

ダッピングによる粉体の偏析現象

川北, 公夫 / KAWAKITA, Kimio / 津々見, 雄文 / 池田, 千尋
/ IKEDA, Chihiro / TSUTSUMI, Yuhbun

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

6

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

10

(発行年 / Year)

1969-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004252>

ダッピングによる粉体の偏析現象

教授 川 北 公 夫

教授 津 々 見 雄 文

助手 池 田 千 尋

Segregation of Granules by tapping

Kimio Kawakita, *Professor*

Yuhbun Tsutsumi, *Professor*

Chihiro Ikeda, *Assistant*

Abstract

Experiments were carried out in which larger particles of glass bead were fed in a glass cylinder and finer particles were poured above them then the cylinder was tapped on a tapping machine, so that the layers of larger and finer particles reversed the place. The variables investigated were the size ratio of the particles, the weight ratio and the total thickness of the particle layers.

When a mixture of different kinds of particles was tapped, the particles of heavier material moved upwards. A single large or heavy particle or even various shaped (other than sphere) substance could be made to rise to the surface through a mass of fine particles.

1. 緒 言

粒子径や比重が異なる粒子の混合粉体を取扱う際におこる分離の現象——いわゆる偏析現象は、選鉱学においては振動を与えて分級する反転分級 (Reverse Classification) として古くから知られており、例えば F. C. Dyer¹⁾ の綜説などがある。

化学工学においても、近年粉体処理上の問題点として粉体に振動を与えたとき、ホッパー内に注ぐとき、あるいはホッパーから流出させるときにおこる偏析現象が注目されはじめ、湯浅²⁾の綜説などがあるが、最近では、J. C. Williams ら³⁾が振動した場合の粒径差による偏析の実験を報告している。著者は粉粒体の充填体にタッピングのような断続的な衝撃を与えることによって次第に分級される一種の偏析現象を観察したので報告する。

2. 実験装置と方法

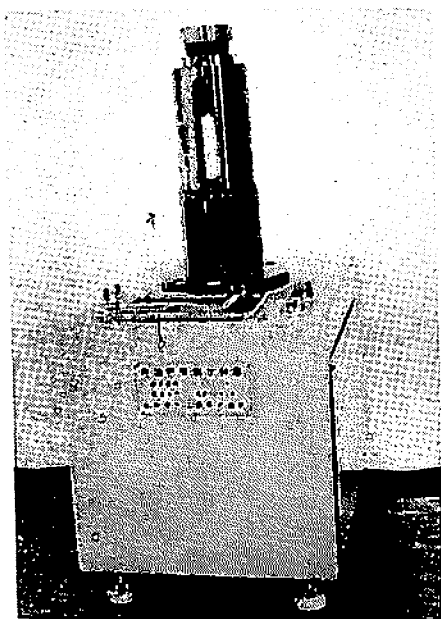


Fig. 1: Photograph of experimental apparatus.

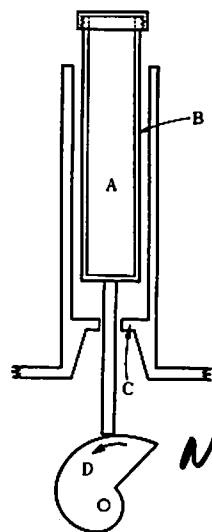


Fig. 2: Schematic diagram of apparatus used.

- A: Glass mess cylinder.
- B: Steel cylinder.
- C: Electric magnet.
- D: Cam.

