



放射熱伝達の解析(第4報) :  
軸対称放射性媒体の放射吸収係数の測定方法について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-07-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 媚山, 政良 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3717">http://hdl.handle.net/10258/3717</a>

# 放射熱伝達の解析

(第4報, 軸対称放射性媒体の放射吸収係数の  
測定方法について)

媚 山 政 良

Analysis of Radiative Heat Transfer  
(4th Report, A measuring method of the radiative  
absorption coefficient of the axisymmetric  
radiative medium)

Masayoshi Kobiyama

## Abstract

A new measuring method of the property of radiative medium, radiative absorption or extinction coefficient, is proposed in this paper. This experimental method is applied to the medium having the axisymmetric characteristics, and does not need the conditions of the medium being homogenous and isothermal. And a distribution of the radiative extinction coefficient of a diffusion flame is shown as one of the applied example.

## 1. 緒 言

高温の放射性媒体を用いる熱交換器は工業用, 民生用に広く利用されてきている。これらの熱交換器は熱の有効な利用を図るため, その作動媒体は高温化され, また熱交換器本体の構造は複雑化してきており, 熱交換器の熱設計では, 安全性を同時に考慮し, 細部に渡る精度の高い理論的な予測が要求されてきている。

しかし, おもに放射熱伝達の計算の煩雑さと数値解析における演算時間の膨大さおよび取扱う媒体の放射物性が明らかとされていないという二つの理由により, 理論的な予測は限られた装置以外には適応されてきていない。前者に関しては, すでに放射熱伝達の計算に有効な計算手法を報告したが<sup>(1),(2)</sup>, 後者に関しては, 放射性媒体の組成が単純であり, また媒体が均一な温度に保たれている場合<sup>(3)</sup>を除き, いまだ明らかとされてはいない。これは, 高温の放射性媒体の放射物性を実際の熱交換器の熱設計に利用できる程度に細部に渡り, また比較的容易に測定できる方法が提案されていなかったことによるものと考えられる。

したがって, 本報では, 軸対称の温度, 濃度分布を有する放射性媒体の放射物性(ここでは,

放射吸収係数ないしは減衰係数)を測定する一つの方法を提案する。この方法は、対称軸に直角方向、すなわち半径方向の温度分布とそれを含む同一平面上から壁へ伝達される放射熱量を壁からみていくつかの方向に分割し測定を行ない、これらの値を用い、放射熱伝達に関する熱平衡式を解くことにより、着目している平面上の媒体の放射物性を求め、また、その平面を対称軸に沿って移動し、同様の測定を行なうことにより、対象とする軸対称媒体の二次元的な放射物性の分布を求めようとするものである。

また、この方法の具体的な適応例として、プロパンガスを燃料とした、層流、定常拡散火炎の減衰係数の分布を測定例として示す。

### 記号

$l$ : 長さ m, 放射受熱量測定方向	$z$ : 鉛直方向
$A$ : 面積 $m^2$	$r$ : 半径方向
$V$ : 体積 $m^3$	$m$ : 半径方向の要素数, $l$ の方向の数
$E_g$ : 媒体の放射能 $kcal/m^2h$	$n$ : $l$ 方向の微小要素の数
$E_w$ : 壁面の放射能 $kcal/m^2h$	$\kappa$ : 放射吸収係数, ないしは減衰係数 $1/m$
$E_R$ : 放射計の放射能 $kcal/m^2h$	$\theta$ : 方位角方向
$T_g$ : 媒体温度 $^{\circ}K$	$\Delta\omega$ : 放射計の立体角 $m^2/m^2$
$q_R$ : 放射受熱量 (熱流束) $kcal/m^2h$	

## 2. 座標系および基礎方程式

座標系を図1に示す。半径方向を  $r$ 、軸方向を  $z$  とする。また、 $O$  を回転の中心として  $l$  方向を定め、 $l$  と  $r$  とのなす角を  $\theta$  とする。鉛直方向  $z = z$  における水平方向の断面を図2に示す。測定の対象とする放射性媒体は半径  $r_0$  の容器内に存在し、 $r = 0$  を対称軸とする温度および濃度分布を有しているものとする。すなわち、放射吸収係数ないしは媒体の種類によっては放射減衰係数  $\kappa$  は、 $\kappa(z, r)$  として示される二次元分布を有するものとする。また、系は定常状態にあり、媒体は放射熱伝達に関し灰色体であり、Kirchhoff の法則、Beer の定理に従い、また壁面は黒体であり、Lambert の余弦法則に従うものとする。

