

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：13601
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K04060
研究課題名（和文）繰り返し送信方式の新提案とその広域化・低消費電力化効果の理論的解明及び実験検証

研究課題名（英文）Theoretical clarification and experimental verification of wide-area and low-power consumption effects in new repetitive transmission scheme

研究代表者
笹森 文仁（Sasamori, Fumihito）
信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：70298090
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、伝送速度と伝送品質の双方の向上を目的とした繰り返し送信方法を新たに提案している。伝送特性は無線回線状態によって大きく変動することから、提案方式の優位性、及び、その波及効果を理論的に解明するために、繰り返し送信回数、及び、無線回線状態をパラメータとした伝送特性の理論式を導出した。また、提案方式は無線エリアの広域化及びIoT機器の低消費電力化の観点で優位性があることを実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の提案方式は、広域化・低消費電力化といった目的を達成するための特別なハードウェアは必要とせず、無線回線の状態に応じて方式設計パラメータを適応的に変更するといった制御が簡単な信号処理（ソフトウェア）だけで可能となる。また、本研究で導出した伝送特性の理論式を用いることで、常に伝送特性を最良に保つような適応制御を理論的に可能にしている。さらに、本方式は音の帯域を用いたOFDM信号を生成でき、信号処理量も小さいことから、低価格で小型なマイコン開発ボードやシングルボードコンピュータにも実装可能である。

研究成果の概要（英文）：In this research, a new repeated transmission method to improve both transmission rate and transmission quality is proposed. Since the transmission characteristics vary greatly depending on the wireless channel condition, theoretical equations for the transmission characteristics are derived based on the number of repeated transmissions and the wireless channel condition in order to theoretically clarify the superiority of the proposed method and its ripple effects. In addition, it is experimentally verified that the proposed method is superior in terms of wide area coverage and low power consumption of IoT devices.

研究分野：無線通信工学

キーワード：OFDM 繰り返し送信 広域化 低消費電力化 理論的解明 実験検証

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

第5世代の移動通信システム(5G)では、従来の移動通信を発展させた「超高速・大容量」のサービスだけでなく、モノのインターネット(IoT)向けの「多数同時接続」「超低遅延」のサービスも提供されている。IoT向けの低消費電力・広域無線通信技術LPWAは、伝送速度を大幅に犠牲にする代わりに、伝送品質を大幅に改善して無線エリアの広域化を可能にする技術である。低コストかつ低消費電力で広域をカバーするために、同じ信号を繰り返し送信して伝送品質を向上する技術が採用されている。

5Gや無線LANなど様々な無線通信システムで採用されている直交周波数分割多重(OFDM)方式は、図1(a)のように N 個の無線チャンネル(サブキャリア)で N 個の変調信号 $s_1 \sim s_N$ を同時に送信するが、同図(b)の繰り返し符号化OFDM方式のように、 $N/2$ 個の変調信号 $s_1 \sim s_{N/2}$ を2つのサブキャリアで同時に繰り返し送信することもできる。ここで、同図(b)は同図(a)に比べて伝送速度が半分低下する代わりに、受信側で2つの信号を合成して2倍の電力で復調できるため、伝送品質が向上する。その結果、IoTシステムにおいて、従来の伝送品質を担保するための送信電力を低減(無線機の低消費電力化)できるとともに、無線エリアの広域化も見込める。

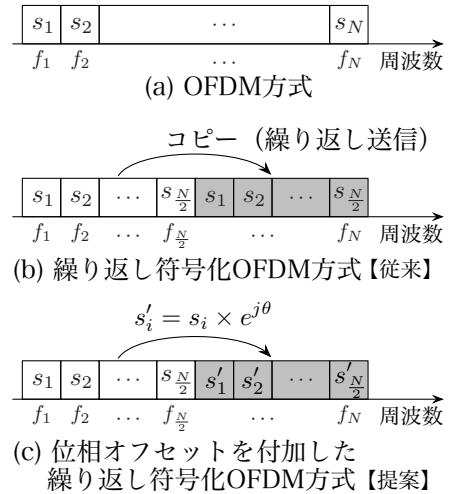


図1: OFDM方式の概念図

2. 研究の目的

図1(b)の繰り返し符号化OFDM方式には、繰り返し送信数に比例して伝送速度が低下する欠点がある。本研究では、伝送速度と伝送品質の双方の向上を目的とした繰り返し送信方式を新たに提案する。一般に、伝送特性は無線回線状態によって大きく変動することから、提案方式の優位性及びその波及効果を理論的に解明するために、無線回線状態をパラメータとした伝送特性の理論式を導出する。また、電波や超音波、可視光等の様々な無線回線を用いて実験検証することで、提案方式は無線エリアの広域化及びIoT機器の低消費電力化の観点で優位性があることを理論と実験の両側面から明らかにする。

