

溶融めっき浴内流れに関するコールドモデル実験

黒部 淳*・井口 学*²・松原 茂雄*・中本 一成*・森田 善一郎*³

Cold Model Experiment on Fluid Flow Phenomena in Hot Dip Plating Bath

Jun KUROBE, Manabu IGUCHI, Shigeo MATSUBARA, Kazunari NAKAMOTO and Zen-ichiro MORITA

Synopsis : Flow phenomena in a hot dip plating bath were investigated by using cold models with reduced scale of 1/5 and 1/10. The flow pattern, mean velocity components, root-mean-square value of turbulence components and Reynolds shear stress in the bath were measured using a hot-wire anemometer and a two-channel laser Doppler velocimeter (LDV). The flow pattern in the bath was three dimensional. Main flow induced by belt motion on the entry side moved into the exit side and subsequently returned along the side walls and the bottom wall to the entry side. A part of the flow returning along the side walls to the entry side entered from the edges of the belt into the region enclosed with the belt. The flow pattern in the region enclosed with the belt was also three dimensional. The flow pattern in the whole bath was in good agreement with that suggested by mean velocity vectors measured with the LDV. Mean velocity components and the root-mean-square value of turbulence components were altogether low in the almost all part of the entry side region except near the belt. A great amount of dross accompanied with flow in a practical hot dip plating bath seems to exist in this region. As the Reynolds shear stress was very high in the vicinity of the strip extending from the sink roll to the exit side, the dross would be vigorously disturbed and dispersed there.

Key words : Hot Dip Plating Bath ; cold model experiment ; flow pattern ; mean velocity ; turbulence ; Reynolds shear stress ; dross.

1. 緒言

連続溶融めっき設備では、めっき浴槽内におけるめっき金属と鋼帯あるいは大気との反応により金属間化合物や酸化物が発生し、これらは一般にドロスと呼ばれている^{1)~7)}。ドロスは、鋼帯に付着すると溶融めっき鋼板表面の品質を低下させるため、従来より様々なドロス除去対策⁸⁾が試みられているが、効率的な技術を開発するまでには至っていない。効率的なドロス除去技術を開発するためには、ドロス移動の原因となるめっき浴内の流動特性やドロス自体の挙動を把握することが重要であるが、これらに関する報告^{9)~11)}は少なく、不明確な部分が多く残っている。

著者らは、溶融めっき浴内の流動特性やドロスの挙動の解明を目的として、モデル実験を実施している。このような実験の場合、実機設備とモデル間で相似則を成立させる必要がある。今回は、溶融めっき浴内の流動特性を解明するため、実機設備を1/5および1/10に縮小した水モデル装置にレイノルズ数相似則を採用した。これらの水モデル装置を用いて、ドロスの移動、分散などに影響を与えるフローパターン、平均流速、乱れ強さ、レイノルズ応力などの基本特性について検討した。モデル設計の詳細は後述するが、

設計過程において相似則緩和を用いており、その緩和の妥当性を確認するため異なる寸法のモデルを用意した。そして、妥当性を確認後、1/5水モデル装置は、主にフローパターンの検討に使用し、1/10水モデル装置は、主に流速などの定量的な測定に使用した。

2. 実験

2.1 実験装置

2.1.1 設計方針

今回の研究目的は、Fig. 1に模式的に示すような、溶融めっき浴内の流動特性を解明することにある。このため、水モデル装置の設計に際しては、(1)式のレイノルズ数に基づく相似則を採用する。

$$Re = F_i / F_f = \rho L v_s / \mu \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 F_i は流体の慣性力、 F_f は流体の粘性力、 ρ は流体の密度、 L は代表長さ、 v_s は鋼帯の移動速度、 μ は流体の粘度である。ここでは、代表長さ L にシンクロールの直径 D をとっている。

(1)式より実機設備と水モデル装置との間には、(2)式

平成7年1月18日受付 平成7年4月24日受理 (Received on Jan. 18, 1995; Accepted on Apr. 24, 1995)

* 日新製鋼(株)加工技術研究所 (Forming Technology Development Laboratories, Nisshin Steel Co., Ltd., Tsurumachi Amagasaki 660)

* 2 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University)

