230 界面活性剤添加による抵抗低減流れの乱流特性

川口靖夫[○] (機械技術研究所)、李 沛文 (機械技術研究所、(財)省エネルギーセンター)、
矢部 彰 (機械技術研究所)、菱田公一 (慶應義塾大学)、前田昌信 (慶應義塾大学)

Turbulent characteristics of drag reducing flow by surfactant additives

Yasuo Kawaguchi, Li Peiwen, Akira Yabe, Koichi Hishida and Masanobu Maeda

ABSTRACT

It is known that frictional drag in turbulent flow can be reduced considerably by adding a small amount of surfactant to the fluid. In order to investigate the mechanism of this phenomenon, the turbulent characteristics in surfactant aqueous solution flow in a planer two-dimensional channel has been investigated through visualization by dye injection, velocity measurements by LDV and time scale measurements through temperature fluctuation. Analysis of velocity fluctuation showed that Reynolds shear stress and turbulence production is diminished in drag reducing flow. Coherent structure was not obvious in this flow. It was observed that integral time scale become large near the wall. This finding suggests smaller dissipation and weakening of cascade process of turbulence energy. Lower turbulent diffusion can be explained by these characteristics found in drag reducing flow.

Key words: Drag reduction, Surfactant, Visualization, LDV, Turbulent stress, Time scale, Coherent structure

1. はじめに

特定の界面活性剤を水流に添加すると、乱流抑制によって 80% という大きな抵抗低減効果を容易に得られる。界面活性剤による抵抗低減は特性が安定しており、添加剤は安価で効果が大きいことから、地域冷暖房などの実システムへの応用が活発に議論されており¹⁾、著者らも熱システムへ応用する場合に問題となる伝熱促進に関する一連の研究を行っている^{2)~6)}。

抵抗低減の大きさは比較的簡単な装置で確認でき、摩擦係数や平均熱伝達率といった包括的な測定値は多くのケースについて測定・集積されているが、抵抗低減流れの詳細や、液体のレオロジー的性質との関連については未知の部分があるため、複雑形状流れの予測や溶液サンプルからの抵抗低減率推定といった工学的手段はまだ不足している。

そこで本報では、界面活性剤による抵抗低減現象解明の一助として、抵抗低減チャンネル流れの可視化、2次元レーザードップラー流速計 (LDV) によって測定した乱流統計量について述べ、あわせて温度変動の積分スケールの測定結果について報告する。

2. 実験装置と実験方法

Fig. 1 は、可視化および乱流測定のために用いた回

Fig. 1 Schematic Diagram of Closed Loop Flow Apparatus
① Storage Tank ② Pump ③ Contraction ④ Two Dimensional Channel (H=40mm, W=500mm, L=6m) ⑤ Heater Plate ⑥ Diffuser ⑦ Flow Meter ⑧ Pressure Gauge ⑨ Data Logger ⑩ Personal Computer ⑪ Voltage Regulator ⑫ Heater ⑬ Thermo couple ⑭ Heater Regulator ⑮ Coolin Coil

流水槽の概念図である。水槽は溶液タンク①、温度調節装置⑭、ポンプ②、電磁流量計⑦を備えている。縮流部③、試験部④、ディフューザ部⑥は流れの概要把握、可視化とLDV測定に便利であるように厚さ 20mm の透明アクリル樹脂で構成した。また LDV により光学アクセスが容易になるように、流路の断面は高さ 40mm 幅 500mm の矩形とした。断面の縦横比は 12.5 と大きいので、スパンの中央近くで平面 2 次元の流れができていものと見なせる。試験部長さは 6m であり、主たる測定

Fig. 2 Schematic View of Flow Visualization

は試験部入り口から 5m の位置に設けた光学窓を通して行った。この位置で流れは十分発達しているものと見なせる。座標系は慣行に従って主流方向を x 、壁と垂直方向に y 、スパン方向に z 軸をとる。

可視化測定は、チャンネルの床面から挿入した注射針から墨汁を注入し、写真撮影することによって行った。注射針の先端はチャンネルの中央近くにおいた。墨の注入速度は針先端位置の速度に合わせるようにしている。撮影の概念図を Fig. 2 に示す。

LDV 測定のための光源として出力 2 W のアルゴン・イオンレーザ、光学系は 2 カラー 3 ビーム方式、前方散乱型のものを用いた。Fig. 3 は LDV 測定のための光学系を示したものである。信号処理にはカウンター型処理器を用い、パーソナルコンピュータにデータを記録し、乱れ強度、結合確率密度、4 象限分析といった統計処理を行った。

温度をトレーサとした乱れスケールの測定のためには、チャンネルの床面にステンレス鋼箔を張り、これに通電加熱することによって不均一な温度場をつくり、そこで検知部直径 $50\mu\text{m}$ の細線熱電対を用いて温度変動の時系列データを記録した。その記録を分析して積分時間スケールを算出した。水の熱伝達率は十分高いものとなして、熱電対の時定数に対する補償はしていない。

