

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02144

研究課題名（和文）光OFDM通信用全光型ノード信号処理技術に関する研究

研究課題名（英文）Research on all-optical signal processing technology for nodes of optical OFDM communication

研究代表者

瀧口 浩一（Takiguchi, Koichi）

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：70633254

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：複数チャネル信号をチャネルポーレート間隔で高密度多重する光直交周波数分割多重（Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM）信号のチャネルを挿入・分離するアド/ドロップマルチプレクサ（Add/Drop Multiplexer: ADM）、複数経路に光OFDM信号チャネルの任意の組合せを出力する波長選択スイッチ（Wavelength Selective Switch: WSS）を集積光回路で実現した。

またADM・WSSの簡易化のため、光OFDM信号の有効時間抽出用光ゲートを省いた構成、OFDM信号処理部に小型光コプラを用いた構成を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

可変容量光OFDM信号用の新規構成の光ADM、光WSSを実現した。チャネル間ガードバンドを削減し、トラヒック、伝送距離の変動に応じてチャネル数、チャネルポーレート・変調フォーマットを自在に変化させることによって必要最小限の帯域を使用し、ネットワーク資源を節約できる次世代の適応型光ネットワークの実現に、主に光回路面から資する。また、全光信号処理・光OFDM通信分野などに新規研究領域をもたらせる。

長期的には、ストレスなく情報を扱えるユビキタス社会、持続可能な低炭素社会の実現に資する。また実用を見込める各種集積光回路技術を含み、社会、産業にも貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Optical orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) utilizes orthogonal sub-carrier channels whose baud rates are equal to their frequency spacing. We developed an integrated-optic add/drop multiplexer (ADM) that could multiplex and demultiplex optical OFDM channels flexibly. We also realized an integrated-optic wavelength selective switch (WSS) that could demultiplex any combination of optical OFDM channels to various output ports.

In addition, we investigated an optical ADM/WSS configuration without high-speed optical gates, which were needed for extracting an effective time domain of an optical OFDM signal. We also adopted a compact optical coupler as a signal processing component for the optical OFDM signal. We carried out these two kinds of investigation with a view to simplifying and downsizing the optical ADM/WSS.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：有線通信方式 光OFDM 光信号処理 光デバイス 集積光回路

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現状の波長分割多重による固定グリッド・ポーレートの光ネットワークと異なり、次世代の適応型光ネットワークでは、チャンネル間ガードバンドを削減し、トラヒック、伝送距離の変動に応じてチャンネル数、各チャンネルのポーレート・変調フォーマットを自在に変化させることによって必要最小限の帯域を使用し、ネットワーク資源を節約する。帯域削減によってハードウェアの稼働数を削減し、必要性能を緩和できるため、消費電力、コストを低減できる。固定光ネットワークと比べ、周波数利用効率を向上できる。

2007年に本格的に研究が始まった光直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) は、複数のサブキャリアチャンネル信号をチャンネルポーレート間隔で高密度に周波数分割多重するため、適応型光ネットワークでのガードバンド削減に適する。次世代光 OFDM 通信の各チャンネル容量は数 10 Gbaud 以上で、総容量は 100 Gbit/s を超える。従って OFDM 信号のチャンネル分離に必須なフーリエ変換を電子回路で行うのは、動作速度限界、消費電力増大のため難しく、光領域での直接処理 (全光処理) が必要となる。固定・可変容量光 OFDM 信号の全光チャンネル分離手法は、応募者を始め各国の研究機関から報告されている。

今後、可変容量光 OFDM 信号の処理デバイスに関して、受信側での単純なチャンネル分離から、ノード用として、チャンネルを柔軟に挿入・分離可能なアド/ドロップマルチプレクサ (Add/Drop Multiplexer: ADM)、複数経路に任意チャンネルの組合せを出力する波長選択スイッチ (Wavelength Selective Switch: WSS) などを全光型で検討・実現する段階に本格的に進展させ、適応型光ネットワークの発展に貢献することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、高拡張性・小型・安定・低消費電力な集積光回路を用いて、適応型光ネットワークに資するループバック型構成の可変容量光 OFDM 信号用 ADM・WSS を実現することを目標とする。また、実現した光 ADM・WSS を用いてサブシステム実験を実施する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、以下の手順で研究を行った。

