

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04813

研究課題名（和文）スピン軌道相互作用を利用した3d遷移金属酸化物の磁性制御

研究課題名（英文）Controlling magnetism in 3d transition metal oxides through spin-orbit interactions

研究代表者

菅 大介（Kan, Daisuke）

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：40378881

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：遷移金属酸化物のエピタキシャル薄膜やヘテロ構造を対象として、スピン軌道相互作用が関連した物性に着目しつつ物性開発を行った。ヘテロ構造化による「遷移金属-酸素結合」の変化に伴って、遷移金属中の磁気異方性は変調されることを示した。また磁気記憶材料の重要な特性の一つである垂直磁気異方性の安定化には、酸化物中への圧縮ストレインの印加が有用であった。この知見を活かすことで、通常であれば共存することが稀なハーフメタル電子構造と垂直磁気異方性が共存する酸化物NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>を作製できた。また酸化物ヘテロ構造で見られるトポロジカルホール効果的な振舞いに関して実験結果に基づいて別解釈を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遷移金属酸化物は、古くから磁性材料として、研究・開発されてきた。今回スピン軌道相互作用に関連した磁気特性である磁気異方性の制御などについて新たな知見が得られた。今後の材料開発の新たな指針となると期待できる。例えばハーフメタルなど、これまで磁気異方性の制御が困難と考えられていた材料に垂直磁気異方性を付与することで新機能創出につながる。またスピン軌道相互作用に着目することで、酸化物ヘテロ構造におけるトポロジカルホール効果など新奇現象の発見も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we explored functional properties originating from spin-orbit interactions in oxide heterostructures. We find that magnetic anisotropy in transition metal oxides can be controlled by heterostructuring them and modulating their metal-oxygen bonds. Imposing compressive strain through the structural mismatch is found to be useful to stabilize the perpendicular magnetic anisotropy in oxides. In addition, we successfully fabricated the inverse spinel oxide NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> that has both half-metallic band structure and sufficient perpendicular magnetic anisotropy, although these two properties rarely coexist. We also clarified the physical origin of anomalies in transverse resistivity, which resemble what has been claimed to be the topological Hall effect in oxide heterostructures,

研究分野：薄膜材料科学

キーワード：遷移金属酸化物 スピン軌道相互作用 磁気異方性 ヘテロ構造 遷移金属-酸素結合 エピタキシャル薄膜

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

遷移金属を含んだ酸化物は多彩な物性を示し、機能性材料として開発・応用されている。近年では、薄膜成長技術の発展により高品質な酸化物エピタキシャル薄膜やヘテロ界面が作製できるようになり、バルクの物性からは予想もできない興味深い物性(超伝導、マルチフェロイクス、スピントロニクス機能など)が相次いで見出されている。このような物性の発現において、スピン軌道相互作用は重要な役割を担っている。スピン軌道相互作用は電子のスピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントとの間の角運動量の授受を意味し、磁気異方性などの磁気特性制御や、電圧や電流を用いたスピン操作をも可能にする。そのため、遷移金属酸化物におけるスピン軌道相互作用の理解は重要であり、酸化物ヘテロ構造や界面における物質・機能設計においてもスピン軌道相互作用は重要な指針となっている。

### 2. 研究の目的

ヘテロ構造化された遷移金属酸化物中の電子状態はバルクのそれからは少なからず変調される。このことがヘテロ構造や界面に特有のスピン軌道相互作用の起源と考えられてきた。しかしながら、酸素原子などの軽元素の観察は実験的に難しく、ヘテロ構造中の電子状態を決定する「金属-酸素結合」に関する情報は欠落していた。これが、ヘテロ構造化した酸化物におけるスピン軌道相互作用さらには機能特性に対する影響の解明を阻む原因の一つであった。本研究では、スピン軌道相互作用を起源とする磁気異方性に着目しつつ、ヘテロ構造中の「金属-酸素結合」との相関を調べた。得られた知見を基に磁気異方性の制御を行い、磁気記録材料として有用な垂直磁気異方性を有する酸化物の開発を目指した。またトポロジカルホール効果など、その発現にスピン軌道相互作用が重要な役割を果たす新奇な物性の開発も行った。

### 3. 研究の方法

遷移金属酸化物のエピタキシャル薄膜やヘテロ構造は、パルスレーザー堆積法を用いて作製した。構造評価はX線回折測定を用いた。またヘテロ構造中の酸素原子位置の評価には、放射光X線回折を用いた。X線回折強度を再現するように構造モデルを構築することで、酸素原子を含めた薄膜試料中の全構成元素の三次元原子座標を決定することが可能になる。スピン軌道相互作用が関連した物性に関しては、磁気特性や磁気輸送特性の評価から知見を得た。

