

入門講座

実験テクニック編(流体計測)混相流-3

複雑な混相流

Complicated Multiphase Flow

井口 学
Manabu Iguchi

北海道大学 大学院工学研究科
物質工学専攻 教授

1 はじめに

混相流の測定法については、いままでの2回にわたる解説^{1,2)}で、それらの大半を紹介した。本稿では、高炉や粉体吹き込み精錬プロセスでよく見られる気液固三相流^{3,4)}、スラグ巻き込みに見られる液液二相流など⁴⁾の複雑な混相流の測定法を紹介するとともに、気液、固気、固液二相流に関しても鉄鋼プロセスに関係の深いものを取り上げ、測定の実例について述べる。

2 鉄鋼プロセスにおける複雑な混相流とその測定例

2.1 ガス底吹きによるスラグ滴、メタル滴の巻き込み (気液液三相流)

鉄鋼精錬プロセスでは、スラグ/メタル界面を通過する底吹きガスによってスラグ中におけるメタルの液滴化 (emulsification: エマルジョン化) とメタル中におけるスラグの液滴化 (reverse emulsification: 逆エマルジョン化) が起こる⁵⁻⁷⁾。これによってスラグ/メタル界面積が飛躍的に大きくなって、反応が促進されることが分かっているが、どのような大きさのスラグ滴やメタル滴が幾つ出来るのかといった点については不明なところが多い。これを実機で調査するのは難しいことから、溶鋼のモデルとして水を、スラグのモデルとして動粘度の異なるいろいろなシリコンオイルを用いた実験が行われている。最近では、Lin ら⁵⁾が、水の代わりに塩化亜鉛水溶液を用いているが、シリコンオイルとの密度差を実機に近い値にもっていける長所はあるものの、溶鋼のモデルにしては動粘度が大きくなりすぎるきらいがある。

メタル滴のみの巻き込みが起こる場合 (エマルジョン化) の滴の全体積が知りたい場合には、Lin ら⁵⁾の方法が適用できる。これは、Fig.1に示すように、エマルジョン化が起こ

ると初期のスラグ/メタル界面が降下する現象を利用しており、非常に簡便である。ただし、個々の滴の大きさや個数を求めることは出来ない。

メタル滴とスラグ滴の形状、寸法、個数などについて詳細な情報を得ることは、水モデル実験といえども難しい。これは滴の数が非常に多い上に、激しい乱流場にさらされるために、大小様々な滴が生じ、それらの分布の幅が広がるためである。そこで、滴を凝固させて間接的に情報を得る方法が幾つか提案されている。

(1) ワックス法

逆エマルジョン化している膨大な数のスラグ滴の大きさ分布を滴のまま測定することは容易ではない。このような場合

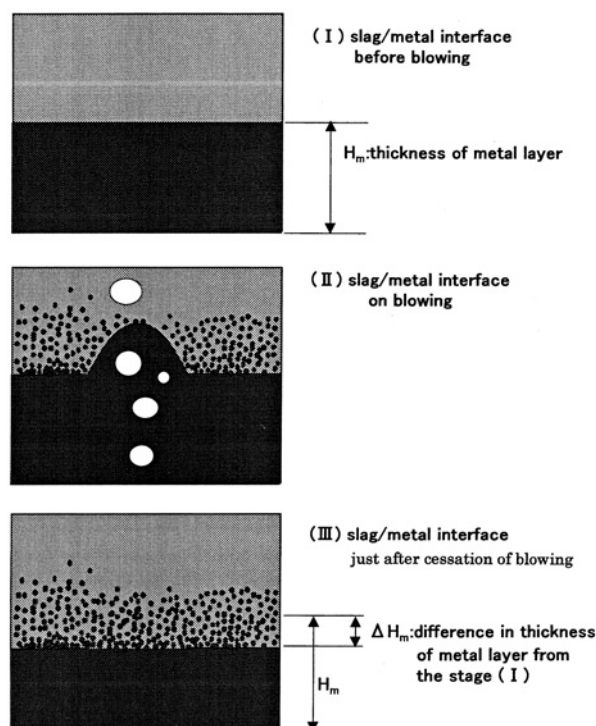


Fig.1 Change in the thickness in molten metal layer

には、例えばスラグのモデルとしてワックスを用い、ワックスが逆エマルジョン化してから浴の温度を下げ、ワックス滴を凝固させて固体として取り出し、前稿で述べた適当な方法¹⁾で大きさや形状を求めることが出来る⁸⁾。

(2) 流動パラフィン法

Frohberg ら⁹⁾はワックスの代わりに流動パラフィンを用いた。

(3) 重合法

スラグのモデルとしてアクリルモノマー、溶鋼のモデルとして食塩水を用い、逆エマルジョン化した滴をポリマーとして凝固させ、固体として取り出す方法もある¹⁰⁾。取り出した固体が微小な場合には、SEMによる観察がよく行われる。

