

称号及び氏名 博士（工学） 福井 阜丈

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 31 日

論文名 「カイラルらせん磁性体を作る磁場による
超伝導体中の渦糸構造の理論研究」

論文審査委員 主査 魚住 孝幸
副査 岩住 俊明
副査 大同 寛明
副査 石田 武和
副査 加藤 勝

論文要旨

超伝導体は電気抵抗がゼロとなる完全導電性と、外部からの磁場を排除する完全反磁性という二つの性質を持つ物質である。臨界磁場を越えた磁場が印加されると、完全反磁性は消失して磁場が侵入する。その磁場侵入の様子は物質によって異なり、臨界磁場を超えると磁場が一度に侵入する第一種超伝導体と、下部臨界磁場を超えると量子磁束という形で部分的に侵入して少しずつ超伝導を壊していく第二種超伝導体に分類される。第二種超伝導体に現れる量子磁束は、その周りで渦電流が流れ、量子磁束と渦電流を合わせて渦糸と呼ぶ。第二種超伝導体はこの渦糸状態になるため、超伝導状態が完全に壊れる上部臨界磁場が第一種超伝導体の臨界磁場よりも高くなり、応用に用いられる超伝導物質である。しかし、外部電流の印加により渦糸が駆動され、電気抵抗が発生し、完全導電性が失われるため、渦糸の制御は超伝導体の応用上重要な因子である。従来の研究では、超伝導体中に不純物や穴を加えることで部分的に超伝導状態ではない領域を作り、そこに渦糸を止めるピン止め効果により臨界電流の向上が行われている。一方で、強磁性体とのハイブリッド構造が渦糸構造の制御として考えられている。強磁性体のドットや強磁性体/超伝導体二層構造の系を用いると、強磁性体の磁気ドメイン構造に依存した渦糸の自発的な形成が生じる。このような構造では、磁気ドメイン構造によるピン止め作用により渦糸の駆動の制限が可能であり、臨界電流が増大する。このように強磁性体を用いた渦糸構造の制御が知られているが、異なった磁気構造を持つ磁性体でも超伝導体中の渦糸構造に影響を与えられることが考え

られる。そのため、特殊な磁気構造を持つカイラルらせん磁性体に着目した。

カイラルらせん磁性体は、らせん軸と呼ばれる軸の周りを磁気モーメントが回転するように配列する磁気構造を持った磁性体である。また、外部から磁場が加わると、この磁気構造はカイラルソリトン格子と呼ばれる周期的なソリトン配列に変形することが理論的、および実験的に知られている。

カイラルらせん磁性体の磁気構造やカイラルソリトン格子において巨大磁気抵抗効果・離散的な電気抵抗の変化・スピン流の生成といった様々な現象が報告されている。そのため、この磁気構造は超伝導体中の渦糸構造にも特異な影響を与えることが考えられる。特に、カイラルらせん磁性体 / 超伝導体二層構造を考えると、強磁性磁気秩序とは異なったピン止め作用が渦糸に現れ、超伝導体中に不純物を導入することなく臨界電流が向上すると考えられる。以上の背景から、カイラルらせん磁性体の磁気構造が超伝導体中の渦糸構造に与える影響を解明することを目的として、数値シミュレーションによる理論研究を行った。

本論文では全5章で構成されており、それぞれの章は以下の通り記述されている。

第1章では、導入として超伝導現象とカイラルらせん磁性体を説明した。特に、超伝導現象の中でも本研究で中心となる完全反磁性・渦糸・Ginzburg-Landau 方程式・強磁性体/超伝導体ハイブリッド構造を詳細に説明した。その後、研究背景と研究目的をまとめた。

