

## 論文 Article

## ブレードコーティングによって塗工される液膜厚さとブレード角の関係

原稿受付 2011年 4月5日  
ものづくり大学紀要 第 号 (2011) 21~27

香村 誠

ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科

## Effect of Blade Angle on the Film Thickness in Blade Coating

Makoto KOMURA

Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists

## Abstract

Flow induced by blade coating is investigated experimentally. The film thickness and the upstream pressure were measured in a laboratory coating apparatus with a rigid blade. The film is coated onto a running tape being positioned under the blade. As is predicted theoretically, liquids of different physical properties behave similar if they have the same value of the capillary number;  $\overline{Ca}$ . The liquid inlet position has little effect on the flow around the gap. The film thickness decreases with coating speed. The relation between the film thickness and the blade angle is discussed in connection with upstream pressure. The correlation between them was observed to turn at a critical value of upstream pressure.

**Key Words :** Blade Coating, Film Thickness, Laser-aided Diagnostics, Free Surface Flow

## 1. はじめに

高粘度の液体を「へら」を用いて塗り付ける作業を工業的にはブレードコーティングと呼ぶ。もちろんこの作業は通常機械的に行われ、粘着テープへの粘着剤の連続塗布や IC 基盤の製作など様々な分野に応用されてきた。そして今後も熔融金属の塗布、液晶パネルの製造などへとその需要は拡大すると予想されるため、今日の薄膜化や高精密化に伴いより高度に液膜を制御する必要性が生じている。

塗工される液膜の厚さを予測し制御することはブレードコーティングにおいて最も基本的な要求であり、応用上もきわめて重要である。これまでも塗工スピードの増加によってより薄い液膜が得られる<sup>1)</sup>ことなど多くが解明されてきたが、ブレード角と膜厚の関係については報告例が少ない。経験的にはより大きなブレード角はより薄い液膜を生成する<sup>2)</sup>とされているが、Sullivan 等の実験<sup>3)</sup>

によれば全く逆の結果が得られている。一般的な知見は必ずしも得られているとはいえないのが現状である。

著者等はすでにブレードコーティングの際に生じる流れについて数値計算を含む理論的な立場からの解析を行い、膜厚や装置に働く力などに注目して報告してきた<sup>4)-6)</sup>。膜厚を支配する無次元パラメータがブレード角 $\alpha$ 、キャピラリ数 $\overline{Ca}$ 、そして上流域の無次元圧力 $p_\infty$ の3つであることも指摘している<sup>5)</sup>。本報ではこれらに引き続いて行った模型実験の結果を、主に膜厚の変化に注目しながら報告する。

## 2. 実験装置および測定方法

実験装置の外観および各部の名称を図1の写真によって示す。図中の塗工槽 (Fluid bath) とは試験流体 (Test fluid ; 実験用塗工剤) を貯えその出口位置で液膜が塗工される槽である。この場所の

拡大図を図2に示す。塗工槽内部の試験流体が、平盤 (Plane board) 上を左方に一定の速さで運動するテープ (Tape) に引きずられブレード (Blade) とテープとの間のギャップ (Gap) を通って、大気中に自由表面を形成しながら流れ出すメカニズムとなっている。詳細は以下のとおりである。

試験流体が塗工されるコーティング面を形成するポリエステル製のテープは、はじめロール状に巻かれており装置を運転することによって図1の白色矢印に沿って一定の速さ  $U_0$  で運動する。すなわち、穴① (Hole①) より平盤上に抜けて平盤と塗工槽の間に連続的に挿入される。隙間  $H_0$  のギャップを出る位置で塗工槽内部に充たされた試験流体はブレードによってしごかれ、テープ上に塗り付けられる。このとき液膜は自由表面を形成する。

テープはこの後さらに平盤上を左方へ移動し、

穴② (Hole②) より平盤下に降りる。この位置では全て測定は終了しており、テープ上の試験流体はドクタ (Doctor) によってそぎ落とされ回収される。そして最後に駆動軸と連動するギヤ① (Gear①)、ギヤ② (Gear②) の間に挟まれながら巻き取り軸 (Rewinder) に巻き取られる。

