固気流動層での比重分離法による 自動車シュレッダーダストの素材分離

Material Separation from Automobile Shredder Dust by Gravity Method Using Gas-Solid Fluidized Bed

押谷 潤, 梶原 朋子, 清島 浩司, 田中 善之助

Jun Oshitani, Tomoko Kajiwar, Kouji Kiyoshima, Zennosuke Tanaka

Received 19 March 2001 ; Accepted 28 May 2001

Gravity separation of plastic, rubber and wire harness in automobile shredder dust is investigated using a gas-solid fluidized bed. Uni-beads (barium silicatitanate glass), zircon sands and glass beads are employed as fluidized particles. Floating and sinking of plastic, rubber and wire harness in the fluidized bed are examined by changing the superficial air velocity. The wire harness is almost completely separated from the other components by using Uni-beads and zircon sands. The plastic can be separated from the rubber by using glass beads, although the separation efficiency is relatively low. Precise adjustment of superficial air velocity is essential to attain high separation efficiency because the particle flow and air bubbles in the fluidized bed affect the floating and sinking of the dust.

Key Words : Automobile shredder dust, Fluidized bed, Gravity separation, Recycle

1. 緒 言

『もののリユース・リサイクル』が重要視される現在、自動車シュレッダーダストもその対象となっている。年間に約500万台発生する使用済み自動車の大半は解体処分されており、エンジンやタイヤ、鉄や非鉄金属などがリユース・リサイクルされ、リサイクル率は75～80%と高い値となっている。残り20～25%のシュレッダーダストは、年間に約100万トン発生し、そのほとんどが管理型処分場に埋立て処分されている^{1, 2)}。1997年、通産省（現在、経済産業省）により公表された「使用済み自動車リサイクル・イニシアティブ」を受けて、（社）日本自動車工業会ではリサイクル率を2015年以降95%以上、埋立て処分量を2015年以降1996年の5分の1以下とする数値目標が自主行動計画として掲げられている。

自動車シュレッダーダストは、プラスチックやゴム、発泡ウレタンなどの有機物が約60%、ガラスや鉄、ハーネスと呼ばれる配線、非鉄金属などの無機物

が約40%を占めている。これらの処理技術として、分別・減容固化技術や乾留ガス化技術、風力選別法などを用いた各素材への分別技術が日本自動車工業会や企業により開発されており、上述の数値目標達成の高い可能性が示されている³⁻⁶⁾。しかし、処理装置の高コストなどが問題で、これらの技術は一般的な利用には至っていない。著者らは、ごくシンプルな手法として、落下するダストに横風を送り込む風力選別法を利用して、ダスト中のプラスチックとゴム、発泡ウレタン、配線、非鉄金属の素材分離を検討した⁷⁾。軽い発泡ウレタンは飛散距離が大きいため高効率で分離可能であったが、他の成分の分離は容易でない結果となった。

そこで本研究では、固気流動層での比重分離法を利用して、ダスト中のプラスチックとゴム、配線の3成分の分離を試みた。粉体を下部からの送風で流動化させた固気流動層は液体に類似した性質を持つために^{8, 9)}、流動化状態でのかさ密度よりも軽い物体は層内で浮揚し、重い物体は沈降する。これまでに著者らは、本手法により石炭の高品位化¹⁰⁾や密度差約250kg/m³の珪石とろう石の分離¹¹⁾を可能にしている。流動化粉体として、ユニビーズ、ジルコンサンド及びガラスビーズを用い、様々な密度を持つ球の浮沈

岡山大学工学部物質応用化学科
(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1) TEL 086-251-8086
Department of Applied Chemistry, Okayama University
(3-1-1, Tsushima-naka, Okayama 700-8530)

Table 1 Characteristics of each component in automobile shredder dust employed

	Total weight (g)	Density (kg/m^3)
Plastic	21.4	990 ± 180
Rubber	21.3	1400 ± 300
Wire harness	20.9	2800 ± 500

Note: The electronic balance (MC210S, Sartorius) was used to measure the density.

