可燃物特性を考慮した火災発熱解析による初期火災危険度評価

出口 嘉一

平成 15 年 2 月 27 日

目 次

第 1 章　序章 **1**
1.1　はじめに 1
1.2　既往の研究 3
1.2.1　初期火災時の火災物理モデルに関する研究 3
1.2.2　可燃物に関する研究 6
1.2.3　可燃物配置が室火災性状に及ぼす影響に関する研究 7
1.2.4　火災危険度評価に関する研究 7
1.2.5　避難安全検証法による安全性評価手法 8
1.3　本研究の目的 12
1.4　本論文の構成 14

第 2 章　火災統計による住宅火災の危険性 **17**
2.1　法規制と死亡リスク 19
2.2　住宅火災の件数と死亡者数 22
2.3　住宅火災での死亡者と死亡原因 22
2.4　住宅火災の出火原因 25
2.5　まとめ 26

第 3 章　可燃物配置調査 **27**
3.1　積載可燃物量に関する既往の調査 29
3.2　家具配置に関する計画系研究 30
3.3　住宅の可燃物配置に関する調査と可燃物配置の特徴 31
3.3.1　本研究で使用した可燃物配置調査 31
3.3.2　調査データの統計 34
3.3.3　可燃物配置モデルの入力値 44
3.4　まとめ 45

第 4 章　可燃物配置モデル **47**
4.1　可燃物配置モデルに関する研究の背景 49
4.1.1　正方格子モデル 50

4.1.2 ランダム配置モデル 51
4.1.3 可燃物のランダム配置による避難限界時間の変動 52
4.2 住宅の可燃物配置モデルの提案 57
4.2.1 可燃物の分類 57
4.2.2 大型可燃物の特徴とモデル 58
4.2.3 小型可燃物の特徴とモデル 60
4.2.4 出火点の検討 60
4.3 まとめ 61

第 5 章 火災燃焼モデル 63
5.1 火災燃焼モデル 66
5.1.1 可燃物の燃焼 67
5.1.2 可燃物間の放射 71
5.1.3 煙流動 73
5.1.4 排煙 76
5.1.5 内装の燃焼性 77
5.1.6 可燃物の着火条件 78
5.1.7 フラッシュオーバー後の発熱性状 79
5.2 火災発熱解析の手順 81
5.3 実大火災実験との比較 83
5.4 まとめ 88

第 6 章 火災発熱解析による可燃物特性の感度解析 89
6.1 ケーススタディの概要 91
6.2 小型可燃物の直径を変化させたときの発熱速度への影響 93
6.3 小型可燃物の個数を変化させたときの発熱速度への影響 98
6.4 可燃物密度一定の条件での可燃物の分割数による発熱速度への影響 102
6.5 大型可燃物配置の違いによる発熱速度への影響 108
6.6 解析に関わる条件の違いによる発熱速度への影響 112
6.7 考察 115
6.8 まとめ 116

第 7 章 火災危険度評価 117
7.1 火災危険度の定義 119
7.2 火災危険度評価 121
7.3 まとめ 128

第 8 章　結章 **129**

参考文献 **136**

記号説明 **137**

謝辞

第1章　序章

1.1　はじめに

建築基準法防火規定の改正 (1998 年) にともない，建築防火規定は，これまでの仕様規定から性能規定へと移行しつつある。仕様規定での火災安全性の基本的な考え方は，定められた時間に一定の発熱に耐えることを強制するものであり，そのために，設計者は法で指定された防火上安全な各種材料や部材の仕様リストから，建物の規模や用途に応じて適切なものを選択し防火設計を行ってきた。確かに，仕様規定では簡易に最低限の防火性能を有した建築物の設計を行うことができる。しかし，よく言われる [1] ように (1) 代替性や (2) 総合性が欠如するという問題点が残ることも否めない。

(1) 個々の規制は，一部の緩和措置 (スプリンクラー設置と防火区画面積の上限の関係など) を除いて，各々独立し，すべてを満足することが要求され，対策相互の代替性がほとんどない。また，規制を守って得られた「最低限の安全」が確保された設計にどの程度の危険が残存しているのかを定量的に確認する方法がない。

(2) 用途・規模・構造について大まかな分類しか規制のレベルを分けることができないため，結果として規制が画一的になる。例えば，建築基準法の特殊建築物では，病院はホテル・旅館，共同住宅と同じ分類になっており,「法の求める最低限の安全」が仮に病院を想定しているとすると，病院以外の用途では最低限の安全ではなく，過剰な安全を要求している可能性がある。個別の建物がもつ空間的・運用的また人間行動的な要素を考慮した設計が可能となる手法が必要である。

これらの問題点を解決するため，また近年の世界的な性能にもとづく火災安全性能評価の流れや非関税貿易障壁の問題などもあり，1998 年に建築基準法防火規定が改正された。新防火規定の性能検証法には，耐火建築物の主要構造部の耐火性能を確認する「耐火性能検証法 [2]」と火災時に当該建築物内の在館者が避難を完了するまでの間，避難上支障のある高さまで煙又はガスが降下しないことを確認する「避難安全検証法 [3]」の 2 種類の検証法がある。また，それぞれの検証法は，ルート A，B，C の 3 つのルートに分かれている。このうちルート A は，従来の仕様規定をそのまま残したものである。ルート B は，性能規定ではあるが設計者が容易に設計できるように，政令・告示において性能要求を確認する際の種々の計算式が定められており，そこに必要なパラメタを入力することで，簡易な計算によって性能要求を満たしたかどうかの確認ができる。ルート

Cは，ルート Bで定められた以外の性能検証法を用いて要求性能を確認し，国土交通大臣に認定を受けるものである。ルート Cの手順で要求性能を確認しようとすると，発熱量や煙流動といった室火災性状を時間変化する現象としてとらえる必要があり，そのためにはコンピュータによるモデル解析を行なわなければならない。しかし，これまでに開発された火災性状を予測するプログラムは，適応上の制約も多く，なにより計算上の負荷を軽減するために，既往の研究により明確にされた個々の火災現象の物理モデルを著しく簡易化した形で利用するに留まっている。幸い，近年のコンピュータ技術の発展はめざましく，パーソナルコンピュータを用いて，手軽に複雑なシミュレーションを行なうことができるようになった。そのため，個別に提案された火災現象の物理モデルを複合して考慮した火災発熱解析プログラムの開発および解析結果を利用した手軽で信頼性の高い火災危険度評価手法が望まれている。

1.2 既往の研究

1.2.1 初期火災時の火災物理モデルに関する研究

本論文の主題である，可燃物特性が室火災性状に及ぼす響について検討する前に，火災現象を物理も出るとしてとらえた既往の研究を，以下，ア．個別の可燃物の燃焼と発生プリューム，イ．可燃物間の燃焼，ウ．室内での燃焼特性に関する研究，エ．室内での煙流動の順に述べる。

ア．個別の可燃物の燃焼と発生プリューム

初期火災時における可燃物の燃焼を表すモデルとしては，発熱速度 Q を時間 t の 2 乗に比例する ($Q = \alpha t^2$) とした考え方が一般的である。このときの係数 (火災成長率)α は，可燃物の大きさ，形状，材料などに依存するもので，すべての可燃物について検討することは不可能である。NFPA(米国防火協会) では，火災の成長曲線として，発熱速度が 1,055 kW に達する時間が 600，300 および 150 sec. である 3 種類の火源をそれぞれ成長速度 Slow，Medium，Fast として分類 [4, 5] している (図 1.1)。また，我が国では，家具などについて実験 [6, 7] により火災の成長曲線が求められている。

出火した可燃物上には火炎が形成される。火炎は時間的に伸縮し，火炎が最も高くなるときと最も低くなるときで火炎高さは大きく異なる。常に火炎が存在する領域を連続火炎，火炎が届いたり届かなかったりする領域を間歇火炎という [8]。通常，火炎高さというときは，時間的に 50 %の割合で火炎が存在する平均火炎高さ L_f を指す。火炎高さに関する基礎的研究はこれまでに数多くなされてきた。火炎高さは，一般に火源の代表径 D と発熱速度 Q の関数として位置付けられており，(1.1) 式で表される火災の規模を表す無次元発熱速度 Q^* を用いて，Zukoski[9] は (1.2) 式の関係を示した。

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g} D^{\frac{5}{2}}} \tag{1.1}$$

$$\frac{L_f}{D} = \begin{cases} 3.3 Q^{*\frac{2}{3}} & Q^* < 1 \\ 3.3 Q^{*\frac{2}{5}} & Q^* \geq 1 \end{cases} \tag{1.2}$$

ここで，

ρ_0	:	大気の密度 (kg/m^3)
T_0	:	温度 (K)
C_p	:	空気の比熱 (1.2 kJ/kg K)
g	:	重力加速度 (m/s^2)
D	:	火源の直径 (m)
Q	:	発熱速度 (kW)
Q^*	:	無次元発熱速度
L_f	:	火炎高さ (m)

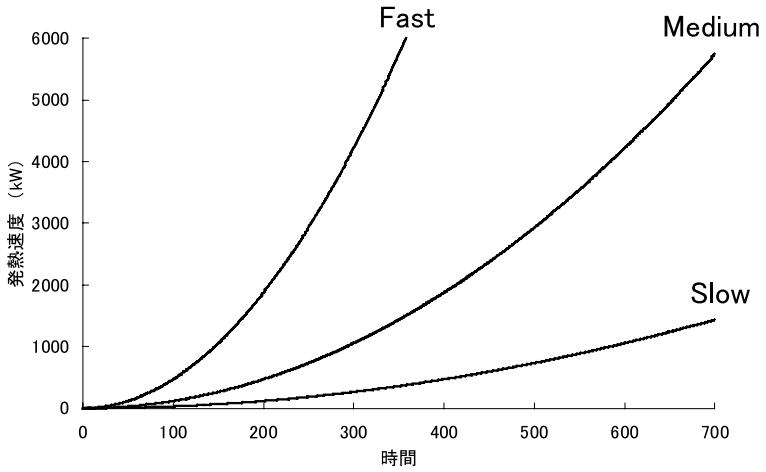


図 1.1: t^2 火災成長曲線 (NFPA)

イ．可燃物間の延焼

出火源付近の可燃物は，出火源上の火炎からの放射熱などにより加熱され着火に至る。火炎からの放射の入射熱流速 q_s (kW/m^2) は，火炎からの放射が指向性なく，4π 立体角に一様に放出されるとすれば，火炎と受熱点との距離 R (m) を半径とする円を考えて，(1.1) 式で簡易に計算できる。ただし，Q は火源の発熱速度 (kW)，χ_f は火源の燃焼による全熱量のうち放射熱として失われる割合で，通常の火災の場合 1/3 としてよい [3)]。

$$q_s = \frac{\chi_f Q}{4\pi R^2} \tag{1.3}$$

より厳密に，火炎からの放射の入射熱流速を求めるには，火炎に対する受熱面の形態係数を計算する方法がとられる。形態係数は，放射面である火炎の形状，放射面－受熱面間の距離などに依存する。また，可燃物が着火するか否かの条件は，放射強度とその継続時間，受熱側の物質特性と着火温度などによるが，実験により，一定の放射加熱を受ける条件のもと，木材の密度と着火時間の関係は，長岡 [10)] により求められている。

ウ．室内での燃焼特性に関する研究

火源が壁の近傍や室隅に存在する場合は，空気の巻き込みが制約されるために室中央にある火源と同一の発熱速度であっても火炎高さが異なる。この影響について，長谷見ら [11] は，火源の発熱速度 Q，火源の直径を D としたときに，$Q^{\frac{2}{5}}/D > 16.5$ の範囲で，最大火炎高さ L_m および連続火炎高さ L_c について，(1.4)，(1.5) 式を示した。

$$L_m = 0.21Q^{\frac{2}{5}} \tag{1.4}$$

$$L_c = 0.14Q^{\frac{2}{5}} \tag{1.5}$$

建築基準法の規制の 1 つに内装制限があるが，これは内装が可燃材であると，火災の燃広がりが激しくなることが理由の一つである。燃広がりの現象は，壁面や天井面に着火すると材料の表面方向に沿って火炎が流れるため，床面と比較すると著しく燃広がり易い。また，壁面や天井面は火災初期の段階から煙層にさらされるため，煙層からの熱によって燃広がりを起こす可能性がある。このような燃広がりが起これば，短時間に天井部が炎上し，フラッシュオーバー (以後 F.O.) を引き起こす可能性があり非常に危険である。

F.O. は，存在は知られているが，なお未知の部分が多く，以下のように様々な定義がある。

1. 区画の局部的燃焼から，区画全体への燃焼への急激な遷移
2. 燃焼支配型燃焼から換気支配型燃焼への急激な遷移
3. 天井に滞留する未燃ガスの着火による火災の急激な拡大

いずれにせよ，最初は緩やかな推移を見せる火災が，ある時点で急激に拡大する現象を F.O. と称し，これは区画された空間での火災の特徴の 1 つである。Waterman[12] は，3.64×3.64×2.43 m の区画で家具を燃焼させる実験を行い，F.O. が発生するためには床面へ 20 kW/m^2 の放射が必要であるとの結論を得た。

エ．室内での煙流動

火源上にはプリュームと呼ばれる燃焼生成物と空気の混合気体からなる熱気流が発生する。火源からの高さが十分に大きいところでは，気流は燃焼の発熱が一点に集中した点熱源上の軸対象流とみなすことができる [13]。実在の火源では，燃焼は有限の大きさの火炎の中で生じており，発熱源は点ではない。そこで，点熱源上のプリューム理論が上手く適用できるようにするため，火源面の下方に仮想点熱源を補整する手法 [14] が用いられる。

煙流動に関するモデルは，一般的な建築物での火災における煙性状を把握するにはゾーンモデル [15] を用いることが多い。また，ゾーンモデルにも，区画内を一様と考える一層ゾーンモデルと高温層と低温層に分類して考える二層ゾーンモデル (図 1.2) がある。また，ゾーンモデルでは予測不可能な旋回流の確認などは別のアプローチが必要であるが，辻本ら [16] は模型実験による煙流動の予測手法を確立した。

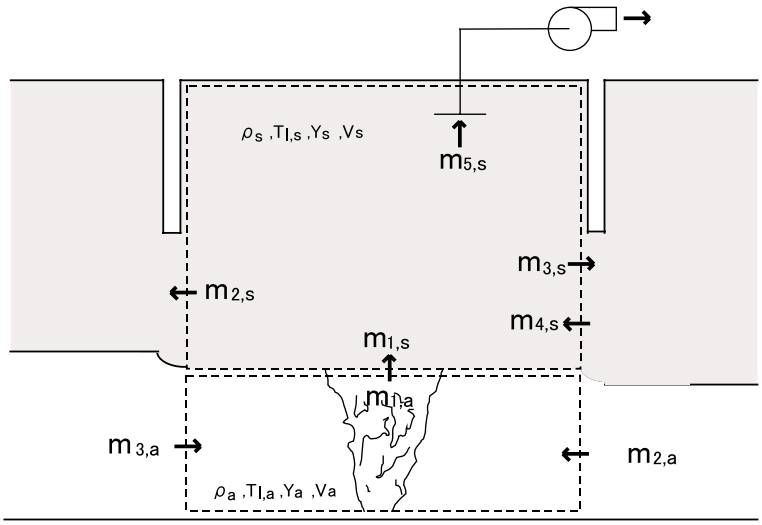


図 1.2: 二層ゾーンモデルの概念図

1.2.2 可燃物に関する研究

室火災性状に影響を与える要因の 1 つとして，可燃物特性が挙げられる。ここで，可燃物特性とは，対象とする空間内の総可燃物量，個々の可燃物の重量 (大きさ)，表面積，材質などの可燃物に特有の性質を指す。例えば，着火しやすく燃焼が速い可燃物が大量に持ち込まれた室は，火災時に非常に危険である。そのため，可燃物特性を適切に把握した上で，室火災性状の計算を行わなければならない。可燃物特性に関する調査は，用途ごとの単位床面積あたりの火災荷重 (可燃物密度) に関する調査 [17] が中心に行われてきた (図 1.3)。さらに，可燃物の発熱速度に影響する可燃物の表面積と可燃物量の関係は，油野ら [18] により調査されている。

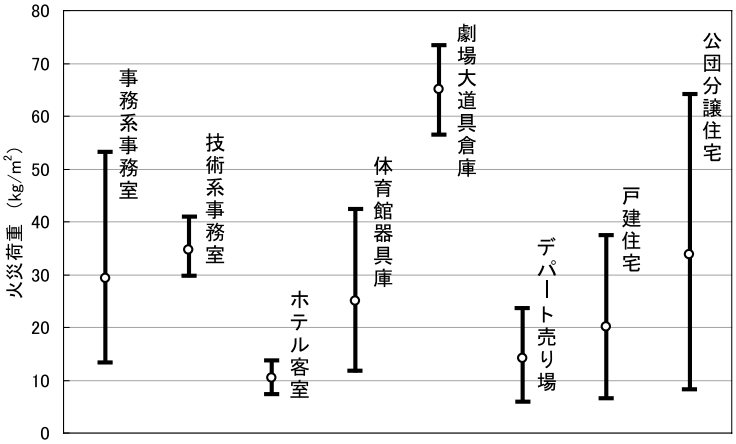


図 1.3: 建物用途ごとの単位床面積あたりの火災荷重

また，計画の分野において，家具の配置に関する研究[19]がいくつか行われているが，これらは生活空間で家具をどのように配置するかの傾向をつかむための研究であり，火災の分野での利用を前提としておらず，火災モデルに応用するのは難しい。

可燃物密度に関する調査以外には，佐藤ら[20, 21]による住宅に関する可燃物配置調査がある。この調査は，可燃物特性のモデル化を念頭においており，可燃物量の調査だけに留まらず，可燃物の材質や配置の特徴などについてまとめている。

1.2.3 可燃物配置が室火災性状に及ぼす影響に関する研究

可燃物配置を考慮して，室火災性状を時間変化する現象としてとらえた研究に，高橋[22]の正方格子モデルを用いた室火災性状予測が挙げられる。高橋の提案した正方格子モデルは，室をグリッドに分割し，グリッド中央に等重量の可燃物を均等に配置したモデルであり，着火点は室中央に配置された可燃物とし，室中央から円状に火災が進展していく。このモデルは，少ない計算量である程度の精度で発熱速度の時間変化をとらえることができ，火災安全性能評価のためのモデル火災を設定する手法を提案した。その後，松本[23]は，可燃物の大きさおよび配置をランダムに取り扱ったランダム配置モデルを用いて，発熱解析のシミュレーションを行い，可燃物特性が室火災性状に与える影響を統計的に分析している。ランダム配置モデルは，室用途を特定することなく，一般的な室での火災安全性の評価を試みている。これらの研究については，4.1でさらに詳しく紹介する。

1.2.4 火災危険度評価に関する研究

火災危険の対象には，人的損失と経済的損失の2通りが考えられる。人的損失には，火煙による死者数や死亡率，在館者がいる空間が火煙によって人命に危険な状態になるまでの時間などがある。また，経済的損失には，焼損面積，焼損を受けた財産の損害金額，修復費用などがある。危険度評価の手法には，　火災危険度を潜在的危険と安全対策のレベルの比で表したもの[24]，　火災の進展状況により火災フェーズを設定し，その火災フェーズの推移を防止する性能で評価したもの[25]，　構造工学の分野で提案されている限界状態設計法を応用し，火災危険度を統計・確率論的に取り扱ったもの[26]などがある。ここでは，本研究の火災危険度評価に関係の深い　限界状態設計法を応用した火災危険度評価の概要を紹介する。

火災危険の判定には，避難所要時間t_eと火煙によって危険となるまでの時間t_cの比較$(t_e > t_c)$が基になり，t_e，t_cともに不確定な要因によって変動する。文献[26]では，この両者の変動幅を考慮して,「ある防火区画内が出火した場合に，区画内の誰かが避難不能となる確率」を火災危険度と定義している。t_eは，避難開始までの時間 (火災発見の方法や情報伝達の方法によって変動) と避難開始から完了までの所要時間 (避難の人数や能力，建築計画によった要因で変動) とに分けられる。t_cは，火源の種類，発熱量，消火設備の信頼性によって変動すると考えられる。

1.2.5 避難安全検証法による安全性評価手法

避難安全検証法[3)]のルート B では，可燃物密度 (単位床面積あたりの発熱量) をもとに，簡易式により煙等降下時間を算定することで，安全性の評価が行なわれている。ここでは，避難安全検証法のうち，階避難安全検証法による安全性評価手法ついて説明する。

階避難安全性能とは,「当該階のいずれの室で火災が発生した場合においても，当該階に在する者の全てが，当該階から直通階段の一までの避難を終了するまでの間，当該階の各居室及び各居室から直通階段に通ずる主たる廊下その他の建築物の部分において，避難上支障がある高さまで煙又はガスが降下しないものであること」と定義されている。

階避難安全検証法は，以下の 2 つの段階に分けて階避難安全性能があることを検証する。

第 1 段階では，火災室となる居室において，在室者が居室の外へ安全に避難できることを確かめる。具体的には，(1.6) 式により，階にある居室ごとに，在室者のすべてが居室からの避難を終了するまでに要する時間 t_{escape} を求める。次に，(1.7) 式により，火災からの煙やガスが避難上支障のある高さまで降下するのに要する時間 t_s を求める。居室の避難終了時間が煙の降下時間を超えないことを確認する (図 1.4)。

$$t_{escape} = t_{start} + t_{travel} + t_{queue} \tag{1.6}$$

$$t_{escape} \leq t_s \tag{1.7}$$

ここで，

t_{escape}	:	居室の避難終了時間 (min.)
t_{start}	:	避難開始時間 (min.)
t_{travel}	:	歩行時間 (min.)
t_{queue}	:	出口通過時間 (min.)
t_s	:	煙等降下時間 (min.)

第 2 段階では，居室からの避難安全が確保されていても，火災室からの煙が避難経路となる廊下に拡大すると，火災室以外の居室からの避難が困難になるおそれがあるため，火災室以外の室について，階に存する者が階から安全に避難できることを確かめる。ここでは，まず，想定される火災室ごとに，階に存する者の全てが直通階段へ避難を終了するまでに要する時間を求める。次に，避難経路などの部分において，煙やガスが避難上支障のある高さまで降下するのに要する時間を求める。階の避難終了時間が煙の降下時間を越えないことを確認する。全ての火災室について，階の避難終了時間が煙の降下時間を超えないことを確認して検証が終わる。基本的には，第 1 段階の居室が階全体に拡張されたものである。

ここで，可燃物密度が関係するのは，居室の煙等降下時間 t_s である (図 1.5)。煙等降下時間は (1.8) 式で表され，蓄煙可能な部分の体積を，正味の煙等発生量で除することで得られる。正味の

煙等発生量とは，火災により発生する煙量 V_s から排煙設備により排出される煙量 V_e を引いた値である。なお，V_s，V_e ともに後述する簡略化した計算式により求めるため，$V_s - V_e$ が負の値をとることもあるため，これを避けるために最小値として 0.01 m^3/min. を設定している。

$$t_s = \frac{A_{room} \times (H_{room} - 1.8)}{\max(V_s - V_e, 0.01)} \tag{1.8}$$

ここで，

A_{room} : 当該居室の床面積 (m^2)
H_{room} : 当該居室の床面の最も高い位置からの平均天井高さ (m)
V_s : 煙等発生量 (m^3/min.)
V_e : 有効排煙量 (m^3/min.)

煙等発生量 V_s は，積載可燃物の火災成長率 α_f 及び内装材の火災成長率 α_m により，(1.9) 式で求められる (図 1.6)。α_f，α_m は，共に可燃物の燃焼拡大の速さを表しており，α_f は，(1.10) 式に示すように積載可燃物の発熱量に応じて算定し，α_m は任意の値を設定する。

$$V_s = 9\Big((\alpha_f + \alpha_m)A_{room}\Big)^{1/3}\Big(H_{low}^{5/3} + (H_{low} - H_{room} + 1.8)^{5/3}\Big) \tag{1.9}$$

$$\alpha_f = \begin{cases} 0.0125 & q_l \leq 170 \\ 2.6 \times 10^{-6} q_l^{5/3} & q_l > 170 \end{cases} \tag{1.10}$$

ここで，

α_f : 当該居室の積載可燃物 1 m^2 あたりの発熱量に応じて定まる値
α_m : 当該居室の壁及び天井の室内に面する部分の仕上げの種類で定まる値
H_{low} : 当該居室の最も低い位置からの平均天井高さ (m)
q_l : 単位床面積あたりの積載可燃物の発熱量 (MJ/m^2)

避難安全検証法で設定されている積載可燃物の単位床面積あたりの発熱量の一部を表 1.1 に示す。木材の単位質量あたりの発熱量を 16 MJ/kg とすれば，住宅の居室の可燃物密度として，45.0 kg/m^2 を想定していることになる。

表 1.1: 積載可燃物の単位床面積あたりの発熱量

室の種類	発熱量 (MJ/m^2)
住宅の居室	720
事務室その他これに類するもの	560
教室	400
廊下，階段その他の通路	32

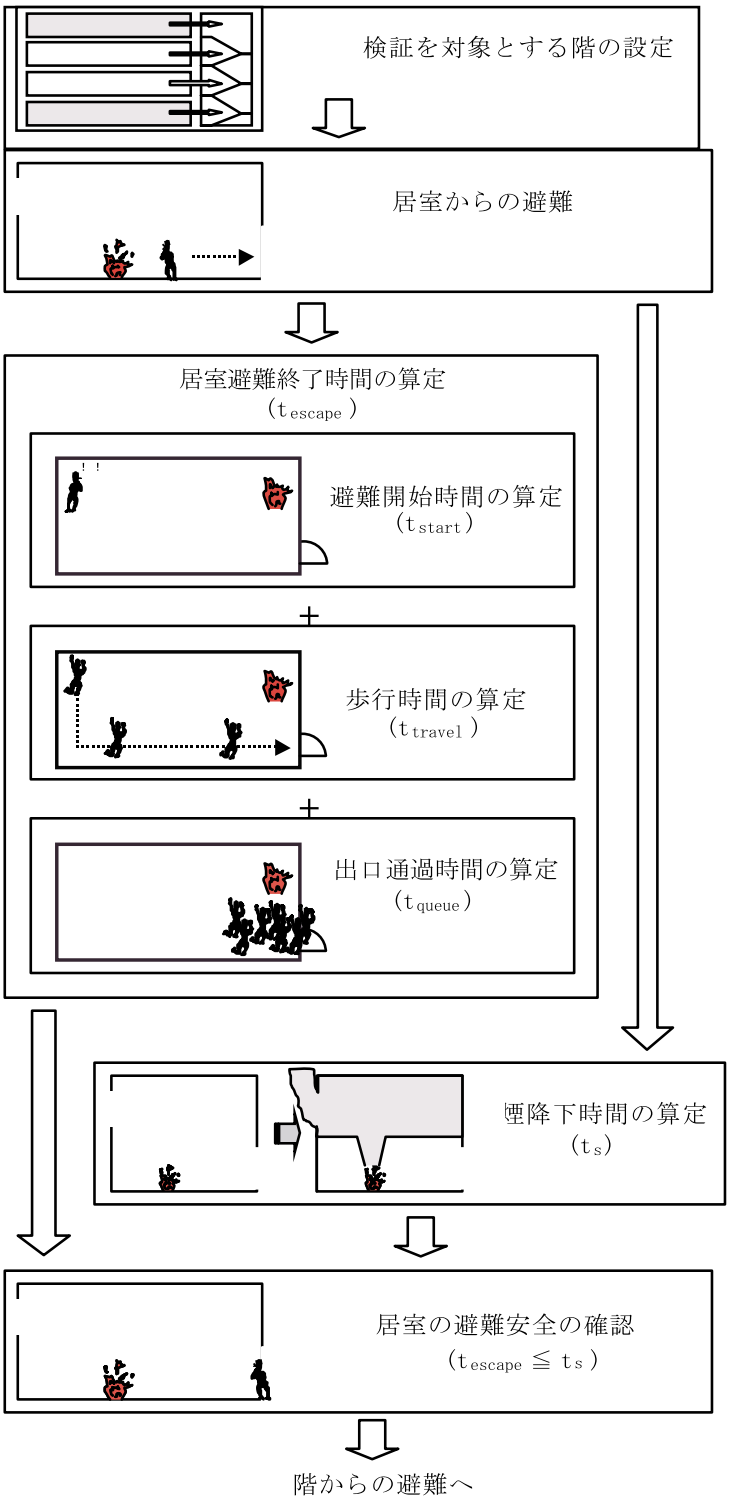


図 1.4: 階避難安全検証法の手順

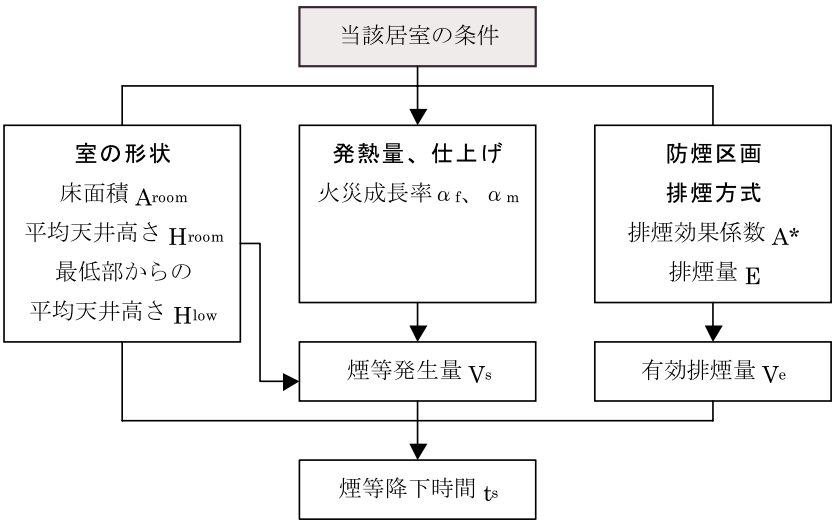


図 1.5: 煙等降下時間の算定手順

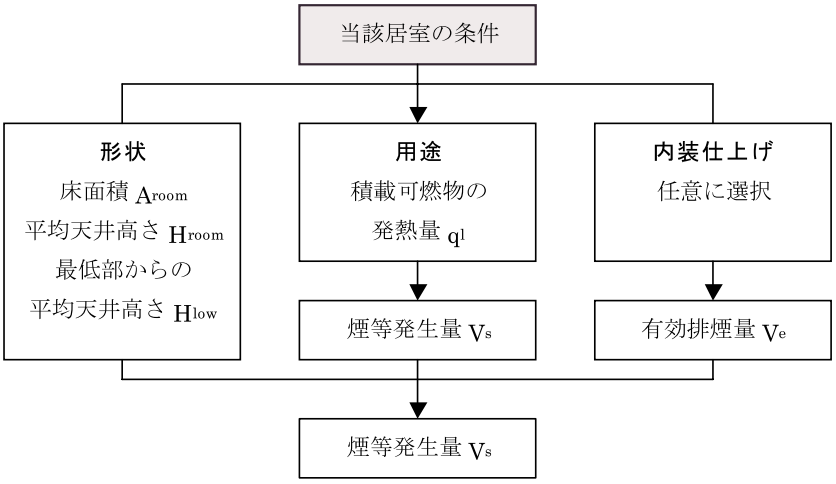


図 1.6: 煙等発生量の算定手順

1.3 本研究の目的

一般に，火災は出火源となる火源から，近傍の可燃物や内装材に延焼することで拡大する。区画された室内で生じた火災の発熱速度は，図 1.7 に示すように，条件によっては無炎状態であるくん焼期を経過し，有炎状態である成長期に移行する。その後，ある程度火災が進展すると，フラッシュオーバー (F.O.) と呼ばれる発熱速度が急激に大きくなる現象が生じる。F.O. 後の盛期火災での発熱速度は，燃え草となる可燃物量や供給される空気量などで決定される。それに対して，成長期での火災の進展には，可燃物の総量，大きさ，材質，配置などの可燃物特性の影響が大きく，単純に，従来用いられてきた室に存在する可燃物量だけでは，発熱速度を推定することはできない。成長期の火災の進展程度によっては，短時間に大きな火災につながるおそれがあり，避難に要する時間が大きく変化する。そのため，成長期の火災を発熱量が時間変化する現象としてとらえることが非常に重要となる。

しかし，従来は，火災の進展状況に関係なく，用途ごとに調査された単位床面積あたりの火災荷重である可燃物密度を用いて，火災安全性の評価が行なわれてきた。前述したように，盛期火災以後の最大発熱量の算定には，燃え草となる可燃物量がわかれば十分であるため，可燃物密度による火災安全性評価で一応の成果が得られた。しかし，可燃物特性が発熱速度の変化に重要な影響を及ぼす成長期においても，可燃物密度を平均化して考慮した手法により，火災安全性評価を行なうことは十分であるとは考えがたい。しかし，この手法は，1998 年に定められた建築基準法防火規定においても適応されており，最大発熱量と火災継続時間が問題となる「耐火性能検証法」において，可燃物密度を用いて安全性評価を行なうのは勿論，初期火災時の発熱速度が問題となる「避難安全検証法」においても，用途ごとの単位床面積あたりの発熱量，つまり可燃物密度で煙層の降下時間の算定を行い，その値と別途求められた避難時間との比較を行なうことで，安全性が評価されている。このように，避難を対象とした比較的初期の段階においても，可燃物密度で火災安全性を検証する理由の 1 つに，従来行なわれてきた可燃物に関する調査の大半は，用途ごとの可燃物密度の調査であり，可燃物の大きさや材質，配置といった可燃物特性に関して調査されたものがほとんどなく，情報が不足していることが挙げられる。

一連の研究として，これまでに，未知の可燃物特性をランダムに取り扱ったランダム配置モデルの提案を行なった。これは，1 m^2 あたり 1 個の可燃物が存在すると仮定して，設定した可燃物密度に従って個々の可燃物の大きさを定め，それぞれランダムに配置させたモデルであったが，1 m^2 あたり 1 個という，本来ならば固定されていないはずの値を固定したために，相対的な安全性の比較は可能であったが，現実の避難計画に応用できるものではなかった。さらに，可燃物特性は用途ごとに大きく異なることが予想され，それぞれの用途に見合った可燃物配置モデルが必要となる。

本研究では，可燃物特性が発熱速度に重要な影響を及ぼす成長期までを初期火災と定義し，可燃物特性に関する調査が数年来行なわれている住宅を対象に，可燃物特性を考慮した可燃物配置モデルを提案する。さらに，これまで個別に提案されていた火災現象の物理モデルを，可能な限

り複合して考慮した火災燃焼モデルを用いて，火災発熱解析を行なうことで，発熱速度を時間変化する現象としてとらえ，初期火災時に可燃物特性が発熱速度にどのような影響を及ぼすかについて検討する。これにより，例えば，防火規制を強化することなく，家具 (可燃物) の配置を変更することで，火災危険度をどの程度低減できるのかを明らかにすることも可能となる。また，従来用いられてきた可燃物密度による初期火災時の火災危険度評価の妥当性について検証する。

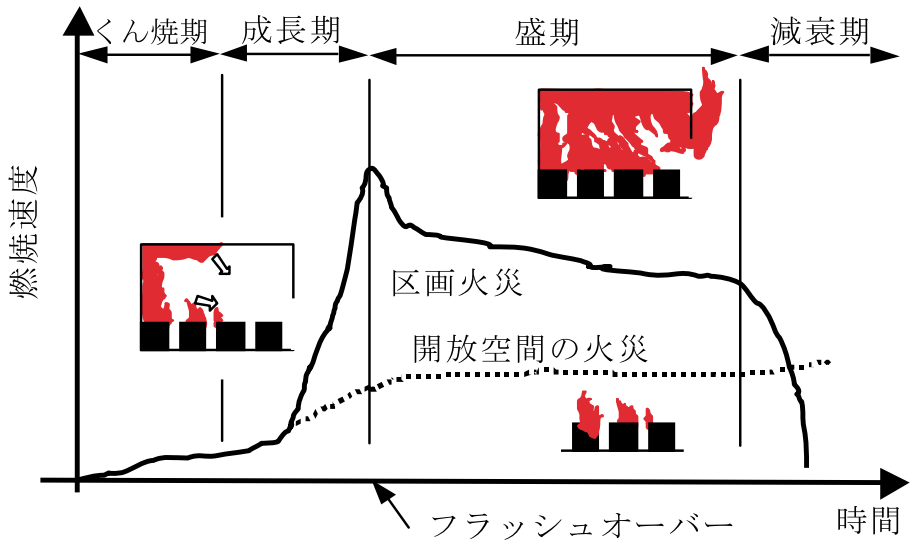


図 1.7: 発熱速度の時間変化

1.4　本論文の構成

本研究は，初期火災時の火災危険度を評価するために，現状で行なわれている可燃物密度にもとづく評価だけではなく，可燃物の配置や大きさといった可燃物特性を考慮する必要があると考え，住宅での可燃物配置調査をもとに可燃物特性を考慮した可燃物配置モデルを構築する。さらに，室発熱性状を時間変化する現象としてとらえるために，個々の火災現象の物理モデルを複合して考慮した火災燃焼モデルを構築し，可燃物配置モデルと合わせて，火災発熱解析を行ない，その解析結果をもとに，火災危険度に影響を及ぼす可燃物特性を特定し，一般に使用されている可燃物密度による火災危険度評価が可能であるかを検証する。本論文は全 8 章で構成され，それぞれの章で，以下の内容について検討を行なっている。なお，本論文全体の流れを図 1.8 に示す。

序章では，本研究の目的を述べると共に，既往の研究の紹介を行なう。既往の文献は，初期火災時の火災の物理モデル，可燃物特性，可燃物配置に関する研究と避難安全検証法での安全性評価手法である。

第 2 章では，本研究で行なう可燃物配置モデルの対象を住宅に定めた理由を，住宅火災の死亡リスクと病院火災の死亡リスクの経年変化を法規制の面での比較から明らかにする。また，住宅火災の実態に添う形での可燃物配置モデルになるよう，火災統計をもとに，住宅火災での死亡者数，死亡原因，出火原因について整理する。

第 3 章では，既往の可燃物量に関する調査，家具配置に関する計画系の研究の紹介を行なう。また，可燃物の配置や大きさの分布に関する実在例の住宅の可燃物配置調査をもとに，住宅の可燃物特性に関する資料を，可燃物配置モデルの入力値となるように整理する。

第 4 章では，一連の可燃物配置モデルとして，可燃物を室に均等に配置する正方格子モデルおよび可燃物をランダムに配置するランダム配置モデルを説明し，第 3 章で整理した住宅の可燃物特性を考慮した，本研究で使用する可燃物配置モデルの構築を行なう。このとき，可燃物配置調査の対象となった家具などの可燃物を「大型可燃物」，居住者の身の回りの物で，持ち込み可燃物量や大きさが確定できない衣類などの可燃物を「小型可燃物」と定義し，それぞれの特徴を考慮したモデル化を行なう。

第 5 章では，個別に提案されていた火災現象の物理モデルを，複合して考慮した火災燃焼モデルを構築する。個々の可燃物の燃焼，可燃物間の放射，煙流動，排煙，内装の燃焼性，F.O. 後の火災性状について述べる。また，第 4 章で構築した可燃物配置モデルに従って可燃物を配置し，火災燃焼モデルにより燃焼性状を計算する火災発熱解析プログラムについて説明する。本章の最後では，実大火災実験で得られた実験結果と同様の条件での解析結果との比較により，火災発熱解析プログラムの妥当性について検証する。

第 6 章では，初期火災時の火災の進展に大きな影響を及ぼすと考えられる小型可燃物の特性として，小型可燃物の直径と個数を考慮して，室火災性状の感度解析を行う。それにより，小型可燃物の可燃物特性が室発熱性状へどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

第 7 章では，本研究の目的である可燃物特性を考慮した火災危険度評価を行なう。第 6 章で得られた知見をもとに，現在，一般に火災危険度評価に使用されている可燃物密度だけで，適切に火災危険度を評価可能であるかを検証する。

第 8 章では，本研究で得られた知見の総括を行い，今後の課題について述べる。

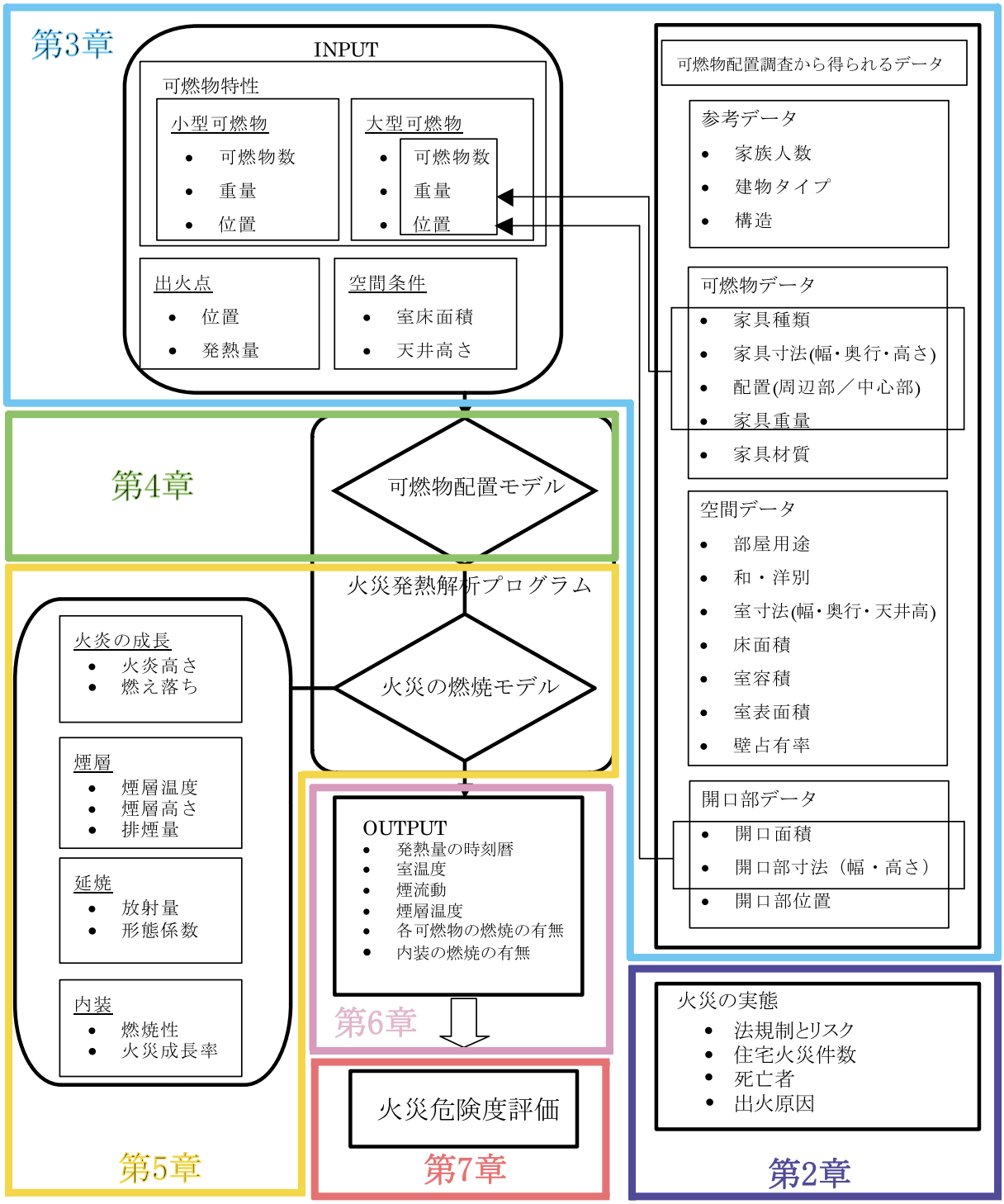

第3章
INPUT
可燃物特性
小型可燃物
可燃物数
重量
位置
大型可燃物
可燃物数
重量
位置
出火点
位置
発熱量
空間条件
室床面積
天井高さ
可燃物配置調査から得られるデータ
参考データ
家族人数
建物タイプ
構造
可燃物データ
家具種類
家具寸法(幅・奥行・高さ)
配置(周辺部／中心部)
家具重量
家具材質
空間データ
部屋用途
和・洋別
室寸法(幅・奥行・天井高)
床面積
室容積
室表面積
壁占有率
開口部データ
開口面積
開口部寸法（幅・高さ）
開口部位置
第4章
可燃物配置モデル
火災発熱解析プログラム
火災の燃焼モデル
火炎の成長
火炎高さ
燃え落ち
煙層
煙層温度
煙層高さ
排煙量
延焼
放射量
形態係数
内装
燃焼性
火災成長率
第5章
OUTPUT
発熱量の時刻暦
室温度
煙流動
煙層温度
各可燃物の燃焼の有無
内装の燃焼の有無
第6章
火災危険度評価
第7章
火災の実態
法規制とリスク
住宅火災件数
死亡者
出火原因
第2章