用いた界面活性剤は陽イオン性で第 4 級アンモニウム塩に分類される塩化セチルトリメチルアンモニウム (CTAC) である。界面活性剤は水中で球状のミセルを形成するが、サリチル酸を適量加えることによりミセルは棒状となり、相互に絡み合うことによって溶液に顕著な粘弾性を与える。以下に CTAC X ppm と記す場合は、

Fig. 3 LDV Measurement System Including Traverser
 ① Traverser Mechanism (y -direction) ② Traverser Mechanism (z -direction) ③ Optical Window ④ Water Channel ⑤ Mirror ⑥ Front Lens ⑦ Photomultiplier Optics

同重量濃度のサリチル酸も含むことを意味する。界面活性剤を添加するとせん断粘性率も上昇するが、今回用いた濃度範囲ではせん断粘性率の上昇はさほどではないので、データの整理には溶媒である水の粘性率を用いている。

3. 実験結果と考察

3. 1 染料注入による可視化撮影

Fig. 4a に、界面活性剤水溶液 (濃度 100ppm) 中の流れを染料で可視化した写真を示す。レイノルズ数は 17500 である。対比のため、界面活性剤を含まない水の場合で、同じレイノルズ数の流れを同様に可視化した写真を Fig. 4b に示す。Fig. 4b を見ると染料で染められた部分は渦スケール相当の凹凸を持ち、下流にゆくほど広がるとともに全体に薄くなってゆき、典型的な乱流拡散の様子を示している。ビデオ画像によると、染料の形も時々刻々変化しており、種々のスケールの渦が活発に運動しているようすが見て取れる。これに対して、Fig. 4a に示す界面活性剤を添加した場合には、染料で染められた流脈は糸状となっており、流れは拡散性に乏しいことが推察される。糸状の流脈は、同じ位置では上下に波打つように見えるが、その程度は Fig. 4a に比べるときわめて小さい。

Fig. 4a Dye Streak in Surfactant Solution Flow (CTAC 100ppm, $Re=17500$)

Fig. 4b Dye Streak in Water Flow ($Re=17500$)

3. 2 LDV による速度変動の測定

種々の界面活性剤濃度の溶液流れに対し、LDV を用いて平均速度 U と乱れ変動強度 u' , v' のチャンネル高さ方向の分布を測定した。レイノルズ数は 22000 であり、この濃度範囲において静圧測定から定めた抵抗低減率は 60% 内外の値を示している。抵抗低減が顕著な場合、平均速度は乱流に典型的な $1/7$ 乗則と、層流における放物線型速度分布との中間的なものとなる。乱れ強度の絶対値は抵抗低減のない水の流れの場合と比べると低下するが、摩擦速度で無次元化すると u' は水の場合と比べて同程度、 v' は半分程度となることがわかった。このように、抵抗低減流れであっても乱れは存在しており、異なる方向成分の強度間の差が開く傾向になる。

Fig. 5 に、 u と v との相互相関であるレイノルズせん断応力 $-\overline{uv}$ の分布を示す。界面活性剤を加えた場合、どの濃度であってもレイノルズせん断応力の値は負か 0 に近い値を持ち、水の場合とは大きく異なる。平均速度の勾配は存在しており、 x 方向の速度変動成分と y 方向のそれとの相関が存在しないことは混合距離仮説が近似的にも成り立たない事を示している。この現象は、ポリマーによる抵抗低減流れにおいても報告されており、抵抗低減現象と密接に関連するものと考えられる。

レイノルズせん断応力の消失に伴って、乱流運動のコヒーレント構造がどのように変化しているかを調べた。Fig. 6 は u と v との結合確率密度 P_{uv} の大きさを u - v 平面の中の等高線で示したものである。通常の流れでは大きな振幅の運動に u と v との相関が顕著になる結果、等高線は左上から右下に向かう方向に伸びた楕円型となるのが普通で、この研究でも水の場合には Fig. 6a に示すように、傾いた楕円型の等高線が見て取れる。一方界面活性剤を添加すると、Fig. 6b のように結合確率密度は楕円型の等高線はもつものの、長軸は u 方向を向いており、大振幅運動間の相関がなくなることがわかる。4 象限分析を試みた結果からも同じ結論が導かれる。Fig. 7 は、 u と v との符号に従って乱流運動を 4 つの象限に分類し、象限毎に $\overline{uv}$ に対する寄与を積算したもので、通常のせん断乱流で $dU/dy > 0$ であれば、第 2 象限($i=2$)に属する Sweep 的運動と第 4 象限($i=4$)に属する Ejection 的運動が卓越するのが普通である。しかしながら抵抗低減流れでの観測結果である Fig. 7 をみると、4 つの象限にさほど差異はなく、むしろ第 1、第 3 象限に属する Interaction 運動が大きな寄与をなすことがわかる。

