

# 目次

## 序章

1. はじめに
2. 研究の目的
3. 研究の進め方

← 図1.2. プトリウム の例

## 一章 模型実験概要

1. 実験の経緯と目的
2. 実験内容
  1. 実験場所と時期
  2. 実験条件
  3. 測定項目
  4. 模型図面と測定点
3. 相似則について

← 表1~3. 実験条件一覧  
← 図3. 発熱パターン  
← 写真1.2. 可視化の例  
← 図4~6. 模型図面

## 二章 二層ゾーンモデルによるシミュレーション計算

1. 二層ゾーンモデルの概説
2. 入力条件
  1. 空間形状
  2. 燃焼条件
  3. その他
3. 出力結果  
・今回用いるデータ

← 図7. 二層ゾーンモデルの概念図

← 図8~9. 模型の置換  
← 図10. 発熱パターンの  
← 表4. 入力データ例

← 表5. 出力結果例

## 三章 模型実験と二層ゾーンモデルの結果の比較

1. 対照実験における比較 (A-Bシリーズ)
  1. 温度の時間変化 (図12)
  2. 煙層高エの " (図13)
  3. 温度の垂直分布の " (図14, 15)
2. 設計案想定実験における比較

1. 温度の時間変化 (図16)
2. 煙層高さの " (二層ゾーンモデルの結果のみ) (図17)
3. 温度の垂直分布の " (図18)

## 四章 二層ゾーンモデルの検討

### 1. 計算上の問題

1. 主なエラー及び計算結果の疑問点
  - ・ 開口無し条件での計算ストップ
  - ・  $T_S < T_A$  エラーでの "
  - ・ IAシリーズでの温度上昇の立ち上がりの遅れ
  - ・ 計算刻みと出力時間間隔の精度
  - ・ Cシリーズにおける模型形状の置換について

2. 1.に対する処置
3. その他

### 2. 相似性について

- ・ 二層ゾーンモデルによる相似則の検証

(図11)

### 3. その他

## 終章 まとめ

参考文献

謝辞

付図. 11~18

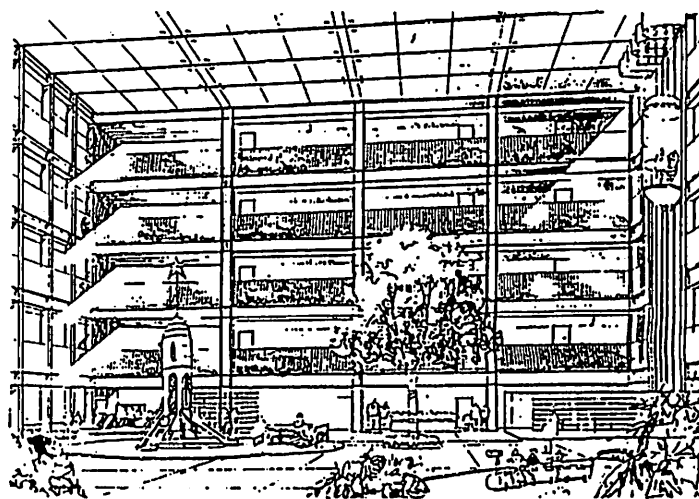
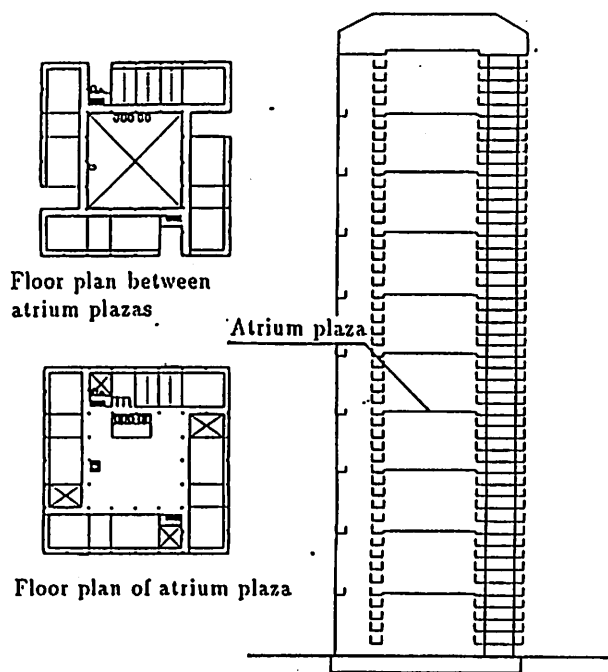
# 序章

## 1、はじめに

近年、建築物の大型化・高層化に伴い、数階層に及ぶアトリウム（吹抜け空間）を持つものが増えてきた。また、将来の超高層建築構想では、人工地盤などで数階から十数階にも及ぶアトリウムをいくつも重ねた構造としたものもみられる。（図1、2）

このようなアトリウム空間は、火災時において、延焼の危険はもちろんであるが、それ以上に、煙による避難障害などの危険が考えられる。つまり、アトリウム空間に面した側では、火災階よりも上階の方が煙に巻き込まれやすく、有効な避難路が得られなくなる可能性、あるいは、煙によって死亡する危険すらある。さらに、アトリウムが重なっている場合、火災の発生したアトリウムだけでなく、その上層のアトリウムにも煙が充満する可能性も十分考えられる。

したがって、模型実験・シミュレーション計算などを通して、あらかじめその煙流動を予測し、有効な排煙をする構造や避難経路の計画によって、煙の危険を少なくしなければならない。



← 図1：アトリウムの例 平面・断面図

↑ 図2： 同 内観パース

## 2、研究の目的

前述したように、煙流動の予測手段として、まず模型実験が挙げられる。当然、アトリウム空間が広大であるため、実大模型による実験を繰り返すのは難しく、実験はスケールダウンした模型によって検討しなければならない。模型における煙流動が実空間におけるそれとの相似性に関して、スケールダウンすることによる影響が考えられるので、火災状況など 適切な相似則によって設定する必要がある。本研究で検討する実験は、相似則を用いた縮小模型による実験である。

一方、シミュレーション計算では、不明確な物理性状に関して仮定・近似を一部含むが、基本的には全て物理法則に基づくため、相似性にはスケールダウンの影響が少なく、計算結果はほぼ相似のものが得られると考えられる。

よって、シミュレーション計算と実験の結果を比較して、異なったスケールでもシミュレーションで説明できれば、その実験結果も信頼できると判断できる。

本研究の目的は、相似則に基づき行われた縮小模型による実験がシミュレーション計算で説明できるかどうか比較し、実験結果の判断の補足と、実験とシミュレーション計算の信頼性について検討を行った。

## 3、研究の進め方

本研究では、比較のための実験結果及びシミュレーション計算の結果を以下のものから得た。

### 模型実験：

名古屋大学工学部建築学科辻本研究室で行われた、文献 1 による相似則を用いた縮小模型実験（2つの異なるスケールによる対照実験、及び、実際的设计案を想定した実験）の測定値。実験の概要は、本論 ~~三~~ 章、文献 3 を参照。

### シミュレーション計算：

二層ゾーンの概念を用いた建物内煙流動予測計算（本論では、以下、二層ゾーンモデルと略す）による結果。設定値は、模型実験の仕様とする。本モデルの詳細は、本論 ~~三~~ 章、文献 4 を参照。

以上の結果を用いて、まず2つの異なるスケールによる実験結果と計算結果を比較し、温度変化・煙層高さの変化・温度の垂直分布の推移などから二層ゾーンモデルで説明可能かどうかの検討を行った。

次に、実際の設計案を模した模型について同様に比較し、さらに、計測はされていないが実験で観察されたような煙流動が、シミュレーション計算の結果によっても説明できるかの検討を加えた。

これらの検討から、縮小模型による実験を二層ゾーンモデルで説明可能か、スケールダウンによる相似性に関する影響があったかどうかなど考察した。

# 一章 模型実験概要

## 1、実験の経緯と目的

(株)竹中工務店及び新日本製鉄(株)が提案しているT-50プロジェクトについては、(財)日本建築センター内に、「T-50防災安全委員会」が設置され、計画の総合安全性についての検討が行われ、『「T-50」(副都心型超高層住宅計画)に関する技術指導報告書』が作成された(1989年12月)。この報告書の中で検討課題として残された火災時の煙流動・煙制御に関する知見を得る目的で本実験が行われた。前掲報告書の課題をもとに、

- 1) 一部に開口を持つアトリウム空間での煙流動に関する相似則(文献1)を、スケールの異なる模型実験を行うことで確認する。
- 2) T-50のアトリウム2ブロック分(10階層分)の模型を用いてアトリウムと外部空間を結ぶ開口の位置と量が煙流動に及ぼす影響を知り、設計案を想定した実験で、出火ブロックの通路及び上接ブロックの避難安全性を判定するために有効なデータを得る。

ことを目的とする実験を行った。

## 2、実験内容

### 2-1・実験場所と時期

実験場所： 名古屋大学工学部 9号館 構造実験室

期 間： 1989年 2月～5月

### 2-2・実験条件

実験は、A, B, Cシリーズから成り、その概要と実験条件を説明する。

・ A, Bシリーズの目的は、スケールの異なる模型で相似則が成立することを確認することであり、AシリーズとBシリーズでは同じ番号の実験は境界条件が相似の関係にある。又、変化させる要素は、火源位置・発熱パターンの他に実際の設計を想定して、オープンコーナーに相当する開口の幅、天井スリットに相当する開口の有無、エレベーター開口に相当する開口の有無とした。実験条件をまとめたものを表1（Aシリーズ）、表2（Bシリーズ）に示す。

・ 尚、実験を進行していく過程で、火源を中央に置くとオープンコーナー開口の位置関係を原因とする旋回流が生じ、煙が渦を巻いて吹抜け空間全体に広がり、煙流動の相似性の確認が困難であることが判明し、このため標準的な火源位置を当初の中央から隅角部に修正している。

・ エレベーター開口の位置と寸法、火源位置は図4-4の模型図面を参照されたい。

・ 発熱パターンについては図3に説明を付したが、実大スケールに換算すると発熱パターン1が1.25MW（アルコールパン約4 m<sup>2</sup>の火源）、発熱パターン2が2.5MWに相当する。

・ Cシリーズについては実際に想定される実験条件を考慮し、変化させる要素として、オープンコーナーの数、オープンコーナー開口部に設置される風除けスクリーンの有無、天井スリットの幅を選んでいる。実験条件は、表3（Cシリーズ）に示す。

表1、Aシリーズ実験条件一覧

実験 NO.	スケール	開口条件			エレベーター 開口	天井 スリット	火源位置		発熱 パターン	備考	
		無	1/3	1/12			中央部	隅角部			
A-1-1	1/25	○					○		1		
2		○					○		2		
3		○					○		3		
4		○						○	1		
5		○						○	2		
6		○						○	3		
A-2-1				○				○		1	
2				○				○		2	
3				○				○		3	
4				○					○	1	
5				○					○	2	
6				○					○	3	
A-3-1					○				○	1	
2					○				○	2	
3					○				○	3	
A-4-1					○	○			○	1	
2					○	○			○	2	
3					○	○			○	3	
A-5-1				○		○		○	1		
2				○		○		○	2		
3				○		○		○	3		