### 4. 研究成果

#### (1) 酸化物ヘテロ構造中の「金属-酸素結合」の可視化と磁気異方性との相関

ペロブスカイト構造を有する遍歴強磁性体 SrRuO<sub>3</sub> (SRO) は、ヘテロ構造化し RuO<sub>6</sub> 酸素八面体歪みを変調することで磁気異方性が制御できることが明らかになっている。また最近では「異常ホール効果の電界変調」や「トポロジカルホール効果的な振舞い」など興味深い物性も見出されている。これらの物性の理解にはヘテロ構造中の「遷移金属-酸素結合」に関する知見が重要になる。そこで、ヘテロ構造化した SRO に対して放射光 X 線回折を行い、ヘテロ構造中の全構成元素の三次元座標を決定し、Ru-O-Ru 結合を可視化した。試料にはパルスレーザー堆積法によって (110)NdGaO<sub>3</sub> (NGO) 基板上に作製した SRO エピタキシャル薄膜 (膜厚 10nm) を用いた。磁気輸送特性評価から、作製した SRO 薄膜の強磁性転移温度は 150K 程度であり、垂直磁気異方性を有していることを確認した。

放射光 X 線回折測定は SPring-8 の BL13XU にて行い、計 39 本の逆格子ロッドに沿って CTR (Crystal Truncation Rod) 散乱を測定した。観測された全ての回折プロファイルは  $a^0a^0c^-$  パターンの RuO<sub>6</sub> 酸素八面体回転 (図 1) を考慮した構造モデルを用いることで再現できた。同定された回転パターンは SRO バルクにおけるパターン ( $a^-b^+a^-$ ) とは異なり、薄膜化によって面内における RuO<sub>6</sub> 回転が消失したことがわかる。このことは、酸素八面体回転によって格子定数が短くなることに加えて、基板からの圧縮ストレインによる格子変形を考慮することで理解できる。つまり薄膜格子は圧縮ストレインによって面直および面内方向にそれぞれ伸張および縮小します。この格子変形は薄膜面内における八面体回転を抑制し、面直方向の回転を増強している。

これまでの放射光構造解析の結果は、SRO 薄膜が有する垂直磁気異方性の起源に対して解釈を与える。薄膜中の Ru<sup>4+</sup> は 4d  $t_{2g}^4$  の電子配置を有しているが、RuO<sub>6</sub> 酸素八面体の格子歪みによって、 $d_{yz}$  および  $d_{zx}$  軌道が優先的に電子占有される。またこれらの軌道の混成が促進されることで、面直方向の軌道磁気モーメントが誘発され、垂直磁気異方性が実現したと理解できる。実際、放射光 X 線磁気円二色性測定から、SRO 薄膜はおよそ  $0.17 \mu_B/\text{Ru}$  の軌道磁気モーメントを有していることを確認した。

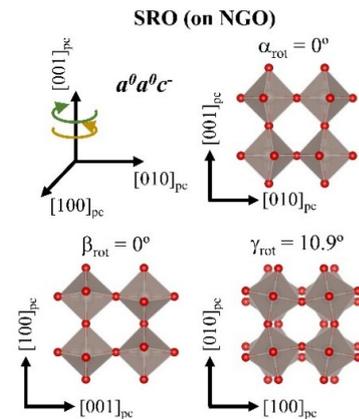


図 1: SRO (膜厚 10nm) / NGO へテロ構造中における RuO<sub>6</sub> 酸素八面体回転。

上記の SRO 薄膜に関する結果は、ほかの強磁性酸化物に対して垂直磁気異方性を付与するための指針を与えるものです。つまり d 電子が  $t_{2g}$  軌道を占有している酸化物に対して、圧縮ストレインを印加することで、垂直磁気異方性を誘起できることを示唆している。

そこで、この指針を基に遍歴強磁性体である  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$  (LSCO) 適用し、圧縮ストレインを印加することで垂直磁気異方性の付与を試みた。パルスレーザー堆積法を用いて LSCO を (001)  $\text{LaAlO}_3$  (LAO) 基板上にエピタキシャル成長させることで圧縮ストレインを印加しました。また比較のために、(001) LSAT 基板上でも引張ストレイン下にある LSCO 薄膜を作製し、ストレインが磁気異方性に与える影響を調べた。図 2 には LAO および LSAT 基板上の薄膜から得られた磁気ヒステリシス曲線を示す。LAO 基板上の薄膜では薄膜面直および面内方向に沿って測定したヒステリシス曲線はほぼ同じであるのに対して、LSAT 基板上の薄膜では面内方向の曲線においてのみ明瞭なヒステリシスが観測された。これらの結果は、磁化の方向つまり磁気異方性が基板からのストレインに依存して変化していることを意味している。LAO 基板上の薄膜では磁化が面直方向から約 45 度傾いており垂直磁気異方性が誘起されているのに対して、LSAT 基板上の薄膜では磁化は面内方向に平行であり面内磁気異方性を有している。この磁気異方性の変化は、異常ホール効果の磁気ヒステリシス測定からも確認した。これらの LSCO 薄膜試料に対して SPring-8 の BL13XU にて放射光 X 線 CTR 散乱測定を行ったところ、LAO 基板上の薄膜の面直および面内方向の Co-O 結合距離はそれぞれ 1.949 Å および 1.897 Å であり、LSAT 基板上の薄膜中の結合距離はそれぞれ 1.897 Å および 1.934 Å であった。つまり、基板からのストレインによって Co-O 結合距離が変化し  $t_{2g}$  軌道混成が変調されたために、LAO 基板上の薄膜 (圧縮ストレイン下) では面直方向の軌道磁気モーメントが誘起され、垂直磁気異方性が付与されたと解釈できる。これらの結果は、酸化物中の「遷移金属-酸素結合」(酸素八面体歪み) を原子レベルで制御することが、酸化物遍歴強磁性体の磁気異方性制御、さらには垂直磁気異方性の安定化に有用であることを示している。

