

転がり始める球面-平面間の流体の流動に関する実験的研究^{*注)}

(ニュートン粘性を示す種々の流体を用いた場合)

鳴海 敬倫^{*1}, 長谷川 富市^{*1}, 細川 喜弘^{*2}

Experimental Study on the flow Between a Flat Plate and a Spherical
Surface at the Beginning of Rolling Movement
(Using Various Newtonian Viscosity Liquids)

Takatsune NARUMI, Tomiichi HASEGAWA, and Yoshihiro HOSOKAWA

This paper describes an experimental study on the flow of non-elastic and viscoelastic liquids in thin films held between a flat plate and a spherical surface which begins rolling movement. Properties of these liquids are Newtonian in viscosity. Empirical formulae have been derived for the maxima of liquid film thickness, cavitation points and thickening rates of liquid films. The viscoelastic liquids give about 1.5 times greater values than the non-elastic liquids with the non-dimensional thickness and thickening rate. The cavitation point is a function of the liquid film thickness and the formula is the same both for non-elastic liquids and for viscoelastic ones.

Key Words: Viscoelastic Liquids, Non-Newtonian Fluid, Unsteady Flow, Liquid Film, Cavitation, Experimental Study, Empirical Formula, Human Joint

1. 緒言

工業技術の発達により機械の動きはますます複雑化しつつある。これに伴い潤滑などの場において流体が非定常な動きを受けるケースが多くなってきた。一方、潤滑の場に粘弾性流体を用いる研究も最近多くなされてきており、その荷重保持などに及ぼす優位性などが報告されている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾²³⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾³²⁾³³⁾³⁴⁾³⁵⁾³⁶⁾³⁷⁾³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾⁴²⁾⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾⁴⁸⁾⁴⁹⁾⁵⁰⁾⁵¹⁾⁵²⁾⁵³⁾⁵⁴⁾⁵⁵⁾⁵⁶⁾⁵⁷⁾⁵⁸⁾⁵⁹⁾⁶⁰⁾⁶¹⁾⁶²⁾⁶³⁾⁶⁴⁾⁶⁵⁾⁶⁶⁾⁶⁷⁾⁶⁸⁾⁶⁹⁾⁷⁰⁾⁷¹⁾⁷²⁾⁷³⁾⁷⁴⁾⁷⁵⁾⁷⁶⁾⁷⁷⁾⁷⁸⁾⁷⁹⁾⁸⁰⁾⁸¹⁾⁸²⁾⁸³⁾⁸⁴⁾⁸⁵⁾⁸⁶⁾⁸⁷⁾⁸⁸⁾⁸⁹⁾⁹⁰⁾⁹¹⁾⁹²⁾⁹³⁾⁹⁴⁾⁹⁵⁾⁹⁶⁾⁹⁷⁾⁹⁸⁾⁹⁹⁾¹⁰⁰⁾

についても各種検討されている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾²³⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾³²⁾³³⁾³⁴⁾³⁵⁾³⁶⁾³⁷⁾³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾⁴²⁾⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾⁴⁸⁾⁴⁹⁾⁵⁰⁾⁵¹⁾⁵²⁾⁵³⁾⁵⁴⁾⁵⁵⁾⁵⁶⁾⁵⁷⁾⁵⁸⁾⁵⁹⁾⁶⁰⁾⁶¹⁾⁶²⁾⁶³⁾⁶⁴⁾⁶⁵⁾⁶⁶⁾⁶⁷⁾⁶⁸⁾⁶⁹⁾⁷⁰⁾⁷¹⁾⁷²⁾⁷³⁾⁷⁴⁾⁷⁵⁾⁷⁶⁾⁷⁷⁾⁷⁸⁾⁷⁹⁾⁸⁰⁾⁸¹⁾⁸²⁾⁸³⁾⁸⁴⁾⁸⁵⁾⁸⁶⁾⁸⁷⁾⁸⁸⁾⁸⁹⁾⁹⁰⁾⁹¹⁾⁹²⁾⁹³⁾⁹⁴⁾⁹⁵⁾⁹⁶⁾⁹⁷⁾⁹⁸⁾⁹⁹⁾¹⁰⁰⁾

