

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560990

研究課題名(和文)プラスチック高度リサイクルのための界面性状制御とアドバンスドジグテクノロジー

研究課題名(英文)Advanced jig separation technology for resource recycling and wettability control of plastics

研究代表者

伊藤 真由美(Ito, Mayumi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10339690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：我が国は少ないエネルギーで資源を最大限に活用する循環型社会へと移行しており、廃製品から効率よく有価物を取り出す技術の開発は重要である。我々はこれまでに石炭処理で広く使われている比重選別機(TACUBジグ)をプラスチックのような比較的low比重の粒子選別用に改良し、さらに似た様な比重の粒子も分けられる装置としてハイブリッドジグを開発した。この装置では送気により粒子に気泡を付着させてみかけ比重差を作り出し、選別を行う。そのためには高度な気泡付着の制御が必要であり、粒子側の濡れ性の制御および、気泡径の高度な制御について研究した。また、浮遊している粒子の回収システムの開発も行った。

研究成果の概要(英文)：Industrial systems and daily life in Japan are shifting to a society based on recycling to reduce energy and resource consumption and efficient separation technology of valuable component from used products is important. The authors have developed the RETAC jig (a modified TACUB jig) and the RETAC jig can separate relatively low density particles such as plastics. To further improve the separation ability, a hybrid jig (a RETAC jig with an air bubbler under the particle bed), which can separate plastics having similar specific gravities by the differences in the wettabilities of the particles was developed. Surface modification of plastics with similar wettability enabling separation in the hybrid jig and precise control of the wettability of plastic surfaces are investigated. Effect of bubble size on apparent density of particles was also investigated and recovery system of floating and suspending particles was developed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：再資源化 ジグ プラスチック 相互選別

1. 研究開始当初の背景

今や現代生活はプラスチックなしでは成り立たなくなっており、廃プラスチック量も膨大なものとなっている。プラスチックを循環利用する際の現実のフローを考えると、廃棄製品を効率よく回収・運搬し、解体・選別により高純度化、洗浄し、バージン材と同等の機能を持たせる必要がある。最近では多くの企業が易解体設計や素材規格の統一を進めており、一部のプラスチックは素材としてのリサイクルが可能な状況になりつつある。このような状況変化に伴い、質の高い素材へのリサイクルのために、プラスチック相互の選別技術はますます高度化したものが要求されている。石炭処理の分野では、高品質の石炭を選別するために網下気室型湿式比重選別機 (TACUB ジグ) が用いられており、低いランニングコストで高い選別効率が得られるという特徴を有している。我々はこれまでにプラスチックの相互選別に対応すべく、リバースジグ (水より軽いものを選別するジグ) やハイブリッドジグ (表面の濡れ性に差があれば、同じ比重の物質でも選別できるジグ) を開発し、これらの技術を総じてアドバンスドジグテクノロジーと名付け、その有用性を実証してきた。しかしながら RETAC ジグやリバースジグは装置側の改良により高精度選別が可能になったものの、ハイブリッドジグは試料側の性状が選別成績を大きく左右し、さらに自然疎水性に差のない試料については、表面改質による濡れ性の精密な制御と付着気泡の制御が要求されることが分かってきた。

2. 研究の目的

本研究では比重および自然疎水性に差のない試料を精度よく選別するための、表面改質による濡れ性の精密な制御や、付着気泡の高度な制御、気泡付着粒子の回収システムの確立を行った。

3. 研究の方法

研究目的を計画的に達成するために、4項目に分けて試験を行った。検討項目(1)はフィード特性に応じた表面改質法の検討、(2)はハイブリッドジグに適した濡れ性の程度を評価するための新たな装置の開発、(3)はジグ槽内での粒子への気泡付着制御、(4)浮遊状態に応じたハイブリッドジグ処理法 (産物回収法) の開発である。(1)(2)は、ハイブリッドジグを行う前の試料の濡れ性制御に関する検討であり、(3)(4)はハイブリッドジグ処理に関する検討である。

4. 研究成果

ハイブリッドジグは比重に差が無い粒子同士の選別のために気泡を粒子に付着させ、見掛け比重の差を利用して選別を行う。本研究では、比重および自然疎水性に差のない試料を精度よく選別することが目的である。そこ

