

溝付円柱の溝形状が及ぼす流動特性と抗力低減メカニズム

若井豊^{*1}・高山晋一^{*2}・青木克巳^{*3}

Flow Characteristics and Drag Reduction Mechanism on the Groove Shape of the Circular Cylinder with Grooves

by

Yutaka WAKAI, Shinichi TAKAYAMA and Katsumi AOKI

(received on Sep. 30, 2004 & accepted on Dec. 22, 2004)

Abstract

This paper describes the flow characteristics for a circular cylinder with grooves of different shapes. The purpose of this study is to clarify the surface structure in relation to the effectiveness of drag reduction, and the mechanism of drag reduction. Circular cylinders with 32 grooves in the direction of the span were used in this study. The grooves took one of three shapes (arc, triangle, or square). The pressure of the surface was measured with a semiconductor pressure transducer at $Re=0.4\times 10^5\sim 3.9\times 10^5$. The drag coefficient was calculated from the pressure distribution and by numerical analysis. The vortex shedding frequency at the wake flow area and the velocity near the surface were measured using a hot-wire anemometer. The flow characteristics near the surface were clarified by numerical analysis. It was clear that the drag coefficient is dependent on the shapes of the grooves.

Keywords: Circular cylinder, Fluid force, Flow visualization, Shape of Groove, Numerical analysis

1. 結論

円柱は鈍頭物体の代表的形状であるため、円柱に作用する圧力抗力の低減に関する研究が数多く報告されている。その中に円柱表面に粗さをつけた研究の報告⁽¹⁾⁽²⁾がある。この場合、抗力が減少する臨界領域は滑面円柱に比べ低レイノルズ数側へ移動し、粗さを大きくすると、臨界領域はさらに低レイノルズ数側にあらわれている。しかし、超臨界領域における抗力係数 (C_D 値) は急激な増加傾向を示す。また、円柱表面に規則的な円弧形の溝を施した研究を著者らはすでに報告⁽³⁾しており、溝付円柱の臨界領域は粗さを施した円柱と同様に低レイノルズ数側へ移動し、超臨界領域における C_D 値は粗さを施した円柱よりも減少することや、溝深さを変化させた場合のレイノルズ数に対する揚抗力特性を明らかにしている。このような表面構造の変化による圧力抗力の低減メカニズムが解明されれば、基本形状を変化させることなく、鈍頭物体の圧力抗力の低減が可能となり、設計範囲の拡大や材料費の削減など経済効果をもたらすであろうと考えられる。

そこで本報告では一様流中に置かれた溝付円柱の抗力低減に有効な表面構造を探るとともに、溝形状の違いによる抗力低減のメカニズムを明らかにすることを目的としている。溝形状を代表的形状である円弧・三角・四角形として、圧力分布の測定をおこない、レイノルズ数に対する C_D 値の変化を明らかにしている。また、油膜法による流れの可視化をおこない、溝内部における流れの様式について検討した。そして、熱線風速計を用いて表面近傍の流速測定と後流場の速度変動を測定し、表面

近傍の速度分布とレイノルズ数に対するストローハル数の変化を明らかにしている。さらに、数値解析をおこない詳細な流動特性を調べた。

2. 実験装置及び方法

本実験で使用した風洞は吹出し型風洞であり、その吹出し口寸法は $400\text{mm}\times 180\text{mm}$ である。また、風速範囲は $6\sim 80\text{m/s}$ であり、この風速範囲での乱れ度は 0.4% 以内である。図 1 に供試円柱の断面図を示す。使用した円柱は溝形状が異なる 3 種類の溝付円柱と滑面円柱であり、円柱の直径は $d=80\text{mm}$ 、長さは 172mm である。また、円柱両端には二次流れを防ぐため直径 110mm の側板を取り付けている。