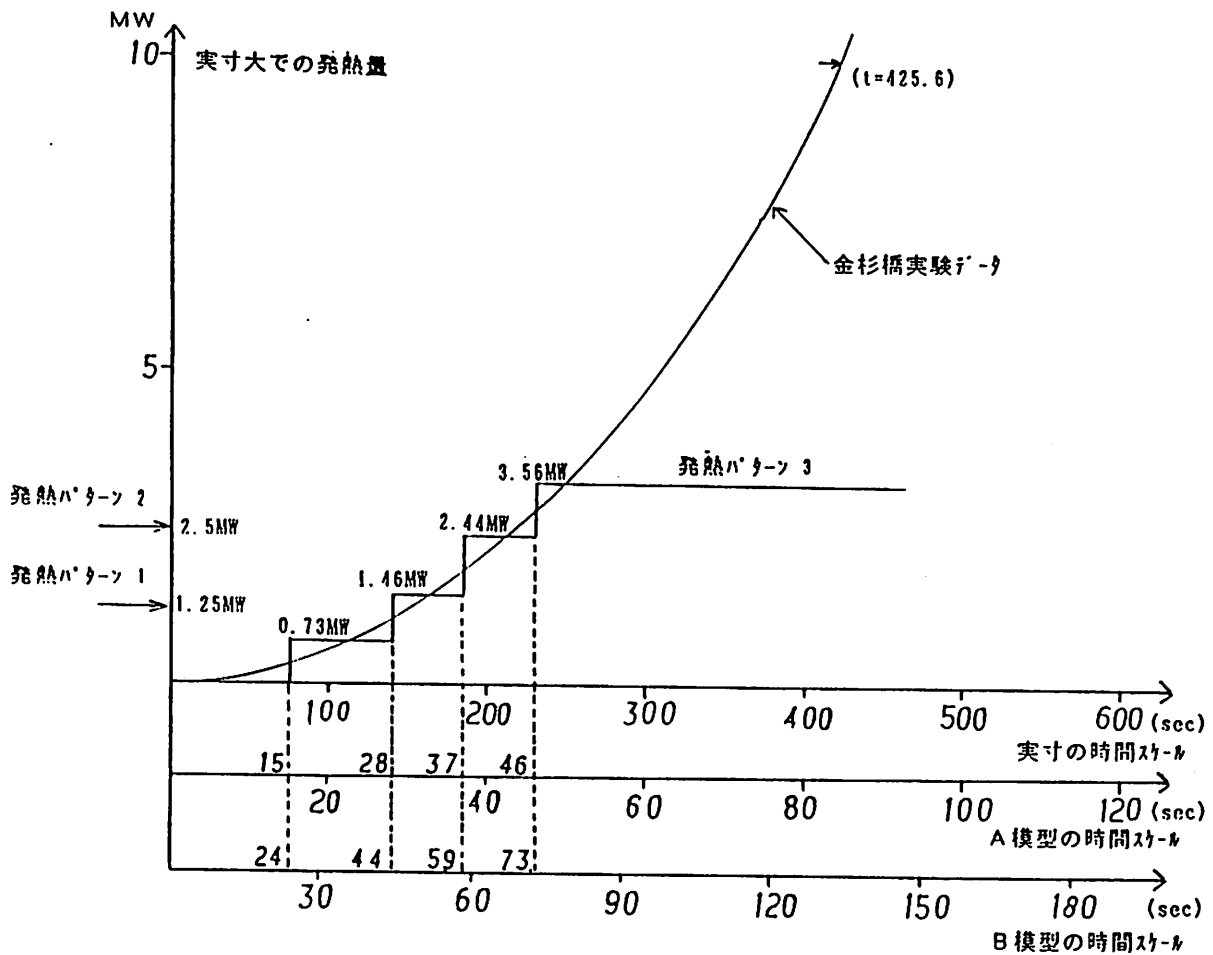
2  
表1、Bシリーズ実験条件一覧

実験 NO.	スケール	開口条件			エレベーター 開口	天井 スリット	火源位置		発熱 パターン	備考	
		無	1/3	1/12			中央部	隅角部			
B-1-1	1/10	○					○		1		
2		○					○		2		
3		○					○		3		
4		○						○	1		
5		○						○	2		
6		○						○	3		
B-2-1				○				○		1	
2				○				○		2	
3				○				○		3	
4				○					○	1	
5				○					○	2	
6				○					○	3	
B-3-1					○				○	1	
2					○				○	2	
3					○				○	3	
B-4-1					○	○			○	1	
2					○	○			○	2	
3					○	○			○	3	
B-5-1				○		○		○	1		
2				○		○		○	2		
3				○		○		○	3		

表3、Cシリーズ実験条件一覧

実験 NO.	スケール	オープンナーの数			オープンナー スクリーン	火源位置		発熱 パターン	備考	
		無	2	4		中央部	隅角部			
C-1-1	1/20	○				○		1	E. V開口無	
2		○				○		2	〃	
2-1				○			○		1	
2				○			○		2	
3-1				○				○	1	
2				○				○	2	
4-1				○		○		○	1	
2				○		○		○	2	
5-1					○			○	1	
2					○			○	2	
6-1					○	○		○	1	
2					○	○		○	2	
7-1					○	○		○	1	E. V開口の垂壁無
2					○	○		○	2	〃
8-1					○	○		○	1	E. V開口無
2					○	○		○	2	〃
9-1					○	○		○	1	1 m相当の天井スリット有
2					○	○		○	2	〃
10-1					○	○		○	1	2 m相当の天井スリット有
2					○	○		○	2	〃
11-1					○			○	1	〃
2					○			○	2	〃
12-1				○			○		1	
2				○			○		2	

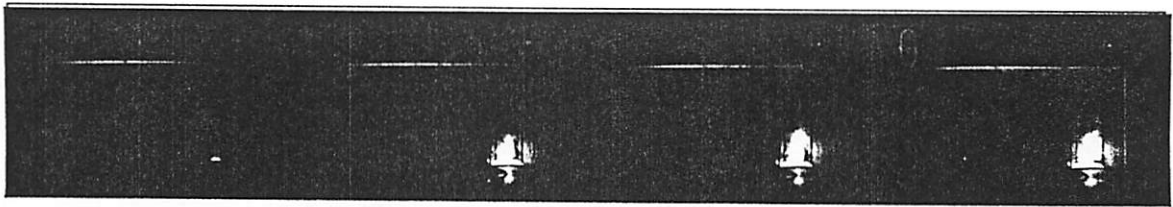
	実物大	A 模型 (1/25)	B 模型 (1/10)	C 模型 (1/20)
発熱パターン 1	1.25 MW	0.4 kW (0.26 ㊲/分)	3.95 kW (2.54 ㊲/分)	0.699 kW (0.45 ㊲/分)
発熱パターン 2	2.5 MW	0.8 kW (0.51 ㊲/分)	7.91 kW (5.07 ㊲/分)	1.398 kW (0.90 ㊲/分)
発熱パターン 3	金杉橋実験 0.552 $\times (1/100)^2 \text{ MW}$	下図	下図	-----



- ・ 模型の発熱量 = (縮尺)<sup>5/2</sup> × 実大の発熱量
- ・ プロパンの低位発熱量; 22.35 kcal/㊲N (22350 kcal/m<sup>3</sup>N)

図 3、模型実験における発熱パターンとその意味

実験A-2-5



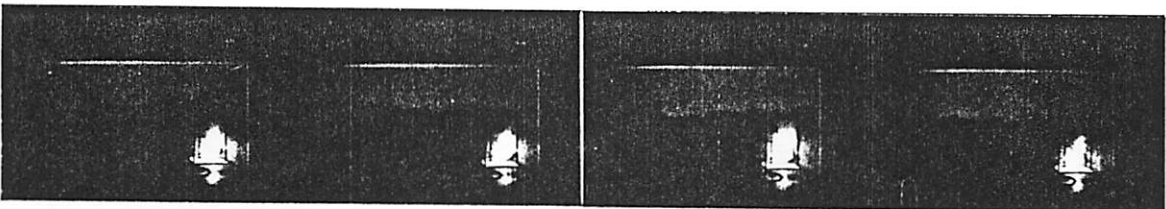
0''                      5''                      10''                      15''

実験B-2-5



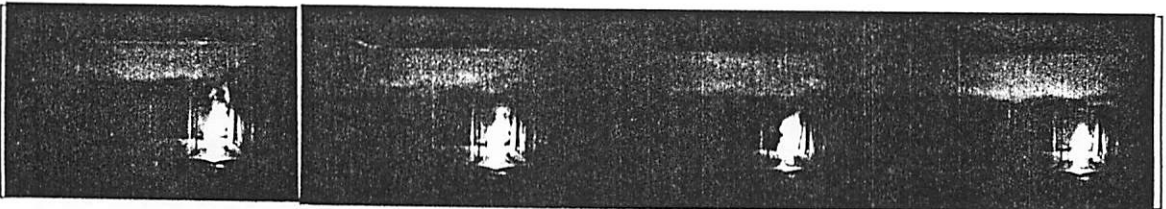
0''                      7''9                      15''8                      23''7

実験A-2-5



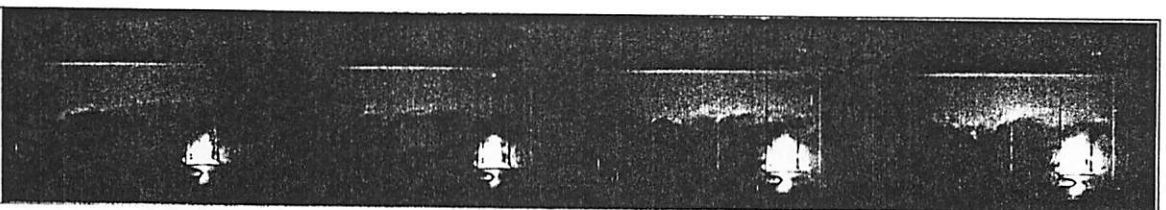
20''                      25''                      30''                      35''

実験B-2-5



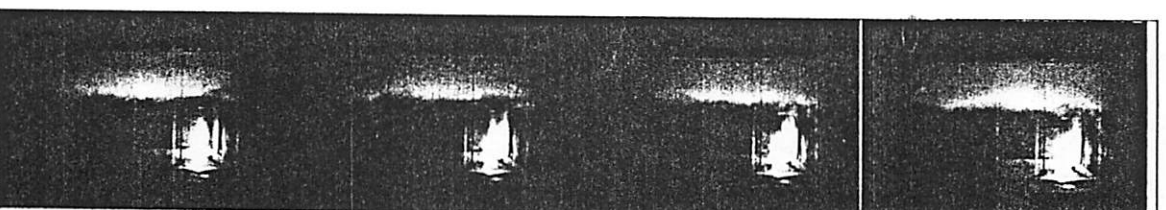
31''6                      39''5                      47''4                      55''3

実験A-2-5



40''                      45''                      50''                      55''

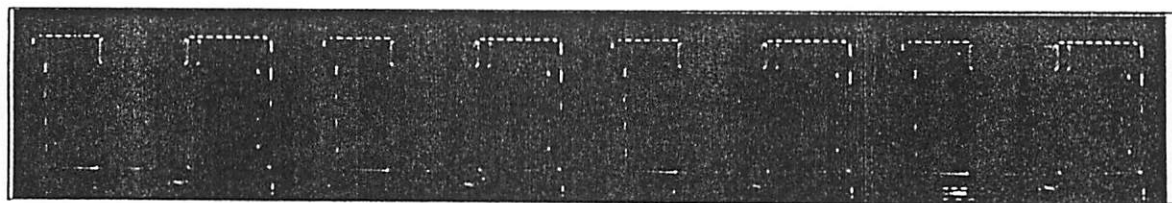
実験B-2-5



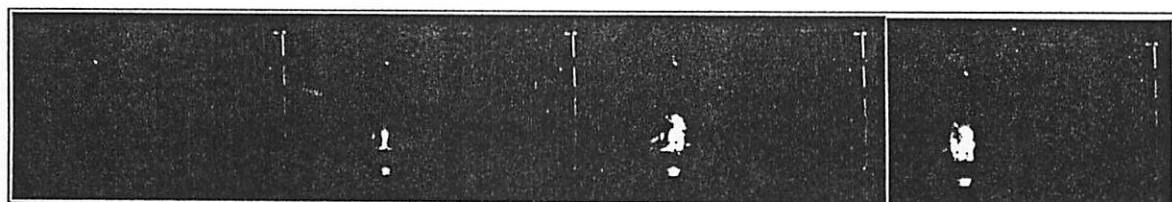
63''2                      71''1                      79''0                      86''9

写真1. 可視化映像の例      実験A-2-5 (1/25) と実験B-2-5 (1/10) の相似性

上接ブロック



出火ブロック



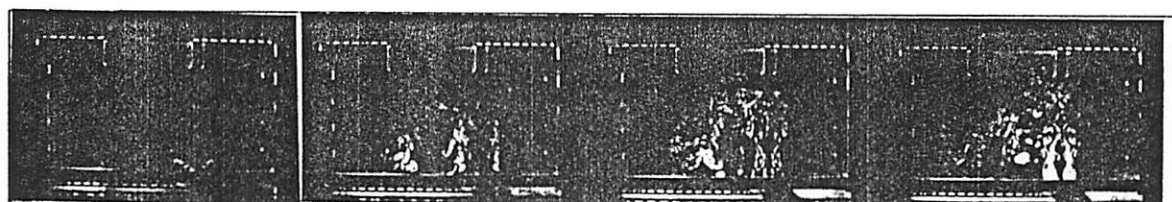
0"

12"

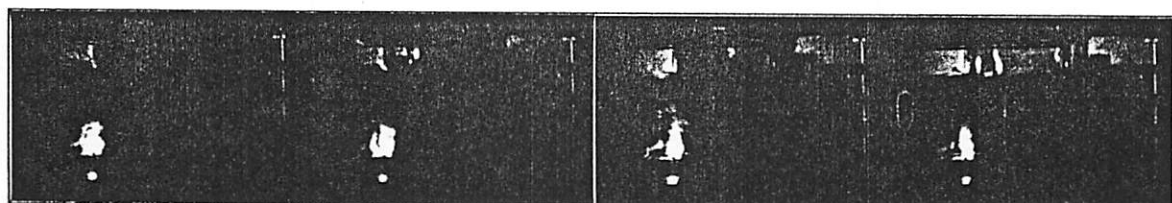
24"

36"

