

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：32601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26620073

研究課題名(和文)磁気浮上反磁性体の光運動制御

研究課題名(英文)Optical motion control of maglev diamagnetic materials

研究代表者

阿部 二郎 (Abe, Jiro)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：70211703

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)：円筒ネオジム磁石上に浮上したグラファイト円板のエッジに光を照射すると、回転運動を誘起することができる。本研究では、光強度と回転数の相関を調べることで、光エネルギーの回転エネルギーへの変換効率を求めた。光照射下におけるグラファイト円板の回転速度から、回転運動エネルギーを算出し、照射光強度との相関を解析した結果、最大で2.8μ%の変換効率を得られた。また、光回転運動の効率向上を目的として、光照射部位、および磁場の空間分布や方向について詳細な検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Graphite has been known as a typical diamagnetic material and can be levitated in the strong magnetic field. We found that the magnetically levitating pyrolytic graphite can be moved in the arbitrary place by simple photoirradiation. It is notable that the optical motion control system requires only NdFeB permanent magnets and light source. The optical movement is driven by photothermally induced changes in the magnetic susceptibility of the graphite. We found that light energy can be converted into rotational kinetic energy by means of the photothermal property. We analyzed the energy conversion efficiency and optimized the condition for increasing the rotational speed.

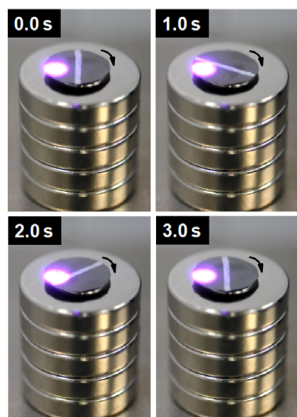
研究分野：物理化学

キーワード：光化学 磁性

1. 研究開始当初の背景

水やプラスチックなどの身の回りの多くの物質は磁石に対して反発する反磁性を持つことが知られているが、多くの物質の反磁性は非常に弱く、磁石の上に浮上する磁気浮上を観測するためには、磁束密度が 10 テスラを超える超電導磁石のような非常に強い磁石が必要となる。一方、グラファイトや金属ビスマスといった特異的に強い反磁性を有する物質では、一般に市販されている 0.3 テスラ程度の磁束密度を有するネオジム磁石を用いても磁気浮上が可能となる。浮上した反磁性体は擬似的に微小重力状態にあり、他の物体との接触面を持たないため、僅かな力で効率よく運動させることができることから、アクチュエータや搬送システムなどへの応用が期待されている。しかし、これまで温度や光、あるいは音といった外部刺激を用いて非接触で磁気浮上体を任意に動かす技術は皆無に等しかった。

研究代表者はグラファイトの優れた光熱変換特性に着目し、光照射による温度上昇に伴う磁化率の変化を利用することで、磁気浮上したグラファイトの浮上距離を非接触で光制御することが可能であることを見出した。そして、この光熱変換特性を利用した磁化率変化による浮上距離制御を応用することで、世界で初となる磁気浮上体の光運動制御技術の開発に成功した。さらに、この技術を応用することで光エネルギーを回転運動に変換できることも明らかにしており、新概念の光アクチュエータや太陽光発電装置の創出が期待される。



2. 研究の目的

本研究では、磁気浮上したグラファイトの光運動機構の解明とグラファイト浮上物質の改良による光エネルギー変換効率の改善、及び光アクチュエータや発電装置の開発を目的として研究を進める。具体的には、(i) 光エネルギー変換効率の測定、(ii) 回転運動の最適化、(iii) 反磁性から常磁性に可逆的に高速で変化するフォトクロミック材料を利用した高度な光運動システムの開発、の3項目について検討し、磁気浮上体の光運動における光エネルギー変換効率を劇的に向上させるために必要な諸因子の解明を試みるとともに、実用レベルのエネルギーを取り出すことのできる発電装置の開発、および高度な光アクチュエータシステムの開発を推進することを目的とする。

