

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006 年度～2009 年度

課題番号：18540141

研究課題名（和文） 量子符号化の定理の基礎付けに関する研究

研究課題名（英文） A STUDY FOR ESTABLISHING THE
FOUNDATION OF QUANTUM CODING
THEOREMS

研究代表者

渡邊 昇 (NOBORU WATANABE)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：70191781

研究成果の概要（和文）：

符号化の定理を量子系で議論するためには、(1) 量子系での相互エントロピー(情報量)の定式化と、(2) 量子系の力学的エントロピーを通しての平均相互エントロピーの定式化の研究が不可欠である。本研究では、上記の(1)と(2)の研究に焦点を絞って以下の研究を実施した。

(1) 量子相互エントロピー型尺度に関する情報伝送効率の研究

通信過程において、チャンネルは入力系の情報を出力系に伝達する働きをもち、相互エントロピーは、チャンネルを通して入力系から出力系に正確に伝わった情報の量を表している。

本研究では、Ohya相互エントロピーと、Coherent information や Lindblad-Nielsenのエントロピーといった相互エントロピー型尺度との比較を光雑音チャンネルで行い、Coherent information や Lindblad-Nielsenのエントロピーが抱える問題点を指摘し、Ohya 相互エントロピーが減衰チャンネルに対して最も相応しい尺度であることを示した。

(2) 量子系の力学的エントロピーの数理的研究

古典系の力学的エントロピー(コロモゴロフ-シナイエントロピー)の量子系への拡張の試みが、Connes - Stormer, Emch, Connes - Narnhofer -Thirring (CNT), Alicki-Fannes (AF), Ohya (Complexity), Accardi-Ohya -Watanabe (AOW), Kossakowski -Ohya -Watanabe (KOW)等によってなされている。本研究では、KOW 力学的エントロピーの定式化を基に、入力にスクイズド光状態を用い、光雑音チャンネルと量子マルコフ過程によって構成された力学系に対して、一般化された AOW エントロピーを計算し、入力状態の変化に対する、量子力学的エントロピーの振る舞いについて厳密に調べた。

研究成果の概要（英文）：

In order to discuss coding theorems in quantum systems, we need to investigate (1) a formulation of mutual entropy (information) in quantum systems and (2)

a formulation of mean mutual entropy based on dynamical entropy of quantum system.

We focus the above (1) and (2), and we obtained the following results.

(1) A study on efficiency of information transmission by means of quantum mutual entropy type measures

In a communication process, a channel has a function to transmit a state of the input system to output system, and the mutual entropy expresses the amount of information correctly sent output system from input system through a channel. I studied the quantum mutual entropy type measures, that is Ohya mutual entropy, coherent information and Lindblad-Nielsen entropy and I compared with these measures for the noisy optical channel. I obtained the result that Ohya mutual entropy is most suitable one for discussing the quantum coding theorems.

(2) A mathematical study of dynamical entropies for quantum systems

A trial of extension to quantum system of dynamic entropy (Kolmogorov - Sinai entropy)

of classical system was studied by Connes - Stormer, Emch, Connes - Narnhofer -Thirring (CNT), Alicki- Fannes (AF), Ohya (Complexity), Accardi-Ohya -Watanabe (AOW), Kossakowski -Ohya -Watanabe(KOW), and so on. In this study, based on the formulation of KOW dynamical entropy, I strictly examined about the performance of the quantum dynamical entropy to calculate the generalized AOW entropy for the squeezed input state and the noisy optical channel, and for the dynamical system consisted of the quantum Markov process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	900,000	0	900,000
平成19年度	800,000	240,000	1,040,000
平成20年度	800,000	240,000	1,040,000
平成21年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	720,000	4,020,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・数学一般

