

## 円弧溝あるいはディンプル付き円柱の空力特性

辰野, 正和  
九州大学応用力学研究所

堀之内, 修  
堀場エステック(株)

石井, 幸治  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/3559>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 128, pp.15-21, 2005-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# 円弧溝あるいはディンプル付き円柱の空力特性

辰野正和\*<sup>1</sup> 堀之内 修\*<sup>2</sup> 石井幸治\*<sup>1</sup>

(2005年1月27日受理)

## Aerodynamic Characteristics of a Circular Cylinder with Grooves or Dimples on the Surface

Masakazu TATSUNO, Osamu HORINOUCI and Koji ISHI-I

E-mail of corresponding author: tatsuno@riam.kyushu-u.ac.jp

### Abstract

The aerodynamic characteristics of a circular cylinder with grooves or dimples on the surface have been investigated experimentally.

At the high Reynolds number regime, the thickness of the turbulent boundary layer around the dimpled cylinder becomes thin and the drag force exerted on the cylinder is small.

**Key words :** *Cylinders, Drag forces, Grooves, Dimples, Turbulent boundary layer*

## 1. 緒言

鈍頭物体の表面に様々な粗度を設けると、境界層の乱流遷移を早め、抵抗を低減させる効果があることは良く知られている。

古くからゴルフボール表面のディンプル（円形くぼみ）は、抵抗低減の効果を持つものとして良く知られている。Bearman & Harvey<sup>1)</sup>は、ディンプルの形と配置を変えた場合の効果について報告している。しかし、その抵抗低減のメカニズムについては調べていない。

一方、円柱については、その表面にサンドペーパー、球状突起、ピラミッド型突起等を取り付け、抵抗低減の効果や渦発生の特性等について Achenbach<sup>2)</sup>, Achenbach & Heinecke<sup>3)</sup>, 岡島・中村<sup>4)</sup>, Güven et al.<sup>5)</sup>, Nakamura & Tomonari<sup>6)</sup>等が報告している。また、安達等<sup>7)</sup>は、円柱表面の周方向にV字形の溝（リブレット）をつけ、高レイノルズ数領域での抵抗低減の効果調べている。さらに Bearman & Harvey<sup>8)</sup>は、楕円型のディンプルを円柱表面に工作してその効果を調べている。彼らの場合、ディンプルの総面積は円柱表面の約49%であった。これらの研究によると、いずれの場合も滑面円柱より低いレイノルズ数で境界層の遷移を早め、抵抗低減の効果があると報告している。しかし、い

れの場合も、抵抗係数は最小値に達した後、レイノルズ数増大とともに徐々に大きくなっていき、滑面円柱の場合の値より大きくなっているようである。

本研究の目的は、ディンプルによる抵抗低減の効果のメカニズムを調べることであり、これまでディンプルによる抵抗低減の効果のメカニズムの詳細については報告されていないようである。また、その研究も少なく、木村等<sup>9)</sup>は、ディンプルの断面、つまり溝についての可視化実験と数値計算により、溝内には閉じたキャビティー流が生じていると報告している。また、沖等<sup>10)</sup>も、溝を持つ円柱について数値計算を行い、溝部分の圧力が高くなると報告している。

三次元的ディンプルによる境界層遷移に関して、二次元的な溝による説明で十分であろうかという疑問を持って、本研究では、円柱表面に円柱軸に平行に多数の円弧状の溝を工作したモデル（二次元的粗度分布）と多数のディンプルを工作したモデル（三次元的粗度分布）を使い、抵抗低減の効果とそのメカニズムの違いを調べようとするものである。

## 2. 実験装置と方法

実験は、幅3.6m、高さ2m、長さ15mの測定洞を備えた回流型風洞で行われた。測定洞内の一様流中の乱れ強さは、最大で0.3%程度であった。

\*1 九州大学応用力学研究所

\*2 堀場エステック(株)

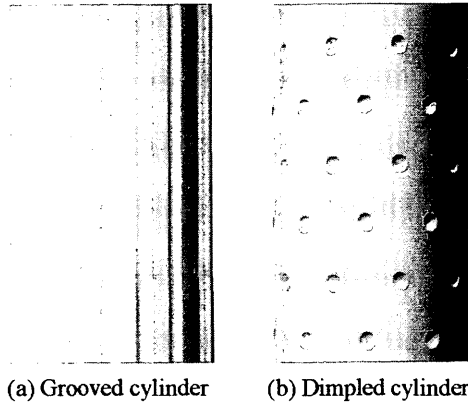


Fig.1 Test cylinders.

