

縦溝付円柱の表面構造変化による抗力低減効果

吉田一誠^{*1}・岡永博夫^{*2}・青木克巳^{*3}

Effect of Drag Reduction for the Surface Structure of Circular Cylinder with Longitudinal Grooves

by

Kazushige YOSHIDA^{*1}, Hiroo OKANAGA^{*2} and Katsumi AOKI^{*3}

(Received on Sep. 30, 2006 & accepted on Jun. 24, 2007)

Abstract

In this paper, we describe the drag reduction and the characteristic of flow around a circular cylinder with grooves. The surface pressure was measured for circular cylinders with four different numbers of grooves (32, 48, 64 and 96) with Reynolds number $Re=0.4 \times 10^5 \sim 4.2 \times 10^5$. The drag coefficient is calculated from the pressure distribution. The flow around the circular cylinders with grooves is investigated using a hot-wire anemometer and by visualization. From the results, it is clarified that the minimum drag coefficient shifts to the high Reynolds number side as the number of grooves increases. We conclude that the wake area, the position of the separation point change and the drag coefficient are affected by the number of grooves.

Keywords: Circular cylinder, Drag reduction, Surface structure, Grooves, Oil film method

1. 緒論

圧力抗力による C_D 値の大きさは、ほとんどが物体の形状、 Re 数、表面粗さと多くの要因に依存するため、物体の形状を変化させることなく、表面構造のみを変化させることで抗力低減が効率的に可能となれば工業的な実用性が広がると考えられる。圧力抗力の低減に関する研究として、鈍頭物体の代表的形状である円柱を用いた抗力低減に関する研究がこれまでに数多く報告されている。その中に円柱表面をサンドペーパーなどによって粗さを付け、粗度を変化させた研究の報告がある⁽¹⁾⁽²⁾。この場合、臨界領域は滑面円柱に比べてより低レイノルズ Re 数側へと移動するが、 Re 数がさらに増加すると、抗力係数 C_D 値は急激な増加傾向を示す。また、著者⁽³⁾⁽⁴⁾らは円柱表面に規則的な溝を施した研究を既に報告しており、溝の効果によって剥離点が円柱後方へと移動すること、滑面円柱より低 Re 数側で臨界領域になり、 C_D 値が亜臨界領域の C_D 値 1.2 より低減することなどを明らかにしている。また、溝深さを変化させた場合のレイノルズ数に対する抗力特性も明らかにしている。

しかし、これまでに溝数を変化させた研究は見られていない。そこで本研究では、円柱の規則的表面構造変化に対する抗力低減のメカニズムを明らかにすると共に、抗力低減に対する最適表面構造を探る事を目的としている。円柱表面には円弧形の溝を相似的に施し溝数を変化させた時の Re 数変化に対する圧力分布を測定し、 Re 数に対する抗力特性の関係を明らかにしている。また、油膜法による円柱表面の流れの可視化、熱線風速計により円柱後流の速度分布、乱れ度分布、ストローハル St 数を測定し表面構造の違いによる C_D 値の変化を解明している。

2. 実験装置及び方法

本実験に使用した風洞は吹出し型風洞であり、風洞の出口寸法は $400\text{mm} \times 180\text{mm}$ である。風速範囲は $6 \sim 80\text{m/s}$ であり、この範囲での乱れ度は 0.6% 以下である。Fig.1 に供試円柱の断面を示す。円柱の直径 d は 80mm 、長さは 172mm であり、本実験では、4 種類の溝付円柱と滑面円柱を使用している。また、円柱の二次流れを防ぐために円柱の両端に直径 110mm の側板を取り付けてある。

溝付円柱の断面形状及び主要諸元を Fig.2 及び Table.1 に示す。円柱の表面に施した溝形状は円弧形で、溝数 N は 32, 48, 64, 96 本である。溝は長手方向に施してある。圧力を測定するための測定孔は Type A, Type B では山部と谷部にそれぞれ 1ヶ所ずつ、Type C, Type D では加工上から谷部 1ヶ所のみそれぞれ円柱表面に対して垂直に開けられており、その直径は $0.6\text{mm} \sim 0.8\text{mm}$ である。

