

強磁場発生装置を用いない量子抵抗標準素子の開発に成功

— トポロジカル絶縁体を応用、国家計量標準と同等精度の電気測定がより手軽に —

2021年12月13日



国立研究開発法人 産業技術総合研究所

国立研究開発法人 理化学研究所

国立大学法人 東京大学

国立大学法人 東北大学

国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)

■ ポイント ■

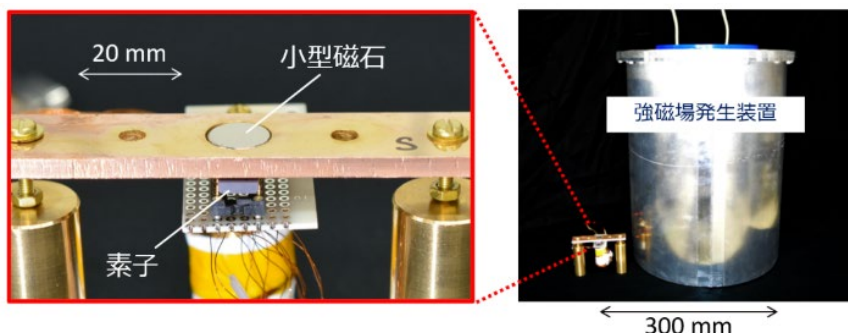
- ・ 新材料トポロジカル絶縁体を応用することで、強磁場発生装置が不要な量子抵抗標準素子を開発
- ・ 素子の品質向上により安定性を大幅改善、国家計量標準と同等の精度を達成
- ・ 小型化で利便性向上、さまざまな現場で最高精度の精密電気計測が可能に

■ 概要 ■

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門は国立研究開発法人 理化学研究所 創発物性科学研究センター、国立大学法人 東京大学 大学院工学系研究科、国立大学法人 東北大学 金属材料研究所と共同で、強磁場発生装置を用いることなく電気抵抗の精密測定(8桁の精度)を可能にする新型量子抵抗標準素子を開発した。

電気抵抗は、電流の流れにくさを反映した物理量である。現在、異なる国や地域においても抵抗の測定値にずれが生じないように、物理現象「量子ホール効果」により電気抵抗の値が量子化抵抗値と呼ばれる一定値をとる量子ホール素子を抵抗測定の基準(抵抗標準)として採用している。量子ホール効果は強磁場下で発現する現象であるため、超伝導電磁石などの大型で高価な強磁場発生装置(概要図(右))を用いる必要があり、手軽な運用が難しかった。このため、強磁場を用いずに利用可能な抵抗標準の開発が世界各国で進められていた。今回、2016年ノーベル物理学賞の受賞理由の一つである、新材料トポロジカル絶縁体において発見された弱い磁場下でも量子化抵抗値を示す現象(量子異常ホール効果)に着目した。この新材料を応用し、ホームセンターなどでも安価に入手でき、利用が容易な小型磁石により発生した弱い磁場を用いて国家計量標準と同等な8桁の精度を持つ量子抵抗標準素子を実現した(概要図(左))。大型・高価で取り扱いの難しい強磁場発生装置が不要になったことにより、最高精度の抵抗標準の小型簡便化が可能になり、民間企業を含めたさまざまな現場での使用が期待される。なお、この技術の詳細は、2021年12月13日(英国時間)に *Nature Physics* 誌にオンライン掲載される。

は【用語の説明】参照



(左)小型磁石を用いる新型量子抵抗標準素子、(右)従来必要だった強磁場発生装置との比較

■ 開発の社会的背景 ■

私たちの身の回りにはほとんど全ての電気製品には、抵抗器と呼ばれる電子回路部品が使われている。電子回路が設計通りに動作するためには、個々の抵抗器が必要な性能を有している必要があり、その確認のために正確な電気測定が求められる。したがって、抵抗値を正確に測定する計測技術は、現在のエレクトロニクス社会を支える基盤とも言える。

