

## 磁石がつくる奇妙な光のねじれ現象 ～新しい光の偏光制御の原理を確立～

### 1. 発表者：

井口 照悟（東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程（研究当時））  
関 真一郎（東京大学 大学院工学系研究科附属総合研究機構 准教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 客員研究員）  
十倉 好紀（理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長／  
東京大学 卓越教授／国際高等研究所東京カレッジ）  
高橋 陽太郎（東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 准教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発分光学研究ユニット ユニ  
ットリーダー）

### 2. 発表のポイント：

- ◆ 旋光性複屈折と呼ばれる新奇な偏光（光の振動面）のねじれ現象の実現に成功しました。
- ◆ 旋光性複屈折が、あたかも物質が回転しているように見なせる奇妙な旋光性（注1）であることを明らかにしました。
- ◆ 「自然旋光性」と「旋光性複屈折」という二つの旋光性を電圧と磁場で制御することで、偏光を自在に制御できることを実証しました。この原理を利用すると、高い自由度を持つ偏光制御デバイスへの応用が期待されます。

### 3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の高橋陽太郎准教授（理化学研究所創発物性科学研究センター創発分光学研究ユニットユニットリーダー）のグループは、関真一郎准教授（理化学研究所創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 客員研究員）、理化学研究所創発物性科学研究センターの十倉好紀センター長のグループと共同で、マルチフェロイクスと呼ばれる磁性材料で旋光性複屈折と呼ばれる新しい光のねじれ現象が生じることを見出し、電圧と磁場によって偏光を自在に制御できることを実証しました。

旋光性とは物質が偏光（光の振動面）をねじる現象を指します。現在までにマイケル・ファラデーによって発見されたファラデー効果と、ビオ・サバルやレイ・パルツールが見出した自然旋光性が知られています。これらの旋光性は光通信や糖度測定などさまざまな用途に利用されています。これら既知の現象とは別に「旋光性複屈折」と名付けられた第3の旋光性が生じることが指摘されていましたが、どのような偏光のねじれが生じるかについては検証されていませんでした。

研究グループは、マルチフェロイクス（注2）と呼ばれる強誘電性（注3）を持つ磁石を透過した光の偏光を測定することで、旋光性複屈折と自然旋光性によってテラヘルツ帯で巨大な旋光が生じることを発見しました。偏光を精密に解析することで、旋光性複屈折による光のねじれが本質的に既知の旋光性とは異なることを明らかにしました。更に、電場と磁場で二つの旋光性を独立に制御できることを実証しました。

今回の成果は、旋光性複屈折を用いることでより高い自由度で偏光の制御が可能であることを示しています。または、将来の高速通信への応用が期待されているテラヘルツ帯の光制御にマルチフェロイクスが役立つことが期待されます。

本研究成果は2021年11月18日（英国時間）に英国科学誌「Nature Communications」オンライン版に掲載されました。

#### 4. 発表内容：

##### <研究の背景>

旋光性とは物質中を進む光の偏光がねじれる現象です。現在までに二つの旋光現象が知られています。一つはマイケル・ファラデーによって発見された磁気光学ファラデー効果で、もう一つがビオ・サバルやルイ・パスツールによって見出された自然旋光性です。これらの旋光性は光通信に用いるアイソレーターや糖度測定など、身の回りのさまざまな機器の基礎原理として利用されています。一方で、これらとは別の性質を持つ「旋光性複屈折」と名付けられた旋光性が存在することが期待されていました。しかし、この第3の旋光性である旋光性複屈折によってどのように偏光がねじれるのか、既知の旋光現象とどのように異なるのかという基本的な性質すら検証されていませんでした。

##### <研究内容>

東京大学大学院工学系研究科の高橋陽太郎准教授らは、強誘電性やカイラリティ（注4）を持つ磁石として近年注目を集めているマルチフェロイクスに着目しました。強誘電性とカイラリティの存在はともに反転対称性の破れを意味しますが、光の応答という観点でみるとそれぞれが旋光性複屈折と自然旋光性という異なる旋光性の起源となります。今回の研究で使用したGaを少量添加したCuFeO<sub>2</sub>というマルチフェロイクスでは、スピンの数ナノメートルという原子スケールで自発的に「らせん型」に配列することで、強誘電性とカイラリティが生じます（図1）。この物質を透過した光の偏光状態を調べることで、既知の旋光性である自然旋光性と比較しつつ旋光性複屈折の検証をすることが可能となります。また、らせん型に配列したスピンはテラヘルツ（ $\sim 10^{12}$  Hz）の振動数で運動することから、テラヘルツ帯の光に対して大きな旋光性が期待できます。

