

粘弾性流体のスライズ流れに関する実験的研究\*  
(第1報, 球面-平面間の流動に及ぼす流体特性の影響)

鳴海敬倫\*\*, 長谷川富市\*\*

Experimental Study on the Squeezing Flow of Viscoelastic Fluids  
(1st Report, The Effect of Liquid Properties on the Flow between  
a Spherical Surface and a Flat Plate)

by Takatsune NARUMI and Tomiichi HASEGAWA

An experimental study has been made on the flow of viscoelastic liquids in thin films held between a flat plate and a spherical surface of a large radius of curvature. Especially, the case is investigated when a spherical surface begins to roll on a flat plate from a stationary and contacting state. Dilute polymer solutions are used as viscoelastic fluids, whose properties are elastic but Newtonian in viscosity. Compared with non-elastic liquids, some effects are shown: The point of cavitation is far from the center of contact where the thickness of the liquid film is minimum. The thickness of the liquid film, generated with a rolling movement, is larger than that of non-elastic liquids.

**Key Words:** Viscoelastic Fluid, Squeezing Flow, Liquid Film, Cavitation, Dilute Polymer Solutions, Experimental Study, Human Joint, Non-Newtonian Fluid

## 1. 緒言

流体のもつ粘弾性的な特性が、種々の流動場において、特異な働きをすることは、よく知られている。特に、潤滑などの際に生ずるスライズ流れの場に、粘弾性流体を用いることは、通常の流体と比べ荷重保持力、スライズ膜厚さに違いを生ずる可能性があるなど興味深い問題を含んでいる<sup>(1)-(3)</sup>。また、医用工学上の問題である生体関節の潤滑機構についても、関節液が粘弾性特性をもつ点、さらに、主な流動場がスライズ流れである点など共通の観点から研究が進められている<sup>(4)(5)</sup>。

しかし、それらの多くは数値計算などによる解析が主体であり、また、実験でも定常流または一次元の運動に限ったものが多く、実際の運動状態に近い状況を扱った例は少ない。

そこで、本研究では、関節のように非定常なスライズ流れを生ずる場合を取り上げ、流体のもつ粘弾性的な特性が、このような流動場にどのように影響するかを実験的に解明することを目的としている。

本報では、運動面を有限な平面と曲率半径の十分大きい球面とで、近似したモデルを用い、球面にころがり運動を与えた場合について実験を行った。特に、粘弾性流体としては、ニュートン粘性を示す範囲の希薄高分子溶液を用い、より高い濃度の溶液では通常含まれてしまう非ニュートン粘性の影響を除外して弾性的な特性のみの影響を比較検討した。

## 2. 実験装置および実験方法

**2.1 実験装置** 実験装置の主要部を図1に示す。実験に用いた平面は、直径40mmの光学ガラス平板①で、図1のように液槽③に固定されている。球面には曲率半径  $R_L=1980$  mm、直径40mmの凸レンズ②を用いており、サポータを介してアルミニウム製のアームが取り付けられている。そして、この球面にころがり運動を与えるためにアームの一端  $P_1$  に、改造した精密てんびん④によって荷重  $F$  がかけられるようになっている。また、他端  $P_2$  は、リニアモータ⑤、マイクロメータヘッド⑥およびその先端に取付けられたピンおよびピボットにより高さを微調整できるようになっている。また、その運動を観測するために、装置下方からは He-Ne レーザ平行光が照射されており、さらに運動状況を記録、撮影するために高速度カメラが

\* 昭和60年10月26日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和60年3月20日。

\*\* 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

設置されている。なお、それらの光路系は、ホログラフィ用のミラー、ハーフミラーなどを用いて組まれている。

**2.2 実験方法** まず、図1のような状態において凸レンズと平板の接点が、その中心(O)から適当な距離( $X_0$ )だけ離れた位置になるように、 $P_2$ 点の高さを調節し、十分安定した後、リキアモーター軸を矢印の方向に引き離し、 $P_2$ 点を解放する。これにより凸レンズは、荷重 $F$ のもとにころがり運動を開始する。そこで、2.1節で述べた光学系を用いて、凸レンズの運動状況を記録する。運動状況は2面間に生ずる光学干渉じま(Newton's ring)の変化として撮影される。そのフィルムを、投影機を介してディジタイザ上に映写し、干渉じまの座標をパーソナルコンピュータに入力する。そして、その値を元にレンズの位置を算出する。

