

令和元年6月3日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05006

研究課題名(和文)りん光材料の磁性変化を利用した新原理によるレーザーマニピュレーション技術の開発

研究課題名(英文) Development of laser manipulation technology by new principle using magnetic property change in phosphorescent materials

研究代表者

池添 泰弘 (Ikezoe, Yasuhiro)

日本工業大学・基幹工学部・教授

研究者番号：70334315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーピンセットの手法を用いて非接触で物体を操作する技術においては、主に数ミクロン程度の小さな物体を顕微鏡下で操作することに使用されるが、強いレーザー光が必須であり、また、大きな物体には適用できないなどの難点もある。本研究では、光を吸収することによって、室温でも磁性変化を引き起こすような、りん光材料や蓄光材料を、磁気アルキメデス浮上技術によって磁場空間中で磁気浮上させた状態で光を当てて、物体を非接触で操作できる技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの非接触操作技術の代表例はレーザーピンセットであるが、非常に小さなものにしか適用できないのに対し、本研究で開発した磁場と光の両者を駆使した非接触操作技術は、巨視的な大きさの物体を操作することも可能である。また、ここで使われる光はLED等の弱い光で十分であるため、汎用性の高い技術となりうる。本研究によって、物体の並進操作を容易に実現できるようになった。今後、回転操作を実現できる技術を開発すれば、物体のあらゆる操作を非接触で出来ることになる。

研究成果の概要(英文)：The technology of manipulating objects without any physical contact such as optical tweezers is used for manipulating objects as small as several microns under a microscope. This method requires a strong laser beam and cannot move objects which are larger than the size of focal point of laser. To overcome such drawbacks, we have developed a new technology which uses magnetic property change in phosphorescent materials or persistent luminescent materials by the irradiation of light. These materials absorb light, which causes their magnetic susceptibility change even at room temperature while they are in the excited state. After absorbing light, the material shows slow relaxation process, emission of light, which resulting in the significantly observable magnetic susceptibility change. We have successfully observed the repeated motion of the sample by turning ON and OFF of the light. Our technology is more common than former technologies and would be used for a variety of applications.

研究分野：応用物理学

キーワード：磁気アルキメデス効果 磁気浮上 蓄光材料 燐光材料 非接触操作

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

医療、宇宙開発、ナノエレクトロニクスなどの最先端の科学技術分野においては、自分の目で確認できないような微小物体の操作や、宇宙空間での作業など、もはや人間が直接接触しながら確認することが不可能な環境での物体マニピュレーションが不可欠である。また、細胞などの取り扱いにおいては、機械的な接触だけで対象物の破損や汚染を引き起こすという問題もある。非接触で物体を操作する技術があれば、上記のような問題を克服できる。解決策の例の一つとしては、レーザーピンセットが挙げられる。これは、レーザー光の焦点付近に物体を保持する技術で、非接触操作技術の最有力候補の一つとして市販品の開発も進んでいる。ただ、機械的な接触が無いとはいえ、高強度の光が必要で、試料への悪影響が拭いきれない。もう一つの例は、アメリカのハーバード大学の G. M. Whitesides 教授らが 2014 年に報告した、永久磁石を用いた物体の操作法である。物体を磁気的な力で浮上させ、それに加えて物体のハンドリング用の磁石を別に用意し、磁場を変化させることで浮上している物体を非接触で動かすという方法である。レーザーピンセットに比べてはるかに簡単な手法として注目すべき方法だが、浮上している物体が複数ある場合に、特定の物体のみを動かすことは出来ない。以上のように、物体を非接触で操作する技術は皆無ではないが、問題点も多く、特定の限られた状況でのみ使われる技術であり、より汎用的に様々な用途に利用できる技術の開発が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、非接触で物体を操作する技術において、背景にあったような問題を克服するために、光と磁場の両方の利点を組み合わせた新技術を開発することを目的とした。ここでは、背景にあった、光と磁場の問題点を克服するだけでなく、両者の利点を組み合わせるような技術の開発となっている。例えば、磁場だけでは、複数の物体の中から特定の物体のみを選んで動かすことは出来ないが、光を特定の物体の身に充てることで、それは可能となる。また、レーザーで浮上させようとするれば、強い光を集光させなければならないが、浮上させるためには磁気的な力を利用すればよい。このようなアイデアで、汎用的な新技術を開発する。

### 3. 研究の方法

ここでは、申請者が開発した磁気浮上技術である「磁気アルキメデス浮上」を用いて、物体を磁場空間で浮上させる。この浮上法は、磁気的な浮力の効果を利用して物体を浮上させる方法で、通常、磁気浮上のためには強い磁場が必要となるが、この浮上法を用いれば、永久磁石のような弱い磁場でも磁気浮上化可能となる。実際、背景で述べた Whitesides 教授らの磁気浮上を利用した非接触物体操作技術は、磁気アルキメデス浮上の技術を用いなければ実現不可能である。

