

令和 6 年 9 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02149

研究課題名（和文）雑音を利用した1ビットアナログ・デジタル変換器によるMIMO-OFDM受信機

研究課題名（英文）MIMO-OFDM Receiver using One-Bit Analog-Digital Converter Utilizing Noise

研究代表者

山里 敬也（Yamazato, Takaya）

名古屋大学・教養教育院・教授

研究者番号：20252265

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、分解能が最も低い1ビットアナログ・デジタル変換器（1-bit ADC）であっても、雑音を利用して、低い分解能を超える信号を受信できることを実証する。具体的には、我々がこれまで行った確率共鳴現象の検討結果を発展させ、雑音を利用する1-bit ADCを用いた信号受信の基礎理論を構築することを目的とする。対象とする信号として、第5世代移動通信（5G）で採用されているMIMO-OFDM信号を取り上げる。そのような複雑な信号であっても、雑音を利用する1-bit ADCを用いた受信機で復調できることを、受信機の開発と受信実験を通して実証する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで雑音は、工学的には邪魔なものとしてフィルタ処理等を駆使して積極的に取り除かれてきた。これに対し、本研究では雑音を積極的に利用する。あえて雑音を利用する通信システムの検討を行うことで、これまでとはまったく異なる考え方に基づき、新しい通信システムの構築を目指している。ここに本研究の学術的独自性と創造性がある。

研究成果の概要（英文）：This study shows that a 1-bit analog-to-digital converter (1-bit ADC) with the lowest resolution can receive signals beyond its resolution by utilizing noise. The main goal is to establish a fundamental theory of signal reception using a 1-bit ADC that exploits noise, building on the results of previous investigations into stochastic resonance phenomena. The target signal is the MIMO-OFDM signal used in fifth-generation mobile communications (5G). Through the development of receiver and reception experiments, the study demonstrates that even complex signals like MIMO-OFDM can be demodulated by a receiver using a 1-bit ADC that utilizes noise.

研究分野：通信・ネットワーク

キーワード：確率共鳴現象 1bitアナログ/デジタル変換器 MIMO-OFDM

1. 研究開始当初の背景

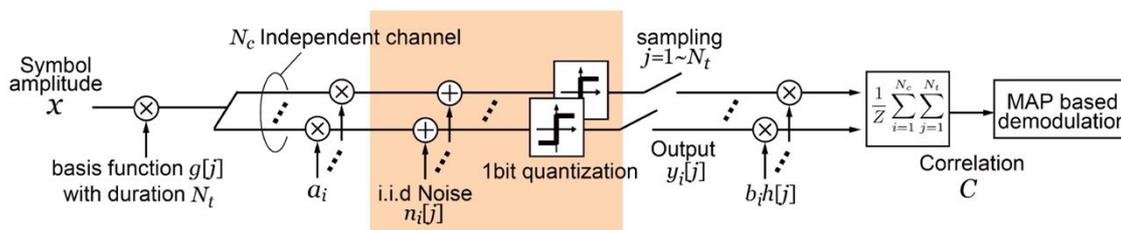


図 1 本研究で検討を行う、雑音を利用する 1bit ADC を用いた MIMO-OFDM システムのモデル図(網掛け部分に示すように 1bit ADC の直前に雑音を印可することを特徴としている)

雑音を積極的に利用する取り組みが注目されている。代表的なもの一つに「確率共鳴現象」がある。確率共鳴現象は、非線形素子と適切な強度の雑音が与えられたときに発現され、その系の応答特性を向上できるしくみである。その研究は、物理学(特に統計物理)での理論検討から始まり、現在は工学での応用が検討されている。工学においても、我々を除き通信システムへの応用はほとんど行われていない。

本研究では、典型的な非線形素子である 1bit ADC と積極的な雑音の利用により、通信システムにおいて確率共鳴現象を発現させ、これまでとはまったく異なる考え方に基づく、新しい通信システムの構築を目指すものである。

2. 研究の目的

本研究では、分解能が最も低い 1bit ADC でも、雑音を利用することによりその分解能を超えた信号を受信できることの実証を目的とする。対象として、5G で採用されている MIMO-OFDM 信号を取り上げ、そのような複雑な信号であっても、雑音を利用する 1bit ADC を用いた受信機で復調できることを、実験により実証する。

これまで雑音は、工学的には邪魔なものとしてフィルタ処理等を駆使して積極的に取り除かれてきた。これに対し、本研究では雑音を積極的に利用する。あえて雑音を利用する通信システムの検討を行うことで、これまでとはまったく異なる考え方に基づく、新しい通信システムの構築を目指している。ここに本研究の学術的独自性と創造性がある。