図 1.8: 本研究の流れ

第2章　火災統計による住宅火災の危険性

火災の危険は人類が火気を使用するようになって以来，有していると考えられる。我が国においても，江戸時代の大火など，火災は人々に身近で恐れられる災害の 1 つであった。人々は火災の恐怖から逃れるために，火災の原因となる出火を抑制したり，火災が大火に進展しないように工夫してきた。さらに，現在では，火災の影響が個人の所有権以外の部分にも及ぶことから，建築基準法や消防法によって建築物にはさまざまな規制がかけられている。近年の火災による死亡者数は，1 年間におおよそ 1,200 人程度 (放火自殺者を除く) で安定している。これを多いと見るか少ないと見るかは判断が難しいところではあるが，1,200 名の死亡者の実に約 3/4 にあたる人々が住宅火災でなくなっている。本来なら，最も安心して生活できる空間であるべき住宅で，このように高い割合で毎年死者が発生していることは，防火を研究テーマとする者にとっては無視できない事実である。これは，現行の建築基準法や消防法で規制の対象となる建築物は，主に不特定多数の人が集まる特殊建築物や，大規模建築物に限られており，個人の所有物である住宅には，上記の規制がほとんどかからないことが原因の 1 つであると言える。確かに，住宅にも厳しい防火規制をかければ死亡者は減るであろう。しかし，規制に頼ることなしに火災による死者を減らす方法はないのだろうか。本章では，本研究で火災危険度評価の対象とした住宅での火災危険とは何かを明らかにするため，消防による火災統計をもとに，住宅火災による死亡者の特徴を整理し，住宅火災の危険性について分析する。

図 2.1 に，本研究の流れと本研究中での本章の位置付けを示す。

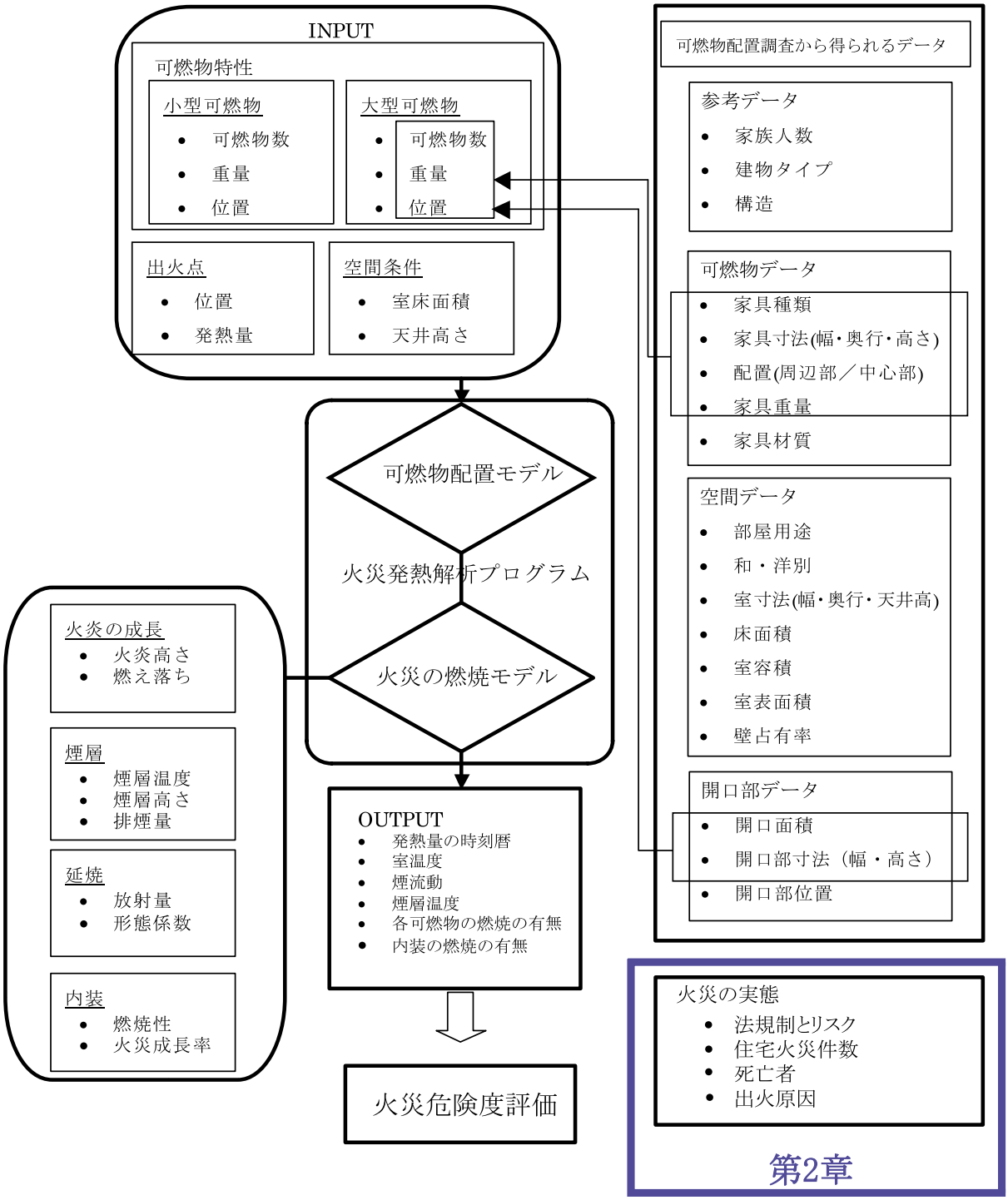


図 2.1: 本研究中の本章の位置付け

2.1　法規制と死亡リスク

現在，建築基準法，消防法で防火規制がなされている建築物は，特殊建築物と大規模建築物だけである。例えば，建築基準法第 27 条により耐火建築物又は準耐火建築物としなければならない特殊建築物として，法別表第 1(い) 欄に共同住宅と併記されている病院は，過去に火災による多数の死者を経験している。その経験を踏まえて，表 2.1，2.2 に示される建築基準法および消防法の法改正が繰り返されることで死亡者数は減少している。図 2.2 は，1955 年からの全国の病院の病床数とそのうちスプリンクラーが未設置であると推定される病院の病床数及び病院火災での死者数の関係を示したものである。法規制が強化される度に，スプリンクラーが設置されたと推定される病床数が増え (スプリンクラー以外の対策も多分に影響されていると思われるが)，それにつれて死亡者数も減少している。現在では病院における火災による死者数は，毎年 5 人程度となっており，30 年前の死亡者数と比較すると明らかに法規制の効果が見てとれる。

一方で，共同住宅は法第 27 条では，病院と同様の規制がかかることになっているが，スプリンクラーの設置義務など病院には適用されても共同住宅には適用されない規制がいくつかある。また，一般的な戸建住宅には，防火に関する法規制のうち，単体規定はほとんどかからない。このため，図 2.3 にみられるように，1970 年代に法規制が強化された病院や旅館ホテルの利用者 10 万人あたりの死亡者数は，法規制がかかる前と比べると急激に減少しており，住宅の死亡者数を下回った。それに対して，法規制のほとんどかからない住宅は，数十年に渡り，非常に高い割合で死亡者数がほとんど変化しないまま推移している。

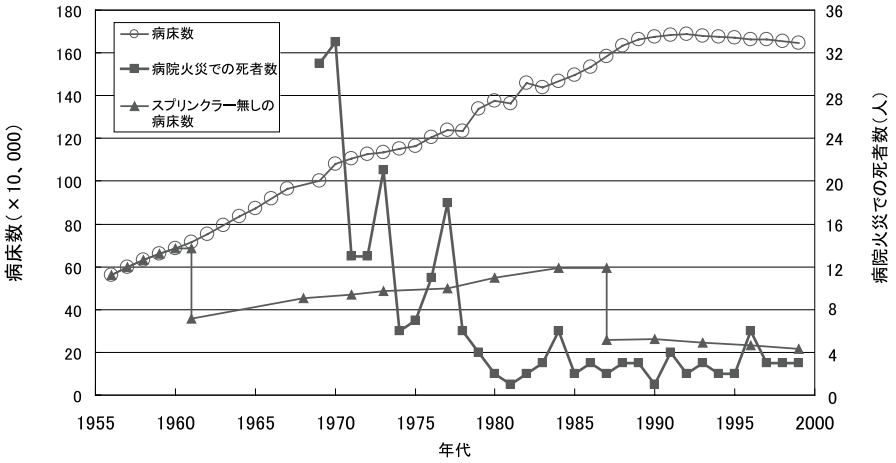


図 2.2: 病院火災での死者数とスプリンクラー設置病床数の関係 [27)]

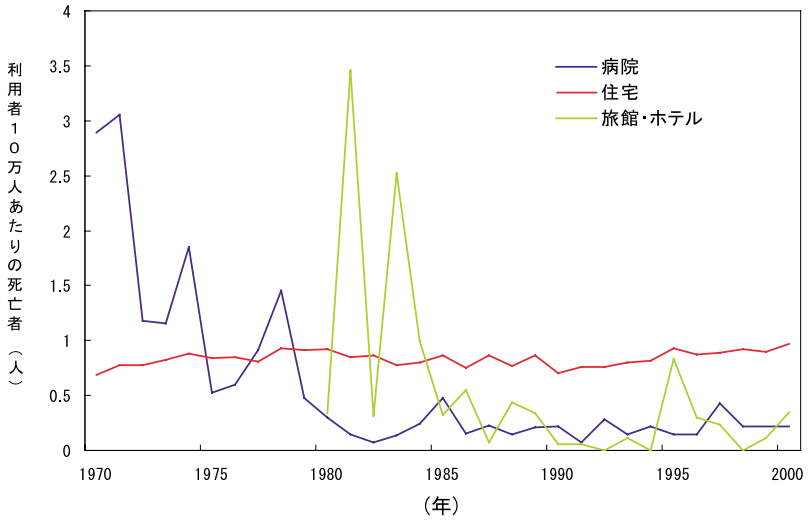


図 2.3: 住宅，病院，旅館ホテル火災での死亡者数 [27)]

表 2.1: 病院に対する建築基準法改正の時期と内容 [27)]

1956 年 6 月	令 120 令 121 の 2	・直通階段の規定 病院の病室から直通階段に至る歩行距離は 50 m(耐火構造など) もしくは 30 m 以下 (歩行距離制限の最初) ・直通階段の設置については令 121 条 (昭 25) で病室の床面積 $\geq$50 m^2 で 2 以上の直通階段 ・屋外避難階段の構造 木造としてはならない
1958 年 10 月	令 112- 6, 7	・(新) 防火区画部分の貫通部の構造の規定 ・(新) ダクトへの防火ダンパーの設置規定 防火区画の規模について（昭 25）は 1,500 m^2 ごと，スプリンクラーを設備した部分は不要
1959 年 12 月	令 112 令 129 令 122	・ 防火区画をしなければならない部分の規定 ・耐火建築物 1,500 m^2 ・スプリンクラー設備設置の場合は最大 3,000 m^2(11 階以上，1,000 m^2 の面積区画) ・壁，床貫通部の防火区画防火区画をしなければならない部分の規定 ・(新) 病院の場合，耐火建築物であれば内装制限不要 簡易耐火建築物では，2 階の用途 $\geq$300 m^2 で居室及びこれから地上に通じる経路の壁・床 を難燃材料以上 ・用途，規模による避難階段の設置規定 (耐火構造の場合の緩和規定) ((昭 25) では，5 階以上に通じる直通階段は避難階段又は，特別避難階段)
1969 年 1 月		・避難階の真上真下階以外の吹き抜け，ならびに 3 層吹き抜け抜けの禁止 いわゆる竪穴区画の規定の制定 ・3 階以上の部分に内装制限 (準不燃材料以上) の適用 ただし，100 m^2 区画した場合は免除される ・避難路は不燃材料または準不燃材料とする ・スプリンクラー設備など自動消火設備および 排煙設備が設置されている場合は，上記規定が緩和される
1970 年 6 月	法 34 法 35	・高さ 31 m を超える建築物に非常用エレベーターの設置の規定 → 令 129 の 13 の 13 ・避難および消火に関する技術規準の整備として排煙設備，非常用照明設備および消火栓，スプリンクラー設備，貯水槽を政令で定める ((昭 25) では 1,000 m^2 以上の病院に避難設備，消火設備を義務付け)
1970 年 12 月	令 112 令 126 の 6 令 126 の 7 令 129	・階段室の防火区画の改正 竪穴の常閉もしくは煙感知器連動閉鎖 ・(新) 非常用進路入口の設備規定 適用範囲は 3 階以上の階で 31 m 以下の部分と，その設置場所非常用エレベーター設置の建築物には適用しない ・(新) 非常用進入口の構造の規定 ・特殊建築物の内装制限の整備適用範囲の変更，病院では階数 1 で延べ面積 3,000 m^2 以上が該当するが大きな影響はない
1970 年 12 月	令 129 の 13 の 3 令 126 の 2 令 126 の 3 令 116 の 2 令 120 令 123 令 126 の 4	・(新) 非常用エレベーターの構造の規定の整備 (31 m を超える部分の階の床面積が 1,500 m^2 を超える病院のみ) ・(新) 排煙設備に関する基準の整備 適用範囲は特殊建築物で延べ面積 500　超えのもの，階数 3 以上で延べ面積 500 m^2 超えのもの (100 m^2 区画は除く)，排煙上有効な開口部面積が床面積の 1/50 未満のもの，延べ面積 1,000 m^2 超えの建築物で，床面積 200 m^2 超えの部分 ・(新) 排煙設備の構造の整備 防煙区画 500 m^2 以内とし，垂壁の規定 排煙口，排煙ダクト，排煙機，ダンパー，予備電源の規定 排煙設備の制御，作動状態の監視は中央管理室でできる ・(新) 無窓の居室 (排煙設備) の規定 ・直通階段に至る距離規定の整備 ・避難階段または特別避難階段の構造の整備 (新) 非常用照明装置の設置の規定 (病室は不要，避難経路は必要) 適用範囲は別表 1 の (1)〜(4) 項の建築物，階数が 3 以上で，かつ延べ面積 500 m^2 超え，階数が 3 以上で，かつ延べ面積 500 m^2 超え，延べ面積 1,000 m^2 超え
1973 年 8 月	令 126 の 5 令 112 令 123	・(新) 非常用照明装置の構造 床面 1 ルクス以上 ・防火戸面積の上限 (3 m^2) の設定，防火ダンパーの遮煙性などの基準の整備 ・避難階段，特別避難階段の出入り口の防火戸の遮煙性，開閉機構の基準 (←令 112)

表 2.2: 病院に対する消防法改正の時期と内容[27] (スプリンクラーのみ)

1961 年 3 月	令 12	施行令制定
		病院用途では 4 階以上に病室 1500 m^2 以上でスプリンクラー設置
1972 年 12 月	令 12	6,000 m^2 以上にスプリンクラー設置
1974 年 6 月	法 17 の 2	消防設備を特定防火対象物に既存遡及する
1987 年 10 月	令 12	3,000 m^2 以上にスプリンクラー設置

2.2 住宅火災の件数と死亡者数

平成 11 年版消防白書[28] によると，平成 10 年に発生した建物火災は 28,932 件である。このうち，住宅火災は 16,635 件であり，建物火災の 57.5 %を占めている (図 2.4)。次に，平成 10 年の火災による死亡者数は，建物火災全体で 1,039 人であったが，このうち住宅火災での死亡者は 865 人である。つまり，火災により建物火災で死亡した人のうち 83.3 %の人が住宅火災でなくなっており (図 2.5)，火災による死亡者数という見地で考えた場合，住宅は非常に危険な建築物であることを示している。住宅火災件数および住宅火災での死亡者数の年度変化を見るために，図 2.6 に平成 12 年度から過去 10 年間の住宅火災件数と住宅火災での死亡者数を示す。これによると，住宅火災件数と死者数共に過去 10 年間ほとんど変化せず一定の割合で推移していることがわかる。このことは，住宅火災が既に社会的リスクとして人々に受け入れられている証拠だと考える意見もある。

2.3 住宅火災での死亡者と死亡原因

住宅火災での人口 10 万人あたりの年齢別死亡者数 (図 2.7) を見ると，65 歳以上の高齢者が死亡する割合が非常に高いことがわかる。これと，図 2.8[29] に示す死者発生経過の内訳を見ると，2 番目に多い「自力避難困難 (21.3 %)」には，高齢者，乳幼児や身体障害者などがあてはまり，火災時の行動能力や判断力に欠けたことが死に至った主たる原因と判断できる。また,「逃げようとして逃げ切れず (15.3 %)」も，いったん避難行動を起こしたものの火災拡大が予想上に早かったり，身体不自由のために逃げ切れなかったケースであり，先の「自力避難困難」と共通する要素がある。「着衣着火 (9.9 %)」も同様で，行動能力の劣る高齢者などが最も多く犠牲となっているケースである。従って，これら 3 つのケースを合わせると，全体の半数近い 46.5 %が火災時の対応能力の欠如が原因であると考えられる。逆に，絶対数は少ないが 10 代，20 代の若者が火災で死亡するケースとしては,「逃げるタイミングの送れ (13.1 %)」があてはまる。このケースでは，早急に逃げていれば死亡に至らなかったと考えられるが，消火作業や家財搬出のために避難に失敗し死亡に至ったと考えられる。

このような事例を考えると，住宅火災で死亡に至るリスクは，住民 (使用者) の避難対応能力に大きく依存していることが予想できる (本研究では，初期火災時の火災の燃焼性状を物理的に評価することを目的としており，使用者の避難対応能力については検討しない)。そのため，今後，高齢化社会を迎える我が国において，住宅火災の死亡率が徐々に増加する可能性が考えられる。

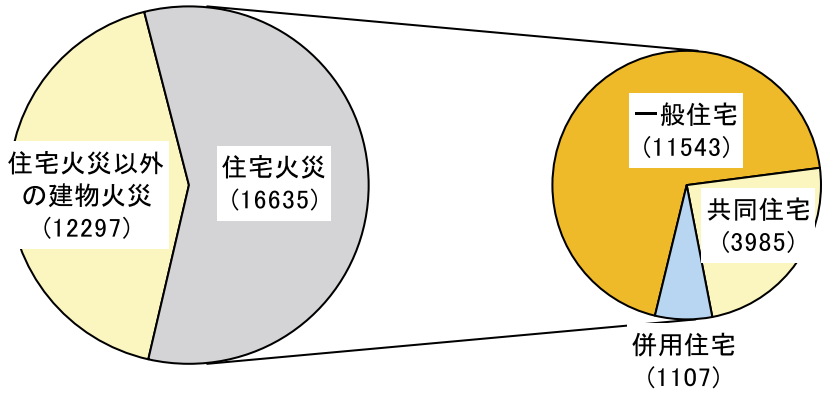


図 2.4: 建物火災における住宅火災の割合

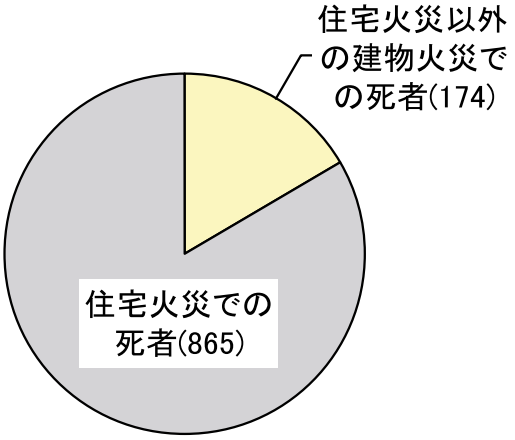


図 2.5: 建物火災での死者数

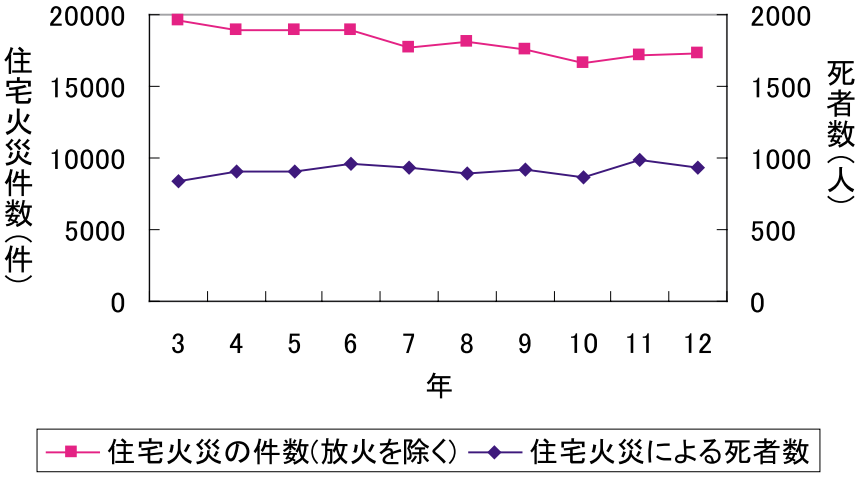
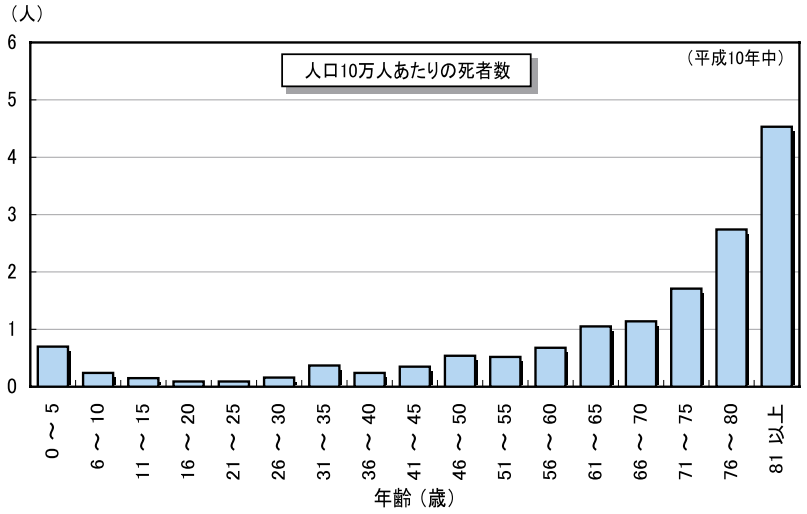


図 2.6: 過去 10 年間の住宅火災件数と死者数



(注) 年齢不明者5名を除く。人口は、平成10年10月1日現在の推計人口(総務庁統計局)による。

図 2.7: 住宅火災における年齢階層別死者発生状況 (放火自殺者を除く)

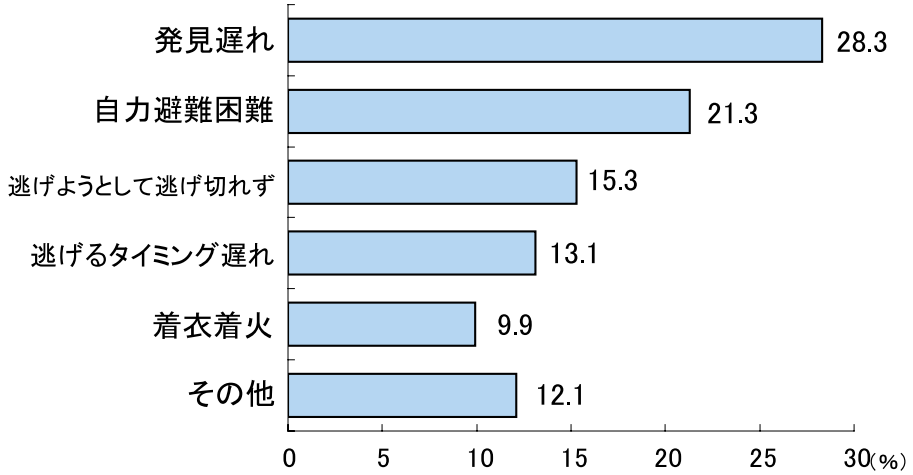


図 2.8: 住宅火災における死者発生経過の内訳

2.4 住宅火災の出火原因

火災初期の段階では，出火源から第一着火物に着火するか否かが，その後の火災の進展に大きな影響を及ぼす。そこで，表 2.3 に住宅火災の出火原因についてまとめた [29]。火災の出火原因の第一位は「不明」となっており，これは火災の原因を特定することが困難であることを示している。第二位は「たばこ・マッチ・ライター」，第三位は「暖房器具」となり，これらは毎年同じように火災の原因として挙げられている。しかし，近年では，その他にもコンセントに付着した埃が原因で火災に至る「トラッキング」やコンセントの断線による火災など出火原因も多種多様にわたっている。文献 [30] によると，平成 11 年度の戸建住宅の出火原因は 203 種類，共同住宅の出火原因は 188 種類と報告されている。

出火原因である出火源から火災に進展するか否かは，出火源近傍の着火物の存在が重要である。水野ら [31] の調査によると，共同住宅における火災での出火原因と第一着火物の関係は，布団などの寝具，衣類，紙くずとタバコライターと暖房用ストーブの組み合わせで約 45 %を占めている。しかし，逆にいえば約 55 %の火災は他の出火原因と第一着火物の組み合わせからなっており，住宅のようにきわめて多種類の可燃物が存在する室においては，出火原因や第一着火物を限定することは困難である。

表 2.3: 住宅火災での出火原因

	出火原因	
第一位	不明	27.9 %
第二位	たばこマッチライター	26.2 %
第三位	暖房器具	21.3 %

2.5　まとめ

本章では，2.1 で，病院と住宅にかかる法規制について述べた。多数の死亡者が発生するたびに法規制を強化してきた病院は，死亡者数が急激に減少しているが，規制がほとんど適用されない住宅では，30 年前から死亡者数がほとんど変っていないことを示した。2.2 では，消防による火災統計をもとに，住宅火災と住宅火災での死亡者数について整理した。住宅火災で死亡している人の半数近くは 65 歳以上の高齢者になっており，また，図 2.8 の死亡原因から検証しても，火災時の対応能力や判断力が不足している高齢者，身体障害者にとって危険であるため，今後の高齢化社会に向けて対策が必要である。2.4 では，住宅火災の出火原因について整理した。住宅の出火原因および第一着火物の関係は，約半数は布団とタバコなどの特定の組み合わせてで決定されるが，残りの半数は特定が困難であり，近年ではトラッキングによる火災が増えるなど多種多様にわたっている。

第3章　可燃物配置調査

可燃物に関する調査は，過去にいくつか行われている。その中で，最も系統的に実施された可燃物量の調査は,「建築物の総合防火設計法[32)]」に掲載されており,「鋼構造耐火設計指針[?)]」において，ほぼ前者の内容が引用されている。しかし，このような可燃物に関する調査の大半は，建物用途ごとの積載可燃物量 (可燃物密度) に関する調査であり，盛期火災時の火災性状に影響を受ける耐火設計に必要な最大発熱量の推定を主たる目的としている。そのため，単体の可燃物の燃焼性状や可燃物間の延焼が発熱量の変化に大きな影響を及ぼす，初期火災を対象とした火災発熱解析を行うには十分な資料とはなりえない。本章では，3.1 で既往の可燃物調査の紹介と初期火災に利用する上での問題点について述べる。3.2 では，火災荷重としての可燃物を扱ったものではないが，計画系のテーマで家具の配置に関する研究の紹介を行なう。3.3 では，本研究で使用した住宅の可燃物配置調査について，調査対象，調査方法，調査結果を説明する。ここで使用する調査は，可燃物配置のモデル化を念頭において調査されたものであり，年度ごとに調査内容が変更されている。調査で得られたデータを統計的に処理し，後述する可燃物配置モデルの入力値として使用する手法について説明する。

図 3.1 に，本研究の流れと本研究中での本章の位置付けを示す。

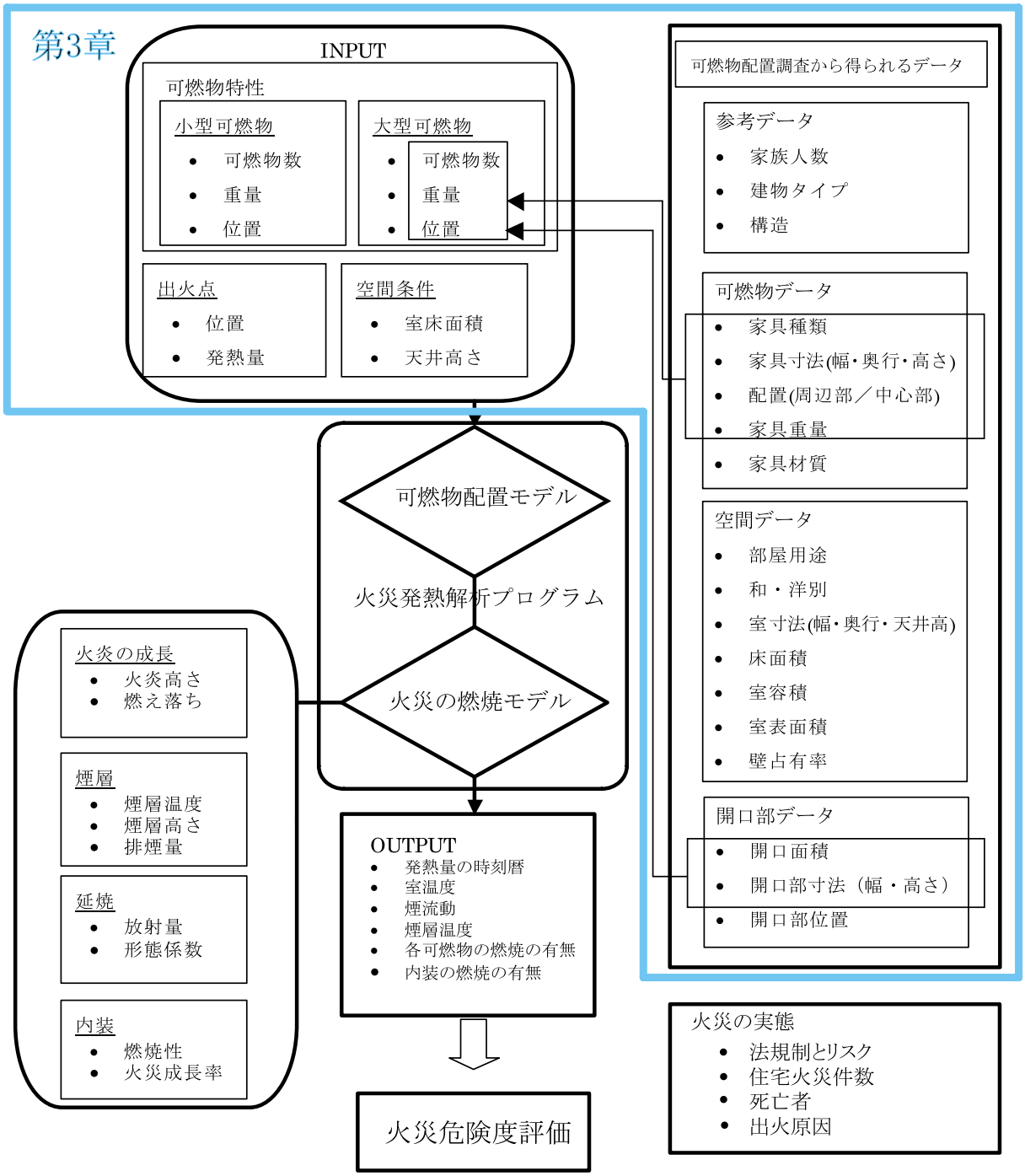


図 3.1: 本研究中の本章の位置付け

3.1 積載可燃物量に関する既往の調査

これまでに行なわれた可燃物に関する調査の大半は，以下に示す単位床面積あたりの積載可燃物量 (可燃物密度) についての調査である。文献[32] では，事務所，ホテル，体育館，劇場，倉庫，デパートなどの建物用途別に積載可燃物量の調査を行っている。しかし，報告されているのは，単純に室に存在する積載可燃物量を床面積で除して，単位床面積あたりの積載可燃物量の平均値とその標準偏差をまとめたものである。ちなみに，積載可燃物量には，表 3.1 の 3 種類を考えている。その他には，文献[33] で，住宅に関する可燃物調査が行われているが，同様に単位床面積あたりの積載可燃物量の平均値とその標準偏差に関して調査されている。表 3.2 に用途別積載可燃物量の平均値とその標準偏差を示す。

このように，既往の可燃物に関する調査では，可燃物密度に関する情報しか得られず，可燃物特性を考慮した可燃物配置モデルを構築するには，情報が不足している。そこで，本研究では，可燃物特性に関して数年来調査されてきた住宅の可燃物配置調査 (3.4 に後述) に着目した。

表 3.1: 積載可燃物量の種類

名称	内容
1) 単位床面積あたりの積載可燃物量	単純に総重量を床面積で除したもの
2) 単位床面積あたりの等価積載可燃物量	材料ごとの発熱量の違いを考慮して，上記の重量を木材換算したもの
3) 単位床面積あたりの収納積載可燃物量	上記の等価積載可燃物量にさらに，可燃物の収納状態まで考慮したもの

表 3.2: 用途別積載可燃物量[32, 33]

建物用途	室用途	積載可燃物量 平均値 (kg/m^2)	積載可燃物量　標準偏差 (kg/m^2)
事務所	事務系事務室	29.3	11.2
	技術系事務室	34.6	4.4
ホテル	客室	10.4	1.5
デパート	売場	14.2	7.0
住宅	戸建	20.0	6.5
	公団賃貸	28.8	11.3
	公団分譲	33.8	10.3
	社宅	37.2	11.5

3.2　家具配置に関する計画系研究

火災を対象とした可燃物配置に関する研究ではないが，計画系の研究の一環として，家具が空間にどのように配置されるかについて報告[19, 34]されている。

表 3.3 に，文献[35]で報告されている家具配置の特徴を家具の種類ごとにまとめた。

表 3.3: 家具の配置の特徴[35]

テーブル	壁に接しない
机	壁に沿って配置され，窓との関係を重視する
ベッド	壁に沿って入口から離れた，日当たりのよい場所に配置される
収納家具	壁に沿って配置され，背の高いものは部屋の角に置かれる傾向がある

その他の調査対象として，文献[36]では，約 50 年間の家具寸法の変化を家具ごとに捉え，収納家具は総じて大型化している傾向があることを示している。また，文献[37]では，家具の種類ごとの保有率と「住戸形式」,「家族構成」の関係を統計的に処理し，座家具類は,「住戸形式」,「家族構成」の両方に規定要因が生じやすく，収納家具は,「住戸形式」,「家族構成」のいずれにも規定要因が生じにくいことを示している。

3.3　住宅の可燃物配置に関する調査と可燃物配置の特徴

3.3.1　本研究で使用した可燃物配置調査

本研究に利用したデータは，鹿島技術研究所が収集し，武蔵工大建築学科の卒業論文として整理した文献[38, 39, 40]など，ならびに鹿島技術研究所の委託研究として文化女子大学沢田教授，丸茂講師が実施[36]した下記2種類のデータである。今回構築した第4章以降で述べる可燃物配置モデルに利用できるように，これらのデータを家具などの配置の規則性について再度集計整理したものである。

本研究では，以下の2つの可燃物配置調査データを統計的に処理することにより，後述する住宅の可燃物配置モデルの入力値を定めた。

1. 工学院大学学生を対象とし，鹿島建設株式会社技術研究所 佐藤が，防災工学の授業の一環として実施された，学生が主に生活している空間における室内の家具類の配置状況についてのアンケート調査 (以後，大学生個室データ)
2. 文化女子大住環境学研究室に鹿島建設株式会社技術研究所が委託した調査資料「住宅の家具配置および空間利用状況に関する基礎的報告」(以後，女子大学生自宅データ)

以下に，それぞれの調査の詳細を説明する。

大学生個室データ

この調査は，佐藤ら[39]によって過去6年にわたり継続的に行われている。各年の調査件数は，平成9年度：54件，平成10年度：73件，平成11年度：77件，平成12年度：107件，平成13年度：86件，平成14年度：56件の計453件である。

平成9年度に行なわれた調査は，6，7月に実施され，利用している空間の平面図及び各面展開図上に木質系可燃物の立体的形状と重量を記載させたものである。平成12年度まで同様のアンケート調査表を用いていたが，可燃性家具を簡便かつ広範囲にデータ収集するために，質問事項の変更 (例えば，家具の重量は個人では測りかねるため，体積のみの記入とし，重量はかさ比重量から換算することにした，また，平面図に記入させていた0.30 m×0.30 mのグリッドを家具の寸法をもとに0.45 m×0.45 mに変更した) を加えている。そのため，ここでは，アンケート内容が同じであった平成9年度から12年度までを1つにまとめ，平成13年度，平成14年度の3種類のアンケート結果について紹介する。

女子大学生自宅データ

火災安全性への前提条件となる，可燃物の設置状況に関する実態を明らかにすることを目的に行なわれた調査資料を整理したものである。調査対象は，首都圏に建設された戸建住宅・集合住宅で，大学生の子供のいる家族が同居する住宅である。対象の住宅は，延べ床面積が42.26〜312.25

m^2(内，97.4 %が 175.3 m^2 以下) であり，家族構成は 2〜7 人であった。ここでも大学生個室データと同様に，調査内容から平成 10 年度以前のデータ 63 件と平成 11 年度のデータ 51 件の 2 種類に分けて考える。

これら 2 つの可燃物調査の目的は，生活様式の多様性から居住者に依存しているとされていた住居内の可燃物 (家具) 配置について，ある空間内における可燃物 (家具) 個数と配置状況などを記入してもらうことで，可燃物 (家具) 配置のパターンを見出そうというものである。可燃物に関する上記 2 つの調査で得られたデータを表 3.4 にまとめる。表 3.4 は上記の 2 つのアンケート調査によって得られたデータの内容と調査の有無をまとめた表で，これらのデータを整理し，比較・検討することによって家具などの可燃物配置のパターン化を目指す。ここで，居室分類の方法の一つとして，家族など，多数の人が食事や団欒の場として使用する公室 (パブリック空間) に対して，主に個人が使用し，就寝などの生活行為の場である私室 (プライベート空間) に大別できる。上記 2 つのデータは大学生個室データが私室 (学生が主に生活している空間) として扱うのに対して，女子大学生自宅データは一般住宅における可燃物調査であることから，室用途別の家具などの可燃物の情報を知ることができる。ただし，女子大学生自宅データの開口部に関するデータについては現段階では公室 (L，LD，DK，LDK) に関するデータのみである。また，室用途別の持ち込まれる家具の個数は，女子大学生自宅データ 114 件すべての居室についてのデータを利用するが，可燃物の位置と壁，開口部との関係については公室についてのみとする。つまり，(1) 大学生個室データをもとに，主に私室における配置パターン，(2) 女子大学生自宅データをもとに，主に公室における配置パターンを整理する。

表 3.4: 本研究で利用した住宅に関する可燃物調査

データ種類	調査対象 実施年度	大学生個室 H9〜H12	大学生個室 H13	大学生個室 H14	女子大学生自宅 H10 以前	女子大学生自宅 H11
参考						
家族人数		○	○	○	△	○
建物タイプ		○	○	○	○	○
構造		○	○	○	○	○
所有権		○	○	○	×	×
経過年数		○	○	○	×	○
空間						
和洋		○	○	○	○	○
部屋用途		○	○	○	○	○
室寸法	幅	○	○	○	○	○
	奥行	○	○	○	○	○
	天井高	○	○	○	○	○
床面積		○	○	○	○	○
室容積		○	○	○	○	○
室表面積		○	×	×	×	×
壁占有率		○	○	○	×	×
床占有率		○	○	○	×	×
有効壁率		×	×	○	×	×
可燃物						
家具種類		○	○	○	○	○
家具寸法	幅	○	○	○	○	○
	奥行	○	○	○	○	○
	高さ	○	○	○	○	○
家具材質		○	○	○	×	×
収納物材質		○	○	○	×	×
収納状況		○	○	○	×	×
配置 (周辺部/中心部)		×	○	○	○	○
位置		×	△	○	×	○
開口部						居間と自室のみ
外気接触の有無		○	○	○	○	○
開口部種類		○	○	○	○	○
開口寸法	幅	○	○	○	○	○
	高さ	○	○	○	×	○
開口面積		○	○	○	×	○
開口部位置		×	×	△	×	△
コンセント						7 件のみ
設置高さ		×	○	○	○	×
個数		×	○	○	○	×

△：資料，図面をもとにアンケートから読み取ったデータ

3.3.2　調査データの統計

2つの可燃物調査で調査された内容のうち，後述する可燃物配置モデルの入力に関連する以下の事項を中心にデータの統計量を示す。ここで，1.および2.は可燃物数に関する入力データ，5.および6.は個々の可燃物重量に関する入力データ，7.は可燃物配置に関する入力データに関連する。ただし，3.および4.に関しては，可燃物配置モデルに使用可能なデータとして不十分であるため，ここではデータの統計量を示すが，可燃物配置モデルの入力データとしては取り扱わない。

1. 床面積と家具数の関係
2. 室用途と家具数の関係
3. 家具の材質の年度変化
4. 収納物の収納状況
5. 家具の体積分布
6. 家具の標準寸法
7. 家具の位置

1. 床面積と家具数の関係

大学生個室データ453件の私室における床面積と平均家具数の関係および女子大学生自宅データ114件における住宅の延べ床面積に対する平均家具数の関係を図3.2および図3.3に示す。ここで，平均家具数とは，図3.2では1室あたりの家具数の平均で，図3.3では1住宅あたりの家具数の平均を示す。共に床面積の増加に伴い平均家具数も増えている。