ブレードは防錆性を考慮してステンレス製とし、先端は可能な限り鋭く磨いた。テープ面との角度 (ブレード角  $\alpha$ ) は  $30^\circ$  および  $60^\circ$  の2とおりを選ぶことができ、ギャップ幅  $H_0$  は任意に設定可能である。また塗工槽側面は可視化写真を撮ることを考慮して、無色透明アクリル板とした。テープ走行面脇の① (図2(a),(b) 参照) は圧力測定孔であり、ここでの測定値を  $P_{UP}$  と呼ぶことにする。なお図2(a)にはブレード上にも3つの孔が見られるが、本報に記す実験の際には常時栓がされている。

試験流体には幅広いせん断速度にわたってニュートン流動を示すことが知られているグリセリン (Fluid 1) と、これを水で希釈した溶液 (Fluid 2) の2種類を用いた。これらはいずれもタンク① (Tank①) に手動で注がれた後タンク② (Tank②) に移り、ビニルチューブ (Tube) を通って試験流体入り口 (Inlet) に供給される。タンク②にはオーバフロー用のパイプ (Pipe) が設けてある。タンク②からチューブそして塗工槽までは常に満水状態に保たれているため、タンク②を上下させることによって塗工槽内部の静水圧をコントロールすることができる。

実験開始時には毎回試験流体の物性値を測定した。動粘性係数  $\nu$  および表面張力  $\sigma$  の測定には、それぞれウベローデ、デュヌーイ 氏型表面張力計を用い、また密度  $\rho$  は質量と体積を測定し算出した。具体的な数値を表1に示す。グリセリンの動粘性係数は温度変化に敏感であることからこの量に限っては実験の途中にも数回測定を行っており、表中の値は

