

入門講座

実験テクニック編(流体計測)混相流-2

固気、固液二相流

Gas-Solid and Solid-Liquid Two-Phase Flows

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

高炉への微粉炭吹き込み時の流れ場は鉄鋼プロセスにおける固気二相流の典型的な例である^{1,2)}。また、溶鋼からのアルミナ等の非金属介在物除去は古くて新しい問題であり、学振第19委員会でも精力的な調査研究が実施され、その成果が報告書にまとめられていることは記憶に新しい³⁾。これは固液二相流の典型例といえよう。しかしながら、このような1,000℃をはるかに超える高温のガスや熔融金属中の微小な固体粒子の動的挙動を実験的に明らかにすることは非常に難しく、専らコールドモデル実験に基づいて実機中の挙動を予測する試みが数多く行われてきた¹⁻⁶⁾。

本稿では流体中粒子の動的挙動ならびに粒子に誘起される流体運動の測定法を対象とする。ただし、測定法の多くは気液二相流の測定法と同じである場合が多いので、重複する場合の記述は最小限に留める。詳細については前稿⁷⁾を参照されたい。なお、固気二相流と固液二相流の相違は、固体粒子を運搬する流体の密度が大きく異なる点、すなわち固体粒子に働く重力の効果が著しく異なる点にある。

2 固体粒子とその運動に関する基礎的事項

2.1 形状、寸法

気泡とは異なり、固体粒子の形状、寸法は場所や時間によって変化しないが、粒子は多く集まるとクラスターを形成することもあるため、取り扱いはずしも容易ではない。複雑な形状を有する大小様々な固体粒子の特性を記述する方法は、気泡について述べたもの⁷⁾がそのまま適用可能である。

2.2 混合比、濃度

(1) 管内固気二相流

管路内の固気二相流については、固体粒子の質量流量 m_s と気体の質量流量 m_g の比として定義される混合比 (mixing ratio) がよく用いられる^{8, 9)}。また、固体粒子の体積流量 Q_s と気体の体積流量 Q_g の比を濃度ということもある。

$$\text{混合比} = m_s / m_g \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$\text{濃度} = Q_s / Q_g \cdots \cdots \cdots (2)$$

(2) 管内固液二相流

管内のある断面を通過する固液二相流の濃度には、体積濃度 C_v と質量濃度 C_m が一般に用いられている¹⁰⁾。

$$C_v = Q_s / (Q_L + Q_s) \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$C_m = m_s / (m_L + m_s) \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで Q_L は液体の体積流量、 m_L は液体の質量流量である。なお、質量濃度は重量濃度に等しい。これらの濃度を慣例的に吐き出し濃度という。

一方、管路の一定区間に含まれる固体粒子の体積をその区間の気体と固体粒子の体積の和で除した値を管内濃度と定義している⁸⁾。したがって、固体粒子の関与する混相流を扱う場合には、濃度の定義に十分留意する必要がある。

2.3 固気二相流の流動様式

2.3.1 垂直管内固気二相流

流動様式、すなわち定常的な気流によって運ばれる固体粒子群の時間的、空間的分布状態¹¹⁾は、粒子数の増加につれて均質流、循環流、スラグ流、充填層内流へと遷移していく。気液二相流に比べて、流動様式を複雑にしているのは、粒子の付着性、摩擦、静電気なども大きな影響を及ぼすためである。流動様式図はおもに管内の圧力勾配と空気平均流速に対して表示される。詳しくは文献^{9, 12)}を参照されたい。

2.3.2 水平管内固気二相流

均質流、プラグ流、閉塞などがあり、流動様式は垂直管の場合と同様に、圧力勾配と空気の平均流速に依存する¹²⁾。

2.3.3 固気二相噴流

気体噴流中に固体粒子が含まれた流れを固気二相噴流と呼ぶ。材料プロセスの分野では、アトマイザーに典型的に見られる。この噴流は粒子の混合比に関して3種類のタイプに分類できる¹³⁾。