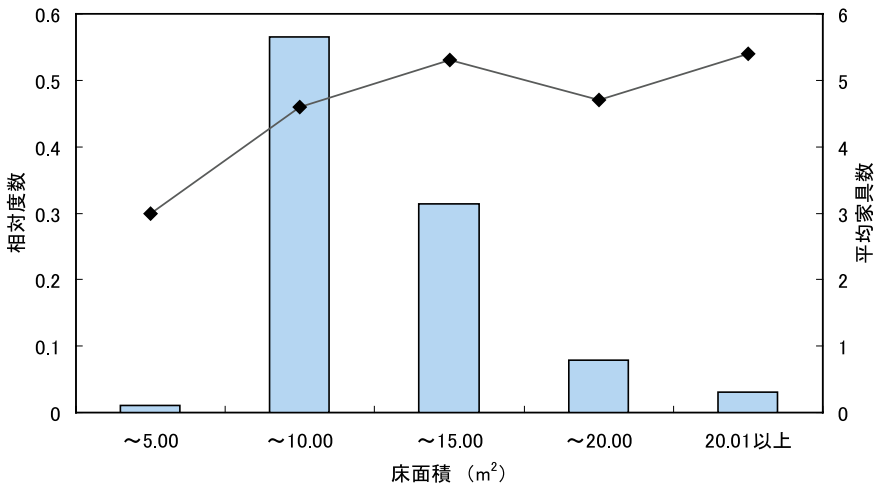


図3.2: 大学生個室データの私室の床面積と平均家具数の関係

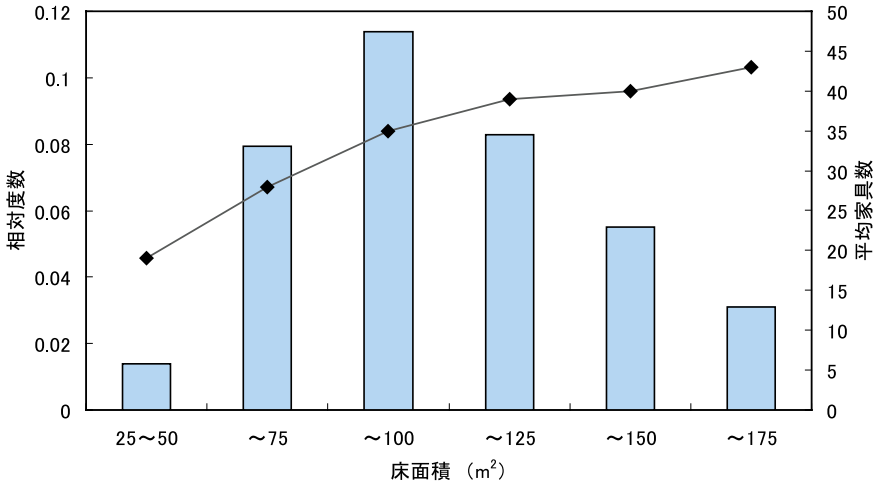


図 3.3: 女子大学生自宅データの住宅 1 件あたりの延べ床面積と平均家具数の関係

2. 室用途と家具数の関係

表 3.5 は，女子大学生自宅データ 114 件で，室用途ごとに置かれた家具の種類とそれぞれの個数を整理したものである。1 部屋あたりの家具平均設置数は 6.10 個であるが，LDK は 12.60 個，和室客室は 2.81 個と室用途によるばらつきが大きい。家具の種類では，雑収納家具が最も多く総数で 636 個，ついでタンス 547 個，ダイニングチェア 404 個となっている。配置に関しては，事務イス，その他イス，ダイニングチェアなどのイス類とダイニングテーブル，ローテーブルこたつのテーブル類が中央部に配置される傾向があるが，その他の家具はすべて周辺部に配置されやすい。ここで，周辺部配置とは，以下の 2 条件のうち少なくとも一方を満たすものをいい，中央部配置とは，周辺部配置以外の配置を指す。

- 可燃物の少なくとも一辺が壁に接している
- 可燃物の重心が壁から 0.45 m の範囲に含まれる

表 3.6 に，表 3.5 の分類別の家具数を部屋数で割った，一部屋あたりの平均家具設置数を示す。

表 3.5: 室用途ごとの家具設置数

家具大分類	家具中分類	全数量	数量	数量	用途							位置	
			(和室)	(洋室)	LDK	親	学生	祖父母	趣味	和室	納戸	中心	周辺
部屋数		662	220	447	48	115	209	32	22	52	39		
収納家具類	雑収納家具	636	160	470	94	78	172	30	24	14	19	23	613
	タンス	547	260	277	8	201	206	34	11	32	34	7	540
	本棚	218	53	163	10	31	125	5	11	4	10	5	213
	食器棚	146	6	140	55	0	0	1	1	0	0	1	145
	サイドボード	66	15	51	15	3	2	0	1	4	0	1	65
座家具類	ダイニングチェア	404	0	404	162	4	0	0	0	0	0	329	75
	机	264	58	205	4	24	187	1	19	5	2	7	257
	ベッド	209	29	179	0	33	166	8	0	1	0	10	199
	事務用イス	196	36	159	0	14	150	1	9	5	2	142	54
	ローテーブルこたつ	178	61	117	26	12	40	6	0	24	0	148	30
	休息用イス	149	23	126	32	11	16	3	2	15	0	57	92
	ダイニングテーブル	105	0	105	43	1	0	0	0	0	0	80	25
	その他のイス	83	24	59	9	21	12	2	6	8	0	63	20
	そ の 他 の テーブル	32	7	25	1	3	7	2	5	3	0	4	28
家電類	テレビ	208	71	137	30	33	51	9	2	8	0	4	204
	冷蔵庫	120	0	120	49	1	0	0	0	0	0	1	119
	ステレオ	99	20	79	7	14	58	0	1	2	0	0	99
	パソコン	25	8	17	1	0	13	0	2	2	0	0	25
	その他の家電機器	134	22	110	27	0	27	5	10	2	0	2	132
その他家具	楽器	80	12	68	17	5	11	1	4	6	1	2	78
	その他	142	67	75	15	51	30	9	5	11	0	3	139
合計		4041	932	3086	605	549	1273	117	113	146	68	889	3152
平均設置数		6.10	4.24	6.90	12.60	4.77	6.09	3.66	5.14	2.81	1.74		

表 3.6: 室用途ごとの平均家具設置数

家具大分類	家具中分類	全数量	数量	数量	用途							位置 (割合)	
			(和室)	(洋室)	LDK	親	学生	祖父母	趣味	和室	納戸	中心	周辺
部屋数		662	220	447	48	115	209	32	22	52	39		
収納家具類	雑収納家具	0.98	0.73	1.08	1.96	0.68	0.83	0.96	1.03	0.27	0.62	3.6	**96.4**
	タンス	0.83	1.18	0.61	0.17	1.75	0.98	1.04	0.44	0.59	0.93	1.3	**98.7**
	本棚	0.34	0.24	0.37	0.21	0.27	0.61	0.15	0.48	0.09	0.28	2.3	**97.7**
	食器棚	0.22	0.03	0.31	1.15	-	-	0.03	0.07	-	-	0.7	**99.3**
	サイドボード	0.10	0.07	0.12	0.31	0.03	0.01	-	0.03	0.05	-	1.5	**98.5**
座家具類	ダイニングチェア	0.61	-	0.92	3.38	0.03	-	-	-	-	-	**81.4**	18.6
	机	0.40	0.26	0.46	0.08	0.21	0.89	0.03	0.82	0.17	0.06	2.7	**97.3**
	ベッド	0.32	0.13	0.40	-	0.29	0.80	0.25	-	0.03	-	4.8	**95.2**
	事務用イス	0.30	0.16	0.36	-	0.12	0.72	0.03	0.41	0.17	0.06	**72.4**	27.6
	ローテーブルこたつ	0.27	0.28	0.27	0.54	0.10	0.20	0.19	-	0.48	-	**83.1**	16.9
	休息用イス	0.23	0.10	0.29	0.67	0.10	0.08	0.10	0.10	0.24	-	38.3	**61.7**
	ダイニングテーブル	0.16	-	0.24	0.90	0.01	-	-	-	-	-	**76.2**	23.8
	その他のイス	0.12	0.11	0.13	0.19	0.18	0.06	0.06	0.20	0.15	-	**75.9**	24.1
	その他のテーブル	0.05	0.03	0.06	0.02	0.03	0.03	0.07	0.24	0.04	-	12.5	**87.5**
家電類	テレビ	0.32	0.32	0.31	0.63	0.29	0.25	0.28	0.07	0.13	-	1.9	**98.1**
	冷蔵庫	0.18	-	0.27	1.02	0.01	-	-	-	-	-	0.8	**99.2**
	ステレオ	0.15	0.09	0.18	0.15	0.12	0.28	-	0.03	0.03	-	-	**100**
	パソコン	0.04	0.04	0.04	0.02	-	0.06	-	0.07	0.07	-	-	**100**
	その他の家電機器	0.21	0.10	0.25	0.56	0.08	0.13	0.16	0.37	0.07	-	1.5	**98.5**
その他家具	楽器	0.12	0.05	0.15	0.35	0.04	0.05	0.03	0.13	0.14	0.02	2.5	**97.5**
	その他	0.21	0.30	0.7	0.31	0.44	0.14	0.27	0.17	0.21	-	2.1	**97.9**

3. 家具の材質の年度変化

大学生個室データで，家具の材質に関するアンケート内容が，平成 9〜12 年度と平成 13，14 年度で異なっている。平成 9 から 12 年度では，構成材料を「木・紙・布・プラスティック・不燃物」の 5 種類に大別し，アンケート記入者がこの中から選択する方法を取っていた。そのため，ごくわずかの例外を除いて，ほとんどのアンケート記入者が 1 種類の構成材料を選択していた。本来なら，家具などの可燃物は，構成割合は限られていたとしても，複数の材料からなっていると考えられ，このように材料を選択する方法では調査に限界があると思われた。そこで，平成 13，14 年度の調査では，構成材料をアンケート記入者が，独自に記入する方法を取った。そこで，6 年間を通して構成材料を比較し，現在までの傾向を見るために，平成 13，14 年度の調査を平成 12 年度以前のデータと比較できるように，単一の構成材料として記載されているものに限ってデータを抽出した (図 3.4)。

しかし，データの抽出と調査方法が大学生へのアンケート調査であったため，調査に取り組む姿勢にばらつきがあったり，記入の基準が不統一 (例えば，ベッドの材質はベッド本体で答える人とマットレスを含めて答える人がいた) であったことなどを考慮すれば，値の信頼性は低いが，数年間の大まかな傾向は示せていると考えられる。また，平成 13，14 年度に調査した構成材料の割合についても，目に見える範囲で構成材料の割合を記入するため，家具メーカーに問い合わせた値と大きく異なったものとなった (目に見えない部分で木材以外の材料が使用されている)。そのため，ここでは家具の構成材料のうち木材の割合が減少する傾向があることを示すに留まり，可燃物配置モデルにおいても構成材料については考慮しないものとした。

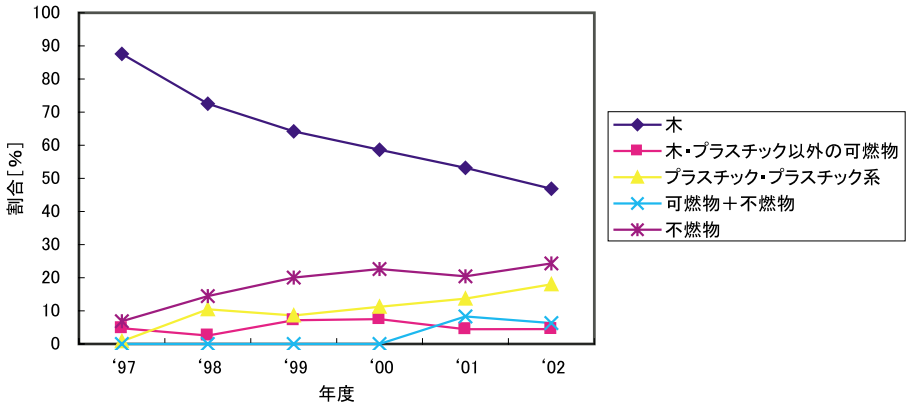


図 3.4: 家具の主要な材質の割合の年度変化

4. 収納家具の収納状況

大学生個室データでは，家具の材質と共に収納家具の収納状況についてもアンケートを行なっている。アンケート方法は，平成 9 年度から 14 年度まで共通しており，収納家具の収納状況を「満杯，3/4，1/2 以下，収納なし」の四段階に定め，この中から記入者が選択する方法で行なわれている。ここでは，アンケート結果から収納家具の収納状況を表 3.7 のように整理し，代表的な収納家具である雑収納家具ついてまとめた。

雑収納家具では，75 %以上の収納状況が報告されていつものが大半を占め，収納家具として実用的に使用されていることがわかる。また，ここでは紹介していない他の収納家具でも同様の傾向が見られた。ただし，アンケート記入時には，部屋に散乱していた衣類などを整理整頓して，収納したとも考えられるため，ここでは，家具以外の可燃物量がどの程度存在するのかの目安として，調査結果を利用することとした。

表 3.7: 収納状況の分類

	詳細
(100)	収納家具に 100 %収納されている状態，満杯
(75)	収納家具に 75 %程度収納されている状態，少し空きがある状況
(50)	収納家具に収納されている割合が半分以下の状態，あまり収納家具として利用されていない状況
(0)	収納家具に全く収納されていない状態

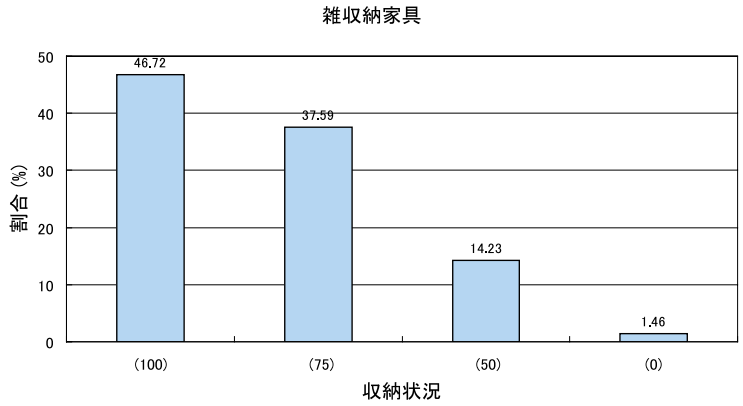


図 3.5: 雑収納家具の収納状況

5. 家具の体積分布

調査の対象となった家具が，どの程度の大きさの可燃物であるのかを検討するために，表 3.5 中のすべての家具 (4041 個) について，体積分布を調べた (図 3.6)。個々の家具の体積は，例えばダイニングテーブルのように中空のものであっても，調査で記入された家具の幅 × 高さ × 奥行 (図 3.7 参照) から算出した。このことで，実際の家具の体積よりも大きく見積もることになり，密度を乗じることで得られる可燃物の重量も大きな値となる。しかし，火災発熱解析では，可燃物の重量は燃焼継続時間のみに関係するため，本研究の対象である初期火災時には，重量増加による発熱速度への影響は無視できる。図 3.6 から，調査の対象となった家具の体積は，0.1〜0.3 m^3 に全体の 50 %以上が含まれており，徐々に大きな家具が増えていくが，1.0 m^3 以上の家具は全体の 10 %程度であることがわかる。

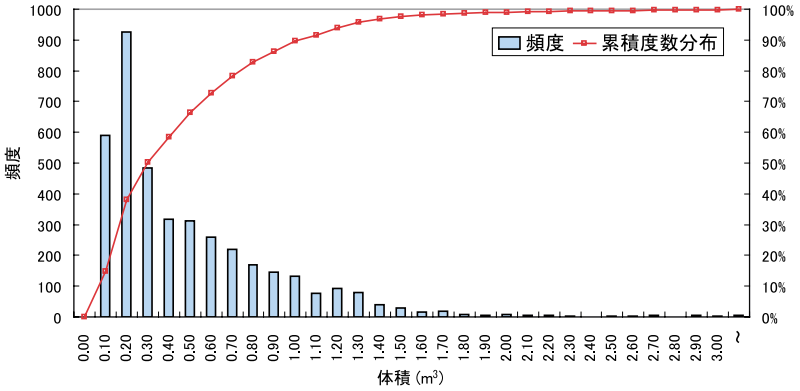


図 3.6: 全家具の体積分布

6. 家具の標準寸法

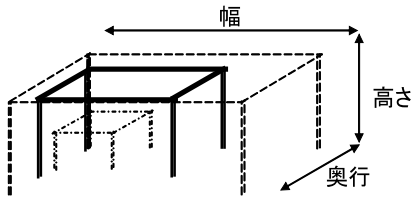
家具の寸法は，おおよそ人間のモデュールで決まってくる。よって，女子大学生自宅データ 114 件で調査された家具の幅・高さ・奥行の分布，寸法ごとの頻度などを考慮し，標準寸法を求めた。このとき，家具の幅・高さ・奥行の寸法は，調査で記入された値を用いた。

ここでは，ダイニングテーブールを例に標準寸法の取り扱いについて説明する。表 3.8 に，ダイニングテーブルの幅・高さ・奥行の最大値，最小値および平均値を示す。図 3.7 中の太線は各寸法の平均値を，点線は幅・高さ・奥行の最大値と最小値を同時にとったもの示している。また，図 3.8 にダイニングテーブルの幅と奥行の関係，および幅と高さの関係の分布を示す。ダイニングテーブルは，幅はやや変動するが高さは約 0.7 m で一定であることがわかる。

表 3.9 に各家具の標準寸法を示す。なお，文献 [36] では，1953 年，1982 年，1995 年の平均的な家具の大きさを調査しており，全体的に大型になる傾向があることが報告されている。

表 3.8: ダイニングテーブルの各寸法の最大値，最小値，平均値

	幅 (m)	高さ (m)	奥行 (m)
最小値	0.61	0.35	0.56
最大値	2.50	0.80	1.80
平均値	1.37	0.69	0.88



ダイニングテーブル

図 3.7: 家具の幅 × 高さ × 奥行の取り方

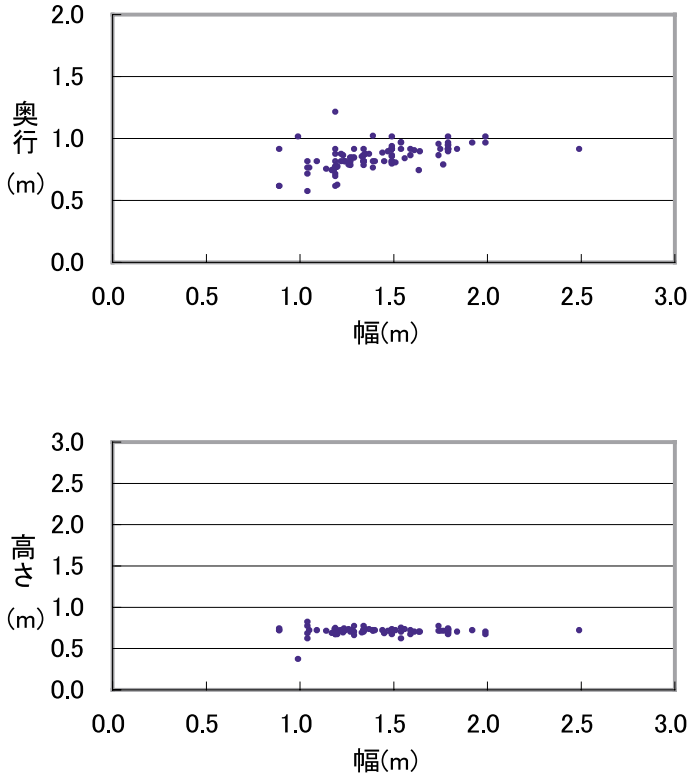


図 3.8: ダイニングテーブルの各寸法の分布

表 3.9: 家具の標準寸法

家具大分類	家具中分類	家具の標準的寸法 (m)		
		幅 (W)	奥行 (D)	高さ (H)
収納家具類	サイドボード	1.25	0.42	1.13
	雑収納家具	0.67	0.43	0.93
	食器棚	0.90	0.44	1.69
	タンス	0.93	0.50	1.78
	本棚	0.88	0.34	1.78
座家具類	休息用イス	1.36	0.77	0.37
	事務用イス	0.45	0.43	0.44
	ダイニングチェア	0.49	0.47	0.43
	その他のイス	0.50	0.39	0.45
	机	0.99	0.63	0.72
	ダイニングテーブル	1.37	0.88	0.69
	ローテーブルこたつ	0.98	0.74	0.36
	その他のテーブル	0.77	0.57	0.55
	ベッド	0.98	1.99	0.39
家電類	ステレオ	0.58	0.32	0.44
	テレビ	0.56	0.43	0.50
	パソコン	0.41	0.42	0.42
	冷蔵庫	0.62	0.59	1.76
	その他の家電機器	0.62	0.36	0.26
その他	楽器	1.39	0.66	1.20
	その他	0.72	0.44	0.57

7. 家具の位置

家具の種類ごとに室内のどのような位置に配置されやすいのかを調べるため，家具と壁との関係および家具と開口部との関係を表 3.10 および図 3.9 で示される 4 種類に分類して整理した。

ここでは，例として，調査数の最も多かった雑収納家具の配置と壁との関係を示す。図 3.10 は，雑収納家具が前述の①〜④のどの配置になるかを示したものである。雑収納家具の場合，①もしくは②に該当するものがほとんどであり，室周辺部に配置されることがわかる。

また，家具と開口部との関係を調べるために，壁面積に対する開口部面積の割合で表される，開口率を定義し，開口率と家具の配置の関係を調べた。図 3.11 に雑収納家具の配置と開口率の関係を示す。開口率が 10 %のものが極端に少ないが，それ以外の開口率と設置頻度の関係をみると，開口率が低いほど設置される頻度が高く，雑収納家具は開口を避けて配置される傾向があることがわかる。開口率 10 %で設置頻度が低い理由は，扉や窓などの大きさが決まっているため，壁に開口部があると開口率が 10 %を超えてしまうものが多く，開口率 10 %の壁自体が少ないためである。

表 3.10: 家具の配置分類

①	隅，角	家具の全体がほぼ 0.45 m 角内に含まれる場合
②	壁	壁に接する場合
③	隅から壁	①＋②
④	中央	①〜③以外

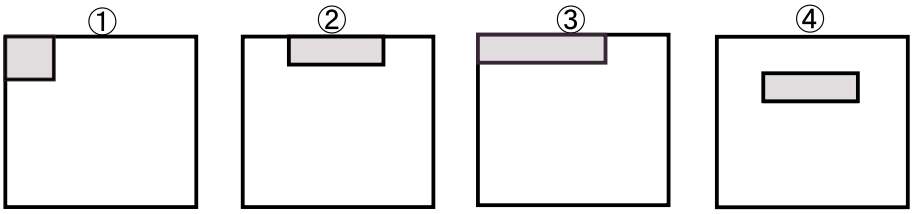


図 3.9: 家具の配置分類

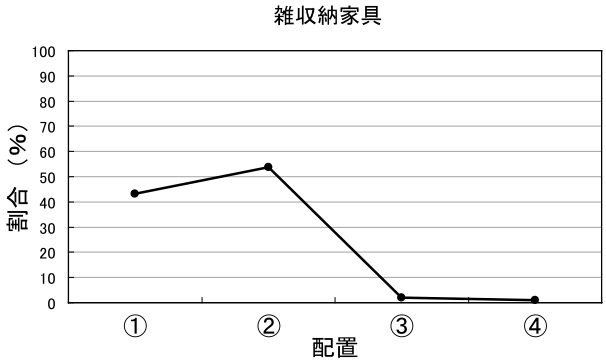


図 3.10: 雑収納家具の配置と壁との関係

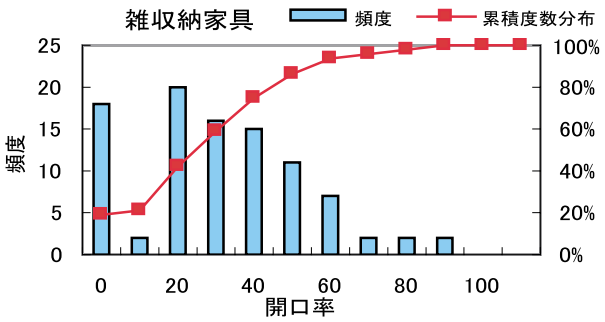


図 3.11: 雑収納家具の配置と開口率の関係

3.3.3 可燃物配置モデルの入力値

3.4.2 に示した可燃物調査データの統計量から判断すると，従来は住宅の可燃物配置は居住者 (使用者) に依存すると思われていたが，ある程度の特徴が見出されることがわかった。本節では，住宅の可燃物特性の特徴を定量化し，可燃物配置モデルの入力値とする。

住宅に持ち込まれる家具は，室用途により種類が限定されることがわかった。そこで，アンケートへの記入漏れはあっても，存在しないものを記入することはないと考え，表 3.6 の室用途ごとの平均家具設置数をもとに家具設置数が整数となるように小数点以下を切り上げ，設置数が家具平均設置数になるまで上位の家具から選び出した。例えば，LDK では，平均家具設置数が 12.6 であるため，可燃物配置モデルでの家具設置数は 13 個となり，表 3.11 に示すように，ダイニングチェア 4 個からテレビまで上位 13 個を LDK に設置される家具として採用する。なお，各可燃物の大きさは，表 3.9 の標準寸法を用いる。

表 3.11: 可燃物配置モデルで使用する室用途ごとの可燃物数

室用途	家具数	家具名称	平均設置数	設置数	幅	奥行	高さ	配置
LDK	12.6	ダイニングチェア	3.38	4	0.49	0.47	0.43	中心
19.23 m ^{2}		雑収納家具	1.96	2	0.67	0.43	0.93	周辺
		食器棚	1.15	2	0.90	0.44	1.69	周辺
		冷蔵庫	1.02	2	0.62	0.59	1.76	周辺
		ダイニングテーブル	0.9	1	1.37	0.88	0.69	中心
		休息用イス	0.67	1	1.36	0.77	0.37	周辺
		テレビ	0.63	1	0.56	0.43	0.5	周辺
親の部屋	4.77	タンス	1.75	2	0.93	0.50	1.78	周辺
13.28 m ^{2}		雑収納家具	0.68	1	0.67	0.43	0.93	周辺
		その他	0.44	1	0.72	0.44	0.57	周辺
		テレビ	0.29	1	0.56	0.43	0.5	周辺
大学生自室	6.12	タンス	0.98	1	0.93	0.50	1.78	周辺
11.08 m ^{2}		机	0.89	1	0.99	0.63	0.72	周辺
		雑収納家具	0.83	1	0.67	0.43	0.93	周辺
		ベッド	0.80	1	0.98	1.99	0.39	周辺
		事務用イス	0.72	1	0.45	0.43	0.44	中心
		本棚	0.61	1	0.88	0.34	1.78	周辺
		ステレオ	0.28	1	0.58	0.32	0.44	周辺
祖父母の部屋	3.68	タンス	1.04	2	0.93	0.50	1.78	周辺
14.11 m ^{2}		雑収納家具	0.96	1	0.67	0.43	0.93	周辺
		テレビ	0.28	1	0.56	0.43	0.50	周辺
和室客室	2.92	タンス	0.59	1	0.93	0.50	1.78	周辺
13.70 m ^{2}		ローテーブルこたつ	0.48	1	0.98	0.74	0.36	中心
		雑収納家具	0.27	1	0.67	0.43	0.93	周辺

3.4 まとめ

本章では，3.1 で既往の可燃物調査の紹介を行なった。これまでの可燃物調査の目的は，耐火設計のための用途ごとの積載可燃物量の平均とその標準偏差の調査であった。そのため，これらの調査結果を初期火災を対象とした住宅の可燃物配置モデルに応用することは困難である。3.2 では，計画系の住様式と家具配置に関する研究の紹介を行なった。それによると，家具の種類によっては，住戸形式と家族構成に強い規定要因があることを示した。3.3 では，住宅の可燃物配置調査で調査された内容と調査結果から得られた可燃物の特徴について統計的にデータを整理した。その結果，従来は居住者に依存すると思われていた可燃物の配置を可燃物配置モデルの入力として扱うことが可能になった。

第4章　可燃物配置モデル

3.1で説明したように可燃物に関する実調査[17]は過去にいくつか行なわれているが，いずれも積載可燃物量(可燃物密度)に関する調査であり，単位面積あたりの可燃物量とその標準偏差が調査の対象となっていた。しかし，初期火災時の室火災性状は，個々の可燃物の大きさや配置といった可燃物特性が大きな影響を及ぼすため，可燃物密度だけでは情報が不足しており，可燃物特性を考慮した可燃物配置モデルが必要となる。また，可燃物特性は用途ごとに特徴が異なることが予想され，それぞれの用途に見合った可燃物配置モデルが必要である。

一方で，可燃物配置をモデル化するには，最も単純なモデルでも下記の三点に関する情報が必要である。つまり，用途ごとに下記三点の特徴が異なり，使用する可燃物配置モデルも異なったものとなる。

1. 個々の可燃物の重量とその標準偏差
2. 単位面積あたりの可燃物数とその標準偏差
3. 可燃物の位置

本章では，4.1でこれまでに一連の研究として構築した可燃物配置モデルを紹介し，それぞれのモデルが対象としている用途や上記1.〜3.の取り扱いについて説明する。4.2では第3章をもとに住宅での可燃物配置モデルの提案を行なう。

図4.1に，本研究の流れと本研究中での本章の位置付けを示す。

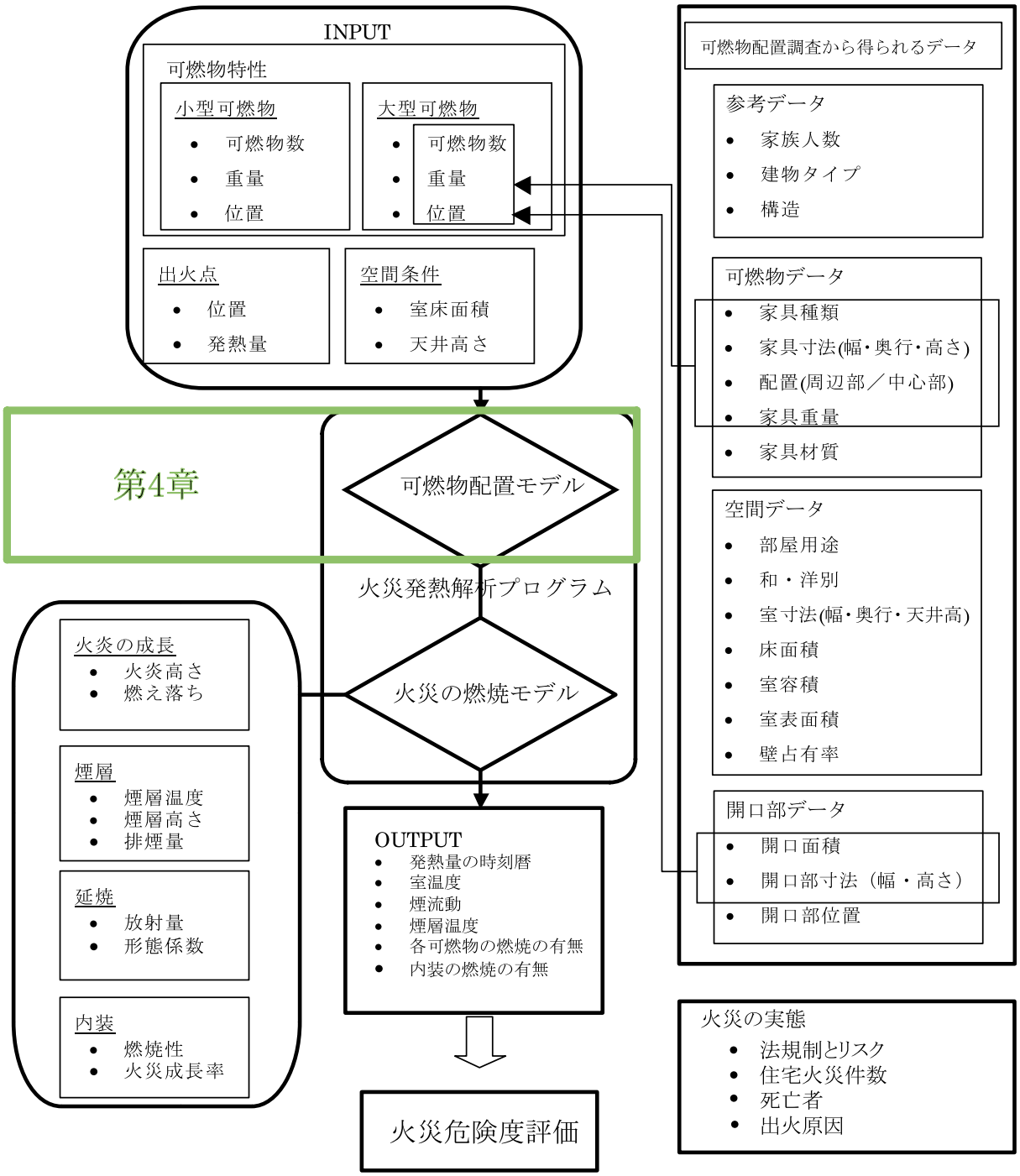


図 4.1: 本研究中の本章の位置付け

4.1 可燃物配置モデルに関する研究の背景

図 4.2 に，横軸に特定の可燃物が特定の位置に配置される割合，縦軸に個々の可燃物重量のばらつきを相対的にとった概念図を示す。図 4.2 から，後述する高橋による正方格子モデルや松本によるランダム配置モデルはそれぞれ対象とする用途が異なっており，住宅を対象とする場合には，新たなモデルが必要であることがわかる。

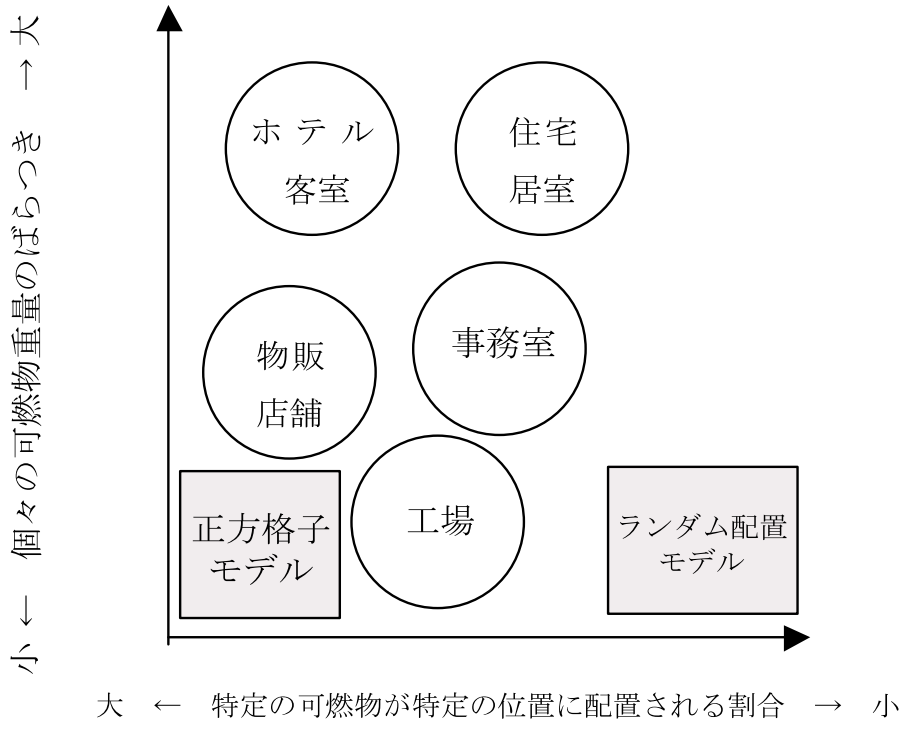


図 4.2: 可燃物配置モデルの対象用途

一連の研究として，これまでにいくつかの可燃物配置モデルの提案を行なってきた。それぞれのモデルには，可燃物の配置に特徴があり，可燃物密度の情報をどのように扱うのかが重要となる。以降，4.1.1 で正方格子モデル，4.1.2 でランダム配置モデルの順に紹介し，4.1.3 では，ランダム配置モデルを用いて初期火災避難安全性能について検証した例を紹介する。

4.1.1 正方格子モデル

高橋[22]は，室を正方格子状に分割し，各正方格子 (サイト) の中央に等重量の可燃物が存在すると仮定した可燃物配置モデル (図 4.3) を構築した。高橋のモデルでは，ある時刻だけを考えると，室には可燃物が存在するサイトと存在しないサイトに明確に分けることができるが，建物の耐用期間を通してみると，すべてのグリッドに可燃物が存在する可能性があることから，各サイトに必ず 1 個の可燃物が存在するものとしている。また，可燃物の大きさ及び可燃物間の隔離距離については，可燃物配置に関わる安全率が，調査で得られた可燃物密度の非超過確率 98 %の値を用いることで十分に満たされていると考え，単純に均一の大きさを有する可燃物が平均隔離距離をもって分布するものとした。また，室中央に配置された可燃物を出火点とし，出火点となる可燃物から，時間の経過とともに延焼が同心円状に周辺に広がり室全体に火災が進展する。各サイトに配置される可燃物は，木材に置換された立方体とし，可燃物の大きさは，可燃物の表面積が発熱速度に影響することから，室全体に存在する可燃物の総表面積が一定となるよう決定されている。正方格子モデルを適用できる建物用途としては，物販店舗，工場などが考えられる。正方格子モデルにおいて室火災性状に影響を及ぼす重要な要素は，収納可燃物密度とサイトの面積である。高橋は，実用的には，すべての収納可燃物密度において，グリッドの面積は 10^0 m^2 のオーダーが適切であると結論付けている。

正方格子モデルでの可燃物配置に関する考え方は，下記のようにまとめられる。

1. 個々の可燃物の重量は，等重量
2. 単位面積あたりの可燃物数は，各サイトに 1 個
3. 可燃物の位置は，各サイトの中央

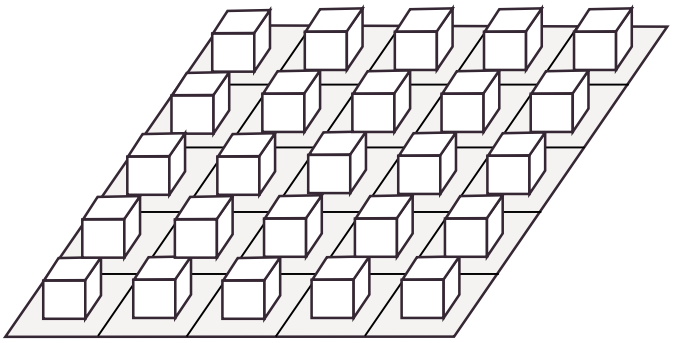


図 4.3: 正方格子モデルでの可燃物配置

4.1.2　ランダム配置モデル

松本[23]は，可燃物の配置と大きさにランダムネスを持たせたランダム配置モデルを構築した。ランダム配置モデルは，正方格子モデルと異なりすべての可燃物が出火点となる場合を考慮しており，収納可燃物密度，床面積などの室火災性状に影響を及ぼすパラメタを変化させて，パラメタごとに感度解析を行なっている。その結果，可燃物の配置と大きさにランダムネスを持たせることで，火災初期の発熱性状に強い変動を与えること，その変動が室床面積や可燃物密度に影響を受けていることを明らかにした。ランダム配置モデルは，特に対象となる建物用途を限定せずに，可燃物の大きさや配置にランダムネスを持たせたときの室火災性状の変動を研究の対象としている。

ランダム配置モデルでの可燃物配置に関する考え方は，下記のようにまとめられる。

1. 個々の可燃物の重量は，用途に応じた平均と標準偏差もつ正規乱数により決定
2. 単位面積あたりの可燃物数は，平均 1 個
3. 可燃物の位置は，一様にランダム

以下に，ランダム配置モデルでの可燃物へのランダムネスの与え方を説明する。

ランダム配置モデルでは，可燃物は 1 m^2 あたり 1 個存在すると仮定し，床面積に応じて可燃物数を決定する。すべての可燃物は室に一様分布に従ってランダムに配置され，平均 1 m^2，標準偏差 0.2 m^2 の正規乱数により仮想占有床面積が与えられる。各可燃物は仮想占有床面積に，建物用途ごとに与えられる可燃物密度を乗じることで重量が決定される (図 4.4)。このときに，可燃物同士が重なったものは，重なった可燃物同士を重心位置で一つにまとめる。また，径が室からはみ出たものは，室からはみ出ないように径を縮小させ，体積の減少分は高さ方向に延長するといった処置が取られている (図 4.5)。

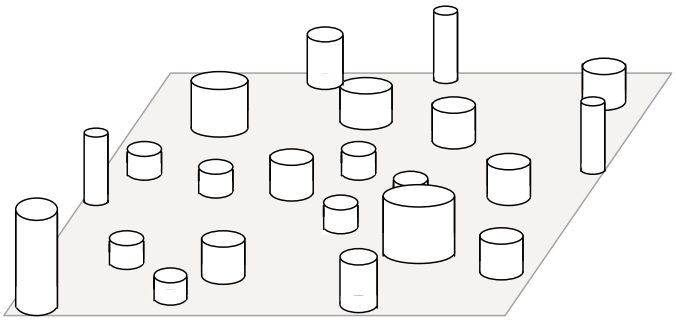


図 4.4: ランダム配置モデルでの可燃物配置

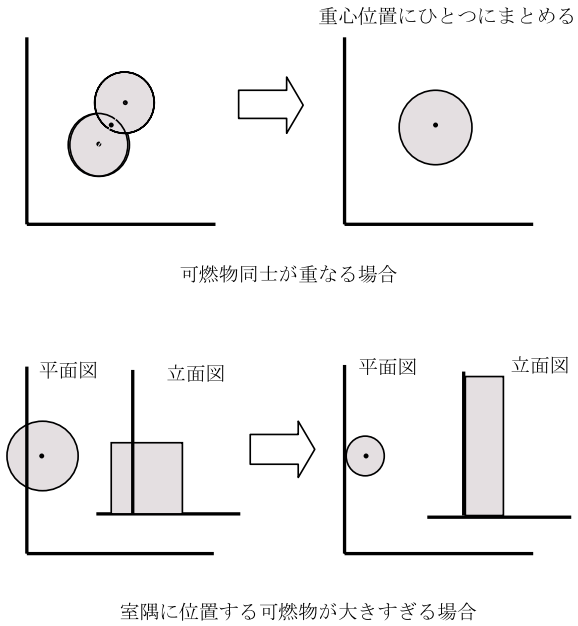


図 4.5: 可燃物同士の重なりと室からのはみ出しの対処法

4.1.3 可燃物のランダム配置による避難限界時間の変動

筆者ら [41, 42] は，松本の可燃物配置モデルに煙流動の概念を導入し，初期火災時に「人が安全に避難するのに必要な時間」の限界として，以下の条件に至るまでの時間 (避難限界時間) を定義し，可燃物をランダム配置させた時に，表 4.1 に示す収納可燃物密度，床面積，内装の燃焼性についての感度解析を行なった。

1. 内装が可燃性で，火炎の高さが天井高さ以上となる
2. 煙層温度が 873 K 以上となる
3. 煙層下端の高さが 1.8 m 以下となる

表 4.1: 入力パラメタ

変数名	入力値
床面積 A(m^2)	**100**，144，196
収納可燃物密度 (kg/m^2) (平均 w, 標準偏差 σ)	(15，5)，**(30，10)**，(50，10)
内装の燃焼性	**Grade3(内装可燃)** Grade0(内装不燃)

避難限界時間の感度解析には，表 4.1 中，太字で示されている値を解析での標準パラメタとし，各パラメタの感度解析を行なっている時は，他の 2 つのパラメタは標準パラメタを使用している。

解析結果として，図 4.6 に標準モデルを，図 4.7，4.8 には床面積を変更したとき，図 4.9，4.10 には収納可燃物密度を変更したとき，図 4.11 には内装の燃焼性を変更したときの避難限界時間に至った原因別度数分布をそれぞれ示す。

図 4.6，4.7，4.8 より，床面積が大きいほど避難限界時間が延びると共にばらつきも大きくなることがわかる。この理由は，床面積が増加することで，蓄煙可能な体積が増し，避難限界時間までに延焼する可燃物数が増えるため，延焼過程での時間のばらつきが生じるためである。また，図 4.6，4.9，4.10 より，床面積のときと同様に収納可燃物密度が小さいほど避難限界時間が延びると共にばらつきも大きくなる。この理由は，可燃物配置モデルにおいて，単位床面積あたり 1 個の可燃物が配置されると仮定しているため，収納可燃物密度の増加に応じて，可燃物が大きくなり，個々の可燃物からの発熱量および煙発生量が増加するためである。図 4.6，4.11 から，内装の燃焼性が可燃性の場合は，火災初期に内装に着火し，内装の燃焼による発熱量が増すことで，煙層温度が上昇し，避難限界時間に達するものが多くみられた。

