

中性子ラジオグラフィによる流動層の可視化と画像処理

小澤 守* 梅川 尚嗣**

1. 緒言

環境関連技術として近年注目を集めている流動層燃焼ボイラや流動層ごみ焼却などにおいては、粒径の異なるごみや石炭などの粒子群が共存し、良好な燃焼状態を維持するためにはこれら粗大粒子を流動層層材中にできるだけ一様に分散、混合させることが重要な設計項目で、それが達成できないときには偏析（セグレグーション）など不都合な事態を招きかねない。このような系においては粗大粒子の層内での循環挙動の原因でもある粗大粒子と気泡の干渉が重要な役割を果たすことになる¹⁾。また例えば図1に示すような循環流動層ボイラでは層内もしくは外部に設置した熱交換器によって収熱すると同時に層内温度の制御を行っている。従来より、このような流動層熱交換器に関しては多くの研究が行われているが、層材や幾何学形状の如何によってその伝熱性能が大きく左右されるため、未だ信頼性の高い評価方法は確立されていない。

流動層熱交換器における伝熱機構は主として熱交換器周りに形成された流体の境界層を通じての伝導伝熱、粒子と伝熱面の直接接触も含めた粒子の対流による伝熱、粒子と伝熱面間の放射伝熱などの機構が考えられるが、粒子径が比較的小さい場合には対流効果が支配的となる。流動層中では固体粒子の運動はそこに形成される気泡お

よびそのウェークによって大きく支配され、特に直交管群などでは管周囲での相分布やその時間変動特性が重要になる。最近、光ファイバプローブを用いた個々の粒子の挙動など詳細に検討されているが、特に管群ではそのような詳細な挙動よりもよりマクロ的な流動様式やボイド率（空隙率）の分布と変動特性が伝熱を考える上では重要であろう。

流動様式については、例えば気液二相流などの場合には比較的容易に目視によって観察できるのに対して、流動層の場合には Masson ら¹⁾ のように透明のガラスビーズを用いるなどしなければ、基本的に可視化が困難である。実際の流動層ボイラでは珪砂が層材として用いられるのが通例で、基本的には直接的な観察はもちろん不可能で、X線ラジオグラフィ（レントゲン撮影）などが従来用いられてきた。

最近、中性子ラジオグラフィによる混相流の可視化技術が大きく注目されるようになり、金属容器や砂で構成された流動層にも十分適用可能であることがわかってきた²⁾。後述するように珪砂は中性子に対して元来透明で、そのため可視化には層材に若干の工夫をするだけでかなりコントラストの高い画像を得ることができ、それによって精度の高い画像処理による定量化が可能となるなど、大きな長所を有している。また実時間でしかも連続的な観察が必要な対象に特に適している。

最近、DSMC法による流動層のシミュレーションが行われ、気泡の形成過程や粒子の流動挙動が報告されている³⁾が、例えば200 μm の層材粒子に対して粗大粒子径が20mmの場合には、粗大粒子に匹敵する層材粒子だけでも 10^6 オーダーの個数となり、層材によって形成される気泡と粗大粒子の干渉などのシミュレーションを行おうとすると、現状では計算機容量の制限からかなりの困難が予想される。計算機容量の問題は将来解決されるにしても、実現象の理解なしにはこのようなシミュレーション技術も有効とはいえない。