### (2) 3d 遷移金属スピネル酸化物の磁性制御

本研究課題では、ペロブスカイト酸化物だけでなく、3d 遷移金属スピネル酸化物においても磁気異方性の制御さらには垂直磁気異方性の安定化を目指した。スピネル酸化物の中には、室温以上で自発磁化を有する物質が知られている。しかしそれらのスピネル酸化物の多くの薄膜試料において、磁化の方向は面内方向であり、垂直磁気異方性を有するスピネル薄膜は稀である。垂直磁気異方性に着目して、物質探索を行ったところ、逆スピネル構造を有するフェリ磁性体  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$  (NCO) が垂直磁気異方性を有することを見出した。以下では NCO 薄膜試料のカチオン分布と磁気異方性を含めた磁気特性の相関について述べる。

NCO エピタキシャル薄膜は、(001)  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (MAO) 基板上にパルスレーザー堆積法で作製した。基板温度は 350°C と固定して、酸素分圧  $P(\text{O}_2)$  を 30mTorr から 150mTorr と変化させて薄膜試料(膜厚 30nm)を作製した。酸素分圧によらず、すべての薄膜は(001)配向で、基板に対して格子整合を維持してエピタキシャル成長していることを確認した。つまり基板と薄膜の格子ミスマッチのために、NCO 薄膜は MAO 基板から圧縮ストレインを受けている。

NCO 薄膜中のカチオン分布を調べるために、共鳴 X 線回折測定を行った。スピネル構造においては、四面体サイトと八面体サイトを占有するカチオンの反射強度に対する寄与は、その反射ごとに異なる。そのため、反射強度のエネルギー依存性を再現するように構造モデルを構築することで、薄膜中の構成カチオンが Co と Ni のように原子番号が近い場合でも、四面体サイトと八面体サイトのカチオン組成を定量評価することが可能となる。実際の測定は、Photon Factory のビームライン BL-4C で行った。Co および Ni の K 吸収端近傍の入射エネルギーをもつ X 線

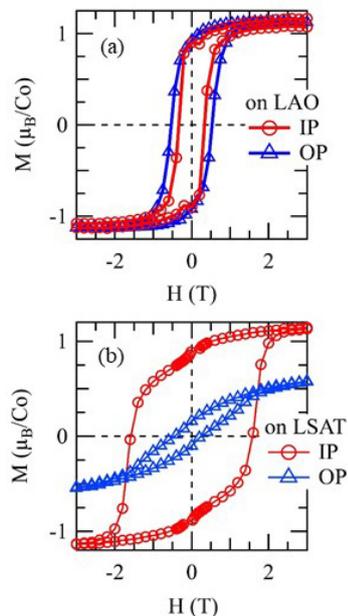


図 2: LAO 基板および LSAT 基板上に作製した LSCO 薄膜の磁気ヒステリシス曲線。測定温度は 20K で、それぞれの薄膜試料に対して面直(OP)と面内(IP)方向に沿って測定。

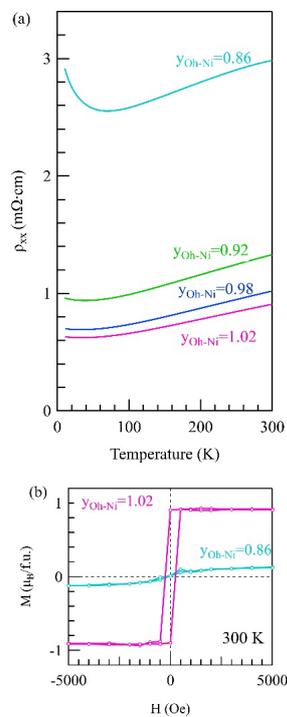


図 3: NCO 薄膜の (a) 電気抵抗率の温度依存性と (b) 面間方向の磁化の磁場依存性。

を用いて回折強度を測定した。測定結果からは四面体サイトにおける Co と Ni の組成は  $P(O_2)$  に依存せずほぼ一定なのに対して、八面体サイトのカチオン組成は  $P(O_2)$  に依存して変化することがわかった。つまり  $P(O_2)$  が高くなるほど、Ni の量が多くなり (Co が少なくなり)、酸素分圧が 150mTorr の場合には、八面体サイトのカチオン組成はバルクの定比組成とほぼ等しくなった。NCO 薄膜中の組成は酸素分圧を変化させるだけで容易に制御できることが分かる。

