

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06086

研究課題名(和文) 直交変調型包絡線パルス幅変調方式送信機における電力効率および変調精度の改善

研究課題名(英文) Improvement of power efficiency and modulation accuracy of quadrature-modulation envelope pulse-width modulation transmitters

研究代表者

榎田 洋太郎 (Yohtaro, Umeda)

東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・教授

研究者番号：80439918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、直交変調(QM)包絡線パルス幅変調(EPWM)方式無線通信用送信機に関する、量子化雑音による電力効率および変調精度低下の問題、およびD級電力増幅器(PA)のスイッチング損失による電力効率低下の問題を解決する技術を提案する。前者の問題に対しては、量子化雑音キャンセリング技術、量子化雑音除去回収技術、および量子化雑音を発生しない送信機アーキテクチャを提案した。また、後者に対しては、D級PAのDE級動作化、およびゼロ電流スイッチング(ZCS)条件を満たすQM-EPWM送信機アーキテクチャを提案した。さらに、これらの提案技術の効果をシミュレーションおよび実験により示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we propose a technique to solve the problem of power efficiency and modulation accuracy due to quantization noise and the problem of power efficiency degradation due to switching loss of Class D power amplifier for quadrature-modulation (QM) envelope pulse-width modulation (EPWM) wireless transmitter. For the former problem, we proposed a quantization noise canceling technique, a quantization noise removal and recovery technique, and a transmitter architecture that does not generate quantization noise. For the latter, we propose Class DE modification of class D PA and a QM-EPWM transmitter architecture that satisfies zero current switching (ZCS) condition. Furthermore, the impact of these proposed techniques is shown by simulation and experiment.

研究分野：回路工学、通信工学

キーワード：直交変調 包絡線パルス幅変調 EPWM 送信機 スwitchング D級 電力増幅器 量子化雑音

## 1. 研究開始当初の背景

移動体通信の送受信機において、電力増幅器 (PA) の消費電力は大きな割合を占める。また、近年では OFDM 等の伝送系に線形性が要求され、かつ大きな PAPR (Peak to Average Power Ratio) を持つ変調方式が主流となっている。したがって、バックオフの大きな信号に対しても電力利用効率が高く、かつ歪みの少ない線形 PA が求められている。このために現在は、キャリア PA とピーク PA を並列に組み合わせる動作させることにより大きなバックオフに対しても高い電力効率を持つドハーティ PA[1]、および AB 級 PA 等の線形 PA の電源電圧を RF 信号の包絡線に従うよう制御することにより高い電力効率を得るエンベロープトラッキング PA[2]が使用されている。しかし、両 PA ともアナログの線形 PA を使用するため、飽和点付近では強い非線形性が生じ、プリディストーション等の非線形性補償技術が必要となる。また、さらに電力効率を上げようとする非線形性が強まり、十分な非線形補償が難しくなる問題がある。

これに対し、本来非線形なスイッチング動作型 PA 出力の定振幅変調 RF 信号の包絡線をパルス幅変調 (PWM) し、バースト状 RF 信号のデューティ比を変化させることにより、実効的に振幅を変化させる包絡線パルス幅変調 (EPWM: Envelope Pulse Width Modulation) 方式[3]-[5]は、PA を完全に飽和動作させることができるため、理想的には 100% の電力効率をもつ。また、定振幅 RF バースト信号の包絡線のデューティ比に比例した電力を出力可能なため、高い線形性を持つ。

この EPWM 方式には、アナログ RF 信号に対しバンドパス型変調器を用いて PWM を行うバンドパス型 EPWM 方式[3]、およびベースバンドにおいてローパス型

