垂直な平板に沿う乱流自然対流の伝熱促進に関する 実験的研究*

(第1報, 吹出し・吸込みの効果)

稲垣 照美^{*1}, 小森 勝夫^{*2}

Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in Turbulent Natural Convection along a Vertical Flat Plate (1st Report, The Effect of Injection and Suction)

Terumi INAGAKI and Katsuo KOMORI

To attain a high enhancement rate in convective heat transfer, deformation or destruction of the boundary layer is a necessary condition. For example, injection or suction is one of the most fundamental methods. Although several attempts of heat transfer enhancement have been made in forced convection, in turbulent natural convection, we have not discussed an effective technique sufficiently. Especially, when only natural convection is applicable to cooling, it is important to analyze its enhancement mechanism. In this paper (the 1st report), therefore, injection and suction were added to turbulent natural convection along a vertical flat plate, and the possibility of heat transfer enhancement was discussed at first. It was realized that local Nusselt numbers affected by injection and suction were 1.5~1.6 times as much as those for pure turbulent natural convection.

Key Words: Natural Convection, Turbulent Flow, Injection, Suction, Heat Transfer Enhancement, Vertical Flat Plate

1. 緒 言

伝熱促進の手法は、能動的なものと受動的なものに大別され、層流や乱流域の強制対流あるいは層流域の自然対流^{(1)~(4)}にその多くが適用されてきた。一般に、大きな熱伝達率は、より多くの流量を付加させた強制対流作用下で達成される。しかし自然放熱でまかなえる体系であれば、生産コストの面からでもできるだけ体系を単純化し、自然対流を積極的に有効利用する必要がある。またたとえ自然対流に対する能動的な伝熱促進であっても、損失の極力少ない手法を組み込むことが重要となる。そして実際の流れ場は、乱流である場合が多い。しかしながら乱流域の自然対流では、これまで伝熱促進に関する試みが全くなされておらず、輸送機構すら満足に解明されていないのが現状である。

伝熱促進を行うためには、何らかの方法で境界層を変形・破壊することが一つの条件となる。一方で流れの変形・破壊は、特に強制対流の場合、ポンプ動力損失や摩擦係数の増大など熱伝達を行ううえで大きな障害

となり得る。しかしながら自然対流の伝熱促進は、特に受動的手法の場合、これらの問題をほとんど考慮に入れなくてもよい。

本研究では、以上の観点から、自然対流に対して能動的手法および受動的手法を含めたさまざまな伝熱促進を試み、その過程で伝熱促進の機構を解明することにした。本論では、その第1段階として、乱流自然対流の変形・破壊を行う目的で境界層の吹出し・吸込みを試み、伝熱促進の一つの可能性を探ることにした。すなわちここでは、吹出し・吸込みを伝熱面上に配置された見掛け上の突起物あるいは障害物とみなした。

主 要 記 号

h_x : 局所熱伝達率 $= q_w / (T_w - T_\infty)$

Gr_x^* : 修正グラスホフ数 $= g\beta q_w X^4 / (\nu^2)$

g : 重力の加速度

Nu_x : 局所ヌッセルト数 $= h_x X / \alpha$

Nu_{xn} : 垂直な平板に沿う乱流自然対流の局所ヌッセルト数

Pr : プラントル数 $= \nu / \alpha$

$Q_{w,p,k,c}$: 消費エネルギー

q_w : 伝熱面熱流束

Ra_x^* : 修正レイリー数 $= Gr_x^* Pr$

* 原稿受付 平成4年8月20日。

^{*1} 正員、茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)。

^{*2} 正員、豊田工業高等専門学校 (〒471 豊田市栄生町2-1)。

V_i, V_s : 吹出しおよび吸込速度
 X : 伝熱面下端からの距離
 α : 熱拡散率
 β : 体積膨張率
 η : 損失係数
 κ : 熱伝導率
 ν : 動粘性係数
 $\bar{}$: 平均値

