

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01140

研究課題名（和文）PT対称な開放系の物理：理論と実験の融合による分野横断型研究

研究課題名（英文）PT symmetry in open systems: theory and experiment

研究代表者

小布施 秀明 (Obuse, Hideaki)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：50415121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：パリティと時間反転対称性を組み合わせた対称性であるPT対称性は、非エルミートなハミルトニアンで記述される開放系の複雑なダイナミクスに統一的な理解を与える。PT対称性は、開放系の基礎的理解を深化させるだけでなく、開放系を制御する新たな指導原理にもなる。本研究では、量子ウォークを開放系に拡張することにより、実験により実証可能な様々な非エルミート開放量子系の性質を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が開始された当初は、非エルミート系に着目する国内研究者は少数であったが、本研究課題の進展に伴い、その重要性が多く研究者に注目された。その結果、物理学の分野で、非エルミート系やその新奇なトポロジカルな性質に関する研究が飛躍的に発展した。これに伴い、日本物理学会において、非エルミート合同セッションが設置され、現在も理論および実験研究が進展しつづけている。特に、非エルミート開放系の基礎的理解だけでなく、非エルミート・トポロジカル相によるエッジ状態を用いたレーザーなど、応用研究にも波及しており、社会的にも十分に意義のある研究となった。

研究成果の概要（英文）：Recently, PT symmetry, which is a symmetry combining parity and time-reversal symmetry, has been attracting much attention around various field of physics because it provides a unified understanding of the complex dynamics of open systems described by non-Hermitian Hamiltonians. PT symmetry is of great importance not only for our understanding of open systems, but also for applications, since it provides a new guiding principle for controlling open systems. In this project, we extend the quantum walk, which has been developed in the field of quantum information, to open systems to reveal various non-Hermitian open quantum system properties that can be demonstrated experimentally.

研究分野：物性理論

キーワード：非エルミート系 開放量子系 量子ウォーク トポロジカル相 PT対称性

1. 研究開始当初の背景

物理学の理論では、環境との相互作用を無視し閉じた孤立系を仮定することが一般的に行われる。特に量子力学では、閉じた系を前提とし、ハミルトニアンにエルミート性を要請することが理論基盤の根底を成しており、固有エネルギー（および観測量）が実数になることや、ハミルトニアンを生成子とするユニタリーな時間発展演算子により確率保存が保証される。しかし、現実世界では開放系と見なせる状況は一般的であるため、開放系・非平衡系の物理を進展させることは重要である。特に、環境との相互作用が強く、確率保存も成立しない開放系を理解すること、そして制御することは容易ではない。

1998年、Benderらは、ポテンシャル項が虚数で表される非エルミートなハミルトニアンであっても、パリティ(Parity)と時間反転対称性(Time-reversal symmetry)を組み合わせた対称性であるPT対称性が存在する[図1(a)の式]のであれば、その固有エネルギーが実数になり、確率保存が成立しうること(図1(a)の式)を示した[Phys.Rev.Lett. 80, 5243 (1998)]。Benderらは、この非エルミートなハミルトニアンで記述される量子力学は、従来の量子力学を内包する根源的な量子論であるとの立場であるが、より寛容な立場からは、開放量子系における粒子の流出入効果を現象論的に取り扱うと虚数ポテンシャルで表されるため、この理論は開放量子系に対する新しい現象論であるとも解釈できる[図1(b)]。以後、図1(a)の式を満たす系を、PT対称な開放系と呼ぶ。この研究をきっかけとし、PT対称性を有する非エルミートな量子系に対して、通常量子力学と類似な理論的枠組みが構築された。この理論は、通常量子力学と類似であるため理解が容易なだけでなく、粒子の流出入量がある閾値を超えると、固有エネルギーが複素数になり、確率保存も失われるというPT対称性の自発的破れが起こるという点でも興味深い[図1(c)]。

