

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14413

研究課題名（和文）2次元超伝導体における量子臨界現象の熱電応答による探究

研究課題名（英文）Investigation of quantum critical phenomena in two-dimensional superconductors by thermoelectric response

研究代表者

家永 紘一郎 (Ienaga, 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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：2次元超伝導体では、極低温かつ高磁場域で生じる強い量子ゆらぎにより、磁束線の量子液体やボース凝縮が生じることが電気抵抗から示唆されているが、完全な実証には至っていない。そこで、電気抵抗測定に加え、磁束線の運動を明確に検出できる熱電効果測定を極低温域まで実施することで、実証を試みた。厚さ12nmのアモルファスMoxGe1-x薄膜を測定した結果、磁場中で生じる残留抵抗の異常が磁束線の量子液体に起因することを明らかにした。さらに厚さ10nmの試料に対して広い温度-磁場範囲で測定したところ、熱ゆらぎ領域と量子ゆらぎ領域の境界線を発見し、磁束線の量子液体の起源が量子臨界点の存在に起因することを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁束線の量子液体は、2次元超伝導体で普遍的に生じる超伝導-絶縁体転移に付随する現象である。通常、2次元超伝導体や層状超伝導体では物質固有の現象と2次元効果が混ざって観測されるため、アモルファス超伝導薄膜という単純な系で得られた知見は、これらを分離するために重要である。

現在研究されている超伝導量子ビットでは磁束線一本の量子性を利用しているのに対し、本研究では超伝導体を貫く磁束線が集団的に示す量子性を明らかにした。このことは、量子計算機としての機能が期待される冷却原子気体のような量子多体系が、固体中にも形成される可能性を示唆しており、新たな量子デバイス開発の指針となると期待される。

研究成果の概要（英文）：In two-dimensional superconductors, quantum liquid and condensation of magnetic flux lines, which are caused by strong quantum fluctuations in the very low-temperature and high-field region, have been suggested by electrical resistance. However, conclusive evidence has not yet been obtained. To verify these phenomena, in addition to the electrical resistance measurements, in this study we conducted the thermoelectric effect measurements down to 0.1 K, which can clearly detect the motion of the magnetic flux lines. In a 12 nm-thick amorphous MoxGe1-x thin film, we revealed that the anomalous residual resistance observed in the high-field region is caused by the quantum liquid of flux lines. Furthermore, by measuring a 10 nm-thick sample over a wide temperature-field range, we revealed the boundary line between the thermal and quantum fluctuation regions, demonstrating that the origin of the quantum liquid of flux lines is due to the existence of a quantum critical point.

研究分野：超伝導，低温物理，ナノ物理

キーワード：2次元超伝導体 熱電効果 超伝導-絶縁体転移 量子渦(渦糸) 超伝導ゆらぎ 異常金属状態 量子臨界

1. 研究開始当初の背景

量子相転移とは絶対零度において量子的なゆらぎが引き起こす相転移であり、臨界点近傍の強い量子ゆらぎが引き起こすさまざまな興味深い現象を解明することは物性物理学の中心的課題の一つである。量子相転移の典型例として、乱れを持つ2次元超伝導体で観測される超伝導-絶縁体 (SI) 転移が挙げられる。2次元系では局在効果により絶対零度での金属状態が禁止されるため、磁場の増加によって超伝導相から絶縁体相という両極端な状態の間で相転移が生じる。このとき、アモルファス(a-)Mo_xSi_{1-x}薄膜のような乱れ効果の強い系では、臨界点近傍の絶縁体相側で異常な負の磁気抵抗が観測されている。この起源として、クーパ対の局在化や、超伝導体中に侵入した磁束線(渦糸)のボース凝縮が理論的に予想されている。一方で、結晶性の高い原子層超伝導体や、アモルファスの中でも乱れの効果が比較的弱い a-Mo_xGe_{1-x} 薄膜などでは、超伝導相と絶縁体相の間の広い磁場範囲で、常伝導シート抵抗よりも数桁低い残留抵抗を生じる異常金属状態が観測されている。この起源として、量子的なゆらぎによって渦糸が動き回る量子液体が予想されている。これらの現象は強相関効果などがない単純な系で生じ、臨界点近傍の強い量子的なゆらぎが起源とされる。しかし、これまでの電気抵抗測定では渦糸の運動に由来する信号と常伝導電子の散乱に由来する信号とを区別することは困難であり、これらの予想は実証されてこなかった。

