

光で操る「マイクロドローン」でナノ空間の微小な力を全方位計測

～6自由度制御により、光の「ねじれ」が生む未知のトルクを初観測～

ポイント

- ・ 光で操る“マイクロドローン”でナノ空間の力を 3D 計測—6 自由度の全方位センシング技術を確立。
- ・ 光の“ねじれ（キラリティー）”が物体を横向きに回す力を世界初観測。
- ・ 生体分子から量子力学的な力まで“見えなかった力”を測る全く新しい計測プラットフォームを確立。

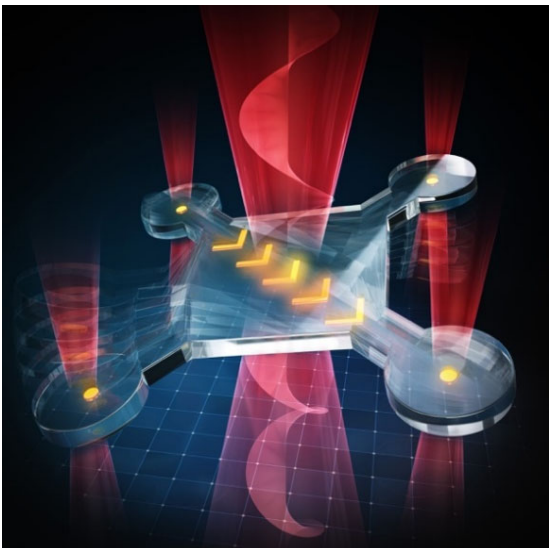
概要

北海道大学電子科学研究所の田中嘉人教授らの研究グループは、光で自在に操る「マイクロドローン」を用いて、これまで光の回折限界^{*1}という制約のために測定が困難だった、ナノ空間で働く微小な力とトルク（回転させる力）を 3 次元的に計測する全く新しい手法を開発しました。

光がナノ粒子に及ぼす力は、ナノ粒子操作技術やナノマシン技術に欠かせない重要な要素です。しかし光には「回折限界」と呼ばれる性質があるため、ナノ粒子の位置や向きを正確に制御・計測することが難しく、力の働き全体（力学応答）を捉えることが困難でした。本研究では、十字型のマイクロ構造体の中心に測定対象のナノ物質を埋め込んだ、独自の「センサー機体（光駆動マイクロドローン）」を開発しました。これを 4 本の集光レーザービームで 3 次元的に捕捉し、位置（前後・左右・上下）と姿勢（3 軸の回転）の合計六つの動き（6 自由度）を極めて高い精度で追跡する技術を確立しました。この手法を用いて、V 字形状をした異方性金属ナノ粒子に光を照射した際の応答を詳細に調べた結果、光の進行方向と垂直な軸まわりに回転が生じる「横方向光トルク」を初めて観測しました。この現象は、従来知られていた照射光の回転（角運動量）によるトルクとは異なり、照射光そのものが持つ「光のねじれ^{*2}（キラリティー）」によって引き起こされるものであり、光が物質に及ぼす力の新しい仕組みを示す重要な成果です。

本成果は、光ナノ粒子操作や光ナノマシンの精密な制御を可能にするだけでなく、生体分子の複雑な回転運動の解明や量子力学的な力の検証など、これまで「見えなかった力」を読み取る新しい計測プラットフォームとして、広範な科学分野への発展に寄与することが期待されます。

なお、本研究成果は、2026 年 4 月 20 日（月）公開の Nature Physics 誌にオンライン掲載されました。



光の回折限界により調べるのが困難であった V 字形のナノ構造に働く横向きの回転の力を、光駆動マイクロドローンの動きを手がかりにして観察をするイメージ図。

【背景】

光が物質に照射されるときに生じる微小な力（光圧や光トルク^{*3}（回転させる力））を利用して物体を操る技術は、ナノテクノロジーの根幹を支えています。近年、この技術をさらに発展させ、ナノ構造のサイズや形状を精密に設計することで、光が本来持つ進行方向や運動量に縛られず、光圧や光トルクの向きと大きさを自在にコントロールする「ナノ構造光圧アクチュエータ」が大きな注目を集めています。例えば、レーザービームにより高速推進させる次世代の宇宙探査船において、複雑な電子機器を使わずに、帆の表面に作製したナノ構造に働く光圧・光トルクによって位置や姿勢を自動修正したり、体内の患部へ薬を運ぶナノマシンに埋め込んだナノ構造に働く光圧・光トルクが自律的に進路を保ったりといった、革新的な応用の鍵を握っています。

