

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18733

研究課題名（和文）PT対称な量子光学系の実現による革新的量子状態制御の探索

研究課題名（英文）Realization of PT-symmetric quantum optical systems towards innovative quantum state control

研究代表者

岡本 亮（Okamoto, Ryo）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10435951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：まず、量子光学技術を駆使することで、開放量子系における光子の流出入効果の制御法を開発した。そして、開発した手法を用いることで、開放量子系に新たな自由度を導入、新奇な物理現象の観測を目指した。その結果、反射境界を持つ量子ウォーク系における光子の移動に対し、流出入効果に由来する非対称性をもたせると、反射境界部分に特異な現象が生じることを理論的に提案、そして、それを実験で実証することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開放量子系の物理学は、量子力学の理論を構築する上で重要な演算子のエルミート性を要請せずに、開放系を含むより広範囲な量子系の物理を包括的に説明する試みである。開放量子系においては、PT対称性の破れにともないダイナミクスの急激な変化が生じることが知られている。また、粒子の流出入量を新たな制御パラメータとすることが可能となる。本研究は、光子の流出入量の制御する新たなアプローチを確立し、新奇な物理現象の観測に成功したものである。本研究成果は、基礎物理学として重要なことはもちろん、新しい量子状態の制御法や量子デバイス開発への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：First, we developed a method to control the effect of loss and gain of photons in open quantum systems. Then, by using the developed method, we introduced new degrees of freedom into open quantum systems and aimed to observe novel physical phenomena. Consequently, we theoretically proposed and experimentally demonstrated that a peculiar phenomenon occurs at the reflection boundary of a quantum walk system when the system has an asymmetry regarding the effect of loss.

研究分野：量子光学

キーワード：開放量子系 量子光学 量子情報科学

## 1. 研究開始当初の背景

近年、粒子の流出入量が釣り合った開放量子系に対して定義される、空間反転対称性(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 対称性は、開放系の複雑なダイナミクスに統一的理解を与え、また開放系を制御する新たな指導原理にもなることから、注目を集めている。具体的には、PT 対称な開放量子系の物理学は、量子力学の理論を構築する上で重要な演算子のエルミート性を要請せずに、開放系を含むより広範囲な量子系の物理を包括的に説明する試みである。PT 対称な開放量子系においては、PT 対称性の破れにともないダイナミクスの急激な変化が生じることが知られている。また、粒子の流出入量を新たな制御パラメータとすることが可能となる。これらの PT 対称な物理系の特徴は、基礎物理学として重要なことはもちろん、新しい量子状態の制御法や量子デバイス開発への応用が期待される。古典的なレーザー光に対しては、光吸収媒質とゲイン媒質を組み合わせた系において粒子の流出入量の釣り合った厳密に PT 対称な開放系が実現され、単一モードレーザー発振や、光損失効果により誘起されるレーザー発振などの非従来型のデバイス応用に向けた研究が活発に行われている。

一方で、PT 対称な量子系は、分担者の小布施と連携研究者の川上が行った、量子光学系に対する理論研究を基に、2017 年に光子の流出のみを制御した近似的な PT 対称な量子光学系が実験的に実現された[Nature Physics 13, 1117 (2017)]。しかし、光子の流出入量の釣り合った厳密に PT 対称な量子光学系は、光子の流出及び流入効果の制御技術が確立されていないため、まだ世界のどのグループも実現に成功していない。

## 2. 研究の目的

本研究では、量子光学技術を駆使することで、開放量子系の新たな制御法の開発を試みた。そして、開発した手法を用いることで、開放量子系に新たな自由度を導入、新奇な物理現象の観測を目指した。さらに、その応用として、量子状態制御手法、及び量子デバイスの開発への道を拓くことを、理論・実験の両面から検討した。

## 3. 研究の方法

本研究では、下記の 3 つの項目について研究を進めた。

### (1) 光子に対する制御可能な流出入過程の検討

PT 対称な開放量子系の実現には、光子の流出入を自在に制御する必要がある。まず、光子の流出に関しては、実現されていたものの、特別な素子が必要であり、流出量の制御が困難であった。そこで、市販の光学素子を用いかつ流出量が制御できる方法について提案、評価した。一方で、光子の流入については、これまで開放量子系に実装されてこなかった。本研究では、光子の流入についても、パラメトリック増幅を用いた方法について検討・評価を進めた。

### (2) 量子ウォークを用いた開放量子系の実現

本研究では、開放量子系を実現するアプローチとして、人工量子系である量子ウォーク系に着目した。量子ウォークは、そのダイナミクスを高い精度で制御できるため、様々な量子物理現象の量子シミュレータとして用いられてきた。量子ウォークを実験的に実現するアプローチとして、直列構造とループ構造の 2 種類について構築を検討した。

