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北村 健三^{*1}, 光石 暁彦^{*2}, 鈴木 孝司^{*2}Fluid flow and heat transfer of natural convection induced around
a row of heated horizontal cylinders placed in inclined planeKenzo KITAMURA^{*1}, Akihiko MITSUISHI^{*2} and Takashi SUZUKI^{*2}^{*1, *2} Toyohashi University of Technology, Department of Mechanical Engineering
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi 441- 8580, Japan

Received: 29 November 2016; Revised: 18 February 2017; Accepted: 1 May 2017

Abstract

The natural convective flow and heat transfer of air induced around an inclined row of heated horizontal cylinders have been investigated experimentally. The experiments were carried out with the ten-cylinders row placed in the plane of inclination angles $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ and 90° from horizontal. The cylinders in the row were heated with constant heat flux and their diameter d and gap G were varied as $d=8.4, 14.4\text{mm}$ and $G=3.6$ to 20.6mm . The Nusselt numbers Nu_d from the cylinders in the row were measured. They showed maxima and minima for the horizontal and vertical rows, while intermediate Nusselt numbers were obtained for the inclined rows. Those Nusselt numbers were next converted to the gap-based Nusselt numbers Nu_G , and, then, rearranged with the non-dimensional parameter $Ra_G^*(G/d)$. The result showed that the Nusselt numbers Nu_G are predicted well with the parameter $Ra_G^*(G/d)$ for the whole rows of inclination angle from horizontal to vertical.

Key words : Heat transfer, Natural convection, Cylinder, Cylinder row, Inclined row, Heat exchanger

1. 緒 言

水平な加熱円柱が複数本、同一平面上に等間隔で設置され、空気の自然対流により冷却される体系は、例えば冷暖房用のラジエータや電気炉あるいは高レベル放射性廃棄物の長期冷却保存をはじめとする様々な伝熱機器、装置などで見られる実用的に重要な体系である。このため、この体系における自然対流の流動・伝熱特性を解明すべく、今まで数多くの研究が実験および数値解析の両面から試みられている。しかし、それらの研究のほとんどは加熱円柱を水平面あるいは鉛直面上に等間隔で一列に配置した、水平一列および垂直一列円柱列を対象としたものである。このうち水平一列円柱列に関する代表的な研究として、栗山ら(栗山他, 1995), 石原ら(石原, 勝田, 2000)および著者ら(北村他, 2014)による実験, Cianfrini ら(Cianfrini et al., 2012)による解析等が挙げられる。このうち、栗山らは常温の空气中に直径 $d=8, 15, 30\text{ mm}$ の等温加熱円柱を3本等間隔で配置した水平円柱列および直径 $d=15\text{ mm}$ の等温加熱円柱を9本等間隔で配置した円柱列について、円柱の平均熱伝達率を測定している。その結果、円柱列の最外側を除く円柱の熱伝達率は円柱間隔に依存して変化し、円柱間隔が狭い場合には、熱伝達率は単独円柱のそれより低下するのに対し、間隔を増加させていくと、熱伝達率は急激に回復し、円柱中心間距離 P と直径 d との比(P/d) が1.5–2付近で極大値を示し、その値は単独円柱よりも最大20%程度高くなること、さらに間隔を広げると熱伝達率は漸減することを報告している。なお、このように間隔が狭い場合に伝熱劣化が

No.16-00542 [DOI:10.1299/transjsme.16-00542], J-STAGE Advance Publication date: 17 May, 2017

^{*1} 正員, フェロー, 豊橋技術科学大学 機械工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)^{*2} 正員, 豊橋技術科学大学 機械工学系

E-mail of corresponding author: kitamura@me.tut.ac.jp

生じるのは、円柱間を流れる自然対流が円柱により抑制されること、また、間隔の増加につれて熱伝達率が単独円柱よりも高くなるのは、隣接する円柱のまわりに誘起される自然対流により円柱間の流れが増速されるためである。さらに、彼らは3本円柱列の中央円柱および9本円柱列の最外側を除く7本の円柱の平均熱伝達率 h_m から、円柱間隔 G を代表長さとする平均ヌセルト数 $Nu_G (=h_m G/\lambda)$ を求めると、この平均ヌセルト数 Nu_G は、間隔 G を代表長さとするグラスホフ数 $Gr_G (=g\beta\Delta T G^3/\nu^2)$ と (G/d) の積 $Gr_G(G/d)$ で整理できることを報告している。ここで λ, β, ν は、熱伝導率、体膨張率および動粘度である。一方、石原らは直径 $d=50\text{ mm}$ の等温加熱円柱を5本、常温の空气中に等間隔で配置した水平円柱列について、円柱列中央に設置された円柱の局所および平均ヌセルト数を測定している。その結果は栗山らが報告したのと同様であり、円柱からの伝熱は円柱間隔の増加に伴って抑制から促進に転じ、ある間隔で極大値を示したあと、単独円柱の値に漸近していく結果を得ている。さらに、代表長さに円柱間隔 G をとった円柱列中心円柱の平均ヌセルト数 Nu_G が、円柱間隔 G 基準のレイリー数 Ra_G と (G/d) の積 $Ra_G(G/d)$ により整理できることを報告している。また、著者らは、等熱流束で加熱された10本の水平円柱列を常温の空气中に設置した体系について伝熱実験を行っている(北村他, 2014)。その結果、円柱列の中心付近に設置された円柱の平均熱伝達率 h_m から円柱間隔 G 基準のヌセルト数 Nu_G を求めると、 Nu_G は円柱直径 $d (=8.4, 14.4, 20.4\text{ mm})$ および円柱間隔 $G (=3.6-30.6\text{ mm})$ の如何によらず、円柱間隔 G 基準の修正レイリー数 Ra_G^* と (G/d) の積 $Ra_G^*(G/d)$ により整理できること、さらに実験で得られた伝熱相関式から、円柱列からの伝熱量を極大とする円柱間隔 G_{opt} の予測式を提示している。

一方、Cianfriniらは等温加熱された10本水平一列円柱列まわりの自然対流について、2次元の数値解析を試みている。解析に当たって、円柱の近傍領域には円筒格子、その外側の領域には直交格子を配し、両者の境界で計算値を適合する手法を採用している。解析は、常温の空気を対象とし、円柱直径基準のレイリー数 $Ra_d=10-10^5$ 、円柱間隔 $(G/d)=0.4-5$ の範囲で行なっている。その結果、円柱列中央付近の円柱の平均ヌセルト数 Nu_d は、 Ra_d が 10^2 以上で単独円柱の値より高くなり、 Ra_d が10以下では低くなることを報告している。

