

円柱背面における伝熱機構

—背面伝熱特性の変化とはく離せん断層の関係—

布施 肇・小山 隆行・河野 行雄*
加治屋厚廣
(受理 昭和61年5月31日)

HEAT TRANSFER MECHANISM ON THE REAR SURFACE OF A CYLINDER — RELATIONS BETWEEN A CHANGE IN HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS AND A SEPARATED SHEAR LAYER —

Hajime FUSE, Takayuki OYAMA, Yukio KAWANO*
and Atsuhiko KAJIYA

In order to make the heat transfer mechanism clear in separated flows, the deformation of the separated shear layer, the velocity distribution in the dead water region, and the pressure distribution around a cylinder were measured. This cylinder has been used as a typical example of bluff bodies.

Using those experimental results, the individual factors concerned and their influences were investigated.

These results will be useful to clarify the heat transfer mechanism.

1. 緒 言

比較的高レイノルズ数におけるはく離流れの熱伝達は工学的に重要な問題であるが、その流体力学的複雑さのために熱伝達機構の解明はきわめて困難である。円柱の背面における熱伝達に関しても多くの研究が報告されているが、それらの結果は必ずしも一致せず、その原因についても不明な点が多い。関係する個々の要因とその影響を検討することによりはく離流れの熱伝達機構の解明も可能と思われる。

本論文は円柱背面熱伝達の特徴が変化する場合の「はく離」せん断層の状態、死水域内の流速分布および圧力分布などの変化を測定することにより、背面熱伝達に影響する種々な要因とその影響経路を見出し、さらにこれらより伝熱機構の解明を試みたものである。ここに報告された資料は比較的初期の頃より当研究室で行なわれた実験結果を総括し、主として広い視野から多角的にその要因を求めたもので、それらいくつかの問題点の中には、すでに解決され詳細には機械学会論文集^{1), 2)}に報告されたものもあるが、今後さら

に深い研究を必要とするものもある。何分、背面伝熱機構は複雑で、広い影響領域をもつものであるから、このように種々の要因を包括し、系統的に追求して相互の関連を見る立場とその個々の要因を深く詳細に求める方法との両面からの追求が必要と考えられる。本論文は前者の立場である。

2. 実験装置および方法

実験の対象とした円柱径 d は 20 mm ($\phi 20$), 10 mm ($\phi 10$), 7 mm ($\phi 7$) の 3 種類で、これらに対し使用した風洞は吹出し型の二次元風洞で、それぞれの円柱径に対するノズル出口の寸法やブロックージ比などは表 1 の通りである。今後、各実験は表 1 に示した記号で表わすことにする。表に示された主流の乱れ強さの最小値と最大値はそれぞれ実験したレイノルズ

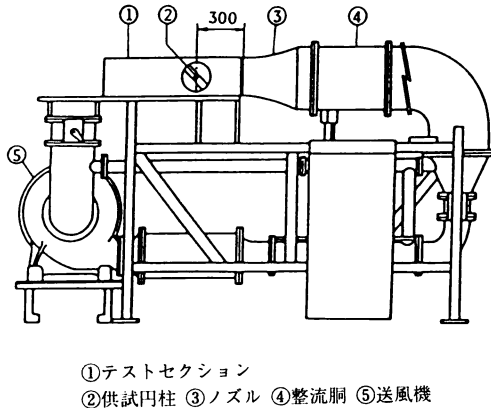
表 1

記号	A	B	C	D	E
円柱径 (mm)	20	10	10	7	7
ゲクト寸法 (mm)	400×60	230×70	230×40	230×70	154×72
ブロックージ比	0.05	0.043	0.043	0.030	0.045
乱れ強さ (%)	1.00~0.80	0.57~0.20	0.56~0.38	0.57~0.20	0.34~0.18
レイノルズ数 $\times 10^4$	0.71~2.95	0.67~2.91	0.65~2.68	0.50~2.17	0.77~2.80

* 都城工業高等専門学校

数の最大値と最小値に対応している。円柱軸と垂直方向のダクトの高さを h とした場合、ブロック比 d/h はいずれの場合も 0.05 以下である。なお、円柱軸と平行方向のダクトの幅 l は A と C が $4d$ でそれ以外は $7d$ である。

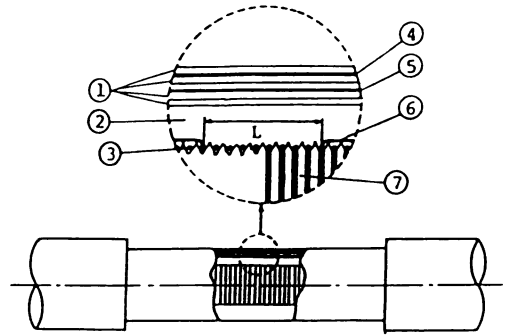
図1は風洞の一例で、いずれの場合も整流され一様流が得られている。この風洞測定部の流れに直交して置かれた図2に示す加熱円柱によりその表面温度を測定してそれより局所熱伝達率を求め、さらに定温度型熱線流速計により、円柱背面の流れ、せん断層厚さ、乱流への遷移の位置、渦形成領域（以後、形成領域と略記）の大きさなどを求めた。



①テストセクション
②供試円柱 ③ノズル ④整流胴 ⑤送風機

図1 風洞

図2は実験に使用した加熱円柱で、所定の直径のベークライト棒にピッチ0.3mm、深さ0.1mmの溝を掘り、これに0.03mmのクロメル線を巻きつけて加熱面を作る。この加熱面中央部の長さ $L=10$ mmの部分供試伝熱面として、その両端より電圧測定線を図のように取り出す。加熱面はエポキシ樹脂であるアラルダイトで固定して厚さ0.2mm程度になるまで真円に旋削する。その表面に厚さ0.16mmの耐熱テフロンテープを巻いた後、0.03mmのアルメル・クロメル熱電対を第一熱電対として、円柱軸に平行におき、これを厚さ0.16mmのテフロンテープで巻くことにより固定する。さらに第二熱電対を、第一熱電対と半径方向一直線上にその接点がかかるように円柱軸と平行において最後にこれを厚さ0.08mmのテフロンテープで固定する。表面温度はこの2つの熱電対の温度より算出される。主流と直角におかれた円柱の加熱線に、直流定電流電源より電流を流し、電流と電圧を測定し