磁気的な力で浮いている物体の位置は、物質固有の磁化率や密度などによって 3 次元空間中の特定の場所に決まる。つまり、物体の磁化率や密度を変化させることが出来れば、物体の位置を動かすことができる。例えば、磁気浮上状態にある物体の磁性を光で変化させることが出来れば、光を照射するだけで物体の位置を操作できることになる。一般には、光で物体の磁性を変化させることは難しく、ほとんどの場合、極低温でのみ観測される。申請者らは、りん光材料や蓄光材料のように、光のエネルギーを吸収した後、光を放射するのに時間がかかる物質に着目した。これらは、室温でも、光照射によって磁性が変化する可能性がある。なぜなら、光のエネルギーが完全に放射されるまでに時間がかかるため、光による励起状態が磁性変化を伴うものであれば、緩和過程が終了するまでは、磁性が変化した状態が保持されるからである。そこで、申請者は、りん光材料や蓄光材料を磁気浮上させ、そこに、光を照射して、物体の位置を操作する実験を行った。物体の位置の観測には CCD カメラを用いた。また、物体の光物性の評価には、緩和過程をミリ秒のオーダーで測定できる分光光度計を用いた。

### 4. 研究成果

図 1 は、実験装置の模式図である。超電導磁石（最大 13T）の室温ボア中において、りん光材料や蓄光材料で作られたサンプルを塩化マンガンや塩化ガドリニウム水溶液中で磁気浮上させ、375 nm の LED 光で物体を照射し、その時の物体の位置をプリズムを介して CCD カメラで記録した。

図 2 は、実験結果の一例である。サンプルは蓄光材料 ( $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu},\text{Dy},\text{B}$ ) をアクリル樹脂の中に埋め込んだもので、重量比で 2:1 となっている。密度は、理論的には  $2.15 \text{ g/cm}^3$  程度と見積もられ、磁気アルキメデス浮上法を利用して磁気浮上状態を実現させた。ここで用いた媒体は、 $47.3 \text{ g/L}$  の塩化ガドリニウム水溶液で、密度は  $1.04 \text{ g/cm}^3$ 、体積磁化率は  $4.68 \times 10^{-5}$  である。

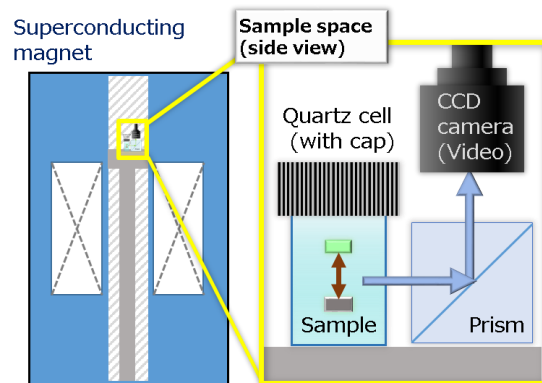


図 1 実験装置模式図

図 2-(a)は物体への光照射を繰り返した時の様子を示している。ここでは、20 秒 LED を ON 状態にしたのち、60 秒 OFF にして、そのプロセスを繰り返した。図から、光を当てると物体が上方へ動き、光照射を止めると下に下がっていく様子がわかる。このとき、上側の方が磁場強度は弱いので、この物体は、光照射によって磁化率が負の方向へ変化したことも分かる。図 2-(b)は、光照射の ON と OFF を繰り返した時の物体の位置変化をプロットしたものである。算出された物体の磁化率の変化はおよそ 3%であった。

その他、有機燐光材料であるアントラセンでも非接触操作に成功した。また、気体中の磁気アルキメデス効果を利用して、蓄光材料を酸素ガス中で磁気浮上させ、上と同様の原理により、非接触で物体を操作することにも成功した。物体のあらゆる運動は、並進と回転だけで記述できるが、並進については、非接触操作の可能性を証明できたと言える。

