粘弾性流体の入口流れに対する上流の壁面の影響*

白樫正高**

西山秀徳***

脇屋正一**

Effects of a Plane Wall above a Pipe Inlet on the Entry Flow
of Viscoelastic Fluids

By Masataka SHIRAKASHI, Hidenori NISHIYAMA and Shoichi WAKIYA

An aqueous solution of Separan AP-30 (2 or 4 wt%) was pushed out through a circular pipe with a diameter $d = 4$ or 6 mm, attached to the bottom of a large reservoir. A plane wall was set in the reservoir parallel to the bottom, the distance z from the bottom being adjustable. The flow in the reservoir was observed and the pressure distribution along the channel was measured. The upper wall significantly affected the flow pattern above the pipe inlet; the transition shear rates from the radial flow with vortex to the spiralling flow and from the spiralling flow to the random flow became lower with a decreasing z/d , and the period of the spiralling flow was shorter with a smaller z/d . For the random flow, the inlet pressure loss increased over a wide range of z/d . For the spiralling flow it decreased in the range $z/d = 5 \sim 20$.

Key Words: Non-Newtonian Fluids, Viscoelasticity, Die Entry Flow, Wall Effect, Inlet Pressure Loss, Pressure Loss Reduction, Flow Pattern

1 緒言

粘弾性流体を大断面容器底面に取付けた円管から押出す際の管入口附近の流れは、高分子材料の紡糸や射出成型等の工程に見られるとともに、伸張流れの性格を持ち、流体の弾性の性質を顕著に反映した特異な挙動を示すことから、これまでに多くの理論的・実験的研究がなされている^{(1)~(3)}。比較的高濃度の高分子溶液の場合、ニュートン流体では管入口から発達した流れとなる程度の低いレイノルズ数において、管入口附近の付加的圧力損失が大きい事が知られている⁽⁴⁾。また管入口附近の流れの様子はニュートン流体とは著しく異り、流量が大のとき不安定となることが確認されている⁽⁵⁾。以上の研究において、上流側の大断面容器は無限の深さ(管軸方向の長さ)を持つとされてお

り、工業的に見られる流れは多くの場合、管入口上流に容器底面(すなわち管入口面)と平行な固体壁を持つにもかかわらず、この壁の影響に関する報告はほとんどなされていない。筆者らの一人は、円管から大気中に流出する高分子溶液のジェット的不安定性を調べた際に、管入口上流に容器底面と平行に板を置いた場合、図1のようにジェットが著しく不安定になるとともに流量が減少することを見出した⁽⁶⁾。その後、この上壁の効果について図2の装置により実験を行い次のような興味ある結果を得た⁽⁷⁾。図3は押し出し圧力 P 一定の下での流量 Q と無次元上壁高さ z/d の関係を表す。ニュートン流体 $M1, M2$ の場合、 $z/d > 1$ において上壁は流量に影響を与えない。粘弾性流体 $S4$ (セパランAP-30の水溶液。以下、 S の後の数字は重量%濃度を表す)に対しては、 P が大きい場合、上壁高さが管直径 d の数十倍でも上壁は流量 Q を小さくする効果を持つ。図3の $P=0.245$ MPaの場合、上壁を底面に近づけていくと $z/d \sim 50$ において Q は z が十分大きいときの値 Q_∞ から減少し始め、以後 z/d の減少とともに急速に小さくなる。ところが、 Q_∞ がこの場合より小さい値において、上壁は逆に流量を増加させる効果を持つことがある。図4はその例で、直径 d が

* 昭和61年4月1日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年9月20日。

** 正員、長岡技術科学大学(〒949-54 長岡市上富岡町1603-1)。

*** 准員、日産自動車テクニカルセンター(〒243-01 厚木市岡津古久560-2)。

図1 ジェットに対する上壁の影響 (P =一定、ポリエチレンオキサイド4%水溶液、 $d=1.16\text{ mm}$, $L=31.8\text{ mm}$, (a) $Q=1.12\text{ cm}^3/\text{s}$, (b) $z=15\text{ mm}$, $Q=0.852\text{ cm}^3/\text{s}$)

等しく管長 L の異なる管について、 Q_∞ が同程度の場合の無次元流量 Q/Q_∞ と z/d の関係が比較されている。 $3 < z/d < 20$ で $Q/Q_\infty > 1$ となり、この現象は管が短いほど顕著となる。本研究では、この粘弾性流体の入口流れに対する上壁の特異な効果を明らかにするため、流れに沿った圧力分布を測定すると同時に容器内の流れを観察して管入口上部の底面と平行な壁の影響を調べた。

