

# 入門講座

実験テクニック編(流体計測)混相流-1

## 気液二相流

Gas-Liquid Two-Phase 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

混相流とは、気体、液体および固体が混じり合った流れである。英語ではMultiphase flowと表す。我が国でも、これを直訳して多相流と呼ぶ研究者もいるが、10年以上も前に日本混相流学会が設立されていることから明らかなように、混相流に統一される趨勢にある。具体的には、気体と液体の場合は気液二相流、液体と固体の場合は固液二相流、気体、液体、固体の全てが混じりあっている流れは気液固三相流などと呼ぶ。

鉄鋼プロセスでは、精錬反応容器内へのガス吹き込み攪拌操作が広く行われているが、これは気液二相流の典型例である<sup>1-6)</sup>。また、アルゴンガスを導入する連続鑄造の浸漬ノズル内の流れにみられるように<sup>7)</sup>、管路内の気液二相流も随所に現れる<sup>8)</sup>。溶融金属中の気泡の形状・寸法、個数、分散状況などは精錬反応特性や非金属介在物除去効率などと密接な関係を有しており、それらの特徴を正確に把握する必要がある<sup>9,10)</sup>。本稿では、実機はもとよりモデル実験で取り扱われる気液二相流の測定法について紹介する。

なお、鉄鋼プロセスで対象となる混相流は気液二相流に留まらず、非金属介在物を含む溶鋼流に代表される固液二相流や溶鋼中へのスラグ滴巻き込みで問題となる液液二相流をはじめとして固気二相流、気液固三相流など多岐にわたる<sup>11-14)</sup>。これらの複雑な混相流の測定法についても次稿から2回にわたって取り上げる。

### 2 気泡特性に関する基礎的事項

気泡特性とは、液体中の気泡に関わる事項、すなわち気泡形状、寸法、平均気泡上昇速度、気泡頻度、ガスホールドアップなどの総称である。まず、これらの定義について述べ、ついで、底吹き円筒浴内気泡噴流と円管内気液二相流の気泡

特性を主な対象に選び、測定法の現状について紹介する。

#### 2.1 気泡形状

##### 2.1.1 静止液体中の単一気泡

単一気泡が静止液体中を上昇する場合の形状については、古くから多くの研究が行われている。気泡形状はモルトン数、エトバス数、レイノルズ数の関数として記述でき、Cliftら<sup>15)</sup>の著書には代表的な形状が図示されている。気泡体積が非常に小さいときには、気泡周りの流れの影響は相対的に小さく、表面張力の作用が卓越する。したがって、気泡はほぼ球形となるが、気泡体積が大きくなるにつれて球形からずれ、気泡と液体の物性値の組み合わせによって、回転楕円体気泡、スカート状気泡、キャップ状気泡など様々な形状の気泡が現れる。

##### 2.1.2 連続的に生成する気泡の形状

###### (1) 反応容器内の気泡

転炉などの反応容器内にガスを底吹きしたとき、Fig.1に示すようにノズル出口での見掛けのガス流速が音速よりも大きければジェッティング状態、小さければバブリング状態となる。後者の場合、ノズル出口で気泡が連続的に生成する<sup>16)</sup>。このような条件下で生成する気泡は先行する気泡の作り出す流れの影響を受けて、単一気泡が静止液体中を上昇する場合とは異なる形状の気泡が現れる。特に、気泡レイノルズ数がある臨界値(約400)を越えて気泡の後流(wake)が乱流に遷移すると、後続の気泡はこの乱れの影響を強く受けることになる<sup>17)</sup>。詳細については後述するが、多針電気探針を用いて測定した気泡の形状はFig.2に示すようになる<sup>18,19)</sup>。静止液体中の単一気泡と顕著に異なる点は、連なって上昇する二つの気泡すなわちダブルット(doublet)の存在である。このような一組の気泡が上昇しつつ周囲の液体と反応するとき、反応に関与する気液界面積をどのように評価すればよい