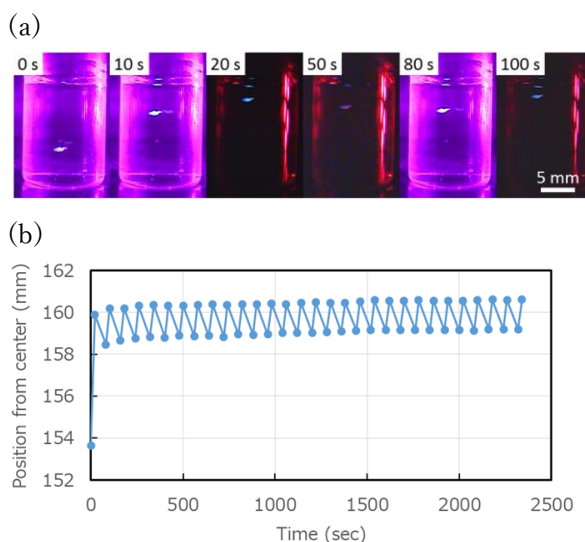


図 2 (a)光照射による物体の非接触操作の様子。(b)物体の位置から見積もられた磁化率の変化。光照射を繰り返すことで、可逆的に位置を制御でき、サンプルの劣化も見られない。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

① 池添泰弘

「手を触れずに物体を動かす ～自己組織化・磁場・光を巧みに利用した新技術～」  
日本磁気科学会誌, Vol. 11 (No. 1), 49-54, 2017 年 12 月 (依頼執筆、査読無し)

〔学会発表〕(計 33 件)

① 岡野 佑亮, 種部 千遥, 大澤 正久, 廣田 憲之, 池添 泰弘

「 $GdCl_3$  水溶液中で磁気浮上した球状蓄光材料の非接触光回転操作」  
第 66 回 応用物理学会 春季学術講演会(2019 年 3 月、東京)

② 種部 千遥, 岡野 佑亮, 大澤 正久, 廣田 憲之, 池添 泰弘

「磁気アルキメデス浮上状態で光操作された物体の運動の解析」  
第 66 回 応用物理学会 春季学術講演会(2019 年 3 月、東京)

③ 池添泰弘 (依頼講演)

「蓄光材料の光刺激磁性変化を利用した非接触光マニピュレーション技術 ～材料におけるエネルギー変換と物体の運動～」  
第 11 回 バイオナノシステムズ研究会 (2019 年 1 月、宇都宮)

④ Yasuhiro Ikezoe (依頼講演)

「Study of motion of the object caused by various energy conversion processes in materials」  
Active Matter Workshop 2019 (2019 年 1 月)

⑤ 岡野佑亮, 種部千遥, 大澤正久, 廣田憲之, 池添泰弘

「正 20 面体形に成形した蓄光材料の非接触光回転操作」  
応用物理学会・磁気科学研究会 第 7 回講演会 (2018 年 12 月、東京)

⑥ 菅谷将之, 池添泰弘

「磁気アルキメデス効果を用いたガラス粒子の自己集合」  
応用物理学会・磁気科学研究会 第 7 回講演会 (2018 年 12 月、東京)

⑦ 武捨秀紀, 岡野佑亮, 池添泰弘

「繰り返し高勾配磁場による微粒子トラップを利用した分離技術の開発」  
応用物理学会・磁気科学研究会 第 7 回講演会 (2018 年 12 月、東京)

⑧ 岡野佑亮, 種部千遥, 大澤正久, 廣田憲之, 池添泰弘

「磁気浮上した蓄光材料の非接触光回転操作」  
第 13 回 日本磁気科学会年会 (2018 年 11 月、仙台)

⑨ 種部千遥, 岡野佑介, 大澤正久, 廣田憲之, 池添泰弘

「磁気アルキメデス効果と磁気浮上物体の非接触光操作への応用」  
第 13 回 日本磁気科学会年会 (2018 年 11 月、仙台)

⑩ 菅谷将之, 池添泰弘

「磁気浮上技術を用いたガラス微粒子の自己集合」  
第 13 回 日本磁気科学会年会 (2018 年 11 月、仙台)