(4) 吸引法

メタル層とスラグ層に吸引用の透明パイプを挿入し、吸い上げることによって大きさと個数を求める方法である¹¹⁾。滴は吸引によって変形するため、形状を正確に知ることはできない。大きさに関しては、透明なパイプを通過する滴の長さ L_p を測れば、パイプ径 D が分かっているので、個々の滴の体積を求めることが出来る。ただし、気流中のエアロゾル測定用パイプの吸引速度に関する研究から明らかなように、吸引速度には最適値が存在することに留意する必要がある¹²⁾。

なお、生成した滴の個数が少ないときには、滴のままの状態で測定することは可能であり、前に述べたスチールカメラ法を始めとして多くの方法が適用できる^{1, 2)}。

2.2 モールドパウダーの巻き込み現象

(液液二相流、気液液三相流)

連続鑄造プロセスのモールドパウダーは、溶鋼の保温、空気による溶鋼の再酸化防止、振動鑄型の潤滑など、多くの機能を有しているが、これが一度溶鋼中に巻き込まれ、微小な滴となって製品中に取り込まれると、製品の品質を著しく阻害することは周知の事実である¹⁴⁾。したがって、モールドパウダーの巻き込みメカニズムについては、古くから活発な研究がなされてきたが^{15, 16)}、いまだに、その決定的な原因については不明な点が多い。巻き込みに関して、従来提案されているメカニズムと、巻き込み現象の測定法について概観する。

溶鋼中へのモールドパウダーの巻き込み現象は、Fig.2に示すように5種類に大別される¹⁷⁾。

(1) 短辺側からの反転流による定常的な削り込み [Fig.2 (1)]¹⁶⁾

(2) 非定常的な片流れに起因するケルビン・ヘルムホルツ型不安定による巻き込み [Fig.2 (2)]¹⁷⁾

(3) 片流れによって浸漬ノズル後方に生ずるカルマン渦による巻き込み [Fig.2 (3)]¹⁸⁾

(4) 浸漬ノズルへのアルミナの付着を防止するために、浸漬

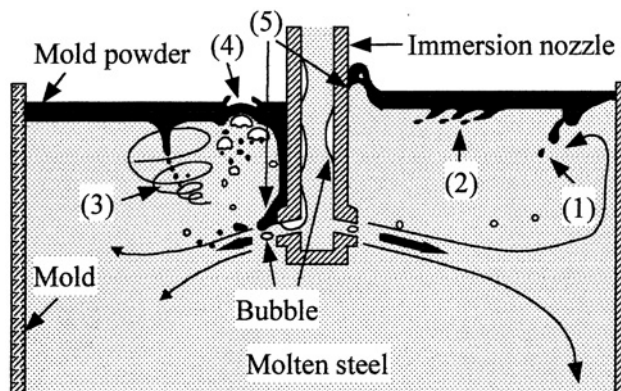


Fig.2 Schematic of mold powder entrapment

ノズル内へ導入されたアルゴンガスが大きな気泡となって溶鋼中を上昇し、モールドパウダー/メタル界面に衝突することによって生ずる巻き込み [Fig.2 (4)]¹⁹⁾

(5) 片流れによって浸漬ノズル表面に生じる圧力差による巻き込み [Fig.2 (5)]²⁰⁾

このような巻き込みを防止するためには、モールドパウダーの巻き込みの起こる臨界条件を求めることが第1の課題となる。したがって、多くのモデル実験が行われてきたが、液液界面で生じる巻き込みの臨界速度の測定には、以前からプロペラ流速計が用いられている²¹⁾。これは、元来、土木工学の分野で河川の水の流速測定に用いられてきた流速計である。米粒大のものもあり、かなり精度の良い測定が可能であるが、非定常流れの測定には向かない。また最近では、プロペラ流速計の代わりに、熱線、熱膜流速計、レーザードップラー流速計がよく使用されているが²¹⁾、これらの方法はほとんど点測定であり、巻き込み現象のような、ある範囲にわたる現象の測定には不向きである。

そこで、筆者らのグループは粒子画像流速計 (PIV) を用いて臨界速度の実験を行った²⁰⁾。この方法は、短時間で流れ場全体の速度ベクトルを求めることが可能であり、ここで対象とするような非定常な流動現象に対しては最適の測定法である。Fig.3にモデル実験で得られた速度ベクトルの1例を示す。界面近傍の流れの状況がよく分かる。