本研究では非定常運動の例として静止状態から動き始める現象を取り上げ、曲率半径の充分大きいレンズと平面ガラスを用いてその球面(レンズ)が転がり始める運動を実現し、そこに生ずる現象を実験的に解析する。これによって非定常流動場における粘弾性特性の影響を検討する基礎データを与えることを目的としている。筆者は前報¹⁷⁾において、球面の半径を一定とした場合のこの運動と共に生ずる流体膜厚さの変化とキャビティの位置の変化の詳細について報告し、その結果の簡単な考察から粘弾性流体の特異性を示した。本報ではこの現象の解析を一般化するため、球面の曲率半径が異なる場合について実験を行い、最大流体膜

* 昭和62年10月2日 北陸信越支部信越地方新潟講演会において講演, 原稿受付 昭和62年1月19日。

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

*2 学生員, 新潟大学大学院。

注) 前報¹⁷⁾では題名を「粘弾性流体のスクイズ流れに関する実験的研究」としていたが、扱っている現象を明確に表現するため本報では題名を上記のように改める。

厚さとキャビティ位置について定常運動の解析例⁷⁾をもとに実験式を導いた。また、それに加え新たに流体膜の生成速度についても同様な整理を行ったので報告する。これらの量に関する実験式を求めることは本実験における現象の解析にとどまらず、関節潤滑などの一般的な非定常潤滑における種々のファクターの関係を検討する上で有意義と考えられる。なお、粘弾性特性については後に述べる理由により現段階では実験式を導く際に考慮せず、法線応力の測定値から濃度の違いによる影響についてのみ考察を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験装置および実験方法の詳細については前報⁷⁾で述べているのでここでは概略のみを説明する。実験装置は図1(上)のような位置関係のレンズ、ガラス平板およびレンズに転がり運動を起こさせるための駆動系からなる。また、レンズ上面にはその面と平行にアームが取り付けられている。実験では、まずレンズと平板を適当な位置で接触、静止させた状態にする。つぎに、ある時刻($t=0$)にレンズの支持をはずし、アームの端に加えられている力 F により転がり運動を開始させる。なお、この運動中レンズの自重などによる下方向の荷重 W と力 F は装置の特性によりほぼ一定である。レンズの動きは二面間に生ずる光学干渉縞(

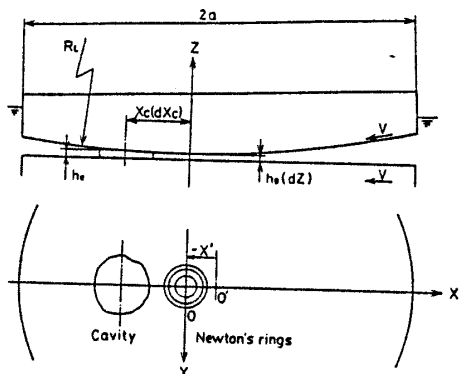


図 1 球面—平面部の概略および使用記号

表 1 使用流体

Solution	$R_L = 1.01 \text{ m}$		$R_L = 3.02 \text{ m}$	
	Temp. (T) °C	Viscosity (η) $\times 10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	Temp. (T) °C	Viscosity (η) $\times 10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Gly. 10%	15.4	1.54	24.1	1.20
S.Syrup 30%	15.4	3.87	24.3	2.71
PEO 100ppm	15.9	1.29	24.3	1.05
PEO 200ppm	15.8	1.53	24.4	1.18

