

連続溶融めっきにおけるガスワイピングジェットの特性

武石 芳明*・青木 健郎*

Characteristics of Gas Wiping Jet in Hot-Dip Coating Process

Yoshiaki TAKEISHI and Takeo AOKI

Synopsis : As for the characteristics of the gas wiping jet in the hot-dip coating process, the flow coefficient, the velocity profile and the impinging wall pressure distribution of a plane jet are investigated using two types of model nozzle.

The friction loss of the wiping nozzle is 1% or less when the ratio of lip length to slit gap is not more than 5. The inner shape of the wiping nozzle has no effect on the characteristics of the wiping jet. The impinging wall pressure at the plate edge is low and the wall pressure distribution is gently as compared with those at the plate center. It is considered that this is the probable cause of edge over coatings. The velocity distribution of the impinging wall jet agrees with Verhoff equation for the wall jet injected parallel to a wall. The velocity scale of the impinging wall jet is affected by the nozzle slit gap and the wiping angle, but the length scale is independent of those values.

Key words : hot-dip coating ; gas wiping ; plane jet ; free jet ; impinging jet ; wall jet ; flow coefficient ; velocity distribution ; impinging wall pressure.

1. 緒言

連続溶融めっきにおけるガスワイピングは、めっき付着量の制御のみならず製品の表面品質を決定する重要なプロセスである。このガスワイピング機構を解明するには、まずワイピングジェットの特性を把握しておく必要がある。

ワイピングジェットは、三つの領域に分けることができる。すなわち、①二次元自由ジェット領域、②二次元衝突ジェット領域および③二次元衝突壁面ジェット領域である。ここで、衝突後鋼板に沿って流れるジェットは、壁面に平行なノズルから噴射形成される二次元壁面ジェット¹⁾²⁾と区別するために二次元衝突壁面ジェットと呼ぶことにする。

二次元自由ジェットについては、多くの実験的および理論的検討が行なわれており、速度分布および特性値である速度の尺度(最大速度)と長さの尺度(速度の半値幅)の推定式が提案されている^{3)~8)}。二次元衝突ジェットは、帯状体の加熱、乾燥あるいは冷却等工業上広く利用されていることから、熱伝達および物質伝達特性と併せて研究されている⁹⁾¹⁰⁾が、鋼板エッジ部でのガス流れに関する研究は見あたらない。二次元衝突壁面ジェットに関しては、わずかにBeltaos⁷⁾¹¹⁾により速度分布と特性値が測定されている程度であり、その特性値におよぼす影響因子の定量化は充分とはいえない。

本研究では、ガスワイピングプロセスにおける基本とも言えるワイピングジェットの特性を総合的に定量化しようとするものであり、内部構造が異なる2種類のワイピング

ノズルを用いてノズルの流量係数、ジェット velocity 分布および圧力分布を測定し、各因子の影響を明かにしたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略をFig. 1に示す。二次元自由ジェットおよび衝突壁面ジェットの速度分布は、外径0.51mm、内径0.26mmのピトー全圧管を用いて測定した。二次元衝突ジェットの壁面圧力分布は、0.1mmの導圧孔を穿った幅150mm、厚

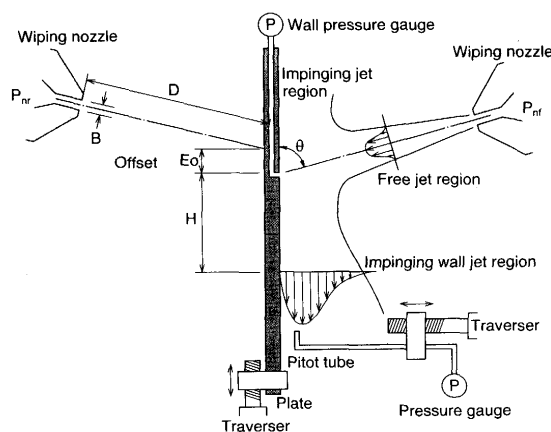


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus and definition of terms.

