

### 3 ロールコーター可視化実験による液膜外観評価

## Visualization Study of Liquid Surface Stability for Full Reverse 3-Roll Coater with Rigid Gravure Roll

小林 弘和 KOBAYASHI Hirokazu JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副課長)  
佐々木成人 SASAKI Masato JFE スチール スチール研究所 機械研究部 主任研究員 (課長)

#### 要旨

製品外観の安定化・美麗化はものづくりを行う上で重要であり、鋼板へのコーティング外観も例外ではない。一方で薄膜化や高速化による製造コスト削減の要求もある。ロール表面に小さな凹凸(セル)を加工したグラビアロールを用いるリバース回転方式のロールコーターはセルからの一定量の液の転写が行えるため、高速での薄膜塗布に関してフラットロールを用いる方式より有利である。しかしグラビアロールは、ロール間の液メニスカスの流れが複雑となり、これまで系統的な研究が行われていない。本研究では、ロール周速及び塗布液物性を変更したコーティング液膜外観の可視化実験を行い、3ロールコーターの外観安定条件を明らかにした。

#### Abstract:

A reverse gravure roll system has a capability coating a thin layer film at high line speed easier than a flat roll coating system because only the liquid entering the gravure cell is transferred to the next roll or substrate. However, the existence of the gravure cell complicates the flow between the rolls. To our knowledge, no systematic study in the literature has explored this condition in depth. In the present study, the flow between a reverse deformable roll and a solid stainless steel gravure roll is visualized in order to determine how the uniformity of coating in the high roll speed region is affected by operating parameters: the speed ratio between the rolls and the properties of the coating liquid. The range for coating uniformity is compared with the case of a gap control system. The results show that the stable region can be expanded by using the reverse gravure roll system.

#### 1. はじめに

コーティング方式には、ロールコーター、カーテンコーター、スロットコーター、スライドコーター、ナイフコーターといった様々な手法がある。その中でも鋼板へのコーティングには、ロール方式がよく利用される。これは薄鋼板の製造ラインでは、基材の厚みやライン速度が頻繁に切り替わるため、スロットやカーテン方式では塗布量の切り替えを安定的に行うことが難しいこと、鋼板とスロット先端とのギャップを制御することが難しいことに起因する。

ロールコーターの例として、**図1**に3ロールコーターの模式図を示す。各ロールは接触する位置において、逆方向に回転するリバース方式である。剛体のピックアップロール(PR)が塗布液をくみ上げ、メーターリングロール(MR)が余剰な液を掻き落とし液量の調整を行う。MRとPR間には隙間(ギャップ)や押し付け圧(ニップ圧)により調整を行う。アプリケーションロール(AR)は弾性体ロールであり、コーティング液を鋼板へと転写する。

コーティングプロセスにおいて、重要なポイントは付着量と外観の制御である。付着量は皮膜の要求性能によって決定され、液濃度や塗布する液膜厚みによって調整される。しかし不適切な条件で塗布を行うと外観欠陥が発生する。**図2**にリビングと呼ばれるロールコーターでよく見られるスジ状の外観欠陥例を示す。

ロールが接触する位置において同じ方向に回転するフォワードロールコーターの外観安定条件は、従来の研究で明らかになっている。Benkreira<sup>1)</sup>、Ruschak<sup>2,3)</sup>、Coyle<sup>4)</sup>、CarvalhoとScriven<sup>5)</sup>らは、キャピラリー数(Ca数)とロール間ギャップとロール径の比により、フォワードロールコーターの安定条件が評価できることを示している。しかし残念ながら、鉄鋼プロセスにおける一般的なライン速度では、ほとんどがリビング発生条件となってしまう。

一方、リバースロールコーターでは、高いCa数においても外観安定条件が存在するため、高速コーティングにおいて広く利用されている。リバースロールの安定条件については、Coyle<sup>6)</sup>が主にロールギャップの影響に着目して検証を行っている。しかしながら弾性体ロールに剛体のグラビアロールを押し付ける3ロールコーターの安定条件について

