

課題番号 :2020A-E16  
利用課題名 (日本語) :磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造の XMCD 測定 III  
Program Title (English) :XMCD measurements on magnetic topological heterostructures III  
利用者名(日本語) :福嶋隆司朗<sup>1)</sup>, 角田一樹<sup>2)</sup>, 竹田幸治<sup>2)</sup>, 平原 徹<sup>1)</sup>,  
Username (English) :R. Fukushima<sup>1)</sup>, K. Sumida<sup>2)</sup>, Y. Takeda<sup>2)</sup>, T. Hirahara<sup>1)</sup>  
所属名(日本語) :1) 東京工業大学理学院, 2) 日本原子力研究開発機構  
Affiliation (English) :1) School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2) JAEA  
キーワード: トポロジカル絶縁体、時間反転対称性の破れ、強磁性

## 1. 概要 (Summary)

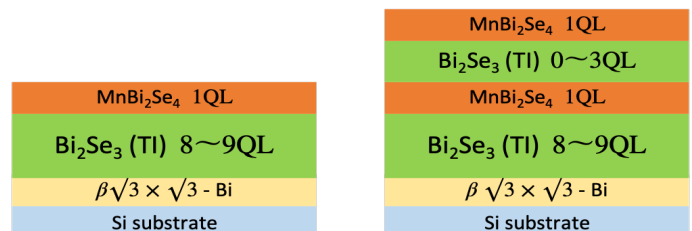
これまで我々は世界に先駆けて開発した磁性トポロジカルヘテロ構造  $\text{MnBi}_2\text{Se}_4/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (MBS/BS) と  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  の磁化特性と表面ディラックコーンのギャップの有無に関して研究を行ってきた。その結果、前者では強磁性と表面のディラックコーンのギャップが明確に観測されたのに対し[1]、後者は 6K まで常磁性でディラックコーンにはギャップは存在しなかった[2]。両者が示す真逆の性質に関して、これまでのところミクロスコピックな起源は明らかになっていない。このようにトポロジカル絶縁体ベースの二次元ファンデルワールス(2D v-dW)磁性体については未解明な点が多い。さらに最近、共同研究者が上記の通常のヘテロ構造と、ヘテロ構造を2つ有するサンドイッチ構造のホール効果測定の結果には大きな違いが存在することが明らかになった[3]。これは磁性原子層間の相互作用が磁化特性を考える上で重要なことを示しているが、その詳細は明らかになっていない。そこで本研究では SPring-8 BL23SU において、MBS/BS、MBS/MBS/BS、MBS/BS1 QL/MBS/BS 試料(1番目は通常のヘテロ構造、2,3番目はサンドイッチ構造)に対して SPring-8 BL23SU において X 線磁気円二色性 (XMCD) 測定を行った。その結果、磁性原子層間の磁氣的相互作用が 2D v-dW 磁性体の磁化状態を安定化させていることが明らかになった。

## 2. 実験(目的,方法) (Experimental)

トポロジカル絶縁体はバルクが絶縁体であるが、表面に金属的なスピン偏極したディラックコーンを有し、時間反転対称性が破れない限りディラック点がトポロジカルに保護されており、ギャップを開けることができない。磁性を導入して時間反転対称性を破ると、ディラック点にギャップが開くと同時に輸送特性で

は無磁場下での量子ホール効果である、量子異常ホール効果(QAHE)が実現する。2014 年に QAHE が初めて実験的に実証されてから多くの研究が行われてきたが、その実現温度は最大でも 2 K である [4]。そこで、QAHE 由来の無散逸に伝導するエッジ状態をデバイスに応用するには、より高温で QAHE を実現することが求められている。

