

論文の内容の要旨

論文題目 走査トンネル顕微鏡によるカイラル磁性の微視的評価と
準粒子干渉の高効率計測

氏名 土師 将裕

本論文は、以下の3項目で構成されている。

1. スピン偏極STMを用いたカイラル磁性薄膜の実空間観察
2. スピン偏極STMに適用可能な探針の特性評価
3. 圧縮センシングを用いた準粒子干渉計測の高速高精度化

1. スピン偏極STMを用いたカイラル磁性薄膜の実空間観察

1.1 研究背景と目的

空間反転対称性が破れている表面や界面では、Dzyaloshinskii-Moriya相互作用(DMI)によって、スカーミオン構造やらせん磁性など、複雑な磁気秩序が引き起こされることがある。DMIハミルトニアンは、DMIベクトル(\mathbf{D})とスピン($\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$)を用いて、 $\mathbf{D} \cdot (\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2)$ と表される。重い元素からなる基板(タングステンなど)の上に形成された磁性薄膜(鉄やマンガンなど)では、基板の持つ大きなスピン軌道相互作用によって界面DMIが実効的に働く。このような磁性薄膜は基板と薄膜の組み合わせによって様々なカイラル磁気構造を示すことが報告されており、またそれらはDMIベクトルの符号によって決定される特定の回転方向を持つ。DMIベクトルの符号の決定には基板が大きく寄与しているとの報告があるが[Torrejón *et al.*, *Nat. Commun.* **5**, 4655 (2014), Kashid *et al.*, *PRB* **90**, 054412 (2014)]、薄膜の材料や厚さによってDMIベクトルの符号がどのように変化するかは明らかではない。

本研究では、薄膜を構成する元素や厚さによって様々なカイラル磁性構造を示すW(110)基板に着目した。W(110)上の単層及び二層のMn薄膜は、スピン偏極走査トンネル顕微鏡(SP-STM)によって、異なる構造のらせん磁性を示すことが報告されている[Bode *et al.*, *Nature* **447**, 190 (2007), Yoshida *et al.*, *PRL* **108**, 187205 (2012)]。したがって、この二つの系から膜厚による回転方向の比較が可能である。しかし、二層Mn薄膜に関しては、カイラリティの有無や回転方向は明らかになっておらず、また、単層Mn薄膜に関しても、回転方向は左巻きと理論的には予測されているものの、実験的に調べた報告は無い。

そこで、二層Mn薄膜の磁気構造のカイラリティを調べ、DMIがらせん磁性の形成に寄与しているかを調べることで、単層Mnの回転方向を調べ、二層Mnとの比較からDMIへの基板と膜厚の寄

与を明らかにすることを本項の目的とした。

1.2. 研究結果

SP-STMとは、探針と試料の間に流れるトンネル電流が両者の磁化方向の相対的な角度に依存することを利用して、試料の磁気情報をナノスケールの分解能で実空間観察する手法である。図2(a)のように、磁化の向きを外部磁場によって制御できる磁性探針（Fe薄膜探針）を用いると、らせん磁気構造の回転方向が右巻きの場合、面内左向きから面直上向きへの外部磁場の変化により、探針の磁化も変化する。ストライプの位相が右にずれる（図1(b)）。左巻きの場合、ずれの方向が逆になる。図1(c)と(d)に示す実験結果は、磁化方向が左向きと上向きの探針を用いて得られたSP-STM像とその断面図である。断面図からわかるようにストライプパターンは右にずれているため、このらせん構造の回転方向は右巻きと決定できた。同様の実験を7つのテラス上で行った結果、全て右巻きと判明した。このことから、二層 Mn 薄膜にはカイラリティがあり、DMI が実効的に働いていると結論できた。同様の方法により、単層Mn薄膜のスピンの回転方向を実験的に調べたところ、単層 Mn 薄膜は左巻きと判明した。これは、第一原理計算で予測された結果と一致する。

