

Heat Transfer Enhancement of Natural Convection from Upward-Facing Horizontal, Heated Plate to Air

正 ○北村 健三 (豊橋技科大) 学 斉藤 久和 (豊橋技科大・院)
正 三角 利之 (鹿児島高専)

Kenzo KITAMURA, Toyohashi University of Technology, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi
Hisakazu SAITO, Toyohashi University of Technology
Toshiyuki MISUMI, Kagoshima National College of Technology

Key Words: Heat Transfer, Heat Transfer Enhancement, Natural Convection, Extended Heat Transfer Surface, Grid Fins

1. 緒言

自然対流を利用した冷却法は、可動部が無いため騒音や振動が発生せず、信頼性が高いなどの長所を有している。しかし、強制対流による冷却に比べ除熱能力が低いことから、主として低発熱源の除熱、冷却に利用が限定されている。この自然対流の冷却能力が適当な手段により向上できれば、今まで強制対流冷却に頼らざるを得なかった様々な発熱機器の除熱、冷却が自然対流により行えるようになり、機器の信頼性や設置環境の向上に繋がるものと期待される。このことから、我々の研究室ではここ数年来、自然対流の伝熱促進法、とくに外部動力の投入を必要としない受動的伝熱促進法の開発を試みて来た。その結果、例えば図1に示すように、水平な基板伝熱面上に適当な大きさの格子を接着してやると、伝熱面により加熱された高温流体が格子により排除され、入替わって低温周囲流体が基板付近に流入する一連の流れが生じ、この流れによって基板からの伝熱が顕著に促進されることを見いだした⁽¹⁾。さらに、この格子を高熱伝導率の素材で作成し、格子がフィンとしても機能するようにすれば、より高い伝熱促進効果が期待できる。そこで、この格子フィン付き伝熱面を試作し、伝熱性能試験を行ったところ、試作伝熱面は同一フィン表面積、高さの従来型プレートフィン付き伝熱面よりも良好な伝熱性能を示すことを明らかにした⁽²⁾。

しかし、著者らの先の実験^(1,2)は、常温の水を試験流体としたもので、多くの実用伝熱機器では水よりむしろ空気を冷却材として利用するのが一般的である。そこで、著者らは先に空気を試験流体とした場合について、伝熱性能試験を行った。その結果、格子を伝熱面上に設置することにより、水と同様、空気に対しても顕著な伝熱促進効果が得られることを確認した⁽³⁾。しかし、実験に用いた格子のサイズや高さが限られていたため、最も高い伝熱促進効果が得られる格子の寸法、高さについては不明であった。そこで、本研究では格子のサイズ、高さを前報よりも更に広い範囲で変化させた場合について伝熱実験を行うことにより、これらの最適値を探ることとした。また、併せて伝熱面基板を垂直にした場合についても実験を行い、水平伝熱面の場合の結果と比較、検討した。

2. 実験装置および測定

本研究で用いた実験装置の概略を図1に示す。伝熱面の構成は前報⁽³⁾のそれとほぼ同様であり、等熱流束および準等温条件で加熱した2種類の伝熱面を製作・使用した。前者は可視化実験に、また後者は伝熱性能試験に用いた。いずれの伝熱面も寸法は $360 \times 360 \text{ mm}^2$ である。可視化実験用の等熱流束伝熱面は厚さ 20 mm の硬質発泡スチロール板表面にステンレス箔ヒータを貼り付け、通電加熱したも

ので、このヒータ表面に感温液晶シートを接着した。一方、伝熱実験用の準等温加熱伝熱面は、上述の箔ヒータ表面上に厚さ 3 mm の銅板を貼り付けたものである。この銅板裏面 22 箇所の地点に熱電対を接着し、壁温測定を行ったところ、壁面および周囲流体の温度差 $\Delta T (=T_w - T_\infty) = 30 \text{ K}$ の場合で、壁温のばらつきは $\pm 1.5 \text{ K}$ 以内であり、伝熱面はほぼ等温とみなせる。また、表面からの放射熱損失を極力低減するために、実験を行う毎に伝熱面をバフ研磨した。また、別途放射伝熱の影響を調べるために、格子をつや消し黒塗料で塗装した場合についても実験を行った。基板伝熱面上に設置する格子には低熱伝導率の厚紙と、高熱伝導率の銅板の2種類を用いた。紙製格子については、格子ピッチ p を $40, 60, 90$ および 120 mm の4種類、高さ H を $5, 10$ および 20 mm の3種類変化させた。また銅製格子については、 $p = 40 \text{ mm}$ で $H = 10 \text{ mm}$ 、および $p = 60 \text{ mm}$ で $H = 10, 20 \text{ mm}$ の3種類を作成し、基板面にはんだ付けした。これら格子付伝熱面の両側面には側板を設け、側方からの流れの流入を防いだ。以上の試験伝熱面を床面積 $0.9 \times 0.9 \text{ m}^2$ 、高さ 0.9 m の測定室の床面中央に水平に設置した。