変調器を用いて PWM を行うローパス型 EPWM 方式[4]、[5]がある。中でも、ローパス型 EPWM 方式は変調器のサンプリング周波数を搬送波周波数以下とすることができるため、変調器の速度限界の影響を受けにくく、また EPWM 信号の高調波成分がバンドパス型 EPWM 方式に比べ少ないことから、高い電力効率を得やすい特徴がある。中でも、直交変調型 EPWM (QM-EPWM) 方式[5]は、原理的に線形であるため、量子化雑音が低くできる点、および全デジタル化が容易である点が優れている。しかし、直交変調型 EPWM 方式はローパス型であるため、ベースバンド信号の帯域が広い場合、変調器のオーバーサンプリング率が不足するため量子化雑音のレベルが信号に対して無視できなくなり電力効率が低下する問題がある。また、量子化雑音により変調精度が低下する問題がある。このため、ローパス型 EPWM 方式の実用化のためには、量子化雑音の十分な低減が必須となる。

QM-EPWM 方式送信機の量子化雑音低減のために、近年量子化雑音キャンセリング技術が提案されている[5]。しかし、この技術では、抽出した量子化雑音を再度 PWM する際に発生する量子化雑音を抑えるために、変調する前に雑音を  $K$  倍に拡大し、PA で出力する際に  $1/K$  倍して、実効的に量子化ビット数を増やしている。しかし、信号の経路と雑音キャンセル用の経路で異なる PA を使用する必要があるため、PA 出力でアナログ的に合成を行う必要がある。しかし、信号用と雑音キャンセル用の PA 出力トランジスタが直接接続されるため、両 PA 出力の干渉により、スイッチング動作によるドレイン - ソース間電圧とドレイン電流の直交条件が崩れ、電力効率が低下する問題があった。また、両出力の干渉により変調精度の低下も生じると考えられる。

一方、一般に EPWM 方式では RF 信号の包絡線に対する過渡応答特性にすぐれたスイッチング型 PA である D 級 PA を用いることにより、高い変調精度が得られることが知られている。しかし、D 級 PA は理想的には効率が 100% となりうるものの、実際にはスイッチング損失が大きい。さらに、二つのトランジスタの同時オフ時に PA 内蔵バンドパスフィルタ内インダクタンスの電流遮断により高電圧が発生し、トランジスタの耐圧を超えやすいため、電源電圧を下げねばならない。これらの理由により、D 級電力増幅器は E 級 F 級等の PA と比べ電力効率が低い問題がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、QM-EPWM 方式無線通信用送信機に関する、(a) 量子化雑音による電力効率および変調精度低下の問題、および (b) D 級 PA のスイッチング損失による電力効率低下の問題を解決する技術を提案することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、2 章で述べた問題 (a) を解決するために、(i) 量子化雑音キャンセリング技術、(ii) 量子化雑音除去回収技術、および (iii) 量子化雑音を発生しない送信機アーキテクチャの提案を行う。また、問題 (b) に関しては、(i) D 級 PA の DE 級動作化および (ii) ゼロ電流スイッチング (ZCS) 条件を満たす QM-EPWM 方式送信機アーキテクチャの提案を行う。