3. 研究の方法

光照射時に生じる照射部位とその周囲に作り出される温度勾配が磁気浮上したグラファイト板の推進力を作り出す要となることで支持される結果が得られているが、具体的な温度勾配と生み出される運動量との関係性などについては依然不明な点が多くある。円筒状のネオジム磁石上で磁気浮上したグラファイト円板の浮上位置や傾きなどを変えながら、グラファイト円板の回転速度の評価を行い、光運動制御装置の最適化を図るとともに、光駆動原理の全容解明を目指す。

研究代表者がこれまで先進的に研究を行ってきたシクロファン架橋型イミダゾール二量体は、光励起によりラジカル対が生成し、反磁性から常磁性に可逆的にミリ秒からマイクロ秒オーダーで高速に変化する高速フォトクロミズムを示す。このような高速フォトクロミック分子を熱分解グラファイト表面に塗布すれば、光照射されたグラファイト表面部が一時的に常磁性になって反磁力と重力のバランスが崩れ、より大きな推進力を生み出すことが期待できる。

4. 研究成果

(1) エネルギー変換効率の測定

円筒磁石上に浮上したグラファイト円板のエッジに光を照射すると、回転運動を誘起することができる。そこで、光強度と回転数の相関を調べることで、光エネルギーの回転エネルギーへの変換効率を求めた (図1)。

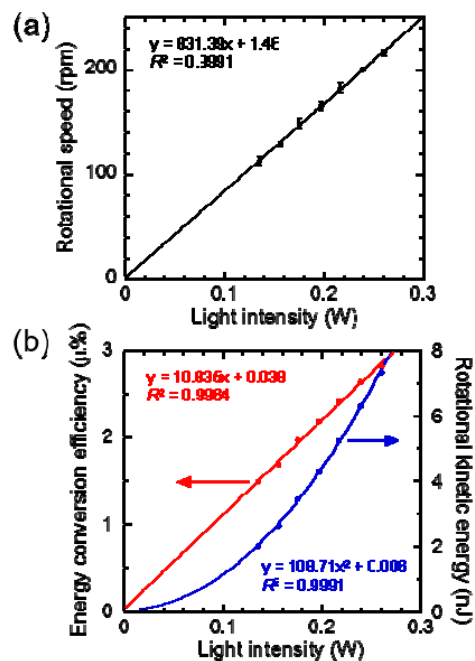


図1. 直径 10 mm のグラファイト円板を用いた場合における (a) レーザー光強度と回転速度の関係、及び (b) レーザー光強度と回転運動エネルギー、及びエネルギー変換効率との関係。

光のエネルギーが直接グラファイトの回転運動エネルギーに変換されたのであれば、以下の運動エネルギーを導く式

$$E = 1/2I\omega^2 \quad \dots\textcircled{1}$$

I : 慣性モーメント [kgm²]
 ω : 角速度 [rad/s]

から光強度に対して回転速度の2乗に比例する挙動が見られると予想される。しかし、レーザー光の強度を0.135~0.260 Wにかけて段階的に上昇させると、それに伴い回転速度が直線的に増加する様子が見られ、最大で216 rpmの回転速度が得られた。光の強度と回転速度が比例関係をとる詳細な原因については現在のところ不明であるが、光熱変換及び熱エネルギーを運動エネルギーに変換する際の効率に起因するものと考えられる。

測定によって得られた各光強度における回転速度から回転運動エネルギーを算出し、レーザー光強度に対してプロットをとった。回転運動エネルギーは①式に対して、円板の慣性モーメントの計算式②を代入することで求めた。

$$I = 1/2mr^2 \quad \dots\textcircled{2}$$

m : グラファイト円板の重量 [kg]
 r : グラファイト円板の半径 [m]

$$E = 1/2I\omega^2 = 1/4mr^2\omega^2 \quad [\text{kgm}^2\text{rad}^2/\text{s}^2] \quad \dots\textcircled{3}$$

光強度と回転速度が比例関係にあることから分かるように(図1a)、回転運動エネルギーは光強度に対して二次の式で良くフィッティングされた(図1b)。続いて、得られた回転運動エネルギーの値に対してレーザー光のエネルギーで除することで、光エネルギーから回転運動エネルギーを取り出す際のエネルギー変換効率を求めた。各レーザー光強度に対するエネルギー変換効率のプロットを図1bに示す。光強度とエネルギー変換効率が比例関係にあることが明らかとなり、最大で2.8μ%の変換効率を得られた。この結果は、レーザー光の強度を上げるほどエネルギー変換効率が上昇することを示すものであるが、ある強度まで光強度を上げるとグラファイトの光吸収が飽和し、変換効率の上昇が頭打ちになると予想される。

