



入門講座

実験テクニック編(流体計測)基礎概説-5

流れの可視化

Flow Visualization

井口 学

北海道大学 大学院工学研究科
物質工学専攻 教授

Manabu Iguchi

1 はじめに

周知のように、鉄鋼プロセスで対象となる流れは下記の特徴を有しており、機械工学、化学工学、土木工学などのように常温近傍で取り扱われている流れとは、その取り扱いにおいて大きな困難を伴うとともに、圧力や流速などの測定もままならないのが常である¹⁻³⁾。

- (1) 熔融金属や気体は一般に非常に高温である。
- (2) 熔融金属は不透明である。
- (3) 流れは気体、液体、固体が混在したいわゆる混相流であることが多い。
- (4) 流れは平均速度に比べて乱れ成分の割合が非常に大きい。
- (5) 熱、物質移動を伴うことが多い。
- (6) 化学反応を伴うことが多い。
- (7) 反応容器の耐火物は熔融金属に濡れにくい。したがって、固体表面における境界条件が濡れのよい場合のそれとは異なっている可能性が高い。

気体の流れに関しては特に問題とならないが、上述のように複雑でしかも不透明な1000℃を超える熔融金属の流れの測定は非常に難しく、本計測シリーズで述べてきたように、連続鑄造モールド内溶鋼表面近傍の流速や温度の測定例が散見される程度である³⁻⁶⁾。本稿で対象としている流れの可視化についても報告例はモデル実験に限られており、X線や中性子線を用いた方法がみられるに過ぎない⁷⁻¹⁰⁾。しかしながら、X線や中性子線ではそれらの出力レベルが制約となり、現在のところ非常に限られた小さなスケールの流れ場しか可視化できない。

鉄鋼プロセス工学の分野では、いわゆる水モデル実験などの物理的モデリングによって、実機の流れの現象を理解しようとする試みが活発に行われているが^{1, 11-13)}、この場合には、既存の可視化手法が適用可能である。

本稿では、このような事情を考慮して、多くの工学分野で既に広く用いられている可視化法について概観するとともに¹⁴⁻¹⁷⁾、熔融金属の流れの可視化の現状と今後の課題や可能性について言及したい。

2 流れの可視化法の種類と特徴

我々が流れ場を把握しようとするとき、通常は見えない流れの速度、圧力、温度などを種々のセンサーを用いて測定し、それらの結果に基づいて全体像を構築する。しかしながら、本シリーズの幾つかの稿で詳しく述べたように、それらの多くはいわゆる点測定用のセンサーであり、一度の測定によって、1点あるいは2、3点における測定値しか得られないことが多い^{3, 18, 19)}。したがって、流れ場全体の測定には多大な時間を必要とし、しかも場所によってはセンサー自身が流れ場をゆがめることもある。また離散的に分布した測定点で得られたデータから全体像を把握するには豊富な経験を有することに加えて、想像力が求められる。流れが定常状態にあれば、たとえ限られたデータであっても全体像の把握はさほど難しくはないが、流れの速度や圧力が時間とともに変化する非定常流の場合には非常に困難な作業となる。

百聞は一見に如かずという諺がある。流れ場全体を短時間に視覚的に捕らえることが出来ないものかと考え、開発された方法が流れの可視化法である。当初は定性的にはともかく、定量的には点測定に比して見劣りのした可視化法ではあるが、次回の粒子画像流速計(PIV)の稿で紹介するように²⁰⁾、最近のコンピューター関連技術の急速な進歩と光学系の開発によって、単純な流れ場であれば乱流成分まで含めて、既存の流速計と遜色のない精度を有するまでになっている。本稿ではPIVを除く可視化法について、次に具体的に述べる。

2.1 注入トレーサー法

方丈記に“ユク河ノナカレハタエスシテ……”とあるが²¹⁾、いにしえの人も水中に巻き込まれる気泡や散りゆくもみじが川面を流れゆく様をみて、水の流れの存在をより身近なものと感じたことであろう。もみじの葉が川面を流れる距離を時間で割れば速度が分かる。また雲の動きをみれば上空の風の流れが察せられる。これが注入トレーサー法の基本概念であって、前述のPIVの基礎ともなっている。

