水平発熱面上の自然対流熱伝達*

(発熱面上方にある物体の寸法効果)

竹内正紀^{*1}, 木村照夫^{*1}, 早川晃宏^{*2}

Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Surface (Effect of the Size of a Rectangular Obstacle above the Heated Surface)

Masanori TAKEUCHI, Teruo KIMURA and Akihiro HAYAKAWA

The effects of the width of a rectangular obstacle above an upward-facing horizontal surface on the natural convection were investigated both numerically and experimentally. The horizontal surface was heated at a uniform temperature with a strip heat source, while the downward-facing surface of the obstacle was kept in either adiabatic or uniform temperature condition. The width of the obstacle was varied in the range of one to four times the width of the strip heat source. From the result, the typical flow patterns were presented in detail, and they were discussed in connection with the heat transfer characteristics. In particular, the region where the heat transfer rate is small in the heated surface becomes widened with increasing of the width of the obstacle for the case of adiabatic condition when the distance between the heated surface and the downward-facing surface of the obstacle is small, while the heat transfer rate is insensitive to the width of the obstacle for the case of uniform temperature condition.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Free Convection, Horizontal Surface, Obstacle, Strip Heat Source, Numerical Analysis

1. 諸 言

自然対流は伝熱工学の基本的な問題の一つであり, その伝熱能力は小さいが, 信頼性や騒音対策の利点で電子機器の冷却や熱交換器の放熱などに利用される。発熱面の姿勢は鉛直, 上向き水平, 下向き水平など種々の形態があり, とくに, 上向き水平面からの自然対流に関する従来の研究は, 広い空間に単独の発熱面が置かれた場合の伝熱特性^{(1)~(3)}, 密閉空間の上下壁が冷却・加熱される場合の容器内流動現象⁽⁴⁾, あるいは容器内に置かれた発熱平板からのプルームの揺動現象⁽⁵⁾などの解明に関するものがほとんどである。

しかし, 電子機器では発熱板が狭い空間に組み込まれる場合も多く, このような場合には発熱面の周囲に流れを阻害する干渉物体が存在することになる。この問題に関して, 著者は前報⁽⁶⁾で発熱面とその上方に置かれた干渉物体の幅が等しい場合について, 干渉物体が発熱面上の流れと熱伝達にどのような影響を及ぼすかを明らかにした。本報では干渉物体の幅が発熱面の幅より大きい場合について数値解析と実験によりその

影響を明らかにする。なお, 実際は物体は発熱面上に発生する熱プルームと熱放射によって加熱されるとともに周囲流体によって冷却され, それらの熱平衡状態で物体の熱的境界条件が定まるが, 本研究では, その極限の場合として前報と同様に, 物体の下面が断熱される場合と, 周囲流体と同じ一様温度に保たれる場合を対象とした。

主 な 記 号

Gr_w : グラスホフ数 $= g\beta(T_w - T_\infty)W^3/\nu^2$

g : 重力の加速度

H : 発熱面と干渉物体下面との間隔

h : 無次元間隔 $= H/W$

Nu_w : 局所ヌッセルト数[式(6)]

$\overline{Nu_w}$: 平均ヌッセルト数[式(7)]

Pr : プラントル数

Q : 熱量

q : 局所熱流束

T : 温度

T_w : 発熱面温度

T_∞ : 周囲流体温度

U, V : X, Y 方向の速度

u, v : 無次元速度 $= UW/\nu, VW/\nu$

* 原稿受付 平成2年10月1日。

^{*1} 正員, 福井大学工学部 (〒910 福井市文京 3-9-1)。

^{*2} 学生員, 福井大学大学院。

W : 発熱面の幅
 W_i : 干渉物体の幅
 w : 干渉物体の幅と発熱面の幅との比 $= W_i/W$
 X, Y : 座標軸
 x, y : 無次元座標軸 $= X/W, Y/W$
 β : 平均体膨張率 $= (1/\rho) \cdot (\rho_\infty - \rho) / (T - T_\infty)$
 θ : 無次元温度 $= (T - T_\infty) / (T_w - T_\infty)$
 λ : 熱伝導率
 ρ : 密度
 ρ_∞ : 周囲流体の密度
 Ψ : 流れ関数
 ψ : 無次元流れ関数 $= \Psi/\nu$
 Ω : 渦度
 ω : 無次元渦度 $= \Omega W^2/\nu$