そこで本報告では、流動層の挙動を理解しまた定量化するために行っている、中性子ラジオグラフィによる気泡流動層の可視化技術およびボイド率の画像計測について述べる。

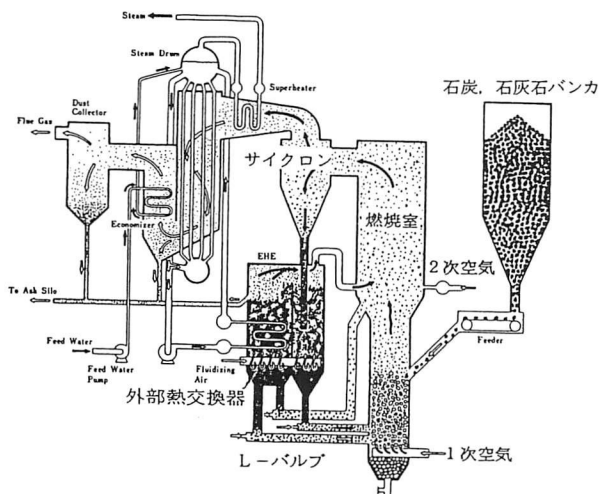


図1 循環流動層ボイラ

* 工学部教授 工博（機械システム工学科）

** 工学部助手 工修（機械システム工学科）

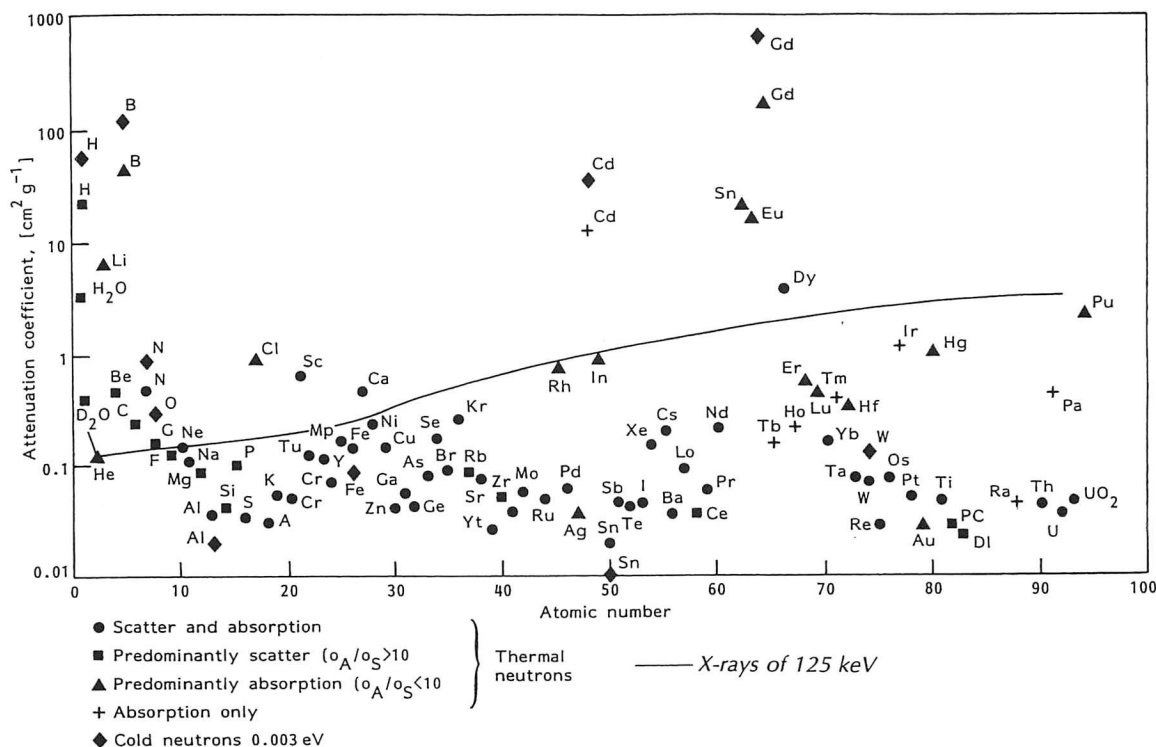


図2 熱中性子に対する質量減衰係数

2. 中性子ラジオグラフィによる可視化

2.1 中性子ラジオグラフィの原理

ラジオグラフィは対射線の減衰の差によって対象物の構造を可視化する手法であり、X線によるレントゲン撮影が最も有名である。中性子ラジオグラフィは放射線として中性子線を用いるもので、中でも高速中性子を用いるものや、熱中性子、あるいは冷中性子を用いるものなどが実用化されている。本研究ではその中で最も広く用いられている熱中性子を用いている。

図2に熱中性子に対する各種物質の質量減衰係数が示されている。図中の実線はX線の減衰係数で、一般に原子番号が大きいほど減衰係数が大きい。従ってボイラや原子炉で問題になるような鋼管内の水や蒸気の挙動などはX線では観察できず、管を例えば薄いベリリウムなどで構成するなどの工夫が必要となる。一方、中性子はその質量減衰係数が原子番号によらず、物質毎に異なるため、上記のような場合には特に好都合となる。例えば、Fe, Ni, Crなどは水素Hを含む水などに比べてほとんど透明と言える。Takenakaら⁴⁾はその性質を用い、しかも医療分野でよく用いられているCT技術を援用して原子炉燃料集合体モデルでのポイド率分布の3次元計測を行うなど、顕著な成果を上げている。