- (1) 光フーリエ変換 / 光逆フーリエ変換共用ループバック型構成の可変容量光 OFDM 信号用 ADM を実現し、その基本特性を評価した。
- (2) ループバック型構成の可変容量光 OFDM 信号用 WSS を実現し、その基本特性を評価した。
- (3) 当初の予定にはなかったが、可変容量光 OFDM 信号用 ADM・WSS の構成簡易化のため、これまで光 OFDM 信号分離回路の後段に必要であった高速光ゲートを除去する構成について検討を行った。
- (4) 可変容量光 OFDM 信号用 ADM・WSS に関して、可変信号の処理機能の評価 (含サブシステム実験) を行った。
- (5) 当初の予定にはなかったが、可変容量光 OFDM 信号用 ADM・WSS の小型化のため、光フーリエ変換回路に光多モード干渉 (Multi-mode Interference: MMI) カブラを用いた光 OFDM 信号分離集積回路の検討を行った。

4. 研究成果

(1) 可変容量光 OFDM 信号用 ADM

本研究で考案した、可変容量光 OFDM 信号用 ADM の構成を図 1 に示す。光スラスタカプラは、分波時に光フーリエ変換 (OFDM チャンネル分離) を、合波時に光逆フーリエ変換 (OFDM チャンネル合波) を、1 素子で実現可能である。スタカプラでの光フーリエ変換のため、共通入力ポートからの光 OFDM 信号を遅延線アレイに等分配し、シリアル・パラレル変換する。特性の可変化のため、必要な遅延線のみをゲートスイッチで選択する。共通出力ポート以外を、 2×2 光スイッチアレイを介してスプリッタの入力ポートに接続する (ループバック構成)。各 2×2 光スイッチの残り 2 ポート的一方をアド入力、他方をドロップ出力とする。共通入力ポート以外の各サブキャリア信号は、光逆フーリエ変換されて共通出力ポートに合波され、光 OFDM 信号のアド/ドロップが実現される。比屈折率差 $\Delta=1.2\%$ の石英光導波路を用いて作製した。チャンネル数可変範囲 2~9、チャンネル毎の容量可変範囲 10~50 Gbaud、総可変容量処理範囲 20~100 Gbaud の特性を実現した。

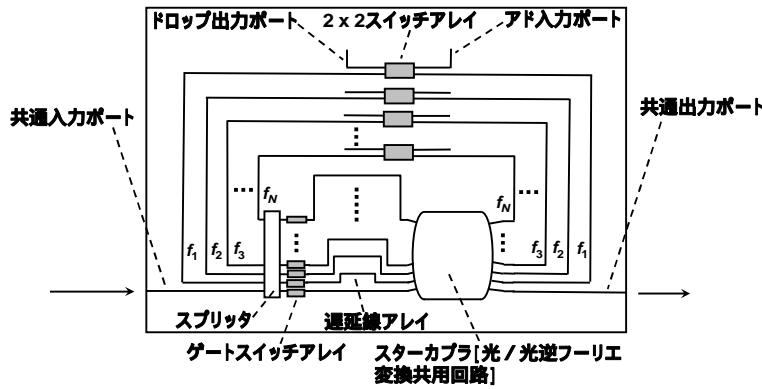


図1 ADMの構成

(2) 可変容量光 OFDM 信号用 WSS

本研究で考案した、光フーリエ変換 / 光逆フーリエ変換共用ループバック型の可変容量光 OFDM 信号用 WSS の構成を図2に示す(1入力2出力)。1x2スイッチの出力位置で最終出力ポートが決まる。 $\Delta=1.2\%$ の石英光導波路を用いて作製した。チャンネル数可変範囲2~4、チャンネル毎の容量可変範囲10~50 Gbaud、総可変容量処理範囲20~100 Gbaudの特性を実現した。

