

# 溶融めっき鋼板外観に与える CGL ワイピング影響

## Wiping Effect of CGL on Appearance of Hot-dip Coated Steel Sheets

吉本 宗司 YOSHIMOTO Soshi JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 研究員  
伊藤 優 ITO Yu JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員(副課長)  
高橋 秀行 TAKAHASHI Hideyuki JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員(副部長)

### 要旨

CGL(Continuous hot-dip Galvanizing Line)では、ワイピングノズルのガス噴流によって溶融亜鉛が飛散(スプラッシュ)する。このスプラッシュと呼ばれる溶融亜鉛の異物がワイピングノズルに付着した場合、亜鉛めっき鋼板の表面に線状マークと呼ばれる長手方向の筋模様が発生する。本報では、ワイピングシミュレーターによるラボ実験や、数値流体解析を用いて、線状マークの発生条件の明確化や、定量化を行った。まずラボ実験により、ワイピングノズルの先端や上部への異物の付着は表面品質にあまり影響を与えないが、スリットギャップの詰まりは線状マーク発生に重大な影響を与えることが分かった。次に、スリットギャップの詰まりによって発生する線状マークは、数値流体解析とワイピング理論を用いることで定量化できることを明らかにした。

### Abstract:

During processing of steel strip in CGL (Continuous hot-dip Galvanizing Line), jet flow of wiping nozzle splashes molten zinc. The attachment of foreign material of molten zinc that is called splash to the surface of the wiping nozzle causes longitudinal striped pattern that is called linear mark on the galvanized steel strip. This paper presented a clarification of generation conditions and a quantification of linear mark based on experiments with a laboratory wiping simulator and a CFD analysis. First, the experiments revealed that although attachment of the foreign material to the front edge or the upper part of the wiping nozzle had an insignificant effect on surface quality, blocking of the slit gap greatly affected the generation of linear mark. Second, it was shown that the linear mark caused by blocking of the slit gap was quantifiable based on a CFD analysis and a wiping theory.

## 1. はじめに

ガスワイピングプロセスとは、液体の膜厚をガス噴流によって制御する手法である。本手法は CGL (Continuous hot-dip Galvanizing Line) において、溶融亜鉛のめっき膜厚を制御するために長年使用されてきた。CGL では、鋼板の表裏面に対向するように亜鉛浴ポットの上に設置されたワイピングノズルが、空気や窒素ガスを鋼板に向かって噴射することで、余分な溶融亜鉛を取り除き、所定のめっき膜厚に制御している。CGL において、溶融亜鉛めっき鋼板の外観に最も影響を与えるのが、このガスワイピングプロセスである。

例えば、ガス噴流によって飛散したスプラッシュと呼ばれる溶融亜鉛の異物<sup>1)</sup>がワイピングノズルに付着することで噴流に影響が及び、線状マークと呼ばれる外観模様が発生する。この外観模様は、程度が悪い場合には外観不良と認識されることもあるため、ワイピングノズルに付着した異物を自動で除去する清掃用装置<sup>2)</sup>や、原因となるスプラッシュ

自体の発生を抑制する手法<sup>3)</sup>など各種の開発がなされている。しかし、どの程度の大きさの異物が影響するのか、その付着場所の影響はあるのか等、模様の発生条件を定量的に評価した例はみられない。そこで本報では、ワイピングシミュレーターによるラボ実験や、数値流体解析とワイピング理論を用いて、線状マークの発生条件の明確化と定量化を試みた。

## 2. 線状マーク

図1にCGLで発生した線状マークの写真を示す。線状マークとは、鋼板の通板方向に平行な長手方向の筋模様である。図2に線状マークと通常のめっき部分のめっき膜厚を示す。めっき膜厚は渦電流式膜厚計(SWT-9000:株式会社サンコウ電子研究所)によって測定した。それぞれ長手方向に10箇所測定することで平均値を算出しており、一回の測定範囲はプローブの位置を中心としてφ2mmである。線状マークのめっき膜厚は通常部より4~5μm厚く、亜鉛の膜厚に起伏があることで線状マークとして視認できることが明らかになった。

