

原子層物質へのレーザー照射で 二次元トポロジカル物質への相転移を実現

理工学部電気電子工学科・理工学研究科機能物質創成コース准教授 春山純志

原子数層からなる半導体をゼロハンテープによる機械剥離で創製、それにレーザー光を照射するだけで二次元トポロジカル絶縁体相に転移させることに世界で初めて成功し、物理の世界で世界最高権威を持つ米国物理学会誌「Physical Review Letters」に掲載されました。エネルギー損失や発熱がなく、動作エラーの小さい次世代電子回路の基盤技術として発展することが今後大いに期待されます。

トポロジカル絶縁体とは？

皆さんは図1a、bの穴の有無の2つのおいしそうなドーナツ、また図1cの取手の付いた(つまり穴の1個ある)マグカップとを、物質としてどう分類するのでしょうか？まさか穴の有無のドーナツを全く異なる物質として、逆に穴の有るドーナツとマグカップを同じ物質として分類する、なんてことはないと思います。

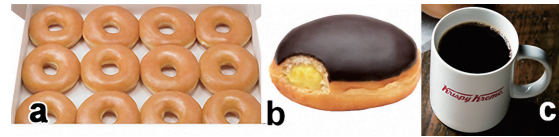


図1 トポロジカルな観点からの物質分類
写真提供: クリスピー・クリーム・ドーナツ・ジャパン株式会社

ところがそれをやってしまうのが、「トポロジ(形状)」という観点からの物質認識です。つまり「トポロジカル物質」の理論に依ると、穴の有無だけでドーナツは異なる物質に、マグカップとドーナツaは同じ物質に分類されます。こうして産まれる「トポロジカル物質」は従来物質(金属や半導体など)の枠に入らない異常な物質として注目され、2016年にノーベル物理学賞を受賞しています。

例えば従来の物質は、電気を良く流す金属、電圧や熱など外部からエ

ネルギーを与えないと電気が流れない半導体に分類できます。これらはエネルギーバンドギャップと呼ばれる電子の存在し得ないエネルギー帯に強い関係があり、前者は電子がそれを感ずることなく走行できるので電気が良く流れ、後者は電子がそれを感じるため、ギャップを飛び越えるエネルギーを与えないと電気は流れません。ギャップが大き過ぎて、もはや電子が飛び越えられない場合は電気が流れない絶縁体になります。スマホやパソコンなどの頭脳・心臓部として動作するCPU(中央演算処理)チップは、これら金属・半導体を組み合わせたトランジスタ素子が僅か1cm画の半導体基板上に数百万個も集積され複雑な回路を組むことで、便利な動作を可能にしています。

ところが「トポロジカル物質」理論で分類された「トポロジカル絶縁体」は、物質内部は絶縁体であるにもかかわらず、物質表面では金属的伝導が発生するという特異な性質を持ちます。しかもこの表面を流れる電子とその自転(スピン)はトポロジカルに保護され、物質固有の散乱要因(欠陥や不純物)の影響を受け

ず一定の抵抗値(量子抵抗 $25.8\text{k}\Omega$)を持ちます。従ってトポロジカル絶縁体の表面を使えば、エネルギー散逸や発熱のない次世代電子スピンの回路や、1億年かかる計算を僅か数秒で行うと言われ、現在注目されている量子コンピュータなどが、極めて低い動作エラーで創製できるとされ、大いに期待されています。その三次元構造での研究は活発でしたが、一方、低次元トポロジカル物質の創製は困難で、特殊な半導体のみが中心でした。二次元トポロジカル絶縁体では、試料中央部は絶縁体ですが試料端(エッジ)は金属伝導を持ち、保護された電子スピンのこの一次元エッジ経路に沿って走行します。この一次元エッジスピン経路は外部電圧などで簡単に制御可能なので、素子応用に最適であると期待されています。

原子層トポロジカル絶縁体の実現

ところがこの2、3年、原子層物質が二次元トポロジカル絶縁体になる可能性が突如報告され、話題を集めています。原子数層からなる物質は従来作成が困難でしたが、2004年にイギリスのグループ

が、鉛筆の芯である黒鉛(グラファイト)・グラフェンの層状物質)の粉をゼロハンテープの上に置いて何度も付け剥がし(機械剥離)するとどんどん薄くなり、最後は炭素原子1個の薄さの二次元層・グラフェンになることを発見し、2010年にノーベル物理学賞を受賞しています。

