己の経験により出火防止のための行動規範を無意識のうちに身につけているためと 考えられる。言い換えれば、本能や経験により無意識の抑止が働いている。

例えば、床暖房しか使ったことのない人が予備知識なしに薪ストーブを使えば当然の結 果として出火率が急増するだろう。そこまででないにしても、比較的着火性が低い可燃物 に囲まれた環境で日常生活を営む人が、着火性が高い可燃物を利用すると、その危険性を 顕在的に理解していないために出火危険性が高まる。このように、室に持ち込まれる可搬 可燃物は、利用者の生活様式や文化と照らし合わせて日常的に触れている可燃物の着火性 以下(防火上優れる)とすべきである。我国において、日常触れている伝統的な可燃物は 木材であり、木材を基準として評価すれば安全に建物を維持管理できると考えられる。

ここで、着火時間を示す式(2-7)を見ると、もし着火限界 $\mathbf{h}\cdot(\mathbf{T}_{ig}-\mathbf{T}_{0})/\epsilon$ が全ての可燃物で同じならば右辺分母の括弧の中(\mathbf{q}_{e} "- $\mathbf{h}\cdot(\mathbf{T}_{ig}-\mathbf{T}_{0})/\epsilon$)は可燃物の種類とは無関係となり、各

種可燃物の着火時間 t_{ig}の大小は放射加熱 qe"に係わりなく $\sqrt{(\mathbf{k} \cdot \rho \cdot \mathbf{c}) \cdot (\mathbf{T}_{ig} - \mathbf{T}_{0})}$ ε によって 決まる。しかし、2.4.3.4 節で示したように木材の着火限界は約 10kW/m²であるのに対して、 PMMA は 2.25~5.5kW/m²であるとの報告 ¹⁴があり、可燃物の種類により着火限界は異なる と考えられる。そのため、各種の可燃物の着火時間 t_{ig}の大小は放射加熱 qe"により異なる。

着火時間で可搬可燃物の着火性を評価する際の加熱強度 qe"は、対象とする避難路におい て予想される出火源に合わせて選択すれば良いが、着火時間が短い方が人的被害が大きく なる可能性が高いため、防火上の観点から着火時間が短くなる大きな放射強度を選択すべ きである。また、菊池¹³⁾が指摘するように、放射加熱が小さいと含水率などの影響で着火 時間が式(2-11)から外れ試験結果が不安定になるため、放射加熱としては 30kW/m³以上とす べきである。我国の不燃性試験では放射加熱 50kW/m³で試験を行っており、これと同じ放 射加熱とした時の着火時間を用いれば、概ね可搬可燃物の着火危険性を評価できると考え られる。したがって、可搬可燃物の着火時間をコーンカロリーメータにて放射加熱 50kW/ m³で測定して、木材の着火時間と比較して評価することが妥当であると考えられる。

各種木材の密度を表 2.5-1 に示す。さらに、それぞれの密度に対して式(2-11)を用いて放 射加熱 50kW/m²での着火時間を算出し、表 2.5-1 に合わせて示す。これによると、木材の密 度は概ね 350~700 kg/m³であり、それに対応する着火時間は 9~31s である。

	性托	気乾密度*1	着火時間*2
	樹 作里	(kg/m^3)	(\mathbf{s})
纠	スギ、サワラ、カヤ	$350 \sim 400$	9~11
葉	モミ、ハリモミ、ヒノキ	$400 \sim \! 450$	11~14
倁	カラマツ、ツガ	$450 \sim 500$	$14 \sim 17$
広葉樹	キハダ、ホオノキ、サワグルミ	$400 \sim 500$	$11 \sim 17$
	ミズキ カツラ、シオジ、シナノキ、ハンノキ、セン、サクラ類	$500 \sim 600$	$17 \sim 23$
	ブナ、ミズメ、マカンバ、イタヤカエデ	600a.700	990.91
	シデ類、ケヤキ、ミズナラ	600~~700	23~31

表 2.5-1 各種木材の密度 15)

*1:気乾とは概ね湿度15%の空気中で乾燥する条件。 *2:式(2-11)により算出

表 2-5-2 に示すように、着火時間 9s と 31s を基準として可搬可燃物を3種類に分類する。 すなわち、放射加熱 50kW/m における着火時間が 31s より長ければ「A:木材よりも着火し にくい可搬可燃物」であり、9~31s であれば「B:木材と同等に着火する可搬可燃物」、9s 未満であれば「C:木材よりも着火しやすい可搬可燃物」である。不特定多数が利用する建 物では在館者が個別の可搬可燃物の着火性状を把握していないため、日常習慣に従い可搬 可燃物を木材と同等の着火性状として取り扱うことが容易に考えられ、その際に出火の危険が高いCの可搬可燃物は避難路に設置すべきでない。不特定多数が利用する避難路には、少なくとも木材と同等の B 以上の可搬可燃物とすべきである。さらに、病院や高齢者施設などでは避難困難な在館者が多く、一度火災が発生すると重大な災害となる可能性が高いので避難路に設置する可搬可燃物はA が適切である。

A・オオトりま差ルしたくい可拠可燃物	放射加熱 50kW/m ² での着火時間が 31s よ
A・小肉よりも有八しに、いり揃り然初	り長い
	放射加熱 50kW/m ² での着火時間が 9s 以上
B·木材と回寺に有欠9 る円版可燃物	31s以下
C:木材よりも着火しやすい可搬可燃物	放射加熱 50kW/m ² での着火時間が 9s 未満

表 2.5-2 可搬可燃物の着火性状による分類

可搬可燃物に使われる代表的な材料について、コーンカロリーメータを用いて放射強度 50kW/m³の条件で着火時間を測定し、表 2.5-2による分類を行う。1つの材料に対して3体 測定して、3体の平均値で分類している。表 2.5-3にコーンカロリーメータで計測した着火 時間と、本論で提案した方法による着火性の分類を示す。木質材料の内、中密度繊維板と シナ合板は無垢の木材と同等のBとなったが、パーティクルボードはAとなる。その原因 としてはパーティクルボードの接着材の影響が考えられる。樹脂(アクリル板とポリカーボ ネート)もA又はBの分類であり、着火性に関しては木材と同等以上である。一方、発砲材 であるポリスチレンフォームはCであり、着火しやすい材料である。こういった着火しや すい材料は、避難路に設置される可搬可燃物の表面材としては用いるべきでない。

現在我国では、建築基準法の防火材料等(不燃、準不燃、難燃)の試験法にコーンカロリー メータが採用され、装置の普及が進んでいる。この装置で測定した着火時間のデータを用 いれば、可搬可燃物表面に着火しやすい材料が使用されることを防止できる。

29

++ *1	厚さ	密度	着火時間	着火時間	着火性
11 11	(mm)	(kg/m^3)	(s)	の平均(s)	の分類
	9.2	728	27.65		
中密度繊維板	9.2	724	23.59	25.0	В
	9.2	723	23.87		
	15.3	707	33.66		
パーティクルボード	15.3	654	28.25	32.2	А
	15.3	689	34.59		
	9.2	536	14.47		
シナ合板	9.2	548	14.12	14.1	В
	9.2	556	13.71		
	5.0	1393	29.91	30. 3	В
硬質塩化ビニル板	5.0	1384	30.73		
	5.0	1384	30.34		
	5.0	1161	28.86		
アクリル板	5.0	1160	29.30	28.8	В
	5.0	1151	28.33		
	5.0	1174	61.64		
ポリカーボネート板	5.0	1175	62.75	63.8	А
	5.0	1174	67.05		
	25.3	26	2.73		
ポリスチレンフォーム	25.3	26	2.76	2.9	С
	25.3	26	3.31		

表 2.5-3 コーンカロリーメータ(放射加熱 50kW/m)による着火時間と着火性の分類

2.6 本章のまとめ

文献⁸の着火時間の予測式を密度について整理し、さらにコーンカロリーメータの結果から係数を求め、木材の着火時間の予測式を得た。これにより、我々が日常的に使う最も代表的な可燃物である木材の着火時間を密度と放射強度のみから予測することが可能になった。

木材は、日常生活で使われる最も伝統的かつ代表的な材料である。これを基準として着 火性状を制限すれば、建物利用者は直感的に理解しやすく、また建物管理の上でもこれま で通りの管理を行えばよく、利用者や管理者にとって特別な負担なく安全を確保できると 考えられる。

文献

- 藤田金一郎:輻射熱による杉板(新材)の着火および発炎(大型試験)、日本建築学会大 会論文集、pp. 301-307、1943.5
- 2) 藤田金一郎:輻射熱による杉板(新材)の着火(小型試験)、日本建築学会大会論文集、 pp. 308-314、1943.5
- 藤田金一郎、火炎輻射熱延焼に対する安全限界距離、日本建築学会論文集、Vol.43、 pp.83-101、1951.7.30
- 4) 藤田金一郎、火炎輻射熱標準曲線加熱をうける杉板の温度上昇、日本建築学会論文集、
 Vol. 48、pp. 110-120、1954. 3. 30
- 5) 藤田金一郎、輻射熱をうける下見板の延焼安全限界、日本建築学会論文集、Vol.49、 pp.143-150、1954.9
- 6) 藤田金一郎:輻射熱をうける板壁の延焼安全限界、日本建築学会論文集、Vol. 50、
 pp. 124-132、1955.3
- 7) 藤田金一郎 他、下見板貼壁の火炎輻射熱により引火限界について再論、日本建築学 会論文報告集、Vol. 88、pp. 421、1963.9
- 8) 長谷見雄二 吉田正志:可燃材料表面の着火性状予測評価手法、日本建築学会関東支 部研究報告集、1986
- 9) 梶田茂:木材工学、養賢堂、1961
- 10) 吉田正志、他3名:内装防火設計に関する基礎的研究 その1,日本建築学会大会梗概 集,1988
- 11) 北原覚一: 実用木材加工全書別巻 木材物理森北出版, 1966
- 12) Kollmann, F: Technologie des Holzes und Holzes und der Holzwerkstoffe, Berlin, 1951
- 13) 菊池伸一:輻射過熱を受けた木材の着火温度、木材学会誌、Vol. 50、No. 1、pp. 37-42、 2004
- 14) (財)日本国土開発技術研究センター編集:建築物の総合防火設計法 第2巻、日本建築センター,1989
- 15)農林水産省林業試験所監修:改訂3版木材工業ハンドブック、丸善株式会社発行、1982

第3章

指数関数による火災成長モデルの提案

3.1 はじめに

前章では、可搬可燃物の着火に対する評価方法を提案した。本章では、着火後の可燃物の燃 焼発熱速度の成長率について検討する。

在館者は火災を確認すると避難や初期消火などを行う。この間に、可燃物の燃焼発熱速度が 徐々に増加する。避難安全性能設計では、火災時に避難等の行動が火災の成長に対してゆとり を持って行うことができるかが課題となる。具体的には、可燃物の燃焼発熱速度を時間の関数とし てモデル化し、火災の現象(例えば煙降下高さなど)が予め定めた危険な状態となる前に避難行 動が完了できるかを検討する。ここで、燃焼発熱速度の関数の中で成長の度合いを示す係数を火 災成長率と呼び、この火災成長率の大小で可搬可燃物の燃焼拡大の早さを示す。

現在、可搬可燃物の燃焼発熱速度のモデルとして一般的に用いられているのは、時間の二次関数(Q=αt²のように時間の2 乗に比例する関数)である。可搬可燃物の燃焼実験では燃焼拡大期に右肩上がりで下に凸の曲線(加速度的に燃焼発熱速度が増大)となる場合が多いことから、下に凸の曲線の中で最も簡単な関数である二次関数を用いたものと推察される。

文献¹⁾によれば、火災成長モデルとして二次関数を最初に提案したのは Haskestad であり、当初 は一次関数、二次関数、三次関数などが検討されたが、後に、液体燃焼など特殊な場合を除いて 二次関数が最も良いとされた。以降、初期段階の火災に対する代表的な火災成長モデルとして、 二次関数モデル(t-squared growth rate)が採用され、煙性状予測や避難性能設計に用いられるよ うになった。我国においては、建築基準法令に 2000 年に導入された避難安全検証法に二次関数 モデルが採用され、二次関数による火災成長モデルが避難安全性能設計における標準火源とな った。

名取²は、国内外の可搬可燃物の燃焼実験に関する45件の文献から274件の発熱速度のデー タを収集した。これらのうち、特にデータ件数が多い椅子に関して、発熱速度の時刻歴が二次関数 で近似できると仮定した場合の近似曲線の係数(火災成長率α)を求めた。

2000年6月に施行された避難安全検証法の解説³において、燃焼領域が同心円状に半径方向 に一定の速度で拡大する場合に燃焼発熱速度が二次関数でモデル化できると記されている。しか し、火炎伝播の理論において燃焼領域が一定の速度で拡大していく現象は可燃物の未燃領域に 寄与する火炎からの放射熱が火炎高さに無関係に一定である(もしくは無視できる)という稀な条 件でおこりうる現象であり、むしろ火災の拡大に伴い火炎からの放射熱も増加していくと考える方が 自然である。

可搬可燃物の燃焼実験では、10~20kW のバーナーを使って着火し、数百~数千 kW までの燃 焼発熱速度を計測することが一般的であり、実験結果として得られる火災成長率は数十から数千 kW の範囲の燃焼発熱速度を対象としたものである。一方、建物の火災安全性能設計を行う際に、 これを超えた範囲の検討を行なう場合も多い。例えば、避難安全検証の避難開始の検討では出火 直後の極く小さな火災が対象であり、また、大規模な室では数千 kW を超えるような大きな規模の 火災が対象となる。そのため、火災安全性能設計を行う際に、多くの場合で成長率を求めた実験
の範囲を超えて結果を利用することになる。

二次関数を用いた火災成長モデルについては、八重樫ら⁴は可搬可燃物の発熱速度を小さな 領域から大きな領域まで同じ火災成長率で表すには無理があり、発熱速度が小さい領域と大きい 領域とで火災成長率を変えるべきだと指摘しており、このことは経験的に導かれた二次関数モデル は外挿できないことを意味している。本来、実験結果から近似された関数モデルは外挿して適用 すべきではないが、止むを得ず外挿する際には経験的に導いた関数モデルでなく物理モデルか ら導出した関数モデルを用いるべきである。

そこで本論では、自己の火炎からの放射熱が燃焼領域の拡大に寄与するという単純な物理モデルに基づいて火災成長モデルを導出し、可搬可燃物の燃焼実験結果と比較することにより、導入した火災成長モデルの妥当性を検証する。さらに名取²⁰が二次関数モデルの火災成長率を算出した際に用いた可搬可燃物の燃焼実験データを用いて、指数関数モデルによる火災成長率 γ を求め、二次関数モデルと指数関数モデルの違いについて考察する。

3.2指数関数による火災成長モデルの導出

火災における可燃物の燃焼は、一般的に可燃物が熱分解して可燃性ガスを放出し、それに着火 して生じた炎の熱がさらに熱分解を促進して燃焼を継続していく現象である。特に、火災初期のよ うに単体で可燃物が燃焼する状態を考えると、可燃物の熱分解に使われる熱とは自己が燃焼した 際に発生した熱の一部である。