さて、図からも明らかなように本実験で用いた珪素はアルミニウムなどと同様に中性子に対してはほとんど透明で、その点では空気と珪砂からなる流動層はまったく可視化できないことになるが、砂の一部を減衰係数の高いガドリニウムやカドミウムなどでコーティングすれば

かなり広範囲に渡って自在に輝度を調節できることになる。

ラジオグラフィシステムは加速器を用いたものから原子炉を用いるものまで日本国内に多数存在するが、より鮮明な画像を得るためには中性子束が高いものが望ましく、特に日本原子力研究所のJRR-3Mの熱中性子ラジオグラフィシステムは世界的に見ても最も高い部類に属する。図3に参考のためにJRR-3Mの概要を示しておく。具体的な手法や詳細については文献(5)を参照されたい。

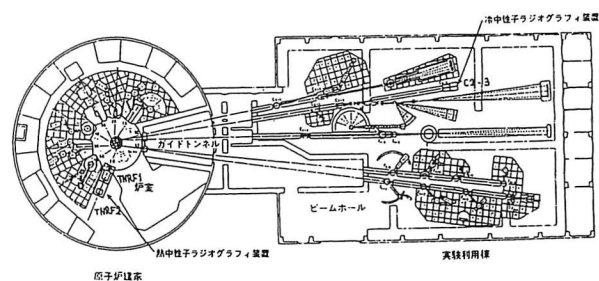


図3 日本原子力研究所JRR-3M 中性子ラジオグラフィシステム

2.2 可視化実験

可視化に使用した流動層は図4に示すように内寸法で幅300mm、厚さ50mm、高さ700mmの中性子に対して透過性のよい厚さ5mmのアルミニウム製の矩形容器で構成され、層材にはSiO₂ 91.3%、平均粒子径82 μ m、真密度2560 kg/m³の珪砂を用いた。この装置では層高400mmに対して流動化開始速度はJ_{Gmf}=0.016m/sであった。なお既

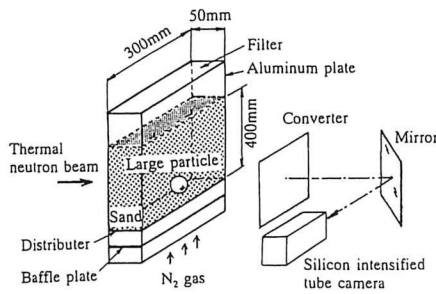


図4 流動層モデル
(管群の場合には粗大粒子の代わりに管群を配置する)

述のように珪砂そのものは中性子に対してほとんど透明で、ポイド率（空隙率）分布を画像処理によって求める際に不都合を生じるため、同じ層材を予め硝酸ガドリニウムあるいは硫酸カドミウムの水溶液に浸してコーティングし、十分に乾燥させたのち体積割合で数%混入することによって着色した。また層材の動きを観測するためにトレーサ粒子として層材よりも若干粒度が大きい微粉炭などを少量混入することによっても層材の動きをトレースできる。

流動層の流動化気体としては、中性子の減衰が大きくまた層材の動きそのものが阻害される原因となる湿度や油分の混入を避けるために窒素ガスを用い、減圧弁、臨界ノズルを介して装置下部に導かれ、バッフル板、多孔質の分散板を通して層内に吹き込まれた。

流動層中の粗大粒子の観察には直径 $d_p = 38\text{mm}$ のピンポン球で、その内部に充填物を詰めて密度をそれぞれ $\rho_p = 88, 500\text{kg/m}^3$ に設定したものを2種類用いた。また管群の周りのフローパターンの観察に際しては直径40mmの中実のアルミニウムの棒を模擬伝熱管として格子状あるいは千鳥状に配列した。

中性子ラジオグラフィ装置としては日本原子力研究所のJRR-3Mのものを使用した。中性子束は $1.5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$ 、照射範囲は幅255mm、高さ305mmである。原子炉から導かれた中性子は重水タンクで減速され、熱中性子としてコリメータを介して照射室に導かれ、測定対象を透過した後、蛍光コンバータを介してビデオカメラで撮影録画した。また撮影に用いたカメラはSIT (Silicon Intensifier Target) 管を撮像管として用いている。

