

一部に開口のある空間での煙流動に関する模型実験

大規模空間での初期火災時における煙流動に関する研究 第一報

MODEL EXPERIMENTS ON SMOKE MOVEMENT
IN A SPACE WITH OPENINGS

Study on the smoke movement in a large space on the early stage of fire Part 1

辻本 誠*, 奥宮正哉**, 長岡 勉***, 梶山隆史****

*Makoto TSUJIMOTO, Masaya OKUMIYA, Tsutomu NAGAOKA
and Takafumi KAJIYAMA*

The laws of scaling for unsteady-state smoke movement were derived by dimensional analysis of the governing equations (continuity, conservation of momentum and conservation of energy) and the boundary condition at the flames and the wall. Experiments were conducted in two stages, two different sizes (1:2.5) and real fire test and its reduced model (1/40). And the similarity in each stage was almost confirmed.

Keywords: *smoke movement, model experiment, scaling law, smoke layer
temperature distribution, wall boundary condition*

煙流動、模型実験、相似則、煙層温度分布、壁面境界条件

1 はじめに

近年、日本においてもアトリウム、ドーム等の大規模な空間を持つ建物が増加する傾向にある¹⁾。このような空間は、開放的で意匠上自由度が大きく、魅力ある空間である。しかし、大規模空間を実現するためには、様々な面からその空間の安全性を保証しなければならず、その検討課題の一項目として火災時の安全性が挙げられる。

火災安全を考える場合に、火災時の煙流動性状を把握することは、空間の利用者の避難安全性を保証するためには必要不可欠であり、火災安全性を保証するための重要な一項目となる。このための煙流動予測手法としては、ゾーンモデル又はフィールドモデルによる数値予測手法が一般的に用いられており²⁾、実用的にかなりの成果を挙げているが、開口部から吹き込む流れの火源への影響等、モデル化が困難な点も多く、現状では相似則を用いた模型実験によるアプローチも平行して検討すべき手法である。筆者らは、この模型実験による煙流動予測手法の確立を目指して研究を行っており、その第一報として、

非定常の煙流動に対する相似則を支配方程式に基づき導出する。また、炎の形状についての相似則との関係を確認するとともに、煙から壁面への熱損失に関しても相似則を提案し、実際に模型実験を実施してこれらの提案を検証した。

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(1)～(3)式が得られる。

本報は、日本建築学会大会学術講演概要集, 1990.10, 1991.9, 日本建築学会東海支部研究論文報告集, 1995.2に発表したものに基づく。

* 名古屋大学工学部地圏環境工学専攻
教授・工博

** 名古屋大学理工学総合研究センター
助教授・工博

*** 竹中工務店技術研究所 工修

**** 大成建設 工修

Prof., Dept. of Geotechnical and Environmental Eng., School of Eng., Nagoya Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Center for Integrated Research in Science and Engineering, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Technical Research Institute, Takenaka Corporation, M. Eng.

Taisei Corporation, M. Eng.

1. 物質拡散の現象の無視
2. 非圧縮性の仮定とBussinesuq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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

・運動方程式

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

・エネルギー方程式

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right) = \rho c_p \alpha_t \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_i \partial x_i} + q \quad (3)$$

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 $L_0, u_0, Q_0, t_0, \Delta\theta_0, \Delta p_0$ により(1)~(3)式を無次元化する。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。

$$\begin{aligned} x_i^* &= x_i / L_0 \\ u_i^* &= u_i / u_0 \\ Q^* &= q L_0^3 / Q_0 \\ t^* &= t / t_0 \\ \Delta\theta^* &= \Delta\theta / \Delta\theta_0 & \Delta\theta &= \bar{\theta} - \theta_a \\ \Delta p^* &= \Delta p / \Delta p_0 & \Delta p &= \bar{p} - p_a \end{aligned} \quad (4)$$

θ_a : 基準温度 p_a : 基準圧力

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{L_0}{t_0 u_0} \frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} &= -\frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2} \frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + g_i \beta \frac{\Delta\theta_0 L_0}{u_0^2} \Delta\theta^* \\ &+ \frac{\nu_t}{L_0 u_0} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{L_0}{t_0 u_0} \frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} + u_i^* \frac{\partial \theta^*}{\partial x_i^*} = \frac{\alpha_t}{L_0 u_0} \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x_i^* \partial x_i^*} + \frac{Q_0}{\rho c_p u_0 \Delta\theta_0 L_0^2} Q^* \quad (7)$$

