

# 連続溶融めっきにおけるガスワイピング機構

武石 芳明\*・山内 昭良\*<sup>2</sup>・宮内 澄隆\*<sup>3</sup>

Gas Wiping Mechanism in Hot-Dip Coating Process

Yoshiaki TAKEISHI, Akiyoshi YAMAUCHI and Sumitaka MIYAUCHI

**Synopsis :** The liquid film flow on a strip steadily moving upward from a coating liquid bath in the gas wiping process for continuous hot-dip coating was analytically investigated assuming that the flow was time-independent and laminar and the surface tension was negligible. The coating thickness profile of the liquid film can be estimated by solving the equation of motion under the boundary conditions that both the impinging pressure and the shear stress of the gas wiping jet act on the liquid film surface. The analytical results of the coating thickness profiles agree well with the experimental results measured by the needle electrode method using glycerine-water solution. The analytical results were also compared with data obtained in a commercial hot-dip galvanizing line. It is confirmed that the effects of the line speed, the nozzle pressure, the nozzle-to-strip distance and the nozzle slit gap on the zinc coating weight can be explained well by the analysis and that the coating weight can be estimated within  $\pm 20\%$  accuracy.

**Key words :** Hot-Dip Coating ; Gas Wiping ; Thin Film Flow ; Impinging Jet ; Impinging Wall Pressure ; Shear Stress ; Coating Thickness ; Continuous Galvanizing Line.

## 1. 緒言

連続溶融めっきにおけるめっき付着量制御は、古くは溶融金属めっき浴直上に設置されたロールにより行われていた<sup>1)</sup>が、1960年代半ばに、非接触法としてガスワイピング法が実用化された<sup>2)</sup>。ガスワイピング法はロールワイピング法に比べめっき付着量の均一性、薄めっき性および高速性に優れており、近年ではほとんどのラインに本法が採用されている。

溶融めっきにおける鋼板の引き上げプロセスに関しては、Hrbek<sup>3)</sup>が最初に理論的な取扱いを行い、鋼板への付着液膜内の速度分布を仮定することによってめっき付着量の推定式を導き、さらに実際の錫めっきラインのデータを基にロールワイピングの影響について検討を行っている。Thornton et al<sup>4)</sup>は、ワイピングジェットによる圧力勾配を考慮する代わりに重力項を無視し、液膜厚さはワイピングジェットの圧力勾配が最大になる位置で決定されるとしてめっき付着量の推定式を導いている。その後、Tuck<sup>5)</sup>、Tuck et al<sup>6)</sup>およびEllen et al<sup>7)</sup>により、液膜の安定性、表面張力およびワイピングジェットのせん断応力の影響についての理論的検討が行なわれているが、実験値との細かい整合性は確認されていない。

一方、溶融めっきラインの付着量制御には、おもに統計

的手法が用いられており、実操業データを基にしためっき付着量におよぼすガスワイピング条件や操業条件の影響に関する重回帰式が提案されている<sup>8)~10)</sup>。しかし、この統計的手法は、回帰分析が行われたラインおよびその操業範囲内では信頼性があるものの新ラインの設計等に用いるには不十分な面もある。

本研究は、汎用性のあるめっき付着量の推定法を確立しようとするものであり、前報<sup>11)</sup>で定量化したガスワイピングジェットの特性を基にして、鋼板面上の液膜流れの解析を行ない、モデル実験および実機データとの比較によりその妥当性を確認したので報告する。

## 2. 理論解析

### 2.1 基礎式

連続溶融めっきにおけるガスワイピングプロセスをFig. 1に示すようにモデル化する。すなわち、溶融めっき浴から連続的に引き上げられる鋼板に付着した液膜にワイピングジェットの衝突圧力と衝突後鋼板に沿って流れる衝突壁面ジェットのせん断力が作用すると考え、この液膜流れを次の仮定の基に解析する。

[仮定]

①鋼板面上の液膜流れは定常層流とする。

平成6年10月7日受付 平成7年2月10日受理 (Received on Oct. 7, 1994; Accepted on Feb. 10, 1995)

\* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

\* 2 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

\* 3 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

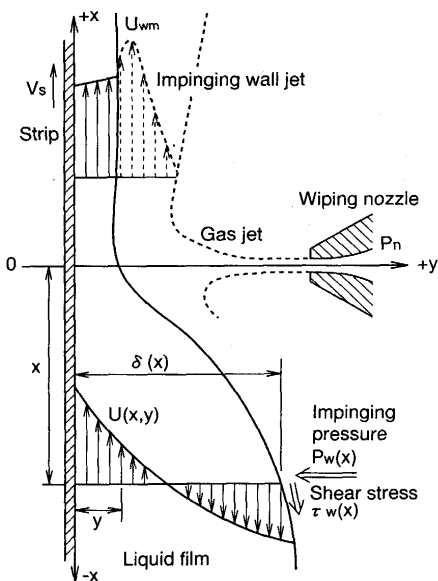


Fig. 1. Analytical model of gas wiping.

②付着液体の表面張力の影響は無視する。

鋼板上の液流れに対する運動方程式および質量保存式は次式となる。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} - g + \frac{\mu_l}{\rho_l} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

境界条件は、鋼板面上で液膜にすべりが無いことおよび液膜表面にワイピングジェットによる衝突圧力  $P_w(x)$  とせん断応力  $\tau_w(x)$  が働くことより次式となる。

$$\left. \begin{aligned} u(x, y)|_{y=0} &= V_s \\ P(x)|_{y=\delta(x)} &= P_w(x) \\ \mu_l \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=\delta(x)} &= \tau_w(x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

よって、(1)および(2)式を(3)式の境界条件のもとに解くと液膜の速度分布は次式となる。

$$u(x, y) = V_s + \frac{\tau_w(x)}{\mu_l} y - \frac{1}{\mu_l} \left\{ \frac{dP_w(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \left\{ \delta(x) - \frac{y}{2} \right\} y \dots\dots\dots (4)$$

鋼板による単位幅当りの液体持ち上げ量は、

$$q = \int_0^{\delta(x)} u(x, y) dy = V_s \delta(x) + \frac{\tau_w(x)}{2\mu_l} \delta^2(x) - \frac{1}{3\mu_l} \left\{ \frac{dP_w(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \delta^3(x) \dots\dots\dots (5)$$

となり、平均膜厚  $\delta_m$  は次式となる。

$$\begin{aligned} \delta_m &= \frac{q}{V_s} = \delta(x) + \frac{\tau_w(x)}{2\mu_l V_s} \delta^2(x) - \frac{1}{3\mu_l V_s} \left\{ \frac{dP_w(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \delta^3(x) \\ &= \delta(x) \left[ 1 + \frac{\tau_w(x)}{2\mu_l V_s} \delta(x) - \frac{1}{3\mu_l V_s} \left\{ \frac{dP_w(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \delta^2(x) \right] \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、無次元化のために

$$\left. \begin{aligned} \delta_m^* &= \frac{\delta_m}{\sqrt{\frac{\mu_l V_s}{\rho_l g}}} \\ \delta^*(\eta) &= \frac{\delta(\eta)}{\sqrt{\frac{\mu_l V_s}{\rho_l g}}} \\ P_w^*(\eta) &= 1 + \frac{1}{\rho_l g b_p} \frac{dP_w(\eta)}{d\eta} \\ \tau_w^*(\eta) &= \frac{\tau_w(\eta)}{\sqrt{\rho_l \mu_l g V_s}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$\eta = \frac{x}{b_p} \dots\dots\dots (8)$$

とすると、(6)式は次式となる。

$$\begin{aligned} \delta_m^* &= \delta^*(\eta) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \tau_w^*(\eta) \delta^*(\eta) - \frac{1}{3} P_w^*(\eta) \delta^{*2}(\eta) \right\} \\ &= h \{ \delta^*(\eta) \} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

また、液膜内の無次元速度分布は

$$\begin{aligned} u^*(\eta, \xi) &= \frac{u(x, y)}{V_s} = 1 + \tau_w^*(\eta) \delta^*(\eta) \xi \\ &\quad - P_w^*(\eta) \delta^{*2}(\eta) \left( 1 - \frac{1}{2} \xi \right) \xi \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ただし、

$$\xi = \frac{y}{\delta(\eta)} \dots\dots\dots (11)$$

となり、液膜表面の無次元流速は次式となる。

$$\begin{aligned} u_s^*(\eta) &= \frac{u_s(x)}{V_s} \\ &= 1 + \tau_w^*(\eta) \delta^*(\eta) - \frac{1}{2} P_w^*(\eta) \delta^{*2}(\eta) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