で比重の極めて近い試料を用意し、その表面改質と、気泡付着特性、ハイブリッドジグによる選別特性についての検討を行った。検討項目(1)ではフィード特性に応じた表面改質法の検討を行った。

廃棄製品由来で比重が同じプラスチック試料として PPGF, HSPS (共に比重 1.04) を用意した。既存の選別手法として知られる浮選試験の予備試験に用いられるハリモンドチューブ試験を行ったところ、両試料ともに 100% の浮遊率が得られ、選別ができないことが確かめられた。次いで、表面改質のためにエアロゾル OT, リグニンスルホン酸ナトリウム, タンニン酸を添加したところ、濃度の増大に伴い親水化し浮遊率が減少するが、浮遊率に差があることを見出した。浮遊率に差が見られた条件でハイブリッドジグ試験を行ったが、良好な選別成績は得られなかった。ハリモンドチューブ試験では粒子や気泡が自由に動けるのに対し、ジグでは粒子層下部から気泡を導入するため、気泡と粒子の接触確率、接触時間、脱離確率等が異なるためと推察され、ジグ層内を模擬した粒子への気泡付着量測定装置の開発が必要であることが分かった。

比重・濡れ性の差が小さい PVC (比重 1.37) と Nylon (比重 1.38) を用意し、表面改質試験を行ったところ、エアロゾル OT で効果が認められた。一般に、エアロゾル OT は表面張力を低下させることによってプラスチックを濡れ易くすることが知られている。しかしながら本試験では、エアロゾル OT 溶液下ではいずれの試料も親水化しており選別できず、この試料を溶液から取り出して水洗いし、これを水に入れてジグをすると、選別可能になることが見いだされた。エアロゾル OT の試料への吸脱着特性などを調べたところ、エアロゾル OT がナイロンに吸着するため水中での選別が可能になること、しかしながら時間の経過に伴い水中で脱離し表面張力低下を引き起こし選別成績を低下させることを見いだされ、ハイブリッドジグでは表面改質の高度な制御が必要であり、適切な選別条件把握のための粒子への気泡付着挙動の測定装置が必要であることが分かった。

検討項目(2)では、前項で必要性が明らかになったハイブリッドジグに適した濡れ性の程度を評価するための新たな装置の開発を行った。

濡れ性の差を利用する粒子の選別法には浮選法があり、その際の浮遊性の定性的評価のためにハリモンドチューブが使われるが、浮選では 1 つの気泡と 1 つの粒子の動的な接触問題で扱えるのに対し、ハイブリッドジグでは、粒子層中を下から上に通過する気泡との接触であるため、専用の濡れ性評価法が必要になる。そこで粒子層の下部から送気し、粒子層にトラップされた気泡体積を測定する装置を開発するとともに、そこに脈動を与

える機構も持たせ、脈動時の気泡付着量、および脈動・送気停止後の気泡脱離量も評価できる装置を開発した。気泡体積の測定にはレーザーセンサを用いた機構を組み込んだ。本装置およびハイスピードカメラを用いることで、ジグ内での粒子と気泡の付着挙動の測定が可能になった。図1に気泡付着量測定装置の概略図を示す。

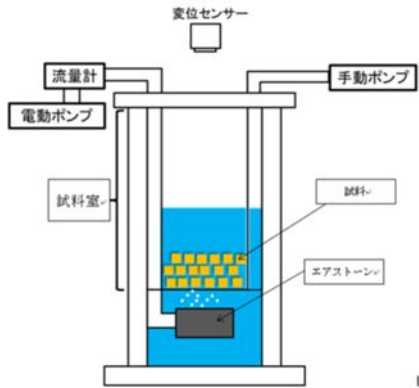


図1 気泡付着量測定装置の概略図

試料として先述の PPGF, HSPS を用いた試験では、エアロゾル OT, リグニンスルホン酸ナトリウム, タンニン酸による表面改質効果を確認するため、気泡付着量の変化を測定した。開発した装置を用いることで少量の試料でジグ選別のための適切な試薬濃度を把握できるようになった。