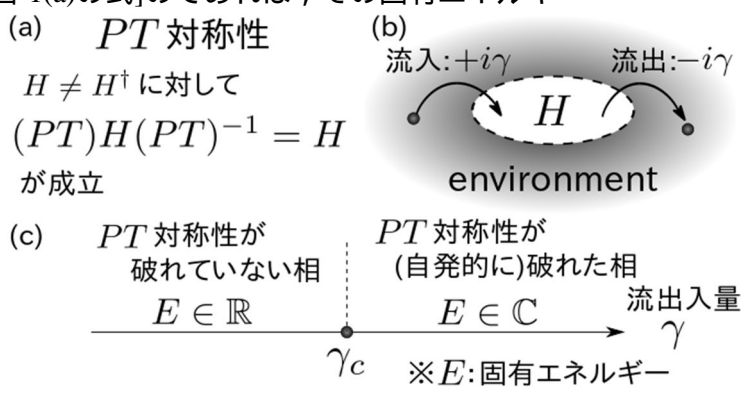


図1. (a) 非エルミートなハミルトニアンに対するPT対称性。(b)PT対称な開放量子系の概念図。粒子の流出入が現象論的に虚数ポテンシャル  $i$  で表される(c)PT対称な開放量子系の量子状態は、流入出量を表す値により、PT対称性が破れていない相と破れた相に二分される。

2009年、PT対称性に関する最初の実験が行われ、その実験結果がPT対称な開放系の理論予測と一致したことが報告された[Phys.Rev.Lett. 103, 093902 (2009)]。(この実験では、レーザー光を用い、光強度損失のある複素屈折率を有する結合光導波路を伝搬させた。レーザー光は、古典的な電磁気学のマクスウェル方程式に従うが、いくつかの近似を用いると、数学的には非エルミートなシュレーディンガー方程式と同等の方程式に還元されるため、PT対称な開放系の理論を適用できる。)これにより、複素屈折率で表される波動光学に対しては、PT対称な開放系の理論の正当性・有用性が明らかとなり、この分野の研究が加速した。特に、PT対称性が破れた相では、非直感的な現象(減衰効果による輸送特性の向上、減衰により誘起されるレーザー発振、一方向輸送等)が起こるため、非従来型のデバイス開発への道が開けた。そのため、古典レーザー光に関するPT対称性の研究は、国外では盛んに行われており、基礎研究にとどまらず、PT対称性の破れを用いたレーザー光などの応用研究も行われている。しかしながら、純粋な量子系に対しては、実験的に虚数ポテンシャルを実現することが困難であるため、検証実験

が行えなかった．そのため，純粋な開放量子系に対して PT 対称な量子力学が適用可能であるのかは，未解決問題として残されていた．

## 2．研究の目的

このような状況の中，本研究代表者の小布施と研究分担者の川上は，2013 年から，PT 対称な開放系の実験検証が可能な量子系として，量子ウォークという量子計算・情報の分野で発達した人工量子系に注目し、この系における PT 対称性とトポロジカル相に関する理論研究・実験検証を行ってきた．PT 対称な開放系の理論が，純粋な量子系に対しても適用できることを実証した研究代表者の論文を Nature Physics 誌で発表し，PT 対称な開放系の研究の新たな第一歩となった．これにより今後，PT 対称な開放系に関する理論・実験研究が盛んになると考えられる．

本研究では，このような状況を踏まえ，理論と実験の研究者が協力し，PT 対称性に関する基礎研究と応用研究を行うことにより，PT 対称な開放系に関する物理を飛躍的に進歩させることを目的とする．従来のトポロジカル相に関する研究を発展させるだけでなく，量子情報への応用を目的にエンタングルメントなど開放量子系における量子性の諸性質を明らかにする．さらには，PT 対称性に基づく量子力学が根源的な量子論となりうるのかについても研究を行う．本研究は，量子情報・量子光学・光物性・強相関量子系・トポロジカル相など専門分野が異なる理論と実験の研究者が協力して分野横断型の研究を行うことも特筆すべき点である．

## 3．研究の方法

### PT 対称な開放量子系の理論・実験研究

#### PT 対称な開放系におけるトポロジカル相の研究：

トポロジカル絶縁体のエッジ状態を誘起するトポロジカル相の研究では，空間次元が重要な役割を果たす．以前の PT 対称な量子ウォークの研究では 1 次元系のみを調べていたため，本研究では 2 次元量子ウォークに，粒子の流出入の効果を加え，PT 対称性を有するための条件を明らかにする．さらに，この系におけるトポロジカル相を理論的に調べる．また，粒子の流出入の効果により誘起される新しいトポロジカル相についての研究を行う．さらには，トポロジカル絶縁体の分野で研究されている非共系な空間群に由来する対称性を考慮することにより，開放系における PT 対称性の一般化を行う．