つぎに垂直一列円柱列に関する研究であるが、上述の水平一列円柱列と同様多くの実験・解析が試みられている。そのうち代表的な研究としてMarstersの実験(Marsters, 1972)、Corcioneの解析(Corcione, 2005)および著者ら(Kitamura et al., 2016)の実験などが挙げられる。そのうちMarstersは、直径 $d=6.35\text{ mm}$ の等温加熱円柱を3-9本垂直方向に等間隔 $(P/d)=2-10$ で常温の空气中に設置した場合について、列中に設置された各円柱の温度を測定している。ここで P は円柱中心間距離である。その結果、円柱間隔が狭い $(P/d)=2$ では、円柱の温度は下流に行くほど高くなり、円柱の熱伝達率が低下すること、逆に円柱間隔が広い $(P/d)=6$ では、温度は下流に向かって単調に低下し、熱伝達率が増加することを報告している。また、前者の伝熱劣化は下側の円柱により加熱され高温となった自然対流ブルームが上側円柱のまわりに流れ込むために円柱温度が高くなる、いわゆるブルームの温度効果によること、また、後者の伝熱促進は、円柱間で冷やされ低温となったブルームが有限な速度で上側円柱のまわりに流れ込む、いわゆるブルームの速度効果によることを述べている。また、Marstersの実験以降も垂直一列円柱列に関しては、円柱直径や間隔、本数を種々変化させた実験が、例えばSparrowら(Sparrow and Niethammer 1981)、Tokuraら(Tokura et al., 1983)、Faroukら(Farouk and Güçeri, 1983)などにより試みられている。しかし、それらの研究は、円柱間隔が下流側円柱の伝熱に及ぼす影響を定性的に議論するに留まっており、下流側円柱の伝熱を支配する無次元パラメータや、円柱からの伝熱量を定量的かつ一般的に予測する相関式を得るには至っていない。一方、Corcioneは常温空气中に等温加熱円柱を2-6本垂直一列に設置した体系について、2次元の数値解析を試みている。彼の解析は、円柱近傍領域に円筒座標、円柱から離れた領域に直交座標を配し、両者の境界を滑らかに接続することにより、円柱列まわりの速度・温度場を解いたもので、円柱直径基準のレイリー数 Ra_d が $5\times 10^2-5\times 10^5$ 、円柱中心間距離と円柱直径との比 (P/d) が2-50の範囲について、各円柱の局所および平均ヌセルト数 Nu_d の解析値を得ている。それによれば、円柱列中に設置された円柱の Nu_d は円柱中心間距離 (P/d) の増加と共に単調に高くなること、その値は円柱列の本数に依存しない結果が得られている。また、 Nu_d の解析値を基に円柱列中に設置された円柱の伝熱相関式を提案している。その相関式では、円柱のヌセルト数 Nu_d がレイリー数 Ra_d 、最下端円柱と N 本目円柱の中心間距離 x と直径 d との比 (x/d) および N のべき関数として与えられているが、この相関式と解析値との間にはかなりの誤差が存在する。

これに対して、著者ら(Kitamura et al., 2016)は等熱流束加熱した円柱を垂直方向に10本等間隔 G で配置した垂直一列円柱列を対象に伝熱実験を試み、円柱列中の各円柱の平均熱伝達率 h_m を測定している。この h_m を種々の

無次元パラメータで整理したところ、円柱間隔 G を代表長さにとった $Nu_G (= h_m G / \lambda)$ が、円柱直径 ($d = 8.4, 14.4, 20.4$ mm) および間隔 ($G = 3.6 - 100.6$ mm) の如何によらず、 G を代表長さとする修正レイリー数 Ra_G^* と、間隔と直径との比 (G/d) との積 $Ra_G^* (G/d)$ で良好にまとまることを明らかにしている。この結果は、水平一列および垂直一列のいずれの円柱列でも、円柱列中に設置された円柱のヌセルト数 Nu_G が、同じパラメータ $Ra_G^* (G/d)$ で予測可能なことを示しており、重要な結果と考えられる。

さて、本研究では上述した水平および垂直一列円柱列の結果を踏まえて、図1に示すような複数の加熱円柱が水平から任意の角度 θ で傾斜した平面上に等間隔で配置された体系、以下これを傾斜一列円柱列と称する、における自然対流の流動と伝熱を実験により解明しようとするものである。この体系については、前述した水平および垂直一列円柱列に比べて圧倒的に研究例が少なく、著者らの調べた限りでは、わずかに Lieberman ら (Lieberman and Gebhart, 1969), Tokanai ら (Tokuai et al., 1997) の実験が挙げられるのみである。そのうち Lieberman らは、通電加熱した線径 $d = 0.127$ mm のニクロム線7本を、水平からの傾斜角 θ が $0, 30, 60$ および 90° の面上に間隔 (P/d) = 37.5, 75, 112.5, 150 で配置した場合について、細線のヌセルト数 Nu_d を計測している。その結果、 $\theta = 30^\circ$ の傾斜面上に設置された細線列が最も高いヌセルト数を示すことを報告している。しかし、彼らが測定精度の検証のために行った単独細線の実験結果によると、 Nu_d は従来の相関式から予測される値よりもはるかに高く、精度の高い測定が行われているか疑問である。一方、Tokuai らは直径 $d = 15$ mm の等温加熱円柱5本を水平からの傾斜角 θ が $30, 45, 60$ および 90° の面上に配置した場合について、各円柱の平均ヌセルト数 Nu_d を測定している。その結果、傾斜円柱列の下端から N 本目の円柱のヌセルト数 Nu_N が、水平円柱列の当該円柱のヌセルト数 Nu_H と垂直円柱列のヌセルト数 Nu_V を用いて、以下のように表せると述べている。

$$Nu_N = Nu_H \cdot (\cos \theta)^\alpha + Nu_V \cdot (\sin \theta)^\alpha \quad (1)$$

ここで、上式の指数 α として $\alpha = 1.7$ なる値を推奨している。しかし、実験で得られた Nu_N の値は、上式(1)の相関式のまわりにならばらついており、式(1)で傾斜円柱列の Nu_d が予測できるか議論の余地がある。

このように傾斜円柱列まわりの伝熱に関しては、幾つか実験が行われているものの、例えば傾斜円柱列のまわりにどのような流れが生じるか、あるいは傾斜角が円柱列からの伝熱に如何なる影響を及ぼすかといった基本的な問題が依然として不明のままである。さらに、傾斜円柱列の伝熱がどのような無次元パラメータに支配され、そのヌセルト数がどうすれば定量的かつ一般的に予測できるかといった問題についても未解明のままである。これらの研究の現状を鑑み、本研究では、まず傾斜円柱列まわりに生じる流れを、煙を用いた流れの可視化により調べることにした。また、傾斜円柱列の伝熱に影響を及ぼすと考えられる円柱直径 d 、間隔 G 、円柱加熱量 Q および円柱列の傾斜角 θ を系統的に変化させた場合について、伝熱実験を試みることにした。この実験により得られた円柱のヌセルト数について、前述の水平あるいは垂直一列円柱列と同様な整理を試みることにし、傾斜円柱列の伝熱を支配するパラメータを明らかにすると共に、そのヌセルト数を定量的かつ一般的に予測する伝熱相関式を導出することにした。

Fig. 1 Configuration and notations of present study on inclined row of horizontal cylinders.