①テフロンテープ ②アラルダイト ③クロメル線
④第一熱電対 ⑤第二熱電対 ⑥電圧測定線 ⑦ベークライト棒

図2 加熱円柱

熱流束 q を求める。測定円柱を回転して、各角度における円柱壁温と気流温度の差を測定して、所要レイノルズ数に対する局所ヌセルト数 Nu_θ が次式により求められる。

$$Nu_\theta = \frac{0.86 IV}{\lambda g (T_{w_\theta} - T_g) \pi L}$$

ここで I = 供給電流 T_{w_θ} = 円柱壁温

V = 供給電圧 T_g = 主流温度

L = 電圧測定長さ λg = 主流の熱伝導率

θ = 前方視点点よりの角度

である。

なお図3はクロメル線による加熱帯をクロメル薄板と考え、テフロンの熱伝導率も考慮した場合の円柱軸方向表面温度の分布を、もっとも条件の悪い場合について示したものである。電圧測定線は線径0.03mmを使用し、円柱の等温線に沿っているため、この測定線による軸方向熱伝導の影響は無視できるものと思う。

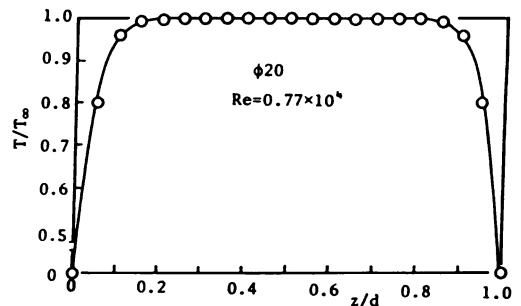


図3 円柱軸方向壁温分布

円周方向の熱伝導誤差を極力防止するため、加熱線として線径 0.03 mm のクロメル細線を使用し、前方淀み点での主流温度との差を 5°C 前後になるように加熱電流を調節した。

3. 実験結果

3.1 円柱表面圧力分布

図4はそれぞれ実験条件(A～E)に対応する場合の円柱まわりの圧力分布を示す。横軸の θ は前方淀み点からの角度、縦軸の C_p は円柱表面と主流との静圧の差を主流の動圧で除した圧力係数を示す。円柱背面で $\phi 7$ の実験条件Dの場合がいくぶん高い圧力を示している。これは後で述べるように形成領域の大きさによるものと思われる。

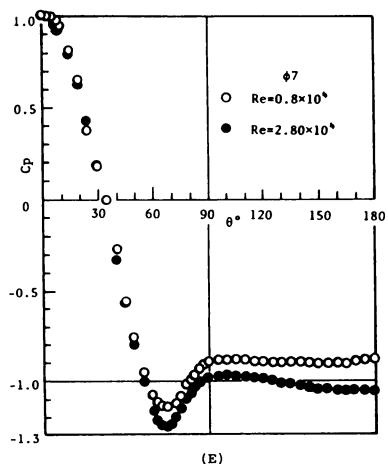
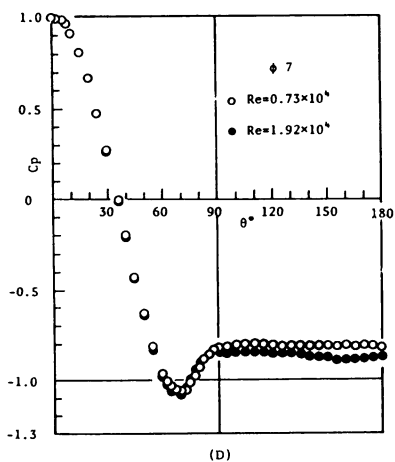
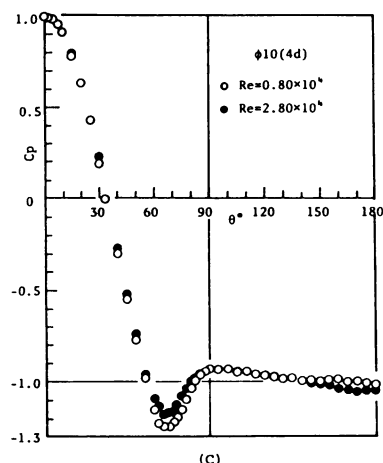
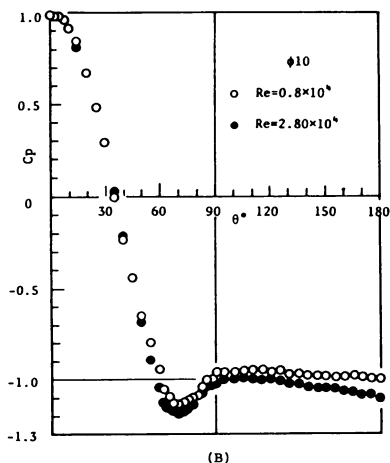
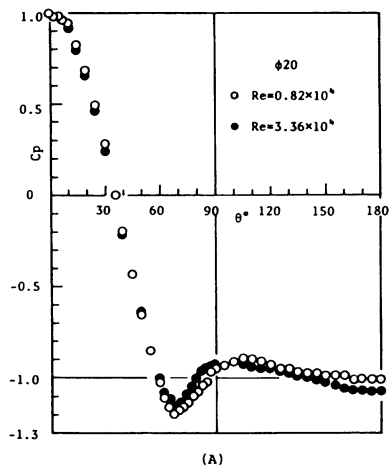


図4 円柱表面圧力分布

3. 2 円柱表面温度分布と局所熱伝達率

図5は実験条件(A~E)に対する円柱表面温度分布を示し、それぞれのレイノルズ数について、角度 θ に対する表面温度の変化が示されている。これらの図において、縦軸は各角度における壁温と主流温との局所温度差($T_{w\theta} - T_g$)と前方淀み点における壁温と主流温との温度差($T_{w0} - T_g$)との比TRを示す。前方淀み点において、実験による Nu_0/\sqrt{Re} の値と理論値 $Nu_0/\sqrt{Re} = 1.14 Pr^{0.4}$ との差は各実験とも約3%以内である。ただし Re はレイノルズ数、 Nu_0 は前方淀み点におけるヌセルト数、 Pr はプラントル数である。図において $\phi 7$ の円柱に対する実験条件Dの場合、レイノルズ数 $Re = 1.02 \times 10^4$ 以下の測定結果においては、最高温度比が約2.3を示す。この値は ϕ