NCO 薄膜中の八面体サイトのカチオン組成の変化は薄膜特性にも影響を与えることも見出した。図 3a に示すのは電気抵抗率の温度依存性である。測定は Van der Pauw 方を用いた。電気抵抗率およびその温度依存性は薄膜作製時の  $P(O_2)$  に依存することがわかる。高い  $P(O_2)$  (100-150mTorr) で作製した薄膜の電気抵抗率は室温でおよそ  $1\text{ m}\Omega\text{ cm}$  であり、その温度依存性は金属的の振舞いであった。一方で  $P(O_2)$  が低い場合には電気抵抗率は上昇し、 $P(O_2)=30\text{mTorr}$  の条件で作製した薄膜の電気抵抗の温度依存性には、低温領域において半導体的な振舞いも観測された。また磁気特性についても  $P(O_2)$  に依存した変化が見られた。図 3b に示すのは室温における面直方向の磁化の磁場ヒステリシス曲線である。 $P(O_2)=150\text{mTorr}$  で作製した薄膜はおよそ  $1\text{ }\mu\text{B}/\text{f.u.}$  の飽和磁化を有し、またその磁化曲線からは明瞭なヒステリシスが観測された。この振舞いは垂直磁化膜の典型的な振舞いである。一方で  $P(O_2)=30\text{mTorr}$  で作製した薄膜の飽和磁化は非常に小さく、またその磁化曲線におけるヒステリシスも非常に小さいものであった。また磁化の温度依存性からは、 $P(O_2)$  が高い(八面体サイトにおけるカチオン組成が化学量論に近いほど) フェリ磁性転移温度  $T_c$  が高くなることも分った。一方で、 $P(O_2)=30\text{mTorr}$  で作製した薄膜のように、八面体サイトのカチオン組成が化学量論比から大きくずれた場合には、 $T_c$  が室温近傍まで低下し、磁化も小さくまた磁気異方性も弱くなる。このように考えることで図 3 の結果も説明できる。

これまでの、カチオン組成に依存した薄膜特性の変化は、近年の第一原理計算の結果とも合致するものである。計算結果からは、NCO のフェルミ準位における電子状態のほとんどは Ni に由来する下向きスピンを持った 3d 電子によって構成されており、一方で Co の寄与はほとんどなることが示されている。つまり NCO はハーフメタリックなバンド構造(スピン分極率は-100%)を有している。このことは、B サイトの Ni 組成が多くなるほど、電気抵抗率が低くなり、また自発磁化が大きくなるという実験結果を説明する。

また薄膜中のカチオン組成は垂直磁気異方性にも影響を与えることも分かった。図 4 に示すのは作製した NCO 薄膜の異方性磁場  $H_K$  の温度依存性と室温における異方性エネルギーのカチオン組成(八面体サイトの Ni 組成) 依存性である。 $H_K$  は異常ホール抵抗率  $\rho_{xy}$  の面内磁場依存性から  $\rho_{xy}=0$  となる磁場として決定した。図 4 からわかるように、八面体のカチオン組成が化学量論に近い薄膜ほど  $H_K$  が大きくなることが分かる。また飽和磁化と  $H_K$  とを用いて異方性エネルギーを計算したところ、カチオン組成が化学量論に近い薄膜ではその値が約  $0.2\text{ MJ}/\text{m}^3$  となり、十分な垂直磁気異方性を有することが分かった。また八面体サイトのカチオン組成が化学量論からのずれが大きくなる程、垂直磁気異方性エネルギーも小さくなることが分かる。これらの結果は、薄膜中の八面体サイトの Ni 量が薄膜特性に強い影響を与えることを示しており、第一原理による電子状態計算の結果とも合致するものである。また X 線磁気円二色性分光を NCO 薄膜に対して行った結果からは、垂直磁気異方性を決定している軌道磁気モーメントは室温で  $0.14\text{ }\mu\text{B}/\text{Co}$  で主に四面体サイトの Co に由来しており、八面体サイトのカチオン (Co と Ni) の寄与は無視できるほど小さいことも明らかになっている。この結果は、NCO 薄膜の四面体サイトのカチオン組成は  $P(O_2)$  に依存しないこと、また作製した NCO 薄膜はすべて垂直磁気異方性を有していることに合致するものである。また四面体サイトの Co に由来する軌道磁気モーメントは、基板と薄膜との格子ミスマッチによる圧縮ストレイン(約 0.4%)によって誘起されていると考えられる。上記の実験結果から、NCO がハーフメタル電子状態と垂直磁気異方性を同時に示す希な物質であり、スピントロニクス材料としてのポテンシャルを見出した。

