

円柱背面における熱伝達機構

— 円柱直径の背面熱伝達への影響 —

布施 肇・小山 隆行・下吉 光明*
加治屋厚廣
(受理 昭和62年5月30日)

HEAT TRANSFER MECHANISM ON THE REAR SURFACE OF A CYLINDER — The effects of cylinder diameter on the rear heat transfer —

Hajime FUSE, Takayuki OYAMA, Mitsuaki SHIMOYOSHI*
and Atsuhiro KAJIYA

In this research the cylinder diameter was changed and it was investigated what kind of heat transfer mechanism occurred. The following conclusions are drawn.

- (1) The rear heat transfer is determined by the magnitude of the diffusion effect in the case of a larger diameter.
- (2) In the case of a smaller diameter, the the development of the shear layer is prevented by the low frequency components of a free-stream, and the rear heat transfer decreases at $Re=7000$ and $Re=10000$. However, at a larger Reynolds number, the energy of a shear layer vortex increases, and the energy increases in the vicinity of the rear stagnation point, as well. Therefore, the rear heat transfer increases.

1. 緒 言

はく離流における伝熱機構解明のため、その代表として円柱背面における伝熱機構を選び、その関係する個々の要因とその影響を検討することにより機構の解明を行っているが、現在までのところ次に示すような機構を明らかにすることが出来た。

主流乱れにはく離せん断層の乱流への遷移に関係した周波数以上の成分が含まれると、遷移は早まり、せん断層の拡散効果が増大して背面熱伝達は上昇する。¹⁾

はく離せん断層には2種類の形式があり、条件(レイノルズ数、主流乱れ、直径など)によりそのいずれかの機構があらわれるが、レイノルズ数によっては低周波の乱れ強さの少しの変化でも、それらの間の遷移現象が変化することが分った。²⁾ これらの現象は我々

のこれまでの研究により、レイノルズ数範囲は勿論であるが、主流乱れと直径の影響を受けることが考えられたので、本研究では乱れを統一して直径の変化による影響を求めた。

2. 実験装置および方法

加熱円柱の構造や熱伝達率の測定法は既報^{1),2)}の通りである。使用した風洞は吹き出し型で8mm円柱は小風洞、16mmと20mm円柱は大風洞を用い、ブロック比はそれぞれ0.052, 0.040, 0.050であった。主流乱れ強さは表1に示すように出来る限り低い値とし、また同じレイノズル数 ($Re=U_{\infty}D/\nu$, U_{∞} : 主流

表1 低周波主流乱れ強さ

円柱 直径	Tu 単位 (%)		
	D = 8 mm	D = 16 mm	D = 20 mm
$Re=0.7 \times 10^4$	0.35	0.33	0.35
$Re=1.0 \times 10^4$	0.24	0.27	0.26
$Re=1.8 \times 10^4$	0.19	0.21	0.21
$Re=2.2 \times 10^4$	0.18	0.19	0.19

*九州松下電器

速度, D : 円柱直径, ν : 主流の動粘性係数) ではほぼ同じ値とした。そのパワースペクトルを示した図1のように主流乱れは10Hzの低周波成分が主であった。とくに16mmと20mm円柱では乱れ強さ以外に乱れの

他の成分およびスペクトルの形状もほぼ一致し, 同じ主流条件下で測定は行なわれたと考えられる。なお, 8mm円柱については後で説明する。

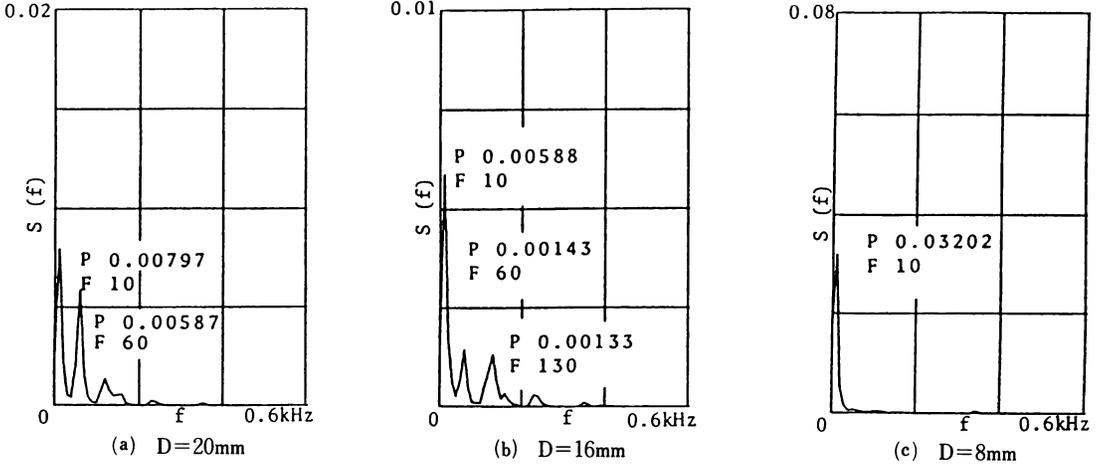


図1 主流乱れのパワースペクトル ($Re=1.0 \times 10^4$)

