

火炎の熱発生率分布の測定

その他（別言語等） のタイトル	The Measurement of the Heat Release Rate of the Flame
著者	媚山 政良, 水野 忠治, 石田 博一
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	10
号	4
ページ	527-543
発行年	1982-11-30
URL	http://hdl.handle.net/10258/3735

火炎の熱発生率分布の測定

媚山政良・水野忠治・石田博一*

The Measurement of the Heat Release Rate of the Flame

Masayoshi Kobiyama, Chuji Mizuno
and Hirokazu Ishida

Abstract

In this paper, the authors proposed a measuring method of the heat release rate of a flame being in a steady state to clear the mutual relationship between the combustion process and the heat transfer process. The measuring method used here is the one in which the distribution of the heat release rate is obtained by substituting the measured profiles of temperature, velocity, radiative absorption coefficient and concentration of chemical species of the flame and combusted gases into the energy equation. The experiment was performed with the coaxial diffusion flame made of the air-propane gas jet changing the excess air ratio and the fuel flow rate to investigate the difference of the heat release rate. Experimental results show the typical characteristic of the diffusion flame, that is, that there are not only exothermic reacting zone but also endothermic one and that the higher exothermic reacting zone exists near the flame front.

1. ま え が き

炭化水素系燃料の燃焼による火炎は、古くから広い範囲に渡り利用されてきている。しかし、火炎は化学反応、熱伝達および流れ、拡散の相互作用により形成され、その現象は複雑である。このため、火炎の特性の推定は主として経験により行なわれてきたが、ボイラーやガスタービンの単位容量の増大の試み、稀薄燃料や廃棄物の新しい燃焼技術の開発、大気汚染の発生源となっている燃焼設備の燃焼技術での改善要求および燃焼器材も含めた資源の節約などの社会的要請から、バーナおよび燃焼室の幾何学性、燃料の物理的、化学的性状などの設計条件から、火炎の形状、寸法、温度や受熱面への熱伝達量およびその分布を詳しく推測する方法の開発が

* 大学院工学研究科（機械工学専攻）

必要となってきた。このため、火炎の現象に対応する運動量、質量、エネルギー保存の偏微分方程式を境界条件およびいくつかの補助方程式とともに解く方法が開発されてきている¹⁾。しかし、入力となる物理、化学上の資料が不足である問題を内在している。すなわち、火炎およびそれを取りまく雰囲気の流れ特性が単純な幾何学性以外に対しては明らかとされていないこと、放射熱伝達速度を直接示す放射吸収係数の分布がまだ十分には報告されていないことおよび前二者にもかかわるが、火炎内での局所的な熱発生率を与える計算式が満足な解を与えていないことが²⁾、上述の方法の広範囲な火炎への適応を妨げている。

本報告では、同軸流定常拡散火炎を用い、火炎および燃焼ガスの温度、速度、放射吸収係数および成分ガス濃度の各分布を実験により測定し、これらの諸量をエネルギー方程式に代入することにより熱発生率分布を求めることを試み、プロパンガス-空気から成る火炎についての測定結果を示し、また、入口条件の違いによる熱発生率分布の差異についての比較検討を行なった。

記号

C_{pi} : 化学種 i の定圧比熱	kcal/kg $^{\circ}$ C	u : 鉛直方向速度	m/s
E_g : 火炎および燃焼ガスの放射能	kcal/m 2 ·s	v : 半径方向速度	m/s
E_w : 壁の放射能	kcal/m 2 ·s	z : 鉛直方向	
G_a : 空気流量	kg/h	z_0 : 対象とする流体の鉛直方向の長さ	m
G_{fu} : 燃料流量	kg/h	γ : 比重	kg/m 3
\bar{h} : よどみエンタルピー	kcal/kg	η : 方位角方向	rad
L_0^* : 対象とする壁面の長さ	m	κ : 放射吸収係数	1/m
l : 微小要素間の距離	m	λ : 空気過剰係数	
p : 流体の圧力	kg/m 2	λ^* : 熱伝導率	kcal/m·s· $^{\circ}$ K
q_g : 熱伝導流束	kcal/m 2 ·s	μ : 粘性係数	kg·s/m 2
q_{in} : 熱発生率	kcal/m 3 ·s	ρ : 密度	kg·s 2 /m 4
R_i : 化学種 i の気体定数	kg·m/kg $^{\circ}$ K	σ : ステファン-ボルツマン定数	kcal/m 2 s 4 K 4
r : 半径方向		τ : せん断力	kg/m 2
r_0 : 対象とする流体の半径方向の長さ	m	ϕ : 微小要素と壁の法線のなす角	rad
T_g : 火炎および燃焼ガスの温度	$^{\circ}$ K		

2. 基礎方程式

2.1 基礎方程式

熱力学第一法則は、定常流体に対し着目する制御体積へのよどみエンタルピー流束の正味量が、

(2)

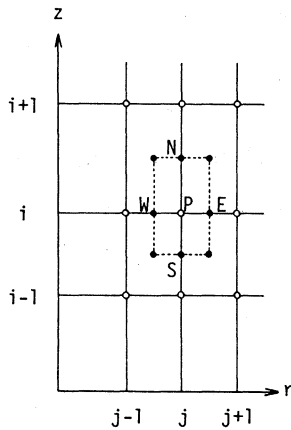


図1 座 標 系

制御体積からまわりに対する熱伝達の和に等しいということを規定している。これを表わす微積分方程式は、熱と運動量の流束を用いると図1に示す座標系に対し、次式として表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{u} \bar{h} + q_{gz} - \tau_{zz} u - \tau_{zr} v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \{ r(\rho v \bar{h} + q_{gr} - \tau_{rz} u - \tau_{rr} v) \} = q_{in} - \text{div}(\mathbf{q}_{Rg}^R) \quad (1)$$

