

# 回転ローラーと静止平板間の流体により生じる力に関する研究

反 町 和 則、長谷川 富 市\*、鳴 海 敬 倫\*

A Study of Normal Forces generated in the Flow between a Rotating Roller and a Plate

Kazunori SORIMACHI, Tomiichi HASEGAWA and Takatsune NARUMI

## 1. 緒 言

流体で潤滑された回転ローラーと静止平板間の流れは、自動車におけるタイヤと路面の関係やロール・コーティング等の塗装や圧延、歯車のかみ合いなどに関連して重要な問題である。しかし、これらの研究はわずかに行われているにすぎない。異径のロール系について、Doremus<sup>(1)</sup>らが流線と圧力分布について実験を行い、Greener<sup>(2)</sup>、Savage<sup>(3)</sup>、Sinha<sup>(4)</sup>らは、理論的な圧力分布やキャビテーションの発生について報告している。また、同径のロール系およびロール-平板系では、筆者らの既報<sup>(5)-(7)</sup>において、ニュートン流体と高分子溶液を用いた場合の流体に生ずる反発力の測定と解析について報告している。また、最近の塗装分野において、ロール・コーティングは広く使用されている塗装方式の一つである。その分野では、主に液分配率や液流量、液膜厚さ等の研究<sup>(8)-(11)</sup>がなされている。

本研究では、流体で潤滑された回転ローラーと静止平板が狭いすき間を隔てて平行におかれているとき、その静止平板に生じる反発力を測定する。回転ローラーと静止平板間に供給する流体としては、ニュートン流体と非ニュートン流体を用いて、比較的低速回転で測定を行う。

## 2. 実験装置および使用流体

### 2. 1 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。実験に使用した回転ローラーは半径  $R = 40\text{mm}$ 、長さ  $L = 100\text{mm}$  で、

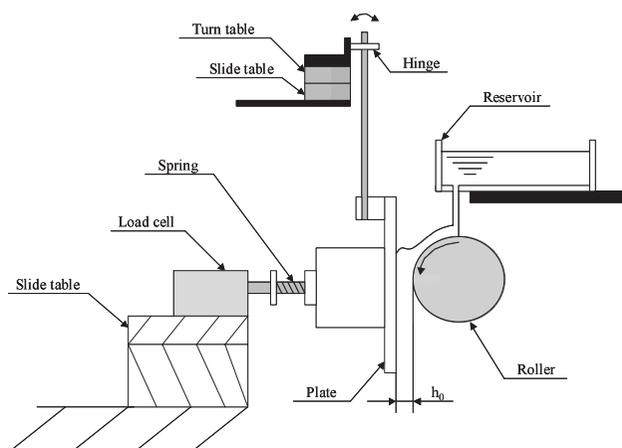


図1 実験装置

\*新潟大学工学部

ステンレス製である。また、静止平板は縦100mm、横150mm、厚さ10mmの亚克力製である。ステンレス製の回転ローラーは、ステッピングモーターによって駆動されパーソナルコンピュータにより制御される。静止平板は、アルミパイプを介して上部のスライドテーブルに固定されたヒンジに取付けられ、微小回転できるようになっている。この静止平板は、外部から力が作用しない場合は自重によるモーメントのために回転ローラーから離れる方向に回転する。この静止平板に、平板後方のスライドテーブルに取付けた2個のロードセル（オリエンテック社製 T1形）を、ばねを介して接触させる。このばねは、2個のロードセルにかかる力を均等化するとともに急激な力からのロードセルを防御するために使用している。さらに、反発力を測定するときの回転ローラーと静止平板のすき間  $h_0$  の確認を行うためにレーザー変位計（松下電工製 ANR1150）を静止平板の両端後方に2個取付けている。ロードセルの値はアンプを通してパーソナルコンピュータに出力させ、レーザー変位計の測定値も同様に出力させて読取る。