すなわち注入トレーサー法とは、流れの中に目印となる物質(トレーサー)を混入させてその動きを観察することにより、流れ場を明らかにしようとする方法である¹⁴⁻¹⁷⁾。このとき、トレーサーの追従性が問題となる。トレーサーの満足すべき条件として、ストークスの抵抗則に従うほど小さく、流れを乱さないことが挙げられる。トレーサーの密度は流体の密度にできるだけ近いほうがよい。流体が水の場合には、塩や砂糖を加えて密度を調整することが行われている。既存の注入トレーサー法には多くの種類があって以下のように分類されている¹⁵⁾。

- (1) **注入流脈法**：流脈線(Streak line)とはある点を時々刻々通過するすべての流体粒子が時刻 t に達した点を連ねた曲線である^{22, 23)}。流れの中のある位置から連続的に煙、ミスト(微細な液滴群)、色素などのトレーサーを注入してその軌跡を観察するのが流脈法である。インクを円管内の水の流れに注入して層流から乱流への遷移現象を明らかにしたReynoldsの実験はつとに有名である²⁴⁾。
- (2) **注入流跡法**：流跡線(Path line)とは任意の一つの流体粒子が時間の経過とともに移動する軌跡である²³⁾。ある位置から粒子などを離散的に注入してその軌跡を観察する。
- (3) **注入タイムライン法**：直線上の多くの位置からトレーサーを一斉に注入したとき、ある瞬間にトレーサーが描く曲線をタイムライン(Time line)という。トレーサーには煙や色素がよく用いられる。
- (4) **懸濁法**：液体の中にあらかじめトレーサーを均一に分散させておき、これを流体として用いる。PIVは主に懸濁法を基にしている。トレーサーとして感温液晶を用いると、速度だけでなく温度場も同時に測定できるが²⁵⁻²⁷⁾、個々の液晶の感温範囲はかなり狭く、広い範囲をカバーするには複数の種類の液晶を用いる必要がある。
- (5) **表面浮遊法**：自由表面にトレーサーを浮かべてそれらの挙動を観察する。熔融金属の流れの可視化には専ら表面浮遊法が用いられている。著者らも以前、溶銅浴の自由表面にトレーサーを浮かべて表面流速の測定を試みたことがあるが、高温熔融金属では画像処理に工夫を要する。

トレーサーの動きが流脈線(Streak line)、流線(Stream line)、流跡線(Path line)のどれを表しているのか、正しく理解しなければならない。流れが定常状態にあれば、これらの線は互いに一致するが、非定常流では互いに異なる。なお、流れの中に1本の空間曲線を考え、その曲線上の各点において速度ベクトルが曲線の接線となるようにしたとき、この曲線を流線という^{22, 23)}。

2.2 タフト法

旗やこいのぼりのはためく様子をみれば風の向きと強さが分かる。また川底の藻の動きをみれば水の流れの様相を知ることが出来る。タフトと呼ばれる細い絹糸や毛糸などを用いて物体の表面やその近傍の流れの強さや方向を求める方法が開発された。これがタフト法であり、モデルだけでなく実機の周りの流れにも適用できる。タフト法は次のように分類される¹⁵⁾。

- (1) **表面タフト法**：物体の表面にタフトを貼りつけて、流れを観察する。船、自動車、列車、飛行機などの表面近傍流れの観察に広く用いられている。
- (2) **タフトグリッド法**：物体から離れたある面内の流れを測りたいとき、その面内に格子を作り、多くのタフトを貼りつける。
- (3) **デプスタフト法**：物体表面から少し離れた位置の流れを知りたいときに用いる。物体表面に立てた棒の先にタフトを取り付ける。
- (4) **タフトスティック法**：物体周りの任意の位置の流れが測定できるように、トラバース可能な棒の先にタフトを取り付けて流れを観察する。

