

Spatial structure of turbulence in functional fluid flow in rectangular channel

○川口靖夫（産総研），馮 自平（ダイキン空調技研），李 沛文（京大工）

Yasuo KAWAGUCHI*, Ziping FENG** and Peiwen LI***

*Inst. for Energy Utilization, National Inst. of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba 606-8564, Japan

**Daikin Air-Conditioning R&D Lab., LTD, Sakai 591-8511, Japan

***Dept. of Mech. Eng., Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan

Some kinds of surfactant solution exhibit effectiveness of turbulent suppression in high Reynolds number flows. In this work, a double pulse PIV system was used to clarify the spatial velocity distribution of surfactant solution flow in a two-dimensional channel. A type of cationic surfactant CTAC ($C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Cl$) mixed with the same weight of counter-ion material NaSal (HOC_6H_4COONa) was used as a drag-reducing additive to water at a mass concentration of 40 ppm. Instantaneous velocity distribution taken by PIV was examined to clarify the effect of surfactant additives.

1. 結論

非ニュートン性流体では、そのレオロジー性質を利用して流体運動を変化させ、有用な機能を発現させることができる。界面活性剤やポリマー等はトムズ効果と呼ばれる乱流抑制作用を発揮し、わずかな量の添加によって高レイノルズ数流れの様相を一変させ、摩擦抵抗は同じレイノルズ数の溶媒流れと比較して 80%も低下することが知られている¹⁾。本報告では、抵抗低減添加剤としてしばしば用いられる第4級アンモニウム塩である CTAC（塩化セチルトリメチルアンモニウム $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Cl$ ）／サリチル酸 HOC_6H_4COONa ／水系希薄溶液を例にとり、乱流抑制作用に伴う水路内流れの乱流の空間的構造の変化について実験的に調べたので報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験装置はこれまでに使用したものと同じ^{2), 3)}の循環型水路を用いた。試験部断面はスパン方向 500mm、高さ方向 40mm ($=H$) の長方形で、全長は 6m である。水路の大部分は、厚さ 20mm のアクリル樹脂で構成した。下流方向に測った距離を x 、壁に垂直方向の距離を y とする。距離の無次元化には H を用いた。 x 方向の速度変動成分を u 、 y 方向の速度変動成分を v と表す。Re 数の算出にはチャンネル高さ H とバルク平均速度 U_b を用いた。

断面の縦横比は十分大きいので、スパン方向の中心近くでは平面 2 次元的流れになっているものと考えられる。スパン方向の中心面に沿って粒子画像速度測定法 (PIV) に

よる x, y 2 方向の速度成分測定を行った (図 1)。PIV は TSI 社の製品で光源はダブルパルス YAG レーザ、CCD カメラの画素数は 1008×1018 である。画像処理ソフトウェアは、Insight 2.01 と独自に作成した誤差ベクトル除去および統計処理プログラムを使用した。粒子は公称径 $60\mu m$ 、密度 $1.03g/cm^3$ のダイアミド (Degussa 社製) を使用した。

実験に用いた溶液は、CTAC（塩化セチルトリメチルアンモニウム）とサリチル酸を同重量濃度になるよう水道水に溶解して調整した。この溶液は著者らがこれまで水路実験や伝熱実験、レオロジー測定に用いてきたものと同じ成分である。

3. 実験結果と考察

3. 1 速度変動の空間的分布

瞬時速度の空間的分布に及ぼす界面活性剤の影響を図 2a と図 2b に示す。いずれの場合も Re 数を 21000 とした。図中の等高線は局所速度の絶対値に従って描いたもので、白い色が高速、黒い部分が低速の領域を示す。界面活性剤を添加しない場合には、壁近傍の低速流体は半島状の不規則な様相を示しており、低速流体が高速流体に向かって侵入する組織的構造が見て取れる。一方界面活性剤を 30ppm 添加すると図 2b に示すように等高線は概ね水平方向に揃い、流れは層流的になることがわかる。このことは大規模な渦構造の消失を意味し、渦の特性長さスケールは短縮する可能性を示唆している。