ニュートンリング)を撮影し、その像を解析することによって数値化される。図1はこのレンズ—平面部の運動状態と高速度カメラによって撮影される像の概略である。また図中に本報で使用する記号を示す。なお、この記号は一般的な表示方法と対応させるためにレンズ最下点と共に動く(すなわち球の中心と共に動く)Oを原点とした座標系をもとに定めてあり、前報とは変更してある。(前報ではガラス平板の中心O'に固定された座標系をとっており、図中の括弧内が前報で用いた記号である。)さて、本報では実験に球面として曲率半径(R_L)が1.01mおよび3.02mのレンズを用いた点が前報($R_L = 1.98\text{m}$)と異なる。また、各々の場合に加えた力 F は、 $R_L = 1.01\text{m}$ では0.10N, 0.20N, $R_L = 3.02\text{m}$ では0.15N, 0.29N, 0.44Nである。

実験に使用した流体の種類は前報と同様であり、その実験時における平均液温と物性値を表1に示す。なお、実験は表に示す温度の $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲内で行われた。前報でも触れたがこれらはすべてニュートン粘性を示す点では共通であるが、グリセリン水溶液(表中Gly.)と水あめ水溶液(表中S.Syrup)は弾性を有しておらず、これに対しPEO水溶液は弾性を有している点で区別される。PEO水溶液の弾性的特徴を示す一例として、ジェットスラスト法を用いて測定した第1法線応力差の結果を図2に示す。横軸は管壁におけるひずみ速度であり、図中のDは測定に用いたパイプの内径である。(測定装置等の詳細については文献9参照。)

3. 実験結果および考察

転がり運動を開始するとレンズは浮上し図1の様な状態になる。それと共にレンズ最下点後方にキャビティが生ずる。この時レンズ最下点の移動速度 V は、前報⁷⁾で示したように、レンズ最下点の初期位置によ

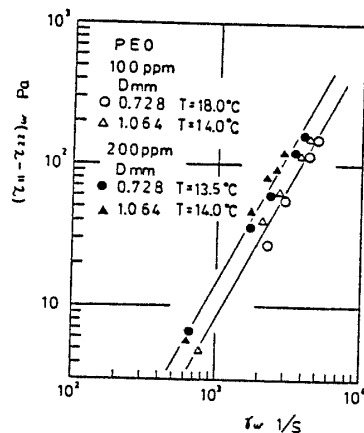


図 2 PEO水溶液の第1法線応力差

ってその大きさは異なるが $t = 0$ からしばらくの間はほぼ一定であった。つぎに示す各々の測定量はこの V が一定の範囲において定まる量である (前報参照)。

3.1 最大流体膜厚さ 図3に、転がり始めからの流体膜厚さ h_0 の変化を前報と同様の方法で整理した一例を示す。ここに横軸の x' はガラス平板中心 O' ($x' = 0$) に対するレンズ最下点位置 (O) である。 h_0, x' については図1を参照されたい。図3からわかるように h_0 は x' の変化に対し最大値 (これを h_{0max} とする) を示しており、 h_{0max} は x' の初期値によって異なっている。この h_{0max} に着目して検討する。ところで、この様な球面-平面間の流動を十分に解析した例は筆者の知るところ粘弾性の有無を問わずほとんど見あたらない。ただ、球面-平面間の定常潤滑を扱った例がCameronの文献⁽²⁾にみられる。ただし、これはすきま一定 (すなわち h_0 を一定) とした場合についてである。これを本実験の結果に適用してみることにする。本実験例のように $O-x, y, z$ 座標系において両面が共に速度 $-V$ で同方向に動く場合のレイノルズ方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = -12\eta V \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\therefore h = h_0 + (x^2 + y^2) / 2R_L \dots\dots (1)$$