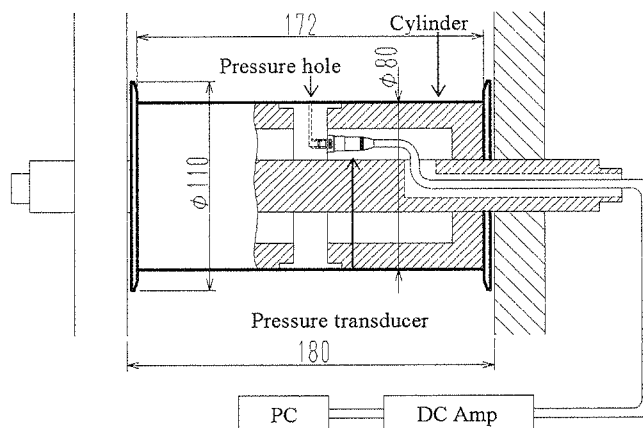


Fig.1 Test cylinder

* 1 工学研究科機械工学専攻修士課程

* 2 工学部機械工学科助教授

* 3 工学部機械工学科教授

2.1 円柱表面の圧力測定

円柱の表面圧力は円柱内部に設置された半導体圧力トランスデューサにより測定し、データ間隔 1msec ごと 2048 点の出力信号を DC アンプにて増幅させ PC にて読み取っている。

2.2 油膜法による円柱表面の流れの可視化

油膜法に用いた油膜は流動パラフィン・オレイン酸・アミノ油に酸化剤として顔料に酸化チタンを混合したものを塗布した。混合率は、 Re 数に応じて変化させている。

2.3 円柱後流場の流れの測定

円柱後流場の速度分布、乱れ度分布、 St 数の測定には熱線風速計を用い、プローブは I 型のものを使用した。また、 St 数は $(x/d, y/d) = (0.6, 0.9)$ の位置で測定をおこなった。

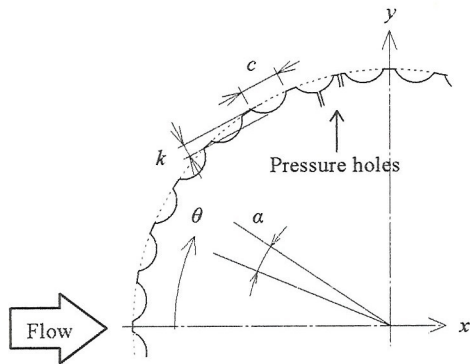


Fig.2 Cross section of test cylinder

Table 1 Specification of test cylinder

Type	Type A	Type B	Type C	Type D
k (mm)	0.3	0.2	0.15	0.1
d (mm)	80			
c (mm)	6.76	4.51	3.38	2.25
$k/c(\times 10^{-3})$	44.38			
$k/d(\times 10^{-3})$	3.75	2.50	1.875	1.25
α ($^\circ$)	11.25	7.5	5.625	3.75
N	32	48	64	96

3. 結果及び考察

3.1 抗力係数

Re 数に対する C_D 値の変化を Fig.3 に示す。 C_D 値は円柱表面の圧力分布を積分することにより得られた抗力 D を用い次式より算出した。

$$C_D = \frac{D}{(\rho U^2 / 2) d} \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気の密度、 U は一様流速、 d は円柱の直径である。

また、これまでの研究から、淀み点が溝外側である場合と溝中心部にある場合とで C_D 値の違いがほとんど見られなかったため、本報告では淀み点が溝外側の場合おいてのみについて述べる。

