希薄界面活性剤水溶液の単一円柱周りにおける流動特性*

西村 龍夫^{*1}, 国次 公司^{*1}, 越智 佑介^{*2}
小西 健太^{*2}, 田之上 健一郎^{*1}The Fluid Dynamical Properties of a Dilute Surfactant Solution
around a Circular CylinderTatsuo NISHIMURA^{*3}, Koji KUNITSUGU, Yusuke OCHI,
Kenta KONISHI and Ken-ichiro TANOUE^{*3} Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

Influence of adding cationic surfactant (Ethoquard O12) with a concentration of 50 ppm on water flow around a cylinder in a range of Reynolds number Re_s between from 64 to 600 was investigated by using LDV and PIV. At $Re_s=300$, the flow with the surfactant formed a stagnant zone, which appeared periodically, in front of the cylinder expanding along the axial direction. The period of the appearance was about 120[s]. The periodic flow structure was visualized by the measurements of velocity fluctuation. The development of the stagnant zone in front of the cylinder induced the expansion of a low speed flow area near the side of the cylinder.

Key Words: Single Cylinder, Flow Visualization, Surfactant Solution, Shear Induced Structure, Unsteady Flow

1. 緒 言

一様流中に置かれた円柱周りの流れは、工学的に重要であり、従来から多くの研究がなされている。ニュートン流体の場合、レイノルズ数 Re が 1 未満では流れは粘性によって支配され、流体は円柱壁面に沿って流れる。 $Re>6$ では円柱後部で流れが円柱壁面から剥離し、一対の循環渦が形成される。しかし、 $Re>40$ になると、円柱に付着していた循環渦は時間周期的に主流中へ放出され、カルマン渦列を形成する⁽¹⁾。渦の放出過程の詳細な観察は、 $Re>180$ の条件では、渦は 3 次元な流れ構造を有するようになり、流れ場は周期性の崩れた乱流と見なせる状態を呈することを示している⁽²⁾。

近年、粘弾性流体の円柱周りにおける流れの研究が行われつつあり⁽³⁾⁽⁴⁾、その中でも特に、界面活性剤による流体抵抗低減効果が注目されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この界面活性剤は対イオンの存在下で棒状ミセルを形成し、さらに、溶液にせん断を加えると、棒状ミセルが互いに絡み合ったネットワーク構造体(Shear Induced Structure; SIS)を形成する。この SIS が発生すると、溶液は高粘度及び粘弾性を呈すようになることが知られている⁽⁷⁾。

Bergins ら⁽⁸⁾は、陽イオン性界面活性剤 (TTAB1000

[ppm])と対イオン NaSal を溶解させた 70℃の水溶液を用い、円柱下流側の流れ場の観察を行った。円柱の温度を溶液よりも 1℃程低下させて行ったシュリーレン法による可視化実験より、低 Re 数の流れ場は水と似た挙動をしているが、300 から 400 の Re 数で流れ場が変化し、カルマン渦発生が抑制が始まることを見いだした。また、この状態で流れ方向および流れ方向に垂直な速度変動を計測したところ、流れ方向の変動速度は水と比べて増加するのに対し、流れに垂直な方向の速度変動は劇的に減少することを示した。これは、SIS が形成された結果生じる効果であるとしている。

ところで過去の研究においては、Bergins らのものに見られるように円柱下流側の流れ場のみ注目しており、上流側における界面活性剤の効果についてはあまり考察されていない。そこで我々は、陽イオン性界面活性剤(塩化オレイルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウム 50[ppm])水溶液を用いて、これまで注目されてこなかった界面活性剤水溶液の単一円柱の上流側および側面側での流動特性を調べることを本研究の目的とする。

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概略図を示す。試料流体は、整流装置を通過し縮流ノズルを経てテストセクションに

* 原稿受付 2005 年 11 月 9 日。

^{*1} 正員、山口大学工学部(〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)。^{*2} 山口大学工学部。

E-mail: tnishimu@yamaguchi-u.ac.jp

流入し、その後、オーバーフローして再びタンクに戻る循環方式となっている。テストセクションは 80×160 [mm] の矩形流路で、直径 15 [mm] の円柱をその軸が流れに垂直になるように設置している。座標系は流れ方向を x とし、流れ垂直方向を y とした。