この文献では圧力 p を、2次元の円筒-平面間の圧力の拡張として求めている。すなわち $p = kx / h^2$ と仮定して式(1)に代入し、 k の値を求めており、その結果、圧力は次式のようなになる。

$$p = 12\eta V x / 5h^2 \dots\dots (2)$$

さらに、流体膜によって保持される荷重 W は、 $x \leq 0$ の領域において $p = 0$ の条件 (Half Sommerfeld の条件) を用い、式(2)を $x \geq 0$ の全領域で積分して

$$W = 10.6\eta V R_L^{1.5} / h_0^{0.5} \dots\dots (3)$$

となる。また、 h_0 に注目すれば

$$(h_0 / R_L)^{0.5} = 10.6\eta V R_L / W \dots\dots (4)$$

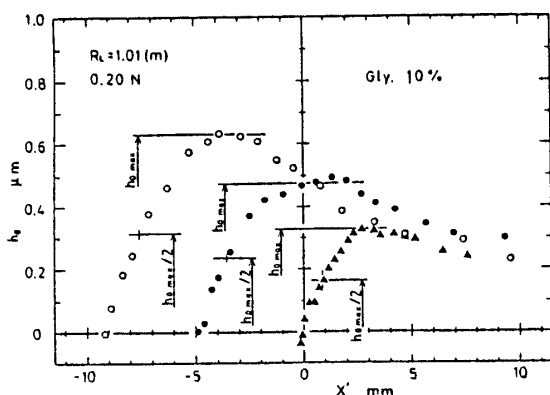


図 3 流体膜厚さの変化

とも表せられる。

ここで式(4)は h_0 を h_{0max} と置き換えれば前報で用いた無次元量で成り立っている。そこで係数を除く右辺、左辺を横軸、縦軸にとり本実験結果を整理してみた。その一例を図4に示す。しかし、この図では十分な整理が行われておらずレンズの曲率半径による違いが表れている。これはレンズの面積が有限 (半径 a 内) であることを考慮しなかつたためと考えられる。そこで、まず式(2)から式(3)を導く積分過程で Half Sommerfeldの条件は同じにとり積分範囲を球面最下点を中心にレンズ半径 a 内としてみると式(3)は次のようになる。

$$W = 3.39\eta V R_L^{1.5} (\gamma a - 0.5 \sin 2\gamma a) / h_0^{0.5}$$

$$\therefore \gamma a = \tan^{-1} (h_a / h_0)^{0.5}, \quad h_a \equiv a^2 / 2R_L \dots\dots (5)$$

また R_L を h_a で置き直し無次元化表示にすると

$$\frac{W h_a^2}{\eta V a^2} = 1.2 \left(\frac{h_a}{h_0} \right)^{0.5} \left(\gamma a - \frac{\sin 2\gamma a}{2} \right) \dots\dots (6)$$

となる。ただし、この式の導出過程は h_0 を一定としているので、本実験のように W が一定で、 h_0 が変化している場合とは条件が異なっている。また、Half Sommerfeld の条件も $x = 0$ でキャビテーションが発生しその後は流体膜が切れて存在しないこととなり、本実験の流体膜が回復し最後まで存在する状況とは異なっている。これらの点を考慮にいれ、今後は式(6)の無次元量をもとに次元解析的に考察することにする。その場合の物理量としては W, η, V, a, h_{0max} および h_a が考えられる。なお、 h_{0max} に達した時の O と O' は一般には一致しないが、レンズの半径 a に比べそのずれは小さいのでその影響は無視できるとして特に考慮しないことにする。そこで、次の3個の無次元量を用いて検討することにする。

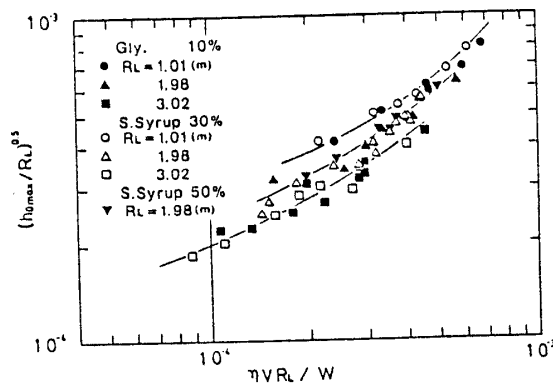


図 4 $(h_{0max} / R_L)^{0.5}$ と $\eta V R_L / W$ の関係

$$P^* \equiv \eta \cdot V \cdot a^3 / (W \cdot h_a^2)$$

$$h_{0max}^* \equiv h_{0max} / h_a \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$a^* \equiv a / h_a (= 2R_L / a)$$

