水平方向にズレのある二本の加熱水平円柱の 自然対流の干渉効果*

亀岡 利行**, 岡田 裕紀***, 久保 真治†,
秋野 詔夫††, 田中 周†, 高瀬 和之††

Interaction of Natural Convection between Two Heated Horizontal Cylinders Installed Alternately

Toshiyuki KAMEOKA, Yuuki OKADA, Shinji KUBO,
Norio AKINO, Amane TANAKA and Kazuyuki TAKASE

ABSTRACT

An experimental study was carried out to investigate the natural convection around two heated horizontal cylinders set in a rectangular enclosure. The heat transfer coefficient of the cylinders is calculated from heat flux, surface temperature and fluid temperature obtained by thermocouples. Temperature distributions and flow appearance were visualized by the liquid-crystal suspension method. The thermo-fluid behavior was characterized by the stratification and the thermal plumes from the heated cylinders. By means of accomplishment in both heat transfer coefficient measurement and the visualization, the varying of heat transfer observed was explained by the interaction between thermal plume from lower cylinder and the boundary layer around the upper cylinder.

Key words: Natural convection, Horizontal cylinder, Enclosure, Thermal stratification, Visualization, Interaction

1. 緒言

容器内に設置された複数の加熱体まわりの自然対流は、形成される温度成層や熱的相互干渉等起因して複雑な伝熱現象を生じさせる。これは、熱交換器、蓄熱槽等の多くの伝熱・熱利用機器の詳細な特性評価に共通する問題である。例えば、加熱水平円柱まわりの自然対流は、無限空間に設置された場合について極めて多くの実験・解析的研究が行われているが、現実の機器のごとく容器中に多数の伝熱管が設置される場合に適用できるか否か検討を要する。そこで、我々は矩形容器内に設置された二本の加熱水平円柱まわりの自然対流伝熱現象を取り上げ、一連の実験的、解析的研究を進めてきた。

前報¹⁾では、垂直に上下二本の円柱を並べて、その中心軸間隔を2直径あけた配置条件において、熱伝達の測定を行うと共に感温液晶懸濁法を用いて温度場と流れ場の可視化を行った。加熱円柱より立ち昇るプルームと容

器内に形成される循環流及び温度成層が干渉して複雑な挙動が生じることを示し、それらと熱伝達率との関連を明らかにした。また、熱伝達率の評価に用いる代表周囲流体温度の取り方を検討し、各円柱の軸心より1直径上方の位置の流体温度を取るとよいことを明らかにした。

本報では熱伝達測定と可視化を併用した実験的研究を行い、上下円柱の位置関係に水平方向のズレ(オフセット)がある場合について、上円柱の熱伝達に特異な増減が生じることを見出し、それが下の加熱円柱から発生したプルーム(下プルーム)の上円柱付近の挙動に対応して生じていることを述べる。

2. 実験装置および方法

Fig. 1に実験装置の概要を示す。作動流体(シリコンオイルと感温液晶を混ぜたもの)を満たした容器に円柱を設置して、それを冷却用の水を満たした外側容器に入れ込んでいる。この外側容器には恒温水を循環させており、内側容器壁面を等温に保つことができる。作動流体の代表温度、円柱壁面温度や発熱量はコンピュータを用いて自動計測した。また、容器の側部からスリット光を照射して直交する方向から可視化観察を行った。

* 原稿受付 1997年3月14日

** 正会員 東京電機大学

*** 東芝

† 日本原子力研究所

†† 正会員 日本原子力研究所

Fig. 1 System setup.

Fig. 2 に本実験で使用了した実験装置を示す。(a)で示すように透明アクリル樹脂製矩形容器内に2本のテスト円柱を水平に設置した。容器幅方向中央から50 mm 右寄りに設置されたテスト円柱は(b)に示すように直径24 mm, 厚さ4.5 mm, 長さ122 mm の銅パイプであり, 内部の電気ヒータで加熱する。加熱面温度を一様にするために, 厚肉の銅パイプを用いた。円柱表面を溝加工して, 二本の壁面温度測定用 JIS-K 型熱電対をハンダで埋め込み表面を仕上げてある。この熱電対の取り付け位置は, 円柱の中心軸を通る水平線上で円柱の左右の表面である。この二点の平均値を円柱壁面温度とした。試験空間である矩形容器 ($300 \times 300 \times 500 \text{ mm}^3$) の上面は二重の蓋にて断熱条件とし, 残りの5壁面は恒温水を流して一定壁温とした。作動流体はシリコンオイル (温度298.2Kに

(a) Schematic of experimental apparatus

(b) Detail of test cylinder

(c) The positions of thermocouples

Fig. 2 Experimental apparatus.