Table 2 Characteristics of powders employed

	Particle diameter (μm)	True density (kg/m^3)	Bulk density (kg/m^3)	Shape	Minimum fluidization velocity, u_{mf} (cm/s)
U.B.	300–350	4200	2600	Spherical	15.4 ± 0.1
Z.S.	90–300	4650	3000	Non-spherical	3.3 ± 0.1
G.B.	250–300	2500	1500	Spherical	5.6 ± 0.2

Note: Averaged values and standard deviations of u_{mf} were obtained from the measurement of 3 times.

Fig. 1 Photographs of each component of about 21g in automobile shredder dust employed

により流動化状態でのかさ密度とそのばらつきを求めた。3成分の密度の大きさは、プラスチック<ゴム<配線の順であり、ユニビーズとジルコンサンドにより配線のみを沈降分離し、ガラスビーズによりプラスチックを浮揚させゴムを沈降させて分離することを試みた。各成分の密度差は小さく、物体の浮沈が層内の粒子や気泡の流れの影響を大きく受けるために、各成分の分離は困難なことが予想される。従って、高い分離効率を得るために、空塔速度を様々に変化させて分離実験を行った。

2. 実 験

2.1 自動車シュレッダーダスト

シュレッダー事業者から入手した自動車シュレッダーダストの中から、プラスチックとゴム、配線の3成分を選択的に採取して分離対象物とした。**Table 1**と**Fig. 1**に分離に用いた各成分の全重量と密度及び写真を示す。いずれの成分も約21gと同程度の重量を

用いており、大きさは10~20mmである。平均密度の差はプラスチック-ゴム間が 400kg/m^3 、ゴム-配線間が 1400kg/m^3 と小さく、密度のばらつきも大きいために固気流動層での比重分離が困難なことが予想される。

2.2 流動化粉体

バリウム・シリカ・チタネートガラスからなるユニビーズ (U.B.) (株式会社ユニオン)、ジルコンサンド (Z.S.) (ラサ商事株式会社) 及びガラスビーズ (G.B.) (東芝バロティニー株式会社) を流動化粉体として用いた。**Table 2**に各粉体の粒径、真密度、かさ密度、形状及び以下に示す手法で得られた最小流動化速度 u_{mf} を示す。U.B. と Z.S. を用いて、3成分の中から配線のみを沈降させて分離することを検討した。U.B. は篩い1段分と比較的単分散かつ球形で流動層内の3成分の浮沈傾向を示す基礎データの取得に適しているのに対し、Z.S. は90–300 μm と粒径が広範囲にわたるがU.B. よりも安価であり、 u_{mf} が小さくブ

Fig. 2 Schematic drawing of the experimental apparatus

ローターの動力などの点で実用化に適していると考えられる。また、G.B.を用いてプラスチックを浮揚させゴムを沈降させて分離することを検討した。

2. 3 実験装置

実験装置は別報¹¹⁾と同様であり、Fig. 2にその概略図を示す。内容20.5cm、高さ48cm、厚さ0.5cmの亚克力円筒管で流動層を作製し、静電気の影響を抑えるために静電防止剤を内壁に塗布した。層底部には、穴径0.3cm、ピッチ0.6cm、開孔率22.67%のステンレス多孔板2枚で布地を挟んだ空気分散板を設けた。流動層内に粉体を高さ15cmとなるように仕込み、ブロワーにより空気を送り込んで流動化させ、モーターバルブの開閉により空塔速度を微調整した。オリフィス流量計の圧力及び流動層底部と大気間の圧力差を圧力センサーにより電圧値として読み取り、あらかじめ得られている電圧－空塔速度及び電圧－圧力損失の関係式を用いて空塔速度 u_0 と圧力損失 ΔP を求めた。 u_0 を徐々に減少させる過程で ΔP を測定し、 ΔP が一定値から減少し始める u_0 を最小流動化速度 u_{mf} とした。

2. 4 流動化状態でのかさ密度とそのばらつきの測定

10kg/m³毎に密度 ρ_{sp} を調整した直径3.75cmの球（ピンポン球に所定重量のスチールショットを詰めたもの）の流動層内での浮沈を調べることで、各粉体の流動化状態でのかさ密度 ρ_{fb} とそのばらつき $\Delta\rho_{fb}$ を求めた。粉体を所定の空塔速度 u_0/u_{mf} で流動化させ、最上層の中心部に球を投入し、5分後に送風を止めて層底部からの球の重心位置 h_{sp} を測定した。 $\rho_{sp} < \rho_{fb}$ の場合は球が浮揚し、 $\rho_{sp} \approx \rho_{fb}$ の場合は浮き沈みせずに流動層内の中層に位置し、 $\rho_{sp} > \rho_{fb}$ の場合は沈降する。各 ρ_{sp} の球について h_{sp} を求め、浮揚する球の密度の中で最も大きな密度を ρ_{sp1} 、沈降する球の密度の

