

一様発熱垂直平板上の空気の層流自由対流熱伝達

(総括ふく射吸収率について)

宮本 政英*・加藤 泰生*・栗間 諄二*

Laminar Free Convection Heat Transfer from a Vertical Plate with Uniform Heat Generation to Air

(Overall Radiation Interchange Factor)

Masahide MIYAMOTO, Yasuo KATO and Junji KURIMA

Abstract

An open-air vertical thin flat plate with uniform heat generation was cooled by the free convection heat transfer to air and by the radiation heat transfer to the enclosing walls.

The overall radiation interchange factor was calculated from the heat generation rate and the convective heat flux. The convective heat flux on the surface was determined by the following two different methods;

1. the measured normal temperature gradient in the boundary layer very near the plate surface.
2. the measured surface temperature and the theoretical solution for laminar free convection on a uniform heat flux vertical surface.

It seems that the radiation interchange factor calculated by using of the both methods agree well with each other, when the emissivity of the surface is small.

1. 緒 言

静止空気中に吊るされた一様発熱する垂直平板まわりの熱移動には、自由対流によるもの、ふく射によるもの、そして平板内熱伝導によるもの等が考えられる。ただし平板内熱伝導は平板がきわめて薄く、その熱伝導率も小さい場合は、ほとんど無視できるため、この発熱は自由対流とふく射で冷却されると考えられる。

従って伝熱面からの自由対流による熱流束は、必ずしも一様ではない。しかしながら局所の自由対流による熱流束を用いたヌセルト数と修正グラスホフ数との関係は、一様熱流束に対する層流自由対流の相似解と きわめて一致し、その解を用いれば伝熱面温度の予測が可能であるとされる。¹⁾ この結果を踏まえると伝熱

面の総括ふく射吸収率 ϵ^2 の推定はきめて容易であると考えられる。

本論文では、一様発熱する垂直平板まわりの総括ふく射吸収率 ϵ' を上述の方法で求めるとともに、伝熱面近傍温度勾配より求めた自由対流熱流束から総括ふく射吸収率 ϵ を推定し、この両者の結果の詳細な比較検討を行った。またこの伝熱面におけるおおよその総括ふく射吸収率を定めると同時に、一様発熱する垂直平板まわりの層流自由対流にふく射の影響を考慮した数値解析を行い、それらの値の妥当性を吟味した。

2. 実験装置及び実験方法

Fig. 1(a) に実験装置の概略図を、Fig. 1(b) にその詳細図を示す。なおこれらの装置は外乱の影響を避けるため周囲四方をベニヤ板及びコンクリート壁で囲い、天井及び出入口はポリエチレンフィルムで覆いをした。これらは十分な対流空間を確保するように留意された。

*機械工学科

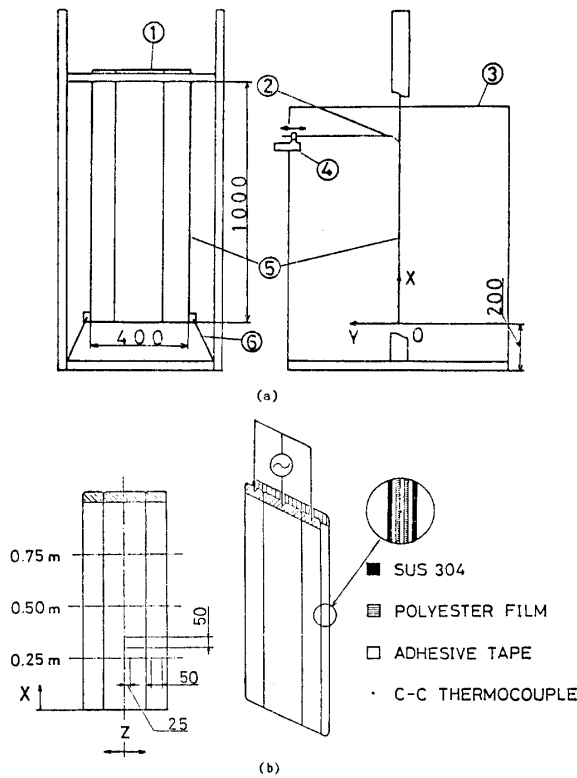


Fig. 1 (a) Experimental apparatus and coordinate system
 1 Copper bus bars
 2 C-A Thermocouple
 3 Acrylic plate
 4 Micrometer
 5 Heated plate
 6 Spring for tension
 (b) Structure of heated plate