大きなアルゴンガス気泡がモールドパウダー/メタル界面へ衝突することによって生じる巻き込み現象の観察には、高速度ビデオカメラが広く用いられている²²⁾。

製品内に取り込まれたモールドパウダーの粒子径は大小様々であり、非常に裾野の広い分布を有することが知られている²³⁾。このような分布は溶鋼中に巻き込まれたモールドパウダーがよほど強い乱流場に置かれないと実現出来ないことは明らかである。この条件が満足されるに最も相応しい巻き込みメカニズムは、前述の (5) に示した浸漬ノズル表面に現れる圧力分布に起因するものであると筆者は考えている。

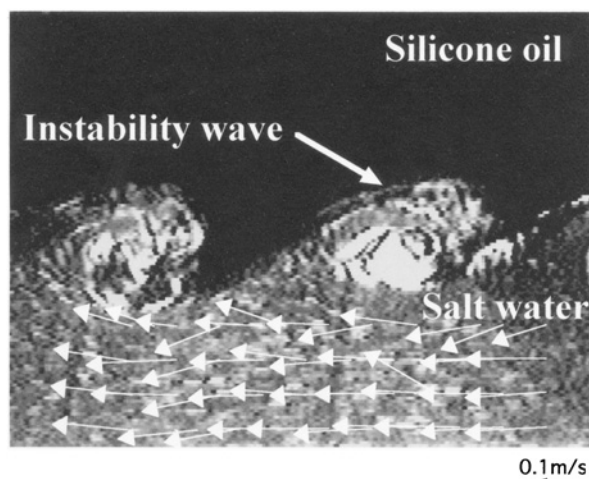


Fig.3 Velocity vectors measured with PIV

ただし、水モデルではモールドパウダー／メタル界面における大きな界面張力場を模擬することはできない。水銀やウッドメタルなどの低融点金属を用いたモデル実験が望まれるが、この場合の巻き込み現象を観察するのは難しい。

2.3 スピットングのメカニズム解明に関するモデル実験 (気液二相流)

鉄鋼プロセスにおいては、様々なガス吹き込み攪拌操作が行われている。冶金反応を促進させるには、気液界面積を大きくすることが有効な手段である²⁴⁾。しかしながら、ガス流量一定の下で気泡を小さくすると、気液界面積は増加するが、気泡内部の圧力が高くなり、気泡が浴表面に達して破裂するときに、いわゆるレーリージェット (Rayleigh jet) を誘起し、このジェットとともに小さな液滴が浴表面から飛び出していく (Fig.4)²⁵⁾。これはjet dropといわれており、スピットング (spitting) の原因となる。気泡が大きくなると、レーリージェットに起因するスピットングは生じないが、代わりに気泡膜が破裂するときにfilm dropといわれる小さな液滴が多数発生する²⁶⁾。このような小さな液滴が例えば上吹きランスからの吹き込みガスによって運び出されるとダストとなる。

Jet dropやfilm dropに関する研究は、おもに4,000frames/sの高速度ビデオカメラを用いて行われ、それらの生成メカニズムが解明されてきた。1,000frames/sの高速度ビデオカメラと動画像流速計 (PIV) を用いた最近の研究によれば²⁷⁾、気泡が浴表面を離脱するときには液滴の発生に加えて、多くの小さな気泡が浴中へ巻き込まれることが分かった。模式図がFig.5であり、気泡が浴表面に到達した瞬間の液体の速度ベクトルがFig.6である。PIVの有効性がここに現れている。スピットングの総量を測るためには、浴表面にスポンジをおいて液を吸収させるとともに、容器側

