



Title	ふく射ガスの温度分布解析 : 吸収係数の異なる2種類のふく射ガスが存在する場合
Author(s)	谷口, 博; Taniguchi, Hiroshi; 糸井, 等 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 47, 1-31
Issue Date	1968-03-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40860
Type	departmental bulletin paper
File Information	47_1-32.pdf



ふく射ガスの温度分布解析

—吸収係数の異なる2種類のふく射ガスが存在する場合—

谷 口 博*
糸 井 等*

(昭和42年11月30日受理)

Temperature Distribution of Radiant Gas

—The Existence of Two Kinds of Gases with Different
Absorption Coefficients—

Hiroshi TANIGUCHI

Hitoshi ITOI

1st Heat Engine Division, Faculty of Engineering

(Received November 30, 1967)

Abstract

It is recognized that a combustion condition in furnace is affected by the cooling rate of its surface and that the heat transfer between radiant gas and the surface is strongly influenced by radiation.

Various papers have been published on radiative transfer in furnaces. In general, a simplified condition of the same absorption coefficient is applied for a whole gas layer in furnace. However this condition may not be applied in the case of a luminous flame which exists in a usual furnace, inasmuch as the absorption coefficient of a luminous flame is greater than that of combustion gas. Furthermore, it is recognized that the gas radiates an emissive power in some regions of wave length and its absorption coefficient is affected by temperature.

The authors made an attempt to analyze the temperature distribution of radiant gas in a case where two kinds of gases with different absorption coefficients existed between two parallel infinite surfaces. It was shown that the analysis was also applicable to the case where the gases radiated emissive power in certain regions of wave length and that these absorption coefficients were affected by temperature. The calculations were conducted by the Monte Carlo method and programmed for electronic digital computation.

All examples in this paper were calculated by a computer. Reference data were used to compare the difference of analytical results between gray gas and real gases.

* 機械工学科熱機関学第一講座

目 次

1. ま え が き	2
2. 温度分布解析	2
3. モンテカルロ法による解析	13
4. 電子計算機用プログラム	19
5. 計 算 結 果	26
6. 結 び	31

1. ま え が き

火炉内における燃焼状態は火炉壁の冷却率により影響を受けることが一般に知られているが、燃焼状態の解析に際し火炉壁の冷却率を考慮した研究は少ないように思われる。火炉内における熱伝達は主としてふく射により行なわれているので、上記燃焼状態の検討のため、火炎および燃焼ガスと火炉壁との間のふく射熱伝達、炉内温度分布の解析が必要である。

火炉内の温度分布解析は以前より研究されているが、火炎および燃焼ガスの吸収係数が等しい場合^{1),2),4),5)}について行なわれていることが多い。このような条件は一般に無輝炎の場合に相当するものであり、実際に多く存在する輝炎の場合には当てはまらない。すなわち、輝炎の場合には火炎の吸収係数が燃焼ガスに比べ相当大であることが知られているので、火炉内の温度分布解析を行なうに際して両者を区別して取扱う必要がある。また、とくにガスふく射を解析する場合問題となるのはふく射に關与する波長域が限定されていること、吸収係数が温度の関数であることなど^{3),6)}であるが、理論解析が困難なため省略されていることが多い。しかし、いずれも火炉内の温度分布解析に際し重要であるから、条件として取入れるよう考慮することが望ましいものと思われる。

本報告では、上記各点について検討を進め、火炉内を火炎と燃焼ガスの部分に区分し、両者の吸収係数が異なる場合について解析することとした。また、吸収係数が温度の関数であり、その温度依存度が火炎と燃焼ガスに対しそれぞれ異なる場合も考慮している。ふく射に關与する波長域が限定されている場合(図-1参照)についても考慮し、以上の各条件と組み合わせて解析している。数値計算を行なうに際しては、モンテカルロ法を応用して火炎、燃焼ガスおよび火炉壁よりのふく射をまとめて計算する方法を採用することとした。

2. 温度分布解析

無限大平行2平面間の中央部に発熱せるふく射ガス

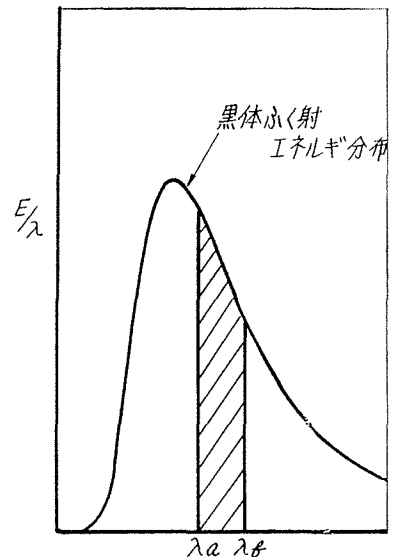


図-1 仮想ガスのふく射能

(火炎に相当する) が集中し、その両側に遮蔽ガス (燃焼ガスに相当する) が図-2のごとく存在する場合について解析を行なうこととした。ただし、熱伝達はふく射のみにより行なわれ、対流および伝導による熱伝達は考えないものとする。火炎および燃焼ガスとしてはふく射に関する波長域が限定されており (図-1 参照)、吸収係数がガス温度の関数である仮想ガスを考慮することとしたので、両者のふく射能は次式により表わすことができる。

$$E_f = (1 - e^{-KP_f T^t}) F(T) \sigma T^4 \quad (\text{火炎}) \quad (1)$$

$$E_g = (1 - e^{-KP_g T^t}) F(T) \sigma T^4 \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (2)$$

ただし、 E_f , E_g : ふく射能, KP_f , KP_g : 吸収係数 (ガスの分圧も考慮した値),

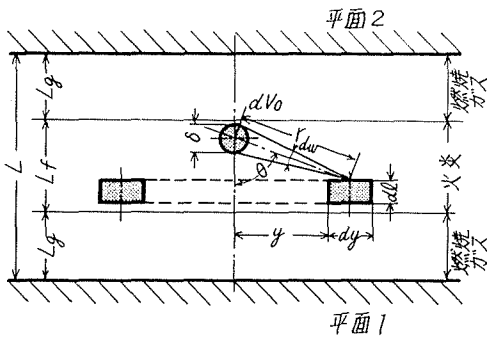


図-2 a

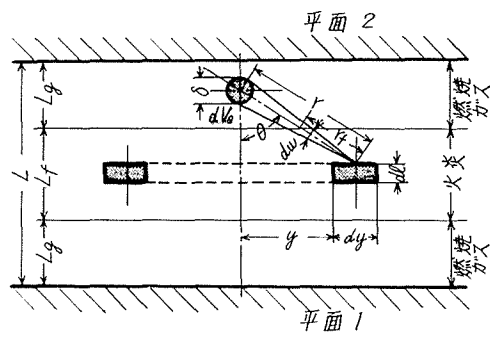


図-2 b

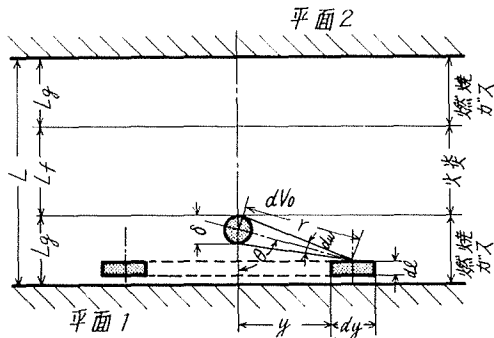


図-2 c

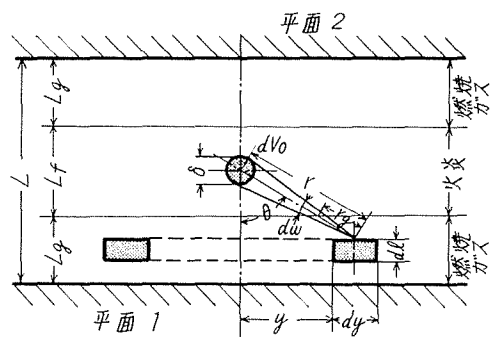


図-2 d

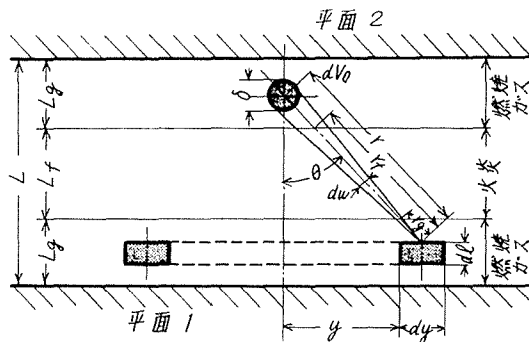


図-2 e

T : 温度, l : 厚さ, σ : ステファンボルツマン定数

$$F(T) = \frac{C_1 \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{d\lambda}{\lambda^5 (e^{\lambda T} - 1)}}{\sigma T^4} \quad C_1 = 2\pi C_0^2 h$$

$C_2 = C_0 h/k$ C_0 : 光速, h : プランク定数, k : ボルツマン定数, λ_a, λ_b : 波長

図-2 のリング状ガス体のふく射能は

$$4dA dl KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \quad (\text{火炎}) \quad (3)$$

$$4dA dl KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (4)$$

ただし, dA : リング上面の面積 $= 2\pi y dy$, dl : リングの厚さ

リング状ガス体より微小ガス体 dV_0 に到達するふく射量は

$$\frac{d\omega}{4\pi} 4dA dl KP_f(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^r KP_f(T) dr} \quad (\text{火炎} \rightarrow \text{火炎}) \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{4\pi} 4dA dl KP_f(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^{r_f} KP_f(T) dr} - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \quad (\text{火炎} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \quad (6)$$

$$\frac{d\omega}{4\pi} 4dA dl KP_g(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^r KP_g(T) dr} \quad (\text{燃焼ガス} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \quad (7)$$

$$\frac{d\omega}{4\pi} 4dA dl KP_g(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T) dr} - \int_{r_g}^r KP_f(T) dr \quad (\text{燃焼ガス} \rightarrow \text{火炎}) \quad (8)$$

$$\frac{d\omega}{4\pi} 4dA dl KP_g(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T) dr} - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \quad (9)$$

(燃焼ガス \rightarrow 火炎 \rightarrow 燃焼ガス)

ただし, $d\omega$: dV_0 の立体角 $= \pi \delta^2 / r^2$, δ : dV_0 の直径,

r, r_f, r_g : リング状ガス体よりの距離

dV_0 の体積は $\pi \delta^3 / 6$, 吸収率は $2KP_f(T) \delta / 3$ または $2KP_g(T) \delta / 3$ であるから, 上記ふく射量のうち dV_0 に吸収される量を求めると

$$KP_f(T_0) dV_0 KP_f(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^r KP_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} dl \quad (\text{火炎} \rightarrow \text{火炎}) \quad (10)$$

$$KP_g(T_0) dV_0 KP_f(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^{r_f} KP_f(T) dr} - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} dl \quad (11)$$

(火炎 \rightarrow 燃焼ガス)

$$KP_g(T_0) dV_0 KP_g(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^r KP_g(T) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} dl \quad (12)$$

(燃焼ガス \rightarrow 燃焼ガス)

$$KP_f(T_0) dV_0 KP_g(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T) dr} - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr \frac{2y dy}{r^2} dl \quad (13)$$

(燃焼ガス \rightarrow 火炎)

$$KP_g(T_0) dV_0 KP_g(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T) dr} - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \cdot \frac{2y dy}{r^2} dl \quad (14)$$

(燃焼ガス \rightarrow 火炎 \rightarrow 燃焼ガス)

ただし, T_0 : dV_0 の温度

これを積分し、2平面間の火炎および燃焼ガスより放出され dV_0 に吸収される量を求めると

$$\begin{aligned}
 & KP_j(T_0) dV_0 \left[\int_0^{L_g} KP_\theta(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r KP_\theta(r) dr - \int_{r_g}^r KP_f(r) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\
 & + \int_{L_g}^{L_g+L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r KP_f(r) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\
 & \left. + \int_{L_g+L_f}^L KP_\theta(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r KP_\theta(r) dr - \int_{r_g}^r KP_f(r) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

(火炎)

$$\begin{aligned}
 & KP_\theta(T_0) dV_0 \left[\int_0^{L_g} KP_\theta(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r KP_\theta(r) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\
 & + \int_{L_g}^{L_g+L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r KP_f(r) dr - \int_{r_f}^r KP_\theta(r) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\
 & \left. + \int_{L_g+L_f}^L KP_\theta(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r KP_\theta(r) dr - \int_{r_g}^r KP_f(r) dr - \int_{r_f}^r KP_\theta(r) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right]
 \end{aligned}$$

(燃焼ガス) (16)

