

文部科学省 科学研究費補助金 学術変革領域研究(B) 令和5-7年度
超軌道分裂による新奇巨大界面応答
Colossal Interface Response: CIR

Vol. 02 2025.4



第3回成果報告会 (2025年3月18日) 東京大学 武田ホール

本研究領域では、様々な界面を用いて、外場(電場・磁場など)による物性応答(磁化・スピン・構造変化など)を詳細に調べることで、『高効率デバイス』の実現に結びつく新たな機能性を生み出す『界面学理』の構築を目指します。本現象を原子スケールで観測し、第一原理計算を用いて理論的に理解し、その結果を実験にフィードバックする循環型研究体制により、新たな現象や材料系を開拓していきます。

[研究期間 2023年度~2025年度 領域番号: 23H03801(総括班)、23H03802~5(計画班)]



会議レポート

大矢 忍
東京大学大学院工学研究科電気系工学専攻



A01班大矢グループでは、MBE法を用いて種々の高品質な単結晶ヘテロ界面を作製し、界面における「特異な軌道分裂」を人工的に制御することにより巨大応答(磁化・スピン・構造など)を開拓し、A01班、A02班およびA03班と協働することにより、このような新奇の物理現象を理解するとともに、高効率のデバイスの実現に結びつく新たな機能性を生み出すことを目指します。

研究期間: 2023年度~2025年度
領域番号: 23H03801(総括班)、23H03802(計画班)

[会議レポート] Fe/MgOからなる2層電極をもつGeチャネルデバイスを作製し、磁場により変化する25000%もの巨大な抵抗変化を示す抵抗スイッチ効果を観測しました。A03(福島)班との共同研究により、理論的に導電性フィラメントを構成するMg欠損内の軌道分裂が極めて重要な役割を果たしていることを明らかにしました [Adv. Mater. (2024)]。さらに、電圧を固定して磁場を掃引することで、電圧を印加した状態で磁場履歴を記憶できる機能が存在することを見出しました [Adv. Funct. Mater. (2025)]。

佐藤 幸生
熊本大学 半導体・デジタル研究教育機構



A02班佐藤グループでは、(i)「電場印加その場電子顕微鏡法」、(ii)「高精度走査透過型電子顕微鏡法(高精度STEM)」ならびに(iii)「原子分解能電子エネルギー損失分光法(原子分解能EELS)」を独自技術で融合し、A01班が作製した界面試料の原子配列・電子状態ならびにその電場応答を、原子スケールで直接観察し、データをA03班福島グループに提供することで、新奇巨大界面応答の原理の解明を目指します。

研究期間: 2023年度~2025年度
領域番号: 23H03801(総括班)、23H03804(計画班)

[会議レポート] デバイス動作時の構造変化を観察する「電圧印加その場電子顕微鏡法」にて、交流電場を印加する手法を構築し、強誘電ナノドメインの応答を直接観察することに成功しました。[Appl. Phys. Lett. (2024)] A01(永沼)班との共同研究でBiFeO₃において発見した新規結晶相に関する成果についての論文を投稿しました。また、A01(大矢)班との共同研究で、電場下での酸化物界面原子応答、電子状態変化を解析中です。

永沼 博
名古屋大学/東北大学



A01班永沼グループでは、非平衡マルチフェロイクス界面層で観測されている電界による巨大な磁化変化の原因を追究します。超軌道分裂が果たしている役割を、班間連携により高度な構造解析および理論解析を用いて理解し、極低電圧における『界面巨大応答の学理』を構築することを目指します。最終的には、超電導量子干渉計の感度を上回る超磁場感度センサ素子の実現を目指します。

研究期間: 2023年度~2025年度
領域番号: 23H03801(総括班)、23H03803(計画班)

[会議レポート] BiFeO₃/Coにあらわれた室温以上に転移温度のある強磁性・強誘電性のマルチフェロイック二次元界面層の起源を明らかにするために、深さ分解X線磁気円二色性(XMCD)、並びに磁気線二色性(XMLD)を評価しました。FeのL_{2,3}吸収端スペクトルは4本観測され、従来のFe系酸化物(Fe₃O₄, CoFe₂O₄等は3本)で報告されているXMCDスペクトルとは異なりました。A03(福島)班の福島氏に加えて、三重大学の名和先生の協力のもと、第一原理計算を用いてスペクトル解析を行った結果を報告しました。