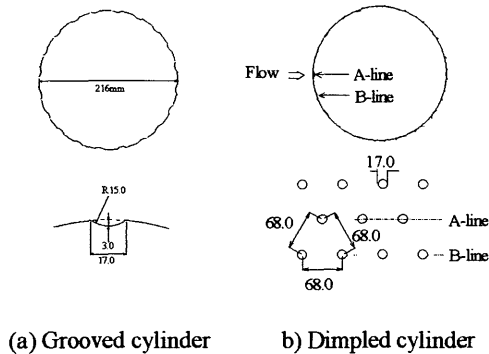


Fig.2 Arrangement of the grooves and dimples for each cylinder. Dimensions are in mm.

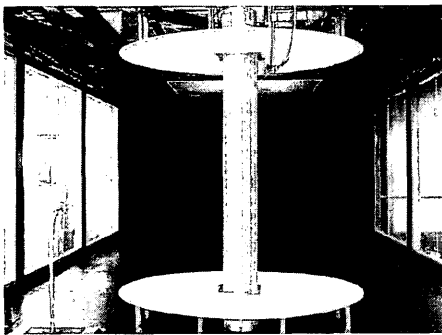


Fig.3 Test cylinder set in the wind tunnel.

実験モデルは、滑面円柱及び表面に工作した2種類の円柱であった。各円柱は、外径 216mm の塩化ビニール製の中空円筒である。Fig.1 に、溝付き円柱、ディンプル付き円柱の写真を示す。溝付き円柱は、Fig.2(a)に示すように、等間隔 (18° おき) に 20 本の円弧溝を設

けており、溝部分と山部分の幅は等しく、約 17mm である。つまり、溝部分は、円柱の全表面積の 50% にあたる。円弧溝の深さは 3mm である。一方、ディンプル付き円柱では、Fig.2(b)に示すように、ディンプルは、溝付き円柱の溝の部分の列にある。ディンプル中心間の間隔を 68mm と一定になるようにして互い違いに配置している。ディンプルの並ぶ一つの断面には 10 個のディンプルが並んでいる。この場合ディンプルの占める割合は、円柱の全表面積の 5.7% にあたる。ディンプルの直径は約 17mm、深さは 3mm である。

滑面円柱も含め、各モデルの抵抗は、モデル上下に固定した分力計で計測した。Fig.3 に、抗力計測時のモデル設置の様子を示す。両端には、直径 1.5m の端板を設置した。これは円柱直径の約 7 倍である。端板の外側の円柱と同じ直径のカバーの中に分力計はある。測定された抵抗値  $D(N)$  をもとに、次式により抵抗係数  $C_d$  を求めた。

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 S}$$

ここで、 $\rho$  は空気の密度、 $U_0$  は風速、 $S$  は上下端板間のモデルの射影面積である。

モデル表面の圧力分布を調べるために、溝付き円柱では、溝の中央と山部分の中央にそれぞれ 1 個ずつの圧力孔 (直径 0.5mm) を設けた。つまり一周 40 個の圧力孔がある。一方、ディンプル付き円柱では、ディンプルの並ぶ一つの断面に 9° おきに 40 個 (ディンプルの中央に 1 個ずつと山部に 3 個ずつ) の圧力孔 (直径 0.5mm)、その下のディンプルの並ぶ断面にも 40 個の圧力孔を設けた。各点の圧力の測定値  $P_n$  を基に、次式により各点の圧力係数  $C_{pn}$  を求めた。

$$C_{pn} = \frac{P_n - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_0^2}$$

