

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760160  
 研究課題名 (和文) 光による磁気制御を利用した磁気浮上高精度ナノ粒子形状選別システムの開発  
 研究課題名 (英文) Development of selection system for levitated nano-particle using photo-thermal effect  
 研究代表者  
 水谷 康弘 (MIZUTANI YASUHIRO)  
 徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・講師  
 研究者番号：40374152

研究成果の概要 (和文)：ナノ粒子の形状を非接触選別するために、光熱変換効果により磁場を制御することで粒子の光操作を可能にする磁気浮上システムを構築した。本システムでは、一般的な粒子が反磁性体であることに着目したパッシブ磁気浮上システムを基本原理としている。また、磁気浮上した物体を操作するために、熱に敏感な感温磁性体を用いて光照射による温度制御を利用して磁場の制御を行った。磁束密度の計算から永久磁石の配列を検討し、実際に装置を構築することで反磁性物質の位置制御が可能であることを確認した。

研究成果の概要 (英文)：

This application is described light-driven method for diamagnetic material in numerical analysis and experiments. The proposed system consists of permanent magnets, temperature-sensitive ferrite and light source. Since diamagnetic material can levitate passively, it was driven efficiently without contact. Magnetic susceptibility of temperature-sensitive ferrite depends on its temperature controlled by photo-thermal effect. Magnetic flux distribution changes by heating temperature-sensitive ferrite. Therefore diamagnetic material can be control without contact. Noncontact light-driving possibility of diamagnetic material is derived from numerical analysis in one and three dimension. As a result, diamagnetic material is successfully controlled by using soldering iron instead of light.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,200,000	4,420,000

研究分野：光応用計測，光応用工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学

キーワード：反磁性物質，磁気浮上，光熱変換効果，光駆動

1. 研究開始当初の背景

ナノ粒子形状選別法はナノ粒子を用いた

高精度なデバイスを作製する上で必用不可欠な技術である。しかし、ナノオーダーの物質を大気中で直接選別することが困難であるために新規デバイスを安定した品質で供給することが困難となっている。ナノオーダーの物質の形状選別法が開発されれば、ナノオーダーの物質を用いた新しいデバイスが高品質化されるだけでなく、量産化が可能となるためにナノテクノロジーによる生活の向上に大きく寄与すると考えられる。

一般的に、金、銀や炭素などの産業応用されるナノ粒子は磁場に反発する反磁性という性質を有する。磁場に反発する特性を利用して永久磁石のみで構成可能な簡易な浮上システムを構築することができる。さらに、レーザを用いた光熱変換効果により磁場を変化させることで反磁性物質の選別が可能となる。

## 2. 研究の目的

ナノ粒子形状選別を行うため反磁性特性を利用した静電浮上システムを作製し、さらに、光学的にナノ粒子を遠隔操作するシステムを開発することである。本申請課題では、反磁性物質を浮上および駆動するために、静磁場解析を行った。また、光による遠隔操作を可能とするために感温磁性体を用いて磁場を変化させる光駆動システムを提案する。

## 3. 研究の方法

本研究では、三次元静磁場解析により反磁性物質の磁気浮上に最適な条件を数値計算により検討する。また、反磁性物質が浮上した状態の確認および観察しながら反磁性物質を操作可能にするシステムを検討する。静磁場解析では、永久磁石のみで構成された磁気浮上プレートの磁極配置や磁極の大きさを検討する。また、磁場の変化に対する磁気浮上物質の位置変化について、基礎理論式を導出し解析的に原理検討するとともに数値解析により詳細を検討する。

浮上操作の顕微鏡では、観察照明光用、光照射用および観察用の三軸構成できる同軸落射タイプの顕微鏡を自製した。また、浮上した状態を観察できるように単眼式の顕微鏡も設置する。

浮上状態を解析するために、光照射中の温度やCCDカメラによる画像を取得できるシステムも合わせて構築する。

以上の解析方法および装置を用いて、まず、基本原理を構築する。次に、磁石を駆動体とみなし浮上させることで磁気浮上原理および光による非接触駆動を試みる。その後、三次元解析による磁場分布の解析から磁気浮上プレートを検討する。最後に、反磁性物質を磁気浮上させ磁気浮上システムの特長評価を行う。