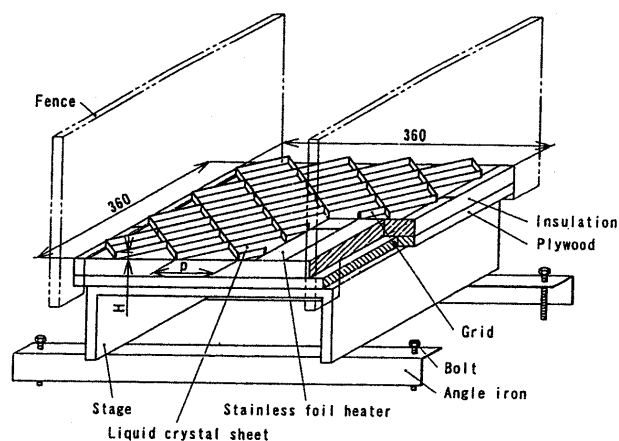


Fig. 1. Test plate with grids and experimental apparatus

3. 実験結果および考察

3.1 伝熱面表面温度分布の可視化 まず、格子によって基板伝熱面からの伝熱が促進される様子を、感温液晶を用いた伝熱面表面温度の可視化により調べてみた。その代表的な結果を図2に示す。図は等熱流束条件で加熱した平滑伝熱面および伝熱面上に $p=90 \text{ mm}$ 、 $H=10 \text{ mm}$ の紙製格子を接着した場合の可視化結果を比較したものである。まず、図2(a)の平滑伝熱面の場合であるが、伝熱面の端部から少し離れた位置に斑点状の模様が生じているのが分かる。この模様の部分は低温で、伝熱面端部から流入した周囲流体が伝熱面からはく離する際に生じる。いま伝熱面は等熱流

束条件で加熱されているので、この低温模様部分では熱伝達率が局所的に高くなっていることを示している。一方、これ以外の伝熱面表面は高温となっている。つぎに格子を伝熱面上に設置した図 2(b)では、それぞれの格子内に低温（高熱伝達率）の斑点模様が生じていることが分かる。この可視化結果から、伝熱面上に適切な大きさの格子を設置することにより、基板まわりの伝熱が顕著に促進されることが明らかである。

3.2 格子付伝熱面の平均熱伝達率 しかし、上の可視化では定量的にどの程度伝熱が促進されているか不明である。そこで本研究では、熱電対を用いて基板伝熱面の熱伝達率を定量的に測定することにした。この熱伝達率を等熱流束伝熱面について測定するのは極めて困難である。そこで、等熱流束伝熱面の代わりに等温加熱伝熱面を用いて伝熱面全体の平均熱伝達率 h を測定することにした。なお、この平均熱伝達率 h は、以下のように定義した。

$$h = q_{conv} / (T_w - T_{\infty}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

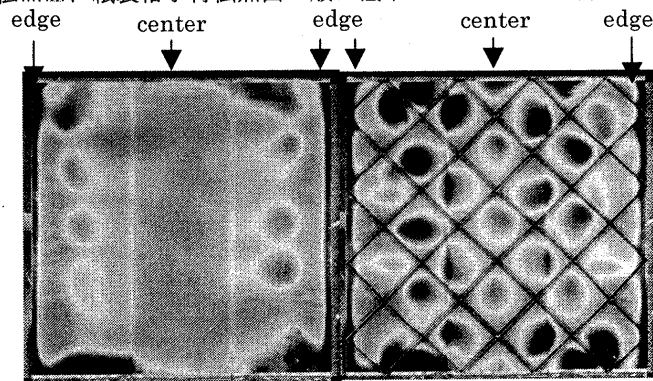
上式の q_{conv} は対流熱流束であり、次式により求めた。

$$q_{conv} = q_{total} - q_{cond} - q_{rad} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで q_{total} 、 q_{cond} 、 q_{rad} はそれぞれ、ヒータで発生したジュール発熱量を基板表面積で除した表面熱流束、熱伝導により伝熱面裏面へ漏洩する熱流束および伝熱面表面からの放射熱流束を示す。なお、基板伝熱面上に銅製格子を接着した場合には、格子が拡大伝熱面（フィン）として機能するが、本研究では、この格子を有効伝熱面積に算入せず、基板表面積から上の q_{total} を求めた。従って後述する銅製格子付伝熱面の平均熱伝達率は、いわゆる見かけの平均熱伝達率を表していることを注意しておく。

さて、まず紙製格子付き伝熱面の平均熱伝達率を測定した結果の一例を図 3 に示す。この図は、ピッチ $p=90\text{ mm}$ 一定で、高さ H の異なる格子を伝熱面に接着した場合の結果を示したもので、横軸には伝熱面と周囲流体との温度差 ΔT ($T_w - T_{\infty}$) をとっている。いずれの温度差 ΔT においても格子付伝熱面の熱伝達率は平滑伝熱面より高くなり、とくに格子高さ $H=10\text{ mm}$ では約 30% 程度高い熱伝達率が得られている。このようにまばらな間隔で紙製の格子を伝熱面に接着するだけで顕著な伝熱促進効果が得られる結果は注目値する。