2017年8月30日受付

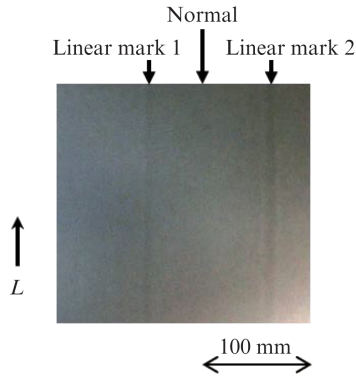


図1 線状マークの写真  
Fig. 1 Photograph of linear mark

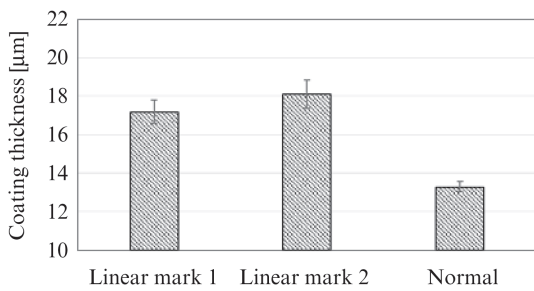


図2 線状マークと通常部のめっき膜厚 (図1参照)

Fig. 2 Coating thickness of linear mark and normal coating (cf. Fig. 1)

### 3. ワイピングシミュレーターによるラボ実験

#### 3.1 実験方法

前述のとおり、ワイピングノズルへのスプラッシュと呼ばれる溶融亜鉛の異物の付着が線状マークの発生原因であることは知られていたが、異物の付着位置や大きさの影響は知られていなかった。そこで、ワイピングシミュレーターを使用することで、上記の影響を調査した。図3に実験装置

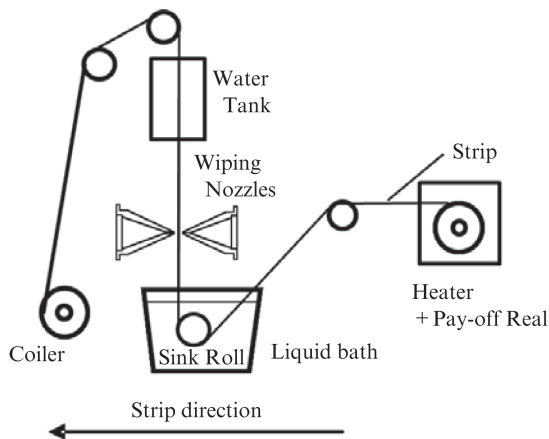


図3 ワイピングシミュレーターの概要図  
Fig. 3 Schematic of wiping simulator

表1 実験条件

Table 1 Experimental condition

Coating material	Zinc
Strip size [mm]	0.45 t × 100 w
Bath temperature [°C]	470
Transfer speed [m/min]	50
Nozzle-strip distance [mm]	10
Plenum pressure [kPa]	20

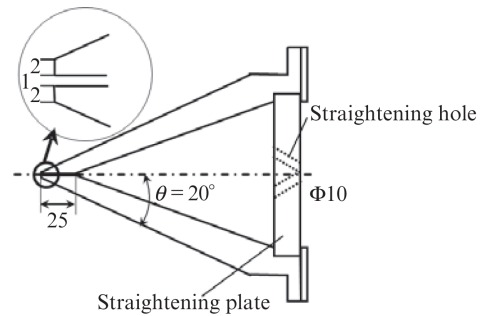


図4 ワイピングノズルの概要図  
Fig. 4 Schematic of wiping nozzle

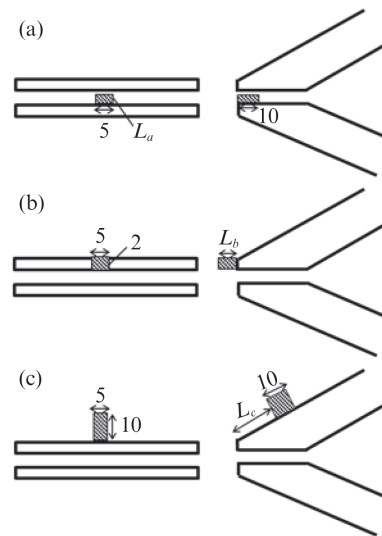


図5 障害物のワイピングノズルへの設置位置  
(a) スリットギャップ (b) ノズル先端 (c) ノズル上部

Fig. 5 Attachment position of block to wiping nozzle  
(a) Slit gap (b) Front edge of nozzle (c) Upper part of nozzle