2. 数値解析

図1のように、上向き水平面的一部分JB(幅 W)が一様温度に加熱され、その上方に幅 W_i の長方形断面の半無限に長い物体(以後、干渉物体と称する)が左右対称に置かれた場合を考える。上向き水平面で発熱部分JB以外の面は断熱されているとする。また、周囲の流体は無限に広がっており、かつ一様温度に保たれているものとする。干渉物体の下面KGは、断熱されている場合(以後、断熱条件と称する)と周囲流体と等しい一様温度に保たれている場合(以後、等温条件と称する)の2種類を考え、干渉物体でKG以外の表面は断熱されているとする。この場合に発熱面上に生じる流れ場は、流れは二次元定常、流体は非圧縮性、粘性散逸は無視、浮力項以外の物性値を一定とすると、次の式を解くことによって得られる。

$$\frac{\partial(u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial(v\omega)}{\partial y} = -Gr_w \frac{\partial\theta}{\partial y} + \frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\omega}{\partial y^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

図1 座標系と計算領域

$$\frac{\partial(u\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(v\theta)}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\omega = -\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$u = \frac{\partial\psi}{\partial x}, v = -\frac{\partial\psi}{\partial y} \quad \dots\dots\dots(4)$$

これらの式は前報⁽⁶⁾と同じであり、水平方向に遠く離れた境界(図1の境界CE)では流体が水平に流入すること、発熱面より上方に遠く離れた境界(図1の境界DE)では流れが境界層形に流出するものとして、前報⁽⁶⁾と同様の方法で数値計算した。無次元の座標系における計算領域を境界CEについて $y=0.5 \cdot w+2$ の位置に、また境界DEについて $x=2$ の位置においた。

発熱面上の局所熱流束 q は式(5)で計算され、局所ヌッセルト数 Nu_w 、平均ヌッセルト数 $\overline{Nu_w}$ を式(6)、(7)のように定義した。

$$q = -\lambda \frac{T_w - T_\infty}{W} \left(\frac{\partial\theta}{\partial x} \right)_{x=0} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$Nu_w = \frac{qW}{\lambda(T_w - T_\infty)} = \left(-\frac{\partial\theta}{\partial x} \right)_{x=0} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\overline{Nu_w} = 2 \int_0^{1/2} \left(-\frac{\partial\theta}{\partial x} \right)_{x=0} dy \quad \dots\dots\dots(7)$$

数値解析は $Pr=0.7$, $Gr_w=1.0 \times 10^6$ の条件下で、発熱面と干渉物体の間隔 h および干渉物体の幅と発熱面の幅との比 w を種々に変化させて行った。

3. 実験装置と方法

数値計算で得られた流動状態と熱伝達の特性を確認するため、流体として大気圧の空気 ($Pr=0.7$) を用いた実験を行った。なお、間隔 h が小さくなるとわずかの冷却効果で流動状態が変化し、干渉物体の下面を完全に断熱した実験装置を製作することは非常に困難であるので、実験は等温条件のみとした。実験装置は前報⁽⁶⁾のものとはほぼ同じであり、その概略を図2に示すように、発熱面およびその上方に置かれた干渉物体から構成される。発熱面は幅 $W=80$ mm、長さ 251 mm

図2 実験装置の概略

図3 流れ場(断熱条件の数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$) 図4 流れ場(等温条件の数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

