

## Au(111) 微傾斜表面上の 3d 遷移金属ナノ構造における磁気構造 Magnetic structure of 3d transition metal nanostructures on vicinal Au(111) surfaces

川合真紀<sup>a,b</sup>、白木 将<sup>c</sup>、広瀬正明<sup>b</sup>、Brianto Usman<sup>c</sup>、南任真史<sup>a</sup>

Maki Kawai<sup>a,b</sup>, Susumu Shiraki<sup>c</sup>, Masaaki Hirose<sup>b</sup>, Brianto Usman<sup>b</sup>, Masashi Nantoh<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 理化学研究所、<sup>b</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科、<sup>c</sup> 東京大学工学部

<sup>a</sup>RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research), <sup>b</sup>Department of Advanced Materials Science, School of Frontier Sciences, The University of Tokyo. <sup>c</sup>Department of Applied Chemistry, School of Engineering, The University of Tokyo.

微傾斜表面に金属原子を極微量蒸着し、金属原子のナノワイヤーのサイズや形を精度良くコントロールできる。本研究では、Au(788)微傾斜表面上にFeとNiの2次元単原子層を構築し、その磁気構造をX線吸収分光ならびに磁気円二色性を用いて調べた。Feの単原子層(1 ML)では、強磁性-常磁性転移温度の低下、表面垂直方向の磁気異方性が観測された。またその磁気異方性はFeと表面Auとの強い相互作用が要因であると考えられる。一方、Niの単原子層は、低温(T=25 K)、強磁場下で磁化していることがMCDスペクトルから明らかになったが、その角度依存性を調べると表面面内方向、さらにはステップに平行な方向が磁化容易化軸であることが分かった。

We fabricated low-dimensional nanostructures of 3d transition metals on vicinal Au(111) surfaces, and examined their magnetic structures using x-ray absorption spectroscopy (XAS) and magnetic circular dichroism (MCD). In the case of Fe monolayer, transition temperature from ferromagnetism to paramagnetism is lower than that of bulk system. Angular dependence of MCD spectra and magnetization curves reveal the anisotropic feature of localized magnetic moment, which is due to the hybridization between orbitals of Fe and underlying Au substrate. In the case of the Ni monolayer, absorption spectra at the Ni  $L_{2,3}$  edges showed significant MCD signals under the external field of  $H=1.9$  T and at  $T=25$  K. Angular dependence of Ni- $L_3$  peak in MCD spectra showed minimum value in intensity in the surface normal direction, indicating that the surface normal is the hard direction for magnetization, and its easy direction is in-plane direction parallel to the steps.

ステップが規則的に並んだ微傾斜表面に極量の金属原子を蒸着すると、金属原子はステップにトラップされて1次元原子鎖を形成する。金属の蒸着量や蒸着レート、基板表面の傾斜角度(ステップ間隔)等の条件を変えることにより、低次元ナノ構造体の形やサイズ、周期性などを精密にコントロールすることができる。このようにして構築されたナノ

構造体では、その物理的性質がバルクとは大きく異なってくる。表面科学の分野では、自己組織化により構築された周期ナノドット等に関する研究が古くから行われている。本研究では、固体表面に規則的に配列する1次元の金属ナノワイヤあるいは2次元ナノシートを人口的に作り出し、その表面ナノ構造体の磁気特性を明らかにする。特に3d遷移金属に対し敏感な軟X線磁気円二色性（軟X線MCD）を利用し、表面における遷移金属ナノ構造体の磁気特性を明らかにする。

低次元金属ナノ構造を構築する方法として、Fig. 1のようにステップが平行かつ規則的に存在するようなステップ基板（単結晶の低指数面をミスカットした微傾斜表面）を用意し、単原子層以下の極微量金属を表面に蒸着する。これは表面に存在するステップの多くが吸着原子や分子に対しポテンシャルミニマムを与えるという事実から、蒸着された金属原子が表面を拡散後、ステップに沿って吸着し1次元金属ワイヤを形成するというシナリオに基づいている。さらに蒸着量を増していくと、2次元薄膜、3次元バルクへと構造体を変化させるため、次元性と磁気特性との関連性、そのクロスオーバーを調べることができる。

