

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01005

研究課題名（和文）非エルミート系の非平衡輸送現象：物理量演算子を定義する枠組みの構築

研究課題名（英文）Nonequilibrium Transport Phenomena in Non-Hermitian Systems: Framework of Defining Physical Operators

研究代表者

羽田野 直道 (Hatano, Naomichi)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：70251402

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,200,000円

研究成果の概要（和文）：非エルミート量子系は新しい分野として成長しつつあります。本研究では非エルミート系の伝導現象の理論的枠組みを開発しました。非エルミート系では物理量の定義に注意が必要で、例えば実験に対応する電流演算子が何であるかは不明でした。しかし、このような問題意識は広く共有されているとは言えません。現在のほとんどの理論は非エルミート・ハミルトニアン固有値と固有ベクトルを調べているだけで、物理量に非エルミート性がどのような影響を与えるのかは、ほとんど研究されていませんでした。本研究では電流演算子の定義についての問題意識を持つことから出発し、非エルミート系での輸送現象の実験に正しく対応する理論を開発しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学の講義ではハミルトニアンはエルミート演算子であるべしと教えます。しかしこれは孤立して閉じた系の量子力学です。現実には孤立した量子系など存在せず、環境と結合してエネルギーや粒子をやりとりしたり、測定器を結合させて測定データを得たりします。このとき、注目する量子系ではエネルギーが保存せず、そのハミルトニアンは決してエルミート演算子ではありません。

これまでは実験で、外界の影響を排除するために多大な労力と資金を投じてきました。外界の影響を考慮済みの非エルミート量子力学が発展すれば、むしろ外界の影響を利用した実験ができるでしょう。それは物理学にパラダイムシフトを起こすでしょう。

研究成果の概要（英文）：The non-Hermitian quantum system is growing as a new research field. In the present study, we developed a theoretical framework of transport phenomena in non-Hermitian systems.

Caution is necessary in defining physical quantities in non-Hermitian systems. For example, the correct definition of the current operator that can be used to analyze experimental data has not been known. Nonetheless, the fact has not been shared by the whole research community. Most of the current studies analyze only eigenvalues and eigenstates of the non-Hermitian Hamiltonian, but not how the non-Hermiticity affects physical quantities. In the present study, we start with defining the current operator and thereby developed the theory that correctly corresponds to experimental situations.

研究分野：物性基礎論・量子基礎論

キーワード：非エルミート量子力学 開放量子系 輸送

1. 研究開始当初の背景

1996年に研究代表者・羽田野が「非エルミート量子力学」と銘打った論文[1]を発表して以来、非エルミート系の研究はコミュニティを拡げてきました。Lindblad方程式でジャンプ項が効かない時間スケールや、ジャンプ項を事後選択で取り除いた状況で、非エルミート・ハミルトニアンは開放量子系のダイナミクスを正しく記述します。非エルミート・トポロジカル系への興味も相まって、2～3年前から論文数が急速に増加し、今や一つの研究分野へと脱皮しようとしています(図1参照)。

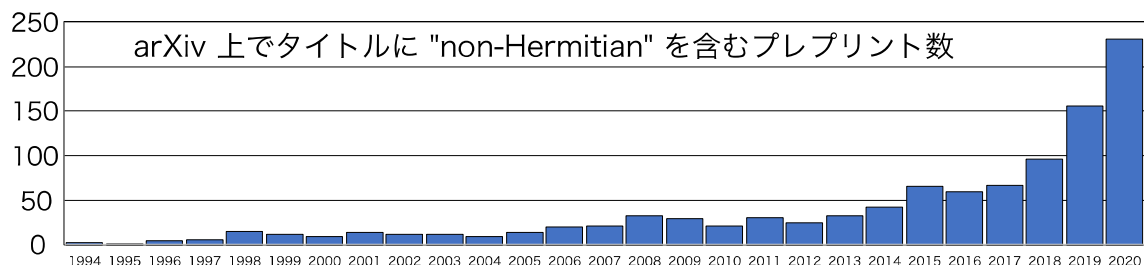


図1: arXivに登録された、non-Hermitianをタイトルに含むプレプリントの数の経年変化。2020年10月21日現在。

ただし、ほとんどの研究は以前の研究を「非エルミート化」した研究、つまり既に存在する研究において、敢えてハミルトニアンを非エルミートに拡張して固有値と固有ベクトルを調べ、それらが示す新奇な現象を発見することに終始している研究が多いと言わざるを得ません。非エルミート量子力学にパラダイムシフトを起こして新しい段階へと昇華するためには、ハミルトニアンだけでなく、物理量を記述する演算子を適切に定義し、実験における測定量と対応する理論を構築する必要があります。しかし、そのような問題意識が広く共有されているとは言えません。

