

二層モデルを用いた  
斜め通路における  
煙流動解析

名古屋大学工学部建築学科

防災安全工学講座 辻本研究室

1 5 9 1 0 7 7 2

高 橋 和 治

## 【 目次 】

### 序文

### 第1章 模型実験について

#### 1. 模型実験の概要

#### 2. 実験結果

### 第2章 二層モデルについて

#### 1. モデルの説明

#### 2. モデルの定式化

#### 3. 計算の手順

#### 4. 二層モデルでの入力条件

### 第3章 考察

#### 1. 相似則に基づく入力条件の修正

#### 2. 実験結果と計算結果の比較

#### 3. 風の影響

### 結論

### 謝辞

### 文献

## 序文

大規模建築物や高層建築物が災害に対して種々の弱点を有していることは指適されるところであり、建築防火の研究も主として建築物の耐火性、防煙方法あるいは避難の問題に精力が注がれてきた。このような被害を如何にすれば有効に減少できるか、あるいは一体、被害の減少を計ることが現実的に可能かどうかに関心が向けられつつある。しかし、防煙方法や避難の問題を考える為には火災時に煙がどの様に流れるのかを明らかにしなければならない。ところがこの煙流動は火災の状況と建物の空間特性（空間の床面積と高さ、開口の位置と大きさ）に大きく左右される。本論では特に空間特性に着目して、中廊下型の集合住宅における煙流動の解析、通路の安全性等の検討を目的とする。一般に中廊下型の集合住宅は、共用通路がその階にある各住戸と階段・エレベーター等をつなぎ、そのつながれた水平な面（階）が積み重なる構成になっている。この建物で火災が起こった場合に共用通路を1つの大きな部屋とし、そこに多数の開口（通路-住戸、通路-外気）があると考えることにより容易に煙流動（拡散・伝播）を解析することができるであろう。また、それについての研究はすでにいくつか行われている。<sup>1)</sup>

ここで扱う特殊な集合住宅は、各住戸ごとに南北面のプライベートな開口部（窓）をもつように設計され、共用通路が階段を含む斜めの通路となった立体的な中廊下型の建物である。（図1）またエレベーターホールには自然排煙口が設けられており、外部と開口をもっている。（図2）この建物で火災が起こり通路に煙が流れ出た場合に煙は水平方向の動きに縦方向の動きが加味され、どの様に拡散・伝播するのかが明らかではない。そこで煙流動を解析するために模型（スケール1/5）を用いた実験を、模型実験と同様の火災を想定した煙流動シミュレーションを行った。シミュレーションには煙流動を高温ガス層と空気層に分離して解析する二層モデルを用いた。実験では無風の条件で行わざるを得なかったが、実際には外気風の影響を考慮しなければならない。そこで外気風が煙流動にどのように影響を及ぼすか、自然排煙口の効果に変化があるかについても考察した。

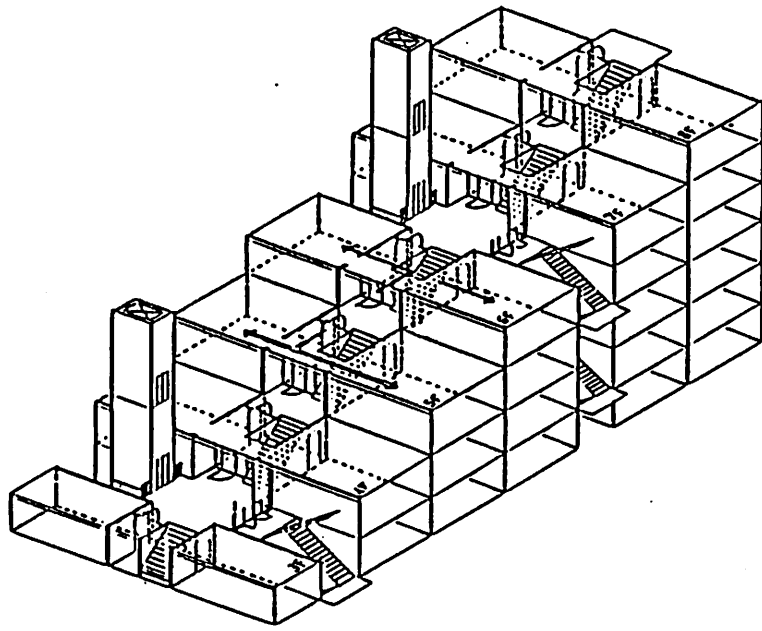


図1 高層集合住宅の斜め通路のパス

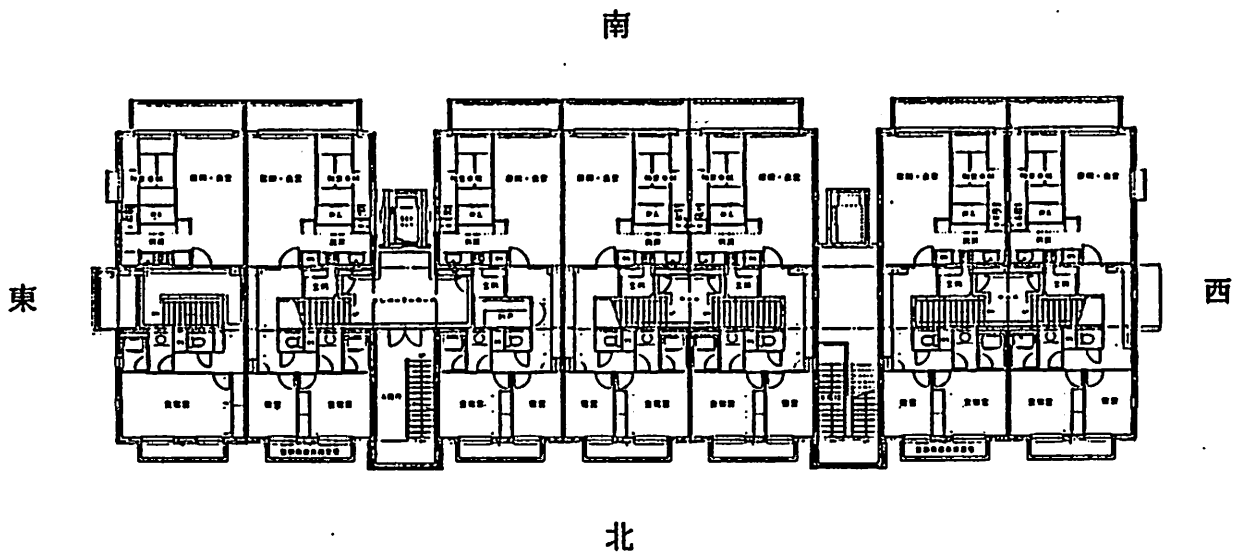


図2 平面図

# 第1章 模型実験について

## 1-1 模型実験の概要

### (実験模型)

煙流動の観察対象となる斜め通路部分の模型(スケール1/5)を作成し、実験において火災室の火源は、メタノールを燃焼させ、可視化のために発煙筒もしくは発煙片を用いた。

### (測定項目)

測定項目は、以下の3項目について図3に示す点で測定した。

- 1) 温度: A~Jの位置で9個の熱電対により測定
- 2) 煙層厚さ: 目視観察による測定
- 3) 流れの速度: スモークワイヤーによる測定

### (実験の概要)

煙の流れに影響を及ぼす因子として以下の6つをとりあげ、これを変化させて実験した。

#### 1) 火災室の温度(火災の規模)

火災室の温度は煙の流れにどれだけ影響を与えるかを確かめるために火源を変化させて実験を行った。火源はL(125φ、150φのアルコールパンを同時燃焼)、M(150φのアルコールパン)、S(125φのアルコールパン)の3種類を用いた。

#### 2) 火災室の位置

エレベーターホールのある階でホールに面している住戸から出火した場合と、それより1層上で通路部分にしか面していない住戸から出火した場合には、通路内の煙の流れが異なると考えられる。その流れを確認するために、1階層と2階層とに火災室を変化させて実験した。

#### 3) エレベーターホールの開口面積

エレベーターホールには、エレベーターの両脇にスリット(400巾×5500高さ)が設けてある。このスリットは火災時には排煙口としてかなりの量の煙を排出することが期待されるが、この開口面積が計画の2/3、1/3、あるいは0になったとき、流れにどのよう

な影響があるかを検証した。

#### 4) 両端開口部の開口面積

外気風の影響を避けるためには、斜め通路の外気が面する開口部の風圧係数をできるだけ同じにすることが望ましい。このためには、両端開口部を南側に開く部分だけに限定することになるが、このことで生じる面積の減少が流れに変化を与えるかどうかを実験した。

#### 5) 通路の区画

火煙の拡大を防ぐため、斜め通路、特に2つのエレベーターホールにはさまれた通路部分を扉で区画することが考えられる。この場合の効果を知るために、図3に示す位置で斜め通路の上部もしくは下部に区画のある場合の実験を行った。

#### 6) 火災室の外気への開口

外気-火災室-斜め通路のつながり方から、外気と火災室の間に開口がない場合に比べて、開口がある場合には斜め通路がより煙突としての作用を強め、斜め通路への煙の流出量が増えるのではないかと予想される。これを確認するため、火災室に斜め通路に対するものと同じ開口を外気に対して設け、実験を行った。

ただし、ここでは1)、2)の場合について変化させシミュレーション結果と比較した。このときの実験条件を表1に示す。

表1 模型実験の火源条件

実験	火災室の位置	火源の大きさ
1	1階層	L
2	1階層	M
3	2階層	M
4	2階層	S

L: 760-600(大+中)  
M: 760-600(大)  
S: 760-600(中)

大: 150φ  
中: 125φ

〈固定されている条件〉  
エレベーターホールの開口部は全開  
両端開口部は全開  
通路の区画なし  
火災室に外気との開口部はない

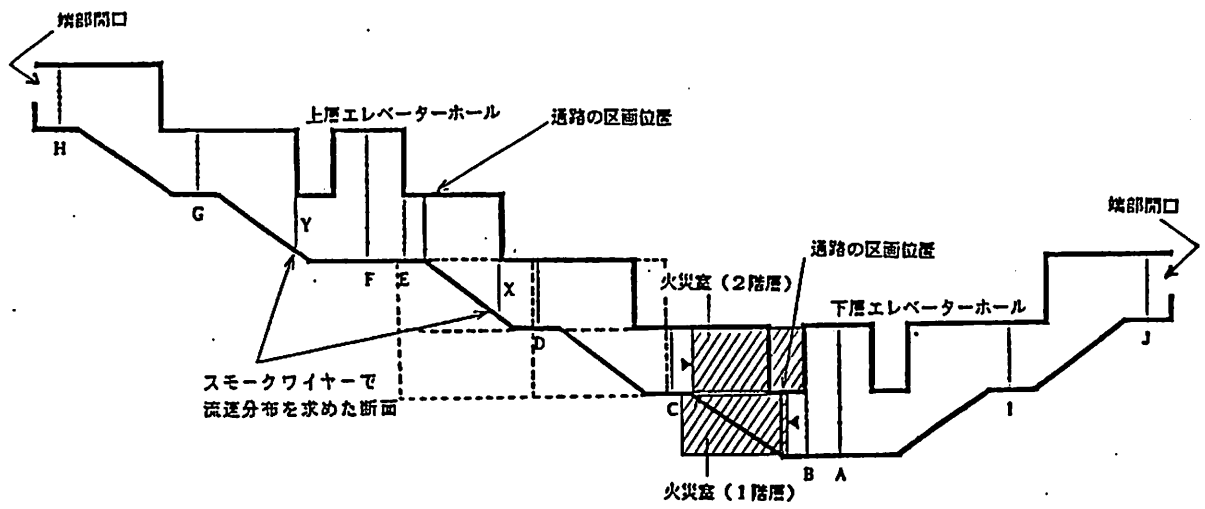


図3 測定点の位置

## 1 - 2 実験結果

ここで実験での代表的な煙流動の例を図4（火災室1階）、図5（火災室2階）に示す。煙層の着色は目視による煙の濃度を表現している。また実験で観察された流れ方は煙と空気の二層流であった。

以下に模型実験で得られた結果を簡単にまとめる。

### 1) 火災室の温度と流れ

煙層の性質（特に煙層の厚さ）は火災室の温度にはほとんど影響されない。

### 2) 火災室の位置と流れ

エレベーターホールのある階で火災があった場合と、これより1階層上で火災があった場合を比較した。結果として、火災室の位置に関わらず、エレベーターホールの開口（自然排煙口）の存在により斜め廊下を上昇する煙量は $1/3 \sim 1/4$ に減じている。

### 3) エレベーターホールの開口面積と流れ

2つあるエレベーターホールの開口を開放状態から下から順に $1/3$ ずつ閉じていく。煙が二層流状態であれば開口部を $1/3$ 閉じてても排煙効果は減じられるが、二層流状態でなければ下 $2/3$ 閉までは効果に大きな差は無い。下 $1/3$ 開と全閉では煙の流れはほぼ同様に、非常に危険な状態を作り出す。

### 4) 斜め通路両端開口と流れ

開口を南面に限定した場合、H点の温度分布の下半分に温度上昇が起こることを除いて、流れに変化はない。H点の現象は末端踊り場部分で生じる重力換気（外気の流入）が減じたためと考えられ、流れ全体の変化は生じていないと判断される。

### 5) 区画を設置した場合の流れ

火煙の拡大を防ぐための斜め通路を扉で区画した場合（図3）、火災室が図3の点線で囲まれた位置にあると、火災階を含む上層2階層分が非常に高温になる。すなわち、しっかりした区画（扉によるもの）では内部の温度上昇による危険の増大があり、ゆるやかな区画（ホールの開口）では量的にはかなり減少するものの上階への煙の流出があるということである。



#### 6) 火災室の外気側開口と流れ

火災室に斜め通路に対するものと同じ開口を設け、実験を行ったが、流れに大きな差は生じなかった。火災室の位置を変え、火源を変えて実験を行なったが温度プロフィルの差は生じていない。この理由は、エレベーターホールの開口が十分に大きく、排煙、火災室への給気の両方を行なうことで、斜め通路を煙突化しない作用をしているためと考えられる。

ただし、実験ではメタノールの燃焼の他に発煙筒・発煙片の燃焼熱も煙形成に影響している。

実験より、通路内の煙は大半がエレベーターホールの開口（自然排煙口）から放出されること、開口はその面積を減少させるとその効果も小さくなることがわかった。また、相似則を考慮すると、自然排煙口は実際の建物でも有効に機能し通路の安全性を高めると考えられる。

なお模型実験と結果については、文献<sup>2)</sup>を参照。

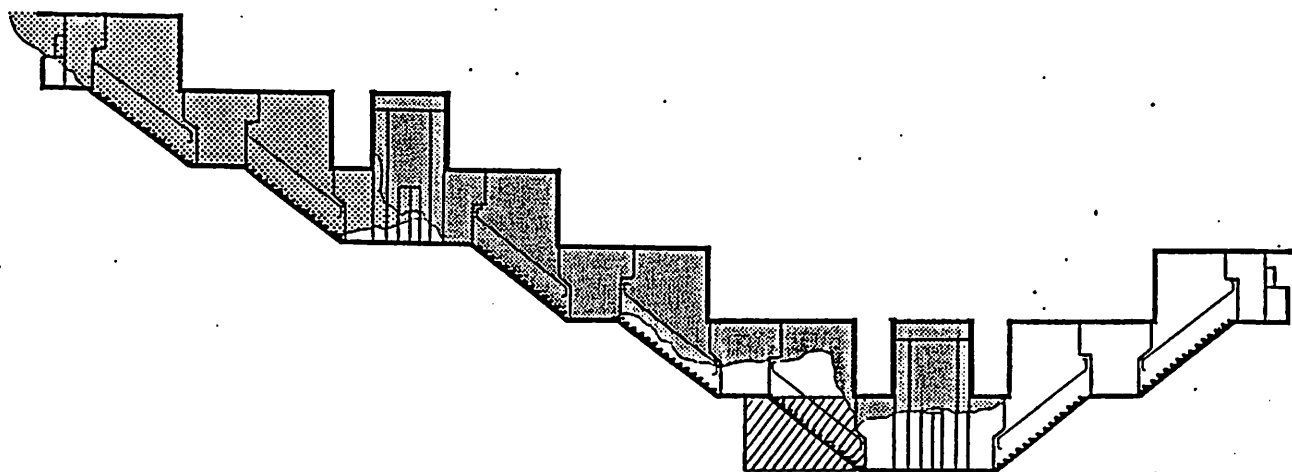


図4 斜め通路内の煙の挙動の例（火災室1階）

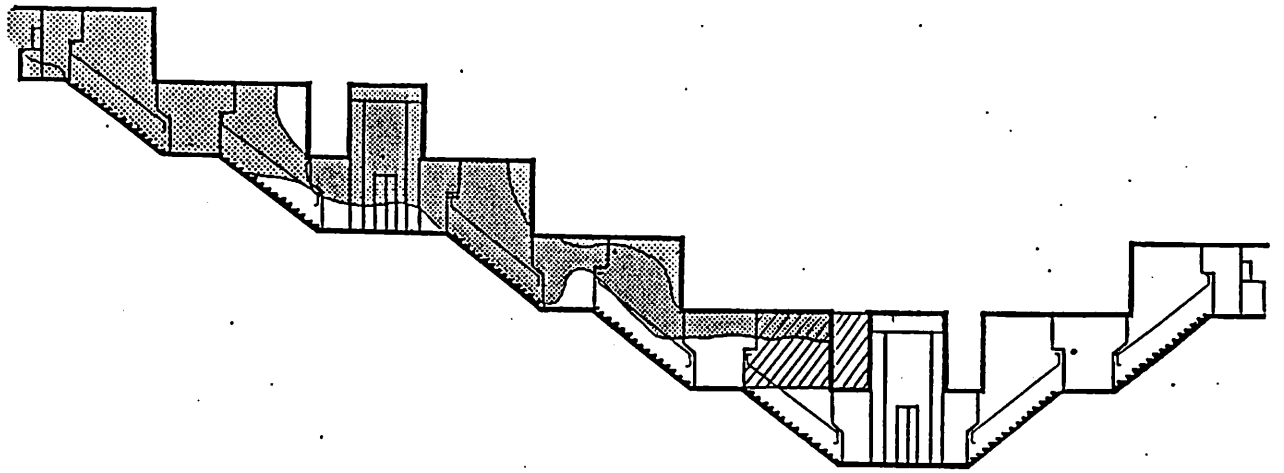


図5 斜め通路内の煙の挙動の例（火災室2階）

## 第2章 二層モデルについて

### 2-1 モデルの説明

ここでシミュレーションに利用する二層モデルは、煙流動を高温ガスと空気の二層流とみなして解析するもので、建築研究所の田中<sup>3)</sup>を中心に開発され、公開されている。このモデルと実測との整合性に関する研究<sup>4)</sup>もいくつか行われている。

モデルの基本構造は各室間の流れ（煙と空気の流れ）を換気計算網<sup>5)</sup>を用いた手法で計算する。 $\Delta t$ 時間前の開口をはさむ二室の煙層温度・厚さと空気層温度・厚さを条件に各室の基準レベルの室内静圧を、質量収支とエネルギー収支が釣り合うように逐次近似計算する。この結果を利用して、次のステップの煙層温度・厚さ等を計算する。

煙層のうち上昇して隣室に移動したものについては空気層からの巻き込み量を考慮する。

対流は一般に強制対流と自然対流とに分けられるが、火災時には強制対流的流れが生ずることも自然対流的流れが生ずることもある。更に両者が共存することも考えられ、場合に依じてこの両形態を使い分けるしか方法がない。このモデルで対流による壁面への熱損失は熱伝達率( $\text{kcal}/\text{m}^2 \text{ s } ^\circ\text{k}$ )を仮定して計算する。この値については文献<sup>3)</sup> PP.50 ~ PP.53 を参照してもらいたい。

### 2-2 モデルの定式化

この節では、火災時に室上部に形成される高温層及び下部の空気層を検査体積として質量やエネルギー保存式を考慮し、各室の高温層の温度及び厚さを求める常微分方程式、換気条件式を導いている。この定式化については文献<sup>3)</sup>を文献のまま以下に引用する。

## 第2章 建築火災モデルの定式化

### 2.1 本章の概要

火災によって実際に燃焼し、あるいは被災するものは建物の構造体、区画壁、内装、収納物あるいは人間などであるにも拘らず、我々は従来から火災室の空気（ガス）の温度を火災の激しさを始めとする種々の性状の指標としている。室内で盛んな燃焼が生ずると、室内ガスの温度も当然高くなるから火災の激しさを表わす上で、これ以上に便利なものは他に思

浮ばないが、室内ガスの重要性は、このような燃焼の結果としての意味よりも、むしろ、それが室内や室外に火災を拡大する上で重要な媒体となる点にある。

火災の拡大は、燃焼部分で発生した熱が未燃焼部分に伝播され、それを加熱し熱分解させるから進行するのである。換言すれば、燃焼の拡大には常に熱の伝播が先立つが、火災室内ガスは室内の一部における燃焼により発生した熱を、室内全体に広域化する働きをするし、また火災室の開口部を通じて廻り込み、室外へも大量の熱を伝播する点でも重要である。この高温ガスの重要性は、火災の初期に於ても盛期に於ても変わらない。我国の住宅のように、室間区画が確かでない建物では、高温ガスによる延焼の危険性はことに大きいと思われる。その上これは、ただ燃焼拡大の点からのみ重要であるばかりではなく、建築材料より高温ガスに対して格段に弱い人間にとっては、より一層の脅威となる。従って室内高温ガスに焦点を合わせて火災現象のモデル化を計ることは、全く正当なことであると言えよう。

本章では、火災を初期と盛期の2つに分割し、初期においては火災室においてもその他の室でも、室上部の高温層ガスと下部の空気層が分かれていると仮定し、これらを検査体積として質量やエネルギーについての保存式を導き、更にこれから高温層の温度や厚さ、および換気条件を定める式を誘導する。また盛期においては火災室だけは高温ガスのみで満されるとし、火災室の温度を求める式と換気条件を定める式を導く。これらの式に含まれる発熱、伝熱、換気等に関わる項は、更にモデル化が必要となるが、ここで導かれる式は火災現象を表現する最も基本的な式と考えることが出来る。

## 2.2 初期火災モデルの定式化

複数室を有する建物の場合は、ひとまず措くとして、単室の火災のみに関していえば、フラッシュ・オーバー以後の火災の挙動については既に多くの人により比較的よく調べられており、室の開口条件、熱的条件および可燃物条件などにより、性状がほぼ決定されることが知られている。一方、フラッシュ・オーバー以前の火災の性状は、現在のところよく知られていない。これは一つには、性状が出火条件や着火物の条件などの初期条件によりまちまちのため、定式化が難しかったためでもある。このようなフラッシュ・オーバー以前の火災の多様なパターンについて全て適切にモデル化することは、恐らく不可能である。そこで、どのようなパターンを典型として認めるかということが既に一つの難しい問題となる。これは現時点では、頻度の高いと思われるもの、建築火災に特有なもの、建築防火に有益な情報を与えるものというような観点から選ばれることになろう。この点からみて、室内に1つの火源とその上の火災ブルームを考えるモデルは、最初、排煙の解析の目的で Thomas 等により〔文1〕、その後単室火災の解析で Rockett〔文2〕、Quintiere 等〔文3〕、Emmons 等〔文4〕により既に採用されているが、概ね妥当なものと考えられる。

## (I) 初期火災モデルの記述

フラッシュ・オーバに至る以前の初期火災の典型的モデルとして、Fig. 2.1に示すように建物内の一室で火災が発生し、床上にある可燃物が火源となって燃焼している場合を考える。可燃物の熱分解により発生し室内に放出された可燃ガスは、周囲の空気中の酸素と混合して燃焼し発熱する。この燃焼により暖まり、浮力を生じた燃焼生成ガスは、更に周囲の空気を巻き込みながら上昇して火源上に火災ブルームを形成する。火災ブルームを通じて上昇した燃焼ガスと空気の混合ガスは、室の天井下に高温のガス層を形成する。火源での燃焼が継続していると、火災ブルームを通じてガスや熱量が供給されるため、高温層の厚さや温度は次第に増加し、保有する熱を、天井や周壁の上部等へは主として輻射および対流熱伝達で、床や周壁の下部或いは床上の家具等へは主として輻射で伝達し、その温度を上昇させ着火の危険をもたらす。また高温層が厚みを増して室の開口部に達すると、それを通じて隣室へ流出し、そこにも高温層を形成し、隣室の各部へ熱を伝達して室外延焼の危険を生ずる。火災ブルームへは、高温ガス層の下の空気層から空気が供給されているから、空気のバランスを保つために、火災室へは隣室から空気が流入することになる。こうして次々に火災室の燃焼が誘起する高温ガスと空気の流れの場が生じ、建物全体が火災に巻き込まれるようになる。