* 3 大阪大学工学部(現:住友金属工業(株)顧問) (Faculty of Engineering, Osaka University, now with Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

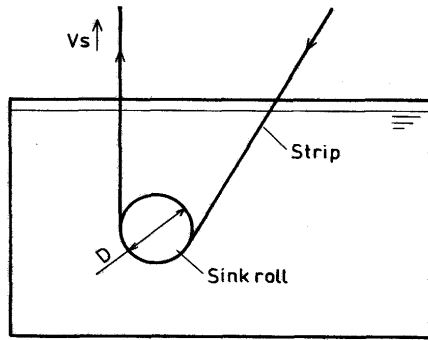


Fig. 1. Schematic of a hot dip plating bath.

が成立する必要がある。

$$\rho_R L_R v_{SR} / \mu_R = \rho_M L_M v_{SM} / \mu_M \dots\dots\dots (2)$$

ここで、添字Rは実機、Mは水モデル装置を示す。また、 v_{SM} はベルトの移動速度である。

(2)式に実機設備の諸元、融体の物性値ならびに鋼帯の移動速度を代入してレイノルズ数を算出すると、 10^6 のオーダーとなる。この値と1/5水モデル装置の上記の諸量を用いて、水モデル装置のベルト移動速度を算出すると、 $v_{SM} = 43.5$ (m/s)と非常に大きくなり実現が困難である。ところが、実機設備での浴槽内の流れは乱流と考えられ¹²⁾、水モデル装置の水槽内を乱流に保てば相似則を緩和してもよいため、ここではレイノルズ数を 10^5 のオーダーとした。ただし、実験は水槽内が乱流であることを予め確認してから行う必要がある。また、相似則緩和の有効性を確認するため、1/5水モデル装置でベルト移動速度 v_{SM} を、1/10水モデル装置を用いることによって代表寸法を変えて実験を行った。

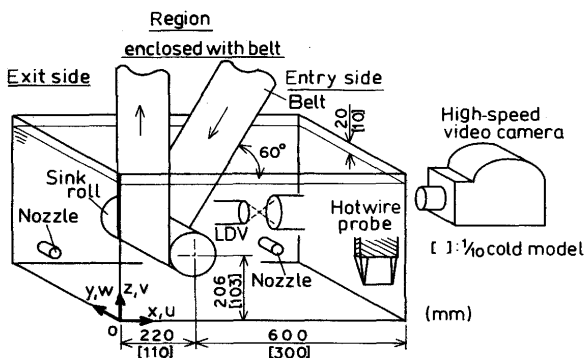


Fig. 2. Experimental apparatus for 1/5 and 1/10 cold model experiments (numeral in bracket denotes the dimension for 1/10 cold model).

Table 1. Main specifications of cold models.

	1/5 model	1/10 model
Sink roll	$\phi 140 \times 420$ mm	$\phi 70 \times 210$ mm
Belt	$0.2^t \times 240^w$ mm	$0.2^t \times 120^w$ mm
Vessel	$10^t \times 820^w \times 620^d \times 458^h$ mm	$5^t \times 410^w \times 310^d \times 229^h$ mm
	Transparent acrylic resin	

2.1.2 実験装置の概要

水モデル装置の概要をFig. 2に、主仕様をTable 1に示す。なお、Fig. 2の括弧内の数値は、1/10水モデル装置の寸法を示している。本装置は、アルミニウム製の架台上に透明アクリル製の水槽を固定し、水槽内にシンクロールを設置している。シンクロールと装置上部の2本の駆動用ロールとを介してエンドレスベルトを取り付け、模擬的な鋼帯としている。エンドレスベルトの移動速度 v_{SM} は、サーボモータによって最大4.8(m/s)まで大きくすることが可能である。

水槽内での座標は幅方向をx、高さ方向をz、奥行方向をyとし、それぞれの方向の流速をu、v、wとした。さらに、水槽でのベルト侵入側を“entry側”，ベルト立ち上がり側を“exit側”，シンクロール上方のベルトが相対向する領域を“ベルト間”とした。

