

連続溶融亜鉛めっきラインのガスワイピングにおける 3-スロットノズルの噴流形態

Jet Flow Characteristics of 3-Slot Nozzle at Gas Wiping Process in CGL

武田玄太郎 TAKEDA Gentaro 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 (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 (部長)
壁矢 和久 KABEYA Kazuhisa JFE スチール スチール研究所 研究企画部長 (理事)・博士 (工学)

要旨

連続溶融亜鉛めっき鋼板製造工程のめっき付着量制御には、一般的に単一スロットノズルによるガスワイピング法が用いられる。ガスワイピングでは、効率の良いめっき絞り性能の実現や鋼板表面欠陥発生回避が課題となる。これらの課題に対し、中央スロットの上下に補助スロットを配した多段スロットノズルが注目されており、その噴流混合形態とめっき絞り性能への影響について調査した。補助スロット噴流によって中央スロット噴流と周囲流体との速度差が低減し、中央スロットの乱流エネルギーが低下することで噴流拡散が抑制され、めっき絞り性能が向上するメカニズムを見出した。

Abstract:

The single-slot gas wiping is commonly used in coating weight control of continuous galvanizing lines (CGL). In gas wiping process, it requires more efficient coating controllability and avoiding surface defects on the steel sheet. A multi-slot nozzle with two auxiliary slots arranged on the two sides of the main slot attracts attention. JFE Steel investigated relationship between the mixed jets behavior and the wiping capability. This study revealed that the velocity difference between the center slot jet flow and the ambient gas decreases due to the auxiliary slot jets, and diffusion of the jet flow is suppressed due to a reduction in the turbulent kinetic energy at the two sides of the center slot jet, then the wiping capability can be improved.

1. はじめに

自動車、建材、家電用表面処理鋼板を製造する連続溶融亜鉛めっきライン (Continuous Galvanizing Line, 以後 CGL) のめっき付着量制御には、一般的にガスワイピング法が用いられている。ガスワイピング法は、気体噴流を用いて液体付着量を制御する手法であるため、鋼板およびめっき液に非接触で亜鉛付着量を制御でき、付着量均一性、薄めっき性および経済性に優れているなどの利点がある。通常、単一スロットノズル (以後、1-スロットノズル) が用いられており、そのガスワイピング機構は理論的にはほぼ確立されている¹⁻⁴⁾。

それらに基づくと、生産性を高めるために連続ラインの通板速度を上昇させるには、通板速度に応じてガスワイピングの噴射圧力を適宜制御すればよいことがわかる。しかし、めっき絞り性能⁵⁾やガスワイピングの際に発生するスプラッシュと呼ばれる表面欠陥の問題⁶⁾からワイピング性能には限界があるとされている。また近年、上記の課題を克服するワイピングノズルとして、多段スロットノズルの研究が実施

され始めている⁷⁻⁸⁾が、その噴流形態はとても複雑で、めっき絞り性能との関連は明確になっていない。

本論文では、自社で開発した3-スロットノズルを用い、ワイピング模擬実験でめっき絞り性能を調査した⁹⁻¹⁰⁾。また、汎用ソフトを用いた流動解析 (Computational Fluid Dynamics, 以後 CFD) も合わせて実施し、3-スロットノズルの噴流発達形態とめっき絞り性能への影響について考察した。

2. ガスワイピング理論

ガスワイピングによるめっき付着量制御機構としては、以下に示す考え方²⁻³⁾が知られている。図1に示すように、溶融めっき浴から引き上げられる鋼板に付着しためっき液膜にワイピングガス噴流の衝突圧力と衝突後鋼板に沿って流れる衝突壁面噴流のせん断力が作用するとして、この液膜流れを次の仮定の下にモデル化する。

- ①鋼板面上の液膜流れは二次元定常層流、鋼板に平行な方向の流れに対して、鋼板に垂直な方向の流れは十分小さい
- ②めっき液の表面張力、酸化、鋼板の表面粗さ、合金化