中で最も小さな密度を ρ_{sp2} として、以下のEqs. (1)と(2)から ρ_{fb} と $\Delta\rho_{fb}$ をそれぞれ求めた。 ρ_{fb} は浮き沈みしない球の密度の平均値、 $\Delta\rho_{fb}$ は浮き沈みしない球の密度範囲を示す。各粉体で所定の空塔速度において h_{sp} を3回測定した。得られた三つの値から ρ_{fb} と $\Delta\rho_{fb}$ の平均値と標準偏差をそれぞれ求めた。

$$\rho_{fb} = \frac{\rho_{sp2} + \rho_{sp1}}{2} \quad (1)$$

$$\Delta\rho_{fb} = \rho_{sp2} - \rho_{sp1} \quad (2)$$

2. 5 ダストの浮沈と分離評価法

粉体を所定の空塔速度 u_0/u_{mf} で流動化させ、U.B.ではプラスチック、ゴム、配線それぞれを個別に投入し、Z.S.では3成分を混合して投入、G.B.ではプラスチックとゴムを混合して投入した。なお、U.B.ではプラスチックとゴムの浮揚及び配線の沈降が最も顕著な u_0/u_{mf} において、3成分の混合投入も行った。投入1分後に送風を止めて各成分中個々の層底部からの重心位置 i を測定し、層底部から3cm毎の各成分の重量割合 w_i を求めた。

分離評価を行うために、以下に定義する純度 x_p と回収率 x_r をそれぞれ求めた。U.B.とZ.S.では、プラスチックとゴムが浮揚し配線が沈降するため、最上層 $i=12-15$ に浮揚するダスト中のプラスチックとゴムの重量割合と、最下層 $i=0-3$ に沈降するダスト中の配線の重量割合をそれらの x_p とした。また、プラスチックとゴムの投入全重量に対する最上層 $i=12-15$ に浮揚するプラスチックとゴムの重量割合と、配線の投入全重量に対する最下層 $i=0-3$ に沈降する配線の重量割合をそれらの x_r とした。G.B.では、プラスチックが浮揚しゴムが沈降するため、最上層 $i=12-15$ に浮揚するダスト中のプラスチックの重量割合と、最下層 $i=0-3$ に沈降するダスト中のゴムの重量割合をそれらの x_p とした。また、プラスチックの投入全重量に対する最上層 $i=12-15$ に浮揚するプラスチックの重量割合と、ゴムの投入全重量に対する最下層 $i=0-3$ に沈降するゴムの重量割合をそれらの x_r とした。実験は各条件下で3回行い、各値の平均値と標準偏差をそれぞれ求めた。

3. 結果と考察

3. 1 空塔速度と圧力損失

各粉体で空塔速度 u_0 を徐々に減少させる過程で圧力損失 ΔP を測定した。Fig. 3に結果を示す。 u_0 が大きい場合では ΔP が一定であり、各粉体が流動化し

Fig. 3 Dependence of pressure drop on superficial air velocity

ていることを示している。一方、最小流動化速度 u_{mf} 以下では ΔP が直線的に減少しており、粉体が固定化していることを示している。U.B. と Z.B. のかさ密度は同程度であり流動化状態での ΔP の値はほぼ同様であるが、Z.S. には U.B. よりも小さな粒径のものが多く含まれているために、Table 2 に示したように Z.S. の u_{mf} の方が U.B. の値よりも小さくなっている。

