

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01330

研究課題名（和文）光通信の大容量化に向けた広帯域パラメトリック光増幅および波長変換技術の研究

研究課題名（英文）Research on broadband optical parametric amplification and wavelength conversion for large capacity optical communication

研究代表者

遊部 雅生（Asobe, Masaki）

東海大学・総合科学技術研究所・教授

研究者番号：60522000

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）：非対称な位相整合特性のマルチQPM素子にSH光用ミラーを設けた反射型のモジュールを用いて励起光発生と信号の増幅を1つの素子で実現した。さらに変調信号光の増幅を試み、単一の素子を用いたOPAにおいて光通信に適用可能な信号品質が得られることを始めて実証した。また、EDFAの帯域外のOPAを用いて光ファイバの損失を補償して中継伝送を始めて実証した。Sバンド信号を中継増幅し、中継後はLバンド帯アイドラ光を伝送することで位相共役効果による分散補償の効果を実証した。さらに中継増幅後のSバンド信号を再び伝送する構成についても検証し、適切な分散補償を併用することで伝送距離の延伸を始めて実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年通信分野の情報トラフィックはIoTなどの普及により目覚ましい勢いで増大しており、通信インフラを支える光通信の大容量化が急務となっている。現在の光通信システムの周波数帯域は中継器に用いられるEDFAの帯域で制限されているが、本研究の成果はこの制限を取り払い、光ファイバの低損失帯域である1.3-1.8 $\mu\text{m}$ での帯域での中継増幅を用いた伝送の可能性を拓くものであり、光通信の広帯域化による大容量化を実現するうえで大きな学術的、社会的意義がある成果が得られたと言える。また本研究成果を利用して炭化水素系ガスの1.7-1.8 $\mu\text{m}$ 帯の吸収スペクトルの計測も実現され、ガスセンシングの分野の発展にも貢献できた。

研究成果の概要（英文）：Using a reflective module with an SH light mirror attached to a multi-QPM device with asymmetric phase matching characteristics, we achieved pumping light generation and signal amplification in a single device. Furthermore, we attempted to amplify the modulated signal light and demonstrated for the first time that OPA using a single device can provide sufficient signal quality applicable to optical communications. We also demonstrated for the first-time repeated transmission by compensating for optical fiber loss using OPA outside the EDFA gain band. By amplifying the S-band signal and transmitting the L-band idler light after the OPA, we demonstrated dispersion compensation due to the phase conjugation effect. We also verified a configuration for retransmitting the S-band signal after the OPA and demonstrated that the transmission distance could be extended by using appropriate dispersion compensation.

研究分野：光通信、光エレクトロニクス

キーワード：光通信 大容量 広帯域 光増幅 波長変換 光パラメトリック ガス分光 センサ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、通信設備によって運ばれる情報トラフィック量は年率 1.4 倍程度の勢いで増え続けており、今後 IoT などのモノに紐づく通信の拡大により、さらなる大容量化が必要である。通信システムで伝送可能な通信量は単位周波数あたりの情報量である周波数利用効率 (bit/s/Hz) と使用可能な周波数帯域(Hz)の積で決まり、これまで周波数利用効率の向上により大容量化が実現されてきた。しかしながら、シャノンの理論によれば、周波数利用効率には信号対雑音の比率である SNR で決まる限界があり、光ファイバの非線形光学効果による SNR の上限が観測されている。すなわち、光通信システムにおける周波数利用効率はその理論的な限界に迫りつつある。そこで、通信システムの伝送容量をさらに向上するためには、周波数帯域の拡大が重要な課題と言える。