2. 実験装置および測定

実験を行うに当たって、他の多くの研究と同様、試験流体に常温の空気($Pr=0.71$)を用いることにした。また、円柱列の流れ方向の伝熱特性の変化をより詳しく調べるために、円柱列中に設置する試験円柱の本数を10本とし、試験円柱には前報(北村他, 2014, Kitamura et al., 2016)で用いたのと同じ円筒状カートリッジヒータを使用した。このカートリッジヒータは、図2に示すように、薄肉のSUS304ステンレスシースパイプ内にニッケル合金製の発熱線を封入し、耐熱マグネシアで焼結したもので、金型等の加熱用として市販されている。このヒータを使用したのは、本実験のように多数の加熱円柱を用いる場合には、個々の円柱の寸法精度および電気特性(抵抗値)のばらつきが小さいことが必要不可欠と考えたためである。実験には外径 d の異なる2種類のカートリッジヒータ $d=8, 14\text{ mm}$ を使用した。ヒータの全長はいずれも 250 mm である。実験に当たって、円柱列中に設置した10本の円柱を等しい熱量 Q で加熱するため、円筒ヒータを直列に接続し、直流安定化電源を利用して定電流モードで加熱した。この試験円柱の熱伝達率を測定するには、円柱表面温度を計測する必要がある。このため線径 $100\text{ }\mu\text{m}$ のクロメル・アルメル熱電対を図2に示すように、ヒータ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。なお、熱電対をヒータ表面に溶接しただけでは、円筒外側を流れる流体の温度を拾うため、これら熱電対の外側に厚さ 0.1 mm の銅箔をヒータ全周に亘って貼り付けた。このため試験円柱の実外径 d は $d=8.4$ および 14.4 mm となった。

実験に当たっては、試験円柱を水平からの傾斜角 θ が $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ および 90° の同一平面上に等間隔 G で設置した。このために図3に示す架台を利用した。この架台の両側板に、試験円柱よりも少し大きい $\phi 9$ および 15 mm の穴を一定のピッチ P で開け、この穴の中に試験円柱を挿入した。なお、このピッチ P であるが、直径 $d=8.4\text{ mm}$ の円柱では $P=12, 14, 19, 29\text{ mm}$ 、 $d=14.4\text{ mm}$ の円柱では $P=20, 25, 35\text{ mm}$ とした。このとき円柱間隔 $G(=P-d)$ は、 $d=8.4\text{ mm}$ の円柱では $G=3.6, 5.6, 10.6, 20.6\text{ mm}$ 、 $d=14.4\text{ mm}$ の円柱では $G=5.6, 10.6, 20.6\text{ mm}$ となる。

本研究では、これら水平円柱列中に置かれた各円柱の平均熱伝達率 h_m を次式で定義し、測定を行った。

$$h_m = Q_w / [A(T_w - T_\infty)] \quad (2)$$

ここで、 Q_w : 円柱表面から自然対流により移動する熱量、 A : 円柱表面積、 T_w : 円柱表面温度、 T_∞ : 周囲流体温度である。この対流伝熱量 Q_w であるが、本研究で取り扱う空気の流れでは、円柱表面からの放射伝熱量 Q_{rad} が対流伝熱量 Q_w に比べて無視できないことから、放射伝熱量 Q_{rad} を次式で見積り、

$$Q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4) \cdot A \quad (3)$$

円柱の通電加熱量 Q_j から、この放射伝熱量 Q_{rad} を差し引くことにより求めた。ここで、上式の σ はステファン・ボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8}\text{ W/K}^4$)、 ε は円柱表面の放射率である。この放射率 ε には前報の実験(北村他, 2014)で得た値 $\varepsilon=0.13$ を採用した。なお実験では、この放射による損失 Q_{rad} を極力低減するために、壁温 T_w と周囲流体 T_∞ との温度差 $\Delta T(=T_w - T_\infty)$ が最大でも 40 K 以下となるよう加熱量 Q_j の上限を設定した。この加熱量 Q_j であるが、円柱表面熱流束 $q_j(=Q_j/A)$ が、直径 $d=8.4\text{ mm}$ の円柱では $q_j=70\text{--}380\text{ W/m}^2$ 、 $d=14.4\text{ mm}$ の円柱では $q_j=45\text{--}180\text{ W/m}^2$ の範囲で変化させた。この結果、式(3)で見積もった放射熱損失量 Q_{rad} は、最大でも対流伝熱量 Q_w の10%以下の値となった。

つぎに円柱の表面温度 T_w であるが、上述したように、本研究では円柱の上下端および側面の3ヶ所で温度を計測している。計測された3地点の温度はほぼ等しく、そのばらつきは本実験の最大温度差 $\Delta T=40\text{ K}$ の場合でも $\pm 0.5\text{ K}$ 以内に収まった。これは発熱線からステンレスシース管へ熱が移動する過程で、温度が均一化されること、および空気の熱容量が試験円柱の熱容量に比べて相対的に小さいことが理由として考えられる。このため、それぞれの円柱は等温加熱されているとみなすことができる。つぎに周囲流体温度 T_∞ であるが、壁温測定用の熱電対と同じ線径、素材の熱電対を、傾斜円柱列の最下端円柱と同一の水平面上に、円柱から外側へ 50 mm 離れた地点に設置し、計測した。これら円柱列は床面の影響を受けないよう、架台底面からの高さが最小でも 250 mm となるように設置した。これら試験円柱を装着した架台を断面 $1200 \times 1200\text{ mm}^2$ 、高さ 1200 mm の測定用小部屋の底面中央部に設置した。この測定用小部屋の床面および天井はステンレス製のパンチングメタル板で製作されており、小部屋の床面から乱れの小さな新気を導入し、加熱円柱から立ち上る高温のブルームを天井からスムーズに排出

できるようにしている。なお、これらの試験円柱および装置により実現される円柱直径基準の修正レイリー数 $Ra_d^*(=g\beta q_w d^4/\lambda\alpha\nu)$ は $800-3\times 10^4$ 、円柱間隔 G と直径 d と比 (G/d) は $0.39-2.45$ である。本研究では、円柱列の実験に先立ち、試験円柱の検定を兼ねて、円柱を単独で設置した場合について円柱の平均ヌセルト数 Nu_d を測定した。その結果、本実験で使用した円柱のヌセルト数は、単独円柱まわりの自然対流に対する Morgan (Morgan, 1975) あるいは Fujii ら (Fujii et al., 1982) の伝熱相関式から求めたそれと $\pm 5\%$ 以内で一致することを確認している。

また、本研究では後述するように円柱列まわりの流れを煙により可視化した。この可視化に当たっては、外径 15 mm、肉厚 1 mm、長さ 250 mm のアクリルパイプ外表面に、厚さ 20 μm 、幅 23 mm のステンレス箔ヒータ 2 枚を貼りつけた可視化用円柱（実直径 $d=15.4$ mm）10 本を新たに製作・使用した。この円柱に貼付した 2 枚の箔ヒータの隙間に $\phi 1.5$ mm の穴を開け、線香の煙をこの穴を通じてパイプの内側から外側に向けて吐出させた。なお、穴は円柱の長手方向中心断面付近に開けている。また、円柱表面に貼付した箔に所定の電流を流すことにより、伝熱実験用の試験円柱 $d=14.4$ mm とほぼ同じ熱流束 q_w および修正レイリー数 Ra_d^* となるよう円柱を加熱した。

Fig. 2 Test cylinder for heat transfer experiment.

