

# 電磁力を利用した非接触式溶融金属表面流速 センサーの開発

井口 学\*・花崎 一治\*<sup>2</sup>・寺内 幸生\*<sup>2</sup>

Development of Non-contact Electromagnetic Sensor for the Meniscus Velocity Measurement of Molten Metal Flow

Manabu IGUCHI, Kazuharu HANAZAKI and Yukio TERAUCHI

**Synopsis** : A velocimeter was proposed for the measurement of the surface velocity of molten metal flow. Cold model experiments were carried out to evaluate its accuracy. Wave motions were imposed on the molten Wood's metal surface by means of the Lorentz force. The propagation times of the waves in the upstream and downstream directions were detected with two level sensors. The surface velocity of molten Wood's metal flow was calculated from the propagation time difference and the distance between the two level sensors. The surface velocity could be accurately measured even if wave motions, *i.e.*, meniscus level fluctuations caused by other external and internal oscillations existed on the molten metal surface. These disturbances can readily be removed using a narrow band pass filter because the frequency of the imposed wave motions is predetermined.

**Key words**: velocimetry; meniscus flow; molten metal; continuous casting mold.

## 1. 緒言

溶鋼の連続鋳造過程においては、周知のようにタンディッシュから鋳型に浸漬ノズルを通じて溶鋼を分配注入している<sup>1)</sup>。浸漬ノズルには複数の吐出口が設けられ、各吐出口から同量の溶鋼を吐出するように構成されており、鋳型内におけるメニスカス高さがほぼ同じ水準に維持されるように制御しながら供給されている。ところが、鋳型内への溶鋼の注入に関し、いくつかの問題点が指摘されている。例えば、浸漬ノズルを長期間使用し続けると、各吐出口から流れ出る溶鋼の吐出量に不均等が生ずる。これは、脱酸目的で溶鋼中に添加されているアルミニウムが酸化してアルミナとなり、浸漬ノズルの内壁に付着堆積して浸漬ノズルを閉塞させ、ノズル内溶鋼の円滑な流通を阻害するためである。鋳型内に注入される溶鋼の吐出量に、方向による偏りが生じることによって、鋳型内での不均一凝固や溶鋼表面の乱れが引起されるとともに、浸漬ノズルから供給される溶鋼の給湯量と下部側からの引抜き量のアンバランスも生じ、鋳片品質の低下や鋳造効率の低下をもたらす。

このような事態を回避するには、浸漬ノズルからの吐出流の偏りや上記アンバランスなどで発生する鋳型内のレベル変動を早期に検知し、防止するための対策を講ずることが重要であり、以前から吐出流の偏りやレベル変動を検知

するための流速測定技術や<sup>2-13)</sup> レベル測定技術<sup>14-20)</sup> が多数開発されている。しかしながら、レベル測定技術に比べて流速測定技術の精度面の不備は否めない<sup>9,11,21)</sup>。

今までに開発が試みられている非接触式の流速測定技術は、導体である溶融金属が磁界中を移動する際、その流速に応じて検出コイルに起電力が発生する原理に基づいている<sup>12,13)</sup>。しかしながら、従来の測定技術では、検出コイルに発生する起電力が検出コイルと溶融金属との間の距離、すなわち溶融金属レベルの影響を強く受けることから、流速に起因する起電力とレベル変動に起因する起電力を分離することが難しく、レベル変動が大きい場合には、結果的に流速を精度良く測定することができなくなる。ここで、別途レベル計を用いて溶融金属レベルを測定し、これにより補正を実施することも技術的に可能であるが、鋳型内のレベル変動を測定すべく実用化されている渦電流レベル計の精度では補正は難しく、専用に高精度の補正用レベル計が新たに必要となる。すなわち、補正用レベル計の感度を上げるためには大きなものが必要となるが、このようなレベル計の大型化は鋳型表面の監視や鋳造パウダー（フラックス）の散布の邪魔になり、溶融金属の流速の方向も精度良く測定できなくなる。さらには、補正用レベル計を設置するための自動化機器も大型化し、設備費が高くなるといった問題もある。

本研究は上記状況に鑑みなされたもので、溶融金属のレ

平成14年5月13日受付 平成14年6月29日受理 (Received on May 13, 2002; Accepted on June 29, 2002)

\* 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

\*<sup>2</sup> ヘレウスエレクトロナイト (株) (Heraeus Electronite Co., Ltd.)