2. 研究の目的 本研究では、渦糸のボース凝縮や量子液体が期待される領域において渦糸の存在を明確に捉えるために、従来の電気抵抗測定に加え、渦糸の運動に由来する信号だけを選択的に検出できる熱電効果測定を極低温域の 0.1 K まで実施した。さらに、熱電信号から渦糸の持つエントロピーの温度依存性を解析することで、渦糸ボース凝縮と渦糸量子液体を実証することを目的とした。

3. 研究の方法

2次元超伝導体として a-Mo_xGe_{1-x} 薄膜を用いた。乱れの強さ(常伝導シート抵抗)の異なる4つの a-Mo_xGe_{1-x} 薄膜(試料 A-D)に対し、希釈冷凍機を用いて 0.1 K の極低温域まで電気抵抗と熱電効果を測定した。熱電効果測定の機構は 2017-2018 年度の科研費若手研究 (B)「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」において開発したものを使用した。

超伝導体の長さ方向(縦方向)に温度勾配 $\nabla_x T$ をつけると、(i) 超伝導ゆらぎ(超伝導の振幅のゆらぎ、図1中央)と(ii) 渦糸の運動(超伝導の位相のゆらぎ、図1左)は横方向に電場 E_y を発生させる(図1右)。これに対し、常

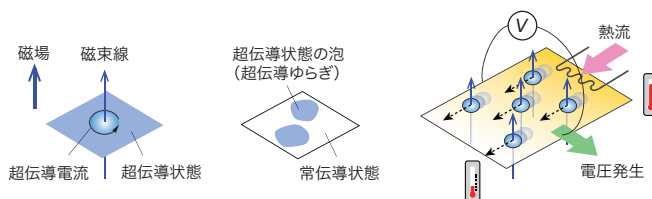


図1. (左) 適度な大きさの磁場中では、磁束線が、超伝導電流の渦を伴った欠陥として侵入し、渦糸と呼ばれる。(中央) 超伝導の前兆である「超伝導ゆらぎ」状態の概念図。時間的に変動し、空間的に不均一な泡のような超伝導領域が形成される。(右) 熱電効果測定の模式図。磁束線や超伝導ゆらぎは熱流(温度勾配)と垂直方向に電圧を発生させる。

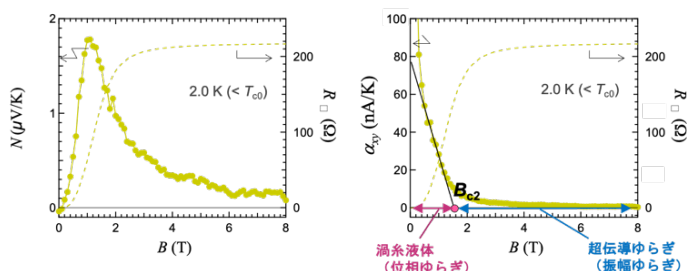


図2. (左) 試料 A の熱電信号 N ($\equiv E_y / \nabla_x T$) の磁場依存性。比較のためシート抵抗 R_{\square} も載せている。(右) 熱電信号から換算された熱電係数 α_{xy} ($= N / R_{\square}$)。渦糸信号は上部臨界磁場 $B_{c2}(T)$ に向かって磁場に対して線形に減少する。

伝導電子の運動は主に縦方向に電場 E_x を発生させる．特にアモルファスのような電子が動きにくい試料では，常伝導電子からの E_y への寄与は無視できるため，横方向の熱電信号（ネルンスト信号） $N \equiv E_y / \nabla_x T$ を測定することで，超伝導ゆらぎと渦糸の寄与だけを選択的に検出できる．さらに信号の磁場依存性を解析することで両者の寄与を分離することも可能である（図2）．

4. 研究成果

(1) 2020 年度より前までに，薄膜試料の熱電効果を極低温・高磁場で測定する方法を確立させ，アモルファス $a\text{-Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ 薄膜（試料 A, $T_{c0} = 2.58 \text{ K}$ ）の測定を進めていた．電気抵抗測定から，磁場誘起の超伝導-異常金属-絶縁体（SMI）転移が観測され（図3上），0.1 K までの熱電効果測定によって異常金属状態内で渦糸由来の熱電信号が観測されたことから，異常金属状態の起源は量子渦糸液体であることが分かりつつあった．2020 年度では特に，低温部までの配線の改良やノイズ対策を施すことで熱電効果測定を高精度化させることに成功した（図3下）．その結果，渦糸の持つ輸送エントロピーを定量評価することが可能になり，量子渦糸液体の輸送エントロピーは極低温下で非常にゆるやかに減衰するという量子臨界性を示すことが明らかになった．このことは，SI 転移における量子臨界点の広がりによって異常金属状態が出現していることを示唆している．以上の成果は *Physical Review Letters* 誌に掲載された [K. Ienaga et al., *Phys. Rev. Lett.* **125**, 257001 (2020)]．本成果を元に執筆した解説記事が固体物理（アグネ技術センター編）に掲載され [家永紘一郎 大熊哲, 固体物理 **55**, 723 (2020)]，さらに7件の招待講演を行った（国内会議3件，国際会議4件）．

