タッピングによる粉粒体の充てんおよび分離*

佐 納 良 樹** 光 田 健 治***

茂 木 賢 治 郎*** 寺 田 栄 一***

On the Packing and Segregation Processes of the Particulate Solids by the Tapping Method

by

Yoshiki SANO, Kenji MITSUDA, Kenjiro MOTEGI and Eiichi TERADA

(Faculty of Textile, Shinshu University, Ueda)

The processes of segregation in binary particulate solid mixture were studied by photographing and comparison of the tapping curves. The steel ball, lead shot and spherical glass (these were coarse and regular shaped) were used in this tapping procedure for samples.

The results obtained were as follows :

(1) The tapping process of the binary particle mixture was classified into two types, that is, the non-segregation type as shown in Fig. 4 and Fig. 6, and the segregation type as shown in Fig. 5 and Fig. 7.

(2) It seemed that the tapping process in the non-segregation type was regarded as simple packing process of one component system.

(3) The concept of "critical diameter ratio of the small particles"⁶⁾ proved right in the treatment of experimental results. The segregation proceeded when the diameter ratio was smaller than 0.4 and, when more than 0.5 the segregation did not proceed.

(4) The concept of "critical mixing ratio"⁷⁾ turned out wrong in this experiment, because the effect of the mixing ratio was more complicated than the particle size ratio.

(Received Feb. 14, 1968)

1 緒 言

粉粒体粒子の充てんについては従来、粉体層の圧縮性、強度および伝導性などの諸現象に関連して、均一球の充てん理論、異径粒子の最密充てん率など、静的な充てん状態に関する研究が多いようである。

それに対し充てん過程の研究としては久野¹⁾、種谷ら²⁾、および荒川らの充てん過程を解析した実験があるが、粉粒体の分離の過程について論じた報告はほとんど見あたらない。

いま、均質な球形粒子群をいかに長時間タップしてもこの系では粒子は互いに分離することがなく、最密充てん状態に近づいていくだけである。しかし粒径、密度などの異なる異種粒子系では条件により、分離が起こる。そしてそのような系では単なる充てん過程に重畳して分離が起こるものと考えられる。

本報では粒子群の諸性質のうち、まず粒子径および大小粒子の混合比に着目した。そして、均一粒子系の

充てん実験結果と異径二成分粒子系の空隙率減少状況を比較検討することにより、分離の過程について考察した。

2 実験装置および方法

2・1 実験装置

タッピング装置の主要部は、久野らの用いたのと同じであるので説明は省略する。タップ周期は全実験を通じて 22 rpm に保った。

充てんびんはメタクリル樹脂製の正四角筒であり、試料の粒径に応じて3種類の大きさ(10×10×100 mm, 20×20×200, 30×30×200)のものを用了。

2・2 実験方法

試料は Table I に示したような、比較的あらく、しかも形状の整った粒子である。びんへの装入は二重管引上げ装入法によった。

所定回数のタッピングごとに角筒の四面につき、それぞれ2箇所ずつ計8箇所の粒子層高をノギスで測定して見掛け密度の算出を行なった。

また、びんの落下高さはねじで調節できるようにしてあり、粒子層表面の跳躍を起こさない最高限度の高

* 原稿受理 昭和43年2月14日

** 正 会 員 信州大学繊維学部 上田市常入

*** 信州大学繊維学部 上田市常入

Table I. Physical properties and tapping results of the single component systems.

Sample		Physical properties		Tapping results		
		Mean particle dia. (mm)	Density (g/cc)	Void fraction (—)		Packing speed (—)
				Initial	Final	
Steel ball	0.4 ϕ	0.400	7.73	—	—	—
	1.0	1.000	7.73	0.401	0.365	0.0114
	2.0	2.000	7.72	0.433	0.386	0.0204
	4.0	4.000	7.73	0.437	0.383	0.0187
Lead shot	#10	2.11	11.04	0.416	0.382	0.0122
	#4	3.09	11.05	0.415	0.370	0.0450
	#1	4.18	11.18	0.423	0.388	0.0301
Spherical glass —250/+300 mesh		0.0464	2.42	0.448	0.370	0.0116
	0.1 ϕ	0.104	2.50	0.438	0.381	0.0136
	0.3	0.248	2.51	0.405	0.368	0.0353
	0.4	0.328	2.51	0.415	0.380	0.0120
	0.6	0.604	2.51	0.427	0.393	0.0206
	0.8	0.963	2.50	0.427	0.401	0.0209
	1.0	1.410	2.51	0.444	0.403	0.0107

さでタッピングを行なった。

3 実験結果

3.1 均一粒子系の充てん

Table I に示した粉粒体をそれぞれ単独にタップ充てんした結果をそれぞれ Fig. 1, 2 および 3 に示した。図のように粉粒体の種類、粒径に関係なく空隙率（無次元）の対数とタップ回数（初期の短い

Fig. 1. Packing curves of the steel ball.

Fig. 2. Packing curves of the lead shot.

