

外部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

名古屋大学大学院 工学研究科 建築学専攻

防災安全工学講座 辻本研究室

梶山 隆史

1994年2月

目次

0.1 研究の目的	1
はじめに	1
0.2 研究の方法	1
1 相似則についての考察	3
1.1 熱気流に関する相似則	4
1.2 プルームの生起条件	8
1.3 火炎形状の相似	8
1.4 壁面・天井面における損失熱量の相似	9
1.5 まとめ	11
2 ボイド空間の煙流動に外気風が及ぼす影響	13
2.1 実験の概要	13
2.2 実験条件	13
2.2.1 模型	13
2.2.2 模型火源	14
2.2.3 風洞設備及び模型の設置	14
2.2.4 風速	14
2.2.5 温度測定	16
2.2.6 熱気流の可視化とその記録	16
2.2.7 まとめ	17
2.3 実験結果及び考察	18
2.3.1 風速による煙流動性状の概観	18
2.3.2 スケール効果の検討	20
2.3.3 境界層の相似性を考慮した効果	23
2.3.4 トレーサーの影響	25
2.3.5 輻射よけの効果	26
2.3.6 まとめ	28

3	アトリウム ¹ の煙流動に外気風が及ぼす影響	29
3.1	実験の概要	29
3.2	実験条件	30
3.2.1	模型	30
3.2.2	模型火源	32
3.2.3	風洞設備及び模型の設置	32
3.2.4	風速	32
3.2.5	温度測定	34
3.2.6	熱気流の可視化とその記録	34
3.2.7	まとめ	36
3.3	実験結果及び考察	37
3.3.1	可視化観察及び温度データによる煙流動の定性的解析	37
3.3.2	温度データによる熱気流性状の分類	41
3.3.3	開口部風速に関する考察	43
3.3.4	開口部風速による煙層生成条件	44
3.3.5	まとめ	45
	おわりに	91
A	風洞の概要と境界層スクリーンの作成	93
A.1	風洞実験に関する概説	93
A.2	風洞施設の概要	94
A.3	スクリーンによる境界層乱流の作成	95
A.3.1	煙流動模型実験における境界層乱流の意義	95
A.3.2	自然風の性状	95
A.3.3	境界層乱流作成の手法	96
A.3.4	スクリーンの設計及び作成	97
A.3.5	スクリーンの作成	100
A.3.6	試行過程及び結果	102
B	予備実験（模型火源についての検討）	109
B.1	実験の目的	109
B.2	火源発熱量と対流，輻射成分比	109
B.2.1	実験の方法	109
B.2.2	実験結果及び考察	112
B.3	火炎形状	114
B.3.1	実験の方法	114
B.3.2	実験結果	118

目次

iii

参考・引用文献

129

謝辞

130

はじめに

0.1 研究の目的

近年、内部にアトリウムやガレリアなど大規模な吹抜け空間（以後アトリウムと称する）を有する建築物が数多く建てられており、今後ますます需要が増えるものと思われる。アトリウムは建物内部に半屋外的な開放感のある空間を提供し、人を引きつける魅力的な空間となるほか、建物内部での位置認識がしやすくなるなど建物の付加価値を高める効果がある。しかし一方で、万が一火災が発生した場合、アトリウムは巨大な竪穴空間となって有毒な火災煙を伝播させ易くし、避難を困難にする等の危険が指摘されている。アトリウム建築では、火災安全が建築計画上最も重要な課題であり、火災煙を制御するために自然・機械排煙設備を設置、蓄煙スペースの確保等の手段が講じられている。しかし、アトリウムの火災事例は世界的にみても数件しかなく、こういった安全手段を評価するには種々のシミュレーション手法に頼っているのが現状である。現在一般的に用いられているシミュレーション手法としてゾーンモデルやフィールドモデル等の数値シミュレーションが挙げられる。ところがゾーンモデルは限界を踏まえていれば実務上完成されたレベルにあるとはいえ、安定な煙成層が形成されることを前提にしており、アトリウムが外界と開口を持つ以上当然考慮されるべき建物外気風の影響を、十分には加味できないのが実状である。またフィールドモデルはこのような条件を加味できる点で有望であるが、現時点では計算機能力をはじめ問題点を残しており、研究段階である。

本研究は相似縮小模型を用いた実験的シミュレーションによりアトリウムの安全手法の評価をしようとするものである。実験によるシミュレーション手法は既往の研究^{[1][2][3][4]}で概ねその有効性が報告されているが、本研究では排煙性能に対する外気風の影響を検討し、手法の確立に必要な知見を得ることを目的とする。

外気風が排煙に与える影響が無視できないことは既存建築物を用いた火災実験でも指摘されており、これを具体的に検証した研究は数少ないことから本研究の重要性は高いと言える。

0.2 研究の方法

模型実験によるシミュレーションを行う際には模型実験と実際の火災が物理的に相似になっていることが必要である。そこで第1章では現象を支配すると考えられる方程式

群を無次元化し、火源の発熱量、輻射量、火炎形状、壁面の熱収支などの条件を与える相似則を導出する。

第2章では上部が完全に外気に開放された、中庭のようなポイド空間の模型実験により、外気風影響下の排煙における基本的な性状を確認する。本来、縮小模型実験の現実再現性を評価するには実物大の模型を作って実験を行い、縮小模型実験と比較するのが最良であるが、そのようなことは事実上不可能である。そこで本研究ではスケールの異なる2種類の相似模型で実験を行い、相互の相似性を確認することによって模型実験の妥当性、有効性を示すことにする。

第3章では現実的な形状のアトリウムとしてガレリア状アトリウムを想定し、縮小模型実験を行うことにより、風速、風向、排煙口の面積の他、アトリウム周りの建築が排煙に与える影響についても検討する。

また、Appendix 1として風洞設備の概要と市街地境界層の鉛直風速分布を実現するスクリーンの作成について、Appendix 2として既往の研究^{[1][2]}及び第2章で問題となった模型火源の相似性に関する予備実験の結果を説明する。

第 1 章

相似則についての考察

模型実験により煙流動を予測するためには現実の現象と模型実験における現象が物理的に相似である必要がある。相似則とは、ある現象について種々の物理量が縮尺の変化に対して相似になる条件を示すものである。しかし縮尺を変えつつ全ての物理量を相似にすることはほとんど不可能であるから、その現象に重要な関係を持つ物理量を見極め、これらについての相似条件を導出する。本研究では、アトリウムなどの大規模空間の底部で火災が発生することを想定し、火災により生じる熱気流が空間内に拡散し開口部から排出される現象を熱プルームの対流現象として捉え、また空間内の熱が壁面や天井面を通して外部へ逃げていく現象を半無限壁への熱伝達、熱伝導現象として支配方程式を検討した。図 1.1 に相似則の概念図を示す。

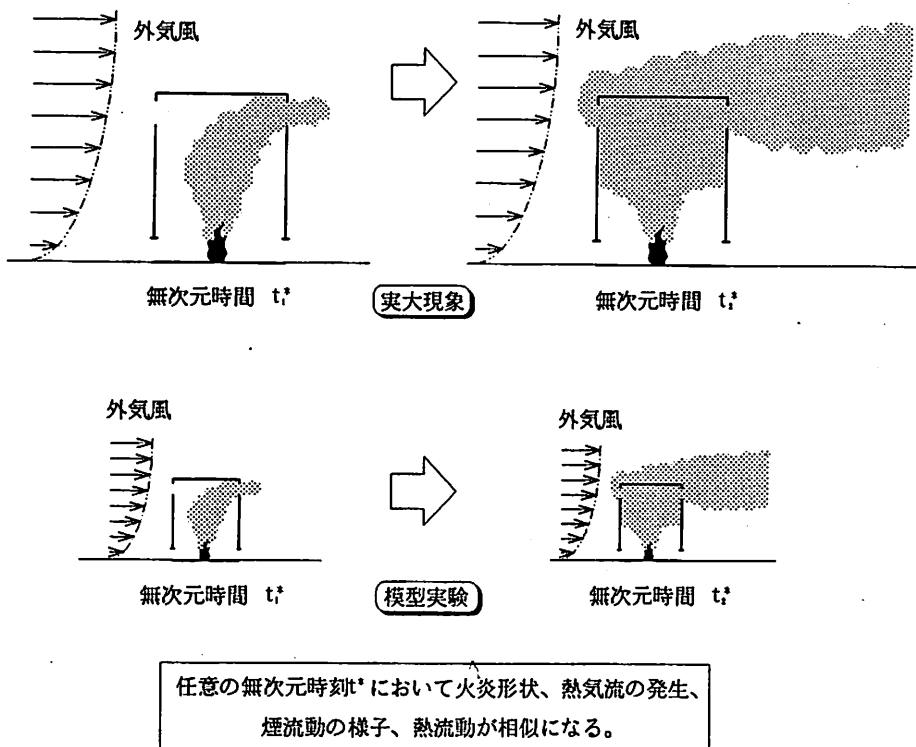


図 1.1: 相似則の概念図

1.1 熱気流に関する相似則

建築空間の内部における火炎周囲の気流についての相似則は過去の研究で導出され、おおむね成立することが確認されているので、本研究では Quintiere, 辻本, 竹之内, らによって示されている方法^{[1][5]}をまとめておく。この熱対流現象は粘性流体の運動量移送, 熱移送, 物質移送の方程式群式(1.1)(連続方程式, 運動方程式, エネルギー方程式, 拡散方程式)で表される。これらの移動現象の支配方程式群から得られる π ナンバー, 及び特定の境界条件より相似則を求める。

本章で扱う数式には以下の規約を用いる。

1. x, y, z の各方向成分を添字 1, 2, 3 で表す。

$$\text{ex) } u_1 = u, \quad u_2 = v, \quad u_3 = w$$

2. 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。

$$\text{ex) } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

•連続方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

•運動方程式

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{3} \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$$

•エネルギー方程式

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i \partial x_i} + q - \theta \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) - p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \mu \Phi$$

•拡散方程式

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u_i \frac{\partial C_A}{\partial x_i} = D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x_i \partial x_i} + R_A$$

•状態方程式

$$P = \rho R T$$

(1.1)

ρ : 密度 u_i : 速度ベクトル p : 圧力
 f_i : 体積力ベクトル (自然対流では浮力 $f_i = g_i(\rho - \rho_0)$)
 g_i : 重力加速度ベクトル μ : 粘性係数
 c_p : 定圧比熱 θ : 温度 λ : 熱伝導率

$$q: \text{発熱量} \quad -\theta \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_p = \beta: \text{熱膨張率}$$

$$\Phi = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right): \text{散逸項} \quad C_A: \text{A種の濃度}$$

$$D_A: \text{A種の拡散係数} \quad R_A: \text{A種の発生}$$

ここで、密度変化は温度変化と濃度変化によってのみ引き起こされると仮定して、浮力項に Bussinesq 近似¹を用いる。浮力項以外で $\rho = \text{const}$ と仮定すれば、 $\beta = (\partial\rho/\partial\theta)_p = 0$ となるのでエネルギー方程式中の熱膨張による項は省略される。

•連続方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

•運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i \beta (\theta - \theta_0) - g_i \beta^* (C_A - C_{A,0}) + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

•エネルギー方程式

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i \partial x_i} + q + \mu \Phi$$

•拡散方程式

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u_i \frac{\partial C_A}{\partial x_i} = D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x_i \partial x_i} + R_A$$

(1.2)

$\nu = \mu/\rho$: 動粘性係数

浮力項においては $-g_i(\rho - \rho_0) = g_i\beta(\theta - \theta_0) + g_i\beta^*(C_A - C_{A,0})$

$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial C_A} \right)_{T,p} = \beta^*$: 膨張率

式(1.2)中の拡散方程式は浮力の項を介して運動方程式と独立でないが、煙流動に対する物質拡散の影響は小さいと考えられるので、拡散方程式及び浮力項に含まれる拡散の影響は無視する。さらに散逸の影響も非常に小さいと考え、エネルギー方程式の散逸項は無視する。

•連続方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

•運動方程式

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i \beta (\theta - \theta_0) + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

•エネルギー方程式

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i \partial x_i} + q$$

(1.3)

次に、各従属変数をアンサンブル平均と変動成分の和(式(1.4))に分け、Reynolds 応力及び変動成分の熱輸送の項に以下のモデル化(式(1.5)(1.6))を行う。

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p = \bar{p} + p', \quad \theta = \bar{\theta} + \theta', \quad C_A = \bar{C}_A + C'_A \quad (1.4)$$

¹温度変化にともなう密度の変化が気流性状に及ぼす影響を浮力についてのみ考慮し、気体そのものは非圧縮であることを仮定する。

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \sigma_{ij} \quad (1.5)$$

ν_t : 渦動粘性係数 $k = (\overline{u_i'^2}/2)$: 乱流エネルギー

$$-\overline{u'_i \theta'} = \alpha_t \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_i} \quad (1.6)$$

$\alpha = \lambda/\rho c_p$: 温度拡散係数 α_t : 渦温度拡散係数

式全体のアンサンブル平均をとり，上記モデルを方程式群に代入する。また，発達した乱流場では，壁面近くの極薄い境界層部分を除いて $\nu \ll \nu_t$, $\alpha \ll \alpha_t$ であるから ν , α に関する項を省略する。

$$\left. \begin{aligned} &\bullet \text{連続方程式} \\ &\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \\ &\bullet \text{運動方程式} \\ &\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + g_i \beta (\overline{\theta} - \theta_0) + \nu_t \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} \\ &\bullet \text{エネルギー方程式} \\ &\rho c_p \left(\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_i} \right) = \rho c_p \alpha_t \frac{\partial^2 \overline{\theta}}{\partial x_i \partial x_i} + q \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

次に以下の6つの代表値 $L_0, u_0, Q_0, t_0, \Delta\theta_0, \Delta p_0$ により上式を無次元化する。

$$L^* = L/L_0 \quad u_i^* = \overline{u_i}/u_0 \quad Q^* = qL_0^3/Q_0 \quad t^* = t/t_0$$

$$\Delta\theta^* = \overline{\Delta\theta}/\Delta\theta_0 \quad \overline{\Delta\theta} = \overline{\theta} - \theta_a \quad \Delta p^* = \overline{\Delta p}/\Delta p_0 \quad \overline{\Delta p} = \overline{p} - p_a$$

θ_a : 雰囲気の温度 p_a : 雰囲気の圧力

$$\left. \begin{aligned} &\bullet \text{連続方程式} \\ &\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \\ &\bullet \text{運動方程式} \\ &\frac{L_0}{t_0 u_0} \frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2} \frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + g_i \beta \frac{\Delta\theta_0 L_0}{u_0^2} \Delta\theta^* + \frac{\nu_t}{L_0 u_0} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*} \\ &\bullet \text{エネルギー方程式} \\ &\frac{L_0}{t_0 u_0} \frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} + u_i^* \frac{\partial \theta^*}{\partial x_i^*} = \frac{\alpha_t}{L_0 u_0} \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x_i^* \partial x_i^*} + \frac{Q_0}{\rho c_p u_0 \Delta\theta_0 L_0^2} Q^* \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

相似の条件は上記の無次元化された方程式群が同じ解を持つことであり、そのためには式(1.8)の係数が等しくなることが必要である。

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{L_0}{t_0 u_0} \left(= \frac{1}{St} \right), & \pi_2 &= \frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2} \\ \pi_3 &= g_i \beta \frac{\Delta \theta_0 L_0}{u_0^2} \left(= \frac{Gr}{Re^2} = Ar \right), & \pi_4 &= \frac{\nu_t}{L_0 u_0} \left(= \frac{1}{Re} \right) \\ \pi_5 &= \frac{\alpha_t}{L_0 u_0} \left(= \frac{1}{Pr \cdot Re} = \frac{1}{Pe} \right), & \pi_6 &= \frac{Q_0}{\rho c_p u_0 \Delta \theta_0 L_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

St : ストローハル数 Gr : グラスホフ数 Re : レイノルズ数
 Ar : アルキメデス数 Pr : プラントル数 Pe : ペクレ数

土屋らの研究^[6]において流れが乱流であれば、 Re , Pe は一定であると判断されるため、結局 $\pi_1 \sim \pi_3$, π_6 の4つの π ナンバーが保存されることが条件となる。6つの代表値に関して4つの関係式があるので、2つの代表値で他の4つの代表値を表現することができる。火災の縮小模型実験では、実験を計画するとき最初に縮尺比と火源の種類を決定することが一般的である。一般に火源を決めると燃焼の機構が変化しない限り、火炎温度はほぼ変化せず、雰囲気温度との差が温度の代表値として定まる。したがって縮尺比と温度差の代表値によって他の4つの代表値を表現することが模型実験上便利である。

ここで実大、模型に関するものをそれぞれ下添字 r, m で表すと、 $\pi_1 \sim \pi_4$ を保存する条件から以下に示す相似則が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{Q_m}{Q_r} \right] &= \left[\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_r} \right]^{3/2} \left[\frac{L_m}{L_r} \right]^{5/2}, & \left[\frac{t_m}{t_r} \right] &= \left[\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_r} \right]^{-1/2} \left[\frac{L_m}{L_r} \right]^{1/2} \\ \left[\frac{u_m}{u_r} \right] &= \left[\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_r} \right]^{1/2} \left[\frac{L_m}{L_r} \right]^{1/2}, & \left[\frac{\Delta p_m}{\Delta p_r} \right] &= \left[\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_r} \right] \left[\frac{L_m}{L_r} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

実大と模型に関する代表値 f_r, f_m の比 f_r/f_m を $n(L)$ で表すと、式(1.10)は以下のように書き表せる。

$$\left. \begin{aligned} n(Q) &= n(\Delta \theta)^{3/2} n(L)^{5/2}, & n(t) &= n(\Delta \theta)^{-1/2} n(L)^{1/2} \\ n(u) &= n(\Delta \theta)^{1/2} n(L)^{1/2}, & n(\Delta p) &= n(\Delta \theta) n(L) \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

式(1.11)の第1式は実験を行う際の発熱量を示している。式(1.11)の第2式は現象の時間変化の関係を示している。式(1.11)の第3式は気流速度に関する関係を示しており、実験における設定風速の条件として用いる必要がある。式(1.11)の第4式は圧力に関する関係式である。なお、入力としての風速以外の気流速度、内部圧力の関係は模型の中で自然に満たされるものと考ええる。

特に実大実験と模型実験とで同種の火源を用いた場合など、火炎温度が等しく雰囲気温度と火炎温度の温度差 $\Delta \theta$ が等しい場合には $n(\Delta \theta) = 1$ となり、式(1.11)は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} n(Q) &= n(L)^{5/2}, & n(t) &= n(L)^{1/2} \\ n(u) &= n(L)^{1/2}, & n(\Delta p) &= n(L) \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

既往の研究^{[1][2][3][4]}で、この相似則を用いて火災時の熱気流性状を縮小模型実験によって再現できることを確認しているため、本研究においてもこの相似則を用いる。

1.2 プルームの生起条件

大空間の底部で火災が生じた場合、煙は火災から生じた逆円錐状のプルームに乗って天井面に到達し、その後天井面に沿って水平に層を成して広がり、時間とともにその厚さが増すという性状を示す。模型実験を行う際には模型内でもこの性状を示す必要がある。このような性状を引き起こす条件として、文献^[7]では円柱形状空間の中央底部に加熱面をおいて実験を行い、実験での空間の幾何学的条件のもとで閉空間でのプルームの生起条件を次式のように示している。

$$Gr > 1.2 \times 10^9 \quad (1.13)$$

この条件を代表長さとして模型の高さ $L(\text{cm})$ を用い、火炎温度と雰囲気温度の温度差 $\Delta\theta_f$ に対して求めると図 1.2 のようになる。一般に炎の温度は 1000°C 前後であることから $L < 20(\text{cm})$ ではこの条件を満たさない。

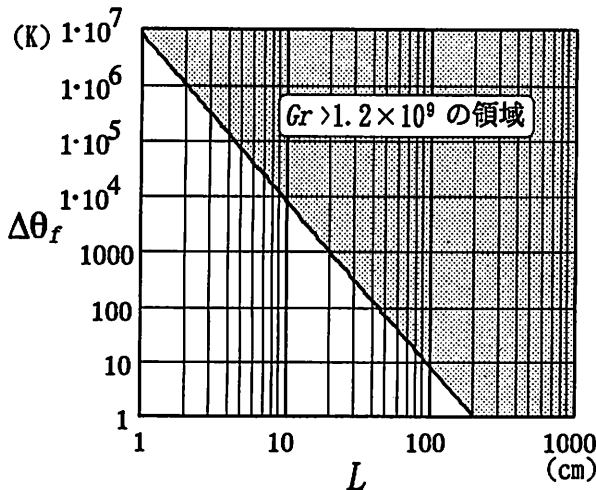


図 1.2: 長さ, 温度差と Gr 数

1.3 火炎形状の相似

火炎の輻射を考える際、厳密には炎の燃焼形態や、煙の透過率、ガス輻射などを考慮する必要があり、非常に複雑な議論が必要となる。しかしそのような議論は本論の目的からは外れてしまうので、本研究では火源における輻射の影響は詳細には考慮せず、輻射は同じ温度の炎の表面から同じ強度で照射されると考えて、形態係数のみを考えることにした。形態係数は火炎形状を相似にすることで相似性を満たされるものとした。火炎(乱流拡散炎)の形状については既往の研究^{[8][9]}から火炎高さと火源寸法の比が発熱量と火源寸法の関数になることが知られており、式(1.14)のように表される。

$$\frac{L_f}{D} = f(Q_f^*) \quad Q_f^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 g^{1/2} D^{5/2}} \quad (1.14)$$

L_f : 炎の高さ (Flame height at 50% intermittency)

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 T_0 : 雰囲気空気の温度

仮に火炎温度が等しい場合の相似則, 式(1.12)の第1式が満たされるときには

$$n(Q) = n(L)^{5/2}$$

従って,

$$n(Q_f^*) = \frac{n(L)^{5/2}}{n(D)^{5/2}}$$

よって, 以下の式(1.15)が成り立つとき $n(Q_f^*) = 1$ となり実大と模型の Q_f^* が等しくなる。 Q_f^* が等しければ, 火炎の縦横比が等しくなる。

$$n(D) = n(L) \quad (1.15)$$

いいかえれば式(1.12)の第1式のような発熱量で燃焼させた場合, 縮尺比に火源の直径の比を合わせれば, 火炎の形も自然に相似になる。

1.4 壁面・天井面における損失熱量の相似

火源により発生した熱は対流熱伝達により気流にのるものと, 輻射熱伝達により直接壁面・天井面に到達するものに大別される。このうち輻射によるものは前節で述べたように火炎の形状が同じであれば壁面からみた形態係数はスケールに関わらず等しい。また一般的な材料はほぼ灰色体とみなせることから吸収率も同じと考え, 壁体表面への入射熱量は自然に相似になると考える。熱気流から壁面(天井面)への熱損失は熱気流と壁面の表面熱伝達及び壁対内部の熱伝導によるものである。この表面熱伝達については壁対表面における流速や壁面形状に関する経験式があげられているが, そのメカニズムは不明確であり, また本研究で扱うような非定常現象では解析が非常に困難である。そこで本研究では表面熱伝達を無視し, 熱気流温度が壁面表面温度に一致すると仮定して壁体への熱吸収のみを考慮し, はじめ一様な温度 θ_0 にあった半無限壁体の表面温度が $\Delta\theta$ だけ上昇した場合(図1.3)の熱伝導現象として相似則を導いた。

このときの壁体の内部温度 $\theta(x, t)$ の解は文献^[10]から

$$\theta(x, t) = \theta_0 + \Delta\theta \operatorname{erfc} \frac{x}{2(kt)^{1/2}} = \theta_0 + \Delta\theta \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2(kt)^{1/2}}} e^{-\xi^2} d\xi \right) \quad (1.16)$$

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

壁体表面からの熱流 \dot{q} はフーリエの法則より

$$\dot{q} = -\lambda_w \left(\frac{d\theta}{dx} \right) \Big|_{x=0} \quad (1.17)$$

(1.16) 式を (1.17) 式に代入すると

$$\dot{q} = -\lambda_w \left(-\frac{\theta}{(\pi kt)^{1/2}} e^{-\frac{x^2}{4kt}} \Big|_{x=0} \right) = \frac{\lambda_w \Delta \theta}{(\pi kt)^{1/2}} = \Delta \theta \left(\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t} \right)^{1/2} \quad (1.18)$$

次に辺の長さが dx , dy , dz の微小立方体を考える (図 1.4)。ここで $x=0$ (y - z 平面) は

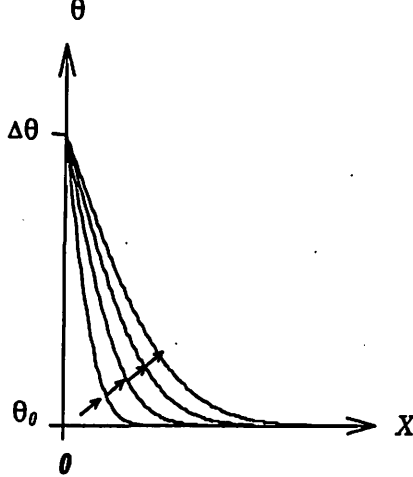


図 1.3: 半無限壁体の温度上昇

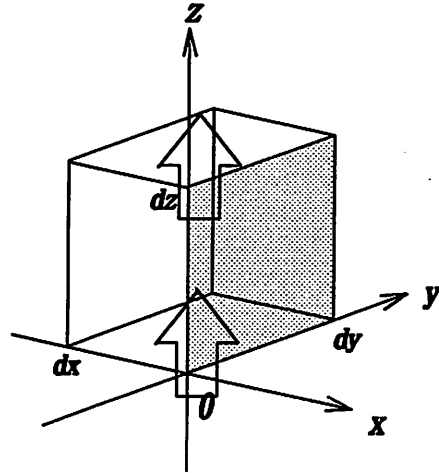


図 1.4: 壁面付近の微小立方体

壁体表面を, $x \geq 0$ の領域は壁体内部を表すものとし, 気流は z 方向に dz/dt の速さで流れているものとする, 微小時間 dt の間に $Z=0$ の面に入る熱量 dQ_{in} と $z=dz$ の面から出ていく熱量 dQ_{out} の差 dQ は

$$dQ = dQ_{in} - dQ_{out} = -\rho c_p \left(\frac{d\theta}{dz} \right) dz \left(\frac{dz}{dt} \right) dx dy dt \quad (1.19)$$

この熱量が壁面に入射したものと考え, 方程式をたてると

$$-\rho c_p \left(\frac{d\theta}{dz} \right) dz \left(\frac{dz}{dt} \right) dx dy dt = \Delta \theta \left(\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t} \right)^{1/2} dy dz dt \quad (1.20)$$

上式を代表値 L_0, t_0, θ_0 で無次元化し整理すると

$$-\rho c_p d\theta^* dx^* L_0 = \Delta \theta^* \left(\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t^*} \right)^{1/2} dt^* t_0^{1/2} \quad (1.21)$$

雰囲気空気の密度 ρ と比熱 c_p はスケールに依存しないのでこの式が模型と実大双方で成り立つためには次式をみたせば良いことになる。

$$n(L) = n(\lambda_w \rho_w c_w)^{1/2} n(t)^{1/2} \quad (1.22)$$

従って (1.12) 式の第 2 式から

$$n(\lambda_w \rho_w c_w) = n(L)^{3/2} \quad (1.23)$$

1.5 まとめ

以上により以下のような相似則が導かれた。

表 1.1: 各物理量の相似則

物理量 f	$n(f)$	= 模型の物理量 f_m / 実大の物理量 f_r	
代表長さ	$n(L)$	$= L_m/L_r$	
温度変化	$n(\Delta\theta)$	$= \Delta\theta_m/\Delta\theta_r$	$= 1$
時間	$n(t)$	$= t_m/t_r$	$= n(L)^{1/2}$
発熱量	$n(Q_G)$	$= Q_{Gm}/Q_{Gr}$	$= n(L)^{5/2}$
気流速度	$n(u)$	$= u_m/u_r$	$= n(L)^{1/2}$
火源寸法	$n(D)$	$= D_m/D_r$	$= n(L)$
壁体の熱特性	$n(\lambda_w\rho_w c_w)$	$= (\lambda_w\rho_w c_w)_m/(\lambda_w\rho_w c_w)_r$	$= n(L)^{3/2}$

第 2 章

ボイド空間の煙流動に外気風が及ぼす影響

2.1 実験の概要

本章では外気風影響下における排煙の最も基本的な性状を把握するために天井部分が完全に外気に解放されたボイド空間の模型を用いて実験を行った。実験条件中の外気風に関しては、前田建設工業（株）技術研究所の風洞施設を用いた。この風洞は比較的大きな断面を持つ測定部を有するが、十分な助走距離が無いため Appendix 1 で示すスクリーンを用いて市街地境界層の鉛直風速分布を実現している。また異なったスケールでの模型実験を行うことにより、模型実験の現象再現性の確認も併せて行う。実験では熱気流（煙）の温度の測定と可視化した熱気流の流動性状を観察することにより、外気風の影響を考察する。

2.2 実験条件

2.2.1 模型

実験に用いた模型は、屋根面が開放された直方体の中庭のような空間を想定したボイド空間で、実大のスケールは $W27\text{m} \times D27\text{m} \times H15\text{m}$ とし、模型のスケールをその $1/20$ 、 $1/30$ とする。なお、模型底部には火源となるバーナーの設置及び熱電対の配線等のスペース確保のため $H100\text{mm}$ ほど底上げしてあり、模型底部と風洞の底部のレベルは一致していない。

本実験では開口面積が非常に大きく、熱気流のほとんどが外部に流出することが予想されることから、気流から壁面への熱損失は無視できるものと考え、厚さ 10mm の合板で作成した。また模型は可視化した際の視認性を考えて艶消しの黒色に塗装し、正面となる 1 壁面は可視化観察が可能なように透明アクリルボードで作成した。

この模型は、関根らによって行われた既往の煙流動模型実験^[11] で用いられたものを流用した。

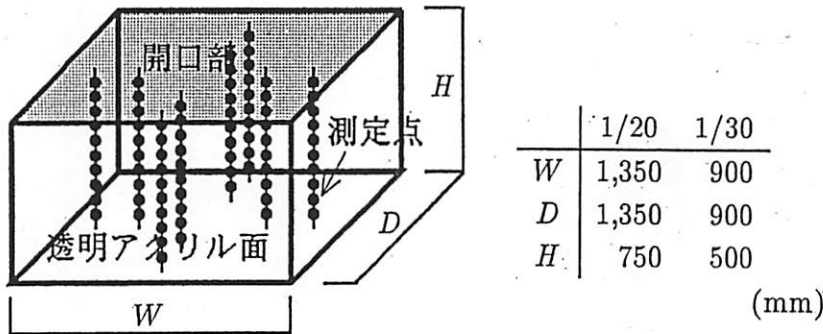


図 2.1: 模型図

2.2.2 模型火源

実験用の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た。火源の燃料にはプロパンガスを用い、プロパンガスの低位発熱量 22.35(kcal/Nl) から、マスフローコントローラー（大倉電気製，MF5000 シリーズ）で流量を制御することにより発熱量の設定を行った。また、マスフローコントローラーは流量ゼロの状態からは応答性が悪いため、三方弁を用いてあらかじめ設定した流量を他の場所（ブンゼンバーナー）に流しておき、実験開始のタイミングで火源バーナーに切り替えて流す工夫がされている。また実大の火源を直径 1.5m の円形火源で、発熱量 2.5MW（一定）と設定した。図 2.2 に模型火源システムを示す。

2.2.3 風洞設備及び模型の設置

実験は前田建設工業株式会社技術研究所の風洞実験棟第二測定部で行った。本研究ではスクリーンを用いて市街地境界層風を模擬した 1/4 乗べき乗則の風速分布を実現している。（Appendix 1 参照）

既往の研究^[11]ではこのスクリーンを用いずに実験を行っており、その効果についても後で比較する。

実験模型は図 2.3 に示す位置に設置した。

2.2.4 風速

設定風速は実大の平均風速で 0, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0(m/s) とした。風速の測定には熱線風速計を用いた¹。模型の風上側壁面上端位置での風速を基準風速として、模型を風洞の中に設置する前に設定風速に合わせた。その際、風洞天井面近くに設置したピトー管による風速、風洞送風ファンの回転数の記録及び再現性の確認を行い、模型を設置した後は、ファンの回転数で風速を代表させるようにした。また風速設定の後、トラバース装置を用いて風速の鉛直分布を測定した。

¹本章での風速測定方法についての詳細は Appendix 1 参照

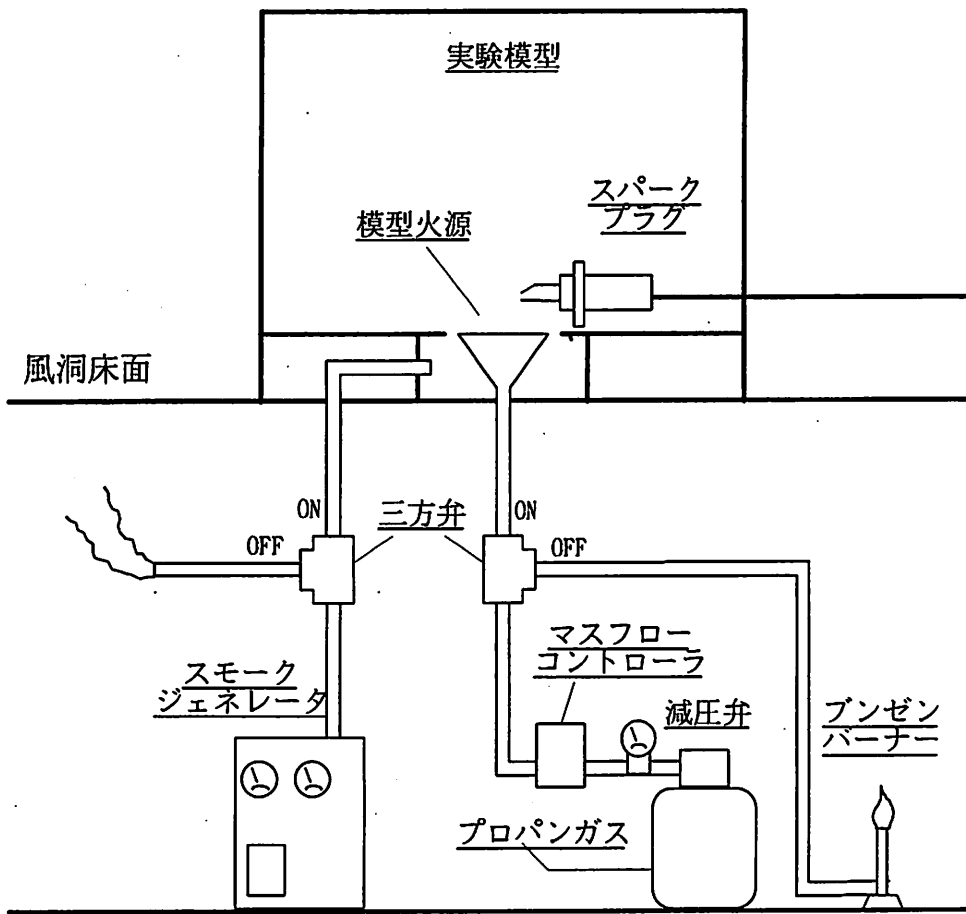


図 2.2: 模型火源システム図

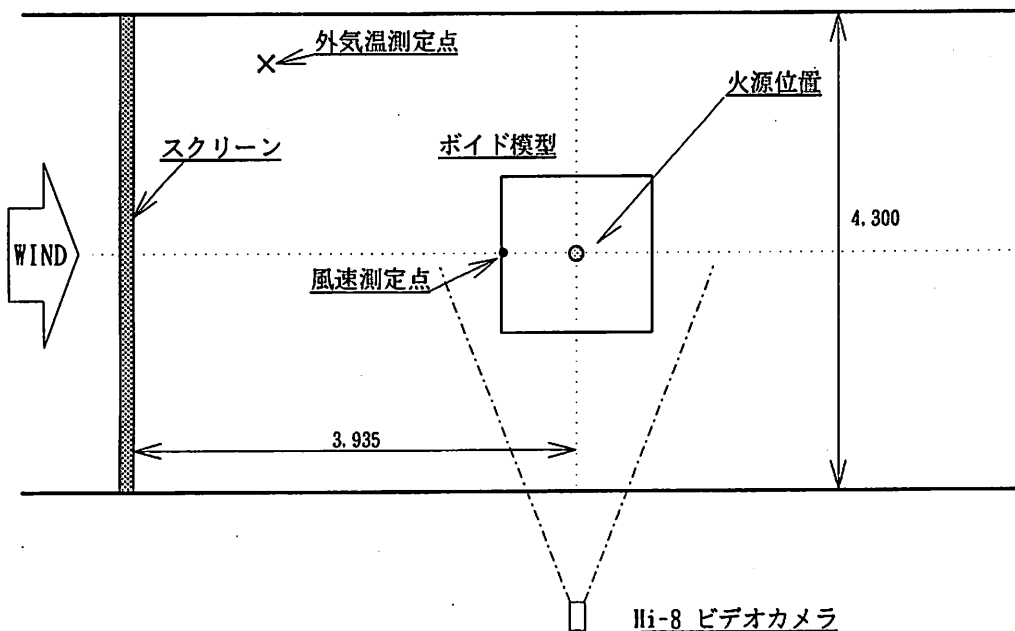


図 2.3: 模型設置位置

2.2.5 温度測定

模型内気流温度（80点）と外部温度（1点）を測定した。温度測定にはT-Type(CC)熱電対（ $\phi 0.15\text{mm}$ ）を用い、データロガー（HR2500 横河電気）をパソコンで制御することにより多点同時測定を行った。データは実大換算で約30秒毎に30分間測定した。図2.4、図2.5に温度測定点を示す。また、熱電対にはアルミホイル製のラップ状輻射よけを取り付け、熱電対が裸の場合との比較を行った。

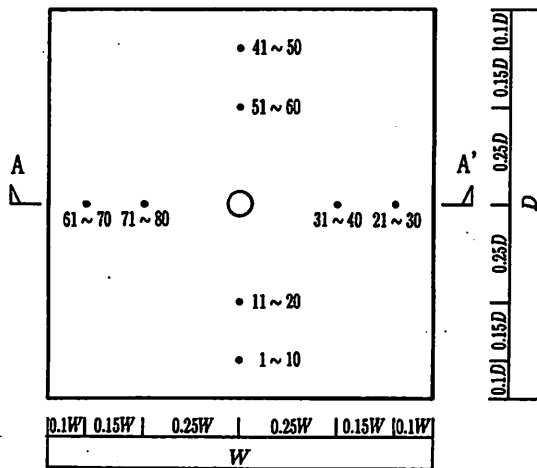


図 2.4: 温度測定点平面図

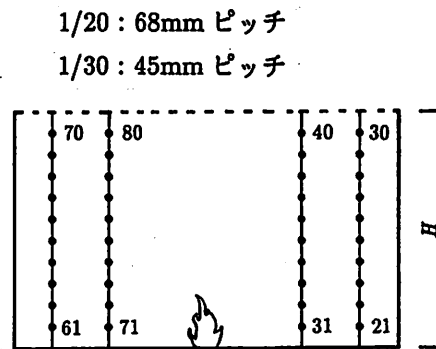


図 2.5: 温度測定点立面図

2.2.6 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、アルゴンイオンレーザー発生装置（NEC GLG3000）で空間内鉛直断面にレーザーシートを照射して熱気流を可視化した。また、可視化した様子をビデオ（SONY VIDEO Hi8）で記録する。トレーサーが熱気流に与える影響を考慮し、分析にはトレーサー無しの実験データを用いた。

2.2.7 まとめ

実験条件を表 2.1に示す。

表 2.1: 実験条件

実験条件 (実大換算値)	1/20 模型	1/30 模型
風速 (m/s) (0,5,7.5,10,15)	(m/s) 0,1.1,1.7,2.2,3.4	(m/s) 0,0.9,1.4,1.8,2.7
発熱量 (2.5 MW)	1.4 kW	0.51 kW
火源直径 (1.5 m)	75 mm	50 mm
計測時間	6 秒毎 6 分間	5 秒毎 5 分間
風速設定基準高さ	850 mm	600 mm
輻射よけ	有り, 無し	有り, 無し
トレーサー	有り, 無し	有り, 無し

2.3 実験結果及び考察

実験結果の検討は気流温度データと目視観察、及びビデオ映像を基に行った。気流温度データについては予め実験開始前に測定した模型内温度（ほぼ一様）を基準として、実験開始後の各測定データとの温度差を計算した。データはA-A'断面（図2.4）での温度コンター図²及び平均気流温度の時間変化で示した。温度コンター図の等温線の初期値は2(K)で間隔は2(K)である。ただしこの温度コンター図は測定点での温度を基準として等温線を作図したものであり、火源近傍の高温域（プルーム域）が現れていないなど実際の気流温度分布とは異なっている。平均気流温度は、特に明記の無いものは全測定点中顕著に温度上昇のみられた火源風上側の測定点20点（測定点番号61～80番（図2.4））の温度を平均化している。

2.3.1 風速による煙流動性状の概観

本章で検討したボイド空間では天井面が完全に外気に開放されており、その開口は火源によってできるプルームのスケールに対して十分大きいので、無風時ではプルームがまっすぐに立ち上り、煙は完全に排出された。（図2.6）そのため、測定点ではほとんど温度の上昇が見られなかった。

有風時では風は開口の風下側の壁面を伝わるようにして模型内に流入し、ボイド内に断面方向の旋回流ができるため火炎は風上側に傾き、火源から発生した煙は風上側から排出される（図2.7）。風速が大きくなると流入風量が多くなり、プルームの軸は床面に近づくので、火炎の傾きも大きくなり、風上側床面の火源近傍では煙濃度、気流温度ともに高くなる（図2.8）。しかし煙は上部開口からどんどん排出され、新鮮空気が供給されるので、火源近傍の風上側以外の大部分の場所では、煙濃度は低い。

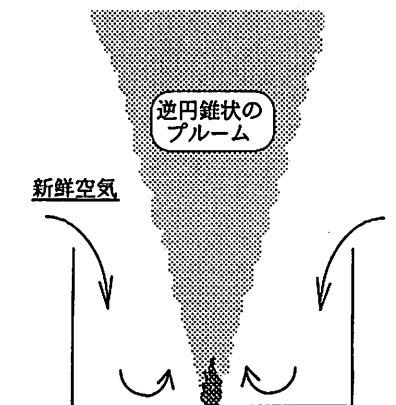


図 2.6: 無風時の煙流動

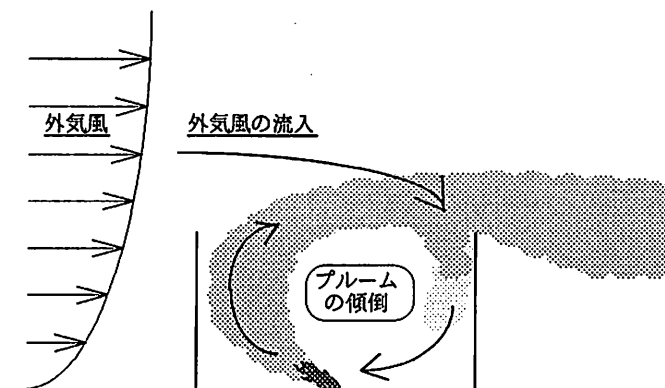


図 2.7: 有風時の煙流動

²本実験における熱気流は2次元的な流動性状を示したため、A-A'断面以外の温度測定点では全ての実験ケースで2(K)以上の温度上昇はなく、検討に使用できるデータは得られなかったので、掲載を省略する。

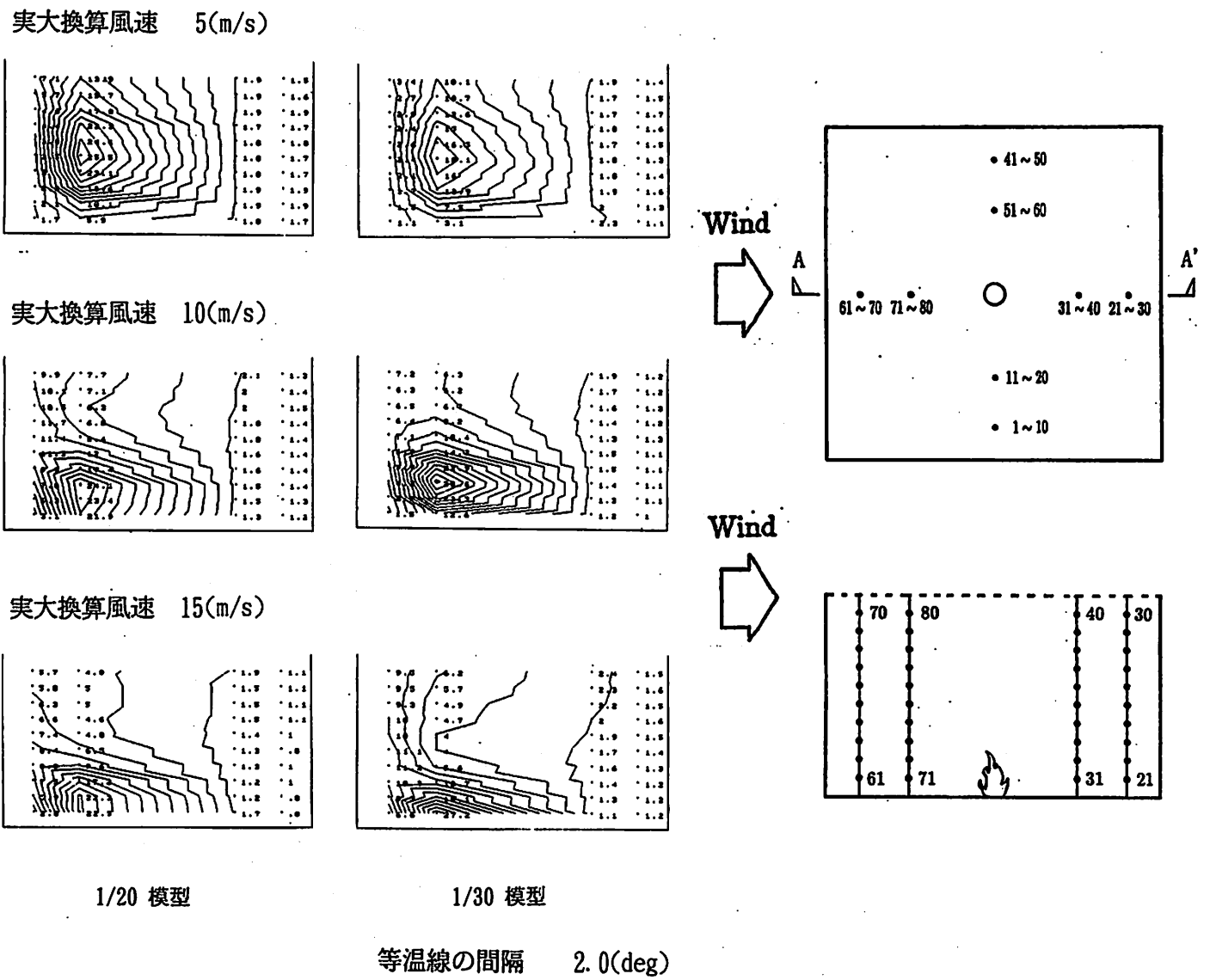


図 2.8: 各風速の温度分布 (実大換算 5 分後)

2.3.2 スケール効果の検討

1/20, 1/30 どちらのスケールにおいてもその煙流動性状は定性的には概ね相似であることが確認された。また、温度の分布形状（図 2.9）及び平均温度の時間変化（図 2.10）双方とも傾向的には非常に相関が高い。しかし厳密に言えば 1/20 模型の方が 1/30 模型より温度が若干高くなっている。温度の差が表れた原因については、

- (1) プロパンガスが完全燃焼しておらず、燃焼率がスケールにより異なっている可能性がある。
- (2) 火源の発熱量の内、対流成分と輻射成分の分配比率がスケールによって変化している可能性がある。
- (3) 火源の火炎がスケール（バーナーの径）によって相似でない形状になっており、幾何学的境界条件を満たしていない。

などが考えられる。上記については Appendix 2 で実験を行い、考察する。

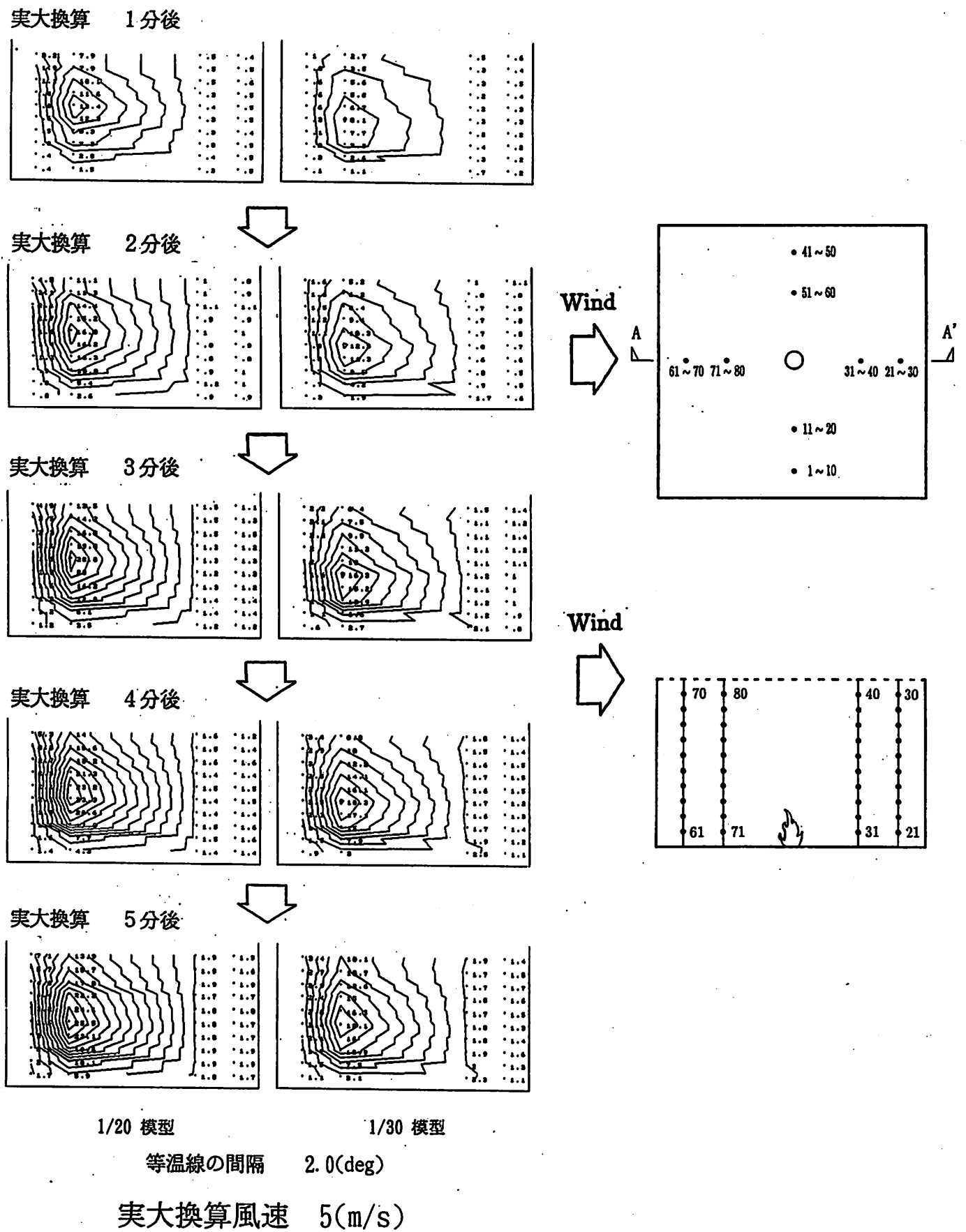


図 2.9: 温度分布図 (スケール比較)