溝付円柱の断面形状を図 2 に示す。溝形状は円弧・三角・四角であり、円柱の周囲に 11.25deg 間隔で均等に 32 本施している。

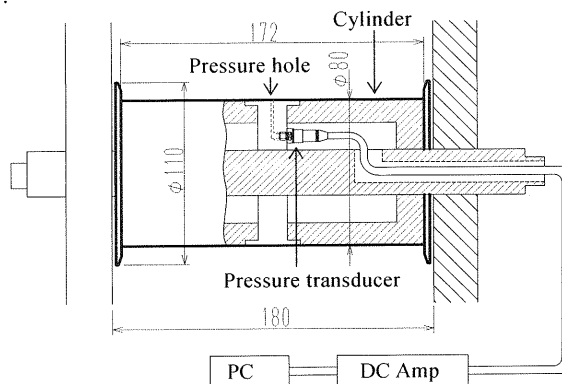


Fig.1 Test cylinder

* 1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期
* 2 工学研究科機械工学専攻博士課程後期
* 3 工学部機械工学科教授

溝の深さは0.3mmであり幅は6.76mmである。そして、表面圧力を測定するために直径0.8mmの圧力測定孔を溝外部に1箇所、溝内部に3箇所設けている。溝内部に設けた測定孔は隣り合う山の頂点間の角度($\alpha=11.25\text{deg}$)を4等分した位置の表面に対して垂直にあげられており、本報告では流れの方向に対して上流側から入口側、中心部、出口側と呼ぶことにしている。表面圧力は円柱内部に取り付けた半導体圧力トランスデューサによりサンプリング時間1msecごとに2048点で測定し、DCアンプを介しPCにて処理している。表面圧力は流れに正対する位置が溝外部になる状態と溝中心部になる状態で区別して溝付円柱では一周128点で計測をおこなった。

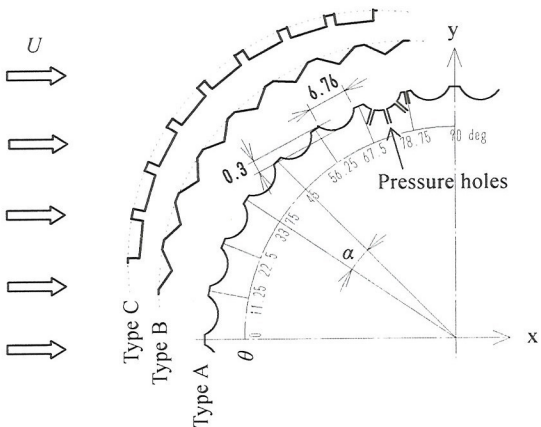


Fig.2 Cross section of cylinder

円柱表面及び円柱後流場における流れの様子を観察するため、油膜法と火花追跡法を用いて可視化実験をおこなった。油膜法に用いた油膜は流動パラフィン・オレイン酸・アミニ油に顔料として酸化チタンを混合したものを塗布した。

円柱表面近傍の流速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。測定はXYテーブルにより円柱表面から半径方向に0.1mm間隔で移動し、サンプリング時間1msecごとに1024点で計測をおこなった。

後流場の速度変動の測定には熱線風速計を用い、(x/d, y/d)=(0.6, 0.9)の位置で測定をおこなった。

3. 数値解析

円柱周りの流れを明らかにするため、二次元非定常乱流計算をおこなった。数値解析には汎用熱流体解析ソフトウェアFLUENTを用いた。使用した乱流モデルは、大きな圧力勾配のあるような複雑な流れに適用可能であると言われている⁽⁴⁾ Realizable k-εモデルである。格子作成には格子作成ソフトであるGambitを用いた。計算領域は図3に示すように幅20d、高さ