ここで，すべての図において，火炎の高さが天井に達する条件および煙層温度が 873 K を超える条件が原因で避難限界時間に至ったものは，ほとんど発生時間がばらついていない。この原因は，火炎の高さが天井に達するものは，可燃物自体の高さがある程度必要であり，可燃物配置の段階で室からはみ出て配置されたものが高さ方向に延長され，かつ着火点となった場合に，火炎が瞬時に天井に達することで発生するためであり，また，着火点が内装着火の条件を満たしている場合，時間 t=0 から内装の発熱量が加味されるが，内装の発熱量がばらつきをもたない一定量であるため，同時刻に煙層温度が 873 K を超えるため，避難限界時間にばらつきが生じない。一方，避難限界時間のばらつきが大きくなる現象は，煙層下端の高さが 1.8 m 以下となることで避難限界時間が大きく変動することに起因していることがわかる。また，このときの避難限界時間に至るものは偏った分布形をしているが，これは，すべての可燃物の火災成長率 α を同じ値としているため，個々の可燃物の発熱速度は，それぞれの重量に応じてピーク値 (Q_{peak}) のみが変動し，定常状態に至るまでは全く同じ発熱速度となること，さらに，煙発生量は発熱速度の 1/3 乗に比例するため，結果的に発熱速度がある値を超えたときに煙層下端が 1.8 m まで降下し，避難限界時間に至ることが原因である。つまり，発熱速度のピーク値がある大きさよりも大きい可燃物が発火源となった場合は，その可燃物が定常状態に至る前に避難限界時間に達するため，避難限界時間は，ある時刻より早くは表れない。

このように，ランダム配置モデルでは，本来ならランダムな値であるはずの単位床面積あたりの可燃物数を，床面積 1 m^2 あたり，1 個の可燃物があると可燃物数を固定して扱っているため，床面積に対して収納可燃物密度が大きい場合，もしくは収納可燃物密度に対して床面積が小さい場合は，可燃物をランダム配置したにもかかわらず，このようにランダムネスを表現できない結果になる可能性がある。今後は，床面積 1 m^2 あたりの可燃物数や火災成長率のランダムネスを考慮しなければならない。

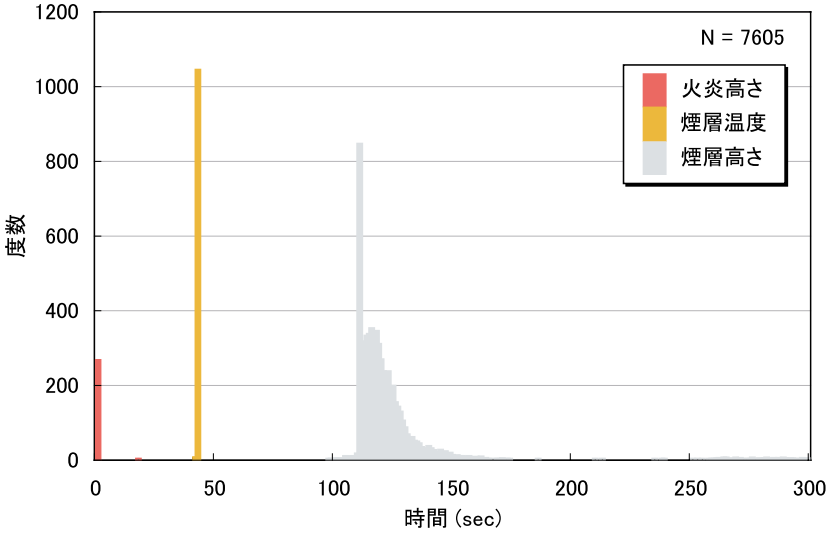


図 4.6: 避難限界時間に至った原因別度数分布 (A=100 m^2，w=30 kg/m^2，Grade3)

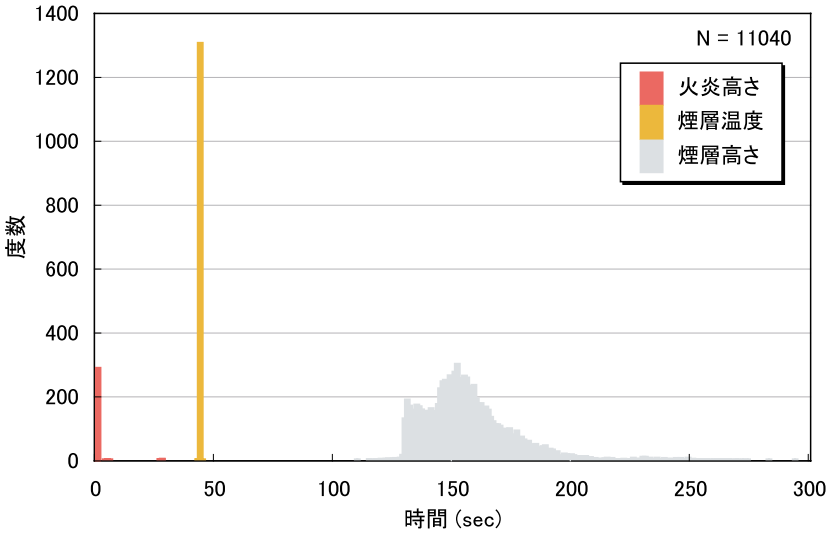


図 4.7: 避難限界時間に至った原因別度数分布 (A=144 m^2，w=30 kg/m^2，Grade3)

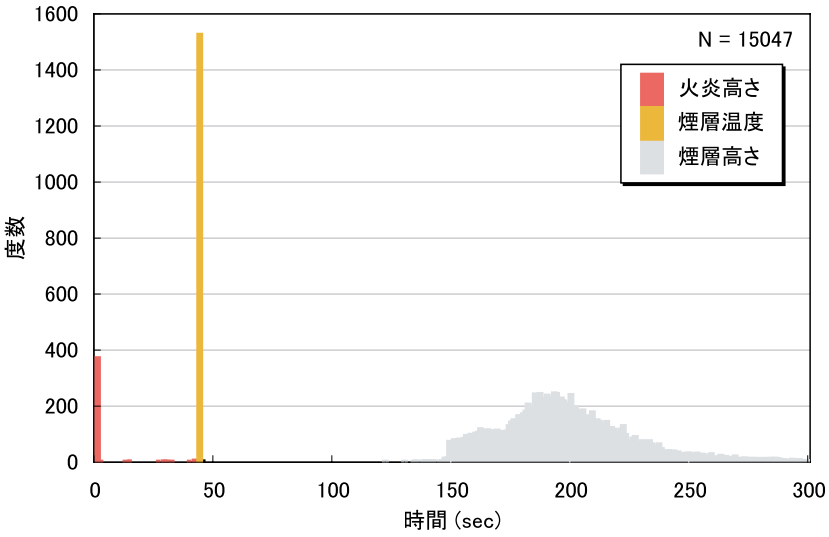


図 4.8: 避難限界時間に至った原因別度数分布 (A=196 m^2, w=30 kg/m^2, Grade3)

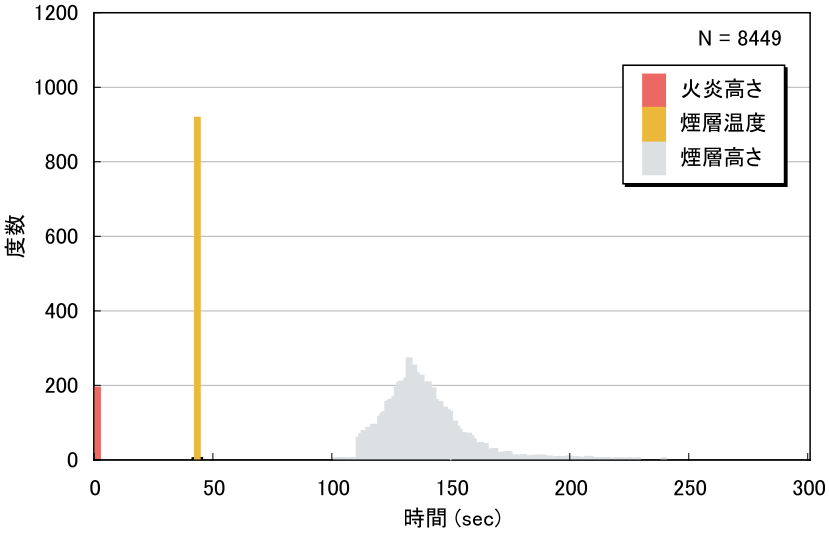


図 4.9: 避難限界時間に至った原因別度数分布 (A=100 m^2, w=15 kg/m^2, Grade3)

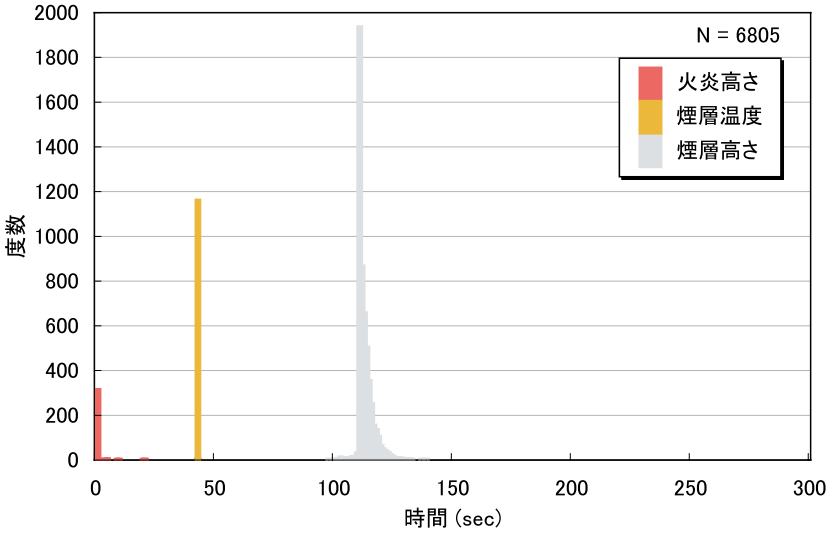


図 4.10: 避難限界時間に至った原因別度数分布 (A=100 m^2, w=50 kg/m^2, Grade3)

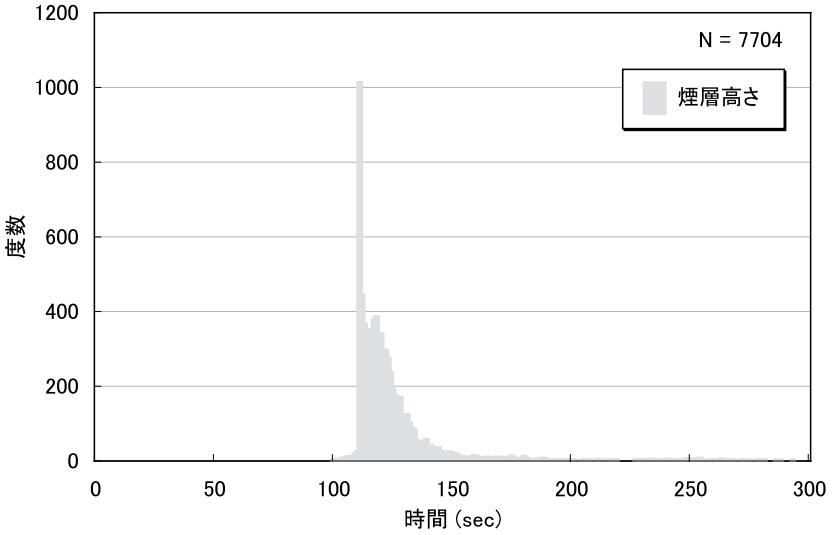


図 4.11: 避難限界時間に至った原因別度数分布 (A=100 m^2, w=30 kg/m^2, Grade0)

4.2　住宅の可燃物配置モデルの提案

4.2.1　可燃物の分類

ここでは，第 3 章で説明した住宅の可燃物配置調査をもとに住宅に適した可燃物配置モデルの提案を行う。住宅での可燃物配置は居住者 (使用者) により大きく異なるため，可燃物配置のモデル化は困難であるとされてきたが，可燃物調査を整理することで，以下のような特徴を見出すことができた。

- 室周辺部に配置される家具と中央部に配置される家具がある
- 背の高い可燃物が室周辺に配置される
- 開口部は避けて配置される傾向がある
- 室用途により存在する家具は 3〜7 種類に限定できる

また，文献 [35] により，机やベッドなどの家具は，それぞれ配置されやすい場所があることがわかった。しかし，調査の対象とならなかった家具以外にも，例えば，衣類，雑誌類，ごみ類といった可燃物が少なからず存在する。これらは居住者 (使用者) により持ち込まれる量が大きく異なることが予想される。また，これらは，家具などの大型の可燃物とは異なり，日常的に使用され，配置の特徴をモデル化することは困難である。このことが，住宅の可燃物のモデル化が困難であるとされてきた理由であると思われる。そこで，可燃物の配置がある程度特定できる可燃物と居住者 (使用者) や時間により総量や配置が変動する可燃物の少なくとも 2 種類の可燃物があると考え，調査対象となった比較的大型の家具などの可燃物を「大型可燃物」と定義する。また，可燃物配置調査で調査の対象とならなかった衣類などの，普段から使用され，可燃物特性を特定することが困難な可燃物を「小型可燃物」と定義する。

以下，4.2.2 で大型可燃物のモデル化，4.2.3 で小型可燃物のモデル化について，それぞれの特徴を踏まえ，本研究での扱いについて述べる。

4.2.2　大型可燃物の特徴とモデル

本研究で使用する可燃物配置モデルは，空間条件 (長辺，短辺，天井高さ，開口部位置) を考慮して，大型可燃物 (家具) を以下の手順に従って室に確定配置するものとした。

1. 室用途毎に，家具の種類を確定する (表 3.11)
2. 各家具は，木製品 (平均密度 w=100 kg/m^3 [43]) とする
3. 燃焼の成長に関係する係数である火災成長率 α は，すべての大型可燃物で，一般に木材の火災成長率として使用される 0.0125 とする
4. 家具の寸法は，標準寸法 (表 3.9) とする
5. 家具の形状を下記のルールにより円筒に置換する
   (a) 家具の高さは変化しない
   (b) 実際の家具と底面を除く表面積が同じになるよう円筒の直径を定める
   (c) ただし，ベッドは壁に接して配置されている場合が多く，円筒に置換することで室から大幅にはみ出てしまうため，長辺方向で二分し，それぞれを円筒にする
6. 体積の大きな家具から順に，配置されやすい位置に配置する
7. 家具が重ならないように微調整を行なう

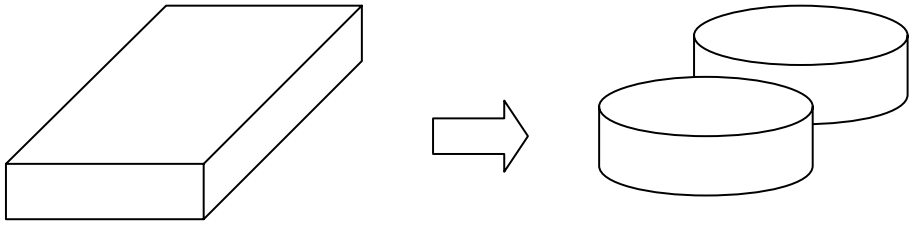


図 4.12: ベッドの円筒置換

ここで，直方体の可燃物を円筒に置換することで，可燃物の形状が変化するため，可燃物間の形態係数に誤差が生じる。図 4.13 には，第 3 章で最も多く配置されていた雑収納家具 (標準寸法:H=0.93 m,W=0.67 m,D=0.43 m の直方体) を上記のルールに従って円筒 (H=0.98 m, 直径=0.43 m) に置換した時に，図 4.14 に示す位置関係で微小平面である受熱面が x 軸上を 0〜+3m まで移動した時の形態係数の変化を示している。なお，直方体および円筒の火炎高さは，後述する円筒に形成される連続火炎高さ (L_{min}=0.79 m) を用いた。図 4.13 から判断すると，直方体を円筒に置換したことによる形態係数の誤差は，30 %程度低く見積もってしまうが，火災初期には，大型可燃物から小型可燃物への放射よりも，小型可燃物から大型可燃物への放射の影響が重要であることや，可燃物の着火条件などの他の条件で安全側に判断していることから，直方体の可燃物を円筒に置換するモデルの簡素化による誤差は，工学的に無視できる範囲であると判断した。

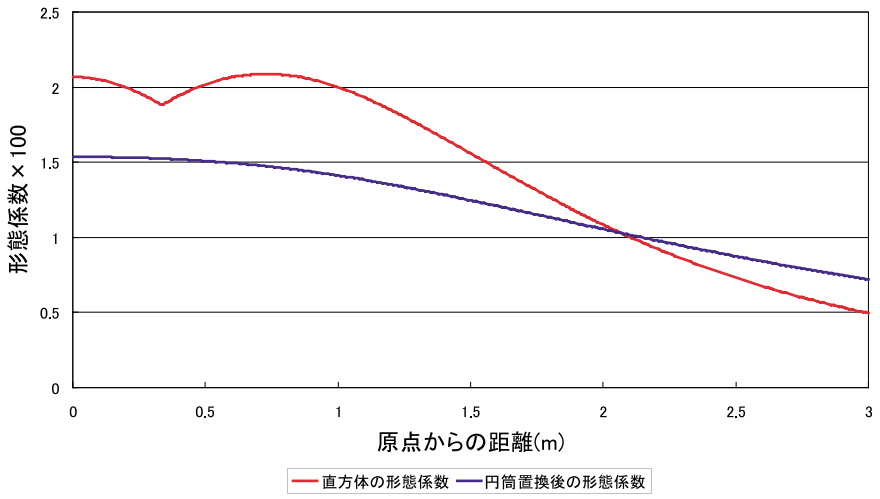


図 4.13: 直方体の可燃物を円筒に置換することによる形態係数の変化

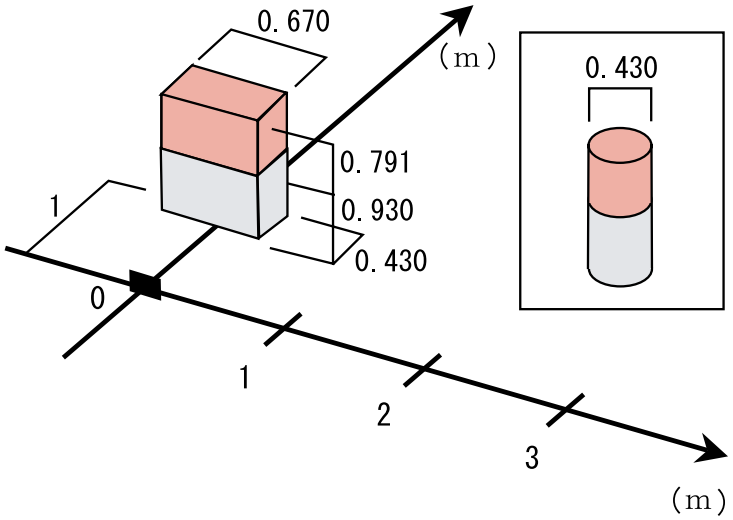


図 4.14: 放射面 (円筒，直方体) と受熱面の位置関係

4.2.3 小型可燃物の特徴とモデル

小型可燃物は居住者 (使用者) により，持ち込まれる可燃物量が大きく変動することが予想される。また，様々な種類の可燃物が考えられ，位置や個々の重量，材質などを確定的に特定することは，非常に困難であると考えられる。しかし，初期火災時の発熱速度は，可燃物間の延焼が拡大していくことで進展し，延焼の原因となる小型可燃物の特性は無視することができない。そこで，本研究では，小型可燃物の大きさと密集度が火災の進展を左右し，発熱速度の成長に影響を及ぼす要因であると考え，小型可燃物の直径および個数を考慮したモデル化を行なう。小型可燃物の直径は，住宅に存在する小型可燃物を想定した平均値 (0.1〜0.3 m 程度)，変動係数 10 %の正規変数と仮定する。同様に，小型可燃物の個数についても，想定される範囲 (10〜30 程度) の値を仮定する。配置は，一様に室にランダムに配置しているものとする。この際に，大型可燃物や他の小型可燃物に重なった場合は，重ならなくなるまで乱数発生の試行を繰り返し，可燃物同志は重ならないものとする。なお，小型可燃物は直径＝高さの円筒に置換し，材質が多様であることが予想できるため，火災成長率 α は，平均値 0.0125，変動係数 25 %の正規変数を仮定した。ただし，小型可燃物の燃焼継続時間の算出に必要となる密度は，すべての小型可燃物において，木材の密度である 500 kg/m^3 を用いる。

表 4.2: 小型可燃物のモデル化

大きさ	直径を小型可燃物を想定した平均値，変動係数 10 %の正規変数と仮定
密集度	想定される範囲の個数を仮定
配置	他の可燃物と重ならないように室に一様にランダム配置
火災成長率 α	平均値 0.0125，変動係数 25 %の正規変数を仮定

4.2.4 出火点の検討

第 3 章で説明したが，住宅火災の出火原因は，近年では多種多様となっており，出火源を特定し，出火源の位置や大きさをモデル化することは非常に困難である。また，予測しがたい出火点を考慮に入れるためには，出火点はランダムに配置されると考えたほうが都合がよい。本研究では，本来ならタバコなどの微小火源から第一着火物として 1 つの小型可燃物に着火するまでの，くん焼期に相当する時間を考慮する必要があるが，微小火源から第一着火物へ延焼した時間を t=0 と考え，ランダム配置された小型可燃物の 1 つを出火源として扱う。このとき，寝タバコのように，微小火源であるタバコから小型可燃物を介さずに，いきなり大型可燃物に着火する場合も考えられるが，これは大型可燃物の近傍に偶然配置された小型可燃物から大型可燃物へ延焼した場合に相当すると考える。

第 5 章で後述するが，出火源である小型可燃物も，未燃の可燃物が着火した時と同様の物理モデルで火災が成長する。すなわち，αt^2 火源 (図 5.5 参照) を用いる。

4.3 まとめ

可燃物特性は用途により特徴が異なるため，それぞれの用途に見合った可燃物配置モデルが必要である。4.1 では，一連の研究としてこれまでに提案した可燃物配置モデルとして，正方格子モデルとランダム配置モデルを紹介した。正方格子モデルは，室に均等に可燃物を配置させ，ランダム配置モデルはランダムに配置させることが特徴である。4.2 では，ランダム配置モデルに煙流動の概念を導入し，初期火災時に「人が安全に避難可能」な限界時間を示す避難限界時間を定義して，可燃物のランダムネスが避難限界時間に及ぼす影響について述べた。それによると，避難限界時間には，床面積や可燃物密度が大きな影響を与えていることがわかった。また，4.3 では，本研究の目的の 1 つである住宅の可燃物配置モデルの提案を行なった。第 3 章で説明した住宅の可燃物調査をもとに，可燃物を大型可燃物と小型可燃物に分類し，大型可燃物は可燃物調査をもとに特徴をモデル化し，円筒の木製品として取り扱う。また，小型可燃物は，居住者 (使用者) により，可燃物特性が異なると考えられるため，小型可燃物の直径と個数を考慮してモデル化を行なった。

ここで，本研究で使用する可燃物配置モデルに必要な三条件についてまとめると，以下のようになる。

1. 大型可燃物の重量は，調査にもとづく
   小型可燃物の重量は，解析ごとに設定する直径に依存
2. 大型可燃物の個数は，調査にもとづく
   小型可燃物の個数は，解析ごとに設定する
3. 大型可燃物の配置は，確定配置
   小型可燃物の配置は，室に一様にランダム配置

第5章　火災燃焼モデル

1998 年の建築基準法防火規定の改正に伴い，耐火性能，避難安全性能の検証にあたり，火災を発熱量が時間変化する現象としてとらえることがより一層重要となった。一般に，区画火災では，時間の経過と共に図 5.2 のように火災が進展していく。とりわけ，初期火災時には，図 5.2 中 (b) から (c) や (e) に火災が進展する際に，可燃物の配置，燃えやすさなどの可燃物特性が，その後の火災の進展に大きな影響を及ぼす。そのため，これまでのように簡易式 [44] により火災室の温度を予測するだけでは不十分であり，対象となる室用途に適した可燃物配置モデルと火災時の室火災性状の計算を行なう火災燃焼モデルが必要となる。図 5.1 に本研究の目的である「火災危険度評価」のために必要な可燃物配置モデルおよび火災燃焼モデルと可燃物配置モデルの入力として用いた可燃物配置調査との関係を示す。

本章では，5.1 で，火災燃焼性状の基礎的な説明と火災燃焼モデルでの考え方を，5.1.1 可燃物の燃焼，5.1.2 可燃物間の放射，5.1.3 煙流動，5.1.4 排煙，5.1.5 内装の燃焼，5.1.6 可燃物の着火条件，5.1.7 フラッシュオーバー後の発熱性状の順に説明する。5.2 では，本研究に使用した火災発熱解析プログラムの概要を説明する。5.3 では，火災発熱解析プログラムの妥当性を検証するために，実大火災実験の紹介を行い，実験結果と同様の条件で解析を行なった解析結果との比較を行なう。

図 5.1 に，本研究の流れと本研究中での本章の位置付けを示す。

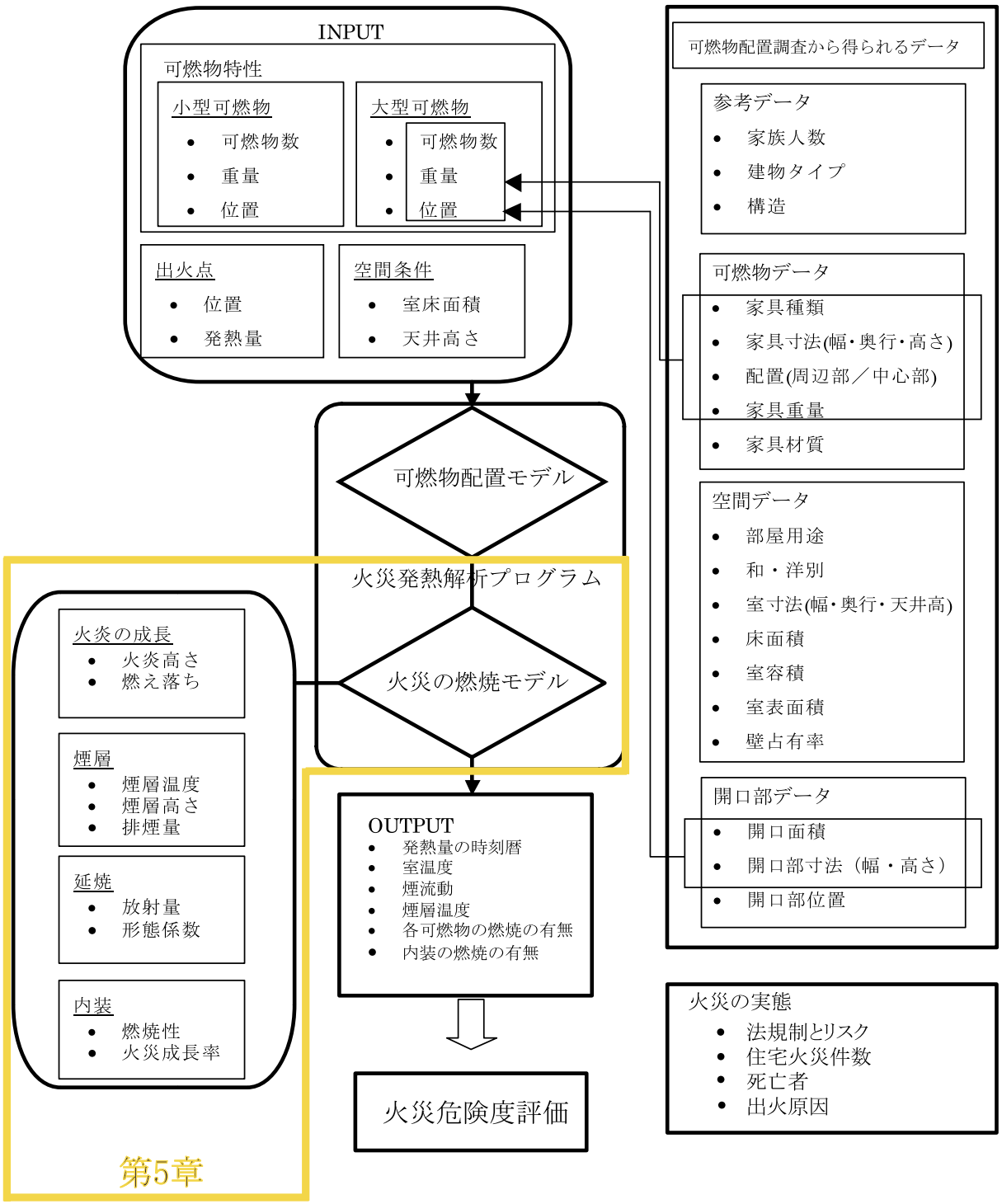
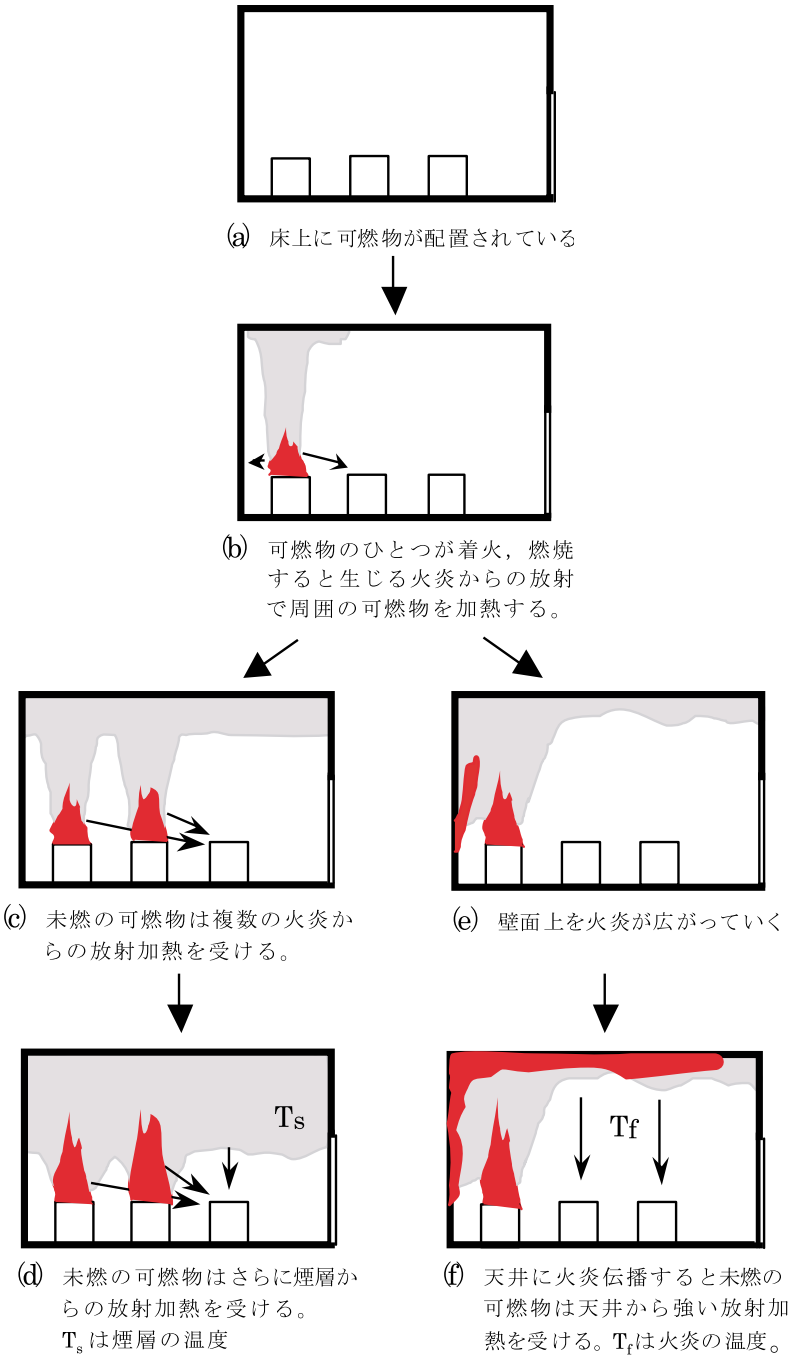


図 5.1: 本研究中の本章の位置付け



(a)〜(b)〜(c)〜(d) 床上可燃物の燃焼拡大

(a)〜(b)〜(e)〜(f) 内装上の燃焼拡大

図 5.2: 区画火災での火災の燃広がりと未燃の可燃物への伝熱性状

5.1　火災燃焼モデル

図 5.3 は，区画内で生じた火災による発熱速度の時間変化を模式的に示したものである。一般に，区画された室内における火災は，火源から近傍の可燃物や内装に延焼し燃焼が室全体に拡大していく。このとき，条件により，有炎状態になる前に無炎状態が継続するが，この状態をくん焼期という。これに対して，可燃物に着火し，火炎が可燃物表面を燃焼拡大する時期を成長期という。成長期初期は比較的ゆっくりと燃焼が拡大していくが，しだいに燃焼により生じた高温の煙が天井付近に蓄積することや内装材の燃焼により区画全体が高温になることなどが原因で，F.O. とよばれる発熱速度が急激に大きくなる現象が発生し，盛期火災に至る。F.O. になると，すべての可燃物が燃焼していると考えられるため，最大発熱速度は総可燃物量に依存する。

くん焼期は，可燃物の発熱速度も小さく，他の可燃物に燃広がることなく，自然鎮火する場合が多い。また，成長期の発熱速度の成長率 (時間変化率) が高ければ，短時間に大きな火災に進展することを意味し危険である。そのため，本研究では，最初の発火源であるタバコなどの可燃物がくすぶっている状態であるくん焼期から，1 つの小型可燃物に着火した時点を t=0 とし，F.O. 以前の成長期までを解析の対象としている。

また，これまでは，可燃物上に形成される火災などの個々の火災現象の物理モデルについての研究はされてきたが，それらを複合して燃焼性状の時間変化を計算するモデルは少ない。そこで，本研究では，松本の構築した火災燃焼モデルに修正を加えるとともに，煙流動の概念を導入した火災燃焼モデルを構築した。本節では，個々の火災現象の物理モデルを，5.1.1 可燃物の燃焼，5.1.2 可燃物間の放射，5.1.3 煙流動，5.1.4 排煙，5.1.5 内装の燃焼，5.1.6 可燃物の着火条件，5.1.7 フラッシュオーバー後の発熱性状の順に説明する。

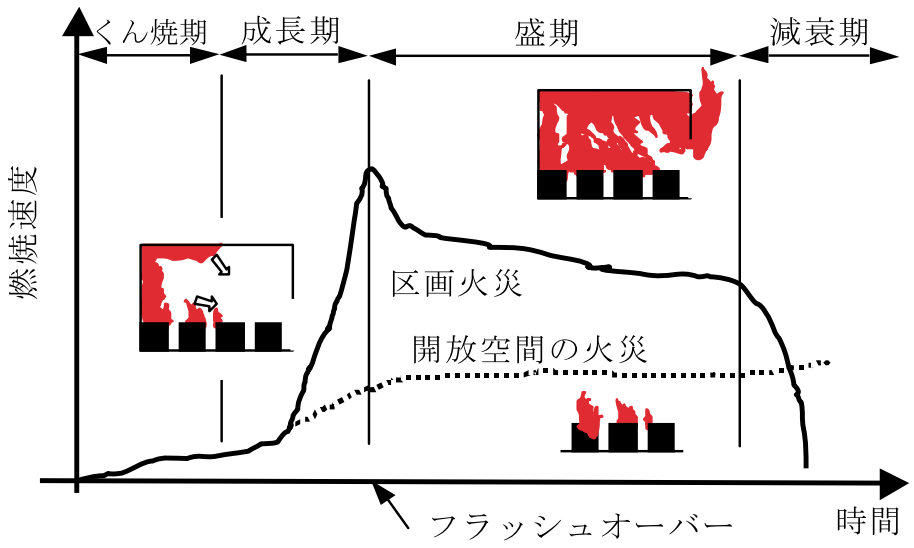


図 5.3: 発熱量の時間変化

5.1.1 可燃物の燃焼

可燃物の燃焼性状は，材質や形状などに依存し，著しく複雑であるため実用的な予測手段は現在のところ存在しない。しかし，可燃物の燃焼性状は大きく分けると典型的な 4 つのタイプに分類できる。図 5.4 に (a) 発熱量が低いまま燃焼を継続するもの，(b) ある時点で急激に発熱量が増大し，ピークを示した後，速やかに衰えるもの，(c) 最初のピークがあった後暫く衰えるが，また燃焼の勢いが復活し，2 度目のピークを持つもの，(d) 発熱量が増大した後，準定常的に推移して衰えるもの [45] を示す。本研究では，火災の研究で一般的に使用されている可燃物の燃焼モデル (図 5.5) を用いる。図 5.5 に示すモデルでは，火災による発熱速度は，時間の二乗に従って成長し，その後，可燃物の表面積で決まる発熱速度 (Q_{peak}) で定常状態に至る。やがて，燃焼継続時間 (t_d) に至ると可燃物は燃え尽き，瞬時に発熱速度が 0 となる。ここで，t^2 の係数 α を火災成長率と呼ぶ。なお，第 4 章で述べたように，本研究では，大型可燃物の火災成長率 α は確定値で 0.0125 とし，小型可燃物の火災成長率 α は平均値 0.0125，標準偏差 0.003 の正規確率変数を仮定した。

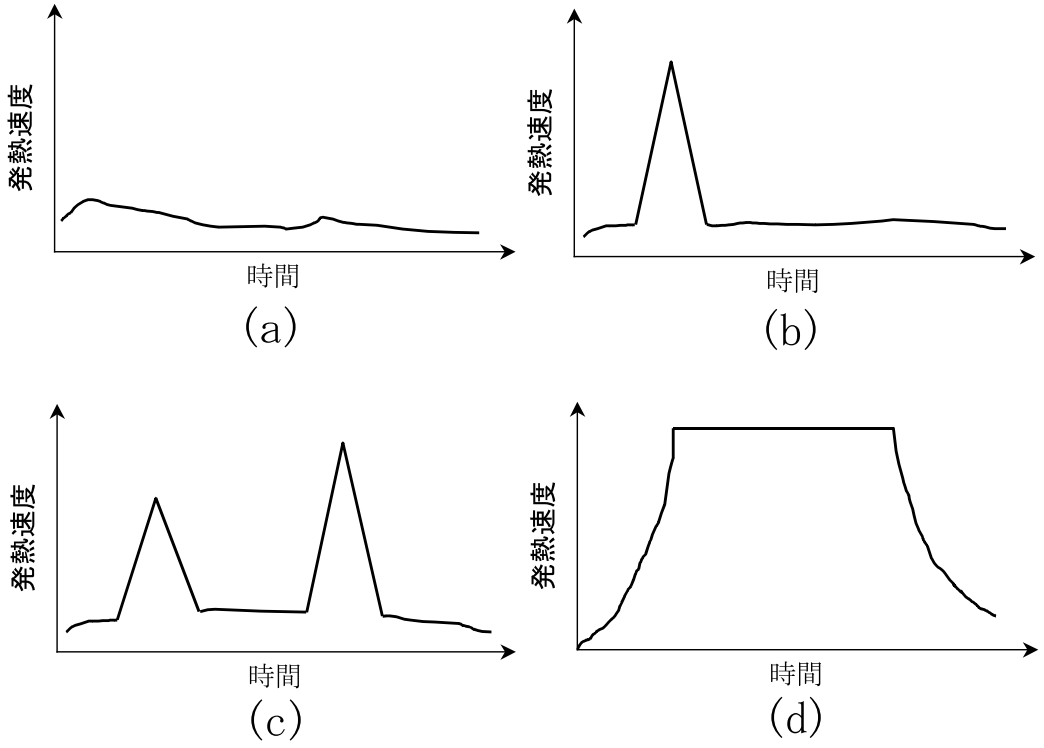


図 5.4: 可燃物の発熱速度のタイプ [45]

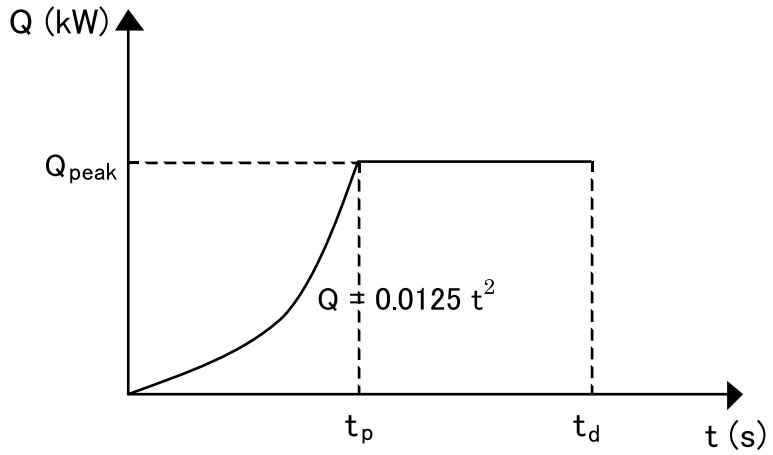


図 5.5: 本研究で使用した可燃物の発熱速度モデル

図 5.5 中の定常状態時の発熱速度 Q_{peak} は可燃物の表面積に依存し，(5.1) 式で与えられる。

$$Q_{peak} = q_s \times A \tag{5.1}$$

ここで，

Q_{peak} : 定常状態時の発熱速度 (kW)

q_s : 木材の単位表面積あたりの発熱速度 (112 kW/m^2)

A : 可燃物の表面積 (m^2)

また，可燃物の燃焼継続時間 t_d は，木材 1 kg あたりの発熱量 q から，(5.2) 式で与えられる。

$$\int_0^{t_d} Q\,dt = q \times W \tag{5.2}$$

ここで，

t_d : 燃焼継続時間 (sec.)

q : 木材の単位重量あたりの発熱量 (16,000 kJ/kg)

W : 可燃物の重量 (kg)

燃焼している可燃物上部には火炎が形成される。通常，複数の火炎が存在する場合，火炎高さは他の可燃物の火炎との複合効果により，単体の火炎高さと異なる性質をもつ。高橋 [22] は，実験結果と従来の単体の火炎高さに関する研究結果のすり合わせを行うことにより，この現象における火炎高さを定式化している。しかし，この高橋の研究結果の適応範囲は図 4.3 に示す高橋の正方格子モデルに限られており，本研究にそのまま適応することはできない。そこで，本研究では，単体の火炎高さの代表的な表現として，Zukoski[9] の提案式を用いる。ただし，Zukoski の式は平均火炎高さを評価するものであり，一般に，可燃物の放射を考える際の火炎の形状としては，連

続火炎高さを持って火炎の高さとするため，本研究では連続火炎高さが平均火炎高さの半分であると仮定して Zukoski の式を修正して用いる ((5.3) 式)。なお，本研究で使用する可燃物はすべて円筒に置換し，火炎も可燃物上部に同じく円筒で形成されるものとする (図 5.6)。

$$\frac{L_{min}}{D} = \begin{cases} 1.65 \cdot Q^{*\frac{2}{3}} & Q^* < 1 \\ 1.65 \cdot Q^{*\frac{2}{5}} & Q^* \geq 1 \end{cases} \tag{5.3}$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g} D^{\frac{5}{2}}} \tag{5.4}$$

ここで，

ρ_0	:	大気の密度 (1.2 kg/m^3)
T_0	:	常温空気の絶対温度 (293 K)
C_p	:	空気の定圧比熱 (1.0 kJ/kgK)
g	:	重力加速度 (m/s^2)
D	:	火源の直径 (m)
Q	:	火源の発熱速度 (kW)
Q^*	:	無次元発熱速度
L_{min}	:	連続火炎高さ (m)