の概要図を示す。予熱された鋼板を溶融亜鉛浴に浸漬した後に、ワイピングノズルのガス噴流によってめっき膜厚を調整し、鋼板を巻き取る構成となっている。表1に実験条件を示す。

図4に本実験で使用したワイピングノズルの概要図を示す。スリットギャップの中心線を軸として線対称な形状である。ノズル先端の寸法は、スリットギャップが1.0 mm、スリット長が25.0 mm、リップ幅が2.0 mmである。またノズル幅

表 2  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$  の条件  
Table 2 Conditions of  $L_a$ ,  $L_b$  and  $L_c$

$L_a$ [mm]	0.05, 0.125, 0.25, 0.5, 1
$L_b$ [mm]	1, 3, 5
$L_c$ [mm]	0, 10, 20

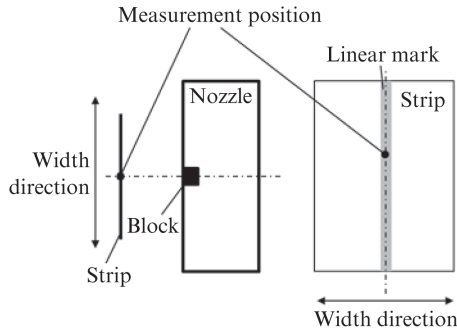


図 6 めっき膜厚の測定位置の例

Fig. 6 Example of coating thickness measurement position

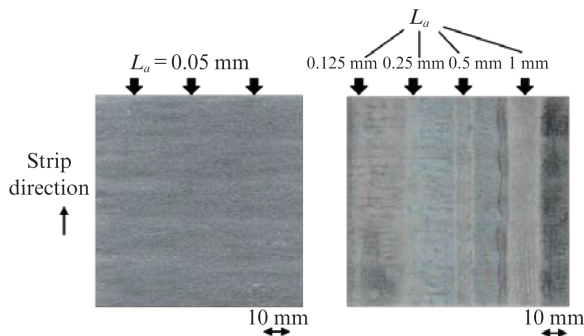


図 7 線状マークの写真 (図 5 (a))

Fig. 7 Photograph of linear mark (Fig. 5 (a))

は 200 mm である。

実際の異物の代わりとして、スポンジやセロハンテープを使用した。図 5 にそれぞれの障害物のワイピングノズルへの設置位置や大きさを示す。ここで、障害物の設置位置は、図 5 (a) がスリットギャップ、図 5 (b) がノズル先端、図 5 (c) がノズル上部である。また障害物のパラメーターとしては、 $L_a$  が障害物高さ、 $L_b$  が障害物長さ、 $L_c$  が先端からの距離である。

表 2 に図 5 におけるパラメーターの実験条件を示す。比較として、通常条件 (障害物無し) での実験も行った。

めっき膜厚は図 2 と同様の方法で測定した。図 6 にめっき膜厚の測定位置の例を示す。障害物の設置位置と正対する位置で測定した。

### 3.2 実験結果

図 7 に図 5 (a) (スリットギャップに設置) の条件での実験後の鋼板の写真を示す。 $L_a=0.05$  mm では線状マークは視認できないが、 $L_a \geq 0.125$  mm では視認することができる。

