

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21244007

研究課題名(和文)量子情報の数学的基礎研究

研究課題名(英文)Mathematical study of quantum information

研究代表者

小澤 正直(OZAWA, Masanao)

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40126313

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円、(間接経費) 10,140,000円

研究成果の概要(和文)：量子測定理論と量子集合論を軸に量子計算量理論と量子符号理論に新しい数学的方法を開発した。本研究代表者が確立した小澤の不等式と呼ばれる普遍的な不確定性原理の研究を発展させ、世界で初めて測定誤差と擾乱に関するハイゼンベルクの不等式の不成立を実験的に観測し、小澤の不等式の成立を確認した。また、量子計算の実現に伴う様々なモデルに対して、計算量、デコヒーレンス、必要な物理的リソースなどを明らかにした。更に、誤差を回避するための新しい符号化法を開発した。これらの成果により、量子情報技術の開発、関連産業、文化などにも幅広いインパクトを与えた。

研究成果の概要(英文)：We developed new mathematical methods for quantum measurement theory, quantum set theory, quantum complexity theory, and quantum coding theory. We advanced the study of a universally valid reformulation of the uncertainty principle based on the Ozawa inequality. We experimentally observed the violation of Heisenberg's error-disturbance relation for the first time in the world and also confirmed the Ozawa inequality in the same experimental arrangement. We showed computational complexity, inevitable decoherence, and necessary physical resources for various models of quantum computation. Moreover, we developed a new coding to correcting those errors. Those results gave broad impacts on quantum information technology, related industries, and culture.

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：数理物理学 量子測定 不確定性原理 量子情報 量子計算 量子符号 量子集合論 数学基礎論

1. 研究開始当初の背景

(1) 1994年にShorのアルゴリズムが発見されて以来、量子情報に関する研究が飛躍的に進展し、数学、量子物理学、情報科学が相互に密接な関係を持つ新しい学際的数理学の分野が生まれた。この分野では、量子情報技術の開発ばかりでなく、認識論的ならびに存在論的基礎が未だに解明されていない量子力学の基礎に関しても、量子情報という新しいパラダイムの下で飛躍的な学術的深化が期待されている。

(2) 因数分解及び離散対数問題に対するShorのアルゴリズムが多項式時間計算量をもつことは、量子計算量理論で保証されるが、実際は、環境からのデコヒーレンスと総称される誤りが不可避であり、それを量子誤り訂正によって訂正できなければならない。誤り耐性量子計算理論の最新の成果によれば、誤り訂正が可能であるためには、基本計算素子の誤り確率を厳しい閾値以下に押さえる必要がある。従って、量子計算の数理における基本問題は、このような高い精度における量子状態制御の可能性を理論的に究明することであり、また、様々なデコヒーレンスに対応する量子誤り訂正符号の可能性を理論的に究明し、開発することである。

(3) 申請者は1980年代より量子力学の基礎に関する研究を展開し、1984年に、物理的に実現可能な量子測定の統計的同値類と正規化された完全正写像値測度の同等性を証明して、量子測定理論の基礎を確立した。1988年には、その理論を応用して、重力波検出限界に関するユエン-ケープス論争を解決した[Nature 331 (1988) 559, News and Views]。2003年には、ハイゼンベルクの不確定性原理を打破する測定のモデルを示し、新たに測定誤差と擾乱に関する普遍的な不確定性原理を確立した。更に、この研究から、保存則における測定精度の限界を示すウィグナー・荒木・柳瀬の定理を定量的に表現する公式を得た。この公式を量子計算の計算精度に応用することから本研究の着想を得た。

2. 研究の目的

(1) 本研究課題は、これまで申請者が独自に開発してきた量子測定理論と量子集合論を軸に、数学、量子物理学、情報科学の境界に新しい学問分野を展開することを目指している。とりわけ、量子測定理論は量子情報の認識論的側面に関する数学的基礎を与え、量子集合論は量子情報の存在論的側面に関する数学的基礎を与えることが期待され、それらの基礎に立って、量子計算理論と量子符号理論に新しい数学的方法を開発し、量子情報技術の開発、情報・ナノテクノロジー関連産業、文化