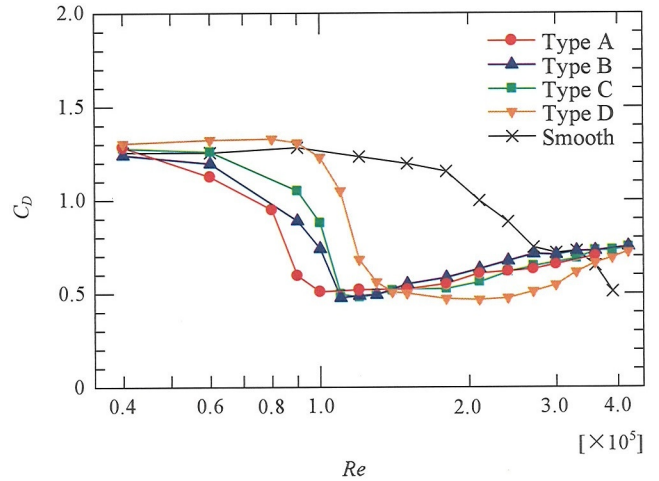


Fig.3 Drag coefficient

Fig.3 より、滑面円柱の場合には、 C_D 値が約 1.2 で一定な亜臨界領域と $Re=1.8 \times 10^5$ 付近から急激に減少する臨界領域が見られ、一般的な滑面円柱の傾向と一致している。溝付円柱については、急激に C_D 値が減少する臨界領域そして、最小値を得た後に増加傾向を示す超臨界領域が見られる。滑面円柱と溝付円柱を比較すると、溝付円柱はどの Type においても滑面円柱よりも臨界領域が低 Re 数側へと移動し、 C_D 値が減少している。各 Type を比較すると、最も低 Re 数側で臨界領域を迎えるのは Type A であり、溝数が増えるに従い、臨界領域は高 Re 数側へ移動する。臨界点における C_D 値を比較すると、Type A が最も高く、溝数が増えるに従って低い値をとっている。また、Type D における超臨界領域は、他の Type と比べて C_D 値の増加勾配が小さいとすることができる。

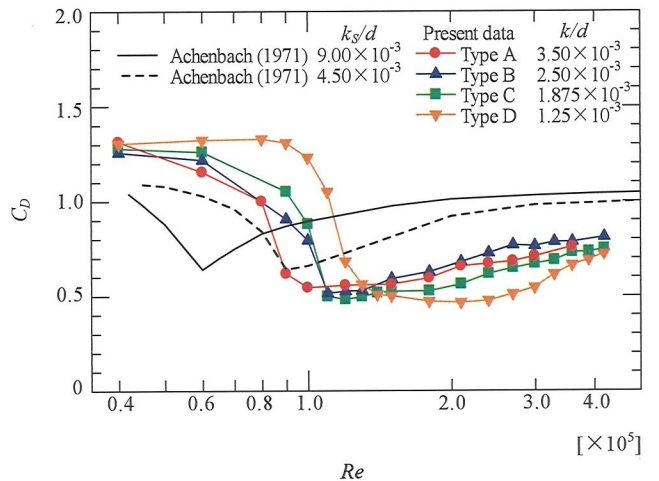


Fig.4 Comparison of drag coefficient

Fig.4 は粗面円柱の実験の図である。本実験の溝深さ比 k/d と粗面円柱の粗度パラメータ ks/d は比較することができないので C_D の値の比較は困難であるが、臨界 Re 数の揃ったものどうしを比較することによって、溝付円柱の C_D は粗面円柱の C_D に比べ臨界領域における C_D の最小値が小さく、超臨界領域での上昇傾向が小さく溝付円柱の C_D の方が粗面円柱より小さいとすることができる。