試料流体は、界面活性剤として塩化オレイルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウム(商品名: エソカード O/12, ライオン(株)製)を質量濃度で 50 [ppm], 対イオンとしてサリチル酸ナトリウムを 30 [ppm] となるように溶解させたものを使用し、溶液温度は 27 [°C] とした。よって、本研究で用いた界面活性剤水溶液は Bergins らの用いた TTAB 水溶液と比べると、1/20 の濃度の希薄溶液となっている。

円柱周りの流れの可視化には、蛍光染料法と電解沈殿法を用いた。蛍光染料法については、染料としてローダミン B 液を用い、円柱の高さ方向中央付近の側面に開けた径 1.0 [mm] の穴から溶液を注入し、アルゴンイオンレーザーを照射してその挙動を観察した。また、電解沈殿法については、テストセクション上面を陰極、円柱を陽極として円柱面に導電性塗料を塗布、電圧をかけてトレーサーを発生、プロジェクターランプにより白色光を照射して、その挙動を観察した。撮影はテストセクション下面よりデジタルビデオカメラによって行った。

定量的な計測として、LDV 及び PIV を用いた時間平均速度の測定を行った。光散乱粒子には油性の白色修正液及び $8 [\mu\text{m}]$ のポリエチレン粒子を使用した。

流れのレイノルズ数 Re_s は、流路の断面平均流速 U_∞ と円柱直径 D を用いて次のように定義する。

$$Re_s = \frac{\rho D U_\infty}{\mu} \quad (1)$$

本研究で用いた水溶液は 50 [ppm] の希薄溶液であるので、密度 ρ と粘度 μ には溶媒である水の値を用いた。

Fig.1 Experimental apparatus.

3. 実験結果および考察

図2に、各 Re_s 数における水及び界面活性剤水溶液の円柱下流側の流れ場を蛍光染料法によって可視化した結果を示す。水の場合、 $Re_s=179$ ではカルマン渦列が観察されるが、 Re_s 数が増加するにつれて渦列の輪郭は崩れていき、 $Re_s=600$ では、後流は乱れた状態になっている。一方、界面活性剤水溶液の場合、 $Re_s=179$ では水の場合に見られたカルマン渦が見られず、 $Re_s=300$ においては、水に比べて円柱後流の乱れが抑制され、後流の染料の幅が縮小しているのが確認できる。この傾向は $Re_s=600$ ではより顕著であり、これらは、Bergins ら⁶⁾が報告した TTAB 溶液の円柱周りの流れにおけるカルマン渦の抑制現象に類似している。

Fig.2 Effect of Reynolds number on the wake region behind a single cylinder ($D=15$ [mm]).

Fig.3 Velocity profile of the wake region behind a single cylinder.

Fig.4 The time signals of velocity fluctuation measured by LDV ($D=15[\text{mm}]$).

図3は、LDVを用いて円柱後端から下流側に向かって $x/D=5$ の線上における y 方向の時間平均速度分布を測定した結果を示す。横軸は流れ方向の時間平均速度 u を主流速度 U_∞ で、縦軸は距離 y を円柱直径 D で無次元化したものである。可視化実験における水と界面活性剤水溶液の間の著しい違いにも関わらず、 $Re_s=300$ での時間平均速度の違いはそれほど顕著でないことがわかる。一方、 $Re_s=600$ では可視化において界面活性剤水溶液の場合に現れた後流の収縮が速度分布においてもはっきりと認められる。

図4は $x/D=3$, $y/D=1$ の点での速度変動の計測値であり、水の場合に見られるカルマン渦に起因する周期的な変動が、界面活性剤水溶液では抑制されていることが示されている。また、PIVによる円柱後流領域の速度場の計測においても、 $Re_s=125$ 付近での速度変動は両者でほとんど変わらないのに対し、 $Re_s=300\sim600$ では劇的に抑制されていることを確認している。これらの観察結果は、円柱下流側の流れ場が過去に観察された界面活性剤流れの特徴を有していることを示している。

