The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Theory of topological charge pumping by moirè pattern sliding
Author(s)	藤本, 大仁
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92162
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　藤本　大仁　　）	
論文題名	Theory of topological charge pumping by moirè pattern sliding (モアレ模様のスライドによるトポロジカル電荷ポンプ)

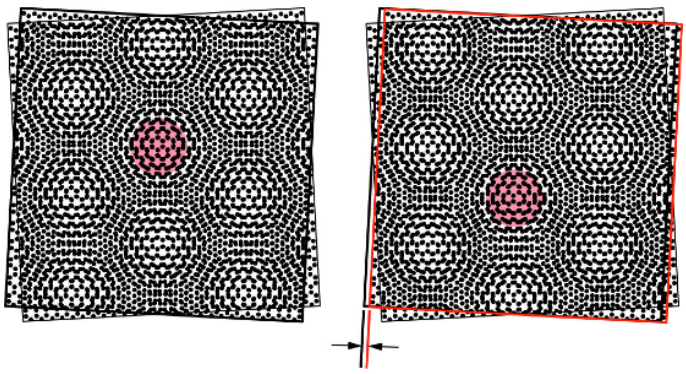
論文内容の要旨

近年，グラフェンなどの2次元物質が生成され，基礎・応用ともに活発な研究が行なわれている．2次元物質の特徴として，層同士を任意の角度で重ねられることが挙げられる．このツイスト角により，単層系にはない新奇な物性が発現する．例えばツイスト二層グラフェンでは2つの異なる周期構造が干渉し，大きな周期構造を形成する．これはモアレ模様と呼ばれ，電子相関に顕著な影響を与え，超伝導転移することが観測され，多くの研究が行なわれている．

これまでに固定された積層系の研究が進展している．一方で，ツイスト積層系は層間のスライドの自由度を有しており，本博士論文ではツイスト積層系のダイナミクスに着目する．片方の層を他方に対して水平に移動させるとき，原子間距離分である数Å動かすだけで，モアレ模様はその数百倍もの距離を移動する．これは，「モアレスピードアップ」と呼ばれる現象である．しかし，このモアレ模様の運動に伴う電子の量子力学的性質は未解明である．

この研究では，モアレ超格子を形成する一般の積層系において，層間の相対的なスライドによる電荷ポンプとそのトポロジカルな性質について理論的に調べた．一方の層を他方に対して相対的にスライドさせるとモアレ模様が移動し，これに追随して電子の輸送が生じることを示した．特にフェルミエネルギーがエネルギーギャップ中にある時，このスライドにより輸送される電子の個数は「スライドチャーン数」という新しいトポロジカル不変量により特徴付けられ，またこのスライドチャーン数が量子ホール効果に類似したDiophantine方程式に従うことを明らかにした．実際にツイスト二層グラフェンに対して計算を行うことで，ギャップ内でスライドチャーン数が非ゼロの整数となり，電荷ポンプがグラフェンシートのスライドと垂直な方向に生じることを示した．さらにリボン構造のツイスト二層グラフェンの電子状態を実際に計算し，スライドチャーン数とエッジ状態のスペクトルの数が対応するバルクエッジ対応を明らかにした．

本研究で提案した層間スライドによる電荷ポンプは，電気的自由度と機械的自由度の交差相関現象とみなすことができ，その逆現象も期待できる．そのためナノモーターやナノ電流源への応用が期待される．さらに，層間のスライドはあらゆる低次元物質が有する自由度である．２次元磁性体や超伝導体などの層間スライドへ理論を拡張することで，様々な準粒子を機械的に制御できる可能性を秘めている．



図：ツイスト２層グラフェンにおける層間スライドとモアレ模様の移動

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　藤本　大仁　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	越野 幹人
	副 査	教授	浅野 建一
	副 査	教授	松野 丈夫
	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

2 枚のグラフェンを互いに回転させて重ねたツイスト二層グラフェンでは、モアレ干渉模様によって電子構造が母物質から大きく変化し、それに起因して様々な特異な現象が現れる。とくに魔法角と呼ばれる特定の回転角においては、バンド分散がほとんどない平坦バンドが生じ、増強された電子間相互作用効果によって超伝導が現れることが発見された。これはモアレ模様で物性が根本的に変わる顕著な例として大きな注目を集め、これを契機に様々な二次元物質のモアレ積層が研究されるようになった。従来のほとんどの研究では、モアレ模様が固定された静的な系での物性が対象とされてきた。一方で、二次元層同士が互いにスライドするとモアレ模様はもはや一定でなく、格子の動きに対して極めて鋭敏に変化する。そのような動的に変化するモアレ模様における物性の研究は今までにほとんど例がなかった。

藤本大仁氏はこの問題に着目し、グラフェン層のスライドに対する電子の応答現象及び、それと関連したトポロジカルな物性についての理論研究を行った。藤本氏は、グラフェン層のスライドをハミルトニアンの断熱変化と捉え、それに対する電子の応答をトポロジカル量子ポンプ（Thouless ポンプ）の形で定式化した。その結果、スライドによって移動する単位時間あたりの電子数は、藤本氏によって「スライドチャーン数」と名付けられたトポロジカル不変量で表現することができ、それゆえ整数に量子化されることを証明した。これはグラフェン格子の機械的運動と電子系の応答がトポロジカル不変量を通じて結合するという非自明な結果であり、ナノトライボロジーや MEMS（微小電気機械システム）分野への波及も期待される。またトポロジカル量子ポンプは、近年冷却原子系における光格子という極限的な環境下で実現された例があるが、今回成果はグラフェンを 2 枚重ねただけのはるかに単純な系で原理的に実現可能であることを示すものである。

さらに藤本氏は、上記のモアレ量子ポンプと、試料端に局在するエッジ状態との間に密接な関係があることを見出した。一般にバルク（無限系）のトポロジカルな性質は、リボン等の有限系におけるエッジ状態の存在と関連し、この関係はバルク・エッジ対応とよばれる。藤本氏は、スライドチャーン数のバルクエッジ対応の帰結として、非零のスライドチャーン数をもつエネルギーギャップの中には必ずエッジ状態があることを発見した。定性的には、モアレ模様の移動によってワニエ軌道が移動し、試料端に差し掛かったときにエッジ状態に変化するという描像で理解することができる。この発見は、スライドチャーン数は、量子ポンプという動的な性質のみならず、静的な系でのエッジ状態の存否に関わる重要な量であることを示すものである。

上記のように、藤本氏の博士論文の内容は、モアレ模様の動的変化という今までにない新しい観点からツイスト二次元物質を考察し、モアレポンプという新しい概念を世界に先駆けて示したものである。以上より、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。