ここで、 $P_\infty$  は、一様流中の静圧である。

また、境界層の平均速度分布と乱れ強度の計測は、X 型熱線流速計によった。

### 3. 実験結果

#### 3.1. 各モデルの抵抗変化

Fig.4 に、滑面円柱、溝付き円柱、ディンプル付き円柱の各々の抵抗係数  $C_d$  および Bearman 等<sup>8)</sup> が、ディ

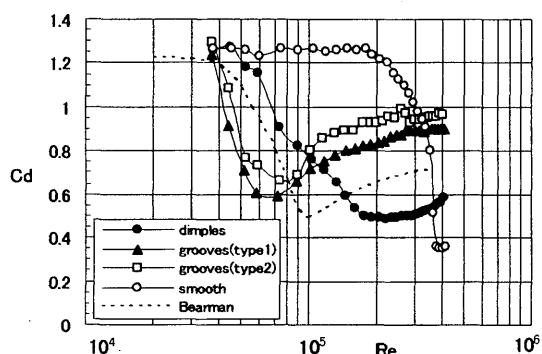


Fig. 4 Variation of Cd with Reynolds number for smooth, dimpled and grooved cylinder. Data of Bearman et al. are included.

ンプル付き円柱で求めた Cd のレイノルズ数変化を示す。

滑面円柱では、 $Re \approx 2 \times 10^5$  付近までは  $Cd \approx 1.25$  とほぼ一定値をとっている。その後は層流剥離泡を伴う境界層の遷移によって Cd 値は急激に小さくなる。この特性は良く知られていることである。円柱表面に各種の粗度を付けて抵抗を減らそうとするのは、この  $Cd \approx 1.25$  を小さくしようとするものである。

溝付き円柱のタイプ1、タイプ2とは、それぞれ前方岐点( $\theta = 0^\circ$ )に溝がある場合および山の部分がある場合を示す。溝付き円柱では、Cd 値は低いレイノルズ数で急激に減少し、 $Re \approx 7 \times 10^4$  前後で最小値をとるが、その後はレイノルズ数増大とともに徐々に増大していき、 $Re \approx 4 \times 10^5$  付近では  $Cd \approx 0.9 \sim 1.0$  近くに達している。この値は、滑面円柱の Cd 値よりもはるかに大きな値であり、溝付き円柱は滑面円柱よりも大きな抵抗を受けることになる。

Bearman 等<sup>8)</sup>の Cd 値は、 $Re \approx 4 \times 10^4$  付近から徐々に小さくなり、 $Re \approx 10^5$  付近で最小値をとっている。その後は、レイノルズ数増大とともに Cd 値は大きくなっていく。その増大傾向は、溝付き円柱に似ている。

一方、本実験におけるディンプル付き円柱の Cd 値は、レイノルズ数増大とともに徐々に減少していき、 $Re \approx 2 \times 10^5$  付近で最小値をとる。その後はレイノルズ数増大とともに若干大きくなっていき、 $Re \approx 4 \times 10^5$  付近では  $Cd \approx 0.6$  程度になっている。この値は、滑面円柱の値よりは大きい、溝付き円柱の値よりは小さい。

このように、溝付き円柱とディンプル付き円柱とでは、Cd 特性に大きな違いがある。つまり、両円柱の Cd 値は、 $Re \approx 10^5$  付近でほぼ等しいが、その後はレイノルズ数増大とともに溝付き円柱の Cd 値は増大し続ける。一方、本実験のディンプル付き円柱の Cd 値は減少していく。高レイノルズ数領域で Cd 値が小さい程受ける抵抗

の絶対値は小さいのであるから、この2種類のモデルの抗力特性を比べれば、本実験のディンプル付き円柱の方が抵抗低減の特性は優れているといえる。また、Bearman 等<sup>8)</sup>のディンプル付き円柱と比較しても本実験のディンプルの工作の方が優れているといえる。

以下では、こうした Cd 特性を持った溝付き円柱とディンプル付き円柱のまわりの流れの詳細を調べることとする。

### 3. 2 圧力分布、剥離点

Fig. 5, 6 は、溝付き円柱について、レイノルズ数が低い場合と高い場合の代表的な圧力分布を示す。Fig. 5 は、溝付き円柱タイプ1についてであり、Fig. 6 は、溝付き円柱タイプ2についてである。どちらも、低いレイノルズ数では  $\theta = 80^\circ$  付近で  $C_p$  値は -2 を少し越える程度に低くなっている。これは滑面円柱の場合よりもかなり低く、 $\theta < 90^\circ$  での低圧であるので、抵抗低減に溝の効果が大きいことが分かる。一方、レイノルズ数の高い場合には、 $C_p$  の最小の位置は  $\theta \approx 70^\circ$  付近にあるが、 $C_p \approx -1.8$  程度であり、また剥離点も前方へ移動しているようである。こうした結果、抵抗は大きくなっており、高レイノルズ数領域では、溝の効果は小