## 4. 研究成果

本研究において、以下の成果を得た。

### (1) 光子に対する制御可能な流出入過程の検討

まず、光子の流出過程についての成果を述べる。PT 対称性を反映した量子ウォーク内での光子の流出過程では、一方のコイン状態には、全く損失がないが、直交するもう一方のコイン状態には、所望の損失を生じさせる必要がある。光子を用いた量子ウォークの場合、一般に光子の偏光がコイン状態に用いられるが、従来の研究では、流出効果を実装するために、部分偏光ビームスプリッターが用いられてきた[Nature Physics 13, 1117 (2017)]。この素子は、特殊な誘電体多層膜コーティングにより、偏光毎に異なる反射率を実現するものである。しかし、これを用いた場合、1 度設計した特性を変えることができないため、光子の流出量を後から制御することができない。そこで、本研究では、ガラス界面におけるプリユースター角付近の偏光依存性を用いることで、光子の流出量が制御可能な手法を提案した。並行度が高い複数枚のガラス板(窓板)の角度と枚数を変化させることで光子の流出量の制御が可能であることを確認した。具体的には、ターゲットとなる流出量により枚数を決定し、その後、角度により微調整を行った。評価の結果、例えば、2 枚のガラス板を組み合わせることで、水平偏光に対しては透過率 98%、垂直偏光に対しては透過率 65%を実現することができた。なお、垂直偏光の損失については、ガラス板の角度を変化させることで制御可能なことも確認できた。

次に、光子の流入過程の実装に向けた検討について述べる。流入過程については、単一光子状

態に対して、パラメトリック増幅過程を通じて光子の総量が増加することを確認した。まず、単一光子状態を生成した。波長 405nm の連続波レーザー光をポンプ光として、非線形光学結晶に入射し、パラメトリック下方変換過程を通じて光子対を生成した。光子が対で同時に発生するため、片側の光子を検出することで、もう片側の光子の存在が担保される伝令付き単一光子源となる。次に、非同軸条件の非線形光学過程を用いた光子流入系を構築した。非線形光学結晶に、単一光子と増幅用の LED 光を、角度をつけて入射した。非線形光学過程を通じて、LED 光の強度に依存して、入力した単一光子の総量が増加することを確認した(図 1)。この手法により、光子の流入量の制御が可能であることを確認した。

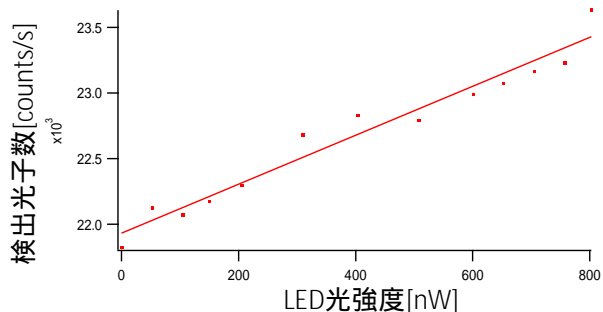


図 1 . 光子の流入過程の検証実験の結果。

## (2) 量子ウォークを用いた開放量子系の実現

量子ウォークを用いて開放量子系を実現した。具体的には、研究分担者の小布施が新たに着想した表皮効果についての理論提案について実験的に検証した。表皮効果は、開放量子系に特有の現象であるものの、その特性は十分に理解されていない。本提案では、反射境界を持つ量子ウォーク系における光子の移動に対し、流出効果に由来する非対称性をもたせると、反射境界部分に特異な現象が生じることが予想された。まずは、直列構造を持った量子ウォーク系に、光子の流出過程のみを実装した原理検証実験を進めた。光子の流出過程については、独自に確立した手法を用いた(詳細は、(1)光子に対する制御可能な流出過程の検討)。光子の流出過程を時間発展に組み込んだ量子ウォーク系を構築し、微弱レーザー光を構築した系に導入し、その時間発展をビームプロファイラで測定・評価した。実験の結果、時間発展に用いた光子の流出過程が適切に動作していることが確認できた。そこで、光源を、パラメトリック下方変換過程によって発生した光子対を用いた伝令付き単一光子源に変更した。入力を単一光子に変更したことで、出力部では、ファイバプロップと単一光子検出器を用いた光子出力分布測定システムを構築した。ファイバプロップを一次元的に走査することで、出力部分の光子の空間的な分布を測定できるようにした。また、理論提案を実現するために、光子を用いた量子ウォークで初めて、反射境界を実装した。反射境界としては、量子ウォークのサイト間の位相関係を維持することが可能な特殊な光学素子を設計し、特注した。この特注光学素子を用いて検証実験を行い、反射境界が実現できていることを確認した。そして、構築した量子ウォーク系で時間発展を観測した。2種類の条件の反射境界を準備することで、表皮効果だけでなく、エッジ状態も実現できるようにした。これにより、光子の反射境界付近の振る舞いについて、これら二つの異なる物理現象について、同じ実験系で観測することに成功した(図 2)。本成果については現在論文にまとめているところである。