## 4. 研究成果

図1に、パッシブに磁気浮上した物体の位置が変化する原理をポテンシャルエネルギーを用いて示す。パッシブ磁気浮上した物体のポテンシャルエネルギーは、図1中のAに示すように下に凸の形になる。物体はポテンシャルエネルギーが低い位置で安定となるため、図1中の1の位置で安定に存在する。ここで何らかの手法によりポテンシャルエネルギーをAの状態からBの状態に変化させることで、物体のポテンシャルエネルギーは2になり、その後、安定な状態を得るために3の位置に変化する。すなわち、物体は図1中に示す移動量を得ることができる。このAからBへのポテンシャルエネルギーの変化を光により生じさせるのである。

申請者は、感温磁性体と光を用いることで光熱変換方式の磁場制御に着目した。磁性体の磁化率はキュリー温度で急激に変化する。一般的な磁性体ではキュリー温度が数百度

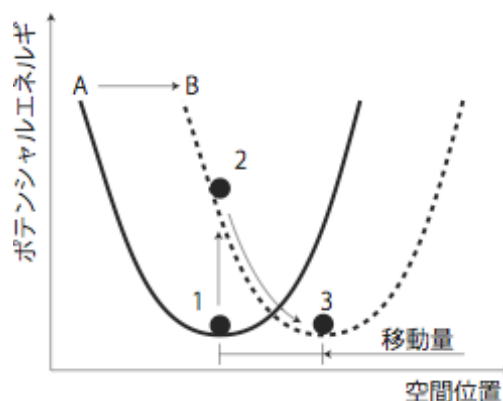


図1 磁気浮上物体の浮上原理および駆動原理

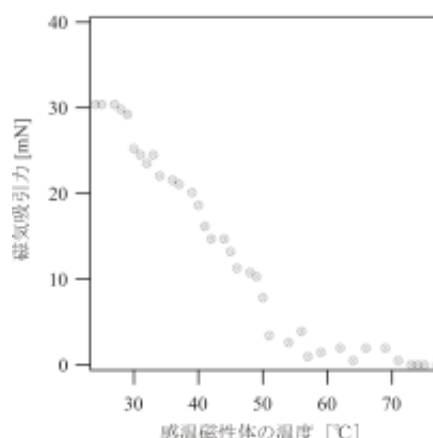


図2 本申請課題で用いた磁場制御用感温磁性体の磁気吸引力の温度依存性。

図 3 磁気浮上した永久磁石の光駆動原理.

以上の高温になる必要があるが、感温磁性体のキュリー温度は室温から 100 度程度である。そこで、光エネルギーを熱エネルギーに変換する光熱変換効果により感温磁性体の温度を光制御することで磁場の制御が可能となる。図 2 に、本申請課題で用いた MnZnCu 系の感温磁性体の光熱変換効果による磁気吸引力の変化を示す。光源に波長 810nm の半導体レーザーを用いて磁気吸引力を測定した。図 2 に示すとおり、感温磁性体の温度が 30 度以上になると磁気吸引力は徐々に低下し 55 度以上になるとほぼ 0 となった。このことから、感温磁性体と光熱変換効果を組み合わせることで磁界を制御できるといえる。

永久磁石を駆動体として位置の光制御を行った。感温磁性体および反磁性物質を用いた磁気浮上光駆動システムの駆動原理を図 3 示す。図 3 (a) に初期状態を示す。駆動体である永久磁石は重力が作用することで下向きの力のみ作用する。そこで、重力を打ち消すための上方の力を作用させるために永久磁石を駆動体の上方に配置する。この永久磁

図 4 磁気浮上した永久磁石のポテンシャルエネルギー分布.

図 5 磁気浮上した永久磁石の非接触駆動.

石には、駆動体磁石に作用させる磁場を変化させるために感温磁性体を配置する。感温磁性体は、駆動体を三次元的に制御するために互いに温度干渉のないように独立して配置する。また、駆動体磁石が安定に浮上するために一組の反磁性物質の間に駆動体磁石を配置する。このとき、駆動体永久磁石は、二つの反磁性物質と、一つの引き上げ用磁石との力が釣り合う位置に安定して浮上する。駆動体を垂直方向に駆動させるときを図 3 (b) に示す。駆動体の直上に配置した感温磁性体は、レーザーで照射することにより磁化率が低下する。その結果、駆動体磁石に作用する磁場強度が垂直方向に変化するために垂直駆動が可能となる。また、水平方向に駆動する方法を図 3 (c) に示す。所望の駆動方向に対して反対の方向に配置した感温磁性体をレーザーで照射することにより、駆動体の水平方向の磁場の強度に変化を与える。その結果、駆動体磁石に作用する磁場は水平方向で勾配ができるために、水平方向の磁力のバランスが崩れるために水平方向の駆動が可能となる。以上の動作は、感温磁性体に対するレーザーの照射を停止すると感温磁性体の磁化率は元に戻るために繰り返し制御が可能である。