本研究では 2 つのテーマを設け検討した。

(a) 雑音を利用する 1bit ADC による信号復調の基礎研究

これまでの成果を発展させ、MIMO-OFDM 信号受信に応じて、故意に加える雑音分布、雑音帯域と 1bit ADC 出力との因果関係の解析を、理論解析及び計算機シミュレーションにより行う。検討結果を随時下記 (b) の開発研究に反映する。また、(b) の開発研究で得られた課題を解析に取り込み、より現実に近い環境にも対応可能な信号復調理論を構築する。

(b) 雑音を利用する 1bit ADC による MIMO-OFDM 受信機の開発研究

上記 (a) の実験による実証を目的として、雑音を利用する 1bit ADC による MIMO-OFDM 受信機を開発し、その有効性を確認する。

本報告書では、主に (b) の検討結果について述べるものとする。

3. 研究の方法

3.1 OFDM 信号伝送実験モデル

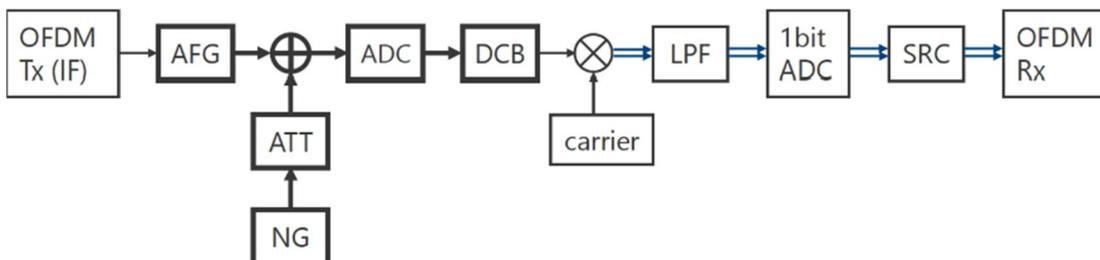


図 2 OFDM 伝送実験モデル図

本研究で開発した OFDM 信号伝送実験系のモデルを図 2 に示す。図において、枠線が太線のものは機器を用いたハードウェア処理を、枠線が細線のものは、PC 上でソフトウェア処理すること表す。図中の各ブロックは、次の意味を持つ。

- ・ OFDM Tx: IF 帯 OFDM 信号波形データ生成部
- ・ AFG (Arbitrary Function Generator): 任意信号発生器 (ファンクションジェネレータ)
- ・ ATT (Attenuator): 減衰器
- ・ NG (Noise Generator): 雑音発生器
- ・ ADC (Analogue-to-Digital Converter): ADC ボード
- ・ DCB (Data Capture Board): データキャプチャボード
- ・ Carrier: 搬送波
- ・ LPF (Low Pass Filter): 低域通過フィルタ
- ・ 1bit ADC: ソフトで実現する 1bit ADC
- ・ SRC (Sampling Rate Converter): サンプリングレート変換器
- ・ OFDM Rx: ベースバンド OFDM 信号受信部

搬送波を乗算する部分以降、矢印が 2 本出ている箇所は、I-ch と Q-ch からなる複素ベースバンド信号が流れることを意味する。

本研究では、無線 LAN 規格 IEEE802.11a に準拠した送受信系を利用した。IEEE802.11a の複数ある伝送モードのうち、16QAM を用いる 24 Mbps モードと 64QAM を用いる 48 Mbps モードを用いて実験を行った。

次に、送信機から受信機まで、順に信号の流れを説明する。OFDM Tx (IF) では、PC 上で IEEE 802.11a 規格に準ずる OFDM 信号フレームを表す数値データ列を作成する。得られた数値データを任意信号発生器 (AFG) に保存する。任意信号発生器は、保存された波形データを指定された電圧および周期で、連続的に生成し、同軸ケーブルに送る。送信信号には雑音発生器で生成された雑音が減衰器で減衰されて加えられる。雑音発生器は、出力電力が 0 dBm, 10 MHz から 2 GHz まで一定の周波数特性を持つ白色雑音を出力する。減衰器は、減衰量を調節可能であり、今回は 0 dB から 30 dB まで 1 dB 刻みで減衰量を変化させた。雑音を加えられた

送信信号は高速 ADC でサンプリングされ、データキャプチャボードで記録される。ADC のサンプリング周波数は 3.2 GHz, 量子化ビット数は 12 ビットである。データキャプチャボードに保存されたデータは接続する PC に送られる。以降の受信信号処理は全てソフトウェアで行う。

