

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654123

研究課題名(和文)微小コイルSQUIDによる自発的磁束観測の試み

研究課題名(英文) Trial experiments of detecting spontaneous magnetic flux by SQUID with a small pick-up coil

研究代表者

谷口 年史 (Taniguchi, Toshifumi)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80207183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：過去に行われたYBCO系超伝導体の測定から粒子間結合の値を評価し、その値を用いて数値計算を行い計画変更後の測定系で実測可能かのシミュレーションを行った。その結果、厳しい条件であるが、ある条件下で測定の可能性を示すことが出来た。
また、大きな成果として、物性(磁性)研究の分野では有名なレビュー誌として30年にわたり23巻発行されている「Handbook of Magnetic Materials」(Elsevier) ed. by K.H.J. Buschow に執筆を依頼され、分担者である川村氏と共著で本研究課題の内容も含んだレビューを執筆した。

研究成果の概要(英文)：The coupling constant between the fine particles of the superconducting state of YBCO are estimated from the previous experimental results. We did the numerical simulation in order to estimate the intensity of the superconducting flux loop. We conclude that the intensity of the magnetic field made by the superconducting flux loop can be detectable by using the normal SQUID technique with a small coil.
We will publish a review article "Spin Glasses" from Elsevier. The article is a chapter of the famous series of "Handbook of Magnetic Materials".

研究分野：低温・磁性

キーワード：カイラリティ 協力現象 超伝導 自発磁束

1. 研究開始当初の背景

近年、フラストレーションの概念は、元々の発祥の地であるスピン系のみならず、凝縮系物理学全般で注目されている。その中で「右手系」と「左手系」を区別する自由度、カイラリティは、磁性体の新規秩序と磁気励起（スカームオン、 Z_2 ボルテックス）、マルチフェロイックなど様々な新規物性を理解するための、最も重要な概念と位置付けられている。申請者は、代表的なフラストレート、ランダム磁性体である合金スピングラスで、カイラリティの寄与を異常ホール効果に観測することに最初に成功した。(T.Taniguchi et al, Phys. Rev. Lett. 93, 246605 (2004))
しかし磁性体の場合、常に系に存在する異方性により純粋にカイラリティのみの秩序化を検証することは困難であることが分かってきた。異方性はカイラリティ自由度とスピン自由度を結びつけ、必ずカイラリティの秩序化はスピンの秩序化を誘起してしまう。カイラリティ研究のパイオニア(H.Kawamura, J. Phys. Condens. Matt. 10, 4707 (1998))であり、研究初期の頃からこの分野をリードしてきた分担者川村は、異方性の効果が無視できる理想系として超伝導セラミックスの研究を提案してきた(H.Kawamura, Phys. Rev. Lett. 78, 1556 (1997))。YBCO 銅酸化物超伝導セラミックスは、粒径が $1\mu\text{m}$ 程度の超伝導体がジョセフソン接合した集合体である。グレイン間のジョセフソン接合のエネルギーは、

$$E_{mn} = -J_{mn} \cos(\theta_m - \theta_n)$$

である。ここで、 θ_m は各グレインの波動関数の位相、 J_{mn} はグレイン間の結合定数であり、これは XY スピン系と同じである。YBCO 超伝導体は d 波超伝導体であるから、 J_{mn} は負の値もとる可能性があり、グレインを結ぶループに負の値の結合定数が奇数個含まれる場合は、基底状態はフラストレーションにより縮退する。この系にはこのようなループが多数存在すると考えられ、ループ間での協力現象が期待される。

ループに自発的に流れる電流は、「右」回り、「左」回りの自由度、つまりカイラリティ自由度を持ち、それが協力現象を起こすすればカイラリティの協力現象と考えることができる。実験的には、協力現象を示唆する現象が報告されているが、未だ決定的なものはない。これは直接このループ電流の存在を示すことが困難であったからである。

2. 研究の目的

銅酸化物超伝導セラミックスで期待される、超伝導グレイン間電流により生じる自発的磁束フラックスの検出を目的とするセンサー（微小コイル）および SQUID による測定手法、データ解析を含む装置開発を行い、ループ電流（カイラリティ）の協力現象を観

測する。本研究課題で測定対象とする YBCO 系超伝導セラミックスは、粒径が $1\mu\text{m}$ 程度の超伝導体がジョセフソン接合した集合体である。YBCO 超伝導体の波動関数の対称性は d 波であるため、超伝導グレインを結ぶループにはある種のフラストレーションが生じ、ループ電流が超伝導体の転移温度より下で、凍結した状態が出現することが予想されている。このループ電流が作る磁束を検出することにより、このような凍結現象、ある種の秩序化を直接観測するのが本研究課題の最終目標である。

3. 研究の方法

本研究課題で最も重要な部分は、 $1\sim 10\mu\text{m}$ 程度の検出コイルの作製と、それをを用いた磁束フラックス測定のための SQUID システム開発である。検出コイルは、薄膜 YBCO (ドイツ THEVA 社製) を加工し作製する。また、試料全体の磁束フラックス測定のためのコイルは通常の超伝導線を用い、容易に作製可能である。SQUID システムに関しては、model 5000 dc SQUID コントローラと SQUID 素子を所有している。このシステムを改良し、SN 比を向上させ微小磁場検出を以下の計画で行う。まず、通常コイルによる SQUID システムの立ち上げを行い、これを用いた環境ノイズの測定、ノイズレベルに応じた対策を行う。ノイズ対策としては、高透磁率材料（ミュウメタル）による遮蔽、試料空間の超伝導物質による遮蔽を考えている。次に、YBCO 薄膜の加工、微小コイルによる SQUID 感度の確認し、最終目標の磁束の温度変化測定を行う。

