

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19027

研究課題名（和文）高速分光イメージングに向けたノイズキャンセリングSTMの開発

研究課題名（英文）Development of a noise-cancelling STM aimed at fast spectroscopic imaging

研究代表者

吉澤 俊介（YOSHIZAWA, Shunsuke）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・主任研究員

研究者番号：60583276

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：走査トンネル顕微鏡による分光イメージングは、超伝導体に形成されるボルテックスを数テスラといった高磁場で実空間可視化できるほぼ唯一の手段である。しかし、非平衡ボルテックス系に展開するためには1回の測定にかかる時間を短縮する必要があり、測定データに侵入する振動ノイズを除去する新しい方法が望まれる。われわれは、独立成分分析を利用して分光イメージングデータから特徴量を抽出し、空間的な相関の有無によって信号とノイズを分離する方法を提案した。これとあわせて、マルチパスモードを利用したイメージングの高速化も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

独立成分分析を利用する方法は、ノイズ除去だけでなく、走査トンネル顕微鏡で測定された複雑なスペクトルの起源を切り分けて考察する手がかりも提供できる。処理自体は大変簡便であるので、超伝導体以外にも、空間的に不均一な系を含むさまざまな物質で役にたつことが期待される。

研究成果の概要（英文）：Spectroscopic imaging by scanning tunneling microscopy is almost the only way to visualize the superconducting vortices in real space in high magnetic fields. However, in order to observe non-equilibrium vortices, the time required for a single scan must be reduced, and new methods to remove vibration noise are desired. We proposed a method to extract features from spectroscopic imaging data using independent component analysis, and to separate the signal and the noise according to the presence or absence of spatial correlation. We have also improved the speed of spectroscopic imaging by using multi-pass scanning mode.

研究分野：低温物性、表面科学

キーワード：走査トンネル顕微鏡 分光イメージング 多変量解析 ノイズ除去

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

走査トンネル顕微鏡は (STM)、鋭くとがらせた探針と試料表面とのあいだを流れるトンネル電流を検出しながら探針を走査することにより、表面構造を原子空間分解能で可視化できる顕微鏡である。トンネル電流 I をバイアス電圧 V で微分した微分伝導度 dI/dV は試料表面の局所状態密度を反映するので、高エネルギー分解能・高空間分解能の分光測定手法にもなる。この dI/dV 測定を視野の各点で行うことにより、局所状態密度の空間マッピング、すなわち分光イメージングが可能となる。これは他のプローブ顕微鏡にない STM の強みである。

STM による分光イメージングは超伝導体の研究でしばしば使われる。磁場中の超伝導体には量子磁束 (ボルテックス) が形成される。ボルテックスの中心では超伝導が抑制されているので、STM で測定した電子状態の違いから可視化できる。これは、数テスラといった高磁場でボルテックスを実空間可視化できるほぼ唯一の手段である。加えて、ボルテックスの中心に形成される準粒子束縛状態の測定を通じて超伝導状態についての様々な情報が得られるので、基礎研究で生かされている。

一方、ボルテックスは熱揺らぎや外部電流などで動き、超伝導特性を左右することが知られている。このようなボルテックスの非平衡状態を明らかにすることは学術的に重要なテーマであることに加え、実用材料としての超伝導研究にも貢献できる。しかし、STM による非平衡ボルテックス系の研究は、わずかな例 [K. Uchiyama *et al. Physica C* **470**, S795 (2010)] を除いて行われていない。これは分光イメージングに要する「露出時間」が非常に長く、1 回の測定に数時間から数日を要するのが普通だからである。根本的な解決のためには、測定時間を決めているシグナル・ノイズ比を向上させることが要求され、ノイズの主要因である STM ヘッドに伝わる振動を低減する必要がある。一般に STM 装置は防振台のうえに載せられ、地面から伝わる振動は低減されている。一方、空気を伝わる音や、ケーブルや配管の揺れ、クライオスタット内部で発生する振動などには無力である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、分光イメージング測定に要する時間を短縮するため、全く新しい振動ノイズ低減機構を開発することを目的とした。これを、当初から考えていた ① 測定されるデータに含まれるノイズの低減という方向性に加え、② すでに測定されたデータからのノイズ除去という観点からも進め、あわせて ③ 分光イメージングの方法自体の再検討も行った。

3. 研究の方法

探針の走査中は、トンネル電流を一定にするようフィードバック制御がはたらく。しかし、分光測定中はフィードバック制御をオフにするため、振動ノイズがそのまま信号に反映される。このノイズを打ち消すには、別途何らかの方法で STM ヘッドに入ってくる振動を検出し、その情報を使ってノイズ成分を取り除くという方針があり得る。そこでまずは STM 装置内部に振動センサーを設置することにより STM ヘッド自体にある種の免振機構を備えさせることを目指した。また、計測された分光イメージングデータからノイズ成分を取り除くという観点からは、何らかの基準にしたがって信号とノイズを分離できれば有益であるので、その方法を探索した。

