

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15166

研究課題名（和文）スピン分解STMによるスカーミオン-超伝導界面の新奇物性探索

研究課題名（英文）Interface between superconductor and magnetic skyrmions studies by spin-polarized STM

研究代表者

土師 将裕（Haze, Masahiro）

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：50805869

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）：本研究は超伝導体と磁性体の界面を作製し、その界面で発現する新奇現象を走査トンネル顕微鏡（STM）によって明らかにすることである。超伝導体であるNbSe<sub>2</sub>上に分子線エピタキシー法によってCrBr<sub>3</sub>薄膜を作製することによって本研究を遂行した。原子像及び、基板との格子定数の違いに起因するモアレ構造がSTMによって可視化され、磁気特性が局所の変調に由来すると思われる電子状態の局所変調が観測された。さらに、超伝導特性がCrBr<sub>3</sub>島構造の端において電子状態が局所的に変調されていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、通常競合する超伝導特性と磁気特性を、それらの物性を持つ2つの物質を人工的に接合させたときにどのような現象が飽きるかは物性物理の重要課題の一つである。これまで理論的にその界面におけるMajorana粒子の存在など新規物性が予測されていたもののその現象の存在に対して確たる証拠はなかったが、本研究は、確たる証拠とはいえないまでも、超伝導体と磁性体の界面において新奇現象が起きていることを支持する結果となり、物性物理の重要課題に取り組む非常に重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to make an interface between magnetic and superconducting materials and to detect exotic phenomena by scanning tunneling microscopy (STM). In this study we fabricated ferromagnetic CrBr<sub>3</sub> thin films on the superconducting NbSe<sub>2</sub> substrate by molecular beam epitaxy.

Atomically resolved images and Moire patterns are observed by STM. Local modulation of electronic states are also observed, which is likely due to the local moderation of magnetic properties. In addition, we observed that superconducting properties are locally modulated on the edge of CrBr<sub>3</sub> island structures.

研究分野：表面物性

キーワード：走査トンネル顕微鏡 超伝導 磁性

### 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス分野において、メモリ等への応用への期待から、磁気スカーミオン構造が大いに注目を集めている。スカーミオン構造とは、空間的にねじれた磁気構造で渦のような形をしており、それらが格子を組んでいる。強磁性体や反強磁性体とは異なり、非線形な磁気構造を持つスカーミオンは、空間反転対称性の破れとスピン軌道相互作用に起因する非対称な相互作用(ジャロシンスキー・守谷相互作用)がその形成に大きな役割を担っている。ジャロシンスキー・守谷相互作用によって形成されるスカーミオン構造の大きな特徴の一つは、そのねじれ方向が右巻きもしくは左巻きの1方向に決まっているというトポロジカルな性質を持つ点であり、基礎物理の観点からも大きな注目を集めている。

スカーミオンはそれ自体が、基礎と応用の両側面から注目を集めている一方、超伝導とスカーミオンとの界面でも新奇現象が期待されている。特に注目を集めているのが、Majorana 束縛状態の形成である。Majorana 束縛状態とは、粒子と反粒子が等しい関係を持つ Majorana 粒子によるもので、電気的に中性な新たなフェルミ粒子である。特殊な量子統計に従う Majorana 粒子は、その状態がトポロジーに守られており、その安定性の高さから、量子コンピュータにおける量子ビットの候補ともなっている。Majorana 粒子の存在は素粒子分野で予測され、その後約 80 年にもわたってその存在が検証されてきた。近年、物性物理分野で量子スピン液体 [Y. Kasahara et al., *Nature* 559, 227 (2018).] やトポロジカル超伝導体 [T. Machida et al., *Nat. Mater.* 18, 811 (2019).] でわずかながら観測例が報告され始めている一方、より深い理解のためには異なる系での実証が必要である。

