

液体で潤滑された二つの回転ローラに作用する トルクと力に関する研究*

反町和則*¹, 長谷川富市*²

A study of Torque and Force Working between Two Rolls Lubricated with Liquid

Kazunori SORIMACHI and Tomiichi HASEGAWA

The driving torque of two-roll nipping polymer solutions, one rotating and the other fixed, was measured. Aqueous glycerin solution possessing Newtonian dynamic properties was used as the mother liquid, and polyethylene oxide (PEO) or polyacrylamide (SEPARAN) was mixed into it at the concentration level of 10 to 1000 ppm 's in weight. It was found that the torque is mainly concerned with the viscosity for glycerin and diluted polymer solutions, but for non diluted polymer solutions it takes values greater than those estimated with the viscosity possessed by the solution. A line of vortex was observed at the nip entrance in the direction of the roll axis for non diluted solutions, but not for the diluted solutions. Torque and force were estimated using the second-order fluid model with an assumed simple flow field. The result shows that the torque is not affected by the elasticity of fluid, but the force is directly related to the second normal stress coefficient of the fluid.

Key Words: Viscoelastic Fluid, Non-Newtonian Fluid, Constitutive Equation, Lubrication, Roll Coating

1. ま え が き

ロールコーティングは塗装分野の種々の技術の中で単純な装置で生産性が高く効率的な塗装方式として広く使用されている。この方式に関しては、多くの研究者が円筒表面の薄膜の厚さや安定性の問題について報告し、円筒間のすきまや使用流体のキャピラリ数が影響することを述べている^{(1)~(6)}。

一方、潤滑された回転するローラのうけるトルクや力⁽⁷⁾は、コーティングのほかに圧延、歯車のかみあい、平面上を転動する車輪⁽⁸⁾などに関連して重要となる。しかし、これについての研究はわずかに行われているにすぎない。Oliverらは小直径の固定円筒を大直径の回転するローラに平行に小さいすきまを隔てておき、そのすきまに液体を供給したとき小径円筒に生ずる反発力と摩擦力を測定した⁽⁹⁾。その結果、粘弾性流体はニュートン流体と比較すると反発力は著しく増加するが摩擦力はほぼ等しいことが見いだされた。Doremus-Piauも反発力について同様の結果を得ている⁽¹⁰⁾。しかし、この現象に対する理論的説明は行われていな

い。

本研究では、潤滑された二つの同一直径のローラが狭いすきまを隔てて平行におかれ、その片方が回転し、もう一方が静止しているとき必要とされるトルクを種々の液体とローラのすきまについて測定する。

また同様な状況下におけるトルクと力を粘弾性流体の構成方程式を用いて検討する。

2. 実験装置の方法

実験装置の概略を図1, 2に示す。使用した円筒はステンレス製で半径 $R=4$ cm, 長さ $L=10$ cm であり、

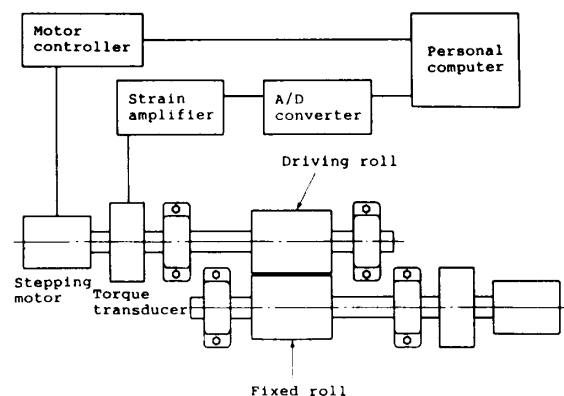


図1 実験装置

* 平成2年10月12日 第2回日韓流体工学会議において講演, 原稿受付 平成3年4月1日。

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

*² 正員, 新潟大学工学部。

一方の円筒を静止させ、もう一方の円筒をステッピングモータで回転させた。周速度 v は 0.041, 0.077, 0.132, 0.254, 0.384 m/s の 5 種類であり、これらの各速度においてローラに働くトルクをトルク変換器で測定した。トルク変換器はひずみゲージタイプのもを用い、回転側ローラのシャフトとモータとの間に取付けた。円筒間のすきま h は、0.1, 0.15, 0.2 mm の 3 種類である。すきまにおけるひずみ速度は線形速度分布を仮定すると $400 \sim 4000 \text{ s}^{-1}$ となる。