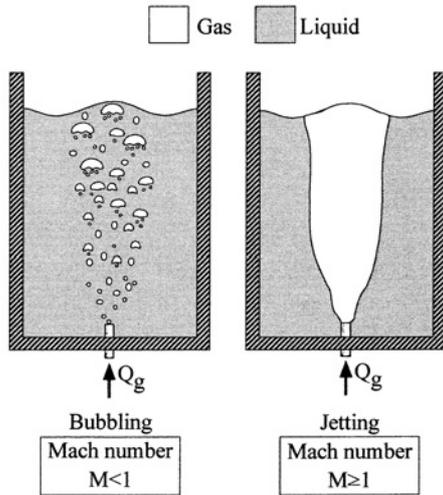


Fig.1 Bubbling and jetting

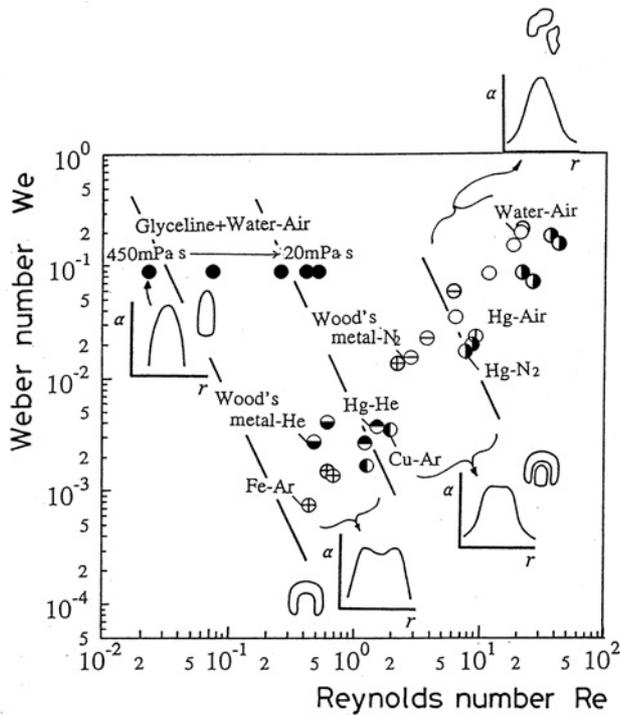
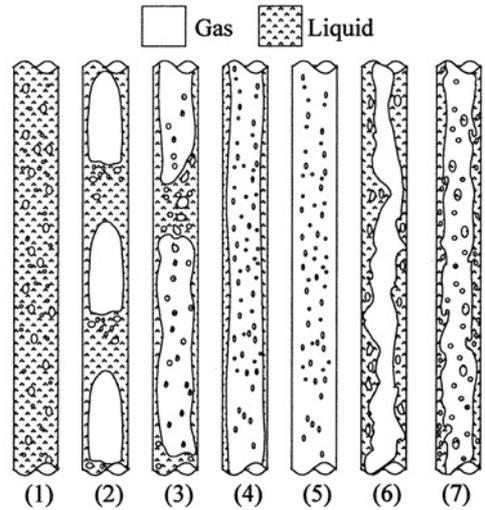


Fig.2 Classification of bubble shape in bubbling jet

のか判断に迷うところである。

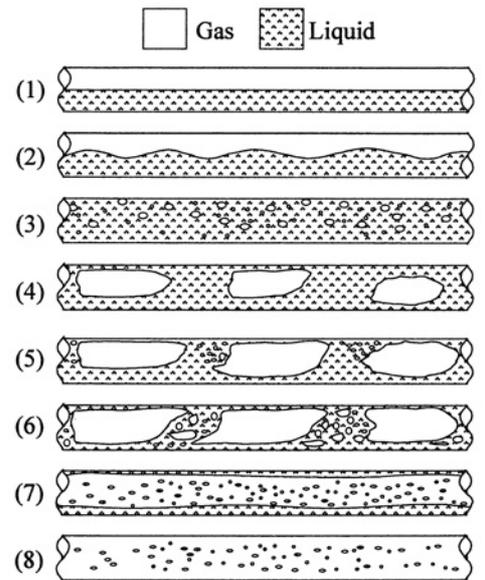
(2) 管路内の気泡

反応容器内に設置したノズルで生成されるガス分散相はその形状、寸法に関わらず、上述のように気泡と呼ばれるが、管路内のガス分散相には慣例上“気泡”の他にいくつかの呼称がある。Fig.3およびFig.4に垂直円管内および水平円管内気液二相流の流動様式を示す<sup>20-22)</sup>。ガスの体積流量 $Q_g$  ( $m^3/s$ )が増加するにつれて、流動様式は顕著に変化する。ガス分散相のうち、その大きさが管内径よりも小さいもののみが一般に気泡に分類されており、内径よりも長手方向の寸法が大きくなるとスラグ (slug) と呼ばれるようになる。カ