2. 実験装置と測定法

図1は、実験装置の概要を示したものである。吹出し・吸込口（伝熱面下端から745 mmの位置）の口径は直径5 mm、小孔列のピッチは15 mmとし、スパン方向に19孔設けた。流出・流入温度は主流体のそれと等しく、小孔から水槽対向壁までの距離は900 mmである。小孔は、一様な流入・流出を実現するためダンプタンク（直径300 mm、高さ200 mmの円筒容器）の放射状孔を介して三相マグネットポンプと接続され、流量計測には、あらかじめ検定された面積式流量計を使用した。実験で設定した吹出し・吸込速度 V_i, V_s は、それぞれ0.11, 0.22, 0.33 m/s および0.44 m/s である。

また伝熱面は、長さ985 mm×幅300 mm×厚さ10 mmのベークライト板上に短冊状のステンレスはく（幅300 mm×長さ80 mm×厚さ30 μ m）を直列に接続し、交流定電圧電源で通電加熱することにより等熱流束条件を満足している。壁面温度の測定には、直径70 μ mのクロメル-アルメル熱電対を流れ方向40 mm間隔で、また伝熱面下端から785 mm（小孔下流40 mmの位置）にスパン方向22.5 mm間隔で、いずれもはく裏面（短冊状ステンレスはく中央部）にスポット

図1 実験装置

溶接した。この際スパン方向熱電対は、小孔の真上と小孔間中央の真上となるよう配置した。また裏面への熱伝導損失を防止するため、伝熱面裏面に厚さ45 mmの発泡スチロール製断熱材を取付けた。さらに伝熱面側面には、周囲流体の巻込みを防止するため高さ150 mmの側壁を設け、伝熱面先端は、60°の鋭角とした。なお実験は、脱気した水を作動流体とし、伝熱面全体を大形水槽（1500×1000×800 mm³）内に沈めて行った。

本実験では、壁面温度と主流体温度との温度差が最大でも20°C程度であるため、流体の物性値変化が熱伝達に及ぼす影響は、無視できるものと考えられる。なお、無次元数中の物性値は、壁面温度 T_w と主流体温度 T_∞ の平均値 $(T_w + T_\infty)/2$ に基づいて評価した。さらに実験データの不確かさ評価は、ANSI-ASME に基づいた不確かさ解析（95% 包括度）を利用した。その結果、校正実験による熱電対の不確かさは、1%、 Ra^* 数および Nu_x 数の不確かさは、それぞれ7% および6% であった。また伝熱実験では、伝熱系にふく射熱量 Q_R や伝導熱量 Q_C を考慮して有効熱伝達率を求めなければならない。しかしながら、今の場合、作動流体が水でかつ温度差が比較的小さいため、ふく射熱量 Q_R や伝導熱量 Q_C は無視し得るほど小さい。

3. 結果および考察

3.1 吹出しを伴う自然対流の乱流熱伝達 図2は、熱流束5000 W/m²、 $\overline{Ra^*} \sim 4.0 \times 10^{13}$ において、小孔列と平行なスパン方向の局所熱伝達率 Nu_x を測定した結果である。図2から、吹出し速度の増加とともに熱伝達率が向上する伝熱促進が観察できる。また熱伝達率がスパン方向にほぼ一様に分布していることから、すべてのケースにわたり二次元的に均等な吹出しが行われていることがわかる。なお同様な傾向は、熱流束9500 W/m²、 $\overline{Ra^*} \sim 7.5 \times 10^{13}$ においても得られた。

図3は、縦軸に局所熱伝達率 h_x [W/m²K]、横軸に伝熱面下端からの距離 X [mm] をとって乱流域の流れ方向局所熱伝達率を示したものである。熱流束は、9500 W/m² である。図3中点線が吹出し位置を表し、吹出しのない流れの熱伝達率は、高さ方向にほぼ一定値を示している。図3から吹出し位置の直下で極めて高い熱伝達率を示し、その後急速に吹出しのない場合に漸近していくことがわかる。また伝熱促進の割合は、吹出し速度の増加とともに大きくなる傾向にある。また図4は、熱伝達率における物性値の影響を取り除くため、 Nu_x-Ra^* 数平面上に上記実験結果を整理し直

