
多目的塗装ラインにおける付着量制御技術

Coating Weight Control Technology IN Multipurpose Coating Line

田野口 一郎(Ichiro Tanokuchi) 池永 孝雄(Takao Ikenaga) 村上 進次郎(Shinjiro Murakami)

要旨：

水島製鉄所で1991年1月から稼動した多目的ライン(MCL)で生産している薄膜塗装製品は、ウェット膜厚3～13 μ mという薄膜であり、従来のロールコータの付着量制御モデルでは高精度自動制御が困難であった。このため著者らは、弾性流体潤滑理論を応用し、薄膜塗装にも適用できる制御モデルを開発した。これは、ニップ圧をかけ、アプリータロールのゴムが弾性変形した状態でのロール間の液膜厚を定量的に評価したもので、膜厚に影響するほとんど全ての要因を取り込んだモデルである。本モデルを実操業に適用した結果、全ての品種に対して良好な結果を得、高精度付着量制御が可能となり、安定した操業が続いている。

Synopsis：

The multipurpose coating line (MCL) was started in January 1991 at Mizuahima Works. The products of MCL are thin-film coated steels, and the thickness of the coated film is 3 to 13 μ m under the wet condition. In case of this thin-film coating by a roll coater, the precise coating weight control is difficult when using the conventional control model. Therefore, the authors have developed a new coating Weight control model which can be given uniform coating weight even during thin-film coating by applying the elastohydrodynamic lubrication theory. This model can evaluate the apartment negative gap formed between the pickup roll and the applicator roll with nip pressure, and has considered almost all the factors that influence the coating weight. After applying this model to MCL operation, sufficient results for all products have been obtained. The precise and automatic coating weight control is made possible, and the operation of MCL is stabilized.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Coating Weight Control Technology in Multipurpose Coating Line



田野口 一郎
Ichiro Tanokuchi
水島製鉄所 プロセス
開発部開発設計室 主
査(掛長)

池永 孝雄
Takao Ikenaga
水島製鉄所 プロセス
開発部開発設計室 主
査(課長)

村上 進次郎
Shinjiro Murakami
水島製鉄所 冷間圧延
部表面処理課長

要旨

水島製鉄所で1991年1月から稼動した多目的塗装ライン(MCL)で生産している薄膜塗装製品は、ウェット膜厚3~13 μm という薄膜であり、従来のロールコータの付着量制御モデルでは高精度自動制御が困難であった。このため著者らは、弾性流体潤滑理論を応用し、薄膜塗装にも適用できる制御モデルを開発した。これは、ニップ圧をかけ、アプリータロールのゴムが弾性変形した状態でのロール間の液膜厚を定量的に評価したもので、膜厚に影響するほとんど全ての要因を取り込んだモデルである。本モデルを実操業に適用した結果、全ての品種に対して良好な結果を得、高精度付着量制御が可能となり、安定した操業が続いている。

Synopsis:

The multipurpose coating line (MCL) was started in January 1991 at Mizushima Works. The products of MCL are thin-film coated steels, and the thickness of the coated film is 3 to 13 μm under the wet condition. In case of this thin-film coating by a roll coater, the precise coating weight control is difficult when using the conventional control model. Therefore, the authors have developed a new coating weight control model which can be given uniform coating weight even during thin-film coating by applying the elastohydrodynamic lubrication theory. This model can evaluate the apparent negative gap formed between the pickup roll and the applicator roll with nip pressure, and has considered almost all the factors that influence the coating weight. After applying this model to MCL operation, sufficient results for all products have been obtained. The precise and automatic coating weight control is made possible, and the operation of MCL is stabilized.

1 緒 言

近年、めっき鋼板上にクロメート、樹脂等を塗装し、耐食性の向上、耐指紋性の付与、プレス性の向上等の高付加価値化を狙った薄膜塗装鋼板の需要が自動車、家電向けを中心に増加している。このような需要に対応するため、水島製鉄所に多目的塗装ライン-MCL (Multipurpose Coating Line) -を建設し、1991年1月に稼動した。

鋼板への塗装は、MCLを含めロールコータにより広く行われているにもかかわらず、従来付着量モデルとしてはMatsudaらの式が提案されているのみであり、この式ではMCLで対象としているようなウェット膜厚3~13 μm の薄膜塗装に適用することは困難である。この理由は、ロールコータによる塗装状態の定量的評価が成されていないことに起因している。

