

平面と曲面からなる二次元柱群の熱伝達

土田 一・相場洋介*・相場眞也**

Heat Transfer around Two-Dimensional Bluff Bodies Consisting of a Plane Surface and Curved One

Hajime TSUCHIDA, Yousuke AIBA* and Shinya AIBA**

(2003年12月9日受理)

In this paper, the heat transfer characteristics around the cylinder are discussed. Two Test Pieces whose sides are planed at angle of $\theta_c = 53$ deg, are installed at the interval of $c/d = 1.15$. The air flows along the side of Test Pieces. In the range of Reynolds number $Re = 1.41 \times 10^4 \sim 6.15 \times 10^4$. The results of this experiment reveals that at $Re = 6.15 \times 10^4$, the largest numerical value is got, and that the rate of the heat transfer a of the second Test Piece in the use of two Test Pieces is larger than in the use of single body.

1. 緒言

熱交換器とは、ある流体から他の流体へ熱移動させる装置であり、産業、民生の各分野にわたって、加熱、予熱、蒸発、凝縮、冷却などの操作に広く利用されている⁽¹⁾。特に管型熱交換器では、円管が使用される場合がほとんどであるが、性能向上のためには熱伝達に優れることは当然であるが流動抵抗が円管のそれよりも低いことが要求される。

省エネルギー、エネルギーの有効利用という時代の要請により、熱交換器の高性能化及びコンパクト化に関してこれまで種々の試みがなされている⁽²⁾⁽³⁾。しかしながら、特に円管を用いてコンパクト化を想定した研究では、そのピッチ比が1.2以下で急激に伝熱性能が低下することが報告されている⁽³⁾。このような観点から円柱を切断角 $\theta_c = 53^\circ$ で削りだした、平面と曲面からなる単独二次元柱を迎え角 $\theta = 90^\circ$ とし、空気流に対して直交させた場合、熱伝達特性は、流速の適応範囲があるものの、平均熱伝達率が円柱の場合より、最大33%程度大きくなることが示されている⁽²⁾。また、単独二次元柱まわりの局所熱伝達が、流速によらず極めて少なく平均値からの偏差は最大±15%であることも明らかになっている。さらに、他の迎え角 θ に比較し背圧と抗力係数が最小(円柱の60%程度)となり、しかも剥離渦の

放出に伴う振動が抑制されることがわかっている。

このような背景により、本研究では、新たな伝熱管として提案されている前述の平面と曲面からなる二次元柱を、空気流に対して迎え角 $\theta = 90^\circ$ で流れ方向と平行に2本設置し、熱交換器のコンパクト化という観点から、極めて狭い間隔 ($c/d = 1.15$) に限定し、流速を変化させるとともに、二次元柱群の熱伝達特性を流れ特性との関連で明らかにするための実験的研究である。

記号表記

- C_p : 圧力係数 = $(p - p_\infty)/(0.5 \cdot \rho \cdot U_\infty^2)$
- C_D : 抗力係数 = $D/(0.5 \cdot l \cdot d \cdot \rho \cdot U_\infty^2)$
- c : 軸間距離 [mm]
- D : 抗力
- d : 二次元柱の円弧間距離 [mm]
- l : 二次元柱のスパン方向の長さ [mm]
- Nu : ヌセルト数 = $\alpha \cdot d/\lambda$
- Re : レイノルズ数 = $U_\infty \cdot d/\nu$
- s : 二次元柱の半円周 = 43.4 [mm]
- S : 伝熱面積 [m²]
- T.P. : テストピース
- U_∞ : 主流速度 [m/s]
- U : 時間平均速度 [m/s]
- $\sqrt{u'^2}$: rms 速度変動
- x : 上側曲面中央からの円周方向の距離 [mm]
- X : 主流方向の距離 [mm]

* 秋田工業高等専門学校専攻科学生

** 秋田高専名誉教授

- Y : 主流と直角方向の距離 [mm]
- α : 熱伝達率 [W/m²K]
- θ : 迎え角 [°]
- θ_c : 切断角 [°]
- ν, λ, ρ : 空気の動粘性係数, 熱伝導率, 密度

2. 実験装置及び実験方法

長さ約1000mm, 高さ320mm, 幅214mmの矩形断面を測定部とする吹き出し形風洞を用い, 測定部中央に図1に示すような切断角 $\theta_c = 53^\circ$ で削りだした二次元柱を迎え角 $\theta = 90^\circ$ で主流方向に2本並べて設置し(以後, 上流側を1st T.P., 下流側を2nd T.P.と呼称する), 熱伝達及び流れ場の測定を行った. なお, 測定部における主流乱れ強さは, 最大0.7%程度である.