平成6年7月1日受付 平成6年10月14日受理 (Received on July 1, 1994; Accepted on Oct. 14, 1994)

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

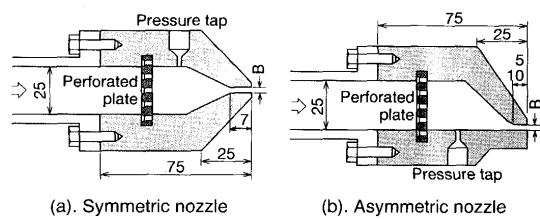


Fig. 2. Shape of gas wiping nozzle tested.

さ 3 mmの鋼板を用いて測定した。

ワイピングガスとしては、スクリーコンプレッサーで加圧された圧縮空気を用いた。圧縮空気は、冷凍器で冷却除湿され、減圧弁で所定の圧力に調整された後、温度、圧力および流量を計測され分配ヘッダーより供試ノズルに供給される。

2・2 供試ノズル

実験にはFig. 2 に示す内部構造の異なる2種類のノズルを用いた。Fig. 2 (a)はノズル内部構造が上下対称であり、ガス流路は上下両方から絞られている。Fig. 2 (b)はノズル内部構造が非対称であり、ノズル内部の下方はフラットで上方からだけ絞られている。ノズル幅は、それぞれ200mmであり、スリットギャップは、上下リップを固定するサイドプレートのシム厚を変えることによって任意に設定できる。

2・3 実験方法

(1) ノズルの流量係数

流量係数は、ガスジェットが等エントロピー流れであるとした時の理論流量 G_t に対する実流量 G_m の比として次式で定義し、この流量係数におよぼすノズルのスリットギャップとリップ長の影響を測定した。

$$C_n = \frac{G_m}{G_t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、理論流量はノズル圧力 P_n より次式で計算した。

$$G_t = A_n a_n \rho_n M_n \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_n^2\right)^{-\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$a_n = \sqrt{\kappa R T_n} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{P_n}{P_a} < \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \text{の時} \\ & M_n = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left\{ \left(\frac{P_n}{P_a}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\}} \dots\dots\dots (4) \\ & \frac{P_n}{P_a} \geq \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \text{の時} \\ & M_n = 1 \end{aligned} \right\}$$

実流量はオリフィス流量計による測定値を用いた。

(2) 二次元自由ジェットの特性

速度分布は、ピトー管で測定された全圧より計算される

マッハ数 M とノズル圧力より求められるノズル出口の理論マッハ数 M_0 を用いて整理した。

$$\left. \begin{aligned} & \frac{P_p}{P_a} < \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \text{の時} \\ & M = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left\{ \left(\frac{P_p}{P_a}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\}} \dots\dots\dots (5) \\ & \frac{P_p}{P_a} \geq \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \text{の時} \\ & M^2 - \frac{\kappa - 1}{2\kappa} = \frac{\kappa + 1}{2\kappa} \left(\frac{P_p}{P_a}\right)^{1 - \kappa} \end{aligned} \right\}$$

$$M_0 = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left\{ \left(\frac{P_n}{P_a}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\}} \dots\dots\dots (6)$$

特性値である速度の尺度(最大マッハ数)および長さの尺度(速度の半値幅)は、それぞれ速度分布から求めた。速度の半値幅は、ジェットの中心から最大値の1/2になるマッハ数を呈する位置までの距離として求めた。

(3) 二次元衝突ジェットの特性

壁面圧力分布、圧力の尺度(最大壁面圧力)および長さの尺度(圧力の半値幅)におよぼすスリットギャップ、ノズルからの距離、ワイピング角度およびノズル圧力の影響を測定した。また、鋼板中央部のみでなく鋼板エッジ部での偏流の影響を調べるため、エッジより3mmの位置での壁面圧力分布を両ワイピングジェットを鋼板エッジ部で衝突させた場合およびオフセットを付けた場合についても比較した。

(4) 二次元衝突壁面ジェットの特性

二次元自由ジェットの場合と同様に(5)式および(6)式によるマッハ数で整理した。速度の半値幅は、最大マッハ数位置よりも外側において、マッハ数が最大値の1/2になる壁面からの距離として求めた。

3. 実験結果および考察

3・1 ノズルの流量係数

スリットギャップを0.44~2.11mmまで変化させた時のノズルの流量係数におよぼすノズルリップ長 L_n とスリットギャップ B との比の影響をFig. 3に示す。流量係数はノズル圧