これまでトポロジカル絶縁体に強磁性を付加する方法として薄膜作製時に磁性不純物を導入する、という方法が行われていた。これに対し我々は最近、Mn と Se をトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  に蒸着すると、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の表面最上位層に Mn と Se が潜り込むことで  $\text{MnBi}_2\text{Se}_4/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (MBS/BS)という、秩序だった磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合を形成できることを明らかにした。このヘテロ構造では室温まで約 100 meV という大きなディラックコーンギャップが観測された。さらに SQUID による磁化測定では面直の磁化曲線にヒステリシスが観測され、確かにディラックコーンギャップが磁性由来のものであることが明らかになった [1]。本研究ではこれをベースに、通常の MBS/BS ヘテロ構造(図 1(a))、及び MBS/MBS/BS、MBS/BS1 QL/MBS/BS サンドイッチ構造の試料(図 1 (b))を作製した。実験室で試料を作製後に表面保護のためにキャップしたものを



BL23SU の超高真空装置に導入後、200-250 度で加熱し図 1(a)磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造 MBS/BS および(b)磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造 MBS/BS ( $n$  QL)/MBS/BS の模式図。本研究では  $n = 0$  と 1 である。

てキャップを飛ばすことで清浄表面を回復してから測

定を行った。液体ヘリウムにより最低 6 K まで試料を冷却した。

### 3. 結果と考察 (Results and Discussion)

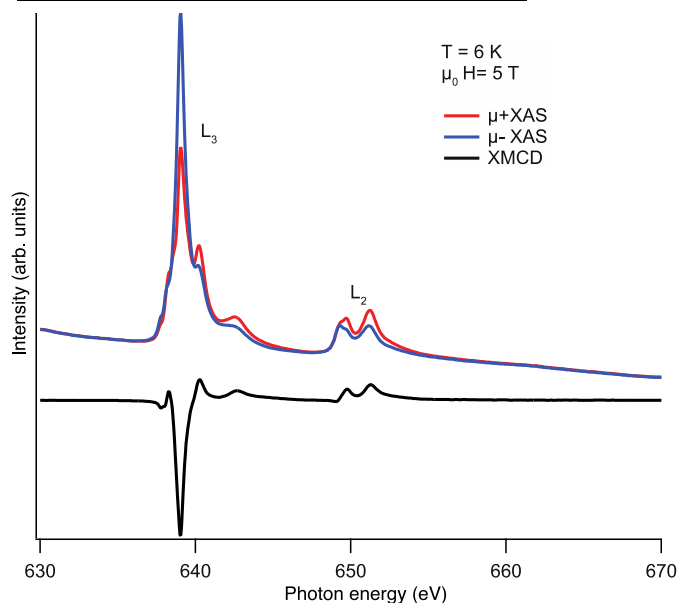


図 2 MBS/BS の 6 K、5 T における XMCD スペクトル。

図 2 は 6 K で MBS/BS の試料に 5 T の面直磁場を印加した際に測定された XMCD スペクトルである。明確な XMCD シグナルが  $L_3$ 、 $L_2$  吸収端ともに観測されていることが分かる。

次に光エネルギーを  $L_3$  吸収端ピークに固定して、印加磁場を掃引して XMCD 強度を測定することで導出された各温度での MH カーブを図 3 に示す。最低温の 6 K ではゼロ磁場近傍で折れ曲がりが見られ、強磁性成分が存在していることが分かる。昇温するにつれて折れ曲がり越来越少くなり、20 K では  $\pm 3$  T の範囲内で直線になり、これは常磁性へと変化したことを示している。よって MBS/BS ではキュリー温度が 15-20 K の間と見積もられた。同様の MH カーブは MBS/MBS/BS 試料(図 4)、MBS/BS1 QL/MBS/BS 試料(図 5)でも得られ、それぞれキュリー温度は直線へのずれの評価から 35 K 以上、20-25 K と見積もられた。

最後に 6 K での MH カーブを試料別に比較したものを図 6 に示す。高磁場と低磁場での直線の折れ曲がりが一番大きいのが MBS/MBS/BS サンドイッチ構造

