

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月11日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14337

研究課題名(和文) 熱電効果測定を用いた2次元超伝導体の渦糸量子凝縮相の探究

研究課題名(英文) Exploring the quantum condensation of vortices in a two-dimensional superconductor using thermoelectric effect measurements

研究代表者

家永 紘一郎 (Inaga, Koichiro)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：50725413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：乱れた2次元超伝導体の極低温高磁場域の絶縁相内で予想されている渦糸ボース凝縮を、熱電効果測定によって調べた。超伝導アモルファス MoxGe_{1-x} の3次元膜に対する予備実験($T>5\text{K}$)では、熱的渦糸液体相において明瞭な熱電信号を観測し、超伝導ゆらぎ領域と区別されることを示した。次に2次元薄膜を 100mK まで測定したところ、金属的量子渦糸液体相に対応する極低温低磁場域で、明瞭な渦糸信号を観測した。しかし試料の乱れが弱いためか、高磁場において渦糸凝縮絶縁体相を示唆する顕著な負の磁気抵抗は観測されず、熱電信号もその付近で消失した。今後は乱れを強めた試料を作製し、渦糸量子凝縮の探索を進めていく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子層近くまで薄くした超伝導体に極低温で磁場を加えていくと、超伝導が完全に壊れて絶縁体となる前に、超伝導体内を貫く磁束(渦糸)が量子効果によって凍らず液体状態になった金属や絶縁体状態が現れることが予想されている。特に絶縁体相では多数の磁束が1つの波に凝縮した特異な現象が予想され、それが検証できれば大きな学術的意義をもつ。本研究ではこの現象を最も明確に検出できる、熱流に対する磁束の応答を測定する実験手法を確立させた。その結果、磁束が量子液体状態となった金属相があることを明らかにした。これにより磁束が量子凝縮した絶縁体を検証する準備が整った。

研究成果の概要(英文)：Using thermoelectric measurements, we study the Bose condensation of vortices, which is predicted at very low temperature and high field in an insulating phase of disordered two-dimensional (2D) superconductors. In the preliminary experiment above 5 K using a three-dimensional superconducting amorphous MoxGe_{1-x} film, clear thermoelectric signals were observed in a thermal vortex-liquid (VL) phase. In the experiment down to 100 mK for a 2D film, clear signals from vortices were observed in the low-temperature and low-field regime, corresponding to a metallic quantum VL phase. With increasing the field, however, these signals decrease and vanish toward a critical field of the metal-insulator transition. This is consistent with the observation that a negative magnetoresistance just above the transition, indicative of the vortex condensation, is very small. This probably results from weak disorder in the sample. We will continue our study using samples with stronger disorder.

研究分野：低温物理学

キーワード：ネルンスト効果 渦糸 磁束量子 超伝導薄膜 超伝導-絶縁体転移 量子相転移 ボースグラス 量子凝縮

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乱れた2次元超伝導体における磁場誘起超伝導-絶縁体転移(SI転移)は典型的な量子相転移として知られる現象であり、絶縁体相内の転移点近傍領域においてクーパー対(ボソン)が局在化したボースグラス相の存在が長く議論されている。この相ではクーパー対と双対関係にある量子化磁束(渦糸)がボース凝縮を起こしていると予想されていることから、その実験的検出が試みられてきた。これまでに極低温高磁場下での電気抵抗測定によってボースグラス相を示唆する負の磁気抵抗が観測されているものの、絶縁体相における渦糸の存在を直接捉えた実験は未だ報告されていない。これは2次元超伝導体の有限温度域において渦糸は液体相となるため、渦糸固体格子の検出に有効とされる手法が使用できないことにも起因している。

2. 研究の目的

本課題では、温度勾配によって渦糸を運動させ、運動によって発生する電圧を検出するネルンスト測定をおこなうことで、絶縁体相における渦糸の存在を明確に捉え、渦糸ボース凝縮相の実験的実証に迫ることを目的とした。エントロピーの消失したクーパー対は熱応答を示さないため、ネルンスト測定は渦糸の運動に敏感なプローブとなると期待される。

