

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能  
を有する材料・デバイスの創出」  
研究課題「量子スピン液体におけるトポロジカル準  
粒子の解明と直接検出」

## 研究終了報告書

研究期間 2019年10月～2025年03月

研究代表者: 松田 祐司  
(京都大学 大学院理学研究科 教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1)実施概要

トポロジに由来して創発されるマヨラナ粒子と非可換エニオンは、環境ノイズに強いトポロジカル量子計算の鍵となる準粒子である。本研究では、これら準粒子の舞台となるキタエフ・量子スピン液体状態にある磁性体においてトポロジに関する性質の徹底解明、創発準粒子の直接検出・可視化によるトポロジカル量子計算の基盤技術の確立を目的とする。

キタエフ・量子スピン液体物質  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  熱ホール効果や比熱の精密測定を行い、マヨラナ粒子および非可換エニオンが現実物質に存在することの証拠を与える半整数熱量子ホール効果とマヨラナ・ギャップの磁場角度依存性を詳細に調べた。その結果、プラナー熱ホール効果の半整数量子化を初めて観測し、トポロジカル不変量(チャーン数)とマヨラナ・ギャップの磁場方向依存性が理論模型の予想とほぼ一致することを明らかにした。これは中間目標のベンチマークとなる成果である。さらに、高磁場において結晶の回転対称性を自発的に破るネマティック状態が現れ、トポロジカル相転移が起きていることを明らかにした。これらは当初予期していなかった成果である。理論解析の結果、磁場誘起ネマティック状態として量子計算のエラー補正モデルのひとつであるトーリック・コード状態が実現することを示すとともに、その実験的検出手法を提案した。

### (2)顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

#### 1.

概要:キタエフ量子スピン液体物質  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  において面内磁場下における熱ホール効果(プラナー熱ホール効果)の半整数量子化を観測した。これは2次元電子とは本質的に異なるホール効果の量子化現象であることを示すとともに、創発準粒子の存在をさらに決定づけるものである。さらに、トポロジカル不変量(チャーン数)とマヨラナ・ギャップの磁場角度依存性を決定し、理想的な理論模型から期待されるふるまいとほぼ一致することを明らかにした。また、半整数熱量子ホール効果が消失する高磁場領域において、比熱が面内磁場角度に対して2回対称性を示し、結晶の6回回転対称性を自発的に破るネマティック状態が現れることを示した。さらに、磁場誘起のトポロジカル相転移が起きている可能性を指摘した。

#### 2.

概要: $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  の熱ホール効果および比熱の面内磁場角度依存性の精密測定を行い、熱ホール効果の符号反転とディラック・コーン型エネルギー分散を有するギャップレス状態の出現が、蜂の巣格子のアームチェア方向への平行磁場中で同時に起こることを明らかにした。以上のふるまいは、いずれの磁場方向においても励起ギャップが開きギャップレス状態が期待されないボゾン起源では説明することができず、量子化の有無に関わらず熱ホール効果がマヨラナ粒子起源であることを明らかにした。以上の成果は、現実物質におけるマヨラナ粒子および非可換エニオンの存在を決定づけるものであり、これまでの議論を解消し研究を大きく進展させるものである。

#### 3.

概要:金属(グラファイト)基板上の $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  原子層膜について走査型トンネル顕微鏡測定により、絶縁体では前例のない欠陥周りの空間変調パターンが観測された。キタエフ模型に基づいたコンダクタンス・マップの数値シミュレーションを行なったところ、実験結果を再現するパターンが観測された。シミュレーションに用いた理論モデルの詳細な解析より、観測された空間変調パターンはマヨラナ粒子により形成されたフェルミ面に由来する可能性を指摘した。間接的ではあるものの、非可換エニオンの構成要素であるマヨラナ粒子を実空間で捉えた例はなく、非可換エニオンの直接検出に向けた重要な結果である。

## < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

### 1.

概要: チャーン数とマヨラナ・ギャップの磁場角度依存性より、現実物質に存在する非キタエフ相互作用に対して非可換エニオンが現れるトポロジカル状態が安定して存在することを示すものである。このことは、ポロジカル量子コンピューターを念頭にした応用展開において、磁性絶縁体である  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  が極めて有望であることを示す重要な成果である。

### 2.

概要: 理論解析より磁場誘起ネマティック状態がトリーク・コード状態である可能性を指摘した。トリーク・コード状態は量子コンピューターにおける量子誤り補正のモデルとして知られており、磁場により非可換エニオンが現れるトポロジカル相とトリーク・コード状態という異なるトポロジカル相を制御できる可能性が示された。このようなトポロジカル相転移は前例がなく、幅広い量子計算分野での応用展開の可能性を示すものである。

### 3.

概要: キタエフ量子スピン液体物質  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  の結晶多形である  $\beta$ - $\text{RuCl}_3$  の原子層膜の作製に成功した。そして薄膜成長過程において幅数 nm、長さ数  $\mu\text{m}$  のナノワイヤが形成され、さらにナノワイヤが非平衡過程に特徴的なチューリング・パターンと類似したパターン形成することが明らかとなった。このようなパターン形成はこれまでマクロなスケールで議論されてきたものであり、原子スケールでは前例のない。トポロジーとの直接的な関連はないものの、予期しない驚くべき成果である。  $\beta$ - $\text{RuCl}_3$  量子細線の直接的な活用、もしくは  $\beta$ - $\text{RuCl}_3$  ナノワイヤをマスクパターンに用いることにより、グラフェンなどの基板材料のナノリボン作製、朝永-ラッティンジャー液体状態の実現、スピン鎖の接合作製など、様々な応用展開が期待される。

## < 代表的な論文 >

1. T. Yokoi *et al.*, “Half-integer quantized anomalous thermal Hall effect in the Kitaev material candidate  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$ ”, *Science*, vol. 373, pp.568-572, 2021.