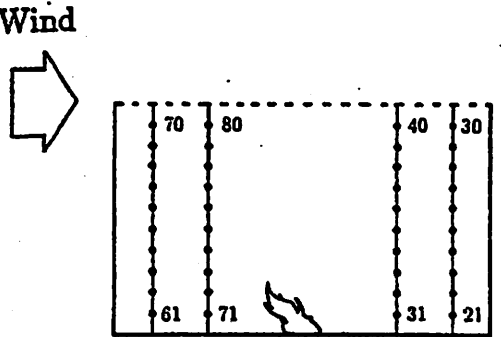
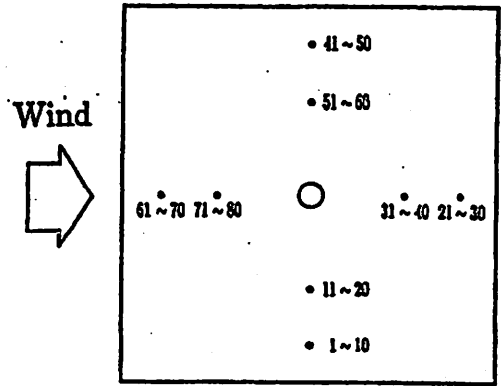
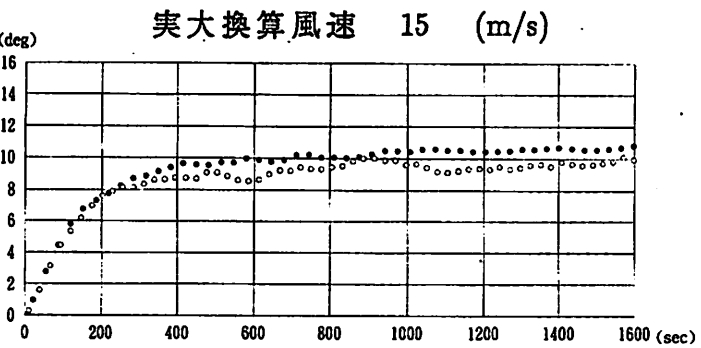
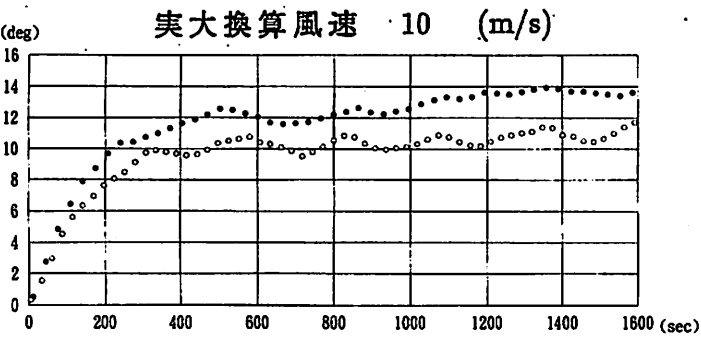
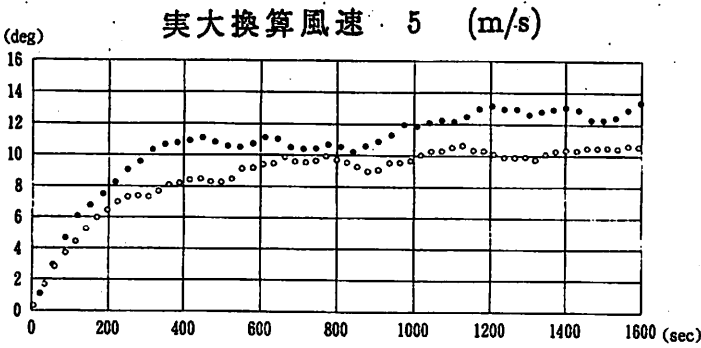
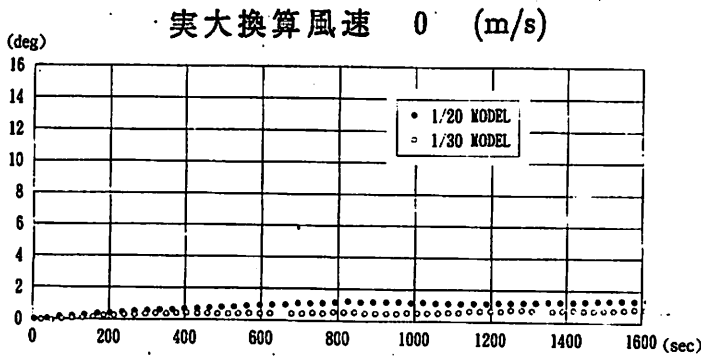


図 2.10: 平均温度時間変化 (スケール比較)

2.3.3 境界層の相似性を考慮した効果

既往の研究^[1]ではスクリーンを用いず、風洞の初期状態の風³の条件で実験を行っている。この実験結果と本研究での実験結果を比較すると（図 2.11, 図 2.12），本実験の結果の方がかなり指示温度が高く、温度分布の形状も異なる（高温になる領域がかなり下方に位置している）。また、模型のスケールの違いに対しても本実験の結果の方がより相似性が高い。このように温度データ（あくまで測定点における）に差が出た原因として、べき乗分布を持つ風の影響下では火源によるプルーム領域が常に安定して温度測定点に及んでいたのに対し、一様分布ではプルーム領域が安定せず、後に述べる熱電対の輻射よけによる応答遅れの周期よりプルームの変動周期が短いことによって温度が上がらなかったと予想される。（図 2.13, 図 2.14），このことから境界層の相似性を考慮することは煙流動性状を正確に把握するために非常に重要であることが明らかとなった。

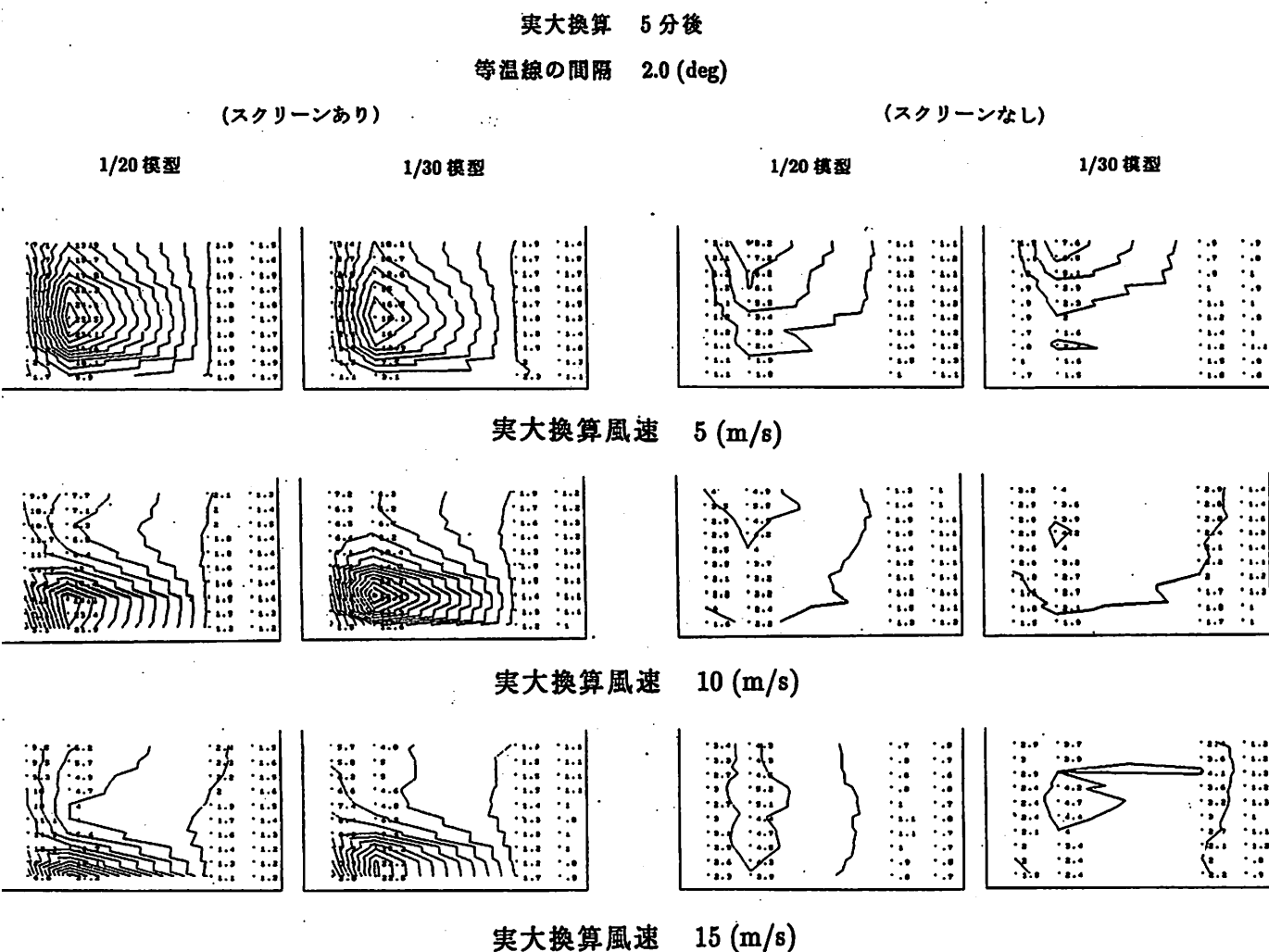


図 2.11: 温度分布図の比較（スクリーンの有無）

³平均風速の鉛直分布がべき乗則になっておらず、模型のスケールによって鉛直分布形状が相似になっていない。また乱れは風洞壁面付近を除いて非常に小さい。詳しくは Appendix 1 参照。

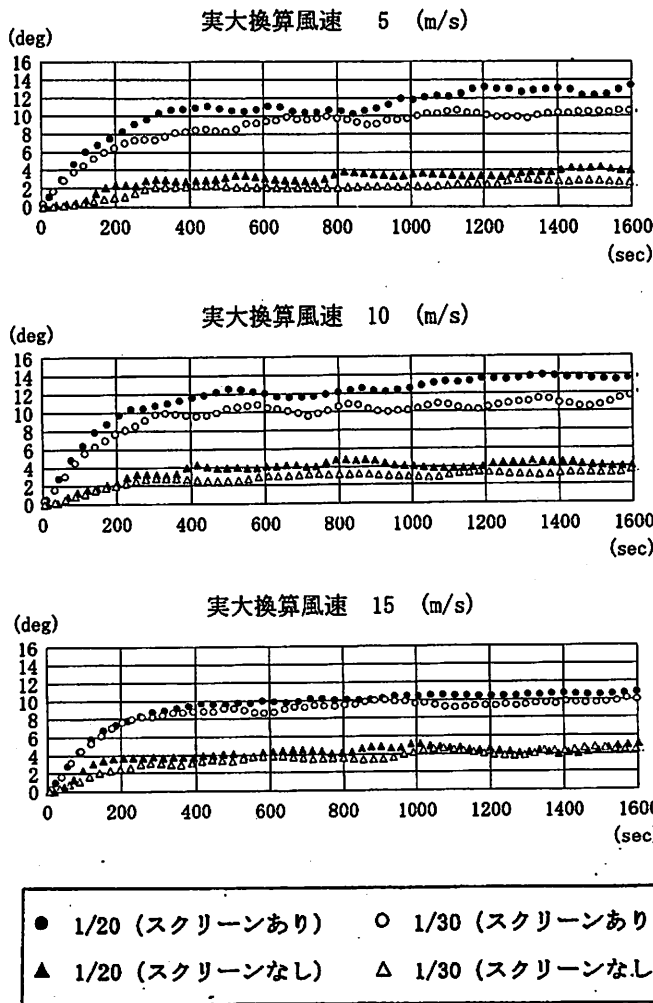


図 2.12: 平均温度の時間変化 (スクリーンの有無)

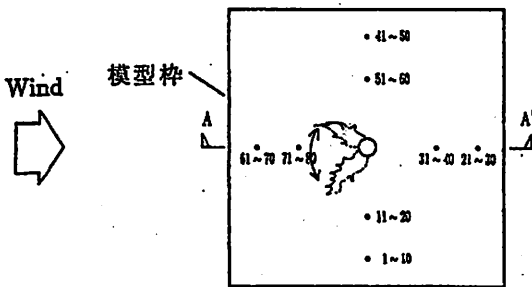


図 2.13: 境界層風での火炎性状

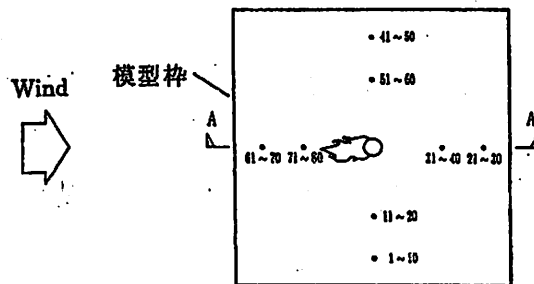


図 2.14: 一様風での火炎性状

2.3.4 トレーサーの影響

本章で扱っている温度データはトレーサーを注入しなかった実験ケースであり、可視化観察は別実験で行っている。しかし、可視化観察した実験においても温度データをとっているが、その測定結果とトレーサーを注入しない実験での測定結果を比較すると、温度分布(図 2.15)、平均温度の時間変化(図 2.16)双方においてほとんど有意な差はみられず、微小な誤差は再現性の誤差に含まれる範囲である。このことから熱気流に対するトレーサーの影響は無視できると判断する。

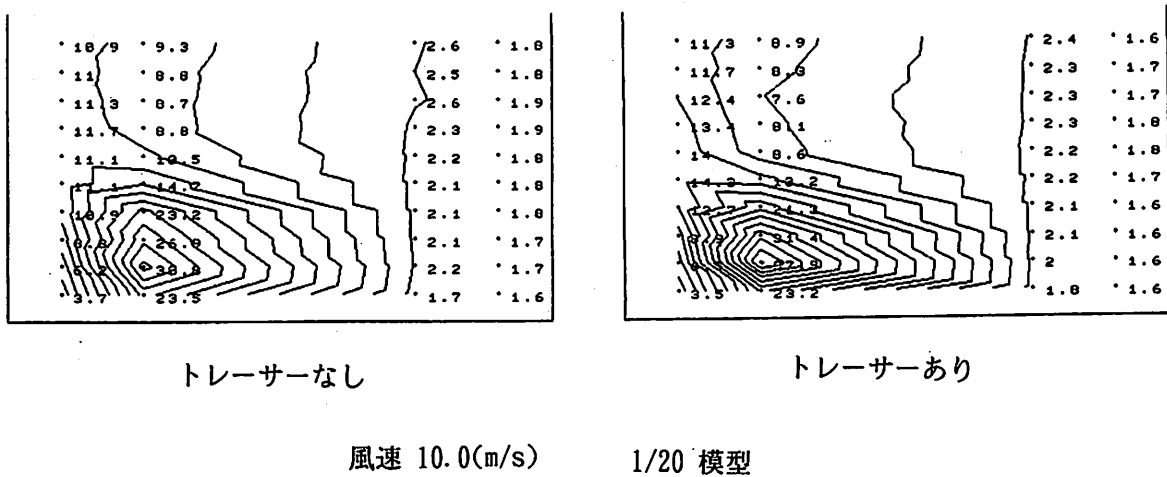


図 2.15: 温度分布図の比較 (トレーサーの影響)

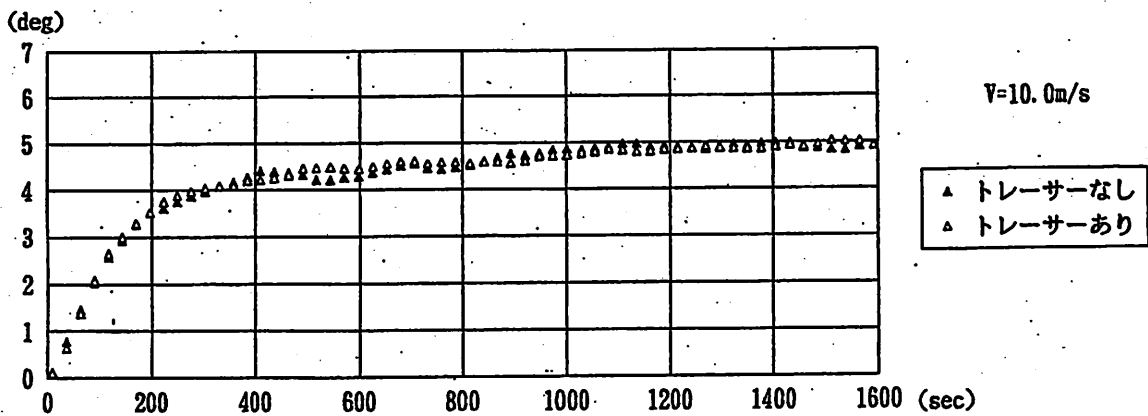


図 2.16: 平均温度の時間変化 (トレーサーの影響)

2.3.5 輻射よけの効果

1/30 模型, 測定点番号 61,71 番の温度上昇の時間変化 (図 2.17) に着目し, その効果について考察する。まず, 無風状態 (風速 0m/s) では火源に近い 71 番で, 輻射よけの無しの裸熱電対は輻射よけ付きの熱電対に比べて指示温度が高い。これに対して, 火源から遠い 61 番ではその差がほとんど見られない。無風状態では, これらの測定点に火源によるプルームの領域が直接及ぶことは無いことから, 輻射よけの有無による指示温度の違いはまさに受輻射量の違いによると考えられ, 火炎に対する形態係数の大きい 71 番でその差が大きく出ていることが説明できる。

次に 7.5m/s の状態では, 循環流により火炎及びプルームは風上側に傾き, いずれの計測点においても熱気流の影響を受ける。そのため, 全体として熱容量が小さい輻射よけ無しの熱電対では, 着火直後の立ち上がり及び温度変動に対して敏感に対応するのに対し, 輻射よけ付きの熱電対では応答性が悪く, 変動周期の短い温度変化は平均化される。また, 火炎が傾いて測定点に近くなるため, 71 番では無風時より測定点からみた炎の形態係数はかなり大きくなり, 輻射よけの有無による温度差が大きくなる。この時, 71 番より形態係数の小さい 61 番では温度差がほとんど無いことから輻射よけの効果は有ると認められ, 61 番では輻射熱伝達より対流熱伝達が支配的であると考えられる。このような傾向は 1/20 模型についても同様である。しかし, 一部例外も見られ, 全て上記のような現象であるとは断定できない。輻射の影響度の把握と, このような輻射よけの有効性の検討を含めて, 温度測定の方法については今後の課題である。

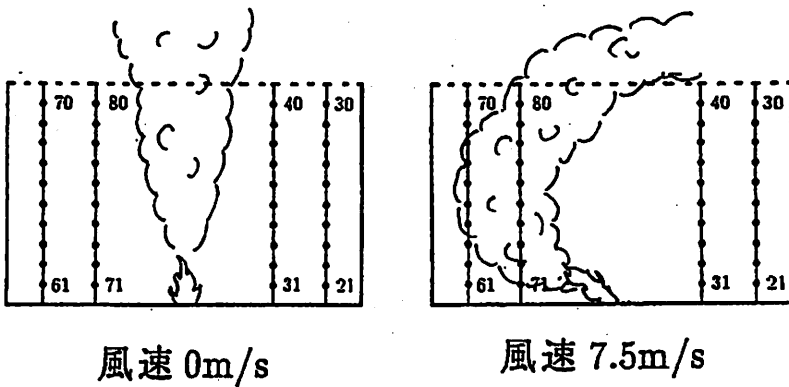
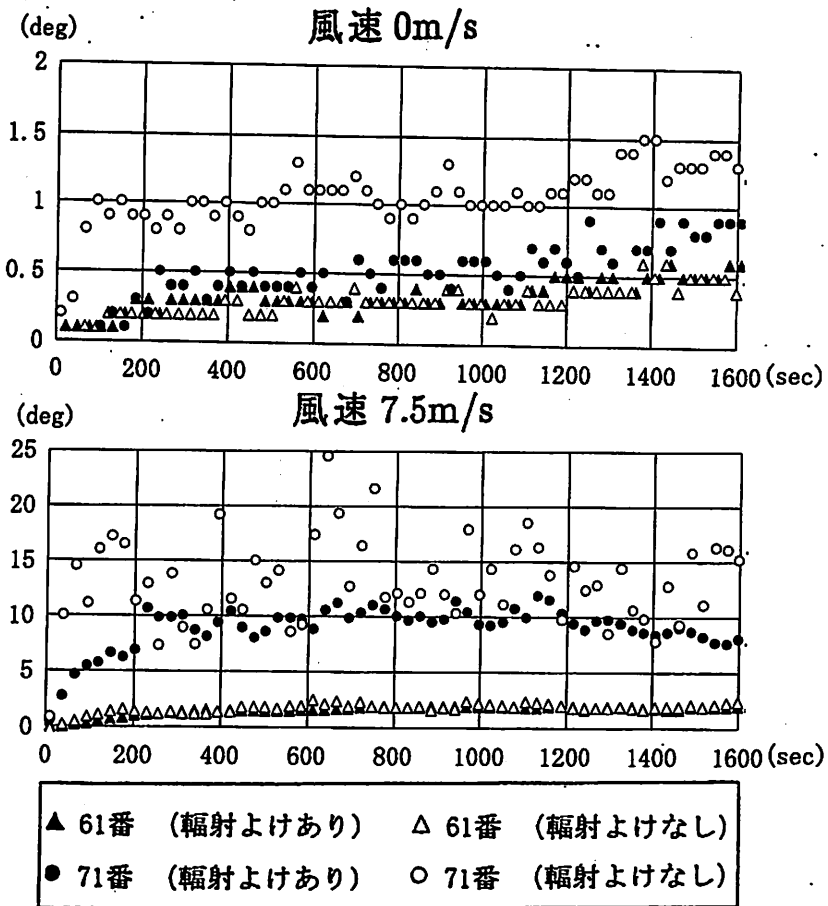


図 2.17: 代表点温度の時間変化 (1/30 模型)

2.3.6 まとめ

温度分布、火炎の形状等から 1/20, 1/30 模型の間には、ほぼ相似則が成立している
と確認できた。また、既往の実験結果^[11]との比較から構造物の風洞模型実験では常識で
ある境界層の相似性への考慮が、火災の模型実験においても非常に重要であり、必須条
件となり得ることを示した。

第 3 章

アトリウムの煙流動に外気風が及ぼす影響

3.1 実験の概要

アトリウムの排煙計画ではその気積の大きさから煙層の形成と室内気流の成層化を期待し、内外の圧力差を利用した自然排煙を適用する場合が多い。しかし外気風影響下では、条件によっては有効な煙層が形成されず、避難安全上の危険が生ずる可能性がある。(図 3.1)

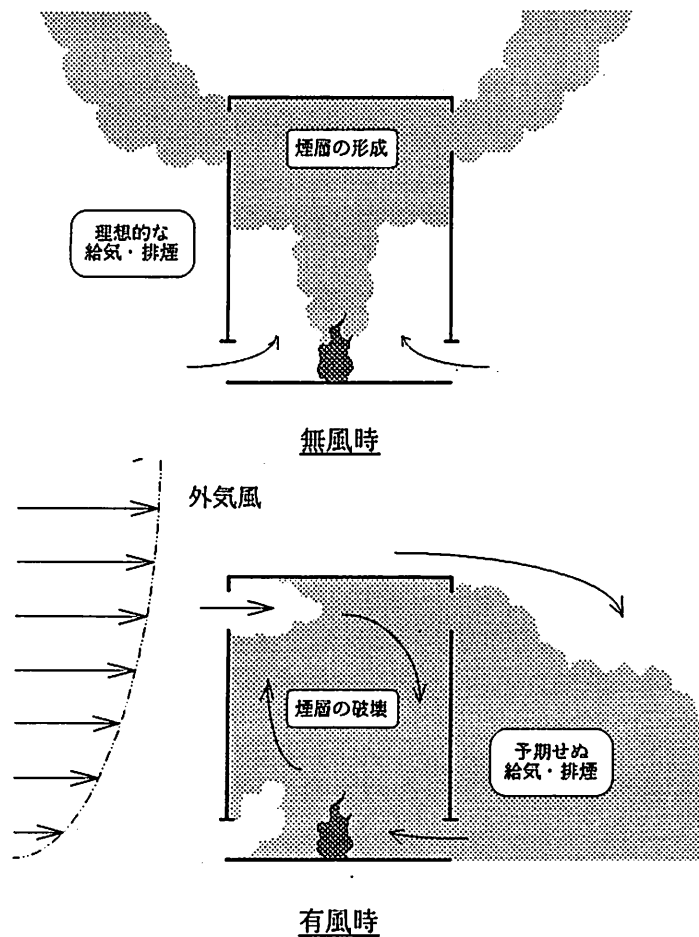


図 3.1: 煙流動性状概念図

本章では外気風影響下におけるアトリウムの排煙性状を把握するために仮想のアトリウムを設定し、その相似縮小模型を用いて模型実験を行った。模型の材料選定と実験条件は第1章で導いた相似則によって決定し、実験条件中の外気風に関しては前章同様、前田建設工業（株）技術研究所の風洞施設を用い、スクリーン¹を用いて市街地境界層の鉛直風速分布を実現している。実験では熱気流（煙）の温度及び開口部における流入風速の測定、熱気流の可視化観察により、排煙時の外気風の影響を考察する。

3.2 実験条件

3.2.1 模型

模型形状

建築物内でのアトリウムの空間的位置付けについて文献^[12]では次のような分類例が示されている。

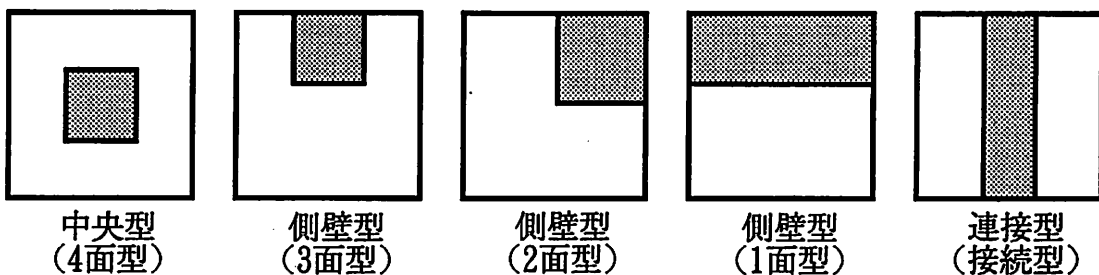


図 3.2: 建築物内でのアトリウムの空間的位置

中央型（4面型） 大規模な建築物の中央に吹抜け空間を設けているもの。

- アトリウム空間が閉鎖空間となっており、アトリウム・周辺部分相互の影響が大きい。
- 熱・煙等の排出が行いにくい。
- 比較的に高層となり、屋内的なイメージで使用されることが多い。

側壁型（3,2,1面型） 外部空間をガラスで覆う等して外壁面に吹抜け空間を形成するもの。

- 主要建築物に付属する形で建築されることがある。
- ホテル等のエントランス・ロビー等に利用されるものが多い。
- 比較的低層のものが多い。
- 外部に面する部分を有するので、煙制御・延焼防止等、防災上有利な面がある。

¹Appendix 1 参照

接続型（接続型）複数の建築物に囲われた隣棟間スペースや中庭的空間に覆いをかけることによりアトリウム空間にしたもの。

- ツインタワー等の独立性の高い建築物の間に設けられることが多い。
- 比較的低層のものが多い
- アーケード状（ガレリア状）となることもある。
- 既存の建築物相互を接続する場合もある。

上記類型化の中で最も多いアトリウム形態は中央型と接続型である。しかし中央型の多くは大規模な高層アトリウムが多く、実験設備の関係上縮小模型実験がやりにくい²ため、低層ガレリア状の接続型アトリウムを実験対象として選定した。

実験で想定したアトリウムは、現象を支配する因子を明確にするため、図3.3に示すように2つの建物（以下併設建物と称する）に挟まれたシンプルなアトリウムとした。アトリウム上部の併設建物から突出した壁面には排煙口を想定した開口を、また下部の併設建物に接しない壁面には出入口兼火災時の給気口を想定した開口をそれぞれ対面に1つずつ計4つ配した。この開口は条件を単純にするため常に全開とした。（ただし1ケースのみ比較の基準として全ての開口を閉めた実験も行った。）模型のスケールは実大の1/20とし、開口の大きさについては表3.1に示す。

また併設建物A、Bはそれぞれ取り外しが可能で、側壁型（1面型）アトリウム形態での実験（風下側にのみ併設建物が付随する）も行った。

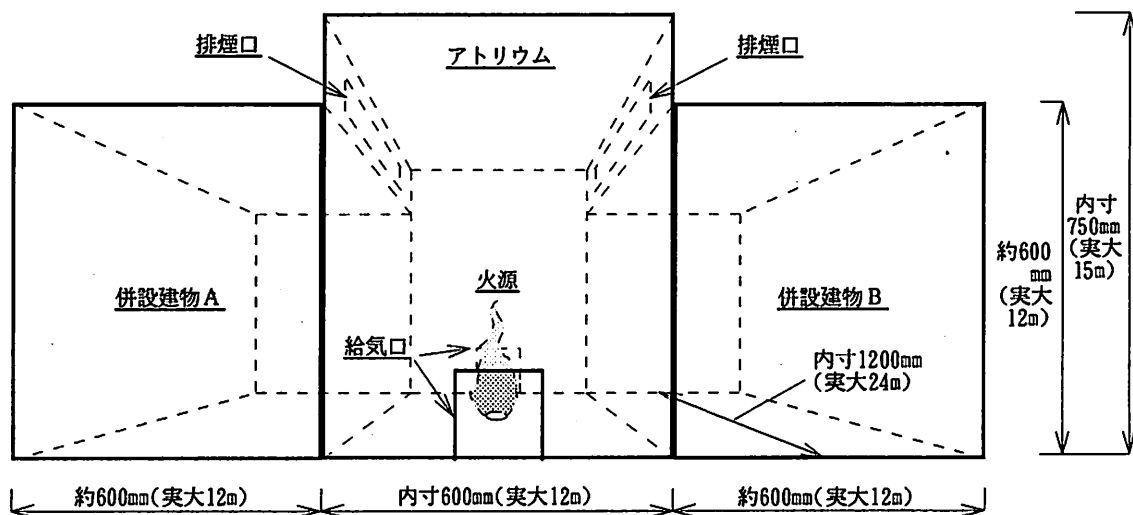


図 3.3: 模型外観図

²風洞の遮閉率（Appendix 1, A.1節参照）とプルームの生起条件（第1章1.2節参照）、乱流火炎の生起条件（Appendix 2参照）から実験が成り立たない

表 3.1: 開口寸法

	開口場所	面積 (床面積に対して)	$W_o \times H_o$
実大	下部給気口	1/25	2.88m × 2.00m
	上部排煙口	1/50	2.40m × 1.20m
		1/25	4.80m × 1.20m
		1/10	12.0m × 1.20m
1/20 模型	下部給気口	1/25	144mm × 100mm
	上部排煙口	1/50	120mm × 60mm
		1/25	240mm × 60mm
		1/10	600mm × 60mm

模型材料

模型は厚さ 12mm の合板で作成し、内側壁面には第 1 章 1.4 節で求めた相似則に基づき、軟質繊維板を張り付けた。ただし給気口のある一壁面は可視化観察が可能なように透明アクリルボードで作成した。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。また壁面上部と屋根面を一体化し、排煙口の面積が異なるセットを 3 種作成して開口条件を変えられるようにした。

3.2.2 模型火源

模型火源は前章と同様硬化ガラス製ロートのバーナーを用い、プロパンガスを燃焼させた。ただし、火源セットは風洞床面をくり貫いて床下から図 3.5 に示す位置に設置した。

また実大の火源を直径 1.5m の円形火源で、発熱量 1.5MW (一定) と設定した。図 3.4 に模型火源システムを示す。

3.2.3 風洞設備及び模型の設置

風洞設備も前章同様、前田建設工業株式会社技術研究所の風洞実験棟第二測定部で行い、スクリーンを用いて境界層乱流を生成している。

実験模型は火源の位置を中心に図 3.5 に示す位置に設置した。風向条件は模型の向きを変えることで変化させ、模型正面 (透明アクリル面) に対して 0, 90 (°) で実験を行った。

3.2.4 風速

風速の設定はゲルマニウム風速計を用いてアトリウム模型の風上、スクリーンの風下 2,000mm、風洞幅の中心で (図 3.5)、アトリウム模型の屋根面の高さでの風速を計測し、この点での風速を基準風速として設定風速に合わせた。設定風速は実大の平均風速で 0, 5.0, 10.0(m/s) とした。

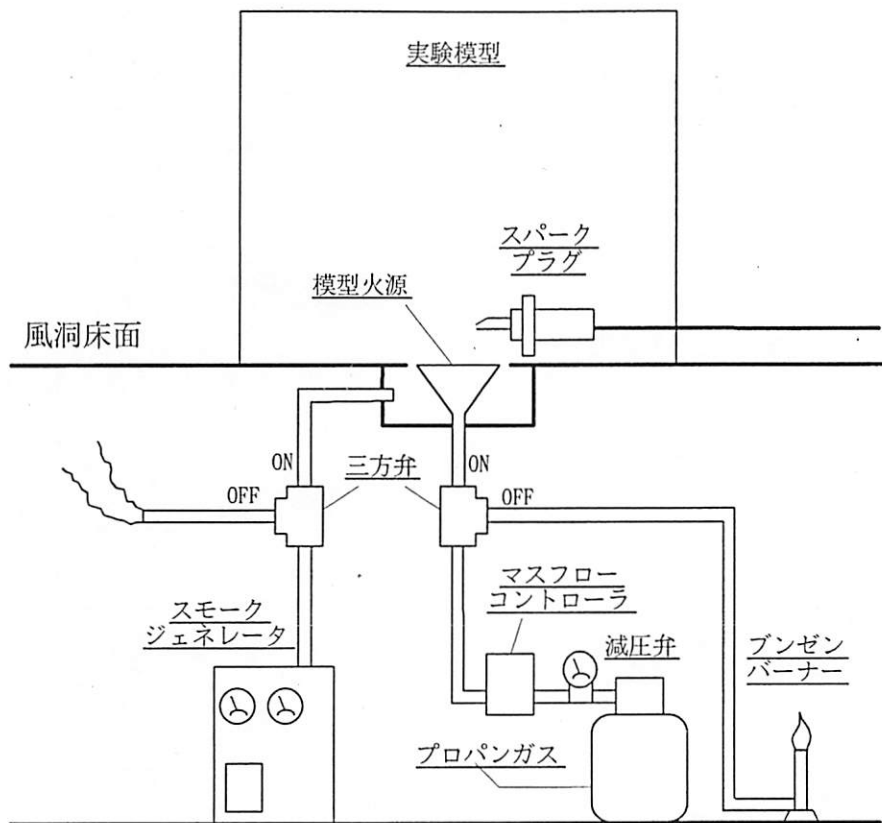


図 3.4: 模型火源システム図

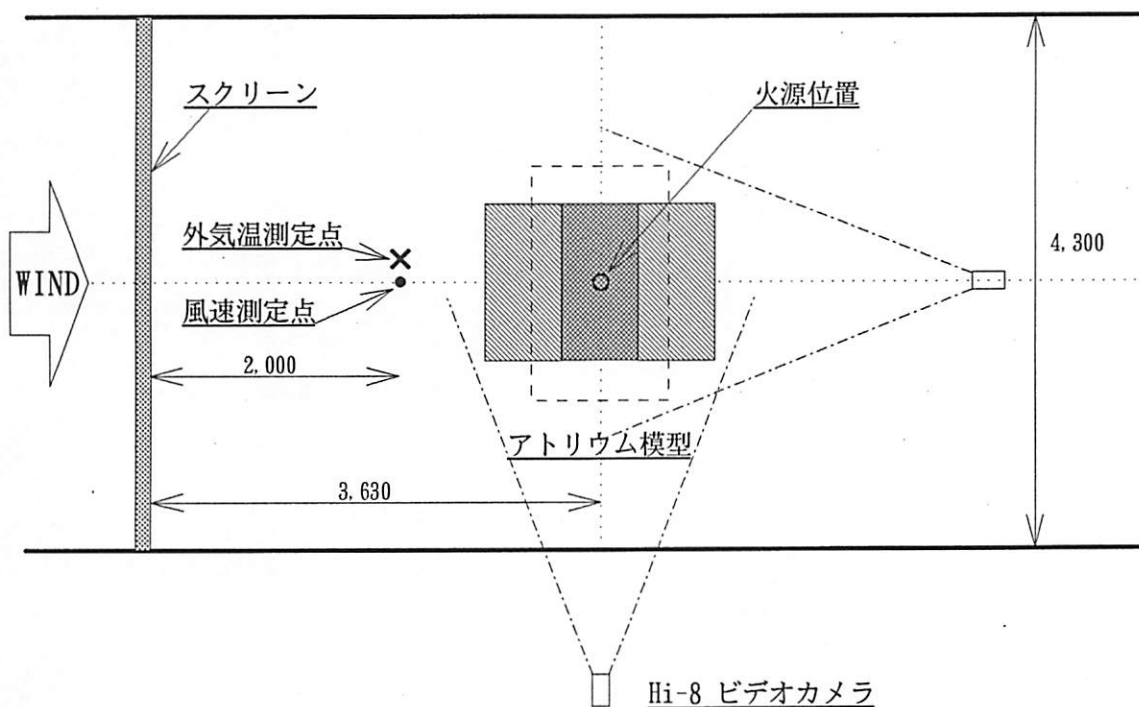


図 3.5: 模型設置位置

また、排煙口の流入、流出風速をサーミスタ風速計で測定した。サンプリングタイムは0.1(s)で30秒間のデータを取った。

3.2.5 温度測定

温度計測にはK-Type(CA)熱電対($\phi 0.1\text{mm}$)を用いて、外気温度(図3.5)、模型内気流温度(図3.6のA~Lの位置でアトリウム天井高を10等分し、その間の9点、計108点)、開口部温度(給気口温度1点 \times 2、排煙口温度3点 \times 2計8点[図3.7])合計117点を計測した。本章では、熱電対の線径が細いことから輻射の影響を受けにくいと考え、輻射よけは用いなかった。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い、ハードディスクにデータを落とした。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計測していると言える。

3.2.6 熱気流の可視化とその記録

前章同様オイルミストをトレーサーに、アルゴンイオンレーザー発生装置でレーザーシートを照射して熱気流の可視化を行った。本実験ではレーザー発生装置を2台使用し、1台はアトリウム模型の上方約500mmの位置に設置して模型内の煙流動を、もう1台は風洞天井面から照射して排煙口から流出する煙流動をそれぞれ可視化した。また、可視化した様子をビデオ(SONY VIDEO Hi8)で記録した。前章の結果から、トレーサーが熱気流に与える影響は無視できると考え、一つの実験で温度測定と可視化観察を同時に行った。

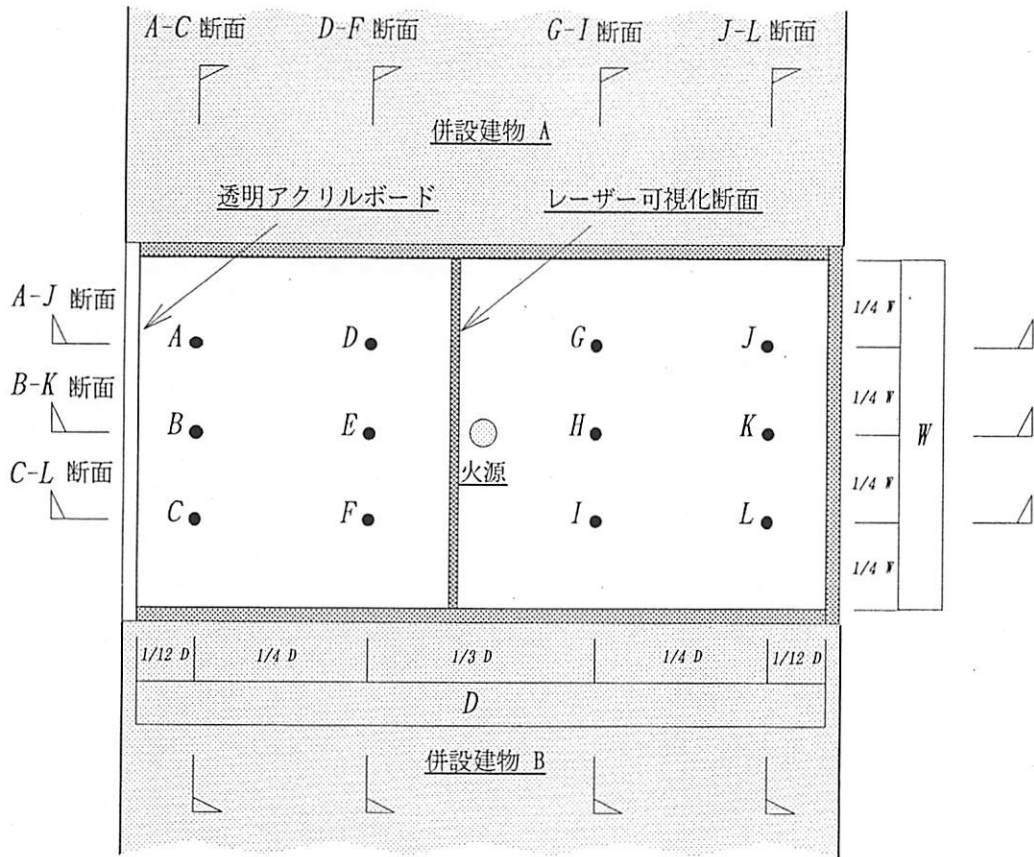


図 3.6: 温度測定点平面図

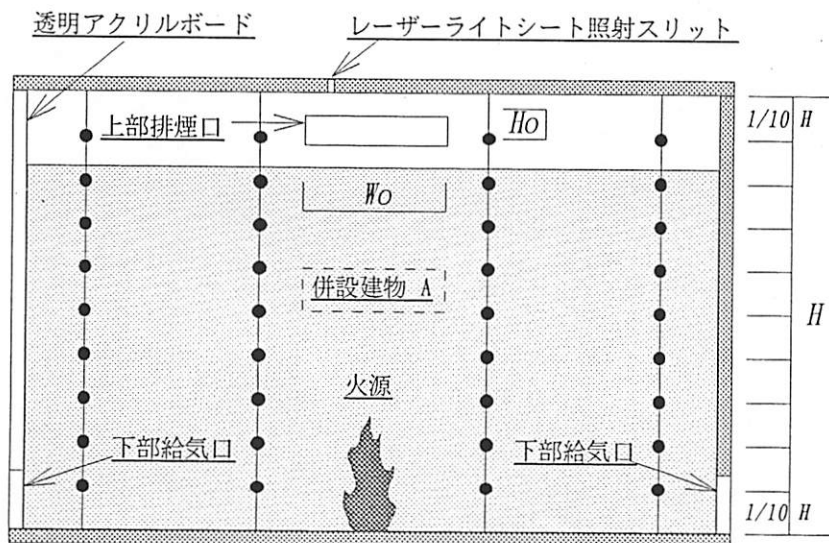


図 3.7: 温度測定点断面図

3.2.7 まとめ

実験条件を表 3.2に、実験ケースを 3.3に示す。

表 3.2: 実験条件

実験条件 (実大換算値)	1/20 模型
風速 (m/s) (0, 5, 10)	(m/s) 0, 1.1, 2.2
風向 (°)	0, 90 (°)
発熱量 (1.5 MW)	0.84 kW
火源直径 (1.5 m)	75 mm
給気口面積	床面積の 1/25
排煙口面積	床面積の 1/50, 1/25, 1/10
開口パターン	全閉, 全開
併設建物	有, 無
計測時間	4 秒毎 90 回

表 3.3: 実験ケース

実験ケース	実験番号	併設建物 (風上側)	併設建物 (風下側)	風向 (排煙口に)	風速 (実大換算)	排煙口面積 (底面積の)
ケース C	Case-CLOS	—	—	—	—	—
ケース 0	Case-0-S-00	—	—	—	—	1/50
	Case-0-M-00	有	有	—	—	1/25
	Case-0-L-00	—	—	—	—	1/10
ケース 1	Case-1-S-05	—	—	—	—	1/50
	Case-1-M-05	有	有	垂直	5(m/s)	1/25
	Case-1-L-05	—	—	—	—	1/10
	Case-1-S-10	—	—	—	—	1/50
	Case-1-M-10	有	有	垂直	10(m/s)	1/25
	Case-1-L-10	—	—	—	—	1/10
ケース 2	Case-2-S-05	—	—	—	—	1/50
	Case-2-M-05	無	有	垂直	5(m/s)	1/25
	Case-2-L-05	—	—	—	—	1/10
	Case-2-S-10	—	—	—	—	1/50
	Case-2-M-10	無	有	垂直	10(m/s)	1/25
	Case-2-L-10	—	—	—	—	1/10
ケース 3	Case-3-S-05	—	—	—	—	1/50
	Case-3-M-05	有	有	平行	5(m/s)	1/25
	Case-3-L-05	—	—	—	—	1/10
	Case-3-S-10	—	—	—	—	1/50
	Case-3-M-10	有	有	平行	10(m/s)	1/25
	Case-3-L-10	—	—	—	—	1/10

3.3 実験結果及び考察

実験結果の検討は気流温度データと目視観察、及びビデオ映像を基に行った。気流温度データについては予め実験開始前に測定した模型内温度（ほぼ一様）を基準として、実験開始後の各測定データとの温度差を計算した。

3.3.1 可視化観察及び温度データによる煙流動の定性的解析

まず、比較の基準として行った全ての開口を閉じたケース（ケースC）では、アトリウム内の温度分布から判断すると図3.16dのように明確な成層化が生じているが、高温層と低温層の2層化は起こらず、可視化によっても煙層の形成は見られない。また時間の経過に伴って成層化したまま全空間的に温度は上昇した。

次に無風状態の実験ケース（ケース0）では上部排煙口の面積によって差はあるが、成層化及び煙層の形成が見られ、一定時間経過後は煙層下端位置も一定となり定常状態となった。煙層の温度は排煙口の面積が大きいほど低くなったが、これは外部に流出する熱気流の量が多くなる分、給気口から流入する新鮮空気も増え、空間の換気回数が増えたことによるものと考えられる。またこれに伴って給気口からのドアジェットがアトリウム内の熱気流を乱すようになり、煙層と新鮮空気層の境界が不明確になる傾向が見られた。

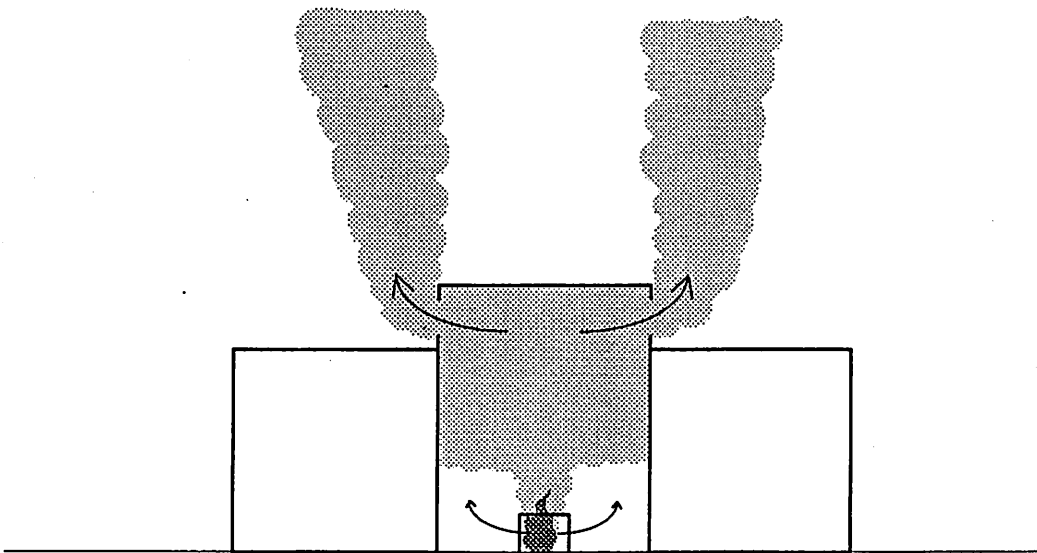


図 3.8: 無風時の煙流動性状

有風時では次の3つのケースに分けて考察する。

ケース1 風向が上部排煙口に直交，下部給気口に平行で上流側，下流側両方に併設建物を有する場合

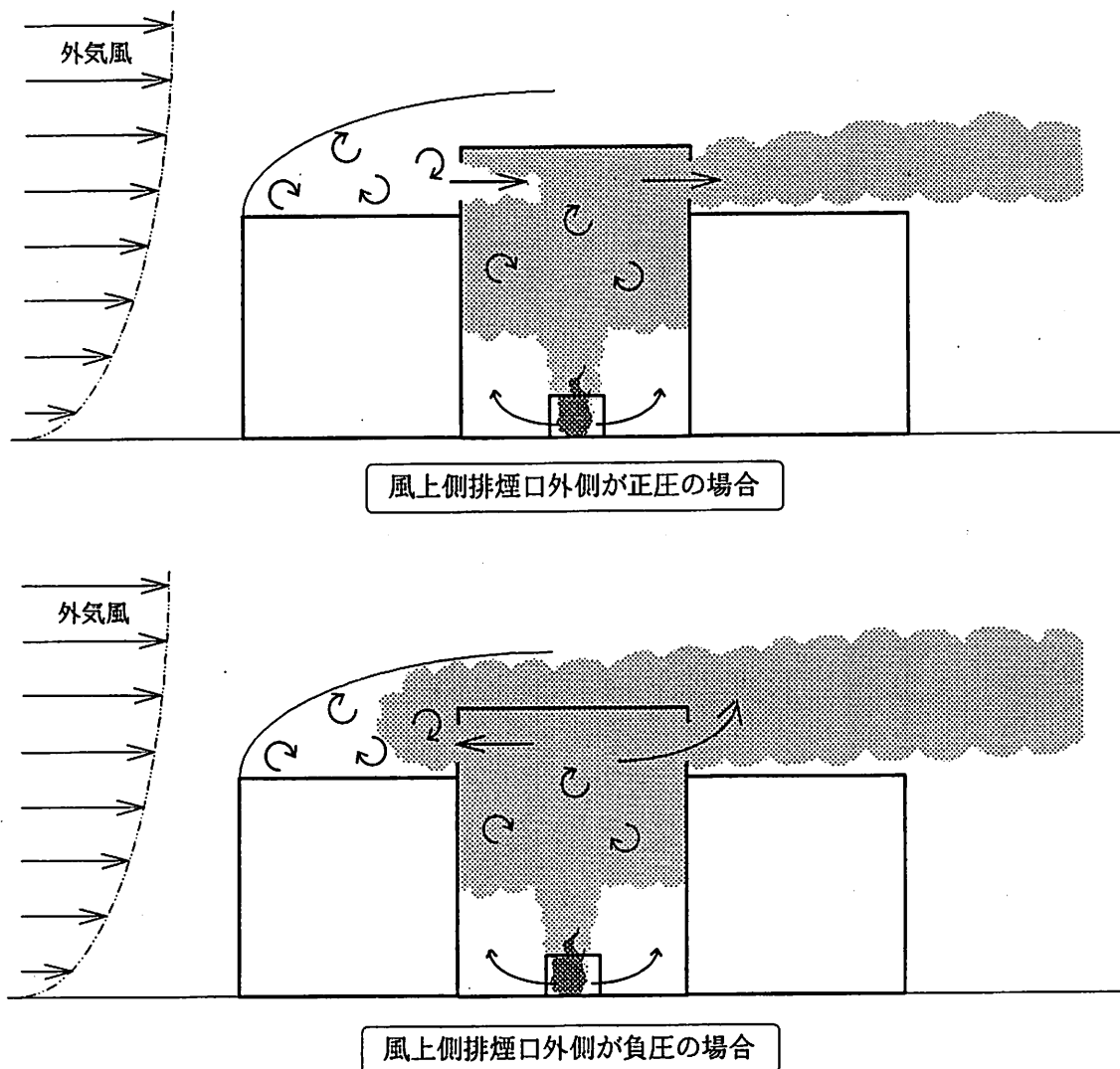


図 3.9: 有風時の煙流動性状 (ケース1)

