容器内に温度成層と循環流がある場合の 加熱水平円柱の自然対流熱伝達*

久保真治^{*1}, 秋野詔夫^{*1}, 田中 周^{*2}
亀岡利行^{*3}, 岡田裕紀^{*4}

Natural Convection Heat Transfer from Heated Horizontal Cylinders with Thermal Stratification and Circular Flow in Enclosure

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

The present study describes an experiment on natural convective heat transfer from horizontal cylinders to silicone oil or water in a rectangular enclosure. By means of the visualization of temperature distributions by a liquid-crystal suspension method and the measurements of temperature by thermo-couples, obvious thermal stratification and circulating flow were observed. The heat transfer coefficient for the cylinders with thermal stratification and circular flow are estimated. In case of those are weak, as fluid temperature which was located appropriately is assigned to reference, relationship between Rayleigh number and Nusselt number agree with the relation of previous works on natural convection. If those are effective, it is difficult to put in order by former equations.

Key Words: Natural Convection, Heat Transfer, Flow Visualization, Horizontal Cylinder, Enclosure, Thermal Stratification, Circular Flow

1. 緒言

加熱体の熱伝達特性を調べるため液体を用いた自然対流熱伝達実験を行う場合、最も単純な境界条件である無限空間に対応するようにすると装置は大きなものになりコストも大きなものになる。実現可能な小規模な容器内で実験を行うと、その熱伝達現象には容器の影響が現れるようになる。加熱体が存在する容器内には、温度成層が形成されたり、循環流が生じたりして複雑な伝熱現象を生じる。そのため、加熱体まわりの熱伝達率を測定する場合には、無限空間に設置された場合とは異なり様々な問題が生じる。それは、温度成層に関しては、加熱体周囲の流体温度に分布が生じるので、平均熱伝達率を評価する際には代表周囲流体温度の測定位置の検討が必要となること、循環流に関しては、強制対流の効果の強さを評価しなければならないことが挙げられる。

本研究は、このようなケースにおいて容器内に設置した加熱体(水平円柱)まわりの熱伝達整理式の確立を目指すもので

ある。容器内にはその大きさや加熱体の設置位置、作動流体の種類等に関係した熱対流現象が生じる。そこで今回はプラントル数の異なる二種類の作動流体(シリコンオイル、水)を使用した。加熱体は、直径の異なる三通りの水平円柱を用い、円柱を一本設置した場合、それより複雑なケースである垂直配置になるように上下に二本並べて設置した場合について層流条件の自然対流熱伝達実験を行った。実験は、まず、熱対流現象を把握するため感温液晶法⁽¹⁾による容器内の流体温度分布と流れの観察を行い、さらに容器内に取り付けた複数の熱電対を用いて容器内流体の深さ方向の温度分布の測定を行った。加熱開始から十分に時間が経過した後には、容器内の温度はほぼ定常になり、そのときの円柱の熱伝達率について、代表周囲流体温度の測定位置の深さを変えて整理、検討を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 図1(a)に実験装置の概略を示す。実験装置は空調のある部屋に置いた。容器内には、加熱用水平円柱を一本、あるいは二本を上下に垂直になるように並べて設置

* 原稿受付 1997年6月2日。

^{*1} 正員, 日本原子力研究所(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4)。

^{*2} 日本原子力研究所。

^{*3} 正員, 東京電機大学(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)。

^{*4} (株)東芝(〒230-0051 横浜市鶴見区鶴見中央4-36-5)。

Fig. 1(a) Schematic diagram of system setup in case of two cylinders installed.

した。また、容器外側に恒温水を循環させることにより側壁を冷却、加熱できる。これによって、円柱を加熱する前の初期流体温度を調節したり、加熱実験中に側壁を等温に保つことができる。また、矩形容器の前後面は等温、上下壁面は、ほぼ断熱条件になっている。容器側面には、温度分布を可視化するためのスリット光源がある。

図 1(b) に示すように加熱円柱は、内部に恒温水を流して加熱できる銅製のパイプである。この加熱円柱は直径 40, 20, 10mm の三種類があり交換して用いた。円柱の長さは 390mm で円柱の長さと同径の比は最低でも 9.6 である。加熱円柱内は二重構造で、外部の恒温装置から供給された恒温水は円柱の内管を通った後、円柱先端で流れが反転し、外管に沿って流れ、円柱表面を加熱した後に、出口から流出し、流量計を経て恒温装置に戻る。