ベル変動によっても測定精度が大きく影響を受けることなく、装置の小型化が実現され、さらには鋳型内のレベル変動をも同時に測定可能とした熔融金属の非接触流速測定技術を提供せんとするものである。すなわち、鋳型内に満たされた熔融金属表面にローレンツ力により波動を発生させ、波動の伝播速度が熔融金属表面の流れによって変化することを利用して熔融金属の表面流速を測定する装置の開発を行った。まず低融点金属であるウッドメタルを用いて基礎実験を実施し、測定原理の妥当性について検討した。

## 2. 測定原理と実験装置

### 2.1 測定原理

Fig. 1に模式的に示すように、熔融金属の表面に高周波磁界を印加してローレンツ力により表面を凹ませ、電源のある周波数で周期的に on/off すると波立ちが発生し、波動が周囲へ伝播していく。このとき、熔融金属表面に流動があると、波動の伝播速度が熔融金属の流速の影響を受け、伝播速度が方向によって異なる。そこで、波立ちの発生部に対し上流側と下流側の双方を含む2箇所以上の複数箇所において、熔融金属のレベル変動を測定すれば、波動伝播の時間遅れを解析することによって熔融金属の表面流速が算出できる。この波動の周波数は既知であるので、たとえば他の要因による波動が存在しても、狭帯域フィルターを用いて容易に弁別できる。

#### 2.1.1 流れの方向が既知の場合

熔融金属の流れの方向が既知の場合には、波動の伝播時間をレベル変動の測定により2点間で検知し、その位相差を信号解析して流速を算出する。ローレンツ力によって発

生させた波動は上流側と下流側へ速度  $V_u$  と  $V_d$  で伝わる。

$$V_u = V_w - V_{mf} \dots \dots \dots (1)$$

$$V_d = V_w + V_{mf} \dots \dots \dots (2)$$

ここで  $V_w$  は静止浴表面上の波動伝播速度、 $V_{mf}$  はウッドメタル流速である。したがって、上流側と下流側のレベル計に到達する波動に時間差が発生し、これを測定することで熔融金属の流速  $V_{mf}$  が測定可能となる。

時間差  $\Delta t$  は次式で与えられる。

$$\Delta t = L/(V_w - V_{mf}) - L/(V_w + V_{mf}) \dots \dots \dots (3)$$

ここで  $L$  は発信コイル（馬蹄型コイル）と受信コイル（レベル計）との距離である。静止浴表面上の波動伝播速度  $V_w$  が与えられると流速  $V_{mf}$  は次式で計算できる。

$$V_{mf} = [(L/\Delta t)^2 + V_w^2]^{1/2} - L/\Delta t \dots \dots \dots (4)$$

ただし、本測定法は  $V_w > V_{mf}$  のときにのみ適用可能な点に留意されたい。すなわち、発信コイルの上流側と下流側に受信コイルがある場合には、静止浴表面上の波動伝播速度  $V_w$  よりも表面流速  $V_{mf}$  が大きい場合には、波動が上流側の受信コイルまで伝播してこないで、測定できない。

表面流速  $V_{mf}$  が  $V_w$  よりも大きいと、発信コイルの下流側の2箇所に受信コイルを設置すればよい。例えば、発信コイルから1番目の受信コイルまでの距離を  $L$ 、2番目の受信コイルまでの距離を  $L+L_1$  とすれば

$$\begin{aligned} \Delta t &= (L+L_1)/(V_w + V_{mf}) - L/(V_w + V_{mf}) \\ &= L_1/(V_w + V_{mf}) \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

となり、表面流速  $V_{mf}$  は次式で与えられる。

$$V_{mf} = L_1/\Delta t - V_w \dots \dots \dots (6)$$

上述のように、本測定法では位相差に着目しているため、熔融金属表面のレベル測定の精度はそれほど必要とされず、電磁誘導により流速に応じた誘導起電力が発生するといった原理を採用していた従来の方法とは異なり、鋳型内における熔融金属のレベル変動の影響を受けることなく流速を精密に測定できる。すなわち、ローレンツ力により発生させる波立ちの周波数を、鋳型のオッシレーション、溶鋼のスロッシングなどの要因から生じる熔融金属表面のレベル変動の周波数と異なる帯域に設定し、波立ちによる信号とそれ以外の要因で生じるレベル変動を信号処理により弁別して測定することに、本測定法の特徴がある。

