

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成23年 4月 1日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760609

研究課題名 (和文)

乾式比重分離技術の処理速度増加のための物体移動速度の測定と新規連続装置の作製

研究課題名 (英文)

Measurement of a sink velocity of an object in a gas-solid fluidized bed and development of a new fluidized bed separator for improvement of a separation speed

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 (和文)：

本研究では流動層内での物体の沈降速度を測定する方法を新規に考案し、層高が沈降速度に及ぼす影響を検討した。その結果、安定な沈降速度を得るためには層高を低くする方が良いことが明らかとなった。続いて、これらの知見を生かしてシックナータイプの連続比重分離装置を新規に設計および作製し、処理速度を調べた。その結果、処理速度は従来装置と比べて約2.4-3.4倍増加し、本タイプが処理速度増加に対し有効であることが示唆された。

研究成果の概要 (英文)：

Measuring method of a sink velocity of an object in a gas-solid fluidized bed was newly designed, and the effect of the bed height on the velocity was investigated. It was found that the height should be lower in order to get the stable velocity. Using this result, a thickener-type gas-solid fluidized bed separator was newly designed and made, and a separation speed was examined. The speed of this separator was 2.4-3.4 times larger than that of previous one. From this result, it is suggested that this thickener-type system is effective for improvement of the speed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			0
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：粉体工学，化学工学

科研費の分科・細目：プロセス工学，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，物体移動速度，見掛け比重，気泡，高処理

速度、シックナータイプ

1. 研究開始当初の背景

21世紀に入り、世界各国で高いリサイクル率が設定された法案が制定されている。これにより使い捨てが許された大量生産の時代から持続可能な循環型生産の時代へ移り変わることが余儀なくされつつある。使用済みの家電・自動車を破碎し、有価金属を回収した後に残る廃棄物をシュレッターダストと呼ぶ。その量はEU全体では年間約300万トン、USAでは250-300万トン、日本では約100万トンにも達すると言われている。シュレッタ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、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)表面が汚染された廃棄物の投入により重液の汚染が著しいこと、さらに、(3)廃液処理や分離後の乾燥工程が必要、(4)装置からの液漏れ、(5)寒冷地での利用が不可能などの欠点がある。そこで、我々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法の開発を行ってきた。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、比重や粘度などが液体に類似した性質を持つ。層内に物体を投入すると、液体の場合と同様に物体を浮沈させることにより比重の異なる物体を上下層に分離可能となる。

2. 研究の目的

これまで我々は固気流動層内での比重差に基づく浮沈現象に注目し、様々な基礎研究および取り出し機構を備えた分離装置の開発を行ってきた。その中でも珪石とろう石の連続分離において比較的高速な分離速度を実現してきた(分離効率=0.64, 体積換算処理速度=0.9m³-object/(m²·h))。しかし、排出量が膨大であるシュレッターダストを処理するためには、現段階では処理速度が十分とはいえない。これは層内での分離物体の詳細な挙動が十分に解明されておらず、最適な装置設計ができていないためだと考えられる。そこで、本研究では固気流動層による乾式比重分離法の処理速度向上を目的として、(1)固気流動層高が沈降速度に及ぼす影響の検討と、(2)シックナータイプの連続乾式比重分離装置の開発を試みた。

