

# 研究プロジェクト名: スピン3重項トポロジカル超伝導体を用いた新規超伝導スピントロニクスの研究

**概要:** スピン3重項トポロジカル超伝導体では, スピンと超伝導秩序変数の自由度が互いに絡み合った新しい準粒子状態の発現が期待されている. 例えば, 超伝導体の界面における自発スピンを伴うエッジ状態や, 半整数量子化磁束芯と呼ばれる新奇な磁束量子渦が形成されうること, また, この量子渦においてはスピンと超伝導秩序変数の位相がともにねじれた状態が実現し, 渦中心付近でマヨラナ粒子が出現すること等が理論的に予測されている. マヨラナフェルミオンはトポロジカル量子ビットと呼ばれる新しい量子演算の基礎を担う可能性が示唆されており, その性質を応用することで新たな超伝導スピントロニクスの構築が期待できる. 本プロジェクトにおいては, そのような超伝導とスピンの自由度が絡み合った状態から生まれる新たな超伝導スピントロニクスを提案することを目的として, スピン3重項トポロジカル超伝導体を用いた種々のデバイス構造における電子状態の研究を進める.

**コアメンバー:** 土浦宏紀, 吉岡匠哉, 柏谷聡(産総研), Manfred Sigrist (ETH-Zurich)

**期待される研究成果:**

- (1) 半整数量子化磁束芯が安定化する条件を微視的模型を用いて理論的に説明することにより, 操作可能な局在マヨラナ状態実現の可能性が開ける. これは, トポロジカル量子ビットの有力な候補となりうる.
- (2) トポロジカル超伝導状態に生じうるドメイン構造の安定性に関する解析が可能になり, トポロジカル超伝導体を用いた素子の設計指針を与えることが可能になる.

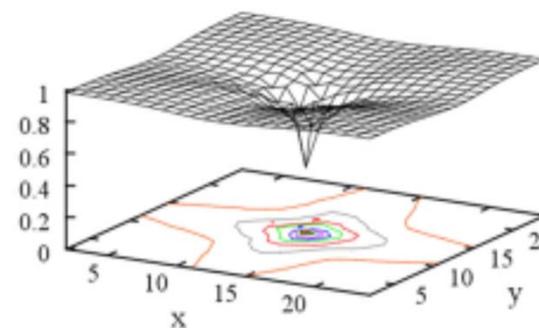


図1: カイラルp波の磁束芯

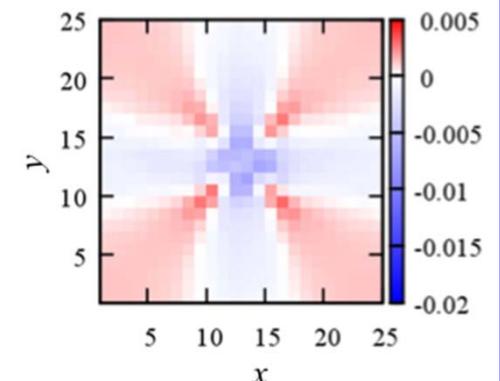


図2: 磁束芯近傍の磁化分布

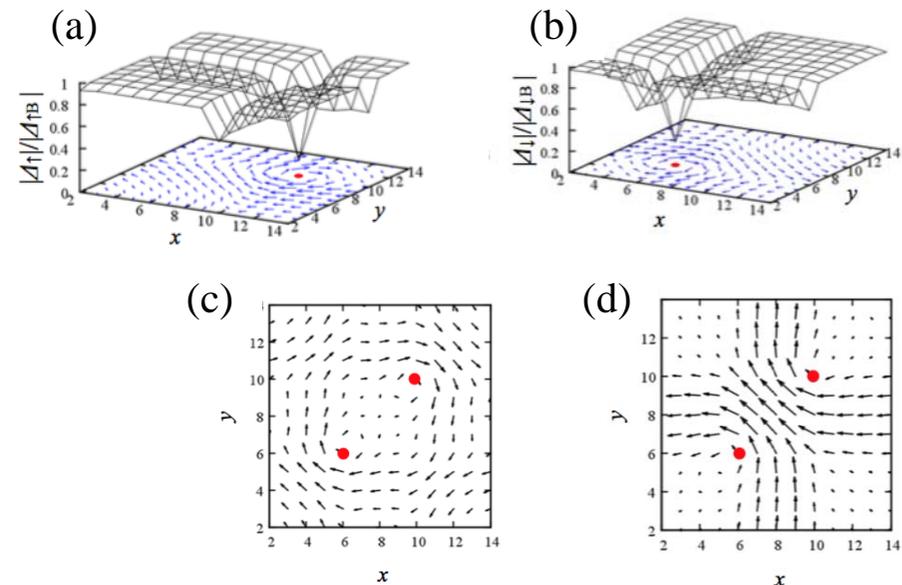
## 研究プロジェクト名: スピン3重項トポロジカル超伝導体を用いた新規超伝導スピントロニクスの研究

