

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：23901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360151

研究課題名(和文)量子フェージング通信路とその伝送限界及び符号化・復号化、変調方式に関する研究

研究課題名(英文) Quantum fading channel and its information carrying limit, coding-decoding, and modulation

研究代表者

白田 毅 (USUDA, Tsuyoshi)

愛知県立大学・情報科学部・教授

研究者番号：80273308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：1960年代に量子通信の研究が始まって半世紀、最初の数十年は一握りの専門家によって研究されていたものが、1990年代から研究者人口が増え、その後多くのプロジェクトが立ち上がって、いよいよ実用化が期待されるまでになった。しかし、真に量子通信の技術化を進めるには、必ずしも流行しているとはいえない地道なテーマに取り組むことも必要である。

本研究では、そのような流行外のテーマの一つ、量子フェージング通信路に注目し、理論研究を進めた。まず、通信路のモデルを考え、伝送限界特性である最小誤り率や通信路容量を計算、また、それらの計算のための公式などのツールの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：A half-century has passed after studies of quantum communication began. Now we dream the day that quantum communication systems are used everyday. To achieve the goal, we should study all kinds of subjects which contain not only popular issues but also sober or more realistic ones. One of such issues is a quantum fading channel which is essential in wireless quantum communications. In this study, we consider a channel model of a quantum fading and show performance of quantum communication systems when we apply various coding-decoding, and modulation. As a result, quantum receivers clearly outperform classical ones under the fading environment.

研究分野：工学

キーワード：情報通信工学 量子情報理論 量子通信 フェージング 通信路容量

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 本分野の研究動向

量子情報理論分野では、過去、いくつかのビッグニュースがあったが、2004年、MITのグループによって量子減衰通信路の通信路容量が明らかにされたこともその一つといえる (Classical capacity of the lossy bosonic channel: the exact solution, V. Giovannetti, S. Guha, S. Lloyd, L. Maccone, J. H. Shapiro, and H. P. Yuen, Physical Review Letters, vol.92, 027902, 2004). これは、従来の情報理論で言えば、AWGN (加法的白色ガウス雑音) 通信路の通信路容量が、初めて明らかにされたほどのインパクトがあり、量子通信の研究は一つの山を越えたともいえる。このため、量子情報理論の理論研究は、新たな段階に入ったといえる。例えば、多くの研究者が取り組んでいるものとして、量子マルチアクセス通信路の研究があるが、無線通信等で重要視されているフェージング通信路についても、本格的な研究を行うべき時期にきていると考えられる。量子通信におけるフェージング通信路の重要性は、本研究提案時まで、公の場では議論されることがほとんどなかったが、実は、当時、複数の大手メーカーがフェージング環境下での量子通信の応用に興味を持ち、また、量子通信のパイオニアらは、量子フェージング通信路を研究することの重要性を示唆していた。このように、基礎研究と応用研究の両面で、量子フェージング通信路の研究を行う機が熟しつつあった。

それまで、世界を見渡しても、量子フェージング通信路の研究はあまりなされてきていなかったが、オーソドックスなフェージング通信路に関しては、数多くの研究がある。特に、その伝送限界である通信路容量を明らかにしたのは、Kennedy である (Fading dispersive communication channels, R.S. Kennedy, New York: Wiley-Interscience, 1969)。一方、量子フェージング通信路については、アナログ量子通信の研究の中で、Kennedy の弟子の Personick により量子クラメルラオ不等式やダイバーシティの検討がされていた (Application of quantum estimation theory to analog communication over quantum channels, S.D. Personick, IEEE Trans. Information Theory, vol. IT-17, no.3, 1971. あるいは Personick の学位論文)。量子通信の萌芽期以降、量子フェージング通信路の研究はほとんど注目されてこなかったが、その間、停滞期はあったものの、量子情報理論の研究は大きく発展し、1996年から1998年にかけて量子通信路符号化定理が証明され、1997年に量子一括復号の効果を示すことで、超加法的量子利得の具体例が通信総合研究所 (現 NICT) の研究者により初めて示されるなど、劇的に前進した。1971年当

時は、量子一括復号が知られておらず、Personick の解析は、個別ヘテロダイン測定を仮定した、いわば半古典的なアプローチであったため、フル量子での定式化、アプローチが必要と考えられた。

