格子による傾斜加熱平板の自然対流熱伝達の促進*

佐々木 重幸^{*1}, 芦 分 範 行^{*1}

Enhancement of Natural Convection Heat Transfer from an Inclined Heated Plate by Using Rectangular Grids

Shigeyuki SASAKI and Noriyuki ASHIWAKE

The effect of inclination angle on the natural convection heat transfer from an inclined heated plate with rectangular grids is investigated. Experiments are performed in air for inclination angles in the range of -30 to $+60$ degrees measured from a vertical plane, for grid heights in the range of 5 to 10 mm, and for four values of the diagonal length of the grid. For each configuration, the surface heat flux ranges from 50 to 200 W/m². It is found that the rectangular grids enhance local heat transfer coefficients when these grids are applied to an inclined plate. The rectangular grids enhance the average heat transfer coefficients along the horizontal center line of the plate by up to 20 percent when compared to those coefficients for a smooth plate, even when the angles of inclination are ± 30 degrees.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Heat Transfer Enhancement, Plate, Grid

1. 緒 言

自然対流による冷却は、可動部がないため機器の信頼性が高く、またコスト的にも有利な場合が多い。そのため、パーソナルコンピュータ等の小形の電子機器にあっては都合のよい冷却方式といえる。しかし近年、これら小形の電子機器の発熱量も増加してきており、より高性能な自然対流用伝熱面の開発が強く求められている。

自然対流用伝熱面に関しては、最近、三角らおよび北村らが注目すべき研究結果を公表している。

三角らは、鉛直伝熱面上に、直角に低熱伝導率の仕切板を設け、仕切板前部と後部の詳細な熱伝達率の測定と流れの可視化を行っている。そして、ある高さ以上の仕切板を用いることにより、仕切板後方における熱伝達が促進されることを示している⁽¹⁾。また、仕切板を重力方向にとがったV字形(分流板)にすることにより、伝熱面と熱交換した高温の流体を伝熱面から速やかに排除することにより、分流板の前部で生じる高温流体のよどみが低減でき、熱伝達が促進されやす

いことを見いだしている⁽²⁾⁽³⁾。北村らは、水平上向きの伝熱面上に格子を配置した構造の伝熱面に関して検討し、流れの可視化と熱伝達率の測定を行い、自然対流が促進された結果を報告している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。格子を用いた伝熱面構造は、自然対流の熱伝達率自体を向上させることができるため、小形・軽量化が強く要求される電子機器の冷却に適していると考えられ、三角ら、および北村らによって得られている知見は応用の面からも極めて有用であると考えられる。しかしながら、例えばノート形パーソナルコンピュータ等の実際の場合では、伝熱面は必ずしも鉛直、または水平ではない。したがって、傾斜を有する伝熱面に対して、仕切板や

Fig. 1 The rectangular grids applied to an inclined plate

* 原稿受付 1997年10月6日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300-0013 土浦市神立町502)。

格子の効果を調べておくことは実用上重要である。

本報告は、北村らが水平面において用いた格子構造を、重力方向に対して傾斜させた平板伝熱面に適用した場合(図1)の伝熱促進効果について検討を行ったものである。

記 号

C : 係数(プラントル数の関数)

$$Gr_x^*: \text{局所修正グラスホフ数} = \frac{g \cos \theta \cdot \beta \cdot q \cdot X^4}{\nu^2 \cdot \lambda}$$

g : 重力の加速度

H : 格子高さ

h : 熱伝達率

N : 水平(伝熱面幅)方向の測定点数

$$Nu_x: \text{局所ヌッセルト数} = \frac{h_x \cdot X}{\lambda} = \frac{q \cdot X}{(T_x - T_\infty) \lambda}$$

Pr : プラントル数

q : 熱流束

$$Ra_x^*: \text{局所修正レーレー数} = Gr_x^* \cdot Pr$$

S : 格子対角長さ

T : 温度

X, Y : 長さ

ε : 放射率

β : 体膨張係数

θ : 伝熱面角度

λ : 熱伝導率

ν : 動粘性係数

添 字

flat: 平滑面での値

grid: 格子付き面での値

m : 平均値

r : 代表値

x, y : 局所での値

∞ : 周囲における値

2. 実験装置および測定

2.1 実験装置 本実験で用いた装置の概略を図2(a)に示す。また、図2(b)に伝熱面断面の詳細を示す。伝熱面は、厚さ30 μm 、幅200 mm、長さ100 mmのステンレスはくを長さ方向に0.5 mm程度の間隔をあけ3枚並べて配置することにより幅200 mm、長さ300 mmの伝熱面を構成する。伝熱面の裏側には、粘着面を有する厚さ7 mmのスチロール板を張り付けた。そのスチロール板のさらに裏側には、厚さ10 mmの紙フェノールペークライト板を取付け、この板を支持台に設けられた角度調節装置に固定した。角度