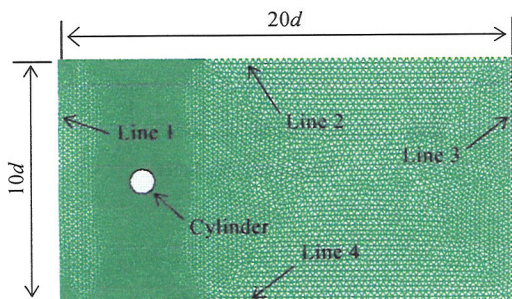


Fig.3 Calculation area

10dとし、境界条件は、Line 1に流入条件として30m/s一定流速を与え、Line 3に流出条件として静圧を0Paと与えた。Line 2及びLine 4は対称境界条件とした。

4. 実験結果及び考察

4.1 抗力係数

図4はRe数に対する抗力係数 C_D 値の変化を示している。 C_D 値は時間平均による圧力分布より、溝内部を三分割した長さを用いて積分して得られた抗力 D を用いて次式で算出している。

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

ここで、 U は一様流速、 ρ は空気の密度、 d は円柱直径である。

粘性流体中に置かれた物体には、一般に、壁面摩擦による摩擦抗力と、物体の形状に依存する圧力抗力が作用する。境界層剥離を伴う円柱のような鈍頭物体では圧力抗力が抵抗の大部分を占めるので摩擦抗力は無視した。

ここで流れに正対する点が溝外部になる場合の溝配列をPattern 1とし、流れに正対する点が溝中心部になる場合の溝配列をPattern 2とした。

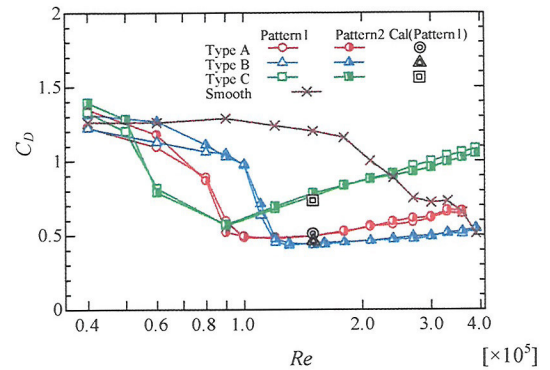


Fig.4 Change of drag coefficient for Re

図4より、滑面円柱は C_D 値が約1.25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、溝付円柱の場合では亜臨界領域、臨界領域、超臨界領域が確認できる。滑面円柱と溝付円柱を比較すると、溝付円柱の臨界領域は滑面円柱よりも低レイノルズ数側にあらわれる。また、溝付円柱の中で最も低レイノルズ数で臨界領域を迎えるものは四角形の溝を有するものであり、最も高レイノルズ数で臨界領域を迎えるものは三角形の溝を有するものである。しかし、それぞれの臨界点における C_D 値は四角形の溝を有するものが最も高く、三角形の溝を有するものが最も低くなり、超臨界領域で最も抗力低減が可能となる溝形状は三角形であることが明らかとなった。また数値解析の結果は、実験結果と良く一致していると言える。そして、超臨界領域における C_D 値の増加傾向は円弧形、三角形の溝を有するものは緩やかであるのに対し、四角形の溝を有するものは増加の度合いが大きい。また、Patternの違いによる C_D 値の違いがほとんど見られないため、以後Pattern 1のみについて詳細に述べる。