Fig. 1 に実験装置の写真を示す。Fig. 2 はその模型図で、Aは内径3cm、高さ17cmの目盛付ガラスシリンダーであり、これに試料を充填してBの鉄製シリンダーに入れて固定する。このシリンダーの下部にピンが接続しており、Dのカム回転により上下にタップする。タップの落下高さは主として3cmで行ない、カムの回転は50R/minである。Cはシリンダーが落下した際に二次衝撃を受けないように、落下した瞬間にマグネットが働いてシリンダーを固定する。シリンダーに試料を充填する場合は、注入のしかたによって容積の値が異なるのをできるだけ防ぐために、シリンダーの上に一定のロートを固定しそれを通して試料を注入した。

試料は模型的に考えやすいために球形のものを扱い、種々の粒子径の異なるガラスビーズを主体とし、その他鉄球、銅球、鉛散弾などを使用した。

3. 実験結果

3.1 混合、分離の現象

Fig. 3 は、大小のガラスビーズを、重量比1:1、全重量100gとし、粒径比10:1、5:1、2:1の場合についてのタッピング回数と空隙率との関係を示した。ダッピング高さ1cm、A、aは粒子径2mmと1mm(粒径比2:1) B、bは1mmと0.2mm(粒径比5:1)、C、cは2mm 0.2mm(10:1)の場合を示す。

実線で示したA、B、Cの曲線は、いずれも小粒子50gの上に大粒子50gを充填してタッピング

した場合で、点線で示したa,b,cはそれとは逆に大粒子50 gの上に小粒子50 gを充填してタッピングした場合を示す。

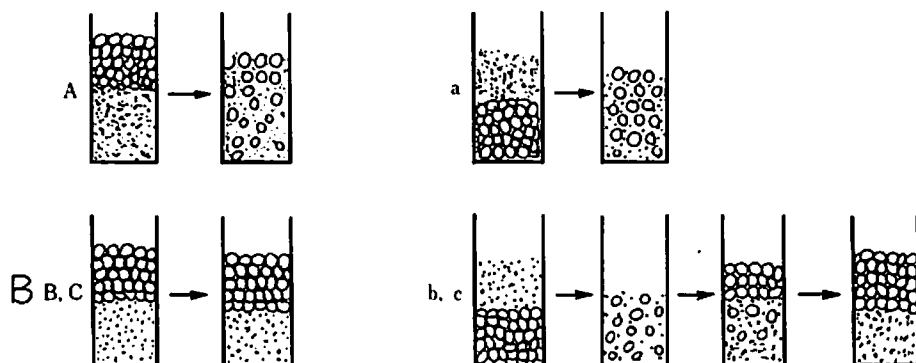
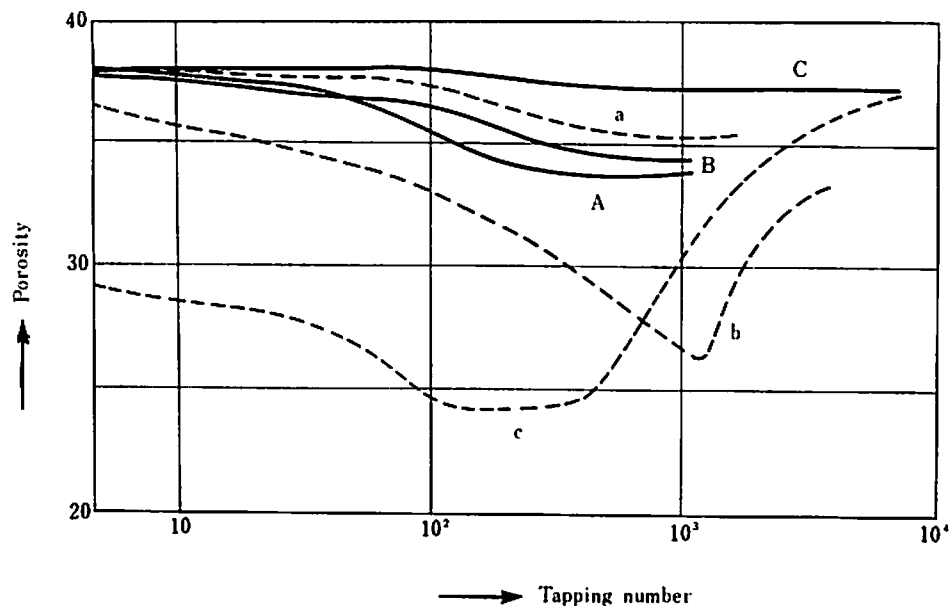