キーワード：情報数理, 量子情報

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プロセスの研究は、1980年代頃に盛んに行われていたが、その後の量子コンピューティングの研究が開始されたことに伴い、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な広がりを見せ研究が行われている。特に、量子情報通信プロセスの数理的研究は、(1) 量子情報を測る尺度の理論である量子エントロピー理論、(2) 量子状態変化の理論である量子チャンネル理論、(3) 量子符号化の定理、(4) 量子信号理論、(5) 量子信号検出理論、(6) 量子信号推定理論等々があり、非可換確率論を数理的ベースとして様々な研究が行われているが、最も重要な問題の一つの量子符号化の定理が未解決のまま残されている。

本研究では、量子系のエントロピー理論と量子チャンネル理論の研究を基に、量子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基礎数理を地道ではあるがひとつひとつ構築し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ていく予定である。

2. 研究の目的

(1) 量子チャンネルに関する研究

量子系の状態変化を扱う理論が、量子チャンネル理論であり、量子系の情報通信プロセスを記述するために用いられ、Holevoによる半古典的（一方が古典系の）チャンネルの導

入や、Ohya による、量子力学的（完全な量子系における）チャンネルの数学的定式化と減衰過程のチャンネルモデルの導入など様々な研究が成されてきた。ところで、情報通信プロセスのように外界の影響を考慮する場合は、2つ以上の系を取り扱うことが必要であり、全系の状態の正值性を保証するためには、全系における状態変化を記述する量子チャンネルに完全正值性などの正值性より少し強い条件を付け加えることが必要である。ところで、2つ以上の系の状態の干渉性を表したものが量子エンタングルメントであり、量子系に特有の性質である。量子エンタングルメントした状態を生成する研究は、正值性より少し強い条件を付け加えた量子系の状態変換により定式化される可能性があり、これを用いた量子情報通信プロセスを調べることが重要な課題である。

本研究では、現在までに行ってきた量子チャンネルに関する研究を基に、(1) リフティングを用いた定式化、(2) Jamiolkowski 自己同型写像を用いた定式化、(3) 完全正写像と正写像を用いた定式化について検討し、量子エンタングルメントを取り込んだ量子情報通信プロセスの数理的基礎付けを行うことを目的とする。

(2) 量子エントロピーに関する研究

量子系におけるエントロピー理論の研究は、1932年に von Neumann によって導入された量子系のエントロピーにさかのぼることができる。さらに、量子系の相対エントロ

ピーは Umegaki や Lindblad, Donald などによって、古典系の Shannon 型の相対エントロピーの対応で研究され、その後、Araki や Uhlmann などによって、より一般の量子系へ拡張する研究が行われてきた。ところで、情報通信プロセスのエントロピー解析において最も重要な尺度が、相互エントロピーである。エントロピーそのものは、入力状態のもつ情報の量を表しているが、相互エントロピーは、入力の情報量のうち、チャンネルを通して出力系に正しく伝達された情報の量を表しており、情報通信プロセスに対する情報伝送の効率を調べる上で必要不可欠なものである。量子相互エントロピーは 1983 年、Ohya によって定式化され、量子通信路容量の導入を始め様々な成果が得られている。

本研究では、現在までに行ってきた量子エントロピーに関する研究を基に、(1)の研究で得られた量子系の状態変換に関する結果を用いて、量子エンタングルメントを考慮した平均量子相互エントロピーの定式化を行い、その加法性の証明を試みることを目的とする。

(3) 量子情報源符号化の定理

1964 年、Umegaki は、測度論的な枠組みにおいてエントロピーの積分表現に関する McMillan 型の定理を証明した。この定理は、定常的な確率測度から定まるエントロピー関数が確率測度によらないある定まった可測関数によってつねに表現できることを主張するものである。この定理は、Ohya, Tsukada, Umegaki により少しの一般化が行われた。研究代表者は、Tomita-Takesaki 定理と非可換確率論における十分性の概念を用いて、この定理を von Neumann 代数によって定式化されている非可換系に拡張できることを論じた。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作用素が定常状態によらないある定まった作用素によってつねに表現できることを示している。この結果は、量子系の McMillan 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たものである。