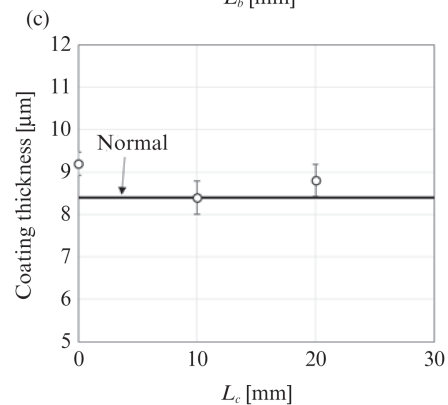
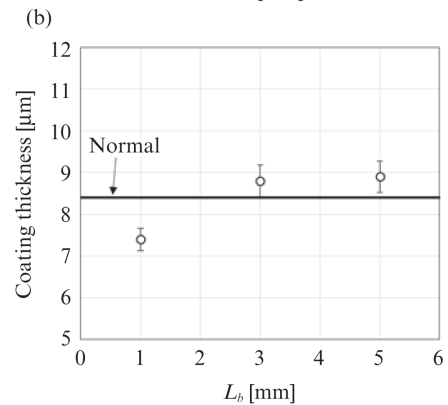
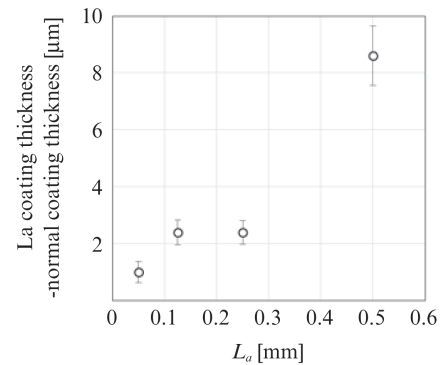
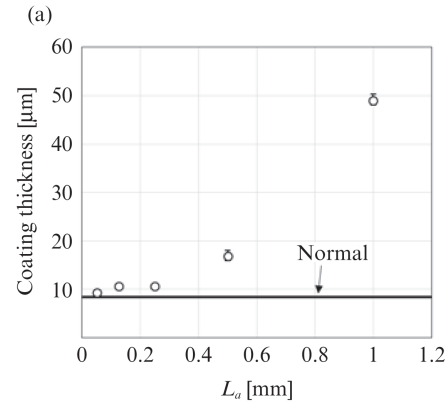


図 8 障害物のめっき膜厚への影響

(a) スリットギャップ (b) ノズル先端 (c) ノズル上部  
Fig. 8 Influence of block on coating thickness  
(a) Slit gap (b) Front edge of nozzle (c) Upper part of nozzle