- (1) Bubbly Flow
- (2) Slug Flow
- (3) Froth Flow or Churn Flow
- (4) Annular-Mist Flow
- (5) Mist Flow
- (6) Slug-Annular Flow
- (7) Bubbly-Annular Flow

Fig.3 Flow regimes in vertical pipes



- (1) Stratified Flow
- (2) Wavy Flow
- (3) Bubbly Flow
- (4) Plug Flow
- (5) Slug Flow
- (6) Froth Flow
- (7) Annular Mist Flow
- (8) Mist Flow

Fig.4 Flow regimes in horizontal pipes

タカナで表すと紛らわしいが、精錬で用いられるスラグ (slag) とは異なり、弾丸とかいう意味である。また、このような大きな気泡をプラグ (plug) と呼ぶこともある。管内気液二相流の本を参照するときには、ガス分散相の定義に注意しなければならない。なお、管路の濡れ性が悪い場合には、気泡やスラグが管壁へ付着し、それらの形状は濡れ性の良い場合とは顕著に異なるが<sup>8)</sup>、この方面の系統的研究は緒についたところである。

## 2.2 気泡の大きさ

反応容器や管路内には大小様々な気泡が存在する。気泡径に関しては、以下の3種類の量について検討しなければならない<sup>23,24)</sup>。

- (1) 1個の気泡の代表径
- (2) 気泡群の大きさ分布
- (3) 気泡群を代表する平均的な大きさ (平均気泡径)

以下、各項目について詳しく述べる。

### 2.2.1 1個の気泡の代表径

代表径には幾何学的な径と相当径とがある。相当径とは何らかの物理量と等価な球の直径である。下記の代表径がよく用いられている。

- (a) 定方向径、(b) マーチン径、(c) 投影面積円相当径、(d) 等表面積球相当径、(e) 等体積球相当径、(f) ストークス径、(g) 流体抵抗相当径、(h) 光散乱径

ところがFig.2に示した複雑な形状の気泡となると、等価直径の定義は難しい。

### 2.2.2 気泡群の大きさ分布

頻度分布と積算分布によって分布形状を記述する。頻度分布に関しては、対数正規分布とワイブル分布がよく知られている。

### 2.2.3 平均気泡径

平均気泡径については以下に示すように、多くの種類がある。詳細については文献<sup>23-25)</sup>を参照されたい。

- (a) 個数平均径、(b) 長さ平均径、(c) 面積平均径、(d) 質量平均径、(e) 平均面積径、(f) 平均体積径、(g) 調和平均径

### 2.2.4 気泡の平均弦長さ

様々な形状の気泡が上昇するときには、気泡の平均的な大きさを表すために平均弦長さが慣例的に用いられる。電気探針を用いると、探針が気泡を貫く距離の平均値として平均弦長さは容易に測定できるが、この量は上に述べた定方向径の個数平均値に他ならない。気泡が球形で大きさが等しい場合には、平均弦長さを1.5倍すると直径に等しくなることが川上ら<sup>26)</sup>によって証明されている。

## 2.3 ガスホールドアップ

流れ場のある位置に着目したとき、そこを通過する気泡の占める時間割合をガスホールドアップあるいは時間ボイド率と定義している<sup>27)</sup>。単位は%で表される。なお、単位体積中

に占める気泡の体積割合を空間ボイド率あるいは単にボイド率と呼ぶが、エルゴード性が成立すれば時間ボイド率と空間ボイド率は等しくなるといわれている<sup>28)</sup>。電気探針を用いると時間ボイド率が測定できる。

## 2.4 気泡頻度

ある測定点を単位時間に通過する気泡の数であり、単位はHzである。

## 2.5 平均気泡上昇速度

文字通り、多くの気泡の上昇速度を平均した値である。小さな球形気泡の表面に界面活性物質が付着すれば、気泡表面の運動が抑えられて、気泡表面は固体表面と同じようになり、気泡上昇速度は固体球の上昇速度に等しくなることが知られている<sup>29,30)</sup>。また、気液間の熱伝達や物質移動も界面活性物質の影響を強く受ける<sup>31)</sup>。モデル実験を行うときには、気液界面が界面活性物質に汚染されているかどうかについて十分注意する必要がある。