Fig. 3: Mixing and segregation phenomena of glass beads by tapping.

	size ratio	size (mm)
A, a:	2 : 1	2.0, 1.0
B, b:	5 : 1	1.0, 0.2
C, c:	10 : 1	2.0, 0.2

粒径比 2 : 1 の A, a の場合はともにタッピングによって自動的に十分に混合してもはや分離しない。粒径比 5 : 1, 10 : 1 については, B, C とともに混合せず, b, c はタッピングとともに小粒子が大粒子の間に浸透して, b は約 1000 回, c は約 600 回で十分に混合してそれぞれ最小空隙率の値をとり, その後は大粒子が浮び出てくるにつれて空隙率が上昇し, 終には全ての大粒子が上方に移動分離して完全に逆転し, それぞれに B, C の場合 (初めから大粒子が上) と同じ状態になる。

一般に大粒子が上におかれた A, B, C については, 粒径差が大きいほど空隙率の低下は少なく, 大小の粒子が分離したまゝの状態を保ちやすい。それに反して小粒子が上の a, b, c については,

いずれもよく混合するが、粒径差が大きいほど混合したときの最小空隙率の値は低いし、また混合も早く行なわれ、大粒子が上に浮上しやすい。

3.2 大粒子が浮上する限界粒径比

上記のように、大小の粒径差が大きいときはタッピングにより大粒子が分離浮上し、粒径差が小さいときは混合したまゝで分離しないことがわかったので、両者の境界がどの辺にあるかを知るための実験を行った。

試料の全重量を120gとし、ガラスビーズの大粒子と小粒子の粒径比を種々に変えてタッピングした。タッピング高さ3 cm。

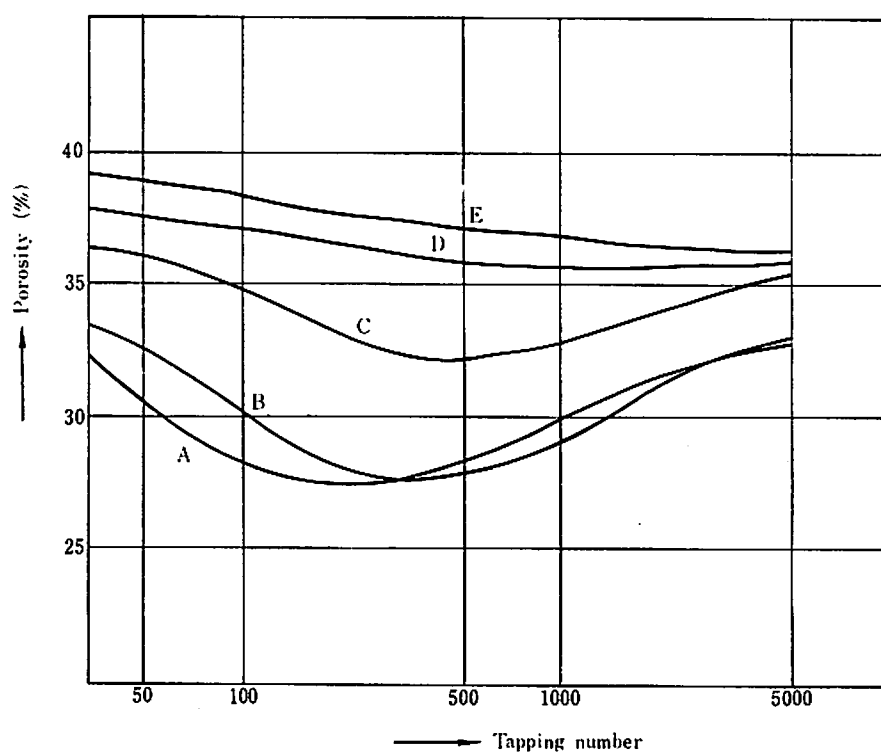


Fig. 4: Effect of size ratio.

