

正 瀬谷川 勲 (新潟大工)
 学 大 西 進 (新潟大産)

学 津井田 武 (新潟大産)

1 緒言

高分子溶液の小オリフィスに流入する液体は、噴流法としての性質を有するため横断力式の検討に重要である。但し、小孔流入前の圧力降下や細管内流動、流出口ジェットの影響などに大きく影響を及ぼすために、工業的にもおもしろ味がある。しかし、ppmオーダーの低濃度溶液の小オリフィスを比較的高い流速で流れる場合の研究は、実験の困難とあって従来あまり行われていない。

本研究は、小オリフィスを通る流れのジェット反力とオリフィス通過時の圧力降下を同時に測定するものであり、これらの測定は、従来あまり留意されなかった小流量域についても行われる。また、得られた結果についての考察を行う。

2 実験装置および使用流体

実験装置の概略を図1に示す。本装置の詳細な説明は既報を参照したい。反力測定に用いたオリフィス径Dは1.24~0.22mmの6種であり、オリフィス流入前の管路径は主に30mmであるが、比較のために10mmの管路も使用した。

実際に使用した流体は水(本産水)とPEO18、セプランAP30の各々100ppm水溶液であり、高分子水溶液には溶解の際、水質安定剤を100ppmの割合で添加した。

3 実験結果

3.1 粘度測定

本実験に先立って使用流体の粘度を、細管法を用いて測定した。その結果を図2、図3に示す。測定したみかけの粘度 $\eta_a (=8V/D, V$ は平均流速、 D は細管径)の範囲では、PEO水溶液はニュートン粘性を示し、セプラン水溶液は非ニュートン粘性を示した。非ニュートン粘性については、べき乗則 $\eta_a = m(dv/dy)^{n-1} (dv/dy)$ を用いたが、これらの溶液に対する m, n の値は図中に記してある。

3.2 オリフィス流出時の反力

図4~図6は、各オリフィスから水および溶液が流出する際の反力の値を、運動量変化による力 PQV で無次元化した T_w/PQV を示している。なお、横軸はレイノルズ数 Re (非ニュートン粘性を示すセプラン溶液のときは一般レイノルズ数 Re^*)である。ここで ρ は流体密度、 Q はオリフィス流出流量、 V はオリフィス流出時の平均速度 $(=4Q/\pi d^2)$ 、 $Re = \rho V D / \mu$ 、 $Re^* = \rho V^{2-n} D^n / K^*$ 、 $K^* = m [(3n+1)/4n]^n$ である。