スカーミオン-超伝導界面でも、これらと同様に Majorana 束縛準位の形成が理論的に予測されている。近接効果によって侵入した超伝導電子対が、スカーミオン格子による周期的に変化する磁気ポテンシャルと相互作用を起こした系は、Majorana 条件を満たすため、Majorana ゼロモードと呼ばれるスピン偏極した束縛準位の存在が期待される [G. Yang et al., *Phys. Rev. B* 93, 224505 (2016).]。また、超伝導体側では、スカーミオンによる周期的な磁場によって本来とは異なる周期の Pearl vortex と、その周期の違いに伴う反 vortex が発現することが予見されている。さらに、vortex とスカーミオンの相互作用によりスカーミオンサイズが制御できるとの理論計算がなされており、超伝導スピントロニクスへの発展も期待できる [S. M. Dahir et al., *Phys. Rev. Lett.* 122, 097001 (2019).]。このように、基礎科学の観点からも応用への観点からも、超伝導-スカーミオン界面系は非常に興味深い研究対象であるが、実験的研究が不足しているため、きちんとした理解がなされていない現状がある。そこで本研究は、超伝導-スカーミオン界面において、どのような物理現象が引き起こされているのかという問いに対して取り組むものである。

### 2. 研究の目的

本研究では、超伝導上のスカーミオン薄膜およびスカーミオン上の超伝導薄膜を作製し、スカーミオンと超伝導の界面において、本当に束縛状態が実現するのか、特異な vortex 状態が形成されているのかどうか、さらに実現している場合、どのような空間分布で電子状態・スピン状態として現れるのか、これらの問いに対する答えを見つけることを目的としている。磁性体と超伝導界面に関する研究のほとんどは、強磁性体と超伝導体によるもので、本研究のように非線形な磁性と超伝導の界面に関する実験的研究は少ない。非線形な磁気構造と超伝導体の 2 次元界面の研究も行われてはいるが [A. D. Bernardo et al., *Nat Commun.* 6, 8053 (2015).]、界面の状態は清浄ではなく、さらなる理解のためには、清浄な界面および表面を作製する必要がある。

### 3. 研究の方法

本研究を遂行するには、清浄な 2 次元界面が作製できることが重要である。2 次元ファンデルワールス層状物質である  $\text{CrI}_3$  及び  $\text{CrBr}_3$  は、どちらも強磁性体でかつ、スカーミオン構造を示す可能性があることが知られている。したがって、本研究では、これらの物質を採用した。2 次元ファンデルワールス層状物質は、2 次元ファンデルワールス層状物質間であれば、清浄な界面を作製できることが知られている。そこで、超伝導体として  $\text{NbSe}_2$  を採用した。

本系のような 2 次元ファンデルワールス化合物のヘテロ構造を作製するには、分子線エピタキシー法による薄膜作製を用いる方法と、スコッチテープによって試料を剥離し、基板に転写する方法の 2 通りが考えられる。本研究ではまずこれらの手法のどちらが有効かを詳細に調べ、より有効な手法を用いて作製した試料を局所的な状態密度を測定する手法である走査トンネル顕微鏡 (STM) によって測定する。

#### 4. 研究成果

まず、分子線エピタキシー法による薄膜成長を行った。図1にグラファイト及び超伝導体であるNbSe<sub>2</sub>上に形成したCrBr<sub>3</sub>単層薄膜のSTM測定像を示す。島構造をした薄膜が形成されていることがわかる。さらに拡大した像においては、原子分解した像と基板との格子不整合性を反映した約5nm周期のモアレ構造が可視化されている。STM像から、CrBr<sub>3</sub>本来の格子定数を保ったまま、原子レベルで平坦な薄膜が形成されていることがわかる。面白いことに、異なるモアレパターンが観察されており、これは異なる角度で膜が形成されていることを示している。