## 4. 研究成果

本研究で前提とする QM-EPWM 方式無線送信機の基本構成を図 1 に示す。

(a) 量子化雑音による電力効率および変調精度低下の問題を解決する技術

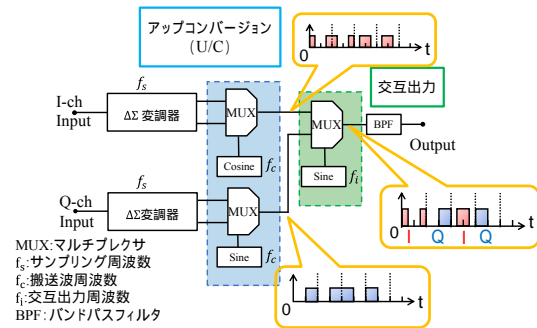


図1 QM-EPWM方式送信機の基本構成

(i) 量子化雑音キャンセリング技術

変調器で発生する量子化雑音を抽出しキャンセルすることにより、信号近傍の量子化雑音を低減（ノイズシェーピング）する技術としてMASH方式[6]が知られているが、出力電圧が多値デジタル信号となるため、オン・オフの二値デジタル信号で動作する必要のあるスイッチング型PAを駆動することができない。このため本研究では、MASH方式変調器の出力を多値化せず、二値のまま並列にスイッチング型PAに入力することによりスイッチングPAの使用を可能とする、並列出力MASH(PO-MASH)方式による量子化雑音キャンセリング(図2)[ ]を提案した。提案する方式によるQM-EPWM送信機の構成を図3に示す。本量子化雑音キャンセリングは、スイッチングPAを使用することができるため、高効率かつ量子化雑音の少ない送信機を構成できることが期待できる。課題は、並列出力されたスイッチング型PA出力の合成方法であるが、損失の少ない合成方法として複数アンテナ素子を用いた空間信号合成法が考えられる。また、やや若干効率は低下するものの、高精度な変調に適する、複数の差動回路の負荷を共通化することによる電流合成による方法が考えられる。

本方式を用いて計算機シミュレーションにより得られたPO-MASH方式によるQM-EPWM送信機の誤差ベクトル振幅(EVM)で表された変調精度を図4に示す。比較のために、従来の2次変調器を用いたものを合わせて図中に示す。図よりわかるように、1次3段のPO-MASH方式QM-EPWM送信機は、2次変調器を用いたものより変調精度が大幅に優れている[ ]。

(ii) 量子化雑音除去回収技術

EPWM方式送信機の高効率性を維持しつつ量子化雑音を低減するための有力な方法として、電力増幅器挿入トランスバースフィルタ(PAITF)技術(図5)が研究されている[7]。本研究ではPAITFの雑音除去性能を高めるため、トランスバースフィルタの各経路の重みにハニング窓を適用する方法を提案し、計算機シミュレーションにより信号対雑音電力比を大幅に向上できることを示

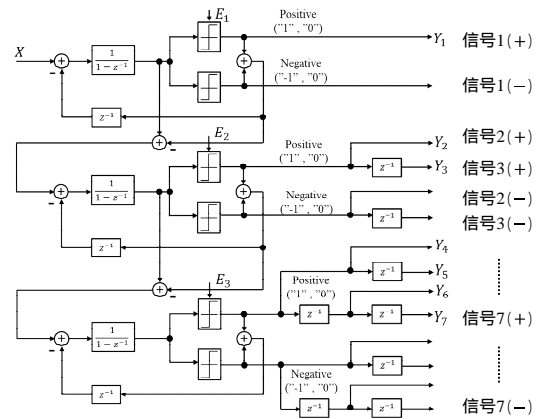


図2 並列出力MASH(PO-MASH)方式による量子化雑音キャンセリング(ベースバンド部分、1次3段の場合)

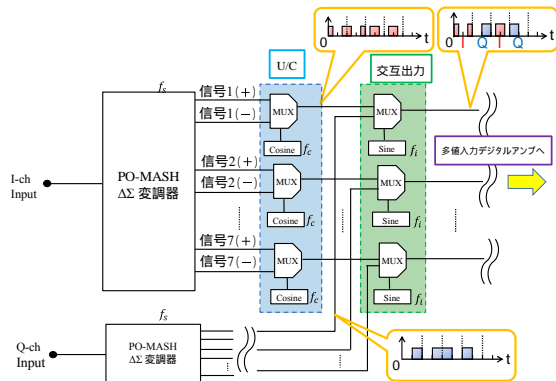


図3 PO-MASH方式を用いたQM-EPWM送信機(1次3段の場合)

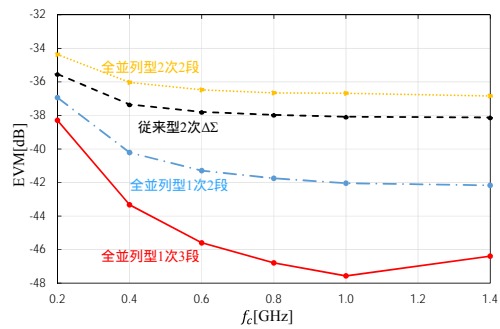


図4 PO-MASH方式QM-EPWM送信機の搬送波周波数( $f_c$ )に対する誤差ベクトル振幅(EVM)シミュレーション結果

した[ ]。また、PAITFに使用するハイブリッドの(差出力)ポートから出力される量子化雑音電力を整流器を用いて直流電力として回収することにより、電力効率を高める方法を提案し、計算機シミュレーションにより電力効率を大幅に改善できる可能性を示した[ ]。