#### PT 対称な開放系の量子性に関する研究：

PT 対称な非ユニタリー量子ウォーク時間発展を行うエンタングルした光子対の基本的な性質を明らかにする．PT 対称な量子力学が，現象論であるのか，あるいは従来の量子力学を内包する根源的な量子論であるのかは，長らく議論が行われている．根源的な量子論であるためには，実数の固有エネルギーと確率保存に加え，物理の基本原則を満たしているか否かが重要となる．本研究では実験的検証を念頭に，これらの理論研究を粒子の流出入の効果を取り入れた PT 対称な量子ウォークの時間発展演算子に適用する．

#### 実験検証：

上記の理論結果を，量子光学デバイスにより構成される PT 対称な量子ウォークの実験にて検証を行う．本研究では，プリュースター角により光子の流出量を制御する光学

## デバイスを用いた量子ウォークを構築する

### 4. 研究成果

初年度は、開放量子系において高次トポロジカル数を有する非ユニタリ-時間発展を行う理論モデルとして3ステップ非ユニタリ-量子ウォークを構築し、そのトポロジカル相の相図等を理論的に調べた。さらに、吸収効果のある開放系における粒子の平均変位が、トポロジカル数と関係づけられることを用い、光子の吸収効果を取り入れた量子光学系における実証実験を行い、理論が正しいことを示した。さらに発展研究として、前述の系を拡張することによりPT対称性を明らかにした。また、非エルミート系におけるバルク-エッジ対応の検証として、高次トポロジカル数を有する系における複数のエッジ状態の数を波動関数振幅の振動特性から見分ける手法についての理論研究を行った。また、非エルミート系の特異な現象の一つとして知られる異常表皮効果を示す1次元量子ウォークのモデルを理論構築し、このモデルの性質についての理論研究を開始した。さらに、このモデルに対する実証実験を行うため、量子光学系における実験系構築に着手した。また、テラヘルツ波に対するPT対称性の破れを用いた非従来型導波路を実現するために、1次元鎖を用いた理論モデルに対する計算を行い、透過率の流出効果の強さ依存性についての定性的な理解を得た。

2年目は、前年度に理論研究を行ったPT対称性を有する3ステップ非ユニタリ-量子ウォークに対し、PT対称性・カイラル対称性・時間反転対称性を同時に破る摂動を加えた系への拡張を行った。摂動がない場合はトポロジカル相は整数 $Z$ で特徴づけられるが、摂動を加えると対称性が変化し、トポロジカル数は $Z_2$ で特徴づけられる。しかし、エッジ状態の数は、摂動を加えてトポロジカル数が $Z_2$ となったとしても、非エルミート系特有の例外点により、整数 $Z$ のままに保たれることが分かった。この結果より、従来知られていなかった新しい機構による非エルミート系におけるバルク-エッジ対応の破れが明らかになった。

また、高次元系への拡張として、PT対称性を有する2次元非ユニタリ-量子ウォークに関する理論研究を行った。その結果、この系には非エルミート・ワイル半金属相に伴うエッジ状態が現れることが明らかとなった。また、非線形効果を有する量子ウォークのエッジ状態のダイナミクスを非エルミート性の観点から調べた。