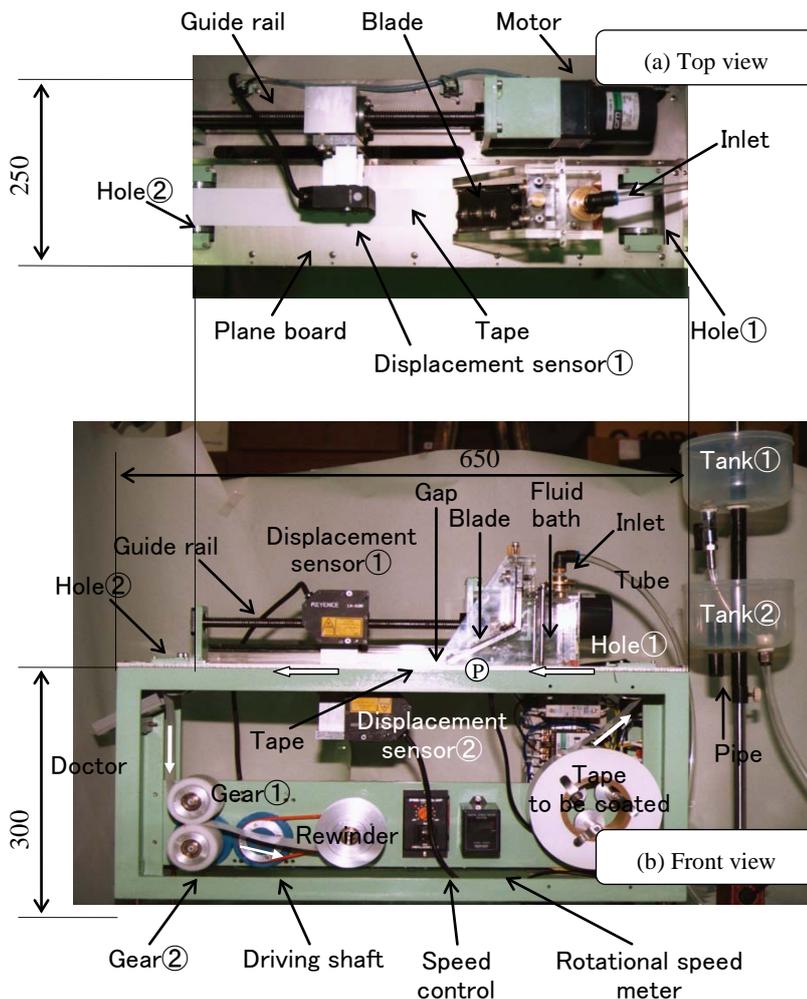


Fig.1 Experimental apparatus

その平均値である。

ギャップ幅  $H_0$  の調整には隙間ゲージを用い、ブレードの先端がテープを横切る方向に、コーティング面（テープ面）と十分平行であることを確認した。

さて、冒頭にも記したように膜厚  $H_\infty$  を含んでこの種の流れを決定する無次元パラメータはブレード角  $\alpha$  のほかに、

$$\overline{Ca} = \frac{\sigma}{\rho \nu U_0} \quad (1)$$

$$p_\infty = \frac{P_{UP}}{\rho \nu U_0 / H_0} \quad (2)$$

で定義されるキャピラリ数  $\overline{Ca}$ 、そして上流域の無次元圧力  $p_\infty$  の3つである。ここに  $P_{UP}$  はギャップ位置より上流側へ充分離れた場所での圧力である。この種の流れはギャップ近傍では粘性力が圧倒的に支配的である<sup>4)</sup>ため、この  $P_{UP}$  の無次元化には粘性圧力を用いた。無次元パラメータにレイノルズ数が含まれないのも同様の理由による。

そこで以上の準備の下に、膜厚  $H_\infty$ 、コーティング面上の上流域圧力  $P_{UP}$ 、塗工速度  $U_0$  の測定を行った。各々について概略を述べる。

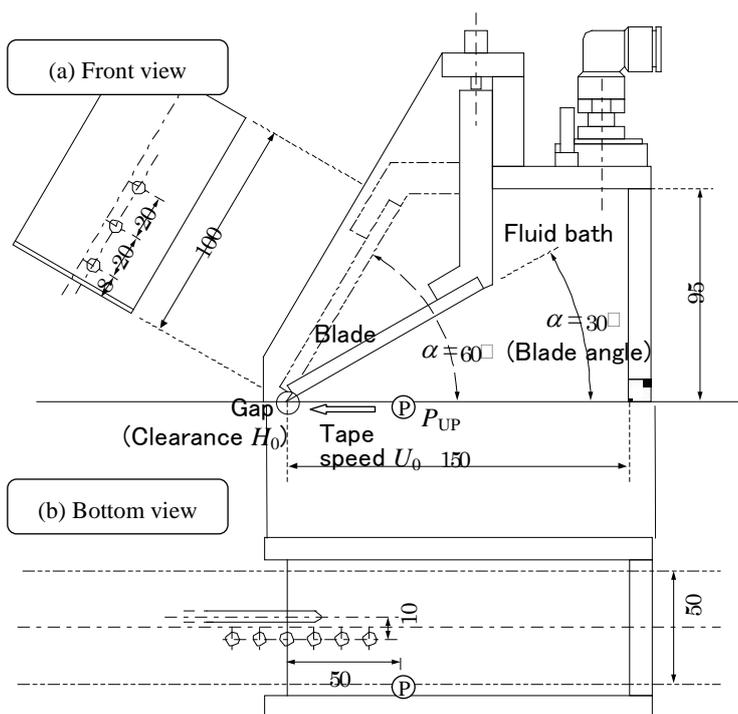


Fig.2 Schematic diagram of fluid bath

Table1 Physical properties of the test fluids

	Fluid 1	Fluid 2
bulk density : $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.30	1.19
kinematic viscosity : $\nu$ (cm <sup>2</sup> /s)	8.43	1.46
surface tension coefficient : $\sigma$ (dyn/cm)	63.3	68.3

なお、本報に記載するパラメータは  $\alpha, \overline{Ca}, p_\infty$  を除けばすべて次元を有する量であることを注意しておく。

## 2.1 膜厚 $H_\infty$ の測定

膜厚の測定にはキーエンス社製レーザ変位センサ<sup>†</sup> (Displacement sensor) を採用した。テープのうねりを考慮してレーザ変位センサは上下に2台設置 (図1参照) し、それぞれの方向より測定される液膜表面の位置とテープ裏面位置より膜厚  $H_\infty$  を算出した。

塗工された液膜の厚さはギャップ幅  $H_0$  の10倍程度離れた下流域ではほぼ一定の厚みとなることが知られている<sup>5)</sup>。本実験では余裕をみてギャップ位置から20(mm)の位置で測定した。