であり、その表面温度が一樣温度になるように分割加熱した。発熱面以外の水平面は断熱になるように、ベークライト板を用いた。水平面において発熱面から断熱面へ熱伝導で逃げる熱量で断熱面が加熱されるのを防ぐためにこれらの境界に水冷却管を入れた。干渉物体は寸法効果を調べるために、その幅を $W_i=80, 120, 160, 200$ mm の4種類に変化させ、かつ、発熱面と干渉物体の間隔を種々に変化させて実験を行った。干渉物体の下向き表面は分割された水冷却管により周囲空気と等しい温度になるように調節した。干渉物体の側面は断熱になるようにベークライト板を用いた。発熱面、干渉物体下面および周囲空気温度は熱電対で測定した。流れの二次元性を確保するために発熱面と干渉物体の長さ方向の前後に光学ガラスをはめた板を平行に立て、この方向の流れを防止した。温度場の測定にはマッハ・ツェンダー干渉計を用い、その干渉じまから発熱面の局所熱伝達率を算出した。また、トレーサとして線香の煙を用いて流れを可視化した。

4. 結果および考察

4.1 流れ場 数値解析で得られた流れ場の例として、 $w=1$ および 2 , $h=0.6, 0.4, 0.3$ および 0.2 の場合の流線を断熱条件について図3に、等温条件について図4に示す。いずれの図においても、発熱面は $x=0$, $y=0 \sim 0.5$ の範囲である。また、図5は干渉物体の端の位置における無次元流れ関数の最大値 $\psi_{\max}$ すなわち発熱面と干渉物体の間に流れ込む周囲流体の流量を示している。断熱条件の場合には図3からわかるように、

図5 w と $\psi_{\max}$ の関係(数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

周囲流体は発熱面に沿って流入し、干渉物体下面に沿って流出する。干渉物体が大きいとき、周囲流体の流れに囲まれる小さな渦が生じる。周囲流体の流量は、図5からわかるように、間隔 h が小さくなるほど、また、干渉物体が大きくなるほど少なくなる。また、図3の $h=0.2$ の場合に顕著に見られるように、同じ間隔 h では干渉物体が大きくなるほど周囲流体の多くは対

称軸より遠く離れたところまでしか流入できなくなる。

等温条件の場合には、図4からわかるように間隔 h が広い場合 ($h=0.4, 0.6$) には周囲の冷たい流体は発熱面の中央付近まで流入するが、干渉物体が大きくなると、周囲流体は発熱面と干渉物体の間へ流入しにくくなり、発熱面と干渉物体の間に周囲流体の流れに囲まれた渦流が明確に認められるようになる。間隔 h が小さい場合 ($h=0.3, 0.2$) にはこの周囲流体の流れに囲まれる渦流のほかに間隔 h の大きさによって1対以上の熱的不安定による渦流が発熱面の中央部に生じる。また、図4と図5からわかるように、間隔 h が小さくなるに従い、干渉物体が大きくなるほど周囲流体の発熱面への流入量が急激に小さくなり、それとともに、干渉物体の下方の周囲流体が流れ込む領域のうちで周囲流体の流れに囲まれる渦流が占める割合が大きくなる。図6は等温条件の場合について、発熱面の発熱量 Q の内の干渉物体下面に伝わる熱量 Q_i の割合 Q_i/Q

図6 w と Q_i/Q の関係
(等温条件の数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

図7 流動状態の可視化写真
($Gr_w=1.7 \times 10^6$, $w=1.5$)

を示している。図6のように、同じ干渉物体の大きさでは間隔 h が小さくなるほど、また同じ間隔 h では干渉物体が大きくなるほど Q_i/Q が大きくなる。とくに、 $h=0.2$ では、 w が1.5以上ではほとんどすべての熱量が干渉物体下面へ伝わり周囲流体が持ち去る熱量はごくわずかになることがわかる。このことは周囲流体の流入量が非常に小さくなることと対応している。