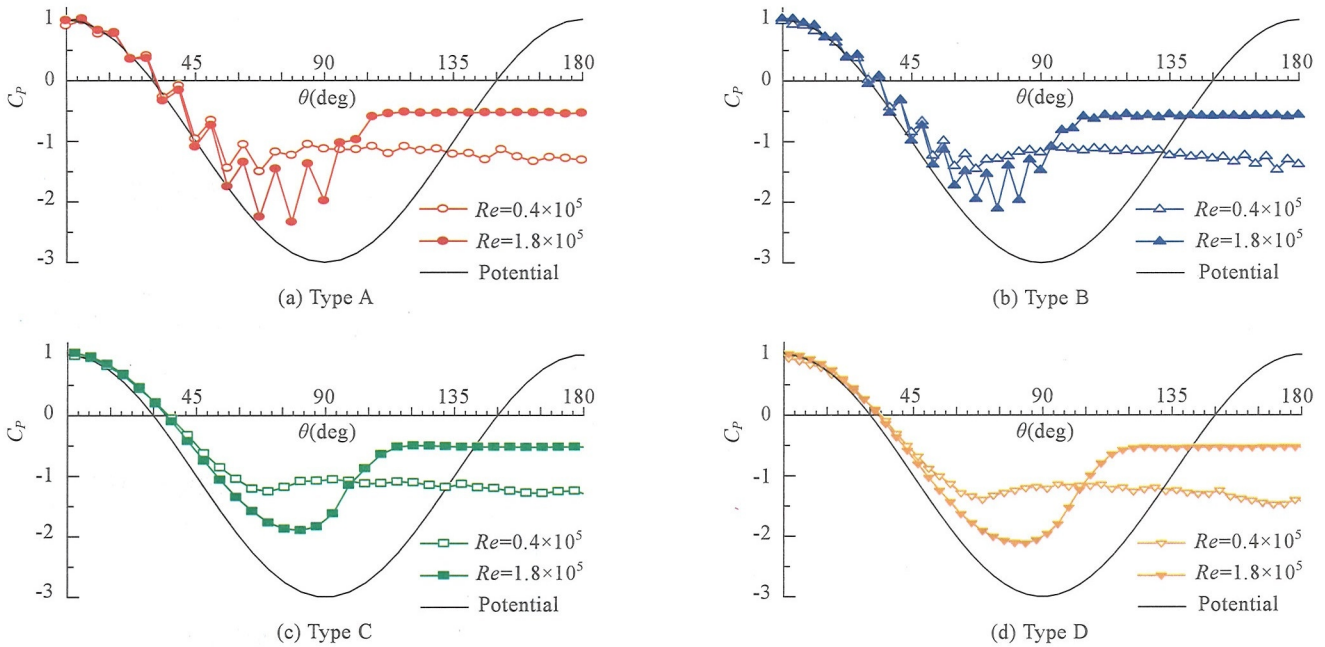


Fig. 5 Pressure distribution

3.2 圧力分布

圧力係数 C_p 値は、次式より定義される。

$$C_p = \frac{P - P_0}{\rho U^2 / 2} \quad (2)$$

P は物体表面の圧力、 P_0 は一様流の静圧である。

Fig.5 に溝付円柱の亜臨界領域 $Re=0.4 \times 10^5$ 、超臨界領域 $Re=1.8 \times 10^5$ における C_p 値の分布を示す。淀み点を 0° として、 θ 方向に $0 \sim 180^\circ$ としている。

Type A, B における C_p 分布に見られる凹凸は山部と谷部の速度差によるものである。亜臨界領域では溝数の違いは C_p 分布にはほとんど表れず、どの Type においても C_p 値は 70° 付近まで減少傾向を示したあとわずかに上昇し、 80° 付近から C_p 値は一定の値を保っているため、Fig.3 においても C_D 値に違いが見られない。それに比べ超臨界領域では C_p 値はいずれの Type でも 100° 以降で一定の値をとり始めており、超臨界領域における剥離点の位置は、亜臨界領域における各 Type より下流側にあり、また、背圧が高くなっている。このことから、Fig.3 に示すように超臨界領域における C_D 値は亜臨界領域より小さくなる。また、超臨界領域における剥離点は Type B が最も上流側で、Type D が最も下流側にあり、Fig.3 に示す超臨界領域における C_D 値の差異と一致している。