実験を始める前に、溶液を流さない状態で回転トルクを測定し、その値を溶液が円筒のすきまに流れている状態で測定したトルクから差引くことによって、正味の回転トルクの測定値とした。使用した流体は、ニュートン流体としてグリセリン水溶液 (GLY.80, 90, 100% : 重量比)、水あめ水溶液 (SYRUP 70, 80, 85% : 重量比) を用い、粘弾性流体としてグリセリン 90% 水溶液にポリエチレンオキサイド (PEO) やポリアクリルアミド (SEPARAN) を溶かしたものを用いた。また、表面張力の影響を調べるため市販の洗剤 (界面活性剤 : APE を加えたグリセリン水溶液 (90%) と水あめ水溶液 (80%)) を用いた。PEO の分子量は $4300000 \sim 4800000$ で、SEPARAN のそれは $5000000 \sim 10000000$ である。使用した流体の一覧を表 1 に示す。流体の粘度の測定には、コーンプレート式粘度計と細管式粘度計を使用した。

3. 実験結果と考察

図 3 は、細管式粘度計によるせん断応力の測定結果である。図 3 において、せん断応力 τ [Pa] (縦軸) のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] (横軸) に対する傾きはほぼ 1 で、ニュートン粘性であることがわかる。また濃度が大きくなると粘度も増加し、グリセリン 100% は 80% 水溶液より 10 倍以上大きい粘度を示している。図 4 はコーンプレート式粘度計による結果で、縦軸は対数目盛でとつ

た粘度 η [Pa·s]、横軸は温度 θ [$^{\circ}\text{C}$] である。ひずみ速度は、 1.9 s^{-1} である。温度の増加とともに粘度は減少し、濃度の増加とともに粘度は大きくなっている。し

表 1 使用流体

Liquids Used					
No	GLYCERIN/WATER ratio		No	SYRUP/WATER ratio	
1	100/ 0		14	85/ 15	
2	95/ 5		15	80/ 20	
3	90/ 10		16	71/ 29	
4	80/ 20				
No	GLYCERIN/WATER ratio	PEO	No	SYRUP/WATER ratio	APE
5	90/ 10	10ppm	17	80/ 20	1.3%
6	90/ 10	50ppm			
7	90/ 10	100ppm			
No	GLYCERIN/WATER ratio	SEPARAN			
8	90/ 10	10ppm			
9	90/ 10	50ppm			
10	90/ 10	100ppm			
11	90/ 10	500ppm			
12	90/ 10	1000ppm			
No	GLYCERIN/WATER ratio	APE			
13	90/ 10	1.6%			