実験による測定量は、半径方向の温度分布  $T_g(z, r)$  すなわち  $T_g(z, i)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) および図1ないしは図2に示す  $l$  方向からの放射熱伝達量  $q_R(z, l)$  すなわち  $q_R(z, i)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) とする。ここで、 $q_R$  を測定する放射計の立体角  $\Delta\omega_r (= \Delta A_R / l^2)$ 、熱交換器の半径  $r_0$  および放射計の回転の中心  $O$  を定めると、放射計を  $l = i$  方向に向けた時、つぎの放射熱伝達に関する熱平衡式が成立する。

$$q_{R(z,i)} = \int_{\Delta V_i} \frac{4\kappa(z,l)E_g(z,l)e^{-\int_0^l \kappa(z,l)dl}}{4\pi l^2} dV + \int_{\Delta A_i} \frac{E_w(z)\cos\theta'_i e^{-\int_0^l \kappa(z,l)dl}}{\pi l^2} dA - \int_{\Delta\omega_R} \frac{E_R}{\pi} d\omega \quad (1)$$

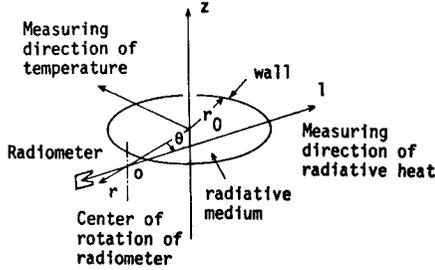


図1 全体の座標系

ここで、右辺第一項は  $l = i$  方向に存在する媒体  $\Delta V_i$  から放射計への放射熱伝達量、第二項は壁面  $\Delta A_i$  からの放射熱量、第三項は放射計から放射計外部への放射熱伝達量であり、左辺は放射計が受ける熱量である。また、 $E$  は放射能であり  $\sigma T^4$  より算出される。ここで、 $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数である。

### 3. 放射吸収係数 (減衰係数) $\kappa$ の算出

実験による測定に先立ち、半径方向に対し測定点  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) を定めると、図2に示す  $l = i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 方向の立体角  $\Delta\omega_R$  に含まれる体積  $\Delta V_i$  中の微小要素  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) (ただし、

$n = 2(m - i + 1)$ ) の体積  $\Delta V_{i,j}$ 、 $l$  方向の長さ  $\Delta l_{i,j}$ 、焦点から微小要素の代表点 ( $\Delta l_{i,j}$  の中点、すなわち半径  $r_i$  と  $l$  との交点とする) までの長さ  $l_{i,j}$ 、微小要素  $n$  と接する壁の面積  $\Delta A_i$  と焦点からの距離  $li$  および  $\Delta A_i$  の法線が  $l$  方向となす角  $\theta'_i$  が幾何学的関係から求められる。なお、 $l = i$  方向で半径方向の要素  $i$  ( $r_i$ ) に属する微小体積に関しては、他の要素とは異なり、測定の精度を高めるため微小要素を2個おき、おのおのを  $J$ 、 $J + 1$  と名付け、その代表点が半径  $r_i$  上にある様にする。

