

FeSi における新規トポロジカル表面のスピンの軌道状態の直接観測 Direct observation of spin-orbit coupled state at a novel topological surface of FeSi

金澤直也¹, 堀智洋¹, 山崎裕一², 雨宮健太³

¹ 東京大学 工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

² 物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

³ 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

Naoya KANAZAWA^{1,*}, Tomohiro HORI¹, Yuichi YAMASAKI², Kenta AMEMIYA³

¹Department of Applied Physics, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

²Research and Services Division of Materials Data and Integrated System (MaDIS),
National Institute for Materials Science (NIMS), 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan

³Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

1 はじめに

キラルな結晶構造を持つ B20 型 FeSi は、強相関効果が関連した絶縁体として古くから知られている[1]。第一原理電子状態計算からは単純な非磁性の狭ギャップ絶縁体であると予想されていたが[2]、高温における大きな帯磁率の出現[3]やギャップエネルギーよりも遥かに低い温度での絶縁体-金属クロスオーバー[4]などの多くの非自明な電子・スピン物性が観測されてきた。FeSi における電子状態・スピン状態は完全に解明されておらず、現在でも多角的な観点から研究がなされている。

最近ではトポロジーの観点から FeSi の物性が再検討されており、表面に強磁性金属状態が現れることが発見された[5]。通常トポロジカル絶縁体に代表される物質、すなわち電子状態がトポロジカルな性質を持つ物質においては、内包する重金属元素に特有の強いスピン軌道相互作用の存在が重要である。強いスピン軌道相互作用によりトポロジカル電子状態に必要なバンド反転が生じ、表面にはスピン-運動量ロッキングした金属状態が安定に発現する。このスピン-軌道結合表面は高効率なスピントロニクス機能をもたらしてくれ、次世代省電力エレクトロニクスデバイスへの応用が期待されている。一方で、FeSi は比較的原子番号の小さい軽元素で構成されているにも関わらず、トポロジカル絶縁体のようなスピン軌道物性を示すことも明らかになった[5]。表面は 40 meV 程度の大きなラシュバ型スピン分裂を示し、電流を流すとスピン軌道トルクを通して、自身の面直強磁性磁化の向きを反転することができる。これは貴金属フリーの磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) に応用できる可能性があり、今後の研究の進展が期待される。

FeSi 表面の電子・スピン状態の実験的な観測・評価について、これまでに電気伝導特性評価と偏極中

性子反射率実験が行われてきた。特に偏極中性子反射率実験は、表面のわずか 0.35 nm 厚さにのみ強磁性磁化が存在することを実証しており(図 1)、FeSi のトポロジカルな側面を顕わにしている。しかし一方で、スピントロニクス機能の起源となっているスピン-軌道結合状態については実験的な解明ができていない。これは、中性子回折実験ではスピンモーメントと軌道モーメントをまとめて観測してしまい、それぞれの寄与を分離できないことにある。

そこで X 線磁気円二色性(XMCD)実験によりスピン・軌道モーメントの直接観測を行い、FeSi 薄膜表面におけるスピン-軌道結合状態の物理的起源の解明を目指した。

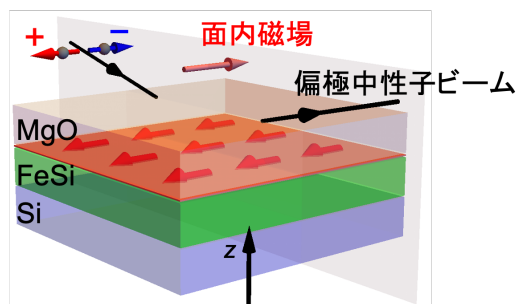


図 1: 偏極中性子反射率実験による FeSi 表面強磁性状態の観測

2 実験

分子線エピタキシー(MBE)法とスパッタリング法により FeSi 薄膜試料を作製した。MBE 法により Si(111)基板上に厚さ 10 nm の FeSi(111)薄膜をエピタキシャル成長させ、表面保護のためスパッタリング法により厚さ 2 nm の MgO を堆積させた。

