

# 偏光変調型軟 X 線を用いた複素誘電率の直接測定



久保田雄也\*

東京大学物性研究所  
kubota@spring8.or.jp



赤井久純

東京大学物性研究所  
akai@issp.u-tokyo.ac.jp



平田靖透

東京大学物性研究所  
hirata@issp.u-tokyo.ac.jp



松田 巖

東京大学物性研究所  
imatsuda@issp.u-tokyo.ac.jp

磁性は自然科学で長年注目されてきた研究分野であり、さらにその技術応用は現代社会においてなくてはならないものとなっている。実験研究においては光をプローブとし、磁気光学効果を介して固体の磁性を調べる手法が19世紀より広く用いられている。さらに、多種元素を組み合わせた接合界面や超格子薄膜などがスピントロニクスの研究分野で近年注目を集めている背景を受け、吸収端での元素選択性と共鳴現象を利用した軟 X 線領域の磁気光学効果が、それら埋もれた磁性層を調べる有用な手法として期待されている。しかし、これまで軟 X 線領域で行われてきた研究では、磁気光学効果の一部である磁気円二色性 (magnetic circular dichroism, MCD) にしか着目できておらず、もう一つの磁性パラメータである磁気旋光性も観測できる新しい測定手法と包括的な議論が求められている。

別の磁気光学効果として、可視光領域で発展してきた磁気光学カー効果 (magneto-optical Kerr effect, MOKE) がある。MOKE とは右図にあるように、直線偏光の光を磁性体に照射したとき、反射光が MCD により楕円偏光となり、さらに偏光角が磁気旋光性により変化する現象である。このときの偏光角の変化分をカー回転角といい、楕円偏光の楕円率とともに磁性情報を持つ。これら二つの物理量を測定するため、入射光の偏光を連続的に変調させる光学遅延変調法が利用されてきた。この MOKE において入射光の波長を軟 X 線領域の磁性元素の吸収端に合わせることで、元素選択性を付加できるとともに、共鳴効果により可視光を用いるよりも巨大なカー回転角を観測でき、高精度な測定が可能であることが

最近わかってきた。しかし、これまでの共鳴 MOKE 測定では偏光変調が可能な軟 X 線光源が存在しなかったため、主にカー回転角にのみ注目し、楕円率は比較的測定が困難であった。

以上の背景を受け、両者が測定可能な軟 X 線領域の手法として、分割型クロスアンジュレータの特性を活かした連続型偏光変調軟 X 線磁気分光法の開発を目指し、世界で初めてその実現に至った。分割型クロスアンジュレータに含まれる電磁石移相器へ周波数  $\nu$  の交流電流を加えると、左右の円偏光が  $\nu$  で連続的に切り換わるような偏光変調光源を実現できる。その光源を磁性体に入射すると、楕円率が  $\nu$  成分として、カー回転角が  $2\nu$  成分として得られ、ロックイン手法と組み合わせることでカー回転角と楕円率を同時にかつ精密に測定できる。この光学遅延変調法共鳴 MOKE を Fe ナノ薄膜に対して実施し、高効率なカー回転角と楕円率の同時測定が軟 X 線領域において成功した。さらに、カー回転角と楕円率が同時測定可能ということは物質固有の誘電率テンソルの非対角項を完全に決定でき、物質中の電子構造や光学遷移を考察できる。実際にこの Fe ナノ薄膜に対する MOKE 測定で得られた結果から、磁性情報を持つ誘電率テンソルの非対角項を実部虚部ともに完全に決定でき、第一原理計算による理論値と良い一致を示すことができた。

本研究において、元素選択性、バルク敏感、高感度、誘電率の決定というメリットを持ち、物質評価や理論計算に非常に有用な測定手法の開発に成功したと言える。今後、希薄磁性体や埋もれた磁性体を対象としたさらなる研究展開が期待できる。

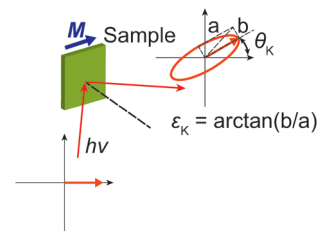
—Keywords—

**磁気光学効果：**

物質中の磁化が光に及ぼす作用。光の偏光に影響する。光の偏光状態は左右の円偏光の重ね合わせと考えられ、磁気的性質がそれらの強度差と位相差を変化させる性質を、それぞれ磁気円二色性と磁気旋光性という。代表的なものにファラデー効果やカー効果がある。

**磁気光学カー効果 (magneto-optical Kerr effect, MOKE)：**

磁気光学効果の一種で、直線偏光の光を磁性体に入射すると、その反射光が磁気円二色性により楕円偏光となり、さらに磁気旋光性により偏光面が回転する現象。楕円率 ( $\epsilon_k$ ) と回転角 ( $\theta_k$ ) から試料の磁性情報が得られる。



**分割型クロスアンジュレータ：**

アンジュレータとは、光速に近い電子ビームを磁石列によって蛇行運動させることで放射光を生成する装置。分割型クロスアンジュレータはその一種で、4台の水平8の字アンジュレータと4台の垂直8の字アンジュレータ、7台の移相器から構成される。SPRING-8 BL07LSU に設置されており、高輝度かつ様々な偏光状態の軟 X 線を作ることができる。

\* 現所属：高輝度光科学研究センター