

トポロジカル絶縁体の量子化磁気光学効果の観測

—省エネかつ高効率な光学素子の実現へ—

要旨

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター強相関量子伝導研究チームの岡田健大学院生リサーチ・アソシエイト（東京大学大学院工学系研究科 大学院生）、十倉好紀チームリーダー（同教授）、創発分光学研究ユニットの高橋陽太郎ユニットリーダー（同特任准教授）、強相関界面研究グループの川崎雅司グループディレクター（同教授）、東北大学金属材料研究所の塚崎敦教授らの共同研究グループは、磁石の性質を持たせたトポロジカル絶縁体^[1]に光を当てると、磁気光学効果^[2]により偏光^[3]が回転し、その回転角が量子力学で規定される普遍的な値をとることを実験的に証明しました。

自然界には、観測される量が物質の詳細に依らず物理学の基本定数でのみ定められる普遍的な現象がいくつか存在します。例えば量子ホール効果^[4]は、観測されるホール抵抗^[5]が必ず電気素量 e とプランク定数 h によって決められた値を示します。また「量子異常ホール効果^[6]」は近年、磁石の性質を持たせたトポロジカル絶縁体上で実現されました。量子異常ホール効果が生じた試料に光を当てると、偏光の回転角が微細構造定数^[7]と呼ばれる電磁相互作用の基本定数で定められる“量子化した磁気光学効果”が生じることが予測されていました。

この量子化磁気光学効果を実験的に観測するために、共同研究グループは、独自に開発したトポロジカル絶縁体の薄膜を使って、従来よりも高い温度で安定な量子異常ホール効果を実現し、薄膜にテラヘルツ光^[8]を当てました。その結果、テラヘルツ光の偏光回転角が微細構造定数によって定まることを実験的に証明しました。量子異常ホール効果を用いると、無磁場での偏光回転と物質内でのエネルギー吸収がゼロとなる光応答が可能となります。また、今回測定に用いた厚さ8ナノメートル（nm、1nmは10億分の1メートル）の薄膜で観測された回転角は0.15度であり、薄膜の単位厚さ（cm）当たりの回転角で評価すると、200,000度/cmに相当します。この値は、従来の偏光回転素子よりも2桁近く大きい偏光回転効率を示しています。

本成果は、今後、テラヘルツ帯における省エネルギーで高効率な光学素子の実現につながると期待できます。

本研究は、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）課題名「強相関量子科学」の事業の一環として行われました。成果は、英国のオンライン科学雑誌『*Nature Communications*』（7月20日付け：日本時間7月20日）に掲載されます。

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関物理部門 強相関量子伝導研究チーム

大学院生リサーチ・アソシエイト 岡田 健 (おかだ けん)

(東京大学大学院工学系研究科 大学院生)

基礎科学特別研究員 吉見 龍太郎 (よしみ りゅうたろう)

チームリーダー 十倉 好紀 (とくら よしのり)

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

統合物性科学研究プログラム 創発分光学研究ユニット

ユニットリーダー 高橋 陽太郎 (たかはし ようたろう)

(東京大学大学院工学系研究科 特任准教授)

強相関物理部門 強相関物性研究グループ

研修生 茂木 将孝 (もぎ まさたか)

(東京大学大学院工学系研究科 大学院生)

強相関物理部門 強相関界面研究グループ

上級研究員 高橋 圭 (たかはし けい)

グループディレクター 川崎 雅司 (かわさき まさし)

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

統合物性科学研究プログラム 創発光物性研究ユニット

ユニットリーダー 小川 直毅 (おがわ なおき)

東北大学 金属材料研究所

教授 塚崎 敦 (つかざき あつし)

1. 背景

ファラデー効果やカー効果などの磁気光学効果とは、磁石の性質を持つ物質（磁性体）に光を当てたとき、透過光および反射光の偏光（振動電場の方向）が回転する現象のことを指し、磁性体において広く観測されます。磁気光学効果は、光通信素子や光磁気ディスクの原理として利用されている現象です。磁石の性質を持たせたトポロジカル絶縁体では、無磁場でファラデー効果やカー効果が生じ、その回転角が量子力学で規定される普遍的な値をとることが理論的に予想されていました。