実際に物質を透過したテラヘルツ帯の偏光を調べることで、共鳴的に増強された旋光を観測することに成功しました。1 mmの厚みの試料を透過した光の旋光角は最大30度程度に達します。精密に偏光状態を解析することにより、この旋光が旋光性複屈折と自然旋光性が共存することで生じていることがわかりました。

一般的に異方性のある物質中を進む光の状態は、線複屈折性・線2色性と呼ばれる直線偏光の傾きに応じて光の進む速さや光吸収が変わる現象で理解することができます。例えば、線2色性は液晶の基本原理として用いられており、液晶パネルの中では実際に分子の向きを回転させることで、光の明暗を制御しています。これに対し、旋光性複屈折では、結晶の異方性はそのままであるのにも関わらず、あたかも結晶が回転していると思えるような奇妙な旋光性が生じていることが明らかになりました（図2）。また、この旋光性複屈折は非相反性と呼ばれる、対向して進む光の旋光角が反転するという性質も持ち合わせています。このような新奇な性質は、旋光性複屈折の起源である電気磁気結合（注5）に由来しています。もう一つの旋光性である自然旋光性によっても、直線偏光が非相反性を持って回転します。しかし、これは円2複屈折という、右回りと左回り円偏光の進む速度の差から生じます。このような旋光性の性質の違いから、旋光性複屈折は既知の旋光性と区別することが可能であるということがわかりました。

また、今回の研究では電圧によって強誘電分極とカイラリティの符号を制御し、更に磁場を印加することで旋光性複屈折と自然旋光性をそれぞれ独立に制御することに成功しました。この結果は、これまでの旋光性を用いた場合よりも高い自由度で光の偏光を精密に制御できることを示しています。

#### <展望・社会的意義>

今回の研究では、旋光性複屈折の基本的な性質を明らかにするために、マルチフェロイクスを用いてテラヘルツ帯の偏光状態を調べました。しかし、旋光性複屈折はテラヘルツ帯に限らずさまざまな帯域で生じうる現象であり、マルチフェロイクスに限らず近年注目を集めているトポロジカル物質をはじめとするさまざまな物質で実現されることが期待できます。ファラデー効果や自然旋光性とは本質的に異なる旋光現象である旋光性複屈折は、新たな光の制御原理となることが期待できます。今回の研究で実証したように、旋光性複屈折による旋光角は電圧と磁場の両者によって制御することが可能です。磁場の大きさで連続的に旋光角を制御することもできます。このような光機能性は、新しい偏光制御素子の基本原理として役立つことが期待されます。

#### 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」（11月18日（英国時間）掲載）

論文タイトル：Enhanced gyrotropic birefringence and natural optical activity on electromagnon resonance in a helimagnet

著者：S. Iguchi, R. Masuda, S. Seki, Y. Tokura, Y. Takahashi\*

DOI 番号：10.1038/s41467-021-26953-x

#### 6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻  
准教授 高橋 陽太郎（たかはし ようたろう）

<報道担当>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

理化学研究所 広報室 報道担当

#### 7. 用語解説：

（注1）旋光性

直線偏光が物質中を進むときに回転する現象を指します。磁場に平行に進む直線偏光が回転する現象を磁気旋光、またはファラデー効果と呼びます。磁場の符号反転で、偏光面の回転角が反転します。一方で右手系、左手系の区別が存在するカイラリティを持つ物質では自然旋光性が生じます。この場合は右手系、左手系で偏光面の回転角が逆になります。

（注2）マルチフェロイクス

自発的に強誘電や強磁性などの性質を示す物質をフェロイクスと呼びますが、複数の強的な性質が共存する物質をマルチフェロイクスと呼びます。特に、スピン配列に由来した強誘電性が

生じる物質は代表的なマルチフェロイクスとして知られており、新機能材料としてさまざまなデバイスへの応用が期待されています。

(注3) 強誘電性

物質に電場を印加することで、物に電気分極が生じます。しかし、ある種の物質では電場が無くとも自発的に電気分極が生じる強誘電性を持ちます。電気分極の正負の符号をビットとすることでメモリなどのデバイスに利用されるほか、光学材料としても幅広く利用されています。