本研究では光パラメトリック増幅器の広帯域化の面から上記課題の解決を図るために着想したものである。現在の光通信では、波長多重方式が用いられており、中継用装置として光信号を光のまま一括増幅することのできる光増幅器が用いられている。現在の基幹系商用システムでは 1530-1605nm で動作するエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)が用いられている。現在の光通信システムの周波数帯域は EDFA の動作帯域によって制限されている。これは増幅に用いている希土類の特性によるもので任意の波長帯の増幅を実現することは困難である。波長 1300nm-1800nm の範囲では光ファイバの伝送損失が小さく、これらの波長の任意の波長帯を増幅する光増幅器が実現されればそのインパクトは極めて大きい。一方で光通信用半導体レーザーは、各種のガスセンサ用光源としても用いられている。特に波長 1700nm 帯においては各種の炭化水素系ガスが倍音吸収を示すと考えられるが、この波長帯における波長可変レーザーが市販されていないため、各種ガスの吸収スペクトルの詳細な計測を行うことができない。一方 1300-1600nm 帯の光通信波長帯では高性能な波長可変レーザーが実現されており、1700-1800nm への波長変換が可能になれば、炭化水素系ガスの吸収スペクトルの詳細な測定を実現でき、ガスセンシング分野の発展にも寄与が期待された。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は光通信の大容量化に資するため、波長 1300nm-1800nm の任意の波長帯を増幅可能な新規光増幅器を実現することにある。上記目的を達成するため、本研究では周期分極反転 LiNbO<sub>3</sub>(PPLN)導波路の分極反転構造に独自の連続的な位相変調を施し、複数の位相整合波長が得られるマルチ QPM 素子を用い、通信波長帯レーザーの第 2 高調波発生(SHG)による励起光の発生と光パラメトリック増幅を 1 つの素子で実現する構成を提案した。また本技術によれば信号光を任意の波長帯のイドラ光に変換することが可能であり、光通信用波長可変光源の波長変換により、従来詳細な計測が行われていない波長帯のガス吸収スペクトルを計測することも可能になる。しかしながら、本研究開始までの検討により以下のような課題があることが分っていた。(1)最適化されたマルチ QPM 素子の設計・作製による効率の向上と増幅動作の実証 (2)励起光を効率良く導波路へ入射するための構造提案と実証 (3)光ファイバの低損失領域をカバーする広帯域増幅特性の実証 (4)イドラ光を利用したガス吸収分光等の応用の実証。本研究では研究開始までの原理確認実験で明らかとなった課題を解決し、光ファイバの低損失波長領域の任意の波長帯を増幅可能な光増幅器の基本的な動作を実証することで、将来の光通信ネットワークのさらなる大容量化に資するとともに、従来不可能だった 1700nm 帯における各種環境ガスの吸収分光を可能にすることを目標とした。

### 3. 研究の方法

研究の目的に掲げた各課題の解決に向けて、以下のような方法で研究を進めた。

#### (1) 最適化されたマルチ QPM 素子の設計・作製による効率の向上と増幅動作の実証

本研究の提案では 2 つの位相整合ピークを持つマルチ QPM 素子が必要となるため、分極反転構造に連続的な位相変調を施し、所望の位相整合曲線が得られるように位相変調関数を最適化する方法を用いて 2 ピーク素子の構造を設計・素子作製を行った。2 ピークのマルチ QPM 素子では従来の 3 ピーク素子に比べて 1.5 倍の変換効率が得られ、SHG 過程、増幅過程の双方の効率が向上するため、利得の向上が期待できる。また SHG 過程における励起光の発生において、基本波の強度が十分に大きい場合は高い変換効率が得られるため、SHG 過程の素子の効率は必ずしも高くなくて良いことが考えられる。一方でパラメトリック増幅過程に関してはより高い変換効率が求められる。この考えに基づいて、SHG 過程に用いられる位相整合ピークを相対的に小さく抑え、光パラメトリック増幅に用いる位相整合ピークの強度が大きくなる非対称な位相整合曲線をもつ素子を設計する方法についても検討した。

#### (2) 励起光を効率良く導波路へ入射するための構造提案と実証

従来は、LiNbO<sub>3</sub> 導波路中で SHG 過程で発生した励起光を光ファイバで取り出し、反射させて再び導波路へ入射していたため、励起光の結合損失が大きく、変換効率の低下を招いていた。この問題を解決するため、導波路の片端面に第二高調波(SH 光)波長のみを反射するダイクロイックミラーを直接蒸着し、SH 光を反射する構造を検討した。2 ピーク素子の導波路端面にミラーを形成し、その後光ファイバを取り付けた光ファイバ入出力型モジュールを作製した。本構成では励起に用いられる SH 光が導波路から取り出されることがなく、直接反射されるため、従来の原理確認実験で生じていた SH 光の損失が大幅に低減される。これにより高い波長変換効率、増幅利得が期待できる。作製したモジュールを用いて、SH 光発生と光増幅を 1 つのマルチ QPM モジュールで行う増幅特性の評価実験を行い、励起光の反射構造による増幅利得の向上の効果を検証した。

