希薄高分子水溶液の微小管路内流れに関する研究*

渡辺 敬三^{*1}, 平尾 宗彦^{*2}, 小方 聡^{*3}

Flow Characteristics of Dilute Polymer Solutions in a Micro Tube

Keizo WATANABE^{*4}, Munehiko HIRAO and Satoshi OGATA^{**} Tokyo University of Agriculture and Technology, Department of Technology and Risk Management,
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

Pressure drop and velocity profile for a micro tube were investigated on laminar flow of distilled water and dilute polymer solutions. It is the range of 50.2-251.8 μm in diameter, and the value of l/d is about 340. By a pressure drop measurement it is shown that the experimental data agree with Hagen-Poiseuille equation in the case of Newtonian fluids. And the flow rate of the dilute polymer solutions increased comparing with that of distilled water at the low Reynolds number range. The increase ratio of the flow rate is about 15% in maximum in the case of $d=251.8 \mu\text{m}$. For the result of micro PIV measurement, there are few differences between the velocity profile of distilled water and Peo 5 ppm solution.

Key Words: Dilute Polymer Solution, Circular Pipe, Laminar Flow, Micro Tube, Micro PIV, Pressure Drop

1. 緒 言

高分子水溶液の微小管内層流における流れがニュートン流体とは異なることが実験的に明らかにされている。すなわち、高分子水溶液の微小管内流れにおける流量は、円すい-平板粘度計により得られた粘性挙動を基に算出される流量より大きな増加を示す⁽¹⁾。この流量増加は見掛けの滑りに起因すると考えられ、壁近傍における高分子の希薄な層の形成によるものであるという仮定が一般的になされている。この層内の粘度がバルク粘度に比べ低いため滑りなし条件に反することなく管内を流動する流体が滑りを起こしているように見えるというものである。高分子水溶液のこの滑り速度は壁面ずり応力とともに増加するが、shear thinning による粘度低下が顕著なため全流量に対する滑りの割合は減少する。また Quibraham⁽²⁾ により管径の減少に伴い見掛けの粘度が減少し、臨界直径よりも

小さくなると見掛けの粘度が増加することも明らかにされている。

一方、近年 Muller-Mohnssen ら⁽³⁾ により高分子水溶液の矩形管内速度分布の測定が実験的になされ、流れ場の変化が明らかにされている。しかしながら、見掛けの滑り現象のおもな原因と考えられている管路内の濃度分布の不均一性に対する実験的な解釈はまだまだ見いだされておらず、これらの現象は高分子の網目構造や壁面への吸着、shear thinning といったさまざまな問題が絡み合い複雑化していると考えられる。そこで、これらの問題をより簡略化するためには shear thinning の影響のないような高分子濃度での研究が必要と考えられる。

よって、本研究は非ニュートン粘性の無視できる希薄な高分子水溶液を用いて微小管路内層流の圧力損失測定および速度分布測定を行い、その流動特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

供試流体はニュートン流体として蒸留水を用い、希薄高分子水溶液として 0.5~5 ppm のポリエチレンオキサイド(商品名 Peo-15)および 1~3 ppm のポリアクリルアミド(商品名 Separan-AP 30)水溶液を用い

* 原稿受付 2005 年 4 月 1 日。

^{*1} 正員、東京農工大学大学院技術経営研究科(☎184-8588 小金井市中町 2-24-16)。^{*2} 東京都立大学大学院工学研究科(☎192-0397 八王子市南大沢 1-1)。^{*3} 首都大学東京大学院工学研究科(☎192-0397 八王子市南大沢 1-1)。

E-mail: motlz019@cc.tuat.ac.jp

Table 1 Dimension of micro tubes

$d(\mu\text{m})$	$l(\text{mm})$	l/d	Photograph of micro tube ($d=50.2\mu\text{m}$)
251.8	85.0	337.6	
148.4	50.0	336.9	
101.8	35.0	343.7	
77.7	26.0	334.4	
50.2	25.0	498.0

Fig. 1 Viscosity of dilute polymer solutions

た。図1に円すい-平板粘度計(Anton Paar社製)を用いて測定した供試流体の粘度を示す。図1より希薄高分子水溶液として用いた Peo 5 ppm 水溶液および Separan 3 ppm 水溶液が非ニュートン粘性特性をもたないことがわかった。そして、それらは蒸留水の粘度と $\pm 1.5\%$ 以内で一致した。よって、希薄高分子水溶液の実験結果の整理には水の粘度を用いた。

