

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12403

研究課題名（和文）強磁性体配列を用いた高磁場勾配磁気アルキメデス浮上による有価物の選択分離回収

研究課題名（英文）Material separation utilizing magneto-Archimedes levitation under a high magnetic field gradient.

研究代表者

三浦 大介 (Miura, Osuke)

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：50281241

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では低磁場下で固体混合物から有価物質を分離・回収するために、磁場中に強磁性体を最適配列させることで発生する高磁場勾配を使うことにより、磁気アルキメデス浮上力の大幅な向上と水平方向の磁場均一性を実現させた。さらに実用化を目指して、レーストラック型マグネットを用いた連続分離・回収システムについて検討した。その結果、比較的低磁場中で、数10～0.1ミリ程度の主要な金属やプラスチック片を塩化マンガン水溶液中で5秒以内に固有の位置に安定浮上させ、さらに流れ場中で分離回収するシステムを考案した。また同様な手法を水平方向に適用し、自由落下する混合物から磁気力で特定の物質を分離する手法も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では物質固有な物理定数である密度と磁化率のみをパラメーターとして重力と磁気力を駆動力とする「磁気アルキメデス浮上」に着目し、物理的手法のみによる混合物からの物質の選択分離・回収の実現を目指した。超伝導マグネットの磁場中心に強磁性体円柱を格子状に安定浮上配置させるという独自の手法を用い、磁気力ファクターを大幅に増大させ、レーストラック型NbTi超伝導マグネットがオープン空間に発生する強い磁気力を利用した物質の連続磁気浮上分離回収システムを考案した。これにより混合物からの有価金属回収や構造異性体、たんぱく質、各種抗体を装飾した磁気ビーズなど様々な有価物質の効率的な分離回収が可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to separate and recover valuable substances from a solid mixture under a low magnetic field, the magnetic Archimedes levitation force is significantly increased by using a high magnetic field gradient generated by optimally arranging ferromagnetic materials in the magnetic field. The improvement and the uniformity of the magnetic field in the horizontal direction were realized. For further practical use, we examined a continuous separation and recovery system using a race track type magnet. As a result, in a relatively low magnetic field, a system that stably floats major metals and plastic pieces of several tens to 0.1 mm in a manganese chloride aqueous solution to a unique position within 5 seconds and separates and recovers them in a flow field. We also applied a similar method in the horizontal direction to develop a method for separating a specific substance from a free-falling solid mixture by magnetic force.

研究分野：超伝導材料・超伝導応用・磁気力応用

キーワード：磁気アルキメデス浮上 高勾配磁気分離

1. 研究開始当初の背景

混合物からの物質の分離精製方法としては溶解析出、熔融製錬、電解、湿式法等、物質を化学変化させて分離する方法が主流で実用化されている。しかしながらそれらはエネルギー消費やCO₂の削減、さらに経済性の観点からまだ十分とは言えない。また、それらの方法では分離できない物質も存在する。一方、物質そのものは変化させずに物理的手段のみで物質を分離する方法は未だ実用化されていない。

一方、鉛直方向磁場勾配中に置かれた物質とその周囲の媒質には重力と磁気力の両方が働くが、いわゆる「磁気アルキメデス効果」により物質が置かれた領域に相当する媒質に働く力が物質の浮力として働き、それらが釣り合う位置で安定浮上することが近年知られている。その浮上位置は浮上する物質と媒質との密度差と磁化率の差、及びその位置における磁場と磁場勾配の積により(1)式のように決定される。ここで μ_0 は真空の透磁率[H/m]、 g は重力加速度[m/s²]、 B は磁束密度[T]、 ρ_f は媒質の密度[kg/m³]、 χ_f はその磁化率[-]、また ρ_p は物質の密度[kg/m³]、 χ_p はその磁化率[-]である。

$$B \frac{dB}{dz} = \frac{\rho_f - \rho_p}{\chi_f - \chi_p} \mu_0 g. \quad (1)$$

通常は超伝導マグネットなどの電磁石の発生する左辺の磁場と磁場勾配の積(BgradB:磁気力ファクター)が鉛直方向の位置の関数であるため、上式により媒質中の物質固有の浮上位置が決定される。しかしながら10Tの超伝導マグネットであってもその値は400T²/m程度とそれ程大きくは無く、例えばプラチナなどの高密度な常磁性金属の浮上は実現しない。そこで申請者らは超伝導マグネットの磁場中心に軸対称の強磁性体材料を三角格子配列で配置することでこの磁気力ファクターを大幅に増加させ、さらに水平方向には均一な磁場・磁場勾配の積を作り出す新手法を考案した。(今回の研究で特許申請) この強磁性体配列を用いたいわゆる「高磁場勾配磁気アルキメデス法を用いる物理的手法のみによる物質の選択的分離回収システムの開発」が本研究の取り組む学術的な問いとなる。

