

振動による流動層選別

加古川東高校 池田樹生, 坂田悠真, 櫻井輝一, 細岡大生, 山崎優美

要 旨

私たちは振動による粉粒体の流動化について研究している。最終的に振動による流動層選別を行うために、粉粒体に働くブラジルナッツ効果なども考慮し流動化による効果が強く現れる条件を求めることを目標とする。今回は振動する粉粒体や粉粒体に入れた物体の挙動について明らかにするため実験を行った。BB 弾からなる粉粒体を使用して振動中の粉粒体全体の体積を測定し、そこから粉粒体が流動化したときに粉粒体に入れると沈む物体の質量の理論値を計算し、実際に実験で求めた値と比較した。また粉粒体の粒子数、振動数、粉粒体に入れる物体の質量を変え、その挙動を観察した結果、振幅一定の振動を与えた粉粒体には流動化とブラジルナッツ効果(対流)の二つの効果が共存すること、流動化の効果が強く現れるのは粉粒体の粒子数が少なく、振動数が大きいとき、また粉粒体に入れる物体の質量が大きいときであることが分かった。

1. はじめに

粉粒体の下から空気を送り込むと、粉粒体は浮遊状態となり液体的挙動をする。これを流動化といい、流動化した粉粒体を流動層という。現在、この流動層とその中に入れた物体の密度差を利用した流動層選別という選別技術があり、廃棄物のリサイクルや工業分野で利用されている。また、粉粒体に強い振動を与えることによって、同様に粉粒体が液体的挙動をとる可能性があることが先行研究に示唆されている。このことから私たちは粉粒体に空気の代わりに振動を与えることで流動層選別を行うことが可能だと考えた。一方、粉粒体に大きな物体（以下大物体とする）を入れ振動させると、大物体が浮上するブラジルナッツ効果という現象が存在する。この浮上力は振動による流動層選別に影響を与えてしまうため、浮上力の発生条件を明らかにする必要がある。私たちは図 1 のような相図を得ることができるのではないかと考えた。本研究では振動する粉粒体に入れた大物体の挙動を観察し、流動化する条件、ブラジルナッツ効果が起こる条件を報告する。

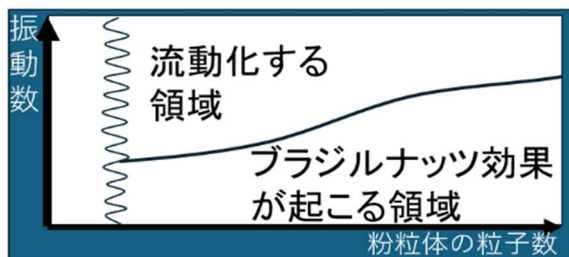


図 1 期待される相図

2. 実験装置

この項目では本研究で使用・作成した実験装置に関しての詳細を記す。

大物体として 3D プリンタで PLA を使用して一辺 2cm の立方体の箱を作製。これにナットを入れてふたをすることにより質量を調節した大物体を用意する。粉粒体には発泡スチロール球 ($\Phi 8\text{mm}$)、BB 弾 ($\Phi 6\text{mm}$) を利用した。そしてモーターを利用したクランク機構によって縦方向に振動を与える図 2 のような装置を作製した。

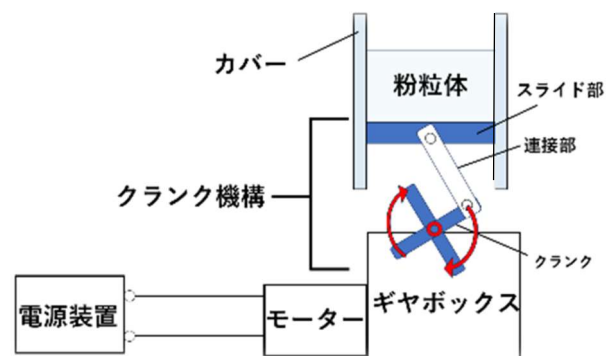


図 2 実験装置の略図

以下に装置の詳細を記載する。クランク機構は接続部(縦 80mm、横 10mm)、スライド部(縦 30mm、横 80mm)、クランク部(回転半径 7.5mm) となり、接続部、スライド部は 3D プリンタで PLA を用いて作製。モーターはマブチモーター株式会社の RS-540SH を使用。振幅の大きい振動を与えるためタミヤ 6 速ギヤボックスを改造しギヤ比 17.0 でクランクを回転させた。粉粒体を入れる容

