X線ラジオグラフィによる流動層の可視化

古井 秀治[○](関西大院), 小澤 守(関西大学), 梅川 尚嗣

Flow Visualization of Fluidized-Bed by X-ray Radiography

Shuji FURUI, Hisashi UMEKAWA and Mamoru OZAWA

ABSTRACT

Fluidized-beds are important equipments in many industrial systems, such as chemical reactors, coal and/or incineration firing systems. Bed-material movement in the fluidized-bed has a prime important in the heat transfer process. The fluidized-bed installed vertical-tubes was visualized by X-ray radiography system. Image processing technique has been developed to measure quantitative data of void fraction by X-ray radiography. The visualized images clearly showed an interaction between rising bubbles and tubes.

Keywords : Fluidized-bed, X-ray radiography, Image processing technique, Void fraction

1. 緒論

流動層熱交換器は伝熱特性において、非常に良い熱伝達特性を有しており、その伝熱特性は層材の挙動に大きく依存していることは明らかである。それゆえ伝熱特性を理解するにあたって層材の挙動（フローパターン）を把握することは非常に重要な課題の一つである。すでに Rowe らにより X 線写真による流動層内の可視化は行われてきたが^(2,3)、解像度が低く定量的なデータを得るまでには至っていない。そこで本研究では最新の X 線ラジオグラフィシステムを用い、すでに実績のある中性子ラジオグラフィシステムによる可視化、および画像処理法を参考に⁽⁴⁾、縦形管群を挿入された流動層内の可視化実験を行い、得られた画像に画像処理を施すことにより、層内の空隙率（ボイド率）を定量的に評価した。

2. 実験装置および実験方法

テストセクションは Fig.1 に示すような幅 320mm、高さ 720mm、奥行き 115mm（内寸法は幅 300mm、奥行き 100mm）の矩形容器で、材質は放射線に対して比較的透過率の高いアルミニウムを用いている。テストセクション下部には流動化ガスを流入させるためのエアレーションタップがあり、その上方にある分散板を通して層内に気体がほぼ均一に流入できる構成になっている。このテストセクションには模擬伝熱管であるアルミニウムパイプ（ $\phi=25\text{mm}$ ）を垂直に挿入できるようになっており、取り付ける管ピッチ H/D は 1.2, 1.5, 2.0, 3.0 と 4 つのパターンに変えることができるようになっている。

本研究では画像処理において、後に示す Eq.(2)で層材の定数項である質量減衰項 $\rho_s\mu_{ms}$ を求めるために校正用装置

を用いた。校正用装置の概略図を Fig.2 に示す。校正用装置は 4 個のセルからできており、それぞれ 100mm, 75mm, 50mm, 25mm の静止層を形成できるようになっている。Eq.(4)での便宜上、それぞれ $n=1, 2, 3, 4$ と番号をつけた。また Eq.(4)において、壁の定数項 $\rho_w\mu_{mw}\delta_w$ がテストセクションを同じ値をもつように、同じ材質でかつ X 線の入射方向に対して同じ厚みをもつようになっている。

Fig.1 Test section

Fig.2 Calibration model

Fig.3 Experimental apparatus

層材には平均粒子径 $218\mu\text{m}$, 密度 2555kg/m^3 のけい砂を用いており静止層高は 370mm , 静止時のボイド率が 0.4 , 流動化開始速度が 0.07m/s であった。

実験装置を Fig.3 に示す。本実験では、流動化ガスとして N_2 タンクから供給される、窒素ガスを用いており、減圧弁、圧力計、臨界ノズルを通じて所定の流量に調節することができるようになっている。

可視化実験には島津製作所製 X 線テレビ検査システム FI-30 を用い、 30frames/s でデジタルビデオを用いて画像を記録した。実験時の X 線出力は 75kV , 1.0mA である。

3. 画像処理法

3.1 可視化画像の輝度値

本研究では X 線ラジオグラフィシステムによって可視化を行い、得られた画像の輝度値から流動層内のボイド率を求める。画像処理法およびボイド率の算出法については以下のとおりである。

一般に強度が I_0 の放射線が厚さ δ , 密度 ρ , 質量減衰係数

μ_m の照射体を通して I に減衰したとき, I_0 と I の関係は次式で表される。

$$I = I_0 \exp(-\rho \mu_m \delta) \quad (1)$$

よって, X 線ラジオグラフィにより得られた流動層の画像の輝度値分布 $S(x, y, t)$ は

$$S(x, y, t) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mw} \delta_w - \{1 - \varepsilon(x, y, t)\} \rho_s \mu_{ms} \delta_s] + O(x, y) \quad (2)$$

ここで $G(x, y)$, $O(x, y)$ はそれぞれゲインとオフセットである。添字 w , s はそれぞれテストセクションの壁, 層材 (けい砂) を意味し, x , y はそれぞれ水平, 垂直方向座標, t は時間を表している。

実験で撮影した画像は以下の 4 種類である。

・オフセット画像

X 線を照射しない状態で得られる暗電流の画像。オフセットの画像の輝度値は $O(x, y)$ で表される。

・静止層画像

テストセクションに層材を充填した静止層時の画像。静止層時のボイド率を ε_0 とすると, 輝度値 S_0 は次式となる。

$$S_0(x, y) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mw} \delta_w - (1 - \varepsilon_0) \rho_s \mu_{ms} \delta_s] + O(x, y) \quad (3)$$

