

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01792

研究課題名（和文）高結晶性2次元超伝導体における磁束の量子ダイナミクスと量子臨界現象の研究

研究課題名（英文）Investigation of quantum dynamics of vortices and quantum critical phenomena in highly crystalline 2D superconductors

研究代表者

野島 勉 (Nojima, Tsutomu)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：80222199

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,100,000円

研究成果の概要（和文）：MoS₂単結晶表面の電場誘起2次元電子系や剝離法により作製したNbSe₂単結晶薄膜を用いて、高い結晶性を有する2次元超伝導体における量子磁束状態およびそのダイナミクスを研究した。これらの輸送特性を温度・磁場・電流・厚さの関数として詳細に測定することにより、2次元超伝導体の量子ゆらぎを反映した包括的な磁束相図を作成することに成功した。得られた結果の比較を通して、2次元超伝導の典型として知られる量子金属状態（面直磁場中において電気抵抗が極低温まで残る状態）の発生源やゼロ磁場中の電流により発生する量子磁束・反磁束状態およびその動的相転移を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質が持つ次元性を3次元から2次元へ下げることにより、量子ゆらぎの効果が飛躍的に大きくなることはスピン系をはじめ様々な物質系で共通して期待される事象である。本研究成果は、これを巨視的な超伝導の磁束系やそのダイナミクスにおいて明らかにしたものであり広い学術分野にわたる波及効果を持つ。本研究で得られた量子金属状態や磁束-反磁束状態の動的転移といった2次元超伝導体の磁束ダイナミクスは、磁束状態に対する深い知見が不可欠な超伝導線材応用だけでなく、超伝導量子ビット等といった薄膜デバイスを用いたエレクトロニクス応用へ向けた基礎研究となるため、社会的意義も十分に有する。

研究成果の概要（英文）：We studied the quantum vortex states and their dynamics in highly crystalline two-dimensional (2D) superconductors by using the electric-field-induced 2D electron system at the surface of MoS₂ single crystals and the exfoliated NbSe₂ single crystal films. By measuring the transport properties of them as a function of temperature, magnetic field, electrical current and thickness in detail, we successfully made the comprehensive vortex phase diagrams of 2D superconductors containing the quantum fluctuation. Through the comparison of the obtained results, we clarified the origine of the quantum metallic state, where the drop in temperature dependence of resistance levels off at low temperature in out-of-plane magnetic field, the current induced quantum vortex-antivortex state at zero field, and their dynamical phase transitions, all of which were suggested to be typical of 2D superconductors.

研究分野：低温物理学

キーワード：超伝導 2次元超伝導 量子磁束 電気二重層トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

電気二重層トランジスタ (EDLT: Electric Double Layer Transistor) の手法により静電キャリアドープされた単結晶表面 (図 1) や剥離法 (スコッチテープ法) によって得られる原子層 2 次元単結晶で発現する超伝導は、その 1 nm~数 10 nm という極限的な薄さと高い結晶性の組み合わせにより、粒界・転移・欠陥といった乱れの効果を最小限に排除した理想的 2 次元超伝導となることが期待され、本研究開始以前より世界的に注目されてきた (引用文献①)。これら高結晶性 2 次元超伝導体において、新たに見出された現象の一つが、量子金属状態と呼ばれる面直磁場中での特異な電子状態である。従来型の乱れを含む金属超伝導薄膜に面直磁場を印加すると、超伝導転移は低温にシフトするものの、臨界磁場で超伝導状態から絶縁体状態に量子相転移 (S-I 転移) するまでゼロ抵抗状態を維持する。これに対し、高結晶 2 次元超伝導体では、低い面直磁場中から電気抵抗転移が有限の値に向かって飽和し (量子金属状態)、それがやがて大きなゆらぎ状態を通して、常伝導金属に量子転移する (図 2)。本研究者を含むグループは、この現象を EDLT 系においていち早く見出し (引用文献②③)、極少乱れと強い 2 次元性によって顕在化した量子ゆらぎ (磁束の量子トンネル運動) の効果として説明してきた。しかし研究開始当初は、広い温度域での測定や超伝導有効厚さ d の条件を系統的に変えた実験がなく、その議論は収束していなかった。