開放的な空間において材料・構造が均質な可燃物が単独で燃焼する場合を想定する。このとき、 発生した熱のうちどの程度が次の燃焼に使われるのかは明らかになっていないが、火炎高さや火 炎から発生するプルーム量など火炎に関する物理量の多くは燃焼発熱速度 Q の n 乗に比例して おり、可燃物に戻る熱も発熱速度 Q の n 乗に比例すると仮定する。さらに、可燃物に戻る熱の単位 時間当たりの増加量は、その系(可燃物に戻る熱)の大きさ自体に比例すると仮定する。また、可燃 物に戻る熱は、可燃物表面における熱伝達、可燃物内部への熱伝導、温度上昇(顕熱)もしくは気 化(潜熱)に使われる。このうち可燃性ガスの発生量は潜熱の量に比例する。安定して火災成長が 行われる状態においては、これらの熱の比率に大きな差があるとは考え難く、可燃物の全表面が 受熱する熱のうち気化に使われる熱の割合は一定であるとすることに無理はないと考えた。すなわ ち、可燃物が単位時間当たりに受ける受熱量(kW)と、可燃物が気化する速度(kg/s)の割合は一定 と仮定する。

以上をまとめると、本論では以下の2点を仮定する(図 3.2-1 参照)。

- 燃焼により発生する発熱速度 Q のうち、可燃物に戻る熱はまず Q の n 乗に比例し、かつ、 その単位時間当たりの増加量(以下、増加率)も発熱速度 Q の n 乗に比例
- 受熱量に対する可燃物の気化速度の割合が一定

このとき、十分に空気が存在する空間では可燃物の燃焼発熱速度は気化速度と比例する ため、燃焼発熱速度の増加率 d $\hat{Q}(t)$ /dt は燃焼発熱速度 $\hat{Q}(t)$ の n 乗に比例し、比例定数を γ とすれば式(3-1)のように表される。

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \gamma \cdot \dot{Q}(t)^n$$

(3-1)

ここで、式(3-1)の指数 n については後述の実験から求めることとする。



図 3.2-1 指数関数による火災成長モデルの仮定

3.3 検証実験

3.3.1 実験概要

前節において、自由空間における固体可燃物の燃焼では式 (3-1)に示すように、燃焼発熱速 度の増加率はその時点での発熱速度 Q のn乗に比例すると仮定する。本論では、n乗に比例する ことを確認し、n乗に比例する場合には具体的にnの値を求めることを第一の目的とし、さらに、着 火源の発熱速度により火災成長率が変わるのかを調べることを第二の目的として、燃焼実験を実 施する。本論の仮定の一つは「受熱量に対する可燃物の気化量の割合が一定」であり、できる限り この仮定に従うために、試験体は材料が均質なウレタンフォームとする。ファニチャーカロリーメー タの集煙フードの下に、ウレタンフォームを設置し、その上面に着火して、燃焼発熱速度を測定す る。また、その際に火源により火災成長率に差異が生じないことを確認するために、3 種類の火源 を用いて計 5 回の実験を実施する。なお、使用したファニチャーカロリーメータの測定限界は 1kW(分析計とデータロガーの感度の下限)から 500kW(排煙ファンの容量の限界)であるが、400kW を超えた時点でフードから少量の煙がもれたため、400kW 以上の範囲では実際の発熱速度より低 い値となった可能性がある。

3.3.2 着火源

着火源は、極く小さな発熱速度の綿球(CASE 1、2)、中程度の発熱速度のブンゼンバーナー (CASE 3)、これらよりも大きな発熱速度で椅子等の燃焼試験(ASTM-E-1599)に使われる椅子試験 用バーナー(CASE 4、5)の3種類とする。

実験は、綿球を着火源として2回、ブンゼンバーナーでは1回、椅子試験用バーナーでは2回、 実施する。

ケース名	着火源	ウレタンフォームの重量(kg)
CASE 1	綿球	4.72
CASE 2	綿球	4.71
CASE 3	ブンゼンバーナー	4.71
CASE 4	椅子試験用バーナー	4.69
CASE 5	椅子試験用バーナー	4.71

表 3.3-1 実験条件とウレタンフォームの重量

1) 綿球

綿球は綿花を直径約10mmの球体に丸めたもので、医療機関で一般的に使われているものである。綿球にメタノールを十分に含浸させ、ラジオペンチでつまみ上げて、10s 間空中に保持して燃

料の滴下が無くなったことを確認してから、綿球を試験体上面中央に置き、その 10s 後にライター で着火する。使用した綿球の詳細を表 3.3-1 に示す。

ŧ.	991	始載の学知
衣	3.371	市切りたり

名称	綿球
販売元	白十字株式会社
形状と直径	約 10mm の球
ち重	0.09g
材質	綿

実験に先立ち、燃料の含浸量を計測した。計測は5回行い、その平均値は 0.90g である。

回数	メタノール(g)
1回目	0.84
2回目	0.90
3回目	0.93
4回目	0.90
5 回目	0.92
 平均	0.90

表 3.3-3 綿球の燃料含浸量*

*綿球自体の重さ(0.09g)を含まず。

メタノールを含浸させた綿球を電子天秤の上で燃焼し、その1分後と2分後、鎮火時の重量を測定する。なお、綿球を置く面の断熱性をできる限りウレタンフォームに近づけるために電子天秤の上皿の上に不燃性のロックウールブランケット(厚約 30mm)を置く。さらに、その上に電子天秤の保護のためにアルミ箔を敷いて、綿球を燃焼させながら重量を測定する。

表 3.3-4 メタノールを含浸した綿球の燃焼時の重量*

時間	重量(g)	備考
メタノール含浸前	0.09	
メタノール含浸後	0.99	
着火1分後	0.34	薄青の炎
着火2分後	0.00	赤色の炎
2分20秒で鎮火	0.00	灰

*綿花自体の重さ(0.09g)を含む。

1分までは薄青色の炎が観察されたが、2分の時点では赤色の炎が観察され綿花が燃焼していたと考えられる。したがって、ウレタンフォームの着火に影響が大きく、メタノールが燃焼したと判断される最初の1分間の重量減少を用いて綿球の燃焼発熱速度を算定した。

一分間の重量減少:0.99g-0.34g=0.65g 綿球の発熱速度:0.65g/1 分×19.8kJ/g=12.87kJ/分=0.2kW



写真 3.3-1 綿球の設置状況

2) ブンゼンバーナー

ブンゼンバーナーを試験体上部中央でバーナーロが試験体上面から 100mm となる高さに上下 逆向きに設置する(写真 3.3-2 参照)。ブンゼンバーナーにマスフローコントローラーを接続し、一般 家庭の燃料用として市販されているプロパンガス(LPG)を流す。なお、事前にブンゼンバーナーの 流量を最大に、空気量をバーナーロから火炎が離れる直前を目安に調整する。マスフローコントロ ーラーは、流量最大で設定しするが、ブンゼンバーナーの許容流量がこれを下回っているため、 ブンゼンバーナーにより流量が決まり、その時のガス流量をマスフローコントローラーの指示計で 確認する。バーナーに着火して約 10s で、試験体上部からバーナーを撤去し、直ちに LPG を停止 する。

表 3.3-5 ブンゼンバーナーの詳細

形式	単管式
管内径	11.5mm(実測)
LPG 流量	2.8L/分(実測)
燃焼発熱速度	4kW
試験体上部での燃焼時間	10s

ブンゼンバーナー:2.8L/分×93.9kJ/L=262.92kJ/分=4kW



写真 3.3-2 ブンゼンバーナーの設置状況

3) 椅子試験用バーナー(ASTM-E-1599)

椅子燃焼試験用の着火バーナーであり、外形13mmの管が250mmの正方形につなぎ合わされ、 その下と側面に φ 0.89mm の穴が開けられており、管に燃料を供給して着火すると、椅子の座面、 背もたれ、肘かけに向かって火炎を噴出する仕組みになっている。このバーナーをウレタンフォー ム上部中央にバーナー下面とウレタンフォーム上面の距離が25mmとなるように設置する。バーナ ーにマスフローコントローラーを接続し、一般家庭の燃焼用として市販されているプロパンガス (LPG)を流す。マスフローコントローラーによりLPG 流量13L/分(燃焼発熱速度20kW 相当)となる ように制御する。試験体への着火が確認できた10s でバーナーを試験体上部から撤去し、直ちに LPG を停止する。

22 0:0 0 TH 1 F W	
参考とした規定	ASTM-E-1599
管内径	11.1mm
LPG 流量	13L/分
燃焼発熱速度	20kW
試験体上部での燃焼時間	約 10s

表 3.3-6 椅子試験用バーナーの詳細

椅子試験用バーナー:13L/分×93.9kJ/L=1220.7kJ/分=20kW



図 3.3-1 椅子試験用バーナー



写真 3.3-3 椅子試験用バーナーの設置状況

3.3.3 ウレタンフォームの仕様

ウレタンフォームの試験体は同一ロットで作成されたものであり、大きさは幅 1m×奥行 1m×厚さ 0.3m とする。各試験体の重量を表 3.3-2(実験条件の表)に示す。

3.2.1節で記したように指数関数モデルの仮定の一つは「燃焼により発生した発熱速度 Qのうち、可燃物に戻る熱はまず Qのn 乗に比例し、かつ、その増加率も発熱速度 Qのn 乗に比例」であるが、直方体の可燃物において上面が燃えている場合と、側面が燃えている場合とでは明らかに未燃部分に戻る熱の割合が変わり、その増加率も変わる。そこで、ファニチャーカロリーメータの測定能力の限界まで上面で燃焼拡大が継続するように、できる限り上面の面積を大きく(1m×1m)した。また、上面の燃焼拡大が継続している間に中央部が燃え尽きることが無いように、十分な厚さ(0.3 m)とする。

3.3.4 実験結果

図 3.3-2 に、全実験の発熱速度を重ねて表す。なお、図 3.3-2 では発熱速度 500kW までを表示 するが、今回の実験では発熱速度が 400kW を超えると煙が集煙フードから漏れるため発熱速度が 実際より低くなる可能性がある。そのため、後の解析では 400kW 以下のデータのみを対象とする。 なお、着火時刻はファニチャーカロリーメータ装置のダクトを通過する煙の温度とガス濃度^{注 1)}の変 化から決定する。しかし、綿球を着火源とした CASE 1、2 では、着火時の煙温度とガス濃度の変化 が分析計の感度を下回っており、これらのデータから着火時刻を決定できない。そのため、写真 3.3-4 に示すように、ビデオ映像から CASE1、2(綿球が着火源)の火炎高さが CASE3(ブンゼンバ ーナーが着火源)における 400kW の時点の火炎高さと同じになる時点を求め、さらにビデオ映像 から着火からその時点までの時間を求め、データにおいて発熱速度が 400kW となる時点からその 時間をさかのぼって着火時点とした。本論のウレタンフォームの火災成長は早く、ビデオから読み 取る着火時刻の誤差は数秒以内と推測される。

注 1) 可燃物の燃焼発熱速度を酸素消費法で測定する場合、ガスサンプリングに要する時間 やガス濃度計の反応の遅れのために、ガス濃度の計測結果に数十 s の時間遅れが生じ る。







_



CASE3の400kW画像 (発熱速度データに より106sが400kWと 判断)



CASE1の着火時点



CASE1の400kW画像 (CASE1の106sの画像 と比較して 137s を 400kW とした)



CASE2 の着火時点





=

CASE2の400kW画像 (CASE1の106sの画像 と比較して 136s を 400kW とした)

写真 3.3-4 ビデオ映像による CASE4、5 の着火時刻の決定方法

3.4 指数 n の決定

上記の実験から式(3-1)の指数 n を求める。 すなわち、式(3-1)の両辺の対数をとると、

$$\ln\left(\frac{d\dot{Q}(t)}{dt}\right) = \ln\gamma + n \cdot \ln\dot{Q}(t)$$
(3-2)

に変形され、横軸を $\ln \dot{\mathbf{Q}}$ 、縦軸を $\ln (\mathrm{d} \dot{\mathbf{Q}}/\mathrm{dt})$ として、その傾きから指数 n を求めることができる。

図 3.4-1 に各実験の \mathbf{Q} と $d\mathbf{Q}/dt$ の関係を両対数軸で表す。このとき、着火直後の燃焼が安定しない部分と、装置から煙がもれた 400kW を超えた部分の発熱速度は除外する。これらのグラフを指数関数で回帰して(図 3.4-1 に示した直線が回帰した結果を示す)、その傾きから指数 n を求め、結果を表 3.4-1 に示す。すべての実験において n=1 であり、n=1 とすることはおおむね妥当であると考えられる。なお、n=1 とすると 3.2 節の 1 つめの仮定は「燃焼により発生した発熱速度 \mathbf{Q} のうち、可燃物に戻る熱はまず \mathbf{Q} に比例し、かつ、その増加率も発熱速度 \mathbf{Q} に比例」になる。

ケース	n
CASE 1	0.955
CASE 2	1.009
CASE 3	1.102
CASE 4	0.910
CASE 5	0.943
平均	0.984

表 3.4-1 ウレタンフォーム燃焼実験における指数nの値



図 3.4-1 $\dot{\mathbf{Q}}$ と $\dot{\mathbf{Q}}/dt$ の関係

式(3-1)に n=1 を代入すると、火災成長の基本式は下記のように表される。

$$\frac{d\dot{Q}(t)}{dt} = \gamma \cdot \dot{Q}(t) \tag{3-3}$$

式(3-3)を積分すると、

$$\ln \dot{Q} = \gamma \cdot t + c \tag{3-4}$$

となる。さらにt = $\mathbf{0}$ (s)のとき、 $\dot{\mathbf{Q}}$ = $\dot{\mathbf{Q}}_0$ (kW)とすると、

$$\dot{Q}(t) = e^{\gamma \cdot t + c} = \dot{Q}_0 \cdot e^{\gamma \cdot t}$$
(3-5)

を得る。式(3-5)は発熱速度の経時変化を示しており、本論では以降、指数関数による火災成長モ デルと呼ぶ。また、 γ を指数関数による火災成長モデルにおける火災成長率、 \hat{Q}_0 を初期発熱速度 と呼ぶ。指数関数による火災成長モデルは、単位時間 Δt で発熱速度が EXP($\gamma \cdot \Delta t$)倍になること を意味している(図 3.4-2 参照)。



式(3-4)において、発熱速度の対数 $\ln \hat{Q}$ は時間 t に対して線形の関係にあり、横軸を t とし縦軸を $\ln \hat{Q}$ としてグラフを書けば、その傾きから定数 γ を求めることが出来る。この時の Y 切片 $\ln \hat{Q}_0$ は初期 の火災の大きさを表す定数となる。ここで、初期発熱速度 \hat{Q}_0 は、可搬可燃物が着火した時点での 発熱速度である。ただし、燃焼実験においては、着火源が燃焼している間は着火源からも試験体 に熱が供給され、また、試験体の表面付近の温度勾配が安定するまでは受熱した熱の多くが試験 体の温度上昇に使われるるため受熱に対する可燃ガス発生の割合が低くなる等が原因で着火直 後は火災成長が乱れるため、 \hat{Q}_0 は着火時点の実際の発熱速度とは一致しない。



3.5 指数関数による火災成長モデルの火災成長率 γ

燃焼実験においてバーナーの影響がなくなり安定して成長が始まる時点を t_1 とし、その際の発熱 速度を $\dot{\mathbf{Q}}_1$ とする。また、ファニチャーカロリーメータから煙が漏れるまえの発熱速度 400kW となる時 間(2s 間隔で計測しており、400kW に近い値となる時間)を t_2 とし、その際の発熱速度を $\dot{\mathbf{Q}}_2$ とする。 それ以外の値を指数関数モデルに代入すると、

$$\begin{array}{c}
\dot{\mathbf{Q}}_1 = \dot{\mathbf{Q}}_0 \cdot \mathbf{e}^{\gamma \cdot \mathbf{t}_1} \\
\dot{\mathbf{Q}}_2 = \dot{\mathbf{Q}}_0 \cdot \mathbf{e}^{\gamma \cdot \mathbf{t}_2}
\end{array}$$
(3-6)
(3-7)