風下側排煙口は常に負圧になり，無風状態のケースに比べて多量の煙が流出された。これに対し風上側では併設建物の屋根隅角部で剥離が生じ，剥離流の渦によって開口部で正圧と負圧が交互に起こり，外部空気の流入，煙の流出を繰り返した。(この現象は剥離流による風圧と浮力による内部圧力とのバランスで生じている可能性もあるが，等温での換気実験は行っていないので明らかでない。本実験の条件下では設定風速，開口面積に関わらず同様な現象が起こった。)この現象によりアトリウム内の熱気流は乱され，無風時のような明確な煙層は形成されないが，給気口からの新鮮空気の流入により底部の煙濃度は低く，風速及び排煙口面積が小さいケースでは煙層らしきものが認められた。熱気流の乱れの程度は風速が大きいほど，また排煙口の面積が大きいほど大きくなる。

ケース2 風向が上部排煙口に直交，下部給気口に平行で下流側だけに併設建物を有する場合

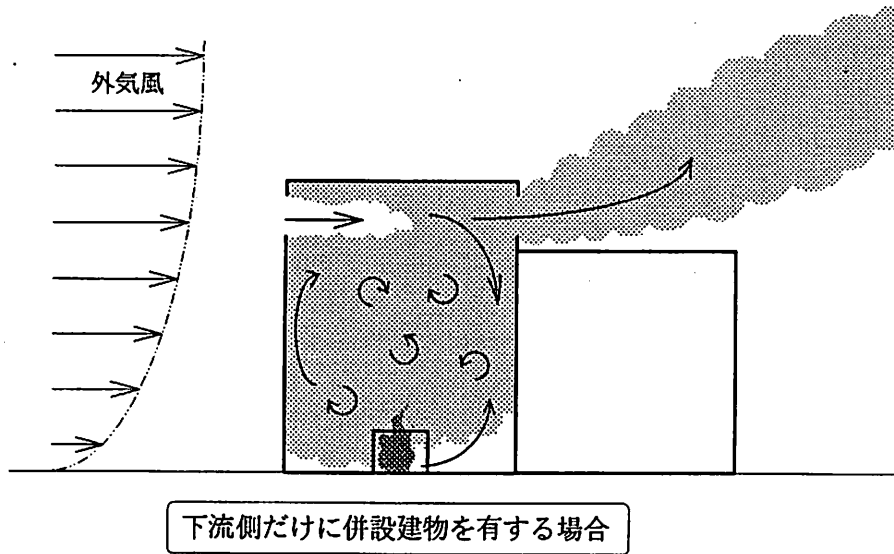


図 3.10: 有風時の煙流動性状 (ケース2)

排煙口では風上側で正圧，風下側で負圧となってアトリウム内上部で風上側から風下側への気流が生じる。これによりアトリウム内の熱気流は激しく乱され，本実験で設定した条件下では風速，排煙口の面積に関らず煙層の形成及び成層化は見られず実験開始直後からアトリウム底部に煙が降下した。また排煙口の面積が大きく風速が大きいケースではこの上部気流による断面方向の旋回流が見られた。(図 3.10)

ケース3 風向が上部排煙口に平行，下部給気口に直交で右側，左側両方に併設建物を有する場合

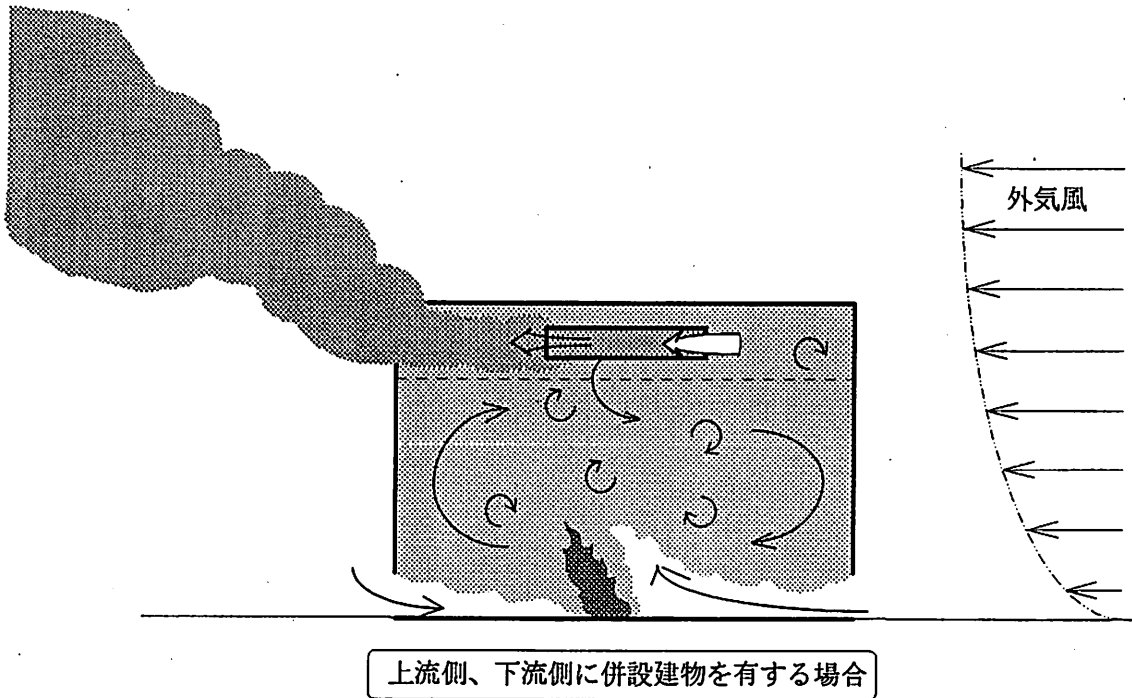


図 3.11: 有風時の煙流動性状 (ケース3)

風上側の下部給気口から外部気流が進入し，火炎及び火炎プルームは大きく風下側に傾いた。またこの気流により旋回流が起こった。アトリウム内ではゆるやかな温度成層が生じているが，煙層の形成は見られない。しかし上流側給気口から新鮮空気が流入するためアトリウム底部の煙濃度は低い。

3.3.2 温度データによる熱気流性状の分類

模型空間内において同じ高さの温度測定点12点の平均温度を各高さ（上下方向に9点，図3.7参照）ごとに表した時間変化を図3.16a～3.37aに，各高さ間の平均温度差（各区分での平均上昇温度）を図3.16b～3.37bに，及び実験開始約2分後の可視化映像写真を図3.16c～3.37cにそれぞれ示す。各区分での平均上昇温度は鉛直方向の温度の傾き($\partial\theta/\partial z$)を表すもので，値が大きいほど鉛直方向に急激に温度が上昇していることを示す。また図3.16d～3.37dに実験開始4分から6分まで（図3.16dのみ2分から6分）の時間平均温度を等温線図に表した。

これらの図と目視観察により，アトリウム内部の煙流動性状を次の3種に分類した。

- a) 温度成層が形成され，さらに煙層が認められるケース
- b) 温度成層は形成されるが，煙層は認められないケース
- c) 温度成層が形成されず，完全混合に近いケース

分類した結果を表3.4に示す。

表 3.4: 煙流動性状の分類

開口面積（底面積の）			1/50	1/25	1/10
風速 0 (m/s)	—	—	○	○	△
風速 5 (m/s)	風向 垂直	併設建物 有	○	○	×
風速 10 (m/s)	風向 垂直	併設建物 有	○	×	×
風速 5 (m/s)	風向 垂直	併設建物 無	△	×	×
風速 10 (m/s)	風向 垂直	併設建物 無	×	×	×
風速 5 (m/s)	風向 平行	併設建物 有	△	△	△
風速 10 (m/s)	風向 平行	併設建物 有	×	×	×

ただし a) を ○， b) を △， c) を × で表記し，風向は排煙口に対して垂直または平行，併設建物は風上側（ただし風向が平行の実験では左側）の建物の有無を示した。風下側（右側）の併設建物はいずれのケースに於いても付随している。

分類は以下の方法によった。

1. 模型内上下温度差が13(K)以上（図3.12の棒グラフで白抜き部分）あり、温度の逆転現象が生じていないものを温度成層形成とみなした。ただし、等温線図及び可視化観察で著しく乱れの確認されるものは除外した。
2. 1のうち、各区間での平均上昇温度に著しいピークのあるもの（温度上昇が直下の区間より2(K)以上のもの）を煙層形成 a), それ以外を b) の状態とした。
3. (1)(2) 以外を c) の状態であるとした。

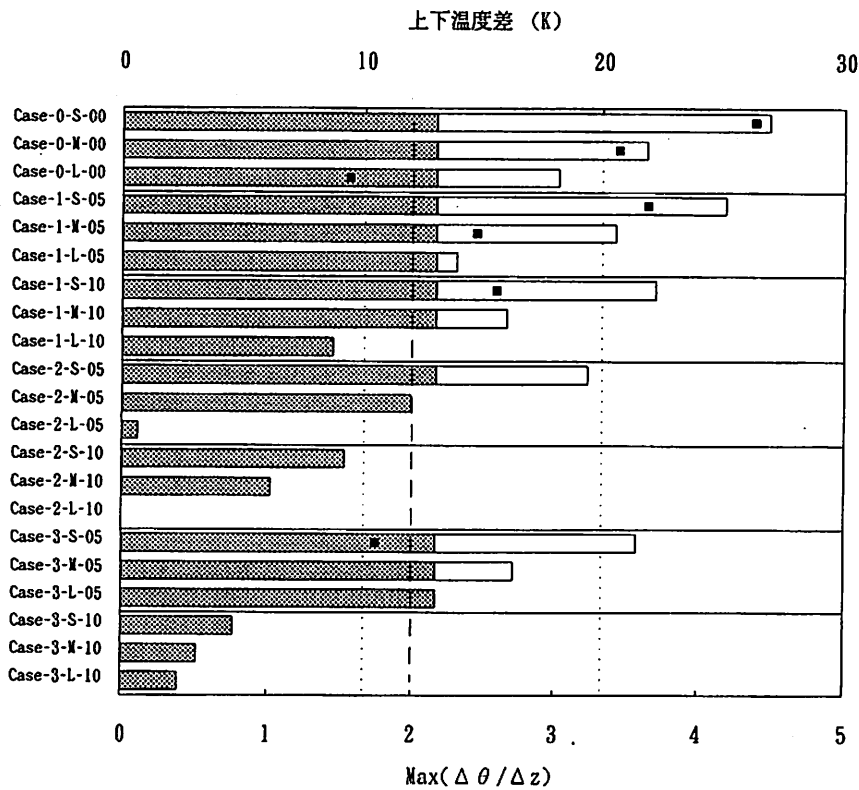


図 3.12: 煙層, 温度成層形成の判定

3.3.3 開口部風速に関する考察

図 3.13に示す風速はケース 0, ケース 1, ケース 2における上流側, 下流側双方の排煙口の中央部平均風速 (サンプリングタイム 0.1(s)× 300 回の平均) である。ただし測定に用いた風速計の出力は風速の絶対値であり, 流出, 流入の区別がつかない。

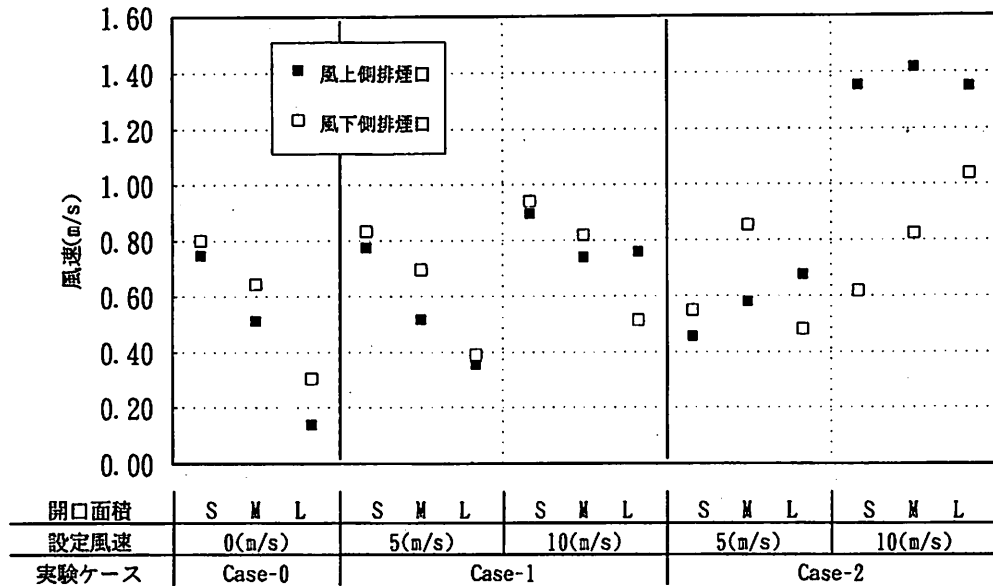


図 3.13: 排煙口平均風速

このうち内部気流に影響を与える度合いが強いと思われる風上側風速 (図 3.13) に着目する。まず無風時 (ケース 0) では, 上部排煙口から熱気流の浮力による気流の流出が見られるが, このときの風速は開口の面積が大きいほど小さい。これは気流の流出によるアトリウム内の温度低下に伴った浮力の減少が原因であると考えられる。次に有風時では上流側併設建物の有り (ケース 1), 無し (ケース 2) でその性状に大きな違いが見られる。ケース 1 では排煙口の面積が大きいほど風速が小さくなり, また設定風速が大きいほど開口の大きさによる差が小さくなる。ケース 1 の煙流動性状については, 風上側の排煙口で外部空気の流入 (正圧), 煙の流出 (負圧) を交互に繰り返すことを述べたが, この風速データから判断すると次に示すケース 2 (上部排煙口から外気が流入する場合) よりケース 0 (下部給気口から外気が流入する場合) の性状に傾向が似ている。このことからケース 1 の上流側排煙口では主として煙の流出 (負圧) が起こっていると推測される。この推測のもとでは, 外部風速が大きいと流出風量が増加し, 内部温度の低下から浮力が減少して流出への外気風による影響が支配的になり, 開口面積の大小の影響が小さくなる, と現象を説明できる。以下の分析ではこの推測を用いて検討を行う。

これに対しケース 2 では風上側の排煙口で常に外部空気が流入している。(前節参照) 従って外気風による圧力と浮力による圧力は相対し, また開口面積が大きいほど内部温度の低下から浮力が減少するので, 流入風速は大きくなる。(図 3.13 設定風速 5m/s) また外部風速が大きいときは浮力による影響が外気風に対して無視できるほど小さくなり, 開口面積の大きさによる風速の差が無くなる。

3.3.4 開口部風速による煙層生成条件

空間内気流が成層化するか乱れて混合するかは流入風の持つ運動量に関係が深いと考えられる。流体の運動量は流入風速 v_{in} と開口面積 S_o 、流体密度 ρ から $\rho v_{in}^2 S_o$ で与えられるが、本研究では $v_{in}^2 S_o$ を指標に分析を行う。また流入、流出の条件の異なるケース0、ケース1、ケース2を同時に評価することは難しいので、ケース毎に検討を加えることにした。

ケース0, 1

ケース0では排煙口から熱気流が流出し、給気口から外部空気が流入する。そこで上流、下流双方の排煙口風速と排煙口面積から流出空気量を求め、給気口面積 S_o で除して給気口からの流入風速 v_{in} を求めた。

ケース1では風上側の排煙口では気流が流入、流出を交互に繰り返す、風下側の排煙口では常に流出する。風上側排煙口の入力運動量の取扱いが非常に難しいが、前節の推測からケース0の場合と同様に上部排煙口から内部気流が流出し、下部給気口から外部気流が流入するとしてケース0と同等に取り扱った。図3.14にケース0, 1における $v_{in}^2 S_o$ と煙流動性状の関係を示す。

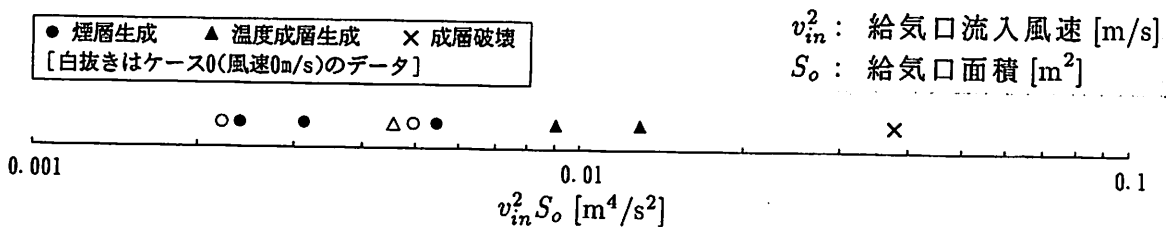


図 3.14: $v_{in}^2 S_o$ と煙流動性状 (ケース0, 1)

この図より、ケース0で温度成層形成（煙層は形成されない）がみられた Δ を除けば、残りの全てが $v_{in}^2 S_o$ の上昇にともなって煙層の形成、煙層はできていないが温度成層は形成、成層破壊の性状を示す。一つの例外については、排煙口風速がかなり低かったため風速測定時の測定誤差が大きくなったものと思われる。（風速計の誤差範囲は0.1m/s程度である。）

ケース2

ケース2では風上側の排煙口から常に外部気流が流入し、風下側排煙口から内部気流が流出する。下部給気口でも若干の気流の出入りはあるが、給気口からの流入が内部気流に与える影響は排煙口からの流入による影響に比べて小さく無視できると考え、上流側の排煙口風速と排煙口面積から $v_{in}^2 S_o$ を求めた。 (V_{in}^2) と煙流動性状の関係を図3.15に示す。

この結果からケース2においても $v_{in}^2 S_o$ の値が大きくなると内部気流が乱れる傾向にあることが確認された。またケース0, 1の場合（外部気流が下部給気口から流入）と

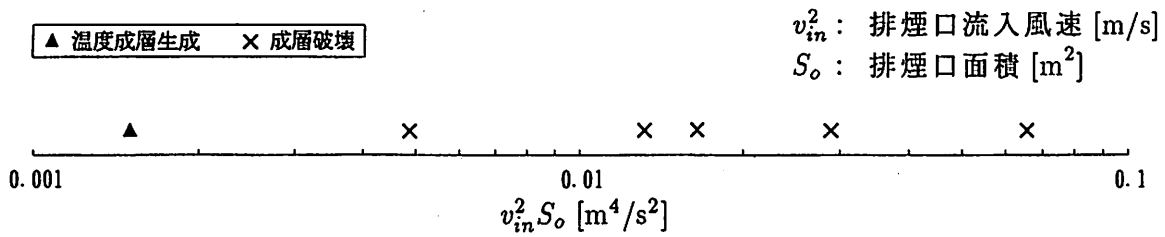


図 3.15: V_{in}^2 と煙流動性状(ケース2)

比較すると、煙層形成から成層破壊に至る遷移域の $v_{in}^2 S_o$ が小さいことから、空間上部から外気の流入がある場合には危険が生じやすいといえる。

3.3.5 まとめ

本章ではガレリア状アトリウムスケール模型を用いて外気風影響下の煙流動性状を検討した。実験の結果、非常に単純な形状のアトリウムであっても、排煙口の大きさ、併設建物(風上側)の有無、風向などの条件により、開口部での流出入風速が変化し、煙流動性状が大きく変わることが分かった。また発熱条件一定のもとでは、空間内に流入する気流速度 v_{in} と開口面積 S_o から $v_{in}^2 S_o$ を求め、この値を指標に空間の煙流動性状を予測できることを示した。

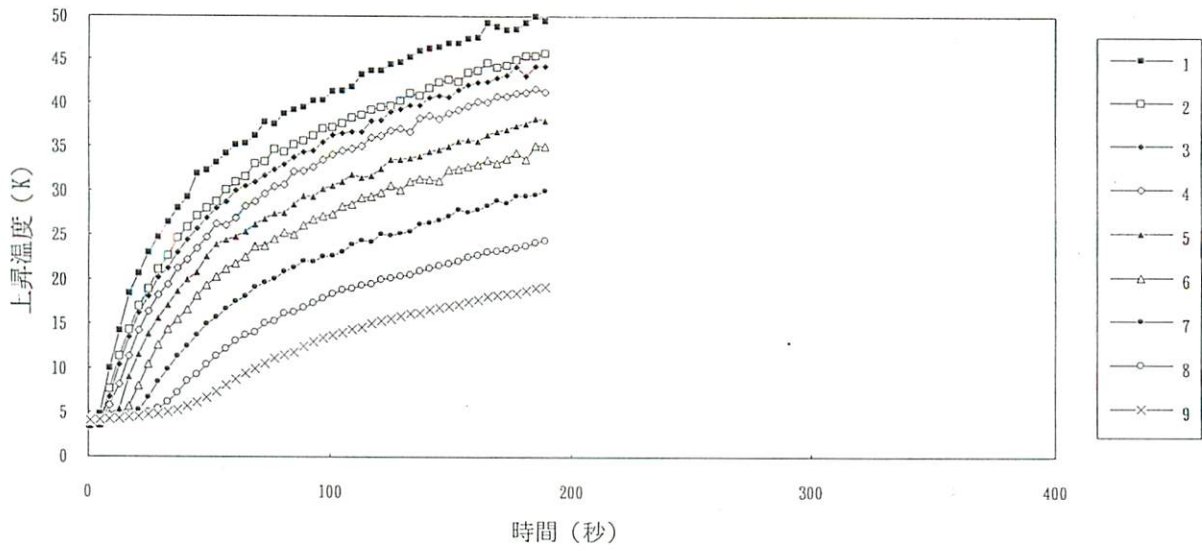


図 3.16a: 各高さにおける平均温度 (Case-CLOS)

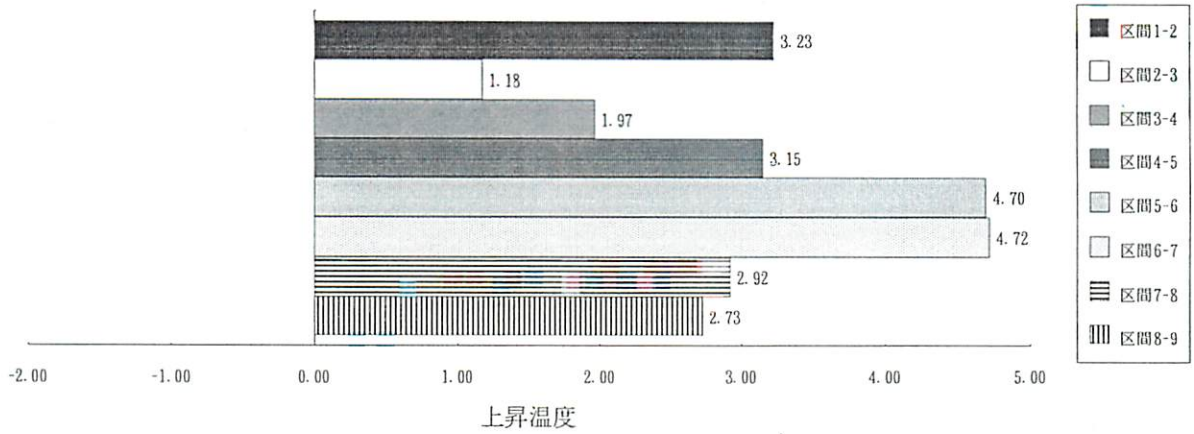


図 3.16b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-CLOS)

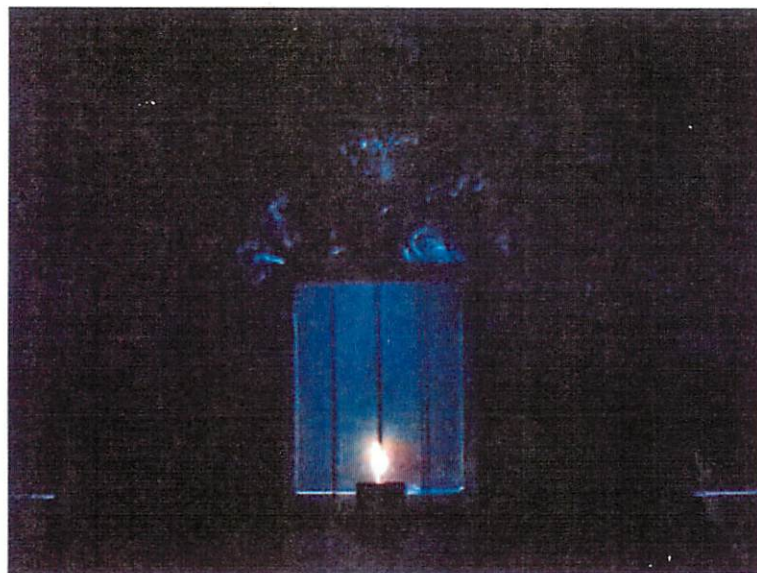
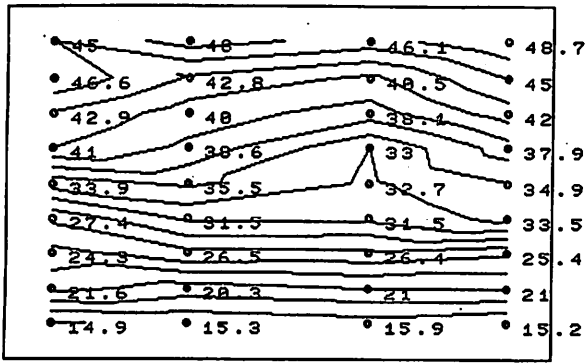
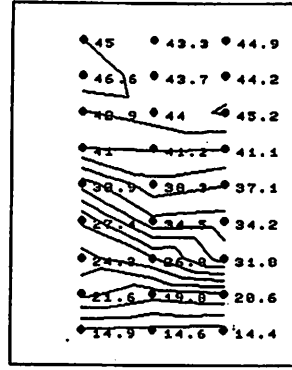


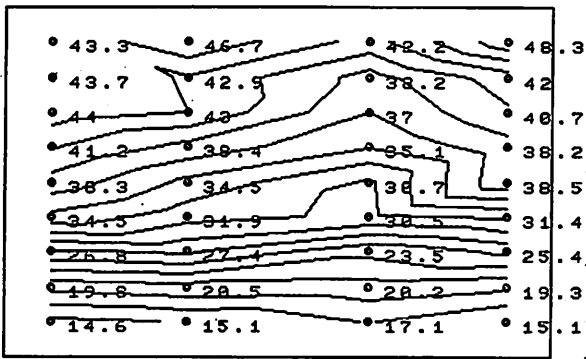
図 3.16c: 実験開始約2分後の可視化写真 (Case-CLOS)



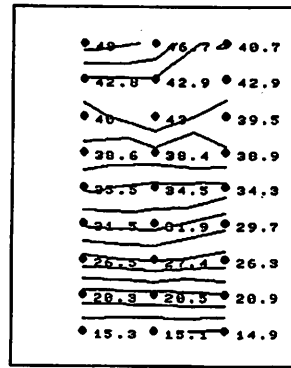
A~J 断面



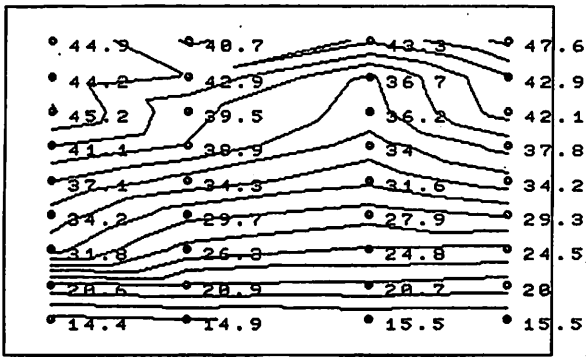
A~C 断面



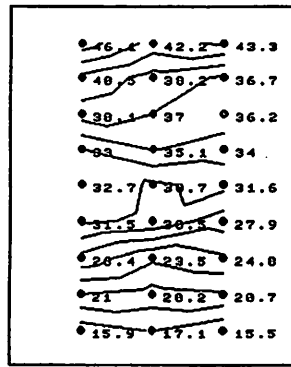
B~K 断面



D~F 断面



C~L 断面



G~I 断面

実験番号	Case-CLOS
併設建物 (風上側)	***
" (風下側)	***
風向 (排煙口に)	***
風速 (実大換算)	***
排煙口面積 (底面積の)	***

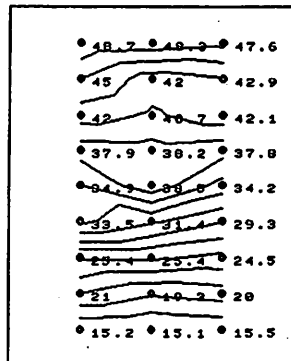


図 3.16d: 温度分布図 (2~3分の平均) J~L 断面

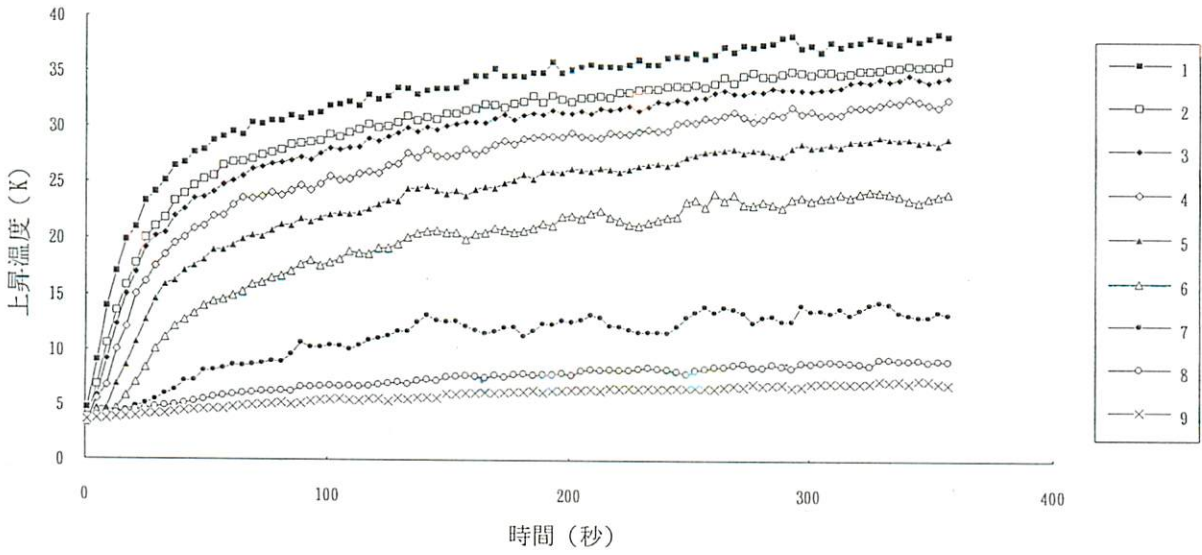


図 3.17a: 各高さにおける平均温度 (Case-0-S-00)

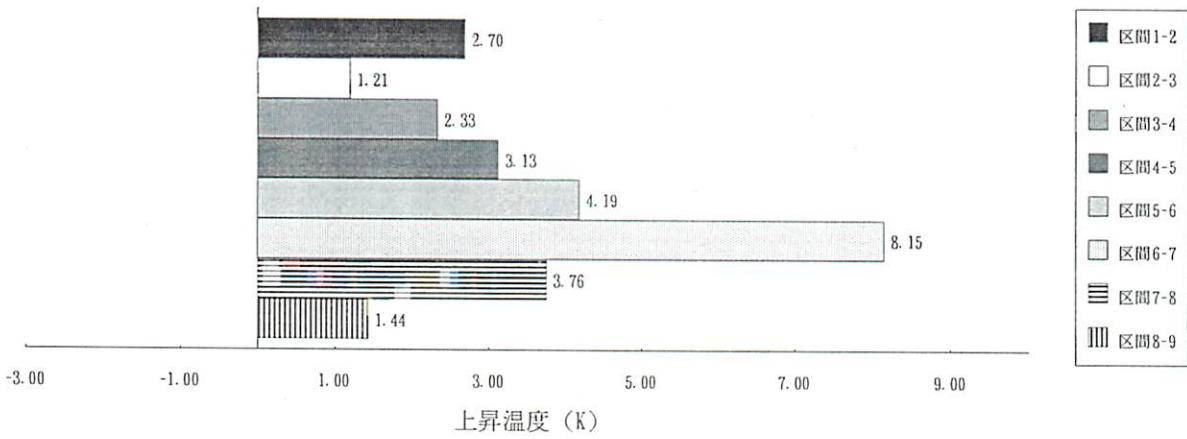


図 3.17b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-0-S-00)

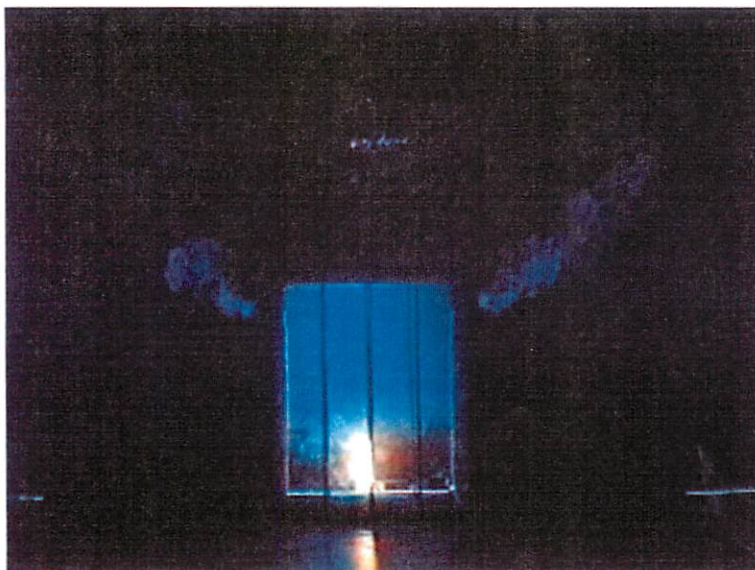
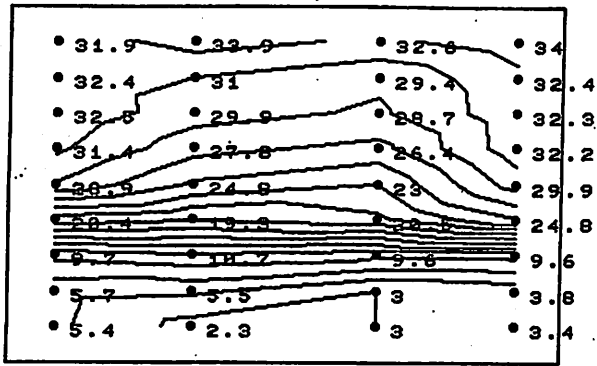
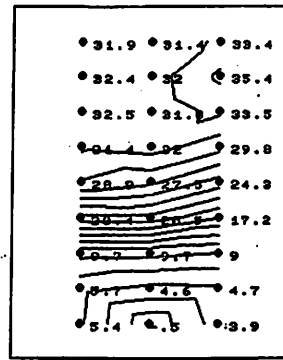


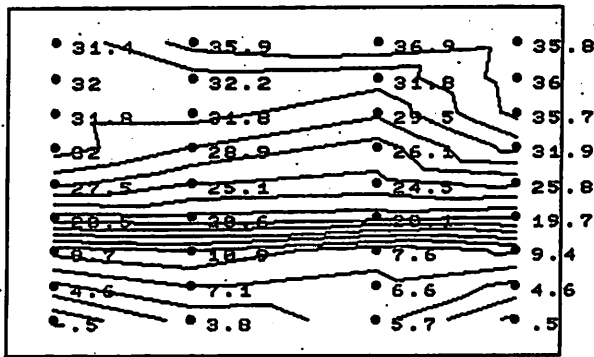
図 3.17c: 実験開始約2分後の可視化写真 (Case-0-S-00)



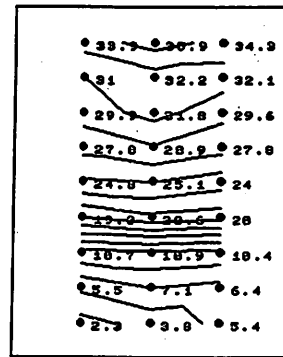
A~J 断面



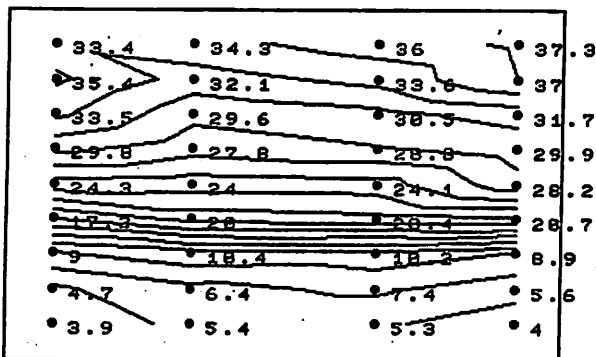
A ~ C 断面



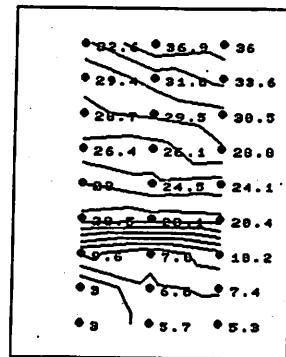
B ~ K 断面



D ~ F 断面

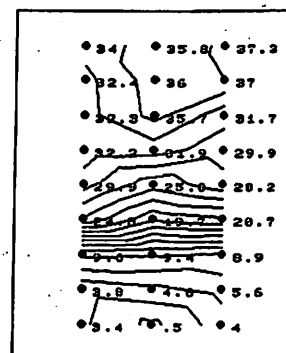


C ~ L 断面



G ~ I 断面

実験番号	Case-0-S-00
併設建物 (風上側)	有
" (風下側)	有
風向 (排煙口に)	***
風速 (実大換算)	0 m/s
排煙口面積 (底面積の)	1/50



J ~ L 断面

図 3.17d: 温度分布図 (4~6分の平均)

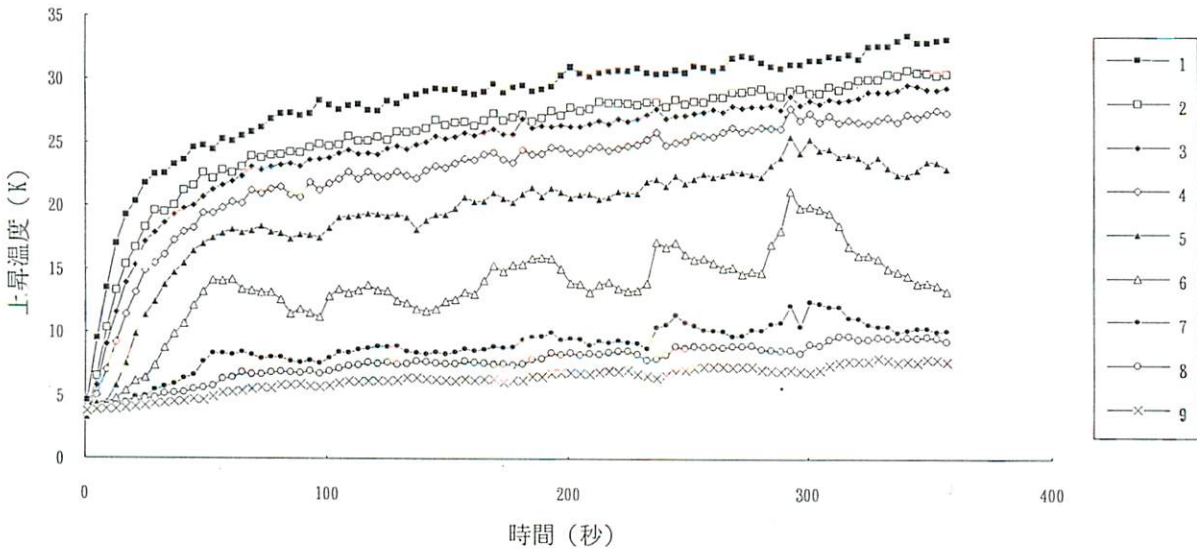


図 3.18a: 各高さにおける平均温度 (Case-0-M-00)

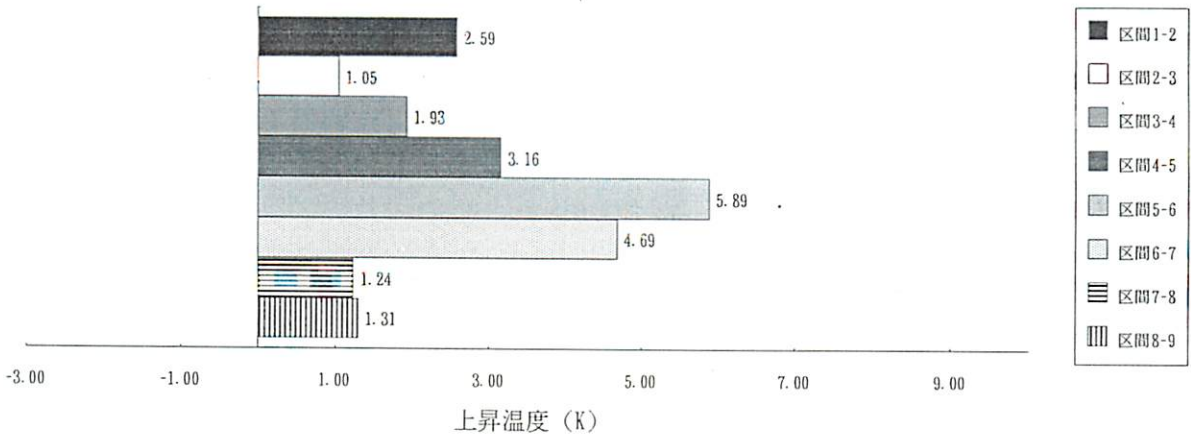


図 3.18b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-0-M-00)

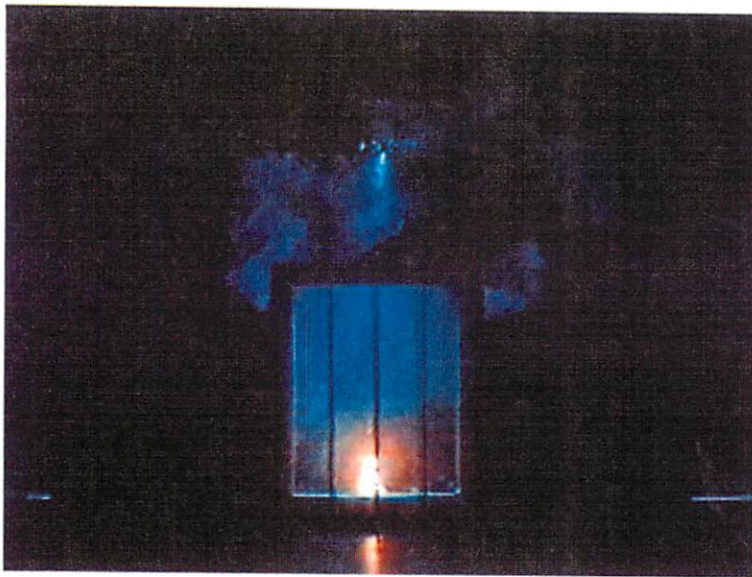
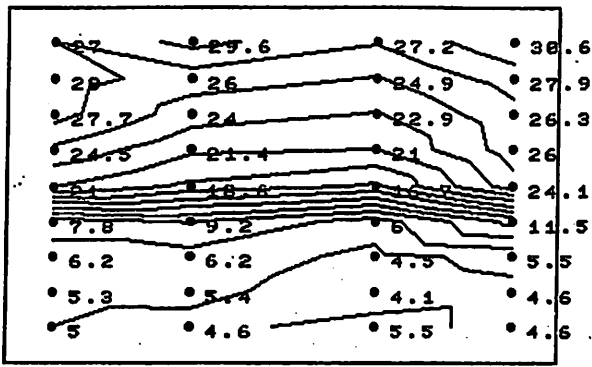
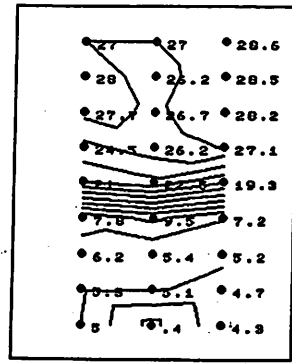


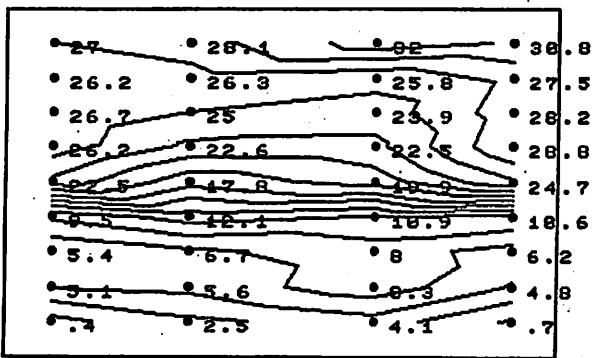
図 3.18c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-0-M-00)



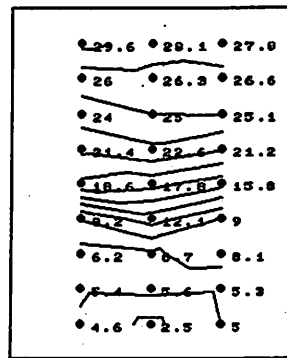
A~J 断面



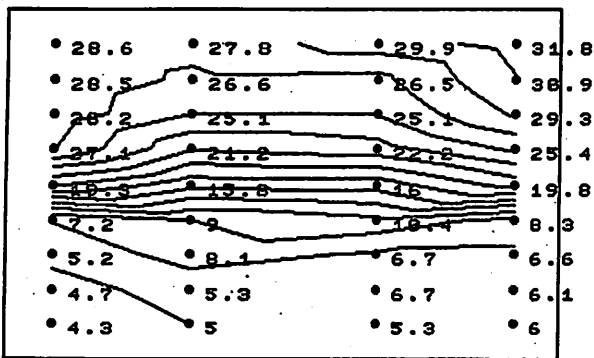
A~C 断面



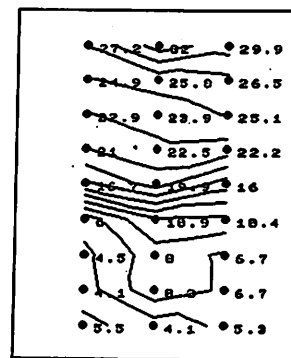
B~K 断面



D~F 断面

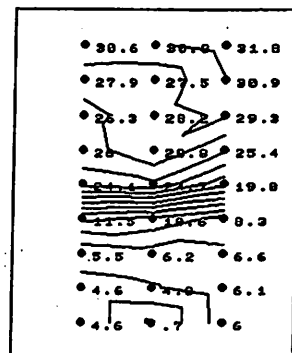


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-0-M-00
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) ***
 風速 (実大換算) 0 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/25



J~L 断面

図 3.18d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

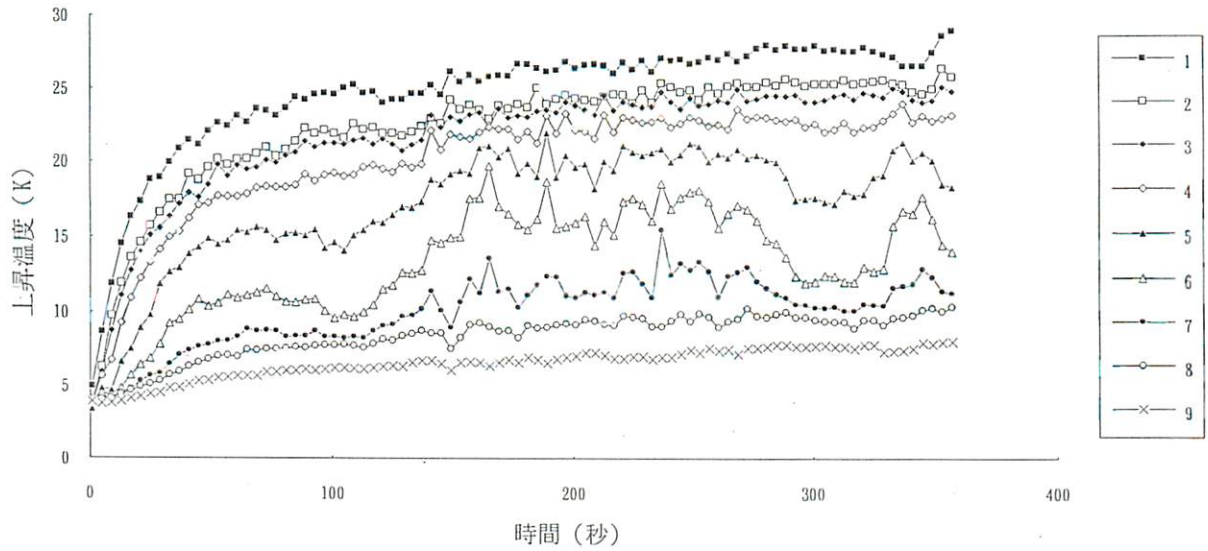


図 3.19a: 各高さにおける平均温度 (Case-0-L-00)

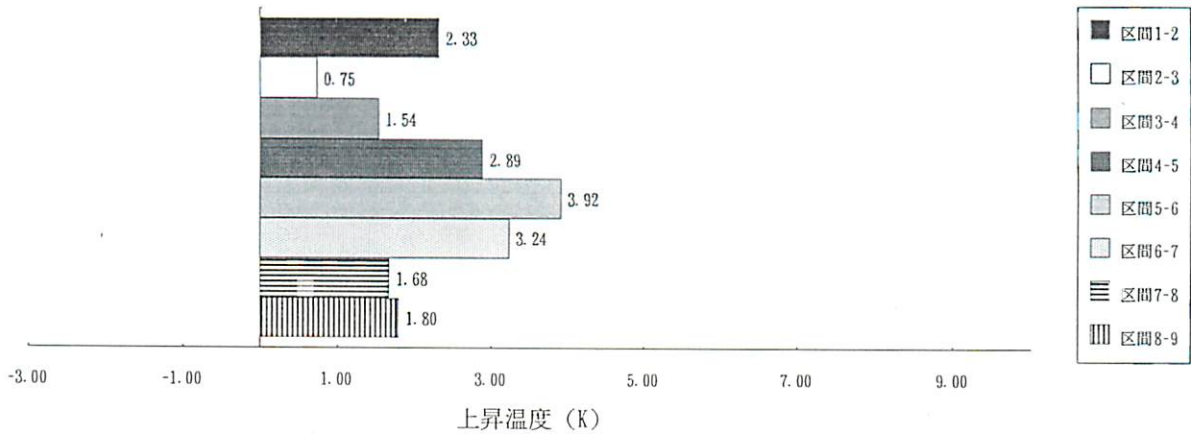
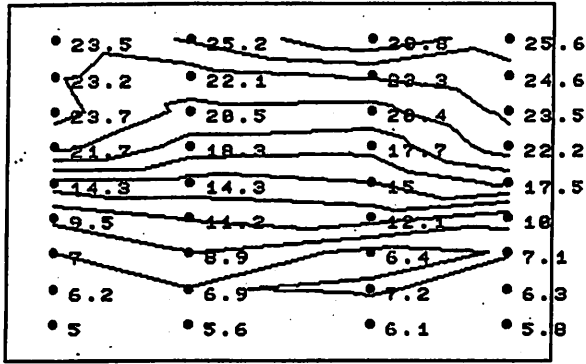