実験は、ころがり開始位置( $X_0$ )を中心から $X_0=0 \sim 10$  mmの範囲で適宜三とおりないし四とおりの位置を選んで行い、また、荷重 $F$ を0.15, 0.29, 0.44 Nの三とおりに変化させて行った。

**2.3 使用流体** 実験には、比較用として通常ニュートン粘性を示し、弾性がないとされている流体(以下粘性流体と呼ぶ)をもちいた。すなわち、グリセリン10%水溶液(体積濃度)、水あめ(Starch Syrup)30%および50%水溶液(重量濃度)の3種類である。また、粘弾性流体としては、水溶性高分子 Poly-ethylene oxide (PEO-18: 製鉄化学工業社製)の100, 200 ppm水溶液(重量濃度)の2種類を用いた。なお、溶媒としては、いずれも蒸留水を用いた。各々の溶液の実験時における平均温度と同条件下での物性値を表1に示す。

実験は、表に示した液温の $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲で行われており、液槽には一定量(15 cc)を満たすようにした。また、先にも述べたが、PEO水溶液はこの程度の濃

度、温度範囲ではニュートン粘性を示し、弾性的な特性も有していることが確かめられている<sup>(6)(7)</sup>。ただし、PEO水溶液では流動による高分子鎖の劣化の影響を防ぐため、その都度溶液を交換した。なお、本報中の図では、溶液の区別を表中に示した略記法を用いて現わすことにする。

### 3. 実験結果

**3.1 現象の概略** この実験において見られた現象の概略と、フィルム上に撮影される像を図2に示す。凸レンズは、 $P_2$ 点を解放した瞬間から $X$ 軸にそってころがり運動を開始するが、その最下点(Newton's Ringの中心)の後方にキャビティが発生、消滅するのがみられた。また、凸レンズ自身が、サブミクロンオーダーながら浮上するのがみられた。この章では、ほぼ粘度の等しいグリセリン10%およびPEO 200 ppm水溶液を例にとり、同一条件下におけるころがり状況、キャビティの位置、浮上量の測定結果を比較していくことにする。また、適宜、高粘度の水あめ50%水溶液の結果も引用し、粘性の影響も検討していく。

**3.2  $X$ 方向のころがり運動** 図3(a)~(c)は荷重 $F$ が0.44 Nの場合におけるレンズ最下点の位置と、ころがり開始からの時間 $t$ の関係を示している。ころがり速度はこの線の傾きの逆数に相当するが、図

表1 使用流体

Solution	Temp. $T$ / $^\circ\text{C}$	Density $\rho$ / $\text{g/cm}^3$	Viscosity $\eta$ / $\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Gly. 10%	30.8	1.02	1.08
S. Syrup 30%	16.8	1.09	3.51
S. Syrup 50%	18.8	1.19	11.3
PEO 100ppm	30.6	1.00	0.857
PEO 200ppm	30.2	1.00	1.05

