



入門講座

実験テクニック編(流体計測)
応用とトピックス-3

速度測定

Velocity Measurement

石井俊夫
Toshio Ishii

NKK 総合材料技術研究所 主査

1 はじめに

これまで、基礎概説で掲載された流速測定の方法を、工場設備での操業パラメータとして使用する、あるいは鉄鋼プロセスを研究開発する時の計測手段として使用する場合には、その環境や設備的なスペースなどの制約により、各種計測方法の中から、最も有効な手法を選択する必要がある。また、計測に関する制約と個々の計測原理を考慮して、有効な計測結果が得られるかどうかを、十分検討を行なう必要がある。そこで本稿では、最近、鉄鋼業界で報告された各種実験で使用された計測方法を概説するとともに、これまで計測不可能と考えられてきた溶鋼に代表される高温熔融金属の流体計測への新たな取り組みについても紹介する。

2 各種流速計の鉄鋼分野における使用状況

鉄鋼の製造現場である、製銑・製鋼・圧延・表面処理などの各プロセスにおいて、空気や窒素ガスなどの気体流量、あるいは水などの液体流量を管理・制御することは日常的に行われていることである。これらの流量計測には、ピトー管流速計・超音波流速計・渦式流速計・レーザドップラー流速計を利用して、実際に計測された流速値から流量を換算する方法が最も広く活用されている。流体力学で言えば、円管流れで層流である場合には円管中央流速の半分が平均流速、また乱流である場合には円管中央流速の概ね9割が平均流速になる。しかし、このような流れは理想的な配管での流れであるために誤差を生じており、多くの場合、別途の方法で検定することが必要である。

このような場合の流速計の選択に際して、危険物などを除く一般的な流体においては、流体の種類に関係無く、クリーンな状態であれば、安価なピトー管流速計を取り付け圧力変

換器で電気信号にする方法が一般的である。しかしながら、多くの操業現場ではクリーンな環境であることは少なく、ダスティな環境であることの方が多い。このような状況では、微細な固形物が混入しているような場合には、固形物をトレーサ替わりにして流速を計測する手法、すなわち超音波流速計やレーザドップラー流速計が使用できる。一方、混入している物質が多過ぎる、あるいは不均一に分散している、などの理由でトレーサとして不適切である場合、または混入している物質の粒寸法が大きくて、流体の流速として代表とできない場合には、本手法での計測は好ましくない。これらの思想的検討には、流体抵抗力と重力とから粒子に関わる運動方程式を立てて解くことが行われる。粒子の速度と流体の速度の差が、流体の流速よりも十分小さければ、その粒子はトレーサとして使用可能であることがわかる。なお、流体抵抗係数に関しては、ストークスの式、アレンの式があり、既に詳細な検討が行われている。

一方、クリーンな状態であっても、オリフィスのように圧損でもって流速を計測する方法は、プロアーのように圧損を大きくできない場合に有効な方法ではない。このような場合には、渦流式流量計やレーザドップラー流速計が採用されている。以下には、製鋼プロセス開発や実機試験などで使われる流速計測に関して詳細に述べる。

2.1 水モデルでの計測例

水モデルの流速計測にはピトー管、熱線流速計が一般的に使用されている。その例として最近、小幡らが報告したRHの水モデル実験¹⁾に使用された実験装置をFig. 1に示す。RHの実験では循環流量が重要なファクターであり、この実験においても知る必要があった。そこで、この循環流量を知るために、まず水モデルの中で逆流など無く一方向に流れる場所で、かつ循環の駆動力となる空気の気泡の影響が無い部位、すなわちRH下降管部分の流速を綿密に計測した。その

