

## （第16回）2020年度・研究助成報告

|                 |                            |
|-----------------|----------------------------|
| 研究題名            | 振動流動層による粒状混合物の乾式比重分離技術の開発  |
| 研究期間            | 2020年4月1日～2022年3月31日       |
| 研究機関・所属<br>研究者名 | 岡山理科大学工学部バイオ・応用化学科<br>押谷 潤 |

## 1. 2020（2021）年度研究成果の概要

本研究では、下部からの送風により粉体を流動化させた流動層に上下振動を加えた振動流動層により、異密度粉体からなる粒状混合物を乾式で比重分離可能な技術の開発を行った。分離対象物として、モデルケースである異密度の球状粉体の混合物のほか、産業的に分離ニーズがある廃棄物や鉱物を業者から入手して使用した。一連の研究を通して、密度差が小さな粒状混合物では送風のみでの流動層では分離が困難であるのに対し、振動を加えた振動流動層では風速を最適化すれば分離可能であることが明らかにし、本技術が様々な問題を抱える従来の湿式分離技術の代替となり得ることを見出した。

## 2. 助成期間内での研究成果の概要

## 1. はじめに

分離技術は産業界に欠かせないものであり、異密度粉体からなる粒状混合物に対しては湿式サイクロンやフローテーションなどの水を用いた湿式分離技術が古くから用いられている。しかし、湿式がゆえに廃液処理や乾燥工程が必要なことや、装置からの液漏れによる作業現場の劣悪化、オーストラリアなど地球温暖化による水不足が懸念される場所での使用が困難など様々な問題を抱えているため、代替となる乾式分離技術の開発が求められている。

申請者らは、粉体を下部からの送風により流動化させた固気系流動層内での物体浮沈現象を利用した塊状混合物の乾式比重分離技術を開発し、廃プラスチックや廃非鉄金属を対象とした分離装置の実用化を果たしている。しかし、同技術では、小サイズの物体が流動化している粉体の動きの影響を強く受けるために密度差通りの安定した浮き沈みが困難であり、サイズが10mmを下回る粒状混合物の分離が不可能であるという問題が見られた。そこで、その問題解決のために、今度は流動層内で密度の小さな粉体が上層へ、密度の大きな粉体が下層へ移動する密度偏析現象に基づく粒状混合物の乾式比重分離技術の開発を進め、粒状の石炭や鉄鉱石を分離することによる高品位化が可能であることを見出した。しかし、同技術も、密度の比に換算して2.0を

下回るような密度差が小さな粒状混合物の場合では密度偏析が起こらず分離が不可能という問題が見られた。そこで、本研究では、流動層に上下振動を加えた振動流動層とすることで、密度差が小さな粒状混合物の場合でも分離可能かを検討することで分離性能が向上した技術の開発を試みた。

## 2. 実験装置

Fig.1 に示す振動流動層装置を分離実験に用いた。内径 100mm のアクリル樹脂製円筒型カラムに分離対象となる粒状混合物を入れた。カラム下部には空気分散板を設け、ベビコンからの空気をマスフローコントローラーで風速制御して空気分散板下部の空気室に送り込んで粒状混合物に送風した。上下振動用に 2 つの振動発生モーターを空気室の左右に設置した。調整ウェイトとモーター内のアンバランスウェイトを変更することにより振幅  $\alpha$  を、インバーターにより振動周波数  $f$  をそれぞれ変化させ、振動強度  $\Gamma = \alpha(2\pi f)^2/g$  を制御した。

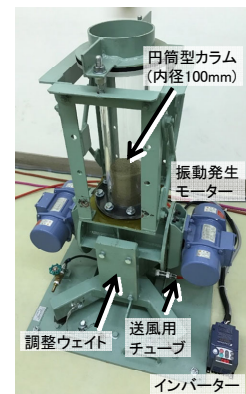


Fig.1 振動流動層装置

## 3. 球状混合物での分離実験

サイズ  $212\mu\text{m} \sim 250\mu\text{m}$  の重質ガラスビーズ (GB、かさ密度  $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ ) とステンレスビーズ (SB、かさ密度  $4.0\text{g}/\text{cm}^3$ ) をかさ体積混合割合 50% ずつとした混合物を用意した。この混合物をカラムに層高 100mm となるように充填して所定の風速により流動化させ、振動強度  $\Gamma = 4.4$  の振動有および送風のみ振動無の 2 条件で分離実験を行った。10 分経過後に送風と振動を停止し、上から約 10mm ずつの 10 層に分割して回収し、各層の重量とかさ体積を測定してかさ密度を算出し、あらかじめ求めた検量線により SB のかさ体積混合割合  $V_{\text{SB}}$  を求めた。また、分離の程度を数値化するために式 (1) により偏析度を求めた。ここで  $i$  は層番号で 1 は最上層を、10 は最下層を示し、偏析度 0% は完全混合を、100% は GB と SB が上下 5 層ずつに完全分離した場合を示す。

