

マイナス金属イオンを含む酸化物で超伝導を発見

—逆ペロブスカイト酸化物初の超伝導体—

概要

金属元素は、化合物中では電子を放出し、プラスに帯電した陽イオンになるのが一般的です。しかしある種の化合物中では、金属元素が電子を吸収し、マイナスに帯電した陰イオンとなります。理学研究科の大学院生オーダ・モハメッドらは、この**マイナス金属イオン**と酸素を含む化合物である「**逆ペロブスカイト酸化物**」において**超伝導を発見**しました。逆ペロブスカイト酸化物での超伝導の発見は初めてであり、珍しいマイナス金属イオンを含む酸化物の性質を調べる研究発展の口火を切ると期待できます。

さらに、逆ペロブスカイト酸化物には、2016年のノーベル物理学賞を受賞した「トポロジー」という性質がかかわっていると予言されています。本研究では、**今回発見の超伝導体がトポロジカル超伝導体である可能性**も理論解析に基づいて提案しました。

本成果は英国 Nature Publishing Group の発行するオンライン誌 *Nature Communications* に2016年12月12日に掲載されました。本研究は、本学理学研究科の前野悦輝教授のグループ、名古屋大学の小林伸吾特任助教ら、そして本学基礎物理学研究所の佐藤昌利教授による共同研究です。本研究は、主に科学研究費補助金「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（代表者：本学 川上則雄教授）の支援を受けて行われました。

1. 背景

超伝導とは、電気抵抗が完全にゼロになる現象です。超伝導体で電線を作れば、エネルギーを損なうことなく大きな電流を流せます。このため、磁気共鳴イメージング（MRI）装置、粒子加速器、またリニアモーターカーなど、小型で強力な電磁石が必要な用途には超伝導は欠かせません。

さて、「**ペロブスカイト酸化物**」は、 ABO_3 （Oは酸素）という単純な組成式で表されます。AやBとして実に多様な元素を使って合成が可能で、地球内部における主要な組成である $MgSiO_3$ をはじめ、非常に一般的な物質群です。酸化物で初めての超伝導が発見されたほか、磁場をかけると電気抵抗が大きく変化する超巨大磁気抵抗物質など、数々の面白い性質を示す物質が存在します。また関連物質には、高温超伝導を示す銅酸化物や、スピン三重項超伝導体として期待されるルテニウム酸化物などもあります。一方、その「鏡写し」といえる「**逆ペロブスカイト酸化物**」（**図1**）については、ほとんど研究されてきませんでした。ここでいう「鏡写し」という比喻は、ペロブスカイト酸化物の中でイオンが帯びている電気の正負と、逆ペロブスカイト酸化物での正負が逆転しているという意味です。（デジカメ以前の世代の方々には、写真フィルムのポジとネガのような関係、という方がわかりやすいかもしれません。）**逆ペロブスカイト酸化物**という、いわば「**鏡の中の物質**」がどのような性質を持つのか、未開拓の分野だけに大変興味深いところです。

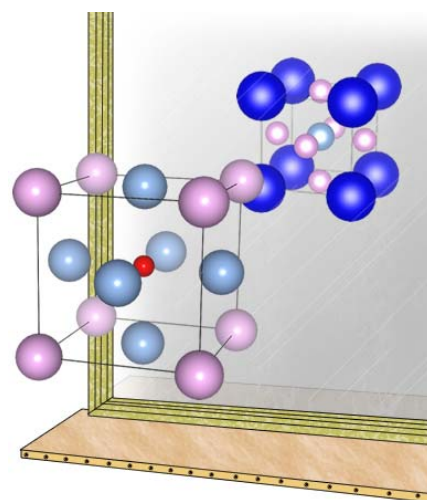


図1: ペロブスカイト酸化物(手前)と、電荷が逆転した、いわば鏡写しのような逆ペロブスカイト酸化物(奥)。赤とピンクはプラスイオン、青と水色はマイナスイオンを表す。

逆ペロブスカイト酸化物には、特に面白い特徴があります。一つ目は、珍しい「**マイナス金属イオン**」を含んでいるということです。そもそも金属元素は、物質中では電子を放出してプラスイオンになるのが普通です。ところが逆ペロブスカイト酸化物では金属がマイナスに帯電しており、これは異常とも言える状態です。本研究で用いた Sr_3SnO も 1980 年に合成されたものの、その詳しい性質についてはこれまでほとんど知られていませんでした。逆ペロブスカイト酸化物は、珍しいマイナス金属イオンを含む未開拓の物質といえます。

