

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21540146

研究課題名(和文) 量子情報理論における基礎的問題の検討と解決

研究課題名(英文) Investigation and resolution on basic problems on quantum information theory

研究代表者

大矢 雅則 (Ohya, Masanori)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：90112896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、いくつかの具体的な問題を通して量子(非可換)確率論の基礎を検討することにある。現在の量子情報に関わる様々な理論は量子確率論をベースにしているが、そこに存在するいくつかの問題点を明らかにし、その解決を試みる。そこで、本研究では以下の順に研究を遂行した。(1)量子情報理論、特に、量子エントロピー論、量子テレポーテーション理論、量子アルゴリズム論に存在するいくつかの問題点を取り上げ、それらを整理した。(2)(1)で掲げた問題はどこまで従来の量子確率論の公理系で議論できるか検討した。(3)(2)の検討の下に、量子確率論の新たな数理を考えた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to invest basic problems of quantum (non-commutative) probability theory through specific problems. Various theories concerning the quantum information are based on quantum probability theory. We clarify some important points, and attempt to solve them. Therefore, we carried out research in the following order:(1) clarify and organize the problems on quantum information theory, in particular, quantum entropy, quantum teleportation and quantum algorithm. (2) investigate how to treat with the problems given in (1) under axioms of quantum probability theory. (3) Under reviewing (2), we constructed a new mathematics of quantum probability theory.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・数学一般(含確率論・統計数学)

キーワード：数学基礎論

1. 研究開始当初の背景

ダブルスリットの実験などに代表されるいわゆる量子現象の説明には、“ミクロなものの存在それ自体が確率的である”という立場から確率論を構成する必要がある。この数学的な記述が量子確率論である。量子系の本質は非可換性にあるといわれるが、量子確率論にはその非可換性ゆえの難しさが存在し、現在の量子確率論の枠組みだけでは理解できない問題もかなり多くある。非ユークリッド幾何学がいくつもあるように、量子確率論も非古典確率論(非コルモゴロフ確率論)という立場にたてば、現在の理論が必ずしも最適なものであると考える必要はない。むしろ、現状の量子確率論の範疇を超えて、より広く量子現象の解明に使える量子確率論、あるいは古典確率論と量子確率論を含む新たな確率論を志向することが必要であろう。こうした新たな確率論を作る処方箋もいくつか出されてはいるが、それらの妥当性を数学的にきちんと調べた研究は今のところ存在していない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、いくつかの具体的な問題を通して量子(非可換)確率論の基礎を検討することにある。

現在の量子情報に関わる様々な理論は量子確率論をベースにしているが、そこに存在するいくつかの問題点を明らかにし、その解決を試みる。そこで、本研究では以下の順に研究を遂行する。

1. 量子情報理論、特に、量子エントロピー論、量子テレポーテーション理論、量子アルゴリズム論に存在するいくつかの問題点を取り上げ、それらを整理する。
2. 1で掲げた問題はどこまで従来の量子確率論の公理系で議論できるであろうか?
3. 2の検討の下に、量子確率論の新たな数理を考える。

3. 研究の方法

本研究では、以下の具体的問題を扱う事と並行して、量子確率論の原理的問題に対するアプローチを行う。

- (1)量子入力・量子出力系における情報理論の構成
- (2)量子エンタングルド状態の一般的分類に関する研究
- (3)量子情報通信過程に関する研究
- (4)量子アルゴリズムに関する研究

4. 研究成果

数多くの研究成果があるが、代表的なものを以下に示す。

- (1)量子テレポーテーションの新しいスキームの提示とその解析
- (2)量子チューリング機械の定式化と量子計算の複雑さの定義
- (3)リフティング写像を用いた量子相互エン

トロピーの定式化

- (4)エントロピー進化率を用いたインフルエンザウイルスの分類
- (5)合成量子パイコね変換についてのカオス尺度を用いた特徴付け
- (6)脳機能を記述する数理モデルの Fock 空間による構成
- (7)Adaptive 力学をベースとした PD モデルの解析
- (8)HIV-1, Influenza A Virus などにおける生体変異の解析への適応力学の応用
- (9)新しい量子探索アルゴリズムの構成とその計算量の導出
- (10)非可換代数を基にした新しい暗号理論の構成とその実装