本研究では、(1), (2)の研究から得られる予定の量子エンタングルメント性を包含した量子チャンネルと平均量子相互エントロピーを基に、McMillan の定理を量子系で論じ、それをベースとして量子系の情報源符号化の定理の証明を試みることを目的とする。

(4) 量子通信路符号化の定理

古典情報通信プロセスの数理の最も重要な結果が符号化の定理であり、(3)で述べた情報源符号化定理と通信路符号化定理がある。通信路符号化定理は、エルゴード性を持つ情報通信プロセスにおける情報源のエントロピーが通信路容量より小さい場合は、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、さらに、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ぶことができるというものである。この定理により極めて信頼性の高い符号化の存在が理論的に保証されることとなり、古典系の情報通信の数理的研究は、符号を生成する理論である符号理論へと発展していくことになる。現在、量子通信路符号化の定理は、Shor, Bennet, Nielsen 等々によりコヒーレント・エントロピーや Lindblad-Nielsen 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て議論されているが、これらの尺度が、負の値を取ったり、入力情報量より値が大きくなってしまふなどの不都合な性質を持つことが本研究代表者等によって示されている。

本研究では、(1), (2), (3)から得られた結果を基に、最も適切な尺度の量子相互エントロピーを(2)の研究により拡張し、古典系の Shannon-Feinstein の定理(通信路符号化の定理)に対応する量子通信路符号化定理の証明を行うための基礎付けを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 量子チャンネルとエンタングルメントに関する研究

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る情報通信プロセス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、完全正性を持つ量子チャンネルで記述することができ、このような場合には、Uhlmann の量子相対エントロピーの単調性より、量子相互エントロピーは入力系の量子状態の持つエントロピー以下になることが厳密に示されている。しかしながら、量子相互エントロピーの代わりに量子相対エントロピーを用いて、入力状態と出力状態のテンソル積から作られる分離状態と入出力間のエンタングルド状態とを比べると、量子相対エントロピーの値は、最大で、入力状態の持つエントロピーの 2 倍の値を取ることが知られている。量子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に関わる性質をきちんと調べることは極めて大切であり、このような量子エンタングルメント性を用いた量子情報通信プロセスの数理的研究は、その重要性とは裏腹に、まだ統一的に調べられていないといった状況である。

本研究では、量子エンタングルメントを生成する数学的ツールとして知られている。

- (1) 量子チャンネルとリフティング
- (2) Jamiolkowski 自己同型写像
- (3) Hilbert-Schmidt 作用素を用いたエンタングルド作用素
- (4) 完全正写像と正写像を用いたアプローチ

等の手法を量子チャネルの構成法と比較しながら調べ、我々のアプローチに最も適した量子エンタングルメントの生成方法を定式化していく予定である。さらに、これらの変換により作られるエンタングルド状態の性質について数学的見地から統一的に調べる。また、本研究では、量子エンタングルメントについて以下のような研究を行う予定である。