2.1 伝熱面

伝熱面は以下の手順で製作された。

- (1) 厚さ $60 \mu\text{m}$ の SUS 304 ステンレス箔を $100 \times 2100 \text{ mm}$ 2枚と $200 \times 2100 \text{ mm}$ 1枚に切断する。
- (2) 電氣的に一樣発熱するように銅電極を長手方向の両端にハンダ付けする。
- (3) これら箔の全裏面に両面粘着テープで電気絶縁用のポリエステルフィルムを貼り合わせた。
- (4) この面に温接点を付き合わせ溶着した $\phi 0.1 \text{ mm}$ C-C 熱電対を配置図 (Fig. 1(b)) に従い接着する。この発熱体は中央から二つ折りにし貼り合わせた。
- (5) この伝熱面は、前縁が床上 200 mm の位置にくるように電極を固定し、また通電加熱による熱膨張からの歪を吸収するため前縁下方にバネで張力を付加した。

なお Fig. 1(a)(b) にも示すように座標系は前縁中心を原点とし、鉛直上方に X, 水平で伝熱面垂直方向を Y, 平行方向を Z と定めた。

ステンレス素面 (SUS 304) を用いた実験を Case A, 伝熱面のふく射熱流束を高めるために、伝熱面全面 (表面露出部分) に黒体塗料スプレー (住友スリーエム社製) を均一に吸き付けた面を用いた実験を Case B と以下呼ぶこととする。

2.2 温度測定

伝熱面温度測定は、前述の $\phi 0.1 \text{ mm}$ C-C 熱電対、およそ40本を用いた。それらの熱起電力は手動切換装置、C-C 専用氷冷式零接点、デジタル電圧計 (略

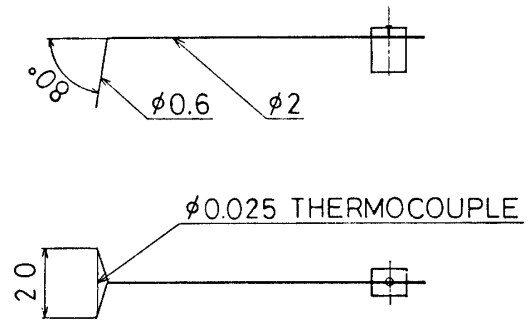


Fig. 2 Thermocouple probe to measure temperature in the boundary layer

q_w w/m^2	$X \text{ m}$		
	0.25	0.50	0.75
a. 30	△	▲	▲
	△	▲	▲
a. 110	□	■	■
	□	■	■
a. 220	○	◐	●
	○	◐	●
a. 590	—	—	—
	▽	▽	▽

Fig. 3 Experimental conditions and their symbols
 Upper row, Case A (bare surface)
 Lower row, Case B (black painted surface)
 in each heat generation rate

DVM, 0.001 mV 精度) を用いて得られた。測定にはほぼ4分間要したが、その間の変化は僅かであり無視した。

伝熱面に垂直 (Y 方向) 方向の境界層内の温度分布測定は $\phi 25 \mu\text{m}$ C-A 極細線熱電対プローブを使用した。(Fig. 2 詳細図) 温度勾配が一定値を示すのは伝熱面近傍数 mm 以内であるため、プローブを行程 30 mm のマイクロメータを用い遠隔操作により微動し十分な測定点数を得た。測定は $X=0.25, 0.5, 0.75$ m の高さで $Y=0\sim$ 数 mm の間を15~20点以上行った。各測定ごとにプローブ微動後60秒経過ののちに、熱起電力をサンプリング周期0.12秒で300個を記憶装置付 DVM に取込み、これを平均した値をその点の平均温度とした。Y 方向温度測定にはおおよそ30分を要したため、この間の周囲温度 T_∞ 、供給熱量 q_w の変化を考慮する必要があり、測定中 T_∞ と q_w は時間の一次関数であると仮定して実験を始める前と終わった後の値から内挿して用いた。

測定は準定常状態を得るために通電加熱後30分程度おいて開始した。

3. 実験結果及び考察

実験結果を示すにあたって実験の条件並びにそれを示す Symbol を Fig. 3 に示す。鉛直方向に三ヶ所、Case A では、供給熱量 $q_w=30, 110, 220 \text{ w/m}^2$, Case B では $q_w=30, 110, 220, 590 \text{ w/m}^2$ の場合について

