

高精度薄膜多層塗布技術開発

スライドビード塗布での動的接液線の可視化と数値解析

“Thin Multi-layer Coatings in a Single Path”

— Visualization and Numerical Study of Dynamic Contact Line on Slide-Bead Coatings —

宮川 一郎*
Miyagawa, Ichiro

山本 裕一*
Yamamoto, Yuichi

A Slide-bead coating is a typical method on multi-layer thin film coating. Usually, to optimize coating process, it is important to understand behavior of the bead, especially of the dynamic contact line (DCL). DCL is the wetting line. We observe the DCL directly with the optical method and numerical studies are carried out to discuss the pressure distribution in the neighborhood of DCL. Position of DCL depends on coating speed. To make it clear, we calculate both flow of coating material at the bead and air flow under the bead. At the region near the DCL, both flows cause quick pressure changes. So, actual vacuum pressure is different between near the DCL and the other. Furthermore, we discuss how DCL is determined by pressure balance along the bottom free surface of the bead.

1 まえがき

写真感光材料は、機能の異なる数多くの層を同時に高品質で塗布することが要求され、塗布で最も重要となるのが、塗布装置リップ先端と支持体のクリアランスにできる液の架橋部、ビードであり、高品質で安定な塗布を行うためには、ビードを如何に安定に保持できるかが問題となる。

高生産性を得るために塗布速度が速くなり、要求される品質が更に厳しくなるにつれて、ビードを安定に保つことは更に難しくなる。その中でウェブの空気同伴現象や、支持体と塗布液の濡れに起因する界面化学現象は、塗りやすい支持体、塗布液、故障のない塗布条件を確立するために非常に重要となる。

特に、塗布液が支持体に初めて接触する場所は動的接触線（接液線）と呼ばれ、気液固の移動境界が存在し、最終的に同伴されてきた空気が塗布液に置き換えられる場所である。したがって、高速化に伴いウェブに同伴される空気がこの境界をより乱し、塗布故障を引き起こし、最悪の場合はビードを破壊し、塗布が不能となる。

本稿では、塗布の高速化、安定化のために、動的接触線の挙動について、代表的な塗布方式であるスライドビード型の塗布装置における同伴空気の影響に着目し解析した結果について報告する。

2 ビード部概要

Fig.1にスライドビード塗布方法の概要を示す。スライド面で積層された塗布液はウェブに塗布される。通常、ビ

* 感光材生産本部 生産技術センター

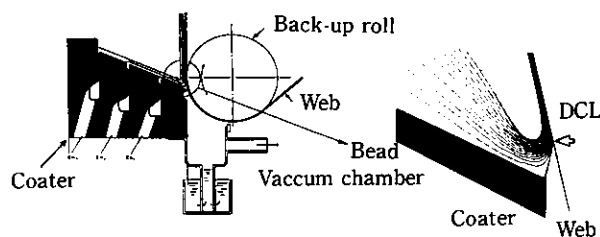


Fig.1 Schematic diagram of slide bead coating

ード部を安定に保つためにビード下部は減圧に保たれる。ビード部は、上側と下側を自由境界に囲まれた液溜りを形成し、ウェブにより液は急激な引き延ばしを受ける。その中でも接液部は気液固の移動境界を形成しており、また、ウェブに同伴された空気が最終的に掻き落とされる場所であり、接液部の挙動は複雑で、安定な塗布を行うためには接液を安定に保つことが必要といえる。

特に、高速度の塗布に対応するためには、同伴空気の影響が大きくなり接液の位置が上がり、塗布故障を発生させる原因となる。

そこで、塗布速度変化に対する接液位置の変化に着目し、可視化により接液の位置、ビード下部形状の測定を行うと共に、数値解析によりビード下部の圧力バランスを、同伴空気により発生する圧力と塗布液流れにより発生する圧力に分けて検討を行った。

3 可視化によるビード形状の測定

ウェブの裏側よりCCDカメラを用いてビード部を直接撮影することにより、ビード部形状を観察した。

塗布膜厚を一定にしたとき、塗布速度によってビード

下部形状の変化を接液位置の変化で表した結果をFig.2に示す。塗布速度が遅い場合は単純に速度の増加につれて、接液位置は上がっていくが、80m/min以上になると逆に下がってくる。すなわち、接液位置は、塗布速度増加に対し単純に増加ではなく、極値を持つ場合があることがわかる。

更に、実際にビード下部の曲率を観察したところ、今回の測定条件ではほぼ直線状になっており、また、ビード下部での塗布液の表面張力を変化させても接液位置、形状は変化せず、ビード下部形状が表面張力の影響を受けていないことを示している。