現在、異なる国や地域においても抵抗の測定値にずれが生じないように、物理現象「量子ホール効果」により電気抵抗の値が量子化抵抗値と呼ばれる一定値をとる量子ホール素子を抵抗測定の基準（抵抗標準）として用いている。しかし、量子ホール効果は、低温（絶対温度 1 度（1 ケルビン）以下）かつ強磁場下（地磁気の約 20 万倍である 10 テスラ以上）で起こる現象である。強磁場の発生には、超伝導電磁石などの強磁場発生装置が用いられる。強磁場発生装置は大型で高価であることに加え、その周囲への漏れ磁場の影響が大きいので、電子製品や工具などの磁性体を近くで用いることができない。そのため、計測装置開発メーカーや計測器の測定値を保証する校正事業者などの民間企業で直接利用できる手軽なものではなかった。強磁場発生装置を用いない簡便な抵抗標準を実現できれば、国家標準と同等精度の抵抗標準を民間企業などのより多くのユーザーが直接使用できるようになり、電気計測の精度の向上が期待される。そのため強磁場発生装置を用いない抵抗標準の研究が世界中で行われていた。

本研究ではトポロジカル絶縁体で発現する「量子異常ホール効果」と呼ばれる現象に着目した。トポロジカル絶縁体は世界中で活発に研究が進められている物質であり、その基礎となる理論的研究に対して 2016 年にはノーベル物理学賞が授与されている。量子異常ホール効果は、「量子ホール効果」と同様にホール素子の電気抵抗の値が量子化抵抗値となる物理現象であるが、量子ホール効果と違い、小型磁石（数 100 ミリテスラ程度。ホームセンターなどで購入可能な事務用マグネットに相当）程度の弱磁場で発現するため、強磁場発生装置を必要としない。そのため、量子異常ホール効果を用いた抵抗標準素子が開発できれば、超伝導電磁石などの強磁場発生装置が不要になると期待される。しかし、これまでの量子異常ホール効果を用いた測定では、わずかに電流を流しただけで期待される量子化抵抗の値からずれてしまうという不安定性の問題があり、電気抵抗測定の基準として用いることができなかった。

■ 研究の経緯 ■

本研究では、量子異常ホール効果の電流に対する安定性を高めるため、トポロジカル絶縁体の品質向上に取り組んだ。特に、トポロジカル絶縁体作製時の条件を最適化することによって、実用的な測定電流を流しても量子化抵抗値からの相対的なずれを 1 億分の 1 以下に抑えられる安定な素子を実現した。これにより、抵抗の国家標準レベルで必要とされる 8 桁の精度を持つ抵抗標準のプロトタイプを開発できた。

なお本研究の一部は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST「トポロジカル絶縁体ヘテロ接合による量子技術の基盤創成（研究代表者：川崎雅司）」などによる支援を受けて行ったものである。

■ 研究の内容 ■

量子異常ホール効果はビスマス、アンチモン、テルル、クロムの 4 つの元素を適切な比で組み合わせたトポジカル絶縁体などにおいて発現する。理想的には、これら 4 つの元素の比がトポジカル絶縁体全体にわたって均一であることが求められる。しかし、実際に作製されるトポジカル絶縁体では、濃度のばらつきにより元素の比が不均一な箇所が生じ、電流に対する不安定性の原因となっていた。今回、元素の比や素子構造、素子作製時の温度などの条件を最適化することによって不均一性を低減し、電流に対する安定性を改善した。図 1(左)は、作製したトポジカル絶縁体を加工して作製した素子の光学顕微鏡写真である。素子は集積回路用パッケージに搭載し、配線されている。まず、作製した素子の電流に対する安定性を確認するための抵抗測定を行った。図 1(右)は作製した素子の電気抵抗値の測定電流依存性を弱磁場下(小型磁石が作る 200 ミリテスラ程度)において測定した結果を示す(図では量子化抵抗値からのずれを相対値で表示)。測定電流が 2 マイクロアンペア以下のとき、量子異常ホール効果によって、抵抗値の量子化抵抗値からのずれがゼロに近づいている。一方、2 マイクロアンペア以上では、量子化抵抗値からずれていく様子が観測された。この結果から、2 マイクロアンペア程度の電流を流しても量子化抵抗値を維持できることが分かった。マイクロアンペアという電流量は、これまでに報告されている値より 2 桁程度大きな電流量である。これは、測定電流に対する安定性が大幅に改善したことを示している。