図7(a)~(c)はそれぞれ $Gr_w=1.7 \times 10^6$, $w=1.5$ ($W=80$ mm, $W_i=120$ mm) の実験条件で得られた流動状態の可視化写真の例を間隔 $h=0.26, 0.20$ および 0.15 の場合について示す。図7(a)では周囲流体の流れに囲まれる渦流が、図7(b), (c)では周囲流体の流れに囲まれる渦流の間にさらに1対あるいは2対の熱的不安定に基づく渦流が観察される。これらの渦流はいずれも発熱面の長さ方向に軸をもつロール状である。この流れの様子は図3に示した数値計算による流れ場と良く一致している。しかし、熱的不安定に基づく渦対の形状は実験結果のほうが数値計算結果よりやや扁平である。

図8 h と $\overline{Nu_w}$ の関係(数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

図9 h と $\overline{Nu_w}$ の関係
(断熱条件の数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

4.2 平均熱伝達率 図8は数値解析による等温条件と断熱条件の場合の平均ヌセルト数 $\overline{Nu_w}$ と間隔 h の関係を示す。図8には発熱面からの熱量がすべて熱伝導で干渉物体下面に伝わるとした場合の関係 $\overline{Nu_w}=1/h$ も記入してある。さらに図9には断熱条件の場合の結果をより広い h の範囲で示している。図8からわかるように、間隔 h が大きくなると、干渉物体の大きさと下面の熱的境界条件に関係なく $\overline{Nu_w}$ は干渉物体がない場合 ($h=\infty$) の $\overline{Nu_w}$ に漸近する。間隔 h が小さくなるに従い、 $\overline{Nu_w}$ は干渉物体がない場合より大きくなり、 h のある値で極大値を示す。この極大値を示す h の値は干渉物体の寸法が大きくなるとともに大きくなる。さらに間隔 h が小さくなるに従い、断熱条件の場合には図9からもわかるように、 $\overline{Nu_w}$ は急激に小さくなり、かつ、同じ間隔 h では、干渉物体の大きさが大きいほど $\overline{Nu_w}$ は小さくなる。一方、等温条件の場合には図8からわかるように、前述の熱的不安定に起因する渦流による干渉物体下面への熱移送の $\overline{Nu_w}$ への寄与が大きくなるため、断熱条件の場合のような大きな $\overline{Nu_w}$ の減少は生じず、さらに間隔 h が小さくなると、 $\overline{Nu_w}$ は熱伝導のみによる熱移送の関係にほぼ一致し、干渉物体の大きさの影響はなくなる。

干渉物体の大きさが $\overline{Nu_w}$ に及ぼす影響をさらに詳細に調べるため、 w と $\overline{Nu_w}$ の関係を h をパラメータとして図10に示す。図10からわかるように、 $h=0.6$ では等温条件と断熱条件で $\overline{Nu_w}$ は等しく、干渉物体の幅が発熱面より大きい場合のほうが等しい場合 ($w=1$) より $\overline{Nu_w}$ が大きくなるのがわかる。また、 $h=$

図10 w と $\overline{Nu_w}$ の関係(数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

0.4 以下では、断熱条件のとき、 $\overline{Nu_w}$ は干渉物体の幅が大きくなるほど小さくなり、その小さくなりかたは間隔 h が小さいほど顕著になる。一方、等温条件のときにも干渉物体の幅が大きくなるほど、 $\overline{Nu_w}$ はわずかに小さくなるが、 $h=0.3$ では $w=2$ 以上で、 $h=0.2$ では $w=1.5$ 以上で $\overline{Nu_w}$ は等しく、それ以上の大きさの干渉物体では干渉物体が $\overline{Nu_w}$ に及ぼす影響は干渉物体の大きさに依存しなくなる。