4. 研究成果

本研究課題では、銅酸化物超伝導セラミックスで期待される超伝導グレイン間電流により生じる自発的磁束フラックスを検出するためのセンサー（微小コイル）開発、および SQUID による測定手法の確立、データ解析を含む装置開発を行い、ループ電流（カイラリティ）の「協力現象」を観測することを目的とした。本研究課題で測定対象とする YBCO 系超伝導セラミックスは、粒径が $1\mu\text{m}$ 程度の超伝導体がジョセフソン接合した集合体である。YBCO 超伝導体の波動関数の対称性は d 波であるため、超伝導グレインを結ぶループにはある種のフラストレーションが生じ、ループ電流が超伝導体の転移温度より下で、凍結した状態（カイラルガラス）が出現することが予想されている。当初予定した超伝導薄膜を購入しセンサーを作成する計画は、薄膜価格の高騰、センサーと SQUID 素子との結合の困難さから断念した。計画を変更し常伝導線によるコイルの作成、常伝導金属による薄膜作製を試みることにした。まず、過去に行われた YBCO 系超伝導体の測定から粒子間結合の値を評価し、その値を用いて数値計算を行い計画変更後の測定系で実測可能かのシミュレーションを行った。粒界の種類（楔

形、溝形、蛇行形)により臨界電流は大きく異なるが過去のデータから最大電流密度を 1.6×10^5 [A/m²]

と見積もることが出来た。

セラミックス超伝導体の平均粒径、ループ電流の平均半径を 1 [μm] 程度とすると、ループ電流の中心で最大

1×10^{-4} [G]

程度となり、測定可能と思われる。

しかし、ループ電流からの距離依存が強く ($\sim r^{-3}$)、0.1 [mm] 程度離れた位置では、 1×10^{-16} [G]

と、非常に小さな値となり、観測できないと思われる。

以上の、オーダーの評価から、偏極中性子、μSR等の試料中にプローブを打ち込む測定、あるいは微小コイルを用いた場合は、試料表面にきわめて接近した測定が必要と思われる。この結果から、厳しい条件であるが、ある条件下で直接測定の可能性を示すことが出来た。本研究課題期間では、実際の測定は行えなかったが、引き続き開発を続ける予定である。

また、大きな成果として、物性(磁性)研究の分野では有名なレビュー誌として 30 年にわたり 23 巻発刊されている「Handbook of Magnetic Materials (Elsevier) ed. by K.H.J. Buschow」に執筆を依頼され、分担者である川村氏と共著で本研究課題の内容も含んだレビューを執筆した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

日本物理学会第 70 回年次大会

早稲田大学 早稲田キャンパス

1) 2015 年 3 月 21 日

「カノニカルスピングラスのランダム磁気異方性測定」

田中浩奈, 谷口年史

2) 2015 年 3 月 23 日

「スピングラス薄膜における 1/f 雑音の測定」

前田正博, 田中浩奈, 竹下俊平, 田辺賢士, 荒川智紀, 谷口年史, 小林研介

日本物理学会 2014 年秋季大会

中部大

3) 2014 年 9 月 7 日

「カノニカルスピングラスの横方向帯磁率測定によるランダム磁気異方性測定の試み」

田中浩奈, 谷口年史

4) 2014 年 9 月 7 日

「スピングラス薄膜における電気測定」

前田正博, 田中浩奈, 竹下俊平, 田辺賢士, 荒川智紀, 谷口年史, 小林研介

日本物理学会第 69 回年次大会

東海大 3/27-30

5) 2014 年 3 月 27 日

「S=1/2 カゴメ格子磁性体 [Cu₃(CO₃)₂(bpe)₃]・2ClO₄ の強磁場 ESR 測定 2」

大久保晋, 高本圭祐, 高橋直己, 張衛民, 櫻井敬博, 太田仁, 谷口年史, 中田隼人, 菊池彦光, 藤井裕

6) 2014 年 3 月 27 日

「カノニカルスピングラスの横方向磁化測定によるランダム磁気異方性測定の試み」

田中浩奈, 谷口年史

7) 2014 年 3 月 27 日

「スピングラス薄膜における電気測定の試み」

前田正博, 田中浩奈, 竹下俊平, 田辺賢士, 荒川智紀, 谷口年史, 小林研介

8) 2014 年 3 月 27 日

「微小領域磁束測定のためのコイル設計と試作」

谷口年史

〔図書〕(計 1 件)

“Spin Glasses” in Handbook of Magnetic Materials (Edited by K.H.J. Buschow), Vol.24 (2015) Elsevier
H.Kawamura and T.Taniguchi

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷口年史 (TANIGUCHI, Toshifumi)
大阪大学大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80207183

(2) 研究分担者

川村光 (KAWAMURA, Hikaru)
大阪大学大学院理学研究科・教授
研究者番号：30153018

(3) 連携研究者

()

研究者番号：