流動層における粒子挙動追跡システムの構築[†]

橘川 徹・石田 愈

東京工業大学 資源化学研究所^{**}

幡野 博之

工業技術院資源環境技術研究所^{***}

層内の気泡と粒子の流動状態を明確に可視化するために奥行きが粒子1層の2次元流動層を作成した。また、高速度ビデオカメラにより、流動状態を毎秒500コマで撮影し、この画像を256階調のピクセルの画面として記録した。この画像データから一定値以上の輝度を持つピクセルをグループ化することにより粒子を識別するプログラムを開発した。このプログラムを用いて連続した画面での粒子の判別をおこなった。さらにその粒子を認識した画面で全体を等間隔なブロックで分割し、それぞれのブロックで局所の代表粒子速度を求め、それを基に粒子個々の対応付けをおこない、粒子ごとの移動速度を求めていくプログラムを開発した。このシステムを1層2次元流動層の気泡周辺での粒子挙動の解析に利用し、今回開発したシステムの有用性を確かめた。

緒 言

近年、高機能材料の開発とともに、材料である粉体の状態を任意に制御する操作が要求されている。しかし、流動層内の粒子と気泡挙動を同時に可視化して、層内の流動状態を連続的に解析した研究はこれまではプローブやビデオカメラを用いての目視に頼った観察 (Fan *et al.*, 1983) (Hatano *et al.*, 1993) (Ichikawa *et al.*, 1990) (Kimura *et al.*, 1987) によるものがほとんどであり、客観的に数値化された評価はほとんど行われていなかった。さらに、流動層内での粒子の挙動は多くのパラメーターが相互作用しており、その挙動を予測する基礎理論はいまだみつからない。

本研究では層内の気泡と粒子の流動状態を明確に可視化するために奥行きが粒子1層の流動層を作成し、高速度ビデオカメラで撮影した画像から個々の粒子を認識し、連続した画面より各粒子の挙動を計算機上で解析するシステムを開発した。それを用いて気泡周りなどでの粒子の挙動を観察し、解析を行った。このことから今回開発したシステムによって、刻々と変化する気泡や粒子の状

態を正確に画像として表現し、さらに粒子個々を判別し、その挙動を数値化して表せることを確認した。

1. 実 験

1.1 実験装置

本研究では、気泡周辺における粒子の動きを明確に可視化するために、粒子1層の奥行きしか持たない2次元流動層 (Ichikawa *et al.*, 1990) を作成した。装置及び測定装置の概略を Fig. 1 に示す。装置は高さ600 mm、幅300 mm、厚さ5 mmの2枚のガラス板に両面テープを貼り付けた厚さ1 mmの銅板をスペーサーとして挟み込んで、直径が1.18 mmの粒子1層を流動化できる奥行きを持たせるようにした。このように作成した流動層で実際に流動化する空間は、縦600 mm、横270 mm、奥行き約1.2 mmである。さらに層の下端に分散板として0.5 mmの孔を53個等間隔に開けてある2 mm厚の銅板を設置した。流動層本体の下には風箱があり、ここにコンプレッサーから空気を流し込んでいる。風箱の空気の流入口のところには装置および粒子の圧力損失を測定するためのマノメーターが取り付けられている。本実験装置では静電気対策としてスペーサーに銅板を用いてアースをとりつけ、また、コンプレッサーから送り込まれた空気には加湿器を挿入している。

[†] 1995年3月1日受理

^{**} 〒226 横浜市緑区長津田町4259

^{***} 〒305 つくば市小野川16-3

Fig. 1 Fluidized bed and video camera system

Fig. 2 Example of inputted data

1.2 測定装置

今回使用した高速度ビデオシャッターカメラは10,000分の1秒のシャッタースピードを持ち、毎秒500コマの画像を撮影しビデオディスクレコーダーに記録される。ディスクレコーダーでは毎秒60コマのスロー再生の形で連続で1,200画面録画される。これを画像処理装置を用いて画像をコンピュータで256階調の輝度のピクセルのファイルとして記録し、計算処理される。また、この他に3台のビデオシャッターカメラを用いて流動層の上半分、下半分、拡大図を撮影し、これらを特殊効果装置により1つの画面に同時に記録することにより高速度映像と各部の時間的な関係を明らかにしておく。

