溝つき円柱まわりの流動特性*

沖 真^{*1}, 青木克巳^{*2}, 中山泰喜^{*3}

Flow Characteristics around a Circular Cylinder with Grooves

Makoto OKI, Katsumi AOKI and Yasuki NAKAYAMA

In the flow around a circular cylinder, the sudden decrease in the drag force occurs at around Reynolds number $Re=3\times 10^5$, but the same phenomenon occurs at a lower Reynolds number in the case where there exist grooves or roughness on the circular cylinder surface. In this paper, in order to make clear the flow characteristics around a circular cylinder with grooves, the unsteady flow was analysed by applying the RNG (Renormalization Group) $k-\varepsilon$ turbulent model to a flow around a circular cylinder with grooves each of whose section shapes being as same as that of a dimple on a golf ball, with changing Reynolds number. This result made clear the characteristics of lift and drag, Strouhal number, flow pattern behind the circular cylinder, pressure distribution and separation points. Moreover, the time averages of these values almost agreed with the experimental values.

Key Words: Numerical Simulation, Flow Characteristics, Circular Cylinder with Grooves, Drag Coefficient, Separation Point

1. 緒 言

一様流中に置かれた円柱まわりの流れは、レイノルズ数 Re の影響により様々な流れの挙動が見られる。特に、抗力があるレイノルズ数 Re において急激に減少するという、いわゆるドラッグ・クライシス現象が起こる事は良く知られている。この現象は本来レイノルズ数が $Re=3\times 10^5$ 付近で起こるが、円柱表面に溝や表面粗さ(粗度)をつける事により、表面上の流れが乱され、いったんはがれた流れが再付着し、その結果として抗力が減少しこれよりかなり低いレイノルズ数でもこのような現象が起こることが知られている。このような現象は、さまざまなものに応用され工学的にも重要なものである。たとえば、ゴルフボールは、球面上にディンプルというくぼみをつけて飛距離を伸ばす工夫をしている。また、最近、架空送電線にかかる

風荷重を低減させるために、くぼみのあるケーブル断面を採用した低風圧電線や送電線を鉄塔間で導体接続するために使われているパイプ式のプレハブジャンパ装置の抵抗を減少させるために、表面に溝をつけたものが開発されており、電線自体の耐久性や経済性の向上および鉄塔部材の小サイズ化等に役立っている。

この現象の基本的な研究として表面粗さをつけた円柱まわりの流れの研究は数多くされており、Achenbach⁽¹⁾, Güven⁽²⁾, 安達⁽⁴⁾, 山崎⁽⁵⁾ によって実験的に報告されている。また、計算でも部分的に円柱表面に突起をつけているもの⁽⁶⁾, ⁽⁷⁾や表面全体にわたって縦方向に沢山の溝を設けているもの⁽⁸⁾, ⁽⁹⁾が報告されているが、レイノルズ数を変化させて、その流動特性を実験結果と比較検討しながら論じた報告はないようである。

そこで本研究では、筆者らがこれまで行ってきた溝つき円柱まわりの流れの計算⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾および実験⁽¹³⁾, ⁽¹⁴⁾の基礎研究をもとにして、数値解析を行い、揚抗力特性、ストローハル数、円柱後流のフローパターン、速度分布、圧力分布およびはく離点などの流動特性について検討した。

* 原稿受付 1997年11月20日。

^{*1} 正員, 東海大学開発工学部(☎ 410-0395 沼津市西野 317)。^{*2} 正員, 東海大学工学部(☎ 259-1292 平塚市北金目 1117)。^{*3} 正員, 未来技術研究所(☎ 178-0063 東京都練馬区東大泉 3-56-2)。

2. 数値解析

2.1 基礎方程式 取り扱う流れは2次元、非圧縮、非定常で外力が作用しないものとし、乱流となるような、比較的高いレイノルズ数 Re を考える。このような乱流の解析方法には、レイノルズ平均モデル、Large Eddy Simulation、直接シミュレーションなどがあるが、ここでは経済性の面からレイノルズ平均モデルを用いる。レイノルズ平均モデルでも乱流の時間平均（アンサンブル平均）流れの非定常性をシミュレーションできるといわれている^{(15), (16)}。このとき基礎方程式は、連続の式と Navier-Stokes の方程式であり、これらの式にアンサンブル平均を施し、乱流モデルとして、はく離流れや層流／乱流遷移流れに良い解を与えられている RNG (Renormalization Group) $k-\varepsilon$ モデル^{(17), (18)}を導入すると、次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_i S^2 - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_i S^2 - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4)$$