3. 研究の方法

(1) 固気流動層高が沈降速度に及ぼす影響

沈降物体を流動層に投入した場合、縦方向だけでなく横方向にも移動してしまうため正確な沈降速度を知ることは難しい。そこで、この問題を解決可能な次の装置を構築した。

図1に実験装置の概略図を示す。底部に空気分散板を取り付けた流動層コラムに層高15, 20cmになるように粒径250-300 μ mのガラスビ

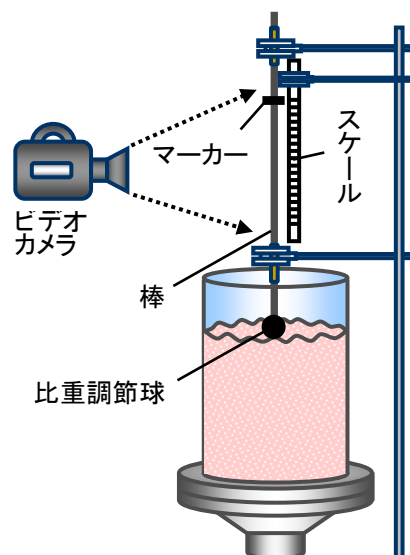


図1 物体移動速度測定装置の概略図

ーズを投入し、十分に流動化を行い乾燥させた。沈降物体として目印のついた長さ60cmの亚克力棒を取り付けた直径4cmの球を用意し、球内部にスチールショットを仕込むことにより流動層の見掛け比重との比重差 $\Delta\rho$ を+0.1, +0.2, +0.4, +0.6に調節した。流動化強度(最小流動化速度 u_{mf} に対する送風速度の比)が $u_0/u_{mf}=2.0$ となるように調節した後、球の1つを層上部中央に投入し、ビデオカメラで目印(亚克力棒)の高さ変化を撮影した。ビデオデータより経過時間 t に対する球の規格化高さ h_{nor} を求めた。各実験は3回ずつ行った。また、比較のため同様の実験を水中(水深=16cm)でも行った。

(2) シックナータイプの連続乾式比重分離装置の開発

さらなる処理速度の向上を実現するためには分離後の物体を層外に素早く取り出し、分離に有効なスポットを効率良く使うことが不可欠であるが、従来のように流動層内に駆動部を持つ取り出し機構にすると流動層の見掛け粘度による抵抗が大きく、その駆動速度には限界がある。そこで、我々は取り出し機構をほとんど持たず排水処理などで連続大量処理に用いられるシックナー(固液分離装置)に注目し、シックナーをモデルとした乾式分離装置を新規に設計および作製した。

図2にシックナータイプの連続乾式比重分離装置の概略図を示す。本装置は主に(1):流動層容器, (2):2段ホッパー(容積:約0.05 m³), (3):粒子投入ガイドの3つで構成されている。図3に流動層容器の詳細図を示す。容器の材質は主に亚克力(厚さ:8mm)を用い、溢流の方向を制御するため、側壁は前後壁より4.5cm低い容器構造にしてある。空気室の上部には空気分散板を取り付けた。図中のスロープは沈降物を排出しやすくするためのものであり、

30-60度の範囲で15度間隔の調節が可能である(本研究では45度で一定とした)。また、その部材には流動化をできるだけ阻害しないよう比較的目の粗い金属網を使用した。容器の排出口には流動化粒子の排出流量を調節する

