

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23360172

研究課題名(和文)多端子情報理論に基づく多入力多出力通信網の効率、信頼性および安全性解析

研究課題名(英文) Analysis of Transmission Rates, Reliability, and Security on Multi-Input and Multi-Output Communication Networks Based on Multi-user Information Theory

研究代表者

大濱 靖匡 (Oohama, Yasutada)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：20243892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：多端子情報理論に基づき、大規模なレーダーからの情報センシング技術や通信の安全性まで考慮した大規模アンテナを用いたネットワーク情報通信送受信技術を支える基盤理論について研究を行った。具体的には、大規模なレーダーからの情報センシングの理論的モデルを考察し、最適通信と信号推定の理論的境界を解明し、通信システム設計技術者の設計指標を与えた。また、大規模アンテナを用いた通信に対する安全性を解析する際に、情報の機密性を高める乱数のように制限がかかるという新しい現実的な問題設定のもとで解析を行い、最適な安全通信の境界を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have studied basic theory which provide a basis of the technology for signal sensing and estimation from a large scale radar system or a reliable and secure communication via multi input and output channels(MIMO) using large scale multi-antennas. Specifically, we considered a theoretical model of the information sensing from a large-scale radar and elucidated the theoretical limit of the signal estimation and the optimal communication scheme attaining this limit, providing an index for the communication engineers to design communication systems. In the security analysis of the communication using the large-scale antenna, we introduce a new realistic problem setting that we have a resource constraint on use of random numbers to enhance a security of the message. Under this new problem formulations. We clarified a theoretical limit of the secure communication.

研究分野：多端子情報理論

キーワード：ベクトル型分散観測データ 許容伝送領域 多入力多出力通信網数制約 情報理論的セキュリティ 伝送率・あいまい度領域

1. 研究開始当初の背景

通信技術の飛躍的進歩により、多数のセンサの取得する信号を一括処理することが可能になった。無線通信では、複数のアンテナを利用した送受信技術の実用化が検討されている。こうした通信の大容量化に加え、通信の大域・複雑化が益々進む今日、通信システムの設計、構築の指標として、多入力多出力(MIMO)通信ネットワークの限界と可能性および安全性の定量的解明が現場の通信技術者から強く求められている。

本研究代表者は、これまでの研究で多端子情報理論の立場からセンサネットワークを扱う理論的枠組を構築し、分散型センサネットワークにおける通信の理論限界を部分的に明らかにした。この理論的枠組では多数のセンサからの信号を一括処理できる通信システムの理論的モデルが未検討である。複数アンテナを利用する送受信器を用いて多数の送受信者が通信に参入するシステムは MIMO 多端子通信路としてモデル化される。Gauss 型 MIMO 放送通信路における通信の理論限界の決定問題の解決を契機に、MIMO 多端子通信路の研究が本格化してきた。

多端子情報理論的立場から通信ネットワークの安全性を論じる研究では、安全性の尺度として、情報理論的安全性尺度とよばれる尺度が使われる。この尺度はハードウェア技術に影響されない絶対的尺度であるという利点から、現在、無線通信ネットワークにおいて、通信の物理層における安全性の指標として重視されている。こうした背景の中で、多端子情報理論に基づく通信の安全性の理論限界の解明の研究が活発化している。情報理論的に安全に伝送できる秘密情報の容量を向上させる目的で、多数の送受信アンテナを利用する通信方式が検討されている。この方式の有効性を定量的に明らかにするには、MIMO 多端子通信路の安全性に関する基礎理論が必要である。

分極符号(Polar Code)とよばれる全く新しい符号化手法が 2009 年にアリカンにより提案された。アリカンは、この符号がある 2 端子通信路のクラスに対してシャノン限界を達成することを理論的に証明した。この研究以前は低密度パリティ検査(LDPC)符号、ターボ符号のシャノン限界への接近は数値的にしか示されていなかったため、分極符号の研究は、情報通信分野の研究者に大きな衝撃を与えた。分極符号の出現は多端子情報理論の提示した理論限界を達成する通信システムの実現に向けての研究を加速している。