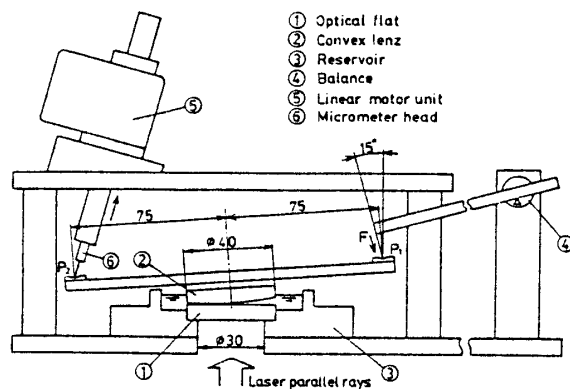


図1 実験装置主要部

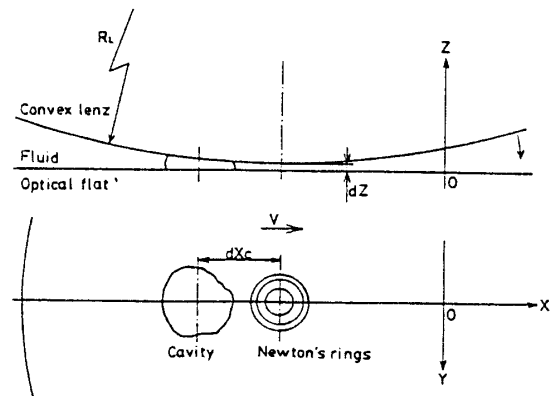
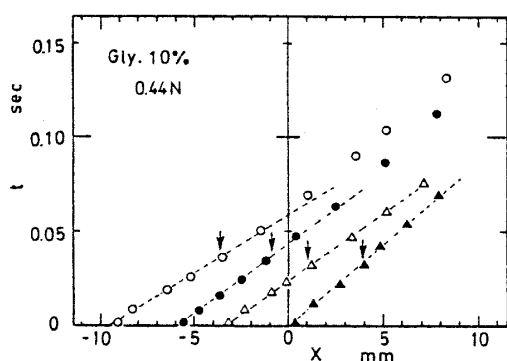


図2 現象の概略および諸元

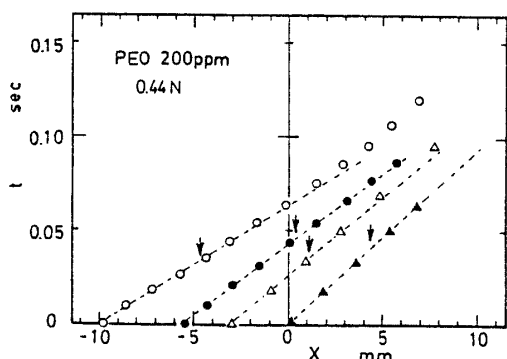
3中に破線で示したように、ころがり開始からしばらくは一定の速度で運動しているのがわかる。また、その速度も、ころがり開始位置により初期に加わるモーメントに違いが生ずるため、その位置がマイナス側になるにしたがって多少早くなっている。ここでは示さないが、この傾向は他の荷重、他の溶液でも同様にみられた。一方、グリセリン水溶液〔図3(a)〕とPEO水溶液〔図3(b)〕を比較すると、直線の傾きおよび値自体もおおむね同じであり、特に顕著な違いはみられない。これに対し、水あめ50%水溶液〔図3(c)〕では、タイムスケールが粘度に比例してほぼ10倍にな

っており、粘性への依存性がうかがえる。なお、図3中の矢印に関しては、レンズの浮上量とのかねあいで3・4節で述べることにする。

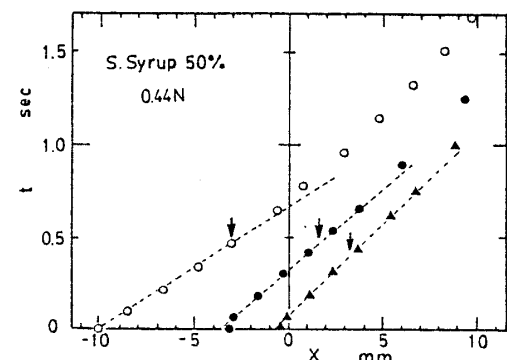
**3・3 キャビティ中心点位置** このようなころがり運動の場合、その最下点後方には負圧領域が存在するが、キャビティはその中心に位置し、発生、消滅するものと考えられる。そこで、レンズ最下点の位置か