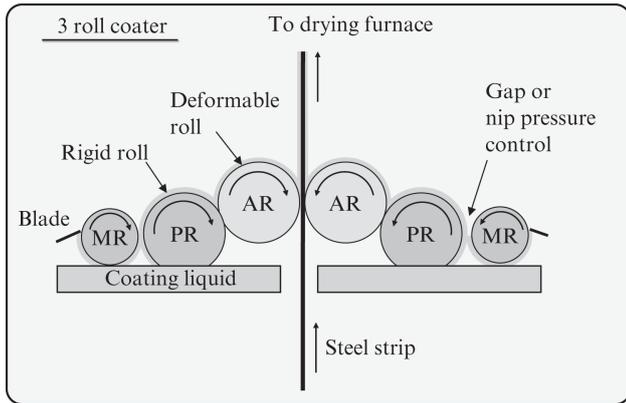


図1 フルリバース3ロールコーター  
Fig. 1 Sketch of reverse 3-roll coater

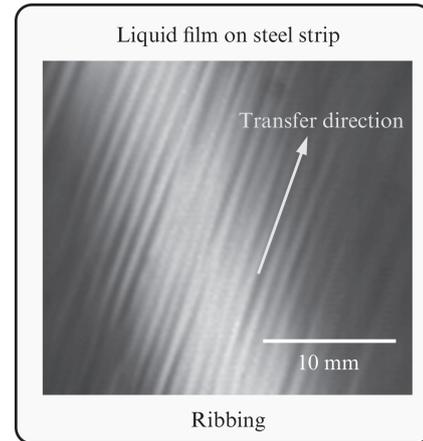


図2 外観欠陥例 (リビング)  
Fig. 2 Example of appearance defect

は、十分に理解されていない。

グラビアロールからの液の転写に関して、Hanumanthu と Scriven<sup>7)</sup>, Pulkrabek と Munter<sup>8)</sup>, Hoda と Kumar<sup>9)</sup>, Dodds<sup>10)</sup> らは、実験観察やシミュレーションにより現象を定性的に検証している。しかし鋼板の実製造プロセスにおいて、液物性を含めた定量的な操業条件を決定するための系統的な研究は行われていない。本研究では、これらを明確にすることを目的として、塗布液の物性および方式を変更したロールコーティング実験を行い、液膜の安定条件を評価した。

## 2. 実験条件と方法

剛体グラビアロールに弾性体ロールの押し付けを行う3ロールコーターに関して、塗布後液膜の外観安定条件を明確にするため、回転するループ状の鋼帯への塗布実験を実施した。実験装置の概略を図3に示す。また実験条件を表1に示す。実験装置は、3ロールコーターとループ状の鋼帯を

回転させるドライブユニットから構成される。ドライブユニットはバックアップロール (BR), ステアリングロール (SR), テンションロール (TR) から構成され、BRとTRは自由回転ロールである。張力は  $1.0 \text{ kg/mm}^2$  で調整し、鋼帯には厚さ  $0.2 \text{ mm}$  の錫めっき鋼板を使用した。ライン速度は  $100 \sim 300 \text{ m/min}$  の範囲で設定した。ARとMRは鉄芯にウレタンゴムを巻き付けた弾性体ロールを使用した。PRは剛体のグラビアロールである。グラビアロールにはV字形の溝を斜線状に加工したものをを用いた。グループの間隔は  $254 \mu\text{m}$ , 溝深さは  $70 \mu\text{m}$  である。MRとPR間はニップ圧

表1 実験基材と塗布液とロールの仕様

Table 1 Specifications of strip, solutions, and rolls

Strip specification	Tin plate steel, W300×t0.2 (mm)
Coating liquid	Newtonian fluid
Roll specification	Diameter: 250 mm, Width: 250 mm
Pickup roll specification	Rigid roll (flat roll or gravure roll)