1.3 実験条件と方法

実験はガラスビーズ-空気系で行った。粒子としては、1.18 mmの篩に目詰まりしたガラスビーズを集め、今回作成した流動層を斜めにし、その中を滑らかに転がるものだけを使用した。実験方法としてはこのように粒度の整った平均粒径1.18 mmのガラスビーズを層高285 mmに充填し、コンプレッサーからの空気を1.54 m/s ~ 2.16 m/sの速度で送り、流動化させた。流動状態をカメラで撮影し、解析をおこなった。

2. 画像解析法

2.1 粒子判別法

本実験では撮影された画像は画像処理装置によって、470×370のピクセルがそれぞれ256階調の輝度をもった画像としてファイルに保存される。この画像データを各ピクセルの輝度の映像として扱うのではなく、粒子の画像として取り扱うためには、ある程度の明るさを持ったピクセルのグループを1つの粒子として認識しなくてはならない。本研究では1層2次元流動層を導入したことにより画面上で粒子が重なり合うことがなく、すべての粒子が球形またはそれに近い形で写っている。この特長は撮影条件の悪い時にも有効で、この特長を生かして

粒子を精度良く判別できるプログラムを開発した。

実際に撮影を行ってみて撮影された粒子を調べると、粒子1層の奥行きにしたために粒子は重なり合うことがなく、撮影条件によってその都度画像の質は異なるが大きく3種類の写り方があることがわかった。

- 1) 透過光によるレンズ効果で粒子の中心部が光ったもの
- 2) 中心が光らず回りの粒子と画像上ではつながってしまっているもの
- 3) 希薄層で粒子が光らず、画面上では非常に小さく写っているもの

今回開発したプログラムではユーザー側が設定するのは、平均粒子径と輝度のしきい値だけである。しきい値を決定する際、輝度の範囲を大きく3つのグループに分けている。第1は粒子の中心部分に対応するある一定値以上の明るさの輝度、第2は粒子の存在を示しているが中心ほど明るくない輝度、第3は背景となる一定値以下の輝度の範囲である。それぞれの輝度の境界値は撮影条件によって調整の必要があるが、本実験では255階調の輝度で撮影したうち、第1の輝度は73以上、第2は36以上、背景はそれ以下とした。プログラムは設定したしきい値を越えるピクセルが存在した場合に、そこでの粒子の存在判別及び中心座標の計算を行う。ここに例として画像データの一部をFig. 2に示す。このアルゴリズムでは、まず画面の左上から右に順次探索していき、右端まできたところで下の段の左端にもどって右に行くというようにすすんでいく。そこで、1)に分類される写り方をした粒子の中心に当たる明るい部分を発見すると、その周りを順次探索していき、中心部分に当たる輝度のピクセルが切れるまで探索範囲を広げていく。隣の粒子とつながっている場合でも、今回は粒子径が決まっているので、その粒子径以上大きくなってしまうとそこまで探索を中止する。そして、明るい輝度の部分をグループ化して粒子とし、その明るい輝度の部分の重心をその粒子

Fig. 3 Example of identified data

の中心とみなす。そして設定した粒子の大きさの範囲のピクセルの輝度を0で置き換えておく (Fig. 3(a))。こうすることで、次の粒子の探索の際に同じ粒子を探索してしまわないようにする。このようにして、まず画面全体で判別をおこなっていき、1)のケースのように粒子として判別しやすい所の処理を完了する。

