

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18801

研究課題名（和文）外部変調器フリー直交振幅変調光源への挑戦

研究課題名（英文）External-modulator-free quadrature amplitude modulation laser source

研究代表者

横田 信英（YOKOTA, Nobuhide）

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：00734542

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：大容量光通信を行うためには光の振幅と位相の両方を活用することが不可欠であり、直交振幅変調方式が今後重要となる。本研究では、直交振幅変調方式の信号光を小型かつ省電力の半導体レーザーから直接生成する手法について研究を推進した。2つの半導体レーザーが相互に光を注入して同期する現象の活用について実験的に検討した結果、本現象が位相のゆらぎを低減し、光通信において有利な効果を有することを確認した。また、同期した半導体レーザーの安定化手法と電極に影響されない固有の変調周波数応答を評価可能な測定系を構築した。集積デバイスの試作も実施でき、直交振幅変調方式の信号光生成に向けた実験環境を構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

直交振幅変調方式の信号光は外部変調器を用いることで生成可能である。しかし、近年急速に成長している情報サービスを安価に利用していくためには、外部変調器を用いることなく半導体レーザーから直交振幅変調方式の信号光を直接生成することが重要である。本研究はこのような困難な課題に挑戦し評価技術の開発と素子の試作を実現したことから、今後の足掛かりとなる成果が得られたものである。

研究成果の概要（英文）：Large-capacity optical communication systems require the use of both amplitude and phase of light. Quadrature amplitude modulation is promising scheme for such communications. In this study, we investigated external-modulator-free quadrature amplitude modulation scheme using directly modulated lasers. Mutually injection-locked semiconductor lasers indicated reduced phase noise which is desirable for optical communications. We developed a frequency locking scheme for the injection locked semiconductor lasers and a measurement scheme for intrinsic modulation response of semiconductor lasers. We fabricated an integrated device for proof-of-concept experiments. Our future work will clarify the detail of the quadrature amplitude modulation laser source.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：直交振幅変調 相互注入同期 半導体レーザー

1. 研究開始当初の背景

近年では大型 IT 企業が次々にデータセンターを立ち上げており、データセンター間の大容量通信光源の需要が急増している。従来は光の強度変調の多値化によって周波数利用効率を向上してきたが、図 1 に示すように、光の位相を制御しない強度変調では多値化が 1 次元的である。一方、直交振幅変調 (QAM) では、光の実部と虚部における直交性を利用した 2 次元的多値化が可能であるため、劇的な大容量化のカギとなる。しかし、QAM を活用するためには光の実部と虚部を独立に変調可能な外部変調器が必須であり、コストや消費電力のボトルネックとなっている。このような状況を打破するため、2014 年に半導体レーザの電流変調に基づく外部変調器フリー QAM 光源が Southampton 大学のグループより提案・実証された [Z. Liu et al., Nat. Commn. 5, 5911 (2014)]。図 2 に示すように、2 つの半導体レーザから出力される強度変調光を直交位相関係で合成するというアイデアであり、両者の位相を同期するために基準となるマスターレーザを用いた注入同期を行っている。低電圧で動作する半導体レーザを活用することで、外部変調器を用いる場合と比べて約 1/25 の省電力化が可能であることが示され大きなインパクトがあったが、非常に複雑な制御が必要となるため、さらなるブレイクスルーが必要であった。

