

熱電対による気温測定に

放射が及ぼす影響

防災安全工学講座 辻本研究室

佐々木 真人

1995年2月

# 目次

1. はじめに	(2)
1.1 研究目的	(3)
2. 放射の影響について	(4)
3. 実験方法	
3.1 加熱平板による放射影響度の実験	(6)
3.1.1 実験装置	(6)
3.1.2 測定システム概念図	(12)
3.2 火源周囲の放射影響度の把握	(13)
4. 実験結果	
4.1 加熱平板の実験における実験結果	(15)
4.2 火源周囲の実験における実験結果	(19)
5. 考察	
5.1 加熱平板の実験結果の考察	(21)
5.1.1 形態係数の影響	(21)
5.1.2 熱電対の熱平衡式	(22)
5.1.3 自然対流熱伝達	(24)
5.1.4 実験式	(28)
5.2 火源周囲の放射影響度の把握への応用	(32)
6. おわりに	(36)

## 1. はじめに

アトリウム空間のもたらす開放感、快適性、豪華さ等は、そこに訪れた人々を魅了し、周囲の景観にも新鮮さを提供する。しかしながら、こうした空間の特徴とは裏腹に、アトリウムは、防災上大きな弱点を持っている。

アトリウム内または隣接する空間の一面で火災が発生した場合、アトリウムを通じて、短時間のうちに多くの連続する他の領域へ煙が広がり、火災の発生に直接関与しない多くの第三者を危険にさらす恐れが非常に高い。アトリウム空間が開放的になり、他の空間との一体感が増して面白みが増すほど、潜在的危険性が高くなるのである。

また、実際には、アトリウム建築はどれ一つとして他と同じ物はなく、個別の設計計画案に関して、それぞれ火災時の煙流動を知るための実大実験を行うことは不可能である。よって、縮尺模型を用いた模型実験を行って予測していくことが必要となってくる。

## 1. 1 研究目的

建物火災に関する実験・実測を行う際には、火災室内の温度計測を行う必要性が常に存在している。なぜならば、温度データは火災性状を把握するために非常に有効なデータであり、人体・構造体への影響を評価するためには欠かせぬものであるからである。しかし、火災室内には輻射源としての火炎が存在し、周壁からの輻射等もあり、高温気流の存在とあいまって、強い対流・放射伝熱場が形成される。そのため、気流温度を測定する場合には輻射成分の影響による測定誤差の影響が常につきまとい、この問題に対する研究<sup>1)</sup>が様々な研究者により行われているが、決定的方法が明らかになっていないと思われる。

現在、初期火災時における煙流動の模型実験法に関する研究を進めている。これは、初期火災時の現象であるため、建物火災という観点にたてば、比較的輻射伝熱の小さい場であるが、気流計測時における輻射成分の影響による測定誤差の問題は常につきまとい、煙による人体へのリスクを温度データから予測するのが通常の方法であるため、これは大きな問題である。そこで、気流温度測定法に関する調査を実施し、輻射成分の測定誤差対策となる各種温度測定法に関する比較実験を行い、測定精度を把握し、模型実験に適した測定法を選定するのが本研究の目的である。

## 2. 輻射の影響について

初期火災時における建物内での伝熱性状は、図2-1のように表される。

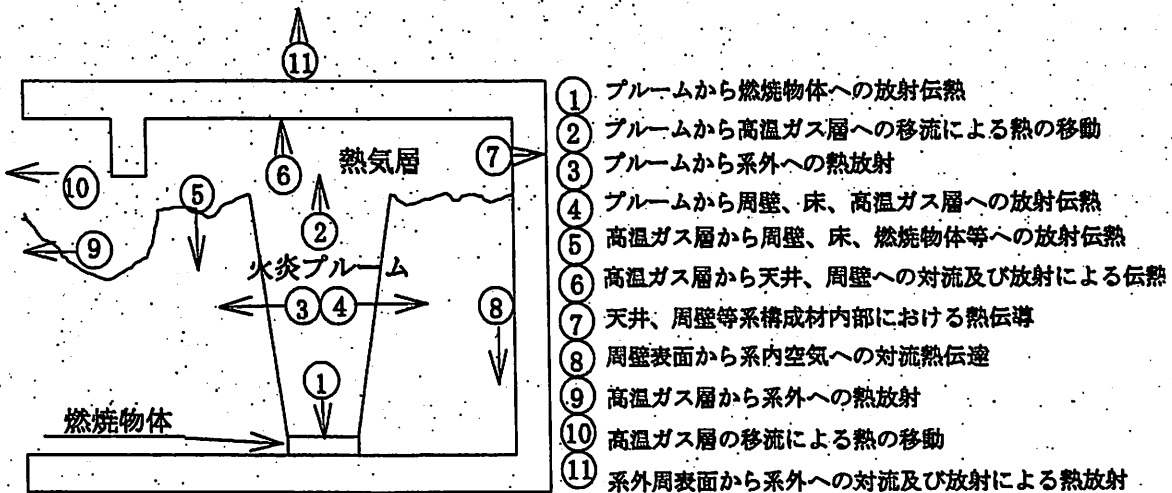
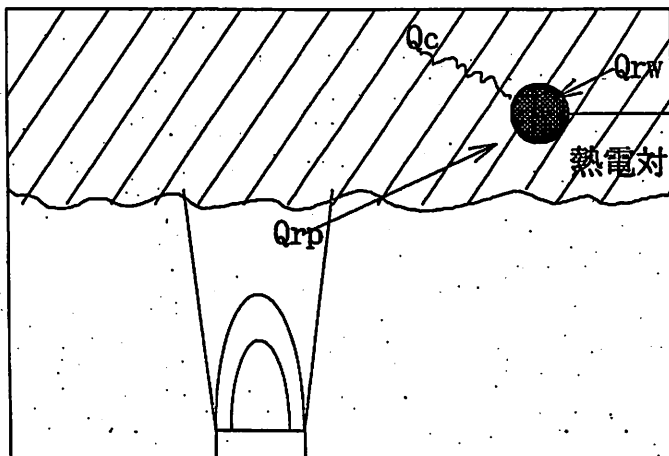


図 2-1 区画内火災初期における伝熱のパターン

熱気層の温度を計測するのに熱電対を用いた場合、火炎からの輻射伝熱および加熱された周壁からの輻射伝熱を受けて、熱電対の指示値は気流温よりも高い値となり、正確な値を測定できない危険性を含んでいる。



- $Q_c$ ; 対流による伝熱量
- $Q_{rp}$ ; 炎からの輻射伝熱量
- $Q_{rw}$ ; 周壁からの輻射伝熱量
- $Q_r$ ; 総輻射伝熱量

図 2-2 熱電対への伝熱パターン

図 2-2 に示すように、熱電対には  $Q_{rp}$ 、 $Q_{rw}$  等、気流温度を計測する場合、計測誤差となる受熱があるため、これに対する対策をとらなくてはならない。

熱電対の温接点は、常に一樣な温度と考え、熱電対での熱平衡式をたてると式(1)のようになる。

$$c\rho V \frac{dT}{dt} = Q_c + Q_{rw} + Q_{rp} \quad \dots \dots (1)$$

$$Q_c = hA(T_f - T) \quad \dots \dots (2)$$

$$Q_{rw} = F_1 \varepsilon_w \varepsilon_t C \left\{ \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right\} A \quad \dots \dots (3)$$

$$Q_{rp} = F_2 \varepsilon_p \varepsilon_t C \left\{ \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right\} A \quad \dots \dots (4)$$

ここで、

$c$ ;比熱,  $\rho$ ;熱電対密度,  $V$ ;体積,  $T$ ;熱電対温度,  $Q_c$ ;対流熱流束

$Q_{rw}$ ;周壁からの輻射熱流束,  $Q_{rp}$ ;火炎からの輻射熱流束

$h$ ;熱電対表面の対流熱伝達率,  $A$ ;熱電対表面積,  $T_f$ ;気流温度

$F_1$ ;火炎から熱電対を見る形態係数,  $F_2$ ;周壁から熱電対を見る形態係数

$\varepsilon_w$ ;周壁の輻射率,  $\varepsilon_t$ ;熱電対の輻射率,  $\varepsilon_p$ ;火炎の輻射率

$C$ ;黒体の輻射常数,  $T_w$ ;周壁表面温度,  $T_p$ ;火炎表面温度

式(1)をみてわかる通り、 $Q_{rw}$ 、 $Q_{rp}$  が測定精度に誤差を及ぼすのであり、建物火災では特に $Q_{rp}$ が問題となるが、火災の形状は非定常であり、輻射率や形態係数が正確には求め難いため、影響量を把握するのは難しいものとなる。

通常行われている輻射熱の影響を除去する方法に関しては、以下のものがあげられる。

- ①熱電対の感温部を輻射から遮蔽する方法
- ②感温部周辺の通風を強制的に行い、対流熱伝達を促進させる方法
- ③感温部の輻射率を低減させる方法
- ④輻射受熱量を把握し、測定結果に補正をかける方法

以上の測定方法について、本研究項目にそくした装置を作成し、比較実験を行い、最適と思われる装置を選定する。

### 3. 実験方法

実験内容は大きく分けて、2つの項目である。1つは、「加熱平板による輻射影響度の把握」に関するものであり、もう1つは「模型火源プルーム周囲温度測定への応用」に関するものである。

以下では、それらの実験方法についてのべる。

#### 3. 1 加熱平板による輻射影響度の把握

垂直加熱平板に面した空間における気流温度測定を行い、輻射影響度の比較を行う。垂直加熱平板では、加熱壁近傍（壁面から 300mm 程度）以外では温度上昇は見られないため、輻射伝熱が卓越した場となり、輻射影響度を把握するのに最適と思われる。

##### 3. 1. 1 実験装置

###### (1) 加熱平板

図 3.1 に示すような、耐熱ガラスを耐熱スプレー（銀色）で塗料被膜したガラス板を、電気ヒーターで加熱する装置を用いる。また、スライダック（電圧を調整するもの）で常時 400℃ になるように調整し、この装置が強い輻射発生装置となる。

###### 1) データロガー

温度計測器としてデータロガー（HR 2500, 横河電気製）を用いる。この測定器にも各端子間に若干の出力格差がある危険性があるので、正しい出力を示すかチェックしておく。

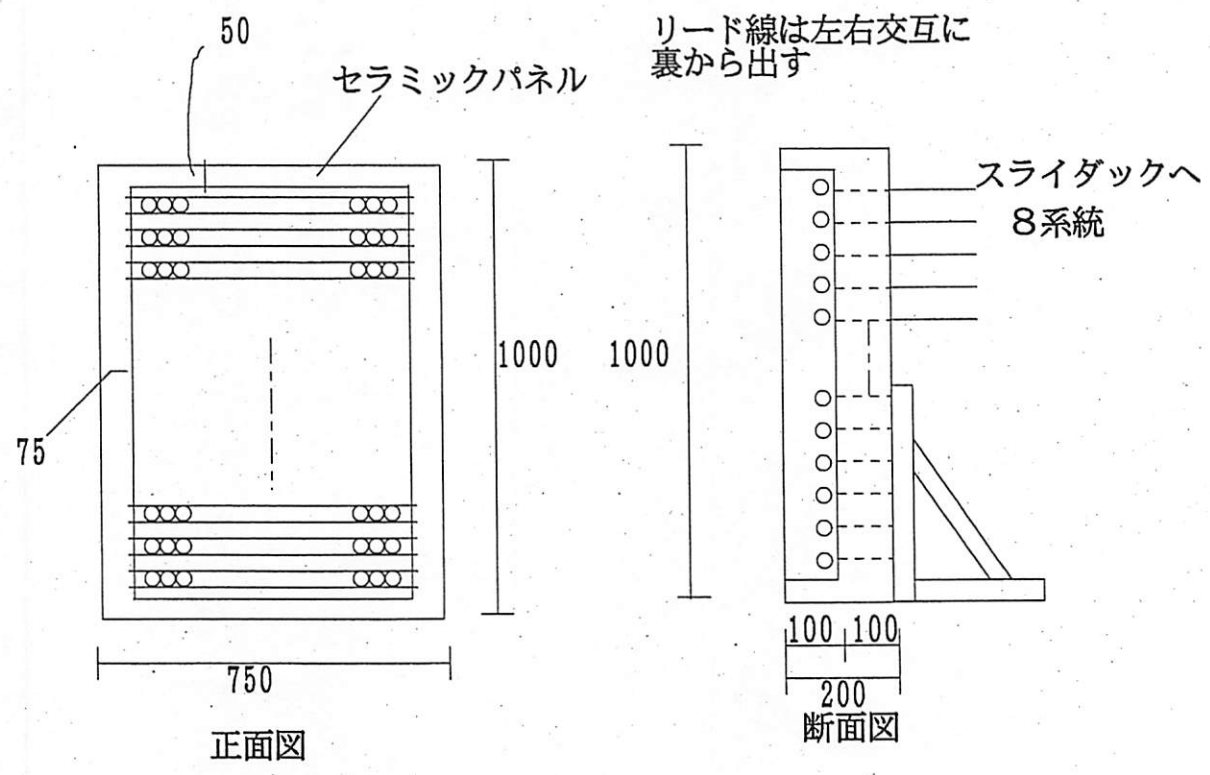
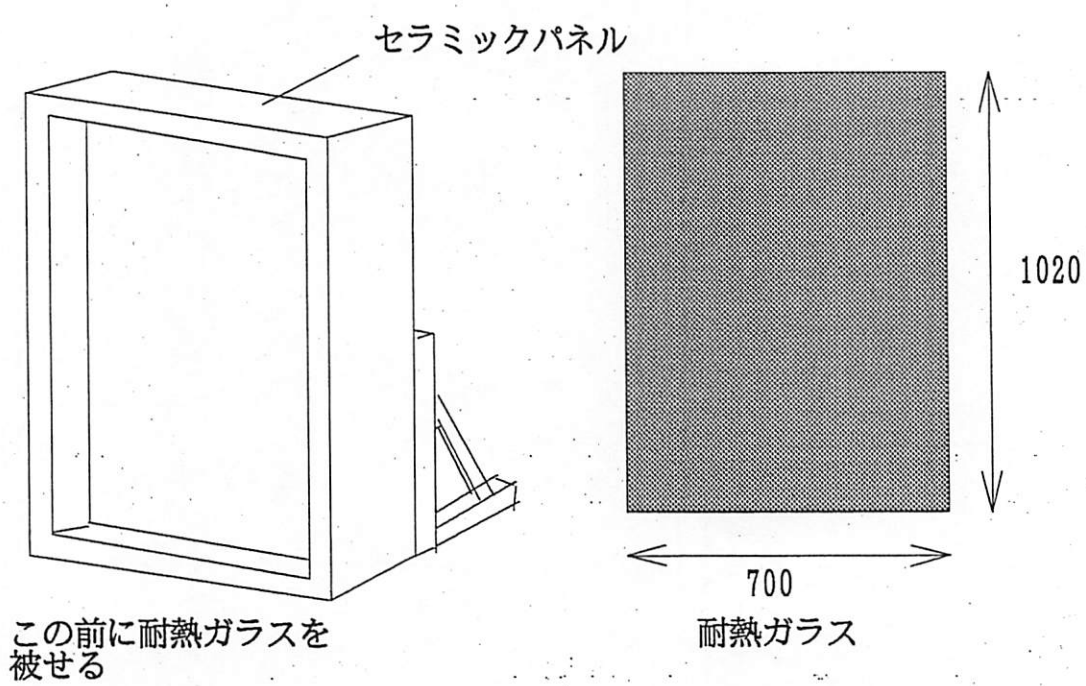


図 3-1 加熱平板装置図



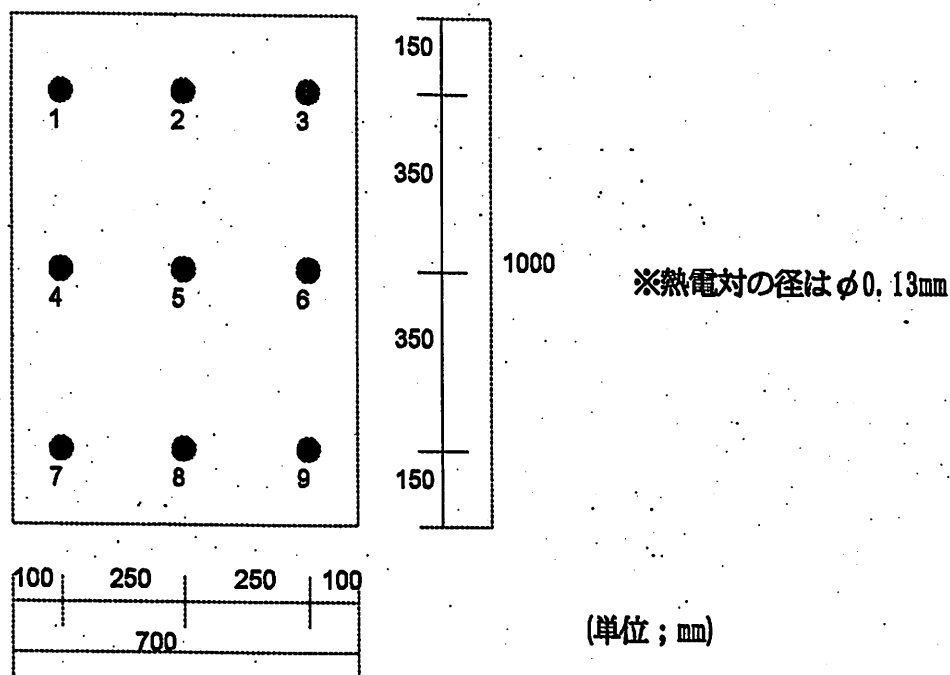


図 3-2 加熱平板表面温測定点

加熱平板への熱電対の取り付けは、耐熱接着剤により点付けして行なう。熱電対の素線は、径の400倍程度壁面に接するようにする。

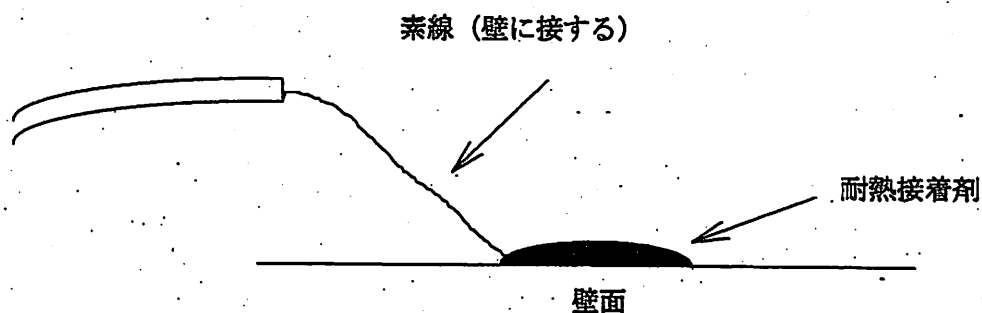


図 3-3 熱電対の壁面への取り付け

(2) 測定点

トラバーサーを用いて空気温度の移動計測を行う。加熱平板の中心点から 20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、60 cm、70 cm、80 cm、100 cm、120 cm、140 cm、160 cm、190 cmのそれぞれの地点において、空気温度指示値が定常になったのを確認しながら測定を行う。