二つ目の面白い特徴は、今年のノーベル物理学賞を受賞する「**トポロジー**」と関係しています。トポロジーとは、もともとはモノの形を数字で表す抽象的な概念です。たとえばメビウスの帯では、ねじれの回数が帯の形を特徴づける数です。ねじれが 0 回の場合は普通の輪になり、1 回の場合はメビウスの帯になります。最近、物質科学にも「トポロジー」という概念が導入されて、研究が急速に発展しつつあります。物質科学では、物質中の電子の状態を数字で表したものがトポロジーです。たいていの物質では、電子の状態はねじれておらず、いわゆる普通の状態です。一方、**電子状態がねじれた「トポジカル物質」**はまだ多くは知られていません。一部の逆ペロブスカイト酸化物では、マイナス金属イオンのために、電子の状態が「ねじれている」ことが理論的に予想されています。しかも、今回超伝導を発見した物質では、**超伝導状態もトポジカルな性質を持つ「トポジカル超伝導体」の可能性**があります。したがって、トポロジーの観点から見ても、逆ペロブスカイト酸化物は「新しい物質」なのです。

2. 研究手法・成果

理学研究科博士課程 2 回生のオーダ・モハメッド、修士課程 2 回生の池田敦俊らは、逆ペロブスカイト酸化物のひとつである $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ という物質を合成し、その超伝導を発見しました。組成式の中の $3-x$ は、Sr の一部が不足していることを示しています。この物質は空気中に取り出すとすぐに分解してしまうので、実験の多くはアルゴンガス中や真空中で行いました。超伝導の特徴であるゼロ抵抗を観測した結果が図 2 です。また、超伝導のもうひとつの重要な性質である、磁束をはじこうとするマイスナー効果も観測しました。これは**逆ペロブスカイト酸化物で初めて発見された超伝導**です。さらに、名古屋大学の博士課程 1 年生の福元敏之らによる理論解析から、超伝導状態も含めて電子の状態がトポロジー的に「ねじれている」可能性もあることも指摘しました。この理論解析には、東京大学物性研究所スーパーコンピュータセンターの計算機システムも利用しました。

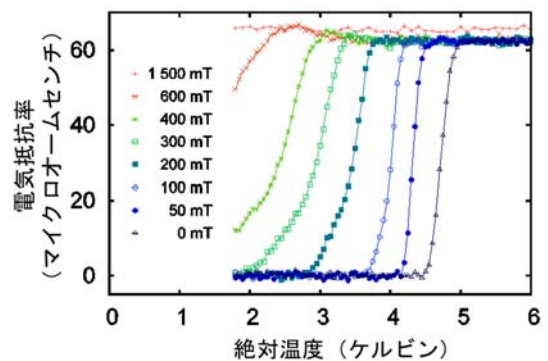


図 2：逆ペロブスカイト酸化物が示す電気抵抗ゼロ。磁場のもとでは超伝導状態が壊れる。1,500 mT（ミリテスラ）は 1 万 5 千ガウスの磁場。

3. 波及効果、今後の予定

過去にはペロブスカイト酸化物での超伝導発見が、その後の高温超伝導体の発見や超巨大磁気抵抗物質の研究などへの波及の基礎となりました。本研究では、逆ペロブスカイト酸化物での初の超伝導を発見できました。今後はマイナス金属イオンが物質中でどのように働いているのか、あるいは超伝導状態のトポロジーは実際どうなっているのかなどを詳しく調べる必要があります。本成果を契機に、逆ペロブスカイト酸化物が注目され、他にも超伝導体があるのか、また他の面白い性質を示す物質があるのかなどを求めて、関連の研究が加速されるでしょう。

4. 研究プロジェクトについて

この研究は、以下のプロジェクトによる支援を受けました。

- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金・新学術領域研究
「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(H27-31年度)
(JSPS KAKENHI Grant Numbers JP15H05851, JP15H05852, JP15H05853, JP15H05855)。
- ・ 公益財団法人 泉科学技術振興財団 平成 28 年度研究助成 (H28-J-146)



<追加の図>

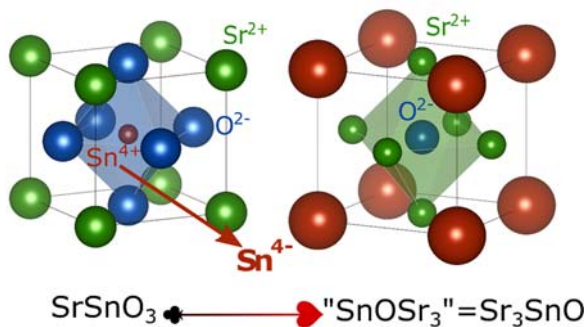


図 3 : 左は通常のペロブスカイト酸化物 SrSnO_3 。右はマイナス金属イオン Sn^{4-} を含む逆ペロブスカイト酸化物 SnOSr_3 (Sr_3SnO とも書ける) で、本研究で超伝導を発見した。

Nature Communications 論文より。

<論文タイトルと著者>

タイトル : Superconductivity in the antiperovskite Dirac-metal oxide $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$

著者 : Mohamed Oudah, Atsutoshi Ikeda, Jan Niklas Hausmann, Shingo Yonezawa, Toshiyuki Fukumoto, Shingo Kobayashi, Masatoshi Sato, and Yoshiteru Maeno

(オーダ・モハメッド, 池田敦俊, ヤン・ニクラス・ハウスマン, 米澤進吾, 福元敏之, 小林伸吾, 佐藤昌利, 前野悦輝)

掲載誌 : Nature Communications 7 (2016) 13617