概要: スピン3重項トポロジカル超伝導体では、スピンと超伝導秩序変数の自由度が互いに絡み合った新しい準粒子状態の発現が期待されている。例えば、超伝導体の界面における自発スピン流を伴うエッジ状態や、半整数量子化磁束芯と呼ばれる新奇な磁束量子渦が形成されること、また、この量子渦においてはスピンと超伝導秩序変数の位相がともにねじれた状態が実現し、渦中心付近でマヨラナ粒子が出現すること等が理論的に予測されている。マヨラナフェルミオンはトポロジカル量子ビットと呼ばれる新しい量子計算の基礎を担う可能性が示唆されており、その性質を解明することにより新たな超伝導スピントロニクスの構築を期待できる。本プロジェクトにおいては、そのような超伝導とスピンの自由度が絡み合った状態から生まれる新たな超伝導スピントロニクスを提案することを目的として、スピン3重項トポロジカル超伝導体における種々の電子状態の研究を進める。

### 研究成果(実施状況):

(1) Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>に対する3バンド有効格子模型を用いて、分数量子化磁束芯の数値解を求めた(図(a), (b))。整数型磁束芯を基準としたエネルギー損失とスピン軌道相互作用との相関を求めた。

(2) 分数量子化磁束芯の近傍における電流密度(図(c))とスピン流密度(図(d))の空間分布を解析した。スピン流密度が磁束芯間で増強されることが明らかになった。



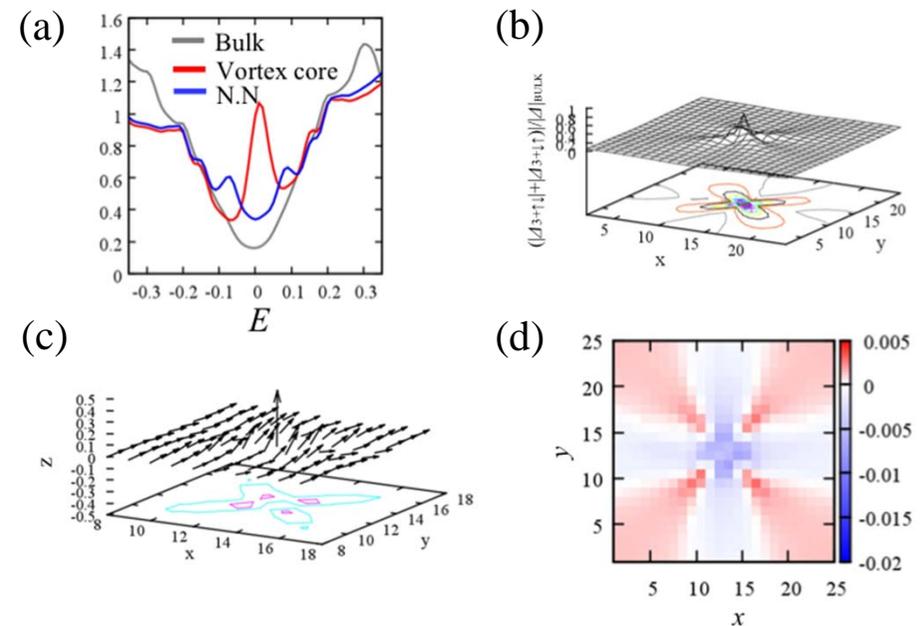
主要発表論文等: [1] R. Asaoka et al., to appear in J. Phys. Conf. ser. [2] K. Yamazaki et al., to appear in J. Phys. Conf. ser. [3] 吉岡匠哉, 土浦宏紀, 日本金属学会誌**81**, 19-25(2017).