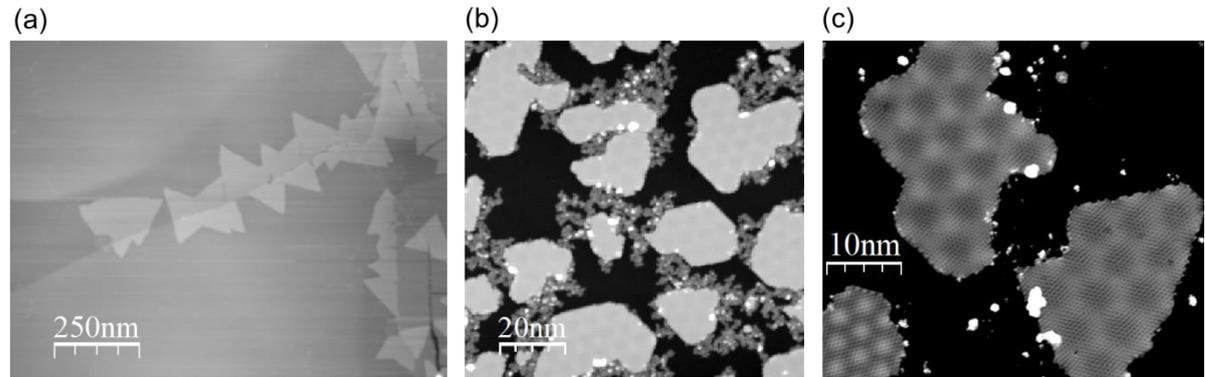


図1 (a)分子線エピタキシー法によりグラファイト上に形成したCrBr<sub>3</sub>単層膜。 (b)同様の方法でNbSe<sub>2</sub>上に形成したCrBr<sub>3</sub>単層膜。 b及びcは極低温(4K)での測定結果である。

次に、微小サンプルの探索方法の開発も進めた。スコッチテープによって剥離した試料を転写した場合、試料の大きさはマイクロメートルサイズになるが、本研究で用いる極低温STM装置のSTMユニットは極低温デューワー及び超伝導磁石に囲まれているため、直接試料を見ることができない。そのため、その微小サンプルをSTM探針直下に位置させることは容易ではない。一方、STM探針が試料以外の部分に接触してしまうと、探針の先鋭さが失われ、測定が不可能になる。したがって、非接触で試料位置を探す手法が必要である。そこで、絶縁基板に金属パターンを作製し、金属パターンとSTM探針の静電容量を測定することで、非接触で金属パターンを可視化し、微小試料の位置を特定する手法に着目した。図2のように短冊パターンを作製し、静電容量測定によって非接触で金属パターン位置の特定に取り組み、可視化することに成功した。

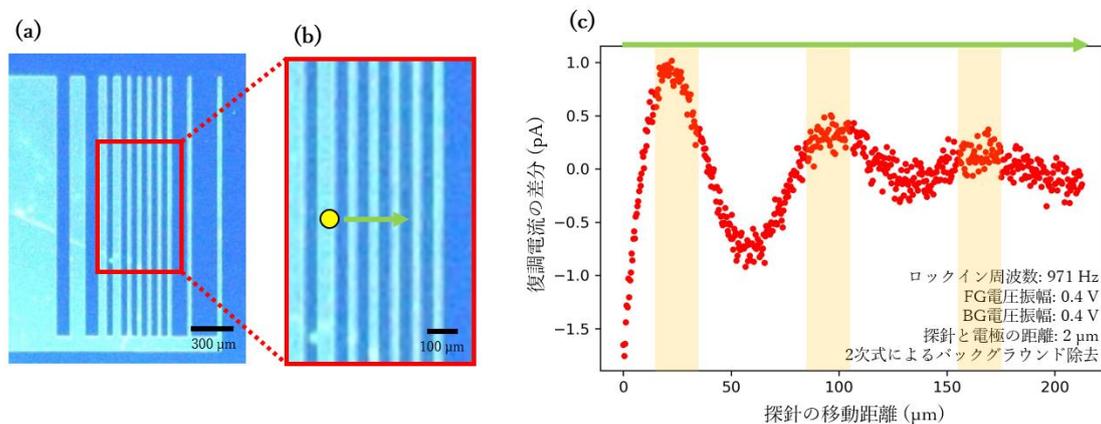


図2 (a, b)短冊パターンの光学顕微鏡写真 (c)探針を(b)内の矢印のように走査しロックイン復調電流から静電容量を測定した結果。金属パターンがある部分に色を塗ってある。探針が金属パターン上に位置しているときに、静電容量が大きくなっていることがわかる。

