438

中性子ラジオグラフィによる流動層熱交換器内 層材挙動の可視化

小澤 守, 梅川 尚嗣(関西大学), 小野寺 俊和,
古井 秀治(関西大院), 竹中 信幸(神戸大学)

Flow Visualization of Bed-Materials in a Fluidized-Bed Heat Exchanger Model by Neutron Radiography

Mamoru OZAWA, Hisashi UMEKAWA, Toshikazu ONODERA,
Shuji FURUI and Nobuyuki TAKENAKA

ABSTRACT

Flow visualization of bed-materials in a fluidized bed was conducted using neutron radiography. The silica sand of the bed-materials are almost transparent for the neutron beam. To have a clear contrast of the visualized image, small amount of sand coated by cadmium sulfate was mixed into the bed-materials. Image processing technique was successfully applied to these images to obtain quantitative data of void fraction distribution.

Keywords: Visualization, Neutron radiography, Fluidized-bed, Image processing, Void fraction

1. 緒言

近年のエネルギー事情や環境問題との関わりから、石炭しかも低品位炭や廃棄物、さらにはごみなどから作成した RDF などの燃焼について、特に環境負荷の小さい燃焼方式が注目されている。そのひとつがリジェネバーナを用いた高温空気燃焼であり、他方は今回の対象である流動層燃焼である。流動層燃焼では層内に砂などの媒体を入れて燃焼させるもので、層材の熱容量が大きいと、結果的に低温において燃焼が可能となる。これによって燃焼時に発生するいわゆる Thermal NOx の発生を抑制できるばかりでなく、層内に消石灰など混入してやれば層内脱硫が可能である。燃料の材質に対しても適応性が高く、現在では PFBC、IGCC など石炭ガス化コンバインド発電の中心技術としても大きな注目を集めている。

流動層に関しては従来から主として化学工学分野において広範囲な研究がなされてきた。その成果はいくつかの成書として刊行されている。しかしながら特に層内に蒸発管などを配置した熱交換器では、管の層材による磨耗のみならず蒸発管内のドライアウトやバーンアウトの問題があり、さらに高性能化を図るためにも、管外熱伝達率の評価が設計のキポイントになっている。熱伝達率に関しては可視化ができなくても測定可能であるが、問題は管周囲の熱伝達率に大きな分布が存在しうること、また層内を上昇する流動化ガスの挙動によって熱伝達率そのものが時間的に変動することなど、

十分把握した上での設計が必要となってきた。さらに石炭など固形燃料をうまく燃焼させるには層内での滞留時間の評価、また粒子径や密度の異なる粒子を混入することから生じ得るセグレゲーション、それらの基礎となる層内循環問題など今後十分な検討が必要となる。

著者らは数年前からこのような流動層を可視化し、画像処理により定量化計測ができないかと考え、熱中性子ラジオグラフィや X 線ラジオグラフィの応用を検討してきた⁽¹⁻⁸⁾。本報では主として中性子ラジオグラフィについての最近の研究成果について報告し、次報では X 線ラジオグラフィによる同一の流動層モデルの可視化について報告する。

2. 中性子ラジオグラフィ

中性子ラジオグラフィについてはすでに多くの解説や論文が公表され、ここで改めて詳細に述べる必要はないが、基本的な考え方についてのみ触れておく。

図1は中性子に対する各種物質の質量減衰係数をプロットしたものである⁽⁹⁾。図中の実線は X 線に対するもので、原子番号の大きい物質ほど質量減衰係数が大きい。一方、中性子に対しては、減衰は物質ごとに大きく異なり、例えば鉄やアルミニウムは減衰係数がかなり小さいのに対して、水素、ガドリニウムやホウ素、カドミウムなどは減衰係数が大きい。従って、高温高压下にある SUS 管内の気液二相流などの可視化には極めて有効な可視化法といえる。

Fig.1 Attenuation coefficient

珪砂を用いた流動層では可視化するためにはほぼ層の厚さを薄くしてやらなければ可視光では見えないし、もし可視光に固執するなら、層材として透明なガラス球を用いる必要がある。従来からこのような流動層の放射線による計測としてはX線ラジオグラフィが最も一般的であり⁽¹⁰⁾、Roweらを中心として精力的に行われてきた。一方、中性子を用いた可視化に関しては、いくつかの試みがなされてきてはいたが、定量化も含めて実験を行ってきたのは著者らを除けばごくわずかである。

可視化に利用したのは日本原子力研究所東海研究所の研究炉 JRR-3M で、そこに設置されている熱中性子ラジオグラフィ装置(TNRF-2)である。これは中性子束が 1.5×10^8 n/cm²s と非常に高く、また n/γ 比は 62.5 n/cm²/μSv で、 γ -線によるバックグラウンドノイズに相対的にコントラストのよい画像が得られる。さらにコリメータ比 L/D は 176 (width) × 153 (height) である。なおこの実験における可視化映像の解像度約 0.5mm/ピクセルであった。重水によって減速され熱中性子として実験装置に照射された中性子ビームは、蛍光コンバータによって可視光に変換され、SIT管カメラによって撮影され、VTRによって記録される。