2. 研究の目的

物質固有な物理定数である密度と磁化率のみをパラメーターとして重力と磁気力を駆動力とする「磁気アルキメデス浮上」に着目し、物理的手法のみによる混合物からの物質の選択的分離・回収の実現を目指すことが研究目的である。この方法を実用化するには、①磁気力ファクターである磁場と磁場勾配の積を増大させ物質の適用範囲を広げる。②高磁場と高磁場勾配をオープンな空間に発生させる超伝導マグネットの開発。③連続分離回収システムの考案、が必要となる。そこで本研究では超伝導マグネットの磁場中心に強磁性体円柱を格子状に安定浮上配置させるという独自の手法により、磁気力ファクターを大幅に増大させ、比較的安価なレーストラック型NbTi超伝導マグネットがオープン空間に発生する高磁場・高磁場勾配を利用した物質の連続磁気浮上分離回収システムの開発を検討する。これにより都市鉱山と呼ばれる電子機器廃棄物や混合物からの有価金属回収、従来技術では分離困難な構造異性体、たんぱく質、各種抗体を装飾した磁気ビーズなど様々な有価物質の効率的な分離回収が可能となる。

3. 研究の方法

①有価物質の磁気アルキメデス浮上マップの製作

有価金属（貴金属、レアメタル等）やその化合物、プラスチックや高分子等の密度（主に文献値）と磁化率（実測値）から(1)式と実験により浮上に必要なBgradBを求める。

②磁気力と分離分解能の向上をめざした磁場中での強磁性体有効配置の検討

超伝導マグネット磁場中心に配置する強磁性体円柱の材質、形状の最適化の為の磁場、磁気力解析を行なう。材質は申請者らの先行研究から飽和磁化の大きい Fe-Mn 合金を選定する。さらに大空間へ拡張するために三角格子配列を主体に有限要素法による磁場解析を行ない、磁気力 $B_{grad}B$ の増大、面内均一性の向上、及び分離分解能向上の最適化を図る。

③磁場中強磁性体配列の最適化における物質の浮上分離の検証実験

現有備品である常温ボア 100mmφ の 10T 超伝導マグネットの磁場中心に非磁性のアクリルコア材に②の解析結果を踏まえて強磁性体円柱を格子状に埋め込んだ磁性体コアを実装し、自己安定浮上させた上部に設置した常磁性塩化マンガン溶媒ベッセル内部にて各種金属の磁気浮上を光学系システムで観察し、浮上位置の理論値との検証実験を行なう。

④強磁性体配列を用いた伝導冷却 NbTi レーストラック型超伝導マグネットの設計

オープンな空間に高磁場・高磁場勾配を発生可能な伝導冷却 NbTi レーストラック超伝導マグネットを市販の設計基準に基づき有限要素法マルチフィジックスのソフトウェアを用いて設計する。

⑤選択分離回収システムの検討

設計された高勾配磁場オープンスペースにおいて連続分離回収可能なシステムを検討する。微細粉碎された混合物をレーストラックコイルの上の媒質容器に入れ、磁気アルキメデス浮上分離させる。被分離物質の水平方向の駆動力はポンプ吸引で行い、物質の分別回収後、媒質はベッセルに循環させる。本システムのイメージを図 1 に示す。

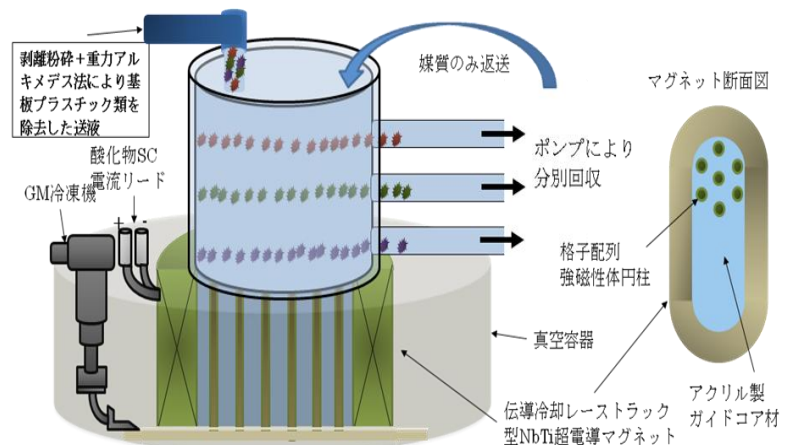


図 1 強磁性体配列を用いた高磁場勾配磁気アルキメデス法による有価物質の連続分離回収システムイメージ（電子基盤廃材の例）

4. 研究成果

①強磁性体配列を用いた鉛直方向磁気アルキメデス浮上の最適化

超伝導電磁石の中心に強磁性体配列を配置した際の磁場分布シミュレーションには FEM ベースのソフトウェアを用い、強磁性体の形状および配列を変化させ解析を行った。また実際の磁場測定もホール素子にて実施した。最適形状の強磁性体円柱を磁場中に配置することで強磁性体の 1mm 直上で超伝導磁石単体での最高磁場勾配に比べ約 7 倍もの磁気力向上が達成され、さらに、強磁性体円柱を三角格子状に最適配列することで磁気力ファクターを水平方向にも均一に拡大させることに成功した。また実験では超伝導電磁石の中心に安定浮上させた強磁性体円柱配列を配置し、塩化マンガン水溶液中で銅、銀、金及び白金の浮上分離実験を行った。超伝導電磁石単体では浮上の確認できなかった白金においては 6T での浮上が確認でき、7T 以上では各金属の分解能は 7mm 以上になることが判明した。さらに銅及びアルミニウム粉末浮上実験の結果、強磁性体配列による水平方向への磁場均一性による均一浮上の有効性が確認された。

