

令和元年6月5日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05823

研究課題名(和文)複数段・複数列配置された熱源まわりの自然対流の伝熱特性とその予測手法の確立

研究課題名(英文) Heat transfer of natural convection from vertical and horizontal rows of multiple heat sources and their non-dimensional correlations

研究代表者

北村 健三 (Kitamura, Kenzo)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・シニア研究員

研究者番号：20126931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数の熱源が一定な水平および垂直方向間隔で分散配置され、空気の自然対流により冷却される体系について、熱源まわりに生じる自然対流の流動と伝熱特性を実験により探った。実験には、垂直加熱平板および水平加熱円柱を用い、これら熱源を水平あるいは垂直方向に一定な間隔で一列配置した場合、垂直および水平両方向に格子あるいは千鳥状に配置したそれぞれの場合について、各熱源の熱伝達率を測定した。そして、実験により得られた熱伝達率を無次元整理することにより、複数熱源まわりの伝熱を支配する無次元パラメータを明らかにすると共に、その伝熱量を一般的かつ広い範囲で予測する伝熱相関式を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、多数の垂直加熱平板や水平加熱円柱が一定な水平および垂直方向間隔で分散配置され、空気の自然対流により冷却される体系について、平板や円柱の伝熱を支配する無次元パラメータを明らかにすると共に、その伝熱を一般的に予測する伝熱相関式を提案した。とくに後者の伝熱相関式は、チューブバンク型やプレートフィン型熱交換器、ピンフィン型ヒートシンクなど、多くの実用伝熱機器の熱設計や高性能化を図るための基礎資料として有用と考えられる。また、本研究で明らかにした無次元パラメータは、平板や円柱だけでなく形状の異なる他の複数熱源まわりの自然対流の流動・伝熱特性を予測する上で重要と考えられる。

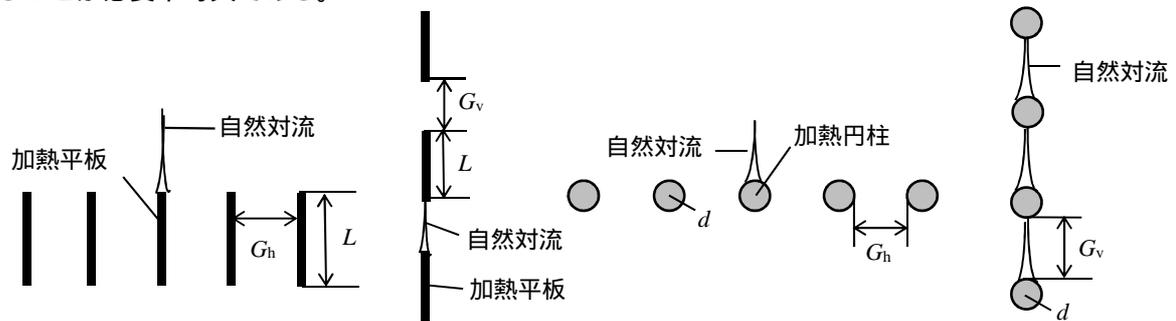
研究成果の概要(英文)：Natural convective heat transfer from the rows of multiple heat sources to air has been investigated experimentally in the present study. The heated horizontal cylinders and vertical plates aligned in the horizontal and/or vertical directions with constant spacing were adopted as the heat sources to simulate the rows or banks consisted with a large number of tubes and plates, which are typically seen in the practical heat exchangers or heat sinks. The experiments began with the measurements of the heat transfer coefficients of the heat sources placed in the rows or banks. The coefficients were, then, arranged with various non-dimensional parameters to obtain empirical heat transfer correlations. After several trials and errors, we have found that the Nusselt numbers of the heat sources are well correlated with the specific non-dimensional parameters when the gaps between heat sources are adopted as the characteristic length in the Nusselt numbers and the non-dimensional parameters.