# 3 気泡特性の測定法

気泡特性の測定法は視覚的なものと電気的なものに大別される。前者を用いると流れ場全体の特徴を捉えることができ、気泡の分散状況を瞬時に把握できる。したがって流動様式の解明や非定常気液二相流の測定などに有効である。一方、電気的な測定法の大部分はいわゆる点測定法であって、通常は限られた測定点における情報しか得られない。そのため、視覚的な方法が得意とする上記分野での適用は苦手であり、定常流において気泡特性に関する詳細な情報が知りたいときに威力を発揮する。

### 3.1 スチールカメラ

透明な液体中を上昇する気泡の形状、寸法を測定するための最も基本的な方法であり、気泡が単独で上昇する場合や数が少なく重なりのない場合に有効である。また、気泡の上昇速度が小さいときには、一定時間間隔 $\Delta t$ で写真を撮れば、移動距離 $\Delta L$ を $\Delta t$ で除すことにより、気泡上昇速度も求められる。ただし、スチールカメラでは気泡頻度やガスホールドアップを求めることは難しい。最近では、画像解析法の進歩によって、多くの気泡が重なり合った状態で撮影されたとしても各々の気泡を分離することが可能となっている<sup>32)</sup>。

### 3.2 ビデオカメラ

#### 3.2.1 家庭用ビデオカメラ

気泡の上昇速度が比較的小さいときには、1/30秒ごとに

画像の取り込みが可能な家庭用ビデオカメラでも十分精度良く気泡形状、寸法、上昇速度に関する情報を得ることができる。非常に小さな多くの気泡の上昇速度に関しては、粒子画像流速計 (PIV) について述べたように、既に幾つかの優れた方法が提案されている<sup>33)</sup>。

3.2.2 高速度ビデオカメラ

200コマ/秒から4000コマ/秒の高速度ビデオカメラが広く用いられており、キャビテーションによる気泡の生成、消滅や管路内を高速度で移動する気液二相流の特性解明に用いられている。江藤ら<sup>34,35)</sup>は4000コマ/秒の高速度ビデオカメラを用いて、浴表面で破裂する単一気泡を観察し、破裂に伴いjet dropとfilm dropの2種類の液滴が発生することを見いだしている。jet dropは気泡の小さいときにみられ、Layleigh jetの生成に関連している。この滴は非常に高いところまで上昇することが分かっており、鉄鋼プロセスにおけるスピitting (spitting) の原因であると考えられる<sup>36)</sup>。一方、film dropは気泡径の大きいときに発生するが、2種類の滴の発生境界を与える臨界気泡径の予測式は知られていない。なお、メタンガスの発生する池の周りでひどい臭いがするのは、これらの滴が風で運ばれるせいでもある。

精錬反応を促進させるには気泡を出来るだけ小さくして、気液界面積を大きくする方策がとられるが、そうすると逆にスピittingは増えることになる。最適な気泡径が存在するといえる。

最近、100万分の1秒間隔で100枚の画像を取り込むことの出来る超高速度ビデオカメラが開発された<sup>37)</sup>。今後、気泡の破裂挙動の解明などに強力な手段となろう。

3.3 電気探針

3.3.1 単針電気探針

もともと蒸気工学分野で開発されたセンサーであり<sup>38)</sup>、その後、機械工学をはじめ、多くの分野で管路内気液二相流の測定に広く用いられている。導電性の液体中に先端を除いて絶縁した電極を浸漬し、別の場所に対極を浸漬して回路を構成する<sup>39,40)</sup>。気泡が電極を覆うと両電極間の抵抗が非常に大きくなる。この現象を利用すれば、流体が熔融金属のように不透明であっても気泡の通過を検知できる。このように気泡を貫通する電極が1本の電気探針を単針電気探針と呼ぶが、ガスホールドアップ $\alpha$ と気泡頻度 $f_B$ が測定できる。電気探針では、一般に2~3mmよりも小さな気泡は測定できない。

