The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Synthesis and Characterization of Topological Insulators and Related Materials
Author(s)	江藤, 数馬
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/24959
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

【93】

氏　　名	江藤　数馬（えとう　かずま）
博士の専攻分野の名称	博　士（工学）
学位記番号	第　26159　号
学位授与年月日	平成25年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科応用化学専攻
学位論文名	Synthesis and Characterization of Topological Insulators and Related Materials （トポロジカル絶縁体およびその関連物質の合成と物性研究）
論文審査委員	（主査） 教　授　安藤　陽一 （副査） 教　授　今中　信人　　教　授　桑畑　　進　　教　授　井上　　豪 教　授　大島　　巧　　教　授　林　　高史　　教　授　南方　聖司 教　授　宇山　　浩　　教　授　平尾　俊一　　教　授　町田　憲一 教　授　古澤　孝弘

論文内容の要旨

本論文においては、新しい機能性材料であるトポロジカル絶縁体およびその関連物質を対象に、単結晶作製・磁気輸送特性測定を主な手法として新たなトポロジカル絶縁体の化学と物理を発見・解明する事を目指して行った研究の結果をまとめた。

第1章では、トポロジカル絶縁体に関するこれまでの研究開発の経緯と現状について述べ、本研究の目的と意義を概括した。

第2章では、スピン軌道相互作用が強いナローバンドギャップ半導体であるPbSの輸送特性測定を行った研究について述べた。観測されたShubnikov-de Haas（SdH）振動の振舞いは電流と磁場の向きの相対関係に依存しており、それがスピン遷移選択律の違いによって生じている事を示した。さらにこの物質では磁気抵抗の角度依存性に特異な振舞が見られ、その要因として、スピン軌道相互作用、static skin effect、古典輸送領域から量子輸送領域へのクロスオーバー、の三者が関係している事を論じた。これにより、スピン軌道相互作用が強い物質系の輸送現象に現れる振舞を理解する上で有用な知見を得た。

第3章では、トポロジカル絶縁体物質として注目されているBi_2Se_3の詳細な輸送特性測定を行った研究について述べた。5×10^{18} cm^{-3}の電子濃度を持つ単結晶試料における極低温磁気抵抗測定の結果、顕著な角度依存振動現象が観測された。同じ試料で観測されたSdH振動からBi_2Se_3のフェルミ面の形状を決定し、その結果を用いて磁場中抵抗の角度依存性をシミュレートする事により、観測された現象の起源が3次元のフェルミ面のランダウ量子化によるものである事を明らかにした。

第4章では、鉛を主要元素として含む混晶組成化合物である$Pb(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$という物質に関する研究について述べた。角度依存光電子分光（ARPES）測定の結果、この物質がこれまで実証されていなかった鉛系物質で初のトポロジカル絶縁体である事が明らかになった。またこの物質では組成xを変化させる事により、キャリアの符号をn型からp型にまで変化させる事が可能であると判明した。一方、輸送特性の測定結果からは、キャリアの符号

が変化する付近の組成であっても、バルクのキャリア濃度を十分に小さくするのが難しい事が明らかになった。これは$Pb(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$における主な結晶欠陥が元素の相互置換であり、その制御が困難であることに起因すると考えられることを議論した。

第5章では鉛系化合物でホモロガス系列を形成する$(PbSe)_5(Bi_2Se_3)_{3m}$の研究について述べた。ARPES測定の結果、この多層ヘテロ構造物質ではそのヘテロ界面にトポロジカルな表面状態が存在する事が明らかになった。また実験から得られたバンド構造は、組成式のmに対応した系統的な変化を示し、これは過去に行われたBi_2Se_3の超薄膜での研究で報告された層数に対応したバンド構造の変化とよく似ている事が明らかになった。これはBi_2Se_3層がこの物質中では実質的に量子井戸になっており、そのため電子状態の量子化が起こっている事を示唆するものであることを議論した。これにより、トポロジカル表面状態を人工的に制御する上で有用な知見を得た。

第6章では、本研究で得られた成果とその意義を要約した。

論文審査の結果の要旨

本論文はトポロジカル絶縁体という新しい種類の固体物質を対象に、その学理の確立および応用に向けた新物質の開発を目指して行われた研究をまとめたものである。得られた主な成果を要約すると以下の通りである。

(1) トポロジカル絶縁体と同様に強いスピン軌道相互作用によって物性が支配されているスピンホール絶縁体の候補物質である PbS を対象とした輸送特性の測定を行い、その物質の単純なフェルミ面からは説明できない異常な角度依存磁気抵抗の振舞を観測している。測定された種々の輸送特性を解析し、スピン軌道相互作用がもたらす影響、static skin effect の影響、等のいくつかの要因がその振舞に関係しているという事を論じており、これまで見い出されていなかったスピン軌道相互作用が強い物質系の新しい輸送現象の振舞の詳細を報告したといえる。

(2) トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の輸送特性測定を行い、そこで観測された磁気抵抗の角度依存振動現象に対して、その起源が 3 次元フェルミ面のランダウ量子化にある事を詳細な理論解析によって明らかにしている。ここで得られた知見は、Bi_2Se_3 および他のトポロジカル絶縁体での輸送特性測定において 2 次元と 3 次元のフェルミ面を区別する際に大変有用だといえる。

(3) 鉛系化合物の $Pb(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$ が新たなトポロジカル絶縁体である事を実証しており、この実験当時まだ報告がなかった鉛系物質におけるトポロジカル絶縁体をいち早く発見した研究である。またこの物質ではその組成を変化させる事により伝導キャリアの符号を反転させる事が出来る事を明らかにしており、化学ポテンシャルを広い範囲で制御できるトポロジカル絶縁体として有用であることを示した重要な結果だといえる。

(4) 鉛系化合物でホモロガス系列を形成する$(PbSe)_5(Bi_2Se_3)_{3m}$に着目した研究を行い、そのヘテロ構造の界面でトポロジカルな表面状態が存在する事を見い出している。この結果は、自然に構成されるヘテロ構造物質がトポロジカル絶縁体の新たな研究対象となり得る事を示しているのに加えて、トポロジカル表面状態を人工的に制御する方法の新たな可能性を提示するものとして、大変に有用だといえる。

以上のように本論文では、トポロジカル絶縁体およびその関連物質における角度依存磁気抵抗測定を用いた詳細な輸送特性の研究によってこれらの物質における輸送現象の学理の確立に貢献しているのに加えて、鉛系化合物で新奇なトポロジカル絶縁体の物質開発を行う事によりこれまで比較的限られていた研究対象を広げる事に貢献している。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。