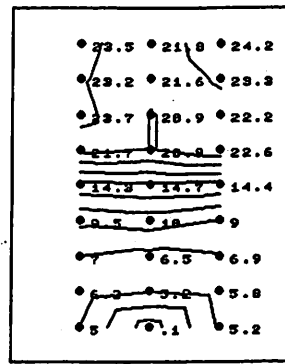
図 3.19b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-0-L-00)



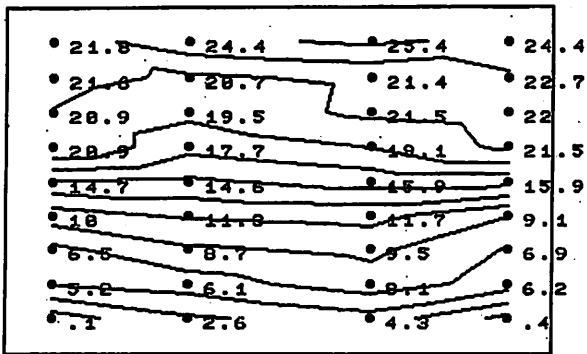
図 3.19c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-0-L-00)



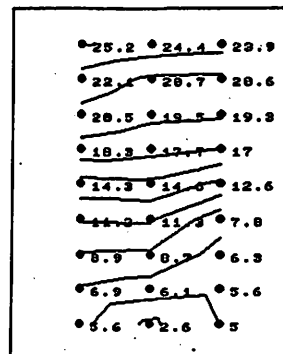
A~J 断面



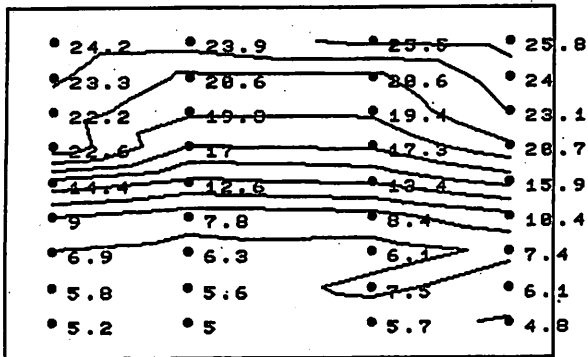
A~C 断面



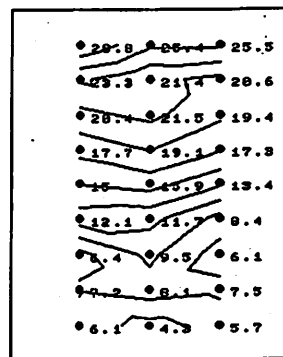
B~K 断面



D~F 断面

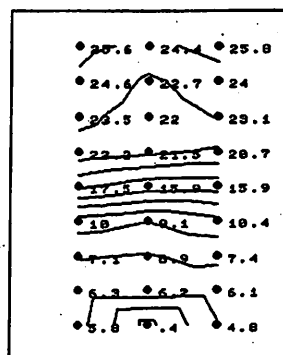


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-0-L-00
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) ***
 風速 (実大換算) 0 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/10



J~L 断面

図 3.19d: 温度分布図 (4~6分の平均)

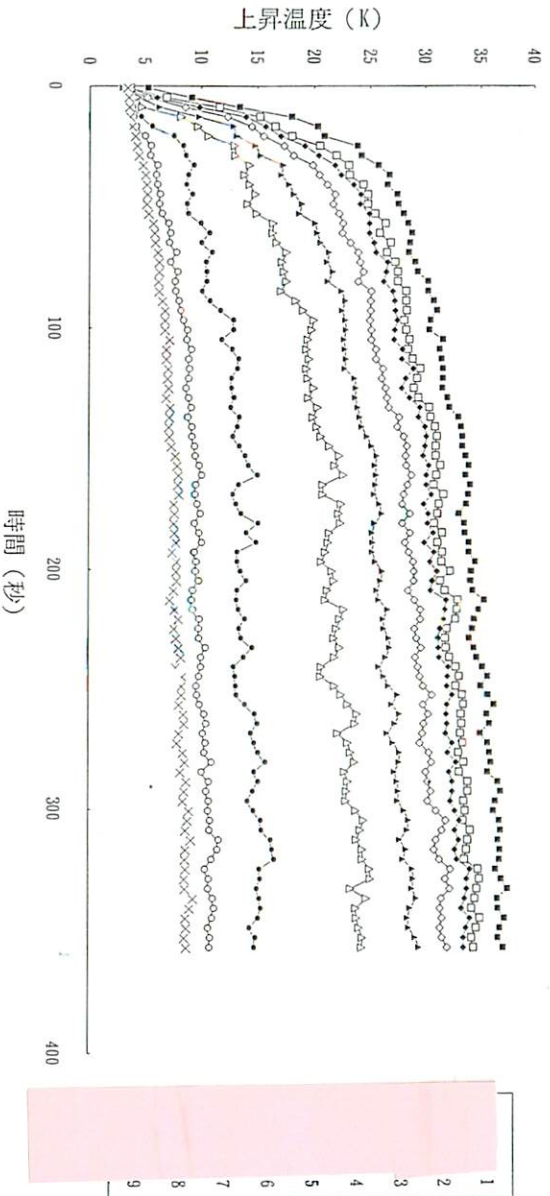


図 3.20a: 各高さにおける平均温度 (Case-1-S-05)

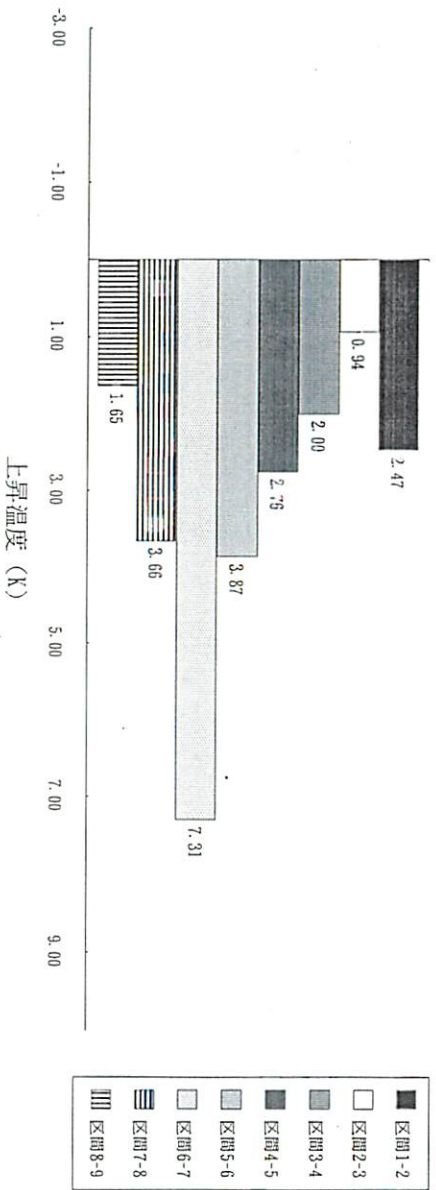
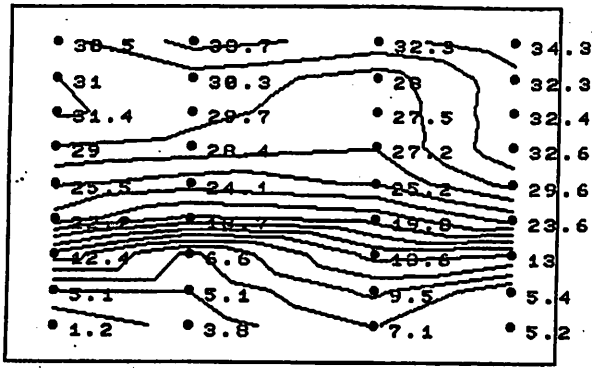


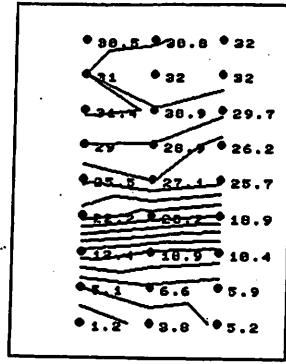
図 3.20b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-1-S-05)



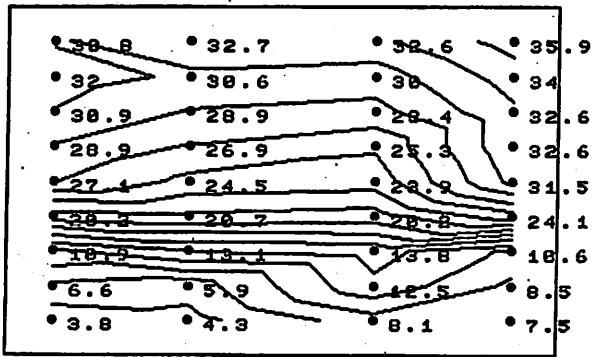
図 3.20c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-1-S-05)



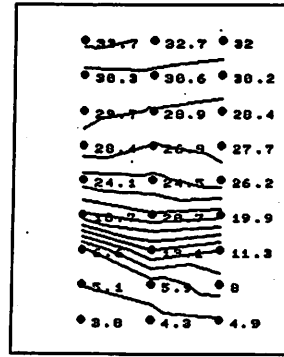
A~J 断面



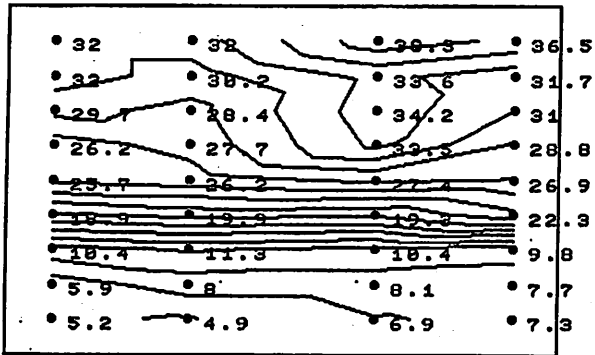
A~C 断面



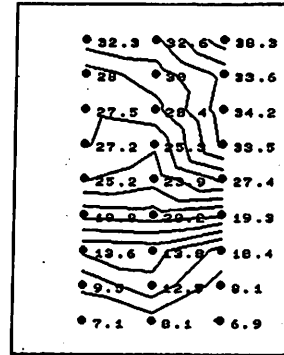
B~K 断面



D~F 断面

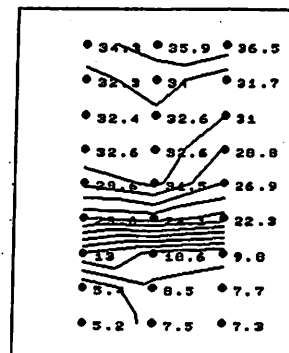


C~L 断面



G~I 断面

実験番号	Case-1-S-05
併設建物 (風上側)	有
" (風下側)	有
風向 (排煙口に)	垂直
風速 (実大換算)	5 m/s
排煙口面積 (底面積の)	1/50



J~L 断面

図 3.20d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

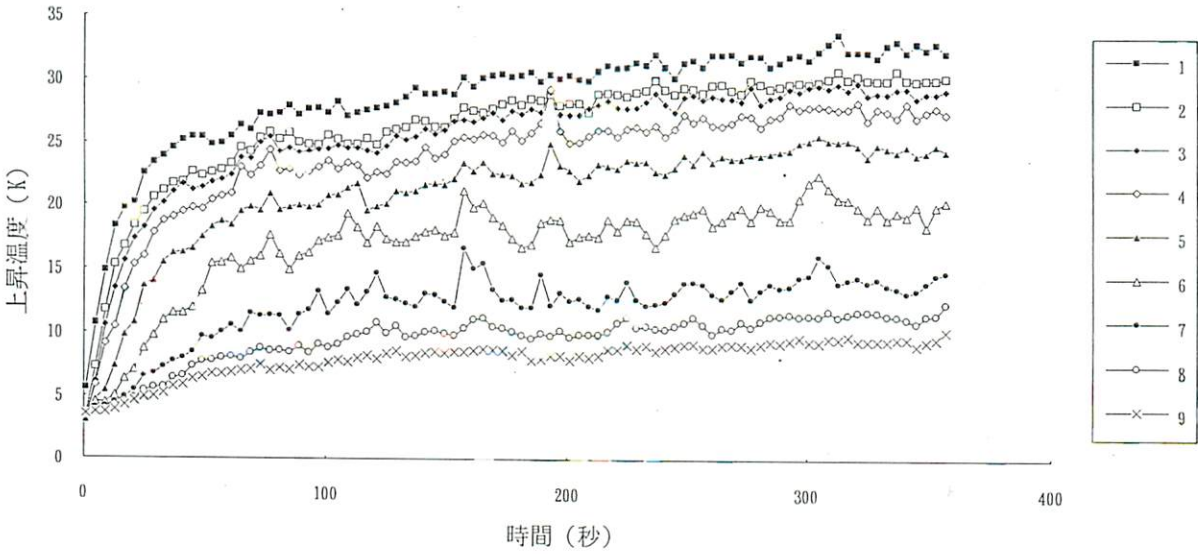


図 3.21a: 各高さにおける平均温度 (Case-1-M-05)

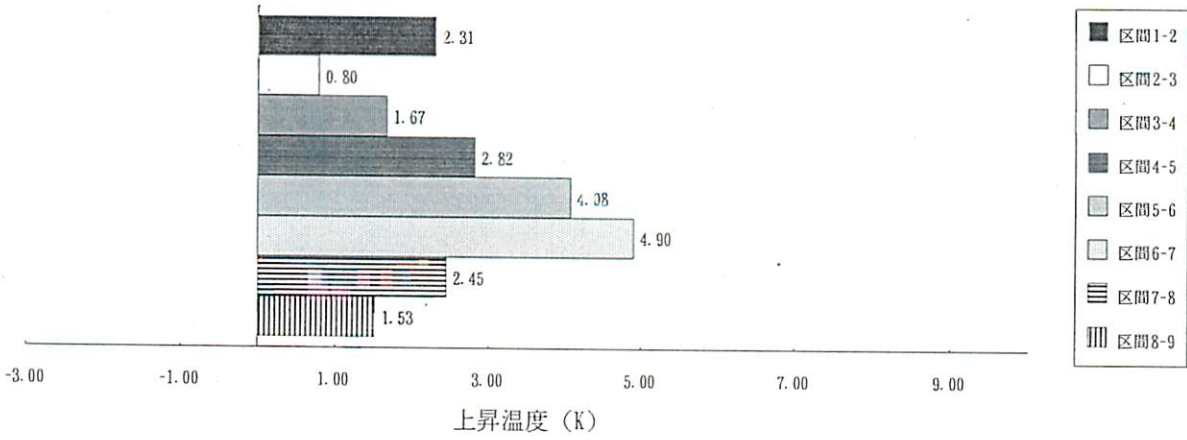
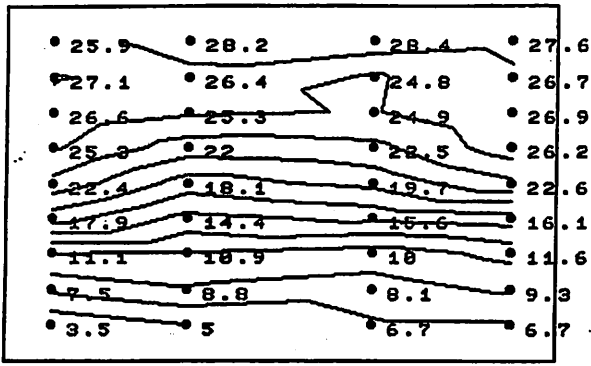


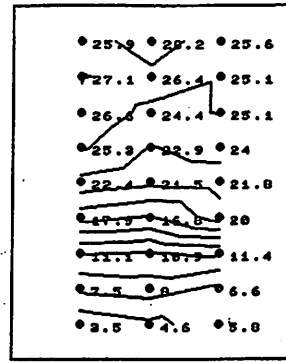
図 3.21b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-1-M-05)



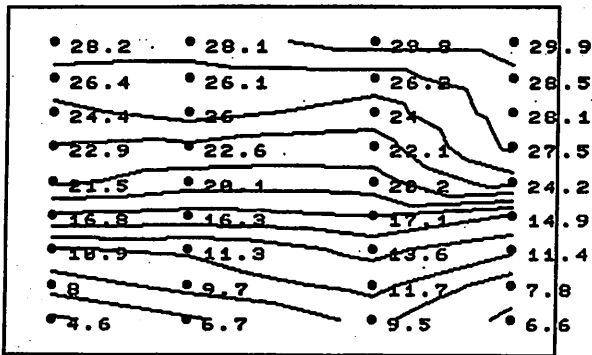
図 3.21c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-1-M-05)



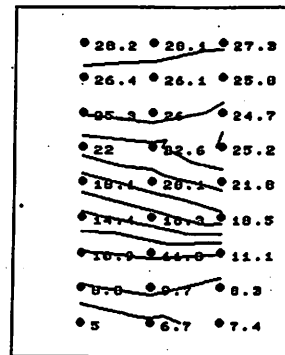
A~J 断面



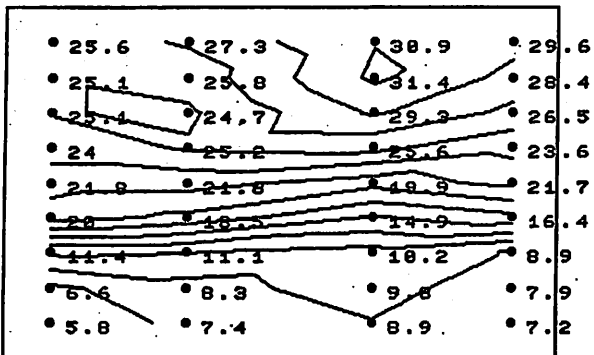
A~C 断面



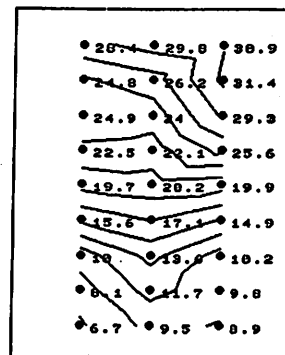
B~K 断面



D~F 断面



C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-1-M-05
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 垂直
 風速 (実大換算) 5 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/25

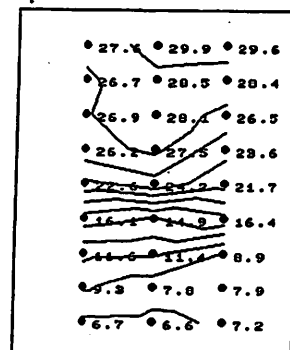


図 3.21d: 温度分布図 (4~6分の平均) J~L 断面

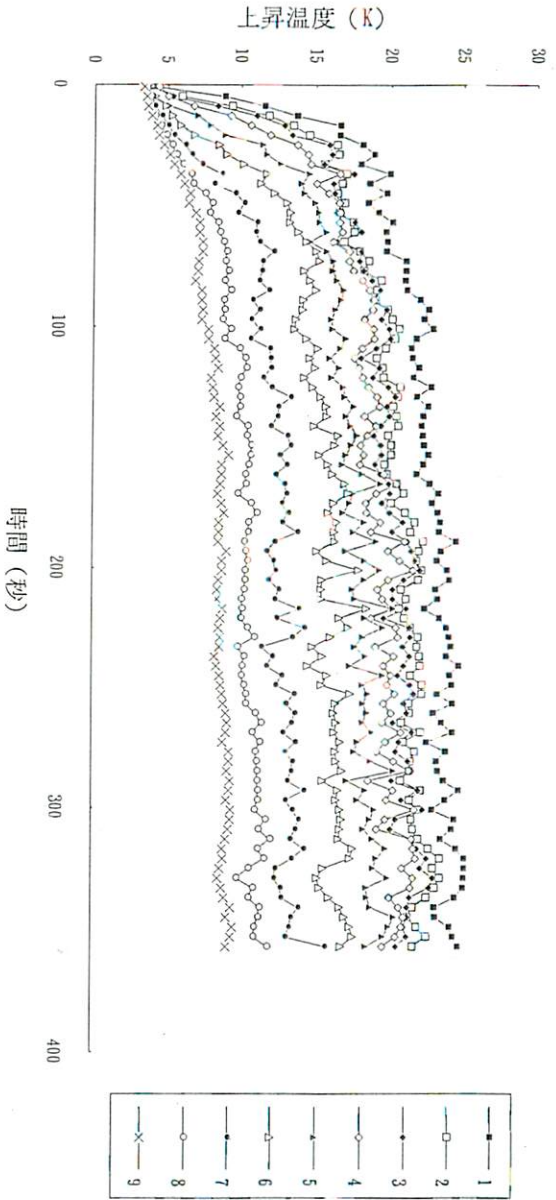


図 3.22a: 各高さにおける平均温度 (Case-1-L-05)

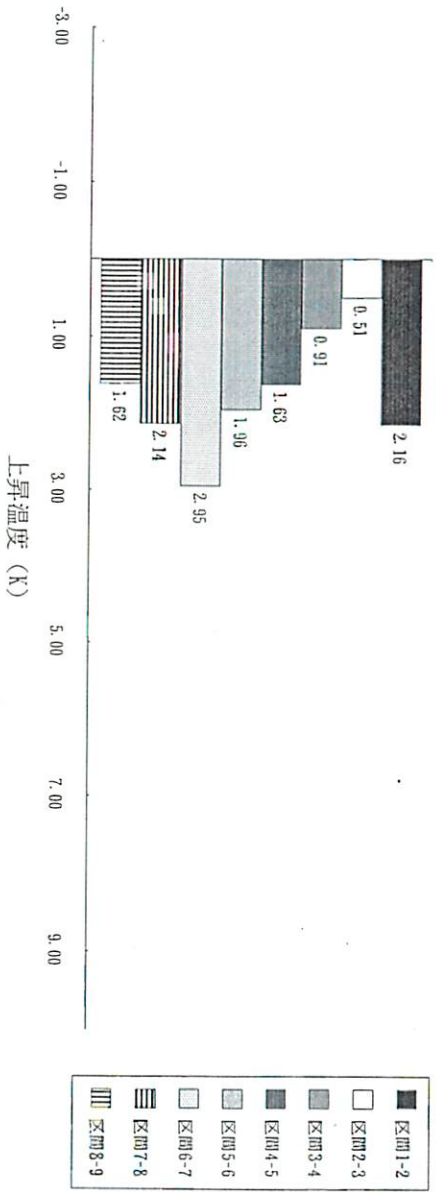
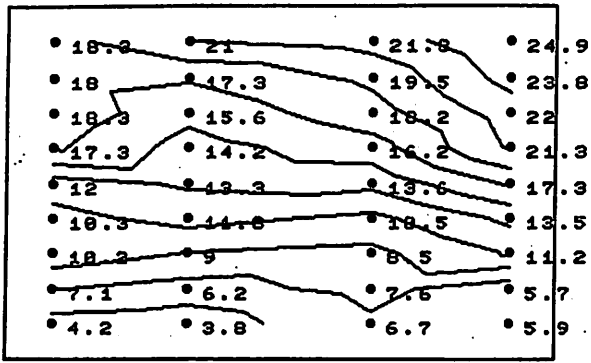


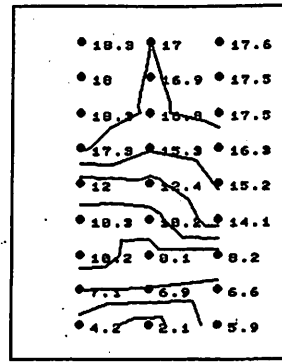
図 3.22b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-1-L-05)



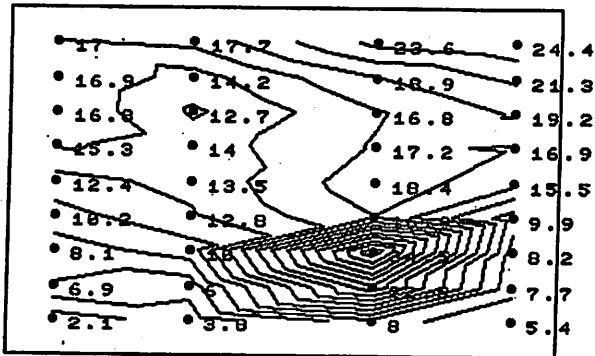
図 3.22c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-1-L-05)



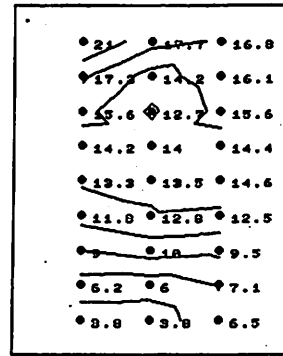
A~J 断面



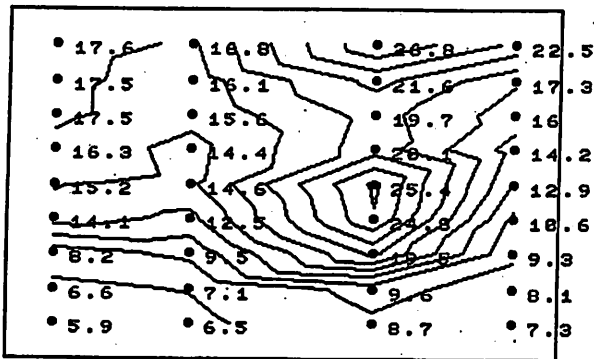
A~C 断面



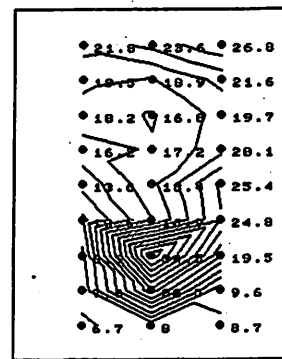
B~K 断面



D~F 断面



C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-1-L-05
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 垂直
 風速 (実大換算) 5 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/10

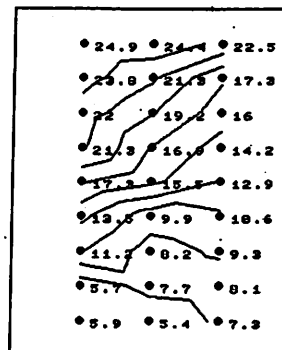


図 3.22d: 温度分布図 (4~6 分の平均) J~L 断面

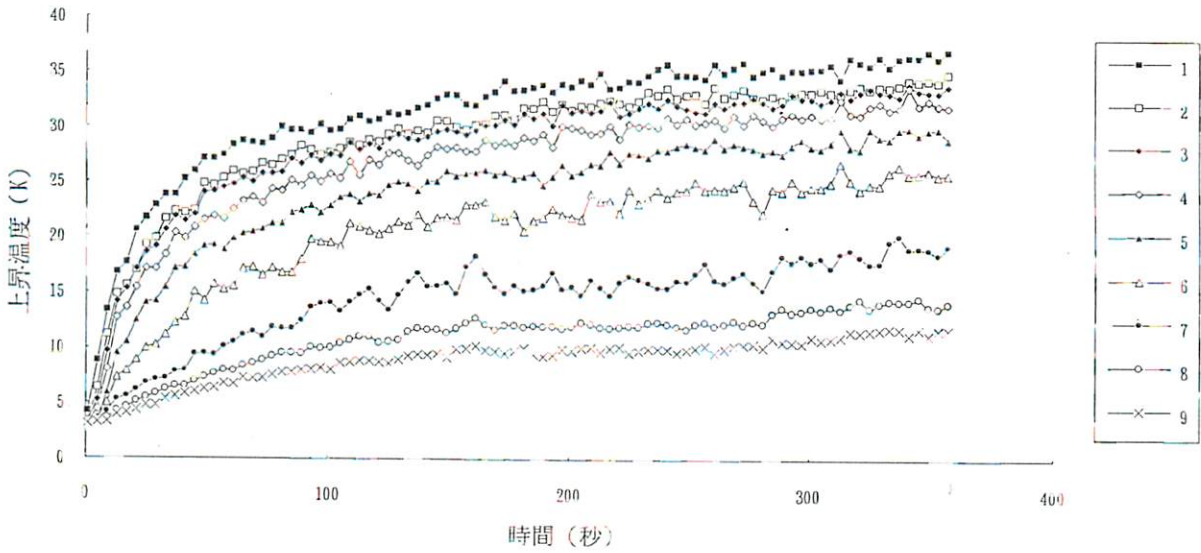


図 3.23a: 各高さにおける平均温度 (Case-1-S-10)

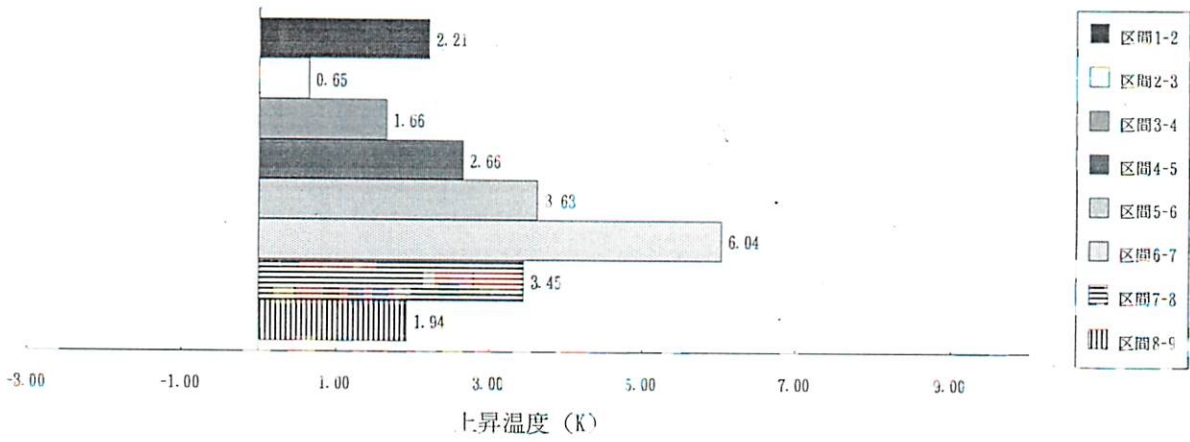
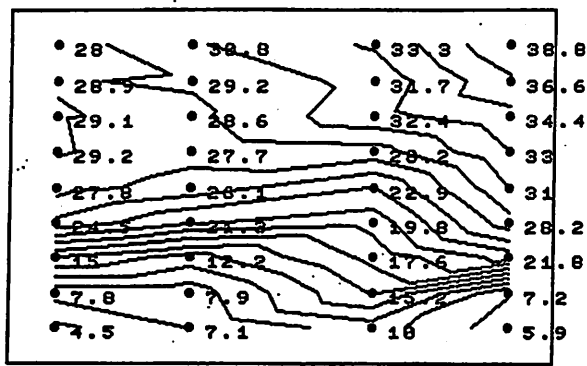


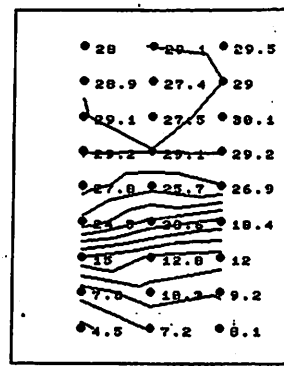
図 3.23b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-1-S-10)



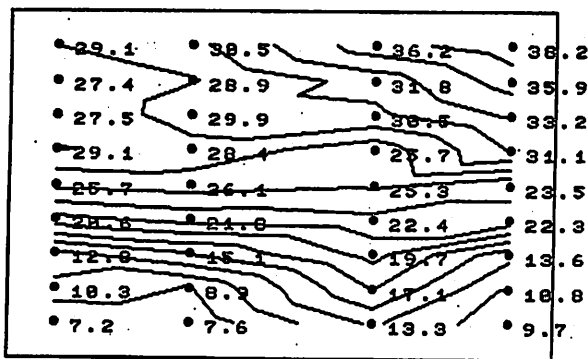
図 3.23c: 実験開始約2分後の可視化写真 (Case-1-S-10)



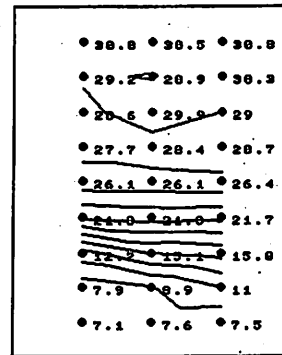
A~J 断面



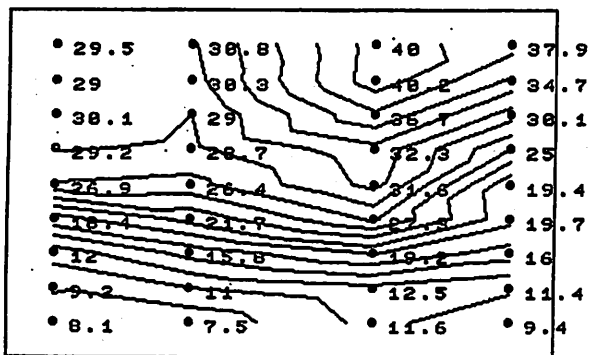
A~C 断面



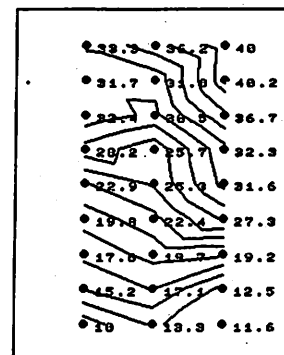
B~K 断面



D~F 断面



C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-1-S-10
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 垂直
 風速 (実大換算) 10 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/50

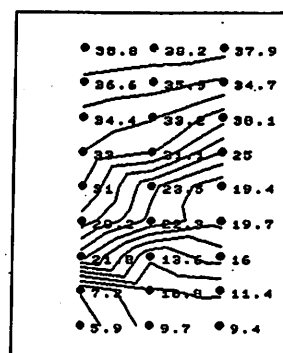


図 3.23d: 温度分布図 (4~6 分の平均) J~L 断面

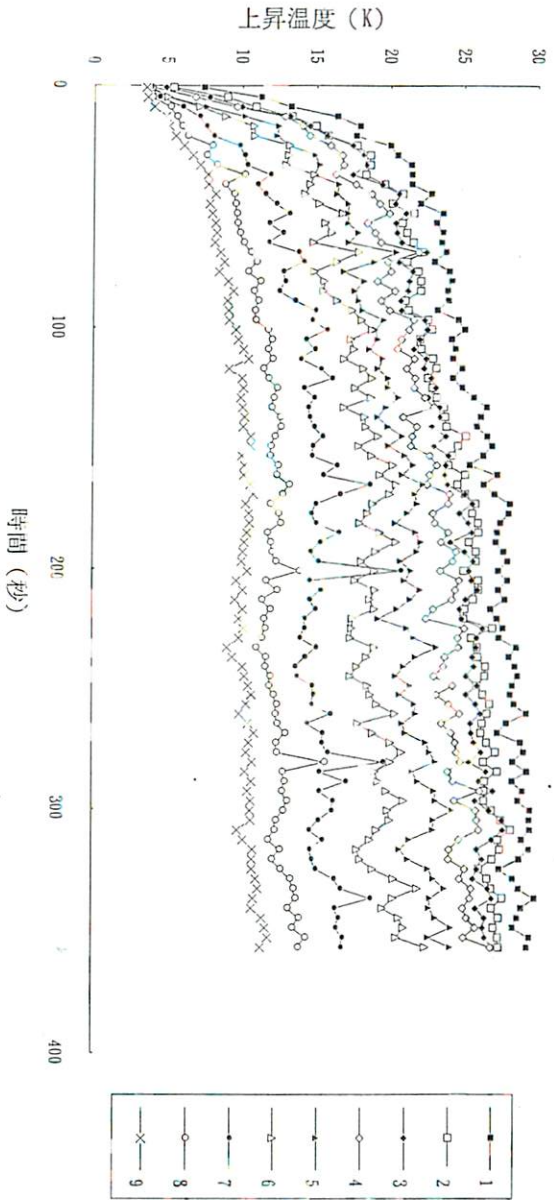


図 3.24a: 各高さにおける平均温度 (Case-1-M-10)

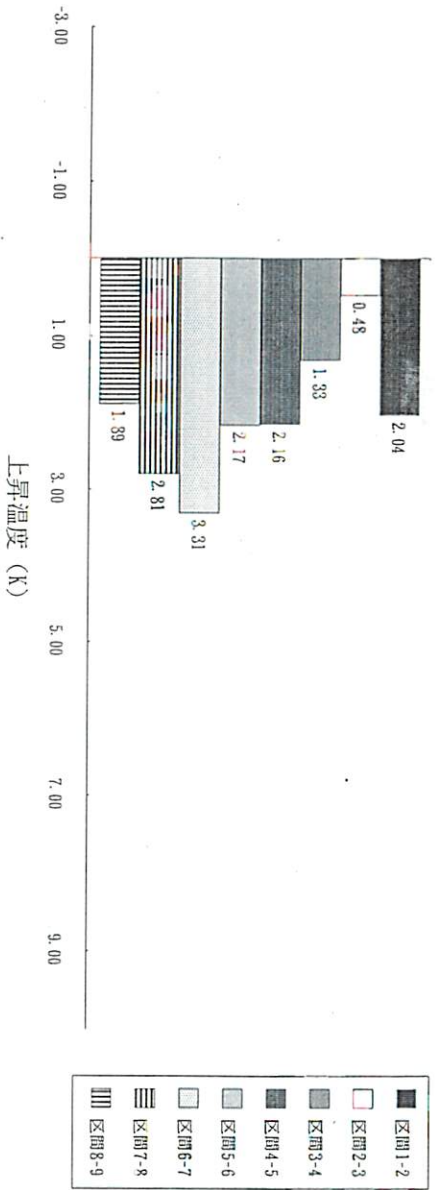
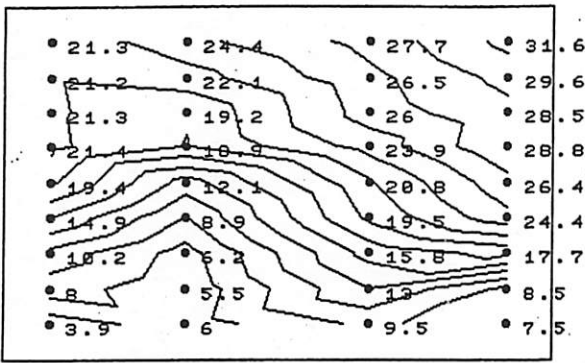
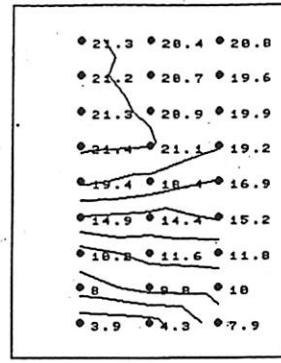
図 3.24b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-1-M-10)

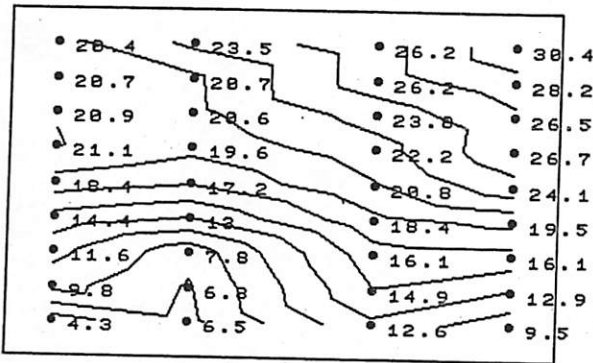
図 3.24c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-1-M-10)



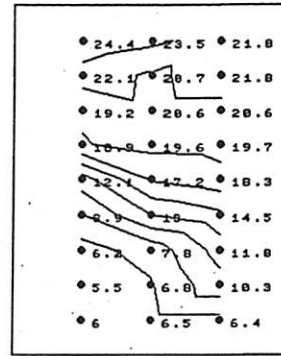
A~J 断面



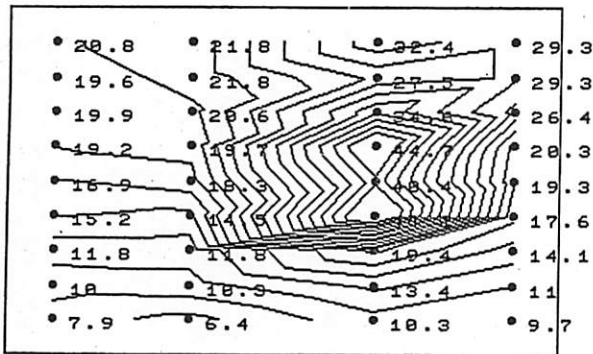
A~C 断面



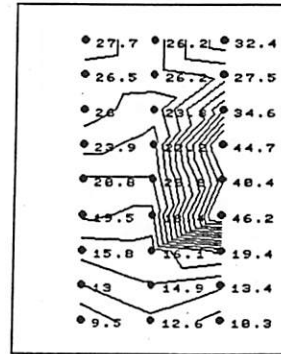
B~K 断面



D~F 断面

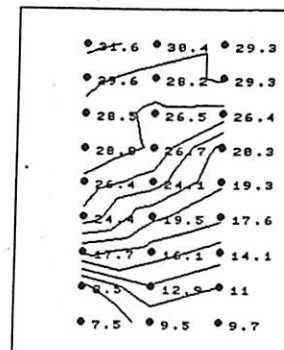


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-1-M-10
 併設建物（風上側） 有
 "（風下側） 有
 風向（排煙口に） 垂直
 風速（実大換算） 10 m/s
 排煙口面積（底面積の） 1/25



J~L 断面

図 3.24d: 温度分布図（4~6 分の平均）

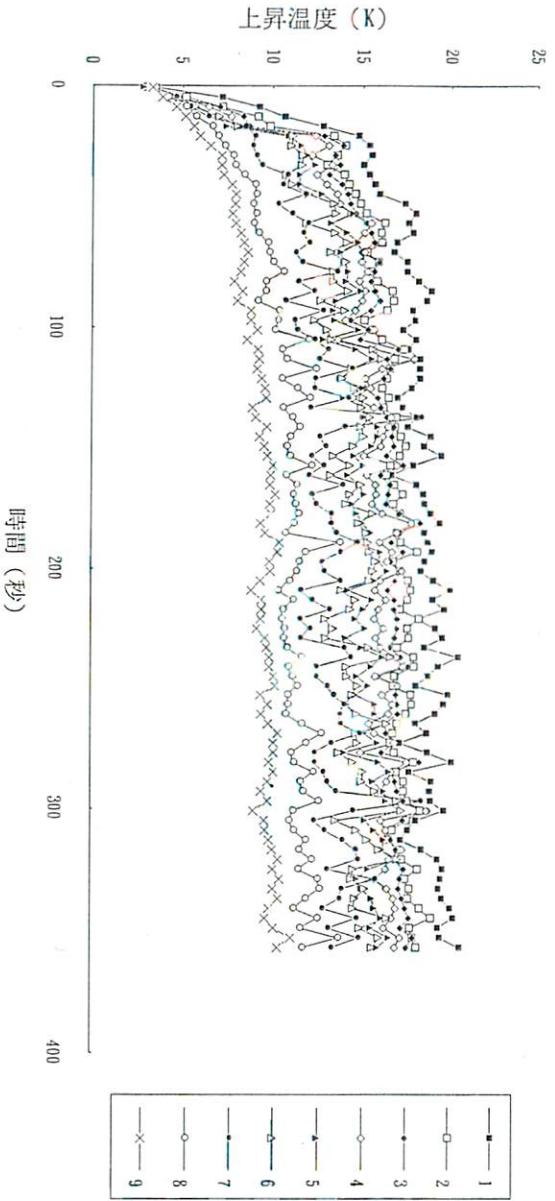


図 3.25a: 各高さにおける平均温度 (Case-1-L-10)

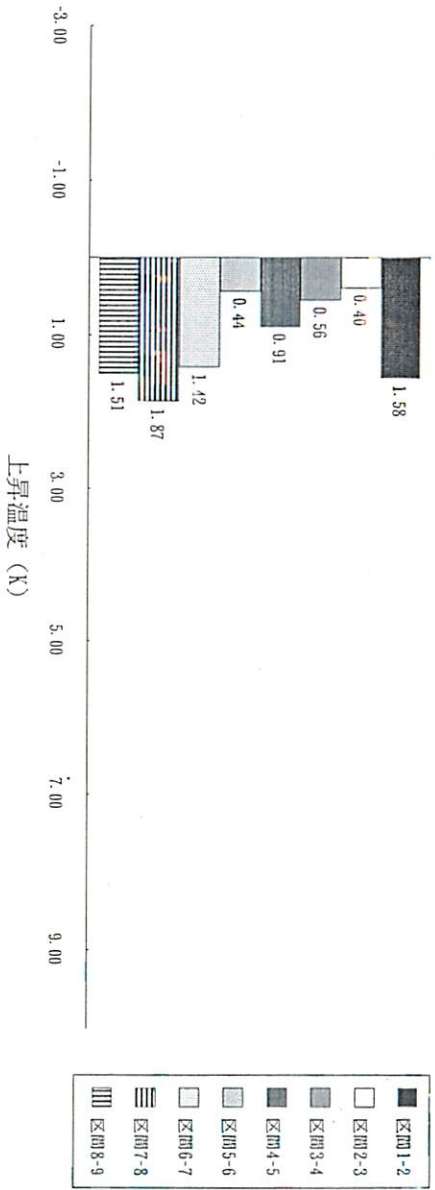


図 3.25b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-1-L-10)

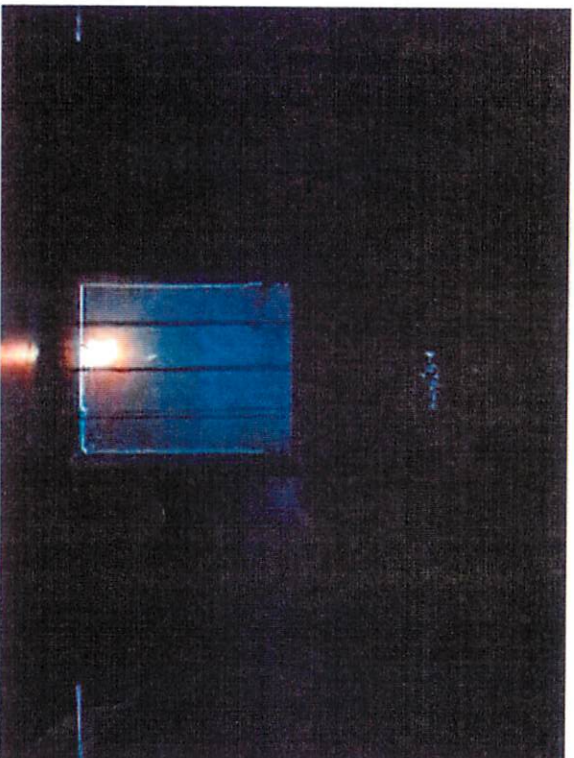
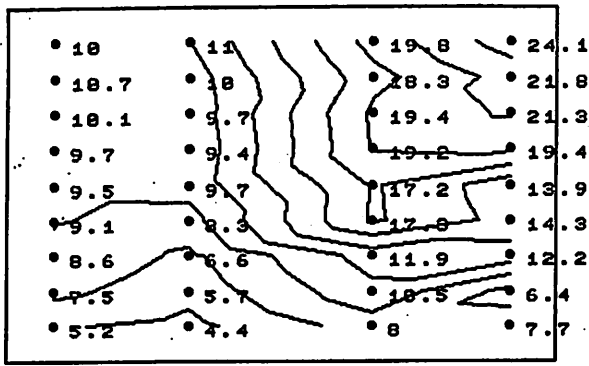
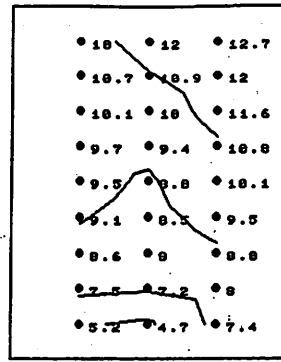


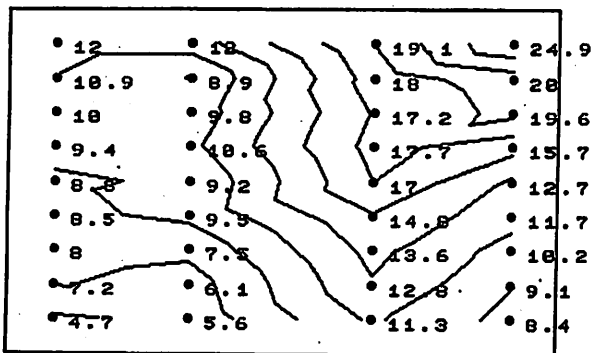
図 3.25c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-1-L-10)



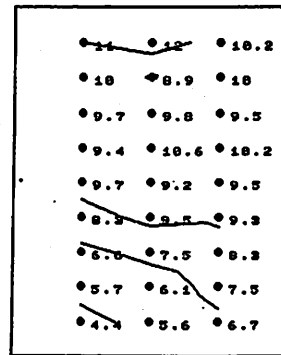
A~J 断面



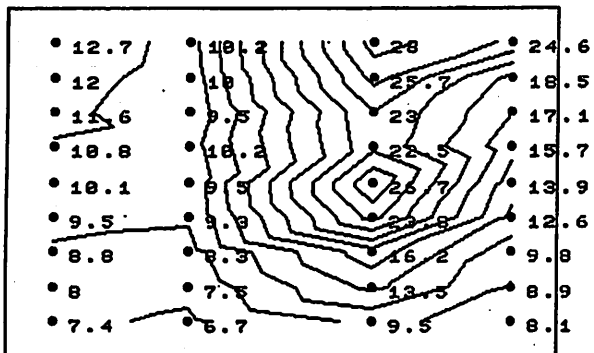
A~C 断面



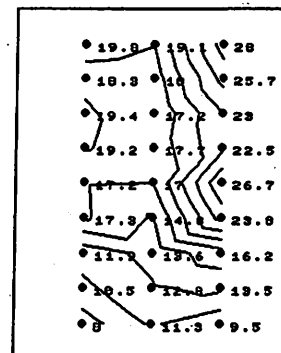
B~K 断面



D~F 断面



C~L 断面



G~I 断面

実験番号	Case-1-L-10
併設建物 (風上側)	有
" (風下側)	有
風向 (排煙口に)	垂直
風速 (実大換算)	10 m/s
排煙口面積 (底面積の)	1/10

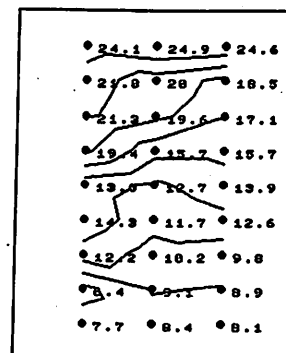


図 3.25d: 温度分布図 (4~6 分の平均) J~L 断面

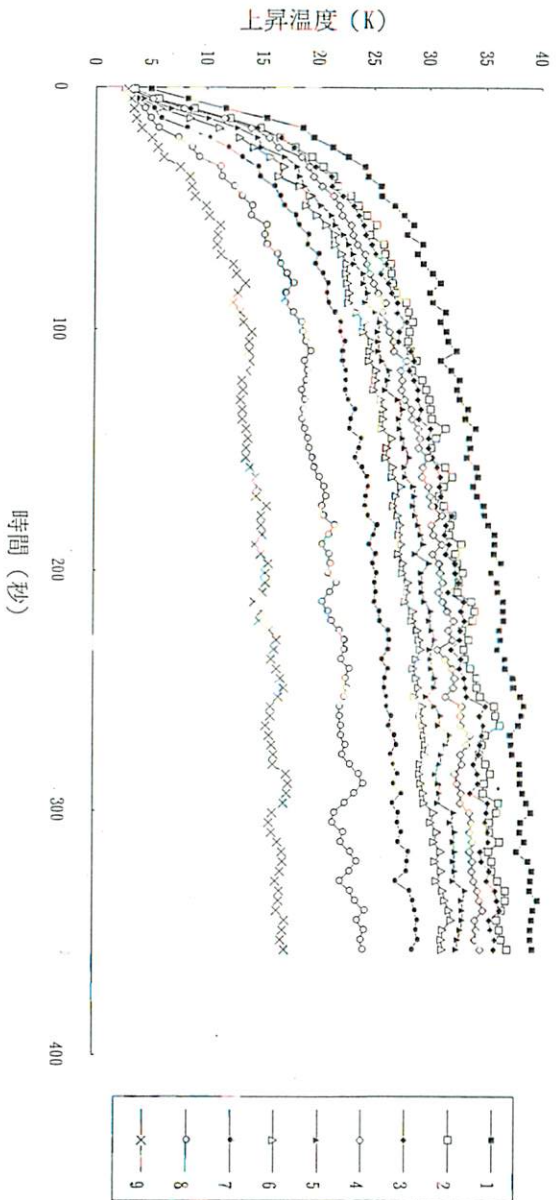


図 3.26a: 各高さにおける平均温度 (Case-2-S-05)