実験に際しては対象とする流動層の画像、中性子を照射しない状態で得られるオフセットを求めるための画像、さらに照射室内を空の状態にして照射したときに得られるシェーディング画像を撮影した。

3. 画像処理法とポイド率分布の算出

中性子ラジオグラフィによる流動層の画像の輝度分布は、中性子の減衰が少ない窒素ガスによる減衰分を無視

すれば次式で与えられる。

$$S(x, y, t) = G(x, y) \exp\{-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x, y) - [1 - \varepsilon(x, y, t)] \times \rho_s \mu_{ms} \delta_s(x, y)\} + O(x, y) \quad (1)$$

ここで $G(x, y)$ 、 $O(x, y)$ はゲインとオフセットであり、中性子線と撮像系の非均一性により空間的な分布を持つ。なお原子炉が一定出力で運転されているためにビームの中性子束は時間的に一定であると考えられ、また撮像系も十分ウォームアップを行っているので、これらの値は時間的に一定と考えられる。 ρ_w 、 ρ_s はそれぞれテスト容器壁と層材の密度、 μ_{mw} 、 μ_{ms} は質量減衰係数を表す。 δ_w 、 δ_s は厚さを表しともに一定の値であり、 ε はポイド率を表している。なお x と y はそれぞれ水平、垂直方向座標、 t は時間、また添字 w と s はそれぞれ壁と層材を意味する。

画像処理に際してはオフセット画像をまず流動層の原画像から差し引き、さらに中性子束の分布による色むらを補正するためにシェーディング画像を用いて補正（画像の輝度の対数をとって差し引きする）を行うことにより、壁を含む流動層の画像の輝度分布 $S'(x, y, t)$ が得られる。

$$S'(x, y, t) = G' \exp\{-\rho_w \mu_{mw} \delta_w - [1 - \varepsilon(x, y, t)] \times \rho_s \mu_{ms} \delta_s\} \quad (2)$$

ここでシェーディング補正したのちのゲイン G' は可視化範囲で一様と仮定している。層材のみの画像を得るためにはさらにテスト容器を空、つまり層材を充填しない状態の画像が必要であるが、実験および測定系の都合からこの画像は得ることができなかった。そこで本研究においては流動化させない状態での画像を求めておき、その上部に位置するガスのみ部分の画像から容器壁のみによる輝度 S'_w を求めた。

$$S'_w = G' \exp[-\rho_w \mu_{mw} \delta_w] \quad (3)$$

上記の式(2)、(3)から層材のみによる中性子のビーム方向の減衰率の2次元分布は次式で与えられることになる。

$$[1 - \varepsilon(x, y, t)] \rho_s \mu_{ms} \delta_s = \log S'_w(x, y, t) \quad (4)$$

つまり層材の質量減衰係数がわかればポイド率 ε の算出ができることになる。本実験においては層材の着色のために硝酸ガドリニウムや硫酸ガドミウムを混入しており、その混入割合により減衰率が変化するため、その算出には困難が伴う。そこで各実験のたびごとにまず未流動化状態で流動層の撮像を行い、層高から求めた平均ポイド率 ε_0 とそのときに得られる S'_0 、 S'_w から $\rho_s \mu_{ms} \delta_s$ を決定した。ただしコーティングを施した層材を含む流動層内は十分に混合されているとして、密度 ρ_s と質量減

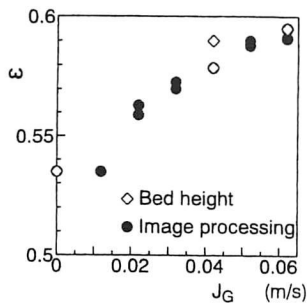


図5 画像処理によるポイド率と層高から求めたポイド率の比較

衰係数 μ_{ms} の分布はないものと仮定している。なお S'_0 は層材部分の平均値である。これらによって次式によりポイド率の分布が算出されることになる。

$$\frac{[1 - \varepsilon(x, y, t)]}{[1 - \varepsilon_0]} = \frac{[\log S'_w - \log S'(x, y, t)]}{[\log S'_w - \log S'_0]} \quad (5)$$