器を塩化ビニル板で底面 80mm×80mm、高さ 100mm、容器を覆うカバーをアクリル板で作製、容器の底部分をスライド部と接着した。



図3 装置全体(正面)



図4 クランク機構

3. 実験1

・仮説1

振動によって流動化は起こる。ここで密度が十分に大きい大物体を振動する粉粒体の中にいれ、この大物体が沈んだとき流動化したと判断する。

・実験1-1 振動中の流体の対流の確認

BB弾(Φ6mm)200gを粉粒体とし実験を行った。3色のBB弾からなる粉粒体を色ごとに3層に分ける。この粉粒体に3～7Vの電圧をかけたモーターで振動を与える。振動時の様子を動画で撮影し、真ん中の層のBB弾がどのような挙動をするか調べる。

結果は対流がみられた。

・実験1-2 振動かさ密度の測定

私たちは振動時の粉粒体全体の密度を振動かさ密度と定義し、これに着目した。5V、6V、7Vの振動を与えた際の振動かさ密度を調べるため動画を撮影する。振動中の静止画像を三枚抽出し、容器内の粉粒体の高さを平均し振動中の体積を

表1 各電圧の振動かさ密度

電圧 (V)	5V	6V	7V
振動かさ密度(g/cm ³)	0.604	0.513	0.486

調べ、振動かさ密度を求めた。結果を表1に示す。

・実験1-3

大物体の質量を m 、振動かさ密度を ρ 、大物体の体積を v 、重力加速度を g とする。粉粒体が流動

化したとき、大物体に働く重力は mg 、浮力は ρvg と表される。重力と浮力はそれぞれ図5のように物体に働く。

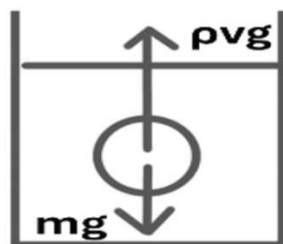


図5 物体に働く力の模式図

$mg - \rho vg < 0$ のとき大物体は浮上し、 $mg - \rho vg > 0$ のとき沈む。

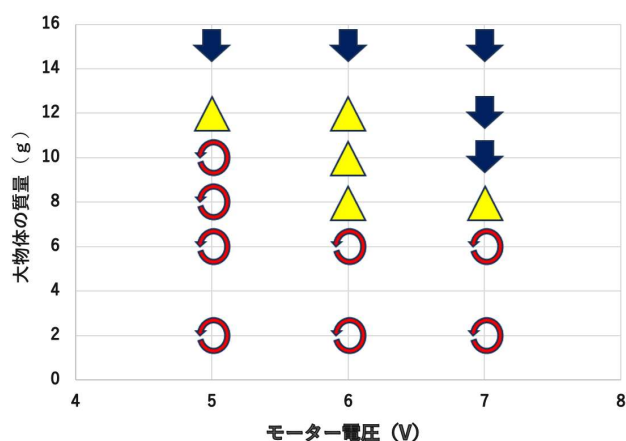
この考え方から粉粒体が流動化した際の各電圧で大物体が沈むと考えられる質量を求める。結果を表2に示す。

表2 大物体が沈む値(理論値)

電圧 (V)	5V	6V	7V
質量 (g)	4.83 g	4.10 g	3.88 g

・実験1-4

3g、6g、8g、10g、12g、15gの質量の大物体を用意し、粉粒体に大物体を一つ入れる。それぞれ5V、6V、7Vの電圧をモーターにかけ振動を与え、それぞれの大物体について挙動を観察する。結果を図6に示す。



