

論文の内容の要旨

論文題目 Controlling non-trivial magneto-transport properties
 induced in oxide heterointerfaces
(酸化物界面に誘起される非自明な磁気輸送特性の制御)

氏 名 大内 祐貴

背景と目的

強磁性体と強いスピン軌道相互作用を有する非磁性体からなるヘテロ構造では、界面における空間反転対称性の破れから、有効的なDzyaloshinskii-Moriya相互作用が誘起され、磁気スキルミオンなどのキラルなスピン構造が形成される。これらは新たな情報担体として注目され、金属材料の積層膜で活発な研究が行われてきた。金属材料の強磁性体はキュリー温度が室温を超え、室温動作デバイスとしての利点を有する一方、表面・界面の酸化による変質や界面付近の結晶格子の乱れなどによる影響が議論されており、これらの影響を低減した系における外場制御や界面設計の知見が重要となっている。近年、酸化物においても強いスピン軌道相互作用に由来する電子状態や磁気特性が明らかにされている。これらの酸化物では、成長条件を制御することで格子整合性のある高品位なヘテロ構造の作製が可能である。特に、強磁性金属 SrRuO_3 と強いスピン軌道相互作用を有する常磁性半金属 SrIrO_3 からなるヘテロ構造において、磁気スキルミオン形成を示唆する非自明な磁気輸送特性が報告された。そこで本博士論文では、エピタキシャル成長させた酸化物ヘテロ構造において、磁気輸送特性や近接効果の測定を通して、スピン軌道相互作用に由来したスピン現象の電場制御や設計方針の確立を目指した。

I. SrRuO₃-SrIrO₃ヘテロ構造における異常ホール効果の電場制御

SrIrO₃ とのヘテロ界面を持つ強磁性体 SrRuO₃ の異常ホール効果について、電場制御性を調べた。SrRuO₃ 単体の異常ホール効果は内因性異常ホール効果として、バンド構造の特異性に由来した波数空間のベリー位相を反映し、磁化に対して単調に変化せず、符号反転を生じることが知られている。本章ではこのような異常ホール効果が、SrIrO₃ とのヘテロ構造を作製した場合、大きく電場制御されることを見出した。薄い SrIrO₃ 側からの電場が重要であることから、界面付近への電場印加が、強磁性体中のキャリア密度変化では説明できない影響を与えることを明らかにした。

II. SrRuO₃-SrIrO₃ヘテロ構造におけるトポロジカルホール効果の電場制御

SrRuO₃-SrIrO₃ヘテロ構造に現れるトポロジカルホール効果について、電場制御性を調べた。トポロジカルホール効果は、非共面的なスピン構造に由来しており、伝導電子はスピン構造中を遍歴する際に実空間上のベリー位相を獲得し、実効的な磁場を感じる。本章では、磁気光学カー効果測定による磁化曲線の抽出によって、トポロジカルホール効果が電場制御されることを初めて見出した。本ヘテロ構造では磁気スキルミオンがトポロジカルホール効果を与えるとされており、その変調は磁気スキルミオンの大きさ、すなわち Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用の変調と考えられ、界面付近への電場印加が、界面の非対称性に由来する効果を制御可能であることを明らかにした。

III. SrRuO₃-SrIrO₃ヘテロ構造における近接効果

SrRuO₃-SrIrO₃ヘテロ構造の物質選択における特徴を明らかにするため、SrIrO₃ に誘起される近接効果を調べた。特に近接磁化と Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用の相関については金属材料系においても議論が続いている。本章では SrRuO₃-SrIrO₃ヘテロ構造について SPring8 BL39XU を利用して、X線吸収分光およびX線磁気円二色性を測定し、Ir層における電荷移動、近接磁化の大きさを見積もった。そして、本ヘテロ構造では電荷移動がほとんどなく、IrにはSrRuO₃と逆向きで小さな磁気モーメントが誘起されることを見出した。誘起された磁気モーメントはIr酸化物に特有な大きい軌道磁気モーメントの寄与を含んでおり、理論計算と合わせることで、近接磁化はDzyaloshinskii-Moriya相互作用と単純な相関はないものの、強いスピン軌道相互作用の影響を受けることを明らかにした。

IV. ペロブスカイト型Co酸化物における磁気輸送特性

4,5章で見出した電場制御の起源として界面の電位勾配に加え、SrIrO₃層のフェルミ準位変化が考えられる。後者の場合、より電荷移動の大きな組合せでヘテロ構造を設計すれば、大きなDzyaloshinskii-Moriya相互作用の発現が期待できる。本章では界面での電荷移動を重視した強磁性体としてCo酸化物を選択し、磁気輸送特性を測定した。

$\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3\text{-SrIrO}_3$ ヘテロ構造においては、トポロジカルホール効果は検出されず、 $\text{SrRuO}_3\text{-SrIrO}_3$ の場合よりも界面の効果が小さいことを見出した。これまでの結果と合わせることで、界面誘起のスピ構造制御には電荷移動よりも、界面付近の電位勾配が重要であり、 $\text{SrRuO}_3\text{-SrIrO}_3$ におけるスピ構造形成にはIrの価数や SrRuO_3 側のスピ軌道相互作用も重要である可能性が高いことを明らかにした。

結論

強いスピ軌道相互作用を有する SrIrO_3 と強磁性体 SrRuO_3 とのヘテロ構造において、ホール効果、磁気光学効果の電場依存性を測定し、スピ軌道相互作用に由来した磁気輸送特性が、ヘテロ構造の設計を工夫することで電場制御可能であることを明らかにした。さらに、界面における磁気的な近接効果と、異種強磁性体を用いたヘテロ構造における磁気輸送特性を測定し、スピ軌道相互作用による界面磁気特性への影響やトポロジカルなスピ構造の形成を調べた。 SrIrO_3 を用いたヘテロ構造においては、Irが4価の方が、5価よりも有効的なスピ軌道相互作用を介した非対称性の効果が大きく、トポロジカルなスピ構造形成に好ましいと同時に、強磁性体側のスピ軌道相互作用や磁気異方性も界面由来のスピ構造形成に影響を与えることが示唆された。