### (2) 研究代表者らの状況と本研究課題の提案

一方、研究代表者らは、量子情報理論の予言する量子通信の伝送限界が、どのような多重化、変調、符号化・復号化により達成するかという研究テーマについて、長年研究を続け (例えば、平成18年度から20年度、平成21年度から23年度の科研費プロジェクト)、デジタル変調を適用した場合の量子通信路容量や量子符号化・復号化、多重化に関する成果を得ていた。また、その成果の一部は、2008年、量子通信理論のパイオニアらが集まった会議で発表し、彼らから、重要かつ稀少な研究であり、他の研究者が使いこなせていないノウハウも持っているとの評価をいただいた。量子フェージング通信路については、その会議後にも話題に出たが、研究代表者らは、まずは基本的な量子通信路モデルについて、集大成として広帯域通信路の研究に取り組んだ。そして、平成23年度までのプロジェクト終了後、次のステップとして、応用的量子通信路モデルに取り組むこととし、本研究課題を提案した。

## 2. 研究の目的

本研究は、量子通信ネットワークの実現を究極の目標とし、量子通信が、小規模ネットワークからグローバルネットワーク、コスモネットワークまで、あらゆる場面で適切に実用化されることを夢見ている。このため、基礎実験等の研究だけでなく、様々なレベルの理論研究が必要である。本研究では、従来ほとんど考察されてこなかった量子フェージング通信路に注目し、まずはそのモデルを考え、量子通信路容量や最小誤り率などを明らかにすることによって、その伝送限界を示す。また、その限界を達成することを目標に、現実的な変調、符号化・復号化を適用した場合の特性を調べ、様々な条件下で最適な変調、符号化・復号化方式を明らかにすることが、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

第一の目的である量子フェージング通信路のモデルの考察を、通信路の入出力の関係を明らかにすることにより行う。第二の目的である量子フェージング通信路の伝送限界の解明として、出力状態に対する誤り率の量子最適検出限界を計算する。第三の目的である量子フェージング通信路に対するデジタル変調の効果の定量評価は、これまでの研究で培った離散化通信路容量の導出ノウハ

ウを活用することで実施する。最後の第四の目的である量子フェージング通信路の伝送限界の達成を目指した符号化・復号化の検討については、量子一括復号の公式を一般化し、様々な符号による量子利得を定量的に評価する。具体的には以下のように研究を進める。

#### (1) 量子フェージング通信路のモデル

フェージング現象では、位相及び振幅が時間変動することから、位相変動と振幅変動それぞれの効果により、通信路の出力状態がどのように変化するかを明らかにする。まず、コヒーレント状態入力の場合の出力状態を明らかにし、モデルの妥当性を、古典的受信機であるホモダインあるいはヘテロダイン受信機を用いた場合に、量子論と古典論に差があるかどうかで検証する。

#### (2) 通信路の伝送限界の解明とデジタル変調の効果の定量評価

量子フェージング通信路の出力量子状態は一般に混合状態となるため、混合状態に対する量子測定、特に誤り率を最小化する量子最適測定の性質を解明する研究を進める。また、基本的デジタル変調方式を想定し、量子フェージング通信路の出力の量子最適検出特性を調べ、古典最適の場合と比較する。さらに、ASK, PSK, QAM などの代表的な変調方式に基づく離散化通信路容量の特性調査を行う。

#### (3) 広義の群共变的信号の定義とその性質の解明及び通信路行列公式の一般化、公式を用いた符号化・復号化の特性調査

従来の通信路行列公式を量子フェージング通信路に適用可能なものに一般化するため、広義の群共变的信号を定義し、その必要十分条件などを明らかにすることでその性質を解明する。また、それらの結果を数学的な道具として公式の一般化を試みる。さらに、極めて大規模な符号化は、汎用公式では計算困難であるため、特定の符号についてカスタマイズした公式の導出を行う。これらの公式を使い、符号化・復号化の特性調査を行う。

### 4. 研究成果

以下、主な項目ごとに研究成果を示す。なお、導出した公式や証明、通信路容量や相互情報量、誤り率の特性など、グラフ等を含む詳細な結果については、発表論文等に示している。その中で、本報告書の「5. 主な発表論文等」に記載したものについては、該当する項目の最後に引用している。