円柱表面には壁面温度計測用の熱電対が数本埋め込まれている。このうち円柱の長さ方向中間部の熱電対の平均 (2 または 3 点) を円柱壁面温度とした。本実験の加熱条件範囲では熱電対を埋め込んだ位置と円柱表面の温度差は $1/100^\circ\text{C}$ 以下である。周囲流体温度は、容器の底から自由表面まで垂直方向一列に並べた熱電対 (23 点、間隔 19.7mm) の列を用いて測定した。この熱電対列は円柱と容器側壁の中間かつ前後面の中間に設置した。

熱電対の熱起電力はスキャナ付きデジタルボルトメータ (分解能 $1\mu\text{V}$) にて測定した。使用した熱電対は JIS 0.4 級 T 型 (銅-コンスタンタン) シース付熱電対 (シース長さ 500mm 、補償導線 約 5m) で、一本一本に対して、 $5\sim 50^\circ\text{C}$ の温度範囲にて校正試験を行った。校正用基準温度計には、水晶温度計 (精度 $\pm 0.05^\circ\text{C}$) を用いた。熱起電力と校正用基準温度計温度の関係から最小二乗法によって直線を当てはめて、各熱電対の校正式を求めた。

Fig. 1(b) Schematic diagram of heating cylinder.

Fig. 1(c) Schematic diagram of enclosure in case of two cylinders installed.

図 1(c) に実験装置における容器の概略図を示す。透明アクリル樹脂製矩形容器 (容器内高さ 470, 幅 300, 奥行き 380mm) 内に一本ないし、上下に垂直な配置になるように二本の加熱円柱を水平に設置した。二本設置した場合の上下円柱の中心間距離 P は、円柱直径 40mm では 2.25 直径, 20mm では 2.25 直径, 円柱直径 10mm では 3 直径の長さに相当する。

加熱円柱設置位置は容器幅方向中央で、深さ方向は、一本円柱の場合はその中心軸が容器底面より約 100mm 、二本円柱の場合は円柱間の中点が底面より約 145mm である。

作動流体は、底面から高さ 425mm まで注入した。液面は上部蓋には接しておらず自由表面である。本容器に注入した作動流体は、シリコンオイル (信越化学製 KF56) あるいは純水である。シリコンオイルの物性値は温度 25°C において、密度 999.26kg/m^3 、比熱 $1578.11\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、熱伝導率 $0.1237\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、粘性率 $0.0155\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、体膨張率 $8.533\times 10^{-4} 1/\text{K}$ 、プラントル数 197 である。純水の物性値は文献 (2) の値を用いた。

本実験では温度分布を可視化するために感温液晶法を用いた。ここでは、温度で色が変わる感温液晶をマイクロカプセル化したもの (日本カプセルプロダクツ社製) を使用した。

シリコンオイルには、粒径 $15 \sim 30 \mu\text{m}$ 、呈色領域 $24.8 \sim 29^\circ\text{C}$ の粒子を、水には、粒径 $60 \mu\text{m}$ 、呈色領域 $19.8 \sim 25^\circ\text{C}$ の粒子を、重量濃度比 $0.02\text{wt}\%$ の割合で混入分散した。そして、容器側部からスリット光を照射して、容器中央の垂直断面の温度分布を観察した。感温液晶は観察角度によって呈色に影響が出るので、実験中は観察角度を一定に保った。また、観察面は 300mm の幅があるため、容器全体の温度分布の観察は約 3m の距離をおき視野角が 6° 以内になるようにした。

2.2 実験手順 実験開始前に、側壁用恒温水槽から恒温水を側壁に流して、容器左右側壁面を等温にした。同時に、スクリー型攪拌器によって作動流体を攪拌して、容器内の温度分布と感温液晶粒子の濃度分布を一様にし、実験開始時の作動流体の初期温度にした。スクリーを停止して、しばらく放置し、容器内の作動流体を静止させた後、円柱用恒温水槽から恒温水を円柱に供給して加熱を開始した。加熱中にも側壁に恒温水を流し続け冷却することによって、長時間後には容器内の全ての温度が定常状態になるようにした。

