磁気浮上グラファイトの光駆動技術

青山学院大学
阿部　二朗

1. はじめに

負の磁化率を有する反磁性体は磁界に反発するため，磁石の上に浮上する磁気浮上を示す[1]．磁石の上に反磁性体を置くと，下向きに働く重力とは反対の上向きに磁気反発力が生じるが，多くの物質の反磁性[†1]は非常に弱く，重力が磁気反発力に勝るため磁気浮上は観測されない．一般に，反磁性体の磁気浮上を観測するためには，磁束密度が10 Tを超える超伝導磁石のような非常に強い磁石が必要になる[2)～5)]．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 T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[6) 7)]．浮上した反磁性体は擬似的に微小重力状態にあり，ほかの物体との接触面をもたないため，わずかな力で効率良く運動させることができる．そのため，磁気浮上は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[8]．本稿では，グラファイトの優れた光熱変換特性を利用することで，磁気浮上したグラファイトの浮上距離，および浮上位置を非接触で自在に制御できる新しい磁気駆動技術を紹介する[9]．

2. 結果および考察

反磁性体の磁気浮上を最初に報告したのは，1939年のブラウンベック（W. Braunbek）らによる論文である[1]．1990年頃から磁気浮上に関する興味深い研究成果が発表されるようになったが，その中でもガイム（A. K. Geim）らが報告した超伝導磁石を用いて，カエルやバッタなどの生物を生きたまま磁気浮上させたデモンストレーションは大きな注目を集めた．近年では強い磁力をもつネオジム磁石の普及で，磁気浮上は身近なものとなったが，磁気浮上体の浮上距離や位置を自在にコントロールする技術の開発には至っていない．

磁気浮上は式（1）に示すように，磁石上の物体に働く重力（mg）と磁気反発力（F_{mag}）のバランスで考えることができる．

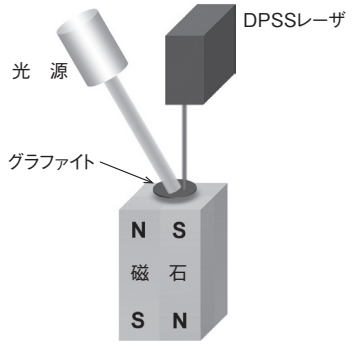
$$mg = F_{mag} = (\chi V/\mu_0)\, BdB/dz \qquad (1)$$

ここで，mは磁気浮上体の質量，gは重力加速度，μ_0は真空の透磁率，χとVはそれぞれ磁気浮上体の体積磁化率と体積を表す．またBは磁界強度，zは浮上距離である．式（1）は，磁気浮上体の密度ρを用いて，式（2）のように簡略化することができる．

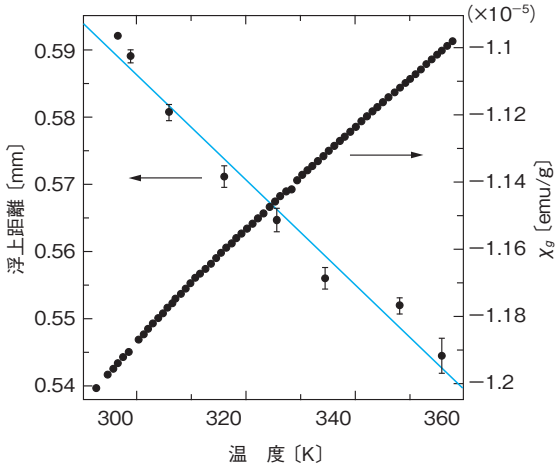
$$\rho g\mu_0/\chi = BdB/dz \qquad (2)$$

式（2）より，浮上距離は磁界強度や磁界勾配，あるいは磁気浮上体の密度や磁化率で決まることがわかる．すなわち，これらの値を制御することで浮上距離の制御が可能になることを示している．

Panasonicが開発した「PGSグラファイトシート」(EYGS121803)は，高分子フィルムを熱分解によりグラファイト化する方



（a）



（b）

図1　(a) 光熱変換を利用した磁気浮上距離の光制御の実験装置．ネオジム磁石（サイズ：3 × 3 × 10 mm，磁束密度：500 mT）4個を隣接する磁極方向が逆になるように配置．PG円板：厚さ25 μm，直径3 mm，質量0.40 mg．光源：DPSSレーザ（出力：300 mW，波長：405 nm）．
(b) 浮上距離と磁化率の温度依存性．