引用は、雑誌論文の場合は「雑誌」に「5. 主な発表論文等」に記載の通し番号を付け（例．雑誌 ），学会発表の場合は同様に「学会」に通し番号を付ける（例．学会 ）ことで行っている。

#### (1) 量子フェージング通信路のモデル

##### 位相変動のモデル

位相と振幅の時間変動のうち、まず、位相に着目し、位相変動がある場合の通信路出力状態を考え、BPSK 変調を行った場合の誤り率特性を調べた。その際、位相変動量の分散が未知の場合の量子最適受信機のロバストネスについて考察した。結果として、位相変動無しに最適化された受信機は、位相変動量の変化に非常に敏感であり、すぐに大きく劣化してしまうことがわかった。また、同時期のイタリアの研究グループ動向を踏まえ、量子準最適受信機のロバストネスについて考察した。同グループは、量子準最適受信機が古典最適受信機よりも悪くなることを示したが、本研究では、前プロジェクトで扱ってきた改良型量子準最適受信機を用いれば、古典最適受信機よりも常に良くなることを示した。詳細は、次の論文等に示している：雑誌 ，雑誌

##### 振幅変動のモデル

次に、振幅の確率的減衰のある通信路を考え、そのクラウド表現を扱った。減衰率が一定値の場合は、よく知られた減衰通信路となり、ガウス通信路のクラスに属すが、減衰率が確率的になることで非ガウスとなり、馴染みの無い通信路になるという意味で、理論的にも興味深い。この通信路について、BPSK 変調を行った場合の誤り率特性を調べ、コヒーレント状態とホモダイン受信機を用いた半古典的特性と、フェージング通信路の古典論の結果を比較し、両者が完全に一致することを示し、提案モデルが一定の妥当性を持つことを示した。

詳細は、次の論文および投稿中の論文等に示している：学会 ，学会

#### (2) 通信路の伝送限界の解明とデジタル変調の効果の定量評価

##### 誤り率特性

BPSK 変調というもっとも基本的なデジタル変調方式について、(1)で示した通信路の出力の量子最適検出特性を調べ、古典最適の場合と比較した。その結果、Personick のアナログ量子通信の結果と異なり、量子通信の優位性が明確に確保されることを明らかにした。

詳細は、次の論文および投稿中の論文等に示している：学会 ，学会

##### 通信路容量

(1)で示した通信路について、ASK, PSK, QAM などの代表的なデジタル変調方式に基づく離散化通信路容量の特性調査を行った。具体的には、信号エネルギー制約の下で、通信路容量の特性を調べた。その結果、信号エネルギーが小さいところでは、信号数による通信路容量の差は小さく、BPSK 変調でほぼ通信路容量が達成されること、また、信号エネルギー

ギーが大きいところでは、信号数を増やす効果が高いことが確認された。これは、以前に示した無雑音あるいは減衰通信路の場合と定性的には一致する結果である。詳細は、次の論文等に示している：学会

群共变的混合状態信号に対する量子測定  
の性質の考察

量子フェージング通信路の出力状態は、一般には混合状態となるが、混合状態に対する量子測定、特に量子最適測定の性質は、純粋状態の場合に比べ未解明な部分が多かった。このため、混合状態を含む一般の量子状態に対する量子測定の考察を行い、群共变的状態に対しては、任意に与えられた量子測定の性能と同じ性能を持つ群共变的測定が存在することを明らかにした。また、いくつかの量子状態に対する量子最適測定を導出した。詳細は、次の論文等に示している：雑誌

量子検出問題の定式化の一般化

通信路の伝送限界は、大きく分けて、情報量規準と誤り率規準があるが、有限時間、有限符号長など、現実的問題設定においては、後者がより有用である。これまでは、平均誤り率規準を主に扱ってきたが、その定式化を一般化し、関連基礎理論を進展させた。詳細は、次の論文等に示している：雑誌

(3) 広義の群共变的信号の定義とその性質の  
解明及び通信路行列公式の一般化の検討、  
公式を用いた符号化・復号化の特性調査

位相項を考慮した広義の群共变的信号の  
定義とその性質の解明及び通信路行列公式  
これまでに定義した広義の群共变的信号を  
さらに拡張した定義を与え、その必要十分  
条件などを明らかにすることでその性質を  
解明した。また、それらの結果を数学的な  
道具として、従来の通信路行列公式に含  
まれない形式の公式を導出した。さらに、  
定義した広義の群共变的信号のクラスに  
対し、グラム行列の分解を与え、通信路  
行列公式を導出した。得られた公式は、  
従来の公式を少し修正した程度のもの  
ではなく、違ったクラスの公式と位置  
づけられる。詳細は、次の論文等に示  
している：雑誌