図5に上記の画像処理で求めた平均ポイド率と層高が

ら求めたポイド率を比較して示している。気相の容積流速 $J_G=0$ に対応するデータは S'_0 を決定する際に用いたデータであり、これ以外の各データが両方法で互いによく一致していることから、ここでの画像処理はほぼ満足できるものと考えている。なお層高の読みとり精度、壁での S'_w 、未流動化状態での層材の S'_0 の分散を考慮すると、画像処理によるポイド率は0.01程度の精度で算出されているものと考えられ、ポイド率分布の議論には十分の精度を持っており⁶⁾、またある程度の定量的評価も可能であると考えている。

4. 可視化例とポイド率分布

4.1 粗大粒子の挙動

図6、7に画像処理によって求められた流動層中の粗大粒子の挙動が1/30sごとの画像として示されている。図6は粗大粒子の密度が500kg/m³の場合であり、図7は密度が88kg/m³の場合である。いずれの場合も $J_G=$

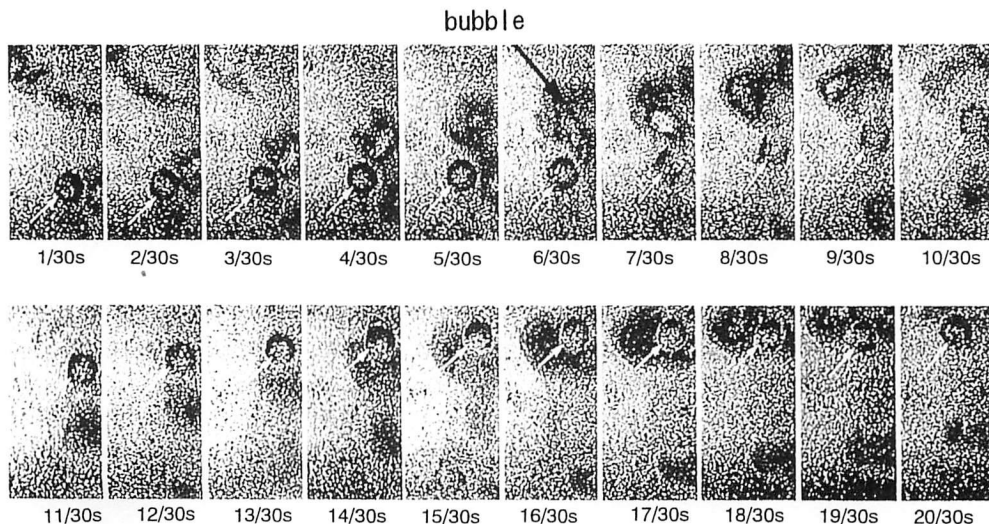


図6 粗大粒子の挙動 ($\rho_P=500\text{kg/m}^3$, $d_P=38\text{mm}$, $d_S=82\mu\text{m}$, $J_G/J_{Gmf}=3.88$)

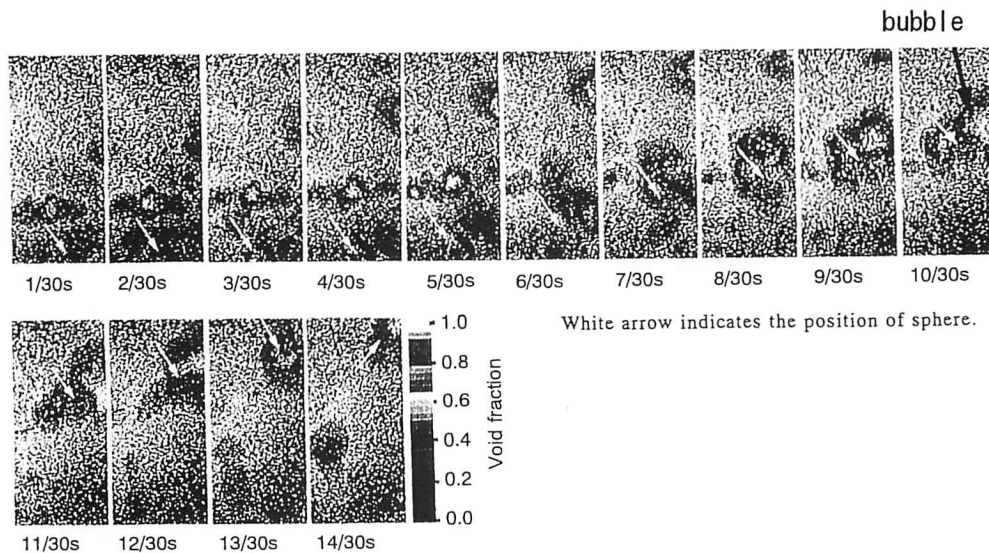


図7 粗大粒子の挙動 ($\rho_P=88\text{kg/m}^3$, $d_P=38\text{mm}$, $d_S=82\mu\text{m}$, $J_G/J_{Gmf}=3.88$)