# 研究プロジェクト名: スピン3重項トポロジカル超伝導体を用いた新規超伝導スピントロニクスの研究

概要: スピン3重項トポロジカル超伝導体では、スピンと超伝導秩序変数の自由度が互いに絡み合った新しい準粒子状態の発現が期待されている。例えば、超伝導体の界面における自発スピン流を伴うエッジ状態や、半整数量子化磁束芯と呼ばれる新奇な磁束量子渦が形成されること、また、この量子渦においてはスピンと超伝導秩序変数の位相がともにねじれた状態が実現し、渦中心付近でマヨラナ粒子が出現すること等が理論的に予測されている。マヨラナフェルミオンはトポロジカル量子ビットと呼ばれる新しい量子計算の基礎を担う可能性が示唆されており、その性質を解明することにより新たな超伝導スピントロニクスの構築を期待できる。本プロジェクトにおいては、そのような超伝導とスピンの自由度が絡み合った状態から生まれる新たな超伝導スピントロニクスを提案することを目的として、スピン3重項トポロジカル超伝導体における種々の電子状態の研究を進める。

## 研究成果(実施状況):

(1)  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  に対する3バンド有効格子模型を用いて、カイラルp波およびヘリカルp波超伝導状態における磁束芯の準粒子状態を解析した(図(a))。ヘリカルp波状態に限り、磁束芯近傍にカイラル成分が誘起されることを見出した(図(b))。このとき、dベクトルの空間分布は図(c)のようになることが明らかになった。さらに、ヘリカルp波の場合は磁化がわずかに誘起されることを見出した。その空間分布は図(d)のように4回対称性をもって磁束芯の周囲に分布する。



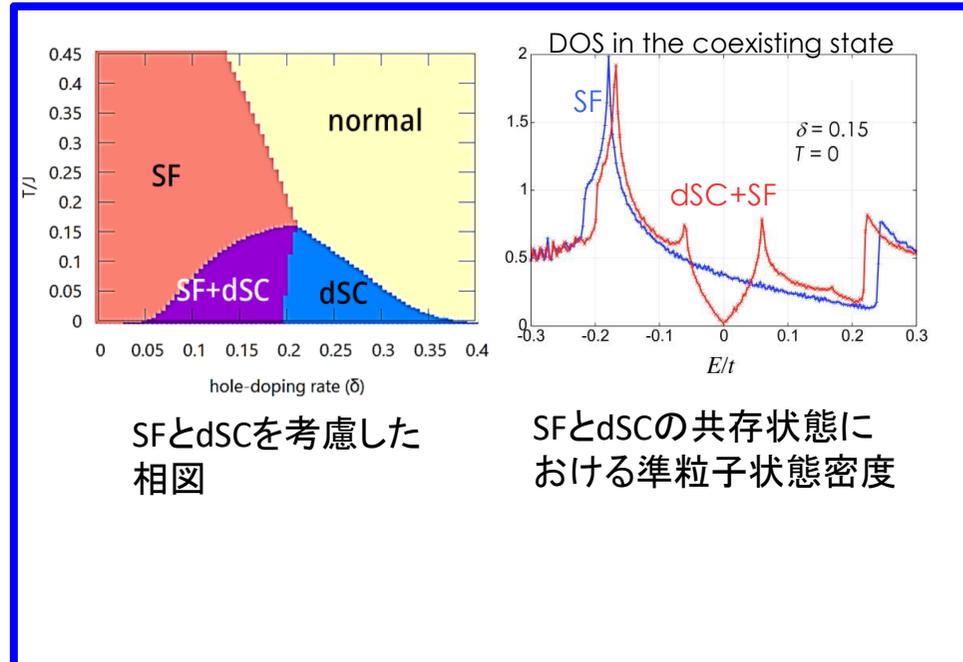
主要発表論文等: [1] R. Asaoka, H. Tsuchiura, and M. Sigrist., J. Phys.: Conf. ser. 871, 012025 (2017), [2] K. Yamazaki, T. Yoshioka, H. Tsuchiura, and M. Ogata, J. Phys.: Conf. Ser. 871, 012009 (2017).