においてプラントル数 197, 密度 $9.993 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 比熱 $1.578 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 熱伝導率 $1.237 \times 10^{-1} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 粘性率 $1.545 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 体膨張率は $8.533 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$ であり, 容器に 410 mm の深さまで満たした。

オフセットのない場合, Fig. 2(c)の左図に示すように, 各円柱中心から 1 直径上方に設置した熱電対によって各円柱の代表周囲流体温度を測定した。オフセットのある場合には, 熱電対の位置は変更せずに, Fig. 2(c)右図に示すように鉛直配置から上円柱を距離 S だけ水平移動させて両円柱間にオフセットを与えた。 S を円柱直径 D で割った S/D を無次元オフセット量とした。なお, 上下円柱の垂直方向中心間距離 P は 2 直径 (48 mm) に保った。

円柱壁面温度, 周囲流体温度, ヒータの電流, 電圧を 5 分間隔で測定した。これらの測定と可視化観察を加熱開始から 400 分経過するまで行った。

作動流体中には温度分布を可視化観察するために, 温度で色が変化する感温液晶 (日本カプセルプロダクツ社製, W-30 型, 呈色領域: $24.8 \sim 29^\circ\text{C}$) を重量濃度比 0.02 wt% で混入懸濁した。

3. 実験結果および考察

上円柱のみ加熱した実験と, オフセット量 S/D を $0 \leq S/D \leq 5/4$ の範囲にて 11 通りに変化させた実験を行った。円柱は電気ヒータにて等熱流束で加熱した。発熱量は上下円柱ともに 6 W である。この条件ではレイリー数 $Ra = Pr \cdot D^3 g \beta \Delta T / \nu^2$ は 7.5×10^5 程度である。ここで, Pr : プラントル数, D : 円柱直径, g : 重力加速度, β : 体膨張率, ΔT : 境界膜温度差, ν : 動粘性率である。

3.1 温度とヌセルト数の経時変化

以下に特徴的な 4 つのオフセットの結果を示す。まず, 円柱の壁面温度の経時変化を Fig. 3 に示す。

(a)は $S/D=0$ (上下円柱を鉛直に配置) の場合である。下円柱壁温は 12 分までに急速に上昇して, その後ゆっくりと上昇した。これに対して, 上円柱壁温は 12 分までは下円柱とともに上昇しているが, その後下円柱よりもさらに上昇して 22 分で温度がピークを示した。その後, 上円柱壁温は低下して 37 分で下円柱壁温とほぼ同じになった。さらに加熱を続けると上円柱壁温は下円柱壁温よりも上昇した。

(b)は $S/D=1/12$ に配置した場合である。上円柱壁温は加熱開始から 22 分まで下円柱壁温より低かったが, 27 分で急に上回った。さらに, 80 分以降上円柱壁温は下円柱より相対的に上昇し, 130 分でピークを示した後, 下円柱より高い温度のままほぼ定常状態に達した。

(c)は $S/D=1/2$ に配置した場合である。加熱開始から 37 分を越えるまで, 上円柱壁温は下円柱壁温より低かった。40 分から 80 分にかけて上円柱壁温が上昇した。100

Fig. 3 Time variation for temperature of two cylinders.

分前後に上下円柱壁温の差が小さくなったが, その後, 徐々に開いていった。

(d)は $S/D=5/4$ に配置した場合である。加熱開始から上下円柱がほぼ同じように上昇していき, 徐々に上円柱の方が高くなっていった。

次に, ヌセルト数 $Nu = hD/\lambda$ の経時変化を Fig. 4 に示す。ここで, h : 熱伝達率 $= q/\Delta T$, q : 熱流束 (円柱内ヒータ発熱量から求める), λ : 熱伝導率である。図中に示した Nu_s は上円柱のみを単一加熱した場合のヌセルト数である。

(a)は $S/D=0$ に配置した場合である。上円柱ヌセルト数 Nu_u は 17 分で極小値をとった後, Nu_s を上回る値まで急増するが, その後ゆっくりと減少し, 177 分以降は Nu_s を下回った。下円柱ヌセルト数 Nu_l は加熱開始初期を除き, 緩やかな増大傾向を示し, 最終的に Nu_s より大となった。

(b)は $S/D=1/12$ に配置した場合である。 Nu_u は 32 分で一度極小値を示した後には上昇し, 60 分で Nu_s に接近した後に再び低下して, 137 分で 2 度目の極小値となった。 Nu_l は 27 分で極小値となり, その後ゆっくり上昇した。250 分前後からは Nu_u と Nu_l はほぼ同じ値に

Fig. 4 Time variation for Nusselt number of two cylinders.