### (3) 光ファイバの低損失領域をカバーする広帯域増幅特性の実証

光パラメトリック増幅では 1300-1800nm の任意の波長を増幅することが可能であり、その実証が望まれる。そこで、励起光の発生とパラメトリック増幅を個別の PPLN 導波路を用いて広帯域増幅特性の実証を行った。個別の導波路の温度を変化させることによって位相整合波長を調整できるため、位相整合波長と励起光波長の離調を容易に変更できる。SHG 過程で発生する励起光を導波路の外に取り出すため、効率の観点では不利となるが、増幅用の素子として 1 つの位相整合ピークを持つ QPM 素子を用いることで、素子単体の効率は 2 ピークの素子に比べて大きくなる。このことにより励起光の損失による利得の減少を補うことが可能となる。上記の構成により広帯域光増幅を実証した。さらにデータ変調された信号光を増幅・波長変換し、信号光・アイドラ光が光通信に適用可能な信号品質を有しているかの実証実験を行い光パラメトリック増幅器の中継増幅器としての有効性を検証した。

### (4) アイドラ光を用いたガス吸収スペクトル計測の実証

多くの炭化水素系ガスは中赤外波長である 3400nm 帯において分子振動の基本振動による極めて強い吸収を示すが、高価で特殊な検出器が必要などの課題があり、より簡便な構成でのガスセンシングが望まれている。1700nm 帯は 3400nm 帯の倍の光周波数に相当するため、倍音振動による吸収が期待できる。1400nm 帯の波長可変光源を、1700nm 帯へ変換し、これまでにこの波長帯における吸収スペクトルが明確になっていないガス種の吸収スペクトルの計測を行い、近赤外半導体レーザを用いたガスセンサの実現可能性を検証した。当初の計画では励起光の波長変調を用いた波長変調分光法による測定を計画していたが、励起光の波長変調幅に比して測定対象の吸収幅が広いと、波長変調分光法が必ずしも有効ではないと予想された。そこでガスの吸収波長に光源波長を固定してガス濃度に対する吸収強度の変化を評価し、近赤外半導体レーザを用いたガスセンサの実現可能性を検証した。

## 4. 研究成果

### (1) 最適化されたマルチ QPM 素子の設計・作製による効率の向上と増幅動作の実証

本研究の提案しているマルチ QPM 素子を往復で用いて、励起光の発生とパラメトリック光増幅を従来よりも高効率化を行うためには 2 つの位相整合ピークを有する波長変換素子が必要となる。上記目的のため 2 ピークマルチ QPM 素子の設計・作製を行った。応募者らが考案した分極反転構造に連続的な位相変調を施し、所望の位相整合曲線が得られるように位相変調関数を最適化する方法を用いて 2 ピーク素子の分極反転構造を設計し素子作製を完了した。また、事前検討で用意していた 3 ピークマルチ QPM 素子を光ファイバモジュール化した素子を光ファイバ部で励起光を反射し往復で用いて、励起光の発生とパラメトリック波長変換を実証した結果を Optics Express に投稿し公表した。さらに複数の位相整合ピークを有するマルチ QPM 素子において、SHG 過程による励起光の発生に用いる位相整合ピークと光パラメトリック増幅(OPA)過程に用いる位相整合ピークの効率が後者の方が大きくなる非対称な位相整合曲線を得るための、周期分極反転構造の位相変調の最適化の方法を確立した。実際の素子作製においては導波路サイズの不均一性により所望の非対称性な位相整合曲線が得られたため、以降の検討ではこの素子を原理検討に用いた。

### (2) 励起光を効率良く導波路へ入射するための構造提案と実証

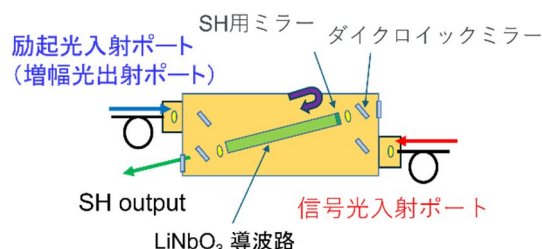


図1 反射型マルチ QPM モジュールの構造

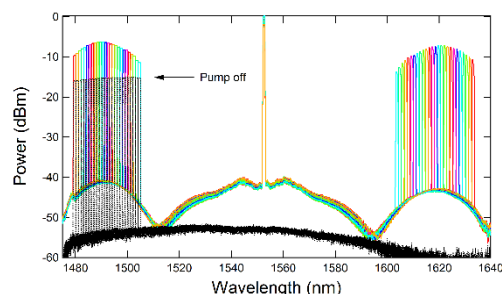


図2 反射型モジュールによる光増幅スペクトル



SHG 過程で発生した励起光を効率良く導波路に入射する構造として、2 ピークマルチ QPM 素子の片端面に SH 光波長のみを反射するダイクロイックミラーを設けた反射型のファイバ入出力他モジュールを作製した。図 1 にモジュールの構造を示す。同モジュールを往復で用いることにより、マルチ QPM 素子を用いた構成としては初めて OPA 過程による信号利得を得ることに成功した。図 2 に増幅した信号光とアイドラ光のスペクトルを示す。QPSK 変調を施した S バンドの信号光を上記のモジュールを用いて光パラメトリック増幅し、同時に発生する L バンド帯アイドラ光の信号品質をビット誤り率の測定により評価した。単一の素子を用いた EDFA の帯域外の光パラメトリック増幅において光通信に適用可能な信号品質が得られることを初めて実証することに成功した。以上の成果は Optics Continuum に投稿し公表した。