3. 研究の方法

提案する繰り返し送信方法について概説する。例えば{1,1}という2ビットのデータをQPSK変調した図2(a)のような信号 s_i を、図1における前半の任意のサブキャリア f_i で送信することを考える。従来方式では s_i をそのまま後半のサブキャリア $f_{i+N/2}$ で繰り返し送信していたが、提案方式では1ビットのデータを新たに追加し、追加データが“1”の場合は図2(b-1)のように s_i の位相を 90° 進め、“0”の場合は同図(b-2)のように 90° 遅らせて繰り返し送信する。例えば図2(b-1)の信号を受信した場合、受信信号を 90° 進めた信号 $s_i e^{j\pi}$ と元の図2(a)の信号 s_i を合成すると打ち消し合ってゼロになり、逆に 90° 遅らせた信号 s_i と元の信号 s_i を合成すると $2s_i$ となることから、しきい値判定によって追加データが“1”と判定できる。すなわち、1つの変調信号 s_i で送信できるデータを2ビットから3ビットに増加でき、理論的にはシステム全体で伝送速度が1.5倍向上する。

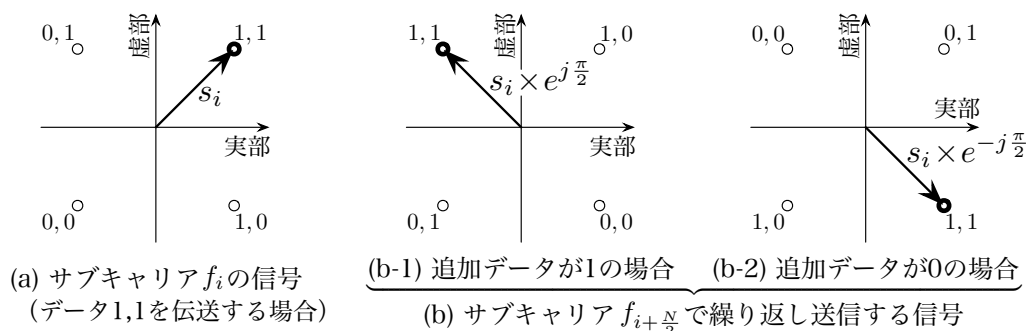


図2: 本研究で提案する繰り返し送信方式の概念図

上述の提案方式を応用し、繰り返し送信数 L を $L = 2^k$ 回に設定すると、従来方式と比較して k ビットのデータ（シンボル）を追加送信できる。デジタル変調方式 M -PSK 及び M -QAM の1シンボルあたりの同時送信ビット数を $F_b (= \log_2 M)$ とし、図1(a)のOFDM方式の伝送レート R を $R = F_b$ とすると、同図(b)の従来の繰り返し符号化OFDM方式（以降、従来方式）の伝送レート R は

$$R = \frac{F_b}{L} \quad (1)$$

となる。一方、同図(c)の位相オフセットを付加した繰り返し符号化OFDM方式（以降、提案方式）の伝送レート R は

$$R = \frac{F_b + k}{L} = \frac{F_b + \log_2 L}{L} \quad (2)$$

となる。QPSKを想定した場合（ $F_b = 2$ の場合）の繰り返し送信数 L と伝送レート R の関係を表1に示す。同表より、同じ繰り返し送信数の時は提案方式の方が伝送レートを高く保てることがわかる。また、同程度の伝送レートを保つための繰り返し送信数は、提案方式の方が多く設定できることがわかる。例えば、 $R = 1$ を担保する場合、従来方式は $L = 2$ であるのに対して、提案方式は $L = 4$ である。繰り返し送信数の増加は伝送品質の向上につながることから、同一の送信電力で情報伝送した場合、提案方式の方が無線エリアが広がる。あるいは、同程度の無線エリアをカバーする場合、提案方式は送信電力を低減してIoT機器の低消費電力化に結びつけることができる。

本研究では、提案方式の優位性を理論と実験の両側面から明らかにするために、以下の手順で研究を遂行する。

- (1) コンピュータシミュレーションによる伝送特性の取得・解析及び繰り返し送信数及び無線回線状態をパラメータとした伝送特性の理論式の導出

無線回線では、伝送距離に応じた電力減衰や雑音の影響が無視できないため、伝送特性はその回線状態によって大きく変動する。まずはじめに、コンピュータシミュレーションを用いて、様々な繰り返し送信数及び無線回線状態における提案方式の伝送特性を明らかにする。具体的には、回線品質の評価指標であるビット誤り率、誤り無くパケット送信が成功する確率であるパケット成功率、単位時間・単位周波数あたりに送受信できるデータ量であるスループットの各伝送特性を取得する。