2. 研究の目的

そこで本研究では、非エルミート系の非平衡輸送現象を記述する理論的枠組みを開発し、それをもとに非エルミート系における物理量の定義の一般論を構築することを目的としました。中心となる問いは「非エルミート系に対して輸送係数をどのように計算すればよいか」です。

輸送係数を理論的に与えるためには、カレント演算子を定義する必要があります。エルミート系においてすら、カレント演算子の定義には、常磁性カレントにとどめるのか反磁性カレントも含めるのかという選択肢があります。非エルミート系に対しては、さらに選択肢があり、何を正しいとすべきかの基準すら現状で明確ではありません。ところが、そのような問題意識を持たずに頓着なく計算を行っている研究も見受けられます。

本研究では、正しい輸送係数を与える基準は何か、それによって導かれるカレント演算子は何か、そして、一般に物理量演算子はどのように定義すれば良いかを問います。それに答えることによって非エルミート量子力学に新たな地平を拓き、分野をリードすることが最終的な目的です。

3. 研究の方法

そこで本研究ではまず非エルミート系の中で電流を測定せず、有限の非エルミート系にエルミートの電極を結合して(図2参照)ランダウアー公式によって電流を定義することから出発しました。



図2: (a) 非エルミート系の両端にエルミートな導線と電極を結合する。(b) 中央に非エルミートな散乱体、両側にエルミートな半無限の導線がある場合の散乱問題。

ランダウアー公式によれば、電極間の電流は図の散乱問題を解いて、透過確率を求めることによって得られます。図2(a)と(b)の等価性は、散乱体のエルミート性に依存しないので、こうして定義された電流は実験で直接観察されるべき量と考えられます。

計算例として、PT 対称系の透過確率（ランダウアー公式によればコンダクタンスに比例）を図3に示します。

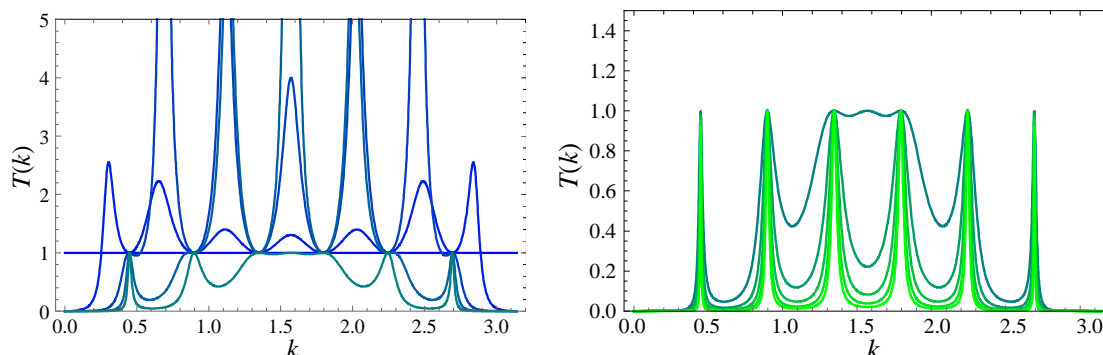


図3：透過確率の計算例[2]。無限長タイト・バインディング模型上で、7サイト離して i と i の PT 対称な複素ポテンシャルを配置しました。非エルミート性が弱い場合（左）と非エルミート性が強い場合（右）前者で透過確率が1を越えています。

一般に透過確率は1を超え、場合によっては発散しますが、これは以前の論文で発見された、非エルミート系における Resonance in Continuum (RIC) と呼ぶ現象です。非エルミート散乱体において、外部と粒子やエネルギーのやりとりが存在することが原因です。

このことを考慮して、連続の式にソースやシンクを導入すれば、非エルミート量子力学における新しい連続の式が定義できます。この非エルミートの連続の式と矛盾しないように非エルミート系内部の電流を与えることを、非エルミート系における電流演算子を定義する判断基準として提案します。

4. 研究成果

論文[3]が、特に非対称ホッピングの Hatano-Nelson 模型における電流の意味を明らかにしました。電流保存の法則から図4のように、各バンドに外界との結合が必要であることが明らかになりました。つまり、図5のように、電線に外界全体が接触している実験系に対応することが明らかになりました。なお、電流演算子は通常の見方を用いられています。