トポロジカル絶縁体は、内部は絶縁体ですが、表面には電子の質量が実効的に「ゼロ」に一致した特殊な金属状態を持つ物質です（図1(a)）。しかし、トポロジカル絶縁体に磁石の性質を与えると、表面の電子は質量を獲得し、エネルギーにギャップ（質量ギャップ）が開いた絶縁体となります（図1(b)）。このとき、磁場がなくてもホール効果が発生し、さらにそのホール抵抗が電気素量 e とプランク定数 h のみで決まるような普遍的な量子状態が現れます。この現象は「量子異常ホール効果」と呼ばれ、近年、トポロジカル絶縁体において初めて実現されました。

量子異常ホール効果を示すトポロジカル絶縁体の表面に光を照射すると、偏光が回転します。その回転角は、微細構造定数と呼ばれる電磁相互作用の基本定数で決まります。これは、量子異常ホール効果の光応答である“量子化した磁気光学効果”であり、非常に大きな偏光回転効率が無磁場かつエネルギー無

損失で実現することから、その観測が期待されていました。しかし、これまで量子異常ホール効果は数十ミリケルビン (mK、1mK は 1,000 分の 1 ケルビン、0K は -273.15°C) という極低温でのみ実現可能であるなど、実験的な検証にはいくつかの課題がありました。

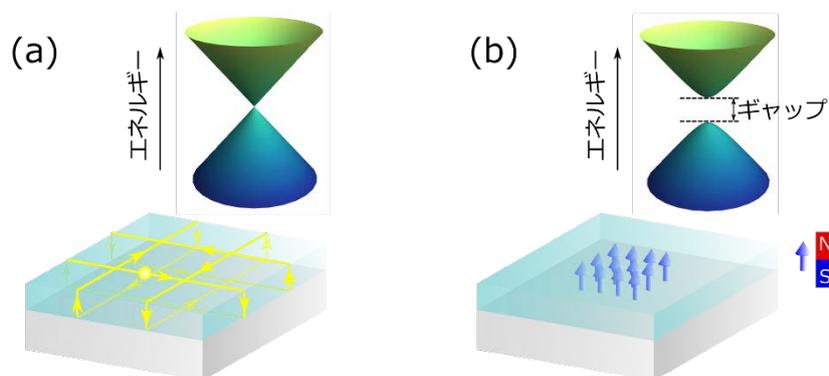


図 1 トポロジカル絶縁体と量子異常ホール効果の概念図

- (a) トポロジカル絶縁体では、表面の電子は実効的に質量を持たず、エネルギーにギャップは発生しない。このとき、表面の電子は金属のように自由に動き回ることができる（黄色の矢印）。
- (b) トポロジカル絶縁体に磁性元素（青の上向き矢印）を添加して、磁石の性質を持たせると、表面の電子は質量を獲得し、エネルギーにギャップ（質量ギャップ）が発生する。このとき、磁場をかけなくてもホール抵抗が量子化した値を示す（量子異常ホール効果）。

2. 研究手法と成果

共同研究グループは独自に開発したトポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ (Bi: ビスマス、Sb: アンチモン、Te: テルル) 薄膜にクロム (Cr) を変調ドーブ^[9]した試料^{注1)}を作製しました。この試料は既存の作製方法に基づいたものと比べて、1~2 桁高い温度領域で量子異常ホール効果を発現するため、光による量子状態へのアプローチが可能になりました。

また、光による量子化偏光回転を観測するためには、質量ギャップ (図 1 (b)) に比べて十分に小さい光子エネルギーを持つ光を用いる必要があります。先行研究^{注2)}から、作製した試料の質量ギャップは 50 ミリ電子ボルト (meV、1meV は 1,000 分の 1 電子ボルト) 程度と予想され、可視光の 1/40 程度のエネルギーに相当します。このため、テラヘルツ光と呼ばれる可視光の 1/500 程度の光子エネルギーを持つ光を使い、量子化偏光回転の検出を行いました。さらに、回転角と微細構造定数の関係を検証するため、透過時のファラデー回転角と反射時のカー回転角を同時に計測する必要がありました。そこで、時間領域テラヘルツ分光法^[10]と呼ばれる手法を用いることで、ファラデー回転角とカー回転角を同時に高い精度で測定しました。

トポロジカル絶縁体の薄膜を透過したテラヘルツ光の偏光回転を観測したところ、トポロジカル絶縁体表面で量子異常ホール効果が発達するにしたがい、両者の回転角が増大していく様子を発見しました。量子異常ホール効果が十分に発達した低温では、理論的に予測されていた通り、ファラデー回転角とカー

