



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



## 火炎の燃焼・熱伝達特性に関する研究(第1報)： 定常拡散火炎の放射吸収(減衰)係数の分布について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-07-30 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/10258/3749">http://hdl.handle.net/10258/3749</a>

# 火炎の燃焼・熱伝達特性に関する研究

(第1報, 定常拡散火炎の放射吸収(減衰)係数の分布について)

媚山政良

## A Study on the Characteristics of Combustion and Heat Transfer of a Flame

(1st Report, Radiative Absorption (Extinction)  
Coefficient of Stationary Diffusion Flames)

Masayoshi Kobiyama

### Abstract

The distributions of the radiative absorption (extinction) coefficient are important characteristic values for the theoretical prediction of the heat transfer of the flames and furnaces. In this paper, some distributions of the absorption coefficient of the coaxial diffusion flames in the steady state were measured with the vertical cylindrical furnace and combustive wind tunnel and with various experimental conditions and fuels. The experimental results show that the distributions of radiative absorption coefficient are complex and the values are different according to the experimental conditions.

### 1. 緒 言

火炎は J・H・ロニー・エネの「人類創成(火の戦争)」にみるように、古くから人間の営みを支えてきた、時々不誠実な面を見せることはあるが仲の良い「生き物」である。しかし、その利用技術は必ずしも大きく発展してきたわけではなく、近年、種々の社会的要請により、新しい効率の良い燃焼方法の開発と火炎の特性の理論的な推定方法の拡充が望まれるに至っている<sup>1)</sup>。

新しい燃焼技術の開発は燃料の物理性、化学性については当然のことながら、燃焼を支える燃焼器および補機についての検討も含め、幅広く行なわれてきており、具体的には次に述べる方面での研究開発が主であるように思われる。すなわち、i) 火炎の燃焼反応速度を高めつつ安定した燃焼範囲を広げる方法の研究開発。ii) 火炎から受熱面への熱伝達速度を高める方法。

iii) 燃料の完全な燃焼と排ガスを清浄化させる方法。iv) 燃料の種類が多様化に対応するための開発。v) 部分負荷時にもボイラ効率，燃焼効率などを低下させない燃焼方法の開発。これらの研究開発の対象は各々独立しておらず同時に達成させたい目標である。

火炎の燃焼・熱伝達特性の推定はこれまで主として経験すなわち試作により行なわれてきたが，上述の新しい燃焼技術の開発要請などにより，試作前にかなり詳しい特性の予測を必要としてきている。火炎の特性の推定方法はいくつか提案されてきているが，火炎は高温であり，その中で起る化学反応は時間が無視できる程早いため，燃料と空気および燃焼ガスの混合過程をもって火炎の特性の推定を行なうことも可能である。このため，主に次の三つに分類できる<sup>2)</sup>。すなわち，i) 乱流噴流の相似則に基づく方法。ii) 統計的に炉内を良く混合された領域とプラグ流領域に分割した簡単なモデルにより，熱伝達量の総量などを算出する方法。iii) 炉内の現象に対応する一連の質量，運動量，エネルギーの偏微（積）分方程式に対応する境界条件および二，三の補助方程式とともに解く方法。これらの方法は各々長所，短所を併せ持っており，対象とする火炎や燃焼装置および要求される物理量とその精度などにより使い分けられている。しかし，これらの方法はいずれもほぼ確立はしているが，適応できる火炎や燃焼装置の簡囲が狭く，また，具体的ないくつかの特性値などをさらに測定し取り込まなければ有効な利用を行ない得ない状態にある。

したがって，本研究ではこれらの背景のもとに，火炎の有効な利用方法についての検討を行なうとともに，火炎の特性の推定方法の拡充，発展のための資料の提供および検討を行なうことにする。

まず本報では，火炎およびそれを利用する火炎の熱伝達特性の予測に必要な，拡散火炎およびそれを取りまく燃焼ガスの放射吸収（減衰）係数を実験用立型円筒火炉および燃焼風洞を用い測定したのでその結果を報告する。

#### 主 な 記 号

$d$ : 空気供給口直径	m	$T_g$ : ガス温度	°K
$G_{fu}$ : 燃料流量	kg/h	$V_{air}$ : 入口空気流速	m/s
$L_{cc}$ : 燃焼室の長さ	m	$V_{fu}$ : 入口燃料流速	m/s
$L_f$ : 火炎の長さ	m	$z$ : 軸（鉛直）方向	
$l$ : 放射吸収係数 $\kappa$ の軌跡		$\alpha$ : 入口空気旋回角	rad
$l\kappa$ : $\kappa = 0.4$ 1/m の軌跡		$\epsilon_g$ : 放射率	
$q_R$ : 放射受熱量（火炉の場合）	kcal/m <sup>2</sup> h	$\kappa$ : 放射吸収係数	1/m
$q_R^*$ : 放射受熱量（風洞の場合）	kcal/m <sup>2</sup> h	$\lambda$ : 空気過剰係数	
$r$ : 半径方向		$\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数	kcal/m <sup>2</sup> s°K <sup>4</sup>
$r_0$ : 燃焼室半径	m		

## 2. 火炎の放射吸収（減衰）係数について

火炎の放射吸収係数の値は、予混合火炎などの不輝炎の場合あるいは輝炎であってもその輝度が低い場合には小さく、これに伴い火炎内の熱伝達構造に占める放射熱伝達量の割合も低い。しかし、これらの火炎も含め空間を隔てた燃焼器の側壁へ伝達される熱は放射によるものが主であり、その熱量を推定する場合には、火炎および燃焼ガスの放射吸収係数の値は不可欠な特性値となる。本報で取扱う放射吸収係数および平均放射率は燃焼器内の浮遊炭素粒子や噴霧油滴の散乱の影響を受けた値であり、狭義の放射吸収係数の値を示しているわけではなく、むしろ放射減衰係数と表現される値である。しかし、実際の火炎およびそれを内包する火炉燃焼室の熱伝達の数値解析では、放射吸収係数と放射散乱係数を分離し用いる長所は、火炎などが灰色体近似を行ない得ない特殊な場合以外にはない。したがって、本報では吸収係数と散乱係数の和、すなわち減衰係数を放射吸収係数とする広義の定義に従い用いる。

火炎の熱伝達特性の理論解析（予測）における放射吸収係数の取扱い方法はおもに次の二通りに分類される。すなわち、i) 炉内において放射吸収係数を一定<sup>3)</sup>ないしは火炎と燃焼ガスに對しおのおの異なる一定の値<sup>4)</sup>を与え解析する方法。ii) 局所的な放射吸収係数の値（すなわち分布）を用い解析する方法。なお、これらの方法は前述の火炎の特性の推定方法の分類に関連している。前者の放射吸収係数の取扱い方は主流に直角方向の分布を考慮しておらず、一般にこの方向での温度変化およびガス組成の変化は大きく、それに伴い放射吸収係数の変化も大きいことが予想されるため、壁面熱負荷分布などの詳しい推定を行なうには適してはいない。これに対し、後者の方法はこの欠点を克服できる。しかし、火炎を含む炉内の放射吸収係数の分布は、局所的な放射性媒体の分圧から算出する<sup>5)</sup>ことが可能ではあるが、工業的に最も広く用いられている輝炎では H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>などのガス放射とともに炭素粒子すなわち煤からの固体放射の量が多く、煤の発生、成長過程の解明が十分行なわれてきているとは言難い現在、不輝炎など特殊な火炎の例を除き、放射吸収係数の分布を炉内ガスの成分の分布から算出するのは無理なようである。（逆に火炎の放射特性から煤の分布を推定して行くことは可能である。）したがって、現在の所、炉内の燃焼・熱伝達特性の数値解析においては放射吸収係数の分布を物理的入力とせざるを得ない。

したがって、本報では上述の物理的入力とする放射吸収係数の分布を既報<sup>6)</sup>による実験方法により求め示すとともに検討を行なう。ここで示す放射吸収係数は軸対称の二次元的な温度分布、濃度および流れの分布をもつ火炎および燃焼ガスに対する値（分布）であり、横置火炉、直方体火炉などにおける値ではない。しかし、工業的に利用されている火炎の最も基本的

な形態は軸対称同軸流火炎であり、本報の結果から非軸対称火炎についての分布も推定される。なお、任意の形状を有する放射性媒体の吸収係数の測定方法は既に報告<sup>7)</sup>してある。

なお、従来、火炎および燃焼ガスに対する放射吸収係数は、主流方向に対し直角方向の平均放射率<sup>8, 9, 10, 11, 12)</sup>として測定されており、代表的な平均放射率の測定方法には、i) 光高温計と放射温度計を併用する方法 ii) Schmidt 法 iii) Traversing 法があるが、これらの方法を既報<sup>6, 7)</sup>に準じた使い方をすると軸対称媒体および任意形状の媒体の放射吸収係数の分布を求めることができそうであることおよび非接触のより優れた測定方法が開発できる可能性のあることを付記しておく。また、主流方向および主流に直角方向の放射率を測定した例としては微粉炭燃焼の場合について1931年 Rosin<sup>13)</sup>により報告された例はあるが測定方法に不明な点が多い。

### 3. 火炉内の乱流拡散火炎の放射吸収係数分布

#### 3.1 実験装置および実験条件

装置全体図を図1に、火炉の寸法を図2に示す。火炉は立型円筒形であり、内径400mm、高さ400mmの同寸法のブロックを積み重ねることにより燃焼室の長さ  $L_{cc}$  を変えることができる。本実験では400mm、800mm、1200mmの三段階に分け測定を行なった。また、各プロ

