

トポロジカル材料科学と革新的機能創出  
2019 年度採択研究者

|                  |
|------------------|
| 2021 年度<br>年次報告書 |
|------------------|

那須 讓治

東北大学 大学院理学研究科  
准教授

量子トポロジカル磁性体のもつ素励起の時空間的制御

## § 1. 研究成果の概要

本研究では、強い量子性すなわち長距離の量子エンタングルメントを有する量子磁性材料に注目し、そこで現れる特殊な統計性を有する準粒子を、時間的および空間的に制御する方法を確立し、そのデバイス応用への基盤を構築することを目的として研究を行っている。特に、量子多体効果が顕著な量子スピン液体に注目して、これまで、実時間ダイナミクスを追跡する計算手法の確立や、強磁性体など他の磁性体との接合系の解析およびそれを利用したスピン注入の理論提案を進めてきた。今年度は、昨年度までで構築した計算手法を応用するなどして、準粒子の持つトポロジカルな特徴を捉え、それを観測するための理論提案を行った。具体的には、以下の3点に関する研究を進めた。1. 量子スピン液体における特殊な統計性を有する準粒子励起の検証方法を提案するために、マヨラナ準粒子の流れが局在フラックス励起によって散乱される過程を実時間シミュレーションによって解析し、フラックス励起が作るベクトルポテンシャル場がマヨラナ準粒子の伝搬に影響を与えることを見いだした。2. 量子スピン液体における乱れの効果に注目し、磁気相互作用のランダム性と不純物導入の2種類の乱れの効果に対して数値計算を実行することで、マヨラナゼロモードの存在が磁気励起スペクトルの低エネルギーモードとして現れることを見だし、さらにそれが磁化率の温度依存性にも特徴的な変化をもたらすことを発見した。3. 準粒子が担う熱輸送特性と比熱の温度依存性の関係を調べるために、Kitaev量子スピン液体に対する熱ホール係数と励起ギャップの磁場角度依存性をスピン波理論によって系統的に調べ、素励起としてマヨラナ粒子を仮定した場合には熱ホール係数の符号反転によって励起ギャップが閉じるが、スピン波のようなボース粒子を仮定した場合には励起ギャップは閉じる必要がないことを見いだした。

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) “Majorana correlations in the Kitaev model with ordered-flux structures”, A. Koga, Y. Murakami, and J. Nasu: Phys. Rev. B **103**, 214421-1-9 (2021).
- 2) “Role of Majorana fermions in spin transport of anisotropic Kitaev model”, H. Taguchi, Y. Murakami, A. Koga, and J. Nasu: Phys. Rev. B **104**, 125139-1-8 (2021).
- 3) “Spin dynamics in the Kitaev model with disorder: Quantum Monte Carlo study of dynamical spin structure factor, magnetic susceptibility, and NMR relaxation rate”, J. Nasu and Y. Motome: Phys. Rev. B **104**, 035116-1-17 (2021).
- 4) “Field-angle dependence of thermal Hall conductivity in a magnetically ordered Kitaev-Heisenberg system”, S. Koyama and J. Nasu: Phys. Rev. B **104**, 075121-1-13 (2021).