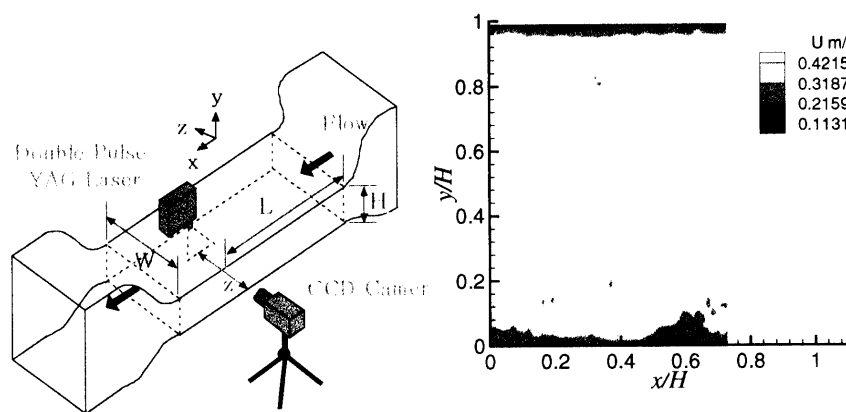


Fig. 1 Schematic view of two dimensional channel and PIV system

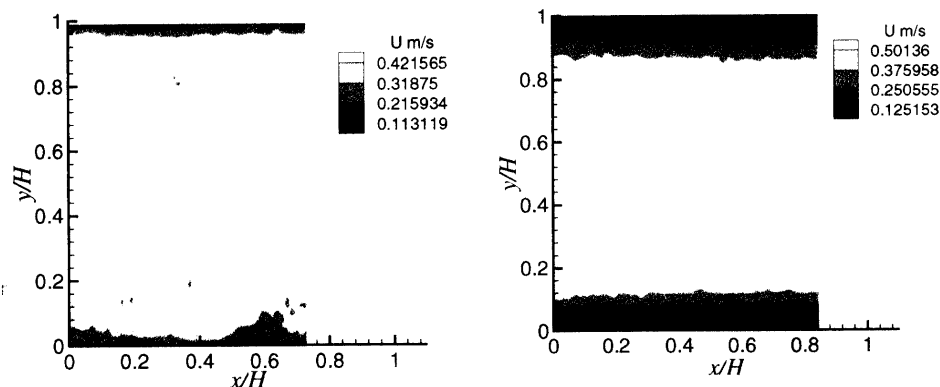


Fig. 2a Instantaneous velocity distribution in water flow (CTAC 0ppm) at Re=21000

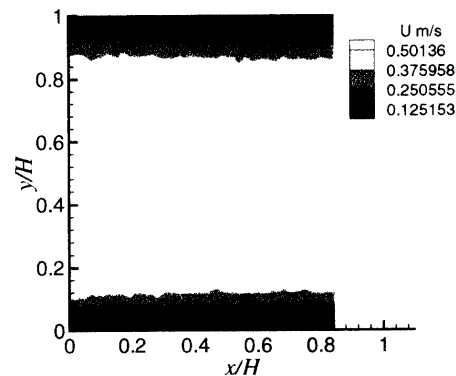


Fig. 2b Instantaneous velocity distribution in drag reducing flow (CTAC 40ppm) at Re=21000

そこで 500 枚の速度画像をもとに x 方向速度成分 u の自己相関関数を計算し、これを積分して積分空間スケール L を算出した。

$$R_{uu}(\Delta x, y) = \frac{1}{u'^2} \int u(x, y) u(x + \Delta x, y) dx$$

$$L(y) = \int R_{uu}(\Delta x, y) \Delta x$$

図 3 にはその結果を示す。積分空間スケールは壁からの距離に比例して増大し、概ね一定値を示したのち、水路中央近くで窪みをみせる。界面活性剤添加するとスケールは短くなる。混合距離仮説に従えば、スケールが短くなることは乱流拡散の低下に相当し、界面活性剤の添加による摩擦抵抗の低下と矛盾しないことになる。

3. 2 速度変動のパターン分類

Kevlahan は局所の速度変動から算出されるパラメータ Σ をもとに乱流構造を 5 つの基本的パターンに分類することを試みた。ここで Σ は

$$\Sigma = (S^2_{ij} - \Omega^2_{ij}) / (S^2_{ij} + \Omega^2_{ij})$$

S_{ij} は変形テンソル Ω_{ij} は渦度テンソルである。Kevlahan は Σ と圧力をもとに 5 分類を行った⁴⁾が、本研究では圧力変動を測定できないので、 Σ 、 S 、 Ω をもとに以下の 4 種類のパターンを抽出した。

Eddy: $|\Omega| > \Omega'$, $|\Sigma| > \Sigma'$ & $\Sigma < -1/3$,
 Shear: $|\Omega| > \Omega'$, $|\Sigma| > \Sigma'$ & $-1/3 < \Sigma < 1/3$,
 Convergence: $|\Omega| > \Omega'$, $|\Sigma| > \Sigma'$ & $\Sigma > 1/3$,
 Stream: $|\Omega| < \Omega'$, $|\Sigma| < \Sigma'$ & $|u| > u'$