本実験では、円柱から周囲流体への伝熱量は、円柱加熱用恒温水の出入口温度差とその流量から算出した。その伝熱量と周囲流体用熱電対と円柱表面用熱電対の熱起電力を測定して、熱伝達率を求めた。作動流体の物性値は、膜温度（伝熱面温度と代表周囲流体温度の算術平均）の値を用いた。加熱開始後5分間隔で1000分以上時間が経過するまで、測定データの経時変化をスキャナ付デジタルボルトメーターとパーソナルコンピュータを用いて自動的に記録した。この際に、定常状態で円柱加熱用恒温水の出入口温度差が $3 \sim 4^\circ\text{C}$ になるように流量を決めた。各円柱直径、各加熱条件に対して、この出入口温度差の条件を満たすようにした。以上の伝熱実験と同時に感温液晶法による可視化をして、容器内流体の温度分布や流れ、プリューム挙動についてビデオ撮影、写真撮影を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 容器内に生じる温度成層と循環流 可視化と熱電対による温度測定を併用して、二本同時に加熱する条件で容器内に生じる温度成層の発達の様子と定常状態に達したときの温度成層の分布形状を調べた。加熱開始後、時間とともに周囲流体の温度は上昇し、伝熱量はそれに応じて小さくなってゆくのを実験条件に幅ができた。この実験条件は図5、図6の図中に記す。可視化した容器内温度分布を目視と写真撮影にて観察し、ところ全体的には、加熱円柱からサーマルプリュームが蛇行しながら上昇して自由表面に達する、容器の側壁近傍には下降流ができる、上昇するプリュームに引きずられるように大きな渦ができる、といった特徴が挙げられる。

まず、作動流体にシリコンオイルを用いた場合について述べる。図2に40mm円柱、図3に20mm円柱、図4に10mm円

柱を用いた場合の、容器内温度分布の経時変化を示す。赤から緑そして青色の順に高い温度を示している。円柱の向かって右側よりスリット光が入射しているので円柱の左側には影ができています。図2(a)は加熱開始後20分経った状態である。加熱円柱まわりに温度境界層が形成され、円柱上方にはサーマルプリュームが蛇行しながら上昇している。そして、容器上部から流体温度が上昇していき温度成層が形成される。また、下円柱からのプリュームは上円柱に衝突しているように見える。循環流は左右対称ではなく容器の左部分と右部分に温度差ができています。図2(b)は加熱開始後1時間経った状態である。下円柱より上部にある流体の温度が上昇しており、(a)よりも温度成層が発達している。色変化より、上下円柱間の流体の温度勾配が大きい様子がわかる。上円柱より上部では縦方向横方向ともに温度はほぼ一様に見える。図2(c)は加熱開始後4時間経った状態である。全体の温度は(b)よりも上昇している。下円柱より少し下部は温度が上昇しているが、それより下方の部分はほとんど温度上昇が見られず、初期温度とあまり変わらない。以上の温度成層とプリュームの傾向は、図3(円柱直径20mm)でもほぼ同様である。図4(円柱直径10mm)は温度成層に関しては、図2、図3と同様であるが、下円柱のプリュームは上円柱に衝突しておらず、その右側近傍を通過している。

この写真撮影と同時に測定した容器内の垂直方向の温度分布を図5(a), (b), (c)に示す。プロットした線は、加熱開始後0, 47, 102, 157, 212分……以降55分おきのデータである。図5(a), (b), (c)ともに傾向は同様であった。加熱開始時には温度分布は容器内で一様である。加熱開始後しばらくの間は、垂直方向に温度勾配が大きい。また、プロットの間隔から温度上昇速度が大きいことがわかる。時間の経過とともに、温度勾配は緩くなり、温度上昇も小さくなっていき、ついには定常状態に達する。これは円柱から周囲流体への伝熱量と、流体から容器外部への放熱する伝熱量が釣り合った状態である。このときの温度分布は上円柱よりも上方ではほぼ平坦であり、上円柱から下円柱にかけては勾配はきつ、下円柱の下方ではさらに急峻な分布になっている。(a)(b)(c)の順に定常状態の温度が低いのは円柱直径が異なるため伝熱量の大きさが違うためである。

次に、水を用いた二本同時加熱時の容器内温度分布の測定結果を、円柱直径40, 20, 10mmの場合について、それぞれ図6(a)~(c)に示す。円柱の直径によらず同じ傾向を示しており、作動流体がシリコンオイルである図5(a)~(c)と比較すると、全体的に温度分布は平坦であり、特に上下円柱間の温度勾配もほぼ平坦である。また、可視化観察において容器全体にシリコンオイルより大きな循環流が観察された。

温度勾配が平坦となる理由は、両流体の物性値の違いであると考えられる。水の粘性率はシリコンオイルの1/17程度なので、容器内対流による攪拌効果が大きく、また、水の熱伝導

Fig. 2 Visualized temperature distribution in enclosure with two heating cylinders($d=40\text{mm}$, silicon oil).