などにも幅広いインパクトを与えることを目標とする。

(2) これまでの研究で、数学的に厳密な方法で量子測定理論を開発し、従来の不確定性原理の不備を明らかにして、不確定性原理の全く新しい定式化を確立した。本研究では、これらの研究を発展させ、実験的検証を行い、また、それを応用して、量子計算の実現に伴う様々なモデルに対して、想定される不可避な誤差とそれを防ぐのに必要な物理的リソースとのトレードオフを明らかにする。更に、このような誤差を回避するために量子ビットの新しい物理的符号化法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 研究課題を以下のテーマに分類して、研究代表者、研究分担者の役割分担を定める。

集合論的研究：量子集合論を公理的集合論及び作用素環論の手法で研究する。研究代表者及び研究分担者・松原洋の研究グループが担当する。

測定理論的研究：量子測定理論の数学的基礎を作用素環論及び量子集合論の手法で研究する。研究代表者および連携研究者・ブシェーミの研究グループが担当する。とりわけ不確定性原理や保存法則により現れる不可避的誤差限界を研究する。実験的検証を研究協力者長谷川、枝松の研究グループと共同で研究する。計算理論的研究：量子計算理論の数学的基礎を量子計算量理論及び量子集合論の手法で研究する。研究代表者及び研究分担者・西村治道の研究グループが担当する。更に、量子計算を物理的に実現する上で現れる誤差の評価と不可避性を研究する。研究協力者 Gea-Banacloche のグループと共同研究を行う。

符号理論的研究：量子符号理論の数学的基礎を符号理論及び量子集合論の手法で研究する。研究代表者及び研究分担者・神保、浜田の研究グループが担当する。保存則に由来する原理的な誤りを回避するための新しい符号化を研究する。

4. 研究成果

(1) 2009年度の研究において以下の成果を得た。

小澤は、不確定性原理から導かれる非可換物理量の同時測定可能性を研究して、1量子ビット上で狭義に非可換な(共通の固有ベクトルを持たない)物理量が同時測定可能になるのは、一方の物理量の固有状態のときであり、その場合に限ることを証明した。従来、狭義非可換物理量は同時測定不可能と考えられてきたが、本研究により量子測定理論の厳密な数学的定式化のもとで、その同時測定可能性が初めて明らかにされた。

小澤は、量子計算の精度限界を制御系との相互作用が満たす保存法則から導くことを研究して、以下の成果を得た。任意のユニタリゲートを任意の加法的保存量の存在のもとで実装すると、実装されたゲートのユニタリゲートに対する非忠実度が $B = \sin^2 \theta / (4 + 4(L/c)^2)$ 以上であることを導いた。ここに、 θ は量子ビット系の保存量の回転軸をゲートの回転軸の周りに回転させた軸と回転させる前の量子ビット系の保存量の回転軸との間の角とする。この結果により、スピン $1/2$ の量子ビット上の任意のユニタリゲートをスピン $N/2$ 系の制御系との回転不変な相互作用で実装する場合に、 $\theta = 0$ の場合に非忠実度が $\sin^2 \theta / (4 + 4N^2)$ 以上になり、 $\theta = \pi/2$ の場合に非忠実度が $1 / (4 + 4N^2)$ 以上になることが示された。

西村は、偽コイン発見問題を解く量子アルゴリズムを研究して、以下の成果を得た。 N 個のコインの中に k 個の偽コインがある場合、古典のアルゴリズムでは情報理論的限界により $k \log(N/k)$ 回のオーダの天秤の使用を必要とするが、 $O(k^{1/4})$ 回で k 個の偽コインすべてを発見する量子アルゴリズムを開発した。従来、同一の問題に関する量子計算量と古典計算量のギャップは指数的であるか 2 乗以下に限られていたが、これにより、 4 乗のギャップを持つ自然な問題が発見された。

(2)2010 年度の研究において以下の成果を得た。

小澤は、量子集合論に関する以下の研究を行った。任意の完備オースモジューラ束上の量子集合論で実数の等号理論を構築した。量子物理量の値の同一性に関する完全に一般的な扱いが可能になった。

小澤は、量子測定理論に関する以下の研究を行った。Weyl 環の位置と運動量を表現するために、一般の代数的量子論において非有界観測可能量をその概周期関数環の生成元として定義し、一般 EPR 状態の理論を構築した。これによって EPR に対する Bohr の回答の数学的再構成に成功した。

