

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01447

研究課題名(和文) リング共振器型分布ファイバラマンレーザー増幅を用いた長距離光中継伝送方式の研究

研究課題名(英文) Long-haul optical transmission using distributed Raman ring laser amplification

研究代表者

佐野 明秀 (Sano, Akihide)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：20731904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：基幹系光ファイバネットワークを構成する光増幅中継伝送系の大容量化に向けて、リング型分布ラマンリングレーザー増幅(DRRLA)を提案し、特性評価を行った。DRRLAは、双方向の伝送ファイバを用いてリング共振器を形成し、2次励起光のみを外部から入力することにより一次励起光をリング内で発生させ、信号光を増幅する方式であり、簡易な構成で低雑音光増幅を実現することができる。本研究では、基本構成及びその改良構成を提案し、10,000 km級の長距離伝送において有効性を実証した。また、利得帯域の広帯域化、前方ラマン増幅に起因する偏波クロストークキャンセラの実現にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分布ラマン増幅(DRA)は、基幹系光通信システムの大容量化に向けて効果的な技術であり、信号光に対して約100 nm短波長側の1次励起光を伝送ファイバの後端から入力する後方一次励起の構成がすでに実用化されている。しかしながら、DRAの高性能化に向けた検討に関しては、励起光のRINや励起系構成の複雑化などの制限により、長らく停滞が続いてきたのが現状である。

こうした状況において、本研究では高次ラマン増幅と前方ラマン増幅の効果を簡易な構成で実現できることを実証したという点で重要な成果である。これは、基幹系光通信システムのさらなる大容量化につながる技術であり、大きな進展である。

研究成果の概要(英文)：Distributed Raman ring laser amplification (DRRLA) was proposed in order to extend the transmission capacity of optically-amplified transmission systems in optical fiber transport networks, and the performance of the proposed DRRLA was evaluated. DRRLA utilizes bidirectional transmission fibers to form a ring resonator, which is pumped by second-order pump lights to generate a first-order pump light. This scheme realizes low-noise signal amplification with a simplified configuration. We proposed basic and improved configurations of DRRLA, and its feasibility was confirmed in the transmission experiments over about 10,000 km. Moreover, the gain bandwidth extension and the polarization crosstalk canceller were also successfully demonstrated.

研究分野：光通信システム

キーワード：ラマン増幅 光通信方式 コヒーレント受信 光増幅器 光ファイバ

1. 研究開始当初の背景

5Gをはじめとする様々な新規ネットワークサービスの登場により、コアネットワークにおけるデータ通信量の増加が続いており、基幹系光通信システムの伝送容量拡大への期待が高まっている。伝送容量拡大のためには高次多値変調技術の導入が不可欠であり、このため光増幅中継伝送系の更なる低雑音化が課題となっている。

光増幅中継系の低雑音化に向けては分布ラマン増幅(DRA: Distributed Raman Amplification)の適用が効果的である。現状では、信号光に対して約100nm短波長側の1次励起光を伝送路の出力端から入力する後方1次励起構成が実用化され、広く導入が進んでいる。一方、DRA中継系の雑音特性をさらに改善するため、伝送路の入力端からも励起光を入力する前方ラマン増幅や、一次励起光のさらに短波長側に1次励起光をラマン増幅するための2次励起光を追加する構成が検討されている。このようなDRA高性能化の検討においては、励起光数の増加による増幅中継系の複雑化が課題である。また、前方ラマン増幅では、励起光の相対強度雑音(RIN)が信号光に影響を及ぼすRINトランスファーを抑制することが大きな課題である。

前方ラマン増幅の実現に向けては、RINの小さいインコヒーレント光源を一次励起光に用いることが提案されている。この場合、インコヒーレント光源のみでは十分なラマン利得を得るのが困難なため、高次励起も併用した構成が提案されている[引用]。また、伝送ファイバの両端に一次励起光波長を反射するファイバグレーティングを配置して伝送ファイバを含む共振器を構成し、伝送ファイバ中で1次励起光を発生させ、これにより信号光を増幅する分布ラマンリングレーザー増幅(Distributed Raman Laser Amplification, DRLA)構成も検討されており、注目を集めている[引用]。

一方、前方ラマン増幅による信号劣化をデジタル信号処理により低減する方式についても検討が進んでいる。具体的には、前方励起光源のRINによる位相雑音をパイロットトーンを用いて低減する方式が提案され、実証が進んでいる[引用]。