3.3.2 2針電気探針

Fig.5に示すように、2針の電気探針を用いれば、ガスホールドアップと気泡頻度に加えて平均気泡上昇速度 $\bar{u}_B$ と平

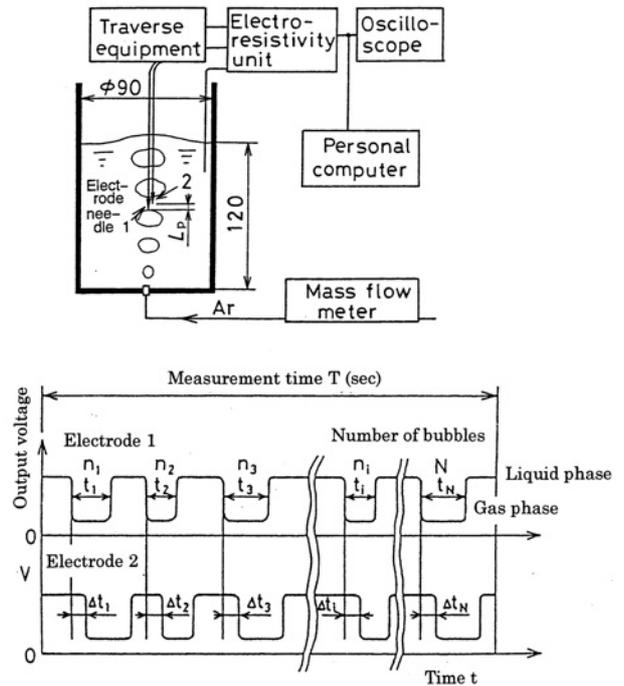


Fig.5 Two-needle electroresistivity probe

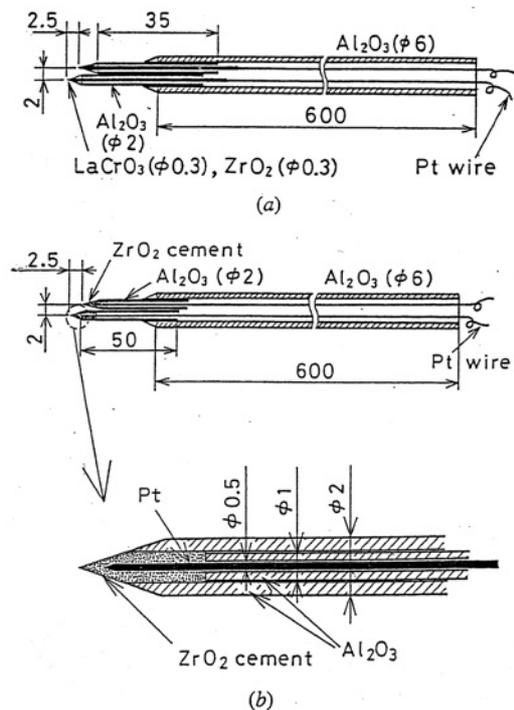


Fig.6 Electroresistivity probe for measuring bubbles in molten iron bath: (a) probe applicable to 1,250°C (mm) and (b) probe applicable to 1,600°C (mm).

均弦長さ $\bar{L}_B$ が得られる。1,600°Cの溶鉄中底吹きアルゴン気泡の気泡特性を測定できる2針電気探針も開発されている<sup>40)</sup>。電気探針の構造と材質をFig.6に示す。探針の寿命は1,600°Cでは約15分、1,250°Cでは約2時間である<sup>41,42)</sup>。ただし、いずれもモデル実験の結果であり、実機での測定例は皆無である。

3.3.3 多針電気探針

(1) 剣山状電気探針

Sekoguchiら<sup>43)</sup>は、生け花に使う剣山によく似た、総数409本の電極からなる電気探針を作製し、円形断面垂直管内上昇気液二相流の気泡特性の測定に用いた。針は管横断面に均一に分布しているのので、上昇する気泡の進路がそれほどゆがめられることなく針を通過する。したがって、気泡の3次元形状をかなり精度良く測定できる。

(2) 櫛状電気探針

鉄鋼精錬プロセスで用いられるガス吹き込み方法、例えば単孔ノズルによるガス吹き込みに際して、ノズルの上方に剣山状電気探針を設置すれば、気泡の一部は電気探針を避けて上昇するようになる。そこでFig.7に示す櫛状の電気探針が開発され、単孔ノズルで生成される気泡の形状寸法の測定に用いられた<sup>18,19)</sup>。この多針電気探針では、気泡の垂直断面形状が求められる。測定結果の一例をFig.8に示す。スカート

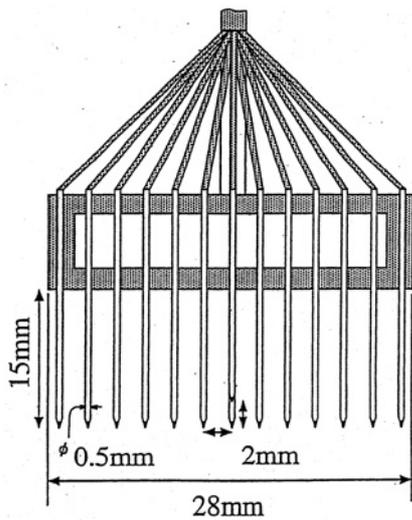


Fig.7 Schematic of multineedle electroresistivity probe

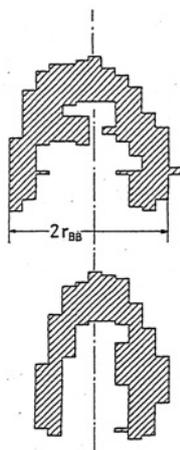


Fig.8 Bubble shape of two successively rising bubbles detected at z=5cm with multineedle electroresistivity probe for Wood's metal-He system.