3. 研究の方法

熱電効果測定用の機構を設計・自作し、研究室保有の冷凍機へ設置した(図1)。薄膜試料に温度勾配 $\times T$ を印加するためには、熱伝導率の低いガラス基板上に蒸着した超伝導薄膜試料の片側だけを熱浴と熱接触させ、反対側からヒーターを用いて熱流を印加する。このときガラス基板と熱浴間やガラス基板とヒーター間の熱抵抗を十分小さくし、試料上の測定用リード線と熱浴の間の熱抵抗を十分高くする。ネルンスト信号 N は、ホール端子間電場を E_y とすると $N = E_y / \nabla_x T$ として定義される。

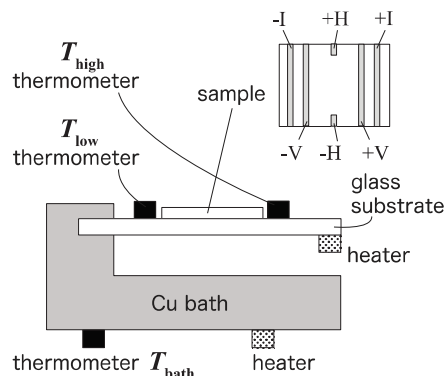


図1 薄膜試料に対する熱電効果測定の概略図[1]

4. 研究成果

2017年度は熱電効果の測定機構を作製し4K冷凍機で予備実験を行なった。試料には、電気抵抗測定から既に温度-磁場軸上の渦糸相図が明らかである、厚さ300nmのアモルファス $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ の3次元膜を用いた。図2に5.0Kで磁場掃引によって測定された(a)電気抵抗率と(b)ネルンスト信号を示す。2.9Tにおいて抵抗率はゼロから有限に立ち上がる。これは渦糸がピン止めされている渦糸固体相から、渦糸液体相というピンから動ける渦糸の運動が有限抵抗を生じさせる状態への熱的な融解に対応する。さらに磁場を増加させると抵抗率は常伝導抵抗率にむかって緩やかに増加していく。渦糸液体相と常伝導状態間の変化はクロスオーバーとして理解されており、電気抵抗測定では渦糸がどの磁場領域まで存在しているかを決

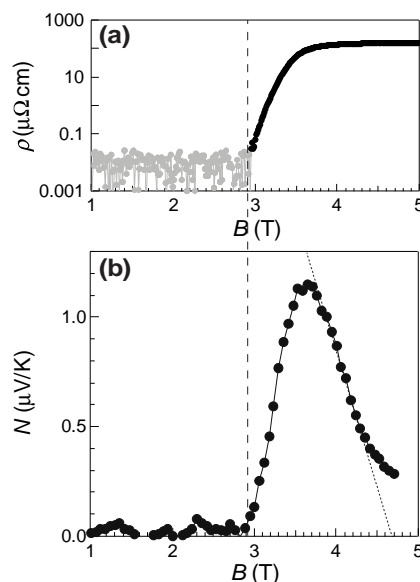


図2 厚さ300nmのアモルファス $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ 3次元膜の(a)電気抵抗率と(b)ネルンスト信号。5.0Kにおいて磁場掃引によって測定[1]。

めることは難しい。一方でネルンスト信号は、2.9 T の融解点でゼロから大きく立ち上がり、3.6 T 付近でピークを示したのちに減少に転じていった。この振る舞いは典型的な渦糸信号と良く一致しており、融解点における信号の立ち上がりはピンから外れた渦糸が温度勾配によって運動しはじめることを意味し、さらなる磁場印加による信号の減少は常伝導状態に向かって渦糸コアの有する余剰エントロピーが消失していくことに対応する。渦糸信号は線形に減少するとされるため、外挿した点線より大きな信号が観測されている 4.5T 以上では、超伝導ゆらぎが信号の起源であると解釈される。このように、熱的渦糸液体相において渦糸運動に起因した明瞭なネルンスト信号を観測でき、超伝導ゆらぎと区別されることがわかった。以上の結果は日本物理学会 2018 年秋季大会や the 31th International Superconductivity Symposium (ISS2018)などで発表され、論文[1]として掲載予定である。