 $\dot{\mathbf{Q}}_2 = \dot{\mathbf{Q}}_0 \cdot \mathbf{e}^{\gamma \cdot \mathbf{t}_2}$ bases interms

$$\gamma = \frac{\ln \dot{Q}_1 - \ln \dot{Q}_2}{t_1 - t_2}$$

$$Q_0 = e^{\frac{t_1 \cdot \ln Q_2 - t_2 \cdot \ln Q_1}{t_1 - t_2}}$$

$$(3-8)$$

$$(3-9)$$

となる。また、同様に二次関数による火災成長モデルの火災成長率 $\alpha \delta$ 、 t_1 での発熱速度 $\hat{\mathbf{Q}}_1$ 、 t_2 での発熱速度 $\hat{\mathbf{Q}}_2$ から求める。

$$\dot{\mathbf{Q}}_{1} = \alpha \cdot (\mathbf{t}_{1} - \mathbf{t}_{0})^{2}$$
(3-10)
$$\dot{\mathbf{Q}}_{2} = \alpha \cdot (\mathbf{t}_{2} - \mathbf{t}_{0})^{2}$$
(3-11)

$$Q_2 = \alpha \cdot (l_2 - l_0) \int dt dt$$

$$\begin{array}{c} \alpha = \left(\frac{\sqrt{\dot{Q}_1} - \sqrt{\dot{Q}_2}}{t_1 - t_2}\right)^2 \\ t_0 = \frac{t_2 \cdot \sqrt{\dot{Q}_1} - t_1 \cdot \sqrt{\dot{Q}_2}}{\sqrt{\dot{Q}_1} - \sqrt{\dot{Q}_2}} \end{array} \right)$$
(3-12)
(3-13)

となる。

指数関数モデルが初期発熱速度 Q₀をパラメータとして持つのと同様に、二次関数モデルは成長 開始時間 t₀をパラメータとしており、いずれのモデルもこれと火災成長率の2つのパラメータにより 曲線を定義している。

表 3.5-1 に各実験の t_1 、 $\hat{\mathbf{Q}}_1$ 、 t_2 、 $\hat{\mathbf{Q}}_2$ 、 γ 、 $\hat{\mathbf{Q}}_0$ 、 α 、 t_0 を、また、図 3.5-1~5 に、各実験結果に合わ せて指数関数モデルと二次関数モデルを示す。

図 3.5-1~5 によると、指数関数による火災成長モデルは実験結果と非常に良く一致する。また、 火災成長率 γ は 0.049 から 0.056s⁻¹とほぼ同じ値になる。一方、初期発熱速度 \mathbf{Q}_0 は、着火源の発 熱速度に概ね比例する傾向が見られる。この時、CASE 2 以外は \mathbf{Q}_0 が着火源の発熱速度より小さ な値となるが、これは前述のように試験体の表面付近の温度勾配が安定するまでは受熱した熱の 多くが試験体の温度上昇に使われるため、その分火災成長が遅れるためだと考えられる。CASE 2 の \mathbf{Q}_0 が着火源の発熱速度より大きくなった原因については不明であるが、CASE 1、2 の綿花を着 火源とした実験では、着火時点を実験後にビデオ記録などを参考にして決めており、初期発熱速 度 \mathbf{Q}_0 に関しては誤差が多く含まれる可能性がある。 ー方、二次関数モデルについては、着火源の発熱速度が大きい CASE 4 と CASE 5 は実験結果 と比較的よく一致しているが、小さい CASE1 と CASE2、CASE 3 は大きく食い違った。これは、 $\hat{\mathbf{Q}}_1$ と $\hat{\mathbf{Q}}_2$ の比が大きいことが原因である。二次関数モデルでは、概ね $\hat{\mathbf{Q}}_1$ と $\hat{\mathbf{Q}}_2$ の比が 10 倍程度なら実験 結果と比較的よく一致するが、それを超えると実験結果と徐々に一致しなくなる。また、同じ実験結 果に対して、 $\hat{\mathbf{Q}}_1$ と $\hat{\mathbf{Q}}_2$ の選び方を変えると火災成長率 α が変わるといった問題がある。また、二次関 数モデルにおける成長開始時間 t₀は、図 3.5-1~5 におけるx切片であり、火災成長モデルとして は火災が発生する時点の意味を持っている。

ケーフタ	実験値			指数関数		二次関数		
(着火源)	t ₁ (s)	$\dot{\mathbf{Q}}_{1}$ (kW)	t ₂ (s)	$\dot{\mathbf{Q}}_2$ (kW)	γ (s ⁻¹)	Q ₀ (kW)	α (kW/s²)	t ₀ (s)
CASE 1 (綿球)	60	4.98	136	391	0.057	0.16	0.053	50.3
CASE 2 (綿球)	60	7.26	136	404	0.053	0.30	0.052	48.2
CASE 3 (ブンゼン)	30	9.5	106	404	0.049	2.2	0.050	16.2
CASE 4 (椅子用)	30	38	76	387	0.050	8.4	0.086	9.0
CASE 5 (椅子用)	30	51	68	400	0.054	10.0	0.115	8.9

表 3.5-1 各実験の火災成長率











図 3.5-3 CESE 3(ブンゼンバーナー)の発熱速度時間変化





(b)縦軸を対数軸で表示図 3.5-4 CESE 4(椅子試験用バーナー)の発熱速度時間変化



(b)縦軸を対数軸で表示図 3.5-5 CESE 5(椅子試験用バーナー)の発熱速度時間変化

3.6 着火源の影響

発熱速度の時間変化が指数関数による火災成長モデルに従うとすると、ある発熱速度 \mathbf{Q}_3 に到達する時間 t_3 は、発熱速度 \mathbf{Q}_0 を式 t=0(s)として(3-5)より、

$$t_3 = \frac{\ln(\frac{Q_3}{\dot{Q}_0})}{\gamma}$$
(3-14)

と表される。着火直後は発熱速度が安定しないため、十分に成長した状態の 400kW を基準とし、 $\gamma \ge \dot{\mathbf{Q}}_0$ は表 3.5-1 に示した各試験体の値を用いて、式(3-14)により各試験体において $\dot{\mathbf{Q}}_3$ =400kW となる時間 t_3 を求め、表 3.6-1 に示す。400kW に達するのが最も遅いのは CASE 1 であり、これを 基準として時間をずらして図 3.6-1 に全実験を重ねて表す。今回の着火源の発熱速度は綿球の 0.2kW から椅子試験用バーナーの 20kW と100 倍の違いがあるが、全ての発熱速度の傾きはほぼ 一致していることが分かる。

ケース名	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
400kW となる時間 t ₃ (s)	137	136	106	77	68
CASE1 との時間差(s)	0	1	31	60	69

表 3.6-1 各実験の時間差

前節の表 3.5-1 示したように、指数関数による火災成長モデルの火災成長率γは 0.049~ 0.056s⁻¹ とほぼ同じ値になる。すなわち、十分に空気が供給される空間において固体可燃物の同 じ面に着火した場合には、指数関数による火災成長モデルの火災成長率γは着火源の発熱速度 の影響を受けないことが確認できる。



図 3.6-1 実験結果の比較(時間補正)

3.7 二次関数による火災成長モデルとの比較

現在の避難安全性能設計で標準的に利用されている二次関数による火災成長モデルと、指数 関数による火災成長モデルは、いずれも下に凸の曲線でありよく似た形を示しているが、これらの 特徴を比較する。

図 3.7-1 に両モデルの概念図を示す。2.3.2 節や文献 ²に示されるように、火災成長モデルの係数は、燃焼実験における安定的に燃焼している範囲から求める。モデル化の範囲を (t_1, \dot{Q}_1) から (t_2, \dot{Q}_2) とすると、式(3-8)~式(3-9)、式(3-12)~式(3-13)を用いて火災成長率 α と γ を算出できる。当然のことながら $(t_1, \dot{Q}_1), (t_2, \dot{Q}_2)$ の 2 点で両モデルの曲線が交わる。

モデル化の対象とした範囲の外を見ると、t₂を超えると指数関数モデルは二次関数モデルと比較して急激に発熱速度が上昇する。また、二次関数モデルは原点を 0kW としているが、指数関数モデルは関数の性質上常に正であり、0s の時点の発熱速度も正の値 Q₀ となるなどの違いがある。



図 3.7-1 指数関数と二次関数の比較

表 3.5-1 に示したように、着火源を変えると、二次関数による火災成長モデルの火災成長率 a は 異なる値となる。これは、モデル化の対象とした範囲が異っている(今回は Q₁の値が大きく異なって いる)ことが原因である。同様に、八重樫ら⁴⁾も「二次関数による火災成長モデルでは、燃焼の前半 と後半で火災成長率 a を変える必要がある」と指摘した。これらは、二次関数による火災成長モデ ルは火災成長率を求める範囲により火災成長率が異なってくる傾向があることを意味している。実 験結果を基に作成されたモデルは適用範囲を明確にすることが原則であるが、特に二次関数によ る火災成長モデルはモデル化の範囲により火災成長率が異なる傾向が強く、適用に際しては注意 を要する。

3.8 既往の実験結果を用いた指数関数による火災成長モデルの検証

南ら⁵や松山ら⁶が行ったマットレス(ウレタンフォームの表面にクロスを掛けたもの)とウレタンフォ ームの燃焼実験結果を用いて、火災成長モデルの検証を行う。南ら⁵の実験 A1~2 では直方体の マットレスに約 20kW の LPG バーナーで着火し、松山ら⁶の実験 A3~4 では二等辺三角形のウレ タンフォームの頂部にライターで着火した。図 3.8-1 に発熱速度を片対数グラフで示す。ここで、A1 ~2 はバーナーを停止した時間を点線で示す。

図 3.8-1 の A1~2 では、バーナーが燃焼している間はバーナーの影響を受けて曲線となるが、 停止後は直線となる。また、A3~4 はライターで着火しており、燃焼初期から直線となる。さらに、い ずれも可燃物の全表面が燃焼し最大発熱速度となるまで一定の傾きで増加する。このことは、均 一な構成の可燃物が燃焼する際に、発熱速度の時間変化が指数関数となることを意味しており、 式(3-5)は火災成長モデルとして妥当であることが確認てきる。なお、図 3.8-1(A4)では、発熱速度 が指数関数に従って 10kW から 400kW に拡大しており、発熱速度が 40 倍程度の範囲であれば指 数関数モデルを適用可能と考えられる。

念のため、図 3.8-2 に縦軸を実軸として A3 と A4 の発熱速度を図示し、さらに 60s の部分を拡大 した。分析計の分解能力の影響で実験データがばらついているが、指数関数モデルは数 kW の小 さな発熱速度まで良く一致している。一方、図 3.8-2(A3)~(A4)および図 3.8-2(A3)~(A4)に二次 関数モデルの曲線をあわせて示す^{注 2)}。指数関数モデルは数kW の小さな発熱速度まで実験結果 と良く一致するが、二次関数モデルは小さな発熱速度まで一致するとはいえない。

ケー ス	試験体寸法(m)	主材	着火	文献
A1	$1 \times 0.5 \times H0.3$	ウレタンフォーム	LPG 着火 20kW,50s	
A2	1×1×H0.3		LPG 着火 20kW,90s	5)
A3 A4	0.6×0.9×H0.16 (二等辺三角形) 模型室内で燃焼		ライターで着火	6)

表 3.8-1 実験条件(ウレタンフォーム)

注 2)文献 %に火災成長率 αの回帰式が明記されており、その値を用いて図示した。







図 3.8-2 ウレタンフォームの燃焼性状(実軸)

3.9 実際の可搬可燃物の火災成長率

一般的に可搬可燃物は複数の材質が組み合わされた複雑な構造と形となっている。そのため、 本論の仮定である「燃焼により発生した発熱速度 Q のうち、可燃物に戻る熱の増加率は発熱速度 Q に比例」と「受熱量に対する可燃物の気化量の割合が一定」が、必ずしも成り立たない。しかし、 可搬可燃物のそれぞれの構成部材での燃焼性状は基本的には上記の仮定に従うものと考えられ、 その集合体である可搬可燃物も全体としては指数関数に従う傾向を示すものと考えられる。そこで、 実際の可搬可燃物の燃焼実験結果を見直し、指数関数モデルに従うのかを確認する。また、合わ せて火災成長率 γ の値を求める。

実際の可搬可燃物の例として、筆者が行った燃焼実験^{7~9)}や、名取²⁾が収集した燃焼実験のデ ータベースを使って、代表的な可搬可燃物である椅子とクリスマスツリーの火災成長率γを求め る。

3.9.1 可燃物の燃焼実験からの火災成長率の導出方法

可燃物の燃焼実験では多くの場合ガスバーナーや着火剤などで強制的に着火し、酸素消費法や重量測定法により燃焼発熱速度の経時変化を計測する。その際の燃焼発熱速度 Q を対数 lnQ に変換し、その模式図を図 3.9-1 に表す。

着火源で可燃物に着火するには、ある程度の時間を要する。この間、可燃物が受け取る熱はバーナーの炎からの熱が主であり可燃物が独自で燃焼する状態と比べて明らかに現象が異なっている。したがって、この間の燃焼発熱速度は本論が扱う火災成長率の対象外とする。

可燃物に着火した後に、着火源を停止すると燃焼は一旦減衰し、しばらくは可燃ガスの発生より も可燃物の温度上昇に熱が使われるため不安定な火災成長となるが、やがて安定した成長を始め る。安定成長期には、可燃物から発する炎の熱が可燃物自体に戻り、その熱により燃焼が安定的 に成長していく。その際の燃焼発熱速度 Qの対数 $\ln Q$ の時間変化を図 3.9-1 のように図示して、 その傾きから火災成長率 γ を求める。燃焼拡大が可燃物の全表面積に至ると最大発熱速度となり、 その後は燃え尽きなどにより減衰していく。

また、指数関数による火災成長モデル(Q=Q₀・e^{γt})では、火災成長率γは時間の逆数の単位を 持ち、成長の速さを表している。また、火災成長率γは、Q₀の値とは無関係に片対数グラフの傾き から求めることができる。すなわち着火源の発熱速度に関係なく火災成長率を求めることができる。

一方、二次関数による火災成長モデル($\mathbf{Q} = \alpha t^2$)では、実験結果から火災成長率を求める際に、 火災成長期間において近似した放物線が原点を通るように時間軸をずらして、その原点を火災成 長時間の原点とする²⁰必要があり、この時間軸のずらし方により火災成長率が異なってくるといった 問題がある。

実際の可燃物は均質でなく複雑な形や構造をしており、燃焼の段階により放射による熱のフィードバックの割合や気化の割合が異なる。例えば椅子では、座面は水平面であり、背は鉛直面であり、

炎からの受熱の割合が異なる。また、木フレームにウレタンフォームを張り付けた椅子ではウレタン フォームが燃焼する段階と木フレームが燃焼する段階では、同じ受熱量を受けた際の可燃ガスの 気化量が異なる。したがって、燃焼する場所や燃焼の主体となる材料により火災成長率は異なっ てくるが、同一の部位と材料が安定して燃焼する段階では lnQ は直線となり、その部分から γ を求 めることができる。言い方を変えれば、燃焼の過程において燃焼する部位(例えば座が燃焼する段 階や、背が燃焼する段階)や材料(例えばウレタンが燃焼する段階や、木フレームが燃焼する段階) が変われば、当然それに応じて火災成長率は変化する。本論は避難安全性能の評価への適用を 前提としており、火災成長モデルとしては安全側の評価(安全率を多く見込んだ)をすべきであり、 安定して燃焼する状態のうち最大の火災成長率を、当該可燃物の火災成長率とすべきである。な お、この際にバーナーなどの着火源が燃焼している間は除外して考える必要がある。