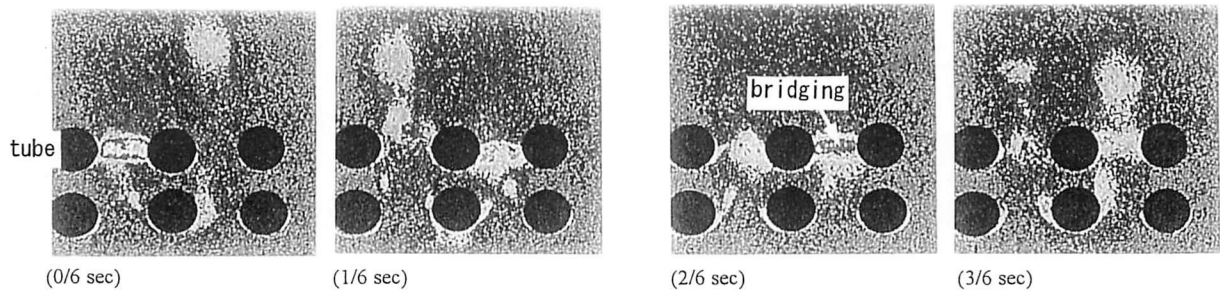


図8 管群周りの流動様式 ($L/D=1.5$, $H/D=2$, $D=40\text{mm}$, $d_s=218\mu\text{m}$, $J_G/J_{Gmf}=1$)

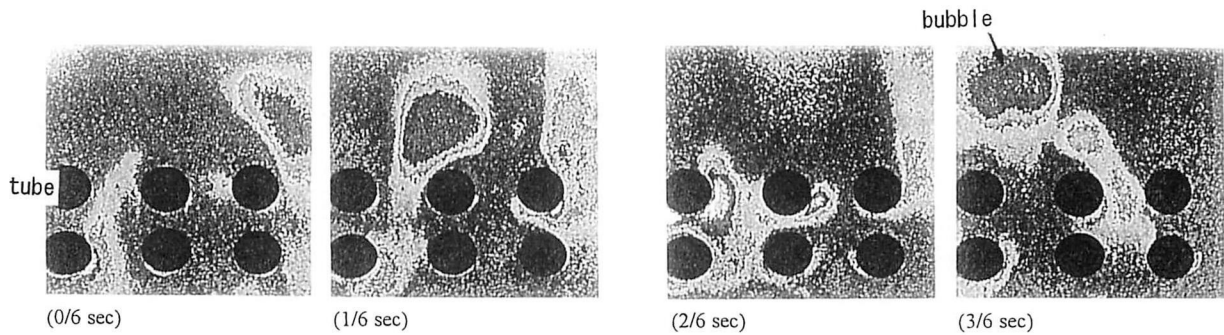


図9 管群周りの流動様式 ($L/D=1.5$, $H/D=2$, $D=40\text{mm}$, $d_s=218\mu\text{m}$, $J_G/J_{Gmf}=4$)

0.062m/s ($J_G/J_{Gmf}=3.88$)である。色の濃度はおよそポイド率の値に応じて設定され、図中の白の矢印で示す丸の部分が粗大粒子を、黒の矢印で示す部分が気泡を表している。図6に示す粗大粒子の密度が大きい場合には、層材中を層材の動きと共に緩やかに上昇していた粗大粒子は、その極く近傍に気泡が接近するとその気泡ウェークに引きずられるように一時的に急上昇するが、気泡の上昇速度が大きいために取り残される。その後下方から上昇した気泡が追いつくと、気泡内を貫通して落下し、気泡ウェーク部分を通過して再び層材中に残されることになる。このように粗大粒子は気泡の運動にともなってランダムに上下動を繰り返しながら徐々に上昇していく。