ここで、式(1)中の諸量は次式で表わされる。

$$\rho = \frac{P}{(\sum_i m_i R_i) T_g} \quad (2)$$

$$\bar{h} = (\sum_i c_{pi} m_i) T_g + \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (3)$$

$$q_g = -\lambda^* \text{grad}(T_g) \quad (4)$$

$$\tau_{zz} = \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \text{div}(\mathbf{V}) \right] \quad (5)$$

$$\tau_{rr} = \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \text{div}(\mathbf{V}) \right] \quad (6)$$

$$\tau_{zr} = \tau_{rz} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (7)$$

$$\text{div}(\mathbf{V}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv) + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (8)$$

$$-\text{div}(\mathbf{q}_{Rg}^R) = -4\kappa E_g + \kappa \left[\int_0^{z_0} \int_0^{r_0} 4\kappa E_g \left\{ \int_0^{2\pi} e^{-\int_0^{l'} \kappa' dl'} \frac{d\eta}{4\pi l'^2} \right\} r dr dz \right. \\ \left. + \sum_{\text{all wall}} \int_0^{L_0} E_w \left\{ \int_0^{2\pi} e^{-\int_0^{l'} \kappa' dl'} \frac{\cos \phi d\eta}{\pi l'^2} \right\} r dz \right] \quad (9)$$

また、連続の式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\{r(\rho v)\} = 0 \quad (10)$$

なお、本報告で取扱う範囲内での予備実験および予備計算では、式(9)の右辺第1項は、式(1)の他の項と比較してかなり小さく、また、式(9)の右辺第2項は第1項よりも小さい値となるため、計算方法の複雑な第2項は、ここでは考慮しないこととする。

2.2 基礎方程式の差分近似

微分方程式の数値解析による解法は、微分方程式を差分方程式に近似し、その解を求めることに帰着させる場合が多い。本報では、連続の式(10)およびエネルギー方程式(1)に差分近似法を適用し、おのおの、半径方向速度 v および熱発生率 q_{in} について解くこととする。

差分近似の方法には、前進差分、後退差分および中間差分があるが、連続の式(10)より半径方向速度 v を求める場合、未知数 v の性質上、次に示す後退差分を用いた。また、エネルギー方程式(1)に火炎の諸量を代入し熱発生率 q_{in} を求める場合、測定点間の間隔が広い欠点を克服するため、次に示す中間差分を用いた。

(1) 後退差分

独立変数を z, r とし、任意の従属関数を $F(z, r)$ とする。このとき、図1に示す格子点を用いて $F(z, r)$ に後退差分を施すと次となる。

a. 1階の微係数: F_z, F_r

$$F_z: \frac{\partial F}{\partial z} \approx \left(\frac{\Delta F}{\Delta z} \right) = \left(\frac{F_i - F_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \right)_j \quad (11)$$

$$F_r: \frac{\partial F}{\partial r} \approx \left(\frac{\Delta F}{\Delta r} \right) = \left(\frac{F_j - F_{j-1}}{r_j - r_{j-1}} \right)_i \quad (12)$$

(2) 中間差分

独立変数を z, r とし、任意の従属関数を $F(z, r)$ とする。このとき、図1に示す格子点を用いて $F(z, r)$ に中間差分を施すと、1階、2階の微係数は次となる。

a. 1階の微係数: F_z

$$F_z: \frac{\partial F}{\partial z} \approx \left(\frac{\Delta F}{\Delta z} \right) = \left(\frac{F_N - F_S}{z_N - z_S} \right)_P = \left[\frac{\left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) - \left(\frac{F_i + F_{i-1}}{2} \right)}{\left(\frac{z_{i+1} + z_i}{2} \right) - \left(\frac{z_i + z_{i-1}}{2} \right)} \right]_j = \left(\frac{F_{i+1} - F_{i-1}}{z_{i+1} - z_{i-1}} \right)_j \quad (13)$$

b. 2階の微係数: F_{zz}

$$\begin{aligned}
 F_{zz} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial F}{\partial z} \right) \approx \frac{1}{\Delta z_P} \left[\left(\frac{\Delta F}{\Delta z} \right)_N - \left(\frac{\Delta F}{\Delta z} \right)_{S-P} \right] \\
 &= \frac{1}{\left(\frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2} \right)_j} \left[\left(\frac{F_{i+1} - F_i}{z_{i+1} - z_i} \right) - \left(\frac{F_i - F_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \right) \right]_j
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

c. 2 階の微係数: F_{rz}

$$\begin{aligned}
 F_{rz} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial z \partial r} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial F}{\partial r} \right) \approx \frac{1}{\Delta z_P} \left[\left(\frac{\Delta F}{\Delta r} \right)_N - \left(\frac{\Delta F}{\Delta r} \right)_{S-P} \right] \\
 &= \frac{1}{\Delta z_P} \left[\left\{ \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial r} \right)_{i+1} + \left(\frac{\partial F}{\partial r} \right)_i}{2} \right\} - \left\{ \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial r} \right)_i + \left(\frac{\partial F}{\partial r} \right)_{i-1}}{2} \right\} \right]_j \\
 &= \frac{1}{\Delta z_P} \left[\frac{\left(\frac{\partial F}{\partial r} \right)_{i+1} - \left(\frac{\partial F}{\partial r} \right)_{i-1}}{2} \right]_j \\
 &= \frac{1}{\left(\frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2} \right)_j} \left[\frac{\left(\frac{F_{i+1, j+1} - F_{i+1, j-1}}{r_{j+1} - r_{j-1}} \right) - \left(\frac{F_{i-1, j+1} - F_{i-1, j-1}}{r_{j+1} - r_{j-1}} \right)}{2} \right] \\
 &= \frac{(F_{i+1, j+1} - F_{i+1, j-1}) - (F_{i-1, j+1} - F_{i-1, j-1})}{(z_{i+1} - z_{i-1})(r_{j+1} - r_{j-1})}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