図 3.9-1 単体可燃物の火災成長の模式図

3.9.2 椅子の火災成長率

筆者らが行った燃焼実験^{7~9)}である表3.9-1の椅子について、3.2.2節の導出方法に従い火災成 長率γを求める。なお、文献⁷⁾は建設省総合プロジェクト「防耐火性能評価技術の開発」の検討課 題の一部として実施したものである。

図3.9-2~21に椅子の燃焼発熱速度の時間変化を片対数で示す。着火は、ASTM-E-1599の椅子燃焼試験用のLPGバーナー(試験では発熱速度約 20kW で 80s燃焼)で行っており、バーナーを停止した時間を点線で示す。バーナーが燃焼している間は激しく燃焼するが、停止後は燃焼速度が急激に低下し、しばらく後に火災成長が開始する。

椅子では、ほとんどの試験体で2段階の成長を示す。一つ目は座の燃焼で、二つ目は背の燃焼 である。燃焼面が水平と鉛直の違いがあり、炎から可燃物に戻る熱の割合が異なるため、火災成 長率に差が生じたと考えられる。当然のことながら、鉛直面である背の方が火災成長率が大きい。

火災成長の過程ではいずれの試験体も発熱速度の対数が直線となっており、立体可燃物においても指数関数モデルを適用することが妥当であると考えられる。また、実際の可搬可燃物の構造 は均質ではなく出火した部位により火災成長率が異なるため、避難安全性に対する影響を評価・ 検討する際には安全側の評価として最大の傾きをその可搬可燃物の火災成長率としておくことが 望ましいと考えられる。具体的には、主に背が燃焼する段階での lnQ の傾きを、椅子の火災成長率とする。表 3.9-1 に各試験体の火災成長率 y を合わせて示す。

表 3.9-1 の火災成長率 γ を椅子の種類ごとに見ると、劇場椅子では火災成長率 γ が 0.009~ 0.060s⁻¹、スタジアム椅子では 0.021~0.353 s⁻¹である。 γ が 0.009 s⁻¹と 0.060s⁻¹では火災成長に 6 倍以上の差があり、一方で 60s で進む成長が、他方では 9s で起こることを意味している。 火災成長 率 γ は同じ用途の椅子であってもかなりの違いがあり、避難安全性に重大な影響を与えていると 考えられる。 避難安全上重要な室においては、火災成長率に留意しながら可搬可燃物の設置を 検討すべきである。

初期発熱速度 \mathbf{Q}_0 については、実験ごとに大きくばらついている。表 3.9-1 の初期発熱速度 \mathbf{Q}_0 は背を対象としたものであり、背に着火するまでにかなりの時間を要しており、ほとんどのケースで 初期発熱速度 $\dot{\mathbf{Q}}_0$ は極端に小さな値になった。

また、表 3.9-1 において、T2-1と2、T3-1と2、T4-1と2、T5-1と2、S1-1と2、S2-1と2、CASE1 と2 は同じ試験体を燃焼した。この中で T4-1と2 は 2 倍以上の違いが生じた。文献 ⁷によると、こ の二つは実験再現性が悪く、その原因は「木製の背板が燃え残るか、燃え尽きるかの差であり」、さ らに「どちらが真でどちらが否ということでなく、どちらも起こりうる現象である」と記述されている。実 際の可搬可燃物の燃焼実験では、燃える順番の僅かな違いなどが実験結果に重大な影響を与え る場合がある。指数関数モデルに関わらず、燃焼実験から火災成長モデルを想定する場合には、 可能な限り複数の実験を行い安全側の評価となる値を採用することが望まれる。

				着火源	火災	初期発熱	
	歩工の種類	試験体の	重量	の発熱	成長率	速度	文
	1町」・シノイ里大貝	特徴	(kg)	速度と燃	γ	$\dot{\mathbf{Q}}_{0}$	献
				焼時間	(s^{-1})	(kW)	
T2-1	あたまたフ	布張り	10.5		0.029	0.101	
T2-2	劇场何士	ウレタンフォーム	19.5		0.018	3.915	
T3-1	■ 11-11-1大 フ	布張り	22.10		0.034	0.001	
T3-2	劇场何丁	ウレタンフォーム	33.12		0.017	0.160	
T4-1	■ 11-11-1大 フ	布張り	10 5 -		0.058	0.0005	
T4-2	劇场何丁	ウレタンフォーム	19.5g	20kW,	0.021	1.173	7)
T5-1	■ 11-11-1大 フ	布張り	19.19	80s	0.060	0.092	()
T5-2	劇場何士	ウレタンフォーム	13.12		0.057	2E-7	
S1-1	ッカンジマン 林 フ	高密度	0.00	0.210	6E-16		
S1-2	スタンプム 愉士	ホリエチレン	8.08		0.145	4E-11	
S2-1	スタジアム椅子	高密度	10.00		0.353	6E-55	
S2-1		ホリエチレン	12.28		0.196	2E-15	
CASE 1	空港椅子	合皮張り ウレタンフォーム	0.0	20kW,	0.024	0.003	0)
CASE 2	空港椅子	高密度 PP フレ ーム	8.0 80s	0.022	0.003	8)	
Spec 1	会議椅子	合成繊維張り ウレタンフォーム 樹脂フレーム		20kW, 80s	0.011	16. 827	
Spec 3	劇場椅子	布張り ウレタンフォーム 木フレーム		38kW, 300s	0.009	0.091	
Spec 4	スタシアム椅子	高密度 PE 成 型	—	38kW, 105s	0.021	0.097	
Spec 5	会議椅子 2 脚 (Spec 1 と同じも の 2 脚)	合成繊維張り ウレタンフォーム 樹脂フレーム		20kW, 80s	0.019	6.237	9)
Spec 6	スタジアム椅子2脚 と同じもの2脚 (Spec4)	高密度 PE 成型		38kW, 105s	0.024	0.008	
Spec 7	劇場椅子 2 脚 (Spec 3と違うもの 2 脚連結)	布張り ウレタンフォーム 木フレーム		20kW, 80s	0.010	0.0004	

表 3.9-1 試験体一覧と火災成長率(椅子)



写真 3.9-1 T2 の試験体の外観(劇場椅子)



写真 3.9-2 T3の試験体の外観(劇場椅子)



写真 3.9-3 T4の試験体の外観(劇場椅子)



写真 3.9-4 T5 の試験体の外観(劇場椅子)



写真 3.9-5 S1 の試験体の外観(スタジアム椅子)



写真 3.9-6 S2 の試験体の外観 (スタジアム椅子)



写真 3.9-7 CASE 1と2の試験体の外観(空港椅子)



写真 3.9-8 Spec 1、Spec 5(2脚)の試験体の外観(会議椅子)



写真 4.9-9 Spec 3 の試験体の外観(劇場椅子)



写真 3.9-10 Spec 4(1脚)、Spec 6 の試験体の外観 (スタジアム椅子)



写真 3.9-11 Spec 7 の試験体の外観(劇場椅子)











図 3.9-4 T3-1の発熱速度











図 3.9-7 T4-2の発熱速度



図 3.9-8 T5-1の発熱速度



図 3.9-9 T5-2の発熱速度



図 3.9-10 S1-1 の発熱速度


図 3.9-13 S2-2 の発熱速度



図 3.9-14 Casel の発熱速度



図 3.9-15 Case2 の発熱速度



図 3.9-16 Spec.1 の発熱速度



図 3.9-17 Spec.3 の発熱速度



図 3.9-18 Spec.4 の発熱速度



図 3.9-19 Spec.5 の発熱速度



図 3.9-20 Spec.6 の発熱速度



図 3.9-21 Spec.7 の発熱速度

3.9.3 クリスマスツリーの火災成長率

名取²が収集したクリスマスツリーの燃焼実験のデータベースを利用して、火災成長率γを算出 する。表 3.9-2 にデータベースに掲載されているクリスマスツリー(生木のツリーも含む)の一覧を示 す。No.1~5 および No.13~14 は小区画内で、No.6~12 は自由空間で燃焼した。着火はマッチも しくはアルコールパン(イソプロパノール、80cm³) で、いずれもクリスマスツリーの低い枝に行った。

これらのクリスマスツリーの燃焼では、枝や葉の間を火炎や熱気が上昇するため、ウレ タンフォーム上面の燃焼とは未燃部分への伝熱の状況が異なる。しかし、伝熱の状況に係 らず、燃焼により発生した発熱速度 Q のうち、可燃物に戻る熱の増加率は発熱速度 Q に比例す るのであれば、指数関数による火災成長モデルを適用することが可能であると考えられる。 このことを検証するために、クリスマスツリーの燃焼結果を用いてモデルの検証を行う。

図 3.4-22~35 に燃焼発熱速度の時間変化を片対数で示す。クリスマスツリーの火災成長は早く、 一度着火すると、ほとんどの試験体が一分以内に最大発熱速度に達する。そのため、図 3.9-22~ 35 では時間軸の途中から発熱速度が始まっている。ケースによっては、数秒から数十秒程度の 時間で火災成長が終わっているものがあり、データの時間間隔の関係で値に誤差が含まれ ると考えられる。

図 3.9-22~35 によると、火災が成長する過程ではほとんどケースで発熱速度の対数が直線となっており、クリスマスツリーについても指数関数モデルを適用することが妥当であると考えられる。特に、No.8 は 100kW から 4000kW までの範囲で発熱速度の対数が直線となっており、4000kW であっても指数関数による火災成長モデルを適用できることが確認できた。

表 3.4-2 によると、火災成長率 γ は 0.065~0.551s⁻¹と約 10 倍の開きがある。スタジアム椅子の 0.021~0.353 s⁻¹と比べて若干大きく、さらに、劇場椅子の 0.009~0.06 s⁻¹や空港椅子 0.022~ 0.024 s⁻¹と比べるとかなり大きいことが分かる。火災成長率 γ は火災拡大の速さを示しており、クリ スマスツリーのような可搬可燃物は、一度火がつくと瞬く間に拡大するため、そのことに留意して設置する必要がある。

また、初期発熱速度 \mathbf{Q}_0 については、論文 $^{10)\sim12}$ において着火した時間が明確にされておらず^{注1)}、時間の原点を着火時間とすることができない。そのため、初期発熱速度 $\dot{\mathbf{Q}}_0$ の値が大きくばらつく結果となる。

74

						火災	初期発	
No.	試験体種類	燃焼場所	高さ	直径	重量	成長	熱速度	文
			(m)	(m)	(kg)	率γ	$\dot{\mathbf{Q}}_{0}$	献
						(s^{-1})	(kW)	
1	パイン(乾燥)、中程度の密度	区画内	1.9	1.6	6.0	0.169	1E-5	
2	米松(乾燥)、かなり高密度	区画内	2.2	2.1	12.0	0.085	2E-7	
3	米松(乾燥)、中程度の密度	区画内	2.1	1.4	8.6	0.306	5E-10	10)
4	パイン(乾燥)、中程度の密度	区画内	1.6	1.2	5.3	0.227	2E-8	
5	米松(乾燥)、中程度の密度	区画内	1.3	1.0	3.0	0.551	7E-19	
6	欧州赤松、23℃50%で3週乾燥	自由空間	2.6	1.7	17.2	0.169	1.2321	
7	欧州赤松、23℃50%で3週乾燥	自由空間	2.7	1.3	15.6	0.250	12.139	
8	欧州赤松、23℃50%で3週乾燥	自由空間	2.3	1.7	6.8	0.118	23.549	
9	欧州赤松、23℃50%で3週乾燥	自由空間	2.5	1.2	9.5	0.078	13.29	11)
10	欧州赤松、23℃50%で3週乾燥	自由空間	2.5	1.7	19.1	0.065	62.367	
11	欧州赤松、23℃50%で3週乾燥	自由空間	2.5	1.1	12.7	0.058	11.042	
12	欧州赤松、23℃50%で3週乾燥	自由空間	3.1	1.5	18.1	0.266	0.9412	
13	フィンランド産のごく一般的なクリスマスツ	ルームコーナー	2.4		7.0	0.259	1E-32	
	リー、25℃30%で1週乾燥	試験装置	2.4					12)
14	フィンラント産のごく一般的なクリスマスツ	ルームコーナー	2.4		7.4	0 151	25-7	14)
	リー、25℃30%で1週乾燥	試験装置		4.4		1.4	0.151	3E-7

表 3.9-2 クリスマスツリーの試験体の仕様と火災成長率

-:不明。 23℃=300.15K。











図 3.9-24 クリスマスツリーNo.3 の発熱速度











図 3.9-27 クリスマスツリーNo.6 の発熱速度







図 3.9-29 クリスマスツリーNo.8 の発熱速度



図 3.9-30 クリスマスツリーNo.9 の発熱速度









図 3.9-33 クリスマスツリーNo.12 の発熱速度







図 3.9-35 クリスマスツリーNo.14 の発熱速度

3.10 本章のまとめ

火災初期における可搬可燃物の火災成長モデルとして、現在我国では一般的に二次関数モデルが用いられている。しかし、二次関数モデルは小さな発熱速度から大きな発熱速度までを同じ火 災成長率で表すには無理があることが示されている⁴⁾。

そこで、モデルに物理的な意味を持たせることに配慮し、「燃焼により発生した発熱速度 Q のうち、 可燃物に戻る熱はまず Q に比例し、かつ、その増加率も発熱速度 Q に比例」で、かつ「未燃部分 での受熱量に対する可燃物の気化量の割合が一定」であると仮定し、指数関数による火災成長モ デルを導出した。均質なウレタンフォームを用いた燃焼実験を実施してモデルを検証すると、本論 で実施した実験は単一の可燃物が燃焼するような初期火災フェーズに当たる発熱速度 400kW ま での範囲であったが、指数関数により発熱速度を精度よくモデル化できることが確認できた。指数 関数と二次関数のいずれの火災成長モデルも燃焼実験結果を曲線近似してモデル化しているこ とに変わりないが、指数関数モデルの方が、小さな発熱速度から大きな発熱速度まで広い範囲で 実験結果を再現できることが分かった。具体的には、指数関数による火災成長モデルはウレタンフ オームの発熱速度を10kWから400kWの範囲で良い精度で近似でき、一方、二次関数による火災 成長モデルは 10kW から 400kW の範囲では実験結果との差異が大きく、40kW から 400kW の範 囲なら実験結果を比較的良く近似できた。

さらに、着火源の発熱速度を変えても指数関数モデルの火災成長率 γ は変わらないことを確認 した。このことは、ガスバーナーで着火した燃焼実験の結果を、ライターなどで失火した火災の火 災成長モデルに適用できることを意味しており、避難安全性能設計において大きな意味を持って いる。

均質なウレタンフォームの実験結果と良い一致を示した指数関数による火災成長モデルである が、実際の可搬可燃物はより複雑な構造、材料、形を持っており、これに対しても適用できるかを、 椅子とクリスマスツリーの燃焼実験結果を基に検討した。椅子では、ほとんどの試験体で座と背の2 段階の火災成長を示した。燃焼面が水平と鉛直の違いがあり、炎から可燃物に戻る熱の割合が異 なるため火災成長率の値は異なるが、それぞれの部分で発熱速度の対数が直線となっており、指 数関数による火災成長モデルを適用することが妥当であると考えられる。クリスマスツリーについて も、火災成長する過程ではほとんどケースで発熱速度の対数が直線となっており、指数関数による 火災成長モデルを適用することが妥当であると考えられる。