実験を行った。

3.1 伝熱面温度分布

3.1.1 水平 (Z 方向) 温度分布 $X=0.25, 0.5, 0.75$ m における Z 方向温度分布を Fig. 4 に示す。縦軸は、 $Z=0$ における温度 T_z との温度差を示す。Fig. 4(a) は Case A の場合で $Z=0$ を中心にほぼ左右対称の温度分布を示し、 $+0.49\sim-3.28^\circ\text{C}$ の間の値を示す。Fig. 4(b) の Case B の場合は、Case A 以上に両端の温度差は小さい。両者とも、 $Z=\pm 175$ mm で若干低い値を示すほかは、ほぼ水平で特に、 $-75 < Z < +75$ mm の間における水平な分布から二次元性は十分保たれていると考えられる。なお $Z=\pm 125$ mm における若干高い値は電流の偏流による発熱の不均一性の可能性が考えられる。

3.1.2 鉛直 (X 方向) 温度分布 Fig. 5 に X 方向温度分布を示す。横軸には、周囲空気温度を差し引いた壁温を示す。Case A は、いずれの q_w に対しても緩やかに上昇する傾向にあり、これは本実験条件が層流域であることを示す。これに対して Case B は、 $q_w=30, 110 \text{ w/m}^2$ の場合は $X=0.25$ m 以上では一様壁温に近い温度分布を示す。これはふく射熱流束 q_r の全熱流束 q_w に占める割合 q_r/q_w の増加 ($q_r/q_w=0.65$) により対流伝熱による冷却効果の減少を意味する。また $q_w=590 \text{ w/m}^2$ においては、 $X=0.8$ m 当りから乱流への遷移とみられる温度の減少がみられる。

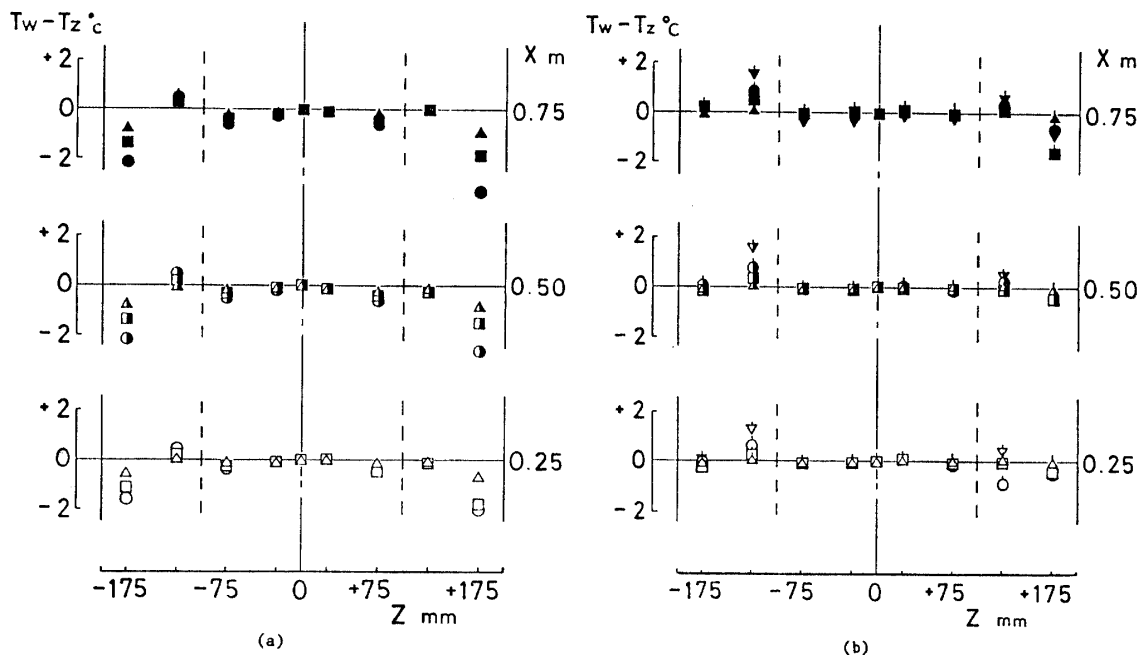


Fig. 4 Horizontal distribution of temperature difference, $T_w - T_z$ on the heated plate (a) Case A (b) Case B