$$\text{偏析度} = \frac{1}{10} \left\{ \sum_{i=1}^5 \frac{50 - V_{\text{SB}}(i)}{50} + \sum_{i=6}^{10} \frac{V_{\text{SB}}(i) - 50}{50} \right\} \times 100\% \quad \text{式 (1)}$$

Fig.2 に各風速での各層の SB のかさ体積混合割合  $V_{\text{SB}}$  を示す。まず、下段の振動無での結果を見ると、低風速の  $4.6\text{cm}/\text{s}$  と  $9.2\text{cm}/\text{s}$  と高風速の  $21.6\text{cm}/\text{s}$  と  $27.7\text{cm}/\text{s}$  では各層の  $V_{\text{SB}}$  は約 50% でほぼ等しく密度偏析は生じなかった。中風速の  $15.4\text{cm}/\text{s}$  では最上層の  $V_{\text{SB}}$  が約 30% と若干 GB が多く、最下層は約 65% と若干 SB が多く、わずかながら密度偏析が生じた。一方、上段の振動有での結果を見ると、低風速の  $4.6\text{cm}/\text{s}$  では密度偏析は生じなかったが、風速の増加に伴い密度偏析が進行し、 $15.4\text{cm}/\text{s}$  では上 5 層はほぼ GB で下 3 層は完全に SB であり、密度偏析が顕著に生じた。さらに風速を増加させると密度偏析が抑制される結果となった。これは、風速の増加に伴い粉体の

運動性が高まるために混合効果が支配的になるためであると考えられる。Fig.3 に振動有無での風速に対する偏析度を示す。グラフから明らかなように振動有での偏析度が振動無と比較して極めて大きな値となっており、送風のみでの流動層では分離が困難な密度差の小さい粒状混合物の分離が振動を加えた振動流動層により可能であることが明らかとなった。また、偏析度が最大値を示すことから、分離に適した風速が存在することも明らかとなった。

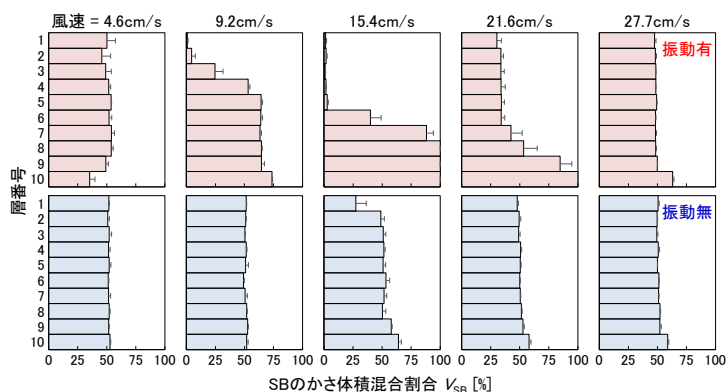


Fig.2 各風速での各層のSBのかさ体積混合割合

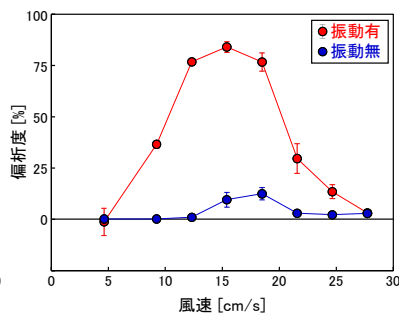


Fig.3 風速と偏析度の関係

#### 4. 有機系・無機系混合廃棄物での分離実験

建設廃棄物から鉄やコンクリートなどを取り除いた後に残るサイズ  $250\mu\text{m}$  ~  $4000\mu\text{m}$  の有機系・無機系混合廃棄物を分離対象として用意した。実験方法は前項と同様で、この混合廃棄物をカラムに層高  $100\text{mm}$  となるように充填して所定の風速により流動化させ、振動強度  $\Gamma=1.0$  の上下振動有と振動無とで分離実験を行った。また、比較のために同じく振動強度  $\Gamma=1.0$  の左右振動有でも分離実験を行った。なお、左右振動の発生は Fig.1 に示した上下振動発生モーターを  $90$  度回転させて設置することで行った。10 分経過後に送風と振動を停止し、上から約  $10\text{mm}$  ずつの 10 層に分割して回収し、各層の重量とかさ体積を測定してかさ密度を算出した。また、分離の程度を数値化するために式 (2) により偏析度を求めた。 $i$  は前項と同じく層番号で、 $\rho_{av}$  は各層のかさ密度を、 $\rho_{av}$  はそれらの平均値を表し、偏析度が大きいほど密度偏析が顕著であることを示す。