2. 研究の目的

本研究では、5 年の研究期間において、多端子情報理論的立場から多入力多出力通信

ネットワークの理論的モデルを構築し、このモデルに対し、通信の理論限界を明らかにする。

3. 研究の方法

多入力多出力通信システムへの拡張が実用上重要と考えられる多端子通信システムに焦点を絞り、その理論的モデルの構築を行う。取り扱う多端子通信システムに関する研究課題を以下のように設定し、研究を行うこととする。

(1) ベクトル型信号に対する分散符号化の問題

(2) 情報理論的立場からの MIMO 多端子通信路の効率、信頼性および安全性解析

本研究開始後に、ある種の多入力多出力通信システムの符号化問題を記憶のある通信システムの符号化問題として扱えることが判明した。このことにより、多入力多出力多端子通信システムの問題を記憶のある多端子通信システムの符号化問題との関連で研究することが重要であるとの認識に達した。そこで、当初の研究計画方法の(1)、(2)に加え、次の研究項目を研究計画の中に追加した。

(3) 記憶のある多端子通信システムに対する符号化の研究

また、本研究開始後に情報理論の分野における新しい研究の流れを生み出す出来事があった。これを踏まえて、本研究の計画を見直し、新しい研究課題をさらに一つ研究計画に取り入れることとした。この詳細を以下に説明する。

一入力一出力通信路の効率と信頼性のトレードオフの理論限界の解明に関して、符号の長さが有限長の場合は、従来知られているシャノン限界通信の理論限界よりも小さい値が理論限界となることがポリャンスキーらの近年の研究で明らかとなった。これは、有限の符号長に対する通信の限界の解明を求める現場の通信技術者に衝撃を与える結果であった。この研究は、符号の有限長解析とよばれる新しい情報理論の研究の潮流をもたらしたが、多端子通信システムへの理論の展開は、これからの研究課題であり、数多くの難問を抱えている。情報理論の研究分野において、符号の有限長解析の研究は、本研究課題の 2 年目あたりから本格的な研究が開始されたものであり、本研究の当初の研究計画にはこのような研究の方向は、全く想定されていなかった。本研究課題では、研究計画の途中からにはなるが、情報理論研究の新しい潮流である符号の有限長解析の理論研究へ新規参入し、この理論についての考察を行うこととした。具体的には、符号の有限長解

析の研究を多端子通信システムへ展開するにあたり、そのための第一関門として位置づけられる多端子通信システムにおける符号化の強逆定理の強化と精密化を研究計画の中に以下の研究課題として取り入れることとした。

(4)符号の有限長解析の研究の多端子通信システムへの展開を目的とした符号化の強逆定理の強化と精密化

4. 研究成果

(1) ベクトル型信号に対する分散符号化の問題に関する研究について、次の結果を得た。

①間接的および直接的情報源符号化の問題の研究：

発生信号が多数の L 個のセンサにより観測される状況下で、各センサの観測信号が個別にデータ縮約されて、1か所の情報処理センターへ送られる通信システムを考える。情報処理センターで元のデータ信号を推定するとき、信号の推定精度と観測信号の圧縮率のトレードオフを問う問題が考えられる。発生信号および観測信号がガウス型でいずれもスカラー信号の場合に、上記のトレードオフ関係を記述する領域（伝送率ひずみ領域とよばれる）を決定する問題はガウス型 CEO 問題とよばれ、研究代表者が 2005 年に完全解決を与えた。本研究では、ガウス型 CEO 問題の拡張として、発生信号が、 K 次元のガウスベクトルの場合を考え、これが $K \times L$ 行列 A により L 次元に線形変換され、その各成分が L 個の独立なガウス雑音により汚されて L 個の観測ノードで受信される場合を考察した。上記の通信システムにおいて、各センサーは発生信号を間接的に分散符号化していることから、本研究では、拡張されたガウス型 CEO 問題を間接的分散符号化問題とよんだ。間接的符号化問題自体は、本研究計画以前から進めてきたものであるが、本研究計画の課題の基礎となる重要な研究課題であることから、この研究課題に取り組み、以前の研究で得られた領域の外界と内界が一致する条件を著しく改善する条件を与えた。一方、 $K=L$ で A が単位行列で、かつ、信号が雑音に汚されることなく観測できる場合は、 L 個の分散センサは、 L 次元の発生信号の各成分を直接観測できることになる。このような L 個の発生信号の各成分をセンサーが直接観測し、これらを分散符号化した結果をセンターへ送り、そこで発生信号を推定する問題を直接的符号化問題とよぶ。本研究では、 $K=L$ で A が単位行列の場合の間接分散符号化問題と直接符号化問題との関係を明らかにし、間接符号化問題の結果を全て、直接符号化問題の結果に変換できることを見出した。これにより、間接的分散符号化において得た改善結果をすべて、直接的分散符