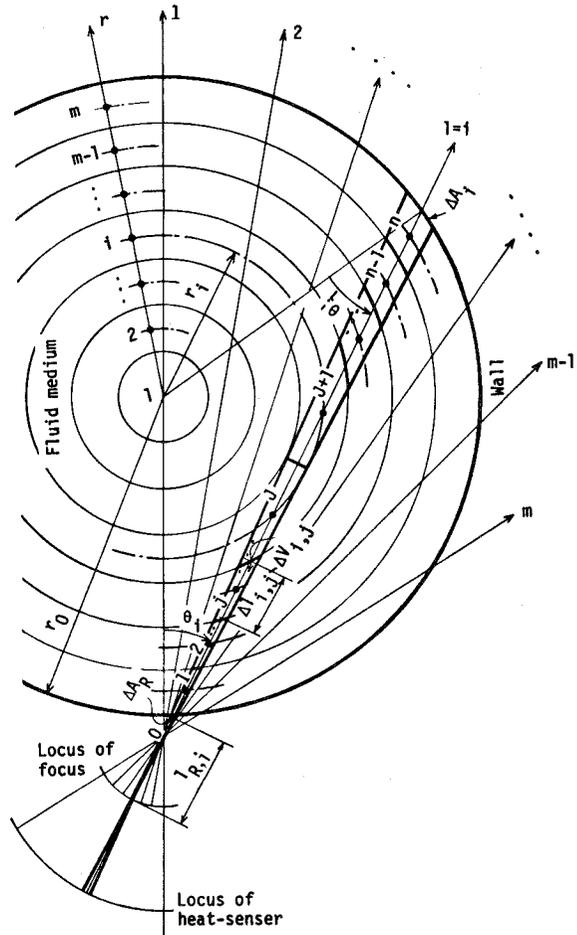


図2 z断面の座標系

式(1)を上述の方法により図2に示す微小要素に分割し、付号をつけ差分近似を行なうと次式を得る。ただし、ここでは添字  $z$  を省略する。

$$q_{Ri} = \sum_{j=1}^n \frac{4\kappa_{i,j} E_{g,i,j} e^{-\sum_{j'=1}^j \kappa_{i,j'} \Delta l_{i,j'}}}{4\pi l_{i,j}^2} \Delta V_{i,j} + \frac{E_w \cos \theta'_i e^{-\sum_{j'=1}^n \kappa_{i,j'} \Delta l_{i,j'}}}{\pi l_i^2} \Delta A_i - \frac{E_R}{\pi} \Delta \omega \quad (2)$$

図2に示す関係から微小要素  $J$  および  $J+1$  での  $\kappa$  を  $\kappa_i$ 、すなわち、 $\kappa_i \equiv \kappa(r_i) = \kappa_{i,j} = \kappa_{i,j+1}$  とおき、軸対称の関係を用ると、式(2)はつぎのように  $\kappa_i$  について書き表わされる。

$$A_i \kappa_i \exp\left(-\frac{\Delta l_{i,j}}{2} \kappa_i\right) + B_i \kappa_i \exp\left(-\frac{3}{2} \Delta l_{i,j} \kappa_i\right) + C_i \exp(-2\Delta l_{i,j} \kappa_i) + D_i = 0 \quad (3)$$

ただし、 $A_i = Z_j$ ,  $B_i = Z_{j+1}$ ,  $C_i = \sum_{j=j+2}^n Z_j + Z_i$ ,  $D_i = \sum_{i=1}^{j-1} Z_j - q_{Ri}^* \pi$ ,  $q_{Ri}^* = q_{Ri} + E_R \Delta \omega / \pi$  ここで、 $z$  は次の値をとる。

$$\begin{aligned} j < J \text{ の時: } Z_j &= Y_j \kappa_{i,j} \exp\left\{-\left(\frac{\Delta l_{i,j}}{2} \kappa_{i,j} + \sum_{j'=1}^{j-1} \Delta l_{i,j'} \kappa_{i,j'}\right)\right\} \\ j = J, J+1 \text{ の時: } Z_j &= Y_j \exp\left\{-\left(\sum_{j'=1}^{j-1} \Delta l_{i,j'} \kappa_{i,j'}\right)\right\} \\ j > J+1 \text{ の時: } Z_j &= Y_j \exp\left\{-\left(\sum_{j'=1}^{j-1} \Delta l_{i,j'} \kappa_{i,j'} + \sum_{j'=j+2}^{j-1} \Delta l_{i,j'} \kappa_{i,j'} + \frac{\Delta l_{i,j}}{2} \kappa_{i,j}\right)\right\} \end{aligned}$$

また、 $Z_j = Y_j \exp\left\{-\left(\sum_{j'=1}^{j-1} \Delta l_{i,j'} \kappa_{i,j'} + \sum_{j'=j+2}^n \Delta l_{i,j'} \kappa_{i,j'}\right)\right\}$