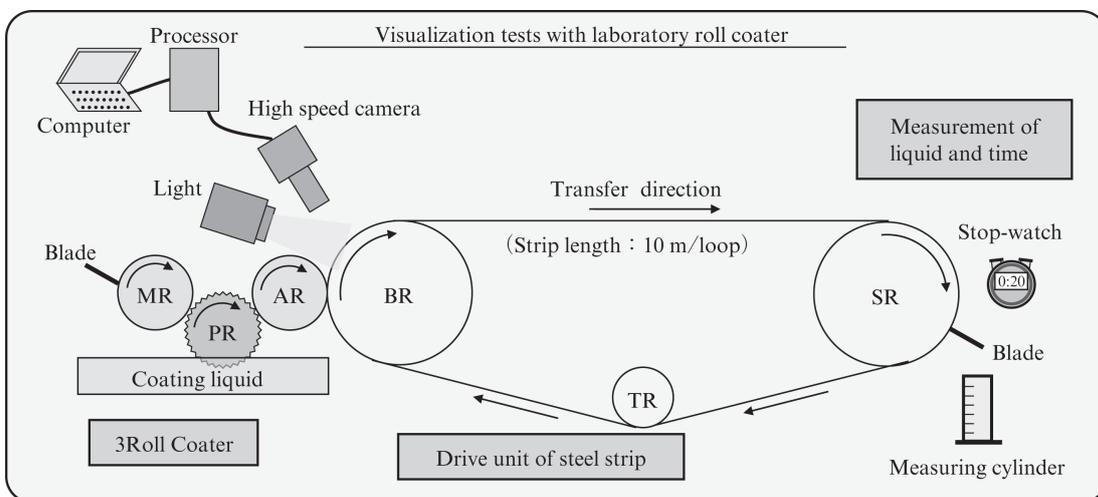


図3 実験装置概略  
Fig. 3 Sketch of experimental set-up

で制御され、制御範囲は5~10 kgfとした。鋼帯に塗布する液膜厚みは、ニップ圧とロール周速によって調整できる。PRとAR間のニップ圧は15 kgf、ARと鋼板間のニップ圧は20 kgfに設定した。

また別条件として、MRとPRに剛体のフラットロールを用いた実験も実施した。その場合、MRとPR間はギャップで制御され、60~100  $\mu\text{m}$ の間で調整した。液膜厚みは、ロール間ギャップとロール周速により調整される。ゴムロールは全て同一仕様で、ゴム厚みは30 mm、ゴム硬度はショアA硬度で55度である。

液膜厚みは、SRに設置したブレードにより掻き落とした液の流量と計測時間から換算した。塗布液として使用した液は、全て水系溶液でニュートン流体である。表面張力は31~45 mN/m、粘性係数は1.0~2.7 mPasの範囲で調整した。液物性の調整は、水溶液中の固形分比率の変更により行った。固形分比率は、3.5~7.0%で調整した。

液膜の外観観察には、高速度カメラ (Photron Fast Cam MAX) を使用した。カメラには所望の倍率が得られる光学レンズを用い、視野上で液膜を可視化できるよう照明の角度を調整した。高速度カメラは、2000 フレーム/秒で撮影を行った。

### 3. 実験結果と考察

液膜外観へのMR周速の影響を検証する実験を実施した。AR周速 ( $V_{AR}$ ) と鋼板速度 ( $V_{LS}$ ) の比は1.0、液膜厚みは7  $\mu\text{m}$  と9  $\mu\text{m}$  である。PRをフラットロールまたはグラビア

ロールとした条件における鋼板上の液膜外観を図4に示す。

液膜外観は、フラットロール方式 (ギャップ制御) と比較してグラビア方式 (ニップ圧制御) の方が良好であった。またギャップ制御方式では、PR周速 ( $V_{PR}$ ) に対しMR周速 ( $V_{MR}$ ) の遅い条件で太いスジ模様 (リビング) が発生した。これはMRとPR間の液メニスカスの振動によるものと推定できる。ギャップ制御方式では、 $V_{MR}/V_{PR}$  が小さい条件ほどリビングが発生しやすく、大きい条件ほど液膜は安定へと向かうことが知られている<sup>6)</sup>。一方、グラビアロールでは  $V_{MR}/V_{PR}$  が小さい条件においても液膜外観は均一であった。これはグラビアロールとニップ圧制御を用いることで、MRとPR間の液メニスカスが安定化したことが原因である。実際、ニップ圧制御方式において  $V_{MR}$  は液膜外観に全く影響しなかった。これはグラビアセルに入った液のみが転写されていることに起因しており、グラビアロール方式がより均一な液膜を塗布できることを示した。

またグラビアセルの容積に対する鋼板上への塗布液の転写率は約0.4であった。PRからARへの液の転写に関して、MRで掻き落とされた後、つまりグラビアセルが完全に液で満たされていない状態のため、PRからARへの転写率は0.4以上であったといえる。

フォワード回転コーターでは、Carvalhoら<sup>5)</sup>により弾性体ロール、剛体ロールの両方でリビングの臨界点が比較されている。ロール間ギャップの狭い条件では、弾性体ロールの臨界Ca数は、剛体ロールより高くなる。したがって弾性体ロールでは、より速いライン速度において剛体ロールより美しい外観が得られる。本研究はリバース回転方式であ

