ポリマーによる抵抗減少流れの PIV 計測*

三神 史彦**, 西川 進栄**

PIV Measurements of Drag-Reducing Turbulent Flows by Polymer Additives

Fumihiko MIKAMI and Nobuhide NISHIKAWA

1. はじめに

ある種の高分子や界面活性剤の水溶液は、乱流状態において著しい摩擦抵抗減少効果を示すことが知られている。1948 年に高分子溶液のトムズ効果¹⁾が見出されて以来、高分子や界面活性剤を添加した抵抗減少流れの乱れの特性について多くの研究が行われてきている。例えば、LDV による速度計測によって、抵抗減少流れでは乱れの非等方性が増大することや、レイノルズ応力が抑制されることが明確になってきた^{2), 3)}。また最近では、高分子の構造を表現したモデルを添加することによって希薄高分子水溶液の乱流の数値計算が試みられており、乱れの再分配機構の変化を示唆する結果が得られている^{4), 5)}。また、抵抗減少率とともに平均ストリーク間隔が増大することが、流れの可視化によっても示されている⁶⁾。しかし、抵抗低減を生じるメカニズムについての詳細は、未だ明らかではない。

近年、流れの中に混入したトレーサ粒子の運動を可視化して得られる画像データから流れの速度を計測する PTV (Particle Tracking Velocimetry) や PIV (Particle Image Velocimetry) が種々の流れ場の測定に用いられるようになってきている。これは、瞬時の流れ場を一挙に算出できるという、従来の点計測にはない特長をもつことから、非定常流れの構造の解明に適している。PTV や PIV で得られた速度場から瞬時の変動速度ベクトル場を算出することが可能であり、このような瞬時の変動速度ベクトル場の情報をもとにチャンネル乱流や乱流境界層の構造が、水や空気の場合を対象に詳細に調べられている^{7), 8)}。本稿では、このような画像速度計測の特長を生かすことによる抵抗減少流れの研究について、著者らの実験結果を中心に具体例をいくつか紹介する。

2. 天然高分子キサンタンガム

抵抗減少効果を得るために水に添加する高分子は、使用流体の環境への影響や、ポンプによる機械的な劣化を考慮して、天然高分子キサンタンガムを使用している。

これは、微生物キサントモナス・キャンペストリスの生成物で、機械的劣化にも強く、食品添加物として主に用いられる。実験には、数百 ppm の一様な水溶液を使用する。

抵抗減少効果を起こす種々の高分子と同じように、キサンタンガムは直鎖状の高分子である。水溶液は非ニュートン性を示し、せん断率が大きくなると粘度が減少する shear thinning 特性がある⁹⁾。数百 ppm の希薄なキサンタンガム水溶液でも通常白濁し、可視化画像計測には不向きであるため、水溶液が透明になる処理をした製品（興人, Kohjin-KR）を実験に使用した。

3. 抵抗減少率

Fig. 1 は、実験で使用した流路の概略である。オーバーフロー機構をもつヘッドタンクより流体を静水圧差によって流路内に流入させ、定常流を得る。矩形断面をもつ水平直線試験管路は透明アクリル製で、断面積の異なる A-セクションと B-セクションからなっており、これらは L 字管と広がり角 2° の拡大管によって接続されている。各セクションの測定部には圧力タップが設けられており、差圧の測定によって管摩擦損失係数を算出する。抵抗減少率 DR% は次式によって、同一流量における水および高分子水溶液の管摩擦損失係数 λ_w および

Fig. 1 Schematic of flow channel and circulation system for drag reduction experiment.

* 原稿受付 2002 年 7 月 1 日

** 正会員 千葉大学 工学部

Fig. 2 PTV recording setup and channel flow coordinates.