## (II) 定式化のための仮定

上記のような建物内の初期火災のモデルを定式化するに当たって、次のような仮定を設ける。

- a. 高温ガスの発生する火災室に於ても、高温ガスが流れ込んだ建物内の他の室に於ても、上部に高温層が形成され下部に常温の空気層が形成される。
- b. 室上部の高温層と下部の空気層とは明確な不連続面を形成し、火災ブルーム、ドア噴流を通じて以外に、この面を通じての両者の間の質量や熱の交換は存在しない。
- c. 各室の室上部の高温ガス層は、それぞれに至る所で温度が一様となっている。
- d. 各室の下部の空気層は、完全に透明であって輻射を完全に透過する。また床からの対流熱伝達も無視できる。従って空気層は、熱の出入が皆無であって終始最初の温度に等しく保たれる。
- e. 火源上の火源ブルームから周囲への熱輻射を無視する。従って火源で発生した燃焼熱は、火災ブルームを通じて全て高温層に流入する。
- f. 開口部を通ずる室外への輻射は無視する。

仮定 a, b に関して言えば、不連続面は全く明確と言うわけではなく、幾分の乱流混合が存在するけれども初期火災室に関しては、実用的な範囲で十分満足のゆく仮定であることが支持されている〔文1〕,〔文3〕。また火災室から隣接する廊下へ煙が流出した場合にも、二層流が観察されることが報告されている〔文5〕。一般にこのような二層流の混合状態を定めるパラメタとなるのは、

$$Ri = g (\partial T / \partial z) / T (\partial v / \partial z)^2$$

で定義されるリチャードソン数  $Ri$  であり、この値が大である程二層流の安定はよいから、高温層の温度が高い程また高温層と空気層の相対速度が小さい程高温層は安定する。今回の研究の対象は住宅のように小さな室が幾つか開口部で連なっている小規模な建物であるから、開口部以外での流速は比較的小さいことが期待される。また大規模建築物に比較して、発熱に対する熱損失が少なく高温層の温度が保たれるという点でも、仮定に有利に働くと考えられる。

仮定 c は、主要には計算の簡易化のための仮定であるが、火災時の高温層は比較的良好に攪拌されること、また煙粒子などを多く含むため輻射による温度の均一化が促進されること等のため実用的にはほぼ妥当な仮定と考えられる。

空気に含れる  $H_2O$  や  $CO_2$  は、熱輻射の吸収、輻射を行うが、それ程著しくない。また、仮定 b により高温層と空気層が混って煙粒子が空気層に混入することが許されていないため、空気層は常に熱輻射に対して透明に保たなければならない。

高温層からの輻射により熱せられた床から、対流熱伝達で空気層に熱が流入することは考えられるが、一般に対流熱伝達率はそれ程大きくないので、床の温度が著しく高くない初期においては、概ね無視出来よう。こうして仮定 d は、空気層に対するエネルギー保存式を省くことが出来る。

仮定 e は、実際の火災から幾分遊離していると考えられる。一般の火災では、家具や油の燃焼による火炎は可成りの高さまで立上り、火災ブルームは炎で明るく輝いて、輻射を発生しているからである。火災ブルーム部分からの輻射を無視し、燃焼熱が全て火災ブルームを通して高温層に入ると考えることは、高温層に入る熱量を幾分過大評価することになるが、この誤差は次の理由により部分的に救済されよう。一つには、高温層が厚くなった場合にはブルームの空気層部に露出された部分が減少することである。更にブルーム部からの輻射の約半分は直接高温層に入射することが期待されるし、また最初周壁や床に入射した残りの輻射もそれらの部分の温度を高めることにより、間接的に高温層からの正味の輻射失熱を減少させるからである。

仮定 f は、主要な輻射源を高温層と考えると、開口部が余り大きくない限り、室外から見込まれる高温層の部分は比較的小さいから概ね妥当であろう。

### (iii) 初期火災モデルの定式化

火災現象を記述する上で最も基本的なものは、質量やエネルギーの各保存式、および高温ガスの状態式などである。建物内各室の高温層および空気層を検査体積として、これらを考えると下の(A)~(E)のような式を得ることが出来る。先ず記号を次のように定める。

$\rho_{s,i}, T_{s,i}$  : 室  $i$  の高温ガスの密度 ( $kg/m^3$ ) および温度 ( $^{\circ}K$ )。

$\rho_a, T_a$  : 空気の密度 ( $kg/m^3$ ) および温度 ( $^{\circ}K$ )、(各室共通)。

$T_e$  : 熱分解ガスが可燃物から放出されるとき温度 ( $^{\circ}K$ )。

$A_{R,i}, H_{R,i}$  : 室  $i$  の面積 ( $m^2$ )、天井高 ( $m$ )。

$Z_{s,i}, Z_{a,i}$  : 室  $i$  の高温層および空気層の厚さ ( $m$ )。

- $C_p$  : 気体の比熱 (kcal/kg °K), (一定とする).  
 $M_{s,i}; M_{e,i}; M_{p,i}$  : 火災気流から高温層への流入ガス量 (kg/s), 空気層から火災ブルームへの巻き込み空気量 (kg/s); 火源の燃焼速度 (kg/s).  
 $SS_{ijk}, SA_{ijk}$  : 開口  $k$  を通ずる室  $i$  から  $j$  への高温ガスの質量速度 (kg/s), 但し,  $SS_{ijk}$  は  $Z_{s,j}$  より上部,  $SA_{ijk}$  は  $Z_{s,j}$  より下部における流れ.  
 $AS_{ijk}, AA_{ijk}$  : 開口  $k$  を通ずる室  $i$  から  $j$  への空気の質量速度 (kg/s), 但し,  $AS_{ijk}$  は  $Z_{a,j}$  より上部,  $AA_{ijk}$  は下部に於ける流れ.  
 $SE_{ijk}$  :  $i, j$  間の開口  $k$  のドア噴流への巻き込み空気量 (kg/s).  
 $\Sigma_k$  : 室  $i, j$  間の全ての開口について加算することを意味する.  
 $\Sigma_j$  : 室  $i$  に連絡する全ての室について加算することを意味する.  
 $n$  : 建物内の空間数.  
 $m$  : 建物内の各空間々の開口数 (本来空間毎に異なる。つまり  $m = m_{ij}$  ).  
 $\dot{Q}_{F,i}$  : 火源の燃焼による発熱速度 (kcal/s).  
 $\dot{Q}_{R,i}$  : 輻射により高温層が周壁等から得る正味の熱量 (kcal/s).  
 $\dot{Q}_{C,i}$  : 対流熱伝達により高温層が得る正味の熱量 (kcal/s).  
 $Q_P$  : 可燃物の熱分解潜熱 (kcal/kg)

#### (A) 高温ガス層の質量保存式

ある任意の室  $i$  の高温ガス層は、開口部を通して連絡している隣室の高温ガス層と高温ガスの交換を行う。またドア部分では、高温ガスの噴流に対して空気が巻き込まれ、高温ガスを増加させる。更に火災室では、火災ブルームを通じて高温ガスが供給される。従って記号について Fig. 2.1 を参照すれば、火災室を含めた建物内の任意の空間  $i$  の高温層の質量保存式が次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{d}{dt} (\rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i}) \\
 & = \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA'_{jik}) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) \right\} + M_{s,i} \\
 & \qquad \qquad \qquad (i = 1, n) \qquad \dots\dots\dots (21)
 \end{aligned}$$

但し、ドア噴流への巻き込みは、高温ガス流のうち、 $SA_{jik}$  のみ生ずると仮定し、また火災室以外では、 $M_{s,i} = 0$  である。

#### (B) 空気層の質量保存式

任意の室  $i$  の空気層は隣室の空気層と開口部を通して空気の交換を行う。また各開口部を通過して室に入ってくるドア噴流に空気が巻き込まれ、火災室では火災ブルームにも空気が巻き込まれるから、空気層の空気が減少する。従って空気層の質量保存式は、

$$\frac{d}{dt} (\rho_a A_{R,i} Z_{a,i})$$

$$= \sum_j \sum_k \left\{ (AS_{jik} + AA_{jik}) - (AS_{ijk} + AA_{ijk}) - SE_{jik} \right\} - Me,i$$

( i = 1, n ) \quad \dots\dots\dots ( 2.2 )

(C) 高温ガス<sup>層</sup>のエネルギー保存式

任意の室 i の高温ガス層は開口部を通しての隣室との高温ガスの交換により、ガスが保有する熱量も同時に交換する。高温層はまた輻射、対流熱伝達で天井、床等の周壁と熱の交換を行う。更に火災室では火災ブルームを通じて熱が供給されるが、火災ブルーム部分からの輻射失熱は無視したから、これは火源の燃焼で発生する熱量と熱分解ガスが持込む熱量の和から、熱分解に必要な熱量を差引いたものに等しい。更にドア噴流部からの失熱も無視し、空気層温度  $T_a$  を基準にして書くと高温層のエネルギー保存式は次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \left\{ C_p \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i} (T_{s,i} - T_a) \right\}$$

$$= \dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{C,i} + \left\{ -Q_p + C_p (T_e - T_a) \right\} M_{p,i}$$

$$+ \sum_j \sum_k \left\{ C_p (SS_{jik} + SA_{jik}) (T_{s,j} - T_a) - C_p (SS_{ijk} + SA_{ijk}) (T_{s,i} - T_a) \right\}$$

( i = 1, n ) \quad \dots\dots\dots ( 2.3 )

但し、火災室以外では  $\dot{Q}_{F,i} = 0$  である。また火災時、熱は室内ガスから周壁に伝わるから  $\dot{Q}_{R,i}$ 、 $\dot{Q}_{C,i}$  は、一般に負になることが多い。

(D) 高温ガスの状態式

一般に気体の状態式は、その圧力や成分組成に依存する。しかし、一般の火災は極めて 1 気圧に近い環境下で起るので、火災により誘起される微小な圧力差の空気密度に対する影響は無視し得る。また火災では、燃焼が関与するので高温ガスの成分組成は可成り変化することが予想されるが、現在のところ、これらを考慮した扱いは技術的に困難なので、これも無視し状態式として下式 ( 2.4 ) を使用する。

$$\rho_{s,i} T_{s,i} = \rho_a T_a \quad ( i = 1, n ) \quad \dots\dots\dots ( 2.4 )$$



(E) 恒等式

次の(2.5), (2.6), (2.7)の各式は, それぞれ高温層と空気層の厚さ, 火災ブルームへの巻き込み, およびドア噴流への巻き込みに関連する恒等式であって, ほとんど自明である。

$$Z_{s,i} + Z_{a,i} = H_{R,i} \quad (i=1, n) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$M_{p,i} + M_{e,i} = M_{s,i} \quad (i=1, n) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$SA_{jik} + SE_{jik} = SA'_{jik} \quad (i=1, n) (k=1, m) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

以上, (2.1)~(2.7)式は(II)で述べたような仮定に立脚した場合の建物内の任意の室の状態を支配する基礎式であると言えることができる。

(iv) 高温ガス層の温度と厚さの式の誘導

式(2.1)~(2.7)は, フラッシュ・オーバー以前の火災室が建物内にある場合の任意の室の状態を支配する基本式であると言えるけれども, 我々が直接求めたいところの高温層の温度  $T_{s,i}$  や厚さ  $Z_{s,i}$  を陽に与えているものではない。そこで次に式(2.1)~(2.7)を基にして, これらを与える式を誘導する。

(A) 高温ガス層の温度  $T_{s,i}$

先ず高温層のエネルギー保存式(2.3)の左辺を

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left\{ C_p \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i} (T_{s,i} - T_a) \right\} \\ &= C_p (T_{s,i} - T_a) \frac{d}{dt} (\rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i}) + \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i} \frac{d}{dt} \left\{ C_p (T_{s,i} - T_a) \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

のように展開し, 右辺第1項に高温層の質量保存の式(2.1)を代入すると式(2.8)は次のように書ける。

$$\begin{aligned} & C_p (T_{s,i} - T_a) \left\{ \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA'_{jik}) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) \right\} + M_{s,i} \right\} \\ & \quad + \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i} \frac{d}{dt} \left\{ C_p (T_{s,i} - T_a) \right\} \\ &= \dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{c,i} + \left\{ -Q_p + C_p (T_e - T_a) \right\} M_{p,i} \\ & \quad + C_p \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) (T_{s,j} - T_a) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) (T_{s,i} - T_a) \right\} \end{aligned}$$

これから,

$$\begin{aligned}
 & C_p \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i} \frac{dT_{s,i}}{dt} \\
 &= \dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{c,i} + \left\{ -Q_p + C_p (T_e - T_a) \right\} M_{p,i} \\
 &+ C_p \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) (T_{s,j} - T_a) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) (T_{s,i} - T_a) \right\} \\
 &- C_p \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA'_{jik}) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) \right\} (T_{s,i} - T_a) - C_p M_{s,i} (T_{s,i} - T_a) \\
 &= \dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{c,i} \\
 &+ C_p \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) (T_{s,j} - T_{s,i}) - (SA'_{jik} - SA_{jik}) (T_{s,i} - T_a) \right\} \\
 &- Q_p M_{p,i} + C_p \left\{ M_{p,i} (T_e - T_a) - M_{s,i} (T_{s,i} - T_a) \right\}
 \end{aligned}$$

更に状態式(2.4)を使って整理すると、結局高温層の温度を与える式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_{s,i}}{dt} &= \frac{T_{s,i}}{C_p \rho_a T_a A_{R,i} Z_{s,i}} \left\{ (\dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{c,i}) - Q_p M_{p,i} \right\} \\
 &+ \frac{T_{s,i}}{\rho_a T_a A_{R,i} Z_{s,i}} \left[ \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) (T_{s,j} - T_{s,i}) \right. \right. \\
 &\left. \left. - (SA'_{jik} - SA_{jik}) (T_{s,i} - T_a) \right\} + \left\{ (T_e - T_a) M_{p,i} - (T_{s,i} - T_a) M_{s,i} \right\} \right] \\
 & \qquad \qquad \qquad (i=1, n) \qquad \dots (2.9)
 \end{aligned}$$

ここで  $C_p \rho_a T_a A_{R,i} Z_{s,i} / T_{s,i} = C_p \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i}$  は、高温層の熱容量に他ならない。従って加えられる熱が  $T_{s,i}$  を増加させることは言うまでもないが、高温ガスの交換により、 $i$  室より高い温度のガスが流入すると温度差に比例して、 $T_{s,i}$  を増加させる。また、

$$(SA'_{jik} - SA_{jik})(T_{s,i} - T_a) = SE_{jik} (T_{s,i} - T_a)$$

$$(T_e - T_a) M_{p,i} - (T_{s,i} - T_a) M_{s,i} = (T_e - T_{s,i}) M_{p,i} - (T_{s,i} - T_a) M_{e,i}$$

であるから、ドア噴流や、火災ブルームへの巻き込み空気は  $T_{s,i}$  を減少させる。

#### (B) 高温ガス層の厚さ $Z_{s,i}$

高温層の質量保存式(2.1)の左辺を

$$\frac{d}{dt} (\rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i}) = A_{R,i} \left( \rho_{s,i} \frac{dZ_{s,i}}{dt} + Z_{s,i} \frac{d\rho_{s,i}}{dt} \right)$$

と展開し、この右辺の第2項に状態式を考慮して式(2.1)を整理すると、

$$\frac{dZ_{s,i}}{dt} = \frac{Z_{s,i}}{T_{s,i}} \frac{dT_{s,i}}{dt} + \frac{T_{s,i}}{\rho_a T_a A_{R,i}} \left[ \sum \sum_{jk} \{ (SS_{jik} + SA'_{jik}) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) \} + M_{s,i} \right]$$

この右辺第1項に先に得られた温度の式(2.9)を代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{dZ_{s,i}}{dt} &= \frac{Z_{s,i}}{T_{s,i}} \left[ \frac{T_{s,i}}{C_p \rho_a T_a A_{R,i} Z_{s,i}} \left\{ (\dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{C,i}) - Q_P M_{p,i} \right\} \right. \\ &\quad + \frac{T_{s,i}}{\rho_a T_a A_{R,i} Z_{s,i}} \left[ \sum \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) (T_{s,j} - T_{s,i}) - (SA'_{jik} - SA_{jik}) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (T_{s,i} - T_a) \right\} + \left\{ (T_e - T_a) M_{p,i} - (T_{s,i} - T_a) M_{s,i} \right\} \right] \\ &\quad \left. + \frac{T_{s,i}}{\rho_a T_a A_{R,i}} \left[ \sum \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA'_{jik}) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) \right\} + M_{s,i} \right] \right] \\ &= \frac{\dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{C,i} - Q_P M_{p,i}}{C_p \rho_a T_a A_{R,i}} + \frac{1}{\rho_a A_{R,i}} \left( \frac{T_e}{T_a} M_{p,i} + M_{s,i} - M_{p,i} \right) \\ &\quad + \frac{1}{\rho_a T_a A_{R,i}} \sum \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) T_{s,j} - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) T_{s,i} \right. \\ &\quad \left. + (SA'_{jik} - SA_{jik}) T_a \right\} \quad (i = 1, n) \quad \dots\dots\dots (2.10) \end{aligned}$$

結局(2.10)式が高温度の厚さを与える最終的な式となる。従って加えられる熱は、高温ガスを膨張させ体積を増すために高温層の厚さ  $Z_{s,i}$  を増加させる。また流入するガスはその絶対温度に比例して、 $Z_{s,i}$  の増加に効くことがわかる。

(v) 換気条件式の誘導

建物内各開口部の流れ速度式を各室の室内静圧をパラメタとして表現すると、実際の計算にあたっては、その静圧を知る必要が生ずる。このためにここでは、「室内静圧は空気層の質量保存式を満足するように定まる」という仮説を用いる。この結果得られる式を換気条件式として後で使用する。

空気層の質量保存式(2.2)は  $dZ_{a,i}/dt = -dZ_{s,i}/dt$  を考慮すると、

$$\rho_a A_{R,i} \frac{dZ_{s,i}}{dt} + \sum \sum_{jk} \left\{ (AS_{jik} + AA_{jik}) - (AS_{ijk} + AA_{ijk}) - (SA'_{jik} - SA_{jik}) \right\} - M_{e,i} = 0$$

この第1項に高温層の式(2.10)を代入すると

$$\begin{aligned} & \rho_a A_{R,i} \left[ \frac{\dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{c,i} - Q_p M_{p,i}}{C_p \rho_a T_a A_{R,i}} + \frac{1}{\rho_a A_{R,i}} \left( \frac{T_e}{T_a} M_{p,i} + M_{s,i} - M_{p,i} \right) \right. \\ & \left. + \frac{1}{\rho_a T_a A_{R,i}} \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) T_{s,j} - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) T_{s,i} + (SA'_{jik} - SA_{jik}) T_a \right\} \right] \\ & + \sum_{jk} \left\{ (AS_{jik} + AA_{jik}) - (AS_{ijk} + AA_{ijk}) - (SA'_{jik} - SA_{jik}) \right\} - M_{e,i} = 0 \end{aligned}$$

従って整理すると結局、室内静圧の満足すべき式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{\dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{c,i} - Q_p M_{p,i}}{C_p T_a} + \frac{1}{T_a} \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) T_{s,j} - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) T_{s,i} \right\} \\ & + \sum_{jk} \left\{ (AS_{jik} + AA_{jik}) - (AS_{ijk} + AA_{ijk}) \right\} + \frac{T_e}{T_a} M_{p,i} = 0 \quad \dots\dots (2.11) \end{aligned}$$

式(2.11)から、高温ガスの流れは温度が高い程換気に対する影響が大きいが、火災ブルームやドア噴流への巻き込みは換気条件式に関係しないことが知られる。因みに上の仮説の代りに「室内静圧は室全体の質量保存式を満足するように定まる」という仮説から出発しても同じ結果が得られることは、室全体の質量保存式

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} (\rho_a A_{R,i} Z_{a,i} + \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i}) \\ & = \sum_{jk} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik} + AS_{jik} + AA_{jik}) - (SS_{ijk} + SA_{ijk} + AS_{ijk} + AA_{ijk}) \right\} + M_{p,i} \end{aligned}$$

に高温層の質量保存式(2.1)を代入すれば、空気層の保存式が得られることから明らかである。むしろこの仮説の方が一般性がある。

### 2.3 盛期火災モデルの定式化

フラッシュ・オーバーを経て十分成長したのちの単室火災の性状については、我国の川越・関根を始めとして、諸外国の多くの研究者により可成り詳細に調べられている。にもかかわらず、ここで敢えて取り上げた理由は2つあって、1つには、それらの研究が主として建築躯体構造の耐火力の評価を目的として行われたものであり、今回のように火災室から放出される高温ガスの挙動を調べたものは見当たらないからである。盛期火災の室から建物内部に流出した高温ガスの動きを調べることは、延焼面からは重要である。また理由のもう1つは、それらが殆んど全て単室についてのみ行なわれたものだからである。単室火災については、燃焼速度等の重要な量を換気因子  $A\sqrt{H}$  が大きく支配していることなどが知られている

が、一般に室は建物の一部をなす空間であり、室の開口部も窓のように直接屋外に開いたものもあれば建物内部の空間に開いたものもある。これらの開口が、火災室の換気に対して皆同じ働きをするとは考えにくい。このように盛期火災の室が小規模な建物の内部にあるときの火災の挙動を調べる足がかりを提示しておくことは意義が大きい。

(i) 盛期火災モデルの記述

フラッシュ・オーバを経て室内火災が盛期に至ると、初期火災と異り、室内の広範な可燃物が熱分解、燃焼を始めるので、温度も非常に高くなり周壁等への伝熱量も増大する。また、もはや火災ブルームも存在しなくなり高温ガス層と空気層との区別も消え、室中に高温ガスが充満し渦巻くようになって、火災室に流入する空気は全て高温ガスと盛んに混合し、中に含まれる可燃ガスを燃焼させる。しかし、一方建物内の火災室以外の室では、燃焼が生じていないので初期火災と同様2層流が保たれるが、高温ガスの温度や量が初期火災より大きいため、延焼の危険は一層深刻なものとなろう。

(ii) 盛期火災モデルの定式化

盛期火災モデルの定式化のために、まず次のような仮定をおく。

a) 火災室は高温ガスのみが充満し、その温度は一様である。

b) 火災室以外の室では、高温層が保たれる。

火災室では、高温層と空気層の区別がなく、一方火災室以外では、2層流が保たれるから、火災室と火災室以外とを分けて考える。但し記号は、初期火災の場合と同様とする。

1) 火災室以外の室

この場合は、初期火災の場合と同様であるから、式(21)～(27)がそのまま成立し、従って高温層の温度、厚さを求める式、換気条件式も全く(29)、(210)、(211)と等しくなる。但し、 $M_{s,i}$ 、 $M_{p,i}$ 、 $\dot{Q}_{F,i}$ は0である。

2) 火災室の場合

盛期火災の室では、空気層を考えず高温ガス層のみとするから、火災室の高温層の厚さは常に天井高に等しい。すなわち  $Z_{s,i} = H_{R,i}$ 。従って考える保存式は、高温ガス層の質量保存式、エネルギー保存式のみとなる。

A) 火災室ガスの質量保存式

盛期火災では、火災室へ流入した空気は空気層を作らず、室内の高温ガスと瞬時に混合すると考えてよい。また熱分解ガス  $M_{p,i}$  も空気を巻き込んで火災ブルームを作ることはなく、そのまま高温ガスに混合するから、火災室ガスの質量保存式は、

$$\frac{d}{dt} (\rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i}) = \sum_{jk} \left[ (SS_{jik} + SA'_{jik}) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) \right] + M_{p,i} + \sum_{jk} \left[ (AS_{jik} + AA_{jik}) - (AS_{ijk} + AA_{ijk}) - (SA'_{jik} - SA_{jik}) \right] \quad (i = \text{火災室}) \quad \dots\dots (2.12)$$

但し、右辺は流入する高温ガスも空気も全て火災室ガスの質量の増加をもたらすと考え、式(2.1)(2.2)の右辺を機械的に加えたものであるから、実際には実現されない項も含まれている。また、 $Z_{s,i} = H_{R,i}$  ( $i = \text{火災室}$ )であるが、式の形をあとで他の式と調整するため敢えて $Z_{s,i}$ を使っている。

#### B) 火災室ガスのエネルギー保存式

火災室へ流れ込む空気は、その温度  $T_a$  を基準とすることによって、熱エネルギーを持ち込まないと考えることが出来る。また盛期火災では、初期火災の場合に比べて燃料への伝熱を更に付加しなければならないが、燃料への伝熱は  $\dot{Q}_{R,i}$ ,  $\dot{Q}_{C,i}$  に含めて考えることにすると