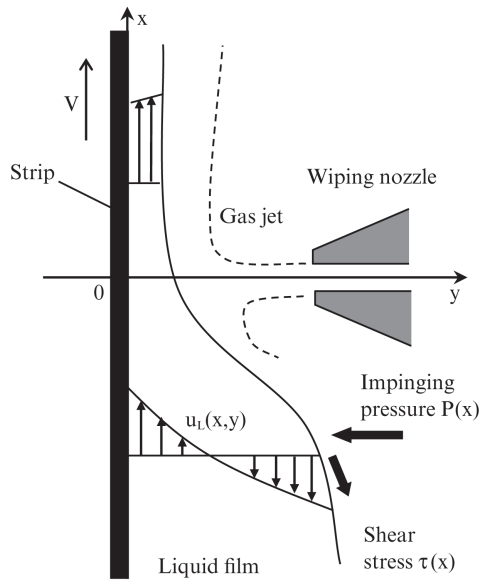


図1 ガスワイピング解析モデル
Fig. 1 Analytical model of gas wiping

現象は無視する

③鋼板とめっき層の界面はすべらない

以上の前提でめっき液膜の運動方程式を解くと、めっき膜厚は次のように表せる。

$$T = \frac{S + \sqrt{S^2 + 4G}}{2G} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $T = t\sqrt{\rho_L g / \mu_L V}$ $\dots\dots\dots (2)$

$$S = \tau / \sqrt{\rho_L \mu_L V g} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$G = 1 + (dp/dx) / \rho_L g \quad \dots\dots\dots (4)$$

T, S, G はガスワイピングに関する無次元数であり、 T は無次元めっき厚、 S は無次元せん断応力、 G は無次元圧力勾配、 μ_L はめっき液粘度、 u_L はめっき液 x 方向速度、 ρ_L はめっき液密度、 g は重力加速度、 P は衝突圧力、 t は最終めっき膜厚、 V は通板速度である。このように、めっき膜厚はワイピングガスによる圧力勾配 dp/dx と壁面せん断応力 τ によって決定される。1スロットノズルでは、ノズルギャップを固定すれば噴射圧力とノズル—鋼板距離に応じて dp/dx と τ は一義的に決定される¹⁾。しかし、3スロット等の多段スロットノズルの噴流特性の研究事例は少なく、近い形態としては同軸円形噴流の混合・拡散に関する研究¹¹⁾が先行している。

3. 実験方法および数値解析方法

3.1 3-スロットノズル

従来の1スロットノズルと比較して、多段ノズル噴流形

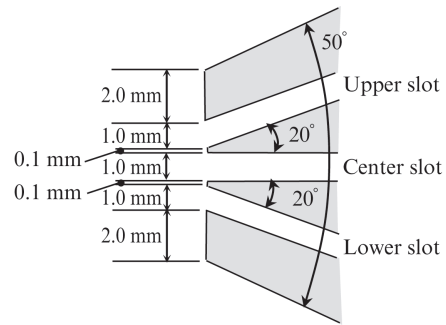


図2 3-スロットノズルの先端形状
Fig. 2 Tip shape of 3-slot gas wiping nozzle

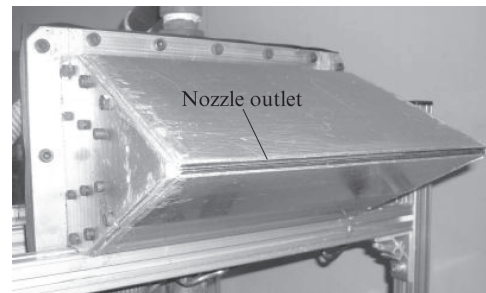


写真1 3-スロットノズル外観写真
Photo 1 Photograph of 3-slot wiping nozzle

態に関わるノズル形状や噴射条件のパラメータは多い。主スロット—補助スロットの噴射口間距離が3噴流合成後の噴流形態に大きく影響し⁹⁾、主スロット—補助スロット間距離を狭くしないとめっき絞り性能は向上しない。本論文で用いた3スロットノズル先端断面の概略図を図2に示すが、主スロット—上下補助スロット間距離は0.1 mmとした。また、補助スロットの噴射角度（主スロットと補助スロットの角度）も噴流形態に大きく影響すると推定される。高橋らの報告¹²⁾では、ワイピングノズル外形角度は鋭角であるほど、めっき絞り性能が優れることが示されており、ノズル部材強度も加味して、ノズル外形角度50°、上下スロットは中央スロットに対して噴射角度を上下対称に20°傾斜させた1種類のノズルを用いた。使用ノズルの外観写真を写真1に示す。中央、上下スロットともにスロットギャップ $D=1.0$ mm、スロット幅長さは250 mmである。