上接ブロック



出火ブロック



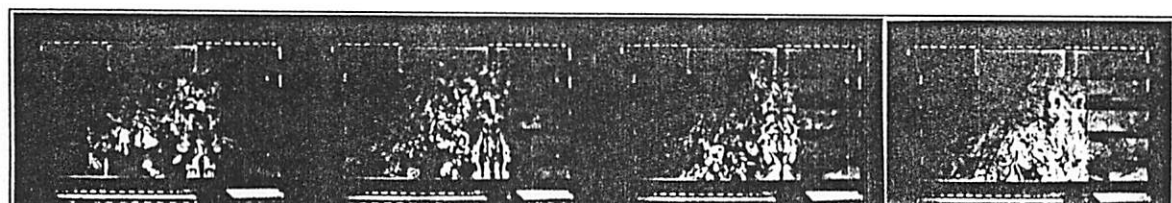
48"

60"

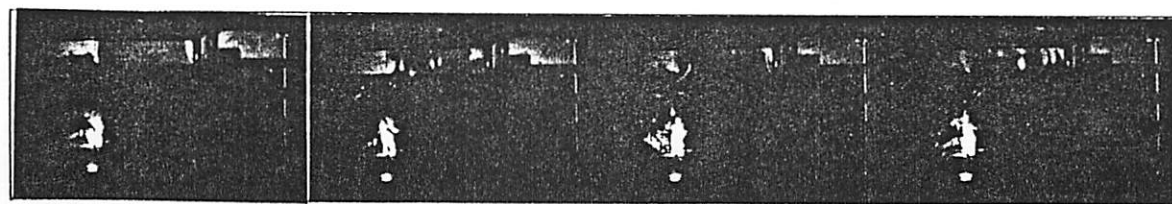
72"

84"

上接ブロック



出火ブロック



96"

108"

120"

132"

## 2-3・測定項目

### 1)温度

アトリウム部（2カ所、Cシリーズではさらに上部ブロックで1カ所）、オープンコーナー相当の開口部（2カ所）で、垂直方向11点の温度分布、スリット開口部などの数点で、応答性の良いCC熱電対を利用して温度を測定した。（図6に測定点を模式的に表現）

計測結果は、シミュレーション計算結果と併せて図11以降（巻末）に掲載。

### 2)濃度

CO<sub>2</sub>濃度を、Bシリーズ及びCシリーズの上部アトリウムで測定した。

計測結果は、本論文においてはシミュレーション計算結果との比較を行わなかった（サンプリングの数が少ないため）ので、省略した。

### 3)煙層の可視化とその記録

アルゴンレーザー発生装置と光学機器の利用により、アトリウムのほぼ中央の断面での煙層変化を可視化した。

撮影は、ビデオ装置及びカメラ（撮影間隔は、Aシリーズ5.0秒、Bシリーズ7.9秒、Cシリーズ5.5秒）で行い、煙層降下の判定材料とした。

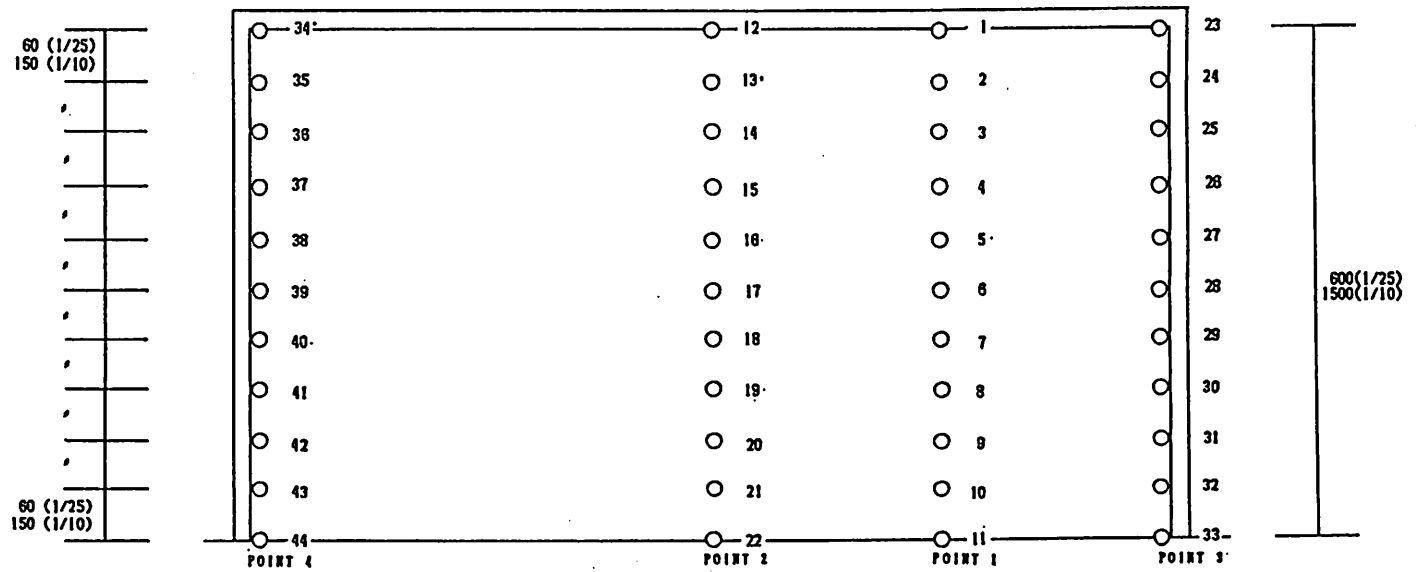
（写真撮影の例：写真1、2）

## 2-4・模型図面と測定点

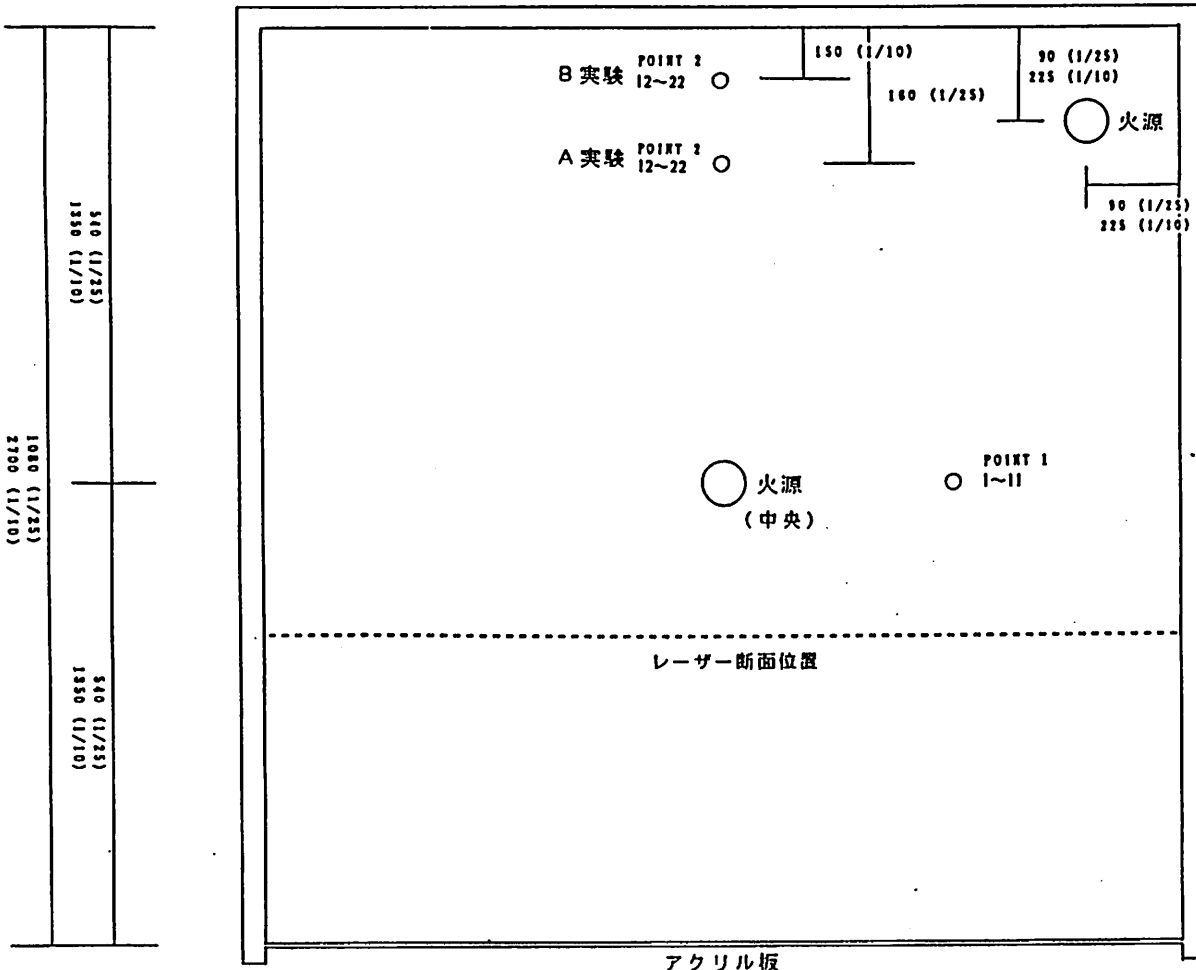
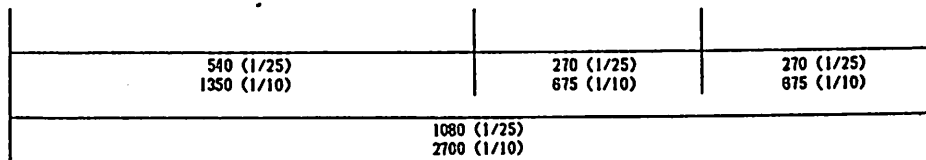
Aシリーズ（縮尺1/25）、Bシリーズ（縮尺1/10）、Cシリーズ（縮尺1/20）の実験模型の図面と、2-3で述べた温度の測定点、火源の位置などを図4-1～5, 5-1、2に示した。

図面は表現が複雑にならないよう、開口条件等が大きく異なるものごとに図を変えて表現している。

図番	図が表現している実験
図4-1	A-1-1～1-6, B-1-1～1-6
図4-2	A-2-1～2-3, B-2-1～2-3
図4-3	A-3-1～3-3, B-3-1～3-3
図4-4	A-4-1～4-3, B-4-1～4-3
図4-5	A-5-1～5-3, B-5-1～5-3
図5-1 (1, 2)	Cシリーズの測定点
図5-2	Cシリーズ各実験での開口等を模式的に表現
図6	測定点模式図