4. 研究成果

(1) 振動センサーのノイズ問題

当初から想定されていた障害は、振動センサーからの信号にもノイズが含まれることである。すなわち、振動に由来するノイズを除去できても別の原因で発生するノイズが加算される。これを回避するために、複数の振動センサーからの信号を使って、振動シグナルとノイズとを分離する必要がある。これは暗中 (ブラインド) 音源分離と呼ばれる問題であり、その標準的な計算手法のひとつとして独立成分分析の適用を試みた。しかし、振動センサーごとの遅延時間の処理に工夫が必要であり、残念ながら解決には至っていない。一方で、ここで導入した独立成分分析が、すでに測定された分光イメージングデータに対する特徴量抽出の手段として有用であることがわかってきたので、その方向の研究も進めた。

(2) 独立成分分析による特徴量抽出

独立成分分析は、観測される混ざり合った信号から元の信号を取り出すために使われる計算手法であり、理論的な拠り所として元の信号が互いに独立であるという仮定が用いられる。しばしば取り上げられる例は、複数の独立した音源から発せられた音が複数のマイクで録音される状況で録音データから元の信号を分離する、という音源分離の問題である。本研究ではこの問題を分光イメージングデータからの特徴量抽出の問題に対応させる。不純物や欠陥、ボルテックス内の準粒子が「特徴的な状

態密度」(=特徴量)を有し、観測されるトンネルスペクトルはそれらを重み付きで足し上げたものであると仮定する。音源分離の問題における音源に対応するのは「特徴的な状態密度」であり、録音データに対応するのがトンネルスペクトルである。録音マイクの個数は分光イメージのメッシュに対応させる。このような置き換えをすれば、計算自体は既存のライブラリを適用するだけで済み、簡単である。

図1に示すのはある超伝導体の分光イメージングデータに独立成分分析を適用したものであり、左から分離信号、分離信号の重みの空間分布、その自己相関を表している。自己相関が有限の相関長をもって減衰する場合には、対応する分離成分が空間的に相関していることを意味し、「特徴的な状態密度」を反映したものであると考えられる。一方、自己相関が原点でのみ値をもつときは空間的な相関が無いことを意味し、分離成分はノイズに対応すると考えられる。このようにすると、測定された分光イメージングデータから信号とノイズを切り分けられる。

本提案手法は、ノイズ除去だけでなく、複雑なスペクトルの起源を切り分けて考察するための手がかりも提供できる。処理自体は大変簡便であるので、超伝導体にかぎらず、空間的に不均一な系を含むさまざまな物質の STM 測定に役にたつと期待される。主成分分析を使った事例もあるが[J. Yamanishi *et al. Appl. Surf. Sci.* **428**, 186 (2018)], 主成分分析による分離信号は独立であるとは限らない(無相関は独立を意味しない)ので、分離信号の物理的解釈をしやすいのではないかと考えている。

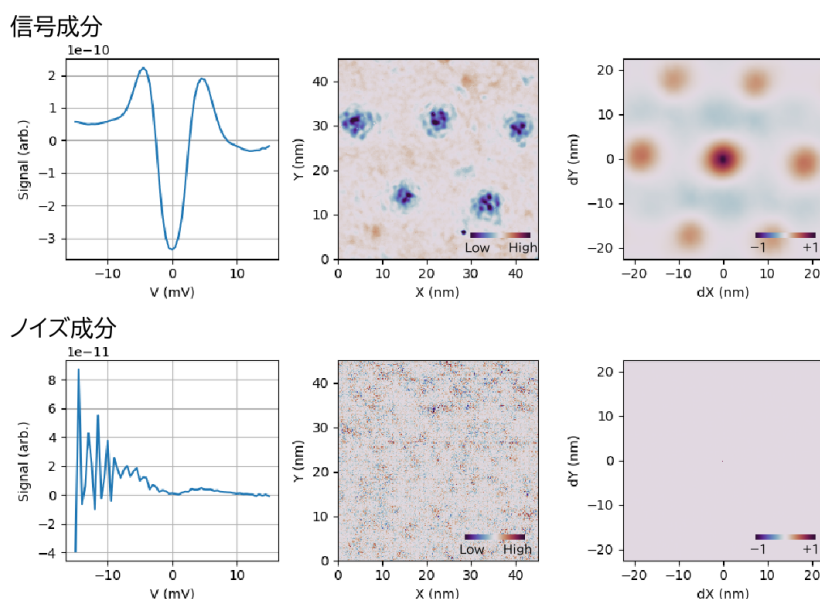


図 1: ある超伝導体の分光イメージングデータに独立成分分析を適用した例。分離された成分のうち典型的なものを示している。左から分離信号、分離信号の強度マップ、強度マップの自己相関イメージである。信号成分(この場合はボルテックスに誘起された状態に対応する)が有限の相関長をもっているのに対し、ノイズ成分は空間的な相関が無いことで区別できる。