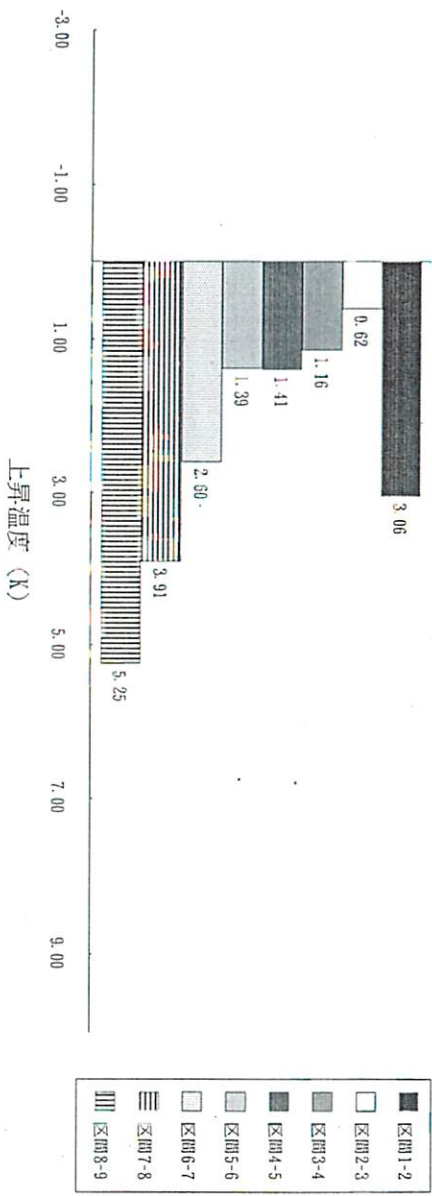
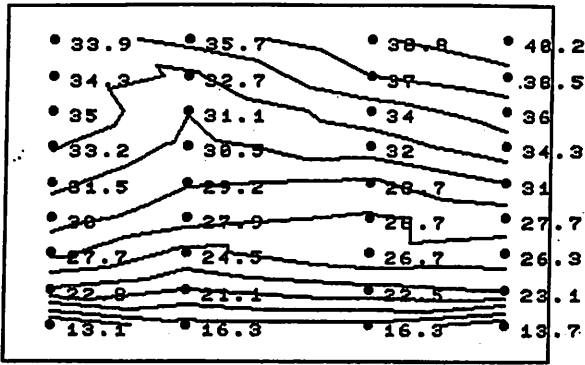
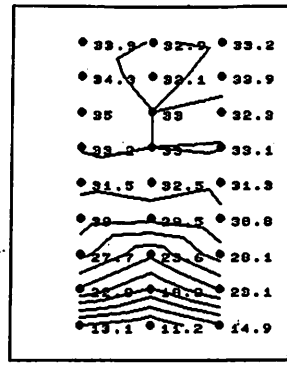
図 3.26b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-2-S-05)

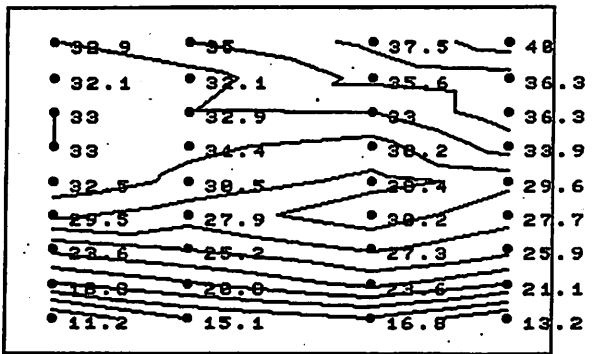
図 3.26c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-2-S-05)



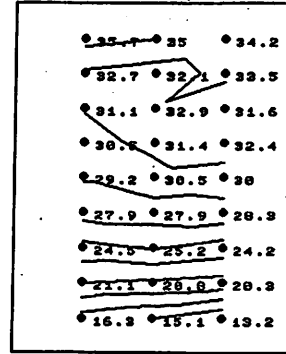
A~J 断面



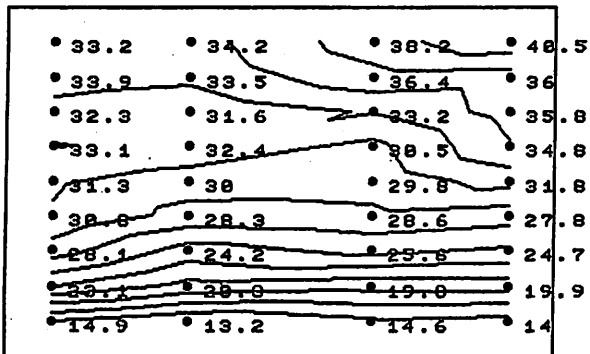
A~C 断面



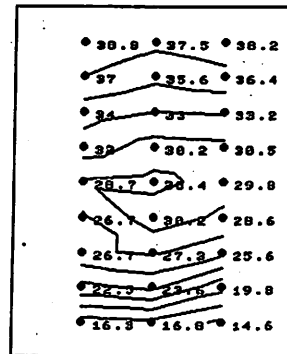
B~K 断面



D~F 断面

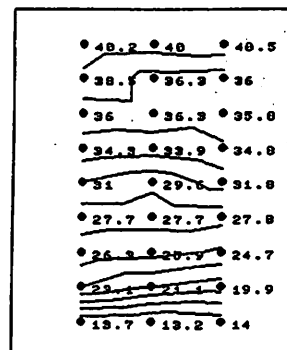


C~L 断面



G~I 断面

実験番号	Case-2-S-05
併設建物 (風上側)	無
" (風下側)	有
風向 (排煙口に)	垂直
風速 (実大換算)	5 m/s
排煙口面積 (底面積の)	1/50



J~L 断面

図 3.26d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

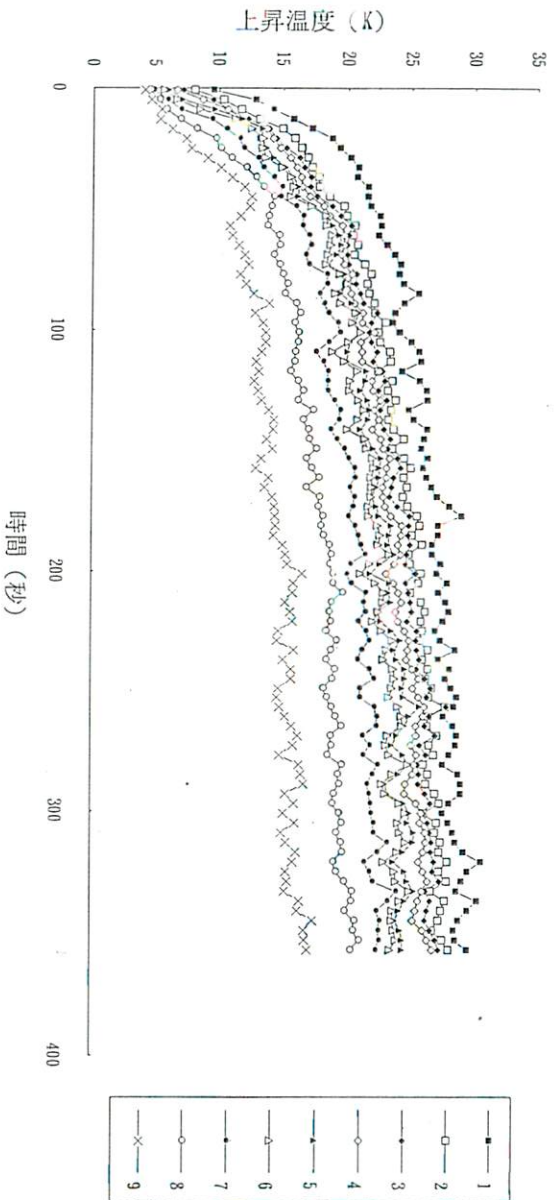


図 3.27a: 各高さにおける平均温度 (Case-2-M-05)

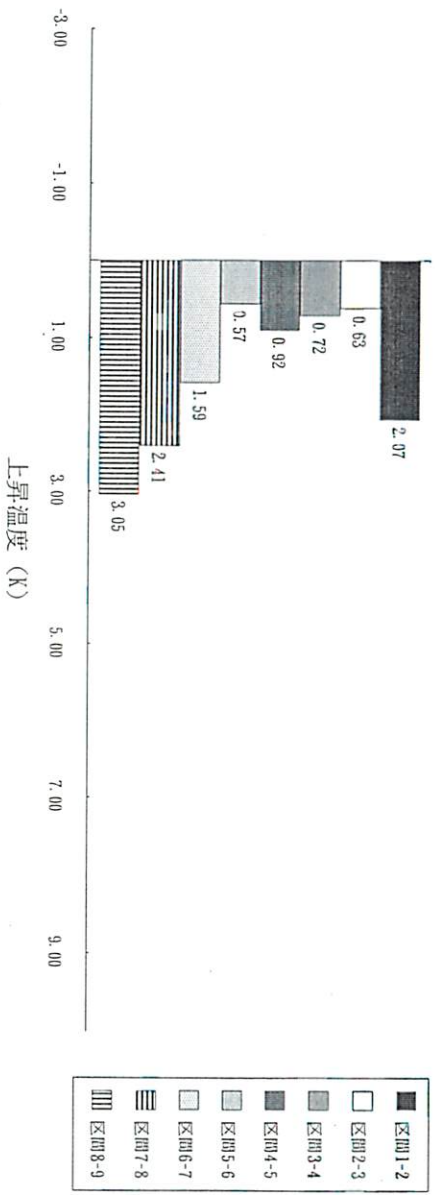


図 3.27b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-2-M-05)

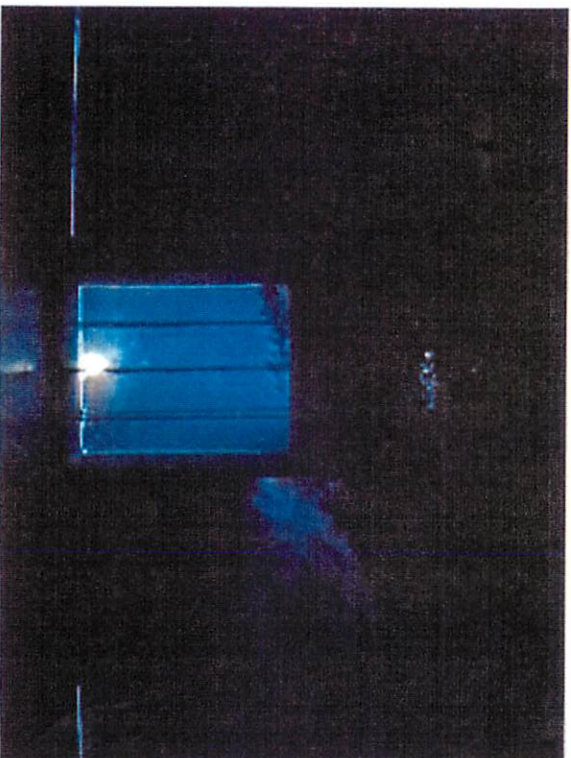
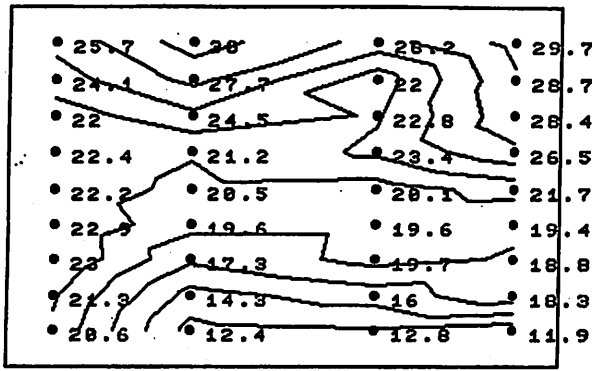
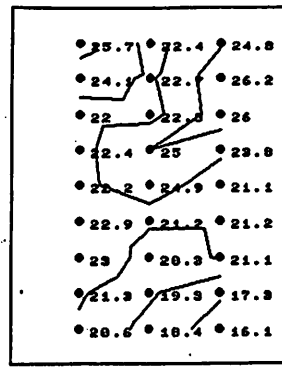


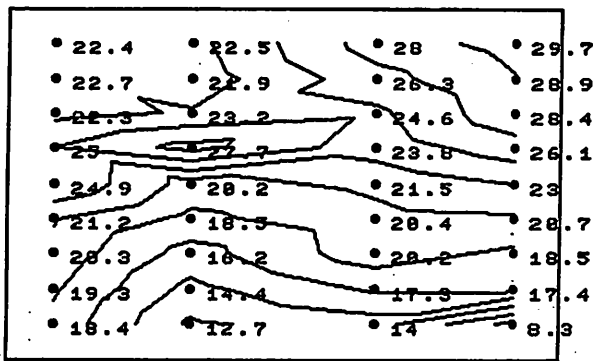
図 3.27c: 実験開始約2分後の可視化写真 (Case-2-M-05)



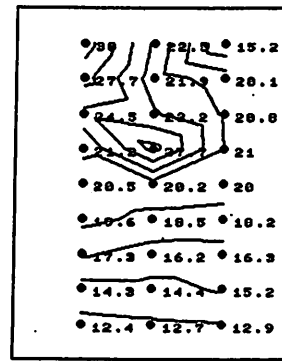
A~J 断面



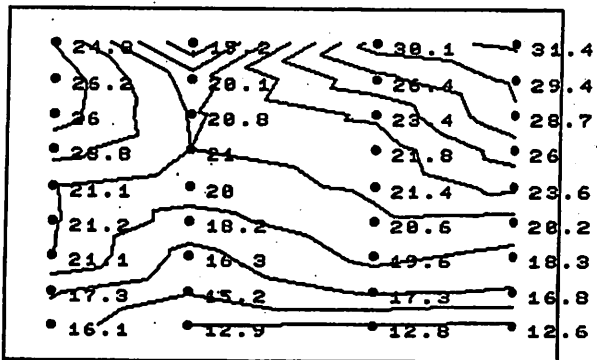
A~C 断面



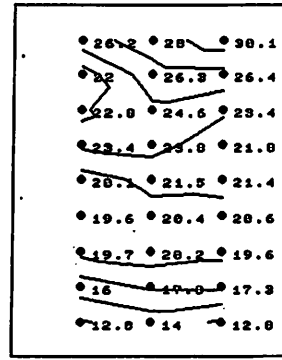
B~K 断面



D~F 断面

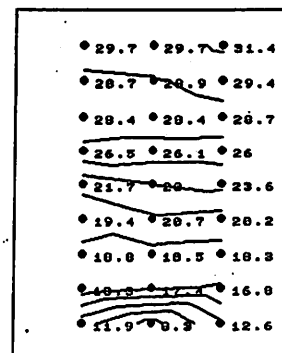


C~L 断面



G~I 断面

実験番号	Case-2-M-05
併設建物 (風上側)	無
" (風下側)	有
風向 (排煙口に)	垂直
風速 (実大換算)	5 m/s
排煙口面積 (底面積の)	1/25



J~L 断面

図 3.27d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

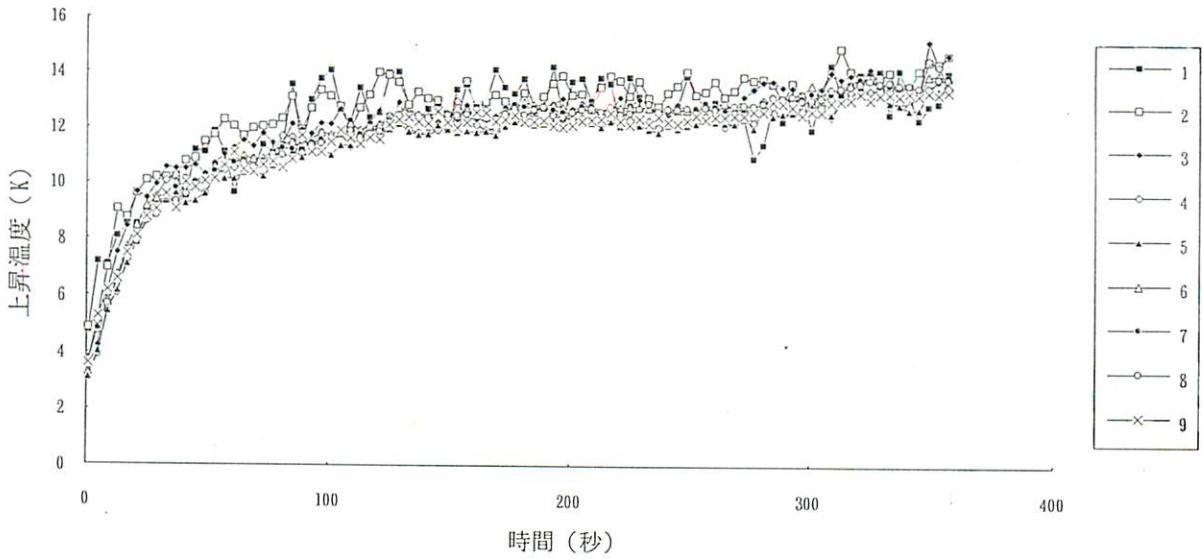


図 3.28a: 各高さにおける平均温度 (Case-2-L-05)

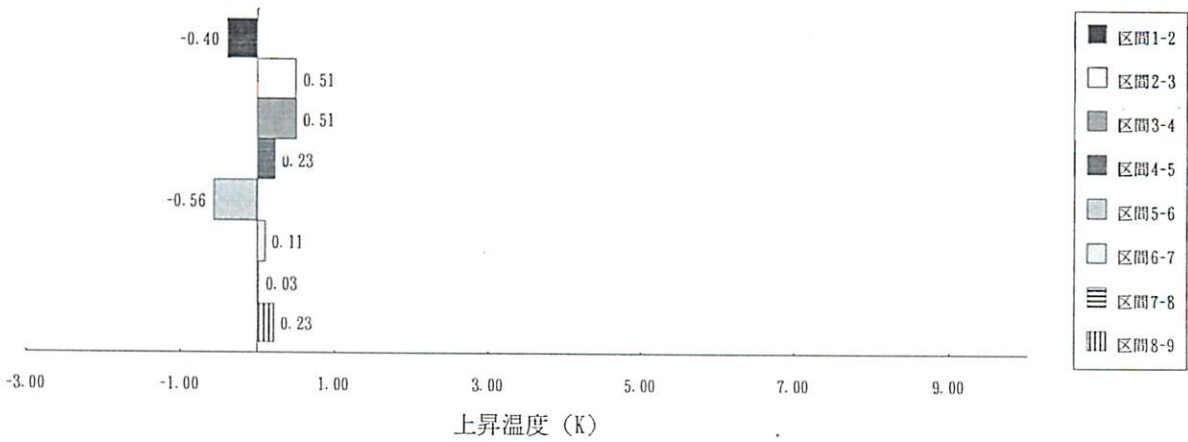


図 3.28b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-2-L-05)

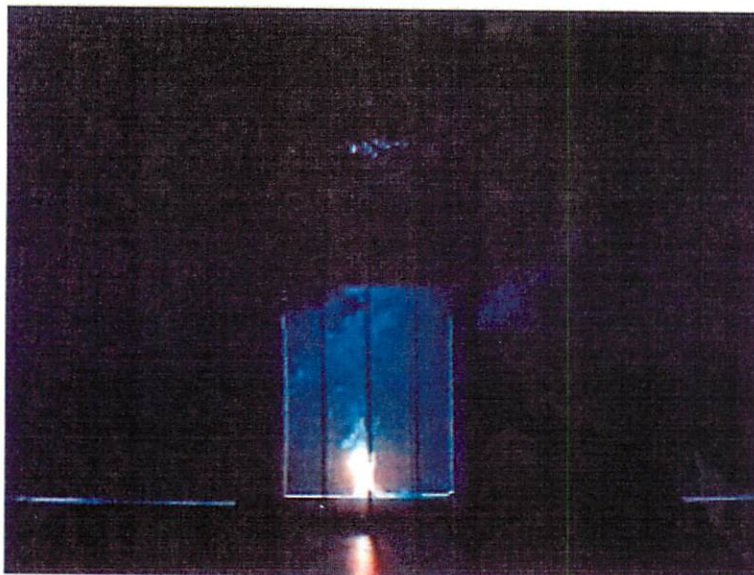
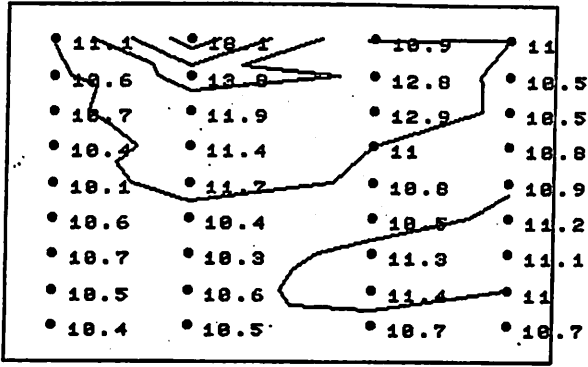
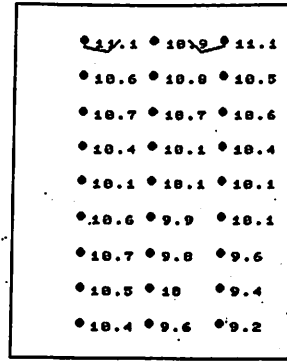


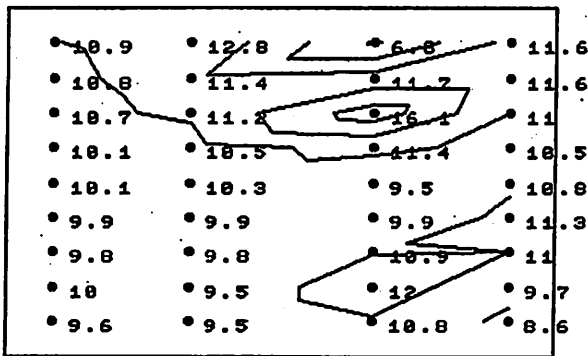
図 3.28c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-2-L-05)



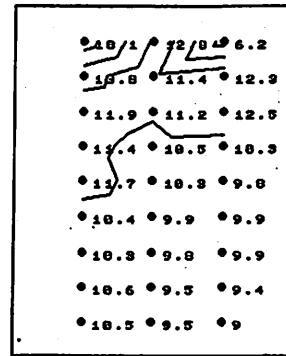
A~J 断面



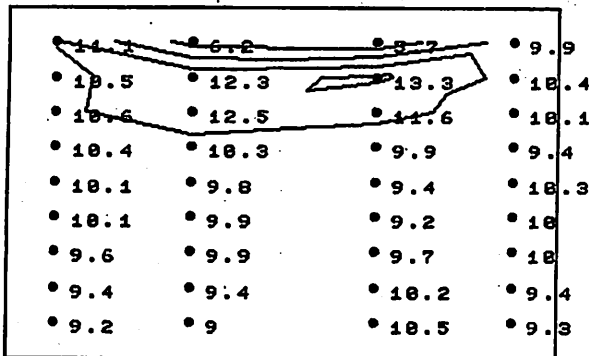
A~C 断面



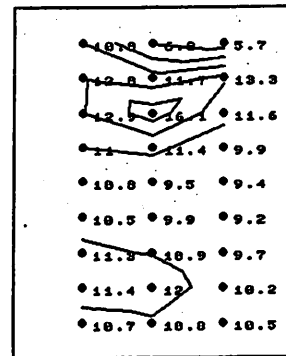
B~K 断面



D~F 断面



C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-2-L-05
 併設建物 (風上側) 無
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 垂直
 風速 (実大換算) 5 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/10

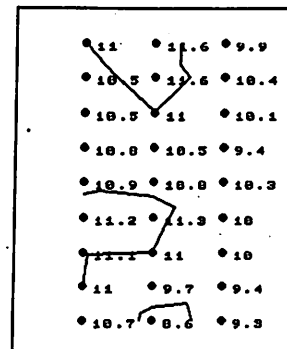


図 3.28d: 温度分布図 (4~6 分の平均) J~L 断面

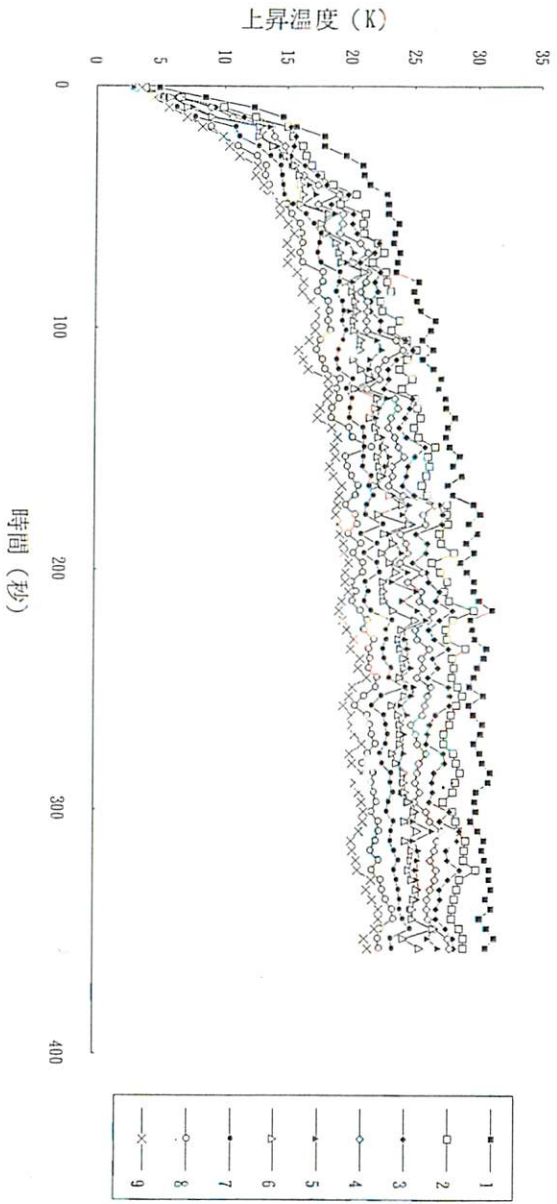


図 3.29a: 各高さにおける平均温度 (Case-2-S-10)

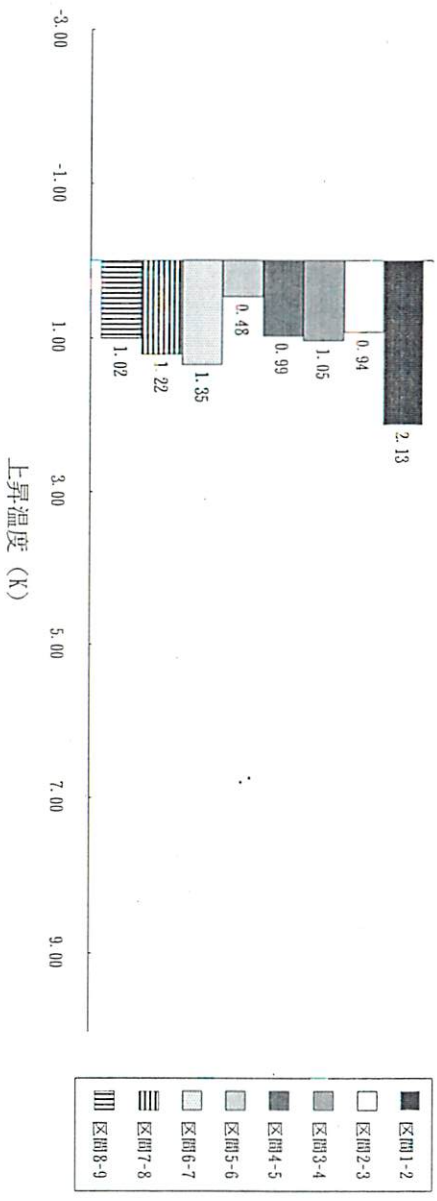


図 3.29b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-2-S-10)

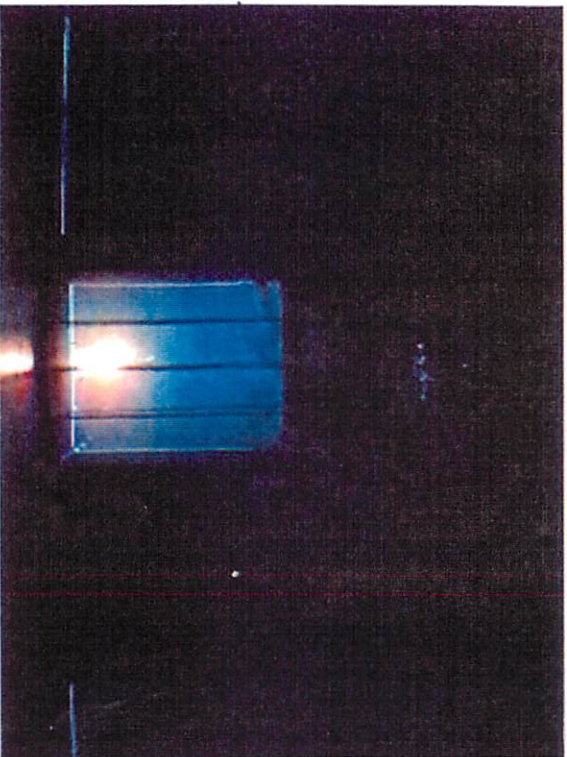
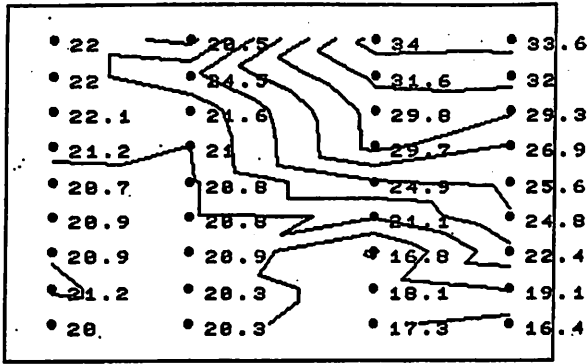
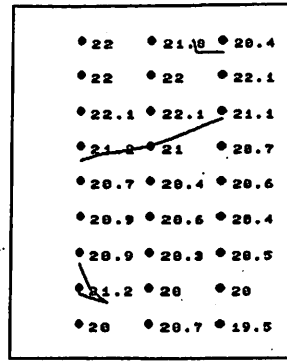


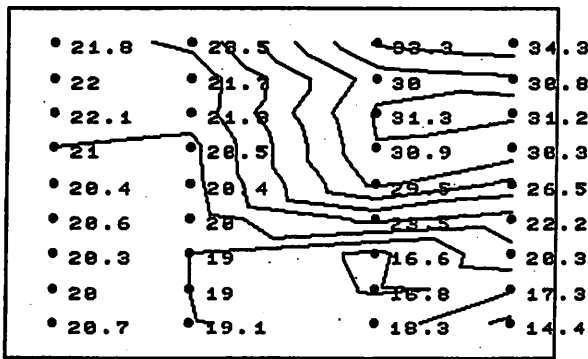
図 3.29c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-2-S-10)



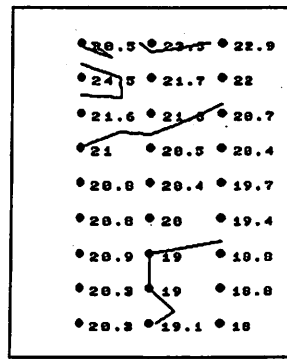
A~J 断面



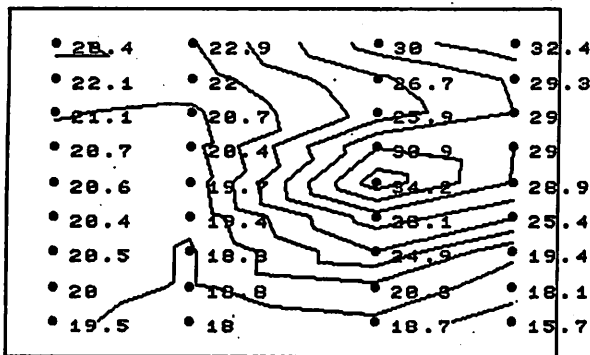
A~C 断面



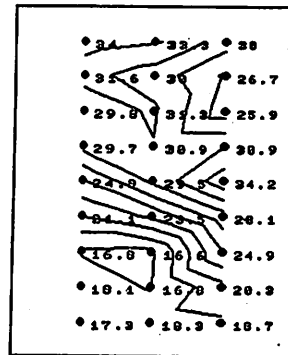
B~K 断面



D~F 断面

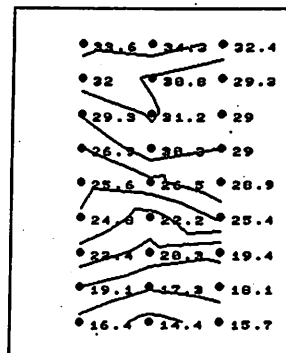


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-2-S-10
 併設建物 (風上側) 無
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 垂直
 風速 (実大換算) 10 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/50



J~L 断面

図 3.29d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

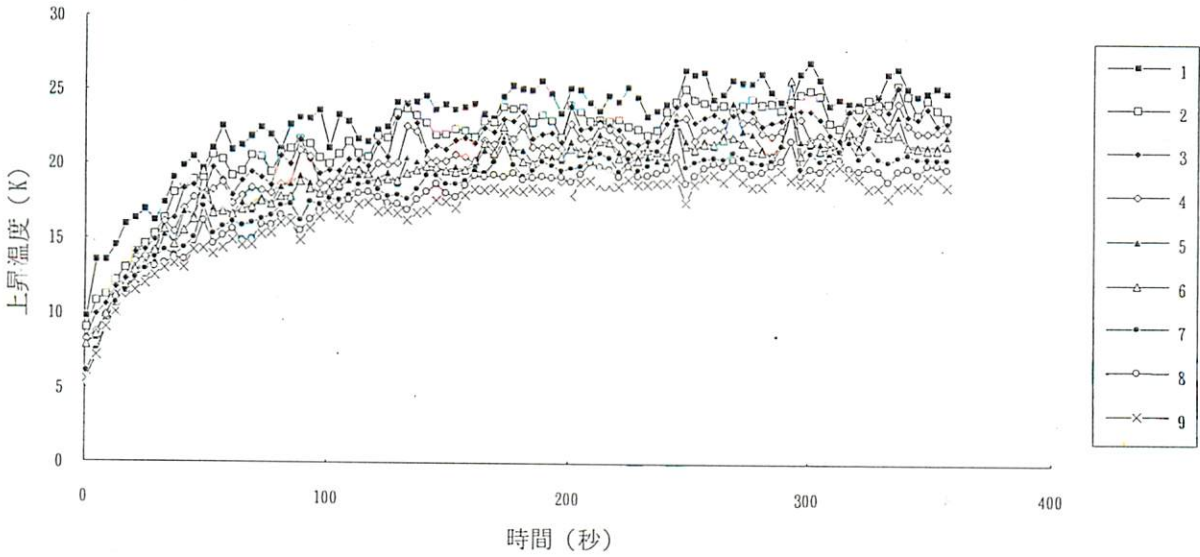


図 3.30a: 各高さにおける平均温度 (Case-2-M-10)

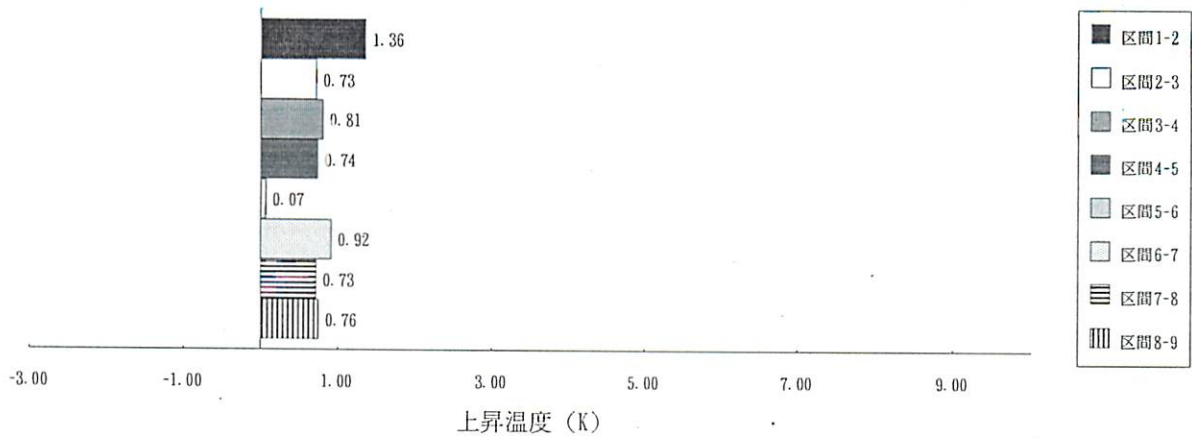


図 3.30b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-2-M-10)

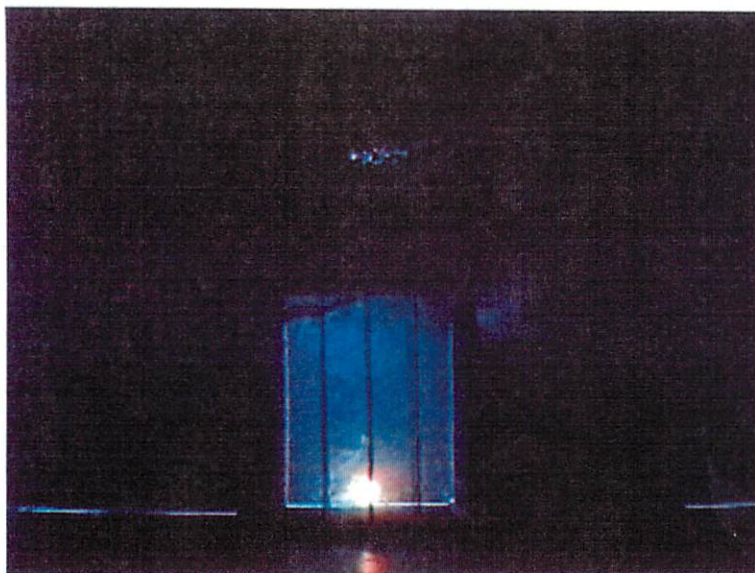
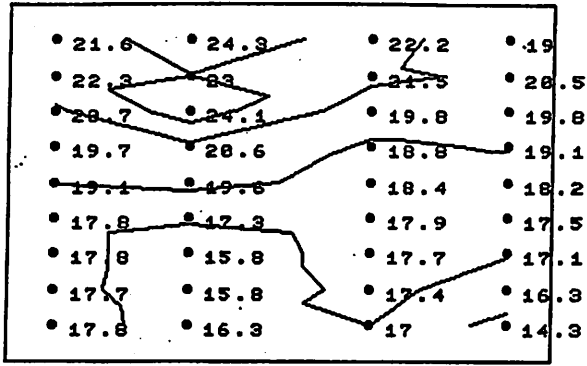
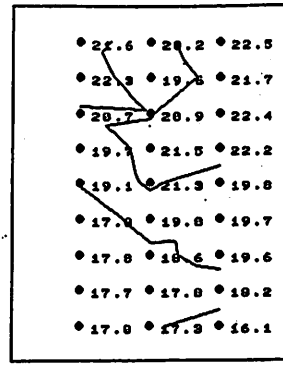


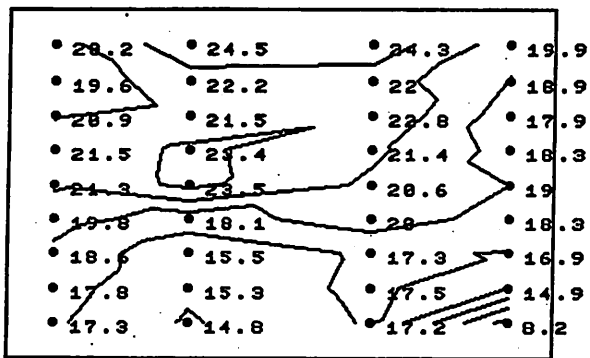
図 3.30c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-2-M-10)



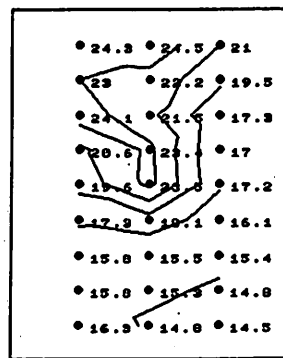
A~J 断面



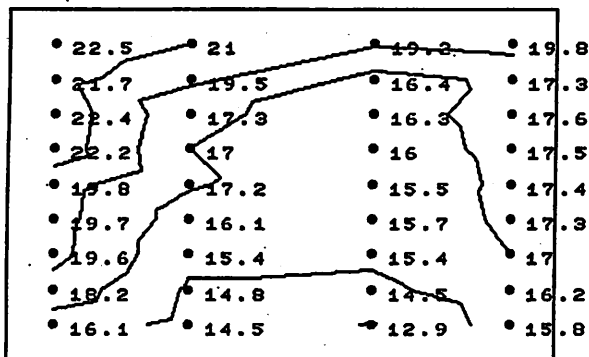
A~C 断面



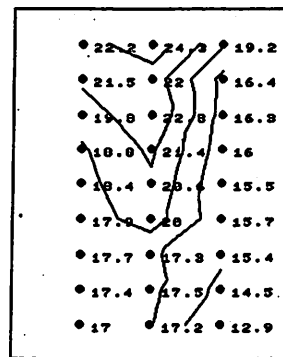
B~K 断面



D~F 断面



C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-2-M-10
 併設建物 (風上側) 無
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 垂直
 風速 (実大換算) 10 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/25

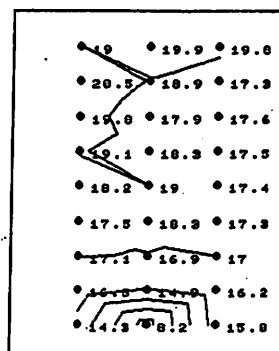


図 3.30d: 温度分布図 (4~6 分の平均) J~L 断面

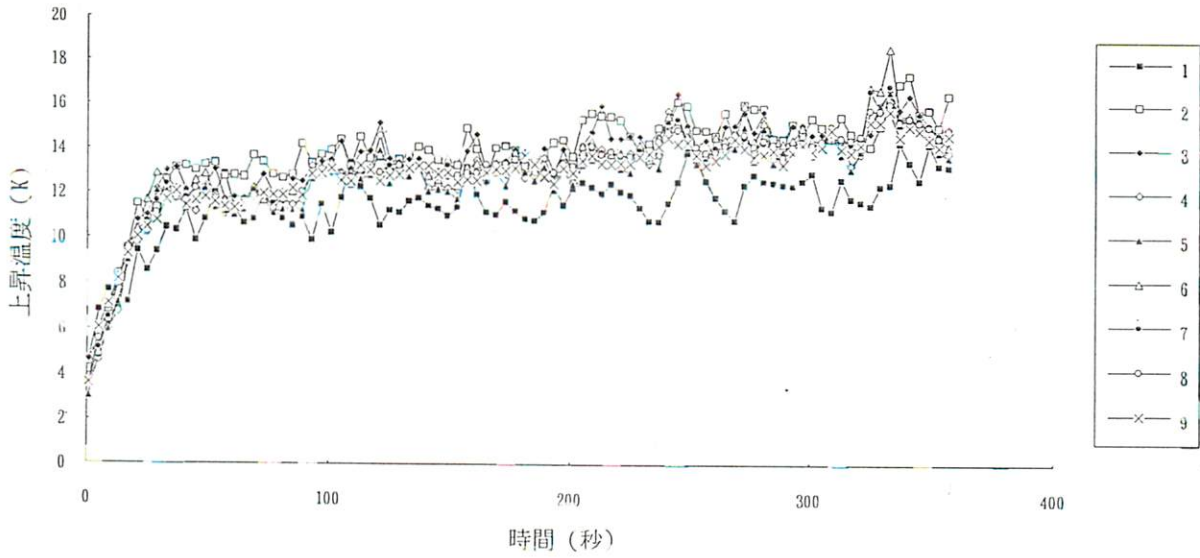


図 3.31a: 各高さにおける平均温度 (Case-2-L-10)

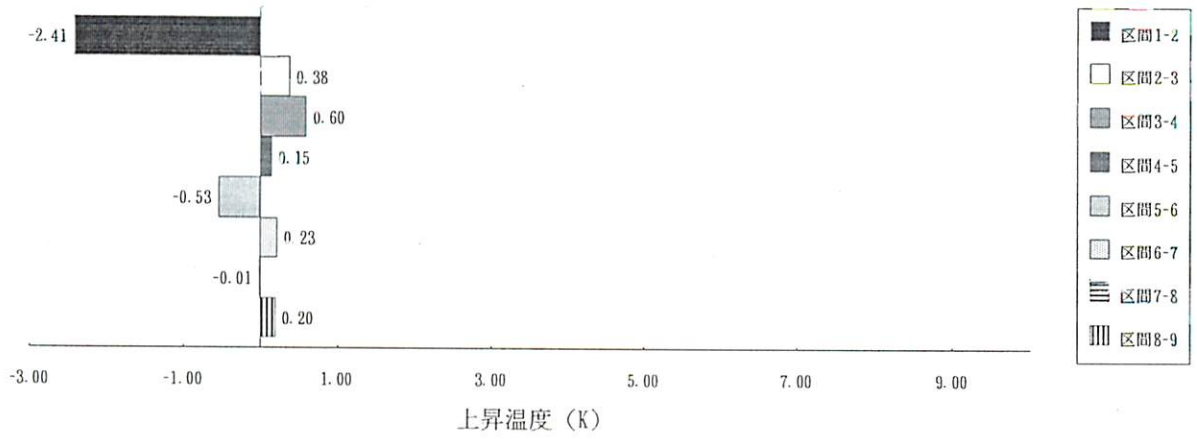


図 3.31b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-2-L-10)

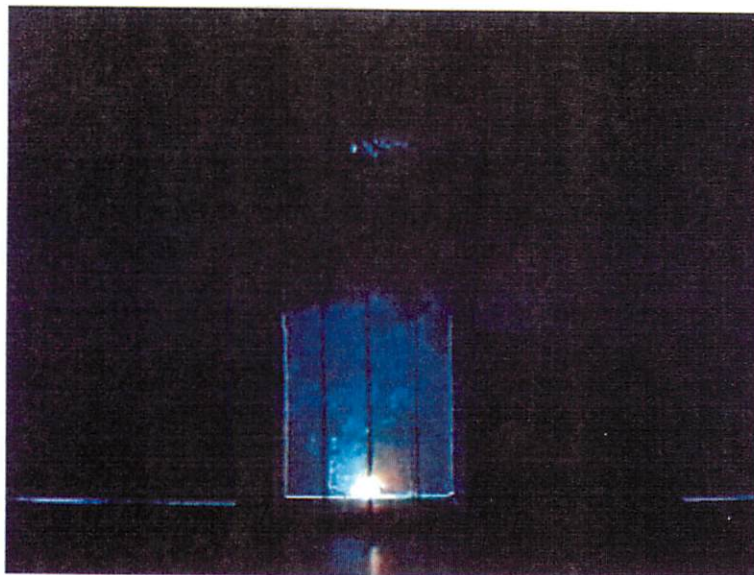
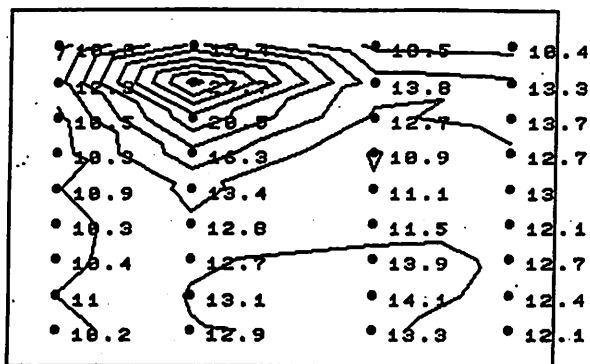
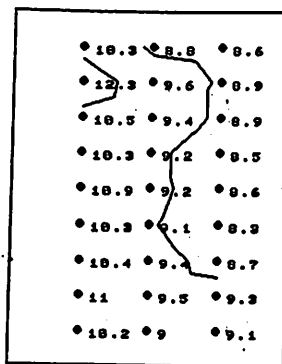


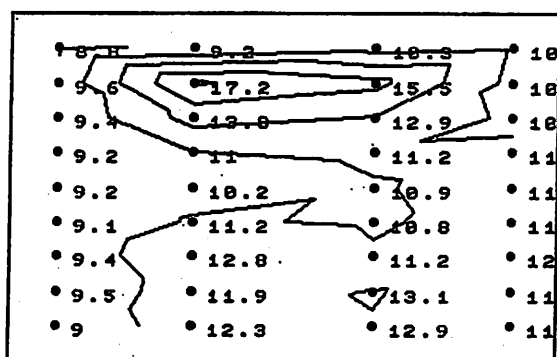
図 3.31c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-2-L-10)



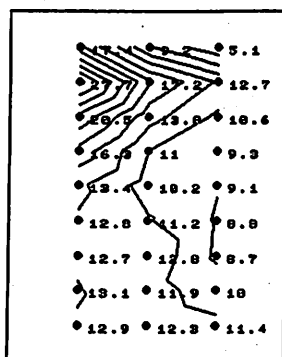
A~J 断面



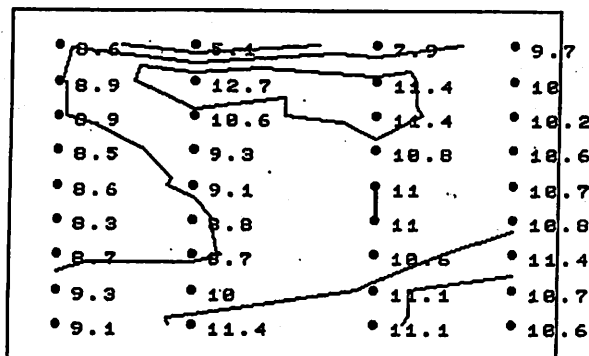
A~C 断面



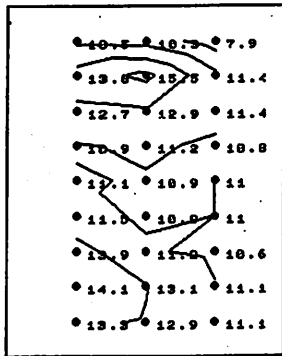
B~K 断面



D~F 断面

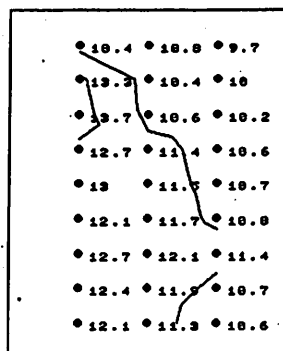


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-2-L-10
 併設建物 (風上側) 無
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 垂直
 風速 (実大換算) 10 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/10