2. 研究の目的

基幹系光ファイバ増幅中継伝送システムの長距離化・大容量化に向けて、リング共振器型のDRLA方式を新規に提案し、その動作を実証することを目的とする。DRLAは、光信号対雑音比(OSNR)の改善と非線形光学効果の抑圧という面において有力な方式であるといえる。一方で、現状のDRLAでは励起光の相対強度雑音(RIN)に起因する伝送劣化が生じることが明らかになっている。そこで本研究では、双方向の伝送ファイバを利用してDRLAの共振器構成をリング型にすることを提案し、これにより伝送劣化の解消を目指す。提案構成の基本特性を明確化するとともに、デジタルコヒーレント通信方式に基づく伝送実験を実施することにより伝送性能を総合的に検証する。これらの取り組みにより従来方式に比べ伝送距離を2倍以上に延伸することを目標とする。

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) リング共振器型のDRLAを提案し、光増幅基本特性の評価を行うとともに、長距離伝送実験を実施して動作検証を実施した。
- (2) (1)の検討の結果明らかになった前方2次励起光のRINによる特性劣化を抑圧し、伝送特性を向上させるための改良構成を考案し、その特性評価を行った。
- (3) 多波長の波長多重伝送に対応するために、リング共振器内で複数の一次励起光を発生させることによる広帯域化を実証した。
- (4) 前方ラマン増幅を用いた中継伝送系において伝送品質劣化の要因となる励起光RINに起因する偏波クロストークをデジタル信号処理により補償する偏波クロストークキャンセラを提案し、前方ラマン伝送実験を行ってその効果を検証した。

4. 研究成果

- (1) リング共振器型DRLA増幅中継系の基本動作確認

図1に、本研究で提案したリング型分布ラマンレーザー増幅(Distributed Raman Ring Laser Amplification, DRRLA)中継系の構成を示す。本構成ではWest to East(WtoE)系およびEast to West(EtoW)系の両方向の伝送路をペアで利用する。各方向の伝送ファイバに両方向から2次励起光を入射し、ファイバ中で1次励起光を発生させる。1次励起光は各伝送ファイバの間に設けたアイソレータ及び光フィルタにより両ファイバ中を信号光と逆方向に周回し、信号光をラマン増幅する。本構成では、信号光を増幅する1次励起光が信号光に対して逆方向に伝搬するため、一次励起光から信号光へのRINトランスファーを低減しつつ、伝送ファイバの全領域にわたって光増幅を行うことが期待できる。

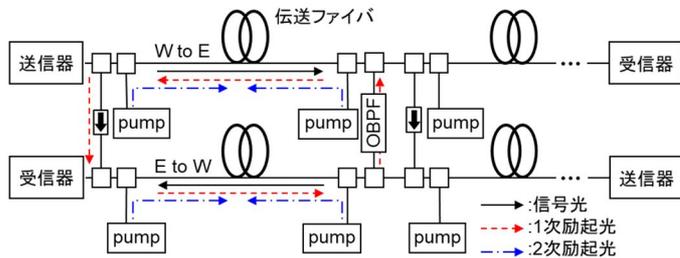


図1 リング型分布ラマンレーザー増幅中継伝送システムの構成

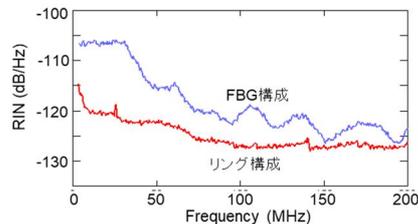


図2 RIN測定結果

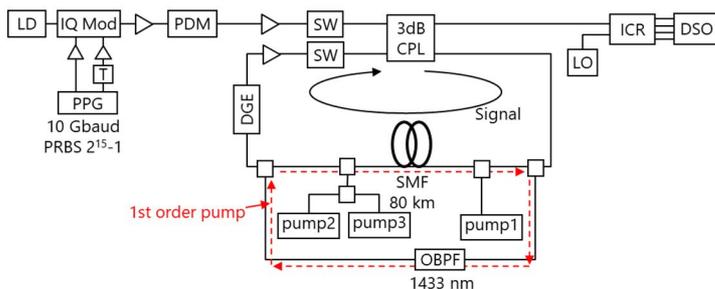


図3 実験系

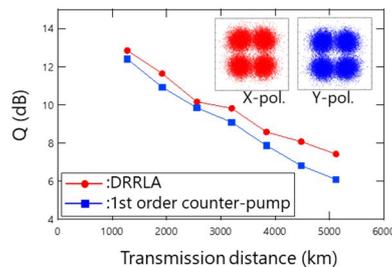


図4 Q値の伝送距離依存性

図2に、**40 km**のシングルモードファイバ(SMF)伝送路におけるRIN測定結果を示す。比較のために、従来構成のDRRLA (FBG構成)を用いた場合の結果を合わせて記載している。提案構成ではDCから**200 MHz**までの全周波数帯域にわたってRINの抑圧が確認でき、特に**30 MHz**以下程度の低周波領域でのRIN低減が大きく、期待された動作が実現されていることが確認できる。

