



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Topological Phenomena in Quantum Walks owing to Peculiarity of Floquet and/or Open Systems [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	望月, 健
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14225号
Issue Date	2020-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79400
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ken_Mochizuki_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 望月 健

審査担当者 主 査 教 授 矢久保 考介

副 査 教 授 明楽 浩史

副 査 教 授 戸田 泰則

学位論文題名

Topological Phenomena in Quantum Walks owing to Peculiarity of Floquet and/or Open Systems
(フロケ系や開放系に特有の性質に起因する量子ウォークのトポロジカルな現象)

過去数十年に渡り、平衡系や孤立系におけるトポロジカル相の研究から、固体中の電子物性に関して多大なる知見が獲得されてきた。系のエネルギーバンド構造は、トポロジカル数という整数値により特徴づけられ、ゼロではないトポロジカル数で特徴づけられる相は非自明なトポロジカル相と呼ばれる。非自明なトポロジカル相が存在し得るかは系の対称性及び空間次元のみから決まるため、エネルギーバンド構造のトポロジに起因する現象は系の詳細に依らず様々な物理系で起こり得る。バンドのトポロジカルに非自明な構造は系の境界に局在したエッジ状態の出現により顕在化され、そのよう対応関係はバルク-エッジ対応と呼ばれる。非自明なトポロジカル相及びバルク-エッジ対応の観点から、既知の現象の再解釈及び新奇現象の理論予想が成されてきた。たとえば、整数量子ホール効果はチャーン数によって特徴づけられるトポロジカル相及びエッジ状態を基に理解され、また Z_2 トポロジカル数で特徴づけられる相の理論研究はヘリカルエッジ状態が存在するトポロジカル絶縁体の発見に繋がった。

上で述べたようにトポロジカル相の研究は電子系において精力的に行われてきたが、同様の概念は光学系に対しても適用可能である。そのような、非自明なトポロジカル相が存在し得る光学系の一つに、ランダムウォークの量子力学版である、量子ウォークという系がある。量子ウォークは、エッジ状態の実空間観測が可能である、対称性及びトポロジカル数の制御が容易であるといった、トポロジカル相を研究するのに適した特徴を持っている。それらの性質から、量子ウォークにおいて様々なトポロジカル相及びエッジ状態が理論実験の両面から研究されてきた。量子ウォークにおけるエネルギーバンド構造のトポロジは時間に依存しないハミルトニアンで記述される電子系との類推から多くの性質を理解できるため、量子ウォークはしばしば電子系におけるトポロジカル相のシミュレータと称される。しかし、そのような光学系を用いた”シミュレーション”の性能は、通常のコンピュータと比較して大きく劣っている。また、光学系を用いた電子系の模倣は機能的光学素子の開発といった応用的成果に繋がる可能性はあるが、そのような研究から理論的に新たな成果が生まれる事は稀である。

このような問題に対し著者は、孤立系や平衡系との類推からは理解できないトポロジカルな現象を探求する事で、量子ウォークにおけるトポロジカル相の研究に意義を見出している。本論文で著者は量子ウォークの持つ三つの特徴的性質に着目し、これらに起因した新奇トポロジカル現象を議論している。一つ目は、光の増幅減衰効果である。増幅減衰効果を含む開放系では光子の確率振幅もしくは光強度の総和が保存しないため、孤立系とは定性的に異なるトポロジカルな現象が起こり得

る事を示している。二つ目は、フィードフォワード制御に起因する非線形効果である。非線形系における揺らぎの発散から、線形な時間発展方程式に従う通常の孤立量子系とは異なるドラスティックな現象が起きる事を予想している。三つ目は、量子ウォークの持つ時間方向の周期性である。フロケ系と呼ばれる時間周期性を持つ系では特殊な対称性やバンド構造が有り得るため、時間に依存しないハミルトニアンで記述される孤立量子系との類推からは理解できないトポロジカル相が存在する可能性を指摘している。

本論文の構成は以下の通りである。一章では背景及び目的が概説されている。二章では、一次元の巻き付き数に焦点を絞ってトポロジカル相の導入的説明が与えられる。三章では、量子ウォークの記述方法及び量子ウォークのトポロジカル相が解説されている。四章では、増幅減衰効果を含む開放量子ウォークにおけるトポロジカル相が議論され、カイラル対称性に起因するバルクエッジ対応及びパリティ・時間反転対称性に由来するエッジ状態の特異なダイナミクスが示されている。五章では、非線形量子ウォークにおけるエッジ状態の線形安定性が調べられ、時間の離散性が分岐現象に対して本質的な役割を果たす事が実証されている。六章では、時間グライド対称性に由来するトポロジカル相が議論され、フロケ系特有の巻き付き数の表式及び具体的なモデルにおけるエッジ状態の振舞いが明らかにされる。七章ではまとめ及び今後の展望が述べられている。

これを要するに著者は、量子ウォークという光学系を舞台として、孤立系や平衡系に対する従来の理論からは予言できないトポロジカルな現象を幾つも明らかにしただけでなく、トポロジカル物性論の適用範囲を拡張することによりこの分野に対する深い理解と新たな知見を得たものであり、応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。