(1) 希薄粒子濃度

混合比が約0.1までの場合であり、気体の平均流成分と乱れ成分はともに粒子の影響をほとんど受けない。

(2) 低粒子濃度

混合比が約0.1から約5までの場合であり、粒子は気体の流れには影響を与えるが、粒子どうしの衝突は無視できる。

(3) 高粒子濃度

混合比が約5以上の場合であり、粒子どうしの衝突も無視できなくなり、多くの粒子が集まってクラスターを形成するようになる

2.3.4 流動層

流動層内の流動状態(流動様式)はガスの空塔速度と重量平均粒径の組み合わせに対して以下のように分類される¹⁴⁾。

(1) 粗粒流動層(低速粗粒流動層、中速粗粒流動層)

(2) 微粉流動層

(3) 高速(粗粒)流動層あるいは循環流動層

(4) 希薄(高速微粉)流動層あるいは気流輸送

2.4 固液二相流

2.4.1 垂直管内固液二相流

垂直管内粒子-水系の固液二相流の流動様式については坂口ら¹⁵⁾の研究がある。粗大粒子も含め、粒子径と管路の直径との比が0.5を境にして議論が展開されている。

2.4.2 水平管内固液二相流

均質流、疑均質流、摺動流、堆積流などがある^{9,16)}。なお、スラリーも固液二相流の1種とみなせるが、詳細については次稿に譲る。

3 測定法

3.1 形状、寸法、個数、移動速度の測定

流動している気体や液体中の固体粒子を何らかの方法で取り出し、形状、寸法、個数を測定する方法と、移動速度を加えた四つの量を流れ場の中で直接測定する方法とに大別される。

前者の場合、測定は比較的容易であって、粉体工学や微粒子工学の分野で開発された方法がそのまま適用できる¹⁷⁻¹⁹⁾。後者については、以下に示すように幾つかの独特な方法が開発されている。

3.1.1 流体中から固体粒子を取り出して測定する方法

代表的な方法について以下に述べる^{9,17,19)}。

(1) ふるい分け法

メッシュの異なるふるいを用いて幾何平均粒子径を求める。目の粗いほうのふるいは通過するが、細かいほうのふるいは通過しないでそのふるいの上に残る粒子があれば、粒子径は二つのメッシュの間の値を有することになる。最も古典的な方法であるが、ふるいの数を多くするほど精度は高くなる。

(2) 画像解析法(顕微鏡法)

顕微鏡で取り込んだ画像を解析して形状、寸法、個数を求める。最近の画像解析ソフトの開発はめざましく、粒子が重なり合った状態であっても解析可能である⁷⁾。

(3) 沈降法

管路から取り出した粒子を溶媒中に入れ、沈降する速度を測る。非常に小さな粒子の大きさと沈降速度の間にはストークスの関係式が成り立つので、この相関を利用すれば粒子径が求まる。このようにして求められた径をストークス径と呼ぶ。