# 研究プロジェクト名: スピン3重項トポロジカル超伝導体を用いた新規超伝導スピントロニクスの研究

概要: スピン3重項トポロジカル超伝導体では、スピンと超伝導秩序変数の自由度が互いに絡み合った新しい準粒子状態の発現が期待されている。例えば、超伝導体の界面における自発スピン流を伴うエッジ状態や、半整数量子化磁束芯と呼ばれる新奇な磁束量子渦が形成されうること、また、この量子渦においてはスピンと超伝導秩序変数の位相がともにねじれた状態が実現し、渦中心付近でマヨラナ粒子が出現すること等が理論的に予測されている。マヨラナフェルミオンはトポロジカル量子ビットと呼ばれる新しい量子演算の基礎を担う可能性が示唆されており、その性質を解明することにより新たな超伝導スピントロニクスの構築が期待できる。本プロジェクトにおいては、そのような超伝導とスピンの自由度が絡み合った状態から生まれる新たな超伝導スピントロニクスを提案することを目的として、主にスピン3重項トポロジカル超伝導体や、銅酸化物超伝導体における種々の電子状態の研究を進める。

## 研究成果(実施状況):

交替フラックス状態 (staggered flux state: SF) は、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ相で観測されるいくつかの実験事実を記述する。しかし、電子ホール非対称な準粒子状態密度を与えるなど、実験と矛盾する点も存在する。我々は、 $\text{CuO}_2$ 面を記述する理論的モデルに、隣接サイト間のクーロン反発を加えたモデルを用い、SFとd波超伝導 (dSC) の共存する状態を調べた。隣接サイト間クーロン力はSFを安定化させると同時にdSCを抑制する。そのため、共存状態においては、非対称なSFギャップがまず開き、残留状態密度を利用してd波超伝導が開くという機構により、実験で観測される準粒子スペクトルが得られることが分かった。



SFとdSCを考慮した相図

SFとdSCの共存状態における準粒子状態密度

主要発表論文等: [1] H. Tsuchiura, M. Ogata, K. Yamazaki, and R. Asaoka, J. Phys.: Conf. Ser. 969, 012066 (2018), [2] K. Yamazaki, H. Tsuchiura, T. Yoshioka, and M. Ogata, J. Phys.: Conf. Ser. 969, 012044 (2018), [3] T. Yoshioka and H. Tsuchiura, Appl. Phys. Lett. 112, 162405 (2018), [4] H. Tsuchiura, T. Yoshioka, and P. Novák, Scripta Materialia 154, 248 (2018)

# 研究プロジェクト名: スピン3重項トポロジカル超伝導体を用いた新規超伝導スピントロニクスの研究

**概要:** スピン3重項トポロジカル超伝導体では、スピンと超伝導秩序変数の自由度が互いに絡み合った新しい準粒子状態の発現が期待されている。例えば、超伝導体の界面における自発スピン流を伴うエッジ状態や、半整数量子化磁束芯と呼ばれる新奇な磁束量子渦が形成されうること、また、この量子渦においてはスピンと超伝導秩序変数の位相がともにねじれた状態が実現し、渦中心付近でマヨラナ粒子が出現すること等が理論的に予測されている。マヨラナフェルミオンはトポロジカル量子ビットと呼ばれる新しい量子演算の基礎を担う可能性が示唆されており、その性質を解明することにより新たな超伝導スピントロニクスの構築が期待できる。本プロジェクトにおいては、そのような超伝導とスピンの自由度が絡み合った状態から生まれる新たな超伝導スピントロニクスを提案することを目的として、主にスピン3重項トポロジカル超伝導体や、銅酸化物超伝導体における種々の電子状態の研究を進める。