第2章では、カイラルらせん磁性体の磁気構造によって現れる二次元超伝導体の渦糸構造を示した。始めに、計算手法である二次元有限要素法による Ginzburg-Landau 方程式の解法を記述した。次に、比較のために均一な磁場下における渦糸構造を示した。均一な磁場下において、自由エネルギーの磁場依存性から、磁場の増加に伴い渦糸が一つずつ増加していくことを示した。その後、カイラルらせん磁性体の影響を取り込んだ時の渦糸構造を示した。カイラルらせん磁性体が超伝導体に与える影響を、カイラルらせん磁性体の磁気モーメント配列をそのまま磁場として取り入れ、ヘリカルな磁場が超伝導体に印加されている状況を考えた。その時、カイラルらせん磁性体のハミルトニアンを厳密解を用いることで、その磁場分布を解析的に表した。二次元超伝導体においては面に垂直な磁場成分のみを考え、カイラルらせん磁性体の磁気構造によって作られた、空間的に振動する磁場が超伝導体に印加された状況に置き換えた。その時、①均一な磁場下に、空間的に振動する磁場が加わる時の渦糸構造と、②空間的に振動する磁場による渦糸構造をそれぞれ求めた。①において、空間的に振動する磁場により渦糸が現れる領域と現れない領域が交互に生じることで、均一な磁場下で現れた規則正しい三角格子の渦糸配列は変調された。一方で②において、渦糸は空間的に振動する磁場の山と谷の位置に隣接して、反平行に現れた。この渦糸配列は、渦糸間の相互作用と、渦糸と磁場との相互作用の競合のために生じる。そこに

印加磁場が加わると、印加磁場と反平行の量子磁束を持つ渦糸は消失した。このような渦糸配列では、外部電流が流れることによる渦糸の駆動に制限が生じることで、空間的に振動する磁場が渦糸のピン止め作用となることが考えられる。従って、不純物のような人工的なピン止めを加えることなく臨界電流が向上することが期待できる。

第3章では、二次元超伝導体における渦糸構造の安定性を議論した。本研究で用いた数値シミュレーションでは、初期状態としてオーダーパラメータ分布をランダムに与えて、反復計算によりオーダーパラメータの収束解を求めた。そのため、同じ数値パラメータや磁場の大きさを用いた時でも、初期状態の違いで渦糸の数や位置が異なった渦糸構造が得られた。そこで、それぞれの渦糸構造に対して **Ginzburg-Landau** の自由エネルギーを計算することで最安定な渦糸構造を求めた。また、自由エネルギーの磁場依存性から、渦糸構造の最安定な状態の転移も調べた。その結果、ある磁場の大きさを超えると、最小の自由エネルギーを持つ状態が「渦糸が全くない状態」から「渦糸が空間的に振動する磁場の山と谷に一つずつ現れる状態」へと転移する。この変化は、渦糸の数が磁場の増加に伴い一つずつ増加していく均一磁場下の変化とは異なる。この相転移は、系を空間的に振動する磁場の半周期のサイズとなる小さな超伝導体の集合と考えることで理解できる。それぞれの小さな系はエネルギー的に等価であり、どの系においても同じ状態が現れると考えられる。そのため、渦糸が一つ現れる時は、全ての小さな超伝導体に一つずつ現れるため、全体として同時に一列に渦糸が並ぶ構造が得られたのだと考えられる。また、その状態から磁場が大きくなると、渦糸が一挙に二列に並ぶ状態へと最安定状態が変化することも分かった。その後、一定の大きさのカイラルらせん磁性体からの磁場に、印加磁場を加えた時の安定な渦糸構造を調べた。印加磁場が増加すると、磁場に反平行な渦糸が一挙に消失する状態と、平行な渦糸の数が増加する状態が得られた。それらの状態のうち自由エネルギーの大小の比較から、印加磁場下で安定である状態が、反平行な渦糸が消失した状態であることが分かった。以上の研究により、二次元超伝導体の系において、カイラルらせん磁性体を作る空間的に振動する磁場により渦糸が一度に一列に並び、印加磁場が加わると、磁場に反平行な渦糸が一挙に消失するということが明らかになった。

第4章では、カイラルらせん磁性体の磁気構造によって現れる三次元超伝導体の渦糸構造を示した。第2章と第3章では、二次元超伝導体の系に現れる渦糸構造を調べており、二次元超伝導体では、カイラルらせん磁性体から作られる磁場のうち、面に垂直で空間的に振動する磁場のみを考えていた。そのため、三次元超伝導体に拡張することによって、カイラルらせん磁性体のヘリカルな磁気構造からの効果を取り込んだ。まず、計算手法である三次元有限要素法を用いた **Ginzburg-Landau** 方程式の解法と、ヘリカルな磁場による渦糸構造を示した。平行六面体