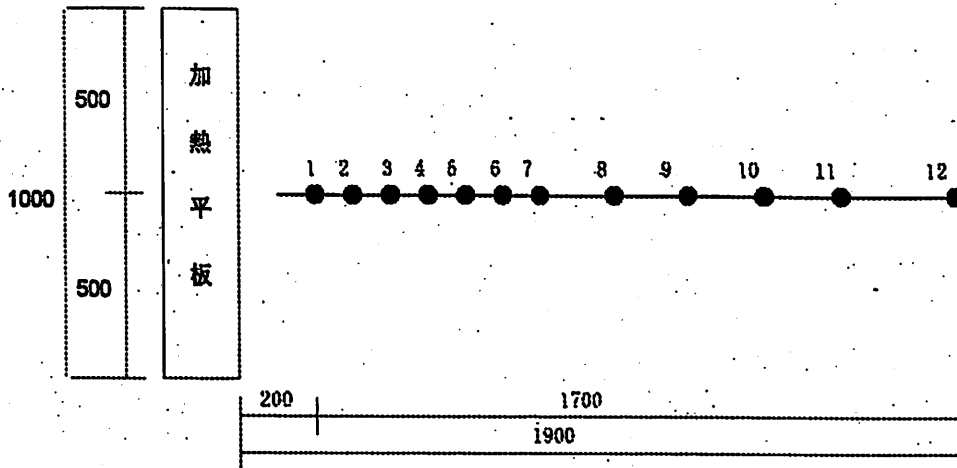
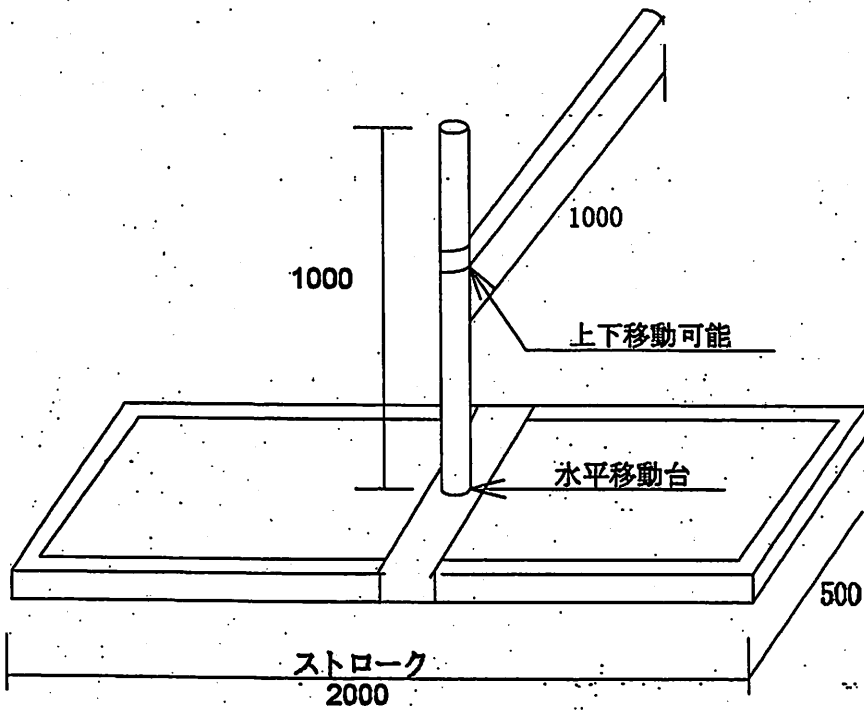


図 3-4 測定点

1) 熱電対トラバーサー

ストロークが2mの水平移動する治具を作成し、空気温度の移動計測を行う。



(単位; mm)

図 3-5 熱電対用トラバーサー

### (3) 被膜処理を施した熱電対

熱電対の輻射率を0に出来れば、輻射受熱量は0に出来るはずである。しかし、現実的には輻射率を完全に0にはできないので、0に近い物質を用いて被膜処理を施すことにする。ここでは、ニッケルメッキが最も薄い被膜厚にできるということであるため<sup>1)</sup>、ニッケル被膜を用いることにした。

#### <注意点>

- ① 絶縁のない素線に金属被膜を直接施した場合、その金属被膜が熱電対素線と接している部分も異種金属の接合点と見る事ができ、これらの部分の影響が測温に及ぼすことも予想される。
- ② 被膜処理範囲に十分な注意をする必要がある。
- ③ 温接点は通常のスポット溶接ではメッキしにくいと思われるので、素線同士を突き付け接続するような方法が必要。

### (4) 吸い込みノズル付き熱電対

吸い込みノズル付き熱電対は、以下の理由により放射の影響を受けにくい。

- ・熱電対の素線と感温部をノズルで遮蔽することにより、放射の影響を低減できる。
- ・通風を強制的に行うことにより、対流熱伝達率を大きくできるので、対流熱伝達量が大きくなる。

通風を行うチューブの内径が小さく、0.5・0.2mm は通すことが不可能なためと 0.025mm は素線が作業中に切れてしまう恐れがあるため、今回測定するのは 0.1・0.05mm の2種類となった。

吸い込み式でもう一つ問題となるのは、ノズルからの吸引量である。これは、文献<sup>2)</sup>によるとノズル内の風速が 1.6m/s 程度が望ましいとあるが、いろいろ吸引量を変化させて実験してみた結果、多めではあるが 3.3m/s で行うことになった。

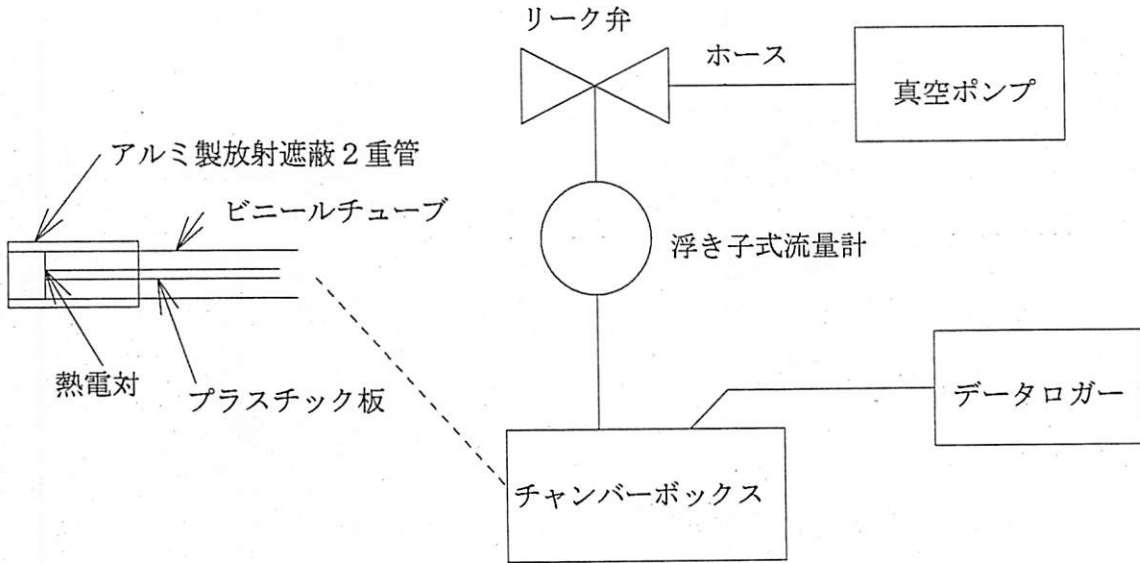


図 3-6 吸い込みノズル付き熱電対概念図

(5) 輻射遮蔽による方法

輻射率の小さい筒や板によって、輻射熱を遮蔽する方法である。方法が簡単であるため通常よく用いられる方法である。

①アルミ円筒

アルミ製の円筒（直径1 cm, 長さ3 cm, 厚み0.1 mm）を輻射遮蔽筒として測定を行なう。温接点は円筒内に1 cm引き込んだ位置に設置する。つまり、開放面から45° 以内の輻射熱は受けてしまうことになる。また内部には、熱電対固定用のプラスチック板をいれている。

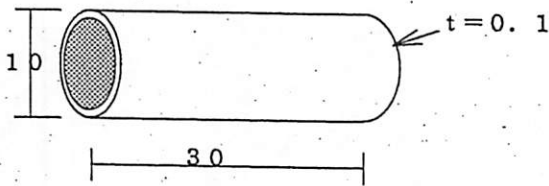
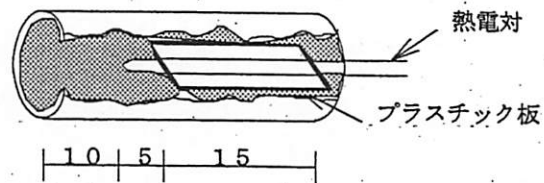


図 3-7 アルミ円筒



(単位; mm)

図 3-8 アルミ円筒内部

## ②アルミ板

アルミ製の長方形板2板（縦1cm, 長さ3cm, 厚み0.1mm）に熱電対をはさみ込んだものを用いて測定を行う。板と板の間隔は5mmとする。

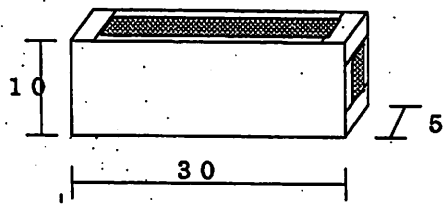


図 3-9 アルミ遮蔽板

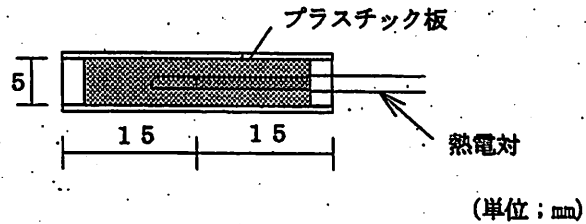


図 3-10 遮蔽板内部

①・②ともに径が小さいほど、プラスチック板に接着するのが困難なため 0.5・0.2・0.1 mm の3種類で測定した

### 3. 1. 2 測定システム概念図

加熱平板の温度が均一になるようにスライダックで調整して実験を行う。空気温度指示値が定常になったのを確認してから実験を行う。

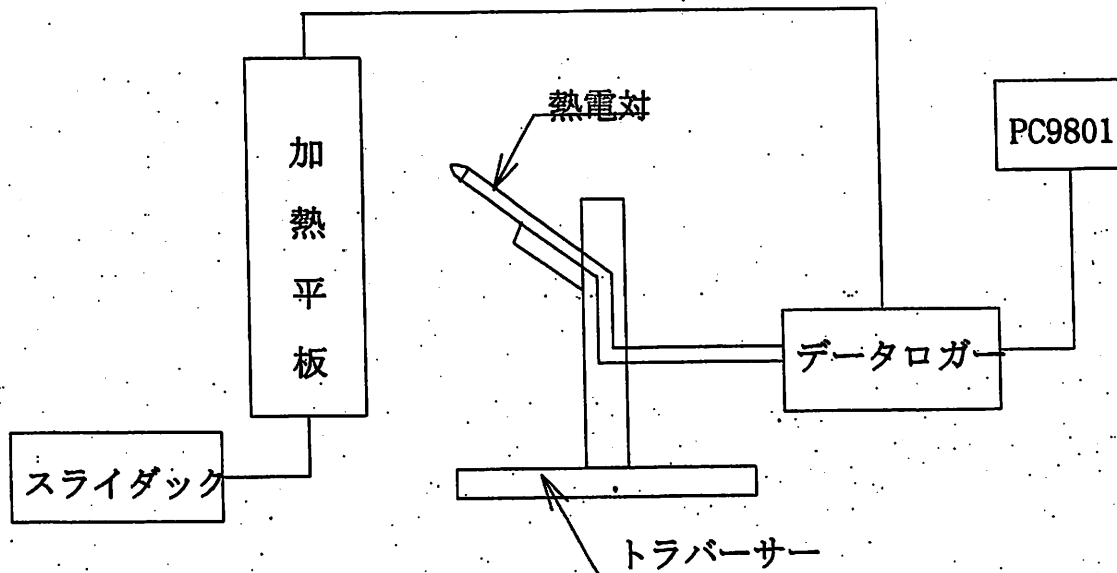


図 3-11 測定システム概念図

### 3. 2 火源周囲の放射影響度の把握

火源周囲で通常の熱電対 (K-type) を用いて測定を行った場合に、輻射影響度を受けてどの程度温度が上昇するか確認するために実験を行う。

模型火源には、実大で直径 1.5m、発熱量 3MW のものを想定して縮尺 1/20, 1/15 のものを用いる。

文献<sup>9)</sup>によると、「乱流拡散火炎では、発熱量の約 20~40%が放射により放出され、他の大部分が対流で失われるが、発熱量に対する放射量の割合は、炭素組成が大きい燃料ほど大きくなる。また、乱流火炎からの放射は図 3-12 のような指向性を持ち、火炎の中心からの距離が同じならば、上方ほど放射受熱強度が大きくなる。」と述べている。

この実験の測定点は、図 3-13 に示すように等間隔に並んだ格子上の 24 点でおこなった。格子の間隔は、想定火源の火炎の高さに関係したものである。

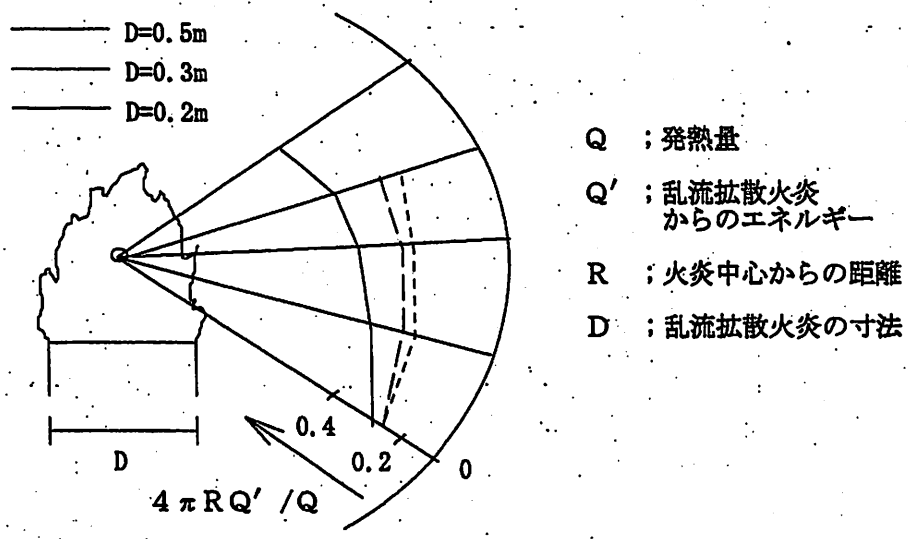


図 3-12 炎の放射の指向性

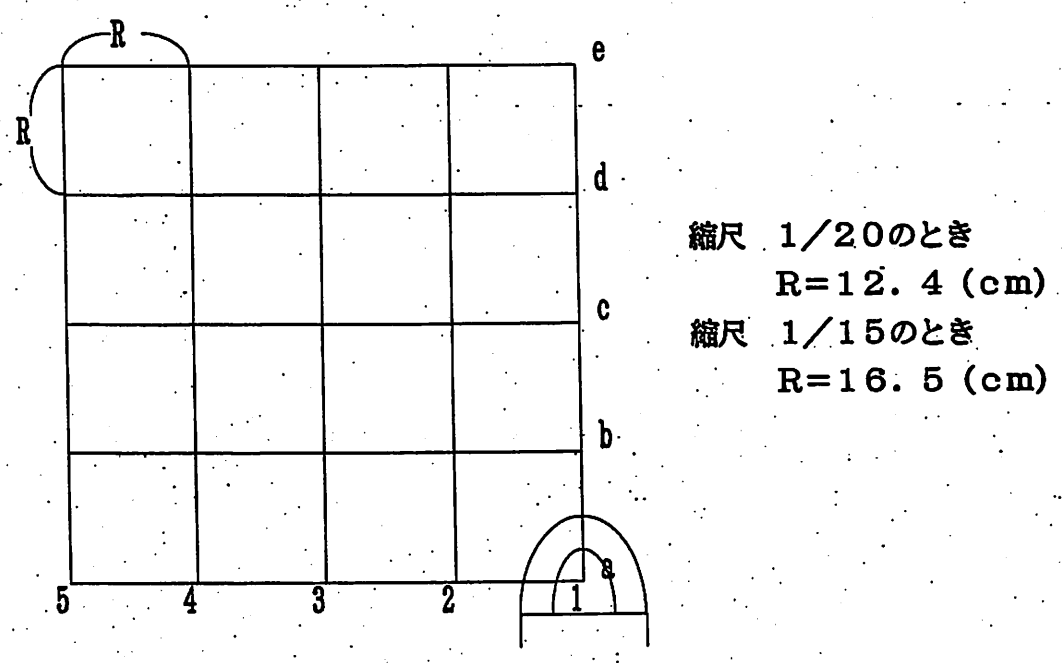


図 3-13 火源周囲における測定点

#### 4. 実験結果

##### 4.1 加熱平板の実験の結果

予想では各方法によってそれぞれにもう少し放射の影響を避けられると考えていたが、4つの実験を行なった結果それらがどれも望ましい結果は出ず、明快な解決法には至らなかった。それぞれの実験についての結果は以下に述べる。