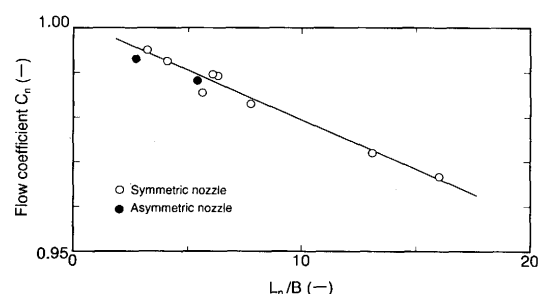


Fig. 3. Effect of nozzle lip length to slit gap ratio on flow coefficient.

力を0.01~0.2MPaまで変化させた時の平均値である。ノズルの流量係数は、ノズル形状によらず L_n/B の増加にともなう減少している。すなわち、ノズルリップ長が長くなるほど、またスリットギャップが狭くなるほどノズルからの噴出抵抗が大きくなる。本実験範囲では L_n/B を5以下にすれば流量係数は0.99以上になり理論流量に対しての損失は1%以下になる。

3・2 二次元自由ジェットの特 性

(a) 速度分布

二次元自由ジェットの速度分布を、 M_f/M_{mf} と x/b_{mf} との関係で整理してFig. 4に示す。ポテンシャルコア領域では、速度分布の相似性は認められないが、ノズルから一定距離以上離れた完全発達領域では相似形になる。同図には、非対称ノズルのデータも併せ示したが、対称ノズルと同様に速度分布は対称である。ちなみに、Fig. 4の横軸のマイナス側が非対称ノズルにおけるフラットな下リップ側に当たる。また、Fig. 4 (b)にはTollmienおよびGoertlerによる速度分布の理論解¹⁾も示したが、本実験結果はジェット中心部付近ではGoertlerの解と、またジェット中心から離れた部分ではTollmienの解とよく一致している。

(b) ポテンシャルコア

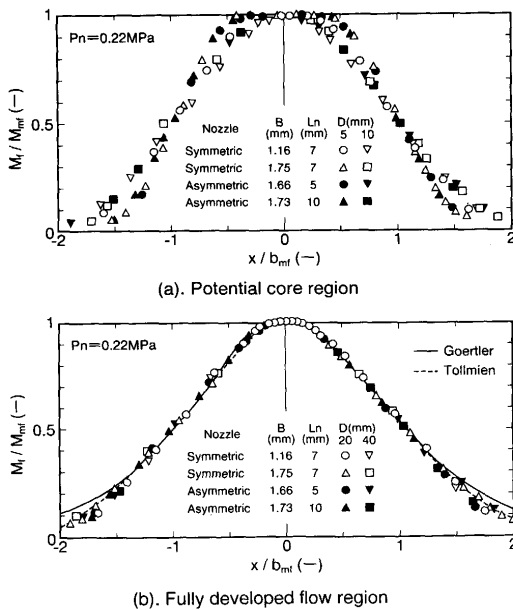


Fig. 4. Velocity distribution of wiping jet.

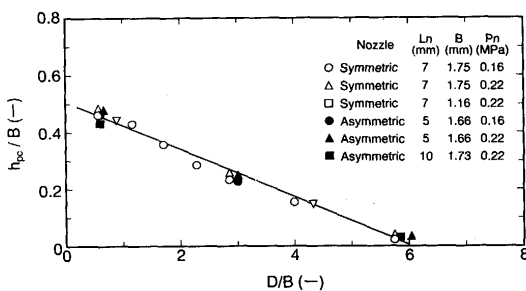


Fig. 5. Potential core width of wiping jet.