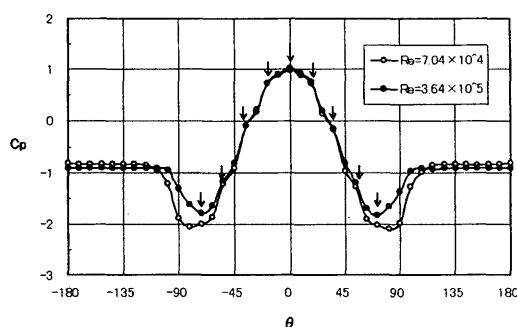


Fig. 5 Mean pressure distributions for the grooved cylinder (type 1 orientation).

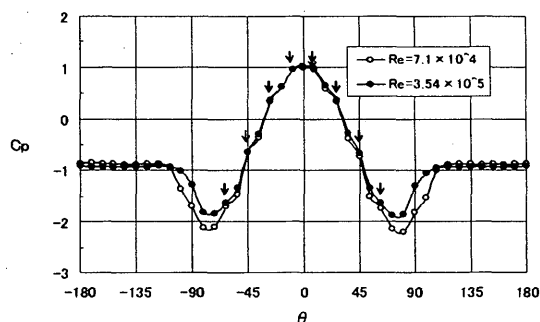


Fig. 6 Mean pressure distributions for the grooved cylinder (type 2 orientation).

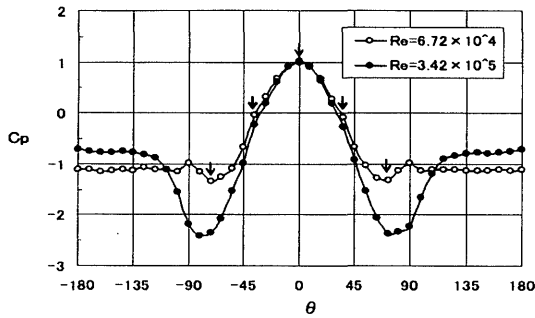


Fig. 7 Mean pressure distributions for the dimpled cylinder (on A-line).

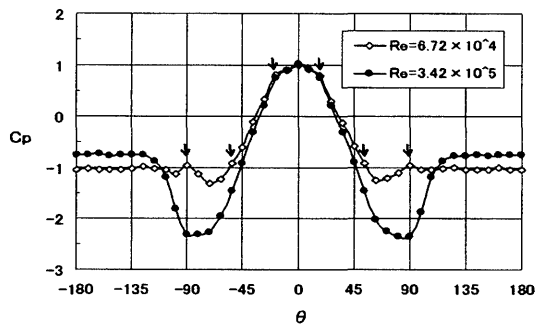


Fig. 8 Mean pressure distributions for the dimpled cylinder (on B-line).

さくなっていることが分かる。なお、注目すべきことは、いずれの場合も、滑面円柱の圧力分布に比べて、溝部での圧力が若干高く、山部での圧力が若干低くなっていることである。Fig. 5, 6 で、矢印で示した位置が溝の位置である。また、矢印で示したあたりまで、溝部の圧力は滑面の場合より若干高くなっている。沖等<sup>10)</sup>が数値計算で指摘したと符合するが、そのメカニズムの詳細は不明である。矢印よりも後方では、溝部、山部での圧力差は見られなかった。