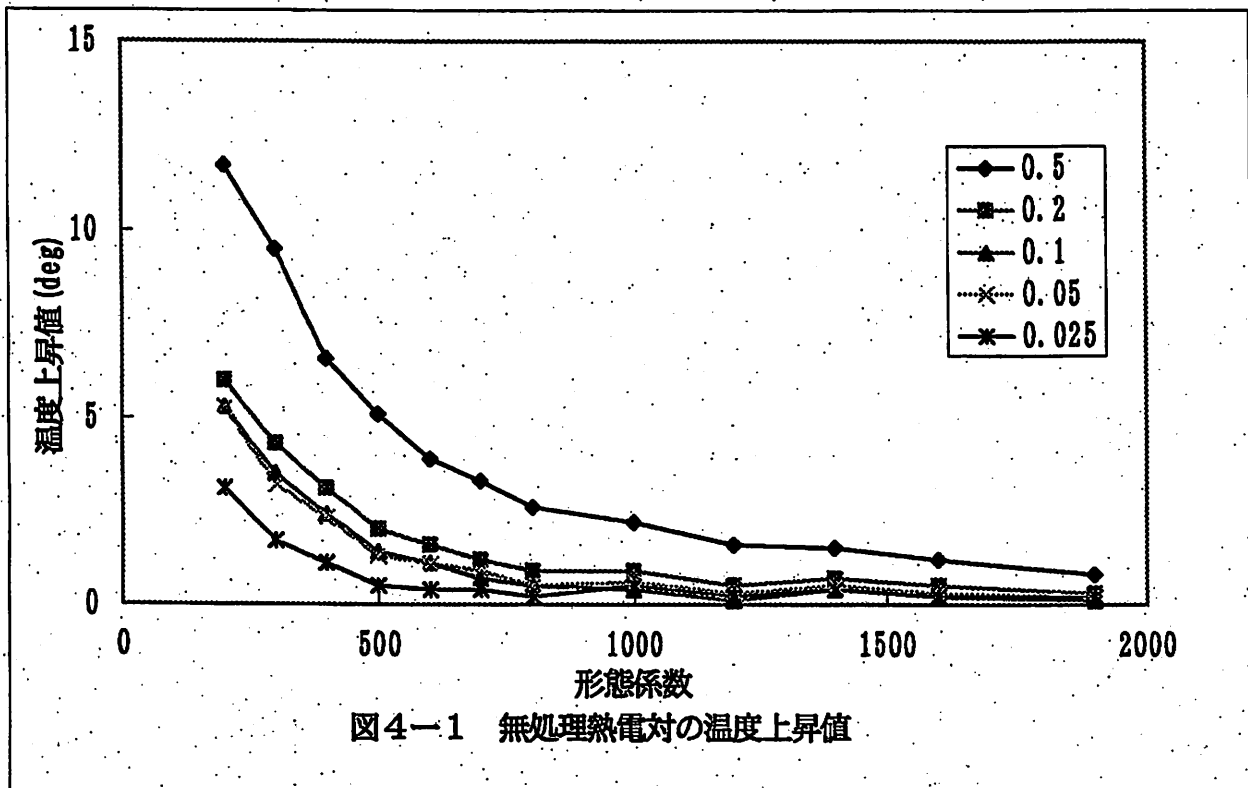
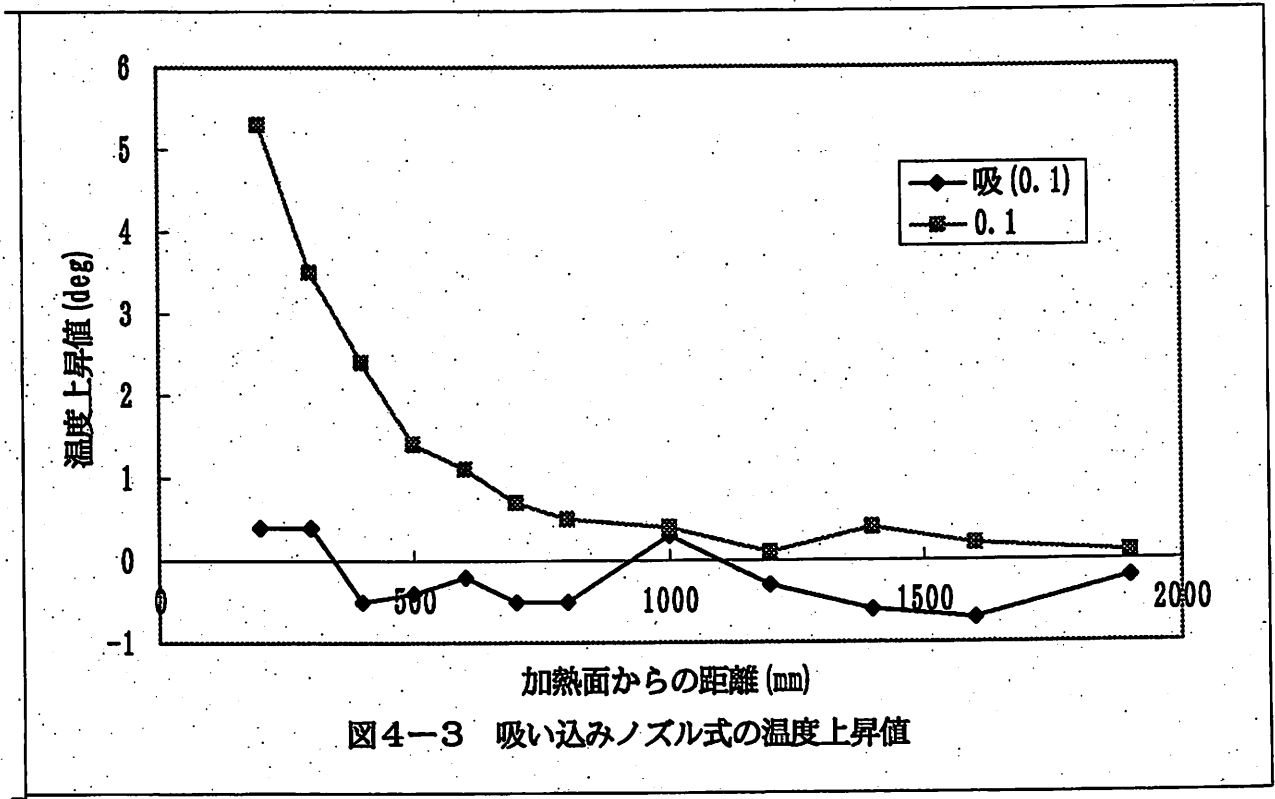
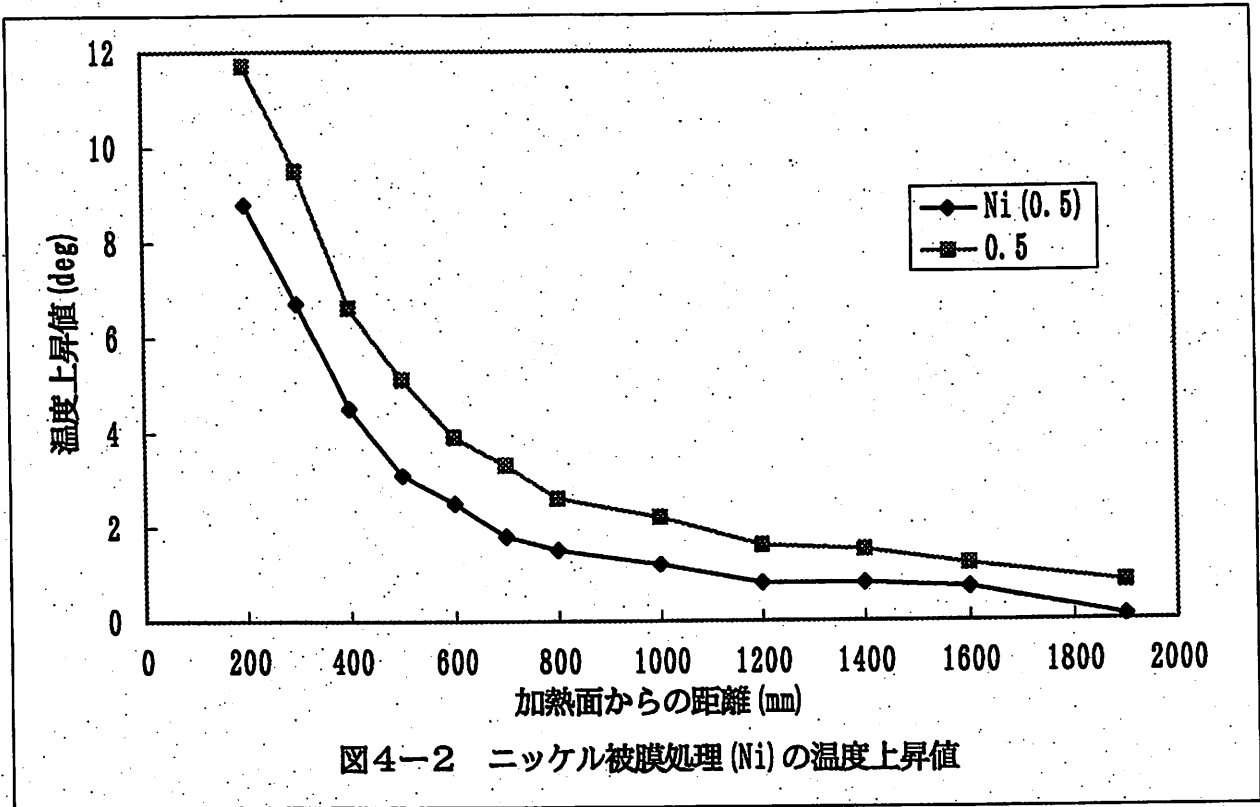
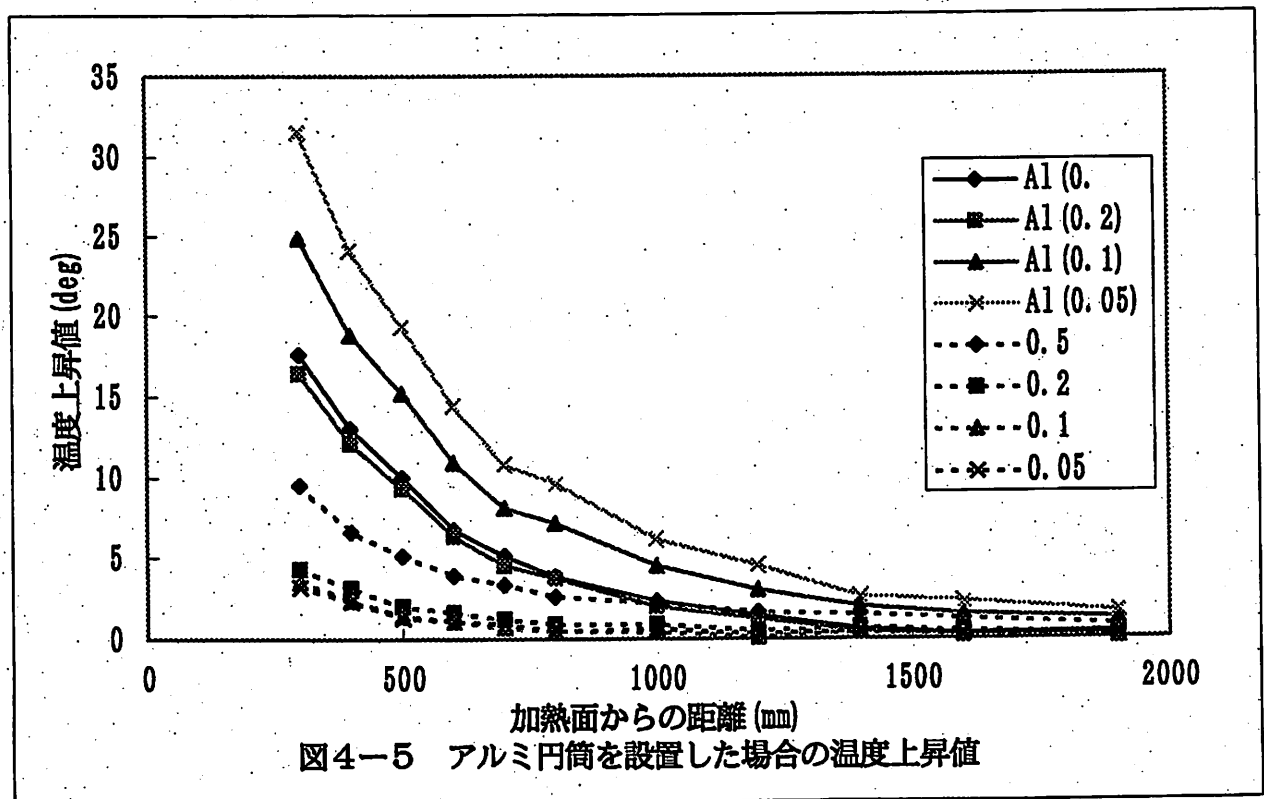
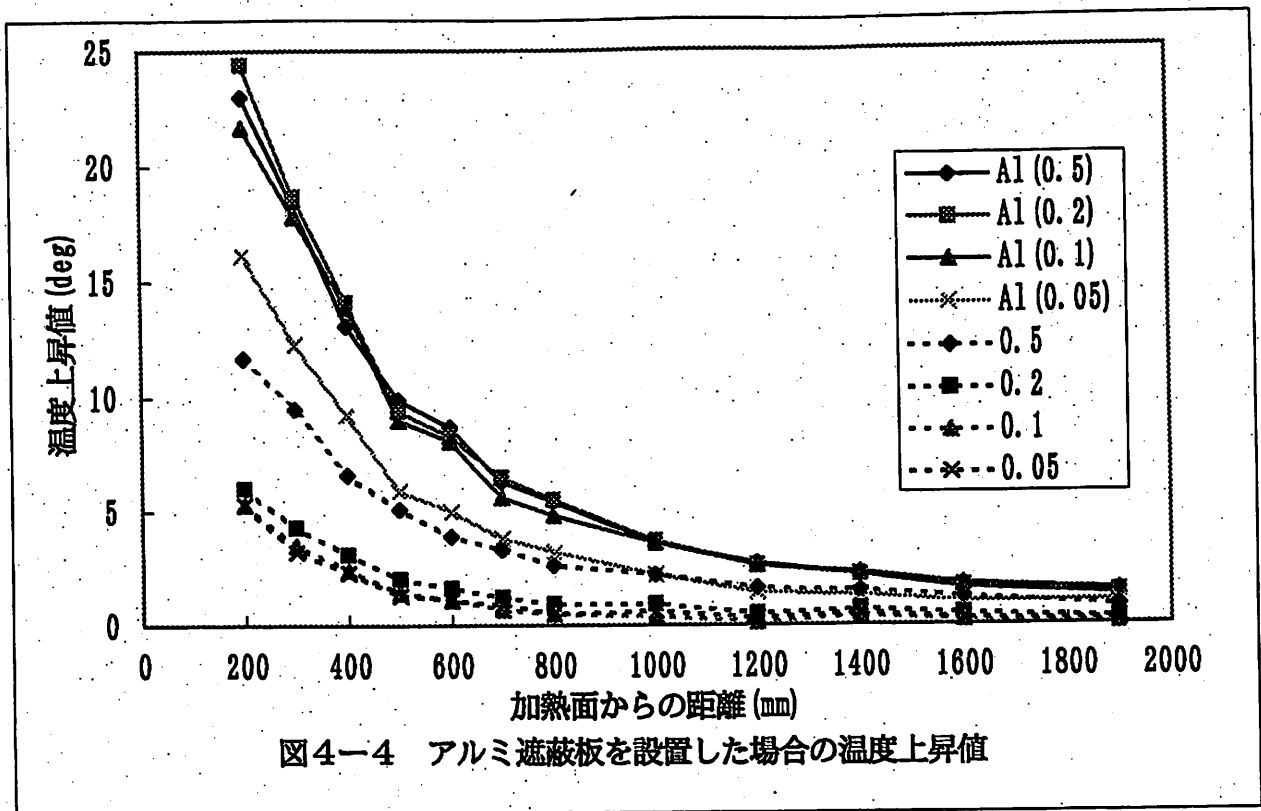


図4-1において、無処理熱電対による温度上昇は形態係数の影響によって、熱源からの距離が小さいほど大きく、熱電対の径が大きいほど大きい。 $\phi 0.1\text{mm}$  と  $\phi 0.05\text{mm}$  に明確な差が生じない理由は不明である。







ニッケル被膜処理は、細い素線で処理することが物理的に難しく、一種類の線径でしか実験できなかったが、4つの実験の中では唯一、無処理の熱電対よりも放射の影響が小さい値を示した。

吸い込みノズル式は、結果だけ見れば、気温からほとんどずれがなかった。それは、アスマン式乾湿球計の原理より明らかである。しかし、この方法は周囲の空気を吸い込むため周囲の場を乱す恐れがあり、また、周囲の平均的な温度になるため空間変動が大きい場所では、使用するのに注意が要る。

そして、大掛かりな装置が必要となり、熱電対の本数が多い場合などでは、使用するのが大変で実用的でない。

アルミ遮蔽板は、遮蔽板から再放射を受けそのために無処理の熱電対よりも、かなり大きな温度上昇を起こしている。 $\phi$  0.05mm 以外のこれよりも大きな径の熱電対ではほぼ同じ温度上昇で、 $\phi$  0.05mm だけ誤差が小さいが、それでも無処理の  $\phi$  0.5mm よりも温度差が大きい。

アルミ円筒を使った場合でも、遮蔽板と同様な結果がえられた。ただ、アルミ円筒を用いた場合、熱電対の径が小さいものほど高い値を示しているが、その原因は解明できなかった。

また、これらの遮蔽による方法は、その放射遮蔽体自体が障害物となり、周囲の気流性状を変えてしまう恐れも有している。

#### 4. 2 火源周囲の気温測定の結果

3. 2で述べたように、火炎の発熱量の約70%は対流として放出されているので、火炎の軸上に当たるb1, c1, d1, e1の4つの計測点では他の計測点に比べ、かなり高い値を示している。また縮尺による違いは、火炎の大きさ（火炎の高さ、直径）が異なる分、計測距離も異なっているので、この段階ではどちらがどうとは言えない。