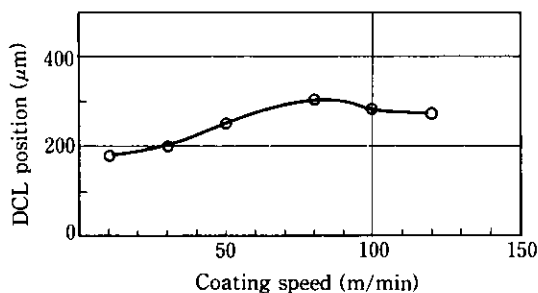


Fig.2 Relationship between coating speed and DCL

4 ビード部圧力バランスの検討

ビード部で発生する圧力は、塗布液流れで発生する圧力Pf、同伴空気流れで発生する圧力Pa、ビード下部減圧Pv、ビード下部表面張力による圧力Psが考えられるが、今回はPvは一定として取扱、Psは3の結果よりPs=0とした。そこで、Pf、Paについて数値解析を行った。

4.1 同伴空気による圧力の計算

ビード下部の空気流れについて、基礎方程式として、連続の式、Navier-Stokesの運動方程式を、固体境界でスリップなしの境界条件を用いて有限要素法にて計算を行った。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ -\nabla \mathbf{p} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}_j + \rho \mathbf{g} &= 0 \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}_{\text{solid}} \quad \text{at solid surface} \end{aligned}$$

速度分布と圧力分布の計算結果の一例をFig.3に示す。

速度分布をみるとウェブに同伴されてきた空気が接液部

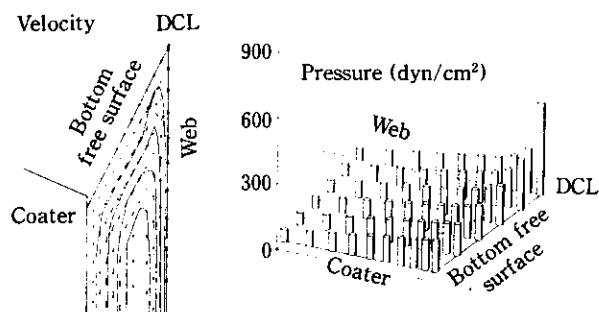


Fig.3 Typical flow pattern of entrained air

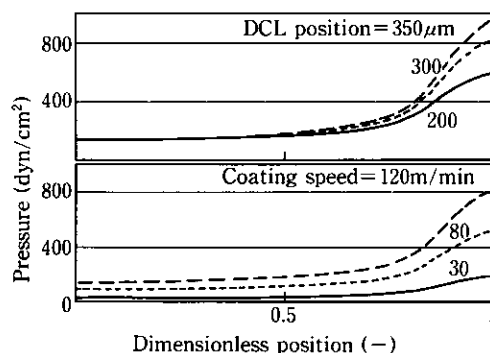


Fig.4 Pressure distribution along the bottom free surface

で取り除かれコーターリップ面に沿って下方へ排出されている。これにより接液部付近の圧力は周りに較べて高く、接液部が最も高い。Fig.4にビード下部に沿った圧力分布の、塗布速度、接液位置による変化を示す。塗布速度が速いほど圧力は高く、速度増加に伴い同伴される空気量が増加していることに起因する。また、接液位置が高くなるほど、空気を排出する空間が小さくなり、接液部で発生する圧力は高くなっている。実際には塗布速度増加につれて、接液高さは高くなれば、両者とも圧力を上げる方向になり、ビード下部では、接液付近を中心に圧力が高くなる。特に接液部においては、実際にビードの安定化のために必要な減圧が十分に得られていないことを示している。したがって、高速塗布に対応するためにはビード下部減圧をより強くする必要があるといえる。

4.2 塗布液流れによる圧力の計算

ビード部の塗布液流れについて、4.1と同様に連続の式、運動方程式を用い、境界条件として固体境界でスリップなし、上側の自由表面では形状と表面張力のバランスを考え、速度と形状を同時に計算で求め、下部自由境界は可視化の結果から形状は直線で近似し、単純なスリップ境界とし、計算をおこなった。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ -\nabla \mathbf{p} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}_j + \rho \mathbf{g} &= 0 \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}_{\text{solid}} \quad \text{at solid surface} \\ \sigma_n &= -\gamma \nabla \cdot \mathbf{n} - p \quad \text{at top free surface} \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} &= 0 \quad \text{at free surface} \end{aligned}$$

速度分布と圧力分布の計算結果の一例をFig.5に示す。接液付近で速度の大きさと方向が急激に変化し、それにもない接液部付近で圧力が大きく変化する。Fig.6にビード下部に沿った圧力分布の接液位置、塗布速度による変化を示す。接液部の直前で発生する減圧は最も強く、塗布速度が大きいくほど、接液位置が低いほど、発生する減圧は強い。これは、ビード下部での塗布液の引き延ばしと対応し、引き延ばしが強いほど負圧は強くなる。