・実験画像

実験中の画像。輝度値は Eq.(2) で表される。

・校正用画像

X 線によるけい砂に対する減衰項 $\rho_s \mu_{ms} \delta_s$ のうち, $\rho_s \mu_{ms}$ の値を求めるための画像。輝度値 S_p は次式で表される。

$$S_{p,n}(x, y) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mw} \delta_w - (1 - \varepsilon_0) \rho_s \mu_{ms} \delta_{s,n}] + O(x, y) \quad (4)$$

3.2 オフセット補正

オフセット補正は, 対象となっている画像の輝度値から単純にオフセットの画像の輝度値を差し引きすることによって行う。

3.3 層材の減衰項 $\rho_s \mu_{ms}$

校正用装置を用い, 以下の処理を行って $\rho_s \mu_{ms}$ の値を決定した。

$$\begin{aligned} \log S_{p,n} - \log S_{p,n+1} \\ = -(1 - \varepsilon_0) \rho_s \mu_{ms} (\delta_{s,n} - \delta_{s,n+1}) \end{aligned} \quad (5)$$

より, 校正用のモデルの $n=1 \sim 3$ について平均すると

$$\rho_s \mu_{ms} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{n=1}^3 \frac{\log S_{p,n} - \log S_{p,n+1}}{-(1 - \varepsilon_0)(\delta_{s,n} - \delta_{s,n+1})} \quad (6)$$

3.4 層厚 δ_s の決定

後に示す Eq.(9) において, δ_s の値を代入する際に X 線入射方向から見て垂直管がない部分は $\delta_s = 0.1[\text{m}]$, 垂直管がある部分については各 x 座標における管の厚さを差し引く配慮が必要である。そこで管がある部分での x 座標を特に $x_t (-0.0125 \leq x_t \leq 0.0125)$ とし, 管中心の x 座標を $x_t = 0$ とすると, δ_s は

X線ラジオグラフィによる流動層の可視化

Fig.4 Luminance distribution of δ_s

$\delta_s = 0.1$ (管のない部分)

$$\delta_s = 0.1 - 2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - x_i^2} \quad (\text{管のある部分}) \quad (7)$$

$d=0.025[\text{m}]$ (管直径)

で表される。

そこで Fig.4 に示すような輝度分布を持つ画像を作成し、画像間の演算により処理した。但し、X線の照射間に管壁を構成するアルミニウムの厚さが異なっているが、これは実験画像と静止画像間の対数差をとることで相殺される。

3.5 シェーディング補正およびボイド率の算出

実験画像と静止層画像の輝度値の対数差をとることにより $G(x, y)$ を消去し、シェーディング補正を行った。

$$\log \frac{S(x, y, t)}{S_0(x, y)} = \{\varepsilon(x, y, t) - \varepsilon_0\} \rho_s \mu_{ms} \delta_s \quad (8)$$

これより、ボイド率 ε は次式で求められる。

$$\varepsilon(x, y, t) = \frac{\log \frac{S(x, y, t)}{S_0(x, y)}}{\rho_s \mu_{ms} \delta_s} + \varepsilon_0 \quad (9)$$

Fig.5 Image processing

Fig.6 Visualized images

Fig.7 Void fraction fluctuation

以上より Eq.(6)と Eq.(7), Eq.(9)を用いることにより流動層内におけるボイド率の値を画像の輝度値として求めることができる。

4. 実験結果

校正用装置を用いて測定したけい砂のX線に対する減衰項 $\rho_s \mu_{ms}$ の値は 46.36 であった。

Fig.5 に画像処理過程として, 原画像, オフセット補正後, シェーディング補正後および処理後のボイド率を輝度値として表した画像をそれぞれ示す。Fig.6 に時系列データの例を示しており, この図において明るく白く見える部分が気泡であり, 黒い部分が砂の層でボイド率が比較的低いことを示している。

また, 原画像において右側に見えるのが垂直管であるが, 画像処理後には壁の項とともにほぼ補正されている。

画像からもわかるように層下部で発生した気泡は, 管を覆うようにして上昇する。また空塔速度を大きくすると, 気泡径, 発生頻度ともに大きくなった。

Fig.7 に画像の輝度値から得たボイド率の時間変動の例を示す。今回測定したボイド率は層底部からの高さを z とし, $z=227\text{mm}$, 278mm の位置における管の左側面 9×49 pixel (約 $1.2\text{mm} \times 6.7\text{mm}$) の範囲の空間平均値である。Fig.7 において, ボイド率が急激に上昇している部分から気泡の通過が確認できる。また, $z=227\text{mm}$, 278mm の位置でのグラフのもつピークに時間的なずれがあることから, 気泡の上昇が確認でき, 画像データより得たボイド率から層内の様子を把握できることが確認された。

5. 結言

X線ラジオグラフィを用いて, 流動層内の可視化を行い, フローパターンの可視化が可能なることに加え, ボイド率の定量測定が可能であることを示した。また, 中性子ラジオグラフィにおけるように適当なトレーサー粒子を混入すれば, PIV 法によって速度分布の計測も可能となる。

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。また実験に際しては関西大学工学部松本貴洋君の協力を得た。

参考文献

- (1) 鞭巖, 堀尾正靱, 流動層の反応工学, 培風館, (1984).
- (2) Rowe, P.N., Partridge B.A., *Trans.Inst.Chem. Eng.*, 43, 157(1965).
- (3) Horio, M., Nonaka, A. *AIChE J.*, 33,1865(1987).
- (4) 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, Lyon(1998).