一方、Fig. 7, 8 は、ディンプル付き円柱についての圧力分布を示す。Fig. 7 は、一つのディンプルが前方岐点( $\theta = 0^\circ$ )にある場合の A 列の圧力分布であり、Fig. 8 は、その下の B 列についてのものである。基本的にはほとんど差はなく、低いレイノルズ数の範囲では、剥離点が  $90^\circ$  付近まで後退し、剥離後流域の  $C_p$  の値も  $-1 \sim -1.1$  程度で滑面円柱の値に比較して若干大きくなっている。その結果、滑面円柱よりは低い抵抗となっているが、溝付き円柱よりは大きい。高いレイノルズ数領域では、Fig. 7, 8 で明らかなように、 $\theta = 80 \sim 90^\circ$  で  $C_p$  値は  $-2.3 \sim -2.4$  という値となっており、抵抗低減に効果があることがわかる。しかし、この  $C_p$  の値は、滑面円柱の両側で境界層が乱流に移移した場合の値よりは若干大きい。また、ディンプル付き円柱

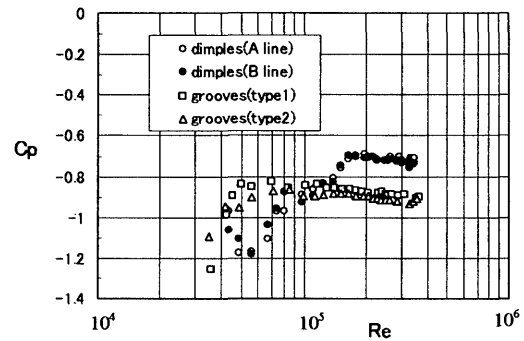


Fig. 9 Variation of base pressure coefficient with Reynolds number for each cylinder.

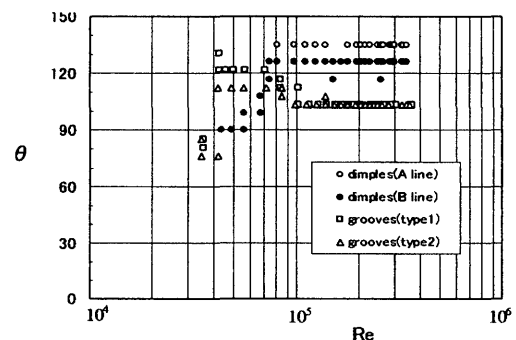


Fig. 10 Variation of separation point with Reynolds number for each cylinder.

の剥離後流内の  $C_p$  の値は  $-0.7 \sim -0.8$  程度であるが、この値は滑面円柱で境界層が乱流に移移した場合の値約  $-0.3$  より小さい。その結果、Fig. 4 で明らかなように、ディンプル付き円柱は高レイノルズ数領域で抵抗低減の効果はあるが、境界層が乱流に移移した滑面円柱の値には及ばない。Fig. 7, 8 で矢印で示した位置がディンプルのある位置である。この場合も、ディンプル内の圧力が若干大きくなっているのが分かるであろう。矢印よりも後方では、ディンプル部と山部での圧力差は見られなかった。

Fig. 9 に、各モデルの背圧係数を示す。溝付き円柱の場合、レイノルズ数が大体  $6 \times 10^4$  より大きい範囲ではあまり変化していない。一方、ディンプル付き円柱では、 $Re = 1.6 \times 10^5$  付近まではレイノルズ数増大とともに  $C_p$  の値は徐々に大きくなっていく。これは、Fig. 4 の抵抗係数の図で、ディンプル付き円柱の  $C_d$  の値が徐々に小さくなっていく領域に対応している。レイノルズ数が  $1.6 \times 10^5$  を越えると  $C_p$  の値はほぼ一定となっている。

Fig. 10 に、圧力分布から求めた各モデルの剥離点を示す。溝付き円柱では、 $Re > 10^5$  でほとんど一定で約  $103.5^\circ$  であった。一方、ディンプル付き円柱では

$Re > 8 \times 10^4$  の範囲で  $\theta = 120 \sim 135^\circ$  であった。滑面円柱で乱流境界層が形成されている場合、剥離点はほぼ  $135^\circ$  の付近と知られている。ディンプル付き円柱の場合、その近くまで剥離点が後退しているのが分かる。

### 3.3 平均速度分布、乱れ強度

Fig. 11 に、 $\theta = 90^\circ$  の位置における X 方向の無次元の平均速度  $\bar{u}/U_0$  の Y 軸方向分布を示す。ここで、X 軸は一樣流方向、Y 軸はモデル表面に鉛直方向とする。溝付き円柱についてはタイプ1の場合、ディンプル付き円柱については A 列の位置での値である。一樣流風速  $U_0 = 5\text{m/s}$  と  $10\text{m/s}$  について示している。