Fig. 3 Visualized temperature distribution in enclosure with two heating cylinders($d=20\text{mm}$, silicon oil).

Fig 4 Visualized temperature distribution in enclosure with two heating cylinders($d=10\text{mm}$, silicon oil).

率はシリコンオイルのそれより5倍程度大きいので温度も拡散しやすい。

3.2 循環流と二本円柱間の干渉の影響 可視化によって、二本同時加熱の場合には、下円柱からのプリュームが上円柱に衝突しており、また、容器内には循環流が観察されたので、それらは円柱と伝熱的干渉を起こしていると予想される。それが円柱の熱伝達に、どの程度影響を与えるかの目安として

Fig. 5(a) Time variation for temperature distribution of working fluid ($d=40\text{mm}$, silicon oil). 0, 47, 102, 157, 212minutes.....

Fig. 5(b) Time variation for temperature distribution of fluid ($d=20\text{mm}$, silicon oil).

Fig. 5(c) Time variation for temperature distribution of fluid ($d=10\text{mm}$, silicon oil).

グラフホフ数とレイノルズ数の比 Gr/Re^2 について考える。

まず、下円柱のプリュームが上円柱に及ぼす影響であるが、ラインソースから生じるプリュームの垂直方向速度 u について Gebhart ら⁽³⁾ は、プリュームの中心において

$$u = 4^{\frac{1}{2}} \left(\frac{g\beta Q}{c_p l} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{x}{\mu\rho} \right)^{\frac{1}{5}} C \quad (1)$$

としている。栗山ら⁽⁴⁾ と同様に、次のように置換することに

Fig. 6(a) Time variation for temperature distribution of working fluid ($d=40\text{mm}$, water). 0, 47, 102, 157, 212minutes.....

Fig. 6(b) Time variation for temperature distribution of fluid ($d=20\text{mm}$, water).

Fig. 6(c) Time variation for temperature distribution of fluid ($d=10\text{mm}$, water).

より直径 d の円柱へ適用した.

$$\frac{Q}{l} = q\pi d \quad (2)$$

ここで, g :重力加速度, β :体膨張率, c_p :比熱, μ :粘性率, ρ :密度, Q/l :単位長さあたりの発熱量, q :熱流束, x :線状熱源からの距離, d :円柱直径, $C=0.2505(Pr=100)$, $C=0.4480(Pr=6.7)$ である. x には円柱間距離の代表的な長さとして, $3d$ を与えた. C は, シリコンオイルにはプラントル数 Pr がオーダー的に近い $Pr=100$ の値, 水には $Pr=6.7$ の値を用いた. このようにして求めたブリュームの速度から $Re = ud/\nu$ を計算して, グラフホフ数 $Gr = d^3g\beta\Delta T/\nu^2$ (ここで, ΔT :境膜温度差=円柱壁面温度 - 代表流体温度, ν :動粘性率) と比較した. 本研究にて行った二本円柱加熱時の上円柱の実験条件(長時間経過後)において, Gr/Re^2 はシリコンオイルでは小さいもので64程度, 水では2.6程度であった. Fandら⁽⁵⁾は水平円柱の複合対流熱伝達に関して, $40 < Gr/Re^2$ のときには円柱から周囲流体への熱伝達は自然対流が支配的であると述べており, ほぼシリコンオイルの場合に相当する. また $2 < Gr/Re^2 < 40$ のときには自然対流と強制対流が同程度の強さであると述べており, ほぼ純水の場合に相当する. 亀岡ら⁽⁶⁾は, シリコンオイルを注入した矩形容器内に上下に並べて設置し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, 特に円柱近傍に着目して研究を行った. 上側円柱の熱伝達率に小さい量ではあるが特異な増減(5%程度)が認められ, それは, 下側円柱から立ち上るブリュームの影響が原因であることを可視化観察と伝熱実験を併用して明らかにした. また, 稲垣ら⁽⁷⁾は, 作動流体に水を用いて垂直方向に並べた二本の水平円柱の熱伝達実験を行い, それぞれの円柱から生じる自然対流が干渉(揺動, 加速効果, 周囲流体の巻き込み)し, それが熱伝達率に及ぼす影響は単一円柱と比べて最大25%程度と述べている.