(a) グリセリン10%

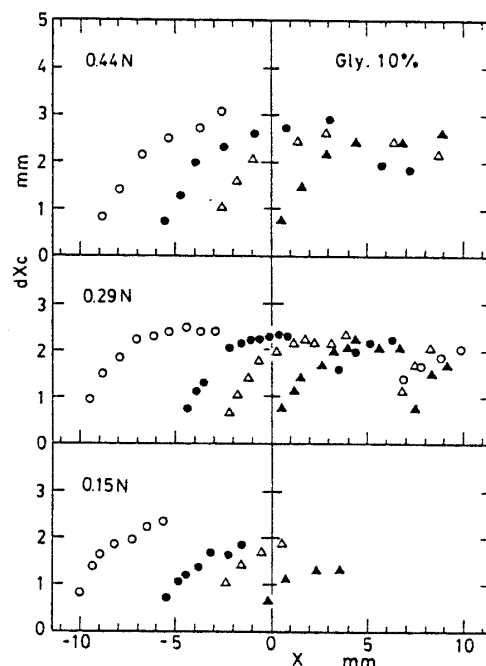


(b) PEO 200 ppm

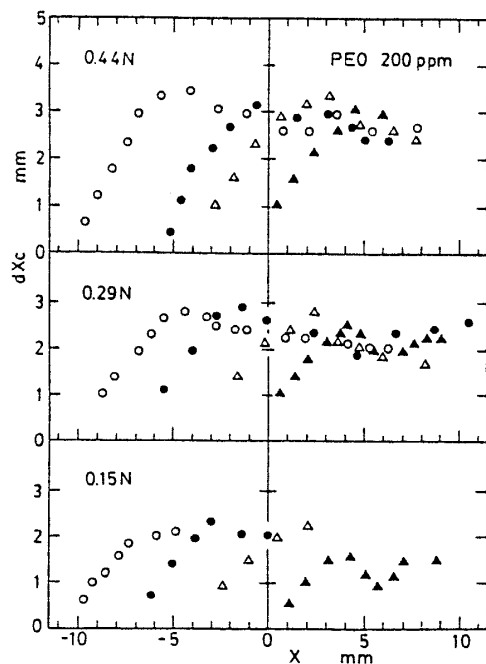


(c) 水あめ50%

図3 X方向のころがり運動



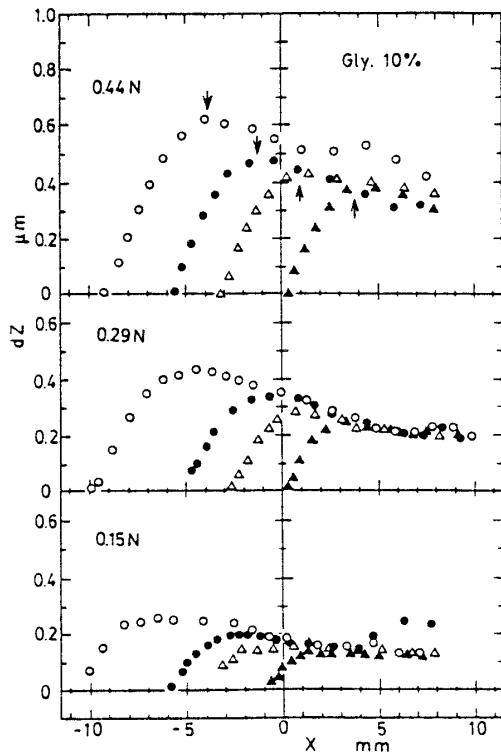
(a) グリセリン10%



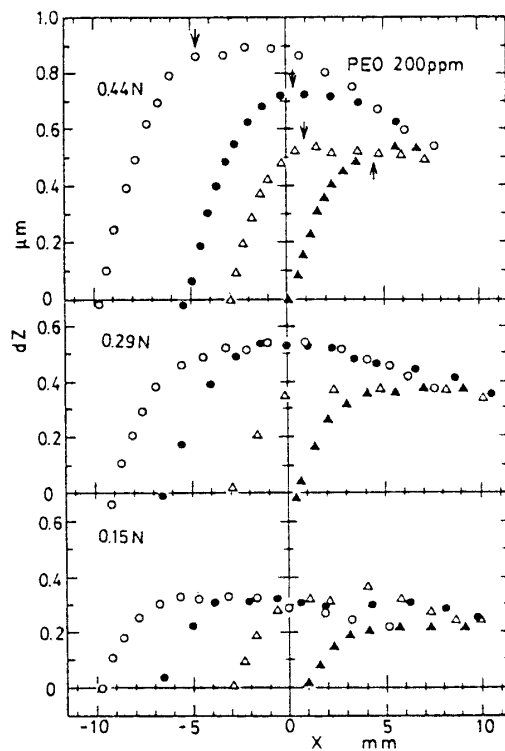
(b) PEO 200 ppm

図4 キャビティの後方位置

らキャビティ中心までの距離  $dX_c$  をレンズ最下点の位置に対して整理してみた。その結果を図4(a),



(a) グリセリン 10%



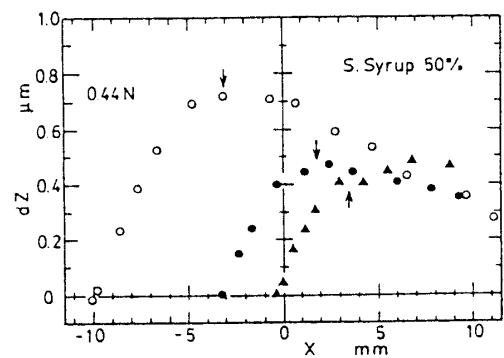
(b) PEO 200 ppm

(b)に示す。各々0.44 Nの結果が図3に対応している。キャビティの形状が不規則であり、また途中で消滅するため、データにかなりの誤差を含むが、荷重  $F$  が大きくなるにしたがって、その中心が後方に離れていることがわかる。一方、ころがり開始位置による違いはわずかである。そして、各々ある位置からはほぼ一定の値に飽和している。この位置は3・1節の運動が直線で近似される ( $X$  方向の速度一定の) 領域内であり、最初の運動でほぼ定まっていることがわかる。