供試管はフューズドシリカ製微小円管を用い、詳細を表1に示す。管径の測定には光学顕微鏡(KEYENCE社製)を用いた。表1中の微小円管断面図より、真円度が高く表面が滑らかなことがわかる。

測定には図2に示す任意の一定流量を長時間供給可能なピストンとシリンダを備えた定流量吐出し実験装置を用いた。供試実験装置はコンピュータによりモータ回転速度を制御し、ギヤを介してピストンを押し出し、流体を流動させるシステムである。

本装置により正しく流量が得られていることを示すため、重量法により求めた流量 Q とモータ回転数により求めた流量 Q_m を比較した結果を図3に示す。ここで流量誤差を次式で定義した。

$$\varepsilon_{\text{error}} = \frac{Q - Q_m}{Q_m} \times 100[\%] \quad (1)$$

図3より、流量誤差は $\pm 0.5\%$ 以内であることがわかり、本装置により流量が正しく得られていることが

Fig. 2 Pressure drop measurement system

Fig. 3 Error of flow rate

示された。

圧力計はひずみゲージ式圧力変換器で、許容圧力最大1.0 MPa のものを使用している。圧力測定は圧力容器内の圧力を測定しており以下の補正を行った。

$$\Delta P_f = \Delta P - \Delta P_e - \Delta P_o \quad (2)$$

ここで、 ΔP_f は粘性摩擦損失、 ΔP は測定圧力、 ΔP_e は管入口助走区間での損失、 ΔP_o は出口における運動エネルギーの損失である。

また、 ΔP_e と ΔP_o の和は一般によく用いられる Hagen-Poiseuille 流れ理論および過去の文献(4)から流体の単位体積あたりの運動エネルギーの2.2倍とした。それは以下の式で表される。

$$\Delta P_e + \Delta P_o = 2.2 \times \frac{\rho v^2}{2} = 2.2 \times \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 d^4} \quad (3)$$

結果の整理には以下の二つの式を用いた。

$$\lambda = \frac{\pi^2 \Delta P_f d^5}{8\rho l Q^2} \quad (4)$$

Hagen-Poiseuille 式

$$Q_p = \frac{\pi (d/2)^4 \Delta P_f}{8\mu l} \quad (5)$$

ここで ρ は密度、 d は管内径、 λ は管摩擦係数、 l は管

長, Q_p は Poiseuille 流量である。

温度は約 20°C で行った。微小な流れ場では温度の与える粘性への影響が顕著なため、熱電対を用いて圧力チャンバ内の管入口温度を 0.1°C 単位で測定した。測定を行った Re 数範囲は 10~500 である。

3. 実験結果および考察

図 4 に圧力損失測定により得られた管径 $d=251.8 \mu\text{m}$ における管摩擦係数 λ の実験結果を示す。実験結果の精度を調べるため管摩擦係数 λ に関して不確かさ解析を行った結果、直径 $d=251.8 \mu\text{m}$ 、管長 $l=85 \text{ mm}$ 、 $Re=7.5$ で最も不確かさが大きく、不確かさ 1.77% (99% 包括度) であった。希薄高分子水溶液の管摩擦係数は濃度の高い供試流体において顕著な差が見られたため、Peo 5 ppm と Separan 3 ppm について結果を示した。直線はニュートン流体の解析結果である $\lambda=64/Re$ を表す。図 4 から、蒸留水の測定値は Hagen-Poiseuille 式とよく一致することがわかる。一方、Peo 5 ppm 水溶液および Separan 3 ppm 水溶液が低レイノルズ数範囲で管摩擦係数が $\lambda=64/Re$ より低い値となっていることから流量増加していることがわかる。この流量増加は管径の影響を受ける。

これらの傾向をより明らかにするため図 5, 6 にそれぞれ蒸留水、Peo 5 ppm 水溶液、Separan 3 ppm 水溶液の流量増加率 ε を示す。また、図 7 に管径が実験結果に及ぼす影響を $Re=100$ の場合に対して示す。ここで、流量増加率 ε は流出流量 Q と Poiseuille 流