なお、梅景ら²⁰⁾は沈降法を用いて粒子群を形成する球形粒子に働く流体抗力の測定を行っている。

(4) レーザーを用いる方法

以下の方法が知られているが、精度については検定を行い、確認する必要がある²¹⁾。

(a) ミー散乱法

平行な光束の中にある粒子の弾性散乱特性、すなわち散乱する光の強度と粒子直径の関係を利用する。

(b) 透過光減衰法

平行な光路上に存在する粒子の散乱と吸収による減衰特性を利用する。粒子の濃度が求まる。火災中のすす粒子の質量濃度が測られている。

(c) 回折法

ブラウンホーファー回折の原理を利用して粒子群全体の代表径を求める。

(d) ホログラフィー法

レーザーの干渉性を利用する。パルスレーザーを利用すると高速計測が可能となる。この方法では、粒子の大きさと3次元位置を求めることも出来る。

(e) 相関法

浮遊する微細粒子がその径に依存した分子運動的な挙動

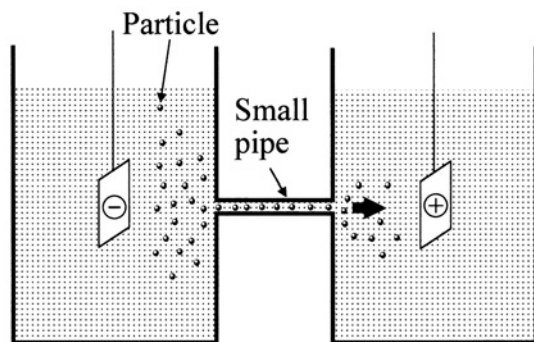


Fig.1 Schematic of Coulter counter

(ブラウン運動)を示してレーザー光を動的に散乱させる特性を利用する。

(f) 偏向比法

微粒子による散乱光強度の水平方向と垂直方向の偏向成分の比が粒子径に依存することを利用する。

(5) コールタ・カウンタ法

固体粒子の個数と大きさを同時に測定できる装置であり、広く用いられている。Fig.1に示すように、導電性の液体中にある固体粒子が細い流路を通過するとき、流路の入口と出口の間の電気抵抗が変化することに着目する。溶鋼中非金属介在物測定用の装置も市販されており、いっそうの精度の向上が計られている。測定可能な粒子径の範囲は流路径の約2%から40%程度であると言われている^{9, 19)}。

(6) シースフロー法

赤血球や白血球などの血球測定分野では、ノズル内に液体を流しておき、ノズル入口に設置した細いパイプから出口に向かって血球を含む液体を注入し、ノズル出口に取り付けた長方形断面流路を通過する赤血球や白血球にレーザー光線を照射し、その散乱光を処理することによって個数を求める(Fig.2)²²⁾。血球の種類を同定する方法も開発されている。本方法は、レーザーを用いる方法の1種ともいえるが、レーザー回折法は主として静止した粒子を対象としているのに対して、動的な測定法であるので区別した。最近では、この方法が固体粒子の測定にも利用されている。

(7) 超音波センサー

非金属介在物測定用のセンサーである。溶鋼中に分散させた微小固体粒子群に超音波を当てると粒子群の振動によって粘性消散が生じ、超音波が減衰する。この原理を用いると粒子の寸法と個数が求められる^{23, 24)}。

3.1.2 直接測定法

(1) スチールカメラ、高速度ビデオカメラ

スチールカメラと高速度ビデオカメラを用いた気泡運動の測定法については前稿⁷⁾に詳しい。その説明文中の気泡を固

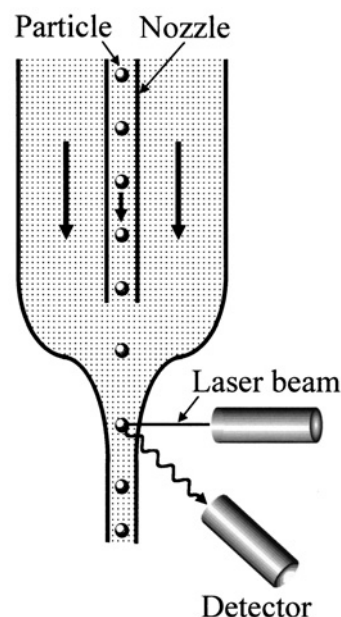


Fig.2 Sheath flow method

体粒子と置き換えるだけでよい。

(2) レーザードップラー流速計 (LDV)

LDVは透明な気体や液体の単相流の局所流速を求めるための精度のよい流速計であることはよく知られている。ただし、LDVは流体中に混入した $1\mu\text{m}$ 程度の微細な球形固体粒子(シーディング粒子)の速度を測っているのであって、流体の速度を直接測定しているのではない。シーディング粒子が十分小さくて、流体に追従して動いているとき、すなわち両者の間に相対速度がないときにのみ、流体の速度が正しく求まる。