Fig. 3 Experimental apparatus.

3. 実験結果および考察

3・1 円柱列まわりの流れの可視化

本研究では、まず傾斜円柱列まわりに生じる自然対流の流動状況を上述の可視化用円柱と煙を利用した流れの可視化により調べてみた。その可視化の代表的な例として、円柱間隔 G を一定 $G=9.6$ mm に保ち、円柱列の傾斜角 θ を水平 ($\theta=0^\circ$) から垂直 ($\theta=90^\circ$) まで変化させた場合の結果を図 4 に示す。そのうち図 4(a) は、水平一列円柱列 ($\theta=0^\circ$) の結果を示したものである。この図から、各円柱の下端部から流出した煙は円柱表面に沿って流れた後、円柱の上端部からブルームとなって離脱し、円柱列の鉛直中心軸上へ寄り集まる様子が読み取れる。また、円柱列の周りには左右対称な流れ場が実現されていることが分かる。つぎに円柱列を水平から 30° 傾斜させた場合であるが、図 4(b) に示すように、煙は水平円柱列の場合と同様、円柱表面に沿って流れた後、円柱上端部から離脱し、ブルームとなって上昇していく。このブルームは下流側円柱列上方の円柱から離れた地点を下流に向かって流れる様子が読み取れる。また、これと同様なブルームが図 4(c) に示す $\theta=45^\circ$ の傾斜円柱列でも観察されるが、

プルームは $\theta=30^\circ$ の円柱列に比べて、下流側円柱のより近傍を流ることが分かるであろう。一方、円柱列の傾斜角が $\theta=60^\circ$ になると、図 4(d) に示すように円柱上端部から離脱したプルームは下流側円柱のさらに円柱に近い地点を流れ、さらに図 4(e) に示す $\theta=75^\circ$ の円柱列では、プルームは下流側円柱表面に沿うように流ることが分かる。また、垂直円柱列($\theta=90^\circ$) では図 4(f) に示すように、下側円柱から離脱した自然対流プルームは円柱背面で定形的な渦を形成した後、上段側円柱のまわりに流入し、最終的に円柱列上端の円柱からプルームとなって上方へ流れ去っていく。

つぎに、これら円柱列まわりの流れが円柱間隔 G によってどのように変化するか調べてみた。その一例として、円柱列の傾斜角を一定($\theta=45^\circ$) に保ち、円柱間隔を $G=4.6, 9.6, 19.6$ mm の 3 種類変化させたときの可視化結果を図 5 に示す。まず円柱間隔が最も狭い $G=4.6$ mm の場合、プルームは図 5(a)に示すように円柱から斜めに離脱し、下流側円柱の近傍を流れた後、円柱列から次第に遠ざかっていく。一方、円柱間隔を増加させていくと、図 5(b), (c) に示すように、プルームは円柱からより垂直に近い角度で立ち上がるようになり、その後、下流側円柱から離れた地点を流れていく様子が読み取れる。これら一連の可視化結果より、傾斜円柱列まわりの流れは傾斜角 θ だけでなく、円柱間隔 G によっても変化することが分かるであろう。

Fig.4 Visualized flow fields induced around horizontal and inclined rows of heated cylinders, $d=15.4$ mm, $G=9.6$ mm, $q_w=75$ W/m², $Ra_d^*=1.5 \times 10^4$. The smoke lines in those figures represent the movement of the plumes detached from the cylinders in the row. One will see that the plumes from the horizontal row gather toward the vertical symmetrical-line of the row. While the plumes from the inclined rows direct toward downstream, and they gradually approach to the vicinity of the downstream cylinders with increasing the inclination angle θ of the row.

Fig.5 Visualized flow fields induced around cylinder rows of fixed inclination angle $\theta=45^\circ$, $d=15.4\text{mm}$, $q_w=75\text{W/m}^2$, $Ra_d^*=1.5\times 10^4$. One will see that the plumes arising from cylinders become vertical with increasing the gap between cylinders G .

3・2 傾斜円柱列中に設置された円柱のヌセルト数

さて、本研究では上述の流れの可視化結果を参考にして、まず、直径 $d=14.4\text{mm}$ の傾斜円柱列中に設置された円柱の平均ヌセルト数を測定してみた。その一例として、円柱を一定な熱流束 $q_w=95\text{W/m}^2$ で加熱し、円柱列の傾斜角 θ を水平($\theta=0^\circ$) から垂直($\theta=90^\circ$) まで変化させた場合について、各円柱のヌセルト数 Nu_d を測定した結果を図 6 に示す。なお、このとき円柱直径基準の修正レイリー数は $Ra_d^*=1.5\times 10^4$ となり、このレイリー数における単独円柱のヌセルト数を比較のため図中実線で示した。図 6(a), (b), (c) は、それぞれ円柱間隔が $G=5.6, 10.6$ および 20.6mm の結果を示したもので、図の横軸には、円柱列下端から数えた円柱の番号 N をとり、各円柱のヌセルト数 Nu_d を傾斜角 θ ごとにプロットしたものである。まず、最も円柱間隔が狭い $G=5.6\text{mm}$ の結果であるが、図 6(a) に示すように、円柱のヌセルト数は $\theta=0^\circ$ の水平円柱列で極大となり、傾斜角 θ の増加につれて Nu_d は単調に低下していき、 $\theta=90^\circ$ の垂直円柱列で極小となることが分かる。図 6(b), (c) に示す $G=10.6$ および 20.6mm の円柱列についても、これと同様な結果が得られた。また、円柱列下端（水平円柱列の場合は最外側）に設置された円柱 ($N=1$) のヌセルト数は、傾斜角 θ および円柱間隔 G の如何によらず、単独円柱のヌセルト数にほぼ一致することが分かる。このように円柱列下端円柱のヌセルト数 Nu_d が傾斜角や円柱間隔によらず単独円柱のヌセルト数に一致する結果は、熱流束 q_w や直径の異なる他の円柱列 $d=8.4\text{mm}$ でも同様であった。