ところで、Bergins ら⁽⁵⁾は緒言で述べたように TTAB 溶液の挙動が $Re_s=300$ 付近で変化すること、さらにこの付近の条件では液の挙動が製造日に依存して変化することを指摘しており、これらの結果はこの付近の Re_s 数が SIS の形成において重要な役割を果たす条件であることを示唆している。そして、本研究における円柱上流側の流れ場の観察でも $Re_s=300$ 付近における特異な挙動が見いだされた。それは流れ場の長周期変動の出現である。図5は、上流部を含む円柱周りにおける界面活性剤水溶液の流れの様子を示す。 $Re_s=64$ では水と同様に円柱後部に発生していた渦が、 Re 数が

Fig.5 The flow behavior in the frontal part of a cylinder

Fig.6 The time signals of velocity fluctuation at the center-line in the frontal part of the cylinder measured by LDV ($D=15[\text{mm}]$).

増加した $Re_s=179$ では消失している(図中 A 部分)。代わりに、 $Re_s=300$ では円柱の上流側によどみ域が生成されているのが見いだせる(図中 B 部分)。連続した観測により、このよどみ領域は分単位の周期で流れ方向に伸縮することが見いだされた。図中には最も上流側に伸張した状態を示している。しかしながら、 $Re_s=600$ では上流側のよどみ域は消滅し、まっすぐに伸びた後流だけが観察された(図中 A 部分)。

図6は、 $x/D=-1$, $y/D=0$ の点における速度変動の計測値であり、変動の状況をわかりやすくするために規格化しない速度値を示している。水の場合には、1[s]程度の周期の微小な変動のみが現れる実質的に定常な流れ場であるのに対し、界面活性剤水溶液では微小変動に加えて 120[s]程度の周期を有する長周期の変動の出現が示されている。測定位置とよどみ領域の関係から、図5に示した状態が速度が最も減少している時刻に対応す

Fig.7 Streamwise velocity profile in the frontal part of the cylinder.

と見なせる。

$Re_s=300$ における長周期変動の効果は時間平均速度分布にも現れている。図7は、図5中に示した上流側の $x/D=2$ および1の線上における流れ方向の時間平均速度分布の測定結果を示す。水の場合、速度分布は Re_s 数に依存せずほぼ一本にまとまる一方で、界面活性剤水溶液では速度分布は Re_s 数に強く依存している。低 Re_s 数では、水の場合と類似した分布を示すが、 Re_s 数の増大とともに中心付近の速度に大きな減衰が生じており、これは、特に $Re_s=300$ で顕著である。とりわけ、 $x/D=2$ と-1の間の比較より、 $Re_s=300$ では他の条件よりも減衰の生じる領域が拡大していることが見出され、長周期変動の影響を受けていることがわかる。

円柱周りの粘弾性流体の流れにおいて上流側に出現するよどみ領域については、過去にいくつかの報告がある。Ultman ら⁽¹⁰⁾は、ポリマー-CMC-7Hを1.7%溶解させた希薄溶液を用いて0.0002と非常に低い Re_s 数で単一円柱周りの流れの可視化を行い、本研究と類似した円柱上流側のよどみ域の発現を確認した。さらに、オセーン近似にMaxwellの粘弾性モデルに基づく構成方程式を組み合わせた解析が、実験の流れをよく再現

することを示した。薄井⁽¹¹⁾はナビエーストークス方程式にMaxwellモデルを適用した数値シミュレーションを行い、 $Re_s=1$ の条件で上流側でよどみ域の存在を示す流線を得た。ManeroとMena⁽¹²⁾は、ポリアクリルアミドとグリコールの水溶液を用いた低 Re_s 数の流れの可視化実験を行った結果、液の緩和時間が長くなる条件で上流側によどみ域が出現しやすくなる傾向があることを指摘した。また、小方ら⁽¹³⁾は、 $Re_s=20$ の流れに対してFENE-P粘弾性モデルを適用した数値シミュレーションを用いて、エソカードO/12200[ppm]溶液に対する可視化実験で得られた円柱前方から側面にかけてのよどみ領域の発達の再現に成功したことを報告している。これらの結果は上流側のよどみ域の発現は界面活性剤水溶液の粘弾性に起因することを予想させる。しかし、上述の低 Re_s 数域に対する研究ではよどみ領域は定常的に存在しており、本研究でみられたような動的な挙動は示されていない。