ただし、 L : 2平面間の距離、 L_f , L_g : 火炎、燃焼ガスの厚さ

図-3 のリング状平面のふく射能は

$$dA \varepsilon \sigma T_j^4 \quad (17)$$

ただし、 ε : 平面のふく射率、 T_j : 平面の温度

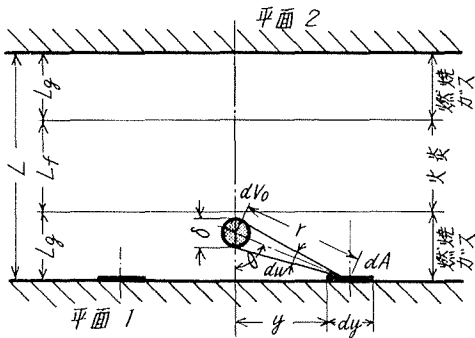


図-3 a

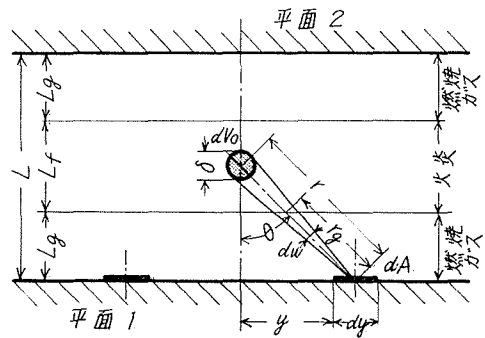


図-3 b

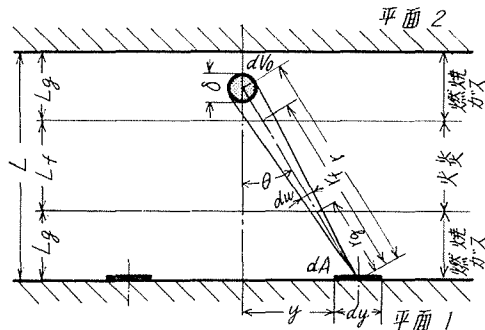


図-3 c

リング状平面より微小ガス体 dV_0 に到達するふく射量のうちガスふく射に関与する分は

$$\frac{d\omega}{\pi} dA \cos \theta F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 e^{-\int_0^r KP_g(T) dr} \quad (\text{平面} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \quad (18)$$

$$\frac{d\omega}{\pi} dA \cos \theta F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 e^{-\int_0^g KP_g(T) dr} \int_{r_g}^r KP_f(T) dr \quad (\text{平面} \rightarrow \text{燃焼ガス} \rightarrow \text{火炎}) \quad (19)$$

$$\frac{d\omega}{\pi} dA \cos \theta F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 e^{-\int_0^g KP_g(T) dr} \int_{r_g}^r KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \quad (20)$$

(平面 \rightarrow 燃焼ガス \rightarrow 火炎 \rightarrow 燃焼ガス)

ただし、 θ : dA の法線とふく射方向とのなす角

上記ふく射量のうち dV_0 に吸収される量を求めると

$$KP_g(T_0) dV_0 \cos \theta F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 e^{-\int_0^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \quad (\text{平面} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \quad (21)$$

$$KP_f(T_0) dV_0 \cos \theta F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 e^{-\int_0^g KP_g(T) dr} \int_{r_g}^r KP_f(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \quad (22)$$

(平面 \rightarrow 燃焼ガス \rightarrow 火炎)

$$KP_g(T_0) dV_0 \cos \theta F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 e^{-\int_0^g KP_g(T) dr} \int_{r_g}^r KP_f(T) dr \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \quad (23)$$

(平面 \rightarrow 燃焼ガス \rightarrow 火炎 \rightarrow 燃焼ガス)

これを積分し、2平面より放出され dV_0 に吸収される量を求めると

$$KP_f(T_0) dV_0 F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^g KP_g(T) dr} \int_{r_g}^r KP_f(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \quad (\text{火炎}) \quad (24)$$

$$KP_g(T_0) dV_0 \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right. \\ \left. + F(T_k) \varepsilon \sigma T_k^4 \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^g KP_g(T) dr} \int_{r_g}^r KP_f(T) dr \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right] \quad (25)$$

(燃焼ガス)

ただし、 $j=1$ の場合 $k=2$ 、 $j=2$ の場合 $k=1$

図-4 のリング状ガス体より平面の微小面 dA_0 に到達するふく射量は

$$\frac{d\omega}{4\pi} 4dA dl KP_f(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^r KP_f(T) dr} \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \quad (26)$$

(火炎 \rightarrow 燃焼ガス \rightarrow 平面)

$$\frac{d\omega}{4\pi} 4dA dl KP_g(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^r KP_g(T) dr} \quad (\text{燃焼ガス} \rightarrow \text{平面}) \quad (27)$$

$$\frac{d\omega}{4\pi} 4dA dl KP_g(T) F(T) \sigma T^4 e^{-\int_0^g KP_g(T) dr} \int_{r_g}^r KP_f(T) dr \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \quad (28)$$

(燃焼ガス \rightarrow 火炎 \rightarrow 燃焼ガス \rightarrow 平面)

ただし、 $d\omega$: dA_0 の立体角 $= \pi \delta^2 \cos \theta / 4r^2$ 、 δ : dA_0 の直径、

θ : dA_0 の法線とふく射線方向とのなす角

これを積分し、2平面間の火炎および燃焼ガスより放出され dA_0 に到達する量を求めると

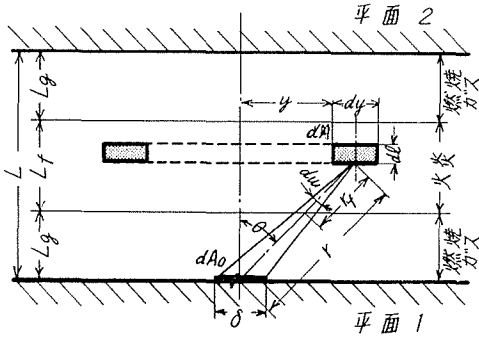


図-4 a

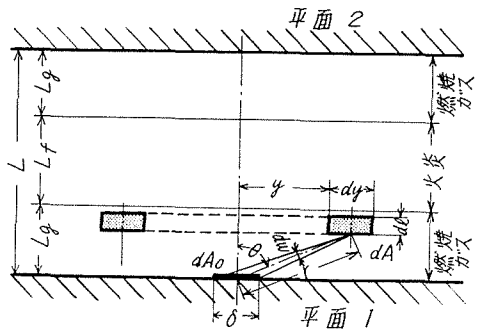


図-4 b

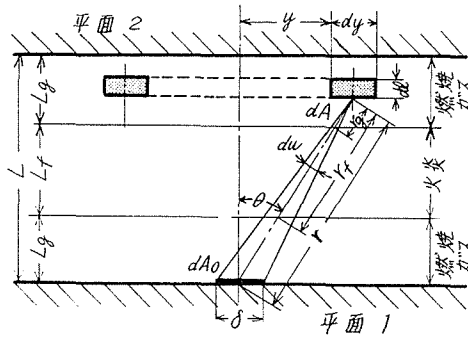


図-4 c

$$\begin{aligned}
 & dA_0 \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\
 & + \int_{L_g}^{L_g+L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^f KP_f(T) dr - \int_f^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\
 & + \int_{L_g+L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^g KP_g(T) dr - \int_g^f KP_f(T) dr - \int_f^r KP_g(T) dr} \right. \\
 & \left. \left. \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right] \quad (\text{火炎および燃焼ガス}) \quad (29)
 \end{aligned}$$

図-5 のリング状平面より他平面の微小面 dA_0 に到達するふく射量は

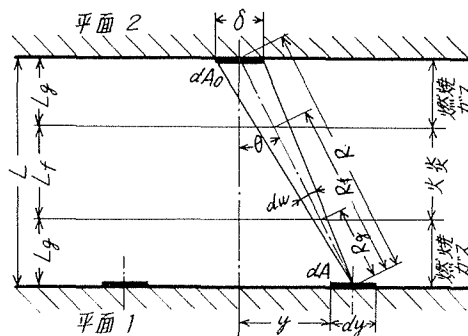


図-5

$$\frac{d\omega}{\pi} dA \cos \theta F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \quad (30)$$

(平面→燃焼ガス→火炎→燃焼ガス→平面)

ただし, $d\omega$: dA_0 の立体角 $=\pi\delta^2 \cos \theta/4r^2$, R, R_f, R_g : リング状平面よりの距離
これを積分し, 平面より放出され dA_0 に到達する量を求めると

$$dA_0 F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \quad (\text{平面}) \quad (31)$$

式(29)のふく射量のうち平面で反射され他平面に到達する量を求めると

$$\frac{d\omega}{\pi} (1-\varepsilon) dA \cos \theta [S] e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \quad (32)$$

ただし

$$\begin{aligned} [S] = & \left[\int_0^{L_g} K P_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta \cdot e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\ & + \int_{L_g}^{L_g+L_f} K P_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta \cdot e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\ & + \int_{L_g+L_f}^L K P_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \right. \\ & \left. \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \left. \right] \end{aligned}$$

上式を積分すると

$$dA_0 (1-\varepsilon) \int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \cdot [S] \quad (33)$$

さらに2平面で順次繰返し反射され, 微小ガス体 dV_0 に到達するふく射量は

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{\pi} (1-\varepsilon)^m dA \cos \theta \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\ \cdot [S] e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr} \quad (34) \end{aligned}$$

(火炎および燃焼ガス→反射→燃焼ガス→火炎)

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{\pi} (1-\varepsilon)^m dA \cos \theta \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\ \cdot [S] e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr} \quad (\text{火炎および燃焼ガス→反射→燃焼ガス}) \quad (35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{\pi} (1-\varepsilon)^m dA \cos \theta \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\ \cdot [S] e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \quad (36) \end{aligned}$$

(火炎および燃焼ガス→反射→燃焼ガス→火炎→燃焼ガス)

上記ふく射量のうち dV_0 に吸収される量は

$$\begin{aligned} K P_f(T_0) dV_0 (1-\varepsilon)^m \cos \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \\ \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot [S] \quad (37) \end{aligned}$$

(火炎および燃焼ガス→反射→燃焼ガス→火炎)

$$\begin{aligned}
& KP_g(T_0) dV_0(1-\varepsilon)^m \cos \theta e^{-\int_0^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot [S] \quad (38)
\end{aligned}$$

(火炎および燃焼ガス→反射→燃焼ガス)

$$\begin{aligned}
& KP_g(T_0) dV_0(1-\varepsilon)^m \cos \theta e^{-\int_0^r KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot [S] \quad (39)
\end{aligned}$$

(火炎および燃焼ガス→反射→燃焼ガス→火炎→燃焼ガス)

これを積分し、 $m=1\sim\infty$ について加算すると、2平面間の火炎および燃焼ガスより放出され順次反射を繰返ししながら dV_0 に吸収される量が求められる。

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=1}^{\infty} KP_f(T_0) dV_0(1-\varepsilon)^m \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^r KP_f(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\
& \cdot \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\
& + \int_{L_g}^{L_g+L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\
& + \left. \int_{L_g+L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^r KP_g(T)dr} \right. \right. \\
& \cdot \left. \left. \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right] \quad (\text{火炎}) \quad (40)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=1}^{\infty} KP_g(T_0) dV_0(1-\varepsilon)^m \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr} \right. \\
& - \left. \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^r KP_g(T)dr \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \right. \\
& \cdot \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl + \int_{L_g}^{L_g+L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \\
& \cdot \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl + \int_{L_g+L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \\
& \cdot \left. \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right] \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (41)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=1}^{\infty} KP_g(T_0) dV_0(1-\varepsilon)^m \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\
& \cdot \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\
& + \int_{L_g}^{L_g+L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^r KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\
& + \int_{L_g+L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^r KP_g(T)dr} \right. \\
& \cdot \left. \left. \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right] \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (42)
\end{aligned}$$

式(31)のふく射量のうち平面で反射され他平面に到達する量を求めると

$$\frac{d\omega}{\pi} (1-\varepsilon) dA \cos \theta \cdot [S_j] \cdot e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \quad (43)$$

ただし

$$[S_j] = \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^\infty \cos \theta \cdot e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]$$

上式を積分すると

$$dA_0 (1-\varepsilon) \int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \cdot [S_j] \quad (44)$$

さらに2平面で順次繰返し反射され、微小ガス体 dV_0 に到達するふく射量は

$$\begin{aligned} & \frac{d\omega}{\pi} (1-\varepsilon)^m dA \cos \theta \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\ & \cdot [S_j] \cdot e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr} \quad (\text{平面} \rightarrow \text{反射} \rightarrow \text{燃焼ガス} \rightarrow \text{火炎}) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d\omega}{\pi} (1-\varepsilon)^m dA \cos \theta \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\ & \cdot [S_j] \cdot e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr} \quad (\text{平面} \rightarrow \text{反射} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d\omega}{\pi} (1-\varepsilon)^m dA \cos \theta \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\ & \cdot [S_j] \cdot e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^R KP_g(T)dr} \end{aligned} \quad (47)$$