デジタル化された受信信号は、搬送波が乗算され IF 帯からベースバンド帯に周波数変換される。後述するように、本検討では、IF 信号をベースバンド信号に変換する方法として 2 通りの方法を適用した。ベースバンド信号は I-ch と Q-ch の成分を持つ複素数信号であるため、モデル図においては、搬送波が乗算された後の信号フローは 2 本の矢印で表されている。ベースバンド信号は LPF に入力されて帯域制限される。本研究では、確率共鳴の観点から、雑音をより広帯域に取り込むため、LPF の帯域制限を行わない (± 1.6 GHz に相当) か、帯域幅を ± 800 MHz から ± 1.2 GHz まで、所要帯域幅の 80 倍から 160 倍と緩い帯域制限を行った。LPF 出力は、I-ch と Q-ch それぞれで 1bit ADC に入力される。1bit ADC への入力を x , 出力を y とすると、入出力関係は次式で表される。

$$y = Q(x) = \begin{cases} -1 & (x < 0) \\ +1 & (0 \leq x) \end{cases} \quad (1)$$

1bit ADC 出力のサンプリング周波数は ADC (機器) のサンプリング周波数と等しい 3.2 GHz であり、ベースバンド OFDM 信号受信部はサンプリング周波数 80 MHz の信号を想定しているため、サンプリング周波数を 1/40 に減らす必要がある。そこで、本研究では、1bit ADC 出力を 40 サンプル毎に、その 40 サンプルの平均値を求めて、OFDM 受信プログラムに渡すという方法を用いた。1bit ADC の出力は、その期待値が、1bit ADC への入力信号の値、加わる雑音の確率密度関数に依存することが知られている。1bit ADC への入力信号の値を y , 加えられた雑音が、平均 0, 分散 2 のガウス分布に従う確率変数であると仮定すると、各 1bit ADC 出力 z の期待値の 1 次近似は次のように表される。

$$E[z] = \sqrt{\frac{2}{\pi\sigma^2}} y \quad (2)$$

ここで、 $E[z]$ は z の期待値を表す。OFDM 信号受信部では、チャンネル補償に伴い、信号の正規化が行われるため、信号の絶対値の大小や係数 $2/\sigma$ は、ほとんど受信特性に影響を与えない。一方、(2) から分かるように、 $E[z]$ は y/σ , すなわち SNR の平方根に相当する値に比例する。この近似は、SNR が小さい (σ が大きい) ほど、誤差が小さい。すなわち、SNR が小さいほど、1bit ADC を用いない場合 (本研究では線形受信と呼称する) に比例した信号波形が得られる。ところで、 z は 1bit ADC 出力であるため、 ± 1 のいずれかをとり、その期待値の取り

得る範囲は $-1 \leq E[z] \leq 1$ である．したがって，(2) の右辺は， $|y| > \dots$ となる時，前述の範囲を越えた値を出力することになる．今，入力信号の値の分布が一定であると仮定すると，雑音強度が相対的に小さい $|y| < \dots$ となる時， $E[z]$ は真値から離れ，さらに \dots が小さくなるにつれ，誤差との乖離が大きくなる．このことから，SNR が大きくなると，BER 特性が劣化すると予想される．本研究では，雑音強度を減衰器を用いて，減衰量により変化させるため，SNR の増加は，雑音減衰量の増加に相当する．

1bit ADC 出力の平均値を OFDM 受信プログラム (OFDM Rx) に入力し，復調処理を行い，送信ビットと照らし合わせて 1 フレーム内における平均ビット誤り率 (BER) を求めた．

3.2 送信信号生成

OFDM Tx では，搬送波で周波数変換された OFDM 信号波形の数値データを生成する．IEEE802.11a 規格における 24 Mbps モードに則した信号波形データの生成について述べる．24 Mbps モードでは，変調方式として 16QAM，誤り訂正符号として符号化率 $R = 1/2$ の畳み込み符号が用いられている．