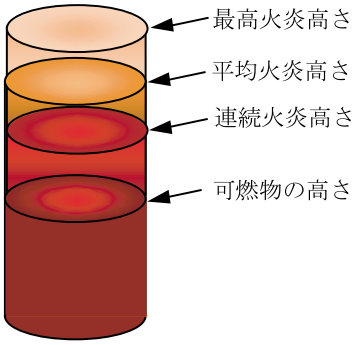


図 5.6: 火炎形成のモデル

室隅で可燃物の燃焼が起こった場合，一般に火炎の高さが伸びる事が知られている。そこで，本研究では高橋の研究結果 [22] に従い，$S/D < 1$，$S = \sqrt{S_1 \times S_2}$ を満たす (図 5.7 参照) 可燃物が室隅に存在する場合には，(5.5) 式を用いて室隅部に位置する可燃物の火炎高さの算出を行うこととする。

$$\frac{L_{min}}{D} = 2.54Q^{*\frac{2}{3}} \tag{5.5}$$

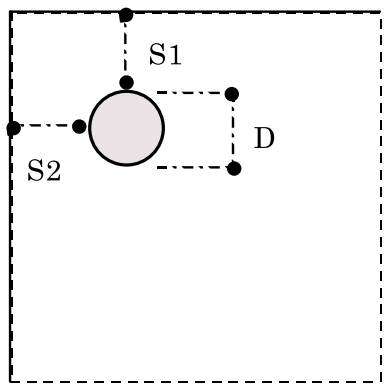


図 5.7: 室隅の条件

また，本研究では可燃物の燃え落ちの影響を以下のように考慮する。木材の燃焼は，一般に木材表面から内部に進行するが，ここでは，底面の形状は可燃物の燃えつき (t_d) まで一定で，高さのみが可燃物の発熱量に応じて減少していく簡易モデルを用いる。つまり，可燃物は，時間 t までの発熱量の積算値に応じて，木材の単位重量あたりの発熱量 (16,000 kJ/kg) に相当する重量だけ高さ方向に燃え落ちると考えている。そのため，図 5.5 で，発熱速度が定常状態に至る時間 (t_p) を境に，燃え落ち量の算出式が異なる。以下に，燃え落ちを含んだ可燃物高さの算出式を示す。

$$h1 = h0 - \frac{t_s^3}{4.8 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot D^2} \tag{5.6}$$

$$h2 = h0 - \frac{t_s^3 + 240 \cdot (t_s - t_p) \cdot Q_{peak}}{4.8 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot D^2} \tag{5.7}$$

ここで，

$h0$: 着火前の可燃物の高さ (m)
$h1$: 定常状態に入る以前の可燃物の高さ (m)
$h2$: 定常状態以降の可燃物の高さ (m)
t_s : 着火からの経過時間 (sec.)
t_p : 着火から定常状態に入るまでの時間 (sec.)
D : 可燃物の直径 (m)

5.1.2 可燃物間の放射

可燃物間の延焼は，放射面から受熱面への放射伝熱のみによるものとする。放射による熱流の計算には放熱物体と受熱物体の相対的な位置関係およびそれぞれの物体の形状により決まる形態係数が重要となる。本研究では，可燃物はすべて円筒に置換されている。しかし，円筒の放射面から受熱面上の微小平面に対する形態係数の計算は，後述する放射面ー受熱面間に放射を遮蔽する物体 (ここでは可燃物) がある場合に非常に困難であるため，本研究では図 5.8 に示すように，受熱面は受熱物体の重心位置に火炎に正対するような微小平面とし，放熱面は受熱面からの接線で切り取られる平面を用いて，(5.8) 式にて形態係数の計算を行った。

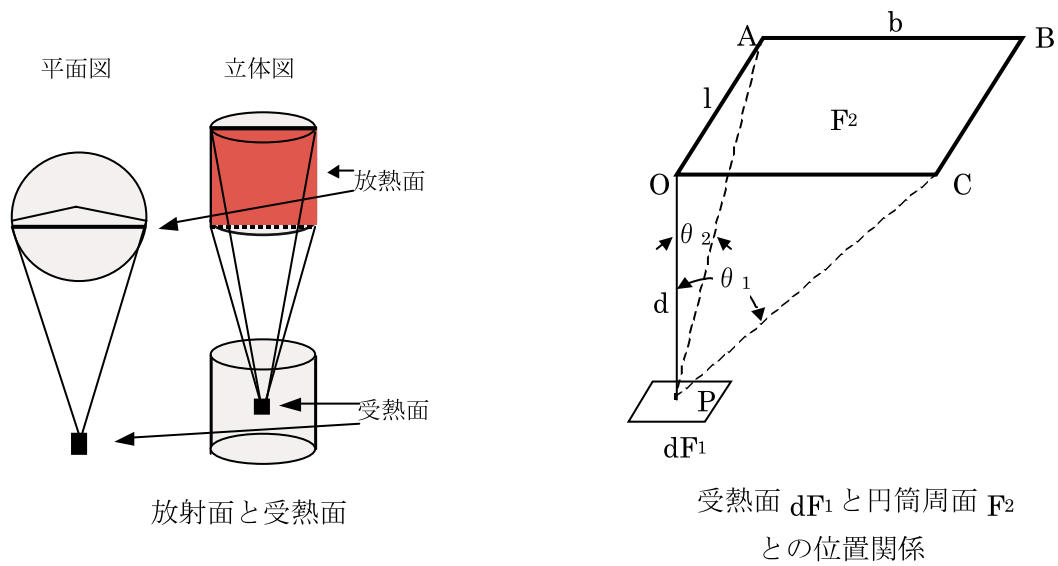


図 5.8: 放熱面と受熱面の関係

$$\varphi = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\cdot\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}} + \frac{b}{\sqrt{d^2+b^2}}\cdot\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{d^2+b^2}}\right] \tag{5.8}$$

放熱面から受熱面が受ける放射熱流は，(5.8) 式の形態係数を用いて，(5.9) 式にて導かれる。

$$I = \sigma\epsilon\varphi(T_f^4 - T_i^4) \tag{5.9}$$

ここで，

σ : ステファンボルツマン係数 (5.67×10^{-11} kW/m^2 K^4)
ϵ : 放射率
T_f : 放熱面 (火炎面) の温度 (K)
T_i : 受熱面の初期温度 (K)

n 個の放射源からの放射熱量 I_f は，それぞれの放熱源からの受熱を足し合わせた (5.10) 式で表される。

$$I_f = \sum_{i=1}^{n} I_i = \sum_{i=1}^{n} \sigma\epsilon\varphi(T_f^4 - T_0^4) \tag{5.10}$$

(5.10) 式に含まれる形態係数は放熱面と受熱面の間に何も存在しないと考えた場合の放熱面の受熱面に対する形態係数である。仮に，放熱面と受熱面の間に放射を遮蔽する可燃物が存在する場合は，障壁となる可燃物により遮断される形態係数を差し引くことで求められる。図 5.9 に障壁となる可燃物によって放熱面が切り取られる様子を示す。この場合，障壁となる可燃物によって黒塗り部分の形態係数が放熱面から切り取られ，放射面として考慮する形態係数は，白抜き部分となる。

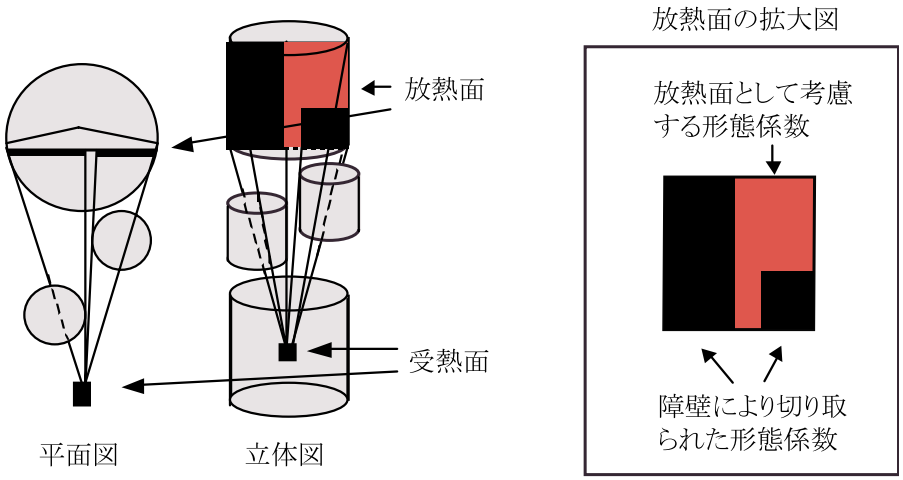


図 5.9: 障壁による放熱面の切り取り

5.1.3 煙流動

火炎を生じて燃焼している可燃物上には，密度差により浮力が生じ上昇熱気流が発生する。火炎で発生する燃焼熱の一部は，放射で周辺の可燃物を加熱し，残りの燃焼熱が周辺空気の温度を高め上昇気流となる。この上昇気流は，上昇する過程で周りの空気を巻き込んで上方に行くに従い円錐状に広がる。火炎上に生じるこのような熱気流を火炎プリュームと呼ぶ。

本研究では，着火した可燃物上にそれぞれ独立した火炎プリュームが形成されるものとし，近傍で燃焼している複数の可燃物同士の合流火炎によるプリューム性状の変化は考えないこととする。個々の火災プリュームから煙層へ流入する上昇気流量は，辻本ら [16] による実験結果から，(5.11) 式で表される。

$$V = 0.195 \cdot \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \cdot \left(\frac{gQ_0}{\gamma_0 C_p T_0} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (Z + Z_0)^{\frac{5}{3}} \tag{5.11}$$

ここで，

V : 高さ Z での上昇気流量の体積 (m^3)
γ_f : プリュームの平均比重量 ($\mathrm{kg/m}^3$)
γ_s : プリューム外の煙層の平均比重量 ($\mathrm{kg/m}^3$)
Q_0 : 火源での発熱量 (kW)
γ_0 : 常温空気の比重量 (1.2 $\mathrm{kg/m}^3$)
Z : 床面から煙層下端までの高さ (m)
Z_0 : 床面から仮想点熱源 (図 5.10 参照) までの距離 (m)

実火災において，火源は点ではなく有限の大きさを持っている。プリュームの諸性状を考えるときには，点熱源上のプリューム理論を用いるため，点熱源が火源面上の高さではなく火源の幾分下方に下がった位置にあるとする補正が必要である。Thomas[14] はプリュームの広がり角度を 15 度と考え，火源面の下方 $1.5\sqrt{A_f}$ に仮想点熱源の位置 Z_0 があるとみなした (ただし，A_f は火源面の面積)。本研究においても，この仮想点熱源を考慮する。ただし，可燃物の燃焼が定常状態になったとき，Z_0 が最大となると考え，そのときの火源面の面積を可燃物の表面積とした。なお，定常状態以前の火源面の面積については，図 5.10 に示すように，可燃物に着火した時点から線形で大きくなることとする。

区画内において，燃焼により生じた煙と常温の空気とは，一般に二層を形成する傾向がある。そこで，本研究では，室空間が上部の高温の煙層と下部の新鮮空気層から形成されていると仮定する二層ゾーンモデル [46](図 5.11) を用いる。上部層，下部層は，完全に水平面で分離されているものとし，各層の境界面を通じる質量の移動は，プリュームを通じてのみ行なわれるものとする。実火災実験などにより，プリュームが発生し，煙が天井下にたまっていき床面に到達するまでの間，プリューム外での煙層は，冷却によって周壁近傍で煙が降下する以外は，時間の経過に従い，煙層下端がほぼ水平で徐々に降下する状態が観察されている。したがって，煙層の増加は，それぞ

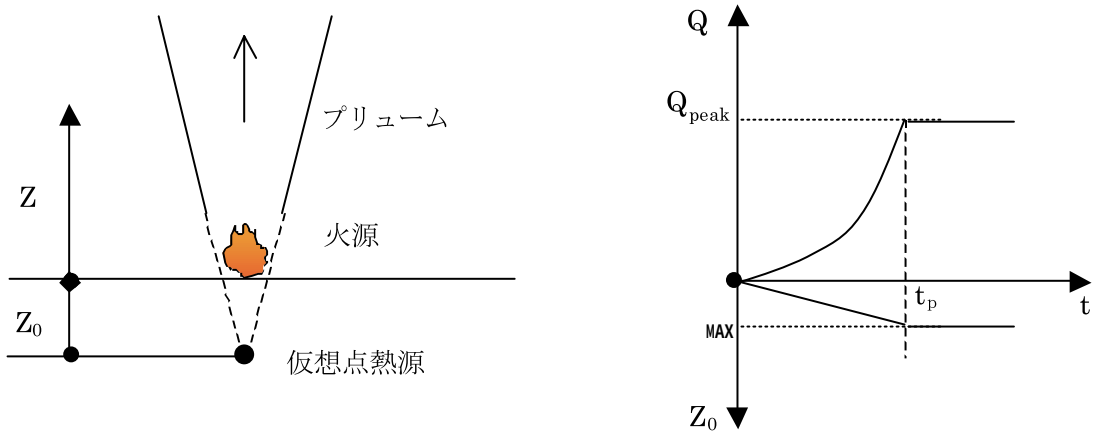


図 5.10: 仮想点熱源の位置

れの火源がつくるプリュームから煙層に供給される量の和 ((5.12) 式) とし，時間 t における煙層高さは，(5.13) 式で表される。

$$I_v = \sum_{i=1}^{n} V_i \tag{5.12}$$

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{\gamma_f}{\gamma_s} \cdot \frac{I_v}{A_{room}} \tag{5.13}$$

ここで，

I_v : n 個の火源からの上昇気流量の和 (m^3)

A_{room} : 室床面積 (m^2)

なお，壁の内装が可燃性である場合には，壁面の燃焼による煙量の増加が考えられるが，壁面近傍での巻き込みは無視できるものとして，煙量の増加には関与しないものとして扱う。ただし，煙層に与えられる熱量としては，加算して扱う。

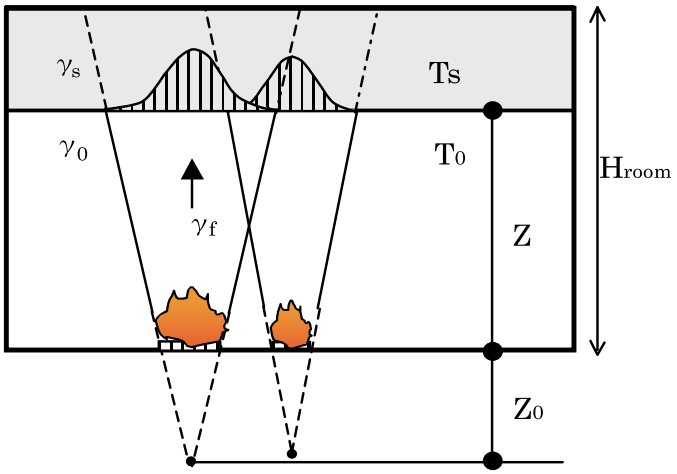


図 5.11: 二層ゾーンモデルの概念図

プリュームによって煙層に与えられる熱量と内装の燃焼による熱量の和の K 倍 ($K = 0.7$) の熱量が煙層の温度上昇に寄与すると仮定し，かつ，煙層の持つ熱量が瞬時に煙層全体に一様拡散するとすれば，煙層の温度 T_s は，(5.14)，(5.15) 式で表される．

$$\frac{d\left\{\Delta\theta_s \cdot (H_{room} - Z) \cdot A_{room}\gamma_s C_p\right\}}{dt} = KQ_{room} \tag{5.14}$$

$$T_s = T_0 + \Delta\theta_s \tag{5.15}$$

ただし，γ_s は，(5.16) 式を満たすものとする。

$$\gamma_s = \gamma_0 \cdot \frac{T_0}{T_0 + \Delta\theta_s} \tag{5.16}$$

ここで，

H_{room}	:	天井高さ (m)
T_s	:	煙層温度 (K)
$\Delta\theta_s$	:	煙層の平均温度上昇 (K)
Q_{room}	:	内装と可燃物の発熱量の和 (kW)
K	:	Q_{room} のうち煙層に与えられる割合 (=0.7)

5.1.4 排煙

窓などの開口部からの自然排煙は，煙の浮力を利用したものであり，その排煙効果は，開口部の上端高さ，大きさ，形状，室内外の温度差などに影響を受ける。自然排煙は排煙機などを設置する必要がなく，天井を高くし，開口部を高い位置に設置すれば，排煙効果が高まり，煙層の降下を緩慢にすることができる利点がある。自然排煙によって流出する煙体積は，煙層下端に中性帯があるとして，(5.17) 式で略算される。

$$W_E = \frac{2}{3}\alpha_0 B\,(H_b - Z)^{\frac{3}{2}}\sqrt{2g\gamma_s(\gamma_0 - \gamma_s)} \tag{5.17}$$

ここで，

W_E : 自然排煙による排煙量 (m^3/sec.)
α_0 : 開口部の流速係数 (=0.7)
B : 開口幅 (m)
H_b : 開口部上端までの高さ (m)

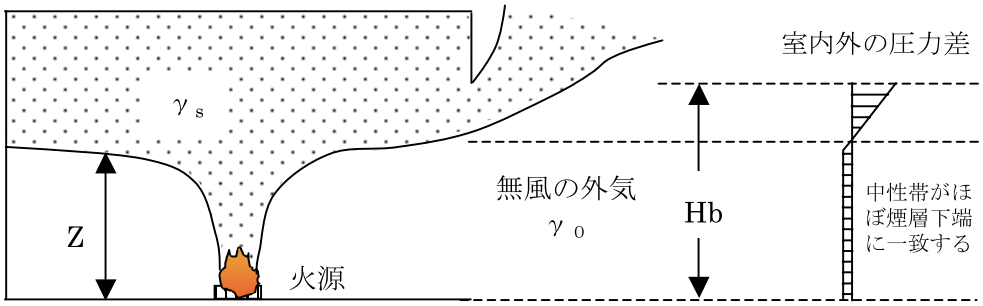


図 5.12: 開口がある場合の煙の流れ

排煙をおこなった場合の煙層高さは，排煙によって流出した煙の体積を考慮し，(5.20) 式で表される。

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{\gamma_f}{\gamma_s}\cdot\frac{I_v - W_E}{A_{room}} \tag{5.18}$$

また，排煙をおこなった場合の煙層温度は，排煙による煙の流出により熱量が失われると考え，(5.14)，(5.15) 式と同様に (5.19)，(5.20) 式で表される。

$$\frac{d\left\{\Delta\theta_s\cdot(H_{room} - Z)\cdot A_{room}\gamma_s C_p\right\}}{dt} = KQ_{room} - W_E\cdot C_p\Delta\theta_s\gamma_s \tag{5.19}$$

$$T_s = T_0 + \Delta\theta_s \tag{5.20}$$

ただし，γ_s は，(5.16) 式を満たすものとする。

5.1.5　内装の燃焼性

高橋のルームコーナー試験による実験[22]によると，内装材料は図 5.13 に挙げる 3 パターンのグレードに分けることができる。各グレードの具体的な説明は以下の通りである。

グレード 1 火源から生じる火炎に接する部分のみが着火し燃焼するが，それ以外の部分への燃焼拡大はほとんどない。つまり，火災初期〜盛期火災に至るまで，内装は室全体の燃焼拡大に寄与しない。(F.O. しない)

グレード 2 天井を這うような火炎に対して，内装は燃焼拡大するが，火炎が天井に達しない火災に対して天井が燃焼拡大に寄与しない。すなわち壁のみで燃え止まることが期待される。(火災によっては F.O. する)

グレード 3 小規模の火災に対して内装の燃焼が拡大する。

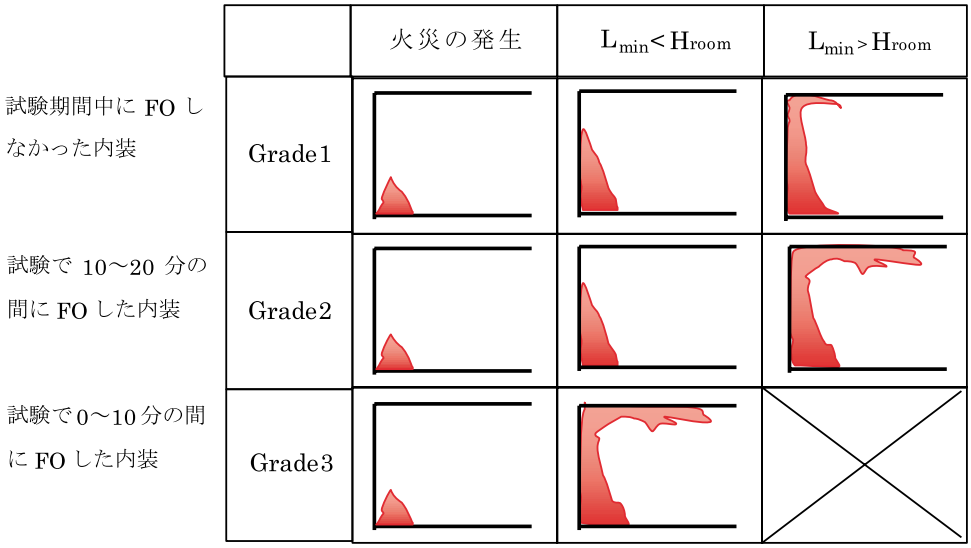


図 5.13: ルームコーナー試験による内装の燃焼に関する性能分類[22]

内装の発熱量の計算式は，(5.21) 式[22]で表されるが，この計算式は上で説明したグレード 1，2，3 のいずれもが従う式である。

$$Q_{mat} = 0.01 \cdot q_{mat} \cdot \frac{0.01 q_{mat} - 1}{tig} \cdot \alpha_f^{\frac{2}{3}} \cdot t^{\frac{8}{3}} \tag{5.21}$$

ここで，

Q_{mat} ： 内装燃焼による発熱速度 (kW)
q_{mat} ： 内装材料の単位面積あたりの発熱速度 (kW/m^2)
t_{ig} ： 内装の着火時間 (sec.)
α_f ： 内装の火災成長率 (0.0125 kW/s^2)

ただし，$q_{mat} > 100$ の材料の場合のみ (5.21) 式が成立し，q_{mat}，t_{ig} はコーンカロリメーター試験の結果を用いる (後述の Grade3 の内装を使用した解析では，q_{mat}=218 kW/m^2，t_{ig}=7 sec. を用いた)。なお，内装の着火判定は，図 5.7 の $S1$，$S2$ に対して，$S1/D < 0.5$ もしくは $S2/D < 0.5$ を満たす可燃物が着火した時点で，可燃物上に形成された火炎が内装に接炎するものと考え，内装も着火するものとする。

5.1.6 可燃物の着火条件

未燃の可燃物が時間 t に受ける受熱流束 $I(t)$ は，(5.22) 式に示されるように，燃焼している可燃物上に形成された火炎からの受熱流束の和 I_f と煙層からの受熱流束 I_s の和によって表される。

$$I(t) = I_f(t) + I_s(t) = \sum_{i=1}^{n} I_i(t) + I_s(t) \tag{5.22}$$

このとき，未燃の可燃物の着火の条件式は，可燃物の受熱流束 $I(t)$ と着火時間 t_{ig} を用いて (5.23) 式で表わされる。

$$\int_0^{t_{ig}} I^2(t)\, dt = 120,000 \tag{5.23}$$

ここで，

$I(t)$ ： 時間 t での可燃物の受熱流束 (kW/m^2)

この着火条件は，一定の放射強度 I において木材の着火温度と着火時間に関する実験[47, 10]により，一般に定められた値であるが，放射強度が非定常 ($I(t)$) である場合においても適用できる。図 5.14 に実験結果と I^2t=12,000 を示す点線を示す。なお，点線が I=10 kW/m^2 から始まっているのは，木材の着火限界となる放射熱流が 10 kW/m^2 であるためである。また，未燃の可燃物が，燃焼している可燃物上の火炎から受ける放射と煙層から受ける放射とでは，受熱面が異なると考えられるが，ここでは未燃の可燃物は，各面で受けた受熱流束の合計で着火を判定した。

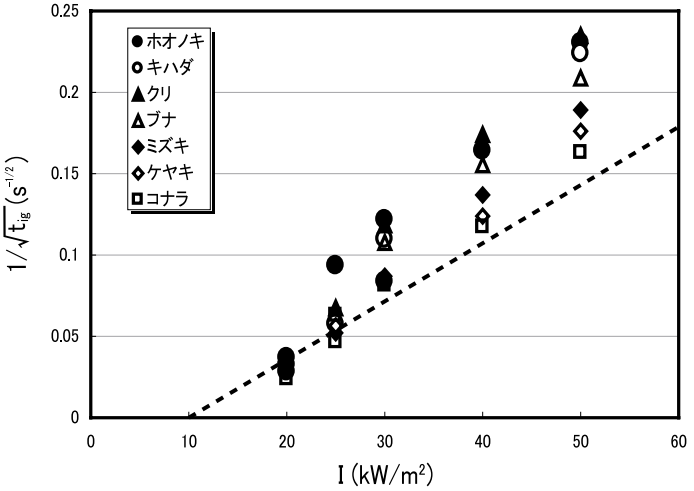


図 5.14: 木材の着火温度と放射熱流の関係

5.1.7 フラッシュオーバー後の発熱性状

F.O. に関しては，未知な部分が多く，その定義も完全に合意されていない。代表的な考え方として，以下の定義がある。

1. 区画の局部燃焼から，区画全体への燃焼への急激な遷移
2. 燃焼支配型から換気支配型への急激な遷移
3. 天井下に滞留する未燃ガスの着火による火炎の急激な拡大

いずれにせよ，最初緩やかな推移を見せる火災が，ある時点で急激に拡大する現象ということができ，火災実験だけでなく，現実の火災においても，区画火災では頻繁に発生する現象である。

Waterman[12] は，実験により F.O. が発生する条件として，床面へ 20 kW/m^2 の放射が必要であることを示した。20 kW/m^2 の放射は，ほとんどの可燃物を口火着火させるのに十分な入射熱であり，この放射源は初期火源以外に天井に蓄積された高温の煙層であろうと考えられている。このため，煙層の温度が 873 K をもって F.O. の生起条件とする考え方 [48] もある。

本研究の対象は，火災発熱解析において 10,000 回のモンテカルロシミュレーションでの発熱速度の平均値を利用する (詳細は 5.2 参照) ため，全体としては F.O. 発生までの初期火災を対象としているが，個々の解析の中には解析終了までに F.O. に至るものもある。そのため，以下の条件のうちいずれか 1 つを満たすと F.O. に至ったと判定し，F.O. 発生後の発熱性状の計算も行なっている。

- 煙層の温度が 873 K を超える
- 内装可燃の条件 (グレード 1，2，3) で，可燃物上に形成される火炎の高さが天井高さを超える

なお，F.O. 発生後は，室内にある未燃の可燃物すべてが着火し，個々の可燃物は瞬時に発熱速度が定常状態に至るものとする。また，室発熱速度の上限 $Q_{\max}$ は，換気支配型に移行するものとし，川越 [49] の式を修正した (5.23) 式の値を越えないものとする。

$$Q_{\max} = 1500 B H_b^{\frac{3}{2}} \tag{5.24}$$

ここで，

B : 開口部の幅 (m)

H_b : 開口部の上端高さ (m)

5.2 火災発熱解析の手順

本研究での火災発熱解析プログラムとは，可燃物配置モデル (4.2 参照) により配置された可燃物が，火災燃焼モデル (5.2 参照) に従って燃焼の進展を時刻暦で計算するプログラムである。以下に解析シミュレーションの手順を示す。

解析シミュレーションの手順

1. 入力データにより，大型可燃物を確定配置
2. 可燃物配置モデルに従い小型可燃物をランダム配置
3. 小型可燃物の一つをランダムに発火源とする
4. 火災燃焼モデルに従い，燃焼性状の計算
5. 1.〜4. を以下の解析終了条件のうち，いずれか 1 つを満たすまで繰り返す

解析の終了条件

- 自然鎮火した場合
- $t = 600$ s を経過した場合
- すべての可燃物が燃え尽きた場合

解析シミュレーションは，小型可燃物の配置および直径をランダムに扱い，上記の計算を 10,000 回繰り返すモンテカルロシミュレーションを行なう。解析に必要なプログラムへの入力データおよび出力の一覧を以下に示す。

入力データ

- 空間条件：室の辺長 (a, b)，天井高さ (H_{room})
- 開口条件：開口幅 (B)，開口部上端高さ (H_b)
- 大型可燃物の情報：直径 (D)，高さ (ho)，位置 (x, y)
- 小型可燃物の情報：小型可燃物の直径の平均 (μ_D)，標準偏差 (σ_D)，個数 (n)

出力データ

- ランダムに決定された小型可燃物の直径 (D)，高さ $(h0)$，位置 (x_i, y_i)
- 各可燃物の最大発熱量 (Q_{peak})，着火から最大発熱量に至るまでの時間 (t_p)，燃焼継続時間 (t_d)
- 10,000 回のモンテカルロシミュレーションでの発熱速度 Q の平均および平均$\pm\ \sigma$
- 可燃物の着火状況
- 時間 t での，煙層高さ $(Z(t))$，煙層温度 $(T_s(t))$，排煙量 $(W(t))$
- F.O. に至った原因および解析番号
- 大型可燃物に着火した解析番号

図 5.2 に火災発熱解析プログラムのフローを示す。

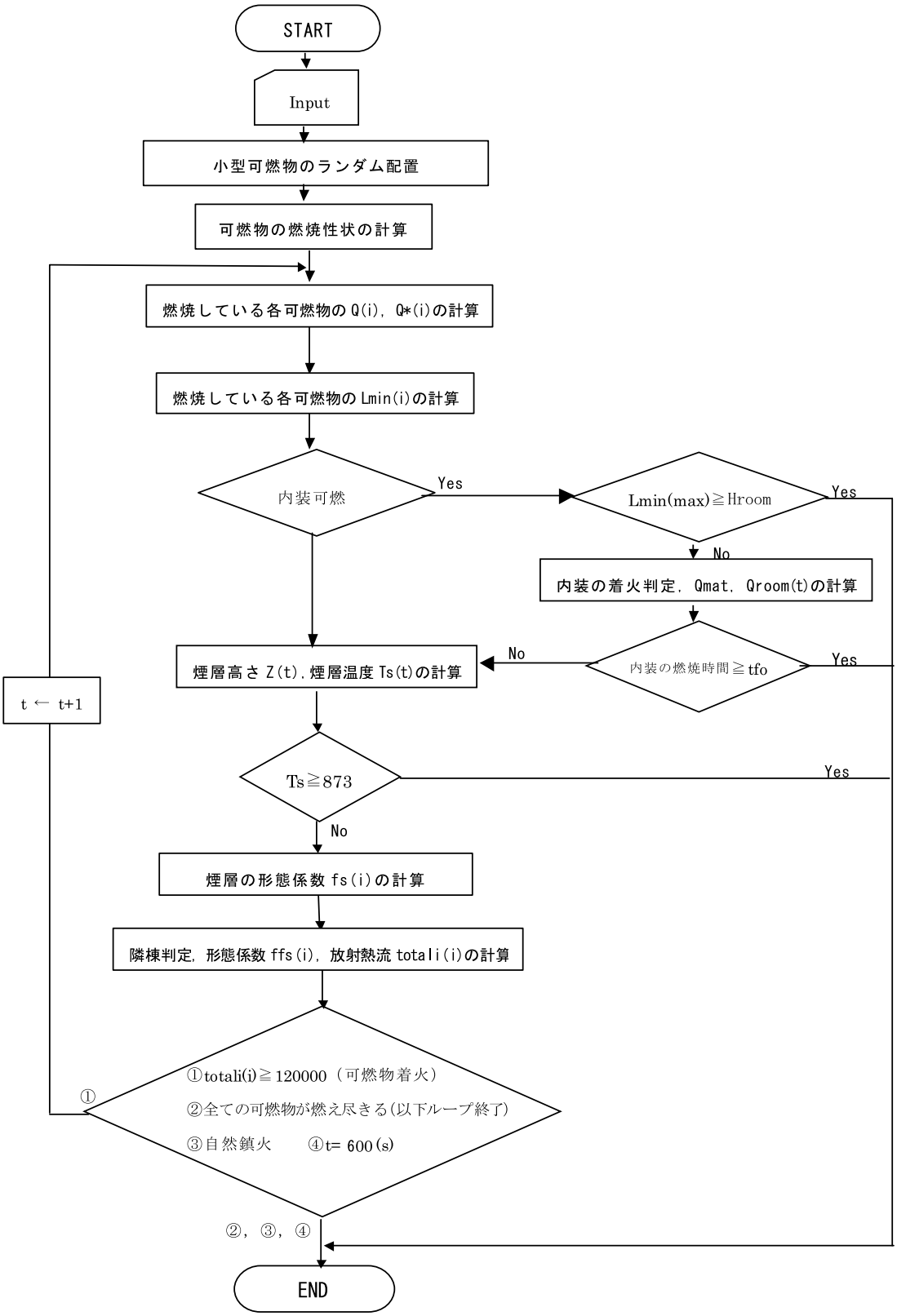


図 5.15: 火災発熱解析プログラムのフロー

5.3　実大火災実験との比較

実際の建築物に火をつけた，実大スケールでの火災実験がいくつか行われている。戸建住宅の場合，火災により住宅自体がどのように燃えるのか，近隣の家に延焼するおそれがあるのかなどを明らかにすることが目的であることが多い。これまで、表5.1に示すような実大実験が実施されている。本研究ではこのうち、可燃物の量や配置のデータが明確な例として6の実験を選び、この結果と提案モデルからの結果を比較することでその妥当性を確認することとした。

表 5.1: 実大火災実験報告書一覧

	名称	報告日時	実施者
1	木質系プレハブ住宅の実大火災実験などに関する調査報告書	昭和58年8月	日本建築防災協会，プレハブ住宅火災研究委員会
2	住宅部材安全性能向上事業報告書	昭和61年3月	日本住宅木材技術センター
3	住宅部材安全性能向上事業報告書 実大火災実験編　木造3階建住宅の火災性状	昭和62年3月	日本住宅木材技術センター
4	住宅部材安全性能向上事業報告書 軸組木造住宅部材の火災安全性能	昭和63年3月	日本住宅木材技術センター
5	3階建て鉄鋼系プレハブ住宅実大火災実験報告書	平成2年3月	日本建築センター
6	木造3階建共同住宅実大火災実験報告書	平成4年1月	建築研究所，日本建築センター

木造3階建共同住宅実大火災実験[50)]

ここでは，木造3階建共同住宅実大火災実験を紹介するが，実験の目的が多岐にわたっているため，本研究に関連のある部分についてのみ説明する。木造3階建共同住宅実大火災実験の目的は，木造3階建共同住宅の火災性状などの把握および防火上の安全性を従来の耐火建築物と比較など総合的な資料を得ることである。出火室は1階LDK(居室)で，隣室および上階への延焼などについて測定されているが，本研究では区画された室の火災を対象にしているため，火災室のみについて説明する。図5.16に火災室での可燃物の配置図を示す。室の長辺は5.64 m，短辺は3.64 m，天井高は2.735 mである。図中に示されている番号は，実験時に配置された家具で表5.2に家具の種類をまとめた。表中の位置は，配置図の左下を原点としたときの家具の中心位置を示す。また，☆は出火点を示し，出火点付近の床面から高さ方向に0.1 m，0.6 m，1.2 m，1.8 m，2.4 mで室温度が測定されている。室温の測定には,「JIS C 1602　熱電対」に規定されている0.75級以上の精度を持つクロメルアルメル(K)熱電対が用いられた。なお，室温度以外には，煙濃度の測定，ビデオ・目視による火災性状の考察，放射強度の測定などが行われた。

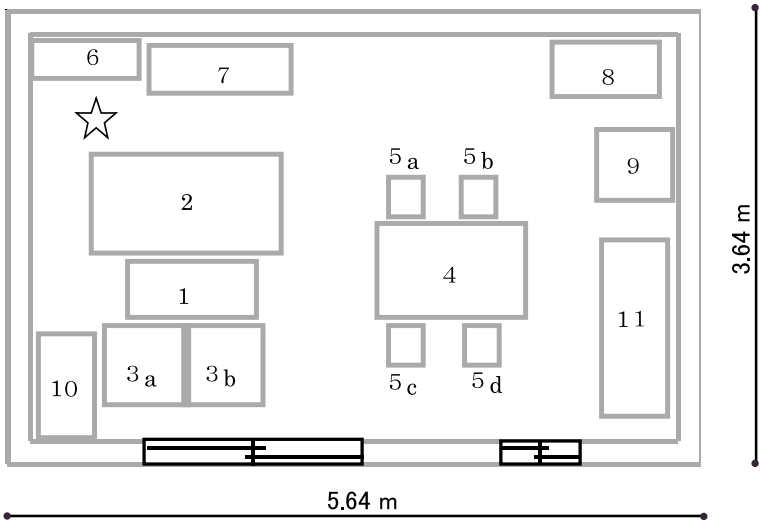


図 5.16: 木造 3 階建共同住宅実大火災実験の出火室の配置図

表 5.2: 実大火災実験 [50] で配置されていた可燃物

番号	名称	大きさ (m) (W × D × H)	位置 (m) (x, y)
1	テーブル	1.08 × 0.48 × 0.46	(1.46, 1.38)
2	ソファー (大)	1.60 × 0.83 × 0.83	(1.05, 2.11) (1.78, 2.11)
3	ソファー (小)	0.77 × 0.84 × 0.83	a(1.05, 0.65) b(1.78, 0.65)
4	食卓	1.25 × 0.80 × 0.68	(3.65, 1.54)
5	椅子	1.25 × 0.80 × 0.68	a(3.24, 2.11) b(3.97, 2.11) c(3.24, 0.97) d(3.97, 0.97)
6	本棚	0.90 × 0.32 × 1.78	(0.57, 3.32)
7	食器棚	1.20 × 0.41 × 1.79	(1.70, 3.24)
8	リビングボード	0.89 × 0.45 × 1.83	(4.94, 3.24)
9	冷蔵庫	0.60 × 0.65 × 1.66	(5.18, 2.43)
10	テレビ	0.88 × 0.48 × 0.91	(0.41, 0.57)
11	流し台	1.50 × 0.55 × 0.80	(5.18, 1.05)

実大火災実験にもとづく火災発熱解析

次に，図 5.16 および表 5.2 で示される実大火災実験 6[51] の可燃物配置と同様の条件で火災発熱解析を行うために，第 4 章で説明した可燃物配置モデルを用いて，可燃物を円筒の木製品に置換 (表 5.4) し，再配置したものを図 5.17 に示す。報告書からは，可燃物の材質は特定できなかったため，すべての可燃物が木材であったと仮定し，火災成長率 $\alpha = 0.0125$ とした。解析に必要な他の諸条件は，表 5.3 にまとめて示す。なお，円筒に置換した際に，可燃物同士が重なるもしくは室からはみ出るものがあったため，位置を若干補正することで，重なりおよびはみ出しが起こらないようにした。ただし，テレビは明らかに木製品でないため，初期火災時に燃焼することは考えにくく，直径を小さくすることによる発熱速度への影響が小さいと判断し，テレビのみ可燃物同士の重なりを回避するために位置を補整すると共に，直径を小さくした (0.83 → 0.60 m)。

また，報告書に記載されている出火点の位置は，平面図上に記載されているだけで正確に把握できない。ここでは，報告書に記載されている，おおよその位置から図 5.4 中の☆印の位置 (0.74, 2.76) を出火点とした。なお，出火点の発熱量に関して，報告書に以下の記述がある。

> 「エゾマツ辺材クリブ 20×20×600 mm を 60 本使用し，格段 12 本ごとに井桁錠に段に積み重ね，最下段の隙間にエチルアルコール 500 ml を含浸させたインシュレーションボード 10×15×600 mm を挿入した。また，点火の熱源として，最下段のクリブの中の 6 本に市販のニクロムヒーターを取付け，遠隔操作による電動点火方式を採用した。」

解析では，第 4 章で説明した図 5.5 に従い，最大発熱量 Q_{peak} が約 100 kW の火源 (直径 0.47 m の円筒木材) を用いた。

表 5.3: 解析に関わるその他の条件 (実大火災実験との比較)

内装の燃焼性	不燃 (グレード 0)
室床面積	5.64 m × 3.64 m
天井高さ	2.74 m
開口部面積	1.8 m × 1.8 m の窓の 1/4 を開放

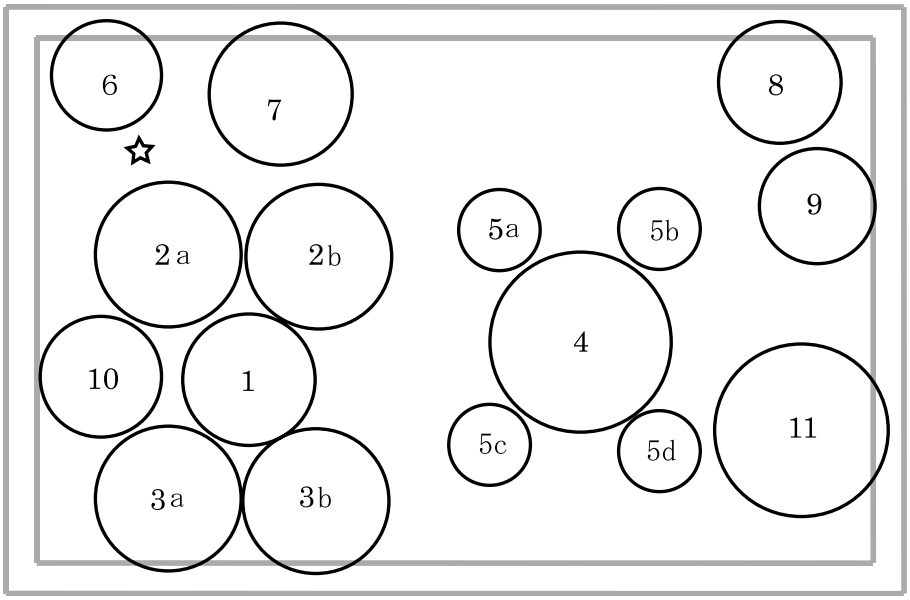


図 5.17: 解析での可燃物の配置図

表 5.4: 実大火災実験 [50] で配置されていた可燃物

番号	名称	大きさ (m) (D × H)	補整位置 (m) (x，y)
1	テーブル	0.91 × 0.46	(1.46，1.38)
2	ソファー (大)	0.99 × 0.83	(0.86，2.11) (2.80，2.11)
3	ソファー (小)	0.98 × 0.83	a(0.86，0.65) b(2.80，0.65)
4	食卓	1.20 × 0.68	(3.65，1.54)
5	椅子	0.56 × 0.68	a(2.98，2.11) b(4.32，2.11) c(2.98，0.97) d(4.32，0.97)
6	本棚	0.75 × 1.78	(0.57，3.32)
7	食器棚	0.98 × 1.79	(1.70，3.16)
8	リビングボード	0.83 × 1.83	(4.94，3.22)
9	冷蔵庫	0.78 × 1.66	(5.18，2.43)
10	テレビ	0.60 × 0.91	(0.42，1.38)
11	流し台	1.19 × 0.80	(5.04，1.05)

解析結果

実大火災実験と解析結果の比較は，実大火災実験報告書に記述されている温度性状について検証する。なお，実大火災実験報告書では，出火室の温度性状が以下のように報告されている。

> 「点火後 1 分頃から上昇し始め，2 分半過ぎには 450 ℃を越え，3 分 45 秒に南面の掃き出し窓のガラスの破損が始まり，7 分には最高温度 1006 ℃に達し，8 分 30 秒にガラスが前面落下し，外部に火炎が大きく噴出した。その後，火炎は減少して煙が多くなり 9 分ごろに 660 ℃にまで低下した後再び上昇し，25 分頃に約 970 ℃に達した後は緩やかに下降して 60 分時点の温度は約 650 ℃であった。」