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

研究発表論文のうち、査読有りで主たる論文と、研究発表のうち招待講演のものを下に示す。

[雑誌論文](計45件)

1. W. A. Majewski, T.Matsuoka, M.Ohya; "Characterization of PPT state and measures of entanglement", J. Math. Phys. 50, 113509 (2009).(査読有)
2. T.Hara, S.Iriyama, K.Makino, H. Terada, M.Ohya, Mathematical description of drug movement into tumor with EPR effect and estimation of its configuration for DDS, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, Vol. 75, pp.42-46, 2010, (査読有)
3. K.-H. Fichtner, K.Inoue, M.Ohya (2010), On the Low-Temperature Behavior of the Infinite-Volume Ideal Bose Gas, Infinite Dimensional Analysis, Quantum Probability and Related Topics, Vol.13.1, pp.39-63(査読有)
4. K.-H.Fichtner, L.Fichtner, W.Freudenberg, M.Ohya(2010), Quantum Models of the Recognition Process - On a Convergence Theorem, Open Systems and Information Dynamics, Vol 17.2, 161-187 (査読有)
5. T.Hara, K.Sato, M.Ohya(2010), MTRAP: Pairwise sequence alignment algorithm by a new measure based on transition probability between two consecutive pairs of residues, BMC Bioinformatics 2010, 11:235 (査読有)
6. K.Sato, T.Tanabe, M.Ohya, How to Classify Influenza A Viruses and Understand Their Severity, Open Systems & Information Dynamics, 17.3, pp. 297-310, 2010 (査読有)

