

© 1992 ISIJ

論 文

水-空気系底吹き気泡噴流により攪拌される
円筒容器内流れの画像計測植村 知正*・井口 学*²・山本富士夫*³
森田善一郎*²・水越 渉*⁴Video Image Analysis of Mixing Flow in a Cylindrical Vessel Agitated by a
Bottom Blowing Bubbling JetTomomasa UEMURA, Manabu IGUCHI, Fujio YAMAMOTO,
Zen-ichiro MORITA and Wataru MIZUKOSHI

Synopsis :

The Particle Tracking Velocimetry (PTV), which is one of the quantitative flow visualization techniques, enables to measure both instantaneous velocity distributions and traveling paths of fluid elements in relation with the condition of the whole flow field. And hence the technique is believed to become a useful tool for the measurement of mixing flows.

In the present experiment, the binary correlation method, one of the PTV algorithms, is used in the measurement of the strong mixing flow in a cylindrical bath which is agitated by a bubbling jet from the bottom. The distributions of liquid phase such as instantaneous or short-time averaged velocity and those of RMS values of fluctuation are measured. Also velocities and sizes of rising bubbles are simultaneously measured.

Key words : image analysis; bubbling jet; injection metallurgy; velocity distribution; PTV.

1. 緒 言

転炉や溶融還元炉では内部にガスを吹き込み、その気泡による攪拌効果を利用して均一かつ迅速な脱炭や還元反応を行っている。これらの炉内の流動現象の研究において水モデル実験が行われる理由として、溶融金属の実験では実現しにくい計測上のいくつかの利点、すなわち流動現象を直接観察できること、常温で計測できることなどがあげられる。

底吹き気泡による攪拌の駆動力は気泡の浮力である。上昇する気泡が前方では液を押し上げ、後方では周囲の液を引き寄せている。その結果として浴内の液は気泡の上昇路に沿った上昇流と浴壁沿いの下降流による大きい循環流れに横方向の間欠的な変動流動が加わって複雑な乱流状態を呈している。さらに、ある条件下では浴内流

動の不安定に起因する上昇気泡群の旋回現象も報告されている¹⁾。

流体现象の計測に従来から利用されている点測定法(レーザー流速計, 熱線流速計, 電気探針など)は特定の点の現象の時間変化を測定するには適しているが, 物質の移動軌跡や瞬時流動パターンの計測には向いていない。これに対して, 近年発達してきた画像解析を利用した流れの計測法は流れ場全体の流動状態を把握しつつ, 瞬時の速度分布を定量的に測定することができるので, 混合流れのように非定常に変化する物理量の空間分布状態の計測に適している。しかし一方では時間的な変動や平均量の計測には大量の画像を解析する必要があるため, 現在は高速かつ自動解析の方向に開発が進められている。

流れの可視化画像から速度を定量的に計測する方法

平成元年 10 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 8 月 26 日受付 (Received Aug. 26, 1991)

* 大阪大学基礎工学部 工博 (Faculty of Engineering Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho Toyonaka 560)

*² 大阪大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University)

*³ 福井大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Fukui University)

*⁴ 住友金属工業(株)設備技術部 (Plant Engineering Department, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

がいくつか提案されているが、なかでも粒子追跡法 (PTV, Particle Tracing Velocimetry) はすでに一部では3次元の流れ計測²⁾も行われており、上述の気泡攪拌流の計測に適している。PTVは画面中の粒子(トレーサー)に着目し、この粒子が短時間後の別の画面中のどの粒子であるか(粒子の対応)を識別して粒子速度(=水の流速と見なす)を測定する方法である。短い時間間隔で撮影された画面間で粒子の同定を行ういくつかのPTVアルゴリズムが実用されているがその中でも本研究で用いた2値化相関法³⁾は局所の粒子分布パターンの類似性から粒子の対応を推定する方法であり、パーソナルコンピュータ上で高速に解析できる特徴がある。

ここでは2値化相関法によるPTVを円筒型容器内の底吹き気泡による攪拌流れの計測に適用し、瞬時速度分布、短時間平均速度分布、気泡の上昇速度、気泡分布、粒子の運動経路などの計測を試みた結果について報告する。