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left\{ C_p \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i} (T_{s,i} - T_a) \right\} \\ &= \dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{C,i} + \left\{ -\dot{Q}_p + C_p (T_e - T_a) \right\} M_{p,i} \\ &+ \sum_{j,k} \left\{ C_p (SS_{jik} + SA_{jik}) (T_{s,j} - T_a) - C_p (SS_{ijk} + SA_{ijk}) (T_{s,i} - T_a) \right\} \\ & \dots\dots (2.13) \end{aligned}$$

となる。

#### C) 高温ガスの状態式

これは言うまでもなく、初期火災の場合と同様である。

$$\rho_{s,i} T_{s,i} = \rho_a T_a \quad \dots\dots (2.14)$$

#### (四) 火災室温度の式の誘導

火災室ガスのエネルギー保存式(2.13)の左辺を式(2.8)と同じように展開して、質量保存式(2.12)を代入すると、

$$\begin{aligned} C_p \rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i} \frac{dT_{s,i}}{dt} &= \dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{C,i} - \dot{Q}_p M_{p,i} + C_p M_{p,i} (T_e - T_a) \\ &+ C_p \sum_{j,k} \left\{ (SS_{jik} + SA_{jik}) (T_{s,j} - T_a) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) (T_{s,i} - T_a) \right\} \\ &- C_p (T_{s,i} - T_a) \left[ \sum_{j,k} \left\{ (SS_{jik} + SA'_{jik}) - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) \right\} + M_{p,i} \right. \\ &\left. + \sum_{j,k} \left\{ (AS_{jik} + AA_{jik}) - (AS_{ijk} + AA_{ijk}) - (SA'_{jik} - SA_{jik}) \right\} \right] \end{aligned}$$

これを整理すると

$$\begin{aligned} \frac{dT_{s,i}}{dt} = & \frac{T_{s,i}}{C_p \rho_a T_a A_{R,i} Z_{s,i}} \left[ (\dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{c,i}) - Q_p M_{p,i} \right] \\ & + \frac{T_{s,i}}{\rho_a T_a A_{R,i} Z_{s,i}} \sum_{jk} \left[ (SS_{jik} + SA_{jik})(T_{s,j} - T_{s,i}) - (AS_{jik} + AA_{jik}) \right. \\ & \left. - (AS_{ijk} + AA_{ijk}) \right] (T_{s,i} - T_a) \Bigg] + \frac{T_{s,i}}{\rho_a T_a A_{R,i} Z_{s,i}} M_{p,i} (T_e - T_{s,i}) \end{aligned} \quad \dots\dots (2.15)$$

これが火災室の温度を与える式となる。但し火災室に空気層がないため実際には、AA<sub>jik</sub>、AS<sub>jik</sub> および AA<sub>ijk</sub> の項は生じないので式(2.15)から取除くことも可能である。

(iv) 換気条件式の誘導

盛期火災の室の場合は、高温層の厚さ Z<sub>s,i</sub> は常に天井高 H<sub>R,i</sub> に等しく一定であるから、求める必要がない。従って火災室ガスの質量保存式(2.12)を使い、これが満足されるとして、換気条件式を求められる。式(2.12)の左辺は、状態式および Z<sub>s,i</sub> が一定であることを使うと、

$$\frac{d}{dt} (\rho_{s,i} A_{R,i} Z_{s,i}) = A_{R,i} Z_{s,i} \frac{d\rho_{s,i}}{dt} = A_{R,i} Z_{s,i} \left( -\frac{\rho_{s,i}}{T_{s,i}} \right) \frac{dT_{s,i}}{dt}$$

である。これを考慮して式(2.12)に温度の式(2.15)を代入して整理すれば結局

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}_{F,i} + \dot{Q}_{R,i} + \dot{Q}_{c,i} - Q_p M_{p,i}}{C_p T_a} + \frac{1}{T_a} \sum_{jk} \left[ (SS_{jik} + SA_{jik}) T_{s,j} - (SS_{ijk} + SA_{ijk}) T_{s,i} \right] \\ + \sum_{jk} \left[ (AS_{jik} + AA_{jik}) - (AS_{ijk} + AA_{ijk}) \right] + \frac{T_e}{T_a} M_{p,i} = 0 \quad \dots\dots (2.16) \end{aligned}$$

が火災室の換気条件式となる。これは、初期火災時の火災室および全ての場合の火災室以外の室の換気条件式(2.11)と全く同じものである。従って、火災室以外では Q<sub>F,i</sub>、M<sub>p,i</sub> が共に0であること、および周壁や燃料面、室外等への伝熱も一括して輻射伝熱 Q<sub>R,i</sub>、対流伝熱 Q<sub>c,i</sub> の形にまとめて扱うことのみ留意すれば、初期であるか盛期であるか、あるいは火災室であるか否かということに拘らず、換気条件式は形式的に同一のものが使用できることになる。

## 2.4 本章のまとめ

本章では、建築火災を初期と盛期に分け、高温ガス層と空気層を検査体積として基本的な保存式、状態式を考えることにより、先ず初期火災に於ては全ての室の高温層と厚さを求める式および換気条件式を導き、次に盛期火災に於ては、火災室以外の室の高温層の温度と厚さを求める式および換気条件式、また火災室の高温ガスの温度を求める式と換気条件式を導いた。この結果、高温層の温度と厚さを求める式は、初期火災時の建物内の全ての室と、盛期火災時の火災室以外の室では形式的に全く同じ式となり、それぞれ式(2.9)、(2.10)で表現される。また盛期火災時の火災室ガスの温度を定める式は、(2.15)のようになって式(2.9)と少し異なる。これは、初期の場合と異り、火災室へ流入する空気が全て高温ガスに混入するとしているためである。一方換気条件を定める式は、全ての場合について同じ形となり、式(2.11)〔あるいは式(2.16)〕で表わされることが分った。

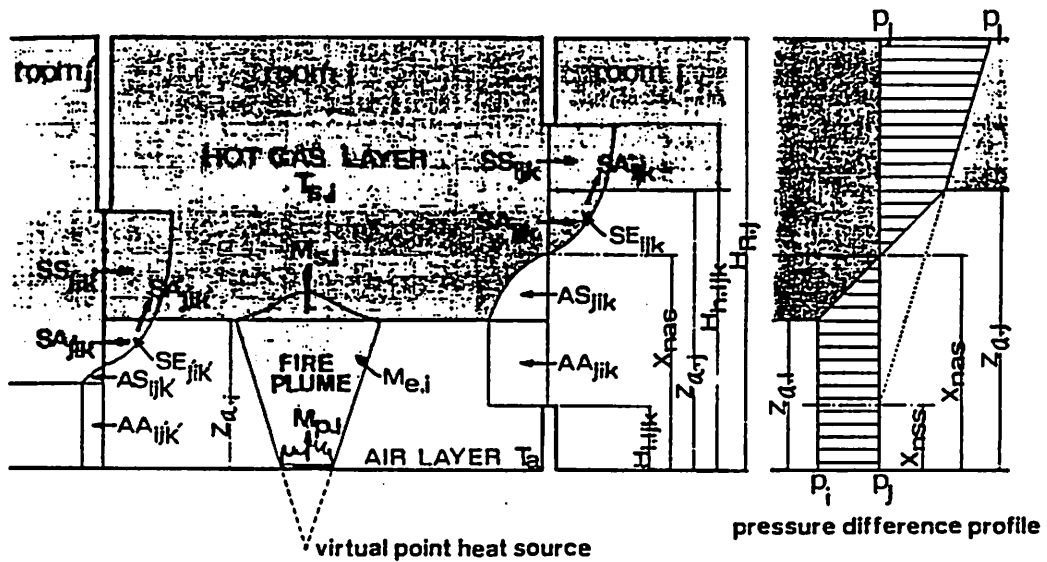


Fig 2.1 初期火災のモデル



## 2-3 計算の手順

この節では文献<sup>3)</sup>をそのまま引用し、電子計算機による計算の手順とプログラムの説明をする。

### 第7章 計算の手続

#### 7.1 本章の概要

本章では理論のまとめとして計算法の概略を述べる。2章～6章で述べて来た理論を実用化する場合には、計算上の技術や工夫が可成りの比重を占めるし、加えて計算法としてまとめておくことは理論の中心となる部分を明示する上で意義が大きいと思われるからである。以下では、まず計算に必要なデータについて述べ、次に場合によって使い分けされるサブルーチン群を列挙し、最後に高温層の温度と厚さを与える常微分方程式の積分を軸にした計算全体の構成について述べる。然しながら、計算法自体は多種多様に考え得るのであり、従ってここで述べる方法は一つの可能な方法に過ぎないものであつて、必ずしも最適のものでもないし、まして唯一のものでもないことは勿論のことである。

#### 7.2 必要データの入力と処理

建築火災の性状には建物の空間特性、室内周壁の熱的特性および火源となる可燃物の特性が関係するから、これらの条件を表わすデータの入力が必要なことは容易に知られる。ここではこれらの入力データと計算技法上の若干の処理について触れておく。

##### (i) 建物の空間特性

建物の空間特性を表わすものとして入力が必要なデータとその定義および、この入力データを処理して得られる新データの定義と意味はTab. 7.1の通りである。

##### (ii) 室内周壁の熱的特性

これは天井、床等への放射熱伝達の計算および熱伝導の計算に必要なものであつて、計算が必要な周壁の数だけ与える。これは、Tab. 7.2 にまとめた。

##### (iii) 可燃物の特性

これは火源の燃焼熱、熱分解潜熱の計算に必要なものである。入力データと処理についてはTab. 7.3 にまとめた。

#### 7.3 サブルーチン群

計算には燃焼速度、発熱量、放射および対流熱伝達、火災ブルームおよびドア噴流の上昇気流量、熱伝導、開口を通る高温ガスや空気の流量の計算が関与するが、これらはそれぞれサブルーチンの形でまとめておくのが便利である。この場合、種々の場合に普遍的に適用でき

るサブルーチンが理想的なのかも知れないが、そのようなサブルーチンは一般にプログラミングが難しいし使用方法も煩雑になるので、単一目的に近い比較的単純なサブルーチンを作成し、場合に応じて使い分ける方がむしろ実用的であろう。また複雑なサブルーチンより単純なルーチンの方が計算時間の点でも有利であるし、更に新たに解きたいような問題が生じたときにも前のサブルーチンを変更することなく、目的に応じたサブルーチンを1つ加えるだけで済む便もある。ここでは紙面等の都合上、各種サブルーチンのプログラムは掲載できないので、初期火災に関連するものについてのみ、仕様と主な流れ図を章末に示しておく。

#### 7.4 計算の組立て

既に2章で述べたように、小規模建築物の火災の解析の中心は根本的には初期火災の場合には一般的に式(2.9)および(2.10)、盛期火災の場合には火災室について式(2.15)その他の室について式(2.9)、(2.10)で与えられる式を解くことなので、これは1階連立常微分方程式を解く問題に他ならない。ただ連立常微分方程式を

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (7.1)$$

とおいたときの右辺の関数  $f(t, y)$  が少々複雑になるに過ぎない。連立常微分方程式の数値解法については、既に多くの解法が開発されているが、精度の点でEuler法等の一段型解法よりRunge-Kutta法、Runge-Kutta Gill法等の多段型解法の方が有利である。

然し、いずれにしろ常微分方程式の積分には汎用ルーチンが殆んどそのまま使用できるので、焦点は関数形  $f$  の決定の問題に絞られる。これは初期火災と盛期火災では少し違いが基本的には大同小異なので、この場合を念頭において関数形決定のサブルーチンを組み込んだ計算の全体構成の流れ図を以下に示しておく。

##### (i) メインプログラム

メインプログラムはFig.7.1に示すように、必要なデータを入力し、初期条件、計算時間々隔、計算時間を定め、常微分方程式を積分する汎用ルーチンを呼ぶ。また、計算が終了すれば結果を出力する。

入力データとしては、Tab.7.1~7.3に示したような個々の計算に特有なもの他、重力加速度  $g$ 、Stefan-Boltzmann定数  $\sigma$  のような普遍的な定数も幾つかある。

結果の出力は全部の計算が終了してからでもよいが、プログラム上は計算の途中で出力する形式にした方が、電子計算機の容量などの点で有利であろう。また常微分方程式を積分する汎用ルーチンの中に、出力のサブルーチンを組み込んでよい。

### (iii) 常微分方程式の積分の汎用ルーチン

これには前に述べたような Runge-Kutta 法 (RK法), Runge-Kutta Gill 法 (RKG法), Milne 法などの汎用ルーチンがある。この場合, 関数形は, FUNCTION 文で定めるものと SUBROUTINE で定めるものとあるが, 大抵の場合両方使える。今回のように関数形の決定手続きに SUBROUTINE を多く使うような場合は, SUBROUTINE を使う方が一貫しているであろう。FUNCTION 文で関数形を定めるようになっている汎用ルーチンでも比較的簡単に SUBROUTINE を使うものに変更できる。

### (iii) 関数形決定のサブルーチン

このサブルーチンは初期火災を解くのか, 盛期火災を解くのかといった問題の違いにより異なる。章末に初期火災に対応するものを DFNC として示しておく。一般には最初に適当なサブルーチンを呼んで関数決定のために必要な量を全て求め, その後で式 (2.9)(2.10) などの式の右辺を作ればよい。各サブルーチンを呼ぶ順序が計算の精度に影響する場合も考えられるが, 計算の時間々隔を小さくすればそれ程問題にならない。変化が小さい量を計算するサブルーチンは, 計算回数を適当に省略しても差支えない。なお室に高温ガスが入る前は, 実際は高温ガス層の厚さは 0 であるが, 高温層の温度を定める式 (2.9) の右辺の分母には高温層の厚さが入っているため, 初期の時点で式 (2.9) が解けないことになるので, 最初, 適当に薄い常温の層を仮想しておくことによって, この難点を避ける。

## 7.5 本章のまとめ

小規模建築物の火災の解析方法の中心は, 基本的には式 (2.9), (2.10) などの常微分方程式の積分の問題に帰せられる。このためには Runge-Kutta Gill 法などの汎用ルーチンが使用できるので, 問題に応じて常微分方程式の関数形の決定方法を工夫すればよい。この場合, 燃焼速度, 発熱量, 輻射および対流熱伝達量, 開口部の高温ガスや空気の流量, 火災ブルームおよびドア噴流の気流量, 熱伝導等のサブルーチンを用意しておき問題に応じてこれらを使い分けるようにするのが便利である。

Tab. 7.1 建物空間特性に関する入力データと処理

入力データ	定義	備考
$N_f$	建物階数	
$N_r$	建物内部空間総数	建物内の居室、階段室等。
$N_{fR} (i=1, N_r)$	建物各階毎の内部空間数	各階の居室等、階段室含まず。
$H_f (i=1, N_f)$	建物各階の階高 (m)	
$B_{R,i} (i=1, N_r)$	各内部空間の幅 (m)	
$D_{R,i} (i=1, N_r)$	" 奥行き (m)	
$H_{R,i} (i=1, N_r)$	" 天井高 (m)	一般には階高と異なる。
$I_{prog,i} (i=1, N_r)$	多数室換気計算の作業変数、空間 i の換気条件式が満足されたとき、次に計算する空間の番号	
$I_{ret,i} (i=1, N_r)$	多数室換気計算の作業変数、空間 i の換気条件式が満足されなかったとき 戻って計算する空間の番号	
$KN_{ij} (i,j=1, N_r)$	内部空間 i と j 間の開口の数	
$B_{w,ijk} (i,j=1, N_r; k=1, KN)$	内部空間 i と j 間の k 番目の開口の幅 (m)	
$H_{h,ijk} (i,j=1, N_r; k=1, KN)$	" " の上端高さ (m)	
$H_{l,ijk} (i,j=1, N_r; k=1, KN)$	" " の下端高さ (m)	
処理データ	定義	備考
$A_{R,i} (i=1, N_r)$	$: B_{R,i} \times D_{R,i}$ 室の面積 (m <sup>2</sup> )	
$H_{Rpi} (i=1, N_r)$	$: H_{R,i} + \sum_{k=1}^{室 i が属する階-1} H_{f,k}$ 換気計算用の天井高さ (m)	静圧の基準レベルを全て1階床レベルに揃えることに付随する処理
$H_{hp,ijk} (i,j=1, N_r; k=1, KN)$	$: H_{h,ijk} - \sum_{k=1}^{開口 ijk が属する階-1} H_{f,k}$ 換気計算用の開口上端高さ (m)	"
$H_{lp,ijk} (i,j=1, N_r; k=1, KN)$	$: H_{l,ijk} + \sum_{k=1}^{開口 ijk が属する階-1} H_{f,k}$ 換気計算用の開口の下端高さ (m)	"

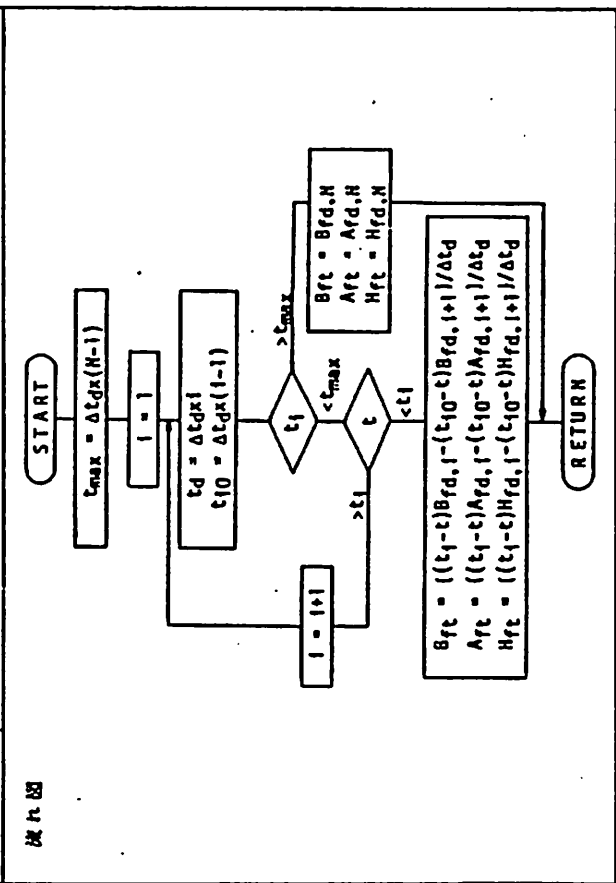
Tab 7.2 熱的特性に関する入力データと処理

入力データ	定義	備考
$\lambda_w$ (各室, 各周壁について)	周壁材の熱伝導率 (kcal/m·s·°k)	差分による熱伝導計算の差分点数を定めるため。
$C_w$ ( " )	" 比熱 (kcal/kg·°k)	
$\rho_w$ ( " )	" 密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
$\ell_w$ ( " )	" 厚さ (m)	
$\epsilon_w$ ( " )	" 輻射率	
Ndiv ( " )	" 分割数	

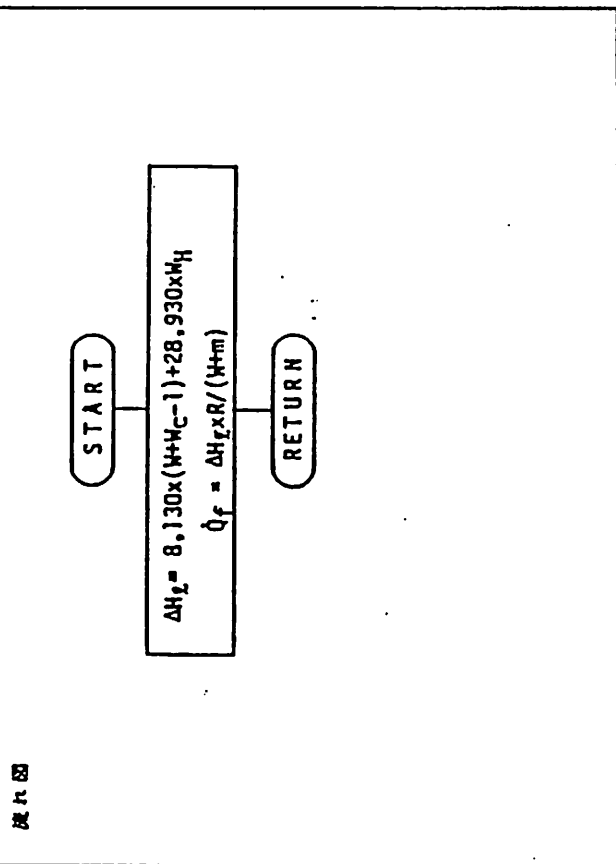
Tab 7.3 火源特性に関する入力データ

入力データ	定義	備考
$N_{fbo}$ $L_{fp}$	火災室となる空間の番号 火災室内に於ける火源の位置を示すパラメタ $L_{fp} = 1, 2, 4$ はそれぞれ室中央, 壁際, 室隅を表わす。	1 - Wは炭素残渣
m	乾材 1 kgに対する含水量 (kg)	
W	火源の燃焼率	
Wc	" 炭素の重量組成 (kg)	
W <sub>H</sub>	" 水素の " (kg)	
W <sub>o</sub>	" 酸素の " (kg)	
Q <sub>exp</sub>	総括燃焼熱の実験値 (kcal/kg)	
T <sub>e</sub>	分解ガスの放出温度 (°k)	
処理データ	定義	備考
$\Delta t_d$	入力される火源データの時間間隔 (s)	火源条件を入力データとして与える場合
Nd	入力される火源データ数	
$B_{fd,i}$ (i=1, Nd)	火源の燃焼速度 (kg/s)	
$A_{fd,i}$ (i=1, Nd)	火源の面積 (m <sup>2</sup> )	
$H_{fd,i}$ (i=1, Nd)	火源の床上高さ (m)	
L <sub>po</sub>	: $8.130 Wc + 34.150 W_H - Q_{exp}$	基準温度における熱分解潜熱 (kcal/kg)
Q <sub>p</sub>	: $L_{po} + C_{char}(T_s - T_a)(1 - W) + C_p(T_e - T_a)W + 580m + C_{vapor}(T_e - T_a)m$	突火災時の熱分解潜熱 (kcal/kg)

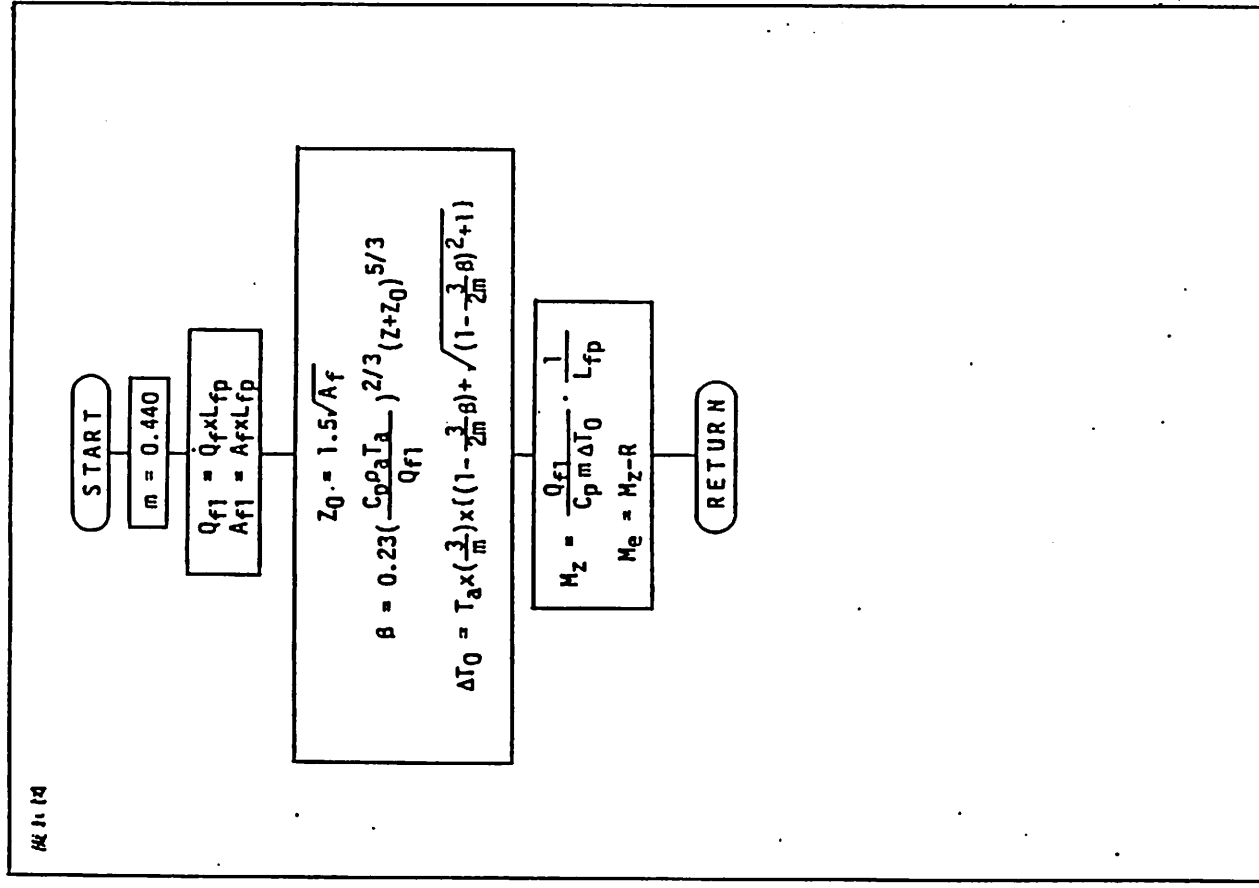
サブルーチン名	B R A T E 1
目的	火焔の燃焼速度、面積、床面上の高さが、ある時間間隔 $\Delta t_d$ 毎に与えられている時、任意の時間 $t$ に於けるそれらを繰返時間間で求める。
入	$t$ : 時間 $B_{fd,1}, A_{fd,1}, H_{fd,1}$ : 1番目の燃焼速度、火焔面積、火焔高さのデータ。 $\Delta t_d$ : データの時間間隔。 $N$ : データ数。 $B_{ft}, A_{ft}, H_{ft}$ : 時間の燃焼速度、火焔面積、火焔高さ。
出力	変数: $t, N$ 配列: $B_{fd}, A_{fd}, H_{fd}$
備考	(1) $i-1$ のデータは時間 $t=0$ に対応するよう与える。 (2) $t$ の入力および $B_{ft}, A_{ft}, H_{ft}$ の出力には引数を使う。 (3) $N_d, B_{fd}, A_{fd}, H_{fd}$ の入力には COMMON を使う。 (4) 引数で与えられた $t$ がデータの与えられている時間を超過する場合は最後のデータをそのまま代入する。