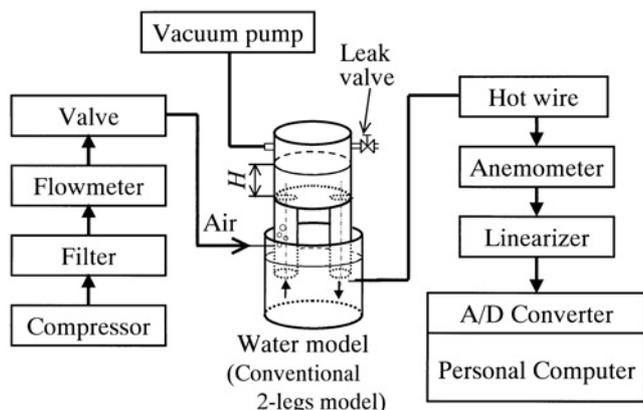


Fig. 1 Experimental set-up

平均流速を空間で積分することにより、循環流量を求める方法を採用した。具体的には、RHの下降管出口より $3 \times 10^{-3}m$ 下部(熱線流速計をトラバースするため、下降管の管内にセンサーを設置せず、下降管の出口直部で流速計測を行った)において、水平方向断面の流速分布を $5 \times 10^{-3}sec$ のサンプリング間隔で4000点のデータを計測し、平均化処理を施す方法で1点の流速を決定した。計測された結果をFig. 2に示す。サンプルポイントは全部で26点、流速の計測範囲は $0.1 \sim 0.3ms^{-1}$ であった。その平均流速を計測して流速分布を求めることにより、平均流量すなわち循環流量を導き出した。

熱線流速計は古くから使用されてきた方法であるが、最近では非接触で容易な計測手法が要望(プローブ挿入による流れへの影響度を最低限にする要望)され、レードル内の液流れや、連続鋳造機鋳型内などの液流れの測定には、レーザ・ドップラー流速計が用いられることが多くなっている^{2~4)}。横谷ら⁵⁾は、4Wの2次元レーザ・ドップラー流速計と、散乱粒子として $0.3\mu m$ のアルミナ粒子を使用して計測を行った。レーザ・ドップラー流速計では、流速を計測するのに必要な散乱光を受光する方法として、一般に前方散乱と後方散乱の二種類のどちらか一方が採用される。工業実験で4W程度のレーザを使用する場合には、前方散乱よりも散乱強度は落ちるが、受光部のプローブ位置合わせが不要である後方散乱方式を採用することが多い。また、このレーザ・ドップラー流速計を用いれば、受光部からの散乱光のサンプリング信号をデータ処理することにより、平均流速ばかりでなく、乱流成分(レイノルズ応力)など、詳細な乱流成分のデータも容易に入手することができ、高精度な計測結果が得られる。

その他の手法として、梶原ら⁶⁾はロール径1.2m、ロール胴長1.1m、ロール間隔(鋳片相当厚さ) $5 \times 10^{-3}m$ 、液面高さ0.4m、ロール速度50m/minのストリップキャスト水毛

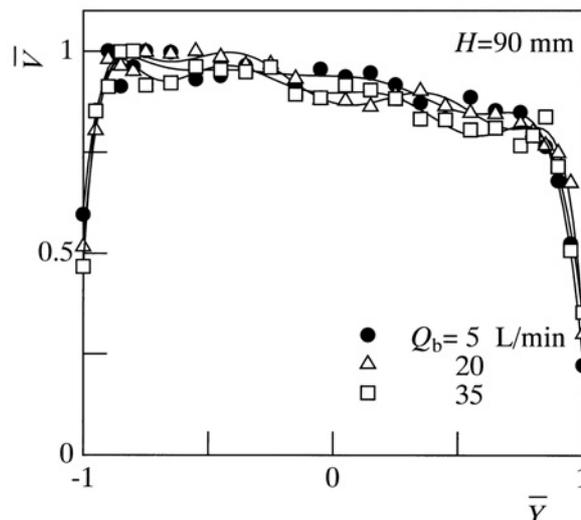


Fig. 2 Flow velocity distributions at outlet of down-leg (V/V_{max})