ただし、 $Y_j = (E_{g,i,j} \Delta V_{i,j}) / (l_{R,i} + \sum_{j'=1}^{j-1} \Delta l_{i,j'} + \frac{\Delta l_{i,j}}{2})^2$

$$Y_i = E_w \cos \theta'_i \Delta A_i / (l_{R,i} + \sum_{j=1}^n \Delta l_{i,j})^2$$

$$l_{i,j} = l_{R,i} + \sum_{j'=1}^{j-1} \Delta l_{i,j'} + \frac{\Delta l_{i,j}}{2}$$

$$l_i = l_{R,i} + \sum_{j=1}^n \Delta l_{i,j}$$

ここで、 $i=1, 2, \dots, m$      $j=1, 2, \dots, n$      $n=2(m-i+1)$

着目する  $z$  平面上において式(3)は  $m$  本成立し、この数は半径方向の分割数と同一としているため、これらを連立し、未知数  $\kappa_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) について解くと、半径方向の放射吸収係数 (ないしは放射減衰係数) の分布  $\kappa(r)$  が得られる。また同様の測定および計算を軸方向の距離  $z$  を変化させ行なうと、二次元の分布  $\kappa(z, r)$  が得られる。

つぎに式(3)から成る連立方程式の解き方を考える。この連立方程式に含まれる各方程式は  $\kappa_i$  に関し超越方程式となり、解きにくい。が、 $l=m$  の方向では、半径  $r_m$  における  $\kappa_m$ 、すなわち  $\kappa_{j=1} = \kappa_{j=2}$  のみが未知数となり、他の諸量は既知のため Newton-Raphson 法などにより解くことができる。また、 $l=m-1$  の方向では  $j=1$  および  $j=n$  での  $\kappa$  がすでに  $l=m$  方向の計算により求められているため、 $\kappa_{j=1} = \kappa_{j=4} = \kappa_m$  として代入すると  $\kappa_{j=2}$  ( $=\kappa_{j=3}$ ) の値のみが未



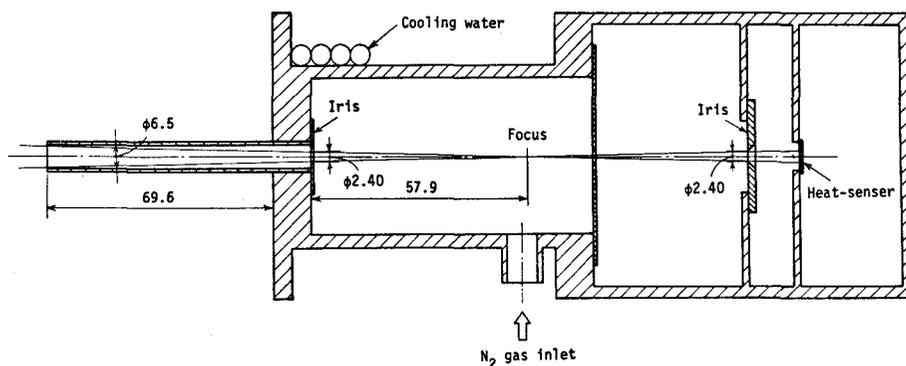


図4 放射計

クは、二重管構造とし、その間に冷却水を流し、壁温を一定に保つよう流量を調整した。また、バーナは図3に示すように測定部の半径方向の中心に位置し、また上向きとし1/8インチ（内径6.5mm）の内管を1インチ（外径34.0mm）の外管でおおう二重管構造とし、バーナ先端部を同心円の鋼板でおおいバーナリップとしている。なお、バーナリップ、バーナの内外壁、測定ブロック内壁、放射計内壁など火炎の光を受ける部分には黒色の耐熱つやけし塗料をぬってある。

放射受熱量の測定には、図4に示す感熱部がCCより成る熱電堆を用い、立体角は細部に渡る測定を可能とするため絞りをを用い、 $\Delta_{OR}=1.35 \times 10^{-3}$ と小さい値となる構造としている。なお、測定中、放射計へ燃焼ガスが流入することをさけるため、微量の窒素ガスを流し、また、放射計の温度を校正時と同一に保つため放射計の外部を冷却している。火炎、燃焼ガスおよび空気の温度測定には径の異なる3種のCA熱電対を用い、径が零の場合を3つの測定値より外挿し、測定点での値とした。また、燃料および空気の流量はそれぞれロータメータ、オリフィスを用い測定した。