λ_p で定義される¹⁰⁾.

$$DR\% = \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_w}\right) \times 100 \quad (1)$$

著者らが行った実験の範囲では、500 ppm のキサンタンガム水溶液で、最大約 20% の抵抗減少効果が得られている。

4. 可視化画像計測

抵抗減少流れにおける乱れの特性を明らかにする目的で、画像速度計測によって、流れ方向と壁面垂直方向の断面内速度 2 成分のベクトル場を調べた。ここでは、通常の NTSC 方式の CCD カメラを用いた PTV による実験結果と、より解像度の高いクロスコリレーションカメラを用いた PIV による実験結果について紹介する。

4.1 NTSC カメラによる PTV 計測

撮影装置の概略を Fig. 2 に示す。トレーサ粒子として、粒径 75~125 μm のポリエチレンビーズを比重整合と反射率改善の目的で二酸化チタンコーティングしたものを使用し、CCD カメラでトレーサ粒子の映像を撮影した。測定は流路奥行中央 ($z=a/2$) の断面で行い、ストロボランプと流路の間には、2 mm のスリットを設けた。

同期信号発生器によって、2 台のストロボランプとカメラの同期がとられ、ビデオの偶数フィールドの終わりと奇数フィールドの始めにストロボを発光させる。このようなフレーム・ストラドリングと呼ばれる撮影方法によれば、ビデオのフィールド (1/60 秒) より短い時間間隔で 2 時刻のトレーサ粒子像を撮影できるが、次の画像の組が得られるのはフレームレートと同じ 1/30 秒後であるため、対象とする流れ場の連続的な変化を捉えることはできない。むしろ、得られた各瞬間の速度場は統計的に独立なものとして扱う。後述するように、これらの速度場からアンサンブル平均によって、従来の LDV や熱線計測などで得られるような乱流の統計量も算出可能である。トレーサ粒子の画像は、S-VHS 方式の VCR に録画した後、画像処理プロセッサ (Nexus Qube) に入力して粒子の重心位置の検出を行い、パソコンで 2 時刻間での粒子追跡¹¹⁾を行った。約 300 フィールド分の画

Fig. 3 Mean velocity profiles.

Fig. 4 Reynolds stress distributions.

像を処理し、150 セットのベクトル場から、壁面からの距離が等しい領域内に含まれる速度ベクトルの局所平均を算出した。

ここで、流路の B-セクションにおいて得られた結果を紹介する。Fig. 3 は平均流速分布 $\langle u \rangle$ であり、キサンタンガム水溶液では、抵抗減少流れに特有の層流と乱流の中間的な速度分布をしていることがわかる。このような特徴的な流速分布は、界面活性剤水溶液の抵抗減少流れでも確認されている^{12), 13)}。一方、変動速度ベクトル u' は次式のレイノルズ分解によって得られる。

$$u = \langle u \rangle + u' \quad (2)$$

変動速度ベクトルからレイノルズ応力分布を求めたものを、Fig. 4 に示す。壁面近傍でデータのばらつきが多少あるが、キサンタンガム水溶液では、レイノルズ応力が抑制されていることがわかる。このような高分子添加による乱流統計量の変化は、従来の方法でも得られている。

さて、画像速度計測でしか得られない情報を示そう。

Fig. 5 は、流れ方向変動速度成分 u' の等高線と変動速度ベクトル場を重ねて表示したものである¹⁴⁾。等高線の色濃い部分は速度が遅く、逆に薄い色の部分では速度が速い。Fig. 5(a)の水の場合は、速度の遅い領域が分散しており、これらの遅い流体塊が管中央へ向かう様子もわかる。Fig. 5(b), (c)は、それぞれ異なる瞬間のキサンタンガム水溶液の変動速度ベクトル場であるが、Fig. 5(b)では下壁面付近、Fig. 5(c)では上壁面付近に速度の遅い領域がまとまって現れ、これらの状態が間欠的に起こることがわかった。界面活性剤による抵抗減少流れでも、

Fig. 5 Fluctuating velocity fields and u' contour at $Re=10000$: (a) Water; (b), (c) Xanthan gum 400ppm.