LDVを利用すれば、固体粒子がレーザー交差部、すなわち測定体積に比べて十分小さいとき、固体粒子の移動速度そのものを求めることができる。また、データ処理に簡単な操作を施すだけで、粒子の個数の測定も可能となる。

粒子の移動速度と個数に加えて、粒子の大きさも測定できるように工夫されたのが位相ドップラー流速計である²⁵⁾。これは、単一粒子の散乱光を2箇所で測定したとき、ドップラー信号の位相のずれが粒子径に比例することを利用する。これに加えて、粒子形状も測定可能にしたのがシャドウドップラー流速計であるが、この方法には回折光強度法と投影法レーザー流速計がある。

神田ら²⁶⁾は二次元同時測定粒径弁別可能な3本ビームのLDVを用いて固気二相壁面噴流の気相と粒子の速度を測定し、乱流特性を明らかにしている。

(3) 粒子画像流速計 (PIV)

本流速計については前稿²⁷⁾で詳しく述べたが、もともと点測定ではなく、ある領域における気体や液体の流速を短時間内に測るために開発されたものであり、LDVと同様に流

体に追跡可能な微小粒子を流体中へ混入し、それらをトレーサーとして用いる。PIVによって多くの固体粒子の移動速度測定が可能である。また、粒子画像流速計の多くは粒子数を数える機能が組み込まれているので、この機能を有効に利用すれば、数多くの固体粒子の個数と各々の粒子の速度を求めることもできる。もし粒子の種類によって色が異なっておれば、適当なフィルターを使用することによって粒子の種類毎の個数や速度を求めることもそう難しくない。なお、固体粒子数が少ないときには、粒子追跡式流速計 (PTV) を用いればよい。

Song ら²⁸⁾はPIVを用いて固体粒子の個数と速度を求める方法を開発し、Fig.3に示すように空気中および水中を落下する粒子測定に適用して、単位時間当たりの落下個数を求めた。Fig.4は水中を落下する粒子の速度ベクトルを表しているが、この図から、ある高さ方向の水平断面を単位時間内に通過する粒子の個数を求めることができる。この方法は、高炉の装入物移動モデル実験だけでなく、駅や広場での人の流れや製品の移動量などの測定にも広く用いることが出来る。

(4) 遮光法

粒子が平行光線を通過すると光が遮られて受光部の光量に変化する。これを電的に検知すれば粒子の大きさと個数が求まる。粒子の性質に依存しないという長所があるが、粒子が多くて重なり合っている場合は精度が落ちる。

筆者らは、微小な固体粒子を用いて熔融亜鉛メッキ浴内のトップドロスおよびボトムドロスの動的挙動に関する水モデル実験を行った²⁹⁾。粒子の直径を一定として、液体の密度を変化させることにより、2種類のドロスの動的挙動に対する物理的モデルを構築した。このとき、銅板へのドロスの付着