## 2.2 上流域圧力 $P_{UP}$ の測定

コーティング面上の圧力は、ギャップ位置よりギャップ幅  $H_0$  の10~15倍程度以上離れた上流域では、ほぼ一定の値  $P_\infty$  に漸近する<sup>4)</sup>。この種の流れには素より流体の慣性力はほとんど影響を及ぼさないため、塗工槽が十分な大きさを有すればブレード先端付近 ( $H_0$  の数十倍程度の範囲) の流れに槽の形状は無関係である (3章参照)。したがって、塗工槽内部全域にわたった圧力分布は槽の形状によって変化するが、あるブレード角  $\alpha$  とギャップ幅  $H_0$ 、そして塗工速度  $U_0$  よりある膜厚  $H_\infty$  が得られているとき、上に述べた一定値  $P_\infty$  は塗工槽の形状には無関係である。本実験では、図2 ①に示す上流域 50.0 (mm)におけるテープ走行面脇での圧力  $P_{UP}$  を測定し、この値を  $P_\infty$  とすることにした。

圧力測定用のセンサには、豊田工機社製半導体圧力トランスデューサ<sup>‡</sup>に、流

<sup>†</sup> LK-2000. 受光素子は CCD, 分解能 1 $\mu$ m.

<sup>‡</sup> PD-104, 0.1F 型. 定格出力  $\pm 0.0098$  MPa, 零点移動温度特性  $\pm 0.08$  %, ヒステリシス  $\pm 0.02$  %.

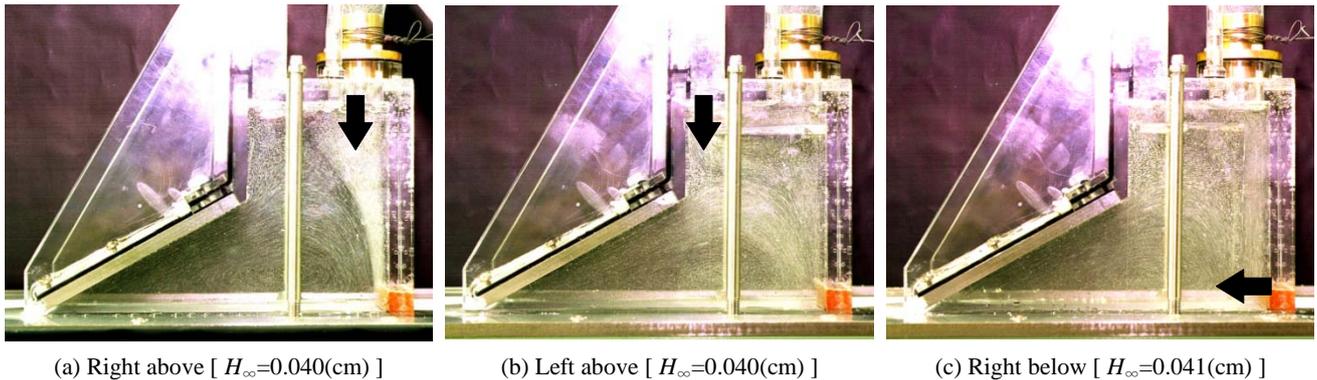


Fig.3 Effect of the fluid inlet on the streamlines

[ Fluid1,  $\alpha=30^\circ$ ,  $H_0=0.050(\text{cm})$ ,  $P_{\text{UP}}=2.8 \times 10^4 (\text{dyn/cm}^2)$ ,  $U_0=5.0(\text{cm/s})$  ]

体用のアダプタを装着したものをを用いた。測定値は大気圧を基準とした値である。

### 2.3 塗工スピード $U_0$ の測定

塗工スピード  $U_0$  は速度調整つまみにより 0~50 (cm/s) までの範囲で変化させることが可能である。速度を変えるごとにテープ上の 1 点が平盤上を一定距離通過するのに要する時間をストップウォッチで計り  $U_0$  を算出した。

