

正 長谷川 富市 (新潟大)
 准 丸 茂 康 典 (東京計器)
 小林 敏 一 (富士通)

1. 緒言

粘弾性流体の法線応力差は、流体の流動特性を解析する際に粘性応力と同等で重要な量である。とくに PPM オークの希薄高分子溶液は、ほとんどの場合ニュートン粘性を示すから粘性についての問題は少ないが、法線応力差はその値が小さいことおよび通常の測定方法では測定困難であり、その実体はほとんど不明の状態である。筆者の一人は先に希薄高分子溶液の法線応力を測定し得る装置を考案、開発したが、このたび測定精度向上のために装置の改良を行ない、それにより種々の希薄溶液の法線応力を測定したのでここに報告する。

2. 測定原理

測定原理は前報⁽¹⁾と同じであるので略述すると定める。図1のようにリザーバに取り付けられた細管から流体がジェットとして流出する場合を考える。図中の点線のように検査面

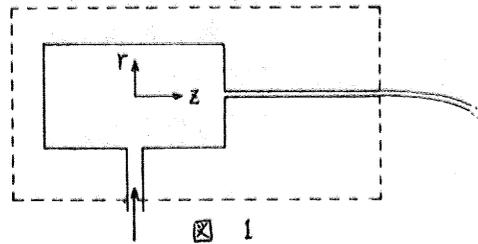


図 1

をとり、z 方向の運動量のつり合いを考える。その際流れは管内および管出口で Poiseuille 流であると仮定する。さて運動量理論によれば次式が成り立つ。

$$\int_0^R S_{zz} 2\pi r dr = T - T_H - f \dots \dots (1), \quad \text{ここに} \quad T = 2\pi \rho \int_0^R v^2 r dr = \frac{\rho \pi}{3} V^2 D^3 \dots \dots (2)$$

ただし、R は管半径、D = 2R は管直径、v は流速、V は平均流速、S_{zz} は z 方向の法線応力、-T_H はジェットにより細管が受ける反力、f は表面張力による力である。ここで式(1)の左辺の積分変数 r と r = (r₀/r_w)R の関係を用いてせん断応力 τ_{rz} (τ₀ は壁面せん断応力) に変換し、さらに両辺を r₀ で微分すると次式を得る。ただし添字 w は壁面における値であることを示す。

$$(S_{zz})_w = \frac{1}{2R^2} \left[2(T - T_H - f) + \tau_w \frac{d(T - T_H - f)}{d\tau_w} \right] \dots \dots (3)$$

さらにせん断応力についてはニュートン粘性を仮定すると次式が成り立つ。

$$\tau_{rz} = \mu \frac{dv}{dr} \quad \text{すなわち} \quad \tau_w = \mu \Gamma \dots \dots (4)$$

ただし μ は粘性係数、Γ = 8V/D は壁面せん断速度である。式(4)を式(3)に代入し

$$(S_{zz})_w = \frac{1}{2R^2} \left(2 + \frac{d \log(T - T_H - f)}{d \log \Gamma} \right) (T - T_H - f) \dots \dots (5)$$

を得る。流量より式(2)によって T が定まり、反力 -T_H を測定すれば式(5)より (S_{zz})_w を求むことができる。(S_{zz})_w は z 方向の法線応力そのものであるが、r 方向の運動量平衡式を

考之、ワイヤ／線の反発と仮定し、これを第一法線応力差 $(\tau_{22} - \tau_{rr})_w$ と結び、(1) のことが可能である。すなわち、次式が成り立つ。

$$(\tau_{22})_w = (\tau_{22} - \tau_{rr})_w \quad \text{----- (6)}$$

3. 実験装置

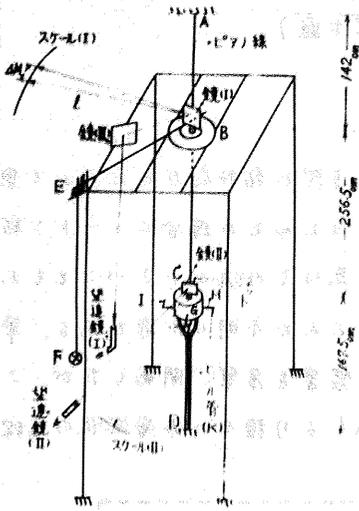


図2-1 全体図

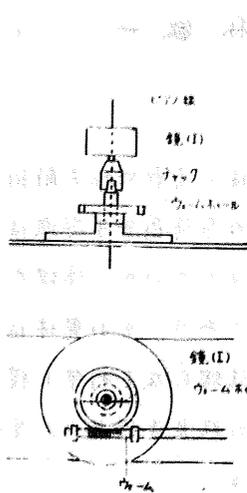


図2-2 8部詳細図

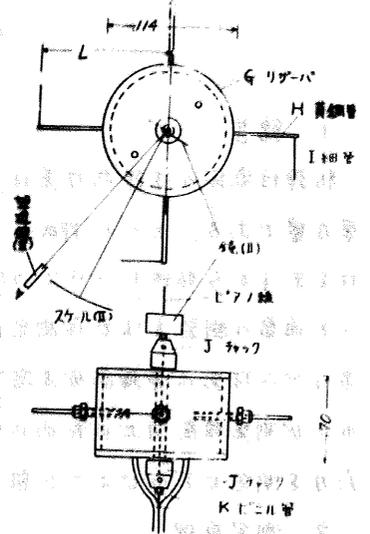


図2-3 ジェット噴出装置 (C部詳細)