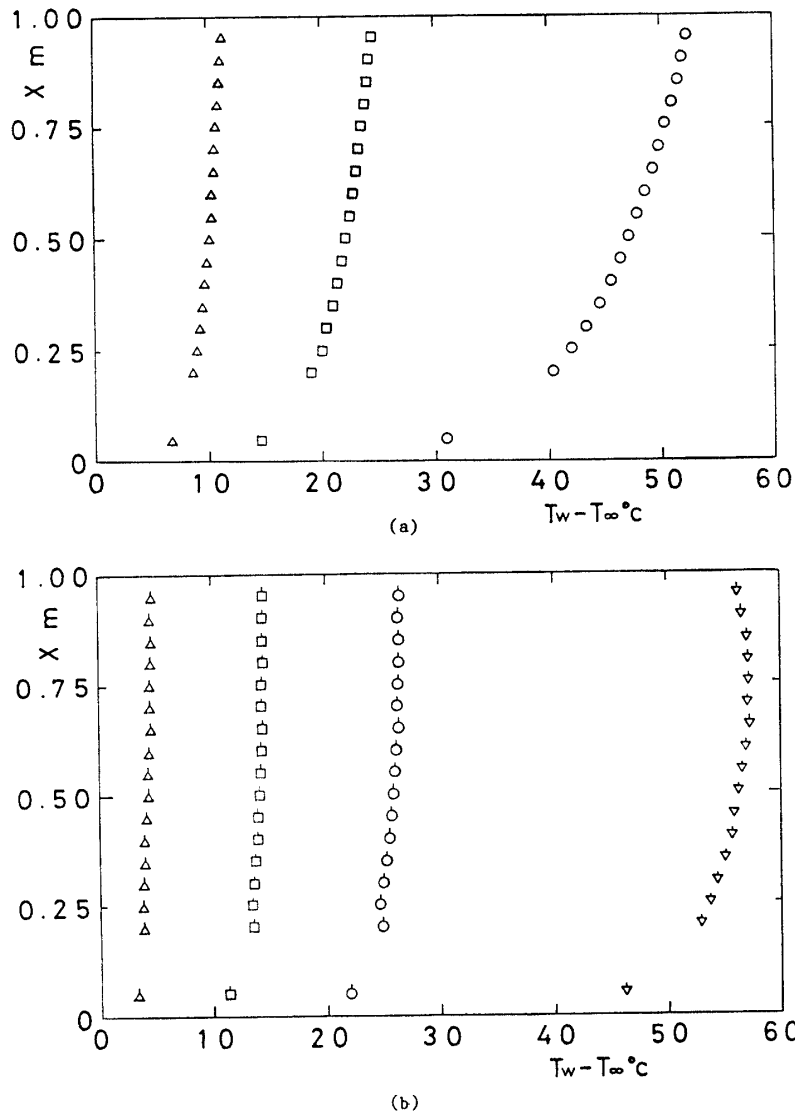


Fig. 5 Vertical distribution of temperature difference, $T_w - T_\infty$ on the heated plate (a) Case A (b) Case B

3.1.3 垂直 (Y 方向) 温度分布 (伝熱面近傍のみ)
 Fig. 6 に Y 方向温度分布を示す。Case A, Case B ともに対流伝熱の算出に用いる勾配 $(\partial T / \partial Y)_{y=0}$ は最小二乗近似の相関が 99% 以上の点を用いて求めた。これら勾配は q_w に依存し高さ X にはほとんど影響されない。なお、Case B の場合は、ふく射の影響で Case A より勾配が緩やかであることがわかる。

3.2 総括ふく射吸収率

伝熱面における全熱流束 q_w は対流熱流束 q_c とふく射熱流束 q_r の和である。

$$q_w = q_r + q_c \tag{1}$$

また、 q_r, q_c はそれぞれ次式で定義される。

$$q_r = \epsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \tag{2}$$

$$q_c = \alpha (T_w - T_\infty) = -\lambda (\partial T / \partial Y)_{y=0} \tag{3}$$

ここに、 σ ; ステファン・ボルツマン定数 ($5.669 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{K}^4$), α ; 熱伝達率 ($\text{w/m}^2 \text{K}$), ϵ ; 本実験ではふく射率を含む総括ふく射吸収率と定める。

