
ダイ塗布方式における巾方向膜厚精度設計技術

Die coating design technology for crossweb uniformity

清水 智仁* 山本 一公**
TomohitoSHIMIZU KazuhisaYAMAMOTO

要 旨

従来のダイ膜厚精度設計因子に加え、新たな設計因子として巾方向コーティングギャップばらつきが巾方向膜厚精度に与える影響に着目し、ダイ塗布方式における高精度な膜厚精度設計技術を確立した。サーマルメディアカンパニーにおける製版フィルム、医療用透明サーマルフィルム、サーマルリライタブルフィルムの製造工程の1つである塗布工程では、①塗布液が大気接触による液組成変化が大きいため、極力大気接触を避けることと、②製品の高い塗膜均一性が求められており、ダイ塗布方式を用いている。ダイ塗布方式では量産塗布機への搭載を考えた場合、コストの問題から1つのダイで数品種をカバーするため、様々な塗布液（粘度特性）・条件（塗布速度、付着量）の下でも高い巾方向膜厚精度を確保する必要がある。一般には試行錯誤を重ね、ダイ条件を巾方向膜厚精度が得られるよう合わせ込むのが現状であるが、巾方向コーティングギャップばらつきを考慮した設計を行なうことで、設計段階で膜厚精度を予測することが可能となった。

ABSTRACT

In a coating process of production manufacturing such as plate-making film, medical film, thermal rewriteable film, we developed a new die coating system with high accuracy for crossweb uniformity introducing the new design factor of coating gap. In the die coating, the coater machine has to be applicable for various kinds of manufacturing products keeping the high quality. Furthermore, the characteristic of coating liquids are easy to change as exposing to the air, and also various coating conditions (coating speed, wet film thickness) is necessary corresponding to the products. So generally, we repeat trial and error to get the high crossweb uniformity. The new system involves the coating gap factor together with the slot gap and accuracy of crossweb width.

* サーマルメディアカンパニー 開発センター
Research & Development Center, Thermalmedia Company
** 生産事業本部 RS事業部 SPR-PG
SPR-PG RSProducts Division, Production Business Group

1. 背景と目的

サーマルメディアカンパニーでは感熱紙、感熱フィルムを初めとして熱転写リボンや可逆性感熱フィルムなどの感熱記録媒体を製造している。これら製品の製造工程は、大別すると塗布液調合・分散工程、塗布工程、乾燥工程、仕上げ工程に分けられる。塗布工程における塗布技術は、製品を生産していく上での基盤生産技術の1つである。

前記したサーマルメディア製品の中で、特に、製版フィルム、医療用透明サーマルフィルム、サーマルリライタブルフィルムの塗布では、下記理由によりダイ塗布方式を用いている。

- ① 塗布液が大気接触による液組成変化が大きい為、極力塗布液の大気接触を避ける。
- ② 商品の性格上、高い塗膜均一性が要求される。

しかし、ダイ塗布方式では、前記①に関しては問題ないが、②については、その利点を生かすには難しい面もある。

それは、1つの塗布液・塗布条件であれば、それ専用のダイを設計し使用することで然程大きな問題にはならない。しかし、実際の製造工程ではコストの問題から1つのダイで数品種を塗布する。その為、様々な塗布液、塗布速度、付着量等の塗布条件下において、所望の巾方向膜厚精度が得られず、ダイ先端リップ開度等の調整を行い膜厚精度を確保している。その結果、試行錯誤を重ね、塗布液・塗布条件にダイ条件を合わせ込んでいるのが現状で、高精度塗布（＝膜厚精度設計）が必ずしもうまく行っていない。

近年、シミュレーション技術、加工技術、計測技術の進歩もあり、高精度膜厚塗工の為のダイ形状最適化設計が行われるようになってきている。

本報では、従来のダイ膜厚精度設計因子に加え、新たな設計因子として巾方向コーティングギャップばらつきが巾方向膜厚精度に与える影響に着目し、その影響を明確化することで、ダイ塗布法における高精度な膜厚精度設計技術を確立した。

2. ダイ塗布方式概要及び特徴

ダイ塗布方式の概要及び特徴を示す。

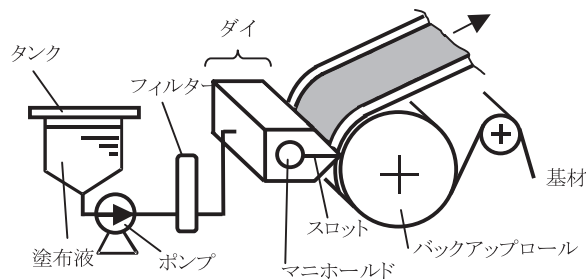


Fig.1 Slot die coating.

