

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01828

研究課題名（和文）境界条件制御によって切り拓く量子ウォークの新たな応用

研究課題名（英文）Novel Applications of Quantum Walk Explored by Controlling Boundary Conditions

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） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、量子ウォーク系の境界条件の重要性に着目、並進対称性を有する2次元境界条件を持つ量子ウォーク系の実現を目指した。その結果、必要となる特殊な空間モードを有する光の状態の生成、およびその生成効率の最適化に成功した。さらに、そのような空間モードにおける、光子の量子状態の空間シフト演算を実現した。また、光子を用いた量子ウォークの分析・評価に役立つ、量子系の時間発展を解析する新たな手法を確立し、実験的に実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の量子ウォークの実験的な研究は、その多くで境界条件が考慮されておらず、境界で粒子が失われる吸収境界条件で行われてきた。これは、確率保存が成立しない特殊な系であり、その応用も限られる。本研究で実現した量子ウォークの時間発展は、周期境界条件を実装できるため、多様な応用につながる。例えば、古典系よりも高速な「量子探索」が、2次元の周期境界条件により実現できる。さらに、境界が重要な役割を果たす様々なトポロジカルな現象の探索にもつながる。このように、本研究成果の波及効果により、多岐にわたる学術的・社会的意義が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the boundary conditions in quantum walk systems and aimed to realize a quantum walk system with two-dimensional boundary conditions that possess translational symmetry. As a result, we succeeded in generating optical states with special spatial modes and optimizing the efficiency of their generation. Furthermore, we realized the spatial shift operation for the photons in such spatial modes. Additionally, we theoretically proposed and experimentally demonstrated a novel method for analyzing the time evolution of quantum systems, which is useful for the analysis and evaluation of quantum walks using photons.

研究分野：量子光学、量子コンピューティング、量子センシング

キーワード：量子ウォーク 量子光学 量子探索 量子シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子ウォークの概念は、電子や励起子等の量子力学に従う粒子の時間発展をモデル化したものとして、古典的ランダムウォークを量子系に拡張することで提案された。例えば、1次元の古典ランダムウォークでは、コインを投げて、コインが表なら左へ、裏なら右へと粒子を移動させる。一方、量子ウォークでは、量子的粒子の内部状態(スピン等)をコインの表と裏に対応付ける。そのため、コインが表と裏の量子重ね合わせ状態をとることができる。従って、例えば、コインが表と裏の重ね合わせ状態だとすると、次のステップで粒子は、右方向に移動した状態と、左方向に移動した状態の重ね合わせ状態となる。

量子ウォーク系は、多様な量子現象をシミュレートできることが分かっており、活発な研究が行われてきた。例えば、トポロジカル絶縁体のエッジ状態をシミュレート可能なことが示され、実験的に実証されている(Nat. Commun. 3, 882(2012))。また、研究分担者である小布施らは、近年注目を集めているパリティ-時間反転対称(PT対称)な非エルミート・ハミルトニアンで記述される開放量子系が、量子ウォーク系で実装できることを理論的に示し(Phys. Rev. A 93, 062116 (2016))、中国のグループと共に実験的に実証している(Nat. Physics 13, 1117(2017))。さらに、光合成細菌の光捕集系における、超高速なエネルギー移動ダイナミクスを説明可能なモデルとしても有望視されている。また、多粒子系の量子ウォークは、特殊なグラフ構造を用いることで、万能な量子コンピュータを効率的にシミュレート可能なことも分かっている(Science, 339, 791(2013))。また、量子探索アルゴリズムに関しては、並進対称性を持った2次元量子ウォーク系であれば、特殊なグラフ構造を用いずとも実装可能なことが報告されている(1次元系では探索できない)。