Variation of porosity is plotted as a function of the tapping number. Larger particles 96g and smaller 24g.

	size ratio	size (mm)
A:	10 : 1	2.0, 0.2
B:	5 : 1	1.0, 0.2
C:	4 : 1	2.0, 0.5
D:	3 : 1	1.0, 0.34
E:	2 : 1	2.0, 1.0

Fig. 4. は重量比4 : 1の場合で、大粒子96 gの上に小粒子24 gを充填してタッピングしたものである。粒径差の小さいD, Eすなわち粒径比3 : 1, 2 : 1の場合は空隙率が減少するだけであり、やがてほぼ一定となり、大小粒子が混合したまゝである。粒径差の大きいA, B, Cすなわち粒径比10 : 1, 5 : 1, 4 : 1の場合は、それぞれ混合による空隙率の低下があるが、その

最小値の付近から大粒子が表面上に浮上して空隙率が増加しはじめ、3000回程度のタッピングでほぼ完全に大小粒子が上下逆転し、それ以上は再び混合しない。このような傾向はFig. 4 に示した重量比4 : 1以外のいろいろに変えた場合も同じである。

要するに、粒径比がほぼ3 : 1以下の場合は混合するだけであるが、4 : 1以上であればタッピングにより大粒子が浮上してくる。

3.3 大小粒子の重量比の影響

Fig. 5. 6 はガラスビーズの大小粒子の粒径比をそれぞれ4 : 1, 10 : 1の場合について、全重量120gにおける大小粒子の重量比率を変えてタップした結果である。タッピング高さ3 cm。大粒子を下に小粒子を上を充填してタッピングを始めた。図の曲線上に記した比率は大粒子 : 小粒子の重量比を示す。点線でかいた曲線は大粒子の方が少ない場合である。

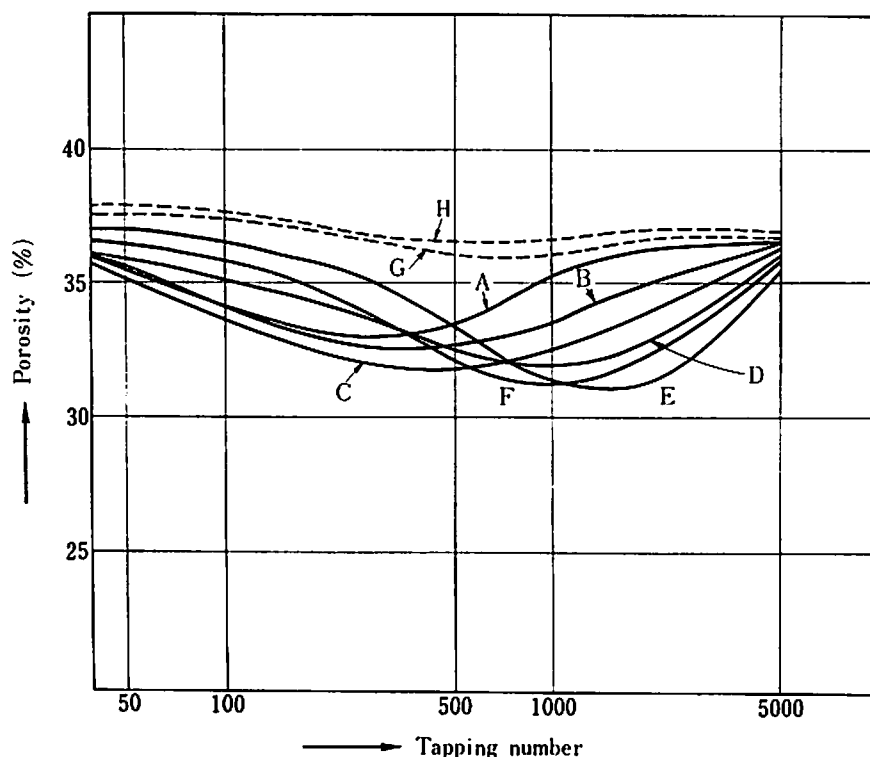


Fig. 5: Effect of weight ratio.

A—H show the weight ratio of larger particles to smaller.

