

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^{a,b}、白木 将^c、高山英俊^b、広瀬正明^b

Maki Kawai^{a,b}, Susumu Shiraki^c, Hidetoshi Takayama^b, Masaaki Hirose^b

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

^aRIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research).

^bDepartment of Advanced Materials Science, School of Frontier Sciences, The University of Tokyo.

^cDepartment of Applied Chemistry, School of Engineering, The University of Tokyo.

Au(111) 微傾斜表面上に 3d 遷移金属の低次元ナノ構造を構築し、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。Ni の単原子層 (1 ML) は、低温 ($T=15$ 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垂直な方向が磁化容易化軸であることが分かった。磁場依存性では磁化ヒステリシスは観測されず、磁気モーメントに強磁性的な長距離相互作用が存在しないことが分かった。また、Ni の 1 次元ナノ構造では明確な MCD ピークが観測されず、磁気モーメントが非常に小さいこと、磁気異方性エネルギーが小さいことが示唆された。

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 the Ni monolayer, absorption spectra at the Ni $L_{2,3}$ edges showed significant XMCD signals under the external field of $H=1.9$ T and at $T=15$ K. Angular dependence of Ni- L_3 peak in XMCD 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 perpendicular to the steps. Magnetization curves did not show ferromagnetic hysteresis loops at any direction. We also observed no MCD signal for quasi-1D Ni nanostructures even at $T=8$ K. These results imply very small magnetic moments and small step-induced magnetic anisotropy for the Ni/Au(788) system. For coverages higher than 1 ML, the Ni overlayers are superparamagnetic at very low temperatures.

構造体をバルクから薄膜というように 3 次元 → 2 次元 → 1 次元と低次元化、あるいはナノクラスターのように数ナノメートルまでダウンサイズすると、その構造体の持つ物理的性質は大きく変化する。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工的に作り出し、その表面ナノ構造体

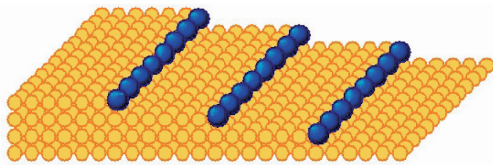


Fig. 1 Organization of periodically arranged nanowires

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 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 2×1 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とは対照的である。

Ni を 1 モノレイヤー蒸着し、MCD スペクト

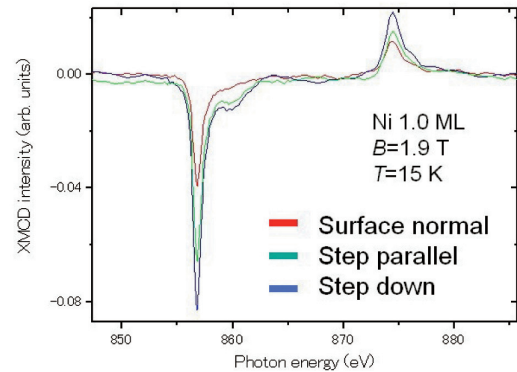


Fig. 2 MCD spectra for Ni monolayers

ルを測定すると、 $T=15$ K の低温、 $H=1.9$ T の強磁場下では、明確な MCD ピークが観測された（Fig. 2）。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、表面

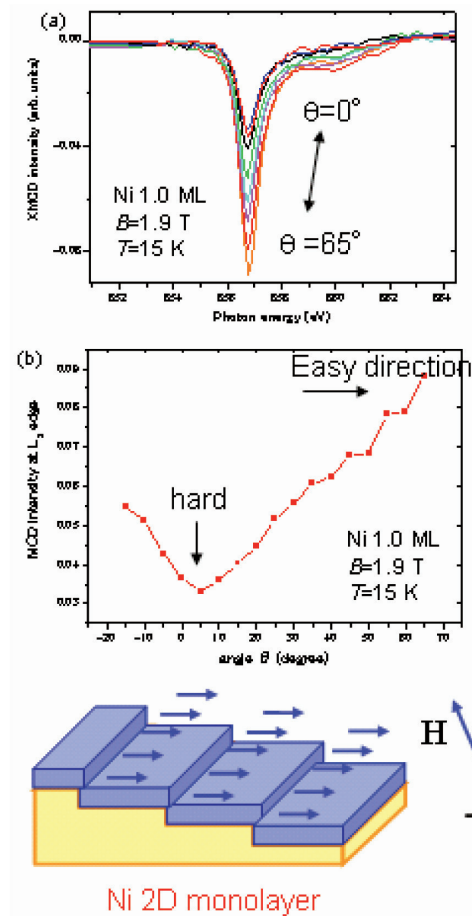


Fig. 3 Angular dependence of MCD spectra

面内方向に磁化容易化軸があることが分かった (Fig. 3)。

このような振る舞いは Fe の場合とは大きく異なる。Fe の場合、強磁場下では大きな MCD シグナルが得られるが、そのピーク強度に角度依存性は見られず飽和磁化となっている。また表面垂直方向において測定した磁化曲線が強磁性的なヒステリシス曲線を示すことから、Fe 単原子層が大きな磁気モーメントと表面垂直方向の大きな磁気異方性を持つことが示唆される。

一方、Ni について磁化曲線を調べたところ、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. 4)。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。またいずれも場合も Fe の場合のようなヒステリシス曲線は示さなかった。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キング温度以上では残留磁化もゼロとなってしまう。さらに磁化容易化軸は面内でかつス

テップに垂直な方向であることから、下地 Au、特にステップとの弱い相互作用により小さな磁気異方性が生じていることが示唆される。

Ni を 0.31 ML (5 原子列相当) 蒸着した 1 次元ナノ構造では、MCD シグナルが得られなかった。Ni の 1 次元ナノ構造では、熱ゆらぎの効果で 1 セグメントに含まれる Ni 原子数が減少し、磁気モーメントと磁気異方性エネルギーが単原子層の場合よりもさらに減少していると考えられる。

参考文献

- [1] H. Fujisawa et al., J. Electron Relat. Phenom. **144-147** (2005) 519.

発表状況

- (1) 高山英俊 他, 日本物理学会 2006 年秋季、千葉 (口頭発表、予定)。
(2) S. Shiraki et al., Asian Pacific Conference on Surface Science & Engineering 2006、香港 (ポスター発表、予定)。
(3) 日経ナノビジネス、"リサーチフラッシュ", vol. 44, (2006)。

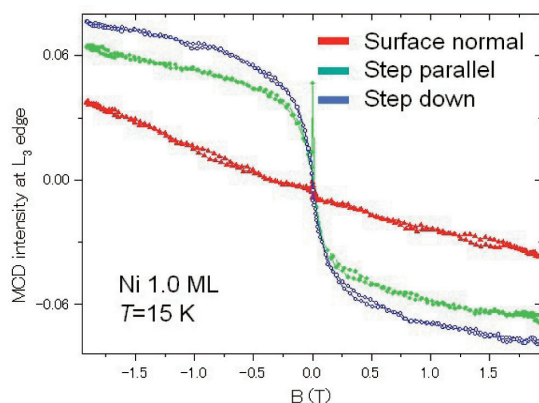


Fig. 4 Magnetization curves for Ni monolayers