MCLの建設においては、多品種の塗装を行い、早期の安定操業を達成するため、汎用性のある付着量制御モデルを開発し、効率的な付着量制御の完成を目指すこととし、そのために弾性流体潤滑理論を応用して薄膜塗装であっても塗装状態の定量的評価が可能な付着量制御モデルを開発した。これをMCLの操業に適用した結果、全ての品種に対しモデルの精度は良好で、効率的に早期の立上げを

達成し、現在も順調に操業中である。

本報においては、コータ設備を中心としたMCLの設備概要と今回開発した付着量制御モデルについて報告する。

2 MCLのライン概要

2.1 ライン概要

MCLの基本仕様をTable 1に、ラインレイアウトをFig. 1に示す。ライン構成は2コート2ベーク方式を採用し、コートは2ロールリバース方式、オープンはクリーン化のためフィルタリングしたエアの間接加熱による熱風方式、クーラはフィルタリングしたエアによる空冷方式、オープン/クーラ間のパスは板振動防止のためフロータ方式に替えオールカタナリ方式を採用している。付着量制御、板温制御、その他のプロセス制御は全て自動制御で行っており、品質の安定化、省力化を図っている。また、オンラインセンサとしては、オープン出側に板温計、クーラ出側に付着量計を設置しており、板温および付着量のストリップ全長にわたる監視を行っている。

2.2 コータ設備

Fig. 2にコータ配置の一部を示す。裏面はバックアップロールに板を巻き付けた状態で塗装し、表面はカタナリ支持された板を下

* 平成5年9月28日原稿受付

Fig. 1 Layout of MCL

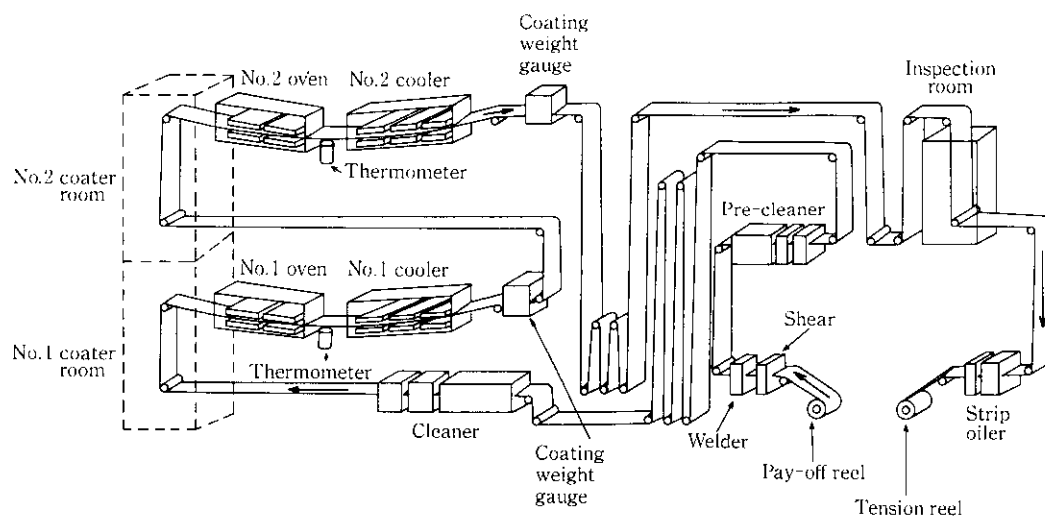


Table 1 Basic specification of MCL

Production capacity	12 500 t/month
Material coil	Galvanized cold or hot rolled steel coils
Strip thickness	0.3~2.3 mm
Strip width	700~1 830 mm
Product coil	
Weight	max 25 t
Outside diameter	max 2 000 mm
Inside diameter	508 mm, 610 mm
Line speed	
Entry section	max 120 m/min
Process section	max 100 m/min
Delivery section	max 120 m/min
Coating process	2 coat 2 bake
Coater type	2 rolls coater
Oven type	Circulated hot air jet
Cooler type	Air cooler