熱伝達測定用二次元柱は図2に示すように, ベークライトと同様の熱伝導率をもつポリアセタール製で, 直径0.1mmのCu-Co熱電対を平面部は3.0mm間隔, 曲面部は2.4mm間隔で合計32本配置し, 厚さ $20\mu\text{m}$ のステンレス箔の裏に固定されている. ステンレス箔の幅は20mmで, ポリアセタールに7巻きし, 直流電源を用い通電加熱し伝熱面熱流束一定のもとで伝熱面表面温度の測定を行った.

また, 熱伝達特性を流れ特性との関連で考察するため速度, 乱れ強さ及び圧力分布の測定を行った. 速度及び乱れ強さは直線化回路内蔵の定温度型熱線流速計(KANOMAX製:熱線は直径 $5\mu\text{m}$ のタングステン線)を用い, 二次元柱は非加熱の状態で測定を行った. 圧力分布については熱伝達測定用二次元柱と同一寸法のもを製作し, 表面温度の測定位置と同一となるように, 0.6mmの圧力孔を16個あけ, 角度を変えることにより, 32箇所の圧力を測定した. また, これらの結果から抗力係数を求めた. ここで, 1st T.P.の中心を座標の原点とし, それぞれの二次元柱の上流側を+, 下流側を-としている.

実験は二次元柱の円弧間距離 d を代表長さとした Re 数を $1.41 \times 10^4 \sim 6.15 \times 10^4$ (主流速度 $U_\infty = 7 \sim 32\text{m/s}$)について, 軸間距離 c/d を1.15に限定して行った. なお, 二次元柱のブロックage比は0.094, アスペクト比は7.13である.

さらに, 流れ模様を観察するため回流水槽を製作し, アルミ粉を用いた表面浮遊法による可視化も行った.

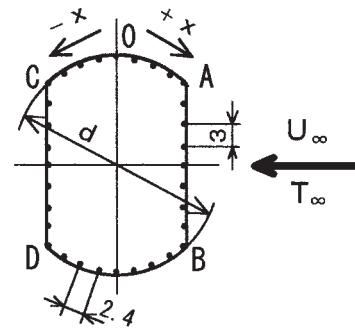


図1 座標系

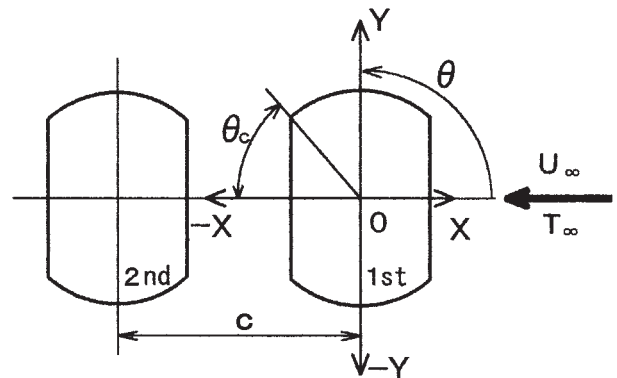


図2 熱伝達率および圧力測定用二次元柱

3. 実験結果及び考察

レイノルズ数 Re (主流速度 U_∞)の変化による熱伝達特性がどのように変化するか, 以下, 流れの可視化及び局所熱伝達率について記述し, 次に速度, 乱れ強さ, 圧力分布及び抗力係数の挙動, さらに平均熱伝達率について述べる.

3.1 流れの可視化

熱伝達特性を流れ特性との関連で把握するため, 自作した回流水槽を用い, アルミ粉をトレーサーとした表面浮遊法による流れの可視化を行った. その一例を図3に示す. 実験条件は $Re = 0.4 \times 10^4$ ($U_\infty = 0.13\text{m/s}$), $c/d = 1.15$, シャッタースピードは0.3秒である. $Re = 0.4 \times 10^4$ と熱伝達率測定の場合とは異なるが, 流れ模様が吹き出し型風洞を用いて行った油膜法で得られた結果($c/d = 1.15$, $Re = 1.41 \times 10^4 \sim 4.97 \times 10^4$)とほぼ同様であることから, 以下に得られた結果を述べる.

