

平成 21 年 4 月 8 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19860054

研究課題名（和文） 固気流動層の流動化制御による乾式比重分離技術の高精度化

研究課題名（英文） Development of high-accuracy dry dense medium separation by controlling fluidization of a gas-solid fluidized bed

研究代表者

吉田 幹生 (YOSHIDA MIKIO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：60444650

研究成果の概要：

空気分散器の圧力損失が層内の流動挙動に及ぼす影響を検討した。圧力損失が大きい場合は層内において対流が生じにくく、高精度分離が期待できる結果が得られた。圧力損失が大きい空気分散器を有する流動層カラムを用いて分離実験を行ったところ、物体サイズによらず安定な分離挙動を示すことが明らかとなった。また、未分級の粒子を流動化粒子として採用する場合には、偏析と流動化の激しさの両者を抑制可能な適度な流動化強度が必要であることが示された。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 1,230,000 | 0 | 1,230,000 |
| 2008 年度 | 1,310,000 | 393,000 | 1,703,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,540,000 | 393,000 | 2,933,000 |

研究分野：粉体工学，化学工学

科研費の分科・細目：化工物性・移動操作・単位操作

キーワード：固気流動層，乾式分離，リサイクル，流動化制御，空気分散器，圧力損失，物体浮沈

1. 研究開始当初の背景

有限な地球資源を有効に利用することを目的として、廃棄物リサイクル技術の開発が世界中で推進されている。家電あるいは自動車シュレッダーダストなどの混合廃棄物を効果的にリサイクルするためには、前処理として各素材に分離することが必要不可欠である。

その1つとして、各素材の比重差を利用し

た湿式比重分離法が挙げられる。これは比重調節した重液中に物体を投入すると、重液の比重よりも小さな比重の物体は浮揚し、大きな比重の物体は沈降するために、比重の異なる物体の分離が可能である。しかし、1)比重調節剤のコストが高いだけでなく、2)廃液処理や分離後の乾燥工程が必要などの欠点がある。そこで申請者らは、これらの問題を抱え

ない代替技術として固気流動層を利用した乾式比重分離技術の開発を行ってきた。

2. 研究の目的

固気流動層とは粒子層を下部からの送風で流動化させたものであり、比重や粘度などの液体に類似した性質を持つ。したがって、この層内に物体を投入すると、液体の場合と同様に比重の異なる物体を分離可能となる。しかし、現段階では廃棄物が比重差どおりに浮沈せずに、分離精度の低下を招く場合があることが確かめられた。これは、本乾式法が湿式法と異なり粒子層下部からの送風を行っているため、気泡上昇などの気体の流動やそれに伴う粒子の流動(層内流れ)の影響を受けること、さらに、層内流れの発生により層内の見掛け比重に分布が生じることに起因していると考えた。そこで固気流動層の層内流れを制御することにより、分離精度の向上が期待できると考え、1) 空気分散器の圧力損失が流動化状態に及ぼす影響、2) 流動化の強弱により生じる粒度偏析が廃棄物浮沈に及ぼす影響を検討した。

3. 研究の方法

(1) 空気分散器の圧力損失が流動化状態に及ぼす影響

流動化粒子には粒径 $210\sim 250\cdot\mu\text{m}$ 、真比重 2.50 のガラスビーズを用いた。流動層カラムには底部に空気分散器を設けた内径 15.3cm 、高さ 40cm の円筒を用いた。空気分散器は代表的な形式である2枚の多孔板によって布1枚を挟んだ構造を取り上げた。分散器の圧力損失を変化させるため、圧力損失の異なる(最小流動化速度における圧力損失が $26.6\sim 824.1\text{Pa}$)4種類の布を用い、分散器の圧力損失が固気流動層の流動化状態に及ぼす影響を検討した。流動化状態を評価するため、