研究分野：熱工学

キーワード：対流伝熱 自然対流 分散熱源 熱交換器 ヒートシンク

1. 研究開始当初の背景

加熱された平板や円柱が静止流体中に設置されると、平板や円柱まわりには自然対流が生じる。平板や円柱が単独の場合には、平板や円柱からの伝熱量は既存の伝熱相関式を利用して容易に求めることができる。しかし、複数の平板や円柱が図 1(a), (c)のように水平方向に一定の間隔 G_h で設置された場合や、図 1(b), (d)のように垂直方向に一定の間隔 G_v で設置された場合に、平板や円柱からの伝熱量を求めるのは、かなり困難である。それは平板や円柱の伝熱量が熱源の大きさ、加熱量あるいは温度差だけでなく、熱源の間隔や置かれた位置により複雑に変化するためである。ところで、これら図 1 に記した体系は、プレートフィンあるいはチューブバンク型熱交換器やピンフィンヒートシンクなど、様々な伝熱機器、装置等で見られる体系である。このため、その伝熱特性を解明すべく、今まで数多くの実験や数値解析が試みられて来た。しかし、それらの研究はいずれも特定の長さ L 、直径 d を有する平板や円柱を特定の枚数・本数 N 並べた平板列や円柱列を対象としたもので、得られた結果はこれら特定の条件・範囲内でのみ成立するものがほとんどであり、一般性に乏しいと言わざるを得ない。このような熱機器・装置の設計・伝熱性能評価を行うには、平板や円柱列中の各熱源の伝熱特性を支配するパラメータをまず明らかにし、熱源の寸法・間隔・加熱条件など広い範囲に適用可能な伝熱相関式を得ることが必要不可欠である。



(a) 水平一列加熱平板列 (b) 垂直一列加熱平板列 (c) 水平一列加熱円柱列 (d) 垂直一列加熱円柱列

図 1 種々の複数加熱源まわりの自然対流

2. 研究の目的

そこで本研究では、まず図 1(a) ~ (b) に記した 4 つの基礎的な体系について、列中に設置された平板および円柱の伝熱特性を実験により調べることにした。これら列中に設置された平板や円柱の伝熱に対しては、平板高さ L や円柱直径 d 、加熱量 q_w 、 ΔT 、水平・垂直方向の間隔 G_h 、 G_v 、平板枚数や円柱本数 N など多くのパラメータが影響を及ぼし、これらが同じ条件下でも、平板や円柱が列中のどの位置に設置されるかによって変化すると考えられる。そこで、本研究ではこれらパラメータを系統的に変化させた場合について、列中に設置された各平板・円柱の平均熱伝達率を測定にした。そして、この熱伝達率を無次元整理することにより、平板列および円柱列の伝熱を支配する無次元パラメータを明らかにすると共に、その伝熱を一般的に予測する伝熱相関式を提案することにした。さらに、これらの結果を踏まえ、本研究では水平な加熱円柱を水平および垂直両方向に複数段・複数列、格子および千鳥状に配置した体系における自然対流の伝熱を実験により探ることにした。これら円柱群中に設置された各円柱の伝熱に対しては、円柱直径 d 、加熱量 q_w 、 ΔT 、水平・垂直方向の円柱間隔 G_h 、 G_v 、円柱の水平方向の本数 N およびその垂直方向の段数などのパラメータが影響を及ぼすことが予想される。そこで、本研究ではこれらパラメータを系統的に変化させ、群中に設置された各円柱の熱伝達率を測定した。そして、これら熱伝達率を無次元整理することにより、円柱群の伝熱を支配する無次元パラメータを明らかにすると共に、その伝熱を一般的に予測する伝熱相関式を提案し、両者の伝熱特性の異同を論じることにした。

3. 研究の方法

本実験で製作・使用した試験平板を図 2(a) に示す。試験平板は、厚さは $30\mu\text{m}$ のステンレス箔ヒータを厚さ 3mm のアルミ板 2 枚でサンドイッチしたものである。試験平板の高さ L は、図 1(a) の水平一列平板列では $L=50, 100\text{mm}$ の 2 種類、図 1(b) の垂直一列平板列では $L=20, 30, 50\text{mm}$ の 3 種類変化させた。平板の長さ (奥行き) はいずれも 320mm である。このように肉厚のアルミ板を試験平板に用いたのは、アルミ板の高い熱伝導率と熱容量を利用して平板の温度を平準化することにより、少数の熱電対で平板の平均熱伝達率を精度良く測定することを意図したためである。平板温度を測定するために、線径 0.1mm の K 型熱電対を平板の奥行き方向中心線上の平板内面側の左右 6 ヶ所の地点に設置した。これら熱電対により測定された 6 点の温度 T_w のばらつきは、本実験の最大温度差 $\Delta T (=T_w - T) = 30\text{K}$ の場合でも、 $\pm 0.25\text{K}$ 以内に収まった。これら試験平板を水平あるいは垂直方向に一定間隔で所定の枚数配置した平板列を対象に実験を行った。実験に当たっては、各平板のヒータを直列に接続し、一定な交流電流を流すことにより、全ての平板を等しいジュール加熱量 Q_j で加熱した。