タフトが実際の流れを忠実に表しているのかどうかはこの方法の最も重要な点であり、多くの論文が報告されている。例えば文献15)を参照されたい。

2.3 壁面トレース法

船や飛行機などの表面近傍の流れ場は、輸送効率と安全性に大きな影響を及ぼす。このような流れ場における剥離や再付着現象の詳細を知るための最も簡便な方法は、表面に油やペンキなどを塗ってそれらの移動特性や変形挙動に着目する方法であり、総称して壁面トレース法と呼ばれる。次のような具体的方法が知られている。

- (1) **油膜法**：文字通り物体表面に油の薄い膜を作り、流れの中にその物体を置く。重力の作用が大きくない壁面上の定常流に主として適用される。油の種類や塗布方法の詳細については文献15)を参照されたい。
- (2) **油点法**：油を壁面上に一樣に塗布する代わりに、点状に油を配置してそれらの移動特性を観察する。

- (3) **物質移動法**：物体表面に付けた物体が気流中へ蒸発、昇華する現象、あるいは液体中へ溶解する現象を利用する。流れ場の特性を定量的に評価するには、当然のことながら速度と物質移動係数との関係が既知でなければならない。周知のように、気流中ではナフタリンがよく用いられる。
- (4) **感温皮膜法**：液晶²⁵⁻²⁷⁾を含む塗料を物体表面に塗布して温度分布を知る。
- (5) **感圧皮膜法**：圧力測定用の稿で挙げた感圧塗料²⁸⁾を用いる。

2.4 化学反応トレーサー法

流体と反応することによって発色する流体を流れの中に導入すれば、その流体の移動に伴って発色領域が時々刻々変化することに着目して流れ場の特性を知ることができる¹⁵⁾。これを流体間反応法と呼ぶ。最近、タンディッシュや連続鋳造モールド内の流れの可視化に、フルオレセントナトリウムがよく用いられている。

壁面に塗布した物質と流体とが接触することによって反応し、発色する現象を利用することも可能であり、物体表面反応法として知られている。この他に電気分解を利用して発生させた微粒子をトレーサーとする方法もある¹⁵⁾。

2.5 電気制御トレーサー法

種々のトレーサーを電氣的に発生させる方法であり、以下のように分類される。

(1) 水素気泡法

水中に張った白金線に電圧をかけると、電気分解によって白金線直径の0.5～1.5倍の大きさの水素気泡が発生するが、この気泡をトレーサーとして利用する。白金線を長手方向に交互に被服しておき、電圧を一定時間間隔でかけるとシート状の気泡群からなるトレーサーができるので、狭まり流路などにおける流れの変形挙動の観察に最適である¹⁵⁾。また管路内の非定常速度分布の測定にも適用可能である。水素気泡法を用いて平板乱流境界層中の組織的大規模構造(Coherent structure)を見いだしたKimらの研究は特筆に値する²⁹⁾。

(2) 火花追跡法

高圧高周波数パルス発生装置を用いて生じさせたイオン化した火花列を気流中のトレーサーとして用いる^{15,17)}。

(3) スモークワイヤー法

細線に油を塗って大電流を通じるとジュール熱によって煙が発生するが、これを気流中のトレーサーとして用いる。

2.6 光学的な方法

流体の密度差や屈折率の変化に着目して流れを光学的に

捉えようとする方法であり、代表的なものとしては次の方法が知られている¹⁴⁻¹⁷⁾。

(1) シャドウグラフ法

通常のカメラやビデオカメラで水中を上昇する気泡を観察すると、気液界面がぼやけて不鮮明となることが多いが、この方法を用いると流体の密度変化を極めて精度よく検知できる。したがって鮮明な画像が得られ、気泡形状の観察などに有効である。