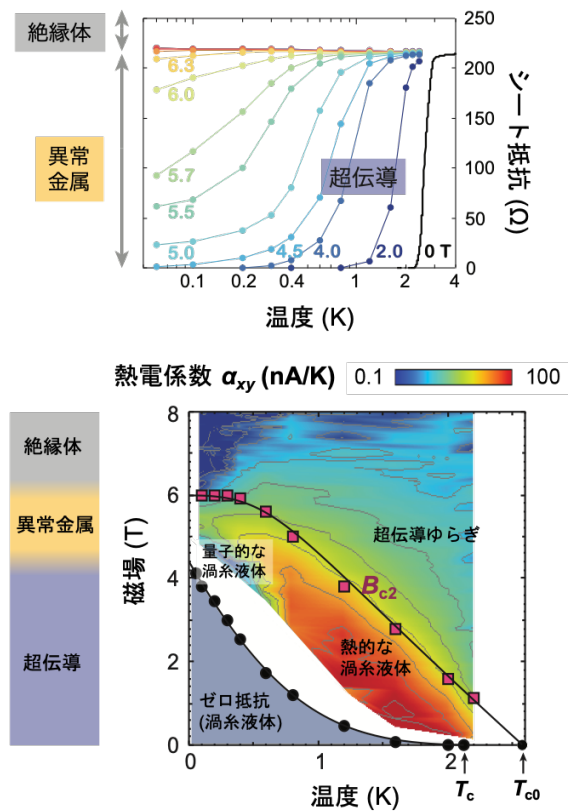


図3. (上) 試料 A の電気抵抗の温度特性．磁場を増加させると SMI 転移が生じる．(下) 熱電係数のカラーマップ．金属状態を示す磁場範囲において，絶対零度付近まで渦糸の液体状態が存在することがわかる．

(2) 2021 年度には，乱れ効果の強い 2 次元超伝導体で期待されるクーパー対の局在化および渦糸ボース凝縮の実験的検出のために，試料 A よりも膜厚が薄い，厚さ 10 nm の $a\text{-Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ 薄膜を成膜した．局在性の違いによる効果を検証するため，Mo 濃度を調整して，常伝導シート抵抗の異なる 2 つの試料を作製した．1 つは試料 A と同じ Mo 濃度の試料 B，もう 1 つはそれより低濃度の試料 C である．電気抵抗測定の結果，試料 B では試料 A よりも常伝導シート抵抗の増加と転移温度の低下 ($T_{c0} = 2.36 \text{ K}$) が見られたが，試料 A と同様に磁場誘起の SMI 転移が観測された．試料 C は常伝導シート抵抗が極端に高く，ゼロ磁場下でも超伝導転移を示さない絶縁体的な振舞いだけが観測された．これらの一連の結果は，常伝導シート抵抗をパラメータとした SI 転移に対応する．

試料 C に対する 0.1 K までの熱電効果測定の結果，信号レベルは測定した全温度-磁場範囲で測定感度以下であった．これは，試料 C の超伝導性が完全に消失しているために，渦糸の信号も超伝導ゆらぎの信号も観測されないことを意味している．同時に，アモルファス試料では常伝

導電子の平均自由行程が非常に短いため、常伝導電子の熱電信号は観測できないほど小さいことも確認された。

試料 B に対する 0.1 K までの熱電効果測定の結果、試料 A と同様に異常金属状態内で渦糸の熱電信号が観測されたが、渦糸ボース凝縮の証拠となる絶縁体相内での渦糸信号は観測されなかった。一方で、極低温域の絶縁体相内で観測された超伝導ゆらぎの信号は試料 A よりも増大した。この結果は、局在性の向上によって量子ゆらぎの効果が強まったためと解釈される。以上の結果より、ボース絶縁体の実証のためには、試料 B と C の中間の常伝導シート抵抗を持つ超伝導試料を作製し、超伝導性と局在性のバランスを最適化させる必要があると判断した。