2. 実験装置と実験方法

2.1 水モデルの実験装置

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。内径 200 mm の透明なアクリル樹脂製の円筒容器に深さ 300 mm に塩水を満たし、底中央部に設けた内径 2 mm のノズルから空気を吹き込む。実験は空気流量 $(2\sim 30) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で行った。円筒形浴の内部を無歪みで観察するために浴全体を $280 \times 280 \times 460$ の直方体の水槽に浸け、浴の両側面から厚さ約 10 mm のスリット光で円筒軸を含む垂直面を照明する (Fig. 2)。

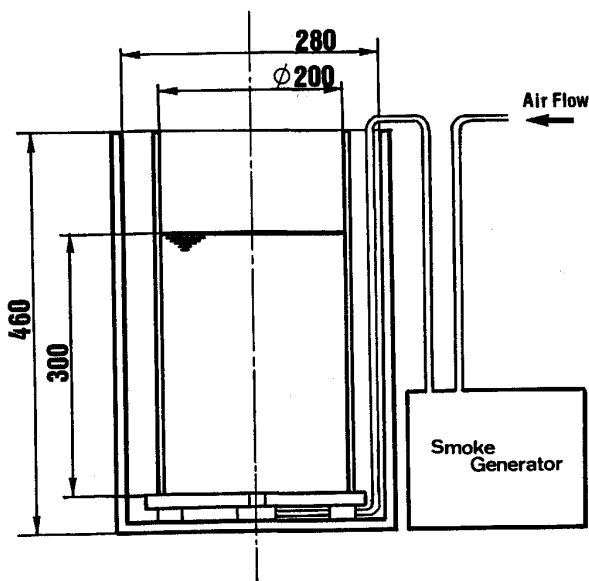


Fig. 1. Dimensions of experimental apparatus.

2.2 画像解析システム

使用した解析システムを Fig. 2 内に示す。観測面に直角な方向からシャッター機能付きの CCD カメラで流れを撮影し、ビデオタイマーで画像に ms 単位で時間を書き込み、いったん VTR に記録する。2値化相関法はパーソナルコンピュータとフレームメモリーだけの簡単なハードウェアだけで高速解析が可能である。VTR から再生された 1/60 s 間隔の画像を 16 画面連続して $256 \times 256 \times 8$ ビットのデジタル画像に変換してフレームメモリーに書き込み、適当な時間間隔の 2 画面を組み合わせ合わせて解析した。この 0.25 s 分のデータを解析して最大 15 枚の連続した瞬時の速度分布や気泡分布のデータが得られる。速度ベクトル分布 1 枚あたりの正味の解析時間は 4 s 程度である。

3. 流れの可視化と画像解析の方法

3.1 流れの可視化

流れの可視化と速度測定のためには直径約 0.9 mm の白いプラスチック球(比重約 1.05)をトレーサーとして利用し、トレーサーが中立浮遊するように食塩で水の比重を調整している。スリット光で水中の気泡を照明すると気泡は気液境界面で光を強く反射して局部的に非常に明るい光点を持った像となり、そのままでは気泡の輪郭を正確に検出できなくなる。そこで気泡の形を正確に抽出するために空気中に煙を混入して白濁した気泡を作ることによって、気泡全体が明るく見えるようにしている。さらに、明るい均一な面光源を透かして撮影すると気泡の形状が正確に認識できることが分かった。

浴全体を一度に撮影して速度分布を測定することが望

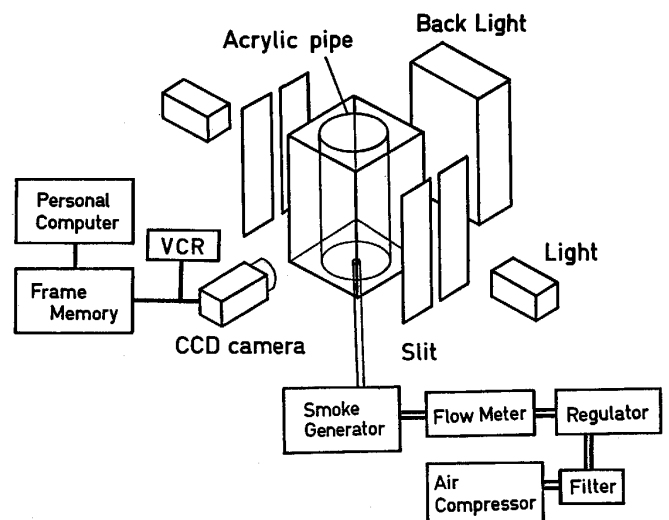
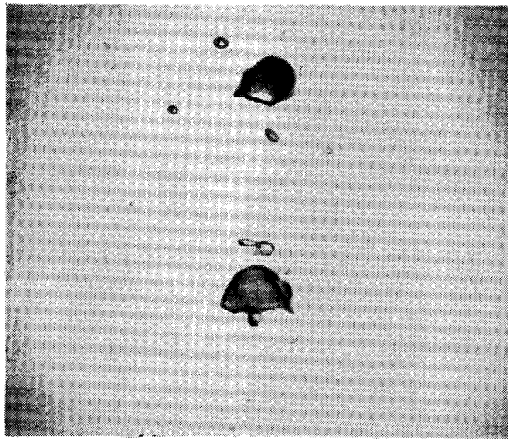