$\bar{u}/U_0$  の値が最大値に達するまでの  $y/d$  の値を境界層厚さとする。溝付き円柱では、 $U_0 = 5\text{m/s}$  ( $Re = 7.54 \times 10^4$ ) の場合の方が、 $U_0 = 10\text{m/s}$  ( $Re = 1.47 \times 10^5$ ) の場合より境界層は薄くなっている。この時、Fig. 4 の抵抗係数を比べると、 $U_0 = 5\text{m/s}$  の方が抵抗係数は小さい。一方、ディンプル付き円柱では、 $U_0 = 10\text{m/s}$  ( $Re = 1.51 \times 10^5$ ) の場合の方が、 $U_0 = 5\text{m/s}$  ( $Re = 7.54 \times 10^4$ ) の場合よりも境界層は薄くなっており、 $\bar{u}/U_0$  の最大値も大きい。この時、抵抗係数は  $U_0 = 10\text{m/s}$  の方が小さい。このように、境界層が薄く、しかも  $\bar{u}/U_0$  の最大値が大きい程抵抗係数が小さくなることを示唆しているように思われる。

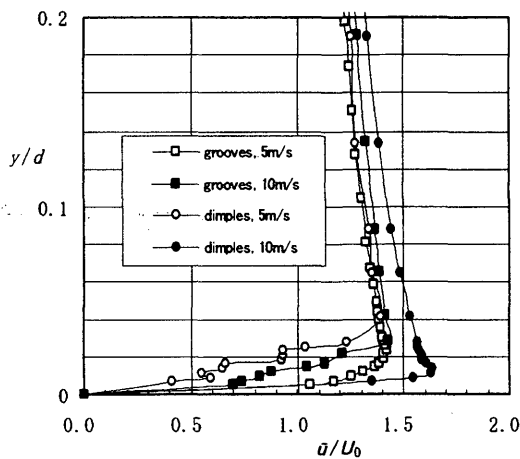


Fig. 11 Mean velocity profiles at  $\theta = 90^\circ$  for each cylinder.

次に、こうした平均的な速度分布を作り出していると思われる X, Y, Z 軸方向の速度成分の乱れ強度を調べた。Z 軸は、X 軸、Y 軸に直角なモデル表面に沿う方向である。ここでは、溝付き円柱についてはタイプ1について、ディンプル付き円柱については A 列について、 $\theta = 90^\circ$  の位置における乱れ強度を調べた。X, Y, Z 軸方向の速度の乱れ成分を  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  とし、それぞれの乱れ強度を次のように定義する。

$$u^* = \sqrt{u'^2}/U_0, \quad v^* = \sqrt{v'^2}/U_0, \quad w^* = \sqrt{w'^2}/U_0$$

Fig. 12, 13 に、溝付き円柱の  $U_0 = 5\text{m/s}$  および  $U_0 = 10\text{m/s}$  の場合について各成分の乱れ強度の Y 軸方向分布を示す。Fig. 12 と Fig. 13 を比較すると、いずれの成分の乱れ強度も  $U_0 = 5\text{m/s}$  の方が、 $U_0 = 10\text{m/s}$  の場合より小さくなっているのが分かる。溝付き円柱の場合、前述のように、抵抗係数が小さいのも、境界層厚さが薄いのも  $U_0 = 5\text{m/s}$  の場合であった。

一方、Fig. 14, 16 に、ディンプル付き円柱の  $U_0 = 5\text{m/s}$ 、および  $U_0 = 10\text{m/s}$  における各成分の乱れ強度を示す。Fig. 14 の  $U_0 = 5\text{m/s}$  の場合、 $u'$  の成分が異常に大きいが、そのときの速度変動を Fig. 15 に示す。約 60 秒間の時間的変化を示している。Fig. 15 によると、 $\theta < 90^\circ$  の前方で流れが間欠的に大きく変化しているのが分かる。流れの剥離、あるいは流れの遷移が間欠的に起こっているのであろうが、その詳細は不明である。Fig. 14 に