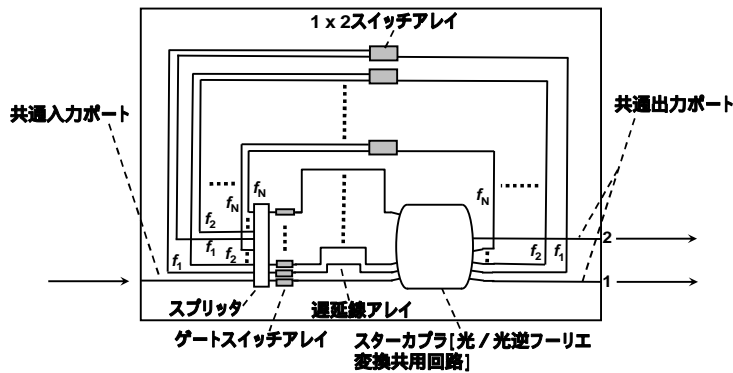


図2 WSSの構成

(3) 光ゲートを除去した可変容量光 OFDM 信号分離回路

これまで光 OFDM 信号分離回路の後段に配置していた有効分離時間抽出のための高速光ゲートを除去して、広帯域受光器(帯域 26.5 GHz)を受信に用いた。これによって有効分離時間領域を電気領域でも保持することができ、分離チャンネルの受信を行うことができる。図3に、10x10スラスタスターカプラ型光フーリエ変換回路構成のゲート除去型集積可変光 OFDM 信号分離回路($\Delta=1.2\%$ の石英光導波路で作製、サイズ 21 x 44 mm²)の構成を示す。最大 10 x 10 Gbaud、5 x 20 Gbaudの光 OFDM 信号を分離できる。

図3の分離回路を用いて分離した、可変チャンネルビットレート光 OFDM 信号(5 x 10 Gbit/s, 5 x 20 Gbit/s)のチャンネルの符号誤り率特性を、それぞれ図4(a), (b)に示す。図4(a)には、参考のため、光ゲート無しで帯域 10.0 GHz の受光器を用いた場合、光ゲート有りの場合(帯域 10.0 GHz の受光器を使用)の特性も示す。注釈のない誤り率は、光ゲート無しで帯域 26.5 GHz の受光器を用いた場合(提案形態)の特性である。提案形態において、全分離チャンネルで 10⁻¹⁰ オーダ以