(iii) 量子化雑音を発生しない準デジタル送信機アーキテクチャ

EPWM方式では、量子化の際に量子化雑音の発生は避けられないため、量子化雑音低

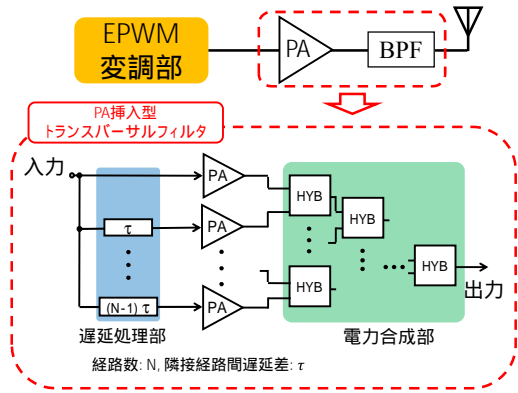


図5 電力増幅器挿入トランスパッサフィルタ

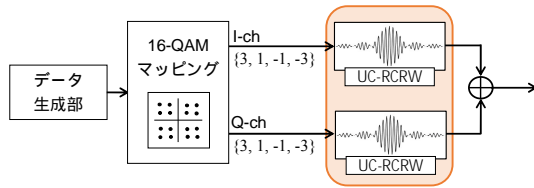


図6 アップコンバージョンしたルートコサインロールオフ波形を用いた無線送信機

減のための対応が必要となる。これに対し、量子化雑音に発生しない準デジタル送信機アーキテクチャ(図6)の提案を行った[ ]。提案する構成は、デジタル信号の送信の際、各シンボルに対応するアップコンバージョンしたRF波形をあらかじめトランスパッサフィルタの係数として用意し、シンボルごとに対応するRF波形を出力する。これにより、本構成は、理想的なアナログ方式送信機と同様に量子化雑音による劣化が生じない。計算機シミュレーションにより、提案する送信機は、変調精度の劣化はほとんどないことを示した。

(b) D級PAのスイッチング損失により電力効率低下する問題を解決する技術

(i) D級PAのDE級動作化

D級PAに対してトランジスタのドレイン-ソース間にキャパシタを並列に装荷することにより高効率動作を実現するDE級PAは、これまでスイッチング電源への応用を目的として研究が行われてきた。本研究では、DE級増幅器の信号伝送への応用をはじめて検討する。このDE級増幅器は、装荷されたキャパシタにより2つのトランジスタが同時にオフとなってもインダクタンスの電流が遮断されないため、トランジスタの耐圧を超えにくい特徴がある。このため、D級PAに比べ大振幅動作が可能となり、電力効率の向上に寄与する。さらに、ゲート入力のバイアスを調整することによりトランジスタの導通するデューティを変化させ、ゼロ電圧スイッチング(ZVS)条件に近づけることにより