タンク内の塗布液をポンプにてダイに送り、ダイ内部のマニホールドで巾方向に分配し、スロットから連続的に均一に吐出させ、ダイ先端リップに対向して背面をバックアップロールに支持され連続走行する基材に塗布液を塗布する方法である。

<特徴>

- ポンプにより送られた液が全量基材に塗布される。即ち塗布付着量が給液量で決まる。
- ・付着量水準の変更は、給液量及びそれに伴うコーティングギャップ変更のみで可能な為、操作が容易。
- 塗布液調合タンクから塗布部まで密閉系での塗布が可能。
- 塗布部材が直接基材に接触することがないため、下層を傷つけることがない。

ただし、高精度な巾方向膜厚精度を得るためには、

- 巾方向に塗布液を均一に吐出させるための、
- ・マニホールド、スロットを合わせたキャビティ設計が必要。
- ・巾方向スロットギャップばらつきを±数 μm 以内に収める高精度加工が必要。

<塗布可能範囲>

- (i) 液粘度 : 1~500 mPa·s
- (ii) 塗工速度 : ~200 m/min (上流側減圧無)
- (iii) Wet膜厚 : 25 μm ~150 μm

3. ダイ塗布方式における巾方向膜厚精度設計の考え方

3-1 従来の巾方向膜厚精度設計因子

従来のダイ塗布方式における巾方向膜厚精度設計は下記

に示す因子によって表されると言われている。¹⁾

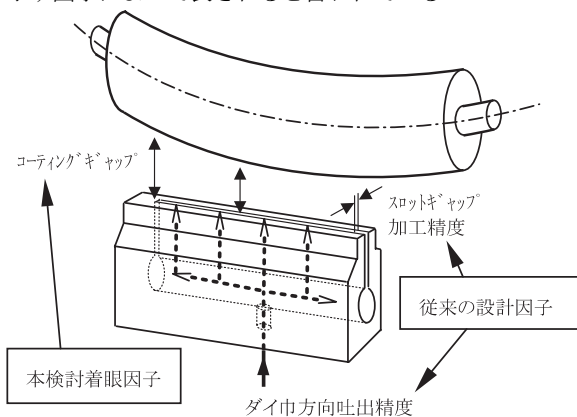


Fig.2 Traditional ways of design factor for crossweb uniformity

巾方向膜厚ばらつき＝

$$\text{ダイ巾方向液吐出均一性 (シミュレーション理論値)} + (\text{スロットギャップ加工精度})^3 \quad (1)$$

式(1)より従来の設計では、ダイ塗布方式はトコロテンのように、ダイより吐出した塗布液が、ダイそのものが持つ巾方向液吐出プロファイルのまま基材に塗布されるとして巾方向膜厚精度設計がされてきた。

3-1-2 本技術開発における着眼点

実際には、Fig.2にあるようにバックアップロールの撓み、ダイ先端リップ真直度の影響により巾方向コーティングギャップは均一ではない。

また、筆者らが過去検討した結果からは、ダイ先端にWet膜厚に比べて大きい断面積を持つ塗布ビードを形成可能な形状(液溜り)のダイでは(Fig.3A)、塗布ビード部下流側の液流動は基本的にクエット流れとなることから、巾方向膜厚精度は巾方向コーティングギャップばらつきによって決定されることが分かっている。

$$\text{巾方向コーティングギャップばらつき} \approx \text{巾方向膜厚ばらつき} \quad (2)$$

さらに、本技術開発におけるダイは、ダイ先端に液溜り構造を持たないスロットコーティングダイである(Fig.3B)。ダイ先端の液流動解析結果では、ニュートン流体での結果ではあるが、Wet膜厚/コーティングギャップ比が0.5~0.6程度の塗布条件下では、液流動はほぼクエット流れになる

報告もある。²⁾

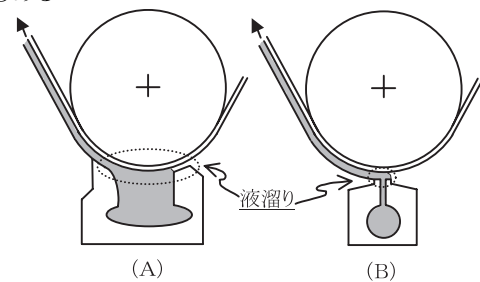


Fig.3 Puddle of die.