また BL-16A において XMCD 測定を行った。全電子収量法によるスピン・軌道モーメントの詳細な温度依存性や磁場角度依存性を測定すると共に、蛍光

収量型深さ分解 XMCD (図 2)を用いて表面磁性状態の情報を抽出した。

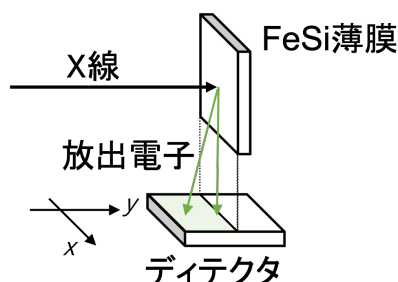


図 2: 蛍光収量法による XMCD スペクトルの深さ依存性測定

3 結果および考察

全電子収量法によって測定した XMCD スペクトルから、有限の軌道モーメントを検出することができた(図3)。特にその大きさは、スピンモーメントに対して 20%近くにのぼり、表面において軌道モーメントが大きく残留していることがわかった。また磁場角度に対してスピン・軌道モーメントはほとんど変化せず、異方性が小さいことがわかった。これにより Fe の *d* 軌道が表面で強くエネルギー縮退していることが示唆された。そして蛍光収量法による測定から、全電子収量法で観測された磁気モーメントは FeSi 表面付近にのみ存在していることがわかってきた。現在、表面付近のスピン・軌道モーメントの分布について定量的な解析を行っている。

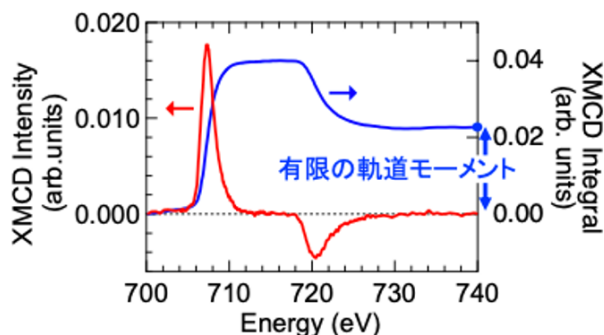


図 3: 全電子収量法によって測定した FeSi 薄膜の XMCD スペクトルの例

4 まとめ

近年観測された FeSi 表面の強磁性金属状態におけるスピン・軌道モーメントを XMCD 測定によって分離することに成功した。特に、軌道モーメントが表面で大きく復活していることがわかり、これまで観測されてきた FeSi の高効率なスピン軌道結合物性の起源の一端を捉えることができた。これは、これまでの中性子回折実験に加えて、相補的に XMCD 測定を組み合わせたマルチプローブ環境を活用できたことによる成果である。今後は蛍光収量法で観測できた XMCD スペクトルの深さ依存性を定量的に解析することにより、スピン軌道状態の起源に迫りたい。

参考文献

- [1] M. Imada, A. Fujimori, and Y. Tokura, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1039 (1998).
- [2] L. F. Mattheiss and D. R. Hamann, *Phys. Rev. B* **47**, 13114–13119 (1993).
- [3] V. Jaccarino *et al.*, *Phys. Rev.* **160**, 476–482 (1967).
- [4] Z. Schlesinger *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1748–1751 (1993).
- [5] Y. Ohtsuka *et al.*, *Sci. Adv.* **7**, eabj0498 (2021).

成果

1. 堀智洋, 金澤直也, 山崎裕一, 平山元昭, 松井彬, 野本拓也, 有田亮太郎, 藤原宏平, 塚崎敦, 市川昌和, 川崎雅司, 有馬孝尚, 雨宮健太, 十倉好紀, FeSi 表面強磁性金属相の X 線磁気円二色性測定によるスピン・軌道状態の観測, 日本物理学会 2021 年秋季大会 21pC2-10 (2021).

* kanazawa@ap.t.u-tokyo.ac.jp