

## 二国間交流事業 共同研究報告書

令和4年4月1日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]  
東北大学・電気通信研究所  
[職・氏名]  
教授・深見 俊輔  
[課題番号]  
JPJSBP 120203503

1. 事業名 相手国: ドイツ (振興会対応機関: DAAD) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 絶縁体スピンオービトロニクス

(英文) Insulator Spin-Orbitronics

3. 共同研究実施期間 2020年4月1日 ~ 2022年3月31日 ( 2年 0ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Johannes Gutenberg University Mainz · Professor · Mathias Klaeui

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		3,800,000 円
内訳	1年度目執行経費	1,900,000 円
	2年度目執行経費	1,900,000 円
	3年度目執行経費	円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	7名
相手国側参加者等	9名

\* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	0	0	0(0)
2年度目	0	0	0(0)
3年度目			(0)

\* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

## 8. 研究交流の概要・成果等

### (1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

本共同研究は、これまで研究がほとんどなされていない、強磁性(または反強磁性、フェリ磁性)酸化物と非磁性(または反強磁性)金属からなるヘテロ構造などを対象とし、電気的な手法から放射光を用いた手法まで多岐に渡る評価手法を駆使して評価し、幅広くその物性や機能性を明らかにすることを目的として 2020 年4月から推進した。

研究機関全体を通して、新型コロナウイルス感染症によるパンデミックの影響で、当初想定していたような高頻度での研究者、学生の派遣、受け入れによる交流こそできなかったが、研究試料の授受、情報交換、共同での国際ワークショップ、ウェビナーの実施、レビュー論文の執筆などを通して、制約の中で最大限の研究交流を行った。

特に、研究開始以前は日本国側代表者の深見の研究室でのみ実現されていた人工反強磁性積層構造における磁気スキルミオンの形成とその電流駆動に関しては、研究試料を日本側からドイツ国側に提供し、ドイツ国側研究機関にて磁気光学効果顕微鏡や放射光施設における X 線透過型顕微鏡などを用いてそのダイナミクスの評価を行った。得られた初期の結果は 2021 年 4 月にオンラインで開催された当分野の世界最高峰の国際会議である Intermag にて共著で口頭発表した。またより詳細な評価から得られた結果を論文投稿した。

また、日本国側代表者の深見とドイツ国側代表者の Klaeui は共同で 2021 年 11 月に 1st Online International Workshop on Spintronics を企画、実施し、30 以上の国と地域から 400 名以上の参加者を集めた。従来のスピントロニクス研究で主に用いられていた電子のスピン角運動量に加え、軌道角運動量を利用することで開かれる新たな可能性などについて議論した。

さらに、2021 年 7 月にはドイツ国側の Klaeui らがシリーズ化して運営しているウェビナーで深見が講師を行い、ノンコリニア反強磁性体の電流制御に関する講義を行った。当講義は YouTube で公開されており、現時点で 750 回を超える試聴がなされている。

このほか、日本国側代表者の深見と、ドイツ国側の研究参加者の Gomony らが中心となり、American Institute of Physics が発刊する学術誌である Journal of Applied Physics にて反強磁性スピントロニクスに関する特集企画を実施した。深見を筆頭著者として発表した編纂後記“Antiferromagnetic Spintronics”は現時点で 17 回の被引用がなされている。さらに、日本国側代表者の深見とドイツ国側代表者の Klaeui らが共著者となり電流誘起磁壁移動に関するレビュー論文“Domain Wall Memory: Physics, Materials, and Devices”も執筆した。当該論文は 2022 年 2 月に Impact Factor が 25.6 の Physics Reports 誌に受理され、3 月 16 日に出版された。

### (2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

本研究交流で得られた代表的な新しい知見、概念として、トポロジカルに保護されたナノ磁気構造である磁気スキルミオンの熱拡散、軌道角運動量を利用した電流誘起磁化制御などが挙げられる。

トポロジカルに保護されたナノ磁気構造である磁気スキルミオンの熱拡散については、研究開始以前の段階で日本国側代表者の深見のチームにて確立していた人工反強磁性積層構造での磁気スキルミオンの形成技術をドイツ側代表者の Klaeui のチームに移植し、熱による拡散(ブラウン運動)とトポロジーの関係について調べた。ブラウン運動は様々な学術領域で観測される普遍的な現象であるが、拡散粒子のトポロジーとブラ

ウン運動の拡散係数の関係に関する研究は成されていなかった。今回、当該研究を推進することで、拡散係数がトポロジーと密接に関係しており、また拡散の程度を磁気スキルミオンのマクロなトポジカル状態によって制御できることを見出した。これはブラウン運動に関する学術研究を進展させる重要な知見であると同時に、ストカスティックコンピューティングなど、既存の決定論的な演算を基礎とする古典コンピュータとは異なる新たな計算原理の開拓にも波及するものである。