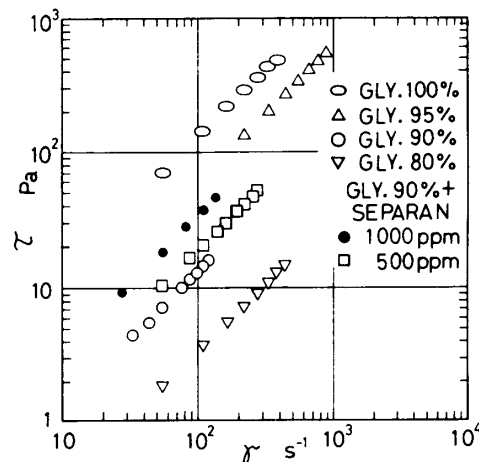


図 3 せん断応力 τ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$

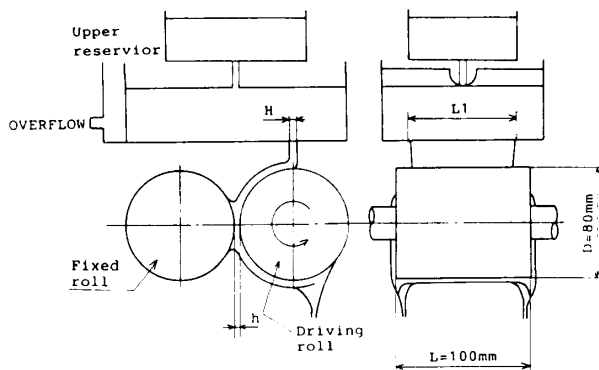


図 2 ローラ部詳細図

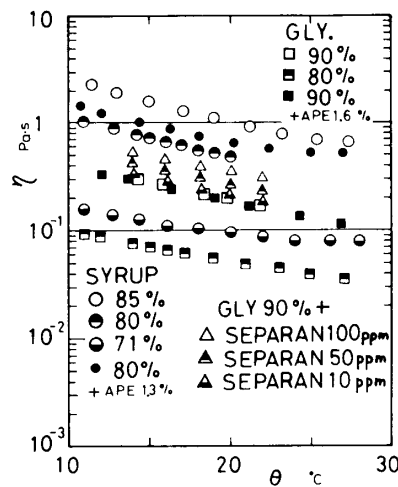


図 4 粘度 η に対する温度 θ の影響

しかし、図4には示していないがPEO溶液(10~100 ppm:グリセリン90%水溶液中)については、濃度による粘度差はほとんど認められず、その値は10 ppm SEPARAN水溶液と同程度であった。図3に示すように使用流体はニュートン粘性を示すので、実験結果の検討の際にはコーンプレート式粘度計の結果(図4)に基づいて温度補正を行った。表面張力についてはデュヌイ形表面張力試験器によって測定を行った。

図5と図6は本実験装置によって測定した回転トルク T [N·m] の値を周速度 v [m/s] に対して示した例

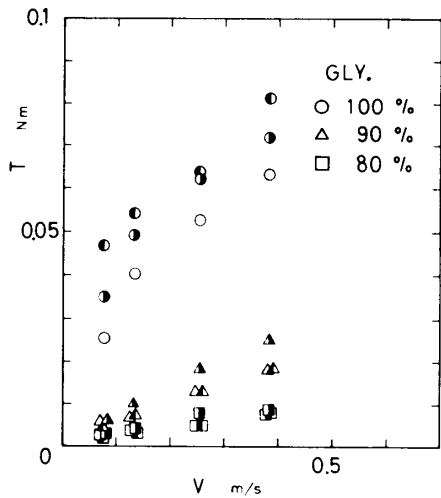


図5 測定トルク T とローラ周速度 v (グリセリン水溶液の場合)
記号●○△などはおのおの $h=0.1, 0.15, 0.2$ mm を表す

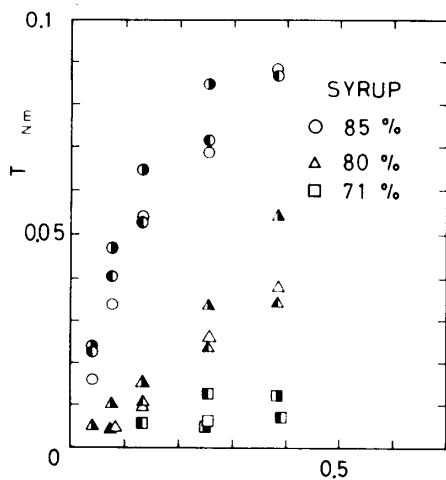


図6 測定トルク T とローラ周速度 v (水あめ水溶液の場合)
記号●○△などはおのおの $h=0.1, 0.15, 0.2$ mm を表す

である。回転トルクは全体の傾向としてすきまの増加とともに減少し、周速度の増加とともに大きくなっている。なお、グリセリン100%ではすきま0.2 mmの値が大きくなっているが、これは測定時の温度差によるものと考えられる(0.1, 0.15 mmは16°C, 0.2 mmは10°C)。また図5, 6と図3, 4を比較すると粘度の大きい溶液の測定トルク値が大きくなっている。

ここで、回転トルクはニュートン流体に関する限り粘度と円筒の周速度、半径に比例し、円筒のすきまに反比例することが予想される。そこで、次の式で与えられる無次元トルク α を導入する。

$$\alpha = T / (\eta \gamma R^2 L) \dots \dots \dots (1)$$

$$\gamma = V / h \dots \dots \dots (2)$$

上式で R はローラ半径、 L はローラ長さ、 v は周速度、 h はすきまである。

図7~10は種々の溶液とすきまについて得られた α をレイノルズ数 Re に対してプロットしたものである。なお、 η については図4により温度補正を行った。図7はグリセリン水溶液の α を示す。10倍程度の粘度変化と2倍のすきま変化による実験値の違い(図5)がこのような無次元化によって2倍程度の範囲におさまることがわかり、さらに α はレイノルズ数に対してはほぼ一定であることがわかる。データのばらつきは特に低いひずみ速度範囲で大きくなっているが、これはトルクが低ひずみ速度では小さすぎるために生じた測定誤差によるものと思われる。データのばらつきのもう一つの原因として、円筒のすきまの出口と入口の溶液の自由表面の差が考えられるが、これについては現時点で明らかでない。また、界面活性剤を加えたグリセリン90%水溶液は、加えないものと比較して粘度はあまり変わらないが(図4)、表面張力は半分程度と