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 $\nu_t / u_0 L_0, \alpha_t / u_0 L_0$ 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 $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ が保存されることが相似の条件となる。

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{L_0}{t_0 u_0} \\ \pi_2 &= \frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2} \\ \pi_3 &= g \beta \frac{\Delta\theta_0 L_0}{u_0^2} \\ \pi_4 &= \frac{Q_0}{\rho c_p u_0 \Delta\theta_0 L_0^2} \end{aligned} \quad (8)$$

上式は未知数6で式4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、

$$\begin{aligned} n(t) &= n(L)^{1/2} \\ n(\Delta p) &= n(L) \\ n(Q) &= n(L)^{5/2} \\ n(u) &= n(L)^{1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

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

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と火源寸法の比が、発熱量と火源寸法で決まる Q_f^* の関数になることが報告されている⁸⁾。

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

L_f : 炎の高さ D : 火源の直径 Q : 発熱量
 ρ_0 : 雰囲気空気密度 c_p : 雰囲気空気比熱
 θ_0 : 雰囲気空気温度

(9)式の条件すなわち、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) 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。

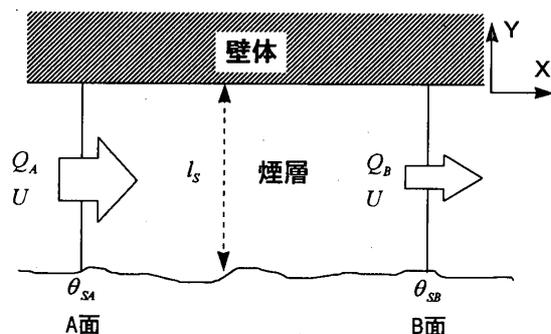


図-1 壁体に接する微小流体

図-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、(10)式となる。

$$\lambda_s \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} l_s - U l_s c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial x} = l_s c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} - \lambda_w \frac{\partial \theta_w}{\partial y} \Big|_{y=0}^{x=x} \quad (10)$$

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

左辺第一項は、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⁷⁾

$$q = \Delta\theta \sqrt{\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t}}$$

が近似的に適用できると考えれば、

$$U l_s c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial x} + l_s c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \Delta\theta \left(\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t} \right)^{1/2} \quad (11)$$

各項を物理量の比で書き直すと(12)式となる。

$$\frac{n(L) n(c_s \rho_s) n(\theta_s)}{n(t)} = n(\Delta\theta) \left\{ \frac{n(\lambda_w c_w \rho_w)}{n(t)} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

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、(9)式の条件下では

$$n(\lambda_w \rho_w c_w) = n(L)^{3/2} \quad (13)$$

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 模型実験

2. で導いた煙流動に関する相似則が成立するかどうかを以下の2つの実験で確認した。

実験(その1)はスケール比2.5の2つの模型を用い、火源の大きさ、開口条件を変化させて煙流動の相似性を確認するものであり、実験(その2)は実大の建築物で行われた煙流動実験のうち、発熱量の時間変化が実測されているもの(蔵前国技館実大火災実験結果⁹⁾)を1/40模型で再現したものである。次報で報告する予定の風洞を用いた外気風の影響に関する検討を含めて、相似則に関する実験は、完結するものと考えている。

3.1 模型実験(その1)

(1) 実験条件

(模型と火源)

実験に用いた模型は図-2に示すように二面に鉛直方向のスリット開口を持つ箱型のもので、対象とする5階層分のアトリウム空間⁽²⁾を単純化している。壁の材料については(13)式の関係により、実大におけるコンクリートに相当する材料として1/25、1/10スケールにおいてそれぞれコルク、ベニヤ板を用いた。模型で用いた材料の $\lambda_w \rho_w c_w$ については、表1に模型実験(その2)での値も含めて示した。

火源については、プロパンを燃料として用い、マスフローコントローラーにより流量制御を行うことで、発熱量を任意に設定できるシステムを用いた。図-3に本実験で用いた火源システムを示す。実験では、表2に示すプロパン量を用いた。又、煙層可視化のために発煙片(発熱量約400W)を火源近傍で発煙させ、上昇する熱気流に巻き込まれるように調整した。模型実験(その2)では、この発熱量を引いた形でバーナーの流量を決めている。(その1)の1/25模型では、この配慮をしていないため、発熱量についてかなりの誤差を含む結果となっている。

