

# 黒鉛をそろえて固めた魔法の絨毯

—高感度センシングへ期待—

## 概要

ふわりと宙に浮くものといえば、魔法の絨毯や天空の城などの想像の産物が心に浮かぶかもしれません。実は鳥やドローンのように駆動力を使わずとも、本当にふわりと宙に浮くものがあります。たとえば鉛筆の芯に用いられているグラファイト（黒鉛）は、永久磁石上で容易に浮かせられます。外部駆動なしで、どこにも触れずに静かに宙に浮くグラファイト片は、微小な力を検出する高感度センサーへの応用が期待されています。センサーとして機能させるには、グラファイトを磁場中で運動させることになりますが、電気をよく通すグラファイト内に電流が流れて運動にブレーキがかかり、性能が落ちてしまいます。そこでグラファイトを微粒子にして表面に絶縁体を塗り、全体としては絶縁体にする手があります。しかし代償として、グラファイトが持つ「異方性」と呼ばれる性質による高い浮上力が損なわれる問題がありました。

京都大学大学院理学研究科 武田和行 准教授、上出友哉 同博士課程学生、田坪歩輝 同修士課程学生と沖縄科学技術大学院大学量子マシンユニット Jason Twamley（ジェイソン トゥワムリー）教授らの研究チームは、グラファイト粒子の表面に薄いガラス層を作って電氣的に絶縁して、かつ、粒子の向きをそろえてから板状に固めたハイブリッド磁気浮上センシング材料を開発しました。この成果は、次世代の高感度な計測技術への応用が期待されます。

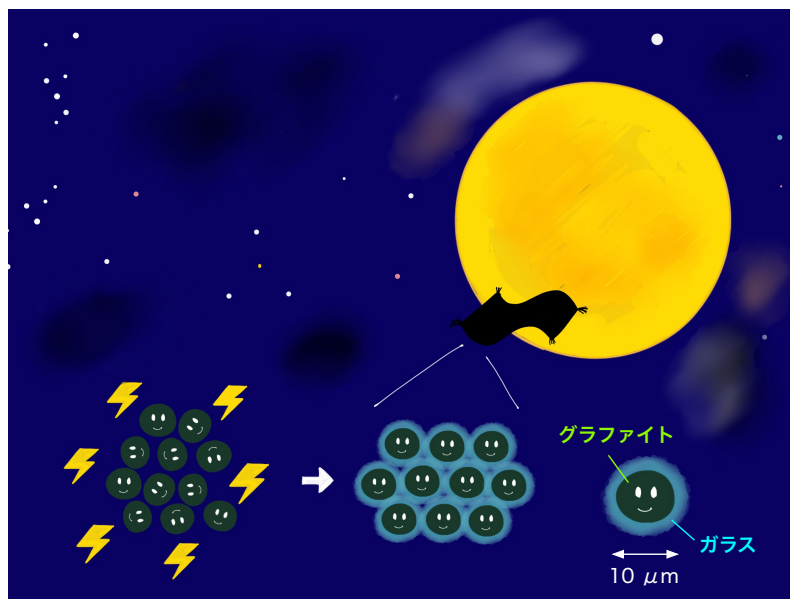


図1: 表面をガラス層で絶縁したグラファイト粒子の向きをそろえて固めた「魔法の絨毯」の浮上イメージ。©京都大学／武田和行准教授作成

## 1. 背景

水などの多くの物質には反磁性と呼ばれる、わずかに磁石に反発する性質が備わっています。その効果は非常に弱いので日常ではあまり気付きませんが、強力な磁石を使えば地球の引力と釣り合って空中に静止させることも可能です。このような現象は反磁性浮上<sup>\*1</sup>と呼ばれており、水滴だけでなく水を多く含む果物や生き物も空中にふわりと浮かせることができます。なかでも鉛筆の芯の主成分としても馴染みの深い、グラファイト（黒鉛）の反磁性は比較的大きく、容易に入手できる永久磁石を用いて浮上させることができます。反磁性浮上体は装置の底面や壁面への接触がないため抵抗や影響を受けず、浮上のための外部電源も不要なため、高感度なセンサーや微小な力を検出するデバイスへの応用が期待されています。

グラファイトの中でも高配向性グラファイト(HOPG)と呼ばれるものは、方向によって電気伝導性が異なる性質（異方性）を持つ結果、非常に高い反磁性浮上力を示します。しかし問題があります。HOPG などは高い電気伝導性のために渦電流<sup>\*2</sup>が発生し、エネルギーが熱として散逸してしまうのです。このため、浮上体の揺動はあっという間に止まってしまうので、センサーとしては使い物になりません。そこで表面を絶縁被覆したグラファイトの微粒子から作られた浮上体が考えられました。その場合、振動は長続きするため、センサーとしては有望です。しかし、内部の微粒子の向きは乱雑であり、グラファイトがもつ大きな反磁性を十分活用できないという、別の問題が生じていました。