(平面 → 反射 → 燃焼ガス → 火炎 → 燃焼ガス)

上記ふく射量のうち dV_0 に吸収される量は

$$\begin{aligned} & KP_f(T_0) dV_0 (1-\varepsilon)^m \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \\ & \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot [S_j] \end{aligned} \quad (48)$$

(平面 → 反射 → 燃焼ガス → 火炎)

$$\begin{aligned} & KP_g(T_0) dV_0 (1-\varepsilon)^m \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr} \right. \\ & \left. - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot [S_j] \quad (\text{平面} \rightarrow \text{反射} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} & KP_g(T_0) dV_0 (1-\varepsilon)^m \cos \theta e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T)dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T)dr - \int_{r_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \\ & \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} KP_g(T)dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T)dr - \int_{R_f}^R KP_g(T)dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot [S_j] \end{aligned} \quad (50)$$

(平面 → 反射 → 燃焼ガス → 火炎 → 燃焼ガス)

これを積分し、 $m=1 \sim \infty$ について加算すると、2平面より放出され順次反射を繰返しながら dV_0 に吸収される量が求められる。

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=1}^{\infty} KP_f(T_0) dV_0 (1-\varepsilon)^m \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^r K P_g(T) dr - \int_{r_g}^r K P_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& \cdot \left[\int_0^{\infty} \cos^2 \theta e^{-\int_0^R K P_g(T) dr - \int_{R_g}^R K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\
& \cdot \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^R K P_g(T) dr - \int_{R_g}^R K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right] \quad (51) \\
& \hspace{15em} (\text{火 炎})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=1}^{\infty} KP_g(T_0) dV_0 (1-\varepsilon)^m \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^r K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \left[\int_0^{\infty} \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr} \right. \\
& \left. - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr} \right. \\
& \left. - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right] \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (52)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=1}^{\infty} KP_g(T_0) dV_0 (1-\varepsilon)^m \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^r K P_g(T) dr - \int_{r_g}^r K P_f(T) dr - \int_{r_f}^r K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& \cdot \left[\int_0^{\infty} \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \\
& \cdot \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right] \quad (53) \\
& \hspace{15em} (\text{燃焼ガス})
\end{aligned}$$

微小ガス体 dV_0 の発生熱量は

$$Q_0 dV_0 \quad (\text{火炎}) \quad (54)$$

ただし、 Q_0 : 火炎の単位体積当りの発生熱量

また、ふく射能は

$$4dV_0 KP_f(T_0) F(T_0) \sigma T_0^4 \quad (\text{火 炎}) \quad (55)$$

$$4dV_0 KP_g(T_0) F(T_0) \sigma T_0^4 \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (56)$$

微小体積 dV_0 についてのふく射エネルギーの平衡式を求め、 $dV_0 KP_f(T_0)$ または $dV_0 KP_g(T_0)$ で除すと次式が得られる。

$$\begin{aligned}
& \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\int_0^r K P_g(T) dr - \int_{r_g}^r K P_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\
& \left. + \int_{L_g}^{L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\int_0^r K P_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right] \\
& \left. + \int_{L_g, L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\int_0^r K P_g(T) dr - \int_{r_g}^r K P_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right] \\
& + \sum_{j=1}^2 F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^R K P_g(T) dr - \int_{R_g}^R K P_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& + \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^{\infty} (1-\varepsilon)^m \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^R K P_g(T) dr - \int_{R_g}^R K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \cdot \left[\int_0^{\infty} \cos^2 \theta e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr} \right. \\
& \left. - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^r K P_g(T) dr} \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl + \int_{L_g}^{L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^{\infty} \cos \theta e^{-\int_0^r K P_f(T) dr} \int_{r_f}^r K P_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{L_g + L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\
& + \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^\infty (1-\varepsilon)^m \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr - \int_{r_g}^r KP_f(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^R g KP_g(T) dr} \right. \\
& \quad \left. - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right]^m \cdot \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^R g KP_g(T) dr} \right. \\
& \quad \left. - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right] + \frac{Q_0}{KP_f(T_0)} = 4F(T_0) \sigma T_0^4 \quad (\text{火炎}) \quad (57)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl + \int_{L_g}^{L_g + L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \right. \\
& \quad \cdot \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r f KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl + \int_{L_g + L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \\
& \quad \cdot \left\{ \int_0^\infty e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \Big] \\
& + \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} + F(T_k) \varepsilon \sigma T_k^4 \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} \right. \\
& \quad \left. - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right] + \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^\infty (1-\varepsilon)^{2m+j-2} \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& \quad \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^R g KP_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^{2m+j-2} \\
& \quad \cdot \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\
& \quad + \int_{L_g}^{L_g + L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r f KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\
& \quad + \int_{L_g + L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \Big] \\
& + \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^\infty (1-\varepsilon)^{2m-j+1} \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \\
& \quad \cdot \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^R g KP_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right]^{2m-j+1} \\
& \quad \cdot \left[\int_0^{L_g} KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \right. \\
& \quad + \int_{L_g}^{L_g + L_f} KP_f(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r f KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \Big] \\
& + \int_{L_g + L_f}^L KP_g(T) F(T) \sigma T^4 \left\{ \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right\} dl \\
& + \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^\infty (1-\varepsilon)^{2m+j-2} \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^R g KP_g(T) dr} \right. \\
& \quad \left. - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right]^{2m+j-2} \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^R g KP_g(T) dr} \right. \\
& \quad \left. - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right] + \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^\infty (1-\varepsilon)^{2m-j+1} \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^r g KP_g(T) dr} \\
& \quad \left. - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^r KP_g(T) dr \frac{2y dy}{r^2} \right] \left[\int_0^\infty \cos^2 \theta e^{-\int_0^R g KP_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr} \right. \\
& \quad \left. \cdot \frac{2y dy}{r^2} \right]^{2m-j+1} \left[F(T_j) \varepsilon \sigma T_j^4 \int_0^\infty \cos \theta e^{-\int_0^R g KP_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr} \frac{2y dy}{r^2} \right] \\
& = 4F(T) \sigma T_0^4 \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (58)
\end{aligned}$$

式(57)および(58)を解くことにより、火炎および燃焼ガスの温度分布を求めることができる。しかし、上式を直接解くことは困難であるから、本報告では次章に述べるごとく、モンテカルロ法を応用した数値解法により温度分布を求めることとしている。

3. モンテカルロ法による解析

モンテカルロ法を適用する場合、ふく射エネルギー束の概念を取入れると都合である。さらに、ガスおよび平面のふく射をまとめて計算するために、著者の提案する仮想厚さ⁴⁾の概念を取り入れることとした。仮想厚さに対しては下記の条件を適用している。

- 1) エネルギー束の反射は仮想厚さに入る際ガスとの境界面にて行なわれる。
- 2) 仮想厚さより放出されるエネルギー束および入射したエネルギー束の反射はガスとの境界面においてランベルトの余弦法則にしたがう。
- 3) 仮想厚さの中ではエネルギー束がガスとの境界面に垂直に流れる。
- 4) 仮想厚さはガスと反対側にて0°Kの黒体に接している。
- 5) 仮想厚さ中は温度が一定であり、吸収係数は零である。

単位体積の火炎あるいは仮想厚さより一定数のエネルギー束が放出されるものとし、このエネルギー束が火炎あるいは燃焼ガスに吸収され再放出される過程、仮想厚さに到達して反射される過程を順次追跡して、仮想厚さを通過し接している黒体に吸収されるまで演算を行なう。

図-6の単位面積の小区分 dl_0 の火炎より放出されるエネルギー束数は

$$N \frac{dl_0}{L_t} \tag{59}$$

ただし、 N : 全エネルギー束数, L_t : 仮想全厚さ $= L + 2dL_j$,
 dL_j : 平面の仮想厚さ

このエネルギー束の強さは

$$\frac{Q dl_0}{N \frac{dl_0}{L_t}} = \frac{Q}{Q_m} \cdot \frac{Q_m}{N} L_t \tag{60}$$

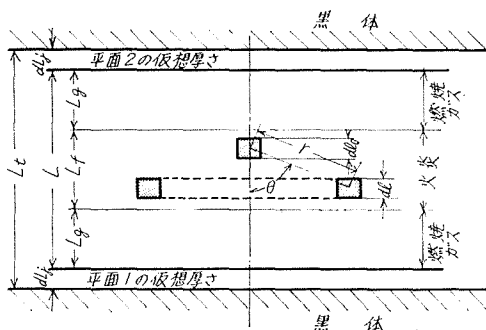


図-6 a

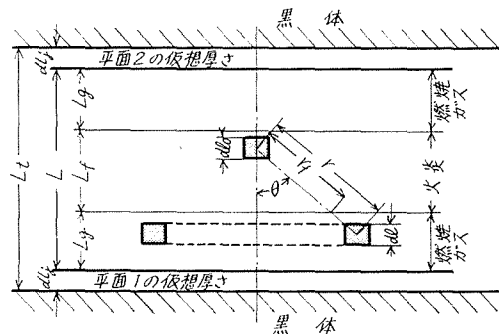


図-6 b

ただし、 Q_m : 平均熱発生量 =
$$\frac{\int_{L_g}^{L_t} Q dl + \sum_{j=1}^2 \varepsilon F(T_j) \cdot \sigma T_j^4}{L_t}$$

また、エネルギー束が頂角 θ の円錐状範囲に放出される確率 R_θ は

$$R_\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \theta}{2} \right) \tag{61}$$

エネルギー束が距離 r にて火炎または燃焼ガスに吸収される確率 R_r は

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^r K P_i(T) dr} \quad (\text{火炎} \rightarrow \text{火炎}) \tag{62}$$

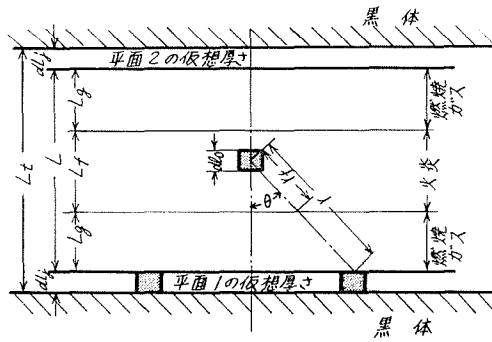


図-7

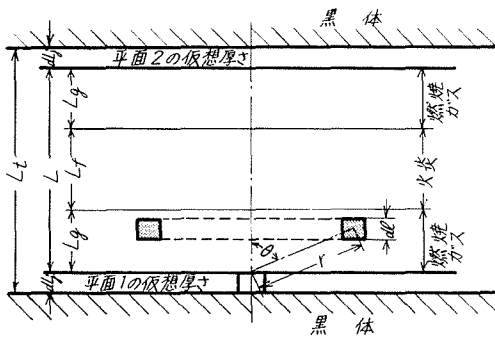


図-8 a

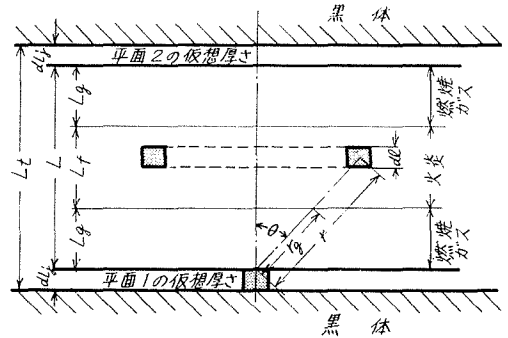


図-8 b

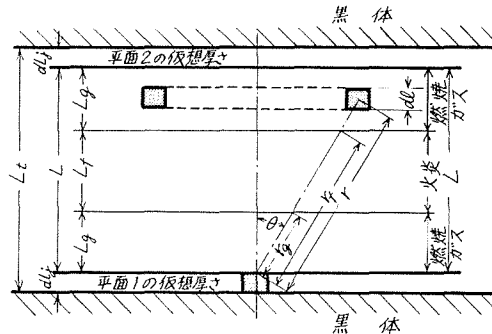


図-8 c

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^r K P_f(T) dr} - \int_{r_f}^r K P_g(T) dr \quad (\text{火炎} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \quad (63)$$

図-7のごとくエネルギー束が平面の仮想厚さに到達する確率 R_j は

$$R_j = e^{-\int_0^j K P_f(T) dr} - \int_{r_f}^j K P_g(T) dr \quad (\text{火炎} \rightarrow \text{燃焼ガス} \rightarrow \text{平面}) \quad (64)$$