†1　反磁性：反磁性は磁性原子をもたない物質の磁気現象である．原子・イオンまたは分子の周りで軌道運動している電子に外部磁界を印加すると，レンツの法則に従う誘導電流によって外部磁界を妨げるような磁界が発生する．このため外部磁界の方向とは逆向きの磁化を生ずる．

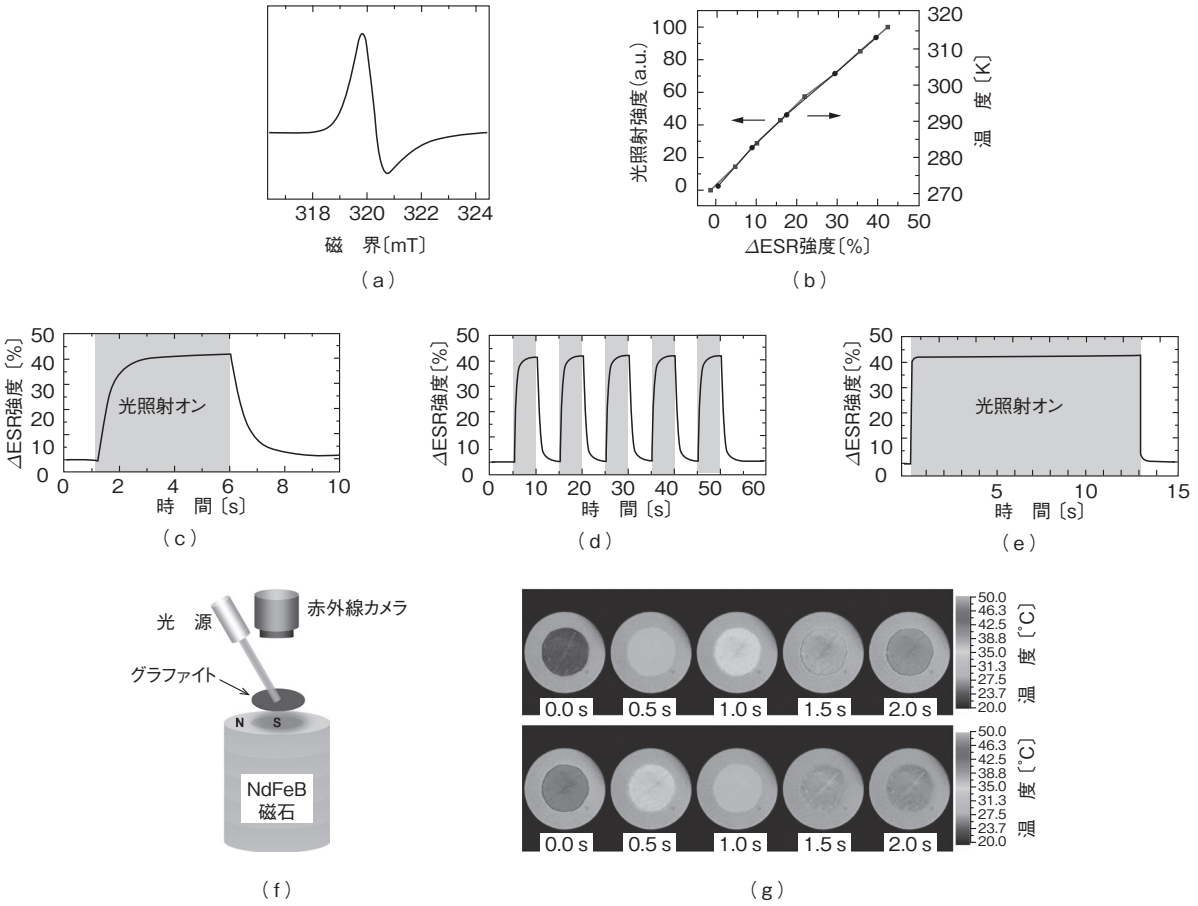


図 2　PG の光熱変換特性および光応答特性.
(a) PG の室温における ESR スペクトル. 磁界方向と PG の c 軸方向の角度を 65 度で測定. (b) PG の ESR 強度の温度および光照射強度依存性. (c) ～ (e) 273 K における ESR 強度の光応答性. (f) 光熱変換特性測定の実験装置. 内側の円柱状ネオジム磁石：ϕ8 × 4 mm; 400 mT, 外側の円筒状ネオジム磁石：ϕ 19 × ϕ' 8.1 × 4 mm; 348 mT. PG 円板：厚さ 25 μm, 直径 10 mm, 質量 3.92 mg. 光源：DPSS レーザ（出力：300 mW, 波長：405 nm）. (g) 光照射後 2 秒間のサーモグラム（上段）および光照射を停止後 2 秒間のサーモグラム（下段）.