実験では、回転ローラーと静止平板を接触させた状態より、ヒンジを取付けたスライドテーブルとロードセルを取付けたスライドテーブルの両者をおのおの調整し、すき間  $h_0$  ( $h_0=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ の6種)を設定する。つぎにリザーバに溶液を供給し、リザーバ底面のスリットから回転ローラーの上部に溶液が流れ落ちるようにする。回転ローラーが停止した状態で溶液が重力によって、ローラーと静止平板のすき間を流れ落ちているとき、そのすき間  $h_0$  を調整・確認する。このとき、静止平板に作用する水平方向の力をロードセルによって測定し、これを  $F_0$  とする。次に、回転ローラーを設定の回転速度（周速度  $V=0.08\sim 1.76\text{m/s}$ ）で回転させ、十分安定した後にすき間が設定値  $h_0$  となるようにロードセルの位置を微調整し、そのときの反発力  $F_{\text{all}}$  を測定する。この測定値  $F_{\text{all}}$  から先の  $F_0$  を差し引くことによって、重力の影響をなくした正味の反発力  $F$  が求められる。

回転ローラーと静止平板間のすき間のひずみ速度は、最小すき間部分において、線形速度分布を仮定すると  $\dot{\gamma}=160\sim 35200 [\text{s}^{-1}]$  となる。

## 2. 2 使用流体

本実験には、ニュートン流体として、水と Glycerin 溶液（100%）、Glycerin20, 40, 60, 80%水溶液（重量濃度）を用いる。また、非ニュートン流体として、ポリアクリルアミド（SEPARAN AP30）

表1 使用流体

No	Liquids	Glycerin[%]	Separan[%]	Water[%]	水質安定剤[%]
1	Water	0	0	100	0
2	Glycerin20%	20	0	80	0
3	Glycerin40%	40	0	60	0
4	Glycerin60%	60	0	40	0
5	Glycerin80%	80	0	20	0
6	Glycerin100%	100	0	0	0
7	Separan100ppm	0	0.01	99.98	0.01
8	Separan500ppm	0	0.05	99.94	0.01
9	Separan1000ppm	0	0.1	99.89	0.01
10	Glycerin60%Separan100ppm	60	0.01	39.98	0.01
11	Glycerin60%Separan500ppm	60	0.05	39.94	0.01
12	Glycerin60%Separan1000ppm	60	0.1	39.89	0.01

100, 500, 1000ppm 水溶液および Glycerin60%水溶液にポリアクリルアミドを100, 500, 1000ppm 溶かした溶液を用いる。使用する溶液を表1に示す。

各々の溶液は、コーンプレート式回転粘度計（東京計器社製 E 型粘度計）を用いて測定し、実験時における溶液温度での粘度補正を行う。なお、水の物性値は理科年表より引用した。

粘度測定結果を図2、図3に示す。図2は粘度に対する温度の影響を示しており、各溶液とも温度の上昇とともに粘度が低下する傾向を示している。また、図3は、非ニュートン流体における粘度に対するひずみ速度の影響を示しており、非ニュートン流体の各溶液とも、ひずみ速度の増加とともに粘度の低下するという shear-thinning 粘性があらわれている。