1st T.P.に衝突した主流は1st T.P.上下曲面に沿うように流れ, 曲面から剥離した流れは2nd

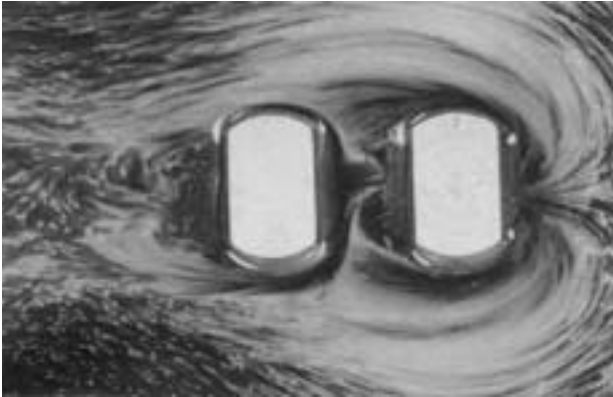


図3 表面浮遊法による流れの可視化
($Re = 0.4 \times 10^4$, $c/d = 1.15$, シャッタースピード0.3秒)

T.P. 前面に衝突し 1st T.P. に巻き込まれるように流れ T.P. 間では淀んだ流れとなっている。また、主流は 1st T.P. 上下曲面に沿うように流れ、2nd T.P. 背面へ巻き込まれるように流れた後、2nd T.P. 背面へ再付着する流れと、後流側に流れるものに分かれる。

3.2 局所熱伝達率

図4及び図5は、 Re 数をパラメータにとり 1st T.P. 及び 2nd T.P. の局所熱伝達率を示したものである。縦軸は局所熱伝達率 α 、横軸は測定位置を表し、A-B間、C-D間はそれぞれ上流側平面部及び下流側平面部、A-C間、B-D間はそれぞれ上側曲面部及び下側曲面部を示している。なお、比較のため図4には単独柱の結果も併せて示した。

図4は 1st T.P. の局所熱伝達率 α を示したもので、 Re 数によって分布形状が異なっている。 $Re \leq 3.90 \times 10^4$ では 1st T.P. 中心部より上流側において α の分布形状に上下の対象性が見られ、C-D間に比較し A-B間の α が大きくなっている。また、下流側に比較し上流側の α が大きく、特に A、B各コーナーで顕著となっている。これは、流れの可視化及び後述する圧力分布から、主流が 1st T.P. に衝突しその流速が主流よりも大きくなる増速効果によるものと考えられる。また、A-C間及びB-D間の曲面部では、円弧に沿って下流側へ向かうに従い α が低下している。この場合、曲面部に沿う流れが層流で、その境界層厚さの増加によるものと考えられる。 $Re \geq 4.97 \times 10^4$ では、C-D間に若干 α の低下する位置がみられるものの、A-B間に比較し α の値に大きな差異は見られない。しかし、 $Re \leq 3.90 \times 10^4$ に比較し A-C間及びB-D間において α の変化が著しく、特に $x/s = 0$ 近傍で最大値を示

し、その分布も非対称となっている。この原因については現段階では不明であるが、 $x/s = 0$ 近傍すなわち上側曲面部で α が最大となることは、この流速以上では層流境界層が乱流境界層へと遷移していると考えられ、 $x/s < 0$ 、すなわち下流側へ行くほどその厚さが増加することにより、 α が徐々に低下するものと考えられる。

なお、単独柱の場合と比較すると、いずれの Re 数においても中心部より上流側において、 α に大きな差は見られないが、中心部より下流側においては、単独柱の α が高くなっている。これは単独柱の場合、剥離した流れが背面部に再付着することにより中心部より下流側の α が高くなるものと考えられるが、本実験の場合、後述するが下流側に二次元柱が存在することで二次元柱間の流速が低下し、単独柱の場合とは背面部近傍の流れ特性がかなり異なっているためと考えられる。

図5は同様に 2nd T.P. の局所熱伝達率を示した

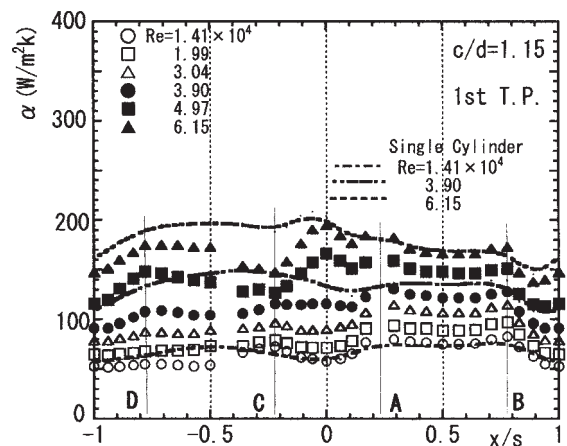


図4 1st T.P. の局所熱伝達率 ($c/d = 1.15$)