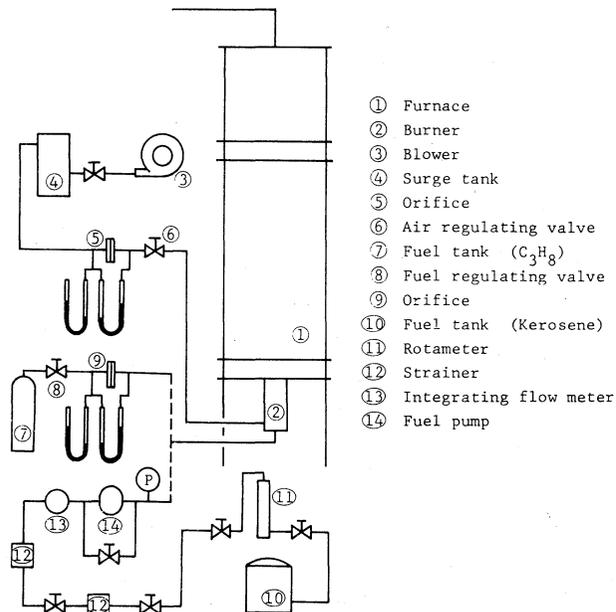


図1 立型円筒火炉の装置全体図

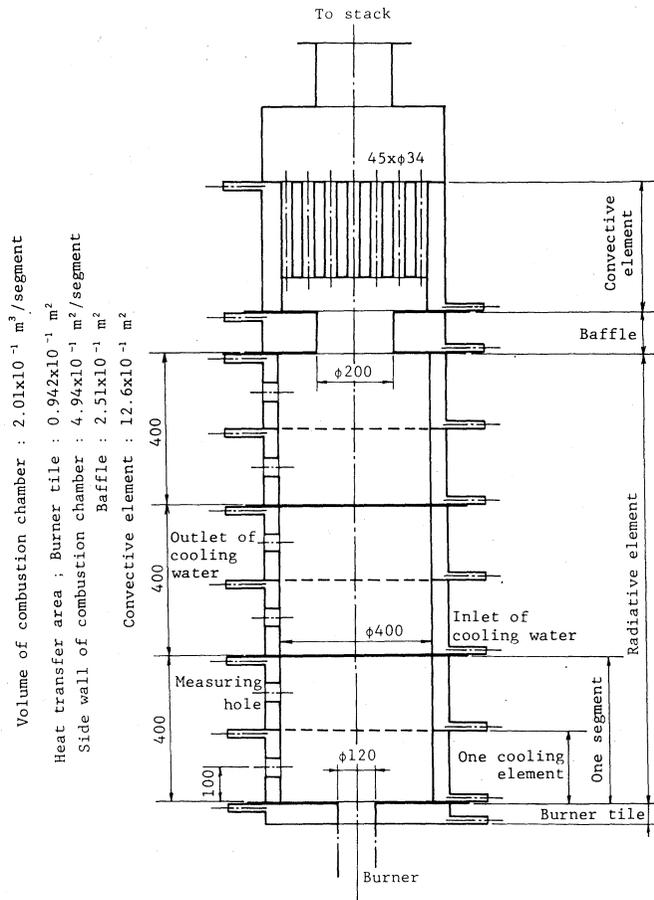


図2 火炉本体

ックは二重管構造で、その間に冷却水を流し炉壁の温度を調整できるように各ブロックを2つの冷却水系統に分割してある。なお、炉内の水蒸気が炉内壁で凝縮することを防ぐため、冷却水の一部を循環させ、水冷壁入口温度を約75°C、出口温度を約85°Cに保っており、火炉内壁は黒色耐熱塗料を塗布し、放射に対し、ほぼ黒体壁としている。また、火炉の上部には内径35mm、長さ250mmの鋼管45本を配し、煙管群を構成し、排ガスの炉内に及ぼす放射の影響を軽減している。

燃焼用空気は遠心送風機からサージタンク、空気導管を通り、オリフィスを用い流量を測定した後、図3(a)に示すレジスタから炉内へ供給した。炉内へ流入する空気の流れはレジスタにとり付けた内径d=60mm、85mmのリングにより設定し、空気旋回角 $\alpha$ は同図(b)に示す角度45°、60°の旋回翼を用い形成させ、0°の場合には旋回翼を用いなかった。

燃料にはプロパンガスないしは灯油を用い、図1に示すおのおの独立した系統を用い、プロパンガスは圧力調節弁により、灯油はギアポンプの吐出圧調節弁により流量を調節し、おのおの

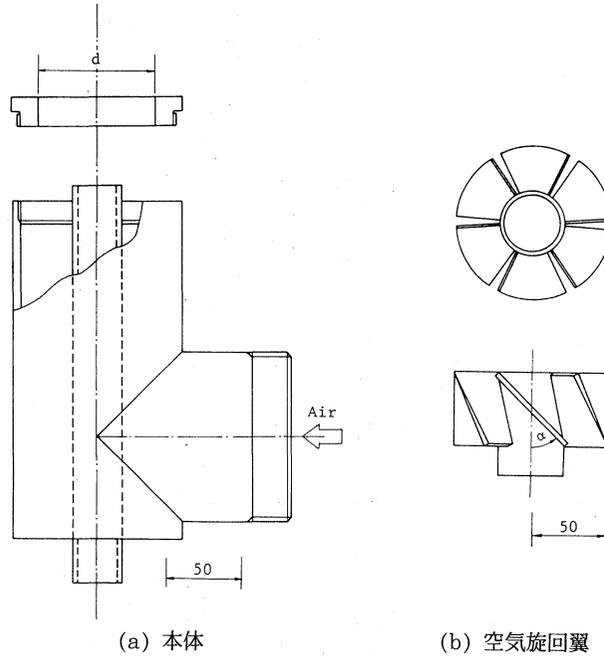


図3 エアレジスター

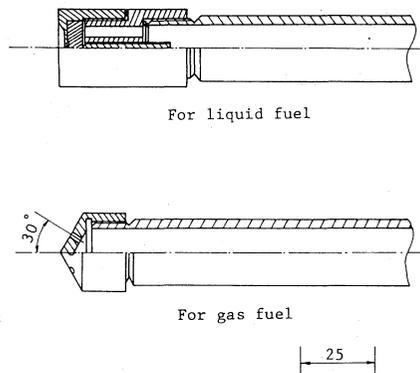


図4 バーナ

オリフィス，ロータメータによりその流量を測定した後，バーナを通し炉内へ供給した。図4にバーナを示す。プロパンガス用バーナは噴射角 $60^\circ$ で2.6mmの噴射口が6個設けられている。灯油用バーナは圧力噴霧式で噴孔径0.25, 0.40, 0.60mmのものを用い，いずれも噴霧角は約 $45^\circ$ である。炉内からの放射熱量を測定する放射計および視野を設定するのに用いた絞り筒を図5に示す。放射計は銅-コンスタンチン熱電推を感熱部に持つ全波長型である。放射受熱量と起電力の関係を求める校正時および測定利用時には，放射計の空孔および絞り管内の水蒸気を排出するため，常時 $N_2$ ガスを流した。なお，本報の測定範囲では放射計の平均電圧感度はほぼ一定の値を示した。

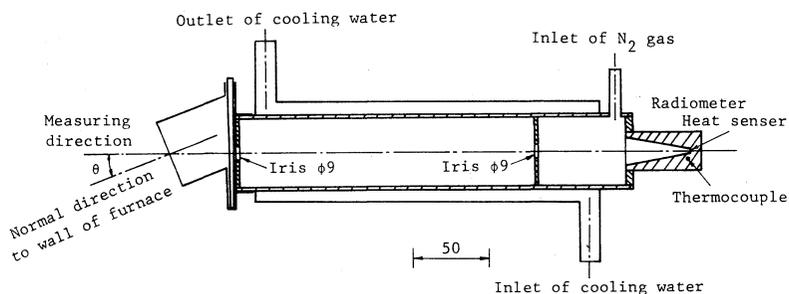


図5 放射計および絞り筒

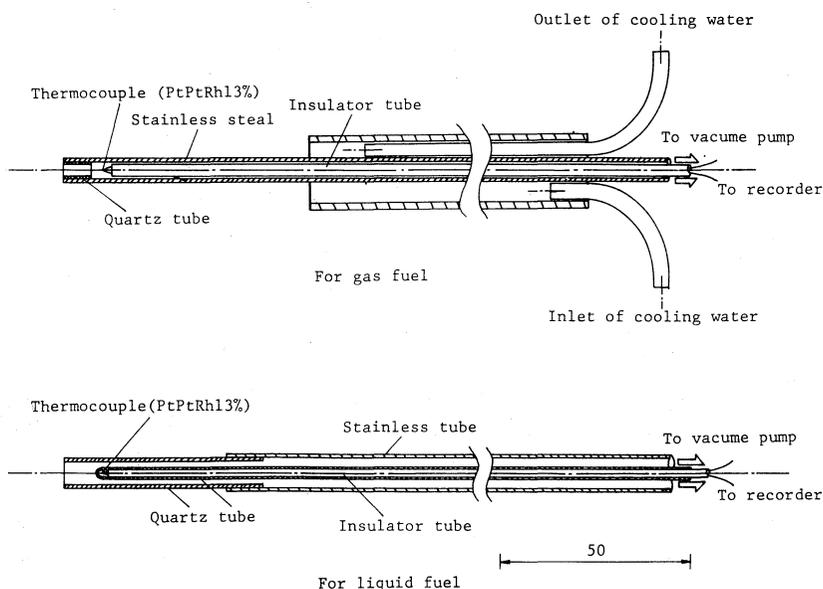


図6 吸引温度計

火炎および燃焼ガスの温度は図6に示す Pt-PtRh (13%) を用いた吸引温度計を用い行なった。プロパンガス用の吸引温度計は吸引速度を上げるため入口を石英管を用い絞っている。火炉内最高温度部において、図6に示すガス用温度計で絞りを持たない場合と絞りを支える管を石英とした場合の測定値を比較すると吸引速度が同一であれば両者にほとんど有意な差異は認められず、また、図6に示す状態と絞りの石英管をはずした場合との測定結果では前者の方が同一吸引流量時における指示温度においても最高指示温度においても高い値を示した。