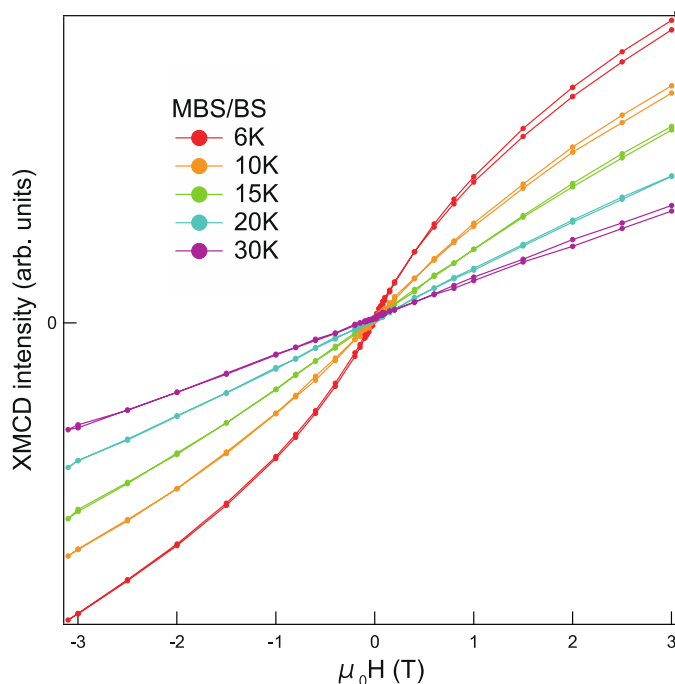


図 3 各温度における、MBS/BS の  $L_3$  吸収端における XMCD 強度の磁場依存性(MH カーブに相当)。

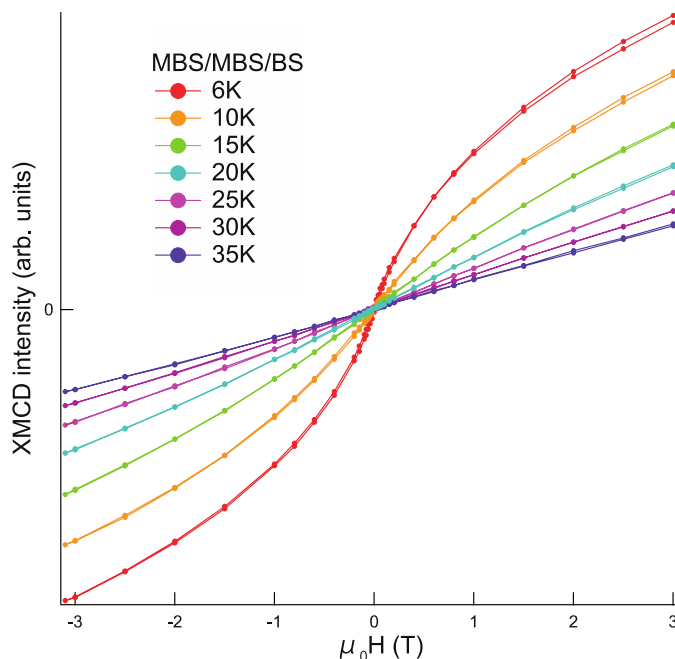


図 4 各温度における、MBS/MBS/BS の  $L_3$  吸収端における XMCD 強度の磁場依存性(MH カーブに相当)。

で、次が MBS/BS1 QL/MBS/BS サンドイッチ構造、そして通常の MBS/BS ヘテロ構造が一番小さい折れ曲がりを持つ、という結論が得られた。これはキュリー温度の大小関係とも一致している。つまり(i)Mn 磁性原子層が 1 つのヘテロ構造よりも 2 つ存在しているサンドイッチ構造の方が強磁性の性質が優れている、(ii)Mn 磁性原子層が隣接している MBS/MBS/BS の方が間に 1QL の

