

光渦でキラリティを見分ける仕組みを世界で初めて解明

～光がゼロの“渦の中心”で現れる左右差の起源を突き止める～

ポイント

- ・光渦の中心付近で現れる左右差の物理的な起源を世界で初めて解明。
- ・独自の光渦高速切り替え技術と理論で、左右差が物質のキラリティ由来であることを実証。
- ・分子集合体など大きな高次構造のねじれを光で選択的に読み出す新手法へ展開。

概要

北海道大学電子科学研究所の橋谷田俊助教、田中嘉人教授らの研究グループは、渦を巻きながら進むねじれた光「光渦」を用いて、物質のキラリティ（左右の違い）を見分ける仕組みを、世界で初めて明らかにしました。

キラリティとは、左手と右手のように、鏡に映した像と重ね合わせることができない性質のことです。この性質は自然界の様々な場面に現れ、分子からナノサイズの構造の中にも存在します。特にタンパク質では、その立体的なねじれの形が生命の働きを左右する重要な役割を担っています。

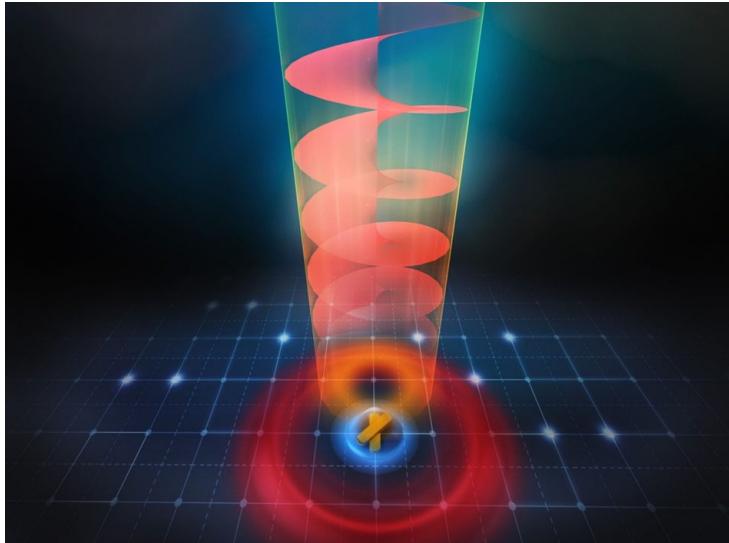
近年、光渦を用いると物質のキラリティを検出できる可能性が注目されてきました。キラリティを持つ物質に左巻きと右巻きの光渦を当てるとき、通り抜けた光の量にわずかな違いが生じることが報告されていました。しかし、その違いがなぜ生じるのか、また本当に物質のキラリティを反映しているのかは、はっきりしていませんでした。

本研究では、独自に開発した光渦の高速切り替え技術を用い、光渦とキラリティを持つナノ構造の位置関係を精密に変えながら、通り抜けた光の左右差を高い精度で測定しました。その結果、光の強度がゼロになる光渦の中心付近で、特徴的な左右差が最もはっきり現れることを見いたしました。光が弱い場所では応答も弱いはずだという直感に反する結果でした。

さらに、研究グループが構築した理論に基づく解析を行ったところ、この左右差がナノ構造内部に広がるねじれと光渦のねじれが結びつくことで生じていることが分かりました。

これにより、光渦で観測される左右差の物理的な起源が初めて明確になりました。本研究成果は、分子が集まってできたより大きな高次構造のねじれを光で選択的に読み取る新しい手法につながるものであり、生命機能に関わる構造を触れずに調べる技術への発展が期待されます。

なお、本研究成果は、2026年2月17日（火）公開のOptica誌にオンライン掲載されました。



光渦が持つ空間的なねじれと物質の立体的なねじれが結びつくことで、暗い中心付近にキラリティ由来の左右差が現れる原理を示した概念図。

【背景】

自然界には、つる植物の巻き付き方や巻貝の殻、さらには台風の渦のように、左右の向きを持つ「ねじれ」が見られます。鏡に映した像と重ね合わせることができないこの性質を「キラリティ」と呼びます。