過渡期を経た後、1本の直線で近似され、次いで空隙率のほとんど変わらない最終状態を示した。図において ρ_0 , ρ_f および ρ_n はそれぞれ充てん前、最密充てん時および n 回タップしたときの見掛け密度である。

また、どの種類の粉粒体についても充てん速度と粒径の間には明りょうな傾向がみられなかった。

さらに、Table I からわかるように、最密空隙率と粒径の間にも明りょうな関係がみられなかった。このような結果が得られたのは、試料の粒径が比較的大きいために粒子径の相違が無視できたためであろう。

3.2 異径二成分粒子系のタッピング

Table I に示した粉粒体を Table II のように組み合わせて、二成分粒子系のタッピング過程を追跡した。その一例を Fig. 4 および 5 に示した。

Fig. 3. Packing curves of the spherical glass.

Fig. 4 は粒径比 [(小粒子粒径)/(大粒子粒径)] 0.500 のスチールボールを混合比 [(小粒子重量)/(大粒子重量)] 0.296 で交互に層状に装入した後タップしたものである。この系では粒子は互いに分離せずに混在したままの状態を保った。また、Fig. 5 に示したのは比較的大径の開きの大きい場合（ガラス球、粒径比 0.233, 混合比 0.0984）である。最初、小粒子を上部に、大粒子を下に“上下装入”^{*1} してあったものがタップごとに小粒子が大粒子の間隙をすり抜けて落下した。

さらに、Fig. 4 および 5 と同じ実験結果を $\log[(\rho_f - \rho_n)/(\rho_f - \rho_0)]$ 対タップ回数のグラフに描いたタップ曲線を Fig. 6 および 7 に示した。Fig. 6 および

*1 粒径比 0.5 以下の二成分粒子を均質に混合することは實際上、きわめて困難である。

Table II. Summary of the experiments on binary systems.

Sample		Particle dia. ratio r/R (—)	Charging ratio m (—)	Tapping height (mm)	Void fraction (—)		Packing speed (—)	Segregation ^{*2}
Classifi- cation	Component ^{*1}				Initial	Final		
Steel ball	$\begin{pmatrix} 2 \\ 0.4 \end{pmatrix}$	0.200	0.097	3 0	0.410	0.347	0.0515	○
	$\begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix}$	0.250	0.071	23 0	0.415	0.337	0.0120	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.4 \end{pmatrix}$	0.400	0.093	3 0	0.430	0.350	0.0299	○
	$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$	0.500	0.094	13 0	0.428	0.386	0.0106	×
	$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$	0.500	0.316	23 0	0.426	0.375	0.0190	×
	$\begin{pmatrix} 4 \\ 2 \end{pmatrix}$	0.500	0.094	13 0	0.424	0.381	0.0228	×
	$\begin{pmatrix} 4 \\ 2 \end{pmatrix}$	0.500	0.296	13.0	0.390	0.365	0.0229	×
Lead shot	$\begin{pmatrix} \#10 \\ \#1 \end{pmatrix}$	0.505	0.100	13 0	0.428	0.375	0.0226	×
	$\begin{pmatrix} \#10 \\ \#4 \end{pmatrix}$	0.683	0.099	13.0	0.413	0.384	0.0491	×
	$\begin{pmatrix} \#4 \\ \#1 \end{pmatrix}$	0.739	0.099	13 0	0.429	0.367	0.0270	×
Spherical glass	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.1 \end{pmatrix}$	0.074	0.097	2.3	0.437	0.350	0.0088	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.176	0.098	3.0	0.430	0.358	0.0303	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.176	0.196	2.3	0.397	0.306	0.0095	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.176	0.301	2.3	0.362	0.285	0.0211	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.176	0.378	3.0	0.350	0.306	0.0451	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.176	0.511	2.3	0.305	0.264	0.0483	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.176	0.708	2.3	0.311	0.275	0.0366	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.176	0.995	2.3	0.312	0.281	0.0468	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.176	1.303	2.3	0.343	0.289	0.0179	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.4 \end{pmatrix}$	0.233	0.098	2.3	0.421	0.368	0.0129	○
	$\begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.258	0.110	3.0	0.426	0.384	0.0113	○
	$\begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.3 \end{pmatrix}$	0.258	0.402	3.0	0.390	0.359	0.0207	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.6 \end{pmatrix}$	0.428	0.099	2.3	0.423	0.390	0.0091	○
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0.683	0.096	13.0	0.426	0.390	—	×
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0.683	0.203	3.0	0.433	0.391	0.0139	×
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0.683	0.298	3 0	0.430	0.389	0.0170	×
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0.683	0.390	3.0	0.406	0.390	—	×
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0.683	0.511	3 0	0.433	0.395	0.0212	×
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0.683	0.703	3 0	0.421	0.379	0.0184	×
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0.683	0.999	3 0	0.417	0.378	0.0151	×
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0.683	1.320	3 0	0.421	0.385	0.0124	×

*1 See Table I

*2 ○ : segregated, × : unsegregated

Fig. 4. Side views of the tapping process in 4ϕ and 2ϕ steel ball system.

Fig. 5. Side views of the tapping process in 1ϕ and 0.4ϕ spherical glass system.