これらの実験から、二層 Mn 薄膜は右巻き、単層 Mn 薄膜は左巻きであることが判った。一見すると、これらは逆巻きであるように見えるが、以下の考察から DMI ベクトルの符号は同じであることが判る。単層Mn薄膜は反強磁性構造を有しているため、模式的に ($\downarrow\leftarrow\uparrow$) と表される。一方、二層Mn薄膜は ($\downarrow\leftarrow\uparrow$) と表される。前述の式からわかるように DMI は隣り合うスピンの外積の向きによって安定なスピン配置を決定する。隣り合うスピンに注目すると、外積の方向はいずれも同じであり、DMI の符号も同じといえる。以上から、単層および二層Mn薄膜のDMIベクトルの符号は変化せず、DMI ベクトルの符号決定には、基板の影響が支配的であることを示唆している。

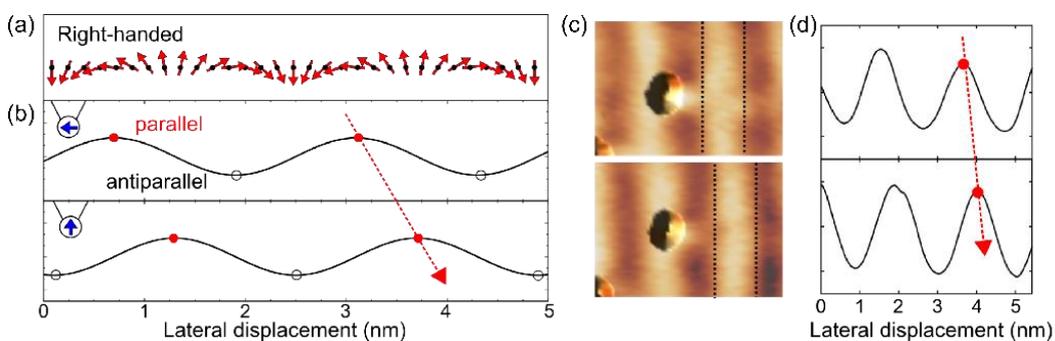


図 1 (a, b) 二層 Mn 薄膜のらせん磁気構造（右巻き）と SP-STM 信号の模式図。(c, d) Fe 薄膜探針による SP-STM 像と断面図。上段（下段）は、面内左向き（面直上向き）の外部磁場下で測定している。

2. スピン偏極走査トンネル顕微鏡に適用可能な探針の特性評価

2.1. 研究背景と目的

SP-STMを行うに当たって、どのような磁性探針を選ぶかは重要な課題である。従来、STMで通常用いられるW探針に磁性薄膜を蒸着したものが広く用いられてきたが、近年、反強磁性体であるCrのロッドを電気化学エッチングにより尖らせた探針（バルクCr探針）が、その作製の容易さから注目を集めている。磁性体を直接先鋭化させた探針は、スピン信号を与える意味でSP-STM測定に有効と思われるが、Cr以外の磁性体を用いた測定は行われておらず、その特性は明らかではない。そこで、W探針にFeを被覆したFe薄膜探針、バルクCr探針に加え、バルクNi探針、バルクFe探針の4つの探針のSP-STM測定における特性を評価し、比較することを本項の目的とした。

2.2. 結果

バルクCr探針、バルクNi探針、バルクFe探針、Fe薄膜探針の4種類の探針を用いて、W(110)上の二層Mn薄膜のSP-STM測定を行った。らせん磁性を持つ二層Mn薄膜において得られるストライプパターンは、全ての探針を用いて取得することができた。したがって、この4つの探針はいずれもSP-STM探針として機能する。また、面直方向に±2Tの磁場を印加してSP-STM測定を行ったところ、バルクNi探針、バルクFe探針、Fe薄膜探針では、取得したSP-STM像のコントラストの反転が観察された。これは、探針の磁化方向が外部磁場によって反転することを意味する。一方、反強磁性体であるCr探針では反転せず、外部磁場による磁化方向制御は難しいことを示す。同様に、面内磁場±1TでのSP-STM測定を行うと、Fe薄膜探針では、SP-STM像のコントラストは反転するが、Cr探針では反転しなかった。一方、バルクNi探針とバルクFe探針では、走査領域が大きく移動し、安定した測定が困難であった。探針全体が強磁性体のため、磁場により強い横方向の力を受けたためと考えられる。