模型断面図



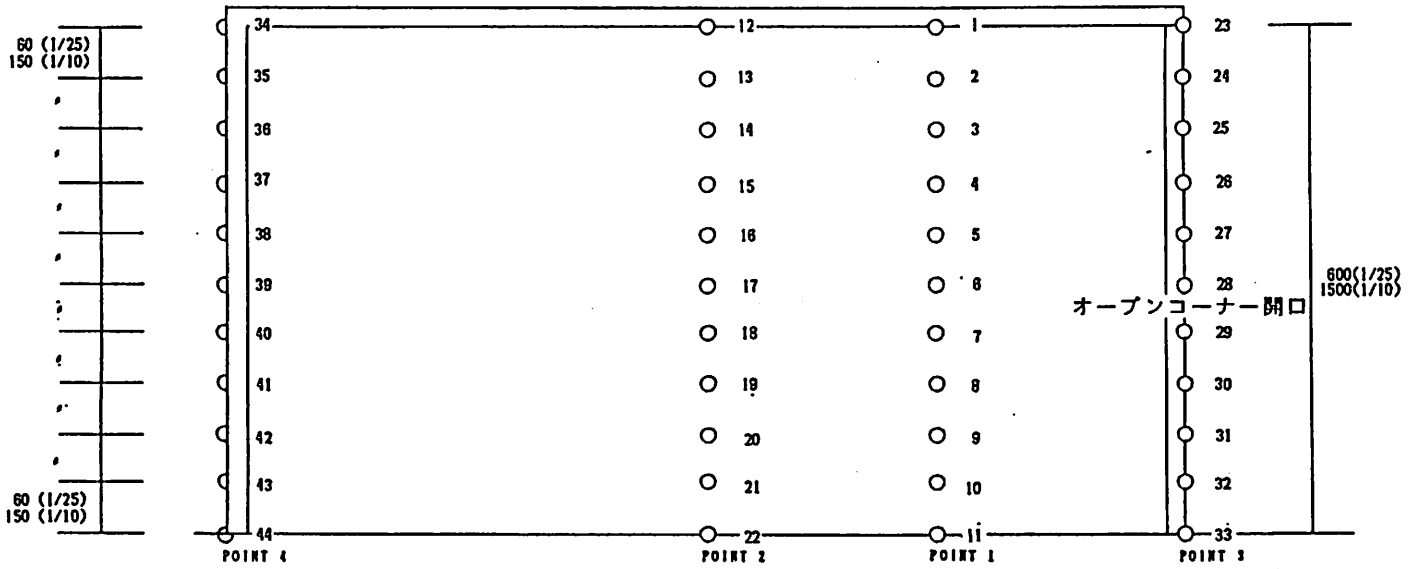
模型平面図

数字 (1~57) は熱電対による温度測定点

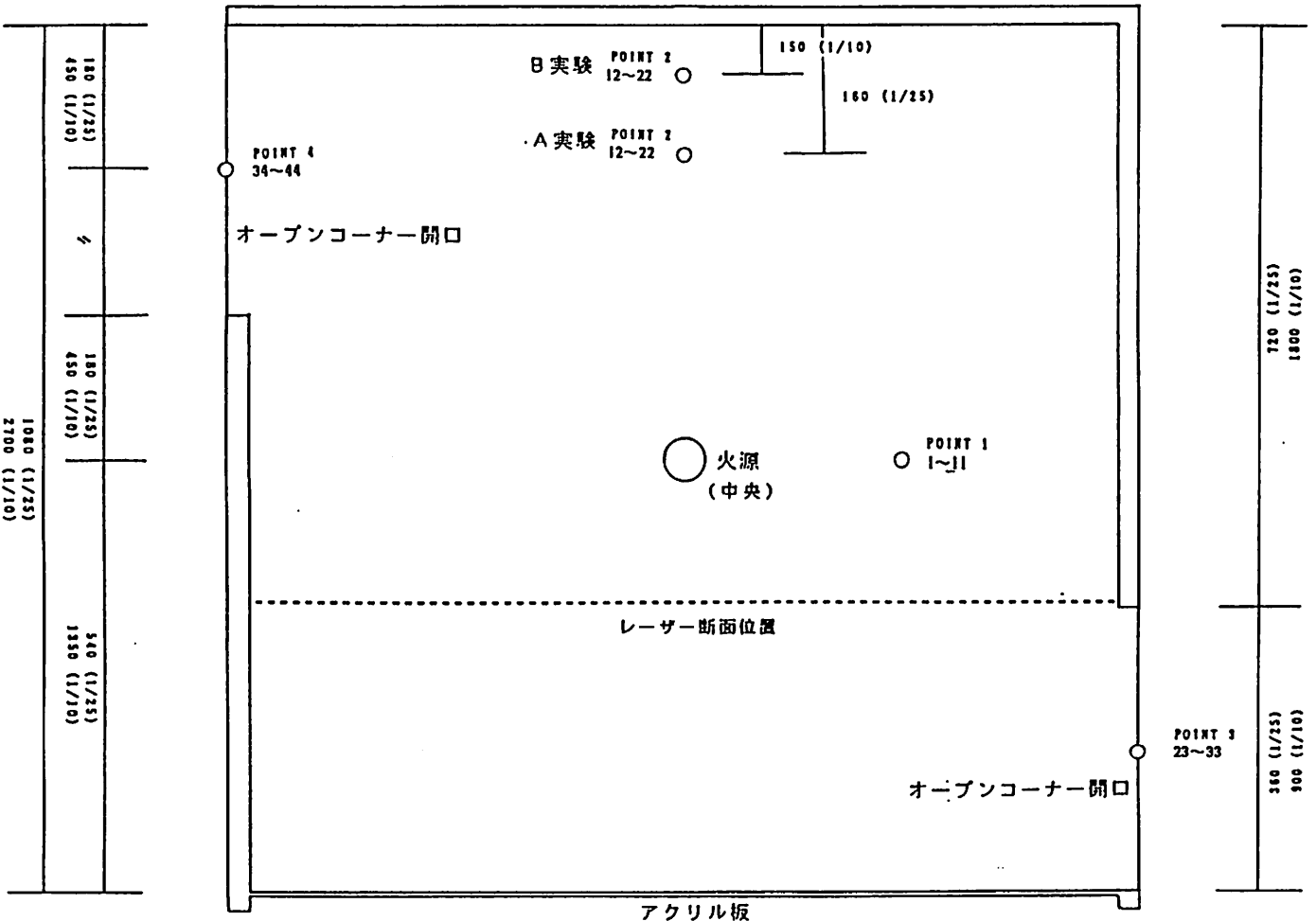
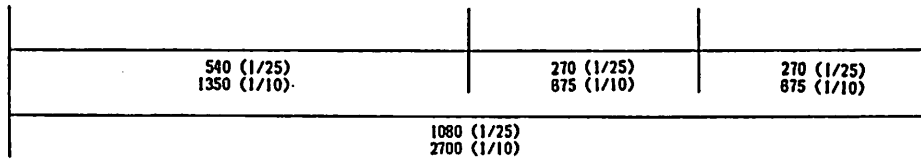
CO<sub>2</sub>濃度測定点は火源真上の5 F部分と炎の先端部

図 4 - 1、模型図面と測定点 (A - 1、B - 1)



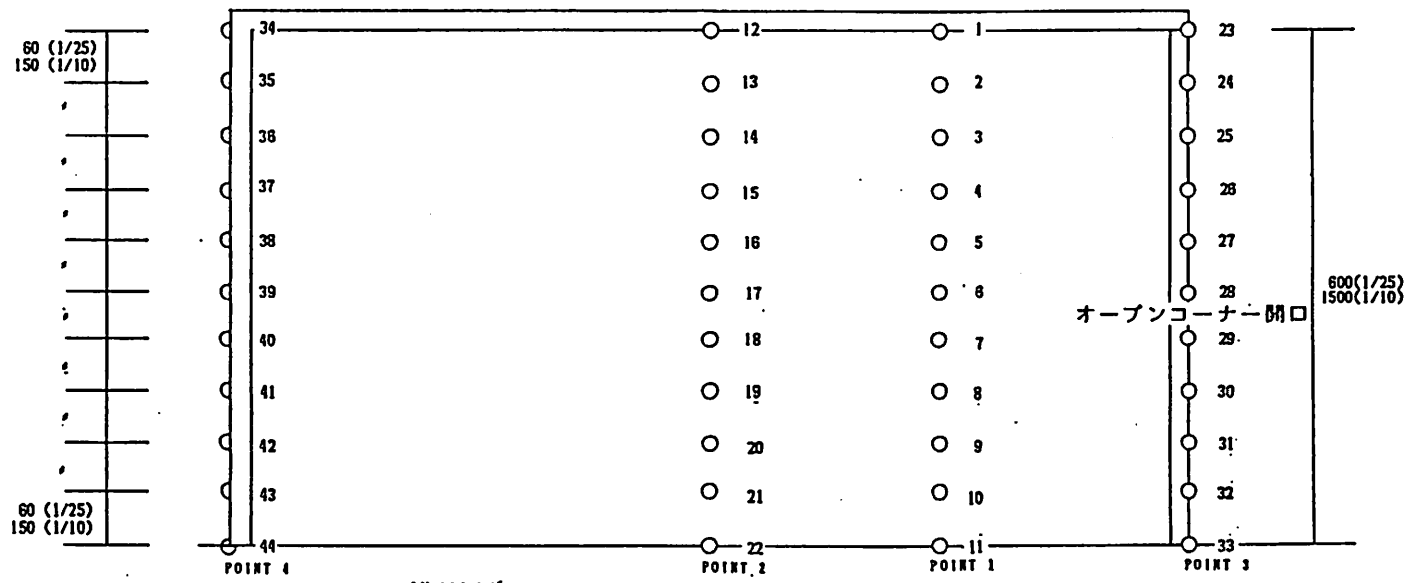


模型断面図

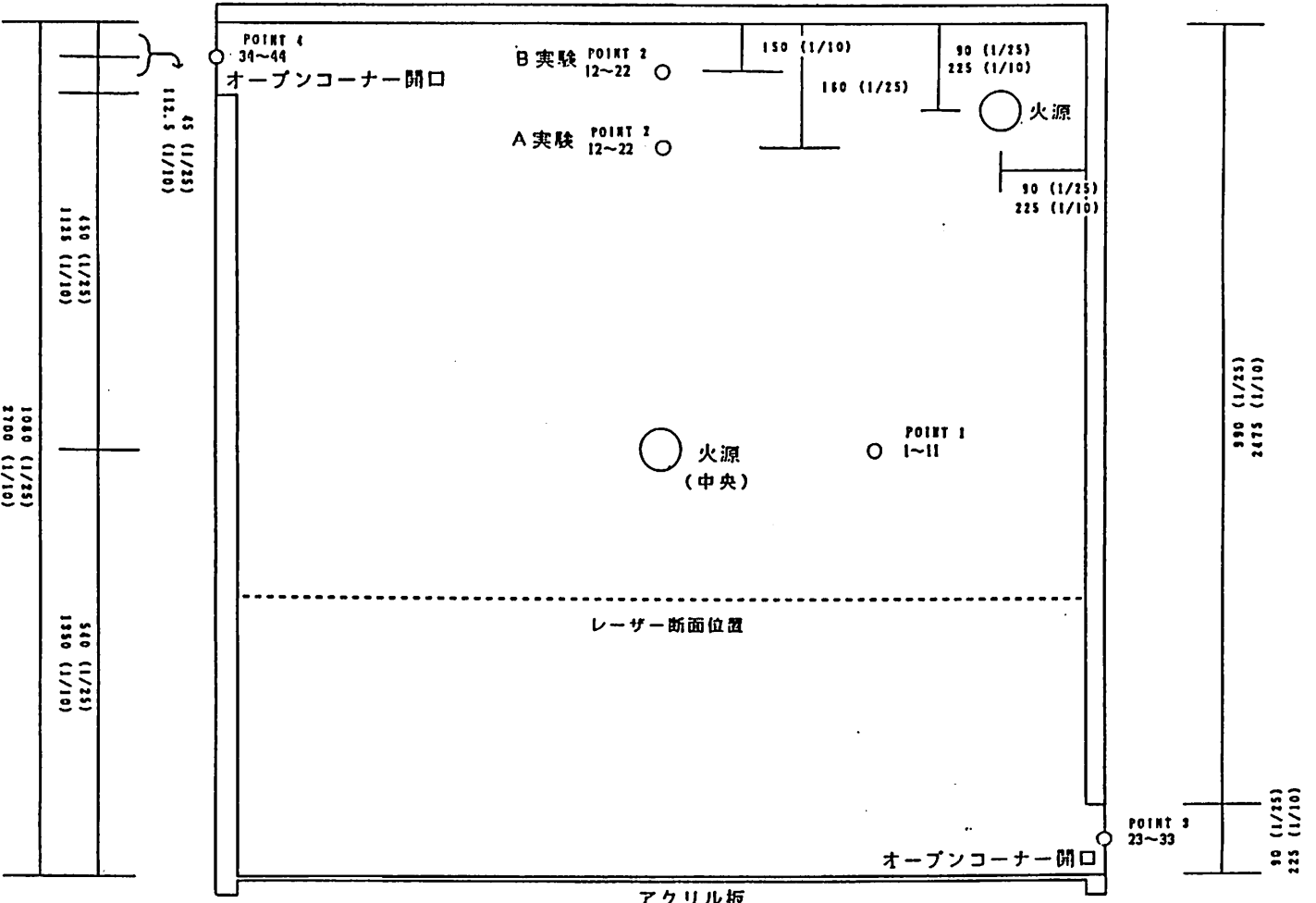
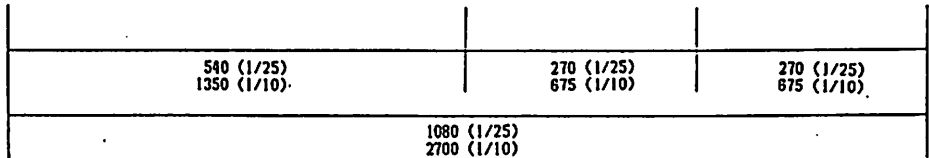


模型平面図

図 4 - 2、模型図面と測定点 (A - 2、B - 2)