3. 実験装置および測定装置

3.1 実験装置

実験装置全体図を図 2 に示す。また、燃焼風洞を図 3 に、バーナ部とその近傍を図 4 に示す。

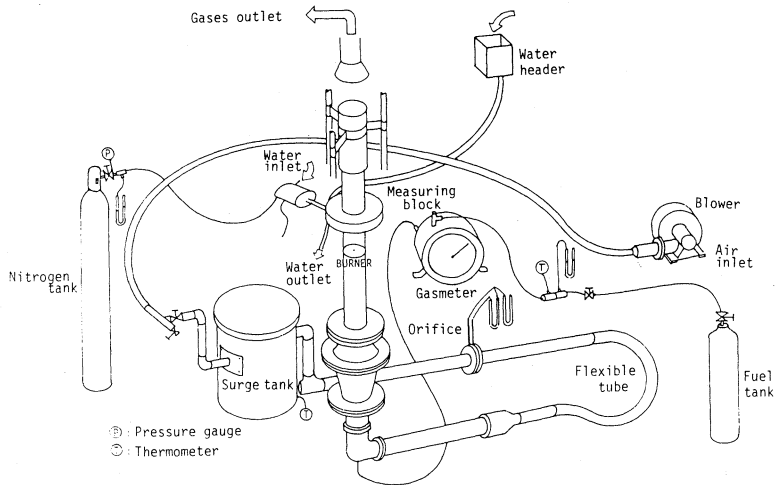


図 2 実験装置全体図

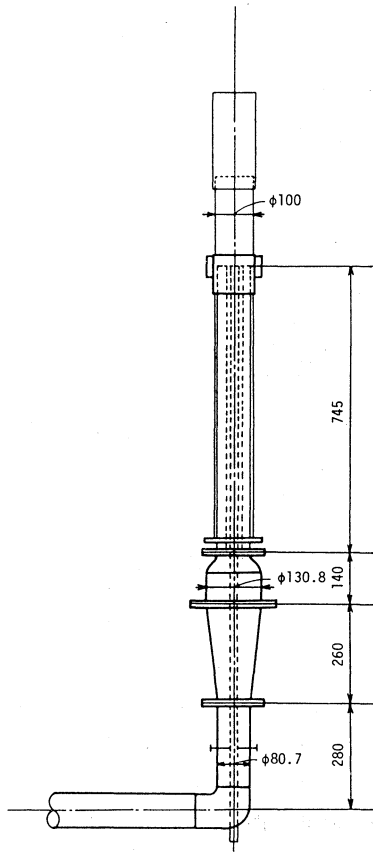


図3 燃焼風洞

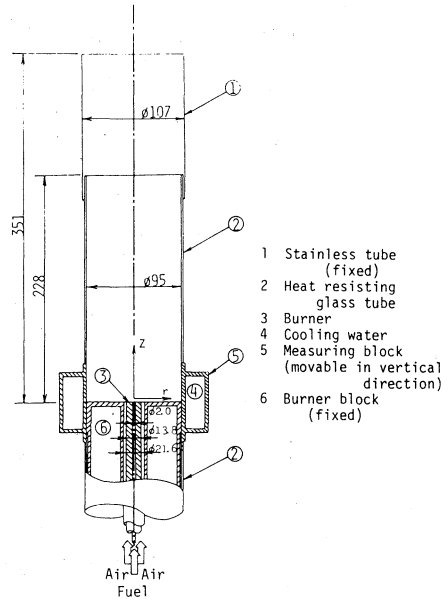


図4 バーナー部

燃料は、プロパンガス（市販 LPG，低位発熱量 10700 kcal/kg）を使用し、直径 2mm の直管から噴出する。空気は、内径 13.8 mm，外径 21.6 mm の同軸管を用い燃焼部へ供給し、バーナー上にプロパン-空気の同軸流定常拡散火炎を形成した。なお、空気系統は遠心送風機により押し込み通風を行ない、サージタンク、オリフィスを通り燃焼部へ供給し、また、燃焼ガスは誘引通風機により屋外に排出される。燃焼風洞には、空気の流れを整流するため、サージタンク、フレキシブルチューブのほか、空気拡張部および絞り部から成るベルエントランスを設けてある。火炎の可視化を目的として測定部上下の燃焼管は、耐熱ガラス管を用いた。測定ブロックは上下に移動できる構造としており、それに伴い、燃焼管の長さの変化による空力特性の変化を軽減するため、燃焼管上部にステンレス管を配置し、燃焼管の鉛直方向長さを一定に保っている。

3.2 測定装置

火炎および燃焼ガスの温度は、裸熱電対 (Pt-PtRh 13%) を用いて測定した。その際、熱電

対の感温部は周囲との放射および熱伝導による外乱を受けるため、必ずしも真の温度を示しているとはいえない。そのため、本実験では、0.1mm および 0.3mm の熱電対を用い、火炎および燃焼ガスの温度を測定し、熱電対感部の表面積比から、表面積が零すなわち直径が 0mm の点を外挿して真の温度とした。成分ガス濃度は、ガスクロマトグラフィー（モレキュラシーブ 5A, 60/80）を用いて測定した。鉛直方向速度は、ピトー管により測定した全圧および静圧の差圧と、温度および成分ガス濃度から求めた密度との関係から求めた。放射受熱量の測定は、銅-コンスタンタン熱電堆を用いた放射計を使用して行なった。なお、測定中、放射計内への燃焼ガスの流入を避けるため、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に外部を水冷却している。

なお、実験条件は、空気過剰係数 λ と燃料流量 G_{fu} をパラメータとして設定し、表 1 に示す。

表 1 実験条件

Experimental number	1	2	3	4	5	6	7
Excess air ratio λ	2	2	3	3	3	4	4
Fuel flow rate G_{fu} kg/h	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04

