固気流動層内での物体浮沈に及ぼす 層底部の空気流入状態の影響

Influence of Airflow at the Bottom of a Gas-Solid Fluidized Bed on Float and Sink of Objects

中務 真吾,^a 山川 直也,^a 図師 竜也,^b 久保 泰雄,^b

Shingo Nakatsukasa, Naoya Yamakawa, Tatsuya Zushi, Yasuo Kubo,

吉田 幹生,^c 後藤 邦彰,^c 押谷 潤^c

Mikio Yoshida, Kuniaki Gotoh, Jun Oshitani

Received 1 September 2008; Accepted 13 November 2008

In this study, float-sink of chlorine containing and not-containing plastics in a gas-solid fluidized bed of silica sand was studied with and without joints in the air distributor and by changing the amount of objects loaded on the air distributor. The float-sink was evaluated using three parameters, i. e., recovery, purity and efficiency. The values obtained with the joints are smaller than without the joints, and decreased with increasing the amount of objects on the distributor. Because there is no airflow at the joints, the sand on the joints is not fluidized and circulating flow of the sand is generated over the area other than the joints. A 2D fluidized bed showed that air bubbles are not uniformly generated on the air distributor and the fluidization of the sand becomes intense when the objects are on the distributor. These results indicate that the circulating flow and the sudden intense fluidization disturb the expected float-sink of objects.

Keywords: Fluidized bed, Gravity separation, Waste plastic, Air distributor

1. 緒 言

今日、天然資源の消費抑制と環境負荷の低減を目指した循環型社会の形成は、国内はもとより国際的にも喫緊の課題となっており、これに向けて欠くことのできない基盤である廃棄物リサイクルの技術開発が求め

られている。廃棄物をリサイクルするためには各素材に分離することが必要不可欠であるが、廃棄物の多様化に伴うリサイクルの困難化が問題となっている。廃棄物の処理過程で発生するシュレッダーダスト中のプラスチックも、その種類の多さなどから循環資源として利用するマテリアルリサイクルは困難とされている。プラスチックは、もともと化石燃料から製造されたものであることから、現在では高カロリーの燃料として利用するサーマルリサイクルが広く行われている。しかし、塩素を含有する場合、燃焼時に塩化水素を発生し炉や配管の腐食を引き起こす。従って、塩素含有プラスチックと塩素非含有プラスチックを分離し、後者のみをサーマルリサイクルの対象とすることが必要となる。両プラスチックの分離技術として、水中に気泡を吹き込み気泡の付着の差を利用する泡浮上式分離や、液体との比重差を利用する比重分離などの湿式法が主に用いられている¹⁾。しかし、界面活性剤や比重調整

^a 平林金属株式会社
(〒704-8122 岡山市西大寺新地108-5) TEL 086-944-7311
Hirabayashi Metal Co., Ltd.
(108-5, Saidaiji-shinchi, Okayama 704-8122, Japan)

^b 永田エンジニアリング株式会社
(〒808-0027 北九州市若松区北湊町10-1)
TEL 093-761-3754
Nagata Engineering Co., Ltd.
(10-1, Kitaminato-machi, Wakamatsu-ku, Kitakyushu 808-0027, Japan)

^c 岡山大学大学院 自然科学研究科 機能分子化学専攻
(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1) TEL 086-251-8086
Division of Chemistry and Biochemistry, Graduate School of Science and Technology, Okayama University
(3-1-1, Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan)

剤などが高価である、脱水・乾燥工程、廃液処理工程を必要とするなどの問題があるため、これらを解決した乾式法の利用が望まれている。

乾式分離技術の一つとして、液体に類似した見掛け比重などの性質を持つ固気流動層^{2,3)}を利用する方法がある。固気流動層は、装置底部へ空気分散板を取り付け、上部から粒子を充填し、下部から空気を流すことで実現できる。物体を投入した場合、見掛け比重よりも比重の小さい物体は浮揚し、大きい物体は沈降するため、比重の異なる2種類の物体の分離が可能となる。押谷らは、これまでに同原理による家電シュレッダーダストからの塩素含有プラスチックの分離⁴⁾が可能であることを明らかにしている。また、モルタルと砂利の分離⁵⁾、選炭⁶⁾や自動車シュレッダーダストの素材分離⁷⁾により、パイロットスケールの半バッチ式分離装置や連続式分離装置の利用も可能であることを示している。