状気泡の存在が明らかにみてとれる。

3.3.4 キャパシタンスプローブ

FuとEvans<sup>44)</sup>は細線と気泡との間のキャパシタンスを測定することによって、気泡寸法、上昇速度、気泡頻度の求めることが可能なプローブを開発した。このプローブの細線は熔融金属と反応しない絶縁物で被覆できるので、長時間の測定が可能であるが、電気探針よりも精度は劣る。

3.4 レーザーオプティカルセンサー

光ファイバーを用いて透明な液体中を上昇する気泡噴流のガスホールドアップ  $\alpha$ 、気泡頻度  $f_B$ 、気泡上昇速度  $u_B$  を測定する方法が提案されている。 $\alpha$  と  $f_B$  の測定原理は単針の電気探針と同様であるが、気泡上昇速度は気液界面で散乱されるレーザー光線のドップラー信号を処理することによって求められる<sup>45)</sup>。

3.5 X線透過法、X線CT法、超音波CT法

流体が不透明な場合や、流体が透明であっても容器が不透明な場合に、気泡を可視化してその形状や上昇速度を求める装置であり、詳細については可視化の稿を参照されたい<sup>46,47)</sup>。

4 液速度と気泡上昇速度の同時測定

多くの気泡が上昇している気泡噴流内の液体の上昇速度をレーザードップラー流速計で測定する場合、液体中の  $1\mu\text{m}$  程度の微細なシーディング粒子によるドップラー信号だけでなく、気泡による信号も含まれる。Ironsら<sup>48)</sup>は1次元レーザードップラー流速計 (LDV) の測定体積、すなわち2本のレーザー光線が交差する部分の近傍に単針の電気探針を設置し、電気探針の出力信号をモニターすることによってLDVの出力信号から気泡の信号を分離した。Iguchiら<sup>49)</sup>は2次元のLDVと単針の電気探針を用いて同様な気液信号分離処理を行った。その結果、ガスホールドアップが約30%よりも小さい流れ場では、気泡信号を除去しなくても液体流れの乱れ成分のrms値はもとより、レイノルズ応力も気泡信号の影響をほとんど受けないことが分かった。

ここで分離した気泡信号は気泡表面の上昇速度を表しており、したがって、これらの信号から平均気泡上昇速度を求めることができる。ただし、気泡内部の速度を求めることは容易でない。

5 気液界面近傍の流速測定

植村らのグループ<sup>50,51)</sup>はレイノルズ数の非常に小さなア

ダマード型の上昇気泡に着目し、気液界面近傍の可視化に工夫をこらして、界面を明瞭に識別するとともに、粒子追跡式画像流速計 (Particle tracking velocimetry : PTV) を用いて液側の流速を求めている。なお、気泡中の流速測定が難しいのは、適当な可視化用粒子が無いためである。この手法を用いれば、複雑な気液界面近傍の流れの特性を知ることが可能であるが、界面の動きの激しい場合には、さらなる工夫を要する。

## 6 液膜の測定

流動様式図 (Fig.3) に示したように、液体流量を一定にして、ガス流量を大きくしていくと環状流や環状噴霧流が現れる。液膜の表面形状や液膜内の流動特性は多くの工学的問題に関連して重要である。芹澤<sup>52)</sup>は液膜の測定法を次の4種類に大別している<sup>53)</sup>。

- (1) 写真撮影法：直接撮影法、光減衰法、染料法
- (2) コンダクタンス法：電極間にある液体の電気抵抗変化を利用する。電気探針法、定電位法、壁面プローブ法、
- (3) 光学的プローブ法：光ファイバー液膜センサー、レーザー変位計
- (4) 超音波法：超音波エコー法、超音波流速計