図11は等温条件の実験 ($Gr_w=1.7 \times 10^6$) による発熱面の平均ヌセルト数 $\overline{Nu_w}$ と間隔 h との関係を先述の数値解析結果 ($Gr_w=1.0 \times 10^6$) とともに示している。図11には参考のため、干渉物体がない場合 ($h=\infty$) の実験値および発熱面からの熱量がすべて熱伝導で干渉物体下面に伝わるとした場合の関係 $\overline{Nu_w}=1/h$ も示してある。また、前述の熱的不安定に基づく渦運動が生じる場合の実験結果を白印で、生じない場合の実験結果を黒印で区別してある。図11のように、実験と数値解析でグラスホフ数が若干異なることと、図4と図7に示すように、渦流の形状が若干異なることのため、定量的には完全に一致しないが、間隔 h が大きくなるに従い、 $\overline{Nu_w}$ はいずれの w でも $h=\infty$ のそれに漸近すること、逆に、間隔 h が小さくなるに従い、 $\overline{Nu_w}$ は極大値、極小値を示しながら、熱伝導のみで熱量が伝わる場合の値にほぼ等しくなること、また、同じ間隔 h であっても、熱的不安定に基づく渦流が生じない場合の $\overline{Nu_w}$ は干渉物体の大きさによって変化するが、熱的不安定に基づく渦運動が生じる間隔 h では w が1.5以上で $\overline{Nu_w}$ は干渉物体の幅によってほとんど変化しないことなどの平均ヌセルト数が示す特徴は実験と数値解析で良く一致している。しかし、熱的不安定に基づく渦流が発生する間隔 h では、渦の形状が実験結果は数値解析結果より偏平になる⁽⁶⁾ため渦流の熱移送の寄与に差が生じ、 $\overline{Nu_w}$ の間隔 h に対する変動が実験では数値解析より顕著に現れる。

平均熱伝達率は局所熱伝達率の分布と密接な関係が

図11 平均ヌセルト数(等温条件)

図 12 局所ヌッセルト数の分布(数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

あり, また, 実用上は冷却効果の悪い場所を知るなど局所熱伝達率の分布を知ることも必要なので, 4・3 節に局所熱伝達率の分布について考察を加える。

4・3 局所熱伝達率 図 12(a)~(d) はそれぞれ間隔 $h=0.6, 0.4, 0.3$ および 0.2 の場合の数値解析による局所ヌッセルト数の分布を干渉物体がない場合 ($h=\infty$) の結果とともに示している。図 12 からわかるように, $h=0.6$ の場合は等温条件と断熱条件で局所熱伝達率の分布に差異がない。また, 干渉物体がある場合の局所熱伝達率は発熱面の端のほう ($y=0.2 \sim 0.5$) で干渉物体がない場合のそれより大きくなり, しかもその大きくなり方は w が 1.5 以上のほうが 1 の場合よりやや大きい。

$h=0.4, 0.3, 0.2$ の場合は等温条件と断熱条件で局所熱伝達率の分布に差異が生じるので, まず, 断熱条件の場合について考察する。 $w=1, h=0.4$ の場合には, 干渉物体がある場合の局所熱伝達率は干渉物体がない場合に比べて, 発熱面の中央部付近ではほぼ等しい値になるが, 発熱面の端のほうの広い範囲ではかなり大きな値になる。さらに, h が小さくなるに従って, また, w が大きくなるに従って, 局所熱伝達率は $w=1, h=0.4$ のそれより発熱面のすべての範囲で小さくなり, しかも, 発熱面の中央部付近での小さくなり方が大きい。とくに, $h=0.2$ の場合には, 発熱面中央部付近の局所熱伝達率はほぼ零となり, w が大きくなるほど熱伝達率がほぼ零となる発熱面の領域が広がる。これは図 3, 5 で述べたように干渉物体の間隔 h が小さくなるほど, また, w が大きくなるほど周囲流体が発熱面の対称軸付近まで流入しにくくなることによる。次に, 等温条件の場合について考察する。 $h=0.4$ の場合の局所熱伝達率は断熱条件のそれと比べて w が 2 以上でわずかに大きくなることを除いてほぼ同じ値になる。しかし, $h=0.3, 0.2$ の場合には, 前述の図 4 の