CrBr<sub>3</sub>のみであるが、分子線エピタキシー法による薄膜成長に成功したため、CrBr<sub>3</sub>/NbSe<sub>2</sub>試料の低温STM測定を行った。図3にCrBr<sub>3</sub>アイランドのエッジ付近で、フェルミエネルギー近傍に着目してトンネル分光スペクトルを測定したものを示す。図3(a)に示す3点で測定したトンネルスペクトルを図3(b)に示す。アイランドの内側及び外側では超伝導に起因する超伝導ギャップが観測されている一方、アイランドエッジでは超伝導が抑制されていることが判る。図3(c)及び(d)は線上で取得したスペクトル群である。こっからも、エッジでのみ超伝導ギャップが抑制されている。マヨラナエッジ状態が形成されている場合には、0mVで束縛状態によるピーク構造が観測されることが期待されるが、今回の測定は4.5Kで行われており、そのピーク構造が温

度によってブロード化されている可能性がある。より低温での詳細な実験が今後の研究課題である。

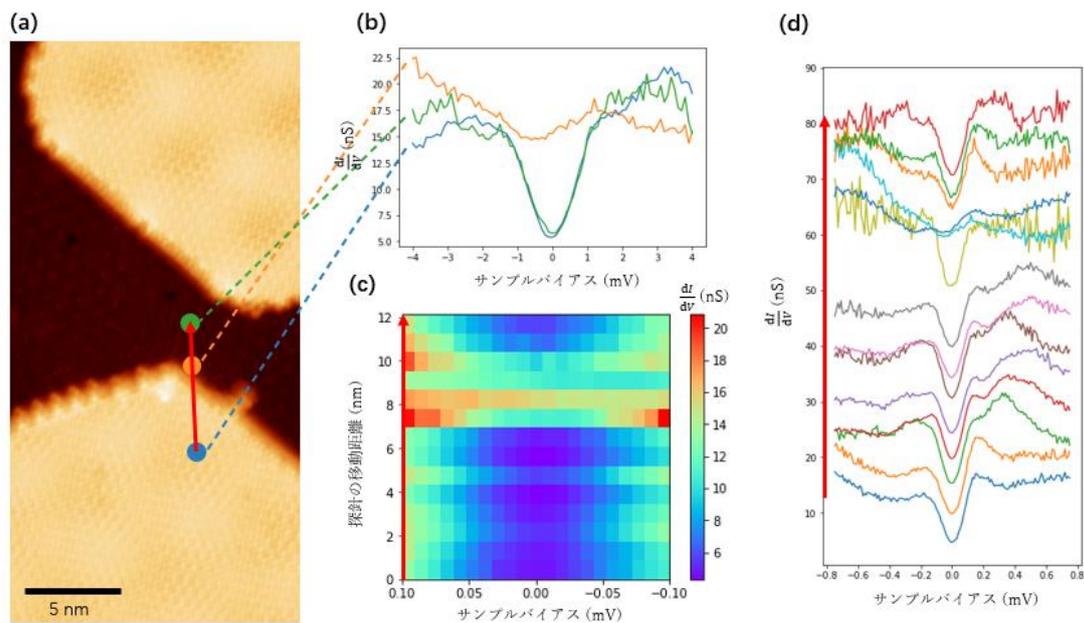


図3 (a) NbSe<sub>2</sub> 基板上的の CrBr<sub>3</sub> のアイランド構造を示す STM 像。図中の矢印はトンネル分光の測定場所を示す、(b) (a) の異なるサイトで測定されたでのトンネル分光 (プロットの色は (a) の STM 像中の点の色と対応している)。(c) (d) いずれも赤色矢印線上の等間隔な 14 点で測定されたトンネル分光スペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sato Yudai, Haze Masahiro, Yang Hung-Hsiang, Asakawa Kanta, Takahashi Susumu, Hasegawa Yukio	4. 巻 61
2. 論文標題 Numerical simulations for ferromagnetic resonance of nano-size island structures probed by radio-frequency scanning tunneling microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025001 ~ 025001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac4556	査読の有無 無
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18件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 土師将裕
2. 発表標題 電子スピン共鳴走査トンネル顕微鏡による原子スピン操作
3. 学会等名 NanospecFY2021mini（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土師将裕
2. 発表標題 機械学習を用いたSTMの高速化
3. 学会等名 実践！ マテリアルズインフォマティクス 実例を通じて学ぶマテリアルズインフォマティクス（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土師将裕, 多賀光太郎, 長谷川幸雄
2. 発表標題 高周波印加STMを用いたナノスケールでの磁性測定
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤優大, 土師将裕, 長谷川幸雄
2. 発表標題 微傾斜面上に形成された鉛単原子層薄膜の超伝導ギャップの磁場依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土師 将裕、佐藤 優大、山田 高広、山根 久典、平井 大悟郎、広井 善二、長谷川 幸雄
2. 発表標題 STMによるラインノード半金属 NaAlSiの超伝導状態測定
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 佐藤 優大、土師 将裕、吉澤 俊介、内橋 隆、長谷川 幸雄
