

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14610

研究課題名（和文）リソース理論に基づく量子測定・操作の統一的限界

研究課題名（英文）Clarifying fundamental limitations of quantum operations based on resource theory

研究代表者

田島 裕康 (Tajima, Hiroyasu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：60757897

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：量子計算や量子測定をはじめとする量子情報処理、物理において最も基礎的な法則の一つである保存則からどのような制限がもたらされるかを一般的に調べました。予想を超えた発展が得られ、量子情報処理一般に適用できる、対称性・非可逆性・量子性の間の普遍的な制限が発見されました。この制限は、量子情報処理だけでなく、量子エンジンやブラックホール物理にも応用が可能です。さらに、この制限を導く際に用いた基礎理論である非対称性のリソース理論と呼ばれる理論を大きく拡張し、non-iid変換と呼ばれる問題を、純粋状態かつU(1)対称性（＝保存則が一つの場合に対応）の場合に完全に解決しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物理において最も基礎的な法則の一つである保存則からどのような制限がもたらされるかを一般的に調べ、一般のダイナミクスに適用できる対称性・非可逆性・量子性の間の普遍的な制限を発見しました。我々の結果は、現実的な設定で量子計算や量子測定をはじめとする量子情報処理にどのような制限がかかるかを明らかにします。このため、こうした量子情報処理を実際に実現していく際に有用な指針をもたらせると期待できる他、量子エンジンやブラックホール物理に対しても新たな物理を解明できることが期待できます。さらに、この制限の基礎にある非対称性のリソース理論と呼ばれる理論についても、幾つかの基礎的な問題を解決しました。

研究成果の概要（英文）：We have studied quantum information processing, including quantum computation and quantum measurement, and clarified several limitations on quantum information processing from the conservation law. In particular, we have obtained a universal tradeoff between symmetry, irreversibility, and quantumness. This limit has applications not only to general quantum information processing but also to quantum engines and black hole physics. Furthermore, for the resource theory used in deriving this tradeoff called the resource theory of asymmetry, we have clarified the non-iid convertibility in the case of pure states and U(1) symmetry (= corresponding to the case of a single conservation law).

研究分野：量子情報理論

キーワード：量子情報理論 保存則 リソース理論 量子測定 量子計算

## 1. 研究開始当初の背景

量子情報処理は物理過程の一種であり、物理法則から制限を受ける。中でも基本的な法則の一つとして、保存則があげられる。保存則から量子情報処理がどのような制限を受けるかについての解析は量子力学基礎論の分野で長い歴史を持つ研究分野である。特に有名な研究は、測定に対する保存則からの制限である Wigner-Araki-Yanase 定理である。この定理は 1952 年から 1960 年にかけて定性的な定理として与えられ、その後 2002 年に小澤によって定量的な定理 (= 不等式) に拡張された。小澤はこの不等式を複数の量子計算ゲートについても拡張したが、任意の量子計算ゲート (= 任意のユニタリーゲート) に対する同様の不等式が成立するかは未解決の問題になっていた。研究代表者である田島は、2018 年に、任意のユニタリーゲートに対して WAY-Ozawa 的な不等式が成立することを示した。上記の背景で得られている結果は、測定と計算という一件全く異なる対象に、同様の不等式が存在することを示している。自然な疑問として、このような不等式がどのような範囲で成立するのか、ということが疑問となる。

## 2. 研究の目的

本研究計画では、上記の疑問、すなわち、「測定や計算で成立した保存則からの制限である WAY 型の不等式は、より広い範囲で成立するか？」を答えることを目的としていた。さらに、上記の研究では、下記の Resource theory of asymmetry と呼ばれるリソース理論の一分野のリソースである量子コヒーレンスと実装エラーの間の WAY 型不等式が得られていたので、この点をより深めることを目指す。

## 3. 研究の方法

リソース理論は量子情報理論における最重要理論の一つであるエンタングルメントの理論を拡張した理論体系である。このリソース理論で最近着目されているのが Resource theory of asymmetry と呼ばれる理論分野である。この分野のテクニックを用いて、「保存則を満たす操作」と「リソースとして『消費』できる状態」の組み合わせによって、「保存則を破る操作」をどの程度実装できるかを考えることができるので、これを用いて 2018 年の結果を拡張し、「実装される操作による保存則の破れの度合い」と「必要なリソースの量」の間に普遍的に成立するトレードオフを導く理論を構築する。