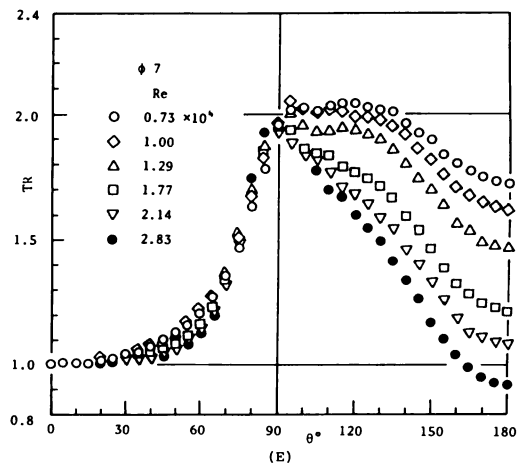
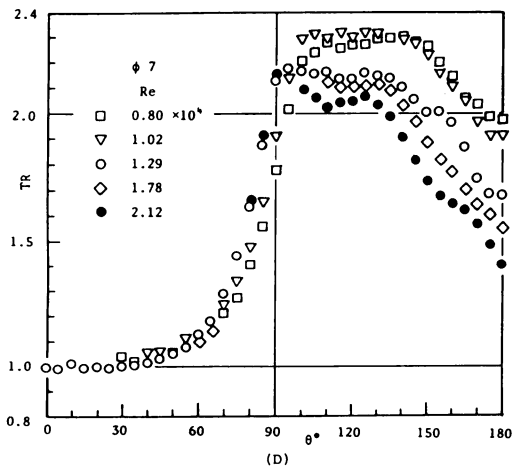
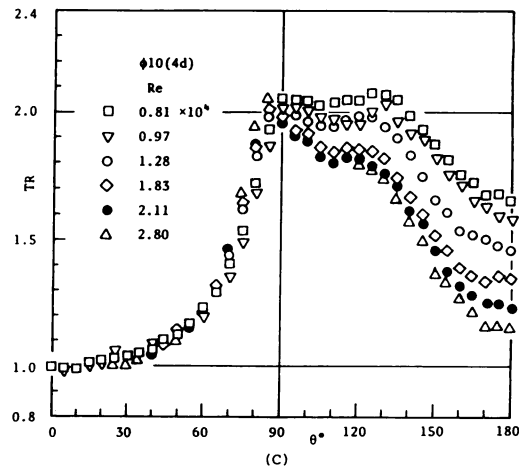
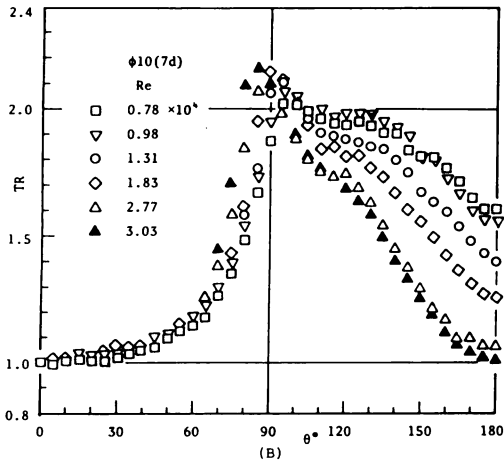
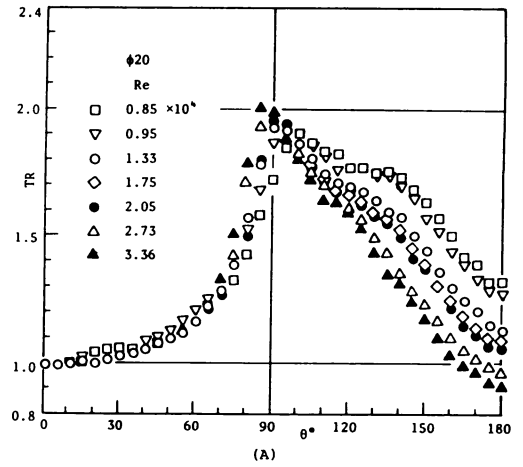


図5 円柱表面温度分布の変化

7のEおよび $\phi 10$ (7d)のBの場合が2.1であるのに比べて高く、特に $120^\circ \sim 150^\circ$ 付近ではDの方がBより著しく高い。これも後で述べるように、形成領域が後方に伸びて熱伝達が悪くなったためと考えられ

る。一般に各円柱に対しては、レイノルズ数の増加とともに、 130° 付近の温度比が低下する傾向にある。しかし図6の例のように同じレイノルズ数に対して、平田ら³⁾の直径41.6 mmと著者らの10 mm (実験B)の温度分布を比較した場合、背面温度はかなり異なり、本実験でははく離点から単調に温度が減少するけれども、平田らのそれは $90^\circ < \theta < 120^\circ$ は一定であり $\theta > 120^\circ$ で温度は減少している。これは主流速度の違いによりせん断層の形状が相違するためと思われるが、この問題についてはさらにせん断層などの特性を検討する予定である。