仮想厚さに到達したエネルギー束が境界面を通過する確率 R_e は

$$R_e = \varepsilon \quad (65)$$

により求めることができる。

図-8の単位面積の仮想厚さ dL_j より放出されるエネルギー束数は

$$N \frac{dL_j}{L_t} \quad (66)$$

このエネルギー束の強さは

$$\frac{\varepsilon \sigma T_j^4}{N \frac{dL_j}{L_t}} \quad (67)$$

上記のうちガスふく射に関与する分は

$$\frac{\varepsilon F(T_j) \sigma T_j^4}{N \frac{dL_j}{L_t}} = \frac{\varepsilon F(T_j) \sigma T_j^4}{Q_m} \frac{Q_m}{N} L_t \quad (68)$$

また、エネルギー束が頂角 θ の円錐状範囲に放出される確率にランベルトの余弦法則を適用した場合の確率 $R_{\theta j}$ を求めると

$$R_{\theta j} = 1 - \cos^2 \theta \quad (69)$$

エネルギー束が距離 r にて火炎または燃焼ガスに吸収される確率 R_r は

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^r K P_g(T) dr} \quad (\text{平面} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \quad (70)$$

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^r K P_g(T) dr} - \int_{r_g}^r K P_f(T) dr \quad (\text{平面} \rightarrow \text{燃焼ガス} \rightarrow \text{火炎}) \quad (71)$$

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^r K P_g(T) dr} - \int_{r_g}^r K P_f(T) dr - \int_{r_f}^r K P_g(T) dr \quad (72)$$

(平面 \rightarrow 燃焼ガス \rightarrow 火炎 \rightarrow 燃焼ガス)

図-9のごとくエネルギー束が他平面の仮想厚さに到達する確率 R_j は

$$R_j = e^{-\int_0^{R_g} K P_g(T) dr} - \int_{R_g}^{R_f} K P_f(T) dr - \int_{R_f}^R K P_g(T) dr \quad (73)$$

(平面 \rightarrow 燃焼ガス \rightarrow 火炎 \rightarrow 燃焼ガス \rightarrow 平面)

火炎または仮想厚さより放出されたエネルギー束が火炎に吸収された場合、同個所より同じ強さのエネルギー束が図-6および7のごとく再放出される。このエネルギー束が円錐状範囲に放出される確率 R_o は式(61)、距離 r にて吸収される確率 R_r は式(62)および(63)、平面の仮想厚

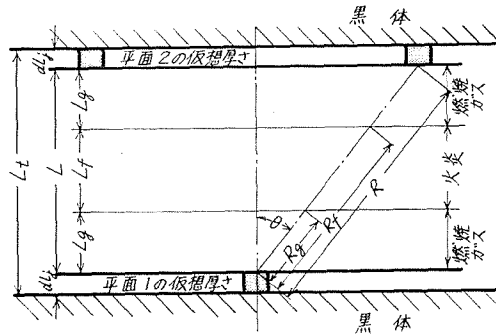


図-9

さに到達する確率 R_j は式 (64), 仮想厚さの境界面を通過する確率 R_e は式 (65) により求めることができる。

また, 火炎または仮想厚さより放出されたエネルギー束が燃焼ガスに吸収された場合, 同個所より同じ強さのエネルギー束が図-10および図-11のごとく再放出される。このエネルギー束が円錐状範囲に放出される確率 R_0 は式 (61) にて求まり, 距離 r にて吸収される確率 R_r は

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^r K P_g(T) dr} \quad (\text{燃焼ガス} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \quad (74)$$

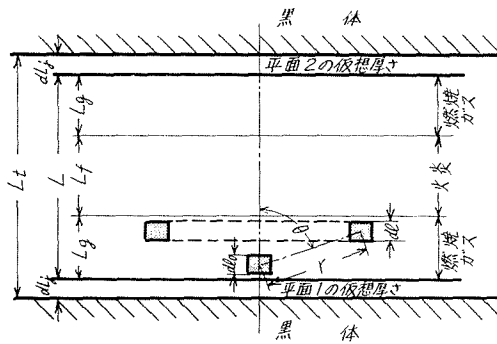


図-10 a

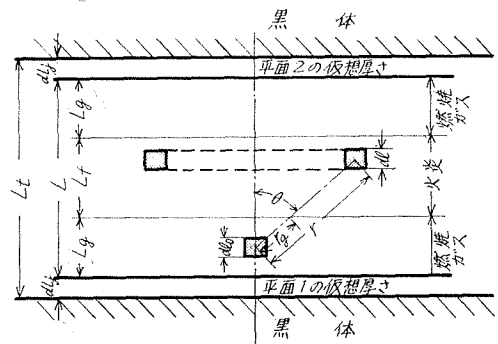


図-10 b

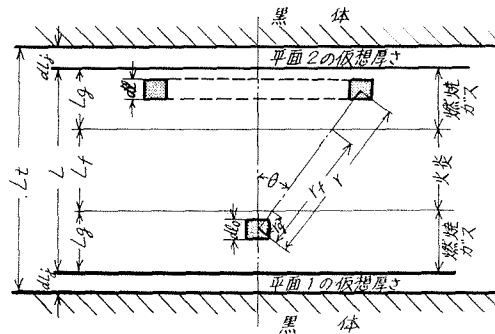


図-10 c

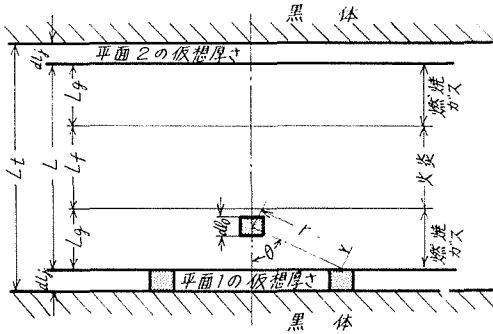


図-11 a

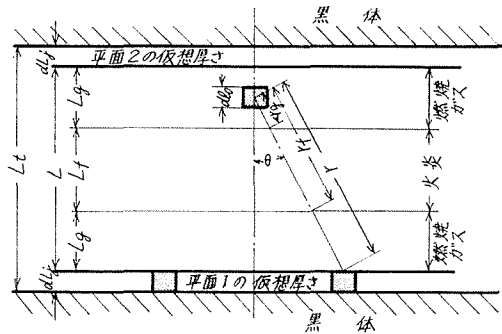


図-11 b

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T) dr} - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr \quad (\text{燃焼ガス} \rightarrow \text{火炎}) \quad (75)$$

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T) dr} - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^{r_g} KP_g(T) dr \quad (76)$$

(燃焼ガス → 火炎 → 燃焼ガス)

平面の仮想厚さに到達する確率 R_j は

$$R_r = e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T) dr} \quad (\text{燃焼ガス} \rightarrow \text{平面}) \quad (77)$$

$$R_r = e^{-\int_0^{r_g} KP_g(T) dr} - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^{r_g} KP_g(T) dr \quad (78)$$

(燃焼ガス → 火炎 → 燃焼ガス → 平面)

仮想厚さの境界面を通過する確率 R_i は式 (65) により求めることができる。

エネルギー束が仮想厚さに到達し境界面にて反射された場合、図-8および図-9のごとく円錐状範囲に反射される確率 R_o は式 (69) にて求めることができる。吸収される確率 R_r を求める場合には、エネルギー束が放出された個所からの総計距離 r_t を考慮して次式により求める。

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^{r_t-r} \{KP_f(T), KP_g(T)\} dr} - \int_0^{r_g} KP_g(T) dr \quad (\text{反射} \rightarrow \text{燃焼ガス}) \quad (79)$$

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^{r_t-r} \{KP_f(T), KP_g(T)\} dr} - \int_0^{r_g} KP_g(T) dr - \int_0^{r_g} KP_f(T) dr \quad (80)$$

(反射 → 燃焼ガス → 火炎)

$$R_r = 1 - e^{-\int_0^{r_t-r} \{KP_f(T), KP_g(T)\} dr} - \int_0^{r_g} KP_g(T) dr - \int_{r_g}^{r_f} KP_f(T) dr - \int_{r_f}^{r_g} KP_g(T) dr \quad (81)$$

(反射 → 燃焼ガス → 火炎 → 燃焼ガス)

他平面の仮想厚さに到達する確率 R_j は

$$R_j = e^{-\int_0^{r_t-R} \{KP_f(T), KP_g(T)\} dr} - \int_0^{R_g} KP_g(T) dr - \int_{R_g}^{R_f} KP_f(T) dr - \int_{R_f}^R KP_g(T) dr \quad (82)$$

(反射 → 燃焼ガス → 火炎 → 燃焼ガス → 平面)

仮想厚さの境界面を通過する確率 R_i は式 (69) により求めることができる。

以上を総合して、単位面積の小区分 dl_o の火炎より放出されたエネルギー束のうち、火炎または燃焼ガスに吸収される確率 R_{ff} および R_{fo} が求められる。また、単位面積の仮想厚さ dl_j

より放出されたエネルギー束のうち火炎または燃焼ガスに吸収される確率 R_{ff} および R_{fg} も求めることができる。ゆえに、小区分 dl に吸収されるエネルギー束数は

$$N_{ff} + N_{jf} = N \frac{dl_0}{L_t} R_{ff} + N \frac{dL_j}{L_t} R_{jf} \quad (\text{火炎}) \quad (83)$$

$$N_{fg} + N_{jg} = N \frac{dl_0}{L_t} R_{fg} + N \frac{dL_j}{L_t} R_{jg} \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (84)$$

ただし、 N_{ff} , N_{fg} : 火炎より放出され、火炎または燃焼ガスに吸収されるエネルギー束数、 N_{jf} , N_{jg} : 仮想厚さより放出され、火炎または燃焼ガスに吸収されるエネルギー束数

上記に各々エネルギー束の強さを乗じ加算すると、小区分 dl に吸収されるエネルギー量を求めることができる。

$$\begin{aligned} & \int_{L_g}^{L_g+L_f} \frac{Q}{Q_m} \frac{Q_m}{N} L_t N \frac{dl_0}{L_t} R_{ff} + \sum_{j=1}^2 \frac{\varepsilon F(T_j) \sigma T_j^4}{Q_m dL_j} \frac{Q_m}{N} L_t N \frac{dL_j}{L_t} R_{jf} \\ & = Q_m \int_{L_g}^{L_g+L_f} \frac{Q}{Q_m} R_{ff} dl_0 + \sum_{j=1}^2 Q_m \frac{\varepsilon F(T_j) \sigma T_j^4}{Q_m} R_{jf} \quad (\text{火炎}) \end{aligned} \quad (85)$$

$$\begin{aligned} & \int_{L_g}^{L_g+L_f} \frac{Q}{Q_m} \frac{Q_m}{N} L_t N \frac{dl_0}{L_t} R_{fg} + \sum_{j=1}^2 \frac{\varepsilon F(T_j) \sigma T_j^4}{Q_m dL_j} \frac{Q_m}{N} L_t N \frac{dL_j}{L_t} R_{jg} \\ & = Q_m \int_{L_g}^{L_g+L_f} \frac{Q}{Q_m} R_{fg} dl_0 + \sum_{j=1}^2 Q_m \frac{\varepsilon F(T_j) \sigma T_j^4}{Q_m} R_{jg} \quad (\text{燃焼ガス}) \end{aligned} \quad (86)$$

単位面積の小区分 dl の火炎の発生熱量は

$$Q_m \frac{Q}{Q_m} dl \quad (\text{火炎}) \quad (87)$$

単位面積の小区分 dl の火炎および燃焼ガスのふく射能は

$$Q_m \frac{4KP_f(T) F(T) \sigma T^4}{Q_m} dl \quad (\text{火炎}) \quad (88)$$

$$Q_m \frac{4KP_g(T) F(T) \sigma T^4}{Q_m} dl \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (89)$$

単位面積の小区分 dl についてのふく射エネルギーの平衡式を求め、 $Q_m dl$ で除すと次式が得られる。

$$\int_{L_g}^{L_g+L_f} \frac{Q}{Q_m} \frac{R_{ff}}{dl} dl_0 + \sum_{j=1}^2 \frac{\varepsilon F(T_j) \sigma T_j^4}{Q_m} \frac{R_{jf}}{dl} + \frac{Q}{Q_m} = \frac{4KP_f(T) F(T) \sigma T^4}{Q_m} \quad (90)$$

(火炎)

$$\int_{L_g}^{L_g+L_f} \frac{Q}{Q_m} \frac{R_{fg}}{dl} dl_0 + \sum_{j=1}^2 \frac{\varepsilon F(T_j) \sigma T_j^4}{Q_m} \frac{R_{jg}}{dl} = \frac{4KP_g(T) F(T) \sigma T^4}{Q_m} \quad (91)$$

(燃焼ガス)

