

特別講演

□学術功績賞受賞記念

鉄鋼プロセス内の輸送現象

Transport Phenomena in Ironmaking and Steelmaking Processes

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



* 脚注に略歴

1 緒言

筆者が鉄鋼プロセスの基礎研究に着手したとき、水銀はともかくとしてウッドメタルなどの低融点の熔融金属であっても、物性値に関する情報が極めて少ないことに驚いた。物理的モデリングには各種相似則が用いられるが、物性値に関する情報がなければ成功はおぼつかない。また、溶鋼中微量成分測定用センサや温度センサは精度のよいものが開発され、実用に供されているが、流速など流動現象に関わる量を測定可能な高精度のセンサはほとんど見あたらなかった。この状況は、残念ながら今もあまり変わっていない¹⁾。本稿では、鉄鋼プロセス内輸送現象（運動量輸送、熱伝達、物質移動）の物理的モデリングの例と、それに関連して開発してきた幾つかのセンサを紹介し、今までの研究を振り返るとともに、今後の抱負を述べたい。

2 鉄鋼プロセスにおける輸送現象の特徴

鉄鋼プロセス内の輸送現象はプロセスの効率に深く関与しており、以下の様に特徴づけられる²⁾。

- (1) 流れは複雑で、強い乱れを伴う混相流である。混相流とは、気体、液体および固体のうち二つ以上が混じり合った流れである³⁾。実機では気液固三相流であることもまれではない。混相流を支配する厳密な支配方程式は特別な場合を除き、存在しない。流れ場を記述するための近似的な支配方程式の導出が必要である。
- (2) 流体は通常不透明であり、しかもその温度は大抵1000℃を超えている。
- (3) 流動現象とともに熱伝達および物質移動が生じている。

(4) 流動現象に冶金反応が伴っている。

(5) 反応容器や管路の壁は一般に溶鋼に濡れない⁴⁾。液体と固体の界面の濡れ性が悪いと、流動、熱伝達および物質移動に関する境界条件は濡れ性が良い場合とは異なると考えられる。

3 モデルの分類と特徴

鉄鋼プロセスの実機を用いて、吹き込まれたガスの挙動や熔融金属の流動特性を明らかにすることは適切なセンサがなく、しかも非常な高温で危険が伴うことから、きわめて難しい。この状況は熱伝達、物質移動および冶金反応が同時に生じているときには、さらにやっかいになる。このような理由により、鉄鋼プロセスにおける流動現象を始めとする輸送現象のより詳しい理解を得るには、モデルを用いた研究に頼らざるを得ないことが多い。鉄鋼プロセスに関する研究で用いられているモデリングは物理的モデリングと数学的モデリングに分類される^{2,5)}。

3.1 物理的モデリング

物理的モデリングは、実機に等しいか、それよりも小さなスケールの模型を作り、溶鋼そのもの、あるいは溶鋼を模擬した液体を流して実験を行い、実機の輸送現象を推測しようとする方法である。流動、熱伝達、物質移動に対する支配方程式が知られている場合には、時間、長さ、質量等に対する代表的なスケールを用いて方程式を無次元化すれば、幾つかの無次元数が得られる。物理的モデリングでは、これらの無次元数を実機の値に一致させ、実際の流体とは異なる流体を用いても流動、熱伝達、物質移動が容易に測定できるように設計される。なお、支配方程式に関する情報が限られている

* 昭和43年3月阿南高専、46年3月徳大工学部機械工学科卒業、48年3月阪大大学院工学研究科修士課程修了後、阿南高専助手、49年6月阪大冶金・金属工学科助手、平成2年2月材料開発工学科学内講師、3年7月助教授を経て、8年10月より現職、現在に至る。

ような複雑なシステムでは、バッキンガムの π 定理を用いると無次元数が求まる。

物理的モデリングは、その精度に応じて次の3種類に大別される⁵⁾。

- (1) 実機よりもややスケールの小さな設備を用いるが、流体は実機と全く同じものを採用する。実操業の指針を得る目的で行われる。
- (2) 実機よりも1桁小さいスケールの模型を対象とする。流体には実機と同じものを用いる。このモデルは数学的モデリングの妥当性の検証にも利用される。
- (3) スケールが実機に等しいか、それよりも小さな模型と、実機とは異なる流体を用いて実験を行う。溶銅のモデルとしては、動粘度が溶銅とよく似た水を用い、アルゴンガスや酸素の代わりに空気を用いる。これは、一般に水モデルとして知られている。このレベルのモデリングの精度は劣るが、実機を設計する際の指針を得る目的で実施される。ただし、溶銅の表面張力は水の約20倍と非常に大きいので、水モデルによる界面現象の研究には注意を要する。この場合には、低融点金属の水銀やウッドメタルを用いるとよい。