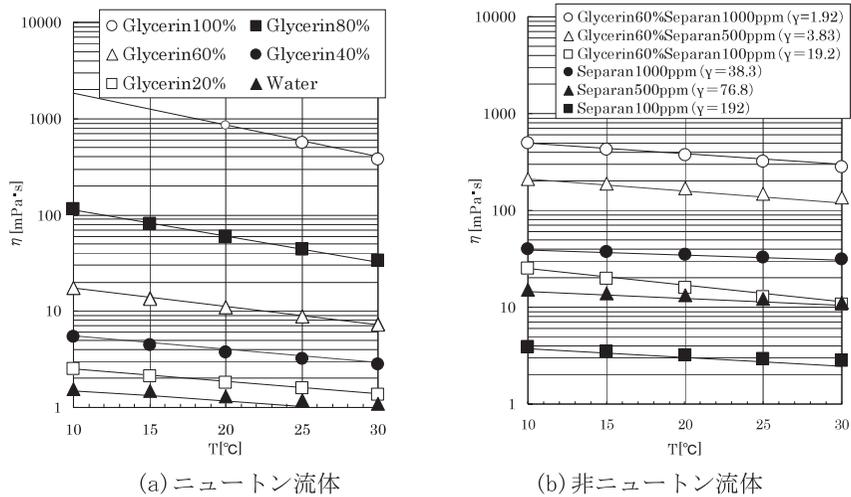


図2 粘度に対する温度の影響

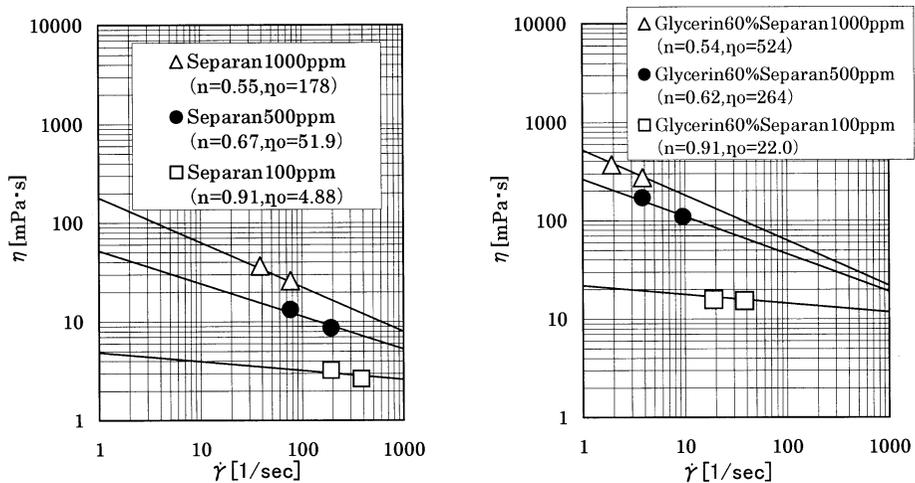


図3 粘度に対するひずみ速度の影響

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1 反発力の測定結果

図4、図5は、流体によって生じた反発力  $F$  [N] の値をローラーの周速度  $V$  [m/s] に対して示した図である。図4は、ニュートン流体の水および Glycerin 水溶液の濃度を变化させた場合を、図5は非ニュートン流体の高分子水溶液の濃度を变化させた場合の測定例を示したものである。図4より、反発力  $F$  はローラーの周速度の増加とともに大きくなっており、また、Glycerin 濃度すなわち粘度の増加とともに大きくなっている。図5より、Separan 水溶液の場合も Glycerin60%水溶液に Separan を加えた溶液の場合もニュートン流体と同様に周速度、Separan 濃度の増加とともに発生する反発力  $F$  は大きくなっている。しかし、溶媒の水および Glycerin60%水溶液の値と比較すると、Separan の添加

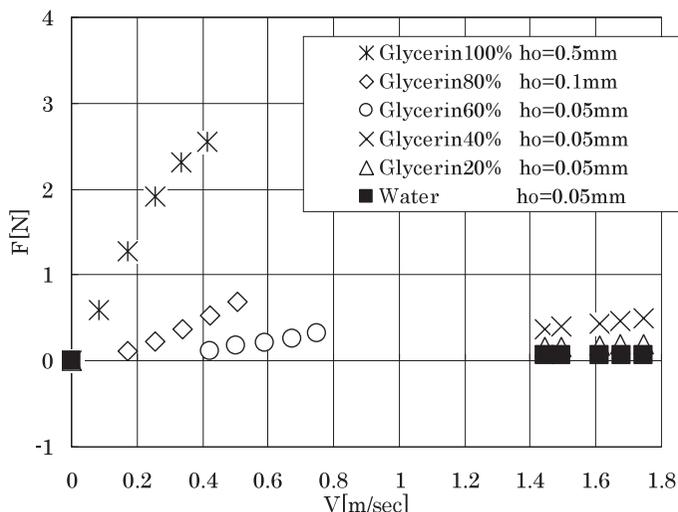


図4 反発力  $F$  とローラー周速度  $V$  (ニュートン流体の場合)

