

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月21日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560208

研究課題名（和文） 自然対流に関する伝熱促進技術の開発

研究課題名（英文） Technology Development for Heat Transfer Enhancement in Natural-Convection Boundary Layers

研究代表者

辻 俊博 (TSUJI TOSHIHIRO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90110262

研究成果の概要（和文）：層流から乱流に至る自然対流境界層に関し、その本質的な伝熱特性を数値解析および実験により詳細に調査し、伝熱促進法を考察した。その結果、重力の方向に主流を付加すれば、境界層の乱流遷移が促進され、局所熱伝達率の高い値が境界層の広い範囲で維持されること、そして境界層内に分割した傾斜平板列を挿入することによって、乱流境界層および層流境界層のいずれについても、縦渦の発生に伴う極めて顕著な局所熱伝達率の向上が観察されることなど、従来困難とされてきた自然対流の伝熱促進が可能であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：For natural-convection boundary layers from laminar to turbulence, the essential heat transfer characteristics have been explored with numerical analyses and experiments. Accordingly, it is found that the transition to turbulence is promoted by adding a mean flow in the direction to the gravity and high local heat transfer rates are maintained over the wide range of the boundary layer. Also, marked increases of local heat transfer rates originated from the generation of longitudinal vortex motions are observed by inserting split inclined plates into the boundary layer both for laminar and turbulence. Thus, the heat transfer enhancements of natural-convection boundary layers are established.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：自然対流, 伝熱促進, 境界層, 乱流, 層流

1. 研究開始当初の背景

自然対流は強制対流とは著しく異なる乱流特性を有しているため、伝熱面上に突起（フィン）を設けても、強制対流のように容易

に伝熱促進を図ることができない。自然対流乱流境界層については、平板を伝熱面幅方向に隙間を設けて並べた伝熱促進装置を境界層内に挿入して流れを制御すると、局所熱伝

達率が約60%増加することがわかった。また伝熱促進装置を小型化して、自然対流層流境界層に試験的に適用したところ、乱流境界層と同様にかなりの熱伝達率の向上が見られた。このような伝熱促進に関する技術の開発は、電力施設などの大型熱発生機器から小型電子機器の自然冷却に有用である。しかしながら、自然対流の伝熱特性については未知な部分が多く、如何なる条件で伝熱促進が可能なのか、また伝熱促進装置を用いる場合、その最適な形状および伝熱促進のメカニズムなどの詳細は不明である。したがって、主流の付加や境界層内への物体の挿入によって自然対流の流れ場と温度場にどのような変化を生じるのかを学術的に明らかにし、その情報に基づく効果的な伝熱促進技術の確立が望まれていた。

2. 研究の目的

自然対流境界層に主流を付加すると、主流の方向によって、その伝熱特性が劣化したり、促進されたりすることが、これまでの実験的研究によって観察されている。しかしながら、伝熱特性が、如何なる条件とメカニズムによって変化するのかあまりよくわかっていない。そこで本研究では、自然対流境界層に主流を付加した場合について、主に直接数値シミュレーションの結果を基に、定量的な伝熱特性に変化を調査することを目的の一つとする。また、境界層内に物体等を挿入した場合に伝熱量が増大する基本的なメカニズムについて、実験と数値シミュレーションを行って解明することも研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 自然対流境界層に主流を付加した場合 (共存対流) の直接数値シミュレーション

自然対流境界層について、流れ方向とその逆方向 (重力方向) に主流を付加した場合について、系統的な直接数値シミュレーションを行った。ただし、実際の流れ (空間発展) をそのままシミュレーションするのは、計算負荷が極めて大きく困難である。そこで、無限に広い平板が、ある時刻から加熱されると同時に主流が付加され、時間と共に発達する境界層 (時間発展境界層) として模擬した。そして、速度境界層積分厚さを基準として、時間発展境界層と実際の空間発展境界層を対比させ、考察を加えた。