3.2 数学的モデリング

数学的モデリングとは、実機中の輸送現象に関する運動方程式、エネルギー式、状態方程式等をたてて数値的に解き、実際の輸送現象を予測しようとする方法である。

輸送現象の数学的モデリングだけでなく、物理的モデリングで留意すべき重要な点は遷移現象である。例えば、層流から乱流、自然対流から強制対流、亜音速から超音速への遷移はプロセスの性能に大きな影響を与えることを忘れてはならない。

3.3 代表的な無次元数

流動現象を扱う際に考慮しなければならない無次元数の代表的なものを以下に列記する。無次元数には、(1) 慣性力と粘性力の比として定義されるレイノルズ数、(2) 気泡に働く慣性力と浮力の比として定義される修正フルード数、(3) 慣性力と表面張力による力の比として定義されるウェーバー数、(4) 流速と音速の比として定義されるマッハ数などがある。物理的モデリングでは実機でどの無次元数が支配的な役割を演じているのかを推測し、各無次元数の値が実機とモデルとで一致するように設計する。Fig.1に示すガス底吹き浴内のバブリング (Bubbling) からジェッティング (Jetting) への遷移は、ノズル出口のマッハ数が1で与えられる^{2,6)}。

3.4 モデリングに対する一般的留意事項

3.4.1 物理的モデリング

複雑なプロセスでは多くの無次元数を考慮する必要があるが、すべての無次元数を実機の値に一致させることは実際上不可能である。そこで、最も支配的な無次元数を探し出さなければならない。幸いなことに、流れ場が乱流であるならば、例えばレイノルズの相似則のように、相似則の緩和が可能となり、無次元数の数を減らすことができる。

3.4.2 数学的モデリング

前述のように、混相流の厳密な支配方程式は知られていない。そこで、輸送現象を適切に記述できる支配方程式群を構築することが最も重要となる。近似の程度は個々の研究者の経験と現象に対する洞察力に依存するが、数学的モデリングにおける基本的手法は、プロセスが異なっても、ある程度共通している。詳細については文献²⁻⁵⁾を参照されたい。

4 物理的モデリングに関する筆者のいままでの研究

筆者は、主として上記 (2)、(3) のレベルの物理的モデリングに着目して研究を進めてきた。ところが、溶融金属のように流体が不透明で、しかも温度が高い場合の気泡の挙動や流速の測定は、そもそもセンサが存在しないことが多いため、センサの開発をしつつ研究を進めざるを得なかった。以下、ガス底吹き容器内の気泡特性測定用のセンサと連続铸造鋳型内の溶銅メニスカス流速測定用センサについて述べる。

4.1 溶融金属中を上昇する気泡の挙動

鉄鋼プロセスでは、前掲のFig.1に示すように精錬反応容

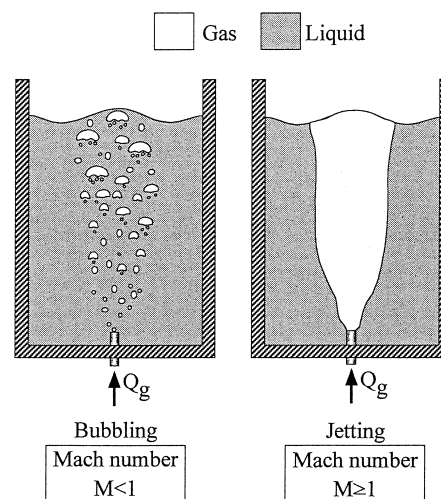


Fig.1 Bubbling and jetting

器内へのバブリング状態でのガス吹き込み攪拌操作が広く行われている⁷⁾。溶融金属中の気泡の形状、寸法、個数、分散状況などの気泡特性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⁸⁾。気泡の分散状況は、気泡頻度、ガスホールドアップ、平均気泡上昇速度などを測定すれば記述できる。なお、ガスホールドアップとは、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であり、時間ボイド率とも呼ばれる。気泡特性測定用のセンサとしては次のものが知られているが、高温溶融金属に適しているものは限られる。