固気流動層によるプラスチックの分離技術を実用化するためには、数百 kg/h～数 t/h の処理を可能とする大型連続式分離装置へのスケールアップが求められる。この場合に注意すべき点の一つとして、空気分散板の構造がある。実機では、空気分散板の清掃や交換などのメンテナンス作業が容易であることが求められる。装置大型化にあわせて空気分散板を拡大すると、上記作業が困難になり不適切な構造であると言える。従って、一つ当たりが比較的小さな空気分散板を複数繋ぎ合わせた構造が必要となる。しかし、空気の出ない繋ぎ目によって流動化状態が変化し、分離精度が低下することが懸念される。そこで、本研究では空気分散板に繋ぎ目がある場合とない場合において、自動車シュレッダーダスト中のプラスチックの浮沈実験を行い、繋ぎ目が物体浮沈へ及ぼす影響について検討した。また、連続式分離装置においては分離対象物の投入、分離、回収が常に行われるため、層底部には常に沈降物が存在することになる。処理速度が大きい場合には沈降物は大量に存在し、これも流動化状態を変化させることが予想される。そこで、あらかじめ層底部に沈降物を仕込んだ状態で浮沈実験を行い、層底部の沈降物が物体浮沈へ及ぼす影響についても検討した。

2. 実 験

2.1 プラスチックと流動化媒体

当社において廃自動車を破碎し、磁力、渦電流選別などにより鉄、非鉄金属などを回収して残った自動車シュレッダーダストを用いた。Fig. 1 に示すように、

Fig. 1 Photograph of automobile shredder residue

プラスチックと配線・非鉄金属で構成されており、プラスチックは長辺 3.5 cm、厚さ 0.4 cm 以下の板状のものが大部分を占める。Table 1 に各成分の重量割合を示す。プラスチックが全体の約 90% を占めており、配線・非鉄金属は約 10% である。プラスチックの内、塩素非含有プラスチックは約 70%、塩素含有プラスチックは約 30% であった。ここで、比重 1.2 の塩化カルシウム水溶液中で浮揚したものを前者、沈降したものを後者と定義した。これは、別報⁸⁾において家電シュレッダーダスト中のプラスチックの塩素の有無が比重 1.2 付近を境に明確に分かれていることから決定した。本研究では実験を容易にするため、プラスチック全体の約 10% を占めるふるい目開き 7.9 mm を通過したものを予め除去した。11.1 mm ふるい上および 7.9～11.1 mm をそれぞれサイズ大および小とし、サイズ別、塩素非含有プラスチックおよび塩素含有プラスチック別の 4 種類に着色した。空気分散板繋ぎ目の影響を検討する実験では、大と小を混合したものを浮沈対象物として用いた。なお、大と小の重量比はプラスチック全体における重量比と同様 6:4 である。層底部沈降物の影響を検討する実験では、大のみを浮沈対象とし、塩素含有プラスチックの小を層底部へ予め仕込んでおく初期沈降物として用いた。どちらの実験においても、浮沈対象物の塩素非含有プラスチックと塩素含有プラ

Table 1 Composition of automobile shredder residue

Component	Weight percentage (%)
Plastic	91.8
(Cl non-containing plastic)	(68.7)
(Cl containing plastic)	(23.1)
Wire & Nonferrous metal	8.2

Table 2 Characteristics of fluidized particle employed

Particle diameter (μm)			True specific gravity (—)	Bulk specific gravity (—)
D_{10}	D_{50}	D_{90}		
165	259	408	2.64	1.32

スチックの重量比をプラスチック全体における重量比と同様に 7:3 とし、前者を浮揚、後者を沈降させることを試みた。

流動化媒体として、**Table 2** に示す粒径、真比重、かさ比重を持つ砂を用いた。ここで、粒径は体積相当径である。粒径は広範囲に分布しており、粒子形状は非球形であるが、実用化の観点から安価で大量に入手しやすいこの粒子を用いた。空塔速度 u_0 を徐々に減少させながら圧力損失を測定し、その関係より求めた最小流動化速度 u_{mf} は 3.54 cm/s であった。