3.3 油膜法による円柱表面の流れの可視化

Fig.6 に溝付円柱の超臨界領域 $Re=1.8 \times 10^5$ における油膜法による円柱表面の可視化実験を行った結果を示す。Type A では溝内部に油膜が線状に現れている部分、油膜が溝入口付近に溜っている部分が確認できる。線状の油膜は、溝外側で剥がれた流れが溝内部で再付着し、その部分が淀んでいるためである。このように油膜が線状に現れるのは流れの再付着点であると考えられる。そして油膜が溝入口付近に溜っている部分というのは、溝内部に再付着した油膜が剥離泡の発生に対応して、溝内部で逆流しているためであると考えられる。また、 $\theta = 101.25^\circ$ の

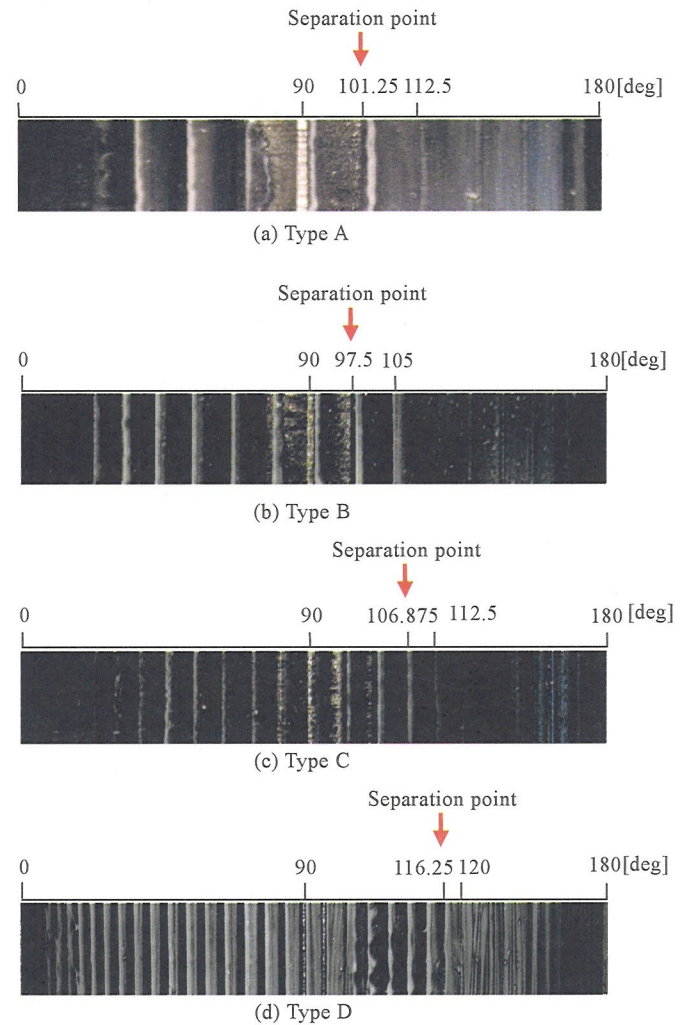


Fig. 6 Oilfilm visualization ($Re=1.8 \times 10^5$, Supercritical region)

山部では油膜は無くなり $\theta = 112.5^\circ$ の山部では油膜が残っている。このことより、 $\theta = 101.25^\circ$ の山部が剥離点であると推察される。同様の理由から Type B では $\theta = 97.5^\circ$ の山部、Type C では $\theta = 106.875^\circ$ の山部、Type D では $\theta = 116.25^\circ$ の山部が剥離点であると考えられる。これらのことより、Fig.3 に示す $Re = 1.8 \times 10^5$ における超臨界領域の C_D 値と比較すると、剥離点が最も下流側にある Type D の C_D 値が最も低く、剥離点が最も上流側にある Type B の C_D 値が最も高い値をとっている。