Fig. 2. Schematic display of experimental apparatus.

ましいが、画像の空間分解能の問題と高速部と低速部の同時測定は困難であることから浴内を底部、中間部、上層部と3部分に分割して撮影した。Photo. 1は上昇中の煙気泡の可視化写真である。写真中の小気泡は大気泡の分裂の際に発生したものである。

3.2 画像解析

本方法の画像解析の流れ図を Fig. 3 に示す。解析は大きく3段階に分けられる。詳細は次節で述べるが、内容を要約すればつぎのようになる。第1段階は気泡やレーザーの像を抽出する原画像の前処理の部分であり、この部分は専用のハードウェアで処理することもできる。第2段階では画像解析を行う。ここで2画面間の粒



$Q=30\text{cm}^3/\text{s}$ $h=300\text{mm}$

Photo. 1. Picture of smoke bubbles.

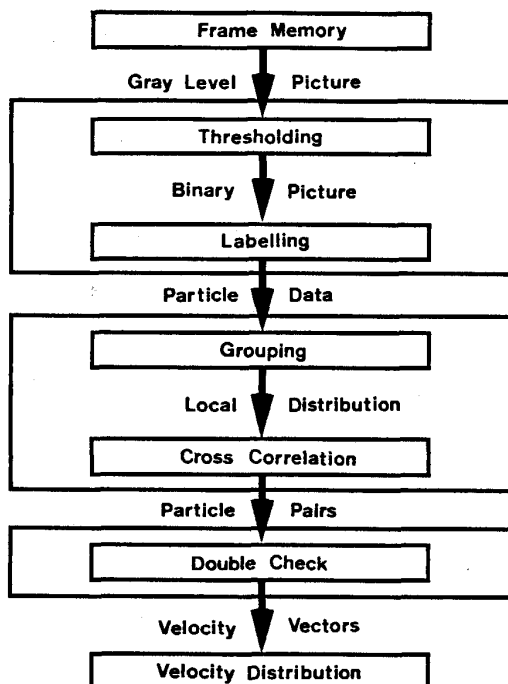


Fig. 3. Flow chart of the image analysis.

子の対応を局所的粒子分布パターンの相関係数によって判定する。この方法で推定された粒子の対応はおおむね正しいものの、普通は多少の誤判定が含まれている。そこで次の第3段階では、さきに判定された粒子の対応に検討を加えて、誤りがあれば修正可能なものは修正し、信頼性の低い対応は破棄する。

以下の項では、各段階の処理についてもう少し詳しく述べる。

3.2.1 原画像の前処理

この段階では、原画像から解析対象になる部分を切り取り、適当なしきい値を設定して2値化する。しきい値は最初にサンプル画像を用いて試行錯誤的に決定しておく。つづいて、明画素部分の連結をしらべて、粒子の面積(画素数)、上端、下端、などのデータを抽出して、ラベルを付けた後、主として面積や寸法から物体の像やノイズを判定して除去する。

3.2.2 粒子対応の判定

二つの2次元画像 k と l の濃度分布をそれぞれ $p(x, y)$ および $q(x, y)$ とし、画像 l を (a, b) だけ平行移動して画像 k に重ねた場合の相互相関係数 C_{kl} を下記のように定義する。

$$C_{kl} = \frac{\int p(x, y) \cdot q(x-a, y-b) dx dy}{\sqrt{(\int p^2(x, y) dx dy) \cdot (\int q^2(x, y) dx dy)}}$$

デジタル画像の場合は離散データなので積分が総和に置き換えられて、上式は下記のように表される。

$$C_{kl} = \frac{\sum (p_i \cdot q_{i+s})}{\sqrt{(\sum p_i^2) \cdot (\sum q_i^2)}}$$