つぎに試験円柱であるが、図 2(b)に示す市販の円筒状カートリッジヒータを使用した。その外径 d であるが、図 1(c)、(d)の水平および垂直一列円柱列の実験では、 $d=8.4, 14.4, 20.4\text{mm}$ 、格子および千鳥円柱群の実験には $d=8.4, 14.4\text{mm}$ のヒータを用いた。実験に当たっては、円柱列・円柱群を構成する全ての円柱を直列に接続し、直流安定化電源を利用して所定の電流を流すことにより、等しい熱量 Q_j で加熱した。この試験円柱の温度を計測するために、線径 0.1mm の K 型熱電対を、ヒータの軸方向中心線上の円筒下端・側面および上端の 3 ヶ所にスポット溶接した。このままでは熱電対は流体の温度を拾うため、熱電対の外側に厚さ 0.1mm の銅箔をヒータ全周に亘って貼り付けた。なお、上述した試験円柱の外径 d はこの銅箔を含む実外径である。これらの試験円柱を所定の水平および垂直方向間隔 G_h, G_v で設置するために、図 3 に示す架台を作成・利用した。この架台の側板には上述の試験円柱よりも少し大きな穴が所定の水平および垂直方向ピッチ P_h, P_v で開けられており、この穴に試験円柱を挿入することにより、円柱を水平に保持した。実験には常温の空気($Pr=0.71$)を用い、列中に設置された各平板・円柱の平均熱伝達率 h_m を次式で定義し、測定を行った。

$$h_m = Q_w / [A (T_{wm} - T)] \quad (1)$$

ここで、 Q_w ; 平板・円柱から対流により移動する熱量、 A ; 平板・円柱表面積、 T_{wm} ; 各平板・円柱の平均温度、 T_∞ ; 周囲空気温度。なお、空気自然対流では熱源から放射により移動する熱量 Q_{rad} が無視できないことから、熱源のジュール加熱量 Q_j から放射伝熱量 Q_{rad} を差し引くことにより、対流熱移動量 Q_w を求めた。

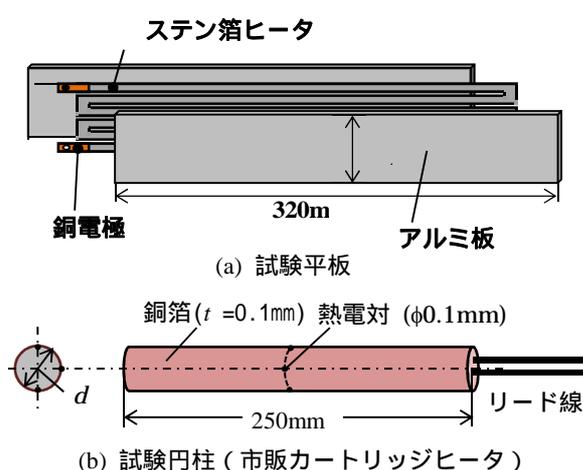


図 2 試験平板および試験円柱

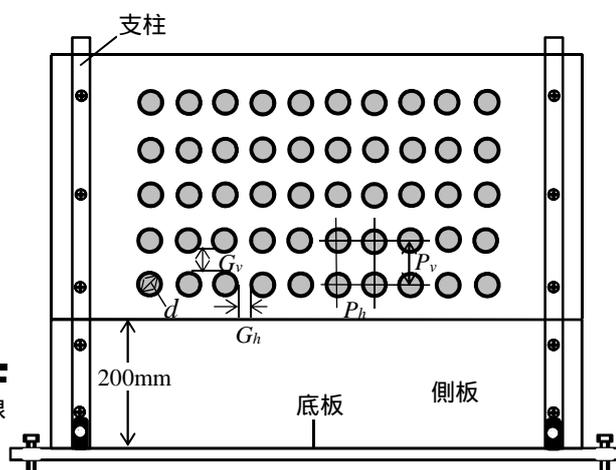


図 3 試験円柱と取付用架台

4. 研究成果

4.1 水平一列平板列・円柱列の伝熱特性

本研究では、まず図 1(a), (c)に示す水平一列平板列および円柱列の伝熱特性を調べてみた。図 4(a)は、そのうち直径 8.4mm の円柱を一定な水平方向間隔 $G_h=10.6\text{mm}$ で設置した場合について、各円柱の平均熱伝達率 h_m を測定した結果を示したもので、円柱本数 N を 1 - 10 本まで変化させた。図の横軸には、円柱列の中心線から各円柱中心までの距離 x を円柱中心間ピッチ P で割った値 (x/P) をとっている。この図から、とくに円柱列中心 $(x/P) = 0$ 付近に設置された円柱の熱伝達率 h_m は、円柱本数 N の増加に伴って単調に増加していき、8 本以上の円柱列では、本数 N