4.2 円柱表面圧力分布

表面の圧力は、圧力係数 C_P として次式により無次元化した。

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

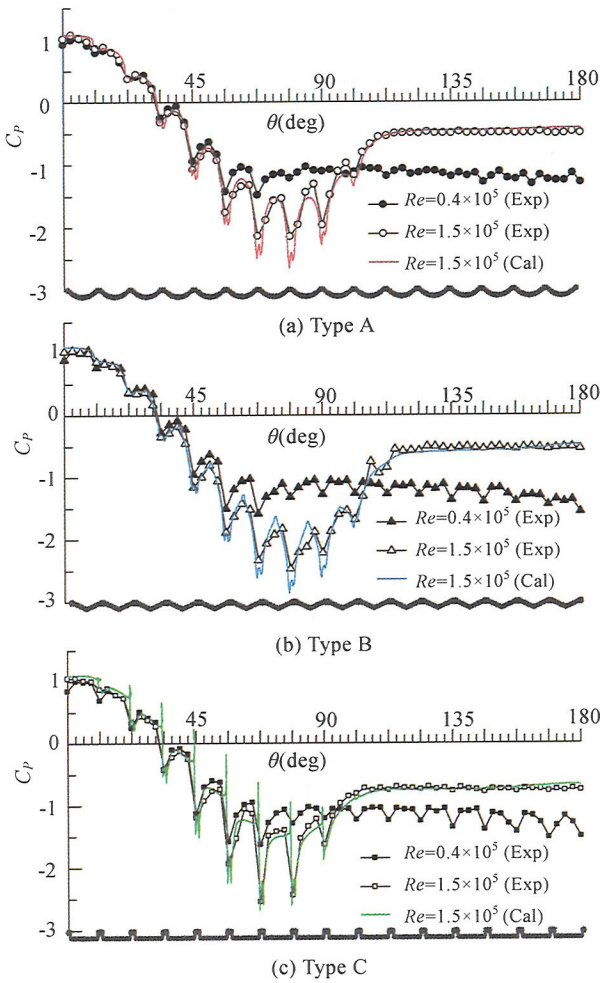


Fig.5 Pressure distribution

ここで、 P は円柱表面圧力、 P_0 は一様流速の静圧である。

図 5 は溝付円柱の亜臨界領域 ($Re=0.4 \times 10^5$) の実験結果と、超臨界領域 ($Re=1.5 \times 10^5$) における実験結果ならびに数値解析結果による圧力分布を示している。 C_p 分布に見られる凹凸は、溝があることで局所的に有効断面積が変化し、溝外部と溝内部で速度差が生じることによるものである。それぞれの Type に共通して超臨界領域は亜臨界領域よりも背圧係数が高く、剥離点も下流側に移動していることが分かる。

流れが表面に沿って流れる場合、溝の中心部が最も流路が広がり中心部で圧力が最大となる。ここで、超臨界領域の C_p 分布に着目すると、Type A は $\theta=0 \sim 56.25 \text{deg}$ の溝において中心部の圧力が最大値を示すため、流れは表面に沿って流れていると考えられる。しかし、 $\theta=56.25 \sim 101.25 \text{deg}$ の溝内部では出口側の圧力が最大値を示している。これは、流れが表面に沿って流れておらず、溝内部に渦領域が形成され局所的に剥離した流れが溝の中心部から出口側の付近に再付着することによるものであると考えられる。Type B も同様に $\theta=67.5 \sim 112.5 \text{deg}$ の溝内部で出口側の圧力が最大値を示しており、この範囲では流れが局所的な剥離を伴っていると推測できる。Type C の溝形状は四角形であり、流れに沿って流れる場合、溝内部での有効断面積の変化がないため、圧力勾配が支配的となり出口側の圧力が低くなる。 $\theta=33.75 \sim 90 \text{deg}$ では中心部及び出口側の圧力が最大値を示しており、この範囲の溝内部には渦領域が形成されていると考えられる。

数値解析結果は Type A, B とも実験結果と良く一致していると言える、しかし Type C は溝の出口部分で実験結果と数値解析結果に差が生じており、数値解析結果には溝の出口部分で急激な圧力上昇が起きていることが分かる。この考察については後述の 4.4 節と合わせて述べる。