### 2.2 解法

(9)式により無次元液膜分布  $\delta^*(\eta)$  を求めるには、無次元平均膜厚  $\delta_m^*$  を決める必要がある。今、(9)式において左辺の無次元平均膜厚  $\delta_m^*$  は  $\eta$  によらず一定であり、右辺は無次

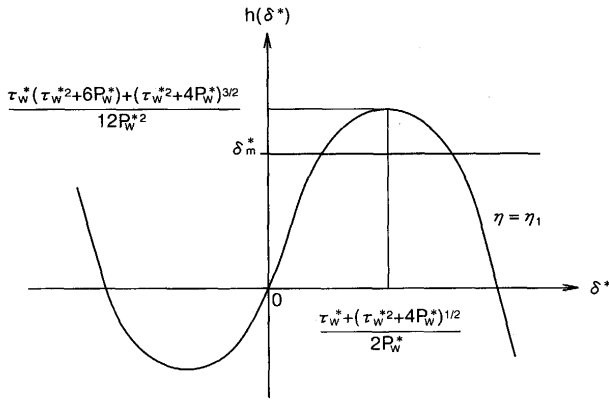


Fig. 2. Solution of film thickness.

元膜厚 $\delta^*(\eta)$ の三次関数である。したがって、(9)式の解は、Fig. 2に示すように関数 $h\{\delta^*(\eta)\}$ と $h\{\delta^*(\eta)\} = \delta_m^*$ との交点であるが、(9)式が実解を持つためには $\delta_m^*$ は関数 $h\{\delta^*(\eta)\}$ の正の極値より小さくならなければならない、次式を満足する必要がある。

$$\delta_m^* \leq \frac{\tau_w^*(\eta) \{ \tau_w^{*2}(\eta) + 6P_w^*(\eta) \} + \{ \tau_w^{*2}(\eta) + 4P_w^*(\eta) \}^{3/2}}{12P_w^{*2}(\eta)} \dots\dots\dots (13)$$

さらに、 $\delta^*(\eta)$ は $\eta$ に対して連続関数であることより、 $\delta_m^*$ は(13)式右辺の $\eta$ に対する最少値とならなければならない。

すなわち、(13)式右辺の $\eta$ に対する最少値を求めることにより $\delta_m^*$ が決まり、(9)式を $\delta^*(\eta)$ に関して解くことにより鋼板への付着膜厚分布を求めることができる。

2・3 ワイピングジェットの特性

ワイピングジェットの鋼板への衝突圧力分布と特性値である圧力および長さの尺度は、前報<sup>11)</sup>における結果より次式を用いる。

$$\frac{P_w(\eta) - P_a}{P_{wm} - P_a} = \exp(-0.695\eta^2) \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{P_{wm} - P_a}{P_n - P_a} = \left\{ 1 + \left( 0.143 \frac{D}{B} \right)^{3.61} \right\}^{-0.287} \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{b_b}{B} = 0.112 \left( \frac{D}{B} + 1.50 \right) \dots\dots\dots (16)$$

また、衝突壁面ジェットのせん断応力については、Beltaos<sup>12)13)</sup>による次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} & \text{衝突ジェット領域 } (\eta \leq 2.5) \\ & \frac{\tau_w(\eta)}{\tau_{wm}} = \text{erf}(0.833\eta) - 0.2\eta \exp(-0.695\eta^2) \\ & \text{衝突壁面ジェット領域} \\ & \frac{\tau_w(\eta)}{\frac{\rho_g U_{wm}^2}{2}} = 0.0474 R_o^{-1/5} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

ただし、

$$\tau_{wm} = 0.06 \frac{\rho_g U_o^2 B}{2D} \dots\dots\dots (18)$$

$$R_o = \frac{\rho_g U_o B}{\mu_g} \dots\dots\dots (19)$$

衝突壁面ジェットの速度の尺度(最大速度)は前報<sup>11)</sup>より次式を用いる。

$$\frac{U_{wm}}{U_o} = 2.17 \frac{(1 + \cos\theta)^{0.613}}{\left( \frac{D}{B} \right)^{0.542} \left( \frac{b_b}{D\eta} \right)^{0.388}} \dots\dots\dots (20)$$