## 7 流量計測

気液二相流の流量計測の試みは原子炉や海洋石油開発に関して活発になされており、2種類に大別される<sup>54)</sup>。

### 7.1 気相と液相を分離せずに測定する方法

- (1) 断面内のガスホールドアップ分布が不均一でない場合には、単相流の流量計の稿<sup>55)</sup>で述べたコリオリ流量計を用いることによって、気相と液相を合わせた質量流量が十分な精度で使用できる。
- (2) 電磁流量計  
管内の流動様式が気泡流の場合には、よい精度が得られる。
- (3) 絞り流量計  
オリフィス、ノズル、ベンチュリー管などの絞り流量計も、精度は落ちるが全体の質量流量の測定に使用できる。

### 7.2 気相、液相それぞれの質量流量計測

タービン流量計がこの目的に適っているが、精度は落ちる。

## 8 圧力計測

基本的に、圧力計測の稿<sup>56)</sup>で述べた測定器を用いることができる。ただし、受圧面が直接流体に触れるフラッシュタイプの場合は特に問題にならないが、導管を有する方式では、導管内に気泡が詰まると、圧力の大きいときや非定常流の測定時には圧縮性の影響が出て、正確な測定ができなくなる。また、液体が凝縮、蒸発するシステムでは特に注意を要する。

## 9 温度計測

気液二相流では、流れ場のある点に着目したとき、気体と液体が通常交互に現れる。気体と液体の温度が互いに等しいときの温度測定は単相流と同様である。しかしながら、両者が異なるときには工夫が必要となる。筆者らは、接点の直径が $12.5\mu\text{m}$ のマイクロサーモカップルを用いて、取鍋を模擬した浴内への低温ガス吹き込み時の気泡と液の温度の同時測定を試みた<sup>57,58)</sup>。吹き込みガス流量が大きくて接点に付着した液体がガスによって吹き払われるような条件下では精度の良い測定が可能であった。

## 10 結言

気液二相流の気泡特性の多くはかなり正確に測定できるようになっている。ところが、気液間反応を解析するに際して最も重要となる気液界面積の測定は依然として困難な状況にある。斬新な測定法の開発が是非とも望まれる。また、溶融金属中を上昇する気泡群の動的挙動の把握にはX線CT法などの方法が欠かせない。この分野の発展も切望される。

### 参考文献

- 1) 第100, 101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1984)
- 2) Y. Sahai and G. R. St. Pierre : Advances in Transport Processes in Metallurgical Systems, Elsevier, Amsterdam, (1992)
- 3) O. J. Ilegbusi, M. Iguchi, and W. Wahnsiedler : Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations, Chapman-Hall/CRC, (1999)
- 4) 梶岡博幸 : 取鍋精錬法, 日本鉄鋼協会, (1997)
- 5) D. Mazumdar and R. I. L. Guthrie : ISIJ Int., 35 (1), (1995), 1.
- 6) J. Szekely : Fluid Flow Phenomena in Metals Processing, Academic Press, New York, (1979)

