

二成分系流動層内の気泡と粗大粒子挙動の可視化

著者	梅川 尚嗣, 小野寺 俊和, 小澤 守, 竹中 信幸
雑誌名	混相流
巻	14
号	4
ページ	451-465
発行年	2000-12-15
その他のタイトル	Visualization of Bubble and Large Particle Movements in a Fluidized-Bed of Binary Mixture of Particles
URL	http://hdl.handle.net/10112/4940

二成分系流動層内の気泡と粗大粒子挙動の可視化*

Visualization of Bubble and Large Particle Movements
in a Fluidized-Bed of Binary Mixture of Particles梅川 尚嗣**
H. Umekawa小野寺 俊和**
T. Onodera小澤 守**
M. Ozawa竹中 信幸***
N. Takenaka

Abstract Fluidized-bed combustion systems are composed of many kinds of particles with a variety of sizes, e.g. coal, sand, RDF, limestone etc. In such a binary system of particles, the segregation, if occurs, may harm the combustion, mixing and heat transfer in the bed, depending on the particle movement. The particle movement or circulation in the fluidized-bed depends on many factors, such as the density ratio, size ratio, shape of particle, fluidization velocity. Owing to the difficulty of flow visualization, such particle movement has not been fully understood so far. This paper describes large-particle movement obtained by the flow visualization using neutron radiography. Tracer particles mixed into the fluidized particles indicated clearly bubbles and the cloud behavior around the bubble. Image processing, i.e. PIV and PTV, gives rather clear understanding on the interaction between the large particle, emulsion and/or cloud behavior in the bed.

Keywords: Fluidized-Bed, Flow Pattern, Segregation, Neutron Radiography, Bubble, Image Processing

1. 緒言

流動層は、良好な攪拌性のゆえに高効率・高性能の反応器として、多くの工業機器で利用されている。石炭や固形廃棄物、RDF(Refuse Derived Fuel)などを燃料とする気泡流動層ボイラを例にとりて考えると、流動層内には層を形成するための流動化粒子に加え、上記の燃料、灰、脱硫材など種々の粒子が混在することとなる。このような多成分(Binary system of particlesを含む)からなる層で流動化を行うと、運転条件によってはセグレーション(偏析挙動)を示すことがある[1]。またセグレーションを起こさないとし、良好な燃焼状態や脱硫性能を確保する上でも、層内における粗大粒子を含めた全体的な循環特性に関する知見は、装置の設計、ス

ケールアップにおいて非常に重要なベースとなる。

流動層においては、固体粒子に作用する重力と気相による抗力とのダイナミックな相互作用が流動化粒子の基本的な駆動要因である。しかしこれらが多数集まって集団的な運動をするときには、明確な界面を有する気液二相流におけるものとは異なるが、同様な気泡(固体粒子の濃度がかなり小さい空隙)が重要な役割を果たすのは周知の事実である。つまり気相は気泡周辺の粒子間隙をすり抜けつつ、同時に大きな塊となって、周囲に対してあたかも浮力や界面張力を持つかのような挙動を示している。流動層における気泡の形成は例えば Tsuji ら [2], Mikami ら [3], Degang Rong [4] の DEM(Discrete Element Method)シミュレーション結果に

* 2000. 4.20 受付

** 関西大学工学部機械システム工学科 〒564-8680 吹田市山手町3-3-35
TEL (06)6368-1121 FAX (06)6388-8785

*** 神戸大学工学部機械工学科

見るように、素過程として粒子間の衝突のみを組み込むことによって気泡形成が認められている。このことから流動層における気泡は気液二相流における気泡とは機構的に異なることが分かるが、現状ではDEMを用いて大規模な装置のシミュレーションは困難で、気液二相流と同様な2流体モデルによるのが効果的であろう。この場合には気液二相流の気泡に働く抗力の計測や、気泡挙動にとって重要なウェークの測定は、ここで対象とした固気系流動層においてもやはり重要で、例えばRoweら[5]によって明らかにされたような気泡周りの流れ場が注目されてきた所以である。多成分系流動層においても同様で、気泡の挙動に伴う大小さまざまな粒子の挙動をどのようにモデル化するかはDEMの検証に使えるだけでなく、また2流体モデルなどの連続体近似モデルの構成式を定式化する際にも重要になってくる。

偏析に関するいくつかのレビュー[1, 6-8]にもあるように、大粒子の周りに小粒子が十分に存在できる場合には小粒子側は連続体とみなせ、大粒子にかかる力は基本的には浮力、重力、抗力を考えればよいとされている。つまり、連続媒質中の固体粒子と同様の扱いの可能性が示唆されているが、実際には本研究で示すように粗大粒子の動きは複雑な流動化粒子の挙動に大きく影響され予測は困難と思われる。このような粒径比の大きな場合に対しては、依然として実験的研究が重要である。粗大粒子の挙動を観察することを目的として、従来から例えば小屋[9]、Nienow [10]、Pruden [11]、Keillor [12]、Rios [13]などによって誘導起電力、X線、RITレーサー、二次元流動層などさまざまな手法を用いた実験が報告されている。上記のような流れの機構を観察する場合、対象は流動層内に形成された気泡であり、また流動化粒子からなるエマルジョン相やクラウド相、およびそれらに影響される粗大粒子である。宮本ら[14]のような光ファイバプローブを用いれば個々の流動化粒子の挙動は計測できても、粗大粒子の動きには不向きであろう。その点、最も可能性の高いのはX線(X線ラジオグラフィ)であるが、X線の減衰が質量数に大きく依存することから、流動化粒子もしくは注目する大粒子として何を用いればコントラストのよい画像が得られるかという点において制約が厳しい。従って従来、代表的にはRoweらによって多くの研究成果[5,15-17]が報告されているが、実際のところ、気泡周りの速度場の定量計測はほとんど存在しない。また粗大粒子、流動化粒子、および気泡の挙動をあわせて観察した例はほとんどない。

それに対して、著者らはこれまで固気系流動層の可視化に対して中性子ラジオグラフィの利用が極めて有

効であることを示すとともに、流動層熱交換器の伝熱・流動特性を空隙率変動ならびにフローパタンなどのマクロな視点に基づいて検討してきた[18-25]。粗大粒子の挙動に関わるものとして、流動化粒子の平均径 $82/218\ \mu\text{m}$ の珪砂からなる流動層内に直径 $20\text{-}44\text{mm}$ の球を投入し、抗力の評価方法について検討を行うとともに、中性子ラジオグラフィによる可視化結果についての報告を行った[18]。中性子(熱中性子ラジオグラフィ)では、中性子の減衰が質量数というよりは物質そのものに依存していることから、流動化粒子を中性子に対して適当に色づけることによって、画像処理にも適した明瞭な連続画像を得ることができる。流動化粒子に気泡に相対的にコントラストをつけること、また適当な大きさのトレーサ粒子を添加することによって気液系の気泡ウェーク計測[26,27]と同様に、気泡周辺の世界計測もでき、さらには粗大粒子そのものの動きも観察できる。

本研究ではこのような中性子ラジオグラフィを用いて流動層の可視化を行い、気泡周りの流動層流動化粒子の挙動と粗大粒子の挙動の関係を明確にすることを目的とした実験を行ったのでここに報告する。

2. 実験目的ならびに装置・方法

実験は単一気泡による流動化粒子挙動の解明と気泡流動層内流動化粒子挙動の解明を目的とした二種類に大別される。従来から気泡流動層中の特性値である気泡の上昇速度の測定や気泡周りの流動化粒子の動きについての定性的な観測は行なわれている[28,29]ものの、実際の流動化粒子あるいはエマルジョンの速度の定量的な測定はほとんど行なわれていないこと、そしてそのために粗大粒子が気泡の運動によってどのような影響を受けるのか、定量的な計測データはほとんど得られていなかった。前者はこれらの問題点に対する一つの実証データを与えるものである。また前者の実験を実際の気泡流動層中での粗大粒子の運動にまで拡大して、その粒子の速度変動や姿勢の変化を調べたのが後者の実験である。いずれにしても従来、定性的にしろ、全く分からなかった問題である。

いずれの場合にも実験装置は同じで、Fig.1にその全体を、またFig.2にテストセクションである流動層を示す。これらは基本的に既報[24, 25]で用いたのと同様に幅 300mm 、高さ 700mm 、奥行き 100mm のアルミニウム製矩形容器内である。流動化粒子として珪砂(SiO_2 : 99.7%、体面積平均径 $d_p=218\ \mu\text{m}$ 、密度 $\rho_p=2555\ \text{kg/m}^3$)を充填したものをを用いた。流動化粒子の粒子径分布

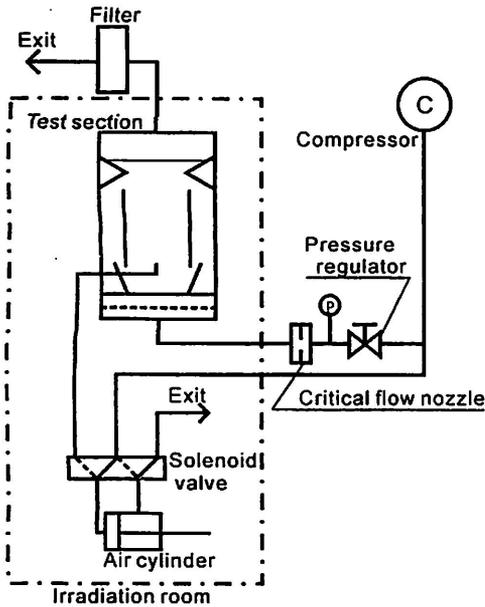


Fig.1 Experimental setup.