次に、取得した伝送特性のシミュレーション値を理論的に解析し、繰り返し送信数及び無線回線状態をパラメータとした伝送特性を定式化する。過去の研究で導出した従来の繰り返し送信方式の特性と比較して、提案方式の優位性を理論的に明らかにする。

- (2) 様々な無線回線を用いた実験検証

電波や超音波、可視光等の様々な無線回線を用いて実験検証を実施する。提案方式は無線エリアの広域化及びIoT機器の低消費電力化の観点で優位性があることを実験的にも明らかにする。

4. 研究成果

3. で述べた方法に従って研究を遂行した。その成果を以下に述べる。

- (1) コンピュータシミュレーションによる伝送特性の取得・解析及び繰り返し送信数及び無線回線状態をパラメータとした伝送特性の理論式の導出

提案方式における復調方法は、まずはじめに追加シンボルを復調し、その後に変調シンボルを復調する。そのため、追加シンボルの復調に失敗すると、変調シンボルの復調特性も劣化する。すなわち、変調シンボルの復調特性は追加シンボルの誤り率に依存する。以上より、追加シンボルのビット誤り率の理論式を新たに導出した後、変調シンボルのビット誤り率として条件付き確率で求める理論式を用いることで、提案方式のビット誤り率の理論式を導出した。なお、本稿では、搬送波電力対雑音電力比 CNR に対する伝送特性を評価対象とする。

表 1: L と R の関係 (QPSK)

