



Title	Transport theory of twisted interfaces in three-dimensional materials
Author(s)	谷, 天太
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105637
rights	
Note	

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 (谷 天 太)	
論文題名	Transport theory of twisted interfaces in three-dimensional materials (3次元物質のツイスト界面における輸送理論)
論文内容の要旨	
本博士論文では、二つの3次元物質をツイスト積層した「ツイスト3次元物質」における輸送現象を理論的に調べた。 近年、ツイスト角の自由度によって多彩な量子物性が実現・制御されることから、ツイスト2次元物質が精力的に研究されている。この系は複数の2次元物質の結晶方位を揃えずに積層することで実現され、その典型例が2枚のグラフェンからなるツイスト2層グラフェンである。この物質では層間のツイスト角度に依存して電子状態が大きく変調され、特に魔法角と呼ばれる特定のツイスト角においてフェルミ準位付近に平坦バンドが出現する。これに起因する超伝導相や強相関絶縁相が実験的に確認されている。さらに近年には、3層以上からなる系や、異種の2次元物質を組み合わせたヘテロ積層系など、さまざまなツイスト2次元物質が注目を集めている。 本論文では「3次元物質をツイストするとどのような現象が起きるか」という疑問に焦点を当てる。ツイスト3次元系においては界面を通り抜ける方向の垂直伝導が可能になるが、それを調べるための基礎理論は確立されておらず、ツイストが輸送現象に与える効果は明らかでない。 そこで我々はまず、再帰的グリーン関数法を用いた垂直電気伝導の計算手法を開発し、最も基本的なツイスト3次元物質であるツイストグラファイト（二つのグラファイトのツイスト積層系）に適用した。その結果、垂直伝導率はツイスト角に対し非単調な依存性を示すことが分かった。波数分解した伝導度を調べることで、この依存性はフェルミ面の重なり中心における透過係数の極端な減少に起因することを明らかにした。透過係数の減少の原因は、ツイスト2層グラフェンの平坦バンドの名残である界面局在状態が引き起こすファノ共鳴であることを、局所状態密度の計算から見出した。ここで発見したメカニズムは一般的なものであり、局在状態を伴う他のツイスト3次元系でも同じ現象が期待される。 論文の後半部分では、層状超伝導体からなるツイスト3次元物質を対象として、ツイスト接合が超伝導に与える影響を探った。前半で確立した理論の枠組みを発展させることでBdG方程式に基づく解析手法を開発し、ゾーン端にフェルミ面を持つモデルに適用した。超伝導位相の空間依存性を調べることにより、ツイストが超伝導体間の実効的なバリアとして機能し、一種のジョセフソン接合となることが分かった。さらに、臨界電流の計算により、ツイスト角度によって接合特性を大きく変調できることを明らかにした。従来のジョセフソン接合とは異なり、ツイストという機械的操作のみで接合特性の調節が可能となるため、可変な超伝導デバイスの設計の観点から有益である。さらに、クーパー対が電流を運ぶことに起因して、ツイストにより二つのフェルミ面が離れても電流が流れる。これは常伝導の場合では起こり得ない、超伝導ツイスト系に特有の現象である。 本論文で発展させた計算手法は、層状磁性体からなるツイスト3次元系や、全ての層間をツイストしたらせん系など様々な物質に応用可能であり、ツイスト3次元物質の物性研究の領域を拓くものである。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (谷 天 太)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教 授 越 野 幹 人
	副 査	教 授 黒 木 和 彦
	副 査	教 授 新 見 康 洋
	副 査	教 授 工 藤 一 貴
	副 査	助 教 川 上 拓 人

論文審査の結果の要旨

二次元材料を非整合に重ねて作られるツイスト積層物質は、多彩な量子物性の舞台として近年大きな注目を集めている。その代表例であるツイスト二層グラフェンでは、二つの原子格子の非整合性がもたらすモアレ干渉模様により平坦な電子バンドが形成され、それに起因して超伝導状態が出現することが発見された。以降、遷移金属カルコゲナイドや窒化ホウ素をはじめとする様々な二次元物質においてもツイスト積層系が盛んに研究され、新たな物性機能が次々と見いだされている。しかしながら、これまでの研究の多くは二次元物質のツイスト積層系に限定されており、三次元層状物質を対象としたツイスト系の研究は、依然として未開拓の領域にとどまっている。三次元層状物質を回転して重ね合わせることで、モアレ界面を介した三次元接合系を構成することが可能であるが、このようなツイスト三次元系での界面の輸送特性を理論的に記述する基礎的枠組みは未確立であり、ツイストが輸送現象に及ぼす影響は未解明のままであった。

谷天太氏はこのような問題意識のもと、三次元層状物質のツイスト界面における輸送現象に着目し、以下の二つの独創的かつ体系的な研究を行った。第一に、再帰的グリーン関数法を用いた垂直電気伝導の数値計算手法を新たに開発し、最も基本的なツイスト三次元物質であるツイストグラファイト（二つのグラファイト結晶を回転して積層した系）に適用した。その結果、垂直伝導率がツイスト角に対して非単調な依存性を示すことを明らかにした。さらにこの非単調な振る舞いが、ツイスト二層グラフェンにおける平坦バンドの名残として界面に形成される局在状態が引き起こすファノ共鳴によるものであることを、局所状態密度の計算から明確に示した。本研究で見いだされた機構は特定の物質に依存しない一般性を有しており、界面局在状態を伴う他のツイスト三次元系においても同様の現象が生じることが期待される。

第二に、前半で確立した理論的枠組みを超伝導体に拡張し、ツイスト接合が超伝導特性に及ぼす影響を理論的に解明した。具体的には、モアレ連続体模型と Bogoliubov-de Gennes 方程式を組み合わせた解析手法を新たに構築し、単純な電子構造を持つ超伝導体モデルに適用した。その結果、超伝導位相の空間分布を解析することで、ツイスト界面が超伝導体間における実効的なバリアとして機能し、一種のジョセフソン接合を形成することを明らかにした。さらに臨界電流の定量的評価を通じて、ツイスト角を変化させることで接合特性を大きく制御できることを示した。従来のジョセフソン接合とは異なり、ツイストという機械的操作のみで接合特性を調節できる点は、可変な超伝導デバイス設計の観点から有用である。また、クーパー対が電流を担うことにより、ツイストによって二つのフェルミ面が運動量空間で離れている場合でも電流が流れることを示した。これは常伝導系では生じ得ない、超伝導ツイスト系に特有の現象である。

本論文で発展させられた計算手法および理論的枠組みは、様々な種類の層状物質からなるツイスト三次元系や、すべての層間にツイストを導入したらせん構造系など、幅広い物質系へ応用可能であり、ツイスト三次元物質の物性研究という新たな研究領域を切り拓くものである。以上のことから、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。