

1. 研究目的及び研究計画

本共同プロジェクト研究の目的は、磁気メモリや磁気センサーなどのスピントロニクスデバイスにおいて鍵となる、電子のスピンと軌道および多極子の結合によってもたらされる新規界面物性の直観的理解を、薄膜作製・放射光によるスピン・軌道・多極子の測定・第一原理計算を融合させて議論することで得ることにある。そして、得られた知見を、新しい機能性を有する磁性スピントロニクス材料の基盤研究へと展開することにより、新しいスピントロニクスデバイスの提案に結び付ける。高度な情報社会を支えるために電気通信技術のさらなる発展が必要不可欠であり、本研究の成果はその一端を担う高速・高密度・低消費電力でかつ信頼性の高いスピントロニクスデバイスの創製に寄与することが期待できる。

具体的には、高性能薄膜作製技術によるデバイス作製、磁気抵抗効果や異常ホール効果などの磁気輸送特性解析、高輝度放射光を用いた物質の磁気モーメント、軌道モーメント、および四極子モーメントの分光学的測定、さらに第一原理計算および摂動モデル計算による磁気物性・スピン輸送特性の理論解析を融合させて、界面での結晶磁気異方性・磁気抵抗効果・スピン(軌道)ホール効果およびこれらの電界や歪による効果などの研究を進める。そのために、それぞれの専門分野(薄膜作製・磁気物性解析・放射光解析・理論計算)の研究者が本共同プロジェクト研究に参加し、各々の研究成果を有機的に結び付けて議論を行う。

研究会では、1つのテーマを決めて関連する物理現象を集中して議論することにより、理解を深めることを目指す。2021年度と同様に、春にキックオフ会議を行い、その後研究の進捗状況に応じて、3~4カ月おきに1回程度研究会を行う予定である。現在の社会情勢を鑑み、研究会は基本オンライン開催とし、状況を判断して可能であればオンサイトの研究会を行うことを計画している。研究会の規模としては、コアメンバーを中心に毎回関連の研究者に声をかけ、10~20名程度の規模で開催する予定である。

2. 準備状況

[研究体制や準備状況]

研究体制として、薄膜作製(三谷、柳原、介川、小泉)、放射光分光測定(岡林、田中、芝田)、理論計算(白井Gr、三浦、小田、増田、千葉、名和)という構成で研究および議論を進める。申請者と本プロジェクトのコアメンバーである三谷(NIMS)、岡林(東大)は、の科学研究費補助金・基盤研究(S)「界面スピン軌道結合の微視的解明と巨大垂直磁気異方性デバイスの創製」を推進してきた(2020年度終了)。また、申請者とコアメンバーの岡林を中心として、豊田理化学研究所の特定課題研究「界面多極子相互作用」が拓く新しい学理」を推進しており、その中でも、界面での四極子と結晶磁気異方性及び歪との関係中心に議論している(昨年度終了)。両プロジェクトは課題の共通点も多いことから、両プロジェクトの参加研究者で合同研究会を開催して活発に議論してきた。その後2021年4月より、通研共同プロジェクト研究として新規採用され、令和3年度は4回オンラインまたはオンサイトで研究会を開催し、活発な議論がなされた。

[当該共同プロジェクト研究における成果等]

関連の論文発表

[1] H. Onoda, H. Sukegawa, J. Inoue, and H. Yanagihara, *Advanced Materials Interfaces*, **8**, 2101034 (2021). "Strain Engineering of Magnetic Anisotropy in Epitaxial Films of Cobalt Ferrite"

[2] H. Koizumi, I. Suzuki, D. Kan, J. Inoue, Y. Wakabayashi, Y. Shimakawa, and H. Yanagihara, *Physical Review B* **104**, 014422 (2021). "Spin reorientation in tetragonally distorted spinel oxide NiCo₂O₄ epitaxial films"

- [3] K. Masuda, H. Itoh, Y. Sonobe, H. Sukegawa, S. Mitani, and Y. Miura, Phys. Rev. B **103**, 064427 (2021). “Interfacial giant tunnel magnetoresistance and bulk-induced large perpendicular magnetic anisotropy in (111)-oriented junctions with fcc ferromagnetic alloys: A first-principles study”
- [4] K. Masuda, T. Tadano, Y. Miura, Phys. Rev. B **104**, L180403 (2021). “Crucial role of interfacial s-d exchange interaction in the temperature dependence of tunnel magnetoresistance”
- [5] Y. Miura and K. Masuda, Phys. Rev. Material **5**, L101402 (2021). “First-principles calculations on the spin anomalous Hall effect of ferromagnetic alloys”
- [6] J. Okabayashi, S. Li, S. Sakai, Y. Kobayashi, T. Mitsui, K. Tanaka, Y. Miura, and S. Mitani, Phys. Rev. B **103**, 104435 (2021). “Perpendicular magnetic anisotropy at the Fe/Au(111) interface studied by Mössbauer, x-ray absorption, and photoemission spectroscopies”
- [7] Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, and Seiji Mitani, Appl. Phys. Lett. **120**, 032404 (2022). “Enhanced tunnel magnetoresistance in Fe/Mg₄Al-O_x/Fe(001) magnetic tunnel junctions”