### 3. 塗工槽形状と慣性力の影響

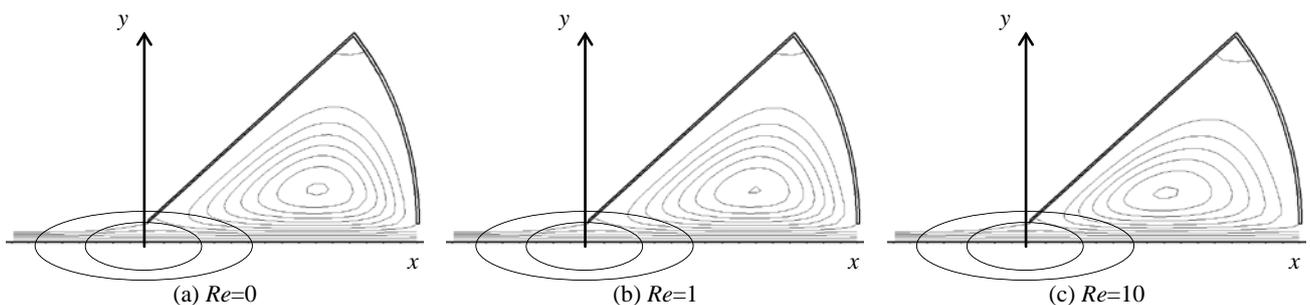
流体の上流域における流れはギャップ付近より下流の流れにほとんど影響を及ぼさないことが数値計算結果によって示されている<sup>7),8)</sup>。このことを塗工槽への試験流体の供給口を変化させて調べた様子が図3である。通常の入り口から試験流体を供給した場合を(a)に、塗工槽内部に仕切板を設けることによって入り口位置および塗工槽形状を変化させた場合を(b),(c)に可視化写真<sup>†9)</sup>によって示した。図中の矢印は試験流体の流入する位置と方向を表している。

これらの図より塗工槽の左側およそ3分の1の領域にわたって、流線はほぼ一致している様子が確認できる。ギャップ付近の流れは試験流体の入り口位置の影響を受けず、塗工槽の大きさと形状にも無関係であることがわかる。得られた膜厚も図3(a)の場合では  $H_\infty=0.040$  (cm) であり、(b),(c)ではそれぞれ  $H_\infty=0.040, 0.041$  (cm) と極めて近い値となった。

このことはギャップ近傍の流れが粘性に強く支配されていることに起因する。数値解<sup>‡</sup>による流線によって慣性力の影響を調べた様子を図4に示す。ここに  $Re$  は以下のように定義されたレイノルズ数であり、破線楕円は流線の比較がしやすいように描き入れたものである。

$$Re = \frac{U_0 H_0}{\nu} \quad (3)$$

塗工槽の形状は実験と異なるが、ギャップ近傍の流線は  $Re=1$  程度であればストークス近似を用いた場合 ( $Re=0$ ) とほとんど差違がみられず、ギャップ近傍ではほとんど慣性力が影響しない様子

Fig.4 Effect of inertia force on the streamlines [ Numerical sol.  $\overline{Ca}=50$ ,  $H_\infty/H_0=0.5$ ,  $\alpha=40^\circ$  ]

† アルミ粉懸濁法, シャッタースピード 0.5(s).

‡ 支配方程式系は付録に記す.

がわかる。なお  $Re=10$  までレイノルズ数が大きくなると慣性力の影響も無視しできなくなるが、本実験における  $Re$  は高々0.5程度である。

塗工スピード  $U_0$  の大きいときには慣性力の効果が重要となることを指摘した報告<sup>10)</sup>もみられるが、通常のブレードコーティングは本実験の測定範囲内で行われることが多い<sup>1)</sup>。

#### 4. キャピラリ数 $\overline{Ca}$ と膜厚 $H_\infty$ の関係

まず異なる動粘性係数  $\nu$ 、表面張力係数  $\sigma$  を持った試験流体を異なるスピード  $U_0$  で塗工し、同一の  $\overline{Ca}$  を実現することを考える。試験流体1を  $U_0=1.2$  (cm/s) および  $U_0=7.9$  (cm/s) で塗工した場合(それぞれ  $\overline{Ca}=5.0, 0.73$ ) および試験流体2を  $U_0=7.9$  (cm/s) で塗工した場合 ( $\overline{Ca}=5.0$ ) での  $H_0$  と  $H_\infty$  の関係を図5に示す。ここにブレード角  $\alpha=30^\circ$  ならびに無次元上流域圧力  $p_\infty=26$  は3本の直線について共通である。

試験流体1を  $U_0=1.2$  (cm/s) で塗工した場合と試験流体2を  $U_0=7.9$  (cm/s) で塗工した場合とは、直線は極めて良く一致しており、同一の  $\overline{Ca}$  が実現されるとき流れはたしかに同様の性質を呈することが分かった。方程式系の無次元化によって予測された現象<sup>4)</sup>が実験によって確認できた。