Size ratio is 4 : 1

A: 7 : 1	E: 2 : 1
B: 5 : 1	F: 1 : 1
C: 4 : 1	G: 1 : 3
D: 3 : 1	H: 1 : 5

これらの図が示していることは、いずれの場合もタップするにつれて大小粒子が混合し、そのために空隙率が減少する（タッピング充填にもとづく空隙率減少はガラスビーズの場合タップ開始直後だけで後はほぼ一定を保つ）。空隙率最小値の付近から大粒子が表面上に浮上して終には上層が大粒子群、下層が小粒子群に分級される。しかし共通した傾向としては大小粒子の重量差が大きいほどタッピング回数の少ないところで大粒子が浮上しはじめる。

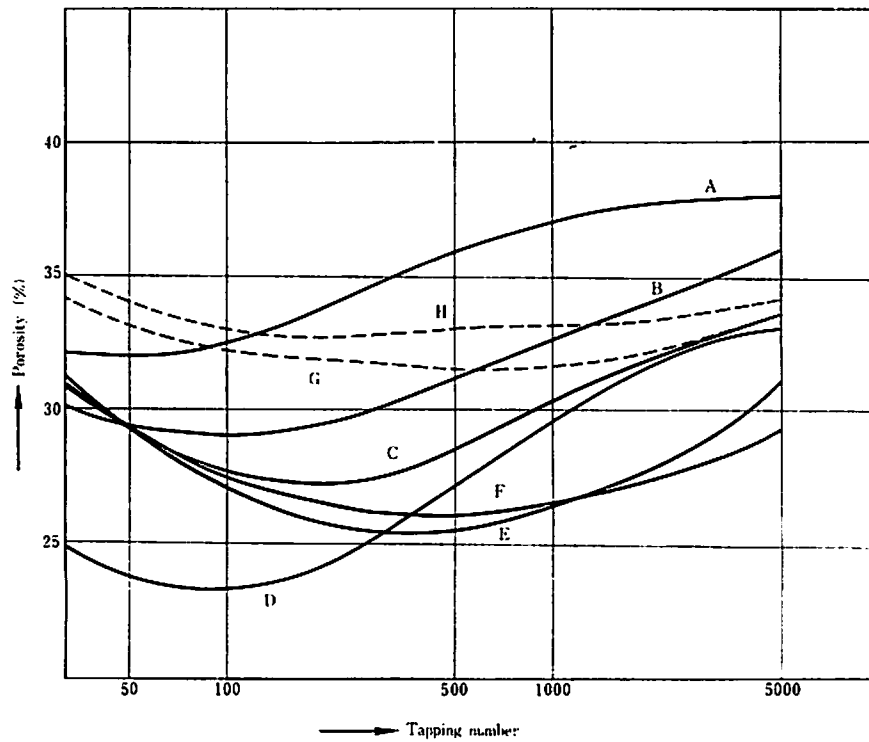


Fig. 6: Effect of weight ratio.

A—H are similar to those of Fig. 5. Size ratio is 10:1.