7. M.Asano, M.Ohya, A.Khrennikov, Quantum-Like Model for Decision Making Process in Two Players Game A Non-Kolmogorovian Model, DOI: 10.1007/s10701-010-9454-y, 2010 (査読有)
8. S.Iriyama, M.Ohya, Quantum Mutual Entropy Defined by Liftings, Foundations of Physics, DOI: 10.1007/s10701-010-9432-4, 2010 (査読有)
9. M.Ohya, N.Watanabe, Quantum Entropy and Its Applications to Quantum Communication and Statistical Physics, Entropy, 12(5), 1194-1245, 2010. (査読有)
10. L. Accardi, D. Chruściński, A. Kossakowski, T. Matsuoka, M. Ohya, On Classical and Quantum Liftings, Open Systems and Information Dynamics, 17.4, 361-387, 2010 (査読有)
11. K.Sato, T.Tanabe, M.Ohya, How to Classify Influenza A Viruses and Understand Their Severity, Open Systems & Information Dynamics, 17.3, pp. 297-310, 2010 (査読有)
12. L.Accardi, M.Regoli, M.Ohya, The QP-DYN Algorithm, QP-PQ 28, Quantum Bio-Informatics IV, 1-16, 2011 (査読有)
13. M.Asano, M.Ohya, Y.Tanaka, A.Khrennikov, I.Basieva, Quantum Uncertainty and Decision-making in Game Theory, QP-PQ 28, Quantum Bio-Informatics IV, 51-60, 2011 (査読有)
14. K.-H. Fichtner, L.Fichtner, W.Freudenberg, M.Ohya, Self-collapses of Quantum Systems and Brain Activities, QP-PQ 28, Quantum Bio-Informatics IV, 101-116, 2011 (査読有)
15. T.Hara, K.Sato, M.Ohya, Entangled Effects of Two Consecutive Pairs in Residues and Its Use in Alignment, QP-PQ 28, Quantum Bio-Informatics IV, 129-136, 2011 (査読有)
16. D.Chruscinski, Y.Hirota, T.Matsuoka, M.Ohya, Remarks on the Degree of Entanglement, QP-PQ 28, Quantum Bio-Informatics IV, 145-156, 2011 (査読有)
17. K.-H. Fichtner, K.Inoue, M.Ohya, A Completely Discrete Particle Model Derived from a Stochastic Partial Differential Equation by Point Systems, QP-PQ 28, Quantum Bio-Informatics IV, 173-184, 2011 (査読有)
18. S.Iriyama, M.Ohya, On Quantum Algorithm for EXPTIME Problem, QP-PQ 28, Quantum Bio-Informatics IV, 173-184, 2011 (査読有)
19. D.Chruscinski, A.Kossakowski, T.Matsuoka, M.Ohya, Entanglement Mapping vs. Quantum Conditional Probability Operator, QP-PQ 28, Quantum Bio-Informatics IV, 223-236, 2011 (査読有)
20. S.Iriyama, M.Ohya, Efficient Quantum Algorithm for NPC and EXPTIME Problems, to be published in Foundations of Physics, 2011. (査読有)
21. K.-H. Fichtner, L. Fichtner, K. Inoue and M. Ohya, Internal noise caused by the memory, OPEN SYSTEMS & INFORMATION DYNAMICS, 18(4), 405-422, 2011 (査読有)
22. A. Khrennikov, M. Ohya, N. Watanabe, CLASSICAL SIGNAL MODEL FOR QUANTUM CHANNELS, INTERNATIONAL JOURNAL OF QUANTUM INFORMATION, 9, 281-291, 2011 (査読有)
23. M. Asano, I. Basieva, A. Khrennikov, M. Ohya and Y. Tanaka, Quantum-like generalization of the Bayesian updating scheme for objective and subjective mental uncertainties, JOURNAL OF MATHEMATICAL PSYCHOLOGY, 56(3), 166-175, 2012 (査読有)
24. M. Asano, I. Basieva, A. Khrennikov, M. Ohya, Y. Tanaka and I. Yamato, Quantum-like model for the adaptive dynamics of the genetic regulation of E. coli 's metabolism of glucose/lactose, Systems and Synthetic Biology, DOI:10.1007/s11693-012-9091-1, 2012 (査読有)
25. G.Adenier, M.Ohya, N.Watanabe, I. Basieva and A.Y. Khrennikov, Double Blinding-Attack on Entanglement-Based Quantum Key Distribution Protocols, American Institute of Physics, 1424, 9-16, 2012 (査読有)
26. M. Asano, I. Basieva, A. Khrennikov, M. Ohya, Y. Tanaka and I. Yamato, Quantum-like model of diauxie in Escherichia coli: operational description of precultivation effect, J.Theor.Biol., 314, 130-137, 2012 (査読有)
27. Y. Tanaka, M. Asano and M.Ohya, Quantum Teleportation for Nonmaximal Entangled States in the Generalized Bell Measurement with Latin Square, Reports on Math.Phys., 69, 57-74, 2012 (査読有)
28. M. Asano, I. Basieva, A. Khrennikov,

- M. Ohya, Y. Tanaka, and I. Yamato, Quantum-like model of glucose effect on Escherichia coli growth, Proceedings of Foundations of Probability and Physics-6, American Institute of Physics, 1244, 507-511, 2012 (査読有)
29. M. Asano, I. Basieva, A. Khrennikov, M. Ohya, and Y. Tanaka, Quantum-like dynamics of decision making in prisoner's dilemma game, Proceedings of Foundations of Probability and Physics-6, American Institute of Physics, 1424, 453-457, 2012 (査読有)
30. M. Asano, I. Basieva, A. Khrennikov, M. Ohya, and Y. Tanaka, Quantum-Like Representation of Irrational Inference, Quantum Interaction 2012, Springer Lecture Notes in Computer Science, 138-147, 2012 (査読有)
31. M. Asano, I. Basieva, A. Khrennikov, M. Ohya, Y. Tanaka, and I. Yamato, A Quantum-Like Model of Escherichia coli's Metabolism Based on Adaptive Dynamics, Quantum Interaction 2012, Lecture Notes in Computer Science Springer, 60-67, 2012 (査読有)
32. M. Asano, I. Basieva, A. Khrennikov, M. Ohya, Y. Tanaka, and I. Yamato, Adaptive Dynamics and Its Application to Context Dependent Systems Breaking the Classical Probability Law, Quantum Interaction 2012, Lecture Notes in Computer Science Springer, 60-67, 2012 (査読有)
33. K.Sato, T.Hara and M.Ohya, The code structure of the p53 DNA-binding domain and the prognosis of breast cancer patients, Bioinformatics, doi:10.1093/bioinformatics/btt497, 2013 (査読有)
34. T.Hara, K.Sato, M.Ohya, Protein Sequence Alignment taking the Structure of Peptide Bond, QP-PQ: Quantum Probability and White Noise Analysis (Quantum Bio-Informatics V), 30, 181-186. 2013 (査読有)