## 2. 研究手法・成果

研究チームは、直径 10 ミクロンのグラファイト微粒子の表面に二酸化ケイ素（シリカ）のガラス層を化学的に合成しました。さらに、表面絶縁被覆したグラファイト微粒子を整列させて固化する独自の手法を開発しました。微粒子を水飴状の水溶液と混合して、得られたドロドロの液体を平らな器に注ぎ、超伝導電磁石が生成する強力な磁場でゆっくり回転させました。磁気的なエネルギーを考慮に入れ、ドロドロ液体中で、それぞれの微粒子が磁場に対してある狙った方向を向く状態がエネルギー的に有利になるように、回転軸と回転速度を調整しました。それと同時に、水分をゆっくりと飛ばして乾燥させると、カチカチの板が出来上がりました。X 線回折測定により、板の中で絶縁被覆グラファイト微粒子が一定方向に高い配向度で整列していることを確認しました。また、微粒子からできているにも関わらずグラファイト単結晶なみの大きな反磁性を有していることも分かりました。



図 2: 永久磁石の上で反磁性浮上する配向表面電気絶縁グラファイト材料

実際作成した反磁性浮上体は、従来の微粒子の配向が乱雑な浮上体よりも安定に、高い位置で浮上しました。さらに、高真空中で振動減衰測定を行った結果、エネルギー損失の小ささを表す品質係数<sup>\*3</sup>  $Q = 6.0 \times 10^4$  を

達成しました。減衰するまでに続く振動の回数の目安は  $Q$  値の 5 倍程度であることから、この結果は浮上体がいったん動くとその振動が 30 万回も持続することを示しています。これは、微弱な外乱を浮上体の振動の振幅として高感度で検出できることを示しています。なぜなら、振動がすぐに減衰する場合には、浮上体が揺さぶられてもすぐに元通りになるために、振幅を精度よく決められないからです。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究は、反磁性浮上体において従来は両立が困難であった、浮上力向上と低損失化を同時に実現しました。本手法によって作製された浮上体は、永久磁石のみを用いた非接触支持と高い  $Q$  値を両立できるため、高感度加速度計、磁場センサー、微小力検出器、さらには、量子センシングや力検出型核磁気共鳴などの、次世代計測技術への応用が期待されます。今後は、グラファイト粒子の被覆絶縁厚さの最適化により、渦電流損失の一層の低減を目指します。また、浮上体内部の微視的な渦電流分布や粒子配向の影響を詳細に解明することで、より高性能な反磁性浮上センサーの開発を進める予定です。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (MEXT Q-LEAP) (JPMXS0120330644) および JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2110) の支援を受けて行われました。

#### <用語解説>

- 1) **反磁性浮上**: 物質が外部磁場に対して反発する反磁性を利用して物体を浮上させる技術。グラファイトは比較的大きな反磁性を有するため、永久磁石のみで、室温で安定に浮上させることができる。
- 2) **渦電流**: 導体が磁場中で運動した際に内部に誘起される循環電流。ジュール熱としてエネルギーを散逸するため、機械共振子の振動減衰を引き起こす。
- 3) **品質係数 ( $Q$  値)**: 共振系に蓄えられたエネルギーがどれだけ失われにくいかを表す指標。 $Q$  値が高いほど帯域幅が狭くなる一方、振動は長時間持続し高感度な計測が可能となる。

#### <研究者のコメント>

グラファイトの薄片がたやすく浮上するのを観察するのは純粋に楽しいです。従来の浮上体は振動がすぐにおさまるのに対して、今回作成した磁気配向表面絶縁グラファイト複合材料で作った浮上体は、ちょっと小突くとその後、1 時間以上もゆらゆら振動し続けるのは驚きでした。浮上実験中にたまたま起こった地震によって測定がダメになったこともありましたが、逆に「ちゃんと地震の揺れを検出できた!」とポジティブに捉えています。(上出友哉)

#### <論文タイトルと著者>

タイトル: Diamagnetically Levitated Sensing Platforms Made With Surface-Insulated and Magnetically Aligned Graphite Particles (表面絶縁および磁気配向されたグラファイト粒子を用いた反磁性浮上センシングプラットフォーム)

著 者: Tomoya Kamide, Ayuto Tatsubo, Jason Twamley and Kazuyuki Takeda

掲 載 誌: Analysis & Sensing

DOI: [10.1002/anse.70099](https://doi.org/10.1002/anse.70099)