

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540162

研究課題名(和文) エンタングルメントを含むチャネルの特徴付けと量子チャネル符号化の定理の基礎付け

研究課題名(英文) The characterization of the channel including the entanglement and establishing the foundation of the quantum channel coding theorem

研究代表者

渡邊 昇 (WATANABE, NOBORU)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：70191781

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、量子系のエントロピー理論と量子チャネル理論の研究を基に、量子チャネル符号化の定理の証明に必要な数理的基礎の構築を目的に、以下のような課題研究を実施した。量子テレポーテーションなどの量子エンタングルメントを含む量子チャネルの特徴付けを行い、(1)量子干渉チャネルに対する量子相互エントロピーの性質を調べた。(2)量子平均相互エントロピーの定式化を基に、種々の量子符号状態の量子平均相互エントロピーを計算した。さらに、Ohya-塚田-Umegakiの定理を遷移期待値や条件付き期待値を用いて、より一般的な量子系に拡張し、量子チャネル符号化の定理の証明に必要な基礎研究を実施した。

研究成果の概要(英文)：In this study, I carried out the following problem studies for the purpose of mathematic basic construction to be necessary for proof of the quantum channel coding theorem based on the study of entropy theory and the quantum channel theory of the quantum systems. I characterize the quantum channel including the quantum entanglement such as quantum teleportations, (1) I investigated a property of the quantum mutual entropy for the quantum interference channel. (2) Based on formulation of the quantum mean mutual entropy, I calculated the quantum mean mutual entropy of the various kinds of encoded quantum states. Furthermore, I extended the theorem of Ohya- Tsukada -Umegaki in general quantum systems using transition expectation and conditional expectation and I carried out the fundamental researches to be necessary for proof of the quantum channel coding theorem.

研究分野：情報数理，函数解析学，実関数論

キーワード：量子情報理論 量子エントロピー 量子チャネル エンタングルメント 量子チャネル符号化

1. 研究開始当初の背景

量子的な性質を持つ光子を信号に用いる光通信過程の研究は、1980年代頃に盛んに行われていたが、量子コンピューティングの研究が始められたことに伴い、現在では、量子情報という、数学・物理学・計算科学・情報科学・情報工学の複合領域にまたがる新たな分野が形成され世界的に研究が行われている。量子情報通信過程の数理的研究では、量子確率論をベースとして、(1) 量子符号化の定理、(2) 量子エントロピー理論、(3) 量子チャンネル理論、などの様々な研究が行われている。

(1) 量子チャンネル符号化の定理の解決に向けて未解決のままの量子符号化の定理については、情報源符号化の定理が、シューマッハ・ペッツ等によって部分的に議論されている。さらに、量子情報通信理論の最も中心的な課題の一つである量子チャンネル符号化の定理は、信号を誤りなく送信するための基準を与え、チャンネルを設計する上で重要な役割を果たすものである。

(2) 量子系の力学的エントロピー理論の展開
量子チャンネル符号化の定理の解決には、通常確率論をベースとして定式化されている力学的エントロピーや平均相互エントロピーの量子系への展開が不可欠であり、部分代数上の様々な力学的エントロピーや部分状態空間上の平均エントロピーと平均相互エントロピーが定式化されている。

(3) 量子エンタングルメントを含む量子チャンネル理論の定式化

近年、光を信号に用いる光通信過程が量子情報通信理論により議論され、様々な結果が得られている。特に、量子密度符号化や量子テレポーテーションなどの量子系に特有の量子エンタングルメントの性質を利用した量子チャンネルに対する情報伝送の効率を調べる研究では、シャノン理論との相違点が指摘され、量子干渉性を含む通信過程の定式化の研究の必要性が叫ばれている。

2. 研究の目的

今日の情報化社会を支える基礎理論の一つに情報理論がある。この情報理論は、通常確率論をベースに定式化され、一連の情報量(エントロピー)を用いて、可換な信号空間上で情報伝送の効率の議論を可能としている。特に、チャンネル符号化の定理は、誤りの少ないチャンネルを設計する上で重要な基準を与えるものであり、その一般化の研究が、力学的エントロピーおよび平均相互エントロピーを用いて行われている。この符号化の定理は量子情報理論の重要課題としてその解決が待望されている。