火炉の二次元性の確認のため、通常の測定方向に対向する測定窓からも測定した。図7は最高温度を含む半径方向の測定例である。低温部では若干の差異を示すが、全般的にほぼ同一の温度を示す。また、壁からみた方位角 $\theta$ 方向については放射受熱量を通常の測定方向と逆向きにも測定を行ってみたが、両者にほとんど有意な差異は認められず、火炎の二次元性はほぼ満足されているものと考えられる。

実験条件を表1に示す。プロパンガス、灯油いずれの場合も燃焼室熱発生率を一定とし、プ

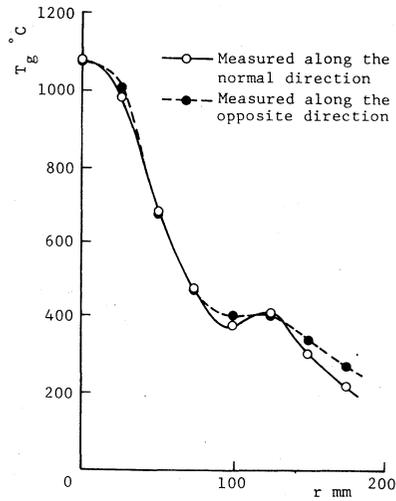
図7 温度  $T_g$  の対称性

表1 実験条件

(a) プロパンガスの燃焼実験時

Experimental Number	Fuel Flow Rate	Excess Air Ratio	Diameter of Air Port	Inlet Air Velocity	Length of Combustion Chamber	Heat Generating Rate
	kg/h	$\lambda$	d mm	$V_{air}$ m/s	Lcc mm	kcal/m <sup>3</sup> h
R101	1.8	1.2	60	4.20	1200	$1.32 \times 10^5$
R102	1.8	1.1	60	3.85	1200	$1.32 \times 10^5$
R103	1.8	1.05	60	3.68	1200	$1.32 \times 10^5$
R104	1.8	1.1	85	1.55	1200	$1.32 \times 10^5$
R105	2.4	1.1	60	5.13	1600	$1.32 \times 10^5$
R106	1.2	1.1	60	2.57	800	$1.32 \times 10^5$

(b) 灯油の燃焼実験時

Experimental Number	Fuel Flow Rate	Excess Air Ratio	Diameter of Air Port	Inlet Air Velocity	Swirl Angle	Length of Combustion Chamber	Diameter of Burner
	kg/h	$\lambda$	d mm	$V_{air}$ m/s	$\alpha$ deg	Lcc mm	mm
R201	1.8	1.1	60	3.63	0	1200	0.4
R202	1.8	1.2	60	3.96	0	1200	0.4
R203	1.8	1.3	60	4.29	0	1200	0.4
R204	1.8	1.2	60	3.96	45	1200	0.4
R205	1.8	1.2	60	3.96	60	1200	0.4
R206	2.4	1.2	60	5.28	0	1600	0.6
R207	1.2	1.2	60	2.64	0	800	1.0

表2 燃料の組成

(a) プロパンガス

	$C_3H_8$	$CH_2(C_2H_4)$	$CHCH_3(C_3H_6)$	$i-C_4H_{10}$	$n-C_4H_{10}$	etc
v/v %	94.0	0.1	1.0	1.0	1.0	2.9

(b) 灯油

	C	H	etc
m/m %	86.0	13.8	0.2

ロパンガスの場合、空気過剰係数 (R 101, 102, 103), 入口空気速度 (R 102, R 104), 燃焼室の長さ (R 102, R 105, R 106) をパラメータとし、灯油の場合、空気過剰係数 (R 201, R 202, R 203), 空気旋回角度 (R 202, R 204, R 205), 燃焼室の長さ (R 202, R 206, R 207) をパラメータとした。燃料の組成を表2に示す。

### 3.2 測定結果および考察

**3.2.1 温度と放射受熱量の測定結果** プロパンガス燃焼時および灯油燃焼時における炉内ガス温度  $T_g$  および放射受熱量  $q_R$  の分布をおのおの図8, 図9に示す。放射受熱量  $q_R$  (正味の値) の分布は既報<sup>3)</sup>の図2に示す放射受熱量測定方向  $\theta_i$  に対応する半径  $r_i$ , すなわち放射計の測定方向の軸と同一平面の火炉の中心からそれへの垂線の長さを用い示してある。

燃焼条件、燃料の種類によって温度はかなり異なった分布を示す。壁温は炉内ガス温度分布から放物線による外挿を用い求めた。確認のためいくつかの例につき壁温を測定したが両者は比較的良好一致を示した。また、放射受熱量は測定方向の方位角  $\theta_i$  を  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  に変化させ測定した。これ以上の方位角での測定は測定窓および放射計の幾何学的関係により行ない得なかったのて上記測定値から外挿した。一般に中心軸上で放射受熱量は高い値を示すが、灯油燃焼時の R 202, R 204, R 205 にみられるように必ずしもその限りではない。

なお、これらの温度、放射受熱量は流れが乱流であるため、図示した値を中心に最大で約15%程度の振れを示した。火炎は燃料の種類、設定条件によらずバーナ直後で不輝炎となるほかは輝炎となった。

**3.2.2 放射吸収係数** 温度および放射受熱量の分布から算出<sup>3)</sup>した放射吸収係数の分布を燃料の種類および各パラメータ毎にまとめ図10~図15に示す。図10~図12はプロパンガスを燃料とした場合の結果で、図10は空気過剰係数  $\lambda$ , 図11は入口空気速度  $V_{air}$ , 図12は燃焼室の長さ  $L_{cc}$  による変化を示す。図13~15は灯油を燃料とした場合の結果で、図13は空気過剰係数  $\lambda$ , 図14は入口空気旋回角  $\alpha$ , 図15は燃焼室の長さ  $L_{cc}$  による変化を示す図である。

これらの放射吸収係数の分布から、次の一般的な傾向を得る。すなわち、半径方向に温度勾

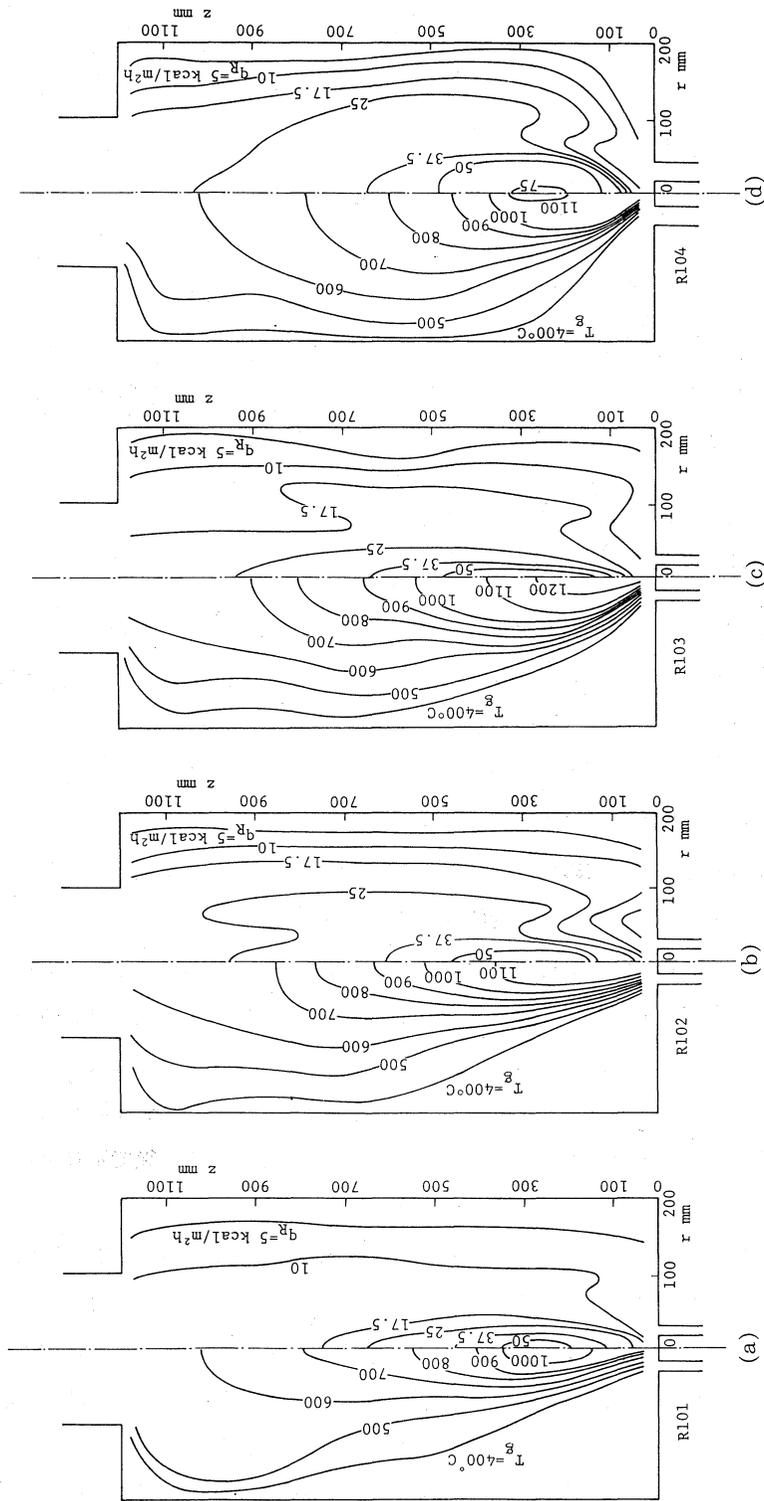


図8 炉内ガス温度  $T_g$  および放射受熱量  $q_R$  (プロパンガス燃焼時)