4.3 円柱表面の流れの可視化

図 6 は溝付円柱表面の流れの様子を明らかにするため、油膜法による可視化実験を行った結果を示している。いずれの Type においても流れに正対する点付近では油膜が残されておらず、Type A では 45deg 、Type B では 56.25deg 、Type C では 33.75deg まで流れは表面に沿って流れていることが分かる。そして、表面に沿って流れた後、次の溝の入口部分では油膜が残されており、その溝内部には矢印で示した位置にスパン方向に線状の油膜が残されている。溝内部に残された線状の油膜を境に、油膜は上流側では主流とは逆向きに、下流側では主流方向へ移動する。したがって、この線状の油膜は、流れが溝外部で剥離し溝内部に剥離泡が発生し再付着する際に出来たものであると考えられる。Type A の $45 \sim 78.75 \text{deg}$ において溝内部に残された線状の油膜は下流側へ移動するため、剥離泡の大きさは下流へいくに従い大きくなる。 $78.75 \sim 101.25 \text{deg}$ の溝内部には線状の油膜を確認することはできない。これは時間変動により再付着点が大きく変動していることで明確な線状の油膜が残されないと考えられる。しかし、大部分の油膜が上流側へ移動しているため溝の出口部付近に再付着していると判断できる。 101.25deg の油膜は完全に剥がされているが、 112.5deg では油膜が残っているため、剥離点は 101.25deg であることが分かる。剥離点直後の溝内部では油膜が薄くなっているが、これは剥離剪断層に引き込まれる逆流によるものであると考えられる。Type B では $56.25 \sim 112.5 \text{deg}$ の全ての溝内部において線状の油膜が確認できる。線状の油膜は下流へいくに従い薄くなり、剥離泡の大きさは下流へいくほど大きくなる。また、剥離点は 112.5deg であり、Type A より溝一つ分下流側である。Type C は $33.75 \sim 67.5 \text{deg}$ の溝内部において線状の油膜が確認でき、

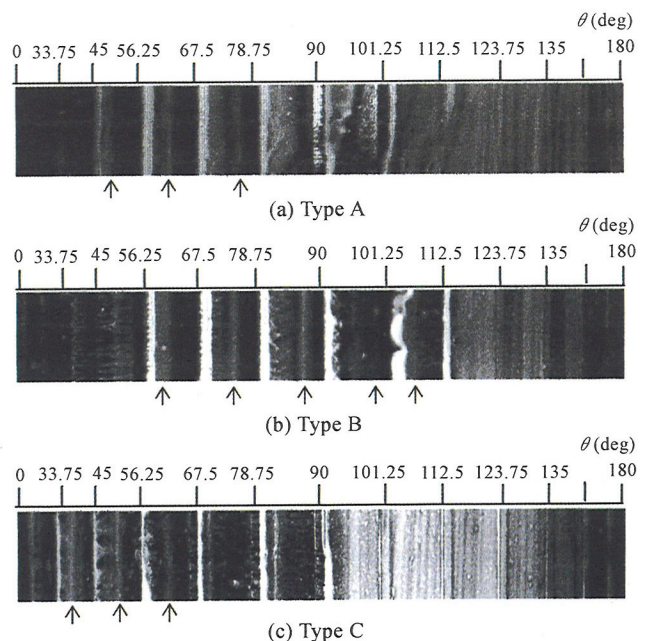


Fig.6 Oil film visualization ($Re=1.5 \times 10^5$)

剥離泡の大きさは下流側の溝ほど大きくなる。67.5~90degの溝内部には油膜が入口付近のみに残されており、溝の大部分は剥離泡による逆流の影響を受けていると考えられる。Type Cの剥離点は90degであり、溝付円柱の中で最も上流側である。

4.4 表面近傍の速度分布

図7は実験結果による $Re=1.5 \times 10^5$ の円柱表面近傍の平均速度分布を示している。流速測定には熱線風速計を用いた。プローブはI型を使用しているため、図の横軸は流速の絶対値を一樣流速で無次元化したものであり、縦軸は半径方向の距離を無次元化したものを示している。つまり $r/d=0.5$ が滑面円柱の表面となり、 $r/d=0.5$ 未満は溝の内部を示している。しかし、実験では熱線プローブを円柱表面に接触させることはできないので、円柱表面から0.05mm以内の位置を表面としている。