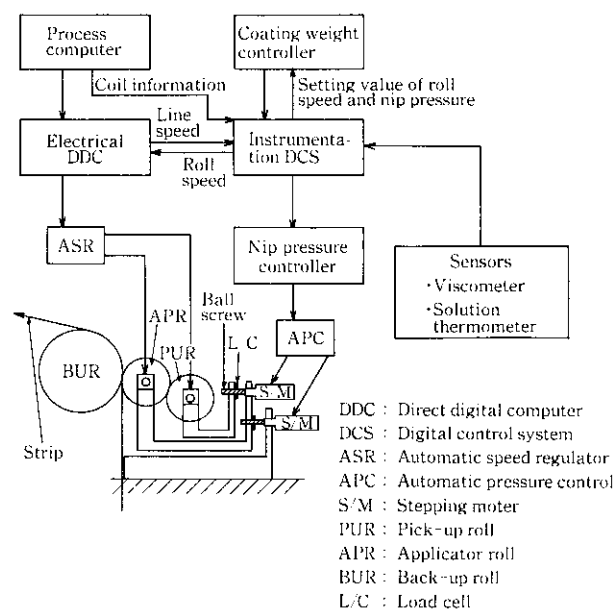


Fig. 3 Schematic illustration of roll coater and coating weight control system

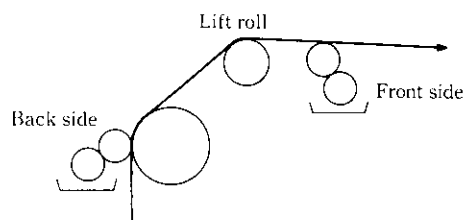


Fig. 2 Illustration of coater layout

側から押上げた状態で塗装する。Fig. 3はコータの概略図および制御系統図である。ライン速度、板サイズ、目標付着量等の情報により付着量制御装置 (coating weight controller) が後述するモデル式に基づき、適正なロール周速、ロール間の押付け力を決定する。その値に応じて DDC (direct digital computer) がロール周速制御を、ニップ圧制御装置 (nip pressure controller) が押付け力制御をそれぞれ高精度で実施する。Fig. 4に塗料供給システムを示す。塗料のコンタミネーションの防止のため、液種ごとに独立システムとしており、さらに塗料温度制御とともに粘度制御を実施し、付着量制御

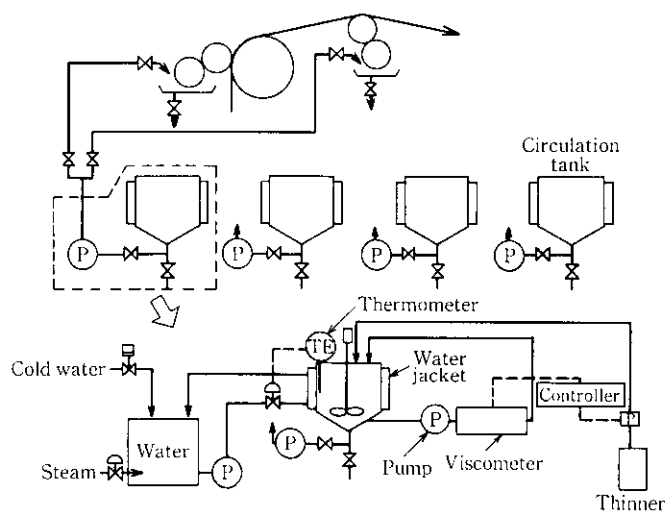
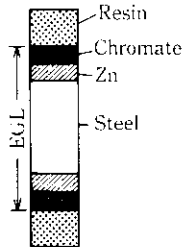
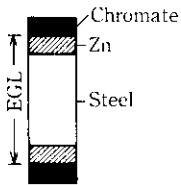
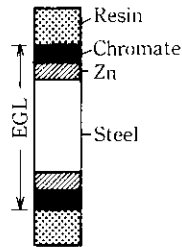
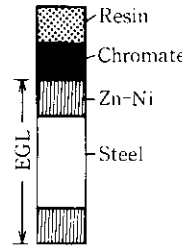


Fig. 4 Circulation system

Table 2 Feature of MCL products and depth profile model

Products	Antifingerprint steel sheet (organic type)	Antifingerprint steel sheet (inorganic type)	Self-lubricant steel sheet	Thin organic composite resin steel sheet
Features	Antifingerprint Anticorrosion	Antifingerprint Anticorrosion Resistance to organic solvent	Lubrication for press Anticorrosion	Anticorrosion
Uses	Electric appliance (Audio chassis) (Computer case)	Electric appliance (Audio chassis) (Computer case)	Electric appliance (Motor case)	Automotive
Depth profile model				