さらに図 6 のデータを詳しくみると、例えば図 6(b) の $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ のデータのように、上に凸でほぼ左右対称な分布を示す場合と、 $\theta=75^\circ$ や 90° のデータのように、ヌセルト数が下流に向かって低下し、左右非対称な分布を示す場合に大きく区分できることが分かる。このうち後者のヌセルト数分布であるが、例えば傾斜角が 75° の円柱列では、図 4(e) の可視化結果に示すように、上流側円柱から離脱したブルームは下流側円柱のごく近傍を流れている。このとき上流側円柱から離脱したブルームは、下流側円柱により加熱され、より高温となる。このブルームによる温度効果により円柱のヌセルト数が下流に向かって低下していくといえる。一方、傾斜角が 45° 以下の円柱列では、図 4(b), (c) の可視化結果に示すように、上流側円柱を離脱したブルームは下流側円柱から離れた地点を通過していく。このためブルームが円柱の伝熱に及ぼす影響は小さく、円柱まわりの伝熱を支配しているのは、円柱近傍の流れと考えられる。この円柱まわりの流れであるが、図 4(b), (c) の可視化結果を詳しくみると、円柱列の上下端を除く円柱では、ブルームはほぼ等しい角度で円柱から離脱・上昇している。このことから、これらの円柱まわりの流れ場はほぼ同様であり、円柱のヌセルト数もほぼ一定な値を示すものと考えられる。しかし、そのヌセルト数は図 6(b) から明らかなように、単独円柱よりも高い値を示している。これは緒論で述べたように、隣接する円柱まわりに誘起された自然対流により円柱間を流れる自然対流の流速が加速されるためと考えられる。一方、このヌセルト数は傾斜角の増加と共に徐々に低下していく。これは傾斜角が増加すると、円柱の水平方向間隔が狭くなり、円柱間を流れる自然対流の流速が低下するためと考えられる。また、図 6 の各図を比較すると、円柱の流れ方向のヌセルト数分布は円柱間隔 G により変化することが分かる。すなわち円柱間隔が狭い $G=5.6\text{mm}$

の場合には、図 6(a)に示すように、傾斜角 $\theta=60^\circ$ でヌセルト数は下流に向かって低下し始めるのに対して、間隔が広い $G=20.6\text{ mm}$ の円柱列では、図 6(c)に示すように、 $\theta=60^\circ$ でもヌセルト数はほぼ左右対称な分布を示している。これは図 5 の流れの可視化に示したように、傾斜角が同じ円柱列であっても、円柱間隔が狭くなるほどプルームが下流側円柱列のより近傍を流れるためと考えられる。これら図 6 の結果より、傾斜円柱列中に設置された円柱のヌセルト数は傾斜角 θ だけでなく円柱間隔 G によっても変化することが分かるであろう。

Fig.6 Streamwise variations of Nusselt numbers from the cylinders placed in the inclined row of cylinders, $d=14.4\text{ mm}$, $q_w=95\text{ W/m}^2$, $Ra_d^*=1.5\times 10^4$. The Nusselt numbers from the rows of small inclination angles show almost symmetrical distributions with respect to the center of the rows, while those from the rows of large inclination angles show monotonous decrease toward downstream.

3・3 傾斜円柱列のヌセルト数の無次元整理

さて、前掲の図 6 は特定の円柱直径 $d=14.4\text{ mm}$ および熱流束 $q_w=95\text{ W/m}^2$ で条件下でのヌセルト数の測定結果を示したものである。本研究では、これ以外の熱流束や直径の異なる円柱列 $d=8.4\text{ mm}$ についてもヌセルト数を測定している。それらの測定値のうち、例えば円柱列の下端から 2 段目の円柱のヌセルト数 Nu_d を、横軸に直径基準の修正レイリー数 Ra_d^* をとってプロットしてみると図 7 のようになる。なお、この図で修正レイリー数 Ra_d^* が 6×10^3 以下の Nu_d は $d=8.4\text{ mm}$ の円柱、 6×10^3 以上の Nu_d は $d=14.4\text{ mm}$ の円柱について得られたものである。この図 7 から、2 段目円柱のヌセルト数は円柱間隔 G および傾斜角 θ により大きく変化するだけでなく、円柱直径によっても Nu_d の値や Ra_d^* に対する勾配が微妙に異なることが分かる。このため傾斜円柱列中に設置された円柱のヌセルト数 Nu_d を、レイリー数 Ra_d^* 、傾斜角 θ 、円柱間隔 G および直径 d の単純な関数として表すのは困難であると言える。これに対して、著者らは前報(北村他, 2014, Kitamura et al., 2016)で、水平および垂直円柱列中に設置された円柱のヌセルト数を測定し、その代表長さに円柱間隔 G をとったヌセルト数 $Nu_G (=h_m \cdot G/\lambda)$ が、同じく間

隔 G を代表長さにとった修正レイリー数 $Ra_G^* (= g\beta q_w G^4 / \lambda \alpha \nu)$ と、間隔 G と円柱直径 d との比 (G/d) を掛けたパラメータ $Ra_G^*(G/d)$ で整理できることを明らかにした。そこで本研究では、この結果を踏まえ、傾斜円柱列中に設置された円柱のヌセルト数が同様なパラメータで整理可能か調べることにした。

この整理に先立ち、まず本実験で得た水平および垂直円柱列のヌセルト数について無次元整理を行ってみた。その結果を図 8(a), (b) にそれぞれ示す。なお、水平一列円柱列では最外側円柱 ($N=1, 10$) のヌセルト数は単独円柱のヌセルト数に一致することから、図 8(a) では最外側円柱を除く円柱のヌセルト数 Nu_G を横軸にパラメータ $Ra_G^*(G/d)$ をとって示した。この図 8(a) から、本実験で得られた円柱 ($N=2-9$) のヌセルト数 Nu_G は、パラメータ $Ra_G^*(G/d)$ によって整理できることが分かる。そこで、参考までにこの両者の相関を次式で近似し、

$$Nu_G = C_1 [Ra_G^*(G/d)]^m \times \{1 - \exp(-C_2 \times [Ra_G^*(G/d)]^{-n})\} \quad (4)$$

実験値を良好に模擬する式(4)中の係数 C_1 , C_2 および指数 m , n を求めてみた。その結果、 $C_1=0.42$, $C_2=8.0$, $m=0.30$, $n=0.20$ なる値を得た。図 8(a) 中に記した実線はこの相関式を示したもので、本実験値を $\pm 4\%$ 程度の誤差で予測する。一方、図 8(b) は垂直円柱列の 2 段目以降の円柱の Nu_G を横軸に $Ra_G^*(G/d)$ をとって両対数表示したものである。この図より、本実験で得た各円柱の Nu_G は $Ra_G^*(G/d)$ に対し直線的に変化することが分かる。そこで、この直線を以下の式で近似し、

$$Nu_G = C [Ra_G^*(G/d)]^n \quad (5)$$

式(5)中の係数 C および指数 n を求めたところ、円柱列下端から $N=2, 3, 4, 5, 8$ 段目の円柱に対して、係数 C はそれぞれ 0.40, 0.35, 0.31, 0.30, 0.29, 指数 n はそれぞれ 0.225, 0.23, 0.235, 0.235, 0.235 となった。なお、図 8(b) 中に記した直線は、これらの値を式(5)に代入した直線を示している。