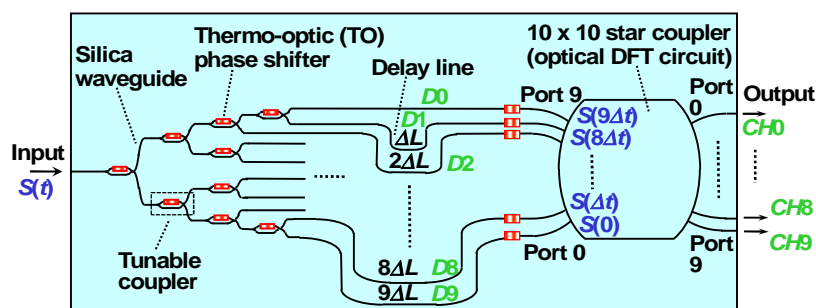


図3 ゲート除去型集積可変光 OFDM 信号分離回路の構成

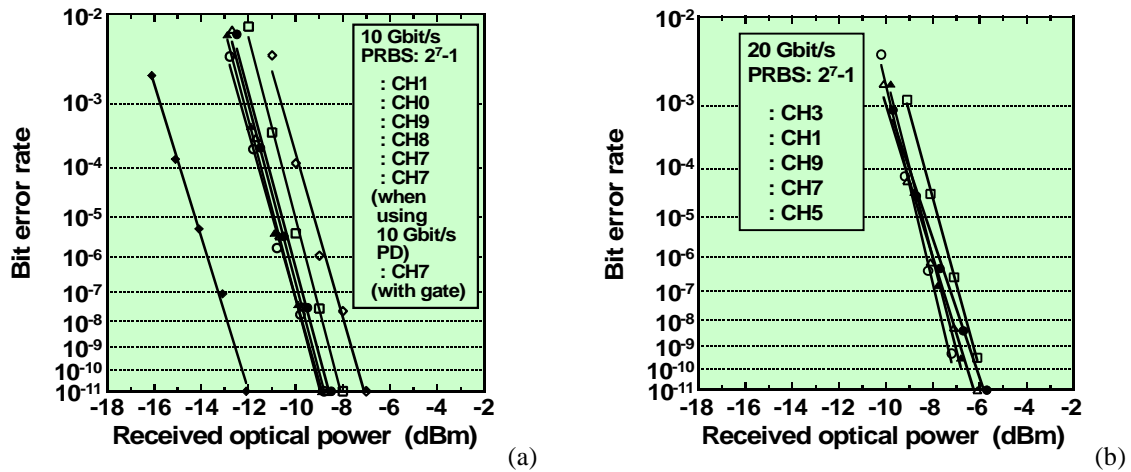


図4 可変チャンネルビットレート光 OFDM 信号の分離チャンネルの符号誤り率特性 [(a) 5×10 Gbit/s、(b) 5×20 Gbit/s]

下の誤り率が得られた。誤り率 10^{-9} における最良特性からのパワーペナルティは、図 4(a)、(b) で、それぞれ 0.03 ~ 0.9 dB、0.3 ~ 1.1 dB であった。図 4(a)において、提案形態に対する、光ゲート無しで帯域 10.0 GHz の受光器を用いた場合のパワーペナルティは 1.8 dB であった (CH7)。また、光ゲートを用いた場合に対する、提案形態のパワーペナルティは 3.1 dB であった (CH7)。

本手法によって ADM・WSS の回路構成を簡易化できる。以下の(4)の検討 (ADM・WSS の可変信号処理機能の評価) において、本手法を適用した。

(4) 可変容量光 OFDM 信号用 ADM・WSS の可変信号の処理機能評価

ADM 回路に関して、可変信号 (20 ~ 100 Gbaud) の処理機能の評価を完了し、機能を実現した。WSS 回路に関しては、可変信号 (20 ~ 100 Gbaud) の処理機能の評価は現時点で未完了であり、現在も継続して実施中である。

(5) 光 MMI カプラ型光 OFDM 信号分離回路

Y 分岐導波路 2 段縦続接続型の 1×4 スプリッタ、4 遅延線アレイ、 4×4 MMI カプラ型光フーリエ変換回路からなる光 OFDM 信号分離回路を、石英光導波路を用いて作製、実現した。導波路の Δ は 2.6 %、MMI カプラ、分離回路のサイズはそれぞれ $32 \times 1,150 \mu\text{m}^2$ 、 $14 \times 24 \text{mm}^2$ である。小型である MMI カプラの使用によって、これまで検討してきた 2×2 カプラ編み込み型光 OFDM 信号分離回路、およびスラプスターカプラ型光 OFDM 信号分離回路より回路サイズを低減できた。