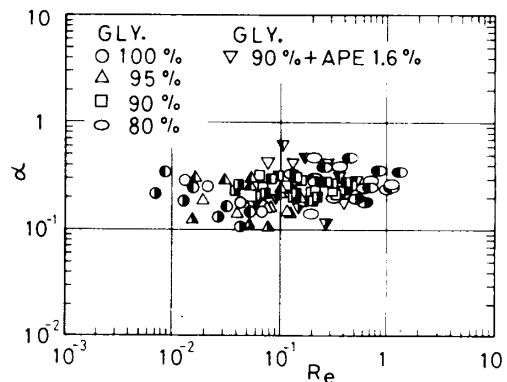


図7 無次元トルク α とレイノルズ数 Re (グリセリン水溶液の場合)
記号●○△などはおのおの $h=0.1, 0.15, 0.2$ mm を表す

なっている。しかし α の値には大きな差が見られず回転トルクに表面張力は大きな影響を及ぼさないものと思われる。

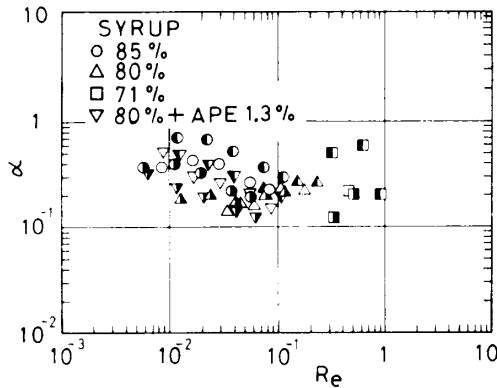


図 8 無次元トルク α とレイノルズ数 Re
(水あめ水溶液の場合)
記号 \circ \triangle \square ∇ などはおのおの $h=0.1, 0.15, 0.2$ mm を表す

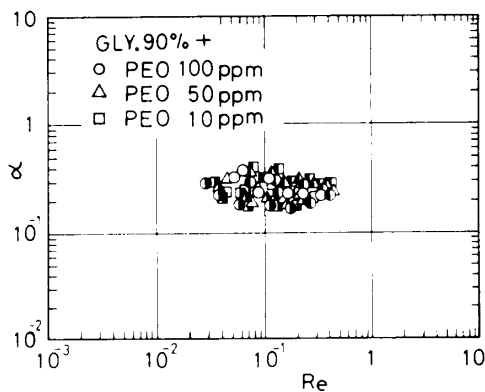


図 9 無次元トルク α とレイノルズ数 Re
(グリセリン 90% PEO 水溶液の場合)
記号 \circ \triangle \square などはおのおの $h=0.1, 0.15, 0.2$ mm を表す

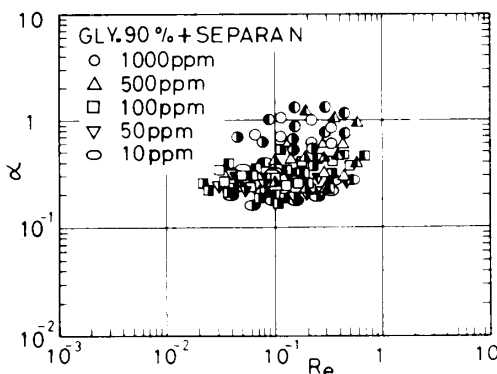


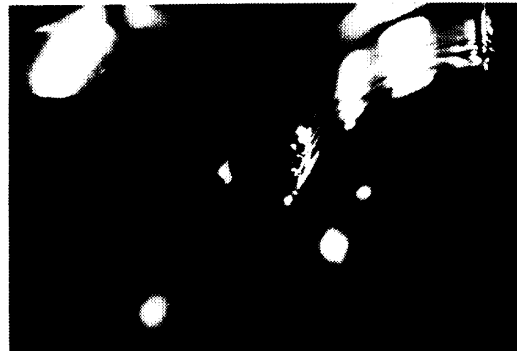
図 10 無次元トルク α とレイノルズ数 Re
(グリセリン 90% SEPARAN 水溶液の場合)
記号 \circ \triangle \square などはおのおの $h=0.1, 0.15, 0.2$ mm を表す