(3) 2022 年度には、引き続き試料 B を測定した。試料 B では試料 A よりも超伝導転移温度 ($T_{c0} = 2.36$ K) や絶対零度での上部臨界磁場 ($B_{c2}(0) = 5.5$ T) が減少しているため、常伝導相に存在する超伝導ゆらぎを、実験室で到達可能な温度・磁場の範囲内で、相対的に広範囲にわたり調査することが可能である。熱ゆらぎ領域 (高温) と量子ゆらぎ領域 (極低温、高磁場) における熱電信号には、熱的相転移と量子相転移の相関長がそれぞれの臨界点で発散する振る舞いが反映される。したがって量子ゆらぎ領域を調べることは、絶対零度での異常金属状態の出現理由を明らかにするための重要な手がかりとなる。超伝導ゆらぎの信号は渦糸の信号と比較して非常に小さいが、これまでに施した検出感度向上の工夫によって観測可能となった。

試料 B に対して T_{c0} と $B_{c2}(0)$ のそれぞれ 2 倍の温度-磁場範囲わたって熱電効果を測定した結果、全範囲で明確な超伝導ゆらぎの信号の検出に成功した (図 4)。これは電気抵抗測定で検出可能な範囲をはるかに超えており、熱電効果がゆらぎに敏感であることを裏付けている。 T_{c0} 以上の高温域では、熱電信号の磁場依存性におけるピーク位置からゴースト臨界磁場 $B^*(T)$ を決定できた。 $B^*(T)$ は温度の減少に伴って減少し、 T_{c0} で $B^* = 0$ へと向かう。これは、熱的相転移の相関長が T_{c0} に向かって発散的に増大することを反映している。 $B_{c2}(0)$ 以上の高磁場域では、熱電信号の温度依存性におけるピーク位置から、熱 (古典) ゆらぎ-量子ゆらぎクロスオーバー線に相当するゴースト温度 $T^*(B)$ を決定できた。これは世界初の実験検出であり、0.1 K までの精密な測定によって達成された。磁場の減少に伴って $T^*(B)$ は減少し、 $T^* = 0$ へと到達する磁場が $B_{c2}(0)$ 以下の異常金属状態の範囲内に位置することがわかった。この結果は、異常金属状態の起源が量子臨界点の存在に起因することを示しており、試料 A の結果 [K. Ienaga et al., *Phys. Rev. Lett.* **125**, 257001 (2020)] が示唆する異常金属状態の臨界性を、より明確に裏付けるものである。本成果は *Nature Communications* 誌へと掲載され [K. Ienaga et al., *Nature Commun.* **15**, 2388 (2024)], 海外国際会議の招待講演として採択された (ISS2023, Wellington)。

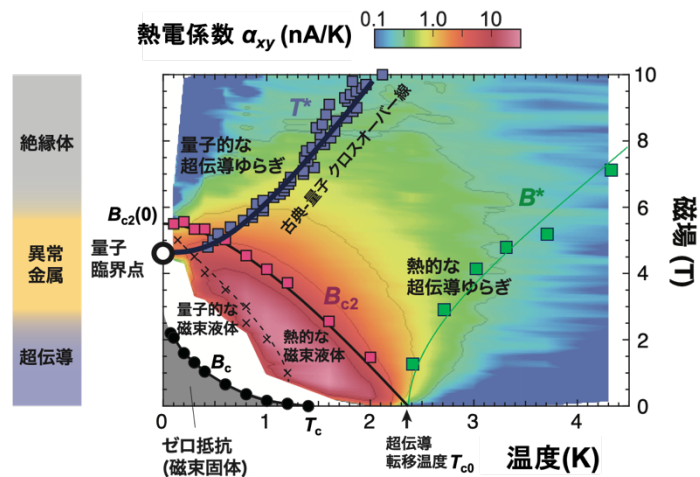


図 4. 試料 B の熱電係数のカラーマップ. 超伝導転移温度よりかはるかに高温から 0.1 K の極低温までの範囲において、広い磁場範囲にわたって超伝導のゆらぎの全貌が明らかになった。熱ゆらぎ-量子ゆらぎクロスオーバー線の存在が初めて実証され、この線が絶対零度に到達する量子臨界点は、異常金属領域の内部に存在することが分かった。