量子信号と符号に対応する群のクラスが  
異なる場合の扱いと通信路行列公式  
整数剰余環と有限体を特別な場合として  
含む環に対し、環上の加群である線形  
符号により符号化された量子信号が群  
共变的となる条件を示した。ただし、  
異なる信号を結びつける変換はユニ  
タリ変換だけでなく反ユニタリ変換も  
許す一般的な状況を考えている。また、  
4相PSKコヒーレント状態信号が拡大  
体に関し2つのタイプの群共变的性を  
持つことを明らかにし、先に示した条  
件に基づき、そ

の群共变的性を示すとともに、特別な  
場合については、従来得られていなか  
ったタイプの通信路行列公式を示した。  
さらに、これまでの群共变的信号に対  
する通信路行列公式を非共变的信号に  
対する公式に拡張する手法につなげ  
うる成果を得た。具体的には、信号は  
PSKのような整数剰余環という群に  
対応、符号はそれとは別のクラスの群  
に対応する場合でも、符号化を工夫す  
ることにより、符号化された信号が群  
共变的となり、公式も容易に得られる  
例を見出した。

詳細は、次の論文等に示している：雑誌

符号の特徴を考慮したカスタマイズ  
した公式の導出と公式に基づく量子利  
得特性

2元ポーラ符号のクラスに属するある  
符号と多元等距離符号について、通信  
路行列公式をさらに簡略化し、通信路  
行列計算のための計算量を大幅に削  
減した。所要計算量は、符号の規模が  
大きくなってほぼ一定であるため、  
計算量の削減と言うよりは、ほぼゼロ  
にしたとも言える結果である。なお、  
前者は従来得られていたシンプレックス  
符号や拡大BCH符号とは異なる符号  
に関する成果であり、後者は多元符号  
に関する初めての簡略化公式導出と  
して位置づけられる。さらに、これら  
の符号による量子利得特性を調べ、  
符号化無し相互情報量に比べ、10倍  
以上の量子利得が得られることを明  
らかにした。

詳細は、次の論文等に示している：学会

(4) その他の成果

以下、プロジェクト提案後の世界の動  
向に基づいて進めた研究、あるいは、  
プロジェクトに関連するその他の課題  
について進めた研究成果を示す。

量子受信機の実現化問題に関わるい  
くつかの検討

本研究の目指す量子通信の実現のため  
には、量子受信機の実現方法を明ら  
かにすることが不可欠であるが、2  
つのコヒーレント状態の張る空間に  
おける任意の量子測定の実現方法を  
明らかにした。これは、この空間上で  
定義される任意の混合状態の最適  
検出の一実現方法が明らかになった  
という意味で、重要な成果である。  
また、3つのコヒーレント状態に  
対する準最適量子測定についても  
検討を進め、信号決定方針の最適  
化により、従来よりも優れた性能  
を得られる可能性を明らかにした。

詳細は、次の論文等に示している：雑誌

“vacuum-or-not”測定(以下、V-or-N  
測定と略す)を基礎とした受信機の  
基本特性  
研究開始後にもたらされた、米国の  
MITを中心としたグループによる  
成果を取り入れ、V-or-N測定を  
基礎とした受信機の実現方法を明

らかにした．具体的には，MIT のグループの示した無限の極限ではなく，有限における V-or-N 測定と量子最適測定 (SRM) のギャップを明らかにした．結果として，PSK および ASK 信号において，V-or-N 測定が元数が少ない場合でも準最適であることがわかった．詳細は，次の論文等に示している：雑誌

有限長の古典-量子ポーラ符号による符号化の量子利得特性

2012 年に古典-量子ポーラ符号と逐次除去復号によって Holevo 容量が達成可能であることが示されたが，通信路符号化定理の証明のツールとしてだけでなく，実用的な符号として意味があるか否かを見るため，符号長が短い場合について，ポーラ符号による情報量の特性を調べた．その結果，調べた符号長数百程度まで，これまでに他の符号で得られていた最大の超加法的量子利得に匹敵する利得が得られることが明らかになった．詳細は，次の論文等に示している：雑誌