キラリティは分子からナノ構造に至るまで広く存在しています。特にタンパク質では、その立体的なねじれの形そのものが生命の働きを左右する重要な要素になっています。しかし、こうした小さな構造の形を直接目で見ることはできません。そこで用いられてきたのが、光を使って左右の違いを読み取る方法です。

これまで広く使われてきたのは「円偏光」と呼ばれる光です（図1左）。円偏光は、電場と磁場が回転しながら進むねじれの性質を持っています。キラリティを持つ物質は、左巻きと右巻きの円偏光に対して異なる応答を示します。その違いを測ることで、分子レベルのキラリティを調べることができます。この仕組みはすでに理解されており、分子のねじれを調べる確立した方法となっています。

一方で近年注目されているのが、「光渦」と呼ばれる光です（図1右）。光渦は、波面が回転しながら進むねじれの性質を持っています。光渦は、ドーナツ状に広がっていることが特徴です。円偏光が“局所的なねじれ”を持つのに対し、光渦は“空間的に広がったねじれ”を持ちます。そのため、分子が集まってできたより大きな立体構造のねじれにも応答する可能性があると考えられます。

実際に、キラリティを持つ物質に左巻きと右巻きの光渦を当てると、通り抜けた光の量に違いが生じることが報告されていました。しかし、ここに大きな疑問が残っていました。円偏光の場合とは異なり、光渦で観測される左右差がなぜ生じるのか、その理由は分かっていなかったのです。さらに、その差が本当に物質のキラリティを反映しているのかどうかも、十分には確かめられていませんでした。つまり、「左右差が見える」とこと、「それがキラリティに由来する」と言い切ることは別の問題だったのです。

本研究は、この未解決の問題に取り組み、光渦で観測される左右差の仕組みと、その起源が物質のキラリティにあることを、実験と理論の両面から明らかにしたものです。

【研究手法】

本研究では、左右対称ではない立体的なねじれを持つナノサイズの人工構造を試料として用いました。細い金の棒を2本、指を交差させたようにねじって重ねた形をしており、「フィンガークロス構造」とも呼ばれています。光のねじれに対して敏感に応答するため、今回の検証に適した構造です。

実験に用いたのは「円偏光光渦」と呼ばれる特別な光です。これは、電磁場の回転に由来するねじれ（円偏光）と、波面の回転に由来するねじれ（光渦）という2種類のねじれを同時に持つ光です。局所的なねじれと空間的に広がるねじれをあわせ持つことで、それぞれの効果を比べながら、光渦に特有の働きを見分けられるようにしました。

測定では、研究グループがこれまでに開発してきた高速切り替え技術（Rev. Sci. Instrum. 2024）を用い、左巻きと右巻きの円偏光光渦を1秒間に5万回（50キロヘルツ）という速さで交互に切り替えながらナノ構造に照射しました。そして、通り抜けた光のごくわずかな差を高い精度で測定しました。このように光を高速で切り替えることで、非常に小さな左右差でも周囲の雑音に埋もれず検出することが可能になりました（図2(a)）。

さらに、ナノ構造を少しずつ動かしながら測定を行い、光渦の空間的な広がりと応答の関係を詳しく調べました。また、光の色を変えながら測定することで、どの色でどのねじれの効果が強く現れるかを比較しました。

加えて、研究グループが新たに構築した理論（Phys. Rev. Research 2025）に基づいて解析し、観測された左右差を、円偏光の局所的なねじれ由来の成分と、光渦の空間的なねじれ由来の成分に分けました。これにより、実験で見えている左右差の起源を理論的に明らかにしました。

【研究成果】

透過光の左右差を空間的に測定したところ、光渦の明るさの分布と対応するドーナツ状のパターンが観測されました（図 2(b)上）。光渦は中心が暗く、周囲が明るいドーナツ状の光の強さを持ちますが、左右差の信号も同じような形を示したのです。

しかし、詳しく見ると、ドーナツの部分と中心付近で、信号の性質がはっきりと異なっていました。ナノ構造が明るいドーナツ部分にある場合には、主に円偏光のねじれによる左右差が観測されました。一方で、光の強さがほとんどゼロになる中心付近では、性質の異なる左右差が現れました。光が弱い場所では応答も弱くなるはずだという直感に反して、中心で特有の振る舞いが見られたのです。