静止液体表面上の波動伝播速度の測定には、以下のよう

にいくつかの方法がある。  
 (1) 熔融金属表面の流れがなく、静止した熔融金属表面に波立ちを発生させた場合、発生部における基準となる信号と、ある表面位置におけるレベル信号の位相差を算出すれば、この位相差と波立ち発生部からの離間距離に基づ

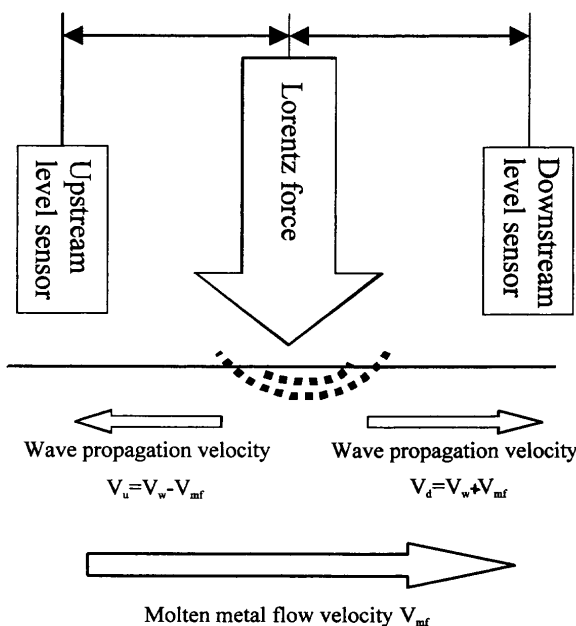


Fig. 1. Schematic of wave propagation caused by Lorentz force.

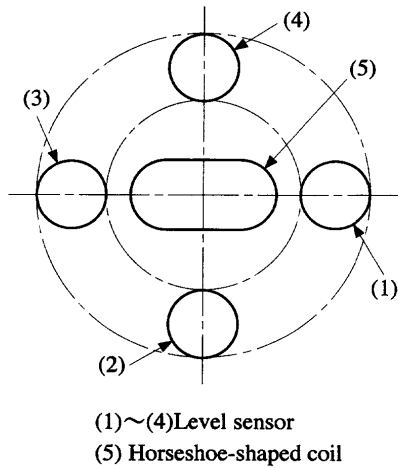


Fig. 2. Configuration of level sensors for the measurement of velocity vector.

き伝播速度  $V_w$  が求まる。

(2) 溶融金属表面に流れがある場合、波立ち発生部を含み、流れの方向に引いた直線上の2箇所に設置したレベル計の信号と発生部の信号の合計3つの信号を用いれば、静止浴表面上の波動伝播速度  $V_w$  と流速  $V_{mf}$  が同時に求まる。いったん静止浴表面上の波動伝播速度  $V_w$  が求まると、発生部における基準となる状態に着目しなくとも、本研究で提案しているように、2箇所に設置したレベル計によって流速が求まる。

#### 2.1.2 流れの方向が未知の場合

溶融金属表面の速度ベクトル、すなわち流れの速さと方向を求めるためには、溶融金属表面上で直角に交わる2軸の速度方向を検出可能な所定の4箇所でレベル信号を測定すればよい (Fig. 2)。x, y 方向の表面流速成分を  $V_{mfx}$ ,  $V_{mfy}$ 、受信コイル1と3の間の時間遅れを  $\Delta t_{13}$ 、受信コイル2と4との間の時間遅れを  $\Delta t_{24}$  とする。 $\Delta t_{13}$  と  $\Delta t_{24}$  を測定すれば、式 (4) の関係を用いることによって  $V_{mfx}$  と  $V_{mfy}$  が容易に求まる。なお、 $V_w$  は伝播方向に依存しないことは言うまでもない。