Saeki ら¹³⁾が高速カメラを用いた PTV で得られた速度場から、管壁付近と中心付近の流速の相関関係に着目し、管壁付近の流速が遅く中心付近の流速が速くなる「層流状態」が一定時間、間欠的に起こることを指摘している。

水と高分子水溶液の流れで、変動速度ベクトル場に見てわかる違いがあるという結果は、研究を開始した比較的初期の段階^{15), 16)}から著者らの目を引いた。その後、PIV 計測も試みながら詳細を調べていく過程で、主流に配向的な変動速度ベクトルの集団が壁面付近に広く分布するという抵抗減少流れの乱れの特徴が明確になってきた^{17), 18)}。しかし、高分子水溶液における乱れの構造の一端が明らかになるには、次節に述べる計測システムの完成を待たなければならなかった。

4.2 クロスコリレーションカメラによる PIV 計測

前節の NTSC カメラを使った PTV 計測によって、キ

Fig. 6 PIV recording setup and channel flow coordinates.

Fig. 7 Imaging of a particle with out-of-plane displacement.

サンタンガム水溶液では水の場合と異なり、壁面付近に速度の遅い領域がまとまって現れることなどが明らかになった。とはいえ、標準的な NTSC 方式の CCD カメラを用いた PTV 計測では、各時刻に得られる速度ベクトルの数はせいぜい 500 個程度と限界がある。これは、瞬時の速度場を調べる目的では、空間分解能が不十分である。このため、高解像度 CCD カメラと、Nd:YAG レーザを用いた PIV 計測によるアプローチの必要性が生じた。

Fig. 6 のような撮影システムを構築することによって、同じ流路でより精細な流れ場の情報が得られるようになった¹⁹⁾。前項のシステムとの主な違いは、画素数が 1008×1018 pixel のクロスコリレーションカメラ (Kodak, MegaPlus ES 1.0/SC) と、ダブルパルス Nd:YAG レーザ (532 nm, 30 mJ/pulse) を新たに使用したことである。

カメラの撮影レンズにも注意を払った。レーザシート面に垂直な方向のトレーサ粒子の移動が、撮像面内における位置変化となる投影誤差^{20) 21)}を避けるため、撮影レンズとしてテレセントリックレンズを使用した。Fig. 7 (a)に示すような通常のレンズでは、主光線がレンズの中

Fig. 8 Reynolds decomposed fluctuating vectors at $Re=21500$.

心を通るため、同じ大きさの物体PおよびQの像は、撮像面において、レンズに近いQの像のほうがPの像より大きくなる。これは、主光線と光軸のなす角度である画角が大きいレンズほど、また周辺部ほど影響が大きい。速度変動の面外成分が面内成分と同程度となる乱流の計測では、この投影誤差が深刻になる²¹⁾。一方、Fig. 7 (b)に示すテレセントリックレンズでは、後側焦点F'の位置に絞りを置いているため、物体側の主光線が平行になる。したがって、同じ大きさの物体PとQの像は、距離が異なっても撮像面で同じ大きさに写るため、投影誤差の影響を避けることができる。テレセントリックレンズは、その光学系の性質上、絞り込んで使用する必要があるため、Nd:YAG レーザのような強力な光源との組み合わせが望ましく、開放に近い絞り値では、周辺部で像の歪みが現れるので注意が必要である。

トレーサ粒子は、PTV 計測に用いたものよりも微細な、粒径 $5\mu\text{m}$ のナイロンビーズを使用した。Nd:YAG レーザの出力ビームは、シート光学系によって厚さ 0.7mm のシート状に広げられ、 $z=a/2$ の測定断面にカメラと同期して照射される。トレーサ粒子の画像は、クロスコリレーションカメラのトリガー二重露光モードによって撮影し、得られた2枚の連続画像は、パソコンのハードディスクに256階調の画像として取り込まれる。およそ1秒に1組の割合で撮影を繰り返し、650組の画像を得た。これらの画像から相互相関法 PIV によって速度ベクトルを算出し、各時刻の瞬時速度場を詳細に検討した²²⁾。