さらに、本DRRLAを用いた長距離伝送実験により、提案構成の性能評価を行った。図3にその実験系を示す。伝送ファイバは**80 km**のSMFとし、片方向ファイバのみの簡易構成で実験を行った。信号は波長**1531 nm**の**10 Gbaud**偏波多重QPSK信号を用い、周回伝送系による長距離伝送を行い、デジタルコヒーレント受信により符号誤り率特性の評価を行った。図4に、**on-off**ラマン利得が**12.6 dB**の時の誤り率から計算したQ値の伝送距離依存性を示す。通常の後方一次励起の場合に比べ、提案構成では**5120 km**の伝送距離において**1.2 dB**のQ値改善が得られており、提案構成の優位性を確認できる。

(2) 前方励起2次励起光のRINによる伝送劣化を抑圧する改良構成

(1)で述べたDRRLAを用いた中継伝送実験においては、前方2次励起光源として、RINの小さいファブリ・ペロー型レーザーダイオード(FP-LD)を用いた。一方、その後の検討においてFP-LDの代わりに、後方一次励起構成の実用システムにおいて通常用いられているファイバグレーティング付LD(FBG-LD)を用いると、伝送特性に劣化が生じることが明らかになった。これは、FBG-LDのRINがFP-LDに比べて大きいことによるものである。広帯域増幅や長期安定性を考慮するとFP-LDには制約もあるため、前方2次励起光源のRINによる伝送劣化を回避する改良構成について、新たに検討を行うこととした。本改良構成では、前方励起光源を省略することにより伝送ファイバの前半部分での利得が不足して信号パワーが減衰するのを抑えるため、リング内で発生する1次励起光が両方向に伝搬可能となるようにして、前方利得によりファイバ前半での信号パワーの減衰を抑える構成とした。

図5に、改良構成を用いた場合の**80 km SMF**中での信号パワーの変化の測定結果を示す。改

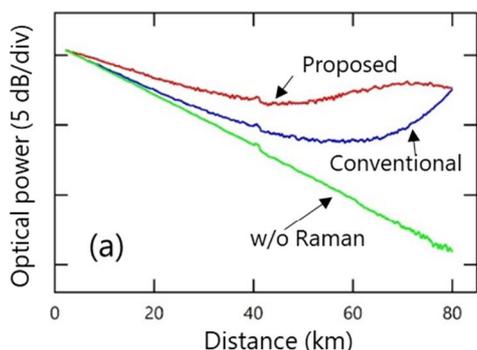


図5 ファイバ中での信号光パワーの変化

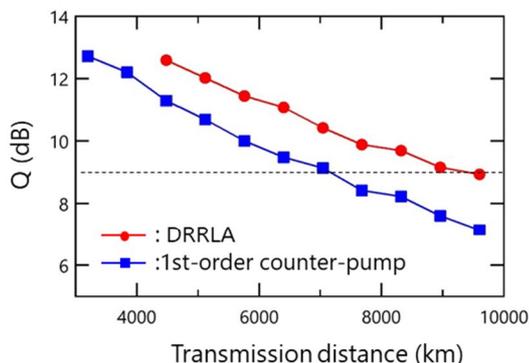


図6 改良構成を用いた伝送実験におけるQ値測定結果

良構成では、波長 **1360 nm** の 2 次励起光をファイバ出力端のみから入力して、一次励起光をリング共振器内で発生させた。1 次励起光の波長はラマン利得が最大となる約 **1457 nm** 程度であり、リング内で両方向に伝搬するため、図 5 においてファイバ入力端近傍においても利得が発生していることが確認できる。通常の後方 1 次励起の場合と比較すると、信号パワー変化は **2.8 dB** 減少しており、改良構成を用いることにより光信号対雑音比の向上が可能であることが確認できる。

この改良構成を用いて波長 **1557 nm** の **9.6 Gbaud** の偏波多重 **QPSK** 信号の長距離伝送実験を行った結果を図 6 に示す。提案構成を用いた場合には **Q** 値の限界を **9.1 dB** ($BER=2.2 \times 10^{-3}$) として **9,200 km** の長距離伝送が実現されており、改良前の **DRRLA** (図 4) に比べて大幅な伝送距離の延伸が可能であることが確認できる。

