

薄膜界面の格子ひずみを用いた磁気異方性の能動的制御

Active Control of Interfacial Magnetic Anisotropy by Strain

東京大学 大学院理学系研究科 岡林 潤

磁性薄膜の界面に生じる格子ひずみを外的に操作することで界面の電子状態を変調できれば、可逆的に軌道磁気モーメントと磁気異方性の制御が可能となり、既存の磁気記録デバイスの概念を超えた機能性を付与できることに着目する。磁気異方性の制御は、スピントロニクスの研究分野において、伝導電子のスピン方向を操るための根幹をなすため、必須の技術となる。特に、誘電体と磁性体の積層構造では、誘電体からの力学的な応力により磁性体の界面磁気異方性を変調できる特徴がある。誘電体 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT) への電場印加によって、ピエゾ効果による格子の変調が可能である。また、その上に室温にて強磁性を示すホイスラー合金 Co_2FeSi を堆積した界面マルチフェロイック構造において、界面でのひずみにより面内の磁化容易軸が 90° 変化する[1]。そして、電気-磁気変換係数が最大となることが知られている[2]。しかし、電場（ひずみ）印加による元素選択的な磁化測定やその変調の起源については、明確になっていない。ひずみと磁化の間について、現象論的に磁歪効果もしくは磁気弾性効果として知られているが、電子論的な理解は進んでいないのが現状である。そこで本研究では、軌道磁気モーメント(m_{orb})を評価できる X 線磁気円二色性(XMCD)を応用し、電場（ひずみ）を可逆に印加できる *operando* XMCD システムを立ち上げて、磁気異方性に関与する m_{orb} の変調を元素選択的に捉えることを試み、ひずみと m_{orb} の関係を明確にすることを目的として研究を進めてきた。

厚さ 0.5mm の単結晶 PMN-PT 基板に、分子線エピタキシー法により Co_2FeSi を堆積し、高エネ研 Photo Factory BL-7A (東大理)にて *Operando* XMCD を行った。試料に電極を装着し、部分蛍光収量法を用いた。本助成にて、このシステムの立ち上げを進めることができた。試料表面をグラウンド電位として、裏面に電圧を印加するシステムとした[3]。

$\pm 8 \text{ MV/m}$ の電場印加による PMN-PT の飽和分極状態では、0.1%程度の圧縮ひずみを受け、それにより磁化容易軸が面内にて 90° 変化する。バイポーラ電場印加時の XMCD にて、Fe L 吸収端の XMCD スペクトルの変化を捉え、 m_{orb} の変調を観測した。Fe の L_3 端での XMCD の磁場依存性では、印加電場により磁化容易軸の変調を捉え、 m_{orb} の変化も観測した。変化量 $0.01 \mu_B$ と見積もり、磁気異方性の変化は $2.5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ となる。Fe では電場による m_{orb} の変化がみられる一方、Co では変化しない結果となった。これは、ホイスラー合金の構成元素のうち、局在的な Fe サイトはひずみによる軌道変調を受けるが、完全スピン偏極伝導を担う Co サイトの軌道は変化しないことが元素別の X 線磁気分光にて初めて判ったことになる。また、電場印加時の広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) により元素別の最近接原子間距離の変化を観測した。

これらを踏まえて、可逆なひずみによる m_{orb} の変化を捉えることができ、「軌道弾性効果」を実証できた。X 線回折や磁化測定では判らず、元素選択的な電子分光を可能とする本装置により初めて判る物理現象である。これはマクロな現象論である磁気弾性効果に対して、電子論的な理解を与えることになる。今後、様々な物質系で軌道弾性状態を調べ、普遍的な現象として確立できると考えている[4]。

【参考文献】

- [1] S. Fujii et al., *NPG Asia Mater.* **14**, 43 (2022).
- [2] T. Usami et al., *Appl. Phys. Lett.* **118**, 142402 (2021).
- [3] J. Okabayashi et al., *npj Quantum Materials* **4**, 21 (2019). [link](#)
- [4] J. Okabayashi et al., submitted.