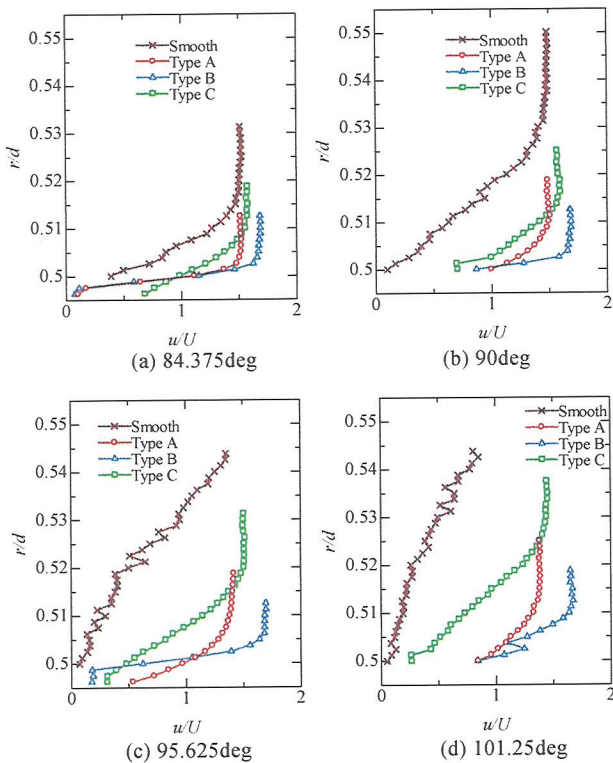


Fig.7 Velocity distribution near the surface ($Re=1.5 \times 10^5$)

図7(a)は溝の中心部の速度分布であり、滑面円柱と溝付円柱の速度を比較すると $r/d=0.5$ の位置での速度は溝付円柱のほうが大きな速度を持っていることが分かる。これは溝があることで滑面円柱の固体壁であるべき点に壁がなく、速度を持つことが出来るからである。そして、溝付円柱の中でもType Bの速度が最も大きく、Type Cが最も小さいことが分かる。図7(b)は溝外側の速度分布でありType Cの剥離点の角度に相当する。ここで、境界層厚さに着目するとType Bが最も薄く、Type Cが最も厚いことが分かる。溝を施すことで滑面の場合よりも境界層の発達を抑えられ、なかでも三角形の溝が境界層の発達の抑制に有効な形状である。また、Type Cの剥離点【図7(b)】における境界層厚さはType Aの剥離点【図7(d)】における境界層厚さと同程度になる。

図8は数値解析結果による $Re=1.5 \times 10^5$ における $\theta=78.75$ deg 付近の溝の出口部分の速度ベクトルを示している。Type A及び

Type Bの流れは滑らかに通過しているのに対し、Type Cは溝の出口付近に渦領域が形成されており、剥離した流れが溝の出口壁に衝突していることが分かる。この衝突により前述4.2節の図5(c)にみられる溝出口壁の急激な圧力上昇は、流れが出口壁に衝突することにより起きていることが分かる。この衝突により流動抵抗が著しく増加し、超臨界領域の C_D 値の増加傾向が他のTypeに比べ大きくなると考えられる。

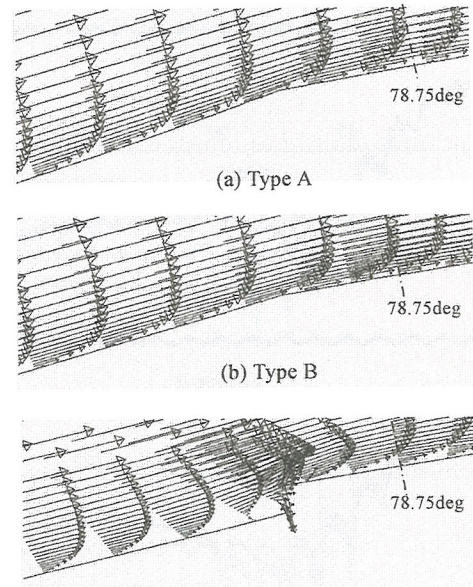


Fig.8 Velocity vector at the exit area ($Re=1.5 \times 10^5$)