ここで、 t は時間、 ρ は流体密度、 u は流速ベクトル、 p は圧力、 k は乱流エネルギー、 ε は乱流散逸率、 μ_{eff} は実効粘度であり、層流粘度 μ と乱流粘度 μ_i の和である。 α_k と α_ε は、それぞれ k と ε に関する乱流プラントル数の逆数である。

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$\eta \equiv Sk/\varepsilon, \quad \eta_0 \approx 4.38, \quad \beta = 0.012, \quad C_\mu = 0.09$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.42, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.68$$

2.2 数値解法 これらの基礎方程式を解くために Fluent Inc. の汎用熱流体解析ソフトウェア FLUENT/UNS を用いる。このソフトウェアでは、有

限体積法によって離散化し、線形化された方程式系の連立解を得るために、SIMPLE アルゴリズムによって速度場と圧力場を関係付けて反復法により解く。時間積分法は、オイラー陰解法を用いている。非定常解析の初期値としては、定常解析をあらかじめ行い、その結果を用いた。

2.3 解析モデル 解析対象は、筆者らのこれまでの研究⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁴⁾で用いているものと同様に、ゴルフボールのディンプル断面と同じ円弧型の溝のついた円柱を2次元的にモデル化する。溝の深さは、円柱の直径を d 、溝の深さを k_g とすると、 $k_g/d = 7.3 \times 10^{-3}$ とし、周方向に等間隔で32個つけ、前方よどみ点では凸部となるように配置している。図1にメッシュ図を示す。解析領域は、円柱を中心にして前、上下方向に $5d$ 、後方に $15d$ とし、左側を入口、右側を出口、上下面は壁面とする。FLUENT/UNSでは格子系として構造／非構造格子の両方が使用できるが、今回の解析では円柱まわりおよび後方の領域を細かく出来ることや、解析結果から解適合格子を使用できることから非構造格子を使用する。格子は、3種類作成し検討の結果、図1(a)に示すものを採用した⁽¹²⁾。格子数は、約52,000である。

図1(b)(c)に滑面円柱および溝つき円柱表面付近の

(a) Whole meshes

(b) Meshes of near surface (Smooth)

(c) Meshes of near surface (With grooves)

Fig. 1 Meshes

格子を示す。格子は、滑面円柱および溝つき円柱とも格子数、格子間隔について出来る限り同じ条件で作成した。

2.4 境界条件 取り扱う流体が粘性流体であるために、円柱表面および上下壁面では流体の間には滑りがないと仮定する。すなわち、

$$u=0, \quad v=0$$

また入口、出口では、それぞれ速度流入境界条件、圧力流出境界条件を使用し、この時の流速と圧力は次の通りとする。

$$\text{入口: } u=\text{const}, \quad v=0, \quad \text{乱れ強度 } 0.7\%$$

$$\text{出口: } p=0$$

3. 結果および検討

3.1 揚抗力特性 解析は、滑面円柱では $Re=2 \times 10^4, 1 \times 10^5, 4 \times 10^5$ 、溝つき円柱では $Re=2 \times 10^4, 4 \times 10^4, 1 \times 10^5$ について行った。図2(a),(b)

に滑面円柱と溝つき円柱の揚力係数 C_L および抗力係数 C_D の時間変動を示す。横軸の時間は、円柱直径 d および一様流速 u_0 で無次元化したものである。 C_L および C_D とも周期性があるが、振幅および周期にそれぞれ違いがある。 $Re=2 \times 10^4$ では、最初は滑面円柱と溝つき円柱は C_L および C_D とも振幅が異なっているが、無次元時間 $t=5$ ぐらいからほとんど一致する。それに対して、 $Re=1 \times 10^5$ では滑面円柱と溝つき円柱は C_L および C_D とも周期、振幅が異なり、 C_D は、溝つき円柱の場合滑面円柱より時間平均で約 0.35 低下する。

滑面円柱および溝つき円柱とも C_L および C_D の振幅は、 Re 数が大きくなるに従い小さくなり、後で述べる臨界点では最小になる。

次に、図2(a),(b)の C_L の後から2周期分の時間区間について、 C_D の時間平均をとったものと Re 数との関係を実験値⁽¹³⁾と比較したものを図3に示す。この図より計算値と実験値は、 Re 数の変化に対して C_D が一定値をとる亜臨界領域ではよく一致し、 C_D が減少しだし最小

1) Lift coefficient C_L

2) Drag coefficient C_D

(a) Smooth

1) Lift coefficient C_L

2) Drag coefficient C_D

(b) With grooves

Fig. 2 Time history of drag coefficient C_D and lift coefficient C_L

値に至るまでの臨界領域, 溝つき円柱については C_D が増加しだす超臨界領域について定性的に一致している. 特に C_D が最小になる臨界点では, 滑面円柱, 溝つき円柱とも誤差が大きくなっているが, これはこの領域では 3 次元的な複雑な流れとなっており^{(8), (9)}, 2 次元計算では十分シミュレートできないことが原因と考えられる.