$$\text{偏析度} = \frac{1}{10} \left\{ \sum_{i=1}^{10} |\rho_{av} - \rho_i| \right\} \quad \text{式 (2)}$$

Fig.4 に各風速での各層のかさ密度を示す。まず、下段の振動無での結果を見ると、低風速の  $10\text{cm/s}$  と  $30\text{cm/s}$  では各層のかさ密度がほぼ等しく密度偏析は生じなかったが、高風速の  $50\text{cm/s}$  と  $60\text{cm/s}$  では上層のかさ密度が若干小さく、わずかながら密度偏析が生じた。次に、上段の上下振動有での結果を見ると、風速  $30\text{cm/s}$  以上では下層になるにつれてかさ密度が大きくなり、密度偏析が顕著に生じた。また、中段の左右振動有の結果でも同様に、風速  $30\text{cm/s}$  以上で密度偏析が生じた。Fig.5 に風速と偏析度の関係を示す。上下振動有では前項と同じく、風速の増加に伴い偏析度も増加して

最大値を示し、さらに風速を増加させると偏析度が減少した。したがって、有機系・無機系混合廃棄物を分離対象とした場合でも分離に適した風速が存在することが明らかとなった。また、左右振動有の偏析度は約 0.15 であり、0.20 を超える上下振動有の方が分離性能という観点で優れていることも明らかとなった。Fig.6 は風速 50cm/s における左右振動有での各層の写真であり、上層には木片などの有機物が、下層には砂利などの無機物が存在することが確認され、上下振動有でも同様の傾向であった。

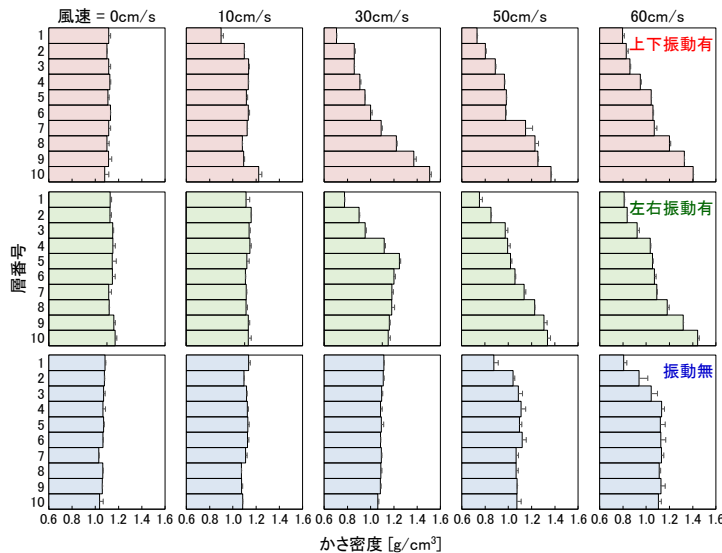


Fig.4 各風速での各層のかさ密度

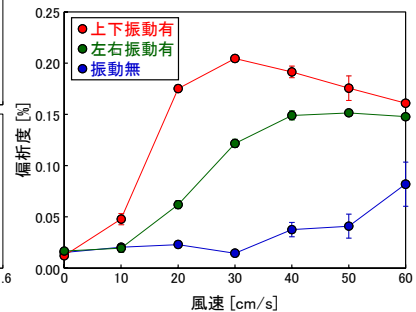


Fig.5 風速と偏析度の関係



Fig.6 風速50cm/s・左右振動有での各層の写真

## 5. 鋳物加工廃材での分離実験

サイズ 90 $\mu$ m~500 $\mu$ m の鋳物加工廃材を分離対象として用意した。実験方法は前項までと同様で、この鋳物加工廃材をカラムに層高 50mm となるように充填して所定の風速により流動化させ、振動強度  $\Gamma = 1.0$  の上下振動有と振動無とで分離実験を行った。30 分経過後に送風と振動を停止し、上から約 10mm ずつの 5 層と層底部に残った