3.4 剥離点

Fig.7 に Re 数に対する剥離点の位置の関係を示している。これは、Fig.6 の油膜法による可視化実験による結果及び、圧力係数分布より判断した。剥離後の後流領域内では、どの測定点においてもほぼ同じ C_p 値になる。しかし、流れが剥離を起こして溝の内部で逆流が発生していると考え、また、剥離は溝の内部で起こるとは考えにくいので、溝の外側で剥離するものとした。そして滑面については測定点と測定点の間で剥離する可能性があるため、測定点の間隔である $5.625(\text{deg})$ の幅をもって示している。

それぞれの Type において、臨界領域の中でも C_D 値が高い Re 数では、剥離点の位置が上流側に見られ、 Re 数の増加とともに下流側へと移行している事が分かる。Fig.3 における臨界 Re 数において、剥離点は最も下流側に示されていることが分かる。そして、超臨界領域の Re 数では剥離点は同じ位置を示している。溝を施したそれぞれの Type の超臨界領域において、Type D が最も下流側で、Type B が最も上流側で剥離していることが分かる。

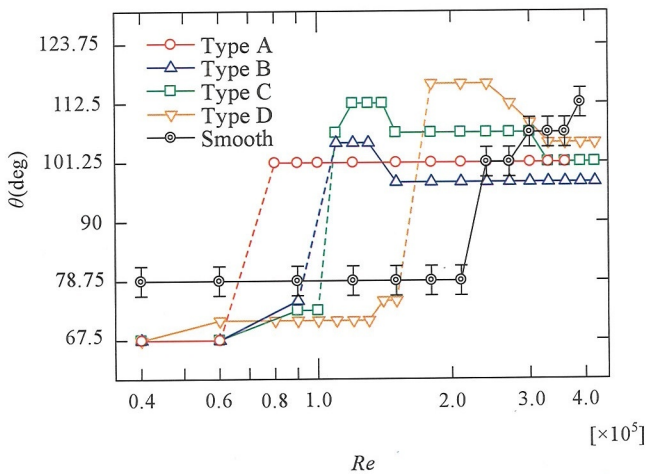


Fig.7 Separation point

3.5 円柱後流場の速度分布及び乱れ度分布

Fig.8 に溝付円柱の超臨界領域 $Re = 1.8 \times 10^5$ における円柱後流を熱線風速計にて格子状に測定した結果を等高線で示した。測定に使用した熱線風速計は I 型プローブを用いているため流れの向きは確認できないので、速度については大きさを表している。どの Type においても円柱のすぐ後方では速度はほとんどなく、大きく乱れていることがわかる。円柱から流れに対して垂直方向に少し離れた場所では乱れはなく一様流速を保っていることから渦の影響を受けていないと考えられる。それに比べて流れに対して水平方向では広範囲にわたって渦の影響を受けていることがわかる。後流領域の幅に着目すると、Type D が最

も狭くなっており、Type B が最も広がっている。このことから、Fig.3 に示しているように Type D の C_D 値が最も小さく、Type B の C_D 値が最も大きくなっていることがわかる。