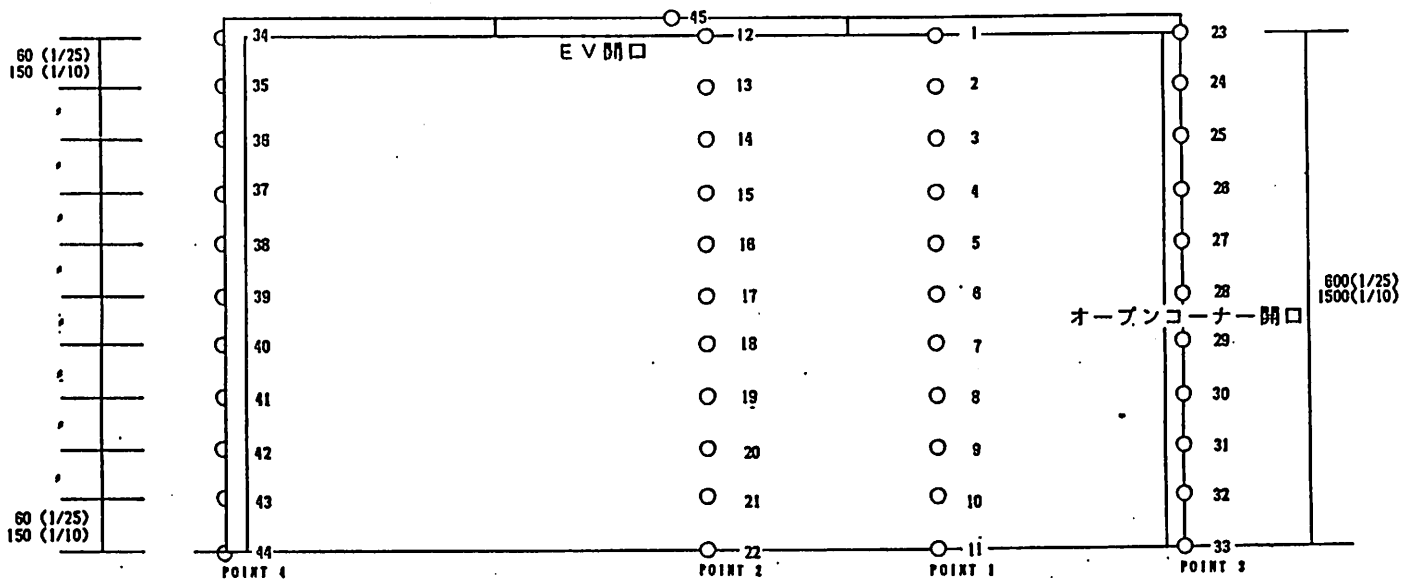


模型断面図

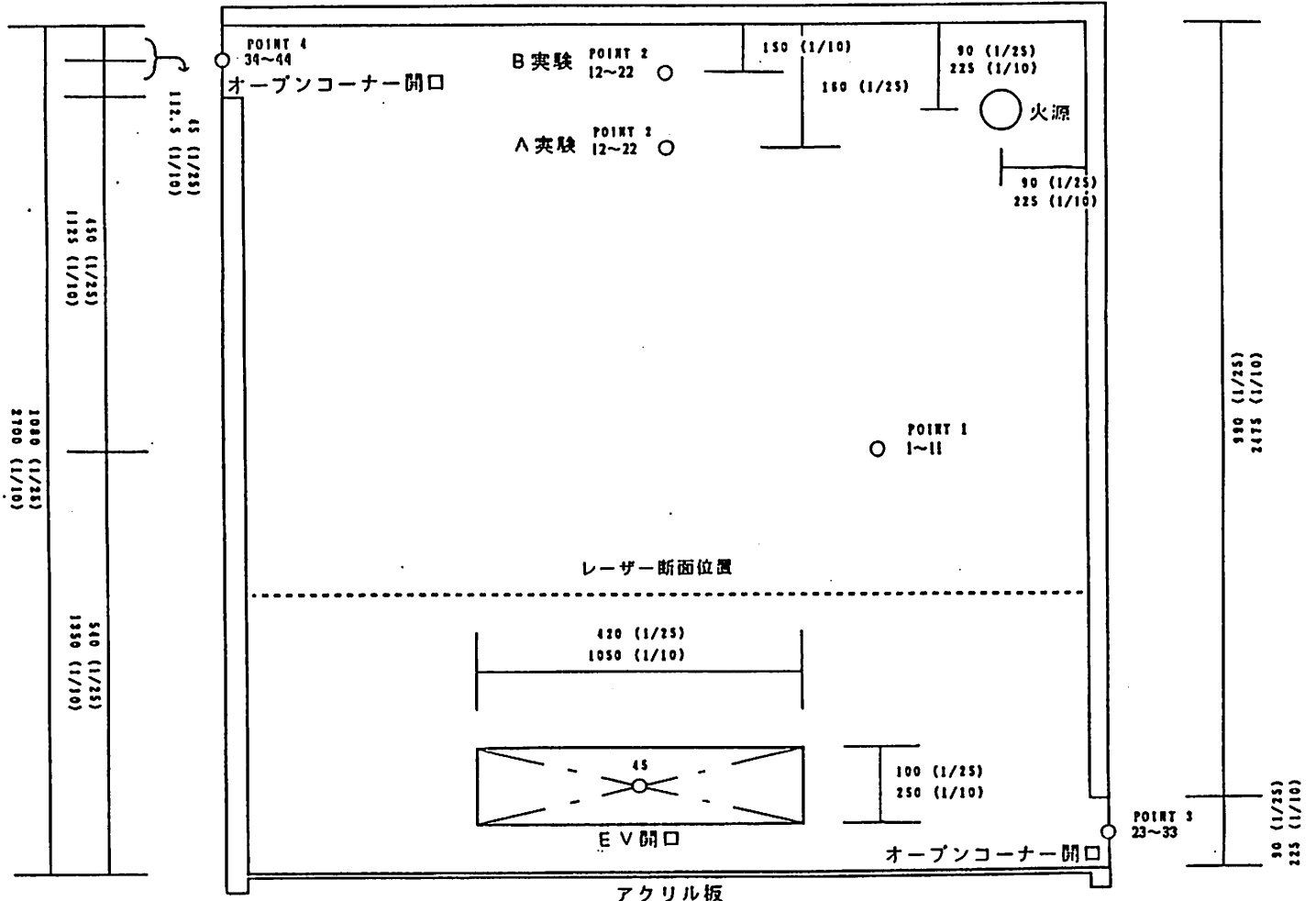
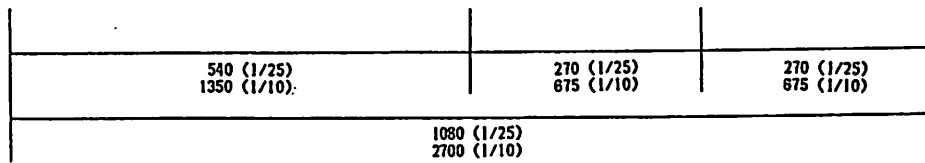


模型平面図

図 4 - 3、模型図面と測定点 (A - 3、B - 3)

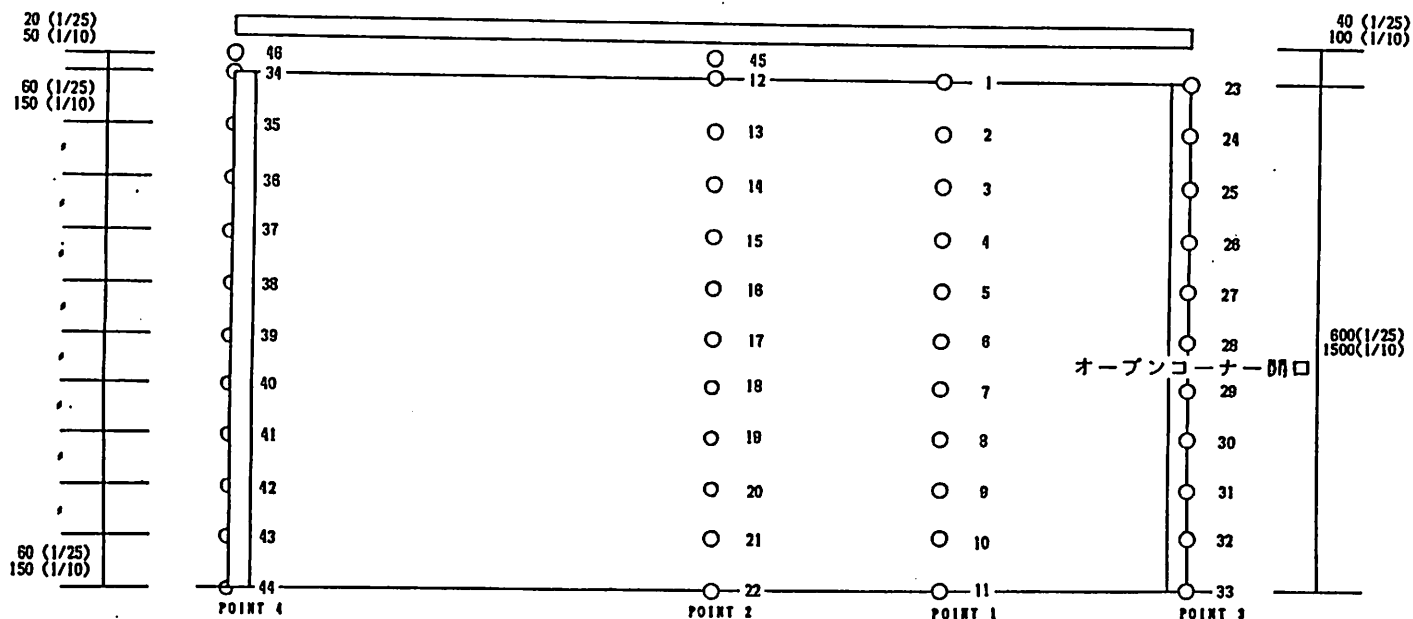


模型断面図

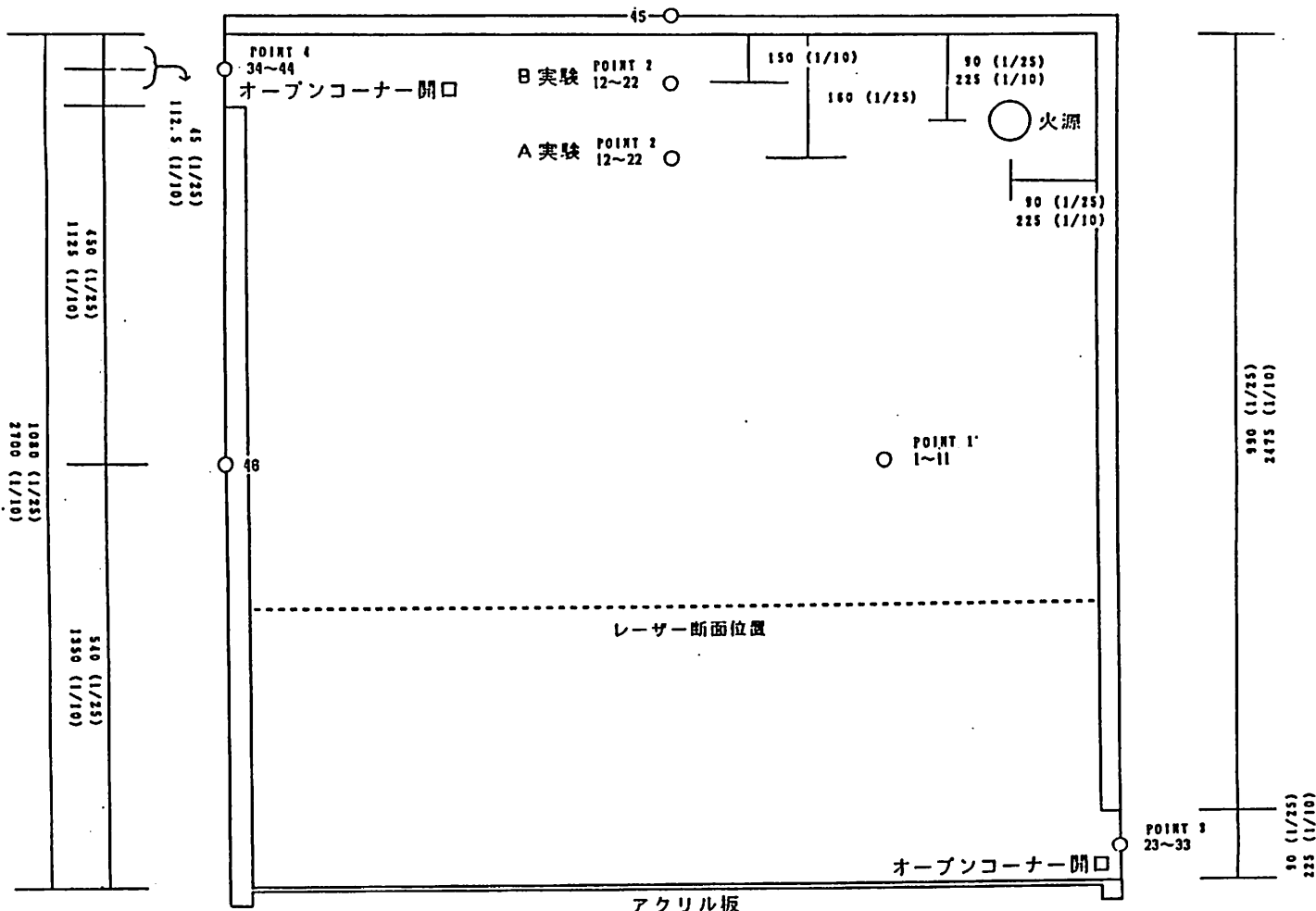
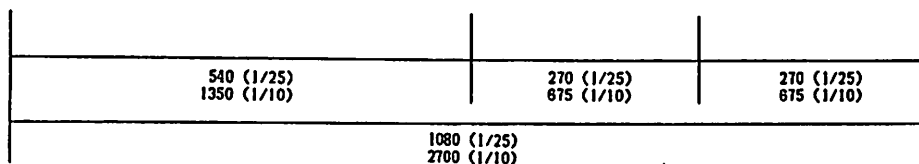


模型平面図

図 4 - 4、模型図面と測定点 (A - 4、B - 4)