2018 年度は希釈冷凍機での実験を実施した。試料には膜厚 12nm(コヒーレント長以下)のアモルファス $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ の 2 次元薄膜を用いた。まず電気抵抗測定を行い、絶対零度に向かって 2 次元系特有の磁場誘起超伝導-絶縁体転移を示すことを確認した。次に超伝導転移温度(2K)付近から 100mK までの様々な温度で磁場掃引によってネルンスト信号を測定したところ、高温域の熱的渦糸液体相だけでなく極低温域の量子渦糸液体相と考えられている領域においても渦糸信号を明確に捉えることができた。この結果は、電気抵抗測定以外の熱測定によって初めて量子渦糸液体の存在を捉えたものであり、現在論文を執筆中である。しかし、今回の試料は乱れの効果が弱かったためか、極低温・高磁場域の絶縁体相内においてボースグラスを示唆する負の磁気抵抗が明確には観測されておらず、ネルンスト信号も高磁場域の絶縁体相へ向かって消失していった。今後は負の磁気抵抗が明確に観測される最適な膜厚を探し、もしくは最適な試料を準備することにより、渦糸ボース凝縮相の探索を進めていく。以上の結果は日本物理学会第 74 回年次大会(2019 年 3 月)にて発表された。

その他にも、高速フローする渦糸の格子性や格子定数を検出する手法であるモードロック共鳴法を用いて、極低温下の渦糸格子の量子融解現象を見出した論文[7]など、多くの成果を得た[2-7]。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

[1] K. Ienaga, T. Arai, T. Hayashi, S. Kaneko and S. Okuma,

“Detection of the vortex-liquid phase in superconducting films by Nernst effect”

Journal of Physics: Conference Series (2019) in press 査読有り

[2] S. Maegochi, M. Dobroka, K. Ienaga, S. Kaneko and S. Okuma,

“Time evolution of the vortex configuration associated with dynamic ordering detected by dc drive”

Journal of Physics: Conference Series (2019) in press 査読有り

[3] M. Dobroka, K. Ienaga, Y. Kawamura, S. Kaneko, S. Okuma,

“Competition between dynamic ordering and disordering for vortices driven by superimposed ac and dc forces”

New Journal of Physics **21**, 043007 (2019) 査読有り

<https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab1170>

[4] Y. Kawamura, S. Moriya, K. Ienaga, S. Kaneko and S. Okuma,

“Nonequilibrium depinning transition of ac driven vortices with random pinning”

New Journal of Physics **19**, 093001 (2017) 査読有り

<https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa819d>

[5] M. Dobroka, Y. Kawamura, K. Ienaga, S. Kaneko and S. Okuma,

“Memory formation and evolution of the vortex configuration associated with random organization”

New Journal of Physics **19**, 053023 (2017) 査読有り

<https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa6ad8>

[6] K. Ienaga, M. Dobroka, Y. Shirahata, Y. Kawamura, S. Kaneko and S. Okuma,

“Random organization of vortices under an anisotropic condition”

Journal of Physics: Conference Series **871**, 012020 (2017) 査読有り

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/871/1/012020>

[7] N. Sohara, A. Ochi, E. Murakami, K. Ienaga, S. Kaneko, N. Kokubo, and S. Okuma

“Vortex states near absolute zero in a weak-pinning amorphous $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ film probed by pulsed mode-locking resonance”

Journal of Physics: Conference Series **871**, 012022 (2017) 査読有り

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/871/1/012022>

〔学会発表〕(計 42 件)

(1) 林太弘, 家永紘一郎, 岩野亜希人, 金子真一, 大熊哲

「乱れた 2 次元超伝導薄膜の極低温下熱電効果測定」日本物理学会第 74 回年次大会, 2019

(2) K. Ienaga, T. Hayashi, S. Kaneko, S. Okuma

“Detection of the vortex liquid phase in thick superconducting films by Nernst effect”

the 31th International Superconductivity Symposium (ISS2018)

(3) T. Hayashi, K. Ienaga, S. Kaneko, S. Okuma

“Nernst effect measurements in disordered two-dimensional superconductors at very low temperatures”

the 31th International Superconductivity Symposium (ISS2018)

(4) 家永紘一郎, 新井琢己, 林太弘, 金子真一, 大熊哲

「ネルンスト効果による超伝導薄膜の渦系液体の検出」日本物理学会 2018 年秋季大会

(5) 林太弘, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲

「乱れた 2 次元超伝導薄膜の極低温下ネルンスト測定」日本物理学会 2018 年秋季大会

他 37 件

〔図書〕(計 0 件)

〔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:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.rcntp.titech.ac.jp/~okumalab>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。