20cm の層高の粒子層を最小流動化速度の 1.2 倍の風速($u_0/u_{mf}=1.2$)において流動化させた後、電子天秤に吊るした鉛球を層内の5つの高さ方向(3cm あるいは 4cm 間隔)と2つの半径方向($r=0\text{cm}$ (中心部), $r=13.8\text{cm}$ (壁付近))の異なる計10箇所の位置に投入し、各位置での鉛球の質量を測定した。得られた質量 m と空気中での質量 m_0 との差 $\cdot m$ を m_0 で割ることにより見掛け浮力を求め、層内の見掛け比重分布を検討した。本結果より、最良の分散器の選定を行った。

層内の浮沈挙動は浮力 $F_f=g_{fbw}V_s g$ と重力 $F_g=-g_{pw}V_s g$ の差である浮沈力 $F_{FS}=(g_{fb}-g_p)\cdot\rho_w V_s g$ によって決定される。ここで、 g_p と V_s はそれぞれ浮沈対象物の比重および体積、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。したがって、浮沈対象物の体積 V_s が小さいほど比重差による浮沈力が働きにくく、分離がしにくいと考えられる。そこで最良と考えられる空気分散器を用いた流動層カラムを用いて物体の浮沈実験を行った。浮沈対象物として直径 D_s の異なる3種類(大: 3.75cm , 中: 3.00cm , 小: 1.88cm)の比重調節球を用いた。所定の風速比(u_0/u_{mf})において粒子層を流動化させた後、比重調節球1つを層上部に投入し、5分間放置することにより球を浮沈させた。その後、流動化を停止し、層底部から球の下端までの高さ h を測定した。得られた h を層高から球の半径を差し引いた値で割ることにより、球の規格化高さ h_{nor} を算出した。 $h_{nor}=1.0$ で完全浮揚、 $h_{nor}=0.0$ で完全沈降したことを示す。なお、測定は3回ずつ行った。

(2) 流動化の強弱により生じる粒度偏析が廃棄物浮沈に及ぼす影響

本技術の実用化の際には流動化粒子が大量に必要となるため、流動化粒子のコスト削減と分級操作などの準備工程の省略が求められ

る。そこで、流動化粒子として粒径範囲が100–600・ μm の未分級の砂を用いた。実験装置は(1)で最良と考えられた空気分散器を基本とした。カラム内に流動化粒子を20cm投入した後、粒子層を最小流動化速度に対する風速比(u_0/u_{mf})を1.5–4.0倍に調節して流動化させた。その後、3.75cmの球を所定の投入高さに投入した。1分後に流動化を停止し、層底部からの球の中心位置 h_c を測定した。 h_c を層高で割ることにより球の規格化高さ $h2_{nor}$ を算出した。 $h2_{nor}=1.0$ で完全浮揚、 $h2_{nor}\approx 0.1$ で完全沈降したことを示す。なお、実験は3回ずつ行った。また、粒度偏析を評価するため、粒子層を最小流動化速度の1.5–4.0倍で30分間流動化させた後、送風を止め、掃除機で層上部から2cmずつ10層に分割して粒子を吸引回収した。その後、各 $h2_{nor}$ の中位径 D_p をレーザー回折/散乱式粒径分布装置によって測定した。

また、未分級の砂を流動化粒子として用いて家電シュレッダーダスト中の廃プラスチックから塩素含有プラスチック(=塩プラ)(重量基準で3割含有)の除去を試みた。塩素プラの除去率を算出するため、回収した浮揚物と沈降物をそれぞれ非塩プラと塩プラに選別し、浮揚した非塩プラの質量 m_f 、沈降した塩プラの質量 m_s を測定した。 m_f を投入した非塩プラの質量で割ることにより回収率を、 m_s を投入した塩プラの質量で割ることにより除去率をそれぞれ算出した。

4. 研究成果

(1) : 布の圧力損失が最も小さい26.6Paの場合は、いずれの高さ位置においても $r=0\text{cm}$ よりも $r=13.8\text{cm}$ の方が見掛け浮力は約0.5小さい結果となった。これは $r=0\text{cm}$ の位置の粒子は上昇し、 $r=13.8\text{cm}$ の位置の粒子は下降するという循環流が流動層内に発生したためだと考えられる。圧力損失の増加に伴い、 $r=0, 13.8\text{cm}$