3.2 ストローハル数 図 2 の C_L の振動周期よりストローハル数 St を求め, いろいろな実験値と比較したものを図 4 に示す. 滑面円柱の場合, 臨界領域において実験値にばらつきが生じているが, 計算値との一致は良好である.

3.3 円柱後流のフローパターン 滑面円柱では $Re = 1 \times 10^5, 4 \times 10^5$, 溝つき円柱では $Re = 4 \times 10^4, 1 \times 10^5$

について, 図 2 の C_L の 1 周期あたり 4 時刻について円柱後流の流線によるフローパターンを図 5(a)~(d) に示す. 図 5 の(a)と(b)を比較すると(b)のはく離点が下流側に移動し, 円柱後方の渦領域も小さくなっており, これが C_D 値の低下する原因となっている. また, 溝つき円柱(d)と滑面円柱(a)との比較においても同様の現象が生じている.

溝つき円柱(c)は, 他と比較するとカルマン渦の発生が小さく, 時間の経過に対してもフローパターンの変化はわずかである.

3.4 速度分布 円柱中心を原点として, 下流側に x 軸, 上向きに y 軸をとり, $x/d = 1.0, 2.0$ における $y/d = -1.5 \sim 1.5$ の線上について, $Re = 1 \times 10^5$ の時間平均 x 方向速度分布の計算値と実験値⁽¹⁴⁾の比較を図 6 に

Fig. 3 Relation between Reynolds number Re and drag coefficient C_D

(a) Smooth

(b) With grooves

Fig. 4 Relation between Reynolds number Re and Strouhal number St

Fig. 5 Flow pattern behind a circular cylinder

示す。これより、 $x/d=1.0$ では、渦による逆流が生じており、また、滑面円柱と溝つき円柱を比較すると、溝つきの方が渦領域の幅が狭くなっていることがわかる。

3・5 圧力分布 円柱表面の時間平均圧力分布の値と実験値^{(13),(14)}との比較を図7に示す。ここで横軸は、前方よどみ点からの角度 θ である。これより、計算値と実験値は定性的によく一致している。溝つき円柱の場合、溝と溝の間の凸部で圧力が低くなり、溝の内部で高くなる。青木の実験値⁽¹⁴⁾は、溝の凹部のみの値であるが、石橋の実験値⁽¹³⁾は、溝の凸部でも測定している。溝内部の圧力分布も両者の実験値と定量的にもほぼ一致している。

3・6 はく離点 図8に $Re=1 \times 10^5$ における円柱表面近傍の流線を示す。この図からは明確に、はく離位置が決定できないので、はく離点近傍の滑面円柱では $\theta=75^\circ \sim 85^\circ$ 、溝つき円柱では $\theta=95^\circ \sim 105^\circ$ の区間について、円柱表面における x 方向流速 u の y 方向微分 $(du/dy)_{y=surface}$ の分布を、図5(a),(d)の各時刻毎にプロットしたものを図9に示す。この図において、 $(du/dy)_{y=surface}=0$ の点をはく離位置 θ_{sp} とする。滑面円柱では、はく離点の時間変動があるが、溝つき円柱ではほとんどない。溝つき円柱の場合、図8からもわかるように $\theta=93^\circ$ 付近の凸部で一旦はく離し、図9(b)より $\theta=96.5^\circ$ 付近で再付着する。そして、 $\theta=102.5^\circ$ 付近の凸部で再びはく離する。

次に、図9の各時刻のはく離点を求め、その時間変動を他の Re 数の場合とともに図10に示す。滑面円柱の変動は図2(a)に示した C_L の時間変動に同調し、臨界領域の方が変動幅は減少している。また、溝つき円柱は、どの Re 数でも変動がほとんどないことがわかる。この図より $Re=1 \times 10^5$ の場合、はく離点の時間平均をとると、滑面円柱で 81.5° 、溝つき円柱で 102° となり、溝をつけることによりはく離位置が後方に約 20° ずれていることがわかる。