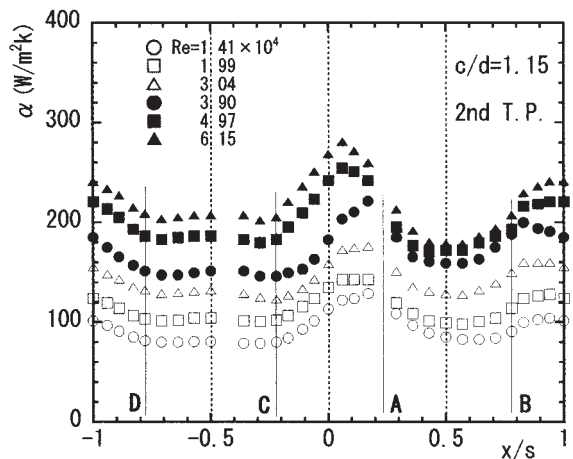


図5 2st T.P. の局所熱伝達率 ($c/d = 1.15$)

もので、いずれの Re 数においてもその分布形状はほぼ同様なものとなっている。上流側においては $x/s = 0.5$ 近傍で α が最小となり、A、B コーナに近づくにつれ α が徐々に増加し、上下曲面部で α のピーク値が存在している。特に、Re 数の増加に従い α のピーク値が下流側へ移動していることがわかる。これは、Re 数の増加とともに 2nd T.P. へ衝突する主流もしくは 1st T.P. から離した流れが下流側へ移動しているためと考えられる。また、下流側においてはいずれの Re 数においても上下曲面部では下流側ほど α は低下し、C-D 間では α の値にほとんど差異は見られない。なお、 $Re \geq 4.97 \times 10^4$ では、上流側と下流側の α に大きな差は見られないが、 $Re \geq 6.15 \times 10^4$ では下流側の α が上流側に比較し大きくなっている。

3.3 速度分布と乱れ強さ分布

前述の局所熱伝達率を流れ特性との関連で考察するため、速度及び乱れ強さの測定を行った。本報告では特に二次元柱間の流れ特性に注目し、1st T.P. 下流側及び 2nd T.P. 上流側近傍の速度、乱れ強さの測定結果について以下記述する。

図 6 及び図 7 は $Re = 1.41 \times 10^4$ の場合について、流れ方向の測定位置 $X/d = -0.40$ (1st T.P. 背面近傍) と $X/d = -0.73$ (2nd T.P. 前面近傍) で得られた速度及び乱れ強さ分布を示したものである。ここで、速度分布の縦軸は流れと直角方向に対する測定位置を表す Y/d 、横軸は各位置における流速と主流速度の比を表す U/U_∞ 、乱れ強さ分布の横軸は測定された乱れ強さと主流速度の比を%で表している。図 6 に示す速度分布において、 $X/d =$

-0.40 , $X/d = -0.73$ の場合、その分布形状はほぼ同様となっており、 $Y/d = \pm 1.5 \sim 1.0$ では主流に比較し若干の増速がみられる。また、 $Y/d = \pm 0.9 \sim 0.5$ において速度急激に減少し、二次元柱間で大きな速度欠損生じている。すなわち、 $X/d = -0.40$ では主流の約 15%、 $X/d = -0.73$ の約 35% となり緩やかな流れになっていることを示している。一方、乱れ強さ分布 (図 7) において、1st T.P. 下流側平面部及び 2nd T.P. 上流側平面部近傍 ($Y/d = \pm 0.7 \sim 0$) では、それぞれ上下のコーナ近傍の平面部で乱れ強さのピーク値が存在している。特に T.P. 上側で顕著であり、最大で約 23% となっている。しかし、平面部の中心近傍に近づくにしたがい乱れ強さは減少し、1st T.P. 背面で約 6%、2nd T.P. 前面で約 10% となっている。このことは先に示した図 5 における同 Re 数での α の分布とほぼ一致している。すなわち、1st T.P. の C-D 間では点 C のコーナ近傍で α が大きく、この位置に相当する $Y/d = 0.7$ で乱れ強さが最大となっていること、また、2nd T.P. の A-B 間では点 A のコーナ近傍でやはり α の増加が著しく、乱れ強さも $Y/d = 0.7$ 近傍で最大となっている。

図 8 及び図 9 は同様に $Re = 6.15 \times 10^4$ の場合の速度分布及び乱れ強さ分布を示したものである。いずれの場合も $Re = 1.41 \times 10^4$ とほぼ同様の傾向となっているが、速度分布 (図 8) では Re 数の増加に伴い、二次元柱間の速度がいずれの測定位置においても主流の 20~50% 程度まで回復している。しかし、図 9 の乱れ強さ分布においては $Re = 1.41 \times 10^4$ の場合に比較しさほど乱れ強さは増加せず、ほぼ同程度

