

## 円管内旋回流における界面活性剤による抵抗低減効果と渦振れ回り現象に関する研究

## A Study on Drag-Reducing Effect of Surfactant Solutions and Phenomenon of Vortex Oscillation in a Swirling Pipe Flow

○ 正 宗像 瑞恵 (熊本大学) 学 川添 智洋 (熊本大学)  
正 松崎 和愛 (熊本大学) 正 大庭 英樹 (熊本大学)

Mizue MUNEKATA, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto 860-8555  
Tomohiro KAWASOE, Graduate School of Kumamoto University  
Kazuyoshi MATSUZAKI, Kumamoto University  
Hideki OHBA, Kumamoto University

**Key Words :** Drag Reduction, Swirling Flow, Surfactant, LDV, Vortex Oscillation

## 1. はじめに

界面活性剤は洗剤をはじめ多くの工業用品に使用されている。また、高分子と同様に微量の界面活性剤を水に添加すると、管内流などのまっすぐな単純せん断乱流において著しく摩擦が低下することが知られている。しかしながら、工業的にパイプラインなどに利用する際には、まっすぐな管内流のみならずさまざまな流れの形態が考えられる。従って、まっすぐな単純せん断流以外の流れ場を調査することは、流体輸送システムの高効率化にとって重要である。

本研究は、界面活性剤を添加した溶液の円管内旋回流について調査し、その抵抗低減効果と旋回流特有の渦振れ回り現象について調査することを目的とする。対象とする流れ場は、管入口に設置された案内羽根型の旋回流発生装置によって旋回流が形成されるため、旋回の減衰を伴いながら下流に流れていく。レーザードップラー流速計 (LDV) で計測した速度変動から渦振れ回り現象について解析した結果を速度分布や乱れ強さの分布の軸方向変化およびスワール数の減衰特性などと比較検討し、界面活性剤による抵抗低減旋回流の構造について考察する。

## 2. 実験装置および方法

図 1 に円管の入口に設置した案内羽根型の旋回流発生装置を示す。乱れ強さおよび旋回強さは案内羽根の枚数や取り付け角度によって調節可能であり、本報告では案内羽根 12 枚、取り付け角度  $\alpha$  は、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$  の場合の結果を示す。測定パイプの内径は  $d=44\text{mm}$ 、長さは  $5000\text{mm}(114d)$  である。実験装置の循環流システムは以前の報告<sup>(1)</sup>と同様であり、恒温装置によって、溶液の温度は  $25\pm 0.5^\circ\text{C}$  に保たれている。

ヘッド差  $H$  を変化させ、流量および壁面圧力の計測を行った。管入口から  $2120\text{mm}$  と  $4370\text{mm}$  の区間  $2250\text{mm}(51d)$  の壁面圧力損失から摩擦係数  $\lambda$  を算出する。LDV により計測した軸方向速度成分および周 (接線) 方向速度成分の平均を  $V_x$ 、 $V_t$  とする。Seeding 粒子には粒子径  $10\mu\text{m}$ 、比重  $0.918$  の低密度ポリエチレン粒子 (商品名: フロービーズ; 住友精化㈱) を使用した。

本実験で使用した界面活性剤は、臭化セチルトリメチルアンモニウム (CTAB) および等モル量のサリチル酸ナトリウムの混合を使用している。以後、CTAB 溶液と略す。初期濃度  $500\text{ppm}$  の CTAB 溶液の実験を行った。この溶液は shear-thinning 粘性を示し、弾性的性質も所有する。

## 3. 結果と考察

3.1 管摩擦係数 図 2 に水の動粘度に基づくレイノルズ数 ( $Re$ ) と管摩擦係数 ( $\lambda$ ) の関係を示す。測定した壁面圧力損失による管摩擦係数は、軸方向速度分布、周方向速度分

布および壁面圧力より算出した全圧損失から求めた管摩擦係数と同様な傾向を示した<sup>(2)</sup>ので、本研究ではその管摩擦係数によって抵抗低減効果を見積もることとする。CTAB 溶液では旋回しているにも関わらず、無旋回時の水の場合よりも摩擦抵抗は減少する  $Re$  数の範囲が存在している。図中の破線は Virk による無旋回時の最大抵抗低減漸近線<sup>(3)</sup>である。CTAB 溶液の抵抗低減効果が得られる  $Re$  数の領域には、最大抵抗低減漸近線に近づく領域と、増加して水の場合の値に近づく領域があり、その領域を分ける臨界  $Re$  数が存在する。案内羽根の取り付け角度が小さいほど、抵抗低減効果の得られる  $Re$  数の範囲は広く、臨界  $Re$  数は高いことがわかる。また、界面活性剤溶液の初期濃度は同じでも溶液状態によって抵抗低減効果に違いが生じるため、同一速度、同一取り付け角度における水での管摩擦係数との比較によって算出される抵抗低減率  $DR(=[\lambda_w-\lambda_c]/\lambda_w \times 100)$  を有効濃度の指標とする。ただし、繰り返し実験によって、本結果の傾向は十分に確認している。