一方、粗大粒子の密度が小さい場合には、図7に示すようにその近傍を大きな気泡が通過すると、その気泡に取り込まれて気泡とともに急上昇していくことが分かる。

気泡周りの層材の運動を気泡に視点をおいて考えると、Kuniiら⁷⁾によれば、層材は気泡の周りを落下して気泡ウェーク部分に堆積し、その後そのウェークを構成する層材を更新するように順次気泡ウェークから排除されていく。したがって気泡下端のウェーク界面は気泡とほぼ同じ速度を持っていることになり、密度の小さい粒子はこの気泡ウェークの界面に乗った形で移動しているのである。

4.2 管群内フローパターン

図8に画像処理によって得られたポイド率分布の時間変化一例を示す。管群の配置のピッチは垂直方向に $L/D=1.5$ 、水平方向に $H/D=2.0$ (L と H は管の中心間

距離、 D は管直径)とした格子配列で、 $J_G/J_{Gmf}=1$ つまり流動化開始状態である。図中の黒丸が管群を表し、白あるいは黒の矢印で示す部分がポイド率の比較的高い部分に対応する。まず全体的な特徴として、各管の上流側、この図では管の下側の淀み点近傍のポイド率が比較的高いこと (Gas pocket) である。さらに各管の下流側の淀み点、つまり管の上側にはポイド率のかなり低い部分 (Stagnation cap of sand) が存在し、特に気相容積流束が低い、しかも管の横ピッチがここに示したように比較的狭い場合には、このStagnation capは管間を通る気泡によってあまり攪乱されないことがわかる。さらにこの図において典型的な特徴は、2列目の管間にブリッジングが認められることである。このブリッジングは条件によっては0.5-1.5秒持続し、時間経過と共に気泡を吸収すると共に下方に拡大して、最後は大きな気泡を形成して崩壊する。この気泡の上昇と共にそのウェーク部分によって運ばれる層材の上昇とは反対に、隣の管間には層材の下向きの動きが引き起こされ、そこでは気泡と層材のいわば対向流が形成され、ポイド率が高くなって再びブリッジングが形成される。これも時間と共に崩壊して、最初と同じ場所にブリッジングが再び現われる。

気相容積流束が大きく $J_G/J_{Gmf}=4.0$ の場合には図9に示すように、気相は主として気泡として運ばれ、管間を通過する際に管間のみならず管の後流部分をもよく攪拌してポイド率も図8の場合に比較して高くなる。このような場合には管の周囲の層材の運動も活発で、ブリッジングは発生しないことが分かる。

5. 結言

中性子ラジオグラフィによって流動層を可視化し、内部のフローパターンの観測、ならびに画像処理によるボイド率の定量計測を行った。ここでの議論はラジオグラフィの有効性を示すための定性的な議論に留めたが、別途報告^{6,8)}しているようにかなりの精度で定量計測が可能である。中性子ラジオグラフィは今後のこの分野の研究開発にとって重要な計測手段の一つになるだろう。

参 考 文 献

- (1) Kunii, D. and Levenspiel, O., Fluidization Engineering, 2nd edition, (1991), 226-228, Butterworth-Heinemann, Boston.
- (2) Takenaka, N., Fujii, T., Akagawa, K., Ono, A., Sonoda, K., Nishizaki, K., and Asano, H., Application of Neutron Radiography to Visualization of Multiphase Flows, Flow Meas. Instrum., 1(1990), 149-156.
- (3) Tsuji, Y., Kawaguchi, T. and Tanaka, T., Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed, Powder Technology, 77(1993)79-87.
- (4) Takenaka, N., Asano, H., Fujii, T., Wada, T., Matsubayashi, M. and Tsuruno, A., Three-dimensional Void Fraction Measurement of Two-Phase Flow in a Rod Bundle by Neutron Radiography, Nucl. Instr. & Methods in Physics Research, Sec. A, 377 (1996), 115-118.
- (5) 三島嘉一郎, 竹中信幸, 中性子ラジオグラフィによる混相流の可視化, 混相流, 5-2 (1991), 102-118.
- (6) 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, 日本機械学会論文集, 62-601 (1996), 3413 - 3420.
- (7) 文献(1), 216-217.
- (8) 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, Nucl. Instr. & Methods in Physics Research, Sec. A, 377 (1996), 144-147.