本研究では、量子系特有の性質である量子エンタングルメントを含む量子チャンネルを特徴付ける研究を行い、さらに、量子系における力学的エントロピーと平均相互エントロピーの定式化をもとに量子チャンネル符号化の定理の基礎付けを与える研究を行うこ

とを主な目的とする。

3. 研究の方法

情報理論は可換系及び量子系の確率論を一つの基礎として構築されており、近年はその周辺領域の研究がとみに盛んである。とくに量子情報通信理論の研究が、情報を核とした共通の土俵の上で進められている。例えば、量子情報通信理論から得られた結果は通信理論などの情報科学のみならず、様々な分野へ応用されてきている。本研究計画では、ヒルベルト空間論、作用素代数論、微分方程式などの既存の数学に情報理論や物理学における諸概念を取り入れて、以下の課題に取り組む：

(1) 量子系の力学的エントロピー理論の展開

(2) 量子エンタングルメントを含む量子チャンネル理論の定式化

(3) 量子チャンネル符号化の定理の解決に向けた基礎研究

(1) 量子系の力学的エントロピー理論の展開
部分代数系に対する量子系の力学的エントロピーの定式化

量子系の力学的エントロピーは、1975年ごろ エムシュとコンヌ-ストルマーによって最初に導入され、1987年には、コンヌ-ナンフォッフア-チリングが C^* -系において CNT 力学的エントロピー (CNT dynamical entropy) を定義した。パークは、いくつかのモデルについて、CNT 力学的エントロピーを計算した。また、1994年には、アリツキー-ファネスが単位の有限作用素分割を用いて AF 力学的エントロピー (AF dynamical entropy) を定め、ハデットは位相エントロピーに関連して力学的エントロピーを論じた。

さらに、ポイキュレスクは、自由確率をもとに一般化された近似のアプローチをベースとして C^* -及び W^* -代数の自己同型写像に対する力学的エントロピーを導入した。1997年には、アカルディ-大矢-渡邊が、量子マルコフ連鎖を通して、AOW 力学的エントロピー (AOW dynamical entropy) を定義し、量子情報理論と関連するいくつかの量子チャンネルのモデルに対して力学的エントロピーの計算を行っている。この AOW 力学的エントロピーは、従来の手法を用いて定められた量子系の力学的エントロピー (CNT・AF) よりも系の状態を詳しく分類することができ、さらに力学的エントロピーを求める計算が他のものに比べて容易であるという特徴を持つ。コサコウスキー-大矢-渡邊は、AOW と AF を含むより一般的な系に対して完全正值写像に関する KOW 力学的エントロピー (KOW dynamical entropy) を定式化した。KOW 力学的エントロピーは、AOW 力学的エントロピーに比べてより多くのモデルに対して適用することができる。

本研究では、これらの力学的エントロピーの関係を調べ、いくつかの数理モデルに対して力学的エントロピーの計算を行う。

部分状態空間に対する量子系の平均エン

トローピーと量子平均相互エントロピーの定式化

1985年には、大矢が、 C^* -混合エントロピーをベースとして量子系に力学的エントロピーと力学的相互エントロピーを定式化し、多段減衰チャンネルに対して光変調の効率を厳密に調べる研究を行っている。

本研究では、量子系の平均相互エントロピーの定式化とそれを用いた量子系のチャンネル符号化の定理の証明のための数理的基礎をいくつかのクラスに分類する。

量子平均相互エントロピーの定式化について

古典系の通信理論では、 KS (コロモゴロフ-シナイ) エントロピーを用いて平均相互エントロピー(情報量)が定められ、通信理論において最も重要な定理の一つであるチャンネルの符号化の定理が証明されている。このチャンネル符号化の定理は、入力信号を符号化する際の誤り確率の上限を与えており、この定理を用いることによって符号化された信号に対して通信の効率などをきちんと取り扱うことができた。量子系のチャンネル符号化の定理を議論する上で、上記の量子系の力学的エントロピーが本質的な役割を果たすものと考えられる。

大矢の導入した C^* -系のエントロピーと相互エントロピーは、量子エンタングルメント状態を分類する尺度を定める上で必要不可欠なものとなっている。

本研究では、量子系におけるチャンネル符号化の定理の証明の基礎付けを与えるために、 KOW エントロピーの考えを導入して作られる新たな一般化された AOW エントロピーを定め、それを基に、量子エンタングルメントの状態変化を取り込んだ平均量子相互エントロピーの定式化を行い、その加法性の性質について調べる。