以上のように、複雑な形状をもつ実際の可搬可燃物の燃焼発熱速度も、指数関数による火災成 長率により良い精度で近似できることが分かった。なお、本論においてウレタンフォームの燃焼実 験により確認した範囲は発熱速度 10kW から 400kW までであり、さらにクリスマスツリーの既往実験 結果によると最大 4000kW まで指数関数による火災成長モデルで近似できることが確認できた。ま た、十分に空気が供給される空間において同仕様の固体可燃物の同じ面に異なる発熱速度の着 火源で着火した場合でも、指数関数モデルの火災成長率 γ は変わらないことを確認した。

文献

- Morgan J. Hurley, and Richard W. Bukowski: Information and Analysis for Fire Protection, Section 3, Chapter 7, pp.3-126-127
- 2) 名取晶子:耐火設計における目標安全水準の分布と表現方法に関する研究、東京理科大学 学位論文、2008.3
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課他編集:2001 年版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説、海文堂出版、2001.3
- 4) 八重樫他:具の火災成長率αについて、日本火災学会研究発表会、C25、2001.5
- 5) 南東君他:大規模木造体育館の火災調査、日本火災学会研究発表会、B14、2002.5
- 6) 松山賢他: 期火災時の煙性状に関する実験的研究、日本火災学会研究発表会、B31、 1999.5
- 水野智之他:椅子の燃焼性状に関する実験的研究、日本火災学会研究発表会、B25、 1998.5
- 8) 長岡勉他:プラスチック系椅子の燃焼性状、日本火災学会研究発表会、A33、2003.5
- 9) 長岡勉他:椅子の燃焼発熱性状、日本建築学会関東支部研究報告、3001、2001.3
- G.Damant and S.Nurbakhsh: Christmas Trees -What Happens When They Ignite ?, Fire and Materials, 18, pp.9-16, 1994
- D.W.Stroup, L.Delauter, J.Lee, and G.Roadarmel: Scotch Pine Christmas Tree Fire Tests, FR 4010, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20849, 1999.12
- 12) A. Ahonen, M. Kokkala, and H. Weckman: Burning Characteristics of Potential Ignition Sources of room fires, Research Report 285, Valtion Teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 1984

第4章

指数関数による火災成長モデルによる

可搬可燃物の避難安全性の評価

4.1 はじめに

前章では可搬可燃物の火災成長率について述べたが、火災成長率が大きくても小さな火 災のまま鎮火してしまえば問題ない。すなわち可搬可燃物が最大発熱速度となったときに、 危険な状態とならず、かつ、隣接する可燃物に延焼しなければ、火災成長率の大小は問題 とならない。具体的には、玄関ホールなどに火災成長率の大きなミニチュアのクリスマス ツリーを置いても、単体であれば火災安全上問題がない。そこで本章では、単体の可搬可 燃物の最大発熱速度について述べ、次に複数の可燃物が配置された場合の延焼について述 べ、その後に指数関数による火災成長モデルを用いた避難安全性の評価方法について述 る。

4.2 単体可燃物の最大発熱速度

名取¹¹は、実際の可燃物の発熱速度を初期成長期、定常燃焼期、減衰期に分けてモデル 化し、定常燃焼期の発熱速度を最大発熱速度 Q_{max} と定義している。

定常燃焼期は単純には全表面が燃焼している状態であり、多くの場合この期間が最大発 熱速度となり、やがて燃え尽きにより減衰していく(図 4-1 左を参照)。一方、薄い板が燃え る場合のように、可燃物の全表面が燃焼する以前に、先に燃焼していた部分が燃え尽きる 場合には、これよりも小さな最大発熱速度となる。この場合には、図 4-1 の右のように定常 燃焼となる部分がなく、火災成長期から直接に減衰期に移行する。



図 4-1 可搬可燃物の燃焼発熱速度モデル

また文献¹⁾では、式(4·1)~式(4·2)のように同種の材料(木質系、プラスチック系)であれば 嵩表面積と最大発熱速度は大きな分散をもつもののほぼ比例の関係にあることが示されて いる。厳密には、単位表面積当たりの発熱速度は燃焼の状況により変化すると考えられる ため差異を考慮すべきであるが、実験経験的には概ね嵩表面積に比例するとしても大きく 外れることはなく、本論においてもそのような考えに立つこととする。

木質系可燃物: $\dot{\mathbf{Q}}_{max} = (148 \pm 90) \, \mathbf{A}_{b}$ (4-1)

プラスチック系可燃物: $\dot{Q}_{max} = (272 \pm 204) A_b$ (4-2)

ここで、Q_{max}:最大発熱速度(kW)、A_b:嵩表面積(m²)

なお、嵩表面積 A_b は、可搬可燃物の寸法を高さH、幅W、奥行きDとした場合に、 直方体の底面を除いた5面の合計面積であり、 $A_b=2(W+D)H+WD$ で算出される値。 ただし、括弧内の数値は(平均値±標準偏差)である¹⁾。

さらに、名取 ¹は各種の椅子の最大発熱速度について整理している。また、海外では John F. Krasny ら ²が 27 種の市販の詰め物椅子の最大発熱速度のデータを整理している。表 4-1 ~2 にその概要を示す。

可搬可燃物の種類	最大発熱速度の 平均値(kW)	最大発熱速度の 標準偏差(kW)	試験体数
1 人用プラスチック椅子(ク ッションあり)	362	82	10
1人用硬質プラスチック系 椅子	594	131	7
1人用木質系椅子	143	100	14
1 人用ソファ	1185	422	14
2~3 人用ソファ	1826	676	25

表 4-1 最大発熱速度 1)

表 4-2 最大発熱速度²⁾

	詰め物椅子のデザイン	詰め物の種類	最大発熱速度(kW)
1	3人掛けソファ	ホ [°] リエステルフォーム	2154
2	3人掛けソファ	CMHR フォーム	1346
3	2人掛けソファ	ホ [°] リエステルフォーム	2285
4	2人掛けソファ	CMHR フォーム	784
5	ソファ	CMHR フォーム	742
6	ソファ	高反発(HR)フォーム	1158
7	ソファ	ホ [°] リエステルフォーム	596
8	1人掛けソファ	ホ [°] リエステルフォーム	1490
9	椅子	CMHR フォーム	552
10	椅子	CMHR フォーム	866
11	椅子	高反発(HR)フォーム	1259
12	椅子	ホ [°] リエステルフォーム	652
13	金属フレーム椅子	CMHR 77-4	829
14	金属フレーム椅子	CMHR フォーム	486
15	金属フレーム椅子	ホ [°] リエステルフォーム	946
16	金属フレーム椅子	ホ [°] リエステルフォーム	778
17	役員用回転椅子	高反発(HR)フォーム	853
18	役員用回転椅子	—	39
19	装飾肘かけ椅子	高反発(HR)フォーム	1119
20	装飾肘かけ椅子	CMHR フォーム	574
21	フォームマットレス	ホ [°] リエステルフォーム	566
22	フォームマットレス	ラテックスフォーム	297
23	スプリングマットレス	ホ [°] リエステルフォーム	330
24	フォームマットレス	CMHR フォーム	29
25	フォームマットレス	浸透性(impregnated)フォーム	16
90	スプリングマットレス	Various fibrous natural	10
20		layers	10

4.3 複数の可搬可燃物が設置された場合の火災成長モデルの考え方

本章の4.1 はじめににおいて、「玄関ホールなどに火災成長率の大きなミニチュアのクリ スマスツリーを置いても、単体であれば火災安全上問題がない」と述べたが、玄関ホール などでは複数の可燃物が近接して置かれることが多い。この場合に、複数の可燃物が同時 に燃焼する可能性があるため、火災安全上の評価を行う際には複数可燃物のグループとし ての燃焼性状を把握する必要がある。

複数の可搬可燃物が置かれる場合、1 つの可搬可燃物から始まった燃焼は、放射や接炎により隣接する可搬可燃物に順次延焼しながら火災成長していく。一方、一般的には可搬可 燃物の燃焼実験は単体で行うことが多く、この実験結果から複数の可搬可燃物の燃焼発熱 速度をモデル化する必要がある。

複数の可搬可燃物が離れて置かれる場合には、隣の可燃物の表面温度が上昇して延焼す るには着火するまでに時間が掛かり、その分の遅れを生じる。着火に要する時間は燃焼し ている可搬可燃物の発熱速度、受熱側の可搬可燃物の表面材の着火性などが影響している が、可搬可燃物を距離を離して設置すれば延焼時間が長く、近づければ短くなることは明 らかである。ここで図4-2に示すように、可搬可燃物は利用者によって移動される可能性 があり、建物の管理者が個々の可搬可燃物の配置を維持管理することは現実的でない。あ る領域で可搬可燃物の移動を許容する条件で、避難安全性を安全側で評価するためには、 移動を想定に入れた可搬可燃物の配置を考慮する必要がある。この時、最も安全側の評価 とは可搬可燃物が接して一体の可搬可燃物として燃焼する状態である。すなわち、図4-2 に示すように、対象となる可搬可燃物が密接して連続して置かれる状態を想定する。

このことを発熱速度で考えると、複数の可搬可燃物が離れて設置される状態を想定する と、図 4-3 の点線のように、延焼に時間を掛けながら火災成長していく。このとき、第3 章で示したように発熱速度が違っても火災成長率γが変わらないことから、延焼を受けた2 つ目以降の可搬可燃物も、全体の発熱速度に対して単体の可搬可燃物と同じ火災成長率γ で火災成長していくと考えられる。したがって、複数の可搬可燃物が密接した状態を想定 し、図 4-3 の実線のように延焼に掛かる時間を無視することにより、安全側の評価とする ことができる。このように考えると、複数の可搬可燃物の火災成長モデルを単体の可搬可 燃物の火災成長モデルと同じように指数関数により表すことが可能になる。

二次関数による火災成長モデルは燃焼の前半と後半で火災成長率 a が異なるとの報告³ があり、このことは実験で得た火災成長率 a を基にしてその測定範囲の外側の発熱速度を 予測できないことを意味している。一方、本論の 3.5 節のウレタンフォームの燃焼実験に おいて指数関数による火災成長モデルは測定範囲 10~400 k W の全域において実験結果と一 致しており、測定範囲の外側の発熱速度を予測することを否定する結果とはなっていない。 したがって、上述のように単体可燃物から得た火災成長モデルをその測定範囲を超えて複 数可燃物に適用する際には、指数関数による火災成長モデルの方が二次関数より適してい ると考えられる。しかし、測定範囲外への適用にあたっては、予測値に誤りが生じる可能 性があることを考慮して、十分に安全率を見込んで適用する必要がある。

実在の可搬可燃物は形や材料が複雑であり、例えば椅子の場合には座と背といった部位 ごとに火災成長率γが異なる。単体の可搬可燃物の火災成長率γは、当該可搬可燃物が最 も早く火災成長する際の値であり、椅子であれば一般的に背の火災成長率である。このと き、延焼に要する時間を無視するということは、火災成長率γが大きい背の部分を連続し て燃焼させる状態を示しており安全側の評価が可能となる。また、この時、最大発熱速度 は可搬可燃物の全表面が燃焼する際の発熱速度とすることで、可搬可燃物の全ての部分を 最も危険な部分に置き換えており、安全側の評価となる。



図 4-2 複数の椅子の火災成長モデルの考え方



図 4-3 延焼した可搬可燃物の火災成長率

4.4 可搬可燃物群が離れて設置された場合の延焼予測

前節では、建物管理者が管理できない可搬可燃物の配置については、安全側の評価を行 うために一体の可燃物とした。一方で、建物の管理者が管理できる配置については、その 配置計画に基づいて可搬可燃物を評価することが合理的である。例えば、ホールやホワイ エのように可搬可燃物が一定以上の距離を確保して置かるような室では、室内に置かれた 全ての可搬可燃物に延焼するわけでなく、一定の範囲の可搬可燃物にのみ延焼すると予想 される。この場合、どの範囲まで延焼が及ぶのかを予測する必要がある。

離れて設置された可燃物間の延焼は放射が主因である。また、接炎や火炎伝播によって 延焼する場合であっても延焼前に受熱側可燃物が放射によって予熱されるため、延焼には 放射の影響が極めて大きい。このとき、一つの可搬可燃物が燃焼している場合よりも、延 焼して他の可搬可燃物が同時に燃焼している場合の方が一般的に放射が強く、次に延焼を 及ぼすことができる可燃物までの距離が長くなる。さらに、2 つが同時に燃焼しているより も 3 つ、3 つよりも 4 つと順次延焼が進むにつれて広範囲に影響を及ぼすことになる。この ように、延焼が起こり得る範囲を順次確認して、延焼が及ぶ範囲を一つのグループとする。



図 4-4 複数可燃物のグループ化の考え方

具体的には、図 4·4 のようにある可搬可燃物の出火を想定し、その燃焼性状を予測し、次 に出火可燃物に比較的近い受熱側の可燃物を選択し延焼するかどうかを予測する。もし延 焼するのであれば、先に燃焼している可燃物と受熱側可燃物を一つのグループと考え、次 にグループとしての燃焼性状を予測し、さらに別の受熱側可燃物への延焼を予測し、順次 グループを拡大していく。もし、いずれの受熱側可燃物に対しても延焼しない状態に至れ ば、そのグループは完成となる。なお、可燃物同士が密接していたり極わずかな距離しか 離れていないなどの理由で延焼することが自明である可搬可燃物を最初から一つの可燃物 として取り扱ってもグループ化に与える影響はない。グループ化のフローを図 4-5 に示す。



この手順を用いると、図 4-6 のように可燃物の配置が同じでも出火する可燃物によりグル ープの組み合わせが異なってくる可能性があるが、その組み合わせの中で最大発熱速度が 最も大きいものが当該室の最大発熱速度である。複数の可燃物が燃焼する場合には、各々 の可燃物の燃焼ピークが発生する時間がずれるため、各々の可燃物の最大発熱速度を単純 に足し合わせた場合よりも小さくなると考えられる。こうした燃焼ピークのずれを考慮す るには非定常解析を行って検討する必要がある。特に、可燃物が均等に一列に配置されて おり、隣接可燃物間の延焼時間が一定となる場合をドミノ火災と呼び⁴、このような場合に は延焼時間と各可燃物の燃焼時間により同時燃焼する何数が決まり、グループの最大 発熱速度は各可燃物の最大発熱速度と同時燃焼する個数の積となる。このような特殊な火 災を取り扱う場合は別として、可搬可燃物が比較的近接して配置されている場合には、全 ての可燃物が同時に燃焼して各々の可燃物のピークが概ね一致していると考えられ、安全 側の評価としてグループの最大発熱速度は各単体可燃物の最大発熱速度の和と想定できる。



図 4-6 出火可燃物によるグループの違い

図 4-5 に示すフローチャートでの延焼予測については、出口ら 5.6や 新谷ら 6により電 算機を用いた予測手法も提案されている。出口らは火炎から直接受熱側可燃物に当たる放 射と煙層からの放射の和の二乗の時間積が許容値に達した時点で延焼が起こるとしており、 簡便に延焼を判定できるといった特徴がある。一方、新谷らは火炎と煙層からの放射に加 えて壁からの放射も考慮し、さらに非定常解析により受熱側可燃物の表面温度を予想し、 延焼を判定しており、比較的精度の高い予測が可能であるが、煙層の質量収支とエネルギ ー収支、壁面や可燃物面での熱収支等を逐次解析する必要があり、延焼を判定するのに煩 雑な計算が必要となる。