式(90)および(91)を解くことにより、火炎または燃焼ガスのふく射能分布および温度分布を求めることができる。実際計算する場合は多数のエネルギー束数について計算する必要があるため、デジタル電子計算機を使用することとした。また、エネルギー束が火炎または燃焼ガス

に吸収される確率および平面の仮想厚さに到達する確率を求める式 (70), (71), (72), (73), (74), (75), (76), (77), (78), (79), (80), (81) および (82) はガス温度の関数であり, ガス温度分布が未知の場合には計算することができない。ゆえに, ガス温度分布を仮定して試行錯誤法により計算を進め, 希望の誤差範囲内におさまるまで計算を繰返す必要がある。

4. 電子計算機用プログラム

モンテカルロ法を適用してデジタル電子計算機用プログラムを作成するために, 図-12のごとく2平面間を M 等分し⁶⁾, 火炎および燃焼ガスの小区分では温度が一様であると考え。平面の仮想厚さは仮定した条件により, そのまま上記小区分と同様に取扱うことができる。

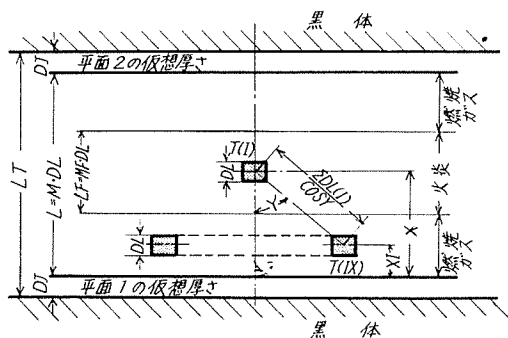


図-12 a

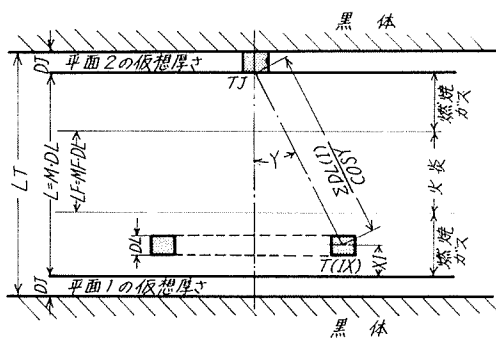


図-12 b

火炎の小区分 I よりエネルギー束が放出される条件は

$$\frac{(I-1) \cdot DL + DJ}{LT} < \text{RAN} \leq \frac{I \cdot DL + DJ}{LT} \quad (92)$$

ただし, DL: 小区分の長さ, DJ: 平面の仮想厚さ, LT: 仮想全厚さ = M · DL + 2DJ
RAN: 0~1 の一様乱数

単位面積の小区分 I より放出されるエネルギー束数は式 (59) より

$$N \frac{DL}{LT} \quad (93)$$

このエネルギー束の強さは式 (60) より

$$\frac{Q}{QM} \frac{QM}{N} LT \quad (94)$$

ただし, QM: 平均熱発生量 = $\frac{Q \cdot MF \cdot DL + \sum_{j=1}^2 E \cdot F(T_j) \sigma T_j^4}{LT}$,

LF = MF · DL: 火炎の厚さ, E: 平面のふく射率

放出される方向は式 (61) より

$$\cos Y = 1 - 2\text{RAN} \quad (95)$$

ただし, Y: 放出される方向

火炎の小区分 I より放出されたエネルギー束が火炎または燃焼ガスの小区分 IX に吸収される条件は式 (62) および (63) より

$$\text{RAN} = 1 - e^{-\sum_{I=I}^{IX} \frac{U(I)}{|\cos Y|}} \quad (96)$$

$$\text{ただし, } U(I) = \text{KF} \{T(I)\} \cdot \text{DL} \quad (\text{火炎})$$

$$U(I) = \text{KP} \{T(I)\} \cdot \text{DL} \quad (\text{燃焼ガス})$$

上式を変形すると

$$U(IX) = -|\cos Y| \log_e(1 - \text{RAN}) - \sum_{I=I}^{IX-1} U(I) \quad (I < IX \text{ の場合})$$

$$U(IX) = -|\cos Y| \log_e(1 - \text{RAN}) - \sum_{I=I}^{IX+1} U(I) \quad (I > IX \text{ の場合})$$

また, このエネルギー束が平面の仮想厚さに到達する条件は式 (64) より

$$\text{RAN} \geq e^{-\frac{1}{2} \sum_{I=I} \frac{U(I)}{|\cos Y|}} \quad (\text{平面 1}) \quad (99)$$

$$\text{RAN} \geq e^{-\sum_{I=I}^M \frac{U(I)}{|\cos Y|}} \quad (\text{平面 2}) \quad (100)$$

仮想厚さに到達したエネルギー束が境界面を通過する条件は式 (65) より

$$\text{RAN} \leq E \quad (101)$$

のごとく求められる。

平面の仮想厚さよりエネルギー束が放出される条件は

$$0 < \text{RAN} \leq \frac{\text{DJ}}{\text{LT}} \quad (\text{平面 1}) \quad (102)$$

$$\frac{\text{L} + \text{DJ}}{\text{LT}} < \text{RAN} \leq 1 \quad (\text{平面 2}) \quad (103)$$

単位面積の仮想厚さより放出されるエネルギー束数は式 (66) より

$$N \frac{\text{DJ}}{\text{LT}} \quad (104)$$

このエネルギー束の強さは式 (68) より

$$\frac{E \cdot F(TJ) \sigma T J^4}{\text{QM}} \cdot \frac{\text{QM}}{N} \text{LT} \quad (105)$$

放出される方向は式 (69) より

$$\cos Y = \sqrt{1 - \text{RAN}} \quad (106)$$

仮想厚さより放出されたエネルギー束が火炎または燃焼ガスの小区分 IX に吸収される条件は式 (70), (71) および (72) より

$$\text{RAN} = 1 - e^{-\sum_{l=1}^{IX} \frac{U(l)}{|\cos Y|}} \quad (\text{平面 1}) \quad (107)$$

$$\text{RAN} = 1 - e^{-\sum_{l=M}^{IX} \frac{U(l)}{|\cos Y|}} \quad (\text{平面 2}) \quad (108)$$

上式を変形すると

$$U(\text{IX}) = -|\cos Y| \log_e(1 - \text{RAN}) - \sum_{l=1}^{IX-1} U(l) \quad (\text{平面 1}) \quad (109)$$

$$U(\text{IX}) = -|\cos Y| \log_e(1 - \text{RAN}) - \sum_{l=M}^{IX-1} U(l) \quad (\text{平面 2}) \quad (110)$$

また、このエネルギー束が他平面の仮想厚さに到達する条件は式(73)より

$$\text{RAN} \geq e^{-\sum_{l=1}^M \frac{U(l)}{|\cos Y|}} \quad (111)$$

仮想厚さに到達したエネルギー束が境界面を通過する条件は式(101)にて求められる。

火炎および仮想厚さより放出されたエネルギー束が火炎または燃焼ガスに吸収された場合、その小区分を式(92)にて求め計算機に記憶させておき、同個所より同じ強さのエネルギー束が再放出されるものとして、上記同様計算を進める。

エネルギー束が仮想厚さに到達し、境界面にて反射される条件は

$$\text{RAN} > E \quad (112)$$

反射される方向は式(106)により求めることができる。反射されたエネルギー束が、火炎または燃焼ガスの小区分 IX に吸収される条件を求めるには、エネルギー束が放出された個所からの総計距離を考慮する必要がある。すなわち

$$U(\text{IX}) = -|\cos YX| \left\{ \log_e(1 - \text{RAN}) + \frac{1}{|\cos Y|} \sum_{l=1}^1 U(l) \right\} - \sum_{l=1}^{IX-1} U(l) \quad (113)$$

(平面 1 で反射)

$$U(\text{IX}) = -|\cos YX| \left\{ \log_e(1 - \text{RAN}) + \frac{1}{|\cos Y|} \sum_{l=1}^M U(l) \right\} - \sum_{l=M}^{IX-1} U(l) \quad (114)$$

(平面 2 で反射)

ただし、YX: 反射される方向

さらに、反射が繰返されると

$$U(\text{IX}) = -|\cos YX_n| \left\{ \log_e(1 - \text{RAN}) + \frac{1}{|\cos Y|} \sum_{l=1}^1 U(l) + \frac{1}{|\cos YX|} \sum_{l=1}^M U(l) \dots \right\} - \sum_{l=K}^{IXK} U(l)$$

(最初に平面 1 で反射) (115)

$$U(\text{IX}) = -|\cos YX_n| \left\{ \log_e(1 - \text{RAN}) + \frac{1}{|\cos Y|} \sum_{l=1}^M U(l) + \frac{1}{|\cos YX|} \sum_{l=M}^1 U(l) \dots \right\} - \sum_{l=K}^{IXK} U(l)$$

(最初に平面 2 で反射) (116)

ただし、YX_n: n 回目に反射される方向

K=1 の場合 IXK=IX-1, K=M の場合 IXK=IX+1

ふく射エネルギー束の追跡は下記のような計算を行ないつつ進められる。まず、式(92),(102)および(103)によりエネルギー束が放出される火炎の小区分または仮想厚さを求め、式(94)または(105)によりエネルギー束の強さ、式(95)または(106)により放出される方向を求める。つぎに式(97),(98)または(109),(110)により吸収される小区分、式(99),(100)または(111)により仮想厚さに到達する条件を求める。エネルギー束が火炎または燃焼ガスにより吸収された場合、同個所より再放出されるものとして計算を続ける。エネルギー束が仮想厚さに到達した場合は、式(101)により境界面を通過する条件を求め、境界面を通過して黒体に吸収された場合はそのエネ

```

C PROGRAM OF MONTE CARLO SOLUTION OF RADIANT HEAT TRAUSFER THROUGH QTF00100
C FLAME AND GAS BETWEEN PARALLEL GRAY WALLS QTF00105
C PROGRAMMED AND CODED BY H. TANIGUCHI , 20 JAN. 1967 QTF00110
C DIMENSION T(100) ,U(100),FG(100),UL(100),RJ(2),R(2), QTF00115
1 SG(100),SJ(2) QTF00120
10 READ (5,11) N,M,MF,IS1 QTF00125 1
WRITE (6,12) N,M,MF,IS1 QTF00130 2
READ (5,13) AKP,AKF,R1,R2 QTF00135 3
WRITE (6,14) AKP,AKF,R1,R2 QTF00140 4
READ (5,13) BF,BF QTF00145 5
WRITE (6,14) BF,BF QTF00150 6
READ (5,13) AL,Q,DUE QTF00155 7
WRITE (6,14) AL,Q,DUE QTF00160 8
READ (5,13) DJ,TJ,F QTF00200 9
WRITE (6,14) DJ,TJ,E QTF00205 10
WRITE (6,452) QTF00206 11
11 FORMAT(S115) QTF00210 12
12 FORMAT(1H 5115) QTF00215 13
13 FORMAT(5E15,7) QTF00220 14
14 FORMAT(1H 5E15,7) QTF00225 15
20 IS2=0 QTF00230 16
NRAN=5249347 QTF00235 17
S=4.96E-8 QTF00240 18
30 DL=AL/FLOAT(M) QTF00245 19
ALF=DL+FLOAT(MF) QTF00250 20
ALT=AL+DJ*2. QTF00255 21
CALL SUB100(TJ,R1,R2,F) QTF00260 22
TJ=F*E+S*TJ**4 QTF00300 23
QM=(Q*ALF+TJ*2.)/ALT QTF00305 24
M1=(M-MF)/2+1 QTF00310 25
M2=M1-MF-1 QTF00315 26
Q=Q/QM QTF00320 27
TJ=TJ/QM/DJ QTF00325 28
IF(M1-1) 31,31,33 QTF00330 29
31 DO 32 I=1,M QTF00335 30
32 U(I)=AKF*DL QTF00340 32
GO TO 40 QTF00345 33
33 DO 34 I=1,M1-1 QTF00350 34
34 U(I)=AKP*DL QTF00355 36
DO 35 I=M1,M2 QTF00360 37
35 U(I)=AKF*DL QTF00400 39
DO 36 I=M2+1,M QTF00405 40
36 U(I)=AKP*DL QTF00410 42
40 NF=0 QTF00415 43
DO 41 I=1,M QTF00420 44
41 SG(I)=0. QTF00425 46
DO 43 J=1,2 QTF00430 47
43 SJ(J)=0. QTF00435 49
60 IF(NI-N) 70,310,310 QTF00440 50
70 NI=NI+1 QTF00445 51
71 CALL SUB900(NRAN,RAN) QTF00450 52
72 X=ALT*RAN QTF00455 53
CALL SUB900(NRAN,RAN) QTF00460 54
80 IF(X-NJ) 90,110,110 QTF00500 55
90 X=DJ QTF00505 56
I=1 QTF00510 57
J=2 QTF00511 58
91 QD=TJ QTF00515 59
SJ(J)=SJ(J)+QD QTF00520 60
100 COSY=SORT(RAN) QTF00525 61
DL0=DL QTF00535 62
GO TO 220 QTF00540 63
110 IF(X-AL-DJ) 120,120,180 QTF00545 64
120 I=IFIX((X-DJ)/DL)+1 QTF00550 65
IF(I-M1) 60,121,121 QTF00555 66
121 IF(I-M2) 122,122,60 QTF00560 67
122 QD=0 QTF00600 68
SG(I)=SG(I)+QD QTF00605 69
130 COSY=1.-2.*RAN QTF00610 70
140 IF(COSY) 150,160,170 QTF00615 71
150 J=1 QTF00620 72
DL0=X-(DL+FLOAT(I-1)*DJ) QTF00630 73
GO TO 220 QTF00635 74