(4) 2023 年度には、乱れ効果の強い 2 次元超伝導体で期待されるクーパー対の局在化および渦糸ボース凝縮の実験的検出を目指し、超伝導性と局在性のバランスを最適化させるために、試料 B と試料 C の中間の常伝導シート抵抗を持つ試料 D ($T_{c0}=0.8\text{ K}$) を作成した。電気抵抗測定の結果、試料 A,B と同様に磁場を変数とした SMI 転移が観測されたが、これまでと異なり絶縁化点近傍で量子グリフィス (QG) 状態による異常金属状態が観測された。QG 状態とは、常伝導状態中に形成された超伝導のゆらぎドメインが長寿命に安定化された状態とされるが、過去の電気抵抗測定からはその物理的描像は明らかになっていない。熱電効果測定の結果、異常金属状態の低磁場域では渦糸信号が観測され、量子渦糸液体に起因する金属状態の存在が確認された。一方で、QG 状態が観測された高磁場域では、渦糸信号は観測されず超伝導ゆらぎの信号だけが得られた。このことから、QG 状態とは超伝導ゆらぎに起因する金属的な残留抵抗状態であり、量子渦糸液体とは区別されることがわかった。また、試料 D でも絶縁体相内の渦糸信号は観測されなかった。このため今後は、さらに局在性の強いアモルファス超伝導体 ($\text{Mo}_x\text{Si}_{1-x}$ や InO_x) を用いて渦糸ボース凝縮の実証を行う予定である。

従来、QG 状態は結晶性の高い 2 次元膜において観測され、試料内の欠陥によって誘起される現象とされてきた。均一な乱れを持つアモルファス構造の薄膜ではこれまでに報告されておらず、我々の試料 A,B でも観測されていない。今回の試料 D は、超伝導を示す試料 B と絶縁体である試料 C の中間の常伝導シート抵抗値を有し、常伝導シート抵抗値をパラメータとした SI 転移の臨界点近傍に位置する。このため、臨界点近傍での強い量子ゆらぎに起因して、アモルファス薄膜でも QG 状態が生じた可能性がある。以上の結果については現在論文準備中である。

