

ロールコーティング時に生ずるしまの間隔と 深さに関する実験的研究*

反町 和 則*¹, 長谷川 富 市*²

Experiment on Wavelength and Depth of Ribbing Generated in Roll Coating

Kazunori SORIMACHI and Tomiichi HASEGAWA

An experiment has been made on ribbing induced on a film coated over a roll surface in coating by means of a two-roll system, one roll rotating and the other fixed. Wavelength and depth of the ribbing are measured by a newly developed technique utilizing an image reflected on the ribbed film surface by a straight bar, and the following are clarified. Non dimensionalized wavelength is correlated with capillary number for Newtonian liquids, but it takes higher values for several viscoelastic liquids used. Viscoelasticity of the liquid has an effect of increasing the depth of ribbing, that is, the depth takes the value of 0.04 mm to 0.1 mm for Newtonian liquids, but 0.07 mm to 0.2 mm for viscoelastic liquids. The wavelength of spatial perturbations generated on the meniscus at the exit of the clearance between the two rolls coincides with the wavelength of the ribbing seen over the roll surface. This means that the perturbation of the liquid generated just after passing through the clearance is carried with rotation of the roll and results in the ribbing over the roll surface.

Key Words: Viscoelastic Fluid, Roll Coating, Ribbing, Lubrication

1. ま え が き

ロールコーティングは、写真フィルム、感光紙、磁気テープなど多くの分野で比較的良好に用いられる操作の一つである。この方式に関しては、多くの研究者がロール表面の液膜の厚さや安定性の問題について報告し、ロール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)~(4)}。

回転する同径の二つのロール系については、Pitts-Greiller⁽⁵⁾、Savage^{(6)~(8)}らが、理論的な塗膜厚さやメニスカス位置について報告し、さらに塗膜面上に現れるしま模様の発生限界の予測をしている。Mill-South⁽⁹⁾らは同径および異径の二つのロール系におけるしまの発生限界に対して実験的にキャピラリ数とロール間のすきまの影響について述べている。またCoyle^{(10)~(12)}も回転方向や速度比を変化させた場合の塗膜面上のしまの状態変化に対する速度比とキャピラリ数の影響について、計算と実験を行っている。これらロールコーティングの従来の研究では、塗膜厚さやしま模様の発生限界に対するものが多い。

しかしながら、製品の外観や品質に重要な影響を与えるしま模様のうち、しま間隔については少数の実験的研究⁽³⁾⁽⁹⁾があるが、しま深さに関する研究は著者らの知る限り行われていない。本研究では、潤滑された2本の同径のロール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、回転側のロールに生ずる液膜のしま間隔としま深さを種々の液体とロールのすきまについて測定する。

記 号

- R : ロール半径
- L : ロール長さ
- v_1 : 回転側ロール周速度
- v_2 : 固定側ロール周速度 = 0
- h : ロール間のすきま
- θ : 液体の温度
- h_d : 液膜上のしま深さ
- h_d^* : 無次元しま深さ = $h_d/(Rh^2)^{1/3}$
- λ_1 : メニスカス間隔
- λ_1^* : 無次元メニスカス間隔 = $\lambda_1/(Rh^2)^{1/3}$
- λ_2 : 液膜上のしま間隔
- λ_2^* : 無次元しま間隔 = $\lambda_2/(Rh^2)^{1/3}$
- Ca : キャピラリ数 = $\eta v/\sigma$

* 原稿受付 平成3年7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。

- η : 粘度
 σ : 表面張力
 v : 平均周速度 $= (v_1 + v_2)/2$
 X : 液膜上の像の横の距離 (波長)
 Y : 液膜上の像の縦の距離 (振幅)