量子エンタングルメントは、量子系特有の性質であり、量子情報通信、量子アルゴリズム、量子コンピュータ等々の研究の基礎を与える重要な課題であるが、極めて難解な問題であり、量子エンタングルメントの判定法でさえ、Peresにより1996年に与えられたPPT(positive partial transpose)規準があるが、分離状態とエンタングルド状態の完全な判別は、2つのHilbert空間が2次元と2次元、2次元と3次元でしか実現されていない。エンタングルメント性の数学的議論は、分離性の判定と密接に関わっている。例えば、全ての分離状態は、Bell-CHSHの不等式において、2以下の値を取ることが知られている。さらに、エンタングルメントと正作用素の理論とは深く関連している。例えば、分離状態であるための必要十分条件として正值写像を用いた正作用素の性質がある。Hilbert空間が2次元と2次元、2次元と3次元では、状態の分離性と、partial transposeが正作用素であることが必要十分であるが、高次元のpartial transposeの理論は未解決の問題である。特に、PPT規準を満たすエンタングルド状態の研究は、Horodecki達によって行われ、Stormer-Woronowicz等によって分解不可能な写像(nondecomposable map)との関連で議論されている。Horodecki達は、PPT規準より少し強い値域に関する規準を設けてこの問題に取り組んでいる。状態の純化可能性と2次元射影作用素を及ぼした状態がエンタングルメント性を持つことが必要十分であり、PPT状態は純化可能性を持たない。純化可能であるエンタングルド状態を自由(Free)エンタングルド状態といい、純化可能でないエンタングルド状態を有界(Bound)エンタングルド状態という。また、PPT規準を満たさない状態をNPT状態という。2つのHilbert空間が2次元と2次元、2次元と3次元では、状態は、分離可能な状態と自由(Free)エンタングルド状態に完全に区別できるが、高次元については、分離可能な状態の集合は、PPT状態の部分集合であり、自由(Free)エンタングルド状態の集合もNPT状態の部分集合となる。また、有界(Bound)エンタングルド状態は、PPT有界エンタングルド状態とNPT有界エンタングルド状態に区別される。また、Werner等は、無限次元空間の有限次元の対称・反対称部分空間上に状態を

定めその状態の分離可能性について議論している。このように、エンタングルメントに関する研究は、2つのHilbert空間が2次元と2次元、2次元と3次元でのエンタングルド状態と分離状態の判別しかできていないという状況であり、高次元、とりわけ無限次元をも含めたエンタングルメントの基礎研究が急務であるが、そのためには、非可換解析の数理を縦横に駆使することが必要であり、国内外でこの問題に正面から取り組む研究者の数は極めて少ないと言わざるを得ない。このような中、OhyaとBelavkinは、無限次元の可分な複素ヒルベルト空間上の有界作用素の全体に対して、エンタングルド作用素をHilbert-Schmidt作用素を用いて定め、エンタングルド状態をq-エンタングルド状態、d-エンタングルド状態、c-エンタングルド状態の3つのクラスに分類することに成功している。さらには、正写像の性質について深く考察してきたKossakowskiと本研究グループの非可換確率論の知識を合わせることにより、エンタングルド状態のより厳密な特徴付けが可能になるものと期待している。

(2) 量子系の力学的エントロピーに関する研究

古典系の通信理論において、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)を用いた平均相互情報量が定められ、それを基にして符号化の定理が議論され、通信の効率などを数理的に取り扱うことができた。量子系においても、力学的エントロピーを量子系に拡張しようとする試みが、Connes-Stormer, Emch, Connes-Narnhofer-Thirring (CNT), Park, Alicki-Fannes (AF), Ohya (Complexity), Accardi-Ohya-Watanabe (AOW), Kossakowski-Ohya-Watanabe (KOW)等によってなされている。この量子力学的エントロピーは、量子系が力学的に変化したとき、系の力学的発展に伴って変化した状態が持つ平均的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た量子力学的エントロピーと量子力学的相互エントロピーの定式化を行い、これらの量子系における力学的エントロピー相互の関係についての研究を行っている。

本研究では、最終年度の量子系における符号化の定理の証明の基礎付けを与えるために、KOWエントロピーと適応力学の考えを導入して作られる新たなAOWエントロピーを基に、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情報量の定式化を行い、その加法性等の性質について調べていく予定である。