回転角のみから定まる値が微細構造定数 ($\sim 1/137$) に向かって収束することが分かりました (図 2)。

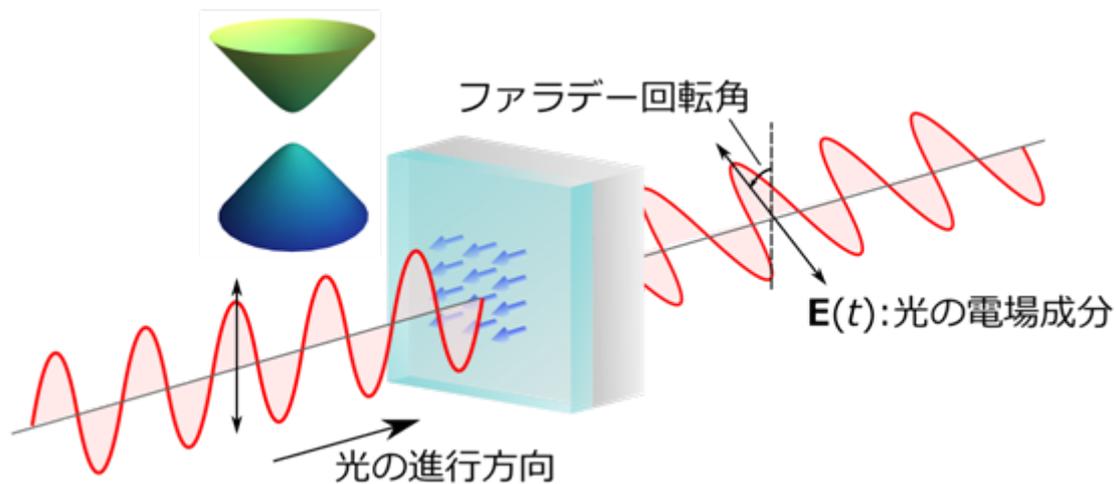


図 2 トポロジカル絶縁体における量子化偏光回転の概念図

量子異常ホール効果が発達したトポロジカル絶縁体に、エネルギーギャップ (質量ギャップ) よりも十分に小さなエネルギーの光 (例えばテラヘルツ光) を透過させると、ファラデー効果、カー効果が発生し、その回転角は微細構造定数で規定された値を示す。図中に示したのはファラデー効果による回転角。

上述のように、量子異常ホール効果では、一旦磁化の向きを揃えると外部磁場がゼロであってもホール抵抗は量子化した値を示します。さらに、量子異常ホール効果が発現すると、透過した光の損失はゼロになり非散逸偏光回転が実現します。今回用いた薄膜試料は厚さが 8 ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) であり、観測された量子化偏光回転はおおよそ 0.15 度でした。これは単位厚さ当たりの回転角で評価すると約 200,000 度/cm に相当し、従来の偏光回転素子よりも 2 桁近く高い回転効率を示しています。本研究では、量子異常ホール効果により、エネルギー無損失かつ高い効率の偏光回転が無磁場で実現できることを実証しました。

注 1) M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. Yasuda, Y. Kozuka, K. S. Takahashi, M. Kawasaki and Y. Tokura, "Magnetic modulation doping in topological insulators toward higher-temperature quantum anomalous Hall effect." *Applied Physics Letters* **107**, 182401 (2015).

注 2) I. Lee *et al.* "Imaging Dirac-mass disorder from magnetic dopant atoms in the ferromagnetic topological insulator $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{0.1}\text{Sb}_{0.9})_{2-x}\text{Te}_3$." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**, 1316 (2015).

3. 今後の期待

現在、量子状態の精密な制御に関する研究は大きく進展しています。今後もトポロジカル絶縁体上で理論的に予測されている、さまざまな新しい量子電磁気現象の実験的な検証が期待できます。

テラヘルツ帯は将来の高速通信やセキュリティー、さまざまなセンシングの

観点から大きな注目を集めています。トポロジカル絶縁体の量子異常ホール効果を用いると、無磁場・エネルギー無損失かつ高い効率を持つ偏光回転がテラヘルツ帯で実現します。したがって、光通信において重要な光遮断機能を持つ部品である光アイソレーターなどへの応用が期待されます。さらに、質量ギャップ以下ではエネルギーに依存しない回転角を示すという特徴もあることから、広帯域で使用可能かつ、省エネルギーで高効率なテラヘルツ帯の光学素子への応用が期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Terahertz spectroscopy on Faraday and Kerr rotations in a quantum anomalous Hall state