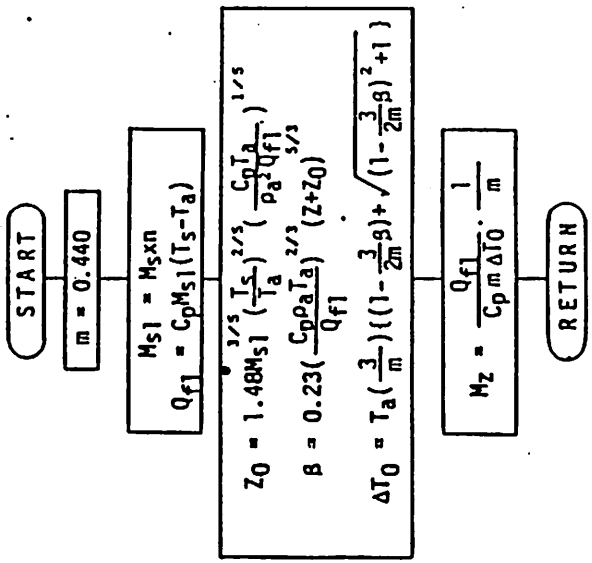
サブルーチン名	Q R A T E 1
目的	火焔の燃焼速度が与えられたとき、熱分解ガスの燃焼による低発熱量を計算する。
入	$W$ : 火焔となる燃料 1 kg の燃焼率 (kg) $m$ : 燃料 1 kg に対する含水量 (kg) $W_c, W_H$ : 炭素、水素の重量組成 (kg) $Q_p$ : 着火時の熱分解熱 (kcal/kg) $T_e$ : 分解ガスの放出温度 (°C) $R$ : 燃焼速度 (kg/s) $\Delta H_f$ : 燃料 1 kg 当りの分解ガスの燃焼による低発熱量 $Q_f$ : 分解ガスの燃焼による低発熱量 (kcal/s)
出力	変数: $W, m, W_c, W_H, Q_p, T_e, R$
備考	(1) $W, m, W_c, W_H, Q_p, T_e$ のインプットには COMMON を使う。 (2) $R$ のインプット、 $Q_f$ のアウトプットには引数を使う。



パラメータ名	FPLUM
目的	火炎の発熱量、面周 位置、燃焼速度および火炎上の高さの算出されたとき、假想気熱源プログラムの高さに沿って燃焼する火炎プラーム上昇気流場、巻き込み空気量を求める。
変数	<p> <math>T_a</math> : 気流周囲の空気温度 (°K)  <math>\rho_a</math> : " 密度 (kg/m<sup>3</sup>)  <math>C_p</math> : 気体の比熱 (kcal/kg °K)  <math>m</math> : 気体の中心軸上高度に対する平均速度の比  <math>\dot{Q}</math> : 火炎の発熱速度 (熱分解熱を元引いたもの) (kcal/s)  <math>A_f</math> : 火炎面積 (m<sup>2</sup>)  <math>L_{fp}</math> : 火炎室内の火炎位置を示すパラメータ, <math>L_{fp} = 1.24</math> はそれぞれ中央、準周、頂周を表わす。  <math>R</math> : 火炎の燃焼速度 (kg/s)  <math>Z</math> : 上昇気流高さ、巻き込み空気量を計算すべき高さ (m)  <math>Z_0</math> : 火炎面から仮想熱源までの距離 (m)  <math>\beta</math> : プログラム中で定義される係数  <math>\Delta T_0</math> : 気流中心軸上の温度 (周囲との温度差) (°K)  <math>M_z</math> : 火炎上の高さ Z までの上昇気流質量 (kg/s)  <math>M_e</math> : 火炎上の高さ Z まで K O を送られる空気量 (kg/s) </p>
入力	変数: $T_a, \rho_a, C_p, Q_f, A_f, L_{fp}, Z$ 定数: $M_z, M_e$
備考	<p>(1) <math>T_a, \rho_a, C_p</math> のインフラットには COMMON を使う。  (2) <math>Q_f, A_f, L_{fp}, Z</math> のインフラット, <math>M_z, M_e</math> のアウトラットには引数を使う。  (3) Z として火炎面から高温層の底までの距離を与えると <math>M_z</math> が高温層に流入する空気量, <math>M_e</math> がそこまでの空気の巻き込み量になる。</p>



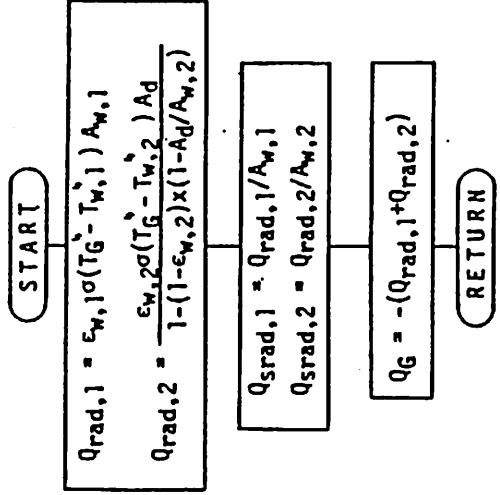
流れ図



サブルーチン名	DRJET
目的	開口から噴出するガスの温度、噴出量、巻き込みモードおよび噴出流の中心からの高さを与えて、その高さでの気流量を反転点線モデルに基づいて計算する。
記号	<p> <math>T_a</math> : 気流周囲の空気温度 (°C)  <math>\rho_a</math> : 気流周囲の空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)  <math>C_p</math> : 気体の比熱 (kcal/kg·°C)  <math>m</math> : 気流中心軸上の温度に対する平均温度の比  <math>T_s</math> : 噴出ガス温度 (°C)  <math>M_s</math> : 開口からの噴出ガス量 (kg/s)  <math>n</math> : 巻き込みモード, <math>n = 1, 2, 4</math>  <math>Z</math> : 気流量を計算すべき噴出流中心からの高さ (m)  <math>Z_0</math> : 噴出中心から反転点線までの距離 (m)  <math>\beta</math> : プログラム中で定義される係数  <math>\Delta T_0</math> : 気流中心軸上の温度  <math>M_z</math> : 高さ Z での上昇気流量         </p>
入力	変数: $T_a, \rho_a, C_p, T_s, M_s, Z$
出力	変数: $M_z$
備考	<p>           (1) <math>T_a, \rho_a, C_p</math> の入力には COMMON を使用する。            (2) <math>T_s, M_s, Z</math> の入力, <math>M_z</math> の出力には引数を使用する。            (3) Z として開口噴出中心から高温側の延までの距離を与えると, <math>M_z</math> が高温側に流入する気流量となる。         </p>



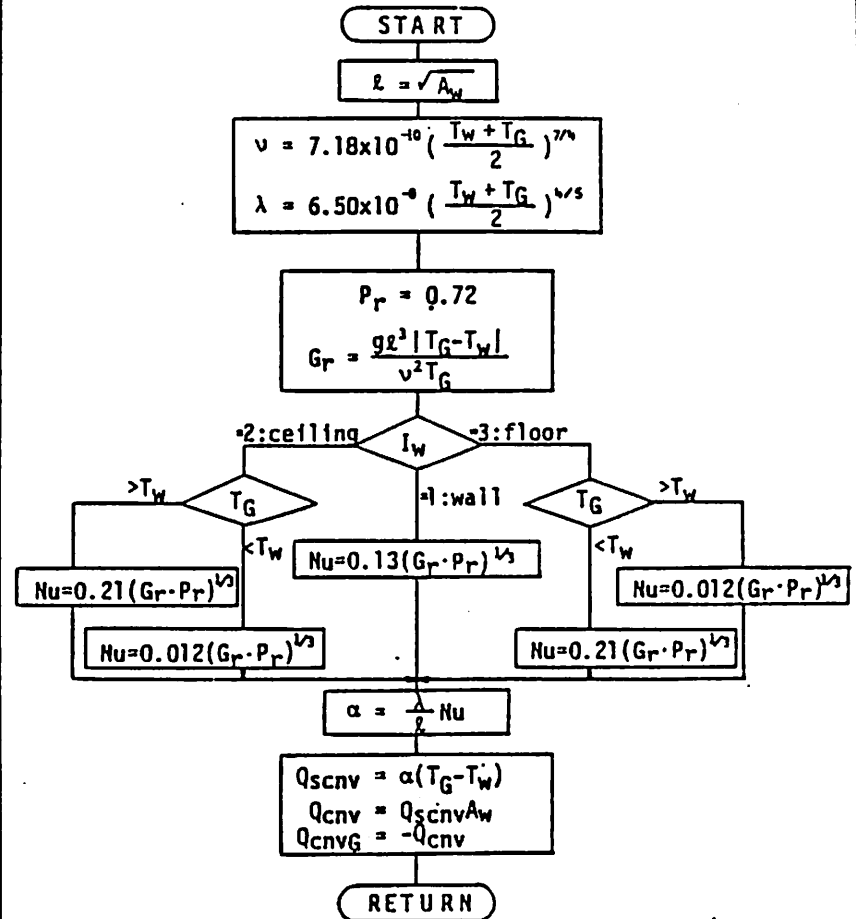
流れ図



サブルーチン名	HTRAD
目的	<p>炉上部の高温ガス層が炉体のとき、天井、床それぞれの表面温度、面積、放射率および高温層の温度、高温層の底の面積を与えて、天井、床への熱放射量および高温ガスの吸収する放射量を計算する。</p>
記号	<p>σ : Stefan-Boltzmann 定数 ( kcal/㎡ s °k<sup>4</sup> )            i : 天井、床を識別する番号、i = 1,2はそれぞれ天井、床を意味する。            Tw,i : 天井、床の表面温度 ( °k )            Aw,i : 天井、床の面積 ( ㎡ )            εw,i : 天井、床の放射率            Tg : 高温ガス層の温度 ( °k )            Ad : σ の底面積 ( ㎡ )            Qrad,i : 天井、床への全放射熱量 ( kcal/s )            Qsrad,i : 天井、床への単位面積当たりの放射熱量 ( kcal/㎡・s )            Qg : 高温ガスの吸収する放射熱量 ( kcal/s )</p>
入力	<p>変数: σ, Tg, Ad            配列: Tw, Aw, εw</p>
出力	<p>変数: Qg            配列: Qrad, Qsrad</p>
備考	<p>(1) 高温ガスに置かれている遮熱部部分も天井と見なす。空気層に露出している遮熱部部分も床と見なす。            (2) σ の入力には COMMON を使う。            (3) Tg, Ad の入力には引数を使う。Ad は普通遮熱の面積をとる。            (4) Tw, Aw, εw の入力には COMMON でも引数でもよい。後者の場合には配列を使っておく。</p>

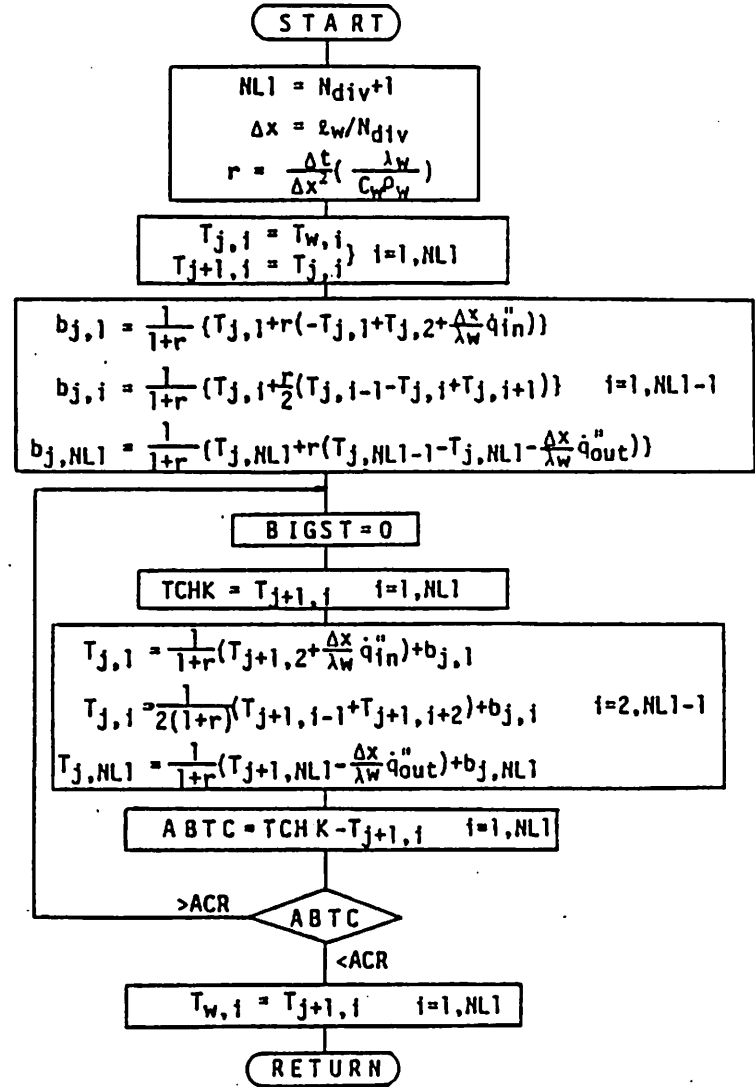
サブルーチン名	HTCNV
目的	周壁の面積、表面温度、種類および高温ガスの温度が与えられたとき、放れを自然乱流と仮定して、周壁面への対放熱伝達量を計算する。
変数	$g$ : 重力加速度 ( $m/s^2$ ) $l$ : 伝達代表長さ ( $m$ ) $\nu$ : 空気の動粘性係数 ( $m^2/s$ ) $\lambda$ : 空気の熱伝導率 ( $kcal/m \cdot s \cdot ^\circ k$ ) $Pr$ : プラントル数 $Gr$ : グラスホフ数 $Nu$ : ヌセルト数 $\alpha$ : 熱伝導率 ( $kcal/m^2 \cdot s \cdot ^\circ k$ ) $T_w$ : 周壁の表面温度 ( $^\circ k$ ) $A_w$ : 周壁の表面積 ( $m^2$ ) $T_g$ : 高温ガスの温度 ( $^\circ k$ ) $l_w$ : 周壁の種類を表わすパラメーター、 $l_w = 1, 2, 3$ はそれぞれ垂直壁、天井、床を表わす。 $Q_{env}$ : 周壁への全対放熱伝達量 ( $kcal/s$ ) $Q_{scnv}$ : 周壁への単位面積当りの対放熱伝達量 ( $kcal/m^2 \cdot s$ ) $Q_{cnvg}$ : 対放熱伝達により高温ガスの得る熱量 ( $kcal/s$ )
入力	変数: $g, T_w, T_g, A_w, l_w$
出力	変数: $Q_{env}, Q_{scnv}, Q_{cnvg}$
備考	(1) ②の入力には COMMON を使用する。 (2) $T_w, T_g, A_w, l_w$ の入力, $Q_{env}, Q_{scnv}, Q_{cnvg}$ の出力には引数を使う。 (3) 天井、床への熱伝達は周壁が垂直壁で囲まれた場合の熱伝達率を $Gr \cdot Pr$ の範囲に拘らず使用。 (4) 1回の CALL より一つの面への伝熱量しか計算しない。したがって多くの面があるときは $Q_{cnvg}$ は HTCNV を CALL するサブルーチン内で加算する必要がある。

流れ図

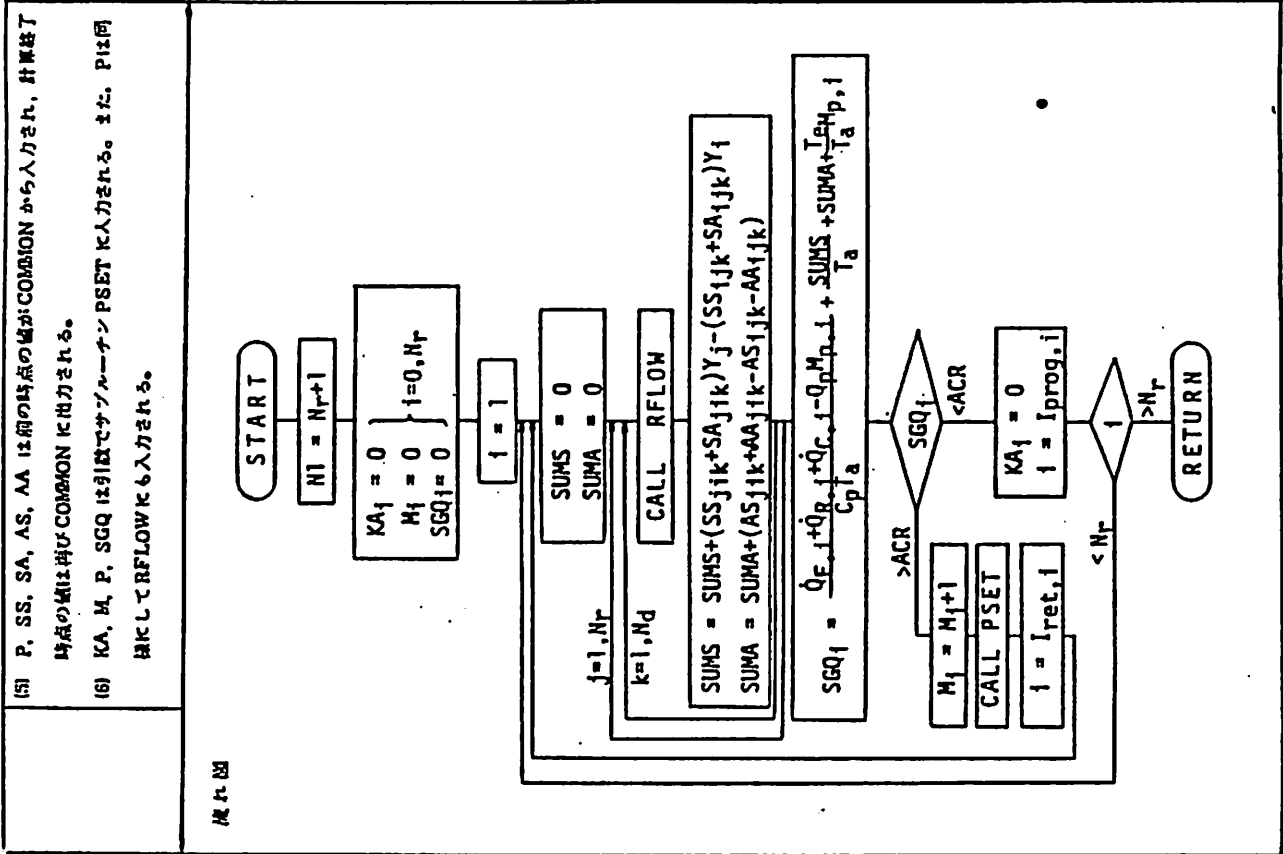


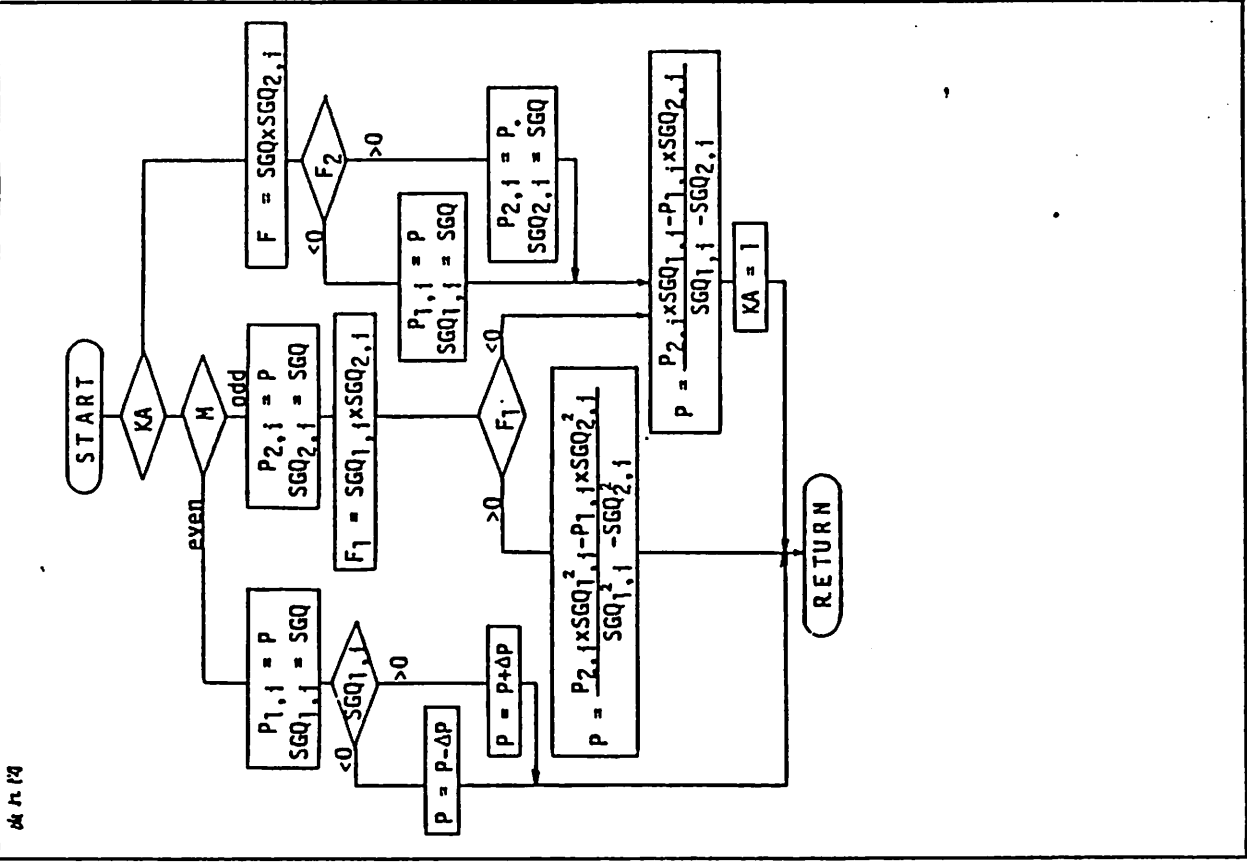
サブルーチン名	CNDCT
目的	平面板の前の時点の温度、加熱側表面からの入射熱流束、非加熱側表面からの放射熱流束、時間間隔を与えて次の時点の領域の温度を反復法で計算する。
記号	$\lambda_w$ : 平面板の熱伝導率 ( kcal/m·s·°k ) $C_w$ : 平面板の比熱 ( kcal/kg·°k ) $\rho_w$ : 平面板の密度 ( kg/m <sup>3</sup> ) $\ell_w$ : 平面板の厚さ ( m ) Ndiv : 平面板の分割数 $\dot{q}_{in}$ : 加熱側表面からの入射熱流束 ( kcal/m <sup>2</sup> ·s ) $\dot{q}_{out}$ : 非加熱側表面からの放射熱流束 ( kcal/m <sup>2</sup> ·s ) $T_{w,i}$ : 平面板の差分点 i における温度 ( °k ) $T_{j,i}$ : 前時点における平面板の差分点 i における温度 ( °k ) $T_{j+1,i}$ : 次の時点 " " ( °k ) $\Delta t$ : 時間間隔 ( s ) $\Delta x$ : 空間差分点間隔 ( m ) ACR : 計算打ち精度
入力	変数: $\lambda_w, C_w, \rho_w, \ell_w, Ndiv, \dot{q}_{in}, \dot{q}_{out}, \Delta t$ 配列: $T_w$
出力	配列: $T_w$
備考	(1) $\dot{q}_{in}, \dot{q}_{out}, \Delta t$ の入力には引数を使用する。 (2) $\lambda_w, C_w, \rho_w, \ell_w, Ndiv$ の入力は COMMON を使用する。 (3) $T_w$ の入出力には COMMON を使い、前の時点の $T_w$ を入力して計算終了時点の $T_w$ を出力する。 (4) 反復法は Gauss-Seidel 反復法を使う。