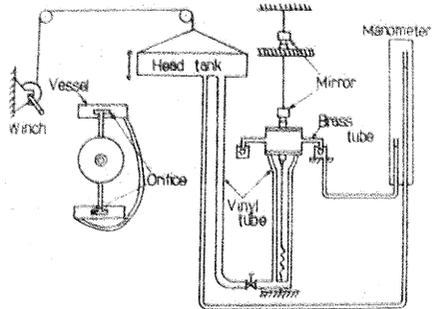


図1 装置全体図

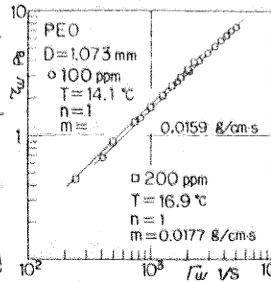


図2 粘度

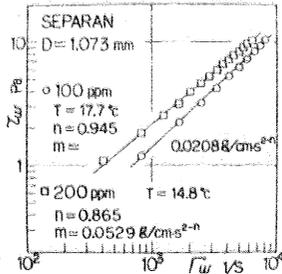


図3 粘度

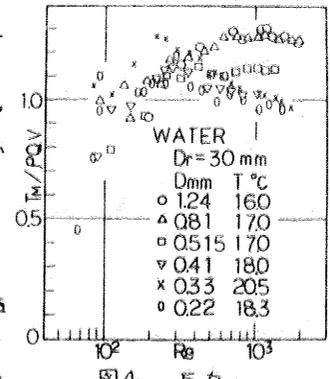


図4 反力

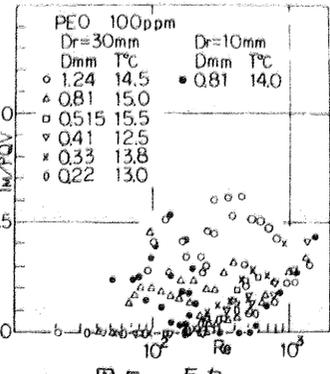


図5 反力

図4の水の場合には、 T_H/P_{0h} はほぼ0.9~1.3の間にあるが、詳細に見ると Re に対し山形の曲線を示すようであり、また $Re > 300$ の範囲で、オリフィス径の小さい方が、概略 T_H/P_{0h} の値も小さいことがわかる。また $Re < 200$ においては、1以下の T_H/P_{0h} の値を示すが、これら(2)の原因については現在明確なことは言えず今後検討したいと考えている。

図5はPEO 100ppm水溶液の場合を示す。全体に水の値より小さい値を示し、とくに低 Re の場合に $T_H=0$ とな(2)る、こ(2)の(2)のは高 Re と同様である。この図で $D=1.24, 0.81$ mmの実験値が0.5~0の値でばらばら(2)っているが、これは圧力差の実験値を参照すると用ゐるべきように、オリフィス前にうずが(2)生じていない場合に相当している。また、うずが(2)できると T_H/P_{0h} の値は、グラフ右方に管径の別なく集まり概略 Re で整理(2)できると思われる。

図6はセパラニ100ppmの $T_H/P_{0h} \sim Re^*$ のグラフである。この場合には、各実験値は Re^* でよく整理されるのがわかる。 Re^* が800~1000で T_H が零から正の値になっていることもわかる。なお、ここには載せていないが、PEO、セパラニ希薄とも200ppmの場合は、100ppmとほとんど同じ傾向であった。反力は溶液の伸張応力に関係すると思われるが、それがこのように Re (または Re^*)でほぼ整理されることは興味あることである。

3.3 オリフィス流出時の圧力差

図7~図9に反力の実験値と同時に測定された、オリフィス前後の圧力差のデータが示してある。つまり、 P_{0h} (または自力加速度、 Δh はオリフィス前後の水頭差)を動圧 $\frac{1}{2}\rho V^2$ で除した $P_{0h}/\frac{1}{2}\rho V^2$ が Re (または Re^*)に対してプロットされている。

水の場合(図7)、 $P_{0h}/\frac{1}{2}\rho V^2$ は Re 前後の値をとるが、とくに $Re < 10^2$ の範囲で大きな値をと(2)る、こ(2)れは反力のグラフ(図4)と参照すると反力が減少することに対応している。また図中には、R-Roscoeが薄刃オリフィスについて理論的に導いた式 $P_{0h}/\frac{1}{2}\rho V^2 = 12\pi/Re$ も示されている。これとの違いはかなり大きい(2)が、こ(2)れには実験で用いたオリフィスの厚さが関係していることを考えられる。

図8はPEO 100ppm水溶液の場合を示す。この図では、実験値は $P_{0h}/\frac{1}{2}\rho V^2 = 2\sim3$ のグループ($D=1.24, 0.81$ mm)と、値がほぼ1で $P_{0h}/\frac{1}{2}\rho V^2 = 100\sim3$ のグループに分けることができる。前者はオリフィス前にうずが(2)生じていない場合であり、後者はうずが(2)存在する場合である。また図中の矢印は、うずが途中で(2)生じて、実験値が「うずなし」から「うずあり」に移ったことを示す。この図にすれば、うずが一旦生じると実験値は Re でほぼ整理される(2)ことがわかる($D=10$ mmの場合は少し上方にずれている)。

