

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 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：2011～2012
課題番号：23840008
研究課題名（和文） 走査トンネル顕微鏡を用いた低次元量子スピン系のボトムアップ構築と局所磁性観察
研究課題名（英文） Scanning tunneling microscopy and spectroscopy on bottom-up fabricated low-dimensional quantum magnets on surfaces
研究代表者 吉田 靖雄（YOSHIDA YASUO）東京大学・物性研究所・助教 研究者番号：10589790

研究成果の概要（和文）：

従来、磁石は「向きの自由度のみを持つスピンの集団」として捉えられてきたが、その描像では定性的にもその性質を説明できない低次元量子磁性体（もしくは量子スピン系）の研究が近年盛んに行われおり、化学的手法によって多くの磁性体が合成され調べられている。これに対し我々は、表面上に吸着させた磁性分子を構成要素とし、走査トンネル顕微鏡（STM）を用いて、理想的な低次元量子磁性体をボトムアップ構築し、その磁性を詳細に調べることを目指している。本研究ではその鍵となる技術である、原子・分子マニピュレーションとスピン偏極 STM を確立した。

研究成果の概要（英文）：

In the past, a magnet has been understood as an assembly of classical spins (vectors). In recent decades, however, low-dimensional (low-d) quantum magnets, which cannot be explained with the classical physical picture, have attracted much attention, and various model compounds have been chemically synthesized. We aimed to achieve bottom-up fabrication of ideal low-d quantum magnets on surfaces by single atom/molecule manipulation with the scanning tunneling microscope (STM) and investigate the magnetic properties in detail and locally with spin-polarized STM. To pursue this goal, we succeeded to establish two important key techniques: single atom/molecule manipulation and spin-polarized STM.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：スピン偏極走査トンネル顕微鏡、表面磁性、量子スピン系

1. 研究開始当初の背景

これまで、量子スピン系の研究は化学的手法によって得られた様々な化合物をモデル

物質として盛んに研究が行われてきた。このようなバルク物質を用いた研究において、以下の 2 つの課題が考えられる。①これらの物

質は、試料内のイオン間・分子間の磁氣的相互作用が1次元鎖内あるいは2次元面内で極端に強い擬低次元系とみなされているが、極低温では微弱な3次元的相互作用が無視できず、磁気秩序が生じるものも少なくない。②バルク物質ではスピン間の相互作用を原子スケールで微調整することは実質不可能であり、数値計算のモデルのように、相互作用のパラメーターを変化させながら系統的にその性質を調べるような研究は難しい。

一方、近年発展した走査トンネル顕微鏡 (STM) による原子・分子マニピュレーション (以下、単にマニピュレーションとする) を用いると、表面上で個々の原子や分子を動かしてナノサイズの人工構造物を作ることが可能であり、この手法を用いると理想的な1次元あるいは2次元量子スピン系を表面上に構築できると期待される。また、原子・分子間隔の調整により、スピン間相互作用を制御したり、系に原子スケールの欠陥を導入してその影響を調べたりすることも可能である。さらに、スピン偏極STMや非弾性トンネル分光は、表面における局所的な磁性を調べることが可能にするので、これらを構築したナノスケールの量子スピン系に適用することでバルク試料では難しかった局所的な磁性や相互作用パラメーターの依存性などを詳細に調べられると考えた。

2. 研究の目的

表面上に吸着させた磁性分子を構成要素とした、様々な幾何学的構造を持つ量子スピン系を構築し、その磁性をスピン偏極 STM と非弾性トンネル分光を用いて、局所的に詳細に調べることが最終的な目標とし、そのために必要なマニピュレーションとスピン偏極 STM の確立を目指した。

3. 研究の方法

マニピュレーションの確立には、Ag(111) 表面上に STM 探針を数 nm 突入させ、それによって散らばった Ag 原子を用いた。そして、原子レベルでの正確な制御を行うために、設計した通りの文字を表面上に描くことを目指した。

Ag(111) 表面において磁性を示すことが知られている磁性分子を最終的な量子スピン系構築の舞台として設定したので、まず同じ表面上でスピン偏極探針の同定を行うための参照試料を作成し、その試料のスピン偏極 STM を安定に行なえる環境を整えることが重要であった。そこで、これまで磁気光学カー効果の測定から強磁性的な性質が報告されている Ag(111) 表面での Co 薄膜に対して、スピン偏極 STM を行い、スピン偏極シグナ

ルを得ることを目指した。スピン偏極探針には、超高真空中で清浄化された W 探針に Fe 薄膜を蒸着させた Fe-coated W 探針と Cr の板をワイヤー状に切り出して製作した Cr bulk 探針を用いた。

