

相対的に回転する2ロール間の流体により 生じる力に関する研究*

関野 龍男*¹, 長谷川 富市*², 鳴海 敬倫*²

Study of Normal Forces Generated in the Flow between Two Rolls Rotating at Relatively Different Speeds

Tatsuo SEKINO, Tomiichi HASEGAWA and Takatsune NARUMI

Normal forces generated in the flow between two-rolls, one rotating and the other fixed, are measured. Water and glycerin-water solutions are used in the experiments and the forces measured under the usual experimental condition are in good agreement with one-dimensional theoretical predictions obtained by Cameron using the Reynolds equation and the half Sommerfeld condition. A thin liquid film is produced on the surface of the rotating roll under the usual experimental conditions. But when the liquid film is stripped off with a spatula, the measured normal force is reduced. In the case of a small quantity of supplying fluids and the low speeds of rotating, the measured normal force is negative for water but positive for glycerin-water solutions.

Key Words: Viscous Flow, Shear Flow, Lubrication, Roll Coating, Normal Force, Liquid Film

1. 緒 言

相対的に回転する2ロール間の流れは、転がり潤滑、歯車、カムなどの各種機械要素の流体潤滑のみならず装輪式車両においてその走行を支える車輪や圧延などの塑性加工の分野まで関連し重要な問題となっている。しかし本研究のように流体がせん断と伸張の両方の影響を受ける2ロール間潤滑場についての研究例はわずかに行われているにすぎない^{(1)~(5)}。Oliverらは回転する大ロールと平行に近接固定した小ロールとの間に流体を供給したときこの小ロールに作用する反発力と摩擦力を測定した⁽¹⁾。その結果、高分子を添加することによりニュートン流体のときよりも摩擦力は減少し、反発力についてはスクイーズ膜潤滑場と同様に⁽⁶⁾著しく増加することを明らかにした。Doremus, Piauらもロール間の流れに注目し反発力によって生じるロールの引き離される方向の変位測定を行い同様な知見を得ている⁽²⁾。しかし、この現象に対する理論的な解明は定性的にもなされていない。

一方、最近の塗装分野においても操業効率の高いロ

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。しかしその塗布流動によって生じる種々の現象(しま模様、さざなみ模様等)はいまだ説明されていない部分が多く⁽⁷⁾⁽⁸⁾、これに関係すると思われるロール間の流体による摩擦力、反発力や流動の解析が望まれている。

本研究では、二つの同一直径のロールを狭いすきまを隔てて平行に設置し、その一方のみを回転させ他方の静止ロールに生じる反発力を測定する。ロール間に供給する流体はニュートン流体で比較的低速回転における測定を行う。

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。実験に使用した二つのロールはともに半径 $R=40$ mm、長さ $L=100$ mm である。ステンレス製の回転ロールは、ステッピングモータ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。アクリル製の静止ロールは、アルミニウム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、そこを回転中心として微小回転できるようになっている。この静止ロールは、外部から作用する力が零のとき自重によるモーメントのため内側(回転ロール方向)に回転

* 原稿受付 平成5年1月18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。

する。そこで静止ロールに釣合い重りを糸を介して取付け、ロールを外側に引っ張ることでその影響を解消した。また、ロードセル（オリエンテック社製Uゲージ式検出器T1形）を静止ロール外側のスライドテーブル上部に2個取付け、その検出部であるピンをばねを介してロールに接触させる。このばねは、二つ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に対してロードセルを防御するために用いられている。さらに力測定時のロールすきま h_0 の確認を常時行うため変位計（岩通電子社製ST 3501）を静止ロールの外側両端に2個取付けている。ロードセルの値はアンプ（豊田工機社製AA 3004形直流増幅器）を通してパーソナルコンピュータに出力させ、変位計の値はデジタルマルチメータに出力させて読取る。

実験では、まず二つのロール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固定したスライドテーブルをおのおの微調整しロール間のすきま h_0 を設定する ($h=0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3$ mmの6種)。次にリザーバを設置し溶液がその底面にあるスリットから回転ロール上部に流れ落ちるようにする。ロールが停止したままで溶液が重力によってのみロールのすきまを流れ落ちている状態で h_0 を確認して静止ロールに作用する水平方向の力を測定しこれを F_0 とする。ここで回転ロールを回転させ（周速度 $V=0.042\sim 0.436$ m/s）十分安定した後、すきまが h_0 となるようロードセルの位置を微調整し力 F_{all} を測定する。この測定値 F_{all} から F_0 を差引くこと