L	R	
	従来	提案
1	2	-
2	1	1.5
3	0.667	-
4	0.5	1
5	0.4	-
8	0.25	0.625
16	0.125	0.375

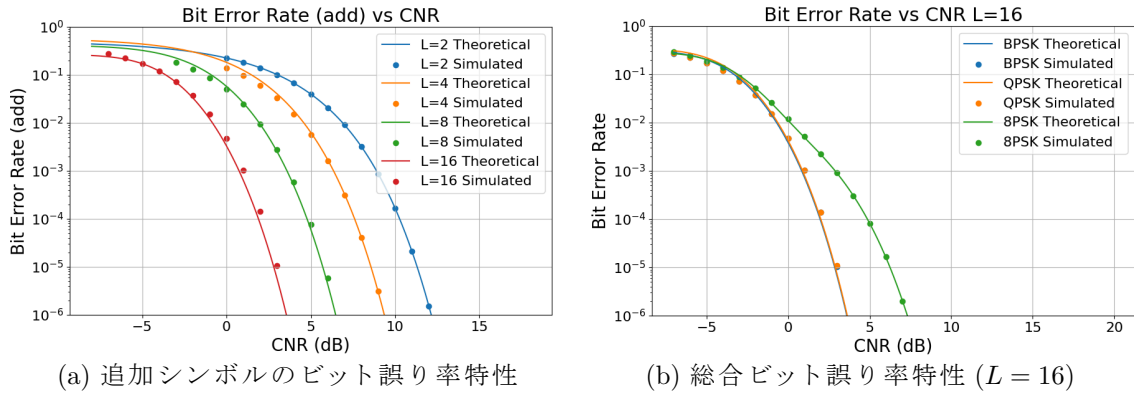


図 3: ビット誤り率特性

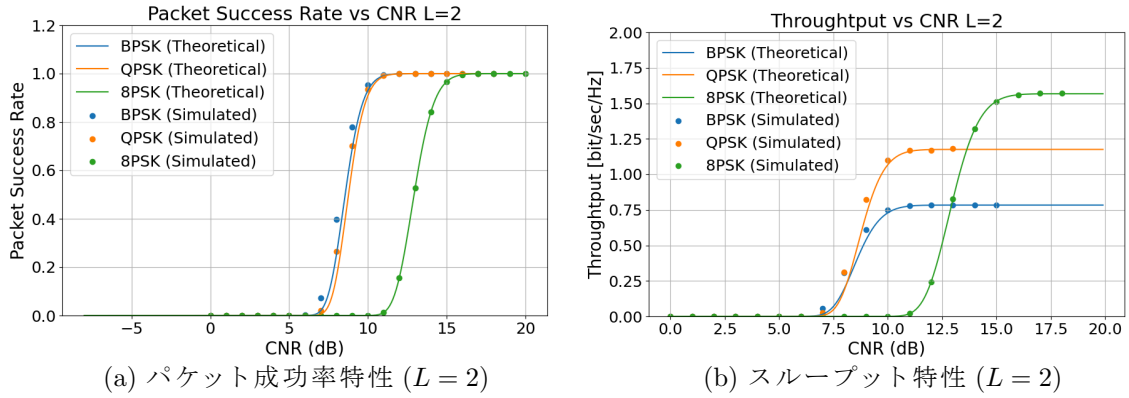


図 4: パケット成功率特性及びスループット特性

図 3(a) に追加シンボルのビット誤り率特性を、図 3(b) に追加シンボルと変調シンボルの総合ビット誤り率特性をそれぞれ示す。また、図 4 にパケット成功率特性及びスループット特性を示す。両図ともに、プロット点がシミュレーション値、実線が理論値である。同図より、シミュレーション値と理論値がほぼ一致していることから、理論式の妥当性が確認できる。

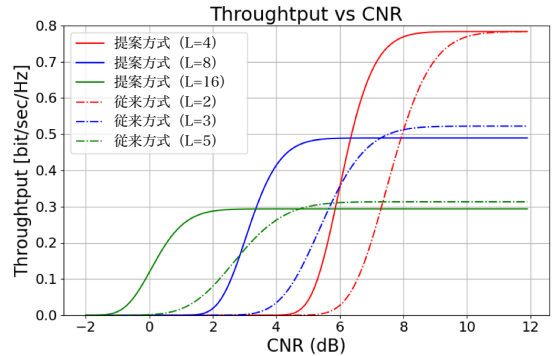
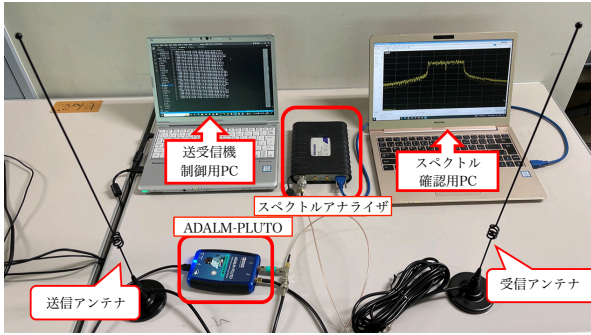


図 5: スループット特性 (理論値)

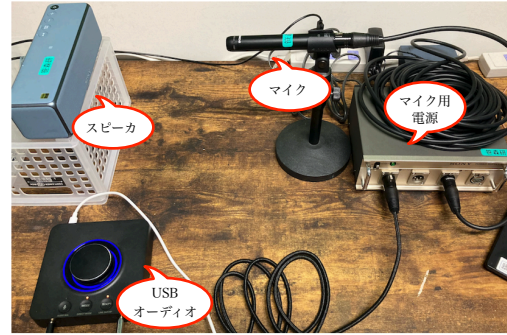
表 1 に示した繰り返し送信数 L と伝送レート R の関係を基に、理論式を用いて算出した従来方式と提案方式のスループット特性を図 5 に示す。ただし、同図において、提案方式の $L = 4, 8, 16$ と従来方式の $L = 2, 3, 5$ がそれぞれ同等の伝送レートである。同図より、どの伝送レートにおいても、同等のスループットを達成する CNR が提案方式の方が約 2dB 低いことがわかる。すなわち、提案方式の方が同等のスループットを達成する送信電力を低く設定できることが理論的に証明できる。

(2) 様々な無線回線を用いた実験検証

理論的に立証できた提案方式の優位性を無線伝送実験を通して検証した。具体的には、搬送帯域を用いた電波伝搬実験と、音響帯域を用いたベースバンド伝送実験を実施した。本研究で構築した無線伝送実験プラットフォームの一例を図 6 に示す。同図 (a) が電波伝搬実験用のプラットフォーム、同図 (b) がベースバンド伝送実験の一つである超音波伝送実験用のプラットフォームである。同図 (a) で使用したソフトウェア無線機は Analog Devices 社の ADALM-PLUTO であり、143MHz 帯と 428MHz 帯で電波伝搬実験ができるように特定実験試験局免許を取得した。また、同図 (b) で使用している SONY 社製スピーカ (SRS-HG10) とマイク (ECM-100U) はいずれもハイレゾ音源対応であり、サンプリング周波数として 192kHz まで設定できる Creative 社の USB オーディオ (Sound Blaster X3) を用いて超音波伝送実験を実施した。