#### 2.1.3 溶融金属の表面流速と湯面レベルの同時測定

上述のレベル計では、溶融金属表面の波動に基づく湯面レベルの変動成分にのみ着目し、湯面レベルの絶対値の測定精度については留意していない。そこで、湯面レベル変動の絶対値の測定手段として、精度のより高い渦電流レベル計を用い、印加した高周波磁界により生じる溶融金属表面の波立ちによるレベル変動と、他の要因によって生じる溶融金属表面のレベル変動とを同時に測定して得られた信号から波立ちによる変動成分を信号処理により電氣的に除去することによって、レベルの絶対値が精度良く求まる。

### 2.2 実験装置

流速測定装置の鳥瞰図、全体の写真、測定部の写真、および測定部の模式図を Fig. 3~6 に示す。測定部は溶融金属表面に高周波磁界を印加し、ローレンツ力により微小な

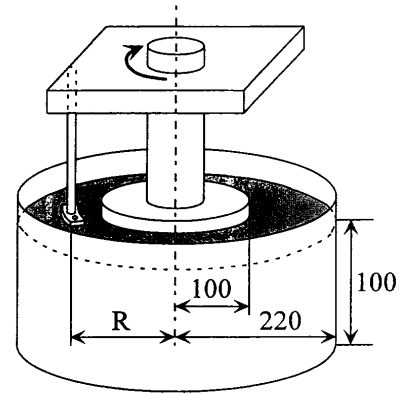


Fig. 3. Bird's-eye view of experimental apparatus.

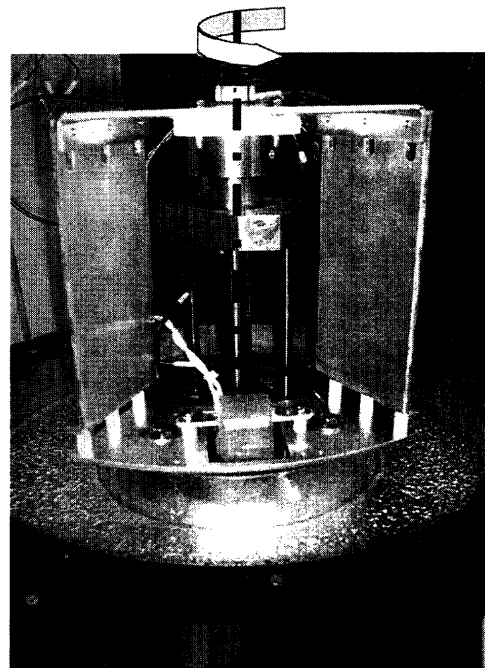


Fig. 4. Photograph of experimental apparatus equipped with electromagnetic sensor.

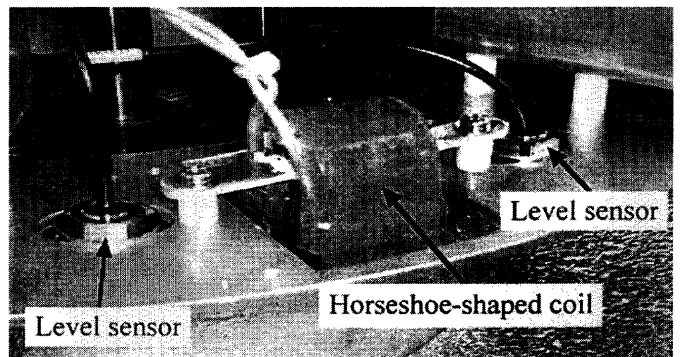


Fig. 5. Photograph of velocity detection unit.

波立ちを発生させる装置、この装置の前後に配置されているレベル計、ならびに溶融金属の流速が反映された各箇所のレベル変動の伝播状態に基づき溶融金属の流速を算出する演算装置とから成っている。波立ち発生部には、馬蹄形

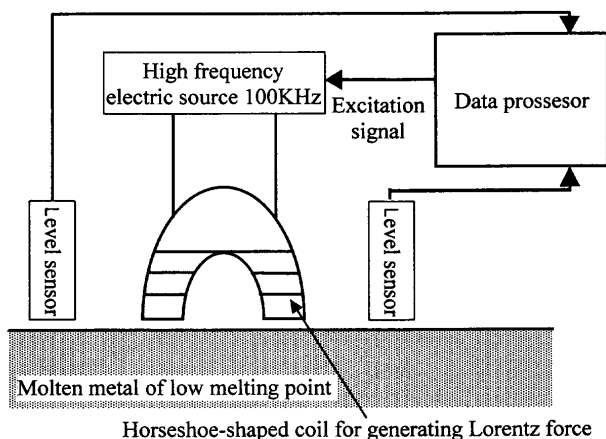


Fig. 6. Velocity detection system.