(i) まず式(2), (3)より、温度勾配を含んだ ϵ が得られる。

$$\epsilon = \frac{q_w + \lambda (\partial T / \partial Y)_{y=0}}{\sigma (T_w^4 - T_\infty^4)} \tag{4}$$

(ii) 次に q_c = 一定の理論解析を利用する方法は以下の様である。ヌセルト数は定義より、

$$Nu_x = \frac{\alpha X}{\lambda} = \frac{q_c X}{\lambda (T_w - T_\infty)} \tag{5}$$

q_c = 一定の理論解析から⁹⁾

$$Nu_x = 0.519 (G_{r,x}^* P_r)^{1/5} \tag{6}$$

$$G_{r,x}^*; \text{ 修正グラスホフ数} = \frac{g \beta q_c X^4}{\lambda \nu^2}$$

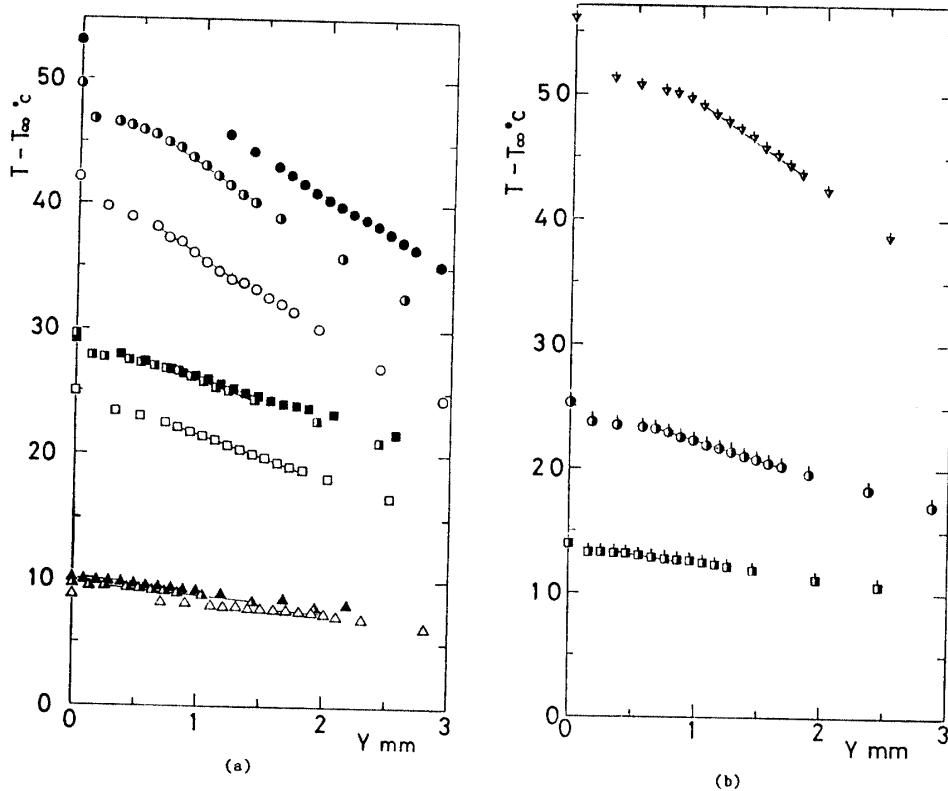


Fig. 6 Normal temperature distribution adjacent to heated plate
(a) Case A (b) Case B

P_r ; プラントル数 (この場合=0.71)

式(5)(6)より q_c に関して整理すると,

$$q_c = 0.441(T_w - T_\infty)^{5/4} \left(\frac{g\beta P_r}{X\nu^2} \right)^{1/4} \lambda \quad (7)$$

式(2)(7)より一様熱流束の理論解析による ϵ が得られる.

$$\epsilon' = \frac{q_w - 0.441(T_w - T_\infty)^{5/4} \left(\frac{g\beta P_r}{X\nu^2} \right)^{1/4} \lambda}{\sigma(T_w^4 - T_\infty^4)} \quad (8)$$

ここで求められた ϵ を ϵ' と置く.

なお物性値⁴⁾ (β 以外) は膜温度 $T_f = (T_w + T_\infty)/2$ における値をとる.