Fig. 5は、速度分布より読みとったポテンシャルコアの半幅 h_{pc} とノズルからの距離 D との関係を示したものである。ポテンシャルコアの半幅は、ノズルから離れるに従って直線的に減少し、ノズルスリットギャップの約6倍の位置で消滅している。最少自乗法によりポテンシャルコアの半幅を求めると次式が得られ、ポテンシャルコアの減衰角度は一般に言われている 4.8° とよく一致している。

$$\frac{h_{pc}}{B} = 0.508 - 0.0847 \frac{D}{B} = 0.508 - \tan(4.84^\circ) \frac{D}{B} \dots (7)$$

(c) 相似性

二次元自由ジェットのポテンシャルコア領域および遷移領域においては、その速度分布の相似性が完全発達領域のように成立しない。しかし、ポテンシャルコアの外側のせん断流領域においては、雰囲気ガスとの混合による流れの減衰が起こっているはずであり、完全発達領域と同様に相似性が成り立つものと考えられる。そこで、ポテンシャルコア領域における長さの尺度を $b_{mf} - h_{pc}$ と考え、速度分布を $\frac{x - h_{pc}}{b_{mf} - h_{pc}}$ で整理すると、Fig. 6に示すようにポテンシャルコアより外側のせん断流領域における速度分布も完全発達領域と同様な相似性が成り立つ。

(d) 特性値

二次元自由ジェットの特性値である速度の尺度とポテンシャルコア領域を考慮した長さの尺度をFig. 7に示す。特性値におよぼすノズル形状の影響は認められない。速度の尺度は、ポテンシャルコアが消滅する D/B が6以上になると減衰しはじめ、15以上の完全発達領域では両対数紙上で直線的に減少する。長さの尺度は D/B に比例して増加する。

完全発達領域における特性値は一般に次式で表され、多くの研究者により係数 k_1 、 C_1 、 k_2 および C_2 が提唱されている^{3)~8)}。

$$\frac{M_{mf}}{M_o} = \frac{k_1}{\sqrt{\frac{D}{B} - C_1}} \dots (8)$$

$$\frac{b_{mf}}{B} = k_2 \left(\frac{D}{B} - C_2 \right) \dots (9)$$

本実験結果も上式で整理すると、Table 1に示すように既

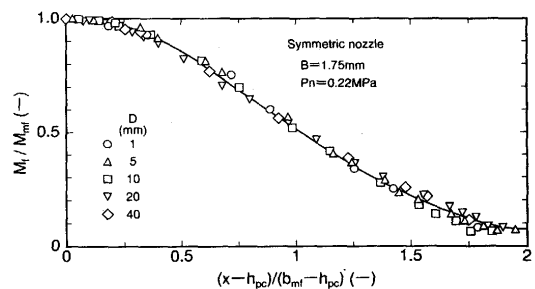
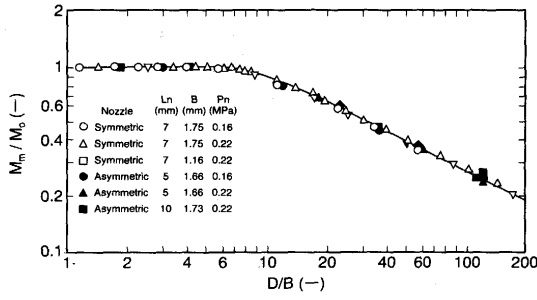
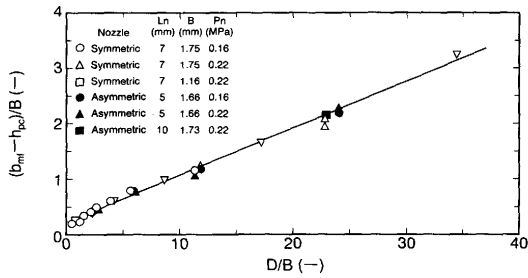


Fig. 6. Similarity of velocity distribution of wiping jet.

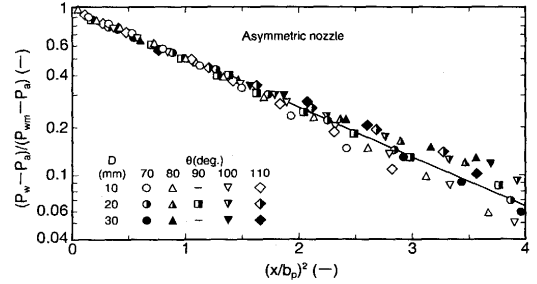


(a). Velocity scale

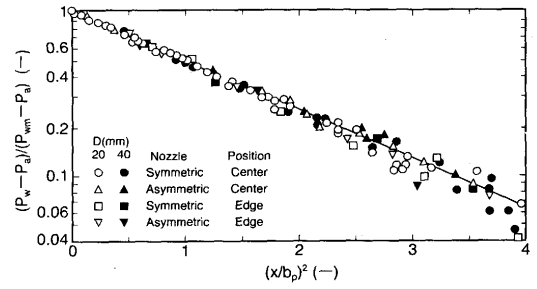


(b). Length scale

Fig. 7. Characteristics of wiping jet.