4. 研究成果

(1) 量子エントロピーおよび量子系の相互エントロピー型尺度に関する研究

量子情報通信に関する数理的な研究は、量子エントロピー理論、量子確率論などをその基礎として定式化されており、様々な量子過程における状態変化を量子チャンネルで記述し、それらの状態変化における情報伝送の効率を量子系のエントロピーを用いて厳密に論じることを目的とする。様々な量子過程において入力系から出力系に量子状態が変化するとき、どれだけ正しく入力系の情報が出力系に伝達されるのかを測る尺度としては、大矢によって1983年に導入された量子相互エントロピーがあるが、近年、量子干渉性を用いた量子通信に関連して、コヒーレントエントロピー・Lindblad-Nielsenエントロピーなどの相互エントロピー型尺度がShor, Bennet 達によって導入されている。また、通信過程において、チャンネルは入力系の情報を出力系に伝達する働きをもち、相互エントロピーは、チャンネルを通して入力系から出力系に正確に伝わった情報の量を表している。通信路容量 (capacity) とは、チャンネルが入力の情報量を最大でどれだけ正確に出力系に伝達することができるかを測るための尺度であり、チャンネル設計に関して重要な基準となっている。本年度は、Ohya 相互エントロピーと、近年、Shor, Bennet 達が定めた相互エントロピー型尺度、Coherent information や Lindblad-Nielsen のエントロピーとの比較を減衰チャンネルで行い、Coherent information や Lindblad-Nielsen のエントロピーが抱える問題点を指摘し、Ohya 相互エントロピーが減衰チャンネルに対して最も相応しい尺度であることを示した。さらに、様々な量子過程に関して、量子相互エントロピーとその他の相互エントロピー型尺度を厳密に計算し、量子相互エントロピーの妥当性について議論を行った。また、Ohya 相互エントロピーと、Coherent information や Lindblad-Nielsen のエントロピーといった相互エントロピー型尺度との比較を光雑音チャンネルで行い、Coherent information や Lindblad-Nielsen のエントロピーが抱える問題点を指摘し、Ohya 相互エントロピーが減衰チャンネルに対して最も相応しい尺度であることを示した。

(2) 量子系の力学的エントロピーに関する研究

古典系の力学的エントロピー(コロモゴロフ-シナイエントロピー)の量子系への拡張の試みが、Connes - Stormer, Emch, Connes - Narnhofer -Thirring (CNT), Alicki- Fannes (AF), Ohya (Complexity), Accardi-Ohya-Watanabe (AOW), Kossakowski -Ohya-Watanabe (KOW)等によってなされている。本研究では、KOW力学的エントロピーの定式化を基に、入力にスクイズド光状態を用い、減衰チャンネルと量子マルコフ過程によって構成

された力学系に対して、一般化された AOWエントロピーを計算し、入力状態の変化に対する、量子力学的エントロピーの振る舞いについて厳密に調べた。さらに、コヒーレント入力と、スクイズド雑音状態を持つ光雑音チャンネルによって構成された力学系に対して、一般化された AOWエントロピーを同様に計算し、雑音状態の変化に対する、量子力学的エントロピーの振る舞いについても調べた。さらに、KOW力学的エントロピーの定式化を基に、光雑音チャンネルと量子マルコフ過程によって構成された力学系に対して、一般化された AOWエントロピーを計算し、入力状態の変化に対する、量子力学的エントロピーの振る舞いについて厳密に調べた。また、本研究では、KOW力学的エントロピーの定式化を基に、入力にスクイズド光状態を用い、光雑音チャンネルと量子マルコフ過程によって構成された力学系に対して、一般化された AOWエントロピーを計算し、入力状態の変化に対する、量子力学的エントロピーの振る舞いについて厳密に調べた。

(3) 量子制御通信過程と量子相互エントロピー型尺度に関する研究

量子情報通信の数理的な研究において、入力の情報が通信過程を通してどれだけ正確に出力系に伝達されたのかを議論することは、最も重要な研究テーマの一つであり、大矢による量子相互エントロピーが、非常に一般的な数理体系のもとで定式化されている。近年、量子干渉性を用いた量子通信に関連して、コヒーレントエントロピー・Lindblad - Nielsen エントロピーなどの相互エントロピー型尺度がShor, Bennet 達によって導入されている。