図 8 は水あめ 71~85% 水溶液の場合で縦軸と横軸は前図と同様である。図 8 では、水あめ 71% 水溶液にデータの大きいばらつきが見られるが全体的にグリセリンと同様の関係が見られ、粘度が支配的であると考えられる。また、界面活性剤入りの溶液と比較すると、グリセリン水溶液の場合と同様に表面張力の影響は少ないように考えられる。

図 9 は 10~100 ppm PEO 溶液の場合を示している。この場合も図 7, 8 と同様の傾向が見られ、少なくともこの程度では溶液の弾性力はトルクには大きく効いてこないことがわかる。

図 10 は 10~1000 ppm SEPARAN 溶液の場合である。100 ppm 以下の濃度の溶液については α と Re との間には図 7~9 と同様の関係が見られる。しかし、500 ppm と 1000 ppm の溶液では無次元トルクが他の希薄溶液より大きな値となっており、このような濃度の溶液では粘弾性による影響があるものと思われる。

一方、これらの溶液のすきま入口部における流動状態を観察すると、500 ppm 以上の SEPARAN 溶液で



(a) 渦列のない場合
(グリセリン 90% SEPARAN 100 ppm 水溶液の場合)



(b) 渦列のある場合
(グリセリン 90% SEPARAN 1000 ppm 水溶液の場合)

図 11 ローラ入口部の流体の流動状態
(周速度 0.25 m/s, すきま 0.1 mm)

は、2円筒間のすきまの入口部の軸方向に1列の渦列が生じ〔図11(b)〕、100 ppm以下の濃度の溶液ではニュートン流体と同様に渦列は生じなかった〔図11(a)〕。このことを上記のトルクに関する実験結果と対応させると、溶液の弾性は入口の流動状態の違い、すなわち渦列の有無を介してトルクに影響を及ぼすように思われる。これに関連して粘弾性流体の小孔流入流れは小孔前方に渦を生ずると非常に大きな圧力損失を生じ、渦を生じないとニュートン流体と大差ない圧力損失を示すことが知られている⁽¹¹⁾。二つのローラ間の粘弾性流体の場合にも類似の現象が生じていることが予想される。

4. 粘弾性流体の構成方程式を用いた検討

ローラ的一方が回転し、他方が静止している場合において、簡単な流れの場を仮定してローラに作用する力を概算する。ローラ表面付近での速度分布を直線で近似し、流れを二次元成分のみであると仮定する(図12)。すきまの最小値を δ_0 とし、回転角 θ を図12の回転方向にとると、最小すきま位置($\theta=0$)で速度成分は次式で示される。

$$v_r = 0$$

$$v_\theta = V_0 \{1 - (r - R) / \delta_0\} \dots\dots\dots (3)$$

(V_0 = ローラの周速度)

いま、すきま最小位置から θ だけ異なる場所(r, θ)における速度成分を

$$v_r = v_r(r, \theta)$$

$$v_\theta = V_0 \{1 - (r - R) / \delta\} \dots\dots\dots (4)$$

と仮定する。ただし、 $\delta = \delta(\theta)$ は θ の関数である。

ここで、二次元の連続の式

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

を満たすように $v_r(r, \theta)$ を求める。境界条件を $r=R$ で $v_r=0$ として、

$$v_r = V_0 \left(R - \frac{r}{2} - \frac{R^2}{2r} \right) \frac{1}{\delta^2} \frac{d\delta}{d\theta} \dots\dots\dots (6)$$

を得る。

ここで δ の関数形は明らかではないが、 $\theta=0$ の軸に関して対称となり、かつ $\theta=0$ で、最小値となるような関数として次式を仮定する。

$$\delta = \delta_0 / \cos \theta \dots\dots\dots (7)$$

このとき、 v_r と v_θ は次式のように求められる。

$$v_r = V_0 \left(R - \frac{r}{2} - \frac{R^2}{2r} \right) \frac{\sin \theta}{\delta_0} \dots\dots\dots (8)$$

$$v_\theta = V_0 \left(1 - \frac{r - R}{\delta_0} \cos \theta \right) \dots\dots\dots (9)$$