(注4) カイラリティ

ショ糖やアミノ酸、水晶のように分子や結晶構造が右手と左手のように鏡像の関係で区別できる性質をカイラリティと呼びます。カイラリティを持つ物質は、自然旋光性と呼ばれる旋光を示すことが知られています。今回の研究では、結晶構造ではなくスピンの配列によって生じるカイラリティを用いることで自然旋光性が現れています。

(注5) 電気磁気結合

一般に静的な電圧が磁化を誘起することはありません。しかしある種の物質中では電圧によって磁化が生じます。これは電気磁気結合と呼ばれます。光は振動する電場と磁場を持ちますが、多くの物質では光の電場のみで光学応答を説明することができます。これに対し、電気磁気結合を持つ物質中では、光の電場と磁場の両者が光学応答に関与します。旋光性複屈折は電気磁気結合によって生じる光学応答の一例です。

8. 添付資料：

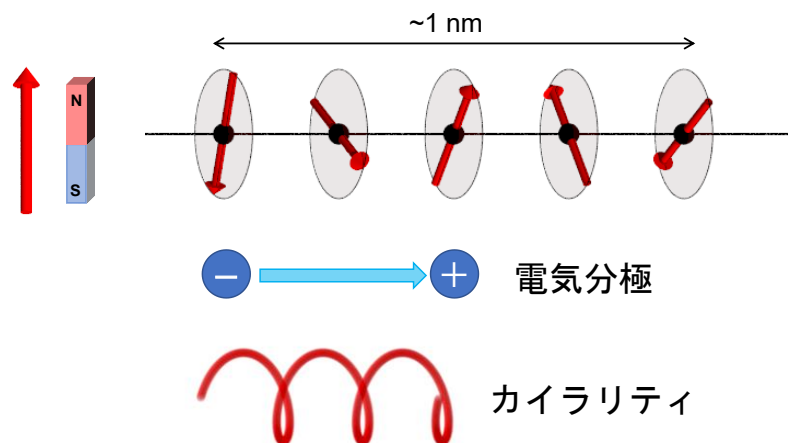


図1：スピン（磁石）が原子スケールでらせん型に配列します。本研究で用いた  $\text{CuFeO}_2$  ではらせん型のスピン配列がカイラリティと電気分極を生み出す。カイラリティは自然旋光性の、電気分極は旋光性複屈折の起源となります。

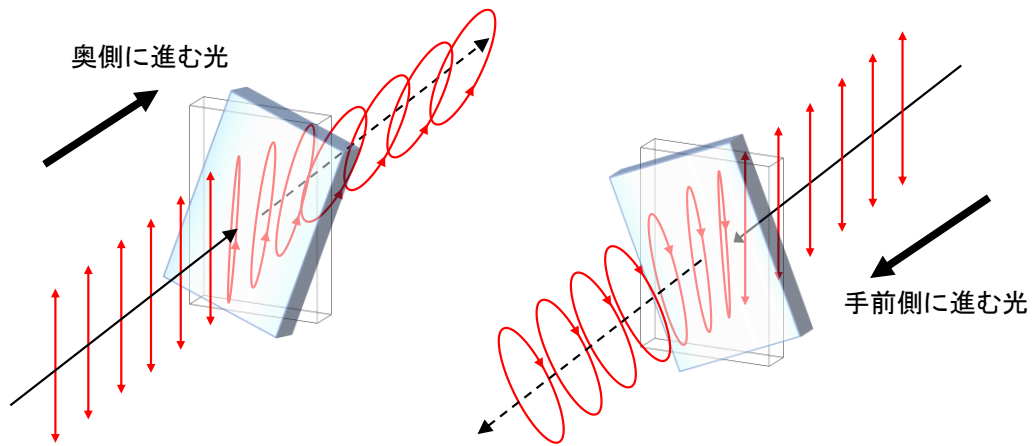


図2：旋光性複屈折の概念図。物質中を進む光は、あたかも結晶が回転しているように振る舞い、偏光（赤矢印）がねじれます。奥側と手前側に進む光は、それぞれ逆向きに結晶が回転しているように振る舞うため、偏光のねじれは逆になります。これは、旋光性複屈折が非相反性を持つことに由来しています。