4. 研究成果

マニピュレーションの確立は、図1のように予め決めておいた間隔で原子を並べ、文字を描くことで達成されたとと言える。

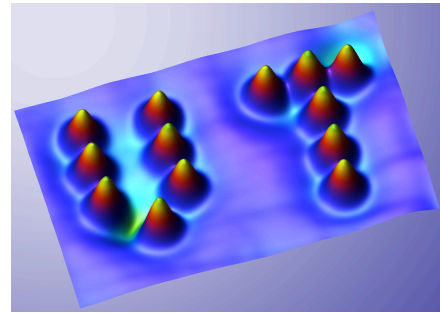


図 1: 原子マニピュレーションによる東京大学の頭文字、「UT」。Ag(111) 表面上の銀原子を利用。

次に、Ag(111) 表面での Co アイランドのスピン偏極 STM シグナルを得ることに成功した。図2に示すように、まず外部磁場の大きさによって微分伝導度 (dI/dV) 像のコントラストがアイランド上でだけ変化するこ

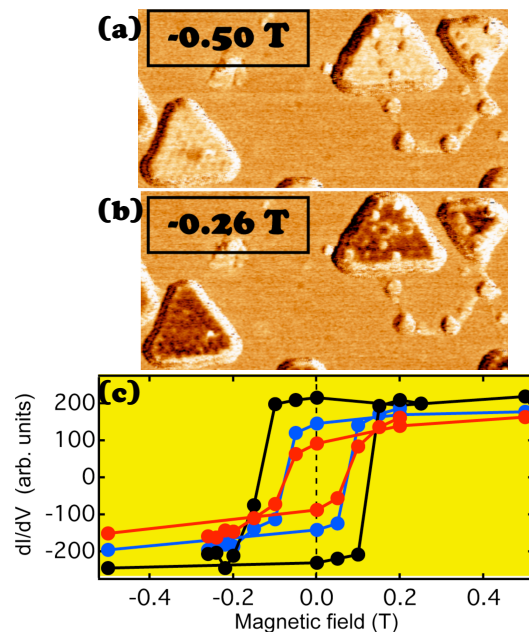


図 2: Ag(111) 面上の Co の三角形アイランドのスピン偏極 STM 像 (a, b) とそこから見積もられた各アイランドのヒステリシス曲線 (c)。

とを確認した。これは、Co アイランドの磁気モーメントの向きが磁場を変化させることで変化していることの現れであり、スピン偏極 STM が成功していることを示している。さらに、 dI/dV 像の各アイランドで、コントラスト（微分伝導度の値）の平均化を行い、その値を測定された磁場の関数としてプロットすることで、それぞれのアイランドのヒステリシス曲線を見積もることに成功した。これにより、Ag(111)表面における Co アイランドの強磁性的性質を確認することができた。これらの成果によって、ナノスケール量子スピン系を表面上に構築し、局所的な磁化測定をする環境が整ったといえる。今後は、同じ表面に磁性分子を吸着させ、マニピュレーションで量子スピン系の構築を行い、スピン偏極 STM による局所的な磁化測定を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

[1] T. Tominaga, T. Sakamoto, T. Nishio, T. An, T. Eguchi, Y. Yoshida, Y. Hasegawa
“Observation of Vortex Clustering in Nano-Size Superconducting Pb Island Structure by Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy Spectroscopy”
J. Supercond. Nov. Magn. 25, 1375 (2012) (査読あり)
DOI 10.1007/s10948-012-1522-4

[2] Y. Yoshida, S. Schröder, P. Ferriani, D. Serrate, A. Kubetzka, K. von Bergmann, S. Heinze, R. Wiesendanger
“Conical Spin-Spiral Order Ultra thin Film Driven by Higher-Order Spin Interactions”
Phys. Rev. Lett. 108, 087205 (2012) (査読あり)
DOI 10.1103/PhysRevLett.108.087205

[3] B. Wolter, Y. Yoshida, A. Kubetzka, K. von Bergmann, S. H. Wla, R. Wiesendanger
“Spin friction observed on the atomic scale”
Phys. Rev. Lett., 109, 116102 (2012) (査読あり)
DOI 10.1103/PhysRevLett.109.116102

[4] K. v. Bergmann, M. Menzel, D. Serrate, Y. Yoshida, S. Schroeder, P. Ferriani, A. Kubetzka, R. Wiesendanger, S. Heinze
“Tunneling anisotropic magnetoresistance on the atomic scale”
Phys. Rev. B 86, 134422 (2012) (査読あり)
DOI 10.1103/PhysRevB.86.134422

[5] 吉田靖雄

「極限環境物性実験からスピン偏極 STM へ」
表面科学 Vol. 33, No. 5, pp. 308-309,
2012 特集「海外研究体験記」(査読なし)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsssj/33/5/33_308/_pdf