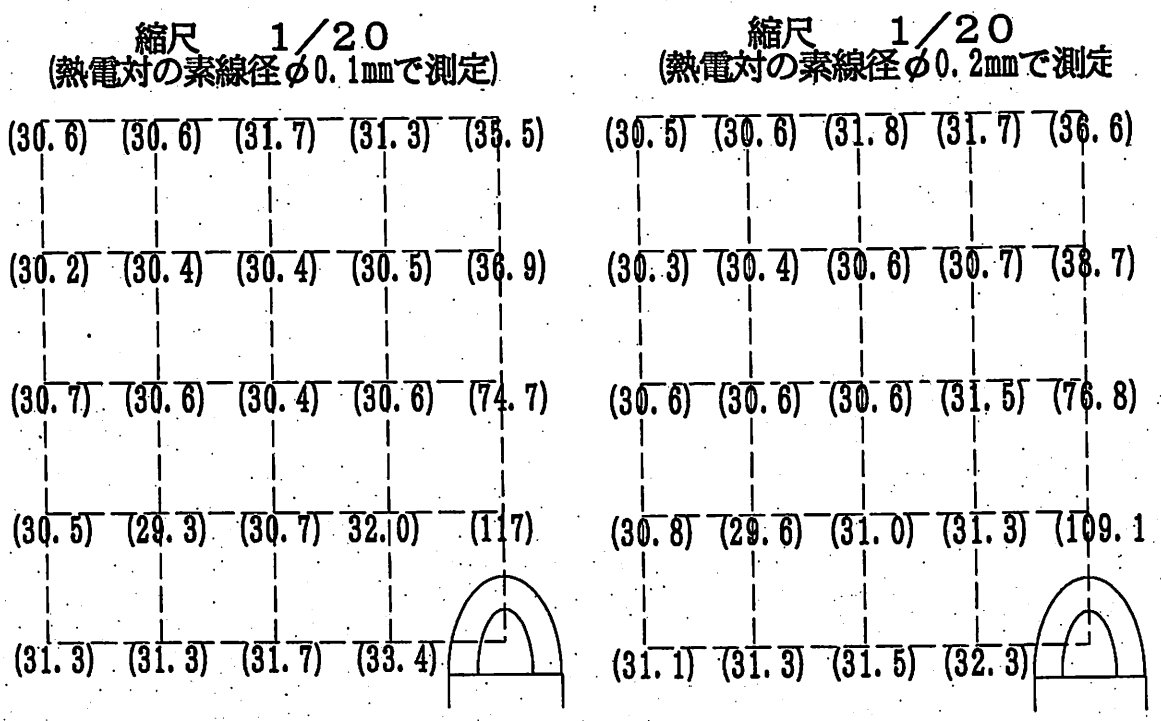


図 4-6 縮尺1/20の実験結果 (°C)

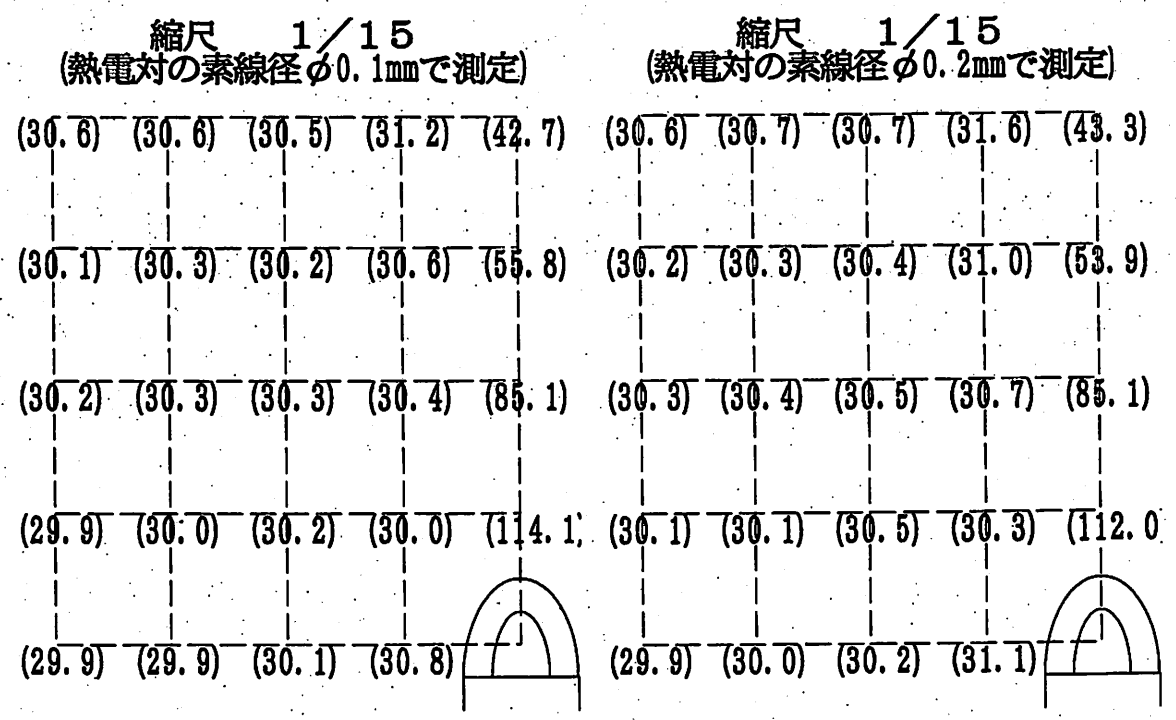


図 4-7 縮尺1/15の実験結果 (°C)

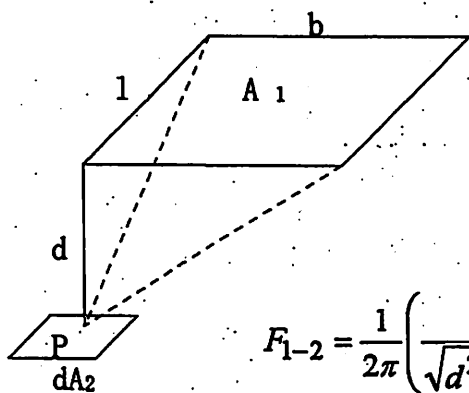
## 5. 考察

### 5. 1. 1 形態係数の影響

無処理の熱電対、アルミ遮蔽板、アルミ円筒、ニッケル被膜、それぞれの実験において、どれも加熱面からの距離が遠くなるにつれ温度上昇が小さくなっている。これには、形態係数が影響を及ぼしていると考えられる。

図 5-3 では加熱平板からそれぞれの計測点への形態係数を示している。ここでの形態係数の計算は、1) 熱電対の受熱面を球ととらえて計算したもの、2) 加熱平板を円に近似させ、また、熱電対の受熱面の方も面ととらえ熱電対の直径を受熱面の半径に置き換えて計算させたものである。

#### 1) 長方形 (加熱平板) から微小面 (熱電対)



$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{l}{\sqrt{d^2 + l^2}} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{d^2 + l^2}} + \frac{b}{\sqrt{d^2 + l^2}} \tan^{-1} \frac{l}{\sqrt{d^2 + l^2}} \right)$$

図 5-1 長方形から微小面への形態係数

#### 2) 中心が向かい合う円 (加熱平板を円に近似) から円 (熱電対を円に近似)

$$R_1 = \frac{r_1}{h} \quad R_2 = \frac{r_2}{h} \quad X = 1 + \frac{1 + R_1^2}{R_2^2}$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \left\{ X - \sqrt{X^2 - 4 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2} \right\}$$

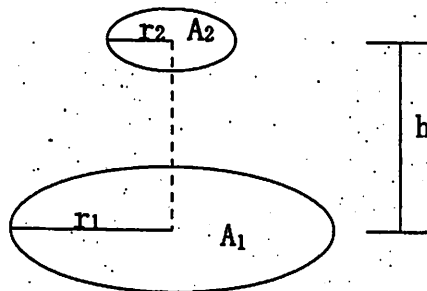
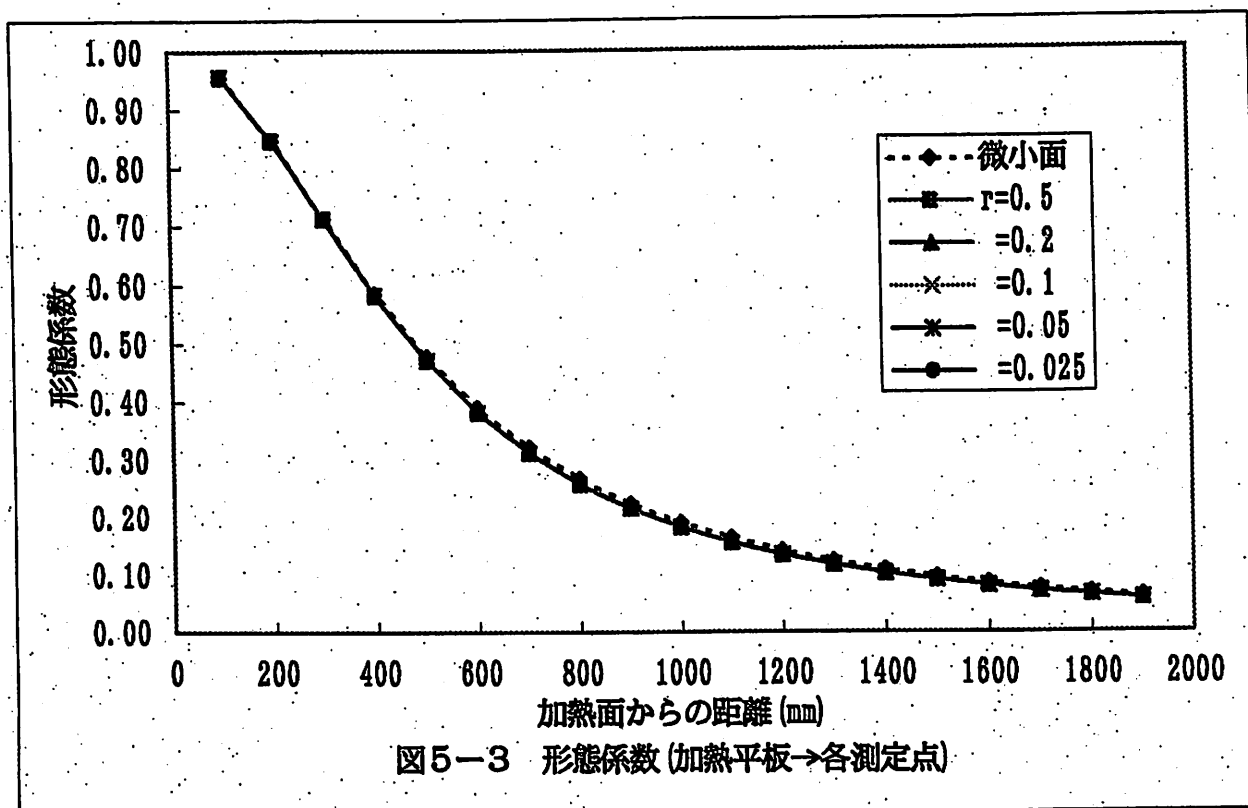


図 5-2 円から円への形態係数

図 5-2 では、1)・2) どちらもほぼ同じ値を示したので、これからは、それぞれの計測点における形態係数は、1) の値を用いることにする。



### 5. 1. 2 熱電対の熱平衡式

無処理の熱電対に生じる温度差を解析するために、熱電対における熱平衡式を以下のよう  
に考えた。ただし、熱電対からの放射による熱移動は無視している。

$$\varepsilon_2 \varphi_{12} E_1 \pi r^2 = \alpha (\theta - \theta_0) \cdot 4\pi r^2 \quad \dots \dots (5)$$

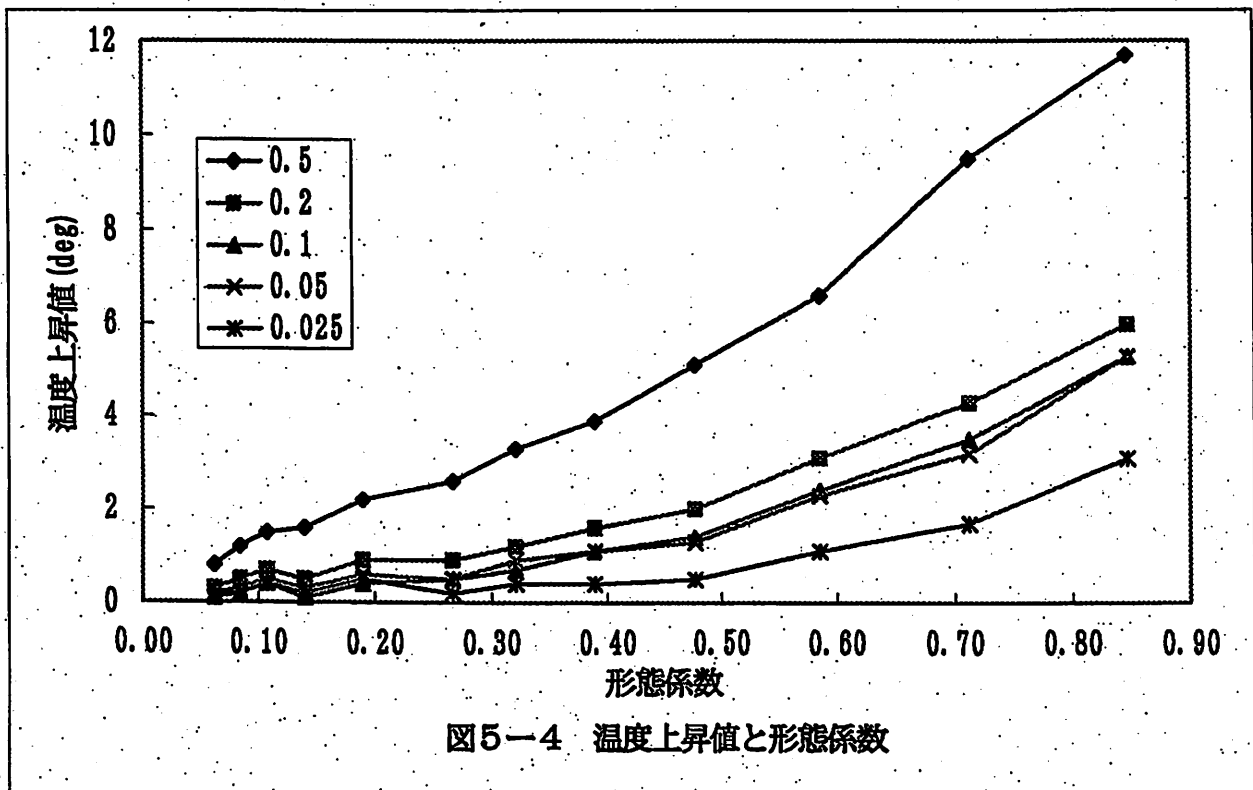
$$\therefore \varphi_{12} = \frac{4\alpha}{\varepsilon_2 E_1} (\theta - \theta_0) \quad \dots \dots (6)$$

$\varepsilon_2$  ; ふく射率,  $\varphi_{12}$  ; 加熱平板から熱電対への形態係数

$E_1$  ; 加熱平板のふく射能,  $\alpha$  ; 対流熱伝達率

$r$  ; 熱電対の径,  $\theta$  ; 熱電対指示値,  $\theta_0$  ; 気温

ここで、 $\alpha$ が一定だと仮定すると、温度差と形態係数は比例関係となり、また、径の大きさには関係ないものとなるはずである。ところが、図5-4は温度上昇と形態係数の関係を表したものであるが、この結果を見ると径が大きい物ほど温度上昇が大きくなり、またグラフの傾きは一致していない。このことから $\alpha$ （対流熱伝達）は、一定ではなく熱電対の径および温度上昇値等に関係していると考えられる。





### 5. 1. 3 自然対流熱伝達

文献<sup>11)</sup>によると、「自然対流とは、空気、ガス、有機液体等の一般の流体内に温度差が生ずると、流体自体に熱膨張を生じるため密度の差が生じ、送風機や風洞などの装置がなくとも重力でひかれて軽い部分は上昇し、重い部分は沈降するため流体の移動が生じることをいう。この自然対流のために液体内に導かれた物体からの熱は、流体内への熱伝導が生じると同時に、強制対流と同様な流体の移動による伝熱が生じる。

この様に、自然対流が存在するときの流体と固体間の伝熱を自然対流熱伝達という。」

#### 1) 球の自然対流熱伝達

熱電対の先端を球ととらえて自然対流熱伝達について考えると、文献<sup>9)</sup>では以下の6つの式が与えられている。

$$\textcircled{1} N_u = 0.558 P_r^{1/4} G_r^{1/4} \dots\dots(7)$$

$$\textcircled{2} N_u = 2 + 0.60 P_r^{1/3} G_r^{1/4} \dots\dots(8)$$

$$\textcircled{3} N_u = 2 + 0.24 G_r^{0.33} \dots\dots(9)$$

$$\textcircled{4} N_u = 2 + 0.392 G_r^{1/4} \dots\dots(10)$$

$$\textcircled{5} N_u = 2 + 0.54 G_r^{1/4} \dots\dots(11)$$

$$\textcircled{6} N_u = 2 + 0.59 P_r^{1/4} G_r^{1/4} \dots\dots(12)$$

$$N_u = \alpha D / \lambda, \quad G_r = g \beta D^3 (t_w - t_a) / \nu^2$$

$N_u$ ; ヌセルト数,  $P_r$ ; プラントル数,  $G_r$ ; グラスホフ数,

$D$ ; m 球の直径,  $\lambda$ ; kcal/mh°C 流体の熱伝導,

$\beta$ ; 1/°C 流体の熱膨張係数,  $t_w, t_a$ ; °C 球の表面温, 流体の温度,

$\nu$ ; m<sup>2</sup>/s 流体の動粘性係数,

これらの式より  $\alpha$  を求めその値を(6)式に代入して、形態係数と温度上昇値の関係を表したのが図 5-5~図 5-10 である。

(7)~(12)までの式を代入したものは、どれもほとんど同じ値を示しており、また(7)の理論式を代入した場合においても  $\alpha$  を一定とした図 5-4 に比べれば Y 軸の値の振幅は減少しているものの、温度差が生じる原因を説明しているとは言

えない。

この理由には、放射を受ける熱電対が正確にいえば球ではないこと（受熱そのものも熱電対の先端からいくらかの長さの分が影響を受けている）、このために対流による放熱も球の値を用いるには無理があることが考えられる。