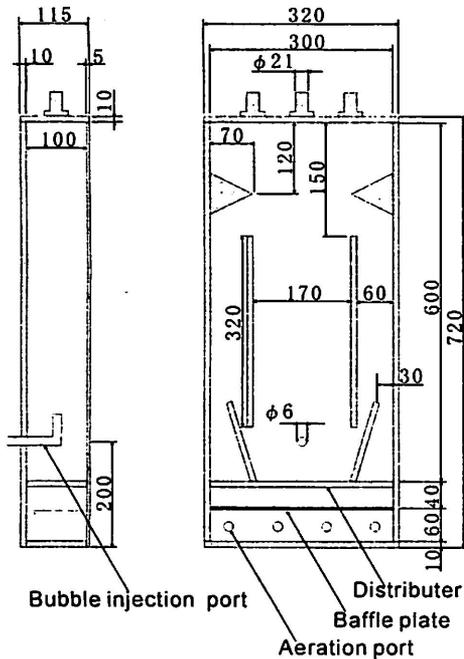


Fig.2 Test section.

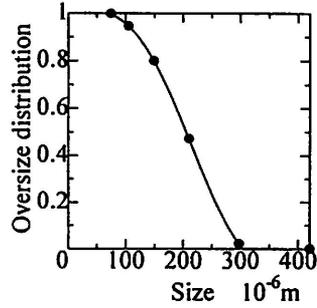


Fig.3 Oversize distribution of sand.

をFig.3に示す。粒子の平均径から判断して、ここで用いた粒子はGeldartマップによるA粒子とB粒子の境界付近に位置付けられ、流動化しやすい粒子として分類されるものである。なおテストセクションの中央部には170 mmの間隔で2枚のスペーサが取り付けられている。今回の気泡挙動や粗大粒子挙動の観察はこの170 mmの中央部分である。スペーサの両外側の狭い部分は流動化粒子を底部から上部に持ち上げるためのリフトチャンネル[25]で、今回の実験では対象とはしていない。これと同様リフトチャンネルの上部に3角形状のガイド板が取り付けられているが、これも今回の実験には関与しない。

流動化粒子は、コンプレッサからの空気を臨界ノズルと圧力調整バルブによって所定の流量に設定してバブル板、分散板を通じて流動層下部から吹き込むことによって流動化される。本実験においては、流動化粒子のみを充填した状態の静止層高は350mmで、そのときの流動化開始速度は $J_{gmf}=0.031\text{m/s}$ 、そのときの空隙率は $\varepsilon_m=0.38$ であった。

テストセクションを構成するアルミニウム板材ならびに流動化粒子として用いた珪砂は中性子に対してほぼ透明である。そこで気泡挙動をより明瞭に可視化するために、流動化粒子に用いたものと同じの珪砂に CdSO_4 水溶液でコーティングを施したものを0.36wt%の割合で流動化粒子に混入することで中性子に対する色付けを行った。さらに流動化粒子挙動の観察を容易にするために、 B_4C と粘土を7:3の割合で混合して作成した約2mm径のトレーサ粒子を流動化粒子に混入した。このトレーサ粒子の直径は可視化映像の解像度(約0.5mm/ピクセル)との兼ね合いで決定したものであるが、流動化粒子である珪砂と比較するとかなり大きな径を有することとなる。小澤ら[18]は流動層中に固定された粗大粒子に作

用する抗力をロードセルによって測定し、連続媒質中の固体球を仮定して、抗力係数がストークスの式で表されるためには粗大粒子径が38 mmでは流動化開始状態の近傍では15 Pas程度のかなりおおきな見かけ粘度ことになることを報告した。今回の実験範囲も既報とほぼ同様であり、またKaiら[30]やSchuegel[29]によれば見かけ粘度の値は水と同オーダーから1 Pa·s程度であることが報告されている。見かけ粘度についてはその測定の仕方によって値が異なり、断定的なことはいえないが、連続体で言えばストークス域にあるとみなしても差し支えないと思われる。したがってトレーサの追従性については本研究の目的に対しては問題がないものとした。なおここでいう追従性は流動化粒子とガスからなるいわゆるエマルジョン相あるいは気泡周りでいえばクラウド層に属する粒子群に対する追従性であって、可視化映像で視認できる流動化粒子群の濃度パターンの挙動とそれに乗ったトレーサ粒子の挙動を比較することで、定性的ではあるが確認している。このことはトレーサ粒子の動きが流動層を構成するDEMシミュレーションで明らかにされるような、粒子間の衝突によってマイクロなスケールで大きく変動する個々の粒子の動きには必ずしも対応していないことを意味している。つまりトレーサ粒子の運動はエマルジョン相の挙動を代表するとみなすのが合理的であり、気泡や粗大粒子に対応する空間スケールに直接対応するものである。

前述の二種類の実験方法についての概略をそれぞれ以下に説明する。

第一番目の実験では、前述のように気泡、流動化粒子ならびに粗大粒子挙動の関係を把握することを目的とした可視化を行った。ここでは外径38mmのスチロール球の内部に流動化粒子等を充填することで密度を流動層のバルク密度にほぼ等しい1500kg/m³に調整して粗大粒子として使用した。実験では、数個の粗大粒子と、前述のような色づけ処理を施した流動化粒子粒子を予め混合した流動層を上記の流動化開始速度のもとで流動化させておく。この状態でエアシリンダと電磁バルブを用いて約160cm³の空気を流動層中央部から急速に注入することで単一気泡を作成した。つまり複数の気泡間の影響が発生しないという点では現実の流動層内部の状態とは異なるが、気泡、流動化粒子ならびに粗大粒子間の挙動を詳細に観察することを念頭においた実験となっている。

第二番目の実験では第一番目の実験と同一の流動層を $J_g/J_{gmf}=2, 4$ で実際に流動化させた状態で可視化を行った。ここで J_g は流動化空気容積流束(流動層の

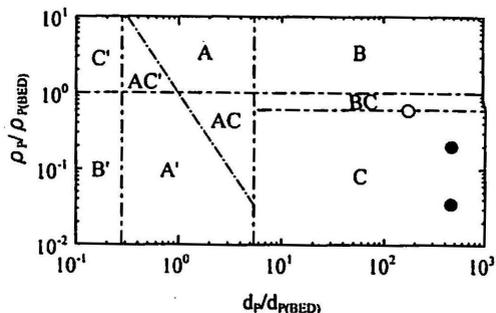


Fig. 4 Segregation map [31], open circle: present experiment and solid circle: Ozawa et al.[18].