これに基づき様々な層状物質をゼロハンテープで原子1個から数個の薄さにする実験が世界で流行っています。ですが、この原子層物質がトポロジカル絶縁体にもなるという驚くべき結果が発見されたわけです。しかしこの場合はゼロハンテープによる機械剥離ではなく、極めて複雑で制御性の悪い結晶作成方法でした。これに対して今回春山研究室は、原子数層からなる半導体・二硫化モリブデン(MoS_2)をゼロハンテープによる機械剥離で作成、それにレーザー光を照射するだけで、照射部を二次元トポロジカル相へ転移させることに成功しました(図2、図3a)。

この発見のポイントは、原子層半導体へのレーザー照射で局所的に発生する熱により半導体結晶に滑りと歪を導入し、トポロジカル絶縁体相に相転移させたことにあります。

MoS_2 分子は質量が大きいこと、層垂直方向の対称性が破れていることに加えて、この歪が存在することがトポロジカル絶縁体相創出の決め手になります。トポロジカル相を創製する多様な試みが過去になされてきましたが、元々我々は原子層半導体 MoS_2 に電子線を照射することで、熱を発生させずに、滑りだけを持つ結晶創製に成功していました。今回はそれをレーザー光に置き換え局所的に熱を発生させ、基板温度を300度近くまで上げることで歪を誘起することに成功し

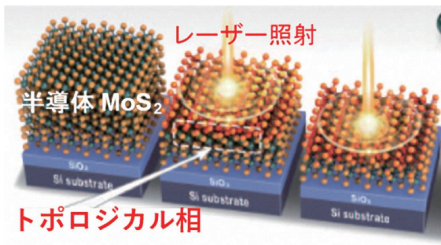


図2 レーザー照射によるトポロジカル絶縁体相創製

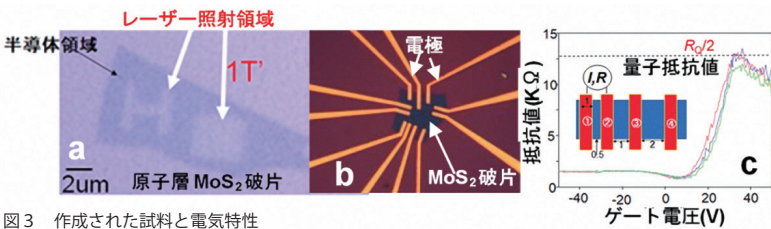


図3 作成された試料と電気特性

たものです。熱は層面内を素早く一様に伝搬するため、照射された上層のみがまずトポロジカル相に転移し、過剰な熱でその下側にある層も次々に転移します。

こうして転移させた照射部を持つ試料に微細加工技術を駆使して複数の電極を形成し、半導体部とのエッジに沿って流れる電子スピンの流れを観測したところ、量子抵抗値が存在することを世界で初めて検出しました(図3b、c)。その他の測定(原子サイズの直径を持つ針でのギャップ観測など)や理論計算も、確かに二次元トポロジカル絶縁体相が存在することを支持しました。

この成果により、原子層半導体物質上へのレーザー照射のみで容易にかつ自在に二次元トポロジカル絶縁体相をパターンニングすることが

可能になりました。前述したように、この相のエッジを流れる電子スピンは欠陥や不純物による散乱の影響を受けないため、この意義は極めて大きいと言えます。例えば前述した量子コンピュータは、夢のコンピュータとしてまさに今、Googleやマイクロソフト、IBMなどが熾烈な研究競争を繰り広げています。しかしその最大の問題点は欠陥などによる散乱が原因で回路に発生する動作エラーで、膨大なエラー訂正回路を構成する必要があります。これに対し、本方法で自在にトポロジカル相回路をパターンニングし、エッジ電子スピンを活用して動作させれば、エラーは大幅に減少し、訂正回路素子数も大幅に低減できることが今後大いに期待できます。

本研究は、東京大学物性研究所・勝本信吾研究室、同大学院工学系研究科機械工学専攻・丸山茂夫研究室、カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学、マドリッド自治大学、ピサ大学、との共同研究で、2019年10月2日付けで、Physical Review Letters (DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.146803) に掲載されました。