一方、2 次元超伝導体では、ゼロ磁場中で Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 状態と呼ばれる磁束と反磁束の結合状態が存在することが予言され、従来型の超伝導薄膜でも電流電圧特性等によりその存在が報告されてきた。しかしこれが極低温において、量子ゆらぎの影響を受けるとどうなるかといった問題や、BKT 状態を高い電流により破壊するとどのように常伝導状態へ転移するかといった問題は、従来型 2 次元超伝導では乱れの効果によりほとんど手つかずの状態であった。

以上の問題を解決するには、高結晶 2 次元超伝導体を用いて、(1) 極低温までの輸送特性測定による包括的な磁束相図の作成、(2) 有効超伝導厚さ d 依存性による量子金属発現条件の解明、(3) 高電流による量子磁束ダイナミクス解明、を行う研究が有効と考え、本研究課題の着想を得た。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では、乱れが極限的に少ない完全 2 次元超伝導体の極低温でおきる量子ゆらぎに支配された超伝導物性 (磁束の量子ダイナミクス、その静的・動的量子相転移) を明らかにすることを目的とした。研究の舞台となる系として、これまでの研究から約 1 nm の原子層厚さで、比較的高い超伝導転移温度 $T_c = 6 - 10$ K を示す、 MoS_2 -EDLT デバイス試料を選んだ。さらに研究開始直後、EDLT デバイスを作製する際の結晶剥離技術を使って、厚さの調節が可能でかつキャリアドープなしで超伝導になる NbSe_2 剥離単結晶膜が作製可能であることに気が付き、これも研究対象物質に加えた。

3. 研究の方法

(1) 試料作製

剥離法で得られる MoS_2 や NbSe_2 単結晶薄膜の面積は 10~30 μm 四方と微小であるため、測定用の電極形成には、1 μm 程度のスリット幅を持つ任意形状の蒸着マスクが必要である。このマスク作製には電子線リソグラフィ法が広く用いられてきた。しかし、この手法はプロセスの複雑化と長時間化を伴い、元々歩留まりの悪い剥離結晶を用いたデバイス研究を遅らせてきた。そこで本研究では試料作製プロセスの効率化を図るため、顕微鏡リソグラフィという手法を新たに導入し、簡便かつ短時間 (1/10 以下の時間) のプロセスでのデバイス試料作製を試みた。図 3 に MoS_2 剥離単結晶上に形成した Ti/Au の電流と電圧電極の例を示す (NbSe_2 でも同様なものが得られた)。研究期間中、ノウハウを構築することにより、幅約 2 μm 以下の電極を再現よく作

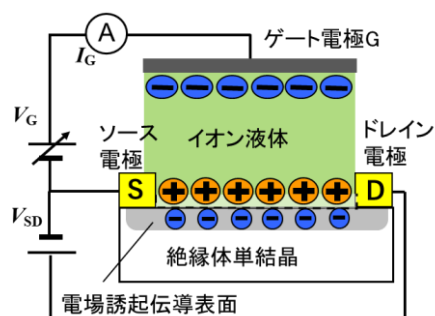


図 1 電気二重層トランジスタの模式図

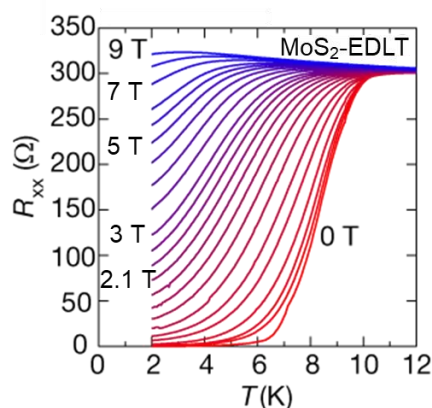


図 2 MoS_2 -EDLT の垂直磁場中抵抗転移に見られる量子金属状態 (引用文献③)

製可能にした。小さな各電極にはワイヤーボンダーで Al 線を配線した。EDLT デバイスの作製は図 3 の結晶と同一基板上の離れた場所にゲート電極を別途蒸着し、これと結晶をつなぐようにイオン液体を乗せることにより行った（これにより図 1 と等価な回路となる）。