量 Q_p を用いて以下の式で定義される。

$$\varepsilon = \frac{Q - Q_p}{Q_p} \times 100 [\%] \quad \dots\dots\dots (6)$$

図 5 から、蒸留水の流量増加率は 50.2~251.8 μm の微小管において $\pm 2\%$ となり、ハーゲン・ポアズイユの式とよい一致を示した。

一方、図 6, 7 から、希薄高分子水溶液の流量増加率は Re 数の増加および管径の減少とともに減少していることがわかる。

Peo 5 ppm 水溶液は $Re < 50$ で 50.2~251.8 μm の

Fig. 5 Flow rate for distilled water

(a) Flow rate for Peo 5 ppm solution

(b) Flow rate for Separan 3 ppm solution

Fig. 4 Friction factor for micro tube ($d=251.8 \mu\text{m}$)

Fig. 6

Fig. 7 Effect of diameter on flow rate ($Re=100$)

Fig. 8 Concept of the method

微小管で流量増加を示し、管径の減少とともに流量増加率が減少する。この流量増加率は管径 $d=101.8 \mu\text{m}$ において最も流量増加率が低くなり、 $d=77.7 \mu\text{m}$ で再び流量増加率が増加を始めることがわかる。

Separan 3 ppm 水溶液も同様な傾向が見られ、 Re 数の増加と管径の減少に伴い流量増加率が減少し、 $d=77.7 \mu\text{m}$ 以下の微小管で流量が再び増加を示した。

前述したように、Quibrahim⁽²⁾ は見掛けの粘度が管径に依存することを指摘している。彼は高分子濃度が高分子網目構造の長さスケールに影響を及ぼし、見掛けの粘度に変化を与えることを示唆している。これらのことから、本研究における管径の流量増加率への依存は高分子の網目構造の変化が見掛けの粘度に影響を及ぼしていると類推される。

一方、現時点で希薄高分子水溶液の管入口、助走区間損失および出口での運動エネルギーの損失を正確に算定することはできない。そこで、これらの諸損失の影響を除去した粘性摩擦圧力損失のみを評価するため、内径が等しく長さの異なる2種類の供試管に等流量で供試流体を流したときの圧力損失の差を比較することにする。

比較に用いた管の詳細を表2に示す。管径 251.8

Table 2 Difference of tube length

$d(\mu\text{m})$	$l(\text{mm})$			$\Delta l/d$
	l_1	l_2	$\Delta l (=l_1-l_2)$	
251.8	85	60	25	99.3
148.4	50	35	15	101.1

Fig. 9 Friction factor

Fig. 10 Flow rate for Peo 5 ppm solution

μm と $148.4 \mu\text{m}$ の長さの異なる管を用い、 l/d は約 100 とした。

実験結果の整理は図8に示す方法で行った。長さの異なる2種類の微小円管の圧力損失 ΔP_1 および ΔP_2 を測定した。ここで、圧力損失は式(2)に示すとおり

Fig. 11 Micro PIV system

Fig. 12 Velocity profile ($Re=6.6 \times 10^{-3}$)

粘性摩擦損失圧力および管入口助走区間の損失 ΔP_e , 出口での運動エネルギーの損失 ΔP_o からなるが, 等流量で流動していることから入口出口の損失は等しいとみなせる。よって, 長さの異なる 2 種類の微小管の圧力損失の差から見掛けの管長 Δl の微小管の粘性摩擦損失圧力が求まる。

実験結果を図 9 に示す。図 9 から Peo 5 ppm 水溶液の管摩擦係数が $\lambda=64/Re$ より低い値となっていることがわかる。結果をより明確に示すため, 図 10 に流量増加率で整理した。図 10 より蒸留水の流量増加率が $\pm 5\%$ 以内であるのに対し, Peo 5 ppm 水溶液は最大約 15% の流量増加を示していることがわかる。このことから, 蒸留水の結果と比較して, Peo 5 ppm 水溶液が粘性摩擦損失の低下により流量増加を示すことが明らかとなった。また, これらの流量増加率が図 6 で得られた値よりも大きいことから, 高分子の添加により管入口出口損失が水よりも低減していると考えられる。