図7は各円柱の 360° にわたる温度分布の一例ではほぼ良好な精度で円柱が作られていることを示す。

図8は局所ヌセルト数の変化の一例で $\phi 10$ (7d)のBの場合である。

図9は各円柱前方旋み点における $Nu-Re$ の関係を示したものであり、理論値 $Nu/\sqrt{Re}=1.14 Pr^{0.4}$ とよく一致している。

図10は各角度における $Nu-Re$ の関係の一例とし

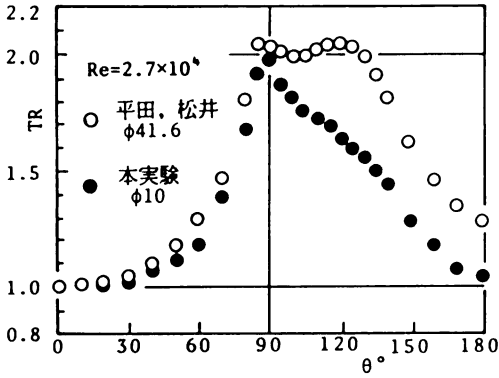
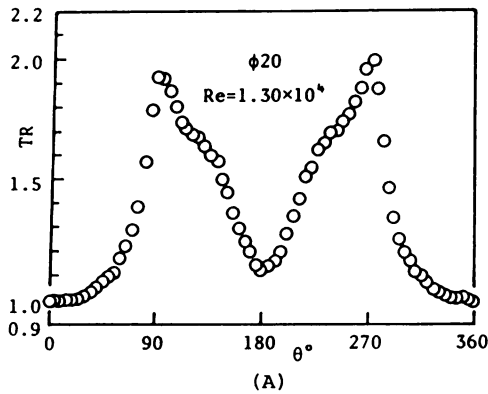
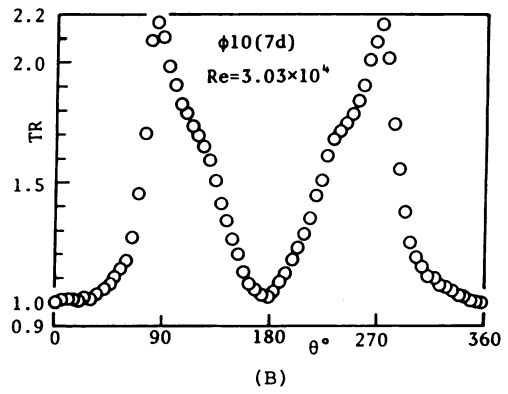


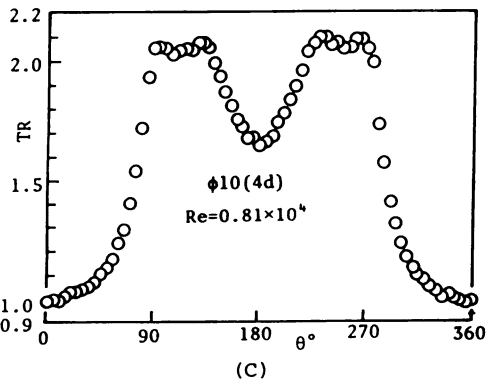
図6 温度分布の比較



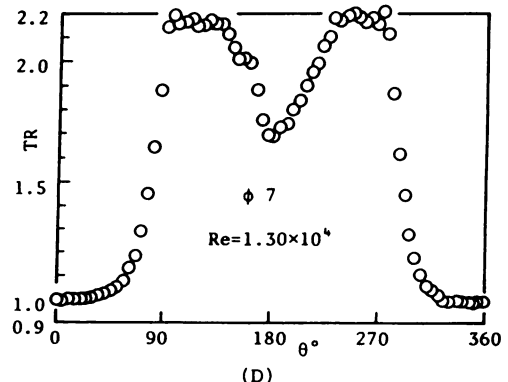
(A)



(B)



(C)



(D)

図7 全円周温度分布

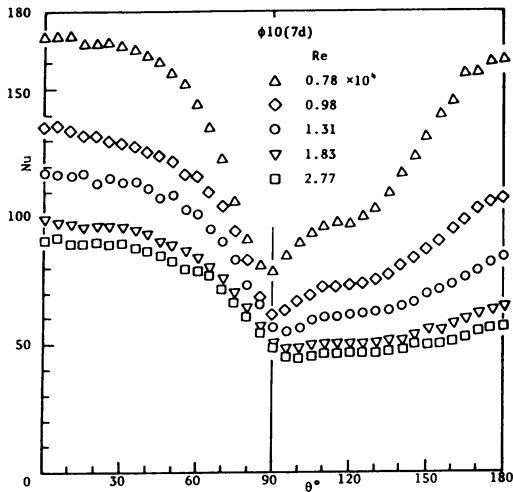


図8 局所ヌセルト数分布

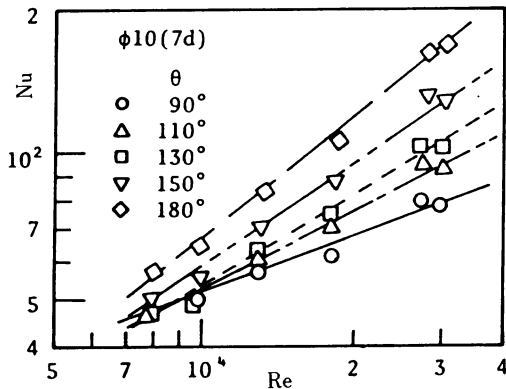


図10 Nu と Re の関係 ($\theta = 90^\circ \sim 180^\circ$)

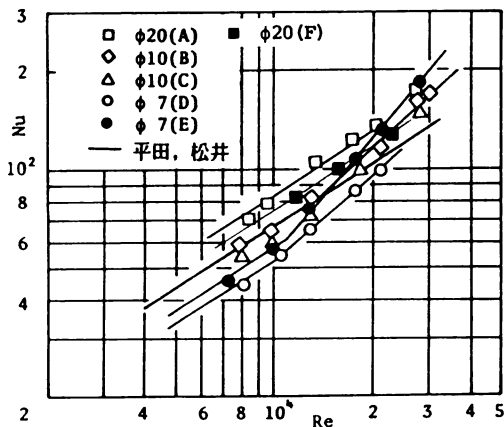


図11 Nu と Re の関係 ($\theta = 180^\circ$)

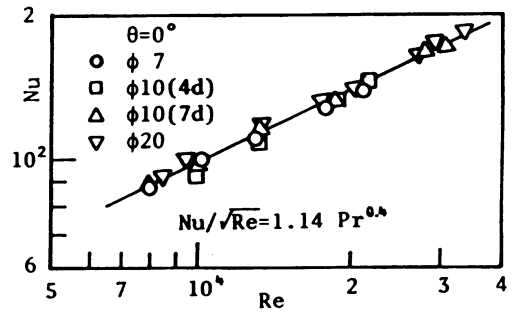


図9 Nu と Re の関係 ($\theta = 0^\circ$)