の見掛け浮力の差が徐々に小さくなり、圧力損失が824.1Paの場合では両者の差はほとんど無い結果となった。これは圧力損失の増加に伴い、循環流が抑制され流動層内部で均一な見掛け浮力が発生しているためだと考えられる。

次に最良と考えられる圧力損失824.1Paの布を用いた空気分散器を持つ流動層カラムでの物体サイズの浮沈実験を行った結果、風速比が比較的大きい $u_0/u_{mf}=3.0$ では、 D_s が小さくなるとやや浮沈挙動が不安定になる場合が見られた。しかし、**図1**に示した $u_0/u_{mf}=2.0$ の結果では、物体サイズによらず安定して分離できることが示された。これは分散器の圧力損失の増加により、層内での循環流が抑制できたためだと考えられる。したがって、わずかな層内流れは避けられない乾式比重分離においても流動化を制御することにより高精度な分離が可能であると言える。

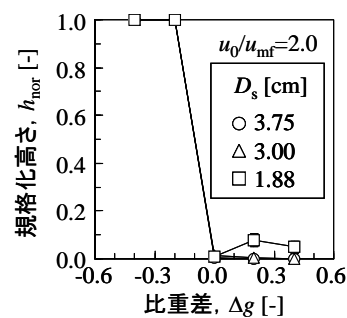


図1 異なる物体サイズでの Δg に対する h_{nor}

(2) : **図2**に各風速比 u_0/u_{mf} における球の比重 g_{sp} に対する球の規格化高さ $h2_{nor}$ 、および、各 $h2_{nor}$ での砂の中位径 D_p を示す。なお、球の投入高さは層底部とした。 $u_0/u_{mf}=1.5$ では、 $g_{sp}\leq 1.02$ の球は完全に浮揚し、 $h2_{nor}=1.0$ となった。 $g_{sp}=1.04$ の球は層高の約半分の高さに位置する結果となった。 $1.04\leq g_{sp}\leq 1.30$ では g_{sp} の増加に伴い $h2_{nor}$ が緩やかに低下した。 $1.32\leq g_{sp}$ では球は完全に沈降したままであり、 $h2_{nor}\approx 0.1$ となった。一方、各 $h2_{nor}$ での D_p は、

上層の $h2_{nor} \geq 0.7$ では $D_p \approx 217 \cdot \mu\text{m}$ であった。

0.7>

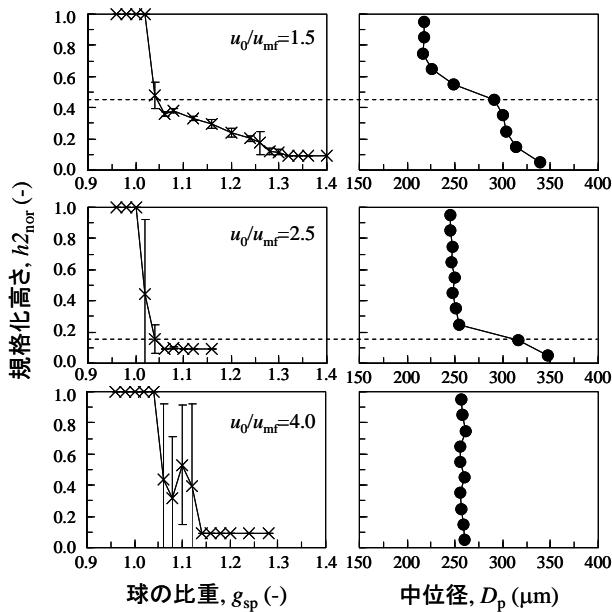


図2 異なる風速比での g_{sp} に対する $h2_{nor}$ と各 $h2_{nor}$ に対する D_p

$h2_{nor} > 0.4$ では D_p が急激に増加し、 $h2_{nor} = 0.4$ では $D_p \approx 291 \cdot \mu\text{m}$ となった。 $0.4 \geq h2_{nor}$ では緩やかに増加して最下層では $D_p \approx 339 \cdot \mu\text{m}$ となった。以上のように、上層と下層の D_p が明らかに異なることから、粒度偏析の発生が確認できる。粒度偏析が生じたのは、 $u_0/u_{mf} = 1.5$ では大粒径の砂は流動化が弱いに対して、小粒径の砂は十分に流動化した結果、小粒径の砂が大粒径の砂の空隙を潜り抜けて上層に達したためだと考えられる。球の浮沈結果と各高さの中位径を比較すると、図中の横点線で示すように、ほぼ同じ $h2_{nor}$ で g_{sp} と D_p の変化は起こっており、粒度偏析と球の浮沈現象は密接に関係していると言える。