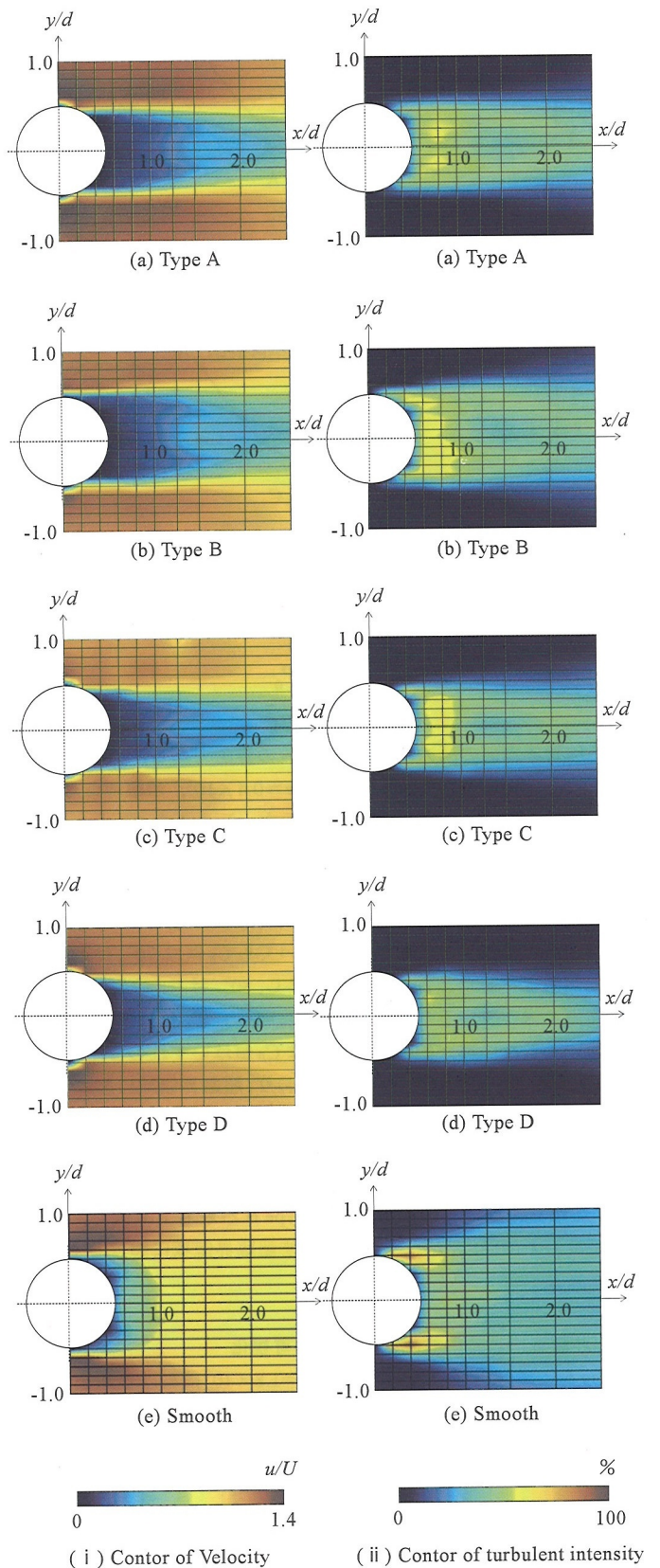


Fig.8 Wake of the cylinder

3.6 ストローハル数

Fig.9 に本実験での Re 数範囲における St 数の変化を示す. St 数は熱線風速計で変動速度を測定し, 周波数分析により得られた卓越した周波数 f から次式より算出した.