さて、本研究ではこれら水平一列および垂直一列円柱列の結果を踏まえて、つぎに傾斜円柱列について同様なヌセルト数の無次元整理を行ってみた。図 9 は傾斜円柱列中の各円柱について整理を行った結果を示したもので、そのうち円柱列の下から $N=2, 3, 5, 8$ 段目の円柱の結果を示す。なお、図中 2 本の実線は、上で求めた水平一列円柱列の伝熱相関式と垂直一列円柱列の $N=2, 3, 5, 8$ 段円柱に対する相関式を示している。まず、2 段目円柱の結果であるが、図 9(a) に示すように、 Nu_G はそれぞれの傾斜角 θ ごとに一つの曲線あるいは直線 ($\theta=90^\circ$) 上にまとまること分かる。また、傾斜円柱列の Nu_G は水平円柱列と垂直円柱列の中間の値をとり、その値は傾斜角 θ の増加と共に低くなること分かる。図 9(b), (c), (d) に示す $N=3, 5, 8$ 段目円柱についても結果は同様であるが、とくに傾斜角の大きな $\theta=75^\circ$ および 90° の場合に、 Nu_G が顕著に低下する結果が注目される。また、垂直以外の傾斜円柱列の Nu_G は、 $Ra_G^*(G/d)$ の増加に伴って急速に水平円柱列の Nu_G へと漸近していき、傾斜角 θ による差が見られなくなることが分かる。

Fig.7 Nusselt numbers of 2nd-cylinder placed in the inclined row of cylinders, where Nu_G are plotted with Ra_d^* . The Nusselt numbers show considerable variations with the gap G , inclination angle θ and cylinder diameter d .

Fig.8 Rearrangements of Nusselt numbers from horizontal and vertical rows of cylinders, where Nu_G are plotted with $Ra_G^*(G/d)$. The gap-based Nusselt numbers Nu_G of the horizontal row gather around the single curve in Fig.8(a), while the numbers Nu_G of the vertical row show linear dependencies on $Ra_G^*(G/d)$. The dependency varies with the location of cylinders.

Fig.9 Rearrangements of Nusselt numbers from the specific cylinders in the rows, where the gap-based Nusselt numbers Nu_G for the rows of various inclination angles θ and gaps G are plotted with $Ra_G^*(G/d)$. The Nusselt numbers Nu_G from the cylinders in the row of fixed inclination angle are correlated well with the parameter $Ra_G^*(G/d)$ regardless of the gaps G and the diameters of the cylinder d .

さて、上の結果より、傾斜円柱列中の各円柱のヌセルト数 Nu_G はパラメータ $Ra_G^*(G/d)$ を用いて整理でき、その値は傾斜角 θ に応じて、一本の曲線または直線上にまとまることが分かった。そこで、本研究ではつぎに傾斜角 θ ごとに、各円柱のヌセルト数 Nu_G を $Ra_G^*(G/d)$ で整理してみた。その結果を図 10 に示す。図 10 は傾斜角 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ および 75° の円柱列について、 $N=2-10$ 段目円柱のヌセルト数 Nu_G をプロットしたものである。まず図 10(a) に示す $\theta=30^\circ$ の結果であるが、10 段目円柱を除く円柱のヌセルト数 Nu_G が、段数 N によらず図中に示す曲線のまわりにほぼまとまることが分かる。また、これと同様な結果が図 10(b) に示す傾斜角 $\theta=45^\circ$ の円柱列の Nu_G についても言える。なお、図 10(a), (b) において 10 段目円柱のヌセルト数が、 $Ra_G^*(G/d)$ の高い領域で他の円柱よりも低い値を示しているが、これは円柱間隔 G が広くかつ傾斜角が 45° 以下の傾斜円柱列では、図 6(b), (c) に示したように、円柱列の最外側に設置された円柱 ($N=1, 10$) のヌセルト数 Nu_d が、水平円柱列と同様、単独円柱の Nu_d にほぼ一致するためである。一方、円柱列の傾斜角が 60° になると、図 10(c) に示すように 10 段目円柱の Nu_G は $N=2-9$ 段目円柱のそれとほぼ等しい値をとるようになり、図中に記した曲線のまわりにまとまる。

これに対して、傾斜角のより大きな $\theta=75^\circ$ の円柱列では、図 10(d) に示すように、とくに円柱間隔 G の狭い $Ra_G^*(G/d)$ が低い領域で、 Nu_G が円柱の設置位置 N に依存して変化する結果が得られた。これは図 4(e) の可視化結果で示したように、間隔が狭いと上流側円柱で加熱された高温のブルームが下流側の円柱近傍に流れ込み、ヌセルト数を低下させるためである。一方、このヌセルト数の差は、 $Ra_G^*(G/d)$ が増加するにつれて急激に小さくなる様子が読み取れる。この図 10(d) の結果から、各円柱 N に対して Nu_G と $Ra_G^*(G/d)$ の間には直線関係が成立し、その

Fig.10 Rearrangements of Nusselt numbers from the cylinders in the rows of fixed inclination angles θ , where Nu_G from 2nd to 10th cylinders are plotted with $Ra_G^*(G/d)$. The plots for the rows of inclination angles $\theta=30, 45$ and 60° gather around the single curves shown in Figs.(a), (b), (c), while the plots for the row of $\theta=75^\circ$ show different linear variations depending on the location of cylinders N .

直線の勾配は下流側円柱ほど大きくなることが分かる。また、図 10(d)の結果と図 8(b)に記した $\theta=90^\circ$ の垂直一列円柱列の結果を比較すると、 $Ra_G^*(G/d)$ が小さな領域では両者の Nu_G はほぼ一致するのに対して、 $Ra_G^*(G/d)$ が大きな領域では、 $\theta=75^\circ$ の円柱列の Nu_G が垂直円柱列に比べて高くなることが分かるであろう。

さて本研究では、これら図 10 の結果を基に、傾斜円柱列のヌセルト数 Nu_G の相関式を参考までに求めてみた。このうち傾斜角 $\theta=60^\circ$ 以下の円柱列では、 Nu_G と $Ra_G^*(G/d)$ は対数平面上で曲線となることから、この曲線の式を前述の式(4)で表し、実験値を良好に近似する係数 C_1, C_2 および指数 m, n を求めたところ、 $\theta=30^\circ$ の円柱列に対して、 $C_1=0.42, C_2=5.0, m=0.31, n=0.18$ 、また $\theta=45^\circ$ の円柱列に対して、 $C_1=0.42, C_2=5.0, m=0.31, n=0.18$ 、さらに $\theta=60^\circ$ の円柱列に対して、 $C_1=0.42, C_2=5.0, m=0.31, n=0.18$ なる値を得た。なお、これらの相関式を導出するに当たって、 $\theta=30^\circ$ および $\theta=45^\circ$ の円柱列では上端円柱($N=10$)の実験データを除外している。図 10 (a), (b), (c) 中の実線はこれらの相関式を記したもので、 $\theta=30^\circ, 45^\circ$ および 60° の傾斜円柱列の Nu_G を $\pm 5\%$ 程度の精度で予測可能である。一方、傾斜角 $\theta=75^\circ$ の円柱列では、 Nu_G と $Ra_G^*(G/d)$ は対数平面上で直線的に変化することから、式(5)で直線の式を表し、式中の係数 C および指数 n を求めたところ、2 段目円柱に対して $C=0.41, n=0.23$ 、8 段目円柱に対して $C=0.28, n=0.26$ なる値を得た。なお、図 10(d) 中の実線はこの相関式を記したもので、相関式の指数 n が上述の垂直円柱列のそれに比べて大きくなることが分かる。