号化における改善結果に導いた。

②ガウス型 CEO 問題の拡張：

本研究では、多入力情報センシングシステムの一つとして、多数のレーダーからの複数のガウス型信号を受け取ることでできる通信システムに注目した。この通信システムに対し、信号の推定精度と観測信号の圧縮率のトレードオフ関係を議論する問題を考察した。この問題は、ガウス型 CEO 問題において、観測信号がベクトル型で発生信号がスカラー型である場合に相当することから、スカラー発生源ベクトル観測 CEO 問題とよんだ。本研究では、スカラー発生源ベクトル観測 CEO 問題を解決した。具体的には、信号の推定精度と各地点で得られるベクトル型観測信号の圧縮率ベクトルのトレードオフ関係を表わす領域（許容伝送率領域）を決定した。

⑤2 値 CEO 問題：

発生信号が 2 値無記憶情報源からの出力列で、この出力列を独立同一の 2 値対称無記憶通信路を通して得られる信号が各分散センサーで観測される場合を考える。この場合の CEO 問題を 2 値 CEO 問題とよぶ。2 値 CEO 問題について、この場合の特殊性を利用して信号圧縮と推定誤差の理論限界を表す領域のより具体的な内界と外界を求める問題も、本研究計画以前から行ってきたものである。本研究では、これまでの研究結果を更に改善する結果を得た。

(2) 情報理論的立場からの MIMO 多端子通信路の効率、信頼性および安全性解析について、次の結果を得た。

①乱数制約付き秘密情報を含む放送通信路：

ある送信信号を X とする。放送通信路からの出力信号 Y, Z は、いずれも多次元である。送信信号の次元は送信アンテナ数に一致し、受信信号の次元は受信アンテナ数に一致する。復号器 2 の得る受信信号 Z が与えられた下での秘密通報の条件付きエントロピーを安全性の尺度とする。これをある決められた値以上とする条件の下で、高信頼度で送信できる秘密通報のビット数 R_1 、共通通報のビット数 R_2 の組 (R_1, R_2) の占める領域を伝送率・あいまい度領域 (Rate Equivocation Region) とよぶ。信号の次元が 1 の場合は、チサールとケルナー (1978) が研究し、伝送率・あいまい度領域を決定した。次元が 2 以上で通信路がガウス型の場合はリュウら (2009) が研究している。従来研究では、安全性を高めるために用いる攪乱用一様乱数に対する情報量制約がない。これは攪乱用一様乱数が無尽蔵に利用できることを意味し、現実的ではない。ここではより現実的な仮定として、攪乱用一様乱数の情報量にある決められた上限が設けられている新しい設定を導入し、この設定の下での伝送率・あいまい度領域の具体形を求め、信号の次元が

1次元の場合を完全に解決した。

②乱数制約付き秘密情報を含む干渉型コグニティブ無線通信：

①で述べた乱数制約付き秘密情報を含む放送型通信路の研究を乱数制約付き秘密情報を含む干渉型コグニティブ無線通信路へ拡張し、同様の結果を得た。

③補助情報を伴う情報源符号化問題から得られる情報セキュリティ問題：

補助情報を伴う情報源符号化問題について、伝送率領域の補集合が、ある種の乱数生成問題の解としての特徴づけられることを見出した。この乱数生成問題における符号化順定理が補助情報源を伴う符号化問題の符号化逆定理の証明と本質的に同一で、符号化逆定理の証明が、補助情報を伴う符号化問題の順定理と本質的に同一であるという事実を導いた。また、補助情報を伴う情報源符号化問題について、領域の外での復号誤り確率が1に近づく速さが、乱数生成の近似誤差として、操作的な意味を持つことが判明し、この近似精度を明らかにする問題を提起した。