また図5によればギャップ幅  $H_0$  と膜厚  $H_\infty$  の関係はいずれも原点に向かう直線となっている。このような比例関係は測定範囲  $U_0 \leq 20$  (cm/s) において常に確認できた。無次元膜厚  $H_\infty/H_0$  が常に定

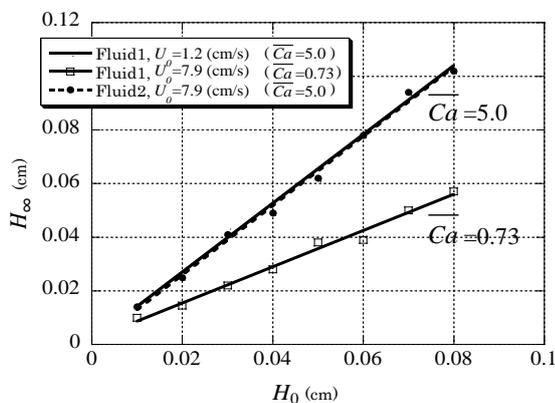


Fig.5 Effect of gap clearance

[  $\alpha=30^\circ, p_\infty=26$  ]

数となることを示唆している。

そしてさらにこの図から  $\alpha$  と  $p_\infty$  を一定に保った場合には、キャピラリ数  $\overline{Ca}$  と無次元膜厚  $H_\infty/H_0$  の間には正の相関があること、すなわち塗工スピード  $U_0$  と膜厚  $H_\infty$  の間には負の相関があることが分かる。

無次元上流域圧力  $p_\infty$  の値は  $P_{UP}$  の値が変化しなくても塗工スピード  $U_0$  の変化によって動いてしまう(式(2)参照)ため、 $p_\infty$  を一定に保つためにはタンク②のヘッド上下によって  $P_{UP}$  を調整しながら実験を行わなければならない。この操作は実際の塗工時の状況とは異なる。また、特定の流体に関して  $\overline{Ca}$  を変化させるとは  $U_0$  を変化させることに他ならない。そこで  $P_{UP}$  を一定に保った場合における、塗工スピード  $U_0$  と膜厚  $H_\infty$  の関係を有次元のまま直接示せば図6のとおりである。

この場合でも  $H_\infty$  は  $U_0$  の増加 ( $\overline{Ca}$  の減少) とともに減少する。しかしその割合は徐々に小さくなっており、十分に大きな  $U_0$  ではある一定の値に漸近するかのごとく振舞うことが分かる。

ところで、図6ではブレード角  $\alpha=60^\circ$  の場合の方が  $\alpha=30^\circ$  の場合よりも大きい  $H_\infty$  が得られるという結果となった。つまりブレード角  $\alpha$  と膜厚  $H_\infty$  の間には正の相関が観察されたことになる。

#### 5. ブレード角 $\alpha$ と膜厚 $H_\infty$ の関係

上流域より下流に向かって加圧するとき膜厚が増加することは極めて自然である。この様子をも

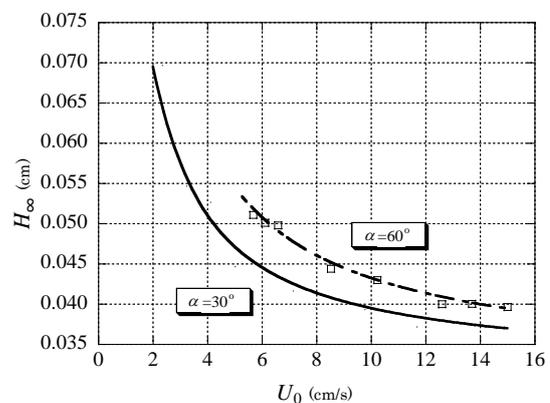


Fig.6 Effect of coating speed

[ Fluid2,  $H_0=0.030$  (cm),  $P_{UP}=1.0 \times 10^4$  (dyn/cm<sup>2</sup>) ]

う一つの有次元パラメータ  $P_{UP}$  の変化とともに示せば図7のとおりである。上流圧力  $P_{UP}$  と膜厚  $H_{\infty}$  の間には線形的な関係のあることが確認できる。一般的な Poiseuille 流れでも流量は圧力勾配に比例することからもこの現象は理解できる。また、ブレード角  $\alpha=60^\circ$  の場合の方が  $\alpha=30^\circ$  の場合よりも厚い  $H_{\infty}$  が得られている点は図6と同様である。