法で製造し，単結晶に近い構造をもつ高い配向性をもつ熱分解グラファイト（PG）である．PG は高い熱伝導率を示すことから主にヒートシンクに使われているが，その磁化率は比較的大きな温度依存性を示す．我々は PG の優れた光熱変換特性に注目し，光照射による温度変化を利用した磁化率制御により PG の磁気浮上距離を光で制御可能であることを見いだした．図 1（a）に示すように，磁極を交互に並べた 4 個のネオジム磁石の上に磁気浮上した PG 円板に，レーザ光（波長 405 nm）を照射することで PG 円板の温度変化を誘起した．PG 円板の表面温度と浮上距離は，赤外線サーモグラフィーとレーザ変位計を用いてそれぞれ測定した．レーザ光強度（0 ～260 mW）を変えると PG 円板の表面温度が変化し，その結果として浮上距離が変化することがわかった．図 1（b）に示すように，PG 円板表面の温度が 293 K のときの浮上距離は 0.592 mm であり，温度の上昇に伴って線形的に浮上距離が減少する．この現象は，PG 円板の温度上昇に伴い磁化率の絶対値が減少して，磁気反発力が減少することに起因している．実際に，図 1（b）に示すように PG の磁化率の絶対値は，温度上昇に伴い線形的に減少する．この磁化率の絶対値の減少は，熱励起電子数の増加による常磁性成分の増大によるものと考えることができる [10]．

PG の光熱変換機構を詳細に検討するために，電子スピン共鳴（ESR）[†2] を測定した．PG の ESR スペクトルは電気伝導体に特徴的なダイソニアン（Dysonian）波形を示す（図 2（a））[10]．PG の ESR 強度は光照射や加熱により増大するが，それらの関係を図 2（b）にまとめてある．PG にレーザ光を照射すると ESR 強度は速やかに増大し約 2 秒で一定値に到達する．一方で，光照射を止めると約 2 秒で元の強度に戻る（図 2（c））．これは，光照射により PG の温度が上昇して，熱励起電子数が増大したことを示している．図 2（d），（e）に示すように，光照射のサイクルを繰り返しても安定な応答や，長時間の光照射（約 12.5 分）でも安定した ESR 強度を示す．さらに，円筒状磁石と円柱状磁石を図 2（f）のように配置した磁石上に磁気浮上した PG 円板の光

†2　**電子スピン共鳴**（Electron Spin Resonance）：電子スピン共鳴 ESR は，静磁界中に置かれた電子スピンに対し，ゼーマン分裂のエネルギーに相当する電磁波を照射し，共鳴吸収を観測する実験手法である．吸収強度・線幅・共鳴磁界などの物理量から，導電性・電子状態・機能性・構造に関する情報が得られる．