により重力による影響が除去され回転による正味の力 F が求められる。ロール間のすきま h_0 のひずみ速度は線形速度分布を仮定すると $\dot{\gamma}=140\sim 21\,800$ [s⁻¹] となる。

2・2 使用流体 本実験には水と Glycerin 10, 50, 80%水溶液（重量濃度）を用いた。おのおの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。粘度測定には Cone-Plate 形回転式粘度計（東京計器社製E形粘度計）を使用した。なお、水の物性値は理科年表より引用した。

3. 実験結果および考察

3・1 反発力の測定結果 図2は反発力 F [N] の値をロール周速度 V [m/s] に対して示した例である。図2(a)は水について h_0 を変化させた場合、図2(b)は $h_0=0.1$ mmの条件下で Glycerin 水溶液の濃度を变化させた場合の測定例である。図2より反発力は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ことがわかる。また、Glycerin 水溶液の F は濃度の増加すなわち溶液粘度の増加とともに大きくなっている。なお、ここで示した反発力 F の値は前述したようにロール回転中に測定した力 F_{all} の値から停止状態での力 F_0 を差引くことによって求めている。

3・2 供給流量変化による影響 ロール間に供給された溶液は入口領域をある程度満たし余分な流量がロール両端面より下方に流れ落ちている。この入口領域を満たしている溶液の水位はリザーバからの流量 Q_R を変えるとわずかながら変化し、その結果測定基準としている力 F_0 に影響を与える。図3は水について流量 Q_R を変化させた場合の重力による影響を含んだ力 F_{all} の測定結果である。図3より停止状態 $V=0$ [m/s]（すなわち、ロールを回転させず重力によってすきまに流体を流したとき）における力 $F_{all}(=F_0)$ は流量 Q_R が大きいほど大きくなっていることがわかる。この傾向は Glycerin 水溶液についても同様であった。

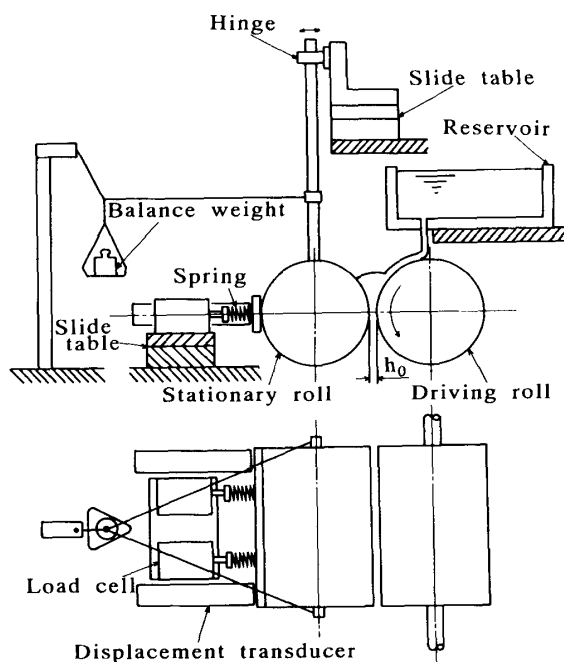


図1 実験装置

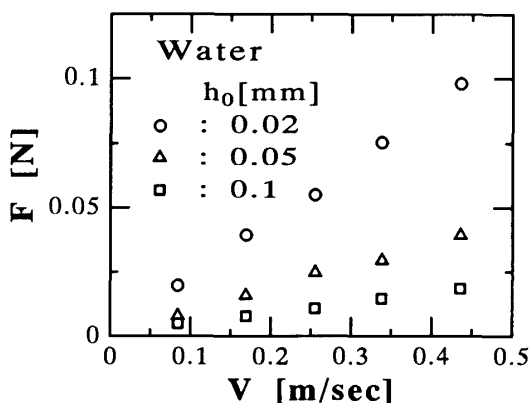
表1 使用流体

Solution	Temp. [°C]	Density [kg/m ³]	Viscosity × 10 ⁻³ [Pa·s]
Water	15	999	1.138
Glycerin 10%	18	1036	1.43
Glycerin 50%	17	1132	6.22
Glycerin 80%	27	1282	100.5