なった。

(c)は $S/D = 1/2$ に配置した場合である。 Nu_u は加熱開始後 52 分で極小値となり、その後上昇して、397 分では Nu_s より 3% 高くなった。また、 Nu_s は、37 分で極小値となり、その後ゆっくり上昇して、397 分では Nu_u よりも低くなった。

(d)は $S/D = 5/4$ に配置した場合である。 Nu_u は加熱開始後 72 分まで Nu_s を上回っている。その後、極小値を示すことなく 200 分前後までゆっくりと低下し、再び上昇して、397 分で Nu_s とほぼ同じになった。 Nu_s は、32 分でゆっくりと極小値となり、その後ゆっくり上昇した。397 分では Nu_u よりも高くなった。

3.2 上円柱のヌセルト数とオフセット量の関係

ヌセルト数の経時変化は下円柱はゆっくりと単純なのに対して、上円柱には複雑な挙動が観測された。そこで、上円柱のヌセルト数に注目した。 Fig. 4(b) に示したオフセット量 $S/D = 1/12$ と Fig. 4(d) の $S/D = 5/4$ を比較すれば顕著なように、上円柱のヌセルト数の経時変化が比較的短時間 (10 分オーダー) に増減するものと、緩やかに変化するものがあり、オフセットが $1/2$ より大きい

Fig. 5 Time variation for Nu_u with offset ratio $0 \leq S/D \leq 1/4$.

Fig. 6 Time variation for Nu_u with offset ratio $3/8 \leq S/D \leq 5/4$.

条件では単純であった。まず、上円柱のヌセルト数が急に増減する場合である、オフセット $0 \leq S/D \leq 1/4$ における Nu_u の経時変化を Fig. 5 に示す。図中の直線は長時間経過後の上円柱単独加熱時のヌセルト数 Nu_s の値である。 $0 \leq S/D \leq 1/4$ では、いずれの場合も一回あるいは二回ほど熱伝達の急な増減が生じた。また加熱開始から長時間経過した 400 分の値は、 $S/D = 0, 1/24, 1/12$ では Nu_s と比べると、低い値となっている。 $S/D = 1/8, 1/6, 1/4$ は Nu_s とほぼ同等であった。次に、 Fig. 6 に、上円柱のヌセルト数が単純に変化する場合である、 $3/8$

$\leq S/D \leq 5/4$ における Nu_u の経時変化を示す。 $S/D = 3/8, 1/2$ は加熱後ごく初期に極小値を示している。 $S/D = 3/4$ 以上だと顕著な極小値はない。加熱開始後長時間経過した 400 分の Nu_u は、 $S/D = 3/8, 1/2, 3/4$ では Nu_s より高く、 $S/D = 1, 5/4$ では Nu_s とほぼ同等である。

栗山ら³⁾ は垂直に並べた二本の水平円柱の自然対流の上円柱の熱伝達率について、下部円柱から到達する高温の浮力流が上部円柱を包み込むことによる抑制効果とながれの重畳による促進効果の兼ね合いに依存する現象だとしている。本実験結果では、オフセット量の増加に従い、長時間経過後の Nu_u は Nu_s に比べて小 (A), 同等 (B), 大 (C), 同等 (D) のように変化 (A, B, C, D は Figs. 5, 6 中の記号) した。従って、本研究においても上円柱の熱伝達に対する下プリュームの効果には、熱伝達を促進するものと抑制するものがあることは同様であった。

加熱開始後長時間経った場合の上円柱熱伝達とオフセット量の関係は、次のように解釈することができる。層流域での垂直平板自然対流の速度境界層と温度境界層の厚さを比較すると、本実験で用いた $Pr = 200$ 程度の流体では、速度境界層が十数倍程度厚い。円柱から立ち昇るサーマルプリュームでも、同程度のオーダーの構造であると考えられるので、下プリュームが上円柱の境界層に与える影響は、温度的にも速度的にも接触している場合、速度的に接触している場合、接触していない場合に分けることができる。さて、長時間経つと下プリュームは上円柱の側方を通過する。オフセット量と長時間経過後の下プリュームと上円柱間の距離はほぼ比例していると考えられる。オフセットが小さいと高温の下プリュームが上円柱を取り囲み熱伝達は抑制される。オフセットの増加とともに下プリュームと円柱の距離も次第に離れ、流れの重畳による促進と包み込みによる抑制が同程度になったところで、上円柱熱伝達は単独円柱のそれと同程度になる。さらにオフセットが大きくなると促進効果が勝り単独円柱の熱伝達より増加し、十分オフセットが大きいと二本の円柱は干渉しなくなり、単独円柱のそれと同程度になる。