また、単体の可搬可燃物の燃焼性状については、ファニチャカロリーメータ等を用いて 燃焼実験により実測する方法が確実であるが、嵩表面積を用いて式(4-1)や(4-2)により最大 発熱速度を予測したり、可燃物の質量と単位発熱速度の積を予想燃焼時間で割って予想し たり、 原田ら⁸⁰のように詳細な熱収支モデルを用いて可燃物の燃焼範囲を逐次解析しなが ら予測するなど、さまざまな手法が提案されている。

既に方法論が確立しているので、高い精度の分析が必要な場合には上述の出口 500や新谷 つらの延焼予測を、また実験施設と試験体を確保できる場合には、ファニチャカロリーメー タを用いて燃焼性状の実測をとることとし、本論では、可搬可燃物の設置計画の際に様々 な配置を簡易に比較検討できることが避難安全計画においては重要であると判断し、延焼 については簡易な放射による予測を用いる。

なお、延焼が生じるために一体のグループとなった範囲については、個々の可搬可燃物 間の距離を維持管理する必要はないが、延焼しないことを条件に別のグループとした場合 にはその隔離距離が可搬可燃物の利用に際する維持管理の対象となる(図 4-2)。

4.5 指数関数による火災成長モデルの適用範囲

第3章において「ある時間 t における燃焼発熱速度の増加率 dQ(t)/dt は、その時点での 燃焼発熱速度 Q(t)に比例する」と仮定した上で指数関数による火災成長モデルを導いてい る。言い換えれば、燃焼によって発生した熱のうち次の燃焼に寄与する熱の割合が常に一 定であることが、この火災成長モデルを適用する際の条件になる。しかし、図 4-7 のよう に火炎が天井に届くと天井面で広がり(以降、展炎という)、放射熱の可燃物へのフィード バックの比率が増大し、火災成長率が大きくなる。したがって、自由空間での燃焼実験を 基にした本論の火災成長モデルの適用限界は連続火炎高さが天井に達しない範囲である。 火災成長モデルの適用に際して、避難完了時点における連続火炎高さが天井高さを超えな いことを確認する必要がある。さらに、最大発熱速度における連続火炎高さが天井高さを 超えないように可搬可燃物を制限れば、より安全な環境が実現できる。

連続火炎高さ(正方形火源の場合)は、

$$L_{f} = 2.3 \cdot \dot{Q}_{tevac}^{2/5} \le ch$$
(4-3)

ここで、

L_f:連続火炎高さ(m)

Qevac: 避難完了時点の発熱速度(kW)

ch:天井高さ(m)

で示され、式(4-3)を Qevac について解くと、

$$\dot{Q}_{evac} \le \left(\frac{ch}{2.3}\right)^{\frac{5}{2}} \tag{4-4}$$

となる。すなわち、避難完了時点の発熱速度が式(4-4)を超えない範囲が本論の適応範囲で ある。



図 4-7 天井に火炎が達した場合の火災成長率の変化

文献®によると、垂壁付きの天井の下でウレタンフォームを燃焼させると、煙温度が

200℃(473.15K)を超えたあたりから最大発熱速度が顕著に増加している。煙温度が200℃(473.15K)を超えると煙からの放射の影響が顕著になり、可搬可燃物自身が発する炎からの 熱で火災成長していくという本論の火災成長モデルの前提が成り立たなくなるため、煙温 度が200℃(473.15K)を超えない範囲が本論の適用範囲である。

発生した可燃ガスが全て燃焼することが前提になっており、室内の酸素濃度が低くなり 換気支配となった場合には、適応範囲外である。

実際の可搬可燃物は可燃材料が燃え尽きることにより発熱速度が減衰するが、本論では 発熱速度の減衰はモデル化していない。このことは安全側の評価となるため適用は可能で あるが、減衰が無い分過剰に安全側の評価となる。また、細長い可搬可燃物において燃焼 の先端部では燃焼範囲が拡大し、延焼の後端部では燃え尽きが生じ、これらが釣り合うと 発熱速度が一定になるというドミノ火災 4 も減衰が主要な現象であり、本論では取り扱うこ とができない。

4.6 指数関数による火災成長モデルを用いた避難安全性の評価方法

火災初期における避難安全性の評価において、火災成長率が大きくても、最大発熱速度 が小さければ避難に支障をきたすことはない。すなわち、避難安全検証¹⁰⁾と同様に考えれ ば、避難を行っている間に煙下端高さが1.8m以下にならないことが条件となる。すなわち、 式(4-5)を満たせばよい。このとき、指数関数による火災成長モデルの発熱速度Q(t)から式 (4-6)により煙発生量 m_{z,Q(t)}を求める。式(4-5)の左辺は当該室の1.8m より高い部分の気積、 右辺第1項は火源が定常に至るまでに当該室に蓄積される煙量、右辺第2項は火源が定常 になってから避難完了までに当該室に蓄積される煙量であり、気積が蓄煙量を上回れば煙 下端高さは1.8m 以上を確保していることになる。

$$\rho_{\rm s} \cdot \int_{1.8}^{\rm ch} A_{\rm H} \cdot d{\rm H} \ge \int_{0}^{\rm t_1} \max\{\dot{m}_{\rm Z,\dot{Q}(t)} \cdot \dot{m}_{\rm e}, 0\} \cdot dt + \int_{\rm t_1}^{\rm t_{evac}} \max\{\dot{m}_{\rm Z,\dot{Q}max} \cdot \dot{m}_{\rm e}, 0\} \cdot dt$$
(4-5)

$$\dot{m}_{Z}(t)_{,\dot{Q}} = C_{m} \cdot \left(\frac{\rho_{\infty}^{2} \cdot g}{Cp \cdot T_{\infty}}\right)^{1/3} \cdot \dot{Q}(t)^{1/3} \cdot (Z + Z_{0})^{5/3}$$
(4-6)

$$\dot{\mathbf{Q}}(\mathbf{t}) = \dot{\mathbf{Q}}_0 \cdot \mathbf{e}^{\gamma \mathbf{t}} \tag{4-7}$$

$$t_1 = \log_{\gamma} \frac{\dot{Q}_{\text{max}}}{Q_0} \tag{4-8}$$

ここで、

me:排煙量(kg/s)

mz,Q(t):発熱速度 Q(t)の際の高さ Z における煙量(kg/s)

- Z:煙下端高さ(m)
- Z₀:仮想点熱源高さ(=1.5√Af;m)
- ch:天井高さ(m)
- A_f:火源面積(m²)
- A_H:高さHにおける水平断面積(m)
- t :時間(s)
- t1:最大発熱速度となる時間(s)
- t_{evac}:避難時間(s)
- Q(t): 発熱速度(kW)
- Q₀:初期発熱速度(kW)
- Qmax:最大発熱速度(kW)
- ρ_∞:周囲空気の密度(kg/m³)
- ρ_s:煙の密度(kg/m³)
- C_m:係数(=0.21)
- C_p: 空気の定圧比熱(=1.0kJ/kg·K)
- T_∞:周囲空気の温度(K)
- γ:火災成長率(s⁻¹)



図 4-8 煙下端高さの算出方法

我国の近年の避難安全性能設計では、煙性状予測において汎用的な非定常2層ゾーンモ デル¹¹⁾が利用されている。このモデルは室内外の空気や煙等の質量収支と熱収支を考慮し ながら逐次計算により煙下端高さを予測する。このモデルを用いて、煙下端高さが1.8mに 降下するまでの時間を求め、さらに別途避難時間を求め、両者を比較することにより避難 安全性を評価できる。このモデルでも、式(4-6)により火災成長モデルの発熱速度から煙発 生量を求めている。ただし、仮想点源高さZoについては異なる式を用いており、具体は文 献¹¹⁾に述べられている。

4.7 避難安全性の評価における初期発熱速度 Q₀の設定方法

第3章では指数関数による火災成長モデルは、固体可燃物の燃焼が拡大する過程を良く再現できることを示した。ここでは、指数関数による火災成長モデルを煙性状予測などの火源として使用する際の初期発熱速度 **Q**₀の設定方法について述べる。

避難安全性を評価する際には安全側の評価(安全率を多く見込む)が原則であるが、 \mathbf{Q}_0 に関しては煙の降下時間や避難開始時間など対象とする事項により安全側の向きが異なる。例えば、煙の降下時間について考えると、 \mathbf{Q}_0 が小さい方が煙が長時間発生するため安全側の評価となる。一方、避難開始時間について考えると、 \mathbf{Q}_0 が大きい方が避難開始が遅れるため安全側の評価となる。このとき、「煙降下に対してほとんど影響がないほど小さな発熱速度」を初期発熱速度 \mathbf{Q}_0 とし、一方、「一般の在館者が明確に火災だと認識して避難開始する時点」を避難開始の原点とすれば、安全側の評価が行える。

どの程度の火災になれば、在館者は火災を覚知するのかについては、これまでのところ明確な 判断基準がなく今後の研究が必要な部分であるが、小さな家庭用のごみ箱が燃焼した際の発熱 速度である 10kW であれば明らかに火災を覚知でき、5 章のケーススタディにおいては、この時間 を避難行動開始の原点とした。

4.8 本章のまとめ

本章では、指数関数による火災成長モデルを用いた避難安全性の評価方法について述べた。

単体の可搬可燃物については、可燃物の全表面が燃焼するまでは指数関数による火災成 長モデルに従い発熱速度が増加し、全表面が燃焼に至ると最大発熱速度で定常燃焼すると いう燃焼発熱速度モデルを示した。また、全表面が燃焼する以前に、先に燃焼していた部 分が燃える尽きると定常燃焼期が現れないが、最大発熱速度としては全表面が燃焼に至る 場合よりも小さな値となることを示した。

複数の可搬可燃物については、本論が対象とする可燃物は可搬であり、利用者により移動される可能性があり、安全側の評価として密接した状態を想定し、延焼に要する時間を Os とした。さらに、指数関数による火災成長モデルでは火災成長率γは発熱速度に関係な く一定であるため、複数の可搬可燃物が一体になって燃焼する状態を想定すると、延焼を 受けた 2 つ目以降の可搬可燃物が燃焼した際も、全体の発熱速度に対して単体の可搬可燃 物と同じ火災成長率γで火災成長すると考えられることを示した。

一方、複数の可搬可燃物が離れて設置されており、その隔離距離を建物管理者が維持管 理できる場合には、延焼がおよぶ範囲を予測してグループ化し、グループの最大発熱速度 を求め、複数の可搬可燃物の燃焼発熱速度モデルの上限値とする考え方を示した。

また、本論の指数関数による火災成長モデルの仮定の一つは「燃焼により発生した発熱 速度 Q のうち、可燃物に戻る熱は Q に比例」であり、天井に連続火炎が達して展炎する場 合や、煙温度が 200℃(473.15K)を超える場合には、可燃物に戻る熱の割合が増加するため 適用範囲外となることを示した。

指数関数による火災成長モデルを避難安全性評価に用いるには、建築基準法の避難安全 検証法と同様に、発熱速度から煙量を求め、さらに煙下端高さが 1.8m になる時間を求め、 これが別途計算した避難時間よりも長くなることを確認して避難安全性を評価する方法を 示した。この時、指数関数による火災成長モデルは発熱速度が 0kW となる時点を持たない ため時間の原点を決める必要があるが、「煙降下に対してほとんど影響がないほど小さな発熱速 度」を初期発熱速度 Q とし、一方、「一般の在館者が明確に火災だと認識して避難開始する時点」 を避難開始の原点とすれば、安全側の評価が行えることを示した。

文献

- 1) 名取晶子:耐火設計における目標安全水準の分布と表現方法に関する研究、東京理科大学 学位論文、2008.3
- John F. Krasny, Willam Parker, Vytenis Babrauskas: Behavior of Upholstered Furniture and Mattresse, ISVN 0-8155-1457-3, 2001
- 3) 八重樫他、家具の火災成長率 a について、日本火災学会研究発表会、C25、2001.5
- 4) 日本建築学会:建築物の火災荷重および設計火災性状指針(案)、ISBN978-4-8189-2710-0 C3052、2013.3
- 5) 出口嘉一、 辻本誠、河野守: 可燃物の分布特性が火災初期発熱性状に及ぼす影響、日本 建築学会環境系論文集、Vol.580、pp.9-14、2004.6
- 6) 出口嘉一他: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、vol.594、pp.1-6、2005.8
- 7) 新谷祐介、原田和典:熱のフィードバック効果を考慮した延焼拡大モデル、日本建築学会環 境系論文集、Vol.641、2009
- 9) 新谷祐介、長岡勉、出口嘉一、原田和典:外部放射を受けるウレタンブロックの燃焼性状に関 する研究、日本建築学会環境系論文集、Vol.78、No.685, pp.241-247、2013.3
- 10) 国土交通省住宅局建築指導課他編集:2001 年版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説、海文堂出版、2001.3
- 11) 建築研究振興協会編集:二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム、2003.2

第5章

可搬可燃物の設置に対する避難路の安全性評価のケーススタディ

5.1 はじめに

本論文の第2章から第4章では避難路の火災安全性確保を目的として、可搬可燃物の着 火性状の評価方法や着火後の火災成長モデルの提示、さらに複数の可搬可燃物が燃焼する 場合の考え方、避難安全性の評価方法について述べる。本章では、これらの各々の評価方 法やモデル、考え方などを用いて、避難路に可搬可燃物を設置する際の火災に対する安全 性評価のケーススタディを行う。

第1章で述べたように、本論の対象とする建物の室はロビー等のように、他の室からの 避難路であり、かつ、その避難路は通路以外の用途を有するために椅子やテーブル等の可 搬可燃物が置かれる可能性が高い室である。こういった室では、可搬可燃物が出火した際 にそこを通る避難者の安全を如何に確保するかが課題となる。火災に対する安全性確保の 手段としては、一つには建築基準法のように標準的な火源に対する建物側の性能(排煙や歩 行距離、防火設備の遮煙性能など)を決めるというアプローチがあるが、竣工後は、建物の 利用方法が対象となり、特にその中に持ち込まれる可搬可燃物の管理が課題になる。可搬 可燃物は種類や仕様、数、配置によって数倍の発熱速度や火災成長率を示すため、避難安 全性に対する影響は、場合によっては建物側の壁や天井や排煙設備の持つ影響より大きい。 建物を維持管理する上で、建物管理者は可搬可燃物を適切に管理する義務があるが、これ までは可搬可燃物に対する客観的な評価方法がなく、建物管理者の主観により可搬可燃物 の種類や配置などが維持管理されてきた。本論では、こういった観点に基づき、可搬可燃 物の避難路の安全性に対する影響の評価法を提案しており、本章では可搬可燃物の仕様を 変えたケーススタディを行うことにより、その評価法の具体を示す。

第1.1節で述べたように、ごく初期火災フェーズにおける火災安全上の目標は出火防止で ある。建築基準法は出火を前提としてその後の避難安全性能を定めるという考えに基づい ており、可搬可燃物の着火性については評価していない。建物自体では出火を防止するこ とはできないので、このことは合理的な考えといえる。しかし、建物の維持管理において は建物自体の管理と同時に、出火防止も管理すべき事柄の一つである。可搬可燃物を設置 する際には、その可搬可燃物の出火の危険性も考慮すべきである。本論では、可搬可燃物 に一定の維持管理が行われることを前提に、先ずはじめに、可搬可燃物の着火性の評価を 行う。

第二に、初期火災フェーズにおける目標は避難安全性の確保であり、この判断には「避 難中に煙にまかれない」を用いる。結果として、可搬可燃物の燃焼の成長の速さが避難安 全性に大きな影響を与える、。