これにより、非対称ホッピング系に対してどのような実験実現があり得るかが明らかになりました。これは、これまでに得られていない大きな成果です。

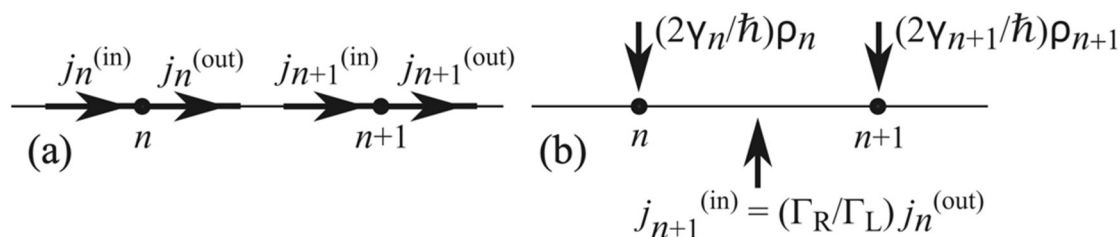


図4：Hatano-Nelson 模型における電流保存の議論[3]。

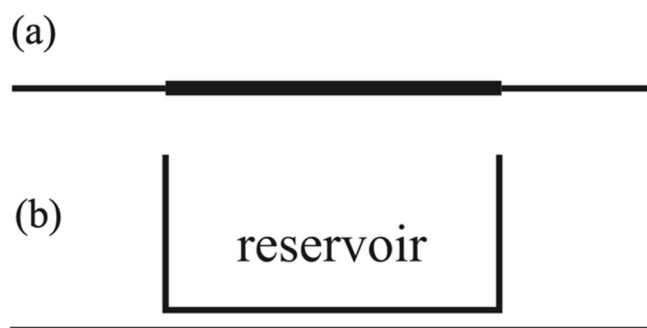


図5：Hatano-Nelson 模型の実験実現の可能性[3]。

参考文献

- [1] N. Hatano and D.R. Nelson, Localization transition in non-Hermitian quantum mechanics, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 570--573
- [2] K. Shobe, K. Kuramoto, K.-I. Imura and N. Hatano, Non-Hermitian Fabry-Perot resonances in a PT-symmetric system, Phys. Rev. Research 3 (2021) 013223
- [3] Y. Takane, S. Kobayashi and K.-I. Imura, Probability Conservation and Localization in a One-Dimensional Non-Hermitian System, J. Phys. Soc. Jpn. 92 (2023) 104705

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamagishi Manami, Hatano Naomichi, Imura Ken-Ichiro, Obuse Hideaki	4. 巻 107
2. 論文標題 Proposal of multidimensional quantum walks to explore Dirac and Schrödinger systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 42206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.042206	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 Kawasaki Makio, Mochizuki Ken, Obuse Hideaki	4. 巻 106
2. 論文標題 Topological phases protected by shifted sublattice symmetry in dissipative quantum systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 35408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.035408	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 and Hideaki Obuse	4. 巻 2301
2. 論文標題 Topological Phases in a PT-Symmetric Dissipative Kitaev Chain	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv:2301.08446, accepted for JPS Conference Proceedings (LT29)	6. 最初と最後の頁 8446
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 Orito Takahiro, Imura Ken-Ichiro	4. 巻 105
2. 論文標題 Unusual wave-packet spreading and entanglement dynamics in non-Hermitian disordered many-body systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 24303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.024303	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 Garmon Savannah、Ordonez Gonzalo、Hatano Naomichi	4. 巻 3
2. 論文標題 Anomalous-order exceptional point and non-Markovian Purcell effect at threshold in one-dimensional continuum systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033029	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 該当する