西村は、量子質問計算量に関する以下の研究を行った。量子質問計算量は、盛んに研究されてきた量子計算モデルであるが、古典計算理論より限定的な質問の研究が中心であった。本研究では、従来の量子質問計算量の計算モデルより強力な質問を行う場合における量子質問計算量の下界を考察し、ある条件下において上界と一致することが明らかにされた。

西村は、量子版 NP に関する以下の研究を行った。NP 問題とは、答えが Yes である条件が、多項式長の証明が存在して、多項式時間の計算能力で Yes であると検証可能だという問題であると考えられる。NP の量子版では、幾つかの量子化が考えられる。本研究では、証明長が入力対数の 2 つ

の量子もつれの量子状態を証明とするモデルに対して、先行研究の NP 問題に対するプロトコルの健全性(ある種の失敗確率)を改良した。

松原は、集合論に関する以下の研究を行った。一般連続体仮説、または、より弱いある仮定の下で P 上の非定常イデアルのプレシピテス性から P 上の非定常イデアルを $\{ \langle \cdot \rangle : \text{cof}(\langle \cdot \rangle) < \aleph_1 \}$ に制限して得られるイデアルの非飽和性を導くことに成功した。これにより、非定常イデアルたちの巨大基数的性質から一般連続体仮説の強い否定が得られるというこれまで知られていなかった形の結果を得ることができた。

(3)2011 年度の研究において以下の成果を得た。

小澤は、量子測定理論の研究を行い、以下の成果を得た。不確定性原理により、測定における誤差と擾乱を共に小さくするにはハイゼンベルク限界と呼ばれる不可避的限界が存在することが知られてきたが、その限界が正しくないことがこれまでの研究で明らかにされ、小澤の不等式と呼ばれる新しい限界が理論的に導かれた。しかし、ハイゼンベルク限界が正しくなく、小澤の不等式が正しい限界を与えるという実験的検証はこれまで行われていなかった。本研究では、スピン測定における誤差と擾乱の理論的限界を詳しく調べ、ある測定モデルでは、測定制御パラメータの広い範囲でハイゼンベルク限界が破れ、しかし、小澤の限界が成立することを突き止めた。このモデルの実験的実現をウィーン工科大学の長谷川准教授と共同で研究し、ウィーン工科大学の実験炉における中性子のスピン測定によってこのモデルを実現し、実験データでハイゼンベルク限界の破れと小澤の限界の成立を実証することに世界で初めて成功した。この成果は、Nature Physics に発表され、全国紙五紙を始めマスコミで大きく取り上げられ、大きな社会的反響を呼んだ。現代物理学の根本原理とされてきた不確定性原理を書き替える実証的成果を導き、今後の量子技術、情報技術に大きなインパクトを与えたことが社会的にも広く注目を集めた。

西村は、量子計算における量子版 NP に関する次の成果を得た。ある定式化では、NP 完全問題に対する「非自明」な効率的検証を行うことが可能であるという事実が、2009年に Blum と Tapp によって証明され、注目を集めている。非自明さの程度は、YES と NO の 2 つの計算結果の確率的有意差の程度が多項式の逆数程度であるとされてきたが、本研究では、多項式は線形にできることを証明し、その最適性を明らかにした。

松原は、薄葉との集合論に関する共同研究で、 P 上の非定常イデアルの巨大基数

的性質から P の skinnier な定常部分集合の存在を証明することに成功した。これより、ある種の基数に対し、非定常イデアルの巨大基数的性質からダイヤモンド原理が導けることが示された。

ブシェーミは、量子測定の中の「情報価値」に基づく順序付けの問題の研究において、統計的決定理論におけるモデル比較の理論を量子統計的決定理論に拡張することに成功し、統計的十分性に関するいくつかの同値条件を得た。

(4) 2012 年度の研究において以下の成果を得た。

小澤は、スピン測定における測定誤差と擾乱の関係について理論的研究を行い、3 状態法と弱測定法による誤差と擾乱の測定法の間には存在する同等関係を明らかにした。また、2004 年に Garretson らによって弱測定で擾乱を計測するために提案された関係式が正しくないことを示す反例を明らかにした。