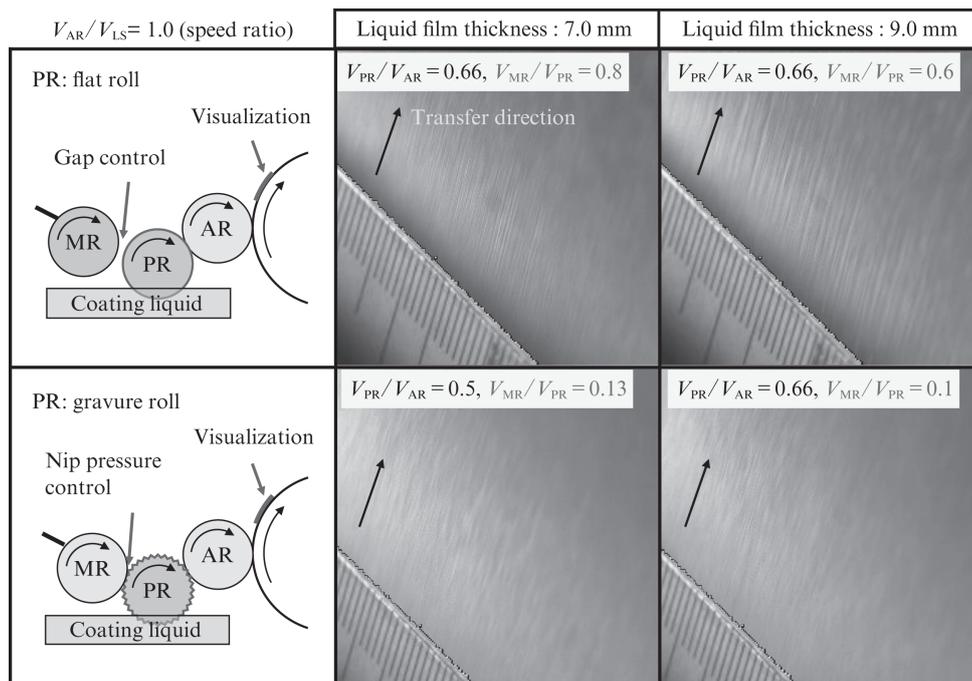


図4 液膜外観 (高速度カメラ画像)

Fig. 4 High speed camera pictures in case of flat and gravure roll condition

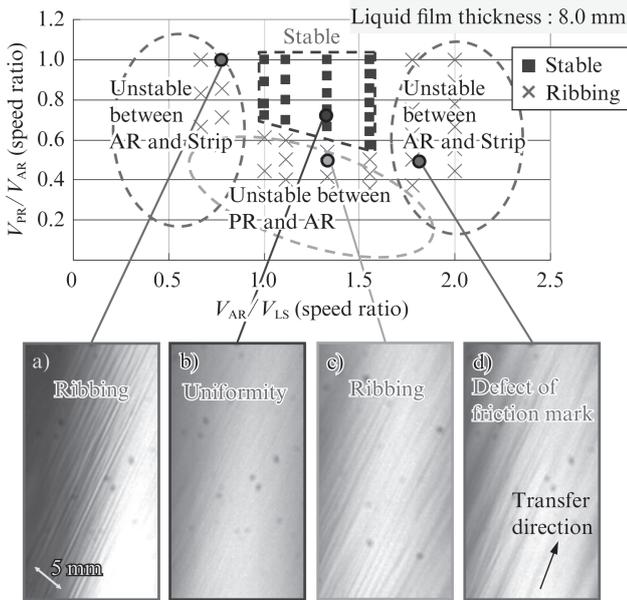


図5 コーティング安定条件と液膜外観

Fig. 5 Stability diagram and liquid surface on strip

るが、グラビアロールという点だけではなく、弾性体ロール（ロール間のギャップが負）という点も液膜の安定化に影響した可能性が示唆される。

図5にリバースグラビアロール方式における外観安定範囲と液膜外観を示す。塗布液の粘性係数は1.0 mPas、表面張力は45 mN/mである。液膜厚みは8 $\mu$ m一定とした。コーティング外観の安定条件はロール周速比により整理することができ、 $V_{AR}$ と $V_{PR}$ が速い条件で安定領域は拡大した。不安定条件として、ロール間の液メニスカス圧力が液側から表面側に増加した場合、液膜は不安定になる。リバースロールにおいてロール周速比が増加すると、この圧力勾配が表面から液側に増加する。この結果、メニスカスは安定へ向かうため、 $V_{AR}$ と $V_{PR}$ の増加は安定領域拡大に寄与したと説明できる。ロール周速比が安定領域にある場合、図5下側b)のように液膜は均一な外観となる。しかし $V_{PR}$ が $V_{AR}$