て $\phi 10 (7d)$ の B の場合を示したもので、 $\theta = 90^\circ$ より 180° にわたり順次勾配が変化している。

図 11 は $\theta = 180^\circ$ におけるヌセルト数とレイノルズ数との関係を実験 A より E までの全部に対し示したものである。円柱径の小さなものほどより低いレイノルズ数のところで式(1)に平行な線からはずれ、式(2)が示す勾配となる。

$$Nu = 0.229 Pr^{0.4} Re^{0.63} \quad (1)$$

$$Nu = C Re^n \quad (n = 1.0 \sim 1.15) \quad (2)$$

この変化の生じる点はレイノルズ数で表わすと、円柱径により異なるが、流速では各円柱とも同一の流速 30 m/s 付近にあるが、このような現象に関しては今後さらにはく離せん断層についての微視的検討を要する。また、各実験結果ともある部分は式(1)の線に平行であるが、同じレイノルズ数に対しては、円柱径により異なったヌセルト数の値を示している。そして $Re = 2.8 \times 10^4$ 付近ではほぼ同じヌセルト数の値に近づく傾向にある。これらの原因については、後流のフローパターンの測定結果もあわせ考察のところで検討する。

3. 3 円柱後方の流れ

本実験では円柱背面の流れの特性を調べるため、図 12 に示されるような方向に熱線プローブを移動させた。

円柱中心より流れ方向に X 軸をとり、円柱中心よりの距離を X/d で表わし、これと垂直方向の X 軸よりの距離を Y/d で示す。X 軸上の $X_1 \sim X_5$ の各位置で、Y の正方向にプローブを移動させた場合と、X 軸上で X の正方向にプローブを移動させた場合、およびせん断層の中心付近を S 方向に移動させた場合の 3 種類の測定を行なった。 $X_1 \sim X_5$ の測定は、せん断層の形状と後流内 Y 方向の速度分布を求めるためであり、

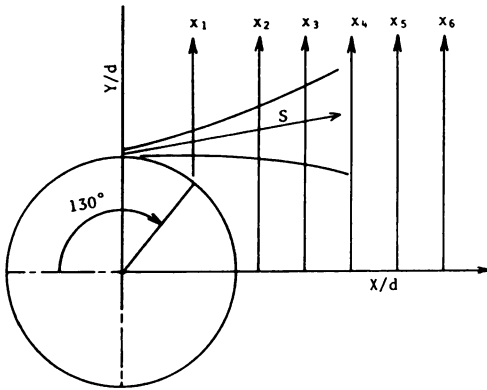


図12 熱線風速計による測定位置

X 軸上での測定は中心線上 X 方向速度分布, S 方向の測定は乱流への遷移位置を求めるとに行なわれた。いずれの場合も熱線は円柱軸と平行な位置に置かれている。

図 13 はレイノルズ数 $Re=0.73 \times 10^4$ における $X_1 \sim X_5$ の Y 方向速度分布であり, 速度は熱線風速計により求めた平均流速で, 図ではこれを \bar{U} で示し, 主流速度は U_∞ で表わしている。

図 14 はこれらの図より求めた形成領域の形状であり, 図 15 は $Re=0.73 \times 10^4$ における X 軸上での X 方向速度分布を各実験条件に対して比較したものである。図 13 と図 14 より次のような傾向がみられる。すなわち円柱径が小さくなるほどせん断層の厚さは薄くなり, せん断層内の速度勾配は急となって, 形成領域の長さは長くなっている。なお, せん断層の形状の決定にあたっては, その外側の境界は各速度分布で流速最大の点より求め, 内側の境界は速度分布でほぼ一様な速度から急に増加し始める点より求めた。形成領域の終りは両せん断層の交わる位置と考え, この終りの位置は図 15 に示すように X 軸上の X 方向速度分布が一様になり始める点から決定した。図 15 でも同様に速度分布が円柱径によって順次変化し, 円柱径の小になるほど速度分布の勾配がゆるやかとなり, 円柱から速度の増加し始める点までの距離が長くなっている。そして円柱表面近傍の無次元速度は円柱径が小さい程小となっている。

図 16 は $Re=2.8 \times 10^4$ における $X_2 \sim X_5$ の Y 方向速度分布を示し, 図 17 は形成領域の形状を図示したものである。図 18 は $Re=2.8 \times 10^4$ のレイノルズ数

における X 軸上の X 方向速度分布の各実験条件に対する結果を比較したものである。このレイノルズ数では速度分布と形成領域の形状における各実験間の差はあまり認められない。

以上の説明のように $Re=0.73 \times 10^4$ では速度分布および形成領域が円柱径により順次変化し, $Re=2.8 \times 10^4$ ではほぼ同一になる傾向は図 11 の熱伝達の傾向と対応関係にある。なお図 14 の左上に示した印は各実験においてせん断層内の流れが層流から乱流へ遷移し始める位置を示し, これは図 19 の波形に示すようにせん断層内で熱線プローブを移動させた場合, 速度変動波形の中に遷移波の現われ始める位置 (図 19 (2)) より求めたものである。

4. 考 察

以上の実験結果は次のように考えられる。まず 30 m/s 以下の流速では後方淀み点におけるヌセルト数とレイノルズ数の関係は式(1)の示す勾配をとるが, それ以上では式(2)が示す勾配になり熱伝達はよくなる。

この原因としては高速によるせん断層の特性変化と考えられるが今後の研究を要する (機械学会論文集²⁾ 参照)。

次に流速 30 m/s 以下で式(1)に平行であるが, 一致しない線も得られているのは, 円柱径と主流乱れの大きさとの相互の関係が影響したためと思われる。たとえば $\phi 20$ の円柱 A の場合は主流乱れ 1% が影響して遷移点の位置がはく離点に接近 ($x/d=0.2$) し, 低レイノルズ数においても高レイノルズ数の場合と同じ形成領域の形になっており, このため後方淀み点の熱伝達はよくなったものと思われる。この $\phi 20$ については, さらに乱れ強さ 0.5%, ダクト寸法 400×200 mm で実験を行ない, ヌセルト数がこれより約 15% 低い結果 (図 11 の F) を得ている。