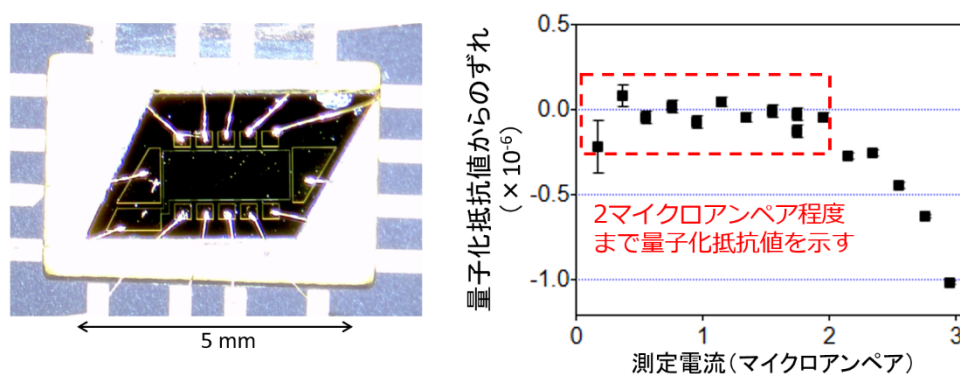


図 1 (左)トポジカル絶縁体を用いて作製した量子抵抗標準素子。(右)抵抗値の量子化抵抗値からのずれ(相対値)の測定電流依存性。

強磁場発生装置を用いない抵抗標準を実現するために、図 2(左)のように素子と小型磁石を組み合わせたプロトタイプを開発した。従来の抵抗の精密測定で使用してきた強磁場発生装置である超伝導電磁石(図 2(右))と比較すると、磁場発生部分で体積 25 万分の 1、重量 2 万分の 1 と大幅な小型軽量化を実現できた。従来の抵抗標準では、超伝導電磁石を冷却するために冷凍機自体も大型であったが、今回の小型化によって冷凍機を含めた抵抗標準装置全体の小型化が可能になる。コストの面でも、1 千万円前後する高価な超伝導電磁石を 100 円未満の小型磁石に代替でき、かつ冷凍機もより安価な小型なものに変更可能になる。また、小型磁石は磁場が漏れる範囲もセンチメートル程度と小さいため、周囲の実験環境への影響もほとんどない。