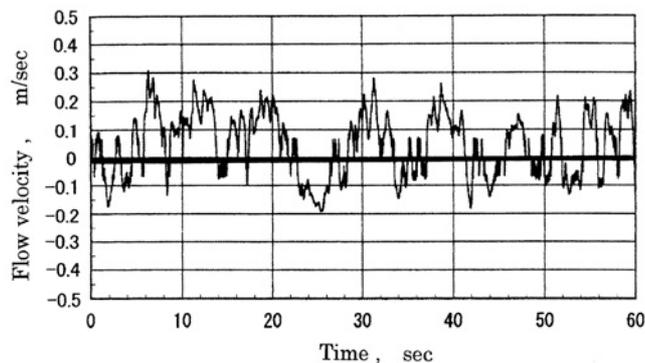


Fig. 3 Measured flow velocity on roll surface at 450mm from center of nozzle, 100mm in depth

デルにおいて、湯溜り内の流速計測を、直径 $5 \times 10^{-3}m$ のプロペラ式流速計で行なった。流速計からのデータは50Hzのサンプリング周波数の計測を行ない、Fig. 3のような時間的変動のある流れの流速計測に成功している。梶原らは、このデータから流速の時間的変化には、1.0~1.5secの周期のものと約10sec周期のものと2種類の流れ変動があり、短い周期の変動は表面波の固有振動と一致していることを確認した。

2.2 低熔融金属・水銀での計測例

加熱や保熱をする必要も無く、電磁攪拌などの電磁気を作用させる実験として、水銀を用いることは有効な手段である。この水銀中の流速を計測する方法として、Vivès Probe⁷⁾が最も良く知られている。その原理は、まず永久磁石もしくは直流電流をコイルに流して直流磁場を形成させる。このプローブを導電性流体中に浸漬させて、直流磁場内に流れが生じるとフレミングの法則により誘導電流のループが導電性流体中に発生する。この誘導電流は、直流磁場の方向と移動する

流体の方向との外積の方向（直流磁場と流れの方向とに垂直な方向）に発生する。その電流をプローブに設置した電極で計測するものである。計測された電流値は流れの大きさに線形に変化し、導電性流れの速さを計測することができる。ここで注意すべきは、磁場の方向と、流体の移動方向、誘導電流の方向は互いに直角関係にあることから、本原理方式では1回の計測で1方向の流速計測となる点である。

このプローブを用いた計測例としては、連続鋳造機のモールド電磁ブレーキの効果を計測したものがある。Fig. 4に岡澤ら⁸⁾が行なった、長辺0.6m、短辺0.1m、高さが1.5mの容器に流量 $5 \times 10^{-4} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の水銀を循環させた実験の概要を、Fig. 5にはノズル吐出口付近で計測された水平方向の速度分布を示す。本実験では、このVivès Probeを用いて、水銀の