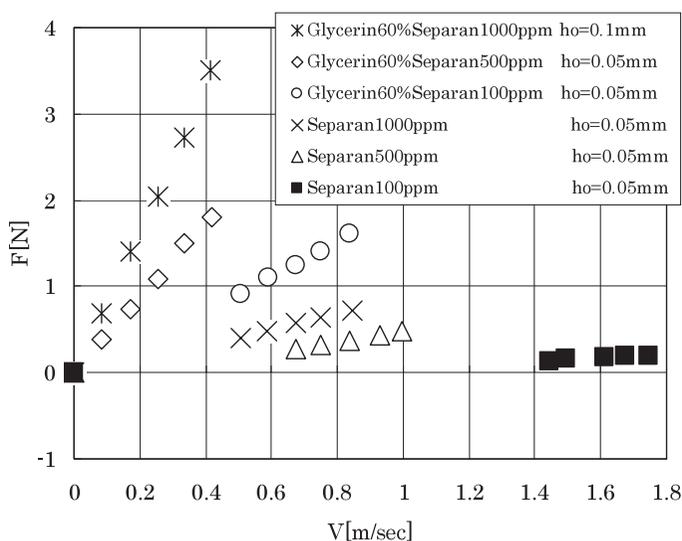


図5 反発力  $F$  とローラー周速度  $V$  (非ニュートン流体の場合)

による粘度の増加以上に反発力  $F$  が大きくなっているように思われる。なお、ここで示した反発力  $F$  は、前述したようにローラー回転中に測定した値  $F_{all}$  からローラー停止状態での値  $F_0$  を差し引くことによって求めている。

### 3. 2 反発力に対する供給流量の影響

回転ローラーと静止平板間に満たされた溶液は、両者のすき間に供給される以外の余分な溶液は、ローラー側面より下方に流れ落ちている。このすき間の入り口部分に供給される溶液は、リザーバからの流量  $Q$  によって変化し、その結果反発力にも影響すると考えられる。しかし、リザーバからの流量  $Q$  を変化させた場合の反発力  $F$  の測定結果 (図 6) からは、ニュートン流体 (a) と非ニュートン流体 (b) の両者とも流量  $Q$  による反発力への影響はほとんどみられなかった。

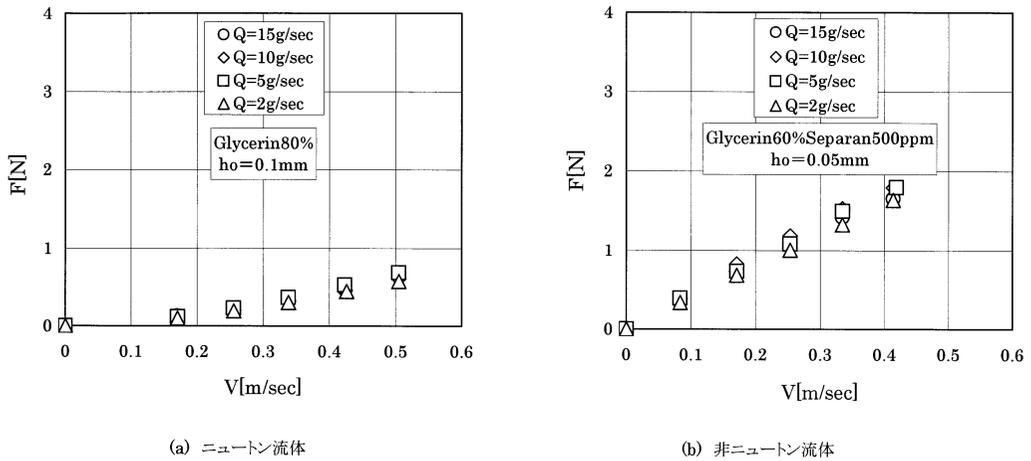


図 6 反発力  $F$  に対する供給流量  $Q$  の影響

### 3. 3 反発力に対するすき間の影響

反発力に対する回転ローラーと静止平板間のすき間変化の影響の測定結果を図 7 に示す。図 7 (a) はニュートン流体として Glycerin 80% 水溶液を示し、図 7 (b) は非ニュートン流体として Glycerin 60%