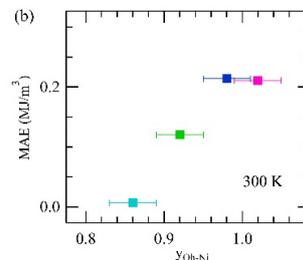
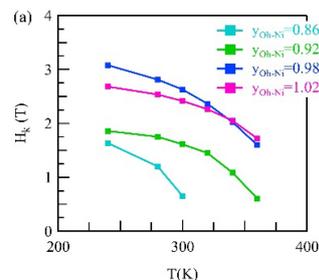


図 4: NCO 薄膜の (a) 異方性磁場  $H_K$  の温度依存性と (b) 室温における異方性エネルギーのカチオン組成(八面体サイトの Ni 量) 依存性。

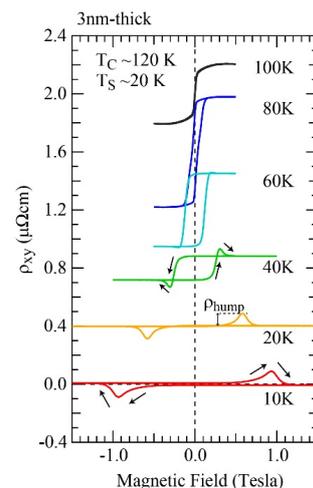


図 5: 膜厚 3nm の SRO 薄膜のホール抵抗率  $\rho_{xy}$  の磁場依存性。

### (3) 酸化物ヘテロ構造で発現するトポロジカルホール効果的な振舞いの解釈

スピン軌道相互作用が重要な役割を果たしている物性の一つにトポロジカルホール効果が挙げられる。トポロジカルホール効果は、トポロジカルな磁気構造と伝導電子との相互作用の結果生じるホール効果のことである。スキルミオンのようなトポロジカルな磁気構造は、特に薄膜のような体積の小さい試料においては、直接観測が難しい。一方、薄膜試料でも輸送特性評価は可能であり、トポロジカルホール効果はトポロジカルな磁気秩序形成の“証拠”としてみなされるようになってきている。ペロブスカイト構造を持った遍歴強磁性体 SrRuO<sub>3</sub> においても、トポロジカルホール効果とみなすことができるホール抵抗の異常が見出されている。しかしその起源が、トポロジカルな磁気構造によるものなのか、それとも別の要因によるものかについては議論の余地がある。そこで、SrRuO<sub>3</sub> 単層薄膜におけるトポロジカルホール効果的な振舞いについて詳細な評価を行い、その起源について議論を行った。

図5に示すのは、膜厚 3nm の SrRuO<sub>3</sub> エピタキシャル薄膜に対して様々な温度で測定したホール抵抗の磁気ヒステリシス曲線である。強磁性転移温度 (120K) 以下の温度領域において、自発磁化に由来する異常ホール効果が観測された。転移温度近傍ではその符号は正であり、温度低下とともにその大きさは減少し、20K において異常ホール抵抗率はほぼゼロとなり、10K では負の異常ホール抵抗率は負へと変化した。また興味深いことに、異常ホール効果の大きさが小さくなる温度領域では、ホール抵抗の磁気ヒステリシス曲線に異常 ( $\rho_{\text{hump}}$ ) が見られた。この  $\rho_{\text{hump}}$  の出現は、通常の異常ホール効果では説明できず、トポロジカルホール効果の現れとも解釈できるものである。そこで  $\rho_{\text{hump}}$  の起源を解明するため、詳細な評価を行った。図6は、温度に対して、 $\rho_{\text{hump}}$ 、異常ホール抵抗率 ( $\rho_{\text{AHE}}$ )、 $\rho_{\text{hump}}$  がピークを示す磁場 ( $H_{\text{hump}}$ ) および  $H_c$  をプロットしたものである。 $H_c$  はホール抵抗がゼロとなる磁場として定義した。異常ホール抵抗率  $\rho_{\text{AHE}}$  がほぼゼロとなる温度領域において、 $\rho_{\text{hump}}$  が增大していることがわかる。また  $H_c$  は  $\rho_{\text{hump}}$  が增大する温度領域で不連続に変化するのに対して、 $H_{\text{hump}}$  は連続的に変化した。これらの