(2) シュリーレン法

この方法も流体の密度変化に着目して流れ場を可視化しようとする方法の一つであり、超音速流れ場におかれた物体周りの観察によく用いられる。

2.7 超音波CT法

超音波CT(Computerized tomography)は人間ドックでなじみが深い。この方法が流れ場の測定にも適用可能である³⁰⁾。

2.8 NMR映像法

気液二相流の気泡の可視化にNMR映像法が用いられている。この方法では相分布と流速分布の同時計測が可能であることに加えて、トレーサーを混入する必要がない。しかも任意の方向に測定面を設定できるという特徴を有している。松井ら³¹⁾はアクリル管内シリコンオイル中を上昇する気泡周りの流れの可視化に成功している。

2.9 透過X線法

熔融金属は不透明であり、例えば熔融金属中で生成される気泡の形状、寸法を測定することは多針の電気探針法を用いても非常に難しい。そこで古くからX線を用いた観察が行われてきたが、現在最も高出力のX線を用いても、溶鉄浴の場合、観察可能な浴の厚みはたかだか50mm程度であり、容器壁の影響を受けることなく生成する気泡を観察することは容易ではない⁸⁾。また、このような空間分解能の問題だけでなく、時間分解能の面でも制約は多いが、10Hz程度の気泡生成頻度であれば十分測定可能である。

Irons and Guthrieは溶鉄浴中に水平方向に設置した溶鉄との濡れ性の悪いノズルから生成する気泡は、ガス流量が小さいときノズル出口から真上に離脱上昇することなく、しばしばノズルに沿って移動することを観察している⁷⁾。このような現象は電気探針では容易に検知できず、まさに可視化法の面目躍如たるものがある。

著者らの観察によれば、上向きJ型ランスから溶鉄中にアルゴンガスを吹き込んだとき、やはりガス流量が低くてノズル出口でのガスの慣性力が小さければ、気泡は浮力に逆らいJ型ランスに沿って下向きに移動し、やがてランスに沿って

J字を描いて浴表面に達した。このように、気泡生成に及ぼす濡れ性の影響の大きさに驚いた経験がある。また、同じ実験中に、ノズルで生成した気泡が浴中を上昇する間に分裂した様子が見えないにも関わらず、非常に多くの小さな気泡が浴中に存在していることに気づき、これまたその原因について頭を悩ました。これは気泡の浴表面での破裂に伴って生じたものであることが後になって分かったが³²⁾、現象を可視化しないとこのような興味深い現象に気づく術もなかった。

X線透過装置の空間分解能と時間分解能を上げることができれば、適当なトレーサーを導入することにより、3次元粒子画像流速計を用いて、熔融金属の流れの3次元速度分布を求めることも可能となる。

2.10 X線CT法

気液二相流中の気泡の空間分布を測定することは多くの電気探針を用いても空間分解能の点から非常に難しい。三澤らは垂直なアクリル円管内水-空気系二相流の非定常挙動を観察可能な高速X線CT法を開発している³³⁻³⁵⁾。この方法はX線の減衰を利用しているが、現在のところ一断面当たりのスキャン時間は3.6ms、空間分解能は2mm、撮影速度250コマ/秒が得られている。

透明な液体が透明な容器の中に入っていれば、流れの可視化は容易である。ところが、容器壁が不透明になっただけで可視化はとたんに難しくなる。この方法を改良し、感度を上げれば、不透明容器内熔融金属中の気泡の3次元形状を捕らえることも夢ではない。

2.11 中性子ラジオグラフィ

中性子を用いて金属製円管内水-空気系二相流や熔融金属中の気泡の挙動を観察する試みが原子力工学の分野で活発に行われている^{36,37)}。現時点では空間分解能と時間分解能にやや難点があるが、今後の有望な方法の一つであろう。

2.12 陽子線ラジオグラフィ

中性子の透過力は大きいために、狭い流路内の気泡挙動を観察するには十分な空間分解能が得られない。そこで、中性子よりも透過力の小さな陽子を用いた陽子線ラジオグラフィが開発されている³⁸⁾。

2.13 コンピュータグラフィックス (CG)

数値計算で得られたデータを分かりやすく表示する技術が急激な進展をみせている。この技術も流れの可視化法に分類されており、ますます重要となろう。詳細については文献15-17)を参照されたい。