(煙層の可視化とその記録)

模型前面にアクリル板を設置して、アルゴンレーザー発生装置と光学機器を使用することで、アトリウム鉛直断面の煙層時間変化を可視化し、その時間変化をビデオ撮影、及び写真撮影を併用して記録した。写真撮影の時間間隔(1/25、1/10スケールでそれぞれ5秒、7.9秒)は、実大では25秒に相当する。

(温度測定)

図-2に示すように、アトリウム内部2ヶ所、開口部

2ヶ所において垂直温度分布（各11点）をCC熱電対で測定した。計測時間間隔は相似則 $n(t) = n(L)^{1/2}$ 、及び計測機器の処理能力より1/25、1/10スケールでそれぞれ10秒、16秒とした。（実大では50秒に相当する）

（変化させた条件）

火源位置；中央、隅角部

発熱量；1.25MW、2.5MW（実大換算値）

開口条件；建物幅の1/3、1/12、無開口

表1 各壁材の $\lambda \rho c$ ($kcal^2 / m^4 h^2 C^2$)

実大材	$\lambda_R \rho_R c_R$	模型材	$\lambda_M \rho_M c_M$
コンクリート(2300kg/m ³)	580	ベニヤ板	22.2
コンクリート(1900kg/m ³)	280	コルク	1.69
木毛セメント	60.8	ロックウール	0.264

表2 プロパン量

実大	1/25	1/10
1.25 MW	4.3×10^{-3} (1%/s)	4.2×10^{-2} (1%/s)
2.5 MW	8.5×10^{-3} (1%/s)	8.5×10^{-2} (1%/s)

（プロパン発熱量は、 $9.358 \times 10^4 w \cdot s / 1\%$ で計算）

(2) 実験結果と考察

（温度データ）

測定された4ヶ所の垂直温度分布（ $\Delta\theta$ で表現）の時間変化を相似則をもとに時間スケールを調整して比較する。

実験条件が対応する実験を1/25、1/10スケールで比較すると、図-4に示すように垂直温度分布、及びその時間変化は良い相似性を示している。ただし、全体に共通な傾向として、1/10スケールの結果は、1/25スケールの結果よりも $\Delta\theta$ が大きい。また、この傾向は開口部が小さいほど強い。この原因には、1) 輻射の影響、2) プロパンの燃焼がスケールで変化している可能性、3) 表面熱伝達の影響などが考えられる。

（煙層可視化データ）

レーザー光で可視化されたビデオ映像及び写真の比較でも温度変化と同様に、煙層高さの時間変化は良い相似性を示している（写真-1にその例を示す）。ただし、1/10スケールの模型ではレーザー発生装置の出力が空間に対して不足しており、これによる見え方の違いの影響を排除できていない。

（旋回流）

火源位置が中央の場合には、この空間の形状では旋回流が生じることが可視化実験により確認された。この旋回流の影響で、煙層は非常に乱され、各点の温度変化は振動しながら上昇する。この現象は1/25スケール、1/10スケールで同様に観察され、旋回を始める時期もほぼ一致する（1/25スケールで60秒前後、1/10スケールで80秒前