小澤は、長谷川ウィーン工科大学准教授と共同で、実験パラメータの昨年度の発表より広い範囲にわたり、昨年度と同様の結論を導いた。

西村は、昨年度に引き続き量子アルゴリズムや量子計算量クラスについて研究を進めた。とくに量子計算量クラスについては、NP の量子版の誤り確率に対するロバスト性について研究し、証明が NP 同様に古典情報であるような量子版 NP (Quantum-Classical Merlin-Arthur proof systems) は、問題の答えが No の場合だけ誤りを生じるような制約されたサブクラスに一致することを明らかにした。

浜田は、量子誤り訂正符号の構成法、および量子誤り訂正符号におけるエンコード・デコード操作を含む量子情報処理一般に関する基礎的な成果を得た。後者の成果は量子ビット系のユニタリ演算の実現可能性に関する基礎的な定理とその応用である。

ブシェーミは、量子測定に必要なリソースを情報理論的観点から解析し、量子測定を被測定系である量子系から測定値の出力系である古典系への通信路として模倣するために必要な古典的リソース（古典通信と共有されたランダム性）を明らかにする一連の符号化定理を得た。また、量子非局所性の概念と量子纏れの概念の同等性を極めて一般的な定式化の下で証明することに成功した。

(5) 2013 年度の研究において以下の成果を得た。

小澤は、枝松東北大教授と共同で、3 状態法、及び、弱測定法という異なる二つの方法により、光子の偏光測定において小澤の不等式が成立するがハイゼンベルクの不等式が成立しない状況を観測することに成功した。このことにより、小澤の不等

式を量子通信に応用する技術的可能性が明らかになった。この成果は、報道発表され、主要全国紙で報道された。

小澤とブシェーミは、情報理論的な枠組みによって定式化された新しい誤差・擾乱関係式を導いた。この関係式は、量子暗号通信路のような量子装置を特徴付けるのに適した情報量的な定義による誤差と擾乱の概念を含んでいて、一般に、測定が被測定量の値を正確に再読することより一般的な相関が重要であるような状況において、小澤の不等式を補う役割を果たすものである。

西村は、前年度までの成果や知見をもとに量子アルゴリズムや量子計算量クラスについて研究を推進した。特に前年度の量子版 NP に関する誤り確率改善に関する成果と記述を 1 ラウンド量子対話型証明系に拡張することを試みた。その結果、AM と呼ばれる代表的な対話型証明系の計算量クラスの量子版について非自明な上界を与えることに成功した。

松原は、Skinny という概念を使って P 上の非定常イデアルの巨大基数的性質から無限組み合わせ論的な帰結を得ることに成功した。たとえば、一般連続対仮説の下では、もし P 上の非定常イデアルがプレシピタス性をもつならば P 上のダイヤモンド原理が成立することを示した。

浜田は、符号理論の研究に関連して、 $SU(2)$ および $SO(3)$ に関して、分解後の要素はあらかじめ与えられた 2 軸のまわりの回転に限るという制約の下、任意の回転を分解するのに必要な分解要素の最小数を決定した。

(6) 本研究課題は、量子測定理論と量子集合論を軸に、量子情報の数学的基礎を確立するための新しい数学的方法を開発し、数学、量子物理学、情報科学の境界に新しい学問分野を展開して、量子情報技術の開発、情報・ナノテクノロジー関連産業、文化などにも幅広いインパクトを与えることを目指すものである。本研究では、量子集合論の研究において、量子集合論内の「同一性」の概念から非可換な物理量の間「完全相関」という新しい概念を導き、それをを用いて「非可換な物理量が同時測定可能な状態がある」ことを理論的に明らかにした。これは、物理量の「可換性」と「同時測定可能性」が同等であるという、長年信じられてきた定説を覆す、画期的な結論である。この結論を定量的に裏付けるために、2003 年に発見した小澤の不等式の検証理論に取りかかった。スピン測定における誤差と擾乱の理論を構築し、制御パラメータの広い範囲で小澤の不等式が成立するが従来ハイゼンベルクの不等式が成立しない状況を突き止め、それを実験で検証する方法を考案した。長谷川ウィーン工科大准教授と共同で中性子のスピン測定でこの方法を実現させ、この状況を実験的に検証した。Nature Physics にそ