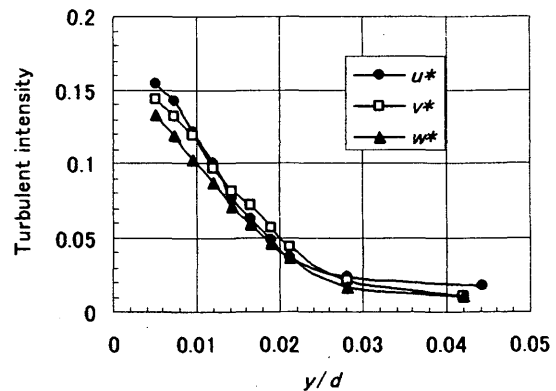


Fig. 12 Turbulent intensities at  $\theta = 90^\circ$  and  $U_0 = 5\text{m/s}$  for the grooved cylinder (type 1 orientation).

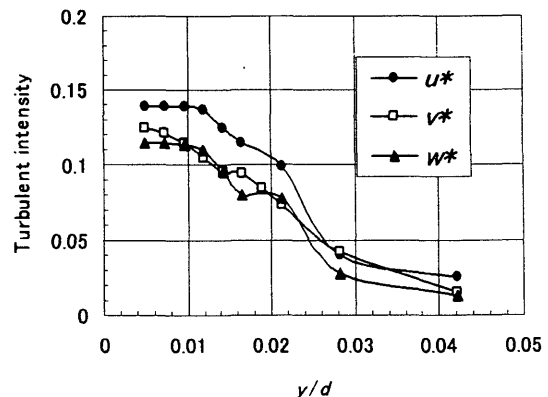


Fig. 13 Turbulent intensities at  $\theta = 90^\circ$  and  $U_0 = 10\text{m/s}$  for the grooved cylinder (type 1 orientation).

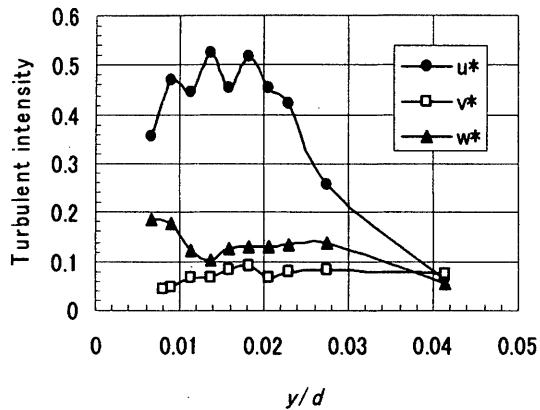


Fig. 14 Turbulent intensities at  $\theta=90^\circ$  and  $U_0=5\text{m/s}$  for the dimpled cylinder (on A-line).

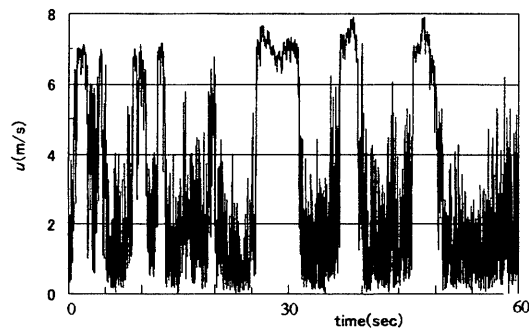
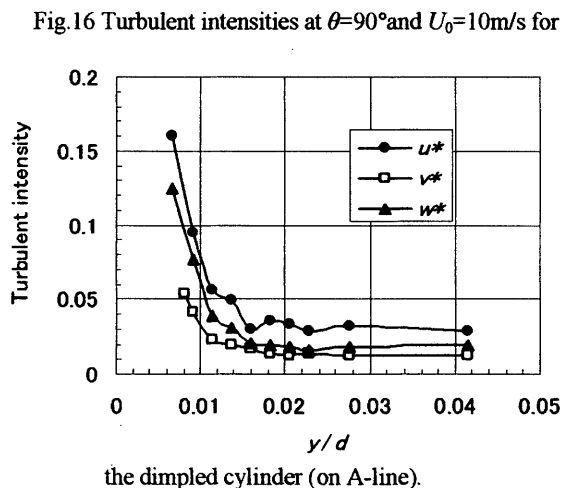


Fig. 15 Fluctuation of  $u$  component at  $y/d=0.0137$ ,  $\theta=90^\circ$  and  $U_0=5\text{m/s}$  for the dimpled cylinder (on A-line).