上式を基にして、次式で与えられるセカンドオーダー流体の構成方程式の各成分を求める。

$$\tau = \eta e + a e_{(1)} + b e \cdot e \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 a, b は物質定数であり、

$$e = \nabla v + (\nabla v)^t \dots\dots\dots (11)$$

$$e_{(1)} = \frac{De}{Dt} - \{(\nabla v)^t \cdot e + e \cdot (\nabla v)\} \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる。

式(8)、(9)を式(11)、(12)に代入し、ローラのうける力やトルクには $r=R$ における値のみが必要になるので、その値を求めると次のようになる。

$$e_{r=R} = \begin{pmatrix} 0 & -\left(\frac{V_0}{R} + \frac{V_0}{\delta_0} \cos \theta\right) \\ -\left(\frac{V_0}{R} + \frac{V_0}{\delta_0} \cos \theta\right) & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

$$e_{r=R}^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{V_0^2}{R\delta_0} \sin \theta \\ \frac{V_0^2}{R\delta_0} \sin \theta & -2V_0^2 \left(\frac{1}{R^2} + \frac{2 \cos \theta}{R\delta_0} + \frac{\cos^2 \theta}{\delta_0^2} \right) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

$$e \cdot e_{r=R} = \begin{pmatrix} \left(\frac{V_0}{R} + \frac{V_0}{\delta_0} \cos \theta\right)^2 & 0 \\ 0 & \left(\frac{V_0}{R} + \frac{V_0}{\delta_0} \cos \theta\right)^2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

式(10)~(15)から、ローラのうけるトルク T のローラの軸方向の単位長さあたりの値は

$$T = \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \{\tau_{r\theta}\} R^2 d\theta$$

$$= \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \left\{ -\eta \left(\frac{V_0}{R} + \frac{V_0}{\delta_0} \cos \theta \right) + a \frac{V_0^2}{R\delta_0} \sin \theta \right\} R^2 d\theta$$

$$= -\eta \frac{V_0 R}{\delta_0} (2\theta_0 \delta_0 + 2R \sin \theta_0) \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $R \gg \delta_0$ 、 $\sin \theta_0 = \theta_0$ とすると、

$$T = -\eta (V_0 / \delta_0) R^2 (2\theta_0) \dots\dots\dots (17)$$

となる。このようなすきま領域で流れが入口出口対称の場合には式(10)の右辺2項、3項は零となり、弾性

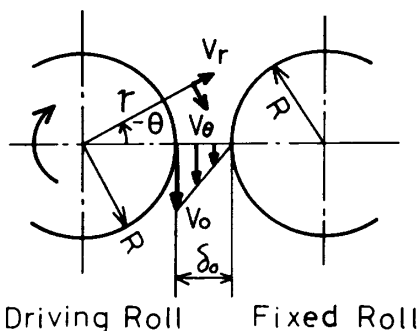


図12 二つのローラ間の流体の流れ

の効果はトルクに対し特に現れない。もちろん非対称の場合は $a = \Psi_1$ (第1法線応力係数) であるので、弾性の効果が現れることになる。実際の流れは上下非対称であるが、トルクに有効な作用を及ぼす範囲 θ_0 についてはすきまが小さいため入口側と出口側でほぼ同一とみなしてもよいであろう。したがってトルクの実験値には、流れの場に変化がないものとするれば弾性の効果は大きく現れないものと思われる。このことは本実験結果の示すところと一致している。

一方、回転側ローラが静止側ローラから引き離される向きに作用する力 F は、軸方向の単位長さあたり次のように求まる。

$$\begin{aligned} F &= - \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \{ \tau_{rr} \cos \theta - \tau_{r\theta} \sin \theta \}_{r=R} R d\theta \\ &= - \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \left\{ b \left(\frac{V_0}{R} + \frac{V_0}{\delta_0} \cos \theta \right)^2 + \eta \left(\frac{V_0}{R} + \frac{V_0}{\delta_0} \cos \theta \right) \sin \theta - a \frac{V_0^2}{R\delta_0} \sin^2 \theta \right\} R d\theta \\ &= - bR \frac{V_0^2}{\delta_0^2} \left\{ \frac{\delta_0^2}{R^2} (2 \sin \theta_0) \right. \\ &\quad \left. + 4 \frac{\delta_0}{R} \left(\frac{\theta_0}{2} + \frac{\sin 2\theta_0}{4} \right) + 2 \left(\sin \theta_0 - \frac{\sin^3 \theta_0}{3} \right) \right\} \\ &\quad + 2a \frac{V_0^2}{\delta_0} \left(\frac{\theta_0}{2} - \frac{\sin 2\theta_0}{4} \right) \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