J~L 断面

図 3.31d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

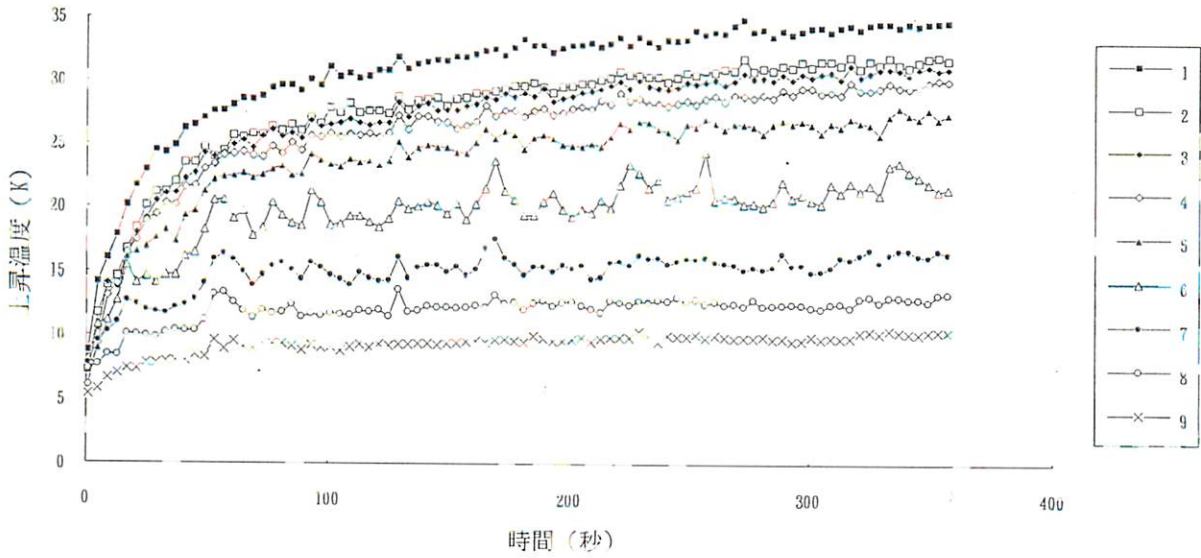


図 3.32a: 各高さにおける平均温度 (Case-3-S-05)

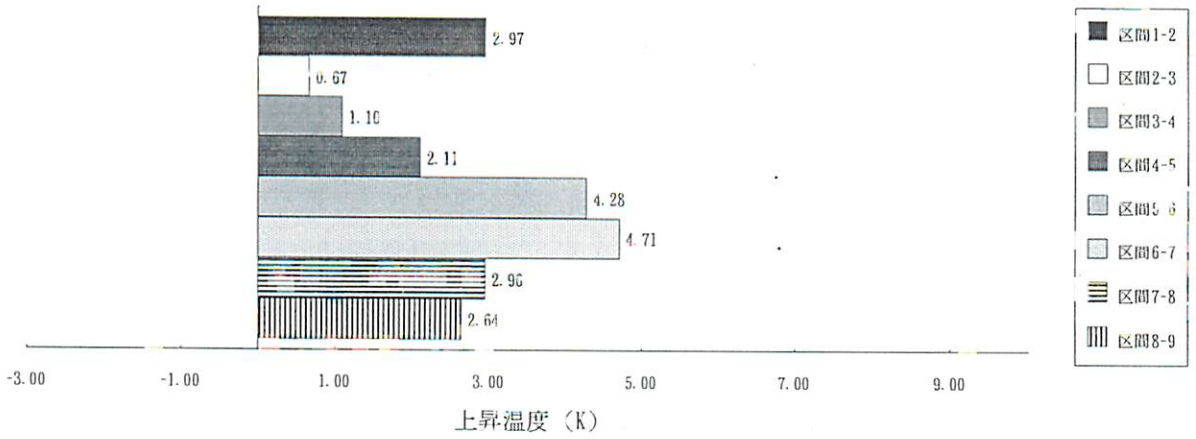
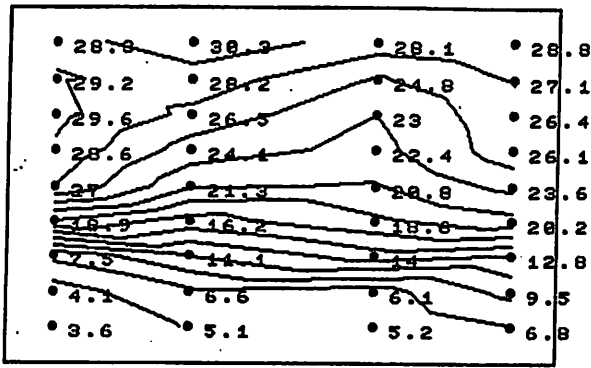


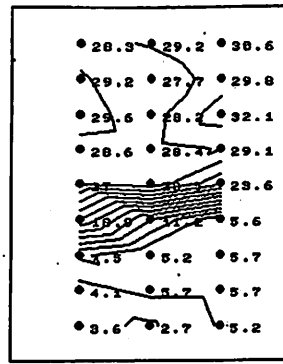
図 3.32b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-3-S-05)



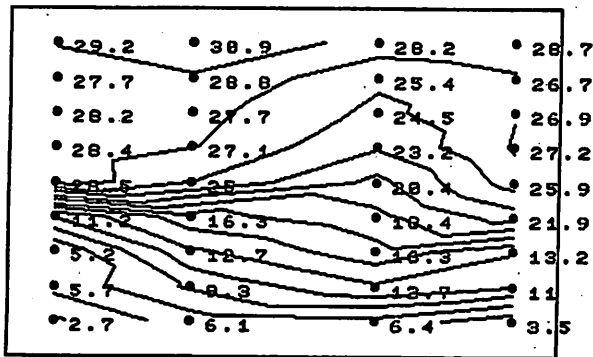
図 3.32c: 実験開始約2分後の可視化写真 (Case-3-S-05)



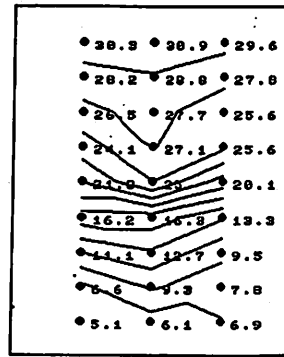
A~J 断面



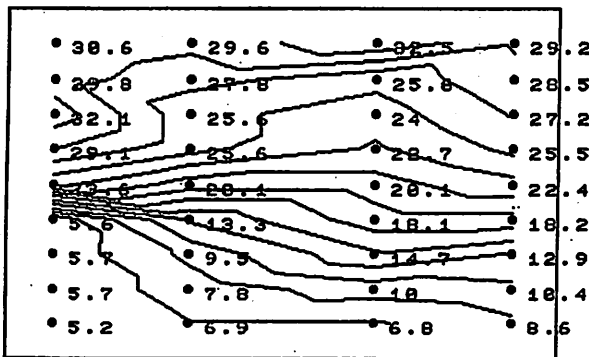
A~C 断面



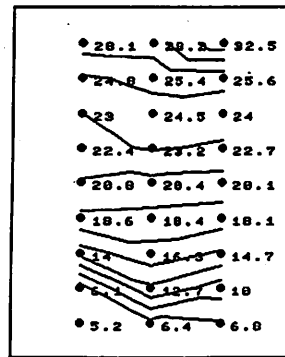
B~K 断面



D~F 断面

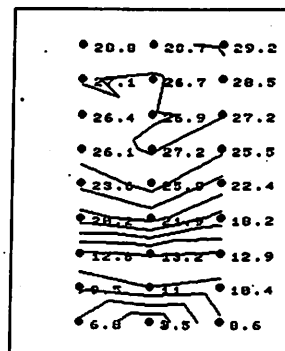


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-3-S-05
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 平行
 風速 (実大換算) 5 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/50



J~L 断面

図 3.32d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

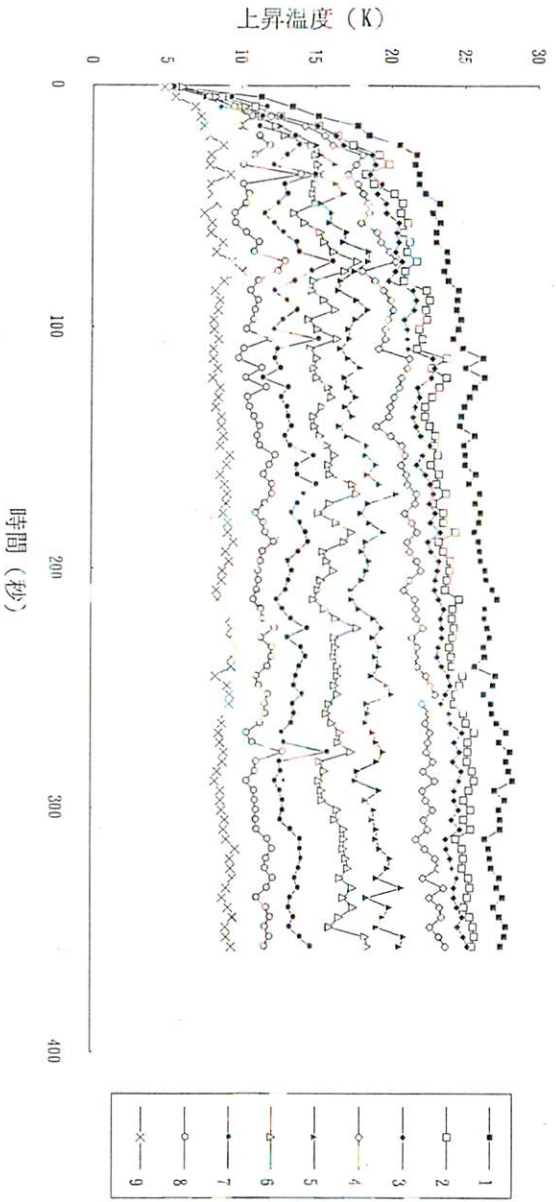


図 3.33a: 各高さにおける平均温度 (Case-3-M-05)

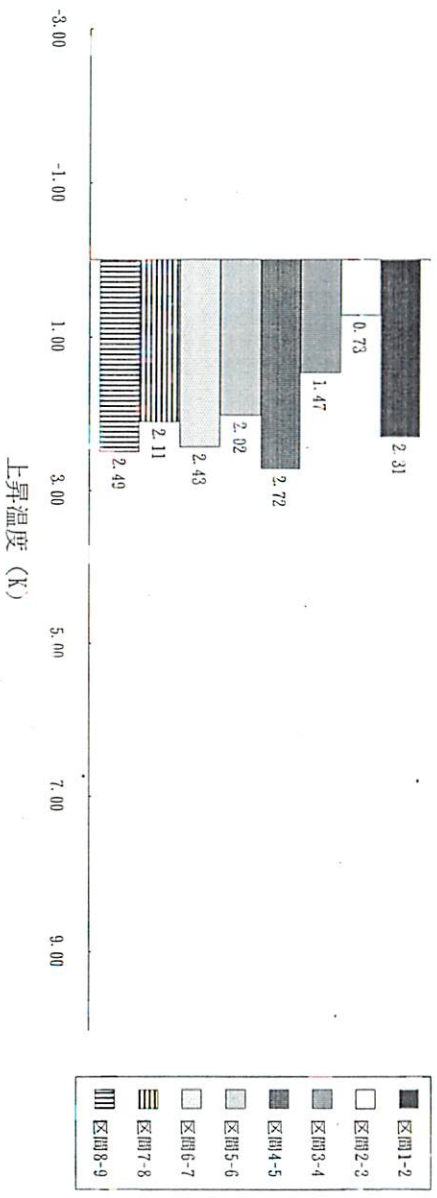
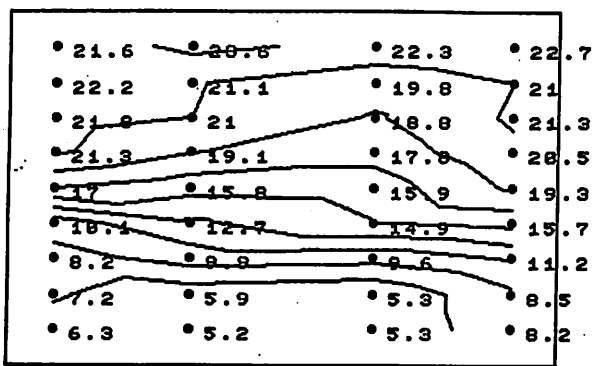
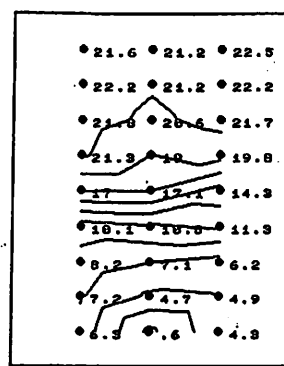
図 3.33b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-3-M-05)

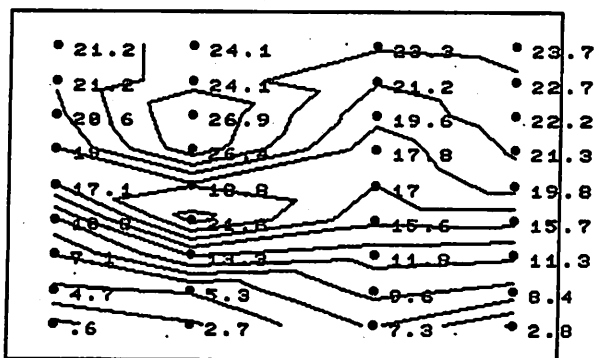
図 3.33c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-3-M-05)



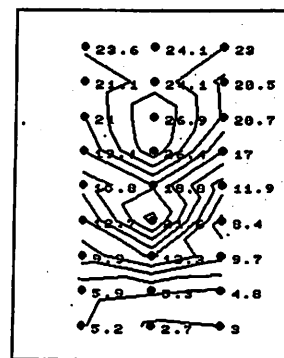
A~J 断面



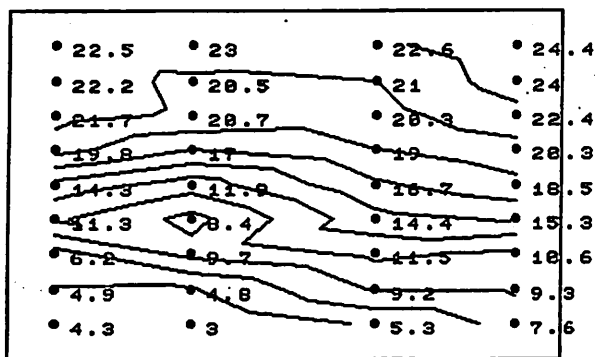
A~C 断面



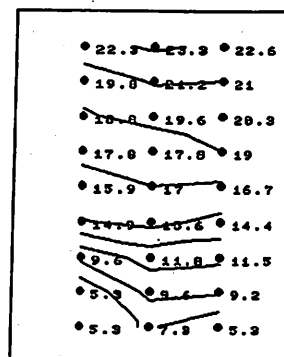
B~K 断面



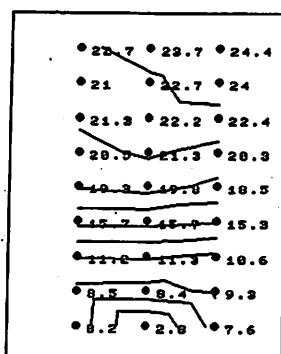
D~F 断面



C~L 断面



G~I 断面



実験番号 Case-3-M-05
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 平行
 風速 (実大換算) 5 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/25

図 3.33d: 温度分布図 (4~6 分の平均) J~L 断面

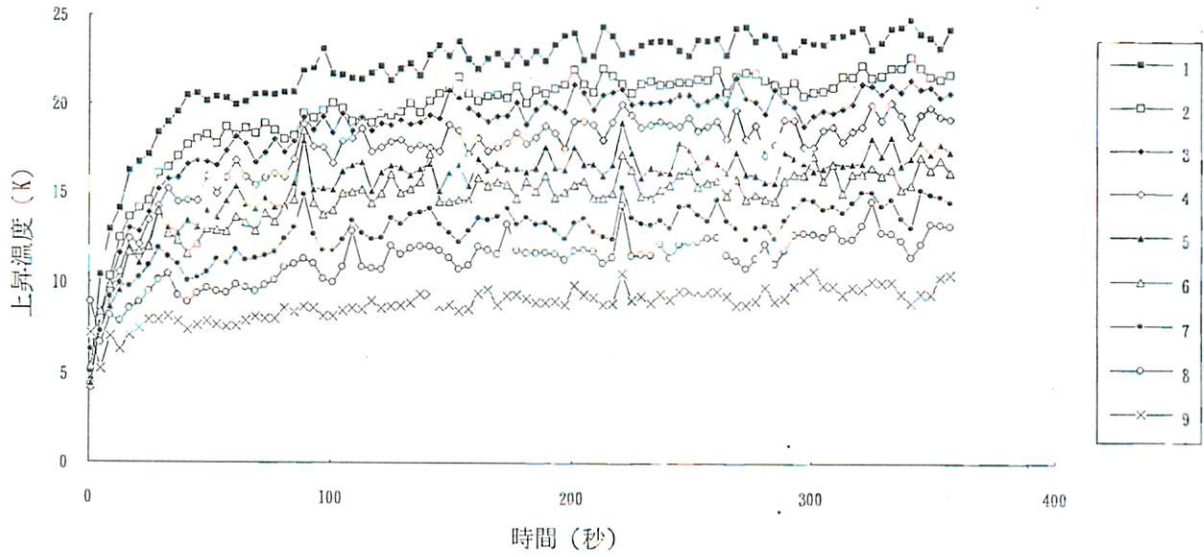


図 3.34a: 各高さにおける平均温度 (Case-3-L-05)

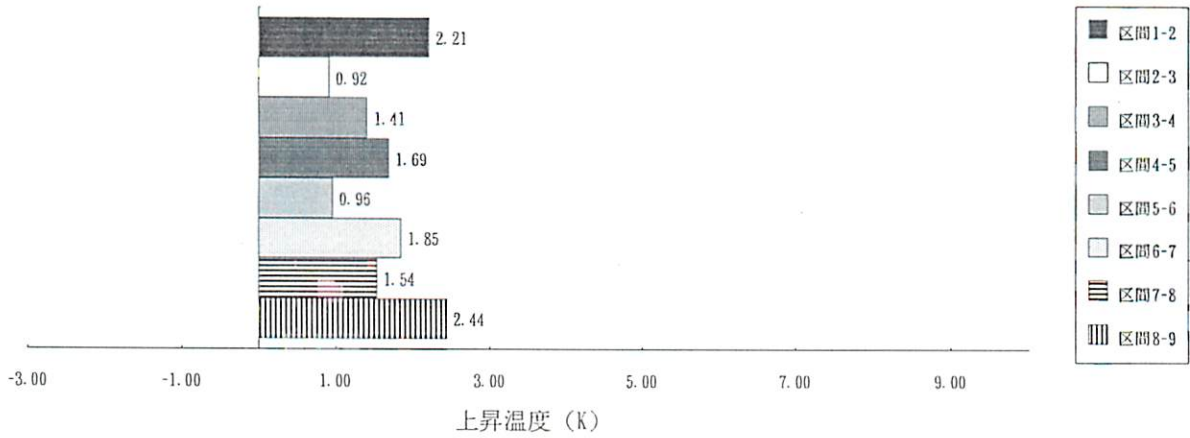
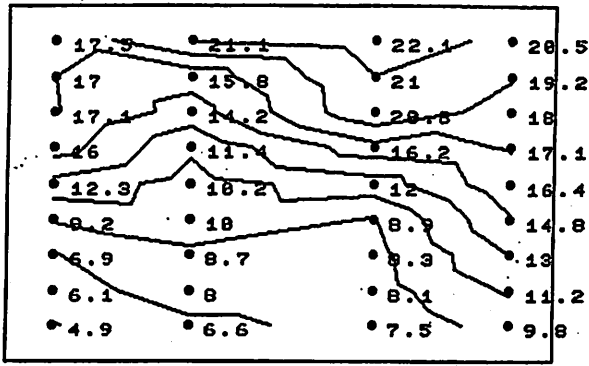


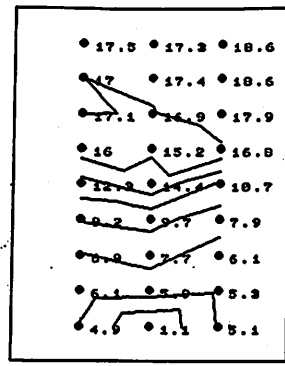
図 3.34b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-3-L-05)



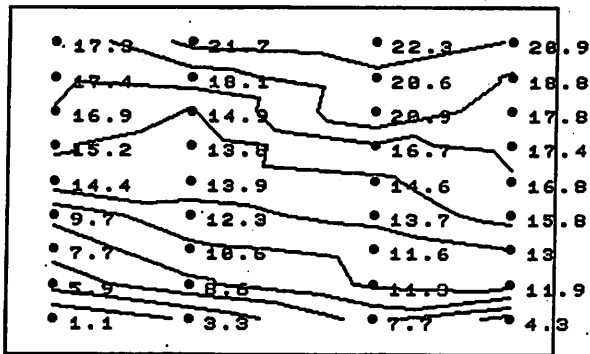
図 3.34c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-3-L-05)



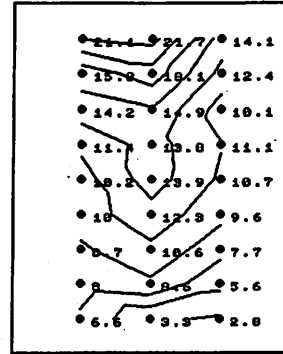
A~J 断面



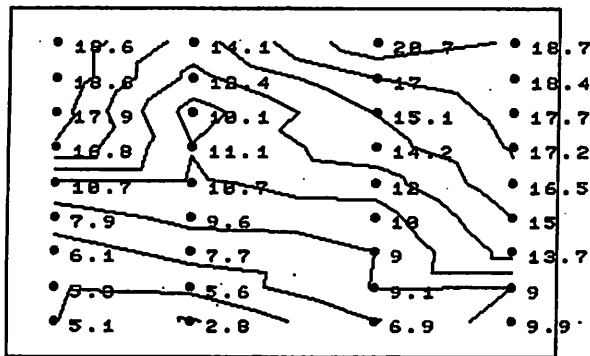
A~C 断面



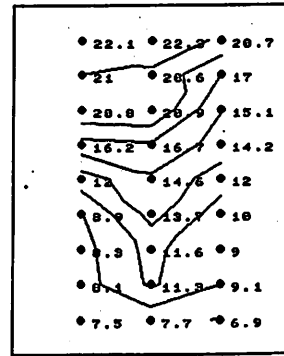
B~K 断面



D~F 断面

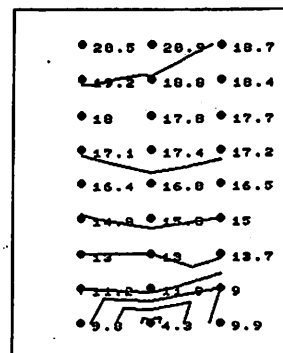


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-3-L-05
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 平行
 風速 (実大換算) 5 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/10



J~L 断面

図 3.34d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

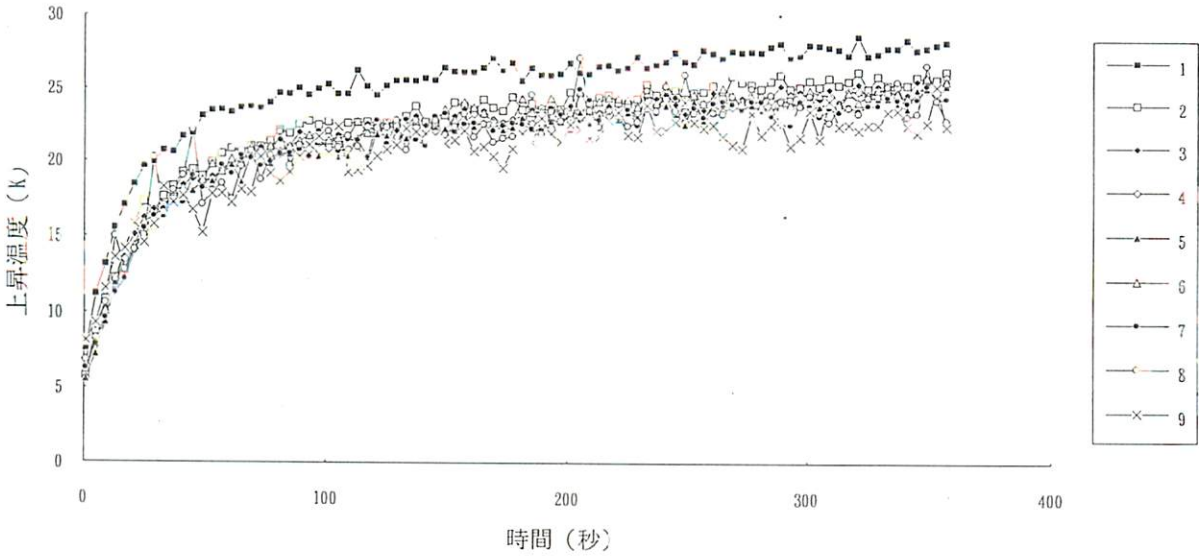


図 3.35a: 各高さにおける平均温度 (Case-3-S-10)

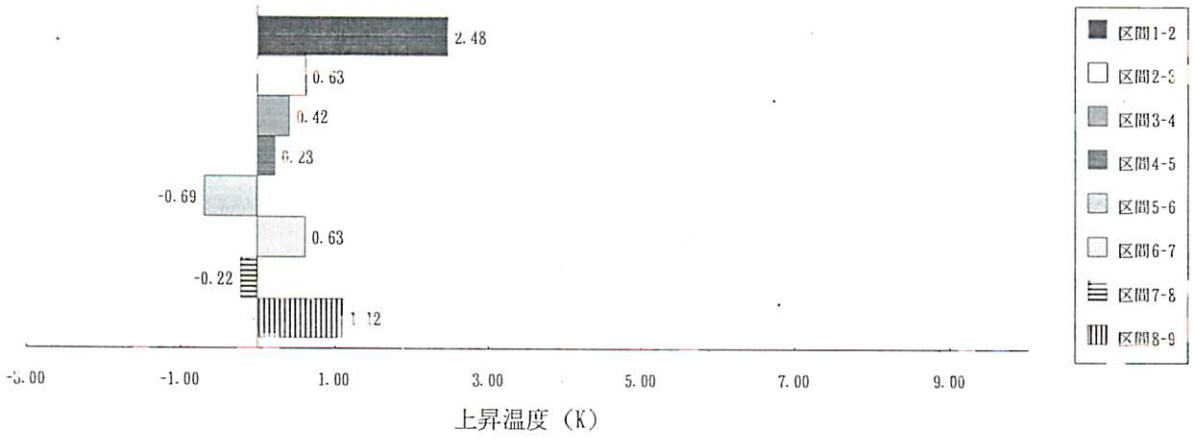
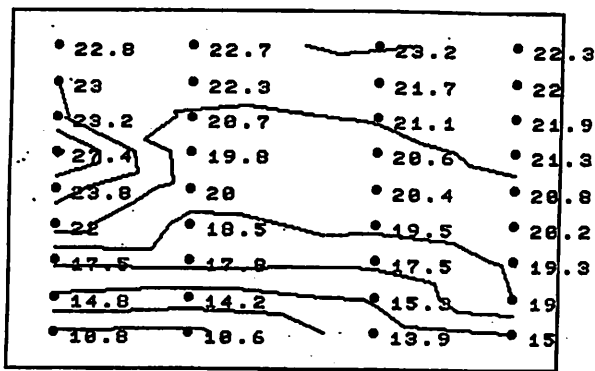


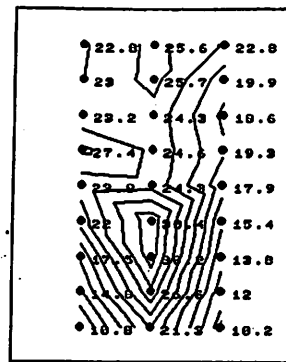
図 3.35b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-3-S-10)



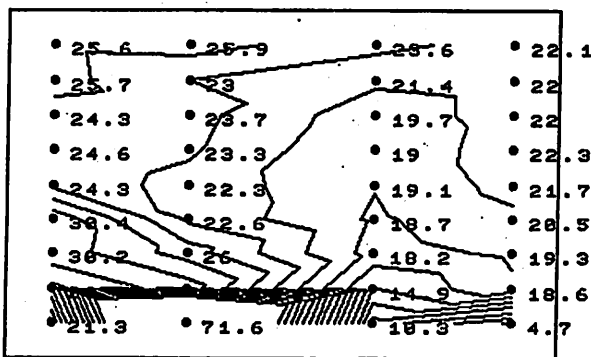
図 3.35c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-3-S-10)



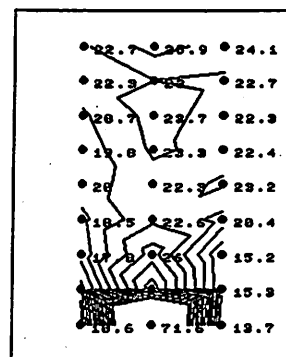
A~J 断面



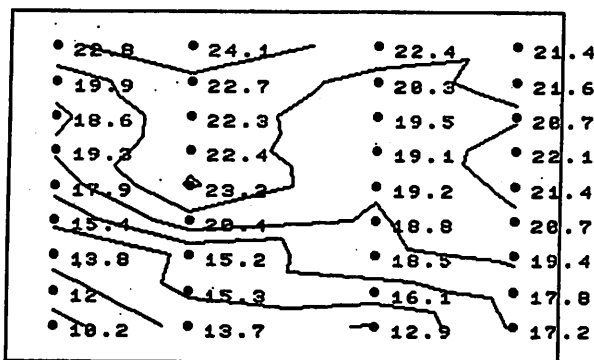
A~C 断面



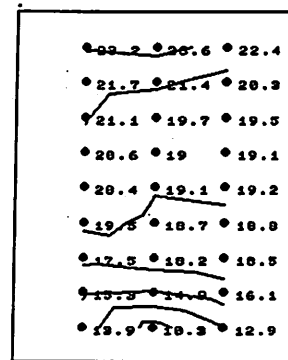
B~K 断面



D~F 断面

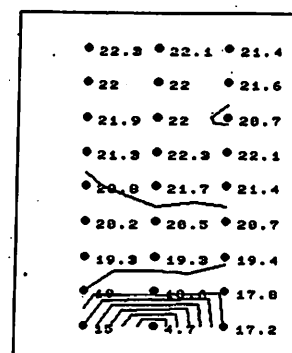


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-3-S-10
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 平行
 風速 (実大換算) 10 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/50



J~L 断面

図 3.35d: 温度分布図 (4~6分の平均)

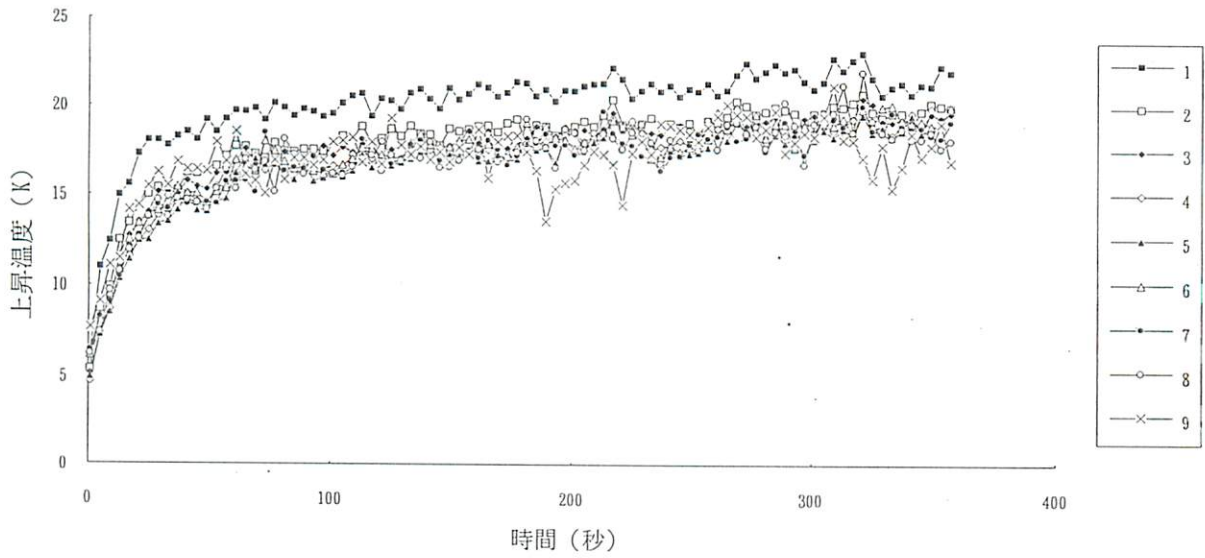


図 3.36a: 各高さにおける平均温度 (Case-3-M-10)

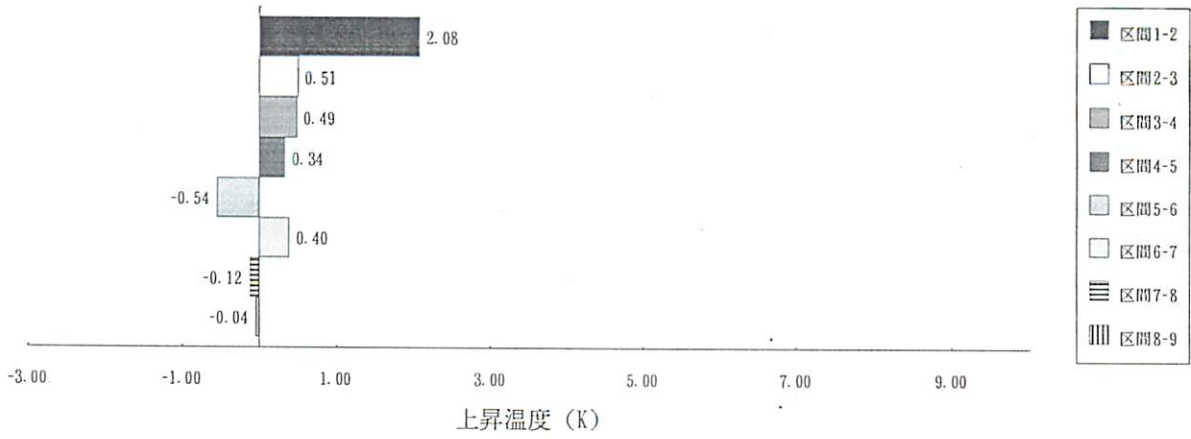
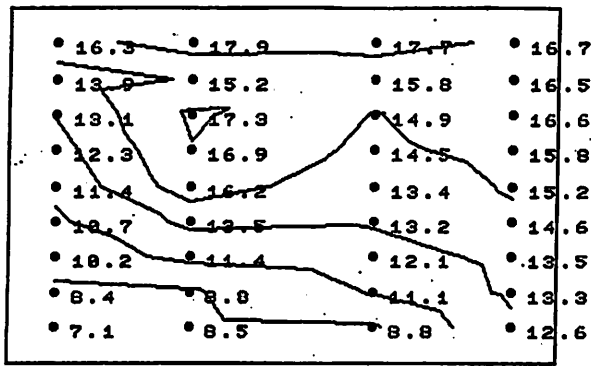


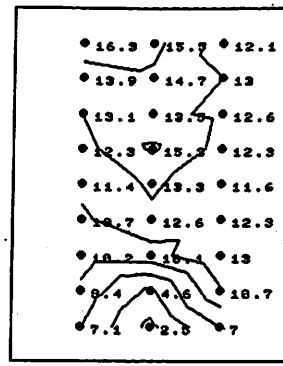
図 3.36b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-3-M-10)



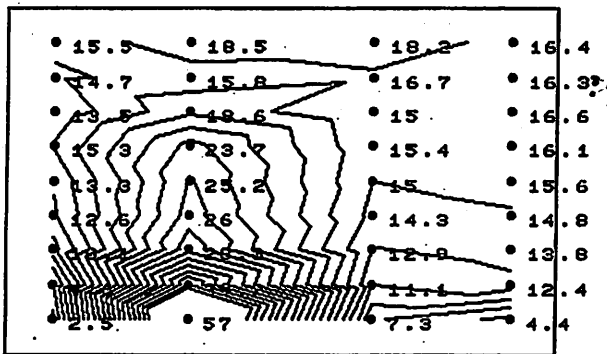
図 3.36c: 実験開始約 2 分後の可視化写真 (Case-3-M-10)



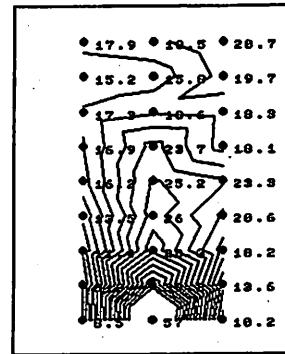
A~J 断面



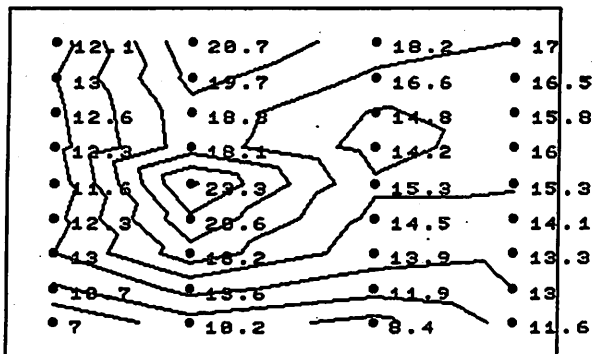
A~C 断面



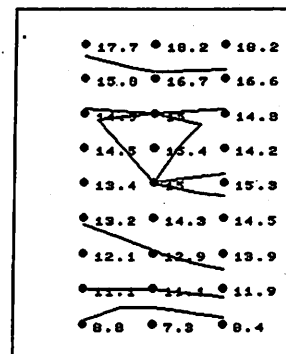
B~K 断面



D~F 断面

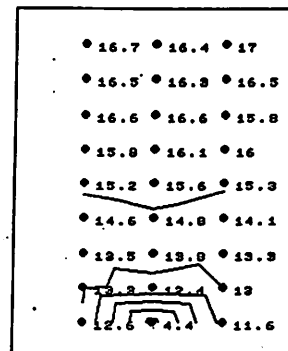


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-3-M-10
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 平行
 風速 (実大換算) 10 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/25



J~L 断面

図 3.36d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

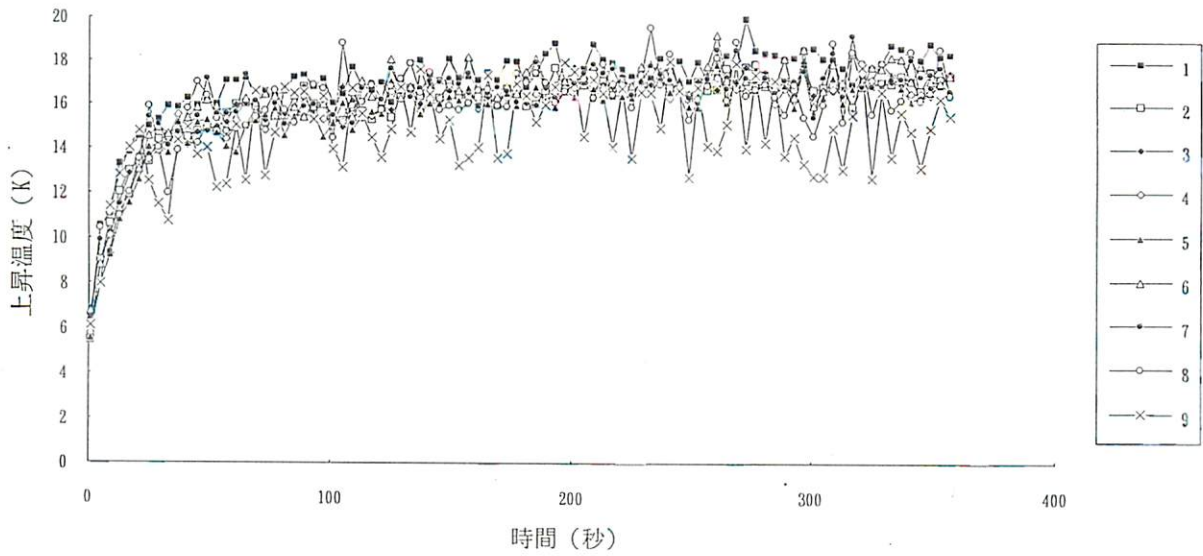


図 3.37a: 各高さにおける平均温度 (Case-3-L-10)

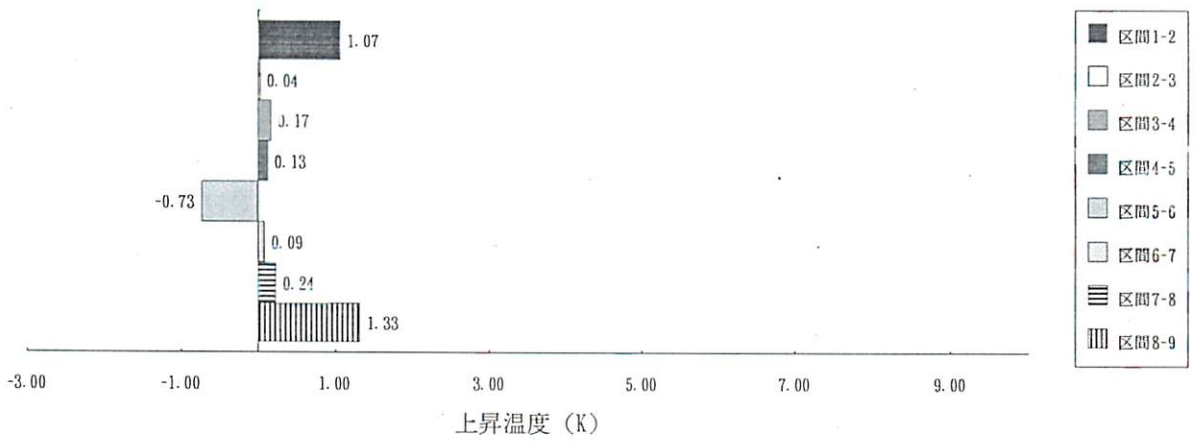


図 3.37b: 各高さ間での平均上昇温度 $\partial\theta/\partial z$ (Case-3-L-10)

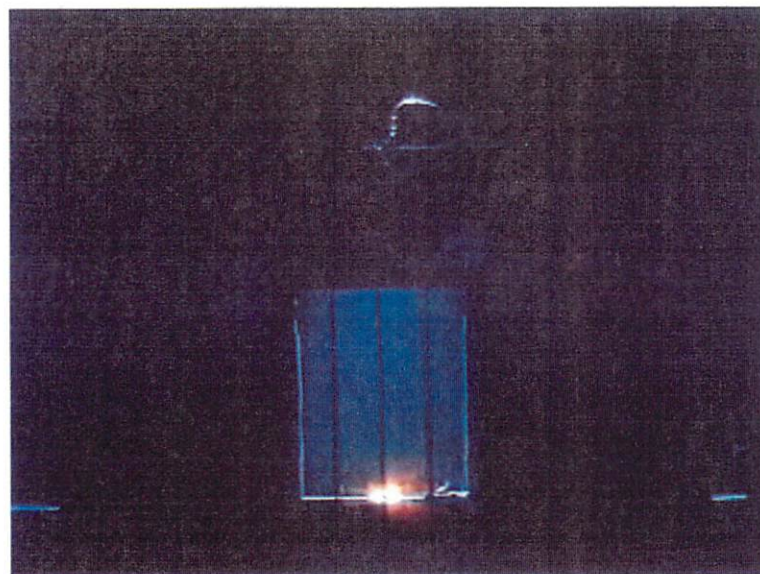
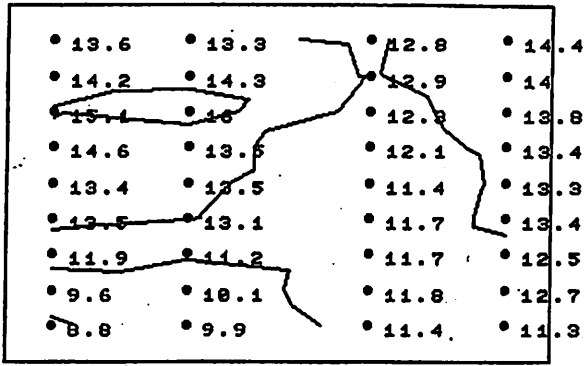
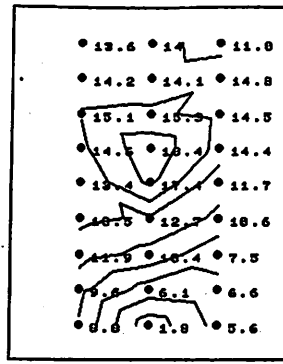


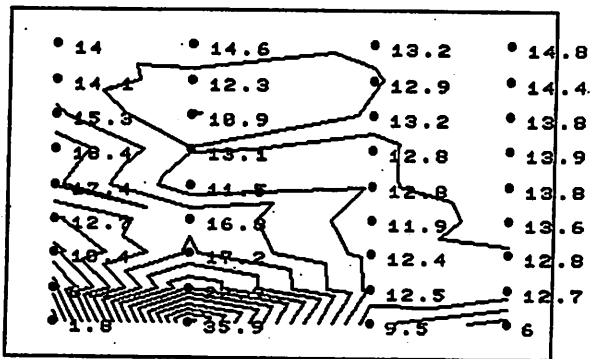
図 3.37c: 実験開始約2分後の可視化写真 (Case-3-L-10)



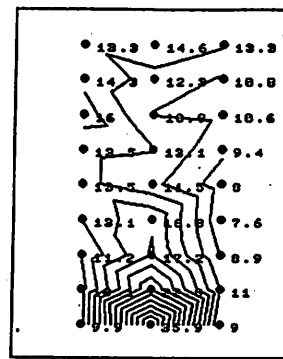
A~J 断面



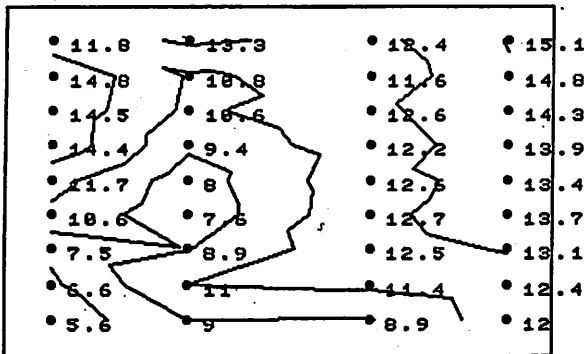
A~C 断面



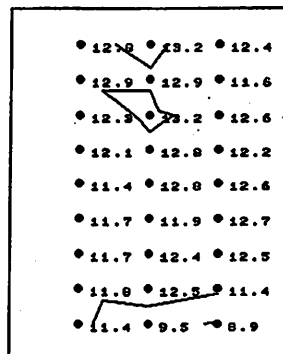
B~K 断面



D~F 断面

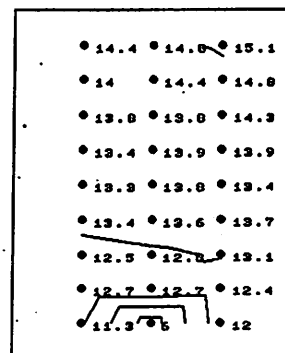


C~L 断面



G~I 断面

実験番号 Case-3-L-10
 併設建物 (風上側) 有
 " (風下側) 有
 風向 (排煙口に) 平行
 風速 (実大換算) 10 m/s
 排煙口面積 (底面積の) 1/10



J~L 断面

図 3.37d: 温度分布図 (4~6 分の平均)

おわりに

本研究では火災時の煙流動現象を支配すると考えられる方程式群を無次元化する事によって、模型実験シミュレーションに必要な相似則を導出し、外気風がアトリウム内部の煙流動に与える影響を模型実験により検討した。

第2章では、上部が完全に外気に開放された中庭のようなボイド空間の模型実験により、外気風影響下の排煙における基本的な性状を確認し、スケールの異なる2種類の相似模型で実験を行って相似則の成立を確認した。また、既往の研究との比較から外気風影響化の煙流動模型実験における境界層乱流の必要性も示した。

第3章では現実的な形状のアトリウムとしてガレリア状アトリウムを想定し、風洞を用いた縮小模型実験を行って風速、風向、排煙口の面積、アトリウム併設建物が排煙に与える影響について検討した。その結果非常に単純な形状のアトリウムであっても、排煙口の大きさ、併設建物（風上側）の有無、風向などの条件により、開口部での流出入風速が変化し、煙流動性状が大きく変わることを示した。また発熱条件一定のもとでは、空間内に流入する気流速度 v_{in} と開口面積 S_o から $v_{in}^2 S_o$ を求め、この値を指標に空間の煙流動性状を予測できることを示した。

本研究のようにアトリウムの煙流動に外気風が及ぼす影響について具体的な検討をおこなった研究は過去に例がなく、研究の第一歩としてはある程度の成果を得ることが出来た。しかしこの研究では検討すべきパラメータが数多くあり、本研究で扱わなかった火源発熱量、開口形状、アトリウム及び併設建物の形状（流れの乱れに影響を与える細部形状を含む）、開口の開閉条件等についても検討の必要があるだろう。また、依然としてスケールによる煙層温度の差の問題が残っており、本論文の Appendix b で予備実験を行って検討したが、その原因をつきとめることは出来なかった。今後さらなる研究の発展によりこのような問題点を解消し、早期に手法が確立されることを期待する。

Appendix A

風洞の概要と境界層スクリーンの作成

A.1 風洞実験に関する概説

風洞実験がはじめて行われたのは1871年（イギリス）のことで、1910年までにはほとんどの先進国で風洞が建設されるようになった。当時の風洞実験は主に航空機に関するもので、建築物の風洞実験については、1930年前後のエンパイアステートビルディングの風圧実験等から行われるようになったと言われている^[13]。このころからわが国でも構造物に関する風洞実験が始まっているが、1940年のタコマ吊橋の崩壊事故以降、構造物に関する実験は世界的に活発化した。しかし筆者らの行ったような建築物火災の屋内煙流動に関する風洞実験はほとんど例がなく、はじめての試みである。

建築物に関する風洞実験は、最近まで、航空機実験の場合にならって一様流（風速一定の気流）を対象に行われてきた。しかし実際の現象を推測するには自然風と相似な境界層乱流（平均風速が高さとともに増加し、かつ風速が時間的空間的に変化する気流）を対象として行わなければならないという相似則が1958年に提案され（図A.1）、以来、自然風と相似な気流を対象とした実験が普及するようになった。

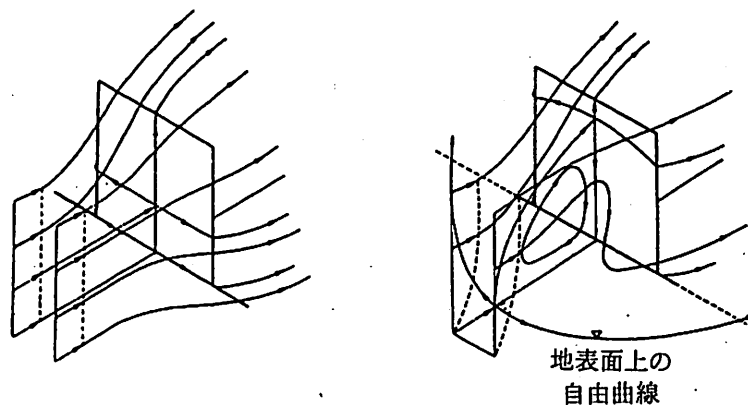


図 A.1: 一様流と境界層乱流での流況の違い

風洞実験に際し、もう一つ重要な注意点として風洞の遮閉率（実験対象物の見付面積と風洞の風路断面積の比）の問題がある。つまり、風路断面に対して実験対象物が大きすぎると、実験対象物付近の風の流れだけでなく、風路全体の流れに影響を与えるおそ