ここで、 P^* の物理的意味を考えてみると次のようである。すなわち、式(2)で与えられる圧力の $y=0$ 、 $x=a$ での値 $\eta V a / h_a^2$ (ただし、定数係数は除き、 $h=h_a$ としてある)に a^2 (面積)を乗じて流体による z 方向の力の代表値を出し、それを W で無次元化したことになる。これらを用いて前報で示したデータも含めて h_{0max}^* に関して整理した結果を図5(a)(b)に示す。なお、横軸の $P^* a^{*0.3}$ における a^* のべき指数0.3は図4での R_L による影響を消去した結果得られたものである。いずれの図もばらつきは見られるがこの横軸ではほぼ整理されているのがわかる。この結果から実験式を求めると次のようになる。弾性のない流体に対しては

$$h_{0max}^* = 5.5 \times 10^{-3} P^{*1.11} a^{*0.33} \quad (8)$$

PEO水溶液に対しては(濃度の違いは考慮せずに平均的な位置に直線を引いた場合)

$$h_{0max}^* = 8.5 \times 10^{-3} P^{*1.02} a^{*0.31} \quad (9)$$

となる。この両式を比較すると、PEO水溶液の弾性

の効果はべき指数にはあまり現れずその係数の違いとして現れることがわかる。そしてその違いは弾性のない流体の約1.5倍になっている。それだけ生成される流体膜が厚くなることになる。なお、PEO水溶液の濃度による違いが現れていない点に関しては後の3・4節で検討する。

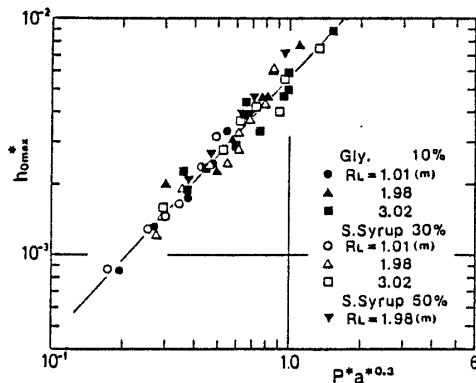
3・2 キャビティの中心位置 次に、転がり運動と共に発生するキャビティの発生位置について検討する。Cameronの文献からキャビティの位置に対する本実験に有効な記述は得られない。しかし、この量との相関が考えられるものに式(2)の圧力の極小になる位置があげられる。この式が $x \leq 0$ でも成り立つとした場合(Full Sommerfeldの条件)、圧力が極大および極小となる点は中心Oに対し対称の位置になる。その位置 x_p を求めると

$$x_p = \pm (2R_L h_0 / 3)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (10)$$

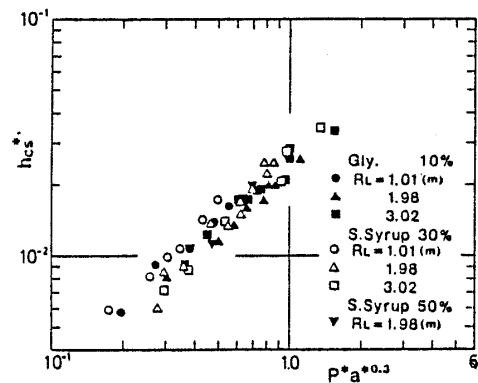
となり、 h_0 の関数であることがわかる。物理的な対応をみるために x_p での流体膜厚さ h_p を考える。すなわち