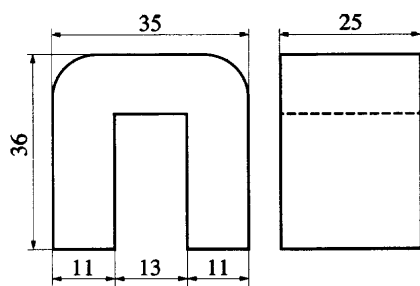


Fig. 7. Shape and size of horseshoe-shaped coil.

のローレンツ力発生コイルと高周波電源を備えたローレンツ力印加装置が用いられている。馬蹄形コイルに高周波磁界を印加することにより、馬蹄形コイル先端、およびその直下の溶融金属表面において、それぞれ磁束線の周りに渦電流が発生する。馬蹄形コイルには2つの先端があるが、そのほぼ中央部の下の溶融金属表面では誘導電流が溶融金属表面（紙面に垂直方向）に流れ、溶融金属表面に平行に印加された高周波磁場との相互作用によりローレンツ力が下向き（溶融金属表面を押し付ける方向）に働く。これにより溶融金属表面が凹む。このとき電源を適当な周波数で on/off すれば溶融金属表面に波立ちが発生する。したがって、このローレンツ力が作用する溶融金属表面が波立ち発生部となる。馬蹄型コイルの寸法は Fig. 7 に示すとおりであり、レベル計の直径は 10 mm である。低融点溶融金属として、密度  $9560 \text{ kg/m}^3$ 、動粘度  $0.341 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、表面張力  $460 \text{ mN/m}$  のウッドメタルを用いた。なお、浴深  $H_L$  は 100 mm とした。

また、馬蹄形コイルを用いる代わりに通常の円筒形コイルを用いることも可能である。例えば、一對の円筒コイルを鋳型の外部に水平に対置させ、これに高周波電流を印加して溶融金属表面に平行な磁力線を発生させれば、同様にローレンツ力が作用し、波立ちを発生させることができる。ただし、前記馬蹄形コイルは、鋳型壁に磁力線を通過させる必要がないことから印加電流を小さく抑えられ、湯面レベルに応じたコイル位置の調整もとくに必要でない点で、

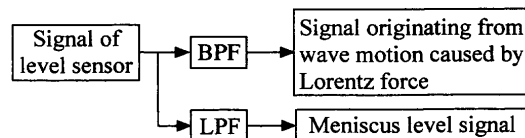


Fig. 8. Discrimination of surface velocity signal and meniscus level signal.

より好ましい。

高周波電源の電流は、ローレンツ力による押し付け力と溶融金属の盛り上がり高さの位置エネルギーのバランスと電源容量とから求めた。なお、巻き数は7であり、周波数は、表皮効果を満足する 60 kHz 以上において最適値を実験的に求めている。その結果、ローレンツ力による波立ちを有効に発生させるためには、馬蹄型コイルに印加する高周波電源の周波数を 100 kHz 程度、電流は、5~10 A 程度にすればよいことがわかった。レベル計の出力信号には、波立ちによる変動と他の要因による変動が重畳している。これらを弁別するためには on/off 周波数、すなわち波立ち周波数を他の要因による波立ち周波数と重ならないようにしなければならない。具体的には、溶鋼流量のバランス変動によるレベル変動の周波数がたかだか 1 Hz であることから、前記 on/off 周波数をこれ以上の帯域に設定することで互いに弁別でき、Fig. 8 に示すように、BPF（狭帯域バンドパスフィルタ）を通じてローレンツ力による波動変動を検出する一方、LPF（低帯域通過フィルタ）を通じて浸漬ノズルの出口での溶鋼流量のバランス変動によるレベル変動を検知することができる。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 ローレンツ力による波立ちの発生