Fig. 8 は、管路の A-セクションで得られた水および 500 ppm キサンタンガム水溶液の瞬時変動速度ベクトル場を示している。レイノルズ分解による変動速度ベクトル場からは流れ場の渦運動を知ることができるが、キサンタンガム水溶液の場合には、水の場合にくらべて著しく渦運動が抑制されていることが示された。

一方、速度場のガリレイ分解は、次式で表される。

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}_{conv} + \tilde{\mathbf{u}} \quad (3)$$

ガリレイ分解による変動成分 $\tilde{\mathbf{u}}$ は、レイノルズ分解による変動速度ベクトルと比較して、以下の特長をもつ⁸⁾。

1. 隣接する領域の相対的な速度差の関係が保存される。
2. ガリレイ変換に対しては支配方程式が不変である (レイノルズ分解の場合は、 $-\langle u'v' \rangle$ を考慮する必要がある)。
3. 変動成分を求める際に平均速度分布がわからなくてもよい。

$\mathbf{U}_{conv}$ として、平均流速分布の最大値 U_c の 0.9 倍をとった結果を Fig. 9 に示す。ガリレイ分解による変動成分からは、 $\mathbf{U}_{conv}$ と同じ速度で動く渦だけが、渦運動として可視化される。Adrian らは、数値計算による結果²³⁾に基づき、PIV による断面内の速度 2 成分の情報の中にヘアピン渦の痕跡を見つけ、これを手がかりに乱流境界層の構造を詳細に調べている⁸⁾。Fig. 10 に示すようなヘアピン渦によって断面内に誘起される速度のパターンを、実際に Fig. 9 の流れ場の中にも見ることができる。推定されるヘアピン渦のヘッドとせん断層の位置を Fig. 9 の速度ベクトル場の上に重ねて表示してみると、キサンタンガム水溶液では、水の場合に比べてサイズのはるかに大きいヘアピン渦の痕跡を確認することができた。

ここでもう一度、前節で紹介した PTV の結果を振り返ってみよう。Fig. 5(b)や Fig. 5(c)で見られた壁面付近の低速域は、実は画面いっぱいに広がるヘアピン渦によって誘起される流れであったと解釈できるが、空間解像度が不十分のため、ヘアピン渦のヘッドの痕跡を確認するには無理があった。空間分解能の十分高い速度ベクトル場の情報を得ることと、この中からヘアピン渦のヘッドに相当する小さな渦を見つけることが、現象解明の鍵と思われる。忘れてならないのは、高分子水溶液では予想を上回るスケールの構造があることである。それゆえ、正方形に近い撮影領域では全体像を把握しきれない恐れもある。反対に、ここで示した渦の直径は 5~7

Fig. 9 Galilean decomposed fluctuating vectors at $Re=21500$ viewed in a frame-of-reference convecting at $U_{conv}=0.9U_c$.

Fig. 10 Schematic of a hairpin vortex and the induced flow.

格子分であり、撮影領域としてはぎりぎりの選択といえるだろう。ごく微量の高分子を溶かした水とはいえ、水の場合を想定した観察領域の設定が通用しないことは注目に値するであろう。

なお、最近 Warholic ら²⁴⁾が抵抗減少率 40~55% の高分子水溶液流れの PIV 計測によって、著者らが観察したのと同じような、一方向の変動速度をもつ広い領域が現れることを指摘しているが、彼らの論文では乱れの組織構造との関連については言及されていない。

4.3 PIV 計測の今後の展望

前節で述べたように、流れ方向と壁面垂直方向の二次元断面内における速度 2 成分のデータから、乱れの構造について、かなりの部分を知ることができる。したがって、今後は二次元 PIV を基本におきながら、次のような視点からのアプローチが重要になってくるであろう。

