# 低温STMによる1次元量子ナノ構造磁性体の構築と局所磁性観察

東京大学物性研究所

吉田靖雄

1. 背景と目的・目標

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・分子間の磁気的相互作用が1次元鎖内あるいは2次元面内で極端に強いため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を可能にするので、これらを構築したナノスケールの量子スピン系に適応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。本研究では、走査トンネル顕微鏡（STM）によるマニピュレーション技術を用いて、S=1を持つ酸素分子を構成要素とした1次元量子ナノ構造磁性体をAg(111)表面上にボトムアップ構築し、スピン偏極STMによる磁化測定と非弾性トンネル分光を行い、その基底状態および励起状態のエネルギー構造を調査することを最終目標にして研究が進められた。

この目標を達成するために、我々が最初に取り組んだのは、マニピュレーション技術とスピン偏極STM法の確立であった。どちらとも低ノイズ・高安定度のSTMを要する難易度の高い技術である。特に、スピン偏極STMは現在世界でも非常に限られた研究グループでのみ可能な技術である。

2. 結果と考察（マニピュレーションとスピン偏極STMの確立）

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。それらの原子の正確な制御をナノスケールで行うために、設計した通りの文字を表面上に描くことを目指し、図1に示すようにそのことに成功した。現在、マニピュレーションは安定に行えるようになっており、酸素分子によるナノ構造体の構築を行う基礎技術が確立されたと言える。

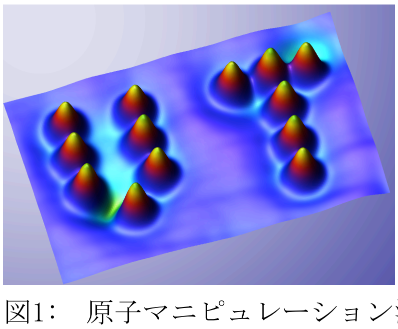
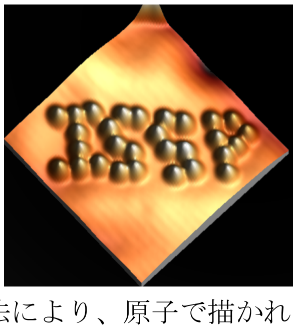

図1: 原子マニピュレーション法により、原子で描かれた東京大学の頭文字“UT”と物性研究所の頭文字“ISSP”。Ag(111)表面上のAg単原子を利用。

次にスピン偏極STMに関しては、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

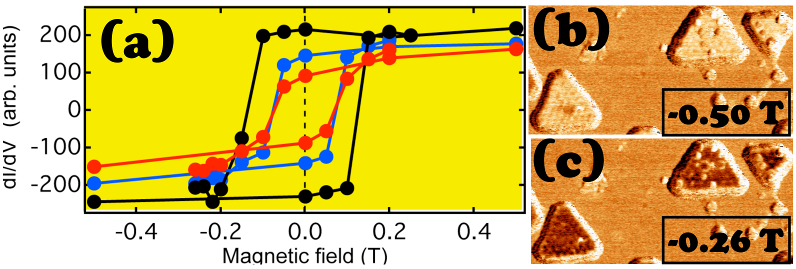


図2:Ag(111)面上のCoの三角形アイランドのスピン偏極STM像(b, c)とそこから見積もられた各アイランドのヒステリシス曲線(a)。

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で確立を目指した。このサンプルのスピン偏極STMを行うことは、技術の確立に加えて、後に酸素分子のスピン偏極STMを行うための参照試料を得るという目的においても重要であった。なお、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W探針とCrの板をワイヤー状に切り出して製作したCrのbulk探針を用いた。その結果を図2に示す。図2(b,c)に示すように、Ag(111)表面上に蒸着されたCo原子はAg(111)表面の三回対称性を反映して、三角形のアイランドを形成している。このアイランドのスピン偏極コントラスト（微分伝導度:dI/dVシグナル）は、外部磁場の大きさによって変化することが確認された。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表れであり、スピン偏極STMが成功していることを示している。さらに、スピン偏極STM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、スピン偏極STMの確立とともに、Ag(111)表面上に酸素分子を吸着させた際の参照サンプルを得たと言える。

3. <u>結果と考察（酸素分子の表面吸着）</u>

本題である酸素分子の磁性を調べる前段階として、これまで低温における低速電子線回折（LEED）で報告されている酸素分子の表面吸着構造を調べ、その磁性を明らかにするために酸素分子の低温吸着（T～20K）と低温STM観察を現在行っている。その結果の一部を図3に示す。低温20　K程度でAg(111)表面を酸素雰囲気中に曝露することで、図3(a)に示すようなライン状の構造が観察された。この構造は、低温LEEDで報告されている構造とは異なっており、構造解析および電子状態の解析を進めている。また、分子吸着時の試料の温度を詳細に変化させることで、構造がどのように変化するかを調べている。

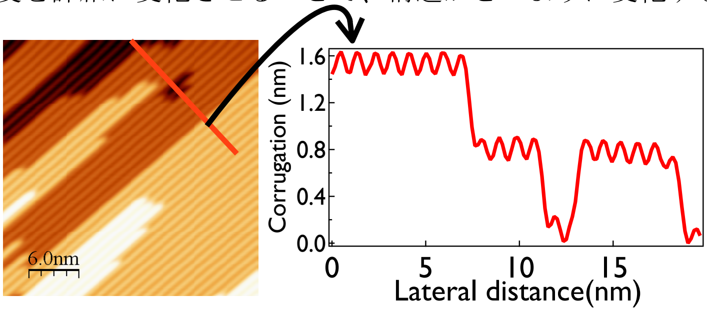


図3:酸素分子を吸着させたAg(111)表面のSTM像(a)とその像の赤線部における断面の構造（b）

4. <u>まとめと課題</u>

今回、表面吸着酸素分子の磁性と酸素分子を用いた1次元量子ナノ構造磁性体の局所的な磁性を調べるために、原子マニピュレーションの確立、スピン偏極STM法の確立、そして酸素分子の低温における表面吸着を行った。その結果、マニピュレーションとスピン偏極STMに関しては非常に良い成果を得ることができた。また、酸素分子の吸着に関しては、未だ未解決な部分があるが今後に繋がる結果が得られていると考えている。今後、分子吸着が確立した後には、本研究において確立したマニピュレーションとスピン偏極STMを用いて酸素分子の1次元鎖の構築およびその局所的な磁性の調査を行って行く予定である。本研究の一部は、日本物理学会、日本表面科学会、国際真空会議(IVC19)、Symposium on surface and nano science 2013において報告を行った。