(2) 量子エンタングルメントを含む量子チャンネル理論の定式化

量子系におけるチャンネルの研究では、ホレボーによって、半古典的(一方が古典系)チャンネルが導入され、さらに、大矢によって、量子力学的(完全な量子系における)チャンネルが定式化されている。特に、光通信過程との関連では、大矢による減衰過程を表すチャンネルの数理モデルの定式化の研究をあげることができる。この量子チャンネルの研究は、一般的には非可換な系から非可換な系への変換を取り扱うものであるが、非可換系が可換系を含むという数学構造を考えると量子チャンネルは半古典的なチャンネルや古典的なチャンネルの議論までも含んだより一般的な表現と行うことができる。このような観点から、古典系から量子系への古典-量子チャンネルや、量子系から古典系への量子-古典チャンネルなども量子チャンネルのある特別な場合として取り扱うことができ、古典-量子チャンネル、量子チャンネル、量子-古典チャンネルという一連の伝送過程が一貫した数理構

造を用いて統一的に議論することができるのである。

本研究では、量子密度符号化や量子テレポーテーションなどの量子エンタングルメントを含む量子チャンネルの特徴付けを行い、以下の研究を行う。

量子エンタングルメントを含む量子チャンネルに対する量子相互エントロピーの性質を調べる。

量子平均相互エントロピーの定式化を基に、量子系のチャンネル符号化の定理の証明に必要な数理的基礎を構築する研究を行う。

(3) 量子チャンネル符号化の定理の解決に向けた基礎研究

古典系のマクミランの定理は、エルゴード情報源から送信するメッセージの長さを十分大きくすればメッセージ1語当たりの情報量が、情報源の情報量に等しくできることを示している。すなわち、送信側の情報を再現する仕方が存在することを示しており、この定理の一般論は、平均エルゴード定理と見なすことができる。大矢-塚田-梅垣は、富田-竹崎定理と量子確率論における充分性の概念を用いて、古典系のエントロピーの積分表現に関するマクミラン型定理をフォンノイマン代数によって記述される非可換系に拡張できることを示した。すなわち、条件付期待値の存在に関するある仮定のもとで、非可換系の定常状態から定まるエントロピー型作用素が定常状態によらずある定まった作用素によって常に表現できることを示した。この結果は、量子系のマクミランの定理を定式化するための基礎付けを与える研究に関連している。さらに、大矢-塚田-梅垣は、フォンノイマン代数のセンターの概念を用いて、一般的な形で量子系のマクミランの定理の証明を与えている。また、この研究は、状態の分離可能性とも密接に関連し、幾つかの状態が相関した量子エンタングルメントの研究とそのチャンネルによる定式化の重要な鍵となると考えられる。さらに、量子平均相互エントロピーの定式化のためには、前年度までに行った量子系の力学的エントロピーの研究の発展が不可欠である。

本研究では、上記の研究を基に、以下の研究を行う。

大矢-塚田-梅垣の定理を遷移期待値や条件付期待値を用いて、より一般的な量子系に拡張し、それを用いて量子符号化の定理の証明を試みる。

シヨア、ベネット、ニールセン等々によりコヒーレント・エントロピーやリンドブラット-ニールセンエントロピーなどの相互エントロピータイプの尺度を用いた量子符号化の定理が部分的に議論されている。しかし、本研究代表者達により、これらの尺度は、負の値を取り、入力情報量より大きくなるなどの不都合な点が指摘され、情報通信の尺度として有効でないことが示されている。

本研究では、量子相互エントロピーと量子

系の力学的エントロピーの定式化を基に、量子エンタングルメント性を包含したチャネルに対する新たな尺度を導入し、量子チャネル符号化の定理を証明するための基礎付けを与える研究を行う。

4. 研究成果

本研究では、量子系のエントロピー理論と量子チャネル理論の研究を基に、量子チャネル符号化の定理の完全な証明を与えることを最終目標とし、その定式化に必要な数理的基礎をひとつひとつ積み上げていくことを目的とする。具体的には以下のような課題を実施した。