4. 実験結果

4.1 測定結果例

ここでは、代表として空気過剰係数 $\lambda=2$ 、燃料流量 $G_{fu}=0.04$ kg/h での測定結果を示す。鉛

λ : 2
 G_{fu} : 0.04 kg/h

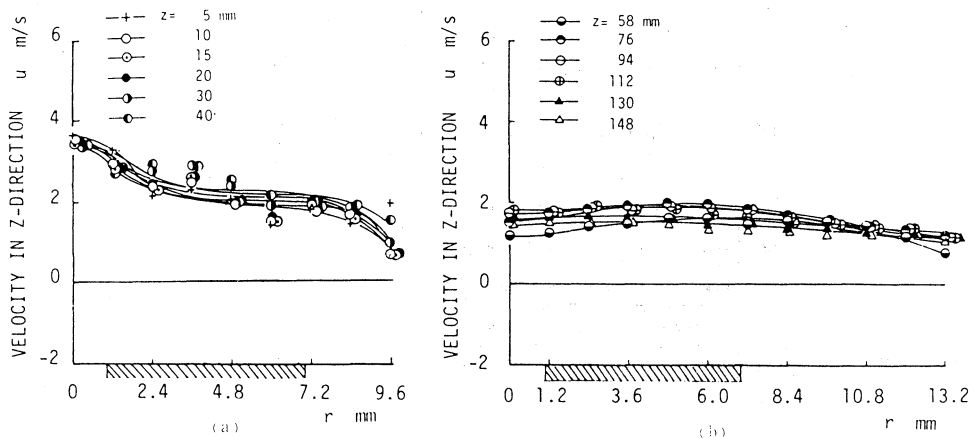


図 5 鉛直方向速度

直方向速度 u を図5, 酸素の質量分率 m_{O_2} を図6, 火炎および燃焼ガスの温度 T_g を等温線で表わした温度分布を図7, 火炎形状を図8に示す。また, 鉛直方向速度 u から連続の式により求めた半径方向速度 v を図9に示し, 放射受熱量と温度 T_g から求めた放射吸収係数 κ を図10に示す。