3. 実験結果および考察

後方岐点におけるヌセルト数 ($Nu=hD/\lambda$, h : 熱伝達率, λ : 熱伝導率) のレイノルズ数への依存性を示した図2より, 直径の違いにより熱伝達は異なり20mm円柱の結果は16mm円柱より熱伝達は良く, 傾きは平行であり Nu と Re の関係においてレイノルズ数の指数は同じである。けれども8mm円柱ではその指数は16mm, 20mm円柱より大きく, $Re \approx 1.7 \times 10^4$ 以上になるとさらに指数は大きくなり熱伝達は20mm

円柱より良くなる傾向を示した。また低レイノルズ数では20mmと16mm円柱の熱伝達の差は16mmと8mm円柱の差より大きい。このような熱伝達の違いについて, (A)20mm円柱と16mm円柱の熱伝達の相違, (B)20mm円柱と8mm円柱の熱伝達の相違に分けて次に考察する。

(A) 20mm円柱と16mm円柱の熱伝達の相違

円柱表面温度を図3に示す。横軸 θ は前方岐点からの角度, 縦軸は各角度における表面温度と主流温度の差を前方岐点の温度と主流温度の差で除した無次元温度 TR を示す。20mm円柱の場合すべてのレイノルズ数においては離点 ($\theta=90^\circ$) より後方岐点に向けて温度は降下し, 後述するようにせん断層の拡散効果が現われ図4からもわかるように熱伝達は上昇している。一方16mm円柱で $Re=0.7 \times 10^4$ では $\theta=120^\circ$ に二次渦³⁾の影響を示す凹部が生じ, レイノルズ数が高くなるとこの二次渦の影響は消滅してゆく。このような結果について次に流れ場より検討する。

図5に示した圧力分布 ($C_p=(P-P_\infty)/\frac{1}{2}\rho U_\infty^2$, P : 円柱表面静圧, P_∞ : 主流静圧, ρ : 主流の密度) より熱伝達のよい20mm円柱の背圧は16mm円柱より低くなっている。また, せん断層の拡散の影響を示す後方岐点への圧力降下^{1),2)}は両円柱とも $Re=1.0 \times 10^4$ 以上で生じている。 $Re=7.0 \times 10^4$ では20mm円柱では

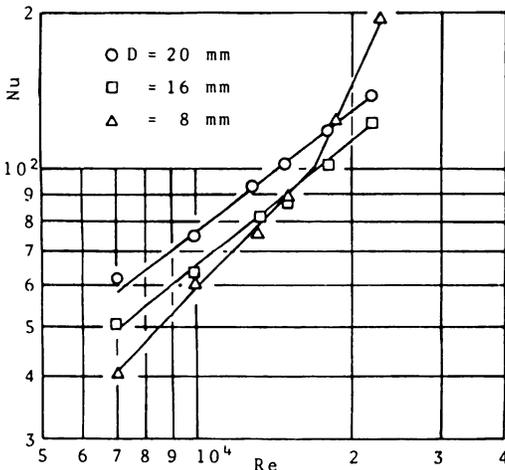


図2 Nu と Re の関係 ($\theta=180^\circ$)

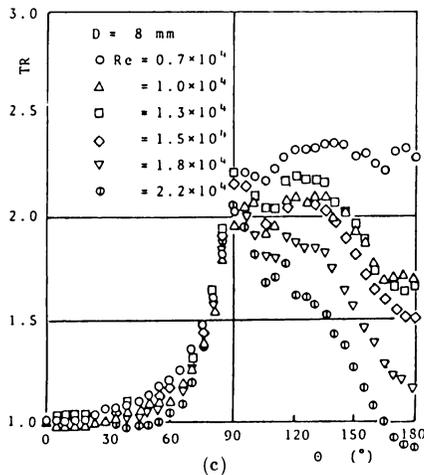
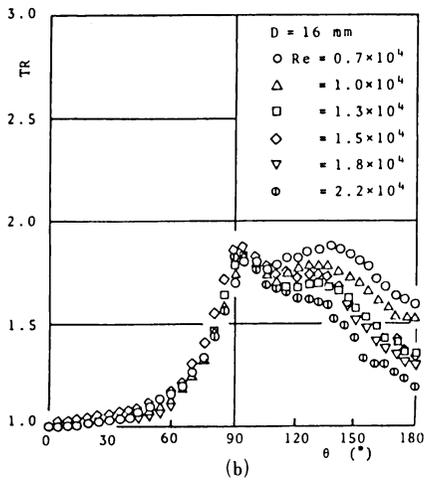
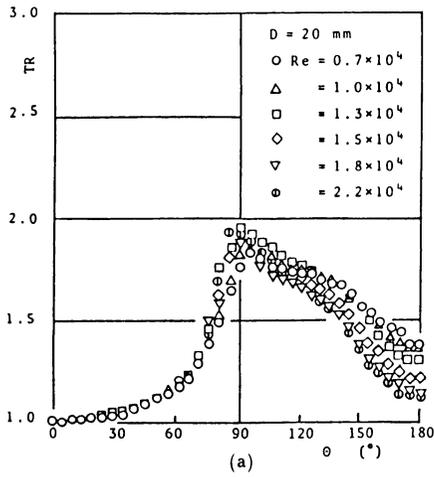