以下の日時・内容にて通研共同プロジェクト研究会を行った。

1. 2021年5月22日第1回“スピン・軌道・多極子がもたらす新規界面物性の開拓”に関する研究会(オンライン)

参加者: 三浦良雄(NIMS)、岡林潤(東京大学)、増田啓介(NIMS)、芝田悟朗(東京理科大)、小田洋平(福島高専)、三谷誠司(NIMS)、介川裕章(NIMS)、名和憲嗣(三重大)、柳原英人(筑波大)、白井正文(東北大)、辻川雅人(東北大)、新屋(東北大)

話題提供者

岡林潤: 13:30-14:45

「X線磁気分光による量子界面の軌道計測に向けて」の題目により講演した。今後の展開として、スピン軌道エンタングルメント、量子界面(量子化界面)の研究について、議論を行った。金属超薄膜の量子井戸状態の形成メカニズムについて議論し、意見交換を行った。

名和憲嗣: 14:45-16:00

「強磁性体/酸化物界面における垂直磁気異方性と軌道モーメントの電界効果」の題目にて講演された。Fe/MgOの電界効果について、軌道別な変調について説明された。面直内方向での量子化軸の定義(特に面内磁化方向での量子化軸の取り方:垂直をz軸としたままにするか、新たに面内方向で量子化軸を定義するか)について議論した。

三浦良雄: 16:10-17:20

「量子井戸界面の軌道と四極子の第一原理計算」の題目で講演された。Cr/Fe/MgOでのFeの量子化準位の形成と、その軌道状態について議論した。 $\Delta 1$ バンドの量子化の本質について議論を行った。



2. 2021年9月25日第2回“スピン・軌道・多極子がもたらす新規界面物性の開拓”に関する研究会(オンライン)

参加者: 三浦良雄(NIMS)、柳原英人(筑波大)、岡林潤(東京大学)、介川裕章(NIMS)、増田啓介(NIMS)、芝田悟朗(東京理科大)、小田洋平(福島高専)、三谷誠司(NIMS)、名和憲嗣(三重大)、白井正文(東北大)、辻川雅人(東北大)、Roy Tufan(東北大)、Guest: Prof. Xiaoyan Zhong (CityU, Hong Kong)

話題提供者

岡林潤: 14:00-15:00

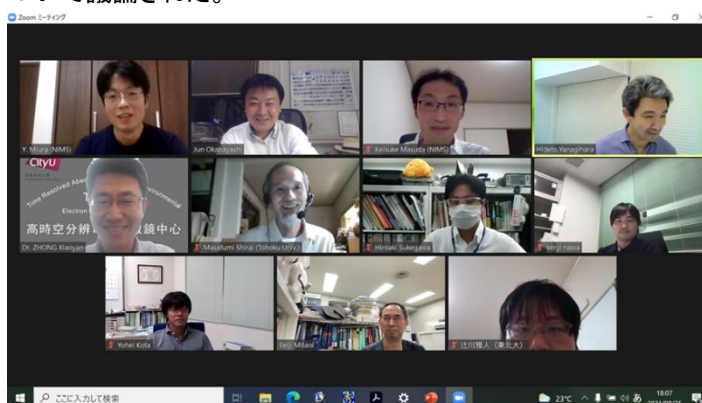
「Exploring Orbital World using X-ray Magnetic Spectroscopies」の題目にて講演した。界面スピン軌道、界面四極子、マルチモーダル測定について今までの総論を述べ、トポロジカル軌道状態について提案した。その後、Co フェライトの垂直磁気異方性について、XMCD, XMLD の結果を基に議論し、意見交換を行った。

介川裕章: 15:00-15:45

「Perpendicular magnetic anisotropy at epitaxial interface: interfaces with $MgAl_2O_4(001)$ and $MgO(001)$ 」の題目にて講演された。Co₂FeAl/MgO 界面でのAlの分布についてTEMによる精密観測、 $MgAl_2O_4$ を用いた際の界面整合性について議論された。そして、量子井戸閉じ込め効果について議論された。

Xiaoyan Zhong (Invited): 16:00-18:00

「Atomic scale electron magnetic dichroism and its applications on interfacial magnetism」の題目で講演された。TEMを用いたEMCDの計測原理について説明され、原子分解能での分光測定について紹介された。スピネル型酸化物におけるサイト別のMCDを紹介され、線二色性への応用や今後の展開について議論された。