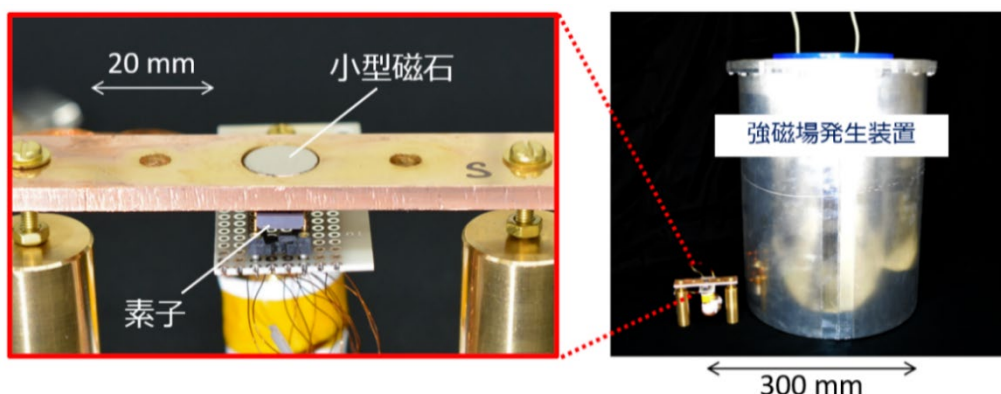


図2 (左)小型磁石を用いる新型量子抵抗標準素子と、(右)従来必要だった強磁場発生装置との比較

次に、開発したプロトタイプのパフォーマンス評価を行った。図1の測定は電流に対する安定性を確認するためには十分なものであったが、ここでは最高パフォーマンスを評価するためにより高精度な測定を実施した。この評価のために、小型磁石を用いて発現させた量子異常ホール効果を利用する新型抵抗標準素子と、強磁場発生装置を用いて発現させた量子ホール効果を利用する従来の抵抗標準素子のそれぞれの抵抗値を求めた。図3は、それぞれの素子で測定された抵抗値の量子化抵抗値からのずれを相対値で比較したものである。この測定から、強磁場発生装置を用いない新型素子は、強磁場発生装置を用いた従来の素子と同様に8桁の精度を持つ抵抗標準を実現できることが分かった。産総研が国家標準として提供している抵抗校正の校正測定能力を実現するには、抵抗標準の相対標準不確かさが 28×10^{-9} 程度であることが必要である。図3に示すように、新型抵抗標準素子の値は不確かさを考慮してもその値の範囲に収まっており、国家標準と同等精度の抵抗標準として利用できることを確認した。

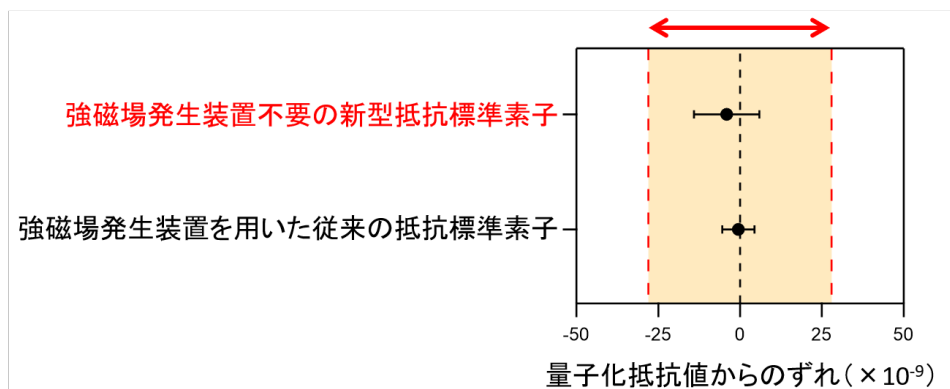


図3 新型抵抗標準素子、従来の抵抗標準素子それぞれで測定された抵抗値の量子化抵抗値からのずれ(相対値)。図中の矢印は産総研の抵抗校正における校正測定能力を実現可能な相対標準不確かさの大きさ($\pm 28 \times 10^{-9}$)。

■ 今後の予定 ■

今回、強磁場発生装置を用いずに国家標準と同等の精度の抵抗標準を実現することができた。今後はさらに品質改善に取り組み、利便性・信頼性の向上を目指す。また、多くのユーザーにも使っていただけるよう、今回の新型抵抗標準素子を搭載することで小型軽量化した精密電気計測装置などの開発に取り組む予定である。

■ 論文情報 ■

掲載誌: Nature Physics

論文タイトル: Quantum anomalous Hall effect with a permanent magnet defines a quantum resistance standard

著者: Yuma Okazaki, Takehiko Oe, Minoru Kawamura, Ryutaro Yoshimi, Shuji Nakamura, Shintaro Takada, Masataka Mogi, Kei S. Takahashi, Atsushi Tsukazaki, Masashi Kawasaki, Yoshinori Tokura, and Nobu-Hisa Kaneko

■ 本件問い合わせ先 ■

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

物理計測標準研究部門 量子電気標準研究グループ

主任研究員 岡崎 雄馬 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第3
TEL: 029-861-1438 FAX: 029-861-3469
E-mail: yuma.okazaki@aist.go.jp

【取材に関する窓口】

国立研究開発法人 産業技術総合研究所(理事長 石村 和彦 URL: <https://www.aist.go.jp/>)
広報部 報道室
TEL: 029-862-6216 E-mail: hodo-ml@aist.go.jp

国立研究開発法人 理化学研究所 広報室 報道担当
〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1
E-mail: ex-press@riken.jp

国立大学法人 東京大学 大学院工学系研究科 広報室
TEL: 03-5841-0235 FAX: 03-5841-0529 E-mail: kouhou@pr.t.u-tokyo.ac.jp

国立大学法人 東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目 1-1
TEL: 022-215-2144 FAX: 022-215-2482 E-mail: press.imr@grp.tohoku.ac.jp

国立研究開発法人 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
TEL: 03-5214-8404 FAX: 03-5214-8432 E-mail: jstkoho@jst.go.jp