福島 鉄也
産業技術総合研究所 研究チーム長



A03班福島グループでは、データ駆動型マテリアルデザイン手法を、酸化物ヘテロ構造材料とブラウンミレライト構造をもつマルチフェロイクス材料に適用し、(1)外場と界面構造が誘起する超軌道分裂と巨大秩序応答機構の学理構築、(2)高効率界面材料のハイスループットスクリーニング、(3)データ同化を用いた電子顕微鏡計測の原子位置・配置の推定、(4)機械学習による超巨大物性応答を実現するバンド構造の予測を行います。

研究期間: 2023年度~2025年度
領域番号: 23H03801(総括班)、23H03805(計画班)

[会議レポート] 第一原理計算と自動網羅計算により、酸化物ヘテロ構造を対象に電子論的解析を実施しました。A01(大矢)班と共同で、磁場でも制御可能なメモリスタの開発に成功しています [Adv. Mater. (2024), Adv. Funct. Mater. (2025)]。また、スーパーコンピュータ「富岳」を用いてバルクBi(Fe,Co)O₃の磁気・構造安定性を網羅計算により精査しました。得られたデータと、A01(永沼)班によるXMCDの実験結果、名和先生(三重大学)によるXMCDの計算結果を組み合わせることにより、複雑な軌道分裂と電気磁気効果の相関関係を解析しています。

令和6年度の活動報告

本領域研究では、様々な異種材料界面を用いて、微小外場による新奇の巨大応答を実現することを目的としています。また、この目標の基礎概念となる「超軌道分裂科学」に基づく固体界面物理分野の創成を目的としています。研究班は、A01新機能創出班、A02微細構造計測班、A03機能設計理論班から構成されています。総括班を設け、班間の共同研究を促進し、研究会等の開催、研究成果の外部発信などを行いつつ、各班の連携具合を常時把握し共同研究を円滑化することを目指しています。班間や国内外研究グループとの結びつきを強化し、最終目標の達成を目指します。

令和6年度は、2回の領域会議（2024年6月、2025年1月）、拡大領域会議（2024年9月）、成果報告会（2025年3月）を開催しました。拡大領域会議と成果報告会については、応用物理学会「強制的秩序とその操作に関する研究会」と共同で開催し、領域アドバイザーの先生方をはじめ、研究会に所属する多数の皆様にも幅広く研究内容についてご議論頂き、分野の輪を広げる取り組みを進めることができました。さらに2024年11月に神戸大学で開催された第18回物性科学領域横断研究会で4名全員が講演を行い、他の学術変革領域との交流も図りました。