分野では空塔速度と呼ばれているが、混相流分野で汎用されている用語を用いる)である。粗大粒子の運動はここで得られる2次元空間(画像)において水平、垂直方向の並進運動のほかに回転運動も考えられる。並進運動は粗大粒子の重心位置の計測で求まるが、回転に関しては別途、角度を決定できる手段が必要である。そこで前述のスチロール球の内部にカドミウムの棒を挿入することで粗大粒子の回転が容易にわかるように工夫している。つまりカドミウムは中性子に対して不透明であり、2-3画素程度の太さであれば可視化画像から容易にその傾き角度を求めることができる。

また実験においては、粗大粒子として球形粒子の他に、密度をほぼ1500kg/m³に調整した直径31mm、長さ52mm(相当直径42mm)の円筒形樹脂容器(フィルムケース)にカドミウムの棒を挿入した粒子も使用した。これによって粗大粒子そのものの形状によって粗大粒子の運動は周囲の流れ場からどのような制約を受けるのかをある程度把握することができると考えた。

これらの粗大粒子と流動化粒子の関係をHorioら[31]のセグレーションマップ上にプロットしたものがFig.4の中空プロットである。ここで、まずセグレーションマップの各領域の境界、ならびに特性について簡単に触れて置く。Horioらは領域を密度比(BCとCの境界は空隙率を考慮して流動化粒子のバルク密度に基づいたもの)、粒径比(大粒子の周辺に小粒子が充分に存在できるかどうかの境界を幾何学的に設定)、流動化速度(同程度の粒径を有する領域で、2粒子が同じ流動化開始速度をとる条件を設定)に基づいて区分した。各領域は下記のように特性づけられている。

- A, A' 重い粒子がフィルム状もしくは塊となって沈降する領域。
- B 大きい粒子が連続的に沈降する領域
- B', C' 細かい粒子が流動化粒子の隙間を移

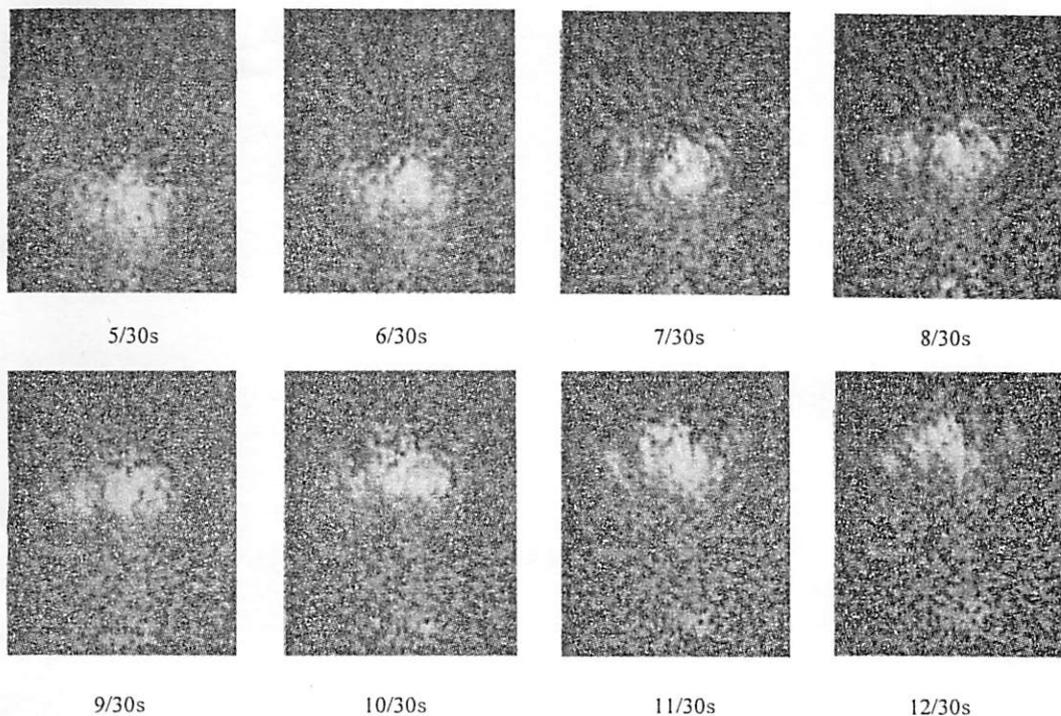


Fig.5 Single bubble movement visualized by neutron radiography.

動する領域

C 大きな粒子が浮き上がり層内を移動する領域

AC, AC' AとC, AとC'の混合領域

今回使用した粗大粒子は流動化した層内のバルク密度とほぼ同程度の密度を有するBとCの中間領域に位置しており、抗力が支配的になると考えられる条件となる。なお、参考として既報[18]で用いた粒子を中実プロットで併記しているが、既報で用いた実験条件はかなり密度比の影響の強い条件であったことが分かる。

可視化については、いずれの実験も日本原子力研究所のJRR-3M熱中性子ラジオグラフィシステムを用いており、可視化画像を30frames/sでビデオ録画している。中性子ラジオグラフィによる可視化および画像処理の詳細については既報[22-25]に詳しいのでここでは省略する。本実験で得られる情報はあくまでも二次元の投影画像に基づくものであり、中性子ビームの進行方向(実験装置の奥行き方向)に対する情報は得られない。しかし流動層では主たる挙動は垂直方向(実験装置の高さ方向)に発生すること、ならびに投影画像における気泡

の周囲の流動化粒子挙動を議論の対象とすることなどから、ここで得られる情報は充分有益なものであると考えている。

3. 単一気泡周りの流動化粒子挙動

気泡による流動化粒子挙動への影響を明確にするために、初めに粗大粒子を混入せずに単一気泡を人為的に作成した状態の可視化画像をFig.5に示す。画像は暗電流によるオフセット補正およびシェーディング処理を施すことで中性子束の不均一性を補正した映像であり、空隙率の高いところほど輝度が高くなっている。つまり図中央を上昇している明るく見える部分が人為的に作成した単一気泡に相当する。また、気泡周りの輝度の低いところは空隙率が低いところに相当するが、その中でも特に黒く見えるドット状のものはB₄Cにより作成したトレーサ粒子である。

画像における輝度分布から、すなわちFig.5でいえば気泡を横断する水平方向あるいは垂直方向空間座標に対して輝度が大きな勾配で変化ところをもって、ここでは界面を定義する。このとき得られる気泡先端位置

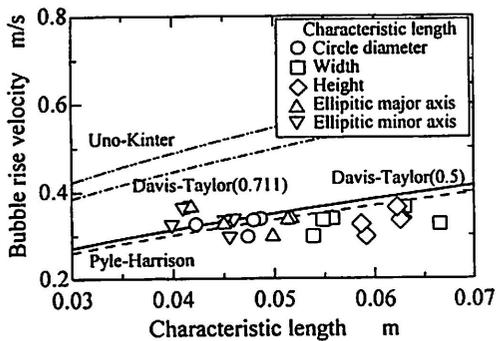


Fig.6 Bubble rise velocity

の時系列変化から気泡の上昇速度が求められ、気泡のいろいろな代表長さに対してプロットしたものがFig.6である。気泡の上昇速度について次式の形の相関式[1]

$$u_b = C\sqrt{gd_b} \quad (1)$$

と比較検討した結果、今の場合、気泡の代表長さとして面積が等価な円の直径を用い、かつDavis-Taylorの理論解[1]である $C=0.5$ とした場合に近いことがわかる。Davis-Taylorの3次元気泡に対する経験値は0.711であるのに対して、厚さ100 mmの層内に40-50 mmの気泡が形成されていることから、ここで観察された気泡はむしろPyle-Harrison[1]の2次元気泡($C=0.48$)に近い値となっている。

またこれらの各画像とそれぞれの1/30秒後の画像とを用いてPIV処理を行ったものがFig.7であり、処理結果は図中に速度ベクトルで表示されている。PIVに関しては相関のための画素マトリックスを 32×32 とした。これは実際の寸法では 16×16 mmに相当する。時間と空間の分解能から ± 0.03 m/s程度の誤差が見込まれる。なお現象そのものが非常定であり、装置の奥行き方向の情報は欠落していることおよび画像のサンプリングレートも十分でないため、過誤ベクトルの出現を防ぎにくい。過誤ベクトルの除去については質量保存に基づいた簡単な方法[32]や、ホップフィールドネットワーク[33]を用いた方法など報告されているが、ここでは得られたベクトルをそのまま示し、過誤ベクトルの除去は行っていない。

前述のように流動化開始状態すなわち $J_g/J_{gmf}=1.0$ にある層にエアシリンダにより急速に層内に注入された空気は、すぐには拡散してしまわず、単一の気泡形態を保って上昇していく。気泡による流動化粒子の挙動を見ると、気泡上部に存在する流動化粒子は、気泡が注入されたことによって発生する層膨張の影響を受け、若干上方へ移動する。これら気泡の上部に存在する流動

化粒子の多くは、気泡の通過時には気泡の周囲に排除され、気泡側面を落下して気泡下部へと回り込む。この流動化粒子挙動のために、気泡周囲にはFig.7に見られるような対称性を持つ流動化粒子の循環が観察されることとなる。また気泡通過後、流動化粒子は気泡通過により発生した流動化粒子の膨張を解消するために若干下方へと移動する。このような気泡の移動に伴う流動化粒子循環の発生範囲は、気泡周り10 mm程度の範囲で観察された。この部分がいわゆるクラウド相にあたる。気泡上昇速度 u_b とエマルジョン相における気相速度 $u_g (= J_g/\epsilon_g)$ の比はいまの場合、 $u_b/u_g=4$ であり、DavidsonやMurrayの結果によればクラウド相の直径は気泡径の1.3倍程度となる[29]。Fig.6に示したデータの気泡径からクラウド相の厚さは12-15 mm程度と予想され、本PIVによる観測結果とほぼ一致する。