3.4 試料層の厚さによる影響

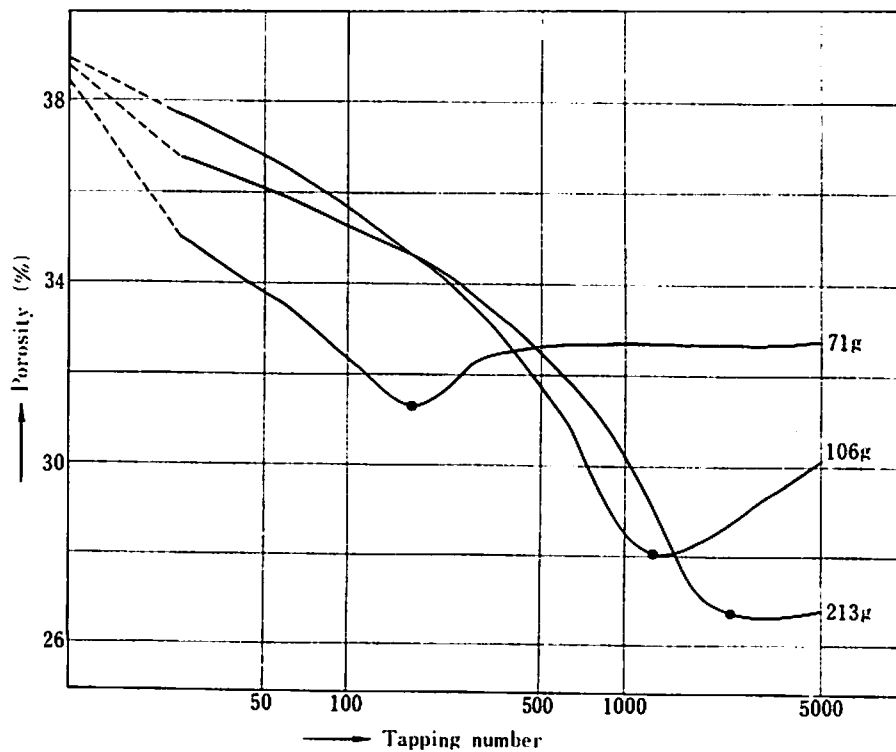


Fig. 7: Thickness dependence of particle layer.

● indicates the point appearing the first large particle on the surface of smaller particle layer.

他の条件が一定であれば、すべての場合に試料層の厚さが薄いほど早く大粒子が浮上する。

Fig. 7 はその一例を示したもので、タッピング高さ 2 cm, 容器のシリンダー径 4 cm, 大粒子と小粒子の重量比 1 : 1, 粒径比 5 : 1 の条件で大粒子を下に小粒子を上を充填してタップしたものである。各曲線の右端に試料の全重量を示したが、当然全重量の小さい方が試料層の厚さは小である。曲線上の黒丸は大粒子が表面上に現われはじめた点を示す。また全重量 71 g の場合のようにタッピング回数がほぼ 500 回以上で空隙率一定となったものは、完全に大粒子が浮上して大粒子が上下二層に分離し、それ以上変化しない状態を表わしている。

3.5 大小粒子の比重が異なる場合

Table 1 は大小粒子の比重が異なる場合の実験結果である。大粒子と小粒子との重量比は 1 : 1, シリンダー径 3 cm。タッピング高さ 3 cm で行なったものである。表の中のタッピング回数とあるのは、上層と下層とにほぼ分級するまでに要した回数を示す。

Table 1. Segregation of granules of different specific gravity.

Sample		Size ratio	Size (mm)	Tapping number	Total weight (g)
upper	bottom				
Glass bead	Steel ball	1 : 2	5.35, 11.0	300	120
〃	Copper ball	1 : 3	0.07, 0.20	1500	80
Copper ball	Lead ball	1 : 10	0.2, 2.0	5—6	80
Glass bead	Lead ball	1 : 14	0.07, 2.0	130	80
		1 : 2	1.50, 3.0	600	120

Tapping number shows when segregation is carried out.

Weight ratio is 1 : 1.

この結果から、比重の大きな粒子の方がタッピングにより浮上しやすいことがわかる。この点に関しては、比重の異なる粒子を振動によって分級し、軽い粒子の方が上層になるという F. C. Dyer の報告とは逆であり、タッピングによる分級の場合は振動による場合と異なり、タップした瞬間の衝撃による粒子のはね上がりが分級に大きく影響していると考えられる。

3.6 大粒子 1 個の場合

これまでの実験では、大粒子が上昇する過程で大粒子相互の充填空隙に小粒子がはいり込んでゆくことを認めているので、大粒子の充填空隙の幾何学的な問題が要因となっているか否かを調べるために、それ自体空隙をもたない 1 個だけの大粒子を用いて実験を行った。実験条件は前項と同じであり、小粒子はすべて 120 g のガラスビーズを用いた。

Table 2 はその結果であるが、表中のタッピング回数は 1 個の大粒子が表面に浮上するまでに要した回数である。このことから大粒子相互の充填空隙のみが分級に決定的な影響をもつのではないことがわかる。なお、ガラスビーズと鉛球の等大の場合に比重の大きい方が浮上したり、コルク球では浮上しないことなどから、前項で述べたタップしたときの粒子のはね上がりが、粒子の移動に大きく影響していることが考えられる。

Table 2 Movement upwards of a single large or heavy particle.