図 4 に、感温磁性体の磁化率を変えたときの浮上磁石のポテンシャルエネルギーを数値計算より求めた結果を示す。ここでのエネルギーは、各磁化率における最低エネルギーを基準として示した。図 4 から明らかなように、ポテンシャルエネルギーの谷間が形成されていることが分かる。このことより、浮上磁石の

図 6 磁気浮上した永久磁石の位置の時間変化. (a) 垂直方向, (b) 水平方向.

安定な位置が感温磁性体の磁化率によることなく存在することが分かる. また, 各磁化率における最低エネルギーの位置は, 感温磁性体の磁化率が変化するに連れ, 垂直方向に変化していることが分かる. このことより, 浮上磁石の垂直位置を感温磁性体の磁化率を変化させることで制御できることがわかる.

光熱変換効果により感温磁性体の磁化率を変化させることで駆動体磁石の位置を制御した状態を図 5 に示す. 図 5(a) は初期状態, (b) は光照射 60 秒後の様子である. 図 5(a) に示すとおり, 初期状態では安定した浮上が得られており, 駆動体直上に配置された感温磁性体にレーザを照射することで磁化率を低下させる. その結果, 垂直方向の磁場強度が弱くなるため, 図 5(b) に示すとおり, 駆動体磁石は垂直方向に位置を変化させることができる. このときの, 駆動体磁石の時間的な z 方向の位置を CCD カメラを用いて画像計測した.

駆動体磁石の位置の時間的な変化を図 6 示す. 図 6(a) が垂直方向の位置の時間変化, (b) が水平方向の位置の時間変化である. 感温磁性体に照射するレーザの照射光強度を, 50 から 300 mW まで, 50 mW ずつ変化させて照射した. 照射開始した時間を 0 秒とし, 80 秒間の駆動体磁石の位置を計測した. いずれの照射強度の場合においても, 感温磁性体にレーザを照射した直後から駆動体が移動を始める. その後, レーザの照射を停止すると, 駆動体は再び元の位置に戻る. また, レーザを照射したときの駆動体磁石の位置は, レーザの照射強度に依存して変化する. これは, 感温磁性体にレーザを照射し光熱変換効果により磁化率が変化するが, 熱飽和したときの温度の変

図 7 反磁性物質の磁気浮上および非接触操作原理. (a) 初期状態, (b) 光照射, (c) 反磁性物質の移動.

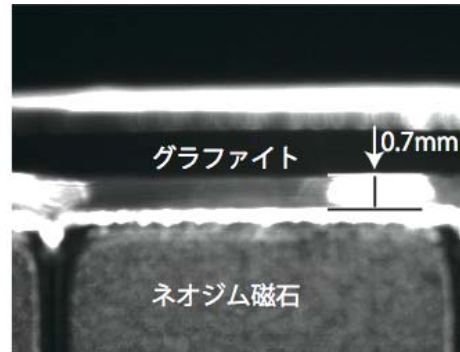


図 8 反磁性物質の磁気浮上の様子.

化に依存する. 以上より, レーザを照射したときの駆動体の位置は, レーザの照射強度に依存することが分かる, また, 位置の制御にはレーザの出力を調整すれば良いことが分かる.

パッシブ磁気浮上では, 浮上する物体が反磁性体でも磁気浮上が可能である. 反磁性物質は, 生体組織など多くの物質が有する一般的な磁気特性であることから, 反磁性物質の位置を制御できる方が汎用性が高い. そのような背景から反磁性物質の磁気浮上位置制御を行った.