決定的だったのは、光の色を変えた時の変化のしかたです（図 2(b)下）。ドーナツ部分で観測された左右差は、色をえてもほとんど変化しませんでした。しかし中心付近では、ある色を境に左右差の向きが逆転しました。これは、中心で現れる信号が円偏光の局所的なねじれによるものではなく、光渦が空間的に広がって持つねじれに由来していることを示しています。

研究グループが新たに構築した理論に基づき、その式をコンピューターで計算して解析した結果、中心付近では光渦のねじれが支配的であることが示されました（図 2(c)上）。円偏光の効果だけでは、この振る舞いを説明できないことも明らかになりました。

これらの結果から、ドーナツ部分では円偏光のねじれ、中心では光渦のねじれが、それぞれ別々に応答を生み出していることが示されました。こうして、光渦でキラリティを見分けられる仕組みが、実験・計算・理論解析の三つの方法によって明確に示されました。

【今後への期待】

本成果により、光渦を使ったキラリティ計測は、単に左右差が見えるという現象の報告から、その理由まで分かることへと進みました。

これまで広く用いられてきた円偏光は、主に分子レベルの局所的なねじれに敏感に応答します。一方で光渦は、分子が集まってできたより大きな立体構造のねじれにも応答する可能性があります。本研究によって、その仕組みが初めて明確に示されました。

今後は、タンパク質の集合体やナノ材料など、より複雑な構造を持つ物質を、触れることなく光だけで調べる技術へと発展することが期待されます。また、光の空間的なねじれを自在に制御することで、物質内部の特定の構造だけを選んで読み出す新しいナノフォトニクス技術にもつながる可能性があります。

光が持つ“空間的なねじれ”と、物質が持つ“立体的なねじれ”と結びつくという原理が初めて明確になったことは、光と物質の関係をより深く理解する上で大きな前進です。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科研費（JP24H00424、JP23K04669、JP22H05132、JP21K14594）、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業（JPMJFR2130）、JST さきがけ（JPMJPR25J6）、並びに文部科学省「人と知と物質で未来を創るクロスオーバーアライアンス」の支援を受けて実施されました。

論文情報

論文名 Unveiling orbital optical chirality through multipolar chiral light-matter interaction (多重極子のキラリティとの相互作用により顕在化した光の軌道角運動量に基づくキラリティ)
著者名 橋谷田俊¹、吳 安安²、田中嘉人^{1,2} (¹北海道大学電子科学研究所、²東京大学生産技術研究所)
雑誌名 Optica (光科学分野の国際的専門誌)
D O I 10.1364/OPTICA.584008
公表日 2026年2月17日(火)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学電子科学研究所 教授 田中嘉人 (たなかよしと)
TEL 011-706-9321 FAX 011-706-9321 メール ytanaka@es.hokudai.ac.jp
URL <https://sites.google.com/view/tanaka-yoshito-lab>
北海道大学電子科学研究所 助教 橋谷田俊 (はしやだしゅん)
TEL 011-706-9338 メール shun.hashiyada@es.hokudai.ac.jp
URL https://researchmap.jp/hashish_n

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)
TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