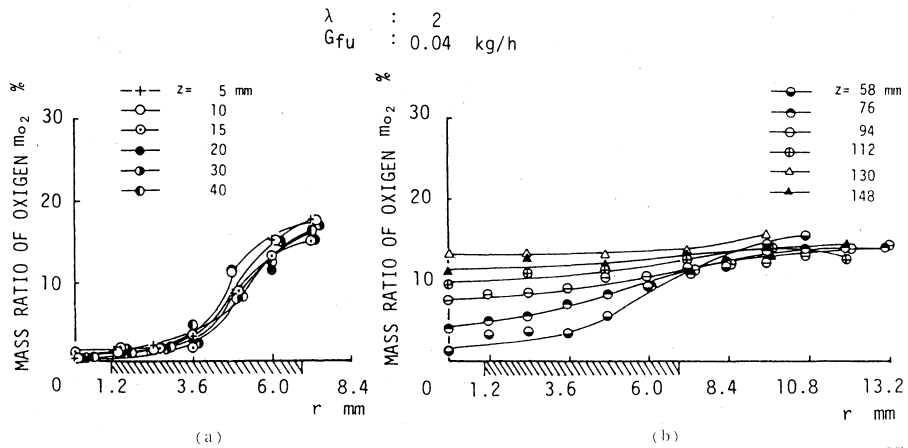


図6 酸素の質量分率

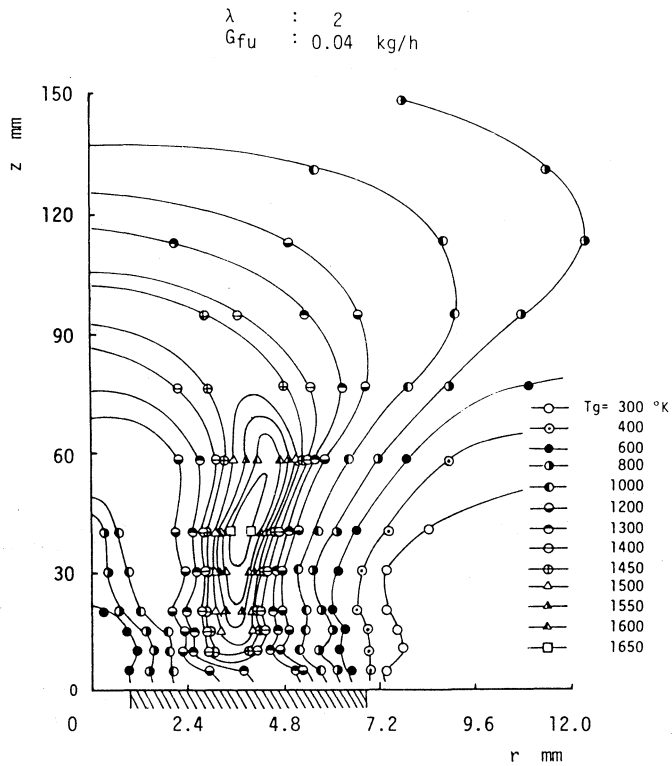


図7 温度分布

火炎の熱発生率分布の測定

λ : 2
 G_{fu} : 0.04 kg/h

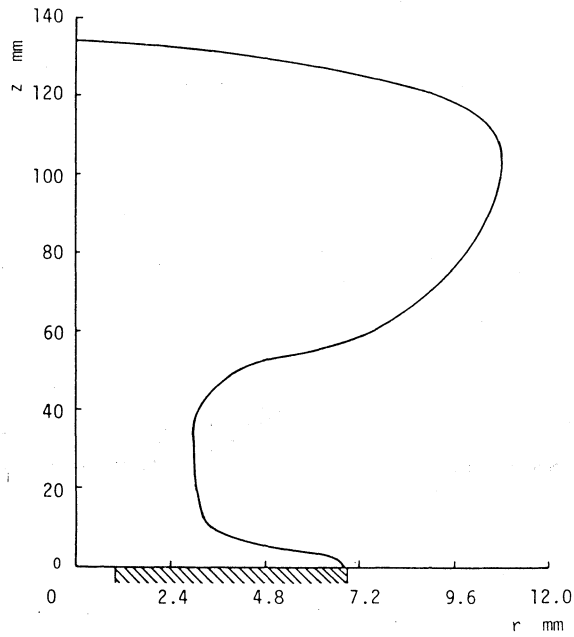


図8 火炎形状

λ : 2
 G_{fu} : 0.04 kg/h

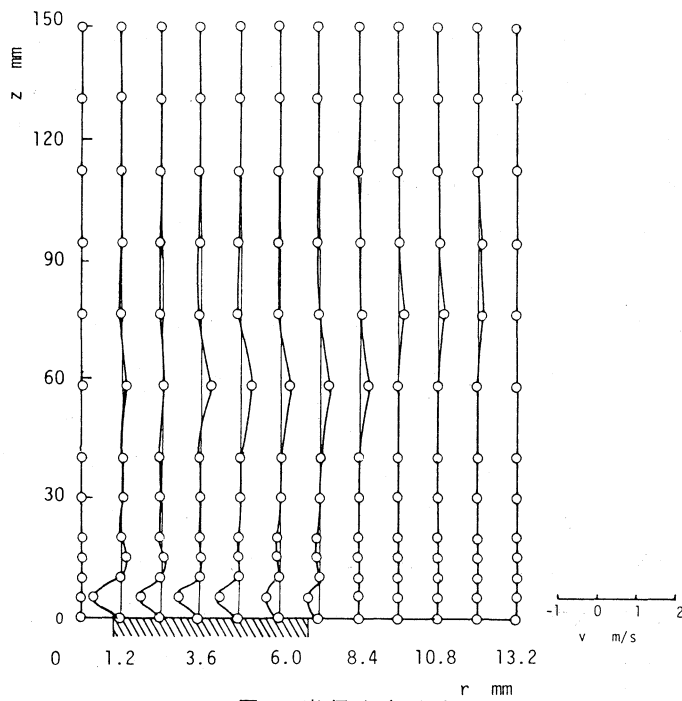


図9 半径方向速度

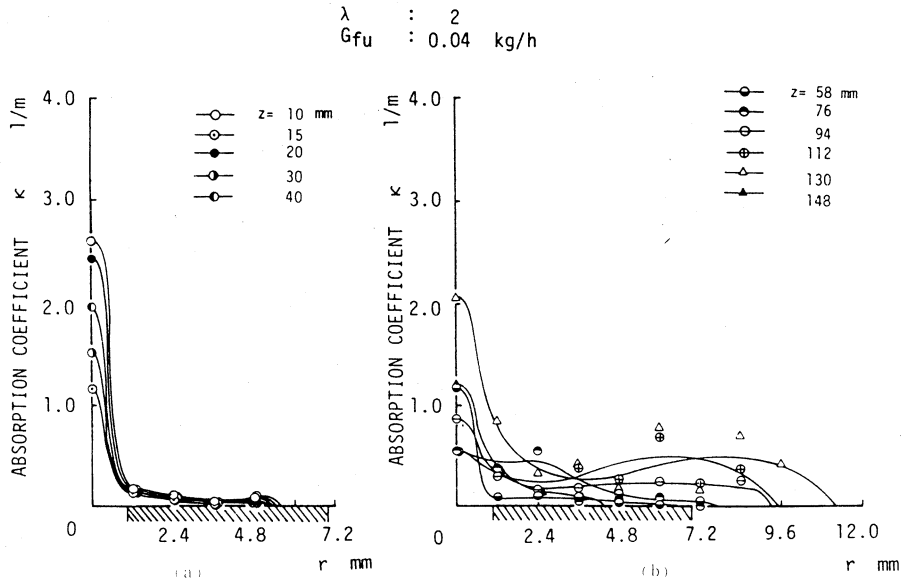


図10 放射吸収係数

4.2 実験結果とその検討

温度，速度，放射吸射吸収係数³⁾および成分ガス濃度をエネルギー方程式(1)に代入して熱発生率 q_{in} を算出した。 $\lambda=2$ ， $G_{fu}=0.04\text{ kg/h}$ の場合の結果を等熱発生率線で表わしたものを図11に示す。この図より，熱発生率分布は，吸熱域および発熱域から成り，火炎外周部が主反応帯となっており，拡散火炎の特徴を示していることがわかる。また，他の実験条件についての結果も同様の傾向を示す。また，各実験条件に対して，温度および熱発生率を等高線の形で表わしたものを図12に示す。これらの図より，各実験条件に対して，熱発生率分布が温度分布に類似していることがわかる。ここで，実験条件の差異による検討を行なうため，燃料流量 $G_{fu}=0.04\text{ kg/h}$ のとき，空気過剰係数 λ を $\lambda=2, 3, 4$ と変化させた場合の $z=20\text{ mm}$ における鉛直方向速度 u を図13に，酸素の質量分率 m_{O_2} を図14に示す。また，同様に火炎形状を図15に，熱発生率 $q_{in}=0$ の等熱発生率線を図16に示す。図13より，燃料流量一定において空気過剰係数が増すにつれて，主流とは逆方向の流れ，すなわち逆流が生じているのがわかる。次に，図14より，空気過剰係数が増すにつれて，火炎中心部の酸素の質量分率が高い値を示すことがわかる。これは，前述した逆流の影響により，火炎中心部への酸素の供給が促進されているためと考えられる。また，熱発生率 $q_{in}=0$ の等熱発生率線を示した図16より，半径 $r=0\sim 3\text{ mm}$ にみられる吸熱域が，空気過剰係数が増すにつれて，狭くなっているのがわかる。これは，空気過剰係数の増加により，火炎中心部への酸素の供給が促進され，燃焼が盛んになったためと考えられ，また，それに伴い火炎が短くなっているのが図15よりわかる。なお，熱