2.2 フローパターンの観察方法

実験条件をTable 2に示す。トレーサーとしては、可視化しやすいように球形で青色のアクリル粒子を使用した。また、水槽内の液体は、アクリル粒子と密度が同一となるように25%NaCl水溶液を使用した。フローパターンの観察は、目視あるいは高速度ビデオカメラを用いて行った。この観察は、主に1/5水モデル装置を対象としたが、相似則緩和の妥当性をみるため1/10水モデル装置も用いた。

2.3 流速の測定方法

2.3.1 熱線流速計による測定

1/5水モデル装置の水槽内が、乱流になっているかどうかを確認するため、熱線流速計を用いて流速の測定を行った。測定時の水槽内の液体には、イオン交換水を用いた。熱線プローブは、直径 $152\mu\text{m}$ の白金線である。水槽内には、温度調節器を設置して液体の温度を一定に保った。また、流速較正用の噴出ノズルをFig. 2に示すように、水槽後方の側壁に設置して、噴流を発生させ、その中に熱線プローブを置いた。このような状態で流量計を用いて噴出口よりの流速を変化させ、実際の流速値と流速計の出力電圧との較正直線を作成した。出力電圧はアナログ信号であるので、この直線を基に、電圧計とRMS計を用いて平均流速と乱れのr.m.s.値を得て、流れが乱流であるかどうかを判断した。

2.3.2 レーザードップラー流速計(LDV)による測定

LDVによる測定は、光ファイバプローブにおける焦点距離などの装置上の制約から、1/10水モデル装置で行った。2次元LDVでは、流れの方向を検出できるため、主に水槽内のx、z方向の流れ特性を詳細に測定した。測定時の水槽内の液体はイオン交換水とし、光散乱粒子には、直径約1

Table 2. Experimental conditions.

Belt speed	0.75, 0.8, 1.0, 1.5, 3.0(m/s)
Working liquid	Aqueous NaCl solution Tap water
Tracer	Acrylic beads($d = \phi 2.0$ mm, blue)

μm のアルミナ粒子を用いた。得られた速度信号をマイクロコンピュータとA/D交換器を用いて、次式に基づき平均流速(\bar{u} , \bar{v} , \bar{w})と乱れのr.m.s.値(u'_{rms} , v'_{rms} , w'_{rms})ならびにレイノルズ応力($\overline{u'v'}$)を得た。測定時間は一測定点につき5 min以上とし、統計上、十分な数の信号を得た¹³⁾¹⁴⁾。

$$u_i = \bar{u} + u'_i \dots\dots\dots (3)$$

$$v_i = \bar{v} + v'_i \dots\dots\dots (4)$$

$$w_i = \bar{w} + w'_i \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N} \dots\dots\dots (6)$$

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \dots\dots\dots (7)$$

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{N} \dots\dots\dots (8)$$

$$u'_{\text{rms}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N u_i'^2}{N} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

$$v'_{\text{rms}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N v_i'^2}{N} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

$$w'_{\text{rms}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N w_i'^2}{N} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (11)$$

$$\overline{u'v'} = \frac{\sum_{i=1}^N u'_i v'_i}{N} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 i は i 番目のデジタル信号を表す。

3. 実験結果および考察

3.1 フローパターン

まず、相似則の緩和の妥当性について述べる。前述のように今回の実験では、実機設備と水モデル装置間でレイノルズ数の相似則緩和を採用し、水モデル装置でのレイノルズ数は実機設備の約1/10である 10^5 のオーダーとした。まず、1/5水モデル装置において乱流となるベルト移動速度 v_{SM} を3.0, 1.5, 0.75m/sと変えることによって、レイノルズ数を 4.2×10^5 , 2.1×10^5 , 1.0×10^5 と変化させてフローパターンを観察したところ、いずれのレイノルズ数においても同じフローパターンが見られた。次に1/10水モデル装置でベルト移動速度 v_{SM} が1.5m/sでのフローパターンを観察した。このときのレイノルズ数は 1.0×10^5 であるが、観察したフローパターンは1/5水モデル装置の場合と同じであった。以上の実験結果から、レイノルズ数の代表速度、代表寸法を変化させてもフローパターンは異なることなく、今回の相似則緩和が有効であることが分かった。