(2) 平板列による自然対流境界層の伝熱促進

種々の形状の平板列を自然対流境界層内に挿入し、レーザー光に用いた速度場の可視

化計測と熱電対による温度計測を同時に行い、得られた定量的データに基づいて、伝熱促進の主因となる熱流動現象を特定する。伝熱促進装置を構成する平板の寸法・形状については、これまで一定間隔のほぼ正方形の平板を伝熱面に平行に配置した場合のみを調査したに過ぎない。したがって、特定された熱流動現象をより活性化させるように、平板の形状や配置する間隔を変えたりするなど、より詳細にその効果を調べた。さらには、数値計算を行って、流れ方向にどのような間隔で伝熱促進装置を複数段設置すれば最適になるのかについても検討を加えた。

4. 研究成果

(1) 自然対流境界層に主流を付加した場合の直接数値シミュレーション

まず、自然対流の伝熱特性を支配する因子を特定するため、直接数値シミュレーションを行った (下記の雑誌論文③参照)。作動流体が空気の場合、境界層の流れ方向に僅かに主流を付加すると、境界層の遷移が遅れ乱流から層流に逆遷移すること、また重力方向 (流れ方向とは逆) に主流を付加すると乱れが増幅されることがわかった。図1は、付加する主流の方向と大きさによって、境界層の乱流遷移が時間的に早くなったり、遅くなっ

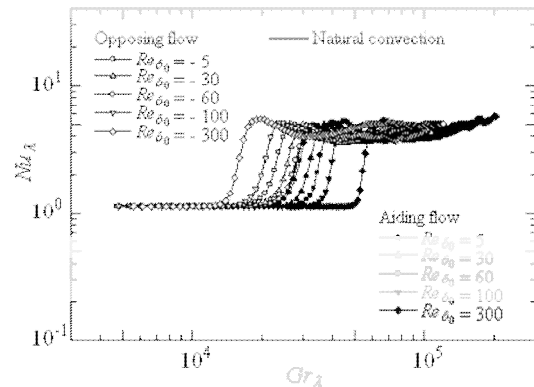


図1 主流の付加による局所ヌセルト数の変化

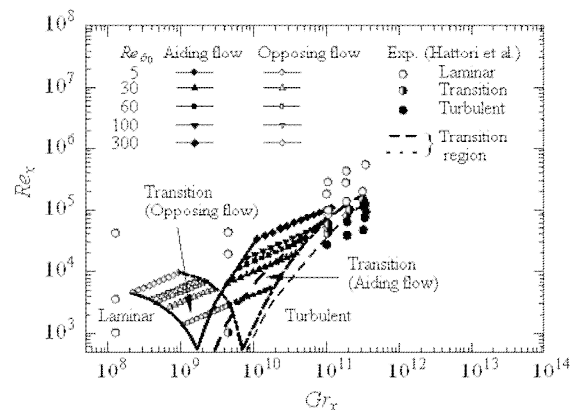


図2 主流の付加に伴う流動様式の変化

たりして局所熱伝達率が大きく変化する状況を示している。この結果を基に、主流 (Re_x) の変化に伴う実際の境界層の流動様式を整理したものが図2で、流れ方向に主流を付加した場合、乱流遷移点が下流側 (Gr_x の大きい方) に変移する。図には、流れ方向に主流を付加した場合の乱流遷移点の実験値が併記されているが、計算値はそれとよく対応している。一方、流れ方向とは逆の方向に主流を付加した場合は、上流側 (Gr_x の小さい方) に変移し、それに伴い伝熱が促進されることがわかる。この図は、流れの状況 (層流あるいは乱流) が、如何なる条件で出現するかを示す重要な流動様式線図である。

また、作動流体が水の場合についても同様の直接数値シミュレーションを行った (下記の雑誌論文①および学会発表⑤参照)。結果としては、空気の場合と比べ、高プラントル数効果で相対的に温度境界層が速度境界層よりも薄くなり、乱流熱流束の挙動が若干異なるものの、本質的な伝熱特性には殆ど差異がなく、このことに関しては、実験でも確かめられた (学会発表①参照)。