3. 2 流動化状態でのかさ密度とそのばらつき

各粉体で空塔速度 u_0/u_{mf} を変化させ、様々な密度 ρ_{sp} の球の流動層内での浮沈位置 h_{sp} を調べ、流動化状態でのかさ密度 ρ_{fb} とそのばらつき $\Delta\rho_{fb}$ を求めた。Fig. 4 と Fig. 5 に U.B. での各 u_0/u_{mf} における ρ_{sp} に対する h_{sp} と u_0/u_{mf} に対する ρ_{fb} と $\Delta\rho_{fb}$ をそれぞれ示す。いずれの u_0/u_{mf} でも、密度の小さな球は浮揚し、密度が大きくなると浮き沈みせずに流動層内の中層に位置する球が現れ、さらに大きくなると球は完全に沈降した。浮き沈みしない球の密度の平均値、すなわち ρ_{fb} は u_0/u_{mf} を変化させてもほぼ一定であるが、そのばらつきである $\Delta\rho_{fb}$ は u_0/u_{mf} と共に増加した。これは、空塔速度の増加に伴い粉体の流動化が激しくなり、球の浮沈が不安定になるためであると考えられる。Fig. 6 と Fig. 7 に Z.S. での結果を示す。U.B. と同様に u_0/u_{mf} の増加に伴い $\Delta\rho_{fb}$ は増加したが、 ρ_{fb} は一定とはならず減少する傾向を示した。一般的に、空塔速度の増加に伴い流動化状態の粉体のかさ体積が増加するため、 ρ_{fb} は減少する。Z.S. では U.B. よりも広範囲の u_0/u_{mf} で球の浮沈実験を行っており、その傾向がより顕著に見られたものと思われる。また、Z.S. の粒径が広範囲であることと形状が非球形であることが空隙率に変化をもたらす可能性があり、それらも U.B. と Z.S. で ρ_{fb} の変化傾向に違いが見られた要因ではないかと考えられる。Fig. 8 と Fig. 9 に G.

Fig. 4 Dependence of position of sphere from bottom on density for various superficial velocities (powder = U.B.)

Fig. 5 Dependence of bulk density of fluidized bed and the dispersion on superficial air velocity (powder = U.B.)

B. での結果を示す。U.B. と Z.S. とは異なり、 u_0/u_{mf} を変化させても ρ_{fb} と $\Delta\rho_{fb}$ はほぼ一定となった。G.B. の密度が U.B. と Z.S. の密度よりも小さいことが要因ではないかと考えられるが、詳細は不明である。

以上の結果、U.B. と Z.S. の流動化状態でのかさ密

Fig. 6 Dependence of position of sphere from bottom on density for various superficial velocities (powder = Z.S.)

Fig. 7 Dependence of bulk density of fluidized bed and the dispersion on superficial air velocity (powder = Z.S.)

Fig. 8 Dependence of position of sphere from bottom on density for various superficial velocities (powder = G.B.)

Fig. 9 Dependence of bulk density of fluidized bed and the dispersion on superficial air velocity (powder = G.B.)

度は $\rho_b \approx 2300 \sim 2400 \text{ kg/m}^3$ であり、ゴムと配線の平均密度の間となった。一方、G.B.の流動化状態でのかさ密度は $\rho_b \approx 1400 \text{ kg/m}^3$ となり、ゴムの平均密度とほぼ同様の値となった。

3.3 ダストの浮沈

各粉体で空塔速度 u_0/u_{mf} を変化させ、プラスチック、ゴム、配線の浮沈実験を行った。**Fig. 10** に、U.B.で3成分をそれぞれ個別に投入した場合の浮沈

Fig. 10 Weight percentage of plastic, rubber and wire harness at each height in fluidized bed for various air velocities

Fig. 12 Weight percentage of plastic, rubber and wire harness at each height in fluidized bed for various air velocities

Fig. 11 Dependence of purity and recovery of plastic & rubber and wire harness on superficial air velocity (powder = U.B.)

Fig. 13 Dependence of purity and recovery of plastic & rubber and wire harness on superficial air velocity (powder = Z.S.)