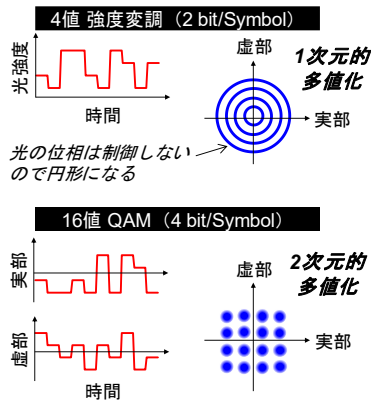


図 1 強度変調と QAM の比較

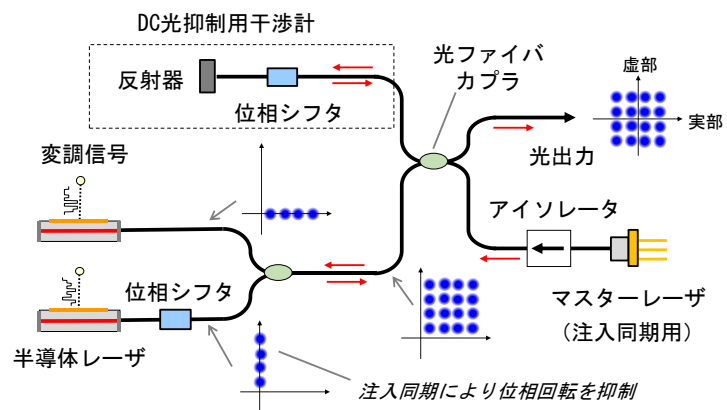


図 2 注入同期を用いた外部変調器フリー QAM 光源

2. 研究の目的

本研究では、図 2 に示した先行研究の欠点を克服する独自のアイデアである、相互注入同期半導体レーザ (図 3) について実験的な研究を推進し、QAM 光源には外部変調器が必須という既存の概念に一石を投じることを目指している。相互注入同期半導体レーザにおいて、2 つの半導体レーザから出力される強度変調光を合成する点は先行研究と同じであるが、注入同期用の独立したマスターレーザを用いず、強度変調光に残留する DC 光成分を互いに注入し合うことで同期する相互注入同期を活用する点が特徴である。高 Q 値 (低光損失) のリング共振器を結合器として用いることで急峻な光フィルタ効果が得られ、変調時においても安定した相互注入同期が維持できることを理論的に明らかにしている [N. Yokota et al., IEEE Photon. J. 11, 6602611 (2019)]。このような新規レーザの基礎となる相互注入同期やその安定化手法の開発、評価手法の開発、集積デバイスの試作について推進する。

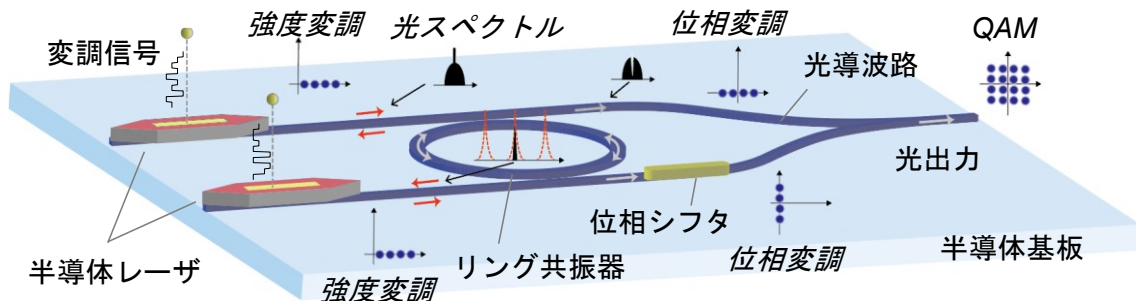


図 3 相互注入同期半導体レーザの概要

3. 研究の方法

半導体レーザの相互注入同期を得る手段としてファブリペローエタロンを用い、同期が得られた際の周波数ノイズを初めて測定する。また、相互注入同期のロバスト性を向上するため、透過型 Pound-Drever-Hall (PDH) 法と直接位相変調を用いた簡便な周波数ロック方式を開発する。相互注入同期半導体レーザにおいて予想される変調周波数応答の広帯域化を電極パッドの影響を排除して測定し、理論計算結果と直接比較可能にするための評価手法を開発する。また、図 3

に示す構成の InP 系モノリシック集積デバイスを試作する。

4. 研究成果

(1) 相互注入同期半導体レーザの周波数ノイズ測定

バルクの光学素子を用いた相互注入同期半導体レーザを構築した。図 4(a)に示すように、ファブリペロー (FP) エタロン、偏光ビームスプリッタ (PBS)、1/4 波長板 (QWP) を組み合わせることで 4 ポートのリング共振器を模擬している。半導体レーザ (LD) には InGaAsP 系の 1.55 μm 帯単一モード半導体レーザを用いた。各 LD の発振波長を光共振器である FP エタロン (Finesse: 156, FSR: 25 GHz) の最大透過率波長に一致させた。周波数ノイズの測定にはコヒーレントレシーバと遅延自己ホモダイン法を用いた。相互注入同期状態の 2 つの LD について、PBS から漏れる光の周波数ノイズを測定したところ、図 4(b)に示すように大幅なノイズ低減が見られた。フリーラン時と比較してホワイトノイズレベルが約 4 桁低減されることを確認した。これは単体の半導体レーザの場合よりも相互注入同期時の方がレーザ共振器が高 Q 値化しているためと考えられ、位相の自由度を利用するコヒーレント光通信において有利な特性である。このように、相互注入同期半導体レーザに関する新しい研究の切り口を実験的に得ることができた。