図 7 に, 反磁性物質の磁気浮上搬送原理を搬送方向に対して上面から見た図を示す. 図 7(a) に示す初期状態では, 感温磁性体をデジタル的に配置している. このとき, 反磁性物質は, 駆動方向に対してポテンシャルエネルギーの壁が存在するため静止している. 次に, 図 7(b) に示すように, 駆動方向に配置された感温磁性体に光を照射する. 光を照射された感温磁性体は, キュリー温度まで温度が上昇すると磁化率が減少するためポテンシャル

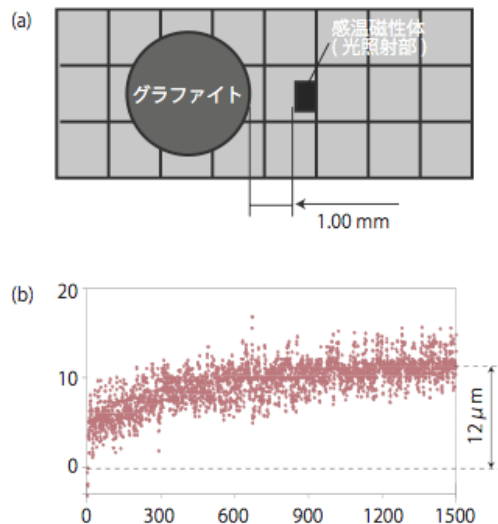


図 9 反磁性物質の非接触光駆動の様子. (a) 実験配置, (b) 反磁性物質の光駆動プロファイル.

エネルギーが減少する。その結果、図 7(c)に示すように、反磁性物質の駆動が完了する。以上の操作を繰り返すことで反磁性物質の連続的な駆動が可能になる。

図 8 に、ネオジム磁石を用いてグラファイトをパッシブ磁気浮上させた反磁性物質の写真を示す。図 8 に示す通り、磁気浮上プレートは 5mm 角のネオジム磁石を組み合わせた構成とした。ここで  $\phi 10\text{mm}$  のグラファイトを乗せると安定した磁気浮上がえられた。この状態を顕微鏡で観察した像が図 8 であり、このときの浮上量は 0.7mm であった。

図 9 に、パッシブ磁気浮上させたグラファイトの光照射による駆動例を示す。図 9(a) に示すように、1mm 角の感温磁性体をパッシブ磁気浮上したグラファイトから 1mm の位置に配置した。この感温磁性体に、出力 200mW、波長 650nm の半導体レーザーを照射しグラファイトの非接触駆動を試みた。グラファイトの位置の時間変化を顕微鏡で観察した結果を図 9(b) に示す。光照射開始から 1500 秒後に  $12\mu\text{m}$  の移動量を確認した。ここでは、原理的な確認のみにとどまっているが水平方向に駆動可能であることを示せた。

パッシブ磁気浮上は、浮上のための制御を必要としないことから装置構成が簡略化できた。パッシブ磁気浮上で物体を駆動するためには、物体のポテンシャルエネルギーを変化させる必要があり、そのために、感温磁性体の磁化率の変化を用いた。感温磁性体の磁化率の変化は、光を照射することによる光熱変換効果で生じさせる。反磁性物質や永久磁石の非接触光駆動が原理的に可能であることを示した。磁気浮上した物体は、摩擦によるエネルギーロスがないためエネルギー効率の良い駆動が期待できる。特に、細胞などの小さな物質は摩擦力の効果が大きくなるため特に有用であると考えられる。さらに、反磁性物質でできていることから、微細加工技術と組み合わせ小型デバイスを作り込むことで新しい細胞駆動システムへの応用展開を見込むことができる。

## 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)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 水谷康弘, パッシブ磁気浮上した反磁性物質の三次元光駆動法, 0 plus E, 査読無, 5 巻, 2010, 539-543.
- ② Yasuhiro Mizutani, Mizue Ebisawa, Yukitoshi Otani and Norihiro Umeda, Optically 3D Controlled Magnetic Levitation Using Temperature Sensitive Ferrite, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有,

Vol. 47, No. 5, 3461-3465, 2008.

[学会発表] (計 2 件)

- ① 堤章洋, 水谷康弘, 岩田哲郎, 大谷幸利, パッシブ磁気浮上を用いた反磁性物質の非接触光駆動法, 2010 精密工学会春季学術講演会, 2010 年 3 月 16 日, 埼玉.
- ② 水谷康弘, 堤章洋, 岩田哲郎, 大谷幸利, マイクロパッシブ磁気浮上による微小物体位置の光制御, 第 14 回知能メカトロニクスワークショップ, 2009 年 9 月 26 日, 和歌山.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 反磁性物質の磁気駆動装置、方法およびシステム

発明者: 水谷康弘

権利者: 東京農工大学

種類: 特許

番号: 特願 2008-231521

出願年月日: 2008 年 9 月 9 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

水谷 康弘 (MIZUTANI YASUHIRO)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス

研究部・講師

研究者番号: 40374152