そのため、どのような火災成長モデルを採用するかは重要な課題である。大きく2つあ って、一つは実験結果の発熱速度と良く一致するが、時間tが分かりにくい。もう一つは時 間tは説明するが、発熱速度を実験結果と比較した際の追随が悪い。第3章で述べたように、 現在の避難安全検証法に採用されている火災成長モデルは二次関数である。しかし、二次 関数による火災成長モデルは、可搬可燃物の燃焼発熱速度の時間変化を小さな発熱速度か ら大きな発熱速度まで一つの火災成長率で再現することができないといった問題がある。 一方、指数関数による火災成長モデルは広い範囲で可搬可燃物の発熱速度を再現できる。 当然のことながら、広い範囲で再現できる火災成長モデルを使用すべきであり、指数関数 による火災成長モデルを用いて評価を行っている。ところで、現在行われている避難安全 検証などでは、発熱速度が 0kW の時点を時間の原点としている。しかし、指数関数による 火災成長モデルは指数関数の特徴として発熱速度が 0kW となる時点は存在しない。そのた めに、時間の原点が存在せず、火災の始まりや避難行動の開始をどの時点にするかといっ た問題が生じるため、この優劣の考え方については 4.7 節で示したがケーススタディの中に その具体例を記す。

なお、本論が対象とする室は他の居室の避難路であり、かつ、用途上可搬可燃物が設置 される室であり、そのような室の中で特に大勢の在館者が利用するため避難安全性の確保 が重要な課題となる劇場ホワイエをケーススタディの対象とする。

5.2 可搬可燃物の評価方法

可搬可燃物の評価フローを図 5-1 に示す。先ずは、当該室の使われ方を考慮して必要な可 搬可燃物の種類と個数、平面上の配置を決めて、仕様を調べながら具体的な可搬可燃物の 候補を決定する。評価の第一段階として、着火性を確認する。第2章で提案したように、 可搬可燃物の部分のうち着火の可能性が高い部分(椅子でいえば、座面や背)の表面材と内部 のクッション材などのサンプルを試験体とし、コーンカロリーメータ試験装置を用いて加 熱強度 50kW/m²における着火時間を計測する。この際に、熱伝導が実際の可搬可燃物と同 じになるように、表面材と内部のクッション材はできる限り実際の可燃物と同じ状態に設 置する。可搬可燃物の着火時間を、木材を基準とした許容着火時間と比較して、設置の可 否の判定を行う。可であれば、次の避難安全性の評価に進む。否であれば、可搬可燃物の 仕様や種類を見直す。

次に、可搬可燃物の発熱速度の時間変化を求める。この結果を利用して煙性状予測を行 う。その際、複数の可搬可燃物を配置する場合には、第4章のように延焼が及ぶ範囲をグ ループ化する必要がある。出口¹⁾や新谷²⁾のように詳細に放射を検討してグループ化する 方法や、火炎高さを求め形態係数から放射受熱量を求めて延焼予測する方法、さらには点 火源を想定して延焼予測を行う簡易な方法がある。詳細な方法は、電算機が必要であり検 討の過程を理解し難いため、本章のケーススタディでは比較的簡易な火炎高さを求め形態 係数から放射受熱量を求めて延焼を予測する手法を示す。

なお、「着火性の評価」と「避難安全性の評価」の順番は入れ替え可能である。



5.3 劇場ホワイエを対象としたケーススタディ

5.3.1 建物モデルと可搬可燃物の種類と配置

図 5-2 に示す劇場をケーススタディの対象とし、劇場からの避難路に当たるホワイエの火 災安全性を検討する。客席数は 1000 席であり、大ホールの床面積は 700 ㎡、ホワイエは 900 ㎡で、天井高さは 4m、大ホールからホワイエへの出口は 6 か所あり、ホワイエから中 央広場への出口も 6 か所であるがこの内の自動扉を除いた 2 か所(合計幅 2.8m)が避難に利 用される想定とした。また今回は、大ホールからの避難を対象とし、避難にホワイエを経 由しない小ホール、楽屋、各控室などは検討の対象外とする。

ホワイエに、コンサートの開始前や休憩時に観客が利用するための椅子の設置を計画し、 2 種類の椅子について検討する。図 5-3 に示すように、横に並べた椅子 5 脚を向い合せに置 き、計 10 脚を 1 セットとし、これを 5.0m 離して 2 セット配置する計画である。図 5-4 に 示すように、椅子の種類はクッションが厚くゆったりと休憩できる椅子 A(3.4.1 節の CASE1)と、木製フレームの座と背に若干のクッションを取り付けた椅子 B(3.4.1 節の Spec.3)の 2 種類を検討対象とする。椅子 A は火災成長率 γ =0.024s⁻¹ で最大発熱速度 \dot{Q} max=600kW と第 3.4.1 節の椅子の中でも比較的火災成長が早く最大発熱速度が大きいも のであり、椅子 B は γ =0.009s⁻¹ で \dot{Q} max=200kW と、椅子 A に比べ火災成長が 0.375 倍と 遅く、最大発熱速度が 1/3 倍と小さいものである。

ケーマタ	体工の毎粒	火災成長率γ	椅子単体での最大発	
7 八山	1町」。シュイモン会	(s^{-1})	熱側 Qmax(kW)	
	クッションが厚くゆったりと休憩			
Case A	できる椅子	0.024	600	
	(3.4.1 節の Case1 の椅子)			
	木製フレームの座と背に若干のク			
Case B	ッションを取り付けた椅子	0.009	200	
	(3.4.1 節の Spec.3 の椅子)			

表 5-1 ケーススタディ条件(椅子の種類)

本章では、2種類の椅子を検討している。図 5-1 のフローでは、一つの種類を検討して否 となった際に他方の種類を検討することになっているが、両者を比較しながら、結果を示 した方が理解が深まるため、2種類の結果を同時に示す。



図 5-2 ケーススタディの対象とする建物(コンサートホール)の平面





(Case A)

(Case B)

 $\gamma = 0.009 \text{ s}^{-1}$ \dot{Q} max=200 kW

図 5-4 検討対象とした椅子

5.3.2 着火性状の評価

それぞれの椅子の表面材(表クロスとクッション材を重ね)を試験体として、コーンカ ロリーメータを用いて加熱強度 50kW における着火時間を計測する。コンサートホールは、 特に避難困難な在館者が多い施設には該当しないため、表 2.6・2 のB「木材と同等の着火性 状;着火時間 9~31s」が判定基準となり、着火時間が 31s 以下であれば良い。

5.3.3 延焼予測によるグループ化

(5 脚の椅子の発熱速度)

先ずは延焼が及ぶ範囲を求めて、可搬可燃物のグループを形成する。図 5-3 の 5 脚の椅 子は接しており、延焼するものとする。この時、実際には 5 脚の椅子がそれぞれ最大発熱 速度となる時間がずれる可能性がある。新谷 ²らが提案しているように、個別の可搬可燃物 の燃焼発熱速度を非定常とし、順次延焼を予測すると個別の可燃物の燃焼のずれが予測で き、グループとしての最大発熱速度がより正確に予測できるが、着火する可燃物の位置に より値が異なるなど多くの検討が必要になる。ここでは、安全側の評価として、5 脚が同時 に最大発熱速度になるとして、グループの最大発煙速度 Qmax を算定する。

CASEA:5脚の最大発熱速度:600×5=3000(kW) CASEB:5脚の最大発熱速度:200×5=1000(kW)



(向い合せの椅子への延焼予測)

5脚の椅子が燃焼した際に、向い合せに置かれた椅子に延焼するかを検討する。

ここでは、火炎高さを求め形態係数から放射受熱量を求めて延焼予測する方法を用いる。 文献³⁾を参考^{注1)}に、線火源の連続火炎高さLfを求めると

注1) 文献には、自由空間における、正方形火源の連続火炎高さと平均火炎高さ、線形火源 の平均火炎高さの予測式が提案されている。今回、線形火源の連続火炎高さを予測す るにあたり、線形火源の平均火炎高さを基に、正方形火源における連続火炎高さと平 均火炎高さの比率を乗ずることにより補正した。 Lf = $2.4Q_1^{*2/3}D$ $Q_1^* = \frac{Q_1}{C_p\rho_0 T_0\sqrt{g}D^{3/2}}$ ここで、 D:代表長さ(火源の幅)(m) \dot{Q}_1 :火源の単位長さあたりの発熱速度(kW/m) Cp:定圧比熱(1.0kJ/kg) ρ_0 :周囲空気密度(1.2 kg/m³) To:周囲空気温度(297K) g:重力加速度(9.8m/s²)

となる。

図 5-5 に示すように、椅子が 5 脚並んだ際の長さは 3.5mであり、単位長さあたりの発熱 速度は、

Case A : Lf=2.0(m)

となる。また、代表寸法は椅子の奥行きである D=0.6mである。

これらを、式(5-1)に代入すると、Case A、B それぞれの連続火炎長さ Lf は下記となる。





火炎形状を底面が椅子 5 脚の水平投影面で高さが連続火炎高さの立方体として、図 5-7 のように、向い合せに置かれた中央の椅子に最も火炎に近い部分から見た際の火炎の形態 係数 F は下記となる。

105

(5-1)
Case A : F=0.435 Case B : F=0.372



図 5-7 火炎形状と受熱面の位置

文献⁴⁾のように、連続火炎の平均的な温度を 880℃(1153.15K)として、連続火炎から放出 される単位面積当たりの放射量を $E= \sigma \cdot (880^4 - 293^4)=5.67 \times 10^{-12} \times (880^4 - 293^4) =$ 100kW/m²として、受熱面における放射受熱量 R を求めると、

Case A: R=43.5(kW/m) > 10(kW/m) 延焼判定基準 Case B: R=37.2(kW/m) > 10(kW/m) 延焼判定基準

となる。いずれの椅子も、延焼判定基準である 10kW/m²を超えており、向い合せの椅子に 延焼する恐れがある。

着火は当該材料の表面温度が着火温度に達するかどうかで予測可能であるが、ここでは より安全側の可燃物配置計画とするために、定常放射を無限時間受けた際に着火温度とな る放射受熱量(着火限界)を延焼の判定基準とする。なお、着火限界は本来は材料ごとに異な るが、文献 かのように防火性能設計では一般的な可燃物の着火限界として木材の着火限界で ある 10kW/㎡が採用されており、本論もこれにならい 10kW/㎡を着火限界の放射加熱とす る。着火限界は、第2章によれば h・(T_{ig}-T₀)/ ε によって推定可能であるが、この式をみ ると(着火温度 T_{ig}-雰囲気温度 T₀)と表面熱損失率hに比例し、放射吸熱率 ε に反比例する。 h は表面の気流の影響が大きいが、可燃物の種類による差は小さいと考えられ、また、 ε は 表面の色の影響を受けるが、着火する前には表面が炭化して黒色となりほぼ $\varepsilon = 1$ の最大 値となり、多くの可燃物はほぼ同じ傾向を示すものと考えられる。したがって、着火限界 は着火温度の差の影響を最も顕著に受けると考えられるが、木材を始めとしたセルロース を主成分とした可燃物の着火温度 T_{ig}は 280℃(553.15K)程度であり、プラスチック系の可 燃物より若干低い傾向があり、木材の着火限界 10kW/㎡は一般的な可燃物の値としては若 干厳しい条件となり、延焼の判定基準としては安全側の計画を誘導しており妥当であると 考えられる。 (10 脚の椅子の発熱速度)

向い合せの椅子 5 脚と合わせて合計 10 脚の椅子が同時に最大発熱速度となった場合を、 安全側の評価として想定する。その際の最大発熱速度は下記となる。

CASEA: 10 脚の最大発熱速度: 600×10=6000(kW)

CASE B:10 脚の最大発熱速度:200×10=2000(kW)

(5m離れた椅子への延焼予測)

図 5-8 に示すように、椅子が 10 脚並んだ際の長さは 3.5m であり、奥行きは 2m である。



図 5-8 椅子 10 脚の配置

長谷見 6によると、長方形火源の連続火炎高さLfは、式(5-2)で表される。

Lf = $1.8Q^{*2/5}D$ (5-2) $Q^* = \frac{\dot{Q}}{C_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} D^{5/2}}$ (5-2) ここで、 D:代表長さ (火源の幅) (m) \dot{Q} :火源の発熱速度(kW) Cp:定圧比熱(1.0kJ/kg) ρ_0 :周囲空気密度($1.2 kg/m^3$) To:周囲空気温度(297K) g:重力加速度($9.8m/s^2$)

各椅子 10 脚の発熱速度と代表寸法 D=2m を式(5-2)に代入すると、連続火炎高さ Lf は下 記となる。





図 5-9 連続火炎高さ(椅子 10 脚)

図 5-10 のように、火炎形状を底面が椅子 10 脚の水平投影面で高さが連続火炎高さの立 方体として、5.0m離れて置かれた中央の椅子の最も火炎に近い部分から見た際の火炎の形 態係数 F は下記となる。

Case A : F=0.112 Case B : F=0.084



図 5-10 火炎形状と受熱面の位置

文献 4 のように、連続火炎の平均的な温度を 880℃(1153.15K)として、連続火炎から放出 される単位面積当たりの放射量を E=100kW/m²として、受熱面における放射受熱量 R を求 めると下記となる。

Case A: R=11.2(kW/m²) > 10(kW/m²) 延焼判定基準 Case B: R=8.4(kW/m²) < 10(kW/m²) 延焼判定基準 Case A は、延焼判定基準である 10kW/mを超えており、5m 離れた椅子に延焼する恐れ がある。一方、Case B は、延焼判定基準である 10kW/mを下回っており、5m 離れた椅子 に延焼する恐れは少ない。

以上の検討により、Case A は椅子 20 脚が同時に燃焼した場合を想定し、Case B は椅子 10 脚が同時に燃焼する場合を想定した。その際の最大発熱速度は下記となる。

Case A: グループ(20 脚)の最大発熱速度: 600(kW)×20(脚)=12000(kW) Case B: グループ(10 脚)の最大発熱速度: 200(kW)×10(脚)=2000(kW)

5.3.4 避難時間と煙降下時間の予測

避難安全性の評価は避難安全検証法と同様の考えに基づき、避難時間と煙降下時間(煙が 避難上恐れのある高さまで降下する時間)の2つを予測し、これを比較することにより行う。

1) 避難時間

避難時間は、避難安全検証法と同様に避難を開始する時間(避難開始時間)と、室の最遠点 (今回は大ホールの最前列中央)から前室(ホワイエ)出口までの歩行時間、前室(ホワイエ)の 扉を通過するための扉通過時間の3つを足し合わせることにより求める。

1-1) 避難開始時間

避難開始時間は、式(5·3)により求める。この時、本論は指数関数による火災成長モデル を用いており、関数の特性上発熱速度が 0kW になることがなく常に正の値となる。そのた め、時刻 0(s)であっても正の値となる。このことは、火災の発生には出火源となる熱源が必 要であり、何もない状態(発熱速度が 0kW)から始まることはないことを意味しており、現 象としては理にかなっていると考えられるが、一方で、出火や避難開始の原点をどこにす るかといった問題が生じる。避難開始のシナリオは、火災を覚知し、避難の意思決定を行 い、避難を開始すると考えられる。火災による熱や光、煙、さらには火災感知警報器の音 など火災状況の何を持って、どの段階で火災を覚知し、どの段階で避難の意思決定をする のかについて様々な課題を示唆した資料は見られるが、これを工学的に立証した文献は見 当たらない。そのため、今回は仮に、米国カリフォルニア州の Technical Bulletin 133 で椅 子等の着火に使用されるバーナー火源の発熱速度が 20kW であり、これは明らかに炎が目 視され、それより早い段階で覚知可能であり、その半分である 10kW の段階で火災を覚知 することとした。この時点を、避難開始の原点とし、その後、周囲の在館者に火災発生を 伝達し、避難の意思決定までに要する時間を、避難安全検証の避難開始時間とした。なお、 今後、火災覚知に関する研究が進み、その条件が明確になった際には、その条件を用いて 火災覚知時間とすることも可能である。

$$t_{start} = t_{10kW} + 2 \cdot \sqrt{\sum A_{area}}$$
 (5-3)
ここで、 t_{start} : 避難開始時間(s)
 t_{10kW} : 火源の発熱速度が 10kW となる時間(s)
 $\sqrt{\sum A_{area}}$: 当該前室を避難しなければならない室の床面積の合計(㎡)