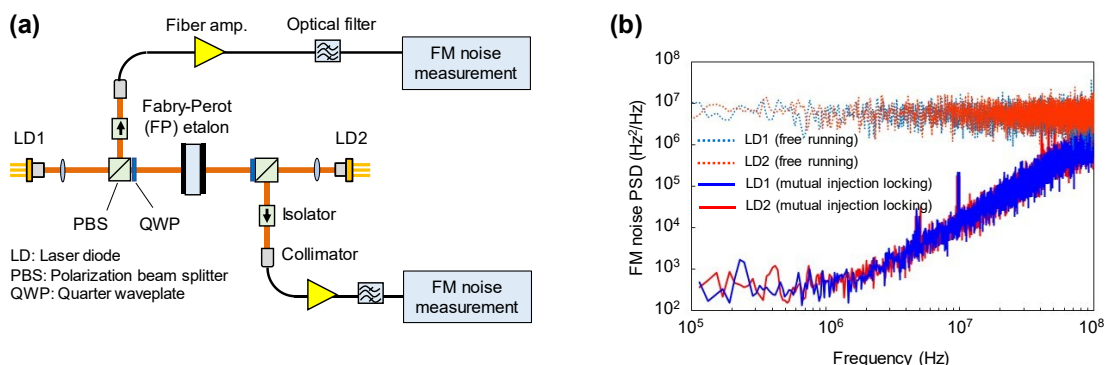


図 4 (a) 相互注入同期半導体レーザの周波数ノイズ測定実験の構成、(b) フリーラン時と相互注入同期時における周波数ノイズの測定結果

(2) 直接変調による光共振器への周波数ロック技術の開発

PDH 法はレーザを外部の光共振器に周波数ロックするための代表的な手法として知られるが、外部変調器を用いてレーザ光を位相変調する必要がある。そこで、より簡便な半導体レーザの直接変調により、PDH 法を適用する手法を検討した。図 5(a)に示す実験構成を用い、半導体レーザ (DFB レーザ) の注入電流を 50 MHz の信号で変調した後、その出力光を FP エタロンに入力し、透過光を受光器で検出した。ここで得られた電気信号は 50 MHz の信号とミキシングされ、エラー信号として検出した。また、エラー信号の形状を測定するため、注入電流には三角波状の低周波信号も重畳し、半導体レーザの発振周波数を掃引した。その結果、図 5(b)に示すように、正負のピークを有するエラー信号形状が確認できた。半導体レーザの電流変調は位相変調と同時に振幅変調も生じるため、エラー信号が周波数変動の原点 (0 GHz) を中心として左右で異なる絶対値のピークとなる可能性があるが、振幅変調の効果を考慮しない場合のシミュレーション結果と概ね一致した。このことから、半導体レーザの直接変調による PDH 法を併用することで、図 3 で示したリング共振器に 2 つの半導体レーザを簡便に周波数ロックし、相互注入同期の長期安定化が実現できる可能性が示唆された。