3. 実験装置

実験装置は図2に示すように全体的には既報と同様の幅 300mm、高さ 700mm、奥行き 100mm のアルミニウム製矩形容器内に、管群もどとして外径 25mm のガラス管に伝熱実験を行うために SUS 箔を巻きつけたもので、配列ピッチは H/D=1.5 および 2.0 の 2 種類とした。層材として珪砂(体積平均径 $d_p=218 \mu\text{m}$ 、密度= 2555kg/m^3)を充填したものをを用いた。層材粒子は 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。本実験においては、層材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 $J_{gm}=0.031 \text{m/s}$ であった。層材は、図3に示すように、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

Fig.2 Test section

Fig.3 Experimental setup

て所定の流量に設定して層下部から吹き込むことで、流動化される。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層材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、層材に用いたものと同一の珪砂に CdSO_4 水溶液でコーティングを施したものを 0.36wt% の割合で層材に混入することで中性子に対する色付けを行った。

可視化映像は 30frame/s でビデオ録画されている。中性子ラジオグラフィによる可視化の詳細については既報に詳しいのでここでは省略するが、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)に対する積分した情報として得られることになる。しかし流動層では主たる挙動は流動化ガスの進行方向(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層材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。

4. 画像処理

可視化画像からボイド率、空隙率などの定量化した情報を得るためには画像処理が必要である。詳細は既報⁽⁸⁾に詳

中性子ラジオグラフィによる流動層熱交換器内層材挙動の可視化

いので、ここでは簡単に書いておく。

まず中性子を照射しない状態で得られたオフセット画像を用いて、暗電流によるオフセットを可視化画像から差引く。ついで装置内に層材を充填しない状態で求められた画像、層材を充填し、色づけのための層材を混入して十分流動化し

たのち、流動化空気を止め、静止した状態での画像を用いて、シェーディング補正ならびに空隙率の定量化がなされる。図4に生画像、オフセット補正後の画像、シェーディング補正後の画像をそれぞれ示しておく。

Fig.4 Example of image processing

Fig.5 Flow pattern in vertical tube-bank.

Fig.6 Void fraction fluctuation

Fig.7 Time-averaged void fraction

5. 垂直管群での気泡挙動

図5に管群配列ピッチ $H/D=1.5$ の場合の一例を示す。白い部分が気泡で、縦の薄く見える3本の管があり、管内の線は熱電対および電源ラインである。気泡径が比較的小さい場合には管間の空間を上昇する場合や、気泡が管にまわりつくように周囲を蛇行して上昇しているのがわかる。気泡の大きさが大きい場合には管を取り巻いて串刺し状になるのが一般的である。

ここで示した画像から空隙率の変動を求めることができる。図6と7にその一例を示す。ここで示した空隙率は管群中央の模擬伝熱管の高さ方向に3箇所、管間側の管側面の 5×20 ピクセルでの空間平均値の時間変動並びに時間平均値を表している。管の右側と左側でほぼ同位相で同じ程度の振幅を示しているのは管を取り巻いて気泡が上昇していることに対応している。

6. 結言

中性子ラジオグラフィによって実用装置で用いられている層材である珪砂を用いた流動層の可視化を行った。これによって流動層のフローパターンの可視化が可能になったばかりでなく、熱伝達率などに大きく影響する空隙率の定量化計測が可能になった。

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、謝意を表する。

参考文献

- (1) 小澤守, 梅川尚嗣, 松田健, 竹中信幸, 松林政仁, 機

論B, Vol.62, No.601, 3413-3420 (1996).

- (2) Ozawa, M., Umekawa, H., Matsuda, T., Takenaka, N., Tsuruno, A. and Matsubayashi, M., Proc. 5th World Conf. on Neutron Radiography, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung E.V., 610-616 (1996).

- (3) Ozawa, M., Umekawa, H., Matsuda, T., Takenaka, N., Tsuruno, A. and Matsubayashi, M., Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Sec.A, 337, 144-147 (1996).

- (4) Ozawa, M., Umekawa, H., Matsuda, T., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Proc. of Int. Conf. on Power Engineering-97, 151-156, JSME, Tokyo (1997).

- (5) Umekawa, H., Ozawa, M., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec.A, 424, 77-83 (1999).

- (6) Ozawa, M., Umekawa, H., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Proc. ICMF'98, Paper No.215, Lyon (1998).

- (7) Ozawa, M., Umekawa, H., Matsuda, T., Takenaka, N. and Matsubayashi, M., Heat Transfer-1998, 2, 75-80, (1998).

- (8) 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 (2000).

- (9) Takenaka, N., Fujii, T., Akagawa, K., Ono, A., Sonoda, K., Nishizaki, K. and Asano, H. (1990), Flow Meas. Instrum., Vol.1, pp.149-156.

- (10) Rowe, P.N. and Partridge, B.A., Proc. Symp. on Interaction between Fluids and Particles, 135-142, Instn. Chem. Engrs, London (1962).