3.2 ワイピングモデル装置

めっき絞り性能評価は、既開発のワイピングモデル装置を用いて実施した⁹⁻¹⁰⁾。装置の概略を図3に示す。本装置は、コイル状のストリップを払い出し、塗布液浴に浸漬させた後、対向するワイピングノズルのガス噴流で塗布液付着量を調整し、ストリップを巻き取る構成となっている。ワイピングノズルは、噴流測定と同様に写真1に示したものを使用し、中央スロット噴射角度が水平になるように設置した。

本実験では塗布液に融点が約60°Cのパラフィンを用い、

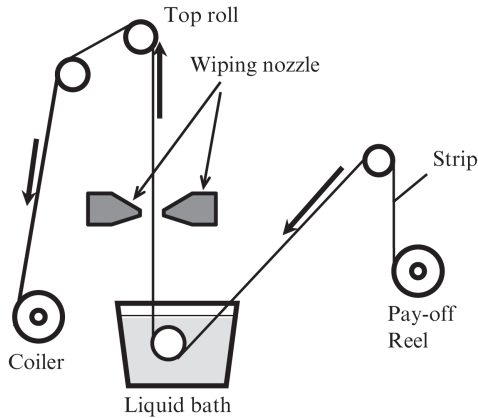


図3 ガスワイピング実験装置

Fig. 3 Experimental gas wiping apparatus

表1 塗膜材料の物性, 塗膜プロセス条件と無次元数

Table 1 Physical properties of coating materials, conditions of coating process and dimensionless numbers

	CGL	Wiping simulator
Coating material	Zinc	Paraffin ^{*1} (HNP-5)
Operation temperature (°C)	460	90
Coating density (kg/m ³)	6 623	759
Coating viscosity (Pa · s)	0.00294	0.0071
Coating surface tension (N/m)	0.81	0.0026 ^{*2}
Nozzle - strip distance (mm)	5-10	10
Transfer speed (m/s)	1.0-2.5	0.67
Plenum pressure (kPa)	10-70	1.5 (center slot) 0-1.0 (upper, lower slot)
T	0.024-0.074	0.03-0.04
S	0.5-3.0	0.6-1.0
G	50-500	230-460

*1 NIPPON SEIRO CO. HNP-5

*2 Maker's publication

塗布実験時の浴温は融点より約30℃高い90℃で行った。ワイピングノズル通過で10℃程度冷却されるものの、その後1.5 m上方のトップロール到達までに、パラフィンが凝固することはない。表1にCGLおよびワイピングモデル装置におけるめっき液の物性値, ワイピング条件, 第2章で示した無次元数 T, S, G の値を示す。ワイピングモデル装置の無次元数 T, S, G はそれぞれCGLの範囲内にあること, および本装置を用いた実験で得られるめっき膜厚は, 前述したワイピング理論から予測される値と精度良く一致すること⁹⁾ から, CGLと本装置の間に相似則が成立すると考えられる。また鉄-亜鉛の場合, 合金化反応を伴うことがあるが, パラフィンと金属面では界面反応を伴わないため, 純粋にワイピン