## 2) 管外の自然対流熱伝達

静止した流体中に水平におかれた円管の外面を流体より高温に保つ場合は、局所的熱伝達率は最下部が最大で、最上部が最小になる。

一様伝熱面温度、および一様周囲温度における円管外面の平均熱伝達率 $\alpha_m$ <sup>9)</sup>は、代表寸法に外径  $d$  を用い、

$$N_{um} = \frac{\alpha_m d}{\lambda_f} \dots \dots \dots (13)$$

$$N_{um} = 0.53(G_{rf} P_{rf})^{1/4} \dots \dots \dots (14)$$

この式は球の自然対流熱伝達における理論式と係数が異なる程度で、(6)式に代入してもよい結果が得られないのは明らかである。

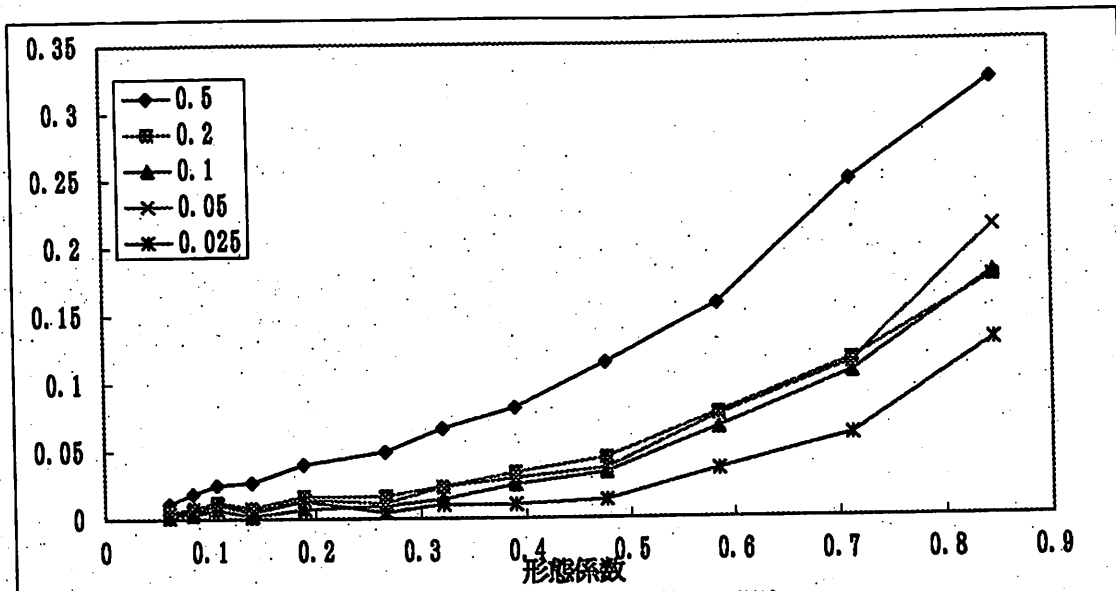


図5-5 Nuの①式を代入して計算した場合

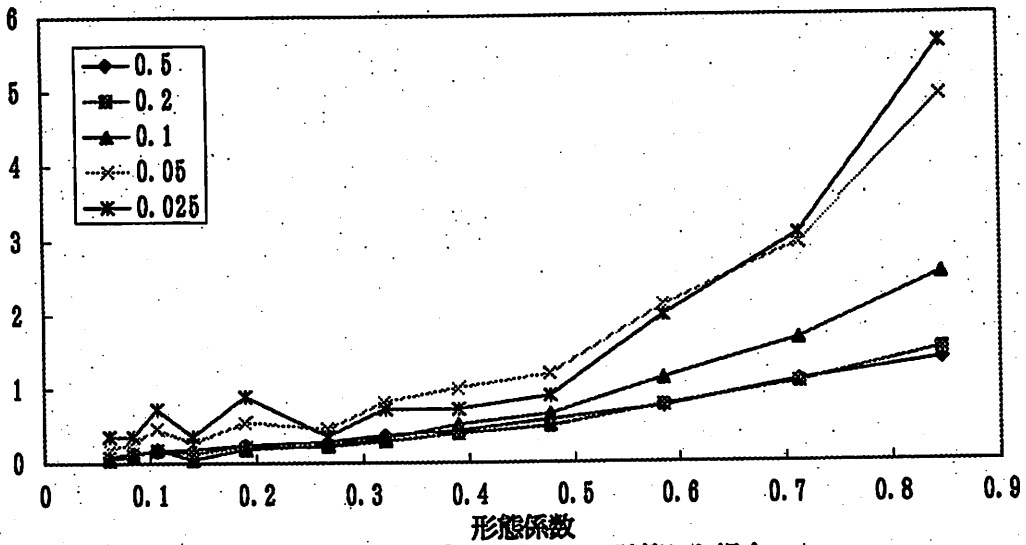


図5-6 Nuの②式を代入して計算した場合

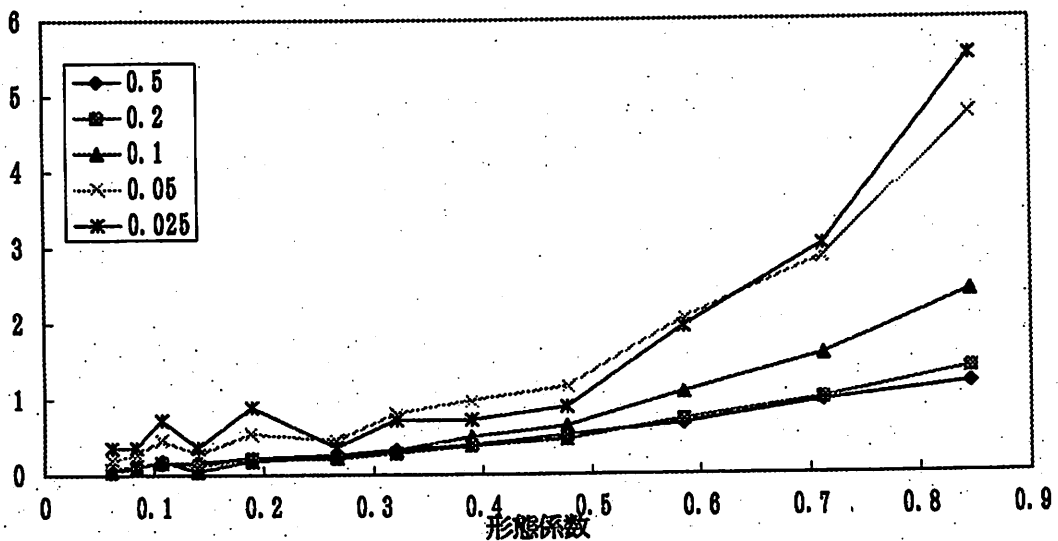


図5-7 Nuの③式を代入して計算した場合

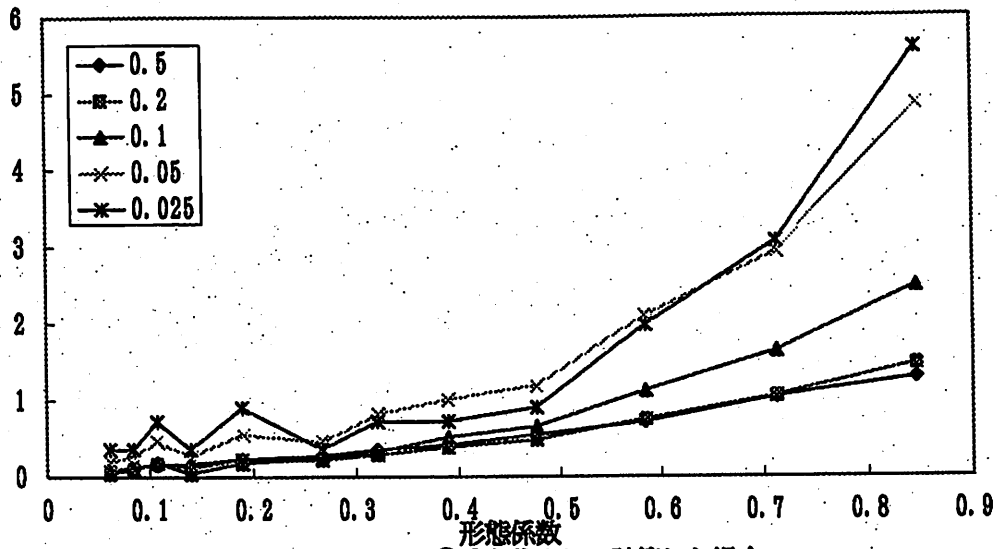


図5-8 Nuの④式を代入して計算した場合

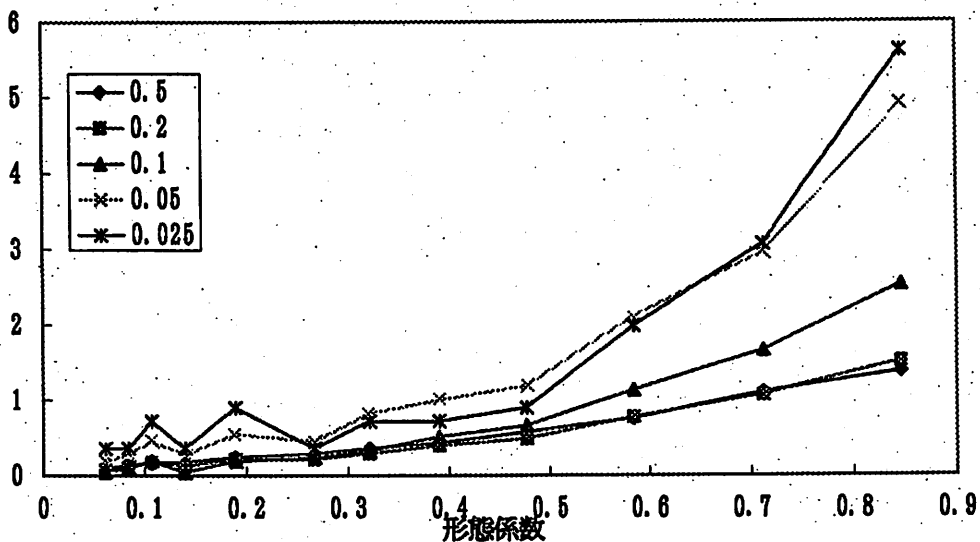


図5-9 Nuの⑤式を代入して計算した場合

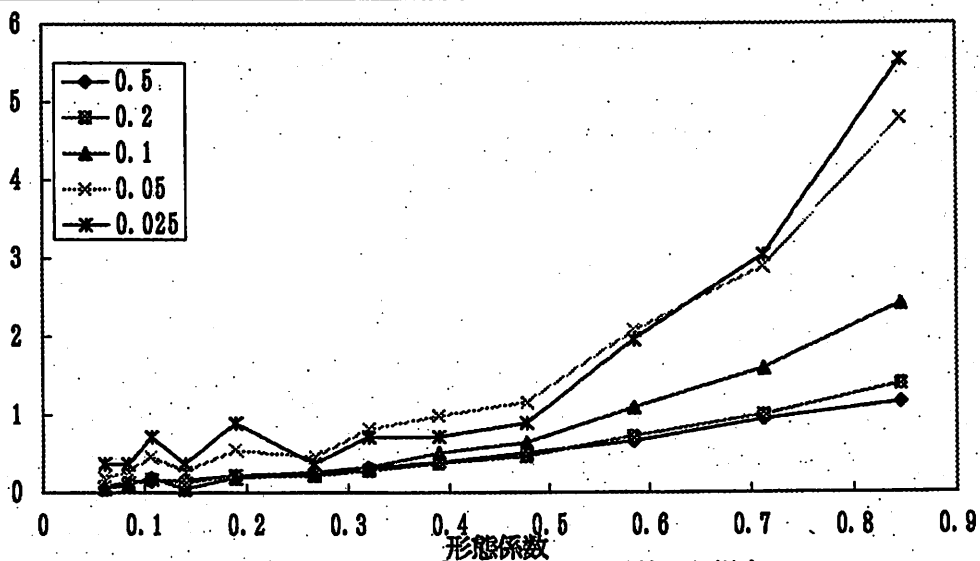


図5-10 Nuの⑥式を代入して計算した場合

#### 5. 1. 4 実験式

球の自然対流熱伝達の理論式から $\alpha$ を求め、それを(6)式に代入すると

$$\alpha = 0.558 \frac{\lambda}{D} P_r^{1/4} G_r^{1/4}$$

$$= 0.558 \lambda P_r^{1/4} \left( \frac{g\beta}{\nu^2} \right)^{1/4} (t_w - t_a)$$

$$\varphi \propto (\theta - \theta_0)^{5/4} D^{-1/4} \dots \dots (15)$$

の関係がえられ、これより

$$\alpha = k(\theta - \theta_0)^m D^n \dots \dots (16)$$

を仮定する。ただし、 $k$ は理論式で0.558に相当する係数。

この式を(6)式に代入すると

$$\varphi_{12} = C(\theta - \theta_0)^{m+1} D^n \dots \dots (17)$$

$$C = \frac{4k}{\varepsilon_2 E_1}$$

(17)式の両辺の対数をとると

$$\ln \varphi = (m+1) \ln(\theta - \theta_0) + n \ln D + \ln C \dots \dots (18)$$

となる。ここで、まず

$$Y = \ln(\theta - \theta_0) , \quad X = \ln \varphi , \quad b = -(n \ln D + \ln C)$$

とおき、 $Y = aX + b$ の関係において最適とおもわれる $a$ の値を、最小二乗法より求める。

このとき $b$ には変数である $\ln D$ の要素も含まれているが、図5-12において傾きである $a$ にくらべ、切片である $b$ の誤差は大きいので、 $a$ の値のみを信用して求めることにした。

図5-12では、 $Y = aX + b$ の関係を表わし、表5-1には $a$ 、 $b$ の値等を表わしている。

表5-1より  $(m+1) = 0.52$ が求まり、それを利用してつぎに $n$ の値を求める。

今度は、

$$Y = \ln(\theta - \theta_0) , \quad X = \ln D , \quad d = \frac{1}{m+1} (\ln \varphi - \ln C)$$

とおき、同様に $Y = cX + d$ の関係において最適とおもわれる $c$ の値を求めた。

図5-13では、 $Y = cX + d$ の関係、表5-2には $c$ 、 $d$ の値等を示した。

以上の解析において、温度差が $1^\circ\text{C}$ 以下のデータは、対数をとった時に負の値を示すので精度をあげるために、 $1^\circ\text{C}$ 以上の値のみを用いて計算した。

表5-1, 5-2より  $m+1=0.52$ ,  $n=-0.27$ の値がそれぞれ求まり, この値を(17)式に代入したものが,

$$\varphi_{12} = C(\theta - \theta_0)^{0.52} D^{-0.27}$$

の関係を表わしたものが図5-14である。

このグラフを見ると, 図5-4の実験より得られたデータで $\alpha$ を一定とした温度上昇値と形態係数の関係のグラフや, 図5-5の球の自然対流熱伝達のヌセルト数の理論式を代入したグラフよりも熱電対の径の大きさによるぶれが小さく, それぞれがほぼ一致した傾きを示している。このグラフから得られた式,

$$\varphi_{12} = \frac{1}{34.4} (\theta - \theta_0)^{0.52} D^{-0.27}$$

は, 加熱平板を用いた実験において測定誤差, 形態係数, 熱電対の径の大きさという3つの要素の関係を表わしたものとなり, この式を使って放射による測定誤差を推定することが可能となった。

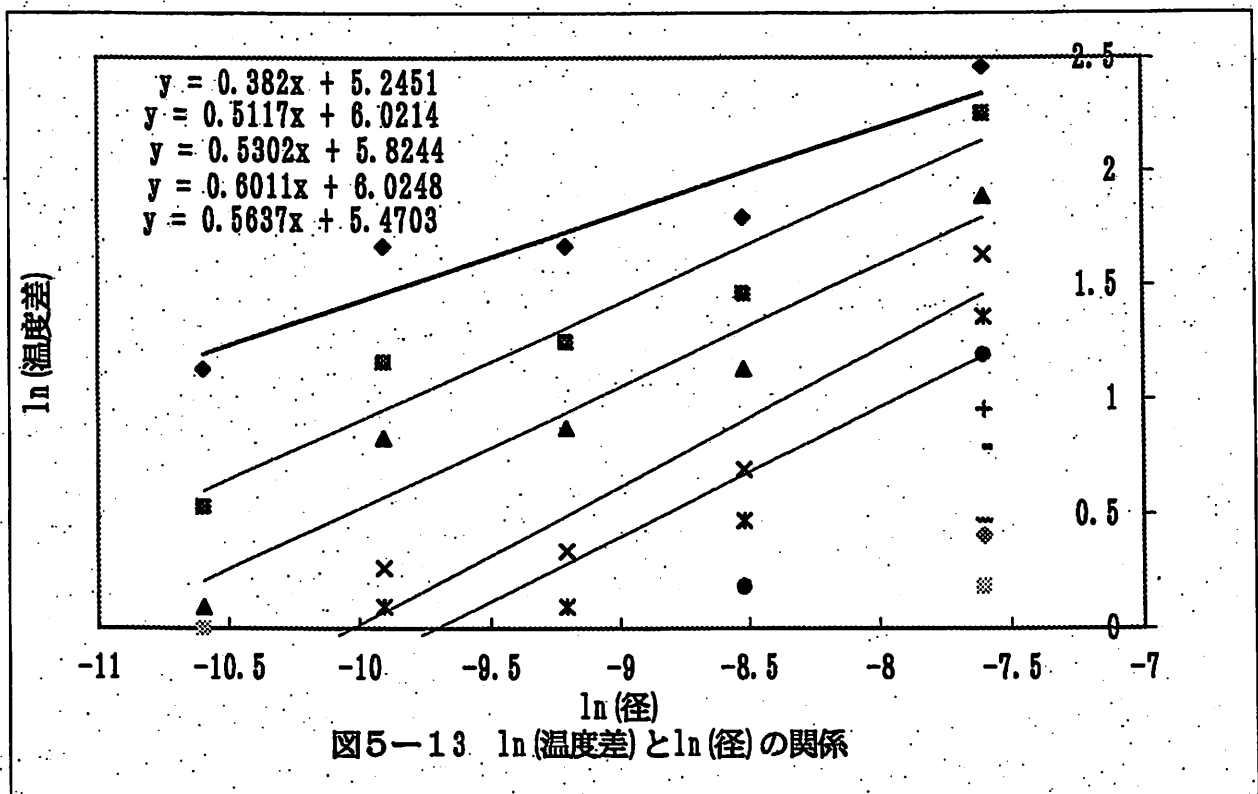
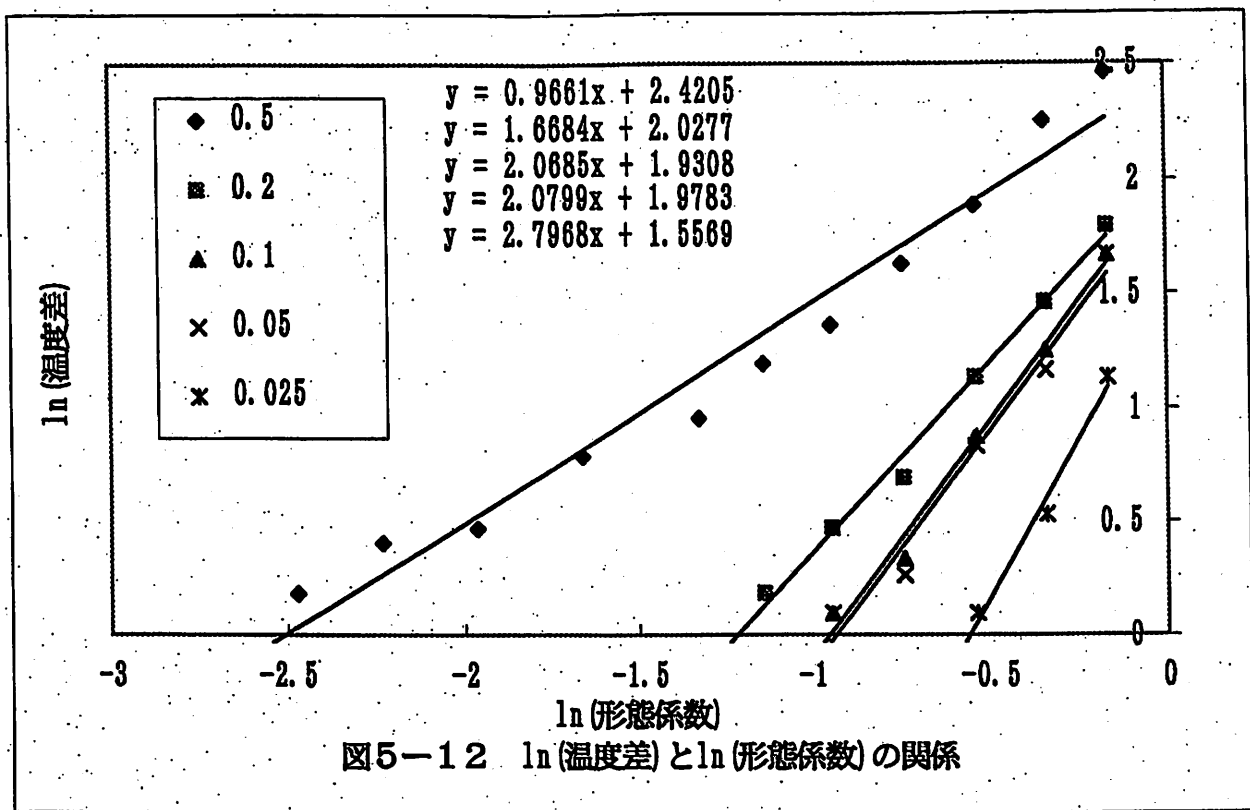