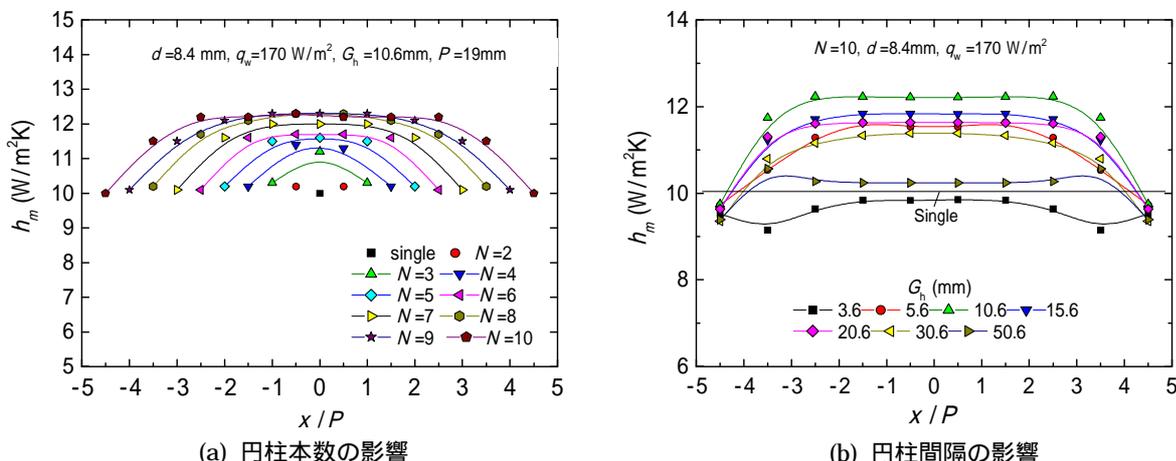


図 4 水平一列円柱列各円柱の熱伝達率

に依らずほぼ一定の値を示すことが分かる。そこで、十分本数が多いと見させる 10 本円柱列を対象に、円柱間隔 G が列中心付近の円柱の平均熱伝達率にどのような影響を及ぼすか調べてみた。図 4(b)は図 4(a)と同じ直径・加熱条件の下で、円柱列の熱伝達率 h_m を測定した結果を示したもので、この図より、列中心付近の円柱の熱伝達率は、円柱間隔が狭い $G_h=3.6\text{mm}$ では単独円柱よりも低い値を示すのに対して、 $G_h=5.6\text{mm}$ では急激に高くなり、 $G_h=10.6\text{mm}$ で極大値をとった後、さらに間隔を増加させると減少に転じ、 $G_h=50.6\text{mm}$ では単独円柱の値近くまで低下していく様子が見取れる。本研究では、つぎにこれら 10 本円柱列の中心付近に設置された円柱の熱伝達率を種々の無次元パラメータを用いて整理することにより、円柱列の伝熱特性を支配するパラメータを探ってみた。その結果、実験値が最も良好にまとまったのが、縦軸に間隔 G_h 基準の平均ヌセルト数 $Nu_{Gh}(=h_m \cdot G_h / \lambda)$ をとり、横軸に G_h 基準のレイリー数 $Ra_{Gh}(=g\beta\Delta T G_h^3 / \alpha\nu)$ と円柱間隔 G_h と直径 d との比 (G_h/d) を掛けたパラメータ $[Ra_{Gh}(G_h/d)]$ をとって整理した場合であった。図 5 は、そのうち列中央の円柱のヌセルト数 Nu_{Gh} をプロットした結果を示したもので、この図より、直径 d および間隔 G_h の異なる実験データが図中に示す一本の曲線のまわりにほぼまとまることが分かる。

この結果を踏まえて、本研究ではつぎに水平一列平板列について同様な伝熱実験を行ってみた。その結果、平板列中心付近に設置された平板の熱伝達率は、平板枚数の増加に伴って単調に増加していき、8 枚以上の平板列では、枚数 N に依らずほぼ一定の値を示すこと、またその熱伝達率は特定の平板間隔 G_h で極大値を示すなど、円柱列と同様な結果を得た。そこで 10 枚平板列中心付近の平板の熱伝達率 h_m を基に、円柱列と同様な無次元整理を行ってみた。図 6 は、列中央平板のヌセルト数 Nu_{Gh} を横軸にパラメータ $[Ra_{Gh}(G_h/L)]$ をとってプロットした結果を示したもので、この図より平板高さ L および間隔 G_h の異なる実験データが図中に示す一本の曲線のまわりにまとまることが分かる。ここで、横軸のパラメータ $[Ra_{Gh}(G_h/L)]$ は、円柱直径 d の代わりに平板高さ L を用いたもので、熱源形状が異なるにも関わらず、熱源間隔 G_h 基準のヌセルト数 Nu_{Gh} が同じパラメータで予測できる結果は、興味深くかつ重要な結果と言える。