$$h_p = x_p^2 / 2R_L + h_0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

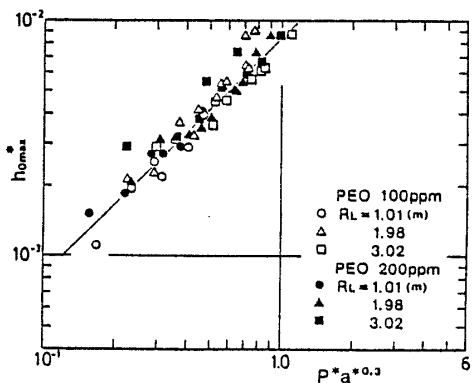
これを用いて式(10)を変形すると



(a) 弾性のない流体

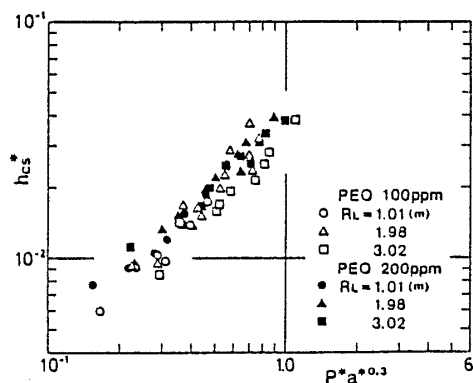


(a) 弾性のない流体



(b) PEO水溶液

図5 最大流体膜厚さ



(b) PEO水溶液

図6 キャビティ中心位置

$$h_p = 1.33 h_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

となり h_p は h_0 だけの関数となる。よって前報ではキャビティの中心の x 方向位置を用いて検討したが、この式 (12) を参考に本報ではキャビティの中心位置の面間距離 h_c を用いて考察を進めることにする。特に、この値は h_0 が h_{0max} を示す前後で一定値を取る (前報参照) そのときの値 h_{cs} を用いて検討することにする。まず、 h_{cs} を

$$h_{cs}^* \equiv h_{cs} / h_a \quad \dots\dots\dots (13)$$

と無次元化し、全体の物理量との関連をみるために 3・1 同様に整理した結果を図 6 (a) (b) に示す。図より h_{0max}^* と同じ横軸で整理されていることがわかる。また、(a)、(b) を比較すると PEO 水溶液の方が h_{cs}^* が大きな値を示していることがわかる。次に、 h_{cs}^* と h_{0max}^* の相関を検討する。それぞれを縦軸、横軸に取りグラフ化した結果を図 7 (a) (b) に示す。縦軸、横軸とも測定量であるため誤差が増大した結果になっているが、ある程度の範囲内では両者の相関がみられる。そこで図中の直線 (2 直線間の範囲) のように近似すると、(a)、(b) 共に

$$h_{cs}^* = (1.4 \sim 2.1) h_{0max}^{*0.92} \quad \dots (14)$$

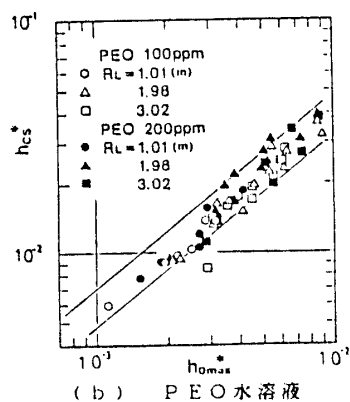
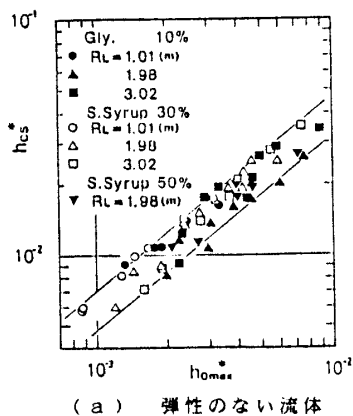


