

可燃物のランダム配置を考慮した煙流動とその制御に関する研究

A Study of Movement and Control of Smoke Using the Model of Random Arrangement of Combustibles

平成 14 年 2 月 8 日

February 8, 2002

名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻

Department of Geotechnical and Environmental Engineering, Nagoya University

花井英枝

Fusae HANAI

要 旨

室内の火災現象を解析するには、複数の互いに関連した要因をどのような形で入力をするのが非常に重要となる。本研究では、収納可燃物特性である、総可燃物重量、個々の可燃物重量、配置のランダム性を考慮した煙流動の解析を行い、人が安全に避難することができる時間（避難限界時間）への影響を検証した。その結果、ランダム性を考慮することにより、内装防火性能、空間条件、収納可燃物密度、排煙条件により避難限界時間に異なる巾のばらつきが生じることが分かった。また、排煙条件を変えて検証を行なった結果、ある条件以上の排煙を行なっても、避難限界時間が長くないことが分かった。

ABSTRACT

It is important to decide factors to analyze a fire behavior. The purpose of this paper is inspection the influence of a randomness of combustibles on the time that people can escape in safety by using the model of random arrangement of combustibles. The results of analysis shows as follows: (1) This time varied in a range changing by the fire safety performance of interior materials, the dimensions of a room, the density of combustibles, and the condition of smoke control. (2) An effective condition of smoke control has closed one solution.

目 次

1	概説	1
2	検証方法	2
2.1	はじめに	2
2.2	検証の流れ	3
2.3	可燃物配置モデル	3
2.4	在館者が安全に避難するのに支障をきたす条件	3
2.5	まとめ	4
3	収納可燃物のランダム性を考慮したモデルの概略	5
3.1	はじめに	5
3.2	火災成長モデル	5
3.2.1	区画内の火災成長性状	5
3.2.2	室内の可燃物の燃焼性状	5
3.2.2.1	可燃物の燃焼性状	5
3.2.2.2	内装の燃焼性状	6
3.2.3	火炎高さおよび燃え落ち	7
3.2.4	可燃物の燃え広がり	8
3.2.4.1	可燃物間の放射加熱	8
3.2.4.2	煙層からの輻射による放射加熱	9
3.2.4.3	可燃物の着火条件	9
3.3	可燃物のランダム配置	10
3.3.1	可燃物の配置	10
3.3.2	対象区画内の可燃物総量	10
3.3.3	個々の可燃物	11
3.3.4	可燃物配置による修正	11
3.4	まとめ	11
4	煙流動の計算	12
4.1	はじめに	12
4.2	可燃物からのプルームの発生	12
4.2.1	火災プルーム	12
4.2.2	仮想点熱源	12
4.3	煙層高さ	13
4.4	煙層平均温度	14
4.5	排煙	14
4.5.1	自然排煙	14
4.5.2	機械排煙	15
4.5.3	排煙を行なった場合の煙層高さ及び煙層温度	15
4.6	本初期火災モデルの適用範囲と問題点	15

4.7	まとめ	16
5	可燃物のランダム性が煙流動に与える影響	18
5.1	はじめに	18
5.2	入力条件	18
5.3	解析結果及び考察	18
5.3.1	正方格子モデルとの比較	18
5.3.1.1	ランダム性の影響	18
5.3.1.2	排煙による影響	19
5.3.2	避難安全検証法との比較	21
5.4	まとめ	22
6	結論	33
	謝辞	34
	参考文献	35
	付録1 正方格子モデルの補足	A1
	付録2 ランダムモデルを用いた解析結果の平均値	A2

1 概説

初期火災時に円滑な避難行動を妨げる最大の要因は、煙による視界の悪化と煙層の持つ、特に、呼吸器系への毒性である。このため、初期火災時における煙流動をなるべく正確に把握し、効果的な排煙を行うことは火災による人命の被害を最小限に食い止めるために不可欠である。

煙流動を扱うには、火災という物理現象がどのように展開するか（発熱量の時間変化）の把握が重要である。すなわち、入力としてどのようなものを考えるのが鍵となる。従来は、空間の用途に応じて発熱量の時間変化をモデル化し、一意のものをいくつか与えて入力をするという方法論が用いられてきたが、建築基準法において、予測火源に対応できる仕組みが定められたこともあり、より詳細な対応が求められることとなった。この初期の試みにおいては、室内空間にある収納可燃物は、同じ大きさ、重量であり、かつ規則正しく配置されていると想定されていたが、本来、収納可燃物は、その総可燃物重量、個々の可燃物重量、配置にランダム性が入るものである。このため、収納可燃物を空間にランダムに配置し、これらの燃え移りで発熱量を予測しようとする新しい試みが始まった。

松本 圭介氏（現、三重県庁）は、本学の修士論文中において、収納可燃物の特性すなわち、総可燃物重量、個々の可燃物重量、配置のランダム性を考慮した火災時発熱解析を行い、ランダム性が発熱速度に与える影響を統計的に検証した。論文の中で、松本氏は、可燃物のランダム性、特に、区画面積および可燃物重量が、火災初期の発熱性状に強い変動を与えることを導いた。

本研究では、不確定な要素が多く検証が困難と思われる火災初期における避難安全性能を確かめるため、この収納可燃物のランダム性を考慮した煙流動を数値計算により求め、人が安全に避難することができる時間への影響を検証していくものである。また、同時に、排煙を行うことによる影響を分析し、効果的な排煙方法を導くことを目標としている。

なお、本論文の構成としては、2章で、収納可燃物のランダム性が、避難安全性能に与える影響の検証方法の説明を行い、3章で、火災成長モデル、可燃物のランダム性の説明を行い、4章で、煙層高さ、温度の算定方法、排煙方法についての説明を行い、5章で、3、4章で説明を行なったアルゴリズムをもとに解析および、その結果の検証、考察を行い、6章で、本研究で得られた知見のまとめを行っている。

2 検証方法

2.1 はじめに

1998年の建築基準法改正により、耐火性能、避難安全性能を確かめるため、より実際に即した火災現象の入力の設定が行われた。すなわち、従来に比べ、性能を確かめるための入力が、より詳細に設定されることとなった。たとえば、建築基準法改正以前は、耐火建築物における主要構造部の耐火性能は、火災モデルとは無関係に、「建物の規模、階数に応じて決められた一定の時間以上、通常の火災時の火熱に耐えることができること」とされていたが、改正により、室用途、床面積、内装防火性能に応じて可燃物の発熱量、火災継続時間が決定されることとなった。しかし、入力パラメーターは、詳細になったものの、発熱量は一定のままであり、どの程度、安全側への評価がなされているか明確ではない。

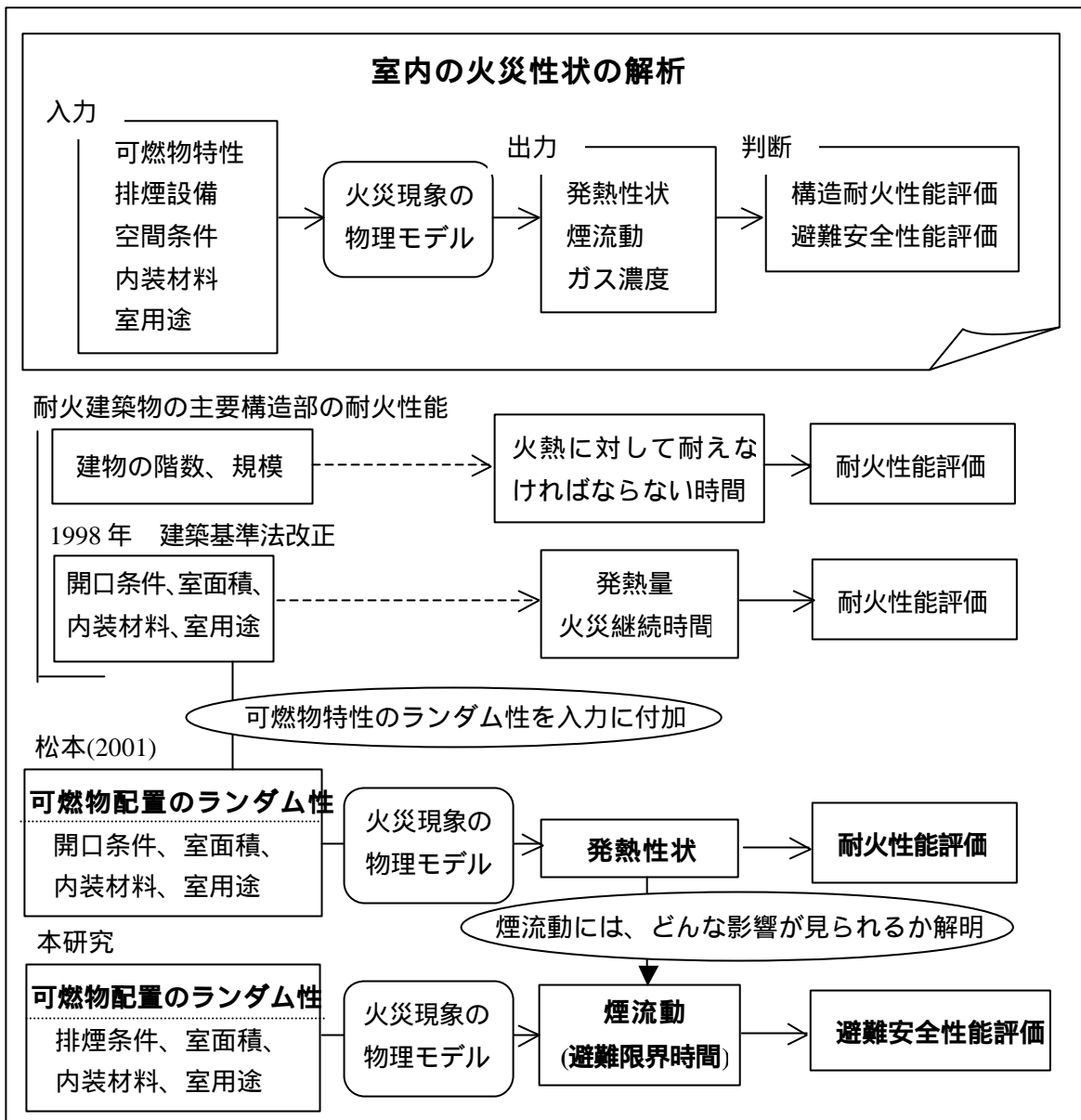


図-2.1 本研究の位置付け

松本は、修士論文で、入力条件として収納可燃物特性のランダム性を考慮した火災時発熱解析を行

い、火災初期に発熱量の変動が大きいことを指摘した。このことから、可燃物のランダム性が煙流動、ひいては避難限界時間にも何らかの影響を与えることが推測されうが、収納可燃物のランダム性の煙流動に与える影響についての研究は、まだ行なわれていない。そこで、本研究では、収納可燃物特性、すなわち、総可燃物重量、個々の可燃物重量、配置、大きさにランダム性を与え、モンテカルロ法によりランダム性が煙流動に与える影響を、避難限界時間を指標として検証する。本章では、その検証方法について説明する。

2.2 検証の流れ

本研究では、松本の指摘した火災初期に発熱量のばらつきが大きいことが、避難安全性にどのように影響するかを収納可燃物のランダム性を考慮した同様のモデルで検証する。このため、まず、避難限界時間を 2.4 で条件を示す「避難可能な時間」とし、空間条件、内装防火性能、排煙条件、室用途（可燃物密度）などのパラメーターを変化させて避難に影響の大きい火災現象への影響を明らかにすると共に、一意のモデルの妥当性を検証する。

さらに、現在の安全基準との比較をするため、避難安全検証法との比較を行い、その妥当性を論じる。なお、避難安全検証法は、建築基準法の改正に伴い平成 12 年に公布された検証法のひとつで、安全な場所への避難終了時間と煙降下時間を求める計算方法が示されており、この二つの大小を比較することにより、避難安全性能を確かめているものである。

2.3 可燃物配置モデル

先ほどから述べている本研究で用いるランダムモデルは、総可燃物重量、個々の可燃物重量、配置、大きさのランダム性を考慮したモデルであり、すべての可燃物が出火点となりうる。対して、正方格子モデルは、従来、一般的に使用されてきたモデルであり、室空間を $1\text{m} \times 1\text{m}$ のグリッドに切り、それぞれのグリッドの中央に同じ重量、大きさの可燃物が均一に配置されていると想定したものである。正方格子モデルでは、室中央に位置する可燃物が出火点となる。(図-2.2、図-2.3 参照)

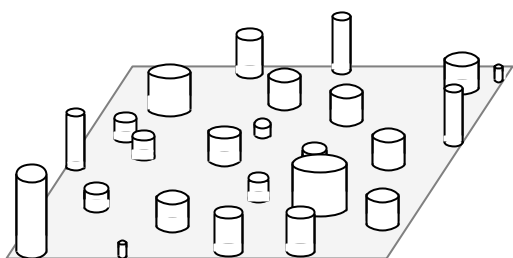


図-2.2 可燃物の配置(ランダムモデル)

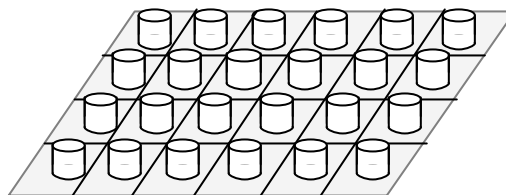


図-2.3 可燃物の配置(正方格子モデル)

2.4 在館者が安全に避難するのに支障をきたす条件

支障をきたす条件として、室内空間がフラッシュオーバーになる条件(1)~(3)と、避難者が煙層に影響を受ける条件(4)を採用した。フラッシュオーバーの生起条件は、まだ、はっきりと定義されうるものではないが、本研究では、1.天井に衝突し、天井下に広がった火炎、2.天井下たまった煙層による輻射熱や内装の燃焼拡大により起こるものとした。

(1) 火炎高さによるフラッシュオーバー

天井の内装を可燃性の材料でしたとき、可燃物の火炎、つまり、可燃物の高さに火炎の高さを加え

たものが、天井高さ以上になった場合、火炎が天井に沿って広がり、その床面への輻射によりフラッシュオーバーが起こるものとする。ただし、天井が可燃でない場合には、この条件でのフラッシュオーバーは起こらないとする。

(2)内装のフラッシュオーバー

壁の内装を可燃性の材料としたとき、火源から生じる火炎に接する内装の部分で燃焼が始まり、近傍で収まらずに、燃焼拡大していくと、フラッシュオーバーが起こる。内装がフラッシュオーバーする時間は、フラッシュオーバー生起時間によって内装に用いる材料を分類した高橋（2000）の実験結果を用いる。

(3)煙層温度によるフラッシュオーバー

天井下に蓄積された煙層の温度が、600 以上となった場合、床面への輻射によりフラッシュオーバーが起こる。煙層を黒体とすると、600 は $30\text{kW}/\text{m}^2$ に相当する温度であり、通常の大さの室での床への入射に換算すれば $20\text{kW}/\text{m}^2$ に相当する。Waterman の実験結果から、 $20\text{kW}/\text{m}^2$ はほとんどの可燃物を口火着火させるのに十分な入射量であり、床面への $20\text{kW}/\text{m}^2$ の輻射により、床面上の未燃の可燃物が着火し、フラッシュオーバーが発生すると考えられる。したがって、本研究においても、600 に達した時点で、フラッシュオーバーが起こるものとする。

(4)煙層高さ

本研究では、煙層高さが1.8m 以下となった場合、煙により避難することが困難となると仮定する。これは、煙層が降下すると、視界が悪化するため、歩行速度が遅くなったり、安全な避難路を認識し避難することが難しくなることから設定した。

なお、内装とは、床面から1.2m 以上の部分の壁及び天井の室内に面する部分の仕上げのことである。本研究においては、天井、壁とも同じ内装とした。

2.5 まとめ

この章では、収納可燃物のランダム性が煙流動に与える影響についての検証方法を説明した。

3 収納可燃物のランダム性を考慮したモデルの概略

3.1 はじめに

松本(2001)は、可燃物特性である、総可燃物重量、個々の可燃物重量、配置のランダム性を考慮したモデルを用い、ランダム性が発熱速度に与える影響について検証を行った。本研究での可燃物のランダム性の考え方、火災成長の計算方法は、このモデルに従うため、この章では、その概略を説明する。

3.2 火災成長モデル

3.2.1 区画内の火災成長性状

図-3.1は、建物の区画内で生じる火災の時間変化を示している。

一般に、室内における火災は、室内に持ち込まれた火気が、過失や故意によって、近くにある可燃物に着火し、燃焼が拡大していくことにより起こる。このとき、条件により、有炎状態となる前に無炎燃焼状態が継続するが、この状態を燻焼期という。可燃物がいった

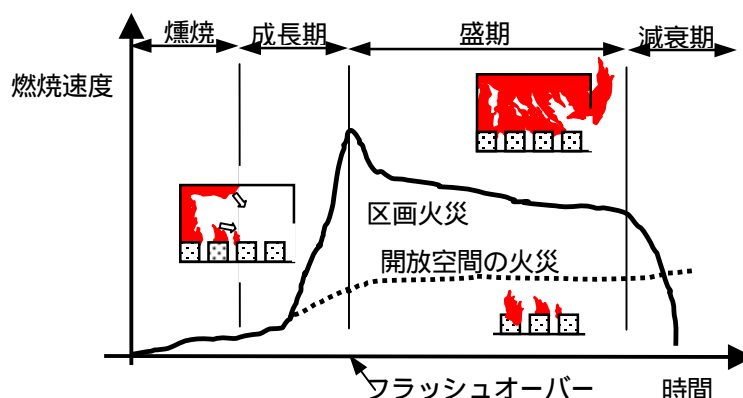


図-3.1 区画内の火災成長性状

ん着火すると火災が可燃物表面を燃焼拡大していく。このときを成長期という。成長期初期は、比較的ゆっくり燃焼拡大していくが、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により、また内装材料の燃焼拡大によって区画全体が高温なり、ある時点でフラッシュオーバーが起こる。これにより、区画全体が一気に燃焼する。その後、可燃物すべてが燃えつきるまで燃焼が継続するが、開口が小さい場合あるいは排煙条件により、燃焼に必要な酸素が欠乏した場合、可燃物がすべて燃えつきる前に燃焼が終了することもある。