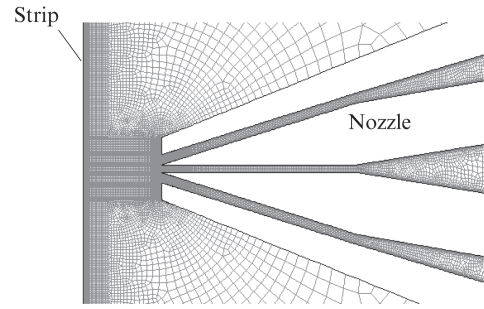


図4 CFD解析に用いた計算メッシュ

Fig. 4 Example of mesh for CFD analysis

グ理論のみを検証することができる。

付着量の計測法には, 実験後サンプルの塗布膜断面観察, 塗布膜剥離前後の重量比較 (以後, 重量法), 渦電流式接触膜厚計による計測などが考えられる。本実験では, 比較的広い面積の平均付着量を精度良く定量化するため, 重量法を採用した。

3.3 ワイピングガス噴流のCFD解析

ノズル噴射出口から鋼板までの領域における噴流発達形態については, 汎用解析ソフトFluent14.5を用いた2次元定常解析で評価した。乱流モデルにはRealizable $k-\epsilon$ を採用した。これは, 標準的な $k-\epsilon$ モデルよりも2次元噴流等の解析により適しているとされているためである¹³⁾。また, 壁近傍の取り扱い, 壁関数モデルと壁近傍モデルを合体させた改良型壁処理を採用した¹⁴⁾。使用した解析メッシュを図4に示す。メッシュ数は約8万である。尚, 本CFD解析の妥当性については, 衝突圧力分布の実測値と比較することで確認した¹⁰⁾。

4. 実験結果および考察

4.1 上下スロット噴流のめっき絞り性への影響

図3に示す実験装置を用いて, パラフィンワイピング実験を行った。実験条件は表1に示した。中央スロットのヘッダー圧力は1.5 kPaで固定し, 上下スロット圧力をそれぞれ単独で, あるいは上下スロットを同時に0.2~1.0 kPaで噴射させた。

図5に実験結果を示す。上下スロット圧力が0.0 kPaの結果は, 中央スロットのみ噴射させた場合の塗膜付着量を示す。上下スロットをそれぞれ単独で噴射する場合に比べ, 上下スロットを同時に噴射した場合が, 今回の圧力範囲においては最もめっき絞り性能が高く, 薄膜となった。上下スロットをそれぞれ単独で噴射した場合を比較すると, 上スロットを噴射した方がやや薄膜化した。また, 圧力影響をみてみると, 上下スロット圧力0.2 kPaでどの噴射パターンでも最薄になり, それ以上の圧力にすると付着量が増加する傾向を示した。通常の1-スロットノズルでは, 2章に示した

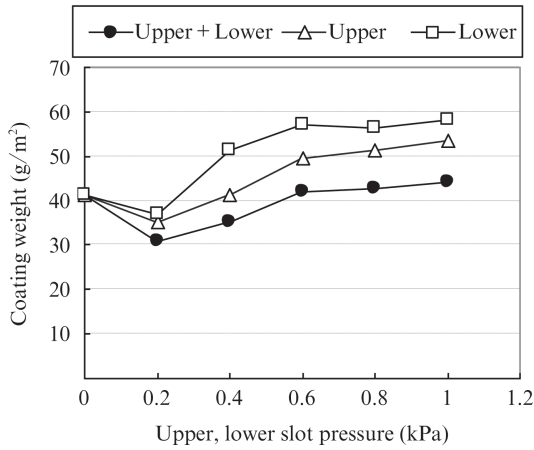


図5 3-スロットノズルワイピング実験の塗膜付着量

Fig. 5 Coating weight in paraffin wiping experiments with 3-slot wiping nozzle

ガスワイピング理論のとおり、ガス噴射圧力を増加させれば塗膜付着量は減少する。しかし、3-スロットノズルでは、上下スロット噴流によって中央スロット噴流の形態が変化するため、噴射圧力増加が必ずしもめっき絞り性向上に繋がらないことを示している。