次に再び画面の左上のピクセルに戻って、2)のケースである中心が光らずに写っている粒子の認識をおこなう。この場合では1)のケースのような中心にあたる輝度が見つけれないので、今度は背景の輝度と粒子の縁の輝度との境界の値をしきい値として、1)の時と同じようにピクセルを探索していく。しきい値以上のピクセルがあると、その周りのピクセルでしきい値以上のものを順次探索していく。探索はあらかじめ設定した粒子の大きさよりも1まわり大きい範囲内で、しきい値以上のピクセルが切れるところまで続ける。このように探索範囲の上限を決めることで、隣の粒子とくっついて写っている場合でも強制的にこれらを分離する。そして、今度平均粒

径の円のテンプレートを用いて、評価関数が最も高い位置を粒子の中心として認識する。その際的评价関数として、テンプレートと対応するピクセルがしきい値以上であるものの数とそれらの輝度の総和を用いた。ここで1)と同じように、設定した粒子の大きさの範囲の輝度を0で置き換えておく (Fig. 3(b))。この0で置き換えることにより、画像例で示したようなくっついて写っている粒子を切り離して判別することができる。このようにして画面全体で判別をおこなっていく。ここで、以上で認識した2種類の粒子の回りを、粒子半径の1.3倍のピクセル分の範囲で輝度を0で置き換える (Fig. 3(c))。

そして3)のように小さく写ってしまっている粒子に対して、2)のケースと同様により小さいテンプレートで同じように判別する。1)、2)の周辺を0に置き換えることにより、2つ以上の粒子がくっついて写っているためにその粒子間の光った部分が、3)の小さい粒子であると間違って認識されないようにしている。判別後の結果を Fig. 3(d)に示す。この方法の利点は、Fig. 2で示したよ

Fig. 4 Sequential picture of aggregative particles

うな粒子がくっついて写ってしまうなど撮影条件の悪い場合でも有効で、照明のあたり方のちがいによる粒子の大きさや形の多少のちがいによる判別のミスを少なくできる点である。このように粒子1層の流動層に適用することで、こちらで平均粒子径を設定するだけで撮影条件の影響の少ない粒子認識が実現できた。

2.2 粒子速度計算

本研究では、2.1で示した方法によって粒子の判別を連続した画面に対しておこない、そこからトレーサを用いることなく、粒子個々の速度計算を可能にするプログラムを開発した。

最初にそれぞれの画面を縦、横それぞれ均等に10分割し、画面全体を100個のブロックに分割した。1ブロックに入ってくる粒子数は最大で20個ほどである。そのブロック内の粒子を、中心座標のY座標が小さいものからナンバリングしていく。Y座標が同じ場合はX座標の小さいものからナンバリングする。そして次の画面の同じブロックとの比較を行い、粒子個々の移動速度計算を次のようにおこなう。

本研究では、この分割したブロックごとでの粒子の挙動を次の2つに大別している。

- 1) 集団的挙動：粒子が密集していて動きが小さく、回りの粒子とはほぼ同様の速度ベクトルで動いているもの。
- 2) 離散的挙動：特に気泡内や周辺などで粒子が比較的高速で移動し、粒子それぞれがばらばらに動いているもの。

まずユーザー側でガス流速から判断し、粒子の移動速度の概略値を設定する。ここでは例として、Fig. 4に示すような1つのブロック例を考えていく。ブロック内で次

の画面との比較をし、それぞれの粒子について移動距離から考えられる移動先の候補をすべてあげる (Fig. 5(a))。各粒子の速度ベクトルについて、このブロックの全粒子がこのベクトルで Δt 移動した後の粒子の像と $t+\Delta t$ で得られている像であると仮定し、その重なりを評価関数として、もっとも高い評価値を与えるベクトルを求めて、ブロックの代表速度とする (Fig. 5(b))。このとき、評価値が一定の基準を満たさなければ、このブロックでは2)のケースの離散的挙動を示しているとみなされ、代表速度は採用されない。1)のケースであると判断された場合には、この代表速度を基にブロック内のすべての粒子についてその代表移動速度ベクトルにもっとも近い候補をその粒子の行き先としていき、粒子個々の対応をおこなっていく (Fig. 5(c))。この時1つの候補に複数の粒子がいてしまう場合では、代表速度により近い動きをしているものを採用し、競合に負けた粒子はその次に近い候補をその粒子の移動先とする。このようにしてブロック内のすべての粒子の速度を求める。