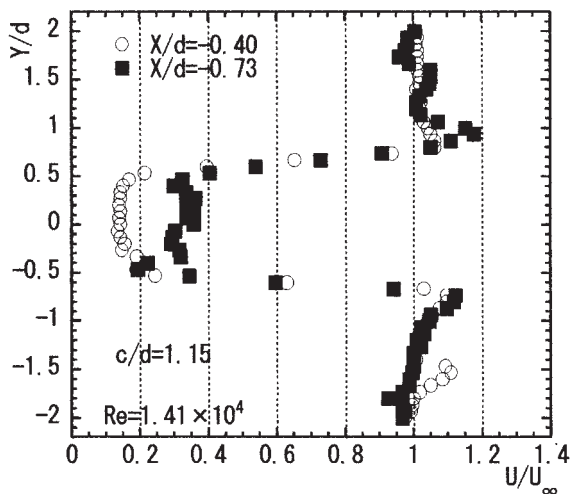


図 6 T.P. 間の速度分布

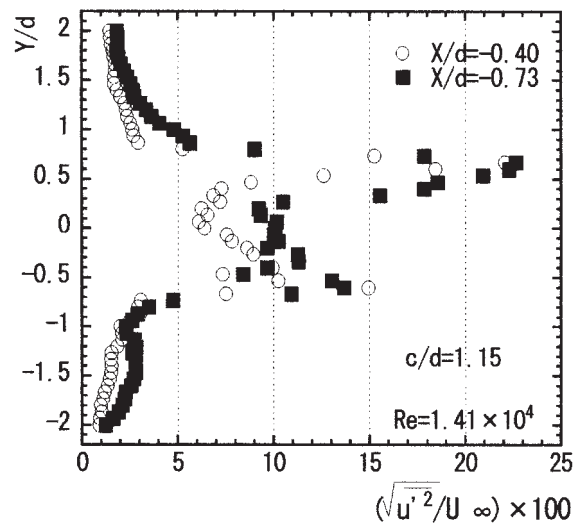


図 7 T.P. 間の乱れ強さ分布

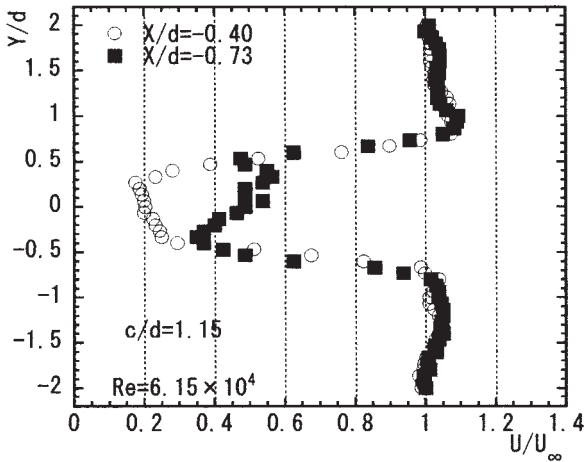


図8 T.P.間の速度分布

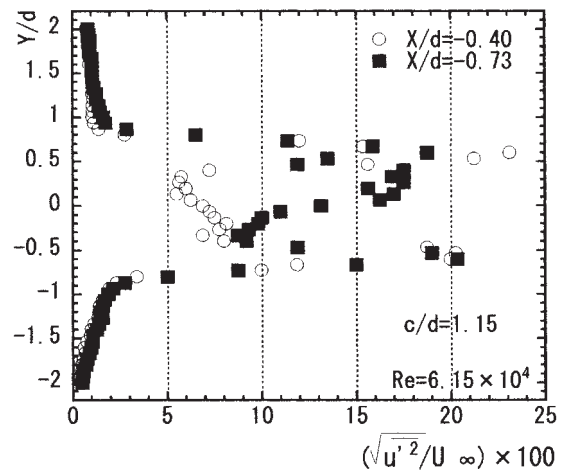


図9 T.P.間の乱れ強さ分布

となっている。このことから、二次元柱間に面するそれぞれの平面部の熱伝達は、Re数が大きい場合、乱れ強さに比較し流速の増加による影響が支配的であると考えられる。

3.4 圧力分布

図10及び図11は、局所熱伝達率の分布に対応する圧力分布を $Re = 1.41 \times 10^4 \sim 6.15 \times 10^4$ の場合について示したものである。図10は圧力測定用 T.P. を 1st T.P. として得られた結果を示したもので、1st T.P. 前面では Re 数によらずほぼ一定の C_p を示しているが、A、B 各コーナ近傍で C_p は急激に減少し、著しく小さい値を示している。しかし、 $Re = 1.41 \times 10^4$ 及び 1.99×10^4 の場合、 C_p の減少は比較的小さいものとなっているこのことは、3.2で述べたように A、B 各コーナで α のピーク値が存在する

