

## 強いスピン軌道相互作用を利用した省エネメモリデバイス材料の開発

東京大学 物性研究所 助教 平井 大悟郎

私達の身の回りにある電子機器の中には多くのエレクトロニクス材料が使われています。これらの材料は、電流や電圧によって電気的性質を変える、または磁場によって磁氣的性質を変えることで情報の書き込みや動作を行っています。このような「対角応答」に対して、磁場で電気的な状態を変化させたり電場で磁氣的性質を変えたりする性質を「非対角応答」と言います。非対角応答が実現できるとデバイスを設計する自由度が高くなり、例えば、電圧によって磁性を制御するタイプの新しいメモリデバイスや磁場により非接触で動作するデバイスなどを実現することができます。このため、これまで非対角応答を実現する材料の開発が盛んに行われてきました。これまでに開発されたなかでも、最も有力な物質群は強磁性と強誘電性を併せ持つマルチフェロイック物質と呼ばれるもので、すでに非対角応答が実証されています。しかし、マルチフェロイック物質は数が限られており、動作温度が室温よりも低いものが多いという課題がありました。

本研究では、「スピン軌道相互作用」という性質に着目し、マルチフェロイック物質とは異なる原理での非対角応答の実現を目指しました。スピン軌道相互作用は、物質の磁氣的性質の源であるスピンと電子の軌道運動を結びつける力で、トポロジカル絶縁体という新奇な状態をもつ物質やスピン流の生成などに深く関わっているため、近年大きな注目を集めています。元素ごとにスピン軌道相互作用の強さは大きな違いがあり、原子番号の大きな元素では軽い元素と比べはるかに強いスピン軌道相互作用が働くことが知られています。そこで、原子番号の大きな遷移金属元素を含む化合物を合成しその磁氣的、電気的性質を調べることで、スピン軌道結合の影響が強く物性に現れる物質の探索を行いました。様々な物質を調べた結果、 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  という物質では強いスピン軌道相互作用によってスピンと軌道が結合した特殊な電子の状態が出来ていることを明らかにしました(図1)[1]。この状態では、電子の運動方向に依存してスピンの方向が固定されているため、例えば、電流を流すだけで磁氣的性質を変えるという非対角応答が起こる可能性があります。最近の私た

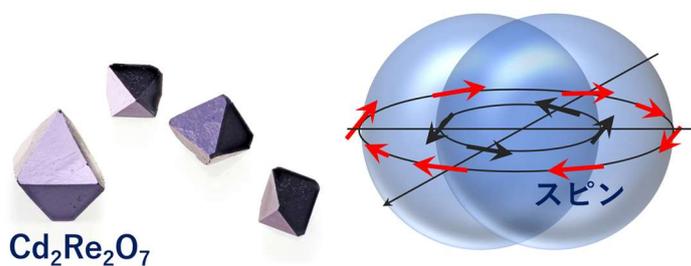


図1(左) 本研究で育成した高品質の  $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  の単結晶。金属光沢のある鮮やかな紫色をしている。(右)  $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  において実現しているスピンと軌道が結合した電子の状態の模式図。電子の動く方向によってスピンの向きは固定されている。

この実験では、電流を  $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  に流した時に磁化率が変化する兆候がみられています。

$\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  の場合、非対角応答が起こる温度はマイナス 70 度程度とまだ室温よりも低いのですが、この原理での非対角応答は室温以上でも実現できる可能性が十分あります。今後さらに、原子番号の大きな遷移金属化合物に着目した物質開発によって、優れた材料が見つかることが期待されます。実際、すでに新しい候補物質  $\text{PbRe}_2\text{O}_6$  を発見し、その性質を調べています[2]。また、物質開発の過程で、見る方向や偏光によって色が変わる物質  $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$ [3] や磁場をかけることで電気抵抗が 200 倍以上変化する物質  $\beta\text{-ReO}_2$ [4] などユニークな性質を持つ物質(図 2) が多数見つかっています。今後も原子番号の大きな遷移金属元素を含む材料において、他の元素では出せないような性質や機能の発見が期待されます。

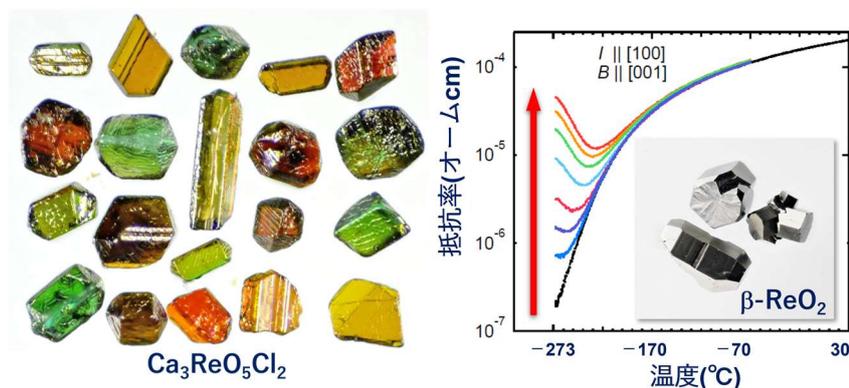


図 2 (左) 偏光板を通して撮影した  $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$  の単結晶。偏光の方向と結晶の無機によって様々な色に変化する。(右)  $\beta\text{-ReO}_2$  の電気抵抗率。磁場をかけると赤矢印のように抵抗率が 200 倍大きくなる。

### 【実用化が期待される分野】

今後情報化社会の進展に伴い、IT 機器のエネルギー消費が爆発的に増加することが予想されます。このため、IT 機器の省電力化は持続可能な社会の実現に向けて非常に重要な課題です。非対角応答を示す物質を使うと従来とは異なる書き込み・読み出しの操作が可能となるため、低消費電力のメモリデバイスの材料などへの応用が期待されています。

[1] Y. Matsubayashi, K. Sugii, H. T. Hirose, D. Hirai, S. Sugiura, T. Terashima, S. Uji, and Z. Hiroi, “Split Fermi Surfaces of the Spin Orbit Coupled Metal  $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  Probed by de Haas van Alphen Effect,” *J. of Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 053702, (2018).

[2] S. Tajima, D. Hirai, T. Yajima, D. Hamane, Y. Matsubayashi, and Z. Hiroi, “Spin orbit coupled metal candidate  $\text{PbRe}_2\text{O}_6$ ,” *J. of Solid State Chem.*, **288**, 121359 (2020).

[3] D. Hirai, T. Yajima, D. Hamane, C. Kim, H. Akiyama, M. Kawamura, T. Misawa, N. Abe, T.-H. Arima, and Z. Hiroi, “‘Visible’  $5d$  Orbital States in a Pleochroic Oxochloride,” *J. Am. Chem. Soc.*, **139**, 10784, (2017).

[4] D. Hirai, T. Anbai, S. Uji, T. Oguchi, and Z. Hiroi “Extremely Large Magnetoresistance in the Hourglass Dirac Loop Chain Metal  $\beta\text{-ReO}_2$ ,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **90**, 094708 (2021).