ローレンツ力発生用コイルに、100 kHz あるいは 80 kHz で 10 A の高周波を印加し、4, 8, 12 Hz で on/off させたところ、ウッドメタル表面に波立ちを発生させることができた。on/off 波形は矩形波とした。ローレンツ力発生用コイルの両側に設置したレベル計（渦流レベル計）で検知した波動の変位 (PtoP) は、約 0.4 mm であった。

#### 3.2 表面流速の測定

上述のように、低融点金属（ウッドメタル）に高周波電流を印加することでローレンツ力により表面に波立ちの発生することが確認できた。そこで、表面流速により波動の伝播速度が変化（上流方向への伝播では減速、下流方向では増速）することを、波動の変位の位相差（伝播速度の違いによる到達時間の差）を測定することによって溶融金属流速が測定可能かどうかを調べた。ただし、表面流速を発生させることは、小規模な装置では難しいので、Fig. 3 の装置でコイルヘッドを回転させて発生させた。流速測定時はコイルヘッドと低融点金属表面間距離を 1.5 mm から

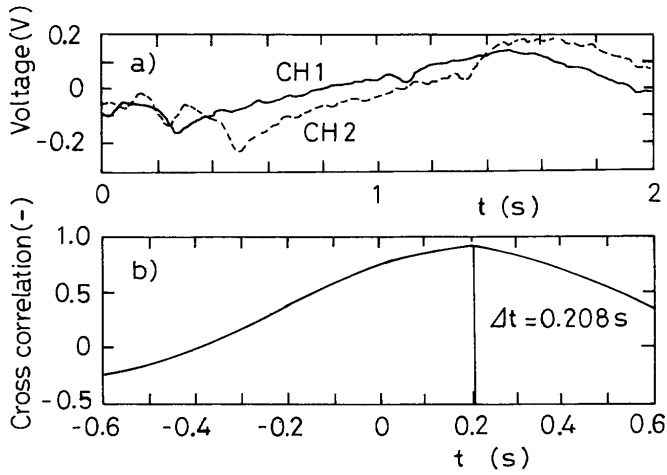


Fig. 9. Time delay between two level sensors (100 kHz, 10 A, 8 Hz, 24 rpm).

5 mm の範囲に設定し、正逆回転させた。回転数はインバータ制御により、モータ速度を調整して変化させた。静止浴表面上の波動伝播速度  $V_w$  は 700 mm/s であった。

コイルヘッドに相対的なウッドメタル表面流速  $V_{mf}$  は次式で与えられる。

$$V_{mf} = R\omega \dots \dots \dots (7)$$

ここで  $R$  は回転中心からコイルヘッドまでの距離 (アーム長さ)、 $\omega$  は角速度である。

波動に基づくレベル信号と時間遅れの結果を Fig. 9(a), (b) に示す。印加周波数 100 kHz, 電流 10 A, on/off 周波数 8 Hz の場合において、24 rpm でアームを回転させたときの測定例である。Fig. 9(a) において、CH1 と CH2 はそれぞれ馬蹄形コイルよりも上流側と下流側のレベル計の出力信号である。電圧が  $-0.2$  V から  $0.2$  V の間で変動している周期 2.5 s の振幅の大きな変動成分はレベル計とウッドメタル表面の隙間がアームの回転によって変化するために生じたものである。この変動の上に小さな振幅の 8 Hz の変動が乗っている。すなわち、この長い周期の変動が、鑄型のオシレーションに起因する湯面変動を模擬していることになる。2つのレベル計で検知した液面波動信号を BPF に通すと、CH1 と CH2 の信号から 8 Hz の成分が採り出せるので、これらの信号の相互相関係数を求めると、Fig. 9(b) のようになり、時間差  $\Delta t$  として 0.208 s が得られる。これを  $L=50$  mm,  $V_w=700$  mm/s とともに式 (4) に代入して流速  $V_{mf}$  を求めると

$$V_{mf} = 500 \text{ mm/s} \dots \dots \dots (8)$$

となる。この値は式 (8) に  $R=200$  mm,  $\omega=2\pi(24/60)$  rad/s を代入して求めた 503 mm/s にほぼ一致している。この結果によれば、時間差  $\Delta t$  を測定する方法としては、波立ち発生部を含む線上の 2 点で測定したレベル変動の波形の相互相関係数を求め、その値が最大になる時間シフト量で推