加えて、実際、量産塗布機の場合には、1台のダイで数品種~10品種以上の品種を塗布できることが前提となる。つまり、1つのダイでWet数10μm~百数10μmの付着量をカバーしなければならない。品種、塗布条件に関わらずダイの構造上スロットギャップは一定となる為、膜厚水準が特に数10μmのような薄膜側の塗布においては、スロットギャップがあたかも液溜りの如く作用する可能性がある。³⁾

また、本技術開発における速度領域は、一般的な塗布速度領域から言えば低速度領域に属する。塗工ビード部があたかも液溜りの如く作用する可能性がある。

以上のように、過去の知見、塗布条件を考えると、巾方向コーティングギャップのばらつきが巾方向膜厚ばらつきに大きな影響を与えないとした、従来の考え方に疑問がある。従って、その影響の可能性について検討を行った。

4. 巾方向コーティングギャップばらつきの巾方向膜厚ばらつきへの影響把握

4-1 実験モデル

巾方向コーティングギャップばらつきの巾方向膜厚ばらつきへの影響をみるために、Fig.4に示すようなダイリップに段差加工を施し、強制的に巾方向コーティングギャップを変化させたダイを用いて塗布を行った。

段差量の設定は、量産塗布機搭載を想定した場合(一般的にダイ巾1000mm以上)、ダイリップの加工真直度は、加工技術的な限界が5~10μm程度と言われていることから、5μm、10μmとした。

また、上記設定量は、スロット長さに対しそれぞれ

0.008%, 0.017%であり充分無視できる量である.

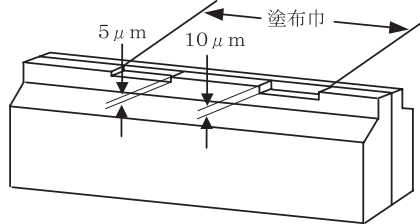


Fig.4 Experimental die.

4-2 実験条件

Table 1に示す条件にてPETフィルムに塗布を行い、乾燥後の膜厚を測定した。その後、測定結果をWet膜厚に換算して巾方向膜厚ばらつきを求めた。ここでは塗布液としてほぼニュートン流体として取り扱えるPVA水溶液を用いた。

前節の疑問点である膜厚水準差の影響、塗布速度及び塗布液粘度の影響をCa.数として実験にとり込んだ。

$$Ca. = \frac{\mu V}{\sigma} \quad (3)$$

μ : 液粘度, V : 速度, σ : 表面張力

Table 1 Experiment conditions

Ca.数	0.08~1.0
膜厚水準	Wet30~80 μm

4-3 実験結果及び考察

ここでは、紙面の都合上実験結果の一部を抜粋しFig.5に示す。

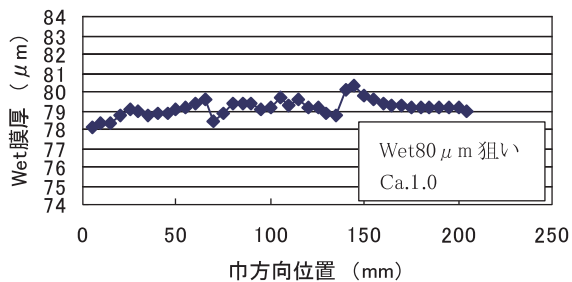
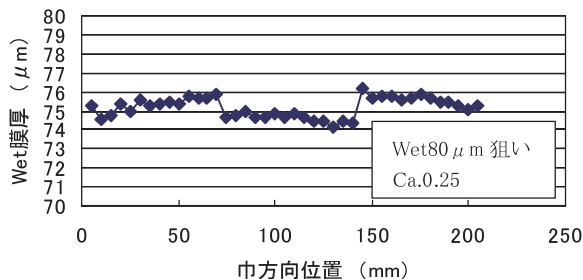
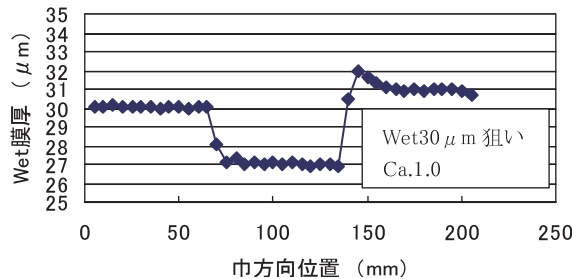
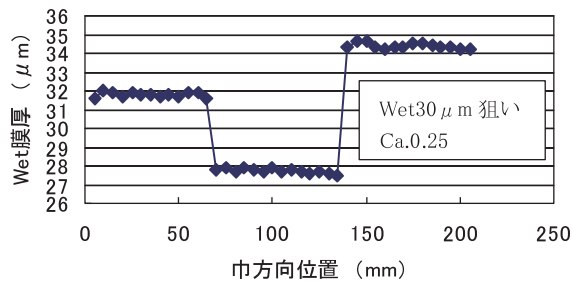