図 7 最大流体膜厚さとキャビティ中心位置の関係

が得られる。この式において PEO 水溶液と他の水溶液の間に違いがみられないことから、図 6 においてキャビティの位置 h_{cs}^* が PEO 水溶液の方が大きくなっている結果は同溶液の方が流体膜厚さ h_{0max}^* が大きいことに起因しておきたものであることがわかる。この点から弾性的特性は流体膜厚さには直接影響するが、その厚さが同じであれば $x-y$ 方向の圧力分布は弾性を有した流体であっても大きな違いはないことが推測される。

3・3 流体膜厚さの増大速度 本報における非定常現象を特徴づける項目として流体膜の生成過程を取り上げ検討してみる。そのために流体膜厚さの増大速度として h_0 が h_{0max} の $1/2$ になるまでの平均増大速度 V_{ho} (図 3 参照) をその代表値として整理することを行う。この現象に関与する物理量は h_{0max} の代わりに V_{ho} をとれば、他は 3・1 と同様であるので同じ手順で次元解析的整理を進めた。ただし、 V_{ho} の無次元量としては速度の方向を考慮して

$$V_{ho}^* \equiv V_{ho} \cdot a / (V \cdot h_a) \quad \dots\dots\dots (15)$$

とした。この値を 3・1 と同様の手順で整理すると図 8 (a) (b) が得られる。この V_{ho} も速度を算出するデータ数が少ない場合が含まれるため誤差が大きいがいずれも h_a などに関係なく整理されているのがわかる。また、PEO 水溶液 (b) の方が大きな値を示しており、これより 3・1 の最大流体膜厚さが厚くなるばかりでなく、その増大速度も早いと言う結論が得

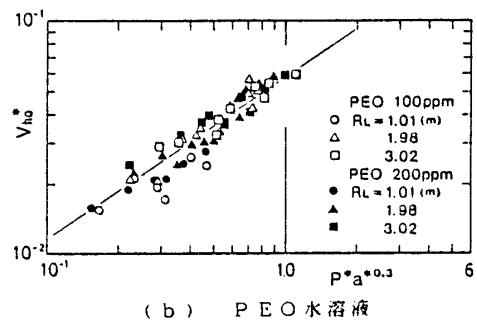
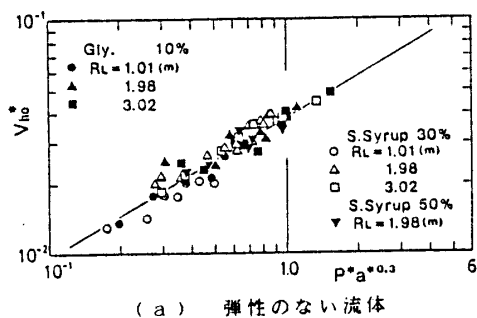


図 8 流体膜増大速度

られる。さらに図より実験式を求めてみると、弾性のない流体に関しては

$$V_{ho}^* = 3.7 \times 10^{-2} P^{*0.59} a^{*0.19} \quad \dots (16)$$

PEO水溶液に関しては

$$V_{ho}^* = 5.7 \times 10^{-2} P^{*0.69} a^{*0.21} \quad \dots (17)$$

となる。データのばらつきを考えればやはり両者の違いはそのべき指数の値には少なく、主に係数に現れていることがわかる。そしてその比も約1.5倍であり3・1の最大流体膜厚さの結果に近い。