また、セパラニ100ppm水溶液(図9)では、明らかに $P_{0h}/\frac{1}{2}\rho V^2$ は Re^* で整理されないことがわかる。これも T_H/P_{0h} の実験値が Re^* でよく整理されることに対応させると興味(2)深く、今後検討したいと考えている。Balakrishnan and Gordon, Locati⁽⁴⁾によれば、伸張応力はオリフィス上流の圧力(今の場合 P_{0h})とほ

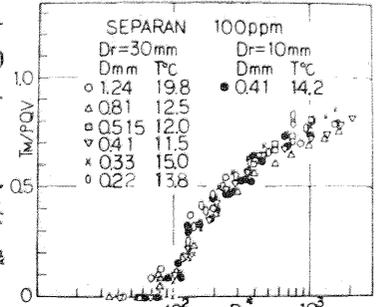


図6 反力

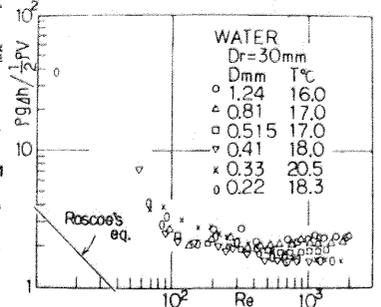


図7 圧力

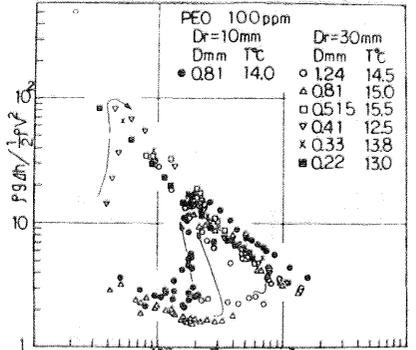


図8 圧力

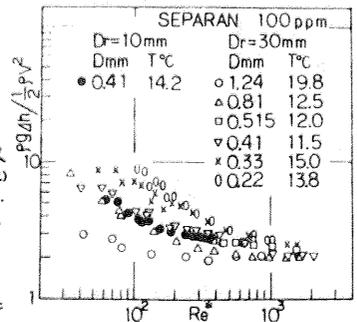


図9 圧力

等しいとされている。本実験結果では、右側の速度断層における伸張応力 S_{11} の最大値は $T_1=0$ の場合における $S_{11}=\rho V_j^2$ (可及流出ジェット流速)であり、圧力はこの値よりなるかに大きいため、少なくともPEO溶液に関する限りBalakrishnanらによる $\rho g \Delta h$ と S_{11} の対応は成立しないと思われる。

4 考察

図10における1と4の間に運動量の法則を適用して式(1)を得る。

$$\rho Q V_1 = A P_1 - \int_4^1 P dA + S_{11} \pi D_j^2 / 4 \quad (1)$$

ただし、上式で1における運動量は小さいとして省略してある。また、 D_j は一般に速度分布を近似したときの流出ジェット径、 P_1 は粘性を生じる以前の1における圧力、 $\int_4^1 P dA$ は壁面4における圧力による力、 S_{11} は流出部におけるx方向の法線応力である。いま、底面4における圧力は、オリフィス周辺部(面積 ΔA)を除いて1における圧力と大きき違いはないと考えられる。つまり液柱となつてオリフィスに向かふべき流れが、一部はオリフィスから流出ジェットとして流出し、残りは底面4のオリフィス周辺部に衝突しx方向の運動量を失うと共に、r方向の流れとなつてオリフィスの遠方に流れ去りうずとなつて管壁を循環する。このような衝突によつて生じる圧力上昇を P_c とすれば、式(1)を P_1 について整理して式(2)を得る。

$$P_1 = \rho (D_j/D)^2 V_j^2 + P_c \cdot \Delta A / \frac{\pi}{4} D^2 - S_{11} (D_j/D)^2 \quad (2)$$