- 7) 学振第19委員会：鋼中非金属介在物研究の最近の展開 (鋼中非金属介在物小委員会報告), (1994)
- 8) 寺内幸生, 井口 学, 小坂博昭, 横谷真一郎, 原 茂太：鉄と鋼, 85 (1999) 9, 645.
- 9) 谷口尚司, 菊地 淳：鉄と鋼, 78 (1992) 4, 527.
- 10) わが国における鋼の連続鑄造技術史, 日本鉄鋼協会, 育成委員会連鑄技術史分科会, (1996), 511.
- 11) 中岡威博, 三宅俊也, 三村 毅, 田井啓文：鉄と鋼, 86 (2000) 4, 231.
- 12) Z.-H. Lin and R. I. L. Guthrie : Metall. Trans. B, 25B (1994), 855.
- 13) 高島 真, 井口 学：鉄と鋼, 86 (2000) 4, 217.
- 14) 模型理論とスケールアップ研究小委員会：鉄鋼製造における模型理論とスケールアップ, 共同研究会熱経済技術部会, 日本鉄鋼協会, (1976)
- 15) R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber : Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press, New York, (1978), 27.
- 16) 森 一美, 佐野正道：鉄と鋼, 67 (1981), 672.
- 17) G. Hetsroni : Int. J. Multiphase Flow, 15 (1989), 735.
- 18) M. Iguchi, T. Nakatani and H. Kawabata : Metall. Mater. Trans. B, 28B (1997), 409.
- 19) M. Iguchi, T. Nakatani and H. Tokunaga : Metall. Mater. Trans. B, 28B (1997), 417.
- 20) 赤川浩爾：気液二相流, コロナ社, (1980)
- 21) 植田辰洋：気液二相流 流れと熱伝達, 養賢堂, (1989)
- 22) G. Hetsroni : Handbook of Multiphase Systems, McGraw-Hill, New York, (1982)
- 23) 神保他編：微粒子ハンドブック, 朝倉書店, (1991)
- 24) 化学工学会：化学工学便覧, 第6版, (1999), 231.
- 25) 粉体工学会編：粉体工学便覧, 日刊工業新聞, 第2版, (1998)
- 26) 川上正博, 富本 登, 伊藤公允：鉄と鋼, 68 (1982) 7, 774.
- 27) 笠木伸英編：流体実験ハンドブック, 朝倉書店, (1997), 600.
- 28) A. Serizawa : Fluid Dynamics Characteristics of Two-Phase Flow, Dr. Dissertation, Kyoto University, (1974)
- 29) R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber : Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press, New York, (1978), 171.
- 30) 富山明男, 片岡 勲, 坂口忠司：日本機械学会論文集B編, 61-587 (1995), 2357.
- 31) 熊谷剛彦, 井口 学：鉄と鋼, 87 (2001) 4, 159.
- 32) X. Song, F. Yamamoto, M. Iguchi, L. Shen, X. Ruan and K. Ishii : ISIJ Int., 38 (1998) 9, 971.
- 33) 宋 向群, 山本富士夫, 井口 学：ふえらむ, 6 (2001) 4, 250.
- 34) T. Etoh, K. Takehara and K. Nakagawa : J. Flow Measurements, 12-17 (1995), 27.
- 35) T. Etoh and K. Takehara : Proc. 3rd Int. Symp. on Air-Water Gas Transfer, Heiderberg, Germany, (1995), 447.
- 36) T. Uchida and M. Iguchi : J. Materials Processing and Manufacturing Science, 8-3 (2000), 256.
- 37) 江藤剛治：私信.
- 38) 赤川浩爾：気液二相流, コロナ社, (1980), 119.
- 39) A. H. Castillejos and J. K. Brimacombe : Metall. Trans. B, 20 (1989), 595.
- 40) M. Iguchi, H. Kawabata, K. Nakajima and Z. Morita : Metall. Mater. Trans. B, 26 (1995), 67.
- 41) 井口 学, 川端弘俊, 森田善一郎, 中島敬治, 伊藤陽一：鉄と鋼, 80 (1994) 5, 365.
- 42) 井口 学, 川端弘俊, 森田善一郎, 中島敬治：日本機械学会論文集B編, 62 (1996) 593, 79.
- 43) K. Sekoguchi, M. Takeishi and T. Ishimatsu : Physico Chemical Hydrodynamics, 6-1/2 (1985), 239.
- 44) Q. Fu and J. W. Evans : ISIJ Int., 39 (1999) 4, 309.
- 45) M. Iguchi, M. Kaji and K. Okita : ISIJ Int., 38 (1998), 802.
- 46) 井口 学：ふえらむ, 6 (2001) 3, 180.
- 47) 竹中信幸：可視化情報学会誌, 21 (2001) 80, 14.
- 48) Y. Sheng and G. A. Irons : Int. J. Multiphase Flow, 17 (5) (1991), 585.
- 49) M. Iguchi, T. Kondoh and T. Uemura : Int. J. Multiphase Flow, 20 (1994), 753.
- 50) 植村知正, 山内 慎：混相流のグラフィック シミュレーションと可視化, 第51回研究会講演論文集, (2001) 3, 1.
- 51) 山内 慎, 植村知正, 小澤 守：混相流, 14 (2000) 4, 466.
- 52) 芹澤昭示：混相流, 14 (2000) 1, 39.
- 53) 赤川浩爾：気液二相流, コロナ社, (1980), 135.
- 54) 峯村吉春：混相流, 14 (2000) 1, 16.
- 55) 佐々木康, 井口 学：ふえらむ, 6 (2001) 2, 84.
- 56) 井口 学, 松浦清隆：ふえらむ, 5 (2000) 10, 731.
- 57) 井口 学, 徳永宏彦, 立道英夫, 森田善一郎：鉄と鋼, 78 (1992) 3, 415.
- 58) H. Tokunaga, M. Iguchi and H. Tatemichi : ISIJ Int., 35 (1995) 1, 21.

(2001年5月22日受付)