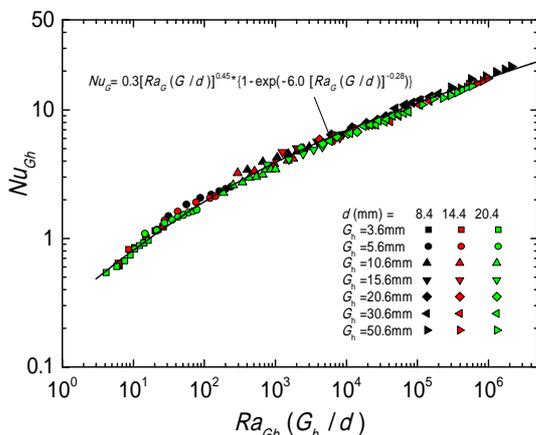


図 5 水平一列円柱列中心円柱のヌセルト数

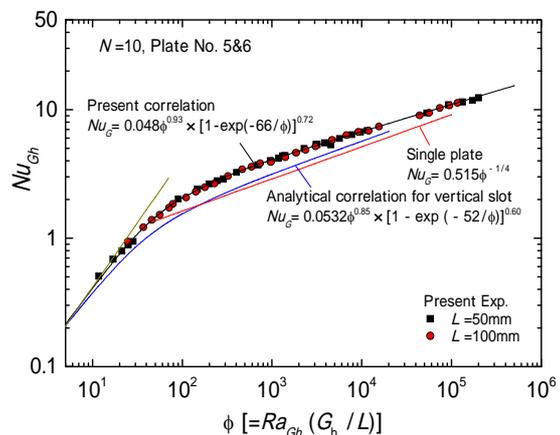


図 6 水平一列平板列中心平板のヌセルト数

4.2 垂直一列平板列・円柱列の伝熱特性

つぎに、本研究では図 1(b), (d)に示す垂直一列平板列および円柱列の伝熱特性を調べてみた。図 7 は、そのうち直径 $d=14.4\text{mm}$ の円柱を垂直方向間隔 $G_v=3.6\sim 100.6\text{mm}$ で設置した場合について、各円柱の平均ヌセルト数 $Nu_d(=h_m \cdot d / \lambda)$ を測定した結果を示したもので、横軸には最下段円柱から数えた円柱番号をとっている。なお、円柱間隔 G_v が広い場合、円柱から上昇するブルームは乱流に遷移する。この遷移位置を図中矢印で示した。この図より、円柱列の 2 段目以降に設置された円柱のヌセルト数は、間隔 G_v に依存して変化し、 G_v が狭いほど値が低下することが分かる。一方、ブルームが乱流に遷移すると、 Nu_d は増加に転じる様子が見取れる。本研究ではこれら垂直一列円柱列のヌセルト数を種々の無次元パラメータを用いて整理すること