示す  $u^*$  の値は、こうした変動から単純に求めたものである。  $v^*$  成分も  $w^*$  成分も大きくなっている。ともあれ、こうした流れが出来ている場合、平均的に境界層は厚く、抵抗は大きい。 Fig. 16 は、  $U_0=10\text{m/s}$  の場合の乱れ強度を示している。表面ごく近くを除いて、乱れ強度は小さい。また、大きな特徴は、  $v^*$  成分よりも  $w^*$  成分

の方が強くなっている。この場合、 Fig. 11 で明らかのように、境界層厚さは薄く、抵抗係数も小さい。こうした結果から、抵抗低減のためには、乱れ強さが強すぎても良くないということがいえる。特に、溝付き円柱のように、  $u^*$  成分がかなり強い場合には、高レイノルズ数領域では境界層は厚くなり、抵抗低減の効果は落ちることになる。ディンプル付き円柱の場合のように、乱れ強度は、物体表面近くで強く、表面から遠ざかるにつれて急激に弱くなり、また  $u^*$  成分よりも  $w^*$  成分の方が強いような場合が高レイノルズ数領域において抵抗低減の効果があると言えるのでは無からうか。 Bearman 等<sup>8)</sup>の実験では、境界層の構造、乱れの特性等何ら示されていないが、レイノルズ数が大きくなるにつれて、抵抗係数は、溝付き円柱と同じような増加傾向を示すことから、物体表面上のディンプルの密度が大きく、作られる乱れの強度が強すぎるのであろう。本実験におけるディンプルの配置は、かなり任意的であったが、これでも十分高レイノルズ数領域において、抵抗低減の効果を確認できた。ディンプルの大きさ、深さ、配置等さらに工夫すれば、より抵抗低減の効果のある場合が明らかになるかもしれない。

#### 4. 結論

円弧溝付き円柱及びディンプル付き円柱について、レイノルズ数による抵抗変化とその流れについて調べた。

実験結果によると、高レイノルズ数領域においては、薄い境界層が形成されるディンプル付き円柱の方が抵抗低減の効果は優れていることが分かった。また、ディンプルの密度も表面積の約 5.7% で十分であり、多すぎても良くないことが分かった。

#### 参考文献

- 1) Bearman, P.W. & Harvey, J.K. : Golf ball aerodynamics, *Aeronautical Quarterly*, May(1976)112-122.
- 2) Achenbach, E. : Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder, *J. Fluid Mech.* 46, part2(1971)321-335.
- 3) Achenbach, E. & Heinecke, E. : On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers  $6 \times 10^3$  to  $5 \times 10^6$ , *J. Fluid Mech.* 109(1981)239-251.
- 4) 岡島 厚、中村泰治：高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所所報、40(1973)387-400.

- 5) Güven, O., Farell, C. & Patel, V.C. : Surface-roughness effects on the mean flow past circular cylinders, *J. Fluid Mech.* **98**, part4(1980)673-701.
- 6) Nakamura, Y. & Tomonari, Y. : The effects of surface roughness on the flow past circular cylinders at high Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.* **123**(1982)363-378.
- 7) 安達 勤、前田博之、塩野正光、尾崎哲雄、松内一雄、河合達雄：高レイノルズ数領域における円柱抗力の低減に関する研究、*日本機械学会論文集*、B 59-558(1993)26-32.
- 8) Bearman, P.W. & Harvey, J.K. : Control of circular cylinder flow by the use of dimples, *AIAA Journal*, **31**, No.10(1993)1753-1756.
- 9) 木村雄吉、蔦原道久、鎌田憲二、生島嘉大：表面に円弧状の溝がある円柱まわりの流れ、可視化情報10, Suppl.1(1990)73-78.
- 10) 沖 真、末廣巻三、青木克己、中山泰喜：溝付き円柱まわり流れの数値シミュレーション、可視化情報13, No.48(1993)44-49.