

MERIT 海外長期派遣報告書

工学系研究科 物理工学専攻 博士2年 MERIT9 期生
求研究室 清水宏太郎

派遣先：University of Tennessee, University of Virginia

受け入れ先研究室：Cristian Daniel Batista 研究室、Gia-Wei Chern 研究室

派遣期間：2023年1月10日～2月3日、2月11日～3月4日

概要

米国のテネシー大学及びバージニア大学にそれぞれ約一か月ずつ滞在し、Cristian Daniel Batista 教授及び Gia-Wei Chern 准教授と共に共同研究を行った。Batista 教授とは、ある種の磁性体で発現する渦上磁気構造であるスキルミオン格子という磁気構造の準安定状態に関する研究を行った。Chern 教授とは、金属磁性体におけるスキルミオン格子のダイナミクスに関する研究を、機械学習を利用した計算手法を用いて行った。

研究内容

磁性体中に発現する渦上磁気構造である磁気スキルミオンは、連続変形によって消すことができないトポロジカルな磁気構造である。スキルミオンはそのトポロジカルな性質に由来する興味深い磁気特性を示すだけでなく、創発電磁場とよばれる仮想的な電磁場を通じて非自明な電子状態や輸送特性をもたらす。基礎物理としてだけでなく磁気デバイスへの応用の面からも関心が強く、理論と実験の両面から盛んに研究が行われている。特にこうした磁気構造の安定化機構やダイナミクスを理論的に明らかにすることは、実験と協同した分野開拓をするうえで重要である。

そこで本海外長期派遣を利用し、こうした問題に精力的に取り組んでいる Cristian Daniel Batista 氏及び Gia-Wei Chern 氏と共に共同研究を行った。Batista 氏とはスキルミオンの非平衡定常状態に関する研究を行った。空間反転対称性の破れた金属磁性体である MnSi では、磁気スキルミオンが三角格子を組んだスキルミオン格子 (SkL) が発現することが知られている。通常 SkL が安定化する領域は小さい一方で、温度掃引によって非平衡定常状態として SkL の安定性が増すことが報告されている。そこで我々は、非平衡定常状態としての SkL の安定性解析に理論的に取り組んだ。計算には Batista 氏のグループで開発されている Sunny というオープンソースのソフトウェアを使用した。初めに本ソフトウェアを用いて MnSi の結晶対称性から許されるスピン間の相互作用を同定し、得られた相互作用を基にランジュバンダイナミクスシミュレーションを用いた安定性の解析を行った。まず磁場下でシステムを急冷することによって、準安定の SkL がゼロ温度にいたるまで準安定状態として現れることを明らかにした。さらにそうして得られた準安定 SkL において、磁場を減少させていくことでスキルミオンが作る格子構造が三角格子から正方格子へ変化することも明らかにした。

Chern 氏とは金属磁性体の観点から SkL の安定性やダイナミクスの問題に取り組んだ。前述の MnSi をはじめとして SkL が発現する物質はしばしば金属である一方で、磁性体中の電子状態が磁気構造に与える影響は未解明な点が多い。こうした問題の背景には、従来の手法では伝導電子とスピンの結合した

系の大規模シミュレーションが非常に難しいという事情があり、効率的なシミュレーション手法を用いた解析が必要不可欠である。そこで我々は、磁性体のダイナミクスを記述する Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式の数値解法に機械学習を組み込んだ効率的な計算手法を用い、金属磁性体における SKL の安定性及びダイナミクスに関する解析を行った。まず初めに我々は Rashba 型スピン軌道相互作用を含んだある種の金属磁性体を記述するモデルに対して、従来の手法を用いたシミュレーションを小規模なシステムに対して行った。その結果、スピン軌道相互作用の大きさに応じて螺旋磁気構造やスキルミオンが正方格子を組んだ SKL が得られることを見出した。さらに、このシミュレーションで得られた磁気構造を教師データとして用い、順伝播型ニューラルネットワークを用いた機械学習モデルの構築を行った。元の金属磁性体をよく記述する学習モデルの構築に成功し、現在このモデルを用いた大規模シミュレーションを行っている。今後巨大な系における解析を通じて機械学習によって加速された手法の有用性を示すだけでなく、金属磁性体特有な SKL のダイナミクスが開拓されることが期待される。



図 1：テネシー大学のフットボールスタジアム。

現地での生活

テネシー大学があるノックスビルは、人口 20 万人弱のテネシー州で 3 番目に大きな都市である。雨や曇りの日がやや多いものの、気候は東京とあまり変わらない。大学周辺は治安も良く、アメリカの中でも物価が比較的安いいため住みやすい街であった。筆者の訪れた 1 月初旬は学期が始まっていなかったため閑散としていたが、中旬になると多くの学生が帰省を終え、特に昼のキャンパスはスクランブル交差点と見まがうほど学生で溢れていた。Batista 氏の研究室は大学の巨大なフットボールスタジアムの近くであり、大学院生が多いこともあり比較的静かだった。



図 2：バージニア大学の中心的な建物である Rotunda。中央は大学設立者であり、アメリカ独立宣言を起草したことで有名な第三代アメリカ大統領トーマス・ジェファースンの像。

研究室には 3 人の学生と 2 人のポストドクが在籍し各々が独立したテーマに取り組んでおり、少人数ということもあり研究室メンバー間や Batista 氏と学生間のコミュニケーションが豊富であることが強く印象に残った。日常的に議論を行うだけでなく、お互いが意見を出し合いそれを尊重しながら問題解決に取り組んでおり、そういった姿勢を見習わなければと強く感じた。

バージニア大学のあるシャーロットビルは、ワシントンから電車で南西に 1 時間半進んだ場所にある大学を中心とした小さな都市である。アメリカ国内で最も住みやすい都市に選ばれただけあり、気候は東京と類似して温暖湿潤、物価も安くコンパクトで快適な街であった。バージニア大学はアメリカ第三代大統領のトーマス・ジェファースンによって設立され、その影響もあり政治や法学といった分野で有

名な大学である。大学自体が世界遺産に選ばれており、シャーロットビル観光で訪れる人も多い。筆者の滞在した Chern 氏の研究室は、大学の象徴的な建造物である Rotunda から歩いて 15 分ほどの場所にあった。物理学科棟が工事中だったため学生が自宅で研究を進めており、多くのコミュニケーションがとれなかったのは残念だったが、Chern 氏とはほぼ毎日議論を行い順調に研究を進めることができた。関連分野の実験家とも頻繁に議論する機会を得られ、大変充実した研究生生活を送ることができた。

謝辞

まず初めに、この度滞在を快諾してくださいました Cristian Daniel Batista 教授、Gia-Wei Chern 教授をはじめとして、研究生生活の各面をサポートしてくださいました各研究室スタッフや学生の皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。また本長期海外派遣の機会をくださった指導教官の求幸年教授、副指導教官の齊藤英治教授、MERIT プログラムに感謝申し上げます。特に求教授にはアメリカ内で二か所に滞在するという決断の背中を押していただき、滞在中も多方面でサポートしていただきました。今回の滞りにあたり、日本学術振興会及び工学系研究科の主催する海外武者修行プロジェクトに経済的支援をいただきました。あわせて深く感謝を申し上げます。