の安定化を図っている。

2.3 製造品種

Table 2 に代表的な製造品種およびそれらの特徴、断面構造を示す。無機耐指紋鋼板、自動車用薄膜有機塗装鋼板のクロメートは、ウェット膜厚約 $3\ \mu\text{m}$ と超薄膜であるにもかかわらず、高精度で塗布されており安定した品質を誇っている。また、両面塗装の製品においても、表裏面とも均一な膜厚で塗装されており、安定した高品質である。

3 付着量制御モデル

3.1 モデルの構築

ロールコータによるコーティング状態の模式図を Fig. 5 に示す。一般に、ピックアップロールはクロムめっきを施した金属ロール、アプリータロールはゴム被覆を施したゴムロールである。付着量の制御因子は、ピックアップロール周速 V_P 、アプリータロール周速 V_A 、ピックアップロールとアプリータロール間の押し付け力 N_P （以下ニップ圧と呼ぶ）、アプリータロールとストリップ間の押し付け力 N_A （以下押付圧と呼ぶ）の 4 因子である。

従来において、付着量を決定するにあたり過去の塗装実績に頼らざるを得なかった最大の理由は、ニップ圧、押付圧をかけ、アプリータロールのゴムが弾性変形した状態で、ピックアップロール／アプリータロール間およびアプリータロール／ストリップ間の液膜厚 h_{PA} 、 h_{AS} を定量的に求めることが不可能だった点にあると考えられる。そこで今回、ニップ圧、押付圧をかけた状態での液膜厚 h_{PA} 、 h_{AS} を定量的に評価するため、弾性変形を考慮して潤滑膜厚の解析ができる弾性流体潤滑理論²⁾を応用し、付着量制御モデルを構築した。以下、その内容について述べる。

弾性流体潤滑理論をピックアップロール／アプリータロール間に適用すると次式が得られる。

$$h_{PA} = 3.1 w_{PA}^{-0.2} \mu^{0.6} V_{PA}^{0.6} E_{PA}^{-0.4} R_{PA}^{0.6} \quad (1)$$

$$w_{PA} = N_P / L$$

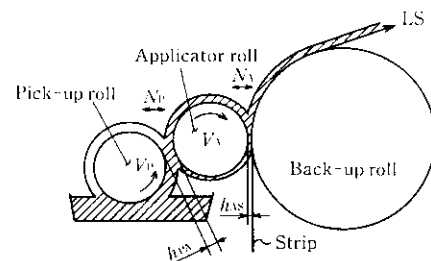


Fig. 5 Illustration of roll coating

$$V_{PA} = (V_P + V_A) / 2$$

$$\frac{2}{E_{PA}} = \frac{1 - \nu_P^2}{E_P} + \frac{1 - \nu_A^2}{E_A}$$

$$R_{PA} = R_A R_P / (R_P + R_A)$$

ただし

L : ロール面長

E_P , E_A : ピックアップロール、アプリータロールヤング率

ν_P , ν_A : ピックアップロール、アプリータロールポアソン比

R_P , R_A : ピックアップロール、アプリータロール半径
次にロール上の流量について考える。ピックアップロール／アプリータロール間を通過する流量 q_{PA} は、ロール間の流速分布は Navier-Stokes の式を解くとほぼ直線であるので

$$q_{PA} = h_{PA} (V_P + V_A) / 2 \quad (2)$$

で与えられる。また、ピックアップロール上とアプリータロール上への液の分配について Wilkinson ら³⁾の結果によると

$$q_A / q_P = \alpha (V_A / V_P)^\beta \quad (3)$$

である。ここで q_P , q_A はそれぞれピックアップロール、アプリータロール上の流量、 α , β は係数である。(3)式と

$q_{PA} = q_P + q_A$ の関係より

$$q_A = \frac{\alpha (V_A / V_P)^\beta}{1 + \alpha (V_A / V_P)^\beta} q_{PA} \quad (4)$$