また、同一条件下でグリセリン水溶液と PEO 水溶液を比較すると、総じて PEO 水溶液のほうが大きな値を示しており、両者では、内部に発生する応力場に違いが生じていることが想像される。

**3.4 浮上量の変化** 次にレンズ自体の浮上量に関して整理を行った。この浮上量  $dZ$  (このような比較的緩慢なころがり運動では、主にスライズ流れに起因して生ずる量と考えられる：以後スライズフィルム厚さと呼ぶ) を、やはりレンズの最下点の位置に対してプロットしたものを図5(a)~(c)に示す。図の対応は3・3節の場合と同様である。どの場合も、ころがり開始から一気にフィルムが形成され、最大値を示し、その後徐々に減少していつている。また、ころがり開始位置がマイナス側になるほどその最大値は大きくなっているが、後半はほぼ同一の曲線上に収束している。そしてその全体的なレベルは荷重の増加によって増大している。また、図5中に示した矢印は、ほぼフィルム厚さが増大しきった点を示しており、図3のそれと対応している。この点は図3において直線近似できる範囲内に含まれており、初期の運動でこの最大値が定まっていることがわかる。

一方、グリセリン水溶液 [図5(a)] と PEO 水溶液 [図5(b)] を比較すると、どの条件下においても PEO 水溶液のほうがフィルムが厚くなっており、こ



(c) 水あめ 50%

図5 スライズフィルム厚さ

こにも PEO 水溶液の特異性がうかがえる。また、これは 3・3 節の現象と対応しているものと考えられ、興味深い結果と思われる。さらに、水あめ 50% 水溶液 (図 5(c)・0.44 N の場合) では、フィルム厚さのレベルはグリセリン水溶液などの場合と大差ない結果となっているが、これは現象自体が自由運動に近いため、3・2 節の結果と相まって、粘度、速度などが相殺されたためと考えられる。

#### 4. 考 察

**4.1 前提条件** この章では、3 章で得られた結果について、粘性などの影響を統一的に扱い、弾性的影響を取り出して比較検討することを試みるが、その前に、この現象に関与すると思われる幾つかのファクタについて、整理するうえでの仮定を設ける。

第 1 に、3・2~4 節で示したように、ころがり開始からころがり速度が一定とみなされる範囲内で、キャビティ中心の後方距離はほぼ一定値に増大しきっており、また、フィルム厚さも最大値を示している。このことから、この両者は初期の運動で決定づけられる量と考えられる。そこで、簡略化のためにその一定速度範囲内での運動は、ころがり開始の瞬間に、凸レンズに加わる接点まわりのモーメントで定まると仮定してデータを整理してみることにする。

第 2 に、平面、球面ともに有限な面積を有するため、エッジ近傍での圧力レベル、流動状況が問題になると思われる。しかし、一方が球面であるため、エッジにおける両面間の隙間は中心のそれに対し十分大きく、また、全体のころがり運動自体も緩慢であるため、発生する圧力は、エッジ近傍では無視できる程度のものであると考えられる。また、エッジよりの流出入についてもその影響は、十分小さいと考えられる。よって、これらは現象には影響のないものと仮定する。

**4.2 ころがり運動に関して** 上記の仮定に基づき、直線近似される範囲の速度  $V$  を算出して、初期

に加わるモーメント  $M_0$  によって運動を整理してみた。初期モーメントとしては、荷重  $F$  によるモーメントと、レンズの自重ならびに浮力が重心に働くとした場合のモーメントの合計を採用している。図 6 では、横軸にその初期モーメントをレンズの曲率半径で割った量  $M_0/R_L$  (すなわち、仮定の球の中心に加えた力) をとり、縦軸には粘度、速度を考慮に入れ粘性力に相当する次元をもつ量 ( $\eta VR_L$ ) をとっている。図 6 から、各実験条件下における  $F$  と  $X_s$  の違いが  $M_0$  としてまとめられ、 $M_0/R_L$  のみで  $\eta VR_L$  が整理されているのがわかる。また、粘度の違い、高分子溶液か否かの違いも明確に現れていない。以上のことからころがり運動については、初期モーメントと粘性によっておおむね定まることがわかる。また、図 6 は、加えた力と、生じた粘性力の関係ともみなすこともできるので、今後は、この  $\eta VR_L$  を用いて統一的に現象を比較、整理してみることにする。