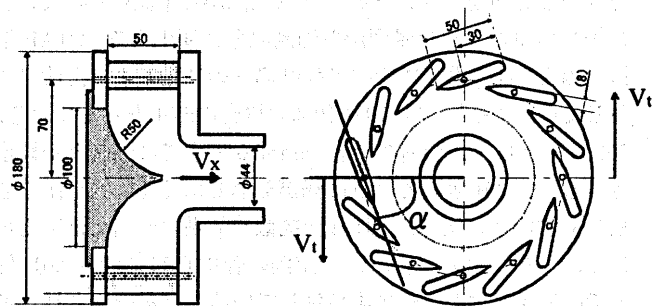


Fig.1 Guide vane type swirl generator

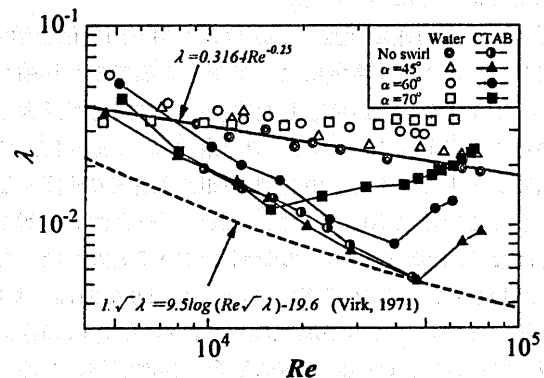


Fig.2 Friction coefficient vs. Re

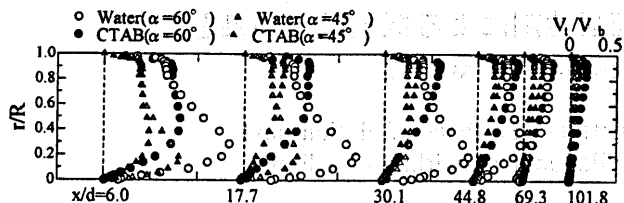


Fig.3 Tangential velocity profiles

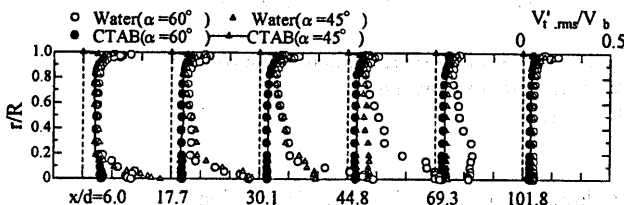


Fig.4 Profiles of tangential velocity fluctuation

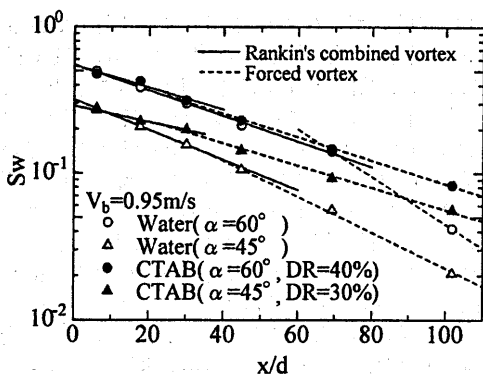


Fig.5 Decay of swirl number

### 3. 2 速度分布および乱れ強さの分布の軸方向変化

図3にバルク速度  $V_b=0.95\text{m/s}$  ( $Re=4.7 \times 10^4$ ) における周方向速度分布を示す。渦タイプは上流から下流にかけて、ランキンの組み合わせ渦型から強制渦型に変化する。CTAB溶液の場合、水の場合に比べて強制渦への変化がより上流側で生じている。図中には  $DR < 50\%$  の場合の結果を示している。DRが高いCTAB溶液の場合、 $x/d=6.0$  ですでに強制渦が観察される。CTAB溶液では自由渦が発達しにくく、強制渦を形成しやすいため、これは抵抗低減効果の一因だと考えられる。また、水の場合、上流側の管中心部 ( $r/R=0.0$ ) 付近では逆流が生じ、渦崩壊が生じていることが推察されるが、抵抗低減の得られるCTAB溶液の場合、ランキンの組み合わせ渦タイプでは管中心部での速度の欠損は観察されるが、逆流は生じにくくなっている。