Au(111)微傾斜表面にFe、Ni、Mnなどの3d遷移金属を微量蒸着するとステップを修飾して1次元ワイヤを構築する様子が走査トンネル顕微鏡（STM）で観察される。Feや

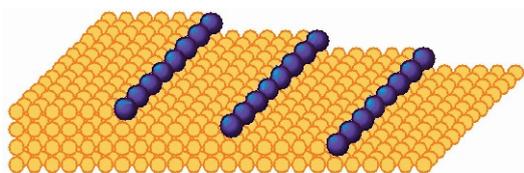


Fig. 1 Organization of periodically arranged nanowires along steps

Niでは下地Auの原子配列と同じfcc構造で1次元ナノ構造を形成するのに対し、Mnでは $2 \times 1$ や $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ などの様々な超構造形成しながら成長する。Coが周期ドット構造を形成したり、Gdが合金表面を形成するのは対照的である。

Feの1モノレイヤーでは、低温（24 K）、強磁場（1.9 T）のもとで、明確なMCDピークが観測される（Fig. 2）。MCD強度の角度依存性を調べると、その差はわずかであり、磁場印加の下でほとんどのモーメントが磁場方向にそろっていくことが分かる。Fig. 3に磁化曲線の角度依存性を示す。表面垂直方向ではバルク強磁性と同様の長方形タイプのヒステリシスが観測された。一方、試料を55度傾斜させると、ヒステリシスループは変形し、残留磁化の減少と保持力の増大が観測された。この結

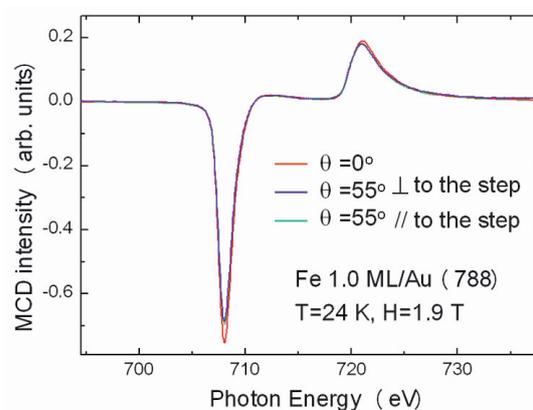


Fig. 2 MCD spectra for Fe monolayers

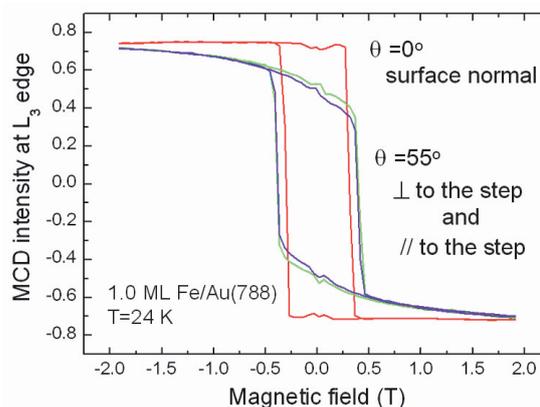


Fig. 3 Angular dependence of magnetization curves

果から、Fe ではモーメントが非常に大きく、高磁場下ではその方向にかかわらず大きな MCD シグナルが得られる。一方、低磁場条件下では、磁気異方性によってモーメントが表面垂直方向を向くこと、マルチドメインを形成していると考えられる。

Ni を 1 モノレイヤー蒸着し、MCD スペクトルを測定すると、 $T=25\text{ K}$  の低温、 $H=1.9\text{ T}$  の強磁場下では、明確な MCD ピークが観測された (Fig. 4)。X 線の表面への入射角度とともに印加磁場の方向を変化させ測定したところ、スペクトルに明らかな差が認められた。その Ni の L3 ピーク強度の角度依存性を調べたところ、表面垂直方向で極小となり、