に対し低下すると、図5下側c)に示すようにARとPR間のメニスカス振動によりスジ状のリビングが発生する。 $V_{AR}$ がライン速度に対し低下した場合、図5下側左a)に示すようにARと鋼板間でリビングが発生する。また $V_{AR}$ がより速い条件では、図5の下側右d)に示す擦れ状模様の外観欠陥が発生した。これはARの回転力によりARと鋼板間の液メニスカスの流れが乱流状態となっていることが原因と考えられる。一方、スジ状の欠陥であるリビングの見られる条件では、液メニスカスは層流に近いと考えられる。これらの結果から、リバースグラビアロール方式において、液膜外観の安定化にはロール周速を適正化する必要があることがわかった。

図6にグラビアロール方式におけるAR上の液膜外観を示す。AR周速とライン速度の比は1.0、液膜厚みは10 $\mu$ mである。この実験では、3種類の塗布液を用いた。図7に各液物性の関係を、表2に各液物性の数値を示す。液1は低粘度で高表面張力、液3は高粘度で低表面張力、液2はその中間程度である。図6からロール周速と粘性係数、表面張力が液膜の均一性に影響していることがわかる。コーティング外観は、粘性係数が低いほど、表面張力が高いほど改善する。メニスカスへの粘性力と表面張力の影響を表す無次元数としてキャピラリー数( $Ca = \mu V_{AR} / \sigma$ )がある。ここで $\mu$ は粘性係数 $\sigma$ は表面張力、 $V_{AR}$ はAR周速を示す。 $Ca$ 数が小さいということは、粘性力に対し表面張力が支配的であることを示す。表面張力は液膜界面の安定に寄与しており、低 $Ca$ 数ではより均一な液膜となる。また $V_{PR}$ が速い場合、リビングの縞模様が減少している。これは前に説明した液メニスカスの圧力勾配の影響による。実験結果は、 $V_{PR}$ の増加と $Ca$ 数の低減が、リバース3ロールコーターの安定領域拡大に寄与することを示している。これら結果から液物性とロール周速が液膜安定性に与える影響が明らかになった。