Fig. 7 に総括ふく射吸収率 ϵ, ϵ' を示す. 下方は, Case A 上方は Case B の場合である. 実線は ϵ' に関する $X=0.2 \sim 0.95$ の値 ($X=0.05$ は除く) の平均線である. Case A の場合では, ϵ, ϵ' 両者はほぼ等しい. ϵ, ϵ' 両者は, q_w の増加とともに増す傾向がみられ, また高さ X 方向にはきわめて変化がなく X には依存しないことを示す. Case B の場合では, ϵ, ϵ' の一致は Case A ほどではない. また ϵ' は高さ X とともに増加する傾向にあり, またバラツキも大きい. Case B の場合(●)温度分布からもわかるように一様壁温に近

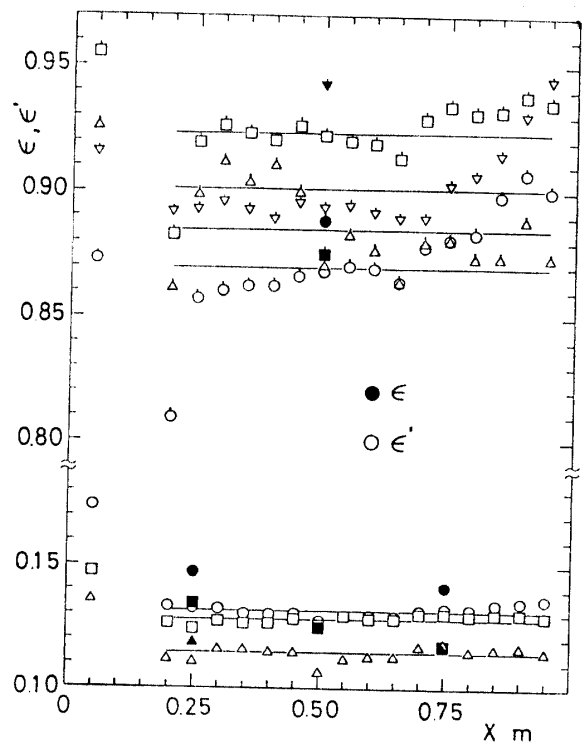


Fig. 7 Overall radiation interchange factor of Case A (bottom side group of symbols) and Case B (top side group)

いにかかわらず式(6)を用いたことにより値が減少する(b)ふく射熱流束が大きく T_w の上昇が小さいため壁近傍の温度勾配が小さく実験精度上問題があるなどからこれらの違いの定量的議論を行うことはできない。実験精度の向上を計れば、この相違が(a)の理由からであることが明確になるとと思われる。

