

5-8 トポロジカル絶縁体が磁石になるメカニズムを解明 一次世代の超低消費電力スピンのデバイスへ

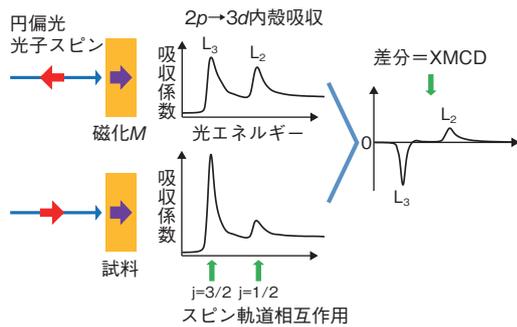


図 5-22 内殻吸収磁気円二色性 (XMCD) の概念図
磁化を揃えた試料に左右円偏光を照射し、スピン軌道分裂した内殻電子による吸収強度差が XMCD です。

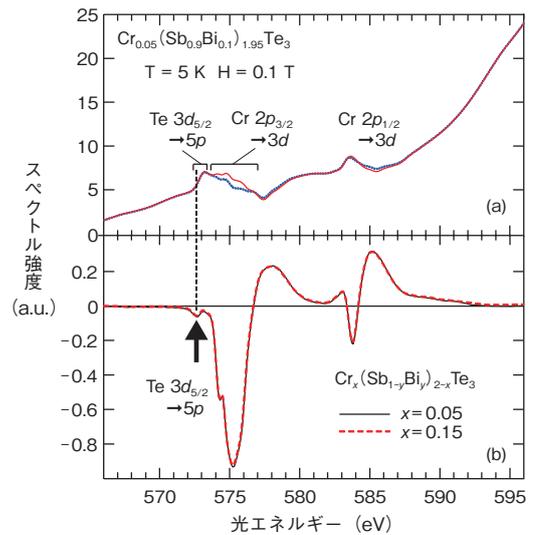
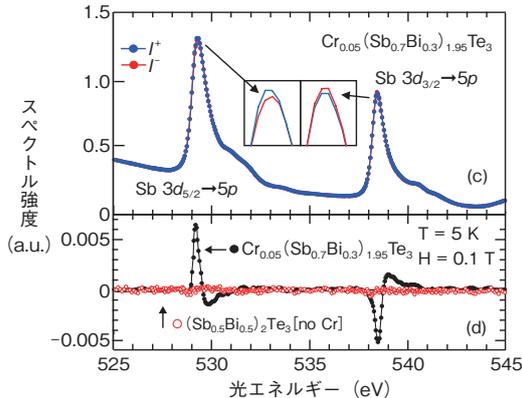


図 5-23 $\text{Cr}_x(\text{Sb}_{1-y}\text{Bi}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ の $\text{Cr } 2p \rightarrow 3d$ と $\text{Te } 3d \rightarrow 5p$ 吸収端での実験スペクトル

(a) XAS, (b) XMCD です。温度は 5 K, 磁場 0.1 T です。

図 5-24 $\text{Cr}_x(\text{Sb}_{1-y}\text{Bi}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ の $\text{Sb } 3d \rightarrow 5p$ 吸収端での実験スペクトル

(c) XAS, (d) XMCD です。温度は 5 K, 磁場 0.1 T です。

近年、トポロジカル絶縁体という電流が流れない絶縁体の表面で金属状態を示す物質が注目されています。ごく最近、この一種 $(\text{Sb}, \text{Bi})_2\text{Te}_3$ に磁性元素クロム (Cr) を微量添加することにより、エネルギー損失なく試料表面に電流が流れる、量子異常ホール効果という新現象が観測され、世界中で研究が行われています。本現象は、Cr 添加による強磁性の発現に関係すると考えられていますが、極低温でしか起こらないため、室温以上の強磁性転移温度 (T_c) を持つトポロジカル絶縁体の開発が切望されています。本研究では、同系の強磁性発現機構を探るべく、大型放射光施設 SPring-8 の BL23SU において、軟 X 線内殻吸収磁気円二色性 (XMCD) 実験を行いました。その結果、Cr だけでなく非磁性原子アンチモン (Sb) やテルル (Te) の極わずかな磁気モーメントを詳細に捉えることにより、強磁性発現機構の解明に成功しました。XMCD とは、左右円偏光に対する X 線吸収 (XAS) 強度の差として定義され (図 5-22)、元素及び電子軌道選択性を有し、その強度は対象元素の持つ磁気モーメントの大きさに比例します。

$\text{Cr}_x(\text{Sb}_{1-y}\text{Bi}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ ($x=0.05, y=0.1, T_c=15 \text{ K}$) の $\text{Cr } 2p \rightarrow 3d$ 内殻吸収スペクトルを図 5-23(a) に示します。測定は、温度 5 K, 外部磁場 0.1 T で行いました。図 5-23(b) は Cr の量が異なる 2 試料の XMCD スペクトルを示しますが、形状は Cr の量に依存せず、基本的には $2p_{3/2} \rightarrow 3d$ 端で負、 $2p_{1/2} \rightarrow 3d$ 端で正となってい

ます。これは、期待通り Cr が強磁性を担っていることを示します。しかし、Cr は微量にしか存在しないため、遠く離れた個々の Cr 磁気モーメント同士を揃える「のり」が何かを調べるのが非常に重要になります。

図 5-23(b) の矢印のとおり Cr 吸収端の低エネルギー側に、微弱ながら $\text{Te } 3d_{5/2} \rightarrow 5p$ 端で負の XMCD シグナルが明瞭に観測されました。この結果から、Te にも磁気モーメントが存在し、Cr のそれに対し反平行に結合していることが明らかとなりました。

図 5-24(c) に $\text{Cr}_{0.05}(\text{Sb}_{0.7}\text{Bi}_{0.3})_{1.95}\text{Te}_3$ の $\text{Sb } 3d \rightarrow 5p$ 内殻吸収スペクトルには微弱な XMCD シグナルが見えます。図 5-24(d) から、 $3d_{5/2} \rightarrow 5p$ 端で正に、 $3d_{3/2} \rightarrow 5p$ 端で負のシグナルとなっています。一方、Cr を含まない試料 $(\text{Sb}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})_2\text{Te}_3$ では XMCD は現れません。この結果は、Sb にも磁気モーメントが現れ、Cr のそれに対し平行に結合していることを示します。

以上のことから、Te や Sb の 5p 電子が、遠く離れた Cr の磁気モーメント間の「のり」の役割を担い、磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Cr}_x(\text{Sb}_{1-y}\text{Bi}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ が磁石になる原因となっていることを初めて明らかにしました。

本研究は、高い強磁性転移温度を持つ異常量子ホール効果の発現に向けた新しい物質設計への指針を与えるとともに、トポロジカル絶縁体を利用した次世代の超低消費電力スピンのデバイスの開発につながっていくものと期待されます。

●参考文献

Ye, M., Saitoh, Y. et al., Carrier-Mediated Ferromagnetism in the Magnetic Topological Insulator Cr-Doped $(\text{Sb}, \text{Bi})_2\text{Te}_3$, Nature Communications, vol.6, 2015, p.8913-1-8913-7.