以下に実験結果の一例として、ベルト移動速度 v_{SM} が1.5 m/sの場合のフローパターン結果を示す。また、1/10水モデル装置を用いた流速測定に際しては、測定のしやすいベルト移動速度 v_{SM} として1.5m/sを選んだ。

Fig. 3に全体的なフローパターンの模式図を示す。ベルトに誘起される主な流れとして、a線で示すentry側からベルトに沿ってexit側に達する強い大規模な流れがある。この流れは、exit側からb線で示す水槽の底面近傍(底面全体に及ぶ)

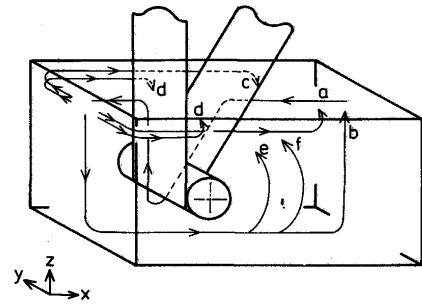


Fig. 3. Flow pattern in the whole hot dip plating bath.

と、c線で示す側壁近傍(側壁全体に及ぶ)を通過して、再びentry側に達する。b線の底面近傍を通る流れは、e, f線で示すように途中で分岐してベルト方向へ向かう。また、c線の側壁近傍を通る流れは、d線で示すように途中で分岐してexit側のベルト近傍からベルト間(exit側のベルト全体に及ぶ)へ入り込むパターンもある。

Fig. 4に示すようにexit側のベルト近傍からベルト間に入り込んだd線の流れは、ほとんどがh線の流れやj線經由h線の流れに乗ってentry側のベルトに向かう。また、興味深い現象として、d線の流れの一部がg線で示すようにexit側のベルトとシンクロールの隙間領域に入り込む。g線の流れは、exit側のベルトとシンクロールの隙間領域近傍の液体がベルトによって上方向に運び去られるのを補充する役割を担っている。exit側のベルトとシンクロールの隙間領域に入り込んだg線とm線の流れは、i線で示すように上方向に流れるか、j線で示すようにh線の流れに合流する。

h線の流れは、ベルトに沿って入り込むk線の流れに合流して、entry側のベルトとシンクロールの隙間領域に入り込む。その後、m線で示すexit側のベルトとシンクロールの隙間領域に回り込む流れやl線で示すように上方向に向かう流れとなる。l線の流れは、やがてh線の流れに乗って行く。さらに、n線で示すようなベルト間外へ排出する流れも発生し、排出後はentry側などへ流れて行く。このように、水槽内の流れは、3次元的な循環流を形成している。

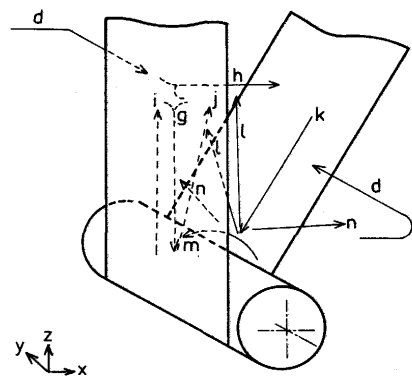


Fig. 4. Flow pattern in the region enclosed with belt.

次に代表的な二つの断面に着目して、フローパターンを見てみる。Fig. 5 に水槽正面から水槽の y 方向のほぼ中心断面 ($y=302\text{mm}$) を観察した場合の、Fig. 6 に水槽上面から表面近傍を観察した場合の結果を示す。Fig. 5 においてベルトに向かう流れは、entry 側 (例えば e, f 線) だけでなくシンクロール直下付近でも発生している。ベルト間では、ベルトとシンクロールの隙間領域から排出する流れが、Fig. 4 で述べたように複雑なパターンを形成している。また、Fig. 6 で示したように、表面近傍においても exit 側からベルト間や entry 側に流れるパターンが確認できた。

観察したフローパターンとLDVの測定から得た速度ベクトルより推測されるフローパターンとの比較を行ってみた。LDVの推定結果として、Fig. 7 に水槽の y 方向のほぼ中心である $y=151\text{mm}$ 位置での結果を、Fig. 8 に水面から 20mm 下の位置での結果を示す。Fig. 8 の表面近傍での測定は、実験装置に関する制約から x 方向のみとした。Fig. 7, 8 の速度ベクトルから推測されるフローパターンを Fig. 5, 6 に示したフローパターンと比較すると、両者はよく一致していることが分かる。また、ここには示していないが、1/10水モデル装置の観察したフローパターンと速度ベクトルを用い