表 5-1

	D(熱電対の径)	a	b	m (=1/a)
	0.5	0.966	2.42	1.0352
	0.2	1.67	2.03	0.5988
	0.1	2.07	1.93	0.4831
	0.05	2.08	1.98	0.4808
	0.025	2.8	1.56	0.3571
$\Sigma$	---	9.59	---	
平均	---	1.92	---	0.5216

表 5-2

	$\phi$ (形態係数)	c	d	n (= -a x m)
	0.846	0.382	5.25	-0.1986
	0.712	0.512	6.02	-0.2662
	0.585	0.530	5.82	-0.2756
	0.477	0.601	6.02	-0.3126
	0.390	0.564	5.47	-0.2933
$\Sigma$	---	2.589	---	-1.3463
平均	---	0.518	---	-0.2693

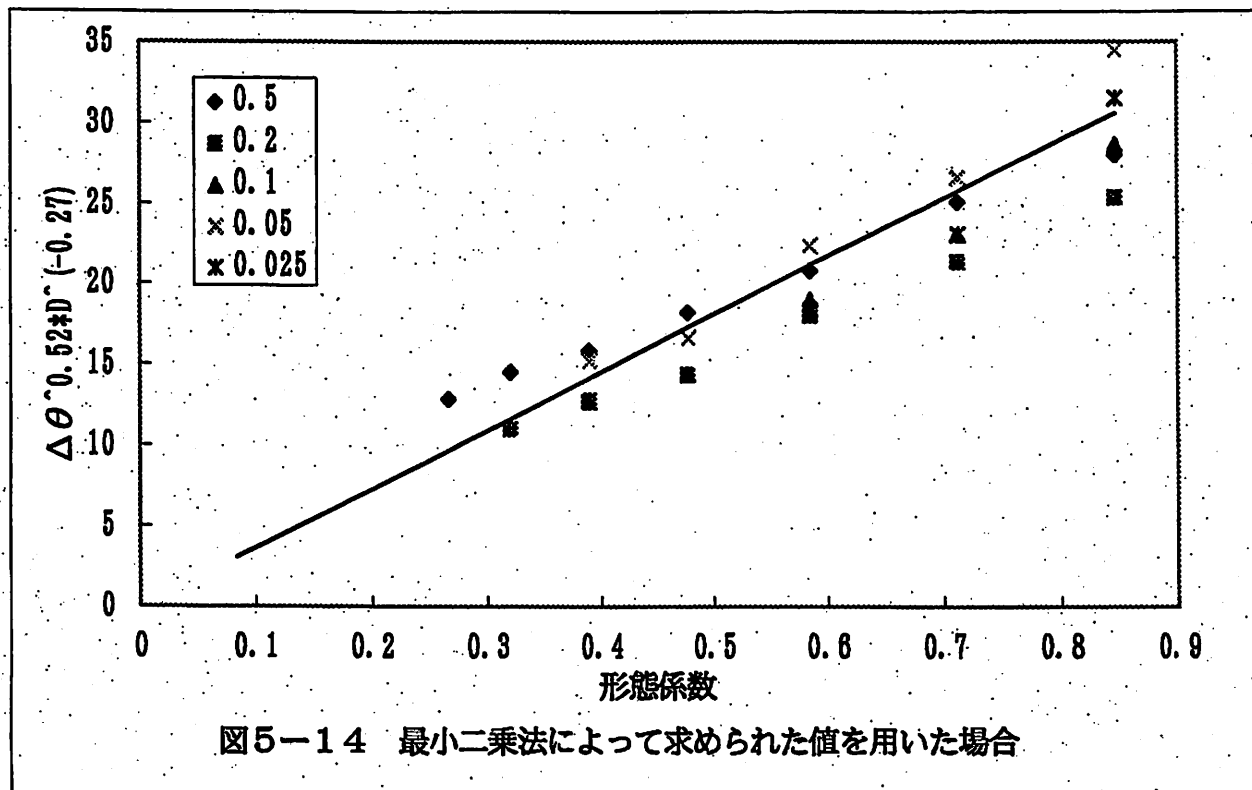


図5-14 最小二乗法によって求められた値を用いた場合



## 5. 2 火源周囲の放射影響度の把握への応用

式(17)の関係によりデータを整理すると図 5-14 のようになり、図 5-14 を用いれば実験条件下で、形態係数と熱電対の径が決まれば、測定誤差を推定することが可能となる。

以上の分析の結果、加熱平板に変わる放射源の場合でもこの熱電対を使用している限り温度上昇度（放射の影響度）を推定することができる。

図 5-14 より、(17)式において

$$C_1 = \frac{4k}{\varepsilon_2 E_1} = \frac{1}{34.4} \dots \dots (19)$$

である。

そこで、加熱平板に変わり、火炎を用いた場合は、

$$C_2 = \frac{4k}{\varepsilon_2 E_2} \quad E_2 ; \text{火炎の放射能} \dots \dots (20)$$

となり、(19)・(20) より

$$C_2 = \frac{E_1}{E_2} C_1$$

$$E^1 = \varepsilon^1 \sigma \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

$$= 0.27 \times 4.876 \times \left( \frac{273 + 400}{100} \right)^4 \approx 2700 \text{ (kcal/m}^2\text{h)}$$

$\varepsilon_1$  ; 加熱平板の放射率、 $\sigma_b$  ; 黒体の輻射常数(kcal/m<sup>2</sup>h(100°K)<sup>4</sup>)

$E_2$  ; 加熱平板の絶対温度(°K)

火炎は実大で、直径 1.5m、発熱量 3MW を想定しているので、模型実験の相似則<sup>1,2)</sup>より発熱量については、 $\{n(L)\}^{5/2}$  の関係が成り立つのでこれを利用して、以下のようになる。

表 5-3 相似則より求まる各種の値

	直径(m)	火炎の高さ(m)	表面積(底面は除く)(m <sup>2</sup> )	発熱量(kW)	発熱量(kcal/h)	放射能(kcal/m <sup>2</sup> h)
実大	1.5	4.7	23.9	3.0×10 <sup>3</sup>	3.49×10 <sup>6</sup>	2700
1/20	7.5×10 <sup>-2</sup>	0.235	0.060	1.68	1950	9750
1/15	0.1	0.313	0.106	3.44	4000	11300

ここでは、発熱量の約30%が放射として放出されるとして考えると、

縮尺 1/20 においては

$$E_{2-1} = \frac{Q_1}{S_1} = \frac{1950 \times 0.3}{0.06} = 9750 \text{ (kcal/m}^2\text{h)}$$

$$C_{2-1} = \frac{E_1}{E_{2-1}} C_1 = \frac{2700}{9750} \times \frac{1}{34.4} = 0.008$$

縮尺 1/15 においては、

$$E_{2-2} = \frac{Q_2}{S_2} = \frac{4000 \times 0.3}{0.106} = 11320 \text{ (kcal/m}^2\text{h)}$$

$$C_{2-2} = \frac{E_1}{E_{2-2}} C_1 = \frac{2700}{11320} \times \frac{1}{34.4} = 0.007$$

$C_{2-1}$ 、 $C_{2-2}$ の値を(17)式に代入すると、形態係数と熱電対の径の組み合わせによって火源周囲におけるそれぞれの測定点の放射影響度が推測される。

(17)式より、

$$\begin{aligned} \varphi &= C(\theta - \theta_0)^{0.52} D^{-0.27} \\ \therefore (\theta - \theta_0) &= \left( \frac{\varphi}{C \cdot D^{-0.27}} \right)^{1/0.52} \dots \dots (21) \end{aligned}$$

図5-17・18には、(21)式より求められた火源周囲の放射による温度上昇値を示した。(ここで用いられた形態係数は図5-15・16の通りである。)

その結果、図4-6・7の測定点のそれぞれの値から、それに対応した図5-17・18のそれぞれの値をひくと、火源周囲の気温が求められる。

これを見る限り今回のような実験条件下においては、気温測定に放射が及ぼす影響は小さいものと考えられる。

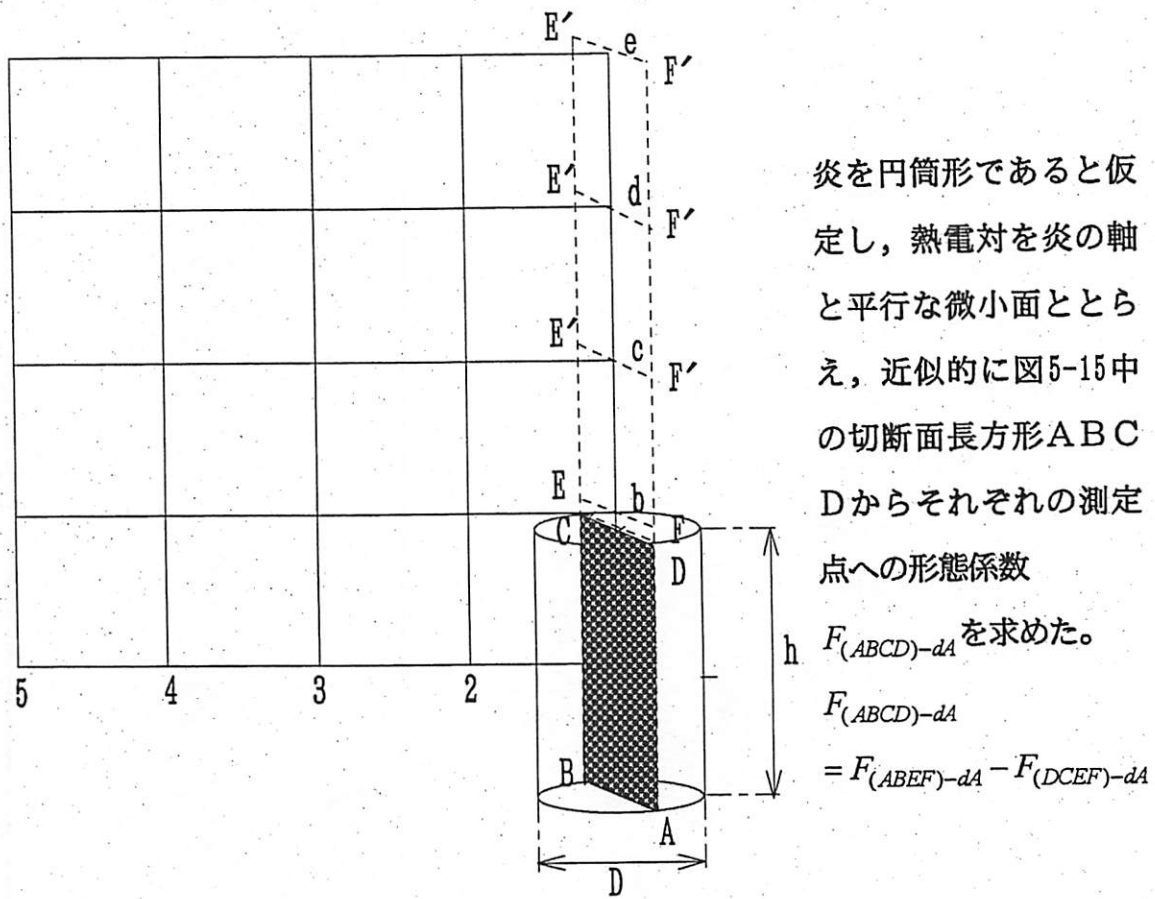


図 5-15 火源周囲の形態係数

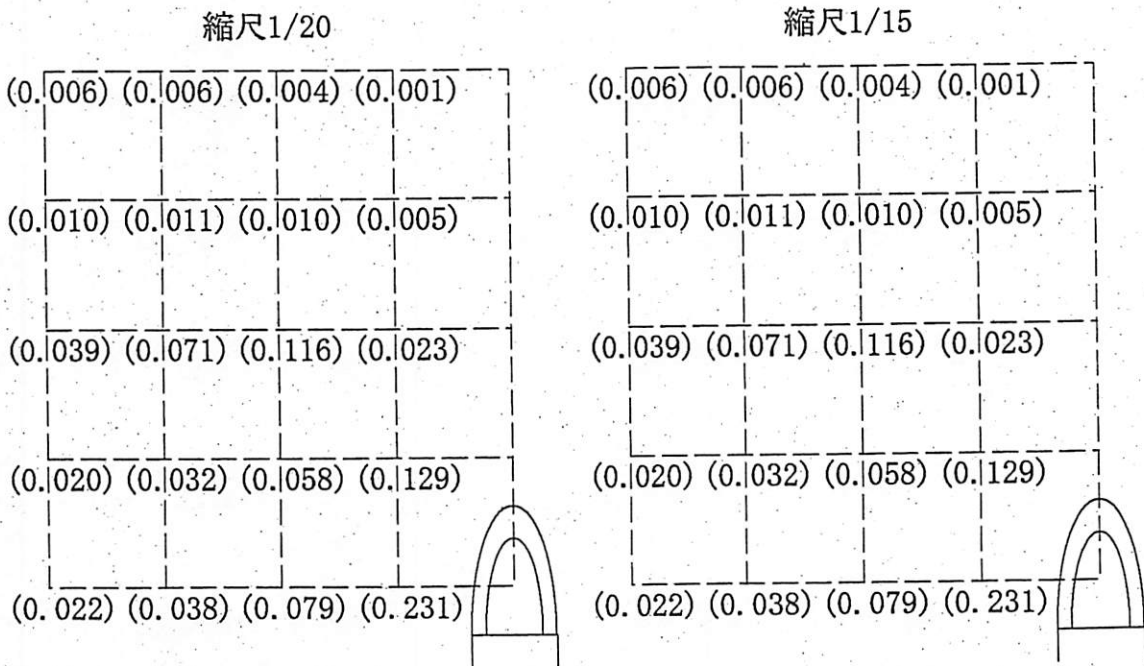


図 5-16 模型火源周囲の形態係数

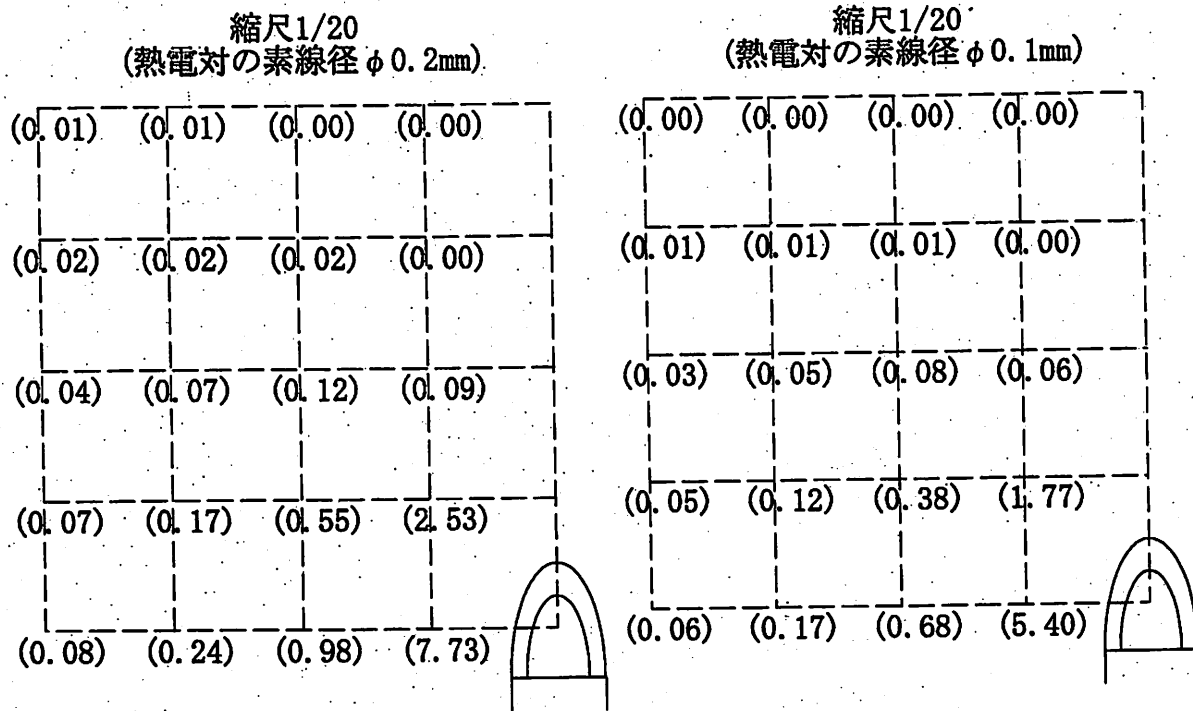


図5-17 縮尺1/20の火源周囲の放射による温度上昇値(°C)