【凡例】

- ↓: 容器底でほぼ動かない状態。
- ↑: その場で小刻みな上下動を繰り返す状態。
- ⦿: 粉粒体中を対流に乗って回っている状態。

図6 振動する粉体中の大物体の挙動

・考察1

まず、ブラジルナッツ効果の原因として対流説や落ち込み説が考えられているが、実験1-1よりこ

の粉粒体でのブラジルナッツ効果は対流によって生じていると考えられる。

グラフより 5V のとき 12g に、6V のとき 8g、10g、12g に、7V のとき 8g に△が現れ、○(対流と↓(沈降)を仕切るようになっている。○の状態は対流に乗っていることからブラジルナッツ効果(対流)の影響が大きく、↓の状態は沈降後に対流の影響が現れないことから流動化の影響が大きいと考えられる。そして、△の状態はブラジルナッツ効果(対流)と流動化の両方の影響が拮抗しているために発生したと考えられ、今回は 6V の振動が対流と沈降の境界になっている。

細かく見ると、12g の大物体では 5V と 6V の振動で、10g の大物体では 6V の振動で、8g の大物体では 6V と 7V の振動で対流と流動化が拮抗している。これは図 7 のように大物体にはたらく重力と対流による抗力が釣りあうからと考えられ、このことは質量の大きな物体ほど流動化の影響を受けやすいことを示唆していると考えられる。

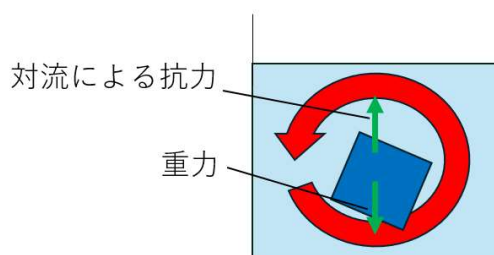
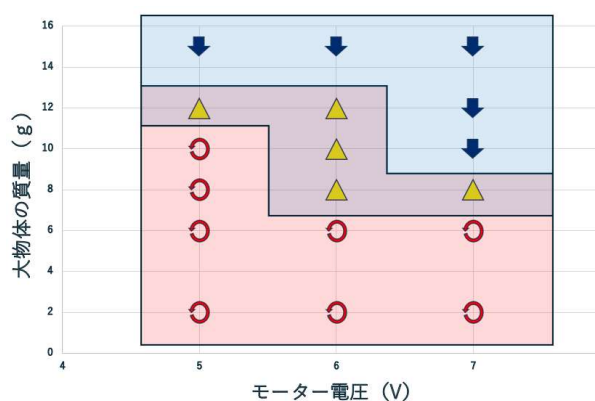


図 7 対流による抗力と重力

また、実際には大物体が沈む値(理論値)よりも大きな質量でないと大物体が沈まないことから、ブラジルナッツ効果(対流)の影響は 5V から 7V の間で常に働いていることも分かる。つまり、○、△、↓の 3 つの挙動が起こっているときにはいずれもブラジルナッツ効果(対流)と流動化の 2 つの効果が共存し、両方の効果の影響を受けているが、どちらか一方が他方よりも強いために一方の効果が顕著に現れていると考えられる。また、図 6 をブラジルナッツ効果の影響の大きい領域を赤、流動化の影響の大きい領域を青と色分けしたものが図 8 である。



【凡例】

- ↓・・・流動化の影響が大きい
- △・・・両方の力が拮抗している
- ・・・ブラジルナッツ効果の影響が大きい

図 8 顕著に現れる効果

4. 実験 2

・仮説 2

粉粒体の粒径が小さいほど、また粉粒体の粒子数が少ないほど振動により流動化しやすい、という仮説を立てた。

・実験 2

粉粒体の粒径ごとに、粉粒体のガラスビーズの量、モーター電圧と大物体の質量の変化による大物体の挙動の変化を記録した。ガラスビーズ粒径は 0.5~0.7mm, 2.0mm, 4.0mm の三種類を使用した。また粒子数はガラスビーズ一粒の質量は均一であるため全体の質量で考え 250g, 300g, 350g の三種類を使用した。実験は、実験 1-4 と同様に行う。結果を図 9~11 に示す。