本研究では、煙などにより避難に支障をきたすまでの時間を研究対象とするため、フラッシュオーバー以前の成長期、つまり、初期火災時のみを取り扱うこととする。

3.2.2 室内の可燃物の燃焼性状

初期火災時において、室内の火災成長は、「収納可燃物の燃焼性状」と「内装の燃焼性状」の和で表すことができる。

3.2.2.1 可燃物の燃焼性状

火源の発熱速度は、時間の関数として、一般に以下の式で表される。

$$\dot{Q}_0 = \alpha t^2 \quad (3.1)$$

ここで、 α ; 火災成長率[kW/s²] , t ; 時間[sec]

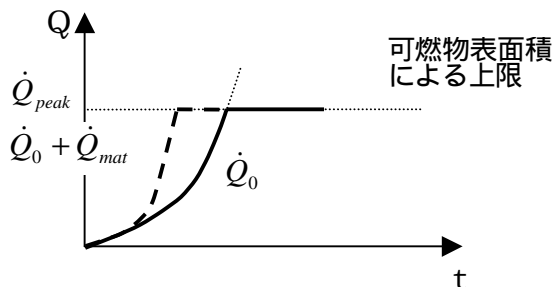


図-3.2 初期火災時の発熱速度性状

また、定常状態の発熱速度は可燃物の表面積に依存することから、次の式で表される。

$$\dot{Q}_{peak} = \dot{q}_s \cdot A_{unit} \quad (3.2)$$

ただし、 \dot{Q}_{peak} ; 定常燃焼時の発熱速度[kW] , \dot{q}_s ; 単位面積あたりの発熱速度[kW/m²] , A_{unit} ; 可燃物 1 個に対する仮想占有面積[m²]

解析では、すべての可燃物を木材と仮定して計算を行う。表-3.1 に木材の物性および燃焼特性を示す。

表-3.1 木材の物性および燃焼特性

物性または燃焼特性	記号	数値	単位
密度		500	kg/m ³
単位質量あたりの発熱量	Q	16,000	kJ/kg
単位表面積あたりの発熱速度	\dot{q}_s	112	kW/m ²
着火に要する受熱放熱量の積算値	$I^2 t_{ig}$	2,000	KW ² min/m ⁴
火災成長率		0.0125	kW/s ²

燃焼継続時間は、次式を解くことにより得られる。

$$\int_0^d \dot{Q}_0 dt = q \cdot W_{unit} \quad (3.3)$$

ここで、 q ; 単位質量 (木材) あたりの発熱量[kJ/kg]

3.2.2.2 内装の燃焼性状

壁面近傍で可燃物が燃焼し、その火炎が内装に着火して燃焼が起こる。このとき、内装の燃焼による発熱速度は、次式で表される。

$$\dot{Q}_{mat}(t) = 0.01 \cdot \dot{q}_{mat}'' \cdot \frac{0.01 \cdot \dot{q}_{mat}'' - 1}{t_{ig}} \cdot \alpha^{2/3} \cdot t^{8/3} \quad (3.4)$$

ここで、 \dot{Q}_{mat} ; 内装燃焼による発熱速度[kW] , \dot{q}_{mat}'' ; 材料の単位面積当たりの発熱速度[kW/m²] , t_{ig} ; 着火時間[t] , α ; 火災成長率[kW/s²] (\dot{q}_{mat}'' , t_{ig} は、コーンカロリメータ試験から得る。)

上式は、 $\dot{q}_{mat}'' > 100$ [kW/m²]のときに成立する。

なお、可燃物が壁面近傍にある条件は、 $S1/D < 0.5$, あるいは、 $S2/D < 0.5$ とする。(図-3.4 参照)

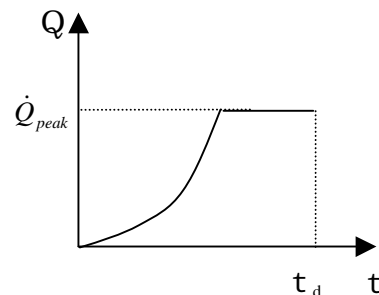


図-3.3 単位可燃物の発熱性状

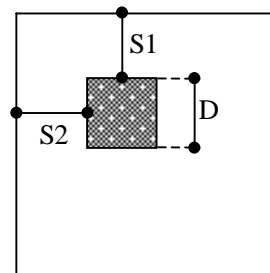


図-3.4 室隅火災における火源の配置

時間が経過するに従い、局所的な燃焼から壁全体に燃焼が拡大していくと、その輻射熱によりフラッシュオーバーが起きると考えられる。高橋 (2000) の実験結果 (ルームコーナー試験) によると、内装材料は、フラッシュオーバーの有無、到達時間を指標として表-3.2 に示す 3 つのグレードに分類できる。この内装グレードが 2 と 3 のとき、それぞれ下記に示すフラッシュオーバー生起時間に達したときにフラッシュオーバーが起こる。

$$t_{F.O.} = \left(\frac{H_{room}}{0.5 \cdot \alpha^{2/3}} \right)^{3/2} \quad (\text{Grade2}) \quad (3.5(a))$$

$$t_{F.O.} = \left(\frac{H_{room}}{\alpha^{2/3}} \right)^{3/2} \quad (\text{Grade3}) \quad (3.5(b))$$

ここで、 $t_{F.O.}$ ；内装によるフラッシュオーバー生起時間[sec]（内装出火～）， H_{room} ；天井高さ[m]， α ；可燃物（木材）の火災成長率[kW/s²]

表-3.2 ルームコーナー試験による内装の性能分類

		F.O.到達時間	性能
Grade 1	不燃材料	試験期間中に起こらない	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。盛期火災に達するまで、内装は室全体の燃焼拡大に寄与しない。
	準不燃材料		
Grade 2		10~20分	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炎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留まることが期待される。
	難燃材料		
Grade 3	可燃材料	0~10分	小規模の火災によっては燃焼拡大する。

3.2.3 火炎高さおよび燃え落ち

可燃物の火炎高さは、可燃物そのものの高さ（height）に連続火炎高さ（ L_{min} ）を加えたものである。以下に算出方法を述べる。

可燃物高さは、燃焼による燃え落ちのため、燃焼が進行するにつれ減少していくと考えられるが、燃え落ちは、その可燃物の形状・材質に大きく左右されるものであるため、定式化して求める事は困難である。そこで、底面積は一定のまま、高さのみが可燃物の総発熱量に応じて減少していくと考えた以下の式を用いる。

$$height1(t) = height0 - \frac{t^3}{4.8 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot D^2} \quad (3.6(a))$$

$$height2(t) = height0 - \frac{(t^3 + 240 \cdot (t - t_p) \cdot \dot{Q}_{peak})}{4.8 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot D^2} \quad (3.6(b))$$

ここで、 $height1(t)$ ；可燃物の燃焼が定常状態に入るまでの高さ[m]， $height2(t)$ ；定常状態以降の可燃物高さ[m]， $height0(t)$ ；着火前のもとの可燃物の高さ[m]， t ；着火からの経過時間[sec]， t_p ；着火から定常状態までの時間[sec]，可燃物の直径（高さ）[m]

建築空間内の可燃物は、通常、火炎を生じて燃焼するが、火炎は、時間的に伸縮するので高さを一意に定める事はできない。火炎は、連続火炎高さ領域、平均火炎高さ領域、連続火炎高さ領域の3つの領域を有すると考えられる。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、Zukoski（1980/1981）が提案した式を修正して用いる。

$$\frac{L_{min}}{D} = \begin{cases} 1.65 \cdot Q^{2/3} & Q^* < 1 \\ 1.65 \cdot Q^{2/5} & Q^* \geq 1 \end{cases} \quad (3.7(a))$$

ただし、

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g} D^{3/2}} \quad (3.7(b))$$

ここで、 ρ_0 ；常温空気の密度[kg/m³]、 T_0 ；常温空気の絶対温度[K]、 C_p ；空気の定圧比熱[KJ/kgK]、 g ；重力加速度[m/s²]、 D ；火源の代表径[m]、 \dot{Q} ；発熱速度[kW]、 Q^* ；無次元発熱速度[-]、 L_{min} ；連続火炎高さ[m]

室隅で燃焼が起こった場合、火炎高さは、自由空間内での燃焼と比べ伸長する。そこで、室隅に位置する可燃物が燃焼した時の火炎高さを、高橋（2000）の研究成果に従い以下の式を用いて求める。

$$\frac{L_{min}}{D} = 2.54 \cdot Q^{*0.65} \quad (3.8)$$

なお、次の条件をみたす可燃物を、室隅にあるとする。（ $S1$ 、 $S2$ 、 D に関しては、図-3.4 参照）

$$\frac{\sqrt{S1 \cdot S2}}{D} < 2 \quad (3.9)$$

3.2.4 可燃物の燃え広がり

3.2.4.1 可燃物間の放射加熱

未燃の可燃物は、燃焼可燃物の火炎からの放射加熱を受け、燃焼する。

受熱面を受熱物体（未燃の可燃物）の重心に位置し火炎に正対する微小平面とし、放熱面を受熱面によって放熱物体（燃焼可燃物）から切り取られる平面として、形態係数を計算する。形態係数は、次の式で求められる。

$$\phi_{2(d1)} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{l}{\sqrt{d^2 + l^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{d^2 + l^2}} + \frac{b}{\sqrt{d^2 + b^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{l}{\sqrt{d^2 + b^2}} \right] \quad (3.10)$$

B 、 d 、 l [m]については、図-3.6 参照、 $\phi_{2(d1)}$ は、平面 2 から微小平面 $d1$ への形態係数を表す記号。

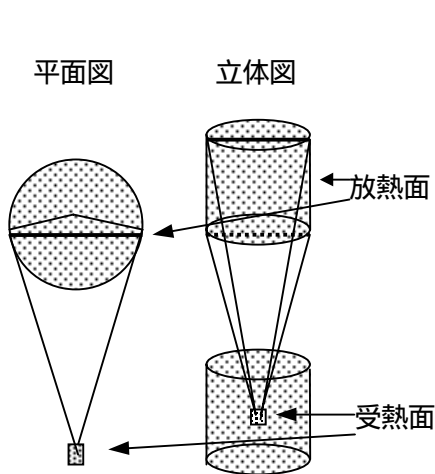


図-3.5 放射面と受熱面

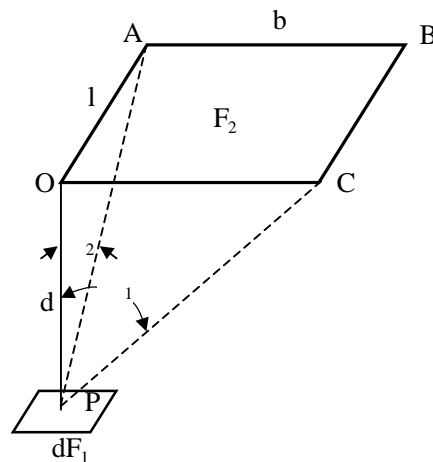


図-3.6 受熱面 dF_1 と円筒周面 F_2 との位置関係

ひとつの放熱源 F_2 から受熱面 dF_1 が受ける放熱熱量 q は、上式で得られた形態係数を用い、次式で表される。

$$\dot{q}_{rec,1}'' = \sigma \epsilon \varphi_{2(d1)} (T_f^4 - T_0^4) \quad (3.11)$$

ここで、 σ ; ステファンボルツマン係数 ($5.67 \times 10^{-11} [\text{kW}/\text{m}^2\text{K}^4]$) , ϵ ; 放射率[-] , T_f ; 放熱面の温度 (火炎面温度) [K] (室隅 ; 1173[K] , 自由空間 ; 1073[K]) , T_0 ; 受熱面の初期温度[K]

n 個の火源からの放射熱流は、それぞれの火源からの放射熱流の和で表される。

$$I_f = \sum_{i=1}^n \dot{q}_{rec,i}'' = \sigma \sum_{i=1}^n \epsilon \varphi_{i(d1)} (T_f^4 - T_0^4) \quad (3.12)$$

室内空間においては、複数の可燃物が存在するため、受熱物体と放熱物体の間に、他の可燃物があることが予想される。そのため、上式に用いる形態係数は、受熱面に対して障害となる可燃物の部分の形態係数を差し引いたものを用いる。

3.2.4.2 煙層からの輻射による放射加熱

未燃の可燃物は、天井下に溜まった煙層からの放射加熱を受け燃焼する。放射熱源となる煙層下端面は、床面積と同じ面積を有し受熱面となる床面に正対し、その最小距離は煙層高さで表現されるとすると、式(3.10)を用いることにより、形態係数 f が容易に得られ、受熱量 I_s が計算される。

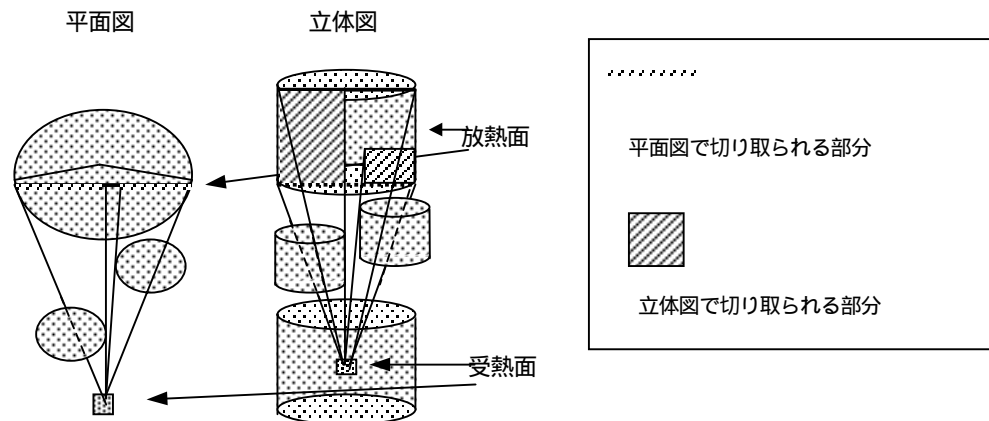


図-3.7 障害による放熱面の切り取り

$$I_s = \sigma \epsilon f (T_s^4 - T_0^4) \quad (3.13)$$

ここで、 σ ; ステファンボルツマン係数 ($5.67 \times 10^{-11} [\text{kW}/\text{m}^2\text{K}^4]$) , ϵ ; 放射率[-] , T_s ; 煙層温度[K] (煙層温度、煙層高さは、第 4 章参照) , T_0 ; 大気温度[K]

3.2.4.3 可燃物の着火条件

可燃物の着火時間を t_{ig} とすると、未燃の可燃物が着火する条件式は、次のように表される。

$$I^2 \times t_{ig} = 120000$$

ここで、 t_{ig} ; 着火時間[sec]、 I ; ある可燃物の受熱量 [kW/m^2] (可燃物からの熱流 I_f と煙層からの熱流 I_s の和)

3.3 可燃物のランダム配置

3.3.1 可燃物の配置

可燃物の配置は、デカルト座標を用いる。x、y 座標は、それぞれ (0,1) (1,0) 区間で一様乱数を発生させたものを部屋の各辺の長さ倍することにより算出される。なお、一様乱数の発生には、Microsoft Fortran Power Station 4.0mにおいて、組み込みサブルーチンを用いた。

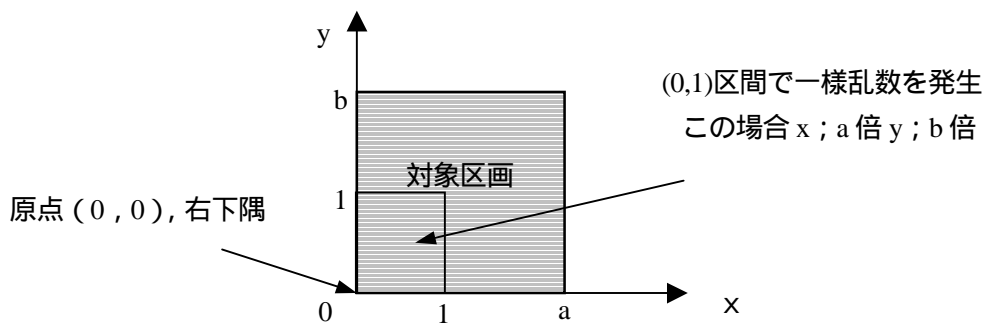


図-3.8 対象区画と座標

3.3.2 対象区画内の可燃物総量

本解析で用いる可燃物密度の値は、防耐火総プロの報告書（1998）のものを用いる。この報告書に記載されている収納可燃物密度の値は、材料ごとの発熱量の違いを考慮して、積載可燃物量を木材換算した等価可燃物量である。これは、火災時発熱性状の算出に用いられる収納可燃物密度が、一般に、室内に置かれている可燃物量を単位面積当たりの木材換算量として扱われることによる。防耐火総プロの報告書の可燃物密度値の本解析に使用する部分を表-3.3 に示す。

表-3.3 収納可燃物密度の調査結果

空間用途		積載可燃物密度 (kg/m ²)		
		平均値	標準偏差	評価値
事務室	一般事務室	30	10	50
	行政事務室	60	10	80
会議室	会議室、セミナー室	10	5	20