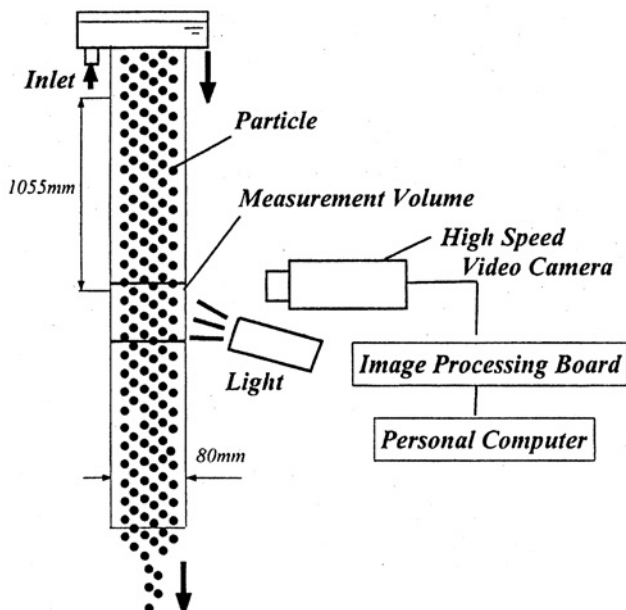


Fig.3 Experimental apparatus. Moving particles in water

状況を知るためには、浴内のある測定点を単位時間内に通過するドロスの個数が問題となるが、これを測定するために固体粒子が直径1mm程度のレーザー光線を横切るとき光量に変化する現象を利用した (Fig.5)。出力信号はFig.6のようになるが、これは電気探針の出力信号と同じである。そこで、

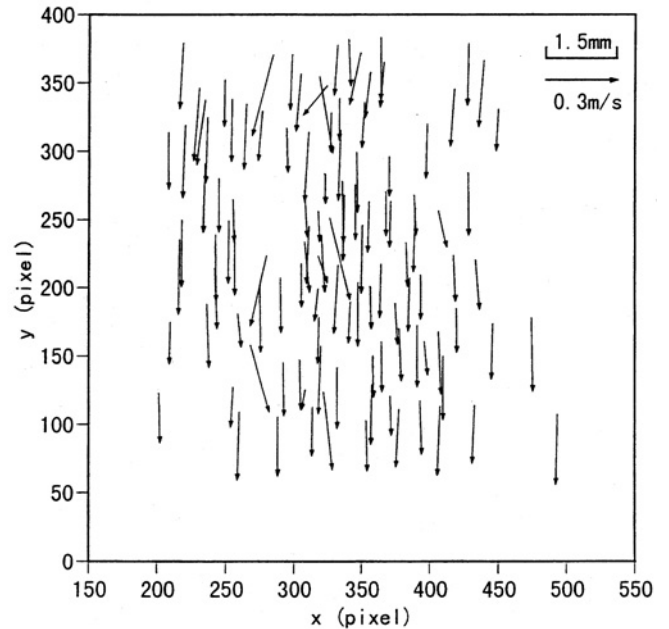


Fig.4 Velocity vector map of particles (water)

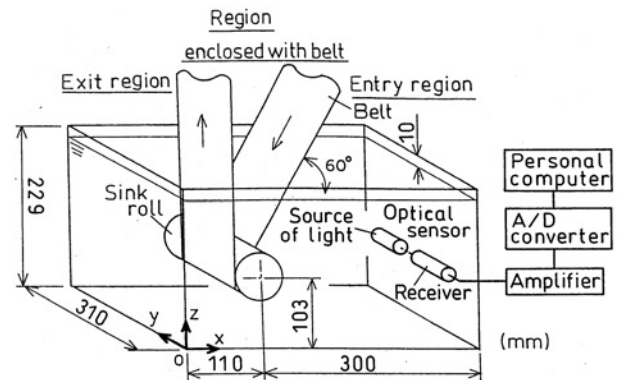


Fig.5 Schematic of a model for hot-dip plating bath

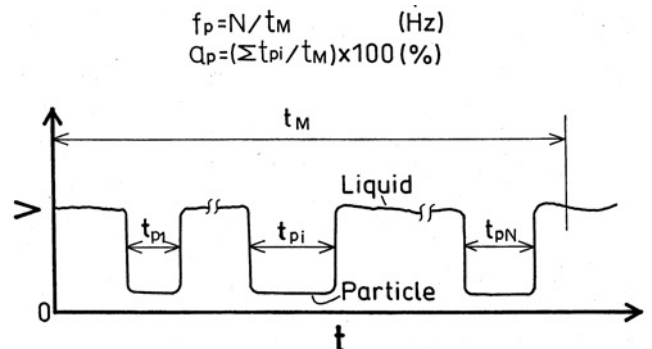


Fig.6 Output signal of optical sensor

データ処理には筆者らが前に電気短針の出力信号の処理に用いたもの⁷⁾と全く同じものを採用した。

(5) 電気プローブ

固液二相流中に挿入した2本の探針を用いて静電容量あるいは導電率を求め、これらの間の相互相関係数に基づいて粒子速度を求める^{30,31)}。

(6) 光ファイバプローブ

光ファイバーを固気、固液二相流中に挿入し、粒子表面からの反射光を用いて粒子直径を求めることができる¹⁴⁾。複数のプローブを用いれば3次元流動層内の気泡形状の測定も可能となる^{31,32)}。