4. 研究成果

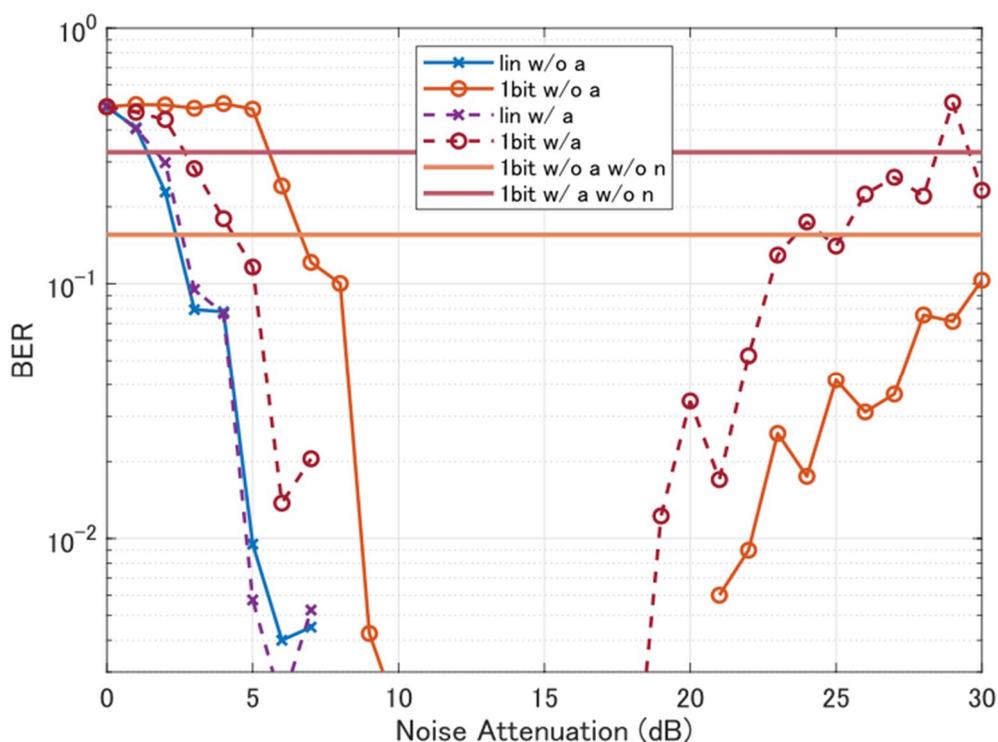


図 3 雑音減衰量に対する BER 特性 (24Mbps モード . 16QAM . 500 バイト伝送)

前節で説明した実験系および信号送受信方法に基づき，OFDM 信号伝送実験を行った．

図 3 に，24Mbps モード (16QAM，符号化率 $R = 1/2$) で 500 バイト (4,000 ビット) 伝送した場合における，雑音減衰量に対する BER 特性を示す．凡例は，線形受信 (凡例中 “lin”) または 1bit ADC を用いた受信 (“1bit”)，周波数変換法 1 (実線かつ “w/o a”) または解析信号を用いる周波数変換法 2 (点線かつ “w/ a”) を用いてベースバンド信号を生成する場合を，それぞれ表している．参考のため，印加雑音が無い場合 (“w/o n”) の BER を表している．これは，雑音減衰量を ∞ とした場合に相当する．

線形受信の場合を比較すると，ベースバンド生成に解析信号を用いたか用いないかは，ほとんど影響が無いことが分かる．本研究の条件においては，雑音減衰量を 8 dB 以上とすると，BER が 0 となった．

1bit ADC を用いた場合，低 SNR 領域では，雑音減衰量を増加するにつれ，SNR が増加することから，BER が改善することが分かる．本実験では，16QAM を用いた場合においても雑音減衰量が 10 dB 程度の区間 (解析信号不使用の時，10 dB から 20 dB の間，解析信号使用の時，8 dB から 18 dB の間) に渡りエラーフリーとなった．更に雑音減衰量を大きくした高 SNR 領域においては，雑音減衰量の増加により徐々に BER が劣化する．このような BER の変化は確率共鳴現象に特有の性質である．雑音減衰量が大きくなるにつれ，誤り率が劣化する現象は次のよ

うに説明できる。雑音減衰量が大きいと、信号成分の強さと比較して雑音強度が弱いため、信号成分に対して符号が反転して受信される割合が減少する。この時、例えば 1-ch における受信信号の値が正である場合、雑音強度が弱いと、1bit ADC 出力はほとんど +1 となる。すると、振幅が +1 であっても +3 であっても、1bit ADC 出力の平均値がほぼ 1 となるため、振幅の強さが区別できない。一方、符号判定の精度は雑音強度が小さいほど良くなる。したがって、雑音減衰量が高い領域では、正負の符号誤りは少なく、振幅の誤り率が 0.5 に近くなるため、BER は約 0.25 となるはずである。しかし、雑音を加えない場合 (“w/o n”), 解析信号を用いない場合で BER は 0.2 弱、解析信号を用いた場合で約 0.3 となっており、理論値 (0.25) に対してわずかに前後している。この違いの理由の一つは 誤り訂正符号を用いているためと考えられる。