さらに、非エルミート系の特異な現象の一つとして知られる異常表皮効果を示す1次元量子ウォークの実証実験を目的に、量子光学系において実験系の構築を行った。

令和2年度が最終年度の予定であったが、新型コロナウイルス感染拡大に伴い、計画の遅延、および研究発表の機会が失われたため、1年間研究を延長した。令和2年度、令和3年度は、非エルミート系特有のトポロジカル相であるpoint gapトポロジカル相、および表皮効果に関する研究を行った。散逸の効果を伴う量子ウォークを用い、非自明なpoint gapトポロジカル数をもつ量子ウォークを構築し、その性質を理論的に調べた。その結果、表皮効果を反映し、全固有状態が固定端近傍に局在することが分かった。一方で、この系のダイナミクスを調べると、系の端に状態がたどり着くと、弾道的に反射することが明らかとなった。さらに、分担研究者の岡本により実験が行われ、理論と実験結果が高い精度で一致した。これにより、量子系においても表皮効果が実装され、さらに弾道的に反射するという新たな性質も明らかとなった。さらに、この系に不規則性を導入することにより、エルミート系では起こりえない、1次元系における局在-非局在転移も生じることが理論的に示された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Tachizaki, R. Sakaguchi, S. Terada, K-I Kamei, and H. Hirori	4. 巻 45
2. 論文標題 Terahertz pulse-altered gene networks in human induced pluripotent stem cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 6078 - 6081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.402815	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Naomichi Hatano and Hideaki Obuse	4. 巻 435
2. 論文標題 Delocalization of a non-Hermitian quantum walk on random media in one dimension	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168615-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2021.168615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takumi Bessho, Ken Mochizuki, Hideaki Obuse, and Masatoshi Sato	4. 巻 105
2. 論文標題 Extrinsic topology of Floquet anomalous boundary states in quantum walks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 28770-01-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.094306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小布施 秀明	4. 巻 76
2. 論文標題 withコロナでの国際会議のカタチ Localisation 2020の取組み	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 375-376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.76.6_375	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ken Mochizuki, Norio Kawakami, and Hideaki Obuse	4. 巻 53
2. 論文標題 Stability of topologically protected edge states in nonlinear quantum walks: additional bifurcations unique to Floquet systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics A:Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 085702-1--26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab6514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Makio Kawasaki, Ken Mochizuki, Norio Kawakami, and Hideaki Obuse	4. 巻 -
2. 論文標題 Bulk-edge correspondence and stability of multiple edge states of a PT symmetric non-Hermitian system by using non-unitary quantum walks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小布施 秀明, 望月 健, 金 多景, 川上 則雄	4. 巻 74
2. 論文標題 量子ウォークのトポロジカル相と光の振幅制御への応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 780-786
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Mizuta, K. Takasan and N. Kawakami	4. 巻 100
2. 論文標題 High frequency expansions for Floquet Prethermal Phases with Emergent Symmetries: Application to Time Crystals and Floquet engineering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 020301-1-5(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.020301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasan, M. Ueda, and N. Kawakami	4. 巻 123
2. 論文標題 Theory of Non-Hermitian Fermionic Superfluidity with a Complex-Valued Interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 123607-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.123601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Kimura, T. Yoshida, and N. Kawakami	4. 巻 100
2. 論文標題 Chiral-symmetry protected exceptional torus in correlated nodal-line semi-metals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115124-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.115124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Mizuta, K. Takasan, and N. Kawakami	4. 巻 100
2. 論文標題 Floquet engineering of topological phases protected by emergent symmetries under resonant drives	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 052109-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.052109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lei Xiao, Xingze Qiu, Kunkun Wang, Zhihao Bian, Xiang Zhan, Hideaki Obuse, Barry C. Sanders, Wei Yi, and Peng Xue	4. 巻 98
2. 論文標題 Higher winding number in a nonunitary photonic quantum walk	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063847-1--10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.063847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Yoshida, I. Danshita, R. Peters and N. Kawakami	4. 巻 121
2. 論文標題 Reduction of topological Z-classification in cold atomic systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 025301-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.025301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Nakagawa, T. Yoshida, R.Peters, and N. Kawakami	4. 巻 98
2. 論文標題 Breakdown of topological Thouless pumping in the strongly interacting regime	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115147-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.115147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Yoshida, R. Peters and N. Kawakami	4. 巻 98
2. 論文標題 Non-Hermitian perspective of the band structure in heavy-fermion systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035141-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.035141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Mizuta, K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami	4. 巻 121
2. 論文標題 Spatial-Translation-Induced Discrete Time Crystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 093001-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.093001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 M. Nakagawa, N. Kawakami, and M. Ueda	4. 巻 121
2. 論文標題 Non-Hermitian Kondo Effect in Ultracold Alkaline-Earth Atoms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 203001-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.203001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Yoshida, R. Peters, N. Kawakami, and Y. Hatsugai	4. 巻 99
2. 論文標題 Symmetry-protected exceptional rings in two-dimensional correlated systems with chiral symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121101(R)-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.121101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計54件 (うち招待講演 24件 / うち国際学会 29件)