すでに見たとおり、高分子水溶液における乱れの構造は、そのスケールが水の場合に比べて大きいのが特徴といえるだろう。画像速度計測では、必要に迫られ空間分解能を重視するあまり、視野いっぱいに管路が入るように撮影する傾向がある。このため、前節で指摘したよう

に、画面に入りきらない予想外のスケールの構造を見落とし、誤った認識をしてしまう可能性もある。高分子水溶液の場合には、複数台の高解像度 CCD カメラを使って、空間分解能を損なわずに、広い範囲の情報を得ることが重要であろう。

一方、ヘアピン渦の発達過程をはじめとする流れ場の非定常挙動を調べる目的で、連続的な速度場の情報を高い時間分解能で得ることもアプローチとして必要である。このためには、 1000×1000 pixel 程度の画素数を持つ高速度カメラと高繰り返しパルスレーザを連係させた画像計測システムを構築する必要がある。幸いなことに、現在、 $20 \text{ mJ/pulse}@1 \text{ kHz}$ 程度の高繰り返し Nd:YAG レーザや Nd:YLF レーザがあり、技術的には不可能ではない。

一方、高分子と乱流現象の関係を解明するためには、流れの中での高分子の分散やその状態を何らかの方法で可視化し、速度場と同時計測することも望まれる。例えば、一様せん断場における高分子鎖の構造が、高分子水溶液の平板近傍の流れを瞬間凍結することによって、電子顕微鏡で可視化されている²⁵⁾。速度場との同時計測を目的とするならば、マクロ的な視点によるミクロな状態の可視化手法の開発が必要になるであろう。

5. おわりに

著者らがこれまで行った実験結果を紹介しながら、PIV による抵抗減少流れの計測の現状と可能性について述べた。PIV は瞬時の速度場の情報を一挙に算出できることから、非定常流れの解析に有効なツールとして利用できる。従来の流速測定法では知りえなかった情報を PIV によって取得することが、抵抗減少流れにおける乱流現象の更なる理解と抵抗減少効果を生じるメカニズムの解明につながることを期待している。