2)のケースのブロックの例を Fig. 6に示す。この場合でも、次の画面の移動距離から考えられるすべての移動先の候補を利用する (Fig. 7(a))。この場合ブロック内では粒子が離れているケースであるので、移動した先の候補が集団的挙動を示すブロックの粒子に比べて少なく、候補が1つだけであるケースも多い。複数候補がある場合では、それぞれの粒子からいちばん距離が近い候補を選択し粒子個々の対応を行う。一つの候補に複数の粒子が選択されてしまうケースでは、候補との距離が近い方を採用していく (Fig. 7(b))。このように1対1の対応が一番成り立ったものをそのブロックでの各粒子の動きとする。実際には離散的に動いているとプログラムが判断

Fig. 5 Identification of velocities of aggregative particles

Fig. 6 Sequential pictures of independent particles

するのは、ここで挙げた Fig. 6 の例と違いブロック内の粒子が 1, 2 個の場合がほとんどであり、行き先の候補が重複したり間違えたりするケースは少ない。

このように画面全体について左上のブロックから順次計算をおこなっていき、粒子個々の移動ベクトルを求めることができる。しかし、ブロックごとに計算していく

ので、ブロックの代表速度が間違えて算出されると粒子の挙動の解析結果は現実の挙動と異なってしまう。特に、気泡の会合などでは会合界面で粒子の移動速度が大きいので設定移動距離も大きくなり、粒子が密に存在しているブロックでもその設定された移動距離で判断すると間違ってしまう場合がある。その対策として各ブロックの

Fig. 7 Identification of velocities of independent particles

Fig. 8 Relationship between bubble diameter and rising velocity

粒子密度にそのブロックの設定移動速度が反比例して設定するようにし、操作側は考えられる最大の速度を設定するようにしてある。またさらに、画面外に粒子がでていってしまうケースでも判断ミスをしてしまう可能性がある。この対策としては実際に撮影し、粒子の存在認識をした画面範囲よりも速度計算をする範囲を1周り小さい画面範囲で計算をおこなっている。このことで出ていく粒子がいったん1周りはずれた所に存在し、それを認識することでプログラムはその粒子が移動速度の計算をする範囲からはずれてしまったと判断でき、その粒子の追跡をやめることができる。それでもブロックの代表速度が間違っている場合にはそのブロックの境界付近で隣のブロックの粒子と競合し、1つの候補を複数の粒子で選んでしまう。このように競合した場合ではそのブロックの代表速度により近い方を優先させ、競合に負けてし

Fig. 9 Void fraction around a bubble

まい移動先がなくなった粒子の存在するブロックは代表速度が間違っている場合であると判断され、そのブロックの代表速度を計算し直して再び対応をおこなうことで

Fig. 10 Behavior of particles around a bubble

補正を行う。前の時間の速度を参考にブロックの代表速度を求めるといった方法もあったのだが、1度間違えてしまうとその後数画面に影響が出てしまうので本研究では連続する2画面からのみ判断している。このように間違えてしまう場合の対策をおこなった結果、間違えて判断される場合は5,6画面中に1,2ブロックほどで済んでいる。

今回の計算では、測定装置である高速度ビデオカメラで撮影を行うと毎秒500コマで撮影され粒子の移動距離は非常に小さいので、この方法により次の候補を比較的容易に見つけることができる。このようにしてトレーサを用いずに粒子個々の動きを判断できるようになった。