また、線状マークは  $L_a$  の増加に従って視認しやすくなる。

図 8 (a) に図 5 (a) (スリットギャップに設置) の条件でのめっき膜厚や、線状マークと通常部のめっき膜厚差を示

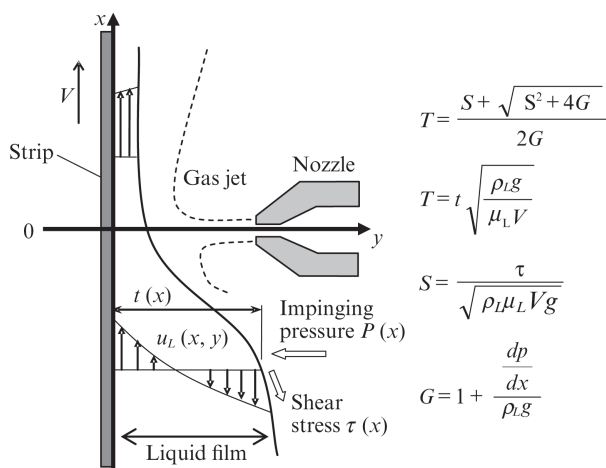


図9 ワイピング理論モデル  
Fig. 9 Wiping theory model

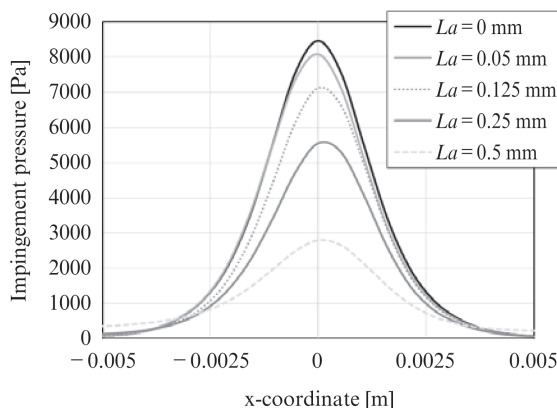


図11 衝突圧力分布  
Fig. 11 Distribution of impingement pressure

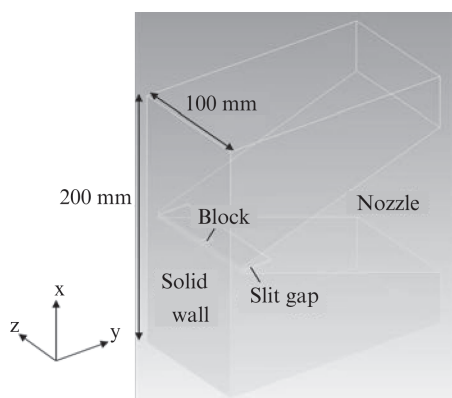


図10 数値解析モデル  
Fig. 10 Numerical analysis model

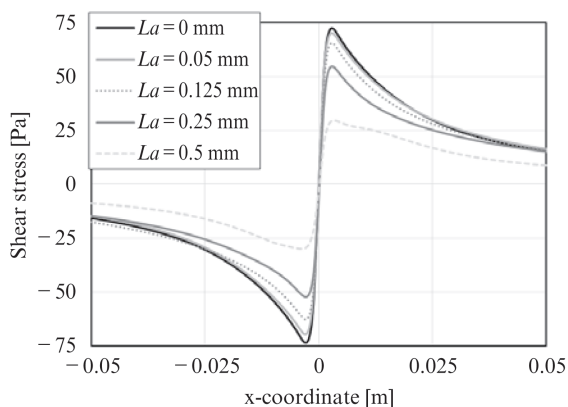


図12 せん断応力分布  
Fig. 12 Distribution of shear stress

す。ここで通常部とは、障害物無しの条件である。めっき膜厚は  $L_a$  の増加に従って増加する傾向がある。図7と比較すると、線状マークはめっき膜厚差の増加に従って視認しやすくなる事が分かる。また、 $L_a \geq 0.125$  mm で視認できるため、めっき膜厚差の視認閾値は約  $2 \mu\text{m}$  と考えられる。

図8 (b) に図5 (b) (ノズル先端に設置) の条件でのめっき膜厚を、図8 (c) に図5 (c) (ノズル上部に設置) の条件でのめっき膜厚を示す。いずれの条件でも線状マークは視認できなかったが、これは線状マークと通常部のめっき膜厚差が  $2 \mu\text{m}$  未満であったためと考えられる。

上記の結果から、ワイピングノズルの先端や上部への異物の付着は表面品質にあまり影響を与えないが、スリットギャップの詰まりは線状マーク発生に重大な影響を与えることが分かった。

#### 4. 数値流体解析とワイピング理論

スリットギャップの詰まりによって発生する線状マークの定量化を、数値流体解析とワイピング理論によって試みた。

まず、ワイピング理論について説明する。ワイピング理論として図9のようなモデルが知られており、めっき膜厚を算出することが可能である<sup>46)</sup>。ここで  $t$  はめっき膜厚、 $g$  は重力加速度、 $\tau$  はせん断応力、 $p$  は衝突圧力、 $\rho_L$  は液体の密度、 $\mu_L$  は液体の粘度、 $V$  は通板速度である。

次に、数値流体解析について説明する。図10に数値解析モデルを示す。数値解析には、市販のソフトウェアであるFluent15.0を使用し、3次元圧縮性のナビエーストークス方程式を解いた。乱流モデルには標準  $k-\epsilon$  モデルを使用し、壁関数には標準壁を使用した。その他の解析条件は表1~2と同一であるが、溶融亜鉛は模擬していない。ワイピングノズルの形状は図4と同一である。メッシュ数は障害物の大きさによって若干異なるが、約250万である。

