

Fe/Cu(001) 表面の原子配列立体写真

服部 梓^a、藤門倫明^a、升永典史^a、郭方准^b、松下智裕^b、松井文彦^{a,c}、大門 寛^{a,c}

奈良先端科学技術大学院大学^a、高輝度光科学研究センター^b、CREST^c

背景： 近年、巨大磁気抵抗効果を利用したハードディスクの磁気ヘッドへの応用や、次世代のナノ密度の記録材料として、ナノ磁性薄膜の研究が盛んに行われている。一般に物質はナノサイズになると、巨視的なサイズにおける性質とは異なる性質を示すようになり、これらの性質を原子レベルで解析することは次世代のナノテクノロジーの鍵を握っている。特にCu(001)上のFe薄膜は、膜厚によって構造と磁性が複雑に変化する興味深い系として知られており、盛んに研究が行われている。しかしながら、ごく薄いナノ薄膜の3次元的な原子配列構造を直接測定する方法はこれまで無く、構造と磁気特性の相関については明らかになっていない。

Cu(001)上のFe薄膜においては、4原子層以下の膜厚においては強い面直磁化を示し、その後10原子層までは上部の2原子層のみが面垂直の強磁性配列で、下部層は反強磁性配列をとる。11原子層以上では面に平行な磁化に変化することが知られている¹⁾。これらのスピン配向転移(SRT: spin-reorientation transition)のメカニズムは pseudomorphic 成長による磁気弾性異方性と形状異方性および表面と界面の異方性(これは面内磁化を誘起する)の兼ね合いから議論されている²⁾。Cu(001)上のFe薄膜の原子配列は、最初に fct (ゆがんだ fcc) 構造、次に fcc 構造、最後に通常の bcc 構造をとると言われており¹⁾、SRT はこれらの構造変化と密接に関連していると思われる。従来、これらの構造変

ごによって研究されていたが、直接3次元配列を見ることはできていない。

最近、光電子角度分布の円2色性という現象を利用して、原子配列の立体写真を直接撮影できる立体原子顕微鏡(図1)が発明された³⁾。円偏光X線を試料に照射し、ある原子から出てくる電子の角度分布を「二次元表示型球面鏡分析器⁴⁻⁷⁾(Display-type spherical mirror analyzer: ダイアナ)」という特殊な分析器で測定する。回転の向きが右回りと左回りの円偏光X線を用いて得られた蛍光板上の像が、それぞれ立体写真の右目用と左目用の像になっており、それぞれの目で見ることによって原子配列構造を立体観察することができる。今回は、この手法でCu(001)上のFe薄膜の原子構造を測定し、SRTと構造との関係を研究することを目的とした。

実験： 実験は世界最大の放射光施設SPring-8のBL25SUに設置されている円偏光アンジュレータと2次元光電子分光システムを用いて行われた。ここでは、数十eVから数千eVまでの強い左右円偏光を取り出すことができる。

この立体写真の測定に用いた装置は、図1に示した「二次元表示型球面鏡分析器」である。この分析器は、試料から放出された光電子のうち、ある一定の運動エネルギーを持ったものの放出角度分布を、歪み無く広い角度範囲にわたって一度に蛍光板上に映し出すことのできるものである。エネルギー分解能はパスエネルギーの0.3%^{6, 7)}である。図からわかるように、試料から出た角度と、蛍光板に入る角度は厳密に平行であるので、試料から出たときの角度分布がそのまま蛍光板上に歪み無く表示される。立体原子顕微鏡としての最適の配置は、図1のように二次元表示型球面鏡分析器にすれすれに円偏光を入射して測定するものである。このとき歪みの無い立体写真が蛍光板上にそのまま得られる。複雑な計算を必要とせず立体写真が直接得られるという利点がある。

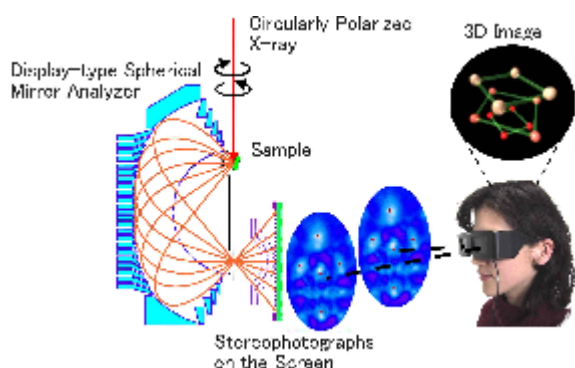


図. 1 立体原子顕微鏡

化はLEED(低速電子回折)、RHEED(反射高速度電子回折)、STM(走査トンネル顕微鏡)な

Cu(001)単結晶は超高真空中でAr⁺イオン衝撃と500°C加熱によって清浄化した。表面の

平滑性と清浄度は RHEED と光電子分光でチェックした。Fe 原子は、アルミナ坩堝を用いて蒸着した。円偏光は表面に 45 度の角度 ([011]方向) で入射した。