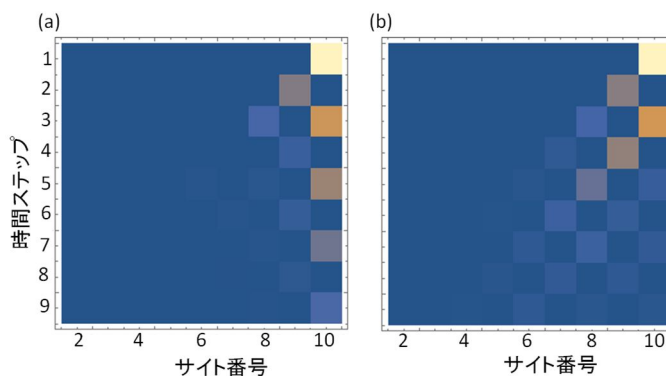


図 2 . 量子ウォーク実験結果。(a) エッジ状態あり。(b) エッジ状態なし。

上記と並行して、ループ構造を

用いた量子ウォークの実験系についても、検討を進めた。特に、ループ構造にとって、重要である光スイッチ部分の詳細な評価を行い、必要な条件を明らかにした。

以上のように、PT 対称な開放量子系の実現に向けて様々な研究成果を得ることができた。また、上記以外にも、本研究に関連して、光子の散逸を古典的な限界を超えて計測する手法の提案と解析(New Journal of Physics 2020)や、量子ウォークのトポロジカル相の理論的な解析(Physical Review B 2020)についても成果を得ている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kawasaki Makio, Mochizuki Ken, Kawakami Norio, Obuse Hideaki	4. 巻 2020
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 12A105-1~23
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Mochizuki Ken, Kim Dakyeong, Kawakami Norio, Obuse Hideaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Bulk-edge correspondence in nonunitary Floquet systems with chiral symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 062202-1~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.102.062202	査読の有無 無
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 Mochizuki Ken, Hatano Naomichi, Feinberg Joshua, Obuse Hideaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Statistical properties of eigenvalues of the non-Hermitian Su-Schrieffer-Heeger model with random hopping terms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 012101-1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.102.012101	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 Mochizuki Ken, Bessho Takumi, Sato Masatoshi, Obuse Hideaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Topological quantum walk with discrete time-glide symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035418-1~15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.035418	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 Okamoto Ryo, Tokami Yuta, Takeuchi Shigeki	4. 巻 22
2. 論文標題 Loss tolerant quantum absorption measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 103016 ~ 103016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abbab4	査読の有無 無
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Hideaki Obuse
2. 発表標題 Quantum walks, Anderson localization, and Non-Hermitian physics
3. 学会等名 Localisation 2020 (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 開放系量子ウォークにおけるトポロジカル相
3. 学会等名 RIMS 共同研究 開放系 QW とトポロジカル相の数理 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Norio Kawakami, and Hideaki Obuse
2. 発表標題 Stability of topological edge states in nonlinear quantum walks: Bifurcations unique to Floquet systems
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Naomichi Hatano, Joshua Feinberg, and Hideaki Obuse
2. 発表標題 Statistical Properties of the Non-Hermitian SSH Model and Symmetry Inheritance owing to Real Spectra
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月健, 金多景, 川上則雄, 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バルクエッジ対応
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
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 例外点を用いた非エルミート光学式ジャイロスコープの分解能
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020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次元2自由度量子ウォークにおける量子探索の最適探索時間の評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 望月健, 別所拓実, 佐藤昌利, 金多景, 川上則雄, 小布施秀明
2. 発表標題 開放系・フロケ系を探索する舞台としての量子ウォーク
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 別所拓実, 望月健, 佐藤昌利, 小布施秀明
2. 発表標題 量子ウォーク系におけるバルクエッジ対応の破れ
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Okamoto
2. 発表標題 Photonic quantum technologies for quantum sensing: from quantum absorption measurement to quantum state estimation
3. 学会等名 SPIE photonics west 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021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 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 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 岡本 亮
2. 発表標題 Photonic quantum circuits for quantum measurement
3. 学会等名 Asia-Pacific Laser Symposium 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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 Edge states in PT symmetric quantum walks with higher topological numbers
3. 学会等名 Non-Hermitian Physics - PHHQP 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 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

〔図書〕 計0件

〔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	小布施 秀明  (Obuse Hideaki)  (50415121)	北海道大学・工学研究院・助教    (10101)	

	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
研究協力者	川上 則雄  (Kawakami Norio)  (10169683)	京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授    (14301)	
研究協力者	廣理 英基  (Hirori Hideki)  (00512469)	京都大学・化学研究所・准教授    (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0件

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
---------	---------