$$St = \frac{fd}{U} \quad (3)$$

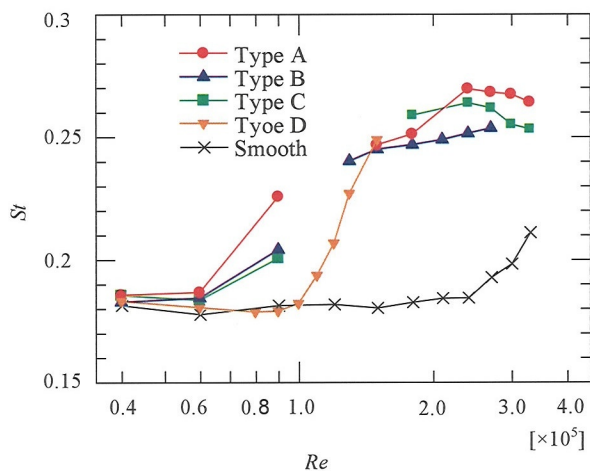


Fig.9 Strouhal number

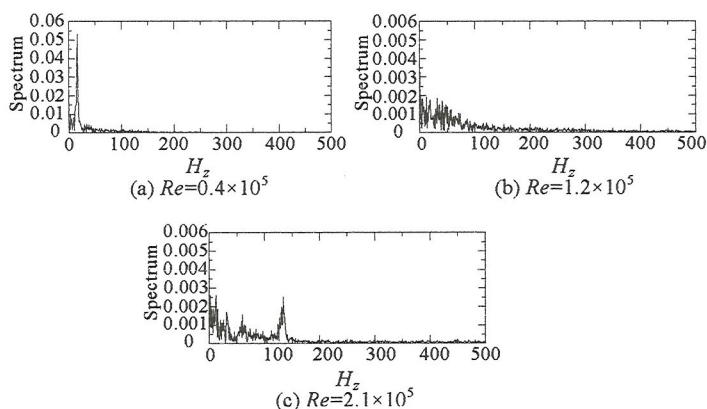


Fig.10 Spectrum of velocity fluctuation of Type A

滑面円柱の亜臨界領域での St 数を見ると, 約 0.18 で一定であり, 臨界領域である $Re=2.7 \times 10^5$ から上昇している. 溝付円柱の臨界領域から臨界点付近では安定した渦放出が認められず, また渦周波数のスペクトルも非常に小さいためプロットはしていない. 例として, Type A の亜臨界領域, 臨界点付近, 超臨界領域での周波数解析結果を Fig.10 に示す. $Re=0.4 \times 10^5$ は約 20Hz の周波数が卓越しており, これはカルマン渦の周波数であると考えられる. $Re=1.2 \times 10^5$ は卓越した渦周波数が見受けられない. そして, $Re=2.1 \times 10^5$ は約 150Hz の周波数が卓越しており, これもカルマン渦の周波数であると考えられる. しかし, 亜臨界領域に比べ超臨界領域では卓越した周波数のスペクトルは非常に小さいことが分かる. 溝付円柱では溝数の違いにより St 数に違いが見られた. 溝付円柱の亜臨界領域にあたる $Re=0.4 \times 10^5$ での St 数は滑面円柱の St 数と同一であるといえる. 溝付円柱の超臨界領域での St 数は, Type B が最も小さい. これはカルマン渦の渦放出周期が長いことを表す. これにより Type B の円柱後流場には大きな渦ができ, 後流領域が大きくなり C_D 値も大きくなると考えられる.

4. 結論

以上の結果から, 以下のような結論が得られた.

1. 臨界 Re 数で最も小さい C_D 値を得たのは Type D であり, 最も大きい C_D 値を得たのは Type A で, 溝数が増すと臨界 Re 数における C_D 値は減少する.
2. Type A, Type B, Type C, Type D の順に低 Re 数側で臨界領域を迎え, 臨界領域は溝数が増すことにより高 Re 数側へ移行する.
3. 剥離点を円柱後方に移動させ, 後流領域が小さくなることで C_D 値を減少させることができる.
4. 後流場の St 数の測定により, 溝数の違いによる渦周波数の違いが明らかとなった.

引用文献

- (1) E.Achenbach, Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 46, part 2, (1971), pp.321-335
- (2) 安達 勤, 小野 博基, 松内 一雄, 河合 達雄, 長 哲夫, 高レイノルズ数領域における円柱まわりの流れ (表面粗さの影響), *日本機械学会論文集 (B 編)*, 55 巻, 511 号, (1989-3), pp.685-692
- (3) 青木 克巳, 李 相根, 沖 真, 溝付円柱周りの流れと抵抗, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 64 巻, 617 号, (1998-1), pp.18-24
- (4) 高山 晋一, 島田 卓弥, 青木 克巳, 円弧形溝による円柱の抗力低減のメカニズム, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 70 巻, 697 号, (2004-9), pp.125-132