2 主な記号

d : 円管直径、図6

D_w : 代表ずり速度、式(2)

K : べき乗則モデルの擬似粘度、式(1)

n : べき乗則モデルの構造粘度指数、式(1)

P : 各点の圧力、添字により位置を表す、図6

Q : 流量

Re , Re^* : レイノルズ数および一般化レイノルズ数、式(3)

x : 管入口からの距離、図6

z : 上壁高さ、図6

ΔP_e : 入口損失、式(4)、図11、12

ΔP_o : 管入口前後の圧力差、図6

3 実験装置・方法および試料流体

実験装置の概略および測定部の詳細を図5、6に示す。実験においては、図5の弁 V_1, V_2, V_3 を閉じた状態でタンク⑤ (容量 0.3 m^3) 内の空気圧を圧力調整弁⑩により適当な値に設定したのち、弁 V_3, V_4 を開い

図2 小型装置

図3 上壁の流量减小効果

図4 上壁の流量増大効果

て試料流体を測定部 (容器①、円管②) から押し出した。測定部は図6のように、稜の長さ 200 mm の立方体容器と、その底面に垂直に取付けられた円管とからなる。容器内には容器底面と平行に 1 mm 辺 180 mm の正方形の平板が設けられており、これと底面との距離 (上壁高さ) z が調節できる。この平板と容器側面との隙間が形成する流路面積は管断面積に比べ十分に大

図5 実験装置概略

表 1 試料流体の性質

Name	Weight-% of Separan AP- 30	Density (g/cm ³)	Temperature (°C)	Constants in Power-Law Model	
				n	$K(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$
S2a	2.0	1.01	17.6 ~ 21.5	0.26	14
S2b	2.0	1.01	16.6 ~ 19.6	0.26	14
S4a	4.0	1.02	14.7 ~ 29.5	0.23	44
S4b	4.0	1.02	18.4 ~ 23.9	0.23	44

図 6 測定部詳細

きいので、上壁面より上流の流れの影響は小さいもの
と考える。管入口上流の流れの観察のため、容器の図
6の紙面に平行な2側面は透明である。

直径 $d = 4, 6 \text{ mm}$ の2種の円管を用い、管軸が水平と
なるように設置した。管入口面は容器底面と同一面内
にあり、角に丸みをつけていない。

押出し圧力一定の下で上壁を管軸方向に移動させ、
それぞれの位置で流れを観察し、流量を重量法で測定
した。また、次のようにして図6の各点の圧力を測定
した。容器内の上壁より上流の点Aの圧力 P_A および
管壁に沿った各点の圧力 $P_3 \sim P_7$ をボール弁を順次
切換えて圧力変換器により1点ずつ測定する。容器底
面の管入口近傍の点Bの圧力 P_B および上壁中央の点
Cの圧力 P_C を圧力変換器により個別に測定する。点
Bと管入口直近 ($x = 3 \text{ mm}$) の管壁上の点の圧力差
 ΔP_0 を差圧型圧力変換器で測定する。以上の測定圧
力はいわゆる hole pressure error を含む。これに
対し、Higashitani and Pritchard⁽⁸⁾ の方法により
補正を試みた。その結果、この補正量は相対的に小さ
く、測定結果に大きな影響を与えないことが示された
ので、以下本論文に示す結果にはこの補正を加えてい
ない。試料流体としてDow社のセパランAP-30の2
wt% および4 wt% 水溶液を用いた。さらに流れの可
視化のため、アルミ粉末を50 ppmの濃度で混入し
た。これらの流体について、円錐・平板型レオゴメータ
および後述の円管内平衡流の圧力勾配から求め
たせん断応力 τ とずり速度 D の関係は本実験の範
囲でべき乗則モデル

$$\tau = K D^n \quad \dots \dots \dots (1)$$

により表された。そこで本論文では流れの代表ずり速
度およびレイノルズ数として、次式(2), (3)によるべ
き乗則流体の円管内平衡流における壁面ずり速度 D_w
および一般化レイノルズ数 Re^* を用いる。