```

図—13 a 電子計算機用

ルギ束の計算を終了し、次のエネルギー束を追跡する。エネルギー束が上記境界面で反射された場合は、式(113)、(114)、(115)および(116)により吸収される小区分を求める。このようにして、ふく射エネルギー束全数について計算し、単位面積の火炎の小区分 I より放出されたエネルギー束のうち火炎または燃焼ガスの小区分 IX に吸収されたエネルギー束数を求め、エネルギー束の強さを乗ずると

$$\frac{Q}{QM} \cdot \frac{QM}{N} \text{LT} \cdot \text{NS}(I, IX) \quad (117)$$

ただし、NS(I,IX): 小区分 I より放出され小区分 IX に吸収されたエネルギー束数

```

160 SG(I)=SG(I)+OD          0TF00640 75
    CALL SUB900(NRAN,RAN)   0TF00645 76
    GO TO 130                0TF00650 77
170 J=2                      0TF00651 78
    DLO=DL*FLOAT(I)+DJ-X    0TF00655 79
    GO TO 220                0TF00660 80
180 X=AL+DJ                 0TF00700 81
    I=M                      0TF00701 82
    J=1                      0TF00705 83
    GO TO 91                 0TF00710 84
220 CALL SUB500(NRAN,COSY,DL,DLO,U,DJ,E,AL,I,J,M,X) 0TF00715 85
230 IF(I) 240,240,270       0TF00720 86
240 SJ(J)=SJ(J)-OD         0TF00725 87
    GO TO 60                 0TF00730 88
270 SG(I)=SG(I)+OD         0TF00735 89
    CALL SUB900(NRAN,RAN)   0TF00740 90
    GO TO 130                0TF00745 91
310 DO 311 I=1,M           0TF00746 92
311 FG(I)=ALT/(DL*FLOAT(N))*SG(I) 0TF00750 94
320 DO 321 J=1,2           0TF00755 95
321 RJ(J)=ALT/(DJ*FLOAT(N))*SJ(J) 0TF00760 97
330 IF(IS2) 340,340,360    0TF00800 98
340 WRITE(6,341)           0TF00805 99
    WRITE(6,342)N           0TF00810 100
    WRITE(6,343)           0TF00815 101
    WRITE(6,344)QM         0TF00820 102
    WRITE(6,345)           0TF00825 103
    WRITE(6,346)(FG(I),I=1,M) 0TF00830 104
    WRITE(6,347)           0TF00835 108
    WRITE(6,348)(RJ(J),J=1,2) 0TF00840 109
341 FORMAT(1H,14X,1HN)     0TF00845 113
342 FORMAT(1H,8X,17)       0TF00850 114
343 FORMAT(1H,13X,2HOM)    0TF00855 115
344 FORMAT(1H,E15.7)       0TF00860 116
345 FORMAT(1H,10X,5HFG(I)) 0TF00900 117
346 FORMAT(1H,5E15.7)      0TF00905 118
347 FORMAT(1H,10X,5HRJ(J)) 0TF00910 119
348 FORMAT(1H,2E15.7)      0TF00915 120
350 IF(IS2) 360,360,390    0TF00920 121
360 DO 361 I=1,M           0TF00925 122
361 UL(I)=U(I)             0TF00930 124
362 CALL SUB800(DL,U,FG,OM,S,AKP,AKF,R1,R2,BP,BF,DHE,M,M1,M2,T) 0TF01000 125
370 DO 371 J=1,2           0TF01005 126
371 R(J)=RJ(J)*OM+DJ       0TF01010 128
380 IF(IS2) 390,390,420    0TF01015 129
390 WRITE(6,391)           0TF01020 130
    WRITE(6,392)(T(I),I=1,M) 0TF01025 131
    WRITE(6,393)           0TF01030 135
    WRITE(6,392)(UL(I),I=1,M) 0TF01035 136
    WRITE(6,394)           0TF01040 140
    WRITE(6,395)(R(J),J=1,2) 0TF01045 141
391 FORMAT(1H,11X,4HT(I))  0TF01050 145
392 FORMAT(1H,5E15.7)      0TF01055 146
393 FORMAT(1H,11X,4HU(I))  0TF01060 147
394 FORMAT(1H,11X,4HR(J))  0TF01100 148
395 FORMAT(1H,2E15.7)      0TF01105 149
396 IF(IS1) 450,450,400    0TF01110 150
400 IF(IS2) 410,410,450    0TF01115 151
410 IS2=1                  0TF01120 152
420 SDU=0.                 0TF01125 153
    DO 423 I=1,M           0TF01130 154
423 SDU=SDU+ABS((U(I)-UL(I))/U(I)) 0TF01135 156
    SDU=SDU/FLOAT(M)       0TF01140 157
430 IF(SDU-DUF) 340,340,440 0TF01145 158
440 DO 441 I=1,M           0TF01150 159
441 U(I)=(U(I)+UL(I))/2.   0TF01155 161
    NRAN=5249347           0TF01160 162
    GO TO 40               0TF01200 163
450 WRITE(6,451)           0TF01205 164
451 FORMAT(1H1)           0TF01210 165
452 FORMAT(1H )           0TF01320 166
    GO TO 10               0TF01325 167
END                        0TF01330 168

```

C	SUBPROGRAM OF CALCULATION OF ABSORBING LENGTH	ALF00100	
C	PROGRAMMED AND CODED BY H. TANIGUCHI, 20 JAN. 1967	ALF00105	
	500 SUBROUTINE SUB900(NRAN,COSY,DL,DL0,U,DJ,E,AL,I,J,M,X)	ALF00110	1
	DIMENSION U(100)	ALF00115	
	510 CALL SUB900(NRAN,RAN)	ALF00120	2
	511 SU=ABS(COSY)*ALOG(RAN)	ALF00125	3
	DL=-DL*SU/U(I)	ALF00130	4
	512 IF(DLL-DL) 680,690,530	ALF00135	5
	530 SU=SU+U(I)*DL/DL	ALF00155	6
	IF(J-1) 531,531,532	ALF00160	/
	531 X=X-DL 0	ALF00200	8
	GO TO 540	ALF00205	9
	532 X=X+DL 0	ALF00210	10
	540 IF(J-1) 550,550,570	ALF00215	11
	550 I=I-1	ALF00220	12
	560 IF(I) 620,620,660	ALF00225	13
	570 I=I+1	ALF00230	14
	580 IF(I-M) 660,660,620	ALF00235	15
	620 CALL SUB900(NRAN,RAN)	ALF00240	16
	621 IF(RAN-E) 630,630,640	ALF00245	17
	630 I=0	ALF00250	18
	GO TO 730	ALF00255	19
	640 CALL SUB900(NRAN,RAN)	ALF00260	20
	642 COSYX=SQRT(RAN)	ALF00300	21
	SU=SU*ABS(COSYX/COSY)	ALF00305	22
	650 COSY=COSYX	ALF00310	23
	IF(J-1) 651,651,652	ALF00315	24
	651 J=2	ALF00320	25
	I=1	ALF00325	26
	X=DJ	ALF00325	27
	GO TO 660	ALF00330	28
	652 J=1	ALF00335	29
	I=M	ALF00336	30
	X=AL+DJ	ALF00340	31
	660 DLL=-DL*SU/U(I)	ALF00350	32
	670 IF(DLL-DL) 680,680,720	ALF00355	33
	680 IF(J-1) 700,700,710	ALF00360	34
	700 X=X-DLL	ALF00400	35
	GO TO 730	ALF00405	36
	710 X=X+DLL	ALF00410	37
	GO TO 730	ALF00415	38
	720 SU=SU+U(I)	ALF00420	39
	IF(J-1) 721,721,722	ALF00425	40
	721 X=X-DL	ALF00430	41
	GO TO 540	ALF00435	42
	722 X=X+DL	ALF00440	43
	GO TO 540	ALF00445	44
	730 RETURN	ALF00450	45
	END	ALF00455	46
C	SUBPROGRAM OF CALCULATION OF GAS TEMPERATURE AND OPTICAL THICKNESS	TOF00100	
C	PROGRAMMED AND CODED BY H. TANIGUCHI, 20 JAN. 1967	TOF00105	
	800 SUBROUTINE SUB800(DL,U,FG,OM,S,AKP,AKF,R1,R2,BP,BF,DUE,M,M1,M2,T)	TOF00110	1
	DIMENSION T(100),U(100),FG(100),UX(100),F(100),FX(100)	TOF00120	
	801 DO 802 I=1,M	TOF00125	2
	FX(I)=1.	TOF00130	4
	802 UX(I)=U(I)	TOF00135	5
	810 DO 815 I=1,M	TOF00140	6
	815 T(I)=(FG(I)*OM*DL/(4.*FX(I)*UX(I)*S))*0.25	TOF00145	8
	SDF=0.	TOF00150	9
	DO 816 I=1,M	TOF00155	10
	TI=T(I)	TOF00160	12
	CALL SUB100(TI,R1,R2,FI)	TOF00205	13
	F(I)=FI	TOF00205	14
	816 SDF=SDF+ABS((F(I)-FX(I))/F(I))	TOF00210	15
	SDF=SDF/FLOAT(M)	TOF00215	16
	IF(SDF-DUE) 820,820,817	TOF00220	17
	817 DO 818 I=1,M	TOF00225	18
	818 FX(I)=(F(I)+FX(I))/2.	TOF00230	20
	GO TO 810	TOF00235	21
	820 TM=0.	TOF00240	22
	DO 823 I=1,M	TOF00245	23
	823 TM=TM+T(I)	TOF00250	25
	TM=TM/FLOAT(M)	TOF00255	26
	830 IF(M1-1) 831,831,833	TOF00260	27
	831 DO 832 I=1,M	TOF00300	28
	832 U(I)=AKF*DL*(T(I)/TM)**BF	TOF00305	30
	GO TO 840	TOF00310	31
	833 DO 834 I=1,M1-1	TOF00315	32
	834 U(I)=AKP*DL*(T(I)/TM)**BP	TOF00320	34
	DO 835 I=M1,M2	TOF00325	35
	835 U(I)=AKF*DL*(T(I)/TM)**BF	TOF00330	37
	DO 836 I=M2+1,M	TOF00335	38
	836 U(I)=AKP*DL*(T(I)/TM)**BP	TOF00340	40
	840 SDU=0.	TOF00345	41
	DO 843 I=1,M	TOF00350	42
	843 SDU=SDU+ABS((U(I)-UX(I))/U(I))	TOF00355	44
	SDU=SDU/FLOAT(M)	TOF00360	45
	850 IF(SDU-DUE) 870,870,860	TOF00400	46
	860 DO 861 I=1,M	TOF00405	47
	861 UX(I)=(U(I)+UX(I))/2.	TOF00410	49
	GO TO 810	TOF00415	50
	870 RETURN	TOF00420	51
	END	TOF00425	52