しかし、ナノ構造が光を受けて生み出す微小な力を正確に測定・評価し、思い通りに設計するためには、物理学的な二つの大きな壁が存在していました。一つは「熱雑音（熱揺らぎ）」による信号の消失です。ナノ物体（ナノ構造含む）は周囲の分子から絶えず衝突を受け、ランダムに激しく動き回っており（熱運動）、計測対象となる微小な力やトルクはこの激しい揺らぎによって平均化され、検出したい信号が埋もれてしまいます。つまり、熱運動を「束縛」して姿勢を固定しない限り、ナノ構造が発する真の力学的信号を正確に測定することは困難です。もう一つは光の「回折限界」と呼ばれる性質による光計測の限界です。光の波長よりも小さなナノ構造の「向き」や「姿勢」の変化は、回折限界のために正確に識別できません。ナノ構造がどの軸を中心に、どの程度の力やトルクで回っているのかという「力学的応答の全体像」を捉えるための標準的な計測手法は、これまで存在しませんでした。

本研究は、これらナノ世界の壁を突破し、ナノ構造が生み出す微小な力を、より大きな構造の動きへと変換して読み出す、いわば「ナノの力を可視化する高感度なセンサー」として、世界初のナノ計測プラットフォームの開発に挑みました。

【研究手法】

研究グループは、ナノ構造が生み出す微小な力学応答を精密に評価するため、独自のナノ計測プラットフォーム「光駆動マイクロドローン」を開発しました。この手法は、背景で述べた二つの物理的な壁を、以下の三つの画期的なアプローチによって同時に解消するものです。

第一に、図 1a に示すように、ナノ構造を十字型のマイクロ構造体（機体）の中心に埋め込み、その機体を 4 本の集光レーザービームで 3 次元的に安定して捕捉しました。これにより、ナノ構造を激しい熱運動から物理的に「束縛」し、異方的な信号が熱雑音によって打ち消されることを防ぎました。第二に、図 2 に示すように、この大きな機体の動きを精密に追跡することで、回折限界によって識別不能だったナノ構造のわずかな位置や傾きの変化を、機体全体のダイナミックな動きへと「翻訳」しました。これにより、ナノ構造がどの軸を中心に、どの程度の力・トルクを受けているのかという、位置と姿勢の合計「六つの動き（6 自由度）」すべてを極めて高い精度で捉えることを可能にしました。第三に、計測のノイズを極限まで排除するための「透明化（ステルス）」です。機体自体が受ける不要な光圧やトルクを排除するため、機体の素材（シリカ）の屈折率を周囲の液体に一致させる「屈折率マッチング」を施しました。これにより、図 1b で示すように、機体は光に対して光学的に透明な状態となり、光圧・光トルク発生用の光は機体を素通りして、中心にあるナノ構造だけを照射することが可能となります。結果として、ドローン自体に邪魔されることなく、ナノ構造に働く「純粋な光圧・光トルク」だけを正確に抽出することに成功しました。これは、従来難しかったナノ世界の微小な力学応答に直接アクセスできる、全く新しいナノ計測プラットフォームの確立を意味します。

【研究成果】

本研究グループは、開発したナノ計測プラットフォームを用い、V字形の異方性金ナノ構造に光を照射した際の力学的応答を詳細に評価しました。その結果、光の進行方向（光軸）と同じ軸まわりに回転が生じるという従来の物理学の常識を覆し、光軸と垂直な面内に軸まわりで回転が引き起こされる「横方向光トルク」を世界で初めて観測することに成功しました。

この未知の現象の正体を突き止めるため、研究グループは図 3a で示す独自の実験系をデザインしました。右巻きと左巻きの円偏光を対向させて照射することで、入射光が持つ「角運動量（光自体の回転）」を互いに打ち消しつつ、光のねじれだけが残る特殊な環境を作り出したのです。この条件下での計測により、図 3b で示すように、角運動量がゼロであっても光のねじれの向きに応じてトルクが反転することを突き止め、この回転が「光のねじれ」そのものとナノ構造の相互作用に由来することを明確に示しました。