4. 結 論

以上の計算結果から、次のような結論が得られた。

- (1) RNG $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる円柱まわりの流れの非定常解析を行った結果、抗力係数、ストローハル数、圧力分布、速度分布は実験値とよく一致した。
- (2) 滑面円柱と溝つき円柱の時間変動による揚抗力特性は、亜臨界領域ではほとんど一致する。
- (3) 滑面円柱および溝つき円柱とも抗力係数が最小値となる臨界領域では、揚力および抗力係数の時間変動の振幅は他の領域と比較して小さくなる。

Fig. 6 Velocity distribution ($Re=1 \times 10^5$)

Fig. 7 Pressure distribution

Fig. 8 Stream lines of near surface ($Re=1 \times 10^5$)

(a) Smooth

(b) With grooves

Fig. 9 Distribution of du/dy near separation point Fig. 10 Time history of separation point θ_{sp}

- (4) 溝つき円柱の臨界点ではフローパターンの時間変化は少なく、カルマン渦の発生も小さくなる。
- (5) 滑面円柱のはく離点位置の時間変動は、揚力係数の時間変動と同調し、溝つき円柱のはく離点位置の時間変動はどのレイノルズ数でもほとんどない。

最後に、本研究を遂行するに際し、株式会社フルーエントジャパンの毛利昌康社長に多大なご便宜を賜り厚く感謝の意を表します。

文 献

- (1) Achenbach, E., Influence of Surface Roughness on the Cross-flow around a Circular Cylinder, *J. Fluid Mech.*, **46-2** (1971), 321.
- (2) Achenbach, E. and Heinecke, E., On Vortex Shedding from Smooth and Rough Cylinders in the Range of Reynolds Numbers 6×10^3 to 5×10^6 , *J. Fluid Mech.*, **109** (1981), 239.
- (3) Güven, O., Farell, C. and Patel, V. C., Surface-roughness Effects on the Mean Flow past Circular Cylinders, *J. Fluid Mech.*, **98-4** (1980), 673.
- (4) 安達・小野・松内・河合・長, 高レイノルズ数領域における円柱まわりの流れ, 機論, **55-511**, B (1989), 685.
- (5) 安達・尾崎・山本・江口・松内・河合, 円柱後流渦列の普遍ストローハル数に関する研究, 機論, **61-583**, B (1995), 793.
- (6) Kawamura, T. and Kuwahara, K., Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness, *AIAA paper*, **84-0340** (1984).
- (7) Kimura, T. and Tsutahara, M., Fluid Dynamic Effects of Grooves on Circular Cylinder Surface, *AIAA J.*, **29-12** (1991), 2062.
- (8) 田村・宮城・藤澤, 粗度を有する円柱まわりの流れの三次元シミュレーション, 第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (1994-12), 427.
- (9) 池田・片桐, 表面粗度を考慮した円柱回りの3次元流動解析, 機論論, No.940-54(1994), 65.
- (10) 沖・末廣・青木・中山, 溝つき円柱まわり流れの数値シミュレーション, 可視化情報, **13-48** (1993), 44.
- (11) Oki, M., Suehiro, M., Aoki, K. and Nakayama, Y., Effect of Grooves' Depth on Circular Cylinder, *FLUCOME'94*, (1994-9), 811.
- (12) 沖・池田・周藤・青木・中山, 非構造格子による溝つき円柱まわりの流れの数値シミュレーション, 東海大学紀要開発工学部, **6** (1996), 161.
- (13) 石橋・青木・岡永・杉浦, 溝付き円柱における空気力特性と流動メカニズム, 機論論, No.95-19(1995), 119.
- (14) 青木・李・沖, 溝付円柱周りの流れと抵抗, 機論, **64-617**, B(1998), 18.
- (15) Franke, R. and Rodi, W., Calculation of vortex shedding past a square cylinder with various turbulence model, *Proc. 8th Symp. On Turbulent Shear Flows*, (1991), 189.
- (16) Rodi, W., On the simulation of turbulent flow past bluff bodies, *J. wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **46-47**(1993), 3.
- (17) Yakhot, V. and Orszag, S. A., Renormalization Group Analysis of Turbulence I. Basic Theory, *J. of Scientific Computing*, **1-1** (1986), 3.
- (18) Choudhury, D., Kim, S. E. and Flannery, W. S., Calculation of turbulent separated flows using a renormalization group based $k-\epsilon$ turbulence model, *ASME FED*, **149** (1993), 177.
- (19) Drescher, H., Messung der auf querangeströmte Zylinder ausgeübten zeitlich veränderlichen Drücke, *Z. Flugwiss.*, **4** (1956), 17.
- (20) Bearman, P. W., On Vortex Shedding from a Circular Cylinder in the Critical Reynolds Number Regime, *J. Fluid Mech.*, **34** (1969), 577.