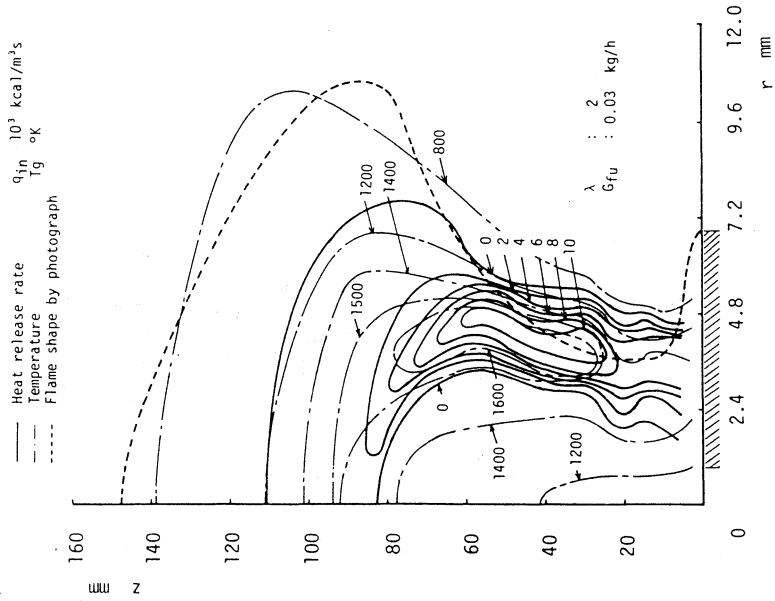


図 12 (a) 熱発生率, 温度および火炎形状

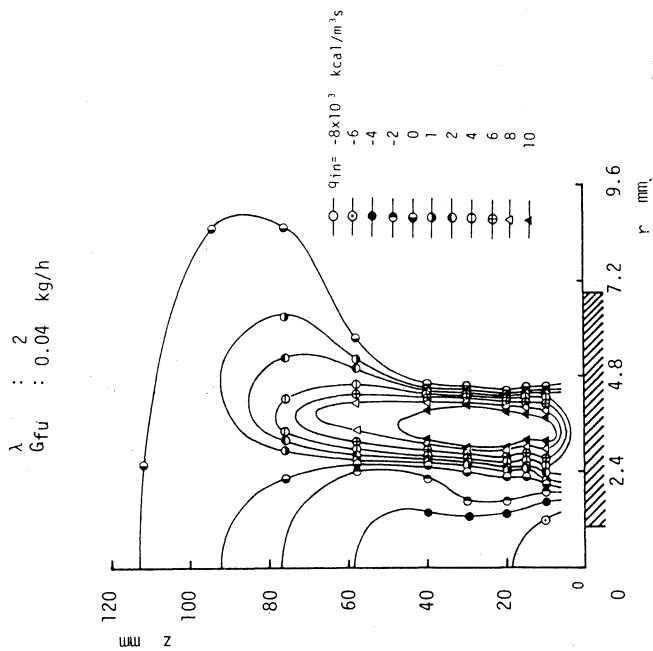


図 11 熱発生率分布

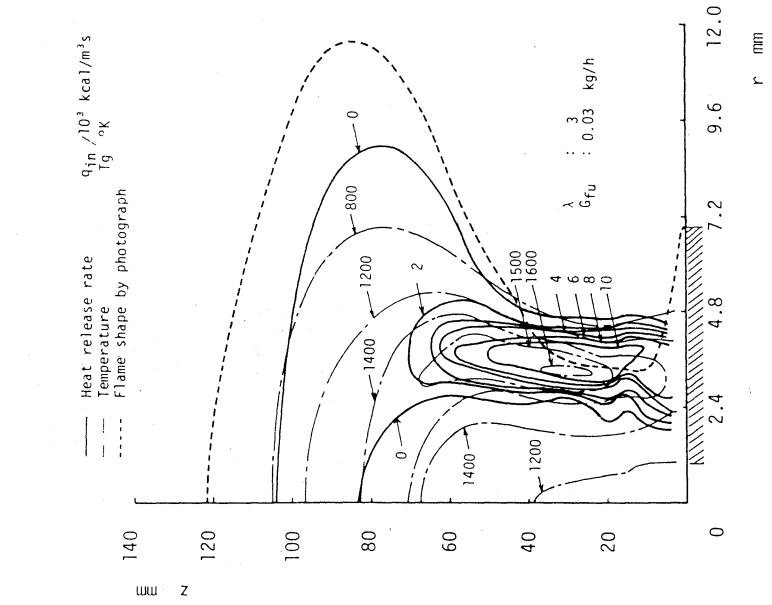


図 12 (c)

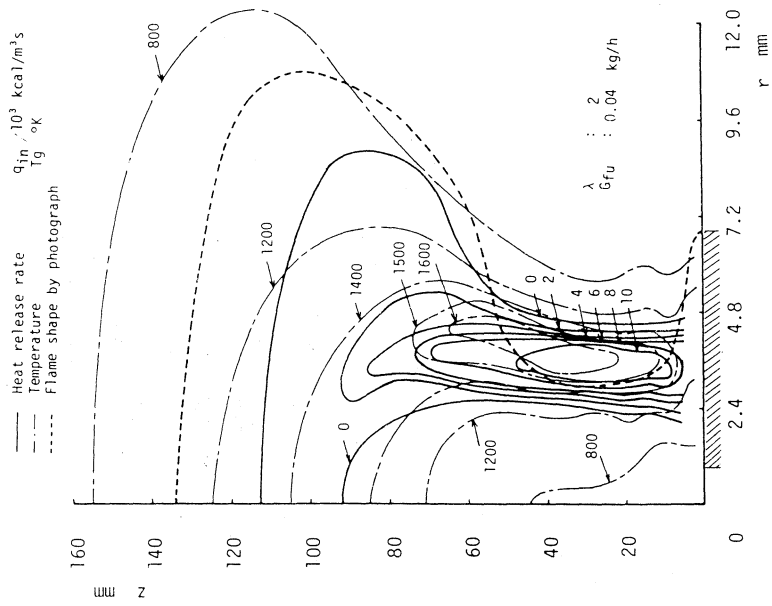


図 12 (b)

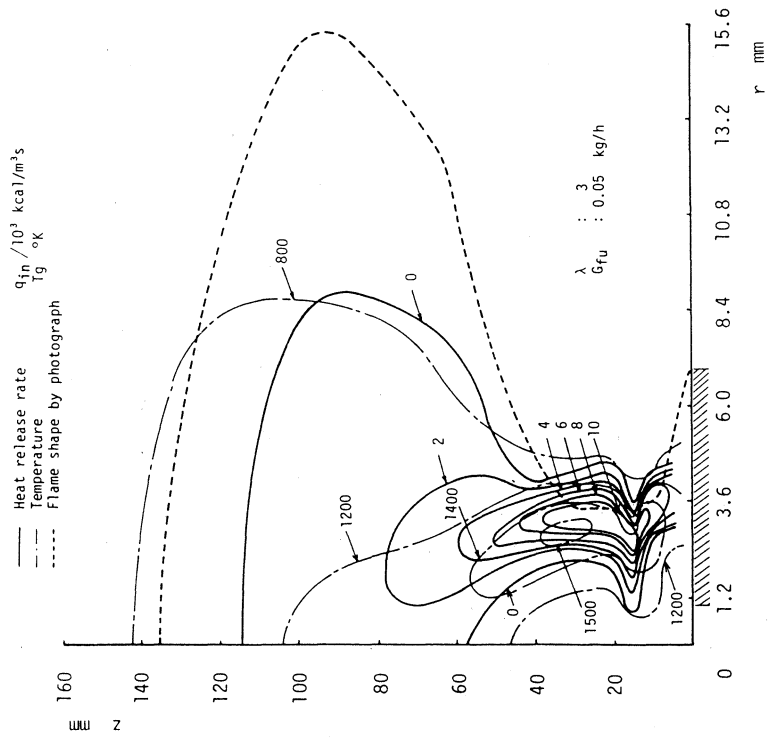


図 12 (e)