2. 実験方法と装置

実験装置の概略図を図1に、ロール部の詳細図を図2に示す。使用した二つのロールはステンレス製でともに半径 $R=40$ mm, 長さ $L=100$ mm であり, ロール間に 0.1 mm オーダのすきま h を設け, 一方のロールは固定し一方のロールをステッピングモータで回転させる。いま, 回転ロールの上部に適当な粘度の液体を供給すると, 液体はすきま h の上部のくさび形領域にある程度たまり (図2), 一部は回転に伴ってすきま h を通過し, 回転ロール面上に液膜を形成する (残りの液体はロール側面より落下する)。このとき液膜には回転数に応じて, ある間隔と深さのしま模様が生ずる (図2, 3)。

このしまの間隔 λ_2 と深さ h_d (図4) を知るために本実験では, 図3に示すような方法を用いる。つまり真

直な物体 (棒) をロール上部の空間におき, 適当な照明をあてるとロール面上の液膜に棒の像が反射して観察できる。この反射像は, 図7の写真に示すようにしま模様のために正弦波状に変形している (しま模様のない場合には, 像は直線的で変形はみられない)。これを写真撮影し, 正弦波状の反射像の間隔を X , 振幅を Y とすると, X はしま間隔 λ_2 に, Y はしま深さ h_d に関係していると考えられる。しかし, X と λ_2 , Y と h_d のおのおのの関係はロールの曲率などが関係していて数理解析的に求めることが困難と思われるため, ここでは実験的に次のようにして求める。すなわち, 図5に示すようにロール面上に細い糸を適当な間隔で巻き付け, その上にビニール膜をはって模擬的なしまをつくり, その間隔 λ_2 と深さ h_d を接触針によって測定する。さらに, 溶液による実験と同様に棒の反射像を写真撮影し X と Y を求める。その両者から X と λ_2 , Y と h_d の関係を求め, これを検定曲線とする。

ロール間のすきま h の出口部におけるメニスカスの凸部の間隔 λ_1 (図6) は, 図2に示すようにロール下部により鏡の反射を利用してすきまのメニスカス部分を写真撮影し求める。