次に軌道角運動量を利用した電流誘起磁化制御について記す。従来電流によって誘起される非平衡なスピ角運動量の蓄積によって強磁性体の磁化を制御できることを見出され、基礎・応用の両面で多くの研究が行われていたが、日本国側代表者の深見のチームなどによる大規模なプロトタイプ実証研究を通して、磁化の制御に要する電力の削減などが求められていた。ドイツ国側代表者の Klaeui らは軌道角運動量を有効利用できる材料系を見出し、それを用いた磁化制御のための基盤を構築した。この知見を受け、深見のチームでのデバイス応用を目指した研究を開始した。期間終了後も当研究を継続し、低消費電力半導体集積回路の実現に向けた基盤構築に取り組む予定である。

### (3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

上述の成果はいずれも両国の研究者が協力して得られたものである。その中で特に、下記の項目(5)で詳述する土肥昂堯(Takaaki Dohi)は中心的な役割を果たした。土肥は研究期間1年目の8月まで日本国側代表者の深見の研究室に所属してドイツ国側との共同研究に従事し、9月からはドイツ国側の Klaeui の研究室に移籍して今度は日本国側との共同研究に従事した。上述の磁気スキルミオンに関する研究は、日本国側とドイツ国側の研究室のそれぞれに強みを合わせることで実現できたものである。

### (4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

本研究によって得られた成果の社会的な貢献の可能性の一つとして、低消費電力半導体集積回路の実現と、それによる低炭素社会への貢献が期待される。目下、2050年のカーボンニュートラルの達成に向け、多様な分野で様々な研究開発が行われている。このうち、半導体、ICTの分野は、社会における人、物、情報、エネルギーの流れを徹底的に効率化することで、低炭素化に貢献することが求められている。現行の情報社会は高度に発展した古典コンピュータに立脚しているが、今後益々増え続ける情報量を効率的に処理するためには抜本的な改善が必要である。

本共同研究の背景にある学術分野であるスピントロニクスはこうした半導体、コンピュータの実現への貢献が期待されている。本共同研究で得られた成果の一つである、軌道角運動量を利用した磁化制御技術に関する萌芽的な知見は、低消費電力での磁化の制御とそれによる半導体集積回路の低消費電力化への貢献が期待される。また、磁気スキルミオンの熱拡散に関する研究は決定論的に動作する現行のコンピュータとはことなる確率性を積極利用した新概念の高効率なコンピュータへと繋がり得るものである。

### (5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

前述の通り、新型コロナウイルス感染症の影響により、当初計画していた人と人の触れ合いを通じた若手研究者の要求については、残念ながら大幅に制限された。研究期間直前の 2020 年 2 月に、ドイツ国側代表者の Klaeui の研究室の大学院生の Felix Schreiber 氏の日本国側代表者の深見の研究室へのインターンシップ留学が確定し、4 月からの渡航を見据えて VISA 発給を含め全ての準備を整えたが、新型コロナウイルス感染症の感染拡大に伴う入国制限により、実現しなかった。

その一方で、2020 年 3 月に深見の研究室で博士(工学)の学位を取得した土肥昂堯(Takaaki Dohi)は 4 月から 8 月まで深見が別途獲得した科研費にて学術研究員として雇用した後、9 月からドイツ国側の Klaeui の研究室に移籍し、博士研究員として研究に従事した。上述の磁気スキルミオンの熱拡散に関する成果は、土肥が日本国側で構築した材料技術をドイツ国側に移植して、ドイツ国側が得意とする、磁気光学効果や放射光を用いた観察技術を用いることでなし得たものである。土肥は Klaeui の研究室の学生の指導も担当し、海外での研究・教育経験を積むことができた。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような様な発展の可能性が認められるか)

本事業により研究試料の授受、連名での国際会議発表、共著での論文発表を行うことで、今後の持続的な共同研究に向けた礎が構築された。またその過程で上述の土肥昂堯など若手人材の交流、シニアな研究者間での信頼関係の構築がなされたことも今後の関係のより一層の発展に向けた重要な要素である。

本研究期間の 2 年間でお互いの持つ技術の強みに関する相互理解を構築できたことで、今後物性科学、デバイス工学、磁性材料・物理学に関する研究を有機的に連携して進めることができる。特に日本国側代表者の深見の研究室は、高品質材料形成技術、極微細素子形成技術を得意とし、一方でドイツ国側代表者の Klaeui の研究室は革新的材料形成、ナノスケール磁気構造の観察技術に強みを持つことをお互いに理解し合うことができたことは今後共同研究を進める上で重要である。

(7)その他(上記(2)~(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

- 深見俊輔, 丸文研究奨励賞, 一般財団法人丸文財団, "トンネル磁気抵抗素子を用いた確率論的コンピューターの原理実証", 2021/03/03
- 山根結太, 令和 2 年度東北大学電気・情報系若手優秀研究賞, 東北大学電気・情報系研究教授会, 2021/03/09
- 山根結太, 日本物理学会若手奨励賞, 日本物理学会, "ノンコリニア反強磁性体の電流応答に対する理論研究とその実証 (Theoretical study on electric response of noncollinear antiferromagnets)", 2021/10/19
- 深見俊輔, 2022 年度稲盛科学研究機構(InaRIS)フェロー, 2022/3/18