二次元粉体振動層における粒子循環速度の垂直成分

秋山 鐵夫*, 井口 達三郎*, 鴻野 成夫*, 太田 篤*

The Vertical Component of the Circulation Velocity of Particles in Two Dimensional Vibrating Particle Beds

by

Tetsuo AKIYAMA[†], Tatsusaburo IGUCHI[†], Shigeo KONO[†]

and Atsushi OHTA[†]

This paper describes a visual study of the circulation pattern of glass beads in two dimensional vibrating particle beds. Flow visualization was achieved by filling the vessel with layers of glass beads of alternately contrasting color. The visual study revealed that particles rise in the central region and travel down near the side walls, with two relatively static layers being formed near the top and bottom of the bed. In addition, the circulation velocity was observed to increase with increasing bed height.

Key Words : Particle Motion, Circulation, Vibrated Bed

1. 緒 言

垂直方向に振動している粉体振動層内の粒子は、中央部で上昇し側壁に沿って下降することは一般的に知られている。Faraday¹⁾は、1831年に粒子を充填した容器の下からスピーカーにより振動を加えると、粒子の循環運動が起り中央部が盛り上がる現象を観察している。近年、計算機の性能向上にともない粒子要素法^{2,3)}などを用い、粒子群の挙動を数値シミュレーションにより可視化する研究が盛んに行われている。粉体振動層においても粒子の動きを実験・数値シミュレーション両面において解明し、Faradayの観察した現象を説明しようとする試みが多くの研究者によってなされている^{4~9)}。しかしこれらの研究は、定性的な解析か粉体層の形状に関するものが主で、粒子の動きの定量的な測定は報告されていない。

高橋ら¹⁰⁾は、45°の傾きを側壁に持つホッパー内循環

流れの垂直方向速度成分を測定している。粒子は側壁に沿ったところで上方へ移動し、反転して中央部で下降し一部は外へ分流するが大部分は下方で再び反転上昇すると報告している。この動きはFaradayの報告している粒子循環方向とは逆である。容器形状の違いにより循環パターンも違ってくるものと思われる。Akiyamaら¹¹⁾は垂直方向に振動する平均粒子径99 μ m、層高100mm(断面100×100mm)の粉体振動層の空気圧分布を測定し、一周期中の最大空気圧が層底(深さ100mm)ではなく層表面に比較的近い位置(深さ25mm)の側壁面で観測されると報告している。この圧力の逆転現象の発現は粒子径が大きくなるほど高い層高を必要とするが、かなり広い振動条件のもとで起こることがその後の報告で明らかにされている^{12,13)}。

本研究の目的は、第一に粒子挙動を可視化することにより田口の数値シミュレーション結果^{8,9)}の実験的検証をし、粒子循環運動の物理機構をより一層明らかにするデータを提供することであり、第二に上記した空気圧力逆転^{11~13)}と粒子挙動の関連を探ることである。実験は、平らな底を持つ透明なアクリル容器に、着色した粒子と無着色の粒子を交互に(縞状に)充填した二

1993年 6月 7日 受付

* 静岡大学工学部化学工学科 (〒432 浜松市城北 3-5-1)

TEL. 053-471-1171

† Dept. of Chem. Eng., Shizuoka Univ.,
(Hamamatsu 432)

次元粉体振動層を用い、写真撮影により粒子挙動を記録した。壁面における粒子移動速度の垂直方向成分の分布も連続写真から求めた。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。振動容器は縦200×横100×奥行き30mmの亚克力製角型容器を使用した。振動実験前に容器内面に帯電防止剤を塗布、乾燥した。試料粒子として平均粒子径 $\bar{d}_s=99\mu\text{m}$ ($d_s=75\sim124\mu\text{m}$)と $227\mu\text{m}$ ($d_s=209\sim246\mu\text{m}$)のガラスビーズを使用し、層高 $L=60, 100, 140\text{mm}$ ；加速度比 Λ (振動加速度/重力加速度) $=3, 5$ ；振動数 $f=50\text{Hz}$ の条件で実験を行った。振動数50Hzを選んだのは、既報¹³⁾の空気圧力測定の結果と粒子挙動を対応させるためである。試料粒子の一部を青色染料で着色し、無着色の粒子と交互に充填し縞模様(Fig. 2)の粒子層を作製した。着色粒子の厚さは3mmとした。ガラスビーズの物性値はTableに示した。実験は試料粒子を上記した方法で容器に充填し、振動機に固定した後振動開始前の層の状態を写真撮影し、振動開始後5秒間は1秒ごと、それ以後は5秒ごとに写真撮影した。振動数は発振機で、加速度比は加速度計で設定した。1秒間に動いた着色粒子層の距離(最先端)から粒子速度を求めた。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table Physical properties of particles