結果： 図 2(a),(b)は、この装置を用いて測定した Fe/Cu(001)面からの Fe および Cu の $2p_{3/2}$ 光電子の放出角度分布パターンであり、この一組で立体写真になっている。運動エネルギーは 500eV である。(a),(b)は、回転の向きが反対の円偏光を用いて測定したものである。図 7 (d)に結晶構造を示す。(a),(b)の左右のパターンは、Fe および Cu 原子から出た光電子の放出角度分布を、[001]方向 (図の上の方) から見ていることになる。(a),(b)においては、(c)の第一隣接原子層 (1st) や、第 2 (2nd)、第 3 (3rd) 原子層の構成原子による前方散乱ピークが、図 2 (d)の方向に観測されている。第一隣接原子層の原子の位置は、(a),(b)において左右に少しずれていて、そのずれが視差角になっている。視差角は、第一隣接原子層の原子が大きく、第 2 (2nd)、第 3 (3rd) 原子層のものは小さいので、(a),(b)の図を左右の目でそれぞれ見ることにより、第一隣接原子層の原子が近く、他は遠くにあるような原子の立体配列を認識することができる。

今後の課題： これらの立体写真は、どちらも fcc 構造になっていることを示している。(a)の Fe 薄膜の構造は、純粋な Fe の安定構造である bcc からは大きく異なっており、従来推測されていたことを直接確認できたことを示している。この手法を用いると、従来までの直接的ではない構造評価方法では出来なかった、膜厚に伴うわずかな構造変化が系統的に測定可能である。今後は、XMCD 測定と組み合わせ、より詳細に磁性と構造の膜厚依存性を調べていく予定である。

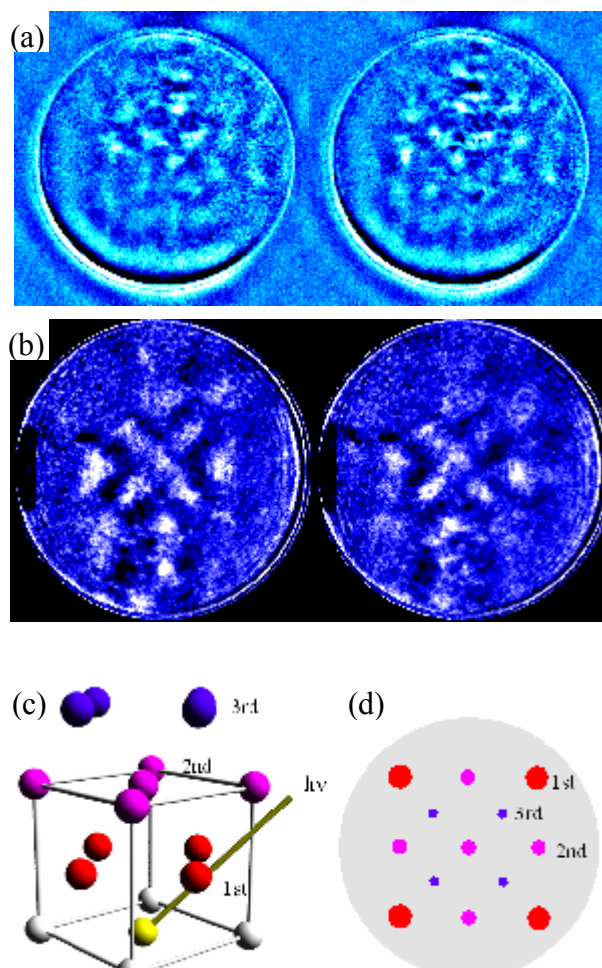


図2 (a) 8 原子層の Fe からの立体写真と (b) Cu 単結晶からの立体写真。運動エネルギーはどちらも 500 eV。左右の像をそれぞれ左右の目で見ることにより、3 次元の原子配列構造(c)をイメージすることができる。

参考文献

- 1) K. Heinz, S. Muller, P. Bayer, *Surf. Sci.*, **352-354**, 942 (1996).
- 2) W. L. O' Brien, T. Droubay, B. P. Tonner, *Phys. Rev. B*, **54**, 9297 (1996).
- 3) H. Daimon, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2034 (2001).
- 4) H. Daimon, *Rev. Sci. Instrum.*, **59**, 545 (1988).
- 5) H. Daimon, and S. Ino, *Rev. Sci. Instrum.*, **61**, 57 (1990).
- 6) M.Kotsugi, et al. *Nucl. Instrum. & Method in Physics Research A*, **467**, 1493 (2001).
- 7) T. Nohno, F. Matsui, Y. Hamada, H. Matsumoto, S. Takeda, K. Hattori and H. Daimon
Jpn. J. Appl. Phys., **42**, 4756 (2003).