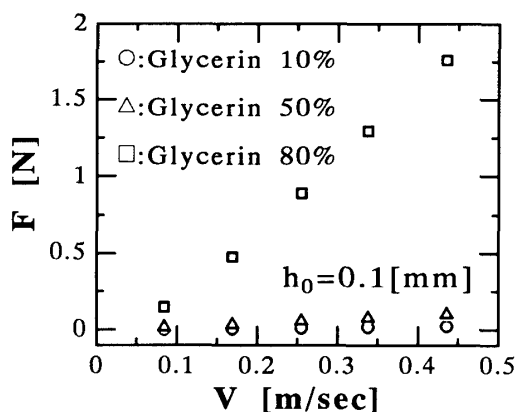
ここで注意を要することは、力 F_{all} は流量 Q_R が少なく周速度が小さいとき負の値を示していることである。ここには示していないが Glycerin 水溶液の場合、 F_{all} は流量 Q_R および周速度 V によらず各濃度とも常に正の値を示す結果が得られており、本実験で負の力が生じるのは水の場合だけである。これは潤滑理論でよくいわれるようにニップ部近傍において負圧領域が生じていることによるものなのか、あるいは水の持つ力学的特性によるものなのかは現時点では明らかでない。次に種々の Q_R について得られた水の反発力 F を図4に示す。回転によって生じた反発力 $F (=F_{all} - F_0)$ は流量 Q_R および F_0 の符号にかかわらずおのおのほぼ同じ値になっている。3・3節で示すがこれは Glycerin 水溶液についても同様である。以上のことからロールが回転することにより生じるニップ部近傍の流れは供給流量の変化による影響を受けないことが推察される。

3・3 ロール表面の液体膜の影響 ここではロールを回転するとき生じる回転ロール面上の薄い液体膜が反発力 F に及ぼす影響について考察を行う。いま液

体がロール間のすきまをすべて満たして流れるとし、そのときの流量を Q_{out} とすると上部リザーバからの供給流量 Q_R が Q_{out} より少ない場合は溶液の供給不足になる。このとき液体はロール間隙のすべてを満たして流ることができなくなり、ロールの長手方向に一部液体の流れない空隙が生じることが予想される。しかし実際には図5(a)に示すように回転ロール表面に付着している液体膜が入口領域まで維持されており、これによって流量不足が補われロール間を満たして液体が流れる。この液体膜の反発力に及ぼす影響を調べるため図5(b)に示すようにへら状のもので液体膜をかき落とし F の測定を行った。Glycerin 80%水溶液についてリザーバからの流量を変化させ測定した結果を図6に示す。図6中黒塗りが液体膜をかき落とした場合の反発力 F_e 、白抜きが液体膜をそのままにして測定した反発力 F である。図6より液体膜をそのままにしたとき、3・2節の水の場合について述べたように F は流量 Q_R によらずほぼ同じ値を示すが、 F_e は Q_R の減少とともに減少することがわかる。これについて供給流量 Q_R が少ない場合は液体膜をかき落とすことによって入口領域を満たす溶液の水位が周速度