[学会発表](計 68 件)

1. S.Iriyama, M.Ohya, Computational Complexity of Quantum Algorithm and Applications(plenary), Mathematical Physics & Applications - MPA'10, 8/29-9/4, Samara, Russia, 2010
2. S.Iriyama, M.Ohya, Generalized Quantum Turing Machine and Its Use to Find an Algorithm Solving NP-Complete, ISABEL 2010, Center for Ecclesiastical Services, Rome, Italy, November 7-10, 2010

3. K.Sato, M.Ohya, Evolution of HIV-1 from the viewpoint of Information Theory, ISABEL 2010, Center for Ecclesiastical Services, Rome, Italy, November 7-10, 2010
4. M.Ohya, "Adaptive dynamics and its application", 44th Symposium on Mathematical Physics, Torun, Poland, 6/20-24, 2012
5. M.Ohya, "Adaptive dynamics and its application to context dependent systems breaking the classical probability law", International Workshop on IDAQP White noise, Quantum Information and Statistics, Aichi Prefectural University, 1/7-9, 2013

[図書](計 1 件)

1. M. Ohya, I. Volovich, Mathematical Foundations of Quantum Information and Computation and Its Applications to Nano- and Bio-systems, Springer Verlag, 778p, 2011

[産業財産権]

出願状況(計 4 件)

名称: 非可換代数を基にした高速で安全なストリーム暗号方式
 発明者: 入山聖史、大矢雅則、L.Accardi, M.Regoli
 権利者: 東京理科大学
 種類: 特許
 番号: 特許願 2012-084113
 出願年月日: 2012 年 4 月 2 日
 国内外の別: 国内

名称: 非可換代数を基にした安全で鍵生成が速い公開鍵暗号方式
 発明者: 入山聖史、大矢雅則、L.Accardi, M.Regoli
 権利者: 東京理科大学
 種類: 特許
 番号: 特許願 2012-151835
 出願年月日: 2012 年 7 月 5 日
 国内外の別: 国内

名称: 非可換代数を基にした高速で安全なストリーム暗号方式(PCT)
 発明者: 入山聖史、大矢雅則、L.Accardi, M.Regoli
 権利者: 東京理科大学
 種類: 特許
 番号: PCT JP2013/057509
 出願年月日: 2013 年 3 月 15 日
 国内外の別: 国内

名称: 非可換代数を基にした高速で安全なストリーム暗号方式(台湾)
 発明者: 入山聖史、大矢雅則、L.Accardi,

M.Regoli

権利者：東京理科大学

種類：特許

番号：台湾 102109287

出願年月日：2013年3月15日

国内外の別：国外

名称：非可換代数を基にした安全で鍵生成が
速い公開鍵暗号方式(PCT)

発明者：入山聖史、大矢雅則、L.Accardi,
M.Regoli

権利者：東京理科大学

種類：特許

番号：PCT JP2013/068419

出願年月日：2013年7月4日

国内外の別：国内

取得状況（計0件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大矢 雅則 (OHYA, Masanori)

東京理科大学・理工学部情報科学科・教授

研究者番号：90112896

(2) 研究分担者

入山 聖史 (IRIYAMA, Satoshi)

東京理科大学・理工学部情報科学科・講師

研究者番号：10385528

原 利英 (HARA, Toshihide)

東京理科大学・理工学部情報科学科・助教

研究者番号：30579769

松岡 隆志 (MATSUOKA, Takashi)

諏訪東京理科大学・経営情報学部・教授

研究者番号：90328568