2・4 計算例

液膜の厚さ分布および流速分布を下記条件において計算してみる。

[計算条件]

- ノズルスリットギャップ B : 1.5mm
- ノズルー鋼板距離 D : 20mm
- ワイピング角度  $\theta$  : 90°
- 鋼板速度  $V_s$  : 2.5m/s
- ワイピングガス : 空気(20°C)
- ノズル圧力  $P_n$  : 29.4kPa(in Gauge)
- 付着液体密度  $\rho_l$  : 6634kg/m<sup>3</sup>
- 粘度  $\mu_l$  : 3.04×10<sup>-3</sup>Pa・s

ワイピングジェットの無次元圧力勾配および無次元せん断応力は、Fig. 3に示すようにワイピング位置( $\eta=0$ )近傍で極大値および極小値を持つ分布となる。

無次元液膜分布および液膜表面流速の計算例をFig. 4に示す。鋼板に付着して持ち上げられた液体がワイピングジェットにより払拭され薄膜になる様子がよく分かる。さらに詳細に観察すると、液膜厚さはワイピング位置( $\eta=0$ )よりわずかに上部で最小になり再び厚くなっている。一方、液膜の表面流速は、ワイピング位置よりわずかに下部で下向きから上向きに変化し、ノズル直下で鋼板の速度と等しく( $U_s^*=1$ )なる。さらにこれより上部では鋼板速度より速

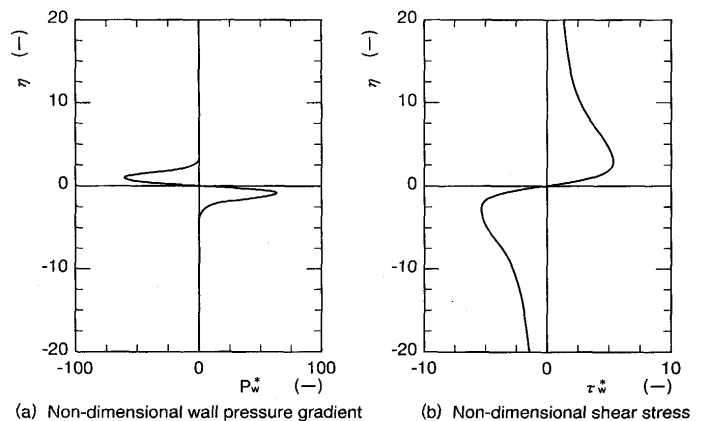


Fig. 3. Characteristics of wiping jet.

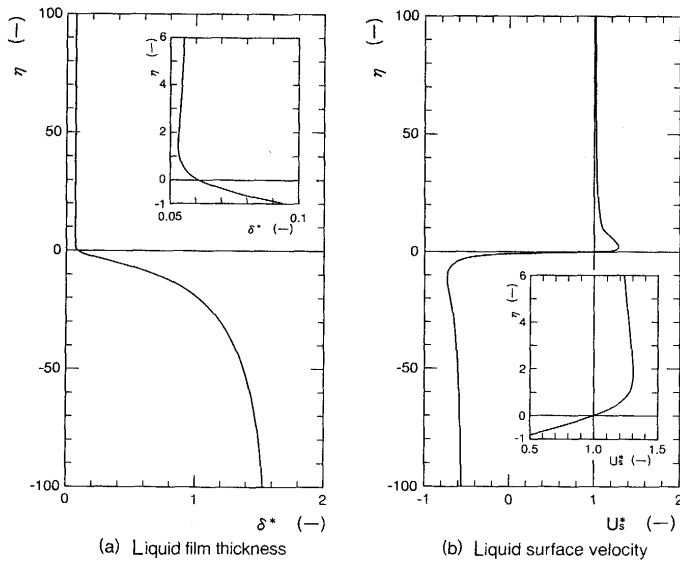


Fig. 4. Calculated results.