またこの分離回路を用いて、4 ch \times 25 Gbaud の光 OFDM 信号のチャンネル分離を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4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 K. Takiguchi and N. Nishio	4. 巻 12000
2. 論文標題 Direct demultiplexing method of terahertz-wave multiple carrier channels in terahertz domain utilizing terahertz-wave asymmetric interferometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SPIE Proceedings	6. 最初と最後の頁 01-05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2608541	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Takiguchi and N. Nishio	4. 巻 12000
2. 論文標題 Pulse amplitude modulation communication in terahertz-band using asymmetric Mach-Zehnder interferometer-type optical signal emulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SPIE Proceedings	6. 最初と最後の頁 D1-D5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2607289	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Takiguchi and H. Masaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Gate-free integrated-optic tunable filter for demultiplexing various capacity optical OFDM signals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 2319-2329
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OSAC.431693	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 K. Takiguchi	4. 巻 11685
2. 論文標題 Terahertz-wave Nyquist wavelength division multiplexing communication utilizing integrated-optic spectrum synthesizer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SPIE Proceedings	6. 最初と最後の頁 M1-M5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2577087	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Takiguchi	4. 巻 3
2. 論文標題 40 Gsymbol/s channel-based Nyquist wavelength division multiplexing communication in a terahertz-band using optical-domain reception signal processing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 2308-2319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.396436	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 K. Takiguchi and Y. Ikeyama	4. 巻 31
2. 論文標題 Tunable optical OFDM demultiplexer utilizing slab star coupler-based optical DFT circuit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 1327-1330
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LPT.2019.2926334	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Takiguchi	4. 巻 11309
2. 論文標題 Integrated-optic spectrum synthesis circuit for manipulating 64 frequency components	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 113090F1-F4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2544569	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件(うち招待講演 1件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 瀧口浩一, 西尾望
2. 発表標題 THz帯マルチキャリア信号のTHz領域直接分離手法に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Takiguchi and N. Nishio
2. 発表標題 Direct demultiplexing method of terahertz-wave multiple carrier channels in terahertz domain utilizing terahertz-wave asymmetric interferometer
3. 学会等名 Photonics West 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Takiguchi and N. Nishio
2. 発表標題 Pulse amplitude modulation communication in terahertz-band using asymmetric Mach-Zehnder interferometer-type optical signal emulator
3. 学会等名 Photonics West 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古河大和, 小田村夏樹, 瀧口浩一
2. 発表標題 光ゲートを除去した集積型光フーリエ変換回路を用いた光OFDM信号分離の検討
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧口浩一
2. 発表標題 非対称マツハツェンダ干渉計型光信号エミュレータを用いたTHz帯パルス振幅変調通信
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧口浩一, 正木秀明
2. 発表標題 可変チャンネルシンボルレート光OFDM 信号分離用ゲート除去型集積可変光フィルタ
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takiguchi and H. Masaki
2. 発表標題 Integrated-optic gate-free tunable filter for demultiplexing various channel symbol rate OFDM signals
3. 学会等名 Optical Fiber Communication (OFC) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧口浩一, 正木秀明
2. 発表標題 光ゲートなしで集積型光フーリエ変換フィルタのみを用いた光OFDMチャンネル分離実験
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takiguchi
2. 発表標題 Terahertz-wave Nyquist wavelength division multiplexing communication utilizing integrated-optic spectrum synthesizer
3. 学会等名 Photonics West 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧口浩一, 正木秀明
2. 発表標題 ループバック構成を持つ10 GHz間隔光周波数コム処理用集積型光スペクトルシンセサイザ
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧口浩一
2. 発表標題 可変容量光OFDM信号サブキャリアチャネル分離用光回路
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧口浩一, 西尾望
2. 発表標題 テラヘルツ帯ナイキストWDM通信の特性制限要因に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takiguchi
2. 発表標題 Integrated-optic spectrum synthesizer with loop-back paths for processing 10 GHz-spaced frequency comb
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takiguchi
2. 発表標題 MMI coupler-type optical DFT filter for demultiplexing 25 Gsymbol/s sub-carrier-based optical OFDM signal
3. 学会等名 FiO/LS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Takiguchi
2. 発表標題 Integrated-optic spectrum synthesis circuit for manipulating 64 frequency components
3. 学会等名 Photonics West 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takiguchi and N. Nishio
2. 発表標題 Flexible data rate THz-wave communication using Nyquist pulses and optical-domain reception signal processing
3. 学会等名 OFC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧口浩一
2. 発表標題 4 x 25 Gsymbol/s光OFDM信号分離用MMIカプラ型DFT光フィルタ
3. 学会等名 電気関係学会、関西連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 正木秀明、瀧口浩一
2. 発表標題 可変光OFDM信号分離用集積型光フィルタの性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会、総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧口浩一、西尾望
2. 発表標題 ナイクストパルスと光領域受信信号処理を用いた可変容量テラヘルツ波通信
3. 学会等名 電子情報通信学会、総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 直交周波数分割多重信号分離システム	発明者 瀧口浩一	権利者 立命館大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-205967	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

立命館大学 理工学部 電気電子工学科 瀧口浩一 https://research-db.ritsumei.ac.jp/rithp/k03/resid/S000982 立命館大学 理工学部 電気電子工学科 瀧口浩一 http://research-db.ritsumei.ac.jp/Profiles/96/0009524/profile.html
--

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