結果を示す。図の縦軸は流動層内での3cmごとの高さ i を表し、横軸は各高さでの3成分の重量割合 w_i を表す。 $u_0/u_{mf}=1.05$ では、プラスチックとゴムは完全に浮揚したが、配線は沈降にくい結果となった。これは空塔速度が小さく粉体の流動性が低いためであると考えられる。 u_0/u_{mf} の増加に伴い沈降する配線の割合が増加し、 $u_0/u_{mf}=1.30$ では、配線はほぼ完全に沈降したが、プラスチックとゴムが完全には浮揚しない結果となった。これは空塔速度が大きい場合では粉体の流動化が激しく、特に流動層表面の振動が大きいためであると考えられる。以上の結果から得られた各成分の純度 x_p と回収率 x_r を u_0/u_{mf} に対して**Fig. 11**に示す。 u_0/u_{mf} の増加に伴いプラスチックとゴムの x_p は増加し、 $u_0/u_{mf} \geq 1.15$ ではほぼ

100%となった。一方、配線の x_p は $u_0/u_{mf} \leq 1.15$ では100%であるが、 $u_0/u_{mf} > 1.15$ では減少した。 x_p の変化傾向とは逆に、プラスチックとゴムの x_r は $u_0/u_{mf} \leq 1.15$ では100%であるが $u_0/u_{mf} > 1.15$ では減少し、配線の x_r は $u_0/u_{mf} \geq 1.15$ でほぼ100%であるが $u_0/u_{mf} < 1.15$ では大きく減少した。これらの要因は、上で述べたように粉体の流動性の低さや流動化の激しさとの関連から明らかである。プラスチックとゴムの浮揚と配線の沈降が最も顕著に見られた $u_0/u_{mf}=1.15$ において、3成分を混合投入して浮沈実験を行った。その結果、プラスチックとゴムでは $x_p=99.1 \pm 0.9$ 、 $x_r=100.0 \pm 0.0$ 、配線では $x_p=98.8 \pm 1.7$ 、 $x_r=92.2 \pm 4.1$ となり、個別に投入した場合とほぼ同様の結果が得られ、3成分から配線の

Fig. 14 Weight percentage of plastic and rubber at each height in fluidized bed for various air velocities

Fig. 15 Dependence of purity and recovery of plastic and rubber on superficial air velocity (powder = G.B.)

みを高効率で分離可能な結果となった。

Fig. 12 と Fig. 13 に、Z.S. で 3 成分を混合投入した場合の浮沈結果と、 u_0/u_{mf} に対する x_p と x_r をそれぞれ示す。各成分の浮沈傾向は U.B. での結果と同様となった。 x_p と x_r の変化傾向も同様であるが、その変化が Z.S. ではより顕著に見られた。これは、前項で述べたように Z.S. が U.B. よりも幅広い粒径分布を持つことと非球形であること、 u_0/u_{mf} が大きいことなどに起因すると考えられる。 $u_0/u_{mf}=1.6$ では、各成分の純度と回収率が共にほぼ 100 % となり、U.B. よりも実用化に適していると思われる Z.S. においても配線のみを高効率で分離可能な結果となった。

Fig. 14 と Fig. 15 に G.B. でプラスチックとゴムを混合投入した場合の浮沈結果と u_0/u_{mf} に対する x_p と

x_r をそれぞれ示す。 u_0/u_{mf} の増加に伴いプラスチックは浮揚しにくく、ゴムは沈降しやすくなり、成分は異なるが U.B. と Z.S. での浮沈傾向とほぼ同様となった。また、 x_p と x_r の変化傾向も定性的に一致している。プラスチックとゴムの平均密度の差が小さく、同程度の密度のものが混在しているために、両者を上下層に完全に分離するには至らなかった。しかし、 $u_0/u_{mf}=1.20$ では、プラスチックとゴムで共に $x_p \approx 90$ と高い値を示し、 $x_r \approx 70 \sim 90$ と予想以上の良好な分離結果だと言える。

U.B. と Z.S. では、 ρ_{fb} がゴムと配線の平均密度の間にあるために、両者の分離は容易に想像できる。しかし、G.B. の ρ_{fb} はゴムの平均密度とほぼ同様の値であるにもかかわらず、特に u_0/u_{mf} が大きい場合においてゴムがほぼ完全に沈降した。従って、以上の結果は密度差通りの浮沈とは言い難い。この要因として、別報¹¹⁾ も述べているが、次のように考えられる。流動層内に投入された物体は層内の粒子や気泡の流れの影響を受けるために、その浮沈は密度差のみでは決定されない。物体の大きさや形により流れの影響が異なるために、同じ密度の物体でも沈降するものとしえないものが存在すると推察される。本研究で得られた ρ_{fb} の値は、直径 3.75cm の球の浮沈により得られたものであり、それとは大きさや形が全く異なる配線は球とは異なる層内流れの影響を受けるために、同じ密度の球と配線で浮沈に違いが見られたのではないかと考えられる。

