Pressure Characteristics of Viscoelastic Fluids in a Converging-Diverging Channel

Hiroshi YAMAGUCHI and Etsuro NODA

*Department of Mechanical Engineering,
Doshisha University, Kyoto 610-03, Japan*

Measurements of pressure at representative points in a converging-diverging channel were carried out for viscoelastic liquids of aqueous solutions of polyethyleneoxide(PEO) and polyacrylamide(PAA) as well as for Newtonian liquids. The pressure drop at the section of converging channel and the pressure rise at the section of diverging channel were simultaneously measured for various flow rates. The experimental results indicate that;

i) magnitudes of both pressure drop and rise for the PEO solution increase with increasing PEO concentration, and the pressure characteristics are similar to those of Newtonian liquids.

ii) the pressure characteristics of the PAA solution are significantly different from those of Newtonian liquids when the PAA concentration is increased. The differences seem to be due to elasticity of the PAA solution.

Key Words: Channel flow / viscoelasticity / Pressure characteristics / Rheological behavior

縮小 - 拡大管路における粘弾性流体の圧力特性

山口 博司*・野田悦郎*

(原稿受理:1994年2月28日)

1. 緒 言

各種管路における粘弾性流体の挙動は、ニュートン流体と比べ、流動形態に大きな相違を生じることが知られ、化学、工学などにおける応用分野のみならず、流体力学基礎研究分野¹⁾において重要である。特に、速度場、圧力場において急激な変化を伴う管路²⁾での粘弾性流体の挙動は流体力学的にも重要な問題として注目を集める一方、多孔性物質内での粘弾性流体の基礎的な挙動^{3), 4)}を知る上で重要な問題として関心を集めている。一方、これら粘弾性流体の管路における流れとして、縮小管路、または拡大管路における流れが別々に取り扱われ^{5), 6)}、連続した縮小 - 拡大管路に関する研究報告は少なく、特に圧力特性に関する詳しい報告は限られているのが現状である。

そこで、本研究では縮小 - 拡大管路において物質特性が比較的

よく知られている PEO(polyethyleneoxide)および PAA(polyacrylamide)の2種類の高分子水溶液を用い、各流量に対し行った管路代表点における圧力計測結果を報告するとともに、本形状をもつ管路における弾性の直接的影響につき検討を加える。

2. 実 験

2・1 実験装置

装置の概略図を Fig. 1(a)に示す。装置は作動流体の押出部、助走部、測定部、後流部、圧力タンクおよび計測、データ処理系で構成した。本実験では高分子流体を取り扱うため、駆動部にはポンプなどを用いず(激しい流体変形に対して高分子鎖状構造の破壊による物性変化をさけるため)、ピストンを使った押出部で流体を駆動した。さらに、測定部の流体に作用する重力による体積力の影響をさけるため、助走部、測定部、後流部を水平に設置した。

Fig. 1(a)に示すように、押出部はシリンダ④内に充填された作

*同志社大学工学部機械系学科 〒610-03 田辺町多々羅

Fig. 1 Experiment arrangement

動流体を流路に押し出す機構で構成されている。動作機構は、モータ①によって回転方向に発生したトルクをボールねじ②によって軸方向の力に変換し、ボールナットとピストンロッド③を固定することによりピストンを押し出せる形態とした。シリンダは内径 100.0mm、ロッド長さ 500.0mm のものを使用し、シリンダヘッドには助走部に合わせるため、また、流れの乱れを防ぐため、先端が直径 25.0mm の先細ノズルを用いた。

助走部⑤は流れに対する乱れを抑えるため水力学的平滑管(アクリル製)を使用した。管長は McComas の理論($L=0.026ReD$)⁷⁾より $L=1500(\text{mm})$ とし、後流部⑩は流れが水平から垂直になる

エルボの影響が測定部⑪に及ばないように充分長く ($L=20D$) とした。

測定部の詳しい形状を Fig. 1(b) に示す。測定は Fig. 1(b) に示す縮小管路入口(圧力 P_1)、ノズル喉部(圧力 P_2) および拡大管路出口部(圧力 P_3) のタップに圧力変換器を備え付けて測定した。