ことは、これらの C_p の挙動からもこの付近の流速が主流よりも大きいことが要因であると考えられる。その後上下曲面では下流側へ向かうほど C_p は回復し、背面ではほぼ同一の値を示している。

同様に図11は 2nd T.P. の結果を示したもので、全体的にみると、1st T.P. に比較し上流側及び下流側において C_p に大きな変動は見られないが、上流側に比較し下流側の C_p が低くなっている。

3.5 抗力係数

図12に圧力分布 C_p より求めた 1st T.P. 及び 2nd T.P. の抗力係数 C_D の結果を示した。1st T.P. においては Re 数の変化による C_D には大きな変化は見られず、一行管群における第一円柱の結果⁽³⁾と比較しても大きな差異は見られない。また、図示はしていないが単独二次元柱の結果ともほぼ同一の値となっ

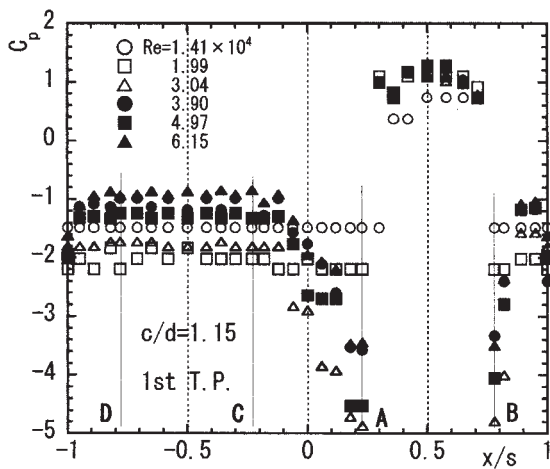


図10 1st T.P.の圧力分布

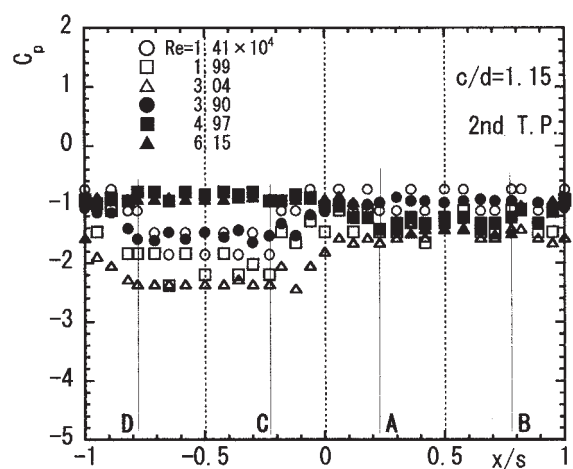


図11 2nd T.P.の圧力分布

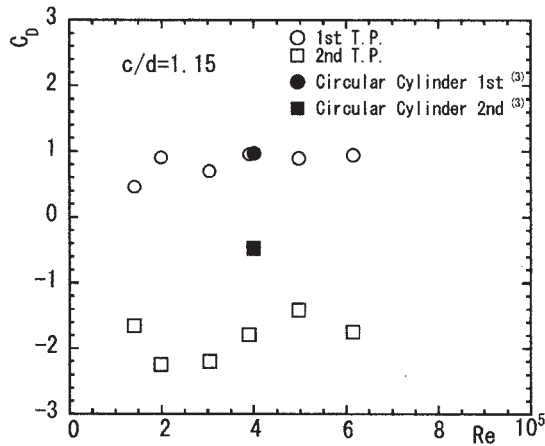


図12 1st T.P. 及び 2nd T.P. の抗力係数

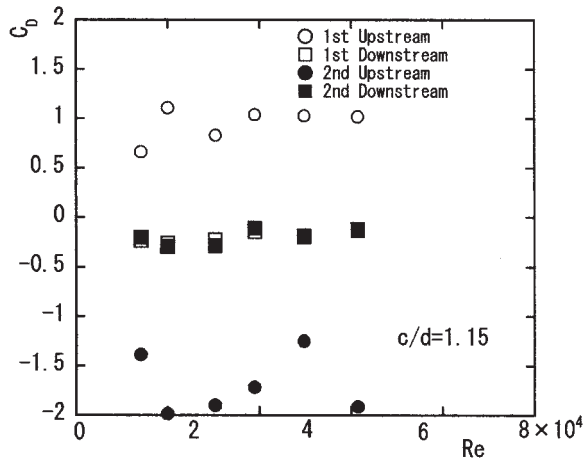


図13 上流側及び下流側の抗力係数

ている。2nd T.P. においては $Re = 1.41 \times 10^4$ では 1st T.P. に比較し著しく小さい値を示し、 $Re = 1.99 \times 10^4$ では最小値を示している。その後、 $Re = 4.97 \times 10^4$ まで C_D は緩やかに増加した後、 $Re = 6.15 \times 10^4$ で再び減少する傾向がみられる。このように、2nd T.P. の C_D にはバラつきがみられることから、今後さらに検討が必要であると考えられる。しかし、一行管群の第二円柱や 1st T.P. に比較し、 C_D の値が著しく小さい値となっている。