- (1) スチールカメラ
- (2) ビデオカメラ（家庭用ビデオカメラ、高速度ビデオカメラ）：最近では100万コマ/秒で連続100枚撮影可能な高速度ビデオカメラもある。
- (3) 電気探針（単針電気探針、2針電気探針、剣山状電気探針、櫛状電気探針）：液体中に浸漬した電極を気泡が覆ったときに電流が流れなくなるような回路を構成して気泡の通過を検知するセンサである。
- (4) キャパシタンスプローブ：細線と気泡との間のキャパシタンスを測定して気泡特性を求める。
- (5) レーザーオプティカルセンサ：光ファイバーを用いて透明な液体中の気泡特性を求める。
- (6) X線透過法、X線CT法、超音波CT法

4.1.1 櫛状の多針電気探針

反応に関与する気液界面積を評価するに際して、気泡の形状に関する情報は重要である。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、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る⁹⁾。気泡体積が大きくなるにつれて球形からずれ、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。一方、転炉などの反応容器内にガスを底吹きしたときには、ノズル出口で気泡が連続的に生成する。このとき、気泡は先行する気泡の後流（Wake）の影響を受けて、単独気泡が静止流体中を上昇する場合とは異なる形状も現れる。

筆者らはFig.2に示す櫛状の多針電気探針を開発し、水銀とウッドメタル中を上昇するヘリウム気泡や窒素気泡の形状を求めた¹⁰⁾。気泡形状は球形ではなく、対をなして上昇する気泡（ダブルット）が観察された。極端な場合には、Fig.3に模式的に示すように、後の気泡が前の気泡に包み込まれてしまうことも起こる。

4.1.2 温度が1600℃の溶鋼用2針電気探針

1250℃の溶銑や溶銅に適用できる2針の電気探針は既に

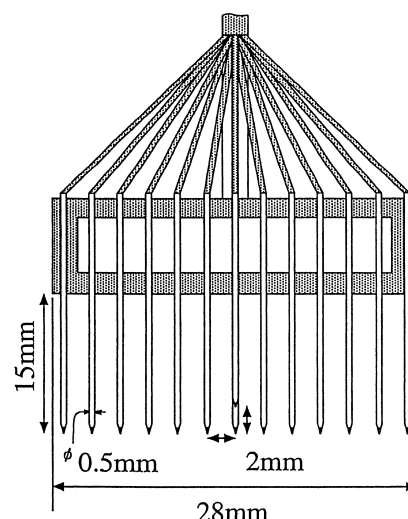


Fig.2 Schematic of multineedle electroresistivity probe

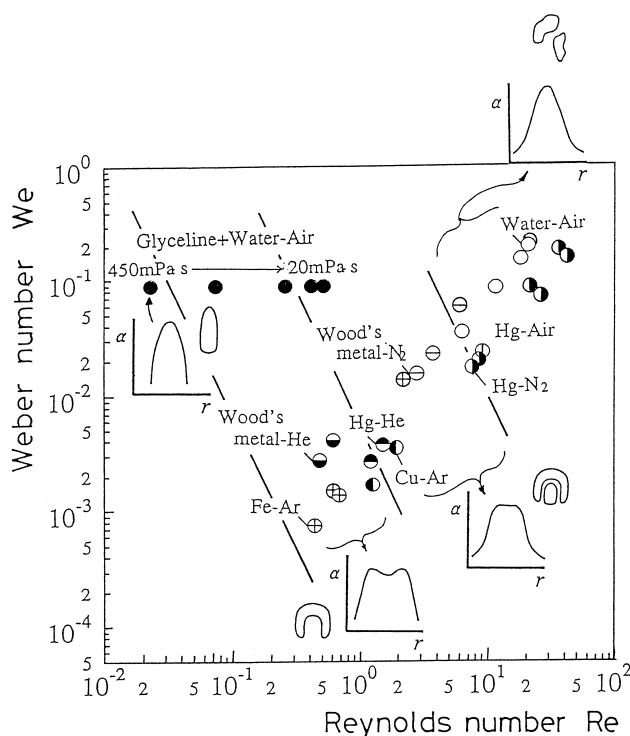


Fig.3 Classification of bubble shapes

開発されていたが^{6,11)}、1600℃に適用できるものはなかった。そこで、筆者らはFig.4に示す2針の電気探針を開発し、気泡特性を測定した。気泡特性は、水と低融点金属を用いて導いた実験式によって近似することができた。この事実は、物理的モデリングによって実機中の気泡特性を予測できることを示唆している。探針の寿命は1600℃では約15分、1250℃では約2時間である¹²⁾。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。