#### 4. 2 実験方法

放射計の校正は、放射計を一定温度に保ち、放射計に実験で用いる絞り管をとりつけ、また、一定量の窒素ガスを流した状態で行ない、式(3)に示す $q_{R}^*$ と起電力の関係を黒体炉を用い調べた。その結果、本実験範囲では入熱と起電力の間には直線関係が見出され、平均電圧感度は $2.84 \times 10^{-2} \mu V / (kcal/m^2h)$ であった。

一般に放射熱を受けている固体表面の温度測定はむづかしく、とくに本報での例の様に輝炎を取扱う場合には、壁表面の熱物性を一定に保ちえず、温度の測定は困難である。また、本報で用いる形式の放射計では放射受熱量の絶対値を測定し得ないことを同時に考慮して、放射性媒体が存在しない場合の対向面からの放射熱量と式(3)の $q_{R}^*$ との和 $q_{R}^{**}$ を基準量とし、相対的な放射受熱量の測定を行なう。すなわち、次式で示す $q_{R}^{**}$ が放射性媒体からの放射熱量(式(1)の右

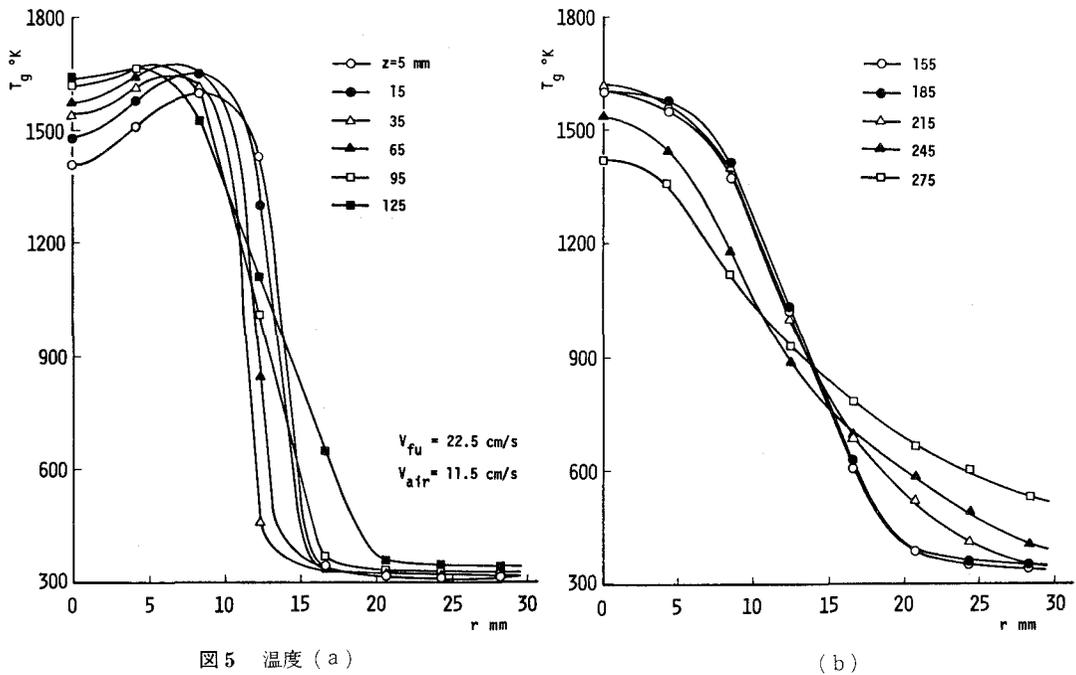
辺第1項)と熱平衡を保つものとし測定を行なう。

$$q_{R_i}^{**} = q_{R_i}^* - \int_{\Delta A_i} \frac{E_w \cos \theta_i}{\pi l_i^2} dA \quad (4)$$