また、図13に 1st T.P. 及び 2nd T.P. の上流側、下流側の抗力係数 C_D の結果を示した。先に示した圧力分布からもわかるように 1st T.P. においては上流側の C_D が大きくなっており、2nd T.P. においては下流側の C_D が大きくなっている。また、1st T.P. の下流側と 2nd T.P. 下流側の C_D はほぼ同一となっている。なお、2nd T.P. 下流側では前述のごとく Re 数によりバラつきがみられ、2nd T.P. の下流側においては複雑な流れとなっていることが

考えられる。

3.6 平均熱伝達

3.2 節で示したように局所熱伝達率分布の変化が円柱群に比較し Re 数によらずかなり小さいものとなっていることから、ここでは平均熱伝達率特性について以下述べる。

図14及び図15はそれぞれ二次元柱平面部と曲面部における平均熱伝達を Nu_m の変化を示したもので、いずれの場合も $Nu_m \propto Re^n$ なる関係が成り立つことを示している。図14は二次元柱平面部の Nu_m を示したもので、1st T.P. では $Re \leq 3.90 \times 10^4$ において上流側平面部 (1st F.F.) で Re 数のべき指数 $n = 0.51$ であるのに対し、下流側平面部 (1st R.F.) では $n = 0.41$ とべき指数 n が小さい値となっている。また、 $Re \geq 4.97 \times 10^4$ においては 1st F.F. では $n = 0.95$ 、1st R.F. で $n = 0.68$ となっている。

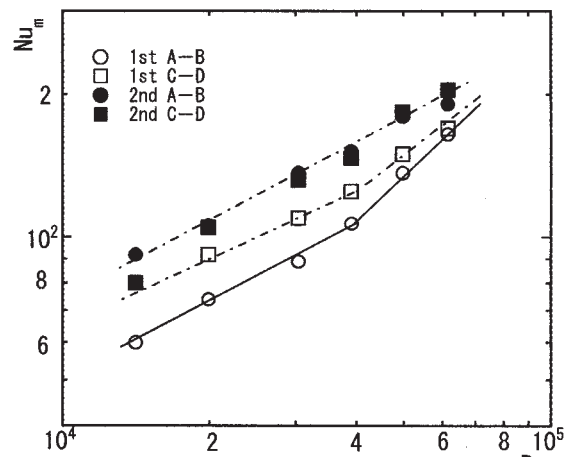


図14 平面部の平均熱伝達

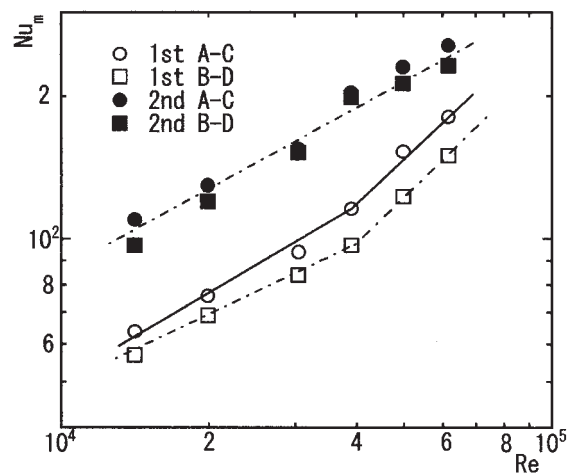


図15 曲面部の平均熱伝達

このことから、1st F.F. では1st R.F. に比較し Re 数に対する依存性が高いことが示された。さらに、 $Re \approx 4.0 \times 10^4$ 近傍でそれぞれのべき指数 n が変化していることから、前述したように1st T.P. 付近の流動状況が変化していることが考えられるが、現段階ではその詳細は不明であり今後の検討課題である。なお、2nd T.P. の場合、いずれの平面部においても同一 Re 数での Nu_m にほとんど差異はなく、 $Nu_m \propto Re^{0.52}$ なる関係で示され、Re 数による依存性はほとんどみられない。