図8に3種類の塗布液について鋼板上への塗布量の相関を示す。図中のプロットは実験値で、線は各塗布液について線形近似した結果である。○で囲まれたプロットは図6右

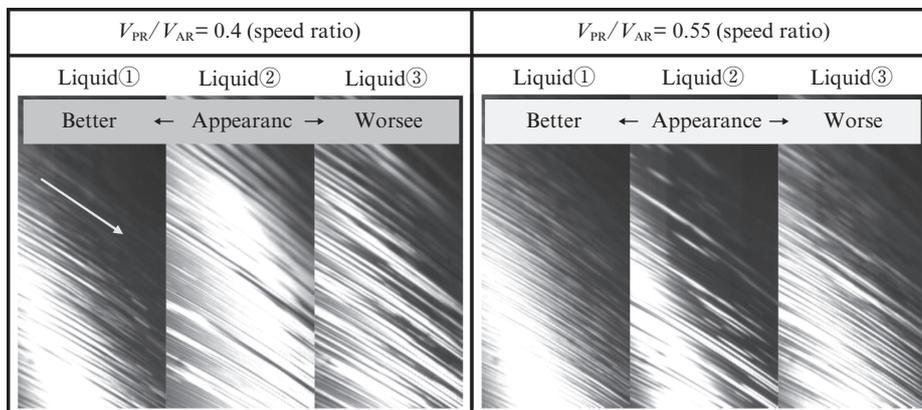


図6 AR上の液膜外観（高速度カメラ）

Fig. 6 High speed camera pictures of liquid surface on applicator roll

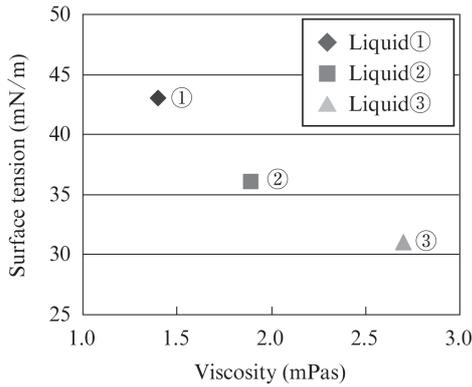


図7 コーティング液物性

Fig. 7 Properties of coating liquids

表2 塗布液の物性値

Table 2 Properties of coating liquids

Type	Non-volatile (%)	Viscosity (mPa · s)	Surface tension (mN/m)	$\mu/\sigma$ (-)
Liquid ①	5	1.4	43	1
Liquid ②	6	1.9	36	1.6
Liquid ③	7	2.7	31	2.7

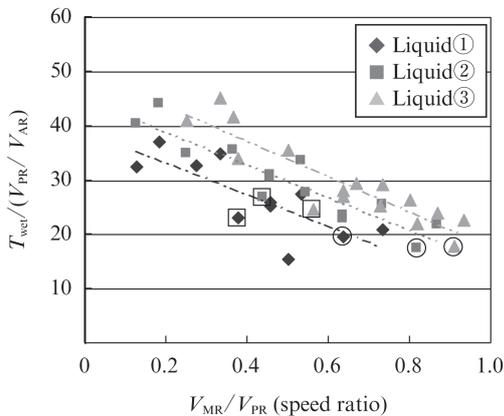


図8 ロール周速比と鋼板上の液膜厚みの関係

Fig. 8 Relationship between roll speed ratio and liquid film thickness on the strip ( $T_{wet}$ : wet thickness on the strip)

側の条件, □で囲まれたプロットは図6左側の条件を示す。横軸はMRとPRの周速比であり,これは塗布液の掻き揚げ量と掻き落とし力の相関を表している。縦軸は鋼板上の液膜厚み  $T_{wet}$  と  $V_{PR}/V_{AR}$  との比であり,これはPRからARに転写される液量の相関を表している。ARと鋼板の速度比は1.0である。塗布液の汲み上げ量に対する掻き落とし力 ( $V_{MR}/V_{PR}$ ) の増加に伴い,液転写量 ( $T_{wet}/(V_{PR}/V_{AR})$ ) が減少する関係にあることがわかる。更に液物性の影響について,高粘性係数で低表面張力の場合,液転写量が増加する傾向にあることがわかった。セルに残存する液量とCa数の関係は,YinとKumar<sup>11)</sup>,HodaとKumar<sup>9)</sup>によって検証さ

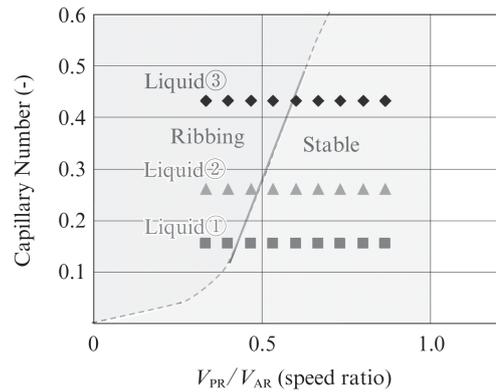


図9 外観安定 Ca 数と実験条件

Fig. 9 Stability diagram for Ca number and experimental condition

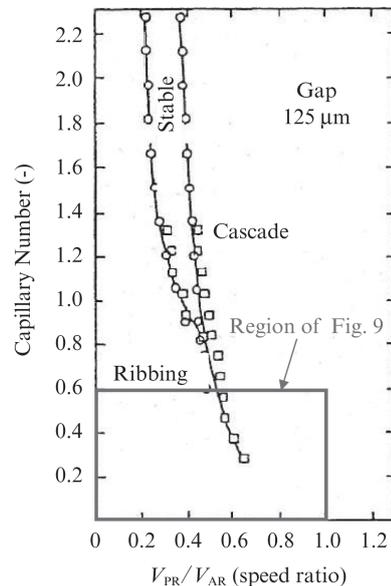


図10 ギャップ制御フラットロール方式の安定条件

Fig. 10 Stability diagram for Gap control coater with flat roll<sup>6)</sup>

れており, Ca 数の増加に伴いセルに残存する液量は増加する。これら研究報告から,高粘性係数,低表面張力(Ca数増加)において,MRで掻き落とされた後のグラビアセル内に残った液量は増加していると考えられる。そのためPRからARへの液転写量がCa数増加に伴い増加したと考えられる。この結果は,PRからARへの液転写量は,PRセルに入っている初期液量の影響を強く受けることを示唆している。

