

S T M単原子操作による磁性原子構造の作製と単原子スピンの直接観察

Fabrication of magnetic atomic structure with STM single atomic manipulation and direct observation of spins in single magnetic atoms

学習院大学理学部 山田豊和

Faculty of Science, Gakushuin University Toyokazu YAMADA

派遣期間 2008年4月15日～2009年3月31日

April 15, 2008 – March 31, 2009

研究機関 Physikalisches Institut, Universitaet Karlsruhe, Wolfgang-Gaede Strasse 1,
Geb.30.23, 76131 Karlsruhe, Germany

研究指導者 Prof. Dr. Wulf Wulfhekel

Single *3d* magnetic Co atoms were deposited on a clean surface of Pt(111) single crystals at 4K in ultra-high vacuum. With the use of a W tip of low-temperature (4K) scanning tunneling microscopy (STM), these single atoms were manipulated and dimers and trimers were successfully fabricated. To study the spin structure of such atomic clusters, we performed inelastic tunneling spectroscopy measurements with the same STM setup. Magnon excitation inside the single atoms, dimers, and trimers were observed on the substrate surface of Pt(111). We obtained giant magnetic anisotropy energies of 10.2, 5.5, and 5.0 meV for single atoms, dimers, and trimers, respectively.

We also studied magnetic Fe nanocluster islands deposited on Cu(111). STM measurements showed coexistence of bcc and fcc structures inside one Fe island. Local density of states measurements compared with theory found that the bcc and the fcc areas have ferromagnetic and layerwise antiferromagnetic structures, respectively. When we apply a strong positive (negative) electric field by the STM tip to the Fe islands, the fcc (bcc) region switched to bcc (fcc), indicating a magneto-electric coupling in the *3d*-metal cubic iron. So far such coupling was only found for the insulators and could be used for data storage.

2008年4月より1年間、山田科学振興財団の長期派遣研究助成の支援を受け、ドイツ国カールスルーエ大学 Wulfhekel 教授の研究室において申請課題“S T M単原子操作による磁性原子構造の作製と単原子スピンの直接観察”の研究を行った。

研究室では、P h . D学生4名、ポスドク研究員4名を指導する立場となり、彼らと主に研究を行

ってきた。研究そのものは、幸いにして順調に進んだ。2008年4月より研究をはじめ、予想よりも早く試料の清浄化を済ませることができた。最初に、予定通りCu(111)単結晶上に4Kにて磁性Co単一原子を蒸着した。蒸着器より蒸発したCo原子は、基板試料であるCu(111)に吸着した際に熱エネルギーが高いと試料表面で拡散し、島やクラスターを形成してしまう。これを防ぐために試料を冷やした状態で蒸着を行い、探針を接近させてSTM測定を行った。Cu(111)表面にCo単一原子が約5-10nm間隔で吸着するように蒸着量の最適化を行った。Cuの上のCo原子の電子状態を測定したところ強い近藤共鳴をフェルミ準位に確認した。このピークは非弾性トンネル分光測定に強い影響を及ぼし、微小なエネルギー領域でのスピンのふるまいを探るのみは適さない。そこで、Cu(111)単結晶をPt(111)単結晶に変えることにした。また、光電子分光の実験よりPt上のCoナノクラスターは高い磁気異方性を有することが指摘されていた。Co単一原子のスピンを安定にするには、高い磁気異方性を引き起こす下地を用いる方が望ましい。

Pt(111)に同様にCo単一原子を蒸着し、STM原子マニピュレーションによりダイマーやトリマーを形成した。図1に例を示す。最初この領域には3個のCo単一原子がある(図1(a))。探針を中央の原子に接近させ、下方の原子の方向へ矢印に沿って探針を動かす。探針を試料からやや離してSTM像を観察すると、図1(b)に示すように中央のCo原子が下方の原子に接近したことがわかる。再度、同様にして原子をマニピュレーションする。すると、図1(c)に示すように2つのCo単一原子が結合しダイマーとなった。このようにして、ダイマー、さらにはもうひとつ原子を追加してトリマーを作製した。

これらの単一原子、ダイマー、トリマーの上に探針を移動し、内部でどのような物理現象が起きているかを探るために非弾性トンネル分光を測定した。その結果を図2に示す。全ての場合で、フェルミ準位(0V)の上と下にピークとディップが観察された。単原子は10meVに、ダイマーは8meVに、そしてトリマーは8meVにピークを示した。このことは、トンネル遷移過程において、このピーク(ディップ)エネルギー位置において非弾性トンネル散乱がクラスター内で生じていることを意味する。つまり、このエネルギー位置で励起されている何かがあるのである。可能性としては、プラズモン、フォノン等が考えられるが、これらの励起エネルギーは20meV以上であり、これら以外の励起が起きていると考えられる。Ab-initio計算との比較より、マグノン(スピン波)が形成されていることがわかった。このエネルギー以上でクラスター内のスピン反転が生じ、結果としてマグノンが生成される。ならば、このピークエネルギーより、これらの磁性ナノクラスターの持つ磁気異方性エネルギーが求められるはずである。結果、10.2meV(単原子)、5.5meV(ダイマー)、5.0meV(トリマー)が得られた。