いずれにしても、自然対流では、その流れとは逆の方向に主流を付加することによって乱流遷移を早め、伝熱促進を図ることが可能である (このことは、通常の強制対流とは大きく事情が異なる)。

(2) 平板列による自然対流境界層の伝熱促進 (雑誌論文②および学会発表③, ④参照)

強制対流とは異なる伝熱特性を有する空気の自然対流境界層に関し、伝熱面近くに隙間を設けた傾斜平板列を挿入することにより、局所熱伝達率の大幅な向上 (約 60 % の増加) を見込めることが、実験および数値解析により明らかになった。この伝熱促進の要因は、図3に示すように、傾斜平板に沿う低温流体の伝熱面への侵入と傾斜平板の端面

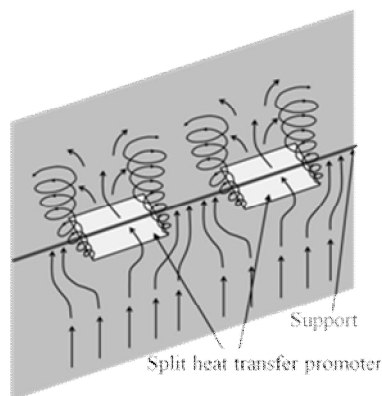


図3 傾斜平板周りに発生する縦渦

から発生する縦渦が伝熱面近傍の高温流体を周囲へ放出する相乗作用によるものである。熱電対およびLDV (レーザードップラー流速計) 等を用いた実験結果については、数値解析結果と極めてよく一致し、その妥当性が確かめられた。

さらに、伝熱面全体で高い熱伝達率を得るために、鉛直方向に多数段の傾斜平板列を設置してその効果を検討した。最も高い局所平均熱伝達率が得られる傾斜平板列 (幅 10 mm の平板を隙間 10 mm で伝熱面に対して 45°傾斜して並べたもの) を、高さ方向に多数段設置して解析を行った。その結果、伝熱面高さ $L = 300$ mm に対して、設置段数を7段としたときに伝熱面全体の平均熱伝達率は増加 (平均で約 48 % の増加) するが、それ以上になると平均熱伝達率はかえって減少することがわかった。図4は、設置段数を7段のときの、傾斜平板中央部、傾斜平板端部および隙間中央部における局所熱伝達率の変化を示したもので、いずれの値も下流方向に増加することが観察される。

図5は伝熱面高さ方向に傾斜平板を7段設置した場合に発生する縦渦の状況を示したものである。最下段で発生した縦渦が、後段の傾斜平板の存在で、さらに大きく発達することによって、図4に示すように、下流に向かって伝熱が益々促進される。