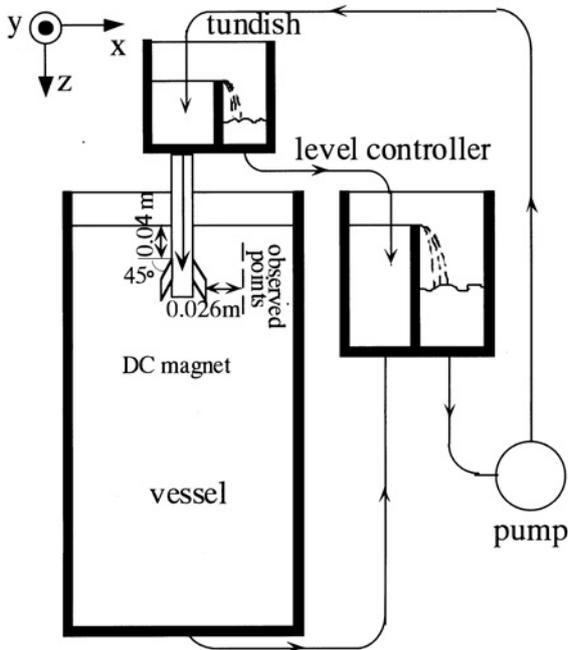


Fig. 4 Experimental apparatus for mercury model simulation

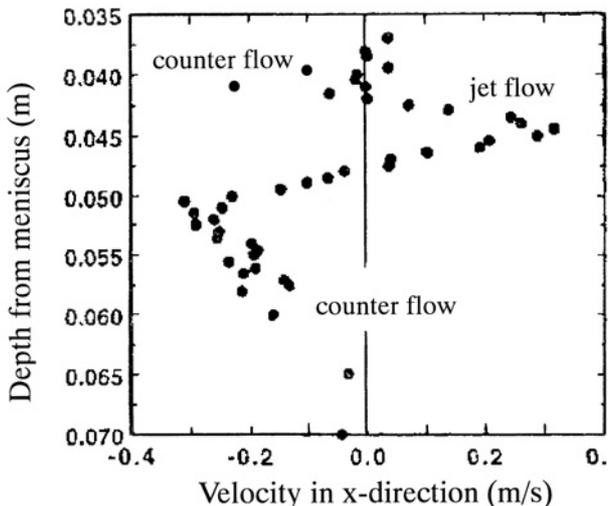


Fig. 5 Velocity profile obtained from meniscus model simulation

流速の範囲が $0.0 \sim 0.3 \text{ms}^{-1}$ で計測が可能であることを確認できた。

また、低融点金属（ウッドメタル：50Bi-26, 7Pb-13, 2Sn-10Cd）を用いた連続鋳造機モールド内のアルゴンガスの気泡挙動を調べるために、鋳型表面（以下メニスカスと呼ぶ）の流速を計測する方法として、水上ら⁹⁾はこのプローブを使用した。プローブは、外径 $3 \times 10^{-3} \text{m}$ で長さ $6 \times 10^{-3} \text{m}$ の永久磁石と、磁石内の両内面に埋設された $2.0 \times 10^{-4} \text{m}$ のエナメル線で構成された。このプローブを鋳型実験装置（長辺0.3m、短辺 $6.8 \times 10^{-2} \text{m}$ 、高さ1.5mのステンレス容器）のウッドメタル界面下 $1.5 \times 10^{-2} \text{m}$ 位置に設置して、局所的なウッドメタルの速さを計測して、メニスカスの流れは供給されるアルゴンガス流量に影響されることを示した。このように、メニスカス面下のような一方向流れ（スラブ幅方向の流れ）の速さを知るには、この手法は有効な方法である。

2.3 溶湯での計測例

連続鋳造機の溶鋼表面などの流速を測る試みは、これまで材質的な問題（溶損、腐食）、高温強度（熱変形、熱歪み）の問題、および計測誤差の問題（信頼性、再現性）、など散財する課題に対応する対策が少なく、実計測された例は極めて少ない。

溶鋼の流速計測にはVivès Probeも有効な方法の一つであるが、キュリー点（鉄では 770°C ）を超える温度域では、(1) 磁石としての特性が無くなる、(2) 磁石の代わりにコイルを使用するにはコイル自身の溶解を防ぐための冷却をする必要がある、など溶鋼の流速を測定する方法としては数々の問題がある。

他の方法で最近報告された、溶鋼の流速を計測する方法としては、(1) 耐火性の円柱を溶鋼に浸漬させ、その円柱に加わる抗力を、歪ゲージやロードセルを用いて計測して、流速に換算する方法、(2) 耐火性の円柱を浸漬させ、その円柱に加わる振動周波数を計測して流速に換算する方法、(3) 溶鋼上面から交流電磁を印加させて、溶鋼中に誘導電流を発生させ、その誘導電流から誘導される磁場を計測することで流速に換算する方法、がある。

2.3.1 抗力による流速計測

溶鋼に浸漬させても熱変形が小さく、溶鋼や溶融スラブの付着しない材質を選択して、ロッドの一端を溶鋼中に浸漬させる。他方端を自由に回転できる支点にして、その時の棒が溶鋼から受ける抗力が、ロッドの自重とが釣り合って決まる傾斜角度を測定して、溶鋼流速に換算する方法（以下、傾斜測定法と呼ぶ）¹¹⁾。あるいは、前述のロッドの途中にロードセルを取り付けて固定し、ロッドが溶鋼から受ける抗力を直