ロールの周速度 v_1 は $0.041, 0.077, 0.132, 0.254$,

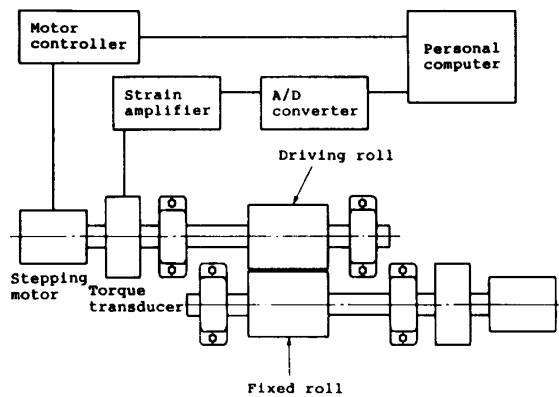


図1 実験装置

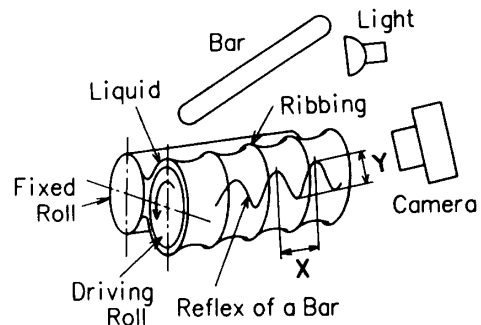


図3 液膜のしまの測定図

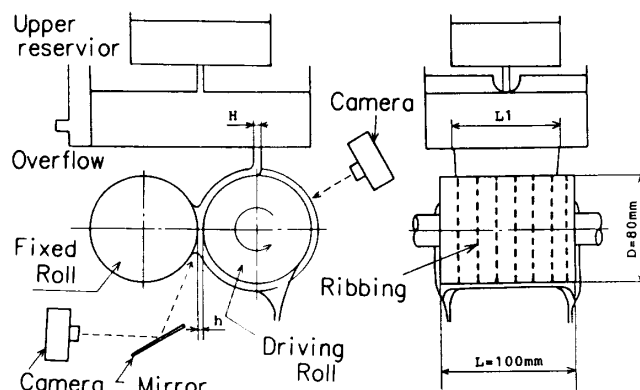


図2 ロール部詳細図

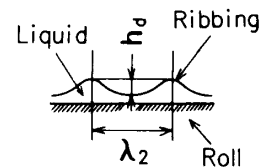


図4 液膜の断面

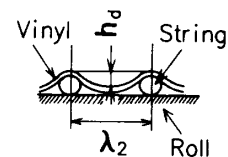


図5 ビニール膜による模擬し

0.384m/sの5種類であり、ロール間のすきま h は、0.1, 0.2 mmの2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。

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 (SYRUP80, 85% : 重量比) であり、粘弾性流体としてグリセリン90%水溶液にポリアクリルアミド (SEPARAN AP 30) を溶かしたものである。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%) も用いた。SEPARAN の分子量は

3 000 000~4 000 000である。使用した流体の一覧表を表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。液体の温度は供給部の温度を測定し、実験結果の検討の際にはこの温度に対する物性値を用いた。

2. 実験結果とその考察

図8に、ひずみ速度を変えて測定したせん断応力の結果を両対数プロットで示す。測定は細管式粘度計によった。図8によれば、せん断応力 τ [Pa] (縦軸) のひずみ速度 γ [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。また濃度が大きくなると粘度も増加し、グリセリン100%の粘度は80%のそれより10倍以上大きい値を示している。

図9にコーンプレート式粘度計を用いて測定したグ

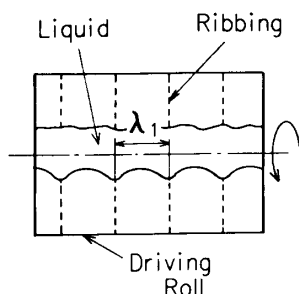
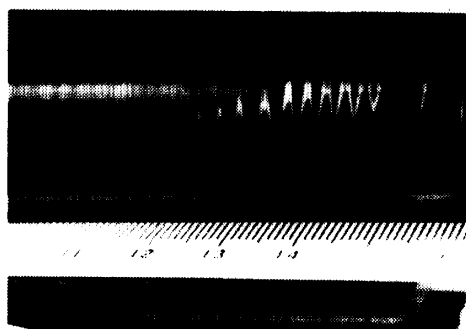
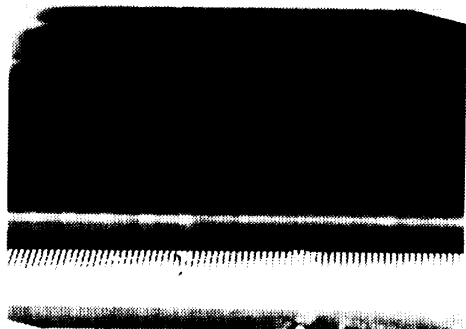


図6 メニスカス間隔 (ロール間のすきまの断面)



(a) グリセリン90%+SEPARAN 100 ppm 溶液の場合 ($v_1=0.384 \text{ m/s}$, $h=0.1 \text{ mm}$)



(b) グリセリン100%溶液の場合 ($v_1=0.384 \text{ m/s}$, $h=0.1 \text{ mm}$)

図7 ロール面上の液膜のしま模様

表1 使用流体

| Liquids Used | | | |
|--------------|----------------------------|---------|-------|
| No | GLYCERIN/SYRUP/WATER ratio | SEPARAN | A P E |
| 1 | 100/ - / 0 | | |
| 2 | 95/ - / 5 | | |
| 3 | 90/ - / 10 | | |
| 4 | 80/ - / 20 | | |
| 5 | 90/ - / 10 | | 1.6% |
| 6 | - / 85 / 15 | | |
| 7 | - / 80 / 20 | | |
| 8 | - / 80 / 20 | | 1.3% |
| 9 | 90/ - / 10 | 100ppm | |
| 10 | 90/ - / 10 | 500ppm | |
| 11 | 90/ - / 10 | 1000ppm | |