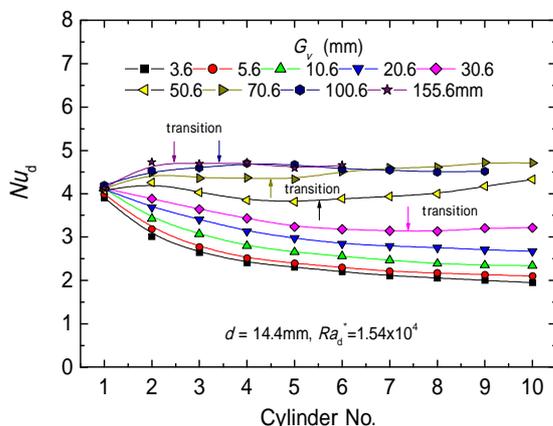


図 7 垂直一列円柱列各円柱のヌセルト数

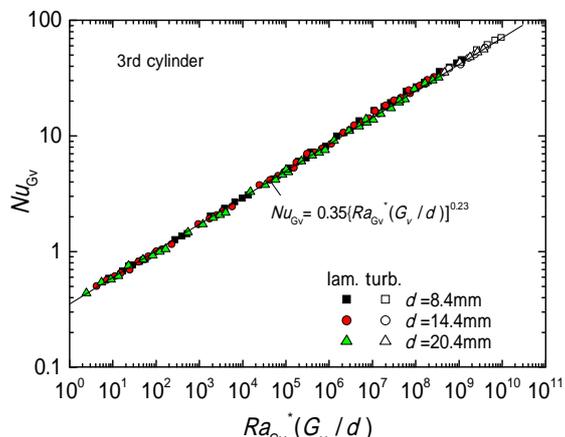


図 8 3 段目円柱のヌセルト数無次元整理

により、伝熱特性を支配するパラメータを探ることにした。そのうち、とくに層流域の実験値が最も良好にまとまったのが、縦軸に間隔 G_v 基準の平均ヌセルト数 Nu_{G_v} ($=h_m \cdot G_v / \lambda$) をとり、横軸に G_v 基準の修正レイリー数 $Ra_{G_v}^*$ ($=g\beta q_w G_v^4 / \lambda \alpha \nu$) と円柱間隔 G_h と直径 d との比 (G_h/d) を掛けたパラメータ $[Ra_{G_v}^* (G_v/d)]$ をとって整理した場合であった。図 8 はその一例として、3 段目円柱のヌセルト数 Nu_{G_v} をプロットした結果を示したものである。この図より直径 d および間隔 G_v の異なる実験値が一本の直線のまわりにまとまることが分かる。なお、本研究では設置位置が異なる他の円柱についても、ヌセルト数 Nu_{G_v} と $[Ra_{G_v}^* (G_v/d)]$ の間に同様な直線関係が成立することを確認している。さらに本研究では、図 1(d) に示す垂直一列平板列についても、円柱列と同様なヌセルト数の測定を行った。その結果を基に、垂直平板列の各平板のヌセルト数 Nu_{G_v} を、平板高さ L を代表長さにとった無次元パラメータ $[Ra_{G_v}^* (G_v/L)]$ で整理したところ、両者の間に直線関係が成立することが分かった。円柱と平板では熱源の形状が異なるにもかかわらず、間隔 G_h 基準のヌセルト数 Nu_{G_h} が同じパラメータで予測できる結果は興味深い。

4.3 格子および千鳥配列円柱群の伝熱特性

本研究では、つぎに多数の水平加熱円柱を格子および千鳥状に配列した円柱群の伝熱特性を調べてみた。図 9 は、そのうち直径 $d=8.4\text{mm}$ の円柱 10 本を水平方向間隔 $G_h=15.6\text{mm}$ で一列に並べ、この円柱列を垂直方向に 5 段、間隔 $G_v=10.6\text{mm}$ で格子状に設置した場合について、各円柱の平均ヌセルト数 Nu_d ($=h_m \cdot d / \lambda$) を測定した結果を示したものである。なお、図の横軸には水平方向の円柱番号をとり、最下段円柱列から数えた段番号 N をパラメータにとっている。図 9 より、円柱列のヌセルト数 Nu_d は最下段円柱列 ($N=1$) で最も高く、その値は間隔 G_h が同じ水平一列円柱列の Nu_d を上回ることが分かる。これは下流側円柱列のまわりに誘起された自然対流により、上流側円柱列まわりの流れが加速されるためと考えられる。一方、円柱列のヌセルト数は下流側円柱列にいくほど単調に低下していくことが分かる。これは上流側円柱列から立ち昇るブルームによって、下流側円柱まわりの流れの温度が高くなるためと考えられる。本研究では、10 本×5 段で格子配列された円柱群について、水平および垂直方向の円柱間隔をそれぞれ $G_h=10.6\text{--}30.6\text{mm}$ 、 $G_v=5.6\text{--}30.6\text{mm}$ の範囲で変化させた場合について、上と同様なヌセルト数 Nu_d の測定を行ってみた。その結果、最下段円柱列 ($N=1$) のヌセルト数は、 G_v に依存して変化し、 G_v が狭いほど高い値を示すこと、また、その値は G_h には依らないことが分かった。一方、 $N=2$ 段目以降の円柱列のヌセルト数は、 G_h 、 G_v に依存して複雑に変化することが分かった。

この結果を踏まえ、本研究ではこれら格子配列円柱群中の円柱のヌセルト数を種々の無次元パラメータで整理することにより、円柱群の伝熱を支配するパラメータを探ることにした。その結果、最下段円柱列のヌセルト数が最も良好にまとまったのが、縦軸に間隔 G_v 基準の平均ヌセルト数 Nu_{G_v} ($=h_m \cdot G_v / \lambda$) をとり、横軸に G_v 基準の修正レイリー数 $Ra_{G_v}^*$ ($=g\beta q_w G_v^4 / \lambda \alpha \nu$) と円柱間隔 G_v と直径 d の比の自乗 $(G_v/d)^2$ を掛けたパラメータ $[Ra_{G_v}^* (G_v/d)^2]$ をとって整理した場合であった。図 10 は最下段円柱列中心付近に設置された No.5&6 円柱のヌセルト数 Nu_{G_v} をプロットしたもので、この図より直径 d および間隔 G_h 、 G_v の異なる実験データが、図中に示す一本の直線のまわりにまとまることが分かる。