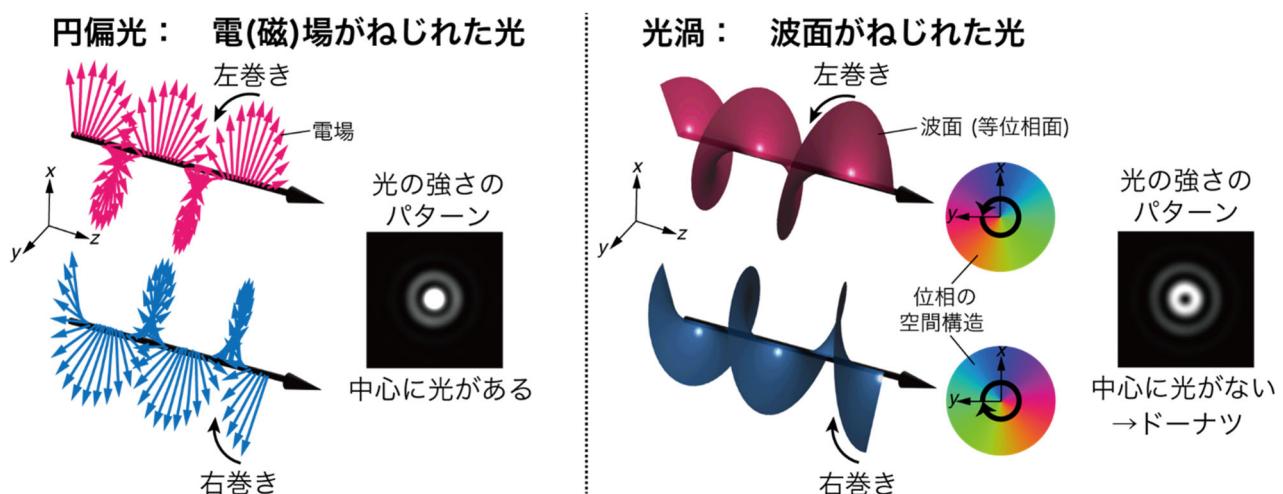


図1. 円偏光と光渦の違い。左は円偏光で、電場と磁場が回転しながら進む「局所的なねじれ」を持つ光。光の強さは中心にも存在する。右は光渦で、波面が回転する「空間的に広がったねじれ」を持つ光。光の強さはドーナツ状に分布し、中心は暗くなる。

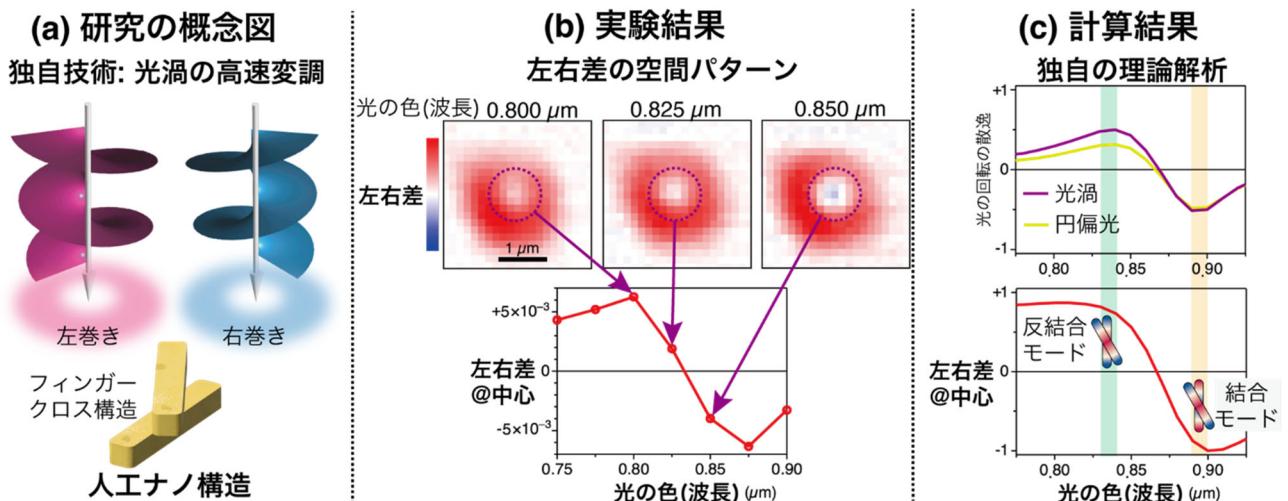


図 2. 本研究の実験と理論解析の概要。(a) 独自に開発した高速切り替え技術により、左巻きと右巻きの円偏光光渦を毎秒 5 万回の速さで交互に照射し、人工ナノ構造「フィンガークロス構造」による透過光の左右差を高精度に測定した。(b) ナノ構造の位置を少しずつ動かしながら測定した左右差の空間分布（上）。左右差は光渦の強度分布に対応するドーナツ状のパターンを示す。ドーナツ中心付近での左右差を抜き出した色依存性のスペクトル（下）では、ある光の色を境に左右差の向きが反転することが分かった。(c) 独自に構築した理論に基づく解析結果（上）。観測された左右差を、円偏光の局所的なねじれ由来の成分と、光渦の空間的なねじれ由来の成分に分離した。実験と同様の条件で計算した中心付近の左右差のスペクトル（下）は、実験と同様の二つのピークを示し、それぞれ電気四重極子の結合モードと反結合モードに対応する。