4.2 連続鑄造鑄型内の溶鋼流速用センサ

まず、既存の流速センサを高温溶融金属に適用する際の問題点を簡潔に述べる¹⁾。

- (1) ピトー管：取鍋や転炉のように循環流と波動が存在する流れ場の測定には適さない。
- (2) 熱線／熱膜流速計：温度変動があると適用できない。
- (3) レーザードップラー流速計：透明でない溶融金属には適さない。
- (4) 超音波流速計：低融点金属に用いられる。
- (5) プロペラ流速計：連続鑄造鑄型の水モデル装置の測定に供されている。
- (6) 磁石流速計：永久磁石のキュリー点よりも溶融金属の温度が低ければ適用可能である。
- (7) 粒子画像流速計：X線を用いると溶鋼中の速度測定も可能である。
- (8) 流動抵抗流速計：鑄型内メニスカス流速測定に用いられている。液面に波があると支持棒に働く流動抵抗が激しく変動し、測定は難しくなる。
- (9) カルマン渦流速計：円柱の浸漬深さが直径の約6倍を超えると、波の影響をほとんど受けなくなる。ただし、流れの方向が変わっても絶対値は検知できるが、方向は検知できない。このセンサについては、後で詳しく述べる。
- (10) 溶融流速計：溶融アルミニウムの流速測定に用いられ

ている。

- (11) 核磁気共鳴を利用した流速計、レーザー誘起蛍光法：溶融金属には適さない。

4.2.1 メニスカス流速測定用センサ

Fig.5に示すように、長い円柱を流れの中に垂直に浸漬したとき円柱の背後にはカルマン渦列と呼ばれる渦列が形成される。渦の放出周波数 f は流速に比例する。比例定数はレイノルズ数 Re が300から 2×10^5 に渉る広い範囲において一定値をとる¹³⁾。したがって、連続鑄造鑄型内のメニスカスから溶鋼中に浸漬した円柱の放出周波数を求めると流速 v が分かる¹⁴⁾。現在実用に供されている円柱にはサイアロンがある。また、放出周波数は円柱に貼りつけたひずみゲージを用いて測定する。本センサも、まずウッドメタルを用いて開発を行ったが、実機鑄型内の溶鋼にもその結果が適用できた。本センサの時定数は0.1秒程度であり、速度変動がこれよりもゆっくりとしているときには、非定常流の測定も可能である。

4.2.2 ローレンツ力を利用した非接触式溶融金属表面流速測定用センサ

橋の上から川面に小石を落とすと、小石が川面に衝突した位置から四方八方へ波紋が広がっていくが、上流よりも下流への伝播速度が大きい。伝播時間差を用いれば流速が求まる。本センサはこの原理を利用しており、溶融金属表面の波はローレンツ力によって発生させる。ウッドメタルの表面流速は測定可能であるが、溶鋼に適用するには解決せねばならない問題は多い¹⁵⁾。

5 結言

実機の溶鋼中を上昇する気泡の挙動を、物理的モデリングで得た実験式や様式図を用いて予測する際の精度は高いと考えているが、実際の様相を知るとはまだまだ先のである。これは流速計についても同様であり、現時点では流れの