【JST 事業に関する窓口】

国立研究開発法人 科学技術振興機構 戦略研究推進部
グリーンイノベーショングループ
嶋林 ゆう子
〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's五番町
TEL: 03-3512-3531 FAX: 03-3222-2066 E-mail: crest@jst.go.jp

【用語の説明】

◆量子ホール効果

電流を運ぶ電子の動きが2次元面内に制限された薄膜材料に10テスラ程度の強磁場を印加した際、電流に直交する方向の電気抵抗（ホール抵抗）が $h/e^2 = 25\,812.807\,459\,304\,5\dots$ オーム（ e は電気素量、 h はプランク定数）という量子化抵抗値をとる物理現象。量子化抵抗の値は時間が経っても変化せず素子の形状などにも依存せず、世界中どこでも同じ値をとる。そのため抵抗標準として各国で採用されている。

◆量子ホール素子

前述のとおり量子ホール効果による量子化抵抗は、素子に電流を流したときに、電流と直交する方向に発生する電圧を通じて測定される。直交する電流と電圧を測定するために、電流測定端子と電圧測定端子が直交する電極構造が必要であり、そのような構造の素子をホール素子と呼ぶ。特に量子ホール効果によって量子化抵抗値を示すホール素子を量子ホール素子と呼ぶ。

◆超伝導電磁石

マイナス270℃程度の極低温で電気抵抗がゼロになる電線（超伝導線）をコイル状に巻いた電磁石。極低温に冷却し、数十アンペアから百アンペア程度の電流を流すことによって強磁場を発生させる。医療用のMRIや超伝導磁気浮上式リニアモーターカーなどでも超伝導電磁石が用いられている。MRI同様に強磁場発生装置周辺の管理区画には時計やクレジットカードなどを持ち込めないなど取り扱いに注意が必要である。

◆トポロジカル絶縁体

トポロジカル絶縁体は、材料の内部は電気を通さない絶縁体でありながら、表面のみにおいて電気を通す電気特性を有する物質の総称であり、近年ビスマス、アンチモン、テルルの3元化合物などにおいて発見された。量子異常ホール効果を発現させるためには強磁性を持たせる必要があり、クロムを加えて磁気的な性質を付与したトポロジカル絶縁体を用いている。トポロジカル絶縁体の性質を理解するための基礎的な理論研究に対し2016年ノーベル物理学賞が授与されている。

◆量子異常ホール効果

量子ホール効果は、外部磁場によって引き起こされる電子の円運動（サイクロトロン運動）を起源としている。そのため外部磁場をゼロにすると量子ホール効果は発現しない。一方磁石のような磁気的性質を持った材料においては、材料自体の磁気的性質が外部磁場と同等の役割を担うため、抵抗値が量子ホール効果と同じ量子化抵抗値をとる。この現象は量子異常ホール効果と呼ばれ、2013年にトポロジカル絶縁体で発見された。量子異常ホール効果は外部磁場を印加しなくても発現するが、本研究ではトポロジカル絶縁体の磁気的性質を安定化する目的で弱い補助磁場を小型磁石によって印加している。

◆テスラ

磁場の強さを表す単位。例えば地磁気は約 50 マイクロテスラ(マイクロは百万分の 1)、医療用 MRI で発生させている磁場は一般的に 1.5 テスラ程度と言われる。量子ホール効果を用いた従来の抵抗標準では、さらに強力な 10 テスラ以上の強磁場が必要である。

◆校正測定能力

測定機器などの校正を行う際に達成可能な最小の測定不確かさ。

◆標準不確かさ

1993 年に初版が国際文書として発行され、ISO(国際標準化機構)及び IEC(国際電気標準会議)の規格(ISO/IEC Guide 98-3)としても位置付けられている「測定における不確かさの表現のガイド」(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: GUM、以下「ガイド」という)によって定義された測定値の信頼性を表す指標。従来は計測の信頼性を表すのに「誤差」が用いられてきたが、その大きさを見積もる方法が統一されていなかった。このガイドによって「不確かさ」(uncertainty)を見積もる方法が国際的に統一された。「標準不確かさ」(standard uncertainty)は標準偏差で表した測定結果の不確かさを表す。