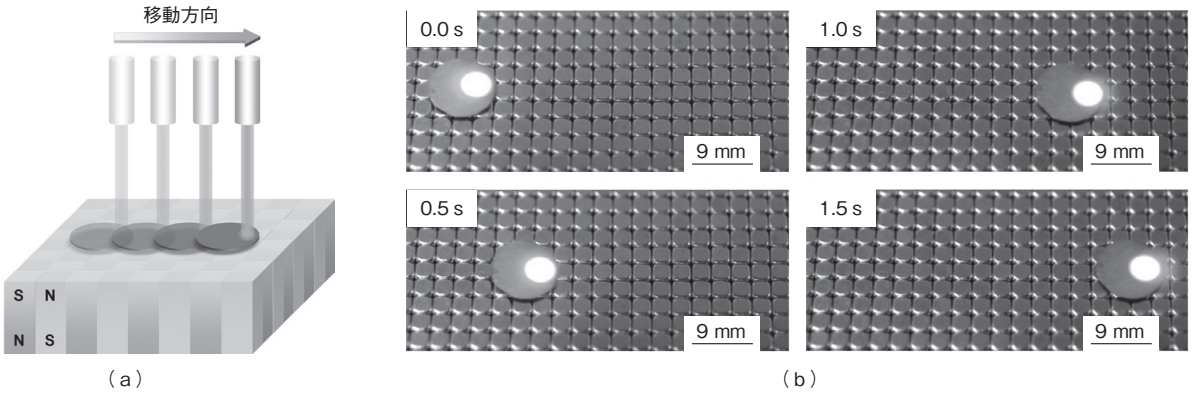


図 3　磁気浮上 PG の光駆動.
(a) 実験装置．ネオジム磁石（サイズ:3 × 3 × 10 mm, 磁束密度:500 mT）を隣接する磁極方向が逆になるように配置.
PG 円板：厚さ 25 μm，直径 10 mm，質量 3.92 mg．光源：DPSS レーザ（出力：300 mW，波長：405 nm）.

熱変換応答を赤外線サーモグラフィーで観測した．300 mW のレーザ光を PG 円板の中心に照射して，33 ミリ秒おきにサーモグラムを記録した結果を図 2（g）に示す．サーモグラムより，レーザ光を照射すると PG 円板の表面温度は約 2 秒で 20 ℃程度上昇し，光照射を止めると約 2 秒程度で室温に戻ることがわかる．この応答時間は ESR 強度の応答速度とよく一致していることから，光熱変換により熱励起電子数が増加していることが明らかになった．

さらに，我々は磁気浮上した PG 円板を光で自在に動かすことに成功した．図 3（a）に示すように複数の磁石の磁極を，市松模様になるように配置した磁石アレーの上に磁気浮上した PG 円板にレーザ光を照射すると，図 3（b）のようにレーザ光の動きに追随して PG 円板を自在に操ることができる．PG 円板の中心部にレーザ光を照射した場合は動かないが，PG 円板の端部に光照射することで PG 円板を動かすことができる．この場合，PG 円板の最大移動速度は 45 mm/s にも達することがわかった．この現象は次のように考えることができる．(i) PG 円板の端部に光照射すると，照射部分の温度が上昇して，表面温度に分布ができる．(ii) 光照射した部分の磁化率の絶対値が減少し，浮上距離が減少することで，PG 円板に傾きが生じる．(iii) PG 円板は傾いた方向に移動する．(iv) PG 円板が動くことで，光照射部位が端部から中心部に移動し，PG 円板の並進運動が停止する．以上の過程を繰り返すことで，PG 円板はレーザ光照射の方向に沿って移動を続ける．このような磁気浮上体の運動光制御はこれまでに報告がなく，我々が世界に先駆けて達成したものである．

最後に，磁気浮上体の回転運動の光制御について述べる．我々は，円筒状磁石と円柱状磁石を図 2（f）のように配置した磁石上に磁気浮上した PG 円板の端部にレーザ光を照射すると，回転運動が誘起されることを見いだした．回転速度は 20 min^{-1} に達する．図 4 に示す PG 円板の端部にレーザ光を照射した場合のサーモグラムから，円板表面に温度分布が生じており，この温度分布が回転運動を誘起していることが推測される．光照射直後の様子を注意深く観察すると，光照射直後には，図 3 に示した直線運動のときと同様に，PG 円板は光照射方向に移動していることがわかった．しかし，PG 円板は磁界ポテンシャルの壁にぶつかるために，その壁を越えて移動することができずに，左右どちらかの方向に逃げることで回転運動が始まるものと考えることができる．回転方向や回転速度は光照射する場所に依存するが，これは外側の円筒状磁石の内径と内側の円柱状磁石の外径がわずかに異なるために，磁界分布が理想的な円筒対称になっていないことに起因しているものと思われるが，その詳細については明らかにされていない．さらに，太陽光をレンズで集光して，PG 円板の端部に照射すると 200 min^{-1} という高速回転運動を実現することができた．