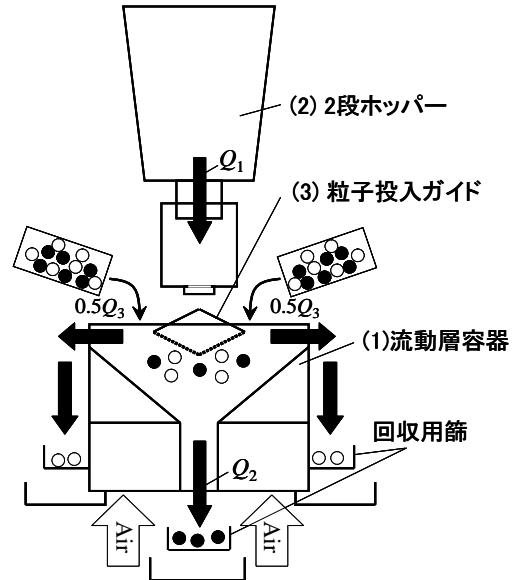


図2 シックナータイプの乾式比重分離装置の概略図

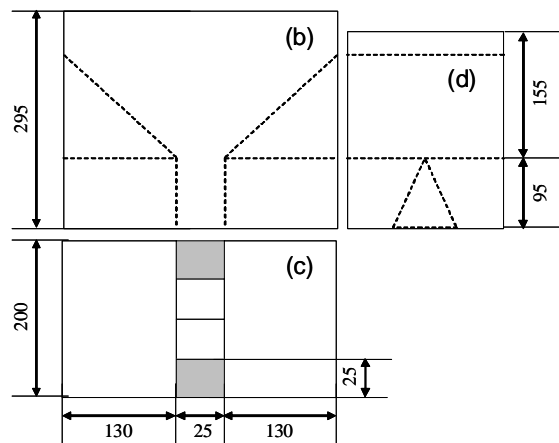
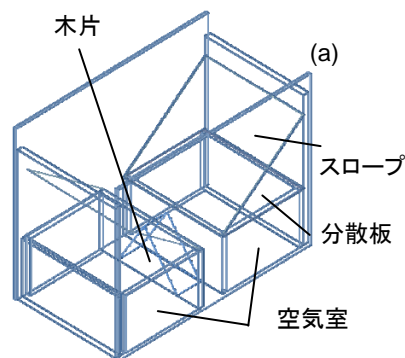


図3 流動層容器詳細図(単位: mm)
(a): 立体図, (b): 正面図
(c): 上面図, (d): 側面図

ため中央部に2等辺三角柱の木片を組み込んだ。これにより排出口は25×25mm(2個)となり、その排出口に設けられたストッパーにより開閉が可能である。また、2段ホッパーは流動化粒子の供給量を安定させるために用い、ホッパー口に設けられたスライダーにより供給量の調節が可能である。粒子投入ガイドは2段ホッパーから投入される流動化粒子を一度2つの流れに分断後、流動層容器内に投入させるために設けられたもので、これにより投入される流動化粒子の容器内での滞留時間を長くし、層全体を均一に流動化しやすくした。

実験手順を以下に示す。流動層容器のストッパーと2段ホッパー排出口のスライダーを共に閉じた状態にし、それぞれに流動化粒子を充填した。流動化強度 $u_0/u_{mf}=2.0$ で粒子層を流動化させた後、ストッパーとスライダーを同時に開口した。このとき側壁の高さを4.5cm低くした容器構造により、流動化粒子の溢流は側壁上部のみから生じる。その後、5秒後に6種類、2-120個の比重調節球を流動層容器の左右から投入し、その後は10秒毎に計3回に分けて投入した(球の合計個数 $n_{all}=6-360$ 個)。浮揚物は流動化粒子と一緒に側壁上部から排出され、側壁に取り付けられた篩により浮揚物のみ回収した。一方、沈降物は流動化粒子と一緒に排出口から排出され、同様に篩により沈降物のみ回収した。分離精度を評価するため(1)-(3)式で示す浮揚割合 $R_f[-]$ 、ニュートン効率 $\eta[-]$ 、体積換算処理速度 $M_v[m^3\text{-object}/(m^2\cdot h)]$ を算出した。

$$R_f = \frac{n_f}{n_{all}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{n_f}{n_{f-t}} + \frac{n_s}{n_{s-t}} - 1 \quad (2)$$

$$M_v = \frac{V}{t_s \times S} \quad (3)$$

ここで、 $n_{all}[-]$ 、 $n_f[-]$ 、 $n_{f-t}[-]$ 、 $n_s[-]$ 、 $n_{s-t}[-]$ はそれぞれ投入した球、浮揚した球、浮揚すべき球、沈降した球、沈降すべき球の各個数を示す。 $V[m^3]$ は投入した分離対象球の総体積、 $t_s[h]$ は分離所要時間、 $S[m^2]$ は分離に有効な面積を示す。流動層容器下部からの流出量 Q_2 は0.80L/sで一定であるが、本研究では2段ホッパーからの流動化粒子の供給量 Q_1 が1.15L/sとなるようにスライダーの開口幅を設定したため、流動層容器からの溢流量 Q_3 は0.35L/sである。また、装置および条件より $S=0.057$ 、 $t_s=8.3 \times 10^{-3}$ とした。なお、流動化粒子には未分級の砂(真比重=2.76、かさ比重=1.38)を用い、分離対象物として直径2cmの比重調節球(浮揚球の比重=0.4、0.6、0.8、沈降球の比重=1.2、1.4、1.6)を用いた。