【凡例】

- ★：大物体が沈む値(理論値)。
- ↓：容器底でほぼ動かない状態。
- ↑：粉粒体表面に浮上している状態。
- △：その場で小刻みな上下動を繰り返す状態。
- ：粉粒体中を対流に乗って回っている状態。

粒径：0.5～0.7mm

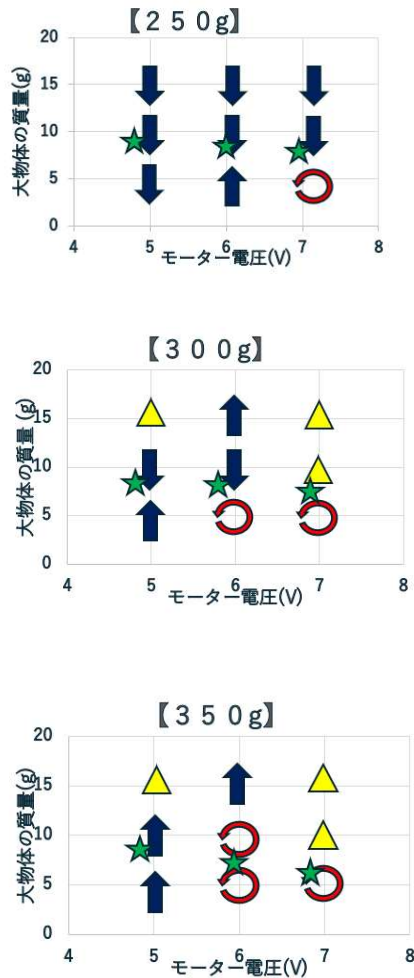


図9 粒径0.5～0.7mmの時の粉粒体量の変化による大物体の挙動

粒径：2.0mm

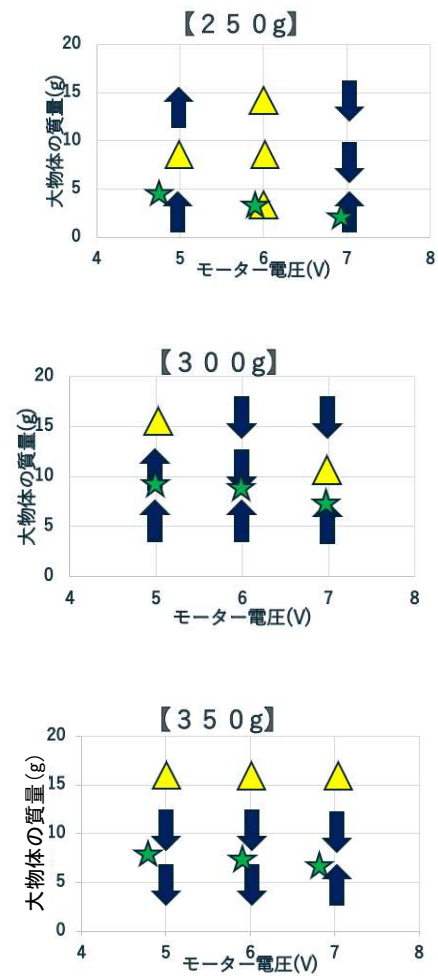
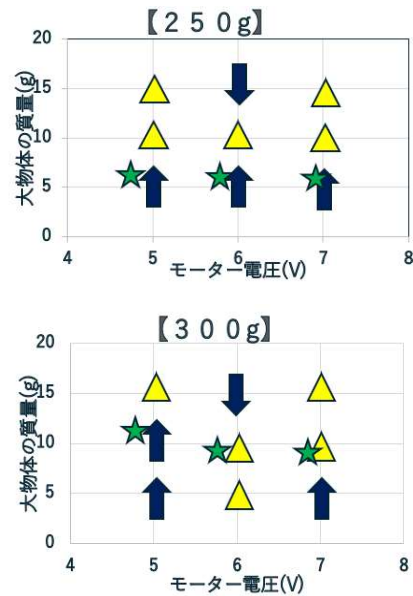