可視化の結果として述べたように, 容器全体に生じる循環流は, 円柱から上昇するブリュームと, 側壁で冷却されることが駆動力であると思われる. 可視化のビデオ画像では, ブリュームに引きずられる流れの方が流速が大きく観察された. ブリュームは容器上方で速度も温度も拡散するので, 循環流の速度はブリュームの上昇速度以下である. 従って, 循環流が円柱の熱伝達に及ぼす影響は, 下円柱ブリュームが上円柱に及ぼす影響と比較して小さいと考えられる.

以上の検討と可視化観察結果より, 本実験における円柱まわりの熱伝達率に関して, シリコンオイルを作動流体に用いた場合には, 下円柱ブリュームの上円柱の熱伝達率に対する干渉と循環流の影響は生じているものの, 小さいと考えられる. 水を作動流体に用いた場合には, 下円柱ブリュームが上円柱に与える影響と循環流の影響があると考えられる.

4. 円柱まわりの熱伝達率の評価

加熱開始後長時間経過すると容器内の温度はほぼ定常状態に達する. この時の円柱から周囲流体(シリコンオイル, 水)への熱伝達率を評価した. 円柱を一本のみ設置して加熱した場合と, 二本を同時に加熱した場合の比較を行った. 加熱実験では, ある初期流体温度に対して, 円柱加熱用恒温水の温度を変化させることによって, 境膜温度差 ΔT を調整した. この ΔT の調整と直径の異なった円柱に取り替えることでレイリー数 $Ra = Pr \cdot Gr$ を変化させた.

まず, 容器内各温度が定常になる経過時間を調べた. 円柱壁面温度と円柱中心深さの流体温度は, 約14時間以降ではほぼ一定値であった. この時間以降を定常状態と考え, この後115分間にとった24点のデータの平均値を評価した. このときの容器内には温度成層がほぼ定常状態で形成されており, 円柱付近の温度勾配の様子は各実験条件ごとに異なっているが, 図5(a), (b), (c)あるいは図6(a), (b), (c)に準じた形状をしていた.

レイリー数に対してヌセルト数 $Nu = hd/\lambda$ (ここで, h :熱伝達率, λ :熱伝導率) を両対数軸上にプロットすると, プロット点はいずれの場合にもほぼ直線上に並んでいた. この結果を, ヌセルト数とレイリー数の指数関係にて整理を行うことにした. その際, 代表流体温度を取る位置を容器の深さ方向に変えて, 次式(3)で

$$Nu = ARa^n \quad (3)$$

フィッティングした. いずれの場合でも相関係数は, 0.99程度であった. 横軸に代表流体温度を取る位置(各円柱中心深さからの垂直方向距離 D を直径で割った値 $=D/d$), 左軸に式(3)中の n , 右軸に式(3)中の A をとって無限空間内での従来の整理式と比較を行った.

まず, 作動流体にシリコンオイルを用いた場合(図7)であるが, 一本円柱加熱の場合, 円柱中心より一直径上より上方に代表流体温度をとると n はほぼ $1/4$ であり, A も McAdams⁽⁸⁾ ($A=0.53$, $n=0.25$, $10^3 < Ra < 10^9$) と同程度の値になった. これは我々の以前の結果⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を裏付けている. n と A は, 代表流体温度をとる深さが円柱上端より上部だとほぼ一定値であり, 円柱上端より下になると McAdams の値から離れる傾向がある. 円柱下端より下になると McAdams の値とは大きく異なってしまう. これは, 以下の理由によると思われる. 作動流体がシリコンオイルなので循環流の強さが小さく円柱まわりへの影響が小さい. 円柱から周囲流体への熱伝達は, 主としてブリュームによって円柱から円柱上方の流体へ移流することによるため, 円柱上方の適当な位置に代表周囲流体温度を選ぶと従来の整理式と一致したものと思われる.