図 7 第1法線応力差

$$D_w = \frac{3n+1}{n} \cdot \frac{2v_a}{d} \quad \dots \dots (2)$$

$$Re^* = \rho v_a^{2-n} d^n / K \quad \dots \dots (3)$$

v_a : 断面平均流速, ρ : 流体密度

表1に試料流体の性質およびべき乗則モデルにおける
定数を示す。表中の S2a と S2b あるいは S4a と
S4b は同一の試料であるが溶解してからの時間および
流動の経歴が異なるのでここでは区別している。しかし
ながら表から分るとおり、粘性に関する両者の性質の
相違は無視してよい。円錐・平板型レオゴメータ
による第一法線応力差 $N1$ とずり速度 D の関係を図7
に示す。 $N1$ は、S2a と S2b あるいは S4a と S4b
のあいだでわずかに異なる傾向が見られるがその差はき
わめて小さく、この点についても両者を区別する必要
はないと考える。

4 実験結果および考察

4・1 管入口上流の流れ 本実験で観察された
流れは、流量の順に、 i) ろうと形定常流れ (radial
flow with vortex), ii) 旋回流れ (spiralling
flow), iii) 不規則流れ (random flow), に大
別される⁽⁷⁾。ろうと形定常流れは、図8のように管入

図8 ろうと形定常流れ (図2の装置, S1, $d=0.889$ mm, $z=60$ mm, $Q=0.05$ cm³/s, 露出時間 1/4 s)

口上流のろうと形の流路から流体が管に流入し、その外側に軸対称の大きな渦が形成されている定常な流れである。流量が大きくなると、このろうと形の流路の軸が傾いて、x軸のまわりを流路全体が旋回する、

ii) 旋回流れ となる。旋回方向は左右同じ確率で出現し、旋回開始時の方向を維持する。この旋回周期は流量の増加とともに短くなる。さらに流量が大きくなると、旋回角の変動および旋回方向の変換が生じ、

iii) 不規則流れ となる。ii) と iii) の区別は明確ではなく、本論文では旋回が同方向に5回以上持続しない場合を不規則流れとした。上壁はこの流れの状態に強い影響を及ぼす。図9は後述の入口損失 ΔP_e を代表ずり速度 Dw と無次元上壁高さ z/d の関数として表しているが、これに上記の流れの型の領域を併記したものである。この図から分るように、ずり速度の増加にともなう流れの型 i) から ii) あるいは ii) から iii) への移行は、 $z/d > 10$ の範囲で z/d が小さいほど低いずり速度で起る。管径あるいは試料のセパラン濃度が異なる場合についても、それぞれの流れの型は $Dw \sim z/d$ 面上のほぼ同じ領域で表された。図10に旋回流れの周期 T_s と無次元上壁高さ z/d の関係を管径 $d = 4, 6$ mm について比較する。この図から、同一流体の旋回流れの周期は d によらず代表ずり速度 Dw と z/d により決定され、上壁は旋回流れの周期を短くすることが分る。

4・2 入口損失 セパラン水溶液に先立って実験装置および測定系の検定のため水について実験を行った。これにより得た水力勾配線を図11に示す。水の場合、レイノルズ数 Re によらず無次元上壁高さ $z/d > 4$ で容器内の3点A, B, Cの圧力は等しく、上壁は水力勾配線に影響を与えない。水力勾配線の十分下流における直線部分を管入口 ($x = 0$) に外挿した圧力を P_{in} とし、容器内の圧力を P_A により代表せられ

図9 流れのパターンと入口損失

図10 旋回流れの周期に対する上壁の影響

ば、入口損失 ΔP_e は

$$\Delta P_e = P_A - P_{in} \dots (4)$$

で表される。本実験による $4000 < Re < 22000$ 範囲の測定結果 および入口損失についての従来の資料 (9) を参照すれば、後述のセパラン水溶液についての実験のレイノルズ数の範囲 $Re < 300$ において $\Delta P_e < 2.3$ Pa と見積られる。粘弾性流体 S2b の水力勾配線を、 $d = 6$ mm, $z = 140$ mm の場合について図12に示す。図12は、ニュートン流体であるならば管入口から発達した流れとなるレイノルズ数において、粘弾性流体の場合には大きな付加的圧力損失が生じ、流れが発達するのに長い距離が必要なることを示している。また、容器内の側面と底面の上の点A, Bの圧力は等しいが、上壁中央の点の圧力 P_C は、管入口の上流に形成されるろうと形の流路に点Cが含まれる場合には点A, Bの圧力よりも低くなる。図12の $Q = 14.2 \sim 103$ cm³/s の水力勾配線において、 $x = 0$ 附近に