トレーサ粒子の速度は、気泡下部のウェーク部分では速度の最大値0.16m/s、平均値で見れば0.14 m/s程度である。一方、気泡の上部では最大で0.25m/s、平均的には0.17 m/s、気泡の側面では0.03 m/sの速度でトレーサ粒子が移動している、Fig.6に示した気泡の上昇速度は0.3 m/s程度で、クラウド相に含まれる粒子群の速度としては気泡上昇速度の50-80%程度の値で、妥当な値であると考えている。なお流れの構造は、層の厚さを薄くした2次元流動層などでの観察結果に基づいて報告されている気泡運動およびそれに伴う流動化粒子の挙動(代表はDavidsonによる気泡)[5, 28]は、トレーサの動きから見限り、妥当なものと思われる。

流動層においては、気液二相流における気液界面に作用するような界面張力は存在しない。したがって流動層中の気泡は粒子濃度の極めて低い空隙であり、気泡が上昇するのは、相対的に粒子が落下することによる移動と見ることができる。その意味で、ここでいう気泡はまさしくボイド波である。しかしながら上記のように相対的な粒子の落下にのみ気泡の移動のメカニズムを求めるとすれば、気泡周りの粒子循環の説明がつかない。DEMなどによって気泡形成のシミュレーションは報告されているが、形成のメカニズムについては十分な議論がなされていないように思う。今後の進展に期待したい。

4. 単一気泡による粗大粒子挙動

Fig.8は先と同様に $J_g/J_{gmf}=1.0$ の条件のもとで粗大粒子を含む流動層内部に単一気泡を注入して可視化を行ったものである。図中に示したアルファベットは個々の粒子を特定するのに使用する。この可視化画像に先

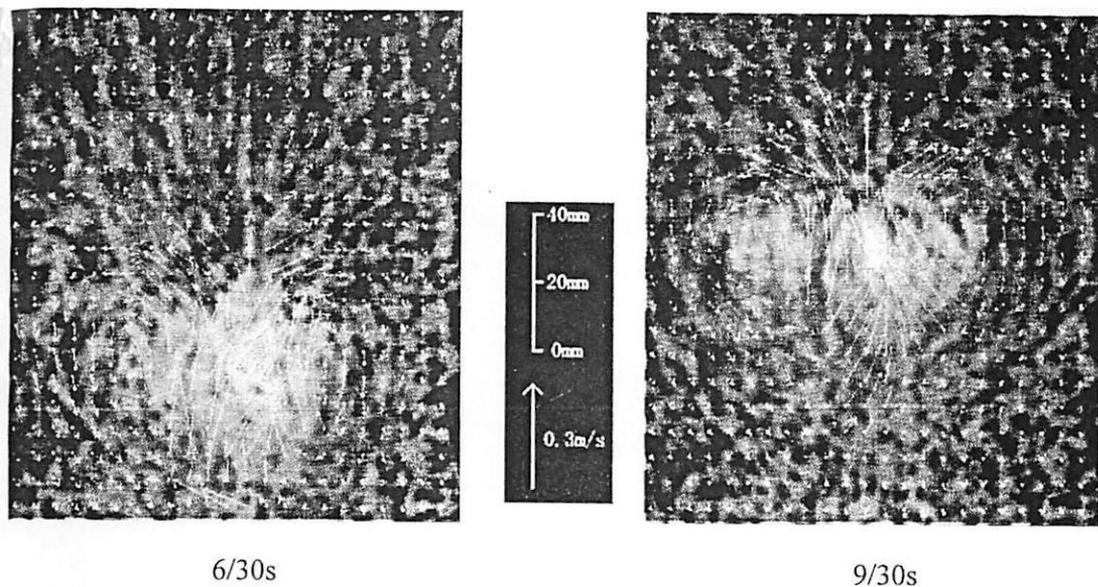


Fig.7 Velocity distribution around a bubble.

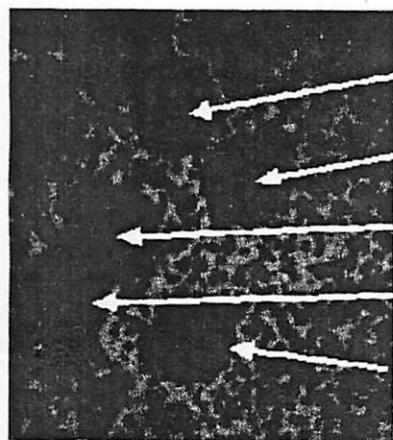


Fig.8 Visualized image of fluidized bed with large particles.

と同様のPIV処理を施して流動化粒子の速度ベクトルを求めたものがFig.9である。ただし、粗大粒子部の速度ベクトルの算出においては、既知である球の大きさに相当する画像を予め作成し、取得映像上の粗大粒子に当てはめることで中心位置を特定し、1/30s後の映像における座標との移動量から速度を個々にもとめるいわゆるPTV処理を適用した。さらに各粗大粒子についてある時刻 t における位置と $t+1/30$ sにおける位置から求められる速度および t と $t+1/30$ sにおける画像から得られる速度を用いれば、 $t-1/30$ s から $t+1/30$ sの間の平均の加速

A 度を求めることができる。この値に粒子の質量を乗じれば、粒子に作用した力が推定できる。Fig.10はこのようにして計算した加速度から粗大粒子に働く力を計算してベクトル表示したものである。つまりここで示される速度ならびに力は1/30 s ごとの透過画像に基づいて計算をしたその間の平均値である。なお速度の測定誤差は ± 0.03 m/s 程度であると推定され、粗大粒子に作用する力については ± 0.08 N 程度である。

まず粗大粒子が混入されたことによる、流動化粒子の挙動の変化について述べる。粗大粒子が混入された状態でも、気泡周りの粒子循環は部分的には確認できる(8/30-11/30 s の粗大粒子B, E間に存在する気泡を参照、Fig.9における各粗大粒子は、ここで示した時間程度では大きく移動せず、Fig.8における粒子位置および記号に容易に対応がつく)ものの、気泡形態はFig.7と比べると明瞭でなく、気泡は進行方向ならびに形状に関して粗大粒子の存在にかなり影響を受けていることが判る。また、10/30 s 前後では粗大粒子Eの存在により気泡が分裂する様子も観察され、Keillorら[12]の言うバブルブレイカの役割を粗大粒子が果たしていることがわかる。

逆に粗大粒子の挙動に対する気泡の影響という観点から観察すると、粗大粒子も基本的には気泡によって発生する気泡周りの粒子循環により移動していると言える。また10/30 s における粗大粒子Eに見られるように