実験で得られたグラビアロールの外観安定条件を図9に示す。プロットは実験条件である。安定領域は,  $V_{PR}/V_{AR}$  が小さいほど, Ca 数が増加するほど狭くなる。しかし  $V_{PR}/V_{AR}$  が大きい領域では,安定領域が存在した。均一塗布にはPR周速の増加が必要であり,その安定領域はCa数とロール周速比で整理できることがわかった。

次にリバースロールコーターにおいて,フラットロールを用いたギャップ制御方式の外観安定領域<sup>6)</sup>を図10に示す。

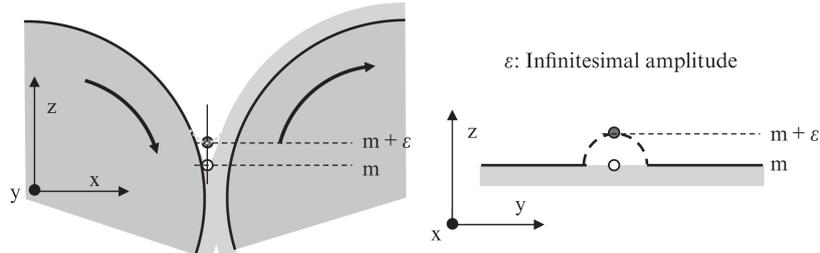


図 11 フラットロール間の液メニスカスイメージ

Fig. 11 Sketch of meniscus for gap control coater with flat roll

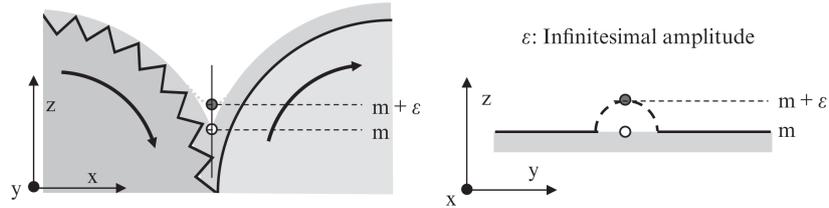


図 12 グラビアロールの液メニスカスイメージ

Fig. 12 Sketch of meniscus for nip pressure control coater with gravure roll

本研究の実験範囲 (図 9) において、ギャップ制御方式では、ほとんどがリビングまたはカスケード欠陥の条件となる。しかしながらニップ圧制御のグラビアロール方式であれば、安定条件が存在した。ニップ圧制御方式の外観安定領域は、低 Ca 数においてギャップ制御方式より大きい。加えて高い  $V_{PR}/V_{AR}$  比においてもカスケード欠陥の発生は見られなかった。これらの結果は、グラビアロールの使用により外観安定領域が拡大することを示している。

理由については、ロール間の液メニスカスにおける微小な振動を考察することで解釈できる。図 11 にフラットロール間の液メニスカス模式図を、図 12 に剛体のグラビアロールと弾性体ロール間のメニスカスの模式図を示す。ここで  $x$  は水平方向、 $y$  はロール幅方向、 $z$  は重力方向の座標、 $m$  はメニスカスの位置、 $\epsilon$  は微小変位を示す。メニスカスにおける圧力境界条件は、次式で表せる<sup>12)</sup>。

$$P_m + \frac{\sigma}{r_m} = P_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $P_m$ ,  $P_0$ ,  $\sigma$ ,  $r_m$  は、それぞれメニスカスの圧力、雰囲気圧力、塗布液の表面張力、メニスカスの曲率半径である。微小変位はメニスカスの振動によって生じ、この振動がリビングのスジ状欠陥となって現れる。メニスカスの位置が  $\epsilon$  動いた場合、 $z$  方向の力のつり合いは次式で表現できる。

$$F_z = P_{m+\epsilon} + \frac{\sigma}{r_{m+\epsilon}} - P \quad \dots\dots\dots (2)$$