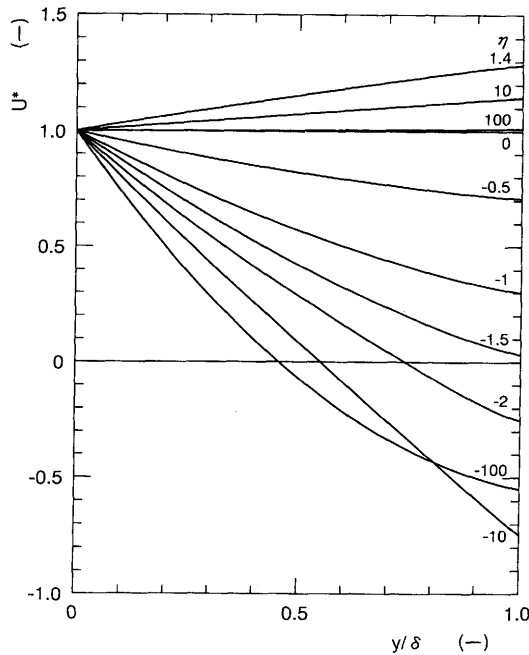


Fig. 5. Velocity distributions of liquid film.

くなり、最大値を示した後再び鋼板速度に漸近している。これは、Fig. 3 に示すようにワイピング位置直上では、附着液体表面に衝突壁面ジェットのせん断力が強く作用するためであり、液膜表面流速は鋼板速度より速くなりその結果液膜厚さが薄くなる。さらに上方では衝突壁面ジェットのせん断力が低下するため液膜表面流速も低下し、液膜厚さは回復する。

Fig. 5 は、液膜内の流速分布を示したものである。ワイピングノズルより下部 ( $\eta < 0$ ) では、速度分布は下に凸の曲線となるが、ワイピングノズルより上部では上に凸な曲線となる。これは液膜表面に、ワイピングノズル下部では下向きに、上部では上向きに衝突ワイピングジェットのせん断力が作用しているためである。また、ワイピングノズ

ル直下およびワイピング位置より充分上方 ( $\eta > 100$ ) では液膜速度は鋼板速度と一致し、速度分布はフラットになる。

### 3. モデル実験

#### 3.1 実験装置および方法

実験装置の概略をFig. 6 に示す。表面に亜鉛めっきを施した幅150mm、厚さ0.7mmのスチールベルトを可変速駆動ロールにより図中矢印の方向に連続回転させ、溶融めっき浴に見立てた水槽に浸漬させる。表面に液体が付着した状態で持ち上げられたスチールベルトは、水槽上部に設けられた一対のノズルによりワイピングされる。

本実験で使用したワイピングノズルは前報<sup>1)</sup>における非対称型であり、ガスとしては圧縮空気を使用した。また、スチールベルトの速度は0~200m/minまで可変である。

スチールベルトに附着した液体の厚さは、Fig. 6 に示す針電極法により測定した。すなわち、10 $\mu$ mの精度を有する微動装置に取り付けた針電極とロール軸との間に10k $\Omega$ の抵抗と電圧記録計を介して1mAの直流定電流を流す。この状態でまず、微動装置により針電極を前進させ針先端がスチールベルトに接した位置(電圧計の指示値が0V)を微動装置の零点とした後針電極を後退させ、一旦液体膜から離す。つぎに、電圧記録計の指示値を見ながら針電極を徐々に前進させ、電圧値が変化し始める位置での微動装置の読み値を膜厚とした。

液体としては、グリセリン水溶液を用い、導電性をよくするために少量のKClを添加した。

#### 3.2 附着膜厚分布

鋼板中央部における高さ方向の附着膜厚分布の実測値と解析値との比較の一例をFig. 7 に示す。解析値と実測値は、ワイピング位置近傍の附着厚変化が大きい部分で若干の差異があるもののガスワイピング後ではよく一致していることが分かる。また、ワイピング直後において附着膜厚が

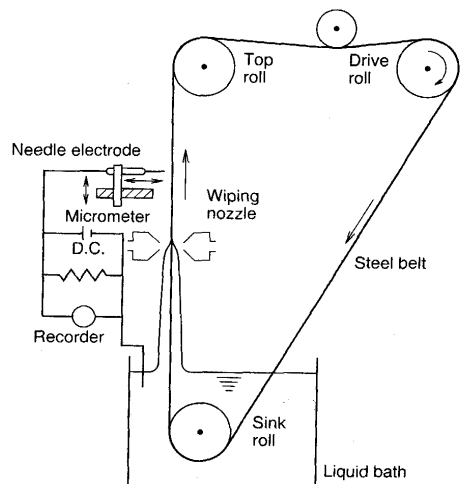


Fig. 6. Experimental apparatus.