さらに、脈動下および静水下での粒子への気泡付着挙動を把握するため、PVC 粒子のみでの試験を行った。静水・脈動条件を比較することで気泡層にトラップされた気泡体積と、実際に粒子に付着している気泡体積、また、脈動・送気停止後に与えた脈動により脱離する気泡量を測定した。さらに気泡径を変化させる試薬 (MIBC) を添加することで、気泡径の変化が上述の挙動に及ぼす効果を調べた。脈動下では上昇水流により間隙率が增大し、ここに小さい気泡が入り込むことで、粒子への気泡付着数が増大すること、また、付着気泡の安定性が増し、脱離しにくくなることなどが明らかになった。

粒子への気泡付着では粒子表面の形状 (凹凸) も影響する。ともに比重 1.31 の PVC および PET を用い、PVC 表面を平滑条件、非平滑条件とし、気泡付着挙動を調べた。非平滑条件の方が気泡が付着しやすいことなどを見出し、選別前の破碎処理が選別成績に大きく影響することを明らかにした。

以上のように、脈動機構を持った気泡付着量測定装置を開発し、ハイスピードカメラによる撮影画像と併せて気泡と粒子の付着や脱離挙動を解析することで、ハイブリッドジグ槽内での粒子や気泡の挙動や、選別に適切な気泡特性などを明らかにした。

検討項目 (3) はジグ槽内での粒子への気泡付着制御、(4) は浮遊状態に応じたハイブリッ

ドジグ産物回収法の開発である。図2に回分式ハイブリッドジグの概略図を、図3に連続式ハイブリッドジグの概略図を示す。

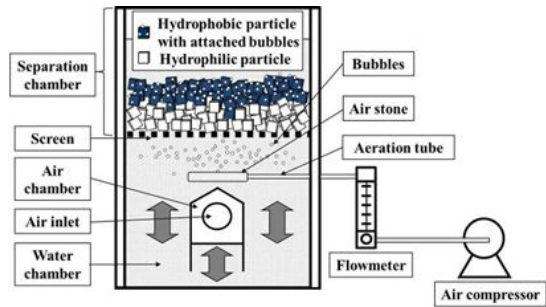


図2 回分式ハイブリッドジグの概略図

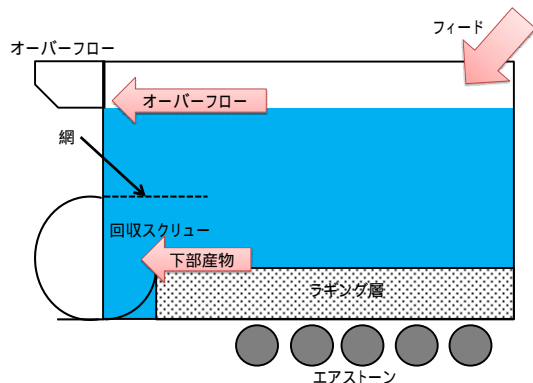


図3 連続式ハイブリッドジグの概略図

まず、これまでの試験で用いた試料を用い、先述の気泡付着量測定から適切な試薬種類及び試薬濃度を決定し、ハイブリッドジグ試験を行った。試料にもよるが、最上層および最下層品位 99%以上の産物が得られ、適切に制御した条件下であれば、良好なハイブリッドジグ選別が可能であることを見出した。

リバースジグは水より軽いものを選別するために開発されたジグであるが、比重および濡れ性の差が小さい試料は選別できない。そこでハイブリッドジグの原理を導入したリバースハイブリッドジグ (図4) を開発し、PE (比重 0.92) と XLPE (比重 0.93) の表面改質と気泡付着量測定、ジグ試験を行った。

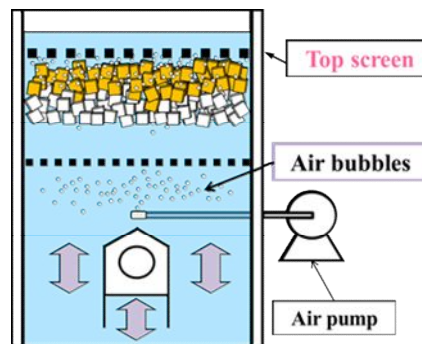


図4 リバースハイブリッドジグの概略図

脈動下で送気した場合の気泡付着量に差はなかったが、脈動を続けながら送気を停止すると、脱離気泡量に差があることが見いださ

れ、この機構を組み入れたジグ試験を行った。回分式試験では、この機構により選別成績が向上することが確認された。さらにこの機構を組み込んだ小型連続式装置を作成した。また、粒子径や粒子形状がリバースハイブリッドジグでの気泡付着挙動に及ぼす影響も調べ、適切な粒径や、破断面の形状を見出した。