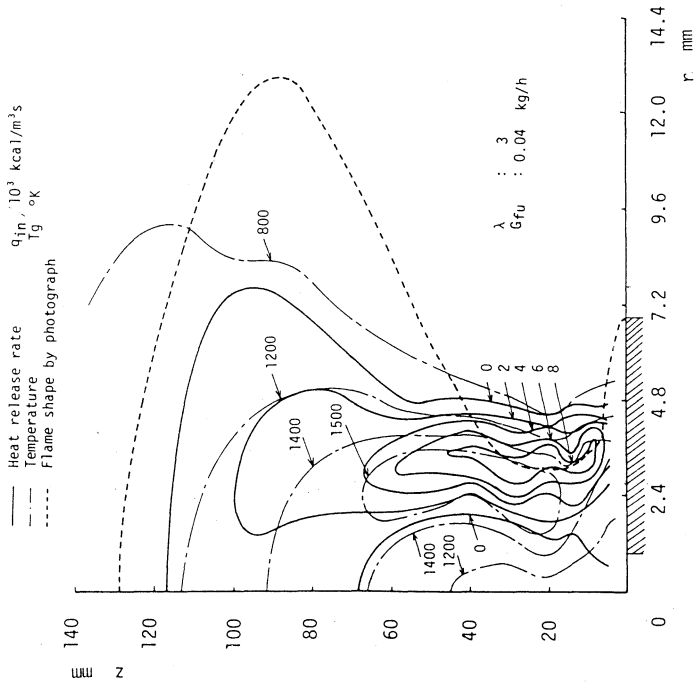


図 12 (d)

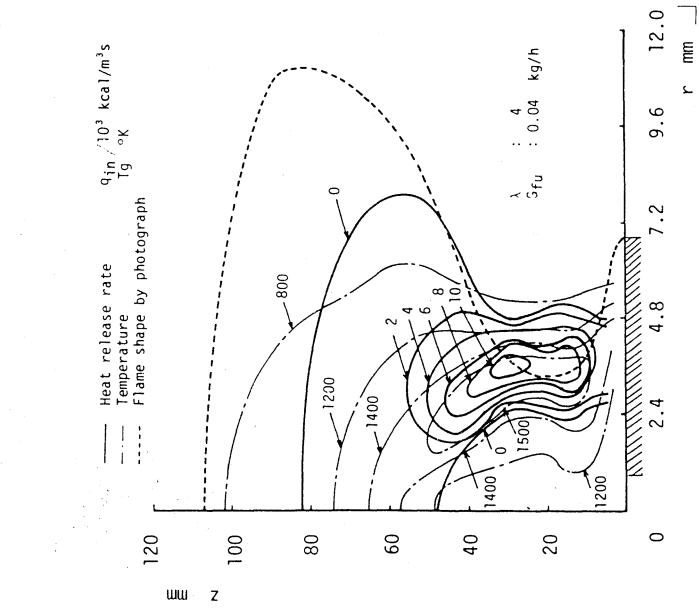


図 12 (g)

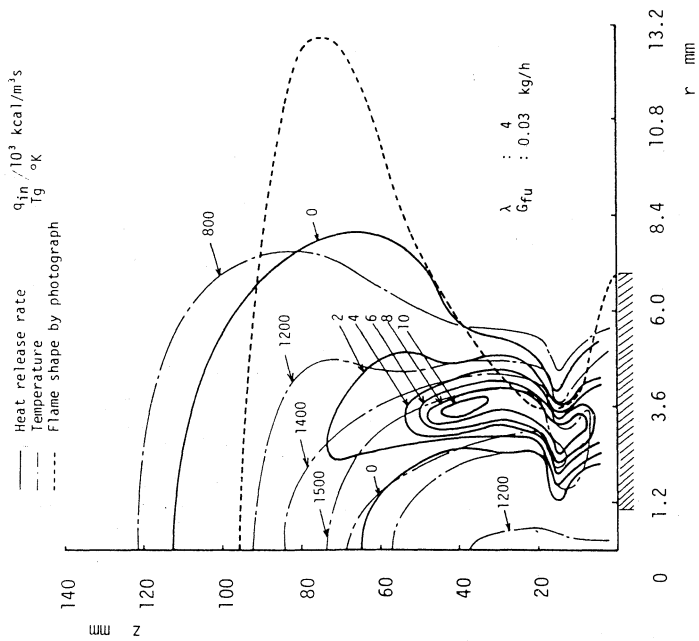


図 12 (f)