前述の方法で法線応力を測定するために、以下のような実験装置を考えた。全体図を図2-1に示す。装置の概要は、ジェットの反力をワイヤ／線の捻れ角に変換して測定するものである。すなわち上下約556 cmの間に張られたワイヤ／線(直径1.5 mm)の途中B点にワームとワームホイールならびに鏡(I)が取り付けられ、C点にジェット噴出装置と鏡(II)が取り付けられている。いま、下からロニル管Kを通過してリザーバGに供給された溶液が細管Iからジェットとなって噴出すると、その反力に対応して、BC間のワイヤ／線及びCD間のワイヤ／線とロニル管が共に捻れる。その捻れは、あらかじめ望遠鏡(II)によってスケール(II)で合わせておいた零点からのずれとして現われる。次にそのずれ(スケール(II)の零点からのずれ)を零にするように、すなわちC部を最初の零点に合わせるように、ハンドルFを回し、棒FE、EBを介してワームホイールと連結されたB部を回転させる。かくして、C点はジェット噴出前の零点にもどり、D点は固定されているから、CD間の変位は零。すなわちロニル管は何ら捻り変形と受けないことになり、ロニル管の影響は除去されたことになる。換言すれば、ジェットの反力によるトルクは、CB間のワイヤ／線の捻れのみにより釣り合うことになる。このとき、鏡(I)(II)を反射し、望遠鏡(II)に映ったスケール(I)の読み4Mと鏡めはジェット反力に対応したCB間の捻れを知ることが出来る。ジェット噴出装置は前報⁽¹⁾と同じで図2-3に示してある。円筒状のリザーバGの上下にはカメラJが取り付けられており、これで本体をワイヤ／線に固定する。リザーバからは内径2.4 mmの4本の管Hが半径方向に突出しており、その先端にはステンレス製の細管IがHに直角に取り付けてある。H-Iは一体であるわけでも、

GとHは取りはすし可能であり、またHの先端は小ネジで止めてあるから、細管H内のゴミは除去できる。細管は5種類準備しており、その管径と管長は表1に示されている。

4. 実験結果

いま、 ΔM スケール(I)の目盛差とし、 l 、 L を図2-1、図2-3で与えられた長さとする。ピエゾ線の捻れ角 $\theta = \Delta M/l$ とジェット反力によるトルク $T_H L$ は、 θ の微小範囲内で比例すると考えられるから次のように表わせる。

$$\Delta M/l = k T_H L \dots\dots (6)$$

ここで k は比例定数でピエゾ線の剛性率より決定される。一方、水の場合は $(S_{zz})_w = 0$ と考えられるから、式(1)より

$$T_H = T - f \dots\dots (7)$$

$$T = \frac{9\pi v^2 D^2}{3} = \frac{16\beta Q^2}{3\pi D^2} \dots\dots (8)$$

上式(8)から $m = k l L 16\beta / (3\pi D^2)$ とおくと、

$$\Delta M = k l L (16\beta Q^2 / 3\pi D^2 - f) = m Q^2 - 3\pi D^2 m f / 16\beta \dots\dots (9)$$

となり、水の場合には $\Delta M \propto Q^2$ の間には線形関係が成り立つことになる。水の場合の実験値が図3に示されているが、式(9)の線形関係をよく満たしていることがわかる。式(9)の m (グラフの傾き)従って k の値は、基準の T_H により校正を行ない、あらかじめ定めておく必要があるが、基準の T_H を用いることがそれほど簡単ではないので、本実験では水の実験値(図3)を元として m の値と決定する。 m は溶液の種類によらない装置定数である。 m がわかると図3の切片 $(3\pi D^2 m f / 16\beta)$ によって表面張力による力 f がわかる。こうして求めた f を、換軸 D の両対数グラフにプロットしたものが図4である。傾きはほぼ1であり、 $f \propto D$ であると見られる。また $f = k' \pi D \sigma$ と表わしてやると $k' = 0.667$ が得られる。 σ は表面張力で本実験で使用した水道水では $\sigma = 73 \text{ dyne/cm}$ である。他の溶液の σ の概略の測定値が表2に示す。