このように円柱径の比較的大きい $\phi 20$ の場合の主流の乱れ強さ 0.5% から 1% への変化に対して, 後方淀み点の熱伝達が大きく変化した原因については機械学会論文集¹⁾ で報告したように, 主流乱れの高周波成分によりはく離せん断層が乱流へ早く遷移したためその拡散効果が大きくなったためのものであることがわかった。

$\phi 10$ の B, C の場合は, $Re=1.5 \times 10^4$ 以下で式(1)に一致するが, 同じ 0.5% 程度の乱れ強さであっても $\phi 7$ の D の場合は図 11 のように式(1)の線より約 20% 低い値を示す。そして乱れが 0.3% に減少した $\phi 7$

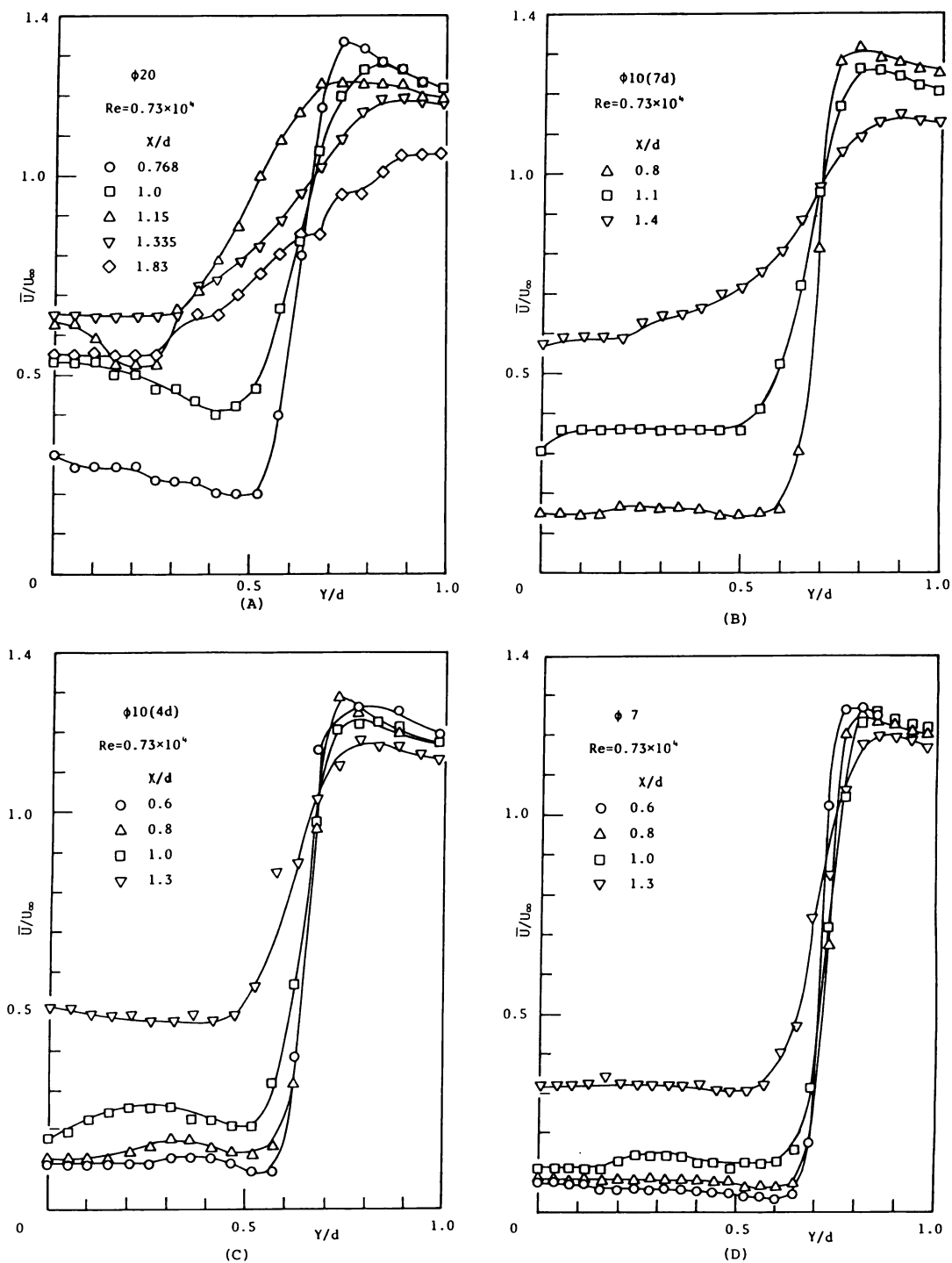


図13 後流の速度分布

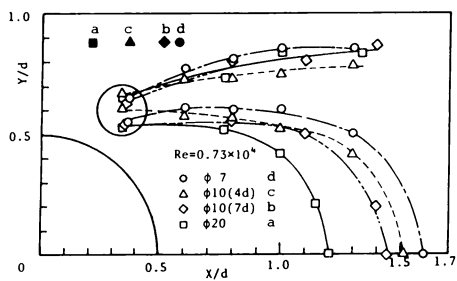


図14 形成領域の形状

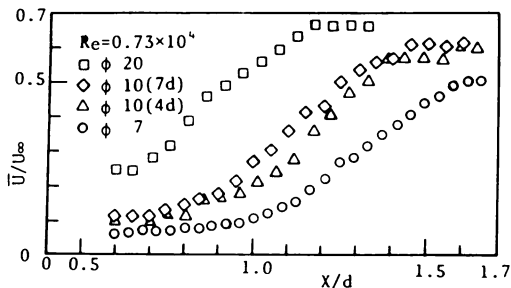


図15 X方向速度分布 (Y = 0)

のEの実験では、図20、図21のようにフローパターンが変わり、ヌセルト数が高くなって式(1)の線に近づく。

このように乱れが増加したことにより背面熱伝達が增加する場合と減少する場合の2通りあることが分った。この原因については論文^{1), 2)}である程度解決されたが、なお未解決な問題(円柱径と主流乱れに関連して、形成領域の変化とせん断層の特性の変化が関係する)があるので今後さらに深い研究を必要とする。