[学会発表] (計 28 件)

[1] 土居啓司、吉田靖雄、長谷川幸雄
「スピン偏極走査トンネル顕微鏡による Ag(111) 表面上のコバルト薄膜の観察」
日本物理学会第 68 回年次大会
広島大学、広島、2013 年 3 月 29 日

[2] 吉田靖雄 (招待講演)
「スピン偏極走査トンネル顕微鏡による単一原子のスピンと磁気相互作用の観測と制御」
日本物理学会第 68 回年次大会
若手奨励賞受賞講演、
広島大学、広島、2013 年 3 月 27 日

[3] A. Fleurence, C.-C.Lee, T. Ozaki, Y. Yamada-Takamura, Y. Yoshida, Y. Hasegawa
“Electronic properties of epitaxial silicene: a LT-STM/STS study”
American Physical Society March Meeting
Baltimore, Maryland, USA, 2013 年 3 月 20 日

[4] Yasuo Yoshida (招待講演)
“Spin-dependent friction observed on the atomic scale by using atomic manipulation and scanning tunneling microscopy”
1st ASRC International Workshop on SPIN MECHANICS
東海、茨城、2013 年 2 月 26 日

[5] A. Fleurence, Y. Yoshida, C.-C.Lee, T. Ozaki, Y. Hasegawa, Y. Yamada-Takamura
“LT-STM/STS Investigation of the Electronic Properties of Epitaxial Silicene”
40th Conference on the Physics & Chemistry of Surfaces & Interfaces
Waikolowa, Hawaii, USA, 2013 年 1 月 20 日

[6] K. Doi, Y. Yoshida, Y. Hasegawa
“Spin-polarized scanning tunneling microscopy of Co thin films on Ag(111)”
The Symposium on Surface and Nano Science 2013, 蔵王、山形、2013 年 1 月 17 日

[7] R. Wiesendanger, B. Wolter, A. Kubetzka, K. Von Bergmann, Y. Yoshida, S. -W. Hla
“Spin friction observed on the atomic scale”
AVS 59th International Symposium & Exhibition
Tampa, Florida, USA, 2012 年 11 月 1 日

[8] 土居啓司, 横須賀拓也, 坂本崇樹
吉田靖雄, 長谷川幸雄
「スピン偏極走査トンネル顕微鏡による
Ag(111) 表面上のコバルト薄膜の観察」
日本物理学会 2012 年秋季大会、
横浜国立大学、神奈川、2012 年 9 月 20 日

[9] 横須賀拓也, Hung-Hsiang Yan,
Hsu-Sheng Huang, Syu-You Guan,
Germar Hoffmann, 吉田靖雄, 長谷川幸雄
「Ag(111) 上に成長させた有機分子ピセン薄
膜の低温 STM 観察」
日本物理学会 2012 年秋季大会
横浜国立大学、神奈川
2012 年 9 月 19 日

[10] 稲垣祐次, 佐藤由昌, 河江達也, 吉田靖雄
酒井尚子, 後藤喬雄, Bohdan Andracka,
Yasumasa Takano, 藤井裕, Beatrice Grenier
「D-F₅PNN の極低温磁化測定」
日本物理学会 2012 年秋季大会
横浜国立大学、神奈川
2012 年 9 月 18 日

[11] Y. Hasegawa, T. Sakamoto, T. Tominaga,
T. Eguchi, T. Nishio, Y. Yoshida
“Unique Voltex states on nanosize supercondu
cting islands observed by LT-STM”
International Conference on Nanoscience +
Technology
Paris, France, 2012 年 7 月 27 日

[12] Boris Wolter, Yasuo Yoshida, Saw Hla,
Andre Kubetzka, Kirsten von Bergmann, Roland
Wiesendanger
“Spin friction observed on the atomic scale”
International Conference on Nanoscience +
Technology
Paris, France, 2012 年 7 月 26 日

[13] K. v. Bergmann, M. Menzel, D. Serrate,
Y. Yoshida, S. Schroeder, P. Ferriani,
A. Kubetzka, R. Wiesendanger, S. Heinze
“Tunneling anisotropic magnetoresistance on the
atomic scale”
International Conference on Nanoscience +
Technology
Paris, France, 2012 年 7 月 26 日

[14] Yasuo Yoshida, Silike Schroeder, Paolo
Ferriani, David, Serrate, Andre Kubetzka,
Kirsten von Bergman, Stefan Heinze, Roland
Wiesendanger
“Conical spin-spiral state in an ultra-thin film

driven by
higher-order spin interactions”
International Conference on Nanoscience +
Technology, Paris, 2012 年 7 月 24 日,