本研究では、昨年までに得られた、相互エントロピー型尺度についての厳密な議論を通して、フィードバックを含む様々な量子通信過程に関して、量子相互エントロピー型尺度を厳密に計算し、その妥当性について調べた。

(4) 量子論理ゲートの定式化に関する研究

計算の高速化に伴い現在のコンピュータが持つ避けられない欠点の一つがAND・ORゲートなどが有する論理演算の非可逆性である。この論理ゲートの非可逆性の欠点を解決する試みのひとつにフレッドキンとトホリによって提案された3入力と3出力の可逆な論理ゲートがある。ミルバーンは彼らの仕事を基にマッハー・ツェンダー干渉計と位相変調を起こす光カー装置を用いて可逆な光論理ゲート (FTMゲート) を設計した。本研究代表者等は、このFTMゲートを量子チャンネルの表現を用いて再定式化し、FTM量子チャンネルにおける情報伝送の効率を量子相互エントロピーを計算することによって正確に調べた。しかしながら、FTMゲートは制御光に光子数確定状態という物理的に実現すること

がきわめて難しい光の状態を使用しており、現在のままの定式化ではこのゲートの実現化は非常に困難であると言わざるをえない。本研究では、対称化されたフォック空間上で、一般化ビームスプリッターを定式化し、それを基に、4つのビームスプリッターを用いた量子論理ゲートの有効性について議論した。さらに、FTMゲートの問題点を量子直交状態の一種であるシュレーディンガーの猫状態を用いて解消できることを示した。

さらに、本研究では、このFTMゲートを量子チャネルの表現を用いて再定式化し、FTM量子チャネルにおける情報伝送の効率を量子相互エントロピーを用いて正確に調べた。さらに、量子コンピュータの最も基本的な素子を実現させる研究は様々なアプローチがあるが、本研究グループは、対称化されたフォック空間上で、一般化ビームスプリッターを定式化し、それを基に、4つのビームスプリッターを用いた量子論理ゲートの有効性について議論している。さらに、FTMゲートの問題点を量子直交状態の一種であるシュレーディンガーの猫状態を用いて解消できることを示した。また、量子アルゴリズムを行うための基礎として、量子アルゴリズムで使用する量子状態をFTMゲートならびに4ビームスプリッターゲートを用いて構成する手法について議論した。本研究グループは、このFTMゲートを量子チャネルの表現を用いて再定式化し、FTM量子チャネルにおける情報伝送の効率を量子相互エントロピーを用いて正確に調べた。さらに、量子コンピュータの最も基本的な素子を実現させる研究は様々なアプローチがあるが、本研究グループは、対称化されたフォック空間上で、一般化ビームスプリッターを定式化し、それを基に、4つのビームスプリッターを用いた量子論理ゲートの有効性について議論している。さらに、FTMゲートの問題点を量子直交状態の一種であるシュレーディンガーの猫状態を用いて解消できることを示した。

本年度は、量子アルゴリズムを行うための基礎として、量子アルゴリズムで使用する量子状態をFTMゲートならびに4ビームスプリッターゲートを用いて構成する手法について議論した。さらに、量子アルゴリズムを行うための基礎として、量子重ね合わせ状態に対するFTMゲートの誤り確率を厳密に調べた。さらに、FTMゲートを組み合わせることによって、Shorの量子アルゴリズムを定式化について論じた。

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9件)