二本同時加熱の場合には, 上円柱は一本加熱とほぼ同じ傾向を示しており, 円柱上端より上方に代表流体温度をとると

Fig. 7 Plots for A and n in eq.(3) of reference fluid temperature location (distance from cylinder) in case of using silicon oil.

McAdams の値と同程度になる。これは、図 5(a)~(c) と一本円柱加熱の場合の上円柱より上方の温度分布はほぼ同じ分布形状をしており、それは、長時間経過後には深さによらず一定値であるためである。下円柱も一本加熱のケースと同じ傾向であるものの、 n , A とともに D/d が 2~3 にかけてステップ状に変化している。これは、この位置には上円柱があり、図 5(a), (b), (c) を見ると温度分布が急に変化している。この位置より上方の温度は下円柱の熱伝達には無関係であるので、ここより上方に代表周囲流体温度を選ぶことは適当ではない。

作動流体に水を用いた場合 (図 8) について述べる。一本円柱加熱の場合では、円柱中心から一直径上方より上に代表流体温度をとると、 n はおよそ 1/4 であり、 A は McAdams と比較して若干大きい値となった。これは、一本加熱では循環流の影響があるものの、総加熱量が小さいため円柱まわりへの影響が小さいためと考えられる。 A と n は、代表流体温度をとる深さが円柱上端より上だとほぼ一定値であり、円柱上端より下になると McAdams の値から離れる傾向がある。円柱下端より下になると McAdams の値とは大きく異なってしまう。

次に、二本同時加熱の場合について述べる。上円柱に関しては D/d に依らず、 n は一本円柱のそれより小さく、 A は一本円柱のそれより大きな値である。下円柱に関しては、 n , A とともにシリコンオイルのそれと同様の傾向であるが、 n は、代表流体温度をとる位置が円柱中心より上だと一本円柱のそれより大きな値を示し、 A は、円柱上方 $0 < D/d < 2$ で McAdams とほぼ同等になり、 D/d が 2 より大きくなると右下がりになっている。このように両円柱ともに n , A の傾向が一本円柱加熱の場合と異なったのは、容器内循環流、下ブリュームと上円柱の干渉の影響だと思われる。

山果ら⁽¹¹⁾と藤井⁽¹²⁾は周囲流体温度に勾配がある場合の

Fig. 8 Plots for A and n in eq.(3) of reference fluid temperature location (distance from cylinder) in case of using water.

垂直伝熱面の自然対流熱伝達において、伝熱面の高さの比で下端から 0.25 程度の周囲流体の温度を代表流体温度に採用すると、周囲流体が温度一定の場合と比較可能になると述べている。我々の結果においても、円柱下端から 0.1 ~ 0.2d 程度の高さに代表流体温度を取ると、上円柱、下円柱、一本円柱の熱伝達の三者の整理式はほぼ一致したが、従来の無限空間内での整理式 (例えば上記の McAdams の式) とは一致しなかった。これは、垂直平板と水平円柱といった伝熱面の形状によるものと考えられる。

以上の結果より、シリコンオイルの場合、純水の場合ともに各円柱中心から一直径程度上方に代表流体温度を採ると、熱伝達率が代表流体温度の深さ方向位置に影響を受け難くなるので、実用であると考えられる。そこで、上下円柱ともにそれぞれの円柱中心深さの一直径上方の流体温度を代表周囲流体温度、円柱直径を代表長さにして、実験結果を無次元数に整理したものを図 9 に示す。横軸はレイリー数、縦軸はヌセルト数である。図は上から、一本のみ加熱円柱を設置して作動流体にシリコンオイルを使用、二本同時加熱でシリコンオイル使用、一本円柱加熱で水を使用、二本同時加熱で水を使用した場合である。一本加熱の場合は四角、二本同時加熱の場合には上円柱は黒丸、下円柱は白丸で示してある。

まず、作動流体にシリコンオイルを用いた場合では、一本円柱加熱したとき (図 9a) には、ヌセルト数は McAdams より 13~31% ほど大きな値である。二本円柱同時加熱の場合 (図 9b) では、上下円柱とも一本円柱とほぼ同程度を示したが、下円柱のヌセルト数は一本のそれを少々上回った。これの理由として、作動流体がシリコンオイルのときには、循環流や上円柱と下円柱からのブリュームの干渉は小さいものの、容器内の温度成層によって円柱まわりには温度分布が生じており、かつ、容器内の循環流によって周囲流体用熱電対に高温流体

Fig. 9 Relationships between Ra and Nu.