図3 円柱表面温度分布

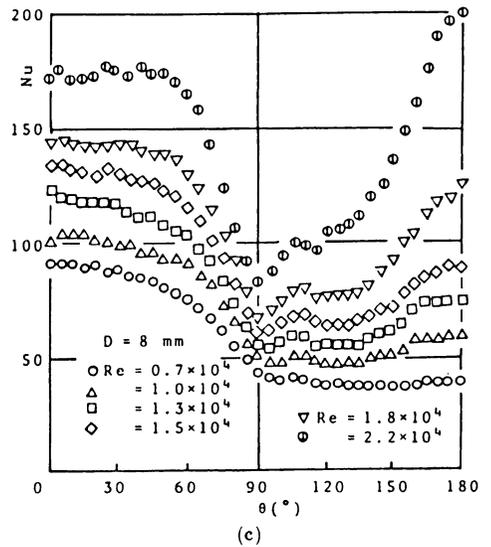
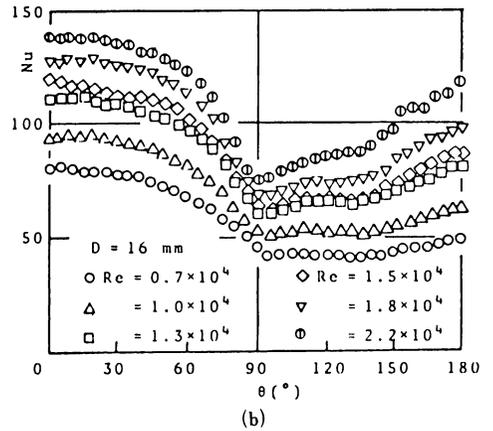
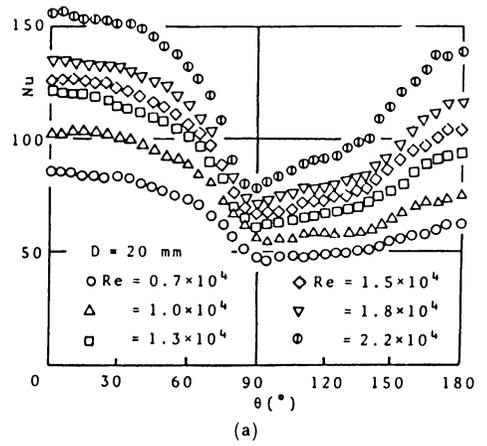