接ロードセルで測定して、溶鋼流速に換算する方法（以下、抗力測定法と呼ぶ）¹¹⁾の、2種類の 방법이報告されている。ロッドの材質としては、サーメット (Mo-ZrO₂)¹⁰⁾、あるいは窒化硼素 (BN)¹²⁾が使用されている。

沖村ら¹²⁾の行なった傾斜測定法をFig. 6に示す。窒化硼素製の1.6×10⁻²m直径の耐火物ロッドを、鑄型内メニスカス下方0.03~0.05mまで浸漬させて、溶鋼流動により生じる傾きの変化をレーザ距離計で計測し、0.1~0.2ms⁻¹の流速測定できることを確認している。時間的に安定な流れであれば傾斜角度が比較的一定となり、平均流速の計測を容易に行なう簡便な方法である。傾斜角度が小さい範囲では、流れに対する抗力係数が大きく変化しないため、傾斜角度からの計算是容易に行なえる。傾斜角度が大きくなる場合には、抗力係数が変化するため、流速換算時には十分な配慮が必要である。

久保田ら¹⁴⁾の行なった抗力測定法をFig. 7に示す。サーメ

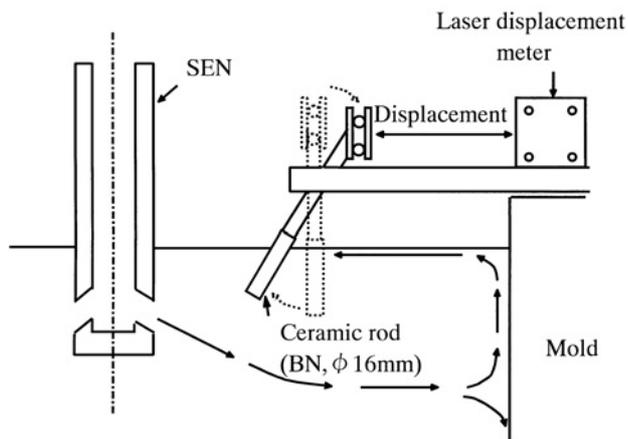


Fig. 6 Schematic view of measurement of meniscus flow velocity

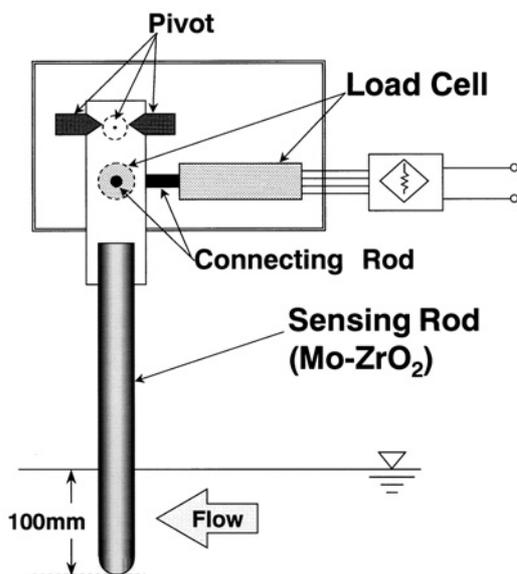


Fig. 7 Schematic drawing of velocity measuring apparatus

ット製の直径0.02m、長さ0.47mのロッドを、鑄型の溶鋼流に先端の0.1mを浸漬させて、ロッドからの抗力をロードセルで検出した。溶鋼で浸漬して使用するロッドの抵抗係数は、あらかじめ低融点合金のモデル実験で検定されたものを使用した。その結果をFig. 8に示す。流速の時間的变化を捕らえることができ、本手法では0~0.6ms⁻¹の溶鋼流速で計測可能であった。これらのデータを基にして、鑄片スラブの品質改善に活用することも可能である¹³⁾。この方法では、浸漬させたロッドの上端は実質的に固定させることになるので、メニスカスのように水平方向に流れる流体の場合には、ロッドの抵抗係数は形状の関数を含まない。そのために、ロードセルの抗力と溶鋼の流速が一義的に決定されて、流量換算は容易である。但し、メニスカスにアルゴンガス気泡が浮上し、溶鋼の流れがメニスカスに水平で無い流れが生じる場合や、ロッドが振動するような場合には、計測が困難となる場合がある。