後）等、相似性を示している。

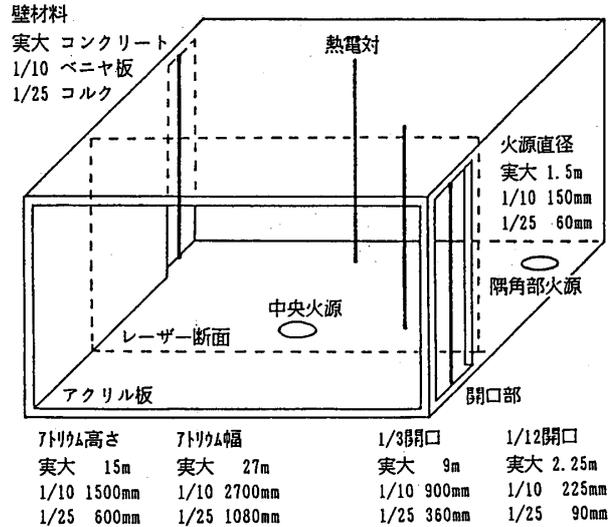


図-2 模型図

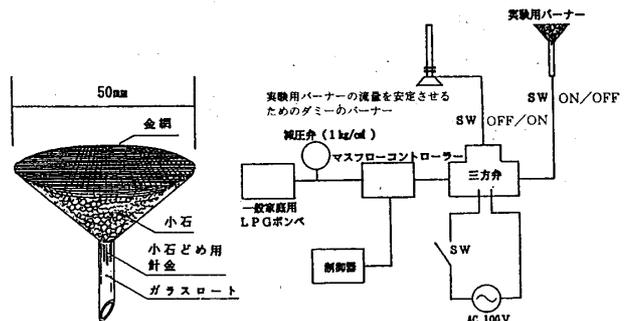


図-3 火源システム

3.2 模型実験（その2）

(1) 実験条件

（模型と火源）

対象とした実大実験データは、蔵前国技館実大火災実験⁹⁾のものである。実験には図-5に示す1/40模型を用いた。

模型材料の選定にあたっては実大建築物の内装材である木毛セメント板に対応するものとしてロックウールを用いた。また、片側をアクリル張りとして内部を可視化できるようにした。模型頂部には排煙口があり、これは電磁コイルを用いて自動的に排煙口が開放される装置とした。実大実験では、着火後6分30秒で排煙口を開放しているため、これに合わせるために、模型では62秒後に排煙口を開放した。火源については、模型実験（その1）と同様のシステムを用いた。火源発熱量の時間変化を図-7に示す。