3. 圧縮センシングを用いた準粒子干渉計測の高速高精度化

3.1. 研究背景と目的

準粒子干渉(Quasi-particle interference; QPI)とは、表面内に2次的に束縛された準粒子（電子）の干渉現象であり、走査トンネル分光(STS)により観測される。QPIパターンの解析から表面電子状態の波数空間での情報が得られるため、QPI計測により、フェルミ面形状やエネルギー分散関係を導き出すことができる。極低温強磁場中でも利用可能であり、そうした環境下での電子状態を解明する上で非常に強力な手法である。最近では、単純な金属表面のみならず、トポロジカル絶縁体や非従来型超伝導体へと拡がりを見せており、さらにスピン偏極STSを用いれば、スピン偏極した電子状態の観測も期待されている。しかし、QPI計測を行うためには、非常に高精度な装置と、数日から1週間に及ぶ測定が必要になり、作業効率が極めて悪い。

そこで、本研究ではQPIパターンの波数空間におけるスパース性（信号のほとんどの構成要素がゼロ値を持つ性質）に着目し、圧縮センシングの手法の一つであるLASSO (Least Absolute

Shrinkage and Selection Operator)により、QPI計測に要する時間を短縮できることを明らかにした。測定対象には、単純な円形のQPIパターンを示すAg(111)表面を用いた。極低温STMによる同表面のQPIパターンから、LASSOにより、サンプリング点数を減らしてもデータ復元が可能なことを示している。

3.2. 研究結果

Ag(111)表面上のQPIパターンを用いて解析を行った(図3)。64800ピクセルで取得した像からデータ点を間引いた画像に対してフーリエ変換およびLASSOを行い、データの間引きによる影響を調べている。図3(a)は実空間での元画像である。 dI/dV 像と呼ばれる表面の電子状態密度分布を表わす像で、表面に局在する自由電子が表面上の格子欠陥や吸着物によって散乱され、干渉により形成する定在波が現れている。図3(b)は図3(a)に対してフーリエ変換を行った波数空間像である。表面電子が等方的に散乱されるため、円形のQPIパターンが観測される。この円形のQPIパターンを「答え」として、間引かれた実空間データから同様の画像が復元できるかの検討を行う。なお、データ点を周期的に間引いた場合、「エイリアシング」と呼ばれるサンプリングの周期性に起因するアーティファクトが見られることがあるため、データ点はランダムに間引いている。図3(d)は7200点までランダムに間引いたデータに対してフーリエ変換を行った結果である。測定点を減らしたことにより、バックグラウンドノイズが増加したことがわかる。一方、図3(e)は同様に7200点まで間引いたデータに対してLASSO解析を行った像である。図2(c)と比較すると、バックグラウンドノイズが軽減され、はっきりと円形パターンを見出すことができる。この結果から、ランダムサンプリングとLASSOを組み合わせることで少ない測定点から、本来の結果を再現できることを示した。

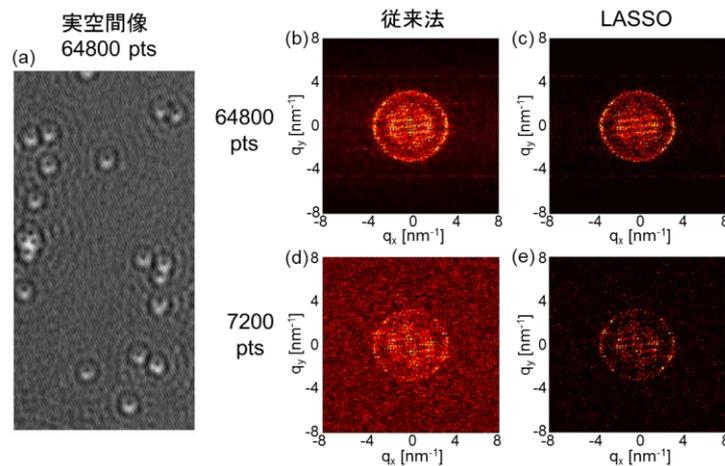


図3 (a)Ag(111)表面の dI/dV 像。(b, c) 元画像(64800点)から従来法(フーリエ変換)もしくはLASSOにより推定した準粒子干渉パターン。(d, e)7200点までランダムに間引いたデータから従来法もしくはLASSOにより推定した準粒子干渉パターン。