れがある。このような実験対象物による遮風の影響を避けるためには通常遮閉率を通常5%前後、高々7%程度¹に抑える必要がある^[3]。

A.2 風洞施設の概要

本研究で使用した前田建設工業株式会社技術研究所の多目的風洞実験施設は大小2つの測定部を有する。第1測定部は長い助走風路と三次元トラバース装置、ターンテーブルを持つ風路断面 W2,300×H2,000 の測定部、第2測定部は助走風路は短いが W4,300×H3,000 の大断面を持つ測定部で、双方ともに回流型と非回流型の両方の機能を備える。表 A.1 に性能諸元、及び図 A.2 に風洞の平面図を示す。

表 A.1: 風洞性能諸元

項目	第一測定部	第二測定部	
風洞本体	風速範囲	1~25m/SEC	0.5~8m/SEC
	風速分布	±1.0%(20m/SEC)	±5.0%(7m/SEC)
	乱れ強さ	0.2%以下(10m/SEC)	0.3%以下(7m/SEC)
	絞り比	7.6:1	2.8:1
	測定洞断面	2.3m×2m	4.3m×3m
	測定洞長さ	21.12m	8m
送風機	型式		一段軸流送風機
	羽根径		φ2800
	流量		5814m ³ /min
	有効圧力		65mmH ₂ O
電動機	型式		直流分巻モータ
	出力		90KW
	回転数		10~510rpm

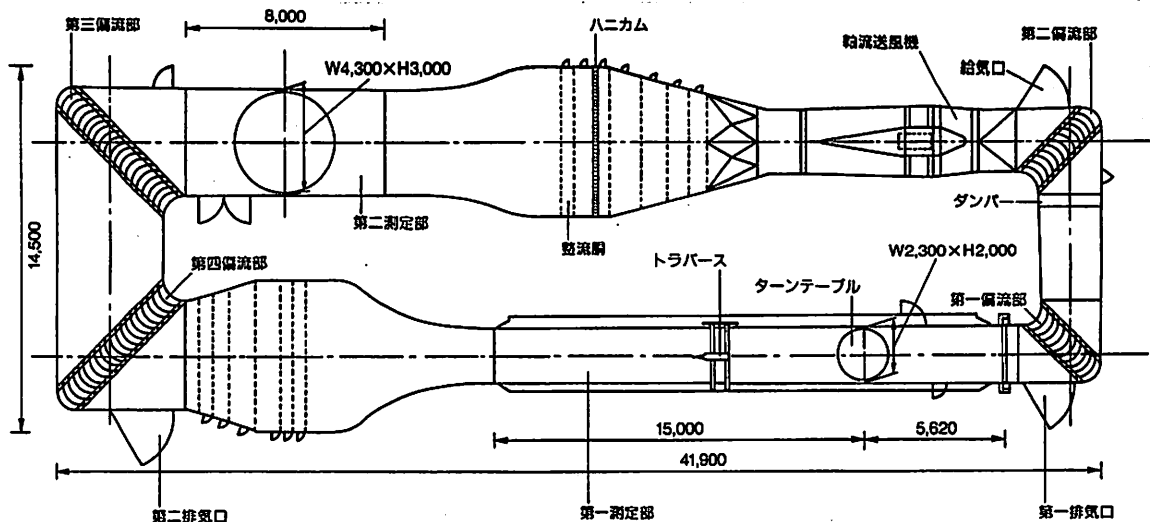


図 A.2: 風洞平面図

¹本研究の第2章、第3章の実験では最大10%程度となっているが、この辺りが限界であると考えている。

A.3 スクリーンによる境界層乱流の作成

A.3.1 煙流動模型実験における境界層乱流の意義

実際の建築物における火災の煙流動において、建物外部の自然風による影響が必ず存在することは第2章、第3章で述べたが、このような外部自然風による影響を模型実験で確認、検証するためには、対象建築物の立地条件（市街地、臨海地等）に即した平均風速、乱れの高度分布を持つ風を実験風洞内に実現する必要がある²。

また、初期状態の風洞の風（風速高度分布がほぼ一様な風³）も、その境界部（床面、壁面、天井面）では乱流境界層が生じており、スケールを変えた模型実験を行う際に、その境界層厚さの相似性を合致させることは困難である。

以上の理由から煙流動模型実験においても境界層乱流は非常に重要である。

A.3.2 自然風の性状

自然風は地上を吹走する際、地表摩擦によって下層の風速が減衰される。従って、平均風速の高度分布は常に地表表面で最も弱く、上層に向かうにつれて強くなる。この現象については、数多くの研究報告があり、いろいろな提案がなされている¹⁴が、本研究では、地表から約300m付近までの平均風速分布として現在最も多く使用され、実測値に合値しているといわれている、べき法則を採用する。この法則は経験的に得られたもので、次式で表される。

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/n} \quad (\text{A.1})$$

U ：地上 $Z(\text{m})$ における平均風速

U_0 ：基準高度 $Z_0(\text{m})$ の平均風速

指数 $1/n$ の値は地表の粗さによって異なるものである。本研究では、この n の値を4として境界層乱流の作成を行った。スケールを変化させた模型実験を行う際、この提案式を用いて代表平均風速を相似則に従って合わせれば、平均風速の高度分布形状も相似になるので模型のスケールによる相似則の確認を行う研究においては、非常に都合の良い提案式であるといえる。

平均風速に対して、最大瞬間風速は乱れ強さとの関係が深い。乱れ強さとは流れの乱れの程度を表す指標として以下の式で表される。

$$\text{乱れ強さ} = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \quad (\text{A.2})$$

$\sqrt{u'^2}(=\sigma_u)$ ：乱流成分の標準偏差

乱れ強さは流れ場に影響を与える度合いが大きく重要な要素となる。地上30m地点の乱れ強さは観測データによると、市街地で0.15~0.20、平野部で0.10~0.15程度である¹⁴。

²この効果については第3章参照

³風洞壁面のごく近傍で風速の低下及び強い乱れが見られるが、ほぼ全断面にわたって一様風速で乱れの少ない流れ

乱れ強さの高度分布については東京タワーでの実測結果を考慮している例が多いが、指標とすべき分布は確定していない。

A.3.3 境界層乱流作成の手法

一般に、前項のような境界層乱流を実験風洞内に実現するには、境界層風洞と呼ばれる長い助走風路を持った風洞を使用し、スパイヤー⁴やラフネスブロックによって境界層乱流を形成している。

一方、バーナーを火源にみたてて行う模型実験では、その性質上あまり小さなスケールの模型を使うことができない⁵。従って、A.1節で述べた模型による遮風効果の影響を考慮するとかなり大きな風路断面を持つ風洞が必要となる。ところが、現在用いられている標準的な構造物用風洞では、この点で不十分なものが多く、本研究で使用したような⁶風路断面の大きな風洞ではスペースや経済的な問題から、境界層を発達させるための助走風路が短いのが実状である。そこで本研究では、助走風路の短い風洞で境界層乱流を形成する一手法として、棒材を水平にして鉛直方向に並べ、その棒材と棒材との間隔を鉛直高度によって断続的に変化させたスリット状成層装置（以下スクリーンと称する）を用いて境界層乱流作成を試みる。

この手法で、平均風速分布をべき法則に従う形状にする研究は西田、片山等によって示されており¹⁵¹⁶、本研究ではこの報告をもとに境界層乱流作成を試みる。この手法は、一様せん断流を風洞内に形成する P.R.Owen & H.K.Zienkiewicz の方法¹⁷を発展させたものであり、目標とする風速分布を形成するためにスクリーンの水平棒材（以下エレメントと称する）間隔を計算し、スクリーンを作成する方法である。この方法の利点としては、

1. ラフネスなどを置くことが困難な測定洞の短い風洞を用いて、接地境界層乱流をアプローチフローとする建物模型実験が行える。
2. スクリーンの設計法に適用可能な計算式があり、その製作が簡単で且つ再現性が期待できる。

が挙げられる。

なおこの手法では乱れ強さと平均風速分布の両方を同時に制御することは困難なので、本研究では平均風速の高度分布を中心にスクリーンの作成を進め、乱れ強さの高度分布は著しく現実と変わらないことを確認する。

⁴尖塔状の柱体

⁵プルームの生起条件（第1章1.2節参照）、乱流拡散炎の生起条件（Appendix 2参照）から実験が成り立たない

⁶前田建設工業（株）技術研究所風洞実験棟第2測定部

A.3.4 スクリーンの設計及び作成

目標とする風速分布は式(A.1)に基づき、次式で表される。

$$U(z) = U_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^{1/n} \quad (\text{A.3})$$

$U(z)$: スクリーン下流での平均風速

U_r : 初期風速

z : 風洞床面からの高さ

z_r : 基準高さ

スクリーンの鉛直方向の抵抗を決定するパラメーターとしてスクリーンの充実率 S を次式で定義する。

$$S = 1 - \beta \quad (\text{A.4})$$

β : スクリーンの鉛直方向微小区間の空隙率

文献^[17]によれば、風洞高さ H の全領域内で速度プロファイルが一次関数的に増加する形状を持つ場合、その充実率を計算する式は、次式で与えられる。

$$\frac{S}{(1-S)^2} = K_0 \left[1 - \frac{2H}{U_0} \left(\frac{dU}{dz} \right) \times \left(\frac{1}{K_0} + \frac{1}{1+a} \right) \left(\frac{z}{H} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (\text{A.5})$$

S : 充実率 K_0 : スクリーンの圧力損失係数

$$a = 1.1/\sqrt{1+K_0}$$

(A.3)式は、風洞高さ H の全領域に対する式であるが、(A.3)式を z 方向に微小分割し、各微小区間 (ΔH) について局所的に一様せん断流を仮定して (A.5) 式を適用すれば、指数分布曲線は直線の折れ線で近似できる。(図 A.3)

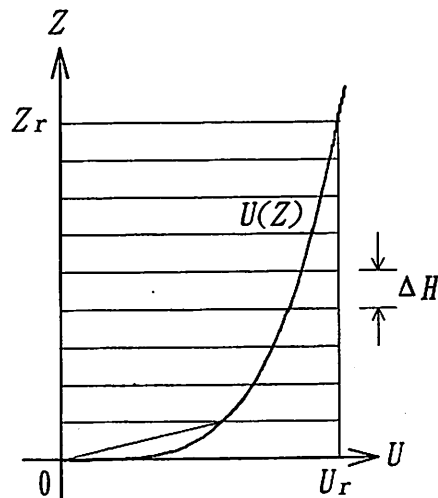


図 A.3: 指数分布曲線の折れ線近似

各区間の平均充実率を区間の中心の充実率で表すとすれば、(A.5)式の H を ΔH で置換し、 $z/\Delta H = 1/2$ とおくことができるので(A.5)式は次式のように簡略化される^[15]。

$$\frac{S}{(1-S)^2} = K_0 \quad (\text{A.6})$$

ここで K_0 を求める。ある流線に沿う圧力の変化に着目すると、非粘性流体の仮定のもとでは次式の関係が成立する。

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho U(z)^2 + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 K_0 \quad (\text{A.7})$$

p_0 : スクリーン上流での静圧

p_1 : スクリーン下流での静圧

ρ : 流体密度

U_∞ : スクリーン上流での風速

これより

$$K_0 = \frac{p_0 - p_1}{\rho U(z)^2/2} + \left(\frac{U_\infty}{U(z)}\right)^2 - 1 \quad (\text{A.8})$$

ここで、速度プロファイルは(A.3)式より

$$\frac{U(z)}{U_r} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^{1/n} \quad (\text{A.9})$$

であるから、もし $U_\infty = U_r$ とおくことができると仮定すると、(A.8)式は

$$K_0 = \left(\frac{z_r}{z}\right)^{2/n} + K_1 - 1 \quad (\text{A.10})$$

$$\text{ここに } K_1 = \frac{p_0 - p_1}{\frac{1}{2}\rho U(z)^2}$$

これより

$$\frac{S}{(1-S)^2} = \left(\frac{z_r}{z}\right)^{2/n} + K_1 - 1 \quad (\text{A.11})$$

を導くことができる^[18]。 K_1 はスクリーンによる断面全体の平均的な圧力損失係数であり、スクリーンの形状、材質により異なる値になると考えることができる。しかし、充実率はスクリーンを含む2次元的な平面内の面積比にすぎず、この値をあらかじめ設定することは困難であるから、その計算にはできるだけ簡略化した式を用い、スクリーンの形状、材質の問題は全て実際の試行段階で考慮するものと考えて、 $K_1 = 1$ とした。

スクリーンを(A.11)式に基づいて作成する場合、(A.11)式が高さ z に対して連続関数であるのに対して実際のスクリーンの充実率は各スクリーンエレメントの厚さにより決まる離散値である。そこで図A.4に示すスクリーンにおいて、 j 番目のエレメントと $j+1$ 番目のエレメントの間隔を I_j 、エレメントの厚さを b とすると、 j 番目のエレメントに対する充実率は次式のようになる。

$$S_j = \frac{b}{I_j} \quad (\text{A.12})$$

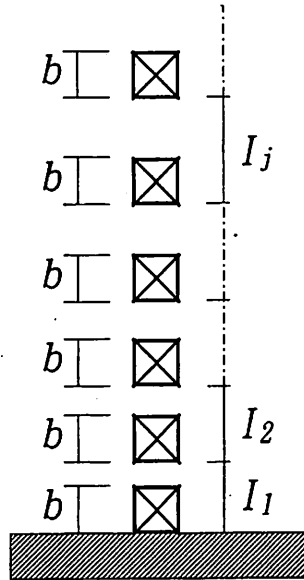


図 A.4: スクリーン

一方, (A.11) 式の $S(z)$ から区間 I_j における平均充実率 \overline{S}_j を次式により求める。

$$\overline{S}_j = \frac{1}{I_j} \int_{h_j}^{h_{j+1}} S(z) dz \tag{A.13}$$

ここで $h_j = \sum_{i=1}^{j-1} I_i, \quad h_1 = 0$

(A.13) 式で求められる \overline{S}_j が (A.12) 式の S_j と一致するように I_j を決定する。表 A.2 に求められた値を示す。

表 A.2: スクリーンエレメントの配列

j	Z_j	I_j	j	Z_j	I_j	j	Z_j	I_j
1	4.60	4.60	11	76.55	8.55	21	173.86	10.65
2	10.10	5.50	12	85.30	8.75	22	184.71	10.85
3	16.10	6.00	13	94.30	9.00	23	195.71	11.00
4	22.55	6.45	14	103.50	9.20	24	206.91	11.20
5	29.35	6.80	15	112.95	9.45	25	218.26	11.35
6	36.50	7.15	16	122.60	9.65			
7	43.95	7.45	17	132.45	9.85			
8	51.70	7.75	18	142.50	10.05			
9	59.70	8.00	19	152.76	10.25			
10	68.00	8.30	20	163.21	10.45			

以上により計算された充実率は非粘性流体の渦なし流れを仮定した解であるが、空気を実験流体とすれば当然粘性の影響がある。従ってこの解は一つの目安とし、試行錯誤

的に目標とする速度プロファイルを実現する。

A.3.5 スクリーンの作成

スクリーンはA.2で述べた風洞の第2測定部に作成した。スクリーンの材料にはエレメントに30mm角の木材，エレメントの治具材（柱）に50mm角の木材を用い，ワイヤー及びターンバックルで補強した。図A.5に作成したスクリーンの写真を示す。

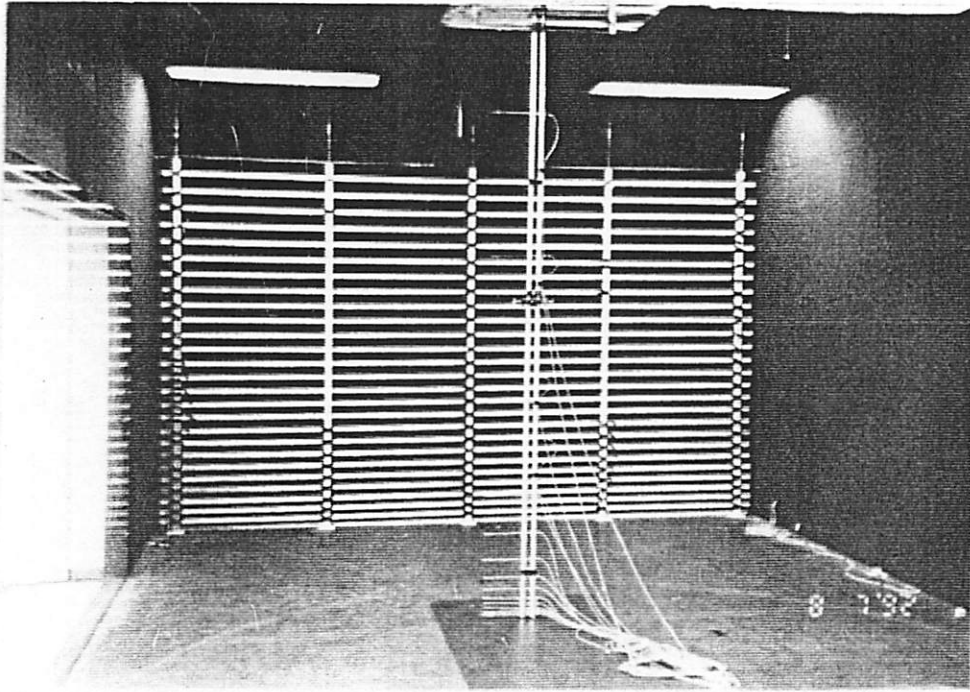


図 A.5: スクリーン全体写真

風速測定

風速の測定には熱線風速計を用い，一軸トラバーサーによる風洞鉛直方向の移動測定を行っている。データの取り込みはA-Dコンバータを介してパソコンを用いて処理を行い，平均風速及び変動風速の標準偏差を求めた。風速データはサンプリングタイム0.1秒で30秒間測定した。本実験に用いた計測システムを図A.6に示す。

風速計 定温度型熱線流速計 MODEL HC-30 (株) 司測研

ピトー管 F-202 JIS型ピトー管

A-Dコンバーター ADC-150A (株) 共和電業 16ch マルチプレクサで順次切り替えて変換

平均風速，及び乱れ強さは次式による。

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{N} \quad (\text{A.14})$$

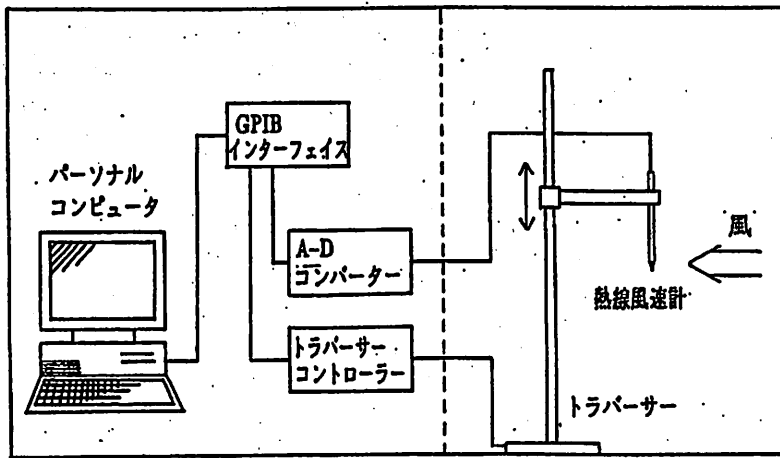


図 A.6: 計測システム

\bar{U} : 平均風速

$$\frac{\sigma}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (U_i - \bar{U})^2}{(N-1)}}}{\bar{U}}$$

(A.15)

σ/\bar{U} : 乱れ強さ

測定点

風速測定は風洞測定部の中心 A 点を基準とし、その左右 2 点、下流 3 点の計 6 点（図 A.7）で、それぞれ鉛直方向の風速を測定した。表 A.3 に鉛直方向の測定点高さを示す。

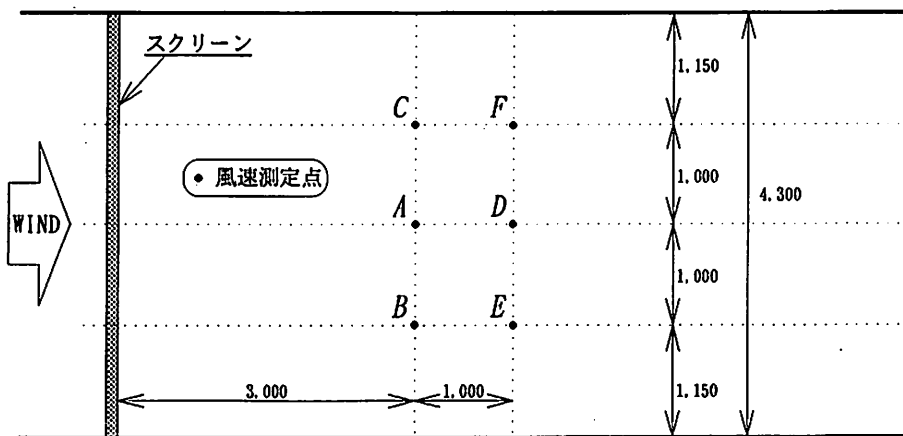


図 A.7: 測定点平面図

表 A.3: 鉛直方向測定点

測定点 番号	床面からの 高さ (mm)	測定点 番号	床面からの 高さ (mm)	測定点 番号	床面からの 高さ (mm)
1	15	6	95	11	600
2	22	7	140	12	900
3	32	8	200	13	1200
4	45	9	290	14	1600
5	65	10	420		

風速

自然風の平均風速は通常 0~5m/s, 台風時でも 15m/s 程度である⁷。また煙流動実験における模型の縮尺は 1/10~1/40 であるから第 1 章の式 1.12 より模型での風速は 0~5m/s, 特に 0~3m/s が中心となる。そこで, 基準高さ (風洞床面高さ 600mm 位置としている) での平均風速を 2~3m/s としてスクリーンの作成を行った。

A.3.6 試行過程及び結果

まず, スクリーンを用いない場合の平均風速高度分布及び, 乱れの高度分布を図 A.8 に示す。

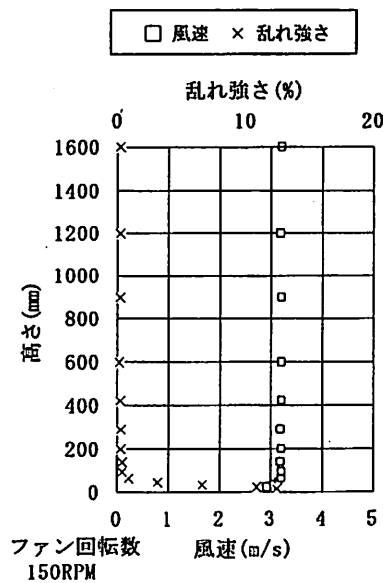


図 A.8: スクリーンを用いない場合の平均風速, 乱れ強さ鉛直分布

以下スクリーンによって得られた風速分布を試行の手順に従って示す。風速は模型実験で使用する際の規準位置として図 A.7 の A 点で測定したものであり, 風洞の送風機ファ

⁷地表付近 (高度 30m 程度) での値

ン回転数 100, 150, 200 [RPM] でのデータを示したものである。これは床面からの高さ 600mm の点における基準風速が 2~3m/s 程度になる回転数である。

Case-1 (図 A.9) 理論式に従ったエレメントの配置では、床面近く(高さ 0mm~600mm)での風速が著しく低く、理想とする、べき乗則曲線(図中実線の曲線)に合致していない。

Case-2 (図 A.10) 床面近くの風速を上げるため、風洞底部のエレメントを一本除去して下から 10 番目までのエレメントの再配列を行い、風洞底部付近の抵抗を下げた。変更後のエレメント配列を表 A.4 に示す。これで底部の風速は改善されたが、高さ 800~1,600mm で風速の低下が見られる。

Case-3 (図 A.11) 上部の風速を上げるため、高さ 1,847mm 以上のエレメント 4 本を取り外し、スクリーンの高さを約 1,740mm とした。この操作により、上部での風速は 1/4 乗の分布に良く一致するようになった。

Case-4 (図 A.12) 次に、底部(高さ 400mm 以下)での風速が若干低いので最下部のエレメントの変更により調整を行った。床面近傍のスクリーンの抵抗を変化させるため、エレメント位置の上・下流への移動を試みたがよい結果が得られず、エレメントの厚さ(b)を 30mm から 20mm にしたところ最も良い風速分布となった。この結果をみると、高さ 200mm より上方の風速分布はべき乗則に非常によく一致しているが、200mm 以下での風速がやや大きい。

Case-5 (図 A.13) これより後の風速分布の調整は床面近傍だけで良いと考えてスクリーンエレメントは変化させず、スクリーンの下流に角材を配置して床面に粗度をつけ、床面近傍の風速分布の調整を行った。この調整により低風速域での 1/4 乗則に一致した風速分布を得ることができた。

表 A.4: 変更後のエレメント配列

j	Z_j	I_j	j	Z_j	I_j	j	Z_j	I_j
1	6.00	6.00	11	85.30	8.75	21	184.71	10.85
2	12.50	6.50	12	94.30	9.00	22	195.71	11.00
3	19.45	6.95	13	103.50	9.20	23	206.91	11.20
4	26.75	7.30	14	112.95	9.45	24	218.26	11.35
5	34.40	7.65	15	122.60	9.65			
6	42.35	7.95	16	132.45	9.85			
7	50.60	8.25	17	142.50	10.05			
8	59.10	8.50	18	152.76	10.26			
9	67.80	8.70	19	163.21	10.45			
10	76.55	8.75	20	173.86	10.65			

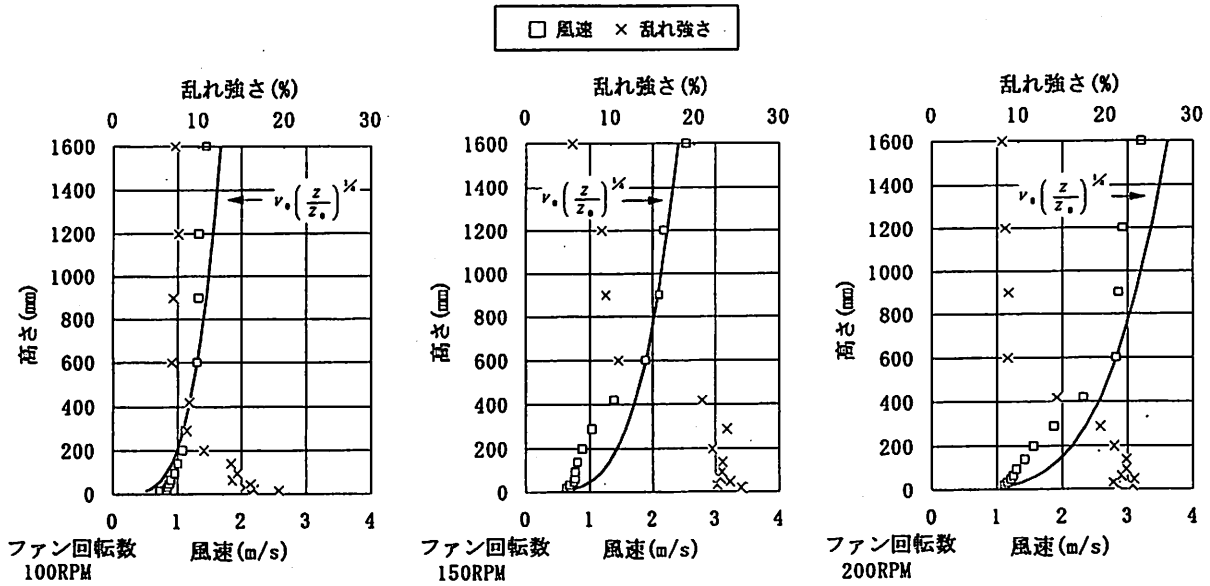


図 A.9: 理論式によるエレメント配列における平均風速, 乱れ強さの鉛直分布

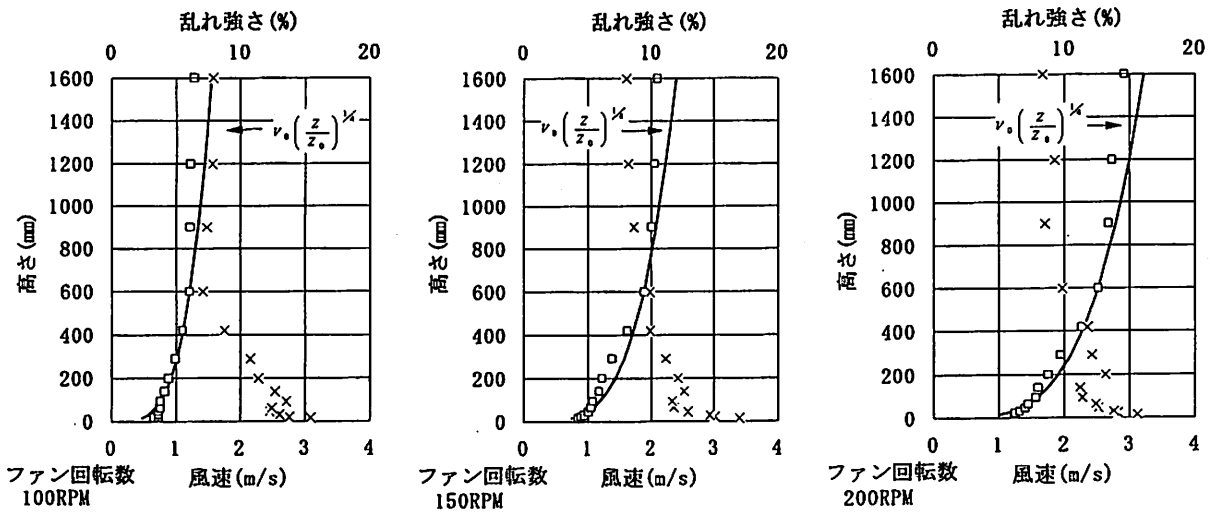


図 A.10: 底部エレメント除去, 再配列後の平均風速, 乱れ強さの鉛直分布

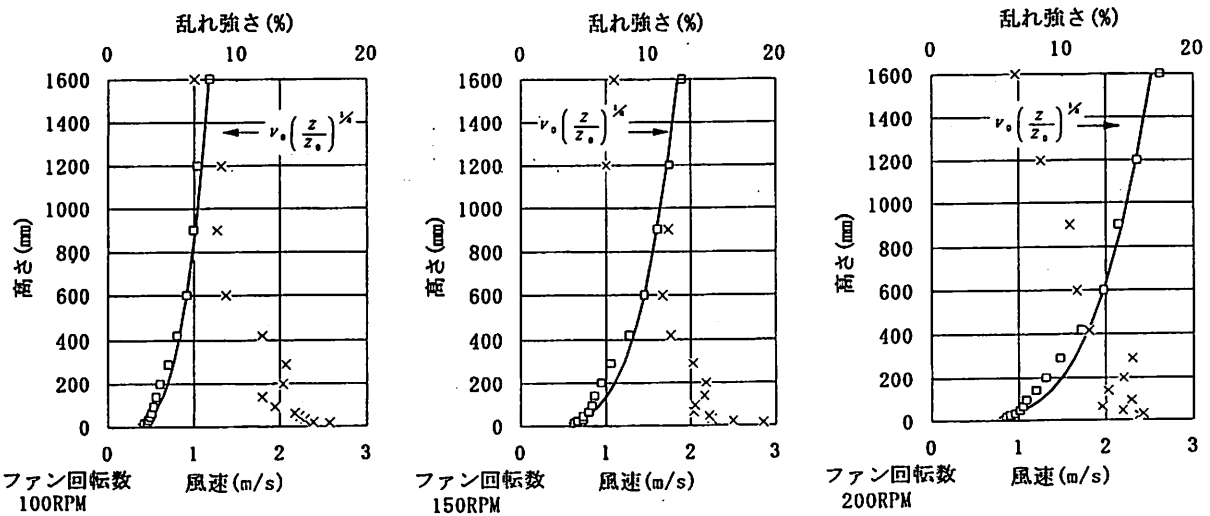


図 A.11: 上部エレメント除去, 全高低下後の平均風速, 乱れ強さの鉛直分布

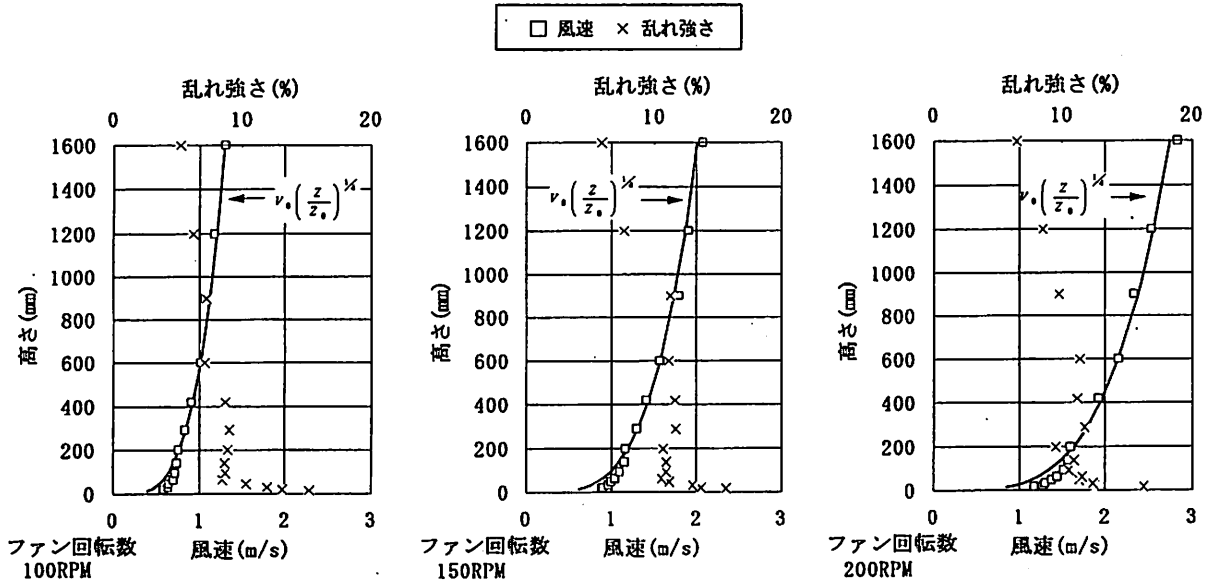


図 A.12: 最下端エレメント厚減少後の平均風速, 乱れ強さの鉛直分布

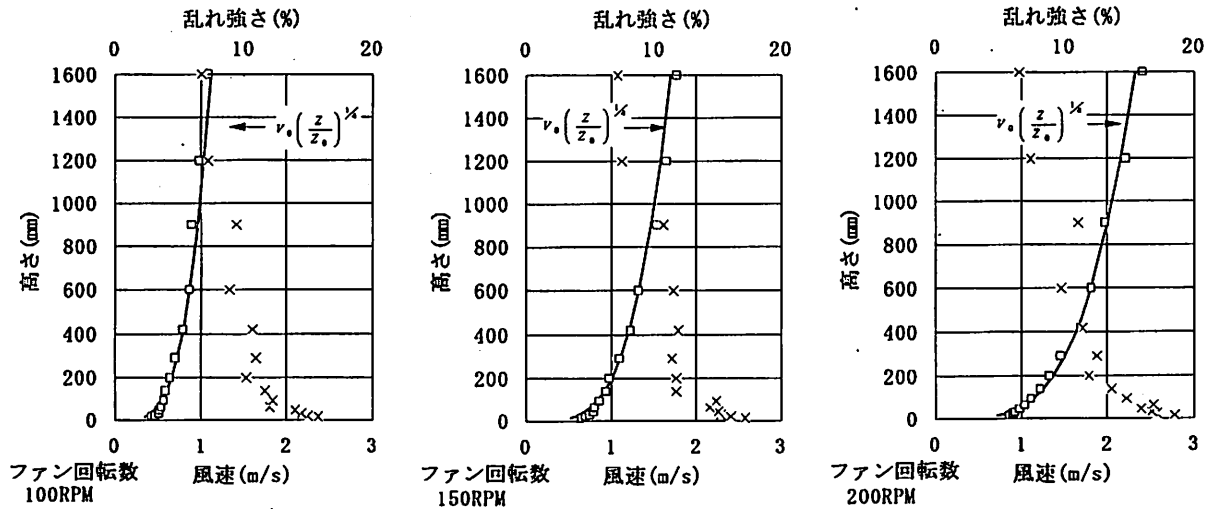


図 A.13: 床面粗度調整後の平均風速, 乱れ強さの鉛直分布

ここまでは平均風速にのみ着目してスクリーンの調整を行ってきた。上記で決定したスクリーンでの乱れ強さは、基準高さ 600mm 以下では 10% ~ 20% 程度で、A.3.2 節で述べた市街地地表面近くの乱れ強さと一致し鉛直分布の傾向もよく似ている。よってこのスクリーンで市街地風を再現することができたと判断する。

次に、決定したスクリーンのA点以外での平均風速、乱れ強さの鉛直分布を検討する。

A点から流れに対して垂直に1m離れたB, C点での風速分布を図A.14, 図A.15に示す。この分布形をみると、多少の差異がみられるが、分布形はそれほど崩れておらず、測定部断面での2次元性も概ね良好である。

またA点から1m下流の点(D点)及びその左右1mでの点(E,F点)での風速分布を図A.16, 図A.17, 図A.18に示す。下流での風速分布の変化はそれほどみられず、風速分布形の保存性は非常に良いと思われる。

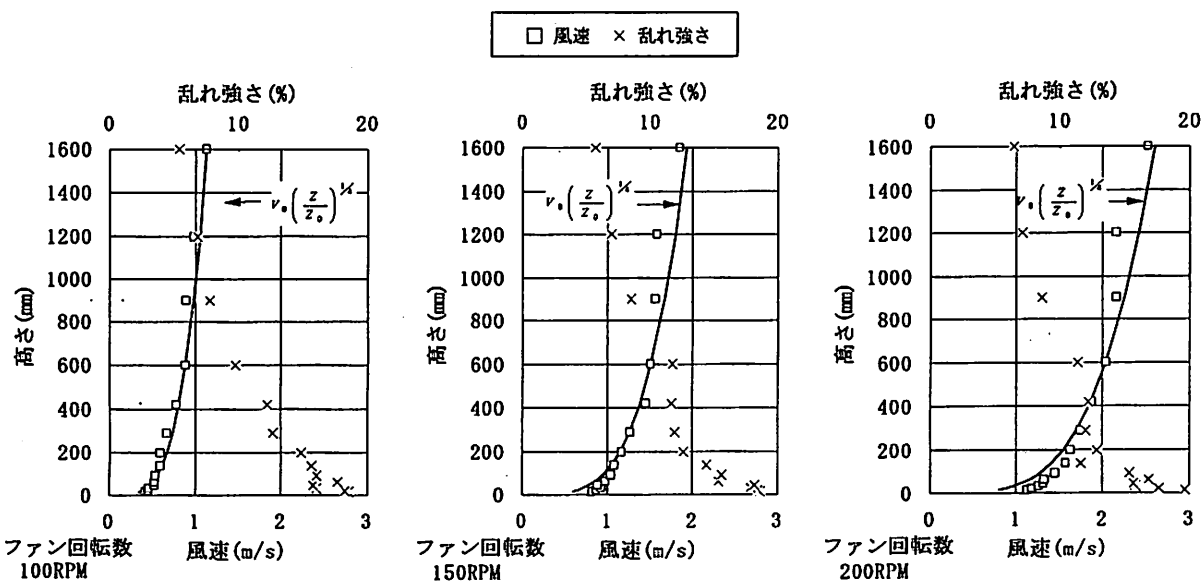


図 A.14: B点での平均風速、乱れ強さの鉛直分布

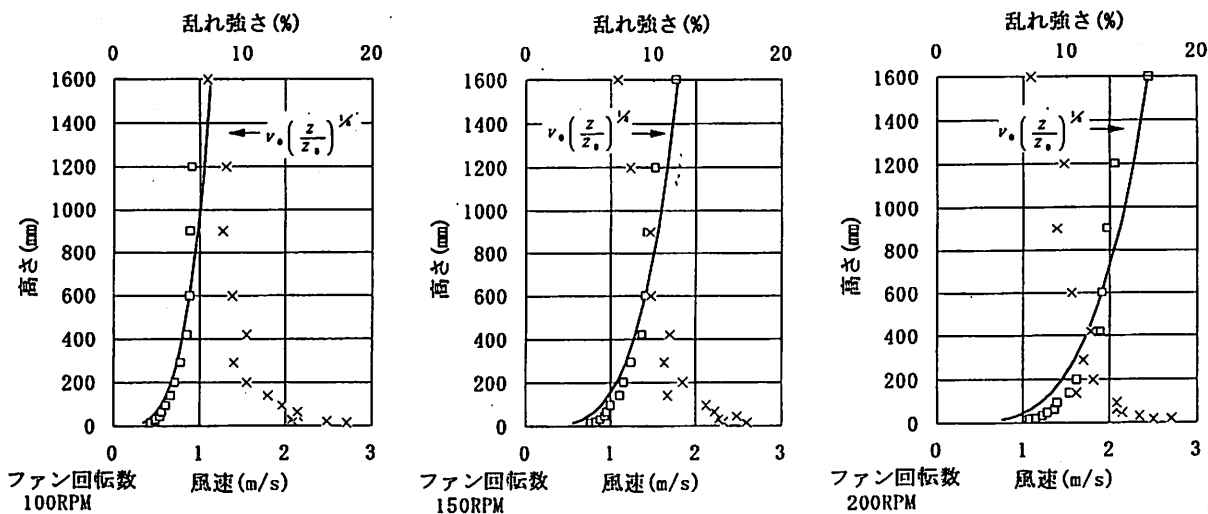


図 A.15: C点での平均風速、乱れ強さの鉛直分布

□ 風速 × 乱れ強さ

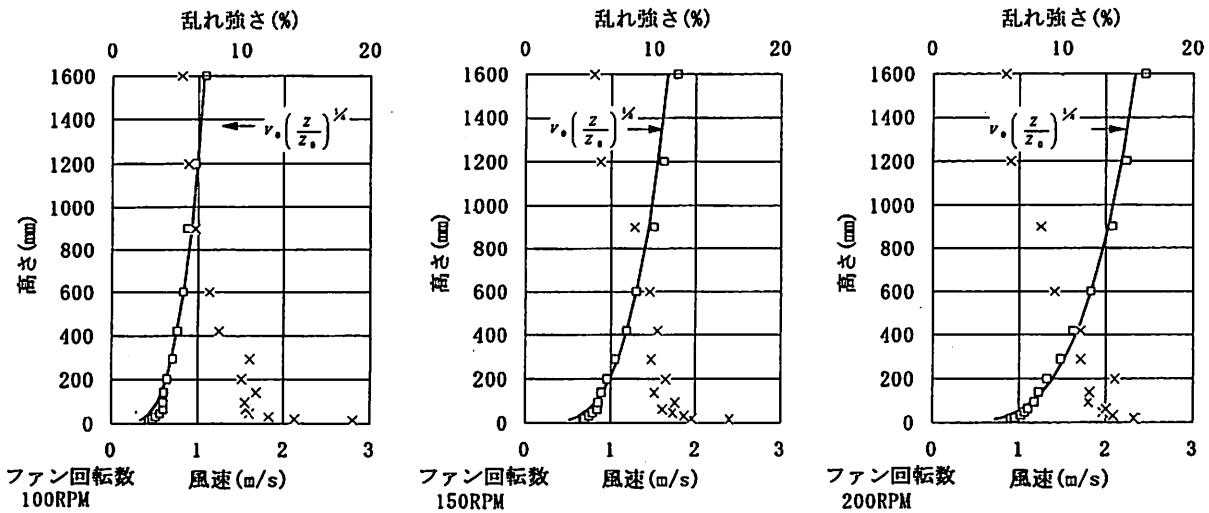


図 A.16: D点での平均風速, 乱れ強さの鉛直分布

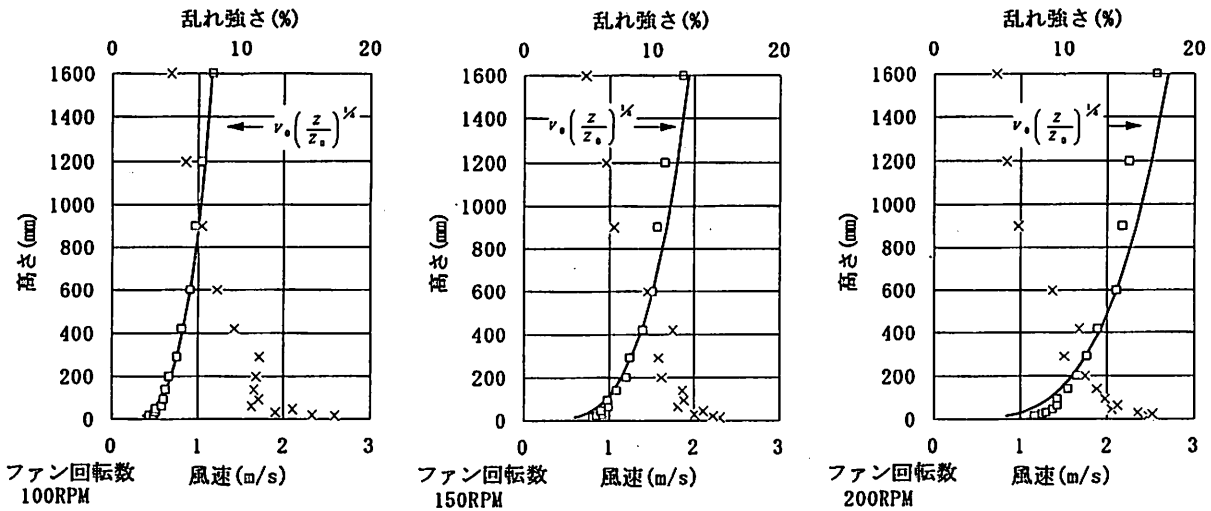


図 A.17: E点での平均風速, 乱れ強さの鉛直分布

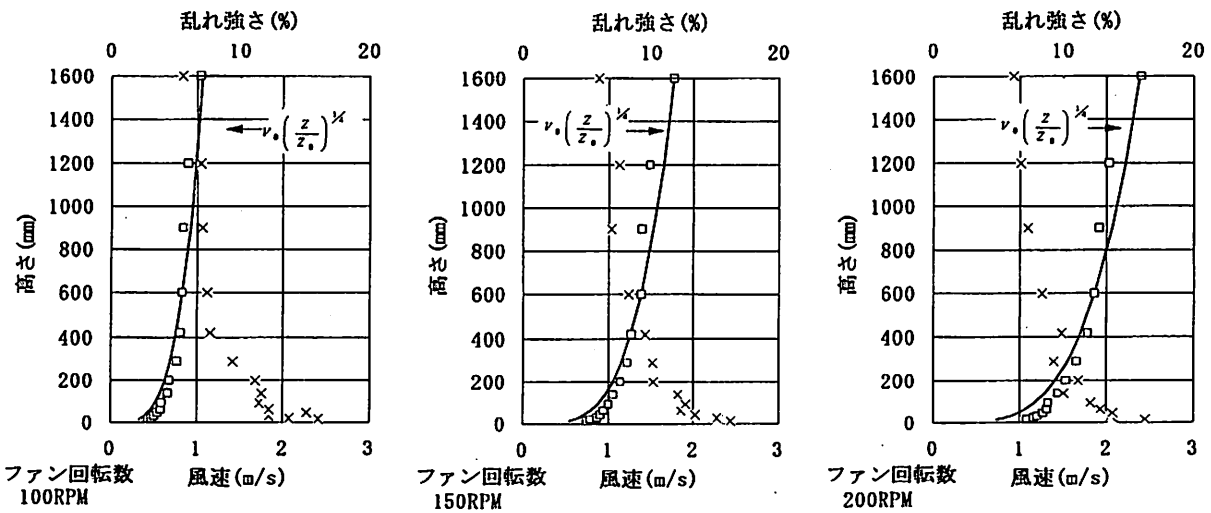


図 A.18: F点での平均風速, 乱れ強さの鉛直分布

Appendix B

予備実験（模型火源についての検討）

B.1 実験の目的

我々の行っている模型実験には相似性の確保に関して未だ整備されていない種々の境界条件が残されている。現実の火炎を再現する模型火源もそのひとつである。本研究では炎の形状、炎境界面での温度が等しいとした境界条件を考え、温度上昇については縮尺比と無関係になるとする相似則を採用して実験を行っている。しかし実際には模型の縮尺が大きいと上昇温度も高くなる傾向にあり、模型火源の火炎形状も必ずしも相似にならないことなどが問題となった。本来乱流拡散炎では、炎の最高温度は 1400°C 前後と燃焼物による変化が小さい^[19]。このため炎表面での熱伝達機構が相似になれば気流の温度は縮尺に関わらず同じになるはずである。上記の煙層温度が異なる原因として考えられる要因の中で模型火源に起因すると思われるものとして、

- (1) プロパンガスが完全燃焼しておらず、燃焼率がスケールにより異なっている可能性がある。
- (2) 火源の発熱量の内、対流成分と輻射成分の分配比率がスケールによって変化している可能性がある。
- (3) 火源の火炎形状がスケール（バーナーの径）によって変化し、幾何学的な境界条件を満たしていない。

があげられる。上記(1)(2)(3)についてその影響の度合いを調べるのが本章の目的である。

B.2 火源発熱量と対流、輻射成分比

B.2.1 実験の方法

図 B.1 に示すような実験装置を用いて実験を行った。

1. 酸素消費法^[20](後述)によりプロパンガスバーナーの発熱量を求め、ガス流量から計算した発熱量と比較する。

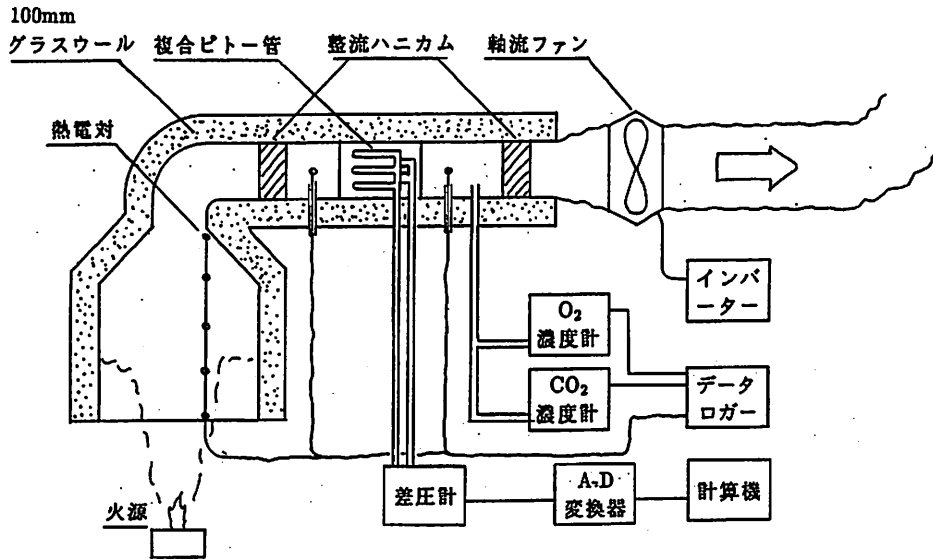


図 B.1: 実験装置

2. 排煙ダクト内の気流温度と気流速度から火源発熱量の内の対流成分を求め、総発熱量との比から火源の対流、輻射成分分配比率を検討する。

以上の手順により、3つの異なる大きさのバーナーに対して4種の想定した実大発熱量を組み合わせ、表B.1に示す実験を行った。(1つの実験パターンにつきそれぞれ2回ずつ)