最小誤り率の近似式

量子通信システムにおいて，誤り率を最小とする量子最適受信機の性能を評価することは，信頼性の高い通信，安全性の高い通信双方で重要である．特に，符号長の長い場合や信号数が非常に多い場合は，最小誤り率の解析解が得られていても，定量評価のための計算量が膨大になることもある．このため，良い近似式を考案することは有意義であるが，本研究では，2 信号のトレース距離を用いた非常に簡単な近似式を提案し，簡単であるにもかかわらず，ASK や PSK 信号に対しては，極めて近似精度が高いことを示した．詳細は，次の論文等に示している：雑誌

行列のテンソル積と和による分解定理

数学の研究者と連携し，行列のテンソル積と和による分解定理を提案し，証明した．これは，本研究で扱う符号化された量子信号に対するグラム行列の構造の本質がテンソル積であることから，グラム行列の平方根の解析解である通信路行列公式に応用可能な成果であるといえる．この成果は，数学の論文誌に掲載され，学術的，実用的双方の価値をもつ結果が得られたといえる．このように，他分野への波及効果も期待できる成果を得ることができた．詳細は，次の論文等に示している：雑誌，雑誌

以上，主な研究成果を研究項目ごとにまとめて記してきた．本研究は，これまでの研究代表者らの一貫した取り組みを継続・発展させ，将来の量子通信実用化へのステップとして，必要な工学的考察を行ったものである．世界の量子通信の研究は，2012 年に量子情報科学分野の研究者である Haroche と Wineland がノーベル物理学賞を受賞したこともあり，

理学的視点に立った難解な実験研究が脚光を浴びるという傾向が益々強くなっている．本研究は，職人的実験研究などの派手さや奇抜な発想があるわけではないが，地味な研究を継続して積み重ねることも技術化に向けて必要であるため，これを我々に課された役割と心得て，一步一步進めている．

## 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 39 件)

K. Nakahira and T. S. Usuda, Realizing a two-dimensional positive operator-valued measure by local operations and classical communication, IEEE Transactions on Information Theory, 2016 年, 掲載決定, 査読有.  
DOI: 10.1109/TIT.2016.2549994

A. Ohashi, T. Sogabe, and T. S. Usuda, On decomposition of k-tridiagonal l-Toeplitz matrices and its applications, Special Matrices, vol.3, pp.200-206, 2015 年, 査読有. DOI: 10.1515/spma-2015-0019

M. Tanaka, A. Ohashi, T. Sogabe, and T. S. Usuda, Derivation of analytical expression of channel matrix for coded 4PSK signals using tensor product decomposition of Gram matrix, Proceedings of AQIS2015, pp.143-144, 2015 年, 査読有.

A. Ohashi, T. S. Usuda, T. Sogabe, and F. Yilmaz, On tensor product decomposition of k-tridiagonal Toeplitz matrices, International Journal of Pure and Applied Mathematics, vol.103, no.3, pp.537-545, 2015 年, 査読有.  
DOI: 10.12732/ijpam.v103i3.14

K. Nakahira, K. Kato, and T. S. Usuda, Generalized quantum state discrimination problems, Physical Review, vol.A91, no.5, 052304, 2015 年, 査読有.  
DOI: 10.1103/PhysRevA.91.052304

T. S. Usuda, Y. Ishikawa, and K. Shiromoto, A class of group covariant signal sets and its necessary and sufficient condition, AIP Conference Proceedings, Vol.1633, H.-J. Schmiedmayer and P. Walther (Eds.), American Institute of Physics, New York, pp.201-203, 2014 年, 査読有. DOI: 10.1063/1.4903137

M. Tanaka, T. Sogabe, K. Shiromoto, and T. S. Usuda, Group covariance and formula of channel matrix of coded 4PSK signals by linear codes over  $F_4$ , Proceedings of ISITA2014, p.348, 2014 年, 査読有.

K. Sato, K. Nakahira, S. Usami, and T. S. Usuda, Error performance for non-destructive quantum receiver of M-ary coherent-state signals, Proceedings of ISITA2014, pp.246-249, 2014 年, 査読有.

N. Iwata and T. S. Usuda, Quantum gain of coding by polar codes with finite codeword length, Proceedings of ISITA2014, pp.250-253, 2014 年, 査読有.