(a) 水の場合



(b) Glycerin 水溶液の場合

図2 反発力とロール周速度

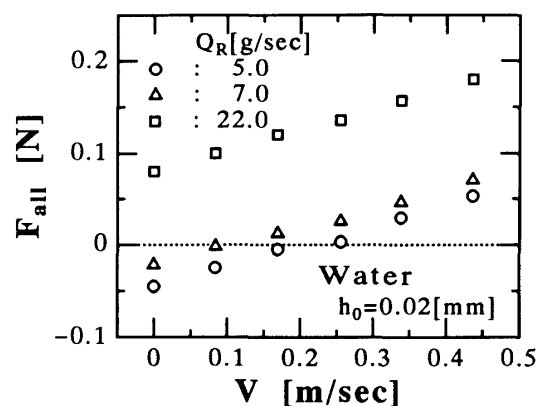


図3 重力の影響を含んだ反発力

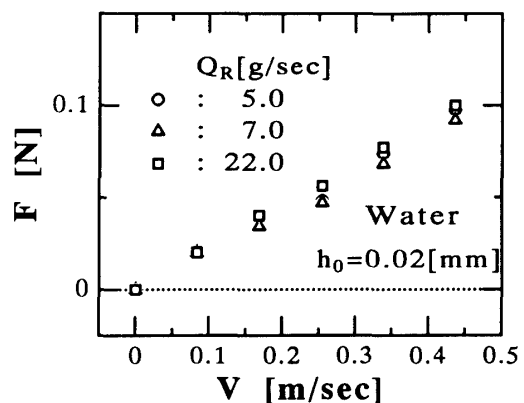
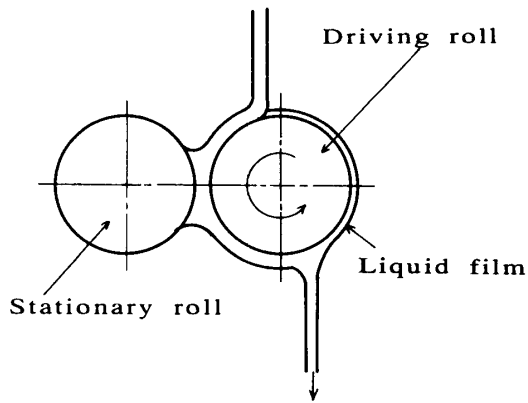
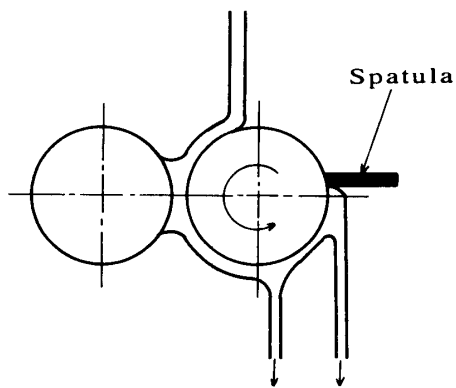


図4 供給流量の反発力への影響



(a) かき落とさない場合



(b) かき落とした場合

図5 ロール表面の液体膜

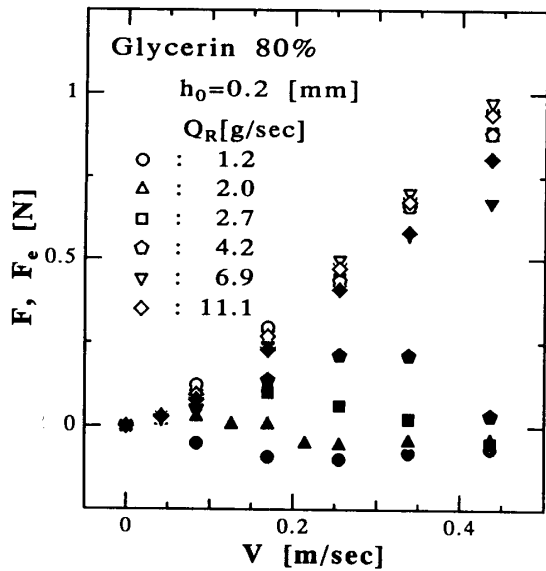


図6 反発力 F と F_e
(白抜き：液体膜をそのままにした場合の F , 黒塗り：液体膜をかき落とした場合の F_e)

の増加とともに下がり、その結果として反発力が減少したと考えられる。しかし流量 Q_R を十分大きくした場合においてもわずかながら反発力の減少が生じている。ここでロール間のすきま h_0 において、回転ロール上で速度 V 、静止ロール上で速度零の線形速度分布を仮定すると、 h_0 を通過する流量 Q_{out} は