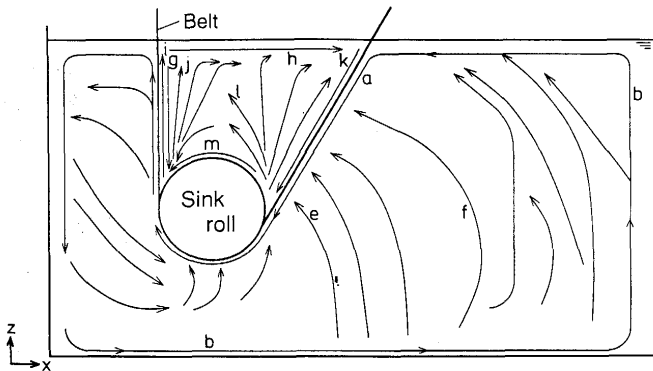


Fig. 5. Flow pattern observed at the middle plane in the y direction of the 1/5 model vessel ($y=302\text{mm}$, $v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

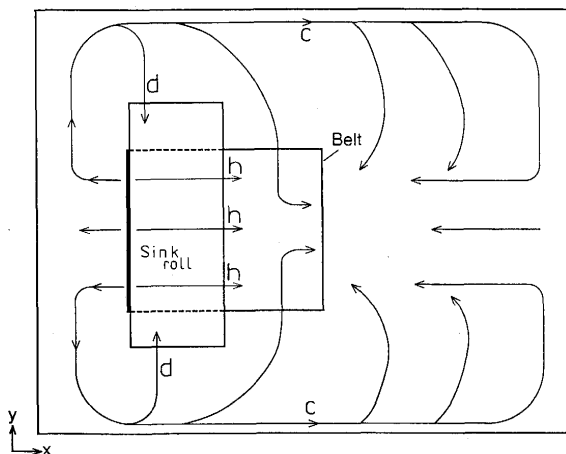


Fig. 6. Flow pattern near the bath surface of the 1/5 model ($v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

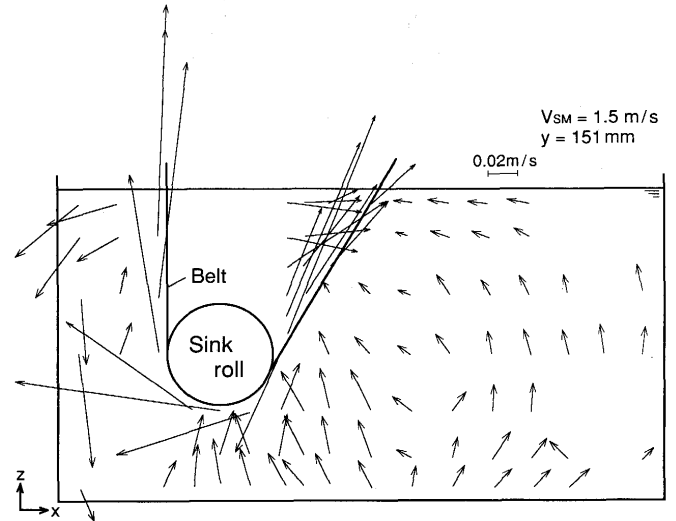


Fig. 7. Velocity vectors measured by means of LDV at the middle plane in the y direction ($y=151\text{mm}$, $v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

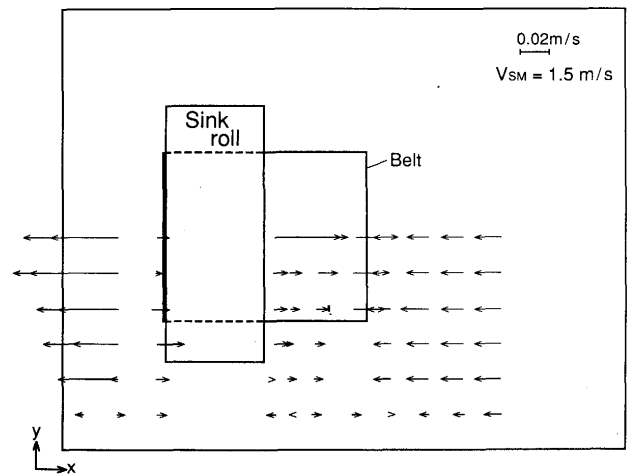


Fig. 8. Velocity component in the x direction measured by means of LDV near the bath surface ($z=199\text{mm}$, $v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

