

2024年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

調査研究報告書(公開版)

【研究題目】 新奇的な「交代磁性」の基礎学理とデバイス応用に関する調査研究

【整理番号】 24-東大1

【代表機関】 東京大学

【調査研究代表者(氏名)】 岡林 潤

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】 物質・材料研究機構 三谷 誠司
東北大学 白井 正文

【TIA 外連携機関】 京都工芸繊維大学 (三浦 良雄)

【報告書作成者】 岡林 潤 【報告書作成年月日】 2025 年 3 月 31 日

【連携推進(具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等)】

低消費電力での磁化の操作、磁気記録(ストレージ)を担うスピントロニクスの研究は、飛躍的に前進しており、エレクトロニクスを補う新しい技術として、今後益々必要となる。その基礎となる電子のスピンは、磁気分裂してスピンの平行配列した強磁性体、磁気分裂のない反平行配列した反強磁性体が使われる。近年、反強磁性体であるが磁気分裂のある第三の磁性体「交代磁性(Alter-magnetism)」が理論的に提唱されている。これは、結晶の構造対称性に由来し、全体では反強磁性体であるが、局所的には磁気分裂を生じうる不思議な状態であると理解される。一方で、交代磁性体を用いれば、磁場によるローレンツ力により電子軌道を操作していたホール効果について、局所磁気分裂を用いて無磁場にてホール効果を実現できるため(結晶ホール効果)、革新的な材料となりうる。そのため、様々な研究が世界的に行われているのが現状である。

代表的な物質として、ルチル型結晶構造の RuO_2 が挙げられる。 RuO_2 をスピントロニクス素子の一部に用いると、 RuO_2 層に流した電流から自然にスピン流に変換されることになり、スピントロニクスにおいて画期的な現象をもたらす可能性を秘めている。他にも構造対称性が等方的でない MnTe や CrSb などでも交代磁性の可能性が示唆されている。本研究では、スピン分裂が最も大きい RuO_2 に着目し、この物質の交代磁性を実証すること、ホール効果デバイスに繋げ、スピントロニクス素子を実現させることを目的とする。

反強磁性体 RuO_2 の近年の研究では、全体では磁化がないためマクロな磁気測定では調べられない。ミクロな各原子サイトの磁気モーメントを決める必要がある。近年の研究では、バルク RuO_2 の μSR (ミュオンスピン共鳴)の実験では、Ru サイトの磁化がないと報告されている。しかし、薄膜ではその限りでなく、構造ひずみの影響を受けて、有限の磁気モーメントがなければ伝導特性などを説明できない。多くの論争がある部分であり、本研究はこの部分の核心に迫る X 線磁

気分光による実験を進めていくことも本研究の目的である。

本研究では、2024 年度に 3 回のワークショップを開催し、上記内容を含めて連携研究者と議論を進めた。別プロジェクトとの合同研究会を開催し、関連する研究者も含めて交代磁性や多極子の基礎と応用に関する検討を進めた。そして、実験および理論計算の結果を論文として投稿するまでに至った。

【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

交代磁性を示す RuO_2 は結晶方位が重要であることが判りつつある。そこで本研究では、スパッタ法により様々な基板上への RuO_2 の堆積を行い、結晶方位を[100], [101]など異なるものを結晶成長した。透過電子顕微鏡などにより、 RuO_2 の結晶の原子配列や規則度、界面の平坦さを確認した。そして、ホール効果測定用の素子作製と、磁気抵抗効果を実証した。

高エネ研放射光施設(KEK Photon Factory)において、XMCD, XMLD の方位による反強磁性秩序の違いを調べた。 RuO_2 にて、XMCD は検出されないが XMLD が検出されることを示した。特に、反平行スピンの揃った Neel 軸の向きも一般には知る術がなかったが、XMLD の角度依存性から決定できた。独自の X 線磁気分光により、交代磁性を調べる測定法を確立しつつある。

第一原理計算により、ひずみや原子内クーロン相互作用などを系統的に調べた。実験と直接的に比較し、ひずみ依存性や磁気モーメント、クーロン相互作用などの物性値の決定に繋げた。反強磁性体は外部応答がないため、理論計算と実験の比較が難しいことが多いが、本研究では磁化の高次の成分を検出する XMLD と結晶ホール効果と合わせて電子状態の議論を進めているのが特徴である。

これらの結果を Nature Communications に投稿中である。また、学会発表として、応用物理学会 2 件、日本放射光学会 1 件、磁性応用に関する国際会議 1 件を行った。

【今後の活動予定】

本共同研究グループは、XMLD, 結晶ホール効果など磁化の高次成分と理論計算を組み合わせることで交代磁性の実証を行える特徴があり、今回の RuO_2 以外にも交代磁性体の候補を探索していく。各々の研究だけではできない議論を多角的に進めることで本質を捉えるためのチームであり、交代磁性の分野にて、世界初の新しいアプローチを提唱していくようにする。

本調査研究を礎として、第三の磁性としての交代磁性体の研究が飛躍的に進めることができつつある。今後、科研費の大型予算の申請により、日本での交代磁性(多極子物性)の研究に関するプレゼンスも高めていく。上記のように、新規の研究を立ち上げていくには、専門家による連携と包括的な議論が不可欠であり、今回の TIA「かけはし」を基にした研究展開が極めて重要な役割を果たす。そして、今後はスピントロニクスの研究分野を次世代型スタイルに前進させていくようにする。