4. 結 言

固気流動層での比重分離法により自動車シュレッダーダスト中のプラスチックとゴム及び配線の分離を試みた。U.B. と Z.S. で 3 成分から配線のみ分離、G.B. でプラスチックとゴムの分離を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) U.B. と Z.S. では上層にプラスチックとゴムが浮揚し、下層に配線が沈降し、3 成分から配線のみを高い純度と回収率で分離可能となった。プラスチックとゴムの平均密度の差は大きくなく、同程度の密度のものが互いに混在するために分離が困難であると予想されたが、G.B. を用いることで純度約 90 %、回収率 70~90 % と予想以上の良好な分離結果となった。
- 2) 固気流層内での物体浮沈は、密度差のみでなく、粉体の流動化状態や物体に与える層内流れの影響などにも依存しているが、空塔速度をコントロールす

ることで密度差通りの物体浮沈及び高い分離効率を 実現可能であることが明らかとなった。

Nomenclature

h_{sp} : position of sphere from bottom	(m)	x_r : recovery	(%)
i : height in fluidized bed	(m)	Greek	
ΔP : pressure drop	(Pa)	$\Delta\rho_{fb}$: dispersion of ρ_{fb}	(kg/m ³)
u_0 : superficial air velocity	(m/s)	ρ_{fb} : bulk density of fluidized bed	(kg/m ³)
u_{mf} : minimum fluidization velocity	(m/s)	ρ_{sp} : density of sphere	(kg/m ³)
w_i : weight percentage at i	(%)	ρ_{sp1} : largest density of floating sphere	(kg/m ³)
x_p : purity	(%)	ρ_{sp2} : smallest density of sinking sphere	(kg/m ³)

References

- 1) Ito, H. : "Current Situation and Problems Involved in Recycling (Car Dismantling and Shredding) of ELV", *Jidosha-Kenkyu*, **19**, 399-403 (1997)
- 2) Iida, S. : "Development of ASR (Automobile Shredder Residue) Recovery Technology by JAMA-Possibility to Achieve the ELV (End of Life Vehicle) Recycling Rate Target 95 % by 2015-", *JARI Research Journal*, **21**, 695-698 (1999)
- 3) Kusaka, K. : "Sorting, Volume Reduction and Solidification Technologies for Automobile Shredder Residue (ASR) - Part 2", *JARI Research Journal*, **21**, 699-702 (1999)
- 4) Horii, H. and T. Kikushima : "Research and Development on Automobile Shredder Residue (ASR) Dry-Distillation/ Gasification Technology - Part 2", *JARI Research Journal*, **21**, 702-706 (1999)
- 5) Toyota Motor Corporation, "Environmental Report 1999", pp. 50-59 (1999)
- 6) Nissan Motor Co., LTD, "Environmental Report 2000", pp. 27-28 (2000)
- 7) Oshitani, J., K. Kiyoshima and Z. Tanaka : "Material Separation of Automobile Shredder Dust by Pneumatic Separation Method", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **38**, 487-492 (2001)
- 8) Association of Powder Process Industry & Engineering, Japan, Ed. : "Fluidization Handbook", pp. 57-59, Baifuhkan (1999)
- 9) Bakhtiyarov, S. I. and R. A. Overfelt : "Fluidized Bed Viscosity Measurements in Reduced Gravity", *Powder Technology*, **99**, 53-59 (1998)
- 10) Tanaka, Z., J. Oshitani, T. Nakamura, T. Syouji and A. Horiuchi : "Development of Technology for Separating Low Grade Coals from Raw Coals by Fluidized Bed of Dry Heavy Medium", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **26**, 327-330 (2000)
- 11) Oshitani, J., M. Kondo, H. Nishi and Z. Tanaka : "Separation of Silicestone and Pyrophyllite by Gas-Solid Fluidized Bed Utilizing Slight Difference in Density", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **38**, 4-10 (2001)