(a). Effect of wiping angle



(b). Effects of nozzle type and wiping position

Fig. 8. Wall pressure distribution of impinging jet.

Table 1. Previous investigations on characteristics of free jet.

Investigator	Date	Velocity scale		Length scale		Nozzle size (mm)	Re No. $\times 10^4$
		k_1	c_1	k_2	c_2		
Albertson et al. ¹⁾	1950	2.29	0.0	—	—		
Miller et al. ³⁾	1957	2.45	-1.57	0.0723	-1.57	12.7 \times 508	1.78
Zijnen ⁴⁾	1958	2.48	-0.60	0.096	0.0	5.0 \times 100	1.33
		2.21	-1.70	0.099	0.0	10.0 \times 250	1.33
Newman ¹⁾	1961	2.40	0.0	—	—		
Abramovichi ¹⁾	1963	2.67	0.0	0.097	0.0		
Foss ⁹⁾	1965	2.30	6.5	0.0625	-2.00	50.5 \times 152	
Goldschmidt ⁶⁾	1965	2.20	5.83	0.0985	0.66	22.9 \times 368	
Heskestad ⁹⁾	1965	1.97	5.3	0.110	5.3	12.7 \times 1676	3.4
Householder ⁶⁾	1968	2.28	6.98	0.0908	-1.46	23.6 \times 381	
Flora et al. ⁹⁾	1969	2.46	2.5	0.108	0.0	12.7 \times 635	1.71
		2.52	2.5	0.113	0.0	12.7 \times 635	2.90
		2.27	-1.00	0.113	-6.00	25.4 \times 635	2.3
		2.10	2.00	0.130	-15.0	25.4 \times 635	2.55
Beltaos et al. ⁷⁾	1973	2.40	2.5	0.10	-0.15	2.24 \times 152	0.57
Kamoi et al. ⁹⁾	1977	2.51	-1.4	0.0859	-1.4	5.0 \times 200	0.64
		2.66	-1.4	0.118	-1.4	10.0 \times 200	1.92
Present work	1994	2.64	3.70	0.0852	-1.61	1.16	3.73
						1.75	6.05

往の研究結果とほぼ一致している。

3.3 二次元衝突ジェットの特性

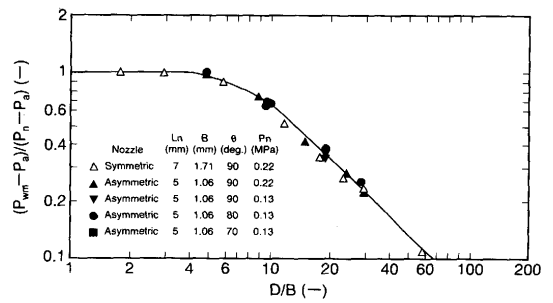
(a) 壁面圧力分布

二次元衝突ジェットの壁面圧力分布をガウス分布として整理したものをFig. 8に示す。本実験範囲ではノズル形状、ワイピングジェットの衝突位置(鋼板中央部とエッジ部)およびワイピング角度の影響は認められず次式で表される。

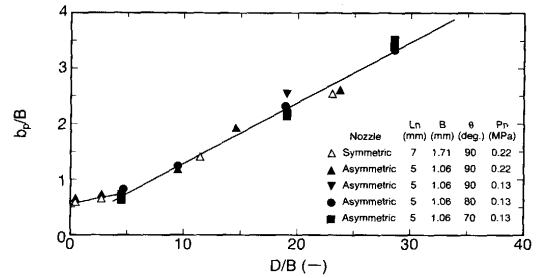
$$\frac{P_w - P_a}{P_{wm} - P_a} = \exp\left\{-0.695\left(\frac{x}{b_p}\right)^2\right\} \dots\dots\dots (10)$$

(b) 特性値

鋼板中央部における二次元衝突ジェットの圧力の尺度および長さの尺度をFig. 9に示す。圧力の尺度は、D/Bが5以



(a). Pressure scale



(b). Length scale

Fig. 9. Characteristics of impinging jet at plate center.