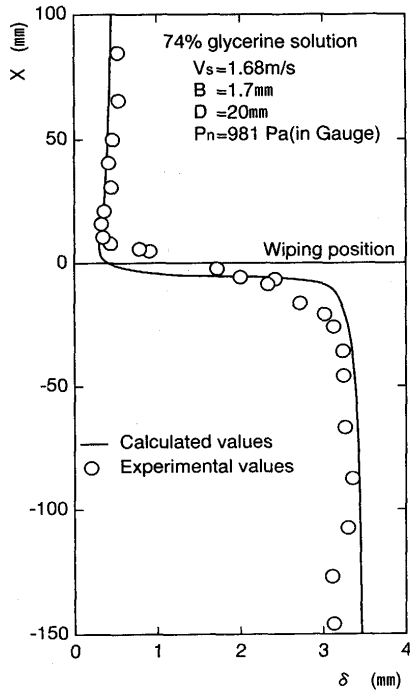


Fig. 7. Comparison of calculated results with experimental results of film thickness profile.

わずかではあるが一旦薄くなった後再び厚くなる現象も解析結果とよく一致している。ワイピング位置近傍の付着膜厚変化が大きい部分、すなわち付着液体の表面曲率が大きい部分において解析値と実測値とに差があるのは、解析において液体の表面張力の影響を無視したためと考えられる。

3.3 付着膜厚の実験値と解析値との比較

Fig. 8 は、ガスワイピング後の付着膜厚の実測値と解析値との比較を示したものである。実測値は、鋼板中央部にお

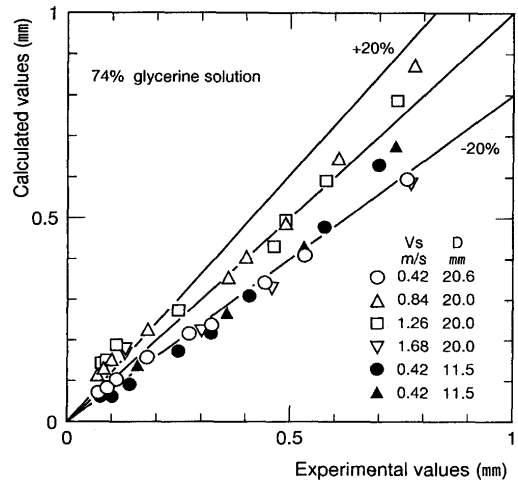
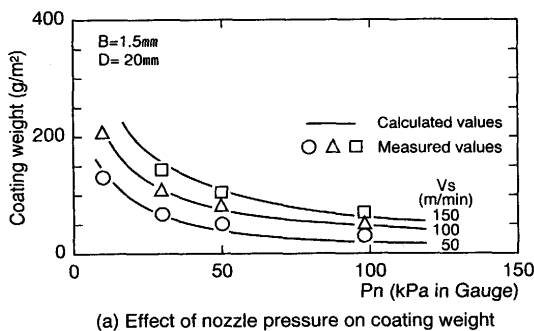


Fig. 8. Comparison of calculated results with experimental results of film thickness.

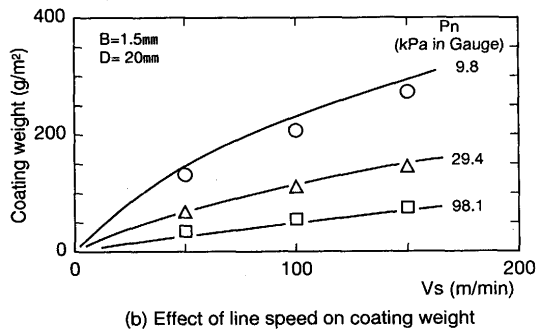
いてワイピング位置から上方へ100mmの位置での測定値であり、ノズル圧力を0.1~9.8kPa (in Gauge) に変化させて測定したものである。この図より、解析値と実測値は、±20%の精度で一致しており、本解析の妥当性が確認できた。