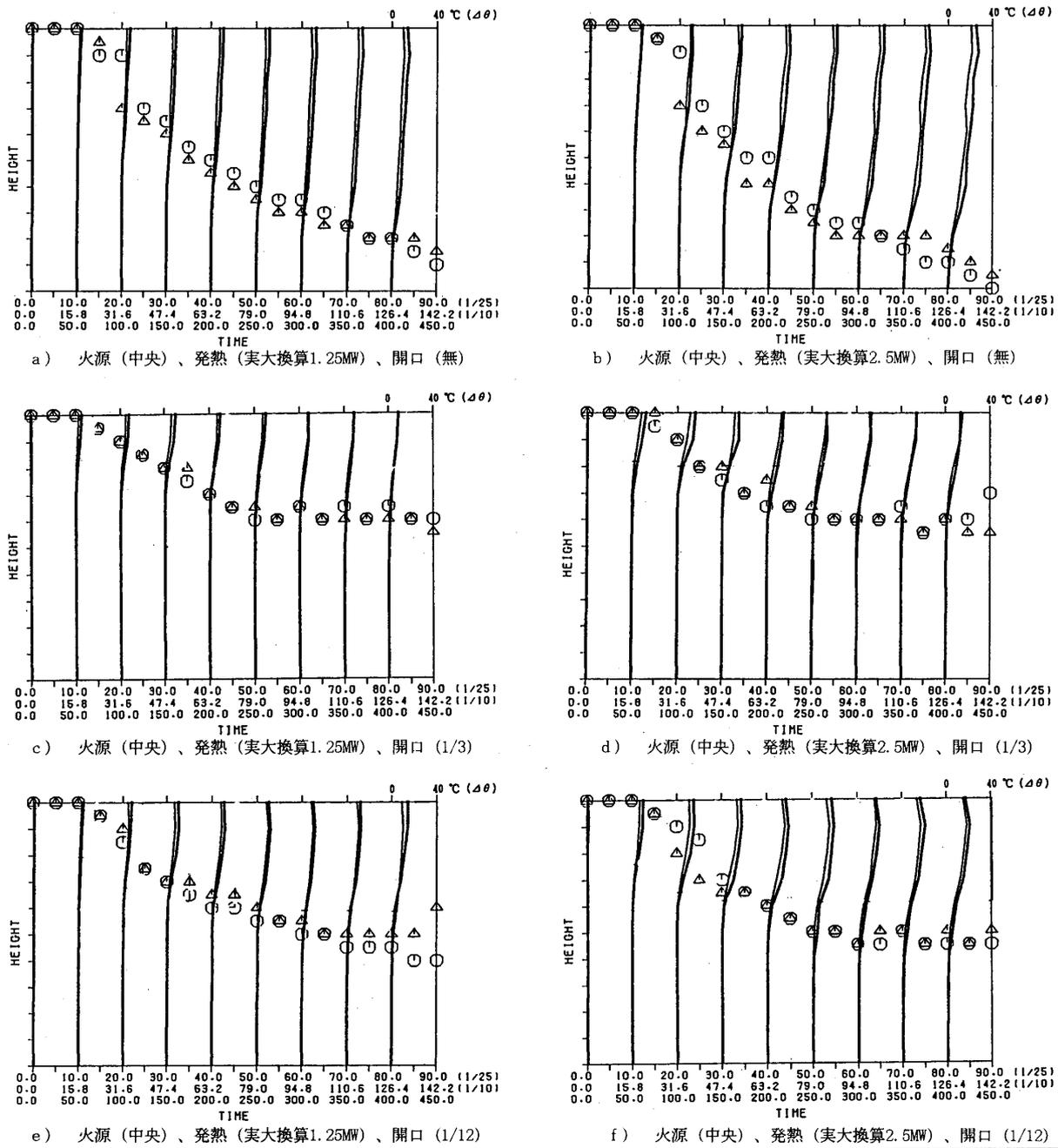


図-4 温度データと可視化データによる相似性の比較

細線	1/25模型実験	温度分布
太線	1/10模型実験	温度分布
○	1/25模型実験	画像処理による煙層下端位置
△	1/10	"

(測定方法)

温度測定は実大実験の測定点をもとにして内部に垂直温度分布54点、開口部2点、外部2点についてT-type熱電対によりデータロガーで記録した。なお、計測時間間隔は実大60秒に対して9秒とした。可視化手法は3.1模型実験(その1)と同様な手法によった。

(2) 実験結果と考察

実大実験の結果⁹⁾では、火源近傍の測定点では実験初期から下部で高い温度が観測されており、輻射の影響等を受けていると判断される。そこで、この影響が小さいと

思われる測定位置を選択して比較を行う。図8に示すように、非定常な温度分布の変化が定性的にはよく一致しており、1/40スケールでも上述の相似則を用いて火災時の熱気流性状を模型実験によって再現できる。この実験は、タイムスケジュールによる排煙口の開放、発熱量が時間変化する火源条件等、非常に複雑な条件を想定していること及び、実大実験の発熱量が衣類の重量減少量でしかわからない等の不確定な要素を含んでいることを考慮すれば、かなり良く一致している。ただし、この実験でも模型実験(その1)と同様、より大きなサイズの実験の方がより高い温度指示値を示す傾向がある。