表 B.1: 実験パターン

想定した実大発熱量 [MW] (火源直径 1,500mm)	2.0	2.5	3.0	5.0
ガス流量による発熱量 [kW] L1:1/30 模型 (火源直径 50mm)	0.41	0.51	0.61	1.01
ガス流量による発熱量 [kW] L2:1/20 模型 (火源直径 75mm)	1.12	1.40	1.68	2.80
ガス流量による発熱量 [kW] L3:1/15 模型 (火源直径 100mm)	2.30	2.87	3.44	5.31*

* マスフローコントローラーの制御範囲による制限から実大想定 4.625MW の発熱量となった

酸素消費法による火源発熱量の測定

酸素消費法とは“燃焼により消費される酸素の単位量当りの発熱量は、火災時に通常関係する有機質材料の広い範囲にわたって概ね一定の値（13.1[kJ/g-O₂], 精度5%以内）

をとる”という原理に基づくものである^[20]。

酸素消費法による発熱量の計測では，酸素(O_2)濃度 $X_{O_2}^A$ [mol分率]，二酸化炭素(CO_2)濃度 $X_{CO_2}^A$ [mol分率]，排煙ダクト内平均気流速度 v [m/s] を測定し，以下の式によって全発熱量 Q_{all-c} [kW] を算出する。

$$Q_{all-c} = \frac{E\rho_o V}{W_{air}} \left(X_{O_2}^o - \frac{X_{O_2}^A(1 - X_{O_2}^o)}{1 - X_{O_2}^A - X_{CO_2}^A} \right) \quad (B.1)$$

E : 単位酸素消費量当りの発熱量 420[kJ/mol]

ρ_o : 雰囲気空気の密度 [kg/m³]

V : 燃焼系に入る空気の体積流量 [m³/s]

W_{air} : 空気のモル分子量 0.029[kg/mol]

$X_{O_2}^o$: 雰囲気空気の酸素濃度 [mol分率]

(B.1)式は，測定器の精度と燃焼形態によりCOの濃度まで考慮に入れた詳細式， O_2 の減少量だけに着目した簡略式を用いることもある。本研究では自作の装置での実験の他，建設省建築研究所建築試験室所有のより精度の良い装置を用いた実験も行った。

ガス流量から計算した火源発熱量

プロパンガスの供給流量による全発熱量 Q_{all-m} [kW] は以下の式により求めた。

$$Q_{all-m} = 4.186/60 \times E_p M \quad (B.2)$$

E_p : プロパンの低位発熱量 22.35[kcal/IN]

M : ガス流量 [l/min]

火源発熱量中の対流成分熱量

火源発熱量の内，対流成分熱量 Q_{con} [kW] は排煙ダクト内の平均気流速度 v [m/s] と温度 t_u [°C]， t_d [°C] から次式によって計算した。

$$Q_{con} = V\rho_o c_o \Delta\theta \quad (B.3)$$

c_o : 雰囲気空気の比熱 $\Delta\theta$: 上昇温度 [deg]

温度測定にはK-Type(CA)熱電対を用いた。なお火源による熱気流が全てフードに捉えられ，フード内で二層化していることを確認するため，集煙フード内温度 t_n [°C] (4点) をモニターしている。

このようにして求めた対流成分熱量には火炎からの輻射のうち，排煙フードの内側を温め，気流に供給されるものが一部含まれている。ここでは熱気流から系外に放出されるガス輻射及び排煙フード内側から系外への放熱は微量で無視できるものとし，火炎に対する排煙フードの形態係数 F_h から $F_o = 1 - F_h$ を系外に対する形態係数として，火炎

から系外に逃げた輻射の割合を求めた。実際の乱流拡散火炎では火炎形状を断定することは難しく、形態係数を詳細に計算することは不可能である。また形態係数は形状よりも対象物間の距離に依存するところが大きいので、火炎をバーナーの半径を半径とする半球面と仮定し、フードの開口（円）との形態係数を求めた。さらに厳密には火炎からの輻射には指向性があるが、ここでは簡単のため全方位にわたって均一（無指向）であるとした。(B.3)式で求められる対流成分熱量に含有される輻射成分を除去した対流成分熱量の修正値 Q'_{con} [kW] は次式で与えられる。

$$Q'_{con} = Q_{all} - \frac{Q_{all} - Q_{con}}{F_o} \quad (B.4)$$

F_h : 火炎の排煙フードに対する形態係数 0.126

F_o : $1 - F_h = 0.874$

Q_{all} : 火源の発熱量 [kW]

以下、対流成分熱量はこの修正値のことを指す。

B.2.2 実験結果及び考察

対流成分と輻射成分の分配比率

図 B.2 に表 B.1 の実験における、プロパンのガス流量から求めた発熱量 Q_{all-m} (理論値) と酸素消費法から計算した発熱量 Q_{all-c} (実測値) の関係を、図 B.3 にガス流量から計算した発熱量に対する温度差と流量の積から求めた対流成分熱量の比 (Q'_{con}/Q_{all-m}) を示す。なお各値は 150 秒間 (75 測定値) の平均値である。酸素消費法では装置の中のガス濃度計、流量計 (複合ピトー管、オリフィス) の測定精度から特に小さな発熱量を計測する際には測定誤差が大きくなるため厳密な議論は出来ないが、図 B.2 からガス流量から計算した発熱量に比べて酸素消費法で求めた発熱量が 1~2 割大きいことから (ただし精度の良い機材を用いた建築研究所のデータの方が理論値に近い)、ほぼ完全燃焼しているものと考えられる。そこで以下の分析ではガス流量から計算した発熱量を基準とする。

温度差と流量の積から求めた対流成分熱量は再現性が良いが、ガス流量から計算した発熱量に対する温度差と流量の積から求めた対流成分熱量の比は模型火源の大きさによって異なった傾向がみられる。火源バーナーの径が 50mm の実験ではガス流量が多いほど対流成分の割合が大きく、0.76~0.93 まで大きな振れ幅を持つ。径 75mm では若干のばらつきはあるがほぼ 0.85~0.9、径 100mm ではガス流量が多いほど対流成分の割合は小さくなるがその値は 0.8~0.85 の間にある。バーナー径 50mm の想定実大発熱量 (2.0~3.0 [MW]) の実験では気流温度の上昇が小さく、測定誤差が相対的に大きくなる上、完全な乱流火炎でなく、層流火炎と乱流火炎の中間的火炎形状であることから燃焼機構が他のケースと異なると考えて分析の対象から除外すれば、発熱量が 1.0~5.0 [kW] の範囲では、発熱量が増える程対流成分熱量の割合が減少し、バーナーの径で不連続になる傾向はみられない。またその値は 0.8~0.9 程度である。これは“模型の縮尺が大きい

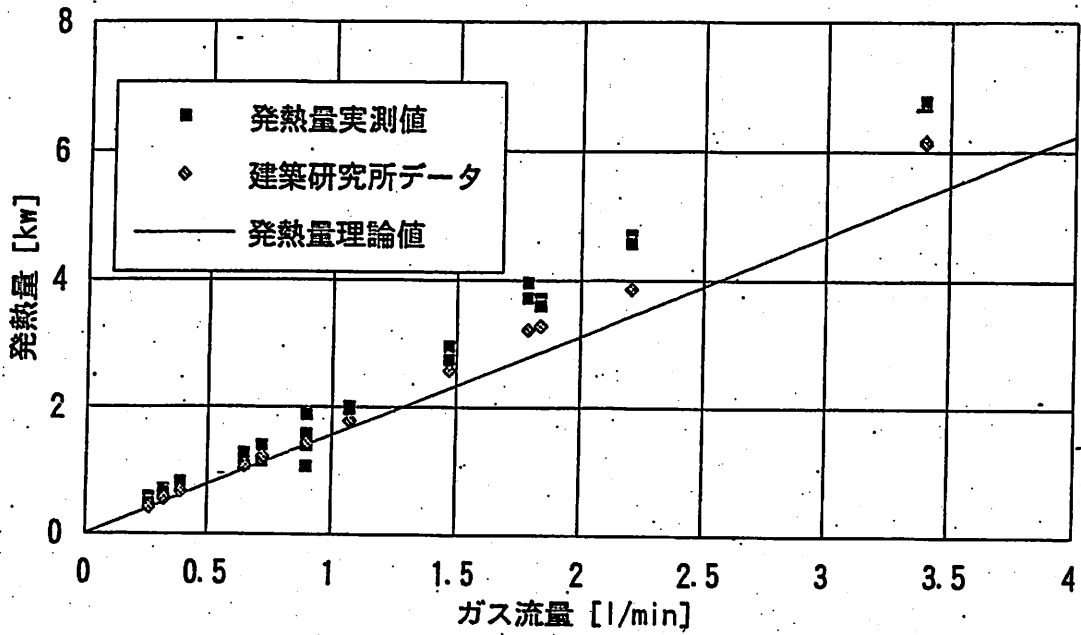


図 B.2: 入力ガス流量と発熱量の関係

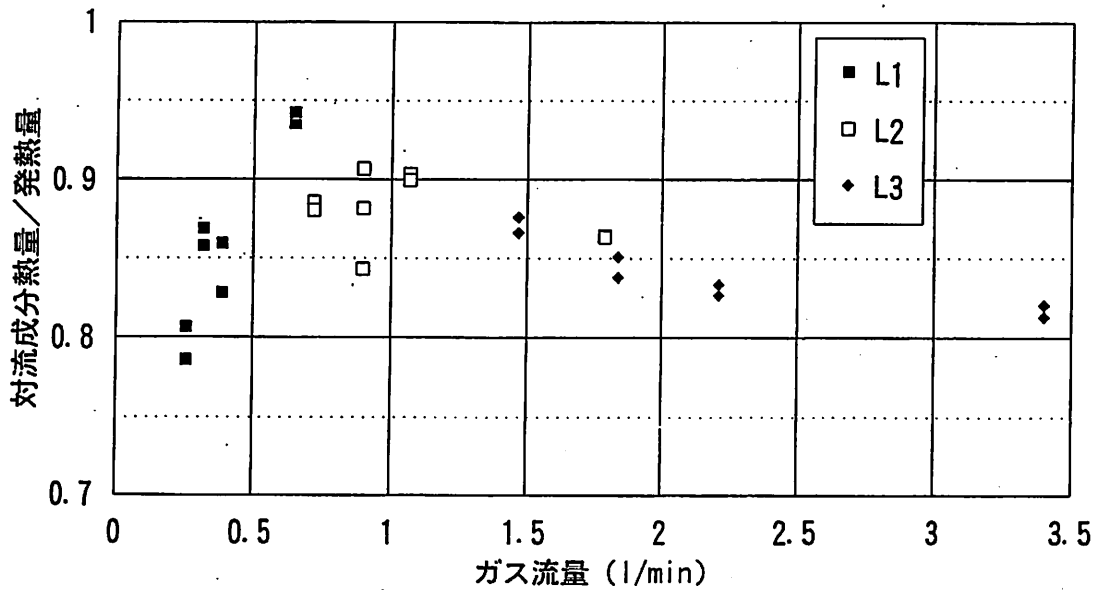


図 B.3: ガス流量から求めた発熱量と温度差と流量の積から求めた対流成分熱量の比

ほど火源発熱量の対流成分比率が大きくなるために気流の温度が高くなる”という仮定に反する結果となった。

B.3 火炎形状

B.3.1 実験の方法

図 B.4 に示すような実験装置を用いて暗室で実験を行った。

1. ビデオカメラのレンズによる歪みがないかを調べるために、火源直径と同じ大きさのグリッド(10×10)を、画角が相似になるように、すなわちそれぞれ画面上で同じように見える位置にカメラを固定した後、スケールの異なるバーナーによる火炎をビデオ撮影する。(図 B.5)
2. その映像を画像処理機を使って二値化し、パーソナルコンピュータにデータとして入力する。
3. 二値化した画像の20秒間(1秒間に30コマ、合計600枚)の各点における平均、標準偏差、火炎先端高さをとって、火炎形状、火炎高さ、炎の振動数を比較する。

以上の手順により、前節同様、表 B.1 に示す実験を行った。なおビデオカメラの絞りは自動調整にし、画面上でスケールが分かるように1cm刻みの目盛を火源位置の高さから配置した。

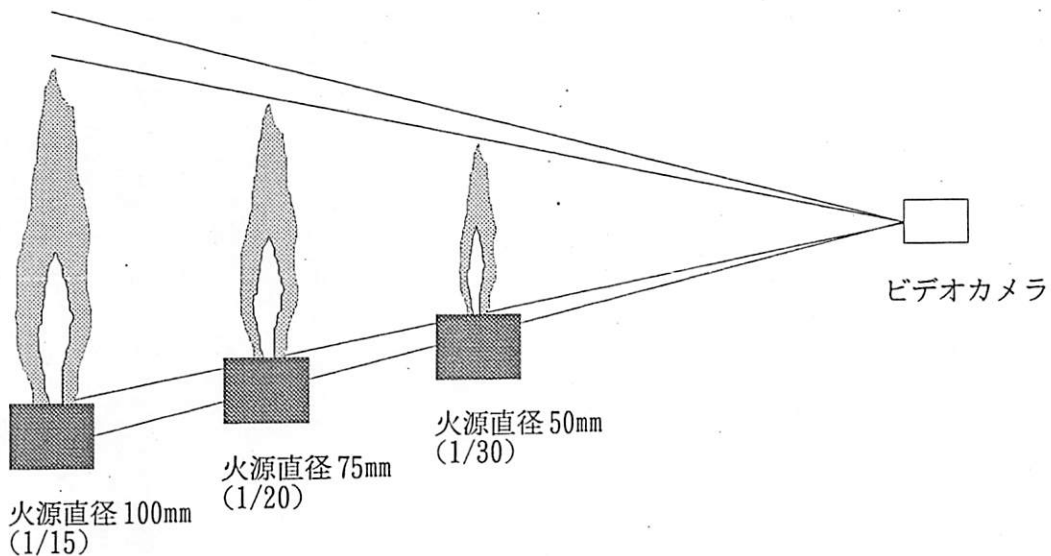


図 B.4: 火炎撮影装置

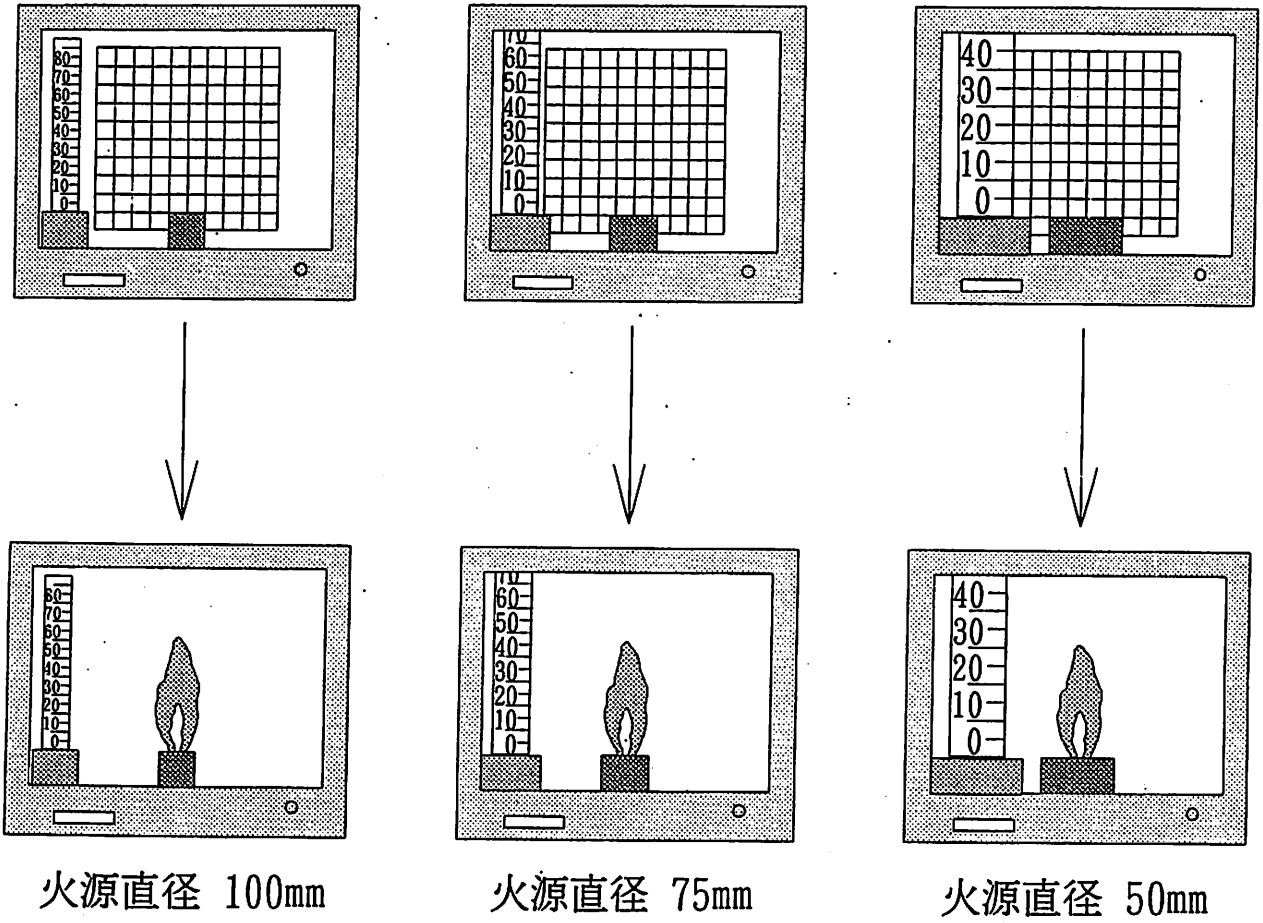


图 B.5: 摄影手順

二値化

図 B.6に示すようなシステムを使って、撮影した映像を次の手順で二値化した。

1. ビデオで撮影した映像を1コマずつイメージメモリーボードを通してコンピューターに入力する。（イメージメモリーボードはフォトロン製 FD98を用いた。）
2. モニターに映る画像と二値化した画像とを比較する事により、明度の閾値 B.2を決定し、二値化する。
3. 二値化した画像を二値化データとしてコンピューターに入力する。

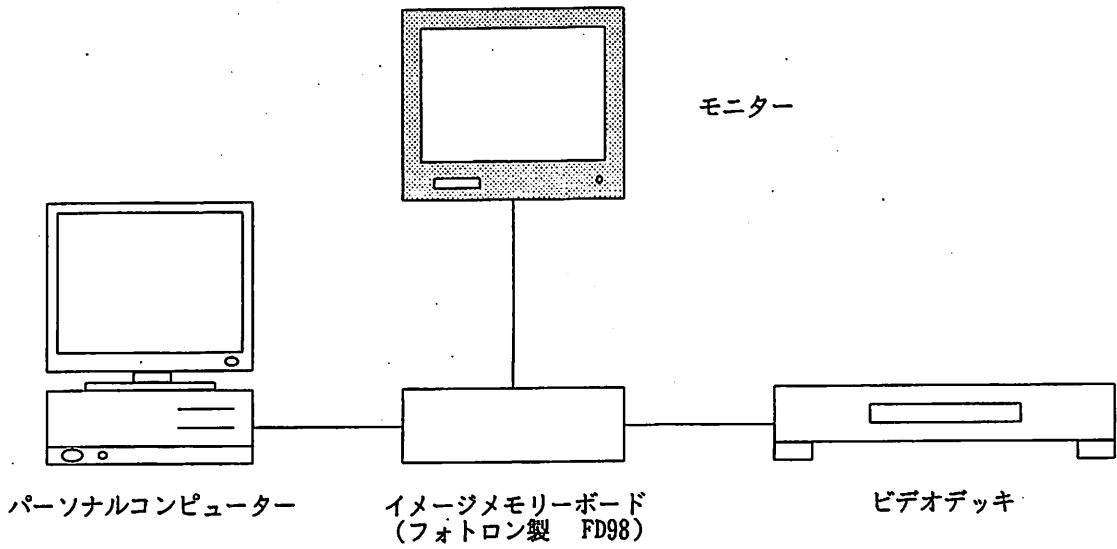


図 B.6: 画像処理機器システム図

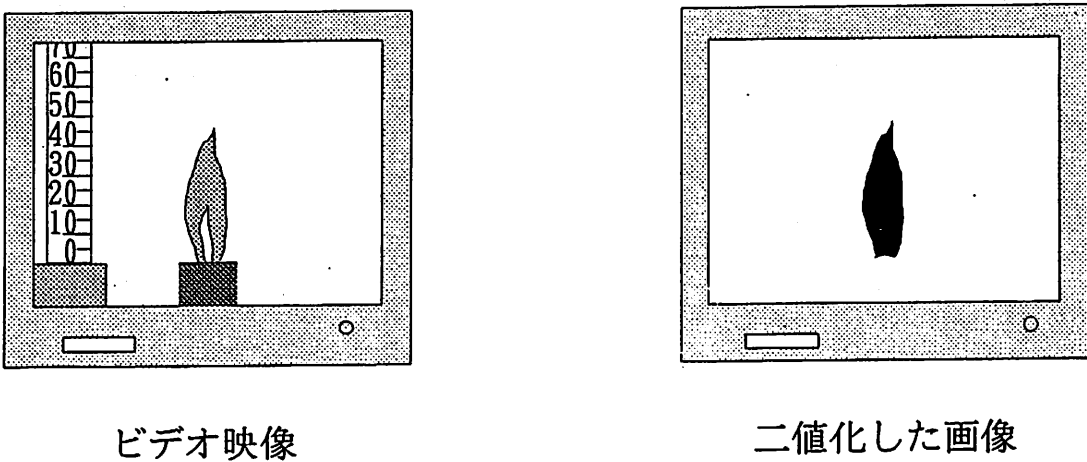


図 B.7: 二値化概念図

明度

明度は0~63までの値をもつが、今回の実験では表 B.2に示すような数値を境界値として用い、表 B.2で示した数値以上を黒、それ未満の数値を白と判断した。

表 B.2: 二値化スレッシュホールドレベル

実験パターン	Q1	Q2	Q3	Q4
L1:火源直径 50mm	30	35	40	45
L2:火源直径 75mm	30	35	40	45
L3:火源直径 100mm	30	40	40	45

高さの算出方法

撮影したグリッドの画像を二値化し、火源の大きさ（3種類）それぞれについて2回ずつ火源位置の高さにある横軸と8マス上（上から2番目）の軸のビットの位置を求めた。

そのビット数をそれぞれのグリッドの大きさを8倍した数値で割り、1ビット当たりの長さ (mm) を求め、火源の大きさごとに平均しビット数にその長さをかけたものを火炎の高さとした。

表 B.3: 高さの算出データ

	上軸	下軸	BIT	GRID SIZE	mm/BIT
火源直径 50mm (1/30 模型)	64	226	162	50	2.469136
	65	227	162	50	2.469136
火源直径 75mm (1/20 模型)	62	230	168	75	3.571429
	62	229	167	75	3.592814
火源直径 100mm (1/15 模型)	56	225	169	100	4.733728
	56	224	168	100	4.761905

平均・標準偏差

二値化した20秒間の画像を重ね合わせ、画像の枚数（600）で割ることにより平均の画像を求めた。また、その平均から標準偏差を求め表示した。

火炎高さの周波数

火炎高さの変動については、データの測定時間が20秒、ビデオ映像は1秒間に30コマなので0.1Hz~15Hzのうちパワースペクトルの卓越した周波数を固有周波数として用いた。

B.3.2 実験結果




火炎形状

表 B.5, B.6に実験パターンごとに二値化した画像各点での平均の明度を表示する。

表 B.7, B.8に実験パターンごとに二値化した画像の明度の標準偏差を表示する。

表示した点は B.4で示す3段階に分けられている。

表 B.4: 明度

	0 ~ 10	11 ~ 29	30 ~ 63
明度			

実験の結果、平均値については火源直径 75mm と 100mm ではほぼ一致した形状になっているのが分かる。想定発熱量 5MW では3種類の径ともに比較的近い形をしている。火源直径 50mm では高さは低く幅も細いことが分かる。

標準偏差については、図での白い部分つまり余り変動していない部分は、どの想定発熱量についてもほぼ相似な形状になっている。そのほかの部分については火源直径 75mm と 100mm ではほぼ一致した形状を示す。火源直径 50mm では高さはそれほど変わらないが、上部の明度 11~63 の部分の割合が少なくなり、幅も細くなっている。火源直径 50mm の 2MW~3MW では平均値、標準偏差の傾向がかなり違うことが分かった。

表 B.5: 平均值 1







平均值	Q1 : 想定発熱量 2MW	Q2 : 想定発熱量 2.5MW
火源直径 50mm (L1)		
火源直径 75mm (L2)		
火源直径 100mm (L3)		

表 B.6: 平均値 2







平均値	Q3: 想定発熱量 3MW	Q4: 想定発熱量 5MW
火源直径 50mm (L1)		
火源直径 75mm (L2)		
火源直径 100mm (L3)		

表 B.7: 標準偏差 1







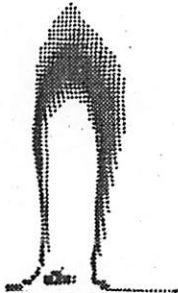


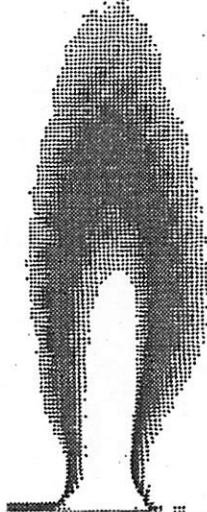


標準偏差	Q1 : 想定発熱量 2MW	Q2 : 想定発熱量 2.5MW
火源直径 50mm (L1)		
火源直径 75mm (L2)		
火源直径 100mm (L3)		

表 B.8: 標準偏差 2

標準偏差	Q3 : 想定発熱量 3MW	Q4 : 想定発熱量 5MW
火源直径 50mm (L1)		
火源直径 75mm (L2)		
火源直径 100mm (L3)		

火炎の高さ

以下に実験の結果を記す。図 B.8に火炎高さの平均を，図 B.9に無次元化した火炎高さの平均を示す。

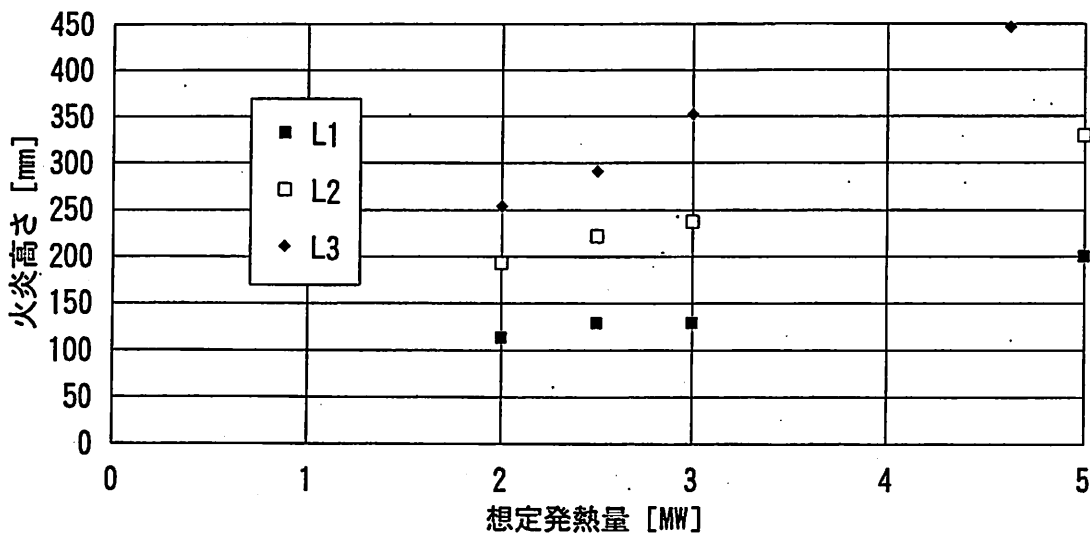


図 B.8: 火炎高さの平均

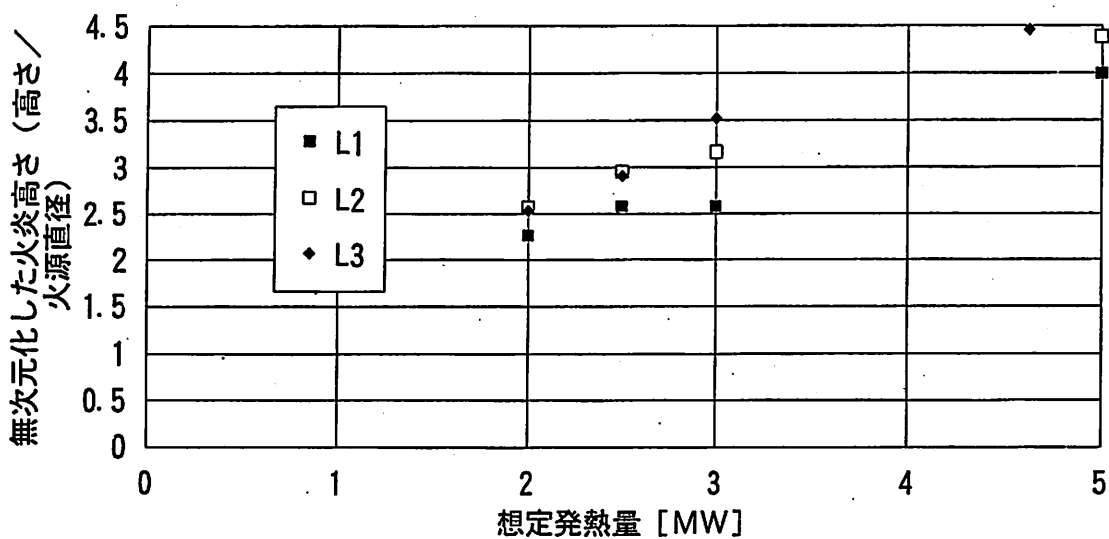


図 B.9: 無次元化した火炎高さの平均

図 B.8を見ると火炎の高さは、想定発熱量の増加にしたがって、火源の直径に関係なくほぼ直線的に増加しているが、火源直径が小さくなるに連れてその傾きも小さくなる（火炎の高さがあまり増加しない）傾向がある。

図 B.9を見ると実大に換算した値は、火源直径 75mm(1/20) と火源直径 100mm(1/15) では、想定発熱量 3MW を除いてほぼ一致している。また火源直径 50mm(1/30) については全体に 1 割程度小さな値となった。

図 B.10にガス流量による火炎高さを示す。

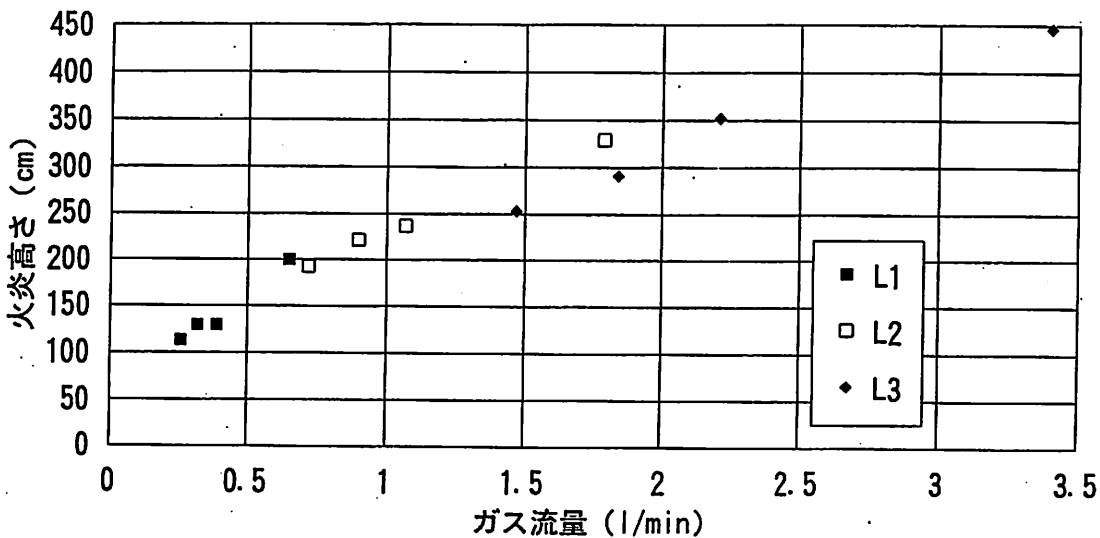


図 B.10: ガス流量による火炎高さ

ガス流量が増えるに従って、L1,L2,L3ともにほぼ直線的に増加の傾向を示しているが、火源の直径が大きくなるにつれて傾きが少しずつ小さくなっていく傾向、すなわち火炎高さが低くなっていく傾向がみられる。これは火炎の高さが火源寸法よりかなり大きくなると、火炎高さに対する火源寸法の影響は消えて火炎高さは発熱速度だけで決まるようになる^[21] ためと思われる。

図 B.11に変動計数（標準偏差／平均高さ）を示す。

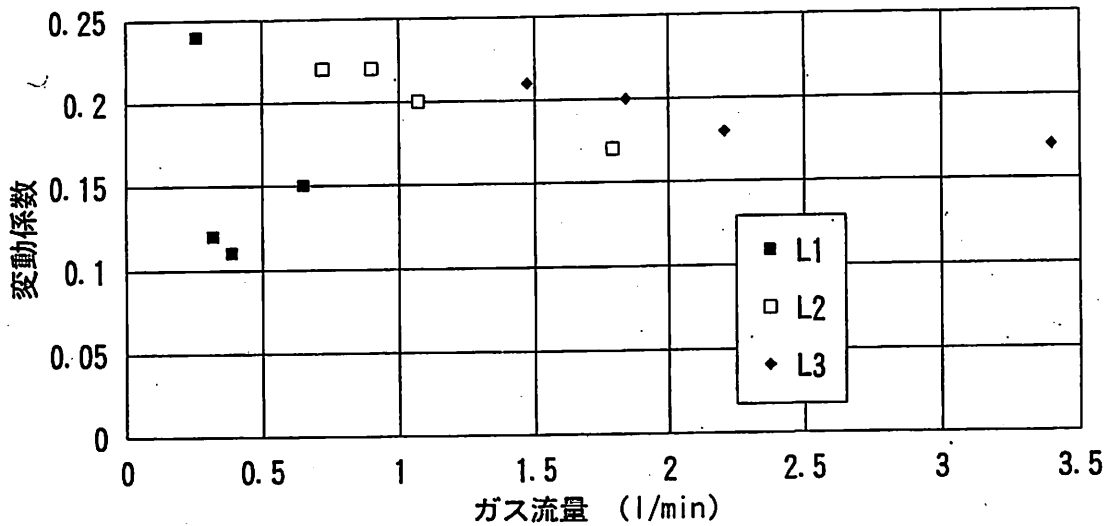


図 B.11: 変動計数（標準偏差／平均高さ）

径 75mm と径 100mm の変動計数は、ほぼ同じ値を示し 0.15~0.25 の間にある。

想定発熱量が増えるに従って変動係数が減る傾向も同じである。

径が 50mm ではガス流量が最も小さい（想定発熱量 2MW）では大きな値を示すがそれ以外では 0.1~0.15 で安定している。つまり L1 の Q2, Q3, Q4 では高さの変動の割合が小さいことが分かる。

図 B.12 に火源寸法に対する燃焼発熱の強さ Q^* を示す。図 B.13 に Q^* を他の研究と比較したものを示す。(乱流拡散炎の高さは、燃えるものの組成にはあまりかわりなく、燃焼発熱 Q に支配され、火炎高さ と火源寸法の比はほぼ $Q_f^* = Q/D^{5/2}$ の関数となることわがわっている)

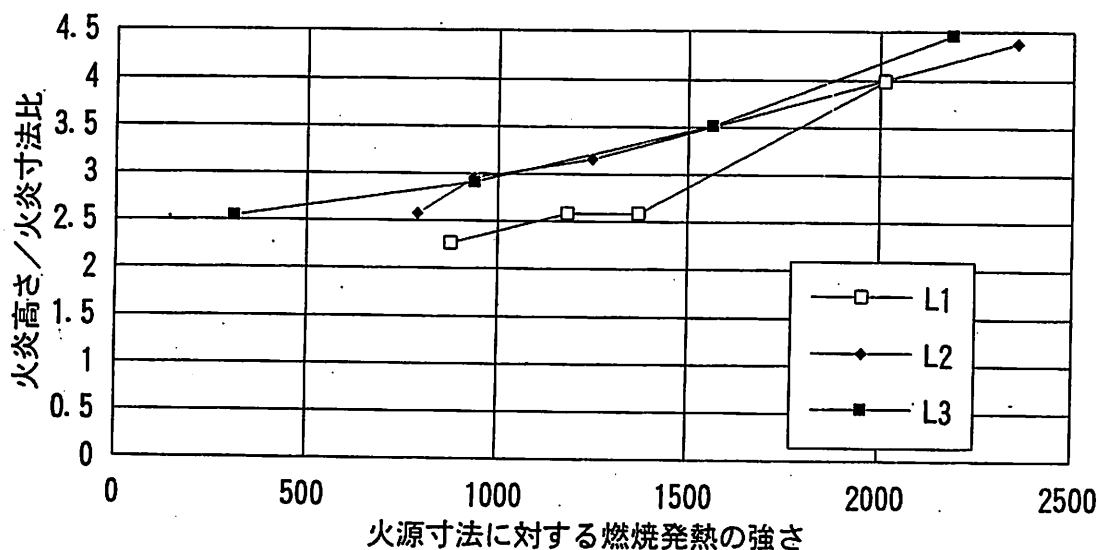


図 B.12: Q^* (測定値)

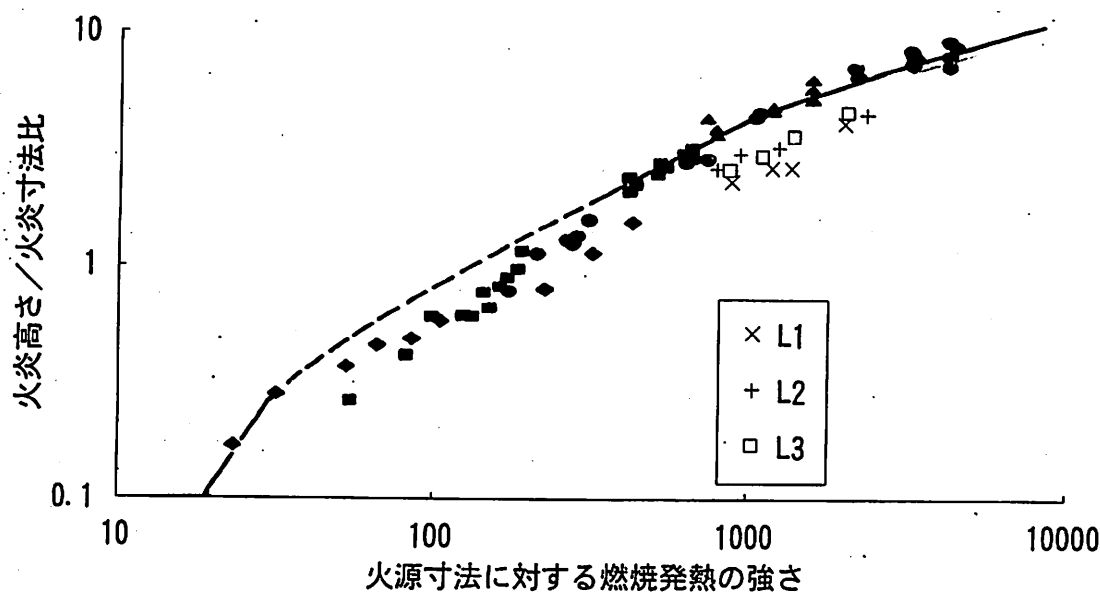


図 B.13: Q^* の比較

図 B.12 では L2 と L3 ではかなり一致した直線となっているが径 50mm では想定発熱量の小さな範囲 (2MW~3MW) では、多少火炎高さ と火炎寸法の比が小さな値を示した。

図 B.13 では L2, L3 はほぼ一致した値を示しているが、やはり L3 は若干低い値を示している。

炎の振動数

図 B.14 にスケールごとの卓越周波数（測定値）を示す。図 B.15 にスケールごとの実大換算した卓越周波数を示す。

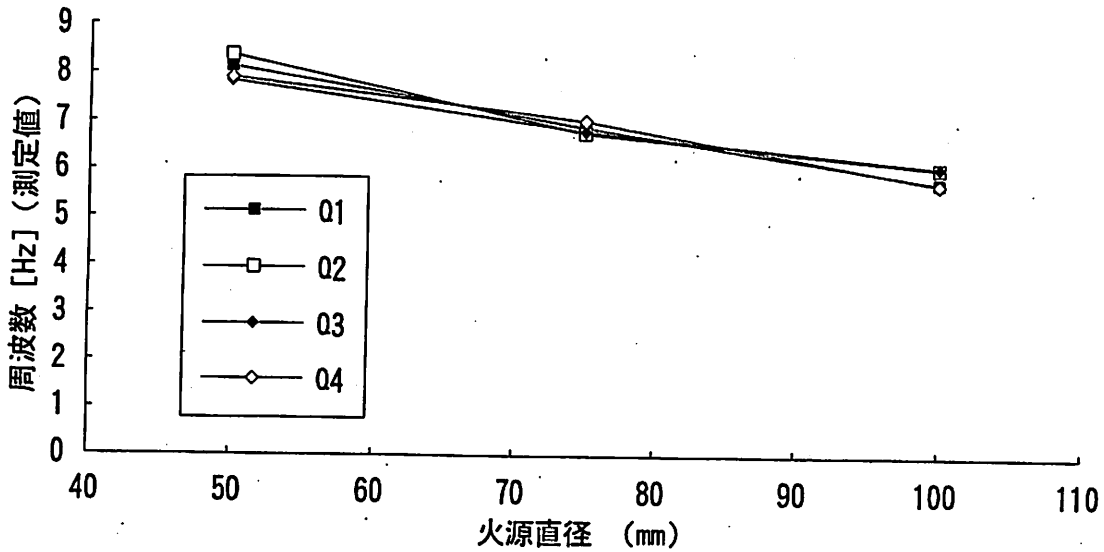


図 B.14: 卓越周波数（測定値）

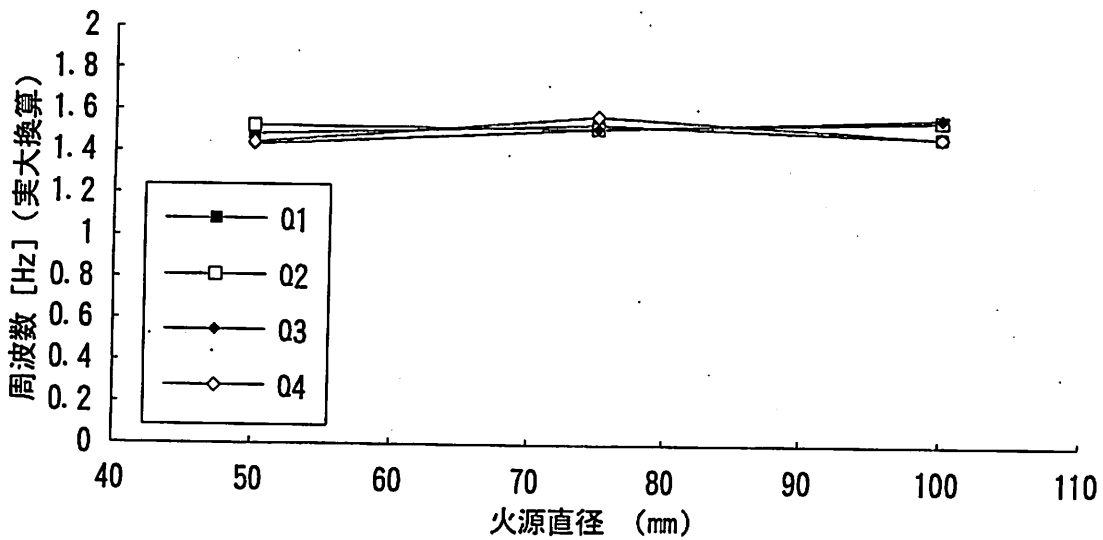


図 B.15: 卓越周波数（実大換算値）

卓越周波数については火源直径によらず想定発熱量ごとに測定値，実大換算値ともほぼ一致した値を示した。

図 B.16に Q^* ごとの卓越周波数（実大換算値）を示す。

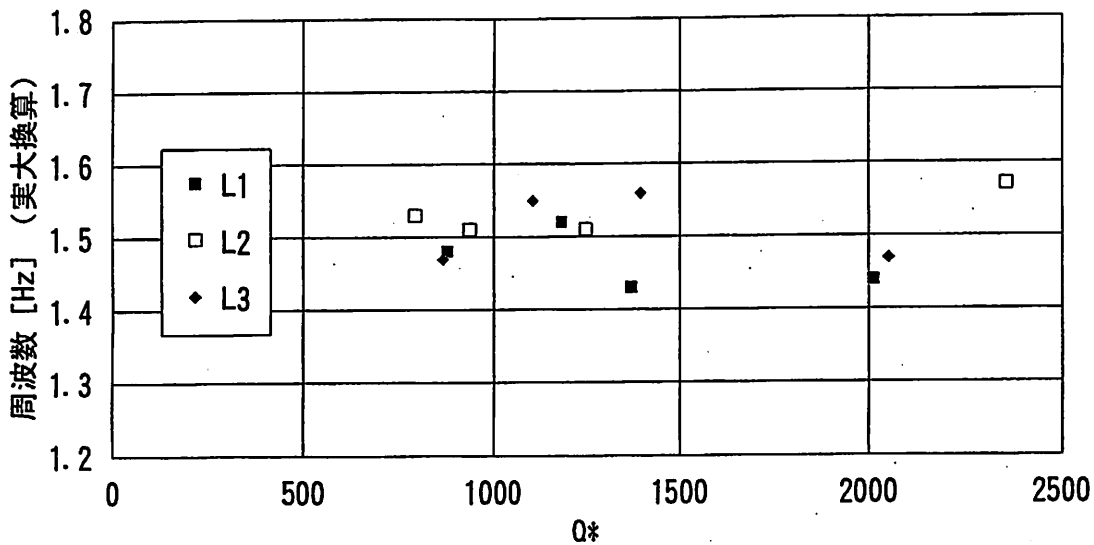


図 B.16: Q^* と卓越周波数（実大換算値）

図 B.16から実大換算した周波数は Q^* の値によらずほぼ一定で1.4~1.6の値を取り安定していることがわかる。

まとめ

火炎高さ、火炎形状のどちらの場合も火源直径75mmと100mmでは、無次元化された発熱速度が同じであればその傾向がかなり一致していることが分かった。

周波数については、火源直径によらず安定した値を取り、実大換算したものについては1.4~1.6の間の値を取っている。

火源直径50mmの傾向が形状と高さの点であまり一致しない理由としては、バーナー径50mmの想定実大発熱量（2.0~3.0[MW]）の実験では完全な乱流火炎でなく、層流火炎と乱流火炎の中間的火炎形状であることから燃焼機構が他のケースと異なると思われるからである。

参考文献

- [1] 竹之内哲次, 辻本誠, 矢野斉: 一部に開口のある閉空間での煙流動に関する相似則, 日本火災学会研究発表会概要集, 1989年5月
- [2] 竹之内哲次: アトリウム火災の模型実験に関する研究—一部に開口部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
- [3] 長岡勉, 辻本誠, 奥宮正哉, 加藤仁久, 山下秀樹: 蔵前国技館火災実験での煙流動についての模型実験, 日本火災学会研究発表会梗概集, 1991年5月
- [4] 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
- [5] Quintiere, J.G., "Scaling Application in Fire Research", Proc. of the International Symposium on Scale Modeling, 1988
- [6] 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
- [7] E.K.Torrance, L.Orloff, J.E.Rockett, "Experiments on Natural Convection in Enclosures with Localized Heating from Below", J.Fluid, Mech. 1969, vol36
- [8] E.E.Zukoski, Toshi Kubota, Baki Cetegen, "Entrainment in Fire Plumes", Fire Safety Journal, 3(1980/81)
- [9] Gunnar Heskestad, "Luminous Hight of Turbulent Diffusion Flames", Fire Safety Journal, 5(1983)
- [10] 甲藤好郎: 伝熱概論, 養賢堂, 1964
- [11] 関根章義, 辻本誠, 奥宮正哉, 志村正幸: アトリウムの煙流動に外気風が及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1992.8
- [12] 大規模建築物及び特異建築物等の消防対策に関する調査研究報告書<アトリウム・人口地盤>, 東京消防庁, 1990.3

- [13] 大熊武司：風洞実験（技術ノート=建築における風工学(1)），建築雑誌，Vol.103，No.1278，1988年10月
- [14] 日本火災学会：火災便覧，共立出版，1984
- [15] 西田勝，片山忠久，石井昭夫，堤純一郎：測定洞の短い風洞における不等間隔スクリーンによる指数分布速度プロファイルの形成，日本建築学会建築環境工学論文集，第5号，1983年11月
- [16] 西田勝，片山忠久，石井昭夫，堤純一郎，下家純一，沼田建一郎：大小2つの風洞における相似なスクリーンによる指数分布速度プロファイルの形成，日本風工学会誌，第19号，1984年4月
- [17] P.R.Owen，H.K.Zienkiewicz：The production of uniform shear flow in a wind tunnel，J.of Fluid Mechanics，vol.2，1957
- [18] 本郷剛：「大小2つの風洞における相似なスクリーンによる指数分布速度プロファイルの形成」に対する討論，日本風工学会誌，第21号，1984年9月
- [19] 秋田一雄：火のはなしII，技報堂出版
- [20] 田中哮義，吉田正志：模型箱試験の開発と酸素消費法，GBRC vol40，1985年10月
- [21] 長谷見雄二：火事場のサイエンス，井上書院，1988
- [22] 江守一郎：模型実験の理論と応用，技報堂，1973
- [23] Richard Saxon,"ATRIUM BUILDINGS : DEVELOPMENT AND DESIGN", 1988
- [24] R.L.Alpert,"Turbulent Ceiling-Jet Induced by Large-Scale Fires", Combustion Science and Technology, 1975
- [25] 新・建築防災計画指針 新技術編，日本建築センター，1991.9
- [26] 坂本雄三：大空間施設及び地下空間における温熱環境予測
- [27] 前田建設工業（株）技術研究所：臨海部における大規模建築物の総合的防災安全に関する調査・検討－実験3－アトリウムの煙流動に外気風が及ぼす影響に関する実験的研究－，財団法人日本建築防災協会臨海部防災安全委員会報告書，1992.4.15
- [28] 梶山隆史，関根章義，奥宮正哉，辻本誠：スクリーンを用いた市街地風を模擬した境界層の作成－大断面を有する風洞における低風速域での境界層の作成－，日本建築学会東海支部研究発表会梗概集，1993.2
- [29] 梶山隆史，辻本誠，堀江記代美，関根章義，奥宮正哉：ボイド空間の煙流動に外気風が及ぼす影響（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，1993年9月

謝辞

この論文を作成するにあたり、終始熱心に御指導戴いた辻本 誠博士（現名古屋大学建築学科教授）、奥宮正哉博士（現中部大学建築学科助教授）そして連日深夜にわたって実験に御協力頂いた関根章義さん（現前田建設工業株式会社技術研究所研究員）に心から感謝いたします。

また、数々の適切な助言をして頂いた朴 哲也博士（現国連地域開発センター）、坂本雄三博士（現名古屋大学建築学科助教授）、伊藤尚寛博士（現三重大学建築学科助教授）志村正幸博士（現前田建設工業株式会社技術研究所滑川分室長）に感謝の意を申し上げます。

また、風洞設備を使用させて下さった前田建設工業株式会社技術研究所、研究助成金を頂いた財団法人前田記念工学振興財団の関係諸氏に感謝申し上げます。

最後に実験、結果分析を行うにあたり多くの援助・協力・激励をしていただいた中部大学学生の野中由久君、藤末忠司君、名古屋大学学生の堀江記代美さん、松下敦士君をはじめとする防災安全工学講座の諸氏に感謝します。

2/19,1992