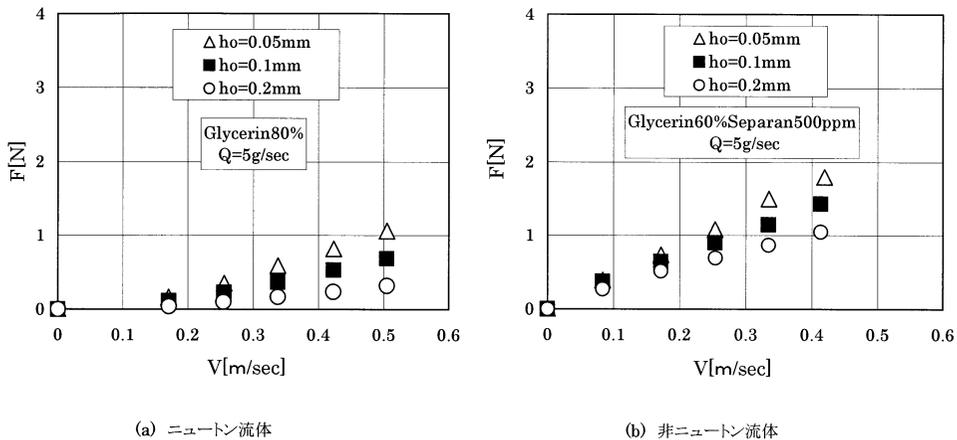


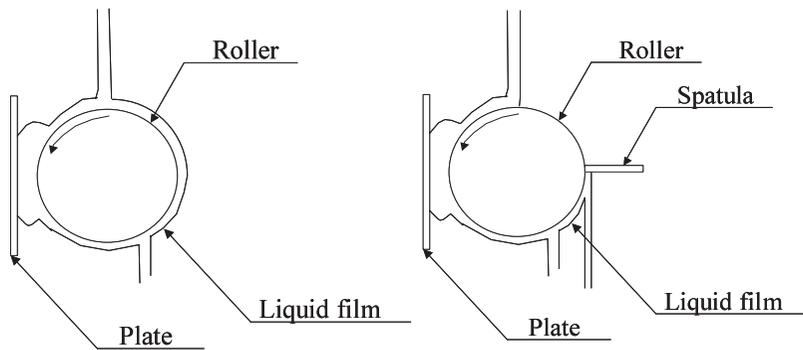
図 7 反発力  $F$  に対するすき間  $h_o$  の影響

水溶液に Separan500ppm を加えた溶液を示している。ニュートン流体、非ニュートン流体ともにすき間が小さいほうが大きい反発力となっている。ニュートン流体ではすき間に反比例して反発力が変化している。非ニュートン流体ではニュートン流体と比較すると、すき間の影響が同程度になっていると思われる。

### 3. 4 ローラー表面の流体膜の影響

溶液は、回転ローラーと静止平板間の入り口部を満たし、両者のすき間にローラーの回転に伴って流入し、ニップ部（最小すき間部分）を通過後、図8のようにローラー表面に流体の膜を形成する。

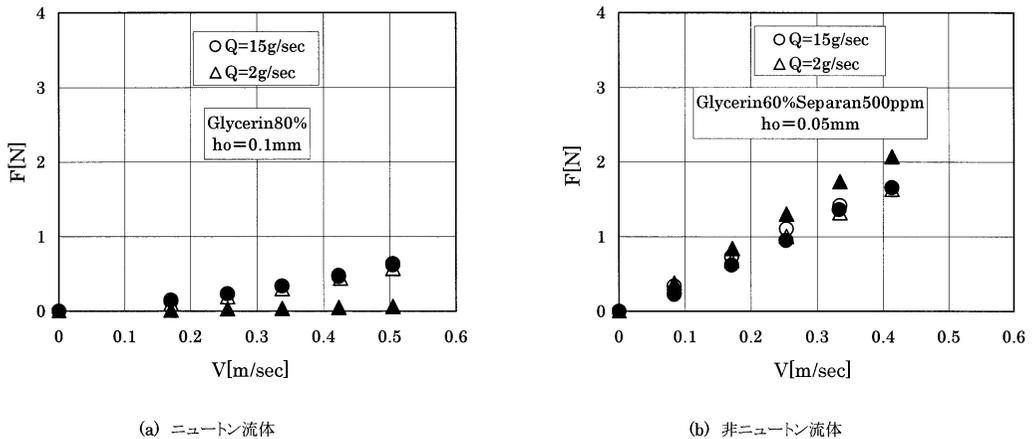
その際、ローラー表面に付着できない溶液はローラー下方に流れ落ちる（図8 (a)）。このニップ部通過後の流体膜の影響を調べるため、図8 (b) に示すようにスクレーパによって流体膜を除去して反発力  $F$  の測定を行った。その結果を図9に示す。図中の黒塗りが流体膜を除去した場合の反発力を示し、白抜きが除去しない場合である。ニュートン流体では、流量  $Q$  が少ない場合は反発力  $F$  の低下が