図9によると、めっき膜厚を決定するのは、ワイピングガスの衝突圧力と、鋼板に沿って流れるガスのせん断応力である。そこで、衝突圧力とせん断応力への、スリットギャップ内の障害物の影響を評価した。

図11に衝突圧力分布、図12にせん断応力分布の数値解析結果を示す。図11、図12は障害物と正対する位置での長

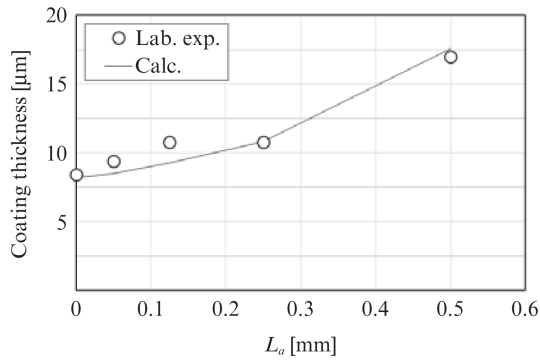


図 13 スリットギャップの詰まりのめっき膜厚への影響  
Fig. 13 Influence of slit gap block on coating thickness

手方向の分布を示しており、 $x=0$  はスリットギャップの中心線に位置する。例えば、 $L_a=0.5$  mm (スリットギャップの詰まりの割合：50%) の条件では、 $L_a=0$  mm の通常条件に対して、最大衝突圧力が約 67% 低下し、最大せん断応力が約 59% 低下する。また  $L_a=0$  mm の通常条件では、衝突圧力分布は  $x=0$  を軸として線対称であるが、 $L_a$  の増加に従って対称軸が  $x$  の正方向 (スリットギャップ内の上側) に移動している。これはワイピングガスが、障害物を避けてスリットギャップ内の上側から噴射するためである。

図 11, 12 の結果を基に、スリットギャップが詰まっていた場合のめっき膜厚を、図 9 のモデルを使用して計算した。図 13 にめっき膜厚の計算結果とラボ実験結果 (図 8 (a)) を併せて示す。計算結果はラボ実験結果とおおむね一致している。本結果から、スリットギャップの詰まりによって発生する線状マークは、数値流体解析とワイピング理論を用いることで定量化できることが明らかになった。

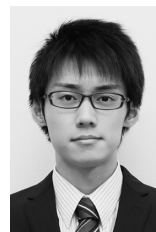
## 5. おわりに

CGL において発生する線状マークと呼ばれる外観模様の発生条件の明確化や定量化をするために、ワイピングシミュレーターによるラボ実験や、数値流体解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) 線状マークは、通常部とのめっき膜厚差が約  $2 \mu\text{m}$  以上ある時に、視認することができる。
- (2) ワイピングノズルの先端や上部への異物の付着はめっき膜厚差にあまり影響を与えないが ( $2 \mu\text{m}$  未満)、スリットギャップの詰まりはめっき膜厚差に大きな影響を与える ( $2 \mu\text{m}$  以上)。
- (3) スリットギャップの詰まりによって発生する線状マークは、数値流体解析とワイピング理論によって定量化可能である。

### 参考文献

- 1) Takeishi, Y.; Suzuki, Y.; Yabuki, K. Japanese J. Multiphase Flow. 2000, vol. 14, no. 2, p. 194.
- 2) Jordan, A.; Dombrowski, S. AISTech. 2010, vol. 2, p. 485.
- 3) Takeda, G.; Takahashi, H.; Miyake, M.; Nakata, N. Japanese J. Multiphase Flow. 2014, vol. 28, no. 1, p. 90.
- 4) Ellen, C. H.; Tu, C. V. Trans. ASME J. Fluid Eng. 1984, Vol. 106, p. 399.
- 5) Elsaadawy, E. A. et al. Metall. Mater. Trans. B. 2007, vol. 38B, p. 413.
- 6) Takeishi, Y.; Yamuchi, A.; Miyauchi S. Tetsu to Hagané. 1995, vol. 81, p. 37.



吉本 宗司



伊藤 優



高橋 秀行