2. 2 異なる空気分散板構造における浮沈実験

実験装置は別報⁹⁾と同様であるため、以下ではその概略を述べる。流動層の大きさは横 100 cm × 奥行き 40 cm × 高さ 50 cm である。層底部には穴径 2.0 mm、ピッチ 3.0 mm、開孔率 40.3% のステンレス多孔板 2 枚で帆布 1 枚を挟んだ空気分散板を設け、空気分散板下部の空気室は均等な 5 分割構造とした。層高 20 cm となるように流動化媒体を仕込み、ブロワから空気を送り込んで流動化させた。各空気室に対して設けたモーターバルブの開閉により、各空気室の空塔速度が等しくなるように調整した。空塔速度は、オリフィス流量計の圧力差を圧力センサーにより電圧値として読み取り、予め得られている電圧-空塔速度の関係式から求めた。なお、本装置には回収機構が設けられており、層底部から 10 cm を境に浮揚物と沈降物を別々に取り出すことができる。

本実験では、**Fig. 2** に示す 2 通りの空気分散板において浮沈実験を行い、空気分散板繋ぎ目の影響を検討した。空気分散板 (A) は繋ぎ目のないものであり、空気分散板 (B) は模擬繋ぎ目として幅 5.0 cm、厚さ 0.5 cm のフラットバーを厚さ 0.1 cm のゴムパッキンと共に空気分散板 (A) の上部へ固定したものである。まず、ブロワを停止した状態でプラスチック 500 g を層上部へ均一になるように投入した。所定の空塔速度 u_0/u_{mf} で流動化させ、3 分後に浮揚物と沈降物を別々に取り出した。これらを塩素非含有プラスチックと塩素含有プラスチックに手で選別し、それぞれの重量を測定した。分離精度を評価するために、Eqs. (1), (2) より塩素非含有プラスチックの回収率 r_{nonCl} と純度 p_{nonCl} を求めた。さらに、Eq. (3) より分離プロセスと

Fig. 2 Plans of (A) jointless air distributor and (B) joint air distributor

しての有効率 E_{nonCl} を求めた。同様に、沈降物に着目して塩素含有プラスチックの回収率 r_{Cl} 、純度 p_{Cl} および有効率 E_{Cl} を求めた。

$$r_{\text{nonCl}} = \frac{\text{浮揚した塩素非含有プラスチックの重量(g)}}{\text{投入した塩素非含有プラスチックの重量(g)}} \quad (1)$$

$$p_{\text{nonCl}} = \frac{\text{浮揚した塩素非含有プラスチックの重量(g)}}{\text{浮揚した全プラスチックの重量(g)}} \quad (2)$$

$$E_{\text{nonCl}} = r_{\text{nonCl}} \cdot p_{\text{nonCl}} \quad (3)$$

実験は空気分散板 (A) (B) に対し u_0/u_{mf} を 1.1, 1.4, 1.6, 1.8 と変化させて 3 回行い、各値の平均値と標準偏差をそれぞれ求めた。

2. 3 初期沈降物存在量変化における浮沈実験と流動化状態の観察

浮沈実験では、横 30 cm × 奥行き 30 cm × 高さ 30 cm の流動層を用いた。層底部の空気分散板は、穴径 2.5 mm、ピッチ 5.0 mm、開孔率 22.6% のステンレス多孔板 2 枚で濾布 2 枚を挟んだものである。層底部に所定量の初期沈降物を均一に積層するように仕込み、その上に層高 20 cm 分の流動化媒体を仕込んだ。本実

験では、これを初期状態として浮沈実験を行い、層底部の初期沈降物の影響を検討した。ここで、初期沈降物は前述したように、投入するプラスチックとは異なる着色をした塩素含有プラスチックの小である。浮沈対象のプラスチック 500 g を層上部へ均一になるように投入し、ブロワから空気を送り込み所定の u_0/u_{mf} で流動化させた。なお、空塔速度は、インバーターでブロワの周波数を制御することにより調整し、渦流量計により測定した。3 分後に流動化を停止し、吸引機により層底部から 10 cm を境に上層と下層を別々に吸引回収した。これらをふるい分けることにより浮揚物と沈降物を取り出し、さらに塩素非含有プラスチックと塩素含有プラスチックに手で選別した。それぞれの重量から、上式と同様の定義で塩素非含有プラスチックと塩素含有プラスチックの回収率 r_{nonCl} , r_{Cl} , 純度 p_{nonCl} , p_{Cl} および有効率 E_{nonCl} , E_{Cl} を求めた。なお、初期沈降物の重量 W_s は各値の算出に加味しなかった。また、初期沈降物のうち浮揚したものの割合は 0.6% 以下であり、ほぼ全量が沈降したままであった。 u_0/u_{mf} を 1.3, 1.6 とし、 W_s を 0, 400, 800, 1200 g と変化させて 3 回実験を行い、各値の平均値と標準偏差をそれぞれ求めた。

流動化状態を観察するために、アクリル板により作製した横 15 cm × 奥行き 0.5 cm × 高さ 40 cm の 2 次元流動層を用いた。層底部に濾布 2 枚を重ねたものを空気分散板として設けた。所定量の模擬初期沈降物を層底部に均一になるように仕込み、その上に層高 20 cm 分の流動化媒体を仕込んだ。ここで、浮沈実験で用いた初期沈降物はサイズが比較的大きく、2 次元流動層内へ仕込むことが困難であったため、1 cm × 0.5 cm × 0.2 cm の塩化ビニル片（比重 1.4）を模擬初期沈降物として用いた。コンプレッサーから空気を送り込んで流動化させ、その状態をビデオカメラに撮影した。なお、空塔速度はマスフローコントローラーで調整した。 u_0/u_{mf} を 1.6 とし、模擬初期沈降物重量 W_{is} を 0, 6, 12, 18 g と変化させて実験を行った。

3. 結果と考察

3. 1 空気分散板繋ぎ目の浮沈への影響

Fig. 3 (a), (b) に、繋ぎ目のない空気分散板 (A) と繋ぎ目のある空気分散板 (B) において、空塔速度 u_0/u_{mf} を変化させた場合の塩素非含有プラスチックと塩素含有プラスチックの回収率 r_{nonCl} , r_{Cl} および純度 p_{nonCl} , p_{Cl} を示す。空塔速度の増加に伴って、1) 層膨張により流動層の見掛け比重が低下することと、2)

Fig. 3 Dependence of recovery, purity and efficiency of Cl non-containing plastics and Cl containing plastics on superficial air velocity for different structures of distributor

流動化が激しくなることの二つの影響から、いずれの値も u_0/u_{mf} の増加とともに変化するが^{8,9)}、全ての u_0/u_{mf} においていずれの値も空気分散板 (A) の場合が空気分散板 (B) の場合よりも大きい結果となった。また、Fig. 3 (c) に示すように、回収率と純度を総合評価した有効率 E_{nonCl} , E_{Cl} も同様である。従って、空気分散板の繋ぎ目は分離精度を低下させることが明らかとなった。

この原因は次のように考えられる。層表面を目視観察したところ、空気分散板 (B) の場合には、全ての u_0/u_{mf} において **Fig. 4** に示すように、繋ぎ目上部に気泡の発生はなく、流動性が低下していた。さらに、気泡発生領域の層表面へ現れたプラスチックは、繋ぎ目上部付近へ移動し沈降することが確認された。これ

Fig. 4 Schematic drawing of the circulating particle flow in the fluidized bed with the joint air distributor

より、Fig. 4 に示すように気泡発生領域中央部では粒子の上昇流が生じ、繋ぎ目上部付近では下降流が生じていたと考えられる。以上のことから、空気分散板に繋ぎ目の場合は、プラスチックは粒子循環流に強く影響を受けるため、流動層との比重差通りの浮沈を示しにくくなったと考えられる。

3. 2 初期沈降物の浮沈への影響

Fig. 5 (a), (b) に、各空塔速度 u_0/u_{mf} において、初期沈降物重量 W_s を変化させた場合の、塩素非含有プラスチックと塩素含有プラスチックの回収率 r_{nonCl} , r_{Cl} および純度 p_{nonCl} , p_{Cl} を示す。前述したように、空塔速度の増加に伴う見掛け比重と流動化の変化の影響から、いずれの値も u_0/u_{mf} の増加によって変化した。

各 u_0/u_{mf} において、同じ空塔速度であるにもかかわらず、 W_s の増加に伴いいずれの値も減少した。Fig. 5 (c) に示す有効率 E_{nonCl} , E_{Cl} も同様である。これより、初期沈降物の存在によって分離精度が低下することが明らかとなった。この原因を検討するために、2次元流動層を用いて模擬初期沈降物重量 W_{is} を変化させた場合の流動化状態を観察した。**Fig. 6** に各 W_{is} における流動化開始3分後の流動化状態の写真を示す。 $W_{is}=0g$ では、層底部で水平方向に分散して発生した細かな気泡が、上方で合一して大きくなりながら上昇した。一方、模擬初期沈降物が存在する場合は、層底部で発生する気泡は大きく、水平方向への分散も粗くなった。これらの度合いは、 W_{is} の増加に伴い強くなることが写真からも確認できる。中でも $W_{is}=18g$ においては、気泡は層底部中央の1箇所のみから発生し、比較的速く上昇して極めて大きな気泡に成長した。以上のことから、空塔速度が同じ場合でも、模擬初期沈降物の存在によって部分的に流動化が激しくなるこ

Fig. 5 Dependence of recovery, purity and efficiency of Cl non-containing plastics and Cl containing plastics on weight of sinks at initial state for different superficial air velocities

とが明らかとなった。その激しさの増加により、プラスチックの浮沈が変化したと考えられる。

Fig. 6 Snap shots of bed of various weight of imitated sinks at initial state

4. 結 言

固気流動層による乾式比重分離装置の実用化に向けたスケールアップを想定し、大型化において必要となる空気分散板の繋ぎ目と、連続化において不可避となる常に層底部に沈降物が存在する状態が、物体浮沈へ及ぼす影響について検討した。その結果、空気の出ない繋ぎ目によって流動性の低下領域と粒子循環流が生じ、層底部の沈降物によって部分的に流動化が激しく

なることで、物体は流動層との比重差通りの浮沈を示しにくくなり、分離精度が顕著に低下することが判明した。従って、大型連続式分離装置へスケールアップする際には、流動性の低下領域が狭く粒子循環流が生じにくい空気分散板の繋ぎ目構造を設計し、層底部の沈降物を少量に抑えることができる沈降物回収機構の設計および処理速度条件の決定が必要であると考えられる。

Nomenclature

D_{10} : particle diameter for 10%	(μm)	r_{Cl} : recovery of Cl containing plastics	(—)
D_{50} : particle diameter for 50%	(μm)	r_{nonCl} : recovery of Cl non-containing plastics	(—)
D_{90} : particle diameter for 90%	(μm)	u_0 : superficial air velocity	(cm/s)
E_{Cl} : efficiency of Cl containing plastics	(—)	u_{mf} : minimum fluidization velocity	(cm/s)
E_{nonCl} : efficiency of Cl non-containing plastics	(—)	W_{is} : weight of imitated sinks at initial state	(g)
p_{Cl} : purity of Cl containing plastics	(—)	W_{s} : weight of sinks at initial state	(g)
p_{nonCl} : purity of Cl non-containing plastics	(—)		

References

- 1) Society of Waste Management Expert, Japan, Ed. : “Haikibutsu Handbook”, p. 812, Ohmsha, Tokyo, Japan (1996)
- 2) Association of Powder Process Industry & Engineering, Japan, Ed. : “Fluidization Handbook”, p. 57, Baifuhkan (1999)
- 3) Bakhtiyarov, S. I. and R. A. Overfelt : “Fluidized Bed Viscosity Measurements in Reduced Gravity”, *Powder Technology.*, **99**, 53-59 (1998)
- 4) Yoshida, M., J. Oshitani, K. Kaname and K. Gotoh : “Fluidized Bed Medium Separation (FBMS) of Cl-Containing Plastics in Home Electric Appliance Shredder Residue”, *Kagaku Kogaku Ronbunshu.*, **32**, 115-121 (2006)
- 5) Yoshida, M., J. Oshitani, K. Okuda, H. Ohishi and K. Gotoh : “Fluidized Medium Separation (FBMS) of Mortar and Gravel for Recycle of Waste Concrete”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **43**, 260-269 (2006)
- 6) Oshitani, J., K. Tani, K. Takase and Z. Tanaka : “Fluidized Bed Medium Separation (FBMS) for Dry Coal Cleaning”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **41**, 334-341 (2004)
- 7) Oshitani, J., K. Kiyoshima and Z. Tanaka : “Continuous Dry Material Separation from Automobile Shredder Residue”, *Kagaku Kogaku Ronbunshu.*, **29**, 8-14 (2003)
- 8) Oshitani, J., T. Kajiwarra, K. Kiyoshima and Z. Tanaka : “Material Separation from Automobile Shredder Dust by Gravity Method Using Gas-Solid Fluidized Bed”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **38**, 702-709 (2001)
- 9) Oshitani, J., K. Ono, M. Ijiri and Z. Tanaka : “Effect of Particle Fluidization Intensity on Floating and Sinking of Object in a Gas-Solid Fluidized Bed”, *Advanced Powder Technol.*, **15**, 2, 201-213 (2004)