LiuとPine⁽⁸⁾は陽イオン性界面活性剤CTABと対イオンNaSalをそれぞれ150[ppm]の濃度で溶解させた希薄溶液の円筒クエット流の観察において、円筒間のせん断速度を増大させていくと、静止円筒面上からSISによって構成されると思われる高粘度流体の指状構造が生成され、分単位の周期で伸縮を繰り返す非定常な挙動を示すことを見いだした。彼らはまた、指状構造の伸縮周期がせん断力の増減の周期に対応することを指摘している。本研究で見いだされたよどみ領域の挙動は彼らが見いだした指状構造の挙動と類似した特徴を有しており、Berginsらが指摘した水溶液の挙動を考慮すると、両者はせん断によるSISの形成と変化という面に関係を有していることが予想される。しかしながらLiuとPineが指摘するようにこの挙動は界面活性剤水溶液による抵抗操作の原理と密接な関係があり、これは現時点では解明されていない問題である。

先に述べたように、円柱下流側の流れ場ではカルマン渦の抑制とともに流れの変動特性が変化することが見出されている。一方、円柱上流部においても $Re_s=300$ でみられたような非定常挙動が生じている。そこで、円柱上流側でPIV計測に基づく変動解析を行い、変動特性の変化を調べた。図8は、PIVを用いて得られた各 Re_s 数における変動エネルギー分布を、主流の運動エネルギーで無次元化した結果である。測定条件としては、最も長周期の変動が予想される $Re_s=300$ に対応して、 $x/D=-1.5 \sim 0$ 、 $y/D=0.5 \sim 0.8$ の範囲を2[s]間隔で測定した60枚のベクトル画像から変動エネルギーを算出した。なお、変動エネルギーの各成分は次のように定義した。

$$\overline{u'^2} = \left[\frac{1}{n} \sum (u - \bar{u})^2 \right] \quad (2)$$

$$\overline{v'^2} = \left[\frac{1}{n} \sum (v - \bar{v})^2 \right] \quad (3)$$

$Re_s=300$ においては、変動エネルギー分布に組織的な構造がみとめられ、流れ場の変動の規則性を反映している。ここで注意すべきは Re_s 数の低い $Re_s=64$ および 179 においても変動エネルギーの規則的な分布が見られることであり、これらの条件でも微小な周期的変動が生じていることが示唆される。一方、 $Re_s=600$ ではエネルギーの顕著な分布構造は見られなくなり、流れ場が周期的に変動する構造を持たない、均質に乱れた状態に遷移していると判断される。しかしながら、 $Re_s=179$ と 300 で見られるように、変動エネルギーの分布には特に円柱近傍において強い左右非対称性が存在している。Bergins らの速度変動の計測結果⁹⁾は、円柱の上流側では下流側とは反対に、流れに垂直な方向の変動が増大することを示しており、本研究においても円柱近傍において図6に示した x 方向の変動よりもさらに長周期の y 方向の変動が存在していることが予想される。そこで、図8に示した計測範囲内における各 Re_s 数での変動エネルギーの最大値を主流の運動エネルギーで無次元化した値を変動強度の指標として採

Fig.8 Fluctuation energy in the upstream side of the cylinder for the surfactant solution ($D=15$ [mm], $60[\mu\text{m/pixel}]$).

Fig.9 Maximum of fluctuation energy in the frontal part of the cylinder($D=15$ [mm]).

用し、流れ場の変化を評価した。図9にその結果を示す。これより、よどみ域の周期的変動が観察された Re_s 数域では変動強度が増大することが確認できる。なお、 Re_s 数を増加させると変動成分の最大値は減少するが、これは図8の $Re_s=600$ の分布図からわかるように、流れ場が均質化した結果、変動がピークを示す領域が存在しなくなるためである。

最後に、円柱周りの流れ場を把握するため、円柱側壁近傍の x 方向速度測定を行った。図10に各 Re_s 数での

Fig.10 Streamwise velocity profiles near the cylinder ($D=15$ [mm]).