3・4 PEO水溶液の濃度による影響 これまでの図においてどの場合もPEO水溶液の濃度による違いは明確に現れていない。しかし、これ以上の濃度の溶液を用いようとするれば非ニュートン粘性を示してしまうため本報における解析方法は適用できなくなる。また、測定値のばらつきが大きいので、200ppm以内で濃度を変えてもこれ以上の結果は期待できない。このように2種類のデータしか得られないため本報では弾性まで含めて実験式を導出することはせず、この2種類のデータに違いが生じない点を検討するにとどめる。粘性による影響はこれまでの整理方法で考慮されていると考え、弾性についてその物性値として図2に示した第1法線応力差を用い考察する。この値を図中の直線で近似し、次式より得られる弾性に関する物質定数 λ 、 s を求めてみる。

$$(\tau_{11} - \tau_{22})_W = 2\eta\lambda\gamma_W^s \quad \dots (18)$$

その結果、PEO100ppmでは $\lambda = 7.3 \times 10^{-3} (s^{s-1})$ 、PEO200ppmでは $\lambda = 7.9 \times 10^{-3} (s^{s-1})$ であり、 s はどちらも1.88となり、これら定数の溶液濃度による違いは少ない。この結果から本実験においてPEO水溶液の濃度による違いがみられなかったのは弾性的特性が近いこと各々の測定値が誤差範囲内になってしまったためと考えられる。

なお、ここで本実験におけるOを原点とする座標系での流体のx方向の動きを考えてみると、球面、平面は等速で同方向に動いており、それと共に流体もその方向に動きつつその厚さを変化する。この過程で流体粒子はせん断のみでなく多分に伸張流的いにかえればスクイズフロー的な流動を受けていると考えられる。伸張流においては粘弾性流体はせん断流には見られない動きをすることが知られており、今後弾性の影響を検討する場合、この点での考慮を加えていく必要があると思われる。

4. 結 論

球面、平面間にニュートン粘性を示す弾性のない流体および弾性のある流体を満たし、静止状態から転が

り運動を開始させる実験を行い、その際生ずるいくつかの現象について次元解析的な考察を行った結果、次のような点が明らかになった。

- (1) 球面の曲率半径の違いも含め、弾性のない流体に対し最大流体膜厚さ、キャビティ発生位置、流体膜の増大速度を整理できる実験式が得られた。また、PEO水溶液に対しても同様の実験式が得られた。
- (2) 最大流体膜厚さに加え、流体膜の増大速度でもPEO水溶液の方が弾性のない流体よりも大きくなる結果が得られた。そして、その弾性による影響は各々の実験式において主に係数の違いとして表現され、どちらもPEO水溶液の係数の値は弾性のない流体の値の約1.5倍になった。
- (3) キャビティの発生位置は流体膜厚さによって整理され、流体膜厚さが同じであればその発生位置は弾性の有無に関与せずほぼ同じになる。
- (4) PEO水溶液の濃度差による影響が本実験の結果に明確に現れなかったことに関連して、溶液の弾性力を測定しこれから求められる弾性に関する定数が濃度によらず近い値であることを示した。

終わりに、実験装置の製作に援助いただいた新潟大学工学部技官の近野正昭氏、また、卒業研究として本実験に助力いただいた鈴木克巳氏、神田義弘氏、関野龍男氏、ならびに当時の学生諸氏に感謝の意を表します。

文 献

- (1) Oriver, D.R., ほか, J. Non-Newtonian Fluid Mech., 12-3 (1983), 269.
- (2) Doremus, P. and Piau, J. M., J. Non-Newtonian Fluid Mech., 13-1 (1983), 79.
- (3) Ferguson, J., ほか, Biorheology, 5 (1968), 119.
- (4) Lai, W.M., Kuei, S.C. and Mou, V.C., Trans. ASME J. Biomech. Engng., 100-4 (1978), 169
- (5) Mou, V.C. and Lai, E.M., ASME AMD, 32 (1979), 19.
- (6) Manohar, K. and Nigam, K.M., Wear, 70 (1981), 283.
- (7) 鳴海・長谷川, 機論, 52-475, B (昭61-3), 1207.
- (8) Cameron, A., Basic Lubrication Theory, (1981), John Wiley.
- (9) 長谷川, 機論, 44-381, (昭53), 1606.