の三次元超伝導体系において、らせん軸を x 軸とすると、ヘリカルな磁場の y 成分と z 成分が空間的に振動しているため、それぞれの磁場による、面に垂直な渦糸が現れた。前章で示した二次元超伝導体で生じた渦糸の間隔は、空間的に振動する磁場の振動周期の半分の長さであり、互いに反平行な渦糸を持っていた。一方で、三次元超伝導体においては渦糸の間隔がらせん周期の四分の一の長さであり、最近接の渦糸と直角の向きの量子磁束を持つ渦糸を持つ。また、小さな系においては反磁場の影響により渦糸が現れないことから、渦糸の出現に関してサイズ依存性があることが分かった。また、二次元超伝導体とは異なり、面に対して斜めの向きの量子磁束を持った、らせん軸方向に傾いた渦糸が現れた。磁場が印加されていないらせん軸方向に渦糸が傾いた原因として、渦糸間相互作用と系の境界からの影響によるものであると考えられる。最後に、ヘリカル磁場の回転方向を変化させた時の渦糸構造を示した。反対方向の回転においては、らせん軸に傾いた渦糸が現れたが、その傾く方向が反対になった。このことは、カイラルらせん磁性体のカイラリティが渦糸構造に影響を及ぼしたことを示している。以上の研究から、カイラルらせん磁性体から作られるヘリカルな磁場において、三次元超伝導体の面に垂直な渦糸に加えて、面に対して斜めの方向の量子磁束を持った渦糸が現れることが分かった。特に、らせん軸方向に渦糸が傾くという渦糸構造は均一な磁場では現れず、ヘリカルな磁場による新奇の渦糸構造であるということが出来る。

第5章では、本研究で得られた結果を要約した。

審査結果の要旨

超伝導体の応用においては、ゼロ抵抗を妨げる渦糸の運動をピン留めにより制御することが重要課題である。本論文は、従来の強磁性体を用いる方法とは異なり、磁気モーメントが一つの方向に沿って回転するカイラル磁性体を超伝導体中の渦糸の制御に用いるというアイデアを新規に提案するものである。有限要素法を用いてギンツブルグーランダウ方程式を解くことで数値的に渦糸構造を調べることにより、以下の結果を得た。

- (1) 超伝導薄膜がカイラル磁性体上に接合された二次元超伝導体の渦糸構造について、2次元のギンツブルグーランダウ方程式を数値的に解くことで、安定な渦糸構造を求めた。その際、カイラル磁性体からの磁場は、二次元超伝導体に垂直な成分が有効なため、その垂直成分を振動磁場として扱った。その結果、(i) 一様な外部磁場のもと、カイラル磁性体からの磁場が渦糸構造を変調すること、(ii) 振動磁場下で渦糸-反渦糸対が生成されること、を見出した。また、これらの結果をもとに、カイラル磁性体を用いた渦糸のピン留めの可能性を示した。
- (2) (1)で扱った二次元超伝導体系について、ギンツブルグーランダウの自由エネルギーを用いて渦糸構造の安定性を調べ、カイラル磁性体からの磁場が大きくなったとき、磁場による空間周期ごとに渦糸-反渦糸対が一斉に現れるという一種の相転移が起こるこ

とを見出した。このような現象は、渦糸がひとつずつ現れる一様磁場下では見られない新規なものである。

- (3) カイラル磁性体のヘリカルな磁場がもたらす3次元超伝導体中の渦糸構造について、3次元のギンツブルグーランダウ方程式を数値的に解くことで調べた。その結果、直方体形状の超伝導体では、(i) 磁場排除の効果によって主に側面に垂直な渦糸が形成されること、(ii) 側面に斜めな渦糸が形成される場合には、渦糸の傾斜方向が磁場の傾斜方向とは垂直方向になることを見出した。また、これらの結果をもとに、カイラル磁性体を用いた渦糸のピン留めの可能性を示した。

カイラル磁性体によるヘリカルな磁場下での渦糸構造というテーマは、これまでにない新しい分野である。以上の研究成果は、その端緒を開く重要なものであり、超伝導の応用に関しても新しい知見を与え、物理学の基礎的な問題としてもこの分野の発展に大いに貢献するものである。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。