Property	Small glass beads		Large glass beads	
	Undyed	Dyed	Undyed	Dyed
Size range (μm)	75~124	75~124	209~246	209~246
Mean diameter (μm)	99	99	227	227
Aerated bulk density (kg/m^3)	1420	1370	1500	1480
Packed bulk density (kg/m^3)	1550	1440	1570	1510
Angle of friction (rad)	0.37	0.37	0.41	0.43
Friction coefficient (—)	0.387	0.386	0.434	0.464

3. 結果と考察

Figs. 2~5に $\bar{d}_s=227\mu\text{m}$, $L=140\text{mm}$, $\Lambda=3$, $f=50\text{Hz}$, $t=0, 1, 5, 10\text{s}$ の写真を示す。写真より次のことが観察される。

(1) 粒子層の上部と下部に比較的動きの遅い層が存在する。

(2) 容器壁面の粒子、特に比較的浅い部分の粒子が大きい速度で下降している。

(3) 容器正面中央部において灰色の部分が広がり、ある深さにおいて粒子の一部は下降していることが観測される。このことはある深さの粒子層の水平断面において、Fig. 6に示したように中央部の粒子は上昇し、容器の正・裏面の壁に接している部分(斜線の部分)の粒子が下降していることを示唆している。すなわち、完全な二次元振動層の実現は、本質的に非常に困難なことをFigs. 2~5は示している。これはしかし粉体振動層に限った問題ではなく、二次元粉体層の挙動を可視化の際常に起こる問題である。したがって、二次元粉体層可視化は、主として定性的な研究に用いられるべきであろう。本研究においては、可視化が循環流れの範囲、実験条件の違いによる粒子の相対的な移動速度等の情報を得るには有効であるが、全体の循環速度を正確に求めるには適していないと考えられる。

平均粒子径 $\bar{d}_s=99\mu\text{m}$ のガラスビーズの場合もFigs. 2~5と同じような傾向を示した。特に(3)に記述した正面中央部の粒子下降が $\bar{d}_s=227\mu\text{m}$ の場合より顕著に現れた。

田口の数値シミュレーション^{8,9)}では $\Lambda=1.44$ の時、層中心よりやや上部に中心を持つ軸対称な粒子循環運動が現れ、層下部は余り動いていない。この循環運動は、振動加速度を増すに従い層下部に広がり、 $\Lambda=2.71$ では層全体に大きく広がっている。しかし、実験では $\Lambda=3$ あるいは5の時(層幅100mmより深い粒子層の場合)他の粒子、条件においてもFigs. 2~5に見られるように層下部に比較的動きの遅い部分が観察され

Fig. 2 Flow pattern of particles in the multilayer particle bed of $\bar{d}_s=227\mu\text{m}$, $L=140\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$ and $\Lambda=3$ (initial state)

Fig. 4 Flow pattern of particles in the multilayer particle bed of $\bar{d}_s=227\mu\text{m}$, $L=140\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$ and $\Lambda=3$ ($t=5\text{s}$)

Fig. 3 Flow pattern of particles in the multilayer particle bed of $\bar{d}_s=227\mu\text{m}$, $L=140\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$ and $\Lambda=3$ ($t=1\text{s}$)

Fig. 5 Flow pattern of particles in the multilayer particle bed of $\bar{d}_s=227\mu\text{m}$, $L=140\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$ and $\Lambda=3$ ($t=10\text{s}$)

た。シミュレーションモデルは、 Λ の値が小さいとき実験結果とかなりよい一致を示すが、 Λ の値が大きくなるに従い実験結果と隔たりが生じる。以上の結果を基に、モデルをさらに改良する必要があると思われる。上記(1)、(2)は又前述した圧力逆転現象と粒子挙動の関連を示している。粉体振動層内の空気圧は、空隙率が急激に変化(減少)するときに上昇する。したがって層下部に比較的動きの少ない層が存在することは、層底部の空隙率変化が遅く急激な空気圧縮が妨げられることを意味し、比較的浅い部分の粒子が大きい速度で動いているのは、その部分の空気が急激に圧縮される可能性があることを示唆している。