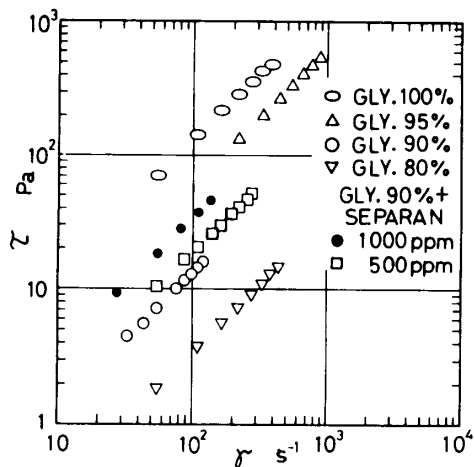


図8 せん断応力 τ とひずみ速度 γ (測定温度 \circ 19°C, \triangle 17°C, \square 26°C ∇ 28°C, \bullet 29°C, \blacksquare 30°C)

リセリン水溶液と水あめ水溶液, グリセリン 90%+SEPARAN 溶液の粘度を示す。縦軸は対数目盛でとった粘度 η [Pa \cdot s] であり, 横軸は温度 θ [°C] である。ひずみ速度は 1.9 s^{-1} である。図 9 によると温度の増加とともに溶液の粘度は減少し, 溶液の濃度の増加とともに粘度は大きくなっている⁽¹³⁾。

図 8 の結果によって使用流体がニュートン粘性を示すことから, 実験結果の検討の際には図 9 のグラフにより温度補正を行った。表面張力についてはデュヌイ型表面張力試験器によって測定した値を用いた。

図 10 にロール上に糸とビニール膜によってつくられた模擬的なしまの間隔 λ_2 と深さ h_d , そのおのおの

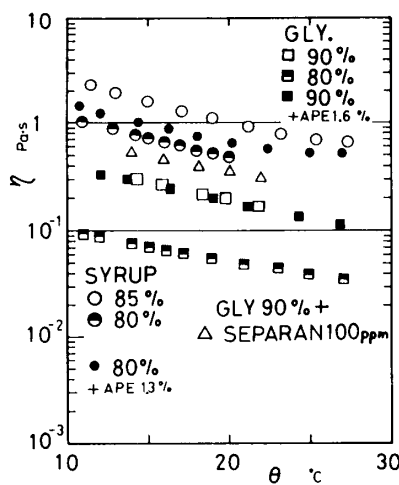


図 9 粘度 η に対する温度 θ の影響

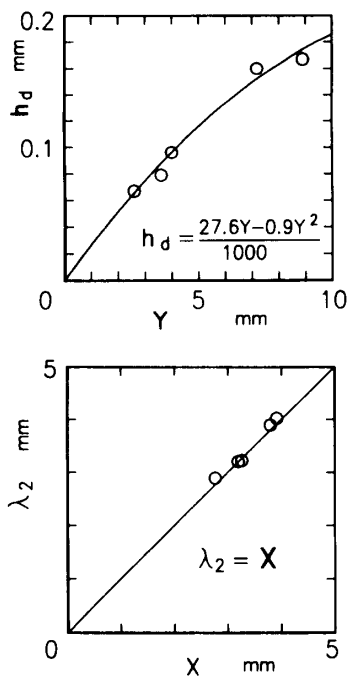


図 10 しま間隔 λ_2 としま深さ h_d の検定曲線

に対応する正弦様反射像の波長 X と振幅 Y との測定結果を示す。データは少ないが図 10 から λ_2 と X はほぼ等しいことがわかる。しかし h_d と Y は比例関係にない。ここでは両者の関係を二次曲線で近似することとし, 図 10 中には最小二乗法で求められた二次曲線が描かれている。上述の図 10 中の実線を X と Y からおのおの λ_2 と h_d を求めるための検定曲線とする。