図 13 発熱面の端における速度 v の分布 (数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

図 14 発熱面の端における温度分布 (数値解析, $Gr_w=1.0 \times 10^6$)

ように, 発熱面の中央部付近に 1 対あるいは 2 対の渦流が生じるので, 渦運動が下降流となる位置では局所熱伝達率が極大となり, その値は干渉物体がない場合よりかなり大きくなる。また, 渦運動が上昇流となる位置では局所熱伝達率が極小となり, その値は干渉物体がない場合より小さくなる。さらに, $h=0.3$ の場合には w が 2 以上で, また, $h=0.2$ の場合には w が 1.5 以上では局所熱伝達率の分布が一致する。以上のように, 間隔 h が小さいとき, 断熱条件では h が小さくなるほど, また干渉物体が大きくなるほど, 発熱面

の中央部付近の熱伝達の悪い領域が広がる。しかし、等温条件では前述の渦流のために、熱伝達は干渉物体の大きさの影響を受けなくなると言える。

また、 $h=0.6$ あるいは 0.4 の場合に、局所熱伝達率が干渉物体の大きさによって、干渉物体がない場合に比較して大きくなったり、小さくなったりするのは次の理由によると考えられる。図13, 14はそれぞれ間隔 $h=0.4$ の場合の発熱面の端($y=0.5$)の断面の発熱面に沿う方向の速度分布と温度分布を干渉物体がない場合の結果と共に示している。図13, 14からわかるように、発熱面近傍の速度は干渉物体のある場合がない場合より速くなっており、かつ、 w が1.5以上の場合のほうが1の場合より速くなっている。一方、境界層外の流体の温度は干渉物体の幅が大きくなるほど高くなる。熱伝達は境界層内の流体の速度が速く、境界層外の流体温度が低いほど大きくなると考えられるので、これらのかねあいで局所の熱伝達が干渉物体がない場合より良くなったり悪くなったりすると考えられる。

図15(a), (b)は等温条件の実験による局所ヌッセル

(a) 熱的不安定に基づく渦流が生じない場合

(b) 熱的不安定に基づく渦流が生じる場合

図15 局所ヌッセル数(等温条件)

数分布を先述の数値解析結果と共に示している。グラスホフ数が実験と数値解析で若干異なるため、それらは定量的には完全に一致しないが、熱的不安定に基づく渦流が生じない場合の例である図15(a)では、干渉物体がある場合はそれがない場合($h=\infty$)に比べて発熱面の端のほうで大きくなる傾向は実験と数値解析で良く一致している。また、熱的不安定に基づく渦流が生じる場合の例である図15(b)では、渦流によって局所熱伝達率に極大値、極小値が生じること、および、 $w=2$ の場合が1の場合より極小値の発生する位置が発熱面の端のほうへ移ることなどの傾向は実験と数値解析で良く一致している。

4.4 渦流が存在する範囲の平均熱伝達率 等温条件の場合に、前述のように、局所熱伝達率は熱的不安定に基づく渦流が発生するかどうかで大きく変わり、渦流が発生すると、間隔 h によって平均ヌッセルト数が極大値、極小値を示すようになる。このように、間隔 h によって平均ヌッセルト数が極大値、極小値を示す理由を明確にするために、図11と同じ実験結果について、渦流が存在する領域のみの平均ヌッセルト数 $\overline{Nu_{w,v}}$ と渦1対の縦横比の渦対数分の1に相当する値 H/L との関係を図16に示す。図16からわかるように $\overline{Nu_{w,v}}$ は干渉物体の大きさに関係なく $H/L=0.26$ 付近で極小になっており、その H/L は1対と2対の渦流が発生する変わりめに相当している。すなわち、渦流の数が増減するときには流れの方向が変化するので