図11 水の水力勾配線

突起が見られるが、これは、管壁上の $x = 3 \text{ mm}$ の点で測定された圧力 P_2 が容器底面の圧力 P_1 よりも高いことを示している。この異常な結果については次節でより詳細に述べる。水の場合と同様に式(4)により求めた入口損失 ΔP_e を流れの型とともに代表ずり速度 Dw と無次元上壁高さ z/d の関数として図9に示した。この図から、 Dw が大きい領域において上壁高さが小さくなるとともに ΔP_e が大きくなる現象（上壁の入口損失増大効果）および中程度の Dw において $z/d = 10$ 付近で ΔP_e が極小値となる現象（上壁の入口損失減少効果）が確認される。また、入口損失増大効果は不規則流れの領域で、入口損失減少効果は旋回流れの領域で起ていることが分る。上壁によるこれらの効果が観察される Dw 、 z/d の範囲は細管 ($d = 0.89 \text{ mm}$) についての観察結果⁽¹¹⁾と概略一致しているようである。

4・3 管入口前後の圧力差 入口損失 ΔP_e は、管入口より上流での圧力損失（流入損失）と管入口より下流における付加的損失（緩和損失）の和である。上壁は容器内の流れに影響を与えるので、上壁の効果は流入損失に対して大きいと考えた。そこで容器底面の死水領域における圧力と管入口直近の管壁上の圧力の差 ΔP_o を差圧型圧力変換器により直接測定した。しかしながらその結果は以下に述べるように全く意外なものであった。図13に、試料 S2a, $d = 4 \text{ mm}$, $z/d = 25$ の場合の ΔP_o の時間的変動の様子を示す。流量 Q が小さく流れがろうと形定常流れの場合は図13(a)(b)のように ΔP_o は一定で Q とともに増加する。旋回流れの場合には(d)のように ΔP_o は規則的に変動しその周期は流れの旋回の周期と一致する。これらの中間の流量ではろうと形定常流れから旋回流

図12 粘弾性流体の水力勾配線

れに、あるいはその逆に移行する現象が見られ、 ΔP_o は(c)のように変化する。この移行において、旋回流れにおける ΔP_o はろうと形定常流れの場合よりも小さいことは注意すべき現象である。旋回流れで流量が大きいときは(e)のように旋回角の変化にともなって ΔP_o に不規則な変動が重なる。さらに大きな流量で不規則流れの領域では ΔP_o は(f)のように激しく不規則に変動する。この測定結果において非常に意外なのは、(d)～(f)のようにある流量を越すと ΔP_o は Q とともに減少し、 Q のある範囲で $\Delta P_o < 0$ 、すなわち管壁上の圧力が容器内の圧力よりも高くなると解釈される現象である。 ΔP_o の平均値 $P_1 - P_2$ と代表ずり速度 Dw の関係を、 z/d をパラメータとして図14に示す。上壁が極めて低い場合（図14では $z/d < 1$ ）を除き、 Dw に対する $P_1 - P_2$ の挙動は z/d によらず類似の傾向を示す。すなわち、 Dw が小さいとき、 $P_1 - P_2$ は小さい正の値で Dw とともにゆるやかに増加する。 Dw がこの領域を越すと Dw とともに減少して負の値となり、ある Dw で最小値に達する。 Dw がこれを越すと $P_1 - P_2$ は急激に増加し正の値となる。上壁は Dw が小さい領域を除き $P_1 - P_2$ を顕著に増加させる。すなわち、上壁が低くなるほど上述の $P_1 - P_2 \sim Dw$ 曲線における最小値の凹みは浅くなりそのときの Dw は小さくなる。 Dw が大きい領域において $P_1 - P_2$ が z/d の減少とともに増加する現象は上壁の入口損失増大効果に対応すると考えられるが

図13 入口前後の差圧変動 (S2a, $d=4\text{mm}$, $z/d=25$)

図14 入口前後の圧力差に対する上壁の影響

その大きさは ΔP_e に比べ桁程度小さい。一方、 $P_1 - P_2$ が負となる D_w の領域は前述の入口損失減少効果が観察される領域とは一致せず、この二つの現象が対応するものではないと考えられる。

5 結 論

セバランAP-30の水溶液を大断面容器底面に取付けられた円管から押出す場合、管入口上流に底面と平行に置かれた壁面の影響を実験的に調べ下記の結論を得た。

(1) 管入口上流の流れの様子は円管内平衡流におけ

る管壁上のずり速度 D_w と無次元上壁高さ z/d により決定される。上壁はろうと形定常流れ (radial flow with vortex) から 遷回流れ (spiralling flow) あるいは遷回流れ (spiralling flow) から 不規則流れ (random flow) へ移行するずり速度を小さくするとともに、遷回流れの周期を短くする。