(a) 流体膜を除去しない場合

(b) 流体膜を除去した場合

図8 ローラー表面の流体膜



(a) ニュートン流体

(b) 非ニュートン流体

図9 ローラー表面の流体膜の影響

(白抜き：液体膜をそのままにした場合、黒塗りに：液体膜をかきおとした場合)

みられた。これは、ニップ部への供給量が減少して反発力が低下したものと思われる。しかし、非ニュートン流体ではそのような現象はみられない。

### 3. 5 無次元化された反発力とレイノルズ数の関係

以上の結果から、反発力  $F$  にはローラー周速度  $V$ 、回転ローラーと静止平板間のすき間  $h_0$ 、溶液の粘度  $\eta$  が関係している。反発力は、ローラー周速度と粘度に比例し、すき間に反比例しているのので、下記の式を用いて、無次元化された反発力  $F^*$  とレイノルズ数を求めた。

$$F^* = \frac{F}{\left(\frac{\eta V R L}{h_0}\right)}, \quad Re = \frac{\rho V \sqrt{R h_0}}{\eta}$$

(式中の記号は、 $\eta$ ：溶液粘度、 $\rho$ ：溶液密度、 $R$ ：回転ローラー半径、 $L$ ：回転ローラー長さ、 $h_0$ ：すき間、 $V$ ：回転ローラー周速度、 $F$ ：反発力、 $Re$ ：レイノルズ数、 $F^*$ ：無次元化された反発力を示す。)

この式は、一次元流れの2物体間の流れを解析した Cameron<sup>(12)</sup>により提唱されているもので、 $F^*$ の値は、full Sommerfeld の条件では0の値をとり、half Sommerfeld の条件では1の値を、Reynolds の条件では1.22の値をとる。従来どの条件が実験結果とあうのかははっきりとは解明されていない。

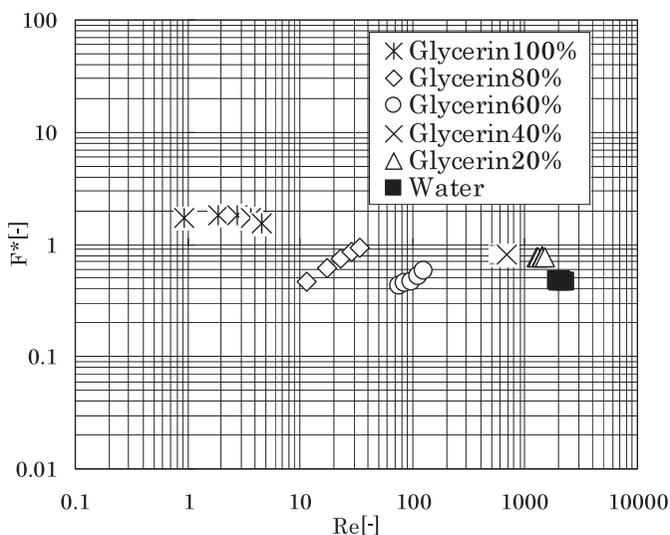


図10 無次元化された反発力とレイノルズ数（ニュートン流体の場合）

図10、図11は、無次元化された反発力  $F^*$  をレイノルズ数  $Re$  に対して示した図である。図10はニュートン流体の場合を示し、図11は非ニュートン流体の場合を示している。図10から、ニュートン流体の場合、 $F^*$ の値はおおよそ1程度となり、粘性力でほぼ整理されていることがわかる。このことから、Glycerin 溶液（100%）を除いて、この流動場を説明するには half Sommerfeld の条件が妥当と考えられる。Glycerin100溶液では、 $F^*$ の値は1.6程度となっており、この場合は Reynolds の条件に近いものと考えられる。

しかし、図11の非ニュートン流体では、Separan100ppm 水溶液を除く他の Separan 水溶液および Glycerin60%水溶液に Separan を加えた溶液とも、無次元化された反発力  $F^*$ の値は2～20程度という