収納可燃物密度に関する既往の研究（油野ら、1996）によれば、ある用途について収納可燃物密度を調査すると、図-3.9に示すような正規分布を描く。火災安全性能評価に用いる収納可燃物密度の値には、この分布の平均値ではなく、非超過確率98%を用いることが推奨されている。表-3.3に示した評価値が、それにあたる。

本研究では、可燃物密度が、表の平均値、標準偏差の正規分布に従うという仮定のもと、解析を行う。なお、収納可燃物密度を求めるために、3.3.1と同様の方法で発生させた一様

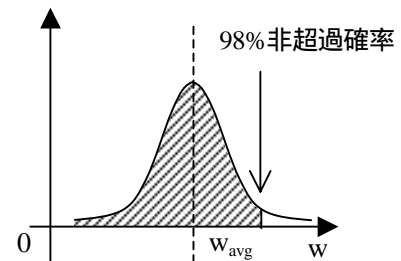


図-3.9 可燃物調査によって得られる分布形と、評価で用いる収納可燃物密度の関係

乱数を用い、Box and Muller 法により正規乱数を求めた。

3.3.3 個々の可燃物

個々の可燃物が占めると仮定する面積を仮想占有面積という。この仮想占有面積を、平均値 1.0 m^2 標準偏差 0.2 m^2 の正規分布に従う乱数値とした。この統計値は、既往の研究結果（高橋、2000）により概ね 1.0 m^2 にとった場合が現実の火災性状を最も良く反映する結果となることが分かっていることから平均値とした。また、標準偏差については、解析結果との兼ね合いを考え、平均の 20% を大体の値とした。

これを、3.3.1 においてランダムに与えられた座標に当てはめることにより、対象区画に、ランダムに仮想占有面積が配置されたことになる。このとき、その総和が元とするの面積より過小または過大になってしまった場合、元の面積と総和の間の誤差が元の面積の 3% 以内に収まるようにした。

次に、3.3.2 で各配置パターンごとに求めた総可燃物密度で決定される対象区画の可燃物総量をもとに個々の仮想占有面積に配置される可燃物の重量を求める。本研究では、可燃物は、すべて円柱であるとして計算を行うため、木材の密度を用いて、さらに円柱の底辺の直径及び高さを求める（直径と高さは同じ）。

3.3.4 可燃物配置による修正

3.3.1 において配置される可燃物の総数は、可燃物が室面積の 1.0 m^2 ごとにひとつあると考え、室面積の規模に応じて定まる。ここで、3.3.1 の方法にしたがって、可燃物をランダムに配置することにより、2 個の可燃物が重なって存在する。ある可燃物内に別の可燃物が配置される。室隅において可燃物が壁を越えて存在する。以上の問題が生じる可能性がある。そこで、 A の場合には、2 個の可燃物をひとつの新しい可燃物に置き換え、その重心を、2 個の可燃物の重心間の中心とし、重量を、それぞれの可燃物の和とする。 B の場合には、可燃物の重心位置は固定したままで、底面を壁に接するまで縮小し、代わりに、高さをおおきくとることで対処する。これにより、高さが、天井を超えた場合、天井高さを、可燃物の高さとし計算を行う。

さらに、上に述べた修正により、新たに C の問題が発生した場合、また、複数の可燃物が重なっていた場合は、同様の方法により、修正を加えることとする。

3.4 まとめ

この章では、可燃物の燃焼性状を求める計算式および可燃物のランダム特性についての説明を行った。

4 煙流動の計算

4.1 はじめに

3章において、燃焼の拡大と可燃物のランダム性についての概略を述べた。本来、この章で、述べる煙流動性状は、燃焼の拡大を求めるために不可欠な要素であり、実際、3章において煙層から床上の可燃物に対する放射熱流を求めるために用いられる。しかし、本研究のテーマにとって重要な項目であるため、特に、本章を用いて説明を行う。

4.2 可燃物からのプルームの発生

4.2.1 火災プルーム

室内において、可燃物は通常、火炎を生じて燃焼し、火炎の上には密度差による浮力によって上昇する熱気流が生じる。火炎で発生する燃焼熱は、一部が輻射で周りの未燃の可燃物を加熱し、残りの燃焼熱が、燃焼ガス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、まわりの空気を巻き込んで、上方に行くに従い円錐状にひろがる。火炎の上で生じるこのような上昇気流のことを、火災プルームという。

本研究で用いるランダムモデルでは、室内に可燃物がランダムに配置されるが、そのひとつが着火し、時間の経過とともに燃焼が広がっていく。このとき、着火した可燃物上に、それぞれ独立した火災プル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ルーム性状の変化は考えないこととする。個々の火災プルームから煙層へ流入する上昇気流量は、辻本(1975)による実験結果から、以下の式で表される。

$$V = 0.195 \cdot \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \cdot \left(\frac{gQ_0}{\gamma_0 C_p T_0} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (Z + Z_0)^{\frac{5}{3}} \quad (4.1)$$

ただし、 V ；高さ Z での上昇気流量の体積[m³]， γ_f ；プルームの平均比重量[kg/m³]， γ_s ；プルーム外の煙層の平均比重量[kg/m³]， g ；重力加速度[m/s²]， Q_0 ；火源での発熱量[kcal/sec]， γ_0 ；常温空気の比重量[kg/m³]， C_p ；空気の定圧比熱[0.24kcal/kg·deg]， T_0 ；常温空気の絶対温度[K]， Z ；床面から煙層下端までの高さ， Z_0 ；仮想点熱源からの距離[m]（4.2.2 参照）

したがって、 n 個の火源からの上昇気流量 I_v は、

$$I_v = \sum_{i=1}^n V_i \quad (4.2)$$

4.2.2 仮想点熱源

実火災において、火源は、点ではなくある有限の大きさを持っている。プルームの諸性状を考えるとときには、点熱源上のプル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 はプル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、これを用いる。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-4.2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。

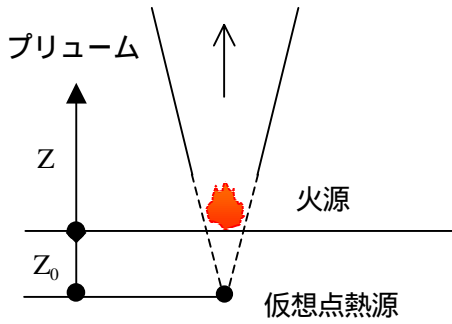


図-4.1 仮想点熱源

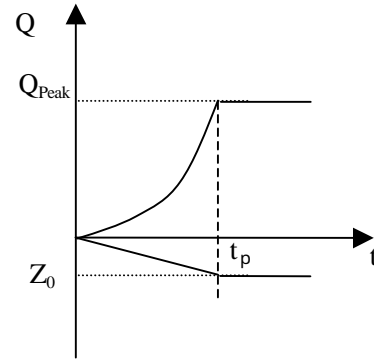


図-4.2 仮想点熱源の位置

4.3 煙層高さ

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2層ゾーンモデルを用いる。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、プルームを通じてのみとする。実火災実験などにより、プル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、プルーム外での煙層は、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、それぞれの火源が作るプルームから煙層に供給される量の和とし、時間 t における煙層高さは次の式で表される。なお、壁の内装が可燃(Grade2,Grade3)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。

$$Z(t) = Z(t-1) + \frac{I_v(t-1)}{A_{room}} \cdot dt \quad (4.3)$$

ただし、 I_v ; n 個の火源からの上昇気流量[m³] , A_{room} ; 室面積[m²]

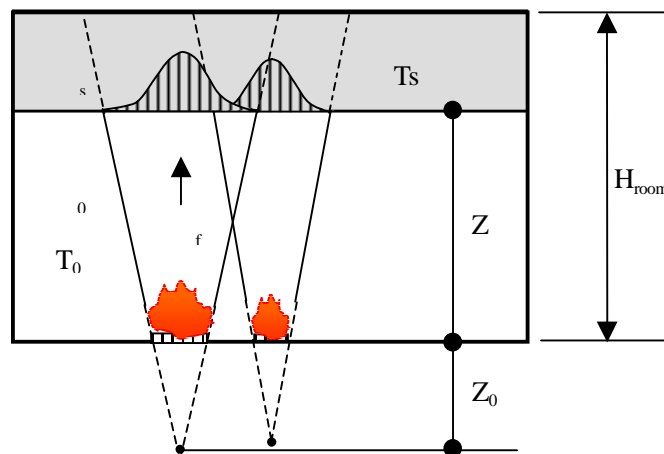


図-4.3 2層ゾーンモデルの概念図

4.4 煙層平均温度

プル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が、すべて煙層の温度上昇に寄与するとし、かつ、煙層の持つ熱量が瞬時に煙層全体に一樣拡散するとすれば、煙層の温度は、次式で表される。

$$T_s(t) = 293 + \Delta\theta_s(t) \quad (4.4(a))$$

$$\frac{d\{\Delta\theta_s(t) \cdot (H_{room} - Z(t)) \cdot A_{room} \cdot \gamma_s(t) \cdot C_p\}}{dt} = KQ(t) \quad (4.4(a))$$

ただし、 $\gamma_s = \gamma_0 \cdot \frac{T_0}{T_0 + \Delta\theta_s}$ とする。

ここで、 H_{room} ；天井高さ[m]， Z ；煙層高さ[m]， T_s ；煙層温度[K]， $\Delta\theta_s$ ；煙層の平均温度上昇（常温との温度差）[K]， γ_s ；プルーム外の煙層の平均比重量[kg/m³]， K ；内装の発熱量と収納可燃物の発熱量の和のうち煙層に与えられる割合[-]， Q ；内装の発熱量と収納可燃物の発熱量の和 [kcal/sec]

4.5 排煙

4.5.1 自然排煙

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、以下の式で略算される。

$$W(t) = \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot B \cdot (H_b - Z(t))^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \gamma_s (\gamma_0 - \gamma_s)} \quad (4.5)$$

ただし、 $W(t)$ ；自然排煙による排煙量[m³/sec]， α ；開口係数[=0.7]， B ；開口幅[m]， H_b ；開口部上端までの高さ[m]

開口外の空間は、無風の外気とみなした。なお、煙層下端で室内外の圧力差が 0 となると仮定した。後述するように、火災初期で、煙層下端が床面から 1.8m までの現象を対象とするため、実際の中性帯との位置のずれは流出量に大きくは影響しない。

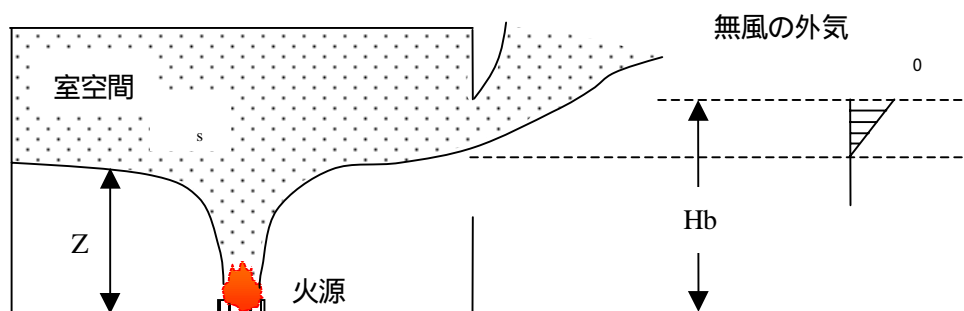


図-4.4 開口がある場合の煙の流れ

4.5.2 機械排煙

機械排煙は、排煙機により、煙を屋外に排出する排煙方法である。外気の状態、煙の温度に左右されることなく、安定した排煙を行なうことができる。また、排煙量を調節することで、区画内への煙の流入を防ぐことができるなどの利点がある。以下の計算では、機械排煙による排煙は、煙層が室の天井高さの 1/10 まで降下した時点で始まるものとする。

なお、表-4.1 に建築基準法に定められている排煙設備の構造について示す。以下の計算条件に用いる排煙方法は、基本的には、建築基準法に従うものである。

表-4.1 排煙設備の主な構造（建築基準法施行令 126 条の 3）

排煙口の材質	排煙口、風道その他煙に面する部分は、不燃材料で造る。
排煙口の位置	当該防煙区画部分の各部分から排煙口に至る水平距離を 30m 以下とし、天井又は、壁の上部（天井から 80cm 以内（もっとも短い防煙壁のたけが 80cm に満たないときは、その値）以内の距離にある部分）に設ける。
手動開放装置	手で操作する部分を、壁に設ける場合は床面から 80cm 以上 1.5m 以下の高さに、天井から吊り下げる場合はおおむね 1.8m 以下の高さの位置に設ける。使用方法を表示する。
自然排煙	防煙区画部分の床面積の 1/50 以上の（直接外気に接する）開口面積を設ける。
機械排煙	120m ³ /min 以上で、かつ、防煙区画部分の床面積 1 m ² につき 1m ³ 以上（2 以上の防煙区画部分に係る排煙機にあっては、当該防煙区画部分のうち床面積の最大のものの床面積 1 m ² につき 2 m ³ 以上）の空気を排出する能力を有する排煙機を設ける。

4.5.3 排煙をおこなった場合の煙層高さ及び煙層温度

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、次式で表される。

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{I_v - (W + E)}{A_{room}} \quad (4.6)$$

ただし、W；自然排煙による排煙量[m³/sec]，E；機械排煙による排煙量[m³/sec]

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、次式で表される。

$$T_s(t) = 293 + \Delta\theta_s(t) \quad (4.7(a))$$

$$\frac{d\{\Delta\theta_s(t) \cdot (H_{room} - Z(t)) \cdot A_{room} \cdot \gamma_s(t) \cdot C_p\}}{dt} = KQ(t) - (W(t) + E(t)) \cdot C_p \cdot \Delta\theta_s(t) \cdot \gamma_s(t) \quad (4.7(b))$$

4.6 本初期火災モデルの適用範囲と問題点

室内での発熱速度は、酸素供給量が燃焼に十分なだけあるかどうかにより違いが生ずる。図-4.5 に示すように、フラッシュオーバー後の盛期火災、または、開口が小さい場合では、酸素供給量により

発熱速度が定まる換気支配型の燃焼になる。

本研究では、排煙の影響を調べるため、窓その他開口部を有しない居室での燃焼、および、機械排煙のみを行うという条件下での燃焼を解析する。本来、開口のない場合には、燃焼により酸素濃度が 18～19%以下になると燃焼性状が大きく変化するため、燃焼で室空間の酸素を 1 割消費した時点から、火源面積の拡大は時間の二乗に比例しなくなり上で述べた煙層高さ及

び煙層温度を求める計算式の適用範囲外になると考えられる。しかし、本研究の研究対象である火災初期においては、可燃物の燃焼が限られた範囲内に留まるため、可燃物の燃焼反応に十分な酸素量が確保されると考え、開口条件の発熱速度に与える影響を考慮しないこととする。

4.7 まとめ

この章では、煙流動を把握するため、室内における煙層高さ、煙層温度の計算式および排煙についての説明を行った。

最後に、解析全体のフローチャートを次項、図-4.6 に示す。

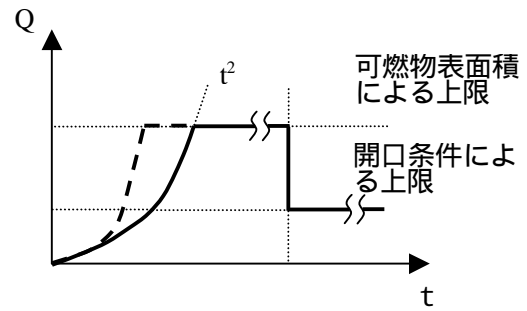


図-4.5 火源の発熱速度性状

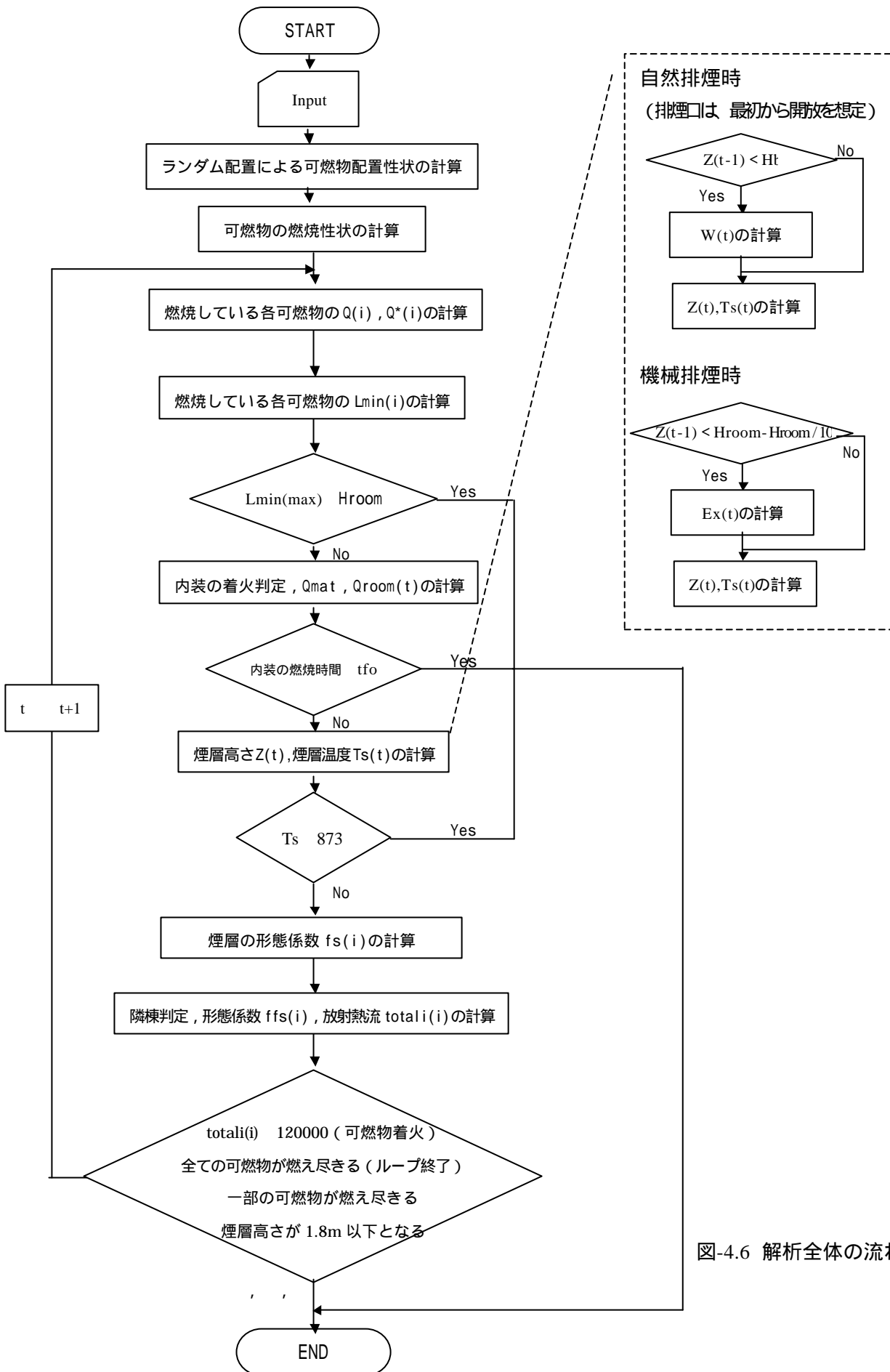


図-4.6 解析全体の流れ

5 可燃物のランダム性が煙流動に与える影響

5.1 はじめに

2章において、在館者が安全に避難するのに支障をきたす条件を設定した。本章では、可燃物特性のランダム性を考慮した火災初期の煙流動を数値計算により求め、ランダム性が、避難安全性を論じるひとつの指標として取り上げた、人が安全に逃げるのに支障をきたさないまでの時間、つまり、避難限界時間に与える影響についての検証を行った。また、避難限界時間が排煙方法によりどのような影響を受けるかについての検証も行った。