図6は、CFDによって計算された衝突圧力分布である。ここで、横軸のx方向位置はスロットギャップDで無次元化した。衝突圧力分布は、その傾きが急峻であるほど、2章のガスワイピング理論におけるGが大きく、めっき絞り性に優れることを意味する。そこで、塗膜付着量が1-スロットより減少した上下スロット0.2 kPaと増加した1.0 kPaの噴流特性を詳細に調べた。図6 (a)は、中央スロットおよび上下スロットを同時に噴射した場合で、中央スロットのみの分布に比べて、上下スロット0.2 kPaにすると衝突分布幅が広がらずに最大圧力が上昇して、中央スロット単独より急峻な分布となっている。上下スロット1.0 kPaにすると、最大圧力はさらに上昇するものの衝突分布幅が倍以上に広がり、圧力勾配としてはやや緩い角度になった。図6 (b)は中央スロットと上スロットを噴射した場合の圧力分布結果である。上スロットを噴射すると左右非対称な圧力分布となり、最大圧力になる位置が中央スロット高さよりわずかに下側 ($x/D < 0$) に移動した。そして、噴流の上側 ($x/D > 0$) と下側 ($x/D < 0$) で圧力勾配が異なる噴流形態となった。このような噴流形態の変化がめっき絞り性に影響したものと推定される。そこで噴流形態をより詳細に考察する。

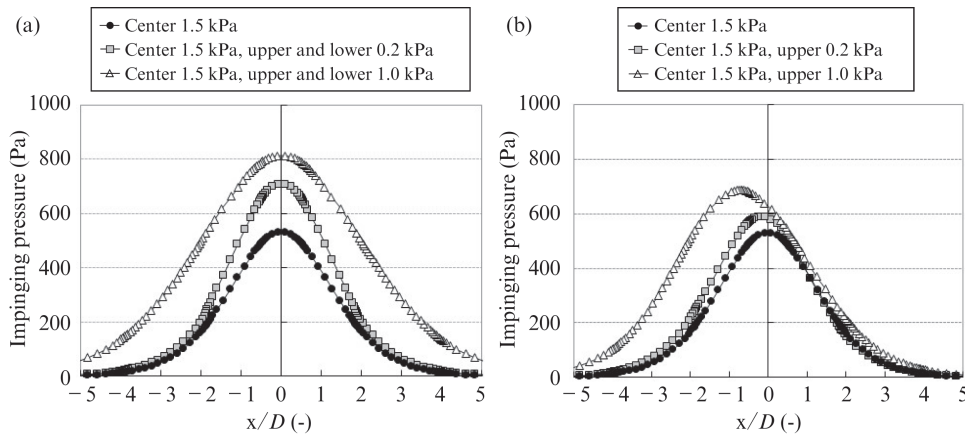


図6 鋼板上の衝突圧力分布 (CFD)