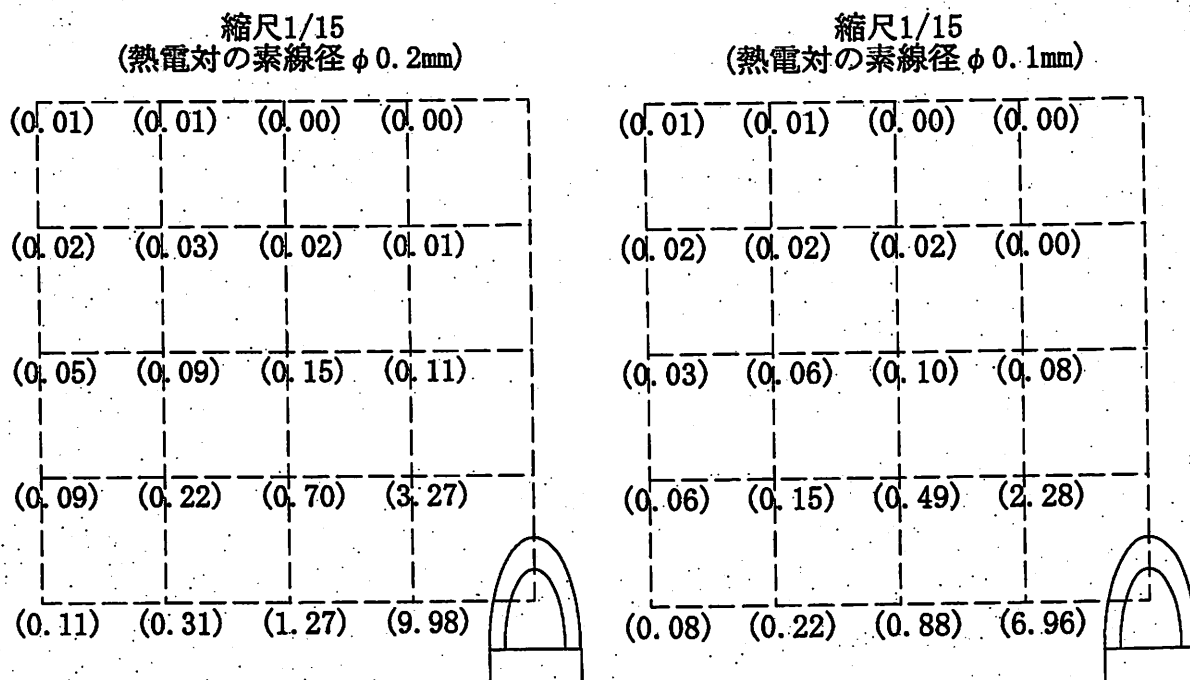


図5-18 縮尺1/15の火源周囲の放射による温度上昇値(°C)

## 6. おわりに

本研究では、火災を想定した一定面積、一定温度の放射源を用いて、放射源からの距離と熱電対の種類（径の太さ、被膜の有無等）が測定誤差に与える影響を実験的に明らかにした。またそこから、放射源の放射能や放射率等の値を入れ替えれば、別の放射源を用いた場合でも測定誤差の予測ができるという結果に至った。今回確認実験として行なった模型火源周囲の気温測定にも、どの程度放射による誤差が含まれているのか予測でき、放射の影響を取り除いた火源周囲の気流温を知ることができた。

これによって今までは火災時の煙流動を知るための模型実験等において気温測定に放射が与える測定誤差を無視して行っていたことが、実際にどれほど放射の影響を受けているのか考慮することができるようになった。

今後「アトリウム空間の外気風影響下における煙流動模型実験」等をする場合にも以上のことを踏まえておこなっていきたい。

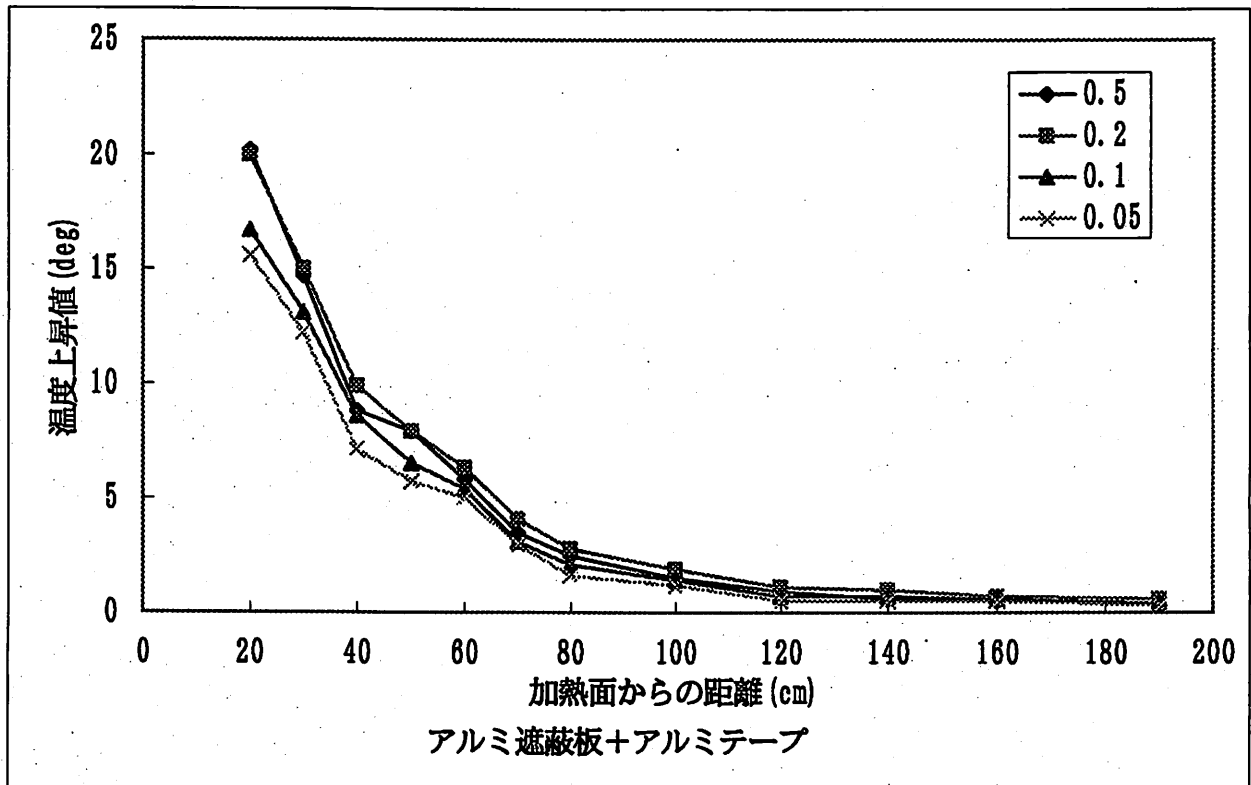
## 参考文献

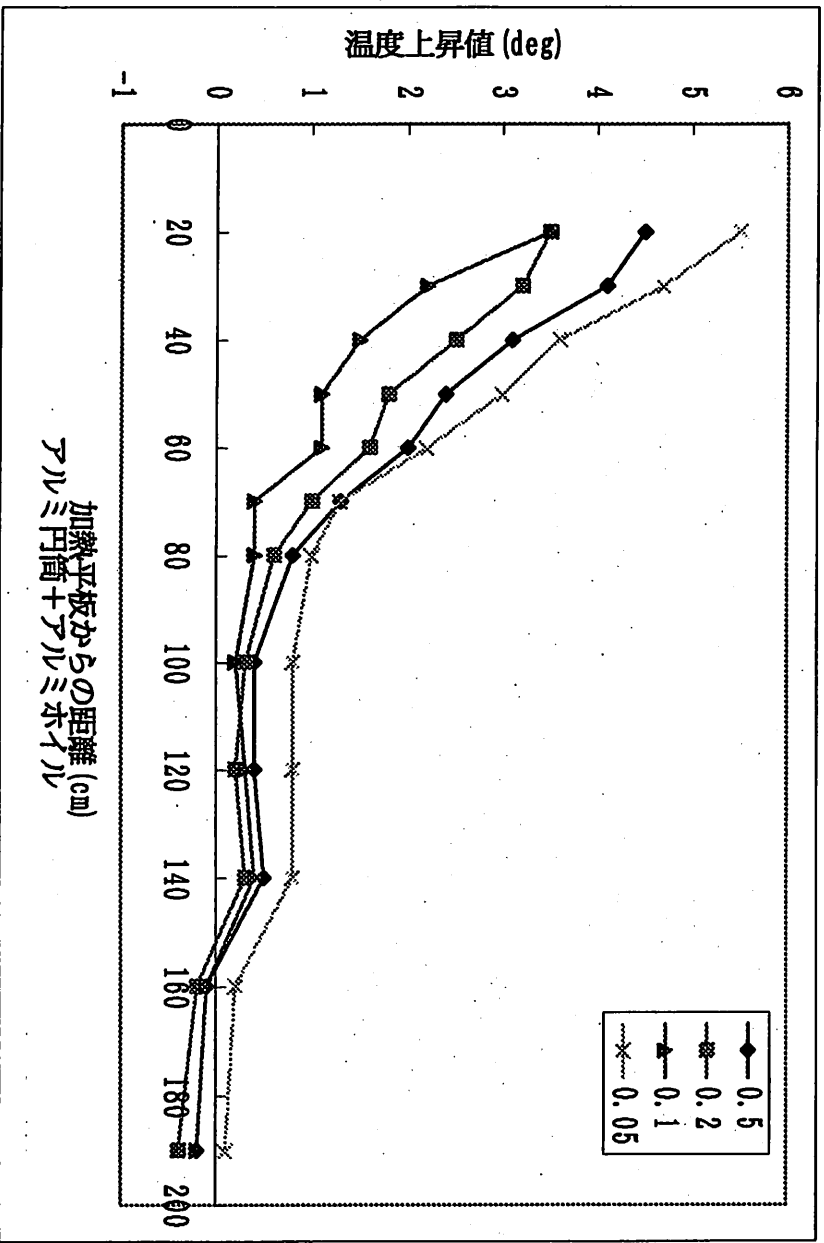
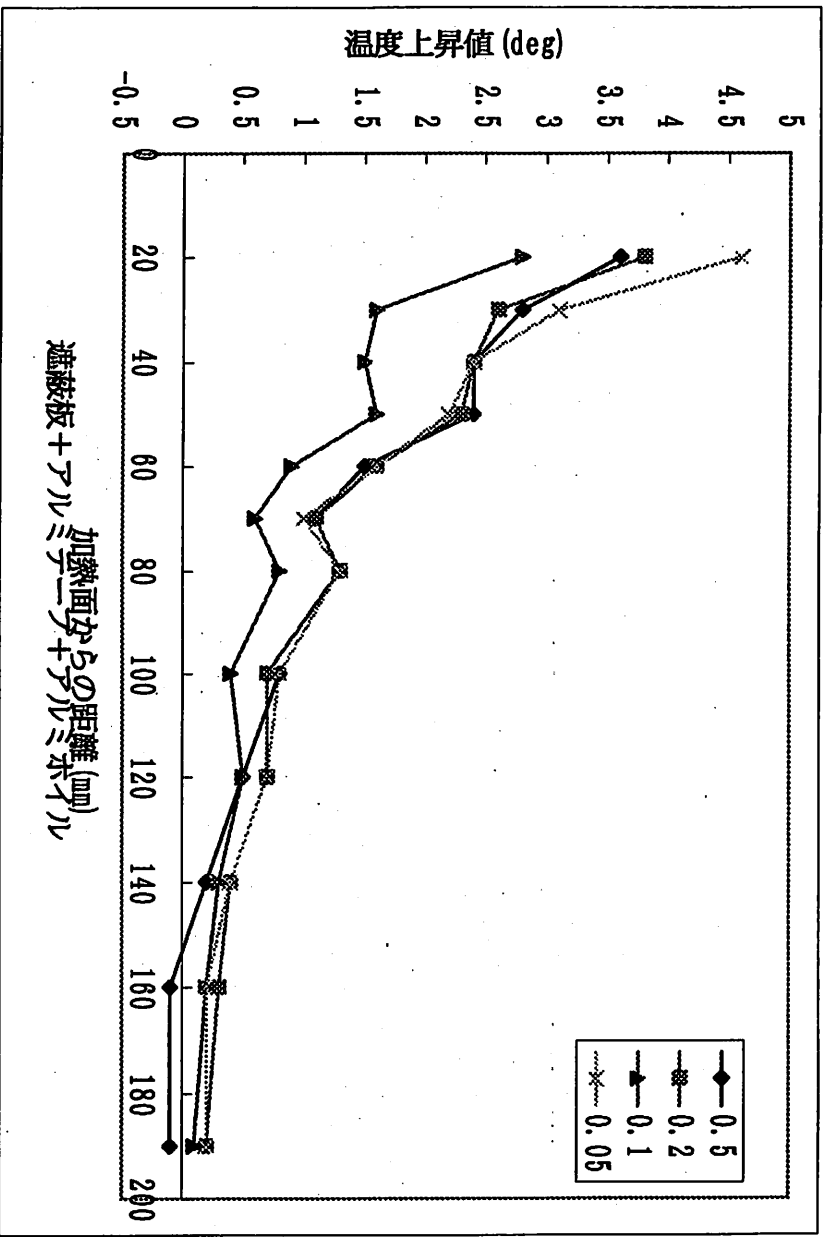
- 1) 渡辺 真志、武田 仁；短波長放射のある室内における空気温度測定法に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集、PP.1～9,1989.5
- 2) 中村 泰人、平岡 久司 他；市街地空間における気温分布性状に関する実験的研究  
日本建築学会計画系論文報告集、PP.48～55,1986.6
- 3) 片山 忠久、塩月 義隆 他；放射環境下における気温およびグローブ温度の測定精度に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集、PP.20～26,1987.11
- 4) 中村 泰人、「放射環境下における気温およびグローブ温度の測定精度に関する実験的研究」に対する疑問、日本建築学会計画系論文報告集、PP.143～145,1988.6
- 5) 中村 泰人；輻射熱の計測、空気調和・衛生工学会論文集、PP.51～58,59 巻4号
- 6) 日本火災学会編；火災便覧、共立出版（株）、1984
- 7) 金谷 英一、石黒 一郎 他；建築環境工学概論、（株）明現社、1976
- 8) 竜谷 光三、清家 清 他；輻射環境下における気温測定装置の試作とその検討（照り返しに関する基礎的研究・その1）、日本建築学会論文報告集、  
No.245,PP.91～99,1976.7
- 9) 日本機械学会；伝熱工学資料
- 10) （財）日本建築センター；「建築物の総合防火設計法」第3巻 避難安全設計法、  
P.32,1992
- 11) 日本機械学会編；「伝熱工学」、森北出版
- 12) 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
- 13) 義江龍一郎、村上周三、加藤信介；「高温鉛直加熱壁近傍の自然対流に関する実験」、  
日本建築学会計画系論文集、pp61-68,1994.7

付録1 アルミ遮蔽板, アルミ円筒の実験の付録

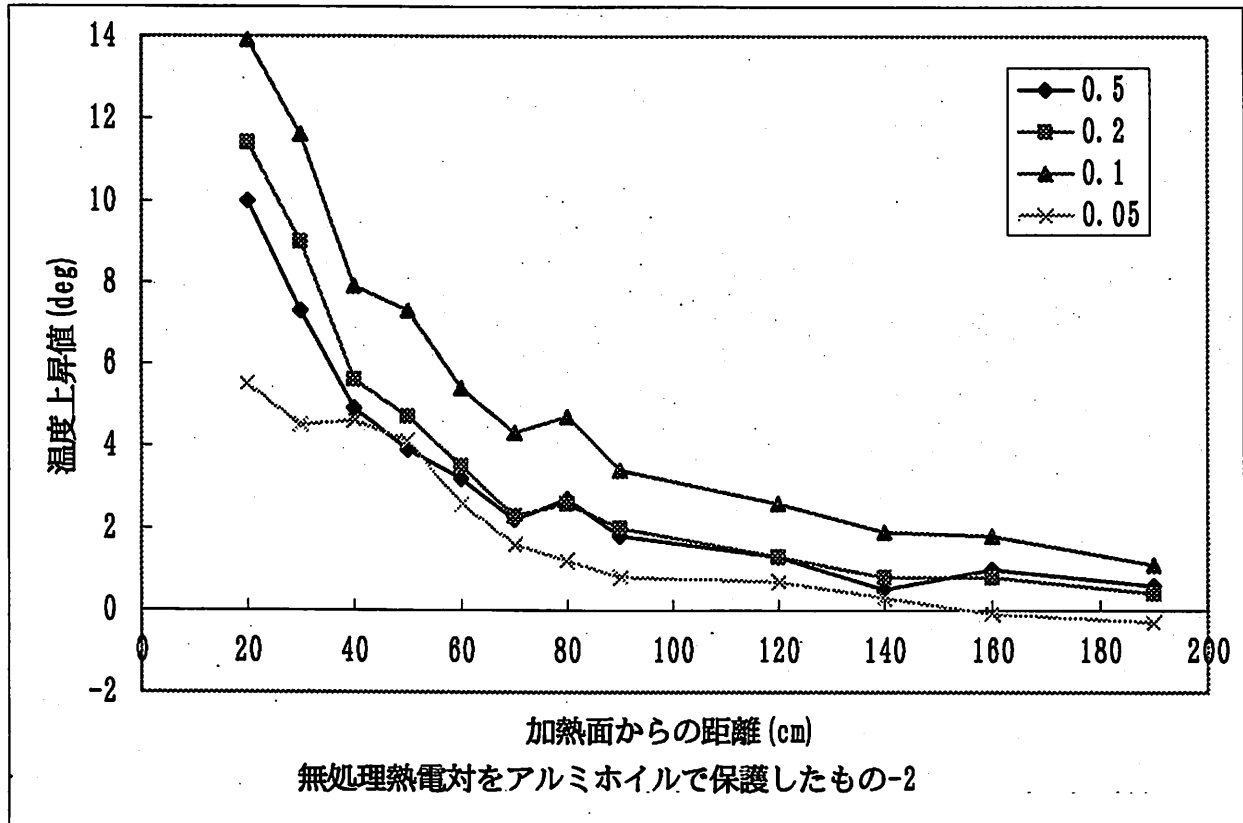
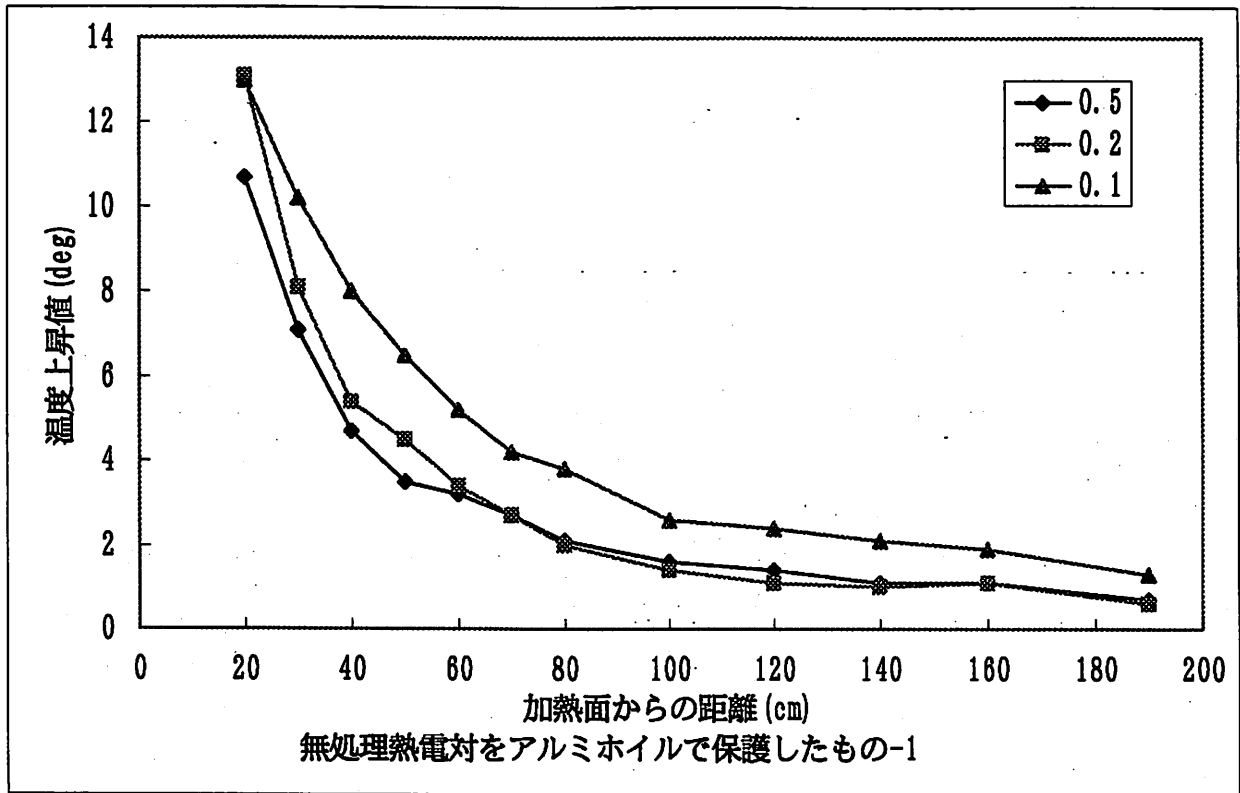
アルミ遮蔽板の実験を行なった時, 遮蔽板の表面が曇っていたため, これよりも輻射率が低いだろうと考えられるアルミのテープを表面に貼って測定してみた。