(3) マルチパスモードによる分光イメージングの高速化

分光イメージングの速度に関しては、マルチパスモードとよばれる測定モードを導入して改善した。具体的には、同じラインを複数回走査し、最初の走査で高さ情報を記録したのちに、以降の走査では記録された高さ情報を参照しながらバイアス電圧を変えて微分伝導度を記録する。この方法のメリットは、バイアス電圧をピクセルごとに変化させないため、ロックインアンプの応答時間を待つ頻度がケタで減ることである。これにより、エネルギー方向の測定点が少ない場合に、従来の測定モードでは 1 時間で 64×64 ピクセルが限界であったところが、 256×256 ピクセルのイメージが余裕をもって得られるようになった。従来比 10-20 倍程度の高速化が実現できたと言える。とくに、 $V = 0$ における dI/dV 値だけが必要であればこれを電流値 I で代替でき、その場合はロックインアンプが不要になるのでさらに数倍の高速化が可能である。

この方法を導入したことによって同じ測定時間内でより高空間分解能の分光イメージを取得できるようになり、新しい成果が得られた。その一つは、Si(111) 基板上に形成された In の二重層物質(表面科学分野では $\text{Si}(111)-\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$ と呼ばれる)で電子定在波を観測することに成功した。この定在波の特徴は、ユニットセル(Si 基板の 1×1 周期に対して辺の長さが $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ の平行四辺形に相当する)よりも細かな波長の定在波が支配的であるという点である。したがって、高分解能で分光イメージングを行わなければ見えなかったものである。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yoshizawa Shunsuke, Kobayashi Takahiro, Nakata Yoshitaka, Yaji Koichiro, Yokota Kenta, Komori Fumio, Shin Shik, Sakamoto Kazuyuki, Uchihashi Takashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Atomic-layer Rashba-type superconductor protected by dynamic spin-momentum locking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1462
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-21642-1	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉澤俊介
2. 発表標題 シリコン表面インジウム原子層の結晶構造と超伝導状態
3. 学会等名 物性研究所ワークショップ「ナノスケール物性科学の最先端と新展開」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉澤俊介、鷲坂恵介
2. 発表標題 インジウム原子層における電子定在波の極低温走査トンネル顕微鏡観測
3. 学会等名 NIMS先端計測シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉澤俊介
2. 発表標題 半導体表面原子層の結晶構造・電子構造・超伝導：走査トンネル顕微鏡から見えるもの
3. 学会等名 SPring-8ユーザー協団体顕微ナノ材料科学研究会 日本表面真空学会放射光表面科学研究部会 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（NANOSPEC 2021）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉澤俊介、鷺坂恵介
2. 発表標題 In/Si(111) におけるプロッホ波干涉の STM 観測
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉澤俊介
2. 発表標題 走査トンネル顕微鏡による原子層超伝導体の電子状態計測
3. 学会等名 SCTM2020 ワークショップ「超伝導物質、トポロジカル物質」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉澤 俊介, 鷺坂 恵介, 藤田 大介, 内橋 隆
2. 発表標題 幾何学的位相解析による不整合変調構造の解析
3. 学会等名 第2回日本表面真空学会若手部会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉澤 俊介
2. 発表標題 走査トンネル顕微鏡で見る超伝導体表面構造と量子磁束
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shunsuke Yoshizawa, Keisuke Sagisaka, Daisuke Fujita, Takashi Uchihashi
2. 発表標題 Visualizing the Uniaxial Incommensurate Structure of Si(111)-(7×3)-In by using Scanning Tunneling Microscopy
3. 学会等名 ACSIN-14 & ICSPM26 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉澤 俊介, 鷺坂 恵介, 藤田 大介, 内橋 隆
2. 発表標題 Si(111)- 7×3 -In 表面における静電遮蔽効果の STM 観測
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉澤 俊介, 鷺坂 恵介, 藤田 大介, 内橋 隆
2. 発表標題 STM観察とDFT計算によるインジウム原子層超伝導体の結晶構造決定
3. 学会等名 第26回渦糸物理国内会議
4. 発表年 2018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
---------	---------