②連続分離システム構築

図 1 に示すレーストラック型超伝導磁石の有価物質回収装置開発を目指し、磁場中心から上部 300mm 地点にある有価物質を自由落下させ、磁気アルキメデス浮上させることにより物質の動的特性と分離分解能を評価した。直径約 2~3mm の各種金属球と各種プラスチック球と片を対

象に磁気浮上分離実験を行い、物質の安定浮上位置と浮上に達する時間を、理論と実測値で評価した。その結果、安定浮上位置は物質の形状に依存しないことや浮上に時間が5秒を超える物質がないことが判明した。有価物質の連続浮上磁気分離の際には物質の大きさによる安定浮上にかかる時間変化が問題となるが、アルキメデス浮上シミュレーションと実験により、数センチ～ミリオーダーの物質では数秒程度で平衡位置に達することが判り、連続磁気分離回収の実現性が示唆された。また、複数の有価金属混合物を同時にアルキメデス浮上させる場合には、異物質同士の磁氣的相互作用が問題となるが、その磁気力の見積もりと実際に混合物の磁気浮上実験を実施し、アルキメデス浮上の磁気力と比較して十分に小さいことが明らかになった。その結果、連続磁気浮上分離に向けての課題はほぼ終了した。

今後の課題としては流れ場中での分離シミュレーションとレーストラックコイルの設計を実施していく。

③水平方向のアルキメデス効果による有価資源の動的分離に関する研究

垂直方向の研究を展開して、より低磁場で物質操作が期待できる水平方向のアルキメデス効果による有価資源の動的分離に関する基礎研究として、水平方向磁気アルキメデス効果において重要な磁気力ファクターである $B \cdot \text{grad}B$ はオープンな横磁場中に最適化した強磁性体配列を水平方向に設置することにより生じさせ、磁気力、重力と抗力による粒子の運動方程式に基づき、有限要素法と時間差分を用いた粒子軌道解析、及び磁気分離実験により印加磁場、有価金属物質とサイズ変化に伴う動的な挙動を評価した。その結果、水平方向磁気アルキメデス効果による物質分離に成功し、磁場が大きくなるにつれ分離分解能が向上すること、及び粒子はある範囲ではサイズに依存することなく分離が可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ren Ichimura, Osuke Miura	4. 巻 未定
2. 論文標題 Material manipulation and separation using the horizontal magneto-Archimedes effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series (2021). 受理済	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Haozhou Chen, Osuke Miura	4. 巻 未定
2. 論文標題 Removal of magnetic fine particles from carbon black powder by high gradient magnetic separation under dry condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Tatsuya Kyushima, Osuke Miura
2. 発表標題 Magnetic levitation of plastics using magneto-Archimedes effect under high magnetic field gradient
3. 学会等名 the 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020) Tsukuba, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ren Ichimura, Osuke Miura
2. 発表標題 Material manipulation and separation using the horizontal magneto-Archimedes effect
3. 学会等名 the 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020) Tsukuba, Japan, Dec. 1-3, 2020. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ren Ichimura and Osuke Miura
2. 発表標題 Study on Manipulation of Substance Using Magneto-Archimedes Effect in a Horizontal Direction
3. 学会等名 10th International Forum on Magnetic Force Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Kyushima, Osuke Miura
2. 発表標題 Magnetic Levitation Experiment of Plastic Using Magnetic Archimedes Effect in High Gradient Magnetic Field
3. 学会等名 10th International Forum on Magnetic Force Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daiki Yamamoto, Kenichi Yamagishi, Osuke Miura
2. 発表標題 Magneto-Archimedes levitation properties for metals by ferromagnetic material arrangement in magnetic fields
3. 学会等名 Magnet Technology Conference MT26 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Shiina, Yu Komatsu, Osuke Miura
2. 発表標題 Characterization of rice hull magnetic activated carbon and a rotary drum type magnetic separator with ferromagnetic mesh filters
3. 学会等名 International Symposium on Superconductivity (ISS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daiki Yamamoto, Yuto Tagawa, Osuke Miura
2. 発表標題 Magneto-Archimedes levitation of metals by optimized ferromagnetic cylinder arrays in magnetic fields
3. 学会等名 International Symposium on Superconductivity (ISS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 物質分離装置	発明者 三浦 大介	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-170778	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	小方 聡 (Satoshi Ogata) (50315751)	東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------