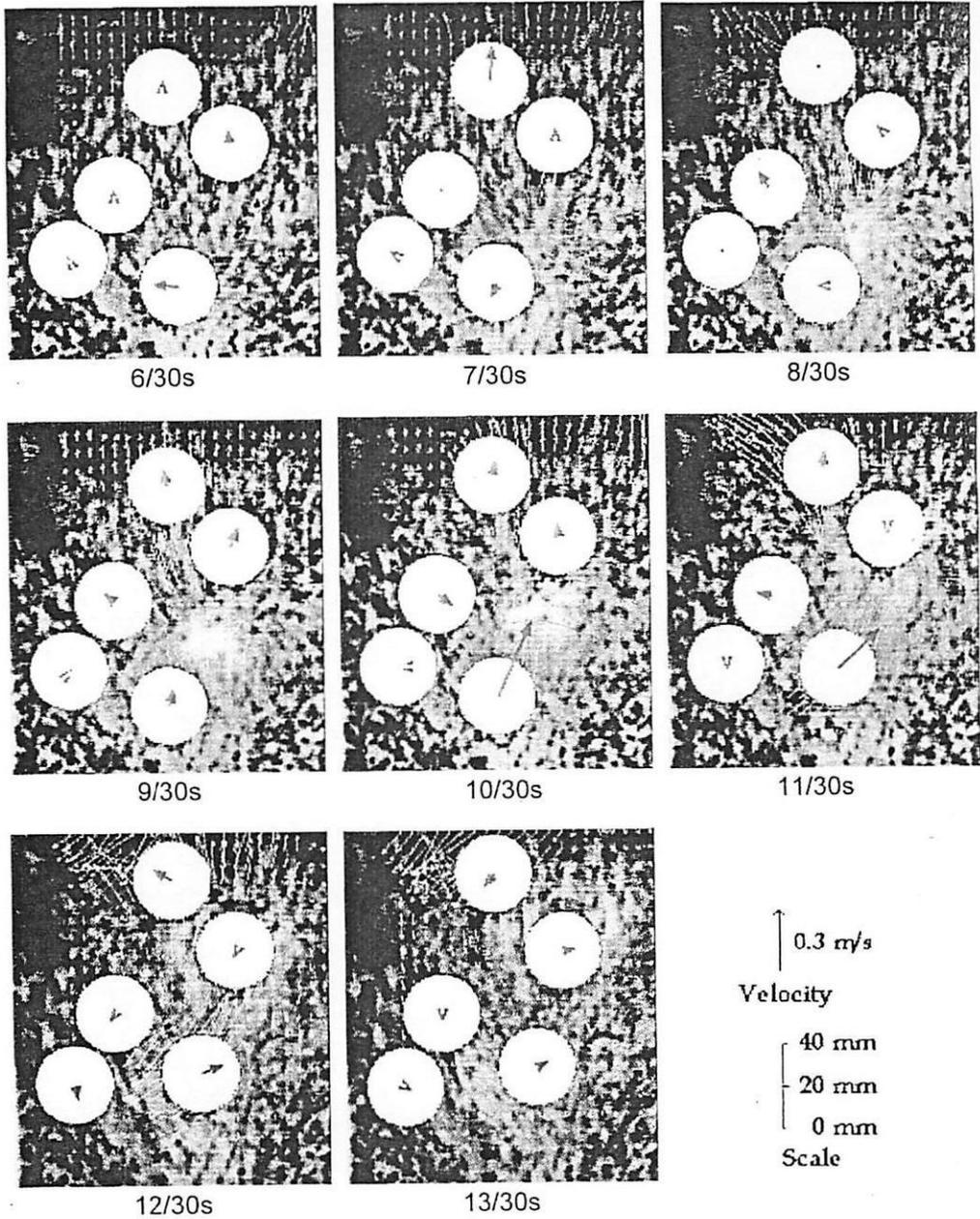


Fig.9 Large particle movement induced by single bubble movement.

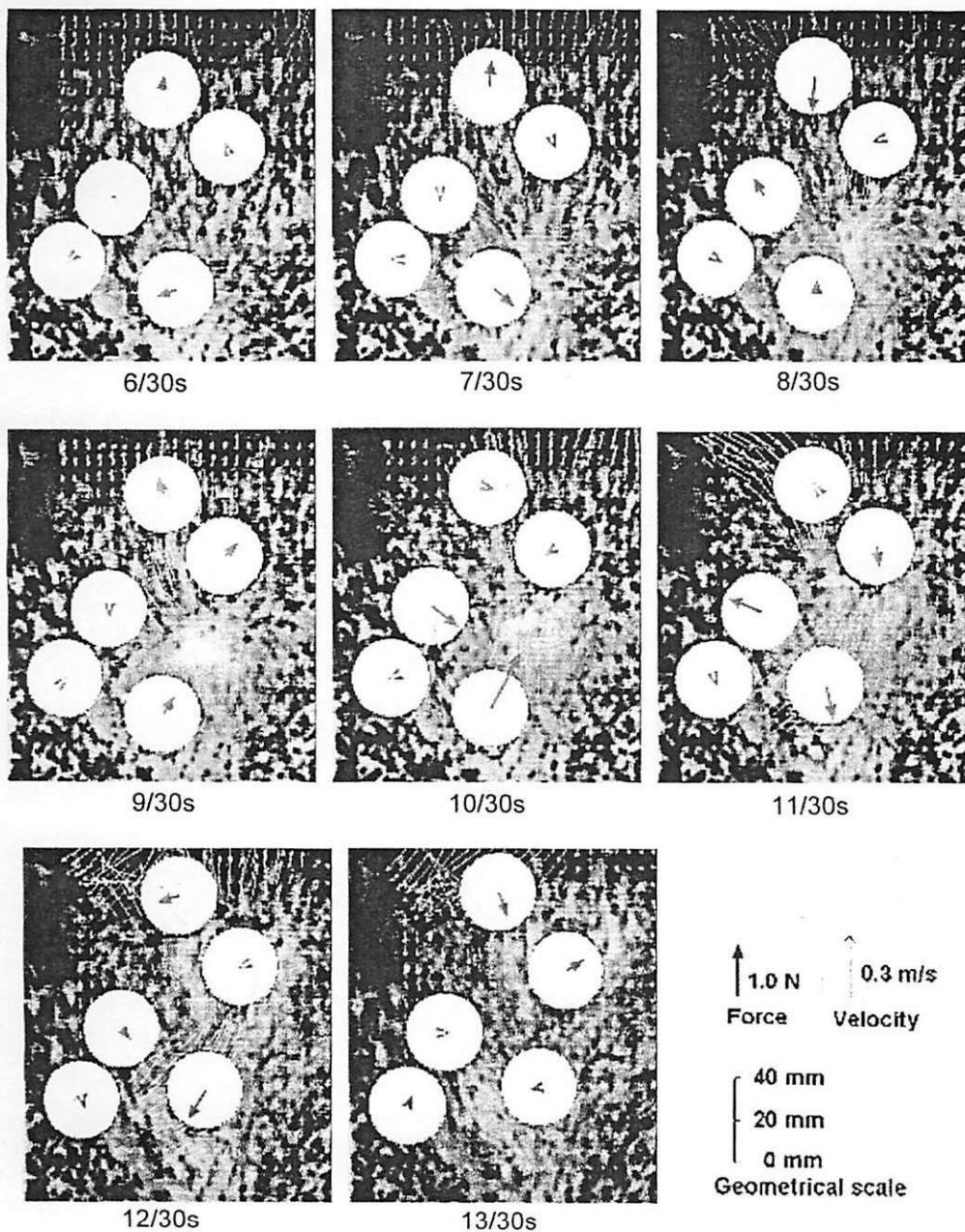


Fig.10 Force acting on large particles induced by single bubble movement.

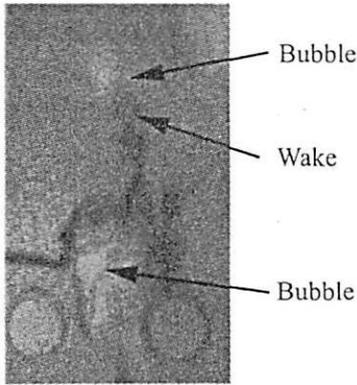


Fig.11 Behavior of fluidized particles induced by bubble movement.

気泡の後流部に強くひかれて移動するかのように見える挙動も示すことがある。

粗大粒子に働く力としては大別して浮力、重力、抗力が考えられる。重力は一定であるが浮力はその粒子が存在する位置での局所的な空隙率の変動に伴って変化する。しかし既報[18]で報告したような気泡内部に粗大粒子が落下するような特殊な場合を除いては、いまの場合、粗大粒子はエマルジョン相の中にあり、浮力の変化はほとんどないと考えられる。したがって、Fig.4のセグレーションマップに関連したHorioらの指摘[31]にもあるように、今回の密度比の範囲では大きく変動しているのは抗力である。抗力の発生因子としては一般的には流動化ガス、気泡、流動化粒子を考えることができる。しかし粒子と気体の大きな密度差の存在、固気系における大きな気泡は気液系での気泡とは異なって明確な界面を有していないこと、Massonの報告[34]にある気泡上部の流動化粒子による粒子の保持の記述やFig.7に示した速度ベクトル(特に気泡上部およびウェーク部)や次に示すFig.11などから、抗力発生の主たる要因は気泡周囲のクラウド相の粒子挙動によるものと考えられる。

Roweら[5]やKuniiら[28]は気泡に伴って移動する流動化粒子(ウェーク)の存在を指摘している。これに関連して著者らが別途行った中性子ラジオグラフィによる可視化実験において得られた画像の一例をFig.11に示す。これは層内のある水平断面内に CdSO_4 でコーティングされた流動化粒子を層状におき、気泡を吹き込んで気泡上昇に伴うウェークの挙動を観察したものである。先行する気泡のウェーク部分によってコーティング粒子群が持ち上げられている様子がわかる。さらに、引き続き気