Fig. 6. Tapping curves of binary system (1).

Fig. 7. Tapping curves of binary system (2).

7にはそれぞれ各成分粒子を別個にタップ充てんして得られた充てん曲線を付記した。

Fig. 6 では二成分系のタップ曲線と各成分粒子の充てん曲線との間には空隙率の値およびタップ速度にあまり差異がなかった。図は省略したが Table II で×印を付した、粒径比の比較的大きい二成分粒子系で同じことがいえた。

次に、Fig. 7 では二成分系のほうが均一系よりも過渡期が短く、充てん過程に比べ相当大きな差異を示した。すなわち、タップ曲線のこう配は充てん曲線のそれと比べてやや小さく、また、Table I および II の最密空隙率を比較すると、二成分系のほうがどちらの成分粒子の最密空隙率より小さかった。このような傾向は Table II で○印を付けた系で一般的にいえた。

なお Table II によると、粒径に関しては粒径比 0.4 以下では確実に分離し、0.5 以上では分離しなかった。一方、混合比については、著者らの実験範囲では粒径比が 0.4 以下なら混合比の値に関係なく分離し、また、粒径比 0.5 以上のときには混合比の値の大小を問わず分離することはなかった。

4 考 察

4・1 二成分粒子系のタッピング過程

異径二成分粒子系のタッピングの結果は、Table II に○および×印を付けたように分離する系と分離しない系に分けることができた。

分離しない系では Fig. 4 からわかるように、小粒子が大粒子の間隙へはいり込めず、粒子の相互位置はほとんど変わらない。そのために、タップ曲線と充てん曲線の間あまり差異がなかったものと思われる。したがって、分離を起こさない系でのタッピング過程は近似的に充てん過程とみなしうるであろう。

次に分離する場合、タップ曲線が充てん曲線よりかなり上方に位置することは、初期状態の持続が均一粒子系のときより短く、さらにタッピング速度もおそいためと思われるが、ここでは詳しく論じないことにする。

一方、最密空隙率については分離した小粒子が容器底部で、大粒子とともに最密充てん状態を形成しているのだから、当然各成分粒子単独の場合の最密空隙率よりも値は小さくなる。

4・2 粒径比および混合比

粒径比についての分離条件は Manegold⁶⁾ らにより、規則配列した球形粒子に対しすでに求められており実験で得た最密空隙率 (Table II) から逆に推論すれば、臨界粒径比 r_c/R は約 0.53~0.23 の間になければならない。著者らの実験結果からは、臨界粒径比は 0.4~0.5 の間にあると考えられるから上の推論とは矛盾しない。ただ、実験では粒径比 0.5 付近で分離、非分離

の区別がやや不明確な場合もあったが、これは臨界粒径に近い大きさをもつ粒子系では粒子どうしの表面摩擦効果が現われるためと考えられる。

次に、混合比については大粒子群の作る空隙容積と、それを満たす小粒子群の容積の関係に基づいた臨界混合比 m_c の概念の適用を試みた。それによると、粒径比 r/R が約 0.4 以下でも混合比が約 0.1 以下の系では分離が起こらないはずであるが、著者らの実験結果は予想と一致しなかった。これは大粒子群の作る空隙容積そのものは小粒子を入れうるものであっても、形状が適当でないために、その空隙に小粒を保持しえないため分離するものと考えられる。

しかし、粒子の分離限界には上述の因子のほかに、粒子表面摩擦およびタップ時に加えられる外力なども関係があり、限界条件は単純でないと考えられる。したがって、この点については別に論ずることにする。

5 総 括

比較的粒径のあらい、形状の整った、スチールボール、散弾およびガラス球を用いてタップによる分離過程の追跡を行なった。また、別に均一径粒子につき充てん実験を行ない分離過程と比較検討した。

その結果、分離を起こす粒子系のタップ曲線とその

系の成分粒子の充てん曲線の相違が明りょうになり、分離の特徴を明らかにすることができた。

さらに実験結果から次のようにいえる。

(1) 異径二成分粒子系で分離を起こさない場合のタップ過程は充てん過程とみなしうる。

(2) 粒径比が 0.4 以下では確実に分離し、0.5 以上では分離を起こさない。

(3) 混合比の影響は複雑であり、臨界混合比の概念による推論と実験結果は一致しなかった。

(昭和42年10月19日 第5回粉体に関する討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Kuno, H., and Y. Hayashi, Proc. Fac. Eng., Keio Univ., **6**, 59 (1953).
- 2) Kuno, H., *ibid.*, **11**, 27 (1958).
- 3) 種谷真一, 曾根敏磨, 応用物理, **31**, 483 (1962).
- 4) 荒川正文, 岡田隆夫, 水渡英二, 材料, **14**, 764 (1965).
- 5) 井伊谷鋼一編, “粉体工学ハンドブック”, p.103 (1965) 朝倉書店
- 6) 久保輝一郎, 水渡英二, 中川有三, 早川宗八郎編, “粉体”, p.211 (1962) 丸善
- 7) 杉本益規, 遠藤一夫, 田中達夫, 化学工学, **30**, 427 (1966).