この測定および計算を容易にする方法の導入による相対誤差は、その最大値が火炎の内部を通る $l$ 方向で表われ、その有効厚さはほぼ $l_i$ に等しいことを考え、また $\kappa$ および $E_g$ の代表値をそれぞれ $\bar{\kappa}$ 、 $\bar{E}_g$ とすると近似的に次式と表わされる。

$$\begin{aligned} & \{E_w \cos \theta_i \Delta A_i / \pi l_i^2 - E_w \exp(-\sum \kappa_{i,j} \Delta l_{i,j}) \cos \theta_i \Delta A_i / \pi l_i^2\} / q_{R_i}^{**} \\ & \approx \{1 - \exp(-\bar{\kappa} l_i)\} E_w / \{\bar{\kappa} l_i \bar{E}_g \exp(-\bar{\kappa} l_i)\} \\ & \approx \{1 / (1 - \bar{\kappa} l_i)\} (E_w / \bar{E}_g) \end{aligned} \quad (5)$$

本実験で用いた装置について考えると、測定ブロックの内壁温度が冷却水温度と数度程度の差しかなく、火炎に比較するとその温度は非常に低く、また、実験装置が小型であり、半径方向の光学距離は小さいことおよび放射計の入熱と起電力の間に直線関係があることから、式(5)の値は非常に小さくなり、上述の相対的な放射受熱量の測定は可能となる。後述の実験条件下では、この方法の採用による誤差は0.2%程度であり、測定誤差内に含まれている。なお、この方法では少なくとも $l = m$ の方向では空気(非放射性媒体)が存在するように実験条件を整え、その方向での出力を基準として他方向の出力を測定し、 $q_{R_i}^{**}$ を算出する。また、 $\kappa$ を求めるに際して



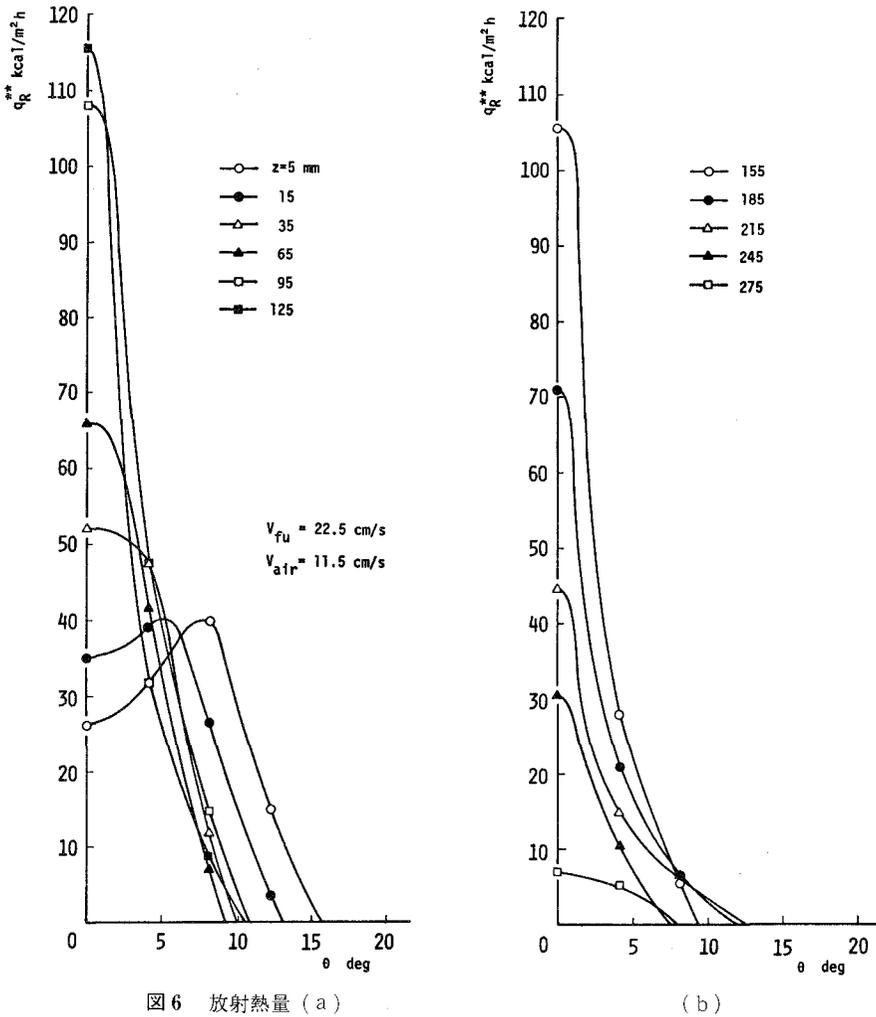


図6 放射熱量 (a)