したものである。図4中実線は、垂直な平板に沿う自然対流の乱流熱伝達に関する実験式⁽⁵⁾(1)，である。

$$Nu_x = 0.568 Ra_x^{*0.22} \dots\dots\dots (1)$$

図4から、吹出しのない流れの熱伝達は、経験式(1)と良好に対応していることがわかる。

3・2 吸込みを伴う自然対流の乱流熱伝達

図2同様、熱流束 5000 W/m^2 、 $Ra_x^* \sim 4.0 \times 10^{13}$ において、小孔列と平行なスパン方向の局所熱伝達率を測定した結果である。図5から吸込みを行った場合でも伝熱促進が現れることが明らかになった。また熱伝達率がスパン方向にほぼ一様に分布していることから、吸込みも吹出し同様二次元的に均等に行われていることがわかる。同様な傾向は、熱流束 9500 W/m^2 、 $Ra_x^* \sim 7.5 \times 10^{13}$ においても得られた。

図6は、 $h_x [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] - X [\text{mm}]$ 平面上に乱流域の流れ方向局所熱伝達率をまとめたものである。熱流束は、 9500 W/m^2 である。図6から吸込位置の直下で極めて高い熱伝達率を示し、その後急速に吸込みのない場合に漸進していくことがわかる。また伝熱促進の割合は、吸込速度の増加とともに大きくなる傾向にある。すなわち熱伝達は、吹出しを行った場合と類似の挙動を呈することが明らかになった。

図3および図6から、吹出しおよび吸込みの影響が顕著に観察される領域は、吹出し・吸込位置の下流150

図4 吹出しを伴う流れの $Nu_x - Ra_x^*$ 分布

図5 吸込みを伴うスパン方向の熱伝達率

図2 吹出しを伴うスパン方向の熱伝達率

図3 吹出しを伴う流れ方向の熱伝達率

図6 吸込みを伴う流れ方向の熱伝達率

図7 吸込みを伴う流れの $Nu_x - Ra_x^*$ 分布

mm 程度に限られていることがわかる。また図 7 は、上記結果を再整理し、 $Nu_x-Ra_x^*$ 数平面上にまとめたものである。無次元整理結果からも伝熱促進の様子を説明することができる。さらに図 4 および図 7 から、本実験の範囲内では、伝熱促進が現れる領域は、吹出し・吸込みいずれの場合も $Ra_x^*=5.0 \times 10^{13} \sim 1.0 \times 10^{14}$ であることがわかる。

3.3 伝熱促進に関する考察 3.1 節および 3.2 節では、吹出しや吸込みが自然対流の乱流熱伝達に与える影響を観察した。本節では、その役割・原因について具体的に考察する。

図 8 および図 9 は、縦軸に Nu_x/Nu_{xn} をとり、横軸に吹出し・吸込速度をとって伝熱促進率を示したものである。 Nu_x/Nu_{xn} は、吹出し・吸込みが存在する場合 (Nu_x) と存在しない場合 (Nu_{xn}) の熱伝達率比であり、以下のように定義した。

$$\frac{\overline{Nu_x}}{\overline{Nu_{xn}}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^9 Nu_{xi}}{\sum_{i=1}^9 Nu_{xni}} \right) / 9 \dots\dots\dots (2)$$

ここで 9 は、2 章図 1 で示した位置に設置したスパン方向熱電対の総数である。いずれの熱流束においても、吹出しにおける熱伝達率比は V_i の増加とともに単調に増大し、本実験の範囲内では最大 80% もの促進率が達成できた。

しかしながら吹出し速度の過度の増加は、より大きな伝熱促進を招くが、自然対流による熱交換の見地から逸脱するおそれがある。さらにポンプ動力損失など余分な因子を考慮に入れなければならない。熱伝達に及ぼす損失の評価は、3.4 節で述べることにする。