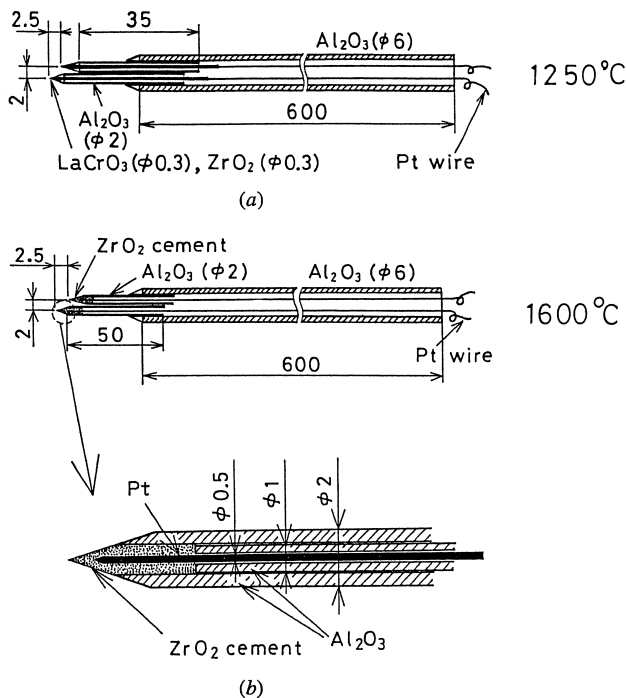


Fig.4 Electroresistivity probe for measuring bubbles in molten iron bath : (a) probe applicable to 1250°C (mm) and (b) probe applicable to 1600°C (mm)

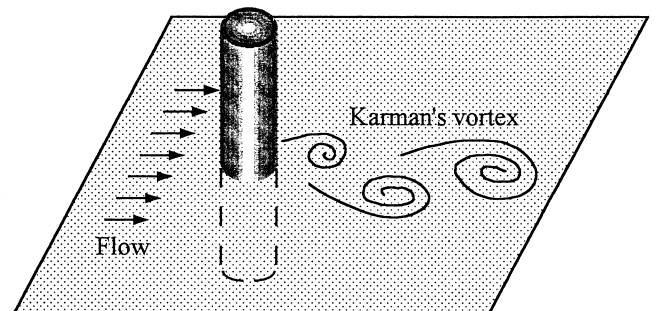


Fig.5 Schematic illustration of Karman's vortex streets

方向が既知の鑄型内メニスカス流速しか測定できない。溶鋼内部の強い乱流場における速度を平均速度だけでなく、乱れ成分まで含めて測定可能な流速計の開発が望まれる。この目標にどの程度肉薄できるか分からないが、努力したい。また、至る所で繰り返しているが、若い頭脳の参入を祈って止まない。

上述の結果を含めて、私の30年に渡る研究の成果は、大阪大学ならびに北海道大学の恩師、共同研究をしていただいた先生方、学生諸君だけでなく、永らくこの分野に携わってこられた各大学の先生方、鉄鋼会社の研究者の方によるご援助の下に得られたものです。末筆で恐縮ですが、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 井口学編著：入門講座 流体計測（実験テクニック編），日本鉄鋼協会，東京，（2002）
- 2) O.J. Ilegbusi, M. Iguchi and W. Wahnsiedler：Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations, Chapman-Hall/CRC, (1999)
- 3) 赤川浩爾：気液二相流，コロナ社，（1980）
- 4) Handbook of Physico-chemical Properties at High Temperatures, ISIJ, (1988)
- 5) J. Szekely：Fluid Flow Phenomena in Metals Processing, Academic Press, New York, (1979)
- 6) K. Mori and M. Sano：Tetsu-to-Hagané, 67 (1981), 672.
- 7) 第100.101回西山記念講座，日本鉄鋼協会，（1984）
- 8) S. Taniguchi and A. Kukuchi：Tetsu-to-Hagané, 78-4 (1992), 527.
- 9) R. Clift, J.R. Grace and M.E. Weber：Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press, New York, (1978), 27.
- 10) M. Iguchi, T. Nakatani and H. Kawabata：Metall. Mater. Trans.B, 28B (1997), 409, 417.
- 11) M. Kawakami, S. Hosono, K. Takahashi and K. Ito：Tetsu-to-Hagané, 78 (1992), 267.
- 12) M. Iguchi, H. Kawabata, K. Nakajima and Z. Morita：Metall. Mater. Trans.B, 26 (1995), 67.
- 13) 流体力学ハンドブック，2nd. ed., 日本流体力学会，丸善，（1998），186.
- 14) M. Iguchi, H. Kawabata, T. Ogura, A. Hayashi and Y. Terauchi：ISIJ Int., 36-Suppl., (1996), 190.
- 15) M. Iguchi, K. Hanazaki and Y. Terauchi：Tetsu-to-Hagané, 88-10 (2002), 629.

（2004年5月6日受付）