図 14



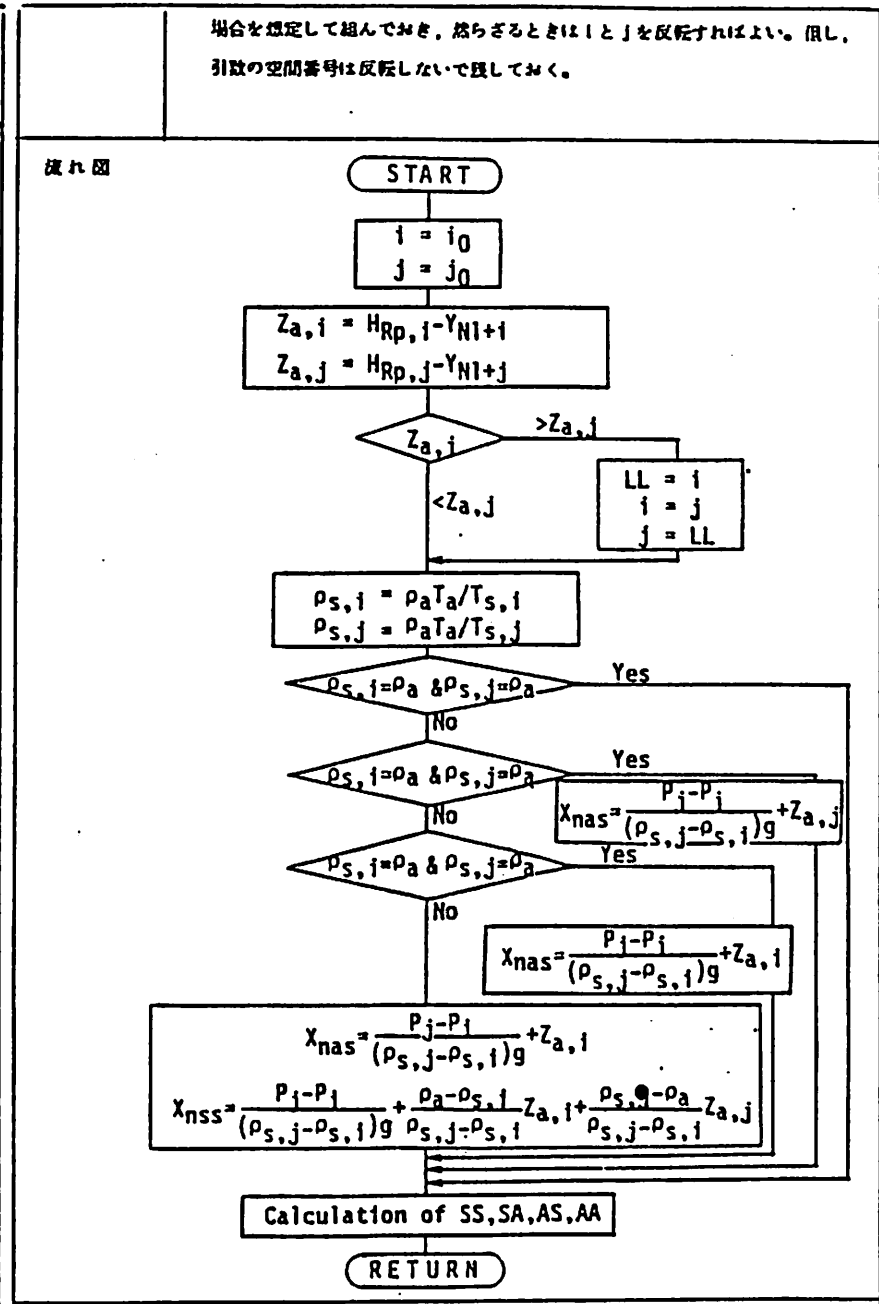
サブルーティン名	VENTL
目的	サブルーティンが呼び出された時点で建物の全内部空間に戻って換気条件式を満足するよ うに室内静圧を定める。高温ガスや空気の流れ速度も同時に定まる。
変数	<p>Nr : 建物内部空間数</p> <p>Ta : 室温空気の流れ度 (%)</p> <p>Te : 熱分解ガスの燃焼温度 (%)</p> <p>Cp : 気体の比熱 ( kcal/kg·°K )</p> <p>Qp : 可燃物の熱分解消熱 ( kcal/kg )</p> <p>Yi : 高温ガス種iの濃度 (%) と質量 ( m )</p> <p>Mp, i : 燃焼速度 ( kg/s )</p> <p>Qi, i : 分解ウスの燃焼による既発熱 ( kcal/s )</p> <p>Qr, i : 総引熱伝達で高温ガスが得る熱流 ( kcal/s )</p> <p>Qc, i : 対放熱伝達で " " ( kcal/s )</p> <p>SSijk, SAijk : 内部空間 j 間の k 番目の開口を通る高温ガスの流速 ( kg/s )</p> <p>ASijk, AAijk : " " " " 空気の流速 ( kg/s )</p> <p>Nd, ij : 内部空間 j 間の開口数</p> <p>Pi : 内部空間 i の静圧 ( Pa )</p> <p>Mi : 静圧決定のための作業変数</p> <p>KAI : " "</p> <p>Iprog, i : 空間 i の換気条件式が満足されたとき次に計算すべき室の番号。</p> <p>Iret, i : 空間 i の換気条件式が満足されなかつたとき戻って計算すべき室の番号。</p> <p>ACR : 計算打ち切戻。</p>
入力	変数: Ta, Te, Qp, Cp, Nr 配列: Mp, T, Qi, Qr, Qc, P, SS, SA, AS, AA, Nd, Iprog, Iret.
出力	配列: P, SS, SA, AS, AA
備考	<p>(1) このサブルーティンでは更にサブルーチンRFLOWとPSETが呼ばれ、これら の両方で計算が進められる。</p> <p>(2) Qi, i, Mp, i は火災強以外では0である。</p> <p>(3) Nr, Yの配列の番号を使い、その値は全てCOMMONをばって入力する。</p> <p>(4) Yi ( i=1, Nr ) に建物内部空間の温度、Yi ( i=Nr+1, 2Nr ) に高温ガ ス種の質量が入っている。残りはサブルーチンRFLOWで使用する。</p>





サブルーチン名	PSET
目 的	1 半の換気条件式が1室の静圧に対して単調減少関数であることを利用し, Regular-Falsi法の後段と放物線近似法の併用による逐次近似法で換気条件式を満す静圧値を計算する。
記 号	<p>P : 空間1の静圧 ( Pa )</p> <p>JP : 静圧の増分 ( Pa )</p> <p>SGQ : 空間1の換気条件式の計算値</p> <p>M : 静圧決定のための作業変数, 空間1に関する換気条件式の計算回数。</p> <p>KA : 静圧決定のための作業変数, 放物線近似法の段階のとき 0, Regular-Falsiの後段に移ったとき 1</p> <p>I : 空間の番号</p> <p>P1, P2 : 前段階の静圧値を記憶するための配列</p> <p>SGQ1, SGQ2 : 前段階のSGQを記憶するための配列</p> <p>変数: P, SGQ, M, KA, I</p>
出 力	変数: P
備 考	<p>(1) 全ての変数と引数を使って入出力する。但し, VENTLから入力されたP, SGQは, サブルーチン内の配列に不変になるまで記憶される。</p> <p>(2) ΔPはある程度逐次的に定めなければならない。今回のような小規模建物の場合は ΔP = 0.01 Pa 前後が比較的よかった。然し電算機の機種などにも依存するかも知れない。</p> <p>(3) 本計算法によるプログラムは福研の山名健男技官の作成。</p>

サブルーチン名	RFLOW
目的	内部空間 i と j の静圧値と開口 k の寸法が与えられたとき、開口を通る高温ガスと空気の流量を計算する。
変り	<p>g : 重力加速度</p> <p>NI : 内部空間数 + 1 ( 外気 )</p> <p>ia : 質量収支をサブルーチン BENTL で計算している内部空間の番号。</p> <p>ja : 空間 ia に開口で連絡している空間の番号、外気も含む。</p> <p>k : 空間 ia と ja 間の k 番目の開口。</p> <p>Hrp, i : 空間 i の 1 階床レベルから計った天井高。</p> <p>Bw, ijk : 空間 i と j 間の k 番目の開口の幅 ( m )</p> <p>Hhp, ijk : 開口 k の上端高さ、1 階床レベルから計る ( m )</p> <p>Hlp, ijk : 開口 k の下端高さ、 " " ( m )</p> <p>Yi : 空間 i の高温剤温度 ( °K )、YNI+1 : 空間 i の高温剤高さ ( m )</p> <p>Za, i : 1 階床レベルから高温剤までの高さ ( m )</p> <p>ρs, i : 空間 i の高温剤の密度 ( kg/m<sup>3</sup> )</p> <p>ρa : 空気の密度 ( kg/m<sup>3</sup> )、Ta : 空気の温度 ( °K )</p> <p>PI : 1 階床レベルでの空間 i の静圧 ( Pa )</p> <p>Xnas : 高温剤と空気の中性帯高さ ( m )</p> <p>Xnas : 高温剤間の中性帯 ( m )</p> <p>SS, SA : 高温ガスの質量流速 ( kg/s )</p> <p>AS, AA : 空気の質量流速 ( kg/s )</p>
入力	変数: g, Ta, ρa, NI, ia, ja, k 配列: Y, Bw, Hhp, Hlp
出力	配列: SS, SA, AS, AA
備考	<p>(1) g, Ta, ρa, Bw, Hhp, Hlp の入力は COMMON を通して行う。</p> <p>(2) NI, ia, ja, k, Y の入力には引数を使う。</p> <p>(3) 各流は SS, SA, AS, AA の出力は COMMON を通して行う。1 回の CALL で i - j, j - i に関連するもののみ出力する。</p> <p>(4) 流れ図は紙面の都合上、細部は示さない。各 SS, SA, AS, AA の具体的計算は 6 章の Tab 6.1 - 6.4 に従って行う。</p> <p>(5) プログラムは Za, i &lt; Za, j とならば空間 i の高温剤の方が j のそれより低い</p>



サブルーチン名	DFNC
目的	建築物内部空間の高温層の温度と燃えを与える常微分方程式の数値解を求める。
記号	<p>N : 建物内部空間数 NI : N+1</p> <p>i : 建物内部空間の番号</p> <p>j : 空間の番号, 外気 (j = NI) も含む</p> <p>nd : i 間の開口数</p> <p>k : 開口の番号 (各 j 間毎)</p> <p>Cp : 気体の比熱 ( kcal/kg °K )</p> <p>ρa : 空気密度 ( kg/m<sup>3</sup> )</p> <p>Ta : 空気の温度 ( °K )</p> <p>Te : 火炎からの熱分解熱 ( kcal/kg )</p> <p>Qp : 火炎の熱分解熱 ( kcal/kg )</p> <p>Mp,i : 燃焼速度 ( kg/s )</p> <p>Ms,i : 空間 i の高温ガス層に流入する火炎プロセルムの流量 ( kg/s )</p> <p>Q<sub>F,i</sub> : 熱分解ガスの燃焼による発熱量 ( kcal/s )</p> <p>Q<sub>R,i</sub> : 空間 i の放射熱伝達により高温ガスの得る熱量 ( kcal/s )</p> <p>Q<sub>C,i</sub> : 空間 i の対流熱伝達により高温ガスの得る熱量 ( kcal/s )</p> <p>A<sub>R,i</sub> : 空間 i の面積 ( m<sup>2</sup> )</p> <p>SSijk, SAijk : 空間 i 間の k 番目の開口を通して i から j に送れる高温ガス流量 ( kg/s )</p> <p>ASijk, AIjk : 空間 i 間の k 番目の開口を通して i から j に送れる空気の流量 ( kg/s )</p> <p>SAijk : 空間 i の高温ガス層に流入する i 間の開口 k のドブ管流量 ( kg/s )</p> <p>Y<sub>i</sub> : 空間 i の高温ガス層の温度と燃え。i=1, NI に燃え。i=NI+1 - 2NI に燃えが入っている。</p> <p>f<sub>i</sub> : 燃え値</p>
変数	<p>(1) 引数により時間、時間間隔、Y, N を入力しを入力する。</p> <p>(2) Cp, ρa, Ta, Te, Qp, Ar は COMMON より入力する。</p> <p>(3) Mp, i は火炎流の SA BRATEI から引数で入力する。他は COMMON から ( 0 ) 。</p> <p>(4) QR, i は火炎流の SQRATEI から引数で入力する。他は COMMON から ( 0 ) 。</p> <p>(5) Ms, i は火炎流の SFPLUM から引数で入力する。他は COMMON から ( 0 ) 。</p>

16) Q<sub>p,i</sub> は HTRAD から引数で入力する。

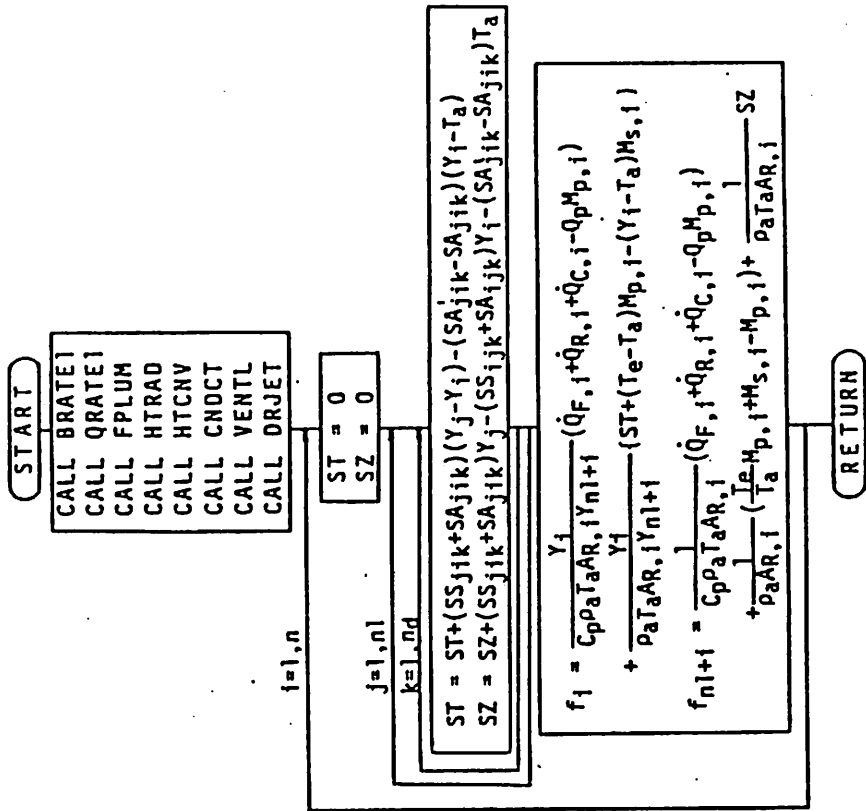
17) Q<sub>r,i</sub> は HTCNV から引数で入力する。

18) SS, SA, AS, AI は VENTL から COMMON を通して入力する。

19) SA<sub>i</sub> は DRJET から COMMON を通して入力する。

20) CNDCT はその時点の燃焼の温度を計算し、COMMON に出力する。使って次の時点の伝熱係数がこの温度を使って計算されることになる。また常微分方程式の係数のルーチンが多段階の場合は材料のステップしか CALL しない。

例 10



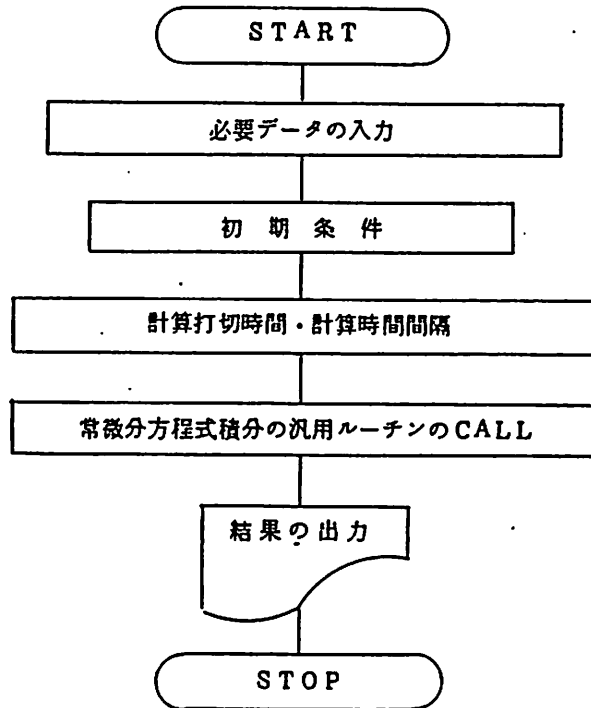


Fig. 7.1 メインプログラム

### 参 考 文 献

- 1) 雨宮綾夫, 田口武夫編: 数値解析とFORTRAN 増補第2版, 丸善, (昭和48年).
- 2) 戸川隼人: 数値計算技法, オーム社, (1972).
- 3) 戸川隼人: 微分方程式の数値計算, オーム社, (1973).
- 4) P. Henrici 著, 清水留三郎, 小林光夫共訳: 計算機による常微分方程式の解法 I (サイエンス・ライブラリー情報電算機 = 16), サイエンス社, (昭和48年).



## 2-4 二層モデルでの入力条件

主な入力条件は、建物の空間特性（各空間の床面積と高さ、開口の位置と大きさ）と火災室での発熱量の時間変化である。ここに空間の割付とその名称を図6に示す。ここでは計算の便宜上14の部屋に分割した。また火災室が1階層の場合、これと開口を持つ隣室は2.F1で、2階層の場合は4.C1である。外気と共通開口部を持つのはエレベーターホール(3.R1, 8.R2)の自然排煙口、両端の部屋(11.C7, 14.C4)の端部開口だけであり、火災室には外気との開口はなく、通路内の区画もない。燃烧データは火源面積( $m^2$ )、質量減少速度( $kg/s$ )、または燃烧速度( $kg/s$ )を入力条件とし、発熱速度( $kcal/s$ )を計算する。

初期条件としては室内・外気ともに、気温  $20^{\circ}C$ ・湿度 70% の値とし、各室の静圧の計算時間間隔は 1秒、出力は 30秒おきで 300秒まで計算している。

火源の大きさ等の修正は 3-1 で述べる。

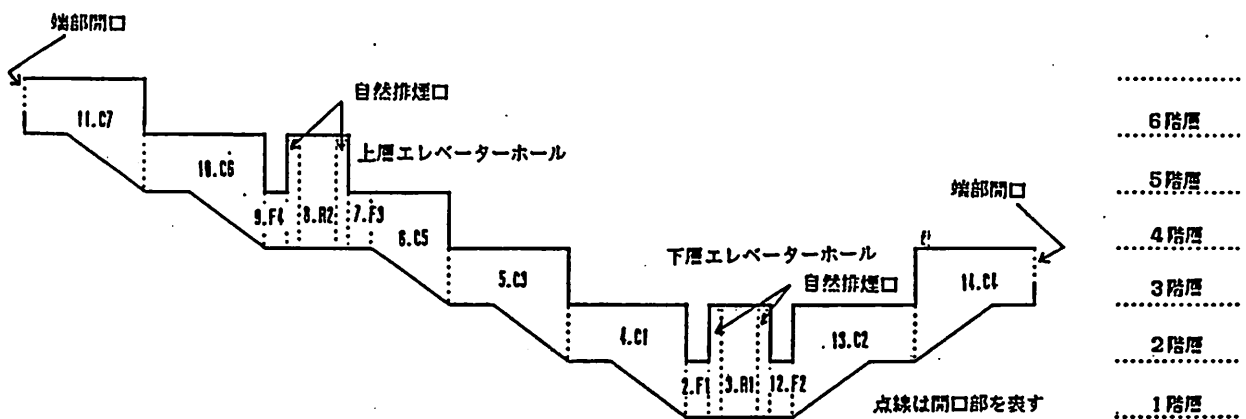


図6 シミュレーションに用いた空間の割付とその名称

## 第3章 考察

### 3-1 相似則に基づく入力条件の修正

文献<sup>3)</sup>と同様、開発されたプログラムでは小さな建物の室内静圧を精度良く計算できないため、煙流動シミュレーションは実大のスケールでおこない、火源からの発熱量を計算するための入力条件は、文献<sup>3)</sup>と文献<sup>6)</sup>から

$$Q \propto L^{5/2} \quad (3.1.1)$$

(Q: 発熱量、L: 縮尺)

の関係式を用いて修正し、実験(模型スケール1/5)値と比較することとした。

#### i) 実験時の火源面積

このとき実験の発熱量は火源の大きさLを例にとると、アルコールパン(150φ+125φ)であるから火源面積は、

$$\begin{aligned} \pi r^2 &= \pi \times \{(7.5 \times 10^{-2})^2 + (6.25 \times 10^{-2})^2\} \\ &= 2.99 \times 10^{-2} \quad (\text{m}^2) \end{aligned}$$

シミュレーションでは模型の5倍の大きさ(幾何学的相似)であるから、計算の火源面積は、

$$2.99 \times 10^{-2} \times 5^2 = 7.49 \times 10^{-1} \quad (\text{m}^2)$$

となり、他の火源の大きさM(アルコールパン 150φ)、S(アルコールパン 125φ)についても同様に、

$$4.42 \times 10^{-1} (\text{m}^2), \quad 3.07 \times 10^{-1} (\text{m}^2)$$

となる。これを計算における火源の大きさL'、M'、S'とする。

ii) 実験時のメタノールの燃焼速度

メタノールが燃焼によって1分間に1mm減少すること<sup>7)</sup>、比重0.8より、模型実験の質量減少速度(燃焼速度)は、

$$\frac{2.99 \times 10^2 \times 0.1 \times 0.8 \times 10^{-3}}{60} = 3.987 \times 10^{-4} \text{ ( kg/s )}$$

iii) 計算に用いた燃焼速度

模型と実大で同一の温度を実現するため発熱速度は、式(3.1.1)を満足する必要がある。実大は模型の5倍であるから計算の燃焼速度は、

$$3.987 \times 10^{-4} \times 5^{5/2} = 2.23 \times 10^{-2} \text{ ( kg/s )}$$

. . . . L'

となる。他の火源の大きさでも各々、

$$1.32 \times 10^{-2} \text{ ( kg/s )}$$

. . . . M'

$$9.15 \times 10^{-3} \text{ ( kg/s )}$$

. . . . S'

となる。この値をシミュレーションでの質量減少速度(燃焼速度)とした。ちなみにメタノールの発熱量は約5,430 kcal/kgである。

またスケールが異なることから生ずる時間軸の違いについても文献<sup>3)</sup>と文献<sup>6)</sup>から

$$\tau \propto L^{1/2} \tag{3.1.2}$$

( $\tau$ : 時間、 $L$ : 縮尺)

の関係式より同じ時間軸になるようにした。

以下に修正した火源条件のデータを表2にまとめる。

表2 計算で用いた火源条件データ

火源の大きさ	火源面積 ( $\text{m}^2$ )	質量減少速度 燃焼速度 ( $\text{kg/s}$ )	発熱速度 ( $\text{kcal/s}$ )
L'	0.749	$2.33 \times 10^{-2}$	$1.12 \times 10^2$
M'	0.442	$1.32 \times 10^{-2}$	$7.17 \times 10^1$
S'	0.301	$9.15 \times 10^{-3}$	$4.97 \times 10^1$