図10 粒径2.0mmの時の粉粒体量の変化による大物体の挙動

粒径：4.0mm



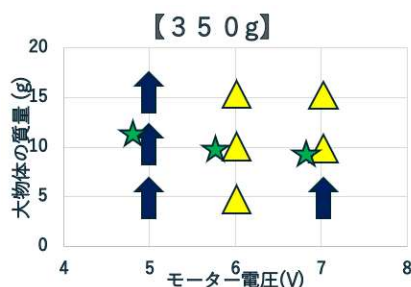
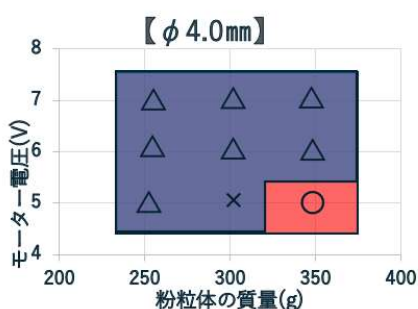
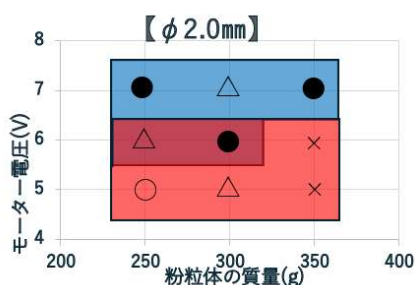
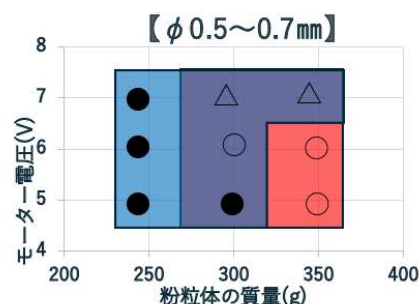


図 11 粒径 4.0mm の時の粉粒体量の変化による大物体の挙動

・考察 2

図 9～11 から各粒径におけるモーター電圧と粉粒体量で実験 1～3 で求めた手法で大物体が沈む値(理論値)を求め、大物体がどのような動きをするのかを考察した。例えば、粒径 0.5～0.7 mm、250g の粉粒体で 5 V の振動を与えた時は、大物体が沈む値(理論値)より大きな質量で沈んだので、流動化していると判断した。実験 1～4 と同様の手法でブラジルナッツ効果の影響の大きい領域を赤、流動化の影響の大きい領域を青に色分けしたところ、図 12 を書くことができた。



【凡例】

- …流動化していると判断した点
- …ブラジルナッツ効果の影響の大きいと判断した点
- △ …二つが拮抗状態にあると判断した点
- × …判断できなかった点

図 12 実験 2 から判断した各粒径での粉粒体の質量、モーター電圧による粉粒体の挙動の変化

色の重なっている部分はその二つの領域が拮抗している部分であると考えられる。この図から、粉粒体の量が少なくなるほど、また振動させる電圧が大きくなるほど流動化しやすいことが分かる。また、粒径の条件に関わらずブラジルナッツ効果の領域は不規則に変化すること、流動化は粒径に依存しないことが、図中の領域の変化の様子から分かった。

5. 結論

振動させる粉粒体中においてブラジルナッツ効果と流動化の効果がそれぞれ強く現れる条件は以下の通り。

- ・流動化……粒体の粒子数が少ない。
振動数が大きい。
質量の大きい大物体ほど影響を受けやすい
- ・ブラジルナッツ効果……いかなる条件でも大物体に影響を与えている

参考文献

- 1 流動層を用いた乾式比重分離法に関する基礎的研究 資源と素材 vol.120 p388-394(2024)
- 2 東京大学粉体班. “ちりも積もれば摩訶不思議”.東京大学粉体班. (参照 2024-6-21)
- 3 振動状態における粉体の流動性 材料 17 巻 177 号 p.545 - 549 (1968)