Fig.5 Experimental results of model.

次に、本実験結果をコーティングギャップのばらつきがどの程度巾方向膜厚ばらつきに影響するかを定量的に表す為にFig.6にまとめた。

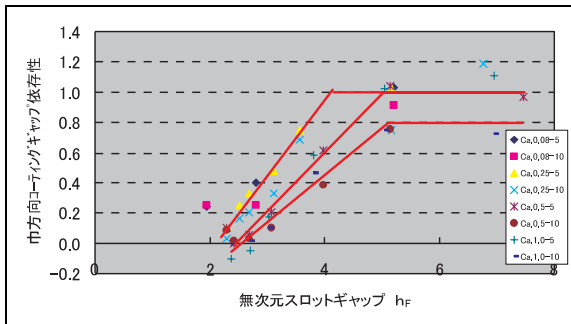


Fig.6 Dependence on non crossweb uniformity of coating gap

ここで、Fig.6におけるx軸、y軸は下記のように定義している。

x軸は、無次元スロットギャップを表している。

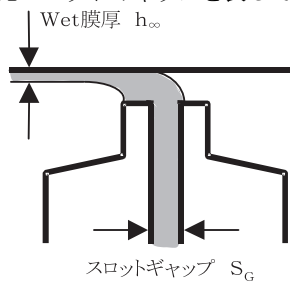


Fig.7 Dimensionless slot gap.

$$\text{無次元スロットギャップ } h_F = \frac{S_G}{h_\infty} \quad (4)$$

S_G : スロットギャップ, h_∞ : Wet膜厚

y軸は、巾方向コーティングギャップばらつきの巾方向膜厚ばらつきへの依存度合い (式5) を表している。

$$\text{巾方向コーティングギャップばらつき依存性} = \frac{h_c - 1}{G_c - 1} \quad (5)$$

ここで、

$$h_c = \frac{h_{MAX}}{h_{min}} \quad (6)$$

h_c : 膜厚変化率、

h_{MAX} : 5あるいは10 μ m段差部によって形成されるコーティングギャップ部の膜厚

h_{min} : 最小コーティングギャップ部の膜厚

$$G_c = \frac{G_{MAX}}{G_{min}} \quad (7)$$

G_c : コーティングギャップ変化率

G_{MAX} : 5あるいは10 μ m段差部コーティングギャップ

G_{min} : 最小コーティングギャップ

y軸の意味は、コーティングギャップばらつき依存性が「0」であれば、所謂トコロテン塗布であり、巾方向コーティングギャップのばらつきに影響なく、巾方向膜厚ばらつきはダイの巾方向液吐出プロファイルによって決まることを意味する。

コーティングギャップばらつき依存性が「1」であれば、塗布技術で言えば、ナイフ塗工であり、巾方向コーティングギャップのばらつきがそのまま膜厚ばらつきとなって現れることを意味する。

Fig.6に示すように巾方向コーティングギャップばらつきに対する巾方向膜厚ばらつきの影響は塗布速度水準 (Ca. 数) よりもWet膜厚の厚薄に大きく依存している。

Wet膜厚が小さいと、スロットギャップがあたかも液溜りの如く作用し、巾方向コーティングギャップが不均一である為に、塗布ビード部で生じている巾方向の圧力差を打ち消すように巾方向に液流動が生じているものと考えられる。