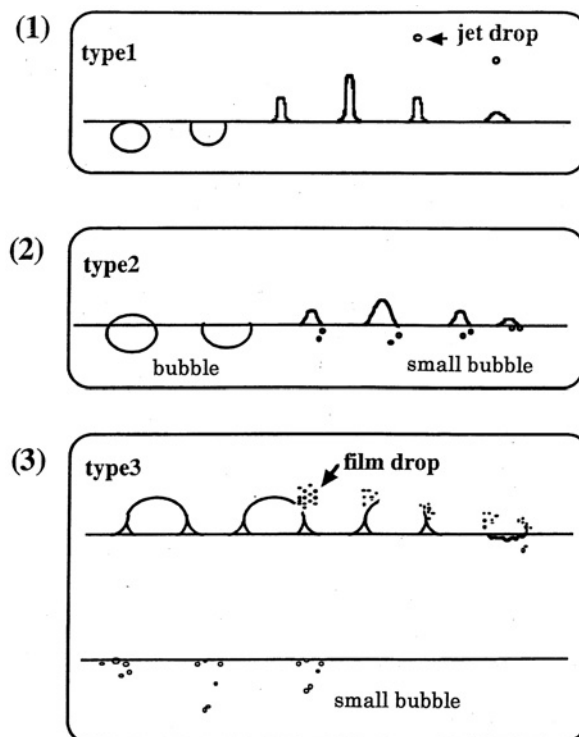


Fig.4 Three types of bubble breakup at bath surface

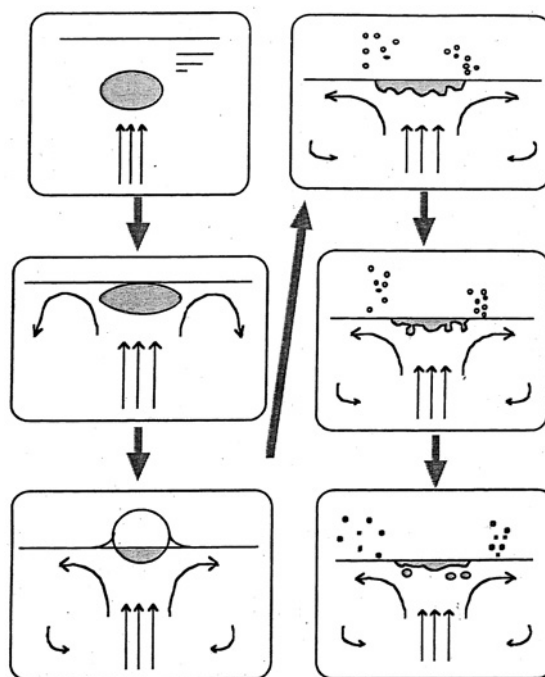


Fig.5 Entrapment mechanism of small bubbles at bottom of bubble

壁に受け皿を取り付けるなどの方策が講じられている。

2.4 均一混合時間の測定 (液液二相流、固液二相流)

均一混合時間は浴内の混合特性を定量的に示す量であり、その測定は、浴中に投入したトレーサの分散に関連する物理量の時間的变化に基づいている¹⁶⁾。水モデル実験でトレー

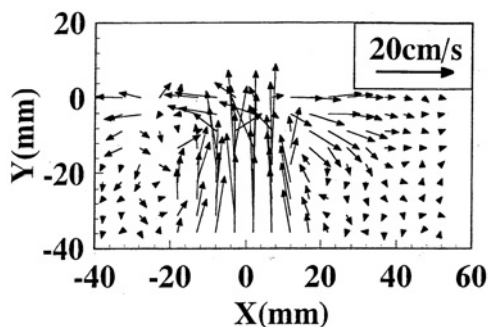


Fig.6 Velocity vectors in silicone oil measured with PIV (side view, $t=0s$)

サーとして最もよく用いられるのはKCl水溶液であり、このトレーサーの分散による局所的な電気伝導度の時間的変化を基にして均一混合時間が決定される。電気伝導度が最終値の95%から105%の範囲内に納まるまでの時間、すなわち95%基準がよく用いられる。溶鉄を用いた実験では銅がトレーサーとして用いられる。

スラグ中の均一混合時間を知りたいこともしばしば生じるが、スラグのモデルとして用いられるシリコンオイルなどには、KCl水溶液は溶解しないため適用できない。そこで、液体の運動への追従性の良い $1\mu m$ 程度の $CaCO_3$ 粒子を投入し、その分散によって外部から入射したレーザー光線の散乱による減衰を利用して均一混合時間を測定する方法が開発されている²⁸⁾。この方法の妥当性を検証するために、水浴に適用し、KCl水溶液をトレーサーとしたときと比較したところ、同じ結果が得られている。ただし、 $CaCO_3$ 粒子を用いるときに留意すべき点は、それをシリコンオイルであらかじめよくなじませておくことである。そうしないと、粉末はクラスターを形成し、良好な結果は得られない。

2.5 固定層と流動層内の流れ (固液二相流、固気二相流)

固定層や流動層は多くの工学分野で広く用いられているが、固体粒子群の間を流れる気体や液体の挙動を正確に測定することは非常に難しい^{29, 30)}。固定層の場合には、個体群は静止しているので、隙間に熱線、熱膜流速計を始めとする各種センサーを設置してやれば流速の点測定は可能となる。ただし、複雑な速度分布を有する隙間全域の流れ場の測定となると不可能に近い。さらに流動層となると、耐衝撃性のよほど強いセンサーでないと挿入することも難しい³¹⁾。流動層内の固体の移動速度を捕らえることは、例えばX線CTなどが使用できるが³²⁾、空間分解能がまだ十分でない。

流体が液体であれば、これらの流れ場の測定に適した方法がないわけではない。液体と屈折率の等しい透明な固体を用いてレーザードップラー流速計なり、PIVなどの非侵襲的な (intrusive) 方法で測定することが可能である³³⁾。この方法