3. 2021年11月27日-28日第3回“スピン・軌道・多極子がもたらす新規界面物性の開拓”に関する研究会(オンサイト@東北大電気通信研究所)

参加者: 三浦良雄(NIMS)、柳原英人(筑波大)、岡林潤(東京大学)、介川裕章(NIMS)、増田啓介(NIMS)、芝田悟朗(東京理科大)、小田洋平(福島高専)、三谷誠司(NIMS)、白井正文(東北大)、辻川雅人(東北大)、新屋ひかり(東北大)

話題提供者

増田啓介: 11/27 13:30 - 15:30

「TMRの温度依存性に対する新たな理解に向けて:sd交換相互作用の重要性」の題目にて講演された。TMRの温度依存性が生じる理由を理論計算から議論された。スピン揺らぎとsd交換相互作用重要性を指摘され、原子内および原子間交換相互作用について議論した。

芝田悟朗: 11/27 15:30 - 17:00

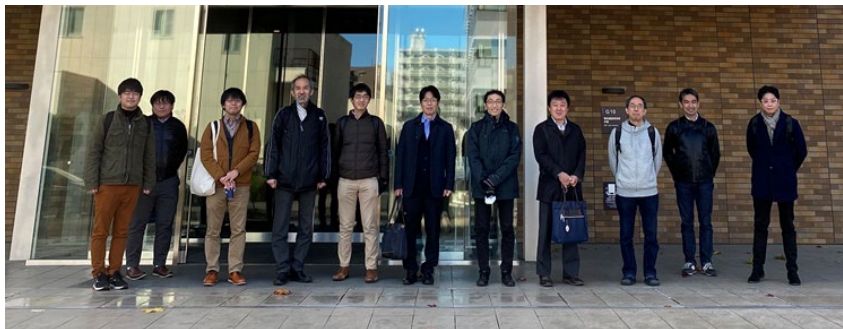
「5d遷移金属における磁気八極子:最近の研究から」の題目にて講演された。 Mn_3Sn のクラスター八極子について、XMCDを用いた検出についての論文を紹介され、内容を議論した。磁気双極子 m_T の計測ができているか、また、双極子が3つから成る八極子(2^3)の計測となっているか、について議論を行った。そして、5d電子系での原子内八極子の計測に向けた議論を行った。Os酸化物での八極子秩序を示唆する文献を紹介され、その計測可能性について議論を深めた。

小泉 洸生: 11/27 17:00 - 17:30、11/28 9:30 - 10:30

「 $\text{NiCo}_2\text{O}_4(001)$ 薄膜の円錐磁気異方性とその特異な磁気輸送特性」の題目で講演された。 NiCo_2O_4 の円錐磁気異方性について実験結果と理論解析による議論を行った。そして、ホール効果について、異常ホール効果では説明できず、異方的なホール効果の存在を示唆するデータを示された。ベリー曲率の異方性、トロイダル四極子、八極子を考慮することで説明可能であることを磁気点群の解析(4mmm)から議論された。

小田 洋平: 11/28 10:30 - 12:00

「種々の金属・合金の磁気特性および伝導現象の第一原理計算に関する最近の話題」の題目で講演された。 $\text{Fe}_2\text{Ni}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{Ni}_2\text{N}$ など化合物について、構造安定性、磁気異方性を議論した。 Fe の Co 化という考えに基づいた電子状態の議論を行った。



4. 2022年2月19日第4回“スピン・軌道・多極子がもたらす新規界面物性の開拓”に関する研究会(オンライン)

三谷 誠司: 13:00-14:00

軌道流および軌道分極率に関するテーマで講演があった。スピン流との類似性から、軌道流も非占有状態の流れとして定義できることが議論された。また、最近の研究として、 Cu に酸素を吸着して系で、スピンのラシュバ効果と類似した、軌道ラシュバ効果の研究が紹介された。

千葉 貴裕: 14:00-15:30

トポロジカル物質を用いたスピン流注入におけるスピンホール角の最近の研究紹介と、トポロジカル物質を用いた磁化反転に関する研究の紹介があった。トポロジカル物質とメタル界面の垂直磁気異方性とスピン軌道トルクの電界効果を利用して、より定電流密度で磁化反転ができることが理論計算により示された。

新屋 ひかり: 15:45-17:20

熱電材料、希薄磁性半導体、ハーフメタル材料に関する研究紹介があった。ハーフメタル材料の研究では、その電子状態と電気伝導の有限温度における振る舞いを、フォノン励起およびマグノン励起を実効的に取り入れられた第一原理計算により解析された。そして、ハーフメタル材料の電気抵抗の温度依存性等が実験の振る舞いとよく一致することが示された。