## 4. 研究成果

研究期間を通して、当初の計画をはるかに上回る成果を得ることができたと考えている。特に重要なものを以下に列挙する。

[Wigner-Araki-Yanase-Ozawa 型不等式の拡張について]

元々の研究目標について、我々は以下の結果を得た、

- ・ 保存則の下での測定と量子計算ゲートのコストの upper bound と lower bound の特定 (Tajima, Shiraishi and Sato PRR2020: QIP2020talk) :  
この結果で、我々は量子計算ゲートのコヒーレンスコストについて、optimal lower bound と optimal upper bound を得た。
- ・ 対称性・不可逆性・量子性間の統一的制限 (Tajima and Saito arXiv2021, Tajima, Takagi, Kuramochi arXiv2022: QIP2023talk)  
さらに WAY 定理と、Eastin-Knill 定理と呼ばれる誤り訂正符号に対する対称性からの制限の統一し、対称性・不可逆性・量子性間の統一的制限を得ることに成功した。この結果は、当初の予定を超えて、ブラックホールや量子熱力学にも適用ができる非常に広範な成果である。
- ・ 量子熱機関の量子コヒーレンスによる性能増強 (Tajima and Funo PRL2021: editor's suggestion and Featured in Physics)  
さらに WAY 定理と類似の不等式が、熱の流れとエントロピー増大の間の不等式に対しても成立する事を指摘し、コヒーレンスによって量子熱機関が古典熱機関の性能限界を超えたスケールリングの性能を発揮できることを示した。
- ・ WAY 定理の連続保存量への拡張 (Kuramochi and Tajima PRL2023: Featured in Physics)  
WAY 定理を、Yanase 条件と呼ばれる条件の下で連続保存量に拡張した。これは WAY 定理が 1960 年に成立して以来の未解決問題の一つの解決である。

【Resource theory of asymmetry の基礎の拡張について】

- ・ Non-iid convertibility の理論の U(1)対称性での確立 (Yamaguchi and Tajima PRL 2023, Yamaguchi and Tajima Quantum 2023)  
Resource theory of asymmetry を大きく拡張し、non-iid と呼ばれるクラスの理論を、U(1)対称性について、純粋状態変換に関して完全に完成した。リソース理論においては、状態変換のレートを規定するリソースの指標を同定することが重要な問題となる。この時、同じ状態の多数のコピーの間の変換を考える iid と呼ばれる設定と、より一般の状態での変換を考える non-iid と呼ばれる設定がある。例えば、エンタングルメントにおいては iid における指標がエンタングルメントエントロピーで、non-iid における指標が情報スペクトルエンタングルメントエントロピーである。RTA においては、U(1)対称性を扱う場合 (= 保存量が一つの場合)、iid において量子 Fisher 情報量が状態変換レートを規定することが知られていた。我々はこの問題の non-iid 版を解いた。
- ・ 任意の連結 Lie 群対称性に対して、Fisher 情報行列がリソース指標となることの確立 (Kudo and Tajima PRA 2023)  
この結果において、我々は任意の連結 Lie 群対称性において Fisher 情報行列がリソース指標となることを示した。
- ・ 任意有限群での iid convertibility の理論の確立 (Shitara and Tajima arXiv2023)  
さらにこの結果において、我々は任意の有限群での iid convertibility の理論を確立した。この結果は非可換群も含む極めて一般的なものである。

