



| | |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title | Anomalous Transverse Transport Phenomena in Topological Metals and Superconductors |
| Author(s) | 松下, 太樹 |
| Citation | 大阪大学, 2022, 博士論文 |
| Version Type | |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/88089 |
| rights | |
| Note | やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。 |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名 (松 下 太 樹) | |
| 論文題名 | Anomalous Transverse Transport Phenomena in Topological Metals and Superconductors (トポロジカル金属・超伝導体における異常輸送現象) |
| 論文内容の要旨 | |
| <p>トポロジカル物質科学は、ヒルベルト空間内の位相幾何学的構造に着目し、物質相を分類、研究する学問分野である。この分野は2000年頃から現在まで研究が爆発的に進められ、物性物理の一分野としてその地位が確かなものとしている。ヒルベルト空間内の非自明なトポロジーは物質相の分類を与えるだけでなく、異常な輸送現象として物理現象に現れる。例えば、時間反転対称性を破ったトポロジカル絶縁体に対応するChern絶縁体は、ゼロ磁場Hall伝導率が低温で量子化値を取る量子異常Hall効果を示す。また、トポロジカル金属の典型であるWeyl半金属では、カイラル異常に由来した磁気輸送現象を発現し、時間反転対称性の破れたトポロジカル超伝導は量子熱Hall効果を示す。これらの例が示すように、物質の非自明なトポロジーと異常な輸送現象は密接に関係している。新しい異常輸送現象を明らかにしていくことはトポロジカル物質の基礎物性は豊かにすることでもあり、デバイスへの応用をという観点でも重要である。また、トポロジカル物質の異常輸送現象を測定し、立証することで、物質の非自明なトポロジーを解明することができる。しかし、物質のトポロジーと異常な輸送現象の関係は未だ完全に理解されているわけではなく、いくつかの重要な課題が未解決のまま残されている。本論文では[1]線ノード半金属固有のトポロジカル輸送現象、[2]トポロジカル超伝導に存在するカイラル・ヘリカルCooper対に由来する異常輸送現象、[3]非ユニタリ状態固有のスピンの伝導現象の理論提案を行なった。</p> <p>[1]上で述べた未解決問題の一つが、線ノード半金属におけるトポロジカル輸送現象である。線ノード半金属は、近年発見された新しいトポロジカル半金属であり、トポロジカル表面電荷や電気分極などの多極子が注目を集めてきた。しかし、線ノード半金属固有の量子化輸送現象は明らかにされておらず未解決な問題として残されていた。本論文では、線ノード半金属の圧電応答を軸性電気応答として定式化することで、線ノード半金属固有の輸送現象を明らかにした。線ノード半金属の圧電効果はFermiループの長さだけで完全に決定される幾何学効果であり、この物質における量子化輸送現象の初めての理論提案である。また、圧電効果によって現れる電流と電気分極の関係を調べることで、線ノード半金属の圧電効果が、電気分極が担う分極電流であることを明らかにした。</p> <p>[2]トポロジカル超伝導体は、マヨラナ準粒子の舞台であり、その量子情報分野への応用はトポロジカル物質科学という分野の究極的な目標の一つである。これまで、多くのトポロジカル超伝導体の候補物質が提案され、議論されてきたが、未だ確立された物質は存在しない。その理由は、トポロジカル超伝導秩序を立証する術が極めて少数に限られていることにある。特に、時間反転対称なトポロジカル超伝導の特徴であるヘリカルCooper対を立証する方法は明らかにされていなかった。本論文では、時間反転対称性の破れたトポロジカル超伝導体中存在するカイラルCooper対、時間反転対称なトポロジカル超伝導に存在するヘリカルCooper対に着目し、これらのCooper対の新しいプローブの理論提案を行なった。具体的には、カイラルCooper対に由来した物理現象として異常音響電気効果、ヘリカルCooper対に起因した物理現象としてスピンNernst効果を明らかにした。トポロジカル超伝導に存在するこれらのCooper対は、これらの輸送現象を観測することによって立証することが可能である。</p> <p>[3]また、時間反転対称なトポロジカル超伝導におけるスピンの伝導の研究を拡張し、時間反転対称性の破れた非ユニタリ超伝導状態のスピンの伝導現象を議論した。準古典理論に基づく数値計算を実行することで、非ユニタリ超伝導状態固有のスピンの伝導現象とし、スピンSeebeck効果を明らかにした。また、Cooper対の角運動量に着目することで、Cooper対の角運動量と異常熱Hall効果、スピンNernst効果、スピンSeebeck効果などの熱・スピンの伝導との関係を明らかにした。</p> | |

論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 (松 下 太 樹) | | | |
|-----------------|-----|-----|-------|
| | (職) | | 氏 名 |
| 論文審査担当者 | 主 査 | 教 授 | 藤本 聡 |
| | 副 査 | 教 授 | 井澤 公一 |
| | 副 査 | 教 授 | 山本 俊 |

論文審査の結果の要旨

本学位論文は、近年、新規機能物質として注目されているトポロジカル物質の輸送現象を理論的に解明することを目的としている。トポロジカル物質では電子の量子状態空間に位相幾何学的に非自明な構造が存在し、これに起因して、特異な輸送現象が現れる。特に代表的な例は高磁場下の2次元電子ガスで、ホール伝導率が普遍定数の整数倍に量子化され、この正数値が電子の量子状態空間の有するトポロジカル不変量で表される。このようにトポロジカル物質では、その量子状態のトポロジカル性を特徴づけるトポロジカル不変量が、観測可能な輸送係数に現れるという際立った性質がある。ところが、トポロジカル物質の内、線ノード半金属（フェルミ面が1次元的な線状の金属）とトポロジカル超伝導については、そのトポロジカル性がいかなる輸送現象に現れるのかについて十分に理解されていなかった。本学位論文はこれら2つの系について、トポロジカル輸送現象を理論的に解明することを目的としている。本論文で明らかにされたことは以下の4点である。

- (1) 線ノード金属のトポロジカル性は反転対称性が破れたときに生ずる波数空間のBerry曲率によって特徴付けられる。松下氏はこのBerry曲率に起因して、系に音波を印加するとホール電流が発生することを理論的に発見した。本論文の結果は、線ノード金属のトポロジカル輸送現象の理解に大きな進歩をもたらすものである。
- (2) 時間反転対称性の破れたトポロジカル超伝導体は自発磁化を有するカイラル・クーパー対で特徴付けられるが、このカイラル・クーパー対を実験的に検出する方法としてカイラリティ揺らぎに起因する異常音響電気効果（音波印加による横電流の発生）を理論的に提案し、その有効性を明らかにした。
- (3) 時間反転対称性で守られたトポロジカル超伝導体について、これまでそのトポロジカル輸送現象はほとんど理解されていなかった。このタイプの超伝導体は、カイラリティが互いに逆向き2つのカイラル・クーパー対の重ね合わせであるヘリカル・クーパー対によって特徴付けられるが、松下氏は、このヘリカル・クーパー対の検出を可能にするスピンNernst効果（温度勾配の印加によって横方向のスピン流を誘起）を理論的に提案し、有効性を明らかにした。
- (4) クーパー対がスピン分極した非ユニタリ・トポロジカル超伝導体に固有の新規スピン輸送現象を発見した。

本論文のこれらの結果はトポロジカル物質の新規輸送現象を解明したという点で基礎学理として重要であることに加えて、将来の新規量子機能材料の開発に有益なものと評価される。

審査委員会では、上述の通り、本論文の学術的価値が非常に高いことが全員一致で認められた。

以上の理由により、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。