Eddy は強い渦度によって、Shear は強いせん断変形によって特徴づけられる。Convergence は流線の集中を特徴とする非回転変形、Stream は大きな運動量を持つ変形の小さい運動である。なお、これらのいずれにも分類できない特徴の乏しい運動も一定の割合で存在するので上の 4 種の出現確率の総和を計算しても 1 にはならない。図 4a および図 4b は、それぞれ界面活性剤を添加しない流れと添加した流れについて上の 4 種類のパターンの出現頻度を示したものである。界面活性剤を含まない水の流れでは図 4a に示すように壁のごく近傍を除いて 4 種類のパターンは一定の出現頻度となる。これらの中では Stream が最も頻繁であり、次に Shear と Convergence がそれにつぎ、Eddy の頻度は他の特徴ある運動に比べて少ない。壁のごく近傍では Shear の出現頻度が増え、Stream の頻度は低下する。また Convergence の頻度も僅かに低下する。次に界面活性剤を添加した場合を見ると、図 4b に示すように、壁から $y/(H/2) < 0.5$ の範囲で shear に分類される速度パターンの出現頻度が顕著に増大する。その分率は最大で 0.4 にも及び、変形に乏しい強い並進運動が主体となっていることがわかる。一方 eddy と convergence は 0 近くにまで低下している。

4. 結言

界面活性剤を添加した抵抗低減流れに PIV を適用し、局所における渦度等の空間的分布について調べた。その結果、抵抗低減流れでは壁面近傍で渦運動が抑制され、積分長さスケールは短くなることがわかった。速度変動のパターン分類によれば、界面活性剤を添加することにより、壁近傍では shear に分類される運動が増大し、eddy と convergence は消滅する。

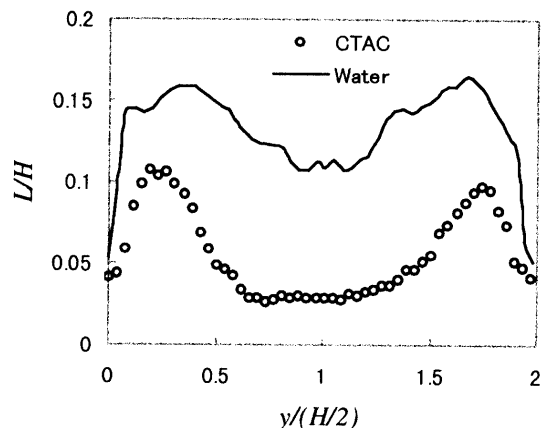


Fig. 3 Distribution of integral length scale of u'

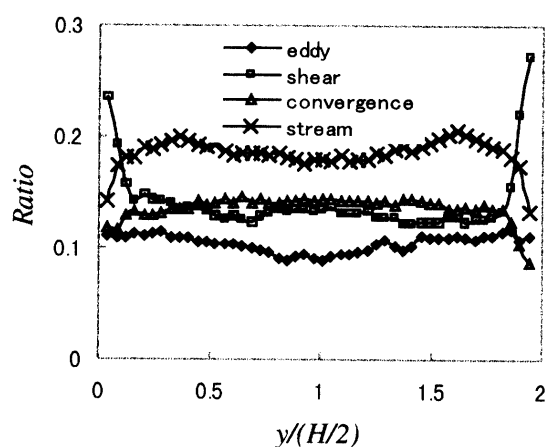


Fig. 4a Ratio of probability of classified structure in water flow (CTAC 0ppm) at $Re=21000$

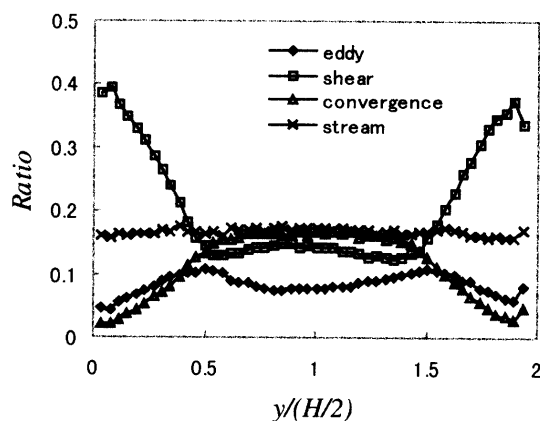


Fig. 4b Ratio of probability of classified structure in drag reducing flow (CTAC 40ppm) at $Re=21000$

引用文献

- 1) 薄井洋基：機能性流体による乱流制御，ながれ，**16** (1997) 105-109.
- 2) Y. Kawaguchi, et al., *Proc. 8th Intl. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics 2* (1996) 29.4.1.-29.4.7
- 3) P.W. Li, et al., *ASME J. Heat Transfer* **123** (2001), pp1-11.
- 4) N.K.-R. Kevlahan, *Appl. Sci. Research*, **51** (1993), pp. 411-415