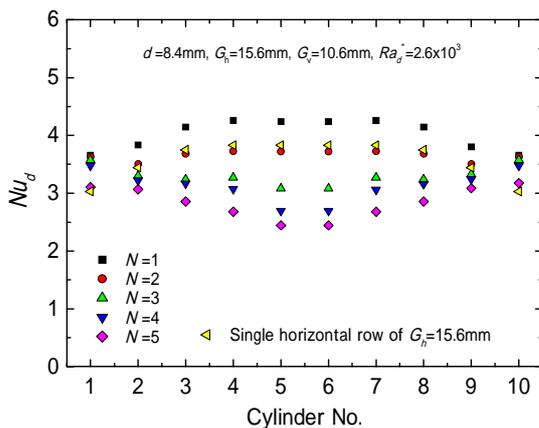


図 9 格子配列円柱群内各円柱のヌセルト数

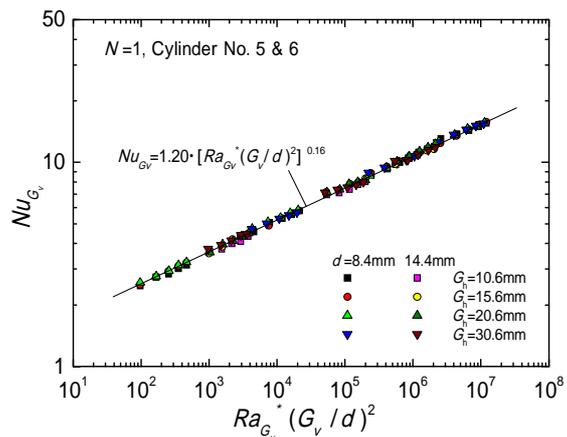


図 10 格子配列円柱群最下段円柱のヌセルト数

一方、円柱群の 2 段目以降に設置された水平円柱列 ($N=2\sim 5$) のヌセルト数であるが、データが最も良好にまとまったのが、縦軸に間隔 G_v 基準のヌセルト数 Nu_{G_v} をとり、横軸に G_v 基準の修正レイリー数 $Ra_{G_v}^*$ と円柱の垂直および水平方向間隔 G_v 、 G_h と直径 d との比 (G_v/d) 、 (G_h/d) を掛けたパラメータ $[Ra_{G_v}^* (G_v/d)(G_h/d)]$ をとって整理した場合であった。図 11 は、その一例として 3 段目円柱列 ($N=3$) の中心付近に設置された No.5&6 円柱のヌセルト数 Nu_{G_v} をプロットした結果を示したものである。この図より直径 d および間隔 G_h 、 G_v の異なる実験データが、図中に示す一本の直線のまわりにまとまることが分かる。また、これと同様な結果は、2, 4, 5 段目円柱列の中央付近に設置された円柱についても得られた。

この格子配列円柱群の結果を踏まえ、本研究では、つぎに円柱を 10 本×5 段で千鳥配列した

円柱群について各円柱のヌセルト数 Nu_d を測定してみた。その結果、最下段円柱列のヌセルト数は、格子配列と同様、垂直方向の円柱間隔 G_v のみに依存して変化し、間隔 G_v が狭いほど高い値を示すこと、一方、2 段目以降の円柱列のヌセルト数は、水平および垂直両方向の円柱間隔 G_h, G_v に依存して変化する結果を得た。そこで、これら円柱のヌセルト数について格子配列円柱群と同様な無次元整理を行ってみた。その結果、最下段円柱列については、垂直方向円柱間隔 G_v を代表長さにとったヌセルト数 Nu_{G_v} が、パラメータ $[Ra_{G_v}^*(G_v/d)^2]$ によって良好にまとまり、図 10 に示した格子配列円柱群と同一の相関式に従うことが分かった。一方、千鳥配列円柱群の 2 段目以降に設置された水平円柱列 ($N=2\sim 5$) のヌセルト数についても、格子配列円柱群と同様、間隔 G_v 基準のヌセルト数 Nu_{G_v} がパラメータ $[Ra_{G_v}^*(G_v/d)(G_h/d)]$ で整理できることが分かった。その代表的な結果として、3 段目円柱列中心付近に設置された円柱 No.5&6 のヌセルト数 Nu_{G_v} をプロットした結果を図 12 に示す。この図より、円柱直径 d および間隔 G_h, G_v の異なる全ての実験値が一本の直線のまわりにまとまることが分かる。また、図には格子配列円柱群の相関式を実線で示したが、この実線と千鳥配列円柱群の実験値を比較すると、とくに横軸のパラメータ $[Ra_{G_v}^*(G_v/d)(G_h/d)]$ が小さな領域で、千鳥配列円柱群のヌセルト数 Nu_{G_v} が、格子配列円柱群よりも高い値を示すことが注目される。この結果は、円柱群からの伝熱を促進するには、円柱を千鳥配列するのが有効であることを意味している。なお、2, 4, 5 段目円柱列について、3 段目円柱列と同様、千鳥配列円柱群のヌセルト数の方が格子配列円柱群よりも高くなることを確認した。ただし、両者の差は下流側円柱列ほど小さくなる。