上になると減衰ははじめ、D/Bが10以上では両対数紙上においてほぼ直線的に減少する。二次元自由ジェットの速度の尺度に比べると、減衰のはじまりがはやくかつ大きくなっており、壁面によるジェットの減速の影響と考えられる。遷移領域をも含めた圧力の尺度は次式で近似できる。

$$\frac{P_{wm} - P_a}{P_n - P_a} = \left\{1 + \left(0.143 \frac{D}{B}\right)^{3.61}\right\}^{-0.287} \dots\dots\dots (11)$$

また、長さの尺度はノズルからの距離に比例して増加し、D/Bが5以上では次式で表される。

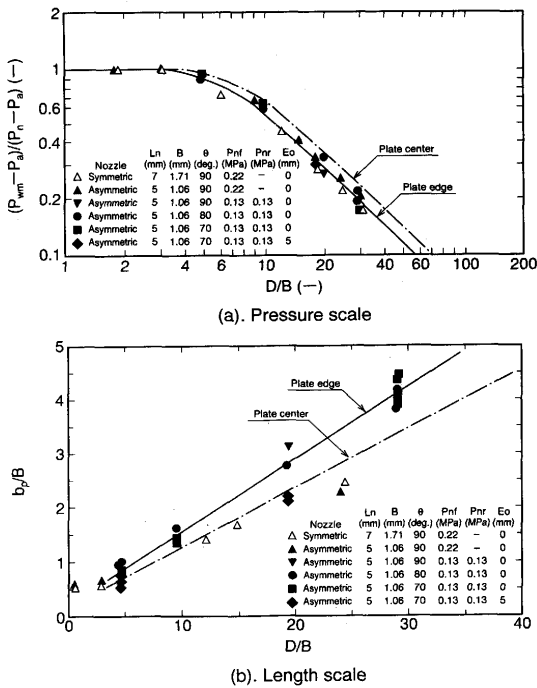


Fig. 10. Characteristics of impinging jet at plate edge.

$$\frac{b_p}{B} = 0.112 \left(\frac{D}{B} + 1.50 \right) \dots\dots\dots (12)$$

Fig.10は、鋼板エッジ部における二次元衝突ジェットの特性値を示したものである。図中には鋼板中央部における特性値を一点鎖線で示したが、圧力の尺度はワイピング条件によらず鋼板中央部より小さくなっている。また、長さの尺度は、片側ワイピング($P_{nr} = 0$ Pa in Gauge)の場合および両側ワイピングでジェットを鋼板エッジ部で衝突しないようにオフセットを付けた場合には、鋼板中央部と同等の値となっているが、両側ワイピングでオフセットを付けない($E_o = 0$ mm)場合には中央部より大きくなっている。これは、両ジェットの影響による干渉で二次元衝突ジェットが乱されているためと考えられる。鋼板エッジ部における二次元衝突ジェットの特性値は次式で表される。

$$\frac{P_{wme} - P_a}{P_n - P_a} = \left\{ 1 + \left(0.169 \frac{D}{B} \right)^{3.40} \right\}^{-0.304} \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{b_{pe}}{B} = 0.135 \left(\frac{D}{B} + 1.73 \right) \dots\dots\dots (14)$$

エッジ部において、二次元衝突ジェットの高さが小さく、長さの尺度が大きいうことは、壁面圧力分布がなだらかになっているということであり、鋼板中央部に比べてワイピング力は低くなっている。これが、鋼板エッジ部のめっき付着量が中央部に比べて多くなるエッジオーバーコートの一因と考えられる。