を得る。

アプリータロール上の流量 q_A のうち、ストリップに転写され

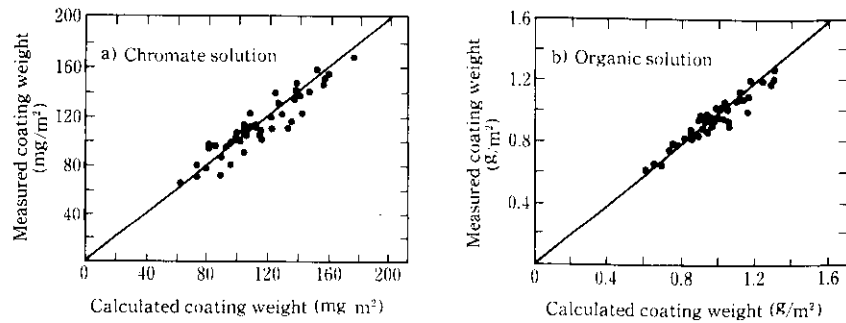


Fig. 6 Comparison of measured coating weight with calculated values

ずにすりぬけてしまうリーク量 q_L について、Wilkinson⁴⁾によると

$$q_L = \lambda h_{AS} (V_A - LS) \quad \dots\dots\dots (5)$$

なる関係がある。 λ は係数である。

ここで、(1)式と同様にして h_{AS} は次式となる。

$$h_{AS} = 3.1 w_{AS}^{-0.2} \mu^{0.6} V_{AS}^{0.6} E_{AS}^{-0.4} R_{AS}^{0.6} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$w_{AS} = N_A / B$$

$$V_{AS} = (V_A - LS) / 2$$

$$\frac{2}{E_{AS}} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_A^2}{E_A}$$

$$R_{AS} = R_A R_S / (R_S + R_A)$$

ただし、 E_s 、 ν_s 、 R_S は添字 S がストリップのものであることを示している以外は(1)式と同じ定義である。

ストリップ上の流量 q_S は

$$q_S = q_A - q_L \quad \dots\dots\dots (7)$$

であり、付着量 M は

$$M = c \gamma q_S / LS \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし C : 塗料濃度

γ : 塗料比重量

となる。(8)式に(1)~(7)式を代入することにより付着量は次式で表されることになる。

$$M = \frac{3.1 c \gamma \mu^{0.6}}{LS} \left\{ \frac{\alpha \left(\frac{V_A}{V_P} \right)^\beta}{1 + \alpha \left(\frac{V_A}{V_P} \right)^\beta} w_{PA}^{-0.2} E_{PA}^{-0.4} R_{PA}^{0.6} \right. \\ \left. \times \left(\frac{V_P + V_P}{2} \right)^{1.6} - \lambda w_{AS}^{-0.2} E_{AS}^{-0.4} R_{AS}^{0.6} (V_A - LS)^{1.6} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これは、付着量に影響を及ぼすと考えられる粘度、濃度、ロール周速、ニップ圧、ロール径、ゴムの弾性、ライン速度等ほとんど全ての要因を取り込んだモデルである。

3.2 モデルの検証

モデルの検証のため、ライン速度を 10~100 m/min の範囲で変化させ、板サイズ、ロール周速、ニップ圧等の条件を変更して塗装した時の付着量の測定値と(9)式のモデルによる計算値の比較を Fig. 6 に示す。a) はクロメート、b) は有機樹脂の場合である。塗料の性状が異なるにもかかわらず、付着量の測定値と計算値は広い付着量範囲にわたって良く一致しており、今回開発したモデルの精度は非常に高いことが分かる。

次に、実操業においては板厚が変わるとオープン能力が律則となり、ライン速度を変化させるため、このときの制御性を調査した。Fig. 7 は塗装中にライン速度を変化させ、本モデルを用いたフィードフォワード制御のみで制御した時の付着量の推移を示したも

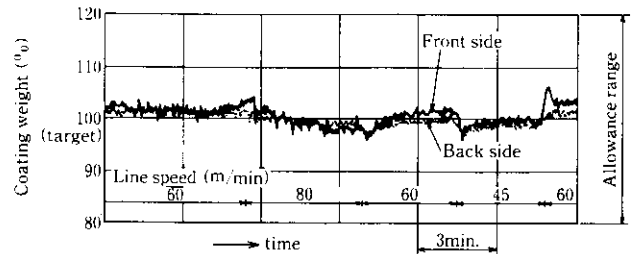


Fig. 7 Chart of coating weight when line speed is changed with only feed forward control

のである。ライン速度が変化しても付着量はほとんど変化しておらず、モデルによるフィードフォワード制御が精度良く動作していることが分かる。また、バックアップロールが無く、板とアプリータロール間の押付圧を積極的に制御できない表面も、バックアップロールのある裏面と同様に精度良く制御できている。

これ以外の品種についてもモデルの精度は良好であることを確認しており、(9)式は幅広い塗装条件に対し、しかも各種の性状の塗料に対して適用することが可能であり、ロールコートによる塗装状態を定量的に精度良く表現した汎用性のあるモデルであることが確認できた。