ここで、 $R \gg \delta_0$, $\sin \theta_0 = \theta_0$ とすると、

$$F = - bR (V_0^2 / \delta_0^2) (2\theta_0) \dots \dots \dots (19)$$

$b = \Psi_2$ (第2法線応力係数) であるので、

$$F = - \Psi_2 (V_0 / \delta_0)^2 R (2\theta_0) \dots \dots \dots (20)$$

通常 $\Psi_2 < 0$ といわれているので $F > 0$, つまり反発力となる。このように軸に垂直方向の力に対しては、弾性の効果それも第2法線応力差が現れることになる。従来、第2法線応力差は第1法線応力差に比べその値が1割程度であることから二次流れや不安定現象を除き、考慮されないことが多かった。しかし、本解析結果によれば F には Ψ_2 が直接効くので注意を要するものと思われる。

5. 結 論

液体をはさんで回転する二つのローラに働くトルクを3種類の円筒間のすきまについて測定した。使用した液体はニュートン流体としてグリセリン水溶液、水あめ水溶液、粘弾性流体として90%グリセリン水溶液に高分子のPEOとSEPARANを溶かしたものである。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) トルクは溶液濃度とともに増加し、円筒のすきまが小さくなると大きくなる。

(2) せん断応力に基づくモーメントによって無次元化されたトルク α は、ニュートン流体および100 ppm以下の希薄なPEO/SEPARAN-グリセリン溶液において、レイノルズ数に関してほぼ一定値をとる。

(3) 500 ppm以上のSEPARAN-グリセリン溶液では、無次元化トルク α は一定とはならず、溶液の濃度とともに増加する。

(4) 500 ppm以上のSEPARAN-グリセリン溶液では、円筒間のすきまの入口部に回転軸方向に1本の渦列が観察され、これはトルク増加と密接な関係があると考えられる。

さらに、セカンドオーダー流体の構成方程式を用い簡単な流れの場を仮定して、二つのローラ間に生じる回転トルクと二つのローラを引き離す方向の力の算定を行った。その結果、流れの場に変化がないと仮定すると流体の弾性はトルクに影響を及ぼさないけれども、引き離し力には影響を及ぼし、その場合引き離し力の増加は第2法線応力係数に比例することが示された。

終わりに、本研究にご助言をいただいた鳴海敬倫助手、近野正昭技官、卒業研究としてご助力いただいた石川聡氏、佐藤隆行氏、高野正弘氏、新鞍知樹氏ならびに当時の学生諸氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Coyle, D. J., Macosko, C. W. and Scriven, L. E., *AICHE J.*, **36-2** (1990), 161.
- (2) Babchin, A. J., Clish, R. J. and Wahren, D., *Adv., Colloid Interface Sci.*, **14** (1981), 251.
- (3) Coyle, D. J., Macosko, C. W. and Scriven, L. E., *J. Fluid Mech.*, **216** (1990), 437.
- (4) Coyle, D. J., Macosko, C. W. and Scriven, L. E., *J. Rheol.*, **34-5** (1990), 615.
- (5) Benkreira, H., Edwards, M. F. and Wilkinson, W. L., *Chem. Eng. Sci.*, **36** (1981), 429.
- (6) 吉田・居谷・寺沢・早船, 塗装の事典, (1980), 55, 朝倉書店.
- (7) 染谷・岡村, 潤滑, **21-8** (1975), 536.
- (8) 村上・鄭・天田・秋本, 化論, **12-1** (1986), 23.
- (9) Oliver, D. R., Bakhtiyarov, S. I. and Shahidullah, M., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **12** (1983), 269.
- (10) Doremus, P. and Piau, J. M., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **9** (1981), 389.
- (11) Hasegawa, T. and Iwaida, T., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **15** (1984), 257.