(2)測定

作製したデバイス試料に対し、温度可変インサー付き超伝導マグネットシステム (9T)、および QD 社の物性測定システム (PPMS : 7T) を用いて、1.6 K–200 K の温度範囲で、面直磁場中輸送特性を詳細に測定した (MoS₂-EDLT デバイスの場合はあらかじめイオン液体が凝固する温度 (200 K) 直上の 220 K において、電子面密度 $n_{2D} = 0.5\text{--}1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ に相当するゲート電圧 V_G を印可し金属化した)。輸送特性は、低電流領域 (オーミック領域) と高電流領域 (非線形領域) に分けて測定した。低電流領域では、縦抵抗、ホール抵抗、非相反抵抗といった様々な輸送特性を交流 4 端子ロックインアンプ法と直流 4 端子法を組み合わせ測定した。高電流領域は電流電圧特性 (I - V) の温度・磁場依存性を測定した。試料の発熱およびそれによって生じる熱起電力の効果を抑えるため、短時間で反転する矩形波電流により、正確な電圧を測定するプログラムを作って高精度化を図った。なお研究開始当初計画した、1 K 以下の極低温での輸送特性は、装置の準備までは行ったが、1.6 K までの実験に予想以上に時間がかかったこと、および極低温実験の直前にデバイス作製プロセスに不具合が生じたことより期間中に遂行できなかった (現在、原因が特定されたため、引き続き極低温実験を進める予定である)。

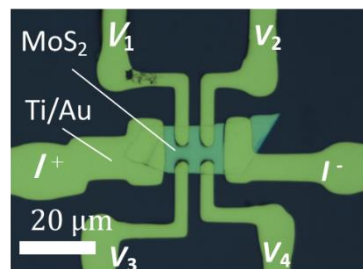


図 3 作製した MoS₂-EDLT デバイスの写真

4. 研究成果

(1) MoS₂-EDLT の磁場中線形電気抵抗転移と温度-磁場相図

MoS₂-EDLT デバイス試料の線形領域の磁場中超伝導転移を測定することにより、これまで (図 2) と同様な、抵抗転移の熱活性型モデルに基づくブロードニングおよび低温の特性温度 T_{cross} 以下における量子金属状態 (抵抗減少のプラトー化) が観測された。図 4 に典型例として電子密度 $n_{2D} = 0.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、超伝導転移温度 $T_c = 8 \text{ K}$ の試料で得られた温度磁場相図を示す。上部臨界磁場 $B_{c2}(T)$ は常伝導状態の 50% の抵抗値における温度と磁場から得たもので、これより過去の報告例とほぼ同じコヒーレンス長 $\xi = 8.6 \text{ nm}$ が導出された (引用文献④)。広い量子金属状態を示すこの相図は、本研究で剥離法と顕微鏡リソグラフィー法を組み合わせ作製された EDLT 試料がクリーンな 2 次元超伝導体であることを意味する。電子線リソグラフィー法以外の手法で剥離結晶を EDLT デバイスで超伝導にした報告例はこれまで国内外でもほとんどなく、この研究成果は、剥離法を用いたデバイス化の研究がより高効率で行え、今後広く普及可能であることを示すものである。