なお、本研究では奥行きが一層の特殊な流動層の粒子挙動について本アルゴリズムの適用をおこなった。奥行が多層の場合や3次元流動層の場合についても、各画面での粒子の認識及び座標がわかれば基本的には同様な方法で各粒子の移動速度を計算することが可能である。しかし、多層となった場合、均一系粒子であっても観察断面上でみられる粒子径には分布が生じてくる点を考慮しなければならない。

3. 結果及び考察

3.1 実験装置の流動特性について

本実験で作成した1層2次元流動層は、従来の2次元流動層と違い、粒子1層の奥行きしか持たないので、壁面の影響を強く受けることが予想される。そのため、一般の流動層で現れる気泡とこの装置で生成した気泡の流動特性とどの程度異なっているか検証する必要がある。

測定した気泡径と気泡上昇速度との関係を Fig. 8 に示す。一般に気泡径 D_b と気泡上昇速度 U_b との間には次の式が成り立つ。

$$U_b = K_b (g \cdot D_b)^{1/2}$$

ただし、 g は重力加速度であり、Pyle-Harrison と Layser は、2次元気泡に対して $K_b = 0.48$ 、2次元スラグに対して $K_b = 0.23$ としている。

今回実験した気泡径と気泡上昇速度をみると、この $K_b = 0.23 \sim 0.48$ の間に入っている。これより、本実験で発生する気泡はスラグがかった2次元気泡といえた。

3.2 気泡周辺での面積率分布

2.1 で粒子の識別及び中心座標の算出が可能となった

Fig. 11 Particle movement around coalescing buubbles

ので、ブロックごとの局所の空間率を求めることが可能となった。Fig. 9 に各ブロックの空間率とそのときの粒子の位置を示す。この例では単一気泡周辺の空間率分布であるが、気泡よりも上方の部分で空間率が低いことからこの粒子群に何らかの抑止力がはたっていることがわかる。また、右側の空間率が高いことから気泡内のガスが右側に抜けていってしまうことが読みとれる。下の 0.028 s 後の画面から確かに気泡内のガスが右側に抜けていってしまい、気泡がつぶれていくのがわかる。このように粒子認識が可能となったために局所の空間率が求められるようになり、気泡や粒子の挙動と空間率との関係を観察できるようになった。

3.3 粒子挙動

2.2 で述べた粒子の認識及び粒子の移動速度算出法を利用して、作成した 1 層 2 次元流動層での粒子の動きを観察し、各時間での粒子個々の速度及び方向をベクトルとして表した。Fig. 10 に各時間での気泡周辺での粒子の挙動を示す。計算は 0.002 s 間の移動距離を算出し、図では 1 つの画面が 0.004 s 間の動きを示す。0.002 s 後の行き先ごとに移動線上に節をつけて移動の方向を示す。こ

こでは流速は $U_0=1.91$ m/s である。気泡上昇速度は 0.28 m/s である。このとき気泡周辺の各粒子の速度が算出されている。たとえば気泡の上方に存在する粒子群は、0.13 m/s 前後で気泡を中心に放射状に上方に移動している。また、気泡の界面の粒子は 0.25 m/s 前後で気泡の界面にそって回り込むように落下している。また、気泡内の粒子は 0.08 m/s 前後でゆっくりと落下している。さらに気泡のウェーク粒子が 0.34 m/s で上昇してきている。これは気泡上昇速度よりも大きい速度で運動しているが、これはこの後下方から気泡が会合してきてこのウェーク粒子が会合面になるために、このように気泡上昇速度よりも粒子上昇の速度が大きいということが説明できる。

つぎに Fig. 11 では気泡会合の時の粒子の動きを示しているが、このとき流速は $U_0=1.79$ m/s である。ここでは後方にあった気泡が前方の気泡に吸い込まれていく様子が観察できる。このとき、後ろから会合してくる気泡は左斜めに上昇しているが、移動速度は増加していき、0.012 s から 0.028 s で 0.48 m/s で移動し、0.048 s から 0.064 s では 0.88 m/s にまで速度が増加していく。この