4. 実操業データとの比較

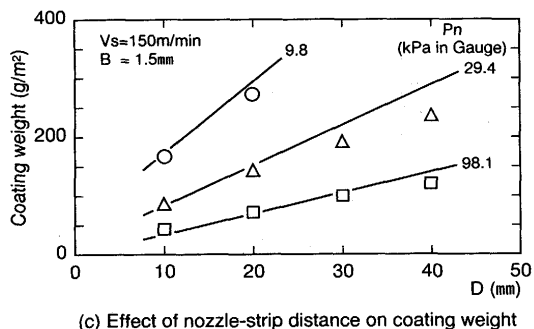
めっき付着量におよぼす操業条件の影響について、当社鹿島製鉄所のNo. 1 連続溶融亜鉛めっきライン (Continuous Galvanizing Line)<sup>14)</sup>における実操業データと解析値とを比較してFig.10に示す。ノズルスリットギャップおよびノズル-鋼板距離が一定であれば、Fig. 9 (a)および(b)に示すようにめっき付着量はノズル圧力の上昇およびライン速度の低下



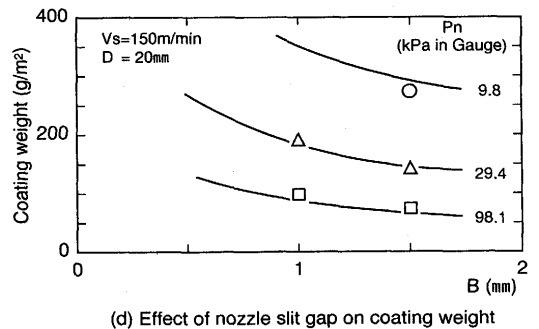
(a) Effect of nozzle pressure on coating weight



(b) Effect of line speed on coating weight



(c) Effect of nozzle-strip distance on coating weight



(d) Effect of nozzle slit gap on coating weight

Fig. 9. Effects of operating conditions on coating weight in commercial hot-dip galvanizing line.

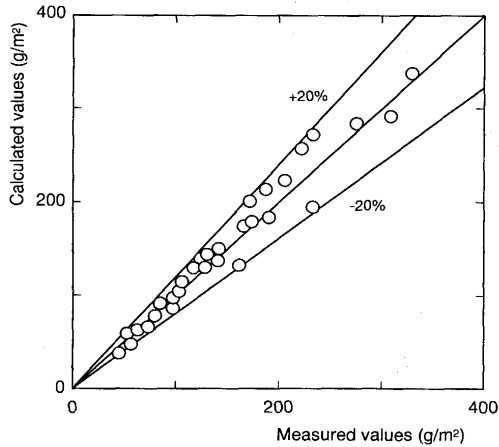


Fig. 10. Comparison of calculated results with measured results of coating weight in commercial hot-dip galvanizing line.

とともに減少する。また、同一ライン速度および同一ノズル圧力では、Fig. 9 (c)および(d)に示すように、ノズルと鋼板との距離が短いほど、ノズルスリットギャップが広いほどめっき付着量は少なくなる。このように、めっき付着量におよぼすノズル圧力、ライン速度、ノズル-鋼板距離およびノズルスリットギャップの影響に関する実操業データと解析値とはよく一致しており、本解析により連続溶融亜鉛めっきラインにおけるめっき付着量の推定が可能であることがわかった。

Fig.10は、実操業データと解析値とを比較したものであるが、解析結果は、±20%の精度で実操業データと一致している。

## 5. 結言

連続溶融めっきにおけるガスワイピング機構に関し、溶融めっき浴から連続的に引き上げられる鋼板に付着した液膜流れの解析を行なうとともにモデル実験および実操業データとの比較を行なった結果、以下の知見が得られた。

(1) 鋼板面上の液膜流れを定常層流とするとともに表面張力の影響を無視して、液膜表面にワイピングジェットの影響を無視して、液膜表面にワイピングジェットの衝突圧力と壁面せん断応力が作用するとして解析により付着膜厚分布を推定できる。