なお、ダクト幅の背面熱伝達に与える影響は、 $\phi 10$ のダクト幅7dの実験Bとダクト幅4dの実験Cを比

較することにより検討した。この結果、図5のBとCの温度分布において $\theta = 100^\circ \sim 150^\circ$ 付近で違いが認められるけれども、図11の後方淀み点の熱伝達には差が認められない。

以上述べたように、また図11に示す通り、主流速度を代表速度としたレイノルズ数に対しては後方淀み点のヌセルト数の値が種々の条件によって変化することがわかる。それで図13から図18に示した測定資料より円柱後方淀み点近傍(約0.1d離れた位置)の流速を求め、これを代表速度とした修正レイノルズ数を Re_s^* とすると、図11の $Re = 0.73 \times 10^4$ におけるA, B,

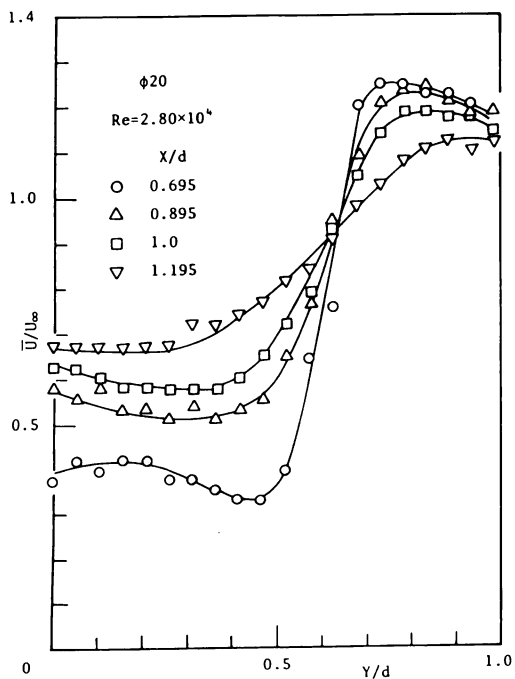


図16 (A)

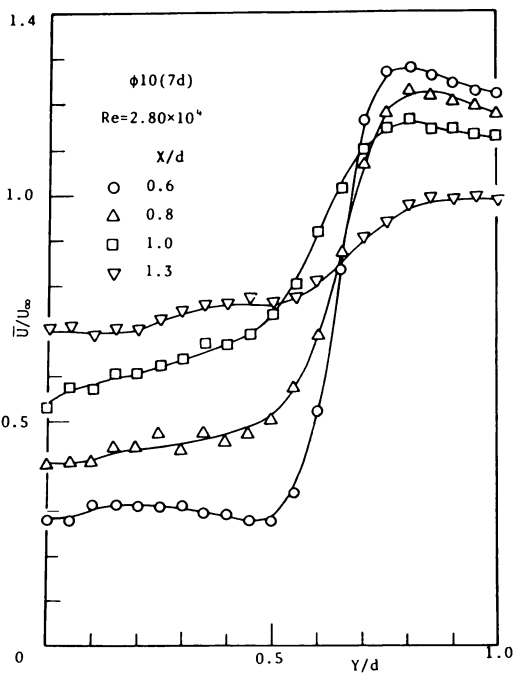


図16 (B)

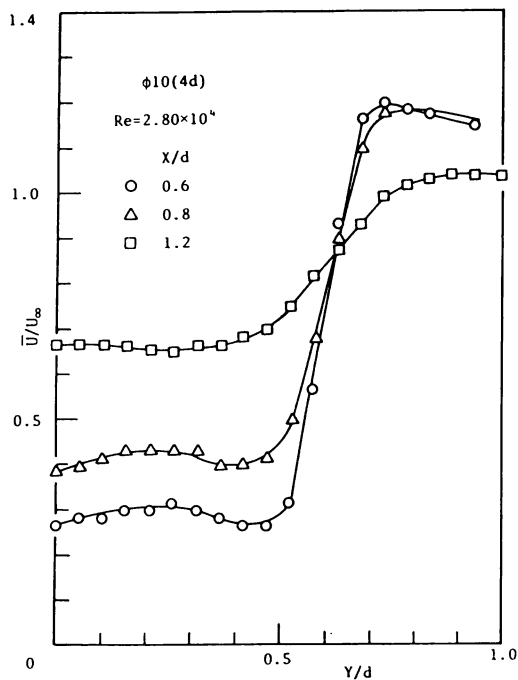


図16 (C)

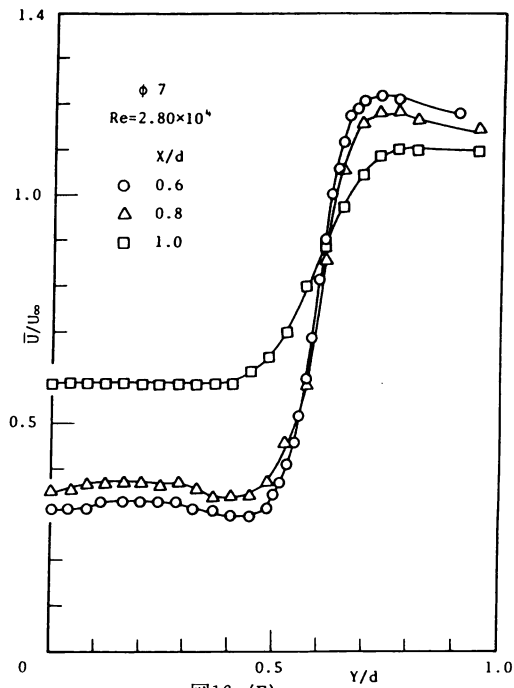


図16 (E)