以上で述べたように、これまで量子ウォークに関して、様々な理論提案がなされ、実験的な実証が行われてきた。しかしながら、あらゆるシミュレーションにとって非常に重要な「境界条件」の検討が十分になされてこなかったため、実験でシミュレート可能な量子現象が限定されてしまっていた。特に、並進対称性を有する2次元境界条件の実現は非常に重要であり、例えば、量子ウォーク型量子探索アルゴリズムの実装や、生体分子等に多い円環状の分子の量子シミュレーションには不可欠である。しかし、これまでほぼ全ての実験は、境界条件を考慮していないため、単に境界で粒子が失われる吸収境界条件で行われてきた。これは、確率保存が成立しない特殊な系であり、その応用も限られる。

2. 研究の目的

本研究では、量子ウォーク系の境界条件の重要性に着目、並進対称性を有する2次元境界条件を持つ量子ウォーク系の実現を目指した。そのために、独自のアプローチとして花弁状入り子構造に基づく時間発展プロトコルを提案、光子を用いた実験的な実装を進めた。また、当初予定していた研究に加え、量子ウォーク系における光子の経路の解析に役立つ新たな手法を提案、実証した。

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) 花弁状空間モードを持つ光の生成とその評価

空間位相変調器を用いて、花弁に対応する部分にのみ、回折格子を作り、光を入射することで、花弁状空間モードを有する光を生成した。回折効率を高めるために、ブレード回折格子を採用した。空間位相変調器は離散的な画素で構成されるため、その変調は階段状となる。その際、階段回折格子の1周期あたりの段数と、回折効率の関係を調べ、花弁状空間モード生成にとっての最適なパラメータを探した。

(2) 偏光サニアック干渉計を用いた空間シフト演算の実現

2次元境界条件を持つ量子ウォーク系の空間シフト演算を、ダブリズムを組み込んだ偏光サニアック干渉計によって実現した。まず、偏光ビームスプリッタで構成される偏光サニアック干渉計を構築し、その安定性や明瞭度などを確認した。その後、独自に設計した自動制御可能なダブリズムシステムを組み込んだ。ダブリズムを組み込んだ偏光サニアック干渉計に花弁状空間モードを有する光を入力し、その空間シフト演算が実現できているかを評価した。

(3) 光子の時間発展の新奇な測定法の確立と実証

光子を用いた量子ウォークの分析・評価に役立つ、量子系の時間発展を解析する新たな手法を確立し、実験的に実証した。量子力学において、量子系は射影測定によって不可逆的に変化する。したがって、量子系を破壊せずにその時間発展を探ることが量子現象を理解する鍵となる。そこで、光子の時間発展に関する情報を、経路に損失を加えることで抽出する新たな手法を提案し、実験的に実証した。また、光子が消失した後、再出現するというパラドキシカルな時間発展を同手法で実証するとともに解析した。

4. 研究成果

(1) 花弁状空間モードを持つ光の生成とその評価

空間位相変調器で生成する階段回折格子の1周期あたりの段数と回折効率の関係を実験的に調べた。空間的にガウス分布を持った光を、回折格子を表示した空間位相変調器に入射し、レンズとスリットを使ってその一次光を分離した。分離された一次光の強度の入射光強度に対する比を回折効率として評価した。回折格子の段数を、2～32段まで変化させた時の回折効率を記録した結果を図1(上)に示す。実験結果から、段数が増加するほど回折効率が高くなることが分かった。一方で、回折格子の段数が増えると、格子周期が増加(格子周期 = $20\ \mu\text{m} \times \text{段数}$)するため、0次回折光と1次回折光の間隔が狭くなる。その結果、段数が増えると、1次回折光の分離効率が低下する。図1(下)は、格子周期を変化させた時の0次光と1次光の間隔である。実験の結果、64段にすると、0次回折光と1次回折光の重なりが大きく、分離効率が低下することが分かった。以上の結果から、本研究では、花弁状空間モードを持つ光を生成する際の最適な段数は、32段であることが分かった。

次に、上記の条件で花弁状空間モードを持つ光を生成した。図2に、スリット後に、適切なレンズを設置し、空間位相変調器面を結像する場所にCCDを設置し測定した結果を示す。花弁状空間モードを持つ光が生成できること、また、空間位相変調器に表示するパターンを変化させることで、花弁数などを変えることができることを確認した。