ところで、傾斜角が 60° 以下の円柱列では、円柱列上下端に設置された円柱を除く円柱のヌセルト数 Nu_G がパラメータ $Ra_G^*(G/d)$ で記述できることが分かった。しかし、両者の相関は傾斜角 θ によって変化する。そこで、本研究では、この傾斜角 θ の影響を取り込んだヌセルト数の整理が可能か検討してみた。このために $\theta=0^\circ-60^\circ$ の傾斜円柱列のヌセルト数について種々の無次元整理を試みたところ、 $Ra_G^*(G/d)$ の代わりに $Ra_G^*(G\cos\theta/d)$ を用いてヌセルト数 Nu_G を整理すると、実験値が比較的良くまとまることが分かった。その結果を図 11 に示す。この図から、 $\theta=0^\circ$ から 60° の円柱列のヌセルト数 Nu_G が、傾斜角の如何によらずほぼ一本の曲線付近にまとまることが分かるであろう。なお、この曲線の近似式を前述の方法にならって求めたところ、以下ようになった。

$$Nu_G = 0.41[Ra_G^*(G\cos\theta/d)]^{0.315} \times \{1 - \exp(-5.5 \times [Ra_G^*(G\cos\theta/d)]^{-0.18})\} \quad (6)$$

ここで、上式の適用範囲は $\theta=0^\circ-60^\circ, N=2-9, Ra_G^*=16-1.38 \times 10^5, (G/d)=0.38-2.45$ である。式(6)を使えば、本実験で得た $\theta=60^\circ$ 以下の傾斜円柱列のヌセルト数 Nu_G を $\pm 10\%$ 程度の誤差で予測することが可能である。

ところで、パラメータ $Ra_G^*(G/d)$ の代わりに $Ra_G^*(G\cos\theta/d)$ を用いてヌセルト数 Nu_G を整理すると、なぜ Nu_G がまとまるかという問題であるが、これについては、図 12(a)に示す平行な加熱平板間流路を流れる自然対流に関する従来の解析が参考になるとと思われる (例えば、宮武、藤井、1972, Aung et al., 1972)。これらの解析では、平板間

Fig.11 Rearrangements of Nusselt numbers from the cylinders in the rows of arbitral inclination angles from 0° to 60° , where Nu_G from 2nd to 9th cylinders are plotted with $Ra_G^*(G\cos\theta/d)$. The figure depicts that the gap-based Nusselt numbers Nu_G from the rows of $\theta=0^\circ$ to 60° gather around the single curve in the figure, indicating that the parameter $Ra_G^*(G\cos\theta/d)$ well correlates the Nusselt numbers Nu_G regardless of the inclination angles.

流路内で側壁に沿って境界層が発達する, いわゆる強制対流管内流の入口助走区間問題と同様な解析が行われており, その結果によれば, 流路間隔 G を代表長さにとった平板の平均ヌセルト数 $Nu_G (=h_m G/\lambda)$ が, レイリー数 $Ra_G (=g\beta\Delta T G^3/\alpha\nu)$ と流路のアスペクト比 (G/H) との積 $[Ra_G (G/H)]$ で整理できることが示されている. 本研究で取り扱う円柱列の体系についても, 図 12(b) 中に灰色で示す流路内で, 流路側壁 (円柱) に沿って境界層が発達する入口助走区間問題としての取り扱いが可能と思われる. また, 実際に著者らは水平円柱列について円柱の平均熱伝達率 h_m を測定し, 間隔 G を代表長さとするヌセルト数 $Nu_G (=h_m G/\lambda)$ を求めたところ, Nu_G がパラメータ $Ra_G^* (G/d)$ で整理できることを明らかにしている(北村他, 2014). これらの結果から, 流路側壁の平均ヌセルト数 Nu_G は, 間隔 G 基準のレイリー数 Ra_G と流路のアスペクト比 (間隔 G /高さ H) との積からなるパラメータ $[Ra_G (G/H)]$ の関数として表せ, 円柱列では流路間隔 G に円柱の最小間隔 G , 流路高さに直径 d をとれば, 平板と円柱のヌセルト数 Nu_G が同一のパラメータ $Ra_G^* (G/H)$ で整理できることが分かる. 一方, 本研究で対象とする傾斜円柱列の体系では, 図 12(c)中に灰色で囲む流路が形成され, この流路の間隔 G は, 水平円柱列と傾斜円柱列で変化しないものの, 流路の高さは, 円柱間を自然対流が鉛直上方に流れることを考慮すれば, 図に記したように $(d/\cos\theta)$ となり, このとき流路のアスペクト比は $(G\cos\theta/d)$ で表せると考えられる. このため傾斜円柱列のヌセルト数 Nu_G が, 図 11 に示したようにパラメータ $Ra_G^* (G\cos\theta/d)$ で整理できるものと考えられる.

Fig. 12 Geometry and characteristic length for natural convection in parallel plates and cylinders.

4. 結 言

本研究は, 水平な加熱円柱が水平から傾斜した平面上に複数本・等間隔で配置された傾斜一列円柱列まわりの自然対流の流動と伝熱を実験により調べたものである. 実験は常温の空气中に, 等しい熱流束で加熱した 10 本の円柱を水平からの傾斜角 θ が $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ で設置した場合について行った. 試験円柱には直径の異なる 2 種類の円柱 ($d=8.4, 14.4$ mm) を用い, 円柱の間隔および熱流束を $G=3.6-20.6$ mm, $q_w=60-250$ W/m² の範囲で系統的に変化させた.

実験では, まず円柱まわりに生じる流れを煙により可視化した. その結果,

- (1) 円柱列の各円柱から離脱した自然対流プルームは, 円柱列下流側円柱の上方を流れていくが, 円柱列の傾斜角 θ が大きく, また円柱間隔が狭くなるにつれて, プルームは下流側円柱に近づき, ついには円柱列に沿って流れることが分かった.

この可視化結果を踏まえて, つぎに傾斜円柱列中に設置された各円柱の平均ヌセルト数を測定してみた. その結果, 以下の知見が得られた.