さらに、この発見は理論的な解析によっても強力に裏付けられました。理論モデルから導出された横方向光トルクの式：

$$N_y = \frac{l}{4\epsilon} \alpha'_s C$$

は、横方向トルクが「光のねじれ C 」と「ナノ構造の共鳴特性 α'_s 」の相乗効果で決まることを示しています（ l はナノ構造の大きさ、 ϵ は周辺誘電率）。実際に、光の波長を変えてナノ構造のプラズモン共鳴^{*4}状態を変化させると、図 3b で示すように、理論の予測通り、共鳴ピークを境にトルクの向きが明確に逆転する現象を捉え、実験と理論の両面からこの新現象のメカニズムを解明しました。

【今後への期待】

本研究で確立された「ナノ世界の力を可視化するプラットフォーム」は、ターゲットとなるナノ構造のサイズや形状、組成、さらには蛍光特性の有無に依存しない極めて汎用性の高い技術です。これにより、これまで計測が困難であった低蛍光・不透明な材料や、複雑なメタマテリアルに働く光圧・光トルクの評価が可能となり、光の進行方向に縛られずあらゆる方向の力やトルクを自在に生み出す「自律型ナノ構造光圧アクチュエータ」の設計が飛躍的に発展することが期待されます。

この精密な3次元計測技術は、光操作の枠を超えて広範な科学分野への波及が期待されます。生物物理学においては、RNAポリメラーゼや回転モーターといった生体分子マシンの複雑なベクトル力学解析に、また量子物理学においては、金属板間に働くカシミール効果や、量子オプトメカニクスにおける極限的な力学現象の探索に大きく貢献します。ナノテクノロジー、バイオ、量子物理といった諸分野を横断し、未知の物理現象を解き明かすための不可欠な基盤技術となることが期待されます。

【謝辞】

本研究は、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業（JPMJFR2130）、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP22H05132、JP21K14594）、並びに JSPS 地域中核・特色ある研究大学強化促進事業（JPJS00420230001）の支援を受けて実施されました。

論文情報

論文名 Transverse Optical Torque observed at the Nanoscale (ナノ空間で観察された横方向光トルク)
著者名 福原竜馬¹、志村 努¹、田中嘉人^{1,2,*} (¹東京大学生産技術研究所、²北海道大学電子科学研究所、*責任著者)
雑誌名 Nature Physics (物理学の専門誌)
DOI 10.1038/s41567-026-03268-6
公表日 2026年4月20日(月)(オンライン公開)

お問い合わせ先

【研究内容に関すること】

北海道大学電子科学研究所 教授 田中嘉人(たなかよしと)

T E L 011-706-9321 F A X 011-706-9321 メール ytanaka@es.hokudai.ac.jp

U R L <https://sites.google.com/view/tanaka-yoshito-lab>

【JST 事業に関すること】

科学技術振興機構創発的研究推進部 加藤 豪(かとうごう)

T E L 03-5214-7276 F A X 03-6268-9413 メール souhatsu-inquiry@jst.go.jp

配信元

北海道大学社会共創部広報課(〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

科学技術振興機構広報課(〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3)