[15] 吉田靖雄 (依頼講演)
「極低温走査トンネル顕微鏡で見るナノス
ケール物性」
第 7 回学術融合ビジュアルライゼーションシン
ポジウム 東京大学柏図書館、
2012 年 7 月 19 日

[16] Yasuo Yoshida, Silike Schroeder, Paolo
Ferriani, David, Serrate, Andre Kubetzka,
Kirsten von Bergman, Stefan Heinze,
Roland Wiesendanger
“Conical spin-spiral state in an ultra-thin
film driven by higher-order spin interactions”
International Conference on Magnetism,
Busan, South Korea, 2012 年 7 月 12 日

[17] Kirsten von Bergmann, M. Menzel, D.
Serrate, Y. Yoshida, S. Schroeder, P. Ferriani,
A. Kubetzka, R. Wiesendanger, S. Heinze
“Tunneling anisotropic magnetoresistance on the
atomic scale”
DPG meeting, Berlin, Germany,
2012 年 3 月 27 日

[18] Y. Yoshida, S. Schröder, P. Ferriani,
D. Serrate, A. Kubetzka, K. von Bergmann,
S. Heinze, R. Wiesendanger
“Conical spin-spiral ground state of a Mn double
layer on W(110) driven by higher-order exchange
interactions”
日本物理学会第 67 回年次大会、
関西学院大学、兵庫、2012 年 3 月 27 日

[19] B. Wolter, Y. Yoshida, A. Kubetzka, K. von
Bergmann, S. H. Wla, R. Wiesendanger
“Spin friction observed on the atomic scale”
DPG meeting
Berlin, Germany, 2012 年 3 月 26 日

[20] 坂本崇樹, 富永貴亮, 西尾隆宏,
江口豊明, 吉田靖雄, 長谷川幸雄
「走査トンネル顕微鏡によるナノサイズ超伝
導体上の量子化磁束観察」
日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、
兵庫、2012 年 3 月 24 日

[21] Yasuo Yoshida, Silke Schroeder, Paolo
Ferriani, David Serrate, Kirsten Von Bergmann,

Andre Kubetzka, Stefan Heinze, Roland Wiesendanger
“Conical spin-spiral ground state of a Mn double layer on W(110) driven by higher-order exchange interactions”
APS March meeting
Boston, USA, 2012年3月1日

[22] T. Sakamoto, T. Tominaga, T. Nishio T. An T. Eguchi, Y. Yoshida Y. Hasegawa
“Unique vortex states on nanosize superconducting islands observed by LT-STM”
American Physical Society March Meeting,
Boston, USA, 2012年2月28日

[23] Y. Yoshida, D. Serrate P. Ferriani, A. Kubetzka, S.-W. Hla, M. Menzel, K. von Bergmann, S. Heinze, R. Wiesendanger
“Detection and manipulation of atomic spins on a two-dimensional non-collinear magnetic template”
19th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 洞爺湖、2011年12月20日

[24] 坂本崇樹, 富永貴亮, 西尾隆宏, 江口豊明, 吉田靖雄, 長谷川幸雄
「走査トンネル顕微鏡によるナノサイズ超伝導体上の量子化磁束観察」
第31回 表面科学 学術講演会、
東京 船堀、2011年12月16日

[25] Silke Schoroeder, Yasuo Yoshida, Paolo Ferriani, David Serrate, Kirsten Von Bergmann, Andre Kubetzka, Stefan Heinze, Roland Wiesendanger
“Conical spin-spiral state in an ultra-thin film driven by higher-order spin interactions.”
56th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scittdale, USA,
2011年11月2日

[26] D. Serrate, P. Ferriani, Y. Yoshida, A. Kubetzka, K. von Bergmann, S. Heinze, R. Wiesendanger
“Spin, orbital and energy resolved Co atomic state”
WE-Heraeus seminar
Bad Honnef, Germany, 2011年10月31日

[27] Silke Schoroeder, Yasuo Yoshida, Paolo Ferriani, David Serrate, Kirsten Von Bergmann, Andre Kubetzka, Stefan Heinze, Roland Wiesendanger
“Conical spin-spiral state in an ultra-thin

film driven by higher-order spin interactions.”
28th European conference on surface science
Wroclaw, Poland, 2011年8月30日

[28] Y. Yoshida (招待講演)
“Detection and manipulation of atomic spins on a two-dimensional magnetic template”
CMOS emerging technology workshop,
Whistler, Canada 2011年6月17日

[その他]
[1] 日本物理学会第7回若手奨励賞 (領域9)
「スピン偏極走査トンネル顕微鏡による単一原子のスピンと磁気相互作用の観測と制御」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 靖雄 (YOSHIDA YASUO)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号：10589790

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし