

アトリウム内初期火災時の煙流動に外気風が与える影響に関する模型実験

佐々木 真人

MODEL EXPERIMENT STUDY OF SMOKE MOVEMENT
ON THE EARLY STAGE OF FIRE IN AN ATRIUM UNDER EXTERNAL WIND

Masato SASAKI

We carried out a few experiments in order to estimate the influence of external wind for the smoke exhaustion performance, and confirmed influence by external wind in atrium by measuring the temperature, wind velocity. As a result of tunnel experiment, according to a condition, as external wind were large, an average of ascending indoor temperature were increasing. But according to other condition, as external wind were large, an average of it is decreasing. As a result of experiment supplied air by fan, we showed possibility we can analyze the smoke exhaustion performance with the momentum by the opening.

目次

1. はじめに	2
1.1 研究目的	2
1.2 研究方法	2
2. 相似則	3
2.1 支配方程式による相似則の考察	3
2.2 境界条件の相似	4
3. 市街地境界層条件下の外気風が煙流動に与える影響について	7
3.1 実験概要	7
3.2 実験条件	7
3.3 実験結果及び考察	11
3.4 まとめ	14
4. 開口部運動量を変化させた模型実験	15
4.1 実験概要	15
4.2 実験条件	15
4.3 実験結果及び考察	20
4.4 まとめ	29
5. おわりに	30

1. はじめに

1.1 研究目的

近年、アトリウム空間を有する建物の建設が増えてきている。それは、技術の発展に伴うものでもあるが、アトリウムの持つ豪華さ、開放性、象徴性といった特殊性によるものであり、人々を魅了し、周囲の環境にも新鮮さを与える空間だからである。

しかし、アトリウム建築は伝統的な安全の手法で守られる空間からは、かけ離れたものであるため、火災が発生した場合、その巨大な堅穴空間は煙の伝播をしやすくし、避難の妨げとなりうる。また、その空間的特色から人々が集まる公共の場として使われることが多く、より高い安全性が要求される。

アトリウムの火災安全性を考えていくうえで、アトリウム建築というのは、一つ一つ異なったものでありどれ一つ同じ物はないことを踏まえておかなければならない。また、実際のアトリウムの火災事例も数少なく、実際の建物を用いて火災実験を行うことも現実的なことではない。現在は、その安全性を評価する手法として、二層ゾーンモデルやフィールドモデルといった種々のシミュレーションに頼っているが、それらは基本的に安定な煙成層が形成されることを前提としており、全ての状況に対応できるものではなく、外気風により煙層が乱される場合などは十分に加味しきれていない。

本研究は、既往の研究¹⁾²⁾でその有効性が示されている相似縮小模型を用いて、外気風影響下での初期火災時の煙流動性状について検討し、シミュレーションへのフィードバックを含めアトリウム空間の煙制御に関する基礎的な知見を得ることを目的としている。

1.2 研究方法

模型を使った、実験的シミュレーションを行うには、幾何学的に相似にするだけでなく、様々な物理的要因を実大のものと相似にさせなければならない。そこで、第2章では、今までに様々な研究者によって研究されてきた相似則¹⁾³⁾についてまとめ、模型実験を行うのに必要な条件を示す。

第3章では、風洞施設を使って、市外地境界層を実現させた条件下で、開口条件や、設定外気風速を変えて、アトリウム内火災時の煙流動に外気風が与える影響について検討する。

第4章では、第3章で得られた結果より、開口部からの外気流入量に着目し、2つの縮尺の異なる相似縮小模型を使って、模型上部排煙口とみなした開口から、流量を制御した外気風を強制的に送り込み、外気流入量と煙流動性状の関係について検討していく。

2. 相似則

2.1 支配方程式による相似則の考察

本研究で扱う相似則は、一部に開口を持つ空間において火災が発生した場合に、これに起因する煙流動（熱気流の拡散）の時間変化が縮尺に対して相似になる条件を示すものである。この現象は、粘性流体の運動量移送、各種熱移送、物質移送で表現され、これらの移送現象の支配方程式群から得られる π ナンバー、及び境界条件より相似則を導くこととする。

この方法はQuintiere³⁾によってほぼ示されている。支配方程式群に以下の仮定を適用すると式(2.1)～式(2.3)が得られる。

1. 物質拡散の現象の無視
2. 非圧縮性の仮定とBussinesq近似
3. 渦動粘性係数、渦温度拡散係数によるレイノルズ応力、熱輸送のモデル化
4. エネルギー散逸の無視

・連続方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

・運動方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i \beta (\bar{\theta} - \theta_0) + \nu_t \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.2)$$

・エネルギー方程式

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right) = \rho c_p \alpha_t \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_i \partial x_i} + q \quad (2.3)$$

P : 圧力 g_i : 重力加速度ベクトル β : 体膨張率 ρ : 密度 θ : 温度 c_p : 定圧比熱
 q : 発生熱 u_i, u_j : 速度ベクトル ν_t : 渦動粘性係数 α_t : 渦温度拡散係数
 添字 i 、 j は $i=1,2,3$ 、 $j=1,2,3$ で、各方向成分の微分で用いる場合には総和を示す。

次に以下の6つの代表値 L_0 、 u_0 、 Q_0 、 t_0 、 $\Delta\theta_0$ 、 Δp_0 により式(2.1)～式(2.3)を無次元化する。ただし、 Q_0 は実験火源の発生熱等を想定しており、一方、支配方程式の q は単位体積当りの発生熱である。

$$\begin{aligned} x_i^* &= x_i / L_0 \\ u_i^* &= \bar{u}_i / u_0 \\ Q^* &= q L_0^3 / Q_0 \\ t^* &= t / t_0 \\ \Delta\theta^* &= \Delta\bar{\theta} / \Delta\theta_0 & \bar{\Delta\theta} &= \bar{\theta} - \theta_a \\ \Delta p^* &= \Delta\bar{p} / \Delta p_0 & \bar{\Delta p} &= \bar{p} - p_a \end{aligned} \quad (2.4)$$

θ_a : 基準温度 p_a : 基準圧力

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{L_0}{t_0 u_0} \frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2} \frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + g_i \beta \frac{\Delta \theta_0 L_0}{u_0^2} \Delta \theta^* + \frac{v_i}{L_0 u_0} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*} \quad (2.6)$$

$$\frac{L_0}{t_0 u_0} \frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} + u_i^* \frac{\partial \theta^*}{\partial x_i^*} = \frac{\alpha_i}{L_0 u_0} \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x_i^* \partial x_i^*} + \frac{Q_0}{\rho c_p u_0 \Delta \theta_0 L_0^2} Q^* \quad (2.7)$$

ここで、煙層による成層化の現象とは矛盾するものの、土屋ら⁴⁾の言うように乱流域では $v_i / u_0 L_0$, $a_i / u_0 L_0$ は一定であると判断すれば、比較したい2つの現象で下記の π_1 , π_2 , π_3 , π_4 が保存されることが相似の条件となる。

$$\pi_1 = \frac{L_0}{t_0 u_0} \quad \pi_2 = \frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2} \quad \pi_3 = g \beta \frac{\Delta \theta_0 L_0}{u_0^2} \quad \pi_4 = \frac{Q_0}{\rho c_p u_0 \Delta \theta_0 L_0^2} \quad (2.8)$$

上式は未知数6つで式4つであるためどれか一つの未知数が定まらない限り相似則が定まらない。ここでは、火炎の温度は火炎の大きさにほとんど影響されないことを利用し、後述する炎の形状の相似性が保たれればバーナーを用いた実験では、炎の表面で $\Delta \theta$ 一定とする流れの境界条件が与えられると考える。

ここで模型と原型に関する物理量 f_M , f_R の比 f_M / f_R を $n(f)$ で表すものとする、

$$\begin{aligned} n(t) &= n(L)^{1/2} \\ n(\Delta p) &= n(L) \\ n(Q) &= n(L)^{5/2} \\ n(u) &= n(L)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

の関係が得られる。そこで縮尺比から定まる発熱量で実験を行い、時間軸を操作して現象を観察すれば相似性を確認できると考えられる。

2.2 境界条件の相似

2.2.1 火源の火炎形状の相似

Zukoski⁵⁾、Heskstad⁶⁾らにより、火災時にみられる乱流拡散火炎は火炎高さ L_f と火源寸法 D の比が、発熱量 Q と火源寸法 D で決まる Q_f^* の関数になることが報告されている。(ここでの Q_f^* は、前述の Q^* とは異なる)

$$\frac{L_f}{D} = f(Q_f^*) \quad Q_f^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p \theta_0 g^{1/2} D^{5/2}}$$

L_f : 炎の高さ D : 火源の直径 Q : 発熱量

ρ_0 : 雰囲気空気の密度 c_p : 雰囲気空気の比熱

θ_0 : 雰囲気空気の温度

式(2.9)の条件すなわち、熱対流の相似条件が満たされれば、 $n(Q_f^*) = 1$ となり、炎の形状の相似性も満たされる。

2.2.2 壁面の熱伝達

煙層と接する壁面から失われる熱量は、煙層と壁面間の表面熱伝達及び壁面内部への熱伝導によって決まる。

このうちの表面熱伝達については、境界層の厚さを縮尺に合わせることは不可能で、以下では壁面が煙層温度と等しくなるとして扱う。

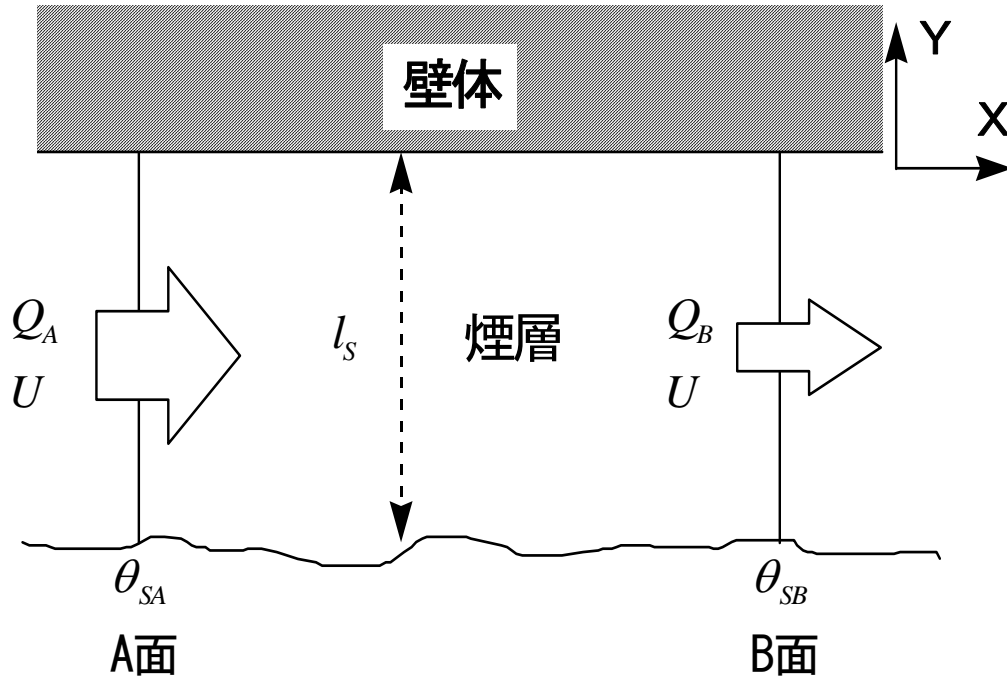


図2.1 壁体に接する微小流体

図2.1のような厚さ l_s (流下方向の厚さの変化は無視できるとする。)で厚さ方向に均一な温度 θ_s の煙層の流下方向の熱収支は下層空気との熱のやりとりを無視して考える。

A面に流入する熱量を Q_{in} 、B面から流出する熱量を Q_{out} 、流体の流速を一定とすると

$$Q_{in} = -\lambda_s \frac{\partial \theta_s}{\partial x} dydzdt + Udydzdt c_s \rho_s \theta_s \quad (2.10)$$

$$Q_{out} = -\lambda_s \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta_s + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) dydzdt + Udydzdt c_s \rho_s \left(\theta_s + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right)$$

(2.11)

A面とB面の間の流体への熱移動

$$Q_c = dx dy dz c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} dt \quad (2.12)$$

壁体への熱移動

$$Q_w = -\lambda_w \frac{\partial \theta_w}{\partial y} \Big|_{y=0}^{y=l_s} dx dz dt \quad (2.13)$$

λ_s : 煙の熱伝導率 λ_w : 壁体の熱伝導率 c_s : 煙の比熱 ρ_s : 煙の密度 θ_s : 煙の温度

θ_w : 壁体の温度 U : 煙の流速 l_s : 煙層の厚さ

$Q_{in} - Q_{out} = Q_c + Q_w$ であるから

$$\lambda_s \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} l_s - U l_s c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial x} = l_s c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} - \lambda_w \frac{\partial \theta_w}{\partial y} \Big|_{x=x} \Big|_{y=0} \quad (2.14)$$

左辺第一項は、 $\lambda_s \ll 1$ で明らかにオーダーが小さい。また右辺第二項については、ある瞬間から表面が $\Delta\theta$ の温度上昇を受ける半無限体への表面からの熱吸収が近似的に適用できると考えれば、文献⁷⁾より、

$$\theta_{(x,t)} = \theta_0 + \Delta\theta \operatorname{erfc} \frac{x}{2(kt)^{1/2}} = \theta_0 + \Delta\theta \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{2(kt)}}} e^{-\xi^2} d\xi \right) \quad (2.15)$$

x : 壁体表面からの距離(深さ) $k(\lambda_w / \rho_w c_w)$: 温度伝導率 λ_w : 壁体の熱伝導率
 ρ_w : 壁体の密度 c_w : 壁体の比熱

ここで、壁体表面からの熱流 \dot{q} はフーリエの法則より、

$$\dot{q} = -\lambda_w \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (2.16)$$

式(2.17)を式(2.14)に代入すると

$$\dot{q} = -\lambda_w \left(-\frac{\Delta\theta}{\sqrt{\pi kt}} e^{-x^2/4kt} \Big|_{x=0} \right) = \frac{\lambda_w \Delta\theta}{\sqrt{\pi kt}} = \Delta\theta \left(\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

さらに、()式を()式に代入すると

$$U l_s c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial x} + l_s c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \Delta\theta \left(\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

各項を物理量の比で書き直すと式(2.19)となる。

$$\frac{n(L) n(c_s \rho_s) n(\theta_s)}{n(t)} = n(\Delta\theta) \left\{ \frac{n(\lambda_w c_w \rho_w)}{n(t)} \right\}^{1/2} \quad (2.19)$$

λ_w, c_w, ρ_w : それぞれ壁体の熱伝導率、比熱、密度

ここで、 $n(\theta) = 1$ が保たれれば、 $n(\rho_s c_s) = 1$ と判断されるから、式(2.9)の条件下では

$$n(\lambda_w \rho_w c_w) = n(L)^{3/2} \quad (2.20)$$

が相似則となる。

文献⁸⁾ではこの条件で、模型実験での壁面材料を変えることで、廊下を流れる煙の垂直温度分布が実大実験での結果に近づく例が報告されている。

3. 市街地境界層条件下の外気風が煙流動に与える影響について

3.1 実験概要

本実験は、市街地境界層の鉛直風速分布を実現した前田建設工業(株)技術研究所の風洞施設で行い、単純な構成のアトリウム空間を想定した 1/20 縮尺相似模型を用いた。

文献⁹⁾で行われた実験を補強する目的で以下の点を考慮して実験を行なった。

- ・ 開口条件によるドアジェットの影響を考え、給気口の開口率を変えて比較を行う。
- ・ 排煙口への風向の影響をみるために排煙口の片側を塞いだパターンを行う。
- ・ 外気風対策として、排煙口の外側にフードを付けた実験を行う。

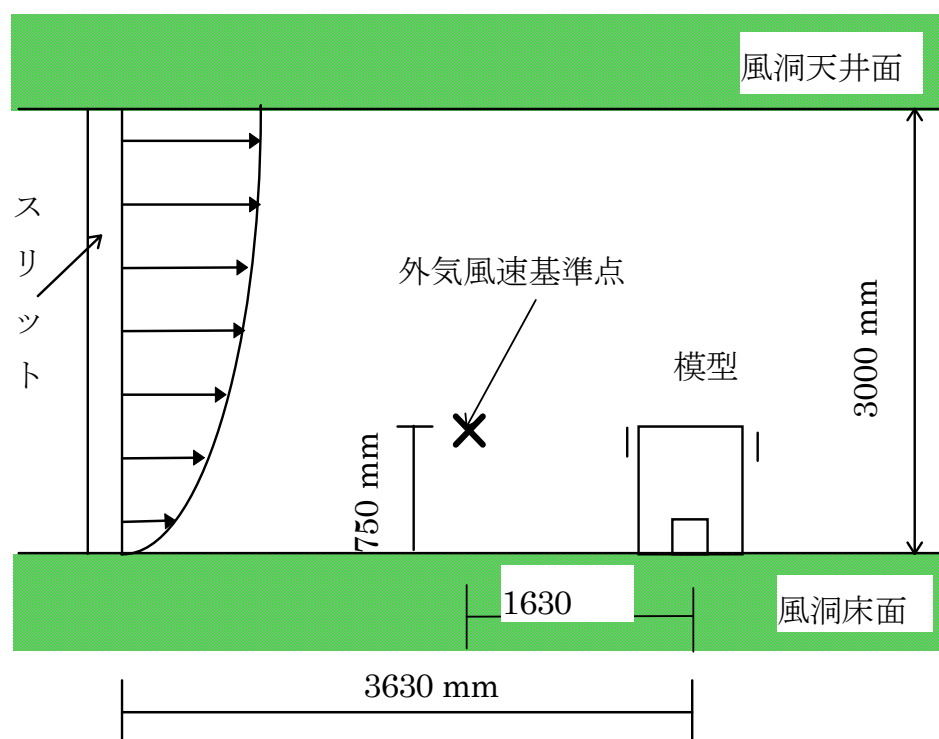


図 3.1 実験概要図

3.2 実験条件

3.2.1 模型

模型は図 3.1 に示す単純な構成のアトリウム空間とし、上部と下部にそれぞれ開口を設ける。模型は厚さ 12mm の合板で作成し、給気口のある 1 壁面を可視化のため透明アクリル張りとした。透明アクリル面以外の内部壁面には、材料への熱移動の相似性⁸⁾をはかるため、相似則より計算し実大におけるコンクリートに相当する軟質繊維板を張り付けた。屋根面には可視化用レーザーライトシートを照射するための透明アクリル製スリットを設けた。

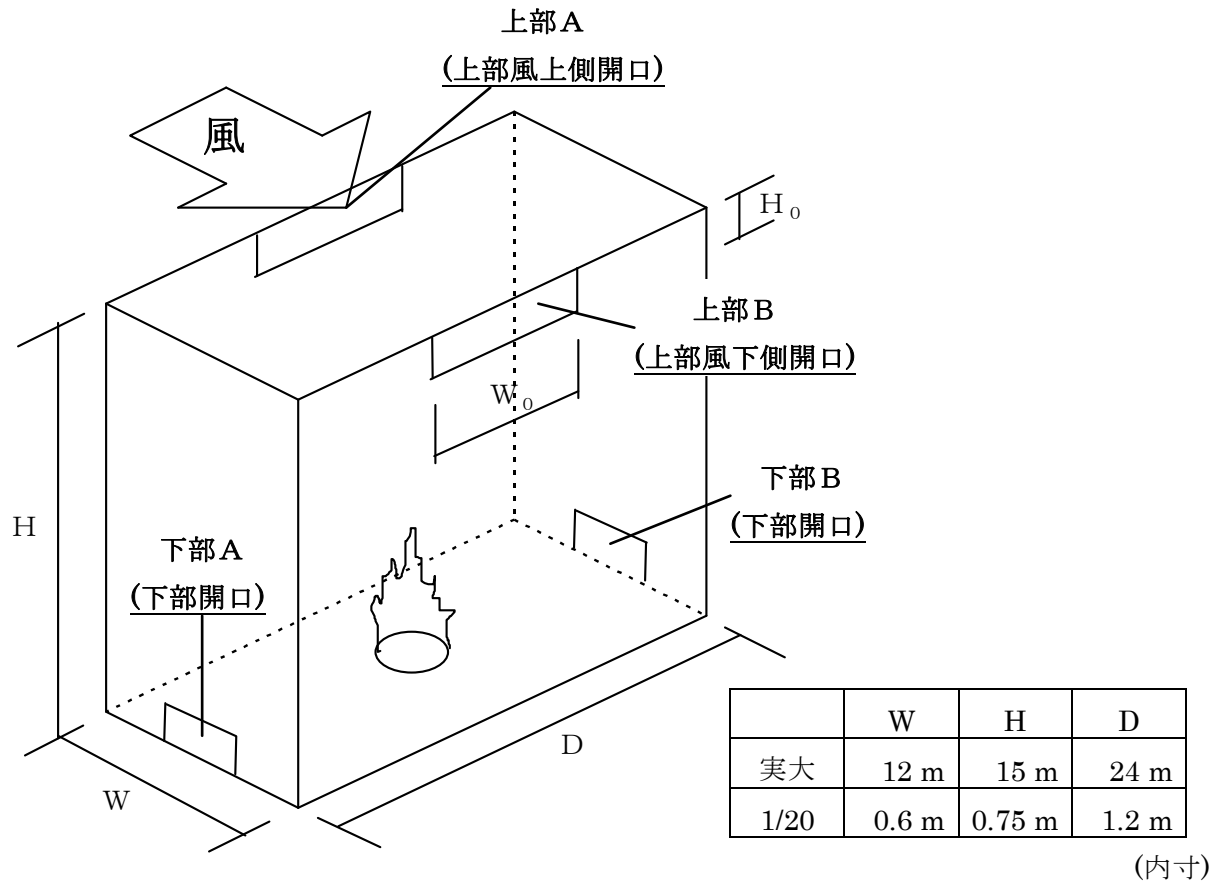


図 3.2 模型図

表 3.1 開口寸法

縮尺	開口位置	開口率(基底面面積に対して)	$W_0 \cdot H_0$
実大	下部開口	1/25	2.88 m · 2.0 m
	上部開口	1/50	2.4 m · 1.2 m
1/20 模型	下部開口	1/25	0.144 m · 0.1 m
	上部開口	1/50	0.12 m · 0.06m

表 3.2 模型材料の物性値

材料名	熱伝導率 λ_w ($kcal / mh^{\circ}C$)	密度 ρ_w (kg / m^3)	比熱 c_w ($kcal / kg^{\circ}C$)	$\lambda_w \rho_w c_w$	$\lambda_w \rho_w c_w$ (実大換算)
普通コンクリート	1.2	2300	0.21	579.6	579.6
軟質繊維板 (JIS A5905 B級)	0.075	300	0.31	6.975	623.8

3.2.2 火源

模型火源には、硬化ガラス製のロートに小石を詰めたものをバーナーとして使用し、燃料としてプロパンガスを用いた。実大の火源は直径 1.5 m の円形火源を想定し、発熱量は実大換算

で 1.5 MW となるようにマスフローコントローラーでプロパンガスの流量を制御し調整を行った。図 3.3 に本実験で用いた火源システムを示す。

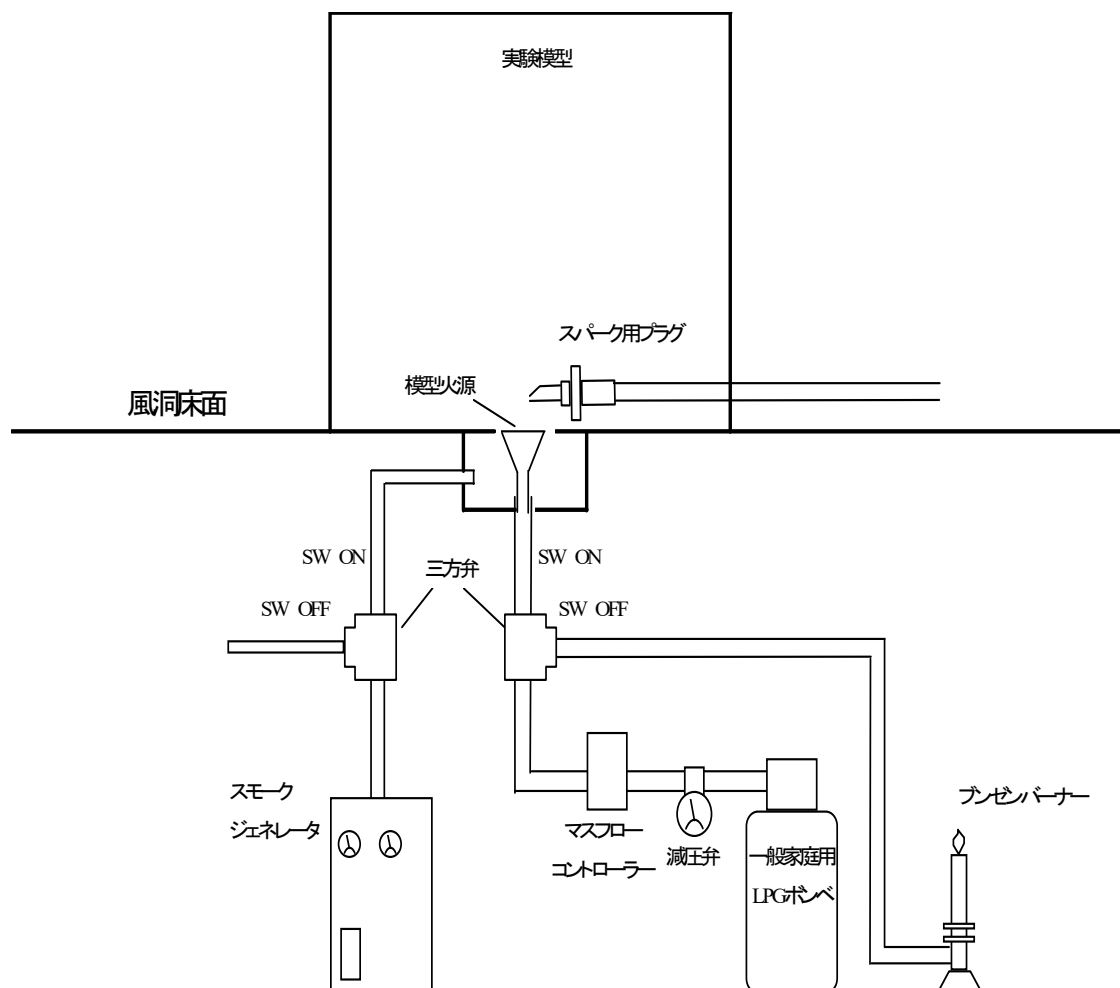


図 3.3 火源システム

3.2.3 測定項目及び測定方法

(風速及び温度)

風洞内の風速の測定には熱線風速計を用い、測定位置は模型の中心から風上方向に 1.63m、鉛直方向は模型の屋根面の高さ(0.75m)を基準とし、この点での風速を設定外気風速に合わせた。また、開口部の風速の測定には、それぞれ中心位置に1つずつ熱線風速計を設置し風速を測定した。

模型内温度測定にはK-T y p e 熱電対 ($\phi 0.1\text{mm}$) を用いて、外部温度 (1点)、模型内温度 (108点)、給気口 (1点 \times 2)、排煙口 (1点 \times 2)、合計 117点を測定した。計測処理は、リモートスキャナーを増設したデータロガーをパソコンで制御して行った。スキャナーのスキャンスピードは 60点/秒でほぼ全点同時に測定を行なえる。

(熱気流の可視化とその記録)

トレーサーとして、スモークジェネレーターによるオイルミストを用い、これをアルゴンイオンレーザー発生装置で空間内鉛直断面にレーザーシートを作成し、熱気流の可視化を行なった。また、可視化した様子をビデオで記録した。

3.2.4 実験条件

実験条件を表 3.3 に示す。

表 3.3 実験条件

	実大	1/20 模型
設定外気風速	0, 2.5, 5.0, 7.5 (m/s)	0, 0.56, 1.12, 1.68 (m/s)
風向	0° (排煙口が風の流れに対して 90°になる位置を基準とする。)	
発熱量	1.5 (MW)	0.84 (KW)
火源直径	1.5 (m)	75 (mm)

3.2.5 実験項目

実験は、以下の 4 ケースのついて行った。

- (Case 1) ; 基本となるケースで、下から給気、上から排気ができるケース (上部・下部両開口ともに開放)
- (Case 2) ; ドアジェットの影響を取り除くため下部開口を封鎖したケース (上部開口開放、下部開口閉鎖)
- (Case 3-1) ; 風向に対する排気口の向きの影響をみるため、風上側の上部開口を閉鎖したケース (上部風上側・下部開口開放、上部風下側開口閉鎖)
- (Case 3-2) ; 風向に対する排気口の向きの影響をみるため、風下側の上部開口を閉鎖したケース (上部風下側・下部開口開放、上部風上側開口閉鎖)
- (Case 4) ; 外気風の影響を和らげるための対策を施したケース (Case1 の条件で、上部開口の外側にフードを設置)

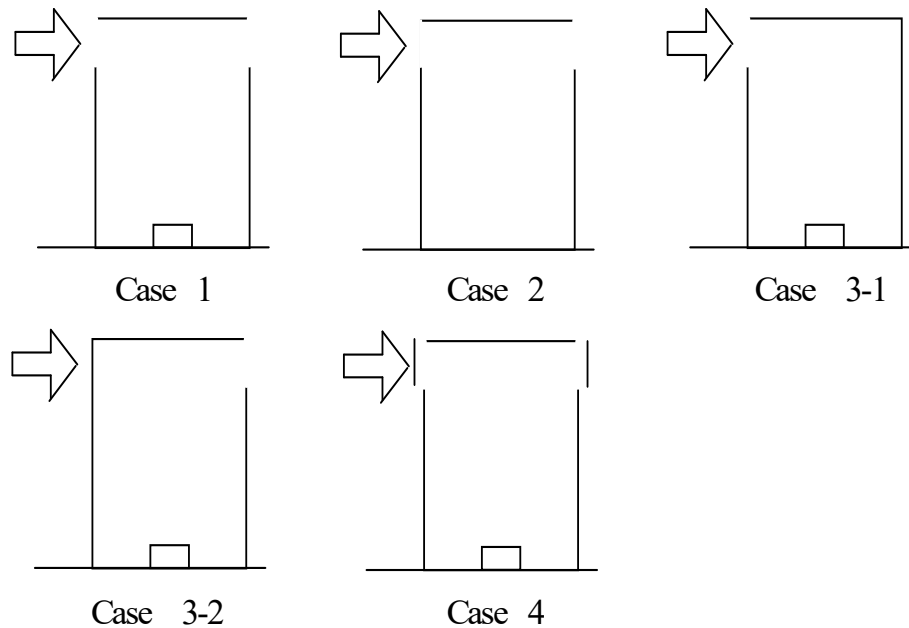


図 3.4 実験ケース概略図

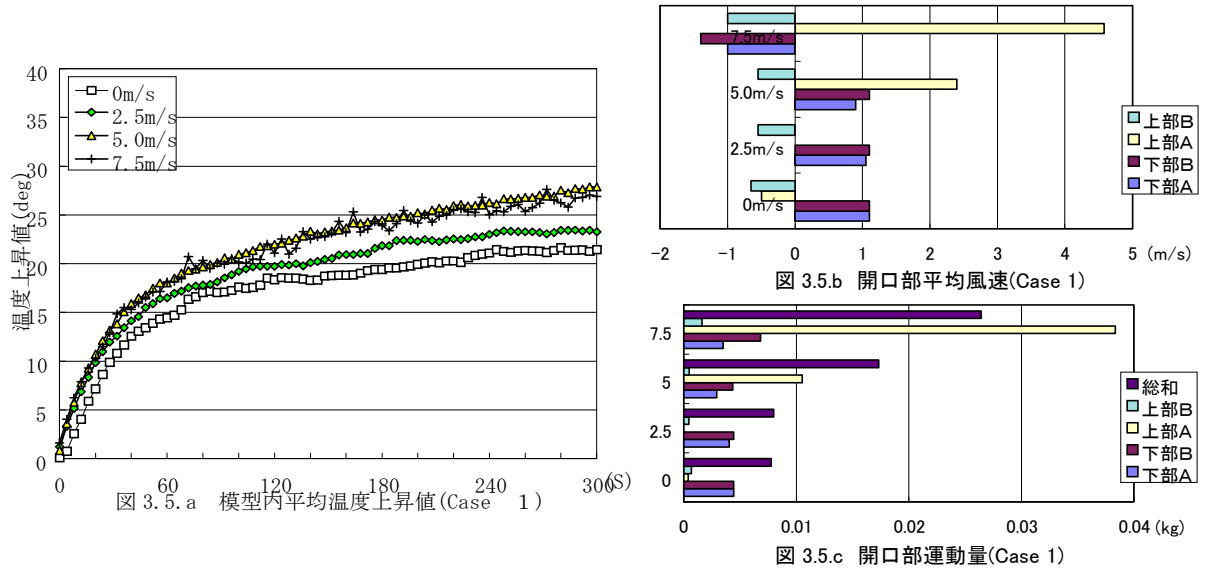
3.3 実験結果及び考察

(Case 1)

無風時においては、上部両側排煙口が排煙、下部給気口が給気を行い、模型内温度上昇（模型内 108 点の算術平均値－風洞内気温）も低い値を示している。

外気風 2.5 m/s では、風上側排煙口で外気圧と煙層の浮力がつりあい、風下側の片側排煙となるため、無風時に比べ模型内温度上昇が増加する。さらに、5.0 m/s では風上側排煙口から給気され、煙層が下降し、給気口でも排煙が行われるようになり、さらに模型内温度上昇が増加した。

7.5 m/s に至っては、風上側排煙口での風速は大きいですが、流入した外気が、一部そのまま風下側開口部から流出し、模型内温度上昇は外気風速 5.0 m/s の時と同様な値を示している。



(注 風速は、模型内への流入を正、流出を負としている)

図 3.6 煙流動概略図

(Case 2)

全体的に Case 1 に比べて模型内平均温度(図 3.7.a)は高い値を示している。これは給気口が閉鎖されているため風上側排煙口が給気を行い、風下側排煙口が排煙を行なうために排煙効率が低下するためと考えられる。Case 1 では風速が強くなるにつれて図 3.5.a に示すように模型内平均温度が上昇する傾向にあったが、Case 2 ではその逆で風速が増すにつれ温度上昇が低下する傾向にある。また Case 2 ではどの風速においても煙層の形成は確認されなかった。

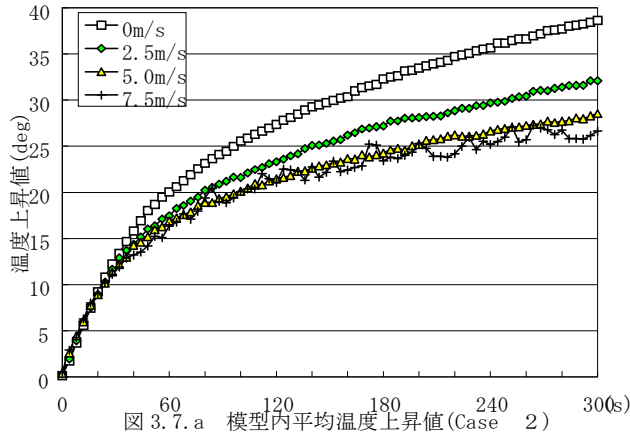


図 3.7.a 模型内平均温度上昇値 (Case 2)

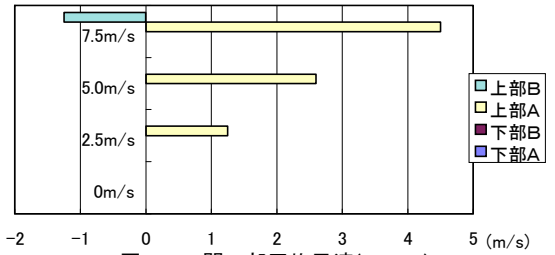


図 3.7.b 開口部平均風速 (Case 2)

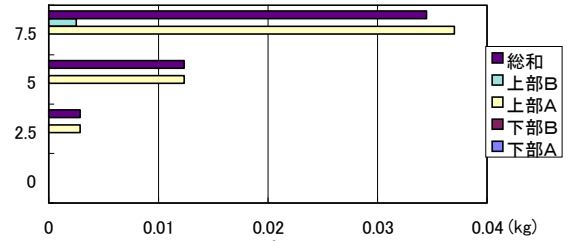


図 3.7.c 開口部運動量 (Case 2)

(Case 3-1)

風速 0、2.5 m/s では、風上側排煙口から排煙が行われ、模型内温度上昇に差は見られない。

風速 5 m/s では、風上排煙口から給気がおこなわれ排煙効果が下がり、模型内温度上昇値(図 3.8.a)も高くなるが、さらに風速をあげる (7.5 m/s) と、給気口から排煙が行われ、温度上昇は減少した。

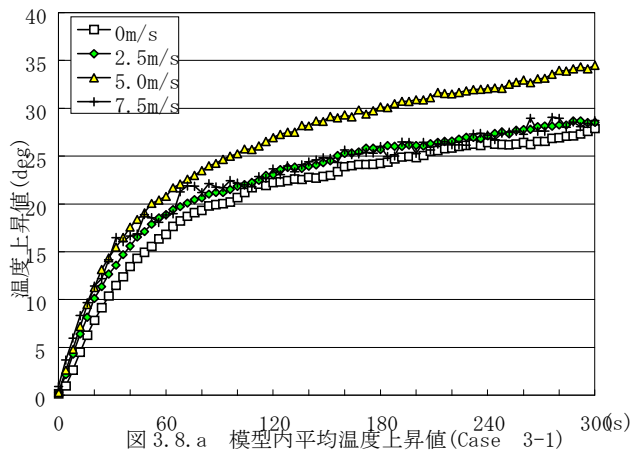


図 3.8.a 模型内平均温度上昇値 (Case 3-1)

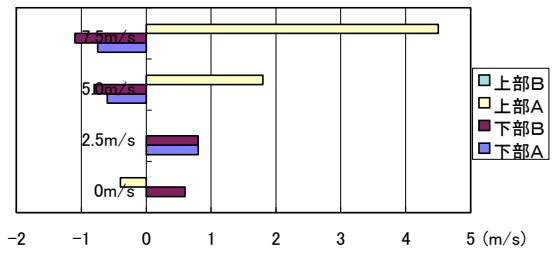


図 3.8.b 開口部平均風速 (Case 3-1)

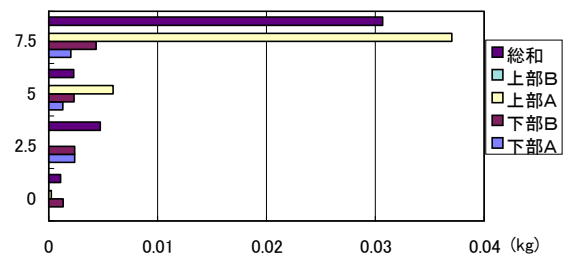


図 3.8.c 開口部運動量 (Case 3-1)

図 3.9 煙流動概略図 (Case 3-1)

(Case 3-2)

風速 0、2.5 m/s においては、風上への開口が無いいため開口部における風速に差がなく、風下側排煙口から排煙が確認され、温度上昇(図 3.10.a)もほぼ同じ値を示している。しかし、風速 5~7.5 m/s の間で、建物の風下に生じる不安定な渦の作用で、風下側排煙口で給気・排気が交互に行われるようになり、排煙効果がうすれ模型内温度も上昇している。

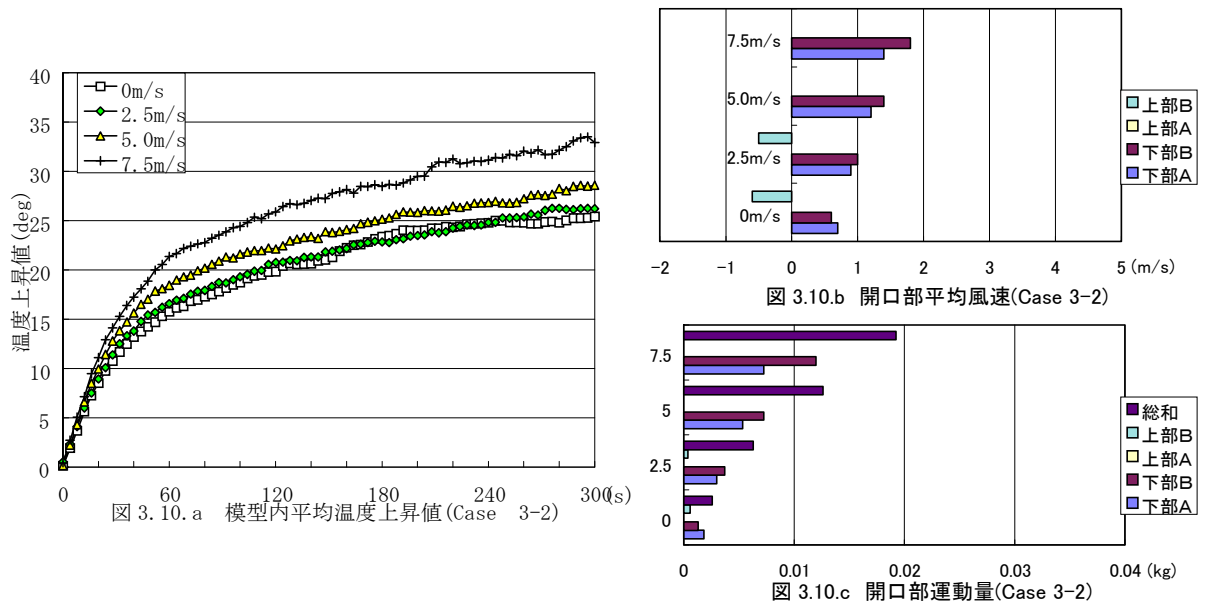


図 3-11 煙流動概略図(Case3-2)

(Case 4)

Case 1 の条件で排煙口の外側にフェンスを設けたものであり、外気風をやわらげる働きをし、基本的に排煙の性状は Case 1 の場合に似たものとなる。Case 1 では風速 2.5~5.0 m/s の間で、風上側排煙口が排気から給気へと変化しているが、Case 4 では風速 5~7.5 m/s の間で変化している。

図 3-12 煙流動概略図(Case4)

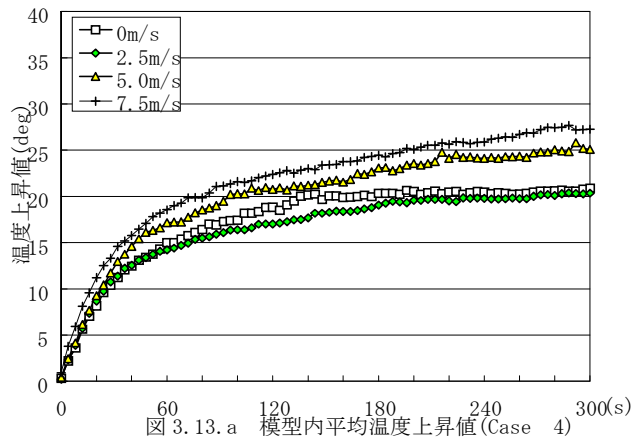


図 3.13.a 模型内平均温度上昇値 (Case 4)

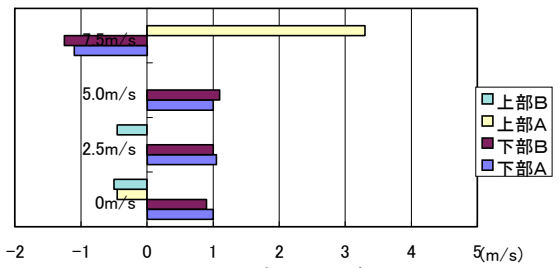


図 3.13.b 開口部平均風速 (Case 4)

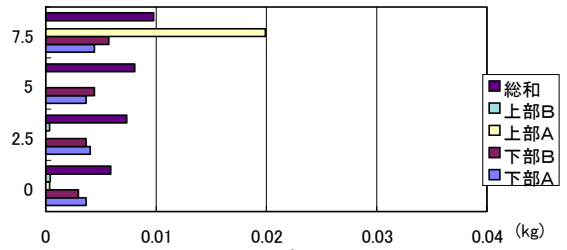


図 3.13.c 開口部運動量 (Case 4)

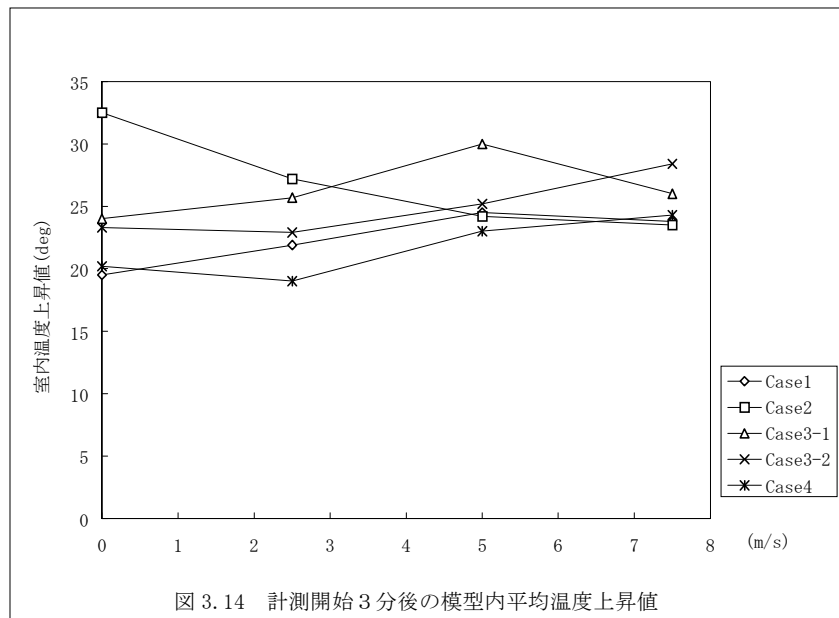


図 3.14 計測開始3分後の模型内平均温度上昇値

4. まとめ

本章の実験は、外気風が煙流動に与える影響を定性的にみたものであるが、Case 1のように無風時に十分な排煙が行われるような場合は、ある風速までは外気風により模型内温度は上昇し、火災安全性は低くなる傾向にある。一方、Case 2のように無風で排煙されにくい形態の場合は、外気風が増すにつれ模型内温度上昇は低下し、危険性は軽減される。しかし、この場合は、無風時での模型内温度上昇が他の場合に比べ高く、やはり開口は十分にとられていた方がよいと思われる。また、外気風速の増加によって模型内温度が上昇する場合でも、Case3-1のように風速 5 m/s を境に模型内温度上昇が低下する場合もあり、風が吹けば安全である、または危険であるといったことは一概に言うことができず、それらは、開口の大きさ、開口の風向に対する向きなど様々な要因に影響されることが分かった。

なお、本章では、開口部での風速を正確に測定することができなかつたため、開口部での運動量を指標に解析の手がかりをつかむことはできなかつた。

4. 開口部運動量を変化させた模型実験

4.1 実験概要

第3章、風洞実験においては、風洞施設を利用し、市街地境界層乱流を実現した状況下で実験を行ったが、外気風の影響を定性的に見る上では十分であっても開口部における風速を正確に測定し、運動量等の影響を求めるには不十分であった。

本実験では、2つの縮尺の異なる相似縮小模型を用い、外気風がアトリウム内の煙流動に与える影響を考察するため、定常風を模型内に強制的に送り込み、その時の模型内及び開口部の温度を測定、また煙流動の可視化観察を行う。模型材料の選定、実験条件は相似則に基づき決定、実験システム(図4.1)はファンと模型をダクトを通して接続、模型の開口率と開口部風速により外気流入量を決定し制御した条件下で実験を行う。

模型の縮尺、風速、開口面積(床面積に対する比で表すので、ここからは開口率と呼ぶ)、発熱量、開口位置の5つの条件の組み合わせによる実験ケースを行い、それぞれのケースに対する外気風の影響を見ていく。

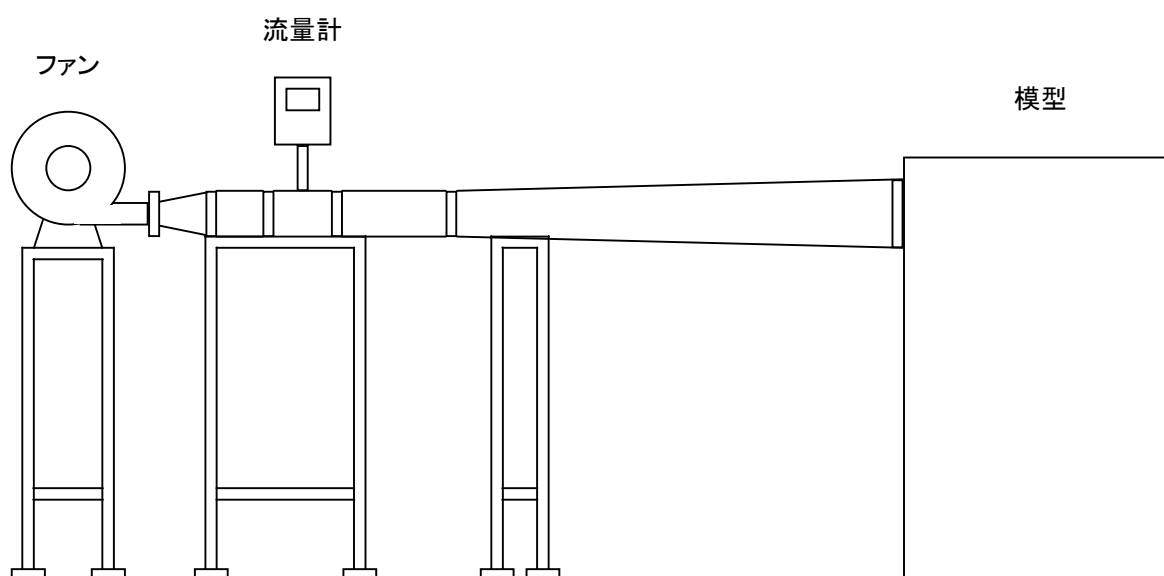
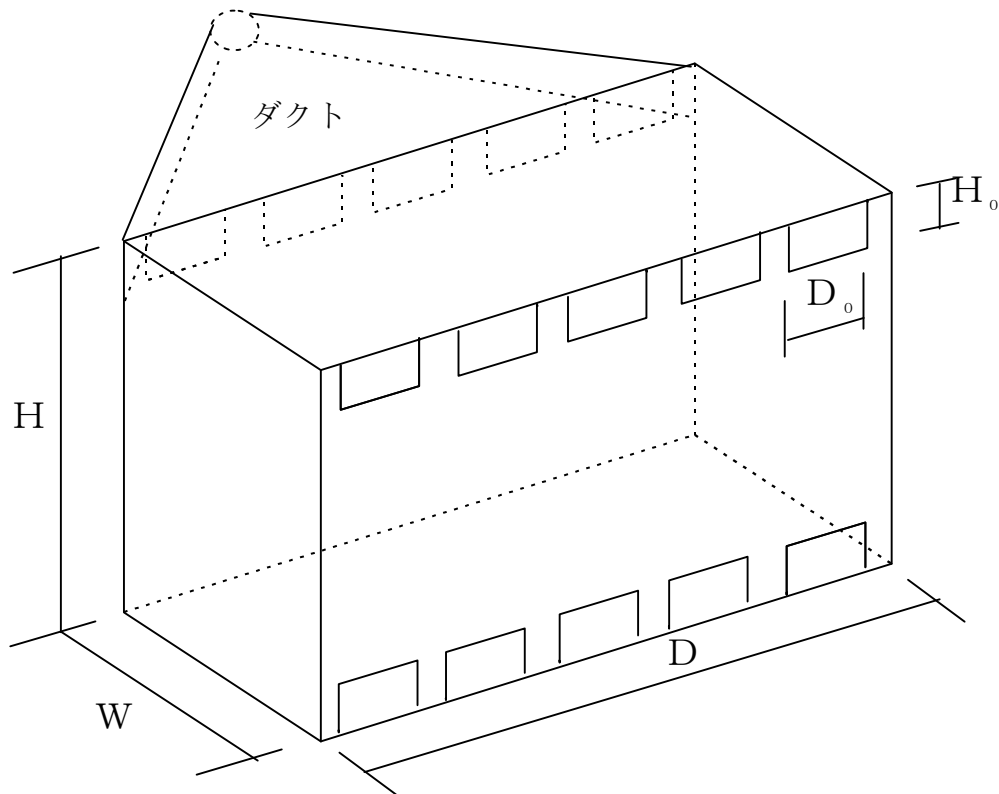


図 4.1 システム図

4.2 実験条件

4.2.1 模型

模型材料は 相似則より実大でコンクリートに相当する軟質繊維板を使い、前面1面のみ可視化のためアクリル板を使用する。火源を設置するため、模型の底部分に火源ボックスを設置する。



	W (m)	H (m)	D (m)	H ₀ (m)		D ₀ (m)	
				1/25	1/50	1/25	1/50
実大	12	15	24	2.4	1.2	2.4	0.6
1/20	0.6	0.75	1.2	0.12	0.048	0.12	0.024
1/30	0.4	0.5	0.8	0.08	0.032	0.08	0.016

図 4.2 模型図

4.2.2 火源

実大で、直径 1.5m の火源を想定し、模型においては 1/20 で $\phi 75\text{mm}$ 、1/30 で $\phi 50\text{mm}$ の漏斗（ガラスの漏斗に小石を詰めたもの）を使用する。発熱量は実大 1.5 MW、3.0MW の 2 通り使用し、プロパン流量は 1/20・1/30 模型において、それぞれ次の通りである。

表 4.1 プロパン流量

実大	発熱量(kw)		プロパン流量(l/min)	
	1.5MW	3MW	1.5MW	3MW
1/20	0.839	1.677	0.538	1.075
1/30		0.609		0.390

プロパン単位発熱量 9.358×10^4 (w·s/l)

火源に点火する際には、まずブンゼンバーナーに点火し、プロパンの流量を調整してから三方弁を切り替え、火源へとプロパンを送り着火する。ブンゼンバーナーへのバイパスは、流量を 0 から立ち上げるとマスフローコントローラーの流量制御に時間がかかるために設置されている。

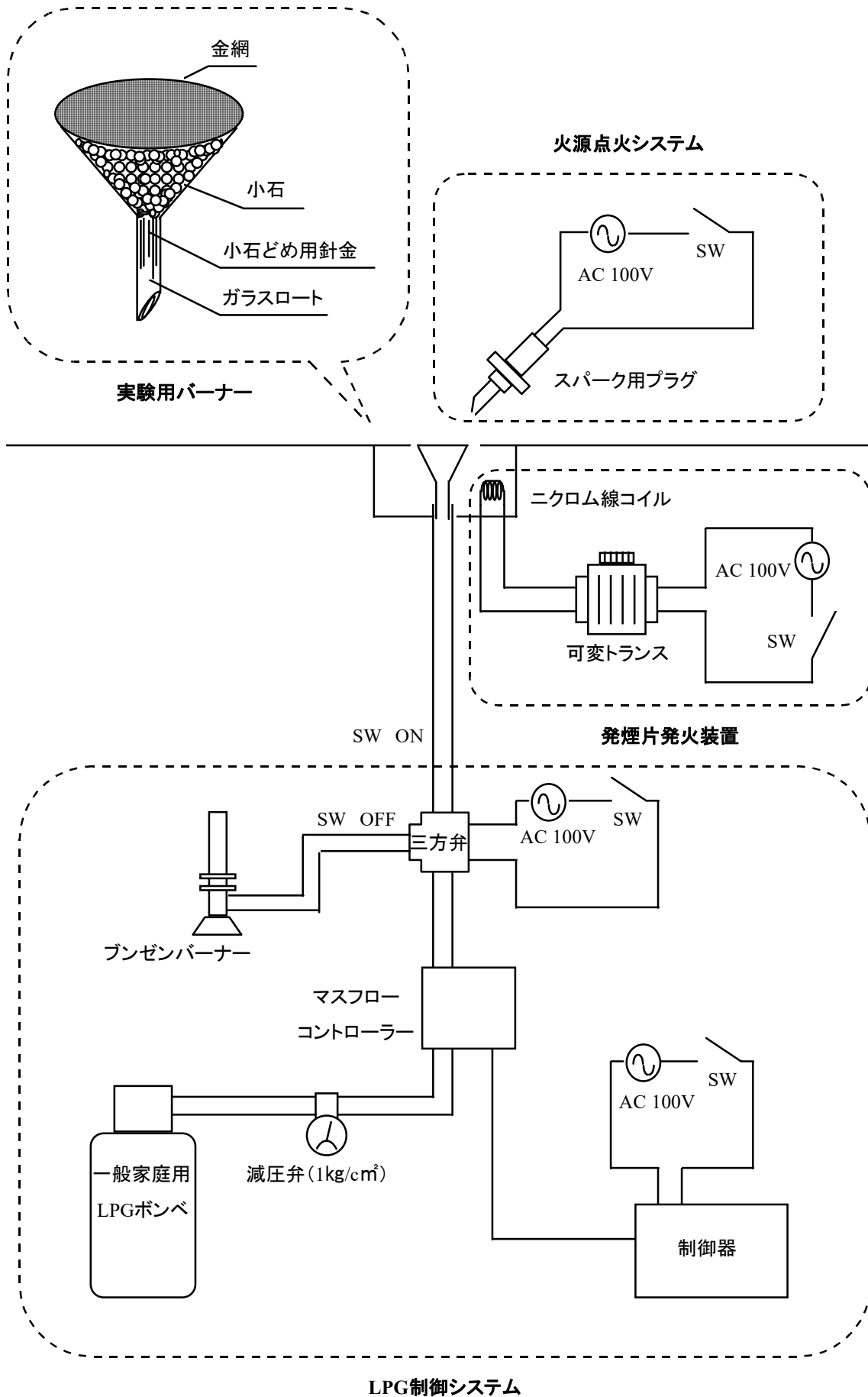


図 4.3 火源システム図

4.2.4 給気システム

本実験のシステムは、流量を制御できることが前提であり、その流量は風洞施設で行われた実験を参考に決定している。必要としている流量は、表 4.2 であり、その流量域より 2 つの流量計 KOFLOC .MODEL.KFL20G SERIES（大流量計；口径 25mm、100～500l/min、小流量計；口径 65mm、600～3000l/min）に決定した。これらの流量計は、差圧式流量計で、それ自体がかなりの圧力損失（200mmAq 前後）を生じるものであったため、流量計を含めたシステム全体の圧力損失を計算し、それをクリアできる高圧供給ファンとして Showa KSB-400 を採用した。

それぞれをつなぐダクトは、JIS 規格に基づいて設計した。

表 4.2 模型流量

実大風速 (m/s)	模型風速 (m/s)	1/20模型流量(l/min)		模型風速 (m/s)	1/30模型流量(l/min)	
		1/50	1/25		1/50	1/25
1	0.223607			0.182574		140.217
1.5	0.33541		579.5888	0.273861		210.3255
2	0.447214		772.7851	0.365148	140.217	280.4339
3	0.67082	579.5888	1159.178	0.547723	210.3255	420.6509
4	0.894427	772.7851	1545.57	0.730297	280.4339	
6	1.341641	1159.178		1.095445	420.6509	
8	1.788854	1545.57		1.460593		

4.2.5. 温度測定

温度測定には、CC 熱電対（ $\phi 0.2\text{mm}$ 、先端ハンダ仕上げ、無処理）を使用し、模型内 60 点、開口部 16 点、模型外（基準温として）4 点、計 80 点において測定。サーモダック EF・E200 によってデータ処理を行う。測定点は、図 4.4 に示す通りである。

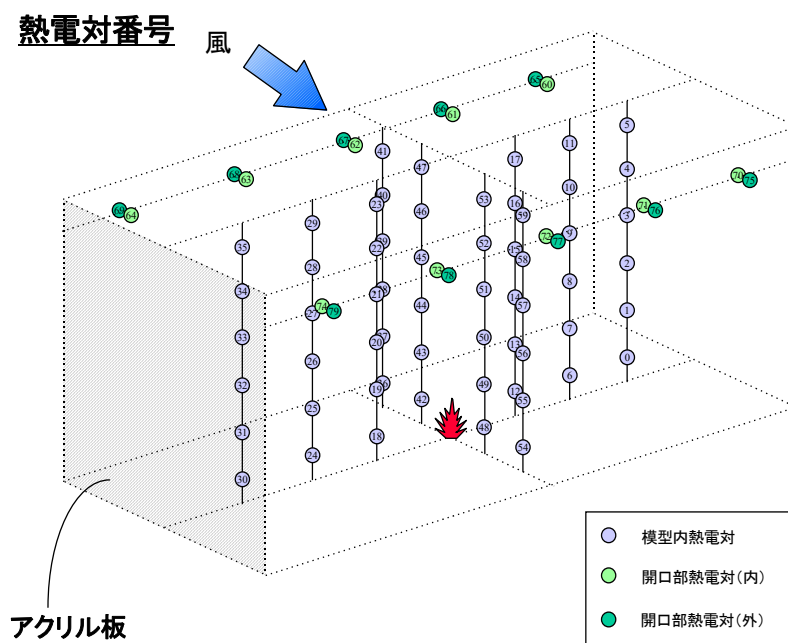


図 4.4 熱電対配置図

4.2.6 実験方法

実験ケースとしては、4つの条件(模型縮尺、発熱量、排気側開口位置、開口率、風速)の組み合わせで、計48ケース行った。実験開始方法は、風速が定常になったところで、火源に着火し、各ケースのインターバルと計測時間に従い、温度測定を行う。計測終了後、模型内の熱を十分に冷ましてから、次ケースの測定を行なう。

4.2.7 実験条件

実験条件をまとめたものを表4.3に示す。

模型の縮尺は、2種類使うことにより相似性の確認をするためのものである。風速は、基本的には模型間で開口部における流量をそろえるようにしてあるが、システムの性能上制御できない流量があり、そのため若干異なっている。

1/20模型で、発熱量1.5MWのケースは、第3章の実験と比較するためのものであり、風速、開口条件は、第3章の設定に合わせている。

開口率は、開口面積/床面積を採用し、これを変化させるには給気側・排気側に各5つづつとる開口の面積を変える。その時の開口位置は、給気側は最上部のみ、排気側は最上部と最下部に設ける。

表 4.3 実験条件

実験条件 (実大換算値)	1/20 模型				1/30 模型	
	発熱量	1.68 kw(3.0Mw)		0.84kw(1.5Mw)		0.61kw(3.0Mw)
火源直径	75mm(1.5m)		7.5mm(1.5m)		50mm(1.5m)	
排気側 開口位置	h,0		h	0	h,0	
開口率	1/25,1/25	1/50,1/50	1/50,1/50	1/50,1/25	1/25,1/25	1/50,1/50
風速 (1/20 模型,1.5Mw は実大外気風速そ の他は実大開口部 風速)	0m/s	0m/s	0m/s	0m/s	0m/s	0m/s
	1.5m/s	3m/s	2.5m/s	2.5m/s	1m/s	2m/s
	2m/s	4m/s	5.0m/s	5.0m/s	1.5m/s	3m/s
	3m/s	6m/s	7.5m/s	7.5m/s	2m/s	4m/s
	4m/s	8m/s			3m/s	6m/s
インターバル	5s(22s)		5s		4s(22s)	
計測時間	3'45"(16'30")		3'45"		3'00"	

4.3 実験結果及び考察

ここでは、今回の実験結果を 4.3.1 では風洞実験に近い条件で行われた発熱量 1.5MW の実験ケースについて、4.3.2 では発熱量 3MW の実験ケースについて考察し、さらに 4.3.3 では発熱量 3MW の実験ケースについて開口部における運動量を指標に混合過程に関する分析を行なう。

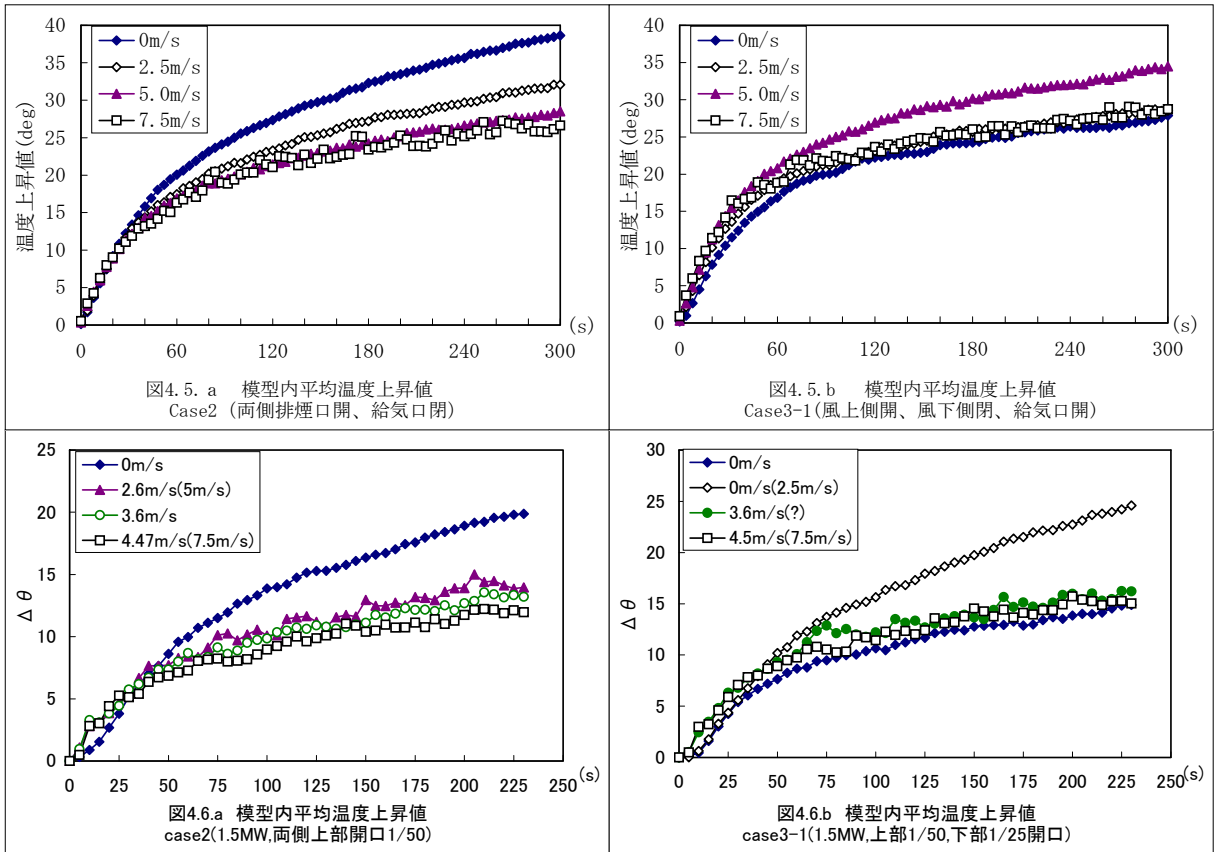
4.3.1 風洞実験との比較

まず、模型内平均温度上昇値をみると全体的に、本実験の方が風洞実験の上昇値よりも小さくなっているが、それは、熱電対の配置による平均温度上昇値への影響や、模型や外気条件による失熱の割合の違いによるものだと考えられる。

Case2 に対応したケースにおいては、風洞実験の結果と同じように風速の増加に伴い、模型内平均温度上昇値は下降している。Case3-1 に対応したケースは、模型内平均温度上昇値の上昇と下降の境界値が風洞実験では、5.0m/s(設定外気風速)であったのに対して、本実験では 2.5m/s 時にそれが値している。

今回の実験の設定風速は、風洞実験時、開口部の中心 1 点で計測された平均風速を設定値として設けたのであるが、風洞実験では、2.5m/s 時の開口部での平均風速が 0m/s となっており、上部開口において給排気が交互に行われたものと考えられるが、本実験でそのような状況を実現させるのは不可能であり、開口部を閉鎖した形に対応した。そのため本実験の 2.5m/s は、他の風速時の値に比べ高い値を示したと思われる。また、風洞実験での 5.0m/s は、システムの性能上制御が不可能であるため計測されていない。

以上のことを考慮すれば、今回のシステムはかなり風洞実験で行われた状況に近い条件下で、行われたと考えられる。



4.3.2 発熱量 3MW の実験ケースについて

(排気側開口位置が基底部にあるケース)

1/20 模型では、模型内平均温度上昇値をみると、開口率 1/25 では風速 0m/s～風速 1.5m/s に至るまでは、平均温も上昇しているが、それ以上は風速の増加に伴い、温度上昇値は下降している。開口率 1/50 では、風速 3.0m/s までは、平均温も上昇するが、それ以上は下降し 6m/s で最も低くなり 8m/s では再び上昇している。

1/30 でも同様な結果となっている。層別平均温度上昇値でみると、1/20 模型では、流量 580 m^3/min (開口率 1/25 では 1.5m/s、1/50 では 3m/s)までは、層別の温度がきれいにわかれ、温度成層が形成されている様子が見られるが、それ以降は徐々にどの層も一樣な上昇値へと近づいていく。開口部の温度上昇値は流量の増加に伴い、中間層(C、D 層)の上昇値から最下部(A層)の上昇値へと近づいていき、最大流量においては、最も低い値を示している。これは、流入した外気風の一部が、拡散せずにそのまま排気していることがうかがえる。

1/30 の層別平均温度上昇値は、最大流量にいたるまで、ほぼ温度成層が乱されず、開口部上昇値も最下層とほぼ同じ値を示している。

1/20 でも 1/30 でも開口率が、1/25 のものよりも、開口率 1/50 の方が同じ流量で比較すると、拡散の度合いが大きい。

(図のカッコ内は順に縮尺、開口位置、給気側開口率、排気側開口率、風速)

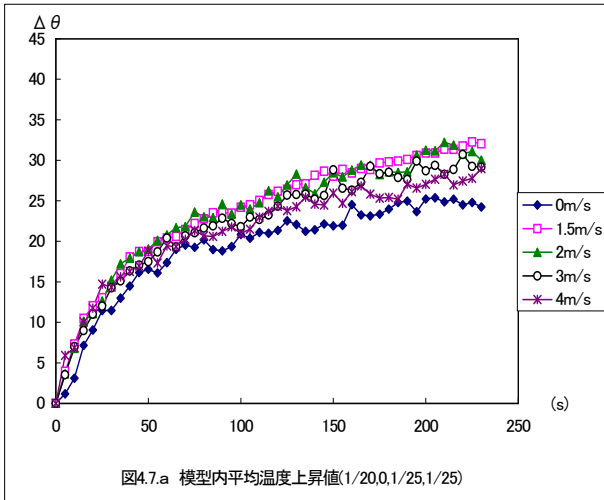


图4.7.a 模型内平均温度上升值(1/20,0,1/25,1/25)

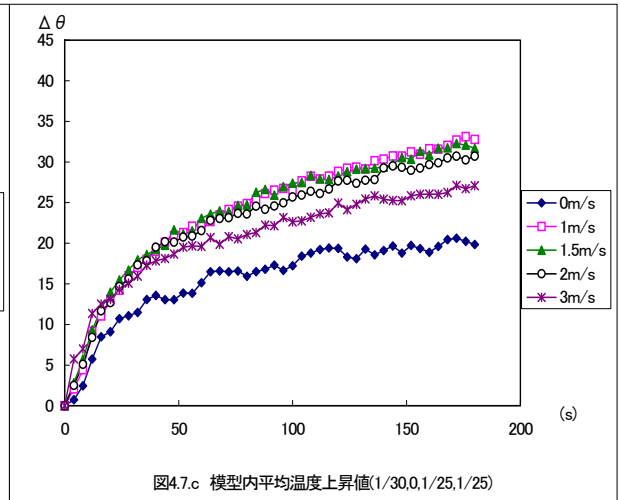


图4.7.c 模型内平均温度上升值(1/30,0,1/25,1/25)

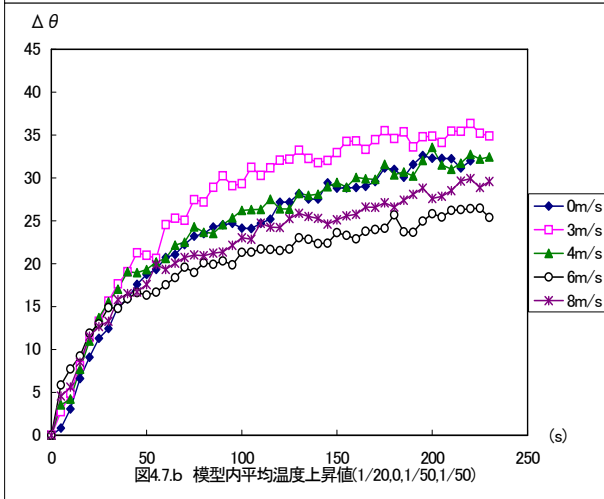


图4.7.b 模型内平均温度上升值(1/20,0,1/50,1/50)

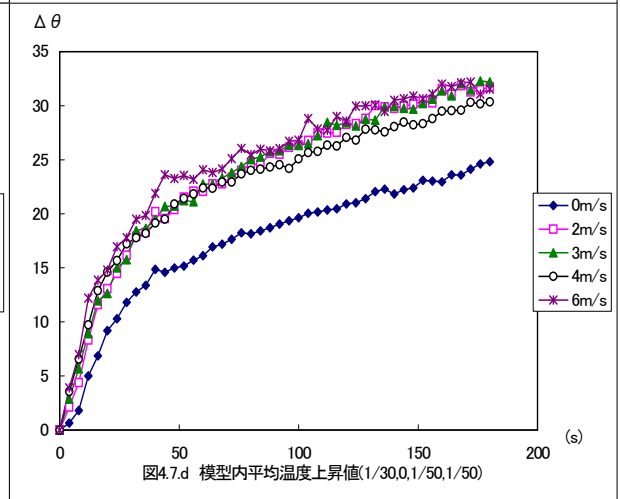


图4.7.d 模型内平均温度上升值(1/30,0,1/50,1/50)

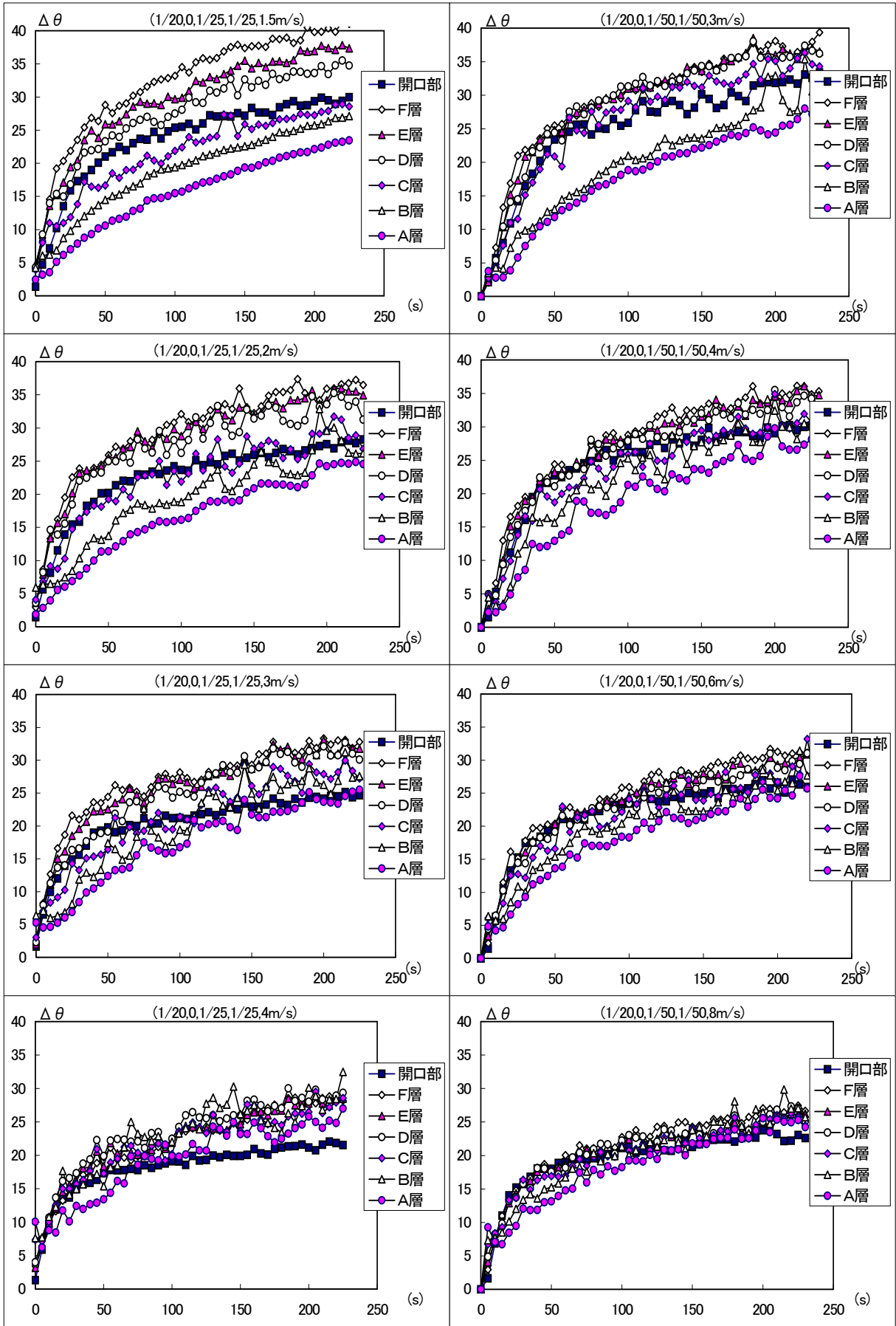


图 4.8 層別平均温度上昇値
(1/20,0,1/25,1/25)

图 4.9 層別平均温度上昇値
(1/20,0,1/50,1/50)

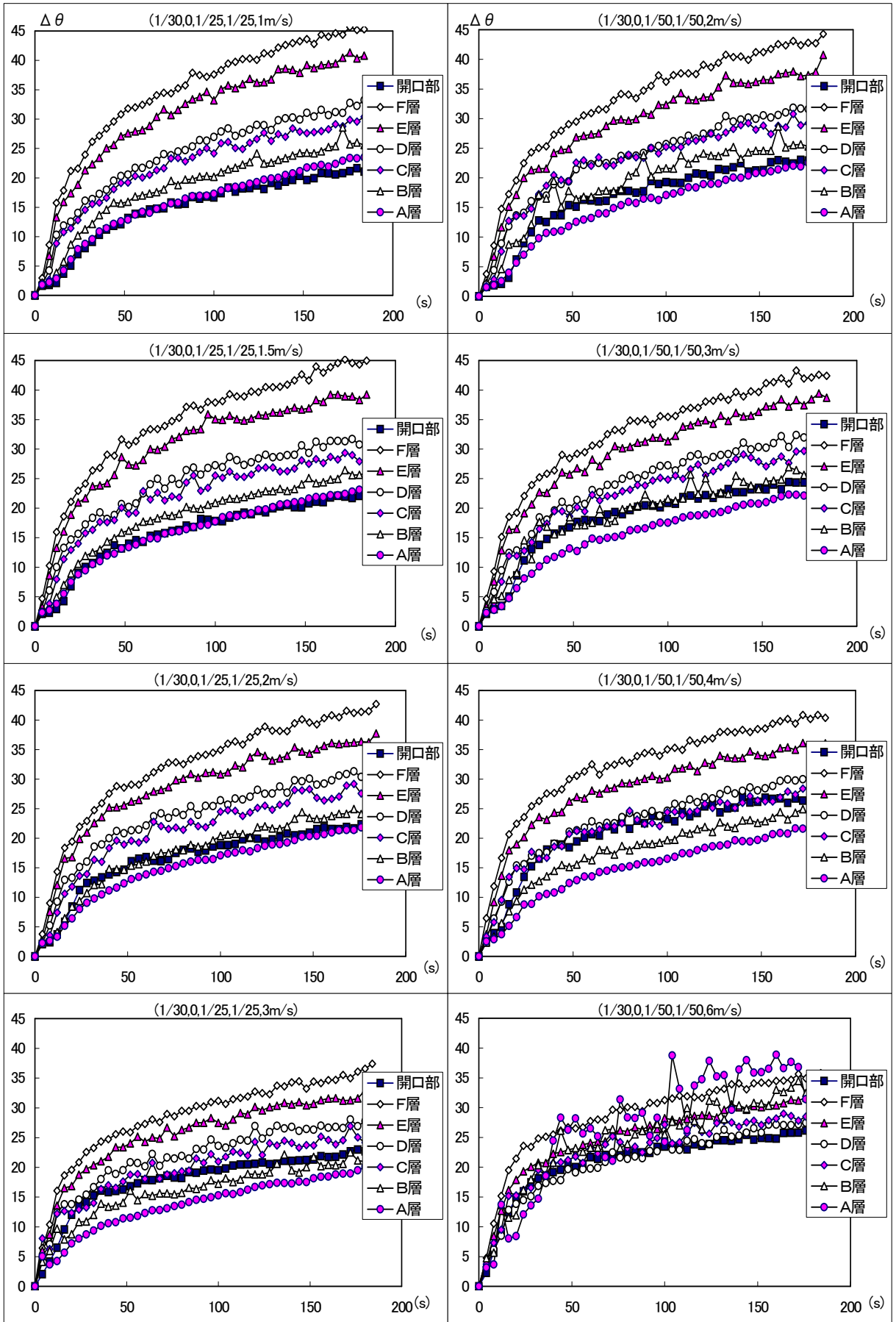


图 4.10 層別平均温度上昇値
(1/30,0,1/25,1/25)

图 4.11 層別平均温度上昇値
(1/30,0,1/50,1/50)

(排気側開口位置が頂部にあるケース)

模型内平均温度上昇値をみると、風速 0m/s のとき極めて高い上昇値を示し、それ以降は風速の増加に伴い、模型内平均温度上昇値は下がっているが、風速 0m/s 以外は、ほぼ同じ値を示しているともいえる。

層別平均温度上昇値をみると、1/20 模型では流量 773 m^3/min (開口率 1/25 では、2m/s、1/50 では 4m/s)までは、模型上部 (D,E,F 層) と模型下部 (A,B,C 層) の二層に成層化されており、開口部上昇値も他の層に比べ最も高い値を示し、上昇値の値も流量によってそれ程変化がない。しかし、流量 1160 m^3/min 以上では、どの層もほぼ同じ値を示しており開口部における上昇値も流量の増加に伴い下降してきている。また、このケースにおいても、開口率 1/25 のケースよりも開口率 1/50 のケースの方が、拡散の度合いは大きい。

(1/20 模型と 1/30 模型の比較)

排気側開口が最下部に設けられているケースでは、模型内平均温度上昇値が最も高い値、または最も低い値を示す境界流入量が存在する、排気側開口が最頂部に設けられたケースでは、流入量の増加に伴い模型内平均温度上昇値も下降するという、大まかな現象としては似たような結果が得られた。しかし、層別平均温度上昇値では、1/20 模型に比べ、1/30 模型では明らかに拡散の度合いが小さい。これは、恐らく給気システム上の問題で、1/20 模型で使われた流入量に比べ、1/30 模型で使われた流入量は低く ($(20/30)^{1/2}$ 倍)、外気供給が不安定となり、模型間によって開口部からの噴流性状が異なったものとなってしまったためではないかと考えられる。

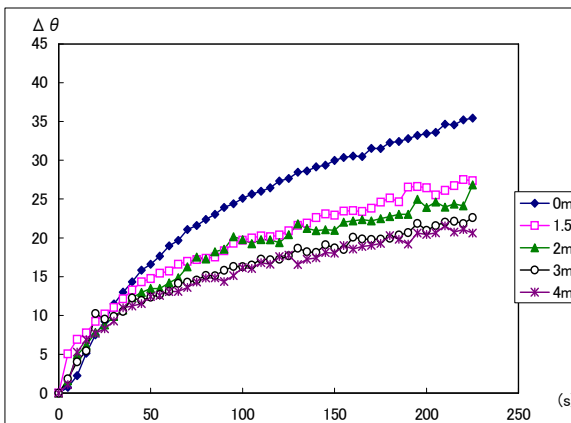


図4.12.a 模型内平均温度上昇値(1/20,h,1/25,1/25)

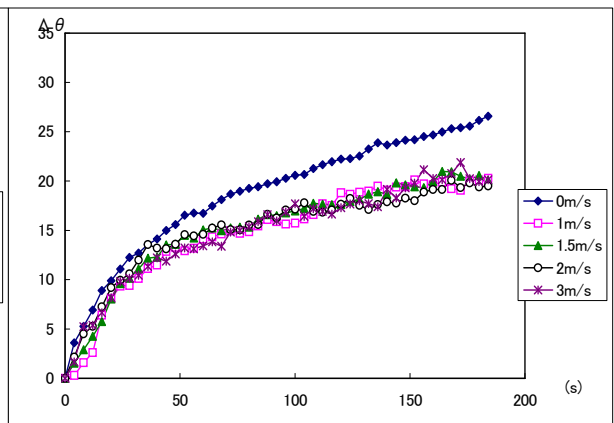


図4.12.c 模型内平均温度上昇値(1/30,h,1/25,1/25)

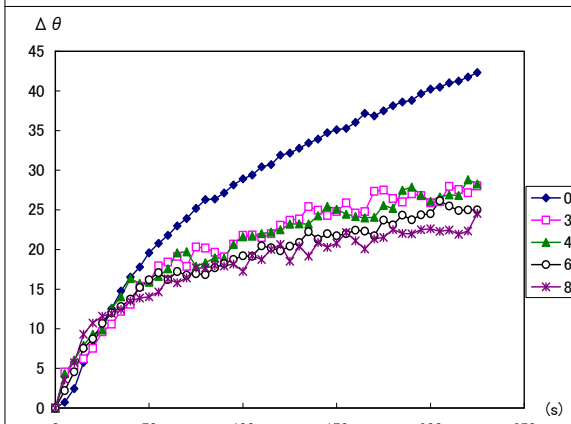


図4.12.b 模型内平均温度上昇値(1/20,h,1/50,1/50)

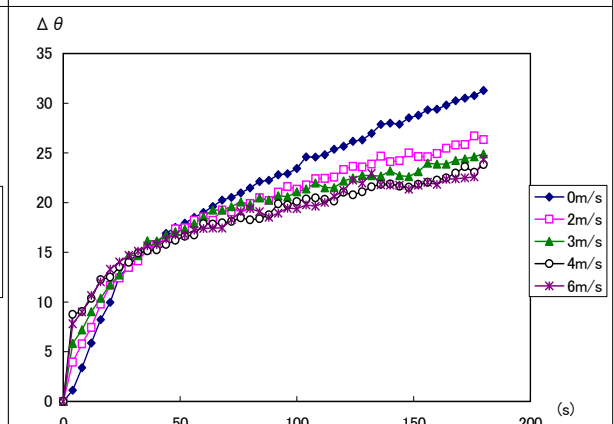


図4.12.d 模型内平均温度上昇値(1/30,h,1/50,1/50)

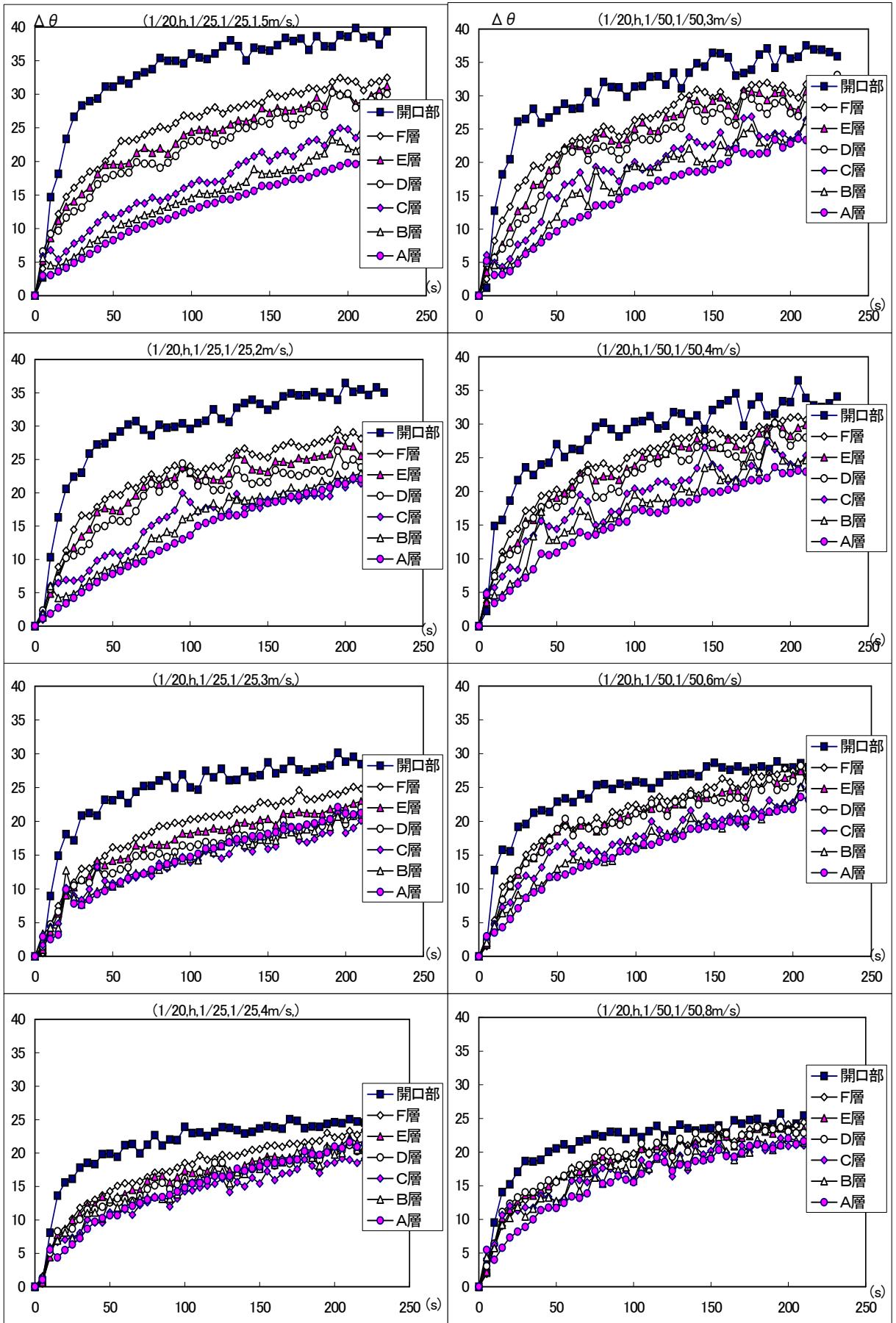


图 4.13 層別平均温度上昇値
(1/20,h,1/25,1/25)

图 4.14 層別平均温度上昇値
(1/20,h,1/50,1/50)

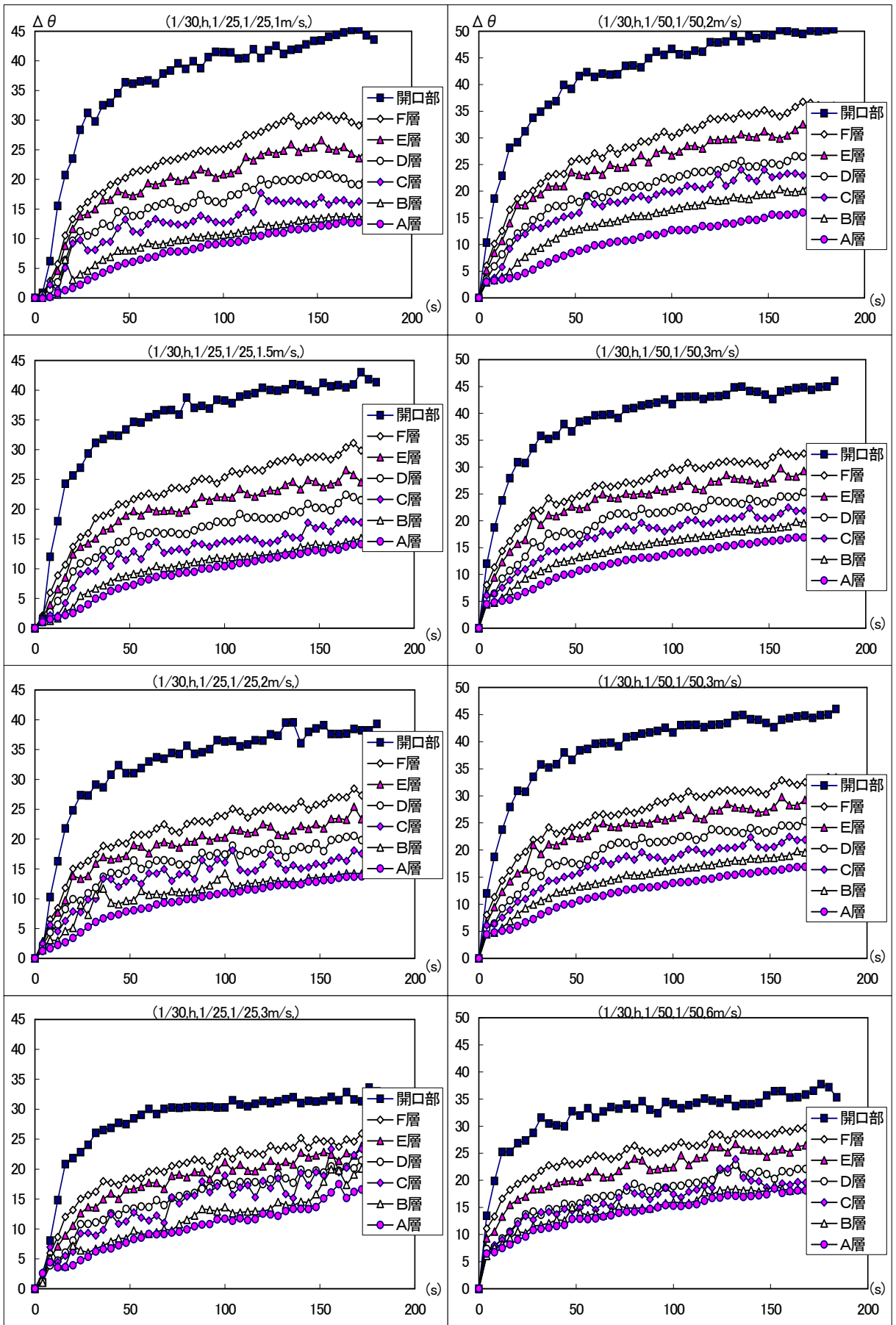
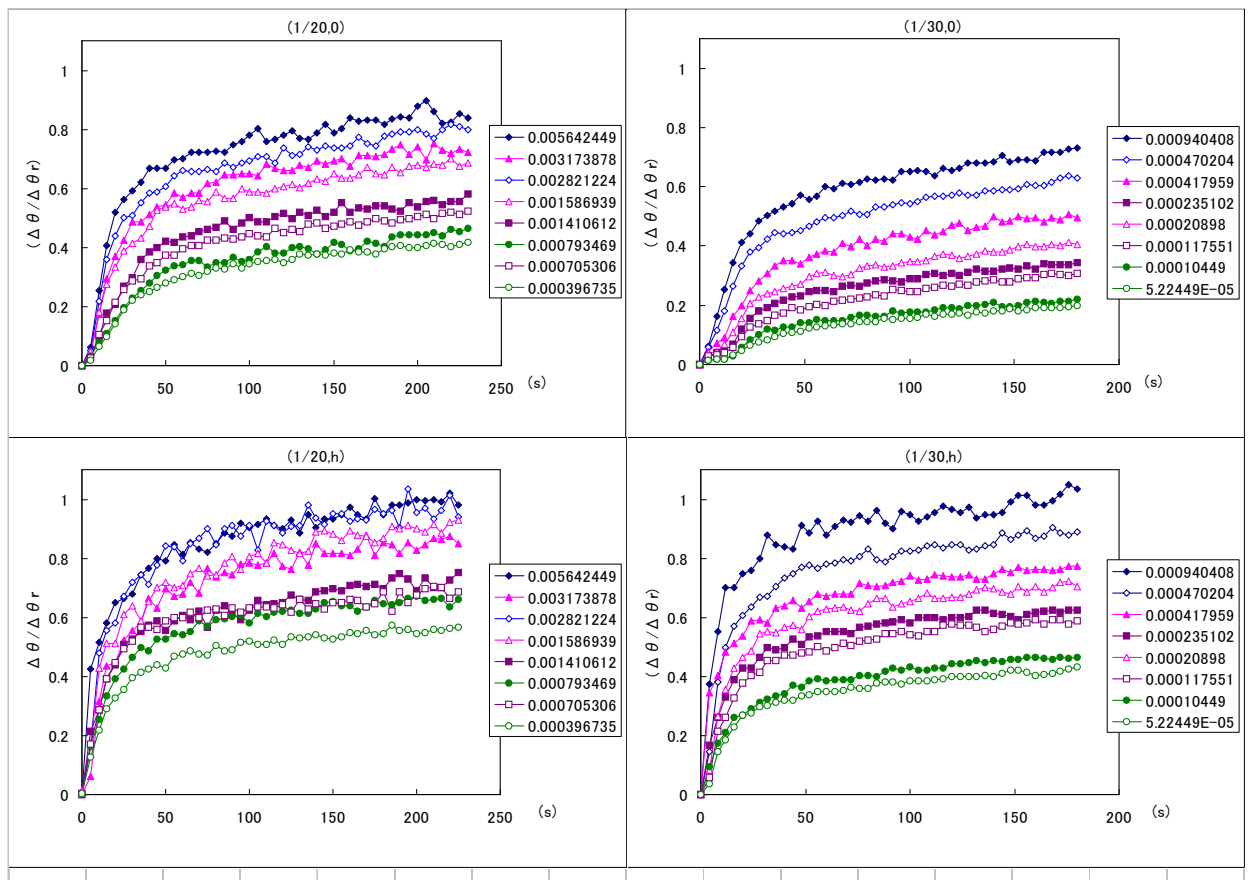


图 4.15 層別平均温度上昇値
(1/30,h,1/25,1/25)

图 4.16 層別平均温度上昇値
(1/30,h,1/50,1/50)

4.3.3 混合過程に関する分析

4.3.2の結果より、同じ流量が吹き込まれていても、風速が大きいケースの方が模型内の混合の度合いが大きい傾向があるので、開口部における運動量を指標として解析を行なう。図 4.17は、開口部でのそれぞれのケースにおける運動量を計算し、数値軸には、模型内で失熱が全くなく、火源の発熱量の5割が瞬時一様拡散されると仮定し、その時の模型内温度上昇値の収束値を $\Delta\theta_r$ ^{注2)}として分母にとり、開口部での温度上昇値を分子として、計算し、それを運動量ごとに比べてみた。開口の位置に関しては、排気側の開口が基底部あるケースよりも頂部にあるケースの方が拡散度が大きいことが読み取れる。このグラフは、値が1に近いものほど、模型の中が拡散していることを示しているが、多少のケースを除いては、運動量が大きくなれば、拡散の度合いが大きい傾向になっている。この事より、模型内の拡散の指標として開口部における運動量が使えることが示された。



(凡例は開口部での運動量、単位は kg)

図 4.17 開口部での運動量を指標とした混合過程

注2) 壁面との熱収支を無視し、外気との収支のみで考え、

$$\frac{1}{2} Q dt = c_p \rho V d\theta + c_p \rho G \theta dt \quad \text{より} \quad \theta = \frac{Q}{c_p \rho G} \left(1 - e^{-\frac{G}{V} t} \right) \quad \therefore \Delta\theta_r = \frac{Q}{c_p \rho G}$$

Q : 発熱量(kcal/s) c_p : 定圧比熱(kcal/kg°C) ρ : 比重(kg/m³)

V : 模型容量(m³) G : 給気量(m³/s) θ : 温度上昇値(°C)

4.4 まとめ

本章では、開口が2ヶ所というごく限られたケースではあるが、開口部での運動量を変化させることにより、外気風が煙流動に与える影響について検討を行なった。煙の可視化はうまくいかなかったので、熱的な面からの検討になるが、層別平均温度上昇値(図4.8~4.11、4.13~4.16)を見ると、一般に防災計画をする場合、煙層下端高さが問題になるのだが、本実験の最下層(A層)温度上昇値がその基準になる。この層の温度上昇値が他の層と近い上昇値であることは、模型内が拡散されていることであり、煙も一様に拡散されていることを示す。その意味では、全てのケースにおいて風速が増すほど危険である結果が得られているが、模型内の全体の温度(模型内平均温度上昇値・図4.7、4.12)は風速の増加に伴い低くなるケースもある。

また、開口からの流入量が同じケースでも風速が大きいケースの方が、模型内の熱拡散が強い結果が得られた。そこで、開口部での運動量を指標として、模型内の混合過程を示した所(図4.17)、運動量の値が近い数ケースを除いては、運動量が大きくなるにつれ混合の度合いも強くなるという結果が得られた。この事より、開口部での運動量が熱的な混合過程の指標になりうることが示された。

5. おわりに

本研究では、相似則を適用し、相似縮小模型を使った2つの実験を行なったわけであるが、1つめの実験である第3章では、風洞施設を使って火災実験を行ない、外気風が煙流動性状に与える影響について、基礎的な知見を得、開口部における運動量がその指標となりうる可能性を示した。

第4章の実験では、第3章で得られた結果を踏まえ、開口部における運動量を制御し、より正確な指標により煙流動性状を解析しようと試みた。今回のシステムでは、模型間の相似性が確認されず、結果の信頼性には問題を残すが、開口部での運動量が大きくなれば、模型内の拡散の度合いも強くなるという結果が得られ、外気風がアトリウム内の煙流動に与える影響を知る一つの手がかりとなった。

また、本研究で取り組もうとした流量域は、確立されたシステムがなく、この流量域での模型実験が確かなものとなれば、煙流動実験だけでなく、空調実験など模型実験の汎用性が広がるものと考えられる。その意味では、本研究は先駆け的なものであり、十分に有効な結果が得られたと思われる。

今後、更なる実験システムの開発と運動量を手がかりにしたアトリウムの防災計画の充実が期待される。

謝辞

本論文を作成するにあたり、終始熱心にご指導して頂きました、辻本 誠 教授、そして、論文の審査にあたりご指導頂きました、松林 宇一郎 助教授、河野 守 講師、いろいろ御助言頂きました、奥宮 正哉 助教授、永井 久也 助手に心から感謝いたします。

また、連日連夜にわたり実験生活を共に過ごした建築学科辻本研究室の島本 龍君、多面にわたり御世話になった地圏安全工学講座の皆さんに深く感謝の意を申し上げます。

1997/3/5

参考文献

- 1)竹之内 哲次：アトリウム火災の模型実験に関する研究—一部に開口のある閉空間での煙流動に関する相似則—，名古屋大学修士学位論文，1990.2
- 2)長岡 勉：大規模空間における熱気流性状の実験的研究，名古屋大学修士学位論文，1991.2
- 3)Quintiere,J.G., "Scaling Application in Fire Research", Proc. of the International Symposium on Scale Modeling, 1988
- 4)勝田 高司、土屋 喬雄：室内空気分布の模型実験法に関する研究—第1報～第3報，空気調和・衛生工学会論文集 No.17, 1981.10
- 5)E.E.Zukoski, Toshi Kubota, Baki Cetegen, "Entrainment in Fire Plumes", Fire Safety Journal, 3(1980/81)
- 6)Gunnar Heskestad, "Luminous Hight of Turbulent Diffusion Flames", Fire Safety Journal, 5(1983)
- 7)甲藤 好郎：伝熱概論，養賢堂，1964
- 8)若松 高志、他 6 名：地下街における煙制御に関する研究，日本建築学会関東支部研究報告集，1991
- 9)梶山 隆史：外気風影響下での大規模吹き抜け空間における煙流動模型実験，名古屋大学修士学位論文，1994.2