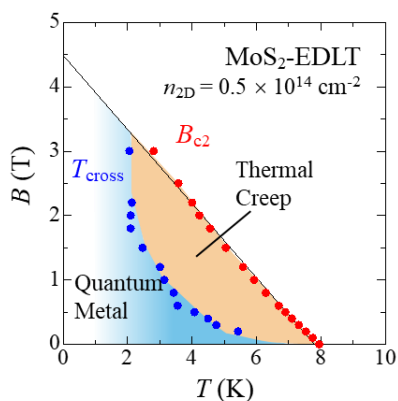


図 4 MoS₂-EDLT の温度-磁場相図

(2) MoS₂-EDLT の電流電圧特性と温度-電流相図

MoS₂-EDLT のゼロ磁場および有限磁場中のすべての温度範囲における、常伝導状態への動的相転移が起こる電流領域までの電流電圧特性測定に成功した。これは MoS₂-EDLT の小さな電気抵抗率 (数 $30 \mu\Omega\text{cm}$)、極薄の有効超伝導厚さ ($d \sim 1 \text{ nm}$)、大きな熱伝導率 (冷却効率) という特性によるものである。低電流領域では、 $V \propto I^\alpha(T)$ によりフィットできる 2 次元系特有のべき乗則が観測され、指数 $\alpha(T)$ が温度の低下とともに温度 $T_{\text{BKT}} = 7.0 \text{ K}$ において 1 から 3 へ急激に上昇する BKT 転移が明瞭に観測された。BKT 状態における、磁束-反磁束の束縛状態の電流による乖離現象が熱励起により起こる場合、 $\alpha(T)$ は $(T_c - T)/T$ に比例し、に温度低下とともに上昇することが知られるが、本研究では約 4 K 以下において、この温度依存性がほぼ一定となる新たな現象を発見した。この結果は、磁束-反磁束対の形成過程が熱励起から量子ゆらぎに移り変わることを意味する。図 4 での磁場中での量子金属状態における抵抗のプラトーに関連する量子ゆらぎ現象が、ゼロ磁場中では I - V 特性に現れることを示唆する重要な結果となった。

一方、高電流領域では図 5 に示すよう、電流電圧特性が多段の不連続な飛びを経て超伝導ゆらぎ状態 (実質的に常伝導状態) に転移するという、特徴的な動的相転移を発見した (図 4 と同じ試料)。これは電流の増加とともに、Phase slip line という幅 ξ 程度の常伝導領域の線状態が電流に応じて複数本形成される現象と解釈される (図 5 挿入図)。この現象は磁束-反磁束対が少なくなる高磁場では観測されないこと、後述するように、50 nm 以上の膜厚の 2 次元磁束系 (3 次元電子系) では観測されないことより、ゼロ磁場の 2 次元極限にあるクリーンな超伝導体に特徴的なものである。これらの結果をまとめた温度・電流相図を図 6 に示す。約 $20 \mu\text{m}$ の長さを持つ本

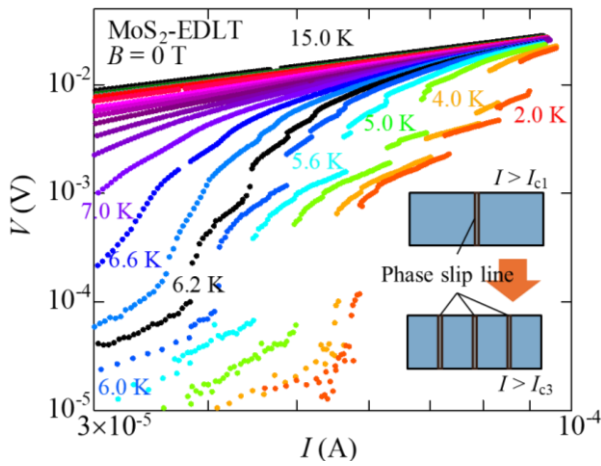


図 5 MoS₂-EDLT の高電流領域での電流電圧特性

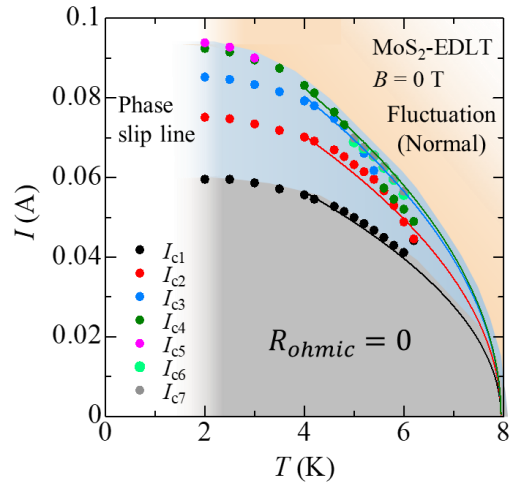


図 6 MoS₂-EDLT の温度-電流相図

研究試料では計 3 本の Phase slip line が形成された後、超伝導ゆらぎ領域に入ることがわかる。電流印可による Phase slip line の侵入は、第二種超伝導体の下部臨界磁場 B_{c1} 以上での量子磁束侵入を連想させ、2 次元極限の超伝導体が電流版の第二種超伝導体という新たな分類をつくる可能性を示唆する。これは超伝導の新たな動的な側面であり、学術的に重要な結果と言える。