圧力タンク⑧は水平管に空気の混入を避け、かつ、負圧計測を避けるために設置高さを $L=500(\text{mm})$ にとった。

2・2 供試流体

実験で使用した流体はニュートン流体として水、グリセリン、また、非ニュートン流体は Polyethyleneoxide, Polyacrylamide (以降 PEO, PAA と略す) の計 2 種類の高分子水溶液を使用した。これらの高分子は分子構造が簡単で希薄溶液においても粘弾性の影響が強く現れる流体として取り扱う^{6), 8)} ことができる。

実験で使用した流体の物質定数を Table I に示す。Table I に示す物質定数 K , n は供試流体を次式で示すべき乗則流体とおいたときの定数である。

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断応力、また、 $\dot{\gamma}$ はずり速度である。これらの物質定数はコーンプレート回転粘度計(東京計器製 VISCONIC E 形)で測定した。なお、Table I に示すデータは、ずり速度 1.92~384(1/s) の範囲において測定したものである。

2・3 実験方法

流体は圧力タンクより注入し、注入時に混入した装置内の空気は押出部に設けた空気抜き用の穴から除去した。流体の測定は押出部のピストン押出速度より求め、水平管内における平均流速は流量および管径より算出した。

実験に際し、流れが測定部で充分発達するように助走部入り口の流体が測定部に到達するまでの時間(40~400 秒)経過後測定を開始した。なお、測定部において流れの発達状態の確認のため予備実験として静止状態から圧力値をモニタしながら実験を行ったところ、上記の時間経過した後では初期変動は認められなかった。

また、実験中における流体の温度変化は全実験において認められなかった。ただし、実験環境の変化に対しては各実験ごとに、流体温度および基準圧力を測定し、適宜物性値に補正を行った。

本実験における流量の計測範囲は、

$$Q = 1.47 \times 10^{-6} \sim 8.83 \times 10^{-5} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

また、この流量範囲に対するレイノルズ数の範囲はニュートン流体に対して、

$$Re = 7.165 \times 10^0 \sim 5.9 \times 10^3 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

高分子流体に対して、一般化レイノルズ数を用いると、

$$Re^* = 9.0 \times 10^{-2} \sim 3.7 \times 10^3 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

の範囲である。ここで、 Re^* は次式により定義した。

$$Re^* = \frac{\rho 8^{1-n} U^{2-n} D^n}{K \{(3n+1)/4n\}^n} \quad (2)$$

測定は、Fig. 1(b) に示す位置に圧力変換器を設置し、変換器の出力信号をアンプによって増幅した後、パーソナル・コンピュータに取り込み処理演算を行うことにより測定した。測定は 2000 回測定し、その平均を圧力データとした。圧力測定に関して、粘弾性流体では流体が定常ずり流動をしている場合、せん断速度に対して静圧孔に偏差応力による誤差が生じることが知られている。よって、圧力測定に際し、次式⁹⁾により最大測定誤差の見積もり

Table I Rheological Properties of Test Fluids

	concentration(ppm)	$K(\text{mPa} \cdot \text{s}^n)$	n
Water		1.0	1.00
GLYCEROL 25%		2.0	1.00
GLYCEROL 45%		4.7	1.00
GLYCEROL 66%		16.0	1.00
GLYCEROL 88%		169	1.00
PEO	100	1.6	1.00
PEO	200	1.8	1.00
PEO	500	6.9	0.84
PEO	1000	14.7	0.76
PEO	2000	19.0	0.77
PEO	3000	68.2	0.75
PAA	100	2.1	0.95
PAA	200	5.3	0.87
PAA	500	92.8	0.52
PAA	600	109	0.49
PAA	800	556	0.37
PAA	1000	952	0.27
PAA	2000	1200	0.25

を行った.

$$P_H = -\frac{1}{2m}(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \quad (3)$$

ただし, レオロジー定数 m は以下の関係より求められる.

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = 2K\lambda\dot{\gamma}^m \quad (4)$$

ここで, $(\sigma_{11} - \sigma_{22})$ は第1法線応力差, λ はべき乗則型一般化Maxwellモデル⁸⁾による応力緩和時間 $s^{(m-n)}$, $\dot{\gamma}$ はずり速度で本研究では流量 Q の最大値におけるポアズイユ流れに対する代表値を用いた.

式(3)に対し $m=2$ を用いた場合⁸⁾, $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ の最大値(PAA 2000(ppm))における計測圧力の誤差は5%以下となり, 本実験では偏差応力による圧力値の補正の必要性は認められなかった.