Fig. 6 Calculated impingement pressure distribution on strip surface

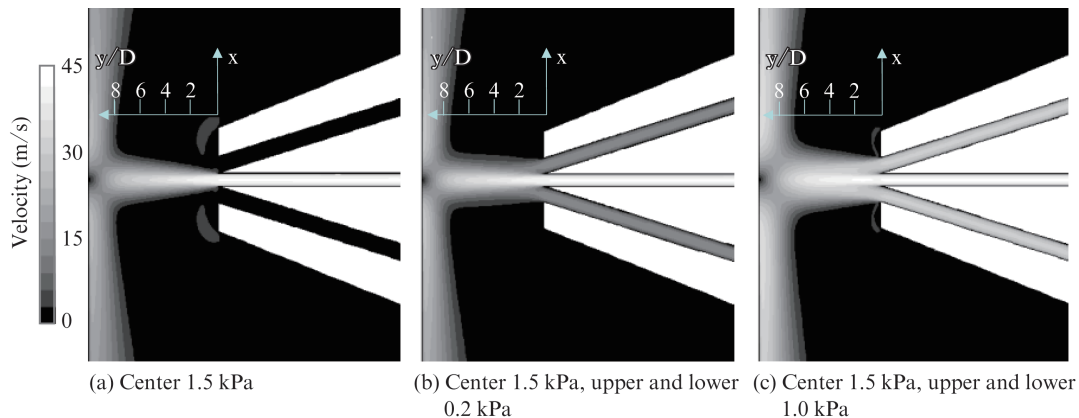


図7 1-スロットおよび3-スロット噴流の速度コンター図

Fig. 7 Velocity contours of single and 3-slot jet

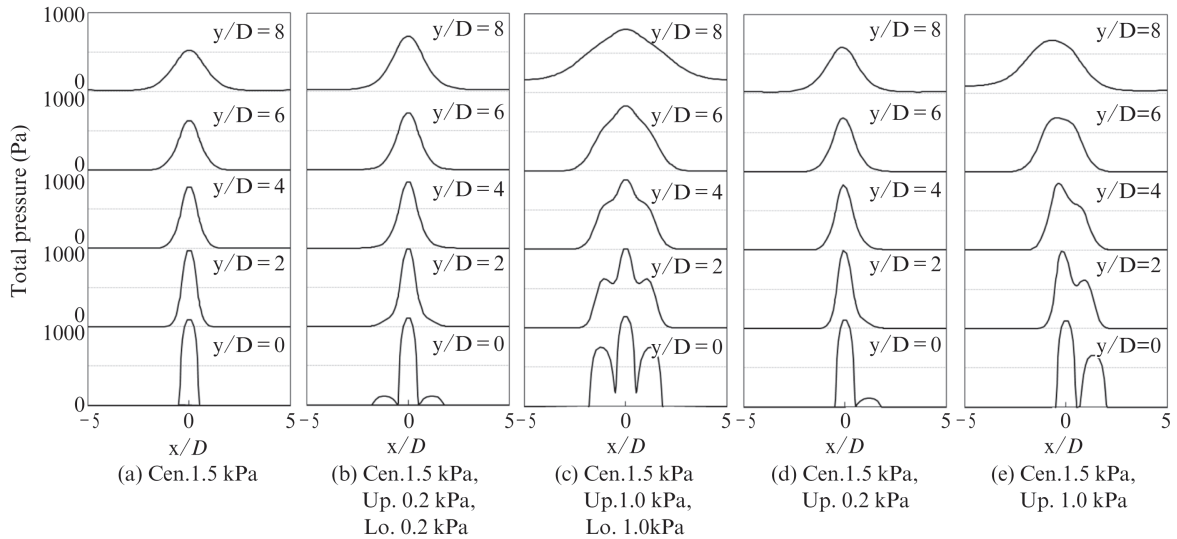


図8 ノズル先端～鋼板までの1～3-スロット噴流の全圧分布

Fig. 8 Total pressure distributions between nozzle tip and strip with single, 2-slot and 3-slot jets