上述の流量増加のメカニズムを明らかにするため, マイクロ PIV による矩形微小管路内の速度分布測定を行った。速度分布測定には図 11 に示すマイクロ

PIV システムを用いた。供試管としてシリコンと Pyrex ガラスからなる幅 $w=160 \mu\text{m}$, 高さ $h=43 \mu\text{m}$ の矩形微小管を使用し, 供試流体は蒸留水および Peo 5 ppm 水溶液を用いた。供試流体には直径 $1 \mu\text{m}$ の蛍光粒子を混入しレーザー励起により可視化を行った。流体はシリンジポンプにより一定流量で押し出され, 微小管を通り流出する。得られた可視化映像を ICCD カメラを用いて 1/30 秒間隔で 130 枚撮影し, 画像群としてコンピュータに取り込む。保存された画像群を画像処理ソフト Dipp-Flow により低密度 PIV 解析を行い平均ベクトルを得た。測定を行った Re 数は 6.6×10^{-3} である。本レイノルズ数は圧力損失実験と比較して非常に小さいが, 流れは層流であるので本質的な流動状態に違いはないと考えられる。さらに, 流路幅が $160 \mu\text{m}$ と圧力測定で流量増加が見られた管径とほぼ同じであるため, 本速度分布測定で得られた結果から, 流量増加のメカニズムを考察できると考えられる。

マイクロ PIV 装置を用いて得られた矩形管路内速度分布の測定結果を図 12 に示す。図 12 中の実線は供試矩形管のニュートン流体に対する厳密解⁽⁵⁾で以下に示す。

$$v = \frac{y}{2\mu} \left(-\frac{dp}{dz} \right) (h-y) - \frac{4h^2}{\pi^3\mu} \left(-\frac{dp}{dz} \right) \times \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \frac{\cosh\left\{\frac{n\pi}{h}(x-w/2)\right\}}{\cosh(n\pi w/2h)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, h は矩形管高さ, w は矩形管の幅である。図 12 は管中央 ($z=21.5 \mu\text{m}$) の測定結果で, 横軸 x は矩形管の幅 w で $x=0, 160 \mu\text{m}$ は壁面の位置を示している。蒸留水の結果は矩形管路内速度分布の厳密解とよい一致をしている。一方, Peo 5 ppm 水溶液において蒸留水との差はほとんど認められず, Muller-Mohssen ら⁽³⁾により示された 0.25 wt% 陰イオンポリアクリルアミド水溶液の速度分布のような顕著な変化は見られなかった。本研究で測定された速度分布の分解能は壁面から $3 \mu\text{m}$ である。従来の研究⁽¹⁾のポリマの壁面への吸着厚さは $0.8 \sim 1.5 \mu\text{m}$ であるという報告から考えると, 本研究においても $3 \mu\text{m}$ 以下の壁面近傍領域で流れが変化していることが考えられる。

4. 結 論

非ニュートン粘性の無視できる希薄な高分子水溶液の微小円管内流動特性を明らかにすることを目的とし, 直径が $50 \sim 250 \mu\text{m}$ の微小管に対する圧力損失測定および速度分布測定を行った。本研究の結論は以下

のようにまとめられる。

(1) 同一管径で管長の異なる2種類の管を用いて粘性摩擦損失圧力を測定し、それらの測定値の比較から、Peo 5 ppm 水溶液が直径 148.4 μm と 251.8 μm の管で最大約 15% の流量増加を生じることを明らかにした。

(2) マイクロ PIV 測定により、Peo 5 ppm 水溶液の速度分布に蒸留水の結果と顕著な差異が認められなかった。このことから、圧力損失測定で得られた流量増加は壁面近傍の流れの特異性によるものと考えられる。

終わりに、マイクロ PIV 測定について協力いただいた本学マイクロプロセス工学講座の楊明助教授および博士課程3年の神田健介氏に感謝する。また、本研

究の一部は平成16年度科学研究費萌芽研究(No. 16656066)の援助を受けたことを記し謝意を表す。

文 献

- (1) Cohen, Y. and Metzner, A. B., Apparent Slip Flow of Polymer Solutions, *J. Rheol.*, **29** (1985), 67-102.
- (2) Quibrahim, A., Excess Pressure Drop of Polymer Solutions in Laminar Capillary Tube Flows, *Phys. Fluids*, **22** (1979), 784-785.
- (3) Muller-Mohnssen, H., ほか2名, Direct Determination of Apparent Slip for a Duct Flow of Polyacrylamide Solutions, *J. Rheol.*, **31** (1987), 323-336.
- (4) Schmidt, F. and Zeldin, B., Laminar Flows in Inlet Sections of Tubes and Ducts, *AIChE J.*, **15**-4 (1969), 612-614.
- (5) Comish, R. J., *Proc. R. Soc., London, Ser. A*, **120** (1928), 691.