$\rho_{\text{AHE}}$ 、 $\rho_{\text{hump}}$ 、 $H_{\text{hump}}$  および  $H_c$  の相関は、膜厚を変えた試料においても見られた。つまり、 $\rho_{\text{hump}}$  の出現は、 $\rho_{\text{AHE}}$  の符号変化と相関するものであり、また薄膜中の  $H_c$  とも関連していることが推測される。図7には、膜厚 3nm の試料において、 $\rho_{\text{AHE}}$  がゼロとなる 20K において測定したマイナーループを示す。マイナーループは負の磁場の大きさを変化させることが測定した。負の印加磁場の大きさに応じて、正の磁場領域で見られる  $\rho_{\text{hump}}$  の大きさと  $H_{\text{hump}}$  が変化することが分かった。これらの振舞いは、実のところ  $\rho_{\text{hump}}$  の出現がトポロジカルな磁気構造に由来するという解釈を考慮することなく理解できる。つまり、図8に示すように、SrRuO<sub>3</sub> 薄膜内において、 $\rho_{\text{AHE}}$  および  $H_c$  が不均一であるということらを考慮すれば、すべての実験結果を首尾よく説明できる。正と負の異常ホール効果が薄膜中に共存し、 $H_c$  が不均一な場合には、トポロジカルホール効果的な振舞いが出現することが容易に理解できる。またこのような状況における磁化反転過程は徐々に進行する。このことを考慮すると、マイナーループの振舞いも理解できる。上記の結果に加えて、 $\rho_{\text{hump}}$  については、その時間依存性、磁場掃引速度依存性、および電界効果についても調べた。個々の詳細な結果に関しては割愛するが、どの結果に関しても、トポロジカルな解釈を取り入れることなく、図8に示す薄膜中の不均一性を考慮したモデルを用いることで理解できることが分かった。つまり、SrRuO<sub>3</sub> のトポロジカルホール効果的な振舞いに関しては、スキルミオンのようなトポロジカルな磁気構造の形成が関与している可能性は非常に低いといえる。その一方で、膜厚を薄くし薄膜の不均一性の効果が顕著になった結果、トポロジカルホール効果的な振舞いが発現したと考えられる。また、薄膜中の不均一性を起源としたトポロジカルホール効果的な振舞いの発現は、SrRuO<sub>3</sub> だけに限定されるものではなく、どの物質や超構造でも起こりうる。このことは、輸送特性評価の結果だけでトポロジカルな磁気構造の可能性を論じることの危険性を示唆するものである。薄膜試料のような体積の小さい試料において形成したトポロジカルな磁気構造の検出技術の確立が、早急に取り組むべき課題であると言える。

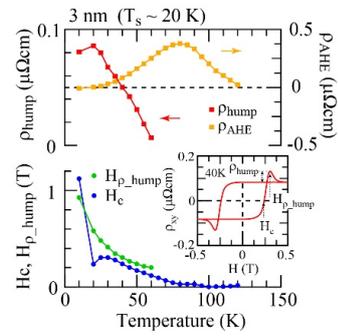


図6: 膜厚 3nm の SRO 薄膜の  $\rho_{\text{hump}}$ 、 $\rho_{\text{AHE}}$ 、 $H_{\text{hump}}$  および  $H_c$  の温度依存性. 挿入図は、 $\rho_{\text{hump}}$ 、 $H_{\text{hump}}$  および  $H_c$  の定義を示す。