が移流し熱電対の測定値を上昇させていることが考えられる。これらから、一本円柱加熱の熱伝達と二本円柱加熱時の上下円柱の熱伝達は一つのライン上にプロットできるので、本伝熱現象は式(3)の形で整理可能なものの、境膜温度差の測定に任意性が生じるので上下各円柱の熱伝達率の絶対値を正確に比較するのは難しいことが分かる。

作動流体に純水を用いた場合であるが、一本円柱加熱の場合(図9c)には、ヌセルト数はMcAdamsより14~21%ほど大きな値である。二本円柱同時加熱の場合(図9d)には、上円柱のヌセルト数は一本円柱のそれと比較して、高レイリー数域で一致しているのに対して低レイリー数域では、一本円柱のヌセルト数より大きく、全体としてレイリー数に対するヌセルト数の勾配が小さい。これには、以下の理由が考えられる。シリコンオイルの可視化では加熱円柱が10mmのケース(図4c)では下プルームが上円柱に衝突していなかった。円柱が10mmの時には水の場合も同様であるとすれば、下円柱からのプルームが上円柱まわりの流れに重畳して上円柱の熱伝達を促進⁽⁶⁾し、また、循環流の影響によって、 n が1/4より小さく(レイリー数に鈍感)になる。下円柱については、一

本円柱よりヌセルト数が大きく、傾向が異なった。これは、容器内の温度成層によって円柱周りには温度分布が生じており、かつ、容器内の循環流によって周囲流体用熱電対に高温流体が移流し熱電対の測定値を上昇させており、境膜温度差を小さく評価したため考えられる。このように、一本円柱、二本加熱時の上下円柱がそれぞれ異なった傾向を示したことから、本容器内の伝熱実験において純水を作動流体に用いた場合には、伝熱現象を式(3)で整理するのは困難であると言える。

5. 結言

矩形容器内に設置した加熱水平円柱まわりの自然対流について調べた。容器内の作動流体温度分布測定と熱流動状態の可視化観察によって、容器内には、温度成層、循環流、加熱体同士の干渉が存在することが分かった。その雰囲気中にある加熱円柱から周囲流体への熱伝達率を評価する際に、代表周囲流体温度の測定位置(深さ)の熱伝達整理式への影響を調べた。循環流や加熱体の干渉が小さい場合には、容器内に温度成層があっても適当な代表流体温度を選べば、従来の無限空間内における自然対流熱伝達の整理式を適用できることが明かとなった。それらが大きい場合には、現象に対して自然対流熱伝達の整理式を適用することは難しかった。

参考文献

- (1) 秋野詔夫, エレクトロニクス, 11(1993), 30.
- (2) 日本機械学会編, 伝熱ハンドブック, (1993), 390, 丸善.
- (3) Gebhart, B., Pera, L. and Schorr, A. W., *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 13(1970), 161-171.
- (4) 栗山雅文・李相一・原田英二・今野宏卓, 化学工学論文集, 19-6(1993), 1074-1080.
- (5) Fand, R. M. and Keswani, K. K., *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 16(1973), 1175-1191.
- (6) 亀岡利行・岡田裕紀・久保真治・秋野詔夫・田中 周・高瀬和之, 水平方向にズレのある二本の加熱円柱の自然対流の干渉効果, 可視化情報, Vol.18. No.68(1998), 46-52.
- (7) 稲垣照美・小森勝夫, 機論, B56-530(1990), 3050-3055.
- (8) McADAMS, HEAT TRANSMISSION, (1954), 177, KOGAKUSHA.
- (9) Akino, N., Takase, K., Kameoka, T. and Okada Y., *Proc. 3rd. Asian Symp. on Visualization*, (1994), 537-542.

- (10) 亀岡利行・岡田裕紀・秋野詔夫・高瀬和之・久保真治, (12) 藤井 哲, 機論, 25-152(昭 34), 280-286.
可視化情報, Vol.15 Suppl. No.1(1995), 241-244.
- (11) 山県 清・川野通彦, 機論, 24-144(昭 33), 547-552.
-