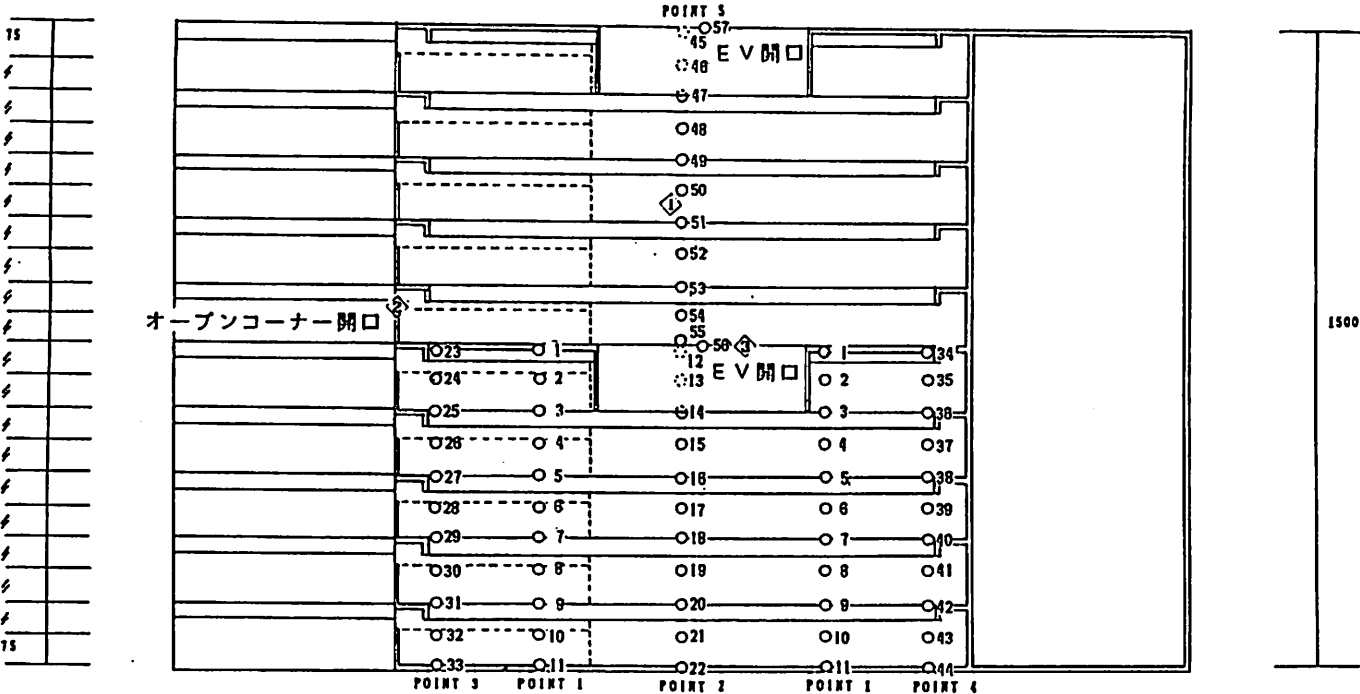


模型断面図

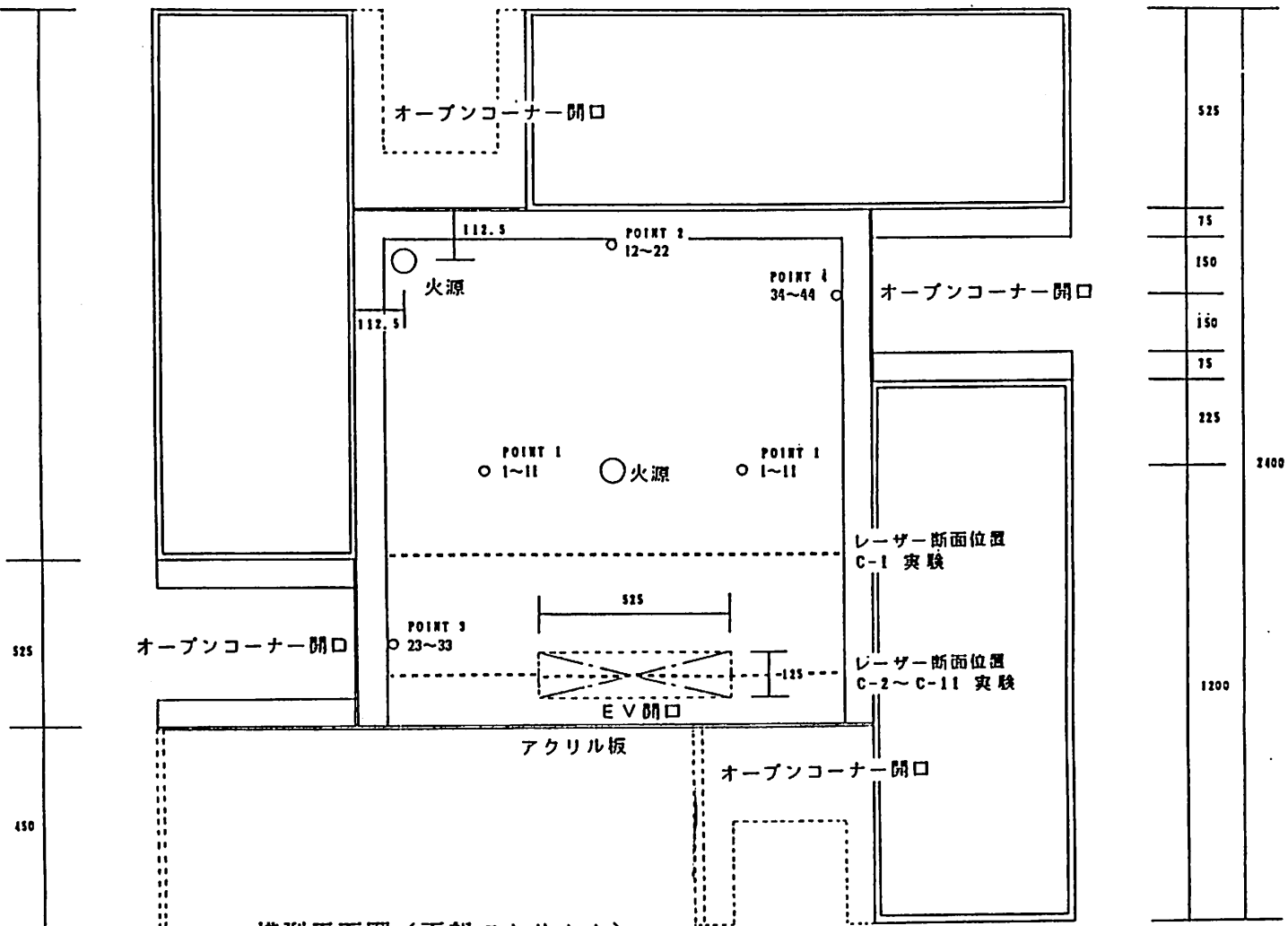
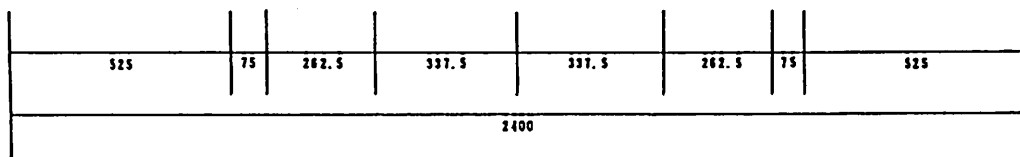


模型平面図

図 4 - 5、模型図面と測定点 (A - 5、B - 5)

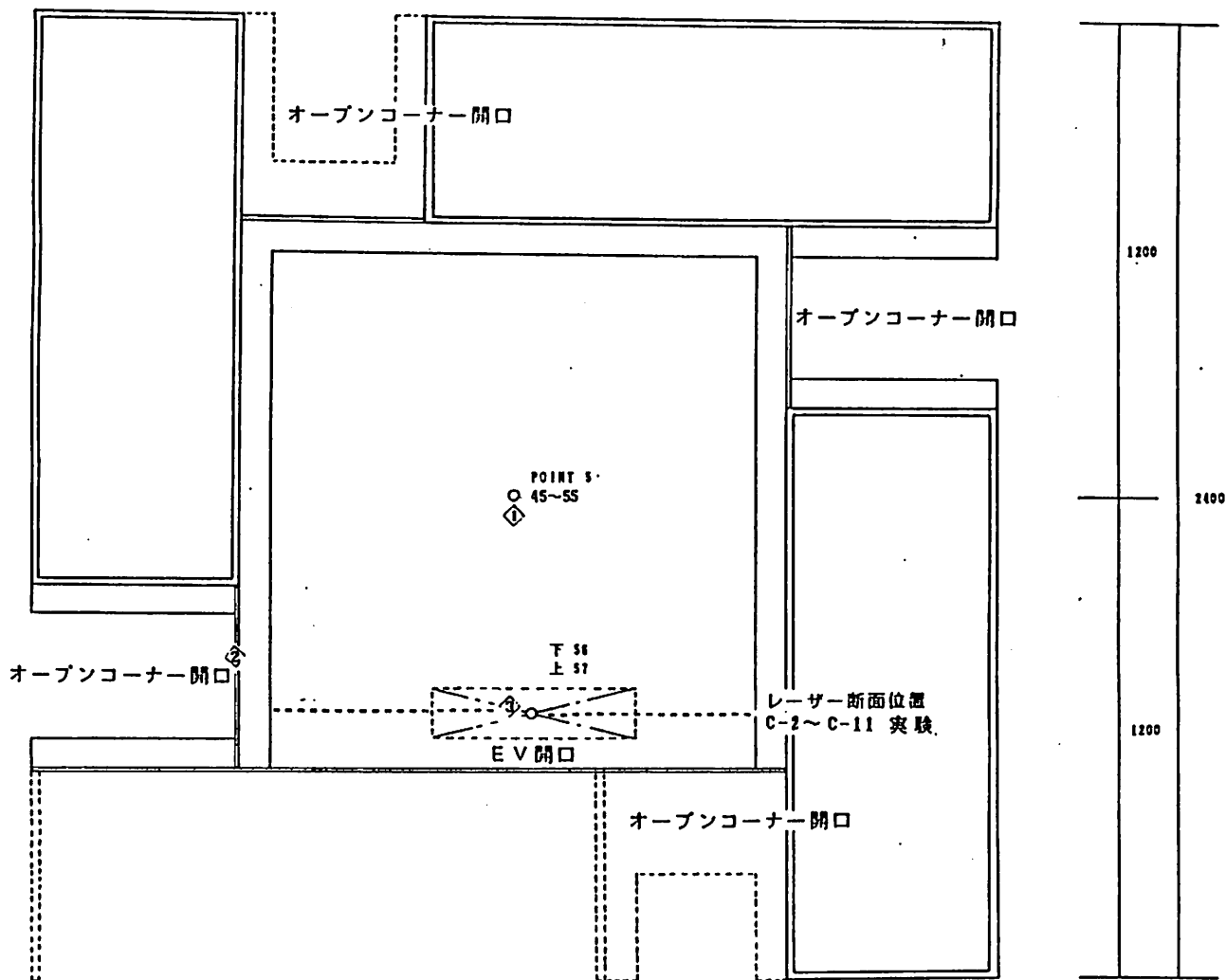


模型断面図



模型平面図（下部アトリウム）

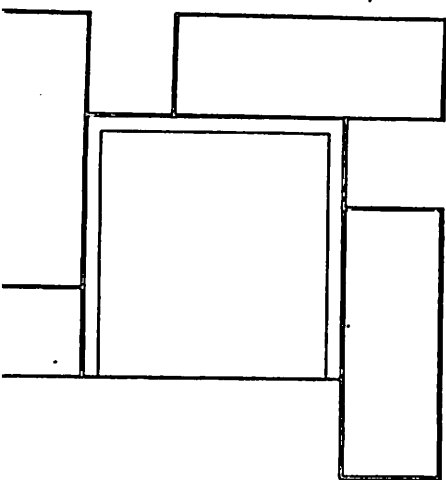
図5-1(1)、Cシリーズ下部アトリウムにおける測定点



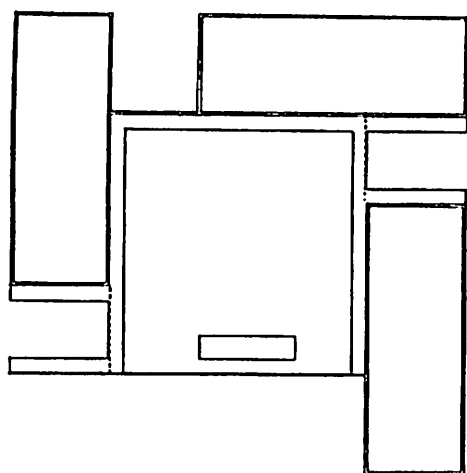
模型平面図（上部アトリウム）

- ◆◆◆はCO<sub>2</sub>濃度測定点
- ◆は全実験
- ◆◆はC-6, C-8実験のみ

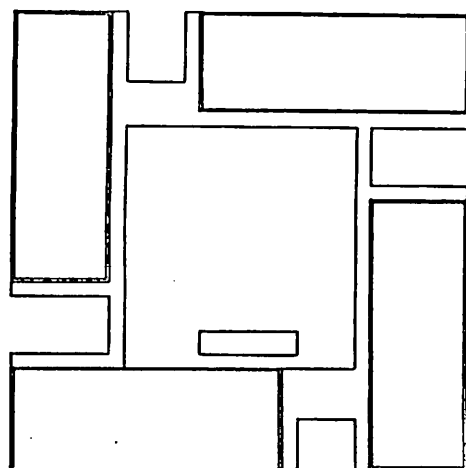
図5-1(2)、Cシリーズ上部アトリウムにおける測定点



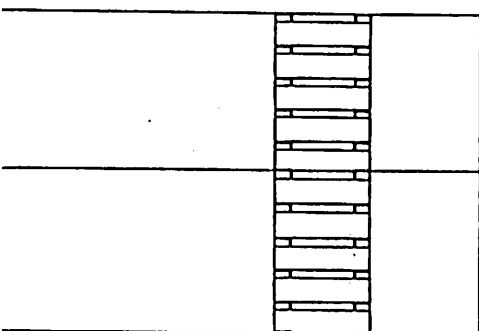
模型平面 C-1  
(オープンコーナー無し)



