粉体層中に形成される空間率分布の測定法について

牧 野 和 孝*、東 山 明*
山 田 昌 治*、倉 光 鋼太郎*

A New Measuring System of the Porosity Distribution Generated in Powder Bed

by
Kazutaka MAKINO†, Akira HIGASHIYAMA†
Masaharu YAMADA† and Kohtaro KURAMITSU†

In order to elucidate the mechanical behavior of powder, the spatial porosity distribution in the powder bed can be considered to be one of the most important informations. However, the method to measure the porosity distribution has not been established sufficiently yet. Then, in this paper, concentrating on this problem, a new measuring system of the spatial porosity distribution formed in the powder bed, which is constituted of X-ray radiograph set up, a pair of cell (test and reference) for the porosity determination and turbidity meter, was presented. And, its measurement accuracy was experimentally checked.

緒 言

粉粒体プロセスにおける粉粒体の挙動、特に力学的挙動は、粉粒体層内に形成される空間率分布によって著しい影響を受けるものと考えられる。例えば、貯槽装置内部の閉塞現象、混合機の所要動力、成形体あるいは堆積粉粒体層の力学的強度とか、レオロジー的特性等の基本的な解明には、粉粒体層中の空間率分布を知ることが不可欠である。しかしながら、現在までのところ空間率分布の測定法は十分確立されているとは云えない^{1,2)}。このことは粉粒体層内の空間率分布の測定法の確立が粉体工学にとって緊急に解明しなくてはならない基礎的な課題の一つであることを意味している。そこで本研究では、この点に注目し、X線透視撮影法を利用した空間率分布の定量的測定法を検討したので報告する。

1. 測定原理

粉粒体層にX線を透過させると、X線はその進行方

向上に存在する粉粒体(= $l\rho$)によって吸収される。ここで、透過率がLambert-Beerの法則に従うとすれば³⁾、粉粒体層によるX線の透過率 I/I_0 は、次式によって記述できる。

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-Kl\rho) \quad (1)$$

ただし、 I_0 および I は、それぞれ粉粒体層前後の入射側および透過側のX線強度、 l は粉粒体層厚さ、 ρ は粉粒体高密度および K は粉粒体層によって決まる吸光係数である。

一方、高密度 ρ と空間率 ϵ との間には、それぞれの定義より次式が成り立つ。

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho}{\rho_p} \quad (2)$$

ここで ρ_p は粉粒体の粒子密度である。

Eq.(2)をEq.(1)に代入すれば、次式を得る。

$$\frac{I}{I_0} = \exp\{-Kl\rho_p(1-\epsilon)\} \quad (3)$$

すなわち、Eq.(3)から、ある粉粒体層に対するX線透過率 I/I_0 は、X線の進行方向に存在する粉粒体の全容積 $l(1-\epsilon)$ に依存し、かつ、その増加に対して指数関数的に減少することがわかる。さて、いま、Fig. 1 のごとき幾何学的形状をした空間率定量用セル a) と目的とするテストセル b) を作成し、それぞれに同一の供

昭和 60 年 3 月 15 日受理

* 秋田大学鉱山学部資源化学工学科(〒010 秋田市手形学園町1-1)
TEL 0188-33-5261 内 750

† Dept. of Chem. Eng. for Resources, Mining College,
Akita University

Fig. 1 Conceptual diagram of test and reference cell

Fig. 2 Conceptual diagram of X-ray radiograph system

試粉粒体を充填することを考える。そして、この2つのセルをX線発生源から同一の距離にFig. 2のごとく背面をそろえて設定し、かつ、セル背面に工業用X線フィルムを付設し、X線写真撮影を行う。この時、各セルの任意の位置のX線透過率は、それぞれ次式で与えられる。

空間率定量用セルに対して、

$$\frac{I_R}{I_0} = \exp \{-K\rho_p l (1 - \epsilon_0)\} \quad (4)$$

テストセルに対して

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp \{-K\rho_p L_0 (1 - \epsilon)\} \quad (5)$$

ただし、 I_R 、 I_t は、それぞれ空間率定量用セルの任意の厚さ l の位置ならびにテストセルの任意の位置におけるX線透過強度である。また ϵ_0 は、あらかじめ均一に充填した空間率定量用セル内の空間率である。したがって、Fig. 2のごとく各セルを透過するX線でX線フィルムを感光させ、現象すれば、X線写真の濃淡度が、それぞれのセルの各位置でのX線透過強度 I_R 、 I_t に対応することがわかる。したがって、テストセルの任意位置における空間率 ϵ は、Eqs. (4), (5)より次式のごとく求められる。