時合面の粒子群は 0.30 m/s から 0.48 m/s に速度が上昇し、会合面から上方に放射状に前の気泡に吸い込まれるように運動している。つまり、気泡上昇速度が粒子の移動速度よりも大きい現象が起きている。これは、粒子が会合面から放射状に運動していくことにより気泡の通り道ができたことで加速し、粒子速度以上の動きをしたと思われる。また、会合した気泡のウェーク粒子が観察でき、気泡の上昇する方向と同じ方向に運動し、0.45 m/s で運動していることが観察された。

結 言

粒子群と気流の相互干渉を測定する手段として 1 層流動層を用いて、粒子の挙動を 500 コマ/秒で撮影し次の結論を得た。

1) 1 層流動層について、粒子の選別方法、静電気対策に工夫をした結果、良好な流動化状態を作り出すことができ、流動層内の気泡と粒子挙動の明確な可視化が可能となった。

2) 500 コマ/秒の高速度ビデオカメラの利用によって、粒子速度が大幅に変わっている系での解析が可能になった。

3) 個々の粒子の運動を個別に追跡するデータ処理技術を開発した。そのためにまず、条件の悪い撮影でも計

算機上で粒子の自動的な判別が可能な画像処理プログラムを開発し、連続する画面から個々の粒子の速度成分を検出するプログラムを作成した。

4) 特に気泡周辺での粒子個々の動きの観察を行い、本実験法の有用性を確認した。

Literature cited

- Fan, L. S., K. Tsuchiya and T. Miyahara: "Visualization of Bubble-wake Interactions for a Stream of Bubbles in a Two-dimensional Liquid-solid Fluidized Bed," *Fluidization Science and Technology*, p. 204, Science Press (1988)
- Hatano, H., S. Matsuda, S. Ueyama, H. Takeuchi and A. T. Pyatenko: "Behavior of Dispersed Solid Particles and Particle Groups in a Circulating Fluidized Bed," Preprint of The 27th of Autumn Meeting of The Soc. Chem. Eng. Jpn., p. 106 (1993)
- Ichikawa, Y., H. Hatano, C. Kuroda and M. Ishida: "Simultaneous Measurement of Bubbles and Solid Particles in a Gas-solid Fluidized Bed," *Kagakukougaku Ronbunshu*, 5, 17, p. 1062-1065 (1990)
- Kimura, I., T. Takamori and T. Inoue: "Image Processing Instrumentation of Flow Velocity Vector Distribution by Using Correlation Technique.-Application to Vortices in the Wake of a Circular Cylinder-," *Keisoku Jidou Seigyo Gakkai Ronbunshu*, 23, 101 (1987)

A System to Trace Individual Solid Particles in a Fluidized Bed

Tetsu Kitsukawa and Masaru Ishida

Research Laboratory of Resources Utilization, Tokyo Institute of Technology,
Yokohama 226

Hiroyuki Hatano

National Institute of Resources and Environment

Key Words: Fluidized Bed, Video Camera, Image Processing, Solid Movement,
Void Distribution

A monolayer-particle fluidized bed is constructed to elucidate the behavior of particles. By using a high-speed video camera, observation and recording of the movement of particles, especially around bubbles were performed. The pictures were saved as data files in a personal computer by applying an image analyzer.

Data files consist of 470×370 pixels having 256 grades of brightness for each pixel. Then a program that recognizes each individual particle and searches for its loci from the consequential data files is made by tracing pixels with brightness higher than a certain threshold value. Also, a program for calculating the velocity of each particle is developed. In this program, each picture is divided into 100 blocks and a typical velocity of the particles in the block is calculated by comparing it with that in the next picture. By this typical velocity of the block, each particle can find the position in the next picture. In this manner, the velocity of each particle can be calculated.

The characteristic feature of this system is to be able to trace all the particles continuously without any tracer particle. The applicability of this system to trace the complex behavior of particles around a bubble confirms its effectiveness.

~~~~~