Sample		Size ratio	Size (mm)	Tapping number
upper	bottom			
Glass bead	Glass bead	1 : 26.8	0.20, 5.35	850
		1 : 16.0	0.34, 5.35	600—800
		1 : 10.7	0.50, 5.35	500—600
		1 : 5.35	1.00, 5.35	400—500
"	Steel ball	1 : 5.50	2.00, 11.0	1000
		1 : 2.0	5.35, 11.0	600
"	Lead ball	1 : 2.25	2.00, 4.5	750
		1 : 1	4.76, 4.5	1000
"	Rubber ball	1 : 50.0	0.20, 10.0	500
		1 : 10.0	1.00, 10.0	200
"	Solder ball	1 : 3.4	3.25, 11.0	1000
		1 : 5.50	2.00, 11.0	500
		1 : 31.4	0.35, 11.0	100
"	Cork ball	1 : 6.00	2.00, 12.0	1000
		1 : 24.0	0.50, 12.0	don't rise
		1 : 60.0	0.20, 12.0	don't rise

Tapping number shows when the particle rises to the surface.

3.7 球以外の形状をした物体

球形でない物体の1個について、前項と同じ条件の実験をした。その結果をTable 3に示すが、偏析現象は必ずしも球形に限らないことがわかる。

Table 3 Movement upwards of a nonspherical substance.

Sample (bottom)	Glass beads (120 g) Size (mm) (upper)	Tapping unnumber
One yen Aluminum coin	4.0	don't rise
	2.0	don't rise
	1.0	460
	0.5	385
	0.2	688
Steel plate: 0.4mm thick 1.3×1.6cm ²	2.0	610
	1.0	298
	0.5	598
	0.34	477
Stainless steel box: 2.6g 1.4×1.6×1.3 (cm)	5.35	380
	2.0	379
Iron stick: 0.6g length 1.6cm, diameter 3mm	5.35	518
	2.0	462
Glass pipe: length 2.1cm diameter, inside 5mm outside 7mm	5.35	102
	2.0	253

Tapping number shows when the substance rises to the surface.

4. 考 察

4.1 偏析現象をおこす原因

振動によって偏析現象が起る原因として, F. C. Dyer は次の2つを挙げている。

- (a) 大粒子層の間隙を通して小粒子が沈降する一種のふるい分け……………小粒子下降効果
- (b) 大粒子が大きな運動量をもつことにより小粒子を乗り越える……………大粒子乗り越え効果

著者の実験では, (a)の小粒子下降効果は肉眼でも一部観察されるし, 高速度カメラ (毎秒 500 コマ) でタップした瞬間を調べても, 小粒子が大粒子の間隙にすべり込んで流れ落ちてゆく状態が観察された。

しかしながらこの Screening 効果だけでは問題は解決されないものであって, 最下層の大粒子が浮び上るということや, 1 個だけの大粒子が浮び上るといふ現象の説明には(b)の大粒子乗り越え効果を考えなければならない。Fig. 8に示したように, 衝撃を加えることによって各粒子はそれぞれに力を及ぼすが, 大粒子Aと小粒子Bとでは, 接触点Cにおいて一部の力が垂直上方の成分に変わり, しかも大粒子はより大きな運動量のために小粒子を乗り越えるように上昇すると考えられる。これが前述したDyerのいう(b)の大粒子乗り越え効果である。