は古くから提案されている割には、あまり採用されていないが、今後の有力な方法の一つとなろう。

なお、高炉装入物降下モデルに関する実験結果がいくつか報告されている^{3, 4)}。焼結鉱やコークスなどを識別するために、粒子を異なった色で着色しているが、各粒子の動きを捕らえるにはカラー画像を利用した粒子追跡型流速計 (PTV) が威力を発揮するであろう。

2.6 選択取水 (液液二相流)

取鍋からタンディッシュへ溶鋼を注ぐとき、溶鋼の流出が完了しないうちにスラグが出てくる。これはやっかいな問題である。このような現象は一般に選択取水と呼ばれている³⁴⁾。例えばFig.7に示したように、混じり合わない2種類の液体を容器に入れておき、上側の液体の存在する側壁から流出させたとき、常識的には上側の液体が流出し、出口位置まで浴表面が降下したときに、流出は止まると考えられる。しかしながら、物性値の組み合わせによっては、当然のことながら最初は上側の液体が流出するが、やがて下側の液体が流出することも起こりうる。したがって、液液二相流を取り扱う場合には、選択取水現象に留意する必要がある。

Fig.8に示した円筒容器における選択取水に関しては、高速度ビデオカメラを用いた活発な研究が行われており、上側の液体が流出し始める条件は次のフルード数を用いて記述できることが分かっている³⁴⁾。

$$Fr = 2.05 (h_2/d)^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$Fr = U/(g' h_2)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$g' = 2(\rho_2 - \rho_1)g/(\rho_1 + \rho_2) \dots\dots\dots (3)$$

ここで U は流出速度、 g は重力加速度、 ρ_1 と ρ_2 は密度、 d は管の内径である。この式が取鍋からのスラグの流出に関してもそのまま適用できるのかといった点については、今後の検討を要する。

2.7 気液分離 (気液二相流)

2.7.1 濡れ性を利用した溶鋼中微細気泡の除去

連続 casting プロセスの浸漬ノズル吐出孔にアルミナが不均一に付着すると溶鋼の片流れが生じ、前に述べたようにモールドパウダー巻き込みの原因となる。これを防止するために、浸漬ノズル内へのアルゴンガスの導入が行われているが、このガスが吐出口を出るとき、噴流状態となっている溶鋼流の強い乱流剪断応力によって、大小様々な気泡に分断され、鋳型内全体に分散する。大きな気泡は浮力によって浮上し、メニスカスを通して大気中へ離脱するが、微細な気泡は溶鋼中に取り込まれてピンホール欠陥となる¹⁴⁾。このような微細気

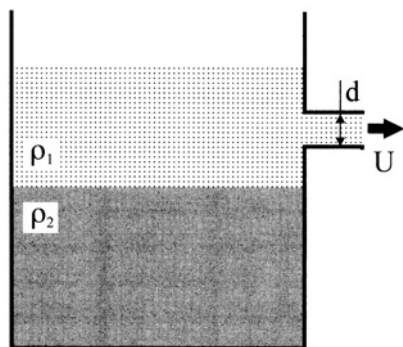


Fig.7 Schematic of stratified two liquid layers in a cylindrical vessel (Side drainage)

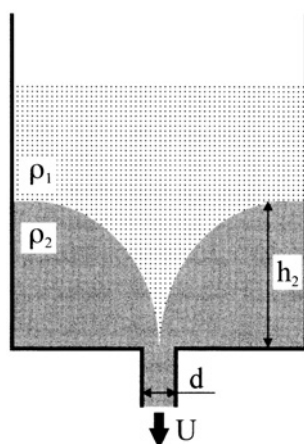


Fig.8 Schematic of stratified two liquid layers in a cylindrical vessel (Bottom drainage)

泡の取り込みをなくすために、電磁ブレーキをかけて溶鋼流速を制御し、できるだけ均一な流速分布となって凝固過程に到達するように配慮されている。これは浮力の効果ができるだけ長く作用し、浮上を促進させるためのものである。

それでは、このような微細気泡を積極的に除去できないであろうか。この課題は今後我々が宇宙空間での気泡発生を伴う材料プロセスを開発するに際しても、またマイクロやナノスケールの材料プロセスの開発に際しても非常に重要である。浮力の効果が無視できるような条件下では、次のような気泡除去法が提案されている³⁵⁾。

- (1) 容器に回転を与えて遠心力を発生させ、液体と気体の密度差を利用して気泡を容器中心へ集める³⁶⁾。
- (2) 超音波を用いて定在波を容器内へ発生させ、気泡に働く音圧を利用して気泡を特定の場所へ集める³⁷⁻³⁹⁾。
- (3) 容器内に温度勾配を与え、気泡に働く表面張力の差を利用して気泡を移動させる⁴⁰⁾。
- (4) 静電気を利用して気泡を移動させる⁴¹⁾。
- (5) 電磁力を利用して気泡を移動させる⁴²⁾。
- (6) 濡れ性の良いY字型分岐管を用いる⁴³⁾。