3.3 局所熱伝達率分布

Fig. 8 に局所熱伝達率分布を示す。実線は一樣熱流束の場合の理論解式(6)、一点鎖線は一樣壁温の場合の理論解で次式で表わされる。³⁾

$$N_{u,x} = 0.468(G_r^* P_r)^{1/5} \tag{9}$$

Case A の実験値は式(6)の線上に、Case B の実

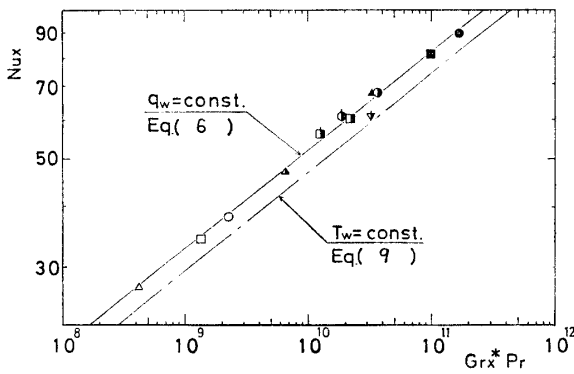


Fig. 8 Distribution of local Nusselt Number $N_{u,x}$

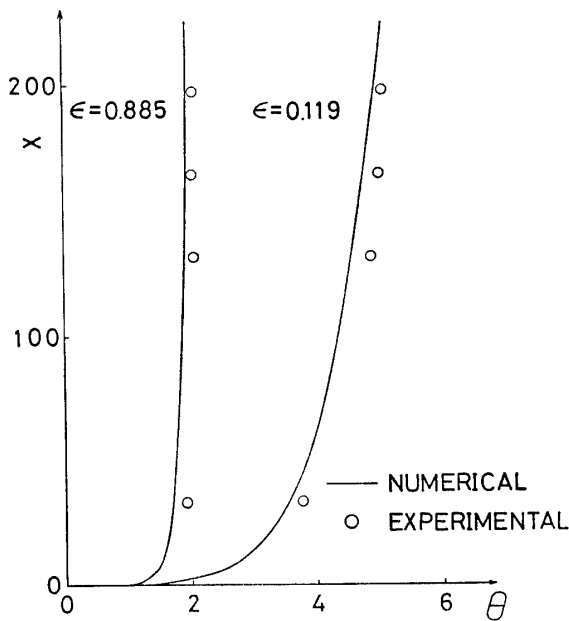


Fig. 9 Comparison of Vertical dimensionless temperature distribution on the heated plate between the theoretical solutions and the experimental results

験値は式(9)の線に近い値をとるはずである。その傾向は Case A ではほぼ満足されているが、Case B の場合は必ずしもその傾向があるとは言えない。これは、Case B の実験精度が悪いからとも考えられる。

3.4 数値計算による温度分布との比較

実験で求めた総括ふく射吸収率 ϵ を用いて一樣発熱する半無限の垂直平板まわりの層流自由対流熱伝達にふく射の影響を考えた数値解析⁶⁾を行い、得られた伝熱面温度と実測値との比較を行なったのが Fig. 9 である。実測値と計算値とは大略一致しており、 ϵ の値がきわめて妥当な値を与えていることがわかる。詳細には、約5~8%の相違があり、これは計算領域が狭いこと、実験における ϵ の X 方向でのバラツキが大いことによるものと考えられる。

4. 結 言

一樣発熱板からの総括ふく射吸収率を二つの方法で求めかつそれらを数値計算に用いることによって以下の結論を得た。

(1) Case A (ステンレス素面) の場合、総括ふく射吸収率は q_c = 一定と仮定した相似解の結果による (ϵ')、温度勾配 $\partial T / \partial Y |_{y=0}$ より求めた値 (ϵ) の両者ともよく一致した。

(2) Case B (黒体塗料面) の場合、 ϵ, ϵ' には若干のバラツキがあるため、かならずしも一致しない。実験精度等の向上がなされれば、十分満足すべき結果が得られると思われる。

(3) 数値解析により得られた結果から、実験結果で得られた値は妥当な値であることが確認された。なお、ステンレス素面は $\epsilon = 0.11 \sim 0.15$ 、黒体塗装面は $\epsilon = 0.88 \sim 0.9$ であると言える。

(4) 熱伝達に関して、Case B が一樣壁温に近い傾向を得るまでに至らなかった。

終わりに、本研究の装置の製作に御協力下さった、機械工学科技官、井上忠義氏、並びに卒業研究として協力いただいた、機械工学科、三谷滋、松原理の両君に深く感謝の意を表わします。

主 な 記 号

- g ; 重力加速度
- G_r^* ; 修正グラスホフ数
- $N_{u,x}$; 局所ヌセルト数
- P_r ; プラントル数
- q_c ; 対流熱流束

q_r ; ふく射熱流束
 q_w ; 伝熱面からの全熱流束
 T_f ; 膜温度
 T_w ; 伝熱面温度
 T_∞ ; 周囲空気温度
 X, Y, Z ; 座標
 α ; 熱伝達率
 β ; 体膨張係数
 ε ; 総括ふく射吸収率
 θ ; 無次元温度
 λ ; 熱伝導率
 ν ; 動粘性係数
 ρ ; 密度
 σ ; ステファン・ボルツマン定数

添字

$'$; q_c = 一定の仮定より得られた値
 x ; 局所値を示す

参 考 文 献

- 1) 藤井哲, 藤井丕夫, 田中宏史, 藤山重生: 日本機械学会論文集, 44-387, 3832 (1978)
- 2) 一色尚次: 伝熱工学, 森北出版 (1981)
- 3) 藤井哲: 伝熱工学の進展, vol. 3, 養賢堂 (1974)
- 4) 藤井哲, 加藤泰生, 三原一正: 九大生研報告, 66, 81 (1977)
- 5) 宮本政英, 秋吉孝紀: 日本機械学会論文集, 47-420, 1578 (1981)

(昭和59年4月14日受理)