(5) その他にも、電流によって駆動された渦糸のフロー特性に関する報告など、多くの成果を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Koichiro Ienaga, Yutaka Tamoto, Masahiro Yoda, Yuki Yoshimura, Takahiro Ishigami, Satoshi Okuma	4. 巻 15
2. 論文標題 Broadened quantum critical ground state in a disordered superconducting thin film	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2388(1-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-024-46628-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Maegochi S., Ienaga K., Okuma S.	4. 巻 4
2. 論文標題 Moving smectic phase and transverse mode locking in driven vortex matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033085(1-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.033085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ueno R, Ienaga K, Maegochi S, Shishido H, Okuma S	4. 巻 2323
2. 論文標題 Dc vortex-flow resistivity in an epitaxially grown MgB2 film probed by pulsed current measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012013(1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2323/1/012013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shun Maegochi, Koichiro Ienaga, Satoshi Okuma	4. 巻 11
2. 論文標題 Critical behavior of density-driven and shear-driven reversible-irreversible transitions in cyclically sheared vortices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 19280(1-9)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-98959-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Koichiro Ienaga, Sunghun Kim, Toshio Miyamachi, Fumio Komori	4. 巻 104
2. 論文標題 Structural and electrical characterization of the monolayer Kondo-lattice compound CePt6/Pt(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165419(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.165419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Ienaga, T. Hayashi, Y. Tamoto, S. Kaneko, S. Okuma	4. 巻 125
2. 論文標題 Quantum Criticality inside the Anomalous Metallic State of a Disordered Superconducting Thin Film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 257001(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.257001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 家永紘一郎, 大熊 哲	4. 巻 55
2. 論文標題 熱電効果で探る2次元超伝導体の量子臨界現象と渦糸状態	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 固体物理(アグネ技術センター[編])	6. 最初と最後の頁 723-735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計76件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 海老原鯛彦, 前垣内舜, 大森康志郎, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 超伝導渦の動的秩序化におけるKibble-Zurek機構: 普遍性の検証
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石上貴大, 家永紘一郎, 吉村優輝, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 電流駆動された超伝導渦糸系に対する熱電計測法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 家永紘一郎, 石上貴大, 吉村優輝, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 熱的測定法で見る超伝導渦糸系の動的相図
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江部薫, 家永紘一郎, 石上貴大, 吉村優輝, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 乱れた2次元超伝導体の量子相転移解明に向けたイオンゲート法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大森康志郎, 前垣内舜, 海老原鯛吉, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 非対称クエンチ過程を用いた動的秩序化転移におけるKibble-Zurek機構
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中井康太, 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 交流重量による渦糸の流動化とクロッキングの制御: 渦糸密度の影響
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子真一, 竹腰直樹, 前垣内舜, 三宅健太郎, 家永紘一郎, 坂田英明A, 大熊哲
2. 発表標題 可逆不可逆転移に伴う渦糸配置の変化: 微視的測定
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小森文夫, 家永紘一郎, 宮町俊生, 加藤弘一
2. 発表標題 Pt原子層/CePt ₂ 原子層/Pt(111)のSTM像とそのDFTシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Ienaga, Y. Tamoto, M. Yoda, Y. Yoshimura, T. Ishigami, S. Okuma
2. 発表標題 A quantum critical point inside the field-induced metallic state of disordered superconducting thin films
3. 学会等名 the 36th International Superconductivity Symposium (ISS2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 家永 紘一郎, 石上貴大, 吉村優輝, 江部薫, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 渦糸フローの秩序化転移に伴う輸送エントロピー増大
3. 学会等名 第29回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江部薫, 家永紘一郎, 石上貴大, 吉村優輝, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 乱れた2次元超伝導体の量子相転移研究のためのイオンゲート法の開発
3. 学会等名 第29回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石上貴大, 家永紘一郎, 吉村優輝, 江部薫, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 渦糸の輸送エントロピー計測による非平衡相転移の検出
3. 学会等名 第29回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子真一, 竹腰直樹, 前垣内舜, 三宅健太郎, 家永紘一郎, 大熊哲
2. 発表標題 ハイブリッド型走査トンネル分光による渦糸の動的秩序化の微視的観測
3. 学会等名 第29回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中井康太, 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 渦糸のクロッキングと流動化の制御
3. 学会等名 第29回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 海老原鯛吉, 前垣内舜, 大森康志郎, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 渦糸の動的秩序化転移におけるKibble-Zurek機構: 普遍性の検証
3. 学会等名 第29回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大森康志郎, 前垣内舜, 海老原鯛吉, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 非対称クエンチ過程を用いた動的秩序化転移におけるKibble-Zurek機構と臨界現象
3. 学会等名 第29回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 家永紘一郎
2. 発表標題 2次元超伝導体の温度磁場相図における超伝導ゆらぎの全貌と量子臨界状態