ブレード角  $\alpha$  と膜厚  $H_{\infty}$  の関係については従来負の相関が有名であり<sup>2)</sup>、著者等による既報の数値解析の結果<sup>5)</sup>も同様の結論に至っている。しかし以上の実験では、わずかに報告されている逆の結果<sup>3)</sup>を得る結果となった。

さて、図7では  $P_{UP}$  が小さくなるに伴って2つのブレード角から塗工される膜厚の差は小さくなり、およそ大気圧 ( $P_{UP} \cong 0$  (dyn/cm<sup>2</sup>)) では  $H_{\infty} \cong 0.030$  (cm) 付近で一致してしまっている。この傾向が  $P_{UP} < 0$  においても継続して成り立つとすれば、上流圧力  $P_{UP}$  が大気圧を下回るときには、より大きなブレード角によってより薄い膜厚が得られることが期待される。実際に  $P_{UP}$  を負圧にする実験を試みたが、今回用いた実験装置ではこの状況を実現しようとしてタンク②のヘッドを下げる時、塗工面付近では塗工槽と平盤との接触面から空気泡が混入し膜厚や圧力などの正確な値を測定することが困難であった。

そこで数値解による結果を図8に示した。縦軸  $q$  は無次元膜厚 ( $= H_{\infty}/H_0$ ) であり、今の場合  $q=1$  は  $H_{\infty}=0.03$  に対応する。この図によれば、たしかにブレード角  $\alpha$  と膜厚  $H_{\infty}$  の相関関係が  $p_{\infty} \cong 4$  付

近で逆転している様子が分かる。

液膜はテープに引きずられるせん断力と上流域から押される圧力とによって下流域に流れ出る。そのため上流域に大気圧より十分大きな圧力が生じている場合、ブレード角を増せば液膜をギャップから押し出す力は増えるため膜厚は増加するものと考えられる。しかし上流域が大気圧程度の圧力の場合にはギャップ付近に負圧が生じている可能性があり、このときブレード角の増加はギャップ位置の流れを上流に向かって引き戻す力の増加につながる。液膜はそれでもテープに引きずられて流れ出すすが、膜厚は減少すると説明できる。

数値解に基づく考察から、ギャップ幅より十分薄い膜厚が得られるとき ( $H_{\infty} < H_0$ )、上流圧力は大気圧より小さいことが分かっている<sup>5)</sup>。そのため薄膜化が進む近年では、主に  $P_{UP} < 0$  (dyn/cm<sup>2</sup>) の範囲における研究が盛んである。しかし一方で  $H_{\infty} > H_0$  の範囲での塗工、すなわち厚膜の需要も少なくない<sup>1)</sup>。このとき上流圧力は大気圧を上回る<sup>5)</sup> ( $P_{UP} > 0$  (dyn/cm<sup>2</sup>)) ため、膜厚の制御の際には本報で明らかになったブレード角  $\alpha$  と膜厚  $H_{\infty}$  の正の相関関係に注意を払う必要があると考えられる。

## 6. むすび

ブレードコーティングの際に生じる流れについて、生成する膜厚に注目し模型装置を用いた実験を行った。その結果明らかとなった事実を以下に要約して記す。

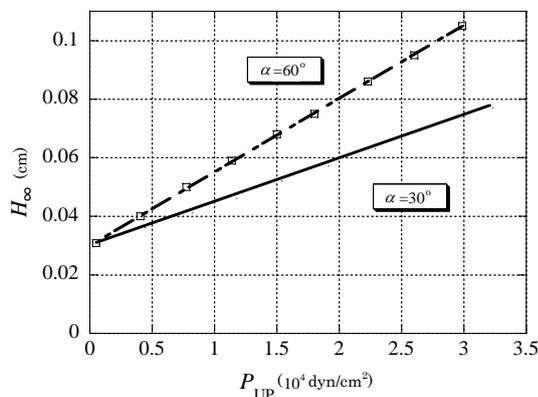


Fig.7 Effect of up-stream pressure

[ Fluid2,  $H_0=0.030$  (cm),  $U_0=5.0$  (cm/s) ]