つぎに紙製格子の代わりに $p=60\text{ mm}$ 、 $H=20\text{ mm}$ の銅製格子を基板伝熱面にはんだ付けした場合について、見かけの熱伝達率を測定した結果を図 4 に示す。図には比較のため、この銅製格子の表面につや消し黒塗料を塗布した場合および同一寸法の紙製格子を接着した場合の熱伝達率も併記した。この図から、つや消し黒塗料を塗布した銅製格子付伝熱面の熱伝達率が最も高く、次いで磨いた銅製格子付伝熱面、紙製格子付伝熱面の順に低下していくことが分か



(a) smooth plate (b) plate with paper grid
Fig.2. Visualized surface temperatures of the test plates
($q_w = 303\text{ W/m}^2$, $T_{\infty} = 16.8^\circ\text{C}$)

る。とくに黒色塗料を塗布した格子付伝熱面の平滑面に対する伝熱促進率は最大約 3 倍であり、磨いた銅製格子付伝熱面の伝熱促進率最大約 2.3 倍よりもかなり大きくなった。これは、つや消し黒塗布面(放射率 $\varepsilon=0.95$)、と磨いた銅板面($\varepsilon=0.03$)からの放射伝熱量の差に基づくもので、とくに空気の場合には、自然対流による対流伝熱量を促進するだけでなく、放射伝熱を出来る限り増大させる工夫が重要であることを示している。

なお、本研究では銅製格子付伝熱面を水平上向きだけでなく垂直に設置した場合についても伝熱性能試験を行っている。その結果によれば、本実験範囲内で $p=90\text{ mm}$ 、 $H=20\text{ mm}$ の銅製格子付伝熱面で最も高い熱伝達率が得られ、平滑面に対する伝熱促進率は最大約 1.7 倍となった。この事実は、本研究で提案する格子付伝熱面が水平、垂直のいずれの場合にも伝熱促進が可能なことを示しており興味深い。

4. 結言

本研究では水平上向き加熱平板から空気への自然対流熱伝達を促進する方法として、伝熱面基板上に格子を接着する方法を提案し、最適な格子サイズ、および格子によりどの程度高い伝熱促進率が得られるかを実験により調べた。その結果、本実験範囲内において、 $p=40\text{ mm}$ 、 $H=10\text{ mm}$ の紙製格子、 $p=60\text{ mm}$ 、 $H=20\text{ mm}$ の銅製格子をそれぞれ基板伝熱面上に接着した場合に、最も高い伝熱促進効果が得られ、平滑面に対する伝熱促進率はそれぞれ 1.3 倍、2.3 倍となった。また、格子の放射率を高くすることにより、更に高い伝熱促進率が得られることを明らかにした。本実験結果は、コンパクトで高性能な自然対流伝熱面の開発に資するものと考えている。

文献 (1) 北村・ほか 2 名、機論 60-569、B(1994)、270 (2) 北村・ほか 2 名、機論、61-582、B(1995)、659. (3) 北村・ほか 2 名、機械学会 2000 年度年次大会講演論文集、Vol. IV (2000)、515.

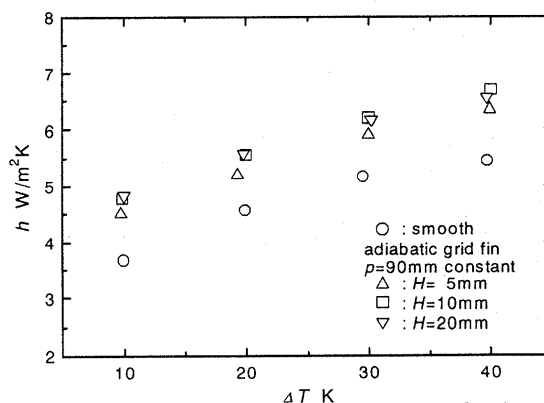


Fig. 3. Heat transfer performance of non-conducting grids

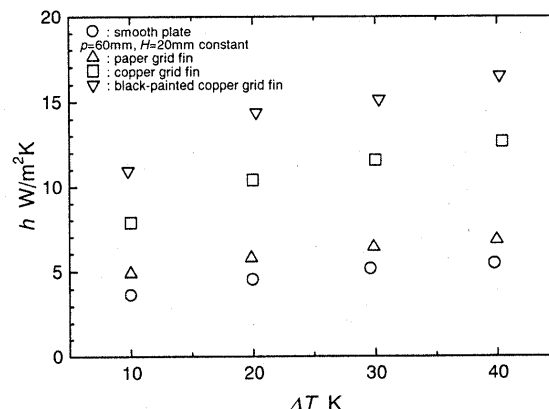


Fig.4. Heat transfer performance of conducting grids