3. 学会等名 東京工業大学 極低温研究支援センター研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 前垣内舜, 家永紘一郎, 大熊哲
2. 発表標題 Kibble-Zurek mechanism for dynamical phase transition in driven superconducting vortices
3. 学会等名 京都大学 齊藤圭司研究室セミナー (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 家永紘一郎
2. 発表標題 熱電効果で探る2次元超伝導体の量子相転移と非平衡相転移
3. 学会等名 金沢大学低温物性研究会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 家永紘一郎, 石上貴大, 吉村優輝, 江部薫, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 輸送エントロピー計測による渦糸系の動的相転移の検出
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 江部薫, 家永紘一郎, 石上貴大, 橘武志, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 アモルファスMoxGe1-x超伝導薄膜の磁場誘起量子相転移に対する乱れの効果
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 家永紘一郎
2. 発表標題 熱電効果測定で探る2次元超伝導体のゆらぎと量子臨界現象
3. 学会等名 2022 年度夏学期 第10回 駒場物性セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichiro Ienaga, Taiko Hayashi, Yutaka Tamoto, and Satoshi Okuma
2. 発表標題 Quantum Fluctuations and Criticality in the Field-Induced Metallic State of a Two-Dimensional Superconductor
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT-29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shun Maegochi, Koichiro Ienaga, Satoshi Okuma
2. 発表標題 Moving smectic phase detected by transverse mode locking in driven vortices
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT-29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永紘一郎
2. 発表標題 二次元超伝導体が示す新奇量子現象：絶対零度でも凍らない磁束線の量子液体
3. 学会等名 大隅良典基礎研究支援受賞者進捗報告会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村優輝, 石上貴大, 家永紘一郎, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 乱れの強いアモルファス超伝導薄膜におけるゴースト温度線
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前垣内舜, 中井康太, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 交流重畳による渦糸系の流動化制御
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 横ディビニング転移に対するスケーリング解析
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石上貴大, 吉村優輝, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 電流駆動された渦糸の輸送エントロピーの計測
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮川一慶, 高田弘樹, 家永紘一郎, 辻井宏之, 橋爪健一, 河江達也
2. 発表標題 Nbナノコンタクト内のフォノン励起に誘起された水素および重水素のトンネル拡散現象
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichiro Ienaga, Sunghun Kim, Toshio Miyamachi, Koichi Kato, and Fumio Komori
2. 発表標題 Atomic and electronic structures of monolayer Kondo lattice CePt ₂ /Pt(111)
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichiro Ienaga, Sunghun Kim, Toshio Miyamachi, Koichi Kato, and Fumio Komori
2. 発表標題 STM study of a monolayer Kondo lattice CePt ₂ /Pt(111)
3. 学会等名 _Integrated Spectroscopy for Strong Electron Correlation (ISSEC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永紘一郎, 吉村優輝, 田本豊嘉, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 熱電効果を用いた異常金属状態の量子臨界点の検出
3. 学会等名 第28回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大熊 哲, 前垣内 舜, 家永紘一郎
2. 発表標題 渦糸系が拓く非平衡物理学：レオロジーから非平衡 KZ機構まで
3. 学会等名 第28回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村優輝, 家永紘一郎, 石上貴大, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 乱れの強いアモルファス超伝導薄膜における熱ゆらぎ-量子ゆらぎ境界
3. 学会等名 第28回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 名取透吾, 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 交差駆動渦糸系を用いた直流フローの動的相図
3. 学会等名 第28回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹腰直樹, 前垣内舜, 三宅健太郎, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 可逆不可逆転移と渦糸配置
3. 学会等名 第28回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石上貴大, 家永紘一郎, 吉村優輝, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 熱電効果を用いた電流駆動下の渦糸フロー状態の検出
3. 学会等名 第28回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 海老原鯛吉, 前垣内舜, 家永紘一郎, 大熊哲
2. 発表標題 渦糸の動的秩序化における Kibble-Zurek機構: 普遍性の検証
3. 学会等名 第28回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村優輝, 家永紘一郎, 石上貴大, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 アモルファス超伝導薄膜の異常金属状態が示すエントロピー異常
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前垣内舜, 家永紘一郎, 大熊哲
2. 発表標題 超伝導渦の動的秩序化におけるKibble-Zurek機構
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会(2023年次大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koichiro Ienaga
2. 発表標題 Quantum criticality in the field-induced metallic state of disordered superconducting thin films probed by thermoelectric effects
3. 学会等名 18th International conference on Vortex Matter in Superconductors (Vortex-2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹腰直樹, 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 可逆不可逆転移に伴う渦糸配置の変化
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 名取透吾, 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 交差駆動渦糸系を用いた動的渦糸相図の作成
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 超伝導渦糸系における横モードロック共鳴
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上野龍司, 家永紘一郎, 前垣内舜, 宍戸寛明A, 大熊哲
2. 発表標題 MgB ₂ 薄膜の直流渦糸フロー抵抗が示すマルチバンド性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家永紘一郎, 依田正弘, 田本豊嘉, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 磁場により破壊された2次元超伝導が示す極低温下の量子ゆらぎ
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 依田正弘, 家永紘一郎, 田本豊嘉, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 2次元超伝導体の量子ゆらぎに対する乱れ増加の効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家永紘一郎, 金聖憲, 宮町俊生, 小森文夫
2. 発表標題 走査トンネル顕微分光を用いた2次元近藤格子CePt ₆ /Pt(111)の電子状態観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家永紘一郎, 金聖憲, 宮町俊生, 小森文夫