4. 研究成果

(1) 固気流動層高が沈降速度に及ぼす影響

理論より本実験の沈降挙動は全ての条件において乱流域での沈降現象であることが判明した。その際の終末沈降速度は次の(4)式が成立する。

$$t\sqrt{\Delta\rho} = \text{constant} \quad (4)$$

ここで $t[s]$ は沈降時間、 $\Delta\rho[-]$ は物体比重と流動層の見掛け比重の差である。図4に水中

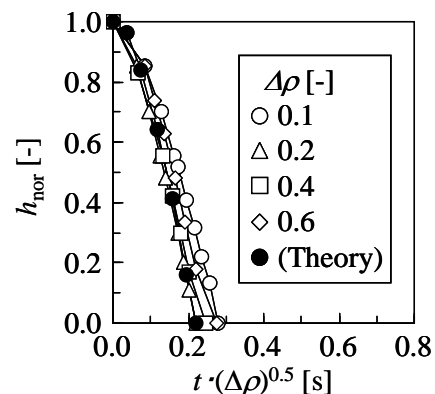


図4 水中での沈降挙動

での比重差を補正した経過時間 $t \cdot (\Delta\rho)^{0.5}$ に対する球の規格化高さ h_{nor} を示す。また図中に理論値も合わせて示す。結果より、全ての比重差の実験結果と理論値がほぼ一本の直線に重なることが分かる。したがって、本測定手法は精度良く沈降速度を測定できることが確かめられた。

図5に各層高での固気流動層での $t' \cdot (\Delta\rho)^{0.5}$ に対する h_{nor} を示す。ここで t' は層高が異なる場合でも比較しやすくするため、層高15cmの場合の経過時間に補正した値である。(a) $h=15\text{cm}$ の場合は $\Delta\rho$ が0.4と0.6の比重差が大きい場合は水中と同様にほぼ一本の直線に重なるが、 $\Delta\rho$ の減少に伴い右側へシフトし、沈降速度が遅くなっていることが確認できる。一方、(b) $h=20\text{cm}$ の場合は $\Delta\rho$ が大きい場合でも一本の直線に重ならない結果となった。また $h=15\text{cm}$ の場合と比べて標準偏差を示すエラーバーが大きく沈降速度が不安定であることが明らかとなった。送風により粒子層に送り込まれた空気は、層内では気泡として存在する。気泡は層内を上昇しながら合一によって成長

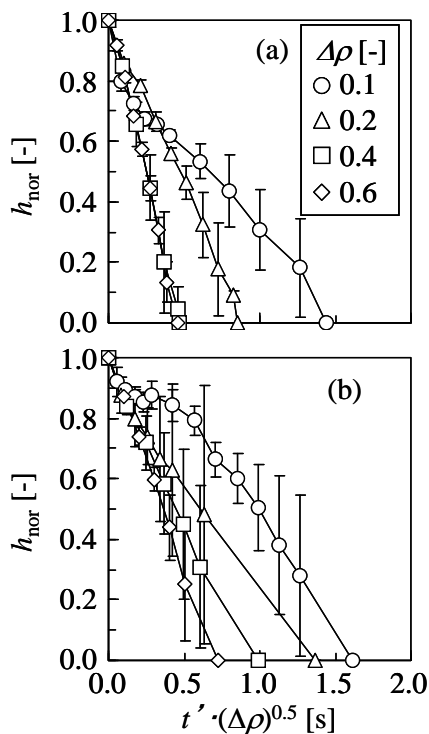


図5 固気流動層中での沈降挙動
(a): $h=15\text{cm}$, (b): $h=20\text{cm}$

するため、層高が高いほど大きい気泡が存在する。このため層高が高いほど気泡の衝突が球に与える影響が大きく沈降速度が不安定になったと考えられる。したがって、安定な沈降速度を得るためには層高を低くする方が好ましいことが明らかとなった。