の成果が掲載され、今後の量子技術、情報技術に大きなインパクトを与えたことが社会的にも広く注目を集めた。その後の枝松東北大教授との共同研究では更に光学的偏光測定においても同様の実証を成功させ、量子情報技術への展開に道をつけた。小澤の不等式の検証実験は、2012年1月の本研究グループの発表に続き、2012年9月にカナダのSteinbergのグループが発表して、Nature News, BBC News, NBC News等でとりあげられた。また、オーストラリアのWisemanのグループから新しい実験の提案が発表されるなど、激しい研究競争が始まっている。さらに、量子計算及び量子暗号の分野の研究も順調に進展し、このような新しい物理学的成果を情報技術に応用し、新しい産業の創出に向けての学術的基礎研究が大いに進展した。

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65件)

F. Buscemi, M.J.W. Hall, M. Ozawa, M.M. Wilde, Noise and Disturbance in Quantum Measurements: An Information-Theoretic Approach, Physical Review Letters 112, 050401/1-050401/5 (2014) (査読有)

DOI:10.1103/PhysRevLett.112.050401

F. Kaneda, S.-Y. Baek, M. Ozawa, K. Edamatsu, Experimental test of error-disturbance uncertainty relations by weak measurement, Physical Review Letters 112, 020402/1-020402/5 (2014) (査読有)

DOI:10.1103/PhysRevLett.112.020402

S.-Y. Baek, F. Kaneda, M. Ozawa, K. Edamatsu, Experimental violation and reformulation of the Heisenberg's error-disturbance uncertainty relation, Scientific Reports 3, 2221/1-2221/5 (2013) (査読有)

DOI:10.1038/srep02221

F. Buscemi, N. Datta, General theory of environment-assisted entanglement distillation, IEEE Transactions on Information Theory 59, 1940-1954 (2013) (査読有)

DOI:10.1109/TIT.2012.2227673

Y. Matsubara, T. Usuba, On Skinny Stationary Subsets of P , Journal of Symbolic Logic 78, 667-680 (2013) (査読有)

DOI:10.2178/jsl.7802180

F. Buscemi, All entangled states are nonlocal, Physical Review Letters 108, 200401/1-200401/5 (2012) (査読有)

DOI:10.1103/PhysRevLett.108.200401

K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, J. Teruyama, Quantum counterfeit coin

problems, Theoretical Computer Science 456, 329-352 (2013) (査読有)

DOI:10.1016/j.tcs.2012.05.039

S. P. Jordan, H. Kobayashi, D. Nagaj, H. Nishimura, Achieving perfect completeness in classical-witness quantum Merlin-Arthur proof systems, Quantum Information & Computation 12, 461-471 (2012) (査読有)

F. Buscemi, Comparison of quantum statistical models: equivalent conditions for sufficiency, Communications in Mathematical Physics 310, 625-647 (2012) (査読有)

DOI:10.1007/s00220-012-1421-3

J. Erhart, S. Sponar, G. Sulyok, G. Badurek, M. Ozawa, Y. Hasegawa, Experimental demonstration of a universally valid error-disturbance uncertainty relation in spin measurements, Nature Physics 8, 185-189 (2012) (査読有)

DOI:10.1038/NPHYS2194

[学会発表](計110件)

M. Ozawa, Heisenberg's Uncertainty Relation: Violation and Reformulation, Emergent Quantum Mechanics (EmQM13), 2nd International Symposium about Quantum Mechanics based on a Deeper Level Theory (招待講演), 2013.10.6, Vienna, Austria

M. Ozawa, Universally Valid Reformulation of Heisenberg's Uncertainty Principle, The 13th International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations (ICSSUR 2013) (招待講演), 2013.6.24, Nuremberg, Germany

K. Edamatsu, S.-Y. Baek, F. Kaneda, M. Ozawa, Error-disturbance uncertainty relations in generalized photon polarization measurements, 20th Central European Workshop on Quantum Optics (招待講演), 2013.6.20, Stockholm, Sweden

M. Ozawa, Universally valid Reformulation of the Heisenberg Uncertainty Principle, A Marcus Wallenberg Symposium "Quantum Theory: Advances and Problems" (招待講演), 2013.6.12, Växjö, Sweden