### 3-2 実験結果と計算結果の比較

本節では第2章で説明した二層モデルを用い、実験条件から推定される境界条件でシミュレートを行い、この結果を実験結果と比較する。ここでは外気風の影響は無いものとする。

計算結果の煙層温度、厚さ、濃度は150～180秒あたりから大きな変化がなく定常化していると考えられる。以下、流れ方（厚さ）、温度、濃度について各々の結果を比較してみる。

#### i) 流れ方

1階層での火災では下層エレベーターホールを越えて右に煙が流れていない。また2階層では下層エレベーターホールに煙が流れていない。この結果から当然ホールより右に煙は流れないこと、また煙層の厚さについても実験(図4,5)と計算(図7,8,9,10)はよく似た結果となっている。流れがほぼ定常化した時刻180秒の各層の質量流速(kg/s)について火災室1階の場合(図11-1、11-2)と、2階の場合(図12)とを示している。これらより1-2-1で述べたように火災室の規模は煙の流れに影響しないことが分かる。

#### ii) 温度

式(3.1.2)より時刻を実験時の時間軸( $\tau_R$ )に合わせると、計算時刻( $\tau_S$ )30秒は、

$$\frac{\tau_S}{\tau_R} \propto 5^{1/2} \quad \text{より}$$

$$\tau_R = 30 \times 5^{-1/2} = 13.4 \quad (\text{秒})$$

となる。ここで代表的位置における煙層温度の時間変化について、計算結果と模型実験での実測値の比較を図13-1、図13-2に示す。

(但し、実測値は測定位置にある9個の熱電対のうち上から2個目を煙層温度とし、計算結果で代表的位置に煙層が形成されていない場合には煙層を代表する値は初期設定値(20℃)、つまり煙層と外気との温度差を0としている。)

実験結果と計算結果では傾向は一致するものの、モデルでの熱的な扱いが不十分なためか実測値の方がかなり温度差が小さい。それについてはこの節の最後で考察する。

### iii) 濃度

計算結果における煙の濃度は、火災によって発生するSOOT(すす)が煙層に含まれる割合で評価している。そのために計算での燃料はウレタンフォームを、質量減少速度(燃焼速度)については、メタノールの相当値(表2)を使って計算した。この結果として煙層温度がメタノールの場合よりも低くなるという影響が出ている。

このとき煙の濃度は各時刻における火災室の濃度を100として他の部屋を表している。というのも模型実験で可視化に用いた発煙筒、発煙片に限られた煙量しか発生できないこと、また目視による濃度の時間変化がうまく表現できないことからこの様な方法で濃度を表した。(表5-1~5-4)

煙の濃度変化は、上昇して隣室に移動するときの空気の巻き込み量に影響していることが分かる。特にこの建物では天井面の段差から十分に空気の巻き込みが期待できる。自然排煙口は下層では給気、上層では排煙に大きな影響をもたらしている。上層より排煙される煙の質量流速(kg/s)は下層の概ね2倍となっている。また最左端の部屋(11.C7)に伝播される煙は火災室の濃度の1/10以下に希釈されている。

以上が火災室の位置、火災の規模が異なる場合の模型実験と実大の計算との比較の結果である。これらから分かるように全体的に流れや温度が各条件に反応する傾向自体は実験と計算でよく一致しているということが出来る。しかし、特に温度の値の一致は良好ではなく計算値の方が高く出ている。これは田中<sup>3)</sup>が次のような理由によると指摘している。

まず1つの理由としては、火災を構成する燃焼、熱伝達(対流、放射)、熱伝導、熱気流(火災ブルーム)等の過程についてモデルが不完全であることが挙げられる。例えばモデルでは簡単に高温層から天井への対流熱伝達は周辺を囲まれた平面板への上向き加熱としたが、実際の火災室内では、火災ブルームによる攪拌による流れがあるから、実験での対流熱伝達はこの影響を受けてモデルより大きくなる可能性がある。この場合は多くの熱が火災室内の周壁に失われるため、火災室以外の各室の温度は今回のモデルより低くなる。

また、より重要な理由の1つとしては、火災のように対流、諸熱伝達、熱伝導等多くの過程を含む現象に於いては、実大と模型でこれらの全ての過程の相似条件を満足させることが出来ないことが挙

げられる。今回の計算では火源の発熱量として模型の  $L^{5/2}$  倍の値を与えたが、これは次のような理由によっている。

$L$  を相似な模型の縮尺、 $\theta$  を周囲との温度差として概算すれば、流速  $u$  (m/s)、体積流速  $V$  ( $m^3/s$ ) はそれぞれ

$$u \sim L^{1/2} \theta^{1/2} \quad (3.2.1)$$

$$V \sim u L^2 \sim L^{5/2} \theta^{1/2} \quad (3.2.2)$$

であるから、対流により運ばれる質量 (kg/s) および熱量  $\theta$  (kcal/s) は  $\rho$  を流体の密度として

$$M \sim \rho V \sim \rho \theta^{1/2} L^{5/2}$$

$$Q \sim \theta M \sim \rho \theta^{3/2} L^{5/2}$$

となる。すなわち模型と実大で温度が等しい場合には

$$M \sim L^{5/2}, \quad Q \sim L^{5/2} \quad (3.2.3)$$

となる。従ってもし熱の移動が専ら対流によるならば、温度を等しく保つためには火災室で付加される熱量も実大では  $L^{5/2}$  倍にならねばならない。

一方、対流熱伝達による周壁等への伝熱量  $Q'$  (kcal/s) を大まかに検討してみると、模型と実大で温度が等しいとき、空気の物性値も等しいことを考慮して、

$$Q' \sim \alpha \theta L^2 \quad (3.2.4)$$

ここで熱伝達率  $\alpha$  はスケールの関数であるが、流れが自然乱流の場合は

$$\alpha \sim \frac{1}{L} Nu \sim \frac{1}{L} Gr^{1/3} \sim \frac{1}{L} \cdot L \sim L^0 \quad (3.2.5)$$

(Nu: ヌセルト数、Gr: グラスホフ数)

従って式(3.2.4)から、

$$Q' \sim L^2 \quad (3.2.6)$$

すなわち、大まかに言えば、計算では発熱量が模型の $L^{5/2}$ 倍になっているのに、対流熱伝達量は $L^2$ 倍しか増えていないことになる。従って失熱が少なく温度が高く出るのである。

その他の種々の過程、例えば燃焼、輻射熱伝達、熱伝導等に関する諸量も単に模型と実大の幾何学的相似を保っただけで全ての相似条件を満足させることは無理である、そこで実験では可能な限り煙温を実際の火災の煙温度に近づけるよう配慮した。



計算時刻 30秒

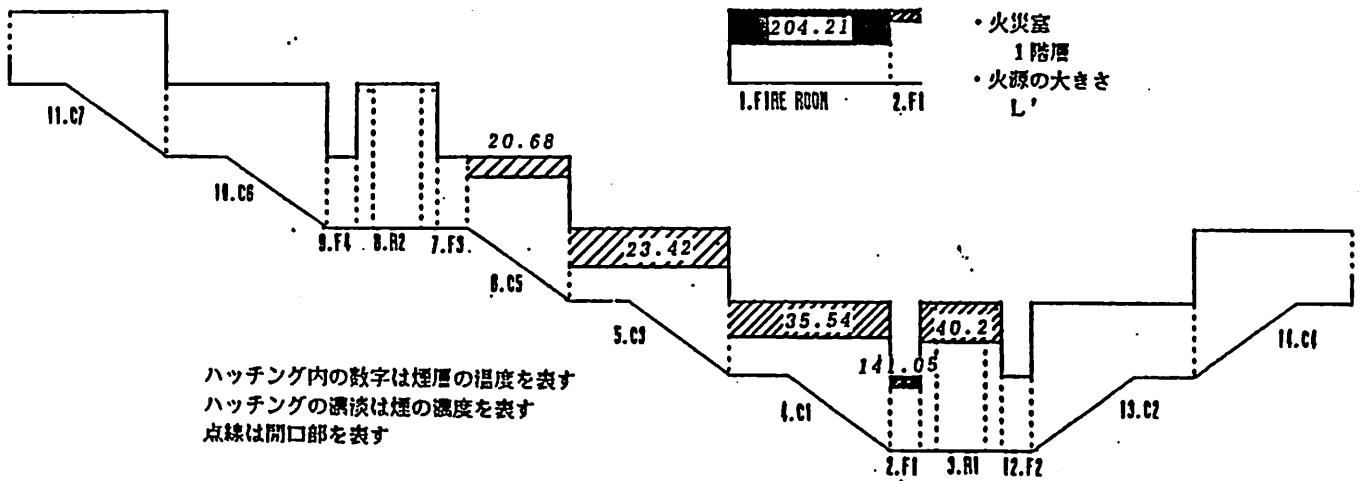


図7 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

計算時刻 60秒

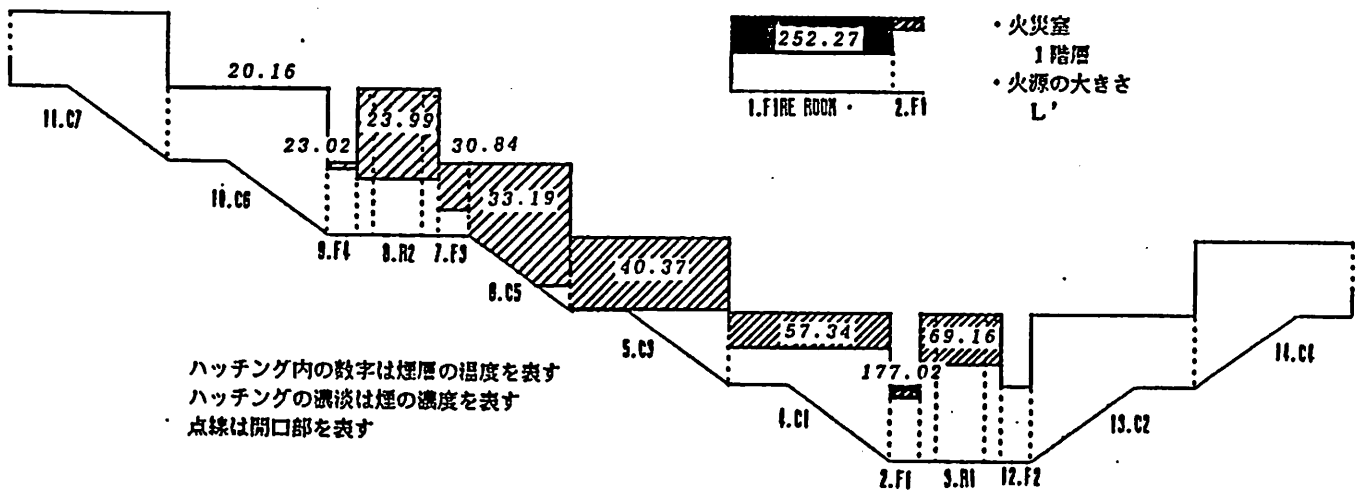


図7 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

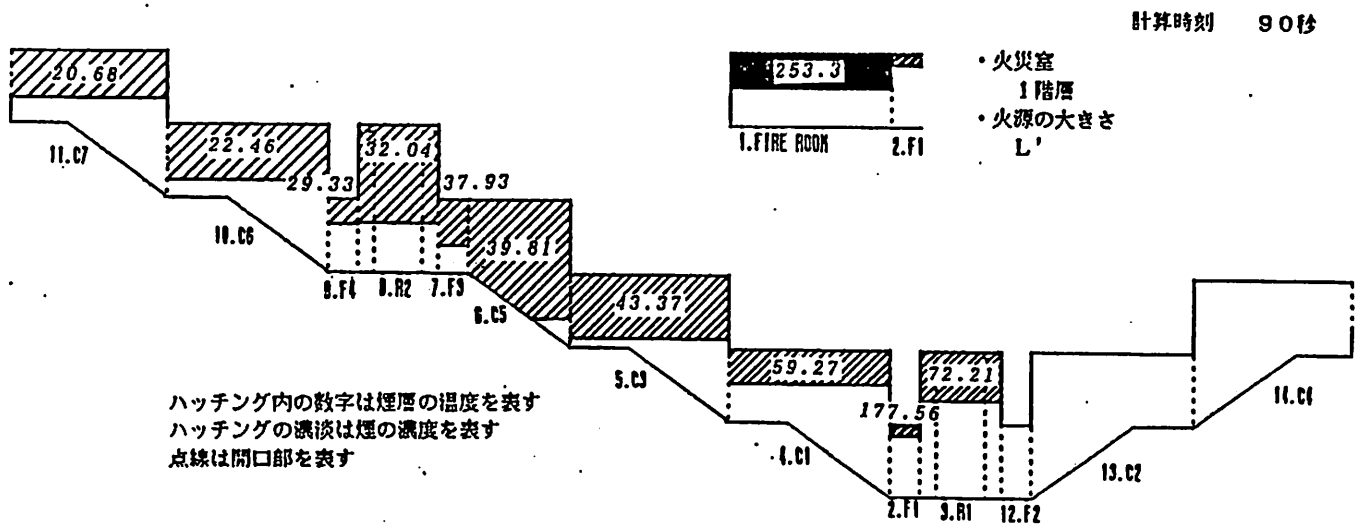


図7 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

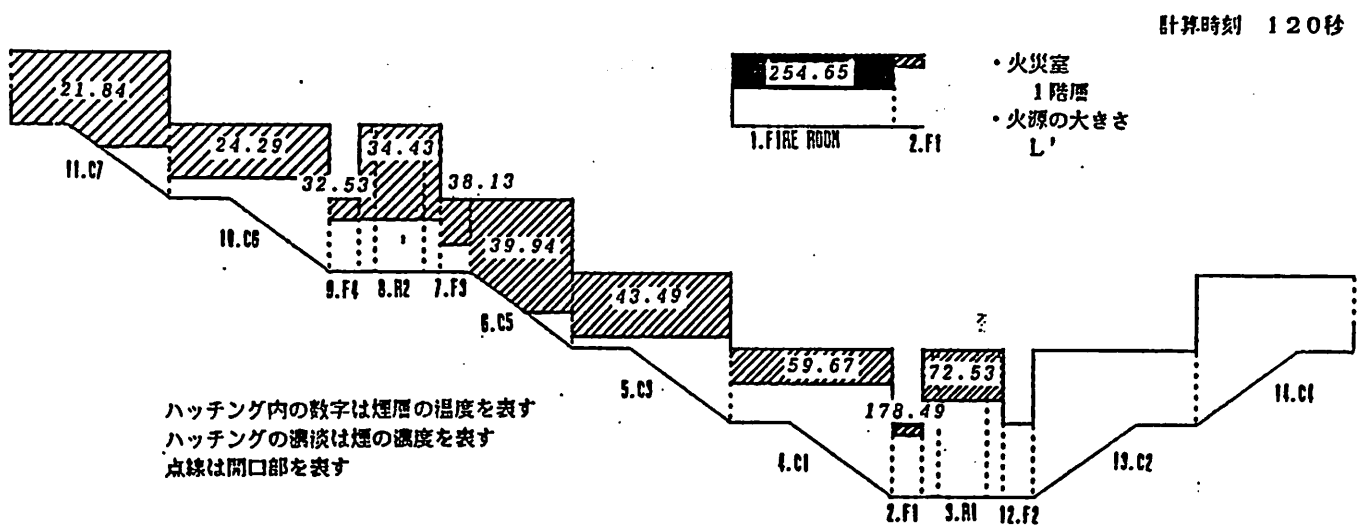


図7 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

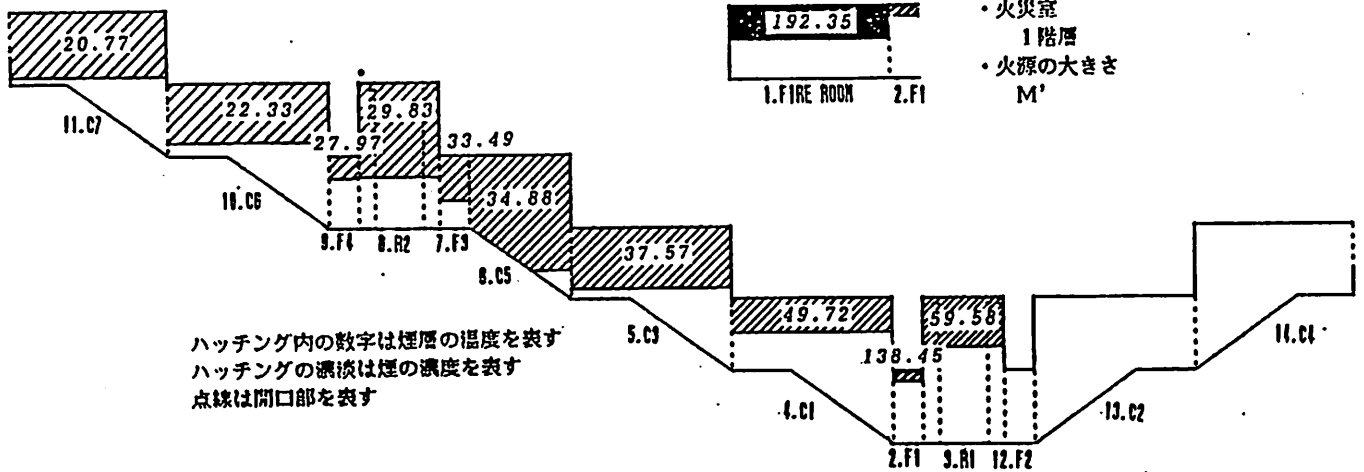


図8 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

表3-1 各時刻における部屋の煙濃度 (火災室1階層、火源の大きさL²)

時刻 \ 部屋	11.C7	10.C6	9.F4	11 <sup>A</sup> -9-4-1 8.R2	7.F3	6.C5	5.C3	4.C1	2.F1	11 <sup>A</sup> -9-4-1 3.R1
30秒	—	—	—	—	—	0	2	9	68	11
60秒	—	0	1	2	5	6	9	17	71	22
90秒	0	1	5	6	9	10	12	19	71	25
120秒	1	3	8	8	10	11	12	19	72	27
150秒	2	4	9	9	11	12	13	20	72	28
180秒	3	5	10	10	11	12	13	20	72	29
210秒	4	5	10	10	11	12	13	20	72	29
240秒	4	5	10	10	11	12	13	20	72	29
270秒	4	5	10	10	11	12	13	20	72	29
300秒	5	5	10	10	11	12	13	20	72	29

12、F1、13、C2、14、C4へは煙は流れない  
各時刻の火災室の煙濃度を100とした場合の  
各部屋の煙濃度を表す

表3-2 各時刻における部屋の煙濃度 (火災室1階層、火源の大きさM²)

時刻 \ 部屋	11.C7	10.C6	9.F4	11 <sup>A</sup> -9-4-1 8.R2	7.F3	6.C5	5.C3	4.C1	2.F1	11 <sup>A</sup> -9-4-1 3.R1
30秒	—	—	—	—	—	0	1	7	66	9
60秒	—	—	—	1	3	4	7	16	72	20
90秒	—	1	3	4	8	9	11	19	72	25
120秒	1	2	7	8	10	11	12	20	72	27
150秒	2	3	9	9	11	12	13	20	72	28
180秒	2	4	10	10	11	12	13	20	73	29
210秒	3	5	10	10	11	12	13	20	72	29
240秒	4	5	10	10	11	12	13	20	73	30
270秒	4	5	10	10	11	12	13	20	73	30
300秒	5	5	11	11	12	12	13	20	72	30