(3) NbSe₂ 剥離膜の低電流領域での磁場中輸送特性と温度磁場相図

研究開始当初の段階において 2 次元極限にある超伝導体での量子金属状態は、様々な系で報告されていたが、これが電子系の 2 次元性 ($d < \xi$) に基づくのか、それとも磁束系の 2 次元性 ($d < \lambda$: 磁場侵入長) に基づくのが明瞭でなかった。加えて量子金属状態がいわゆる格子を組んだ磁束固体状態か液体状態かということにも、明確な描像はなかった。そこで厚さ d が 50 - 80 nm ($< \lambda \sim 100$ nm) という 2 次元磁束系の条件をもつ比較的厚い NbSe₂ 薄膜を剥離法により作製し、その磁場中輸送特性を詳細に測定した。その結果、図 7 に示すよう、ある磁場 B_{SM} (この試料では 0.7 T) 以上で電気抵抗転移に明確なプラトーを観測し、量子金属状態が 2 次元極限でなくても、磁束系の 2 次元性と弱ピンニングという条件を満たせば高い磁場中で存在し得ることを発見した。さらに量子金属状態では、線形電気抵抗は有限なのに対し、磁束のマグナス力を受けた流れを反映したホール抵抗や磁束のエッジバリアの違いを反映する非相反抵抗がゼロになる、といった量子金属ならではの効果も見出した。これは量子金属状態では磁束が束縛された条件下でのみでしか運動できないことを意味し、磁束固体状態にあることを示唆する。以上は量子金属状態が磁束格子中の欠陥が量子トンネル効果により移動する状態であるという、これまでの本研究者らの主張(引用文献①②)を裏付ける重要な結果となった。

様々な膜厚の実験結果をもとに、温度磁場相図を作製したところ、図 4 に見られる量子金属状態の領域は膜厚 d の上昇とともに B_{SM} が上昇することによって、相対的に狭くなるのが分かった。これは d の上昇とともに電気抵抗のゼロ状態 (ピン止めされた 3 次元磁束固体相) が 2 次元量子金属に置き換わりながら次元の変化をするという貴重な次元変化の過程を捉えたものとなった。これにより量子金属状態は 2 次元磁束系特有の現象であることが結論付けられた。

(4) NbSe₂ 剥離膜の電流電圧特性と温度-磁場-電流相図

2 次元電子系である MoS₂-EDLT と 2 次元磁束系である NbSe₂ 剥離膜の違いを精査するため、NbSe₂ 剥離膜の電流電圧特性を行った。ゼロ磁場中および B_{SM} 以下の低磁場中では、低電流領域で MoS₂-EDLT において見られた BKT 状態を示すべき乗則は観測されず、代わりに両対数プロットで上凸となる 3 次元性を示すことがわかった。高電流領域ではある臨界電流において急激に常伝導状態へ転移し、Phase slip line 状態を示す多段の不連続な飛びは観測されなかった。これらの結果は、(3)の量子金属状態が低い磁場では観測されず、抵抗ゼロの 3 次元磁束固体状態となることと連続的につながり、つじつまが合う。

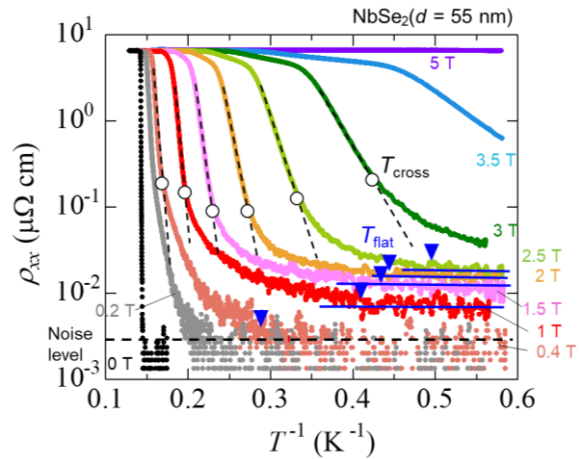


図 7 NbSe₂ 剥離単結晶膜の磁場中超伝導転移 (アレニウスプロット)