(2) 上壁は、遷回流れの領域で無次元高さ $z/d = 5 \sim 20$ の範囲において入口損失 ΔP_e を小さくし、不規則流れの領域では z/d が小さいほど ΔP_e を増加させる。

容器底面と管入口直近の管壁上の点の圧力差 $P_1 - P_2$ は D_w が大きいとき入口損失増大効果に対応して z/d が小さいほど大になる。しかしながら、ある D_w の範囲において $P_1 - P_2 < 0$ となる予想外の結果が得られた。この異常な測定結果については現在の段階では適当な解釈が得られず、今後の興味ある課題と考える。

文 献

- (1) Cable, P. J. and Boger, D. V., AICHE J., 24-5(1978), 869-879. 25-1 (1979), 152-159.
- (2) White, J. L., Appl. Polymer Sympo., No.20, (1973), 155-174.
- (3) 中村・東・堀川, 繊維機械学会誌 (論文集), 31-2 (1978), 41-47.
- (4) Moan, M., Chauveteau, G. and Ghoniem, S., J. Non-Newtonian Fluid Mech., 5 (1979), 463-474.
- (5) Tomita, Y. and Shimbo, N., Appl. Polymer Sympo., No. 20, (1973), 137-153.
- (6) 白樫, 東京工業大学修士論文, 1969.
- (7) Shirakashi, M., Ishida, Y. and Wakiya, S., Rheologica Acta, 22 (1983), 462-470.
- (8) Higashitani, K. and Pritchard, W. G., Trans. Soc. Rheol., 16, (1972), 687.
- (9) 例えば, 富田・山崎, 水力学, 産業図書, 1979, 144-148.
- (10) 富田, レオロジー, コロナ社, 1975, 251-268.
- (11) 石田, 長岡技術科学大学修士論文, (1981).

討 論

〔質問〕 加藤 宏〔東京都立大学工学部〕

z の影響が予想より大きく興味深い現象を提起されたことに敬意を表す。 z にも関連するが容器側壁の影響およびこれを 200 mm とされたことに対する知見があればご教示願いたい。

〔回答〕 著者らの目的に対しては、容器断面寸法が上壁高さ z に比べ十分大きく側壁の影響が無いの

が理想的であったが、装置全体の容量の制約から本装置のような寸法とした。2866 ページ右欄 6 行めから 2867 ページ左欄 2 行めに記したように、上壁と容器壁が形成する流路断面積が管断面積に比べ十分に大きければ容器側壁の影響はないと考えているが、その具体的な大きさについてはわからない。

〔質問〕 長谷川 富市〔新潟大学工学部〕

(1) 管入口後の $p_1 - p_2 < 0$ の領域は管壁のどの程度下流まで広がっていると思われるか。

(2) 水の水力こう配線図をみると管入口直後での圧力は水力こう配線図より低くなっており、ここにうずが生じていることが予想される。水ではレイノルズ数が高すぎて使用した高分子溶液に対応するニュートン流体としては不適当と考えられる。グリセリンや流動パラフィンのような高粘度の液体で水力こう配線をとったらどうなるか。この場合にも管入口直後に壁に付着したうずは生ずるであろうか。使用した高分子溶液についてはうずが生ずると考えられるか。

(3) $p_1 - p_2 < 0$ なる現象に対し、物理的推測は与えられないか。

(4) 測定圧力の時間的応答はどのようなであったか。

〔回答〕 (1) 現在の段階では全くわからない。

この点に関する実験を行いたいと考えている。

(2) ご指摘のように、同程度のずり速度 D_w において $R_e = R^*$ となるような粘度を持つニュートン流体と比較するのがより適当であると思う。しかしながら、2868 ページ右欄式(4)下1～6行めに記したように、この実験の R^* の範囲におけるニュートン流体の入口損失はここで問題としている粘弾性流体の ΔP_e に比べ非常に小さいと考えられる。これらのことから、本論文で取扱っている現象は管入口の渦には関係がないものとする。

(3) 現段階では全くわからない。ただし、 $p_1 - p_2$ は圧力そのものではないので、 $p_1 - p_2 < 0$ がただちに管内圧力 > 容器内圧力を意味するとは考えていない。

(4) 加圧後流れが安定するまでの時間は10～60 min 程度要し、一点の圧力測定については、弁切換え後約10 min 程度で指示の安定を確認して読取った。