S. Asano and T. S. Usuda, A simple approximation of minimum error probability using trace distance, Proceedings of ISITA2014, pp.254-258, 2014 年, 査読有.

S. Koyama and T. S. Usuda, Error performance of optimum quantum detection for BPSK signals in the presence of phase noise and its robustness, Proceedings of ISITA2014, pp.259-263, 2014 年, 査読有.

S. Koyama, K. Nakahira, and T. S. Usuda, Error performance of modified Kennedy receiver in the presence of phase noise, Proceedings of AQIS2014, pp.185-186, 2014 年, 査読有.

K. Nakahira and T. S. Usuda, Implementation of non-projective measurements on a Hilbert space spanned by binary coherent states, Physical Review, vol.A89, no.1, 012120, 2014 年, 査読有.  
DOI: 10.1103/PhysRevA.89.012120

Y. Ishikawa, K. Shiromoto, and T. S. Usuda, Formula for the channel matrix of a certain class of  $(G, \cdot)$ -covariant signals, Extended Abstracts of AQIS2013, pp.209-210, 2013 年, 査読有.

K. Nakahira and T. S. Usuda, Quantum measurement for group covariant state set, Physical Review, vol.A87, no.1, 012308, 2013 年, 査読有.  
DOI: 10.1103/PhysRevA.87.012308

H. Takeuchi, S. Yamaguchi, and T. S. Usuda, Entanglement-assisted classical communication using quasi-Bell states, Proceedings of the First International Workshop on ECS and Its Application to QIS; Toward Macroscopic Quantum Communications, T. S. Usuda and K. Kato (Eds.), Tamagawa University Quantum ICT Research Institute, pp.115-119, 2013 年, 査読有.  
URL: <http://www.tamagawa.jp/research/quantum/discourse/>

[学会発表](計71件)

喜多健志朗, 小山真司, 臼田毅, フェージング通信路のクラウス表現とデジタル変調方式の誤り率特性, 第38回情報理論とその応用シンポジウム, 下電ホテル(岡山県・倉敷市), pp.323-328, 2015年11月25日.

小山真司, 臼田毅, エネルギー制約条件下での量子フェージング通信路の通信路容量, 第38回情報理論とその応用シンポジウム, 下電ホテル(岡山県・倉敷市), pp.373-377, 2015年11月25日.

喜多健志朗, 小山真司, 田中美波, 臼田

毅, フェージング環境下での無線量子通信路モデルとその誤り率特性, 平成27年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 名古屋工業大学(愛知県・名古屋市), K1-7, 2015年9月28日.

岩田直樹, 臼田毅, 古典-量子通信における多元等距離符号の相互情報量公式の簡略化とその特性, 第37回情報理論とその応用シンポジウム, 宇奈月ニューオータニホテル(富山県・黒部市), pp.154-159, 2014年12月10日.

T. S. Usuda, T. Sogabe, and K. Shiromoto, Formula of channel matrix for covariant signal set with respect to a direct product of groups, 12th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2014), Hefei(中国), Abstracts of Papers of QCMC2014, p.45, 2014年11月4日.

岩田直樹, 臼田毅, 古典-量子通信におけるPolar符号の相互情報量の簡略化公式, 2014年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 徳島大学(徳島県・徳島市), A-6-4, 2014年9月25日.

小山真司, 大橋一葉, 石川喜啓, 臼田毅, 位相変動が生じる環境下でのBPSKコヒーレント状態信号の誤り率特性, 第36回情報理論とその応用シンポジウム, 伊東ホテル聚楽(静岡県・伊東市), pp.458-462, 2013年11月28日.

小山真司, 大橋一葉, 石川喜啓, 臼田毅, 伝搬路環境を考慮した無線量子通信路モデルとその誤り率特性, 平成25年度電気関係学会東海支部連合大会, 静岡大学浜松キャンパス(静岡県・浜松市), 講演論文集, F3-4, 2013年9月25日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

臼田 毅 (USUDA, Tsuyoshi)  
愛知県立大学・情報科学部・教授  
研究者番号: 80273308

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

内匠 逸 (TAKUMI, Ichi)  
名古屋工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 30188130

宇佐見 庄五 (USAMI, Shogo)  
名城大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 30387758

城本 啓介 (SHIROMOTO, Keisuke)  
熊本大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 00343666