3.3 付着量制御状況

MC L の付着量制御は 2.2 で述べた制御システムで実施しており、(9)式のモデルをもとに付着量制御装置 (coating weight controller) でロール周速、ニップ圧を求め制御している。Fig. 8 は、ある品種の 1 箇月間の付着量の度数分布である。これは、モデルによるフィードフォワード制御のみで制御した場合のもので、許容範囲の 1/2 程度のばらつきであり制御精度は非常に高い。Fig. 9

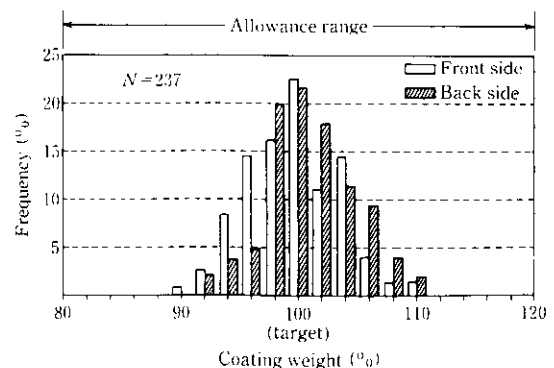


Fig. 8 Distribution of coating weight with only feed forward control

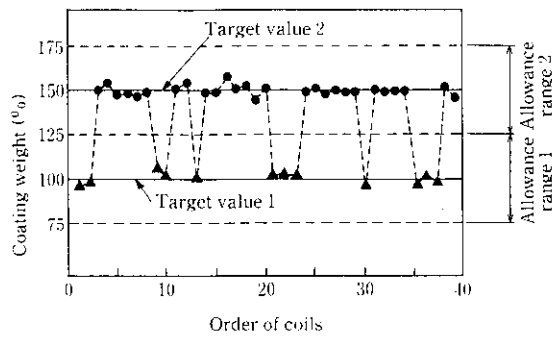


Fig. 9 Coating weight distribution when target value is changed in series of coating

は、付着量目標値が異なる製品をフィードフォワード制御のみで同一チャンスに製造したときの付着量をコイルの塗装順にしたがって示したものである。付着量の変更も精度良く実施できている。

以上のように、高精度の付着量制御が可能となった。

4 結 言

本報では、コータ設備を中心にMCLの設備概要と弾性流体潤滑理論を応用した付着量制御モデルについて報告した。この結果は以

下のとおりである。

- (1) 弾性流体潤滑理論を応用し、付着量に影響を及ぼすと考えられる塗料の粘度、濃度、ロール周速、ニップ圧、ゴムの弾性、ライン速度等ほとんど全ての要因を取り込んだ理論的付着量モデル(9)式を開発した。

$$M = \frac{3.1 c \gamma \mu^{0.6}}{LS} \left\{ \frac{\alpha \left(\frac{V_A}{V_P} \right)^\beta}{1 + \alpha \left(\frac{V_A}{V_P} \right)^\beta} w_{PA}^{-0.2} E_{PA}^{-0.4} R_{PA}^{0.6} \right. \\ \left. \times \left(\frac{V_P + V_P}{2} \right)^{1.6} - \lambda w_{AS}^{-0.2} E_{AS}^{-0.4} R_{AS}^{0.6} (V_A - LS)^{1.6} \right\} \quad (9)$$

- (2) この付着量制御モデルは、MCLで生産している全ての品種に対して幅広い塗装条件で精度が高いことを確認し、このモデルでロールコータでの塗装状態を精度良く定量的に評価することが可能となった。

- (3) ラインでの制御精度は、ライン速度変更時、コイル間のばらつき、目標付着量の変更とも十分な精度を達成できた。

1991年1月に稼動したMCLは、今回報告したモデルの適用により安定した操業を続けており、12500 t/monthのライン能力を達成している。

参 考 文 献

- 1) T. Matsuda, and W. H. Brendley: *Journal of Coating Technology*, **51**(1979)658, 46-60
- 2) トライボロジ研究会編: 「トライボロジ基礎と応用 I」, (1976), 70, [幸書房]
- 3) H. Benkreira, M. F. Edwards, and W. L. Wilkinson: *Chemical Engineering Science*, **36**(1981), 429-434
- 4) H. Benkreira, M. F. Edwards, and W. L. Wilkinson: *Chemical Engineering Science*, **37**(1982)2, 277-282