概要: キタエフ量子スピン液体候補物質である  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  において熱ホール効果測定を行い、面内磁場下において熱ホール伝導度が量子熱伝導度の  $1/2$  倍で量子化する半整数熱量子ホール効果(プラナー熱量子ホール効果)を観測した。さらに半整数熱量子ホール効果の符号からトポロジカル不変量(チャーン数)の磁場角度依存性を決定し、理想的な理論模型の予想とほぼ一致することを明らかにした。

2. O. Tanaka *et al.*, “Thermodynamic evidence for a field-angle-dependent Majorana gap in a Kitaev spin liquid”, *Nature Physics*, vol. 18, pp.429-435, 2022.

概要: キタエフ量子スピン液体候補物質である  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  において超精密比熱測定を行い、マヨラナ・ギャップの磁場角度依存性を明らかにした。そしてこれが理想的な理論模型の予想とほぼ一致することを明らかにした。さらに高磁場において比熱が面内磁場角度に対して 2 回対称性を示し、結晶の 6 回回転対称性を自発的に破るネマティック状態が現れることを示した。

3. T. Asaba *et al.*, “Growth of self-integrated atomic quantum wires and junctions of a Mott semiconductor”, *Science Advances*, vol. 9, eabq5561, 2023.

概要:  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  の熱ホール効果および比熱の面内磁場角度依存性の精密測定を行い、熱ホール効果の符号反転とディラック・コーン型エネルギー分散を有するギャップレス状態の出現が、蜂の巣格子のアームチェア方向への平行磁場中で同時に起こることを明らかにした。以上のふりまいは、いずれの磁場方向においても励起ギャップが開きギャップレス状態が期待されないボゾン起源では説明することができず、量子化の有無に関わらず熱ホール効果がマヨラナ粒子起源であることを明らかにした。

4. K. Imamura *et al.*, “Majorana-fermion origin of the planar thermal Hall effect in the Kitaev magnet  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>”, Science Advances, vol. 10, adk3539, 2024.

概要:キタエフ量子スピン液体物質 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>の結晶多形である $\beta$ -RuCl<sub>3</sub>の原子層膜の作製に成功し、薄膜成長過程において幅数 nm、長さ数 $\mu$ m のナノワイヤが形成され、さらにナノワイヤが非平衡過程に特徴的なチューリング・パターンと類似したパターン形成することが明らかとなった。

5. Y. Kohsaka *et al.*, “Imaging Quantum Interference in a Monolayer Kitaev Quantum Spin Liquid Candidate”, Physical Review X, vol. 14, 041026, 2024.

概要:金属(グラファイト)基板上の $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>原子層膜について走査型トンネル顕微鏡測定により、絶縁体では前例のない欠陥周りの空間変調パターンが観測された。キタエフ模型に基づいたコンダクタンス・マップの数値シミュレーションを行なったところ、実験結果を再現するパターンが観測された。シミュレーションに用いた理論モデルの詳細な解析より、観測された空間変調パターンはマヨラナ粒子により形成されたフェルミ面に由来する可能性を指摘した。

## § 2 研究実施体制

### (1)研究チームの体制について

#### ①「松田」グループ

研究代表者:松田 祐司

研究項目

- ・熱ホール効果の磁場角度依存性測定による $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>におけるトポロジカル・チャーン数の角度依存性の同定
- ・MBE, PLD, スコッチテープ法による $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>原子層薄膜の作製
- ・不純物置換・電子線照射した系における熱ホール効果測定
- ・元素置換、電界効果、近接効果によるキャリアドーブと新奇電子相の探索
- ・単層 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>/金属ヘテロ接合におけるSTM/STS測定による非可換エニオンの直接検出と可視化
- ・磁場誘起トポロジカル量子相転移の熱膨張率、磁気トルク、熱輸送測定による探索

#### ②「芝内」グループ

研究代表者:芝内 孝禎 (東京大学新領域創成科学研究科 教授)

研究項目

- ・比熱および磁気トルクの角度依存性測定によるチャーン数の精密な決定
- ・電子線照射ならびに元素置換による不純物効果の実施
- ・不純物効果に対するキタエフ・量子スピン液体状態の安定性の検証
- ・元素置換、電界効果、照射効果によるキャリアドーブと新奇電子相の探索
- ・極低温比熱の磁場角度依存性測定による高磁場ネマティック状態の解明
- ・スピン・ゼーベック効果および円偏光マイクロ波によるカイラル・マヨラナ・エッジ流の検出

#### ③「藤本」グループ

研究代表者:藤本 聡 (大阪大学基礎工学研究科 教授)

研究項目

- ・非キタエフ相互作用を考慮した理論模型の構築
- ・不純物効果の検証
- ・非キタエフ相互作用を考慮した理論模型の構築
- ・キャリアドーピングに対する相図の理論的考察
- ・非可換エニオンの検出法の理論提案
- ・高磁場ネマティック状態の理論的考察

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

マヨラナ粒子および非可換エニオンを用いたトポロジカル量子計算は、物性物理学のみならず、統計物理、情報科学、素粒子物理、基礎数学など、様々な分野において注目を集めている。実際に、エニオンに焦点を当てた研究会も開かれ招待講演を行うなど、様々な分野の研究者との交流および連携を行っている。