④多重アクセス通信路を用いた同定通信路符号化：

同定通信路符号化問題について、単一通信路の符号化から新たに多重アクセス通信路の符号化へ議論を展開し、新しい結果を得た。単一通信路の場合の結果は、既に IEEE Transaction IT 部門の2013年の2月号に掲載されている。本研究は、この結果を2入力1出力多重アクセス通信路へ拡張することを試みた。通信路が一般の場合には、情報スペクトルの表現を用いて、通信の限界領域（容量域）の外での伝送同定誤り確率の振る舞いを記述する関数を導出した。この関数を解析することにより、通信路の容量域の外での同定誤り確率の振る舞いを明らかにした。

⑤平均ひずみに基づく安全性尺度を用いた共通鍵暗号方式の解析：

シャノンの共通鍵暗号方式では、無条件安全性の下では指数関数的な大きさの鍵集合を必要とすることが明らかにされている。一方、上記の共通鍵暗号方式において、盗聴された暗号文から得られる平文の推定値と元の平文との間の平均ひずみを安全性の尺度として採用した場合の安全性解析が山本（1997）やシーラーとカフ（2012）らによって行われた。特にシーラーとカフは鍵の大きさを平文のブロック長 n の増大列にとるだけで、盗聴者の得る平文の最良の推定値と元の平文との間の平均ひずみが $n \rightarrow +\infty$ のとき最悪値に収束してしまうことを示した。彼らは、平均ひずみの最悪値への収束の速さについては議論しなかったため、鍵集合の大きさが最悪値への収束に与える影響が明らかではなかった。本研究では平均ひずみ

に基づく安全性尺度を用いた共通鍵暗号方式について、置換集合上のランダム符号化に基づく符号化法を提案し、さらに提案した符号化法について、平均ひずみの最悪値への収束の速さを精密に評価した。さらに得られた結果を利用して、鍵集合の大きさを n のどのような関数に選ぶのが妥当であるかを明らかにした。

⑥放送通信路の通信路容量域を計算するアルゴリズム：

本研究では劣化型放送通信路に対し、その容量域を逐次的に計算する新しいアルゴリズムを提案し、提案したアルゴリズムの定める分布列の通信路容量域の境界を与える分布への収束の可能性を議論した。

(3)記憶のある多端子通信システムに対する符号化の研究について、次の結果を得た。

①2つの情報源を考える。このうち一つは無記憶情報源、もう一つは、この無記憶情報源から、雑音のある通信路により誘導されるマルコフ情報源である。本研究では、このような相関と記憶を持つ2つの情報源に対する分散符号化問題を扱った。1つは、補助情報を伴う符号化システムである。このシステムでは、2つの情報源からの出力列はそれぞれ個別に符号化して復号器へ送られる。復号器は、マルコフ情報源からの出力列を任意に小さい誤り確率で復号しようとする。2つの情報源が無記憶の場合に関しては、圧縮限界を表す領域（許容伝送率領域）が、1975年にアルスウェーデとケルナーおよび彼らと同時期に独立にワイナーによって得られた。上記の記憶のある場合は、今日まで全く研究がなされていなかった。本研究では、許容伝送率領域の内界と外界を計算し、情報源がある対称性を持つ場合に両者が一致することを示した。

②マルコフ情報源が復号器において誤りなしで得られる場合に、無記憶情報源からの出力列をある与えられた値以下の平均ひずみで復号する問題を考えた。情報源がいずれも無記憶である場合については、圧縮限界を表すレート歪み関数が、ワイナーとジフにより1976年に与えられたが、上記の記憶がある場合は、やはり今日まで研究がされていなかった。本研究ではこの問題を扱い、レート歪み関数の上界と下界を与えた。情報源がある対称性を持つ場合に両者は一致すると予想しているがその証明は今後の課題である。