3・4 二次元衝突壁面ジェットの特性

(a) 速度分布

二次元衝突壁面ジェットの高さ分布をFig.11に示す。図中実線は、二次元壁面ジェットに関してVerhoff¹¹⁾が求めた次式で表される実験式であるが、二次元衝突壁面ジェットの高さ分布も壁面から遠く離れた部分を除きよく一致している。

$$\frac{M_w}{M_{mw}} = 1.479 \left(\frac{y}{b_{mw}} \right)^{\frac{1}{7}} \left\{ 1 - \text{erf} \left(0.6775 \frac{y}{b_{mw}} \right) \right\} \dots\dots\dots (15)$$

(b) 特性値

二次元衝突壁面ジェットの高さである速度の尺度におよぼすB, D, Hおよび θ の影響については、D/B, H/Dおよび $1 + \cos\theta$ の3変数による重回帰分析を行った結果、次式で表される実験式が得られた。

$$\frac{M_{mw}}{M_o} = 2.17 \left(\frac{D}{B} \right)^{0.542} \left(\frac{H}{D} \right)^{0.388} \dots\dots\dots (16)$$

3変数それぞれの影響をFig.12に示す。Beltaos¹²⁾によると、二次元衝突壁面ジェットの高さにはノズルと壁面との距離Dは影響しないと言われているが、本実験結果では

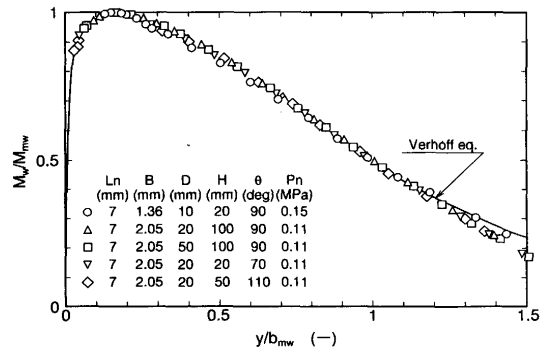


Fig. 11. Velocity distribution of impinging wall jet.

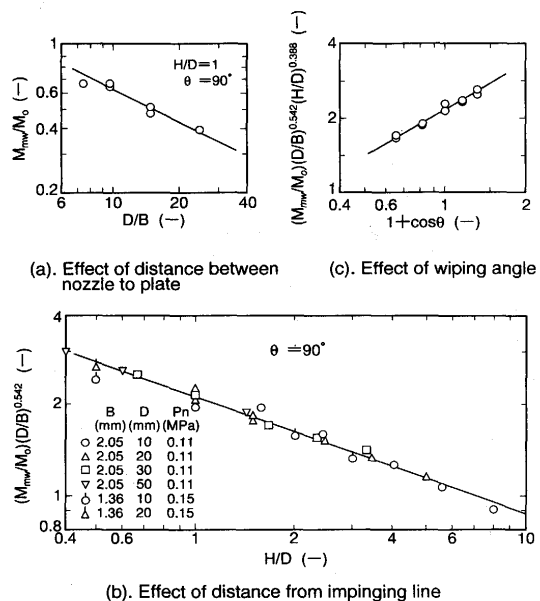


Fig. 12. Velocity scale of impinging wall jet.

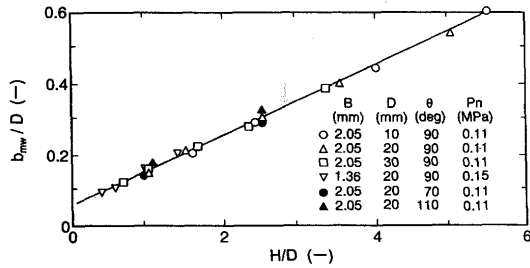


Fig. 13. Length scale of impinging wall jet.

わずかではあるがDの影響が認められる。

長さの尺度は、Fig.13に示すようにスリットギャップおよびワイピング角度の影響は認められず、次式で近似できる。

$$\frac{b_{mw}}{D} = 0.0961 \left(\frac{H}{D} + 0.669 \right) \dots\dots\dots (17)$$

4. 結言

連続溶融めっきにおけるガスワイピングジェットの特徴として、ノズルの流量係数と二次元自由ジェット、衝突ジェットおよび衝突壁面ジェットの速度分布および壁面圧力分布を測定した結果以下の知見が得られた。

(1) ノズルの流量係数は、ノズルリップ長L_nとスリットギャップBとの比L_n/Bが大きくなると摩擦損失により減少するが、L_n/Bが5以下であれば理論流量に対する損失は1%以下になる。