2. 発表標題 単層近藤格子CePt2/Pt(111)の構造と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家永紘一郎, 金聖憲, 宮町俊生, 小森文夫
2. 発表標題 単層近藤格子CePt6/Pt(111)の構造評価と電子状態観測
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Ueno, K. Ienaga, S. Maegochi, H. Shishido, S. Okuma
2. 発表標題 Multiband properties of dc vortex-flow resistivity in epitaxially grown MgB2 films probed by pulsed current measurements
3. 学会等名 the 34th International Superconductivity Symposium (ISS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Maegochi, K. Ienaga, S. Okuma
2. 発表標題 Observation of two reversible regimes in cyclically sheared vortices
3. 学会等名 the 34th International Superconductivity Symposium (ISS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ienaga, T. Hayashi, Y. Tamoto, and S. Okuma
2. 発表標題 Thermoelectric study of the quantum vortex liquid state in a two-dimensional amorphous superconductor
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics 2021 (AC2MP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ienaga, S. Kim, T. Miyamachi, F. Komori
2. 発表標題 Monolayer Heavy-Fermion Compound CePt6/Pt(111)
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家永紘一郎, 金聖憲, 宮町俊生, 小森文夫
2. 発表標題 2次元近藤格子CePt6/Pt(111)の構造評価と電子状態観測
3. 学会等名 表面・界面スペクトロスコピー2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ienaga, S. Kim, T. Miyamachi, F. Komori
2. 発表標題 STM study of the atomic and electronic structure of a single-layer Kondo lattice CePt6/Pt(111)
3. 学会等名 APS March meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 超伝導渦糸系における横ディピニング転移
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022年次大会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永紘一郎, 田本豊嘉, 依田正弘, 吉村優輝, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 磁場により破壊された2次元超伝導が示す量子ゆらぎの臨界性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022年次大会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永紘一郎, 金聖憲, 宮町俊生, 加藤弘一, 小森文夫
2. 発表標題 Pt(111)上のCePt ₂ 単原子層の成長と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022年次大会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永紘一郎
2. 発表標題 単層近藤格子CePt ₂ /Pt(111)の成長と電子状態
3. 学会等名 物性研究所短期研究会「機能的走査プローブ顕微鏡の新展開」“Frontier of scanning probe microscopy and related nano science” (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前垣内舜, 宮川聖, 家永紘一郎, 金子真一, 小林天, 坂田英明, 大熊哲
2. 発表標題 SeドーブしたZrTe3の渦糸状態
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田本豊嘉, 家永紘一郎, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 超伝導アモルファスMoxGe1-x薄膜の磁場誘起絶縁体相における熱電応答
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮川聖, 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 超伝導渦糸系における可逆不可逆転移とポテンシャルエネルギー地形
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 家永紘一郎, 林太弘, 田本豊嘉, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 熱電応答で探るアモルファスMoxGe1-x超伝導薄膜の量子臨界性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子真一, 土屋和樹, 村上明花里, 家永紘一郎, 坂田英明, 大熊哲
2. 発表標題 走査トンネル分光法による直流駆動された渦糸格子の観測
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Ienaga, T. Hayashi, Y. Tamoto, S. Kaneko, S. Okuma
2. 発表標題 Quantum criticality associated with the field-induced superconductor-metal-insulator transition in amorphous thin films
3. 学会等名 the 33th International Superconductivity Symposium (ISS2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Maegochi, K. Ienaga, S. Miyagawa, S. Kaneko, S. Okuma
2. 発表標題 Irreversibility transition caused by increased shear amplitude and vortex density
3. 学会等名 the 33th International Superconductivity Symposium (ISS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Maegochi, S. Miyagawa, K. Ienaga, S. Kaneko, S. Okuma
2. 発表標題 Effects of the velocity on the reversible-irreversible transition in a periodically sheared vortex system
3. 学会等名 the 33th International Superconductivity Symposium (ISS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 家永紘一郎
2. 発表標題 熱電効果測定で探る2次元超伝導体の量子臨界現象と渦糸状態
3. 学会等名 東京工業大学 極低温研究支援センター研究発表会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家永紘一郎
2. 発表標題 極低温下の熱電応答で探る乱れた2次元超伝導体の量子ゆらぎ
3. 学会等名 Nanospec2021 第18回Spring8ユーザー共同体顕微ナノ材料科学研究会 第15回日本表面真空学会放射光表面化学研究部会 第4回日本表面真空学会プローブ顕微鏡研究部会 合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家永紘一郎, 田本豊嘉, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 乱れた2次元超伝導体の量子ゆらぎに対する膜厚減少の効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(2021年次大会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前垣内舜, 三宅健太郎, 名取透吾, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲
2. 発表標題 交差駆動渦糸系における方向メモリー効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(2021年次大会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上野龍司, 家永紘一郎, 金子真一, 笠原成, 松田祐司, 大熊哲
2. 発表標題 FeSe単結晶の渦糸フロ-ホール効果と渦糸相図
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(2021年次大会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ienaga, T. Hayashi, Y. Tamoto, S. Kaneko, S. Okuma
2. 発表標題 Quantum criticality inside the field-induced metallic state in an amorphous superconducting thin film
3. 学会等名 APS March meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 家永紘一郎
2. 発表標題 熱電効果で探る2次元超伝導体の異常金属状態 - 量子臨界現象と渦糸状態 -
3. 学会等名 つくば-柏-本郷 ワークショップ「超伝導物質、トポロジカル物質」(SCTM2020) (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------