NO.	管径 mm	管長 mm
1	0.423	80
2	0.724	140
3	1.068	200
4	1.595	250
5	2.023	300

表 1

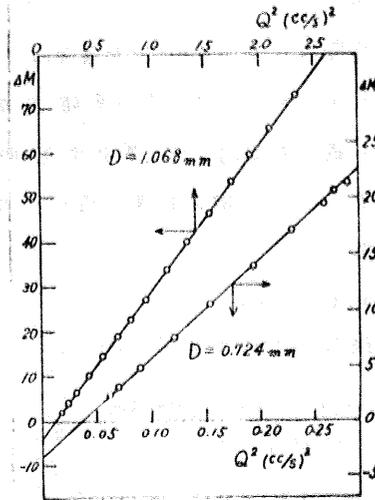


図 3

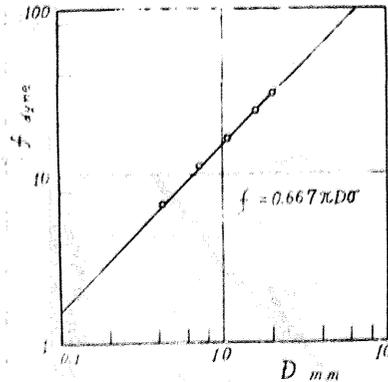


図 4

溶 液	表面張力 (dyn/cm)
水道水	73 (20°C)
PEO 10ppm	61 (")
PEO 2ppm	65 (")
セブロン100ppm	69 (")
セブロン50ppm	67 (")
セブロン20ppm	65 (")

表 2

(2)(3)

れている。従来の値については1.0と0.5とが種々の議論がなされてきたが、本実験による値はこの中間に存在する。図5~9は式(5)に基づいて計算した $(S_{zz})_w$ 対 Γ の両対数グラフである。 $(S_{zz})_w$ の値は、少なくともNO.1,2,3の細管については、管径の違いによらずほぼ一本の線上に存在するが、NO.4,5の細管については、とくに図5,9で明らかのように管径による系統的な違いがみられる。この原因は今後明らかにしたいと考えている。

謝辞

本研究は、筆者の一人が東京工大勤務中に手がけたものであり、筆者にその機会を与えられた東京工大 荒田幸雄教授に心から感謝申し上げます。また、数々の有益な助言を戴いた新潟大学 若月正俊助教授、実験に際し助力を惜しまれなかった高野一男技士ならびに機械工場の諸氏に心から感謝の意を表します。

文献

- (1) 荒田・長谷川 他2名
機講論, NO.730-6 (8648-4), 191
- (2) Oliver D.R., Canad. J. Chem. Eng.,
April (1966), 100
- (3) Skattery J. G., & Schowalter W.R.
J. Appl. Poly. Sci., 8(1964) 1941

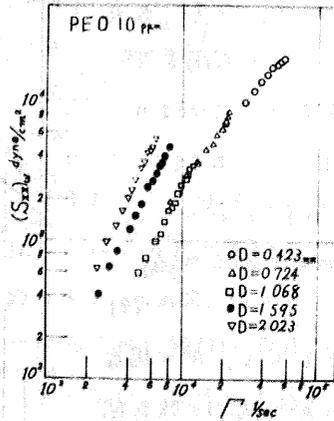


図 5

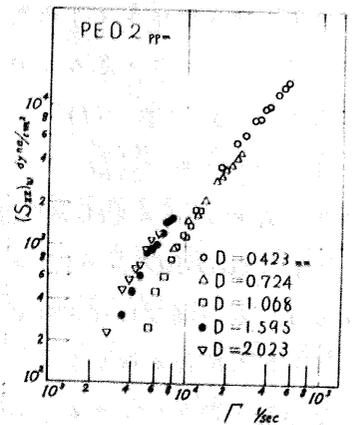


図 6

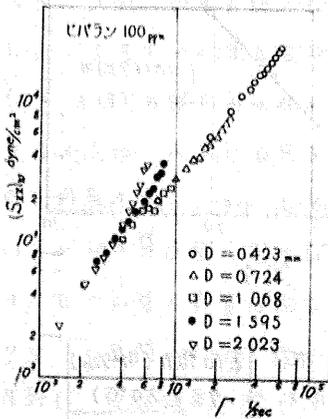


図 7

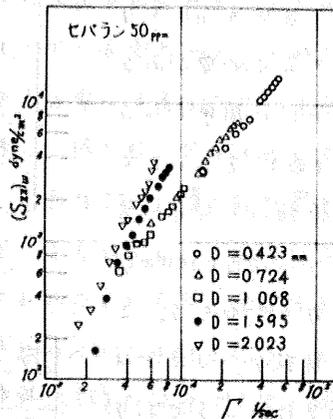


図 8

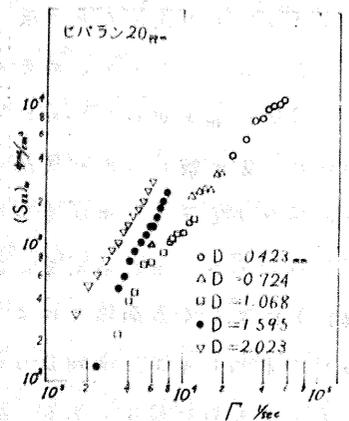


図 9