**4.3 フィルム内部の応力分布に関して** フィルム内部に発生する応力分布状況に関しては、今回の実験からは詳細に言及することはできない。しかしながら、キャビティの中心位置は、凸レンズの上昇に有効に働く応力のおよぶ範囲に関連すると考え、その値を用いて間接的に検討してみることにする。図 7 に、横軸に先ほどの粘性力に対応すると考えられる  $\eta VR_L$  と流体に加わっている力  $W$  の比をとって、縦軸にレンズ最下点からキャビティ中心までの距離のほぼ定常になった値  $dX_{cs}$  をレンズの曲率半径  $R_L$  で無次元化した値をとって整理したものを示す。流体に加わる力  $W$  としては、荷重  $F$  はすべて流体に伝わったとして、この値にレンズの自重から浮力相当分を引いた値を加えたものを用いている。3・3 節で述べたように、かなりばらつきがみられるが、粘性流体については、荷重、ころがり開始位置、更には粘度によらず、整理されているのがわかる。これより、フィルム内部に発生する応力分布は、粘性流体では相似になっていることが想

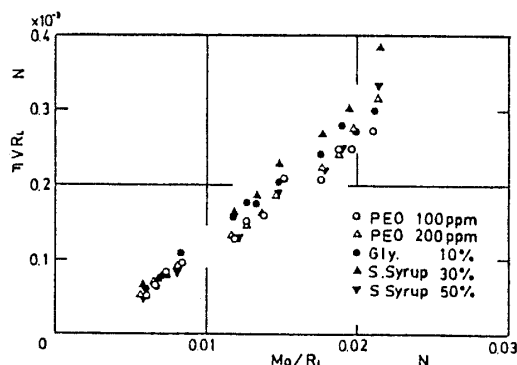


図 6 ころがり運動の一般化

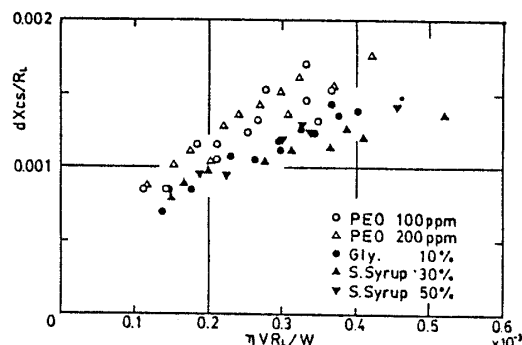


図 7 キャビティの無次元位置

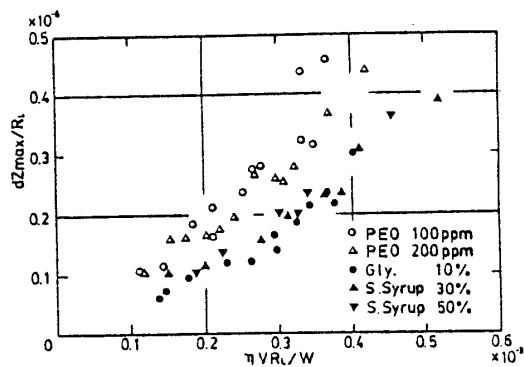


図8 スライズフィルムの無次元厚さ

像される。これに対し、高分子溶液では濃度による差は明確ではないが、いずれも粘性流体の値よりも大きくなっている。この両者の差は20%程度であり、高分子溶液の方がそれだけ負圧中心が後方に位置していると考えられる。さらに、これに比例して応力が有効に働く範囲も大きくなっていることが想像される。これは明らかに弾性的な特性が流動場に影響した結果と考えられる。