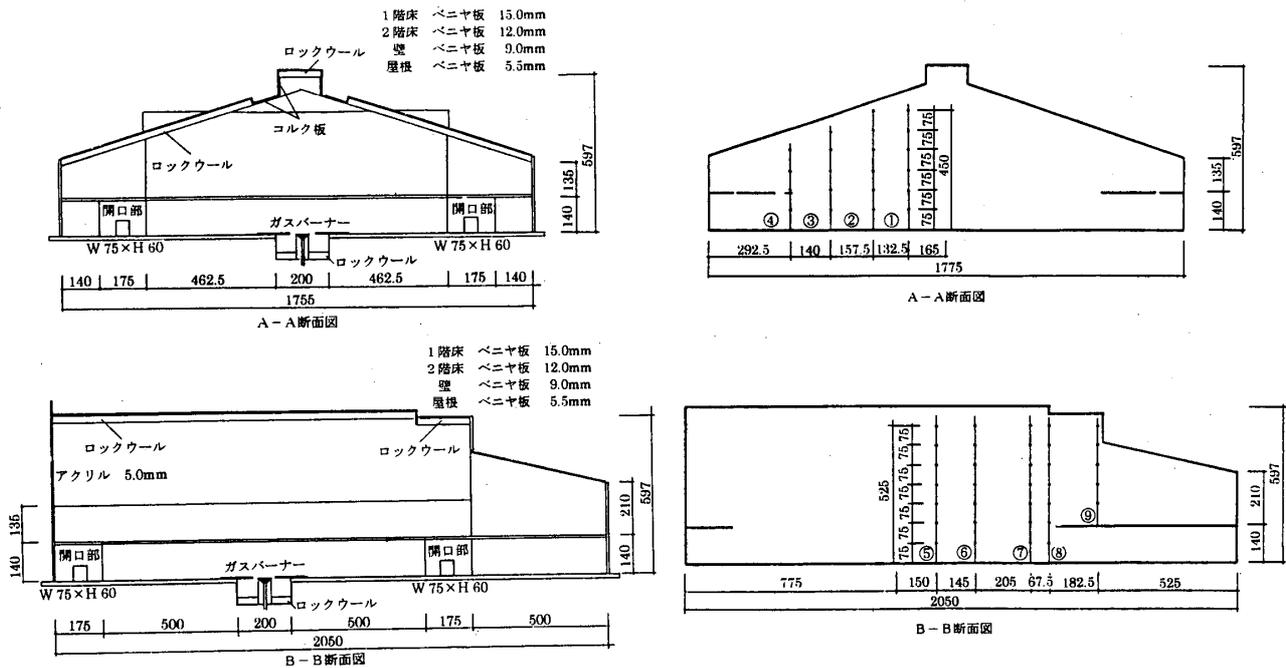
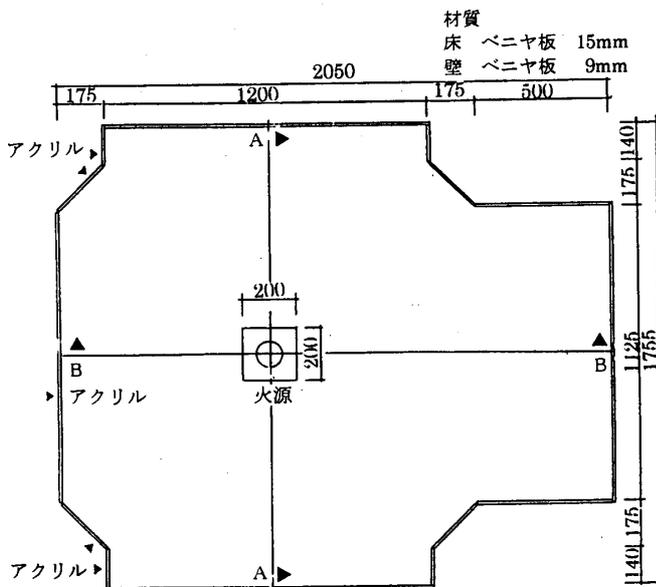