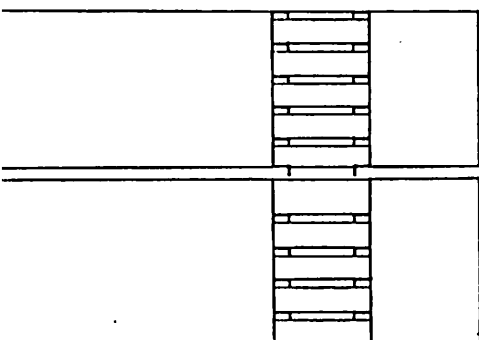
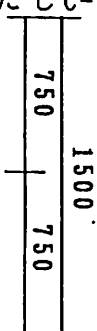
模型平面 C-5~11  
(オープンコーナー2ヶ所)  
ただしC-7は、E.V開口に垂壁無し  
ただしC-8は、E.V開口無し



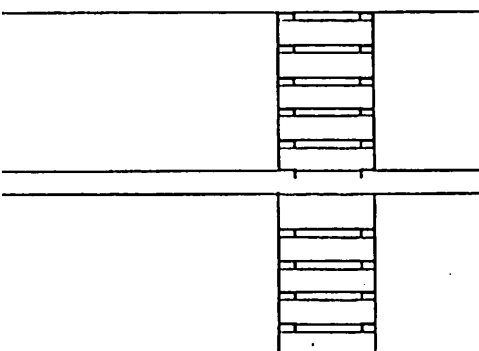
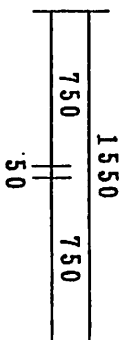
模型平面 C-2~4  
(オープンコーナー4ヶ所)



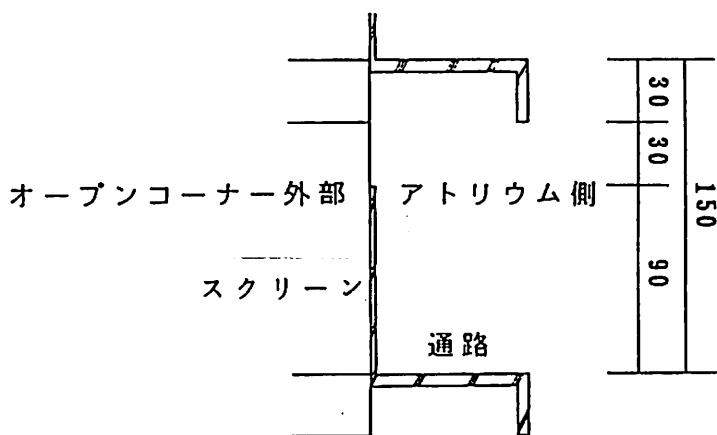
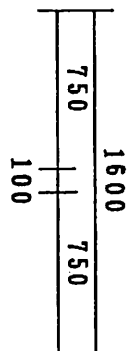
模型立面 C-1~8  
(天井スリット無し)



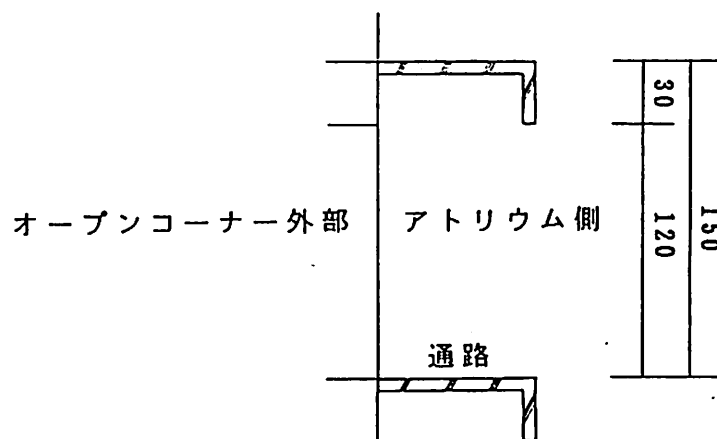
模型立面 C-9  
(天井スリット1相当)



模型立面 C-10,11  
(天井スリット2相当)



オープンコーナー断面 C-4,6~10  
(スクリーン有り)



オープンコーナー断面 C-2,3,5,11  
(スクリーン無し)

図5-2、Cシリーズ実験条件 模式図

## 二章、 二層ゾーンモデルによる シミュレーション計算

### 1、二層ゾーンモデルの概説

この煙流動性状予測モデルは、建築省総合技術開発プロジェクト「防火設計法の開発」の中で開発されたもので、二層ゾーン概念に基づいて作成されている非定常の火災モデルである。

このモデルは、加西の発生に伴う煙の拡散過程で建物内のいずれの空間も、物理的・化学的性質に関してそれぞれ一様で明確に分離される2つの層（上部層・下部層）に満たされると仮定し、各空間の環境の非定常的变化を予測する。

本モデルでは、空間形状の他、火源自体の燃焼条件（燃焼速度、火源面積、CO・すすの発生率等）は設定値として与える。一方、この火源により引き起こされる諸現象（上・下部層の温度・厚さ、 $O_2$ ・ $CO_2$ 等の化学種濃度、輻射・対流熱伝達、開口部における流量など）は全て物理的法則に基づいて予測される。

したがって、縮小された空間形状（模型寸法）に合わせて相似則に基づく発熱量による燃焼条件を設定値として与え、計算結果を相似則の時間の尺度で合わせることで、ほぼ相似の諸現象の計算結果が得られる。

なお、このモデルの詳細は文献2を参照とされたい。また二層ゾーン概念に用いられている仮定を以下に示し、図7を理解の助けとする。

#### ・二層ゾーンモデル

- 1) 建物内のいずれの空間も、2つの層、すなわち上部層（一般的に煙層とも呼ぶ）と下部層（一般的に空気層とも呼ぶ）、もしくはそのいずれか一方によって満たされる。
- 2) 上部層は空間の上部に、下部層は空間の下部に形成され、両者は明快な水平面で分離される。
- 3) それぞれの層はよく混合されており、物理的、化学的性質において一様である。
- 4) 各層の境界面を通じる質量の移動は、火災プルーム、開口ジェット及びそれに起源を有するプルームのみを通じて生じる。

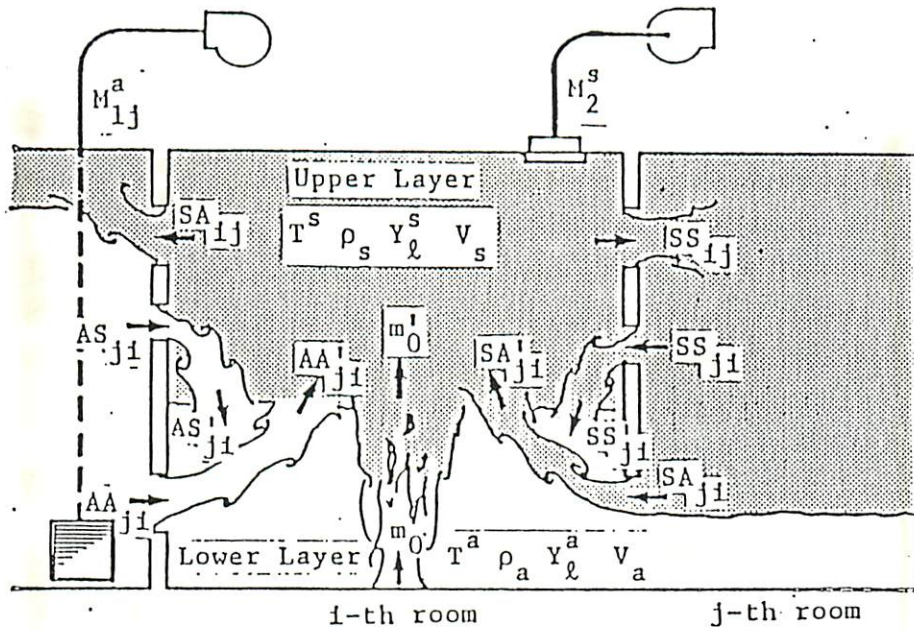


わ)各層の境界面を通じる熱エネルギーの移動は、二)の質量の移動に伴うほか、同一空間内の他方の層及び周壁との放射熱伝達と、各層と周壁との対流熱伝達によって生じる。

ア)火源上の火炎からの直接の放射は無視する。

ト)建物内の各空間の体積は、空間内の圧力変化その他の理由により伸縮することはないものとする。

フ)空間を異にするゾーン間の放射熱伝達は無視する。



- SS : 上部層から上部層への開口部流量 (kg/s)
- SA : 上部層から下部層 " (kg/s)
- AS : 下部層から上部層 " (kg/s)
- AA : 下部層から下部層 " (kg/s)
- SS' : SSを源とする開口ジェットプルームにより上部層へ侵入する流量 (kg/s)
- SA' : SAを源 " 下部層 " (kg/s)
- AS' : SAを源 " 上部層 " (kg/s)
- AA' : AAを源 " 下部層 " (kg/s)
- $m_0$  : 火源の可燃物のガス化(重量減少)速度 (kg/s)
- $m_0'$  : 火源 $m_0$ を源とする火災プルームにより上部層へ侵入する流量 (kg/s)
- T : 層の温度 (K)
- $\rho$  : 層の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
- V : 層の体積 ( $\text{m}^3$ )
- $Y_l$  : 層内の化学種 l の濃度 ( $\text{kg/kg}'$ )

図6、二層ゾーンモデルの概念  
(文献2より引用)

## 2、入力条件

### 2-2・空間条件

今回の模型条件に本モデルを適用させる際、空間形状の設定では、次のようなモデル化を必要としている。

- ・水平開口の概念（計算式）は取り入れられていない。そこで、その開口の位置する高さに開口面積が同一となるような、高さのごく低い幅広の垂直開口によってこれを代用する。
- ・火源及び開口の位置関係は考慮されない。（例えば、火源が中央部の実験と隅角部の実験は、計算では区別されない。など）

したがって、模型実験におけるA，Bシリーズは図8に示すように開口等のモデル化をした。

また、Cシリーズにおいては図9のごく簡単な形状に置き換えた。これは、模型形状を忠実に再現しようとした場合に、計算される温度・室内圧力が不安定な状態に陥り、模型実験での様子とかけ離れた結果を示したりしたためである。

### 2-2・燃焼条件

発熱パターンについては、急激な発熱量の変化によって上部層と下部層の温度の逆転が起こる（煙層が少量の時に過度の冷却が起きる）ため計算が止まるなどの不都合が生じるので、図10に示すようになだらかな変化となるようにした。

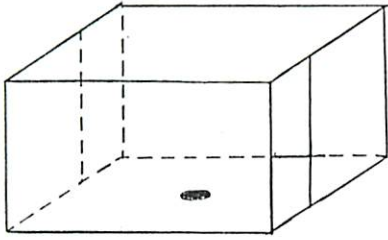
### 2-3・その他

そのほかの入力条件については、表4に入力データ<sup>Y</sup>を示す。  
<sub>の(例)</sub>

## 3、出力結果

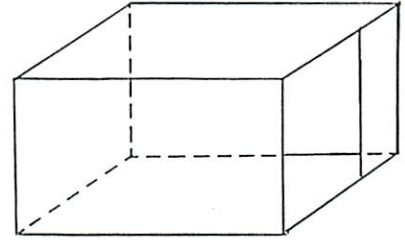
二層ゾーンモデルでは、計算出力として各層の{温度、厚さ、化学種濃度（N<sub>2</sub>，O<sub>2</sub>，H<sub>2</sub>O，CO<sub>2</sub>，CO，すすなど）、放射・対流熱伝達量}、室内圧力、および開口部流量などが得られる。出力結果の例を表5に示す。