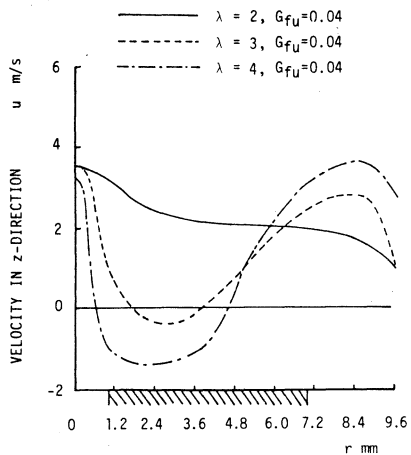


図 13 空気過剰係数による鉛直方向速度の変化

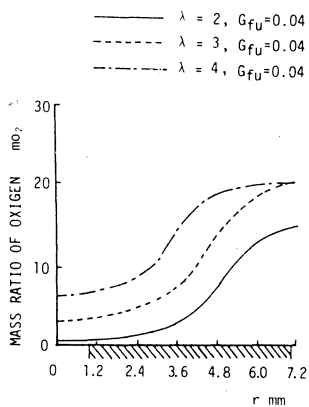


図 14 空気過剰係数による酸素の質量分率の変化

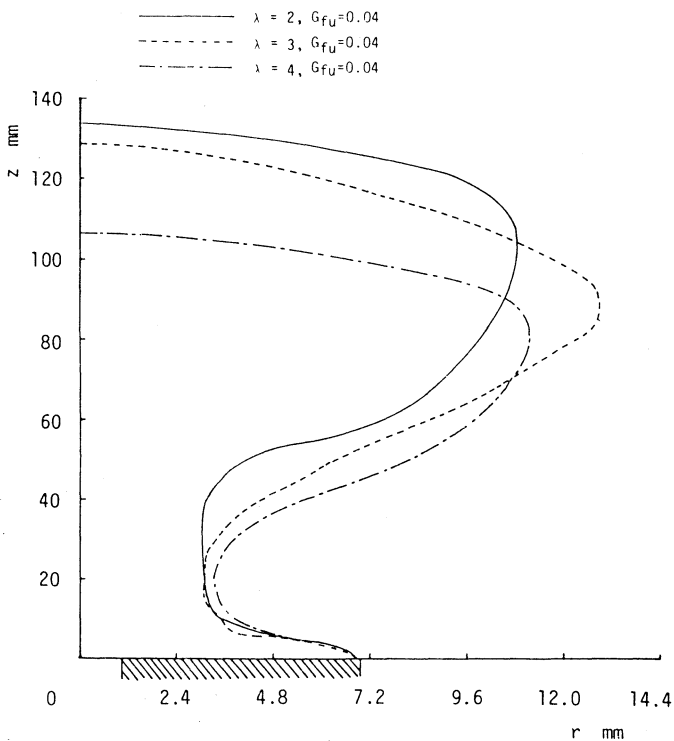


図 15 空気過剰係数による火炎形状の変化

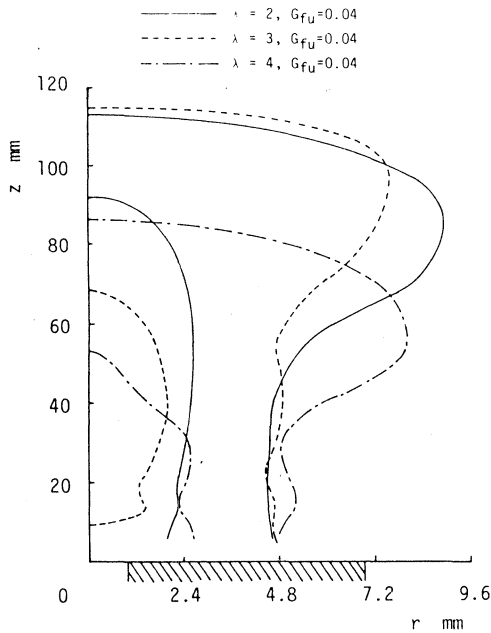


図 16 空気過剰係数による熱発生率 $q_{in}=0$ の変化

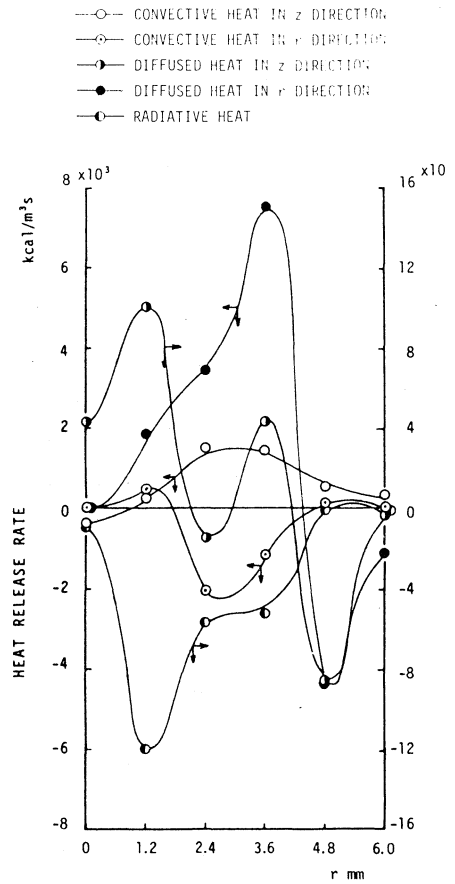


図 17 熱発生率を構成する成分

発生率を構成する成分について $\lambda=3, G_{fu}=0.04\text{kg/h}, z=20\text{mm}$ の場合を代表例として図17に示す。同図より、熱発生率の成分中、流れおよび半径方向熱伝導によるものが大であり、放射による量は小さいことがわかる。

5. あとがき

本報告では、火炎の温度、速度、放射吸収係数および成分ガス濃度を測定し、これらの諸量をエネルギー方程式に代入することにより、熱発生率分布を求めることを試み、また、実験条件の変化による熱発生率分布の差異を検討した結果、おもに次の結果を得た。

(1) 火炎の熱発生率分布は、吸熱域および発熱域から成り、火炎の外周部に高い熱発生率を示す領域が存在し、拡散火炎の特徴を示している。

(2) 燃料流量を一定とし、空気過剰係数を変化させた場合、条件の変化に伴う燃焼状態の

差異が、熱発生率分布を比較することにより、より顕著に把握できる。

(3) 熱発生率を構成する成分については、流れおよび半径方向熱伝導による成分が大きく、速度場、温度場の正確な測定が必要である。

なお、本報告で得られた結果は、条件の変化による火炎の燃焼—熱伝達特性の差異を顕著に示す重要な値であるとともに、火炎の燃焼—熱伝達特性および空気力学特性の数値解析には必須な値である。今後、化学反応論からの火炎の解析と本報告で得られた結果をつき合わせるにより、火炎の特性を示す最も重要な値の一つである熱発生率分布の一般化が行ないうるものであると考えられる。

終わりに、本研究を進めるに当り、ご協力、ご助言をいただいた本学卒業生 岩崎仁史、河合保明両氏に謝意を表す次第である。

文 献

- 1) Gosman, A. D., *et al.*, Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows, (1969), Academic Press.
- 2) Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., FLAMES (4th Edition), (1979), 92, Chapman and Hall.
- 3) 媚山政良, 室工大研究報告 (理工編), 10-2 (昭 55-11), 283.