また，床面から高さ 1.8 m に設置された熱伝対で測定された火災室の室温を表 5.5 に示す。上記記述と若干の違いがあるのは，測定した熱伝対の位置が異なるためである。

表 5.5: 出火室の温度状況

測定温度 (K)	373	533	723	873	1264(最高温度)
記録時間	1’40”	2’10”	3’10”	3’30”	5’30”

表 5.5 で示された室温度および解析で得られた室温度を図 5.18 にあわせて示す。報告書からは，初期火源の大きさが判断できなかったため，解析では約 100 kW の火源を想定したが，この火源の大きさにより第一着火物への延焼時間が大きく変化する。また，報告書では，点火から 3 分 45 秒後に窓ガラスの破損が報告されており，このことで室温の上昇が緩慢になったと考えられるが，解析では，開口部は初期状態から変化しないものとしている。そのため，解析では，180 秒くらいで F.O. が発生し，温度上昇が急激に進行している。しかし，火災初期の火災燃焼モデルの誤差は実験結果と極端にかけはなれたものではなく，今後の解析結果についてもある程度の解析精度を保てると考えられる。なお，解析では，室内は煙層と新鮮空気層の二層ゾーンモデルを使用しているため，図 5.18 に示されている室温は，実験での室温計測高さ (1.8 m) まで煙層が降下した直後からの値となっている。

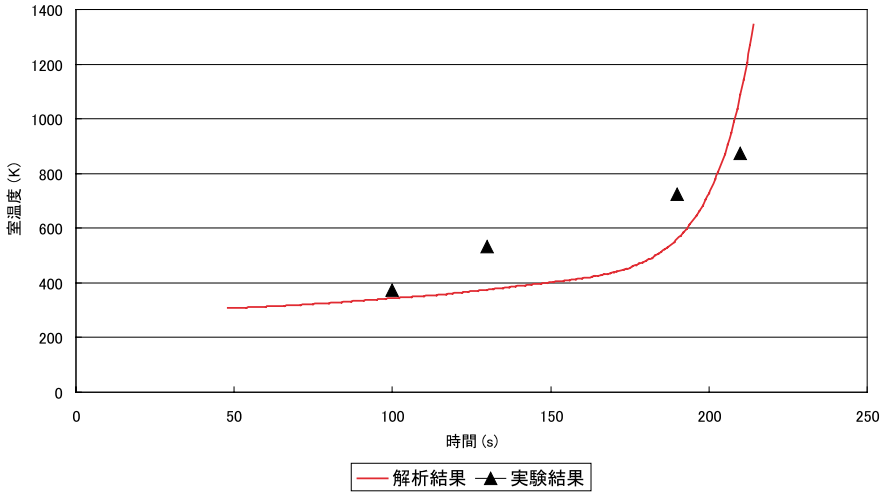


図 5.18: 実大火災実験と解析結果との比較

5.4 まとめ

本章では，火災の燃焼モデルと火災発熱解析プログラムについて説明した。5.1 では，火災燃焼モデルにおいて，火災現象をモデル化する際に考慮したことを 5.1.1 可燃物の燃焼，5.1.2 可燃物間の放射，5.1.3 煙流動，5.1.4 排煙，5.1.5 内装の燃焼，5.1.6 可燃物の着火条件，5.1.7 フラッシュオーバー後の発熱性状の順に説明した。火災発熱解析プログラムは，第 4 章で説明した可燃物配置モデルで室に配置された可燃物から出火を想定し，5.1 で説明した火災燃焼モデルを用いて，火災の進展を時刻暦で計算するプログラムである。計算は時刻 t=600 sec. まで行なうが，その前にすべての可燃物が燃え尽きたり，可燃物が自然鎮火してしまった場合は解析を終了する。また，火災が進展し，F.O. が発生した場合においても，F.O. 直後に室に存在するすべての可燃物が着火するとして，計算を続けた。これは，本研究では，火災初期〜成長期を対象にしているが，後述する 10,000 回の解析での発熱速度の平均値を取る必要があるためである。5.3 では，実大火災実験と同様の条件で行なった解析結果とを比較することで，火災発熱解析プログラムの妥当性を検証した。実大火災実験報告書からは，出火源の大きさが不明であったことなどの問題点もあるが，実験結果との比較では，極端にかけ離れた結果とはならなかった。

第6章　火災発熱解析による可燃物特性の感度解析

第3章で，可燃物配置調査から，大型可燃物については対象とする室に配置される可燃物の種類と個々の大きさ，位置を確定的にモデル化することができた。しかし，小型可燃物は，居住者(使用者)によって持ち込まれる可燃物量，大きさ，配置に大きなばらつきがあると考えられ，その特徴を確定的にモデル化することは困難であると考えられる。しかし，初期火災時の発熱速度の進展には，小型可燃物の大きさと密集度が重要な影響を及ぼすと考えられるため，本研究では，小型可燃物の直径と個数を考慮したモデルを構築した。本章では，小型可燃物の直径と個数を変化させた時に，発熱速度にどのような影響を及ぼすのかについて検証する。そのため，可燃物配置モデル(第4章)および火災燃焼モデル(第5章)を用いて，標準的な住宅の居室(大学生の自室)での出火を想定したケーススタディを行なう。6.1では，ケーススタディの諸条件について説明する。6.2では，大型可燃物を確定配置させた上で，小型可燃物の直径を変化させたときの発熱速度への影響を検証する。6.3では，6.2と同様に小型可燃物の個数を変化させた場合の発熱速度への影響を検証する。6.4では，可燃物密度が一定となる条件のもと，小型可燃物の分割数(個数)を変化させたときの発熱速度への影響を検証する。6.5では，大型可燃物の配置を変更した時の発熱速度への影響を検証する。6.6では，可燃物特性以外の要素が，発熱速度へ及ぼす影響を検証するために，内装の燃焼性を可燃性(グレード 3)にした場合の解析を行なう。最後に，6.7でこれら解析結果の考察を行なう。

図6.1に，本研究の流れと本研究中での本章の位置付けを示す。

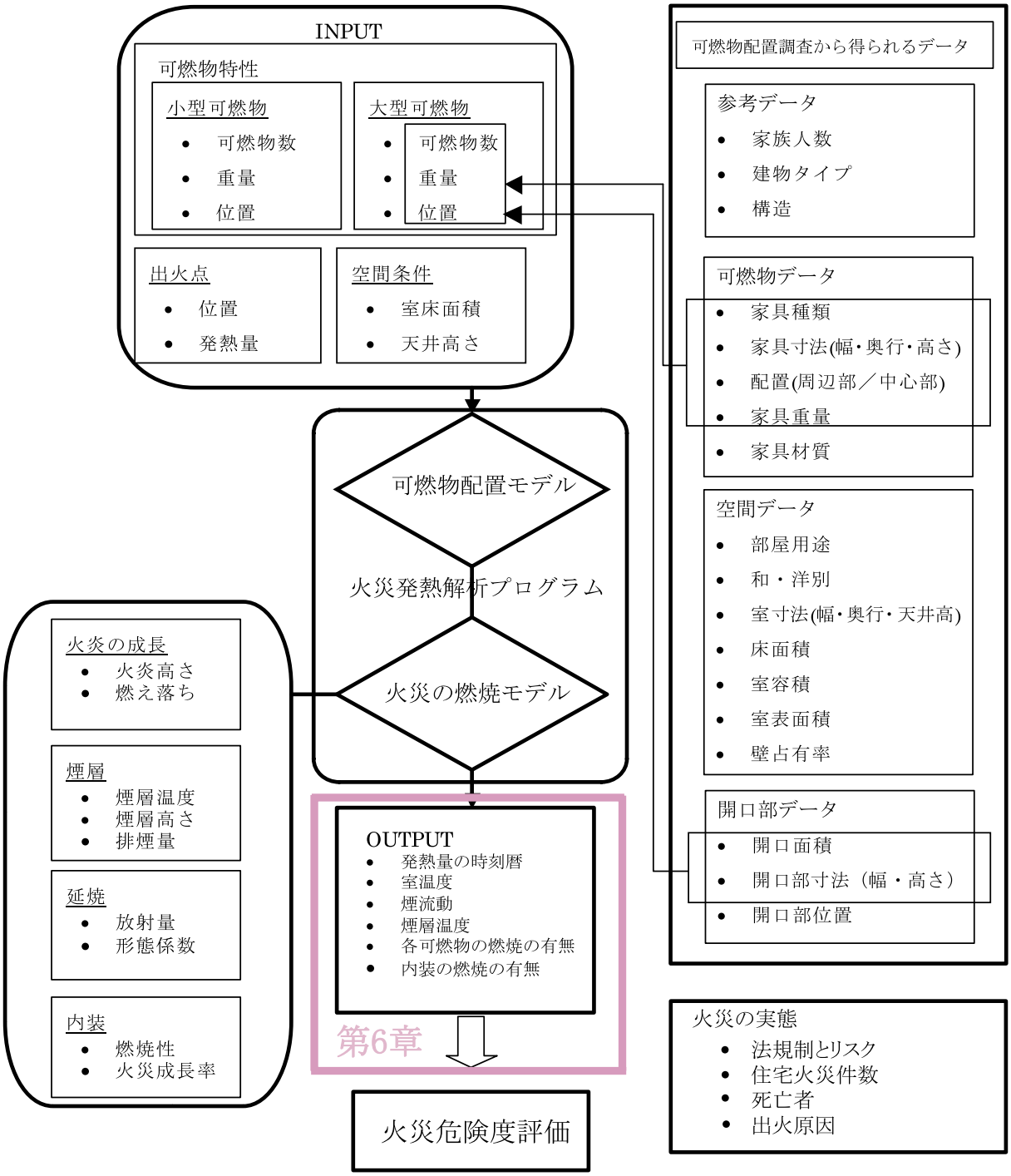


図 6.1: 本研究中の本章の位置付け

6.1 ケーススタディの概要

小型可燃物の大きさと密集度が重要な影響を及ぼすと考えられるため，本章では，小型可燃物の直径と個数を変化させて，発熱速度への影響を検証する。

6.2 では，解析パターン 1 として，小型可燃物の直径を変化させたときの発熱速度への影響を，6.3 では，解析パターン 2 として，小型可燃物の個数を変化させたときの発熱速度の影響を，6.4 では，解析パターン 3 として，可燃物密度が一定の条件で，小型可燃物の分割数 (個数) を変化させたときの発熱速度への影響を検証する。また，6.5 では大型可燃物の配置を変更したときの発熱速度への影響を，6.6 では内装を可燃性材料としたときの発熱速度への影響をそれぞれ検証する。

解析の対象となる空間は，大学生の自室とする。表 6.1 に示される大学生の自室に持ち込まれる大型可燃物 (表 3.11 参照) を，第 3 章および文献 [35] を参考に配置した。ここでは，第 3 章で説明した手法で，大型可燃物は表 6.1 に示される中心座標に確定配置させ，小型可燃物は，大型可燃物や他の小型可燃物に重ならないように室に一様にランダム配置させた。配置された大型可燃物の総重量は 379.0 kg(密度 w=100 kg/m^3 で概算) となる。図 6.2 に，ケーススタディとした大学生の自室に，円筒置換後の大型可燃物を配置した状態を示す。なお，表 6.1 の中心座標は，図 6.2 の室の左下を原点と考えた時の大型可燃物を示す円の中心座標である。解析に関わるその他の条件を，表 6.2 にまとめて示す。

表 6.1: 大学生の自室に配置される大型可燃物

	家具名称	設置数	幅 (m)	奥行 (m)	高さ (m)	円筒変換後の直径 (m)	最大発熱量 (kW)
1	タンス	1	0.93	0.50	1.78	0.88	622.40
2	机	1	0.99	0.63	0.72	0.98	331.05
3	雑収納家具	1	0.67	0.43	0.93	0.68	261.40
4	ベッド	1	0.98	1.99	0.39	1.17*	281.65 281.65
5	事務専用イス	1	0.45	0.43	0.44	0.54	108.50
6	本棚	1	0.88	0.34	1.78	0.75	519.97
7	ステレオ	1	0.58	0.32	0.44	0.54	109.25

*ベッドは 2 つの円筒が連なっているものとみなす (第 4 章参照)

表 6.2: 解析に関わるその他の条件

内装の燃焼性	不燃 (グレード 0)
室床面積	4.00 m × 4.00 m
天井高さ	2.50 m
開口部	幅 1.0 m，開口部上端高さ 2.0 m

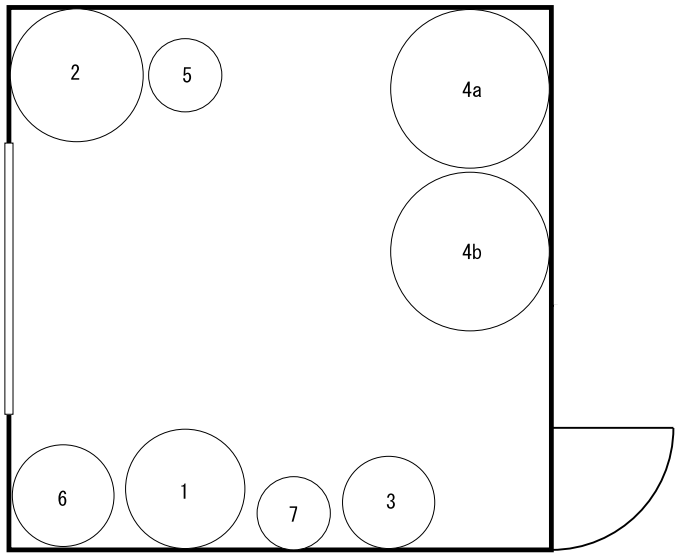


図 6.2: 大型可燃物の配置図

6.2　小型可燃物の直径を変化させたときの発熱速度への影響

火災時に小型可燃物の大きさが発熱速度へ及ぼす影響を検証するために，表 6.3 に示す 1-1 から 1-3 まで，小型可燃物の個数は変化させず，大きさ (直径) を 3 通りに変化させ，解析ごとに小型可燃物の配置および出火点をランダムに変更し，10,000 回のモンテカルロシミュレーションを行った (以後，解析番号 x-y の x は解析パターン番号を示し，y はパラメタ番号を示すものとする)。図 6.3 に 1-2(標準モデル) で小型可燃物を配置させたときの例を，図 6.4 に 1-1 から 1-3 の時間 (横軸) ー平均発熱速度 (縦軸) の関係を，図 6.5 に 1-1 から 1-3 の発熱速度の変動係数を示す。 ここで，本研究では，F.O. 以前の初期火災を研究の対象としているが，10,000 回のシミュレーションの中には，可燃物の配置が危険なものも存在し，F.O. に至る可能性があるものもある。そのため，個々の解析は，F.O. 発生後も計算を続けている。ただし，F.O. 後の発熱速度の上限は，開口部面積で定まる供給空気量に依存するものとし，(5.23) 式で示される値を上限とした。また，F.O. の条件を満たすと，すべての未燃の可燃物が瞬時に着火し，最大発熱量に至るものとした。

表 6.3: 小型可燃物のパラメタ (解析パターン 1)

	小型可燃物の直径の平均 (m)	小型可燃物の個数	小型可燃物の総重量の平均 (kg)	可燃物密度 (kg/m^2)	1 個の可燃物の最大発熱量 (kW)
1-1	0.1	10	3.93	23.9	4.4
1-2	0.2	10	31.4	25.7	17.6
1-3	0.3	10	106.0	30.3	39.6

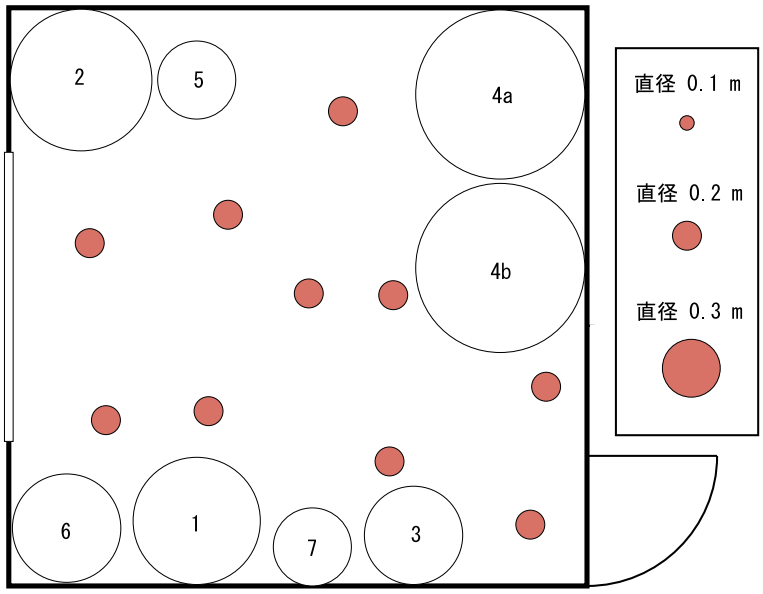


図 6.3: 小型可燃物の配置の例 (1-2)

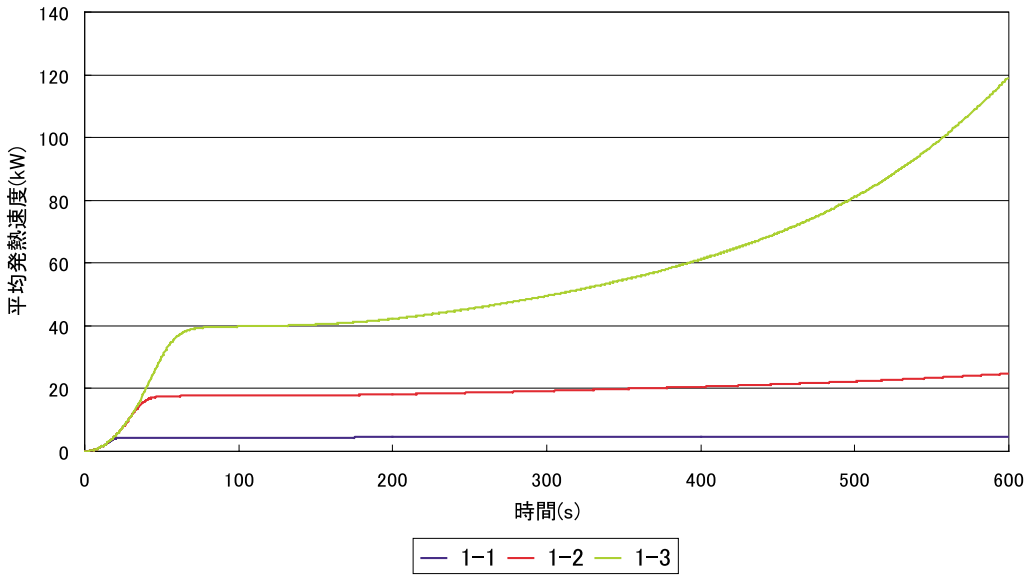


図 6.4: 平均発熱速度 (解析パターン 1)

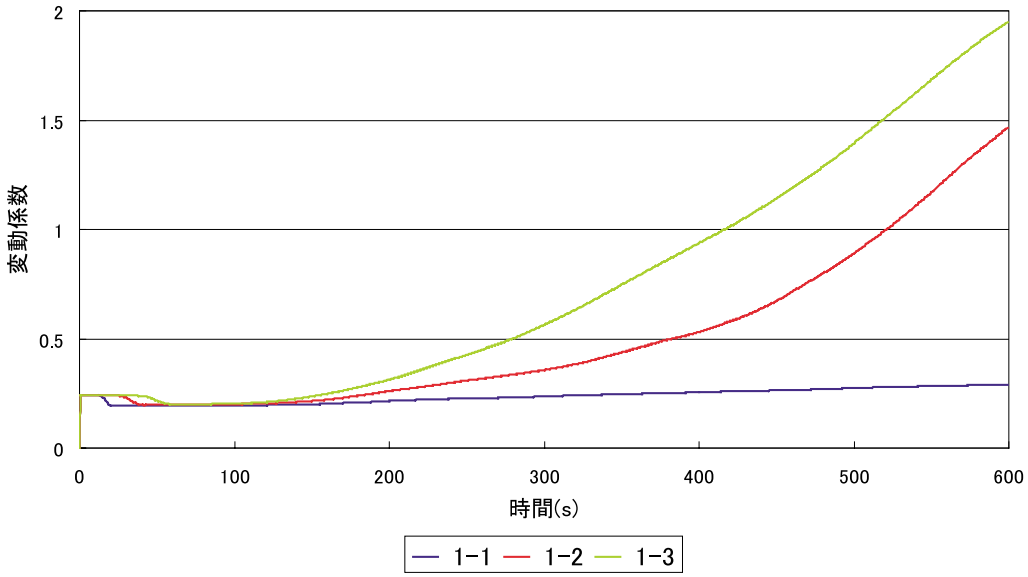


図 6.5: 変動係数 (解析パターン 1)

図 6.4 で，1-1，1-2，1-3 それぞれの t=0 からの発熱速度の勾配はほぼ同じである。これは，発火源となる小型可燃物の火災成長率 α が正規確率変数で与えられ，10,000 回の解析での平均発熱速度を示しているためである。その後，発火源となった小型可燃物は，最大発熱速度で定常状態に至るが，1-1 は，ほぼ発火源の最大発熱量で一定のまま解析終了条件である t=600 sec. に至っている。1-2 は，t=180 sec. くらいから他の可燃物への延焼が見られ，ゆるやかに発熱速度が上昇している。また，1-3 は，t=150 sec. くらいから他の可燃物への延焼がみられ，特に t=200 sec. 以降は，発熱速度が急激に上昇している。これは，発火源となる可燃物の直径が大きいほど，発火源の最大発熱量が大きくなる (表 6.3) ため，燃焼による放射熱流が強くなり，他の可燃物への延焼に要する時間が短くなるためだと考えられる。

また，図 6.5 から，1-1 の変動係数は，0.25 程度で解析終了まであまり増加していない。つまり，小型可燃物の大きさや配置といった可燃物特性をランダムに変更しても，解析結果はほとんど変化しないことがわかる。しかし，1-2 や 1-3 では，時間の経過に従って変動係数が大きくなり，火災の進展が加速する危険な配置とそうでない配置が混在していることがわかる。このことから，可燃物の直径が大きくなるほど，大きな火災に進展する条件が満たされ，可燃物の大きさ (発火源の最大発熱量) が発熱速度に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

この他にも小型可燃物の個数が同じで，直径が大きくなれば，近傍の可燃物への距離が短くなる可能性が高くなるため，他の可燃物への延焼に要する時間が短くなることも発熱速度を増加させた原因であると考えられる。以後の解析においても，燃焼している可燃物の最も近傍に存在する可燃物までの距離が発熱速度に大きな影響を及ぼすと想定できるため，本研究では，これを評価する指標として平均最短距離 d_{ave} を定義する。平均最短距離とは，(6.1) 式で表されるように，すべての可燃物について，それぞれの可燃物の最も近傍にある可燃物までの中心間距離 d の平均を 10,000 回の解析で更に平均をとったものである。解析パターン 1 の平均最短距離を表 6.4 に示す。理論的には，平均最短距離は，可燃物の中心間距離の平均値であるため，可燃物数が同じであればほぼ同じ値になる。しかし，1-1，1-2，1-3 の平均最短距離が若干異なるのは，可燃物同士が重ならないようなモデルとしているため，可燃物の直径が大きくなるほど可燃物の中心間距離も大きくなる。火災燃焼モデルにおいて，可燃物の延焼に関係する要素の 1 つである形態係数は，図 6.6 に示すように，受熱側の可燃物の重心と重心から放熱側の可燃物に引いた接線により切り取られる面で表される放熱面との相対的な位置関係で決まる。そのため，放熱面の発熱量が同じであれば，平均最短距離が小さいほど延焼に要する時間は短くなる。

$$d_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{10000} \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} d_i}{n} \right)_i}{10000} \tag{6.1}$$

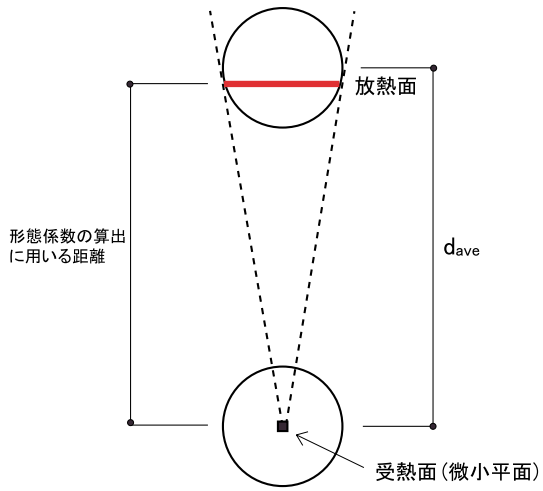


図 6.6: 放射面と受熱面の位置関係

表 6.4: 平均最短距離 (解析パターン 1)

	平均最短距離 (m)
1-1	0.66
1-2(標準モデル)	0.68
1-3	0.71

区画火災では，特に今回のケーススタディのような比較的小さな室では，F.O. に至る可能性が高い。F.O. が起こると瞬時に高温の炎に包まれるため非常に危険である。本研究では，火災初期の 10 分間 (600 sec.) を解析の対象としており，仮に 600 sec. 以内に F.O. に至ったとしても，F.O. 後の検証は行なわない。表 6.5 に解析終了 (t=600 sec.) までに大型可燃物に着火した解析の割合および F.O に至った解析の割合を示す。

表 6.5: 大型可燃物に着火した解析の割合 (解析パターン 1)

	大型可燃物に着火した解析の割合	F.O. に至った解析の割合
1-1	0/10000	0/10000
1-2(標準モデル)	125/10000	0/10000
1-3	1216/10000	50/10000

小型可燃物の直径が最も小さい 1-1 では，大型可燃物に着火したものはなかった。また，1-2(標準モデル) では，大型可燃物に着火した解析が 125 回あったが，解析終了までに F.O. に至ったものはなかった。最も直径の大きい 1-3 では，1,216 回と 12 %以上の解析で大型可燃物に着火し，0.5 %の解析で F.O. に至っている。

次に，可燃物間の延焼の進展状況を把握するために，すべての可燃物の底面積の和に対する燃焼した可燃物の底面積の和で定義される平均焼損面積率を求めた。図 6.7 に，10,000 回の解析の平均焼損面積率を示す。なお，F.O. に至ると，存在するすべての未燃の可燃物が燃焼を開始するため，平均焼損面積率=1 は，すべての解析で F.O. に至ったことを示す。また，平均焼損面積率の時間変化率は，室内の可燃物の燃え広がる速さを意味する。図 6.7 で，平均焼損面積率の t=0 の値が異なるのは，発火源となった小型可燃物の大きさが異なるためである。また，図 6.4 と同様に，1-1 は他の可燃物に延焼しておらず，1-2 は緩やかに延焼し，1-3 は t=150 sec. くらいから延焼が始まり，平均的に，平均焼損面積率が t=0 時点の倍の値になる t=400 sec. 過ぎには，発火源から他の可燃物に延焼し，3 倍になる t=500 sec. 過ぎには 3 個目の可燃物へ延焼していることになる。このように，発火源の発熱速度が大きければ，最初の未燃の可燃物への延焼に要する時間が短くなり，さらに短時間で 3 番目の可燃物へ延焼し，火災は急激に進展することがわかる。

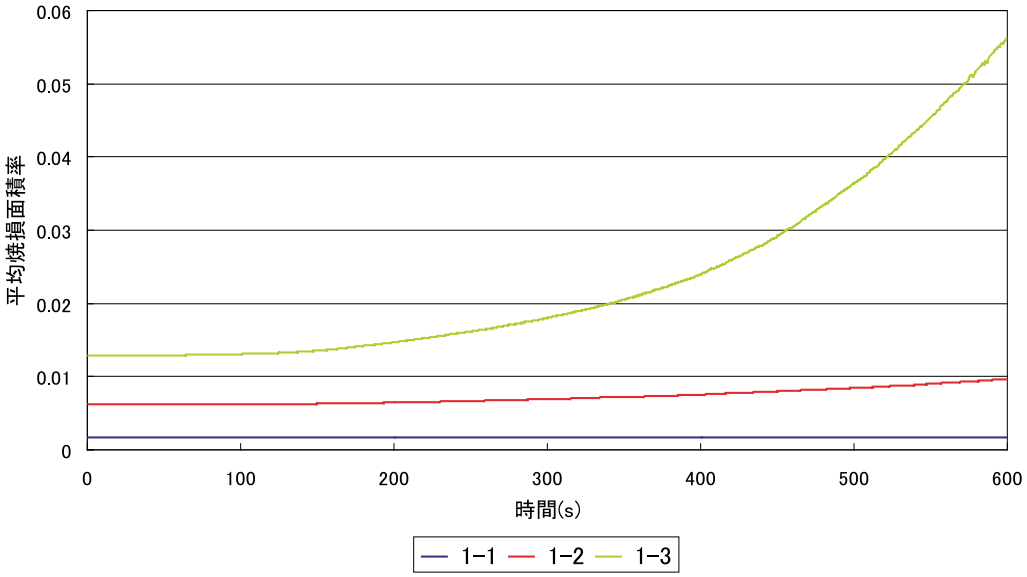


図 6.7: 平均焼損面積率 (解析パターン 1)

6.3 小型可燃物の個数を変化させたときの発熱速度への影響

火災時に小型可燃物の密集度が発熱速度へ及ぼす影響を検証するために，表 6.6 に示すように，表 6.3 の 1-2 を標準モデルとして，小型可燃物の直径を 0.2 m で統一し，小型可燃物の個数を変化させた 2-1，2-2 の 2 通りの解析を，解析パターン 1 と同様に行なった。図 6.8 に解析 2-2 の小型可燃物の配置の例を，図 6.9 に 1-2 および 2-1，2-2 の時間 (横軸) ー平均発熱速度 (縦軸) の関係を，図 6.10 には平均焼損面積率を，図 6.11 に 1-2 および 2-1，2-2 の発熱速度の変動係数を示す。また，表 6.7 には平均最短距離を，表 6.8 には解析終了までに大型可燃物に着火した解析の割合および F.O. に至った解析の割合をそれぞれ示す。

表 6.6: 小型可燃物のパラメタ (解析パターン 2)

	小型可燃物の直径の平均 (m)	小型可燃物の個数	小型可燃物の総重量の平均 (kg)	可燃物密度 (kg/m^2)	1 個の可燃物の最大発熱量 (kW)
1-2	0.2	10	31.4	25.7	17.6
2-1	0.2	5	15.7	24.7	17.6
2-2	0.2	20	62.8	27.6	17.6

表 6.7: 平均最短距離 (解析パターン 2)

	平均最短距離 (m)
1-2(標準モデル)	0.68
2-1	0.83
2-2	0.52

表 6.8: 大型可燃物に着火した解析の割合 (解析パターン 2)

	大型可燃物に着火した解析の割合	F.O. に至った解析の割合
1-2(標準モデル)	125/10000	0/10000
2-1	103/10000	0/10000
2-2	211/10000	0/10000

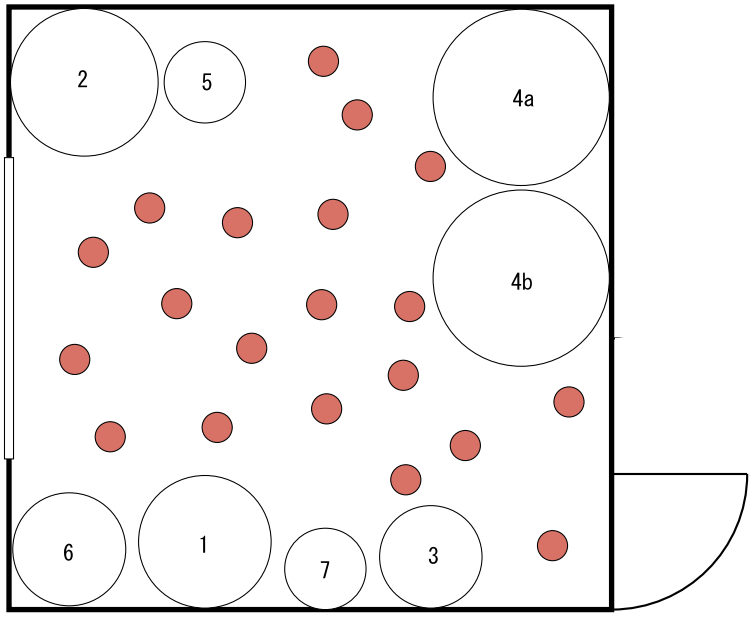


図 6.8: 小型可燃物の配置の例 (2-2)

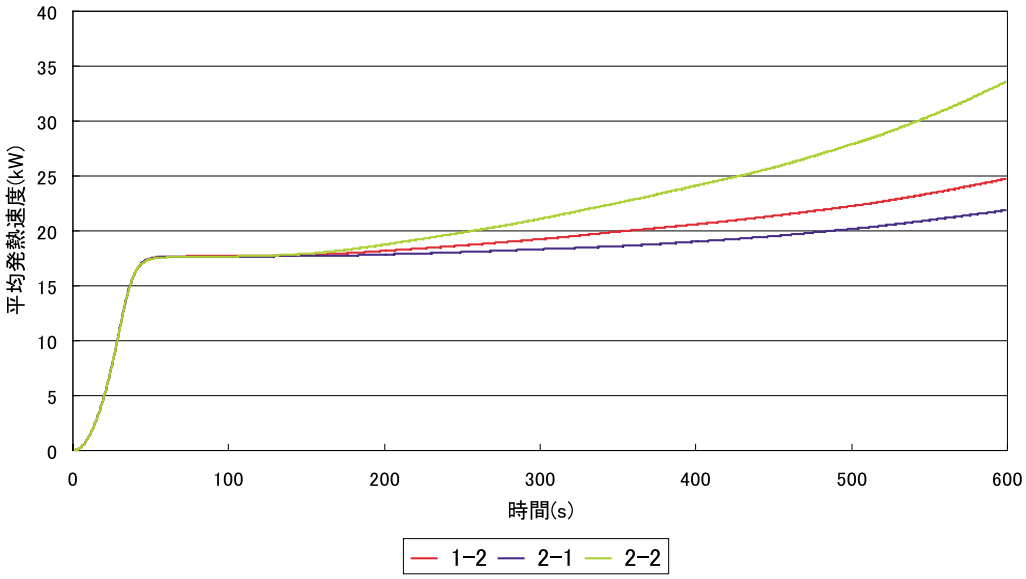


図 6.9: 平均発熱速度 (解析パターン 2)

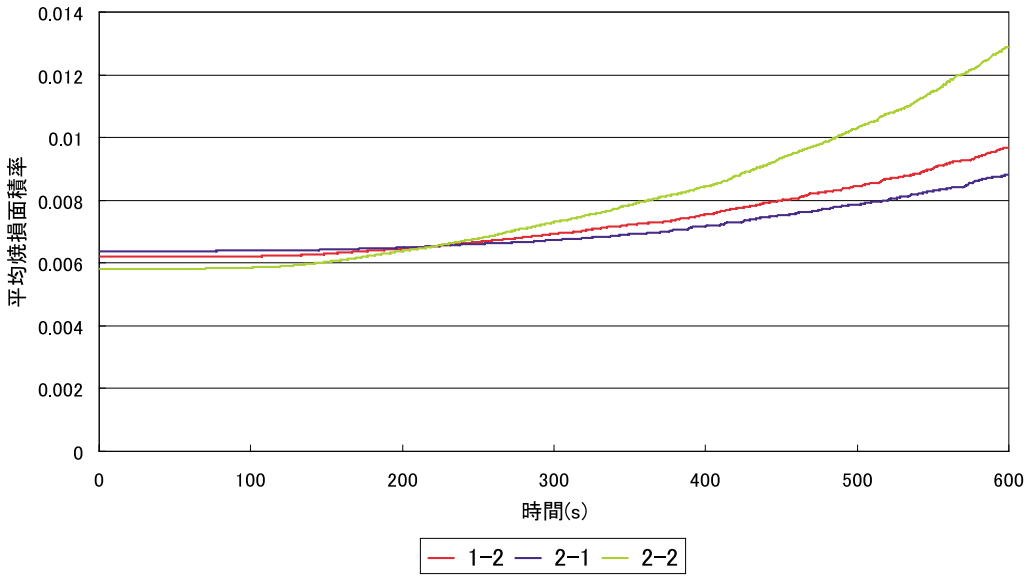


図 6.10: 平均焼損面積率 (解析パターン 2)

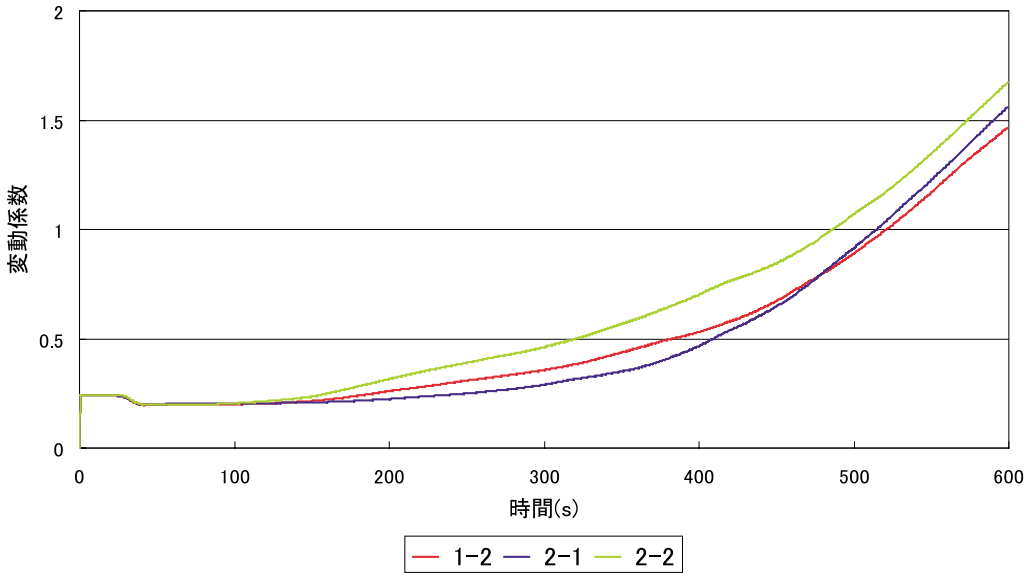


図 6.11: 変動係数 (解析パターン 2)

図 6.9 で，解析パターン 2 の 1-2，2-1，2-2 では，発火源となる小型可燃物の最大発熱量がほぼ同じであるため，発火源の発熱速度が定常状態に至るまでの発熱速度の勾配もほぼ同じである。しかし，t=150 sec. くらいから，2-1，1-2，2-2 と可燃物数の増加に応じて，発熱速度が異なった勾配を示していることがわかる。これは，可燃物数が増すことで，近傍に他の可燃物が存在する可能性が高くなり (平均最短距離が縮まる)，延焼までの時間が短くなったことが原因である (表 6.7)。図 6.10 からも同様に，可燃物数の増加に応じて，可燃物間の延焼に要する時間が短くなっていることがわかる。例えば，最も小型可燃物数の多い 2-2 では，t=550 sec. くらいで，t=0 時点の焼損面積率の値の倍程度の値になっていることから，平均的に他の小型可燃物へ延焼していると読み取れるが，1-2 や 2-1 では t=600 sec. においても延焼は進展していない。なお，図 6.10 の t=0 において，焼損面積率の値が 1-2，2-1，2-2 で異なるのは，小型可燃物の直径が正規確率変数により決定されていることによる誤差と考えられる。しかし，図 6.11 から，解析パターン 1 では，時間の経過と共に，小型可燃物の直径が大きくなるほど変動係数も大きくなっていたが，解析パターン 2 の変動係数は，ほとんど同じ傾向となっている。このことから，小型可燃物の個数の増減は，火災の進展のばらつきにはほとんど影響を及ぼしていないことがわかる。F.O. に関しては，解析パターン 2 においても発生していないが，小型可燃物数の増加に応じて，大型可燃物に着火した解析の割合は増加している。このことから，可燃物の個数が可燃物間の延焼に大きな役割を担っていることがわかった。

6.4 可燃物密度一定の条件での可燃物の分割数による発熱速度への影響

6.2 に示した解析パターン 1 では，小型可燃物の直径が大きくなれば，発火源となる小型可燃物の発熱量が大きくなるために，他の可燃物への延焼に要する時間が短くなり，室発熱速度の成長が早くなることを示した。また，6.3 に示した解析パターン 2 では，小型可燃物の個数が多くなれば平均最短距離が短くなるために，同じく延焼に要する時間が短くなり，室発熱速度の成長が早くなることを示した。しかし，小型可燃物の直径が大きくなったり，個数が増えると，燃え草となる可燃物量も増すため，室発熱速度の成長が早くなるのは自明であると考えることもできる。そこで，燃え草量，すなわち，可燃物密度を変化させずに，燃え草の分割数 (小型可燃物の個数) を変化させて解析を行なった。ここでは，室に存在する小型可燃物の総量を，標準的な住宅の可燃物密度である 30 kg/m^2 になるよう小型可燃物の総量を 100 kg とし，小型可燃物の個数を 10，20，30 個に分割した。表 6.9 に，分割数ごとに 3-1，3-2，3-3 としたときの小型可燃物のパラメタを示す。また，表 6.10 に平均最短距離を，表 6.11 に解析終了までに大型可燃物に着火した解析の割合および F.O. に至った解析の割合を，図 6.12 に時間 (横軸)—平均発熱速度 (縦軸) の関係を，図 6.13 に平均焼損面積率を，図 6.14 に発熱速度の変動係数をそれぞれ示す。

表 6.9: 可燃物密度一定での小型可燃物のパラメタ (解析パターン 3)

	小型可燃物の直径の平均 (m)	小型可燃物の個数	小型可燃物の総重量の平均 (kg)	可燃物密度 (kg/m^2)	1 個の可燃物の最大発熱量 (kW)
3-1	0.29	10	100	29.9	37.0
3-2	0.23	20	100	29.9	23.3
3-3	0.20	30	100	29.9	17.6

表 6.10: 平均最短距離 (解析パターン 3)

	平均最短距離 (m)
3-1	0.71
3-2	0.53
3-3	0.43

表 6.11: 大型可燃物に着火した解析の割合 (解析パターン 3)

	大型可燃物に着火した解析の割合	F.O. に至った解析の割合
3-1	1021/10000	27/10000
3-2	494/10000	3/10000
3-3	364/10000	1/10000

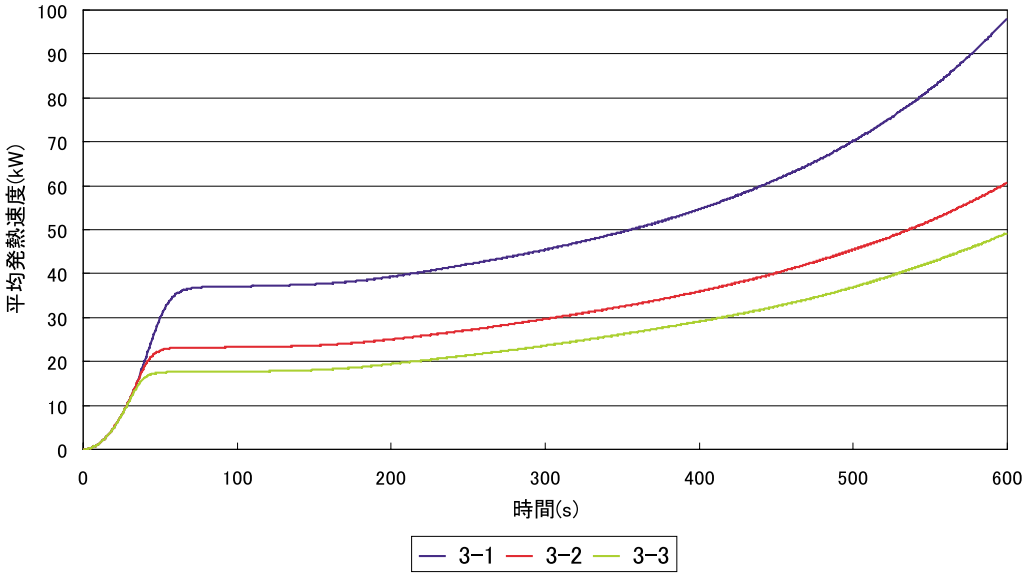


図 6.12: 平均発熱速度 (解析パターン 3)