泡の上部付近のクラウドによってコーティング粒子層が大きく持ち上げられている。粒子Eの場合、このウェークに引きずられて大きく移動したとも考えられるが、分裂して形成された後続気泡の上部付近のクラウドによって押し上げられたとも考えられる。

なお抗力の絶対値としてはFig.10を見る限りでは既報[18]でロードセルを用いて測定を行った値と同程度であることがわかるが、作用する方向はその場所を通過する気泡の挙動や粒子の循環の状況によって時間的に大きく変動し、移動方向もそれらに依存して変化する。

5. 気泡流動層内の粗大粒子挙動

前節では人為的に発生させた単一気泡周りに形成されるクラウド相の比較的大きな粒子循環により粗大粒子に力が作用する様子を述べたが、現実の流動層内部では複数の気泡がランダムに発生して相互に影響しあい、さらに複雑な様相を呈する。また粗大粒子の密度や形状によっては層内で大きなスケールで循環する場合もあり、従来から円筒形やディスクを含むいろいろなものについて層内挙動が調べられている[34]。しかしこれらの検討はほとんどが浮遊するか沈降するかが主題であり、円筒形を対象としたMassonの研究[34]では気泡との干渉や層内での循環挙動も含めた系統的な議論がなされており、注目に値する。ここでは中性子ラジオグラフィの特徴を生かし、前節で述べた単一気泡に伴うクラウドと粗大粒子の議論を気泡流動層に拡大して、層内における粗大粒子の2次元平面内での移動速度および粒子の姿勢の変化を調べた結果について述べる。ただしクラウド相の挙動については、気泡が多数存在して相対的にトレーサ粒子のコントラストが低下したため、前節のように詳細に観察することは困難であった。

Fig.12-14は実際に本装置を流動化させた状態で球形粒子ならびに円筒形粒子を投入した時の可視化映像である。球形粒子ならびに円筒形粒子の中に黒く線状に見えるものが粗大粒子の回転を観察するために挿入したカドミウム棒である。なおカドミウム棒の挿入や密度の調整の際には粗大粒子の重心が偏心しないようにできるだけ注意を払った。

Fig.12, Fig.13は球形粒子の場合で、それぞれ容積流束は $J_g/J_{gmf}=2, 4$ である。Fig.12に示した $J_g/J_{gmf}=2$ の場合には、球形粒子の並進運動とカドミウム棒から推定される角度変動(回転運動)は、気泡の上昇に伴って若干の揺らぎは認められるものの全体的にはかなり小さい。一方、Fig.13に示した $J_g/J_{gmf}=4$ の場合には気泡および流動化粒子の運動がFig.12の場合に比べてかなり激し

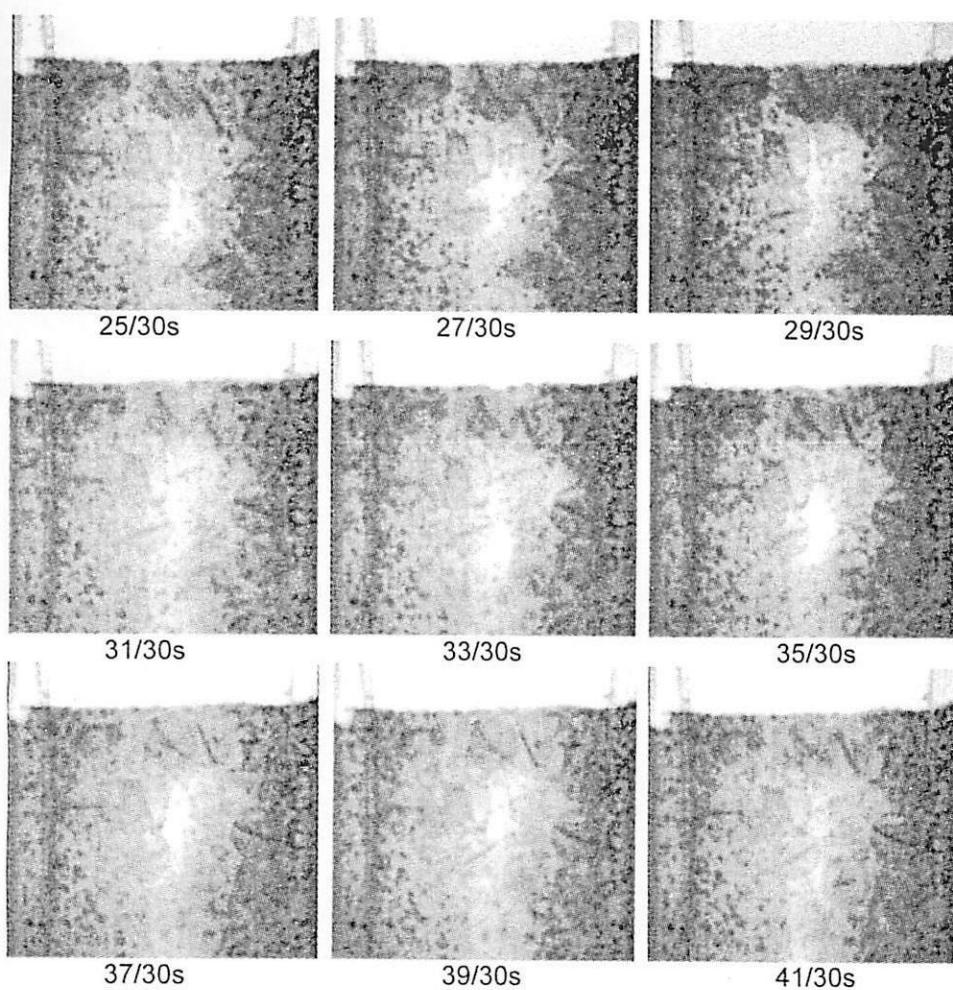


Fig.12 Spherical particles in fluidized bed at $J_g/J_{gmf}=2.0$.

いため、球形粗大粒子の並進運動もかなり激しいが、明確な回転運動は認められない。粗大粒子のスケールに比べてクラウド相のスケールは相対的に小さく、したがって粗大粒子の一部がクラウド相と干渉する場合もありうと思われるが、結果的にみるとこれが粗大粒子にドラスティックな回転運動を引き起こすほどではないことが分かる。Fig.14は円筒形粒子の場合で $J_g/J_{gmf}=2$ である。円筒の軸方向が流動化粒子の移動方向と一致した安定しやすい姿勢をとる傾向があり、また気泡の移動方向、したがって気泡周囲のクラウド相の移動方向が平均的には垂直上向きであるため、粗大粒子の角度の変動は小さい。

$J_g/J_{gmf}=4$ の条件に対して、重心位置の移動から前

節で述べたのと同様に各1/30 s 間の平均値として求めた粗大粒子の移動速度およびカドミウム棒から推定した回転角を時間に対して示したのがFig.15, Fig.16である。Fig.15に示す球形粒子の場合には、もし粒子が偏心していればその影響がでる可能性もあり、それを確認するためにカドミウム棒の角度が異なった2個の粒子（それぞれ図中の番号1, 2に対応）について時系列的に示している。なおここで示した角度は、垂直上向きを0度、投影画像上で時計回りを正方向と規定している。上述のように粗大粒子の速度はかなり激しく変動し、その振幅は一時的ではあるが0.8 m/s 程度にも達する。このように激しく運動をする一方で、粗大粒子の姿勢は気泡に伴う