図16 後流の速度分布

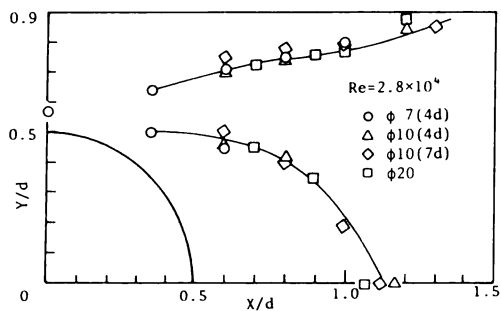


図17 形成領域の形状

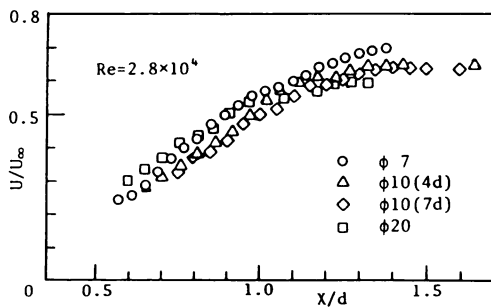
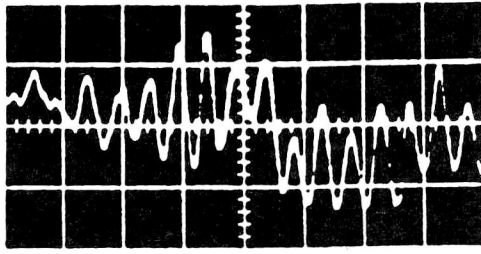
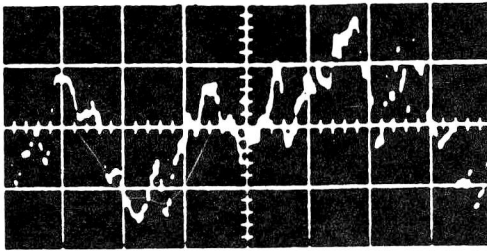


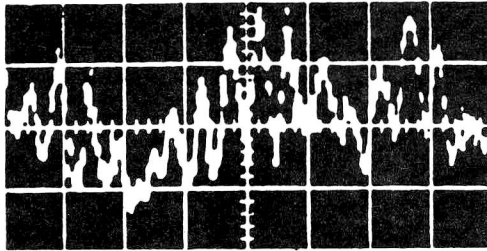
図18 X方向速度分布 (Y=0)



(1) $f=400$ Hz $X/d=0.246$
 $Y/d=0.554$



(2) $f_s=3700$ Hz $X/d=0.573$
 $Y/d=0.608$



(3) $X/d=0.655$
 $Y/d=0.622$

$\phi 7 (7d)$ $Re=7300$

図19 遷移点における波形

C, D および E のヌセルト数の値および $Re=2.8 \times 10^4$ の高レイノルズ数におけるヌセルト数の値は図 22 のように $Nu=CRe_s^{*0.5}$ の式で整理される。

5. 結 論

レイノルズ数 $0.7 \times 10^4 < Re < 3.0 \times 10^4$ 、流速 $10 \text{ m/s} \sim 60 \text{ m/s}$ の範囲で、円柱径 20 mm 、 10 mm 、 7 mm の 3 種類に対して、円柱背面の熱伝達と背面流れとの関係を実験的に求めた結果、次の結論を得た。

(1) 後方淀み点でのヌセルト数は、円柱径により相

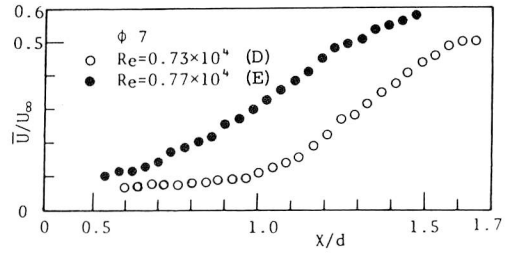


図20 DとEの速度分布の比較

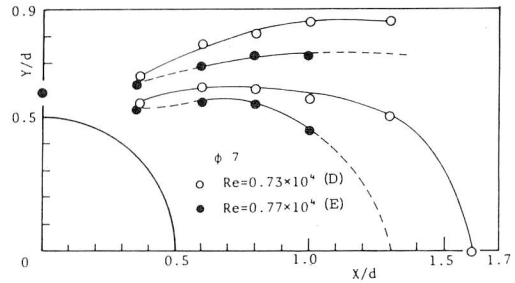


図21 DとEの形成領域の比較

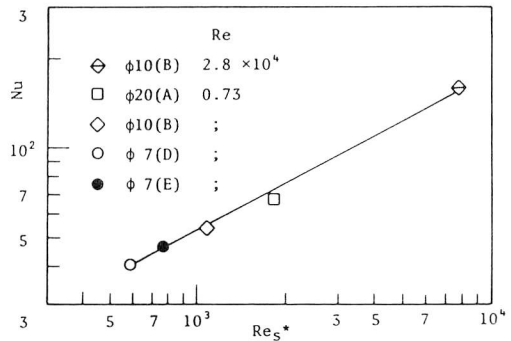


図22 Re_s^* に対する Nu の関係

違するが、 $Re=1.0 \times 10^4$ ないし 1.5×10^4 の付近まで $Nu=CRe^{0.63}$ の形で変化し、それ以上では円柱径により $Nu=CRe^n$ ($n=1.0 \sim 1.2$) の形をとるものがある。その限界値はレイノルズ数では円柱径により異なるが、主流速度では大体 30 m/s 付近にある。

(2) 本実験の範囲で、円柱背面の熱伝達を支配するのはせん断層の形状などの特性であり、同じレイノルズ数であってもせん断層が薄く、形成領域の長いものほど背面の熱伝達は悪い。そしてこのせん断層の形状はせん断層の遷移の位置により変化する。

(3) 本実験における $Nu = CRe^{0.63}$ の範囲, すなわち $0.7 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^4$ の範囲において同じレイノルズ数に対する後方岐点のヌセルト数は, 円柱径と主流速度によっても異なるが, 0.3~0.5% 程度の主流乱れの変化により 15~30% 程度変化する場合がある。

(4) 主流速度を代表速度としたレイノルズ数の場合後方淀み点における $Nu = CRe^n$ の C と n の値は速度範囲とその他の主流条件により変化するが, 後方淀み点近くの流速を代表速度とした修正レイノルズ数 Re_s^*

を用いると $Nu = CRe_s^{*0.5}$ の形の式にまとまる。

最後に, 本実験に協力を得た昭和52年院修了の中間俊豪君, 図面の作成に協力を得た院生・下吉光明, 鶴田和明の諸君に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 布施・ほか2名, 機論, 50-453, B (昭59), 1302.
- 2) 布施・ほか3名, 機論, 51-470, B (昭60), 3392.
- 3) 平田・ほか3名, 機講論, No. 208 (69), 97.