(2) 回転運動の最適化

グラファイト円板の運動は、光照射に伴う温度上昇によりグラファイトの反磁力と重力との釣り合いが崩れるために生じることから、運動効率は光照射部位や磁場の空間分布や方向などに依存することが考えられる。グラファイト円板の回転運動を最適化することを目的として、円筒状のネオジウム磁石上に磁気浮上したグラファイト円板(厚さ25 μm、直径10 mm)に波長405 nmのレーザー

光を照射した際における、円筒状ネオジウム磁石の各移動距離、及び傾斜角度に対するグラファイト円板の回転数を評価した(図2)。グラファイト円板の回転速度は、二枚の反射板シール(3×3 mm)をグラファイトの表面に張り付け、タコメータを用いて測定した。また、グラファイト円板はステンレスの針を中心に通すことでその浮上位置を固定した。

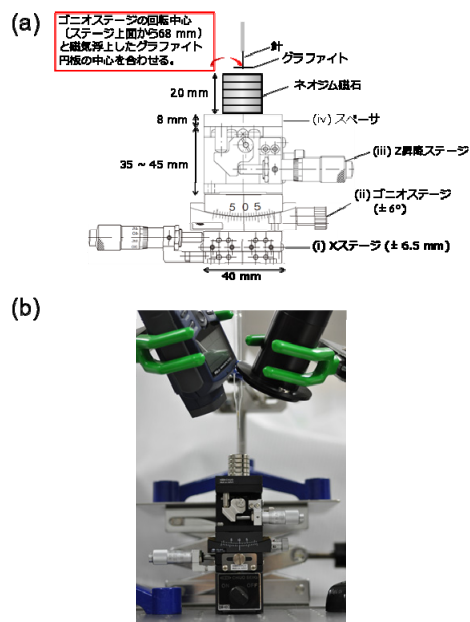


図2. (a)測定装置概略図、(b)測定装置写真。

円筒状ネオジウム磁石の移動方向軸上のグラファイト円板端部に光を照射した際の回転速度を測定すると(図3a)、磁石を原点から光照射方向に移動させることで回転数が徐々に増加し、最大回転数が154 rpmと観測された(図3b)。一方、光照射方向と逆の方向にネオジウム磁石を移動させた場合には、移動距離の増加に伴い回転数の減少のみが観測された。このような挙動は、ネオジウム磁石の移動に伴うグラファイト円板が受ける反発力の変化に起因するものと考えられる。各ネオジウム磁石移動距離における傾斜角度依存性についても評価したところ、光照射方向に傾斜角度を増加させた場合の方が回転数の増加の度合いが高く、移動距離0.6 mm、傾斜角度4°において最大の回転数(180 rpm)が得られた。

同様に、光照射位置をネオジウム磁石の移動方向に対して垂直方向(y軸)のグラファイト円板端部に移して回転速度の測定を行った(図4a)。先の測定とは異なり、ネオジウム磁石の移動距離が-0.2 mmを境に正負いずれの方向に距離を増加させた場合においても、グラファイト円板の回転数の増加が観測された(図4b)。このような挙動は、各傾斜角度においても同様に観測され、移動距離-1 mm、傾斜角度-3°において最大の回転数