調節装置を操作することにより、伝熱面の長さ方向を重力方向に対して任意の角度 θ に設定できる。ここで、鉛直面を $\theta=0^\circ$ とし、上向き面を-(マイナス)、下向き面を+(プラス)とする。伝熱面以外を、断熱のため、スポンジ状の断熱材で包んだ。

はくの幅200 mmの両側は、2個の銅製の電極ではくを挟むことにより固定されている。はくは直接、直流電流を流すことによって等熱流束条件で加熱される。

局所熱伝達率を算出する際に用いるはくの温度は、3枚のそれぞれの幅方向(Y 方向)の中心線上に10 mm間隔ではくの裏側に直接、はんだ付けした直径0.1 mmの銅-コンスタンタン熱電対19点により測定した。また、中央部のはくの長さ方向(X 方向)にも同種の熱電対を10 mm間隔で25点設けた。本実験では、空気を作動流体として用いた。

実験装置は幅1 m、長さ1 m、高さ1.5 mの箱の中央部に設置した。本実験では、伝熱面の周囲温度 T_∞ は $26 \pm 1^\circ\text{C}$ に保たれている。

2.2 実験方法

2.2.1 平滑面 格子を付けた伝熱面を用いた実験を行う前に、本実験装置および実験方法の妥当性を検証し、さらに伝熱促進効果の基準値を把握するため、

(a) Test section

(b) A-A Cross section

Fig. 2 Experimental apparatus

まず平滑面での伝熱実験を行った。

実験は、はくに通電しない状態ですべての熱電対の温度指示値が一定になるのを確認した後に、はくへの通電電流を順次小さいほうから設定し、温度の定常状態を確認後、諸量の測定をすることにより行った。一つの熱流束条件では各温度を10回測定した時間平均値を用いた。なお、実験は各角度条件において3種類の熱流束条件で行った。

2・2・2 格子付き面 本実験では、伝熱面の平板部分のみの伝熱促進効果の検討を行うことを主眼とした。そのため格子部分からの放熱は極力低く抑える必要がある。そこで、格子の材料としては熱伝導率の低い紙(厚さ150 μm)を用いた。個々の格子は正方形とし、その対角長さ S を25 mm から200 mm の間で変えて実験した。また、格子を伝熱面に取付ける際は、格子が拡大伝熱面の役目を果たさないように滑り落ち

ない程度に端部のみ固定した。そのため、格子とステンレスはくとは軽く接する程度である。後述する伝熱面から格子部への放射熱量を補正するために紙製の格子には黒体塗料を全面に塗布し、表面の5箇所に熱電対を設けた状態で実験を行った。実験の手順は平滑面の場合と同じである。空気と伝熱面との温度差は14~44 K の範囲であった。図3に各格子の伝熱面への設置状況を示す。また、本実験の条件を表1に示す。

3. 実験結果および考察

3・1 熱漏えい量の見積もり 本実験の作動流体は空気であるため、水等と比較すると熱伝達率は小さい。そのため、目的とする自然対流による伝熱面表面からの伝熱量以外の熱漏えいが無視できない。熱漏えいとしては、伝熱面裏面からの装置内の熱伝導による逃げ、伝熱面表面から周囲への放射伝熱の二つが考えられる。

自然対流の熱伝達率の算出には、上記の熱漏えい量を詳細に把握し正味の自然対流による表面熱流束を知る必要がある。伝熱面裏面からの熱伝導による熱の逃げるは、次のようにして見積もった。熱電対を、伝熱面裏面の厚さ10 mm のベークライト板を4分割したそれぞれの中心の表裏に張り付けた。そして、ここで測定される温度差と、ベークライトの熱伝導率を用いてベークライト板の厚さ方向の通過熱量を一次元の熱伝導方程式から求めた。