H. Nishimura, Quantum network coding; How can network coding be applied to quantum information?, 2013 IEEE International Symposium on Network Coding (NetCod2013) (招待講演), 2013.6.9, Calgary, Canada

M. Hamada, Overlooked restrictions on Euler angles in quantum computation, American Physical Society March Meeting,

2013.3.19, Baltimore, USA
F. Buscemi, Towards a one-shot entanglement theory, Workshop "Beyond i.i.d. in information theory" (招待講演), 2013.1.9, Cambridge, England
M. Ozawa, Simultaneous measurements and weak values, The Foundations of Probability and Physics-6 (FPP6) (招待講演), 2011.6.13, Växjö, Sweden
M. Ozawa, Universal uncertainty principle, simultaneous measurability, and weak values, The Tenth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computation (QCMC 2010) (基調講演), 2010.7.19, Brisbane, Australia
M. Ozawa, Quantum Reality and Measurement: Quantum Foundations Based on Quantum Logic and Set Theory, Quantum Theory: Reconsideration of Foundations, 5 (QTRF5) (招待講演), 2009.6.15, Växjö, Sweden

〔図書〕(計3件)

南部洋一郎他共著(荒木不二洋, 江口徹, 大矢雅則編)数理物理 私の研究(シュプリンガー量子数理シリーズ 第2巻), 丸善出版, (2012)(分担: 小澤正直 『量子測定理論』 pp. 119-125)

〔その他〕

(報道発表)(計3件)

2013年12月18日, 文部科学記者会見室, 『測定誤差と擾乱の不確定性に関する新たな不等式の実験的検証に成功』

2013年7月17日, 文部科学記者会見室, 『ハイゼンベルクの測定誤差と擾乱に関する不確定性関係の破れの実験的検証に成功-光を用いた小澤の不等式の新たな検証実験-』

2012年1月13日, 文部科学記者会見室, 『現代物理学の根幹である不確定性原理の破れを観測-ナノの世界の深淵を語る基本原理に穴-』

(新聞等掲載)

2014年1月1日発行, 科学新聞(朝刊); 12月25日発行, 中日(朝刊); 日経(夕刊)

2013年8月8日発行, 朝日(朝刊); 7月18日発行, 読売(朝刊); 日経(朝刊); 中日(朝刊); 日刊工業(朝刊); 河北新報(朝刊)

2013年11月1日発行, Physics World [online] News

2013年6月27日発行, Nature 498, 419-420, News

2013年6月4日発行, 中日(朝刊); 5月31日発行, 中日(朝刊); 5月3日発行, 中日(朝刊)

2012年10月20日発行, Science News Vol.182, No. 8, p.15

2012年9月7日発行, 科学新聞

2012年8月31日発行, 朝日(朝刊)

2012年6月1日発行, 『日経サイエンス』(pp. 16~17)

2012年4月28日発行, 朝日(夕刊)

2012年4月1日発行, 『日経サイエンス』(pp.34~43).

2012年3月11日発行, 日経(朝刊)

2012年2月28日発行, 毎日(朝刊)

2012年2月9日発行, 日経(夕刊)

2012年2月1日発行, 中日(朝刊)

2012年1月30日発行, アエラ(p. 31)

2012年1月27日発行, 朝日(朝刊); 1月23日発行, 朝日(朝刊); 日刊工業(朝刊); 1月22日発行, 読売(朝刊)

2012年1月20日発行, Physics World [online] News

2012年1月18日発行, 中日(夕刊)

2012年1月16日発行, 朝日(朝刊); 日経(朝刊); 毎日(朝刊); 読売(朝刊); 中日(朝刊) 他

(ホームページ等)

<http://www.math.cm.is.nagoya-u.ac.jp/~ozawa/>

<http://researchmap.jp/ozawa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小澤 正直(OZAWA, Masanao)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 40126313

(2) 研究分担者

神保 雅一(JIMBO, Masakazu)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 50103049

松原 洋(MATSUBARA, Yo)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 30242788

西村 治道(NISHIMURA, Harumichi)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 70433323

浜田 充(MITSURU, Hamada)

玉川大学・量子情報科学研究所・教授
研究者番号: 10407679

(3) 連携研究者

ブシェーミ フランチェスコ(BUSCEMI, Francesco)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 80570548