図-6 温度分布測定点



1階床平面図
図-5 模型図

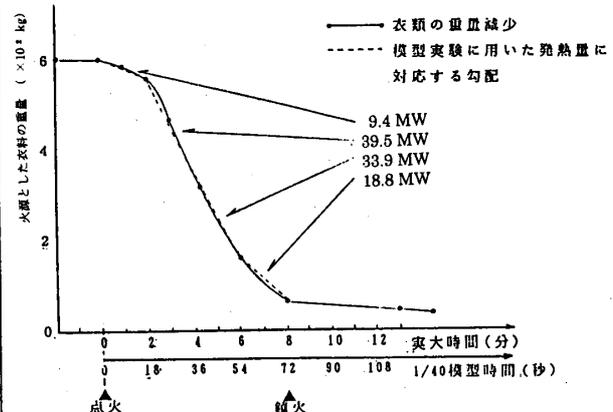


図-7 発熱量の経時変化

4 まとめ

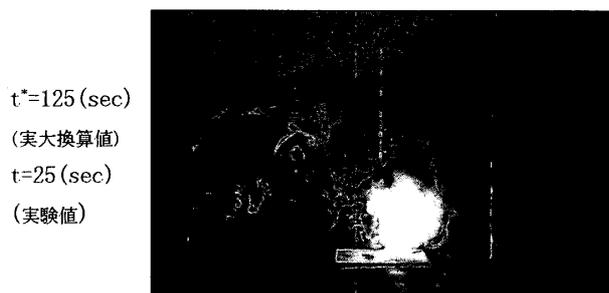
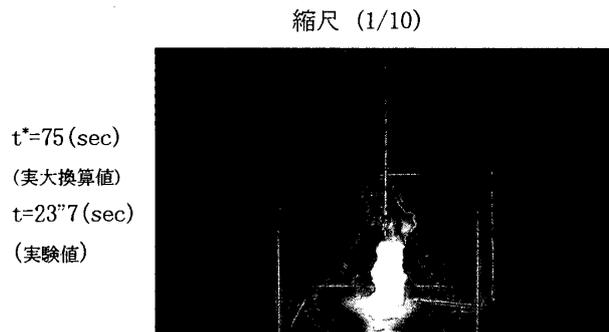
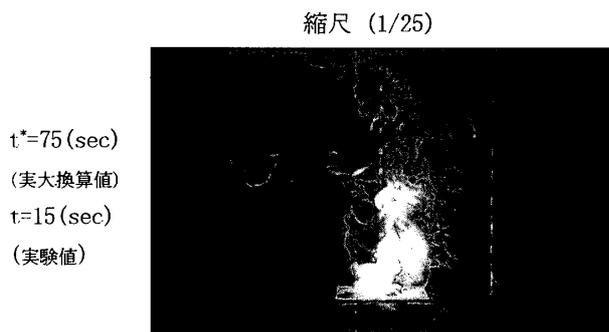
一部に開口のある空間での煙流動に関する相似則を検討し、熱源と時間軸に関して $n(Q) = n(L)^{5/2}$ 、 $n(t) = n(L)^{1/2}$ の条件を、また、壁面からの熱損失に関する条件として $n(\lambda_w \rho_w c_w) = n(L)^{3/2}$ を提案した。この条件で行った1/25、1/10スケールの模型による比較および実大建築物と1/40スケール模型の比較により、本手法による煙流動予測技術の有効性を示す事ができ、この縮尺の範囲で定性的には良い相似結果が得られることを確認した。また、二層ゾーンモデルによる解析では予測できない旋回流の確認等は、現状レベルでの模型実験の有用性を示していると言える。しかし、温度データの定量的な一致は十分とは言

えず、改良するべき余地を残している。

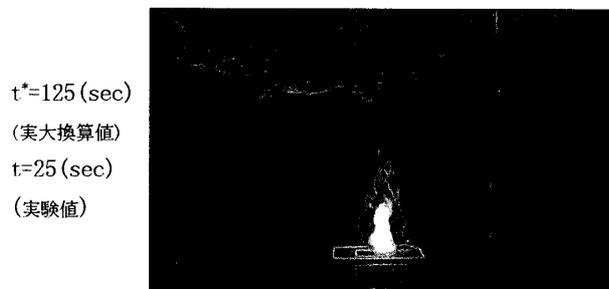
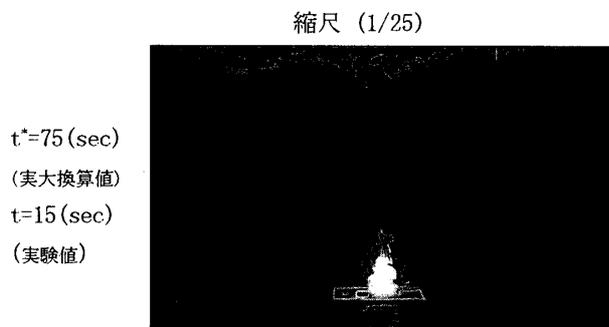
今後、実験装置の改良、熱源および外気風等の境界条件等の詳細な考察と実験的検証を行い、実験手法を確実なものとし、煙流動予測・制御を対象として活用して行く予定である。