- ⑪ 武捨秀紀、岡野佑亮、池添泰弘  
「マイクロ流体チップと繰り返し高勾配磁場を用いた磁気分離技術の開発」  
第13回 日本磁気科学学会年会 (2018年11月、仙台)
- ⑫ 池添泰弘 (依頼講演)  
「バイオ分子の自己集合化に潜む機能」  
第70回 日本生物工学会大会 (2018年9月、大阪)
- ⑬ 種部千遥、岡野佑亮、大澤正久、廣田憲之、池添泰弘  
「磁気アルキメデス効果により磁気浮上させた物体の非接触光操作の解析」  
第79回応用物理学会秋季学術講演会 (2018年9月、名古屋)
- ⑭ 菅谷将之、池添泰弘  
「磁気アルキメデス効果を用いたガラス粒子の磁気浮上と自己集合」  
第79回応用物理学会秋季学術講演会 (2018年9月、名古屋)
- ⑮ Chiharu Tanebe, Yusuke Okano, Masahisa Osawa, Noriyuki Hirota, Yasuhiro Ikezoe  
「Noncontact optical manipulation of SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu, Dy/polypropylene complex levitated in a magnetic field by magneto-Archimedes effect」  
The International Workshop on Material Analysis and Processing in Magnetic Fields 8 (2018年06月、Grenoble)
- ⑯ Yasuhiro Ikezoe, Yusuke Okano, Chiharu Tanebe, Masahisa Osawa, and Noriyuki Hirota  
「Noncontact manipulation of persistent luminescent material by light in a magnetic field」  
The International Workshop on Material Analysis and Processing in Magnetic Fields 8 (2018年06月、Grenoble)
- ⑰ 武捨秀紀、岡野佑亮、池添泰弘  
「ナノ粒子の磁気ソーティング」  
第65回応用物理学会春季学術講演会 (2018年3月、東京)
- ⑱ 岡野佑亮、種部千遥、大澤正久、廣田憲之、池添泰弘  
「Sr<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>の合成と磁気浮上状態での非接触光操作」  
第65回応用物理学会春季学術講演会 (2018年3月、東京)
- ⑲ 種部千遥、岡野佑亮、大澤正久、廣田憲之、池添泰弘  
「磁気アルキメデス効果によって磁気浮上した SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu,Dy の非接触光操作」  
第65回応用物理学会春季学術講演会 (2018年3月、東京)
- ⑳ 菅谷将之、池添泰弘  
「永久磁石を用いたガラス微粒子の磁気アルキメデス浮上」  
第65回応用物理学会春季学術講演会 (2018年3月、東京)
- ㉑ 菅谷将之、岡野佑亮、池添泰弘  
「ガラス粒子の磁気浮上と自己組織化」  
応用物理学会・磁気科学研究会 (2017年11月、東京)
- ㉒ 武捨秀紀、岡野佑亮、池添泰弘  
「微粒子の磁気ソーティング」  
応用物理学会・磁気科学研究会 (2017年11月、東京)
- ㉓ 池添泰弘 (依頼講演)  
「磁場と光を用いた物体の非接触操作」  
応用物理学会・磁気科学研究会 (2017年11月、東京)
- ㉔ 岡野佑亮、種部千遥、大澤正久、廣田憲之、池添泰弘  
「塩化ガドリニウム水溶液中で磁気浮上した蓄光材料の非接触操作」  
応用物理学会・磁気科学研究会 (2017年11月、東京)
- ㉕ 種部千遥、岡野佑介、大澤正久、廣田憲之、池添泰弘  
「酸素ガス中で磁気アルキメデス浮上した SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の非接触光操作」  
応用物理学会・磁気科学研究会 (2017年11月、東京)
- ㉖ 岡野佑亮、種部千遥、大澤正久、廣田憲之、池添泰弘  
「GdCl<sub>3</sub>水溶液中で磁気浮上した Sr<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 粒子の非接触光操作」  
第12回磁気科学学会 (2017年11月、京都)
- ㉗ 種部千遥、岡野佑介、大澤正久、廣田憲之、池添泰弘  
「磁気アルキメデス効果によって磁気浮上した物体の非接触光操作」  
第12回磁気科学学会 (2017年11月、京都)
- ㉘ Yasuhiro Ikezoe, Yusuke Okano, Chiharu Tanebe, Masahisa Osawa, and Noriyuki Hirota,  
「Non-contact manipulation of objects undergoing levitation in a magnetic field」  
The International Conference on Magneto-Science (2017年10月 Reims)
- ㉙ 池添泰弘、大澤正久、廣田憲之  
「磁気浮上状態にある物体の光による非接触操作」  
第78回応用物理学会秋季学術講演 (2017年09月、福岡)
- ㉚ 種部千遥、岡野佑亮、池添泰弘  
「磁場と光を利用した非接触シャフトフリーモーターの開発」  
第64回応用物理学会春季学術講演会 (2017年3月、横浜)

③① Yusuke Hamazaki, Ryo Yuzawa, Masanori Hatazawa, Yuji Fujita, Ryuichi Yatake, and Yasuhiro Ikezoe

「Magnetic separation of plastic materials using permanent magnets」

日本化学会第 97 春季年会 (2017 年 3 月、横浜)

③② 岡野佑亮、種部千遥、廣田 憲之、池添泰弘

「磁場と光を用いた非接触 2 次元コンベア」

第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017 年 03 月、横浜)

③③ 池添泰弘 (依頼講演)

「自己組織化現象と化学モーター」

非線形問題研究会 (2016 年 12 月、埼玉)

〔その他〕

ホームページ等

<http://ikezoelab.sakura.ne.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：大澤 正久

ローマ字氏名：(OSAWA, Masahisa)

所属研究機関名：日本工業大学

部局名：基幹工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：80280717

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。