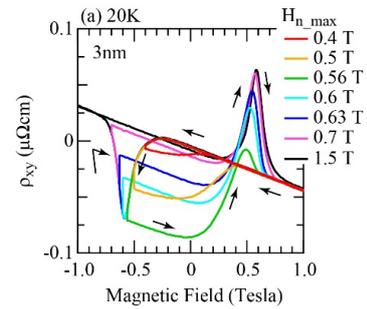


図7: 膜厚 3nm の SRO 薄膜のホール抵抗率のマイナーループ. 測定は 20K で行った。

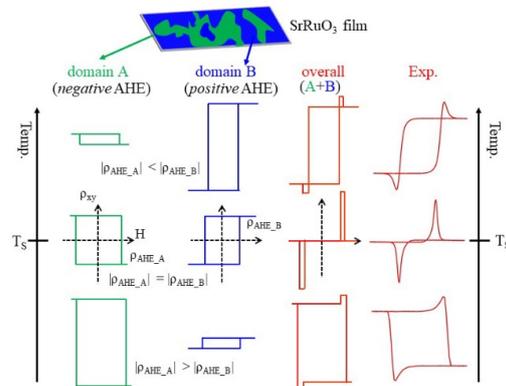


図8: SRO 薄膜におけるトポロジカルホール効果的な振舞い ( $\rho_{\text{hump}}$ ) に対するモデル。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kan Daisuke, Kobayashi Kento, Shimakawa Yuichi	4. 巻 101
2. 論文標題 Electric field induced modulation of transverse resistivity anomalies in ultrathin SrRuO <sub>3</sub> epitaxial films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144405~144405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.144405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shen Yufan, Kan Daisuke, Tan Zhenhong, Wakabayashi Yusuke, Shimakawa Yuichi	4. 巻 101
2. 論文標題 Tuning of ferrimagnetism and perpendicular magnetic anisotropy in NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> epitaxial films by the cation distribution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094412~094412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.094412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kan Daisuke, Moriyama Takahiro, Shimakawa Yuichi	4. 巻 101
2. 論文標題 Field-sweep-rate and time dependence of transverse resistivity anomalies in ultrathin SrRuO <sub>3</sub> films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014448~014448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.014448	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kan Daisuke, Shimakawa Yuichi	4. 巻 115
2. 論文標題 Strain effect on thermoelectric properties of SrRuO <sub>3</sub> epitaxial thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 022403 ~ 022403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5097927	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Kento, Kan Daisuke, Matsumoto Sho, Mizumaki Masaichiro, Shimakawa Yuichi	4. 巻 88
2. 論文標題 Orbital Magnetic Moments in Strained SrRuO <sub>3</sub> Thin Films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 084708 ~ 084708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.084708	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Heo Yooun, Kan Daisuke, Anada Masato, Wakabayashi Yusuke, Tajiri Hiroo, Shimakawa Yuichi	4. 巻 99
2. 論文標題 Correlations between oxygen octahedral distortions and magnetic and transport properties in strained La <sub>0.5</sub> Sr <sub>0.5</sub> CoO <sub>3</sub> thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174420-174420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.174420	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kan Daisuke, Anada Masato, Wakabayashi Yusuke, Tajiri Hiroo, Shimakawa Yuichi	4. 巻 123
2. 論文標題 Oxygen octahedral distortions in compressively strained SrRuO <sub>3</sub> epitaxial thin films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 235303 ~ 235303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5036748	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kan Daisuke, Shimakawa Yuichi	4. 巻 255
2. 論文標題 Defect-Induced Anomalous Transverse Resistivity in an Itinerant Ferromagnetic Oxide	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1800175 ~ 1800175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201800175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kan Daisuke, Niwa Yasuyuki, Koganezawa Tomoyuki, Shimakawa Yuichi	4. 巻 124
2. 論文標題 Growth-temperature-dependent coalescence determines structural phase of mist-chemical-vapor-deposition-grown SnO <sub>2</sub> thin films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 125303 ~ 125303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5045327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Heo Yooun, Kan Daisuke, Shimakawa Yuichi	4. 巻 113
2. 論文標題 Nanoscale oxygen ion dynamics in SrFeO <sub>2.5+</sub> epitaxial thin films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 221904 ~ 221904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5046749	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kan Daisuke, Moriyama Takahiro, Kobayashi Kento, Shimakawa Yuichi	4. 巻 98
2. 論文標題 Alternative to the topological interpretation of the transverse resistivity anomalies in SrRuO <sub>3</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180408~180408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.180408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ozaki Yusuke, Kan Daisuke, Shimakawa Yuichi	4. 巻 121
2. 論文標題 Influence of cation off-stoichiometry on structural and transport properties of (Ba,La)SnO <sub>3</sub> epitaxial thin films grown by pulsed laser deposition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 215304 ~ 215304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4984317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirai Kei, Aso Ryotaro, Ozaki Yusuke, Kan Daisuke, Haruta Mitsutaka, Ichikawa Noriya, Kurata Hiroki, Shimakawa Yuichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Melting of Oxygen Vacancy Order at Oxide-Heterostructure Interface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 30143 ~ 30148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.7b08134	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mizuno Hayato, Yamada Kihito T., Kan Daisuke, Moriyama Takahiro, Shimakawa Yuichi, Ono Teruo	4. 巻 96
2. 論文標題 Electric-field-induced modulation of the anomalous Hall effect in a heterostructured itinerant ferromagnet SrRuO <sub>3</sub>	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.214422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計28件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Y. Shen, T. Zhenhong, D. Kan, and Y. Shimakawa