て推測されるフローパターンもよく一致していた。

実機でのフローパターンに関しては、めっき浴表面において、exit 側のストリップ付近から exit 側の側壁に向かう流れや、シンクロール上方のストリップが相対向する領域で entry 側のストリップに向かう流れが観察されている。このフローパターンは、Fig. 6 で示したフローパターンと同じである。

3・2 流速および乱れの r.m.s. 値の等高線図

Fig. 9 に、ベルト移動速度 v_{SM} が 1.5m/s で $y=151\text{mm}$ の断面の等流速線図を示す。図中の数値は流速値を示している。この断面での流速 ($\bar{V} = (u^2 + v^2)^{1/2}$) は、図中の A で示した領域、すなわちベルトのごく近傍で非常に高いことが分かる。また、entry 側では、水槽の側壁近傍だけでなく、図中の B で示したベルトと側壁の間の広い領域においても流速が低下する。表面近傍においては、Fig. 10 に示すように、entry

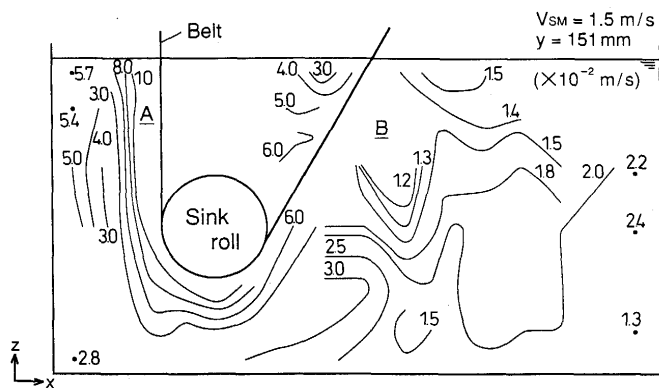


Fig. 9. Contour lines of mean velocity \bar{V} at the middle plane in the y direction ($y=151\text{mm}$, $v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

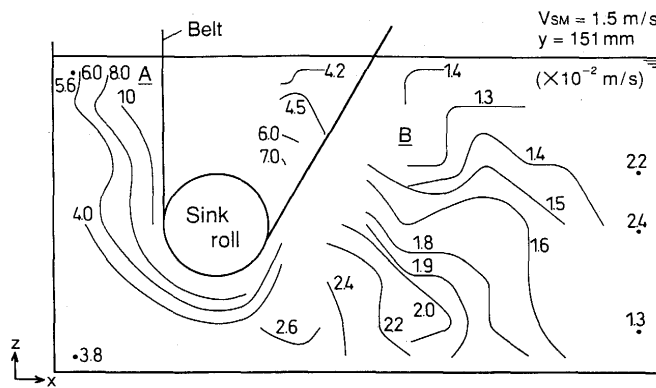


Fig. 11. Contour lines of turbulence V'_{rms} at the middle plane in the y direction ($y=151\text{mm}$, $v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

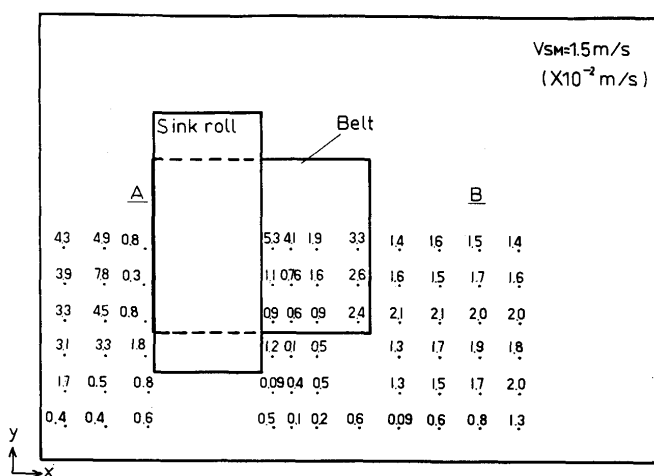


Fig. 10. Distributions of mean velocity \bar{u} near the bath surface ($z=199\text{mm}$, $v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

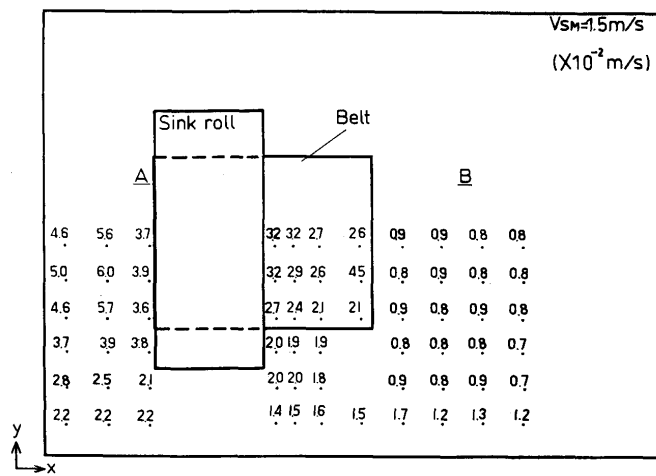


Fig. 12. Distributions of the r.m.s. value of turbulence u'_{rms} near the bath surface ($z=199\text{mm}$, $v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

側のベルトと側壁の間の領域Bや水槽正面の壁に近いほど流速が低下する。なお、水槽内全体の概略の平均流速は、4.0 cm/sであった。

次に、乱れの r.m.s. 値の分布を流速分布と同様の形式で、Fig.11, 12に示す。ベルト移動速度 v_{SM} は、1.5m/sである。乱れの r.m.s. 値 ($V'_{rms} = (u'_{rms}^2 + v'_{rms}^2)^{1/2}$) の分布は、流速分布と同じ傾向であり、Fig.11で示したようにベルトのごく近傍で高く、entry側のベルトと側壁の間の領域Bで低下している。また、表面近傍においてもFig.12に示したように、entry側のベルトと側壁の間の領域Bや水槽正面の壁に近いほど乱れの r.m.s. 値が低下する分布になっている。ただし、この図においては、 $v'_{rms}=0$ としている。なお、水槽内全体の平均の乱れの r.m.s. 値は、概略で4.0cm/sであり、平均流速とはほぼ同じ値である。この結果は、ドロスの分散特性を平均流速のみに着目して議論することに無理があり、乱れの効果を見逃すことができないことを意味している。

溶融めつき浴内では、流速と乱れの r.m.s. 値が低くなっている上記領域近傍においてドロスが滞留しやすいと考えられる。

3・3 レイノルズ応力の分布

Fig.13にレイノルズ応力の分布を、流速および乱れの r.m.s. 値の分布と同様な形式で示す。ベルト移動速度 v_{SM} は1.5m/sである。レイノルズ応力とは乱流渦による流れのせ

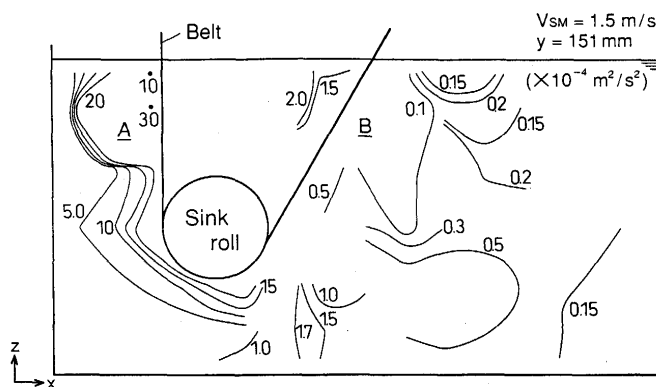


Fig. 13. Contour lines of Reynolds shear stress $\overline{u'v'}$ at the middle plane in the y direction ($y=151\text{mm}$, $v_{SM}=1.5\text{m/s}$).