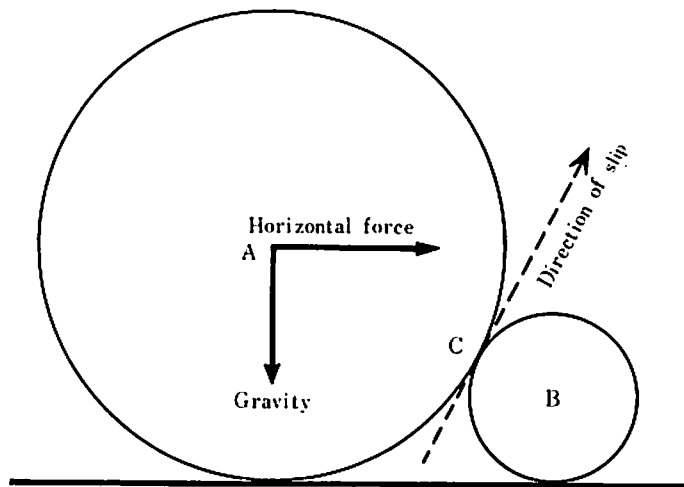


Fig. 8: Diagrammatic representation of riding effect of larger particle over smaller one.

著者が実験したタッピングによる偏析現象においては, 一般に比重の大なる粒子が浮上し, しかも粒子径が等しくてもなお比重の大きい方が浮上しており, 更にまた垂直な側壁をもつ種々の物体が浮上している事実を考えると, どうしても上記の2つの理由だけでは説明することができない。従って著者は, それ以外に, タッピングの操作そのものに起因する粒子の弾性によるはね上りを第3の理由として挙げたい。運動量の大きな粒子がはね上ったとき, 小粒子がその下に流れ込み, 元の位置より上昇した地点で大粒子を支持することになり, これがくり返されると考えるのである。

4.2 偏析現象を表現する方法

偏析現象を表現する方法として、著者はタッピング回数と全体の空隙率とを座標にとり、変化の状況を曲線で表わしたが、等大球をタップした場合、はじめに少量の空隙率低下があり後はほぼ一定の空隙率となることがわかっているの、この実験結果として図示した種々の空隙率変化の曲線は、空隙率を減少していく段階は大小粒子が混合することによる密化過程を表わし、空隙率の最も低下した付近から大粒子が表面上に浮上し、上層に浮上分離する大粒子層と下層に沈下する小粒子だけの層とが大きくなるにつれて全体の空隙率が上昇し、終に完全に上下二層に分級されればそれ以降は空隙率が一定となるのである。従って空隙率変化の状況を表わすことによって偏析現象の状況を定性的に表現できると考えたのであるが、将来は実験を中絶することなしに定量的に表現しうような方法を考える必要がある。J. C. Williams²⁾らは偏析係数というものを提出して、偏析現象を定量的に表現しようと試みているが、その測定方法は未だ一般的なものとはいえない。

5. 結 論

タッピングによる偏析現象を観察した。ガラスビーズについては粒径比3:1以下の場合には大小粒子が混合するだけであり、粒径比4:1以上の場合には大粒子が浮上分離する。分級しやすいの程度は、重量比率が大小いずれかの粒子に片寄っている方が、また試料層は薄い方が分級されやすい。比重の異なる粒子の場合には重い粒子の方が上層に分離される。なお大粒子が1個でも、また球形でない場合でも同様に分級される。このような偏析現象をおこす要因として次の3つが考えられる。

- (1) 大粒子層の充填間隙を通して小粒子が浸透下降する。
- (2) タップしたときの大粒子のはね上り効果。
- (3) 上記(2)のはね上りから再び落下して充填されるとき、粒子相互の水平方向の力が作用し、大粒子が小粒子を乗り越える。

この研究は、日本化学会第20年会(東大)1967, 3月.

応用物理学会学術講演会(金沢大)1967, 10月.

法大工学部内研究発表講演会1966, 12月.

において口頭発表したものをまとめたものである。

Literature cited

- 1) Dyer, F. C.: Eng. Mining J., 127, 1030 (1929)
- 2) Williams, J. C. and G. shields: Powder Technology, 1, 134 (1967)
- 3) Yuasa, Y: Funtai-Kōgaku, 4, 373 (1967)