しかしながら、いずれの方法も約1,600℃の溶鋼中の微細気泡除去には一長一短があって適さない。

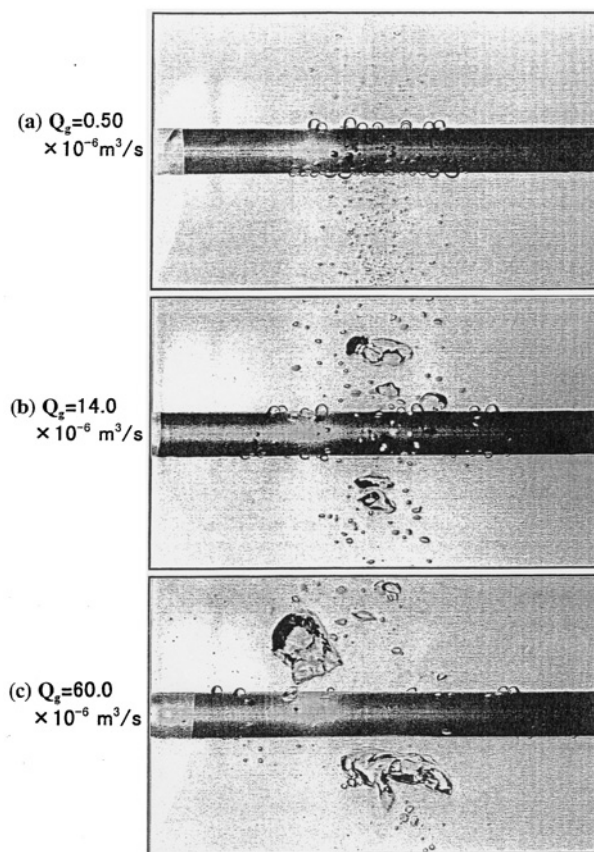


Fig.9 Attachment of bubbles to a poorly wetted cylinder (Qg: gas flow rate)

そこで筆者らは、気泡が濡れ性の悪い固体表面に付着する事実に着目した^{35, 44)}。Fig.9に気泡噴流中に置かれた円柱に付着する気泡の写真を示した。大きな気泡は付着しないが、ある臨界値以下の小さな気泡は円柱に捕獲される。この事実を利用すれば容易に微細気泡を捕獲できる。ただし、ただちに連続鋳造鋳型内の微細気泡除去に適用できるのかといえ、そう簡単ではない。まず鋳型内に固体を挿入すると流れ場が変わり、また場合によっては固体が溶損し、かえって溶鋼を汚染する可能性も考えられる。耐火物の開発を始め、いましばらくの猶予が必要であろう。

透明な液体中に置かれた濡れ性の悪い固体への気泡付着の観察には高速度ビデオカメラを始めとして多くの方法が適用可能である。一方、不透明な溶融金属中の観察は容易でない。筆者ら⁴⁵⁾は透明なアクリル製中空円筒を水銀浴内の気泡噴流中へ水平に設置し、円筒の外表面に付着する気泡の動的挙動をファイバースコープを用いて観察し、気泡の最大付着寸法などの諸特性を明らかにした。

2.7.2 管路内気液二相流の気液分離

地上重力下においては、管路内の気液二相流の気液分離は浮力を利用することによって容易に行える。ところが、前述のように微小重力下や微小スケールの管路あるいは空間で

は、浮力よりも表面力が卓越し、もはや浮力による気泡除去は期待できなくなる。このような管路内の気泡は管路内壁の濡れ性を変化させ、かつT字管などの分岐管を用いることによって除去できる³⁵⁾。これは気泡が濡れ性の悪い壁に付着し、その壁に沿って移動する現象を利用している。

2.8 石油パイプラインの流動様式と流量測定 (気液液三相流)

2.8.1 流動様式

油-水-空気三相流の流動様式には1) 水、油ともに連続した様式、2) 連続する油相に水が分散した様式、3) 連続相が水の様式がよく知られている。中西ら⁴⁶⁾はさらに、連続相が水、分散相が油であり、油はプラグ流、スラグ流、波状流などとなる流動様式を観察している。

2.8.2 流量測定

笛木ら⁴⁷⁾は石油開発現場における油-水-ガス三相流の各相の流量を測定可能なシステムを開発した。このシステムは静電気容量とコンダクタンスの測定が可能な成分率計とベンチュリー管で構成されている。

2.9 ER流体 (Electrorheological Fluid) (固液二相流)

ER効果とは、外部から電場をかけたときに粒子の分散した流体の見掛けの粘度が変化する現象をいう⁴⁸⁾。これを利用すれば、外部から局所的に電場をかけて粘度を極端に大きくし、流動を止めることも可能である。すなわち弁の機能を有している。

