

研究種目：若手研究 (S)

研究期間：2007～2011

課題番号：19674002

研究課題名 (和文) モット絶縁体とスピンホール絶縁体：普通でない絶縁体の物理の究明

研究課題名 (英文) Mott Insulator and Spin Hall Insulator: Elucidating the Physics of Nontrivial Insulators

研究代表者

安藤 陽一 (ANDO YOICHI)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：90371286

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：強相関係、スピンホール効果、トポロジカル絶縁体

1. 研究計画の概要

絶縁体は古くて新しい材料である。例えば、電子間の強いクーロン斥力のために電気が流れなくなっている「モット絶縁体」にキャリアを添加すると高温超伝導が現れるが、そのとき電子系がどのような変遷を辿ってそうなるのかはまだよくわかっていない。また、スピン軌道相互作用によってエネルギーバンド構造にギャップが開いている絶縁体は有限のスピンホール伝導度を持つ「スピンホール絶縁体」であると予想されており、価電子帯の構造によっては「トポロジカル絶縁体」となって新奇な量子現象を示すと期待されている。本研究では、モット絶縁体とスピンホール絶縁体を対象に、研究代表者がこれまでに培った高品質単結晶成長技術、高度なドーピング制御技術、極低温での精密物性測定技術を最大限に活用して、これら普通でない絶縁体における新しい物理を究明する。

2. 研究の進捗状況

(1) モット絶縁体に関しては、両極性ドーピングが可能な初の銅酸化物であることを研究代表者らが見出した (Y, La) (Ba, La)₂Cu₃O_y について重点的に研究を実施している。この物質系における輸送特性測定と中性子散乱を組み合わせた実験の結果、真のモット絶縁体状態では電子ドーブと正孔ドーブの間の「競合」が起こっており、さらに輸送特性も電子側と正孔側で顕著な非対称を示すことがわかった。

(2) スピンホール絶縁体に関しては、これまでに PbS、Bi_{1-x}Sb_x、Bi₂Se₃ について、組成を高度に制御した単結晶試料を作製し、磁気輸送特性の精密測定を行ってきた。このうち特

に Bi_{1-x}Sb_x と Bi₂Se₃ は、Z₂ 数という新しいトポロジカル不変量で特徴付けられる「トポロジカル絶縁体」であることが最近明らかになり、大きな注目を集めている。そこでこのトポロジカル絶縁体特有のスピン偏極表面状態を量子振動効果などの実験によって調べている。これまでに、Bi_{1-x}Sb_x における金属的表面状態を量子振動効果によって観測することに世界で初めて成功し、この成果により、2010年3月のアメリカ物理学会と日本物理学会の両方でシンポジウム講演を行った。またスピン分解光電子分光の専門家と共同で、Bi_{1-x}Sb_x 表面状態のスピン偏極を初めて完全に決定することにも成功した。さらに、低キャリア濃度の PbS 単結晶試料において、表面平行な磁場中で表面伝導層が形成される「静的表皮効果」が関与する、予想外の角度依存磁気抵抗ピーク効果を発見した。以上の成果を報告した3報の論文はいずれも Physical Review B 誌における注目論文として Editor's Suggestion に選ばれている。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(理由)

当課題の採択後にトポロジカル絶縁体の発見という大きな周辺状況の変化があった。これにより、当課題の研究対象の一つであったスピンホール絶縁体は、Z₂ 数というトポロジカル不変量で特徴付けられる新しいトポロジカル量子状態として、当初の想定を越える重要性を帯びることになった。つまり、スピンホール絶縁体は「無散逸のスピン流を生じる普通でない絶縁体」という当初の興味を超えて、ディラック電子性、新奇な電気磁気

効果、超伝導体との接合におけるマヨラナ型準粒子の出現など、非常に興味深い物理を示すことが期待されるに至った。研究代表者はこのトポロジカル絶縁体の基礎物性解明で既に顕著な成果を挙げているが、これは当初の計画以上の研究の進展と言える。

4. 今後の研究の推進方策

当課題の採択後に起こったトポロジカル絶縁体の発見という展開により、研究代表者はこのホットな新分野をリードする先頭集団に入ることになった。このため、本研究では戦略的にトポロジカル絶縁体研究に多くの研究資源を投入している。モット絶縁体に関しては既にキャリアドーピングの本質に迫る成果を挙げたこともあり、残りの2年間はさらにトポロジカル絶縁体の研究に注力する。具体的には、以下の項目を推進することを計画している。

(1) 研究代表者が既に高品質単結晶育成技術を確立している $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ と Bi_2Se_3 のバルク単結晶を用いて、トポロジカル絶縁体の基礎物性を解明する。

(2) 現在試作しているデバイス構造をベースにして、トポロジカル絶縁体表面におけるスピン流の直接観測を目指す。

(3) 理論的にトポロジカル絶縁体の存在が予想されている三元系カルコゲナイドやホイスラー化合物などにおいて、新しいトポロジカル絶縁体を探索する。

(4) 新奇な電気磁気効果やトポロジカル超伝導など、トポロジカル絶縁体を舞台にした新奇な量子現象の探索および検証を行う。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 30 件)

- ① K. Eto, A. A. Taskin, K. Segawa, Y. Ando, Spin-orbit coupling and anomalous angular-dependent magnetoresistance in the quantum transport regime of PbS, **Physical Review B** (Rapid Communications) **81**, 161202(R)-(1-4), 2010, 査読有.
- ② A. Nishide, A. A. Taskin, Y. Takeichi, T. Okuda, A. Kakizaki, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, Y. Ando, I. Matsuda, Direct mapping of the spin-filtered surface bands of a three-dimensional quantum spin Hall insulator, **Physical Review B** (Rapid Communications) **81**, 041309(R)-(1-4), 2010, 査読有.
- ③ A. A. Taskin, Y. Ando, Quantum oscillations in a topological

insulator $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, **Physical Review B** **80**, 085303-(1-6), 2009, 査読有.

- ④ F. F. Balakirev, J. B. Betts, A. Migliori, I. Tsukada, Y. Ando, G. S. Boebinger, Quantum phase transition in the magnetic-field-induced normal state of optimum-doped high- T_c cuprate superconductors at low temperatures, **Physical Review Letters** **102**, 017004-(1-4), 2009, 査読有.
- ⑤ A. N. Pasupathy, A. Pushp, K. K. Gomes, C. V. Parker, J. Wen, Z. Xu, G. Gu, S. Ono, Y. Ando, A. Yazdani, Electronic origin of the inhomogeneous pairing interaction in the high- T_c superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, **Science** **320**, 196-201, 2008, 査読有.

[学会発表] (計 57 件)

- ① 安藤陽一, Quantum Oscillations in a Topological Insulator Bi-Sb, アメリカ物理学会 March Meeting, 2010年3月15日, 米国ポートランド市 (招待講演).

[その他]

ホームページ

http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/fmc/wakate_s.html