### (3) 光ファイバの低損失領域をカバーする広帯域増幅特性の実証

光ファイバの低損失波長領域である 1300-1800nm において任意の波長の光パラメトリック増幅を実証するため、励起光の発生と光パラメトリック増幅を個別の PPLN 導波路を用いる構成で実験的検証を行った。個別の導波路の温度を変化させることによって、光パラメトリック増幅に用いる素子の位相整合波長と励起光波長の離調を変更することで、1300-1800nm の波長域で光増幅が可能であることを初めて実験的に実証することに成功した。図 3 に得られた利得の信号光・アイドラ光波長依存性を示す。

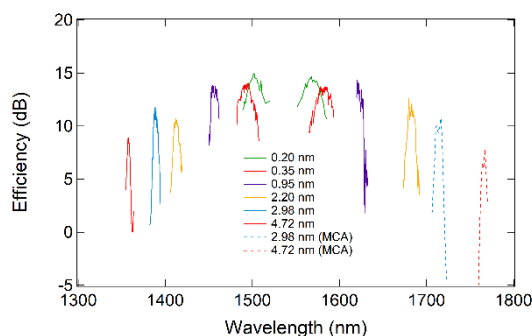


図 3 利得の信号・アイドラ波長依存性

上記の結果を Optics Express に投稿し公表した。さらに励起光の発生と OPA 過程を個別の PPLN 導波路を用いる構成の光パラメトリック増幅器を用いて中継伝送が可能であることを実験的に検証した。図 4 に検証に用いた伝送実験系の概略を示す。S バンド信号を中継増幅し、中継後は L バンド帯アイドラ光を伝送した結果、最大で長さ 130km のシングルモードファイバ(SMF)を伝送後も伝送前の信号光と同等の信号品質が得られることを確認した。図 5 に伝送前後のビット誤り率特性を示す。OPA で得られるアイドラ光は信号光と位相共役の関係にあるため、前段の SMF の異常分散により波形歪を伴った信号光は、OPA により波形の時間反転が行われ、同じ絶対値を持つ正常分散を受けたのと同様の波形に変換される。再び異常分散をもつ後段の SMF を伝送することにより、分散による波形歪が補償できることが明らかになった。さらに S バンド信号を直接受信できる受信系を準備し SMF で伝送された信号光を中継増幅後に再び SMF を伝送し信号品質を評価した。信号光を直接増幅した場合はアイドラ光を利用した場合のような位相共役効果による分散補償の効果は得られないが、適切な分散補償を行うことにより、S バンド信号を直接 OPA により中継増幅することにより、EDFA の帯域外においても伝送距離の延伸が可能であることを初めて実証した。上記の結果は Optics Express に投稿し公表した。

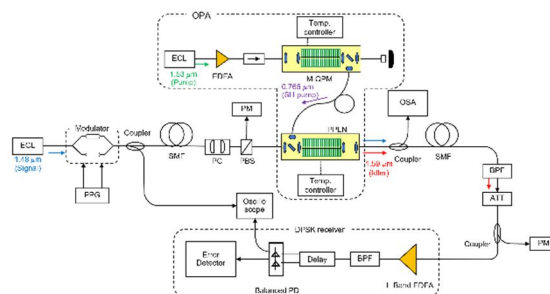


図 4 OPA を用いた中継伝送実験系

### (4) アイドラ光を用いたガス吸収スペクトル計測の実証

上記の光波長変換技術を利用して炭化水素系ガスの倍音振動による光吸収が予想される 1700nm 帯の光を発生するための検討を行った。個別の PPLN 導波路の温度を適切に調整することにより、1400nm 帯の信号光を 1700nm 帯へ変換できることを確認した。さらに 1700nm 帯において炭化水素の倍音振動による光吸収が予想されるジメチルジスルフィドの吸収スペクトルの測定を行った結果、1683nm に倍音振動によるものと見られる吸収ピークが得られることを初めて見出した。上記の知見を元に、最も強い吸収が得られる 1684nm を直接発生可能な固定波長の半導体レーザを用いて、上記ガス濃度計測が可能であることを実証した。