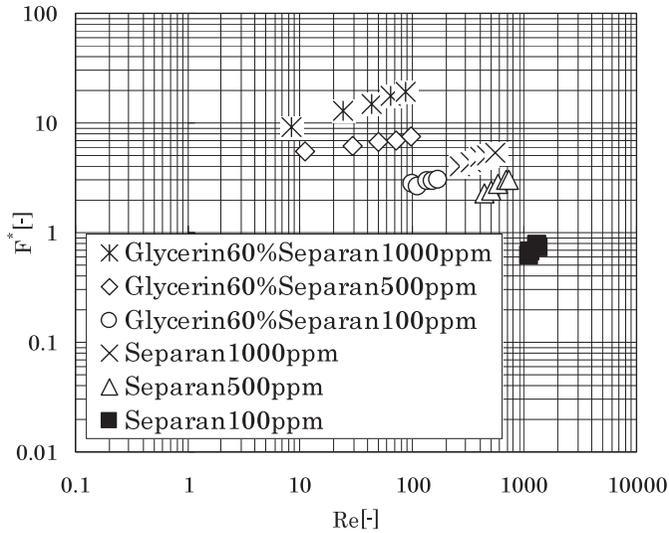


図11 無次元化された反発力とレイノルズ数（非ニュートン流体の場合）

大きな値となっている。Separan 濃度が増加すると無次元化された反発力  $F^*$  の値も大きくなるという傾向がみられる。これは、高分子溶液の流動現象の一つであるワイセンベルグ効果（法線応力効果）によって、流体が回転ローラーに巻き付いてニップ部に強く流入し、反発力の増大を招いたものと考えられる。なお、Separan100ppm 水溶液ではこのような傾向はみられず、ニュートン流体と同程度の値となっている。

#### 4. 結 言

流体で潤滑された回転ローラーと静止平板が狭いすき間を隔てて平行におかれているとき、その静止平板に生じる反発力を、ニュートン流体と非ニュートン流体を用いて測定した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 供給される溶液の粘度、ローラー周速度が大きくなると発生する反発力は大きくなる。また、ローラーと平板のすき間が減少する場合も反発力は大きくなる。
- (2) 無次元化された反発力は、ニュートン流体ではレイノルズ数でほぼ整理される。
- (3) ニュートン流体の場合、本実験で測定された反発力は half Sommerfeld の条件を適用した Cameron の式とほぼ一致する。
- (4) 非ニュートン流体では、反発力は粘性力の増加以上に大きくなる傾向が見られた。これは高分子溶液の流動現象の一つであるワイセンベルグ効果（法線応力効果）によるものと考えられる。

謝辞 本実験に、専攻科修了研究としてご助力いただいた遠藤直行氏、石山純氏に深く感謝の意を表します。

#### 文 献

- (1) Doremus, P. and Piau, P.M., J. Non-Newtonian Fluid Mech., 13 (1983), 79

- (2) Greener, Y. and Middleman, S., *Polymer Eng. And Science*, 15-1 (1975), 1
- (3) Savage, M. D., *J. Fluid Mech.*, 80-4 (1977), 743
- (4) Sinha, P. and Singh, C., *J. Lubrication Tech.*, 104 (1982), 168
- (5) 関野, 長谷川, 鳴海, *機械学会論文集 B*, 59-564 (1993-8), 144
- (6) 関野, 長谷川, 鳴海, *レオロジー学会誌*, 22-2 (1994), 68
- (7) 反町, 長谷川, *機械学会論文集 B*, 57-542 (1991), 26
- (8) 反町, 渡辺, 長谷川, 鳴海, *機械学会流体部門講演会講演論文集*, 99-19 (1999), 257
- (9) 椿野, 足立, *化学工学講演要旨集*, 24 (1991), 26
- (10) 田中, 足立, *化学工学講演要旨集*, 24 (1991), 29
- (11) Hasegawa, T. and Sorimachi, K., *J. AIChE*, 39-6 (1993), 935
- (12) Cameron, A., *Basic Lubrication Theory*, John Wiley, (1981), 80-90

(平成17年 2 月25日受理)