これは、塗布方式は異なるがスライドビード塗布方式における3次元液流動シミュレーションにおいて、塗布ビード部で巾方向に無視できない液流動が発生するという報告⁴⁾からも、ダイ塗布でのスロットギャップ内、塗布ビード部においても巾方向に液流動が生じていることが、可能性として充分考えられる。

次に、塗布速度の影響をみると、Ca. 数が大きいほど、 h_F に対する巾方向コーティングギャップ依存性の傾きが寝ている傾向にある。これは、 h_F 、Wet膜厚を一定にして、塗布速度を上げていくと給液量が増加する事となる。その結果、スロット内の液流速が上がることとなる為、少なくともスロット内での巾方向への液流動が起き難くなることによるものと考えられる。

4-4 実験結果まとめ

ダイ塗布方式は基本的に巾方向コーティングギャップばらつきが巾方向膜厚ばらつきに影響を与えないように従来言

われてきた。しかし、実験結果より膜厚ばらつきに大きく影響を与える領域が存在することが理解できた。

実液検証に際しては、実験結果のばらつきを考慮し、巾方向コーティングギャップばらつき依存性の最大値、最小値を設計に考慮した。

5. 膜厚精度設計結果と塗布結果

Fig.6に示した結果を考慮し、Fig.2に示した従来のダイ膜厚精度設計に付加した形（式8）で設計した設計値と製造で使用する液及び塗布条件で塗布した結果をTable 2に示した。

$$\begin{aligned} & \text{巾方向膜厚ばらつき} = \\ & \text{ダイ巾方向液吐出均一性(シミュレーション：理論値)} \\ & + (\text{スロットギャップ加工精度})^3 \\ & + (\text{巾方向コーティングギャップばらつき} \\ & \times \text{コーティングギャップばらつき依存性}) \end{aligned} \quad (8)$$

Table 2 Results of design and coating.

	h_f	Ca.数	設計結果 巾方向膜厚ばらつき (±%)			塗布結果 巾方向膜厚 ばらつき (±%)
			コーティングギャップ 不均一依存性			
			無視 (従来)	最小	最大	
製品A	5.0	0.28	0.6	1.6	2.5	2.1
製品B	3.4	0.38	0.6	1.1	1.6	1.4
製品C	2.9	2.14	0.5	0.7	0.8	0.8
製品D	2.2	0.09	1.1	1.2	1.3	1.5

塗布結果、設計結果における膜厚ばらつきは、下式により求めている。
膜厚ばらつき (±%) = (最大膜厚 - 最小膜厚) / 平均膜厚 / 2 × 100

Table 2に示した結果より、あらためてダイ塗布方式はトコロテン塗布ではないことが理解でき、コーティングギャップばらつきの影響を考慮することの有効性を意味しているものと考えられる。

また、塗布結果は、コーティングギャップばらつき依存性の最大値を用いた設計結果とほぼ同等の結果を示しており、今後の設計へ反映したい。

6. 結論

従来のダイ膜厚精度設計因子にない設計因子を明確化し

た。

また、その因子を加味した精度の高い設計技術を確立した。

更に、今回確立したダイ膜厚精度設計技術は、今後のダイ設計に活用できるばかりでなく、新品種塗布液が既存のダイで塗布可能か否かを判断する為の適性評価にも活用できる。即ち、塗布液処方設計者が製造塗布工程を考慮した処方設計が可能となる。

7. 今後の展開

本検討により、充分実用的なダイ膜厚精度設計技術を確立できた。今後更に、設計精度を向上するべく検討を行って行きたい。

また、本検討塗布条件以外の塗布条件においても本検討結果が成立するか否か見極めを行い、ダイ塗布技術を更に向上させて行きたい。

さらに、本技術開発によって得られた技術を基に、サーマルメディアカンパニーの他塗布方式の技術向上に努めて行きたい。

参考文献

- 1) P. M Schweizer : LIQUID FILM COATING , CHAPMAN & HALL , (1997) , pp.752-766
- 2) F.Durst , H.G.Wagner : LIQUID FILM COATING , CHAPMAN & HALL , (1997) , pp.410-416
- 3) L . Sartor : SLOT COATING : FLUID MECHANICS AND DIE DESIGN , vol2 , Ph.D , University of Minnesota , (1990) , p.3-46-54
- 4) 安原 : 化学工学会第34回秋季大会予稿集 , (2001)