(2) シックナータイプの連続乾式比重分離装置の開発

図6に各投入個数 n_{all} での浮揚割合 R_f を示す。 $n_{\text{all}}=60$ の場合は比重が0.8以下の球と1.2以上の球がそれぞれほぼ完全に浮揚および沈降し、分離が高精度に行われたことが確認できる。また球を $n_{\text{all}}=252$ 個まで増加させても高精度分離を維持できることも明らかとなった。しかし、 $n_{\text{all}} \geq 288$ の場合は投入個数の増加に伴い、沈降すべき球が沈降しにくい結果となった。これは投入個数の増加に伴い沈降球が排出口付近で込み合うため流動化粒子の排出量が減少(溢流量が増加)し、本来沈降すべき球が浮揚したためだと考えられる。この問題を解決するためには排出口サイズを大きくすることが考えられる。これにより排出口側への流れが強くなると考えられるが、2段ホッパーからの流入量も同時に多くすることにより、高い分離精度を保持するのではないかと考えられる。図7に体積換算処理速度 M_v に対するニュートン効率 η を示す。 $M_v=2.2$

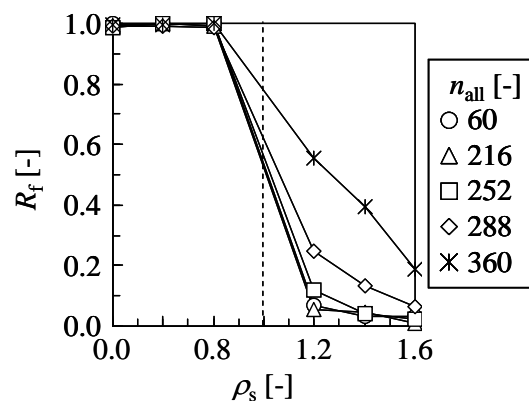


図6 各投入個数 n_{all} での球の比重に対する浮揚割合

$\text{m}^3\text{-object}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ までは $\eta \geq 0.9$ の高精度分離が可能であることが明らかとなった(図中矢印(a))。この M_v 値は従来装置の約2.4倍であり、本装置機構が高速処理に有効であることが示された。また、処理速度がさらに増加すると上記に示した理由により η が急激に減少するが、従来装置とほぼ同程度の分離精度である $\eta \approx 0.6$ と比較すると、 $M_v=3.2 \text{ m}^3\text{-object}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ であり、従来装置の約3.4倍の処理速度が得られた(図中矢印(b))。したがって、本シクナータイプの乾式比重分離装置は約60-90%の分離精度において従来装置の約2.4-3.4倍の高い処理速度を実現可能であり、高速処理の分離に有効であることが示された。

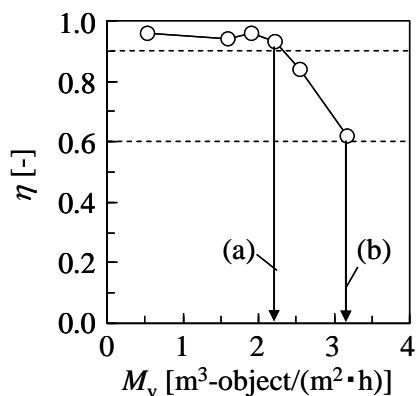


図7 処理速度に対するニュートン効率

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)

[学会発表] (計3件)

(1) 吉田幹生, 高速処理のためのシクナータイプ乾式比重分離装置の開発, 国際粉体工業展東京 2010(アカデミックコーナー), 2010年12月2日, 東京(東京ビッグサイト)

(2) 吉田幹生・白石貴史・岡本健太・後藤邦彰・押谷潤, 分離効率向上を目的としたシクナータイプ乾式比重分離装置の開発, 第48回粉体に関する討論会, 2010年10月20日, 高松(高松シンボルタワー)

(3) 加来俊樹・押谷潤・後藤邦彰・吉田幹生, 固気流動層内の物体沈降速度に及ぼす比重差と空塔速度比の影響, 第2回 化学工学3支部合同北九州大会, 2009年10月31日, 北九州(西日本総合展示場)

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