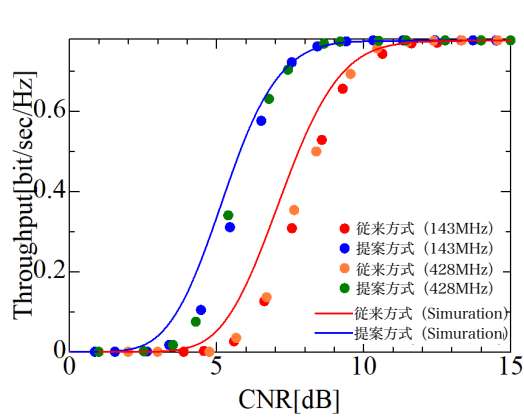


(a) 電波伝搬実験

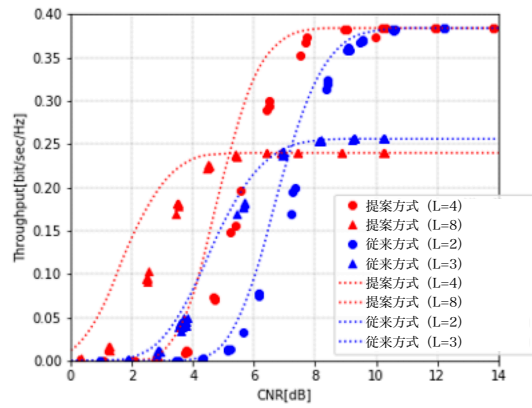


(b) 超音波伝送実験

図 6: 様々な無線回線を用いた実験プラットフォーム (一例)



(a) 電波伝搬実験



(b) 超音波伝送実験

図 7: 様々な無線回線を用いたスループット特性 (一例)

図 7 にスループット特性を示す. いずれもプロット点が実験値で, 実線がシミュレーション値である. 実験における CNR の推定誤差により両者は一致していないが, 提案方式の優位性は立証できる. また, 両実験ともに, 同等のスループットを達成する CNR が提案方式の方が約 2dB 低いことから, 4.(1) で先述した理論解析どおりの結果が得られていることがわかる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuji Akiba, Ryo Shibata, Fumihito Sasamori
2. 発表標題 Performance Evaluation of Visible Light PORC-OFDM Systems
3. 学会等名 2023 International Scientific Conference on Engineering and Applied Sciences (ISCEAS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Aya Yorita, Ryo Shibata, Fumihito Sasamori
2. 発表標題 Adaptive Modulation Control of PORC-OFDM Systems by Ultrasonic Communications
3. 学会等名 2023 International Scientific Conference on Engineering and Applied Sciences (ISCEAS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安田 英道, 柴田 凌, 笹森 文仁
2. 発表標題 ソーラーパネルを用いた可視光OFDM受信機の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高野 晃輔, 柴田 凌, 笹森 文仁
2. 発表標題 OFDMを用いたFM電波によるIoTプラットフォームの設計及び特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 律希, 柴田 凌, 笹森 文仁
2. 発表標題 PORC-OFDMシステムにおける伝送特性の理論解析
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秋葉 祐二, 柴田 凌, 笹森 文仁
2. 発表標題 可視光PORC-OFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 頼田 彩, 柴田 凌, 笹森 文仁
2. 発表標題 超音波通信を用いたPORC-OFDMシステムの適応変調制御
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊 雄大, 柴田 凌, 笹森 文仁
2. 発表標題 電波伝搬実験による8QAM/PORC-OFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 頼田 彩, 笹森 文仁
2. 発表標題 RC-OFDMシステムにおける音響通信プラットフォームの構築及び特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 翔太, 笹森 文仁
2. 発表標題 Android端末を用いた音響通信における8QAM/PORC-OFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高野 晃輔, 仲林 司, 笹森 文仁
2. 発表標題 OFDMを用いたFM電波によるIoTプラットフォームの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田 敏幸, 笹森 文仁
2. 発表標題 PORC-OFDMシステムにおける長距離電波伝搬実験のためのプラットフォーム構築
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲林 司, 後藤 拓馬, 高野 晃輔, 笹森 文仁
2. 発表標題 PORC-OFDMシステムにおけるFM伝送時の特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚本 裕太, 笹森 文仁
2. 発表標題 低密度パリティ検査符号を用いたPORC-OFDMシステムの設計及び特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田 敏幸, 笹森 文仁
2. 発表標題 PORC-OFDMシステムの電波伝搬実験及び特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 翔太, 笹森 文仁
2. 発表標題 Android端末を用いた音響通信におけるPORC-OFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

アウトリーチ活動（計3件）
ひらめき ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～KAKENHI
（研究成果公開促進費 研究成果公開発表(B)）に2021年～2023年で採択され、
「音を見る？光を聴く？電子工作とプログラミングで可視光通信を体験しよう」というプログラムを実施した。

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------