2. 発表標題 半導体基板上に形成された金属単原子層薄膜の超伝導絶縁体転移におけるステップの影響
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 廉東奇, 浜田雅之, 土師将裕, 長谷川幸雄
2. 発表標題 層状物質の微小薄膜のSTM測定手法
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 佐藤優大, 土師将裕, 長谷川幸雄
2. 発表標題 Si(111)微傾斜面上の鉛単原子層超伝導体における超伝導位相コヒーレンスの消失
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 佐藤優大, 土師将裕, 吉澤俊介, 内橋隆, 長谷川幸雄
2. 発表標題 半導体基板上に形成された金属単原子層薄膜の超伝導絶縁体転移におけるステップの影響
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 土師将裕, 佐藤優大, 山田高広, 山根久典, 平井大悟郎, 広井善二, 長谷川幸雄
2. 発表標題 STMによるラインノード半金属NaAlSiの超伝導状態測定
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 佐藤優大, 土師将裕, 大黒文和, 浅川寛太, 吉澤俊介, 内橋隆, 長谷川幸雄
2. 発表標題 単原子層超伝導体におけるステップ誘起臨界磁場増大効果
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 佐藤優大, 土師将裕, 吉澤俊介, 内橋隆, 長谷川幸雄
2. 発表標題 Si(111)微傾斜面上のPb単原子層超伝導相における面直臨界磁場の増大
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 Si(100)表面上のPb単原子層の低温STM測定
2. 発表標題 廉東奇, 佐藤優大, 土師将裕, 長谷川幸雄
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤優大, 土師将裕, 吉澤俊介, 内橋隆, 長谷川幸雄
2. 発表標題 Si(111)微傾斜面上のPb単原子層超伝導体におけるステップ誘起臨界磁場増大効果
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤優大, 土師将裕, 吉澤俊介, 内橋隆, 長谷川幸雄
2. 発表標題 微傾斜面上の単原子層超伝導相体における面直臨界磁場増大のステップ密度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Sato, M. Haze, S. Yoshizawa, T. Uchihashi, Y. Hasegawa
2. 発表標題 Step-induced enhancement of the critical magnetic field in atomic-layer superconductors
3. 学会等名 28th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM28) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤優大, 土師将裕, 吉澤俊介, 内橋隆, 長谷川幸雄
2. 発表標題 微傾斜面上の単原子層超伝導相における面直臨界磁場の増大のステップ密度依存性
3. 学会等名 NANOSPEC 2021
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤優大, 土師将裕, 平井大悟郎, 廣井善二, 長谷川幸雄
2. 発表標題 STM からみるラインノード半金属 NaAlSi の超伝導状態
3. 学会等名 NANOSPEC 2021
4. 発表年 2020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
---------	---------