図—13b 電子計算機用プログラム

```

C      SUBPROGRAM OF CALCULATION OF SPECTRAL FACTOR FOR EMISSIVITY          SFM00100
C      PROGRAMMED AND CODED BY H. TANIGUCHI , 20 JAN. 1967                SFM00105
C      SUBROUTINE SUB100(T1,R1,R2,F1)                                       SFM00110
T1=T1*R1/10000.                                                            SFM00115
IF(T1.LE.0.097) GO TO 1010                                                SFM00120
IF(T1.GE.10.) GO TO 1000                                                  SFM00121
T1=ALOG(T1)                                                                SFM00125
F1=-0.08979023+0.2243122*T1-0.2619683*T1**2                              SFM00130
1  -0.1858129*T1**3-0.08463283*T1**4                                       SFM00135
2  +0.0219086*T1**5-1.093006E-3*T1**6                                       SFM00140
3  -8.441998E-4*T1**7+4.865101E-5*T1**8                                       SFM00145
4  +6.000257E-5*T1**9-9.61758E-6*T1**10                                       SFM00146
F1=EXP(F1)                                                                  SFM00150
GO TO 1020                                                                  SFM00155
1000 F1=1.                                                                    SFM00156
GO TO 1020                                                                  SFM00157
1010 F1=0.                                                                    SFM00160
1020 T2=T1*R2/10000.                                                       SFM00165
IF(T2.LE.0.097) GO TO 1040                                                SFM00170
IF(T2.GE.10.) GO TO 1060                                                  SFM00171
T2=ALOG(T2)                                                                SFM00175
F2=-0.08979023+0.2243122*T2-0.2619683*T2**2                              SFM00180
1  +0.1858129*T2**3-0.08463283*T2**4                                       SFM00185
2  +0.0219086*T2**5-1.093006E-3*T2**6                                       SFM00190
3  -8.441998E-4*T2**7+4.865101E-5*T2**8                                       SFM00195
4  +6.000257E-5*T2**9-9.61758E-6*T2**10                                       SFM00200
F2=EXP(F2)                                                                  SFM00205
GO TO 1050                                                                  SFM00210
1060 F2=1.                                                                    SFM00211
GO TO 1050                                                                  SFM00212
1040 F2=0.                                                                    SFM00215
1050 F1=F2-F1                                                                SFM00220
RETURN                                                                      SFM00225
END                                                                          SFM00230

```

```

C      SUBPROGRAM OF GENERATION OF RANDOM NUMBER , REVISED              RNR001110
C      CODED BY H. TANIGUCHI , 24 NOVEMBER 1965                          RNR001120
900 SUBROUTINE SUB900(NRAN,RAN)                                           RNR001130
910 NRAN=MOD(23*NRAN,10000001)                                             RNR001140
930 RAN=FLOAT(NRAN)*1.E-7                                                 RNR001150
940 RETURN                                                                  RNR001160
END                                                                          RNR001180

```

図-13c 電子計算機用プログラム

また、単位面積の仮想厚さより放出されたエネルギーのうち火炎または燃焼ガスの小区分 IX に吸収されたエネルギー束数を求め、エネルギー束の強さを乗ずると

$$\frac{E \cdot F(T_J) \sigma T_J^4}{QM} \frac{QM}{N} LT \cdot NS(J, IX) \quad (118)$$

ただし、NS(J, IX)：仮想厚さ J より放出され小区分 IX に吸収されたエネルギー束数
単位面積の火炎の小区分 IX の発生熱量は

$$\frac{Q}{QM} QM \cdot DL \quad (119)$$

また、単位面積の火炎または燃焼ガスの小区分 IX のふく射能は

$$4U(IX) F \left\{ T(IX) \right\} \sigma T(IX)^4 \quad (120)$$

単位面積の火炎および燃焼ガスの小区分 IX についてのふく射エネルギーの平衡式を求め、QM·DL で除すと次式が得られる。

$$FA(IX) = \frac{4U(IX) F \left\{ T(IX) \right\} \sigma T(IX)^4}{QM \cdot DL} = \frac{LT}{N \cdot DL} \left[\sum_{l=M_1}^{M_2} \frac{Q}{QM} NS(l, IX) + \sum_{j=1}^2 \frac{E \cdot F(T_J) \sigma T_J^4}{QM} NS(J, IX) + \frac{Q}{QM} \frac{N \cdot DL}{LT} \right] \quad (\text{火炎}) \quad (121)$$

$$FA(IX) = \frac{4U(IX)F\{T(IX)\}\sigma T(IX)^4}{QM \cdot DL} = \frac{LT}{N \cdot DL} \left[\sum_{I=1}^{M2} \frac{Q}{QM} NS(I, IX) + \sum_{J=1}^2 \frac{E \cdot F(TJ)\sigma TJ^4}{QM} NS(J, IX) \right] \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (122)$$

ただし、FA(IX)：小区分 IX の無次元ふく射能，M1~M2：火炎の範囲

式(121), (122)により火炎および燃焼ガスのふく射能分布を求め、さらに、温度分布を求めることができる。しかし、前節にて述べたように、エネルギー束が吸収される確率および到達する確率を求めるためには、ガス温度分布を仮定して計算を開始し、試行錯誤法により計算を進める必要がある。また、F{T(I)}が任意の関数であると、無次元ふく射能からガス温度を直接求めることが困難であるから、この計算にも試行錯誤法を利用する必要がある。

以上により電子計算機用プログラム⁶⁾を図-13のごとく作成した。ただし、U(I)およびF{T(I)}は次式により計算することとした。

$$U(I) = K_f \left\{ \frac{T(I)}{TM} \right\}^{B_f} DL \quad (\text{火 炎}) \quad (123)$$

$$U(I) = K_p \left\{ \frac{T(I)}{TM} \right\}^{B_p} DL \quad (\text{燃焼ガス}) \quad (124)$$

ただし、 K_f, K_p, B_f, B_p ：常数，TM：火炎および燃焼ガス全体の平均温度

$$F\{T(I)\} = e^{A_0 + \sum_{\epsilon=1}^{10} A_{\epsilon} \left\{ \log_e \lambda_b T(I) \right\}^{\epsilon}} - e^{A_0 + \sum_{\epsilon=1}^{10} A_{\epsilon} \left\{ \log_e \lambda_a T(I) \right\}^{\epsilon}} \quad (125)$$

ただし、 $\lambda_a \sim \lambda_b$ ：ふく射に関与する波長域， A_0, A_{ϵ} ：近似式の係数

式(125)による計算結果は精度約5桁である。

プログラム言語としてはFORTRAN IV⁷⁾を使用し、主プログラムおよび4つのサブプログラム（エネルギー束の吸収される小区分を求めるサブルーチン、温度およびU(I)を計算するサブルーチン、F{T(I)}を計算するサブルーチン、乱数発生サブルーチン）に分けて作成してある。実際の計算は日立5020E電子計算機により行なわれたので、図-13のプログラムに計算機コントロール用命令を追加して使用している。

5. 計算結果

前節のプログラムによる計算結果を1種類のふく射ガスのみが存在する場合の既発表の結果^{1)~3)}と比較するため、図-14のごとく火炎が2平面間に充満している場合を計算し、両者が一致することを確認した。その結果は図-15, 16, 17, 18, 19および20のとおりである。すなわち、2平面の間隔が増すに従い、図-15のごとく無次元ふく射能は急増し、また平面のふく射率が減少した場合も図-16のごとく無次元ふく射能が

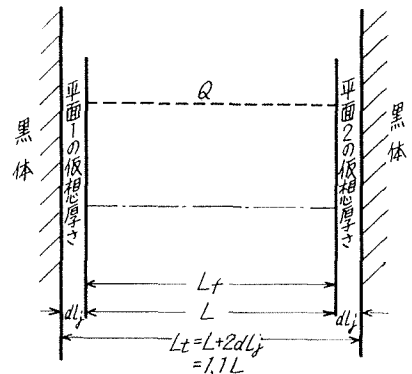
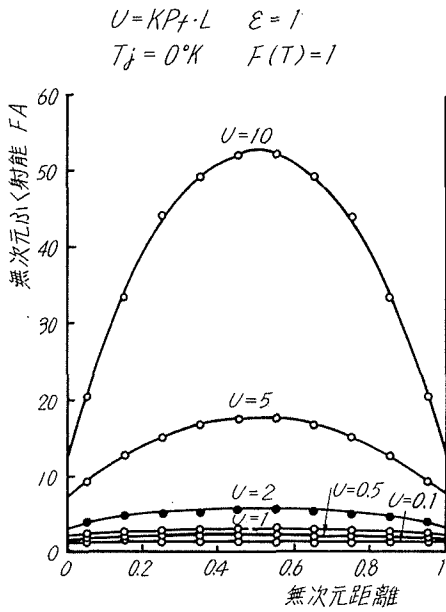
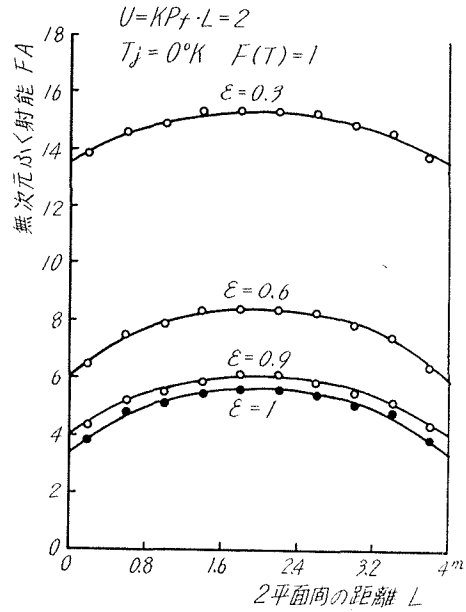