3. 結果および考察

Fig. 2 および Fig. 3 に測定部入口断面平均軸速度 v_z' の変化に対する各々ノズル喉部・入口部 $(P2-P1)'$, および出口部・ノズル喉部 $(P3-P2)'$ の圧力差の関係を示す. 図において, (a)は縦軸が $(P2-P1)'$, 横軸が v_z' , (b)は縦軸が $(P3-P2)'$, 横軸が v_z' である. ここで, 各々圧力差に対しては $1/2\rho V_z'^2$, また, 軸速度については V_z により無次元化を行い, 無次元化を示すために'により表した. V_z は最大流量時の測定部入口における平均流速である.

Fig. 2 に PEO の各濃度における平均速度に対する圧力計測の

(a) $(P2-P1)'$

(b) $(P3-P2)'$

Fig. 2 Measurement of pressure difference (PEO)

実験結果を示す. Fig. 2(a)に示すように希薄溶液(100(ppm), 200(ppm), 500(ppm))では圧力差 $(P2-P1)'$ に対して違いはほとんど見られないものの, 高濃度溶液(2000(ppm), 3000(ppm))においては $(P2-P1)'$ は流速の上昇に伴い, 濃度が低い溶液に比べ減少した(圧力損失が大きくなる). 同様に Fig. 2(b)でも濃度が2000(ppm), 3000(ppm)の時, $(P3-P2)'$ が減少する傾向が示された(圧力回復が小さくなる). これは Table I に示すように, PEO では濃度が高くなるに従い, せん断粘度が高くなり, それに伴って摩擦抵抗が上昇するためと考えられ, 圧力差の相違(縮小部における圧力損失の増大, および拡大部における圧力回復の低下)は主に摩擦抵抗による損失が主な原因であるものと考えられ主流速度の増加とともに, この傾向は大きくなることが示された. また, 高い主流速度における圧力回復の大きな遅れは境界層の剥離に伴う渦発生が原因と考えられる.

次に, Fig. 3 に PAA の各濃度における平均速度に対する圧力計測の実験結果を示す. Fig. 3 では Fig. 2 で得られた結果とは全く異なった結果が生じた. Fig. 3(a)において, 希薄溶液では Fig. 2 と同様な傾向(濃度が高くなるに伴って $(P2-P1)'$ が減少する)が示された. 一方, 高濃度溶液(500~800(ppm))では濃度の上昇に伴い $(P2-P1)'$ が上昇することが示された. さらに, 高濃度の溶液(1000(ppm), 2000(ppm))では v_z' の増加に伴うノズル損失 $(P2-P1)'$ は負の値を取らず, 正の値になる結果が生じた. 一方,

(a) $(P2-P1)'$

(b) $(P3-P2)'$

Fig. 3 Measurement of pressure difference (PAA)

(b)においても200(ppm)までは $(P3-P2)'$ に対して圧力回復を示すものの、500(ppm)以上では、 $(P3-P2)'$ が負の値になった。すなわち、高濃度PAAに対しては、縮小部では圧力が入口圧力に対し上昇し、拡大部では喉部圧力に対し降下する結果となり、ニュートン流体とは逆特性を示すことが示された。これは、濃度の上昇に伴う弾性の増加に起因するものと考えられる。すなわち、伸張粘度が伸張速度に対して増加する割合が大きくなり(ニュートン流体は一定)、等方性圧力に加え法線応力が増加するためであると考えられる。したがって、管断面積が減少する経路では伸張速度が上昇し、伸張粘度が上昇することによって

法線応力が増加するため圧力が上昇するものと考えられ、拡大部においても同様な作用により圧力が下降するものと考えられる。以上の結果より、PAAは高濃度では弾性が非常に大きく、ニュートン流体および希薄溶液では生じない特異な現象(入り口部よりノズル喉部の圧力が高くなる)が起きることが本実験より分かった。

次に、粘性、弾性の影響を知るために平均速度の等しい圧力データを一般化レイノルズ数を使って整理した図をFig. 4~Fig. 5に示す。各々図において、 CP^* は各流量に対応する平均流速で圧力差を無次元化したもので、 Re^* は式(2)より求められる一般化