(7) ECT (Electrical Capacitance Tomography)

粒子の静電容量を複数の電極を用いて測定し、それらの出力データから画像を再構築して粒子の動きを求めるのがECTである¹⁶⁾。電極数は通常6～12個であり、リアルタイムで測定可能である。

(8) MRI (Nuclear Magnetic Resonance Imaging)

原子核の核磁気共鳴を利用しており、おもに固液二相流の空隙構造の可視化や液相の流速測定に用いられる¹⁶⁾。

(9) 超音波による可視化

渡部ら³³⁾は、微細固体粒子が懸濁した水の流れを電子操作型超音波断層装置を用いて可視化し、撮影したビデオ画像をコンピューターを用いて処理し、粒子の移動速度を求めている。また、超音波の減衰を利用すると粒子濃度も求められる³⁴⁾。

(10) X線による可視化

齋藤ら³⁵⁾は流動装置のライザー内における粒子のクラスター現象をX線と高速度ビデオカメラを用いて観察した。

(11) 熱線法

定電流式の熱線流速計の原理を応用して固気二相流の気泡の存在を検知できるプローブが開発されている³¹⁾。

3.2 濃度、混合比、流量の測定

3.2.1 吐き出し濃度

測定方式は2種類に大別される。一つは固体を流体中に混入する前、あるいは分離した後に、それぞれの流量を別個に測る方式であり、直接方式と呼ばれている。他の一つは固体と流体が混り合って流れているときに両者の流量を測る方式である。この方式の特徴は、流量と関係のある物理量を測定する点にあり、間接方式と言われる^{36,37)}。

3.2.1.1 直接方式

秤量法として知られている。例えば、2膜式流量計を用いて管路出口で固液を分離し、それぞれの重量を測定すれば式(4)から重量(質量)濃度が求まる³⁸⁾。体積濃度は固体と液

体の密度が分かると重量濃度から計算できる。

3.2.1.2 間接方式

(1) 衝撃式流量計

粉粒体が検出板に衝突したときの衝撃荷重が粉粒体の流量に比例する事実を利用する。

(2) 静電方式

粒子が管壁や金属球と衝突する際の帯電現象を利用し、帯電量から粒子の流量を求める方法である^{30, 34)}。

(3) 輸送管の途中に発生する差圧の利用

直管に拡大管を接続し、空気流量は拡大管で生じる圧力差によって求め、直管部では粒子の存在による付加圧力損失が混合比に比例する事実を利用する。管路縮小型濃度計、ベンチュリ型濃度計、鉛直逆U字管濃度計などがある³⁸⁾。

3.2.2 管内濃度

締切法は簡便で精度がよい¹⁰⁾。管路のある区間を遮断弁を用いて急に閉め切ったとき、その区間に残された固体の体積とその区間の体積から管内濃度が求められる。

4 おわりに

固気、固液二相流の諸特性を測定するための計器は数多く開発されているが、高温で不透明な熔融金属を取り扱う鉄鋼プロセスでは、それらの大部分はいろいろな制約があってそのままでは適用できない。まだまだ改良、開発の余地が残されている。今後の更なる発展を切望して止まない。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 佐藤道貴: 混相流, 14 (2000) 4, 426.
- 3) 学振第19委員会, 非金属介在物小委員会: 鋼中非金属介在物研究の最近の展開, (1996)
- 4) 谷口尚司, 菊地 敦: 鉄と鋼, 78 (1992) 4, 527.
- 5) J. Szekely: Fluid Flow Phenomena in Metals Processing, Academic Press, New York, (1979)
- 6) O. J. Ilegbusi, M. Iguchi and W. Wahnsiedler: Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations, Chapman & Hall/CRC, (1999)
- 7) 井口 学: ふえらむ, 6 (2001), 793.
- 8) 森川敬信: 流体-固体二相流 空気輸送と流体輸送, 日刊工業新聞社, (1979)