<著者名>

K. N. Okada, Y. Takahashi, M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, N. Ogawa, M. Kawasaki, and Y. Tokura

<雑誌>

Nature Communications

<DOI>

10.1038/ncomms12245

5. 補足説明

[1] トポロジカル絶縁体

電子の波動関数の特殊な幾何学的性質（トポロジー）を反映して、中身は電気を通さない（絶縁体）にも関わらず、表面では電気を通すような物質のこと。

[2] 磁気光学効果

一般に、磁石の性質を持つ物質（磁性体）に光を当てると、透過した光および反射した光の偏光（振動電場の方向）が回転する。前者がファラデー効果、その回転角をファラデー回転角と呼ぶ。後者がカー効果に対応し、その回転角をカー回転角と呼ぶ。両者の効果を合わせて、磁気光学効果という。

[3] 偏光

一般に光は、空間および時間的に振動する電場と磁場の成分によって表される。偏光とは、電場の振動する方向が特定の向きに揃ったような光、あるいはその振動方向を指す。

[4] 量子ホール効果

試料に強い磁場をかけたとき、電子が円軌道を描くことで、ホール抵抗が、物質の詳細に依らず量子化値 h/e^2 （プランク定数 h 、電気素量 e ）の整数分の1に一致する現象のこと。

[5] ホール抵抗

物質に電圧をかけて電流を流している状態で、磁場をかけると、電子の運動方向が、電流および磁場と垂直な方向に曲げられる。この現象をホール効果と呼び、その結果電流および磁場と垂直な方向に発生する抵抗をホール抵抗と呼ぶ。物質が磁石の性質（磁化）を持つ場合は、磁場をかけなくとも電子の運動方向が曲げられて、ホール抵抗が現れることが知られている。

[6] 量子異常ホール効果

電子の波動関数の幾何学的性質が実効的に磁場の代わりの役目を果たすことで、磁場をかけなくてもホール抵抗が量子化値 h/e^2 （プランク定数 h 、電気素量 e ）に一致する現象のこと。

[7] 微細構造定数

電磁相互作用の強さを表す基本的な物理定数であり、電気素量 e 、真空の誘電率 ϵ_0 、プランク定数 h 、光の速度 c を用いて、 $\alpha = e^2/2\epsilon_0hc$ と表される。無次元の量であり、ほぼ $1/137$ に等しい。

[8] テラヘルツ光

周波数が 10^{12} Hz（1兆ヘルツ）付近（0.1T~100THz）にある電磁波。電波と光の間の周波数で、両方の特性を持っている。私たちが目で感じることのできる可視光と比べて、 $1/500$ 程度のエネルギーを持つ。

[9] 変調ドーブ

今回共同研究グループは、磁性元素である Cr をトポロジカル絶縁体に添加するに当たって、表面に乱れを導入することを防ぐために、Cr の濃度を膜厚方向に変調させながら添加した。このような手法を、変調ドーブと呼ぶ。

[10] 時間領域テラヘルツ分光法

試料を通過したテラヘルツ波の波形を直接観測し、フーリエ変換を施すことで透過率や磁気光学回転のスペクトルを導出する手法のこと。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関物理部門 強相関量子伝導研究チーム

大学院生リサーチ・アソシエイト 岡田 健（おかだ けん）

（東京大学大学院工学系研究科 大学院生）

チームリーダー 十倉 好紀（とくら よしのり）

（東京大学大学院工学系研究科 教授）

統合物性科学研究プログラム 創発分光学研究ユニット

ユニットリーダー 高橋 陽太郎（たかはし ようたろう）

（東京大学大学院工学系研究科 特任准教授）

強相関物理部門 強相関界面研究グループ

グループディレクター 川崎 雅司 (かわさき まさし)
(東京大学大学院工学系研究科 教授)

TEL : 03-5841-6855 (岡田) 03-5841-6863 (高橋)

E-mail : okada@cmr.t.u-tokyo.ac.jp (岡田) youtarou-takahashi@ap.t.u-tokyo.ac.jp (高橋)

東北大学 金属材料研究所

教授 塚崎 敦 (つかざき あつし)



共同研究グループのメンバー

上段左から

岡田大学院生リサーチ・アソシエイト、十倉チームリーダー、高橋ユニットリーダー、
川崎グループディレクター

下段左から

塚崎教授、吉見基礎科学特別研究員、茂木研修生

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715

E-mail : ex-press@riken.jp

東京大学大学院工学系研究科 広報室

TEL : 03-5841-1790 FAX : 03-5841-0529

E-mail : kouhou@pr.t.u-tokyo.ac.jp

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班

TEL : 022-215-2144 FAX : 022-215-2482

E-mail : pro-adm@imr.tohoku.ac.jp