Fig. 6 Direction of particle movement at a horizontal cross-section

$t=1, 2$ 秒の写真を用い($t=1$ から2秒間の)、着色粒子層(先端)の移動距離を測定し移動速度を求めた。 $t=1\sim 2$ 秒間に限定したのは(i)振動開始直後は全体の空隙率が変化し正確な移動速度が測れない。(ii) t が大きくなると着色粒子層が分散し位置判定が困難になる

Fig. 7 Vertical component of particle velocity on front wall of the bed ($\bar{d}_s=99\mu\text{m}$, $L=140\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$ and $\Lambda=5$)

等の理由による。

容器壁正面における垂直粒子速度成分(1秒間に移動した距離)分布を、ベクトル表示した一例を $\bar{d}_s=99\mu\text{m}$ の場合について示したのが **Fig. 7** である。なお、水平方向の速度成分は垂直方向成分に比較して小さく、正確な値を得難いので報告しないことにした。ここで、 r は容器中心から水平方向の距離を示す。物質収支より、本来任意の高さにおける下降粒子と上昇粒子の量は等しいはずであるが、ベクトル表示で明らかのように(速度分布曲線を積分するまでもなく)ほとんどの高さにおいて見かけの下降粒子量が多い。これは前記したように完全な二次元振動層が実現されていないことによる。従来、粒子挙動を調べるため二次元粉体層の可視化は、二次元流れの実現をあまり厳密に検討することなく行われてきた。本研究では粒子の垂直方向速度分布を測定することにより、粒子挙動可視化の問題点を明確に示した。Fig. 6 に示したように、容器側壁面に近い部分のみ水平断面の粒子がすべて下降しているが、他の部分では粒子は水平断面の中央部で上昇し、壁付近では下降する傾向にある。 $\bar{z}=100\text{mm}$ 付近で容器側壁の下降速度が最大で、容器正面中央部で上昇が最も顕著に現れている。空気圧測定においても最大空気圧が $\bar{z}=100\text{mm}$ 近傍で記録されており¹³⁾、これは粒子の移動速度と空気圧力の間に相関性のあることを示している。 $\bar{d}_s=227\mu\text{m}$ の粒子の振動容器正面壁における垂直方向の速度成分分布をベクトル表示した一例を **Fig. 8** に示す。Fig. 7 と比較して層下部側壁面における粒子速度が大きく、層の深さにより粒子速度が

Fig. 8 Vertical component of particle velocity on front wall of the bed ($\bar{d}_s=227\mu\text{m}$, $L=140\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$ and $\Lambda=5$)

大きく変化しない。また、 $\bar{z}=40\text{mm}$ 付近と層表面に近い中央部の粒子上昇速度も大きい。これは小さい粒子($\bar{d}_s=99\mu\text{m}$)の振動層に比較して、粉体層全体にわたり粒子の循環運動がみられることを示している。

層高 $L=60, 100\text{mm}$ の振動層における $\bar{d}_s=99\mu\text{m}$ 粒子の垂直速度成分分布をベクトル表示したのが **Figs. 9** と **10** である。Fig. 7 と比較することにより層高の違いによる粒子速度の変化を知ることができる。層高 60mm の場合 140mm の場合と比較して、層上部から下部までの粒子の動きが見られ、層全体の粒子が循環していることがわかる。しかし容器側面の粒子下降速度の最大値は、 $L=140\text{mm}$ の場合の方が大きい。 $L=100\text{mm}$ の粉体層は $L=60$ と 140mm の中間的な挙動を示している。実験範囲においては、容器側面の最大下降速度は層高が高いほど大きくなった。これは、粉体層中の空気の流れと関係すると考えられるが、その機構の詳細な検討は今後の課題としたい。

Fig. 6 に示したように、容器側壁面近傍では水平断面の粒子移動方向が奥行きに関係なくすべて下向きであり、この部分では二次元振動層が実現していると考えられる。そこで定量的に意味のある値として **Fig. 11** に $L=140\text{mm}$ の場合の容器側壁面の粒子速度を示した。図中の x_0 は振動変位の2分の1の値である。粒子速度は大きい粒子の方が一般的には大きい $\Lambda=5$ の場合、層底からの距離 $\bar{z}=60\text{mm}$ より上部では小さい粒子と同等あるいはわずかに小さくなっている。大きい粒子の方が流動性が高く、したがって層底部の速度は大きい $\Lambda=5$ の場合、層上部では空気の流れの影響を受け易い