5.2 入力条件

本研究における解析では、以下の入力パラメーターを採用した。入力パラメーターのうち、仮想占有面積と室天井高さは、固定値とした。仮想占有面積に関しては、既往の研究結果から決定した(3章参照) 収納可燃物密度については、既存の調査研究により導かれた正規分布の平均値と火災安全性評価に用いることが推奨されている評価値(正規分布の非超過確率98%の値)を用いた。内装の防火性能は、Grade1とGrade3を採用した。排煙方法は、自然排煙、機械排煙とも、表-4.1に示した建築基準法における排煙設備の最低限の基準を満たすように設定した。ただし、排煙方法の差をみるために、開口幅、高さを変えて検証を行なったので、その中のいくつかは基準を満たさない。

表-5.1 入力パラメーター

パラメーター名		入力値		
特性パラメーター	仮想占有面積 A_{site} (m^2 、平均値固定)	平均 (固定) 1.0, 標準偏差 0.2		
設計デフォルト	収納可燃物密度 w (kg/m^3)	(平均、標準偏差) (30,10), (50,10), (15,5)		
設計パラメーター	室床面積 A_{room} (m^2)	100 , 144		
	室天井高さ H_{room} (m)	3		
	排煙方法	排煙なし		
		自然排煙	開口部上端高さ H_b (m)	(H_b, B) (2.4,10), (2.4,5), (2.4,15), (2.0,10), (2.0,15)
			開口幅 B (m)	
機械排煙	排煙量 out (m^3/sec)	1.0, 1.66, 2.0 , 2.8		
	内装防火性能	Grade1, Grade3		

太字；解析の標準となっているパラメーター

5.3 解析結果及び考察

本解析は、可燃物配置のパターンのサンプル数をそれぞれ100として解析を行なった。ランダムモデルでは、すべての点が出火点となりうるとし、可燃物配置パターン(100)×出火点数(各モデル毎の可燃物個数)だけの数の解析を行なった。

5.3.1 正方格子モデルとの比較

5.3.1.1 ランダム性の影響

排煙を行なわない条件で、内装防火性能、室面積、収納可燃物密度をパラメーターとしたときの、

ランダムモデルを用いて解析した避難限界時間の累積分布関数を図-5.2～5.4に示した。また、この図に、正方格子モデルの場合の避難限界時間を矢印で書き加えた。機械排煙、自然排煙を行なった場合についても、同様のパラメータを用いて解析した結果を、それぞれ図-5.5～5.7に示した。これらの図から、ランダムモデルを用いた解析結果には、予想されるように、避難限界時間にかなりのばらつきがあることが分かった。このばらつきは、空間条件、収納可燃物密度、排煙条件によって異なるが、ある範囲内に収まっており、室面積が大きくなるほど、収納可燃物密度が小さくなるほど、また、排煙を行なうほどこの範囲が広くなるという結果になった。図-5.11～5.13、5.29～5.31を比較することにより、内装を可燃にした場合、不燃の場合に比べ、火炎高さや内装に着火したことが原因の煙層温度の急激な上昇によるフラッシュオーバー(図-5.11～5.13中 赤色、青色)が着火後すぐに起こっていることから、可燃物の配置によっては着火後すぐに危険な状態となる可能性があることが分かる。図-5.3、5.4、5.6、5.7からも、室面積が大きいほど、また、収納可燃物密度が小さいほど、避難限界時間の平均値が長くなり、ばらつきも大きくなっていることが分かる。これは、室面積が大きいほど、煙降下に時間がかかり、その間の可燃物の燃え広がり性状にランダム性の影響が強くあらわれるため、また、収納可燃物密度が小さいほど、可燃物自体の総発熱量が小さくなることに加え、可燃物の重なりが少なくなるため、燃え広がりに時間がかかるためと考えられる。

また、正方格子モデルとの比較により、すべての解析結果において、ランダムモデルを用いて求めた避難限界時間の60%以上が正方格子モデルを用いて求めたものより短い、すなわち、危険であるということが分かった。特に、排煙をしない場合では80%以上が危険という結果となった。これは二つの原因が考えられる。ひとつは、ランダムモデルでは、可燃物がランダムに配置されるため、互いに重なり合う可燃物があり、可燃物の大きさが大きくなったため、結果的に、最初に着火した可燃物の発熱量が大きくなったこと。ふたつめとしては、ランダム配置のため周辺の可燃物のうち、最も近いものまでの平均距離が、正方格子の場合の可燃物間の距離より短くなったため、燃え移りが早まったことである。また、ランダム配置により室隅にできた背の高い可燃物の火炎高さによるフラッシュオーバー(図-5.11～5.28中 赤色)や壁際に配置された可燃物が壁の内装に着火し急激に煙層温度が上昇したことが原因のフラッシュオーバー(図-5.11～5.28中 青色)が、着火後すぐにおきていることも正方格子モデルには見られないランダムモデルの特徴である。

5.3.1.2 排煙による影響

図-5.8は、排煙の方法をパラメータとして、図-5.9は、機械排煙における排煙量の差をパラメータとして、図-5.10は、自然排煙における開口条件をパラメータとして、ランダムモデルを用いて解析した避難限界時間の累積分布関数である。図に、正方格子モデルの場合の避難限界時間を矢印で示した。図-5.8での排煙条件は、建築基準法において要求されている基準の最低限のものである。図から、自然排煙に比べ、機械排煙の方が、ばらつきが大きくなっていることが分かる。これは、排煙の条件のふたつの違いが原因と思われる。ひとつは、排煙が始まる条件であり、機械排煙では煙層高さが2.7mの時点から排煙が始まるが、自然排煙では2.4mの時点からである。ふたつめは、排煙量の違いであり、機械排煙は、常に一定の量が排煙されるが、自然排煙は、煙層高さが低くなるほど排煙量が多くなる。この二つの違いにより、ばらつきに差がでたものと思われる。また、図-5.9から、排煙量が、 $1.66(\text{m}^3/\text{sec})$ と $2.0(\text{m}^3/\text{sec})$ のときでは、避難限界時間にほとんど差がみられないことが分かる。したがって、 $1.66(\text{m}^3/\text{sec})$ の排煙量が、避難限界時間が長くなる定常状態と見られ、これ以上排煙量を大きくしても、避難限界時間に与える影響は少ないといえる。また、自然排煙に関しても、図-5.10から、建築基準法で定められた基準の最低限を満たすもの(HB 2.4m, B 10m)以上、開口面積を増やしても避難限界時間がほとんど長くないことが分かる。図-5.19から、建築基準法で定められた基

準以上の自然排煙を行なうと、煙が 1.8m の高さまで降下する前に可燃物の燃焼による火炎高さが天井高さまで高くなるため、フラッシュオーバーが起これ、避難限界時間に至るためであると分かる。これは、室面積、収納可燃物密度によらず、一定した傾向である。したがって、自然排煙においては、Hb 2.4m, B 10m の条件のときが、避難限界時間が長くなる定常状態と見られる。さらに、開口条件として、開口幅、開口部上端高さをパラメーターとして検証を行なった、その結果、開口部の上端を低くした場合、開口幅を狭くした場合とも、避難限界時間が短くなり、避難限界時間に至る原因は、煙層の降下によるものであることが分かった。対して、開口部の上端が高い場合、避難限界時間は長くなり、開口幅を広くするに従い、火炎高さによるフラッシュオーバーや内装によるフラッシュオーバーが避難限界時間に至る原因となる割合が増すことが分かった。また、開口部上端高さを低くした場合、開口幅を狭くした場合よりも、避難限界時間への影響が大きいことがわかった。

表-5.2 に、正方格子モデルを用いて求めた避難限界時間とこれに対するランダムモデルでの超過累積値を示す。ランダムモデルでの超過累積値とは、ランダムモデルで解析した避難限界時間のうち、正方格子モデルで解析したものより危険となった割合を示している。なお、正方格子モデルでの避難限界時間に至る原因は、すべて、煙降下によるものであった。表-5.2 から、正方格子モデルにおいても、ランダムモデルを用いた解析結果から、上で指摘した点と同様な傾向があることが分かる。すなわち、自然排煙、機械排煙とも、ある一定の排煙条件が、境界条件となっており、それ以上排煙を行なっても、避難限界時間は長くないことが分かった。

表-5.2 正方格子モデルでの避難限界時間

内装防火性能等級	床面積 (m ²)	収納可燃物密度(kg/m ²)	排煙の有無、方法	正方格子モデル(sec)	ランダムモデルでの超過累積値(%)	
Grade3	100	15	排煙なし	540	84.12	
			機械排煙(2.0m ³ /sec)	2090	80.61	
			自然排煙(Hb 2.4m, B 10m)	1900	73.82	
		30	30	排煙なし	440	92.37
				機械排煙(2.0m ³ /sec)	1160	73.97
				自然排煙(Hb 2.4m, B 10m)	1100	72.68
			50	機械排煙(1.0m ³ /sec)*	1070	75.54
				機械排煙(1.66m ³ /sec)*	1130	69.60
				自然排煙(Hb 2.0m, B 10m)*	890	75.07
	自然排煙(Hb 2.0m, B 15m)*			930	70.62	
	144	自然排煙(Hb 2.4m, B 5m)*	1030	85.78		
		自然排煙(Hb 2.4m, B 15m)	1140	71.22		
		自然排煙(Hb 2.4m, B 10m)	780	73.89		
	Grade1	100	30	排煙なし	440	94.55
				機械排煙(2.0m ³ /sec)	1160	65.31
自然排煙(Hb 2.4m, B 10m)				1100	60.53	

排煙の有無、方法の右上に、*がつくものは、現在の建築基準法の条件をみたしていないことを表す。

5.3.2 避難安全検証法との比較

避難安全検証法での居室避難終了時間及び煙等降下時間と本研究の避難限界時間の算定方法では、煙流動を求めるための入力異なる。しかし、新しく性能規定化された安全基準の妥当性を考えるため、ランダム性を取り入れたモデルとの比較を行なうこととする。なお、おおまかな相違点についてのまとめを行なっておく。

- ・ 可燃物の配置

避難安全検証法では、1m×1mの正方格子の中央にポワソン分布に従った様々な重さの立方体が、配置されていると考え。それを、均等大きさに変換する。したがって、密度、重さが異なる、同じ大きさの可燃物が均等に配置されることとなる。ランダムモデルでは、重さ、大きさが異なる可燃物がランダムに配置される。

- ・ 単位床面積あたりの発熱量

避難安全検証法では、室用途ごとに収納可燃物の単位床面積あたりの発熱量を一意に定めており、事務室を用途とした場合の発熱量は、560(MJ/m²)である。対して、本研究において用いた収納可燃物密度が15(kg/m²)、30(kg/m²)、50(kg/m²)は、それぞれ、240(MJ/m²)、480(MJ/m²)、800(MJ/m²)にあたる。なお、表-5.3の比較では30(kg/m²)を用いた。

- ・ 火災の成長率

本研究においては、火災成長率は、0.0125として解析を行なっているが、避難安全検証法では、火災成長率を単位床面積あたりの発熱量の違いに応じて求めている。なお、単位床面積あたりの発熱量が560(MJ/m²)の場合、0.0989となる。

なお、居室の避難終了時間は、本研究で用いなかったパラメーター、空間条件(扉の位置、幅)、廊下の広さなどに影響を受けるものである。表-5.3に示した居室の避難終了時間は、扉が、室の一端の両端に100m²では0.8m幅のものが、200m²では1.0m幅のものがあるとし、かつ、廊下は、滞留が起こらないほど十分な広さがあるとして計算を行なった。また、自然排煙時には、十分な大きさの給気口があったとした。

表-5.3から、避難安全検証法を用いた計算結果では、排煙を行なっても、内装に可燃材料を使った場合、居室の避難終了時間が煙等降下時間より長くなり危険と判定される。しかし、ランダムモデルを用いて解析した結果、内装材として可燃材料を用いた場合でも、室隅に可燃物を置かず、背の高い可燃物がなければ安全であるといえることがわかった(図5.11,5.14,5.17,5.20,5.23,5.26を参照)。一方、表5.3から、内装に不燃材料を使ったとき、避難安全検証法での煙等降下時間は、ランダムモデルを用いて解析した避難限界時間の99%以上より短い、つまり、危険という結果になった。すなわち、安全側に判断される。したがって、内装に不燃材料を使ったとき、避難安全検証法で安全と評価された場合、室内の可燃物のランダム性に関係なく避難安全性能が確保されることが分かる。

ランダムモデルとの比較により、避難安全検証法は、十分に安全を見込んでいえる。そのため、避難安全検証法で、危険と判断された場合でも、可燃物の配置により、避難安全性能が確保されているものも多いことが分かった。

表-5.3 避難安全検証での計算結果

内装材料	床面積 (m ²)	排煙の有無、方法	居室の避難 終了時間(sec)	煙等降下時間 (sec)	ランダムモデルでの超過累 積値(%)
可燃材料	100	排煙なし	41.96	25.28	3.94
		機械排煙(2.0m ³ /sec)		25.80	4.29
		自然排煙(Hb 2.4m,B 10m)		26.95	4.11
		自然排煙(Hb 2.4m,B 15m)		27.87	4.08
	144	排煙なし	49.85	32.24	8.16
		機械排煙(2.8m ³ /sec)		32.97	7.87
自然排煙(Hb 2.4m,B 15m)		35.13		7.76	
不燃材料	100	排煙なし	37.54	41.37	0.01
		機械排煙(2.0m ³ /sec)		42.77	0.03
		自然排煙(Hb 2.4m,B 10m)		46.05	0.03

5.4 まとめ

本章では、可燃物のランダム性を考慮した解析を行い、避難限界時間を指標として、避難安全性能の検証、考察を行った。

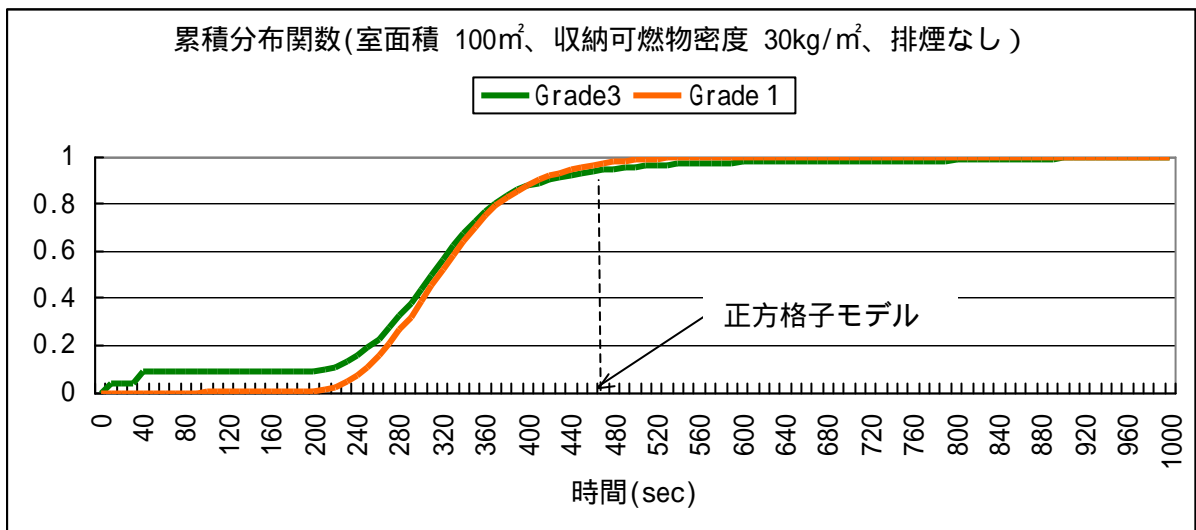


図-5.2 内装防火性能が避難限界時間に与える影響 (排煙なし)