図4に周方向速度変動のrms分布の軸方向変化を示す。水の場合、渦振れ回り現象によって管中心部での乱れ強さが突出し、自由渦の発達が終了した直後の乱れ強さが最大となっていることがわかる。 $\alpha=60^\circ$  での水の場合、 $x/d=17.7$  で自由渦領域が最大に発達し、中心部の強制渦領域の速度勾配も最大となっているにも関わらず、乱れのピークはその断面で最大ではなく、次の  $x/d=30.1$  の断面において最大となっていることがわかる。CTAB溶液の場合、 $x/d=6.0$  の断面において、中心部で多少の乱れの増加は観察されるが、水の場合に比べて極めて小さい。CTAB溶液の場合、粘性が強いため、速度勾配は小さく、大きく緩やかな渦構造を形成していることがその原因として考えられる。しかし、管中心部で同程度の速

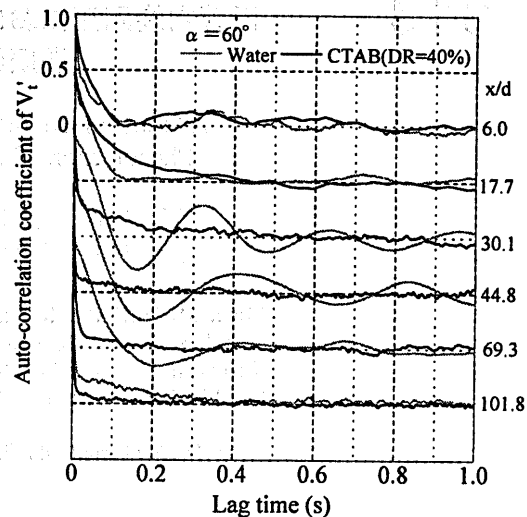


Fig.6 Auto-correlation coefficient of tangential velocity fluctuation

度勾配となる場合 ( $\alpha=45^\circ$  における  $x/d=30.1$  の分布など) を比較してもCTAB溶液の乱れは小さいことがわかる。

### 3. 3 スワール数の減衰

図5の片対数グラフにスワール数( $Sw$ )の軸方向への減衰過程を示す。渦タイプによって異なる減衰勾配をもち、図中の実線はランキンの組み合わせ渦、破線は強制渦での減衰関数を表す。 $Sw$ 数の指数減衰則における減衰係数は、ランキン渦よりも強制渦の方が大きく、ニュートン流体では、 $Re$ 数が小さいほどその減衰係数は大きくなることが報告されている<sup>(4)</sup>。同じ渦タイプで水の場合とCTAB溶液の場合を比較すると、CTAB溶液の方が減衰係数は小さいことがわかる。

### 3. 4 振れ回り現象

図6に  $\alpha=60^\circ$  における管中心付近の周方向速度変動成分の自己相関係数の時間変化を示す。水の場合、自由渦発達が終了した  $x/d > 30.1$  で周期性の良い振れ回り運動が観察され、 $Sw$ 数の減衰とともにその周期は長く、周期性は悪くなる。しかしながら、CTAB溶液の場合、 $x/d=6.0$  においてわずかに0.3sの周期性が確認されるのみで、全体的に顕著な周期的な振れ回り現象は観察されないことがわかる。強制渦では振れ回りにくいことが考えられる。

### 4. まとめ

CTAB溶液の円管内旋回流について調査した結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 案内羽根取り付け角度(初期旋回強さ)が大きいほど抵抗低減効果のある $Re$ 数の範囲は狭く、臨界 $Re$ 数は小さい。
- (2)  $DR < 50\%$ では、上流側でランキンの組み合わせ渦が形成されるが、水の場合に比べて強制渦への変化は早い。
- (3) 同タイプの渦の場合、CTAB溶液における $Sw$ 数の減衰係数は水に比べて小さい。
- (4) CTAB溶液の乱れ強さは小さく、周期的な振れ回り現象も生じにくい。

### 参考文献

- (1) Munekata, et. al., *JSME International J.*, B(2002), 45-1, 35-40.
- (2) 芝田・宗像・ほか2名, 機講論, No.018-2(2001), 165-166.
- (3) Virk, P. S., *Journal of Fluid Mechanics*, 45(1971), 417-440.
- (4) Kitoh, O., *J. Fluid Mech.*, 225 (1991), 445-479.