

X線偏光顕微鏡の開発と応用

佐藤公法¹、上工地義徳²、沖津康平²、松下正⁴、雨宮慶幸^{1、2}

¹東大院工、²東大院新領域、³東大工、⁴物構研

1. はじめに

可視光領域において、物質と偏光の相互作用を利用したイメージングの手法は多結晶物質の結晶粒の観察、磁性体の磁区構造の観察などの手段として広く普及している。最近、軟X線領域では、偏光軟X線を用いた光電子顕微鏡（PEEM）による「偏光顕微法」が磁性ミクロ構造の研究において世界的に注目されている。これに対して、硬X線領域での「偏光顕微法」の試みはいまだに行われていない。軟X線領域での「偏光顕微法」が硬X線領域に対して先行している主な理由は、磁性を担う遷移金属の3d軌道や希土類元素の4f軌道への電子遷移を直接観察できるので大きな磁気二色性が得られ、磁性研究に適したエネルギー領域であるからであろう。しかし、歴史的には放射光を用いた磁気円二色性の測定が初めて行われたのは硬X線領域であったという事実を取っても、硬X線も十分に磁性研究のプローブとしての可能性を有している。軟X線と同様に元素選択的な測定が可能であるばかりでなく、高い透過能力を利用して表面でなくバルクの元素の磁性についての情報を得ることができる。

本発表では、X線偏光顕微鏡の開発、および、直線二色性、磁気円二色性、磁気直線二色性に基づく偏光依存の吸収コントラストイメージなどの成果、今後の展望について述べる。

2. 実験

我々はX線領域で用いることができる高分解能CCD型X線検出器を開発した¹⁻³⁾。この検出器をX線偏光スイッチング光学素子と組み合わせて製作したX線偏光コントラストイメージングの実験装置を図1に示す。

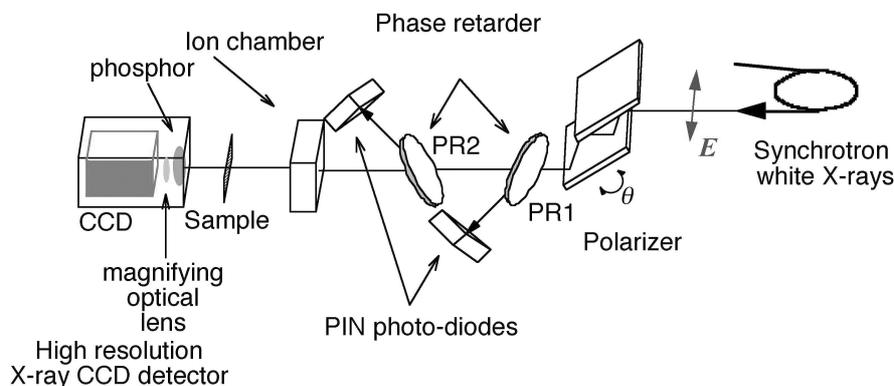


図1 X線偏光コントラストイメージングの実験装置

X線偏光スイッチング光学素子は、4回のブラッグ反射を与えるシリコンチャンネルカットX線偏光子(コバルトK吸収端の場合シリコン422、ニッケルK吸収端の場合シリコン511、鉄K吸収端の場合シリコン331)、2枚のダイヤモンド111透過型X線移相子から成る。透過型X線移相子は、面方位<001>、厚さ約300 μm のダイヤモンド結晶である。移相子は、111反射を与え、散乱面が水平面から45°傾いている。白色の放射光ビームは、X線偏光子により単色化されかつ高い偏光度の水平直線偏光に変換される。このX線ビームは2枚の透過型X線移相子に入射し、そこで水平偏光と垂直偏光、または、左円偏光と右円偏光にスイッチングされる。ここで生成されるX線偏光の水平偏光度は99.99%、垂直偏光度は95%である。また、左右の円偏光度は95%以上と見積もられる。試料を透過したX線像は高分解能CCD型X線検出器で記録される。

3. 結果と考察

開発したX線偏光顕微鏡を用いて、(1) *h.c.p.*コバルト単結晶のコバルトK吸収端近傍でのX線自然直線二色性による偏光コントラスト、(2) *h.c.p.*コバルト多結晶のコバルトK吸収端近傍でのX線磁気円二色性(XMCD)による偏光コントラスト、(3) MP (Metal Particulate)塗布型磁気テープの鉄K吸収端でのX線磁気直線二色性(XMLD)による偏光コントラスト、の観測を行った¹⁻⁷⁾。ここでは、紙面の制約から(3)についてのみ紹介する。

MP塗布型磁気テープの磁性層は、鉄の針状磁性粉、アルミナ、研磨剤、バインダーなどから成り、磁性層厚は3.5 μm である。まず初めに、鉄K吸収端近傍で、X線磁気直線二色性スペクトルの測定を行った。試料は、MP塗布型磁気テープを10枚に重ねて一斉に一様磁化したものである。図2(上)にX線磁気直線二色性スペクトル(実線、波線)と吸収曲線(点線)を示す。得られ