**研究成果(実施状況):** Kitaevによって提案された1次元スピン3重項超伝導モデルは、トポロジカル超伝導を記述する簡単な例であり、その1次元鎖の端点には、マヨラナ準粒子状態が存在することが知られている。このモデルを2本ならべて梯子型モデルを構成した時、鎖間の相互作用によってマヨラナ状態がどのような影響を受けるかという問題を、トポロジカル数の解析および数値的対角化によって調べた。梯子型モデルの相図は図1のようになる。ここで、 $t_{\perp}$  は鎖間の電子の遷移確率振幅、 $\mu$  は化学ポテンシャルである。チェーン数が0, 2, 4の領域に分かれることが見て取れる。しかし、これだけでは端状態の特性が理解できたとは言い難いため、さらに、梯子型モデル同士のJosephson接合を考え、Josephsonエネルギーの位相依存性を調べた。図2に示すように、Josephson効果を与えるトンネル遷移振幅と、鎖間の遷移確率振幅の大小関係によって、マヨラナ準粒子がもたらすトポロジカルJosephson効果と呼ばれる $4\pi$ 周期のエネルギー・位相関係に加え、通常のJosephson効果、さらに $\pi$ 接合と呼ばれる状況の3種類が現れることが明らかになった。

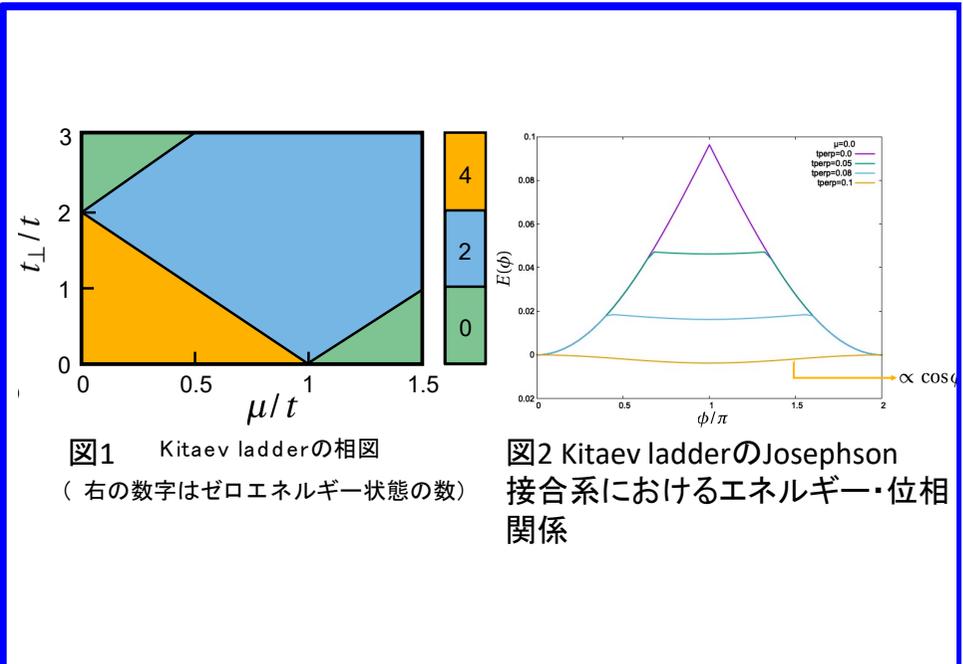


図1 Kitaev ladderの相図  
(右の数字はゼロエネルギー状態の数)

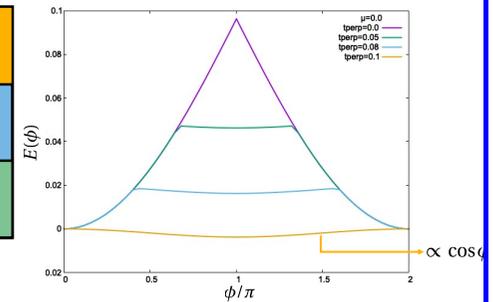


図2 Kitaev ladderのJosephson接合系におけるエネルギー・位相関係

**主要発表論文等:** [1] A. Miura et al., Appl. Phys. Lett. 115, 222403 (2019), [2] S. Fukuda et al., J. Phys.: Conf. Ser. 1293, 012026 (2019), [3] Y. Taguchi et al., J. Low Temp. Phys. 196, 321 (2019).