$$Q_{out} = \frac{Vh_0L}{2}$$

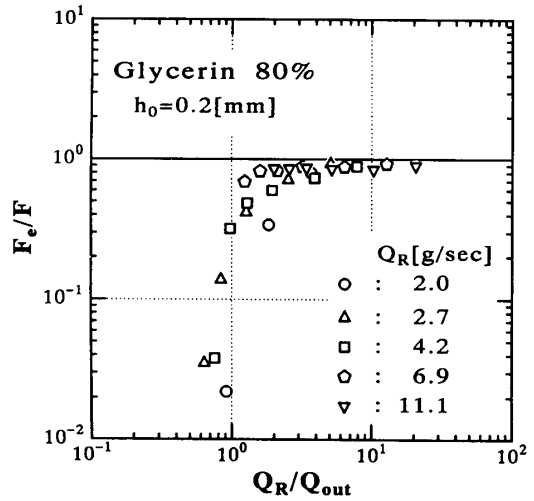


図7 液体膜の反発力への影響

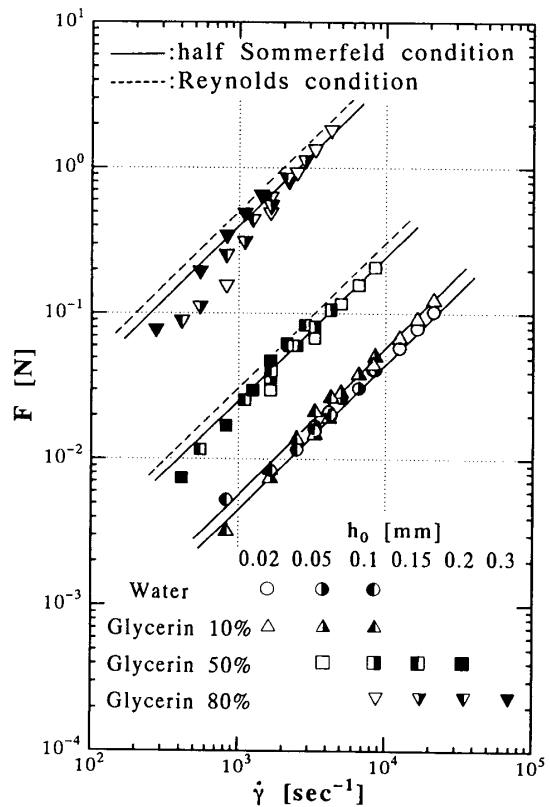


図8 実験値と Cameron の式との比較

となる。ただし L はロール長さである。重力による流れは今の場合すきま h_0 が小さくまた粘度が高いことから回転による流れより十分少なく無視できると考えられる。ここで供給流量 Q_R とこの場合の出口流量 Q_{out} の比をとり反発力の減少率 F_e/F を整理した結果を図7に示す。図7より $Q_R/Q_{out}=1$ でも $F_e/F=0.3$ 程度であり、 Q_R が Q_{out} の10倍程度になっても反発力に若干の減少がみられる。したがって液体膜をかき落とすことによる反発力の減少は見掛けの供給流量の減少のみより生じた現象ではなく、液体膜そのものの消失にも原因があると考えられる。換言すれば、回転ロール面上に付着している液体膜がニップ部付近で流れに何らかの影響を及ぼし反発力を増大させるのであろう。今後液体膜厚さを測定するなどして検討を加えたいと考えている。

3・4 反発力 F の計算値との比較 一次元流れの考えのもとで2物体間の流れを解析した Cameron⁽⁹⁾ によれば反発力は次式で表される。

$$F = \alpha \frac{\eta VRL}{h_0}$$

ただし、

η : 液体粘度 R : ロール半径

である。ここで係数 α は full Sommerfeld の条件では零、half Sommerfeld の条件では 1、Reynolds の条件では 1.22 をとり、従来どの条件が実験結果と合うのかはっきりしていない。図8に $\alpha=1$ とした計算値(図8中実線)と各溶液の液体膜をかき落とさない場合の実験値を比較した結果を示す。また Glycerin 50, 80%水溶液については $\alpha=1.22$ の計算値を破線で示してある。各溶液にわたって実験値と $\alpha=1$ とした計算値はよく一致している。これから本実験による流動場を説明するには half Sommerfeld の条件が妥当であることがわかる。

4. 結 言

一方が回転し他方が静止している2ロール間を流れる液体により生じる反発力を測定した。ニュートン流体である水、Glycerin 水溶液についてロール周速度とすきまを変えて実験を行った結果次のことが明らかになった。

(1) 反発力はロール間のすきまが狭くなると大きくなりまた溶液粘度の増加とともに大きくなる。

(2) 使用流体が水でその供給流量が少ないとき、ロール停止状態で流れが重力のみによっている場合あるいはロール回転数が小さい場合、ロールを接近させる方向に力が作用する。

(3) 回転ロール表面に付着している薄い液体膜を強制的に除去すると反発力は減少する。

(4) 本実験で測定された反発力は half Sommerfeld の条件を適用した Cameron の式によく一致する。

本実験装置の製作に際し助力いただいた近野正昭氏(現: 山形大学工学部技官)、ならびに卒業研究として本実験にご支援いただいた渡辺裕己氏に深く感謝の意を表す。

文 献

- (1) Oliver, D. R., Bakhtiyarov, S. I. and Shahidullah, M., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **12**(1983), 269.
- (2) Doremus, P. and Piau, J. M., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **9**(1981), 389.
- (3) Doremus, P. and Piau, J. M., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **13**(1983), 79.
- (4) Sinha, P. and Singh, C., *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, **104**(1982), 168.
- (5) 黒田・荒川, 機論, **50**-459, B(1984), 2854.
- (6) Oliver, D. R. and Ashton, R. C., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **7**(1980), 369.
- (7) 足立, 塗装工学, **21**-8(1986), 367.
- (8) 反町・長谷川, 機論, **58**-547, B(1992), 773.
- (9) Cameron, A., *Basic Lubrication Theory*, (1981), 80-90, John Wiley.