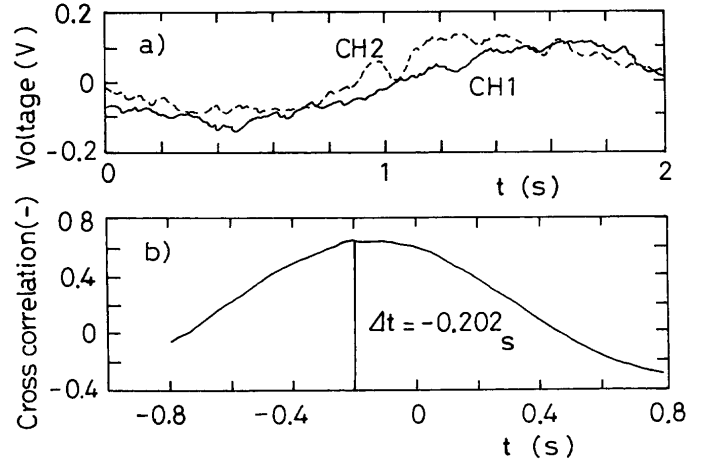


Fig. 10. Time delay between two level sensors (80 kHz, 10 A, 4 Hz, 24 rpm).

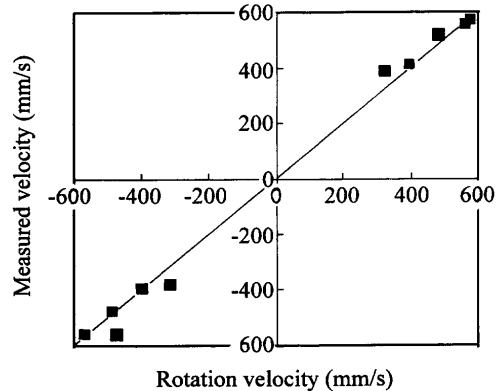


Fig. 11. Comparison between measured velocity and rotation velocity.

定する方法が有効であることがわかる。

Fig.10 に、印加周波数 80 kHz, 電流 10 A とし、同じ 24 rpm で逆回転させながら 4 Hz で on/off させたときの信号を示す。時間差は  $-0.202$  s であり、Fig. 9 の結果によく一致している。このように、2点間の波動変位の信号が良好であれば、他の要因に基づく湯面変動が存在しても、表面流速を精度良く測定可能であることが確認された。なお、正転 24 rpm, 16 rpm から逆転 16 rpm, 24 rpm へと回転数と回転方向を変化させて応答特性を見たが、測定精度は良好であった。

Fig.11 は、回転数換算の流速 (実流速) と本装置による測定結果の比較である。偏差は、 $\pm 10\%$  であり、良い精度が得られている。

### 3.3 連続鑄造鑄型内メニスカス流速測定に用いる際の問題点

#### (1) 波立ちの振幅増大

モールド内のメニスカス部には多くの要因に基づく波動が存在するため、波立ちの振幅はできるだけ大きくする必要はあるが、そうすると装置が大きくなる。装置全体の大型化を回避しつつ、波動振幅を増大する工夫が望まれる。

## (2) 発信コイルおよび受信コイルの冷却

発信と受信のコイルを1600°Cを超える溶鋼表面に近づけて使用するためには、十分な遮熱対策を講じるべきである。

## (3) 印加周波数の設定

連続鑄造鑄型内には多くの外乱に起因する波動が現れる。これらの波動の周波数を明らかにして、できるだけ離れた波動周波数を設定する必要がある。

## (4) モールドパウダーの影響

溶鋼表面にはモールドパウダーが存在する。モールドパウダーの動粘度は溶鋼の値よりもかなり大きいので、波立ちを減衰させる方向に働く。波立ち発生部からの波動の伝播距離の詳細を明らかにしておかねばならない。