3. 3 温度変動のスケール

LDV による速度変動の測定結果から、大きな振幅をもつ運動の界面活性剤添加による変化がわかったが、LDV の原理上の問題から、速度の時系列信号は得られない。そこで、チャンネルの一部を加熱して温度変動を発生させ、これをトレーサーとして流れに関する情報を推察することを試みた。温度変動と速度変動との相関係数は 1 ではなく、また温度のスケールと速度のスケールとは大きさが異なるため、温度変動は速度変動を忠実に

Fig. 5 Effect of surfactant Additives for Profiles of Reynolds Shear Stress $-\overline{uv}$ (CTAC 30ppm-90ppm, $Re=22000$) U_τ : Frictional Velocity

Fig. 6 Contour of Joint Probability Density P_{uv} in u - v plane ($Re=55000$)

Fig. 7 Quadrant Analysis of Velocity Fluctuation ($Re=22000$, CTAC 30ppm)

は表さないが、界面活性剤を添加した効果がスケールに及ぼす影響をみる目的には役立つ。

2 つの代表的な測定点 ($y/(H/2)=0.025$ と 0.15) で得られた温度変動波形を Fig. 8 に示す。界面活性剤を添加しない Fig. 8a の場合、温度変動は周期の短い変動成分からなることがわかる。これに対して、界面活性剤を加えた Fig. 8b の場合、変動周期は長くなる。このことを定量的に表すため、温度変動の自己相関関数を計算し、

Fig. 8a Record of Temperature Fluctuation (Re=22000, Water)

Fig. 8b Record of Temperature Fluctuation (Re=22000, CTAC 30ppm)

その積分値を求めることにより、温度の積分スケールを算出した。Fig. 9 は界面活性剤を添加した場合と添加しない場合に対して、温度の積分スケールの分布を比較したものである。界面活性剤を添加すると、壁近くで積分スケールがきわめて大きくなるのがわかる。

このことから類推すると、壁近傍の乱れの消散率は小さく、3. 2 でみたようにコヒーレント構造も弱いことから、乱れ発生率も同時に小さくなっていることが想像される。また、乱れの異方性が大きいことから、乱れのエネルギー再配分も弱くなっていることが想像され、中規模から小規模の渦は不活発になり、これによって乱流拡散の乏しい状況がうみだされているものと考えられる。

4. まとめ

界面活性剤の添加により、60%程度抵抗の低減した流れに対して、以下の事が観察された。(1) 染料注入法による可視化では、同じレイノルズ数の水流に比べて拡散性が乏しく、不規則な渦運動が存在しない状況が観察された。(2) LDV による速度測定から、平均流れ分布は発達した乱流と層流との中間になり、乱れ強度は弱まるが消失するわけではない。(3) レイノルズせん断応力は0に近い値を示す。(4) このことはコヒーレントな渦運動の消滅によって2方向の速度変動の相関が消失することに起因する。(5) 壁近傍の変動スケールは大きくなっており、壁近傍の乱れ消散率は小さいことが想像できる。(6) 乱れの異方性が大きいことから、乱れの再配分も小さいことも想像され、このことが乱流拡散の乏しい状況と対応すると考えられる。

Fig. 9 Integral Time Scale of Temperature Fluctuation in Thermal Boundary Layer with and without Surfactant Additives Re=12000 (SA: CTAC 30ppm, $q_w=4200\text{W/m}^2$, SC: CTAC 30ppm, $q_w=9300\text{W/m}^2$, WA: Water, $q_w=9300\text{W/m}^2$)

参考文献

- 1) 棚沢一郎 (監修): 「エコ・エネ都市システム, 21世紀の都市エネルギーと熱利用技術」, 第3章6節, 界面活性剤利用流動抵抗低減技術, (財)省エネルギーセンター(1999), 117
- 2) Y. Kawaguchi et al.: Active control of turbulent drag reduction in surfactant solutions by wall heating, ASME Fluid Eng. Div. Conf., FED 237-2(1996), PP.47-52
- 3) Y. Kawaguchi et al.: Existence of double diffusivity fluid layers and heat transfer characteristics in drag reducing channel flow, Proc. 2nd Int. Symp. Turbulence, Heat and Mass Transfer, K. Hanjalic and T.W.J. Peeters ed., Delft University Press, 1(1997), PP.157-166.
- 4) Y. Kawaguchi et al.: Study on a thermal boundary layer of drag reducing surfactant solution: measurements of temperature fluctuation, Proc. ASME Fluid Eng. Div. FED 244(1997), PP.375-380.
- 5) P.W. Li et al.: Experimental investigation of heat transfer enhancement for turbulence drag-reducing flow in a two-dimensional channel, Proc. 2nd EF conference on Turbulent Heat Transfer(1998), PP.P-21-P-29.
- 6) P.W. Li et al.: Control of Drag-Reduction by Channel Height Modification - Transitional Turbulent Characteristics from Drag-Reducing Flow to Turbulent Flow, Proc. 5th ASME/JSME Joint thermal engineering conference(1999), AJTE99-6446.