論文発表

A01	A02	"Single-layer spin-orbit-torque magnetization switching due to spin Berry curvature generated by minute spontaneous atomic displacement in a Weyl oxide", H. Horiuchi, Y. Araki, Y. K. Wakabayashi, J. Ieda, M. Yamanouchi, Y. Sato, S. Kaneta-Takada, Y. Taniyasu, H. Yamamoto, Y. Krockenberger, M. Tanaka, and S. Ohya, <i>Adv. Mater.</i> <i>Accepted</i> .
A01	A02	"Coexistence of $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ superstructure and monoclinic phases in a bismuth ferrite thin film studied via distortion-corrected scanning transmission electron microscopy", Y. Sato, H. Naganuma, <i>Submitted</i> .
A01	A03	"Giant memory function based on the magnetic field history of resistive switching under a constant bias voltage", M. Kameda, S. Tsuruoka, H. Shinya, T. Fukushima, T. Endo, Y. Tadano, T. Takeda, A. Masago, M. Tanaka, H. Katayama-Yoshida, and S. Ohya, <i>Adv. Funct. Mater.</i> 35 , 2415648 (2025).
A01		"Micromagnetic simulations for magnetic-field-free magnetization switching by spin-orbit torque in a perpendicularly magnetized (Ga,Mn)As single layer", M. Jiang, X. Yang, Y. Yu, S. Ohya, and M. Tanaka, <i>APL Mater.</i> 13 , 041106 (2025).
A01		"Enhanced Field-Like Torque Generated from the Anisotropic Spin-Split Effect in Triple-Domain RuO ₂ for Energy-Efficient Spin-Orbit Torque Magnetic Random-Access Memory" Thi Van Anh Nguyen, H. Naganuma, Thi Ngoc Huyen Vu, Samik Dutta Gupta, Y. Saito, Duong Vu, Y. Endo, S. Ikeda, and T. Endoh, <i>Adv. Sci.</i> 2413165 (2025).
A01		"High L ₁₀ -Ordering and Flat Surface Introducing a Two-Step Heating Process with Frank-Van der Merwe Initial Growth Mode at Low Temperature" S. Vergara, H. Naganuma, <i>J. Cryst. Growth</i> , 25 , 768 (2025).
A01		"Field-free spin-orbit torque magnetisation switching in a perpendicularly magnetized semiconductor (Ga,Mn)As single layer", M. Jiang, X. Yang, S. Qu, C. Wang, S. Ohya, and M. Tanaka, <i>ACS Appl. Mater. Interfaces</i> 16 , 23497–23504 (2024).
A01		"Mechanism of ferromagnetism enhancement in a La _{2/3} Sr _{1/3} MnO ₃ membrane released from epitaxial strain", T. Takeda, T. Arai, K. Yamagami, L. D. Anh, M. Tanaka, M. Kobayashi, and S. Ohya, <i>Phys. Rev. Mater.</i> 8 , 054415 (2024).
A02		"Disruption of polar order in lead zirconate titanate by composition-modulated artificial superlattice", Y. Sato, G. Kimura, S. H. Kweon, G. Tan, and I. Kanno, <i>J. Mater. Sci.</i> 59 , 8134 (2024).
A02		"Response of ferroelectric nanodomain to alternative-current electric fields in morphotropic phase boundary Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ -PbTiO ₃ ", Y. Sato, <i>Appl. Phys. Lett.</i> 125 , 242906 (2024).
A03		"First-principles Calculation of Magnetocrystalline Anisotropy of Y(Co,Fe,Ni,Cu) ₅ Based on Full-potential KKR Green's Function Method", H. Okumura, T. Fukushima, H. Akai, and M. Ogura, <i>Sol. State Comm.</i> 373 , 115257 (2023).
A03		"Computational Materials Design of High-Entropy Alloys Based on Full Potential Korringa-Kohn-Rostoker Coherent Potential Approximation and Machine Learning Techniques", K. Sato, G. Hayashi, K. Ogushi, S. Okabe, K. Suzuki, T. Terai, and T. Fukushima, <i>Mat. Transac.</i> 64 , 2174 (2023).
A03		"Computational Materials Design of High-Entropy Alloys Based on Full Potential Korringa-Kohn-Rostoker Coherent Potential Approximation and Machine Learning Techniques", H. N. Nam, Q. M. Phung, K. Suzuki, A. Masago, H. Shinya, T. Fukushima, and K. Sato, <i>ACS Appl. Mat. & Inter.</i> 15 , 43871 (2023).

学会発表

A01	A02	(招待講演) 大矢忍、佐藤幸生, "酸化物単結晶界面における巨大応答の実現と原理理解に向けて", 第18回物性科学領域横断研究会, 神戸大学, 2024年11月27日。
A01	A03	(招待講演) 永沼博、福島鉄也, "マルチフェロイック界面磁性的XMCDスペクトル解析 実験と理論", 第18回物性科学領域横断研究会, 神戸大学, 2024年11月27日。
A01	A02	(Invited talk) Yukio Sato, "Nano-scale local crystal phase analysis in bismuth ferrite thin film by atomic-scale scanning transmission electron microscopy", International Congress on Ceramics (ICC'10), Montreal, Canada, 2024年7月16日。
A01	A03	(Invited talk) S. Ohya, S. Tsuruoka, M. Kameda, H. Shinya, T. Fukushima, T. Takeda, Y. Tadano, T. Endo, L. D. Anh, A. Masago, H. Katayama-Yoshida, and M. Tanaka, "Colossal magnetoresistive switching induced by d0 ferromagnetism of MgO in a semiconductor nanochannel device with ferromagnetic Fe/MgO electrodes", 5th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA), SSp-I22, Celina Peninsula Resort, Quang Binh, Vietnam, 2024年8月6日。
A01		(招待講演) 大矢忍、遠藤達朗、中村葵、田中雅明, "強相関酸化物を用いたスピントランジスタ", 第72回応用物理学会春季学術講演会, 16p-K203-8, 東京理科大学野田キャンパス, 千葉県野田市, 2025年3月16日。
A01		(Invited talk) Shingo Kaneta-Takada, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, "Highly efficient spin-charge current conversion induced by band crossing in all-epitaxial spin-orbit ferromagnetic oxide heterostructures", The 23rd International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE2024), TH-A1-01, Kunibiki Messe, Matsue, Japan, 2024年9月8-13日。
A01		(Invited talk) Shinobu Ohya, "Efficient spin-charge conversion in Rashba two-dimensional electron gas systems of single-crystalline oxide heterostructures", superstrips2024, Hotel Continental Ischia, Ischia-Naples, Italy, 2024年6月24-29日。
A01		(Invited talk) Shinobu Ohya, "Observation of colossal magnetoresistive switching in a Ge-based nanochannel device with ferromagnetic Fe/MgO electrodes", 20th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE2024), Online, Heraklion, Crete, Greece, 2024年9月26-27日。
A01		(Invited talk) H. Naganuma, "Ferrimagnetic ordering and colossal interface response by super-orbital splitting at interfacial multiferroics", 5th International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials, Newcastle Exhibition & Conference Centre, Australia, Nov. 7th, 2024.
A01		(Invited talk) H. Naganuma, "Spintronic Vertical Devices Using Two-dimensional Material", MRS Boston, Boston, USA, Dec. 5th, 2024.
A02		(招待講演) 佐藤幸生, "ナノスケール極性構造と電場応答の電子顕微鏡解析", 2024年日本セラミックス協会秋季シンポジウム, 名古屋大学, 2024年9月11日。
A03		(Invited talk) T. Fukushima, "Design of Magnetic Materials", EU-Japan Workshop on Spintronics and Quantum Transformation (Spin-QX 2023), Forschungszentrum Jülich, Germany, Aug. 7th, 2023.
A03		(Invited talk) T. Fukushima, "First-principles calculations of finite temperature electronic structure and transport properties", The 34th Joint Inter-laboratory Workshop on Nanomagnetism, Online, Feb. 22nd, 2022.