**4.4 スライズフィルム厚さに関して** スライズフィルム厚さに関しては、後半の徐々に減少していく領域も興味深いが、ころがり速度も変化しており統一的な取扱いは困難であるので、ここでは特に初期に生ずるフィルムの最大厚さに注目して検討する。この値は、運動全体のフィルム厚さの大小に比例しており、この流動におけるスライズフィルム生成能にも対応していると考えられる。図8に、このフィルムの最大厚さ  $dZ_{max}$  をやはりレンズの曲率半径  $R_i$  で無次元化したものを、先ほどと同じ量で整理した結果を示す。粘性流体については、4.3節の場合と同様、横軸の値で整理され、ひとつの曲線で近似できた。この結果から、粘性流体の場合、フィルム厚さは発生する粘性力と流体に加わる荷重の比に関連して定まると考えられる。一方、高分子溶液については、やはり濃度の差は明確ではないが、粘性流体の場合より大きな値を示している。このことは、流体のもつ弾性的な特性が付加的に働いた結果と考えられ、少なくともこの実験条件下では、高分子溶液の方がフィルム生成能が良いと結論づけられて、非常に興味深い。この結果は、4.3節の圧力分布の差から生じたものと考えられるが、各節での差はほぼ対応している点からもその関係がうかがえる。

最後に、4.2~4節において、いずれの結果も、ころがり開始位置  $X_s$ 、荷重  $F$  の影響すなわち、有限な面積をもつための(エッジ近傍の)影響はみられておら

ず、このことからエッジ近傍での圧力などは無視できる程度のもものとみなすことができると考えられる。

## 5. 結 言

球面、平面を用いたころがりを含むスライズ流れの場において、ニュートン粘性を示す程度の希薄高分子溶液と粘性流体の比較実験を行った結果、以下の点が明らかになった。

(1) ころがり初期の運動は、加えた初期モーメントと粘性のみによって定まり、特に高分子溶液の特異性は見られない。

(2) この非定常運動において、キャビティが生成されることが確認され、その位置の変化が明らかになった。さらに、スライズフィルムが生成されることも確認され、その過程が明らかになった。

(3) ころがり運動の後方に生ずるキャビティから球面最下点までの距離は初期の運動で定まり、その値は粘性流体の結果に比べ高分子溶液のほうが大きくなった。これに伴って、フィルム内に発生する応力分布にも、それに対応した違いが生じていると考えられる。

(4) この運動において生成されるスライズフィルムは、(3)と同様に運動初期でその最大厚さは定まり、その値は粘性流体の結果に比べ高分子溶液のほうが大きくなった。

(5) 上記(3)および(4)の現象は、粘性については統一的に扱うことができ、粘性流体と高分子溶液の結果の違いは、後者の付加的な特性、すなわち、弾性によって生じたことが明らかになった。

終わりに、卒業研究として本研究に助力いただいた高橋和弘氏、横山慶一郎氏、ならびに当時の学生諸氏に感謝の意を表します。なお、本研究の一部は昭和58年および59年度の科学研究費によったことを付記し謝意を表します。

## 文 献

- (1) Mochimaru, Y., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 9-2 (1981), 157.
- (2) Grimm, R. J., *AIChE J.*, 24-3 (1978), 427.
- (3) Oriver, D. R. and Shahidullah, M., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 9-3 (1981), 257.
- (4) Myers, R. R., Negami, S. and White, R. K., *Biorheology*, 3 (1966), 197.
- (5) Nigam, K. M., ほか, *Wear*, 70 (1981), 63.
- (6) 長谷川, 機論, 44-381 (昭53), 1606.
- (7) 長谷川・ほか2名, 機論, 48-427, B (昭57), 480.

## 討 論

〔質問〕 加藤 宏〔東京都立大学工学部〕

困難な実験を実施されたことに敬意を表す。スライズ流れの実験では測定精度が結果の検討などにも重要な要素となると思う。貴論文における浮上量など主計測量の精度についてその要点をお示しいただきたい。

〔回答〕 本実験の主計測量であるニュートンリングの中心位置、キャビティの中心位置、レンズの浮上量は、いずれも干渉じまなどを撮影し、その像をディジタイザを介して読取る作業を経て得られる量である。この過程において測定精度に最も影響する要因は、撮影した像を読取る時、ある幅をもつ干渉じまなどにディジタイザのカーソルの中心を合わせる時の誤差と考えられる。他の要因については最後に簡単に触れるが、ここではまず上記の誤差に対し説明することにする。

(i) ニュートンリングの中心位置はリング上の任意の3点の座標を読み込み、その座標から円を求め、その中心座標として算出している。その精度は、測定者の熟練などにもよるため、その誤差を求める簡単なシミュレーションを行っており、最大でも±0.1 mm程度の範囲で求められていることを確認している。

