

## 二段階集光光学系によるマイクロビームの生成と三次元磁気解析の可能性 Generation of Microbeam with Two-Step Focusing Optics and Possibility of Three-Dimensional Magnetic Analysis

雨宮健太<sup>a</sup>、佐古恵理香<sup>a</sup>、宮脇 淳<sup>b</sup>、阿部 仁<sup>b</sup>

Kenta Amemiya<sup>a</sup>, Erika Sako<sup>a</sup>, Jun Miyawaki<sup>b</sup>, Hitoshi Abe<sup>b</sup>

<sup>a</sup> 高エネルギー加速器研究機構、<sup>b</sup> 東京大学

<sup>a</sup>High Energy Accelerator Research Organization, <sup>b</sup>The University of Tokyo

最近開発した二段階集光 K-B (Kirkpatrick-Baez) 光学系を用いることによって、BL23SU からの軟 X 線を 3-5  $\mu\text{m}$  まで集光することに成功した。この光学系は短い全長で高い縮小率が得られることが特長であり、既存の測定ステーションの間の短いスペースに設置することができた。得られたマイクロビームと深さ分解 XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism) 法を組み合わせることで、三次元的な磁気解析を行うことが可能である。

Soft X rays from BL23SU were focused to 3-5  $\mu\text{m}$  with a two-step K-B (Kirkpatrick-Baez) optics, which has been recently developed. Since the optics has an advantage that a high demagnification factor can be achieved keeping the total length of the optics short, the system was installed in a short space between two existing experimental stations. One can perform a three-dimensional magnetic analysis by combining the obtained microbeam with the depth-resolved XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism) technique.

### 背景と研究目的

近年、磁気記録媒体などへの応用の観点から、磁性薄膜が盛んに研究されている。こうした磁性薄膜において、表面・界面は多かれ少なかれ内部層とは違った磁気的狀態にある。さらに、内部層の中でさえも同様である保障はなく、スピン密度波のように顕著な深さ方向分布を示す場合がある。我々はここ数年、そうした深さ分布を直接 XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism) 法で調べることができる、深さ分解 XMCD 法を開発し、いくつかの磁性薄膜において特異な深さ分布を明らかにしてきた<sup>1,2)</sup>。

例えば、Fe/Ni/Cu(100) 薄膜においては、Ni は通常の一様な強磁性を示すのに対し、Fe が不可解な磁性を示すことが明らかになった。具体的には、Fe の表面層の磁化が Fe 膜厚の関数として振動的な振る舞いを示し、4 ML 以下では Ni と同じ向き、4.5 ML 程度では逆向き、6 ML 程度で一度ゼロになった後に 9 ML 程度では再び Ni と同じ向きとなり、最後に 10 ML 以上でまたゼロになる。一方、簡単な解析から、Fe のうち Ni と接している部分 (界面) の磁化は常に Ni と同じ向きを示し、残った内部層はほぼ磁化がゼロとなることが示唆された<sup>2)</sup>。

こうした特異な振る舞いを説明する磁気構造の候補として、Feの表面層と界面層が内部層を通して振動的に相互作用している描像が考えられる。ただしその場合、表面層のスピンの磁気モーメントの大きさ自体が変化しているのか、それとも面内方向で回転しているために見かけ上振動するよう見えるだけなのか問題となる。しかし、もし回転しているとしても、こうした薄膜はしばしば磁区構造を示し、ある部分では右回り、ある部分では左回りとなるため、面内方向に平均すると結局、見かけ上は単なる振動と同じになってしまう。

そこで本研究では、入射X線をマイクロビーム化することで特定の磁区だけを選択してX線を照射し、さらに、それぞれの磁区において深さ分解XMCD測定を行うことで薄膜の磁気構造に対する三次元的な解析を可能にすることを目的とした。

## 実験

実験はBL23SUに図1に示すようなマイクロビーム光学系を持ち込んで行った。光学系の仮想光源点(S)が通常の光電子分光装置の試料位置に一致するように光学系を設置し、その位置での像を光学系で縮小して最終的な焦点位置(F)でマイクロビームを得た。二段

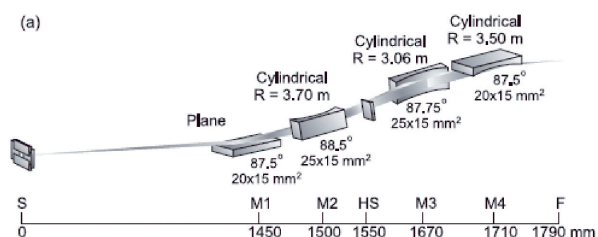


Fig. 1 Schematic diagram of the present two-step K-B microfocusing optics. The virtual source point, S, was set at the sample position of the photoemission station of BL23SU.