最後に、ここに述べた研究の一部は、三井造船(株)ならびに造船学術推進機構の援助によることを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) Toms, B.A.: Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers, Proc. of the International Congress on Rheology, II (1949) pp.135-141.
- 2) Luchik, T.S., Tiederman, W.G.: Turbulent structure in low-concentration drag-reducing channel flows, J. Fluid Mech., Vol.190 (1988) pp.241-263.
- 3) Warholic, M.D., Schmidt, G.M., Hanratty, T.J.: The influence of a drag-reducing surfactant on a turbulent velocity field, J. Fluid Mech., Vol.388 (1999) pp.1-20.
- 4) 梶島岳夫, 三宅裕: 離散要素モデルによる高分子溶液の乱流抵抗低減の数値シミュレーション, 機論 (B 編), Vol. 64, No. 637 (1998) pp. 3636-3643.
- 5) 村田融, 萩原良道, 瀧篤志: 絡まった高分子の壁近傍乱流構造に及ぼす影響, 第 17 回生研 NST シンポジウム講演論文集 (2002) pp. 67-71.
- 6) 伊藤基之, 今尾茂樹, 杉山耕一: 界面活性剤水溶液の抵抗減少流れにおけるストリーク構造, 機論 (B 編), Vol. 63, No. 605 (1997) pp. 40-46.
- 7) Liu, Z.-C., Landreth, C.C., Adrian, R.J., Hanratty, T.J.: High resolution measurement of turbulent structure in a channel with particle image velocimetry, Exp. Fluids, Vol.10 (1991) pp.301-312.
- 8) Adrian, R.J., Meinhart, C.D., Tomkins, C.D.: Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol.422 (2000) pp.1-54.
- 9) Bewersdorff, H.-W., Singh, R.P.: Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions, Rheol. Acta, Vol.27 (1988) pp.617-627.
- 10) Hoyt, J.W.: Drag reduction by polymers and surfactants, Viscous Drag Reduction in Boundary Layers (ed. Bushnell, D. M., Hefner, J.N) (AIAA Inc., 1990) pp.413-432.
- 11) Adachi, T., Nishino, K., Torii, K.: Digital PTV measurements of a separated air flow behind a backward-facing step, J. Flow Visualization and Image Processing, Vol.1 (1993) pp.317-335.
- 12) Kawaguchi, Y., Tawarayama, Y., Yabe, A., Hishida, K., Maeda, M.: Active control of turbulent drag reduction in surfactant solutions by wall heating, FED-Vol.237, ASME Fluids Engineering Division Conference, Vol.2 (1996) pp.47-52.
- 13) Saeki, T., De Guzman, M., Morishima, H., Usui, H., Nishimura, T.: A flow visualization study on the mechanism of turbulent drag reduction by surfactants, NIHON REOROJI GAKKAISHI, Vol.28, No.1 (2000) pp.35-40.
- 14) Nishikawa, N., Ishide, T., Kaminaka, S., Mikami, F.: Visualisation and measurement of flows with large vortical patterns, 8th International Symposium on Flow Visualization (1998), CD-Rom, pp.170.1-6.
- 15) Mikami, F., Nishikawa, N., Tanaka, T.: Visualization and PTV study of drag reducing dilute polymer solution, FED-Vol.237, ASME 1996 Fluids Engineering Division Conference, Vol.2 (1996) pp.143-150.
- 16) 三神史彦, 西川進栄, 田中武: 管内流れにおける高分子の混在効果の PTV 計測, 第 28 回乱流シンポジウム講演論文集 (1996) pp. 103-104.
- 17) 房野知己, 金城倫夫, 三神史彦, 西川進栄: 高分子水溶液における管内抵抗減少流れの高解像度 PIV 計測, 可視化情報, Vol. 19, Suppl. No. 1 (1999) pp. 355-358.
- 18) 三神史彦, 房野知己, 西川進栄: 高分子添加による抵抗減少流れにみられる乱流場の特性, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No. 99-19 (1999) pp. 245-246.
- 19) 三神史彦, 笹田敦史, 西川進栄: 高分子水溶液の抵抗減少流れの PIV 計測, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集 (II), No. 01-1 (2001) pp. 105-106.
- 20) Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry: a practical guide: (Springer, 1998) pp.46-50.
- 21) 西野耕一: 3 次元 PIV の実用化に向けて, 可視化情報, Vol. 20, No. 77 (2000) pp. 113-119.
- 22) 三神史彦, 笹田敦史, 西川進栄: 機論 (投稿中).
- 23) Zhou, J., Adrian, R.J., Balachandar, S., Kendall, T.M.: Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow, J. Fluid Mech., Vol.387 (1999) pp.353-396.
- 24) Warholic, M.D., Heist, D.K., Katcher, M., Hanratty, T.J.: A study with particle-image velocimetry of the influence of drag-reducing polymers on the structure of turbulence, Exp. Fluids, Vol.31 (2001) pp.474-483.
- 25) 宮本博文: せん断流動場におかれた高分子水溶液中のポリマ鎖の可視化に関する一実験, 機論 (B 編), Vol. 60, No. 574 (1994) 2038-2043.

(a) 水, $Re=10000$

(c) 水, $Re=21500$

(b) 希薄高分子水溶液, $Re=10000$

(d) 希薄高分子水溶液, $Re=21500$

(e) ヘアピン渦によって誘起される流れ

口絵 2 高分子添加による管内抵抗減少流れの構造の可視化

(a)(b) PTV による瞬時の変動速度ベクトル場 (レイノルズ分解)

(c)(d) PIV による瞬時の変動速度ベクトル場 (ガリレイ分解)