4.5 表面近傍の乱流運動エネルギー分布

図9は $Re=1.5 \times 10^5$ の数値解析結果による表面近傍の乱流運動エネルギー分布を示している。

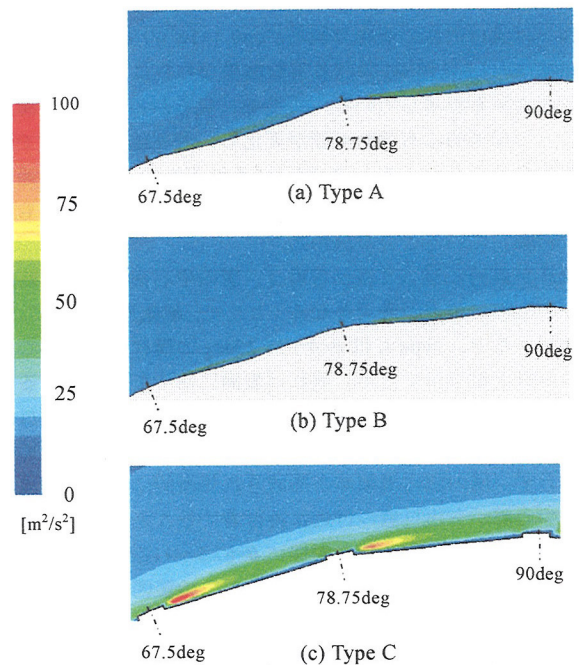


Fig.9 Contour of turbulent kinetic energy distribution ($Re=1.5 \times 10^5$)

Type A, Bの溝内部ではあまり変化が見られないが、Type Cの溝内部では溝の入口付近で乱流運動エネルギーの増加が顕著に表れ

ていることが分かる。四角形の形状は溝の入口部分で乱流運動エネルギーが増加することにより、境界層遷移が促進されやすい形状であると言える。

4.6 後流場の速度分布及び火花追跡法

図10は $Re=1.5 \times 10^5$ における数値解析結果による後流場の速度分布と、火花追跡法による可視化結果を示している。これらの図より、剥離点の位置と後流領域の幅に違いが見られ、剥離点の位置はType Bが最も下流側であり、Type Cが最も上流側である。また、後流領域の幅はType Bが最も狭く、Type Cが最も広いことが分かる。

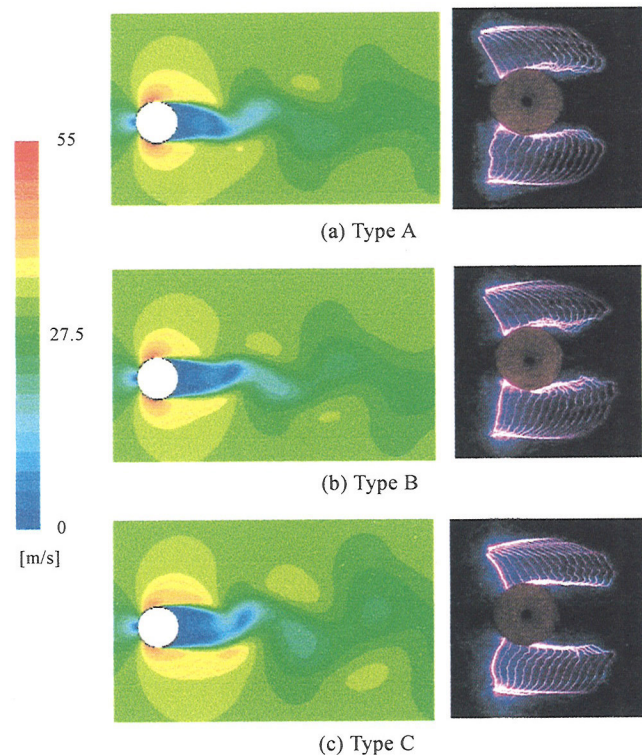


Fig.10 Wake flow of calculation and spark tracing method ($Re=1.5 \times 10^5$)