図15は二次元柱曲面部の Nu_m を示したものであり、図14に示した平面部の Nu_m とほぼ同様の傾向を示している。1st T.P. の $Re \leq 3.90 \times 10^4$ では、A-C 間（上側曲面部）及び B-D 間（下側曲面部）で $Nu_m \propto Re^{0.50}$ であるのに対し、 $Re \geq 4.97 \times 10^4$ では Re 数のべき指数 n が0.95と増加している。この場合、 $Re \leq 3.90 \times 10^4$ においては曲面部で層流境界層が、 $Re \leq 4.97 \times 10^4$ では乱流境界層がそれぞれ形成されていることによるものと考えられる。また、曲面部で Nu_m に若干の差異が生じているが、これは図4に示した局所熱伝達率の分布から、1st T.P. 周りの流れが偏っていることが要因であると考えられる。なお、2nd T.P. の場合、平面部と同様にいずれの曲面部においても Nu_m の値に大きな差異はみられず、 $Nu_m \propto Re^{0.60}$ として示される。

図16はそれぞれの二次元柱の平均熱伝達について示したものであり、比較のため単独二次元柱と相場らの一行管群で得られた結果⁽³⁾も示してある。1st T.P. において $Re \leq 3.90 \times 10^4$ では、 $Nu_{m1} = 0.665 Re^{0.48}$ 、 $Re \geq 4.97 \times 10^4$ では、 $Nu_{m1} = 0.0077 Re^{0.91}$ として求められる。2nd T.P. においては $Nu_{m2} = 0.281 Re^{0.61}$ としてまとめられ、1st T.P. に比較し従

来の結果⁽⁴⁾と同様に熱伝達が向上している。また、同一軸間距離 $c/d = 1.15$ における相場らの結果⁽³⁾ ($Re = 4.1 \times 10^4$) と比較し、1st T.P. ではほぼ同一の値を示しているが、2nd T.P. においては約1.4倍の伝熱が促進される結果が得られた。

4. 結言

平面と曲面からなる二次元柱を、空気流に対して迎え角 $\theta = 90^\circ$ で流れ方向と平行に2本設置し、極めて狭い間隔 ($c/d = 1.15$) に限定し、レイノルズ数 Re を変化させ、二次元柱群の熱伝達特性を流れ特性との関連で明らかにするための実験的研究を行った。本研究の実験範囲内で得られた結果を以下に示す。

(1) Re 数によらず1st T.P. に比較し2nd T.P. の平均熱伝達が大きな値を示し、さらには、同一軸間距離 $c/d = 1.15$ における従来の結果と比較し、1st T.P. ではほぼ同一の値を示しているが、2nd T.P. においては約1.4倍の伝熱が促進される結果が得られた。

(2) 2nd T.P. において、上下曲面の中心近傍で熱伝達率のピーク値が存在し、特に上側曲面の中心近傍で熱伝達率は最大となる。

(3) 抗力係数 C_D において、一行管群の場合と比較し1st T.P. ではほぼ同一となるが、2nd T.P. ではおよそ三倍程度小さい C_D 値が得られた。

(4) $Re = 4.0 \times 10^4$ 近傍を境とし、熱伝達特性および流れ特性に変化が見られるため、今後明らかにする必要がある。

参考文献

- (1) 関信弘一編・他9名，伝熱工学（1988），森北出版
- (2) 相場眞也・高橋洋輔，機論B，65-638，（1999），3406-3413
- (3) 相場眞也・ほか2名，機論B，46-406，（1980），1134-1143
- (4) 伝熱工学資料（昭50-2）

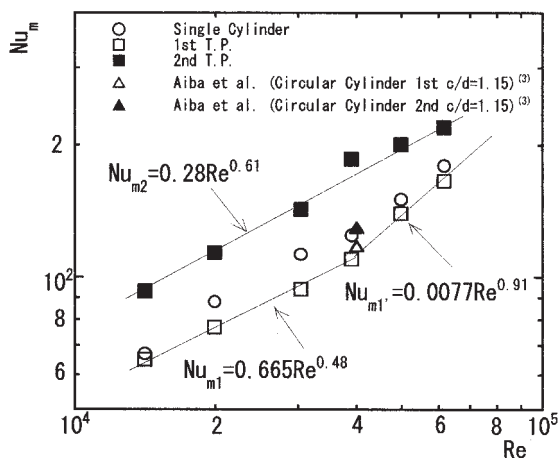


図16 平均熱伝達