図 11, 12 に X と Y から検定曲線によって求めた λ_2 と h_d の値を示す。横軸はいずれもロールの周速度 v_1 である。これによれば本実験範囲で λ_2 は 1~8 mm の値をとり全体的に v_1 の増加とともに減少傾向を示す。また, すきま h が大きいほど λ_2 も大きくなっている。一方, h_d の値はグリセリン水溶液では 0.04~0.1 mm 程度であるが, 粘弾性流体である SEPARAN-グリセリン水溶液では 0.07~0.2 mm と増加している。

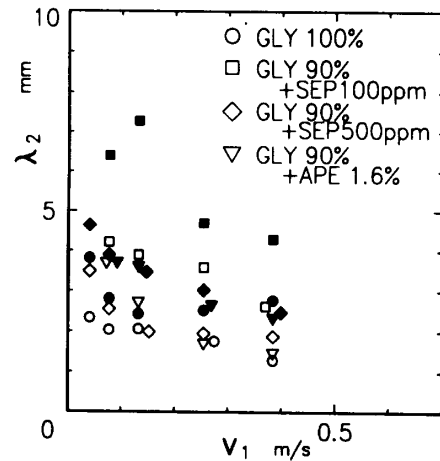


図 11 しま間隔 λ_2 とロール周速度 v_1 (記号○●などはおのおの $h=0.1, 0.2$ mm を表す)

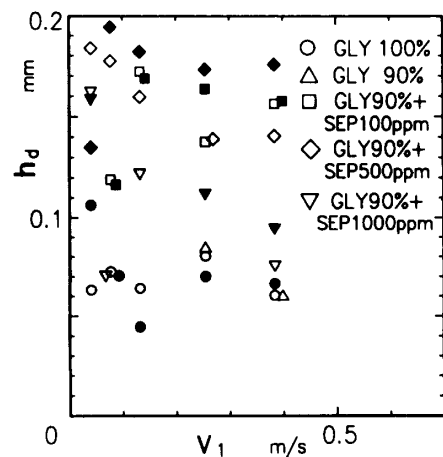


図 12 しま深さ h_d とロール周速度 v_1 (記号○●などはおのおの $h=0.1, 0.2$ mm を表す)

また、 h_a の v_1 に対する変化は λ_2 の場合ほど大きくない。図 11, 12 を通してデータにかなりのばらつきがみられる。ばらつきの原因として、流動に起因するものについてはロール間の流れの不安定によるしま模様の変動、撮影用のライト照射によるロールの温度上昇が考えられ、また測定に関するものについては、ロール面上の反射像がある幅を有していること、特に正弦状反射像の山の部分で反射像に広がりができること（図 7）があげられる。この結果、測定値に 2~3 割程度の誤差が含まれると考えられる。

図 13, 14 には上記のデータを以下のように無次元化し、キャピラリ数 Ca に対してプロットした結果を示す。

$$\lambda_2^* = \lambda_2 / (Rh^2)^{1/3}$$

$$h_a^* = h_a / (Rh^2)^{1/3}$$

$$Ca = \eta v / \sigma$$

$$v = (v_1 + v_2) / 2 = v_1 / 2$$

……………(1)

ただし、 R はロール半径、 η は粘度、 σ は表面張力、 v_1 と v_2 は 2 本のロールの周速度を示す。本実験では v_2 は固定側の速度で零である。