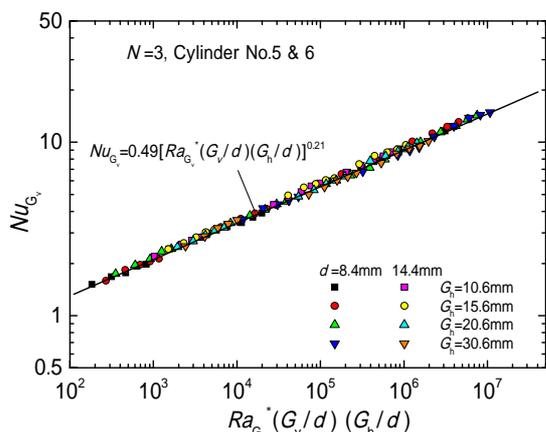


図 11 格子配列円柱群 3 段目円柱のヌセルト数

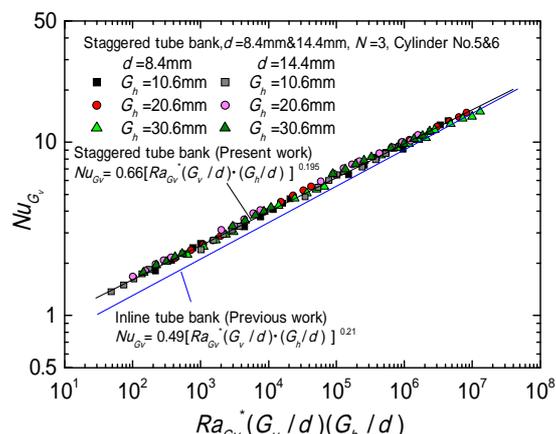


図 12 千鳥配列円柱群 3 段目円柱のヌセルト数

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. 三角利之、田實宗太郎、北村健三、光石暁彦、「鉛直方向に等間隔配置された垂直加熱平板列まわりの自然対流の伝熱特性」、日本機械学会論文集、81 巻 830 号 (2015-10)、DOI:10.1299/transjsme.15-00258.
2. K. Kitamura, A. Mitsuishi, T. Suzuki and F. Kimura. “Fluid Flow and Heat Transfer of Natural Convection Induced Around a Vertical Row of Heated Horizontal Cylinders” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.92, (2017-1) pp. 414-429.
3. 北村健三、光石暁彦、鈴木孝司、「傾斜平面上に等間隔配置された水平加熱円柱列まわりに生じる自然対流の流動と伝熱」、日本機械学会論文集、83 巻 850 号(2017-6)、DOI:10.1299/transjsme.16-00542.
4. 北村健三、光石暁彦、鈴木孝司、「格子配列された水平加熱円柱群の自然対流熱伝達」、日本機械学会論文集、84 巻 857 号(2018-1)、DOI:10.1299/transjsme.17-00410.
5. 北村健三、光石暁彦、鈴木孝司、「千鳥配列された水平加熱円柱群の自然対流熱伝達」、日本機械学会論文集、84 巻 867 号 (2018-11)、DOI:10.1299/transjsme.18-00194.
6. 北村健三、光石暁彦、鈴木孝司、三角利之、「水平方向に等間隔配置された垂直加熱平板列の自然対流熱伝達」、日本機械学会論文集、85 巻 871 号(2019-3)、DOI:10.1299/transjsme.18-00477.

〔学会発表〕(計 4 件)

1. 北村健三、光石暁彦、木村文義、「鉛直方向に等間隔配置された水平加熱円柱列まわりの自然対流の流動と伝熱」、第 52 回日本伝熱シンポジウム (2015-5) 福岡市。
2. 北村健三、光石暁彦、木村文義、「水平あるいは垂直方向に等間隔配置された複数熱源まわりの自然対流の伝熱特性について」、第 53 回日本伝熱シンポジウム、(2016-5) 大阪市。
3. 北村健三、光石暁彦、木村文義、「格子配列された水平加熱円柱群の自然対流熱伝達」第 54 回日本伝熱シンポジウム、(2017-5) 大宮市。
4. 木村文義、山下大貴、北村健三、「垂直加熱平板群まわりの自然対流熱伝達」第 54 回日本伝熱シンポジウム、(2017-5) 大宮市。