瞬間の速度分布の測定結果を示す。陽イオン性界面活性剤水溶液の場合、 $Re_s=300$ ではよどみ領域が最大に伸張した時刻での結果を示し、顕著な変化の見られない他の3条件では任意の時刻の結果を示している。また、水の場合この部分の流れはほとんど定常であると見なせるので、4条件とも任意の時刻の結果を示している。界面活性剤水溶液の場合、 $Re_s=64$ では円柱上流部の流体は断面平均流速の値を示す赤色領域の分布からわかるように壁面に沿って流れる傾向を示す。しかし、 Re_s 数の増加に伴ってくぼみ上流側に周期的な挙動が発達するとともに赤色領域は円柱から離れていき、代わりに、円柱側面に黄色で示される流れが減速された低速域が出現することが確認された。この領域はよどみ域の発達とともに拡大していくが、 $Re_s>300$ でよどみ域が減少し流れの周期性が失われていくとともに、この低速域も減少することが見出された。一方、水の場合、円柱上流部で流体が壁面に沿って流れようとする傾向は、 Re_s 数が増大しても維持されており、 $Re_s=300$ と 600 における瞬間の速度分布には顕著な違いは見られない。

図 10 で見られたような、円柱を取り巻く低速域の出現は、小方ら⁽¹³⁾の研究においても見いだされている。しかし、彼らの流れ場は時間変動しておらず、また、本研究でもこの部分の非定常挙動の詳細な解析は行っていない。本研究で見いだされた円柱上流側の非定常な挙動が円柱側面、さらには下流側の流れの変化とどのような関係を持っているかという点については、今後さらなる検討が必要である。

4. 結 言

径が 15[mm]の単一円柱の上流側および側面側における陽イオン性界面活性剤(Ethoquad O/12;50[ppm]+NaSal;30[ppm]水溶液の流動特性を可視化と速度計測により調べた結果、以下の知見を得た。

- ① $64<Re_s<600$ の範囲で円柱上流を可視化した結果、 $Re_s=300$ において円柱上流部におけるよどみ域の

顕著な発達を観察された。さらにこのよどみ域は約120[s]の周期で流れ方向に伸縮していることが見いだされた。

- ② 円柱上流部の変動エネルギーの分布の変化より、流れの周期的な変動が $Re_s=300$ よりも低い Re_s 数において生じていること、また、 Re_s 数の増大と共に流れがより乱れた状態に遷移していることが示唆された。
- ③ 円柱上流のよどみ域と周期的な変動の発達に伴い、円柱側面で低速領域が拡大することが確認された。

文 献

- (1) Tanekoda, S., The Study of Fluid Mechanics using Flow Visualization (in Japanese), Asakura-Shoten (1988), pp. 90-133.
- (2) Williamson, C.H.K., Exp. Thermal Fluid Sci., Vol.12 (1996), pp. 150-168.
- (3) Cadot, O. and Lebey, M., Phys. Fluids, Vol.11, No.2 (1999), pp. 494-496.
- (4) Cressman, J.R., et al., Phys. Fluids, Vol.13, No.4 (2001), pp. 867-871.
- (5) Bergins, C., et al., Exp. Fluids, Vol. 30 (2001), pp. 410-417.
- (6) Okata, S. and Watanabe, K., Trans. Jpn Soc. Mech. Eng. B, Vol.69, No.687 (2003), pp. 2424-2430.
- (7) Hu, Y. and Matthys, E.F., Rheol. Acta, Vol. 34 (1995), pp. 450-460.
- (8) Liu, C. and Pine, D. J., Phys. Rev. Lett., Vol. 77, No.10 (1996), pp. 2121-2124.
- (9) Saeki, T., et al., J. Soc. Rheology, Japan, Vol. 28, No. 1 (2000), pp. 35-40.
- (10) Ultman, J. S. and Denn, M. M., The Chem. Eng. J., 2 (1971), 81-89.
- (11) Usui, H., Ph. D. thesis, Kyoto Univ., 2 (1971), pp. 81-89.
- (12) Manero, O. and Mena, B., J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 9 (1981), pp.379-387.
- (13) Okata, S., et al., Trans. Jpn Soc. Mech. Eng. B, Vol. 71, No.710 (2005), pp. 2414-2420.