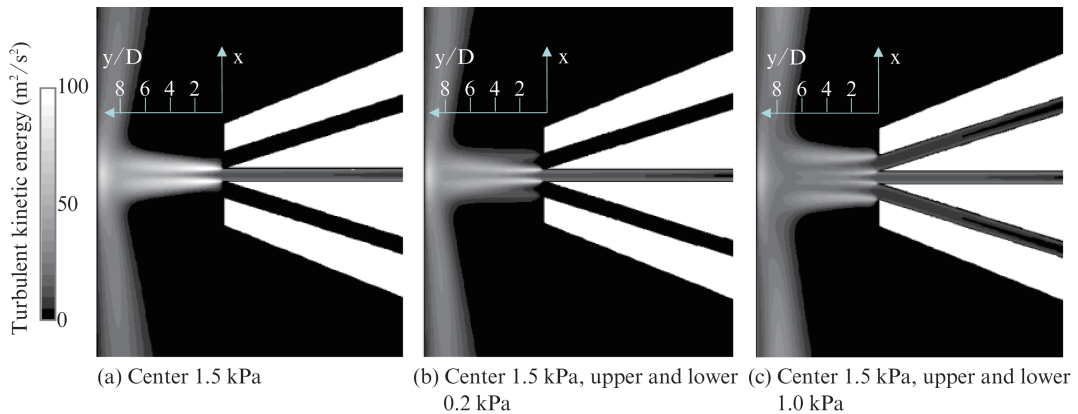


図9 1-スロットおよび3-スロット噴流の乱流エネルギーコンター図

Fig. 9 Turbulent kinetic energy contours of single and 3-slot jets

4.2 3-スロットノズルの噴流形態

スロットノズル先端から鋼板までの噴流の混合形態を示す一例として、**図7**に (a) 中央スロット1.5 kPa, (b) 中央スロット1.5 kPa, 上下スロット0.2 kPa, (c) 中央スロット1.5 kPa, 上下スロット1.0 kPaのときの速度コンター図を示す。本解析においてガス噴射速度は、圧力1.5 kPaでは約42 m/s, 0.2 kPaでは15 m/s (対中央スロット速度比35.7%), 1.0 kPaでは32 m/s (同76.2%)であった。(a)と比較して、(b) (c)では中央スロット噴流の減衰が弱まり、より後方まで高い風速が保たれるようになる。このようにノズル近傍では、速度分布で噴流混合挙動を比較可能である。しかし、鋼板近傍の壁面噴流領域では動圧から鋼板面への静圧へと変化する形態となり、噴流方向や壁面噴流半値幅も変化するため速度分布だけで混合形態を単純比較することは困難である。そこで本論文では、CFD結果の動圧と静圧を合計した全圧分布で、噴流の混合形態を比較した。ス

ロットノズル噴射口から鋼板近傍の範囲 ($y/D=0\sim 8$, ノズル先端を $y=0$ として表記) における全圧分布の変化を**図8**に示す。(a)は中央スロットのみ1.5 kPa (1噴流), (b), (c)は中央スロット+上下スロット (3噴流), (d), (e)は中央スロット+上スロット (2噴流)の解析結果である。

(b) 上下スロット0.2 kPaでは、噴射時は上下スロットからの噴流による動圧のピークがみられるが、直ちに合流して $y/D=2$ の位置ではピークは消失し、単噴流に近い形になる。上下スロットからの弱い噴流によって中央噴流は周囲気体との速度差が軽減されるため、減衰が抑えられ、鋼板近傍における圧力も増大したものと推定される。このような噴流形態になったことで、ワイピング力としても向上したものと考えている。(c) 上下1 kPaでは、 $y/D=4$ までは上下スロット噴流のピークが残存しており、その後完全に混合したあとは拡散が進行し、1-スロット噴流と比べてなだらかな圧力分布となった。

(d) 上スロット0.2 kPaの場合、 $x/D > 0$ (上側) では (b)

と同様、 $x/D < 0$ (下側) では (a) と同様の噴流形態となり、中央スロットの拡散抑止が不十分であったため、全圧ピークとしてもさほど増加しなかった。このように、スロット噴流の拡散抑止には、スロット噴流両側から低速噴流を供給することが有効であることが示唆された。(e) 上スロット 1.0 kPa では、2噴流が完全混合する前の $y/D=4$ 程度までは、中央スロット噴流が偏ることで $x/D < 0$ 側の圧力勾配が非常に急峻に変化し、ワイピング性能向上の可能性もありそうだが、2噴流混合後は分布が急になだらかになり、 $y/D=10$ のワイピングではめっき絞り性能は低下することがわかった。

これまで議論してきた二次元噴流の拡散を、より直接的に評価するため、CFD 解析結果の乱流エネルギー ($k\epsilon$ モデルの k) 分布で比較を行う。図9は図7と同条件における乱流エネルギー分布である。中央スロット噴流にとって、静止気体中への噴射となる (a) では、噴流の両縁での大きな速度差に起因する強い乱流エネルギーが発生する。一方、補助噴流のある (b) では、周囲気体との速度差が軽減することで中央スロット両縁の乱流エネルギーは低減することが確認できる。また、上下スロット噴流の外縁においてもさほど強い乱流エネルギーは発生せず、合成後の噴流幅には大きく影響しない。ノズル出口から鋼板までの流れ場 ($-4 \leq x/D \leq 4, 0 \leq y/D \leq 10$) における乱流エネルギーの積分値で比較すると、(a) を 100 として (b) では 79.3 と約 20% 減少した。(c) の場合、中央スロット噴流の両縁よりも上下スロット外縁の乱流エネルギーが大きくなることで、合成噴流幅が3噴流分まで広がるものと考えられる。上記の乱流エネルギー積分値は 84.7 となり、(b) と比較すると流れ場全体の乱れ度は大きくなった。