(4)符号の有限長解析の研究の多端子通信システムへの展開を目的とした符号化の強逆定理の強化と精密化に関して、以下の成果を得た。

①単一通信路の符号化に関する強逆指数並

びに指数計算アルゴリズム：

1973年に有本は伝送率が通信路容量を超えた場合、通信の伝送誤り確率は符号長の指数関数の一ダで1に収束することを証明し、その指数を陽に求めた。デユェックとケルナーは、1979年にこの場合の最適な指数を得た。有本の指数がデユェックとケルナーの指数が等しいことは、以前から指摘されていたが本研究では、これの厳密な証明を与えた。また、デユェックとケルナーが得た指数の計算アルゴリズムを提案し、提案のアルゴリズムから得られる確率分布更新アルゴリズムより得られる確率分布列が最適分布へ収束することを証明した。

②様々な多端子通信システムに対する符号化の強逆定理の強化と精密化：

様々な多端子通信システムに対し、通信路もしくは情報源が無記憶の場合に通信の限界を表す領域の外での振る舞いを解析した。その結果、通信路の限界領域を超えたところでの誤り確率が1に近づくことを明らかにした。さらに、その収束の速さが、符号長の指数関数のオーダーであることを示した。

②-a) 補助情報を伴う情報源符号化問題に対する強逆定理：

ワイナー、アルスウェーデとケルナー(1975)により考察された補助情報をもつ通信システムにおいて、伝送率ベクトルが許容伝送率領域の外にある場合の復号誤り確率は情報源からの出力系列符号長を大きくすると1に収束ことがアルスウェーデら(1976)により示されていたが、その収束の速さがどうなるかについては不明のままであった。本研究では、収束の速さが符号長の指数関数になることを証明し、その指数の下限を様に求めた。

②-b) 復号器に補助情報のある伝送率・ひずみ問題に関する強逆定理：

補助無記憶情報源が復号器において誤りなしで得られる場合に、無記憶情報源からの出力列をある与えられた値以下の平均ひずみで復号する問題について、平均ひずみが許容ひずみを超える確率をデータ圧縮率の関数として評価する問題を考察した。情報源がいずれも無記憶である場合については、圧縮限界を表すレート歪み関数が、ワイナーとジフにより1976年に与えられた。本研究では、圧縮レートが彼らの得たレート歪み関数を超える場合、平均ひずみが許容ひずみを超える確率は、情報源出力系列の長さの指数関数のオーダーで1に収束することを示し、その指数を陽に計算した。

②-c) 放送通信路に対する強逆定理：

1入力2出力放送通信において、通信路

容量域の外に伝送率ベクトルがある場合の送復号誤り確率は符号長を大きくすると1に収束することがアルスウェーデら(1976)により示されていたが、その収束の速さがどうなるかについては不明のままであった。本研究では、収束の速さが符号長の指数関数になることを証明し、その指数の下限を様に求めた。また通信路がフィードバックを持つ場合について研究を進め、同様の結果を得た。さらに、一方の受信者1に通報1と通報2を送り、受信者2には、通報2のみを送るという非対称型放送通信路の強逆定理を考察し、容量域の外に伝送率ベクトルがある場合の送復号誤り確率は符号長の指数関数のオーダーで1に収束することとその指数の下限を陽に計算した。

②-d) 状態依存通信路に対する強逆定理：

状態依存型通信路に対する強逆定理がチャギとナラヤン(2009)により証明され、通信路容量を超えた場合、通信の伝送誤り確率は符号長の指数関数のオーダーで1に収束することが明らかにされたが、1への収束の速さは明らかでなかった。本研究では、伝送誤り確率は符号長の指数関数の一ダで1に収束することを証明し、その指数を陽に求めた。

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17件) すべて査読あり、主要なもの11件を以下に掲載

[1]“Gaussian CEO problem in the case of scalar source and vector observations,” Yasutada Oohama, IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E98-A, no. 12, pp. 2367-2375, Dec. 2015.
10.1587/transfun.E98.A.2367

[2]“The optimal use of rate-limited randomness in broadcast channels with confidential messages,” Shun Watanabe and Yasutada Oohama, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 61, no.2, 983-995, Feb. 2015.
10.1109/TIT.2014.2382096