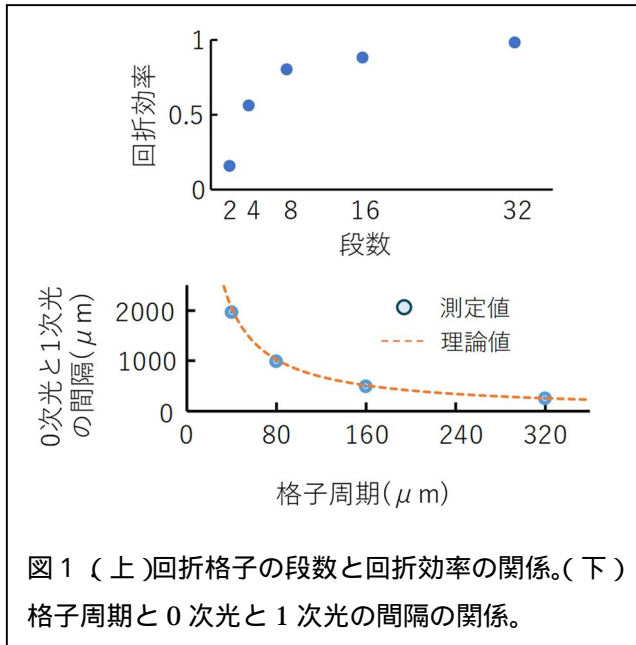


図1(上)回折格子の段数と回折効率の関係。(下)格子周期と0次光と1次光の間隔の関係。

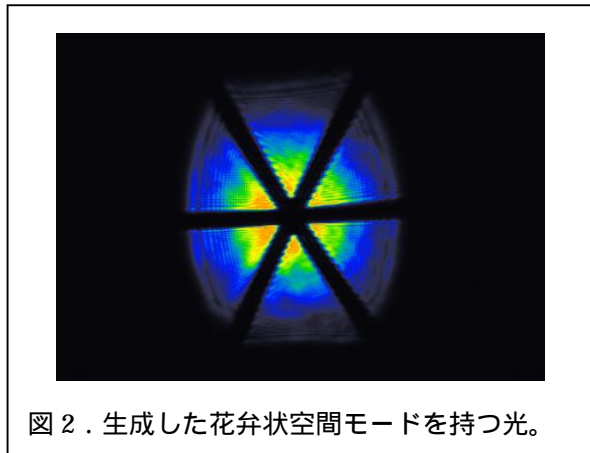


図2. 生成した花弁状空間モードを持つ光。

(2) 偏光サニアック干渉計を用いた空間シフト演算の実現

ダブルプリズムを組み込んだ偏光サニアック干渉計を用いて量子ウォークの空間シフト演算が実現できることを確かめた。具体的には、花弁1枚だけに光が分布する状態を入力状態とし、ダブルプリズムの回転を様々変化させた時の出力の光の分布を測定した。まず、コイン状態(入力光の偏光状態)として、垂直偏光もしくは水平偏光を選択した。測定の結果、コイン状態に応じて、異なる方向に入力分布が空間シフト(回転)することが分かった(図3上段)。次に、重ね合わせ状態のコイン(斜め偏光状態)を入力した。その結果、空間シフトにより、重ね合わせ状態として分離した分布が得られた(図3下段)。また、異なる方向に回転した分布が反対側で再度重ね合わされると、それらが干渉することを確認した。