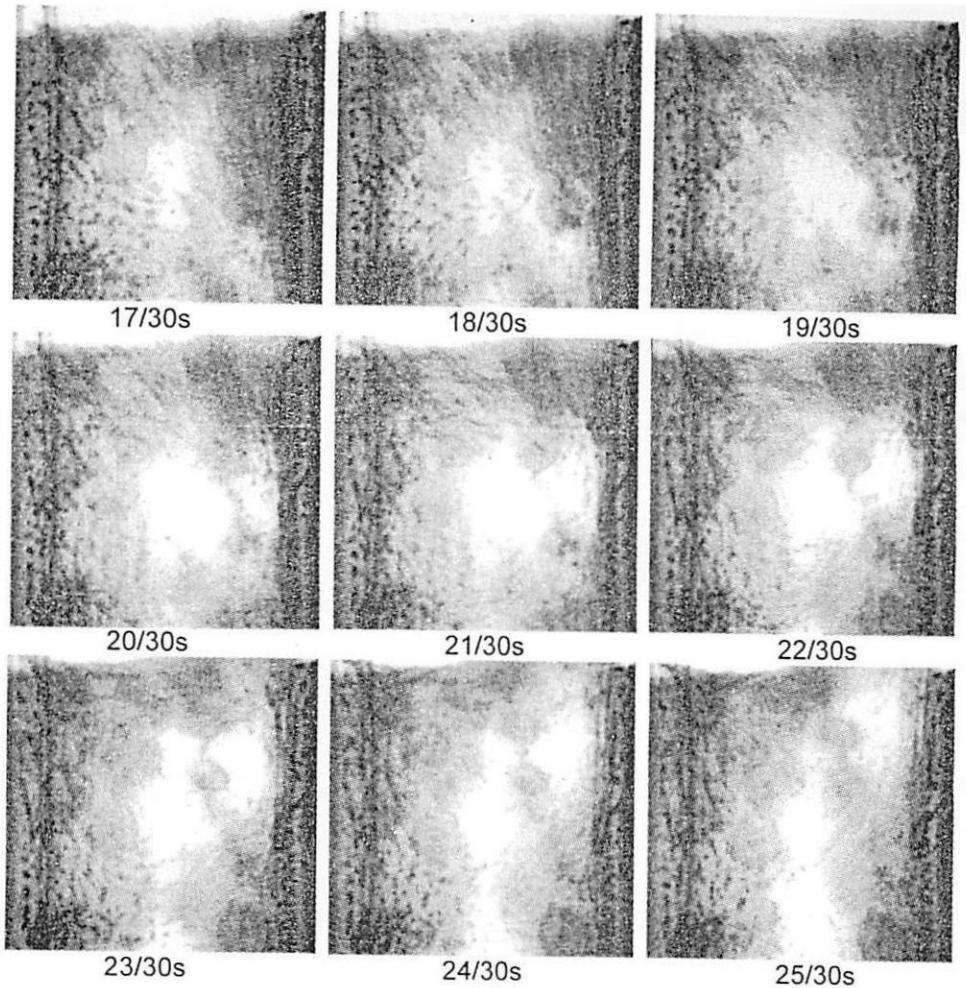


Fig.13 Spherical particles in fluidized bed at $J_g/J_{gmf}=4.0$.

クラウド相の挙動や気泡中への落込みによってときおり大きく変わるが、それ以外では速度はほぼ一定であることが分かる。Fig.16は円筒形粒子に対するカドミニウム棒の角度と速度のデータである。2.7 s 付近で気泡による影響で横倒しになったとき以外には粗大粒子は姿勢を安定に保っている。

今回の実験では限られた視野の中で粗大粒子の挙動を観測することから、粗大粒子の密度を流動層のバルク密度とほとんど同じか、若干小さめに調整したため、粗大粒子は層の上部付近に集中し、層内全域にわたって循環するものはごくまれであった。石炭やRDFの層内での挙動を見るためには粗大粒子の密度についてもう少し大きな幅をもって調整する必要がある。

6. 結言

流動層内に粗大粒子を混入することによって形成した二成分系の流動層内に形成される気泡や流動化粒子および粗大粒子の挙動を中性子ラジオグラフィによって可視化した。層内に混入したトレーサ粒子によって気泡周りのクラウドの速度分布を求めることができた。層内に混入された粗大粒子の運動は、気泡および周辺に形成されるクラウドの挙動に強く支配されることが確認された。また粗大粒子の速度、作用した力、およびクラウドの速度ベクトルを求めた。また気泡流動化状態においては、粗大粒子の速度そのものは気泡の挙動に依存して大きく変動するが、ほぼ同じ姿勢を保ったまま層内を

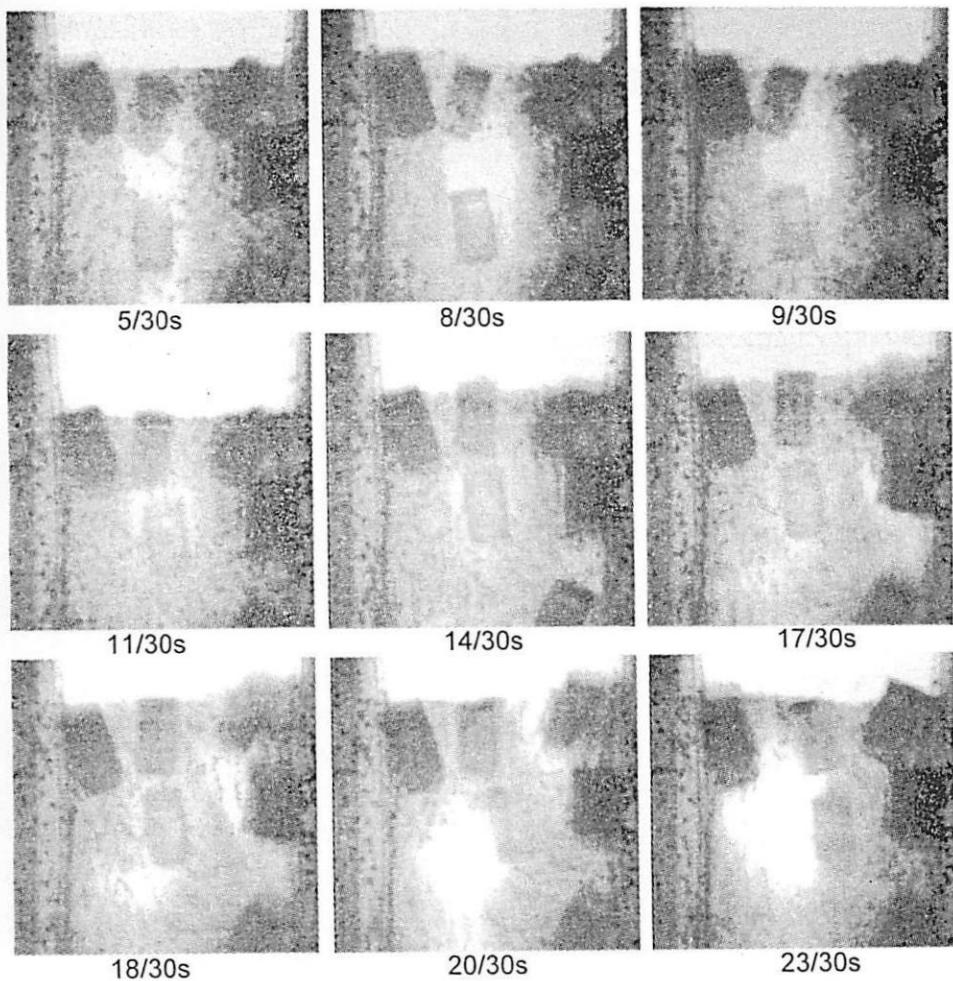


Fig.14 Cylindrical particles in fluidized bed at $J_g/J_{gmf}=2.0$.

浮遊することが明らかとなった。なおここで得られたクラウド相の速度分布や、定性的ではあるが粗大粒子の挙動は石炭、RDFなどの流動層燃焼炉における層内循環や混合の問題の解明に寄与するものと考えている。

本研究は平成11年度原研施設利用共同研究(No.9180)によったものであり、また本研究の一部は平成11年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)No.11450091)によったことを記し、謝意を表す。

Nomenclature

d_p : average diameter of fluidized particle [m]
 D_b : representative length of bubble

(equivalent diameter) [m]
 g : gravitational acceleration [m/s²]
 J_g : volumetric gas flux (superficial gas velocity) [m/s]
 J_{gmf} : minimum fluidization velocity [m/s]
 u_b : bubble rise velocity [m/s]
 u_g : gas velocity in emulsion phase(= J_g/ϵ_{mf}) [m/s]
 ϵ_{mf} : void fraction (voidage) at minimum fluidization velocity [-]
 ρ_p : density of fluidized particle [kg/m³]

参考文献

[1] 鞭巖, 森滋勝, 堀尾正毅, 流動層の反応工学, pp.125-137, 培風館 (1984).

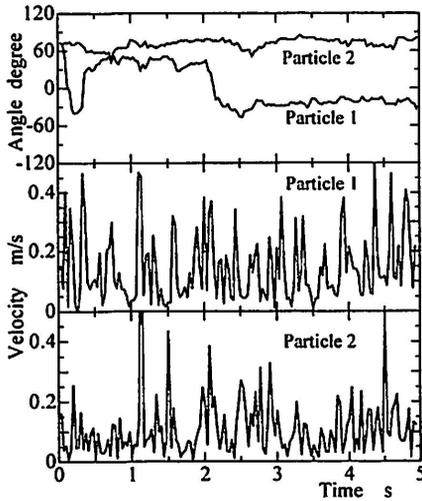


Fig.15 Movement of spherical particles at $J_g/J_{gmf}=4.0$.