このほか、error mitigation への制限 (Takagi, Tajima and Gu PRL2023)、多数の招待講演 (うち一つは APS march meeting)、及び新聞記事 4 件の成果も得ることができた。また、この課題の成果によって日本物理学会領域 11 の若手奨励賞を受賞した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 田島 裕康、布能 謙	4. 巻 77
2. 論文標題 量子コヒーレンスによる流速・散逸のトレードオフの実効的無効化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 621 ~ 626
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11316/butsuri.77.9_621	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 Tajima Hiroyasu, Funo Ken	4. 巻 127
2. 論文標題 Superconducting-like Heat Current: Effective Cancellation of Current-Dissipation Trade-Off by Quantum Coherence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 190604
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.127.190604	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 Hiroyasu Tajima, Naoto Shiraishi Naoto, Keiji Saito	4. 巻 2
2. 論文標題 Coherence cost for violating conservation laws	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.043374	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 Hiroyasu Tajima, Keiji Saito	4. 巻 arXiv:2103.01876
2. 論文標題 Universal limitation of quantum information recovery: symmetry versus coherence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arxiv	6. 最初と最後の頁 1-36
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 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 Hiroyasu Tajima, Ken Funo	4. 巻 arXiv:2004.13412
2. 論文標題 Superconducting-like heat current: Effective cancellation of current-dissipation trade off by quantum coherence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arxiv	6. 最初と最後の頁 1-17
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 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 Ryuji Takagi and Hiroyasu Tajima	4. 巻 101
2. 論文標題 Universal limitations on implementing resourceful unitary evolutions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 22315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.022315	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 Hiroyasu Tajima, Naoto Shiraishi and Keiji Saito	4. 巻 arXiv:1906.04076
2. 論文標題 Coherence cost for violating conservation laws	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 arxiv preprint	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) なし	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 Hiroyasu Tajima and Hiroshi Nagaoka	4. 巻 arXiv:1909.02904
2. 論文標題 Coherence-variance uncertainty relation and coherence cost for quantum measurement under conservation laws	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 arxiv preprint	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) なし	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 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 12件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 量子チャンネル実装における対称性・不可逆性・量子性の統一的トレードオフ構造とその応用
3. 学会等名 第1回中部量子若手ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 熱流と量子効果の関係
3. 学会等名 最適輸送とその周辺 - 機械学習から熱力学的最適化まで（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 量子開放系におけるエネルギーの流れと量子効果
3. 学会等名 第4回若手放談会：エキゾチック核物理の将来（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence
3. 学会等名 APS March meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 Universal sampling lower bounds for quantum error mitigation
3. 学会等名 NICT若手チャレンジラボ・ミニ研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 量子チャンネル実装における対称性・不可逆性・量子性の統一的トレードオフ構造とその応用
3. 学会等名 量子情報と量子基礎論の諸側面（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence
3. 学会等名 Quantum Information Processing 2023 (QIP2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence
3. 学会等名 quantum resources workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence
3. 学会等名 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence and its application to black hole physics
3. 学会等名 Quantum Extreme Universe From Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Superconducting-like heat current: Effective cancellation of current-dissipation trade off by quantum coherence
3. 学会等名 Stochastic Thermodynamics III (WOST III) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Universal limitation on information recovery from scrambling with symmetry and its application to black hole physics
3. 学会等名 Workshop on quantum information and quantum black holes (招待講演)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Universal limitation of quantum information recovery: symmetry versus coherence
3. 学会等名 APS March meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 量子コヒーレンスによる熱流-散逸トレードオフの実効的無効化
3. 学会等名 量子・情報・熱ミニワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Superconducting-like heat current: Effective cancellation of current-dissipation trade off by quantum coherence
3. 学会等名 APS March meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 対称性のリソース理論：保存則の元での測定・操作の原理的限界
3. 学会等名 物性若手夏の学校 (オンライン) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 ユニタリ実装のコヒーレンスコストと、量子熱機関への応用：不確定性関係がもたらす影響
3. 学会等名 量子多体系の熱力学ー数理の発展と展望（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Fundamental exchange rate between coherence and asymmetry
3. 学会等名 Quantum Information and String Theory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 量子計算機はどれだけのコヒーレンスを必要とするか?:保存則 による原理的限界値の解析
3. 学会等名 NICT open summit 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島裕康
2. 発表標題 測定実装の為のコヒーレンス・コストの漸近等式：Wigner-Araki-Yanase theoremの改善
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Limitation on quantum information processing under conservation laws
3. 学会等名 APPC14 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Coherence cost for measurement and computation under conservation laws
3. 学会等名 Quantum Information Processing 2020 (国際学会)
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

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		
シンガポール	Nanyang Technological University		