図16 H/L と $\overline{Nu_{w,v}}$ の関係(実験, $Gr_w=1.7 \times 10^6$)

図17 h と L/W の関係(実験, $Gr_w=1.7 \times 10^6$)

流れがよどみ状態になり、熱伝達が悪くなるものと考えられる。このような現象は1対の渦流が発生する限界の H/L でも生じる。これらの点が図11の平均ヌセルト数が極小になる点に対応している。一方、 $H/L = 0.34, 0.2$ 付近で $Nu_{w,v}$ が極大になっている。この点はそれぞれ1対と2対の渦流に対応しており、渦運動が最も安定で、強い渦運動が生じていると考えられる。これらの点は図11の渦運動が生じている範囲の極大点に対応している。図17は熱的不安定に基づく渦流が存在する範囲の大きさ L/W と間隔 h との関係を示す。図17からわかるように、 L/W は間隔 h が小さくなるとともに増大し、かつ間隔 h が等しいときには干渉物体の幅 w が1.5以上の場合は w が1の場合より大きくなる。また、渦流が存在し始める ($L/W > 0$ になる) 間隔 h は干渉物体の幅が大きくなるほど大きくなる。

5. 結 言

一様温度に加熱される発熱面を含む平板の上方に発熱面より大きい干渉物体が置かれた場合に発熱面上の流れと熱伝達が干渉物体の大きさによってどのような影響を受けるかを明らかにした。数値解析結果は実験結果と流れ場の特徴、熱伝達の特性和も良く一致した。しかし、熱的不安定に基づく渦流が発生する場合には、実験結果のほうが数値解析結果より渦流の形状が扁平になり、それが発熱面と干渉物体下面の間隔 h に対する平均熱伝達率の変動を大きくするなどの若干の相違を生じた。明らかになった結果を要約すると次のとおりである。

(1) 干渉物体の熱的条件にかかわらず、干渉物体

が大きくなるほど、また間隔 h が小さくなるほど、周囲流体の発熱面と干渉物体の間への流入量は減少する。また、その減少の割合は等温条件の場合が著しい。

(2) 間隔 h が小さいとき、断熱条件では干渉物体が大きくなるほど、発熱面の中央部付近の熱伝達の悪い領域が広がる。しかし、等温条件では渦流の発生のために熱伝達は干渉物体の大きさの影響を受けない。

(3) 間隔 h が大きいとき、干渉物体の熱的条件に関係なく、干渉物体の大きさが発熱面の幅より大きいほうが等しい場合より平均熱伝達率は大きくなる場合がある。

(4) 等温条件では干渉物体が大きくなると渦流が発生しやすくなり、その渦流の数と強さによって平均熱伝達率の大きさが変動する。

なお、本報告では干渉物体の大きさの効果を明らかにすることを目的に、グラスホフ数が 10^6 付近で数値解析と実験を行ったが、前報⁽⁶⁾では発熱面と干渉物体の幅が等しい場合について $Gr_w = 10^5 \sim 10^7$ で数値解析と実験を行っており、そこで明らかになった現象は定性的に解析の範囲で Gr_w に依存しないので、本報告で得られた結果も定性的に前報⁽⁶⁾と同じグラスホフ数の範囲で成り立つと考えられる。

文 献

- (1) 阿部・石黒、機論、41-352, B(1975), 3577.
- (2) Yousef, W. W., ほか2名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 104-3(1982), 493.
- (3) 竹内・ほか2名, 機論, 51-462, B(1985), 600.
- (4) 秋野・ほか4名, 機論, 55-509, B(1989), 152.
- (5) 森・ほか3名, 機論, 55-515, B(1989), 2012.
- (6) 竹内・ほか3名, 機論, 52-474, B(1986), 886.