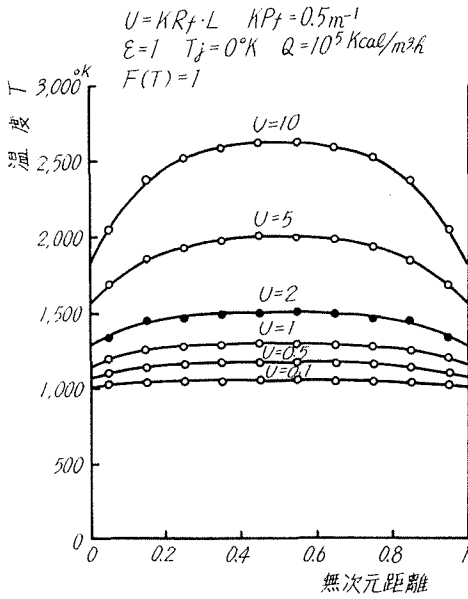
図-14



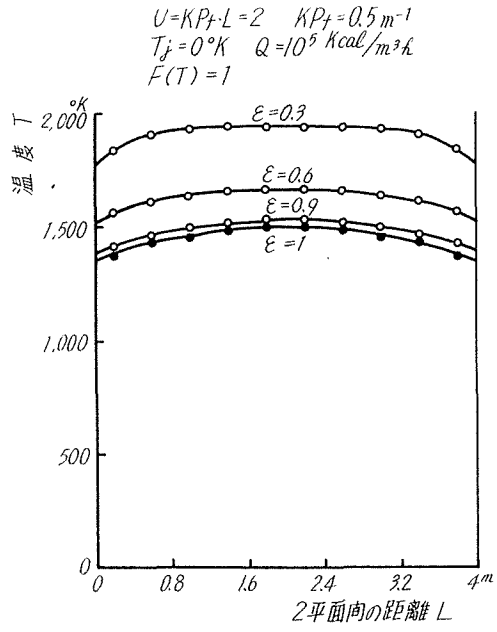
図—15



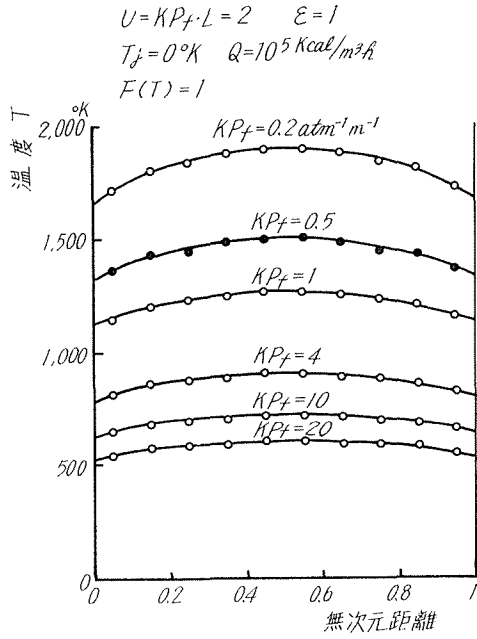
図—16



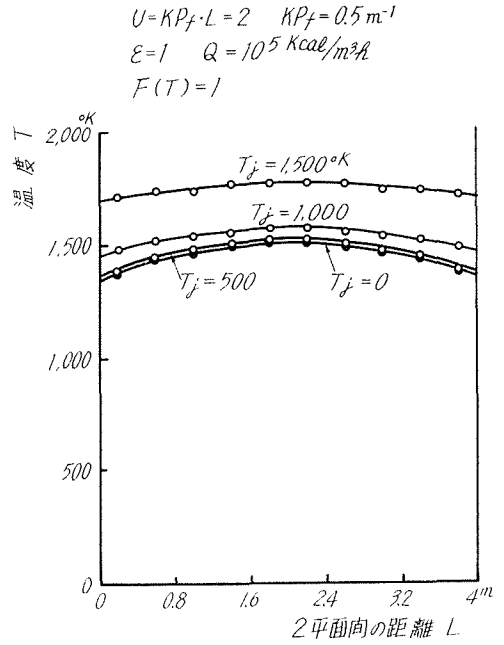
図—18



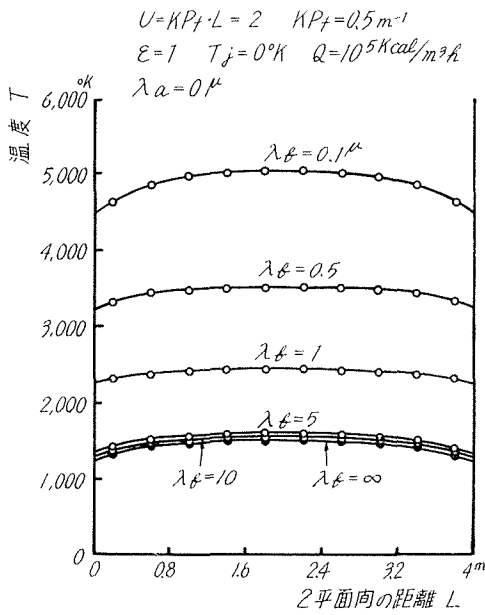
図—19



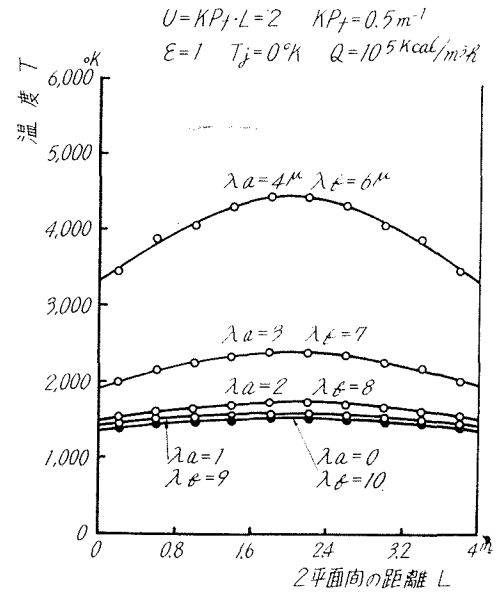
図—19



図—20



図—21



図—22

同様に急増することが示されている。図-19のごとく火炎の吸収係数が変化すると、他の条件が同じでもガス温度が相当変わることがわかる。また、図-20のごとく平面の温度が上昇すると、温度レベルが高くなり、同時に平均化されて来ることが示されている。

一方、図-14の場合についてふく射に関与する波長域の影響を求めたものが図-21および22である。すなわち、ふく射に関与する波長域を零から増加させた場合の計算結果が図-22であり、波長域を0~10 μ の範囲について変えた場合が図-22である。いずれも波長域が狭くなるに従い温度分布が相当高くなって来る。これは波長域が狭いほど放出されるふく射量が減少するので、同じ放出量となり釣合うまで温度が高くなるものと考えられる。

図-23のごとく2平面の中央に火炎が存在し、その両側に燃焼ガスが存在している場合について計算した結果が図-24および25である。平均熱発生率が同じで火炎の大きさが変わった場合の計算結果が図-24であり、火炎の吸収係数が変わった場合が図-25である。すなわち、火炎が中央に集中するほど、また火炎の吸収係数が増すほど中央部の無次元ふく射能が増加することが示されている。

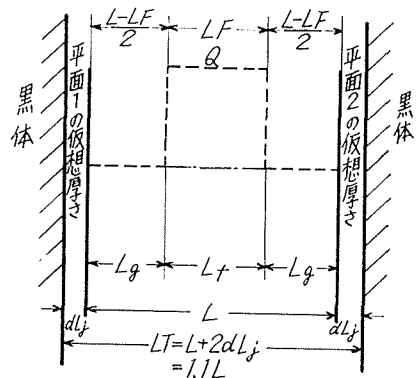


図-23

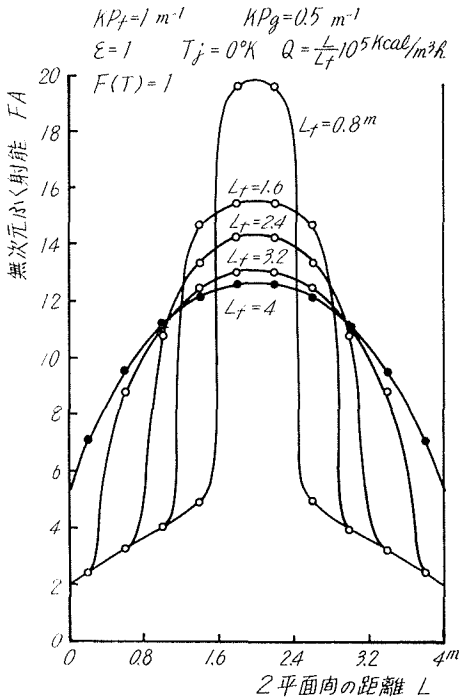


図-24

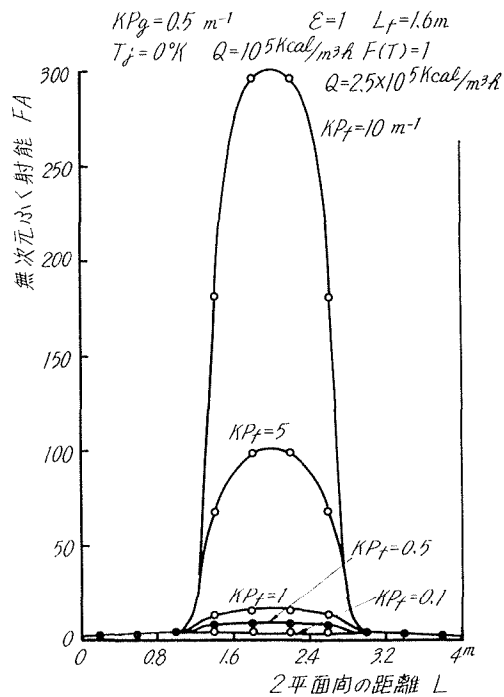


図-25

以上の計算結果は火炎および燃焼ガスの吸収係数が常数の場合についてであるが、図-13のプログラムは吸収係数が温度の関数の場合も計算することができるので、この場合について計算した結果を下記に述べることにする。図-23のごとく、火炎が中央に集中した場合についての計算結果が図-26および27であり、吸収係数に対する温度の依存度により無次元ふく射能分布が変わることが示されている。すなわち、ガスふく射を取扱う場合、灰色ガスと実在ガスによる解析結果の差を推定するための一資料として以上の解析結果が利用できるものと考えている。

実際計算を行なう場合のサンプル数と計算精度の関係については既に発表されており⁴⁾、次元の場合には図-28に示すとおりである。本報告の場合には図-28を参考にしてサンプル数

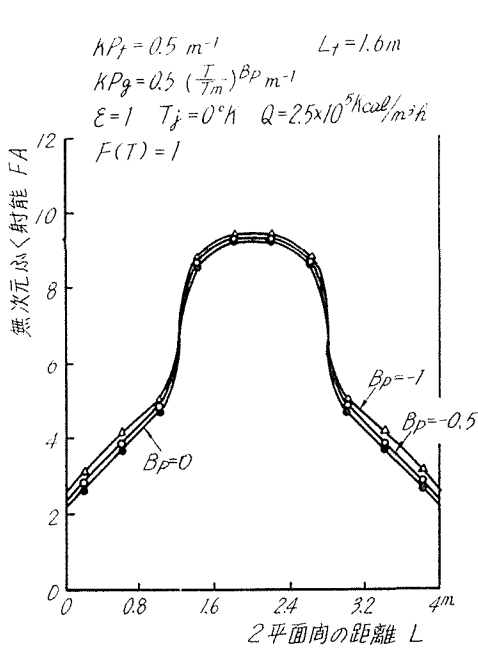


図-26

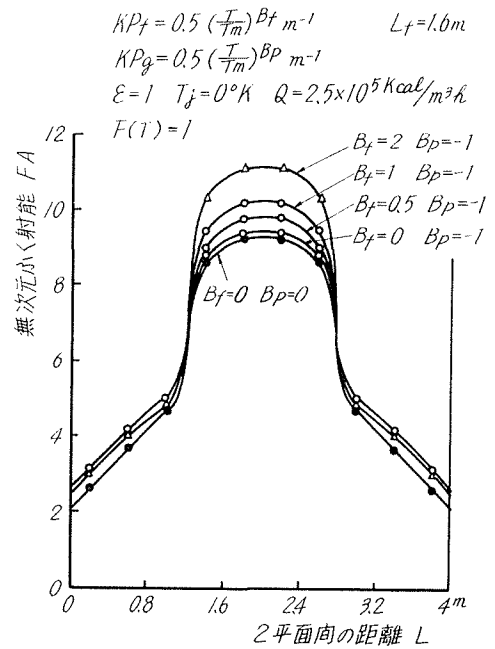


図-27

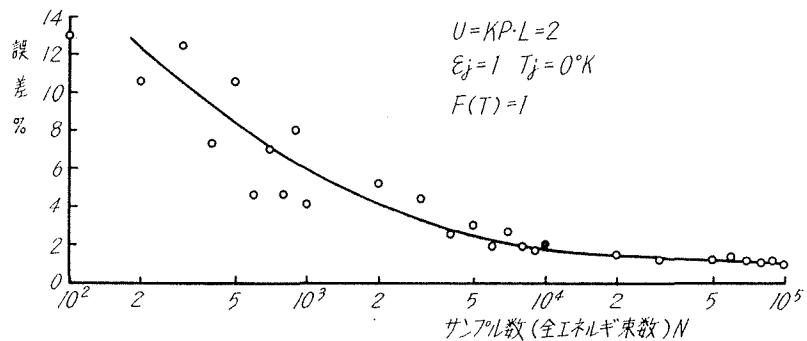


図-28

$N=10\,000$ を選ぶこととし、各計算結果はすべてこの条件にて行なったものである。

6. 結 び

無限大平行 2 平面間に 2 種類のふく射ガス (火炎および燃焼ガスに相当し、互いに異なる吸収係数をもつ。また、ふく射に関与する波長域が限定されており、吸収係数は温度の関数である) が存在する場合について、無次元ふく射能分布を求める式を導いた。しかし、直接解くことができないので、モンテカルロ法を応用した数値解法を検討し、電子計算機用プログラムを作成した。本報告に記載した数値計算による解析結果は次のとおりである。

火炎のみが 2 平面間に充満している場合の結果

- (1) 両平面間の距離を変えた場合、平面のふく射率を変えた場合を計算し、既に発表されている特定条件の場合と比較し一致することを確かめた。
- (2) ふく射に関与する波長域が変わった場合について解析した。たとえば、 $U=2$, $KP_f=0.5\text{ m}^{-1}$, $Q=10^5\text{ kcal/m}^3\text{h}$ の場合、波長域を $0\sim\infty$ から $0\sim 1\mu$ に狭めると、温度分布が 1400°K 程度から 2300°K 程度まで上昇して平衡状態となることがわかった。

火炎が中央に集中し両側に燃焼ガスが存在する場合の結果

- (3) 火炎の大きさを変えると、無次元ふく射能分布が変わることが示されている。たとえば $U=2$, $KP_f=1$, $KP_g=0.5\text{ m}^{-1}$ の場合、火炎を中央の $1/5$ の範囲に集中させると一様に充満させた場合より中央部の無次元ふく射能が約 80% 増加する。
- (4) 吸収係数が温度の関数である場合についても計算し、温度の依存度を変えて無次元ふく射能分布を比較した。火炎の吸収係数を温度の関数とした方が、燃焼ガスの吸収係数を温度の関数とした場合より無次元ふく射能分布に与える影響が大きいことがわかった。

ガスふく射を取扱う場合、灰色ガスと実在ガスによる解析結果の差を推定するための資料として、上記本報告の解析結果が利用できるものと思われる。

本研究を進めるに際し、北海道大学工学部 斎藤武教授、深沢正一教授よりご指導いただき、また計算を進めるに際しては、東京大学大型計算機センターおよび北海道大学計算センターの協力を得た。ここに深く謝意を表する次第である。

文 献

- 1) Usiskin, C. M. and Sparrow, En M.: Int. T. Heat Transfer, 1-1 (1960-6), pp. 28-38.
- 2) Howell, J. R. and Perlmutter, M.: Trans. ASME. Ser. C, 86-1 (1964-2), pp. 116-123.
- 3) 谷口 博: 北大工学部研究報告, 38 (1965-8), pp. 1-21.
- 4) 谷口 博: 機械学会論文集, 33-247 (1967-3), pp. 406-419.
- 5) 谷口 博: 機械学会第 42 期全国大会講演会前刷集, 120 (1964-10), pp. 57-60.
- 6) 谷口 博: 機械学会創立 70 周年記念北海道地区講演会前刷集, 174 (1967-8), pp. 121-124.
- 7) 森口繁一: FORTRAN 入門 (1965-8), 東京大学出版会.