1202 界面活性剤水溶液中の回転円板近傍の流れの可視化

Visualization of the flow over a rotating disk in surfactant solutions

○正 小方 聡 (都立大院) 正 渡辺敬三 (都立大院)

Satoshi OGATA, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-ohsawa, Hachioji-shi, Tokyo
Keizo WATANABE, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-ohsawa, Hachioji-shi, Tokyo

In this study, the flow angle of the flow on the rotating disk in surfactant solutions was investigated by the flow visualization and by the analysis. Flow visualization was performed using the tufts technique, the results from which revealed that the direction of the flow of surfactant solutions on the disk was turned towards the circumferential direction. The analysis, which was based on the logarithmic velocity profile of turbulent pipe flow in surfactant solutions, was carried out using momentum integral equations of the boundary layer. The experimental results of flow angle on a rotating disk can be explained well with the analytical results.

Key Words: Flow visualization, Rotating disk, Surfactant solution, Velocity profile, Boundary layer, Drag reduction

1. 緒言

近年、都市の熱エネルギー供給パイプラインシステムに用いる熱媒体に界面活性剤を添加し、そのポンプステーションの動力を低減化する試みが注目されている。このことは界面活性剤を添加した水溶液は機械的劣化の影響が少ないことに起因する。筆者ら⁽¹⁾は、ポンプの動力を直接評価できる容器内回転円板に関して界面活性剤水溶液による回転円板摩擦の抵抗減少効果を明らかにした。しかし、抵抗減少効果のメカニズムに関連する回転円板近傍の流れは現時点で明らかではない。

本研究は界面活性剤水溶液の容器内回転円板近傍の流れの特性を明らかにするため、タフト法による流れの可視化および運動量積分方程式を用いた解析を行ったものである。

記号

Re: レイノルズ数($=\omega r^2/\nu$), u : 流速, u^+ : 無次元速度($=u/v_*$), v_* : 摩擦速度($=\sqrt{\tau/\rho}$), y^+ : 無次元距離($=y \cdot z/\nu$), α : 半径方向と接線方向の速度成分の比, δ : 境界層厚さ, ρ : 密度, τ : 壁面せん断応力, ν : 動粘度, ϕ : 流れ角, ω : 円板角速度, r, θ, z : 円筒座標系

2. 解析

一般的に円管内乱流の対数速度分布は次式で表される。

$$u^+ = A \log_e y^+ + B \quad (1)$$

ニュートン流体の場合は次式となる。

$$u^+ = 2.5 \log_e y^+ + 5.5 \quad (2)$$

希薄高分子水溶液の抵抗減少流れに対しては、以下に示すVirkら⁽²⁾の対数速度分布がある。

$$u^+ = 11.7 \log_e y^+ - 17 \quad (3)$$

良く知られているように、界面活性剤水溶液は希薄高分子水溶液より大きな抵抗減少効果を示し、その速度分布も異なることが予想される。図1に従来の研究⁽³⁾⁽⁶⁾で得られた界面活性剤水溶液の速度分布を示す。図1より界面活性剤水溶液の速度分布は希薄高分子水溶液より大きな傾きを持っていることが判る。これらの結果を基にして、本研究では界面活性剤水溶液の対数速度分布を以下のように仮定する。

$$u^+ = 20.4 \log_e y^+ - 47 \quad (4)$$

次に、対数速度分布を無限流体中の回転円板上境界層の運動量積分方程式(式(5), (6))に適用し、回転円板上の流れ角に対し解析を行う。

$$\frac{d}{dr} \left(r \int_0^\delta u_r^2 dz \right) - \int_0^\delta u_\theta^2 dz = - \frac{\tau_r r}{\rho} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \int_0^\delta u_r u_\theta dz \right) = - \frac{\tau_\theta r^2}{\rho} \quad (6)$$

ここで、半径方向・接線方向速度成分を式(1)を考慮し以下のように仮定する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

$$u_r = \frac{\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2}} \left(\omega r \sqrt{1+\alpha^2} + A v_* \log_e \frac{z}{\delta} \right) \left(1 - \frac{z}{\delta} \right) \quad (7)$$

$$u_\theta = - \frac{A v_*}{\sqrt{1+\alpha^2}} \log_e \frac{z}{\delta} \quad (8)$$

式(7), (8)を式(5), (6)に代入し、高次の微小項を省略すると α および δ は以下のように求められる。

$$\alpha = \sqrt{3/2} \cdot A v_* / \omega r \quad (9)$$

$$\delta = 4/15 A^2 \cdot \sqrt{2/3} \cdot r \quad (10)$$

式(7)-(10)を組み合わせ整理すれば、流れ角 ϕ に対する以下の式が A, B, Re の関数として求められる。

$$\frac{\sqrt{1+\tan^2 \phi}}{\tan \phi} \sqrt{\frac{3}{2}} = \log_e \left(\frac{8 \tan \phi}{45 A^3} Re \right) + \frac{B}{A} \quad (11)$$