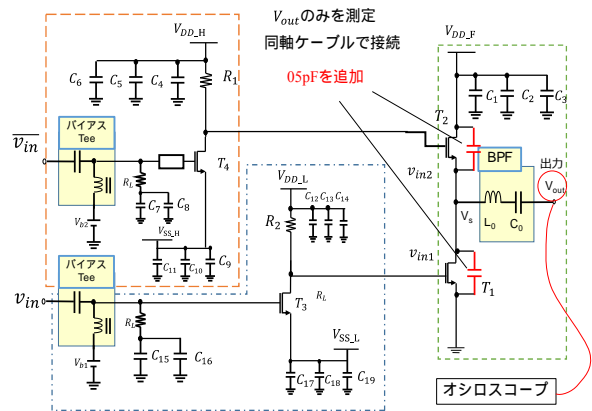


図7 ドライバ付きDE級PAの構成

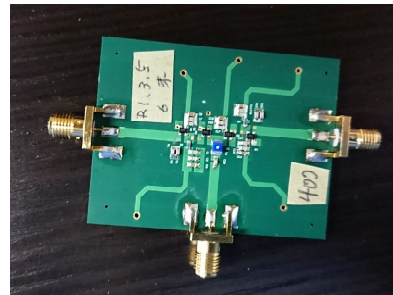


図8 試作したドライバ付きDE級PA

高効率動作が可能である。

GaAs HJFETを用いて、基板上に図7に示す構成のドライバ付きDE級PAの試作を行った(図8)。試作したPAを測定した結果、出力段であるD級PAのドレイン効率として49%の比較的良好な値を得た。しかし、EVMは実装による寄生リアクタンスの影響により-21dBにとどまった。今後は、回路の実装方法を改善しEVMの向上を図るとともに、ZVS条件の最適化により電力効率のさらなる向上を目指す。

(ii)ゼロ電流スイッチング(ZCS)条件を満たすQM-EPWM方式送信機アーキテクチャ

従来の構成によるQM-EPWM方式送信機は、I、Q両チャンネル信号の位相が90°ずれているため、ZCS条件の破れによるスイッチング損失があることを指摘した。これに対し、I、Qチャンネルを独立に増幅したのちハイブリッドで合成し、直交する偏波を用いて信号を伝送することにより、ZCS条件をほぼ満たす構成のQM-EPWM送信機を提案した(図9)[ ]。提案する構成により、図10に示すように、従来の構成よりも大幅に送信機の電力効率を向上できることを計算機シミュレーションにより示した。さらに、図9の構成で使用する180°ハイブリッドを90°ハイブリッドに変更することにより、図9の構成で残るZCS条件の破れを完全に排除構成を提案し、さらに電力効率を向上できることを示した[ ]。

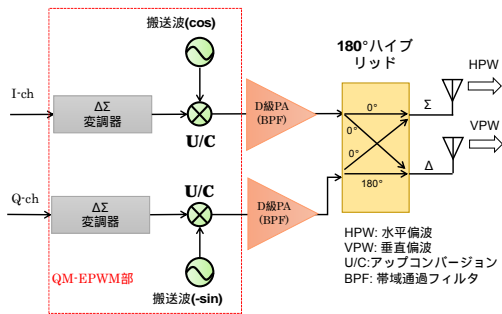


図9 I、Qチャンネルを独立に増幅しハイブリッド合成したのち直交偏波を用いて伝送するQM-EPWM方式送信機（180°ハイブリッドの場合）

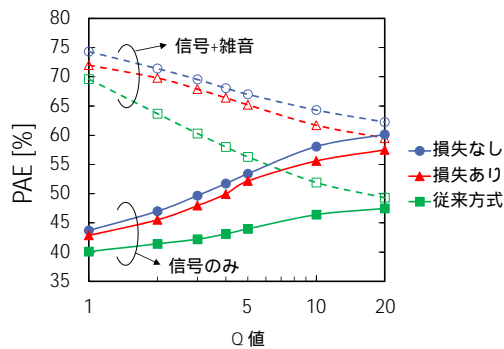


図10 ZCS条件を満たすQM-EPW送信機の電力付加効率（PAE）シミュレーション結果

参考文献

[1] M. Ozen, et al., 2014 IEEE MTT-S IMS, pp. 1-4, June 2014. [2] M. Hussan, et al., 2013 IEEE ISSCC, pp. 366-367, Feb. 2013. [3] W.-Y. Kim, et al., 2011 IEEE MTT-S IMS, pp. 1-4, June 2011. [4] S. Hori, et al., 2011 IEEE RFIC, pp. 1-4, June 2011. [5] R. Hezar, et al., 2014 IEEE RFICS, pp. 217-220, June 2014. [6] Y. Matsuya, et al., IEEE JSSC, vol. 22, no. 6, pp. 921-929, Dec. 1987. [7] S. Fujioka, et al., 2012 ISCIT, Oct. 2012.