2.10 熔融金属中への粉体吹き込み (気液固三相流)

キャリアガスを用いて脱燐剤などの粉体吹き込みが行われているが、粉体を浴内へ均一に分散させることは容易でない。そこで、粉体の浴中への分散に関するモデル実験が活発に行われている。分散過程の観察には粒子画像流速計 (PIV) や遮光式のセンサーが役立つ。筆者らは貫入噴流 (Plunging jet) に着目して、粉体を効率的に浴中に分散させる方法を考えているが⁴⁹⁾、低融点金属のモデル実験において分散状況が容易に測定できるセンサーが見当たらない。是非とも開発したく考えている。管路内の気液固三相流の特性と測定法については、赤対らの論文⁵⁰⁾を参照されたい。

2.11 スラリー (固液二相流)

スラリーとは通常、液体中に混ざった微細な固体粒子が泥状になったもののことである⁴⁾。したがって、一般の固液二相流と区別して取り扱われることが多い。金属の凝固中に攪拌を与えたときに現れる固相と液相が混在する状態がスラリーと呼ばれており⁵¹⁾、半凝固プロセスの開発に際して、このよ

うな混相流の研究は重要である。

一般の管内固液二相流と同様に、スラリーの流動様式は圧力勾配と平均流速に対して図示されている。管閉塞、静止堆積相を伴う流れ、摺動流、非均質流、擬非均質流などがある⁵²⁾。

2.12 高炉内の流れ (気液固固四相流)

高炉内の流れは吹き込まれた粉体も含めると場所によっては四相流となっている。この複雑な流れに関する詳細な解説が最近なされている。文献3)を参照されたい。

2.13 浸漬ノズル内の流れ (気液固三相流)

横谷らは、浸漬ノズル内の溶鋼流に旋回を与えたときに生じる気泡カーテンを利用して非金属介在物を捕獲する方法⁵³⁾やモールド内の速度変動を小さくする方法⁵⁴⁾を提案し、水モデル実験でそれらの有効性を確認している。測定には可視化の方法とLDVが用いられている。

3 おわりに

本稿をもって、鉄鋼プロセスに関わる流動現象の測定法に関する解説を終える。長期間にわたって紙面をご提供頂いたことに、なによりもまずお礼申し上げる。測定対象が多岐に渡るため、広く浅くなり、したがって消化不良になった感は否めない。その分、文献をたくさん挙げたので参考にしていただきたい。

多くの工業分野の中で、こと測定に関しては、鉄鋼プロセスが最も扱いにくいと考えている。鉄鋼分野で通用する計測技術は他のどのような過酷な状況下でも使用できるといっても過言ではないであろう。若い方々の奮闘を期待して止まない。

参考文献

- 1) 井口 学：ふえらむ，6 (2001) 10，793.
- 2) 井口 学：ふえらむ，6 (2001) 11，867.
- 3) 佐藤道貴：混相流，14 (2000) 4，426.
- 4) 鉄鋼製造における模型理論とスケールアップ，日本鉄鋼協会共同研究会，熱経済技術部会，模型理論とスケールアップ研究小委員会編，日本鉄鋼協会，(1986)
- 5) Z.-H. Lin and R. I. L. Guthrie：Metall. Trans. B，25B (1994)，855.
- 6) Z.-H. Lin：Ph.D. Dissertation，McGill University，Montreal，(1997)
- 7) 井口 学，隅田 豊，岡田隆介，森田善一郎：鉄と鋼，79 (1993) 5，569.
- 8) M. Nishikawa，F. Mori，T. Kayama and S. Nishioka