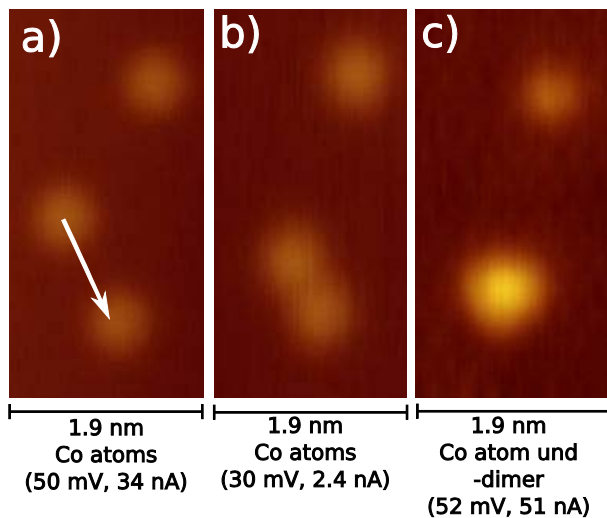


Figure 1: STM images of single Co atoms on Pt(111). The single atom located at the centre in (a) was manipulated along the arrow. After repeating the manipulations (b), a dimer was fabricated (c).

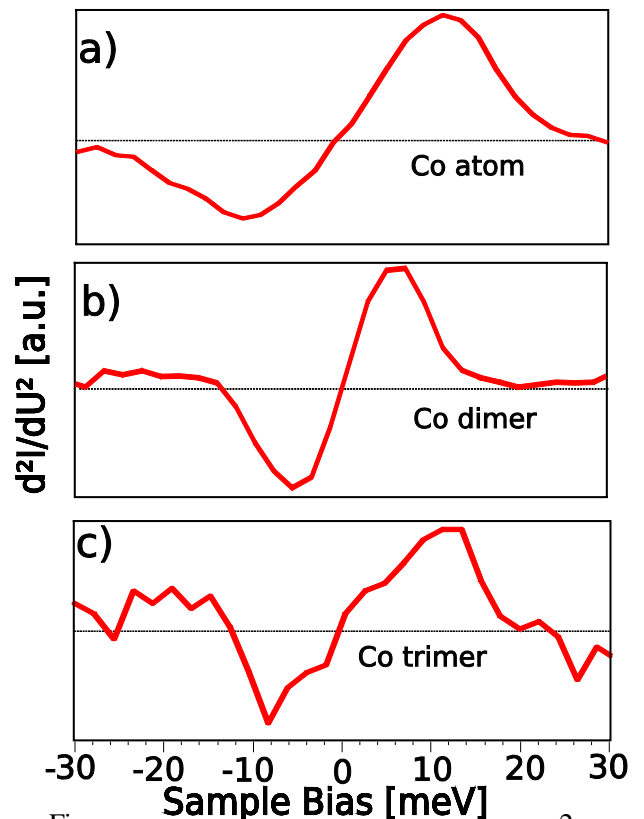


Figure 2: Inelastic tunneling spectra obtained on the single Co atoms (a), dimers (b), and trimers (c).

このようにして、単一原子を用いた測定が順調に進んだため、鉄ナノクラスターのスピン特性を探る実験も行った。鉄を0.2原子層分Cu(111)に蒸着した。すると約2nm径の三角形をした鉄島が作成できた。鉄島は2原子層からなる。1つの鉄島の中には、fccとbccの2つの結晶構造領域が存在している。トンネル分光測定を行い、fccとbccの領域の局所電子状態密度を測定した。Ab-initio計算との比較よりbcc領域では鉄原子が強磁性結合しており、fcc領域では層間で反強磁性結合していることがわかった。研究の中で、ある日、このfcc領域が特定の条件で相転移してbccに変化することを見つけた。解析の結果、探針と鉄島間の電界が、40mV/Å以上の条件でfcc領域がbcc領域に反転することがわかった。強い電界が鉄原子間の距離をわずかに変化させ、それによりスピン状態が反強磁性から強磁性状態にスイッチすることがわかった。さらに印加する電界の極性によりbcc領域をfccに、fcc領域をbccに反転できることが分かった。探針を反転させたい場所に移動し、瞬間的(数ミリ秒)に強い電界をかけることで約1nm²の領域のみを選択的に相転移させることができた。局所電界により1nm²という微小領域のスピン特性を

制御できた。つまり、鉄ナノクラスターは磁気電気結合を有する。これまで磁気電気結合は絶縁体でのみ確認されていたが、今回の研究では、伝導性のある強磁性金属でも同様の効果を見つけることができた。

このようにして、研究を1年間行い、2009年3月31日に一時帰国したが、結局、ドイツ国の教授の勧めもあり、2009年4月1日より学習院大学からカールスルーエ大学に移籍しさらなる研究をすすめている。

2009年5月26日 山田豊和