図4 局所熱伝達率分布

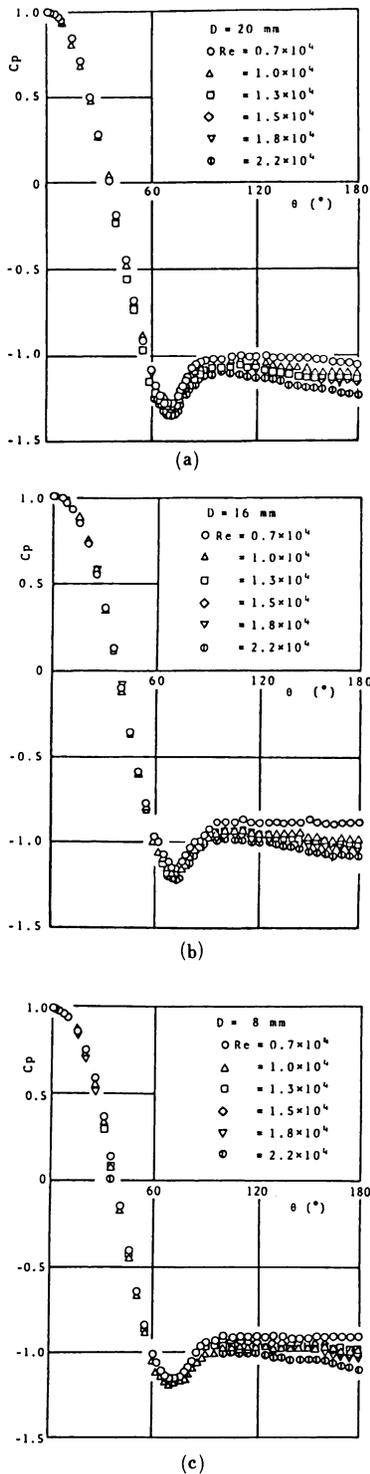


図5 円柱まわりの圧力分布

$\theta = 160^\circ$ 付近より圧力は下がり始め拡散の影響の生じ始めているが、16mm 円柱では背圧は一定でありその影響はあまり認められない。

図6は $Re = 1.0 \times 10^4$ での後流の速度分布を示す。Xは円柱中心より主流方向の距離、Yは主流と直角方

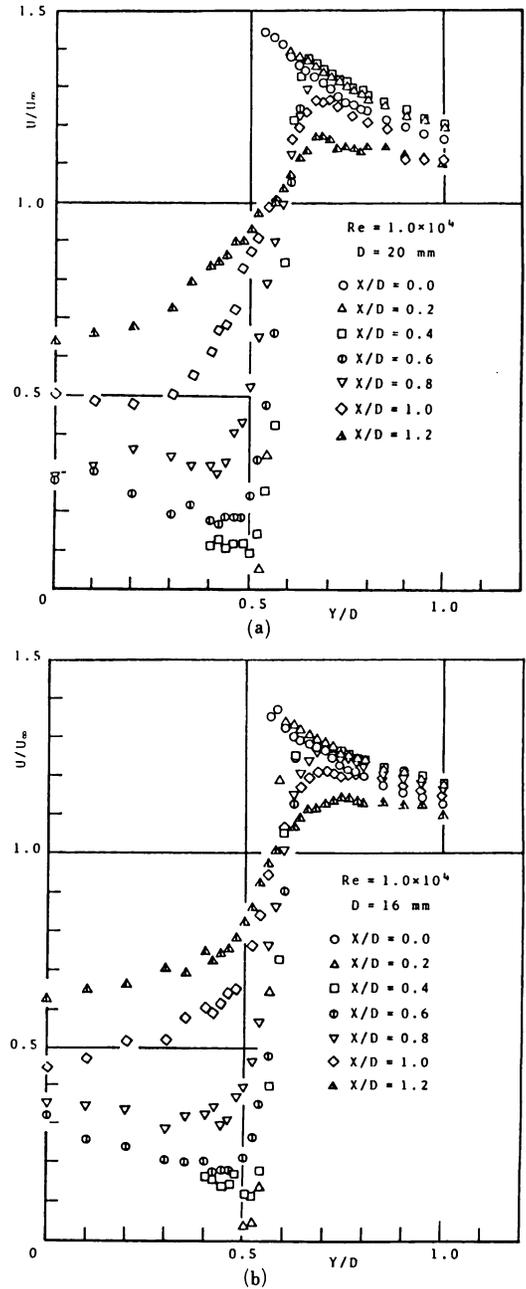


図6 後流の速度分布

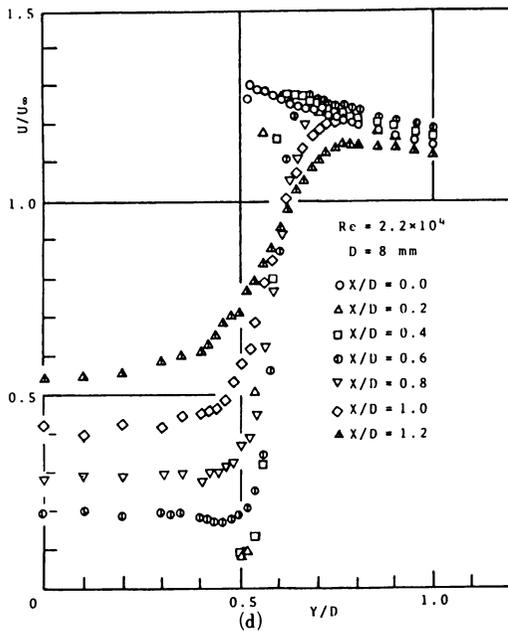
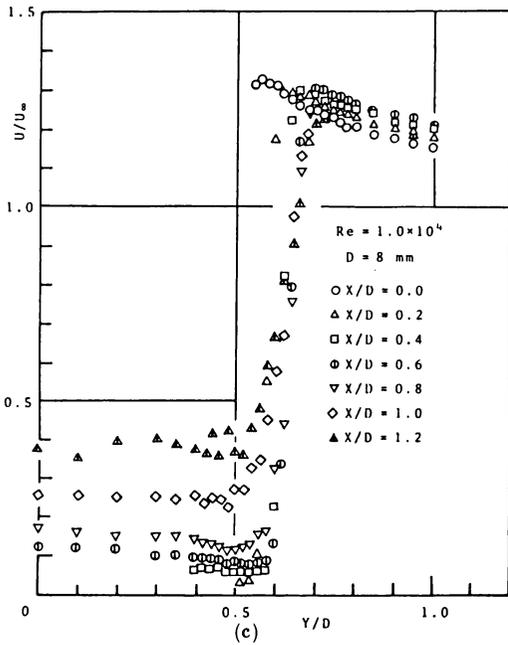


図6 後流の速度分布

向の距離を示す。せん断層の速度勾配は20mm 円柱の方が16mm 円柱よりゆるやかになるのが早く、20mm 円柱の方が拡散の大きいことがわかる。

このような速度分布より図7に示すようなせん断層の形状を求めた。 $Re = 1.0 \times 10^4$ で比較すると20mm 円

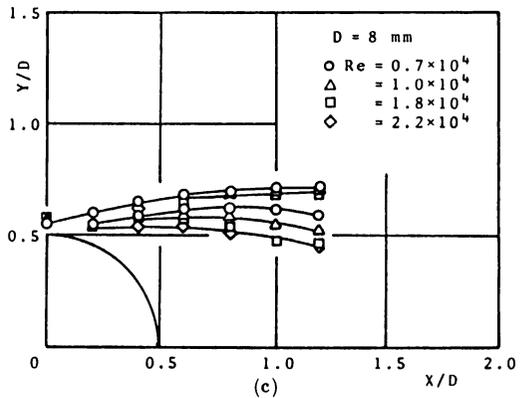
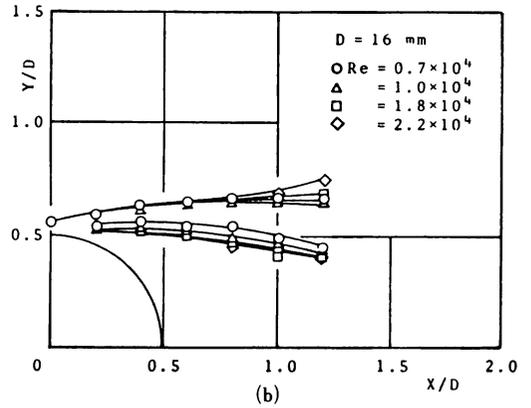
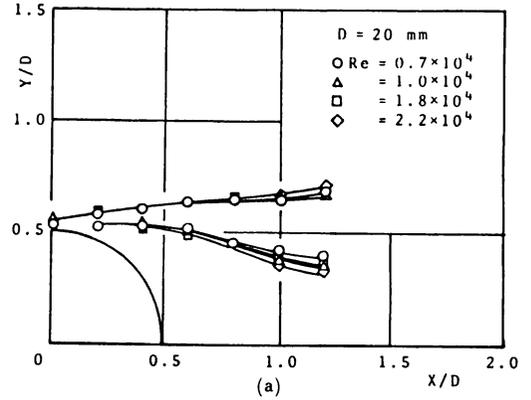


図7 はく離せん断層の形状

柱は16mm 円柱よりせん断層は厚く拡散の大きいことがわかる。8 mm 円柱の場合レイノルズ数の増加とともにかなり薄かったせん断層がしだいに厚くなっている。このようなせん断層の特性をさらに調べるためにせん断層の中心付近で流れ方向の各位置に熱線プロ

ブをおきその出力、すなわち速度変動のパワースペクトル $S(f)$ を求めた。その1例 ($Re=1.0 \times 10^4$, X/D

$=0.4$) を示した図8からわかるように渦放出周波数と低周波でエネルギーはピークをとる。前者はせん断層

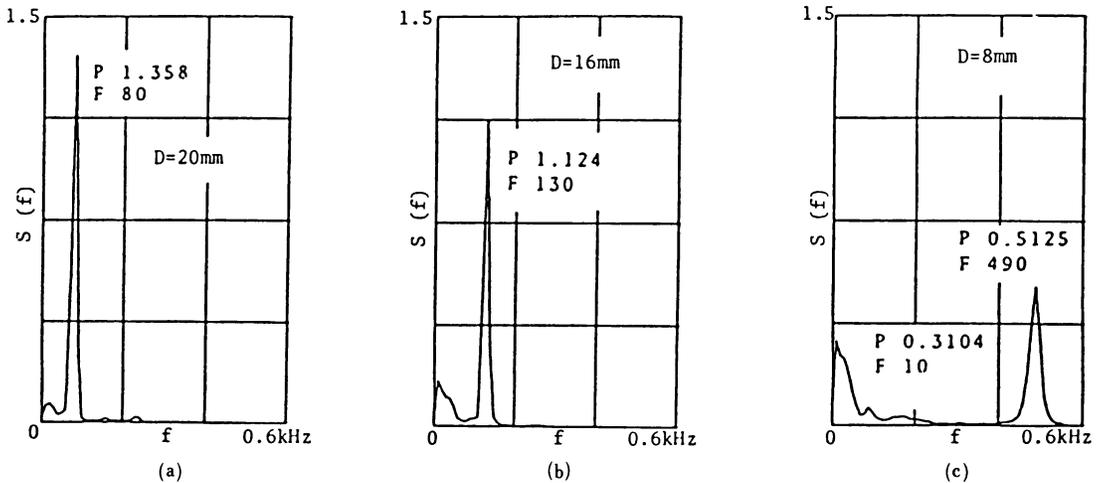


図8 せん断層の速度変動のパワースペクトル

の渦のエネルギーを示している。この2つのピークのエネルギーの値PのX方向への変化を $Re=1.0 \times 10^4$ と $Re=2.2 \times 10^4$ の場合について図9に示す。 $Re=1.0 \times 10^4$

で20mm 円柱の場合、渦のエネルギーは $X/D=0.4$ で最大となるが、この付近で図10に示したように遷移波が現われ乱流への遷移が始まる。乱流への遷移が始まる

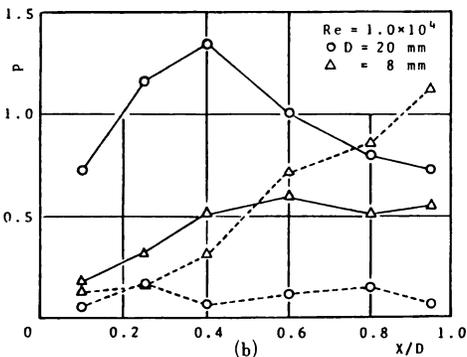
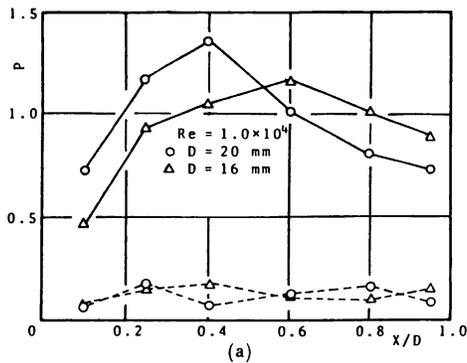


図9 パワースペクトルのピークの変化

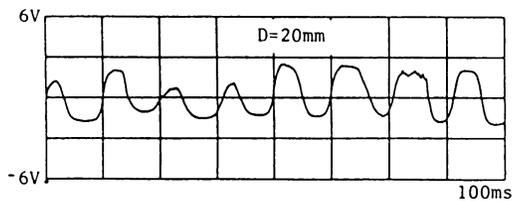
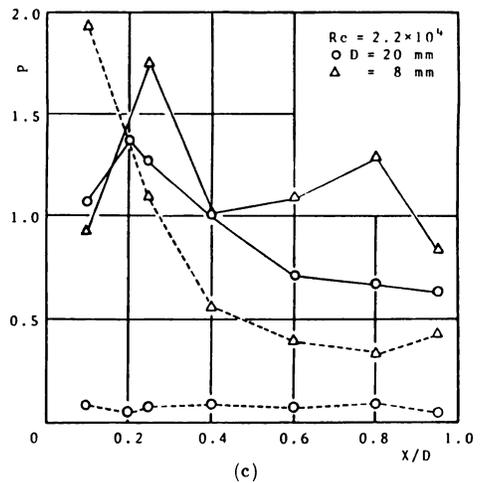


図10 せん断層の速度変動波形

とせん断層の渦のエネルギーは減少し始め、図9からわかるように急速に降下する。この降下の大きいほど拡散の度合は大きく、図より16mm円柱より20mm円柱の方が拡散は大きく、また乱流への遷移も早く始まることわかる。一方、低周波のエネルギーは16mmと20mm円柱とも一定である。

次に後方岐点近傍 ($X/D=0.6, Y/D=0$) における

速度変動のパワースペクトルを図11に示す。渦放出周波数の2倍と低周波でエネルギーのピークが生じ、渦放出周波数の2倍におけるエネルギーは8mm円柱ではレイノルズ数とともに増加する傾向にあるが、16mmと20mm円柱の場合はこのような傾向はみられない。このように背面熱伝達に密接に関係している速度変動のパワースペクトルは8mm円柱の場合と16mm、20mm

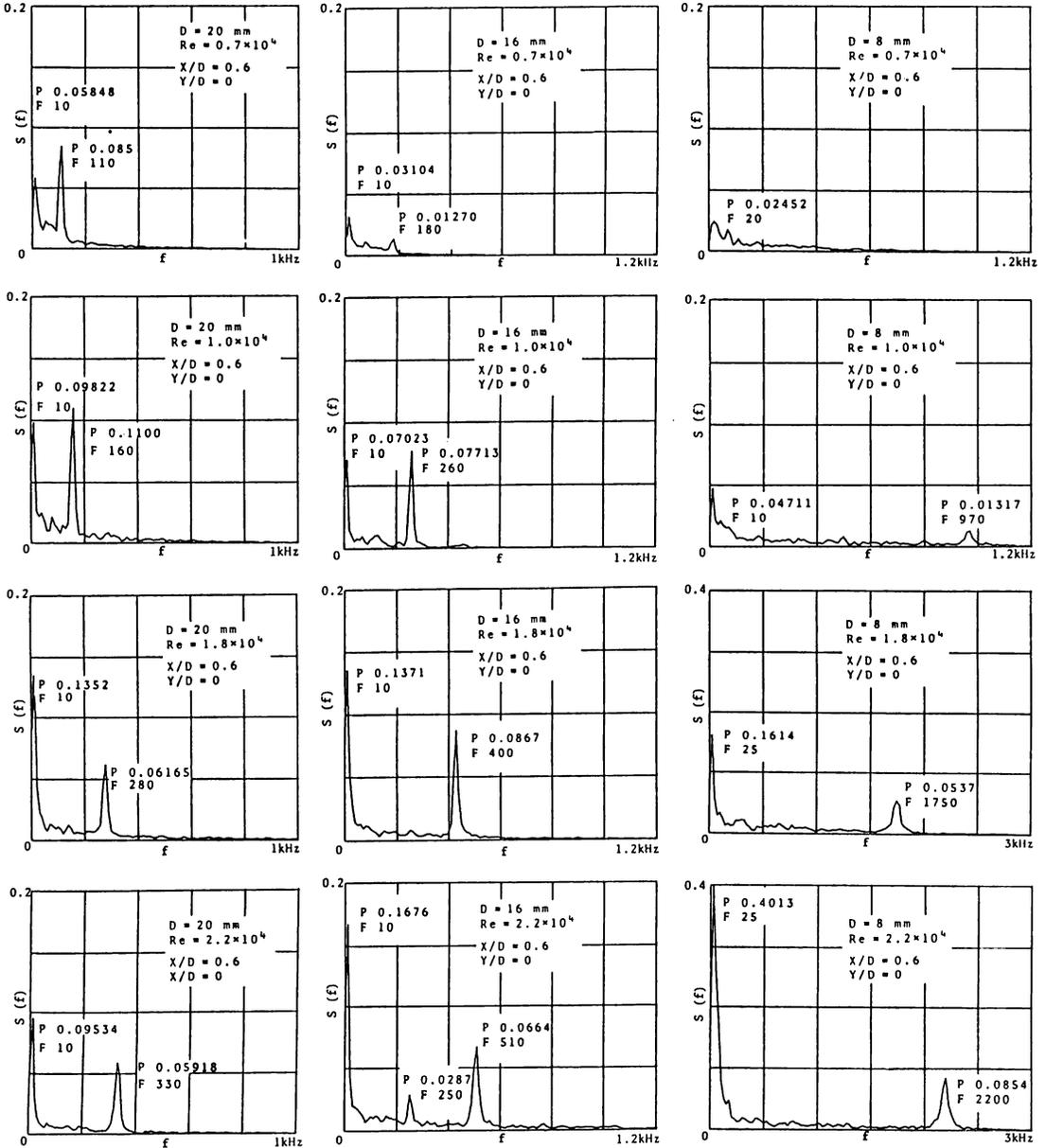


図11 後方岐点近傍でのパワースペクトル

円柱の場合とは明白に異なっている。

以上のように20mm円柱と16mm円柱の熱伝達機構はどちらもせん断層の拡散効果によるものであるが、両円柱の背面熱伝達の違いはその拡散の大きさの違いによることがわかる。

(B) 20mm円柱と8mm円柱の熱伝達の相違

8mm円柱と20mm円柱は異なる風洞で実験したため主流条件が異なる可能性があるためこの点をまず検討する。既報²⁾の10mm円柱では $Re=1.0 \times 10^4$ で乱れ強さが0.3%から0.44%まで変化して遷移現象が生じたが今回は乱れ強さを $Re=1.0 \times 10^4$ で0.24%の最低値におさえ、また20mm, 8mm円柱とも主流が10Hzの低周波を主成分としているため、及び前に予備実験として行なった8mm円柱(小風洞)と10mm円柱(大風洞)で乱れ強さが等しい0.33%での背面熱伝達に及ぼす流れの要素は同じになったので問題はないと思われるが詳しい点については今後さらに検討を要する。

さて、後方岐点では図2に示したように8mm円柱は16mm, 20mm円柱の場合と異なりレイノルズ数の指数は大きく $Re \approx 1.7 \times 10^4$ 以上ではさらに熱伝達は良くなっている。

図3より背面の温度分布は20mm円柱の場合レイノルズ数の全範囲でまとまっているが、直径が小さくなるほど分散している。そして8mm円柱の場合16mm円柱と同じように二次渦の影響を示す凹部があらわれ既報²⁾のように背面熱伝達は悪くなっている。

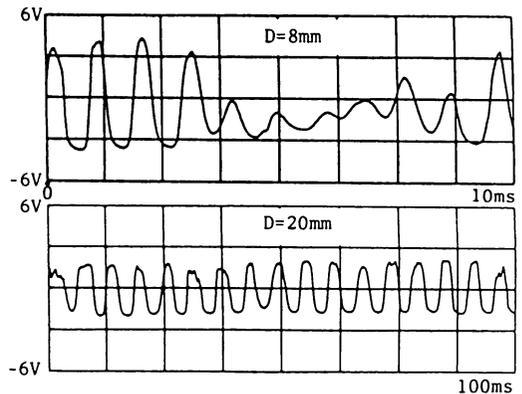
圧力分布を比較すると図5より20mm円柱でははく離点より後方岐点に向けて下がるが8mm円柱では $Re=2.2 \times 10^4$ をのぞいて背面の圧力は一定となっている。8mm円柱の $Re=2.2 \times 10^4$ ではせん断層の拡散の影響を示す後方岐点に向けての圧力降下が見られる。16mmと20mm円柱では背圧が低い程熱伝達は良かったけれども、 $Re=2.2 \times 10^4$ では8mm円柱が20mm円柱よりヌセルト数は大きく、このようなヌセルト数と圧力分布の関係はみられず直径の大きい場合の熱伝達機構とは異なっているものと考えられる。

図6の後流速度分布において低レイノルズ数で8mm円柱はせん断層の速度勾配は急であり、図7からわかるようにせん断層は薄くのびておりカルマン渦の発生位置も遠ざかり背圧も20mm円柱ほど下がっていない。けれども図6(a)からわかるように $Re=2.2 \times 10^4$ になると8mm円柱の速度勾配はかなりゆるやかとなり、せん断層は厚くなりしたがって拡散が生じ、