図 13 によると、ニュートン流体の λ_2^* は水あめ 85, 80% 水溶液の数を除いてほぼ Ca 数で整理され、 Ca 数の増加とともに減少傾向を示す。図 13 中にはロール-ロール系でニュートン流体を用いて得られた Mill-South⁽⁹⁾ の実験データを実線 (R-R) で示す。また、平板-ロール系で得られた実験値⁽⁹⁾ についても破線 (R-P) で示す。ロール-ロール系のデータは実験条件が本実験と異なるにもかかわらず本測定値とほぼ一致し、平板-ロール系による λ_2^* も絶対値はやや異なる

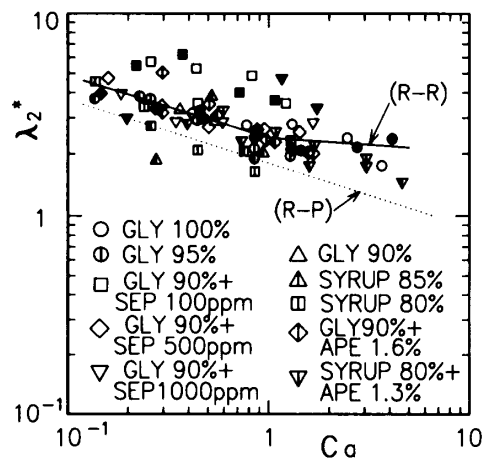


図 13 無次元しま間隔 λ_2^* とキャピラリ数 Ca
(記号○●などはおのおの $h=0.1, 0.2$ mm を表し、
○●などもおのおの $h=0.1, 0.2$ mm を表す)

が本実験結果と似た傾向を示している。また、粘弾性流体の λ_2^* については、グリセリン 90%+SEPARAN 100 ppm の実験値とグリセリン 90%+SEPARAN 1000 ppm の実験値の一部がニュートン流体より大きい。しかし、グリセリン 90%+SEPARAN 500 ppm の実験値とグリセリン 90%+SEPARAN 1000 ppm の実験値の大部分はニュートン流体の値とほぼ等しい。

一方、 h_a^* の結果（図 14）をみると、グリセリン 90%+SEPARAN 100 ppm と 500 ppm の溶液は Ca 数が 0.3 以上ではグリセリン水溶液より高い値を示す。しかし、グリセリン 90%+SEPARAN 1000 ppm 溶液では本実験の Ca 数の範囲でグリセリン水溶液の値と近い値を示す場合もある。このように λ_2^* , h_a^* に対する粘弾性の効果は必ずしも単純ではないが、しま間隔としま深さはともに粘弾性のために増大する場合があることがわかる。

図 15 にはすきま h の出口部におけるメニスカスの凸部の間隔 λ_1 を無次元化した $\lambda_1^* [= \lambda_1 / (Rh^2)^{1/3}]$ の値と、ロール面上の液膜のしまの無次元間隔 λ_2^* の相関を示す。データはばらついているが λ_1^* と λ_2^* はほぼ同じ値をとり、したがって本実験条件の範囲では、すきま出口でメニスカスの凹凸により生成されたしまはロールの回転とともに運ばれ、少なくとも間隔についてはそのまま保持されてロール上の液膜のしまとなっていることがわかる。

以上、一方が停止し他方が回転するロール系について塗膜面上のしまの間隔と深さについて実験を行った。上述のように粘弾性の効果は単純ではないが、従来これに関する実験と理論解析はほとんど行われていない（特にしま深さに関する実験はニュートン流体で

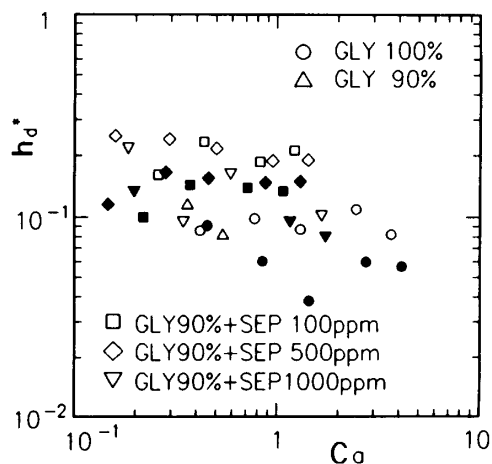


図 14 無次元しま深さ h_a^* とキャピラリ数 Ca
(記号○●などはおのおの $h=0.1, 0.2$ mm を表す)