ん断応力であり、例えば溶融めっき浴中で合体したドロスを分離する力の目安を与える。

まずFig.13に示した $y=151\text{mm}$ の断面でのレイノルズ応力分布は、シンクロール直下から exit 側にかけてのベルト近傍で高くなっている。したがって、シンクロール直下から exit 側にかけてのベルト近傍において、非常に強い乱流になっている。これに対して、entry 側のベルトと側壁との間の領域Bでは、ベルト近傍のシンクロール直下から exit 側にかけての値の約 $1/100$ と低く、穏やかな流れになっていることが分かる。ただし、entry 側のベルトのごく近傍では、装置上の制約からレイノルズ応力の測定はできていない。また、表面近傍のレイノルズ応力も、同様の理由で測定はできていない。

レイノルズ応力分布の結果より、シンクロール直下から exit 側にかけてのストリップ近傍の領域において、溶融めっき浴内のドロスが激しく乱されて分散されることが考えられる。

4. 結言

溶融めっき浴内の流動特性を解明するため、 $1/5$ および $1/10$ 水モデル装置を用いて、フローパターン、平均流速などの基本特性を検討した。以下に得られた主な結果を示す。

(1)水槽内全体のフローパターンは、entry側からベルトに達した流れが、底面近傍と側壁近傍を通過して再びentry側へ戻る3次元的な形態である。このとき、entry側へ戻る流れの一部は、ベルトの端近傍からベルト間へ入り込む。

(2)ベルト間では、ベルトとシンクロールの隙間領域に向かう流れとそこから外に向かう流れが、複雑なパターンを示している。特にexit側のベルトとシンクロールの隙間領

域では、ベルトに沿ってほぼ真直ぐに落下する流れの存在が特筆される。

(3)以上のようなフローパターンは、 $1/5$ と $1/10$ の両水モデル装置とも同じであった。

(4)LDVで測定した水槽の y 方向の中心断面($y=151\text{mm}$)ならびに水面から 20mm 下の位置における平均流速のベクトル図は、上記フローパターンを矛盾なく説明できる。

(5)溶融めっき浴内では、流速と乱れのr.m.s.値が低い値を示すentry側のベルトと側壁の間の広い領域や水槽側壁近傍においてドロスが滞留しやすいと考えられる。

(6)レイノルズ応力分布の結果より、シンクロール真下からexit側にかけてのストリップ近傍において、溶融めっき浴内のドロスが激しく乱されて分散されることが考えられる。

文 献

- 1) 山口 洋, 久松敬弘: 鉄と鋼, 60 (1974), p.96
- 2) 庄司政浩, 伊藤三郎: 日本鋼管技報, 91 (1981), p.493
- 3) 若松良徳, 下崎敏雄, 大西正巳: 日本金属学会誌, 54 (1990), p.784
- 4) 荒川晴美, 神原繁雄, 木村忠雄: 鉄と鋼, 62 (1976), p.S194
- 5) 高村日出夫, 加藤千昭, 森戸延行: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1631
- 6) 山口 周, 酒徳 篤, 牧野浩士, 井口義章: 材料とプロセス, 7 (1994), p.1530
- 7) 石原晴彦, 山中静雄, 浅野和夫, 高谷有志, 栗本樹夫, 大石公志: 材料とプロセス, 7 (1994), p.1531
- 8) 例えば, 伊藤三郎, 高田博純: 日本鋼管技報, 81 (1979), p.178
- 9) 福島祐一, 竹内 力, 多田 健, 藤井良基, 野口孝男, 奈良 正: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1566
- 10) 橋本孝夫, 石原晴彦, 山中静雄, 栗田興一, 宮内澄隆, 山内昭良: 材料とプロセス, 6 (1993), p.1561
- 11) 高村日出夫, 加藤千昭, 望月一雄, 森戸延行: 材料とプロセス, 7 (1994), p.1532
- 12) 山口 洋, 久松敬弘: 鉄と鋼, 59 (1973), p.1994
- 13) 井口 学, 竹内博明, 森田善一郎: 鉄と鋼, 76 (1990), p.699
- 14) 井口 学, 富田祐志, 中島敬治, 森田善一郎: 鉄と鋼, 78 (1992), p.1786