3.3 可視化観察

上述の熱伝達測定と同時に円柱付近の温度分布を可視化観察 (Figs. 7~10) を行った。使用した感温液晶の色は、温度の上昇とともに、黒、赤み帯びたオレンジ、黄土色、緑、青と変化する。従って、写真の温度分布は、黒と赤系の色が低温域、青系の色が高温域に対応している。また、露光時間が 30 秒なので速度の速い領域である速度境界層は円柱に沿った軌跡の集合として観察できる。Fig. 4 中の (i)(ii)……の記号は写真の (i)(ii)……を撮影した時刻に対応している。

可視化によって、下プリュームの進路が上円柱の左右へ振れて変化する挙動が観察できた。この挙動の有無はオフセット量の大小に関係しており、2つのグループに

分けられた。 $0 \leq S/D \leq 1/4$ では、下プリュームが実験中進路を変更した。また、 $3/8 \leq S/D$ では、下プリュームは常に上円柱の左側を上昇し、実験中に進路を変更しなかった。Fig. 5 と Fig. 6 に示した上円柱の熱伝達の増減は、下プリュームが上円柱から離れている、上円柱を取り囲んでいる、などのプリュームの進路と対応が見られた。稲垣ら²⁾ は円柱の伝熱面の温度分布の可視化を行い、干渉を伴う自然対流熱伝達は自然対流の揺動と自然対流同士の干渉 (加速効果および周囲の低温流体の巻き込み現象) とが密接に関連していると述べている。本研究においても、下プリュームが上円柱の境界層に干渉するために熱伝達の変化が起これらと考えられる。

以下に Fig. 4 に対応した 4 つの例を挙げる。まず、下プリュームが上円柱の左右に進路を変える場合のうち二つの可視化結果を示す。Fig. 7 は $S/D = 0$ に配置した場合の可視化写真である。下プリュームは加熱開始直後鉛直に上昇して上円柱を包むようになった。その後、徐々に変化し (i) に示すように上円柱の右側をまわって上昇した (24 分)。この時、Fig. 4 (a) の上円柱ヌセルト数は極小値を取っている。下プリュームは上円柱壁面に沿うように流れている。(ii) は加熱開始後 79 分の状態である。上円柱の向かって右肩部分の色分布を見てみると、壁面上には高温の温度境界層 (青、黄) がある。その外側に黒い層 (低温) が存在し、さらに外側には赤や黄の層が観察される。これらより、下プリュームがその周囲の流体 (低温) を巻き込みながら、上円柱壁面に到達していることが分かる。このため下プリュームと上円柱壁面との間に低温の層ができ、上円柱壁面に沿って流れる高温流体が排除され、代わりに低温の周囲流体が壁面近傍に流入して流れが重畳するため、上円柱まわりの熱伝達が促進されている。(iii) は加熱開始後 150 分の状態である。時間経過とともに下プリュームは上円柱壁面に徐々に接近している。(iv) は加熱開始後 330 分の状態である。下プリュームと上円柱壁面の間には低温層が見られなくなっており、両者は熱的に接しているため上円柱の熱伝達が低下している。

Fig. 8 は $S/D = 1/12$ に配置した場合の可視化例である。(i) に示すように、加熱開始直後の下プリューム鉛直に上昇し、上円柱が右方にオフセットしているため上円柱の左側を流れた。しかし、その 5 分後、下プリュームは上円柱の下方を横切り上円柱の右側に進路を変えた(ii)。その後、プリュームは(iii)の状態を経て左側に移り(iv)、以降は 400 分経過後も右側に戻らなかった。上円柱が下プリュームに包まれた状態(iii)とほぼ同時刻には、Fig. 3 (b) に示すように円柱の温度が上昇し、Fig. 4 (b) に示すように Nu_u が極小値をとった。

次に、下プリュームが上円柱の左右に進路を変えない例のうち二つの可視化結果を示す。Fig. 9 は $S/D = 1/2$ に配置した場合の可視化例である。(i) は加熱開始後 10 分の状態である。下プリュームは下円柱から鉛直上昇し、

Fig. 7 The visualized plume at the condition of two cylinders heated with the offset ratio of $S/D = 0$ (ISO 100, 30 sec, f 5.6).

Fig. 8 The visualized plume at the condition of two cylinders heated with the offset ratio of $S/D = 1/12$ (ISO 100, 30 sec, f 5.6).