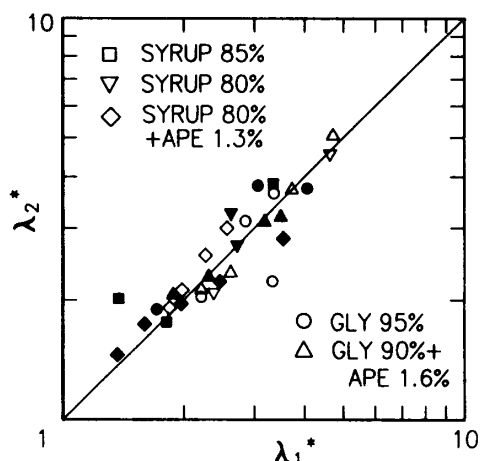


図 15 メニスカス間隔 λ_1^* としま間隔 λ_2^*
(記号○●などはおのおの $h=0.1, 0.2$ mm を表す)

も行われていない)ので、今後は実験条件や溶液種類を変えて実験を行い、さらに数値解析を含めた理論解析を行うことにより現象の解明を行う必要がある。

4. 結 論

ロールコーティング時に生ずる塗膜のしま模様についてしまの間隔と深さを真直物体の反射像を利用する新しい方法により測定し、以下の結論を得た。

(1) 無次元化したしまの間隔は、ニュートン流体ではキャピラリ数でほぼ整理できるが、粘弾性流体ではニュートン流体の値より大きい場合がある。

(2) 本実験で得られたしまの深さは、ニュートン流体では $0.04 \sim 0.1$ mm であるが、粘弾性流体では

$0.07 \sim 0.2$ mm であり、粘弾性により深さが増加する傾向がある。

(3) 液体のすきま通過直後の液面(メニスカス)にみられる空間的擾動の周期(波長)は、ロール面上の液膜のしまの間隔とほぼ一致した。これは、本実験条件の範囲ではすきま通過直後に形成されたしまが、間隔一定のままロールの回転とともに運ばれ、ロール面上の液膜のしまとなることを示唆する。

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高野正弘氏、新鞍知樹氏、岡本暢彦氏、田井中博一氏ならびに当時の学生諸氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Babchin, A. J., Clish, R. J. and Wahren, D., *Adv. Colloid Interface Sci.*, **14**(1981), 251.
- (2) Benkreira, H., Edwards, M. F. and Wilkinson, W. L., *Chem. Eng. Sci.*, **36**(1981), 429.
- (3) 足立, 塗装工学, **21**-8(1986), 367.
- (4) 竹村・足立・中村, 化学工学講演要旨集, **20**(1987), 289.
- (5) Pitts, E. and Greiller, J., *J. Fluid Mech.*, **11**(1961), 33.
- (6) Savage, M. D., *J. Fluid Mech.*, **80**(1977), 743.
- (7) Savage, M. D., *J. Fluid Mech.*, **80**(1977), 757.
- (8) Savage, M. D., *AICHE J.*, **30**-6(1984), 999.
- (9) Mill, C. C. and South, G. R., *J. Fluid Mech.*, **28**(1967), 523.
- (10) Coyle, D. J., Macosko, C. W. and Scriven, L. E., *AICHE J.*, **36**-2(1990), 161.
- (11) Coyle, D. J., Macosko, C. W. and Scriven, L. E., *J. Fluid Mech.*, **216**(1990), 437.
- (12) Coyle, D. J., Macosko, C. W. and Scriven, L. E., *J. Rheol.*, **3**-5(1990), 615.
- (13) 反町・長谷川, 機論, **57**-542, B(1991), 3408.