また、放射伝熱量に関しては、次のように求めた。まず最初に、伝熱面であるステンレスはく表面の放射率 ϵ を簡易放射温度計と校正用熱電対を用いて測定した。その結果、はくの放射率として $\epsilon=0.17$ を得た。次に、格子($\epsilon=0.97$)で囲まれる一つの伝熱面を考え、伝熱面と格子の実測温度、形態係数とおのの放射率を考慮し、数値解析により放射伝熱量を計算

Grid height	H (mm)	5, 10
Grid diagonal length	S (mm)	25, 50, 100, 200
Inclination angle	θ (degree)	-30, 0, +30, +60

Fig. 3 Grid arrangement

Fig. 4 Local heat transfer results for a flat plate

した。その結果、伝熱面からの放射伝熱量は、伝熱面に印加した電力の6~16%程度であった。格子は熱伝導率の低い紙で製作したため、この格子部分への熱伝導による熱漏えいは最大2%程度であると推算され、無視した。

本実験の場合、熱流束の不確かさは±10%、温度測定の不確かさは±2%、熱伝達率の不確かさは±12%以内と推定される。

3・2 平滑面上の自然対流熱伝達 図4は、横軸に局所修正レーレー数 Ra_x^* をとり、縦軸は局所ヌセルト数 Nu_x をとって実験結果 ($\theta = -30 \sim +60^\circ$) をプロットしたものである。図4の実験結果から、3種

Fig. 5 Distribution of local heat transfer coefficients in Y direction ($X=150$ mm)

Fig. 6 Local heat transfer results for a plate with rectangular grids ($H=10$ mm, $\theta = +60^\circ$)

類の熱流束の条件の結果は藤井⁽⁶⁾の層流熱伝達に関する理論式、

$$Nu_x = C \cdot Ra_x^{*1/5} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$C = \left(\frac{Pr}{4 + 9\sqrt{Pr} + 10Pr} \right)^{1/5}$$

に良好に一致し、本実験方法、特に熱漏えい量の見積もりによる、表面熱流束の算出方法の妥当性が確認できた。なお、物性値は体膨張係数 β を除くすべての物性値について代表温度 $T_r [T_r = T_x - 0.38(T_x - T_\infty)]$ における値を採用した。図5は、伝熱面の幅方向(Y方向)の熱伝達率分布の測定例を示したものである。伝熱面の両端部を除くと熱伝達率は、伝熱面の幅方向にほぼ一様であった。ここで得られた各角度条件での平滑面の熱伝達率を、格子付き面の熱伝達率促進の基準値とし以下に用いた。

3・3 格子付き伝熱面の自然対流熱伝達 格子付き平板の局所熱伝達率の測定結果を図6から図11に示す。各図の(a)から(d)は、X方向の局所熱伝達率 $h_x [h_x = q / (T_x - T_\infty)]$ の分布を表している。また(e)から(h)は、Y方向の局所熱伝達率 $h_y [h_y =$

Fig. 7 Local heat transfer results for a plate with rectangular grids ($H=10$ mm, $\theta = +30^\circ$)

$q/(T_s - T_\infty)$ の分布を示す。図6から図11の(a)から(h)の各図は、それぞれ格子寸法を変えた結果を示している。(a)と(e), (b)と(f), (c)と(g), (d)と(h)は、それぞれ同一の格子対角長さの結果である。図6~11中に平滑面の結果を●印で示し、実線は平滑面の計算値である[式(1)]。平滑面の実験結果と、計算値が良好に一致していることが図6から図11の(a)から(d)に示す平滑面の結果からも確認できる。

図6には、格子高さ $H=10$ mm, 重力方向に下向きに傾斜した $\theta=+60^\circ$ の結果を示す。 $S=25$ mm の格子を付けた場合[図6(a)]では、 $X=10\sim 200$ mm の範囲で平滑面の結果よりも熱伝達率が低い。 $S=50$ mm の場合[図6(c)]でもさほど顕著な伝熱促進効果は見られない。 $S=100$ mm の結果[図6(c)]では、伝熱面と格子の対角部が接する $X=100$ mm と 200 mm の位置の後方で熱伝達が高められている様子が現れている。これは、前述の仕切板での作用⁽¹⁾と同様に格子対角部の後方で流体の置換効果により熱伝達が高まったと考えられる。図6(g)は $S=100$ mm での幅方向(Y 方向)の熱伝達率の分布を示している。