- (2) 傾斜円柱列の下端円柱のヌセルト数は, 傾斜角の如何に依らず単独円柱のそれにほぼ一致する. 一方, それ以外の円柱のヌセルト数は, 水平円柱列で極大, 垂直円柱列で極小となり, 傾斜円柱列では両者の中間の値を示す. また, その値は傾斜角 θ の増加と共に低くなる.
- (3) 傾斜円柱列の最外側 ($N=1, 10$) を除く円柱のヌセルト数 Nu_G はパラメータ $Ra_G^* (G/d)$ を用いて整理でき, 傾斜角 θ が 60° 以下の円柱列では, 円柱の設置位置 N に依らず一本の曲線上に, また傾斜角 θ が 75° 以上の円柱列では円柱の設置位置 N ごとに一本の直線上にまとまる. ここで, Nu_G および Ra_G^* は円柱間隔 G を代表長さにとったヌセルト数および修正レイリー数である.
- (4) この結果から, 傾斜円柱列中に設置された円柱のヌセルト数を予測する伝熱相関式を提案した.

これら本研究で得られた傾斜加熱円柱列まわりの自然対流に関する知見および伝熱相関式は、円筒状の発熱体が複数個・傾斜平面上に配置された機器、例えば太陽熱温水器や各種の加熱・照明機器・装置等の熱設計に役立つものと考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、JSPS 科研費 15K05823 の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- Aung, W., Fletcher, L.S. and Sernas, V., Developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.15 (1972), pp.2293-2308.
- Cianfrini, C., Corcione, M. and Habib, E., Free convection heat transfer from a row of horizontal cylinders, *Advanced Material Research*, Vols.452-453 (2012), pp.1246-1251.
- Corcione, M., Correlating equations for free convection heat transfer from horizontal isothermal cylinders set in a vertical array, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.48 (2005), pp.3660-3673.
- Farouk, B. and Güçeri, S.İ., Natural convection from horizontal cylinders in interacting flow fields, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.26, No.2 (1983), pp.231-243.
- Fujii, T., Fujii, M. and Honda, T., Theoretical and experimental studies of the free convection around a long horizontal thin wire in air, *Proceedings of 7th International Heat Transfer Conference*, Vol.2 (1982), pp.311-316.
- 石原勲, 勝田勝太郎, 水平単列円管の自然対流熱伝達, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.66, No.650 (2000), pp.2675-2680.
- 北村健三, 光石暁彦, 鈴木孝司, 同一水平面上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伝熱特性, *日本機械学会論文集*, Vol.80, No.815 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014tep0201.
- Kitamura, K., Mitsuishi, A., Suzuki, T. and Kimura, F., 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 (2016), pp.414-429.
- 栗山雅文, 門叶秀樹, 原田英二, 今野宏卓, 空気中における水平配列加熱円柱群周りの自然対流熱伝達, *化学工学論文集*, Vol.21, No.3 (1995), pp.514-519.
- Lieberman, J. and Gebhart, B., Interactions in natural convection from an array of heated elements, experimental, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.12 (1969), pp.1385-1396.
- Marsters, G. F., Arrays of heated horizontal cylinders in natural convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.15 (1972), pp.921-933.
- 宮武修, 藤井哲, 垂直平行平板間の自然対流熱伝達, *化学工学*, Vol.36, No.4 (1972), pp.405-411.
- Morgan, V. T., The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders, *Advances in Heat Transfer*, Vol.11 (1975), pp.199-264, Academic Press.
- Sparrow, E.M. and Niethammer, J.E., Effect of vertical separation distance and cylinder-to-cylinder temperature imbalance on natural convection for a pair of horizontal cylinders, *Transactions of the ASME, Series C, Journal of Heat Transfer*, Vol.103, No.4 (1981), pp.638-644.
- Tokanai, H., Kuriyama, M., Harada, E. and Konno, H., Natural convection heat transfer from vertical and inclined arrays of horizontal cylinders to air, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol.30, No.4 (1997), pp.728-734.
- Tokura, I., Saito, H., Kishinami, K. and Muramoto, K., An experimental study of free convection heat transfer from a horizontal cylinder in a vertical array set in free space between parallel walls, *Transactions of the ASME, Series C, Journal of Heat Transfer*, Vol.105, No.1 (1983), pp.102-107.

References

- Aung, W., Fletcher, L.S. and Sernas, V., Developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.15 (1972), pp.2293-2308.

- Cianfrini, C., Corcione, M. and Habib, E., Free convection heat transfer from a row of horizontal cylinders, *Advanced Material Research*, Vols.452-453 (2012), pp.1246-1251.
- Corcione, M., Correlating equations for free convection heat transfer from horizontal isothermal cylinders set in a vertical array, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.48 (2005), pp.3660-3673.
- Farouk, B. and Güçeri, S.İ., Natural convection from horizontal cylinders in interacting flow fields, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.26, No.2 (1983), pp.231-243.
- Fujii, T., Fujii, M. and Honda, T., Theoretical and experimental studies of the free convection around a long horizontal thin wire in air, *Proceedings of 7th International Heat Transfer Conference*, Vol.2 (1982), pp.311-316.
- Ishihara, I. and Katsuta, K., Natural convection heat transfer from a cylinder in a single horizontal array, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 66, No. 650 (2000), pp. 2675-2680 (in Japanese).
- Kitamura, K., Mitsuishi, M. and Suzuki, T., Natural convection heat transfer from horizontal array of heated cylinders, *Transactions of the JSME(in Japanese)*, Vol. 80, No.815 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014tep0201.
- Kitamura, K., Mitsuishi, A., Suzuki, T. and Kimura, F., 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 (2016), pp. 414-429.
- Kuriyama, M., Tokanai, H., Harada, E. and Konno, H., Natural convection heat transfer around a horizontal array of heated cylinders in air, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, Vol.21, No.3 (1995), pp.514-519 (in Japanese).
- Lieberman, J. and Gebhart, B., Interactions in natural convection from an array of heated elements, experimental, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.12 (1969), pp.1385-1396.
- Marsters, G. F., Arrays of heated horizontal cylinders in natural convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.15, (1972), pp.921-933.
- Miyatake, M. and Fujii, T., Natural convection heat transfer from vertical parallel plates, *Kagaku Kogaku*, Vol.36, No.4 (1972), pp.405-411 (in Japanese).
- Morgan, V. T., The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders, *Advances in Heat Transfer*, Vol.11 (1975), pp.199-264, Academic Press.
- Sparrow, E.M. and Niethammer, J.E. , Effect of vertical separation distance and cylinder-to- cylinder temperature imbalance on natural convection for a pair of horizontal cylinders, *Transactions of the ASME, Series C, Journal of Heat Transfer*, Vol.103, No.4 (1981), pp.638-644.
- Tokanai, H., Kuriyama, M., Harada, E. and Konno, H., Natural convection heat transfer from vertical and inclined arrays of horizontal cylinders to air, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol.30, No.4 (1997), pp.728-734.
- Tokura, I., Saito, H., Kishinami, K. and Muramoto, K., An experimental study of free convection heat transfer from a horizontal cylinder in a vertical array set in free space between parallel walls, *Transactions of the ASME, Series C, Journal of Heat Transfer*, Vol.105, No.1 (1983), pp.102-107.