$z=m$  の点で展開して線形化すると次式が成立する。

$$P_{m+\epsilon} = P_m + \epsilon \frac{dP}{dz} + O(\epsilon^2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{1}{r_{m+\epsilon}} = \frac{1}{r_m} - \frac{\epsilon}{r_m^2} \frac{dr}{dz} + O(\epsilon^2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

従って (1) 式を用いると (2) 式は次のようになる。

$$F_z = \epsilon \left( \frac{dP}{dz} - \frac{\sigma}{r_m^2} \frac{dr}{dz} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

もし  $F_z > 0$  の場合、攪乱は大きくなり、不安定条件として次式が成立する。

$$\frac{dP}{dz} > \frac{\sigma}{r^2} \frac{dr}{dz} \quad \dots\dots\dots (6)$$

もしメニスカスが攪乱に対し安定であるなら、 $m+\epsilon$  は  $m$  に戻る。その場合、 $F_z$  は負でなければならず、表面張力が高く、曲率半径が小さいほど安定となる。液の表面張力は変化しないため、外観安定化に対して曲率半径が変化したと考えられる。つまり図 12 のニップ圧制御のグラビアロール方式では、図 11 のギャップ制御コーターと比較し、ロール間液メニスカスの曲率半径が小さくなることによって、外観安定領域が拡大したと解釈できる。

#### 4. おわりに

リバースグラビアロールコーターにおいて、液膜外観の安定条件を検証するため、ロールコーター装置を用いた液膜外観の可視化実験を実施し、均一塗布へのロール周速およ

び塗布液物性の影響を明らかにした。

PRに剛体グラビアロールを用いたニップ圧制御方式において、MR周速はリビングに影響しないことがわかった。また均一塗布に適したロール周速を明らかにし、その安定領域がCa数とPR/AR周速比で表現できることを示した。

またニップ圧制御のグラビアロール方式において、ギャップ制御のフラットロール方式と比較して、外観安定領域が拡大することがわかった。これはグラビアロール方式において、剛体PRと弾性体AR間のメニスカスの曲率半径が小さくなることが理由と考えられる。

#### 参考文献

- 1) Benkreira, H.; Edwards, MF.; Wilkinson, WL. Ribbing Instability in the Roll Coating of Newtonian Fluids. *Plast. Rubber Proc. Appl.* 1982, vol. 2, p. 137-144.
- 2) Ruschak, KJ. Boundary Conditions at a Liquid/Air Interface in Lubrication Flows. *J. Fluid Mech.* 1982, vol. 119, p. 107-120.
- 3) Ruschak, KJ. Coating Flows. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1985, vol. 17, p. 65-89.
- 4) Coyle, DJ. Roll Coating Flows 2: The Ribbing Instability. *Ind. Coat. Res.* 1992, vol. 2, p. 33-45.
- 5) Carvalho, MS.; Scriven, LE. Deformable Roll Coating Flows: Steady State and Linear Perturbation Analysis. *J. Fluid Mech.* 1997, vol. 339, p. 143-172.
- 6) Coyle, DJ.; Macosko, CW.; Scriven, LE. The Fluid Dynamics of Reverse Roll Coating. *AIChE J.* 1990, vol. 36 (2), p. 161-174.
- 7) Hanumanthu, R.; Scriven, LE. Coating with Patterned Rolls and Rods. *Tappi J.* 1996, vol. 79, p. 126-138.
- 8) Pulkrabek, WW.; Munter, JD. Knurl Roll Design for Stable Rotogravure Coating. *Chem. Eng. Sci.* 1983, vol. 38 (8), p. 1309-1314.
- 9) Hoda, N.; Kumar, S. Boundary Integral Simulations of Liquid Emptying from a Model Gravure Cell. *Phys. Fluid.* 2008, 20 092106.
- 10) Dodds, S.; Carvalho, MS.; Kumar, S. The Dynamics of Three-Dimensional Liquid Bridges with Pinned and Moving Contact Lines. *J. Fluid Mech.* 2012, vol. 707, p. 521-540.
- 11) Yin, X.; Kumar, S. Flow Visualization of the Liquid-Emptying Process in Scaled-up Gravure Grooves and Cells. *Chem. Eng. Sci.* 2006, vol. 61, p. 1146-1156.
- 12) Savage, MD. Meniscus Instability and Ribbing. *Ind. Coat. Res.* 1992, vol. 2, p. 47-58.



小林 弘和



佐々木 成人