報道発表

A01	A03	2025年1月10日, 磁場履歴を記憶できる新たな巨大抵抗変化メモリ素子を実現 -磁場でも制御可能なメモリスタの開拓-, 東京大学プレスリリース https://www.u-tokyo.ac.jp/press/pr2025-01-10-001
A02		2024年12月11日, 世界初! エコー診断用圧電単結晶におけるナドメインの交流電圧応答を直接可視化, 熊本大学 プレスリリース https://www.kumamoto-u.ac.jp/daijaku/jouhou/kouhou/press/release/2024-file-1/release241211-2.pdf

受賞

A01		大矢GP 金田真悟 第37回独創性を拓く先端技術大賞 (最優秀賞) 文部科学大臣賞, 受賞日 2024年6月14日, 酸化物単結晶ヘテロ界面を用いた超高効率スピン流-電流変換	A01		永沼GP 横山春人 強制的秩序とその操作に関する研究会 夏の学校, ポスター賞 2024年9月20日, 下記の発表に対して、横山春人、鈴木真穂子、永沼博、雨宮健太、"軟X線深さ分解磁気円二色性における Back-Ground処理フレームワーク開発とL ₁₀ -FePd界面への適用"
A01		大矢GP 武田崇仁 Best Poster Award at the 5th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2024), 受賞日 2024年8月6日	A01		永沼GP Ziad Ali, Ziad Ali, Shan Wang, Hiroshi Naganuma, Ada Poon, ICM2024, ポスター賞 2024年7月2日, 「Perpendicular Anisotropy Magnetic Tunnel Junction Sensors with Vertical Flux Concentrators for Neural Magnetic Field Sensing」
A01		大矢GP 金田昌也 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 修士論文 優秀論文表彰, 受賞日 2025年3月24日, 金田昌也 修士論文 「Fe/MgO/Ge二端子電極を有する模型Geチャネルデバイスにおける磁場履歴に基づいた巨大メモリ機能」	A02		佐藤幸生 The Editor-in-Chief Award of Distinguished Reviewer, Journal of Ceramic Society of Japan, 受賞日 2025年3月5日, 日本セラミックス協会

今後のイベント

2025年6月10日 第5回領域会議 @産総研臨海副都心センター (東京都江東区青海)
2025年9月10,11日 拡大領域会議 (愛知県知多郡南知多町)
2025年11月27,28日 第19回物性科学領域横断研究会@東京大学物性研究所柏キャンパス (千葉県柏市柏の葉)

本プロジェクトに関する問い合わせ

cir_core-group@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

もしくは

下記フォーム:

<https://forms.gle/b9j6iCtdM4bNRvM7>