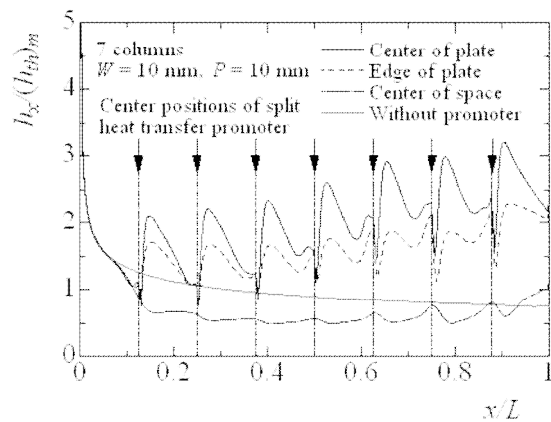


図4 傾斜平板を7段設置した場合の局所熱伝達率の変化

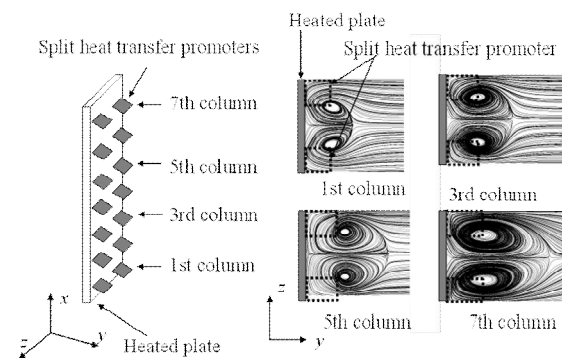


図5 連続した縦渦の発生

先にも述べたように、自然対流の伝熱促進については、これまで極めて困難であるとされてきた。本研究は、それを打破するもので、しかも伝熱面そのものを加工することなく（フィンなどを取り付けるのではなく）、伝熱面近くに形成される境界層内に伝熱促進装置（材質を問わない）を挿入するだけで、伝熱量を大幅に増加させることが可能である。したがって、コスト的にも実用性が高く、既存の大型施設等の熱除去が施設そのものを改修することなく容易に行え、さらに比較的小型の電気・電子機器の筐体等の冷却にも適用できると予想される。このような研究は、これまで国内外とも全く行われていないのが現状であり、実質的に本研究が最初の試みである。また、実験で得られる定量的データは、自然対流の本質を理解する上でも有用なものと考えられ、研究の波及効果は学術的な面でも大きいと期待される。

なお、伝熱面が平面でなく、波状面であるような場合の自然対流に関する研究は極めて少なく、その伝熱特性は明らかになっていない。自然対流の伝熱促進を考える上で、これを調べることも意味がある。そこで波状面に沿う自然対流の伝熱特性についても補足的に数値解析を行い、検討を加えた（学会発表②参照）。結果的として、水平方向に波状面が並んだ伝熱面では、波の波長と振幅によって熱流動がかなり変化するが、波のピッチが小さいときには、平均熱伝達率も平板のそれより約10%増加するがわかった。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① M. Z. Abedin, T. Tsuji and J. Lee, Turbulence characteristics and vortical structures in combined-convection boundary layers along a heated vertical flat plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 55, 2012, 3995-4002
- ② 梶田 欣、辻 俊博、松野匡輔、平板列挿入による自然対流層流熱伝達の促進に関する数値解析、日本機械学会論文集（B編）、査読有、77巻773号、2011、120-128
- ③ M. Z. Abedin, T. Tsuji and Y. Hattori, Direct numerical simulation for a time-developing combined-convection boundary layer along a vertical flat plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 53, 2010, 2213-2212

〔学会発表〕（計6件）

- ① 吉川一央、辻 俊博、自然対流境界層における乱流熱輸送の特性、日本機械学会熱工学コンファレンス2011、2011年10月29日、浜松
- ② 菅 勇輝、辻 俊博、大河内一輝、鉛直波状壁面に沿う自然対流境界層の数値解析、日本伝熱学会第48回日本伝熱シンポジウム、2011年6月3日、岡山
- ③ 梶田 欣、辻 俊博、傾斜平板列による自然対流層流熱伝達の促進、日本伝熱学会第48回日本伝熱シンポジウム、2011年6月3日、岡山
- ④ 梶田 欣、辻 俊博、平板列挿入による自然対流層流境界層の促進に関する数値解析、日本機械学会熱工学コンファレンス2010、2010年10月31日、長岡
- ⑤ M. Z. Abedin and T. Tsuji, Effects of freestream on thermally-driven boundary layers along a heated vertical plate, The 14th International Heat Transfer Conference, August 9, 2010, Washington DC, USA
- ⑥ モハマド・ジョイナル・アベディン、辻 俊博、浜館潤一、鉛直加熱平板に沿う水の共存対流境界層の直接数値解析、日本伝熱学会第47回日本伝熱シンポジウム、2010年5月28日、札幌

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 俊博 (TSUJI TOSHIHIRO)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90110262

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：