5. おわりに

3スロットノズルのめっき絞り性能に対する補助噴流の働きを考察するため、パラフィンを用いたワイピング実験を行い、さらにワイピングガス噴流のCFD解析を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) ワイピング実験より、中央スロット 1.5 kPa に対して、上下スロット 0.2~0.4 kPa まではめっき付着量が低減してめっき絞り性能向上が認められるが、上下スロットをそれ以上の圧力にすると、めっき絞り性能は徐々に低下する。上下スロットを同時に使う方が、めっき絞り性能は高い。
- (2) CFD解析によると、実験でめっき絞り性が向上した条件 (上下スロット 0.2 kPa) では圧力勾配が急峻になり、めっき絞り性能が低下した条件 (上下スロット 1.0 kPa) では圧力勾配が緩くなる。

- (3) CFDで噴流発達形態を調査すると、上下スロット噴流によって中央スロット噴流と周囲流体との速度差が低減し、中央スロット噴流両縁の乱流エネルギーが低下することで噴流拡散が抑えられる。上下スロット噴流速度が中央スロットの35%程度と低速の場合は、3噴流混合後の噴流幅を拡大させず、めっき絞り性は向上する。上下スロット噴流速度が上昇すると、上下スロット噴流の外縁が混合噴流の外縁となり混合噴流幅が広がる。その結果、鋼板衝突圧力分布が緩やかになり、めっき絞り性が低下する。

上述のように、上下スロット流によって、中央スロット噴流の拡散形態と混合噴流幅が大きく変化し、結果としてめっき絞り性に影響する。3スロットノズルの設計や使用条件の適正化には、衝突圧の評価に加え、流れ場の乱れ度も重要なパラメータとなることが明らかになった。

参考文献

- 1) 武石芳明, 青木健郎. 鉄と鋼. 1995, Vol. 81, No. 2, p. 135-140.
- 2) Thornton, J. A.; Graff, H. F. Metallurgical Transactions B. 1976, Vol. 7B, p. 607-618.
- 3) Ellen, C. H.; Tu, C. V. Transaction of the ASME Journal of Fluids Engineering. 1984, Vol. 106, p. 399-404.
- 4) 武石芳明, 山内昭良, 宮内澄隆. 鉄と鋼. 1995, Vol. 81, No. 6, p. 643-648.
- 5) Dubois, M.; Callegari, J. 8th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Sheet Steels Galvatech'11. 2011, p. 845-852.
- 6) 武石芳明, 鈴木豊, 矢葺邦弘. 混相流. 2000, Vol. 14, No. 2, p. 194-202.
- 7) Tamadonfar, P.; McDermid, J. R.; Hrymak, A. N.; Goodwin, F. E. 8th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Sheet Steels Galvatech'11. 2011, p. 817-823.
- 8) Dubois, M.; 8th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Sheet Steels Galvatech'11. 2011, p. 787-802.
- 9) 武田玄太郎, 高橋秀行, 三宅勝, 中田直樹. 混相流. 2014, Vol. 28, No. 1, p. 90-98.
- 10) 武田玄太郎, 高橋秀行, 壁矢和久. 鉄と鋼. 2016, Vol. 102, No. 10, p. 576-582.
- 11) 社河内敏彦, 加藤智宏. 日本機械学会論文集 B 編. 1997, Vol. 63, No. 614, p. 3278-3286.
- 12) 高橋秀行, 武田玄太郎, 三宅勝, 中田直樹. 実験力学. 2015, Vol. 15, No. 3, p. 217-224.
- 13) Shih, T.-H.; Liou, W. W.; Shabbir, A.; Yang, Z.; Zhu, J. Computers Fluids. 1995, Vol. 24, No. 3, p. 227-238.
- 14) Kader, B. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1981, Vol. 24, No. 9, p. 1541-1544.



武田玄太郎



高橋 秀行



壁矢 和久