一方、吸込みの場合には、最大 50% に及ぶ伝熱促進が実現したもの、ある V_s で頭打ちが生じることが明らかになった。このことは、伝熱促進を実施するうえで最適な吸込速度 (今の場合、 $V_s=0.2 \sim 0.3$ m/s 程度) が存在することを示唆している。熱流束の異なる図 9 から同様な結果を得た。これは、境界層を完全

に変形・破壊するために必要な速度であると考えられる。

前述のように、過度の吹出し速度は、本研究で意図する自然対流の伝熱促進の範ちゅうから外れ、伝熱系をより複雑にしてしまうおそれがある。したがって、乱流自然対流の観点からは、吹出し・吸込みが適用できる範囲を伝熱促進率との兼ね合いから、上記速度 $V_{i,s}=0.2 \sim 0.3$ m/s 程度に抑えることが望ましい。この値は、自然対流の伝熱促進において、吹出し・吸込みを見掛け上の障害物とみなすうえでの上限と考えられ、流れ場が強制対流支配とならないための歯止めでもある。

吹出しには、境界層を随所で破壊するほかに伝熱面近傍の乱れを大きく増幅させる効果が存在すると推測できる。すなわち熱抵抗となる境界層の破壊によって、周囲低温流体の巻込みに代表される三次元的な乱れを増幅したと考えられる。一方、吸込みでは、じょう乱を助長することではなく、境界層を吸収することで熱抵抗を低減させる作用が存在すると考えられる。したがってこれらの作用により、伝熱促進が実現したものと言える。このため、流れ方向に幾重 (例えば 150 mm 間隔) にも吹出し・吸込みの小孔を設けることで熱交換効率の良い自然放熱系の伝熱面を構成することが可能になる。例えば、電子機器配列基盤からの自然放熱には、既設のファンを利用した吹出し・吸込みを適用することも考えられよう。

3.4 熱伝達に及ぼすポンプ動力損失の評価 乱流自然対流では、浮力で誘起される流速が小さくかつ大きな温度乱れを伴うため、主流の全圧や壁面摩擦係数を測定することが極めて困難である。したがって、ポンプ動力損失を強制対流の手法に従って評価することができない。そのため、ここでは、ポンプ動力として消費される電力エネルギー Q_P をおのおのの条件で算出し、伝熱面に供給される電力エネルギー Q_w との比

図 8 伝熱促進率

図 9 伝熱促進率

較から損失を評価した。これは、損失評価として必ずしも有効な手段とは限らないが、消費エネルギーに対する利得を単純に見積もったものである。

以上の手法から損失係数は、次式で表される。

$$\eta = 1 - \frac{Q_w}{Q_w + Q_p} \dots\dots\dots (3)$$

最も厳しい条件、最大吹出し・吸込速度 0.44 m/s 下の損失係数は、熱流束 5 000 W/m² で 10%、熱流束 9 500 W/m² で 5% であった。したがって、得られた伝熱促進率には、最大でも 10% のポンプ動力損失が含まれていると考えられる。

4. 結 言

本研究は、垂直な平板に沿う乱流自然対流に吹出しおよび吸込みを付加することで、流れを变形・破壊し、伝熱促進の一つの可能性を検討したものである。

吹出し・吸込みが適用できる範囲は、 $V_{i,s}=0.2\sim0.3$

m/s であり、この領域では、式(1)で表される通常の自然対流乱流熱伝達よりも約 1.5~1.6 倍に至る高い熱伝達率を実現することができた。しかしこれらの値には、ポンプ動力損失として 5~10% 以内の損失が含まれている。

今後は、現象の理解を進めるとともに、他の手法による実験を試みることで乱流自然対流に対する新たな伝熱促進法を確立するうえでの重要な課題となる。

文 献

- (1) 三角・北村, 機論, 53-487, B(1987), 1072.
- (2) 三角・北村, 機論, 54-504, B(1988), 2083.
- (3) Fujii, T., ほか 2 名., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **16**(1973), 629.
- (4) 稲垣・小森, 機論, 57-543, B(1992), 3873.
- (5) Vliet, G. C. and Liu, C. K., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **91**(1969), 517.