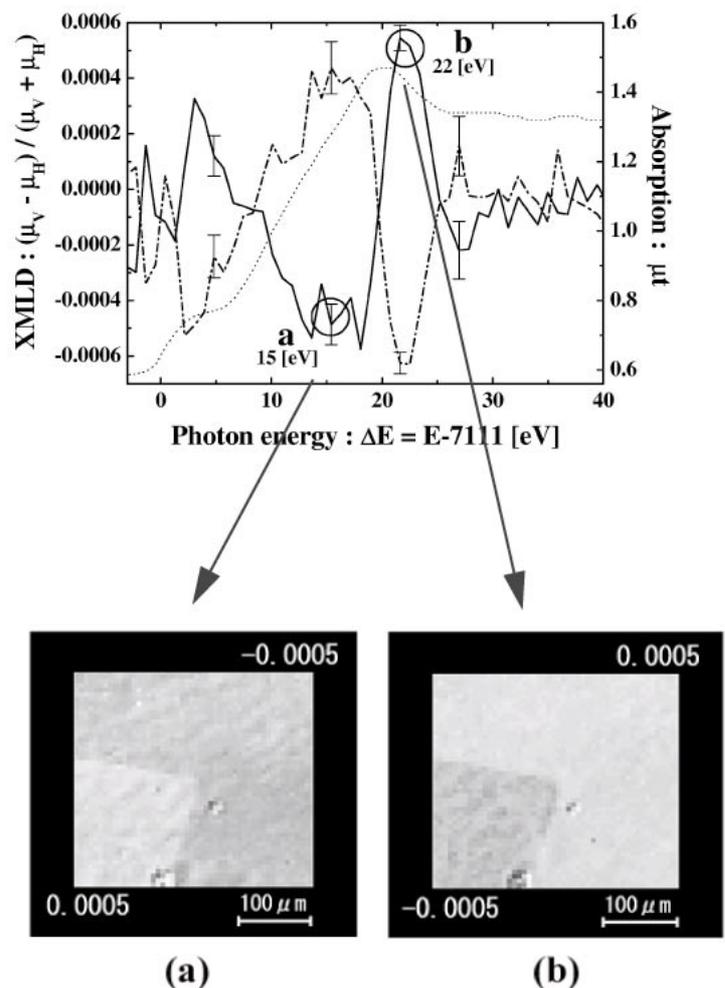


図2 X線磁気直線二色性のスペクトル(上)と偏光コントラスト(下)

た X 線磁気直線二色性スペクトルは、鉄 K 吸収端から 15 eV 高いエネルギーと 22 eV 高いエネルギーで $\pm 0.06\%$ のピークを示した。

イメージングには、MP 塗布型磁気テープを 30 枚に重ねたものに磁化方向がそれぞれ 90° の角度をなす磁区構造をパターンニングしたものをを用いた。この実験では、 90° の磁区構造をイメージングするために、XMLD イメージングを試みた。試料の厚さムラを相殺した後の X 線磁気直線二色性偏光コントラストを図 2 (下) に示す。イメージングは、磁気直線二色性の値が最小 (-0.06%) を示している鉄 K 吸収端から 15 eV 高いエネルギー (a)、X 線磁気直線二色性の符号が反転する値 ($+0.06\%$) を示す鉄 K 吸収端から 22 eV 高いエネルギー (b) で行った。(a) における画像には、明らかにパターンニングした磁区構造のコントラストが見られる。このコントラストは、エネルギーを変化させることによって反転した (b)。

4. まとめと将来の展望

X 線偏光顕微鏡の開発を行い、直線二色性、磁気円二色性、磁気直線二色性に基づく偏光依存の吸収コントラストイメージの測定に成功した。

さらに空間分解能を上げるために、試料の下流に結像ゾンプレートを置き、高分解能 CCD 型 X 線検出器に拡大像を結像させる方法を検討している。この方法では、空間分解能は $0.15 \cdot \mu\text{m}$ に向上することが期待できる。また、硬 X 線の高い透化力を生かしてトモグラフィの手法を取り入れ、三次元空間での磁性構造の研究を行うことにも挑戦したい。

参考文献

- 1) 佐藤公法, 上工地義徳, 沖津康平, 松下正, 雨宮慶幸, 日本放射光学会誌, **13**, 22 (2000).
- 2) 佐藤公法, 上工地義徳, 沖津康平, 雨宮慶幸, 材料科学, **38**, 18 (2001).
- 3) K. Sato, Y. Hasegawa, K. Kondo, K. Miyazaki, T. Matsushita, and Y. Amemiya, Review of Scientific Instruments, **71**, 4449 (2000)
- 4) K. Sato, K. Okitsu, Y. Ueji, T. Matsushita, and Y. Amemiya, J. Synchrotron Rad., **7**, 368 (2000).
- 5) K. Sato, Y. Ueji, K. Okitsu, T. Matsushita, J. Saito, T. Takayama, and Y. Amemiya, J. Magn. Soc. Jpn., **25**, 206 (2001).
- 6) K. Sato, Y. Ueji, K. Okitsu, T. Matsushita, and Y. Amemiya, J. Synchrotron Rad., **8**, 33 (2001).
- 7) K. Sato, Y. Ueji, K. Okitsu, T. Matsushita, J. Saito, T. Takayama and Y. Amemiya, Phys. Rev., **B65**, 134408 (2002).