前項(2)でジグ内での粒子と気泡の付着特性を調べていく中で、気泡付着量によって粒子の浮遊状態が異なることが見いだされた。そこで浮遊状態に応じたハイブリッドジグ産物の回収法の開発を行うため、連続式の小型ハイブリッドジグの産物回収部の改造を行った。ジグ層内の粒子は、(a)気泡付着していない粒子、(b)少量の気泡が付着し見掛け比重が小さくなるものの水面には浮上せず、水中浮遊状態にあるもの、(c)多数の気泡が安定に付着し水面に浮上するものに分類される。(a)については産物回収側の下部にスクリュウエクストラクターを設置し、輩出する機構を組み入れた。(b)については、(a)のスクリュウエクストラクター上部に金属網を設置する方式で排出直前に下部産物から分離する仕組みとした。(c)については脈動水によりオーバーフローさせて回収させる機構とした。回収試験を行ったところ、設置した網の下部に空間ができる状態では循環流が生じ排出が上手く進まないことが分かった。この空間を生じさせないためには、粒子層厚を増大させるなど、粒子層にかかる圧力を高める必要があることが分かり、これらを制御することで、下部排出ができ、ハイブリッドジグ選別および産物回収ができることが確認された。

以上の検討より、試料側の性状が選別成績を大きく左右し、さらに自然疎水性に差のない試料については表面改質による濡れ性の精密な制御と付着気泡の制御を要するハイブリッドジグにおいても、良好な選別成績が得られ、また、破碎処理を含めた前処理およびジグでの適切な選別条件を迅速に把握できるようになった。これにより、RETAC ジグ、リバースジグ、ハイブリッドジグからなるアドバンスドジグテクノロジーが完成し、この技術を適用することで、質の高い素材へのリサイクルのためのプラスチック相互の選別が可能になる。今後は、プラスチックだけでなく金属や電子基板などを含む複合廃棄物にこの技術を適用するための、破碎などの前処理から選別までの一連のシステムの最適化を検討する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

M Tsunekawa, R Kobayashi, K Hori, H Okada, N Abe, N Hiroyoshi, M Ito, Newly developed discharge device for jig separation of plastics to recover higher grade bottom layer product, International Journal of

Mineral Processing, 114-117: 27-29(2012)
査読有

〔学会発表〕(計 13 件)

M Ito, A Saito, N Murase, N Hamaya, M Takeuchi, N Hiroyoshi, Separation of polyethylene and cross-linked polyethylene using a reverse hybrid jig, The 7th International conference on earth resources technology (ASEAN++2013), 2013年11月11日, Centara Duangtawan Hotel, タイ(チェンマイ)

M Ito, S Khanchang, A Saito, N Murase, N Hamaya, N Hiroyoshi, Recycling Treatment of cell phones including PCBs by advanced jigging, The 7th International conference on earth resources technology (ASEAN++2013), 2013年11月11日, Centara Duangtawan Hotel, タイ(チェンマイ)

M Ito, N Hiroyoshi, and M Tsunekawa: Advanced jig separation technology for resource recycling and mineral processing, The 5th Regional Conference on Geological Engineering, 2013年01月15日, Cititel Hotel (マレーシア)

Mayumi Ito, Megumi Takeuchi and Naoki Hiroyoshi: "Plastic-plastic separation using advanced jig separation technology", The 6th International Workshop and Conference on Earth Resources Technology, 2012年05月10日, BP Samila Beach Hotel & Resort (タイ)

M Ito, M Takeuchi, E Ishida, N Hiroyoshi, M Tsunekawa: Hybrid jig separation of plastic particles and surface modification of the plastics, The XXVI International Mineral Processing Congress, 2012年09月25日, Hotel Ashok (インド)

M Ito, M Takeuchi, and N Hiroyoshi: Hybrid jig separation of plastic particles-A case of a separation of Nylon and PVC-, International symposium on earth science technology 2012, 2012年09月18日, パン工科大学 (インドネシア)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mp-er.eng.hokudai.ac.jp/indexjp.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 真由美 (ITO, Mayumi)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号: 10339690

(2) 研究分担者

廣吉 直樹 (HIROYOSHI Naoki)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号: 50250486