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 PT symmetric non-unitary quantum walks with higher topological numbers
3. 学会等名 IIS-Chiba Workshop NH2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 PT symmetric non-unitary quantum walks with higher topological numbers
3. 学会等名 Workshop on recent topics of condensed matter physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 Symmetry and Topological Phases in Dynamical Systems: Quantum Walk Approach
3. 学会等名 TopoMat2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 Bulk-edge correspondence and stability of multiple edge states in PT symmetric non-unitary quantum walks
3. 学会等名 Topological phenomena in non-Hermitian and non-equilibrium systems, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小布施 秀明
2. 発表標題 アンダーソン転移におけるマルチフラクタル性
3. 学会等名 量子・古典における複雑系の物理と普遍性
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Norio Kawakami, Hideaki Obuse
2. 発表標題 The stability of topological edge states in non-linear quantum walks: Bifurcations unique to Floquet systems, revealed from non-unitary time-evolution operators
3. 学会等名 META2019, 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Norio Kawakami, Hideaki Obuse
2. 発表標題 The stability of topological edge states in non-linear quantum walks: Bifurcations unique to Floquet systems, revealed from non-unitary time-evolution operators
3. 学会等名 IIS-Chiba Workshop NH2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Naomichi Hatano, Joshua Feinberg, Hideaki Obuse
2. 発表標題 Statistical properties of eigenvalues in a non-Hermitian SSH model with random hopping terms
3. 学会等名 IIS-Chiba Workshop NH2019TD (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Norio Kawakami, Hideaki Obuse
2. 発表標題 The stability of topological edge states in non-linear quantum walks: Bifurcations unique to periodically driven systems
3. 学会等名 The 4th A3 Metamaterials Forum 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makio Kawasaki, Ken Mochizuki, Norio Kawakami, Hideaki Obuse
2. 発表標題 Bulk-edge correspondence of a non-unitary three-step quantum walk with PT symmetry
3. 学会等名 The 4th A3 Metamaterials Forum 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Julia M. Brevoord, Hideaki Obuse, Yasuhiro Asano, R. J. Boucherie, A. Brinkman
2. 発表標題 Two-Dimensional Quantum Walk with PT Symmetry
3. 学会等名 The 4th A3 Metamaterials Forum 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望月 健, 別所拓実, 佐藤昌利, 小布施秀明
2. 発表標題 二次元量子ウォークにおける time-glide symmetry に守られたエッジ状態
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井村健一郎, 小布施秀明, 川畑幸平, 羽田野直道
2. 発表標題 非エルミート・トポロジカル相の輸送特性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望月健, 金多景, 川上則雄A, 小布施秀明
2. 発表標題 カイラル対称性を有する一次元開放フロケ系におけるトポロジカル数
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河崎真樹男, 小布施秀明
2. 発表標題 非エルミート系における例外点および非相反性を用いた光学センサーの感度評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 生部賢, 井村健一郎, 小布施秀明, 羽田野直道
2. 発表標題 非エルミート系における自発電流: 表皮効果、近接効果、連続の式
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makio Kawasaki, Ken Mochizuki, Norio Kawakami, Hideaki Obuse
2. 発表標題 Bulk-edge correspondence of a non-unitary three-step quantum walk with PT symmetry
3. 学会等名 TopoMat2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Takuya Bessho, Masatoshi Sato, Hideaki Obuse
2. 発表標題 Time-glide symmetric topological quantum walk
3. 学会等名 TopoMat2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Hermitian/Non-Hermitian Kondo Effect in Ultracold Fermionic Systems
3. 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Non-Hermitian quantum phenomena in correlated systems
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Non-Hermitian quantum phenomena in correlated fermion systems
3. 学会等名 Emergent phenomena in ultracold atoms: merging topology, interaction, and dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Non-Hermitian Properties of Dissipative Quantum Gases with Correlation
3. 学会等名 SUPERSTRIPES 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Correlation effects in non-Hermitian fermionic systems:Nonequilibrium phenomena
3. 学会等名 3rd EPiQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 Topological phases on quantum walks
3. 学会等名 Workshop: Mathematical approach for topological physics (I) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 Edge states in PT symmetric quantum walks with higher topological numbers
3. 学会等名 Non-Hermitian Physics - PHHQ XVIII (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Norio Kawakami, Hideaki Obuse
2. 発表標題 PT symmetry and stability of edge states in nonlinear quantum walks