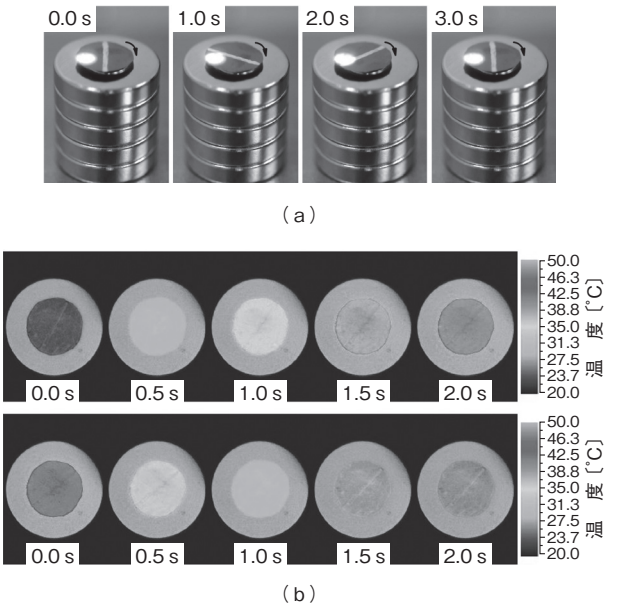


図 4　磁気浮上 PG の光回転運動.
実験装置概略は図 2（f）で記述したものと同じ.
(a) 磁気浮上 PG の端部に光照射することで誘起される時計方向の回転．(b) 光照射後 1.5 秒間のサーモグラム（上段）および光照射を停止後 1 秒間のサーモグラム（下段）.

3. まとめ

クィディッチは，ハリー・ポッターの映画に登場する魔法使いや魔女が空を飛ぶ魔法の箒に乗って行う架空の球技だが，一方のチームが，空中を素早く飛び回る金属製のボールであるスニッチを捕まえることでゲームが終了となる．我々は，光応答性材料を利用してスニッチの動きを実現したい，という思いから磁気浮上体の運動光制御の研究に着手した．優れた光熱変換特性と高い熱伝導特性を併せもつPGは，大きな負の磁化率を有することから安価で強い磁力をもつネオジム磁石上に容易に磁気浮上させることができる．我々は，PGに光照射を行うと，光熱変換により温度上昇が起こり，磁化率の絶対値が減少することでPGの磁気反発力が減少して，浮上距離が低くなることを初めて見いだした．原理は極めて簡単であるが，光照射部位の浮上距離が低くなることを応用することで，磁気浮上PGの並進運動のみならず回転運動を光でコントロールすることに成功した．このような光運動制御技術では磁気浮上体の駆動に用いる光の波長や光源の種類について特に制限がなく，キセノンランプや発光ダイオードなどの人工的な光源だけでなく，太陽光でもPGの運動を実現できることを実証した．さらに，この光運動制御技術は，超電導磁石といった大規模な装置を必要とせず，安価なネオジム磁石を用いて実現することができるため，装置作成のコストを抑えられ，また，必要に応じて装置の規模を任意に変更できる点で，極めて汎用性が高い磁気駆動装置であるといえる．今後は光による物質輸送や，光アクチュエータのみならず，従来の技術にはない全く新しいクリーンで低コスト太陽光発電システムへの応用が期待される．

参考文献

1） W. Braunbek: Z. Phys., **112**, p. 764（1939）
2） E. Baugnon and R.Tournier: Nature, **349**, p. 470（1991）
3） M. V. Berry and A. K. Geim: Eur. J. Phys., **18**, p. 307（1997）
4） A. K. Geim, M. D. Simon, M. I. Boamfa and L. O. Heflinger: Nature, **400**, p. 323（1999）
5） M. D. Simon and A. K. Geim: J. Appl. Phys., **87**, p. 6200（2000）
6） R. Pelrine: Am. Sci., **92**, p. 428（2004）
7） Q. Li, K. -S. Kim and A. Rydberg: Rev. Sci. Instrum., **77**, p. 065105（2006）
8） Y.Mizutani, A.Tsutsumi, T. Iwata and Y. Otani: J. Appl. Phys., **111**, p. 023909（2012）
9） M.Kobayashi and J.Abe: J. Am. Chem. Soc., **134**, p. 20593（2013）
10） G.Wagoner: Phys. Rev., **118**, p. 647（1960）

執筆者連絡先

阿部　二朗（Jiro Abe）
青山学院大学理工学部
〒252-0206　神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1