具体的な研究目標

(1)量子系のチャネル符号化定理の定式化の基礎付け

チャネル符号化の定理は、エルゴード性を持つ通信過程における情報源のエントロピーがキャパシティ（通信路容量）より小さい場合には、受信メッセージから送信メッセージをいくらかでも高い精度で推定することができることを示している。すなわち、平均相互エントロピーが情報源のエントロピーに限りなく近くなるような符号化を選択できるという特徴を持ち、非常に信頼性の高い符号化の存在を理論的に保証している。この定理により、通常の情報通信理論の研究は、効率の良い符号を生成するための理論（符号理論）へと展開していくことになる。現在、量子情報通信理論において、ショア、ペネット、ニールセン等によりコヒーレント・エントロピーやリンドブラット-ニールセンエントロピーなどの量子相互エントロピー型の複雑さの尺度を用いた量子チャネル符号化の定理の議論がなされている。しかしながら、これらの尺度が、負の値を取り、シャノンの基本不等式を満たさないといった情報通信の尺度として都合の良くない性質を持つことが本研究代表者達によって指摘されている。

本研究では、最も適切な量子相互エントロピー型の尺度を見極め、量子系のシャノン-ファインシュタインの定理(チャネル符号化の定理)の証明を行うための基礎付けを行った。

(2)量子系の力学的エントロピーの定式化

通常の情報通信理論では、力学的エントロピー(KS(コロモゴロフ-シナイ)エントロピー)を用いて平均相互エントロピー(情報量)が定められ、それを基にして符号化の定理が一般化されている。このKSエントロピーを量子系に拡張しようとする試みは、コンヌ-ストルマー、エムシュ、コンヌ-ナンフォッフ-チリング(CNT)、パーク、アリツキー-ファネス(AF)、大矢(Complexity)、アカルディ-大矢-渡邊(AOW)、コサコウスキー-大矢-渡邊(KOW)等によってなされている。この力学的エントロピーは、系の力学的発展に伴って変化した状態を持つ平均的な情報量を表している。本研究代表者達は、AOWエントロピー、KOW

エントロピー及び情報力学の複雑さの概念を用いて量子平均エントロピーと量子平均相互エントロピーの定式化を行い、これらの相互関係について研究を行った。

本研究では、量子系のチャネル符号化の定理の証明をするための基礎付けを行うために、KOWエントロピーをベースに新たな一般化AOWエントロピーを導入する。さらに、量子エンタングルメントの状態変化を取り込んだ量子平均相互エントロピーの定式化を行い、その性質を調べた。

(3)量子エンタングルメントを含む量子チャネルの特徴付け

入出力系の間でエンタングルメントした2つの量子状態を用いた情報通信過程である量子テレポーテーションと量子密度符号化などは、完全正值性を持つ量子チャネルで記述することができる。このチャネルに対する量子相互エントロピーは、ウールマンが示した量子相対エントロピーの単調性により、入力系の量子状態の持つ量子エントロピーの値を超えることはできないことが厳密に示されている。しかしながら、入力状態と出力状態のテンソル積で与えられる分離状態と、入出力間のエンタングルド状態とを量子相対エントロピーを用いて比べると、その値は、最大で、入力状態の持つ量子エントロピーの2倍の値を取ることが知られている。

本研究では、量子チャネル符号化の定理を証明する上で、このエンタングルメント性を有する量子チャネルの特徴を厳密に調べ、このような量子エンタングルメント性を含む量子チャネルの定式化について研究を行った。

上記の研究成果によって、今後、量子エンタングルメントを含む量子チャネルの数理的基礎付けと、その量子チャネルに対する量子系の平均相互エントロピーを定式化し、平均相互エントロピーの加法性の証明と量子エンタングルメント性を持つ量子系のチャネル符号化の定理の厳密な証明を行うための糸口が得られ、単に数学的理論の構築だけでなく、量子情報通信の物理工学的な発展に役立つ理論の定式化ができるものと期待する。

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)

[雑誌論文](計29件)

Noboru Watanabe, Note on Entropies of Quantum Dynamical Systems, Foundation of Physics, 2011,41, 549-563 DOI 10, 1007/s10701-010-9455-x (査読有)

Noboru Watanabe, Entropy type complexities in quantum systems, American Institute of Physics, Vol.1327, 289-297, 2011 (査読有)

G. Adenier, Noboru Watanabe and A. Khrennikov, Ion trap experiments on

entanglement: The low visibility case, American Institute of Physics, Vol. 1327, 311-315, 2011 (査読有)

A. Khrennikov, M. Ohya and Noboru Watanabe, CLASSICAL SIGNAL MODEL FOR QUANTUM CHANNELS, International Journal of Quantum Information, Vol.9, 281-291, 2011 (査読有)