- ：J. Chem. Eng. Jpn., 24 (1991) 1, 88.
- 9) M. G. Froberg, F. Gerlach and G. Handschuh : steel research, 61 (1990) 4, 151.
- 10) 井口 学, 森田善一郎, 中島敬治, 隅田 豊 : 学振, 19委-11450, 反応プロセス, 15 (1993) 8, 1.
- 11) 高島 真, 井口 学 : 鉄と鋼, 86 (2000) 4, 217.
- 12) H. Masuda : Lecture Series, Jpn. Soc. Multiphase Flow, 5 (1990), 19.
- 13) 谷口尚司, 菊地 敦 : 鉄と鋼, 78 (1992) 527.
- 14) 鋼中非金属介在物研究の最近の展開, 学振第19委員会・非金属介在物小委員会編, (1996)
- 15) 吉田 仁, 井口 学, 横谷真一郎 : 鉄と鋼, 87 (2001) 8, 529.
- 16) 浅井滋生 : 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1984), 65.
- 17) M. Iguchi, J. Yoshida, T. Shimizu and Y. Mizuno : ISIJ Int., 40 (2000), 685.
- 18) N. Kasai, M. Kawasaki, K. Hanazaki and T. Sakashita : CAMP-ISIJ, 3 (1990) 4, 1114.
- 19) Z. Wang, K. Mukai, Z. Ma, M. Nishi, H. Tsukamoto and F. Shi : ISIJ Int., 39 (1999), 795.
- 20) 吉田 仁, 井口 学 : CAMP-ISIJ, 14 (2001) 1, 87.
- 21) 井口 学, 佐々木康 : ふえらむ, 6 (2001) 1, 14.
- 22) 吉田 仁, 山下真太郎, 井口 学 : CAMP-ISIJ, 13 (2000) 4, 973.
- 23) T. Hiraoka, T. Ohashi, H. Matsunaga and T. Hiramoto : Seitetsu Kenkyu, 294 (1978), 79.
- 24) 北村信也, 宮本健一郎, 辻野良二 : 鉄と鋼, 80 (1994), 101.
- 25) T. Etoh and Takehara and Nakagawa : 流れの計測, 12 (1995) 17, 27.
- 26) 岸田憲一 : 近畿大学理工学部土木工学科修士論文, (1995) 3.
- 27) T. Uchida and M. Iguchi : J. Mater. Processing Manufacturing Sci., 8 (2000), 256.
- 28) M. Iguchi, K. Nakamura and R. Tsujino : Metall. Mater. Trans. B, 29B (1998) 3, 569.
- 29) 千葉忠俊, 吉田邦夫編著 : 流動層概論, 朝倉書店, (1996)
- 30) 篠原邦夫, 高橋洋志, 中村正秋編著 : 移動層工学—実際と基礎, 北海道大学図書刊行会, (2000)
- 31) 幡野博之, 竹内 洋 : 混相流, 14 (2000) 4, 418.
- 32) 井口 学 : ふえらむ, 6 (2001) 3, 180.
- 33) 荻野文丸, 鎌田正浩, 下川慶史 : 第6回計測大阪シンポジウム, 31 (1991)
- 34) 流体力学ハンドブック, 日本流体力学会編, 丸善, (1987), 482.
- 35) 井上 努, 井口 学, 水野義昭 : 混相流, 15 (2001) 2, 158.
- 36) 今井良二, 矢野歳和 : 日本機械学会論文集, 63 (1999) 611, 2296.
- 37) 阿部 豊, 寺西卓也, 山本憲一, 中谷文人 : 混相流シンポジウム'98, (1998), 7.
- 38) 望月 修 : 第5回短時間無重力利用に関する講演会講演論文集, (1996), 27.
- 39) S. Hatanaka, T. Taki, M. Kuwabara, M. Sano and S. Asai : Jpn. J. Appl. Phys., 38 (1999) 5B, 3096.
- 40) 宇宙実験最前線, 日本マイクロ重力応用学会編, ブルーバックス, B-1135 (1996), 219.
- 41) 今井良二, 矢野成和 : 日本機械学会論文集, 60 (1994), 3979.
- 42) 若山信子 : 微小重力環境利用高度高温流体技術開発, NEDO-ITK-9507, (1996), 99.
- 43) R. T. Lahey, Jr. : Nuclear Eng. Design, 95 (1986), 145.
- 44) 水野義昭, 清水知之, 園山 希, 井口 学 : 混相流, 14 (2000) 2, 166.
- 45) Y. Mizuno and M. Iguchi : ISIJ Int., 41, Suppl. (2001), S56.
- 46) 中西重康, 塩見洋一, 惣那康章, 濱路正弘 : 混相流シンポジウム'98, (1998), 203.
- 47) 苗木 学, 占部修司, 山崎大輔, 山下暢人 : 混相流シンポジウム'99, (1999), 115.
- 48) 流体力学ハンドブック, 日本流体力学会編, 丸善, (1987), 639.
- 49) 清水知之, 井口 学, 津田宣久 : 鉄と鋼, 87 (2001) 9, 571.
- 50) 赤対秀明, 南川久人, 細川茂雄 : 混相流, 14 (2000) 3, 270.
- 51) 平井正純, 竹村直浩, 吉川雄司, 山口隆二 : 鉄と鋼, 78 (1992) 6, 902.
- 52) 佐藤 博 : 混相流, 14 (2000) 3, 280.
- 53) S. Yokoya, S. Takagi, H. Souma, M. Iguchi, Y. Asako, S. Hara : ISIJ Int., 38 (1998) 10, 1086.
- 54) 横谷真一郎, 高木茂男, 井口 学, 丸川雄浄, 原 茂太 : 鉄と鋼, 86 (2000) 4, 259.

(2001年5月31日受付)

本計測シリーズに加筆訂正を行い、近々成書として発刊の予定である。日々の流体計測の参考になれば幸いである。