(b)

は式(3)の  $q_{Ri}^*$  を  $q_{Ri}^{**}$  とするとともに  $Y_i$  を零とおく。

実験装置の製作上,  $\theta_i$  の最大値  $\theta_m$  を  $45^\circ$  とし, また  $m$  は 12, すなわち各  $Z$  に対し, 12 方向の放射受熱量の測定を行なった。また,  $z$  方向の測定位置は予備実験により,  $\kappa$  の分布を正しく把握できる点とし, バーナ側では細かい間隔を置いた。なお, ここで採用した位置決めと, さらに細かい位置決めによる結果とでは両者の間に有意な差異は認められなかった。また, 火炎後流部での  $z$  に関する測定範囲は, 放射計の感度が有意である位置までとした。

#### 4. 3 測定結果

測定例を示す。燃料流量および空気流量はおおの 7.46 $\text{cm}^3/\text{s}$ , 711 $\text{cm}^3/\text{s}$  である。また, この時入口流速はおおの 22.5 $\text{cm/s}$ , 11.5 $\text{cm/s}$  である。この条件下では, 火炎は層流, 定常拡

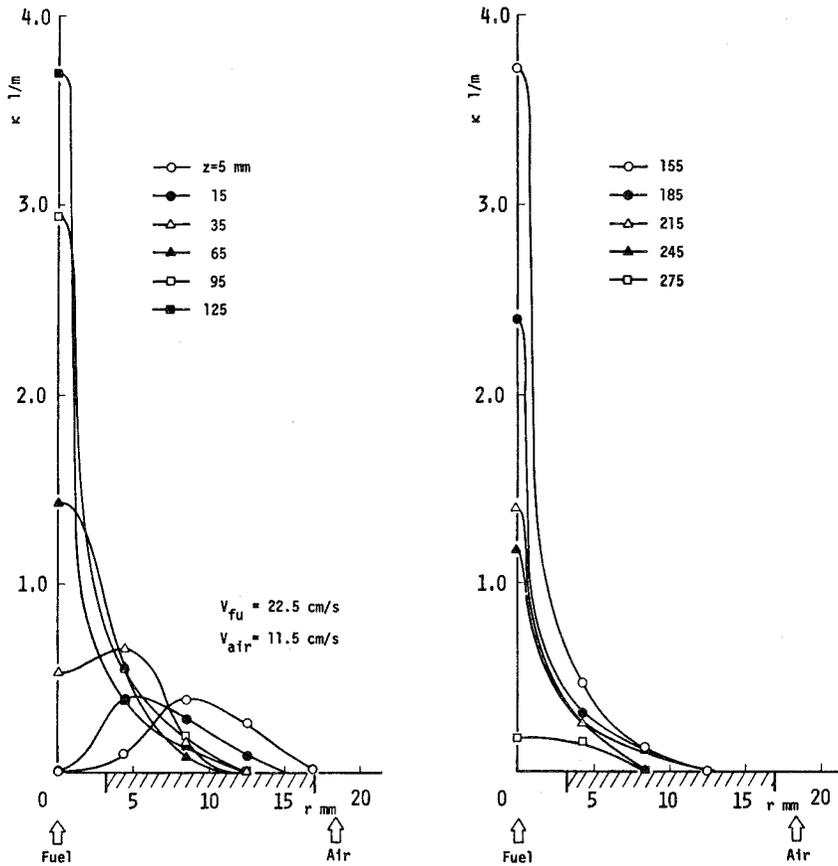


図7 放射減衰係数 (a)

(b)