Entropy type complexities in quantum dynamical processes, Noboru Watanabe, QP- PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Quantum Bio-Informatics IV; From Quantum Information to Bio-Informatics, Vol.26, pp 387-401, 2011 (査読有)

A fair sampling test for Ekert protocol, G. Adenier and Noboru Watanabe, QP- PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Quantum Bio-Informatics IV; From Quantum Information to Bio-Informatics, Vol.26, pp 403-412, 2011 (査読有)

Noboru Watanabe, On Treatment of Communication Processes by Quantum Entropies, American Institute of Physics, Vol. 1424, pp.354-363, 2012 (査読有)

G. Adenier, M. Ohya, Noboru Watanabe, I. Brasieva and A. Yu. Khrennikov, Double Blinding-Attack on Entanglement-Based Quantum Key Distribution Protocols, American Institute of Physics, Vol. 1424, pp.9-16, 2012 (査読有)

G. Adenier, Noboru Watanabe, I. Brasieva and A. Khrennikov, Multiple Photon Absorption Attack on Entanglement Based Quantum Key Distribution Protocols, QP- PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Vol. 30, pp. 171-185, 2013 (査読有)

Noboru Watanabe, On treatment of Gaussian communication process by quantum entropies, QP- PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Vol. 30, pp.363-373, 2013 (査読有)

Noboru Watanabe, On complexity of quantum communication processes, American Institute of Physics, Vol. 1508, pp.334-342, 2013 (査読有)

Note on complexities for Gaussian communication processes, Noboru Watanabe, QP- PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Vol. 29, pp.261-269, 2013 (査読有)

Noboru Watanabe, An Entropy Based Treatment of Gaussian Communication Process for General Quantum Systems, Open Systems and Information Dynamics, Vol. 20, No. 03, pp. 1340009-1~10, 2013 (査読有)

Noboru Watanabe, Note on Complexity of Quantum Transmission Processes, the

proceedings of the 3rd International Conference on Mathematical Physics and its applications, Vestn. Sam. Gos. Techn. Un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki. Issue 1, Vol.30, pp.305-314, 2013 (査読有)

K. Mayuzumi, Noboru Watanabe and I. V. Volovich, On Construction of Quantum Logical Gate by ESR, the proceedings of the 3rd International Conference on Mathematical Physics and its applications, Vestn. Sam. Gos. Techn. Un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki. Issue 1, Vol.30, pp.297-304, 2013 (査読有)

Noboru Watanabe, Entropy type complexity of quantum processes, Physica Scripta, Vol.2014, No.T163, DOI 10.1088/0031-8949/2014/T163/014026, pp.1-6, 2014 (査読有)

Quantum transmission processes and their entropies, Noboru Watanabe, Russian Journal of Mathematical Physics, Vol. 21, No. 3, pp.1-10, 2014 (査読有)

[学会発表](計22件)

N. Watanabe, Note on Mathematical Treatment of Communication System by Quantum Entropies, 32nd International Conference on Quantum Probability and Related Topics, Levico, Italy, 2011-05-30-0604 (2011年5月30日~6月4日) (招待講演)

N. Watanabe, On Treatment of Communication Process by Quantum Entropies, The International Conference on Foundations of Probability and Physics - 6, Linnaeus University, Vaxjo, Sweden, 2011-06-13~06-16 (2011年6月13日~6月16日) (招待講演)

N. Watanabe, Mathematical Treatment of Communication System by Quantum Entropies, 43 Symposium on Mathematical Physics, Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland, 2011-06-20~06-22 (2011年6月20日~6月22日) (招待講演)

N. Watanabe, On complexity of Quantum Communication Processes, The International Conference on Quantum Theory; Reconsideration of Foundations - 6, Linnaeus University, Vaxjo, Sweden, 2012-06-11~06-14 (2012年6月11日~6月14日) (招待講演)

N. Watanabe, Note on Complexity of Quantum Communication Processes, 44 Symposium on Mathematical Physics, Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland, 2012-06-20~06-24 (2012年6月20日~6月24日) (招待講演)

N. Watanabe, Note on Complexity of Quantum Transmission Processes, 3rd International Conference on Mathematical

Physics and Its Applications, Samara, Russia, 2012-08-27~09-01 (2012年8月27日~9月1日) (Plenary 講演)