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1件）

Takashi Noda, Yohtaro Umeda, and Yusuke Kozawa, “Optimization of DSM Sampling Frequency and Interleaving Frequency for Bilevel Quadrature-Modulation EPWM Transmitter,” Journal of Signal Processing, 査読有, Vol. 20, No. 4, pp. 179-182, 25 July 2016. DOI: 10.2299/jsp.20.179

〔学会発表〕（計18件）

山本伊織, 榎田洋太郎, “アップコンバージョンしたルートコサインロールオフ波

形を用いた無線送信機の検討,” 信学技報, vol. 117, no. 343, CAS2017-67, pp. 21-26, 2017年12月. (電子情報通信学会回路とシステム研究会学生優秀賞受賞) Y. Tanaka, Y. Umeda, and Y. Kozawa, “Comparison of power combining methods in power-amplifier-inserted transversal filter for EPWM transmitters,” 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 464-467, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 13-16, 2017.

T. Morita, R. Sakai, Y. Umeda, and Y. Kozawa, “A quadrature-modulation EPWM transmitter that uses sine wave carriers for I and Q channel with a 90°-hybrid,” 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 1003-1006, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 13-16, 2017.

田中裕人, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “EPWM送信機への応用に向けた電力増幅器挿入型トランスバーサルフィルタにおける電力合成法の比較,” 信学技報, vol. 117, no. 244, MW2017-84, pp. 11-15, 2017年10月.

森田智明, 酒井涼, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “同相の正弦波をI、Qチャンネルの搬送波に用い90°ハイブリッドを信号合成に用いる直交変調型EPWM送信機,” 信学技報, vol. 117, no. 244, MW2017-97, pp. 105-110, 2017年10月.

R. Sakai, T. Mgrita, Y. Umeda, and Y. Kozawa, “Quadrature-modulation envelope-pulse-width-modulation transmission system using quadrature polarized waves,” 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), pp. 1142-1145, Boston, MA, Aug. 6-9, 2017. DOI: 10.1109/MWSCAS.2017.8053130

加茂巧, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “デジタル化Low-IF方式送信機のマルチキャリア送信特性,” 信学技報, vol. 117, no. 167, ICD2017-35, pp. 117-122, 2017年7月.

山本匠, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “並列出力MASH方式変調器を用いた直交変調型包絡線パルス幅変調方式送信機,” 信学技報, vol. 117, no. 167, ICD2017-36, pp. 123-128, 2017年7月.

酒井涼, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “直交偏波を用いた直交変調型包絡線パルス幅変調送信方式の検討,” 信学技報, vol. 116, no. 486, MW2016-204, pp. 89-94, 2017年3月.

長澤昂平, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “直交変調型包絡線パルス幅変調方式送信機のFPGA実装における並直列変換を用いた高速化の検討,” 信学技報, vol. 116, no.

487, ICD2016-137, pp. 107-112, 2017年3月.

Takashi Noda, Yohtaro Umeda, and Yusuke Kozawa, "Optimization of DSM Sampling Frequency and Interleaving Frequency for Bi-level Quadrature-modulation EPWM Transmitter," 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16), Honolulu, Hawaii, March 6-9, 2016. (NCSP '16 Student Paper Award受賞)

渡邊邦彦, 榎田洋太郎, 小澤佑介, "オンチップインダクタの対基板容量キャンセルリングによるEPWM送信機用D級増幅器内蔵バンドパスフィルタの狭帯域化," 信学技報, vol. 115, no. 476, MW2015-207, pp. 189-193, 2016年3月.

K. Nagasawa, S. Fujioka, K. Watanabe, Y. Umeda, and Y. Kozawa, "Power-amplifier inserted transversal filter using high-order pass band," 2015 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), pp. 124-126, Sendai, Japan, Aug. 26-28, 2015.

佐々木隆人, 榎田洋太郎, 小澤佑介, "包絡線パルス幅変調方式送信機における量子化雑音抑圧用トランスバーサルフィルタへの窓関数の適用," 信学技報, vol. 116, no. 13, MW2016-1, pp. 1-6, 2016年4月.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榎田 洋太郎 (UMEDA, Yohtaro)  
東京理科大学・理工学部・教授  
研究者番号: 80439918

### (4) 研究協力者

小澤 佑介 (KOZAWA, Yusuke)  
東京理科大学・理工学部・助教  
(現 茨城大学・工学部・助教)