2. 発表標題 Cation-distribution-tuned ferrimagnetism and perpendicular magnetic anisotropy in NiCo <sub>204</sub> epitaxial films
3. 学会等名 IRCCS The 3rd Joint International Symposium " " Reaction Imaging Meets Materials Science" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Kan
2. 発表標題 Transverse resistivity anomalies in the ferromagnetic oxide SrRuO <sub>3</sub> and their interpretation: Topological or Traditional?
3. 学会等名 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Kan and Y. Shimakawa
2. 発表標題 Strain effect on thermoelectric properties of SrRuO <sub>3</sub> epitaxial thin films
3. 学会等名 26th International Workshop on Oxide Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Shen, D. Kan, T. Zhenhong, Y. Shimakawa
2. 発表標題 Influence of growth conditions on structural and magnetic properties of the ferrimagnetic spinel NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
3. 学会等名 26th International Workshop on Oxide Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Heo, D. Kan, and Y. Shimakawa
2. 発表標題 Dynamics of Oxygen Ions in SrFeO <sub>2.5+d</sub> Thin Films
3. 学会等名 IRCCS The 2nd International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 郁美、菅 大介、瀧 昱帆、島川 祐一
2. 発表標題 NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 薄膜中の酸素欠損が磁気特性に与える影響
3. 学会等名 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 大介、水牧 仁一朗、北村 未歩、小谷 佳範、瀧 昱帆、鈴木 郁美、堀場 弘司、島川 祐一
2. 発表標題 垂直磁化を有するNiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 薄膜におけるカチオン価数状態と軌道磁気モーメント
3. 学会等名 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧 昱帆、菅 大介、若林 裕介、島川 祐一
2. 発表標題 Manipulating Cation Arrangements and Perpendicular Magnetization Anisotropy in the spinel oxide NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Anomalous magnetotransport behavior in an itinerant ferromagnetic oxide
3. 学会等名 7th International Symposium Transparent Conductive Materials and 4th E-MRS & MRS-J Bilateral Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Anomalous magnetotransport behavior in an itinerant ferromagnetic oxide with interfacially engineered metal-oxygen bonds
3. 学会等名 2018 Hsinchu Oxide Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Heo, D. Kan, and Y. Shimakawa
2. 発表標題 Nanoscale oxygen ion dynamics in SrFeO <sub>3-d</sub> epitaxial thin films
3. 学会等名 E-MRS Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Heo, D. Kan, and Y. Shimakawa
2. 発表標題 Oxidation Induced Electrical Conduction of SrFeO <sub>2.5</sub>
3. 学会等名 ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅 大介、森山 貴広、小林 顕斗、島川 祐一
2. 発表標題 遍歴強磁性体SrRuO <sub>3</sub> のトポロジカルホール効果的振舞いの別解釈
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Heo, D. Kan, Y. Shimakawa
2. 発表標題 Nanoscale dynamics of oxygen ions in SrFeO <sub>2.5+d</sub> epitaxial thin films
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 顕斗、菅 大介、島川 祐一
2. 発表標題 遍歴強磁性体SrRuO <sub>3</sub> 薄膜のトポロジカルホール効果的振舞いの電界変調とその解釈
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本 笙、菅 大介、島川 祐一
2. 発表標題 機械的変形を利用した遷移金属酸化物の物性制御
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林 顕斗、水牧 仁一朗、菅 大介、島川 祐一
2. 発表標題 遍歴強磁性体SrRuO <sub>3</sub> 薄膜の軌道磁気モーメントの温度依存性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅大介
2. 発表標題 原子レベル構造制御で発現する4d 遷移金属酸化物の新奇な磁気輸送特性
3. 学会等名 第3回固体化学フォーラム研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Interface Engineering of Transition Metal Oxides as a New Route for Exploring Functional Properties
3. 学会等名 International Congress on Pure & Applied Chemistry (ICPAC) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Interface engineering of transition metal oxide as a new route for exploring functional properties
3. 学会等名 Electronic Materials and Applications (EMA) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Atomic engineering of transition metal oxides as a new route for exploring their functional properties
3. 学会等名 The 3rd East-Asia Microscopy Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Tuning magnetic anisotropy by interfacially engineering the oxygen coordination environment in a transition-metal oxide
3. 学会等名 International Workshop on Oxide Electronics (WOE24) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Functional properties emerged in atomically engineered transition metal oxides
3. 学会等名 Core-to-Core Workshop "Novel Quantum and Functional Materials -Design and Synthesis-" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Interface engineering of metal-oxygen bonds as a new route for exploring functional properties of transition metal oxides
3. 学会等名 IUMRS-ICAM 2017 The 15th International Conference on Advanced Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daisuke Kan
2. 発表標題 Interface engineering of metal-oxygen bonds as a new route for exploring functional properties of transition metal oxides
3. 学会等名 3rd Computational Chemistry (CC) Symposium of ICCMSE 2017, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅 大介、島川 祐一
2. 発表標題 原子レベル構造制御による遷移金属酸化物の機能開発
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会 秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅 大介、水牧 仁一朗、島川 祐一
2. 発表標題 界面制御された磁気異方性を有するSrRuO3薄膜の軌道磁気モーメント
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会,
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林 顕斗、菅 大介、島川 祐一
2. 発表標題 圧縮ストレイン下におけるSrRuO3薄膜のホール抵抗の異常な振る舞い
3. 学会等名 第78回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----