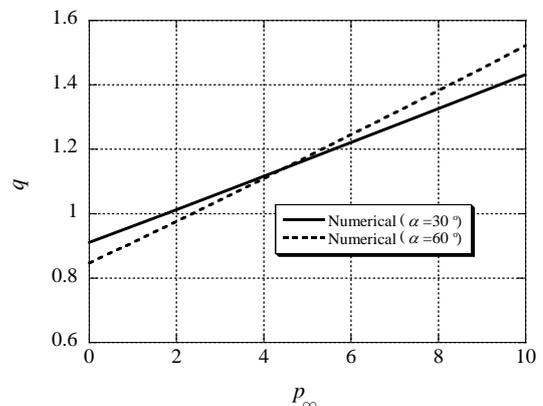


Fig.8 Effect of blade angle (Numerical sol.)

[  $Ca=8.0$  ]

- [1] 膜厚はギャップ付近に生じる粘性力の支配的な流れによって決定される。塗工剤の供給位置の違いや塗工槽の形状は生成する膜厚を含む下流域の性質に影響を及ぼさない。
- [2] 流体の密度 $\rho$ 、動粘性係数 $\nu$ 、表面張力係数 $\sigma$ 、および塗工スピード $U_0$ は、ギャップ付近より下流域の流れにたいしてこれらの組み合わせであるキャピラリ数 ( $=\sigma/\rho\nu U_0$ ) を通じてのみ影響を持つ。
- [3] 塗工スピードを増加させると膜厚は減少するが、その割合はスピードの上昇とともに徐々に緩やかになる。
- [4] 上流域が大気圧以上の場合には、膜厚は上流域圧力に比例して増加する。
- [5] ブレード角と膜厚の間には従来負の相関が有名であったが、この関係は上流域圧力の大きさによって逆の傾向となる。すなわち、上流域が大気圧より十分大きい場合にはブレード角の増加はより厚い膜厚を生じさせ、逆の場合にはより薄い膜厚を生じさせる。

## 【付録】

本文中図4に示した流線および図8の実線、波線は次の Navier-Stokes (渦度輸送) 方程式の差分法を用いた数値計算結果に基づいて描かれている。

$$Re \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \quad (4)$$

$$\omega = - \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここに  $Re$  は式(3)と同様の定義によるレイノルズ数を、 $\psi$ ,  $\omega$  はそれぞれ流れ関数および渦度を表す。境界条件は、個体壁面上で粘着の条件を、上流の流入位置では相応の Couette-Poiseuille 流れを、下流域の流出位置では相応の一様流れを課した。自由表面上では以下に示す運動学的条件および応力の釣合条件を与えた。

$$\psi = -q \quad (6)$$

$$4h_x \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} + (1 - h_x^2) \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (7)$$

$$\overline{Ca} \frac{h_{xx}}{(1 + h_x^2)^{3/2}} + \frac{1 + 3h_x^2}{1 - h_x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} = \int_0^{h(x)} \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} dy - \int_{-\infty}^x \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3} \Big|_{y=0} dx \quad (8)$$

ただし式(7)では空気の粘性は塗工剤に比して無視している。また、式(7)および(8)に現れる  $h_x$ ,  $h_{xx}$  はそれぞれ自由表面形状  $y=h(x)$  の1階および2階微分である。詳しくは文献4)を参照されたい。

## 文 献

- 1) 原崎勇次, コーティング技術の進歩・第4刷, 総合技術センター (1991), 272.
- 2) 原崎勇次, コーティング方式, 槇書房 (1979), 25.
- 3) Sullivan, T.M. and Middleman, S., *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **21**-1 (1986), 13-38.
- 4) 香村誠・長谷川英治, *ながれ*, **15**-4 (1996), 308-319.
- 5) 香村誠・他3名, *機論B*, **64**-620 (1998), 1079-1087.
- 6) 香村誠・他3名, *機論B*, **64**-625 (1998), 2765-2773.
- 7) Eklund, D.E. and Norrdahl, P.C., *Tappi, J.*, **69**-5 (1986), 56-58.
- 8) Sullivan, T.M., Middleman, S. and Keunings, R., *AIChE, J.*, **33**-12 (1987), 2047-2055.
- 9) Koumura, M., *et.al.*, *Proc. Int. 9<sup>th</sup> Coating Sci. Tech. Symp.*(1998), 357-360.
- 10) Pranch, F.R. and Scriven, L.E., *Tappi, J.*, 73-1 (1990), 163-173.