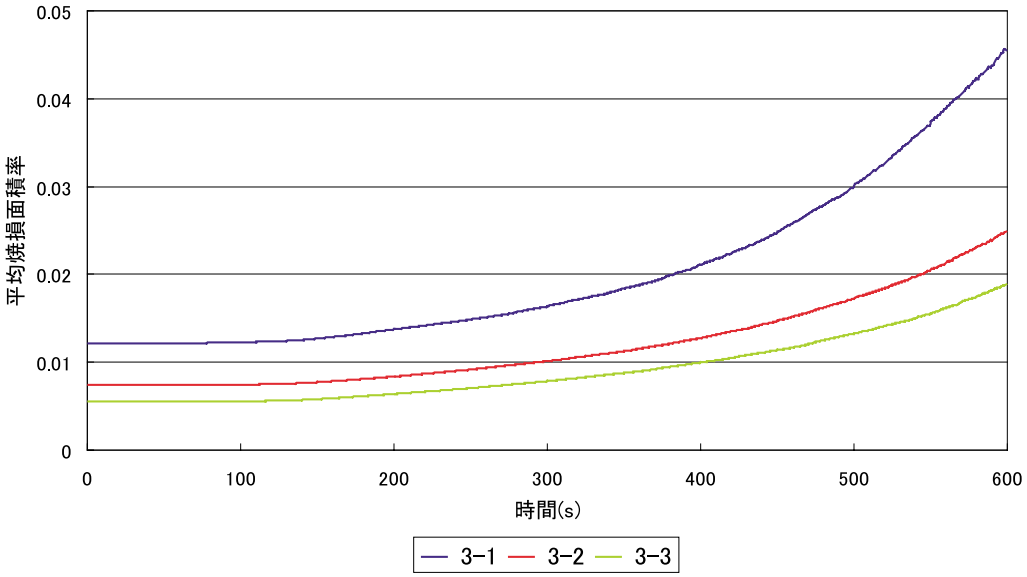


図 6.13: 平均焼損面積率 (解析パターン 3)

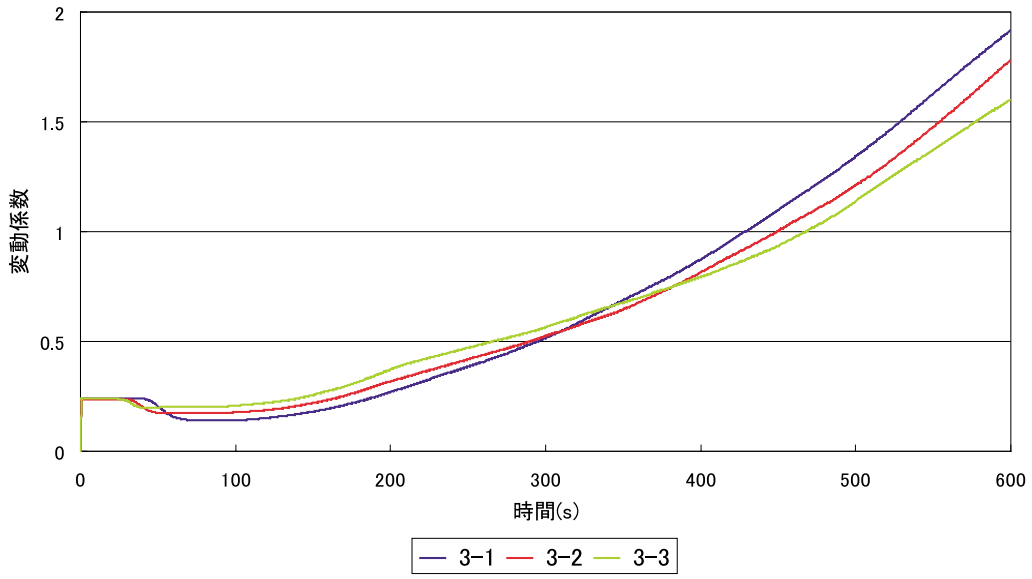


図 6.14: 変動係数 (解析パターン 3)

図 6.12 および図 6.13 から，3-1，3-2，3-3 のすべての場合において，t=0 からの発熱速度の勾配は，小型可燃物の直径を変化させた解析パターン 1 と同様に，発火源が表 6.9 に示す最大発熱量まで上昇し，定常状態に至っている。その後，発火源の大きな 3-1，3-2，3-3 の順に，他の可燃物への延焼が始まり，小型可燃物の個数を変化させた解析パターン 2 と同様に発熱速度が上昇している。図 6.14 に示す変動係数は，小型可燃物の個数を変化させた時と同様に，3-1，3-2，3-3 でほぼ同じ傾向を示している。このことから，変動係数は，発火源の最大発熱量に大きく依存し，解析パターン 1 の 1-1 のように，極端に小さな発火源の場合は，可燃物数が多くても他の可燃物に延焼する可能性が低いため変動係数も小さく, ある程度の最大発熱量を有する発火源であれば，他の可燃物への延焼が発生するため変動係数は同じような傾向を示すことがわかる。

次に，表 6.11 から，3-1 は，3-2，3-3 と比較すると，発熱速度の上昇が激しく，大型可燃物への延焼が 2 倍以上，F.O. に至った解析数も 3-2 の 9 倍も発生している。そこで，どのような状況が F.O. につながるのかを検証するために，図 6.15 に 3-1 で F.O. に至った 27 の解析の発火源の位置を示した。

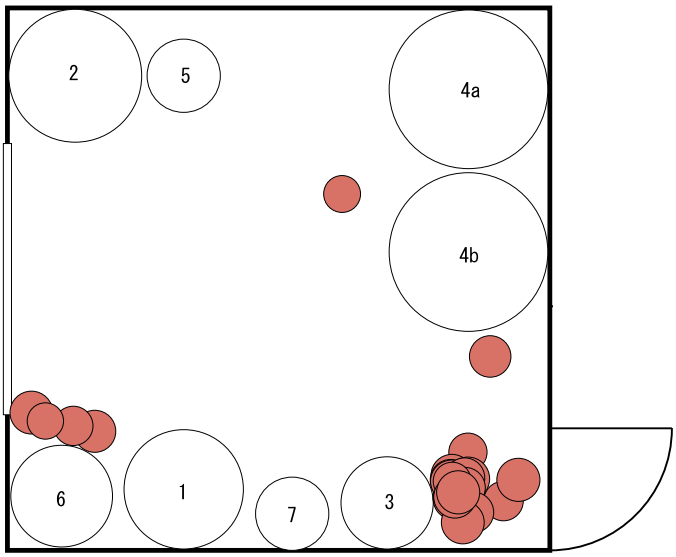


図 6.15: 3-1 で F.O. に至った解析の発火源の位置

図 6.15 から，F.O. に至った解析の大半は，発火源が室右隅および左下に配置された場合であることがわかる。この原因を特定するため，解析中に延焼がどの程度発生するのかを調べた。解析中に着火した可燃物数は，発火源自体も含めると，10,000 回の解析で，21,359 個であった。つまり，1 回の解析につき平均 2.1 個の可燃物が着火したことになり，平均 1.1 個の可燃物に延焼したことになる。一方，F.O. に至った解析で，F.O. までに着火した可燃物数の平均は，17.9 個であり，ここでは 1 回の解析で 18 個の可燃物 (ベッドを 2 つに分割するため，大型可燃物数は 8 個になる) が配置されていることから，F.O. までにほとんどの可燃物が燃焼していたことになる。逆にいえば，600 秒以内に F.O. に至るためには，短時間に全ての可燃物に延焼が拡大する必要がある。そのため，F.O. に至った解析の発火源は，最大発熱速度の大きな大型可燃物が集中している室下部に配置された場合が多い。実際に，F.O. に至った 27 解析の焼損面積率を求めると，図 6.16 の様になり，全解析の焼損面積率を示す図 6.13 と比較すると，150 sec. あたりから燃焼が拡大していき，短時間に延焼が進展していることがわかる。

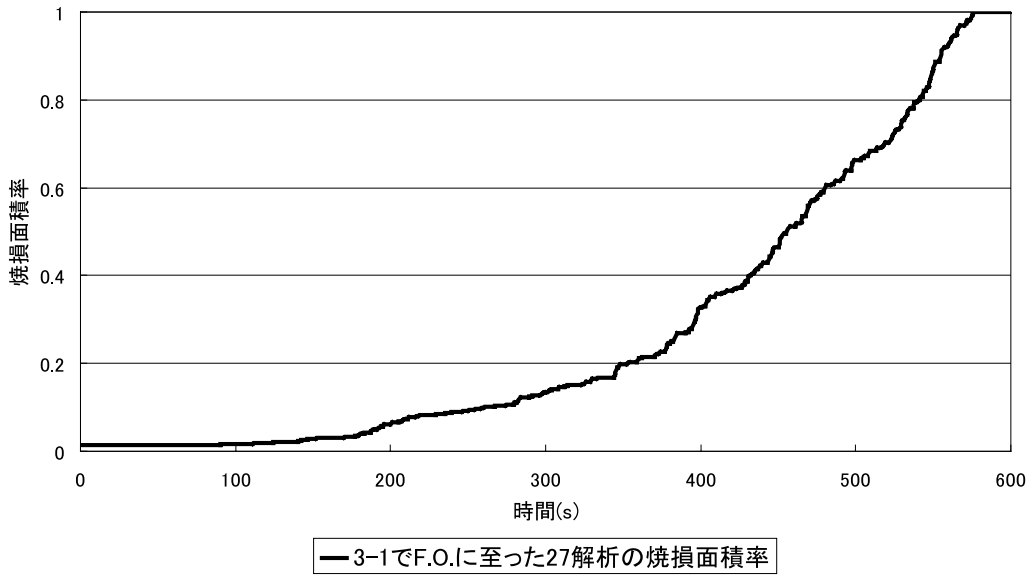


図 6.16: 3-1 で F.O. に至った解析の平均焼損面積率

ただし，ここでは小型可燃物の総量を 100 kg としたが，この値によっては結果が異なる可能性がある。そのため，標準的な住宅の可燃物密度よりもやや多い可燃物密度を想定して，小型可燃物の総量が 200 kg の場合 (解析パターン 4) で，同様の検証を行なった。小型可燃物の分割数を 10，20，30 としたときの解析のパラメタを表 6.12 に示す。また，図 6.17 に 4-1〜4-3 の平均発熱速度を示す。

表 6.12: 可燃物密度一定での小型可燃物のパラメタ (解析パターン 4)

	小型可燃物の直径の平均 (m)	小型可燃物の個数	小型可燃物の総重量の平均 (kg)	可燃物密度 (kg/m^2)	1 個の可燃物の最大発熱量 (kW)
4-1	0.37	10	200	36.2	60.2
4-2	0.29	20	200	36.2	37.0
4-3	0.26	30	200	36.2	29.7

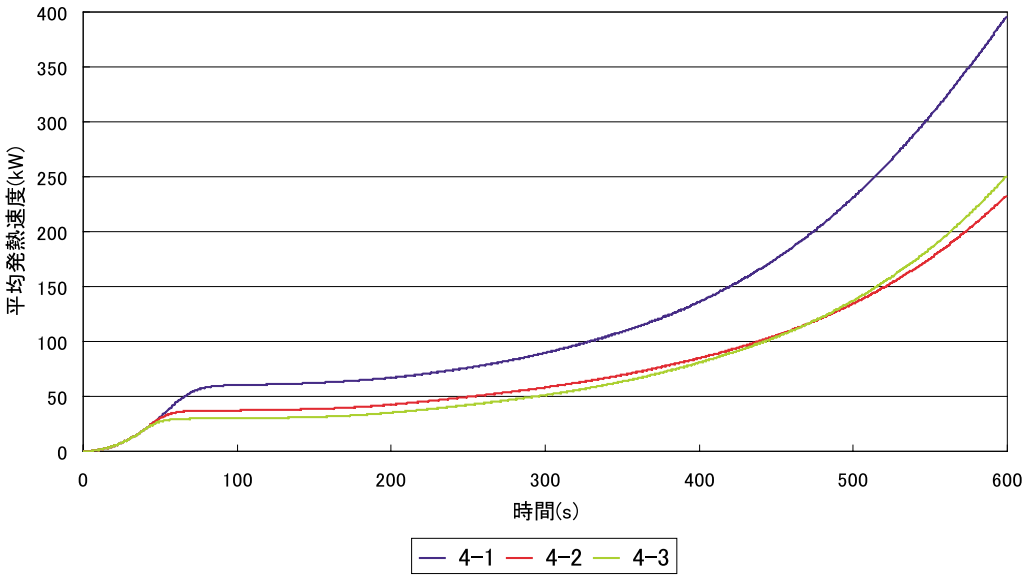


図 6.17: 平均発熱速度 (解析パターン 4)

図 6.17 からわかるように，t=460 sec. くらいで，分割数 n=20 の 4-2 と 30 の 4-3 の平均発熱速度が交差しており，室に持ち込まれる小型可燃物量によっては，分割数が小さく，発火源の最大発熱速度が大きいほど必ずしも危険になるとは限らない。このように，可燃物密度が同じであっても，小型可燃物の総量や分割数が異なれば，個々の可燃物の直径や平均最短距離が変化するため，平均発熱速度および平均焼損面積率が大きく異なり，火災危険度を可燃物密度だけで評価することができないことがわかる。次章では，このことについてさらに詳しく検証を行なう。

6.5　大型可燃物配置の違いによる発熱速度への影響

大型可燃物が燃焼すると，発熱量が大きく，床面積の小さい住宅などでは F.O. の発生につながり危険である。ここでは，大型可燃物の配置が発熱速度にどのような影響を及ぼすかについて検証する。ここでの大型可燃物の配置の違いは，ベッドの方向を長辺が南北方向に向かっていたものを東西方向に変更しただけである (図 6.18)。この大型可燃物の配置の変更以外の条件は，標準モデル (1-2) と同じ条件を用いて火災発熱解析を行なった。表 6.13 に解析に用いた小型可燃物のパラメタを示す。1-2*は今回対象とする図 6.18 の大型可燃物に配置を変更した時の解析である。図 6.20 に，時間 (横軸)―平均発熱速度 (縦軸) の関係を示す。また，表 6.14 には平均最短距離を，表 6.15 には解析終了までに大型可燃物に着火した解析の割合および F.O. に至った解析の割合を，図 6.21 には平均焼損面積率をそれぞれ示す。

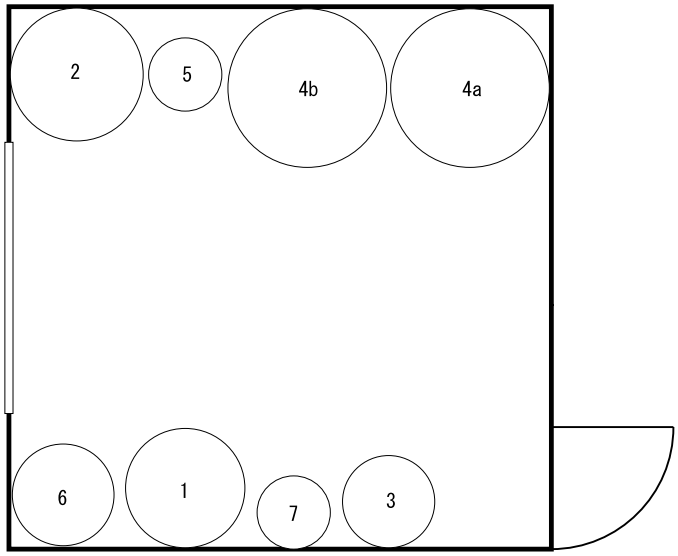


図 6.18: 大型可燃物の配置図*

表 6.13: 大型可燃物配置の比較解析パラメタ

	小型可燃物の直径の平均 (m)	小型可燃物の個数	小型可燃物の総重量の平均 (kg)	可燃物密度 (kg/m^2)	1 個の可燃物の最大発熱量 (kW)
1-2	0.2	10	31.4	25.7	17.6
1-2*	0.2	10	31.4	25.7	17.6

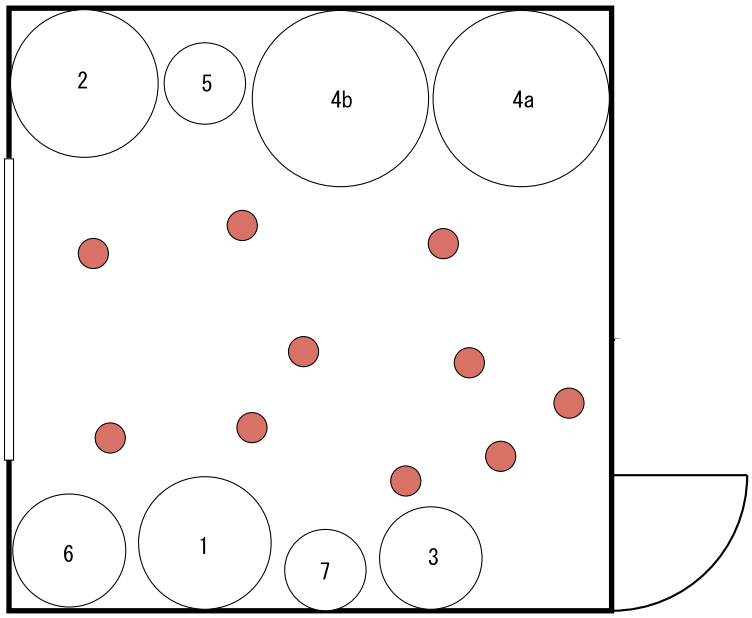


図 6.19: 小型可燃物の配置の例 (1-2*)

表 6.14: 平均最短距離 (大型可燃物配置の比較解析)

	平均最短距離 (m)
1-2(標準モデル)	0.68
1-2*	0.68

表 6.15: 大型可燃物に着火した解析の割合 (大型可燃物配置の比較解析)

	大型可燃物に着火した解析の割合	F.O. に至った解析の割合
1-2(標準モデル)	125/10000	0/10000
1-2*	100/10000	0/10000

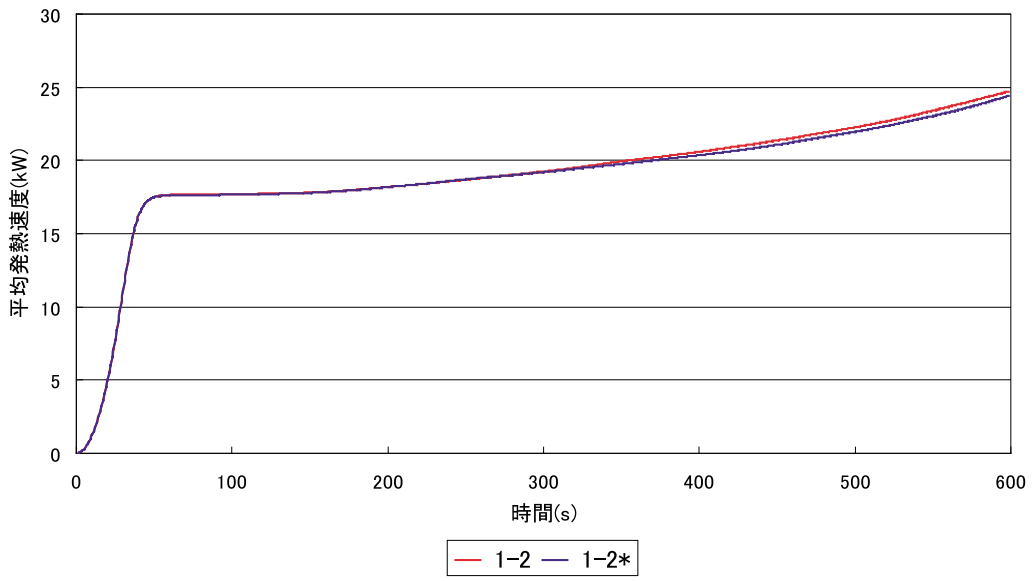


図 6.20: 平均発熱速度 (大型可燃物配置の比較解析)

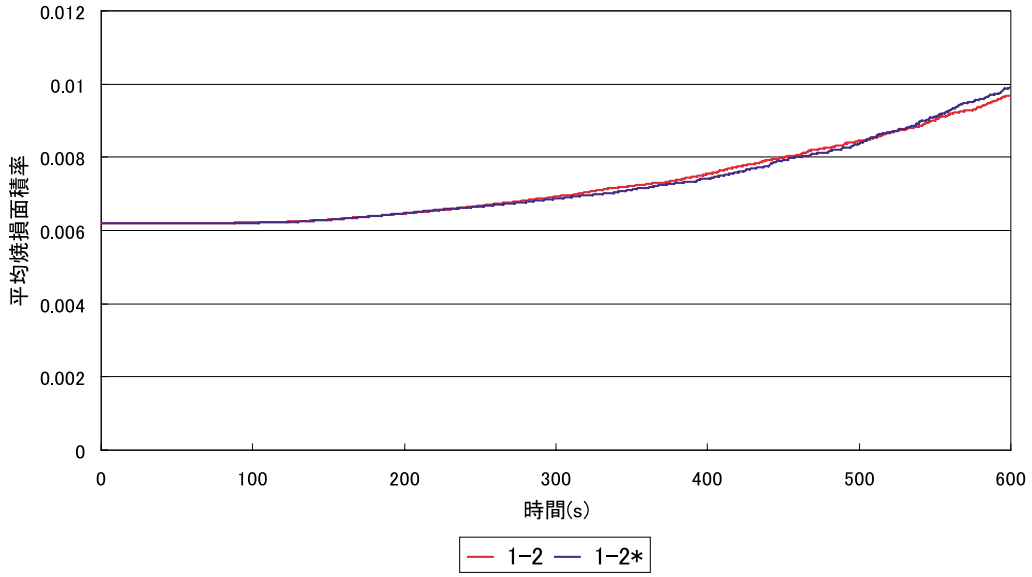
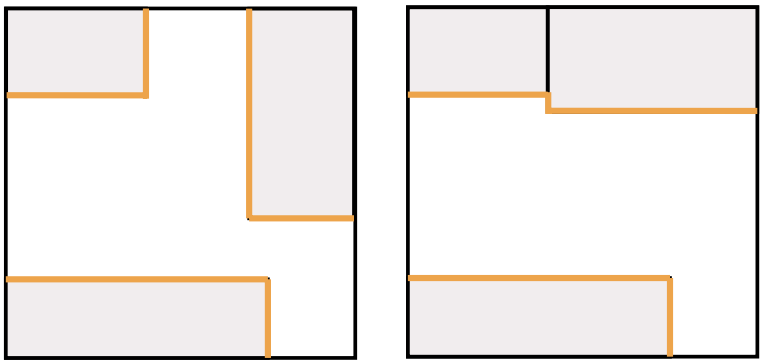


図 6.21: 平均焼損面積率 (大型可燃物配置の比較解析)

今回の解析では，大型可燃物の配置を変更したが，発熱速度 (図 6.20) および平均焼損面積率 (図 6.21) に大きな違いは見られなかった。表 6.14 に示す平均最短距離をみると小型可燃物も含めた可燃物配置を行うと同じ値となり，これが大型可燃物の配置の変更が発熱速度にほとんど影響を及ぼさなかった理由の 1 つであると考えられる。しかし，解析終了までに大型可燃物に着火した解析数は，1-2(標準モデル) が 125 回であるのに対し，1-2*では 100 回と 1-2 の方が多い。これは，大型可燃物の配置を変更することで，小型可燃物が大型可燃物に接することが可能な辺長が小さくなったためだと考えられる (図 6.22 参照)。また，今回の解析では，t=600 sec. までしか検証してないが，更に時間が経過すれば大型可燃物に着火した解析数が多い 1-2 の発熱速度が大きくなることが予想できる。



配置の変更により大型可燃物に
接することが可能な辺長が減少した

図 6.22: 小型可燃物が大型可燃物に接することが可能な辺長 (模式図)

6.6 解析に関わる条件の違いによる発熱速度への影響

ここでは，表 6.1 で定めた解析に関わる諸条件を変更した時に，発熱速度にどのような影響を及ぼすかについて検証する。変更する諸条件は，内装の燃焼性を可燃性材料にした場合である。解析にあたり，上記の条件の変更以外は，1-2(標準モデル) に従うものとする。

内装の燃焼性が可燃の条件

1-2(標準モデル) と同じ条件で，内装の燃焼性だけを可燃性材料 (グレード 3) に変更して，火災発熱解析を行った (表 6.16)。ここで，5.1.4 で説明した燃焼性の異なる内装材のうち，グレード 3 は小規模の火災に対して内装の燃焼が拡大するものである。表 6.17 に，標準モデル及び内装を可燃性に変更した時 (1-2(G3)) の小型可燃物のパラメタを示す。図 6.23 に 1-2 および 1-2(G3) の時間 (横軸) ー平均発熱速度 (縦軸) の関係を示す。また，表 6.18 には解析終了までに大型可燃物に着火した解析の割合および F.O. に至った解析の割合を，図 6.24 には平均焼損面積率をそれぞれ示す。

ここで，内装の着火条件は，図 6.25 に示す可燃物の表面から壁までの最短距離が可燃物の半径よりも近い場所に配置された可燃物が着火した時点で，可燃物上に形成された火炎が内装に接炎すると考え，内装も着火するものとする。

表 6.16: 解析に使用したその他の条件

内装の燃焼性	可燃 (グレード 3)
室床面積	4.00 m × 4.00 m
天井高さ	2.50 m
開口部面積	幅 1.0 m，開口部上端高さ 2.0 m

表 6.17: 内装の燃焼性の比較解析

	小型可燃物の直径の平均 (m)	小型可燃物の個数	小型可燃物の総重量の平均 (kg)
1-2(標準モデル)	0.2	10	31.4
1-2(G3)	0.2	10	31.4

表 6.18: 大型可燃物に着火した解析数 (内装の燃焼性の比較解析)

	大型可燃物に着火した解析の割合	F.O. に至った解析の割合
1-2(標準モデル)	125/10000	0/10000
1-2(G3)	38/10000	1502/10000

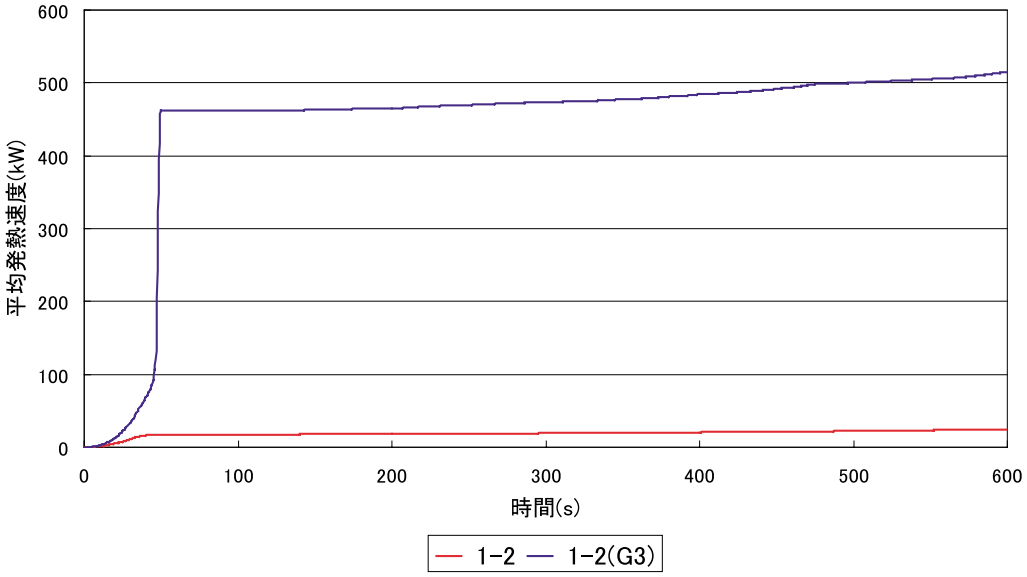


図 6.23: 平均発熱速度 (内装の燃焼性の比較解析)

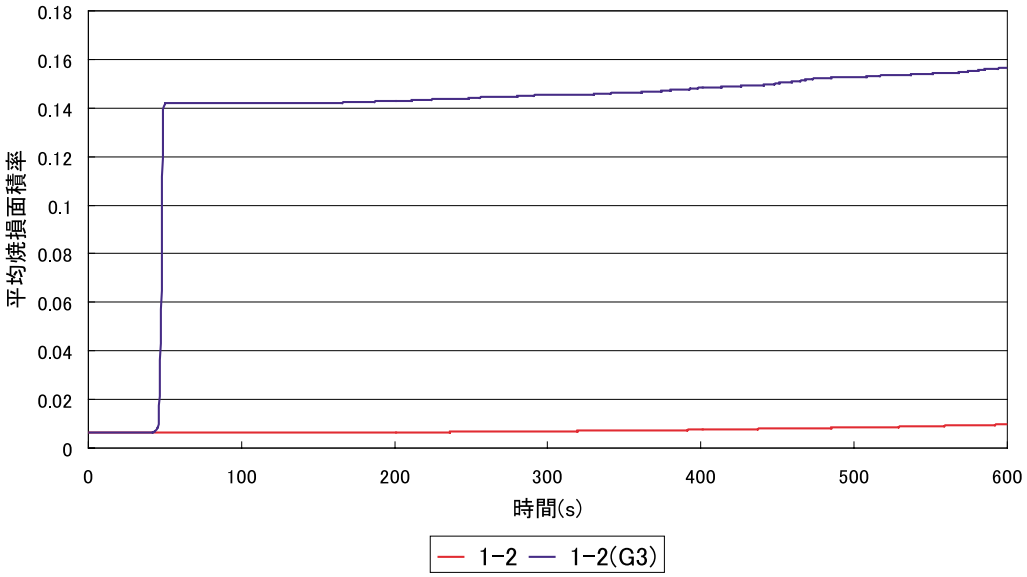


図 6.24: 平均焼損面積率 (内装の燃焼性の比較解析)

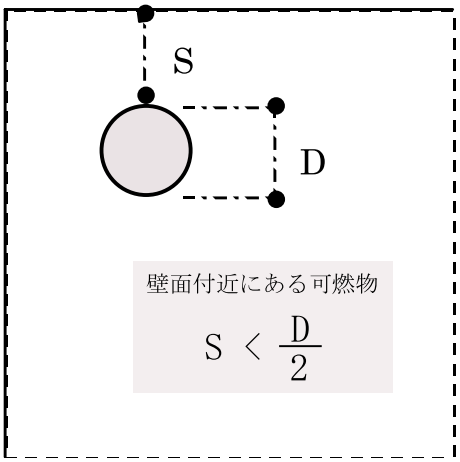


図 6.25: 内装の着火条件

図 6.23 から，内装の燃焼性が可燃 (グレード 3) の場合，不燃 (グレード 0) の場合と比較すると，解析開始時から急激に発熱速度が増大している。これは，出火源となる可燃物が，内装の着火条件を満たす壁面付近の可燃物である場合に，t=0 から内装の燃焼が始まるためである。また，t=45 sec. くらいで発熱速度が急上昇しており，これは，F.O. に至る解析が多いことを示している。表 6.18 をみても，600 sec. 以内に F.O. に至るものの解析数が，グレード 0 の場合は 0 回であるのに対して，グレード 3 の場合では 1,502 回と約 15 %の解析で F.O. に至っている。実際に，住宅火災では，壁面付近の発火源からカーテンや内装に着火することで，短時間に延焼が拡大し，大規模な火災につながった例も少なくない。住宅のように床面積が狭く，内装材が可燃性の場合は，内装着火による危険性を十分に考慮する必要がある。

なお，ここでの解析結果は，発火源の位置に依存しており，内装の着火判定のモデルなどに再考の余地が残っている。

6.7　考察

作家の猪瀬直樹氏と渡辺政彦氏 (当時　東京消防庁予防部調査課原因調査係主任) とのインタビューを収めた文献[52] で，猪瀬氏の「どういう家での火事が多いですか。」の問いに対して，渡辺氏は「家が散かっているのはマズイです。…中略…。これなら火災になっても仕方ないな，というような。テーブルの上に物置くのでも，キチンと置くか，バーッと置くか，ってことですね。」という発言がある。実際に，消防活動をしている隊員にも同じような話を聞いたことがある。これは，部屋を散らかしている人は，ずぼらな性格であろうから，ついうっかりと火災の原因をつくってしまう (出火率が高い) ことと，散かった部屋では，出火源から第一着火物への延焼の確率が高くなるためだと考えられる。ただし，本研究で使用した火災発熱解析プログラムは，小型可燃物に着火した (出火率=1) として解析を行なっていることや身の回りのものである小型可燃物を整理すると，個々の可燃物が大きくなるため，発火源の最大発熱量が大きくなり危険な配置となる。そのため，これら記述とは一致しない点もあるが，整理した小型可燃物を大型可燃物に収納することで，室に散乱する小型可燃物量が減少すると考えると，下記に示す解析結果と一致する。

本章の解析結果より，小型可燃物の直径が大きくなるほど，発火源である小型可燃物の発熱量が大きくなることから延焼までの時間が短くなり，発熱速度の成長が早くなることを示した。また，可燃物の個数が多くなるほど，平均最短距離が短くなることから，同様に発熱速度の成長が早くなることがわかった。そこで，可燃物密度を一定の条件で解析したところ，燃え草となる可燃物量が同じであっても，可燃物の分割数により発熱速度に差異が見られた。つまり，可燃物密度だけを頼りにして，可燃物の大きさや個数を考えずに避難安全設計を行なうことは非常に危険であるといえる。また，大型可燃物の配置の変更が発熱速度および平均焼損面積率に及ぼす影響を検証したが，今回の解析では，両者にほとんど差が見られなかった。しかし，解析時間中に大型可燃物に着火した解析数は配置変更前の標準モデルのほうが多く，解析終了時間とした t=600 sec. 以降の発熱速度に差が見られる可能性を示した。また，内装の燃焼性が可燃であると，内装が燃焼することにより発熱量が増し，内装が不燃であるよりも圧倒的に早い時間で F.O. になる可能性が高い。特に住宅の居室は，床面積が小さく，内装に着火する可能性が高いため，不燃材を用いるなどの対策が有効である。

6.8 まとめ

本章では，6.1 で，解析のケーススタディについて説明した。ケーススタディは，標準的な大学生の自室を想定した。6.2 では，火災の進展に影響を及ぼすと考えられる小型可燃物の直径を変化させた時の発熱速度への影響を検証した。その際に，室発熱速度，平均最短距離，大型可燃物へ延焼した解析の割合，F.O. に至った解析の割合，焼損面積率について検証した。解析の結果，可燃物の直径が大きくなるほど，発火源となる小型可燃物の最大発熱量が増すため，他の可燃物への延焼に要する時間が短くなり，発熱速度の成長が早くなることがわかった。6.3 では，同様に小型可燃物の個数を変化させて発熱速度への影響を検証した。直径のときと同じく，小型可燃物の個数が多くなるほど，可燃物間の距離が小さくなり，延焼に要する時間が短くなるため，室発熱速度の成長が早くなることがわかった。6.4 では，小型可燃物の総量を同じに，すなわち，可燃物密度一定の条件で，小型可燃物の分割数を変化させて解析を行なった。ここでは，分割数が少ない (可燃物の直径が大きい) ほど，他の可燃物への延焼が多く見られ，発熱速度の成長が早いことがわかった。つまり，個々の可燃物特性により発熱速度に大きな変化が見られるため，可燃物密度だけで火災安全設計を行なうことは困難であるといえる。6.5 では，大型可燃物の配置を変更して発熱速度への影響を調べた。しかし，小型可燃物も含めた平均最短距離がほとんど変化しなかったため，発熱速度に大きな変化は見られなかった。ただし，大型可燃物の配置の変更により，大型可燃物に接することができる辺長が減少したため，解析終了までに大型可燃物への延焼があった解析数は減少した。今後は，室形状や床面積などを変更して解析を行なう必要があると思われる。6.6 では，可燃物特性以外の解析に関わる条件として，内装の燃焼性を可燃性内装に変更して火災発熱解析を行なった。可燃性内装が着火すると，出火後わずかな時間で，発熱速度が非常に大きくなり危険である。6.7 では，6.1〜6.6 までの解析の考察を行なった。

第7章　火災危険度評価

第6章で，住宅の標準的な可燃物密度である 30.0 kg/m^2 で，分割数 (可燃物数) を変更して解析を行なったところ，可燃物密度が一定であっても，小型可燃物の分割数が異なれば，初期火災時の発熱速度が異なることを示した。また，可燃物量を変化させて同様の解析を行なったところ，経過時間によっては，分割数の大小だけで発熱速度の変化を説明できないことを示した。このように，可燃物特性と発熱速度は複雑な関係があり，単純に可燃物密度だけで初期火災時の火災危険度を評価することは難しい。

本章では，本研究の目的である可燃物特性を考慮した火災危険度評価を行なう。そのために，7.1 で，本研究で対象とする危険の定義について説明する。また，7.2 で，可燃物特性と火災危険度の関係を検証する。7.3 では，可燃物密度による火災危険度評価が可能であるかを検証する。

図 7.1 に，本研究の流れと本研究中での本章の位置付けを示す。

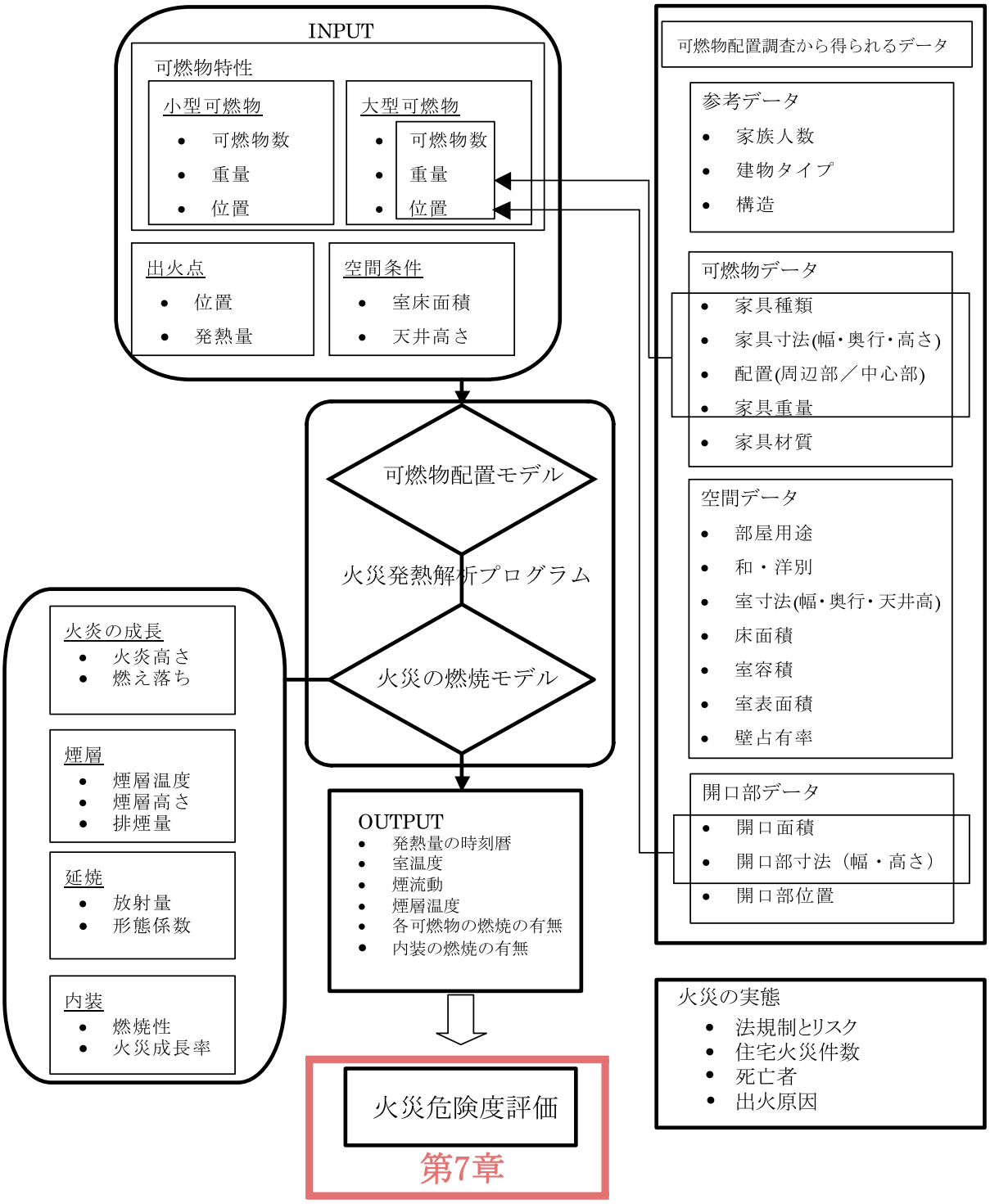


図 7.1: 本研究中の本章の位置付け

7.1　火災危険度の定義

放火自殺者を除いた火災による死因は，火傷と一酸化炭素中毒・窒息の 2 種類でおおよそ 90 %を占める [28]。つまり，初期火災時の火災危険度を評価するには，発熱速度と煙流動が最も重要であるといえる。避難安全検証法 [3] では，初期火災時の火災危険度の評価指標として，煙層の下端高さが 1.8 m に降下するまでの時間を用いている (1.3.5 参照)。しかし，ここでは住宅の居室という極めて規模の小さい空間を対象としているため，煙層の降下時間が比較的早いものの，①降下した煙層の温度が比較的低いこと，②一酸化炭素の発生は通常，酸素が不足し始める F.O. の前後で問題になること，③煙層が降下することで，見通しが阻害され避難に支障をきたす恐れがあるが，ここでは住み慣れた住宅を対象としているため，使用者が避難経路を熟知していると考えられることなどを理由に，必ずしも煙流動で火災危険度を評価することは適切とはいえない。そのため，本研究では，火災危険度を以下の条件を満たす発熱速度で評価する。

第 6 章で解析した標準モデルでは，小型可燃物の直径として 0.2 m を採用した。直径が 0.2 m の小型可燃物の定常状態での最大発熱量は，17.6 kW である。この小型可燃物が 3 個延焼すれば，それ以降の火災の進展に弾みがつくと考え，ここでは，発熱速度が 50.0 kW に至ることを火災拡大の限界状態 (以下，限界状態) と定義する。また，住宅の居室のように床面積の小さい空間では，居室からの避難に要する時間は，健常者の場合で数秒〜数十秒程度であるが，火災時に死亡する人の大半は高齢者や身障者であり，単独では避難できない場合も考えられる。そこで，救助の時間を考慮して，火災発生から 300 秒後と 600 秒後に，総解析数のうち何%の解析で限界状態である発熱速度 50.0 kW を超過しているか (限界状態超過確率) をもって火災危険度を評価する。

例として，第 6 章で行なった表 6.9 に示される，可燃物密度の等しい 3-1，3-2，3-3 の 3 つの解析で，300，600 sec. での火災危険度を評価する。図 7.2 に 3-1，3-2，3-3 の時間 t における限界状態超過確率を示す。