(3) 利得帯域の拡張

これまでの検討では、リング内で発生させる 1 次励起光は 1 波長のみであったため、ラマン増幅の利得帯域としては **20 nm** 程度に限られてしまうため、多波長の **WDM** 伝送に適用することが困難であった。そこで、本検討では **DRRLA** 内で複数の 1 次励起光を発生させることにより利得帯域の拡大に向けた検討を行った。

図 7 に広帯域 **DRRLA** を用いた伝送実験の実験系を示す。本実験では、実験機材の都合上、(1)で説明した双方向から 2 次励起光を入力する構成を用いた。この構成では、リング内で 2 波の励起光を同時発振させることが可能である。2 波の中心波長はカスケードに接続した **FBG** で設定し、その中間の光減衰器で 2 波長間のパワー比率を制御することができる構成とした。

図 8 (a) に広帯域化した **DRRLA** の on-off ラマン利得の波長依存性を示す。2 波長のパワー比率を最適化することにより、利得帯域を従来の 2 倍の約 **42 nm** まで拡張できることが確認できる。図 8 (b) にこの利得帯域の短波長側、中央付近、長波長側の 3 波長における **9.6 Gbaud DP-QPSK** 信号の長距離伝送特性を示す。3 波長ともほぼ同等の伝送特性が実現可能であることを確認できる。以上より、リング内での 2 波長発生により、**C** バンドをカバーするのに十分な増幅帯域を実現できることが確認でき、発生させる 1 次励起光の波長数を増やすことにより更なる広帯域化の見通しが得られた。

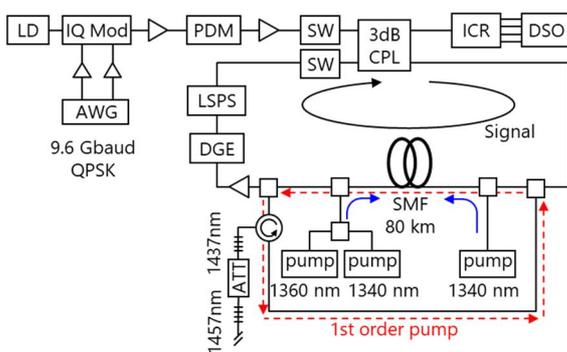


図7 帯域拡張DRRLAを用いた伝送実験系

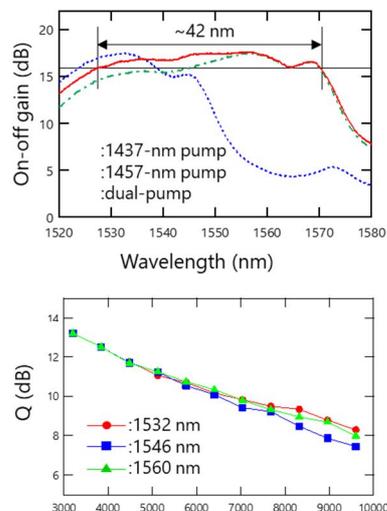


図8 帯域拡張DRRLAを用いた伝送実験結果
(a) on-offラマン利得の波長依存性
(b) Q値の伝送距離依存性

(4) 偏波クロストークキャンセラ

信号光と同方向に伝搬する励起光が存在する分布ラマン増幅系においては、励起光の **RIN** が信号光の品質に影響を及ぼすことが課題となる。特に、励起光の **RIN** により信号光の偏波状態が変動するため、偏波多重された信号に対してはこれがクロストークになり、伝送特性に影響する。本研究では、受信側のデジタル信号処理部においてこれを抑圧する偏波クロストークキャンセラ(**PCC**)について検討を行った。

図 9 に **PCC** の構成を示す。受信側でのデジタル信号処理部において波長分散補償、適応等化、キャリア位相補償を行った後の信号に対して、**X** 偏波・**Y** 偏波間のクロストークを補償するための 1 タップのバタフライ型適応等化器を適用することにより偏波クロストークの補償を行っている。適応等化器のタップ係数は判定指向型の **RLS(Recursive Least Square)** アルゴリズムにより制御することとした。

PCC の効果を確認するために、**80 km** の **SMF** を用いた伝送実験を実施した。伝送ファイバには信号光と同方向に一次励起光を入射し、前方ラマン利得のみが発生する伝送路において性

能評価を行った。図 10 に、**9.6 Gbaud** 偏波多重 **QPSK** 信号の **Q** 値依存性を示す。**640 km** 以上の長距離伝送において、**PCC** を適用することにより **Q** 値が **1.2 ~ 1.4 dB** 程度改善しており、その有効性を確認できる。