12、F1、13、C2、14、C4へは煙は流れない  
各時刻の火災室の煙濃度を100とした場合の  
各部屋の煙濃度を表す

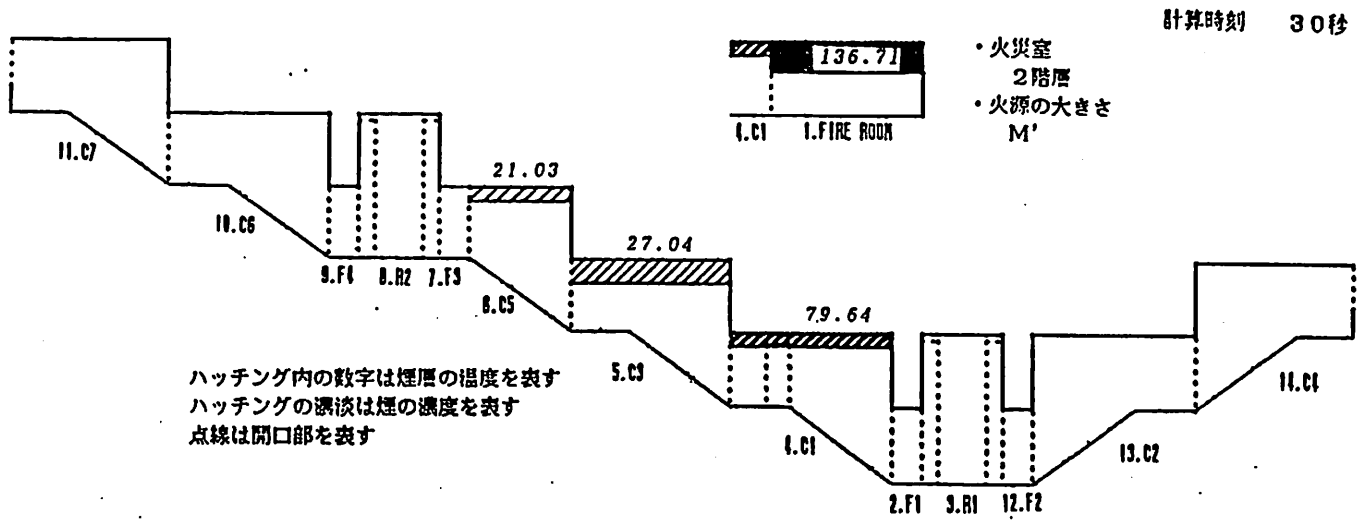


図9 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

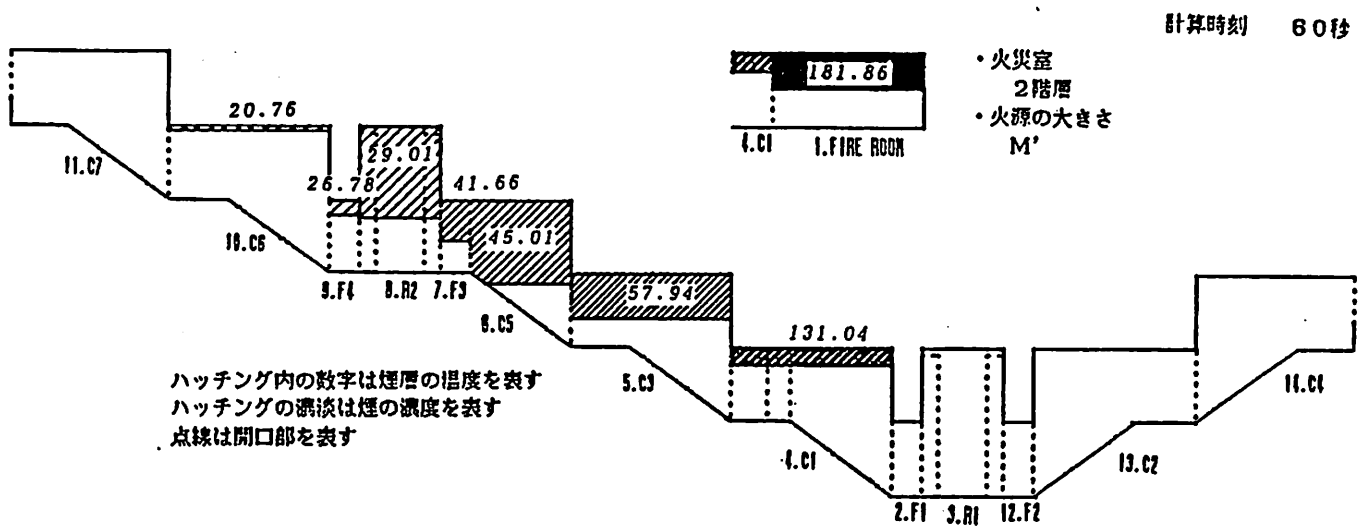


図9 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

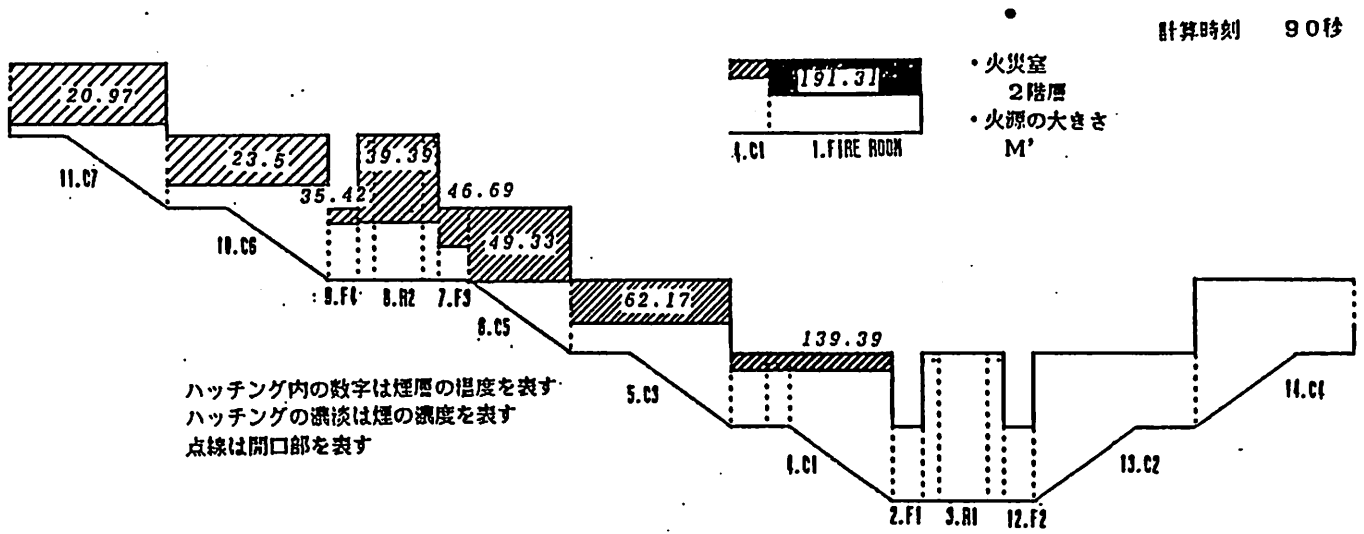


図9 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

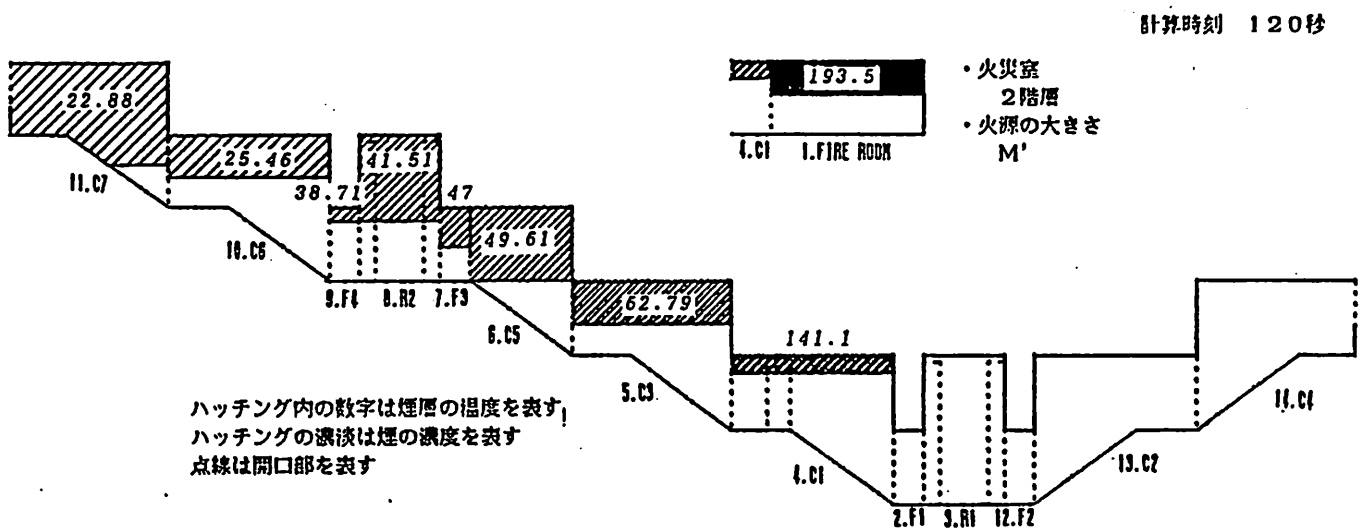


図9 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

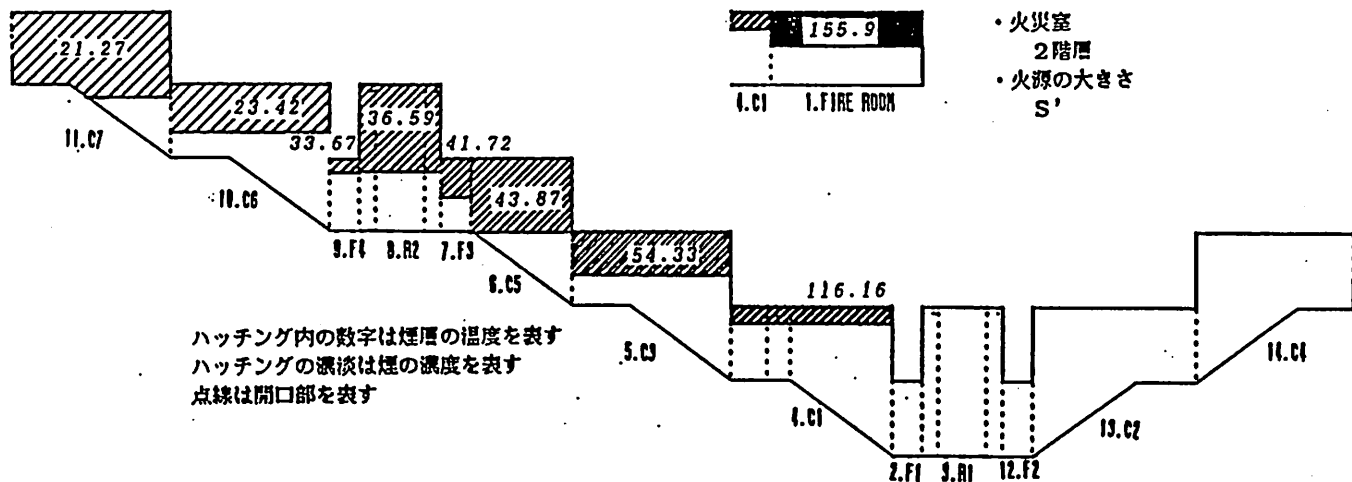


図10 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果

表3-3 各時刻における部屋の煙濃度  
(火災室2階層、火源の大きさM<sup>2</sup>)

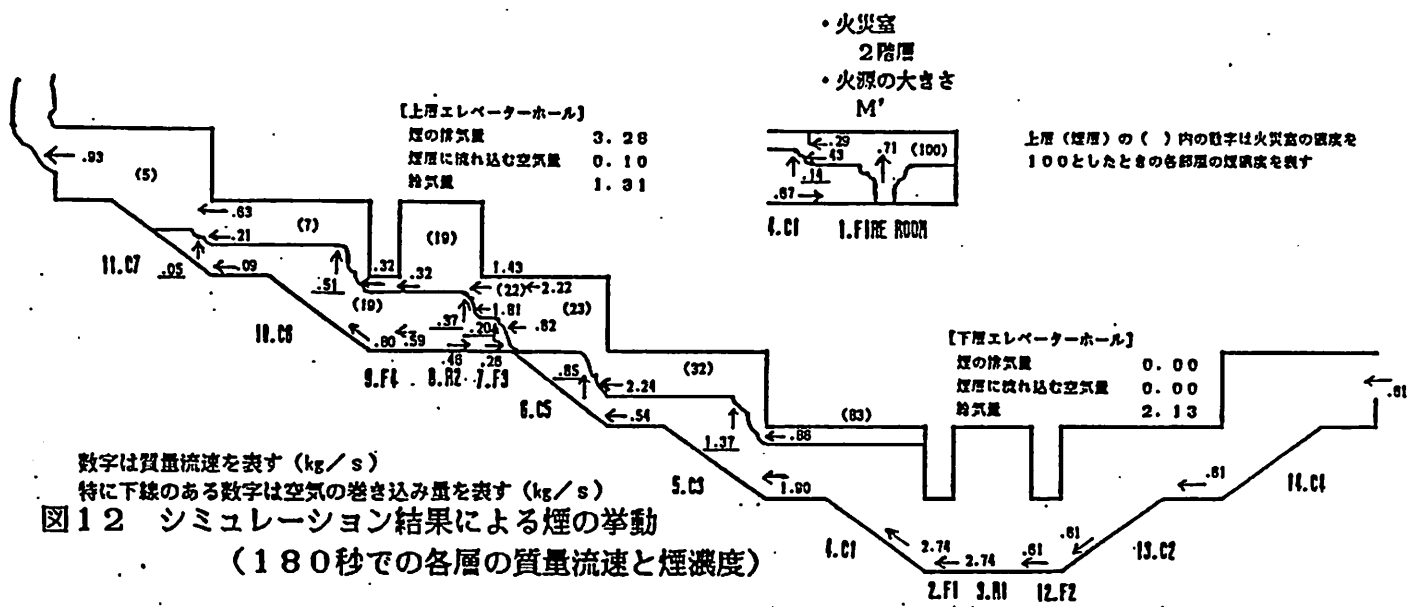
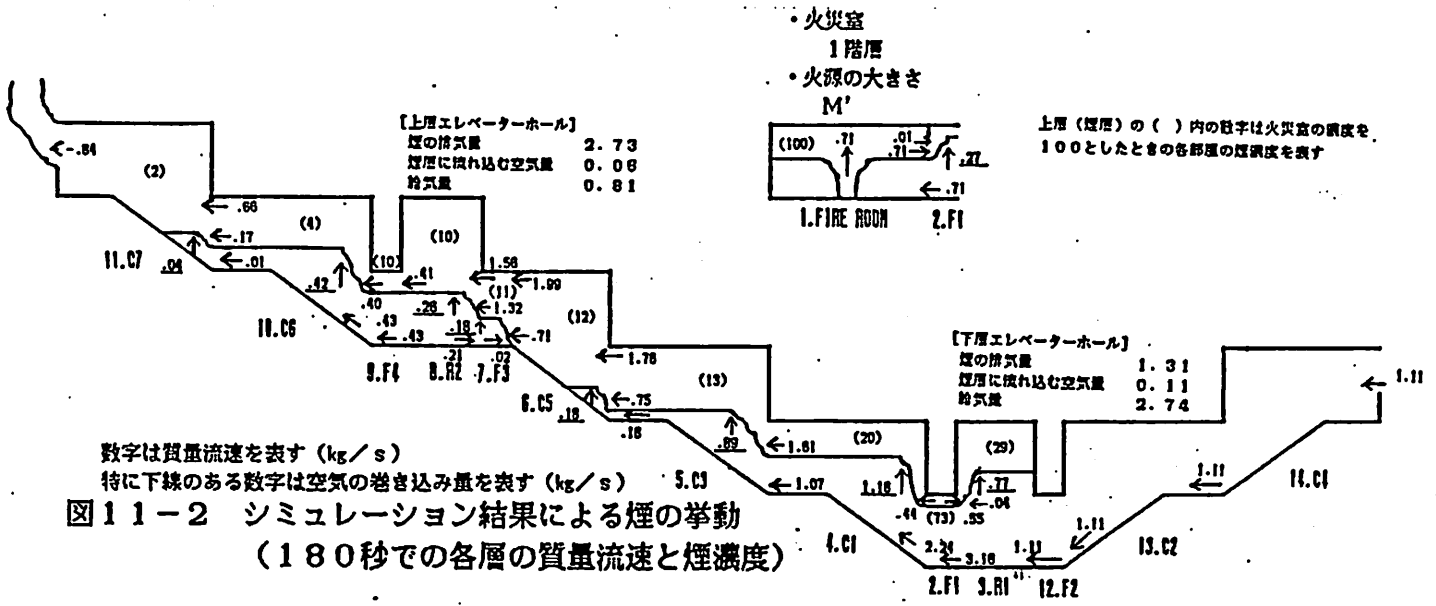
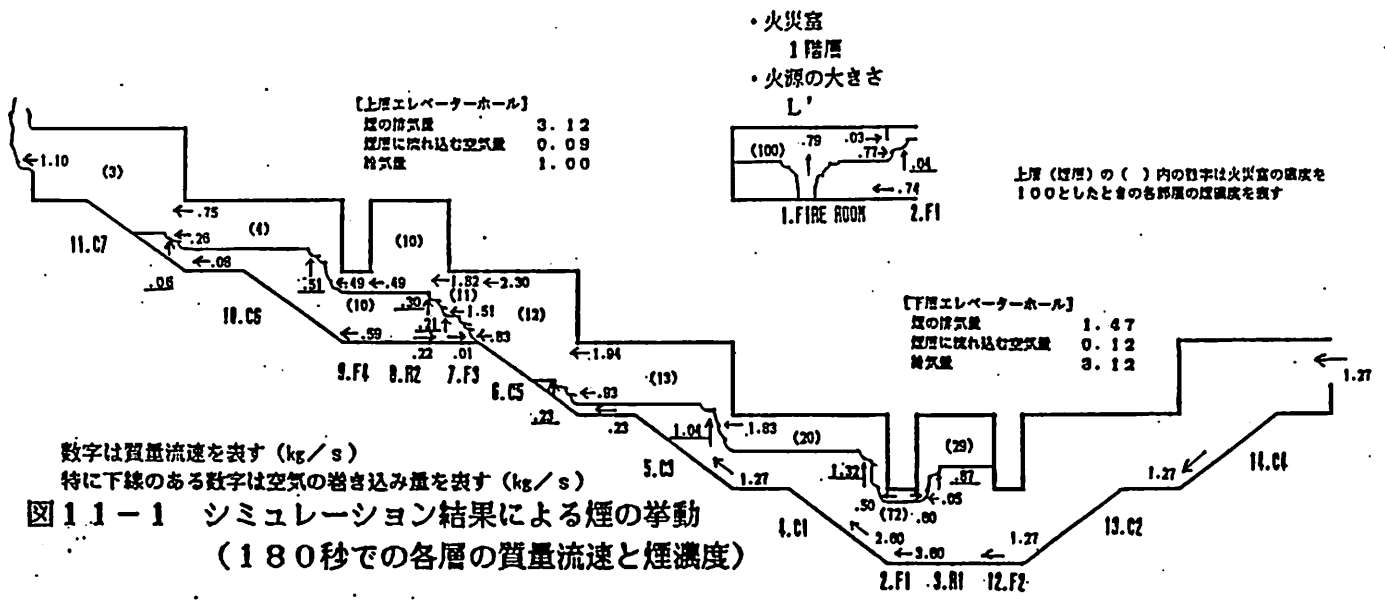
部屋 時刻	11.C7	10.C6	9.F4	11.A-9-3-4 8.R2	7.F3	6.C5	5.C3	4.C1
30秒	—	—	—	—	—	1	7	55
60秒	—	1	3	6	16	18	27	77
90秒	1	3	12	14	20	21	30	80
120秒	2	5	16	17	21	22	31	82
150秒	3	6	18	18	22	23	32	82
180秒	5	7	19	19	22	23	32	82
210秒	6	7	19	20	22	24	32	83
240秒	6	8	20	20	22	24	32	83
270秒	7	8	20	20	22	24	32	83
300秒	7	8	20	20	22	24	32	83

3.R1、12.F1、13.C2、14.C4へは煙は流れない  
各時刻の火災室の煙濃度を100とした場合の  
各部屋の煙濃度を表す

表3-4 各時刻における部屋の煙濃度  
(火災室2階層、火源の大きさS<sup>2</sup>)

部屋 時刻	11.C7	10.C6	9.F4	11.A-9-3-4 8.R2	7.F3	6.C5	5.C3	4.C1
30秒	—	—	—	—	—	0	4	52
60秒	—	—	3	4	12	15	25	76
90秒	1	2	10	13	20	22	30	80
120秒	2	4	15	17	21	23	31	82
150秒	3	5	18	18	22	23	32	83
180秒	4	7	19	19	22	24	32	83
210秒	5	7	20	20	23	24	33	83
240秒	6	8	20	20	23	24	33	84
270秒	7	8	20	20	23	24	33	84
300秒	7	8	20	20	23	24	33	84

3.R1、12.F1、13.C2、14.C4へは煙は流れない  
各時刻の火災室の煙濃度を100とした場合の  
各部屋の煙濃度を表す



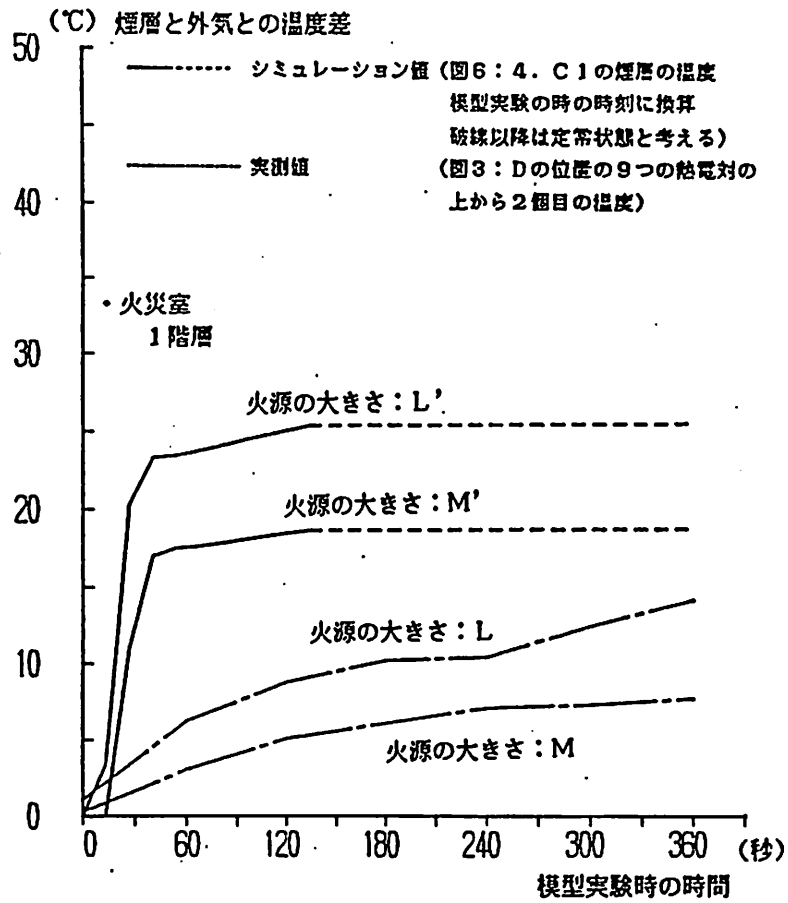


図13-1 代表的な位置での温度の時間変化

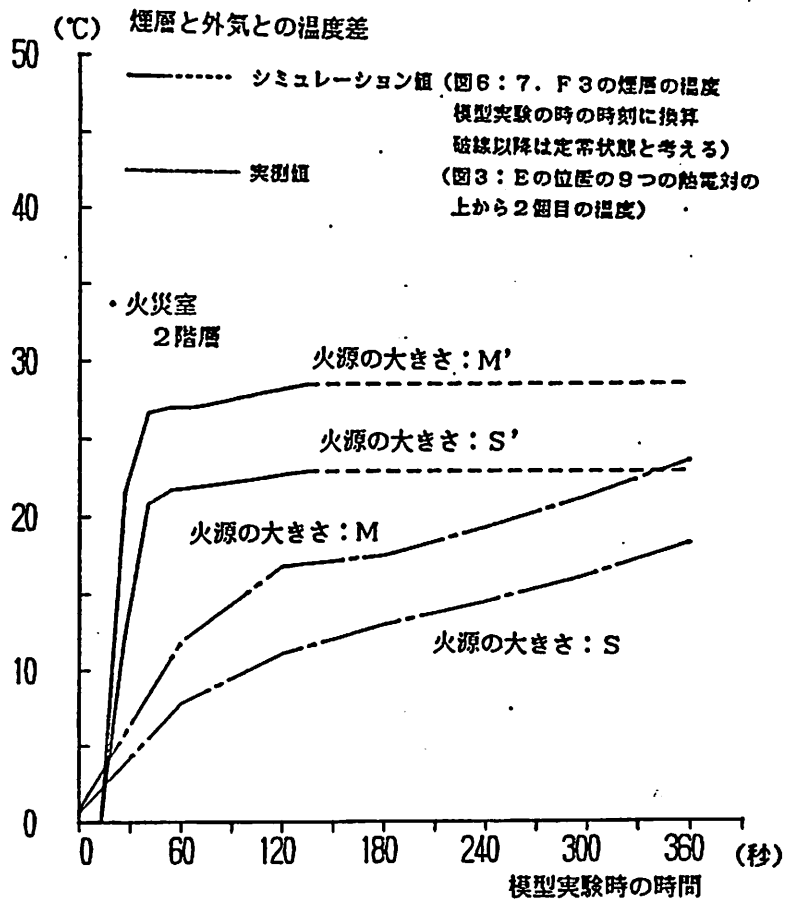


図13-2 代表的な位置での温度の時間変化



### 3-3 風の影響

本節では外気風の煙流動への影響を考察している。火災室の条件は1階、火源の大きさ $L'$ で固定し、8方位から風が吹いた場合をシミュレートした。風速は5m/s、このとき風速の高さ方向の分布は、基準高さ10m、べき乗数0.33とした。各々の開口部の風圧係数は文献<sup>8)</sup>を参考に表4にまとめた。室内、外気温20℃、湿度70%とし外気風の条件が付加されているだけである。建物の方位は両端開口を結ぶ通路が東西に走りエレベーターホールの自然排煙口が南に向いている。(図2 平面図参照)

このときの開口A～Dは次の通りである。

- A: 下層エレベーターホールの自然排煙口
- B: 上層エレベーターホールの自然排煙口
- C: 左端の端部開口
- D: 右端の端部開口

計算時刻120秒の場合についてはその結果を図14～21にまとめた。また、各々の風向での煙濃度を表5に示す。無風の場合も併せて考察する。(無風の場合: 3-2, 図7参照)

どんな風向また無風の場合においても、下層エレベーターホール(3.R1)より右側に煙は伝播しない。

また南西、西、北、北西風、および無風の場合には、最左端の部屋(11.C7)まで薄い煙が伝播するが、南西風を除いて上層エレベーターホール(8.R2)の自然排煙口より排煙されている。

北東、東風の場合については、上層エレベーターホールまで伝播し、自然排煙口より排煙され、外気風の影響でそれより上層には煙は流れない。

南東の風の場合には、上層エレベーターホールから給気される空気の流れにより煙は押し戻され上層エレベーターホールまでも伝播していない。

特に南風は排煙口から排出される煙がホールへ押し戻され最も危険であると考えられるが、C・Dの開口の風圧係数を等しくしている事もあって、この場合も上層エレベーターホールより左には煙は伝播していない。また図22に計算時間120秒の各層の質量流速を示す。これより自然排煙口より大量の空気が供給されることが分かる。上層の排煙口から流入した空気は左右に分かれ左は端部開口(11.C7)から室外へ、右は(4.C1)の煙を押し戻し、下層の排煙口からの空気を

併せて右端開口(14.C4)へ、そこから室外へと流れる。また煙は下層の排煙口から排煙されているが、若干ホール内(3.R1)の濃度が他の場合より高くなっている。

以上より風の影響により煙の流れ(到達距離、濃度)は異なるが自然排煙口の効果については無風の場合と大きな変化がなく、排煙と給気の役割を果たしている。

表4 風向・風圧係数を表す

風向	開口	風圧係数	図	風向	開口	風圧係数	図	風向	開口	風圧係数	図
北 N	A	-0.40	14	南西 SW	A	0.44	17	東 E	A	-0.42	20
	B	-0.40			B	0.44			B	-0.42	
	C	-0.77			C	-0.40			C	0.73	
	D	-0.77			D	0.30			D	-0.40	
北西 NW	A	-0.50	15	南 S	A	0.75	18	北東 NE	A	-0.50	21
	B	-0.50			B	0.75			B	-0.50	
	C	-0.40			C	-0.77			C	0.30	
	D	0.30			D	-0.77			D	-0.40	
西 W	A	-0.42	16	南東 SE	A	0.44	19				
	B	-0.42			B	0.44					
	C	-0.40			C	0.30					
	D	0.73			D	-0.40					