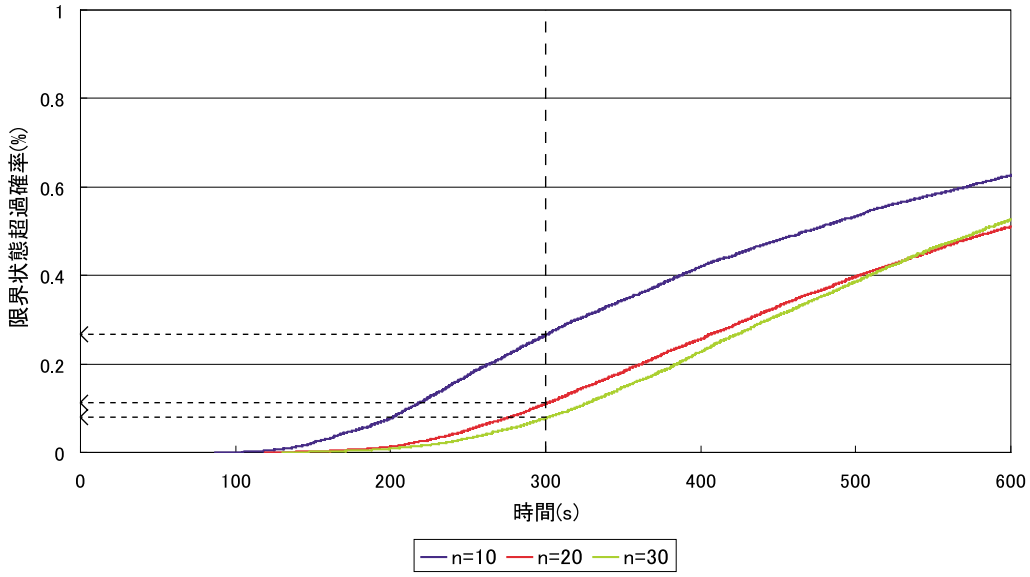


図 7.2: 時間 t における限界状態超過確率

図 7.2 から 300，600 sec. での 3-1，3-2，3-3 の火災危険度である限界状態超過確率は，表 7.1 に示す値となり，ここでの条件では，火災危険度は 300，600 sec. 共に 3-1，3-2，3-3 の順に高く，同じ可燃物密度の火災発熱解析を行なっても，分割数が小さい，つまり可燃物の直径が大きいほど危険であることがわかる。

表 7.1: 限界状態超過確率 (%)

	3-1	3-2	3-3
300 sec.	18.5	9.1	4.9
600 sec.	41.6	31.9	27.6

7.2 火災危険度評価

これまでの解析結果から，発熱速度の成長の早さは，可燃物の直径と平均最短距離に依存していることがわかった。両者は，室に持ち込まれる可燃物の総量とその分割数 n で決定される。これまで，可燃物密度をもとに可燃物配置モデルを構築した例として，4.1.1 で正方格子モデルを 4.1.2 でランダム配置モデルを紹介したが，これらは，1 m^2 あたり 1 個の可燃物が存在する，つまり床面積に応じて分割数を固定したモデルであった。そこで，可燃物の分割数を床面積で固定することなく，室に持ち込まれる小型可燃物量が 50 kg(可燃物密度=26.8 kg/m^2)，100 kg(可燃物密度=29.9 kg/m^2)，200 kg(可燃物密度=36.2 kg/m^3) の場合において，小型可燃物の分割数 n を 10，15，20，25，30 に設定し，火災発熱解析を行なうことで，7.1 で定めた火災危険度 (限界状態超過確率) を評価する。なお，ここでの大型可燃物の配置および他の解析に関わる条件は，第 6 章のケーススタディと同じとする。また，設定した室に持ち込まれる小型可燃物量 100 kg とは，一般にいわれている住宅での可燃物密度 [33] 30 kg/m^2 を想定しており，50 kg の場合は，標準よりもやや少ない可燃物密度，200 kg の場合は，標準よりもやや多い可燃物密度をそれぞれ想定している。

解析に用いた小型可燃物のパラメタを表 7.2 に示す。ここで，表中 n は分割数を，w は可燃物 1 個あたりの重量 (kg) を，D は小型可燃物の直径の平均 (m) を，d_{ave} は平均最短距離 (m) を示す。

表 7.2: 解析のパラメタ

分割数 n	10	15	20	25	30
50 kg					
w	5.0	3.3	2.5	2.0	1.7
D	0.23	0.20	0.18	0.17	0.16
d_{ave}	0.69	0.58	0.51	0.46	0.42
100 kg					
w	10.0	6.7	5.0	4.0	3.3
D	0.29	0.26	0.23	0.22	0.20
d_{ave}	0.71	0.60	0.53	0.45	0.43
200 kg					
w	20.0	13.3	10.0	8.0	6.7
D	0.37	0.32	0.29	0.27	0.26
d_{ave}	0.73	0.62	0.55	0.49	0.45

可燃物密度一定の条件では，小型可燃物の直径の平均と平均最短距離がどのような関係になるのかを調べるため，図 7.3 に，横軸に小型可燃物の直径の平均，縦軸に平均最短距離をとった。小型可燃物の直径の平均は，室に持ち込まれる可燃物の総量とその分割数 n により決まり，可燃物の直径が大きくなれば，平均最短距離はそれに応じて小さくなる。図 7.3 から，同じ可燃物密度であれば，分割数に関係なく，小型可燃物の直径と平均最短距離には，比例関係があることがわかる。

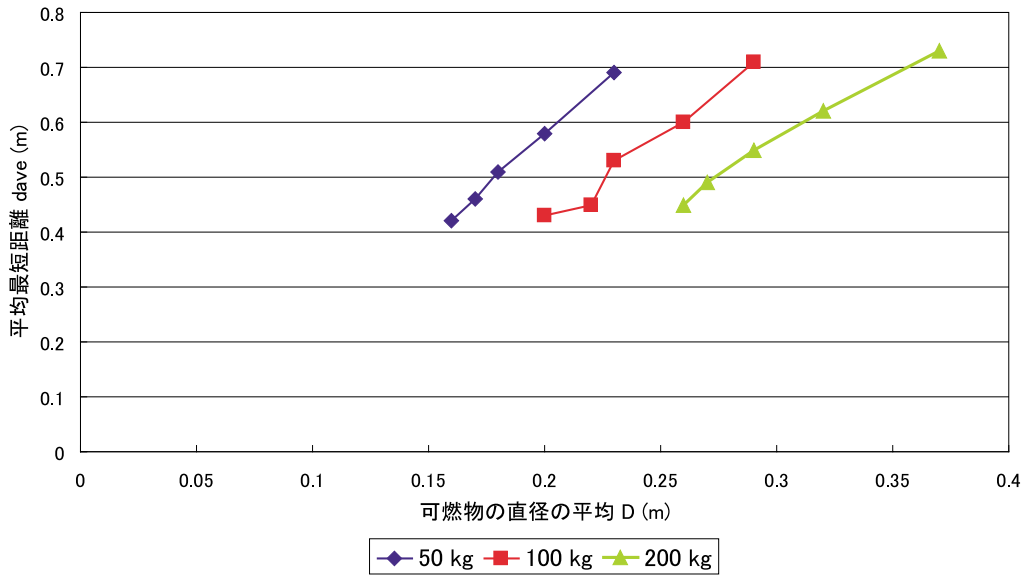


図 7.3: 小型可燃物の直径の平均と平均最短距離の関係

次に，小型可燃物量が 50，100，200 kg のそれぞれの場合での，時間 t における限界状態超過確率を図 7.4，7.5，7.6 にそれぞれ示す。室に持ち込まれる可燃物量が多くなるほど火災危険度が上がることがわかる。また，例えば，可燃物量が 100 kg の時，分割数 n が 10 と 20 の解析では，t=0〜260 sec. 付近までは，n=10 の解析の限界状態超過確率の方が高かったが，その後は逆転している。このように，同じ可燃物量 (可燃物密度) であっても経過時間によっては，分割数が小さいほど危険とは言えないことがわかる

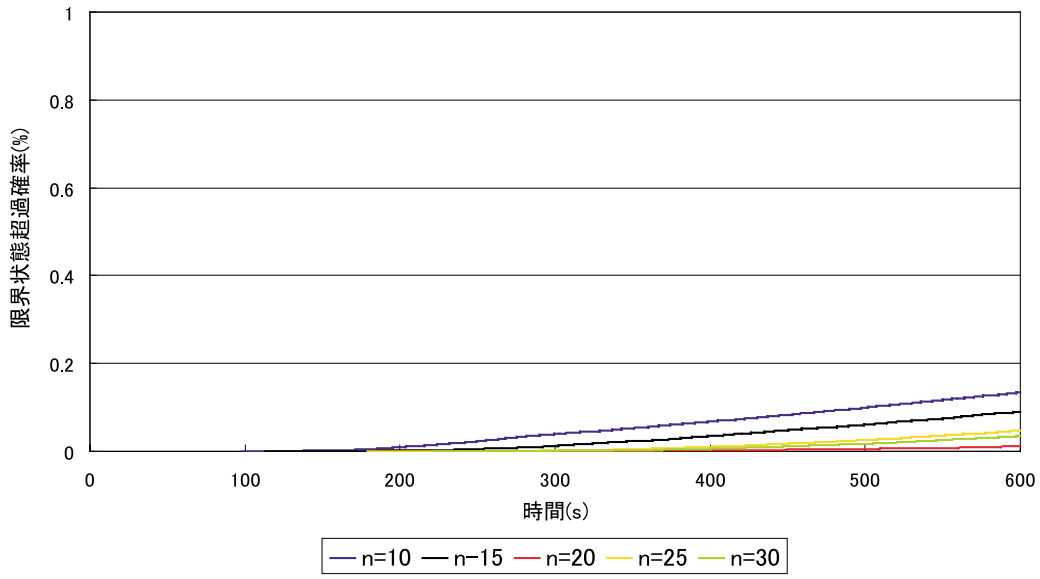


図 7.4: 限界状態超過確率 (50 kg)

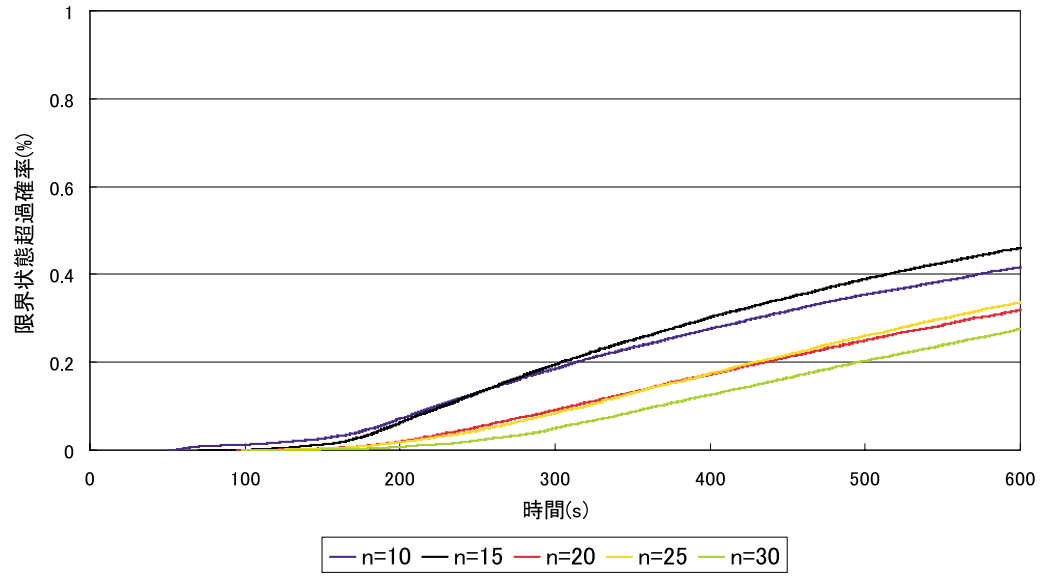


図 7.5: 限界状態超過確率 (100 kg)

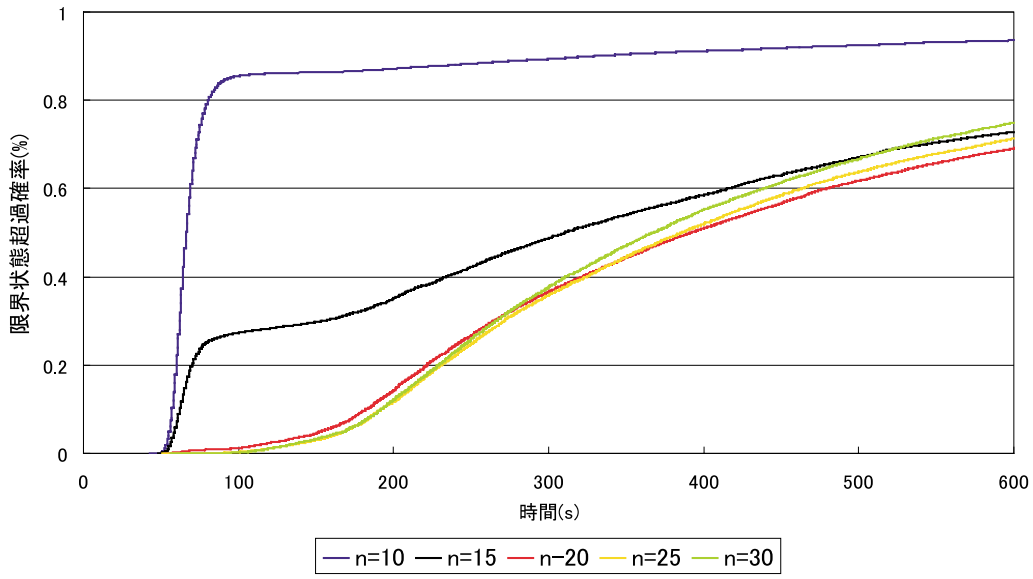


図 7.6: 限界状態超過確率 (200 kg)

図 7.4，7.5，7.6 をもとに，300，600 sec. での限界状態超過確率 (火災危険度) を表 7.3，7.4 に整理した。また，これまでの可燃物密度を利用した火災発熱解析では，例えば単位床面積あたり 1 個の可燃物が存在するなど，可燃物密度に関わらず床面積に応じた分割数を用いていたため，横軸に分割数 n，縦軸に限界状態超過確率をとった火災危険度分布図を図 7.7，7.8 にそれぞれ示す。

ここで，可燃物量が 200 kg の場合で，可燃物の分割数 n を 10，15 を採用した時，可燃物の直径が 0.3 m を超え，発火源が単独で燃焼した場合でもクライテリアを超過する可能性がある。そのため，他の解析と比較すると非常に高い火災危険度を示している。このような分割数を採用することは，現実的ではないため，以降の考察の対象から除外する。

着火から 300 秒後の限界状態超過確率

表 7.3: 300 sec. での限界状態超過確率 (%)

分割数 n	10	15	20	25	30
50 kg	3.9	1.2	0.0	0.2	0.1
100 kg	18.5	19.4	9.1	8.3	4.9
200 kg	89.3	48.7	36.5	35.8	37.5

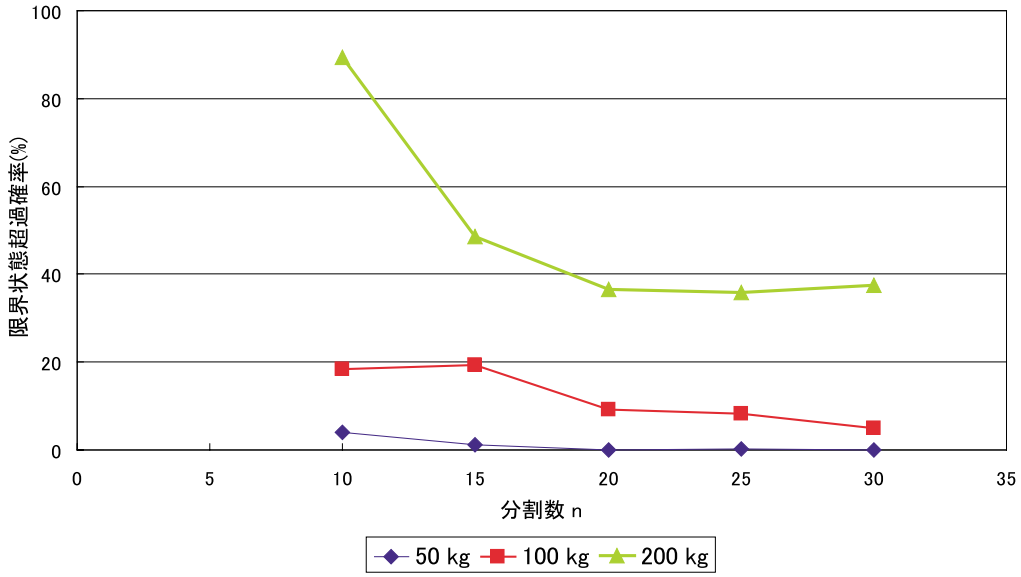


図 7.7: 300 sec. での火災危険度分布図

図 7.7 は，横軸に小型可燃物の分割数 n および持ち込み可燃物量ごとの各分割数での直径 (D50 は，持ち込み可燃物量 50 kg を示す)，縦軸に限界状態超過確率をとり，分割数と限界状態超過確率の関係を示したものである。図 7.7 から，小型可燃物の総量に関係なく，小型可燃物の分割数が 20 以上での火災危険度はほとんど変らず一定値となる。しかし，分割数が 15 と 20 とでは，火災危険度の変化が激しく，特に小型可燃物の総量が 100 kg の場合で火災危険度に 2 倍以上の差が見られる。このことから，分割数が 15 程度までは，発火源となる小型可燃物の発熱量が大きいため，着火から 300 秒での火災危険度は高くなるが，分割数が 20 を超えると，小型可燃物の個数が多くなるが，発火源の発熱速度が小さくなるため，結果として火災危険度はほぼ一定値となる。このように，可燃物密度が同じであっても，可燃物の分割数により火災危険度が変化するため，4.1.1 で紹介した正方格子モデルおよび 4.1.2 で紹介したランダム配置モデルのように，単位床面積あたりに 1 個の可燃物が存在するというモデルでは，火災危険度を正確に評価できないことがわかる。

また，標準的な可燃物量である小型可燃物の総量が 100 kg の場合と，やや可燃物が多い状態を

想定した 200 kg，やや少ない状態を想定した 50 kg を比較すると，分割数に関係なく，可燃物量が少なくなれば火災危険度の低減に非常に効果があると考えられる。大型可燃物の可燃物量を低減するには，例えば木製ベッドをスチールベッドなどの不燃材料のものに変更するなどの対策が考えられるが，あまり現実的ではない。しかし，ある程度の小型可燃物の総量を低減することは可能であり，整理整頓 (例えば本を本棚に収納) することで，小型可燃物量を低減したと考えることもできる。

着火から 600 秒後の限界状態超過確率

表 7.4: 600 sec. での限界状態超過確率 (%)

分割数 n	10	15	20	25	30
50 kg	13.4	8.9	1.1	4.7	3.5
100 kg	41.6	46.0	31.9	33.6	27.6
200 kg	93.6	72.9	69.1	71.3	75.0

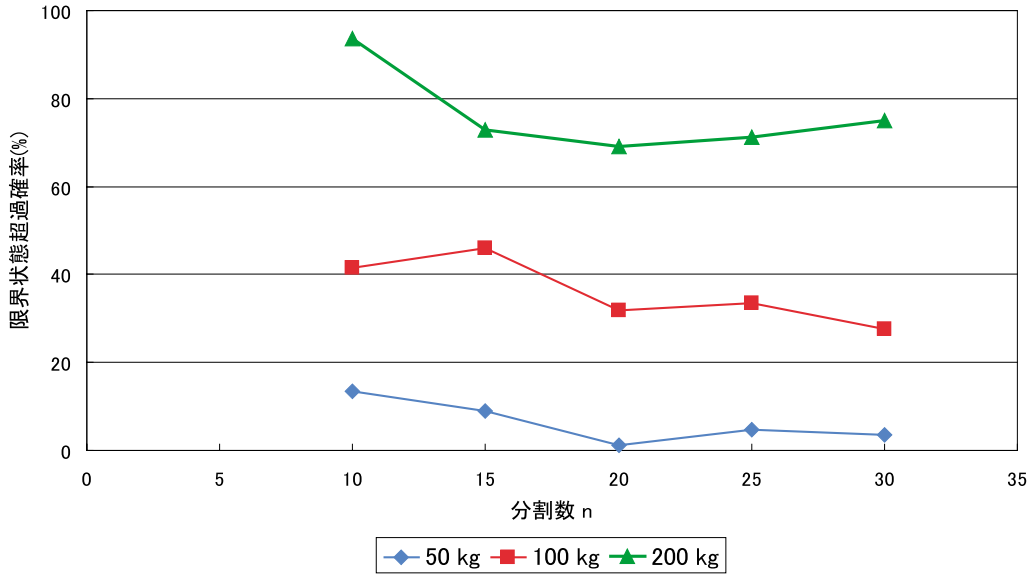


図 7.8: 600 sec. での火災危険度分布図

着火から 600 秒後の火災危険度については，300 秒後の火災危険度とほぼ同じ傾向を示しているが，全体的に火災危険度が上昇している。上昇率は，可燃物量や分割数によって異なるが，可燃物量が小さいほど上昇率が高いことがわかる。また，小型可燃物の総量が減少するほど，分割数 n=20 での火災危険度が，他の分割数の火災危険度と比較して，低下する傾向がある。これは，分割数 n=20 までは，分割数が小さいほど発火源の発熱量が大きいことで火災危険度が高くなる

が，分割数 n=20 を超えると，発火源の発熱量が小さくなる以上に，可燃物数の増加による延焼拡大により，火災危険度が高くなるためだと考えられる。そのため，可燃物総量が多くなるほど，分割数が多くても発火源の発熱量が大きいため，この傾向は薄れていく。つまり，評価対象時間が長く，可燃物総量が少なくなるほど，分割数による火災危険度への影響が大きくなる。

このように，分割数や評価する時間によって，火災危険度は変動し，従来の可燃物密度だけで火災危険度を評価する手法は，十分でないことがわかる。今後，個々の可燃物の大きさの統計量をとるなどの可燃物調査が整えば，同様の手法により他の用途の建築物についても火災危険度の評価が可能である。

7.3 まとめ

本章では，7.1 で，発熱速度 50 kW を限界状態とし，発火源に着火 (t=0) してから 300 秒後と 600 秒後の限界状態超過確率をもって火災危険度を定義した。

また，7.2 では，小型可燃物の直径と個数が火災危険度に大きな影響を及ぼすと考え，小型可燃物の総量を，標準的な住宅の可燃物密度である 30 kg/m^2 に想定し，標準よりもやや少ない可燃物量とやや多い可燃物量の可燃物密度で，それぞれ小型可燃物の分割数を 10〜30 の 5 刻みで変更し，火災危険度評価を行なった。その結果，以下のことを明らかにした。

着火から 300 秒後の火災危険度

- 分割数が 20 以上での火災危険度はほぼ一定となる
- 分割数が 15 と 20 とでは，火災危険度に大きな差があり，分割数が 15 程度までは発火源の発熱量による影響が大きい

着火から 600 秒後の火災危険度

- 分割数が 20 までは，発火源の発熱量が小さくなることで火災危険度が低下するが，分割数が 20 を超えると可燃物数が増加することで延焼が拡大し，火災危険度が高くなる
- 前述の現象は，可燃物総量が減少するほどその影響が大きくなる

このように，分割数や評価時間によって，火災危険度は大きく変化し，現在使用されている可燃物密度による初期火災危険度評価では，ある条件での火災危険度を評価したことにしかならない。単位床面積あたりの可燃物数や，個々の可燃物の大きさなどの可燃物調査が十分に整理されれば，同様の手法で，より厳密な火災危険度評価が可能となる。

第8章　結章

本研究は，住宅の可燃物配置モデルおよび火災燃焼モデルを構築し，これを用いて，室発熱性状の計算を行なうことで，可燃物特性のうち可燃物の直径と個数が室火災性状に主たる影響を及ぼすことを明らかにした。また，この結果，一般に行なわれている盛期火災時の最大発熱量を算定するための指標である可燃物密度を指標とした初期火災時の火災危険度評価が，同じ可燃物密度でも結果が異なる点で十分でないことを示した。

序章では，本研究の目的である可燃物密度により初期火災時の火災危険度を評価することの問題点を示し，初期火災時の火災の進展に大きな影響を及ぼすと考えられる，個々の可燃物の大きさや個数といった可燃物特性を考慮した火災危険度評価を行なう必要があることを示した。さらに，これらに関する既往文献の紹介を行った。

第 2 章では，住宅での火災の実態について検証し，本研究で住宅を火災危険度評価の対象とする理由を明らかにした。まず，住宅火災と病院火災の死亡率の比較から，住宅火災の死亡率が，ここ十数年に渡り，非常に高い水準で推移していることを示した。これは，病院が不特定多数の利用者を想定しているのに対して，住宅は個人所有のものであるため，建築基準法などの規制の適用範囲になりにくいことが原因の 1 つである。また，火災統計から住宅火災での死亡者数，死亡者の年齢構成について整理した。それにより，住宅火災での死亡者は，高齢者が大半を占めることがわかった。また，死亡原因について整理したところ，住宅火災は高齢者や身体障害者にとって非常にリスクの高い災害であることがわかった。さらに，住宅火災の出火原因はここ数年で多種多様に変化していることがわかり，構築するモデルの満足すべき条件を明らかにした。

第 3 章では，既往の可燃物調査の紹介を行なった。可燃物調査は，調査の目的により調査内容が異なるが，既往の可燃物調査の大半は，建物用途ごとの火災荷重の調査を目的としており，単位面積あたりの火災荷重の平均値とその標準偏差のみが調べられてきた。このような調査は，火災がある程度進展した後の盛期火災での発熱量の予測には有効であるが，本研究の対象となる初期火災時での発熱量は，個々の可燃物の大きさや配置といった可燃物特性が重要となるため，これらの調査を可燃物配置モデルの入力として利用することができない。そこで，数年に渡り，可燃物配置モデルの構築を目標として調査された，住宅の可燃物配置調査をもとに，住宅に持ち込まれる可燃物の特徴を整理した。それによると，調査の対象となった家具などの可燃物は，壁際に設置され，開口部を避けるなど配置に特徴があることがわかった。また，和室や LDK など室用途により，持ち込まれる可燃物 (家具) の種類が限定され，設置数や寸法を標準化することが可能となっ

た。この他に，計画系のテーマである家具の配置に関する研究と実大火災実験の紹介を行なった。

第 4 章では，可燃物特性は建物用途ごとに特徴が異なり，用途ごとの可燃物配置モデルが必要であることを示した。一連の研究として，これまでに可燃物を室に均一に配置した正方格子モデル，可燃物をランダムに配置したランダム配置モデルを提案したが，これらは住宅の可燃物配置を表したものではないため，第 3 章で整理した可燃物配置調査の資料をもとに，住宅での可燃物特性を考慮した可燃物配置モデルを構築した。その際に，調査の対象となった家具等の比較的大型の可燃物を「大型可燃物」，調査の対象とはならなかった衣類やごみなどを「小型可燃物」と定義した。可燃物配置モデルでは，大型可燃物については可燃物調査をもとに可燃物特性を確定したモデルとし，小型可燃物の持ち込み可燃物量や配置は使用者に依存する部分が大きく，かつ，小型可燃物の特性が初期火災時の火災の進展に大きな影響を及ぼすと考え，小型可燃物の直径と個数を考慮して，ランダムに配置するモデルとした。

第 5 章では，これまでは個々の火災現象として考えられていた火災現象の物理モデルである，可燃物の燃焼速度や煙流動などを複合し，火災性状を時間変化する現象として計算を行なう火災燃焼モデルを構築した。火災燃焼モデルでは，可燃物の燃焼，可燃物間の延焼，煙流動，内装の燃焼性，排煙についての火災現象を考慮した。第 6 章以降で，この火災燃焼モデルと第 4 章で構築した住宅の可燃物配置モデルを使用して，火災発熱解析を行うが，解析結果が妥当なものであるかを検証するために，実大火災実験の実験結果との比較を行なった。比較の結果，解析結果は実験結果とかけ離れたものではなく，十分実用可能であると判断した。

第 6 章では，火災発熱解析を行なう上で考慮した小型可燃物の可燃物特性を，①可燃物数が一定のもと可燃物の直径を変更したもの，②可燃物の直径が一定のもと可燃物数を変更したもの，③可燃物密度が一定のもと分割数 (可燃物数) を変更したもの，④大型可燃物の配置を変更したものの 4 通りの感度解析を行い，その他にも解析に関わる諸条件を変更したものとして，⑤内装の燃焼性及び排煙条件を変更したものの感度解析を行なった。その結果，可燃物の直径が大きくなるほど，発火源となる可燃物の最大発熱量が大きくなるため，他の可燃物への延焼に要する時間が短くなる。また，可燃物数が多くなることでも，可燃物間の平均最短距離が縮まることで他の可燃物への延焼に要する時間が短くなる。また，可燃物密度が一定の条件で可燃物の分割数 (個数) を変更して，火災発熱解析を行なったところ，小型可燃物の分割数によって，室の発熱速度が変化した。このことからも，可燃物密度だけで火災危険度評価を行なうことが不十分であることを示すことができた。内装が可燃性になると，解析初期の段階で，内装に着火することで発熱速度が大幅に上昇し，F.O. する解析が多数あらわれた。内装の着火条件において，モデルに改善の余地が残されているものの，内装を不燃性材料にすることが，火災危険度を大幅に低下させることには変りはない。

第 7 章では，本研究での火災危険度を，着火から 300 秒後と 600 秒後に，初期火災危険の限界状態として設定した 50 kW を超過する確率で定義した。また，一般に考えられている住宅の可燃

物密度である 30.0 kg/m^2 を想定して，室に存在する小型可燃物の総量を 100 kg とし，それよりやや可燃物量の多い 200kg，やや少ない 50 kg の 3 通りの可燃物密度で，分割数を 10〜30 まで 5 刻みで変更して，火災危険度評価を行なった。その結果，以下のことを明らかにした。

着火から 300 秒後の火災危険度

- 分割数が 20 以上での火災危険度はほぼ一定となる
- 分割数が 15 と 20 とでは，火災危険度に大きな差があり，分割数が 15 程度までは発火源の発熱量による影響が大きい

着火から 600 秒後の火災危険度

- 分割数が 20 までは，発火源の発熱量が小さくなることで火災危険度が低下するが，分割数が 20 を超えると可燃物数が増加することで延焼が拡大し，火災危険度が高くなる
- 前述の現象は，可燃物総量が減少するほどその影響が大きくなる

このように，火災危険度は，可燃物の分割数や評価する時間により大きく変化するため，現在一般に行なわれている可燃物密度による火災危険度評価では，同じ可燃物密度であっても火災危険度が変化するという意味で，十分な結果を得ることはできない。個々の可燃物の大きさや単位床面積あたりの可燃物数の調査などが整理されれば，同様の手法により，他の建築用途の火災危険評価も可能である。

なお，本研究で使用した火災燃焼モデルでは考慮していない可燃物の材質などの影響は，特に初期火災時の発熱速度の成長に大きな影響を及ぼすと考えられ，可燃物配置モデル，火災燃焼モデルに改善の余地が残されている。

参考文献

1) 日本火災学会（編）. 火災便覧　第 3 版. 共立出版, 1985.

2) 国土交通省（編）. 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説. 井上書院, 2001.

3) 国土交通省（編）. 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説. 井上書院, 2001.

4) Bukowski, R.W., Tanaka, T. Toward the goal of a performance fire code. *Fire and Materials*, 1991.

5) NFPA. Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas, 1991.

6) 水野智之, 長岡勉, 山田人司, 長谷見雄二, 吉田正志, 薮田孝敏. 椅子の燃焼性状に関する実験的研究　その 1. 日本建築学会学術講演梗概集, 1998.

7) 山田人司, 水野智之, 長岡勉, 長谷見雄二, 吉田正志, 薮田孝敏. 椅子の燃焼性状に関する実験的研究　その 2. 日本建築学会学術講演梗概集, 1998.

8) McCaffrey, B.J. Purely buoyant diffusion flames- some experimental results. *NBSIR*, 1979.

9) Zukoski, E.E., Kubota, T.and Cetegen, B. Entrainment in fire plume. *Fire Safety Journal*, 1980/1981.

10) 長岡勉, 辻本誠, 古平章夫, 上原茂男, 菊池伸一. 木材の密度と着火時間の関係. 日本建築学会構造系論文集, No. 559, 2002.

11) Hasemi, Y.and Tokunaga, T. Modeling of turbulent diffusion flames and fire plumes for the analysis of fire growth. *ASME 21st National Heat Transfer Conference*, 1983.

12) Waterman, T.E. Room flashover-criteria and synthesis. *Fire Technology*, 1968.

13) 横井鎮男. 熱源からの上昇気流について. 日本火災学会論文集, Vol. 3, No. 1, 1953.

14) Thomas, P.H., Hinkley, P.L., Theobald, C.R., Simms, D.L. Investigations into the flow of hot gases in roof venting. *Fire Research Technical Paper*, No. 7, 1963.

15) 田中哮義. 小規模建築物の火災のモデル化に関する研究 (1). 日本火災学会論文集, Vol. 29, No. 2, 1979.

16) 辻本誠, 奥宮正哉, 長岡勉, 梶山隆史. 一部に開口部のある空間での煙流動に関する模型実験. 日本建築学会構造系論文集, No. 488, 1996.

17) 日本鋼構造協会. 耐火建築物設計における標準可燃物量の調査研究, 1973.

18) 油野健志. 実態調査に基く可燃物量とその表面積の分析. 日本建築学会計画系論文集, 1996.

19) 沢田知子, 谷口久美子, 丸茂みゆき, 萩野谷朱美. 家具の保有・配置状態からみた住様式の動向と住戸計画. 日本建築学会学術講演梗概集, 1996.

20) 佐藤博臣, 栗岡均, 泉潤一, 上野孝弘, 須川修身, 石川孝重. 木造住宅の火災荷重に関する分析. 日本火災学会研究発表概要集, 1997.

21) 佐藤博臣, 栗岡均, 須川修身, 柏市消防本部. 住宅における木質系可燃物の配置に関する研究 (その 1　住宅の家具配置と火災性状に関する分析). 日本火災学会研究発表概要集, 2000.

22) 高橋済. 建築の火災安全性評価のための火源設定に関する研究. PhD thesis, 名古屋大学, 2000.

23) 松本圭介, 辻本誠, 河野守. 可燃物のランダム配置を考慮した火災時発熱解析. 日本火災学会研究発表概要集, 2001.

24) G.A.Purt. The evaluation of t he fire risk as a basis for planning automatic fire protection systems. *Fire Technology*, Vol. 8, No. 4, 1972.

25) 田中哮義. 建設省の住宅防火安全性能評価法. 彰国社, 1987.

26) 長谷部弥, 辻本誠, 志田弘二, 江本哲也. 災害弱者施設における火災危険評価に関する研究. 日本火災学会研究発表会概要集, 1994.

27) 余暁東, 辻本誠. 病院における火災死亡リスクの経年変化と規制. 日本火災学会研究発表会概要集, 2002.

28) 消防庁（編）. 消防白書 平成 12 年度版. ぎょうせい, 2001.

29) 消防庁予防課（編）. 住宅防火対策の実務. 日本消防設備安全センター, 1992.

30) 佐藤博臣, 岩波志富貴, 佐藤寛. 住宅の可燃物実態と初期火災設計用火源. 日本建築学会大会学術講演概要集, 2002.

31) 水野智之, 佐藤博臣. 建物・空間用途別にみた火災初期における初期火源及びその燃焼性状. 日本建築学会大会学術講演概要集, 2002.

32) 国土開発技術研究センター（編）. 建築物の総合防災設計法 (第 4 巻耐火設計法). 日本建築センター, 1970.

33) 新都市型集合住宅システム開発プロジェクト. 新都市型躯体構造システム報告書. 日本建築センター, 1988.

34) 谷口久美子, 沢田知子, 丸茂みゆき. 女子学生寮における家具の保有・配置状態と広さ感・容積感の関連性について　居住空間における空間経験と規模間隔の関連性に関する研究・その1. 日本建築学会大会概要集, 1998.

35) 古賀誉章, 関口亜紀, 槙究. 女子大生の自室における家具の配置の規定要因　その6 家具の配置パターン (1). 日本建築学会大会梗概集, 1999.

36) 丸茂みゆき, 沢田知子, 谷口久美子. 家具の保有・配置状況からみた住様式の動向と住戸計画　その7 家具の寸法・形状の動向に関する考察. 日本建築学会大会概要集, 1998.

37) 谷口久美子, 沢田知子, 丸茂みゆき, 萩野谷朱美. 家具の保有?配置状況からみた住様式の動向と住戸計画　その2 家具の保有状態とその規定要因. 日本建築学会大会概要集, 1996.

38) 関沢愛, 佐藤博臣, 栗岡均, 箭内栄治, 鈴木健. 住宅における木質系可燃物の配置に関する研究　その2 RC造中層住宅における木質系可燃物配置の実態. 日本建築学会大会学術梗概集, 1998.

39) 阿部京子, 佐藤博臣, 栗岡均, 須川修身, 泉潤一. 住宅における木質系可燃物の配置に関する研究　その1 住宅の家具配置に関する分析. 日本建築学会大会学術梗概集, 1998.

40) 佐藤博臣, 栗岡均, 佐藤寛, 岩波志富貴. 住宅における可燃物配置のモデル化に関する調査. 日本建築学会大会学術梗概集, 2001.

41) 花井英枝, 辻本誠, 河野守, 出口嘉一. 可燃物のランダム配置を考慮した煙制御と避難限界に関する研究. 日本火災学会研究発表概要集, 2002.

42) 出口嘉一, 辻本誠, 河野守, 花井英枝. 可燃物のランダム配置による発熱量と煙流動の影響に関する研究. 建築学会計画系論文集, No. 565, 2003.

43) 松山賢. 性能的火災安全設計に用いる火災性状モデルの構築と火災安全性能評価への応用. PhD thesis, 東京理科大学博士論文, 2000.

44) MaCaffrey, B.J., Quintiere, J.G.and Harkleroad, M.F. Estimating room temperratures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. *Fire Technology*, Vol. 17, No. 2, 1981.

45) Babrauskas, V.and Krasny, J. Fire behavior of upholstered furniture. *NBS Monograph 173*, 1985.

46) 田中哮義. 建築火災安全工学入門. 日本建築センター, 1995.

47) 長谷川益夫, 唐沢了. 国産広葉樹の ISO 着火性試験. 木材と技術, No. 56, 1984.

48) Fang, J.B., Jansson, R., Onnermark, B. Fire development in residential rooms after ignition from nuclear explosions. *FOA Report C20016-D6(A3)*, 1974.

49) 川越邦雄, 関根孝. 壁体の熱伝導率の違いによるコンクリート造建物内の火災温度曲線の推定. 日本火災学会論文集, Vol. 13, No. 1, 1963.

50) 佐藤寛, 岸谷孝一, 菅原進一, 三村由夫, 鈴木弘昭, 中村賢一, 吉田正良. 木造 3 階建共同住宅の実大火災実験 (その 1：実験目的及び建物概要). 日本建築学会大会学術講演概要集, 1992.

51) 建築研究所，日本建築センター. 木造 3 階建共同住宅実大火災実験報告書, 1994.

52) 猪瀬直樹. 日本凡人論. 新潮文庫, 1985.

記号説明

A	:	可燃物の表面積 (m^2)
A_{room}	:	室床面積 (m^2)
B	:	開口幅 (m)
C_p	:	空気の定圧比熱 (1.0 kJ/kgK)
D	:	火源 (可燃物) の直径 (m)
g	:	重力加速度 (m/s^2)
$h0$	:	着火前の可燃物の高さ (m)
$h1$	:	定常状態に入る以前の可燃物の高さ (m)
$h2$	:	定常状態以降の可燃物の高さ (m)
H_b	:	開口部上端までの高さ (m)
H_{room}	:	天井高さ (m)
I	:	可燃物の受熱流速 (kW/m^2)
I_f	:	燃焼している可燃物上に形成された火炎からの受熱流速の和 (kW/m^2)
I_s	:	煙層からの受熱流速 (kW/m^2)
I_i	:	燃焼している可燃物上に形成された火炎からの受熱流速 (kW/m^2)
I_v	:	n 個の火源からの上昇気流量の和 (m^3)
K	:	Q_{room} のうち煙層に与えられる割合 (=0.7)
L_{min}	:	火炎の連続火炎高さ (m)
q	:	木材の単位重量あたりの発熱量 (16,000 kJ/kg)
q_{mat}	:	内装材料の単位面積あたりの発熱速度 (kW/m^2)
q_s	:	木材の単位表面積あたりの発熱速度 (112 kW/m^2)
Q	:	可燃物の発熱速度 (kW)
Q^*	:	無次元発熱速度
Q_0	:	火源での発熱量 (kW)
Q_{mat}	:	内装燃焼による発熱速度 (kW)
Q_{peak}	:	可燃物の定常状態時の発熱速度 (kW)
Q_{room}	:	内装と可燃物の発熱量の和 (kW)
t_d	:	燃焼継続時間 (sec.)
t_{ig}	:	内装の着火時間 (sec.)
t_p	:	着火から定常状態に入るまでの時間 (sec.)
t_s	:	着火からの経過時間 (sec.)

T_0 : 常温空気の絶対温度 (293 K)
T_f : 放熱面 (火炎面) の温度 (K)
T_i : 受熱面の初期温度 (K)
T_s : 煙層温度 (K)
V : 高さ Z での上昇気流量の体積 (m^3)
W : 可燃物の重量 (kg)
W_E : 自然排煙による排煙量 (m^3/sec.)
Z : 床面から煙層下端までの高さ (m)
Z_0 : 床面から仮想点熱源 (図 5.10 参照) までの距離 (m)
α : 火災成長率 (kW/s^2)
α_0 : 開口部の流速係数 (=0.7)
α_f : 内装の火災成長率 (0.0125 kW/s^2)
γ_0 : 常温空気の比重量 (1.2 kg/m^3)
γ_f : プリュームの平均比重量 (kg/m^3)
γ_s : プリューム外の煙層の平均比重量 (kg/m^3)
ϵ : 放射率
$\Delta\theta_s$: 煙層の平均温度上昇 (K)
ρ_0 : 大気の密度 (1.2 kg/m^3)
σ : ステファンボルツマン係数 (5.67×10^{-11} $kW/m^2\ K^4$)

謝辞

本研究を遂行するにあたり，名古屋大学大学院環境学研究科 辻本誠教授に感謝いたします。博士課程後期 2 年次から火災分野の研究を始め，右も左もわからない私に対して，先生は懇親丁寧にご指導して下さいました。また，私生活においても，先生の一言がきっかけでマラソンを始めるようになり，2002 年筑波マラソンを無事完走することができました。この経験が論文を書き上げるという精神的・肉体的に過酷な作業で，大いに役立ったと感じています。

独立行政法人 建築研究所 河野守先生に感謝いたします。先生には，学部 4 年次から現在に至るまで，研究の基礎を教えていただきました。学外においても，家族ぐるみでお世話になり，大変感謝しております。

鹿島建設技術研究所 佐藤博臣氏に感謝いたします。佐藤氏には，本研究の要でもある住宅の可燃物配置調査のデータの閲覧を快諾いただくと共に，共同研究として，月に一度の鹿島建設でのご指導をいただきました。また，佐藤氏のご指導を一緒に受けた武蔵工業大学 岩波志富貴氏，原希氏には，住宅の可燃物配置調査のデータの整理に多大なご協力をいただきました。なかなか研究の進まない私にとっては，この月に一度のご指導が研究の進行の目標となりました。

公私共に 6 年間の大学生活を共に過ごした研究室の先輩，後輩の皆さんに感謝します。特に，互いに論文の締め切りに追われ，切磋琢磨した内山聖士氏，余暁東氏，図の作成を積極的に手伝ってくれた徳永英氏達の協力がなければ，このようなかたちで論文をまとめることはできなかったと思います。

最後に，たくさんの方々の協力があったことをここに記して感謝いたします。