3 おわりに

本稿で紹介した可視化法の多くは、主に常温近傍の透明な流体を対象としており、不透明な流体の流れの可視化は非常に限られている。斬新な方法の開発が切望される。なお、機械工学や化学工学で行われている可視化については、文献14-17)に多くの実例が紹介されるとともに、留意すべき点が挙げられている。

参考文献

- 1) O.J.Ilegbusi, M.Iguchi and W.Wahnsiedler: *Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations*, (1999), Chapman-Hall/CRC.
- 2) 井口学, 松浦清隆: ふえらむ, 5(2000) 12, 876.
- 3) 井口学, 佐々木康: ふえらむ, 6(2000) 1, 14.
- 4) M.Iguchi, M.Takeuchi, H.Kawabata, K.Ebina, and Z.Morita: *Trans.JIM*, 35(1994), 716.
- 5) 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.
- 6) 太田金幸, 村上勝彦, 藤本幸二: *CAMP-ISIJ*, 12(1999), 64.
- 7) A.Iron and R.I.L.Guthrie: *Metal. Trans.B*, 9B(1978), 101.
- 8) 井口学, 高梨智裕, 小川雄司, 徳光直樹, 森田善一郎: 鉄と鋼, 80(1994), 515.
- 9) 梅川尚嗣, 小澤守, 松田健, 竹中信幸, 鶴見晃, 松林政仁: *混相流シンポジウム'95*, 14 (1995), 87.
- 10) 竹中信幸, 浅野等, 藤井照重, 和田哲昌, 松林政仁: *混相流シンポジウム'96*, 15 (1996), 311.
- 11) J. Szekeley: *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*, Academic Press, New York, (1979)
- 12) J.Szekeley and O.J.Ilegbusi: *The Physical and Mathematical Modeling of Tundish Operations*, Springer-Verlag, (1989)
- 13) Y.Sahai and G.R.St.Pierre: *Advances in Transport Processes in Metallurgical Systems*, Elsevier, Amsterdam, (1992)
- 14) 日本機械学会編: 写真集 流れ, 丸善, (1984)
- 15) 流れの可視化学会: 新版流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, 東京, (1986)
- 16) W.-J.Yang: *Handbook of Flow Visualization*, Hemisphere Pub. Corp., New York, (1989)
- 17) 流れの可視化学会: 流れのファンタジー, ブルーバック B-629, 講談社, 東京(1991)
- 18) 日本機械学会: 技術資料 流体計測法, 日本機械学会,

- (1985)
- 19) F.Durst, A.Melling and J.H.Whitelaw: Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry, Academic Press, London, (1976)
- 20) 宋向群, 山本富士夫, 井口学: ふえらむ, 6(2000), 4, 印刷中
- 21) 鴨長明: 方丈記, 大福光寺本 (1212).
- 22) 今井功: 流体力学前編, 裳華房, 8版, (1979),38.
- 23) 巽友正: 流体力学, 培風館(1983), 17.
- 24) 植松時雄: 水力学 (第2版), 産業図書, (1985).
- 25) 一宮浩市: 可視化情報, 19,Suppl.2(1999), 75.
- 26) 齊藤竜史, 藤澤延行, 高野剛, 横田正二, 田名綱弘, 渡部功: 可視化情報, 19,Suppl.1(1999), 225.
- 27) 船谷俊平, 藤澤延行, 高野剛, 松浦努: 可視化情報, 19,Suppl.1(1999), 259.
- 28) 半田太郎, 宮里義昭, 益田光治, 松尾一泰, 松本尚之, 坂本和之: 可視化情報, 19 Suppl.2(1999),103.
- 29) H.T.Kim, S.J.Kline and W.C.Reynolds: J.Fluid Mech., 50-1(1971),133.
- 30) 超音波便覧編集委員会: 丸善, 東京(1999),453.
- 31) 松井剛一, 巨瀬勝英, 文字秀明: 混相流シンポジウム'97, 16(1997), 1.
- 32) T.Uchida and M.Iguchi: J.Materials Processing and Manufacturing Science,(2001), in press.
- 33) 三澤雅樹, アーノウドリンデン, 文字秀明, 松井剛一: 混相流シンポジウム'98, 17 (1998), 175.
- 34) 三澤雅樹, イオンライセアス, 高田尚樹, 市川正樹, 赤井誠: 混相流シンポジウム'99, 18 (1999), 99.
- 35) 菊地良樹, 三澤雅樹, 松井剛一, 文字秀明: 混相流シンポジウム'99, 18 (1999), 101.
- 36) 端山俊輔, 前田憲男, 竹中信幸, 浅野等, 藤井照重: 混相流シンポジウム'99, 18 (1999), 95.
- 37) 前田憲男, 端山俊輔, 竹中信幸, 浅野等, 藤井照重: 混相流シンポジウム'99, 18 (1999), 97.
- 38) 掛布光孝: 混相流シンポジウム'97, 16 (1997), 9, 混相流シンポジウム'98, 17 (1998), 175.