一方、量子金属状態が観測された B_{SM} 以上の高磁場領域では、図 8 に示すよう、電流の増加とともに、(i)線形—(ii)非線形—(iii)線形という特徴的な変化を示した後に常伝導状態へ転移することを見出した。これは(i)の量子金属状態が(ii)の Plastic 状態（磁束の部分的な早い流れ）を通して、(iii)の Moving Lattice（動的 2 次元磁束格子）状態へ移ることを意味し、量子金属状態が静的な 2 次元磁束固体状態であることを改めて確認する結果となった。

(3)(4)研究結果より、図 9 に示すような、温度-磁場-電流相図を得ること成功した。これにより量子金属状態が 2 次元磁束固体状態であるという具体的な描像とともにその動的特性を含む全容が明らかになった。この相図は今後 2 次元超伝導の包括的理解に大きく貢献するものと考えられる。

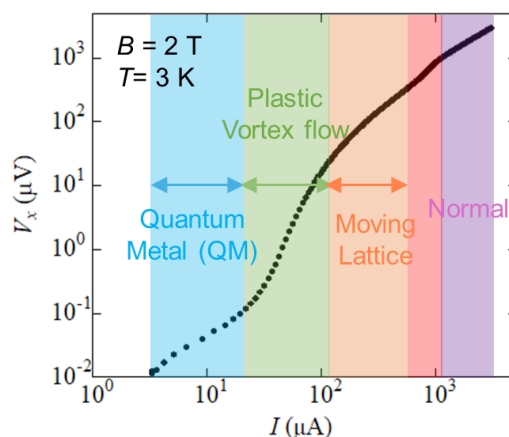


図 8 NbSe₂ 剥離単結晶膜の高磁場領域における電流電圧特性

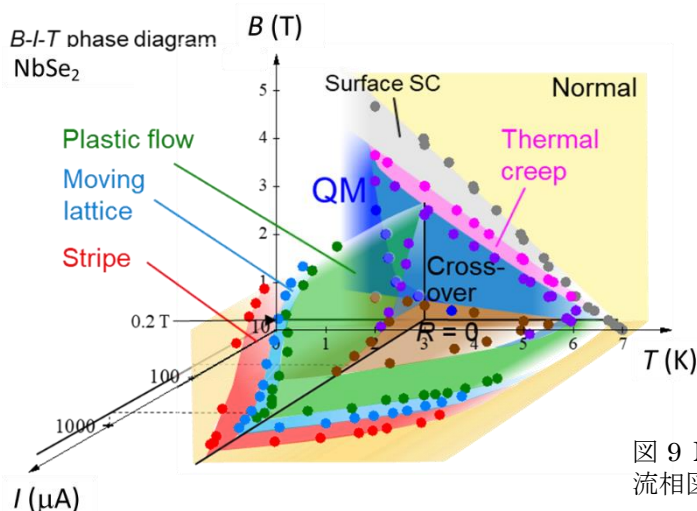


図 9 NbSe₂ 剥離単結晶膜の温度-磁場-電流相図

(5)まとめ

本研究では、MoS₂-EDLT と NbSe₂ 剥離膜詳細な輸送特性の測定を通して、2 次元極限（2 次元電子系）のみに現れる量子現象として、量子ゆらぎにより形成される磁束-反磁束状態（低電流）、Phase slip line 状態の形成を通じた常伝導状態への動的相転移（高電流）を新たに見出した。また磁束の量子金属状態を反映した極低温での抵抗状態は、2 次元極限より条件のゆるやかな 2 次元磁束状態の特性であること、さらには量子金属が量子トンネル効果による磁束の内部運動を含んだ磁束固体状態であるという重要な結論を得た。

これらに加え、層状構造を持つ NbS₂ や PAs 単結晶において、3 次元的なバルク超伝導体であるにもかかわらず、系の特徴的なバンド構造を反映した 2 次元的な磁場中超伝導転移がおこることを国際共同研究により明らかにした。

本研究成果を通して今後、2 次元極限ならでの超伝導特性と、2 次元から 3 次元の間で現れる特徴的な超伝導特性がより明確に峻別され、量子ゆらぎを含む 2 次元超伝導物性の理解がより進展するものと考えられる。