(2) 本解析結果は、グリセリン水溶液を用いたモデル実験による鋼板高さ方向の液膜分布とよく一致し、解析手法の妥当性が確認できた。

(3) さらに本解析結果は、連続溶融亜鉛めっきラインにおけるめっき付着量とも±20%の精度で一致し、本方法によりめっき付着量の推定が可能であることがわかった。

## 記号

- B: ノズルスリットギャップ(m)
- $b_p$ : 圧力の半値幅(m)
- D: ノズル-鋼板間距離(m)
- g: 重力加速度( $m/s^2$ )
- h:  $\delta^*$ の関数(9)式(-)
- $P_a$ : 大気圧力(Pa)
- $P_n$ : ノズル圧力(Pa)
- $P_w$ : 壁面圧力(Pa)
- $P_w^*$ : 無次元壁面圧力勾配(7)式(-)
- $P_{wm}$ : 最大壁面圧力(Pa)
- q: 鋼板単位幅当りの液体持ち上げ量( $m^3/s/m$ )
- $R_o$ : ワイピングジェットのレイノルズ数(-)
- $U_o$ : ワイピングノズル出口の流速(m/s)
- $U_{wm}$ : 衝突壁面ジェットの最大流速(m/s)
- u: x方向の液流速(m/s)
- $u^*$ : x方向の無次元液流速(10)式(-)
- $u_s$ : 液膜表面流速(m/s)
- $u_s^*$ : 無次元液膜表面流速(12)式(-)
- $V_s$ : 鋼板速度(m/s)
- x: 鋼板の高さ方向距離(m)
- y: 付着液体の厚さ方向距離(m)
- $\delta$ : 付着液膜厚(m)
- $\delta$ : 無次元付着液膜厚(7)式(-)
- $\delta_m$ : 平均付着液膜厚(m)
- $\delta_m^*$ : 無次元平均付着液膜厚(7)式(-)
- $\eta$ : x方向の無次元距離(8)式(-)
- $\theta$ : ワイピング角度(deg.)
- $\mu_x$ : ワイピングガスの粘度( $Pa \cdot s$ )
- $\mu_l$ : 付着液体の粘度( $Pa \cdot s$ )
- $\xi$ : y方向の無次元距離(11)式(-)
- $\rho_x$ : ワイピングガスの密度( $kg/m^3$ )
- $\rho_l$ : 付着液体の密度( $kg/m^3$ )
- $\tau_w$ : 壁面せん断応力(Pa)
- $\tau_{wm}$ : 最大壁面せん断応力(Pa)
- $\tau_w^*$ : 無次元壁面せん断応力(7)式(-)

## 文献

- 1) 岩崎徹二, 小池通義: 日新製鋼技報, **20** (1969), p.92
- 2) J.J.Butler, D.J.Beam and J.C.Hawkins: Iron & Steel Eng., **47** (1970), p.77
- 3) A.Hrbek: Metal Finishing J., **7** (1961) Aug., p.298
- 4) J.A.Thornton and H.F.Graff: Metall. Trans. B, **7B** (1976), p.607
- 5) E.O.Tuck: Phys. Fluids, **26** (1983), p.2352
- 6) E.O.Tuck and J.M.V.Broeck: AIChE Journal, **30** (1984), p.808
- 7) C.H.Ellen and C.V.Tu: Trans. ASME J. Fluids Eng., **106** (1984), p.399
- 8) W.J.Edwards, A.J.Carlton, G.F.Harvey, R.F.K.Evans and P.J.Mckerrow: Automatica, **12** (1976), p.225
- 9) 安谷屋武志, 阿部雅樹, 庄司政浩, 矢野秀勝: 鉄と鋼, **66** (1980), p.835
- 10) 安藤成海, 岩崎清俊, 福田豊史, 前原一雄, 小野泰太郎, 笠井研治: 実務表面技術, **29** (1982), p.160
- 11) 武石芳明, 青木健郎: 鉄と鋼, **81** (1995), p.135
- 12) S.Beltaos, and N.Rajaratnam: J.Hydraulic Research, **11** (1973), p.29
- 13) S.Beltaos: J.Hydraulics Division ASCE, **102**, HY9 (1976), p.1177
- 14) 石川康昭, 中井 尚, 藤田貞智, 北村洋一: 鹿島製鉄所亜鉛メッキラインの概要, 住友金属, **41** (1989), p.73