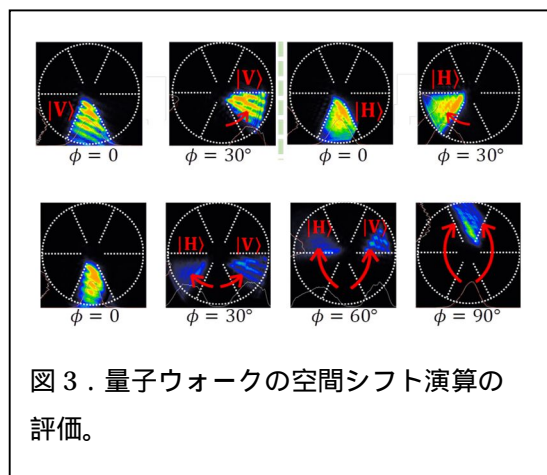


図3. 量子ウォークの空間シフト演算の評価。

(3) 光子の時間発展の新奇な測定法の確立と実証

まず、光子が特定の経路を通る確率に対応する「逐次弱値」と呼ばれる量を、経路に損失を与えることで測定できることを理論的に明らかにした。そして、光子を用いた系で、「粒子の消失と再出現」と呼ばれるパラドキシカルな現象を実験的に実装するとともに、光子の逐次弱値の測定を通してその現象を分析した(PNAS Nexus 2023)。局所的な弱値による単純な解釈は、理論的

に予測されるような、光子の「消失」と「再出現」を示唆しているように見えた。しかし、一方で、逐次弱値の測定結果から、光子が消失したかのように見えていた時間・空間的な地点にも、光子が足跡を残していたことが分かった(図4)。これは、光子の消失と再出現の間で、光子の空間的な情報が完全に消失するわけではないことを示す。これらの結果は、時空間的に局所的な測定量だけでは、すべての種類の量子的な時間発展を完全に説明できないことを意味しており、一般に高次の相関が必要であることを明らかにしたものである。このような、新たな量子的な時間発展の測定手法は、量子ウォーク系に限らず、様々な量子物理的な現象の解明に役立つことが期待できる。

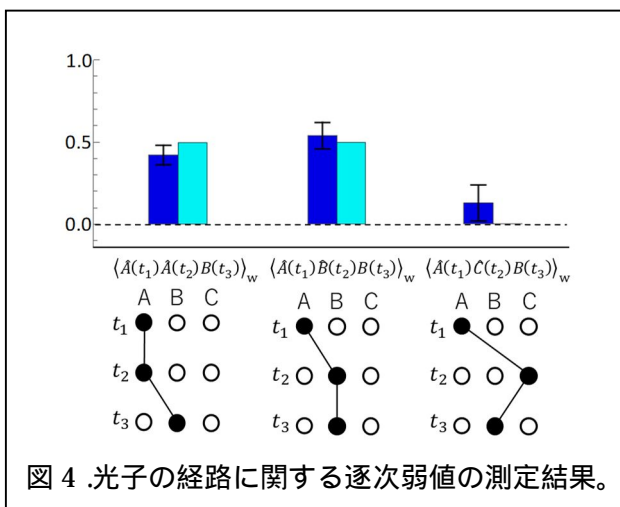


図4.光子の経路に関する逐次弱値の測定結果。

以上のように、並進対称性を有する2次元境界条件を持つ量子ウォーク系の実現に向けた様々な研究成果を得ることができた。上記以外にも、本研究に関連して、量子ウォーク系の評価にも使用できる干渉計内の位相や振幅の測定に関する理論的な研究 (Physical Review A 2020) および多次元の量子ウォークに関する理論的な研究 (Physical Review A 2023) などの多数の成果を得ている。

本研究に対する、研究分担者である北海道大学の小布施秀明准教授、およびバル＝イラン大学の Eliahu Cohen 准教授のご支援に感謝します。また、研究室の竹内教授をはじめとしたスタッフ、および学生の皆様のご協力に感謝します。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

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 Takako Endo, Norio Konno, and Hideaki Obuse	4. 巻 66
2. 論文標題 RELATION BETWEEN TWO-PHASE QUANTUM WALKS AND THE TOPOLOGICAL INVARIANT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Yokohama Mathematical Journal	6. 最初と最後の頁 1-59
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18880/00014026	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 Ryo Okamoto, Tatsuki Tahara	4. 巻 104
2. 論文標題 Precision limit for simultaneous phase and transmittance estimation with phase-shifting interferometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033521-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.104.033521	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8件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

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 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(2022年)
4. 発表年 2022年

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 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

〔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・准教授 (10101)	

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			
イスラエル	バル＝イラン大学			