また, 更にアルミのテープよりもアルミホイルのほうが, 輻射率が小さいと考えられたため, アルミホイルを全面にかぶせてみた。



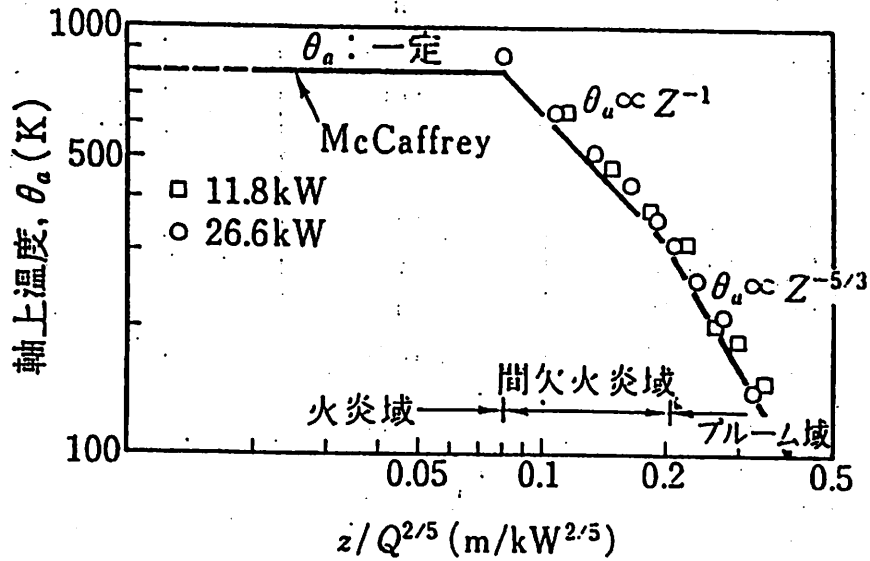






付録2 模型火源プルーム軸上温度測定

火源プルーム軸上温度は、高さの5/3乗に反比例して低下することが知られている。<sup>9)</sup>



(a) 軸上温度

図1 火炎軸上温度

また、文献<sup>6)</sup>によれば軸上温度は以下の式で表わせる。

$$\theta = 0.00198 \left( Q^2 / \beta \rho^2 c_p^2 \right)^{1/3} \cdot c^{-8/9} \cdot Z^{-5/3} \quad \dots (1)$$

ここで、 $c = 0.172 \cdot D^{9/20}$

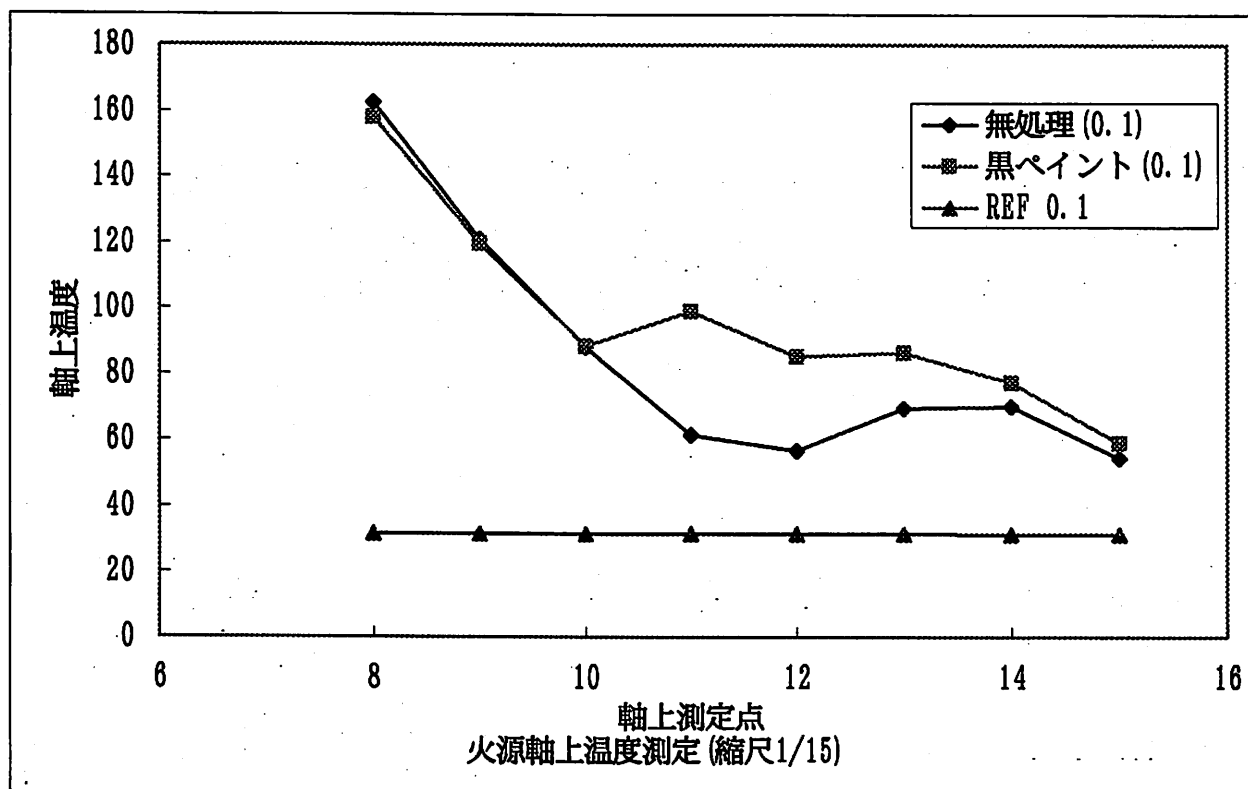
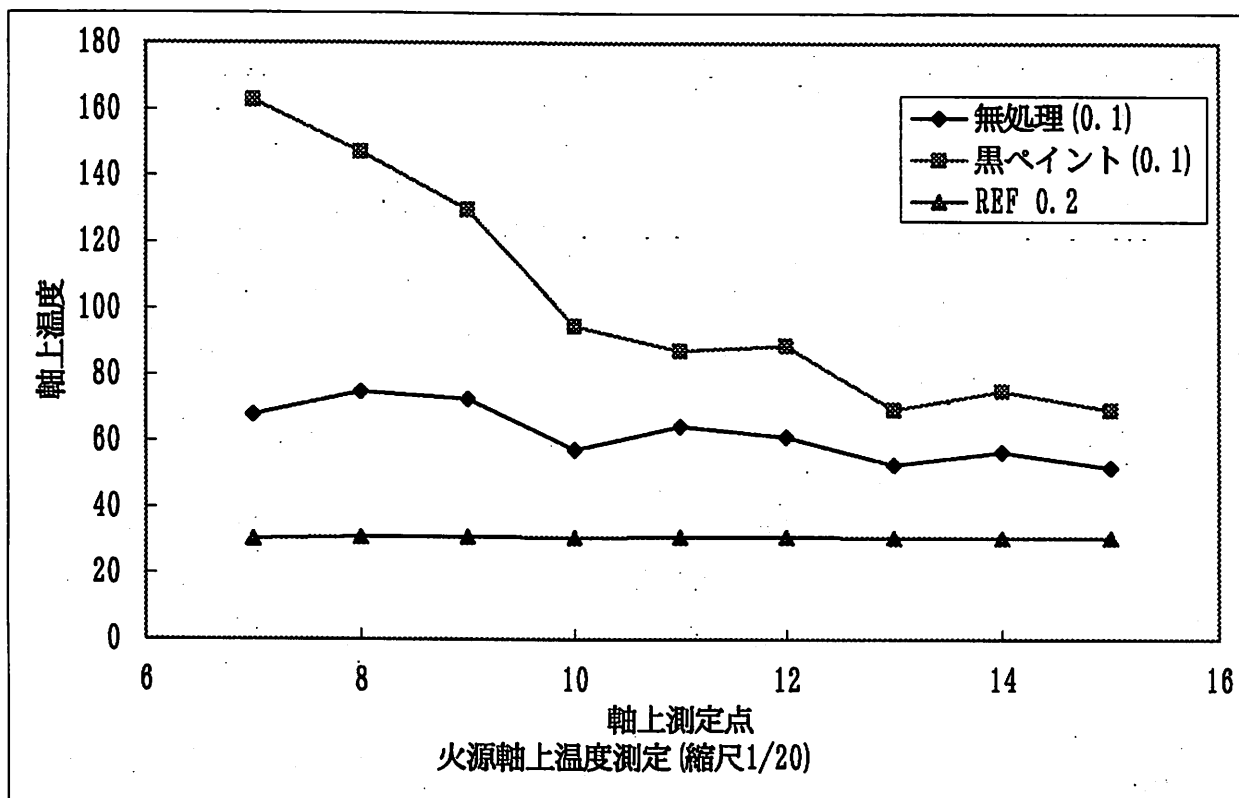
$Q$  ; 発熱量,  $\beta$  ; 空気の体積膨張率,  $\rho$  ; 空気密度,  $c_p$  ; 空気比熱,  $D$  ; 火源寸法

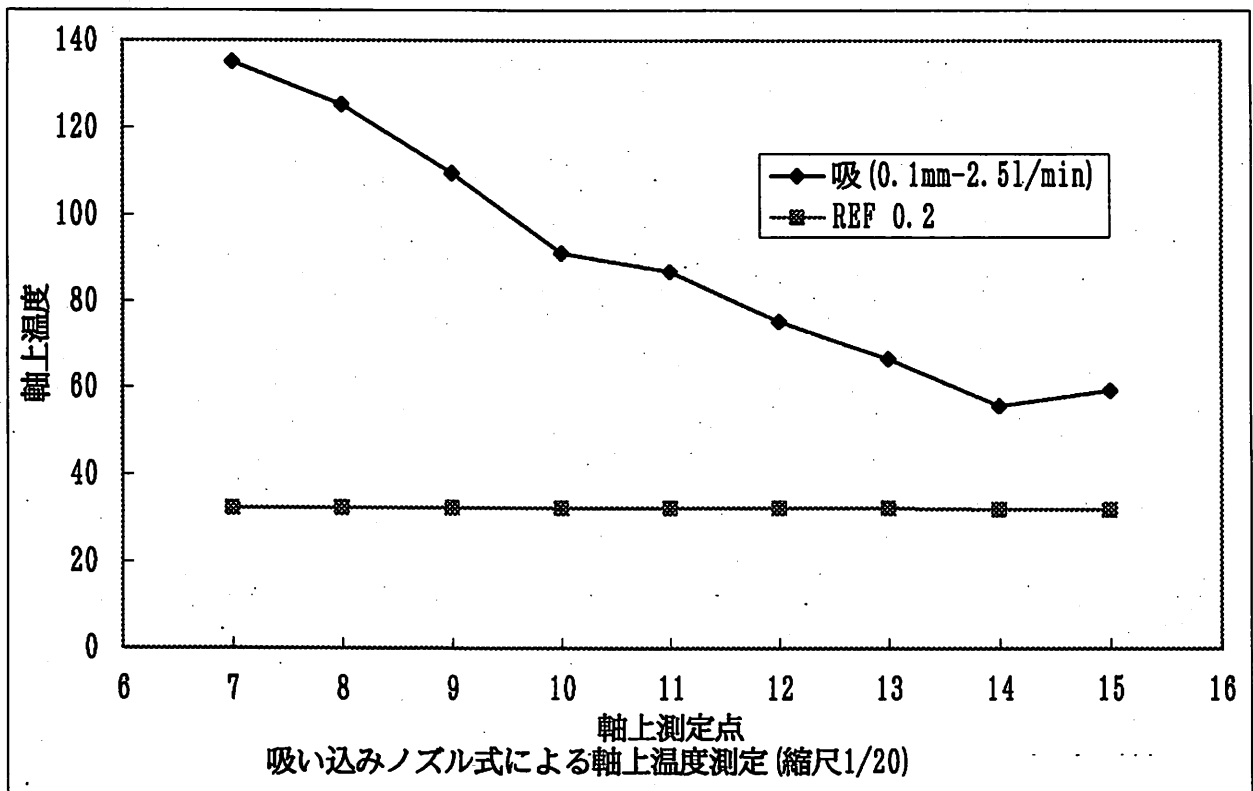
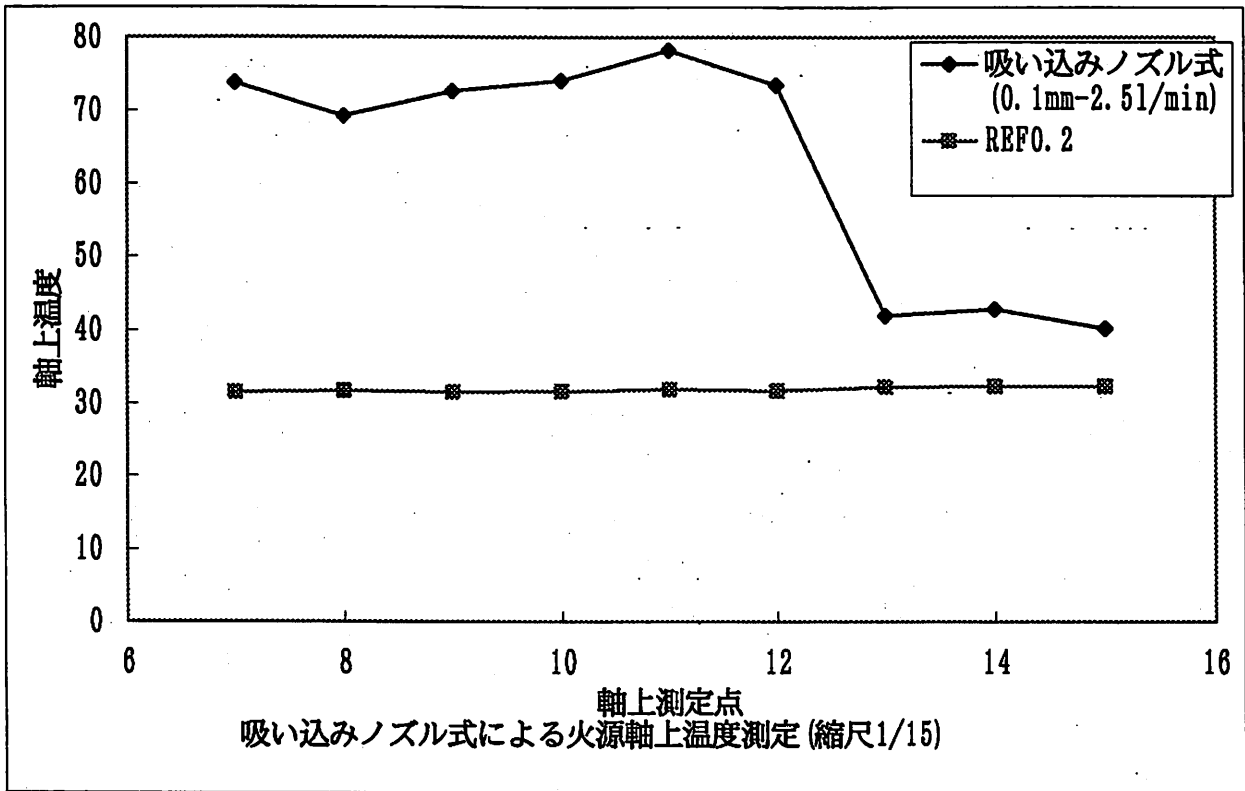
プルーム域は、以下の式で表わせる。

$$0.143 < Z / (D^{-3/10} \cdot Q^{2/5}) \quad \dots (2)$$

ここでの実験の目的は、各種測定法の比較実験によって選定された測定方法で模型火源のプルーム軸上温度を測定し、(1)式との比較を行い測定方法の有効性を示すことと、模型火源の有効性を確認することである。

模型火源には、実大で直径1.5m、発熱量3MWのものを想定して縮尺1/20, 1/15, のものを用いる。





## 謝辞

本論文の研究にあたり、多大なご指導、御援助を頂いた辻本誠教授に深く感謝申し上げます。また、本論文実験にあたり御援助、御協力頂いた前田建設関根章義さん、中部大学岩田薫さん、服部哲夫君、山口隆介君、さらにいろいろと御助言下さった堀江記代美さん、村上慶裕さん、その他防災安全工学講座の大学院生のみなさんに深く御礼申し上げます。

1995年 2月

佐々木 真人