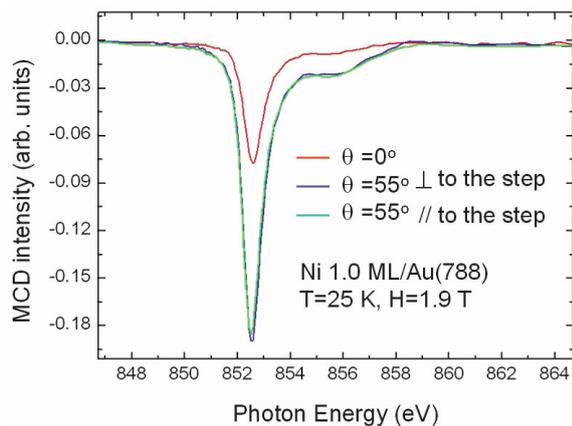


Fig. 4 MCD spectra for Ni monolayers

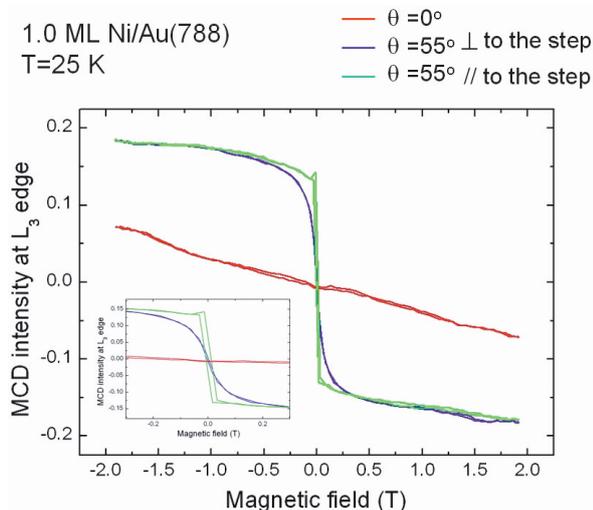


Fig. 5 Magnetization curve for Ni monolayers

表面面内方向に磁化容易化軸があることが分かった。また、磁化曲線を測定したところ、面内方向と表面垂直方向とで磁化曲線に大きな変化が見られた (Fig. 5)。すなわち、表面垂直方向では、常磁性的な磁化曲線となり、面内方向では、超常磁性的な磁化曲線となった。さらにステップに平行な方向でのみ Fe の場合と同様なヒステリシスが小さいながら観測された。以上のことから、Ni 単原子層では、強磁性的なカップリングにより短距離空間では磁気モーメントが揃うが、その大きさは小さく、強磁場下 ( $T=1.9\text{ T}$ ) でも飽和磁化とならない。また面内方向の磁気異方性はあるが、そのエネルギーは小さいため磁場ゼロのもとでブロック温度以上では残留磁化もゼロとなってしまう。磁化容易化軸は面内であつステップに平行な方向であることから、ステップとの弱い相互作用あるいは形状効果による小さな磁気異方性が生じていることが示唆される。一方、Fe の磁気異方性は表面との強い相互作用によるものと推測される。

## 参考文献

- [1] H. Fujisawa et al., J. Electron Relat. Phenom. **144-147** (2005) 519.
- [2] 日経ナノビジネス、“リサーチフラッシュ”, vol. 44, (2006) p.26.

## 発表状況

- (1) H. Fujisawa et al., Phys. Rev. Lett. submitted.
- (2) 白木将, SPring-8 利用者懇談会, 情報・磁性デバイス研究分野合同研究会, SPring-8, 2006 年 10 月.
- (3) 南任真史 他, 日本物理学会 2007 年春季,

鹿児島（口頭発表、予定）.

(4) 白木將 他, 日本物理学会 2007 年春季、  
鹿児島（ポスター発表、予定）.

(5) S. Shiraki et al., Asian Pacific Conference on  
Surface Science & Engineering 2006、香港（ポ  
スター発表）.