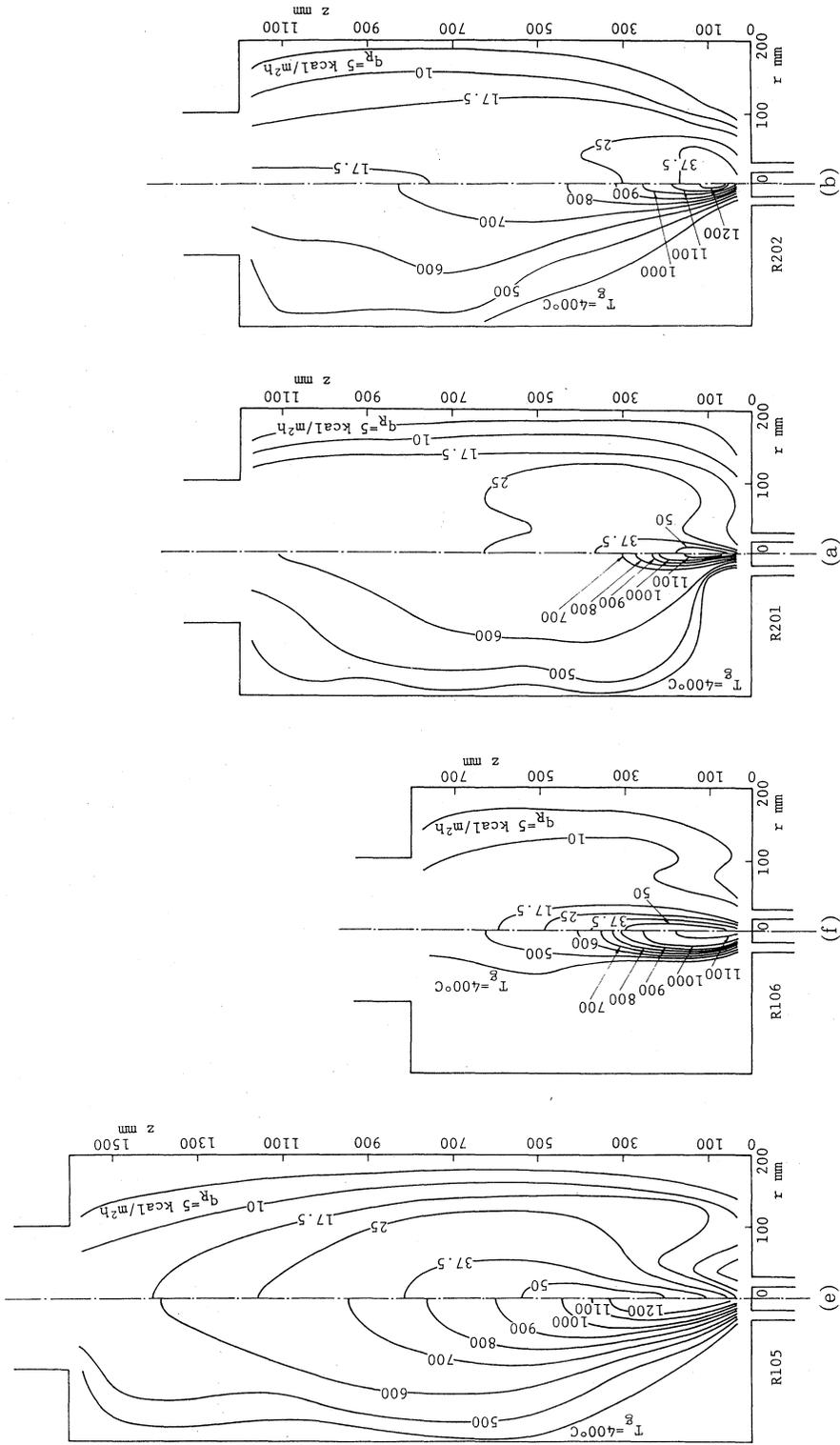


図9 炉内ガス温度  $T_g$  および放射受熱量  $q_R$  (灯油燃焼時)

図8 炉内ガス温度  $T_g$  および放射受熱量  $q_R$  (プロパンガス燃焼時)

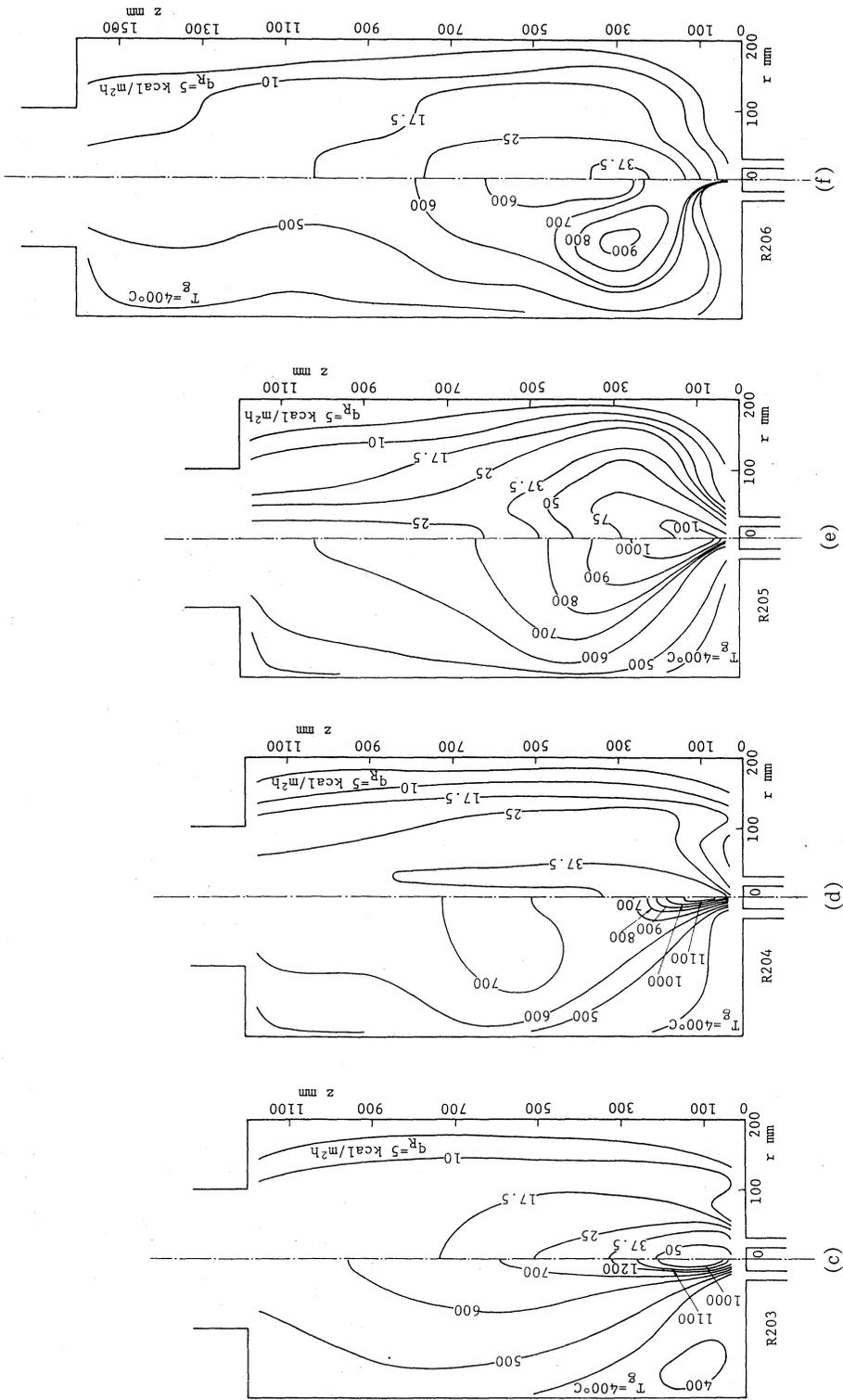


図9 炉内ガス温度  $T_g$  および放射受熱量  $q_R$  (灯油燃焼時)

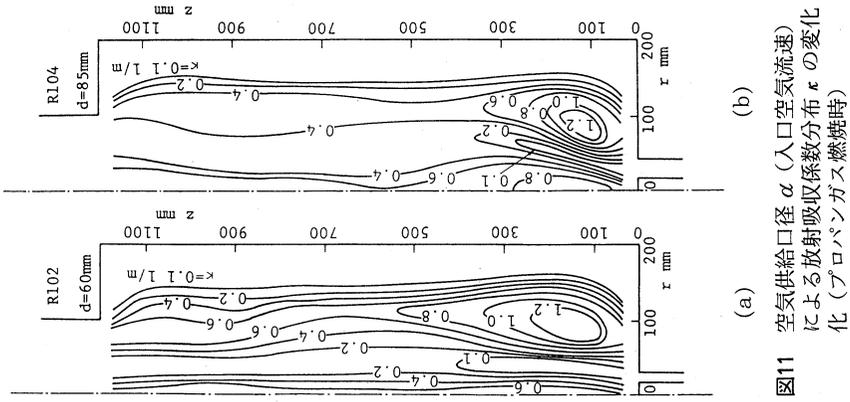


図11 空気供給口径  $\alpha$  (入口空気流速) による放射吸収係数分布  $\kappa$  の変化 (プロパンガス燃焼時)

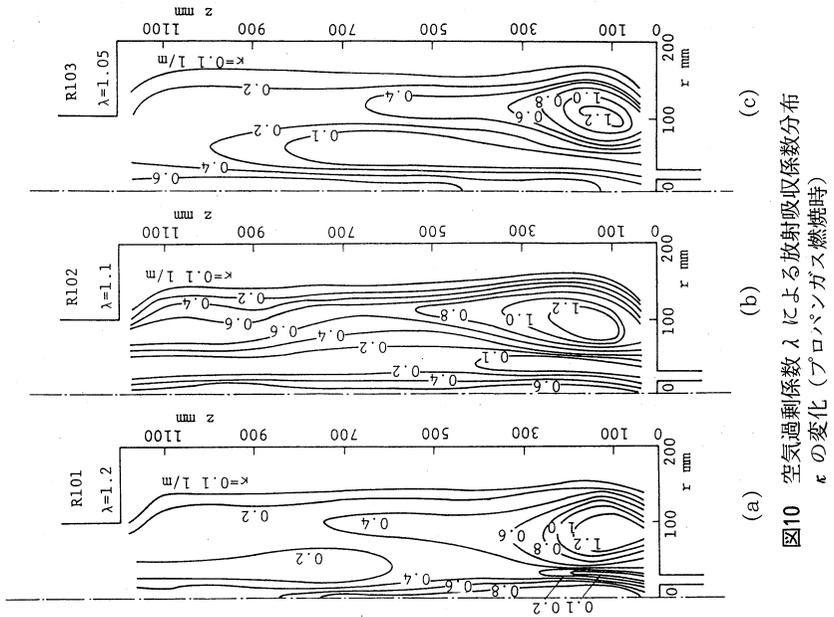


図10 空気過剰係数  $\lambda$  による放射吸収係数分布  $\kappa$  の変化 (プロパンガス燃焼時)

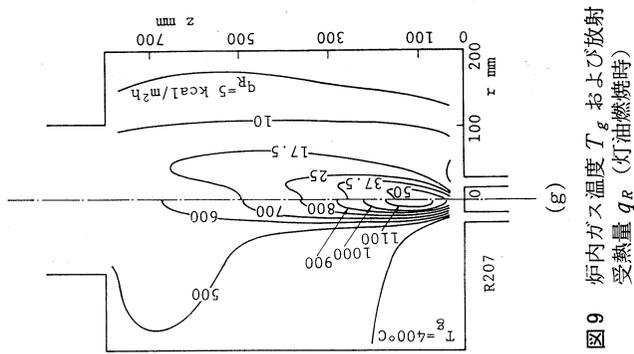


図9 炉内ガス温度  $T_g$  および放射受熱量  $q_R$  (灯油燃焼時)

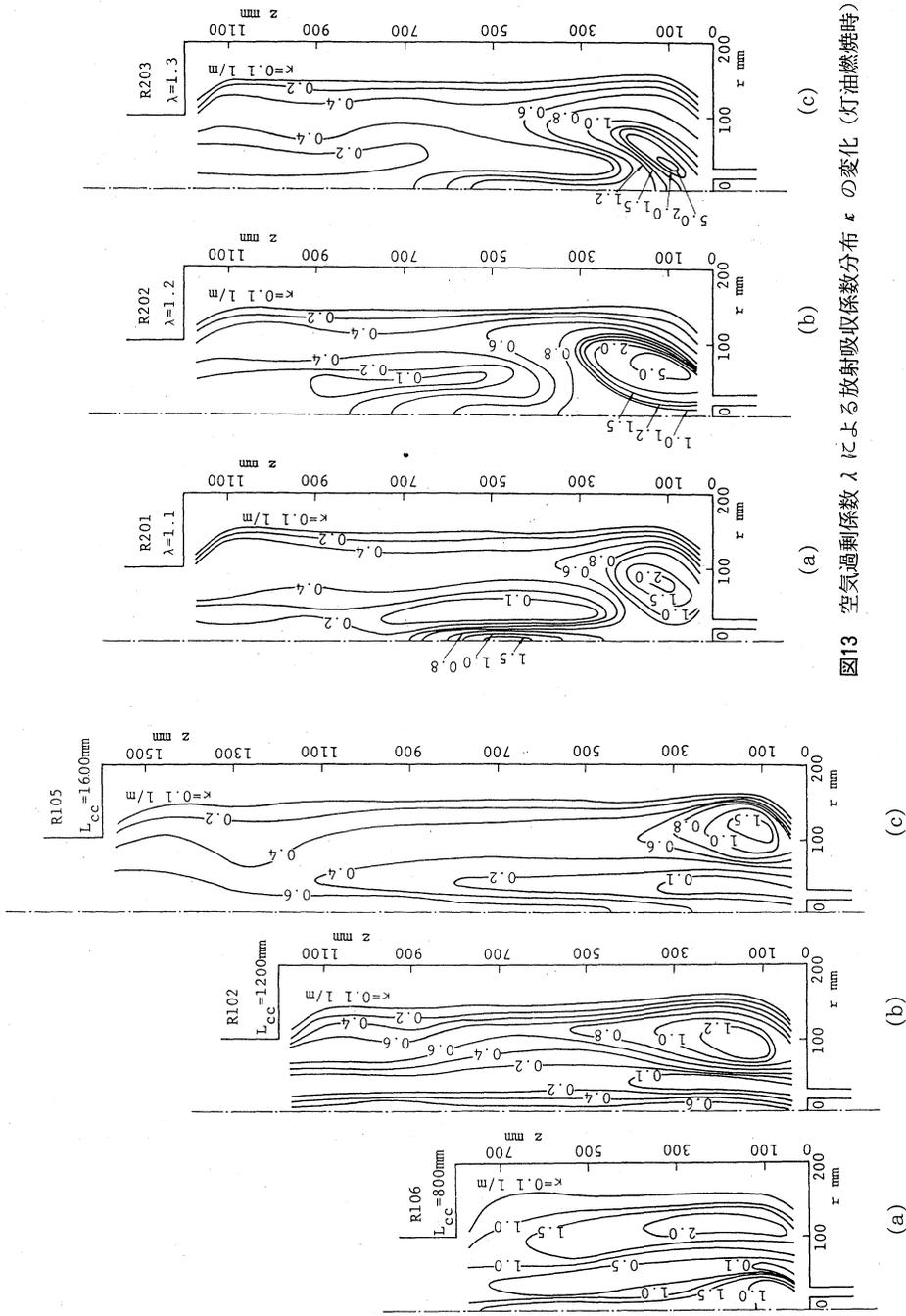


図13 空気過剰係数  $\lambda$  による放射吸収係数分布  $k$  の変化 (灯油燃焼時)

図12 燃焼室の長さ  $L_{cc}$  による放射吸収係数分布  $k$  の変化 (プロパンガス燃焼時)

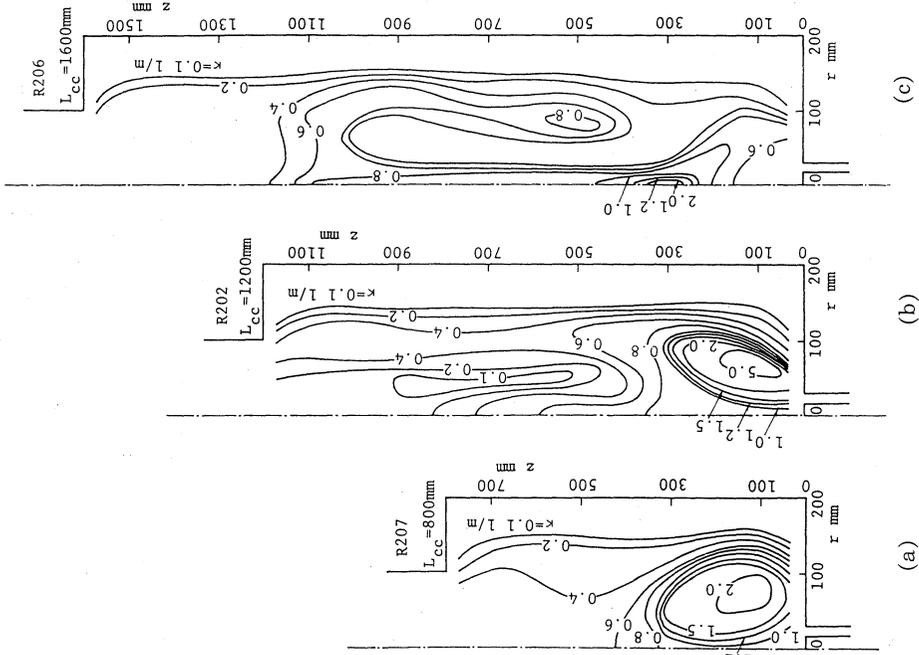


図14 入口空気旋回角  $\alpha$  による放射吸収係数分布  $k$  の変化 (灯油燃焼時)

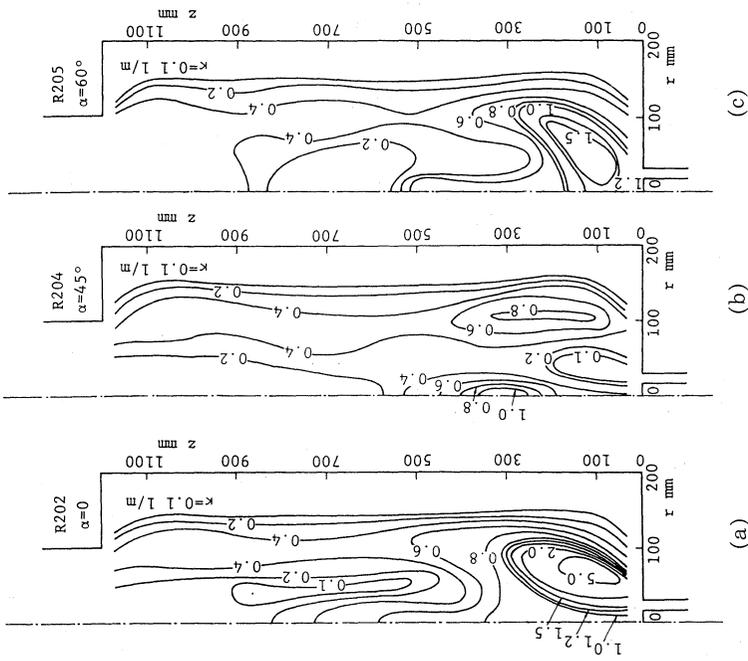


図15 燃焼室の長さ  $L_{cc}$  による放射吸収係数分布  $k$  の変化 (灯油燃焼時)

配の急なバーナに近い領域では放射吸収係数の変化もまた急である。この部分には火炎が存在し、炉内の温度分布に与える影響が大きいとため、火炎および炉内の熱伝達の解析においては、半径方向に平均的な放射吸収係数を用いることは実際の現象との差異を招く一因となる。プロパンガス燃焼時には中心軸上で放射吸収係数の値の極値を示すが、それは必ずしも最大値とはならない。燃料に与えられる運動量の大きな灯油を燃料とした場合には、光学的に中空炎の様相を呈し、燃焼反応の盛んな高温域で高い放射吸収係数の値を示すとは限らない。プロパンガスを燃料とした場合には設定条件によらずバーナタイル近傍の再循環領域に放射吸収係数の高い部分が存在している。この部分には火炎は存在せず、火炎の存在する領域とは空気流の放射吸収係数の値の低い領域を隔て存在していることから、炭素粒子すなわち煤を含む比較的低温度の燃焼ガスが再循環していることに起因しているものと考えられる。灯油燃焼時にはこの再循環流に起因していると思われる放射吸収係数の高い領域と燃焼反応による領域との判然とした区別は見出せない。

次式より算出した放射吸収係数  $\kappa$  の平均値  $\kappa_{mean}$  を用い、各パラメータの影響を調べ図16に示す。

$$\varepsilon_g(z) = 1 - \exp \int_0^{2r_0} -\kappa(z, r) dr \quad (1)$$

$$\kappa_{mean} = \left[ \int_0^{z_0} \left\{ -\log_e(1 - \varepsilon_g(z)) / 2r_0 \right\} dz \right] / \int_0^{z_0} dz \quad (2)$$

同図 (a) より、本実験範囲では同一空気過剰係数  $\lambda$  の場合、灯油の方が高い値を示し、両者の差異は空気過剰係数が高くなるにつれ大きくなる。また、プロパンガスの場合には  $\lambda = 1.1$ 、灯油の場合には  $\lambda = 1.2$  付近で吸収係数の平均値は最大となる。これは、高温の火炎および火

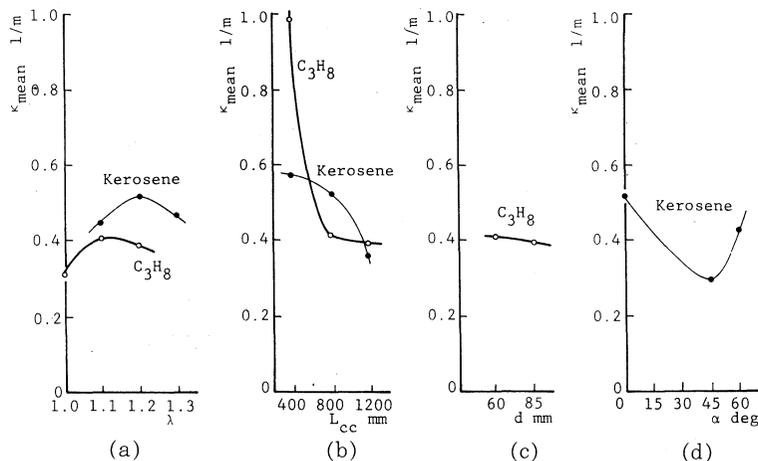


図16 炉内の放射吸収係数の平均値  $\kappa_{mean}$

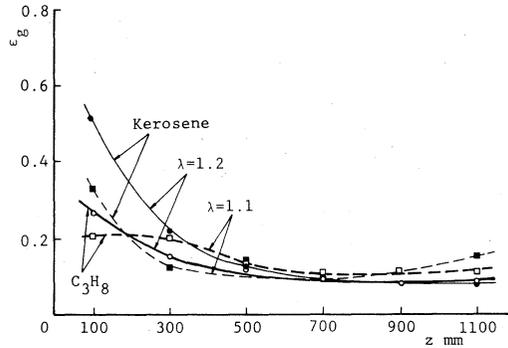


図17 半径方向の平均放射率  $\epsilon_g$

炎近傍の  $\kappa$  にのみ  $\kappa_{mean}$  は依存しているとは限らず、比較的低温である再循環領域による影響も大きいのである。同図 (b) から、燃料に与えられる運動量の小さいプロパンガス燃焼時の方が流れ方向、燃焼室の長さの影響を受けやすいことがわかる。プロパンガス燃焼時には炉内へ供給される空気の流れは、放射吸収係数の分布には影響を与えるが、その平均値にはあまり影響を与えないことが図 (c) よりわかる。また、図 (d) より灯油燃焼時の空気旋回角度の影響は大きく、旋回角  $45^\circ$  付近で、 $\kappa_{mean}$  は極小値を示すことがわかる。半径方向の平均放射率  $\epsilon_g(z)$  を  $\lambda=1.1, 1.2$  の場合につきプロパンガス燃焼時と灯油燃焼時とを比較し、図17に示す。灯油燃焼時の方がバーナ側で高い  $\epsilon_g(z)$  を示すが、 $z=500\text{mm}$  以降では燃料および空気過剰係数による差異はあまりないことがわかる。灯油燃焼時の  $\epsilon_g(z)$  は Laiquddin<sup>12)</sup> および Jmuiden<sup>11)</sup> より報告されている値よりも少し低い。これは火炉の半径、C/H の値が上記の報告におけるよりも小さいことに起因しているものと考えられる。プロパンガス燃焼時においては、上記報告とは若干異なりバーナタイル側の  $\epsilon_g(z)$  が高い。これは本実験範囲では、比較的低負荷燃焼に相当し、(燃焼室熱発生率  $= 1.32 \times 10^5 \text{ kcal/m}^3\text{h}$ ) 低温の再循環領域がバーナタイルの炉側壁側に形成されていることにより生じた現象であるものと考えられる。

#### 4. 燃焼風洞による層流拡散火炎の放射吸収係数の分布

##### 4.1 実験装置および実験条件

実験装置全体図を図18に示す。燃料にはプロパンガスを用い、燃焼用空気は押込み用遠心送風機により、サージタンク、オリフィスを経て風洞測定部へ供給され、燃焼ガスは誘引通風機により屋外へ排出される。燃焼風洞には空気の流れを整流するため、空気拡張部と縮流部を設け、また、火炎の可視化のため測定部上下の燃焼管には、内径  $95\text{mm}$  のパイレックスガラス管を使用している。放射受熱量および火炎、燃焼ガス等の測定を行なう測定部は二重管構造とし、

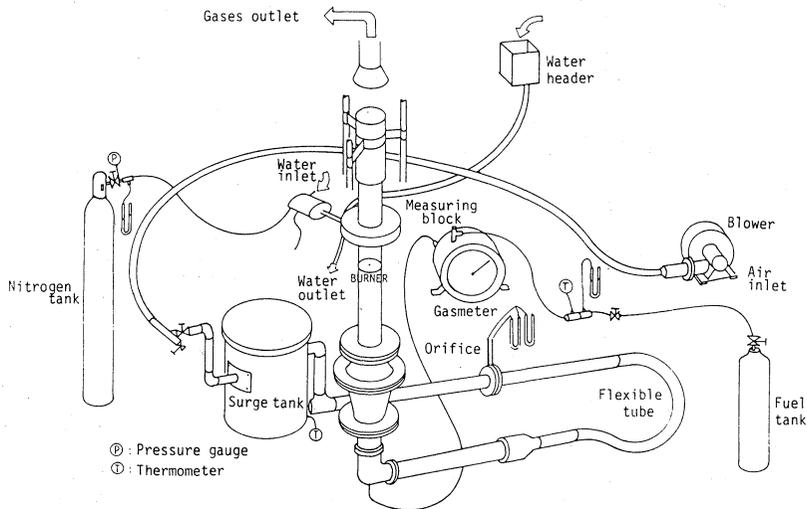


図18 燃焼風洞の装置全体図

表3 実験条件

Experimental Number	Inlet Air Velocity	Inlet Fuel Velocity	Excess Air Ratio	Fuel Flow Rate
	$V_{air}$ m/s	$V_{fu}$ m/s	$\lambda$	$G_{fu}$ kg/h
R301	11.5	22.5	4.0	0.05
R302	17.25	22.5	6.0	0.05
R303	5.75	22.5	2.0	0.05
R304	11.5	45.0	4.0	0.10
R305	11.5	11.26	4.0	0.025

その間に冷却水を流し、壁温を一定に保つようにした。またバーナは内径 6.5 mm、外径 34.0 mm の同軸管状としそのリップを水平とした。なお、他の実験装置についての詳細および測定方法は既報<sup>6)</sup>と同じである。

実験条件を表3に示す。入口空気平均流速  $V_{air}$  および燃料平均流速  $V_{fu}$  をパラメータとしそれに対応する空気過剰係数  $\lambda$  および燃料流量  $G_{fu}$  を併記する。実験番号 R301, R302, R303 は入口空気速度, R301, R304, R305 は燃料流速による違いを示す。

## 4.2 測定結果および考察

### 4.2.1 放射受熱量、温度および火炎形状の測定結果

放射受熱量  $q_R^{**}$  の測定結果を図19に、温度  $T_g$  および火炎形状を図20、図21（同図は放射吸収係数も併記してある）に示す。測定結果の一般的な特徴は既報<sup>6)</sup>に述べたのと同様であるが、入口空気速度ないしは燃料速度の高い R302 および R304 での火炎は火炎先端部で一部遷移範囲となっている。

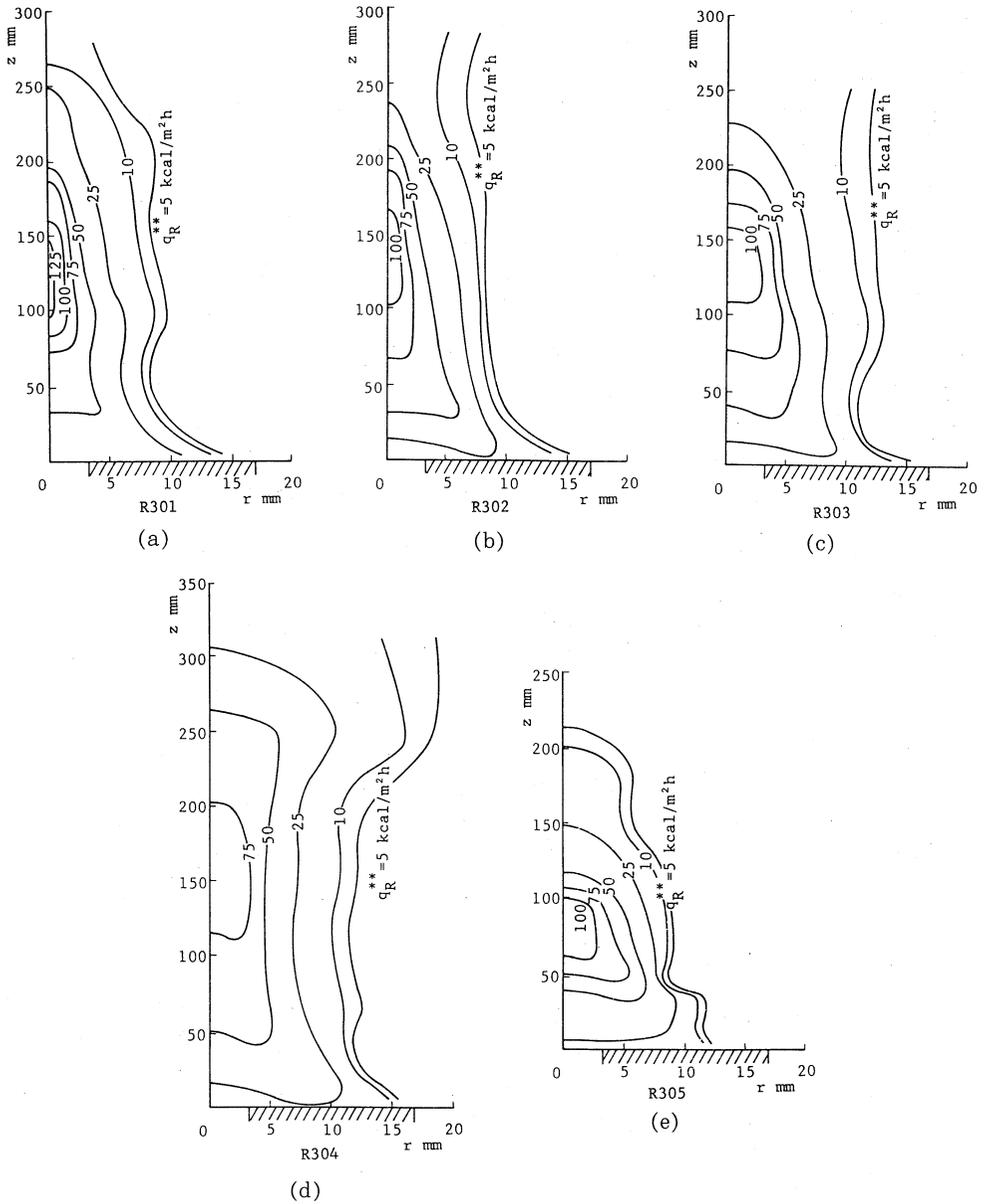


図19 放射受熱量  $q_R^{**}$

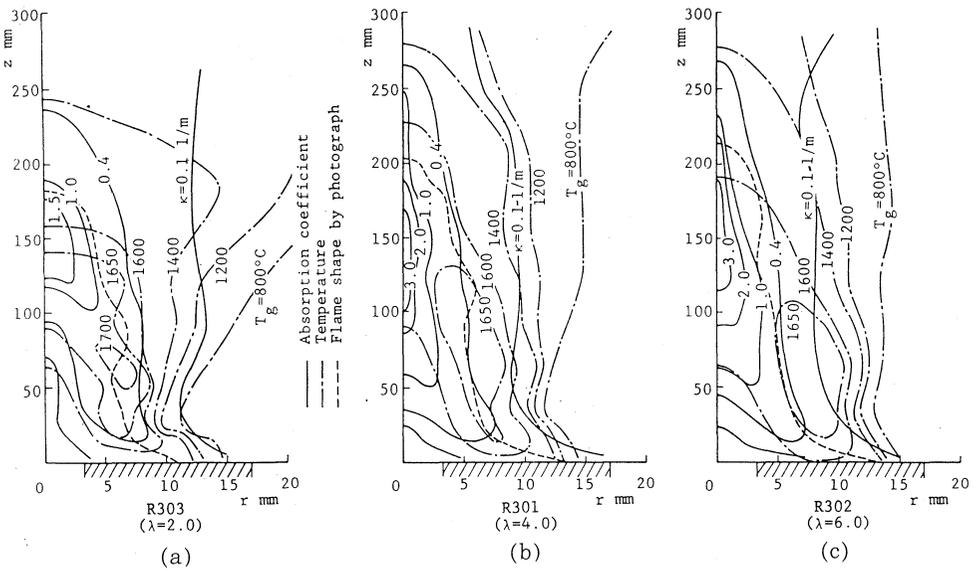


図20 空気過剰係数  $\lambda$  による放射吸収係数分布  $\kappa$  の変化

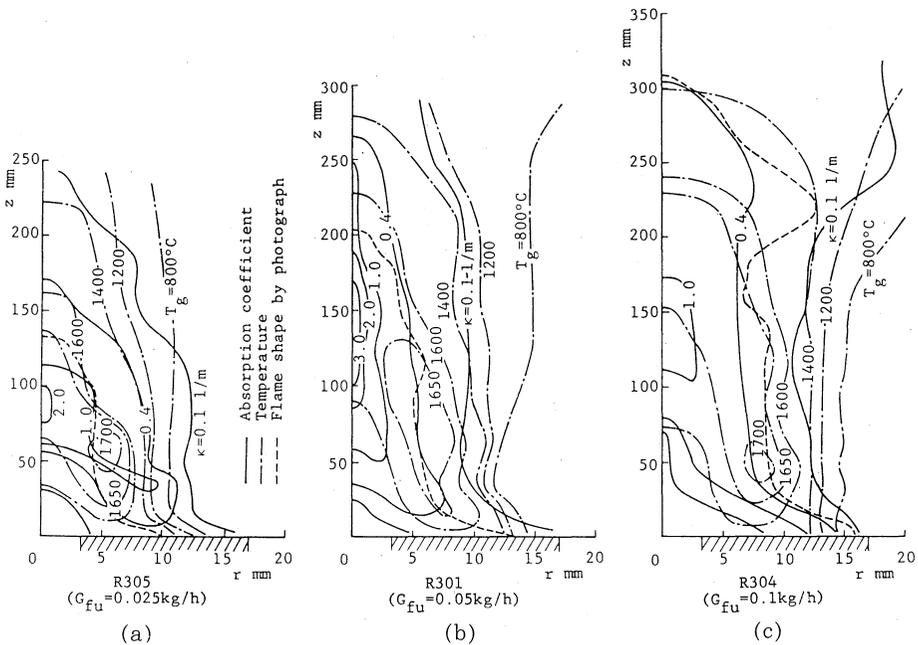
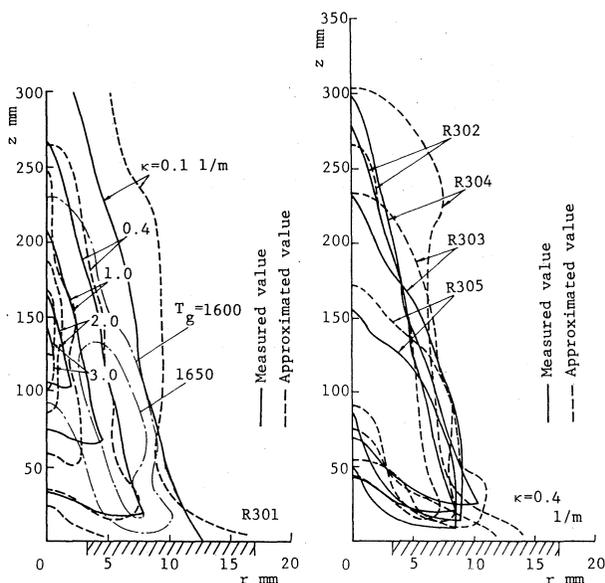


図21 燃料流量  $G_{fu}$  による放射吸収係数分布  $\kappa$  の変化

**4.2.2 放射吸収係数** 放射吸収係数の分布を図21および図22（同図には温度，火炎形状を併記してある）におおの空気過剰係数  $\lambda$ ，燃料流量  $G_{fu}$  による変化を示す。放射吸収係数の分布の検討を行なうには，火炎の総合的な検討を行なうことが必要であり，とくに煤の生成



(a) R301 の場合に対して (b)  $\kappa=0.4$  1/m に対して  
 図22 放射吸収係数  $\kappa$  の近似値

過程，すなわち空気と燃料の混合過程を詳細に分析することが重要であるがここでは現象に関する定性的な検討に止める。微小体積  $\Delta V$  から射出される放射熱  $\Delta q_{Rad}$  は次式と表わされる。

$$\Delta q_{Rad} = 4 \kappa \sigma T_g^4 \Delta V \tag{3}$$

このため，放射熱伝達量の計算では放射吸収係数の高い領域とともに，温度の高い領域での計算精度が全体の結果に大きな影響を与えるため，これらの条件が重なる領域での検討は重要である。

放射吸収係数の分布の全体的な形状は写真撮影 (Nikon FII, F 1.2, 絞り 5.6, 速度 1/8, ASA 100) による火炎外周の形状に似ており，その値は  $\kappa = 0.4$  1/m 程度である。これは煤による固体放射 (波長依存性が低い) が支配的であることを示し，単波長での放射受熱量の測定の可能性を示している。しかし，放射吸収係数の分布と温度との相関は顕著ではない。一般的に，放射吸収係数の高い領域は，バーナに近い領域では中心軸から離れたバーナリム上方に，火炎の長さの約 1/3 程度より上方では中心軸上に表われている。また，層流火炎は入口の空気，燃料流速が高くなるにつれ，軸方向に長く，半径方向に細くなるが，放射吸収係数の分布もそれに従っている。バーナの直後を見ると，入口空気流速が低くなるにつれ，また燃料流速が高くなるにつれ放射吸収係数の低い領域が広がっている。

**4.2.3 放射吸収係数分布の関数近似の試み** 本章で取扱った火炎の放射吸収係数の分布は次の四つの特徴を示している。すなわち，i) 火炎側外周部と放射吸収係数  $\kappa = 0.4$  1/m の等高線はほぼ一致する。ii) 中心軸上，バーナから火炎先端部の  $\kappa = 0.4$  1/m までの距離のほぼ中

央に最大の放射吸収係数を示す位置が存在する。iii) 火炎基部に放射吸収係数の低い領域が存在する。iv) 放射吸収係数の最大値を与える点から火炎外周部を見ると、その方向に放射吸収係数はほぼ指数関数的に減少する。これらの特徴を用い、また、系を支配するパラメータとして実験条件表3に併記する燃料流量  $G_{fu}$  および燃料と空気の比すなわち空気過剰係数  $\lambda$  を用い関数近似を行なう。なお、火炎の空力学的特性を表わす時に用いられる入口流速および速度比を用いても本報と同様の近似式で表わされる。

まず、火炎の外周の形状を関数近似する。本章で取扱ったような比較的肉厚のバーナリム(バーナリップ)の上に再循環領域を形成する) からなる火炎の形状、寸法を推定する試みがなされていないため、主として実験結果によることとする。自由噴流層流火炎の長さ  $L_f$  は Hottel と Hawthorne による式<sup>14)</sup> を用い  $\lambda$  による補正を付け加えると次式となる。

$$L_f = (270 \log_{10} Q \theta_f + 1400)(0.04\lambda + 0.84) \quad (4)$$

ここで、 $Q$  は体積流量を示し、 $\theta_f$  は次式による時間因子である。

$$\theta_f = 1 / \{4 \log_e [(1 + a_t) / (a_t - a_o)]\}$$

$a_o$  はノズル流体中の燃料ガスに対する一次空気のモル比、 $a_t$  は量論比である。

なお、本実験で用いた火炎は制約火炎なので Thring-Newby 数<sup>2)</sup> による補正も試みたが、有意な補正量とはならなかった。火炎外周部の形状は火炎の長さの中心軸上の点から火炎外周部までの長さ  $l_F$  を測ると、その曲線は楕円形と近似され次式と表わされる。ここで、 $\theta_F$  は  $l_F$  の原点からみた中心軸と  $l_F$  方向のなす角度で、 $0^\circ$  から約  $145^\circ$  までの値をとる。

$$l_F = \left[ 1 - \left\{ 0.35 \sqrt{1 - \left( \frac{\theta_F / 145 - 0.5}{0.5} \right)^2} + 0.5 \right\} \right] \times L_f \quad (5)$$

火炎側外周部と放射吸収係数  $\kappa = 0.4$  1/m は近い場所に位置するが、火炎先端部および火炎下部外周部では若干の差異を示すため、その補正  $\delta_L$  および  $\delta_W$  を施し、その軌跡を  $l_\kappa$  とする。

$$l_\kappa = l_F \times (1 + \delta_L - \theta_F \times \delta_L / 145) \times \{1 + (\delta_W - 1) \times \sin \theta_F\} \quad 0 \leq \theta_F \leq 145^\circ \quad (6)$$

ここで、 $\delta_L = 0.4 \times (-0.0375\lambda^2 + 0.325\lambda + 0.3) \times (-480G_{fu}^2 + 52G_{fu} - 0.4)$

$$\delta_W = (0.1\lambda^2 - \lambda + 3.4) \times (800G_{fu}^2 - 124G_{fu} + 5.2)$$

一方、バーナ直上での  $\kappa = 0.4$  1/m の軌跡は次と表わされる。

$$l_\kappa = (L_P / 2 \times \cos \theta'_F + 0.5 - L_P / 2) \times L_P \quad (7)$$

ここで、 $L_P = 0.15 \times (0.275\lambda^2 - 2.65\lambda + 7.2) \times (933G_{fu}^2 - 130G_{fu} + 5.17)$

$$\theta'_F = 180 / 35 \times (\theta_F - 145) \quad 145 < \theta_F \leq 180^\circ$$

以上、式(6)および式(7)より  $\kappa = 0.4$  1/m の軌跡  $l_\kappa$  を得たが、 $l_\kappa$  をはさみ内側および外側に対し  $\kappa$  の分布を与える。中心軸上、バーナから火炎先端部の  $\kappa = 0.4$  1/m までの距離の中央に  $\kappa$  の最大値を与え、 $\kappa$  の基準値 0.4 で除し  $\kappa_o$  とすると次と表わされる。

$$\kappa_0 = 3.5 \times (-0.0625\lambda^2 + 0.625\lambda - 0.5) \times (-373G_{fu}^2 + 44G_{fu} - 0.27)/0.4 \quad (8)$$

$\kappa_0$  を示す点から  $l\kappa$  までの距離を  $l\kappa_0$  とすると同一方向の任意の距離  $l$  に対し実験値の傾向から次の  $\kappa$  を得る。

$$\kappa = \kappa_0^{(1-l/l\kappa_0)} \quad (9)$$

なお、逆に式 (9) から  $\kappa$  の値をとる  $l$  は次となる。

$$l = l\kappa_0 \left( 1 - \frac{\log_e \kappa - \log_e 0.4}{\log_e \kappa_0} \right) \quad (10)$$

実験番号 R301 を例にとり、以上の近似式による値と実測値とを比較し図22 (a) に示す。両者はとくに高温領域において近似の良いことがわかる。また、各実験値と  $\kappa=0.4$  1/m の計算値との比較を図22 (b) に示す。火炎先端部の近似は、層流火炎の場合には比較的良いが遷移域にある R304 では差異を示している。他の領域ではかなり良い近似式となっていることがわかる。

## 5. 結 言

火炎の燃焼・熱伝達特性を解明し、その特性の推定および火炎の有効な利用方法について検討を行なう研究の一環として、本報では、火炎およびそれをとりまく燃焼ガスの放射吸収係数を実験用立型円筒火炉および燃焼風洞を用い測定し示した。その結果次のことが明らかとなった。

全般的な結果

- 1) 半径方向に温度勾配が急なバーナに近い領域では、放射吸収係数の変化もまた急である。この領域は高温の火炎となるため、火炎、火炉の熱伝達の解析ではその考慮を払う必要がある。
- 2) 燃料の種類、燃焼条件により放射吸収係数の分布はかなり変化する。

火炉での結果 (乱流拡散火炎)

- 1) プロパンガス燃焼では、中心軸上で放射吸収係数は極値を示すが、それは必ずしも最大値とは限らず、比較的低温の再循環領域にも放射吸収係数の高い領域が存在する。また、プロパンガス燃焼では、吸収係数の分布はとくに燃焼室の長さによる影響を強く受ける。
- 2) 灯油燃焼時には、光学的に中空炎の様相を呈し、必ずしも燃焼反応が盛んな高温域で高い放射吸収係数の値を示すとは限らない。また、灯油燃焼時にはプロパンガス燃焼時におけるような再循環領域での現象と燃焼反応域での現象の判然とした区別はなく、放射吸収係数の分布はとくに入口空気旋回角および燃焼室の長さによる影響を強く受ける。

燃焼風洞での結果 (層流拡散火炎)

- 1) 火炎外周部と放射吸収係数が  $\kappa=0.4 \text{ 1/m}$  の等高線はほぼ一致し、火炎基部に放射吸収係数の値の低い領域が存在する。
- 2) 中心軸上、バーナから火炎先端部の  $\kappa=0.4 \text{ 1/m}$  までの距離のほぼ中央に最大の吸収係数を示す位置が存在し、その点から火炎外周部を見ると、その方向に放射吸収係数はほぼ指数関数的に減少する。

(昭和58年5月20日 受理)

#### 文 献

- 1) 媚山・ほか2名, 室工大研究報告(理工編), 10-4 (昭57-11), 527.
- 2) Beer, J. M., 工業加熱, 12-6 (1975-6), 389.
- 3) Hottel, H. C., et al., 化学工学, 26-9 (1962), 962.
- 4) 谷口・媚山, 機械の研究, 25-5 (1973-5), 19.
- 5) Buetters, K. A., et al., 15th Symp. on Comb., (1974), 1.
- 6) 媚山, 室工大研究報告(理工編), 10-2 (昭55-11), 283.
- 7) Kobiyama, M., Preceeding of the 2nd Japan Symp. on Thermophysical Properties, (1981), 171.
- 8) Hubbard, G. L. and Tien, C. L., Trans. ASME Ser. C, 100 (1978-5), 235.
- 9) 佐藤・ほか3名, 日本機械学会論文集, 34-234 (昭41-2), 319.
- 10) Sato, T. and Kunitomo, T., Mem, Fac. Engng, Kyoto Univ., 27-1 (1966-1), 75.
- 11) Flame Radiation Research Joint Committee, J. Inst. Fuel, 26-153 (1953-10), 189.
- 12) Laiquddin, S. S., BWK, 14-1 (1962-1), 7.
- 13) Rosin, P., Die Wärme, 54-3 (1931), 42.
- 14) Hottel, H. C. and Hawthorne, W. R., 3rd Symp. on Comb., (1949), 254.