1. 著者名 Hatano Naomichi	4. 巻 2038
2. 論文標題 What is the resonant state in open quantum systems?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012013 ~ 012013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2038/1/012013	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 Hatano Naomichi、Obuse Hideaki	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 ~ 168615
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 Bessho Takumi、Mochizuki Ken、Obuse Hideaki、Sato Masatoshi	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 94306
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 Orito Takahiro, Imura Ken-Ichiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Multifractality and Fock-space localization in many-body localized states: One-particle density matrix perspective	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.214206	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 Orito Takahiro, Imura Ken-Ichiro	4. 巻 105
2. 論文標題 Unusual wave-packet spreading and entanglement dynamics in non-Hermitian disordered many-body systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 24303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.024303	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32件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Manami Yamagishi, Naomichi Hatano, Hideaki Obuse
2. 発表標題 Dynamics of a quantum active particle based on 2D non-Hermitian quantum walks
3. 学会等名 Japan-France joint seminar "Physics of dense and active disordered materials" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura, Takahiro Orito
2. 発表標題 Entanglement dynamics in a non-Hermitian quantum system
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 羽田野直道, 井村健一郎, 川畑幸平, 小布施秀明
2. 発表標題 非エルミートハミルトニアンによるネットワーク上の量子輸送
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura, Takahiro Orito
2. 発表標題 Localization, topology and entanglement in disordered non-Hermitian systems: one- vs. many-body cases
3. 学会等名 Localisation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Manami Yamagishi, Naomichi Hatano, Hideaki Obuse
2. 発表標題 Defining a Quantum Active Particle Using Non-Hermitian Quantum Walks
3. 学会等名 Localisation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尚程, 羽田野直道
2. 発表標題 Prototype controllable coupling theory of open quantum systems in symmetric optomechanics
3. 学会等名 Localisation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miku Ishizaki, Naomichi Hatano, Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Switching the function of the quantum Otto cycle in non-Markovian dynamics: heat engine, heater and heat pump
3. 学会等名 Entropy and the Second Law of Thermodynamics; The past, the present, and the future (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽田野直道
2. 発表標題 Quantum transport in non-Hermitian systems
3. 学会等名 Non-Hermitian Quantum Mechanics 2022 (NH2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miku Ishizaki, Naomichi Hatano, Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Switching the function of the quantum Otto cycle in non-Markovian dynamics: heat engine, heater and heat pump
3. 学会等名 Quantum Thermodynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 折戸隆寛, 井村健一郎
2. 発表標題 非エルミート量子多体系の非平衡ダイナミクスに対する乱れの効果
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高根美武, 小林志遠, 井村健一郎
2. 発表標題 非エルミートな1次元系における散乱問題
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井村 健一郎
2. 発表標題 非エルミート系におけるバルク境界対応と境界に依存する物理、しない物理
3. 学会等名 物性理論セミナー, 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻関連基礎科学系 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井村 健一郎
2. 発表標題 非エルミート量子系の物理
3. 学会等名 物性理論セミナー, 大阪公立大学 (杉本キャンパス) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Bulk-edge correspondence in non-Hermitian systems & physics sensitive vs. insensitive to the boundary condition
3. 学会等名 Non-Hermitian Quantum Mechanics 2022 (NH2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Wave-packet and entanglement dynamics in a non-Hermitian quantum system
3. 学会等名 International Workshop on Physics and Chemistry of Electronic Materials (PCEM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山岸愛, 羽田野直道, 井村健一郎, 小布施秀明
2. 発表標題 2次元量子ウォークの提案: 有効Diracハミルトニアンと(高次)トポロジカル相
3. 学会等名 日本物理学会春季大会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Manami Yamagishi, Naomichi Hatano, Hideaki Obuse
2. 発表標題 Dynamics of a quantum active particle based on 2D non-Hermitian quantum walks
3. 学会等名 Active Matter Workshop 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Manami Yamagishi, Naomichi Hatano, Hideaki Obuse
2. 発表標題 Defining a Quantum Active Particle Using Non-Hermitian Quantum Walks
3. 学会等名 Stat&QuantPhys Autumn School 2022 (国際学会)
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 二次元非エルミート量子ウォークによる量子アクティブ粒子の運動
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会2022
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 第67回物性若手夏の学校
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽田野直道
2. 発表標題 共鳴状態による量子伝導現象の解析とファノ共鳴
3. 学会等名 NPEMコロキウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽田野直道
2. 発表標題 非エルミート量子力学入門
3. 学会等名 第67回物性若手夏の学校(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽田野直道
2. 発表標題 Analysis of quantum transport on tree-like networks using non-Hermitian Hamiltonians
3. 学会等名 Localisation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽田野直道
2. 発表標題 ランダム系の非エルミート量子力学
3. 学会等名 駒場物性セミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河崎真樹男, 小布施秀明
2. 発表標題 PT対称な散逸量子系におけるトポロジカル相
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小布施秀明, 京極淳人, 矢久保考介, 羽田野直道
2. 発表標題 1次元非エルミート量子ウォークの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 日本物理学会秋季大会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田紘明, 川上則雄A, 岡本亮B, 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 日本物理学会春季大会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 羽田野直道・小布施秀明
2. 発表標題 開放量子系の非エルミート量子力学
3. 学会等名 物性研ワークショップ：開放系トポロジーと生体・量子・統計物理（招待講演）
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

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 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 物性研ワークショップ：開放系トポロジーと生体・量子・統計物理
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 Defining a Quantum Active Particle Using Non-Hermitian Quantum Walk
3. 学会等名 Quantum Information Entropy in Physics
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 羽田野直道・井村健一郎	4. 発行年 2023年
2. 出版社 講談社サイエンティフィック	5. 総ページ数 232
3. 書名 非エルミート量子力学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

羽田野直道ホームページ http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/hatano/index-j.html Non-Hermitian Quantum Mechanics 2022 (NH2022) http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/hatano/NH2022/Stat&QuantPhys Autumn School 2022 http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/manami/SQP2022/
--

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)	
研究分担者	井村 健一郎 (Imura Ken-Ichiro) (90391870)	東京大学・生産技術研究所・特任研究員 (12601)	

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2件

国際研究集会 Non-Hermitian Quantum Mechanics 2022 (NH2022)	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Stat&QuantPhys Autumn School 2022	開催年 2022年～2022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