1-2) 歩行時間

大ホールの最前列中央から大ホール出口までの距離は 35mであり、さらにホワイエ出口 までの歩行距離は 38m である。歩行速度を避難安全検証法に基づき v=1m/s として、歩行 時間を算定する。

$$t_{travel} = \frac{\sum l_l}{v}$$
(5-4)
ここで、 t_{travel} : 歩行時間(s)
 $\sum l_l$: 歩行距離の合計(m)
 v : 歩行速度(m/s)

1-3) 扉通過時間

大ホールの客席数は1000人であり、避難者数を1000人とする。また、扉通過時間は避 難安全検証を参考に扉幅1mあたり1.5人/sとし、扉通過時間を算定する。

$$t_{queue} = \frac{\Sigma(p \cdot A_{room})}{1.5 \cdot \Sigma B_{room}}$$
(5-5)

ここで、 t_{queue} : 扉通過時間(s)

 $\Sigma(p \cdot A_{room})$: 避難者数の合計(人)

 ΣB_{room} : 出口幅の合計(m/s)

2) 煙降下時間

避難安全性能評価^{注2)}に一般的に利用される非定常 2 層ゾーンモデルによるシュミレーションである BRI2002⁷⁾を用いて、煙高さの時間変化を予測する。火源条件は指数関数モデルとし、火災成長率 γ は図 5-4 に記載したように CaseA では γ =0.024s⁻¹、CaseB では γ =0.009 s⁻¹、初期発熱速度は防火上十分に小さな値として 1kW、最大発熱速度は第 5.3.3 節で求めたように CaseA では 12000kW、CaseB では 2000kW とする。また、ホワイエの床面積は 900 ㎡で天井高さは 4mとし、排煙は設置せず蓄煙方式とする。火源条件と煙下端高さの時間変化を図 5-11~14 に示す。

なお、式(4-4) に発熱速度 Q=1kW を代入すると(点火源と考え Z₀=0m、また煙温度は ほぼ常温の 20℃(293.15K)として煙密度を 1.2kg/m³として質量速度を体積速度に変換した)、

$$m_{z} = C_{m} \cdot \left(\frac{\rho_{\infty}^{2} \cdot g}{Cp \cdot T_{\infty}}\right)^{1/3} \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot (Z + Z_{0})^{5/3} = 0.8(kg/s) \doteq 1(m^{3/s})$$

となる。ホワイエの床面積は900 mであり、発熱速度1kWの場合に一秒間に降下する煙層 下端高さは、

 $1(m^{3}/s)/900(m^{2}) = 0.001(m/s)$

であり、天井高さ4mと比較して十分に小さく、初期発熱速度1kWは評価に影響のない十分に小さな値と判断する。

注 2) 特殊な構造方法を用いた建築物や新しく開発された材料、設備等の中には、建築基準 法令に定められた一般的な基準ではなく、高度な方法を用いて性能を検証するものが ある。このような場合に対応するため、国土交通大臣が建築物の構造方法等を認定す る制度が設けられている。「性能評価」は、建築基準法に基づく業務で、この大臣の 認定を受けるために必要な事前の審査を行う。性能評価の一つに避難安全性能評価が ある。



図 5-11 CaseA の火源条件



図 5-12 CaseA の煙下端高さ



図 5-13 CaseB の火源条件



図 5-14 CaseBの煙下端高さ

5.3.5 避難時間と煙降下時間の比較による避難安全性の評価

避難安全検証法と同様に床面から 1.8mの高さに煙が降下する時間(煙降下時間)を避難の 許容時間と考えると、CaseA の煙降下時間は 395s、CaseB は 809s となる。避難完了時間 は CaseA が 489s、CaseB が 649s である。表 5-2 のように、CaseA は避難時間の方が長く、 図 5-4 の CaseA の椅子の火災により避難者が避難途中に煙にまかれる危険が高く、設置す べきでないと判断される。一方、図 5-4 の CaseB の椅子では煙降下時間の方が長く、避難 者は煙にまかれる前に避難可能であり、この配置で設置可能と判断される。なお、その際 に 10 脚ごとに 5m 以上の離隔距離を設けるよう維持管理する必要がある。

可搬可燃物条件	避難時間(s)		煙降下時間(s)	判定
CaseA	489	>	395	NG
CaseB	649	<	809	OK

表 5-2 劇場ホワイエの評価

5.5 本章のまとめ

劇場ホワイエにおける可搬可燃物の設定に関する、ケーススタディを行った。

劇場ホワイエでは、椅子の種類により火災成長率と最大発熱速度が異なり、木を中心と したクッション材の少ない椅子は火災避難上安全であると判断され、他方、クッション材 の多い椅子は危険であると判断された。このように、可搬可燃物の火災成長率γや最大発 熱速度を把握することにより、安全な可燃物配置計画を客観的に検討可能であることを示 した。

複数可燃物の延焼予測の具体的な手法については、第1章に示した既往文献など様々な ものが提案されており、本論ではこの中のごく単純な手法によった。どの方法を選択すべ きかについては、各手法の論文などに記載された適用範囲に従えばよく、一般的にはより 詳細な手法を用いれば精度のよい予測が可能となり、また本章のケーススタディ以外にも 様々な条件での評価が可能であると考えられる。

ただし、いかなる手法においても、避難を開始してから完了するまでの間に火災が避難 不可能な状況にならないかが問題であり、火災成長モデルが評価に大きな影響を与える。 本論ではこの点に着目して火災成長モデルに関する研究を行い、指数関数による火災成長 モデルは発熱速度の広い範囲で燃焼実験の結果を精度よく再現できることを示しており、 いずれの手法による場合でも火災成長モデルとしては指数関数を用いるべきと考える。

文献

- 1) 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、Vol. 594、pp. 1-6、2005.8
- 2) 新谷祐介、原田和典:熱のフィードバック効果を考慮した延焼拡大モデル、日本建築 学会環境系論文集、Vol.641、pp.759-766、2009.7
- 3) 日本建築学会編集:建築物の火災荷重および設計火災性状指針(案)、2013.3
- 4) 日本建築学会近畿支部:関数電卓による火災性状予測計算、2001.7
- 5) 日本国土開発技術センター編集:建築物の総合防火設計法、第2巻、1989
- 6) Y.Hasemi, T.Tokunaga: Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames, Fire Science and Technology, Vol4(1), pp.15-26, 1984
- 7) 社)建築研究振興協会 BRI2002 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラ ム,2003

第6章

総括

本論では、ホテルのロビー、オフィスの受付、劇場や集会場のホワイエのような通路以 外の用途を持った避難路に設置される、椅子やテーブル、カウンター、装飾などの可搬可 燃物が避難安全性に与える影響を評価する方法に関する提案を行った。特に可搬可燃物の 着火性と、燃焼発熱速度の火災成長モデルについて研究を行った。

第1章では、研究の背景と目的、本論の構成を記すとともに、本論で研究対象とした着 火性状、火災成長モデル、延焼予測に関する既往の研究について整理した。

第2章では、可燃物の着火性状について述べた。火災は、家具などの可搬可燃物への着 火をきっかけにして拡大することが多く、着火しやすい可搬可燃物を排除することは出火 防止対策として有効であると考えられる。我が国の建築基準法の防火材料等(不燃、準不燃、 難燃)の試験方法に採用された IS05660 発熱性試験(コーンカロリーメータ)装置を使用した 着火性状の評価を提案した。可燃物の着火は可燃物表面が着火温度に達すると発生すると 仮定して着火モデルを導き、さらに木材の各物性と密度との相関を整理し、式(2-11)の木 材の着火時間の予測式を導出した。

$$t_{ig} = 0.436 \cdot \frac{\rho \cdot (0.1953 \cdot \rho + 25.5)}{\left(\dot{q}_{e}^{"} - 10.1\right)^{2}}$$
(2-11)

ここに、t_{ig}:着火時間(s)、ρ:密度(kg/m³)、q_e":放射加熱(kW/m²)

式(2-11)は、密度という比較的入手しやすい物性値と試験条件である放射強度から着火時間を予測できる。なお、式(2-11)の適用範囲は、放射加熱が 30~50kW/m²である。これを 基準として、表面材の着火性状が木材より着火しやすい可搬可燃物を避難路から排除でき る。

第3章では、可燃物が有炎燃焼する際の火災成長モデルについて述べた。火災初期にお ける可搬可燃物の火災成長モデルとして、現在、我が国では一般的に二次関数モデルが用 いられる。しかし、二次関数モデルは小さな発熱速度から大きな発熱速度までを同じ火災 成長率で表すには無理があるとの指摘があった。そこで、モデルに物理的な意味を持たせ ることに配慮し、「燃焼により発生した発熱速度 Q のうち、可燃物に戻る熱はまず Q に比 例し、かつ、その増加率も発熱速度 Q に比例」で、かつ「未燃部分での受熱に対する可燃 物の気化速度の割合が一定」であると仮定し、式(3-5)に示す指数関数による火災成長モデ ルを導出した。

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \cdot e^{\gamma \cdot t} \tag{3-5}$$

ここに、Q(t): 燃焼発熱速度(kW)、Q₀: 初期発熱速度(kW)、γ:火災成長率(s⁻¹)、 t:時間(s)

均質なウレタンフォームを用いた燃焼実験を実施してモデルを検証すると、指数関数に よる火災成長モデルは二次関数よりも発熱速度を精度よくモデル化できることが確認でき た。さらに、着火源の発熱速度を変えても指数関数モデルの火災成長率γは変わらないこ とを確認した。均質なウレタンフォームの実験結果と良い一致を示した指数関数による火 災成長モデルであるが、実際の可搬可燃物はより複雑な構造、材料、形を持っており、こ れに対しても適用できるかを、椅子とクリスマスツリーの燃焼実験結果を基に検討した。 椅子では、ほとんどの試験体で座と背の2 段階の火災成長を示した。燃焼面が水平と鉛直 の違いがあり、炎から可燃物に戻る熱の割合が異なるため火災成長率の値は異なるが、そ れぞれの部分で発熱速度の対数が直線となっており、指数関数による火災成長モデルを適 用することが妥当であると考えられる。クリスマスツリーについても、火災成長する過程 では発熱速度の対数が直線となっており、指数関数による火災成長モデルを適 用することが妥当であると考えられる。以上のように、実際の可搬可燃物の燃焼発熱速度も、指数関 数による火災成長率により良い精度で近似できることが分かった。なお、指数関数による 火災成長モデルの適用範囲は、天井に連続火炎が達して展炎する以前であり、かつ、煙温 度が 200℃(473.15K)以下であることを示した。

第4章では、複数の可搬可燃物が設置された場合の指数関数による火災成長モデルの考 え方、および、火災成長モデルを用いた避難安全性の評価方法について述べた。可搬可燃 物は利用者により移動される可能性があり、移動が予想されるものについては安全側の評 価として密接した状態を想定して一体の可燃物として扱った。このとき、複数の可搬可燃 物が一体になって燃焼する状態を想定すると全体の燃焼発熱速度 Q(t)も単体可搬可燃物と 同じ火災成長率γで火災成長すると考えられる。一方、建物管理者により可搬可燃物の配 置を管理できる場合には、可燃物間の離隔距離を考慮した評価を行うことが合理的であり、 延焼予測を行い延焼の範囲を定めて可搬可燃物をグループ化する方法を示した。

第5章では、劇場ホワイエを対象として可搬可燃物が設置された避難路の避難安全性の 評価に関するケーススタディを行った。劇場ホワイエに10脚で1ブロックの椅子を2ブロ ックで計 20 脚設置する場合を想定し、クッション材の多い椅子とクッション材の少ない椅子の 2 種類の椅子を比較検討した。それぞれの椅子の指数関数による火災成長モデルを想 定火源として煙性状予測を行い、さらに避難時間を算出して、これらを比較することによ り劇場ホワイエの避難安全性を評価した。その結果、クッション材の少ない椅子に関して は安全に避難可能であり、他方、クッション材の多い椅子は危険であると評価された。こ のように、各々の可搬可燃物の火災成長率と最大発熱速度を把握し、指数関数による火災 成長モデルを用いて、可搬可燃物の避難安全性に与える影響を評価可能であることを示し た。

本論の主な成果の一つは、木材の着火時間の予測式を明確にしたことである。この予測 式は、木材の密度と外部加熱のみによって表されており、密度は入手が容易な物性値であ り、これにより着火性が予測できることは工学的な利便性が高い。また、主な成果の二つ 目は、指数関数による火災成長モデルを導出し、さらにウレタンフォームの燃焼実験を行 いモデルの検証を行ったことである。我国の避難安全検証などで用いられる二次関数によ る火災成長モデルに比べ、指数関数による火災成長モデルは実験結果と広い範囲で良く一 致することが分かった。また、指数関数による火災成長モデルの火災成長率は、着火源の 発熱速度が違っても変わらないことを確認した。さらに、本論ではこれら 2 つの主な成果 を用いて可搬可燃物が設置された避難路の避難安全性の評価法を提案した。

本論の成果は、避難路に設置される可搬可燃物の避難安全性の評価の際に有用であり、 これらが建物の維持管理に活用され、安全で豊かな社会の構築に資することを期待する。

120

謝辞

先ずは、四半世紀の長きに渡りご指導を頂いた東京理科大学の辻本誠教授に感謝いたし ます。私が名古屋大学の辻本研究室の扉をたたいて以来、卒業後も都内の珈琲店にてご指 導を受け、叱咤激励を頂きながらようやく本論を纏めることができました。深く感謝申し 上げます。東京理科大学の河野守教授にも、大学4年から長きに渡りご指導を頂き、感謝 しております。東京理科大学の森田昌宏教授には、本研究において貴重なご助言と刺激を 頂き、感謝しております。東京理科大学の関澤愛教授、大宮善文教授、松山賢准教授には、 本論を纏めるにあたり多くのご助言を頂き、感謝しております。私が2年間在籍しており ました東京理科大学国際火災科学研究科は世界トップクラスの火災研究機関であり、この ような環境に身を置き刺激を受けながら学べたことは小生にとって最大の幸運であり、こ れにより本論を纏めることができました。本学の関係者の皆様に感謝します。

私が社会人となり間もないころ、最初に着火理論をご教授頂いたのは早稲田大学の長谷 見雄二教授でした。また、火災成長モデルに関して指数関数を着想した際に相談しご助言 を頂いたのは、京都大学の原田和典教授でした。お二方のお教えが本論において大変に役 立ち、感謝しております。損害保険料率算出機構の名取晶子博士には、ご収集された貴重 なデータのご開示を頂き、感謝しております。北海道立総合研究機構の菊地伸一博士には、 コーンカロリー試験の実施と多くのご助言を頂き、感謝しております。

私の職場である竹中工務店技術研究所の皆様には、ご理解とご援助、励ましを頂き、感 謝しております。特に、新谷祐介博士には実験をお手伝い頂き、感謝しております。

最後になりましたが、温かく見守ってくれた私の家族に感謝を申し上げます。

2014年2月 長岡勉

121