- 9) 化学工学ハンドブック, 化学工学会編, 改訂第6版, 丸善, (1999), 295.
- 10) 益山 忠: 混相流, 14 (2000) 3, 263.
- 11) 富田侑嗣, 原田周作: 混相流, 14 (2000) 3, 263.
- 12) 辻 裕: 空気輸送の基礎, 養賢堂, (1984), 57.
- 13) 混相流体の力学, 日本流体力学会編, 朝倉書店, (1991), 179.
- 14) 流動層概論, 千葉忠俊, 吉田邦夫編, 朝倉書店, (1996), 1.
- 15) 坂口忠司, 細川茂雄, 大江慎一, 富山明男: 混相流シンポジウム'93, (1993), 123.
- 16) 流体実験ハンドブック, 笠木伸英ほか編, 朝倉書店, (1997), 600.
- 17) 微粒子ハンドブック, 神保元二ほか編, 朝倉書店, (1991), 142.
- 18) センサハンドブック, 片岡照栄ほか編, 培風館, (1986), 449, 477.
- 19) 粉体工学便覧, 第2版, 粉体工学会編, 日刊工業新聞, (1998), 3.
- 20) 梅景俊彦, 梶本幸司, 湯 晋一: 混相流シンポジウム'96, (1996), 235.
- 21) レーザー計測ハンドブック, レーザー計測ハンドブック編集委員会編, 丸善, (1993), 229.
- 22) K. Fujimoto: Sysmex J. International, 9 (1999) 1, 31.
- 23) T. A. Strout: Ph. D. Thesis, University of Maine, Prono, ME, (1991)
- 24) T. Matsuoka, H. Kitano, K. Yasuda, S. Koda and H. Nomura: Jpn. J. Apl. Phys., 36 (1997), 2972.
- 25) 菱田公一: 混相流, 14 (2000) 2, 1150.
- 26) 神田 基, 佐藤洋平, 菱田公一, 前田昌信: 混相流シンポジウム'95, (1995), 116.
- 27) 宋 向群, 山本富士夫, 井口 学: ふえらむ, 6 (2001) 4, 250.
- 28) X. Song, F. Yamamoto, M. Iguchi, H. Kato, Y. Murai, K. Ishii, and Y. Sasaki: ISIJ Int., 39 (1999) 5, 471.
- 29) J. Kurobe and M. Iguchi: Science and Technology for Advanced Materials, 1 (2001), 251.
- 30) 齊藤隆之: 混相流, 14 (2000) 4, 302.
- 31) 流動層概論, 千葉忠俊, 吉田邦夫編, 朝倉書店, (1996), 229.
- 32) 幡野博之, 竹内 洋: 混相流, 14 (2000) 4, 418.
- 33) 渡部敬三, 車 峰, 小久保幸栄: 混相流シンポジウム'97, (1997), 11.
- 34) 辻 裕: 空気輸送の基礎, 養賢堂, (1984), 190.
- 35) 齊藤幸司郎, 上田泰稔, 河田 裕, 渡部新吾: 混相流シンポジウム'96, (1996), 165.
- 36) 粉体工学ハンドブック, 井伊谷鋼一編, 第5版, 朝倉書店, (1970), 662.
- 37) 粉体工学便覧, 第2版, 粉体工学会編, 日刊工業新聞社, (1998), 461.
- 38) 渡部金之助: 混相流, 14 (2000) 2, 144.

(2001年5月31日受付)