Fig. 8 Local heat transfer results for a plate with rectangular grids ($H=10$ mm, $\theta=0^\circ$)

格子の中央部($Y=100$ mm)で熱伝達率が高い。 $S=200$ mm の結果[図6(d)]では、 $X=50$ mm の位置に格子の対角部があるが、後方の $X=200$ mm 程度の位置まで促進効果が得られている。このときの Y 方向の熱伝達率分布を見ると、 $Y=40$ mm と 160 mm 付近にピークをもつ形状となる。

図7は、格子高さ $H=10$ mm, $\theta=+30^\circ$ の結果を示したものである。図7(a)では、図6(a)に比べると、さらに低い熱伝達率が現れている。これは格子対角長さに対して比較的格子の高さが高く、重力方向に対して傾斜角度が小さいと、格子で囲まれた空間に低温の空気が入りにくく、高温の空気がよどんでしまうためと推察される。伝熱促進効果は $S=50$ mm の場合[図7(b)]から見られる。 $S=100$ mm の場合[図7(c)]では、格子の中央部付近で熱伝達率が山形に顕著に高められている。この様子は、 $S=200$ mm の場合[図7(d)]にも現れている。 $S=100$ mm の場合[図7(c)]では、局所的には平滑面に対して1.6倍($X=240$ mm)の熱伝達率が現れている。この条件では、 Y 方向熱伝達率分布[図7(g)]においても格子中央部の熱伝達率が高く現れている。

Fig. 9 Local heat transfer results for a plate with rectangular grids ($H=10$ mm, $\theta=-30^\circ$)

図8は、格子高さ $H=10\text{ mm}$ 、 $\theta=0^\circ$ の鉛直面の結果である。熱伝達率の分布状況は図7の場合とほぼ同様であり、局所的には平滑面に対して図7(c)と同様に1.6倍 [図8(c) $X=240\text{ mm}$] の熱伝達率が現れている。

図9は、格子高さ $H=10\text{ mm}$ 、上向き面の $\theta=-30^\circ$ の結果を示している。この場合も図7の結果と大きな相違は見られない。これは、鉛直面から $\theta=\pm 30^\circ$ の範囲では、ほぼ一定の伝熱促進効果が得られることを示しており、実用上重要な結果である。

図10には格子高さが低い $H=5\text{ mm}$ 、下向き面の $\theta=+60^\circ$ の結果を示す。同じ角度条件の $H=10\text{ mm}$ の結果(図6)と比較すると、 $S=25\text{ mm}$ の場合 [図10(a)] ではわずかな促進効果が見られるが、 $S=100\text{ mm}$ の図10(c)と $S=200\text{ mm}$ の図10(d)では、促進割合が小さいことがわかる。

図11は、格子高さ $H=5\text{ mm}$ 、上向き面 $\theta=-30^\circ$ の結果である。この場合においても、顕著な促進効果が見られない。

傾斜平板上に設けられた格子による伝熱促進のメカニズムは、鉛直面に設けられた仕切板の場合と同様で

あると考えられる。すなわち、格子により上流の伝熱面により温められた高温流体を伝熱面から遠ざけるとともに、下流に低温の流体を導くことにより伝熱が促進されたものとする。このような流体の置換を効果的に行うには、ある程度の格子高さ H が必要であり、本実験結果から、 $H=5\text{ mm}$ では高さが不十分であると推定される。格子が高すぎる場合には、格子で囲まれる伝熱面部分に低温流体を導きにくくなるため、熱伝達率が低下することが予想され、傾斜角度によって最適な格子高さ H が存在すると思われる。本実験の範囲では、格子高さ $H=5\text{ mm}$ よりも $H=10\text{ mm}$ の場合のほうが流体の置換が効果的に行われているが、最適な格子高さを見いだすためには、さらに広範囲の実験を行う必要がある。

以上、格子付き傾斜伝熱面からの自然対流熱伝達の定性的な特性を示したが、実用の点からは何らかの定量的な指標が必要である。格子の効果を伝熱面全体にわたって評価するには、さらに詳細な二次元的なデータが必要であり、本実験の範囲では議論できない。本報では、伝熱面の幅方向の熱伝達率分布を測定した伝熱面中央 ($X=150\text{ mm}$) における局所熱伝達率の平均