T E L 03-5214-8404 F A X 03-5214-8432 メール jstkoho@jst.go.jp

【参考図】

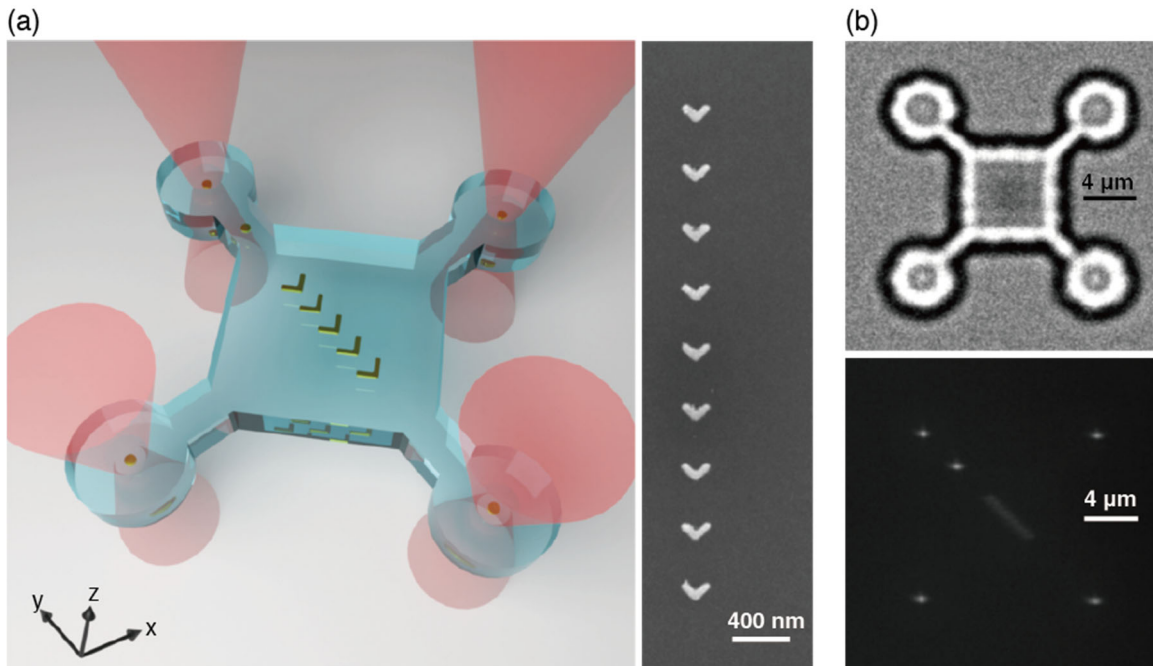


図 1. ナノ計測プラットフォーム「光駆動マイクロドローン」の構造と光学特性

(a) マイクロドローンの構成：4本の集光レーザービームで十字型のマイクロ構造体（機体）を3次元的に光捕捉（左図）し、その中心に埋め込んだ標的ナノ構造（右図）の熱運動を束縛している様子。(b) 屈折率マッチングによる光学的透明化：周辺媒質との屈折率マッチングがない場合（上図）に対し、屈折率マッチングがある場合（下図）ではマイクロ構造体が光学的に透明になり、内部に埋め込んだナノ構造のみに光が照射できる状態「ステルス化」を示している。中心の標的ナノ構造以外の輝点は、透明化したマイクロドローンの光捕捉用及び位置・姿勢計測用のナノ粒子を示している。

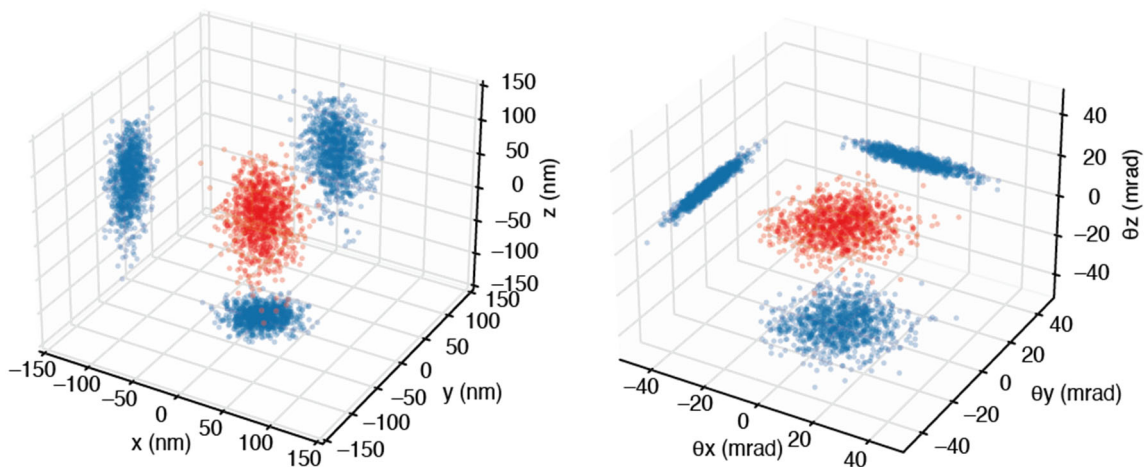


図 2.6 自由度（位置・姿勢）の高精度計測

ナノ構造を保持したマイクロドローンの3次元的な位置揺らぎ（ x, y, z ：左図）及び各軸まわりの回転揺らぎ（ $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ：右図）の計測データ。ナノ構造の熱運動を抑えつつ、微小な変位を機体全体の動きとして捉えることで、高い空間分解能を実現している。

