

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20351

研究課題名（和文）磁性基板上の吸着原子における磁気相互作用

研究課題名（英文）Magnetic interactions for adatoms on magnetic substrates

研究代表者

安井 勇気 (Yasui, Yuuki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：00846636

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、最小単位である単原子での磁気相互作用に対して力の観点からの知見を与えることを目的としている。そのために、イリジウム基板上の鉄薄膜に対して、水素原子を吸着させた系を原子間力顕微鏡および走査型トンネル顕微鏡を用いて調べた。この系では、基板の面方位・鉄の膜厚によってさまざまな磁気構造を持つが、水素原子の吸着によって、異なる応答を示すことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象としている、ナノメートルスケールの磁気構造は次世代の磁気情報記録媒体として期待されている。本研究では、吸着原子を用いることで微小な磁気構造を制御できることを明らかにし、さらに、外部磁場との協奏により、磁気構造に変調をもたらすことを明らかにした。本成果は次世代の磁気情報記録媒体に対し、さらなる制御性を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aim to obtain knowledge on magnetic interactions at single atomic scale. To achieve this goal, we performed atomic-force microscopy and scanning tunneling microscopy measurements for hydrogen absorbed thin iron films on iridium substrates. The substrates behave with various magnetic structures depending on the crystalline orientation and the thickness of the iron film. We found, by absorbing hydrogen atoms, the response is different depending on pristine magnetic structures.

研究分野：低温物性

キーワード：原子間力顕微鏡 走査型トンネル顕微鏡 磁性

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

物質の表面においては、バルクとは異なる特異な状態が現れうる。その中でも特に磁気構造については、空間反転対称性の破れに起因するジャロシンスキー守谷相互作用により、ヘリカル構造、磁気スキルミオンのような微小な磁気構造が実現する場合がある[1]。このような構造が安定化するためには、強磁性や反強磁性などの単純な状態に比べて、より複雑な相互作用が必要となる。そのため、いかなる磁気相互作用により微小磁気構造が実現するかに興味を持たれる。

微小磁気構造は欠陥などの表面構造に敏感であり、ドメイン構造を形成する。そのため、これらをよく理解するためには局所的な手法を用いることが望ましい。その中でも、最小単位となる単原子での磁気相互作用を知ることが微小磁気構造を理解するうえで必要不可欠である。微小磁気構造は次世代磁気メモリとしての活用も期待されており[2]、学問的な観点からも、応用的な側面からも微小な磁気構造・磁気相互作用の情報を引き出す手段の確立が望まれる。

しかし、単原子における観測はその小ささが困難をもたらし、磁気構造を原子分解能で検出する手法は多くない。代表的なものとしてスピン偏極走査型トンネル顕微鏡が用いられてきた[3]。この手法ではアップスピンとダウンスピンの状態密度差の情報が得られる。しかし、得られる情報はそれのみに限られており、磁気相互作用を決定するには不十分である。そこで、他の手段から相互作用に関するさらなる情報を得る必要があり、単原子での磁気相互作用が力という基本的な量にどのように現れるかということを確認する。

## 2. 研究の目的

本研究では、単原子の極限で交換力により磁気相互作用の情報を引き出すことを目的とする。走査型トンネル顕微鏡を用いた状態密度の研究は行われてきたが、本研究では原子間力顕微鏡を用いた力という異なる観測量からアプローチをする。微小な磁気構造は周囲の環境に非常に敏感である。原子間力顕微鏡探針と試料間に働く交換力を利用することで、非常によく似た性質の元素を識別すること、原子の環境を自在に操作することができる。そこで、走査型トンネル顕微鏡と原子間力顕微鏡の2つの強力な手法を同時に利用することで、環境の違いによる相互作用の違いを確認する。

## 3. 研究の方法

### (1) 「基板の磁化方向に対する依存性」

タングステン(110)基板上的マンガン単層膜(Mn/W)は173°のサイクロイド磁気構造を取ることが知られている[4]。この上に微量の鉄原子を蒸着し、液体ヘリウムを用いた4 Kにおいて原子間力顕微鏡および走査型トンネル顕微鏡測定を行う。非磁性探針を用いた場合であっても、Mn/W 基板の磁化方向が面内か面直かに応じて、吸着鉄原子上での状態密度スペクトルが異なることが計算されており[5]、この振る舞いを確認する。さらに、原子間力顕微鏡による測定を行うことで、基板の磁化方向の違いが交換力にどのように影響するが明らかとなる。磁場を印加した測定も行う。特に保磁力近傍での測定により、吸着原子の磁化反転プロセスが明らかとなる。続いて、磁化させた探針を用いた測定を行う。非磁性探針の場合は磁化方向が縦と横の比較だったのに対し、磁性探針の場合には上と下の違いを検出することが可能となる。

### (2) 「吸着元素依存性」

Mn/W 基板上的吸着元素として3d元素を用いた場合について計算がされており、元素の種類によって基板と強磁性的か、反強磁性的に相互作用するかといった大きな違いが期待されている[5, 6]。そこで、Mn/W 基板上にコバルト原子を微量蒸着させ、(1)と同様に、基板の磁化方向に対する依存性を走査型トンネル顕微鏡および原子間力顕微鏡により調べる。これを鉄の結果と比較することで、元素の違いによる磁気相互作用の違いが明らかとなる。