$$\epsilon = 1 - (1 - \epsilon_0) \frac{l}{L_0} \quad (6)$$

以上が、X線透視撮影法を用いる粉粒体層の空間率分布の測定原理である。

なお、X線写真の濃淡度は、たとえば光学的原理を用いたプレスケール(富士フィルム製)などにより⁴⁾、定量的に評価することができる。

2. 測定原理の有効性の検討

測定原理の有効性を検討するために、次のような実験を行った。Fig. 3のごとく厚さの相違する種々のセルを作成し、それぞれのセルにあらかじめ供試粉体(本実験においては、ケイ砂(平均粒径230 μ m、内部摩擦角38.5°)を使用)をセル全体をランダムに振盪させ均一に充填し、そのときの空間率 ϵ_t を求める。そして、テストセルの一つをFig. 2のごとく空間率定量用セル(空間率 ϵ_0)と組み合わせて、前述のごとくX線撮影をする。以上の撮影をすべてのテストセルに対して行う^{*注)}。このようにして得られた一連のX線写真に対して厚さ L_0 のテストセル部の濃淡度に丁度等しい空間率定量用セル内における位置の厚さ l_{xx} を測定する。もし、本測定原理が正しければ、厚さ l_{xx} は、次式で示される l に一致するはずである。

$$l = \frac{1 - \epsilon_t}{1 - \epsilon_0} L_0 \quad (7)$$

Fig. 4には、以上の実験より得られた l_{xx} と l との関係をプロットしてある。これによれば、両者は極めて良好に一致していることがわかる。次に、本測定原理が有効となるためには、粉粒体層に対するX線透過率とX線写真の濃淡度との関係が次式のごとく必要である。

$$\frac{I_R}{I_0} \propto (\text{濃淡度}) \quad (8)$$

*注) Fig. 2からもわかるようにX線発生源は点源である。したがって、点源の拡大照射によって照射面の中央部と両端におけるそれぞれのX線透過距離が互いに異なる。このためX線フィルム上の感光度が相違し、最終結果に誤差が生じる。しかしながら、本報においては前述の両端での各X線透過距離は中央部のそれに対してわずか0.55%増加しているにすぎないことが幾何学的考察からわかる。したがって、X線が点源であることによる誤差は無視しうるものと考えられる。

一方、誤差を生ずる別の因子として定量セル内の一様充填があり、それを実現することが測定上望ましいと考えられる。本報では、定量セル内での一様充填を実現するために、所定量の粉体をセルに充填したのち、セル全体を数10回ランダムに振動する等の工夫をした。なお、セル内の任意高さにおける水平方向の一様性についてはその都度イメージインテンシファイアで確認した。

Fig. 3 Dimensions of each cell

Fig. 4 Relation between l and l_{ex}

Fig. 5 Log-penetration law of turbidity by prescale

このことは、空間率測定用セルに対するX線写真の濃淡度(たとえば、プレスケールによる測定)が $l(1-\epsilon)$ に対して指数関数的に減少するかどうかを実験的に検

Porosity
 ϵ (-)

c) Measurement result

Fig. 6 Measurement example of porosity distribution formed in hopper

討することによって明らかとなる。Fig. 5 には、その結果を示してあるが、濃淡度は $l(1-\epsilon)$ に対して、片対数グラフ上で直線的に減少していることがわかる。以上より本測定法は、十分な精度で粉粒体層内の空間率分布を測定できるものと結論できる。Fig. 6 には、参考のため容器から粉体を一定量排出させ、出口を閉

じ、静止した状態でのテストセル内の空間率分布の測定結果を示してある。これによればテストセル内には特有な空間率分布が形成されていることがわかる (Fig. 6b))。そして、この結果と定量用セルのそれ (Fig. 6a)) に対して本報での測定法を適用すれば、Fig. 6c) のような定量的な空間率分布が得られる。

結 言

以上、本報においては、粉体層の空間率分布の測定

法の可能性について実験的に検討した。その結果、X線透視撮影装置、空間率定量用セルおよび濃淡度計から構成される測定システムによる空間率の測定精度の妥当性を明らかにし、かつ本測定法による測定結果の一例を示した。

Nomenclature

I : X-ray intensity	[]	l_{rx} : Thickness of the reference cell at the position	
I_0 : X-ray intensity of incidence	[]	of equivalent turbidity to that of the test cell	[cm]
I_R : X-ray intensity penetrated through the reference cell	[]	ϵ : Porosity of powder	(-)
I_t : X-ray intensity penetrated through the test cell	[]	ϵ_0 : Porosity of powder in the reference cell	(-)
L_0 : Thickness of the test cell	[cm]	ϵ_t : Porosity of powder in the test cell	(-)
l : Thickness of the reference cell at a specified position	[cm]	κ : Absorption coefficient	[g ⁻¹ cm ²]
		ρ : Bulk density of powder	[g cm ⁻³]
		ρ_p : Particle density	[g cm ⁻³]

Literature Cited

- 1) Cutress, J. O. and R. F. Pulfer : *Powder Technology*, 1, 213 (1967)
- 2) Blair-Fish, P. M. and P. L. Blansby : *J. Eng. Ind.*, 95, 17 (1973)
- 3) Moore, W. J. (Translated by R. Fujishiro) : "Butsuri Kagaku", Tokyo Kagaku Dojin, p. 758 (1979)
- 4) Kuri, I. and H. Kuno : *J. of the Soc. of Powder Technology, Japan*, 5, [6], 616 (1979)