注1) ここで用いる Q_f^* は前述の Q^* とは定義が異なることに注意。

注2) ロ字型平面をもつ50階建集合住宅の中央吹抜部で、床スラブに挟まれた5階層分



1) 実験 A {火源 (中央)、発熱 (実大換算2.5MW)、開口 (1/3) ; 図4のdに対応する}



2) 実験 B {火源 (中央)、発熱 (実大換算1.25MW)、開口 (1/12) ; 図4のeに対応する}

写真-1 写真による煙層の可視化

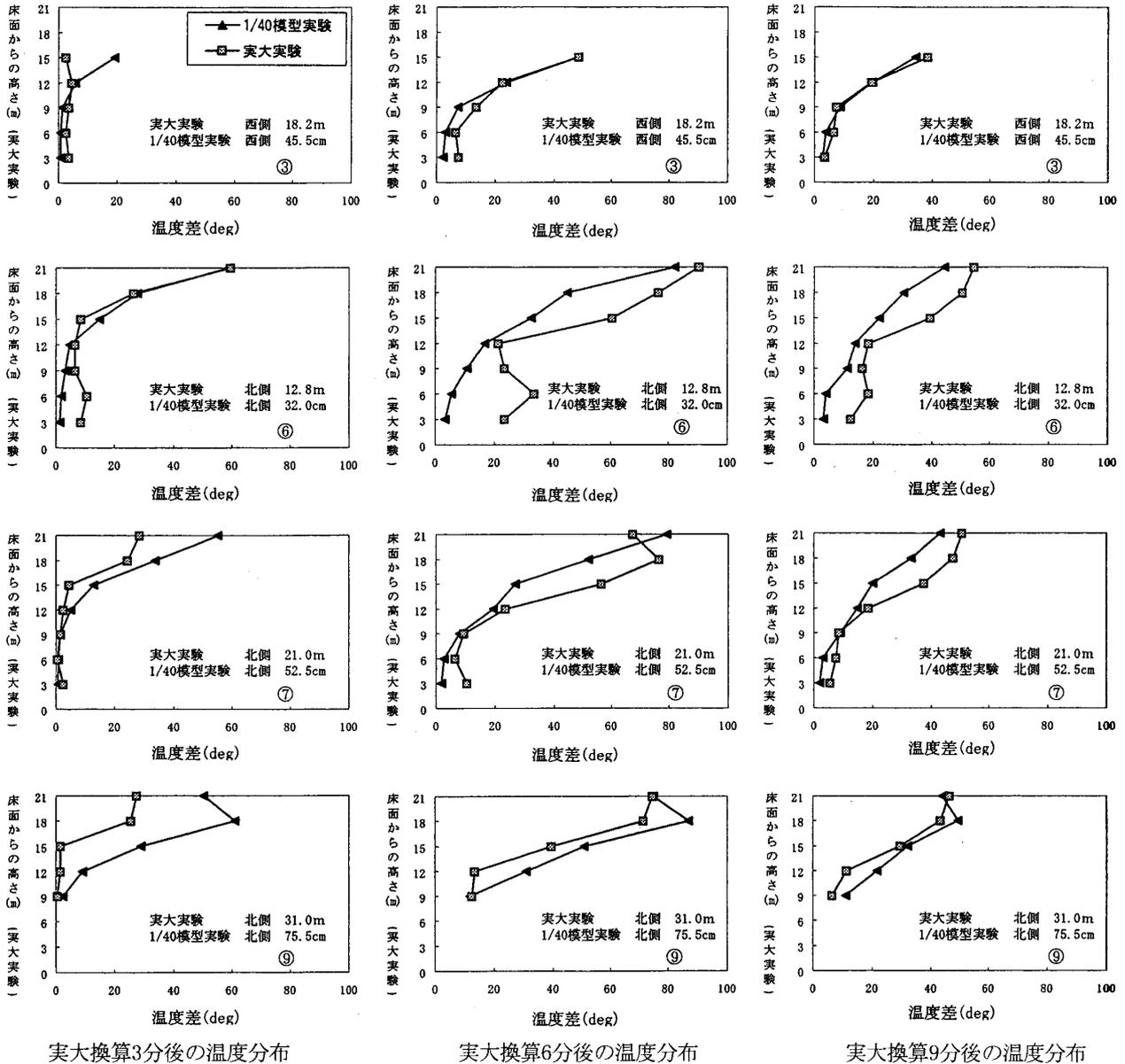


図-8 実大実験結果との温度分布の比較

<文献>

- 1) 成瀬友宏、菅原進一；アトリウムの防災計画事例調査，日本建築学会構造系論文集，第443号，pp.147～157，1993.1
- 2) 上原茂男、古平章夫、八百升；3次元フィールドモデルによる煙流動シミュレーションその1，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.959～960，1990.10
- 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，No17，1981.10
- 5) E. E. Zukoski, Toshi Kubota, Baki Cetegen ; "Entrainment in fire plumes", Fire Safety Journal, 3(1980/81)
- 6) Gunnar Heskestad ; Luminous heights of turbulent diffusion flames, Fire Safety Journal, 5(1983)

- 7) 甲藤好郎；伝熱概論，(株)養賢堂出版，昭和39
- 8) 若松高志、他7名；地下街における煙制御に関する研究 その4) 煙制御実験における相似則の検討，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.185～188，1991.
- 9) 東京消防庁；蔵前国技館火災実験結果報告書，1985.3

(1996年3月10日原稿受理，1996年5月10日採用決定)