ただし、 s は平行移動 (a, b) に相当する画素数、 Σ は画像中のすべての画素に関する総和を表す。

上式の分子は8ビットの画素値の積和であるが、2値化画像では画素値は1または0であるから、分子は論理積 $(p_i \cap q_{i+s})$ の総和に置き換えられ、分母の自乗和は値が1の画素の数に置き換えられ、次の(1)式が得られる。

$$C_k^b = \frac{\sum_i^m p_i^b \cap q_{i+s}^b}{\sqrt{m \cdot n}} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 C_k^b : k 番目の候補粒子に関する2値化画像の相互相関係数; p_i, q_{i+s} : それぞれ第1と第2の画像中の画素値(第2画面は第1画面に対して画素位置を s だけずらせている); m, n : 相関計算領域中の粒子像を形成している画像の数。

最初に、画像中の粒子を識別する標識として、個々の粒子が周辺の粒子と形成している分布パターンを抽出する。すなわち、第1画面の一つ一つの粒子を中心として

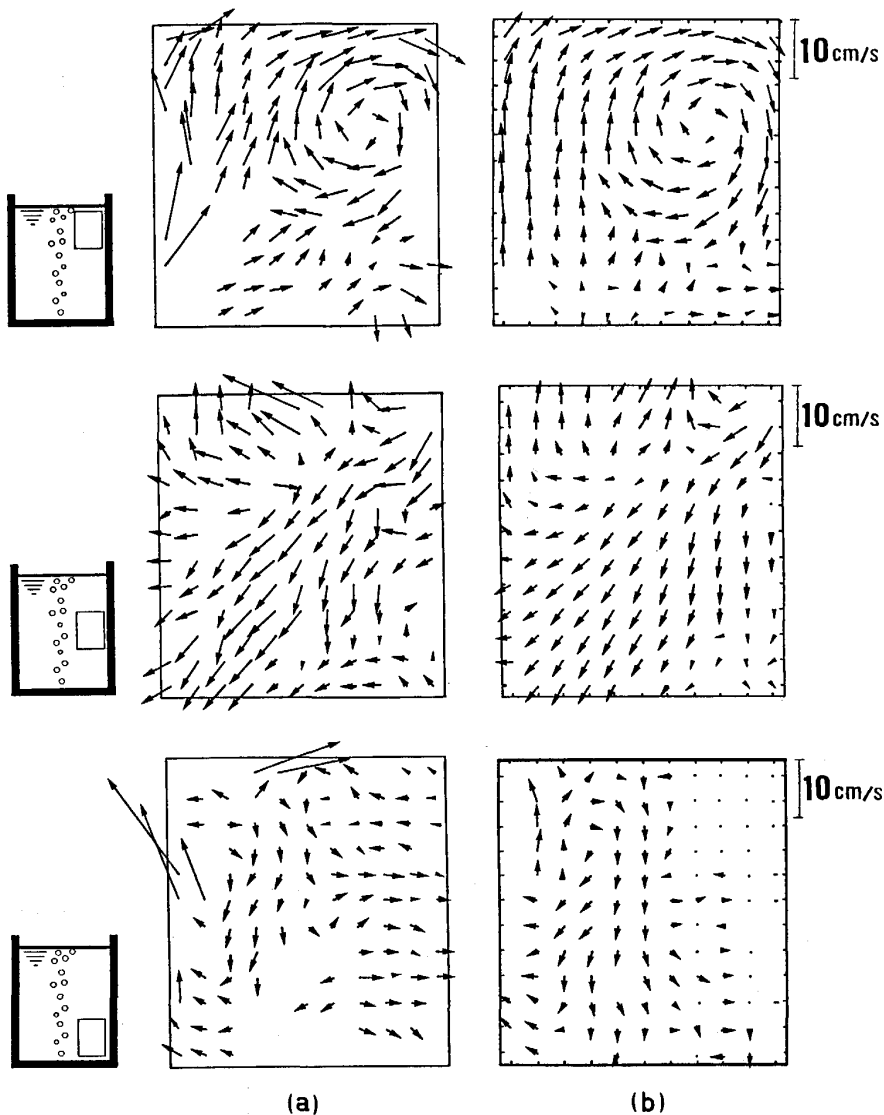
一定範囲内にある周辺粒子を選び出し粒子の分布パターンを形成する操作を行う (Grouping). つぎに第1画面の粒子の対応候補を第2画面から適当な数だけ選び出す. 候補粒子の中から対応粒子を決定するために, 第1画面の着目粒子とそのグループに属する粒子のパターンを, 着目粒子と候補粒子の重心が一致するように粒子パターンをシフトして(1)式に基づいて相関係数を計算する. すべての候補粒子について相関係数を計算して, もっとも係数の値が大きくなる候補粒子がいま着目している第1画面の粒子に対応する第2画面の粒子であると判定する.

3.2.3 粒子の対応の再検討

相関係数から決定された粒子の対応には数は多くないが, しばしば誤対応が含まれるため, 判定結果が正しいかどうか再検討する必要がある. 再検討の方法としては, 周辺の粒子の運動と比較して移動距離や運動方向の

差が大きくなければよいと判定する方法がよく採用されている. しかしながら, このような方法では近くに誤った組合せがあると, どちらが正しいか判定する根拠に乏しく, 悪くすれば間違った粒子の対応に引きずられて, かえって誤判定を増やすことになりかねない. 本論文では推定された粒子の対応を下記の概念に基づいて検討し自動的に修正している⁴⁾が, その方法については文献4)を参照されたい.

二つの粒子分布パターンを重ねた時, 粒子の組合せを考慮しないで重なり面積を評価して(1)式の相互相関係数を計算し, 相関係数が最大となる粒子分布パターンが対応していると推定した. 経験的にはこの方法で推定された粒子対応の大多数は正しい. これに対して, 再検討段階では, 前段階で推定された対応粒子同士が重なる面積分だけを有効とする相関係数(ラベル付き相関)をもう一度計算する. 粒子対応の推定の誤りの最大原因は無

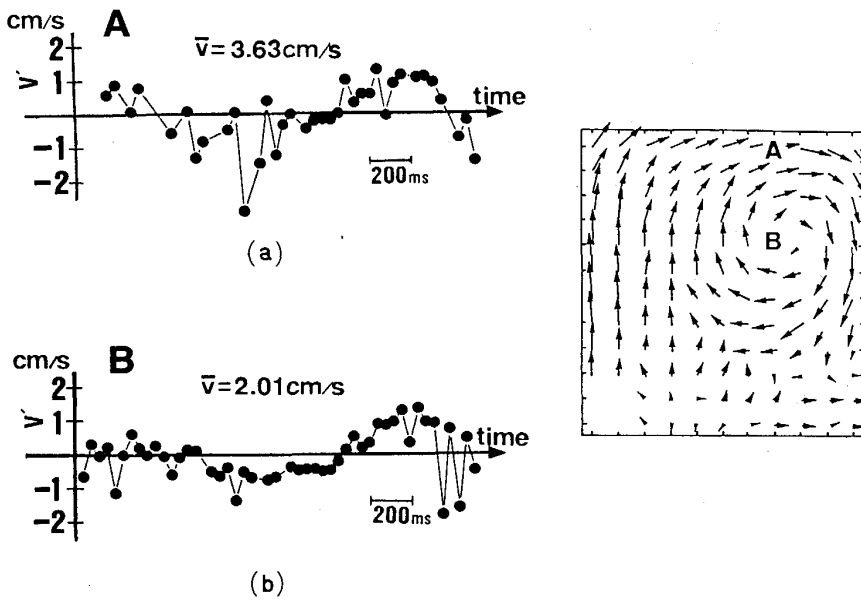


$Q=2\text{cm}^3/\text{s}$ $h=270\text{mm}$

(a) Instantaneous velocity distributions

(b) Time averaged velocity distributions

Fig. 4. Two kinds of velocity distributions measured by PTV image analysis.



$Q=2\text{cm}^3/\text{s}$ $h=270\text{mm}$ $\Delta t=1/30\text{s}$
 (a) Instantaneous velocity distributions measured from consecutive pictures taken every 1/30 seconds.
 (b) Time averaged velocity distributions obtained from 50 consecutive instantaneous velocity distributions.
 Fig. 5. Velocity distributions measured by PTV image analysis.

縁の粒子同士の偶然の重なり面積の寄与で相関係数の値が大きくなるためであるから、無関係の粒子の重なり面積を除外することによってこの種の誤りを除去できる。実際の再検討ルーチンでは誤りの検出と修正の能力を高めるために上述の方法にもう少し詳しい場合分けと検討を加えている。

経験的には、流れが層流の場合は誤対応はほぼ完全に除去される。これに対して、乱流的な流れでは速度ベクトルが周囲の流れと異なってもそれだけでは間違いとは言いきれないので、本研究では「周囲と比較して除去する」処理は採用していない。しかしそのために、物理的に考えられない高速や壁を通り抜けるような間違っただ測定値が除去されずに残っていることがある。このような速度ベクトルを発見した時は人手で除去する。

4. 実験結果と考察

4.1 流れの測定

Fig. 4(a) は噴流の片側の瞬時の速度ベクトルの測定例である。全体を一つの画像にすると空間分解能が不足するので、約 $105 \times 85 \text{ mm}$ の縦長の三つの領域に分けて測定している。Fig. 4(b) は 50 画面から計測された速度の平均速度ベクトルである。Fig. 4(b) には浴の液面の壁付近に定常的な渦の存在が認められる。Fig. 4(a) でも渦が認められるがベクトルの大きさ、方向は必ずしも整ってはいない。また、渦の下部の流れを見ると、Fig. 4(a) の瞬時速度では横方向運動が認められるが、Fig. 4(b) の時間平均速度分布では横方向成分は小さい。これは渦の下部の流れの方向は短時間で大きく変化するが、特定の方向性はないことを示している。流体の

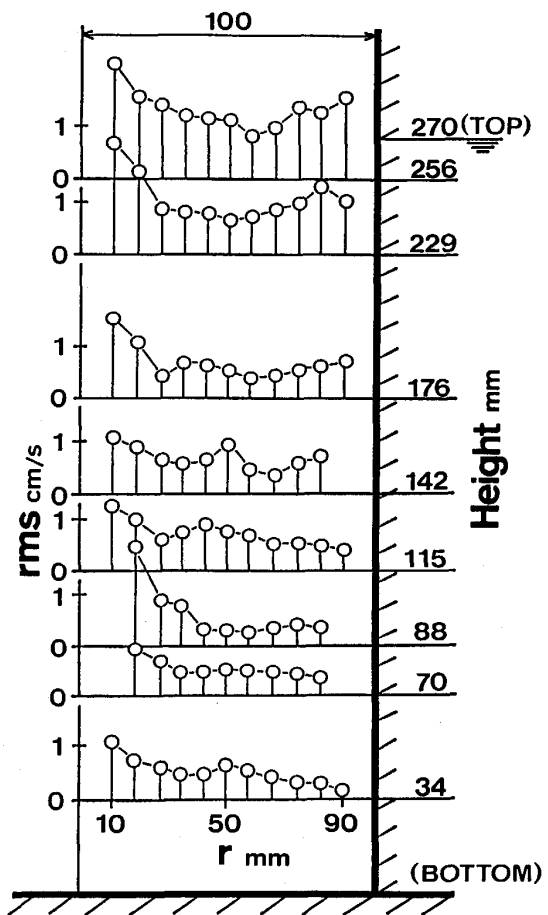


Fig. 6. Radial distributions of velocity fluctuations.

混合にはこのような非定常流動が重要な役割を果たしている。

測定された速度変動波形を Fig. 5 に示す。ここで \bar{V}

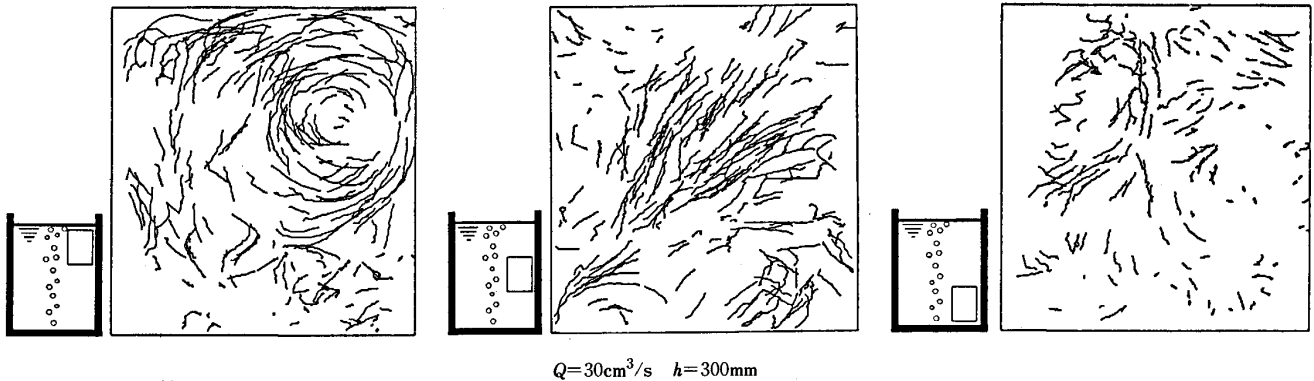


Fig. 7. Traveling paths of tracer particles.

は時間平均速度, V' は \bar{V} からの速度変動成分を表す. Fig. 5(a)は水面近傍の速度変動であり, 振幅の大きい短周期の速度変動が渦の中心部 (Fig. 5(b)) よりもひんぱんに起こっている. 一方, 渦の中心部は長周期の変動が見られるが, 短周期の変動の頻度は低い. これらの2点は同時に測定されたものであるから, 両方の点に同時に起こっている長周期の速度変動は同じ現象であることが分かる.

Fig. 6は速度変動の *rms* 値の径方向分布である. 気泡の通過する中心近傍の領域では計測できていないが, 当然予想されるように気泡がひんぱんに通過する容器中央部で最大値になる傾向を示している. 上部では浴の中心軸から離れるにしたがって変動値は低下する傾向がみられるが, 途中で最小になったあと壁方向に増加する. これは壁に沿って下降する流れの影響である. また, 浴底部の隅では速度, 速度変動ともに低い.

連続50画面から10画面以上連続して追跡できたトレーサーの流動経路を Fig. 7 に示す. 条件を満たして図に示しているのは全体の10%程度である. 残りの90%のトレーサーは10画面分の時間(約0.15s)以内にスリット光で照明された領域の外に出ていると解釈される.

4.2 気泡の運動

はじめに, 本研究の実験条件で共通して観測された気泡の挙動を述べる. 気泡の変形運動を観察すると, ノズルから吹き出される空気ははじめ横方向に広がってから上に向かって伸びてマッシュルーム状でノズルから離脱し上昇し始めると, その後方では周囲から水が突入して上昇する流れが形成されるため, つぎに出る気泡は縦長の形になる. 縦長の気泡は上昇時の抵抗が少ないのと周囲の上昇流に助けられて速く上昇する. これに対してマッシュルーム状の気泡は上昇抵抗が大きく速度が遅いので, 縦長の気泡はマッシュルーム状の気泡に追突し,

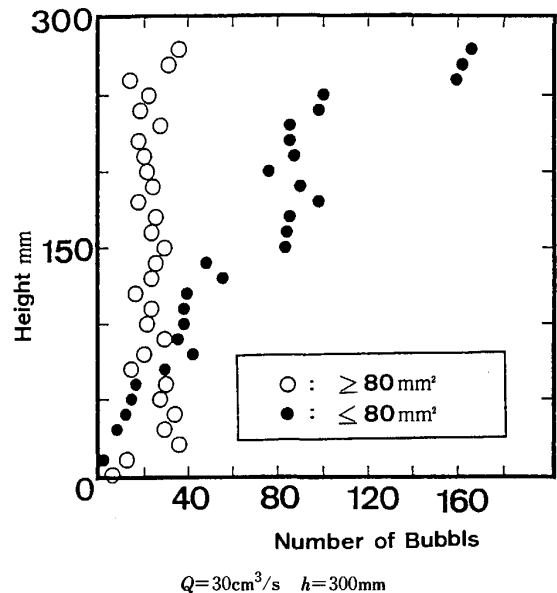


Fig. 8. Relationships between number of bubbles counted for 1/4 seconds and distance from bottom.

合体してできた気泡は大変形してつぎの瞬間には分裂しその際に小気泡が発生する. ノズル出口での突入流れが減衰すると再びマッシュルーム状の気泡が形成されて, あとは同じ経過が繰り返される. 液表面の近くでは水の上昇速度が急減し横に広がるため, 気泡は扁平になる傾向が見られる.

中間部では大気泡は先行する気泡によって引き起こされた水流の乱れに影響されて, 頻繁に変形, 分裂を繰り返しかつ水の乱流運動を引き起こしつつ上昇している.

Fig. 8は連続した16画面の画像(0.25s)から得られた深さ方向の気泡の分布である. ここでの大気泡とは変形できる寸法の気泡であり, そのような気泡は浮力が大きいので浮上過程で液を攪拌する. これに対して小気泡とは変形しない球形の気泡をいう. 大気泡は追突によってノズルから出た直後に急減するが, その後は数の

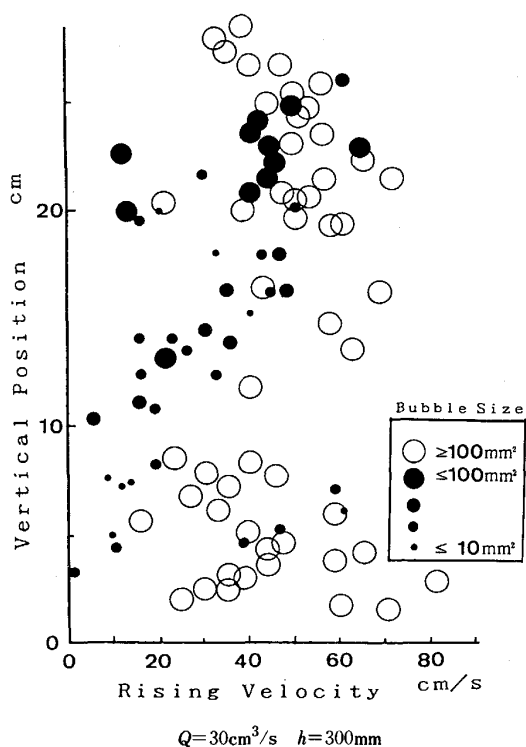


Fig. 9. Relationships between bubble sizes and rising velocities.

増減は少ない。気泡の分裂によって発生した小気泡はそれ以上分裂も合体もせず、液体の流動に乗って移動する。その数は大気泡の分裂や衝突とともに急速に増加する。

浴の中心軸近傍の気泡の上昇速度を Fig. 9 に示す。前述のように発生直後に上昇速度の遅いものはマッシュルーム形の大気泡であり、速いものは縦長である。上昇するにしたがって大気泡の速度の広がり幅は狭くなる傾向が見られる。一方、気泡は小さくなるにしたがって上昇速度は浮力よりも周囲の水の流動に支配される傾向が強くなるため、大気泡より遅くかつ速度の範囲も広い。なお、変形の大きな気泡の速度は頂上部の垂直移動速度をもって上昇速度とした。

Fig. 8, Fig. 9 の計測結果は一応の傾向を示している

もののサンプル数は十分とはいえない。今後さらに大量の画像データを処理することにより滑らかな分布図を製作する必要があるように思われる。

5. 結 言

底吹き気泡流によって攪拌される円筒形浴内の流動特性と気泡の挙動を画像解析を適用して測定し、以下のような結論を得た。

(1) 非定常性の強い浴内の瞬時速度分布を比較的短時間に測定でき、時間平均速度分布と瞬時速度分布の相違を示した。

(2) 2次元面内のトレーサーの運動軌跡を測定することによって、浴内の流動の2次元性の程度を推定できた。さらに3次元測定が可能になれば、液体の循環状態を把握できると思われる。

(3) 気泡の運動状態を観察し、上昇速度と分布を計測して気泡の寸法による挙動の違いを示した。

(4) 画像計測によって乱流の瞬時分布を計測できることが示されたが、従来の実験結果と比較するにはここで示したよりも長時間の時間平均を行う必要がある。

本研究の一部は文部省科学研究費一般研究(C)(No. 02650484)の援助を受けたことを記して謝意を表す。

記 号

C_k^b : 相互相関係数

p_i^b, q_j^b : 第1画面, 第2画面の2進画素値

m, n : 相関小領域内のトレーサー部分の画素数

h : 浴の水深 (mm)

Q : 空気流量 (cm^3/s)

文 献

- 1) 井口 学, 森田善一郎, 古賀敏之: 材料とプロセス, 3 (1990), p. 133
- 2) 西野耕一, 笠木伸英, 平田 賢, 佐田 豊: 日本機械学会論文集 B, 55 (1989), p. 404
- 3) 植村知正, 山本富士夫, 幸川光雄: 可視化情報, 10 (1990), p. 196
- 4) 植村知正, 水越 渉, 山本富士夫: 流れの可視化, 9-suppl. (1989), p. 35