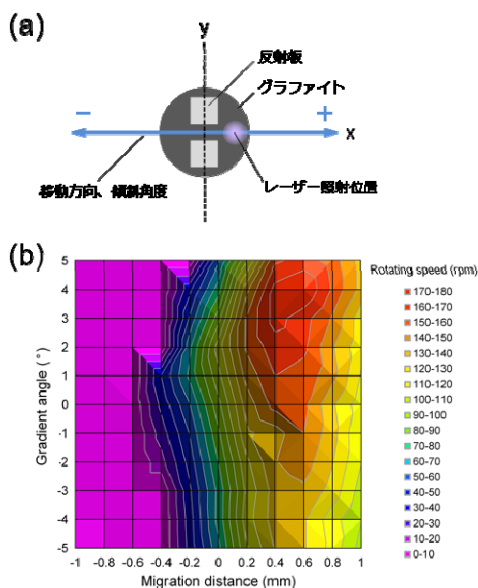


図3. (a) グラファイト円板に対するレーザー照射位置、(b) グラファイト円板の回転速度に関するネオジム磁石の移動距離、及び傾斜角度依存性。

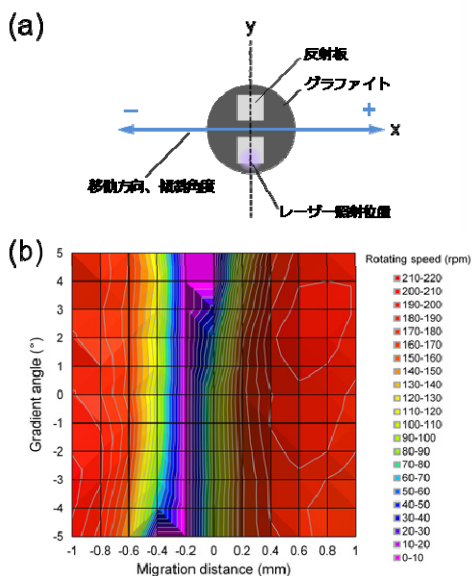


図4. グラファイト円板に対するレーザー照射位置 (a) とグラファイト円板の回転速度に関するネオジム磁石の移動距離、及び傾斜角度依存性 (b)。

(214 rpm) が得られた。以上の実験から、光照射部位や磁場の方向などを最適化することにより、グラファイト円板の回転速度の増加に成功した。

研究開始時には、光アクチュエータや光エネルギー変換システムへの応用を目指していたが、グラファイト円板の大面积化が難しく、当初期待していた大きな起電力を得るには至らなかった。現在までは、グラファイトが持つ光熱変換特性を利用して、光照射によ

る熱励起電子の生成による磁化率変化だけを利用してきたが、今後は光に対して高速かつ高感度に応答する光応答型磁気浮上センサーを構築するために、反磁性安定種に光照射すると常磁性過渡種を可逆的に生成するラジカル解離型高速フォトクロミック分子も併せて利用する。この2年間にマイクロ秒からミリ秒の応答時間を持つラジカル解離型高速フォトクロミック分子の開発に成功しており、グラファイト表面に分子集積体を薄膜化することで、高速光応答型磁気浮上センサーの構築を目指す。

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 4 件)

1. Hiroaki Yamashita, Takahiro Ikezawa, Yoichi Kobayashi, and Jiro Abe, "Photochromic Phenoxy-Imidazolyl Radical Complexes with Decoloration Rates from Tens of Nanoseconds to Seconds", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 137, No. 15, pp. 4952-4955, **2015** (DOI: 10.1021/jacs.5b02353)
2. Tetsuo Yamaguchi, Yoichi Kobayashi and Jiro Abe, "Fast Negative Photochromism of 1,1'-Binaphthyl-Bridged Phenoxy-Imidazolyl Radical Complex", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 138, No. 3, pp. 906-913, **2016** (DOI: 10.1021/jacs.5b10924)
3. Yoichi Kobayashi, Tetsuro Katayama, Takuya Yamane, Kenji Setoura, Syoji Ito, Hiroshi Miyasaka and Jiro Abe, "Stepwise Two-Photon Induced Fast Photoswitching via Electron Transfer in Higher Excited States of Photochromic Imidazole Dimer", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 138, No. 18, pp. 5930-5938, **2016** (DOI: 10.1021/jacs.6b01470)
4. Katsuya Mutoh, Yoichi Kobayashi, Yasukazu Hirao, Takashi Kubo and Jiro Abe, "Stealth Fast Photoswitching of Negative Photochromic Naphthalene-Bridged Phenoxy-Imidazolyl Radical Complexes", *Chem. Commun.*, Vol. 52, No. 41, pp. 6797-6800, **2016** (DOI: 10.1039/C6CC01534D)

[その他]

ホームページ等

http://www.chem.aoyama.ac.jp/Chem/ChemHP/p_hys3/top/abe.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 二郎 (ABE, Jiro)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：70211703