4.7 ストローハル数

図11は Re 数に対する St 数の変化を示している。また St 数は次式により算出した。

$$St = \frac{f \cdot d}{U} \quad (2)$$

f はカルマン渦周波数、 d は円柱直径、 U は一様流速である。

滑面円柱の亜臨界領域では $St=0.185$ で一定であり、 $Re=2.7 \times 10^5$ から上昇している。溝付円柱の臨界領域から境界点付近では安定した渦放出が認められず、渦周波数のスペクトルも非常に小さいためプロットすることができなかった。例として、Type Aの亜臨界領域、境界点付近、超臨界領域での周波数解析結果を図12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。溝形状の違いにより超臨界領域での St 数の違いがみられる。

Type A, Bは高い値を示しているが、Type Cは低い値を示している。 St 数が小さいということ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 C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。

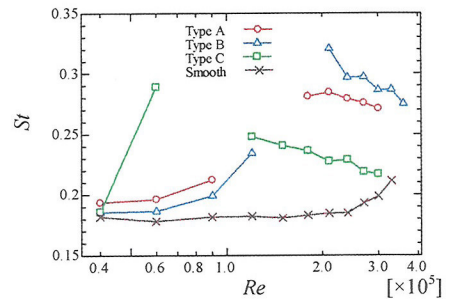


Fig.11 Strouhal number

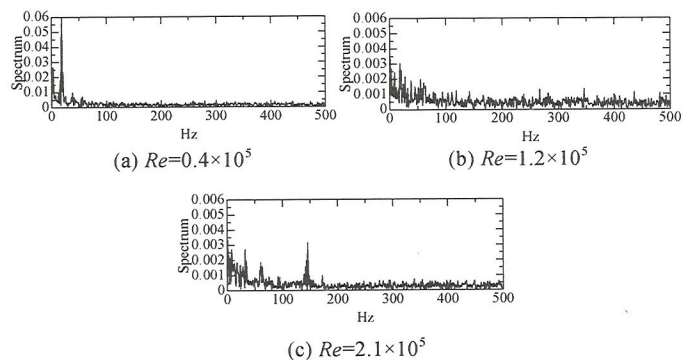


Fig.12 Spectrum of velocity fluctuation of Type A

5. 結論

溝形状の異なる溝付円柱の表面圧力、熱線風速計を用いた表面近傍の流速、後流場の速度変動の測定、数値解析、流れの可視化をおこなった結果以下のような結論が得られた。

1. 溝付円柱は滑面円柱に比べ、臨界レイノルズ数が低レイノルズ数側で現れる。
2. 臨界レイノルズ数は溝形状に依存しており、四角形の溝を有するものが最も低レイノルズ数側で、三角形の溝を有するものが最も高レイノルズ数側である。そして、超臨界領域で C_D 値が最も小さくなるのは三角形の溝を有するものである。
3. 溝付円柱表面の流れは、溝内部に発生する剥離泡により境界層遷移が促進され、滑面円柱よりも剥離点が下流側へ移行し、抗力が減少する。
4. 溝を施すことで滑面の場合より境界層の発達を抑えられることが明らかとなり、三角形の溝形状が最も発達を抑えるため剥離点を下流に移動させることが可能となる。
5. 後流場の速度変動の測定により、溝形状の違いによるカルマン渦周波数の違いが明らかとなった。

参考文献

- (1) E. Achenbach: Journal Fluid Mech., 46-2(1971), 321-335.
- (2) 安達,小野,松内,河合,長: 機論 B,55-511(1989)685-692
- (3) 高山,島田,青木: 機論 B, 70-697(2004-9),125-132
- (4) T. H. Shin, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang and J. Zhu: Computers Fluids, Vol,24 No,3 (1995) 227-238