[3]“Strong converse exponent for degraded broadcast channels at rates outside the capacity region,” Yasutada Oohama, Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), pp. 939 - 943, June 2015.
10.1109/ISIT.2015.7282908

[4]“Exponent function for one helper source coding problem at rates outside the rate region,” Yasutada Oohama, Proceedings of 2015 IEEE

International Symposium on Information Theory (ISIT), pp. 1575 - 1579, June 2015.
10.1109/ISIT.2015.7282593

[5]“Strong converse theorems for degraded broadcast channels with feedback,” Yasutada Oohama, Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Information Theory(ISIT), pp. 2510 - 2514, June 2015.
10.1109/ISIT.2015.7282721

[6]“Cognitive interference channels with confidential messages under randomness constraint,” Shun Watanabe and Yasutada Oohama, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 60, no.12, pp. 7698-7707, Dec. 2014.
10.1109/TIT.2014.2360683

[7]“Indirect and direct Gaussian distributed source coding problems,” Yasutada Oohama, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 60, no.12, pp. 7506-7539, Dec. 2014.
10.1109/TIT.2014.2361332

[8]“Encoding of Markov sources with partial memoryless side information at the decoder,” Yasutada Oohama, Proceedings of the 2014 International IEEE International Symposium on Information Theory and its Applications(ISITA), pp. 556 - 560, Oct. 2014.

[9]“Rate distortion for source coding with Markov side information at the decoder,” Yasutada Oohama, Proceedings of the 2014 International IEEE International Symposium on Information Theory and its Applications(ISITA), pp.551-555, Oct. 2014.

[10]“One helper source coding problem for a class of correlated sources with memory,” Yasutada Oohama, Proceedings of 2014 IEEE International Symposium on Information Theory(ISIT), pp. 581–585, June 2014.
10.1109/ISIT.2014.6874899

[11]“Privacy amplification theorem for bounded storage eavesdropper,” Shun Watanabe and Yasutada Oohama, Proceedings of 2012 IEEE Information Theory Workshop(ITW), pp. 177–181, 2012.
10.1109/ITW.2012.6404652

[学会発表] (計 6 件, 基調講演 1 件含む)

[1]“Explicit lower bounds of the distortion rate function for the Hamming binary CEO problem,” Yasutada Oohama, Proceedings of The 38th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2015),

Kojima, Okayama, Japan, pp. 61—66, Nov. 2015.

[2]“情報スペクトル理論の記憶のある通信システムへの展開,”大濱 靖匡, 第 37 回情報理論とその応用シンポジウム基調講演, 富山県宇奈月温泉, 2014 年 12 月.

[3]“Source coding for Markov sources with partially memoryless side information at the decoder,” Yasutada Oohama, Proceedings of The 37th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2014)Unazuki, Toyama, Japan, pp. 282-287, Dec. 2014.

[4]“劣化型放送通信路の通信路容量域計算アルゴリズムについて,” 新井敦, 大濱 靖匡, 第 37 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA)予稿集, pp.536--541, 富山県宇奈月温泉, 2014 年 12 月.

[5]“平均ひずみに基づく安全性尺度を用いた共通鍵暗号方式の解析,”伊藤寛, 大濱 靖匡, 第 37 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA)予稿集, pp.427--432, 富山県宇奈月温泉, 2014 年 12 月.

[6]“Strong converse for state dependent channels,” Yasutada Oohama, Proceedings of 2013 Shannon Theory Workshop(STW), pp. 73-80, Yuki, Hiroshima, Oct. 2013.

[その他]

ホームページ等

<http://www.uec.ac.jp/research/information/opal-ring/0006000.html>

<http://scholar.google.co.jp/citations?user=TI-4jrEAAA&hl=ja>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大濱靖匡 (OOHAMA YASUTADA)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所
教授

研究者番号：20243892

(2) 研究分担者

得重 仁 (TOKUSHIGE HITOSHI)

熊本学園大学・商学部 教授

研究者番号：50336921

(3) 研究分担者

渡辺 峻 (WATANABE SHUN)

東京農工大学・大学院工学研究科 准教授
研究者番号：70546901