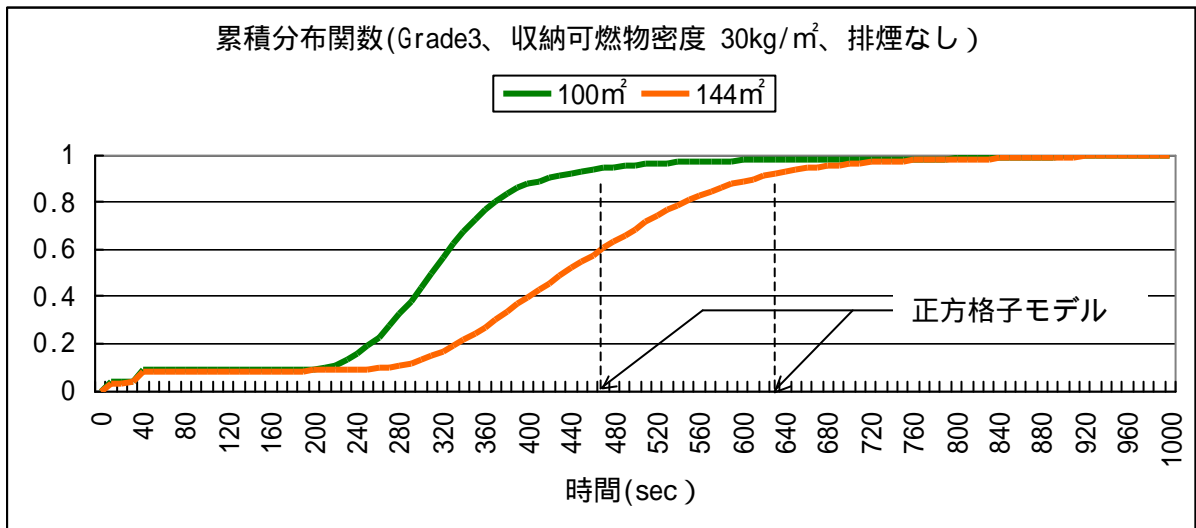


図-5.3 室面積が避難限界時間に与える影響 (排煙なし)

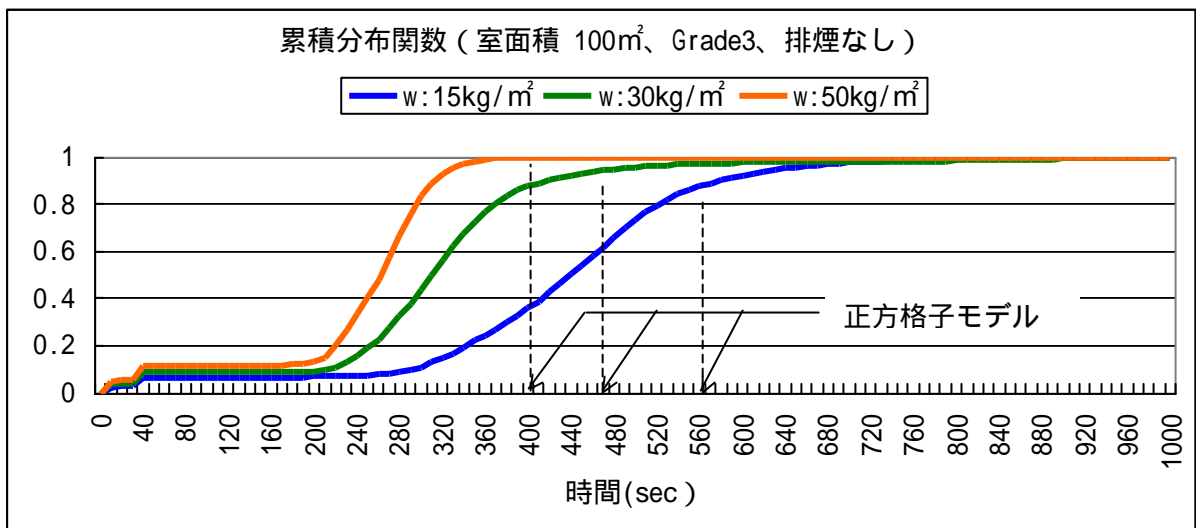


図-5.4 収納可燃物密度が避難限界時間に与える影響 (排煙なし)

図-5.2~5.4の横軸は、1,000秒までとした。

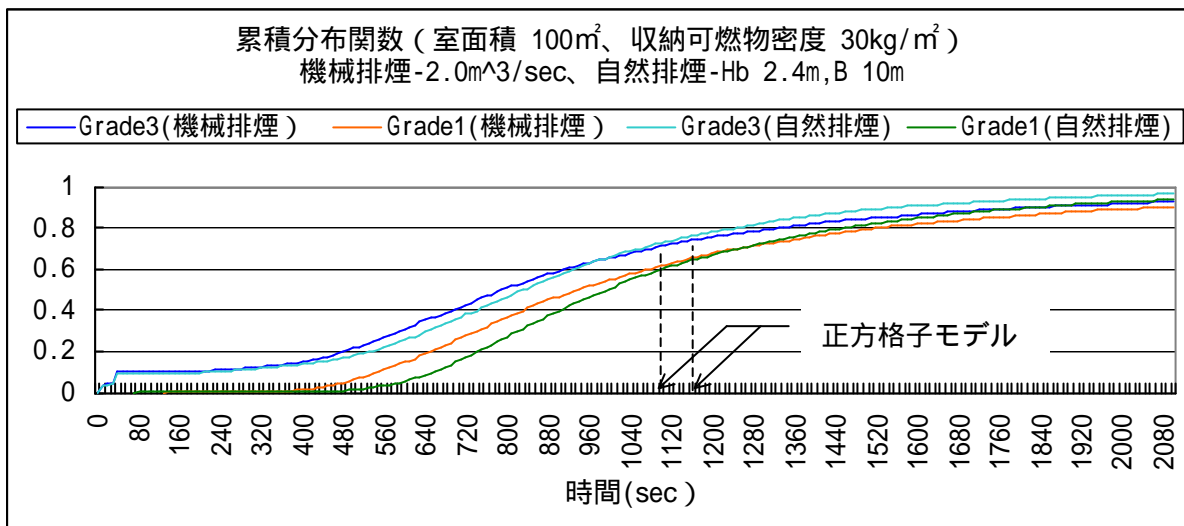


図-5.5 内装防火性能が避難限界時間に与える影響 (排煙あり)

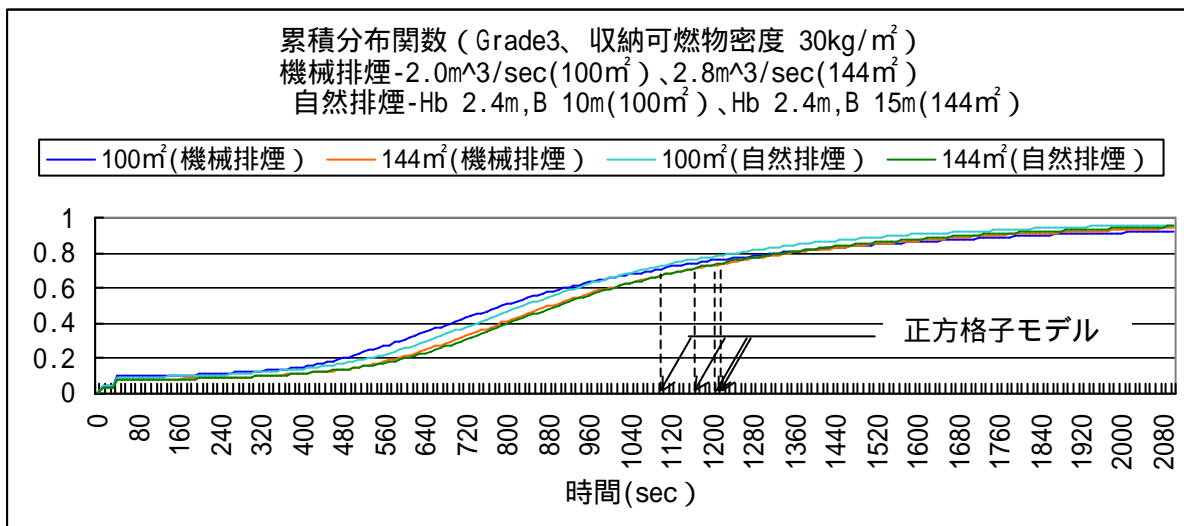


図-5.6 室面積が避難限界時間に与える影響 (排煙あり)

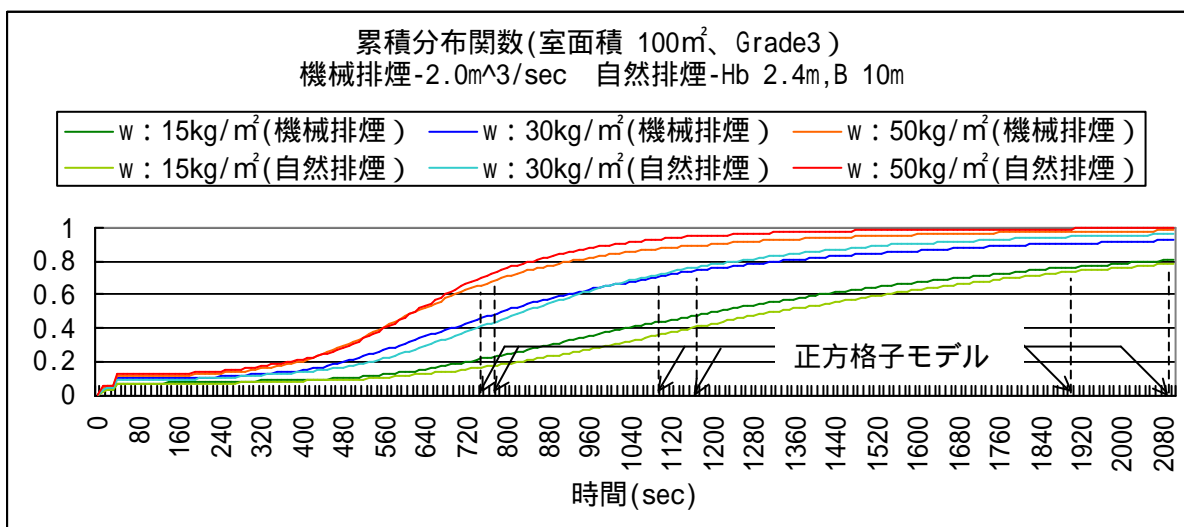


図-5.7 収納可燃物密度が避難限界時間に与える影響 (排煙あり)

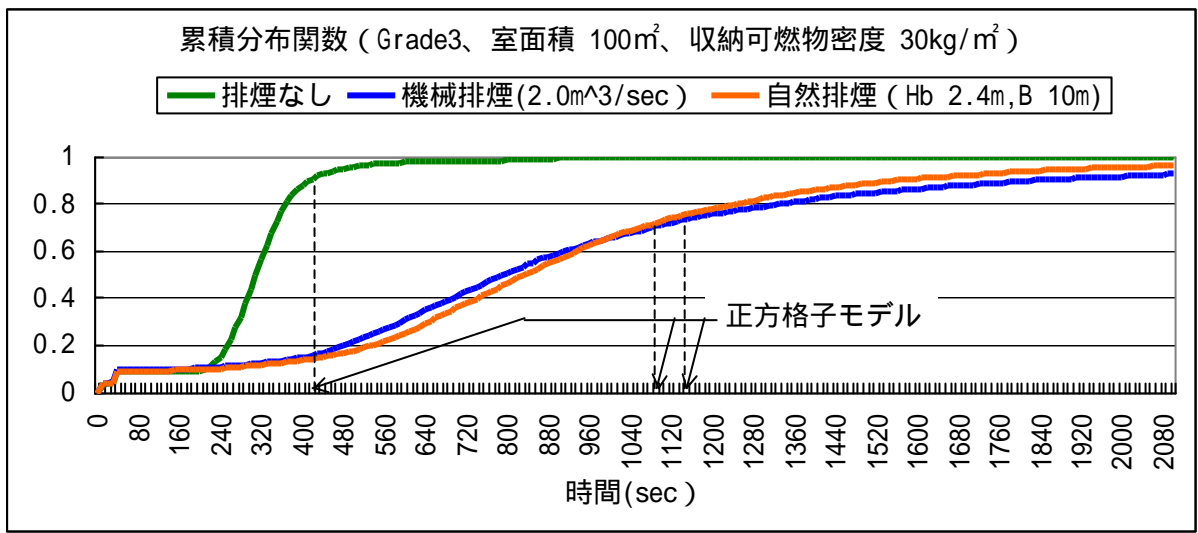


図-5.8 排煙方法の違いが避難限界時間に与える影響

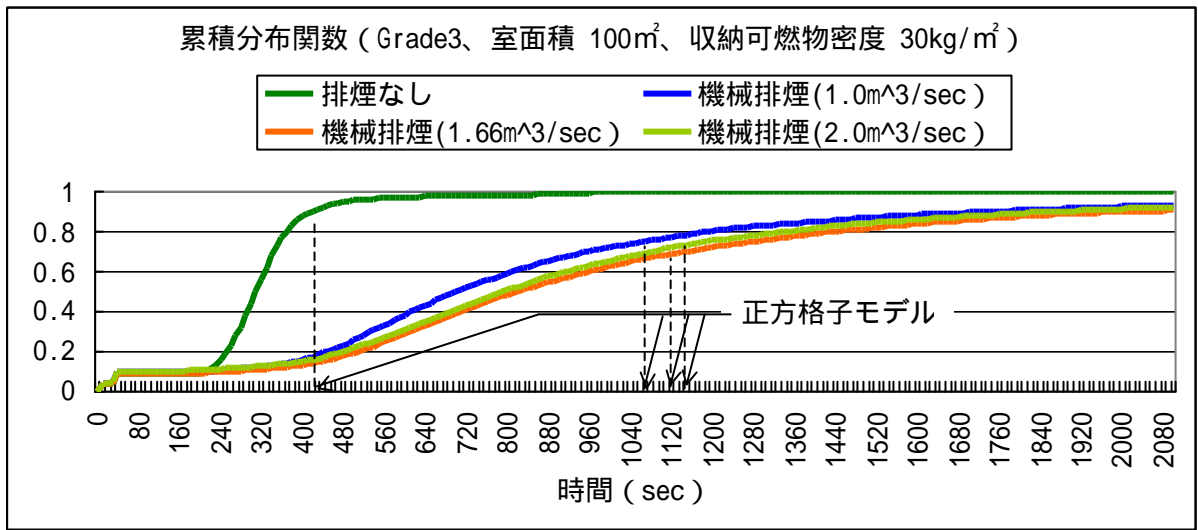


図-5.9 機械排煙による排煙量が避難限界時間に与える影響

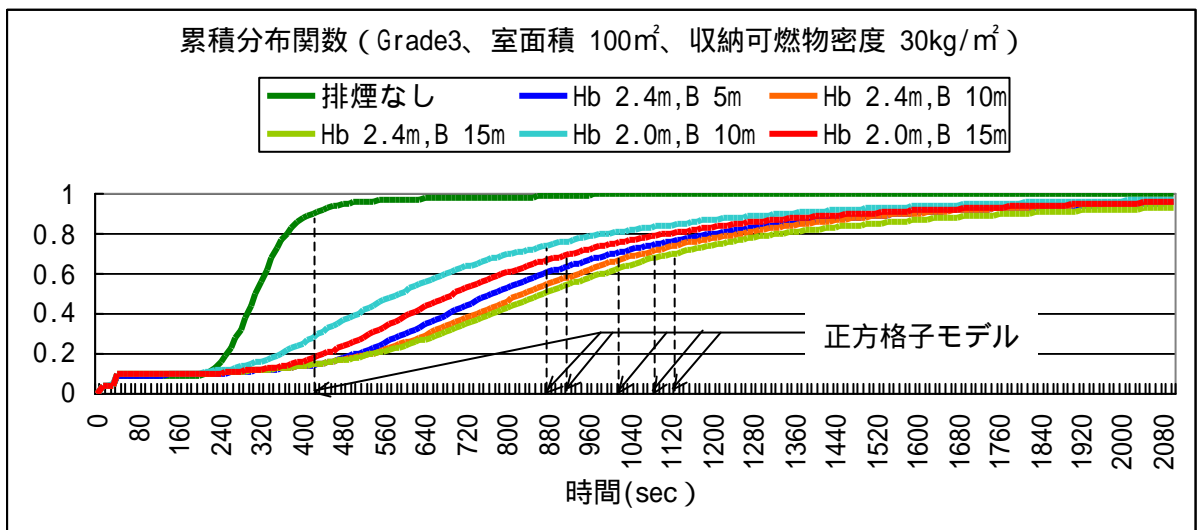


図-5.10 自然排煙時の開口条件が避難限界時間に与える影響

Grade3、室面積 100 m²、w : 30kg/m²

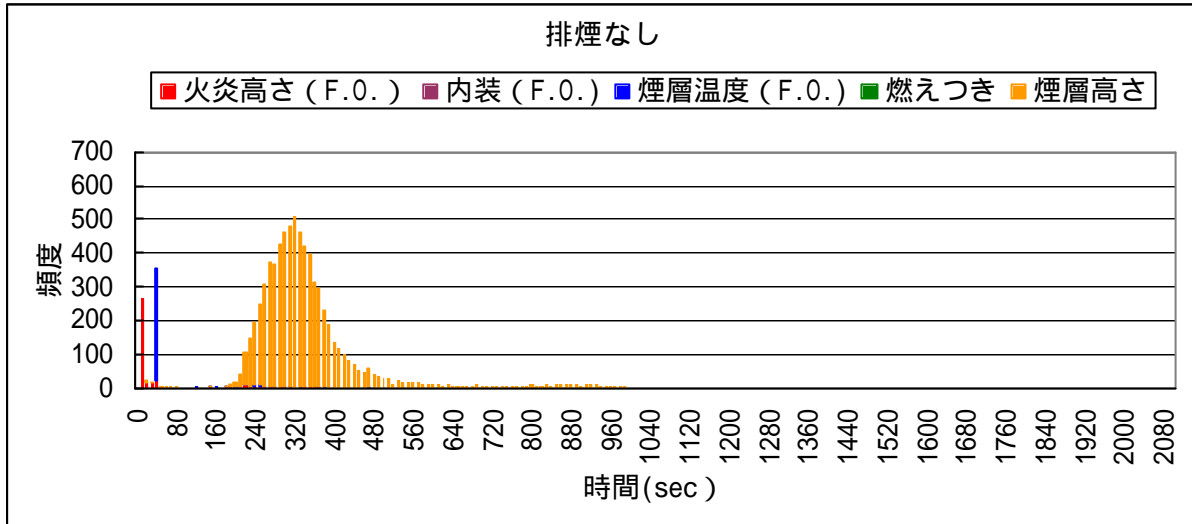


図-5.11 排煙が避難限界時間に与える影響 (標準)