2.3.2 振動による流速計測

流れのある液体にロッドを浸漬させると、ロッドは自励振動する。この現象は、液体中に浸漬されたロッドの後流で形成される、非対称で規則的なカルマン渦列の存在より発生するものである。このカルマン渦列が発生すると、渦の発生によりロッドには流れとは垂直な方向へ力が働き、渦の発生周期と同様の周期で作用力が変動する。この流体の流速、円柱の振動周波数、円柱の直径、からなる無次元数（ストローハル数）が存在し、この値は、ある範囲の乱流場ではほぼ一定値を示す。つまり、熔融金属に浸漬したロッドの直径と振動周波数から流れの絶対値を求めることができる。

井口ら¹⁵⁾は、その原理に基づき、カルマン・ヴォルテックス・プローブを開発した。そのプローブを用いて、連続鑄造機のメニスカス界面の流速計測を行なった水上ら¹⁶⁾の方法をFig. 9に示す。外径5.6×10⁻³mのサイアロンのロッドを使用した。ロッドの一端を5×10⁻²m浸漬させて振動周波

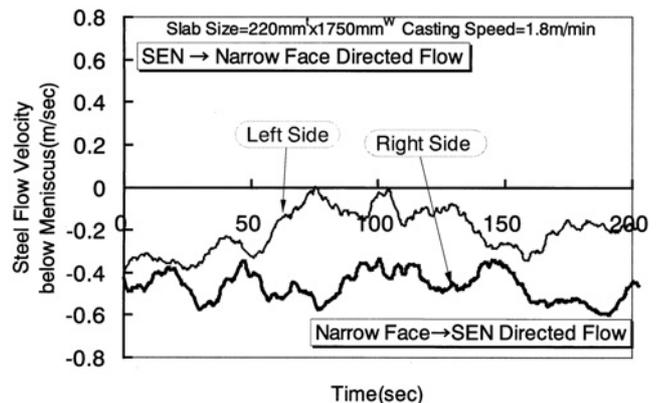


Fig. 8 Examples of measured velocity below meniscus

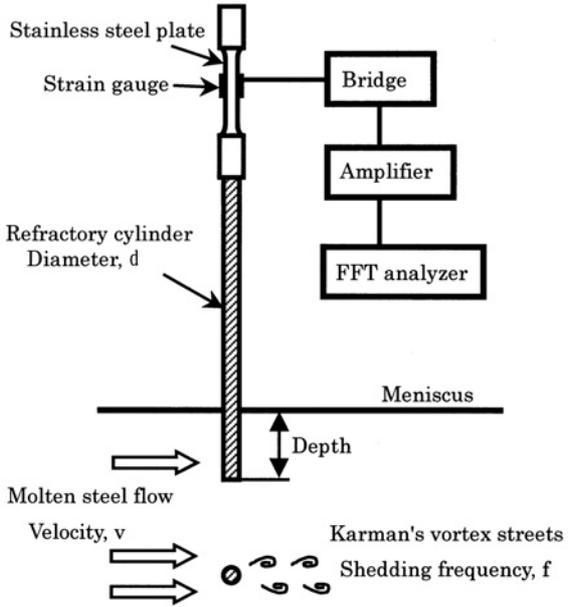


Fig. 9 Measurement system of flow velocity of molten steel below meniscus in continuous casting mold