<引用文献>

- ① Y. Saito, T. Nojima, Y. Iwasa, Nature Rev. Mater. 2, 16094 (2017).
- ② Y. Saito, Y. Kasahara, J. Ye, Y. Iwasa, T. Nojima, Science 350, 409 (2015).
- ③ Y. Saito, T. Nojima and Y. Iwasa, Nat. Commun. 9, 778 (2018).
- ④ Y. Saito et al., Nat. Phys. 12, 144-150 (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 X. Bi, Z. Li, J. Huang, F. Qin, C. Zhang, Z. Xu, L. Zhou, M. Tang, C. Qiu, P. Tang, T. Ideue, T. Nojima, Y. Iwasa, H. Yuan	4. 巻 4
2. 論文標題 Orbital-selective two-dimensional superconductivity in 2H-NbS ₂	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013188-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.013188	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 該当する

1. 著者名 L. Ao, J. Huang, F. Qin, Z. Li, T. Ideue, K. Akhtari, P. Chen, X. Bi, C. Qiu, D. Huang, L. Chen, R. V. Belosludov, H. Gou, W. Ren, T. Nojima, Y. Iwasa, M. S. Bahramy, H. Yuan	4. 巻 9
2. 論文標題 Valley-dimensionality locking of superconductivity in cubic phosphides	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eadf6758-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.adf6758	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 該当する

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐久間翔梧, 野島勉
2. 発表標題 顕微鏡リソグラフィーを用いたMoS ₂ 電気二重層トランジスタの作製
3. 学会等名 第142回金属材料研究所講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野島勉
2. 発表標題 新展開を見せる2次元超伝導研究へのチュートリアル：原子層物質の低次元性と高い結晶性が生み出す新規物性
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐久間翔梧, 野島勉
2. 発表標題 NbSe ₂ 単結晶フレークの磁束相図
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 野島勉
2. 発表標題 電場誘起表面電子系を用いた2次元超伝導物性の開拓
3. 学会等名 第143回金属材料研究所講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐久間翔梧, 野島勉
2. 発表標題 NbSe ₂ 単結晶薄膜における量子金属状態と磁束相図
3. 学会等名 第143回金属材料研究所講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野島勉, 佐久間翔梧
2. 発表標題 2次元磁束系を有するNbSe ₂ 単結晶フレークの量子金属状態と磁束ダイナミクス
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 T. Nojima
2. 発表標題 Research on 2D superconductivity using multifunctionality of ion-gating devices
3. 学会等名 Materials Science Colloquia, School of Engineering, Osaka Metropolitan University (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐久間翔梧, 野島勉
2. 発表標題 NbSe ₂ 単結晶フレークにおける2次元磁束系のダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野島勉, 佐久間翔梧
2. 発表標題 NbSe ₂ 単結晶フレークにおける2次元磁束系のダイナミクスII
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年会 (2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Nojima and S. Sakuma
2. 発表標題 Quantum metallic state and its vortex dynamics in thick NbSe ₂ single crystal flakes
3. 学会等名 36th International Symposium in Superconductivity (ISS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白井宏尚, 野島勉
2. 発表標題 コヒーレンス長程度の厚さを持つPb薄膜の面内渦糸ダイナミクス
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 野島勉, 佐久間翔梧
2. 発表標題 NbSe ₂ 単結晶膜における高電流磁束ダイナミクス
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 坂元玲王, 野島勉
2. 発表標題 MoS ₂ 表面に電場誘起された2次元超伝導の高電流輸送特性と動的相転移
3. 学会等名 第146回金研講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 白井宏尚, 野島勉
2. 発表標題 コヒーレンス長程度の厚さを持つPb薄膜の臨界磁場と面内渦糸ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会(2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 坂元玲王, 野島勉
2. 発表標題 MoS2 表面に電場誘起された2次元超伝導の高電流輸送特性とPhase Slip Line状態
3. 学会等名 日本物理学会 第79回年次大会(2024)
4. 発表年 2024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
研究協力者	佐久間 翔悟 (Sakuma Shogo)		
研究協力者	白井 宏尚 (Hirotaka Shirai)		
研究協力者	坂元 玲王 (Sakamoto, Reo)		

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		
中国	Nanjing University		
英国	The University of Manchester		