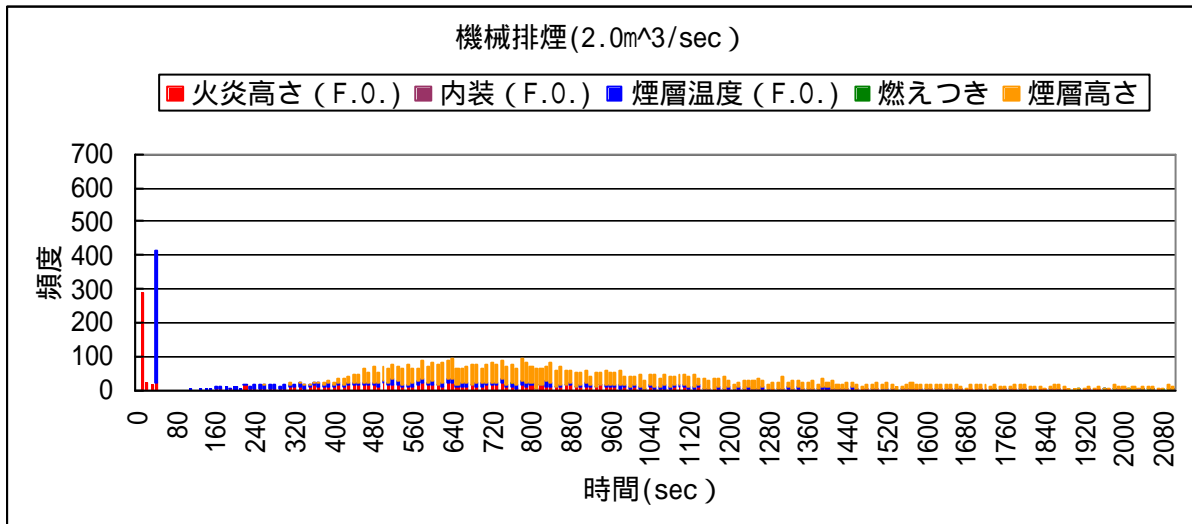


図-5.12 排煙が避難限界時間に与える影響 (標準)

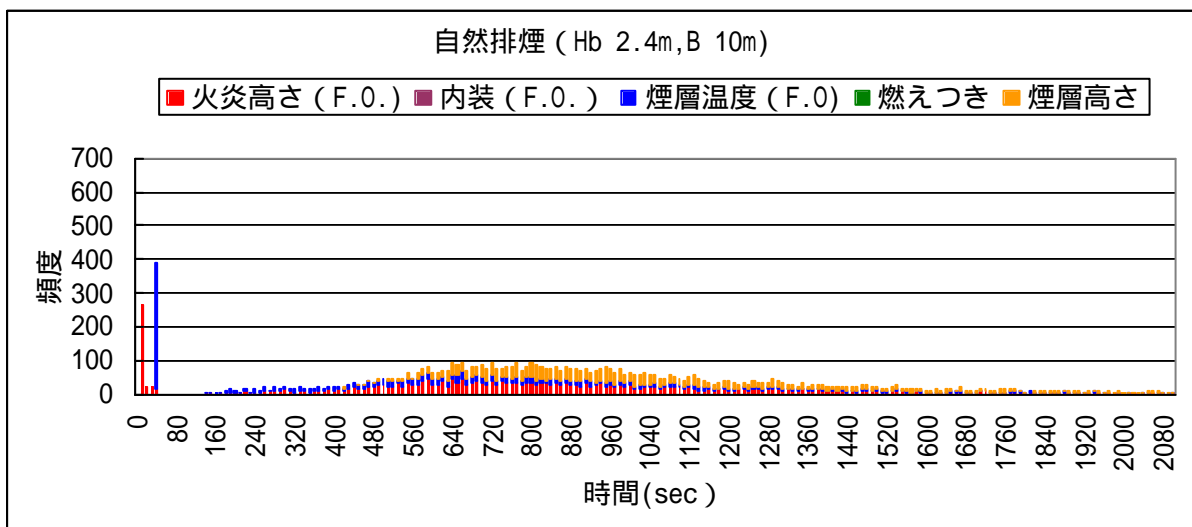


図-5.13 排煙が避難限界時間に与える影響 (標準)

Grade3、室面積 100 m²、w : 30kg/m²

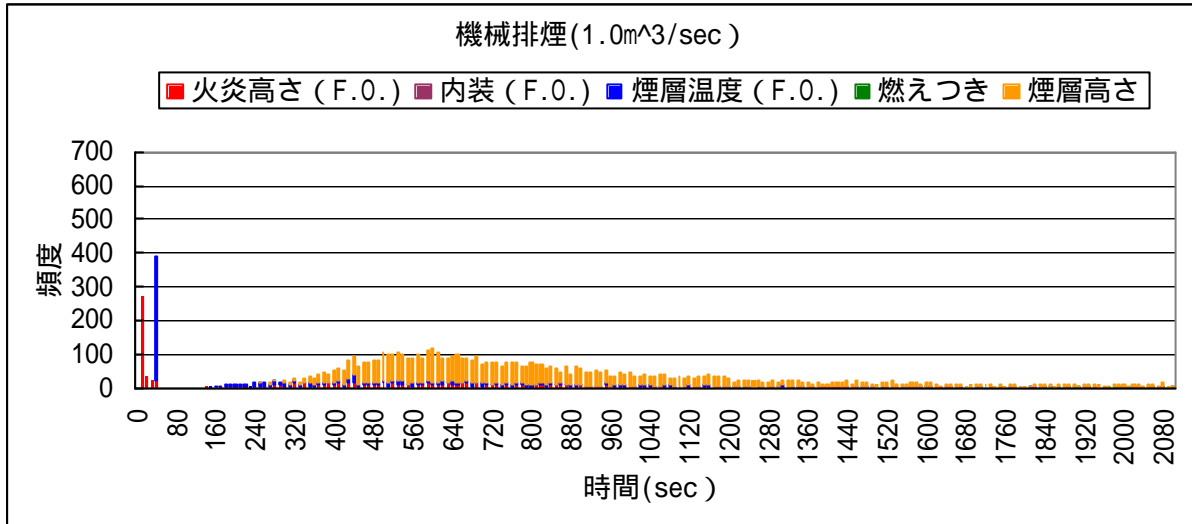


図-5.14 排煙が避難限界時間に与える影響 (排煙方法)

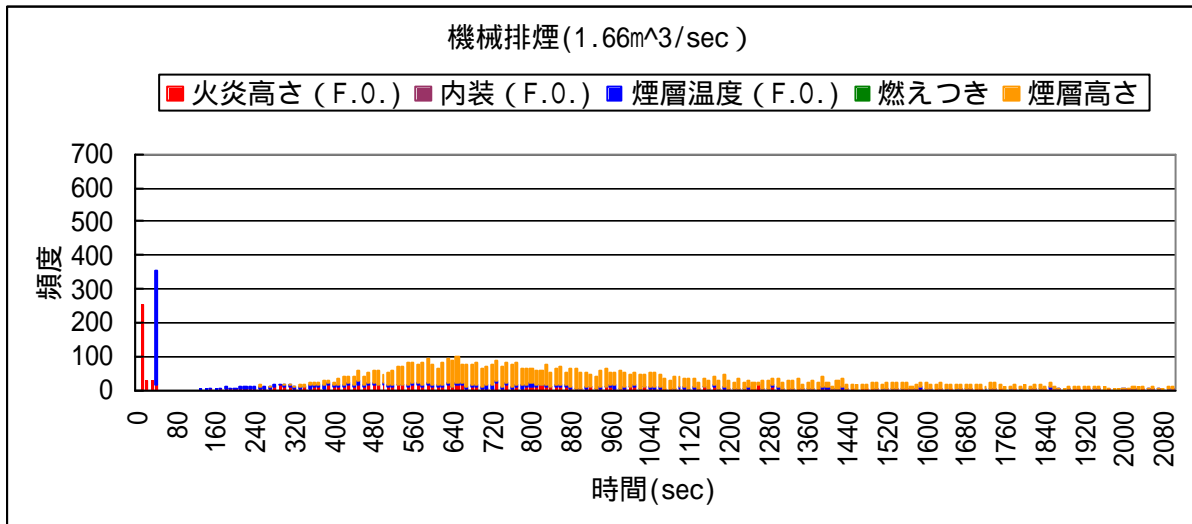


図-5.15 排煙が避難限界時間に与える影響 (排煙方法)

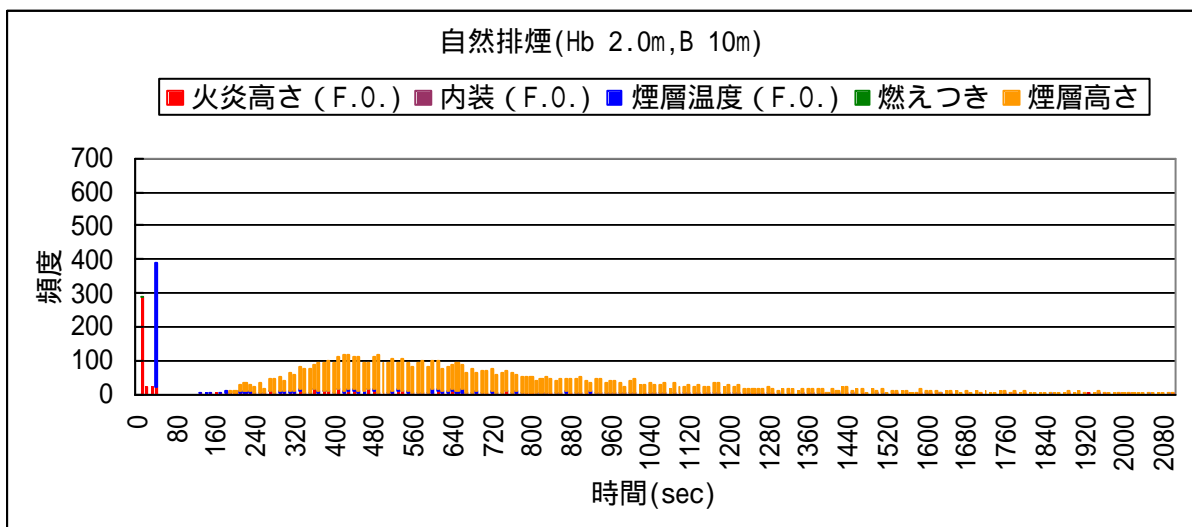


図-5.16 排煙が避難限界時間に与える影響 (排煙方法)

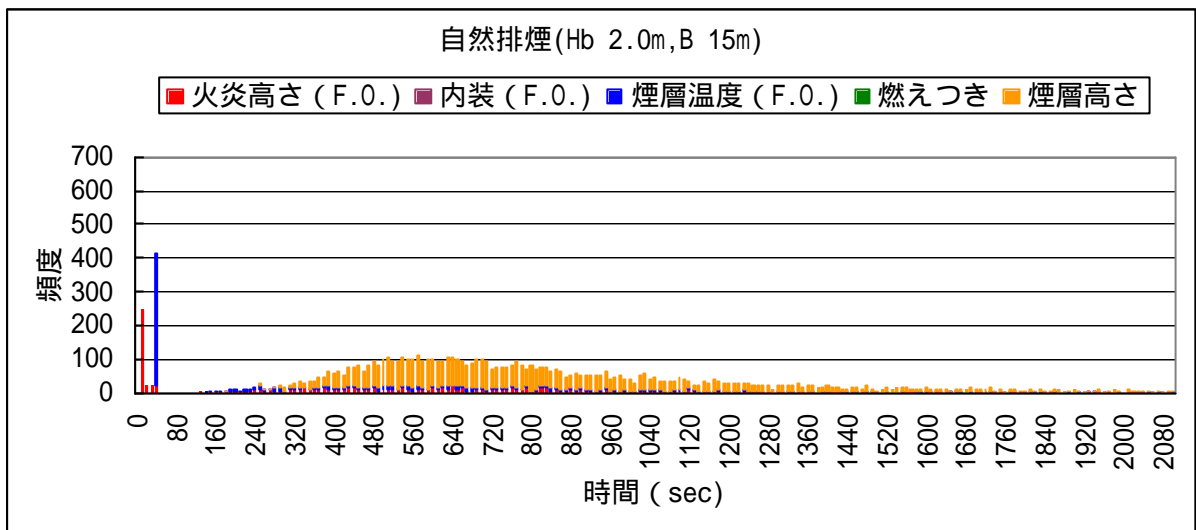


図-5.17 排煙が避難限界時間に与える影響 (排煙方法)

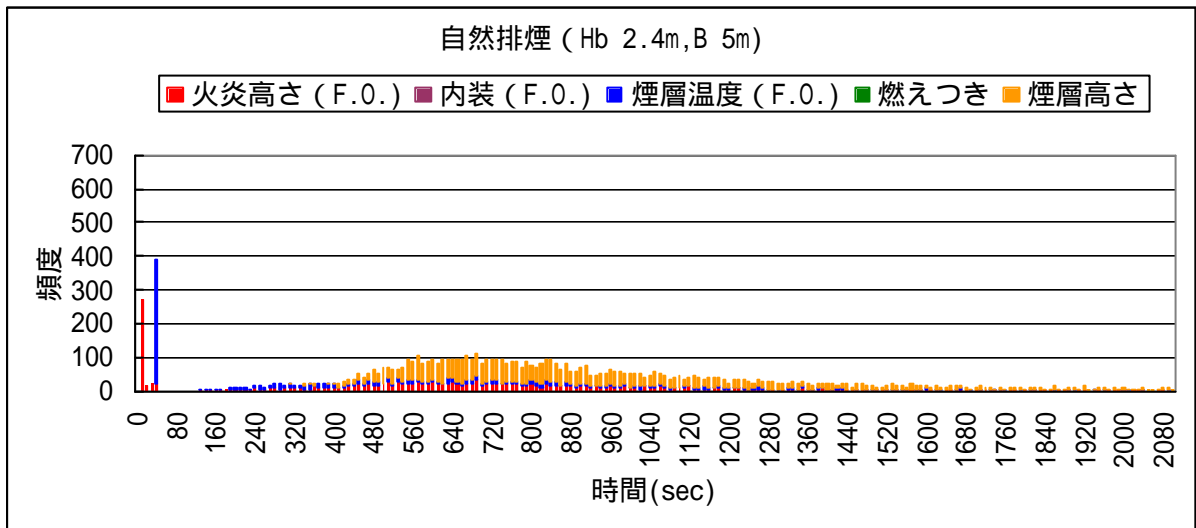


図-5.18 排煙が避難限界時間に与える影響 (排煙方法)

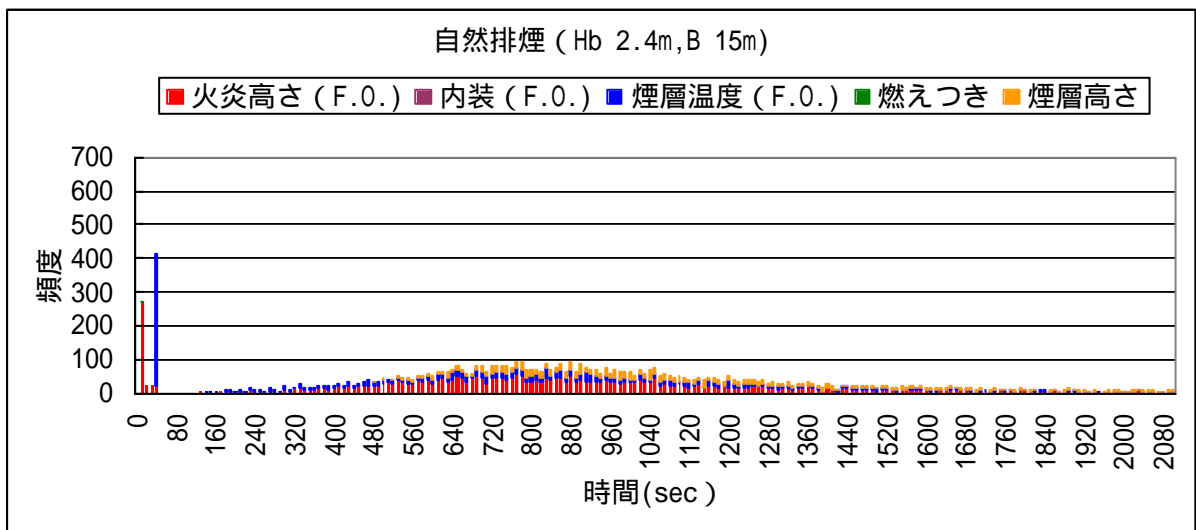


図-5.19 排煙が避難限界時間に与える影響 (排煙方法)