これらの問題の解決策については、今後の研究に譲りたい。

## 4. 結言

今回の実験結果から以下の結論を得た。

(1) 馬蹄型コイルに高周波電流を印加することで溶融金属表面にローレンツ力により微小な波立ちを発生させることができた。

(2) この波動の伝播速度が溶融金属の流速により上流側と下流側で変化することから、馬蹄型コイルの上流と下流に設置した2箇のレベル計の信号には到達時間の差が発生する。この時間差 $\Delta t$ とレベル計の間の距離、 $2L$ から、式(4)に基づいて溶融金属流速を非接触で測定することができた。

(3) 時間差 $\Delta t$ を測定する方法としては、波立ち発生部を含む線上の2点で測定したレベル変動の波形の相互相関係数を求め、その値が最大になる時間シフト量で推定する方法が有効である。

(4) 本表面流速測定法は、速度の検知に直接電磁誘導を応用していないため、レベル計のリフトオフおよび温度ドリフト等の影響を受けることがなく、連続鑄造鑄型内の溶鋼流速の測定に対して極めて有望な方法であると考えられる。

## 記号

- $H_L$  : 浴深 (mm)  
 $R$  : アーム長さ (mm)  
 $V_d$  : 波動の下流方向伝播速度 (mm/s)  
 $V_{mf}$  : 溶融金属の表面流速 (mm/s)  
 $V_w$  : 静止浴表面の波動伝播速度 (mm/s)  
 $V_u$  : 波動の上流方向伝播速度 (mm/s)  
 $\omega$  : 回転アームの角速度 (rad/s)

## 文 献

- History of Steel Casting Technology in Japan, ISIJ, Tokyo, (1996).
- T.C.Hsiao, T.Lehner and B.Kjellberg: *Scand. J. Metall.*, **9** (1980), 105.
- M.Iguchi, M.Takeuchi, H.Kawabata, K.Ebina and Z.Morita: *Trans. Jpn. Inst. Met.*, **35** (1994), 716.
- E.Julius, H.Haubrich, P.Andrzejewski and D.Gotthelf: Proc. Int. Cong. Electromagnetic Processing of Materials, Centre Francais de L'Electricite, Paris, (1997), 5.
- M.Iguchi, H.Kawabata, T.Ogura, A.Hayashi and Y.Terauchi: *ISIJ Int.*, **36** (1996), S190.
- M.Iguchi, H.Kosaka, H.Mizukami, M.Kawamoto, A.Hayashi, Y.Terauchi, M.Hanao and H.Kawabata: *Metall. Mater. Trans. B*, **30B** (1999), 53.
- H.Mizukami, M.Hanao, T.Nara, M.Kawamoto, T.Watanabe, A.Hayashi and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 265.
- T.Kawase, M.Toki, J.Nakajima, K.Tsutsumi and H.Okumura: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 248.
- M.Iguchi, H.Kawabata, and Z.Morita: *High Temp. Mater. Process.*, **19** (2000), 187.
- M.Iguchi and Y.Sasaki: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **6** (2001), 14.
- T.Ishii: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **6** (2001), 529.
- Y.Hiraga, S.Taniguchi, T.Okimura and H.Shinagawa: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 818.
- Y.Hiraga, S.Taniguchi, T.Okimura and H.Shinagawa: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 819.
- T.Kaji, K.Asano, H.Aoki, Y.Wakatsuki, O.Iida and A.Yamane: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1204.
- K.Hanazaki, M.Oka, T.Murakami, T.Nara and Y.Shirota: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 331.
- M.Oka, K.Hanazaki, T.Murakami, T.Kanazawa and Y.Shirota: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 332.
- T.Inada, Y.Okamoto, S.Kusunoki, R.Nishihara, T.Ito and Y.Abe: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 333.
- K.Hanazaki, T.Nara, T.Murakami, M.Oka and K.Fujiwara: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 72.
- M.Yamagishi, D.Omochi, G.Murakami, K.Tanaka, T.Hirokawa, N.Aramaki, T.Itakura and J.Syoda: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 157.
- H.Kitada, O.Kondo, H.Kusachi and K.Sasame: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 892.
- S.A.Argyropoulos: *Scand. J. Metall.*, **30** (2000), 273.