Fig. 10 Local heat transfer results for a plate with rectangular grids ($H=5\text{ mm}$, $\theta=+60^\circ$)

Fig. 11 Local heat transfer results for a plate with rectangular grids ($H=5\text{ mm}$, $\theta=-30^\circ$)

Fig. 12 Variation of average heat transfer coefficients with surface heat flux

Fig. 13 Effect of rectangular grids on the average heat transfer coefficients ($q=120 \text{ W/m}^2$)

値 $\left[h_m = (1/N) \cdot \sum_{n=1}^N h_{yn} \right]$ に限って、伝熱促進効果を定量化する。得られる情報は、限られた条件でのものではあるが、実用上の一つの指標になり得ると考える。

本実験では、格子寸法等の条件により、電気入力 of 熱量に対する漏えい熱量の割合が変化し、表面熱流束が変化する。伝熱促進の一つの指標として伝熱面幅方向 (Y 方向) の局所熱伝達 h_y を算術平均した値を導入するが、それぞれの実験では表面熱流束が 8% 程度異なっている。そこで、3 種類かえた熱流束条件から、所定の熱流束での平均熱伝達率の値を、補間推定して、比較する方法を採った。図 12 には、算術平均した熱伝達率 h_m の熱流束による変化状況を示す。

図 13 に、平滑面に対して格子を付けたことによる熱伝達率の促進割合を $q=120 \text{ W/m}^2$ の場合について

示す。横軸は格子対角長さ S で、縦軸は平滑面に対する熱伝達率の促進率である。この結果より、下向き面の $\theta=+60^\circ$ の結果 [図 13(a)] では、促進割合が格子高さによらず小さい。鉛直面から $\pm 30^\circ$ の条件 [図 13(b), (c), (d)] では $H=10 \text{ mm}$ の場合に、 $S=100 \text{ mm}$ 付近にピークをもち、最大促進率として約 20% の促進率が得られる。また、格子高さ $H=10 \text{ mm}$ 、格子対角長さ $S=25 \text{ mm}$ の条件では、平滑面よりも熱伝達が低下する。

図 13 の結果は、伝熱面中央における幅方向の熱伝達率の平均値を示したものであり、これによって、伝熱面全体の伝熱促進率を論じることはできない。実設計においては、伝熱面全体にわたる詳細な測定が必要になる。しかしながら図 13 の結果から、格子対角長さ S をどの程度に設定すべきかについての指針を得ることは可能であるため、図 13 の結果を用いることにより、実設計に必要な詳細測定に先だて、その範囲を絞り込むことが可能になる。

本研究では伝熱面中央における幅方向の平均熱伝達率で、平滑面に対し約 20% の伝熱促進効果を得ているが、この値は格子のフィン効果を含まない値であり、伝熱面における熱伝達率自体が向上した結果得られたものであるため、小形・軽量化の要求が厳しいノート形パーソナルコンピュータ等の自然対流冷却の限界を引き上げる可能性を示していると考えられる。

4. 結 言

傾斜した平板伝熱面に格子構造を適用した場合の、伝熱促進効果を実験的に調べ、以下の結論を得た。

(1) 傾斜した平板に格子を適用した場合でも、 $\theta = \pm 30^\circ$ では鉛直平板 ($\theta=0^\circ$) に格子を適用した場合と類似の熱伝達率分布が観察された。

(2) 傾斜した平板においても格子を設けることにより局所的な熱伝達を促進することが可能である。平板中央 ($X=150 \text{ mm}$) の位置での平均熱伝達率で $H=10 \text{ mm}$ 、 $q=120 \text{ W/m}^2$ の場合に平滑面に対し、 $\theta = \pm 30^\circ$ のときに鉛直面の場合とほぼ同等の約 20% の伝熱促進効果が認められる。

文 献

- (1) 三角利之・北村健三, 機論, 54-504, B(1988), 2083-2088.
- (2) 三角利之・北村健三, 機論, 57-536, B(1991), 1365-1370.
- (3) 三角利之・北村健三, 機論, 57-543, B(1991), 3867-3872.
- (4) 北村健三・ほか 2 名, 機論, 60-569, B(1994), 270-275.
- (5) 北村健三・ほか 2 名, 機論, 61-582, B(1995), 659-664.
- (6) 藤井哲, 伝熱工学の進展, 3(1974), 1-110, 養賢堂.