Grade3、室面積 100 m²、w : 15kg/m²

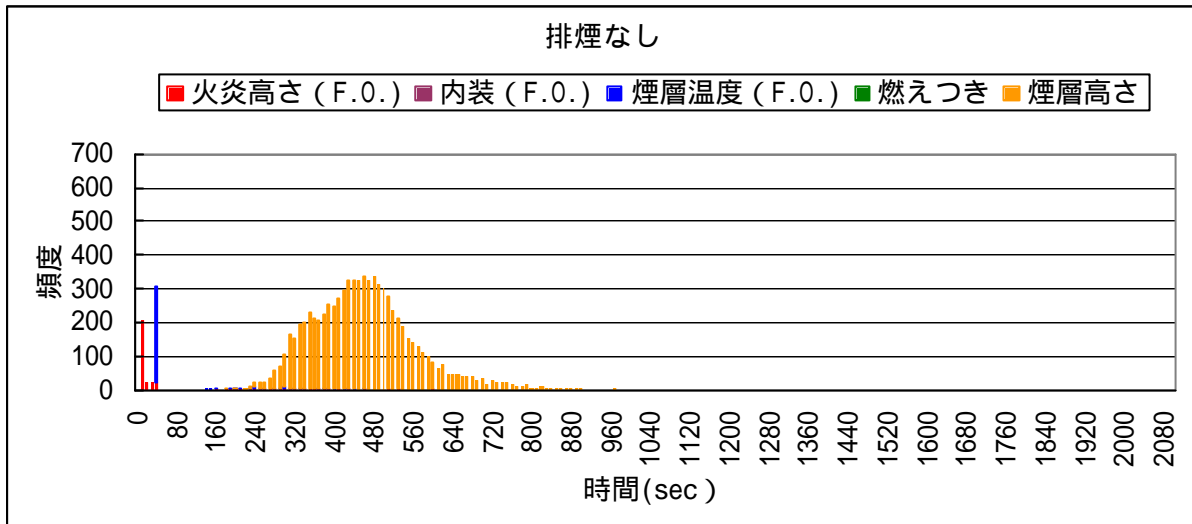


図-5.20 排煙が避難限界時間に与える影響 (w:15)

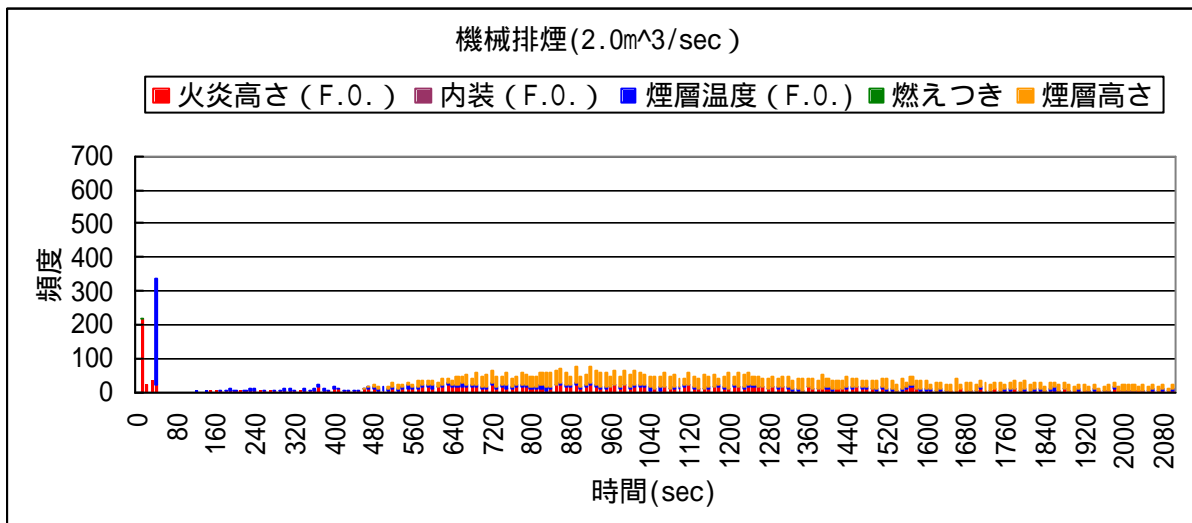


図-5.21 排煙が避難限界時間に与える影響 (w:15)

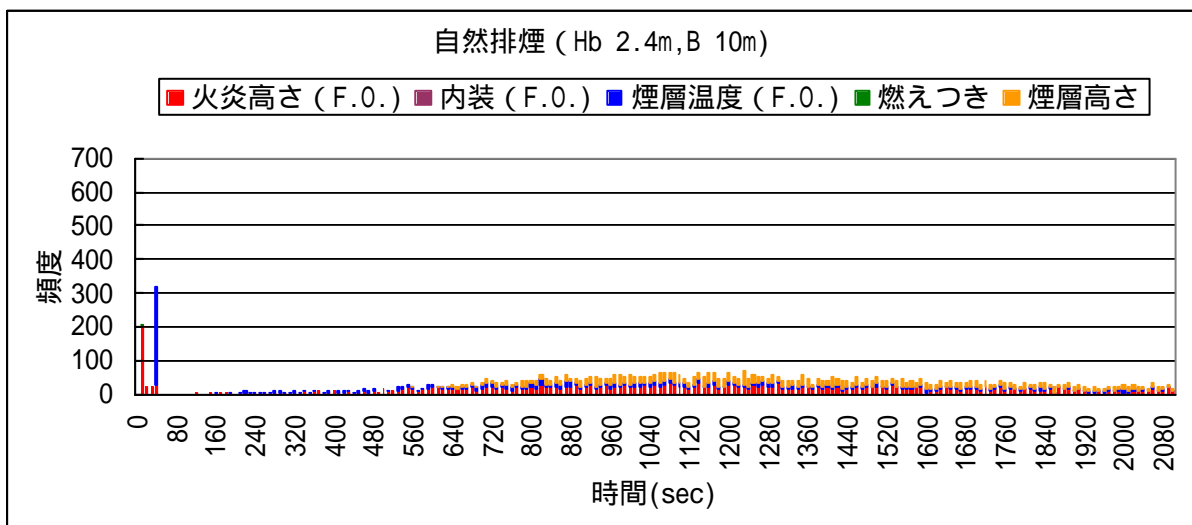


図-5.22 排煙が避難限界時間に与える影響 (w:15)

Grade3、室面積 100 m²、w : 50kg/m²

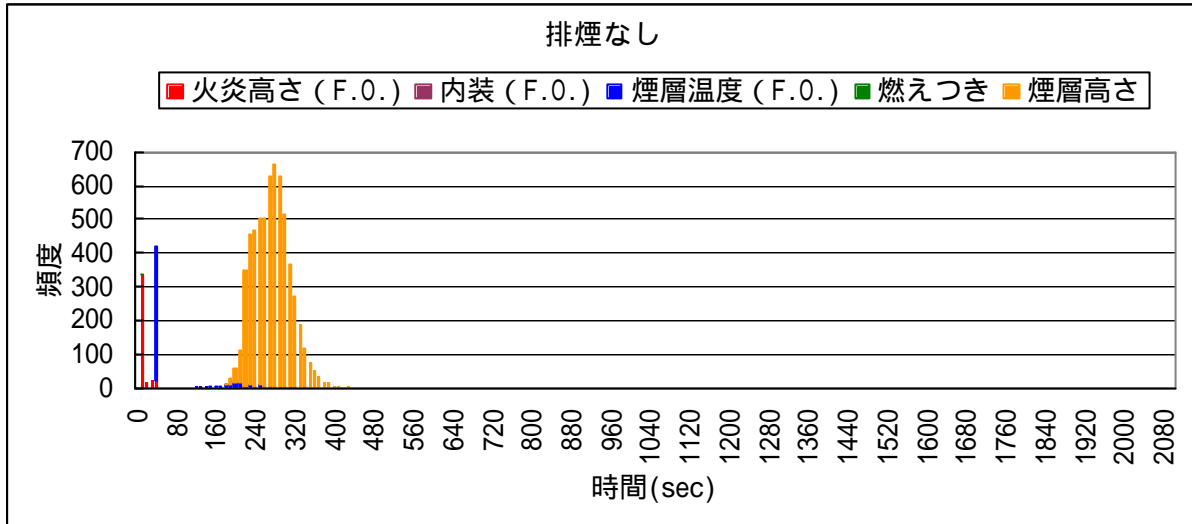


図-5.23 排煙が避難限界時間に与える影響 (w:50)

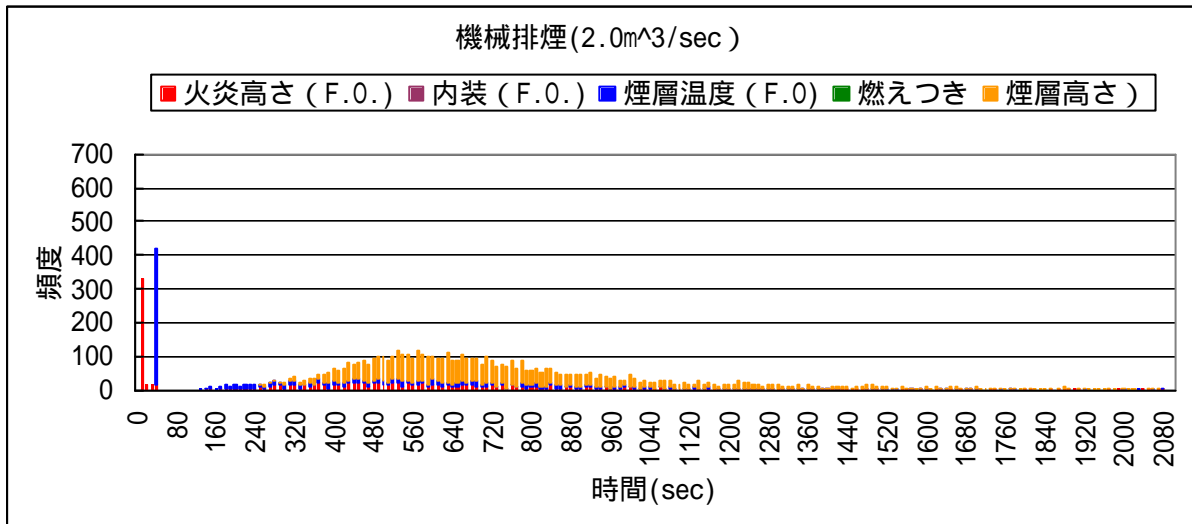


図-5.24 排煙が避難限界時間に与える影響 (w:50)

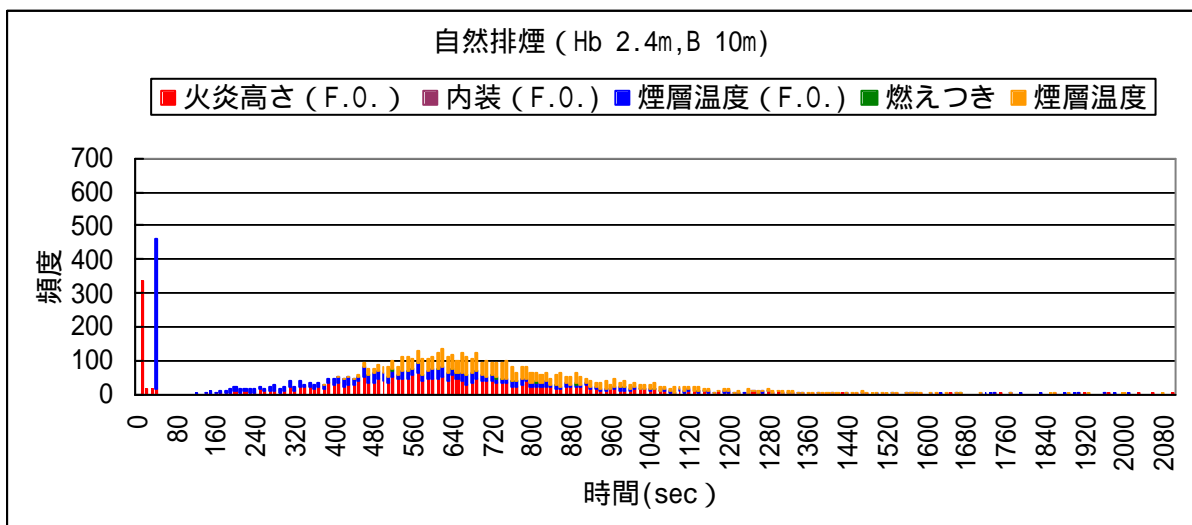


図-5.25 排煙が避難限界時間に与える影響 (w:50)

Grade3、室面積 144 m²、w : 30kg/m²

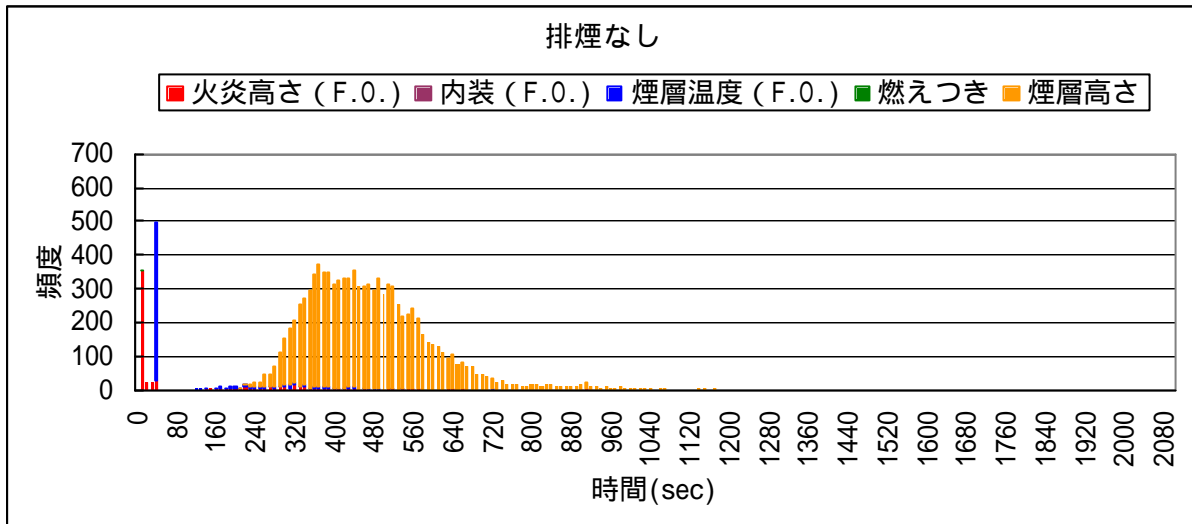


図-5.26 排煙が避難限界時間に与える影響 (144 m²)

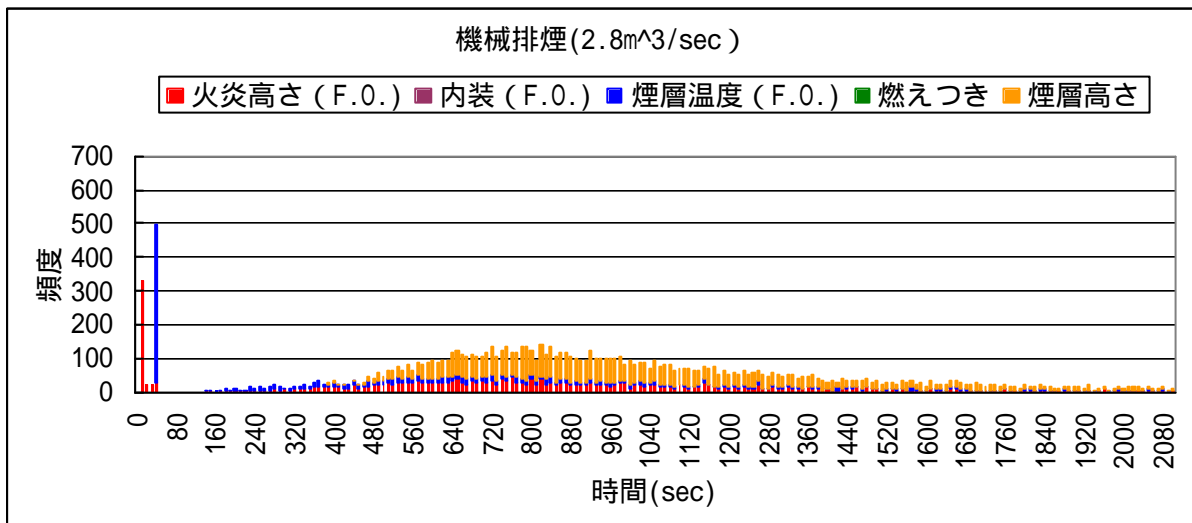


図-5.27 排煙が避難限界時間に与える影響 (144 m²)