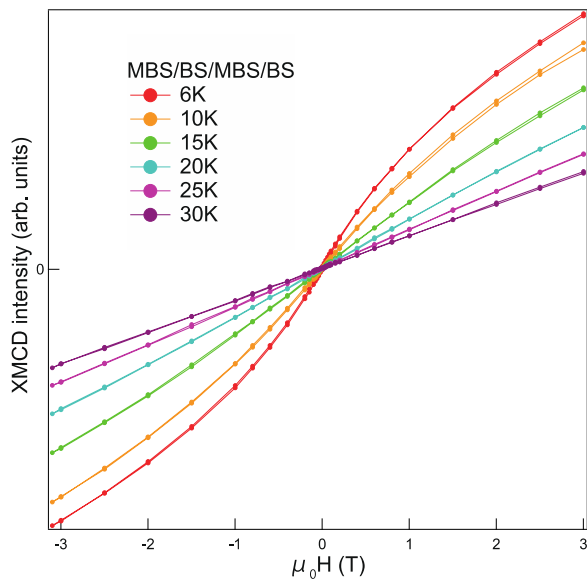


図 5 各温度における、MBS/ BS1 QL /MBS/BS の  $L_3$  吸収端における XMCD 強度の磁場依存性(MH カーブに相当)。

非磁性層を有している MBS/BS1 QL/MBS/BS よりも優れた強磁性の性質を持つ、という 2 点が明らかになった。これは Mn 磁性原子層間の磁氣的相互作用が 2D v-dW 磁性体である MBS の磁化状態を安定化させていることを明確に示している。今後角度分解光電子分光(ARPES)によるバンド構造測定や第一原理計算などを組み合わせて、磁性原子間の相互作用の詳細を明らかにしていく予定である。

#### 4. その他・特記事項 (Others)

##### 参考文献

- [1] T. Hirahara *et al.*, Nano Letters **17**, 3493 (2017).
- [2] T. Fukasawa *et al.*, submitted to Phys. Rev. B (2021).
- [3] T. Takashiro *et al.*, to be submitted (2021).
- [4] M. Mogi *et al.*, Applied Physics Letters **107**, 182401 (2015).

謝辞: 本研究は科研費 基盤研究(A)「強磁性二次元ファンデルワールス原子層物質の新奇な磁化特性の解明と制御」の助成を受けて行われました。

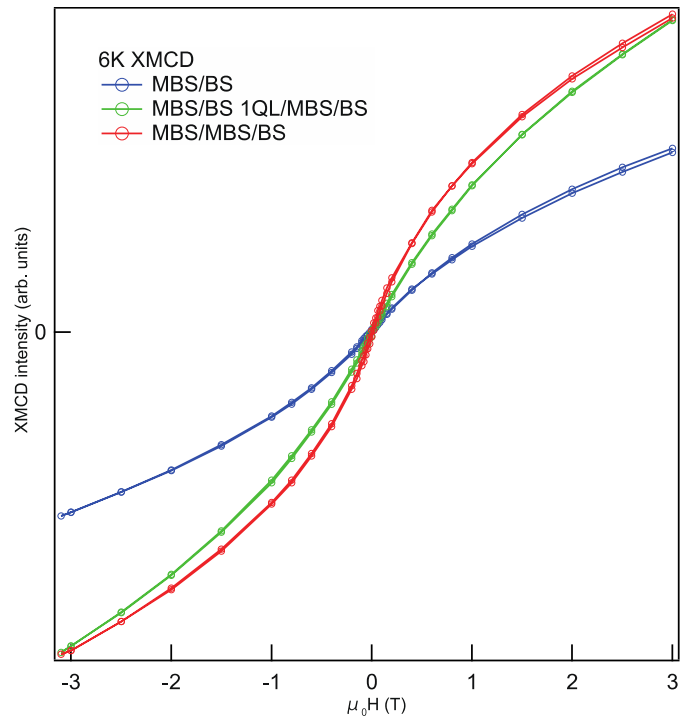


図 6 6 K における、各試料の  $L_3$  吸収端における XMCD 強度の磁場依存性(MH カーブに相当)の比較。