数を、 2.5×10^{-3} secのサンプリング間隔で400のデータを収集し、高速フーリエ変換により周波数解析を行い、流速を算出した。振動を計測するために、振動計測には、浸漬ロッドにステンレス製振動板にゲージを張る。その振動板は長さ 7.2×10^{-2} m、幅 1.0×10^{-2} と一定にし、厚みを1.2、1.5、 2.0×10^{-3} mと変化させた。その結果、振動板の厚みを変化させると、ロッドが振動する流速の計測範囲が変化することが報告され、 1.2×10^{-3} mの振動板を使用すると、 $0.8 \sim 3.5 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1}$ の流速範囲で、周波数とロッド直径の積と、流速には直線関係が成立する。また、 1.5×10^{-3} mの振動板では $2.0 \sim 5.0 \times 10^{-1} \text{ms}^{-1}$ で、 2.0×10^{-3} mでは $2.5 \sim 7.0 \times 10^{-1} \text{ms}^{-1}$ の範囲で同様な直線関係が得られ、流速計として有効であることが判明した。そこで、このプローブを用いて、鋳型内電磁ブレーキの磁場強度を変化させることにより、鋳造速度に対応させたメニスカス流速の設定が可能であることを試験連続鋳造機で確認した。

これまで紹介した、浸漬ロッドを使用して流速を測定する場合、流速計測の範囲は、浸漬したロッドに接触する場所の空間的な平均流速を求めることになるため、Vivès Probeのようにピンポイントの流速を計測することは不可能である。また、ロッドを浸漬させる深さを変化させた計測を行ない、そのデータの差分する処理を施すことにより、流速の深さ方向の分布を知る方法はあるが、同時性が確保されないことに注意を要する。

2.3.3 磁気による流速計測

前項2種類の計測原理が直接、溶鋼に浸漬させたロッドか

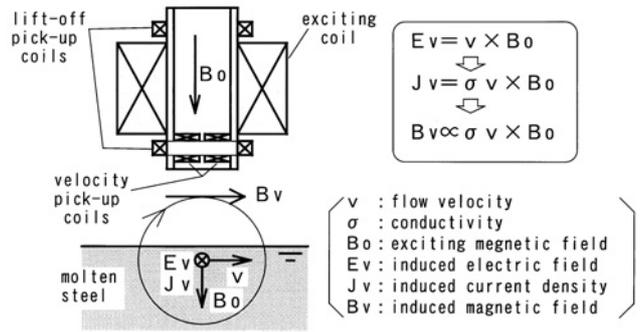


Fig. 10 Schematic diagram of sensor

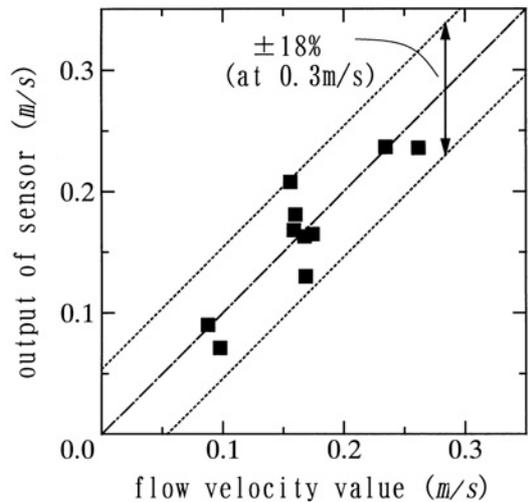


Fig. 11 Results of flow test

らの情報を基に算出するのに対して、磁気の特性を利用して非接触で溶鋼表面の流速を計測する最新の方法がある。この原理は、Vivès Probeと似ているが、Vivès Probeでは誘導電流を計測するのに対して、本方式では誘導電流により発生する誘導磁場を計測している点であり、これにより非接触による溶鋼の流速計測ができる可能性が出てきた。