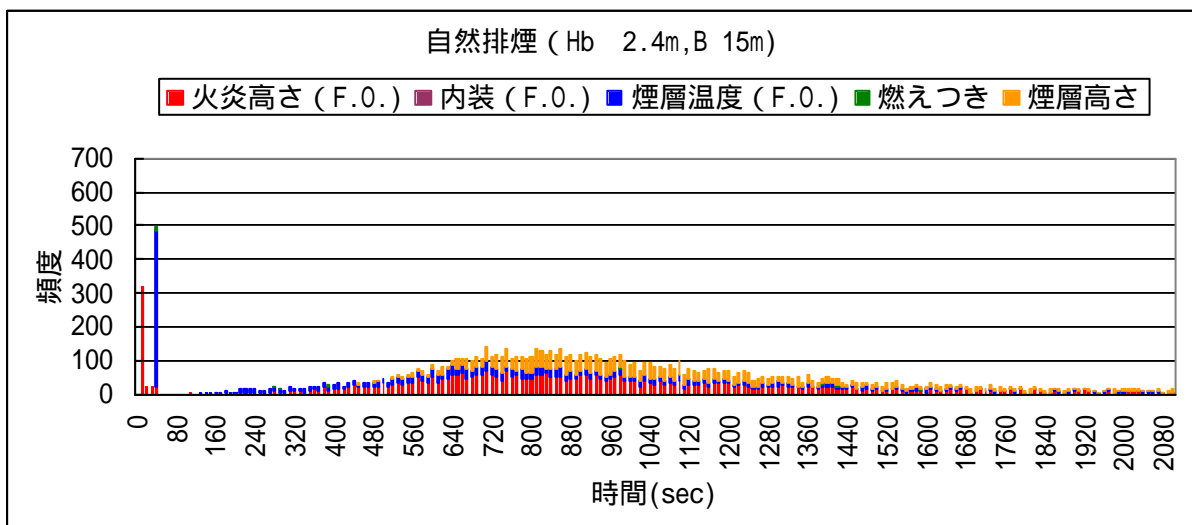


図-5.28 排煙が避難限界時間に与える影響 (144 m²)

Grade1、室面積 100 m²、w : 30kg/m²

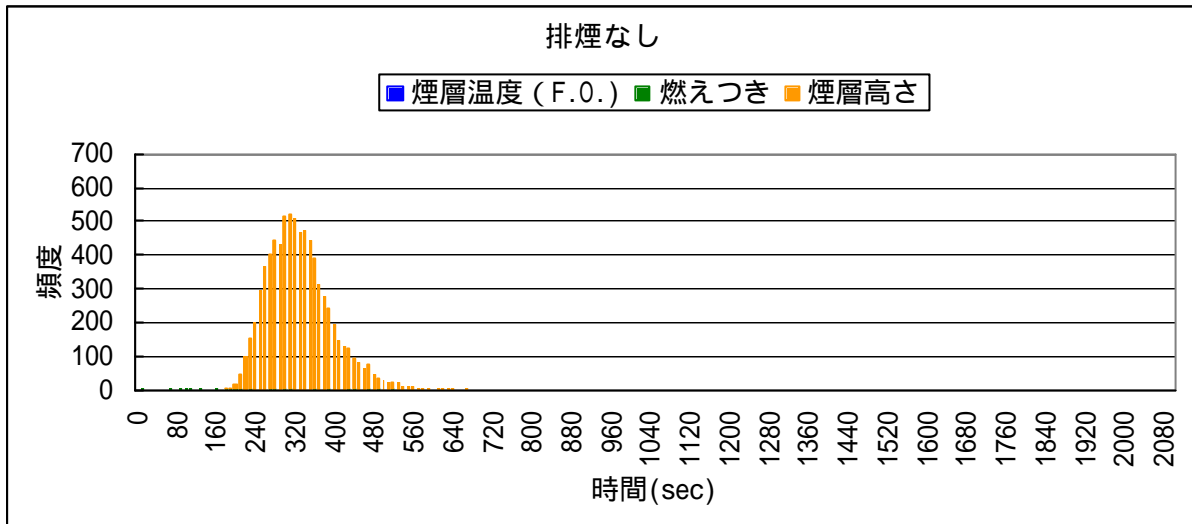


図-5.29 排煙が避難限界時間に与える影響 (Grade1)

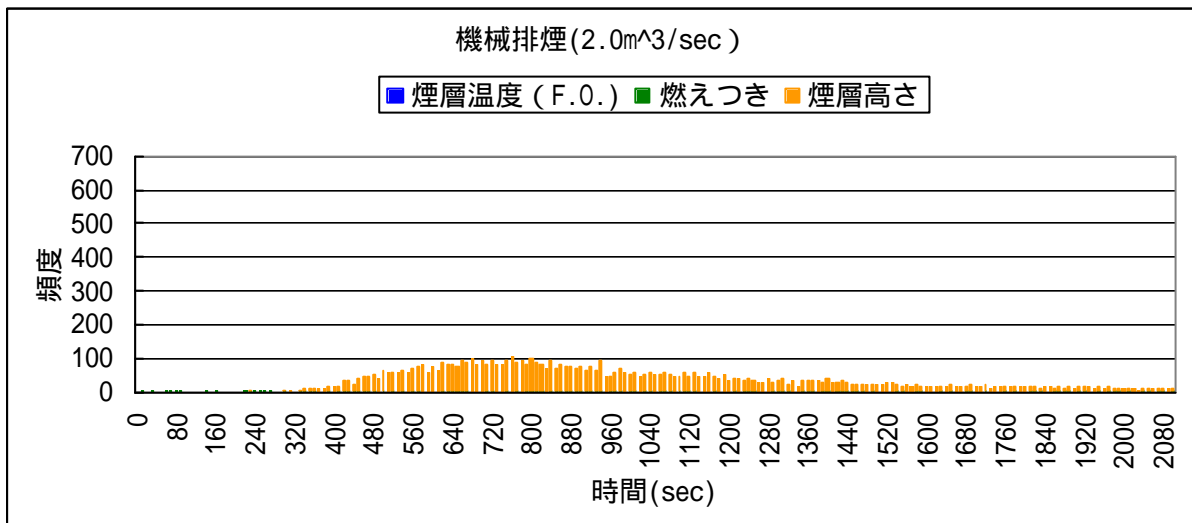


図-5.30 排煙が避難限界時間に与える影響 (Grade1)

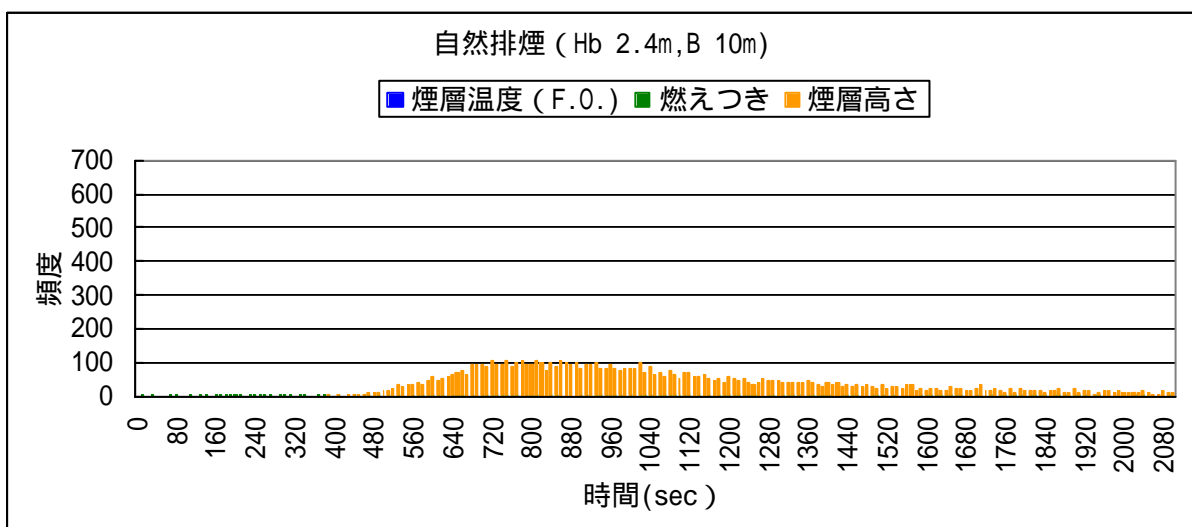


図-5.31 排煙が避難限界時間に与える影響 (Grade1)

6 結論

本研究では、松本(2001)が、収納可燃物特性のランダム性が火災初期の発熱性状に強い変動を与えることを指摘したことをうけ、避難安全性能への影響を調べるため、松本と同じ収納可燃物のランダム性のもとでランダム性が避難安全を左右する煙流動にどのように影響するかを検証した。以下に、本研究でわかったことをまとめる。

- 1) 可燃物のランダム性を考慮することにより、避難限界時間にばらつきが生じることが分かった。このばらつきは、内装防火性能、空間条件、収納可燃物密度により変化し、室面積が大きいほど、収納可燃物密度が小さくなるほど、排煙を行うほど範囲が広がる。
- 2) ランダムモデルでは、可燃物着火後すぐに、火災高さが天井高さよりも高くなるためのフラッシュオーバーや内装に着火したために煙層温度が急激に上昇したことによるフラッシュオーバーが起きる構造となっている。
- 3) 自然排煙、機械排煙とも、ある一定の排煙条件以上の排煙を行っても、避難限界時間は長くない。
- 4) 避難安全検証法は、十分に安全を見込んでおり、避難安全検証法で、危険と判断された場合でも、可燃物の配置により、避難安全性能が確保されているものも多い。

本研究で使用したランダムモデルは、可燃物を室内にランダムに配置したものであり、実際の可燃物配置に即しているとは言い難い。しかし、避難安全検証法において火災性状を解析する際に、より詳細な入力条件を入れることとなったこともあり、新たな入力として可燃物特性を考え、避難安全性能を検証した。今後、可燃物配置をより現実に即したものとし、さらに入力値を増やして解析を行なうことにより、ある室間条件や収納可燃物密度などが与えられた場合に、どのような排煙が効率的かを導くことができれば、実設計に対して、何らかの提案ができるのではないかと考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、名古屋大学 辻本 誠教授には、大変お世話になりました。この論文をまとめることができましたのは、なかなか作業が進まない私を暖かく見守って頂いた先生のご指導、ご鞭撻の賜物であり、ここに厚く御礼申し上げます。

河野 守氏（独立行政法人建築研究所 防火研究グループ）には、解析を行なう上で、多大なるサポートを頂きました。心からの感謝を申し上げます。

松本圭介氏（現 三重県庁）には、お忙しい中、こちらからの様々な質問に対して、回答および助言等をいただきました。松本氏の迅速かつ適切な回答は、研究を進める上で非常に役立ちました。ここに、お詫びの意も込めて深く感謝の意を表します。

最後になりましたが、辻本研究室の皆様には様々な面でお世話になりました。皆様のご協力がなければ、この論文はなかったと思われます。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 松本圭介 (2001): 可燃物のランダム配置を考慮した火災時発熱解析, 名古屋大学修士論文
- 辻本誠 (1975): 火災時の建物内煙流動に関する研究, 東京大学修士論文
- 高橋済 (2000): 建築の火災安全性能評価のための火源設定に関する研究, 名古屋大学博士論文
- 田中孝義 (1993): 建築火災安全工学入門, 財団法人日本建築センター
- 長谷見雄二・藪田孝敏・林吉彦・若松孝旺 (1999): 火災伝播モデルに基づく室内装火災性状の質的分類 (その1) 燃焼発熱性試験結果を用いた火災伝播特性の質的分類モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.239 ~ pp.240.
- 長谷見雄二・藪田孝敏・林吉彦・吉田正志・若松孝旺・時田岳大 (1999): 火災伝播モデルに基づく室内装火災性状の質的分類 (その2) コーンカロリー計によるルームコーナー試験におけるフラッシュオーバー発生時間の簡易予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.213 ~ pp.216.
- 建設省総合技術開発プロジェクト「防・耐火性能評価技術の開発」,平成9年度報告書 (1998), No.9-2 火災安全設計分科会, 建設省建築研究所, 財団法人建築センター
- 油野健志・他 (1996): 実態調査に基づ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, 第483号, pp.1~8.
- 原田和典・辻本誠・高橋済・若松高志 (1999): 建築の火災安全性評価のための設計火源の想定と同定, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, pp.121~124.
- 2001年度版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説 (2001), 国土交通省住宅局建築指導課, 国土交通省建築研究所, 日本建築主事会議, 財団法人日本建築センター
- 2001年度版 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説 (2001), 国土交通省住宅局建築指導課, 国土交通省建築研究所, 日本建築主事会議, 財団法人日本建築センター
- Thomas,P.H., Hinkley,P.L., Theoblad,C.R.and Simms,D.L.(1963) : Investigations into the Flow of Hot Gases in Roof Venting, Fire Research Technical Paper, No.7, HMSO
- Zukoski,E.E., kubota,T. and Cetegen,B.M.(1980/81) : Entrainment in Fire Plume, J.Fire Safety, Vol.3, pp.107~121.

付録1 正方格子モデルの補足

本解析で用いる正方格子モデルは、2章で述べたとおり、室を、単性格子が $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方格子に区切り、その中央に同じ大きさ、重量の可燃物が均等に配置されているとしたものである。先に述べた正方格子モデルでの解析は、出火点を中央にある可燃物とした。一方、ランダムモデルは、配置されたすべての可燃物を出火点としたものである。正方格子モデルでの、出火点による差異をみるため、可燃物配置はそのまま、すべての点を出火点としたときの解析結果を図-A1.1に示す。図から、中央を出火点としたものは、全体のおよそ8割より避難限界時間が短いことが分かった。しかし、ばらつきが、250秒の範囲内におさまっていること、全体として、危険側であることから、ランダムモデルとの比較には、一応の妥当性があると判断できる。

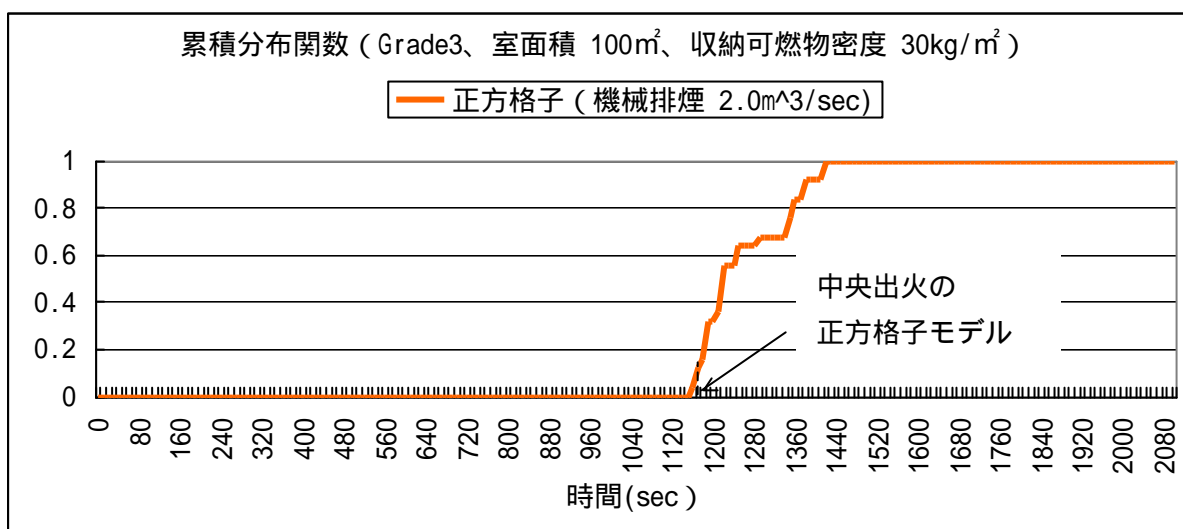


図-A1.1 すべての可燃物を出火点とした正方格子モデルでの解析結果

付録2 ランダムモデルを用いた解析結果の平均値

先に述べたように、本研究では、入力パラメーターを変え、それぞれについて、100（可燃物配置パターンのサンプル数）×可燃物個数の数だけ解析を行なった。その平均値を表-A2.1に示す。正方格子モデルと比較すると、排煙を行なわない場合、入力値を変化させても、その差にあまり影響がない。一方、排煙を行なった場合、収納可燃物密度が大きくなるほど、また、室面積が大きくなるほど、正方格子モデルとの差が小さくなる。つまり、可燃物のランダム性の影響が小さくなると言える。また、内装が不燃材の場合、さらに可燃物のランダム性の影響は小さくなることが分かる。

表-A2.1 ランダムモデルでの解析結果の平均値

内装防火性能等級	床面積 (m ²)	収納可燃物密度(kg/m ²)	排煙の有無、方法	正方格子モデル(sec)	ランダムモデルでの平均値 (sec)
Grade3	100	15	排煙なし	540	429
			機械排煙(2.0m ³ /sec)	2090	1453
			自然排煙(Hb 2.4m,B 10m)	1900	1451
		30	排煙なし	440	313
			機械排煙(2.0m ³ /sec)	1160	966
			自然排煙(Hb 2.4m,B 10m)	1100	914
			機械排煙(1.0m ³ /sec)*	1070	882
			機械排煙(1.66m ³ /sec)*	1130	1044
			自然排煙(Hb 2.0m,B 10m)*	890	711
	自然排煙(Hb 2.0m,B 15m)*		930	822	
	50	自然排煙(Hb 2.4m,B 5m)*	1030	884	
		自然排煙(Hb 2.4m,B 15m)	1140	998	
		排煙なし	370	245	
	144	30	機械排煙(2.0m ³ /sec)	750	685
			自然排煙(Hb 2.4m,B 10m)	780	620
排煙なし			610	432	
Grade1	100	30	機械排煙(2.8m ³ /sec)	1210	1011
			自然排煙(Hb 2.4m,B 15m)	1200	993
			排煙なし	440	329
			機械排煙(2.0m ³ /sec)	1160	1179
			自然排煙(Hb 2.4m,B 10m)	1100	1156

排煙の有無、方法の右上に、*がつくものは、現在の建築基準法の条件をみたしていないことを表す。