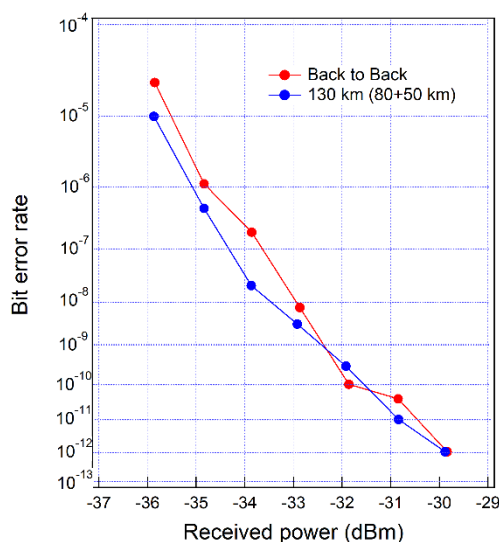


図 5 130km 中継伝送前後の BER 特性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 Asobe Masaki, Kawabata Yuki, Yagi Daiki, Kazama Takushi, Enbutsu Koji, Umeki Takeshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Parametric optical amplification using a reflective multiple quasi-phase-matched LiNbO <sub>3</sub> waveguide module	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Continuum	6. 最初と最後の頁 207 ~ 218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OPTCON.520219	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 Asobe Masaki, Wanifeni Ndadi, Kazama Takushi, Enbutsu Koji, Umeki Takeshi	4. 巻 32
2. 論文標題 Transmission of signal and idler using optical parametric amplifier based on PPLN waveguide	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 8437 ~ 8446
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.519000	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 Asobe Masaki, Punhavan Saroeun, Kato Masato, Umeki Takeshi, Enbutsu Koji, Kazama Takushi, Kasahara Ryoichi	4. 巻 29
2. 論文標題 Parametric wavelength conversion with bidirectional utilization of a multiple QPM device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22900 ~ 22900
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.428868	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 Asobe Masaki, Yagi Daiki, Kawabata Yuki, Umeki Takeshi, Enbutsu Koji, Kazama Takushi, Kasahara Ryoichi	4. 巻 30
2. 論文標題 Broadband optical parametric amplification using PPLN waveguide pumped by detuned second harmonic	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 9473 ~ 9473
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.453578	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ndadi Wanifeni, Masaki Asobe, Takushi Kazama, Koji Enbutsu, and Takeshi Umeki
2. 発表標題 Transmission of S band signal using optical parametric amplifier based on PPLN waveguide
3. 学会等名 Optica Nonlinear Optics Topical Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ndadi Wanifeni, Masaki Asobe, Takushi Kazama, Koji Enbutsu, and Takeshi Umeki
2. 発表標題 Transmission of S band signal utilizing spectral inversion in PPLN based optical parametric amplifier
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaki Asobe
2. 発表標題 Efficient frequency mixing using PPLN waveguides for optical communication and gas sensing
3. 学会等名 Dynamics Days Central Asia and Caucasus (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ndadi Wanifeni, Masaki Asobe, Takushi Kazama, Koji Enbutsu, and Takeshi Umeki
2. 発表標題 Repeated transmission of S band signal using optical parametric amplifier based on PPLN waveguide
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 川端優樹 遊部雅生 風間拓志 圓佛晃次 梅木毅伺 渡邊 啓
2. 発表標題 反射型マルチ QPM モジュールを用いた光パラメトリック増幅の検討
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 工藤 勇人 川端優樹 遊部雅生 風間拓志 圓佛晃次 梅木毅伺
2. 発表標題 反射型波長変換モジュールを用いた光パラメトリック増幅器の検討
3. 学会等名 2022年度 レーザー学会東京支部研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 八木 大希 川端 優樹 遊部雅生 風間拓志 圓佛晃次 梅木毅伺 笠原亮一
2. 発表標題 PPLN導波路を用いたOPAにおける利得波長域拡大の検討
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2021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
研究 分担者	山口 滋  (Yamaguchi Shigeru)  (40297205)	東海大学・理学部・教授   (32644)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	風間 拓志  (Kazama Takushi)	日本電信電話株式会社・先端集積デバイス研究所・研究員	
研究協力者	圓佛 晃司  (Enbutsu Koji)	日本電信電話株式会社・先端集積デバイス研究所・研究員	

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