散輝炎となり、媒体からの放射受熱量の多くは析出した炭素粒子によるため、 $\kappa$ は減衰係数として取扱われる。

図5に媒体の温度  $T_g$  の測定値を、図6に放射受熱量  $q_{R}^{**}$  の測定値を示す。バーナリップ近傍の中心軸付近では火炎は不輝炎となるため放射受熱量は少ないが、この領域以外では同一の  $z$  であれば  $r=0$  の方向、すなわち  $\theta=0$  で最大の  $q_{R}^{**}$  を示している。

以上の測定結果を用い、減衰係数  $\kappa$  を算出した結果を図7に示す。同図では、バーナからの距離  $z$  をパラメータとして示している。図8には等高線の形でおのおの  $\kappa$  と  $T_g$  を示す。なお、同図中には写真撮影により観測した火炎形状を併記する。バーナに近い  $z = 5 \sim 35$  mm 付近では、中心軸から離れた点で  $\kappa$  は最大値を示すが、 $z = 65$  mm 以上では中心軸上で最大値を示し、また、この条件下での最大値は  $z = 155$  mm 付近で表われ、これらの傾向は肉眼および写真による観察結果と一致している。また、 $z = 95$  mm 以降では、中心軸の近傍の狭い領域で高い減衰係

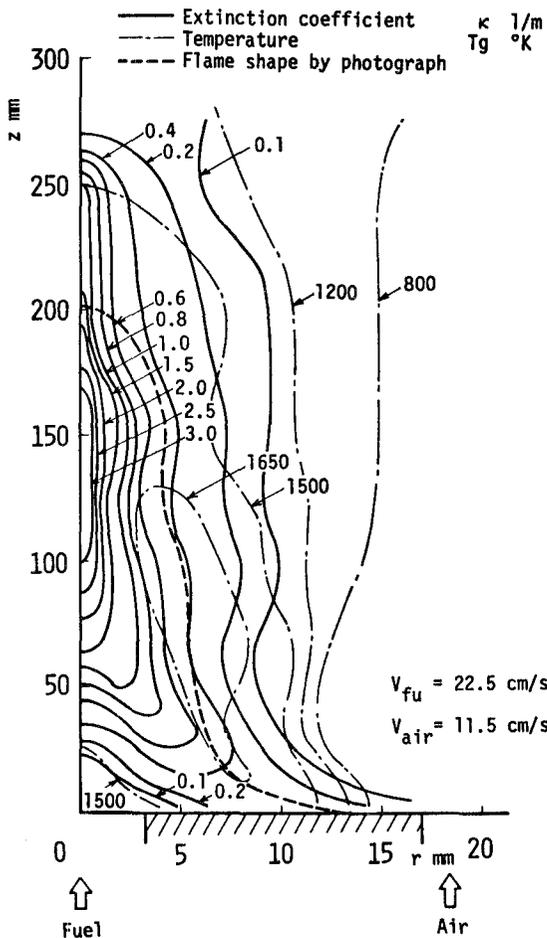


図8 放射減衰係数，温度および火炎形状

数の値を示し，その傾向は火炎後流部である  $z = 250$  mm 付近まで続いている。なお，温度分布と火炎形状を比較すると，輝炎として観測される外縁部において高温の領域が存在している。

## 5. 結 言

本報では，軸対称の温度，濃度分布を有する放射性媒体の放射物性（放射吸収係数ないしは減衰係数）を測定する一つの新しい方法を提示した。この方法を用いると従来明らかとはされていなかった，放射物性の二次元分布を比較的容易に測定できる。また，具体的な適応例として，プロパンガスを用いた輝炎の減衰係数の分布例とこの場合の測定を容易にする方法を示した。とくに測定結果は，その分布を正しく把握し，理論的な解析に反映することの必要性を示すとともに，従来果しえなかった輝炎の特性の一般化の可能性を示しているように思われる。

終わりに，本研究に協力いただいた本学卒業生 橋祐一君，帰山藤人君に謝意を表す次第である。

(昭和 55 年 5 月 15 日受理)

## 文 献

- (1) 媚山，ほか 2 名：日本機械学会論文集，44-385 (昭 53-9)，3125.
- (2) 媚山：室蘭工業大学研究報告 (理工編)，9-3 (昭 53-11)，735.
- (3) Schack, A.: Arch. Eisen. Hüttenwesen, 241 (1939).