(ii) キャビティの中心位置については、その形状が不規則なための読取り誤差が生じる。キャビティの消滅段階では特に不規則な変化をするため、中心位置の見極めは、なかば測定者の目分量に頼らざるを得ず、その精度は最も悪いと考えられる。この段階でも、キャビティの寸法から考えて、精度は±0.2 mm以内と考えられる。

(iii) レンズの浮上量は、(i)と同じ手順でニュートンリングの半径( $r$ )を算出し、次式により浮上量( $dZ$ )を求めている。

$$dZ = \frac{\lambda}{4}n - \frac{r^2}{2R_L} \dots\dots\dots(i)$$

ここで、 $\lambda$ はレーザー光の溶液中での波長、 $n$ はニュートンリングの番号(この場合明環、暗環を続けて1,2と数える)である。ここで問題としている読取り誤差は、式(1)右辺第1項には含まれず、第2項の $r$ にだけ関連してくる。これについても(i)と同様のシミュレーションを行い、その誤差が読取り半径の±1.5%以内になることを確認している。実際には $r$ が実寸法で1.7 mm程度までの範囲で測定を行っているので、最終的に第2項に含まれる誤差は最大で±0.022  $\mu\text{m}$ と考えられる。

この読取り時の誤差のほかに溶液の屈折率など物性値の測定誤差も考えられるが、いずれも1~2%と推定され、これを前述の誤差と合せても、本実験の結果には大きく影響していないと考えられる。

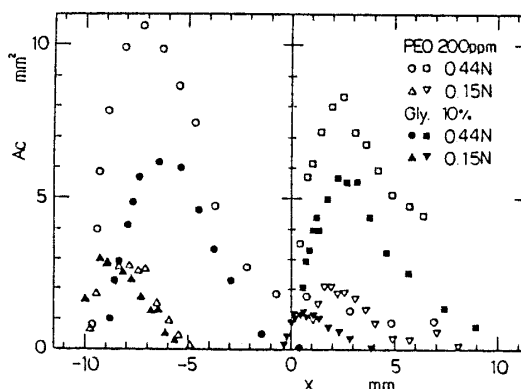
〔質問〕 須藤 浩三〔広島大学工学部〕

(1) キャビティの大きさは、どのくらいなのか。また、負圧領域の圧力は、おおよそどのくらいと推定できるか。

(2) 1211 ページ左欄7行め「…粘度、速度などが相殺された…」とは、どういうことか。

〔回答〕 (1) 本実験でみられたキャビティの大きさ(投影面積  $A_c$ )の変化の代表的な例を付図1に示す。付図1は、本文中図3~5に示したデータの一部(0.44N, 0.15Nにおいて、ころがり開始位置が約-10, 0 mmのもの)に対応している。なお、横軸はニュートンリングの中心位置で示してある。ここに示さない他の溶液、条件の場合も、ほぼ同程度の範囲で変化している。また、キャビティの形状はかなり不規則ではあるが、近似的には、ころがり方向と直角な方向に長い円形として発生し、徐々に円形になり、最大値を過ぎると、逆にころがり方向に長い円形となり消滅していく傾向がみられる。なお、全体的に高分子溶液のほうがその面積が大きくなる傾向がみられるが、その詳細は今後の研究課題としたいと思う。

次に、負圧領域の圧力に関しては、キャビティの位置、大きさ以外には、本実験から各部の圧力を検討するデータが得られず、具体的な数値を挙げることは非常に困難なことである。ただ、キャビティの内部は各溶液の蒸気圧と考えられ、その外部に進むに従い、球-平面間のすきまが二次関数的に広がるため圧力はそれとともに急激に回復し、2面のエッジ近くではその



付図1 キャビティの面積変化

外部の圧力とほぼ等しくなっていると考えられる。この点についても今後の研究にゆだねたいと思う。

(2) 表現が不適切であったことをお詫びする。この行は、「3・2節でも述べたように水あめ50%では粘度が高いため、ころがり速度が遅くなり、その結果フィルム厚さに他の溶液と大きな違いがみられなかった

と考えられる。」の意味で用いた。なお、この点は、考察において図6で示したように粘度と速度の積でころがり運動がほぼ整理され、その結果、図8に示すような形でフィルム厚さが整理されるという結論につながっている。