Fig. 9 Vertical component of particle velocity on front wall of the bed ($\bar{d}_s=99\mu\text{m}$, $L=60\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$ and $\Lambda=5$)

Fig. 10 Vertical component of particle velocity on front wall of the bed ($\bar{d}_s=99\mu\text{m}$, $L=100\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$ and $\Lambda=5$)

(軽い)粒子の速度が増すものと考えられる。事実小さい粒子($\bar{d}_s=99\mu\text{m}$)の粉体層では、層表面から空気流れと共に粒子が飛び上がる現象が観測された。数値シミュレーションにおいても空気流れをいかにモデルに取り込むかが今後の課題であろう。 $\Lambda=3$ の場合は、 $\bar{z}=80\text{mm}$ 以上では粒子の大きさによる粒子速度の差が小さくなっている。当然のことながら $\Lambda=3$ の時より $\Lambda=5$ の方が粒子速度は大きい、小さい粒子の方が Λ の違いによる速度変化が大きい。これも空気流れの影響と考えられる。

Nomenclature

d_s : particle diameter	(μm)	v : particle velocity	(m/s)
$\bar{d}_s$: mean particle diameter	(μm)	$\bar{z}$: distance from vessel base	(m)
f : frequency of vibration	(s^{-1})	Λ : ratio of vibratory acceleration to that due to gravity	(—)
L : height of particle bed	(m)		

References

- 1) Faraday, M. : *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 52, 299 (1831)

Fig. 11 Relation between bed depth and particle velocity at side wall

4. 結 論

着色粒子と無着色粒子を交互に(縞模様)に配した二次元粉体振動層を用い、写真撮影により容器壁面における粒子の移動速度を測定し、以下の結論を得た。

(1) 層高が容器幅(100mm)以上の場合、粉体振動層の上部と下部に比較的動きの遅い層があり、中間部では容器の中央部で粒子が上昇し側壁に沿って下降する循環運動がみられる。

(2) 粒子が大きいくほど層底部の動きの遅い層が小さく、循環する範囲が広い。

(3) 容器側面の粒子、特に比較的浅い部分の粒子が大きい速度で下降しその速度は層高が高いほど大きい。

(4) 容器側壁面に近い部分のみ水平断面の粒子が奥行きに関係なくすべて下降しており二次元振動層が実現していると考えられる。容器側壁面から遠ざかるに従って水平断面の中央部で上昇し正・裏面の壁付近で下降する傾向があり完全な二次元粉体振動層は実現していない。

(5) 容器側壁面の粒子下降速度は一般的に粒子径が大きいく、振動加速度が大きいくほど大きい、層上半部では空気流れの影響を受けて小さい粒子の速度が大きくなる傾向にある。

- 2) Cundall, P. A. and O. D. L. Strack : *Geotechnique*, **29**, 47(1979)
- 3) Satake, M. and J. T. Jenkins (eds.) :
"Micromechanics of granular materials" Elsevier
Sci. Pub. B. V., Amsterdam(1988)
- 4) Evesque, P. and J. Rajchenbach : *Phys. Rev. Lett.*, **62**, 1(1989)
- 5) Laroche, C., S. Douady and . Fauve : *J. Phys.*
(*Paris*), **50**, 699(1989)
- 6) Savage, S. B. : *J. Fluid Mech.*, **194**, 457(1988)
- 7) Rajchenbach, J. : *Europhys. Lett.*, **16**, 149(1991)
- 8) Taguchi, Y. : *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 1367(1992)
- 9) Taguchi, Y. : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **30**,
173(1993)
- 10) Takahashi, H., A. Suzuki and T. Tanaka : *Powder
Technol.*, **2**, 65(1968 /69)
- 11) Akiyama, T., H. Kurimoto and K. Nakasaki :
Chem. Eng. Sci., **44**, 1594(1989)
- 12) Akiyama, T., H. Kurimoto, K. Nakasaki and T.
Matsuda : *Advanced Powder Technol.*, **2**, 265(1991)
- 13) Akiyama, T., H. Yamaboshi and T. Matsuda :
Advanced Powder Technol., **4**, 287(1993)