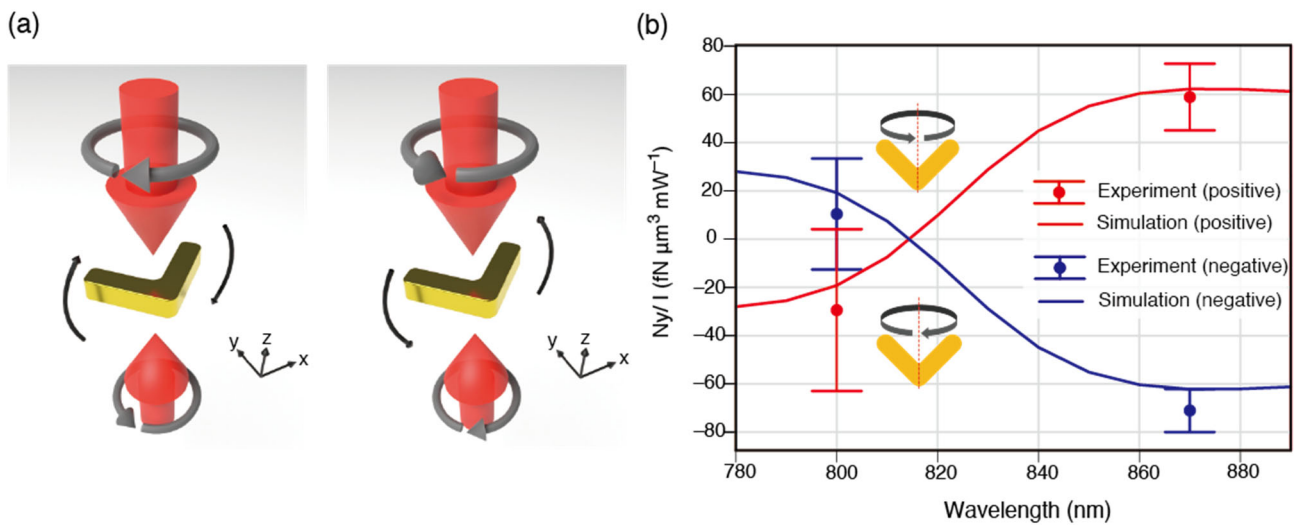


図 3. 横方向光トルクの観測とメカニズム解明

(a) 照射系：対向ビームにより角運動量を相殺し、光のねじれのみを純粹に作用させる実験系。(b) 横方向光トルクの波長依存性：左巻き（正）と右巻き（負）の光のねじれに応じたトルクの反転、及びプラズモン共鳴ピークを境としたトルクの向き逆転を示している。

【用語解説】

- *1 光の回折限界 … 光が「波」の性質を持つために生じる物理的な壁のこと。レンズで光をどれだけ絞り込もうとしても、光の波長（波の1周期）より小さい範囲に集中させることはできない。これを回折限界と呼び、従来の光学顕微鏡で「どこまで小さなものが見えるか」や、光による微細加工の精密さを決める限界となっていた。
- *2 光のねじれ(キラリティー) … 光が進行方向に沿って、らせん状に回転しながら進む性質のこと。右にねじれた光と左にねじれた光があり、この「右と左の区別がある性質」をキラリティーと呼ぶ。身近な例では、ネジやらせん階段、あるいは右手と左手の関係と同じである。本研究では、この光のねじれが、ナノサイズの物体を特定の方向に回転させる「鍵」となっている。
- *3 光圧や光トルク … 光が物質に当たったり、反射・屈折したりする際に、物質を「押す力（光圧）」や「回す力（光トルク）」のこと。光には重さ（質量）はないが、エネルギーと運動量を持っているため、ミクロな世界では「光の風」のように物質を動かすことができる。日常では感じられないほど微小だが、本研究の「マイクロドローン」を操るためのエンジンにもなっている。
- *4 ナノ構造のプラズモン共鳴 … 金属のナノ粒子（1ミリの100万分の1程度の粒子）の中で、電子が集団でゆさゆさと揺れる現象。特定の色の光を当てると、楽器の弦が共鳴するように激しく反応し、光のエネルギーを極めて狭い範囲に閉じ込めることができる。これにより、通常の光では操作できないほど小さなナノ構造に対して、光を使って強力な力を及ぼすことが可能になる。