(2000年9月27日受付)

ブックレビュー

**叢書 鉄鋼技術の流れ第2シリーズ 第1巻
焼結鉱 —資源少国日本の挑戦記録—
稲角忠弘著**

2000年9月 日本鉄鋼協会発行 (Tel.03-3279-6021)
●B5版 299頁 定価4,200円、会員価格3,500円
(消費税等込み、送料本会負担)

焼結鉱に関する専門書が、ほとんど出版されていない中で、本格的に焼結を取り扱ったこの本の存在価値は大きい。本書は筆者の、大学で資源開発を学び、企業人としては焼結基礎研究から業務をスタートし、製鉄原料工場の管理者を経験し、その後現在の海外製鉄原料委員会業務など、一貫して製鉄原料を対象とする技術者としての特化された経歴を糧とした、細部に至るまで具体的な記述に依っていることが特徴で、筆者の技術者としての歩みが濃縮されたものであり会心の作ともいえよう。焼結鉱に関する歴史的な歩みの部分では、過去の歴史を詳しく調べ、それら文献に基づいており、その生産技術の発展の経緯を学ぶものには大いに役立つものである。過去の優れた技術者と、今後この分野に引き続くであろう技術者との架け橋的意義をもつといえる。そして詳細な記述の裏付けとなる引用文献類も、多数リストアップされており、焼結を学ぼうとする読者にとっては、その道案内として大きな助けとなるものである。

本文の中にたくさんの図が掲載されていることは、読者の理解を進めるものとなっている。また写真も鮮明でわかりやすく、要所々々に効果的に配置されている。専門分野的に見ると、プロセス解析にも触れられているが、おもに原料や構造組織に関する説明に力点が置かれ、詳細かつ要点を得ている。コンピューターやプロセス制御に関する記述については、焼結工場の置かれた実情を良く反映している。全体的に過去と現況についてのデータをもとにした豊富な知識を基盤としている。なかでも原料装入技術は、筆者が直接携わったものとしての、臨場感がいたるところに漂っている。そしてシンターケーキに関する記述の箇所では、この本におけるただひとつのカラー写真を採用していることから見ても、この本のウェイトがここに置かれていることがうかがえる。

「今後の展望」については、このシリーズの趣旨から最小限にとどめられているが、むしろここを展望してゆくのは、今後この本によって学ぶ読者が果たすべき役割とも言えよう。一方、ポケット・メモとして、IからVまでのスポットの囲み記事が挿入されており、専門の記述が続いて堅い雰囲気となるところを適当に和らげ、息抜きをさせてくれている。また巻末の索引には、読者の種々の目的に広範囲に役立つように、詳細部分までに及ぶ焼結に関する専門用語を網羅しており、細かい配慮がされたものといえる。この本によって今後、焼結技術を学ぼうと志す若い技術者が、輩出されることが期待されるものである。

(金沢工業大学 経営工学科 柴田充蔵)