4.3 ビード下部での圧力バランス

計算結果をもとに、ビード下部での圧力バランスを検討した。ここでビード下部界面での圧力をPiとすると、

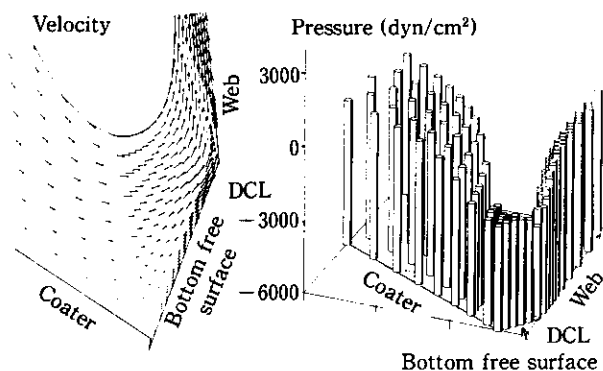


Fig. 5 Typical flow pattern of coating liquid

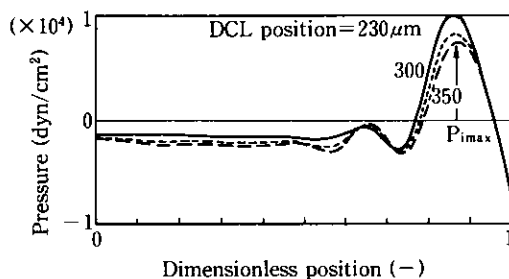


Fig. 7 Pressure distribution along the bottom free surface

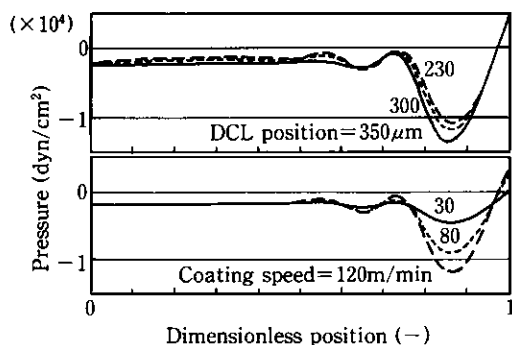


Fig. 6 Pressure distribution along the bottom free surface

$$P_i = (P_f + P_a) - P_v$$

となる。 P_i が正のとき、ビードを上押し上げる力が、 P_i が負のとき、下に押す力が発生する。ここで、計算で得られた P_a 、 P_f より P_i を計算するとFig.7のようになる。ビード下部全体は $P_i < 0$ となっており、下に押す力が発生しているが、接液付近では $P_i > 0$ となり、更に、接液位置が下がるほど接液付近の上に押す力は増加する。実際の塗布においては、ビード部は接液位置を下げようとしているが、局所的に上に押す力が発生し、あるバランスのとれた位置で接液高さが決定されるのではないかと考えた。

本研究では、ビード下部の最大の上に押す圧力 P_{imax} に着目し、さらに、その点で慣性力が大きいほどビード下部の塗布液が上がりにくいと考え、

$$F = P_{imax} / \rho u^2$$

なる無次元数を接液位置を決める評価関数として用いた。ここで、慣性力が P_{imax} に等しくなったとき接液位置は

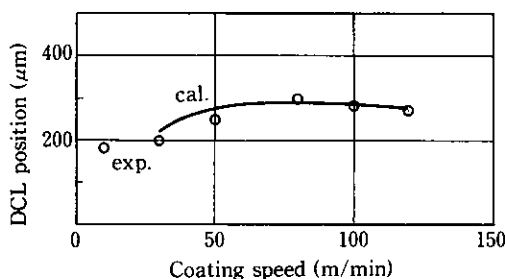


Fig. 8 Comparison of DCL position between experimental and calculate values

それ以上下がらないと仮定し、 $F=1$ のときの接液高さを実際の接液高さを比較した。結果をFig.8に示す。絶対値に若干の差はあるが、塗布速度に対する依存性は計算値と実験値は比較的よく一致している。

5 むすび

塗布液、同伴空気流れの挙動について明確になりつつあり、特に、塗布性に影響が大きい接液位置についても数値解析を用いてある程度予測できつつある。

しかしながら、塗布故障の発生機構については現在でも不明確な部分も多い。今後は基礎的に現象を把握しつつ、より高精度で高効率の塗布技術を開発していく。

●参考文献

- Kennedy, B.S., Burley, R. : J. Colloid Inter. Sci., **62**, 48 (1977)
- Burley, R., Jolly, R.S.P : Chemical Engineering Science, **39**, 1357-1372 (1984)
- Christodoulou, K.N., Scriven, L.E. : J. Fluid Mech., **208**, 321-354 (1989)
- Valenti, J.E., Thomas, W.R. et al. : Int. Eng. Chem. Res., **30**, 453-461 (1991)