- ① N. Watanabe, On quantum mutual type measures and capacity, QP-PQ Quantum

Probability and White Noise Analysis, Vol. 19, pp 370-384, 2006

- ② W. Freudenberg, M. Ohya, N. Turchina and N. Watanabe, Quantum logical gates realized by beam splittings, QP-PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Vol. 19, pp 131-148, 2006
- ③ N. Watanabe, Note on quantum mutual type entropies and capacity, QP-PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Vol. 20, pp 373-379, 2007
- ④ N. Watanabe, Note on quantum mutual entropy type measures, QP-PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Quantum Bio-Informatics; From Quantum Information to Bio-Informatics, Vol.21, pp 315-324, 2008
- ⑤ N. Watanabe, Note on Entropies in Quantum Processes, QP-PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Quantum Bio-Informatics II; From Quantum Information to Bio-Informatics, Vol. 24, pp 216-227, 2009
- ⑥ Note on Information Transmission in Quantum Systems, N. Watanabe, Quantum Stochastics and Information, Statistics, Filtering and Control, pp 383-395, 2008
- ⑦ N. Watanabe, Some aspects of complexities for quantum processes, Open Systems and Information Dynamics, Vol. 16, pp 293-304, 2009
- ⑧ N. Watanabe, Some Aspects of Entropies for Quantum Processes, American Institute of Physics, Vol.1101, pp192-199, 2009
- ⑨ N. Watanabe, On entropies of quantum dynamical systems, QP-PQ Quantum Probability and White Noise Analysis, Quantum Bio-Informatics III; From Quantum Information to Bio-Informatics, Vol. 26, pp 423-441, 2010

〔学会発表〕(計10件)

- ① N. Watanabe, On Information Transmission in Quantum Systems, Quantum Probability, Information and Control Symposium QPIC, Nottingham, England, 2006-07
- ② N. Watanabe, Note on Mutual Entropy Type Measures, The International Conference in QBIC 2007, Tokyo University of Science, Noda, Japan, 2007-03

- ③ N. Watanabe, On Entropies in Quantum Processes, The 39 Symposium on Mathematical Physics, N. Copernicus University, Torun, Poland, 2007-06
- ④ N. Watanabe, Note On Entropies in Quantum Processes, The 28th Conference on Quantum Probability and Related Topics, CIMAT, Guanajuato, Mexico 2007-09
- ⑤ N. Watanabe, Some Aspects of Entropies of Quantum Processes, The 40th Symposium on Mathematical Physics, N. Copernicus University, Torun, Poland, 2008-06
- ⑥ N. Watanabe, Some Aspects of Entropies for Quantum Processes, The 9th International Conference on Foundations of Probability and Physics-5, Vaxjo University, Sweden 2008-08
- ⑦ N. Watanabe, Some Aspects of Entropies for Quantum Processes, International Conference on Mathematical Physics and Its Applications, Samara, Russia, 2008-09
- ⑧ N. Watanabe, On Entropy of Quantum Dynamical Systems, The 3rd International Conference on Quantum Bio-Informatics Center, Tokyo University of Science, Noda, Japan, 2009-03
- ⑨ N. Watanabe, Note on Entropy of Quantum Dynamical Systems, The 5th Conference on Quantum Theory: Reconsideration of Foundations, Vaxjo University, Vaxjo, Sweden, 2009-6
- ⑩ N. Watanabe, Entropy Type Complexities in Quantum Dynamical Processes, The 4th International Conference on Quantum Bio-Informatics Center, Tokyo University of Science, Noda, Japan, 2010-03

[図書] (計2件)

- ① 大矢雅則, 渡邊 昇, 量子暗号と量子テレポーテーション - 新たな情報通信プロトコル -, 共立出版, 2006
- ② 渡邊 昇, 量子エントロピー, 大矢雅則 (編著) 「量子情報を巡る数理と哲理」 - エントロピー・ゆらぎ・マイクロとマクロ・アルゴリズム・生命情報 -, 国際高等研究所 Academic Publication, pp 41-65, 2008

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 昇 (NOBORU WATANABE)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号：70191781

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

大矢雅則 (MASANORI OHYA)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号：90112896

佐藤圭子 (KEIKO SATO)
東京理科大学・理工学部・講師
研究者番号：30366439

入山聖史 (SATOSHI IRIYAMA)
東京理科大学・理工学部・助教
研究者番号：10385528