K. Mayuzumi, N. Watanabe and I. Volovich, On Construction of Quantum Logical Gate by ESR, 3rd International Conference on Mathematical Physics and Its Applications, Samara, Russia, 2012-08-27~09-01 (2012年8月27日~9月1日) (招待講演)

N. Watanabe, Note on Complexity in Quantum Transmission Processes, International Workshop on IDAQP - White Noise, Quantum Information and Statistics -, Aichi Prefectural University, Nagoya, Japan, 2013-01-07~01-09 (2013年1月7日~1月9日) (招待講演)

N. Watanabe, On Complexities of Quantum Transmission Process, 33rd International Conference on Quantum Probability and Related Fields, Marseille, France, 2012-10-01-10-05 (2012年10月1日~10月5日) (招待講演)

N. Watanabe, Entropy Type Complexities in Quantum Communication Processes, QBIC Workshop 2013, Tokyo University of Science, Noda, Japan, 2013-01-11~01-12 (2013年1月11日~1月12日) (主催者)

N. Watanabe, On Entropy Type Measures in Quantum Transmission Processes, The 2nd QBIC Workshop 2013, Tokyo University of Science, Noda, Japan, 2013-03-4~04-5 (2013年3月4日~3月5日) (主催者)

N. Watanabe, On Entropy Type Complexity for Quantum Processes, The International Conference on Quantum Theory: Advances and Problems - QTAP, Linnaeus University, Vaxjo, Sweden, 2013-06-10~06-14 (2013年6月10日~6月14日) (招待講演)

N. Watanabe, On Entropy - Type Complexities for Communication Process, 45 Symposium on Mathematical Physics, Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland, 2013-06-01~06-02 (2013年6月01日~6月02日) (招待講演)

N. Watanabe, Note on Entropy Type Complexities for Communication Channel, Quantum Probability, Statistics and Control, Nottingham, the United Kingdom, 2013-07-04~07-05 (2013年7月4日~7月5日) (招待講演)

N. Watanabe, Note on entropy type complexity of communication processes, The IMS Workshop on IDAQP (Infinite Dimensional Analysis and Quantum Probability) and Their Applications, Institute for Mathematical Sciences, Singapore, 2014-03-03~03-07 (2013年3月3日~3月7日) (主催者)

N. Watanabe, Note on Entropy Type Complexity for Transmission Process, The

34th International Conference on Quantum Probability and Related Topics, Steklov Mathematical Institute, Moscow, Russia, 2013-09-16-09-20 (2013年9月16日~9月20日) (招待講演)

F. Konno, N. Watanabe, On construction of CCNOT gate based on ESR, The 34th International Conference on Quantum Probability and Related Topics, Steklov Mathematical Institute, Moscow, Russia, 2013-09-16-09-20 (2013年9月16日~9月20日)

N. Watanabe, On Entropy Type Complexities of Gaussian Communication Process, The 3rd QBIC Workshop 2013, Tokyo University of Science, Noda, Japan, 2013-10-17~10-18 (2013年10月17日~10月18日) (主催者)

ON ENTROPY OF QUANTUM COMPOUND SYSTEMS, N. Watanabe, The International Conference on Quantum Theory: from Problems to Advances - QTPA, Linnaeus University, Vaxjo, Sweden, 2014-06-9~06-12 (2014年6月9日~6月12日) (招待講演)

Note on Entropies for Compound Systems, N. Watanabe, 46 Symposium on Mathematical Physics, Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland, 2014-06-15~06-17 (2014年6月15日~6月17日) (招待講演)

② NOTE ON ENTROPIES OF QUANTUM COMPOUND SYSTEMS, N. Watanabe, Satellite Conference of the International Congress of Mathematicians 2014, 35th International Conference on Quantum Probability and Related Topics, Chungbuk National University, Cheongju, Korea, 2014-08-22-08-26 (2014年8月22日~8月26日) (招待講演)

② On Entropies of Compound Systems, N. Watanabe, The QBIC Workshop 2014, Tokyo University of Science, Noda, Japan, 2014-10-23~10-25 (2014年10月23日~10月25日) (主催者)

〔図書〕(計1件)

Open Systems, Entanglement and Quantum Optics, Edited by Andrzej Jamiolkowski, Chapter: Quantum Communication Processes and Their Complexity, Intech Book, pp.65-92, 2013 (138ページ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 昇 (WATANABE, Noboru)

東京理科大学・理工学部情報科学科・教授
研究者番号: 70191781