$u_0/u_{mf} = 2.5$ でも、図中の横点線で示したようにほぼ同じ $h2_{nor}$ で g_{sp} と D_p の変化は起こった。しかし、その $h2_{nor}$ の値は $h2_{nor} \approx 0.15$ であり、 u_0/u_{mf} の増加に伴い低下した。これは、 $u_0/u_{mf} = 1.5$ では流動化の弱い大粒径の砂が u_0/u_{mf} の増加に伴って徐々に十分な流動化状態に達し、流動化の弱い砂の割合が減少した

ためだと考えられる。一方、 $u_0/u_{mf} = 4.0$ の g_{sp} に対する $h2_{nor}$ では、 g_{sp} の増加に伴い $h2_{nor}$ の低下割合が急激に変化する現象は見られなかった。また、各 $h2_{nor}$ に対する D_p の結果より粒度偏析が生じないことが明らかとなった。これは、全ての粒径の砂が十分に流動化したためだと考えられる。しかし、 $u_0/u_{mf} = 2.5$ に比べて完全浮揚および完全沈降しない球の比重範囲が増加し、分離の精度が低下したことが確認できる。これは、 u_0/u_{mf} の増加に伴って砂の流動化が激しくなり、球の浮沈が不安定になったためだと考えられる。したがって、未分級の砂を流動化粒子に採用する場合には、偏析と流動化の激しさの両者を抑制可能な適度な流動化強度に設定することが重要であることが明らかとなった。

これらの知見を生かして、未分級の砂を流動化粒子として家電シュレッダーダスト中の廃プラスチックから塩素含有プラスチックの分離を試みた結果、非塩プラの回収率はやや低く50%-60%程度であったが、塩プラの除去率は約95%と高い値が得られた。

本課題より空気分散器の圧力損失を増加させることにより層内の循環流を抑え、分離効率が向上する結果が得られた。また、実用化の際の低コスト化を考慮して、流動化粒子として安価である未分級の砂を用いた場合でも、条件によっては安定な分離挙動が得られることが確かめられ、乾式比重分離の可能性を広げられたと考える。しかし、安定な分離が得られる分散器であっても長期間の使用による分散器の目詰まりや廃棄物投入に伴う汚れ付着により空気吹き出し口の閉塞が生じ、流動化の悪化が予測される。したがって、今後は流動化状態が良好だけでなく、そのメンテナンスがより容易である分散器の検討が必要になると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① 吉田幹生・中務真吾・後藤邦彰・押谷潤，固気流動層内での物体浮沈に及ぼす粒度偏析と物体投入高さの影響，化学工学論文集35，216-220，2009，査読有

[学会発表] (計 3 件)

① 吉田幹生・中務真吾・奥津龍紀・後藤邦彰・押谷潤，乾式比重分離の安定性に及ぼす分離対象物体サイズの影響，第46回粉体に関する討論会，2008年12月3日，奈良(奈良新公会堂)

② 吉田幹生・中務真吾・難波雅明・後藤邦彰・押谷潤・冨師竜也・久保泰雄，未分級の砂を用いたシュレッターダストからの塩素含有プラスチックの分離，粉体工学会 第44回 夏期シンポジウム，2008年8月12日，京都(関西セミナーハウス)

③ 奥津龍紀・吉田幹生・後藤邦彰・押谷潤，物体サイズが固気流動層内の物体浮沈に及ぼす影響，第10回 化学工学会学生発表会，2008年3月1日，吹田(関西大・千里山キャンパス)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 幹生 (YOSHIDA MIKIO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：60444650