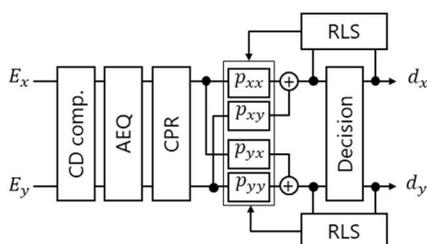


図9 偏波クロストークキャンセラの構成

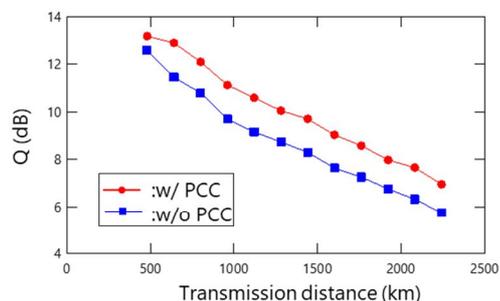


図10 偏波クロストークキャンセラを用いた伝送実験結果

(5) まとめと今後の展望

本研究では、**DRA** 中継系の高性能化に向けて、双方向の伝送ファイバを利用してリング共振器を形成し、その中で信号光増幅用の **1** 次励起光を生成する **DRRLA** 中継系を提案し、その動作検証を行った。各ファイバを双方向から **2** 次励起する構成では、前方 **2** 次励起光の **RIN** による特性劣化があることが明らかになったが、それを克服する改良構成を考案し、**10,000 km** 級の長距離伝送に適用できることを実証した。また、多数の波長を伝送する波長多重伝送に適用可能な広帯域化にも成功した。これらの成果は従来の **DRLA** の伝送性能を大幅に改善する可能性を有している。

今後に向けては、まず数 **10** 波級の多波長伝送における伝送性能の明確化が課題である。このような多波長伝送においては信号パワーの増大による増幅特性への影響を詳しく解析する必要がある。また、本研究では **80 km** の中継間隔において検証を実施したが、中継間隔の更なる拡大に向けた励起光パワーの必要条件についても今後明らかにしていきたい。

< 引用文献 >

- M. Morimoto et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 29, no. 7, pp. 567-570, 2017.**
- G. Rizzelli et al., Optics Express, vol. 24, no. 25, pp. 29170-29175, 2016.**
- G. Vedala et al., OFC2019, Paper Tu3F.7, 2019.**

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Sano Akihide, Ura Katsuya	4. 巻 10
2. 論文標題 Long-haul transmission using counter-pumped distributed Raman ring laser amplification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2020XBL0122	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 前野一誠、佐野明秀	4. 巻 J104-B
2. 論文標題 位相共役ツイン波における信号多重化方式とパルス形状の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Sano Akihide	4. 巻 9
2. 論文標題 Polarization crosstalk canceller for forward-pumping distributed Raman amplification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 288~293
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2020XBL0030	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11件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐野明秀、裏克也
2. 発表標題 後方2次励起型分布ラマンリングレーザ増幅を用いた長距離伝送
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 佐野明秀
2. 発表標題 分布ラマン増幅を用いた光増幅中継伝送
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 佐野明秀、裏克也
2. 発表標題 分布ラマンリングレーザ増幅中継系の利得帯域拡大に関する検討
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 小川誉行, 佐野明秀
2. 発表標題 リング型分布ラマンリングレーザ増幅における前方2次励起光RINの影響
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 佐野明秀
2. 発表標題 前方ラマン増幅を用いた多中継伝送における偏波クロストーク補償
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 前野一誠, 佐野明秀
2. 発表標題 位相共役ツイン波伝送におけるパルス形状とシンボルレートの影響
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 佐々木大地, 佐野明秀
2. 発表標題 マルチバンドCAP を用いた高速POF伝送
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 佐野明秀, 小川誉行
2. 発表標題 リング型分布ラマンレーザー増幅を用いたDP-QPSK長距離伝送
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 2019年

1. 発表者名 Akihide Sano, Takayuki Ogawa
2. 発表標題 Long-Haul Repeatered Transmission Using Distributed Raman Ring Laser Amplification with Second-Order Bidirectional Pumping
3. 学会等名 OECC/PSC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野明秀
2. 発表標題 リング型分布ラマンレーザー増幅中継系のRIN特性評価
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 2018年

1. 発表者名 佐野明秀、小川誉行、鈴木駿
2. 発表標題 リング型分布ラマンレーザー増幅中継系におけるDP-QPSK伝送
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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