式(2), (3), (4)中の定数 A, B を式(11)に代入した結果を図4

Fig. 1 Non-dimensional velocity profiles

① Test disk ($d = 180$, $t = 3$)	⑦ Oil seals
② Shaft	⑧ Bearing units
③ Tufts	⑨ Coupling
④ Spacer	⑩ DC motor
⑤ Side plates	⑪ Strobo scope
⑥ Housing	⑫ Camera

Fig. 2 Experimental apparatus

に示す。界面活性剤水溶液と希薄高分子水溶液の場合レイノルズ数が増加すると流れ角は減少し、ニュートン流体の場合はレイノルズ数に無関係で平行になることが判る。また、界面活性剤水溶液の流れ角は希薄高分子水溶液のそれより大きくなる。

3. 実験装置および実験方法

実験装置を図2に示す。供試円板①はアルミニウム製で直径180mm、厚さ3mmで、透明アクリル樹脂製の容器内で回転する。円板と固定壁の軸方向距離は $s=10\text{mm}$ である。可視化に用いたタフトは直径約0.1mm、長さ約1mmの絹糸製で、中心から35, 45, 55, 65, 75, 85mmの位置に45度おきに計48本取り付けられている。また、タフトは接着面が流れに影響を与えないように円板裏側に接着され、約0.4mmの穴を通して円板表面(可視化面)に出してある。タフトの撮影はストロボライトを円板の回転数に同期させ行われた。

界面活性剤はEthoquad O/12の200ppm水溶液に等モル量のサリチル酸ナトリウムを加えたものである。実験は供試流体をゆっくり攪拌し24時間放置した後、気泡の混入を防ぐためヘッドをかけ容器内の下部に設けられたドレンから静かに流入させ行った。本実験のレイノルズ数は溶媒である水の粘度で計算している。

4. 実験結果および考察

タフト法で得られた可視化写真の一例を図3に示す。得られたタフトの写真画像処理し、タフトの接線から円板表面の流れ角を求める。

図4にタフト法で得られた回転円板上の流れ角の測定結果を、界面活性剤水溶液および水道水についてそれぞれ示す。比較の為、希薄高分子水溶液の実験結果⁽⁹⁾および水道水の実験結果⁽⁹⁾も示してある。

図4より、水道水の場合の回転円板上の流れ角は従来の結

Fig. 3 Example of tuft patterns

Fig. 4 Flow angles on a rotating disk

果および本解析結果とほぼ一致することが判る。

一方、界面活性剤水溶液の場合、流れ角は水道水と比較して大きくなることが判る。これらの結果はアルミ粉法による界面活性剤水溶液中の回転円板上流れの可視化結果⁽¹⁾と一致する。また、界面活性剤水溶液の流れ角はレイノルズ数の増加に伴い減少していく。界面活性剤水溶液中の円板上の流れ角は希薄高分子水溶液よりも大きな値を示し、本解析結果と実験結果は定性的に一致することが判る。

5. まとめ

抵抗減少効果を有する界面活性剤水溶液中の回転円板流れに対して、円板上の流れ角を実験的・解析的に明らかにした。本研究の結論は以下のようにまとめられる。

(1)タフト法による流れの可視化実験の結果、界面活性剤水溶液中の円板上の流れ角は水道水と比較して大きくなる。また、界面活性剤水溶液中の流れ角はレイノルズ数の増加とともに減少する。

(2)界面活性剤水溶液の乱流対数速度分布を運動量積分方程式に適用し解析した結果は、実験結果と定性的に一致する。

本研究は文部省科学研究費補助金奨励研究A(No. 12750145)の援助を受けた。記して謝意を示す。

参考文献

- (1) 小方聡・渡辺敬三, 機論, **66-651**, B(2000), 2899-2904.
- (2) Virk, P. S., 他2名, *J. Appl. Mech.*, **37**(1970), 488-493.
- (3) Zakin, J. L., 他2名, *AIChE J.*, **42**(1996), 3544-3546.
- (4) Warholic, M. D., 他2名, *J. Fluid Mech.*, **388**(1999), 1-20.
- (5) 伊藤基之, 他3名, 機論, **61-590**, B(1995), 3664-3670.
- (6) Bewersdorff, H. W. and Ohlendorf, D., *Colloid and Poly. Sci.*, **266**(1988), 941-953.
- (7) Golgstein, S., *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **31**(1935), 232-241.
- (8) 伊藤英寛, 東北大学高速力学研究所報告, **19-185**(1963), 83-111.
- (9) Watanabe, K., *Bull. JSME*, **21-153**(1978), 455-462.
- (10) Bilgen, E., *J. Basic Engineering*, **93**(1971), 2, 85-87.