いま図5、図6からわかるように、うずが生じた時の $T_1/\rho Q V$ は Re (または Re^*)である程度整理されるから、 $T_1/\rho Q V = f(Re)$ とおくと、オリフィス流に関する運動量の法則から $S_{11} = \rho (V_j/V - f) V_j V \dots (3)$ を得る。式(2)を式(3)に代入して整理し、 $\frac{1}{2} \rho V^2$ で無次元化すると式(4)となる。

$$P_1 / \frac{1}{2} \rho V^2 = 2f + P_c \cdot \Delta A / \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \quad (4)$$

次に、検査液柱を図11の3-3'-4'-4'にとつてx方向に運動量の法則を適用すると、

$$-\rho Q_1 V = -P_c \Delta A - \Delta_{11} Q + 2 Q_2 \quad (5)$$

ただし、 Q は断面3-3'を通して流入する流量、 V はその流速($Q = \alpha V$)、 Δ_{11} は3-3'における偏差法線応力、これは側面3-4'において液柱コア部分との摩擦によるせん断応力、 Q_2 は側面3-4'において実質的にこの作用する面積である。次に検査面を3'-4'にとつてジェットとして流出するコア部分について運動量の法則を用いると、

$$\rho Q (V_1 - V) = -2 Q_2 - \Delta_{11} Q_c + S_{11} \frac{\pi}{4} D_j^2 \quad (6)$$

ただし、 Q_c は3'におけるコア部の断面積($Q_c = \alpha_c V = \frac{\pi}{4} D_j^2 V_j$)である。上式を式(5)を用いて簡略化すると、

$$\Delta_{11} = -\rho f V \cdot V + \rho V^2 - 2 Q_2 / Q_c \quad (7)$$

式(4)(5)から $P_c \Delta A$ 、 Δ_{11} を消去し、さらに

$$2 Q_2 / \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 = \alpha / Re \quad (\alpha \text{ は定数})$$

とすれば式(4)を得る。

$$P_1 / \frac{1}{2} \rho V^2 = (\alpha / \alpha_c + 1) \cdot \alpha / Re + 2(1 + Q_2/Q) f(8)$$

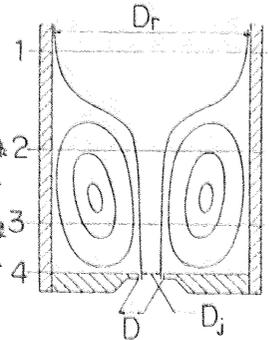


図10

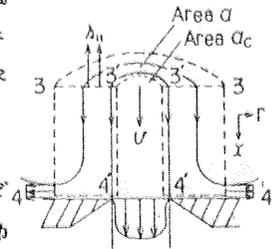


図11

ここで流れの場が相似、つまり α 、 α_c 、 Q_2/Q が一定ならば、無次元化圧力は Re で整理できることになる。この結果は、PEO 100 ppm 溶液の実験結果と一致しているようであるが、セパラ>100 ppm 溶液については $P_1 / \frac{1}{2} \rho V^2$ は Re (Re^*)で整理されず、管径の影響がでている。これは α/α_c 、 Q_2/Q などが一定でないためと思われるが、今後検討したいと考えている。謝辞 本実験装置の製作に協力して戴いた小山裕三氏、実験毎に協力して戴いた森見二氏、杉山高英氏、石田勲氏、その他流体力学工学研究所の諸氏に心から感謝申し上げます。

文献

- (1) 長谷川，機論，44-381 (B53)，166
- (2) 長谷川・高野，機論，45-399，B，(54)，1659
- (3) Weissberg, H. L., Phys. of Fluids, 5-9 (1962) 1033
- (4) Balakrishmann, C. and Gordon, R. J., Proc. VII Int. Congr. Rheology, 1976, 265-267
- (5) Locati, G., Rheol. Acta, 15 (1976) 525-532
- (6) 長谷川・坂谷・大西，機論，48-427，B，(57)，430