### (3) 「吸着原子間の相互作用」

プラチナ基板上的鉄原子において、吸着鉄原子の間隔を制御することにより2原子間の相互作用の距離依存性を調べた報告があり[7]、これを応用することを考える。原子間力顕微鏡を用いることにより探針を用いた原子操作で、吸着原子を基板の任意の位置に運ぶことができる[8]。Mn/Wはサイクロイドと垂直な方向に磁化の向きが揃っているため、吸着原子を縦に移動させることで2原子間の相対スピン角度を、横に移動させることで2原子間距離を制御することが可能である。そのため、原子操作の技術を活用することで、2つの自由度を同時に制御し、

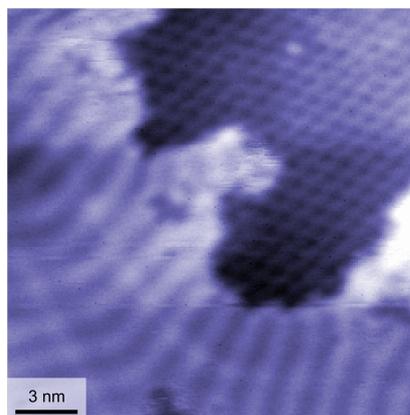
吸着原子間の相互作用の距離依存性、磁化方向の相対角度依存性が明らかとなる。

#### 4. 研究成果

基板の磁化方向に対して吸着原子の振る舞いの変化を調べるため、場所によって様々な磁化方向をもつものを基板として選定することが重要となる。当初はタングステン(110)基板上のマンガン単層膜を予定していたが、イリジウム上の鉄薄膜では、基板の面方位、鉄の膜厚によってさまざまな磁気構造を安定化させることができるので、こちらを選択した。イリジウム上の鉄薄膜試料の作製を行った。超高真空雰囲気下でのイリジウム単結晶基板の清浄化方法、および、鉄原子の蒸着方法を確立し、吸着原子を用意した試料に対して、原子間力顕微鏡および走査型トンネル顕微鏡による観察を行った。

##### (1) イリジウム(111)基板上鉄薄膜への水素原子吸着

イリジウム(111)基板の鉄薄膜においては、鉄の蒸着量によってさまざまな磁気構造を引き起こす。具体的には、鉄1層において磁気スキルミオン格子、鉄2層において磁気サイクロイド構造、鉄3層のゼロ磁場下において長周期の磁気サイクロイド構造、鉄3層の磁場下においてスキルミオンバブル構造が実現する。これらのそれぞれの構造について、水素原子を吸着させた。その結果、鉄2層においては水素原子は六角格子を組む様子が観察された[図]。また、水素原子の吸着によって鉄の磁気構造が大きな変調を受けるものがあることがわかった。走査探針を用いた水素原子の操作も試みたが、水素原子が動く様子は見られなかった。水素原子と鉄薄膜が強く結合していることを示唆する。



図：イリジウム(111)基板上の鉄2層膜に水素原子を吸着させた試料の走査型トンネル顕微鏡図。

##### (2) イリジウム(001)基板上鉄薄膜への水素原子吸着

イリジウム基板の(001)方向については、少量の鉄を蒸着させ、鉄原子が一次元上に配列するチェーン型の構造を調べた。水素原子のない場合に、チェーン上でサイクロイド型の磁気構造をとるが、水素原子を吸着させたとしても、磁気構造に大きな変調は見られなかった。一方で、トンネル電流を印加することで、水素原子を操作することが可能であった。

##### (3) 吸着原子誘発の磁気周期変調

イリジウム(001)基板上の鉄チェーン構造について、吸着原子を含む状態で外部磁場を印加する測定を行った。すると、吸着原子を起点として、鉄原子の磁気構造に変化が現れることを見出した。サイクロイド構造のような複雑な磁気構造は、複数の相互作用の絶妙なバランスにより実現しているため、吸着原子によりこのバランスに変化が生じたと考えられる。

#### <引用文献>

- [1] N. Kanazawa *et al.*, J. Adv. Mater. **29**, 1603227 (2017).
- [2] A. Fert *et al.*, Nat. Nanotechnol. **8**, 152 (2013).
- [3] R. Wiesendanger, Rev. Mod. Phys. **81**, 1495 (2009).
- [4] M. Bode *et al.*, Nature **447**, 190 (2007).
- [5] M. Gutzeit *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 134411 (2020).
- [6] S. Haldar and S. Heinze, Phys. Rev. B **98**, 220401(R) (2018).
- [7] S. Steinbrecher *et al.*, Nat. Commun. **9**, 2853 (2018).
- [8] Y. Sugimoto *et al.*, Nat. Mater. **4**, 156 (2005).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuuki Adachi, Yuuki Yasui, Yoshiaki Sugimoto
2. 発表標題 Probing the spin orientation in Fe chains using non contact atomic force microscopy
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 安達有輝, 飯山敦司, 安井勇氣, 杉本宜昭
2. 発表標題 強磁場低温プローブ顕微鏡を用いたIr(001)上の一次元鉄チェーンの観察
3. 学会等名 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023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
---------	---------