まとめ
本研究では、1bit ADC を用いた 16QAM-OFDM 信号受信実験を行い、適度な雑音電力密度の広帯域雑音を加えることにより、多値変調を伴う 16QAMOFDM 信号を用いて 500 バイトの信号伝送を行い、良好な誤り率特性またはエラーフリーで受信可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Zheng Jinxing, Yamazato Takaya, Saito Masato	4. 巻 11
2. 論文標題 An experimental study on a noise-aided 1-bit ADC receiver for 4-PAM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 817 ~ 822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2022COL0032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Isozaki Arata, Yamazato Takaya, Saito Masato, Lu Shan	4. 巻 -
2. 論文標題 16 QAM-OFDM receiver using 1-bit ADC for noise utilization: Characterization in fading channels with large amplitude fluctuations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/comex.2024TCL0018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takuto Ohtaguro, Masato Saito, Takaya Yamazato
2. 発表標題 Experimental verification of 4-ary Pulse Amplitude Modulated signal receiver with noise-aided one-bit analogue-to-digital converter
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (ICMaSS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大田黒 拓斗, 齋藤 将人, 山里 敬也
2. 発表標題 雑音と1bit ADCを用いた4PAM信号受信実験
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, MIKA2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大田黒 拓斗, 齋藤 将人, 山里 敬也
2. 発表標題 雑音と1bit ADCを用いた4PAM信号受信における雑音強度に対する受信信号点間距離の実験的測定
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部第74回連合大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大田黒 拓斗, 齋藤 将人, 山里 敬也
2. 発表標題 雑音を用いた1bit ADCによる4値PAM信号の復調法に関する実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 121, No. 72, pp.133-138
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小鹿文也, 山里敬也, 齋藤将人, 木村翔, 田中翔馬, 林合祐, 佐藤彰弘, 表英毅
2. 発表標題 3.35GHz帯移動環境における遅延プロファイルの多段推定手法による雑音電力の低減
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会, B-1-44, p.44
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島康雄, 山里敬也, 荒井伸太郎, 齋藤将人, 羽多野裕之, 田中宏哉, 田所幸浩
2. 発表標題 雑音と1bit ADCを用いたマルチアンテナ受信機におけるチャンネル推定と信号復調
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会, B-8-27, p.148
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Saito, T. Ohtaguro, Y. Nakashima, T. Yamazato, S. Arai, H. Hatano, H. Tanaka, Y. Tadokoro
2. 発表標題 A Study on Required FFT Sizes for Demodulation of OFDM Signals by Intentionally Added Noise and 1bit ADC
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Application (NOLTA), pp.105-108 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島康雄, 山里敬也, 荒井伸太郎, 齋藤将人, 羽多野裕之, 田中宏哉, 田所幸浩
2. 発表標題 マルチアンテナ受信機における雑音を利用した1bitアナログ-デジタル変換器の特性解析
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, CS2020-20, pp.25-26
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 磯崎新, 山里敬也, 齋藤将人, 羽多野裕之
2. 発表標題 非線形増幅器が1bit-ADCの入出力解析に与える影響の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会, B-5-19, p.264
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤井大智, 荒井伸太郎, 山里敬也, 羽多野裕之, 齋藤将人
2. 発表標題 確率共鳴現象を利用したPD型可視光通信の通信性能の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会, AS-2
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤将人, 山里敬也
2. 発表標題 1bit ADCとオーバーサンプリングを用いたSFBC-MIMO-OFDM信号受信
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-9-8
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Arata Isozaki, Takaya Yamazato, Masato Saito
2. 発表標題 16QAM-OFDM Receiver Using 1-bit ADC that Utilizes Noise and Performs Frequency Conversion in the Digital Domain Characterization in a Frequency Flat Rician Fading Channel
3. 学会等名 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC), 03-3 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 磯崎新, 山里敬也, 齋藤将人
2. 発表標題 デジタル領域で搬送波を乗算する1bit ADCを用いた16QAM-OFDM受信機 ~2パスフェージングチャネルとAWGNチャネルにおける特性評価~
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, CS2023-26, pp.30-34
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂山 秀明, 齋藤 将人, 山里 敬也
2. 発表標題 雑音と1bit ADCを用いた2x2 SFBC-MIMO-OFDMシステムのビット誤り率特性
3. 学会等名 信学技法WBS2023-59, ITS2023-42, RCC2023-53
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤 将人, 山里 敬也
2. 発表標題 雑音と1-bit ADCを用いたIF 帯16-QAM/OFDM信号受信実験
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会講演論文集 (電子情報通信学会) A-9-22 - A-9-22
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>確率共鳴 https://vimeo.com/manage/videos/499501573</p>

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	齋藤 将人 (Saito Masato) (30335476)	琉球大学・工学部・准教授 (18001)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------