Fig. 9 The visualized plume at the condition of two cylinders heated with the offset ratio of $S/D = 1/2$ (ISO 100, 30 sec, f 5.6).

Fig. 10 The visualized plume at the condition of two cylinders heated with the offset ratio of $S/D = 5/4$ (ISO 100, 30 sec, f 5.6).

上円柱に沿って流れているが、壁面との距離は約 $(1/4)D$ 程離れている。その後、下プリュームは上円柱壁面に徐々に接近した。(ii)は加熱開始後 40 分の状態であり、この時、下プリュームが上円柱壁面に最も接近した。Fig. 4 (c)の 50 分前後における Nu_u の極小値の原因と思われる。その後、両者は離れていった。(iii)は加熱開始後 275 分の状態である。実験中、どの状態においても下プリュームは上円柱の左側を流れた。 $S/D = 1/2$ では、下円柱の淀み点からの鉛直線は上円柱の接線であり、これは上円柱壁面近傍の流れを最も加速する配置と思われる。 Nu_u が極小値となった時刻を除いて、下プリュームは上円柱壁面に対してまっすぐ流入していた。また、同時に、下プリュームが上円柱壁面に周囲低温流体を同伴していた。これらの流れの重畳と低温流体の巻き込みのために上円柱周りの熱伝達が促進されたものと考えられる。

Fig. 10 は $S/D = 5/4$ に配置した場合の可視化例である。(i)は加熱開始後 10 分の状態である。下プリュームはまず、鉛直上昇したが、上プリュームに吸い込まれるように、上プリュームに接近していった。(ii)は加熱開始後 32 分の状態である。上円柱壁面と比較的大きな隙間を保ちつつ、上円柱壁面に沿うように流れた。(iii)は加熱開始後 298 分の状態である。(ii)の状態とほとんど変わっていない。その後、400 分経過後もこの状態であった。実験中、下プリュームは上円柱の左側を流れ、右側を流れることはなかった。また、下プリュームと上円柱の距離も大きい。そのため、両者の干渉が小さくなり、Fig. 4 (d)に示すように上円柱の状態が単一円柱加熱時の状態に近くなったと考えられる。

3.4 プリュームの左右のふれと熱伝達の関係

オフセット量が小さい場合には、下プリュームが上円柱の左右に進路を変更した。オフセット量 $0 \leq S/D \leq 1/4$ において、横軸に S/D 、縦軸に熱伝達が極小になる加熱開始後経過時間をとった図を Fig. 11 に示す。 S/D が大きくなると、熱伝達の極小値をとる時刻も変化しており、一回目の時刻は、 S/D とともにわずかに遅くなる。二回目は S/D の増加とともに早く生じる傾向がある。 $S/D \geq 1/4$ では Nu_u の極小値は 1 回しか現れなかった。また、図には示していないが、加熱量が大きいほど、その時刻は早くなった。

4. 結 言

容器内に設置した 2 本の加熱水平円柱（垂直方向距離は 2 直径）まわりの自然対流熱伝達の、左右に円柱をずらす（下円柱に対して上円柱を右にずらす）ことの影響

Fig. 11 Relation between S/D and time when Nu_u shows sudden decrease.

を調べた。上円柱の熱伝達の変化は下円柱プリュームと上円柱の境界層の干渉によるものと考えられ、熱的接触による抑制と流れの重畳による促進効果によって説明できる。それらの効果には下円柱プリュームと上円柱の位置関係が重要であった。熱伝達測定と感温液晶による可視化を同時に行うことによって以下の知見が得られた。

- (1) 下円柱からのプリュームが、上円柱の左右に進路変更するかどうかは、二本の円柱のオフセット量(左右のズレの大きさ)に関係していた。オフセット量が大きい場合には進路変更はなかった。
- (2) 二本円柱同時加熱の場合、十分長時間後には下プリュームは上円柱の左側を通過した。この時の上円柱のヌセルト数を上円柱単独加熱の場合と比較すると、オフセット量が大きくなるに従い、抑制、ほぼ同等、促進、同等であった。
- (3) オフセットの小さいときには上円柱のヌセルト数の経時変化に顕著な増減が見られた。可視化による観察で、この増減は下プリュームが上円柱を横切って進路を変えることと対応していた。

参考文献

- 1) Akino N., Takase K., Kameoka T., Okada Y., Proc. 3rd. Asian Symp. on Visualization, (1994), 537.
- 2) 稲垣・小森, 機論, 56-530(1990), 3050.
- 3) 栗山・他 3 名, 化学工学論文集, 19-10 (1993), 1074.
- 4) 機械学会編, 伝熱ハンドブック, 丸善, (1993).