- A : 下層エレベーターホールの自然排煙口
- B : 上層エレベーターホールの自然排煙口
- C : 左端の端部開口
- D : 右端の端部開口

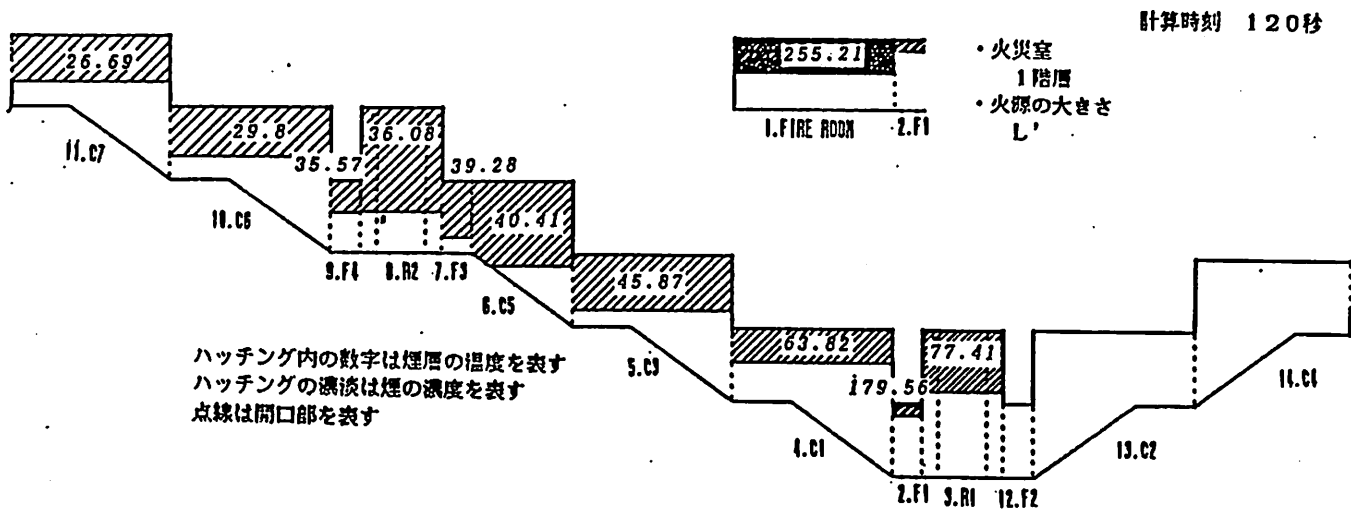


図14 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果（北風）

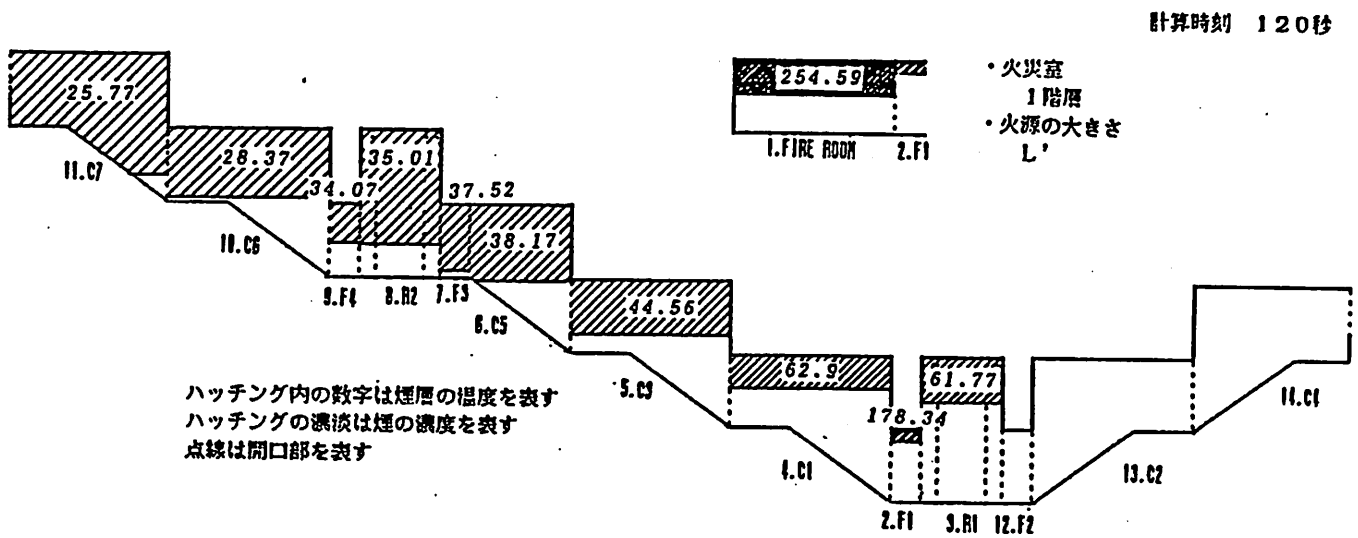


図15 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果（北西風）

計算時刻 120秒

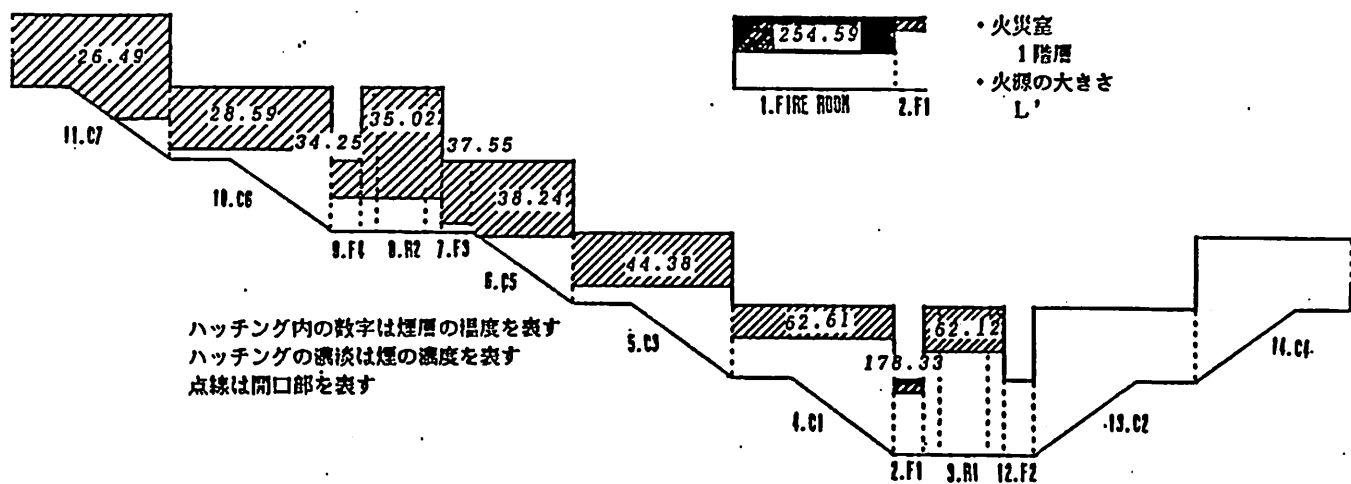


図16 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果（西風）

計算時刻 120秒

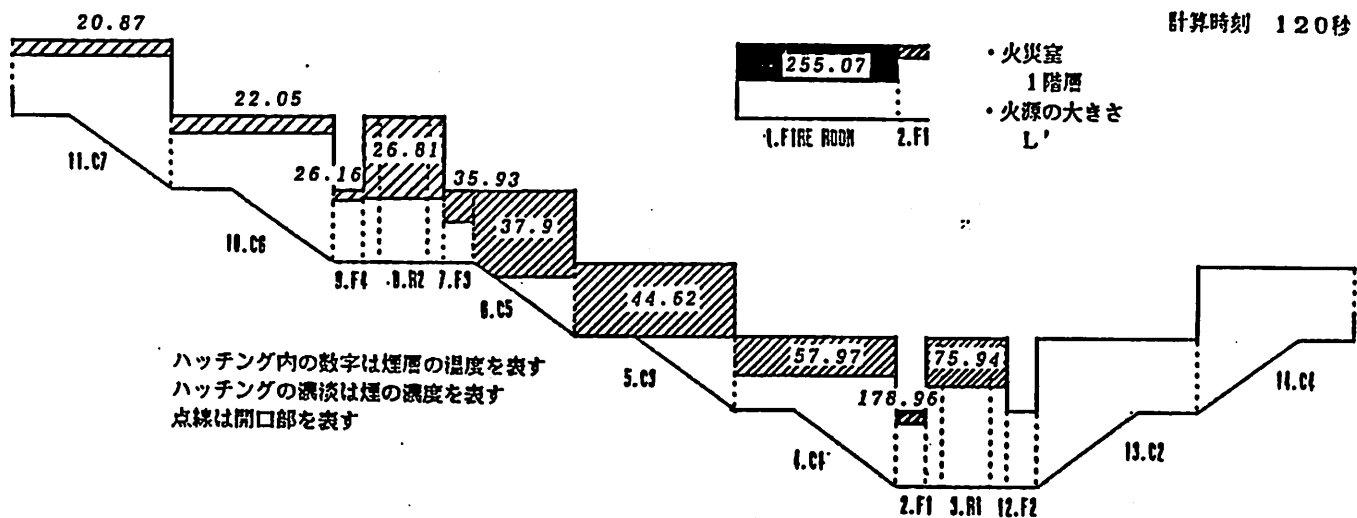


図17 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果（南西風）

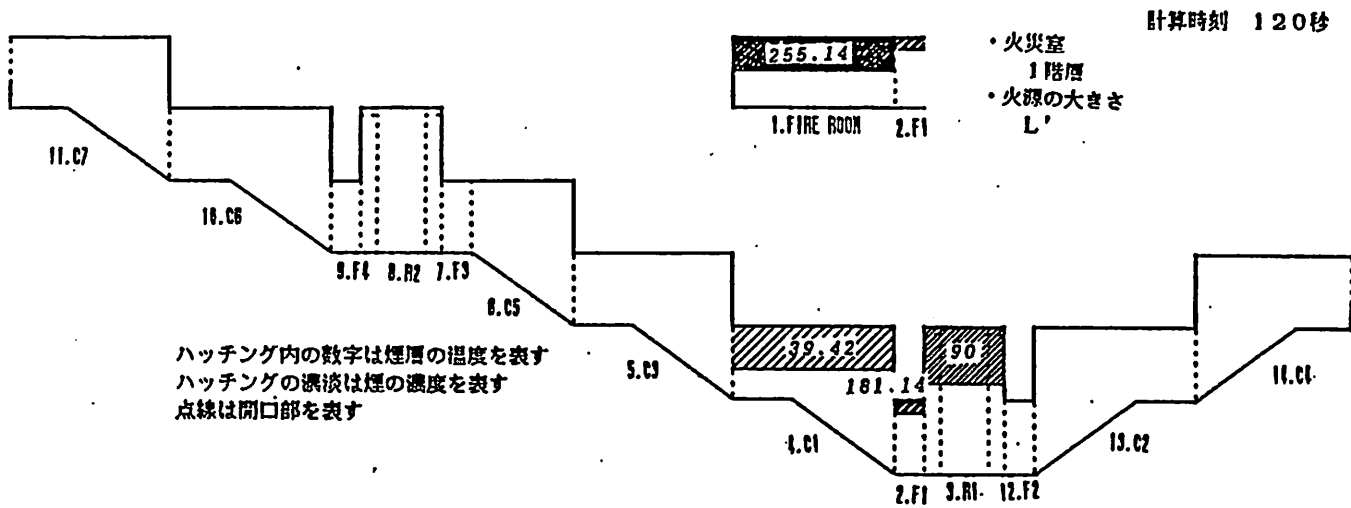


図18 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果（南風）

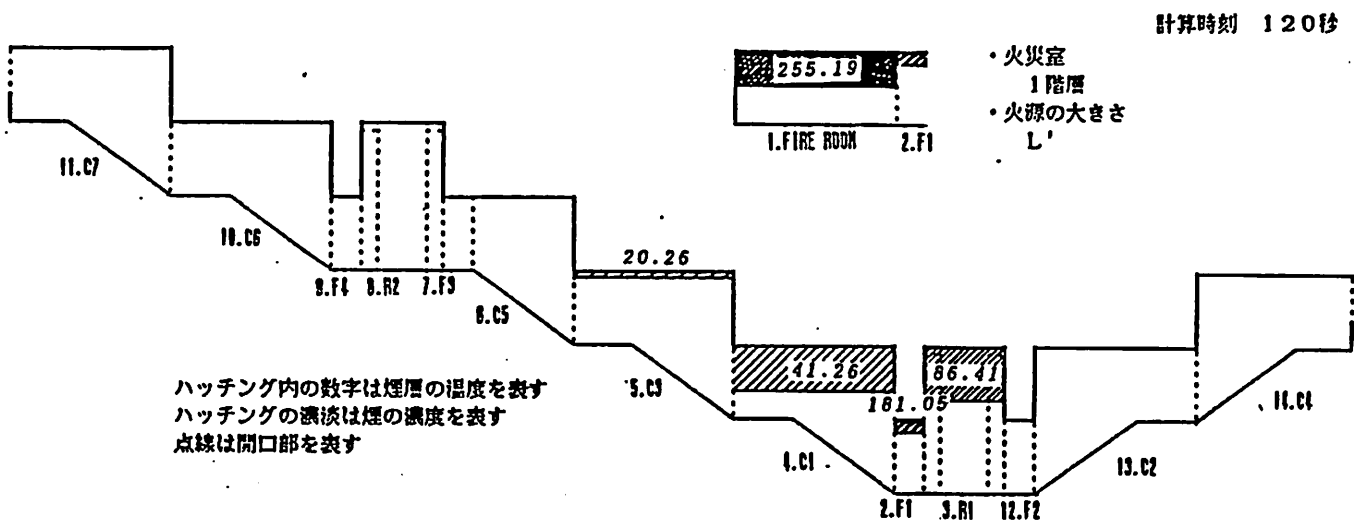


図19 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果（南東風）

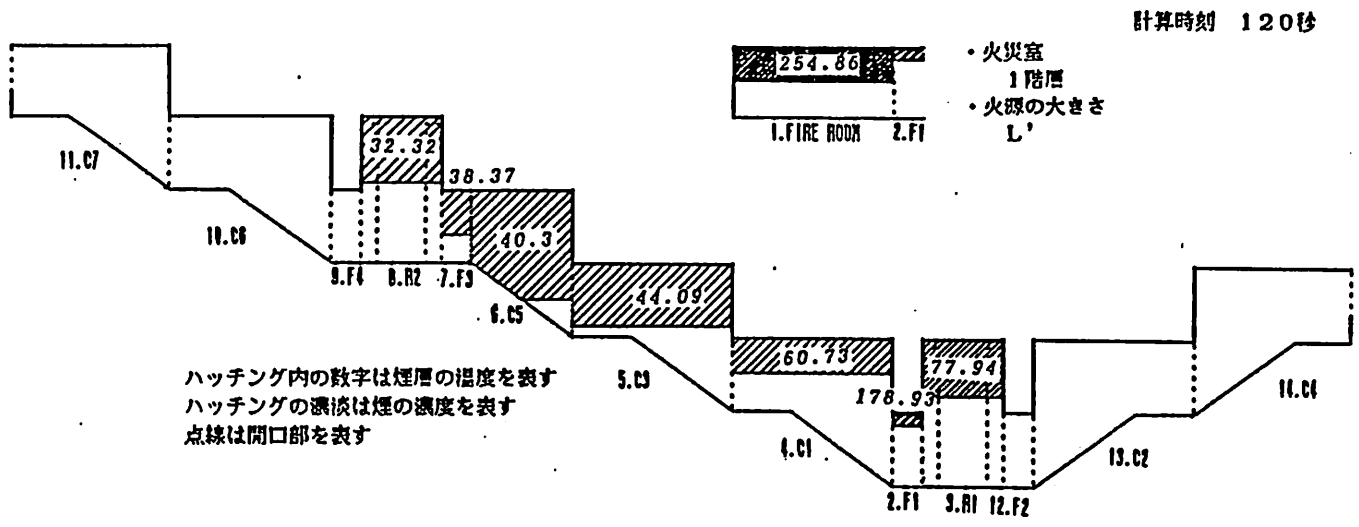


図20 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果（東風）

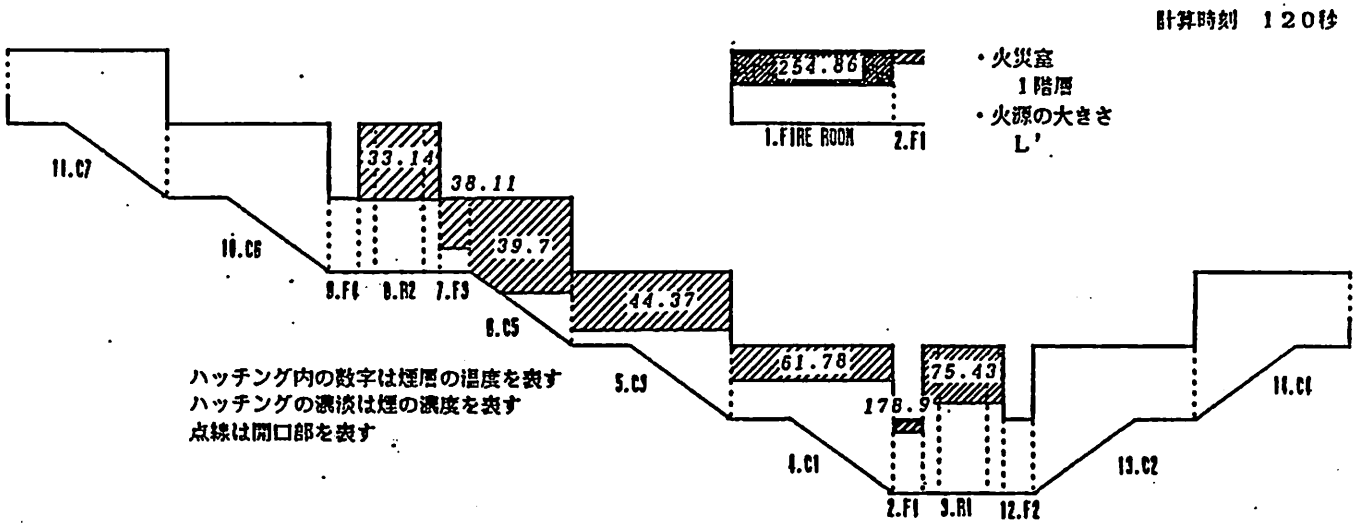


図21 煙層温度・厚さ・濃度の時間変化のシミュレーション結果（北東風）

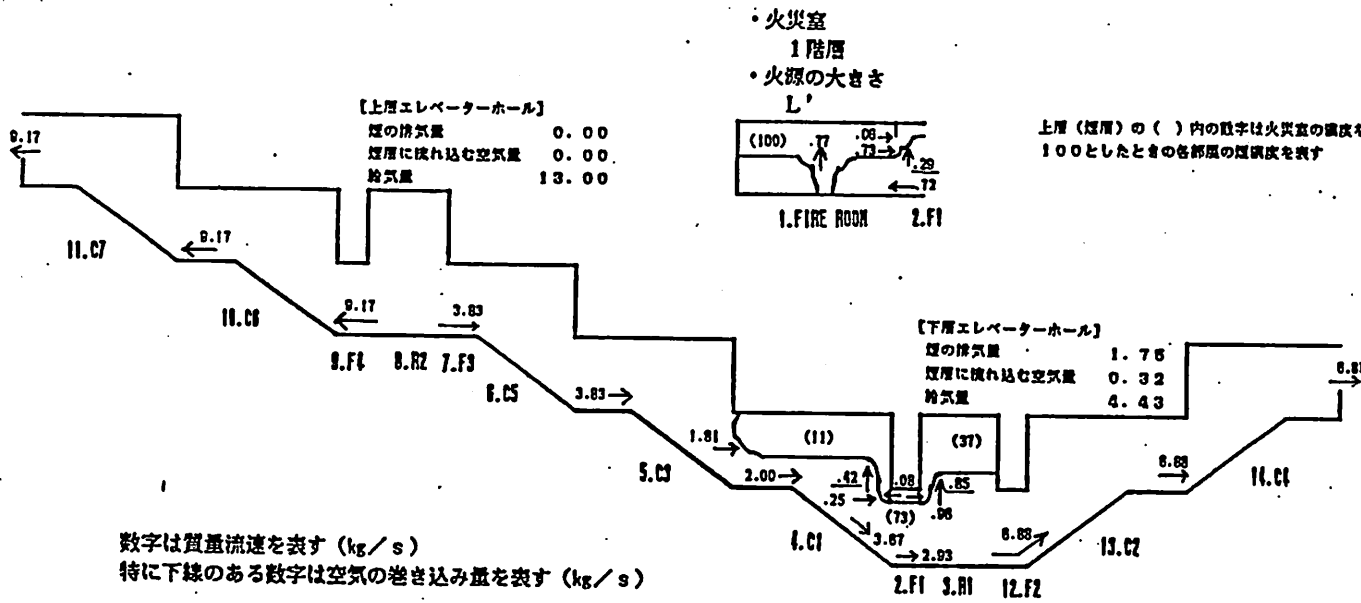


図22 シミュレーション結果による煙の挙動  
 (120秒での各層の質量流速と煙濃度)

表5 風の影響に対する各部屋の煙濃度(計算時刻120秒)  
 (火災室1階層、火源の大きさ $L'$ )

部屋 風向	11.C7	10.C8	9.F4	8.R2	7.F3	6.C5	5.C3	4.C1	2.F1	3.R1
(北風)	4	5	9	9	10	11	13	21	72	31
(北西風)	3	5	8	8	9	9	12	21	71	21
(西風)	4	4	8	8	9	9	12	20	71	22
(南西風)	1	1	4	7	10	11	14	19	72	28
(南風)	—	—	—	—	—	—	—	11	73	37
(南東風)	—	—	—	—	—	—	0	12	73	34
(東風)	—	—	—	7	10	11	13	20	72	31
(北東風)	—	—	—	7	10	11	13	20	72	29
(無風)	1	3	8	8	10	11	12	19	72	27

12. F1、13. C2、14. C4へは煙は流れない  
 火災室の煙濃度を100とした場合の各部屋の煙濃度を表す

## 結 論

実験結果と計算結果より火災の位置、火災の規模が変わっても、また計算結果から風の影響を受けてもホールに設けられた自然排煙口は給気・排煙の役割を十分に果たすことが分かった。これより通路の安全性は保たれるものと思われる。

### 『問題点』

今回用いた風圧係数は、推定値を用いることとなったが、これが正しいかどうかを判断するのは風洞実験等によって調べねばならない。

二層モデルでは煙濃度を一意的に決めておらず今回は火災によるすすの発生率で濃度を評価した。今回の模型実験では熱的な扱いが十分ではなかったこと、つまり燃料（メタノール）のみの発熱量でなく他の要因（発煙片等の発熱量）も含んでしまっていること、計算では燃料をウレタンフォームとしたことなどにより十分な一致がみられなかった。

### 〈モデル自身の問題〉

2-2では盛期火災も含めて理論を展開しているが、計算では初期火災しか行われていない。また燃焼という化学的側面の扱いが弱いことである。つまり実際には開口が狭くなったりして空気の供給が悪くなると火災が長く延びる現象が現れることがあり、空気の供給条件を更に悪くしてメタノールを燃焼させると燃焼は途中で途絶えてしまう。理論では、このような場合の解析は殆ど全く行えないから、このような場合でも初期火災時では開口幅が狭くなる程火災室の温度は上がるというような実情と異なる結果を導く。従って実用十分な解析のためにはこの化学的側面の導入が必須である。また、小規模の建物の室内静圧が計算できないことが挙げられる。

このプログラムでは他に煙の制御（機械による給、排気）の対応についても、また開口部の大きさを時間変化させた場合についても計算することができるようになっている。



## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、モデルの利用に関して御助言、御協力頂いた建設省建築研究所・田中哮義氏、山名俊男氏、並びに清水建設・中村和人氏に心よりの謝意を表します。また名古屋大学工学部建築学科・辻本誠助教授の日頃の御教示と御鞭撻に追うところが大きい、ここに深く謝意を表します。更にその他色々と御世話になりました建築研究所、辻本研究室の皆様に深甚の謝意を表したく存じます。

## 文献

- 1) 火災科学研究所：高層集合住宅の火災時における安全確保、1985
- 2) 西尾善博：高層集合住宅の斜め通路における煙流動の実験的研究、1987年度卒業論文
- 3) 田中哮義：小規模建築物の火災モデル化に関する研究、京都大学博士論文、1978
- 4) 中村和人、田中哮義：2層ゾーンモデルによる煙制御効果の予測、火災学会研究発表会概要集、1987
- 5) たとえば、新建築学大系12 建築安全論、彰国社、PP198～206
- 6) P.H.Thomas et al: "Investigation into the flow of hot gases in roof venting", Fire Research Technical Paper No.7 Her Majesty's Stationery Office, (1963)
- 7) 日本建築学会編：換気設計、設計計画パンフレット Vol118、P50、1976
- 8) 化学工学協会編：化学プラントの安全対策、1978