(a) $Q=1.96 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{S)}$

(a) $Q=1.96 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{S)}$

(b) $Q=5.89 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{S)}$

(b) $Q=5.89 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{S)}$

(c) $Q=9.82 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{S)}$

(c) $Q=9.82 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{S)}$

Fig. 4 Relationship between $CP1^*$ and Re^*

Fig. 5 Relationship between $CP2^*$ and Re^*

レイノルズ数である。

Fig. 4 に入り口部とノズル喉部との圧力差 $CP1^*$ と一般化レイノルズ数との関係を示す。(a)は $Q=1.96 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$, (b)は $Q=5.89 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$, (c)は $Q=9.82 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$ における図である。Fig. 4(a)において, Re^* が 150 以上になるとすべての流体において, $CP1^*$ に変化が見られなくなった。これは、代表速度、代表長さが等しい条件下において, Re^* の上昇は各流体のせん断粘度の低下を示し、Fig. 4 で示されるようにニュートン流体と同じ特性を持つことが分かる。すなわち、圧力特性は弾性によらず粘性による摩擦抵抗のみが支配的であることが分かる。このことより、Fig. 4(a)に示すように PEO は Re^* 全域にわたりはほぼ粘性のみによる圧力特性を持つことが示された。一方、PAA では Re^* の減少に伴って(高濃度溶液) $CP1^*$ が増加することが示された。これより、高濃度溶液 PAA に対しては、粘性以外の要因として弾性的な要因(ニュートン流体および PEO の特性との相違において)が考えられる。Fig. 4(b)($Q=5.89 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$), Fig. 4(c)($Q=9.82 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$)においても, Re^* の減少に伴い、ニュートン流体、PEO の圧力は減少し、PAA の圧力が上昇する傾向は(a)と同様の傾向を示し弾性の影響が認められ、さらに Fig. 4(a), (b), (c)より弾性の影響は流量に依存しないということが分かった。

Fig. 5 にノズル喉部と出口部との圧力差と一般化レイノルズ数との関係を示す。同様に、(a)は $Q=1.96 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$, (b)は $Q=5.89 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$, (c)は $Q=9.82 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$ における図である。(a)に示されるように、 Re^* の変化に対し、PEO はニュートン流体と同様な $CP2^*$ の変化を示す。また、この傾向は Fig. 5(b), (c)の高流量においても同様に認められることが示された。一方、PAA に対しては、Fig. 5(a), (b), (c)より分かるように、高い Re^* 数領域まで相違が認められる。これは、PAA に対する弾性の影響が流れ場に大きく作用しているものと考えられる(例えば、拡大部壁面付近における境界層の剥離による渦領域が、ニュートン流体および PEO と比べ相当違った挙動をすることなどが考えられる)。

本研究では、これらの流れ場における流体挙動についての結果は得られておらず、今後、実験における可視化、さらに理論的解析を行う必要があり、これらの点将来研究としたい。

4. 結 言

縮小・拡大管路において、粘弾性流体の挙動の研究を行い、圧力に関する実験データを報告した。

その結果、高濃度 PAA 溶液では流路入り口とノズル喉部での圧力差が正の値を示し、さらにノズル喉部と拡大部出口の圧力差が負の値を示し、他の流体(ニュートン流体含む)に対して逆転現象が起きた。これより、PAA は他の流体と比べ非常に強い弾性挙動を示すものと考えられる。

参考文献

- 1) Bird RB, Armstrong RC, Hassager O, "Dynamics of Polymeric Liquids", vol 1, Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, NY (1987).
- 2) Park HJ, Mitsoulis E, *J Non-Newtonian Fluid Mech*, **42**, 301 (1990).
- 3) James DF, McLaren DR, *J Fluid Mech*, **70**, 733 (1975).
- 4) James DF, Phan-Thien N, Khan MMK, Beris AN, Piliotis S, *J Non-Newtonian Fluid Mech*, **35**, 405 (1990).
- 5) 加藤 宏, 芝沼弘允, 機会学会論文集 (B 編), **45**, 1669 (1979).
- 6) Huzarewicz S, Gupta RK, Chhabra RP, *J Rheol*, **35**, 221 (1991).
- 7) "流体力学ハンドブック", 日本流体力学編, 丸善 (1987).
- 8) Hasegawa T, Iwaide T, *J Non-Newtonian Fluid Mech*, **15**, 257 (1984).
- 9) Higashitani K, *Trans Soc Rheol*, **16**, 687 (1972).