(2) 二次元自由ジェットの速度分布は、ポテンシャルコア領域においてはポテンシャルコアより外側のせん断流のみを考慮すれば、完全発達領域とともにノズル形状によらず相似性が成り立つ。また、完全発達領域における速度の尺度と長さの尺度に関する実験式は、従来の研究結果と一致する。

(3) 二次元衝突ジェットの壁面圧力分布は、ノズル形状、ワイピング角度およびワイピング位置によらずガウス分布で近似できる。鋼板エッジ部では鋼板中央部に比べ圧力の尺度が小さくなり、両ジェットを鋼板エッジ部で衝突させると両ジェットの干渉により壁面圧力分布がなだらかになる。これがエッジオーバーコートの一因と考えられる。

(4) 二次元衝突壁面ジェットの速度分布は、壁面に平行な二次元ノズルから噴射される壁面ジェットに関するVerhoffの式⁹⁾とよく一致する。速度の尺度には、ノズルと壁面との距離の影響はないと言われていたが、わずかではあるが影

響が認められる。また、長さの尺度にはノズルスリットギャップおよびワイピング角度の影響は認められない。

記号

- A_n : ノズルの開口面積 (m²)
 - a_n : ノズル内の音速 (m/s)
 - B : ノズルスリットギャップ (m)
 - b_m : 速度の半値幅 (m)
 - b_p : 圧力の半値幅 (m)
 - C_n : ノズルの流量係数 (-)
 - D : ノズルからの距離 (m)
 - E_o : オフセット量 (m)
 - G_m : 実測質量流量 (kg/s)
 - G_t : 理論質量流量 (kg/s)
 - g : 重力加速度 (m/s²)
 - H : 衝突点からの距離 (m)
 - h_{pc} : ポテンシャルコアの半幅 (m)
 - L_n : ノズルリップ長さ (m)
 - M : マッハ数 (-)
 - M_m : 最大マッハ数 (-)
 - M_n : ノズル出口内のマッハ数 (-)
 - M_o : ノズル出口直後の理論マッハ数 (-)
 - P_a : 大気圧力 (Pa)
 - P_n : ノズル圧力 (Pa)
 - P_p : ピトー管圧力 (Pa)
 - P_w : 壁面圧力 (Pa)
 - P_{wm} : 最大壁面圧力 (Pa)
 - R : ガス定数 (m²/Ks²)
 - T_n : ノズル内のガス温度 (K)
 - x : ジェット中心からの距離 (m)
 - y : 壁面からの距離 (m)
 - α : ワイピングガスの比熱比 (-)
 - ρ_n : ノズル内のガス密度 (kg/m³)
 - θ : ワイピング角度 (deg.)
- サフィックス
- e : 鋼板エッジ部
 - f : 二次元自由ジェット
 - w : 二次元衝突壁面ジェット

文献

- 1) N.Rajaratnam著, 野村安正訳: TURBULENT JETS(噴流), (1981), p.96 [森北出版]
- 2) G.E.Meyers, J.J.Schauer and R.H.Eustis: Trans. ASME, J. Basic Eng., 85 (1963), p.47
- 3) D.R.Miller and E.W.Comings: J. Fluid Mechanics, 3 (1957), p.1
- 4) B.G.Zijnen: Appl. Sci. Res., 7 (1958), p.256
- 5) G.Heskestad: J. Appl. Mech., 32 (1965), p.721
- 6) J.J.Floria Jr. and V.W.Goldschmidt: AIAA J., 7 (1969), p.2344
- 7) S.Beltaos and N.Rajaratnam: J. Hydraulic Research, 11 (1973), p.29
- 8) 鴨井新生, 田中英穂: 日本機械学会論文集, 43 (1977), p.2569
- 9) R.Gardon and J.C.Akfirat: Int. J. Heat Mass Transfer, 8 (1965), p.1261
- 10) 熊田雅弥, 馬淵幾夫: 日本機械学会論文集(第2部), 35 (1969), p.1053
- 11) S.Beltaos: J. Hydraulics Division, Proc. ASCE, 102 HY9 (1976), p.1177