

## 論文の内容の要旨

論文題目 Bi-Sbトポロジカル絶縁体中転位に関する研究

氏名 濱崎 拓

トポロジカル絶縁体とは、バンドギャップを有するバルクと、ヘリカルスピン偏極したディラック電子が存在する表面/エッジ状態によって特徴づけられる物質である。この特殊な表面/エッジ状態は、電子のスピン向きと運動方向が相互に関連付けられており、弾性散乱によって運動方向を  $180^\circ$  変える場合には、スピンの向きも反転する必要がある。つまり、トポロジカル絶縁体の表面/エッジ上の伝導状態においては、スピンの向きおよびエネルギーを変えないような完全後方散乱は起こりえない。三次元トポロジカル絶縁体の表面状態は二次元的であるので、完全後方散乱以外の弾性散乱は起こりうるが、一次元的なエッジ状態においては、非磁性の不純物による弾性散乱のすべてが禁止されることになる。通常、このような一次元伝導状態を実現するためには、量子井戸構造などの特殊な構造を用いて二次元トポロジカル絶縁体を作製する必要があったが、近年、三次元トポロジカル絶縁体中の一定の条件を満たす転位に沿っても、このような一次元伝導状態が実現されることが、理論的に予測された。

本研究の目的は、理論的に予測されている三次元トポロジカル絶縁体中の転位に沿った一次元伝導状態の発現を、実験的に証明することである。このような転位は、多く層状構造からなるトポロジカル絶縁体には、構造的に導入されにくいものであると予測される。そのため、層内の結合と層間の結合の差が比較的小さい物質である Bi-Sb トポロジカル絶縁体を研究物質として用いた。実在する三次元トポロジカル絶縁体中に理論的に示された条件を満たす転位が導入されること、およびその転位が特殊な伝導状態を伴うことを証明する

ために、透過型電子顕微鏡によって結晶中に導入された転位の構造を観察し、物理特性測定装置により転位導入による結晶の電気的性質の変化を調べた。

本論文は主に二つの研究からなる。本論の第二章にあたるマクロスコピックな系における Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の電気伝導に関する研究と、第三章にあたるメゾスコピックな系における Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の電気伝導に関する研究である。以下にその概要を述べる。

第二章においては、マクロスコピックな系における Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の電気伝導に関する研究について述べている。塑性変形によって導入される転位の多くは結晶中のフランク・リード源から発生したものであり、その多くが元来ループ構造を作っている。発生後の転位の運動様式は物質によってさまざまであるが、一般的に、ミリメートル以上のマクロスコピックなサイズの試料内部を転位が貫通している確率は低いと考えられる。つまり、マクロスコピックなサイズの試料に導入された転位の伝導は、バルクと完全に並列なものにはならず、直列と並列が入り混じったようなものであると考えられる。このような状況においても、転位による伝導がバルクによる伝導と比較して同程度以上のものであるならば、伝導転位の伝導の効果は検出可能である。Landauer-Buttiker の式によって導入された転位の電気抵抗率を見積もると、バルクの電気抵抗および伝導転位上のキャリアの非弾性散乱長が充分大きくなる液体ヘリウム温度付近においては、転位密度が  $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  程度の場合、転位による電気抵抗率とバルクの電気抵抗率が同程度になると見積もられる。以下に行われた実験および得られた実験結果、考察の結果の要点をまとめる。

- ・塑性変形を施した試料の組織を透過型電子顕微鏡により観察したところ、伝導転位の条件を満たすバーガースベクトルを持つ転位の導入が確認された。

- ・同転位は、刃状転位方向に長く導入されていることが分かった。

- ・導入された刃状転位線方向に、電気抵抗率の測定を行ったところ、電気抵抗率の減少が観測された。

- ・導入された刃状転位線垂直方向には、電気抵抗率の減少は観測されなかった。

- ・Hall 測定によりキャリア密度を見積もった結果から、電気伝導率の増大（電気抵抗率の減少）はバルクキャリアによるものではないことがわかった。

- ・上記の結果から、電気伝導率の増大は、転位の伝導による効果であると考えられる。

- ・単すべり系と三重すべり系で電気伝導率の増大に大きな違いが生じなかったことから、電気伝導率の増大は、貫通転位の影響ではないと考えられる。

第二章では、ミリメートルオーダーの結晶に導入された転位の効果について調べ、転位の伝導によるものと考えられる電気抵抗率の変化を検出した。第三章ではそれをおし進め、転位が試料全体を貫通していると考えられるメゾスコピックな結晶において、伝導転位の効果をより直接的に観測することを目指した。以下に行われた実験および得られた実験結果、考察の結果の要点をまとめる。

- ・塑性変形による転位を導入していない試料 A、塑性変形により伝導転位の条件を満たす転位を導入した試料 B、塑性変形により伝導転位の条件を満たさない転位を導入した試料 C を作成した。

- ・試料 A, B, C からそれぞれ、Focused Ion Beam によって透過型電子顕微鏡による観察のための試料を切り出し、透過型電子顕微鏡によって組織の観察を行ったところ、試料 A 内では転位が観察されず、試料 B 内では $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 程度の密度の転位が観察され、試料 C 内では $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 程度の密度の転位が観察された。

- ・透過型電子顕微鏡による観察場所とほとんど同等の転位が導入されていると考えられる位置から、試料 A, B, C それぞれにおいて、電気抵抗率測定用のおよそ $10 \mu\text{m}$ サイズの試料を切り出し、電気抵抗率を測定した。

- ・試料 A は、通常の Bi-Sb に類似した電気抵抗率温度依存性を示した。

- ・試料 B は、低温域において大きな電気抵抗率の減少が観測された。この電気抵抗は、定量的に見積もられる伝導転位の電気抵抗とオーダーで一致していた。

- ・試料 C は、試料 A と似た電気抵抗率温度依存性を示したが、全温度域において試料 A よりも高い電気抵抗率を示した。

以上、第二章と第三章に述べた結果から、Bi-Sbに塑性変形によって一定の条件を満たす転位を導入した場合、全体の電気伝導率が大きく向上することがわかった。転位の導入によってバルクのキャリア密度が減少すること、電気伝導度の向上には異方性があることから、これがバルクを流れるキャリアの影響でないことは明らかである。定量的な見積もりから、トポロジカル絶縁体の表面状態の寄与である可能性も否定された。したがって転位の影響で電気伝導率が向上していると考えるのが妥当である。バーガースベクトルが伝導転位形

成の条件を満たさないような同程度の密度の転位を導入したとき、伝導率の向上は観測されなかったことから、この効果は、転位のバーガースベクトルとバルクのバンド反転の条件が重なったことによって現れるトポロジカルに保護された転位上の伝導状態によるものであると考えられる。実験結果は、マイクロメートルオーダーの非弾性散乱長を用いた一次元的な電気伝導率の定量的な見積もりとも一致しており、この伝導状態が時間反転対称性によって保護された長い非弾性散乱長を持つことを示唆している。