階集光方式は水平方向に関してのみ採用しており、まず円筒鏡M2で30:1の縮小率で中間スリット(HS)位置に集光した後、その像をM3によって1:1でFに再集光する。垂直方向の集光は円筒鏡M4のみで行っている(縮小率20:1程度)。なお、通常の光電子分光装置の位置での集光サイズが十分小さいため、Sの位置に図に示すようなスリットは設置していない。

マイクロビームの焦点位置(F)の直下にはイメージング型の電子検出器が設置されている。これはX線吸収に伴って放出される電子を角度分解して取り込むためのもので、試料すれすれ出射の電子は実効的な脱出深度が浅く、直出射になるにつれて深くなることを利用して深さ方向の情報を得るものである。実際には-500V程度の阻止電場を印加することで、非弾性散乱電子の影響を軽減している。

## 結果、および、考察

図2に焦点位置(F)におけるビームサイズを試料のエッジを用いて評価した結果を示す。水平方向の集光(a)に関しては、仮想光源点(S)におけるビームサイズ(100 μm程度)

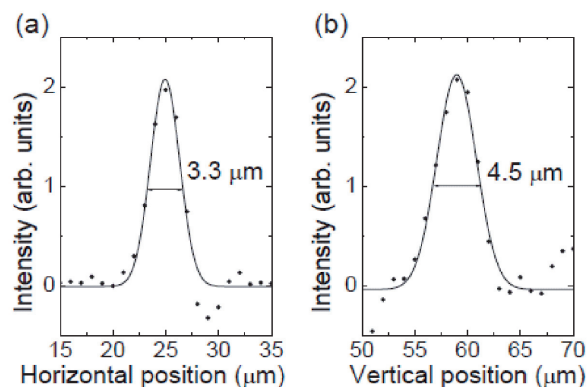


Fig. 2 Horizontal (a) and vertical (b) beam size at the focal position, F, estimated by a sample-edge scan.

と縮小率 (30:1) から予想されるビームサイズと極めてよく一致しており、二段階集光が正しく行われていることがわかる。

一方、垂直方向のビームサイズは予想 (3  $\mu\text{m}$  程度) よりも大きくなってしまったが、これは試料の下側にあった X 線に由来する電子が検出器に入ってしまうために、ビームサイズの測定が正しく行われていないことによると考えられる。なお、残念ながら装置の不具合によってイメージングモードでの電子検出は行えず、試料の問題もあって三次元磁気解析には至っていない。

### 今後の展望

本研究によって、3-5  $\mu\text{m}$  程度のマイクロビームが得られることが確認されたので、これと深さ分解 XMCD 法を組み合わせることにより、面内方向に数  $\mu\text{m}$ 、深さ方向には原子レベルの分解能を持った三次元磁気解析が可能になる。ただし、現時点で明らかになっている問題として、最終ミラーが電子検出器に近いために、ミラーからの光電子が検出器に入ってしまうと必要なシグナルを邪魔してしまうという点が挙げられる。これを解決するために、ミラーを上向きにする、ミラーと検出器の間に板を設置する、ミラーを絶縁して電圧を印加し、電子が飛び出さないようにする、などの対策が必要となる。

### 参考文献

- 1) K. Amemiya et al., Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 936.
- 2) K. Amemiya et al., Phys. Rev. B **70** (2004) 195405.

### 論文発表状況・特許状況

- [1] K. Amemiya, E. O. Sako, J. Miyawaki, H. Abe and

T. Ohta, submitted. to J. Synchrotron Rad.

- [2] 雨宮健太、佐古恵理香、宮脇淳、阿部仁、  
第 20 回日本放射光学会年会・放射光科学  
合同シンポジウム (ポスター発表)

### キーワード

・ XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism)

円偏光 X 線を磁化をもつ試料に照射した時に、その吸収強度が円偏光 (右回りと左回り) もしくは磁化の方向によって異なる現象。内殻軌道の電子を励起するために X 線のエネルギーを選ぶことで元素選択性が得られ、しかも磁気総和則の適用によって、スピンおよび軌道磁気モーメントを定量的に得ることができるという特長がある。