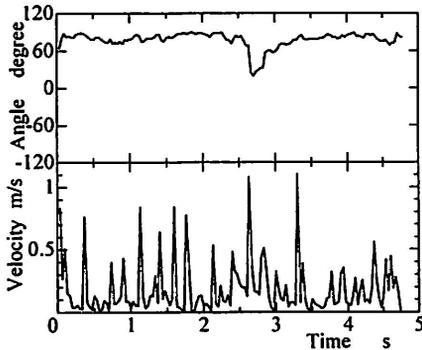


Fig.16 Movement of cylindrical particles at $J_g/J_{gmf}=4.0$.

- [2] Tsuji, Y., Kawaguchi, T. and Tanaka, T., Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed, *Powder Technology*, 77, pp.79-87 (1993).
- [3] Mikami, T., Kamiya, H. and Horio, M., Numerical Simulation of Cohesive Power Behavior in a Fluidized Bed, *Chem. Eng. Sci.*, 53, pp.1927-1940 (1998).
- [4] Degang Rong, DEM Simulation of Hydrodynamics, Heat Transfer and Combustion in Fluidized Bed, PhD Thesis, Tokyo University of Agric. Tech.(2000).
- [5] Rowe, P.N. and Partridge, B.A., Particle Movement Caused by Bubbles in a Fluidized Bed, *Proc. Symp.*

- on Interaction between Fluids and Particles, pp.135-142, *Instn. Chem. Engrs, London* (1962).
- [6] Nienow, A.W. and Chiba, T., Fluidization of Dissimilar Materials, Davidson, J.F., Clift, R. and Harrison, D. eds., *Fluidization* (2nd ed.), pp.357-382, Academic Press, London, (1985).
- [7] 千葉忠俊, 流動層における粒子の混合・偏析, *化学装置*, Vol.28, No.6, pp.49-55 (1986).
- [8] Kunii, D and Levenspiel, O., *Solid Movement: Mixing, Segregation, and Staging, Fluidization Engineering*, pp.211-235, Butterworth-Heinemann, Boston (1991).
- [9] 小屋敏行, 長谷川裕, 国井大蔵, 流動層内に添加した粗大粒子の挙動, *化学工学論文集*, Vol.4, No. 1, pp.108-110 (1978).
- [10] Nienow, A.W. and Cheesman, D.H., The Effect of Shape of the Mixing and Segregation of Large Particles in a Gas-Fluidized Bed of Small Ones, Grace, J.R. and Matsen, J.M. eds., *Fluidization III*, pp.373-380, Plenum, New York (1980).
- [11] Pruden, B.B., Crosbie, D. and Whalley, B.J.P., Circulation of Large Bodies in an Aggregatively Fluidized-Bed, Keairns, D.L. ed., *Fluidization Technology*, Vol.2, pp.65-86, Hemisphere, Washington D.C. (1975).
- [12] Keillor, S.A. and Bergougnou, M.A., A Study of the Action of Floating Bubble Breakers in Fluidized Beds by Interactive Computer Graphics, Keairns, D.L. ed., *Fluidization Technology*, Vol.2, pp.95-109, Hemisphere, Washington, D.C. (1975).
- [13] Rios, G.M., Tran, K.D. and Masson, H., Free Object Motion in a Gas Fluidized Bed, *Chem. Eng. Commun.*, Vol.47, pp.247-272 (1986).
- [14] Miyamoto, M., Jin, R.J., Katoh, Y., and Kurima, J., An Experimental Study on Particle Behavior and Heat Transfer Characteristics around Horizontal Tube Bundle in Fluidized Bed, *Trans. JSME, Ser.B*, Vol.62, No.601, pp.3431-3438 (1996).
- [15] Rowe, P.N. and Matsuno, R., Single Gas Bubbles Injected into a Gas Fluidized Bed and Observed by X-ray, *Chem. Eng. Sci.*, Vol.26, pp.923-925 (1971).
- [16] Rowe, P.N., Macgillivray, H.J. and Cheesman, D.J., Gas Discharge from an Orifice into a Gas Fluidized Bed, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, Vol.57, pp.194-199 (1979).

- [17] Rowe, P.N. and Masson, H., Interaction of Gas Bubbles with Probes in Gas Fluidized Beds, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, Vol.59, pp.177-185 (1981).
- [18] 小澤守, 梅川尚嗣, 松田健, 竹中信幸, 松林政仁, 鶴野晃, 流動層における粗大粒子の挙動と抗力係数, *機論B*, Vol.62, No.601, pp.3413-3420 (1996).
- [19] Ozawa, M., Umekawa, H., Matsuda, T., Takenaka, N., Tsuruno, A. and Matsubayashi, M., Measurement of Dynamic behavior of Void Fraction in Tube-Banks of a Simulated Fluidized-Bed by Neutron Radiography, Fischer, C.O., Stade, J. and Bock, W. eds., *Proc. 5th World Conf. on Neutron Radiography*, Deutche Gesellschaft für Zerstörungsfrei Prüfung E.V., pp.610-616 (1996).
- [20] Ozawa, M., Umekawa, H., Matsuda, T., Takenaka, N., Tsuruno, A. and Matsubayashi, M., Void Fraction Profile in Tube-Banks of a Simulated Fluidized-Bed Heat Exchanger, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Sec.A*, 337, pp.144-147 (1996).
- [21] Ozawa, M., Umekawa, H., Matsuda, T., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Flow Pattern and Heat Transfer in Tube-Banks of a Simulated Fluidized-Bed Heat Exchanger, *Proc. of Int. Conf. on Power Engineering-97*, pp.151-156, JSME, Tokyo (1997).
- [22] Umekawa, H., Ozawa, M., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Visualization of Bed Material Movement in a Simulated Fluidized-Bed Heat Exchanger by Neutron Radiography, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec.A*, pp.424, 77-83 (1999).
- [23] Ozawa, M., Umekawa, H., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Flow Pattern and Void Fraction Distribution of Cross-Flow Tube-Banks in a Simulated Fluidized-Bed Model, *Proc. ICMF'98*, Paper No.215, Lyon (1998).
- [24] Ozawa, M., Umekawa, H., Matsuda, T., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Local Void Fraction Distribution and Heat Transfer in Tube-Banks Immersed in a Fluidized-Bed, *Heat Transfer-1998*, Vol.2, pp.75-80, (1998).
- [25] Ozawa, M., Umekawa, H., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Quantitative Flow Visualization of Fluidized-Bed under Normal- and Down-Flow-Mode Operations by Neutron Radiography, to be published in *Experiments in Fluids*, Vol.28, No.5, pp.413-424. (2000).
- [26] 山本富士夫, 村井佑一: 気液二相流における流速分布の計測, *混相流*, Vol.14, No.1, pp.8-15 (2000).
- [27] 山下稔弘, 山内慎, 植村知正, 小澤守, シリコン油中を上昇する球形気泡表面近傍の流れ, 可視化情報, Vol.19, Suppl. No.2, pp.303-306 (1999).
- [28] Kunii, D., and Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, 2nd ed., pp.115-126, Butterworth-Heinemann, Boston (1991).
- [29] 日本粉体工業技術協会編, 堀尾正朝, 森滋勝監修, *流動層ハンドブック*, pp.61-69, 培風館 (1999).
- [30] Kai, T., Murakami, M., Yamasaki, K. and Takahashi, T., Relationship between Apparent Bed viscosity and Fluidization Quality in a Fluidized Bed with Fine Particles, *J. Chem. Eng. Jpn.*, Vol.24, No.4, pp.494-500 (1991) および 甲斐敬美, 流動層触媒反応器の中の混相構造, *混相流シンポジウム2000 (第19回) 講演論文集*, 19-26 (2000).
- [31] Horio, M., Liu, J. and Muchi, I., Particle Behavior the Fluidized-Bed Grid Zone, Bubbling Zone and Freeboard, Kwauk and Kunii eds., *Fluidization Science and Technology*, pp.112-123, Gordon and Breach (1982).
- [32] Kimura, I., Kuroe, Y. and Ozawa, M., Application of Neural Networks to Quantitative Flow Visualization, *J. of Flow Visualization and Image Processing*, Vol.1, pp.261-269 (1993).
- [33] 篠木政利, 小澤守, 岡田年史, 木村一郎, 自然対流場における速度場の三次元画像計測, *機論*, Vol.66, No.645, pp.206-213 (2000).
- [34] 前出[8], pp.211-235.