3. 学会等名 Non-Hermitian Physics - PHHQ XVIII (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小布施 秀明
2. 発表標題 トポロジカル相と対称性を活用した量子状態制御：量子ウォークによるアプローチ
3. 学会等名 量子情報・物性の新潮流
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 望月健, 川上則雄, 小布施秀明
2. 発表標題 非線形1次元量子ウォークにおけるエッジ状態の安定性
3. 学会等名 量子情報・物性の新潮流
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤澤有祐, 矢久保考介, 川上則雄, 小布施秀明
2. 発表標題 動的変化するトポロジカル相を用いたエッジ状態輸送
3. 学会等名 量子情報・物性の新潮流
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河崎真樹男, 望月健, 川上則雄, 小布施秀明
2. 発表標題 PT対称な3ステップ量子ウォークにおけるトポロジカル相
3. 学会等名 量子情報・物性の新潮流
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 望月健, 小布施秀明
2. 発表標題 ランダムホッピング項を持つ非エルミートSSH模型における準位統計
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 Topological phases on PT symmetric non-unitary quantum walks
3. 学会等名 second TMS-PKU alliance workshop in Beijing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小布施 秀明
2. 発表標題 PT対称な非エルミート系におけるトポロジカル相と実証実験: 量子ウォークによるアプローチ
3. 学会等名 第10回トポロジー連携研究会「非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 Topological Phases on Non-Hermitian systems with PT symmetry: Quantum Walk Approach
3. 学会等名 Topological Material Science: 4th Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小布施 秀明
2. 発表標題 PT対称な非エルミート系におけるトポロジカル相と実証実験：量子ウォークによるアプローチ
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 領域4,1,5,11合同シンポジウム「非エルミート量子力学の新展開」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望月健, 羽田野直道, Joshua Feinberg, 小布施秀明
2. 発表標題 乱れのある一次元非エルミート模型における統計的性質
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤澤有祐, 矢久保考介, 川上則雄, 小布施秀明
2. 発表標題 トポロジカル相の動的制御による1次元エッジ状態の輸送
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河崎真樹男, 望月健, 川上則雄, 小布施秀明
2. 発表標題 IBM Qを用いた3ステップ量子ウォークの実装
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Floquet topological phases in correlated electron systems
3. 学会等名 KIAS-KAIST Workshop on Topology an Correlation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Emergent topological phases in correlated systems by laser irradiation
3. 学会等名 New Trends in Topological Insulators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Laser induced topological phases in correlated systems
3. 学会等名 Erice Workshop 2018: Majorana Fermions and Topological Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Floquet Topological Phase Transitions in Correlated Systems
3. 学会等名 The Second TMS-PKU Alliance Workshop on "Topological Materials and Quantum Materials" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Correlation effects in non-Hermitian quantum systems
3. 学会等名 Japan-Swiss Workshop on "Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM 2018)" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川上則雄
2. 発表標題 強相関系における非エルミート量子現象
3. 学会等名 非エルミート系および光学実験に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣理英基
2. 発表標題 高強度テラヘルツ光が誘起する非線形・非平衡現象
3. 学会等名 非エルミート系および光学実験に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本亮
2. 発表標題 光子を用いた量子情報科学技術
3. 学会等名 非エルミート系および光学実験に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 non-unitary quantum walk approach for non-Hermitian physics
3. 学会等名 Mathematical approach for topological physics (III) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小布施 秀明
2. 発表標題 非エルミート系の物理：量子ウォークによるアプローチ
3. 学会等名 第9回統計物理学懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 Non-Hermitian physics and non-unitary quantum walks
3. 学会等名 統計力学セミナー (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小布施秀明, 川上則雄, 岡本亮
2. 発表標題 非ユニタリー量子ウォークにおける表皮効果の理論と実証実験
3. 学会等名 2021年物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河崎真樹男, 望月健, 小布施秀明
2. 発表標題 散逸量子系における副格子対称性に保護されたエッジ状態
3. 学会等名 2021年物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田紘明, 川上則雄, 岡本亮, 小布施秀明
2. 発表標題 2内部自由度量子ウォークによる量子探索効率の次元依存性と解析的評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山岸愛, 羽田野直道, 小布施秀明
2. 発表標題 量子アクティブ粒子の非エルミート量子ウォークを用いた定義
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽田野直道, 小布施秀明
2. 発表標題 非ユニタリー量子ウォークにおける非エルミート非局在転移
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 小布施秀明(共編者:今野紀雄, 井手勇介)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 培風館	5. 総ページ数 21
3. 書名 量子ウォークの新展開 数理構造の深化と応用(「15章 トポロジカル絶縁体と量子ウォーク」担当)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡本 亮 (Okamoto Ryo)  (10435951)	京都大学・工学研究科・准教授  (14301)	
研究分担者	廣理 英基 (Hirori Hideki)  (00512469)	京都大学・化学研究所・准教授  (14301)	
研究分担者	川上 則雄 (Kawakami Norio)  (10169683)	京都大学・理学研究科・教授  (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Localisatoion seminar series	開催年 2021年~2021年
--	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------