数 mm の合計 6 層に分割して回収し、各層の重量とかさ体積を測定してかさ密度を算出した。また、分離の程度を数値化するために式 (3) により偏析度を求めた。各変数は前項と同じである。

$$\text{偏析度} = \frac{1}{6} \{ \sum_{i=1}^6 |\rho_{av} - \rho_i| \} \quad \text{式 (3)}$$

Fig.7 に各風速での各層のかさ密度を示す。まず、下段の振動無での結果を見ると、高風速の 5.5cm/s では最上層のかさ密度が若干小さくなったが、その他の風速では各層のかさ密度がほぼ等しく密度偏析は生じなかった。一方、上段の振動有では下層になるにつれてかさ密度が大きくなり、特に最下層のかさ密度は他層と比較して極めて大きく、密度偏析が顕著に生じた。Fig.8 は風速と偏析度の関係であり、前項までと同様に振動有の偏析度は振動無の場合よりも大きいことと、振動有では高風速において偏析度が低下して密度偏析が抑制されることが明らかとなった。

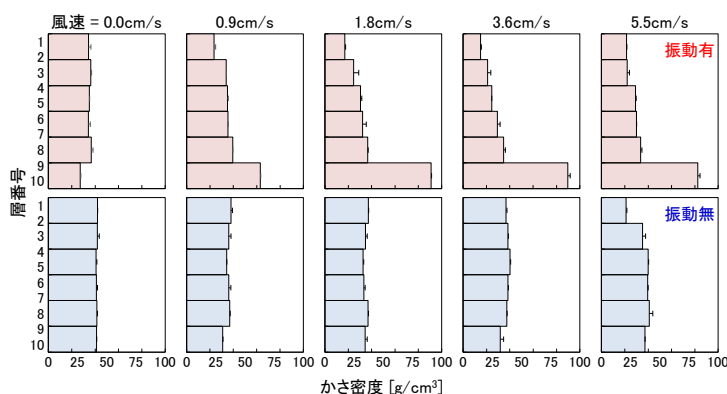


Fig.7 各風速での各層のかさ密度

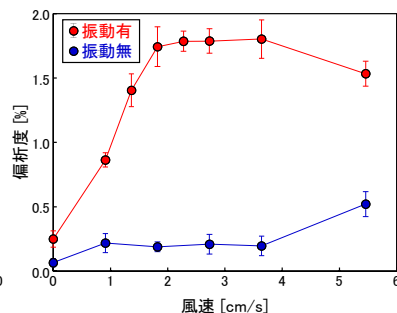


Fig.8 風速と偏析度の関係

## 6. まとめ

モデルケースである異密度の球状粉体の混合物、および産業的に分離ニーズがある有機系・無機系混合廃棄物と鉱物加工廃材からなる粒状混合物を対象として振動流動層を用いた分離実験を行った。その結果、密度差が小さいために送風のみでの流動層では分離が困難であったが、振動を加えた振動流動層では顕著な密度偏析が生じ、密度の大小による分離が可能であることが明らかとなった。また、振動流動層では風速の増加に伴い偏析度は増加して最大値を示し、さらに風速を増加させると偏析度は減少し、分離に適した風速が存在することも明らかとなった。

以上の結果、申請者らがこれまでに開発してきた流動層を用いた乾式比重分離技術の分離性能をさらに向上させるためには、振動を加えることが極めて重要であることを見出した。そして、本研究成果により、振動流動層を用いた乾式比重分離技術が、様々な問題を抱える湿式分離技術の代替となり得る可能性が大いに示された。今後は実用化に向けた装置のスケールアップや連続分離装置の開発を行う。

### 3. 研究発表

#### 学会発表

樋野将貴、押谷潤、辻拓也, 振動流動層内での粉体密度偏析に及ぼす風速の影響, 第26回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2020年11月26日

松岡哲明, 横内貴正, 押谷潤, 馬渡佳秀, 振動流動層を用いた建設廃棄物残渣からの木片などの有機物の分離, 第26回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2020年11月26日

樋野将貴, 押谷潤, 振動層内での粉体密度偏析に及ぼす振動強度の影響, 第27回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2021年12月16日

#### 論文発表

Jun Oshitani, Ryo Sugo, Yoshihide Mawatari, Takuya Tsuji, Zhaohua Jiang, George V. Franks, Dry separation of fine particulate sand mixture based on density-segregation in a vibro-fluidized bed, *Advanced Powder Technology*, 31 (2020) 4082-4088.