背圧も後方岐点に向けて下がり20mm円柱と似た傾向を示す。

せん断層の特性の違いをさらにエネルギー変化により検討する。図9より20mm円柱の場合せん断層の渦のエネルギーはある位置で極大値をとり、低周波のエネルギーはX方向に一定でかなり低い値を示す。これに対して8mm円柱では低レイノルズ数においてはせん断層の渦のエネルギーはピークが生じないで、低周波のエネルギーともX方向に増加するが低周波のエネルギーもかなり大きい。8mm円柱では高速(高レイノルズ数)になるとせん断層の渦のエネルギーは極大値をとり、その後急速に減少するため前述のように拡散が生じそのエネルギーは20mm円柱よりかなり大きく、低周波のエネルギーは低レイノルズ数と異なりX方向に減少し20mm円柱とは特性が異なっている。8mm円柱の場合低レイノルズ数ほど主流乱れの低周波成分の影響を強くうけ、せん断層の発達(流れが乱流へ遷移し拡散の始まること)を妨げていると考えられる。

さらに8mm円柱で高速($Re=2.2 \times 10^4$)の影響をせん断層の乱流への遷移について検討する。図12からわかるように渦放出波形に遷移波の現われる位置、すなわち遷移開始点は20mm円柱では $X/D \approx 0.25$ 、8mm円柱では $X/D \approx 0.4$ である。これまでの研究によると遷移点が高いほど背面熱伝達は良くなる傾向にあったがこの場合は成立しない。けれども遷移完了点(渦放出波形のすべてに遷移波が現われた位置)、 $X/D=0.6$ で渦のエネルギーは8mm円柱が20mm円柱より1.5倍ほど大きくせん断層の拡散効果は増大し、図11の後方岐点近傍の流れのエネルギーも高められている



(a) $X/D=0.25$

図12 せん断層の速度変動波形 ($Re=2.2 \times 10^4$)

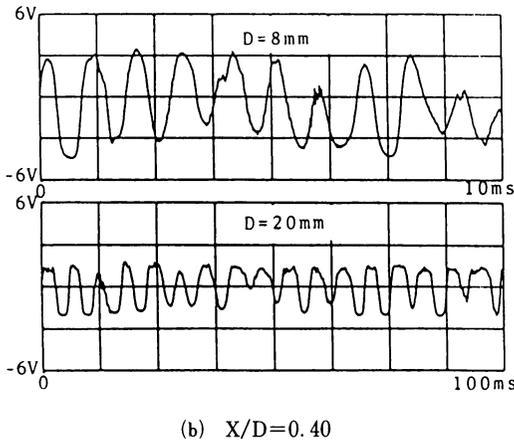


図12 セン断層の速度変動波形 ($Re=2.2 \times 10^4$)

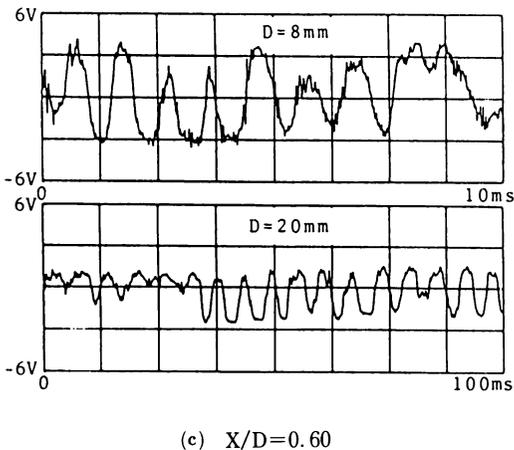


図12 セン断層の速度変動波形 ($Re=2.2 \times 10^4$)

ものと考えられるが、この点に関しては今後の検討を要する。

4. 結 論

直径 8 mm, 16mm および 20mm の円柱を用いレイノルズ数 $0.7 \times 10^4 \sim 2.2 \times 10^4$, 乱れ強さはそれぞれの

数の上下限に対応して 0.35~0.18% の範囲で熱伝達を測定し流れ場との関係より次のことがわかった。

(1) 低周波乱れ強さおよびその他の主流条件を統一し直径差だけの影響を調べた結果、熱伝達機構に次のような 2 つのパターンが明確に生じる。

(a) 小直径 ($D=8\text{mm}$) でレイノルズ数の低い場合は主流の低周波成分によりせん断層の発達に妨げられ拡散効果は弱められるが円柱背面流れのエネルギーとともに熱伝達は増加する。

(b) 大直径の場合は拡散効果によりせん断層は発達し死水域へ巻き込むと共に背圧を下げ、その発達したせん断層領域により背面の熱を奪い、熱伝達は良くなる。

(2) 背面熱伝達を支配する条件、すなわちせん断層の拡散効果と円柱背面流れのうち今回の実験により拡散の影響が大きいことがわかる。

(3) 拡散影響は円柱直径の大きいほど著しい効果はあらわれる。

(4) 小直径 ($D=8\text{mm}$) の高速域 ($Re \times 1.8 \times 10^4, 2.2 \times 10^4$; $37\text{m/s} \sim 44\text{m/s}$) において熱伝達は急増するがこれはせん断層の渦のエネルギーが著しく高くなりせん断層の拡散効果と背面近くの流れのエネルギーが高まるためであり、さらにこの場合高周波のエネルギーの急増も大きく影響したものと考えられる。

最後に、本研究を昭和61年度の卒業論文として行った湯之口龍、窪和久、田畑直樹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 (昭和59), 1302.
- 2) 布施・ほか 3 名, 機論, 51-470, B (昭60), 3392.
- 3) Son, J. S. and Hanratty, T. J., J. Fluid Mech., 35 (1969), 353.