シミュレーションモデル

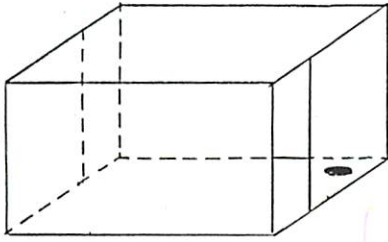


実験 2-1~3

1/3 開口

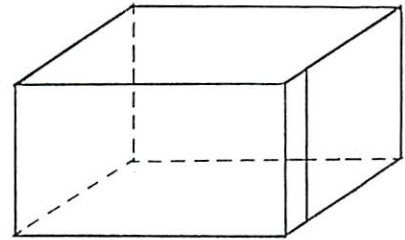


計算 2-1~3

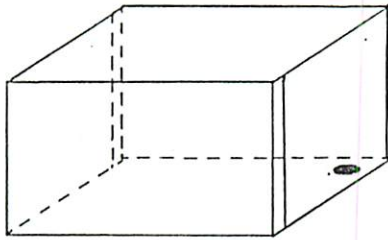


実験 2-1~3

1/3 開口

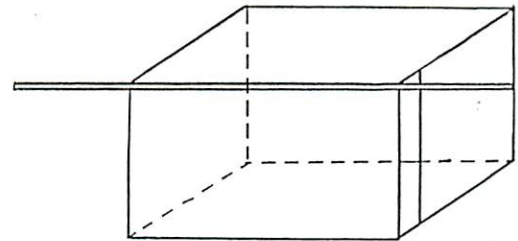


計算 3-1~3

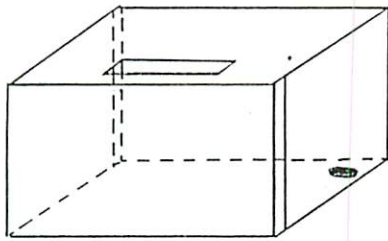


実験 3-1~3

1/12 開口

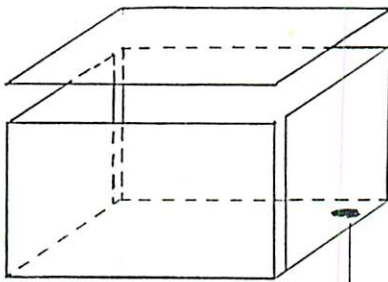


計算 4-1~3



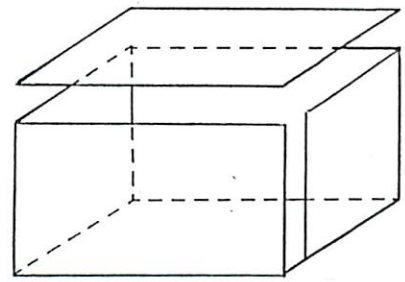
実験 4-1~3

E.V 開口有



実験 5-1~3

天井スリット有

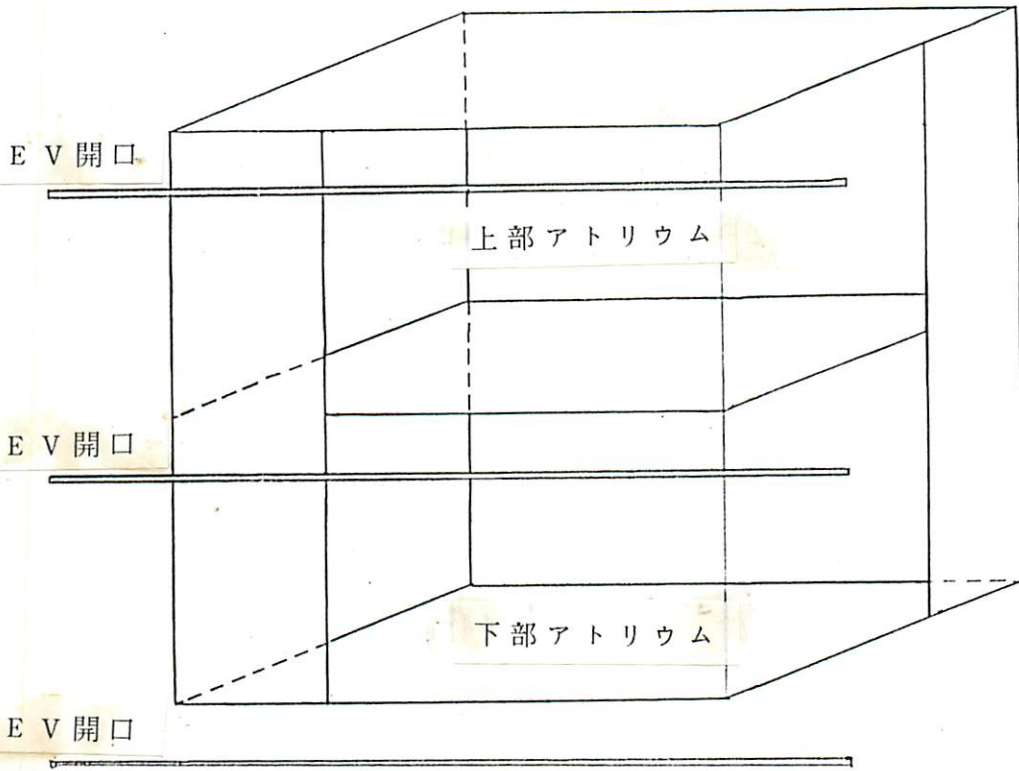


計算 5-1~3

火源

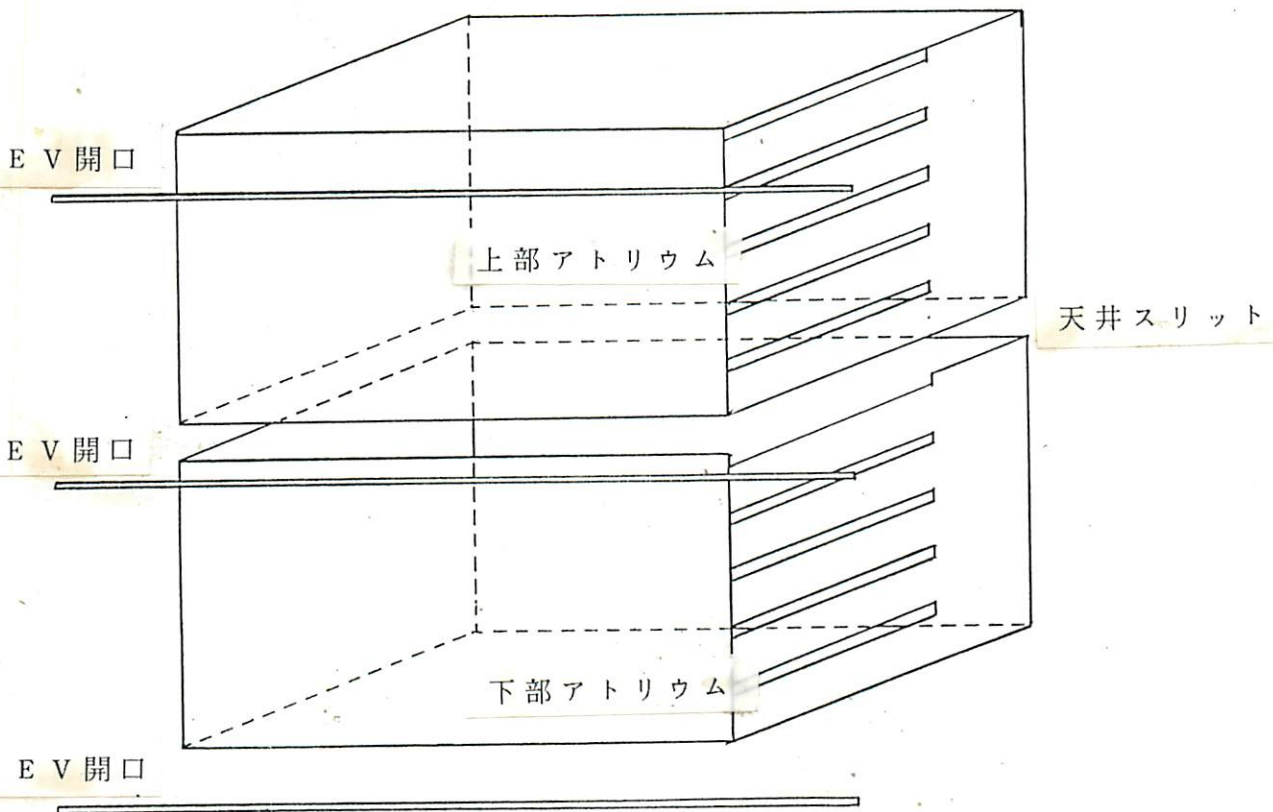
いずれも火源位置は特定せず

図8、A、B模型のモデル化



C-2

オ-7°コーナー-4つ スクリーン無 天井スリット無 E.V.開口有



C-10

オ-7°コーナー-2つ スクリーン有 天井スリット2m相当 E.V.開口有

図9、C模型のモデル化の例

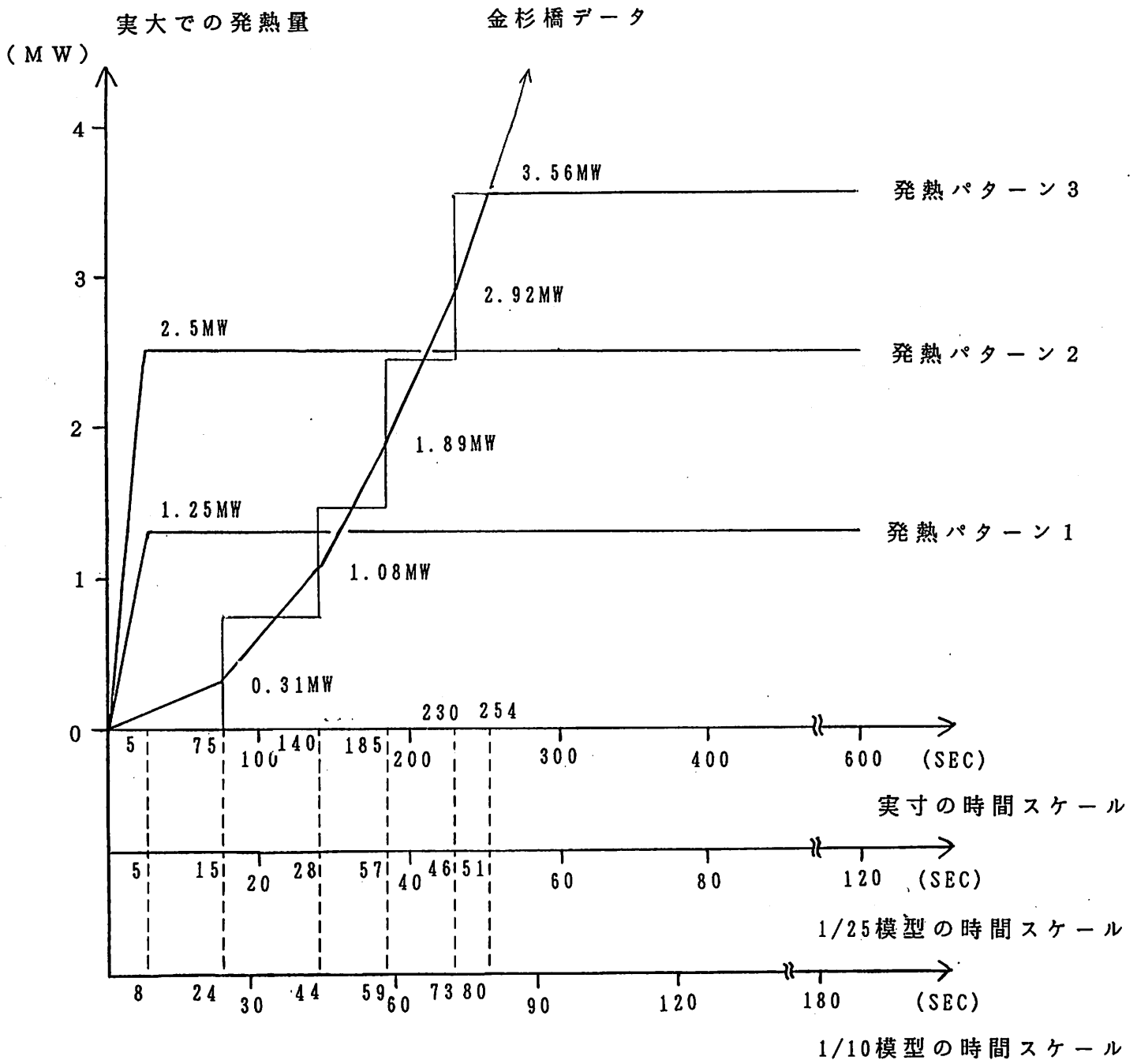


図 10、発熱パターンのモデル化 (図 3 参照)