大田ら¹⁷⁾が開発したセンサーをFig. 10に示す。原理は、励磁コイルにより発生させた交流の励磁磁場 B_0 を溶鋼に印加する。これにより溶鋼中には、流動する溶鋼により電場($E_v = v \times B_0$)が生じて電流 J_v が流れる。この誘導電流 J_v は、誘導磁場 B_v を発生させる。この誘導磁場 B_v は溶鋼の流速に比例するので、流速検知用のコイルを用いて B_v を検出することにより、溶鋼流速は測定できる。

ここで、実際に計測を行なうと数々の問題が発生する。例えば、浴面が変動すると誘導磁場の強度も変動する、すなわち誘導磁場の強度は、電流の流れる位置からの距離の関数でもある。また周囲の温度変化によってゼロ点が変わる。このような問題に対して、湯面変動を検知するコイルを追加し、計測前後でゼロ点の計測を行ない、計測時間内のズレを補正するなどの対策を行なった。その結果、Fig. 11に示すよう

に、低融点合金を用いた計測では、 0.3ms^{-1} の代表流速で±18%の精度で計測可能であることが判明し、溶鋼流動の表面流速を計測できる見込みが得られた。

③ 終わりに

各種製鉄製造プロセスの開発においては、流動現象を把握することが非常に重要なことである。これまで、劣悪な環境で計測が不可能であった溶鋼の流速測定などの領域にも、計測のメスが入るようになった。このような計測技術は、今後のプロセス開発、特に溶鋼状態での流動把握を行なうために必須である。また革新的なプロセス提案や、これまで精度が不明確である数値解析技術の更なる精度向上・解析技術の進歩にも、更に細かい溶鋼の流動情報が得られるセンサー技術の開発が期待されている。

参考文献

- 1) 小幡文雄, 若 良二, 上原一剛, 伊東克則, 河田洋祐: 鉄と鋼, 86 (2000), 225.
- 2) 鎌田千綱, 林 省二, 伊藤公久: 鉄と鋼, 84 (1998), 484.
- 3) 佐々木清人, 井口 学: 鉄と鋼, 85 (1999), 432.
- 4) 横谷真一郎, 高木茂男, 井口 学, 丸川雄浄, 原 茂太: 鉄と鋼, 86 (2000), 259.
- 5) S. Yokoya, S. Takagi, M. Iguchi, Y. Asako, R. Westoff and S. Hara: ISIJ Int., 38 (1998), 827.
- 6) 梶原伸治, 大西邦彦: 鉄と鋼, 85 (1999), 785.
- 7) Ch. Vivès, R. Ricou: Metall. Trans B, 16B (1985), 377.
- 8) 岡澤健介, 沢田郁夫, 原田 寛, 藤 健彦, 竹内栄一: 鉄と鋼, 84 (1998), 490.
- 9) 水上英夫, 平城 正, 渡部忠男: 鉄と鋼, 86 (2000), 152.
- 10) 久保田淳, 久保典子, 鈴木 真, 石井俊夫, 西町龍三, 荒牧則親: 鉄と鋼, 86 (2000), 271.
- 11) J. Nagai, K. Suzuki, S. Kojima and S. Kollberg: Iron Steel Eng., 61 (1984), 41.
- 12) 沖村利昭, 中島義夫, 島田清邦, 池田純治, 俵 正憲: CAMP, 9 (1996), 186.
- 13) 西町龍三, 久保田淳, 小倉康嗣, 石井俊夫, 鈴木 真, 中田正之: CAMP, 8 (1995), 952.
- 14) 久保田淳, 久保典子, 鈴木 真, 中田正之, 山岡祐一: CAMP, 11 (1998), 181.
- 15) M. Iguchi, H. Kawabata, T. Ogura, A. Hayashi and Y. Terauchi: ISIJ Int., 36 (1996), S190.
- 16) 水上英夫, 花尾方史, 平城 正, 川本正幸, 渡部忠男, 林 敦, 井口 学: 鉄と鋼, 86 (2000), 265.
- 17) 大田金幸, 村上勝彦, 藤本幸二: CAMP, 12 (1999), 64.
(2000年8月9日受付)