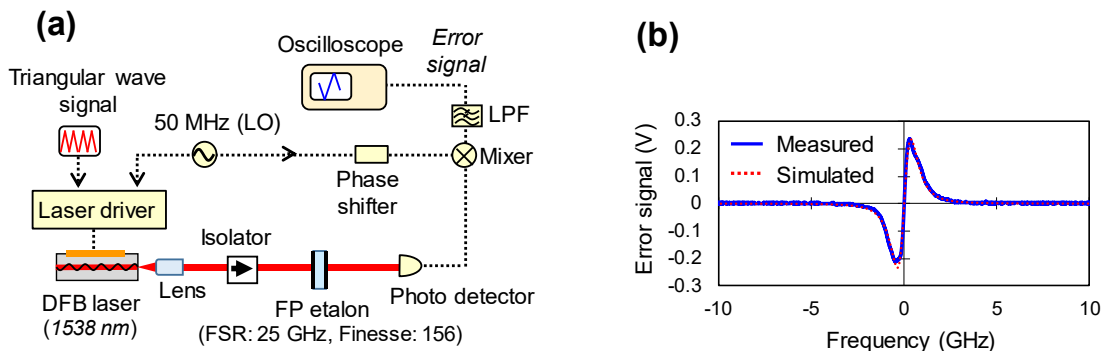


図 5 (a) 半導体レーザの直接変調を用いた PDH 法の実験構成、(b) エラー信号の測定結果とシミュレーション結果

(3) 光変調と光スペクトル測定に基づく半導体レーザの変調周波数応答評価手法の開発

半導体レーザは注入同期時において変調周波数応答帯域が拡大し、緩和振動周波数とは異なる第 2 の共振特性が得られることが知られている。相互注入同期時においても同様の現象が生じると予想され、そのような現象を解明するためには半導体レーザの電極パッドによる周波数応答の影響を排除することが重要である。そこで、光強度変調信号による変調と光スペクトルの測定を用いた半導体レーザの変調周波数応答評価手法を開発した。

実験では図 6 に示す構成を用いた。2 つのポンプレーザは CW 動作しており、両者に発振周波数差を与えた状態で直交偏光で合波している。光弾性変調器 (PEM) で偏光変調した後に偏光子を透過させることで、各ポンプレーザの差周波によるビート信号 (GHz オーダ) を発生させつつ、高感度化に必要なロックイン検出用の参照信号 (42 kHz) を重畳している。ここで、通常の光チョッパー等とは異なり、本手法を用いることで平均パワーを一定としたままビート信号の有無のみを変調でき、これによって光励起される半導体レーザの熱揺らぎの影響を抑制できる。光励起によって変調された被測定半導体レーザの出力光はコヒーレント光スペクトラムアナライザ (コヒーレント OSA) の構成で測定した。光スペクトルには変調に起因したサイドバンドが含まれ、コンピュータ上のデジタルロックイン検出処理を通じてサイドバンドを高感度検出した。

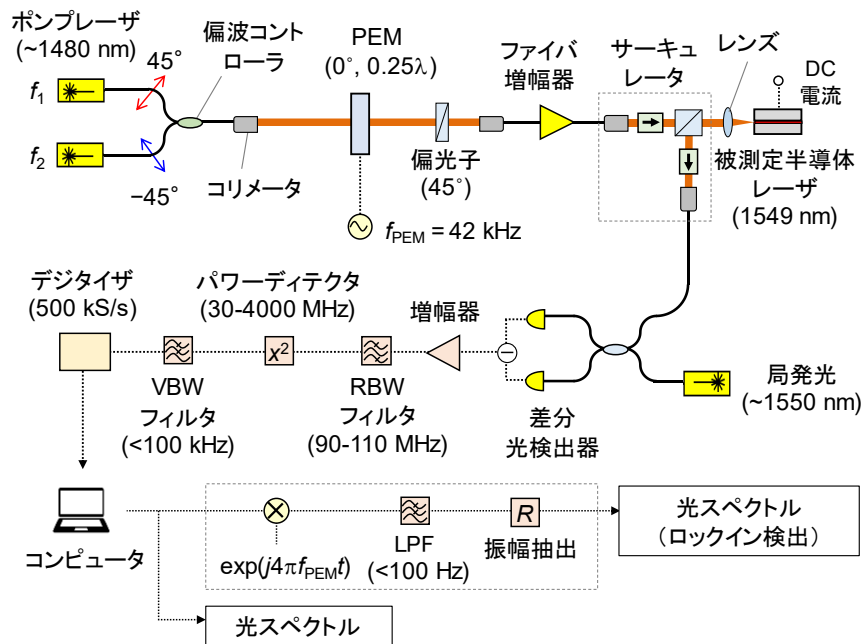


図 6 光変調と光スペクトル測定に基づく変調周波数応答評価の構成

図 7(a) に示すように、ロックイン検出を用いない場合、光スペクトルにおいて変調に起因したサイドバンドが確認できるが、変調周波数が高くなるとスペクトルのノイズレベルに近づいていることがわかる。一方、ロックイン検出を用いた場合 (図 7(b))、光スペクトルのノイズレベルは 20 dB 以上低減され、サイドバンドが明瞭に確認できていることがわかる。このため、ロックイン検出を用いることで光スペクトルのサイドバンドを感度の低下した高周波変調時にも観測することが容易となり、変調周波数応答の形状を詳細に調べることができる。

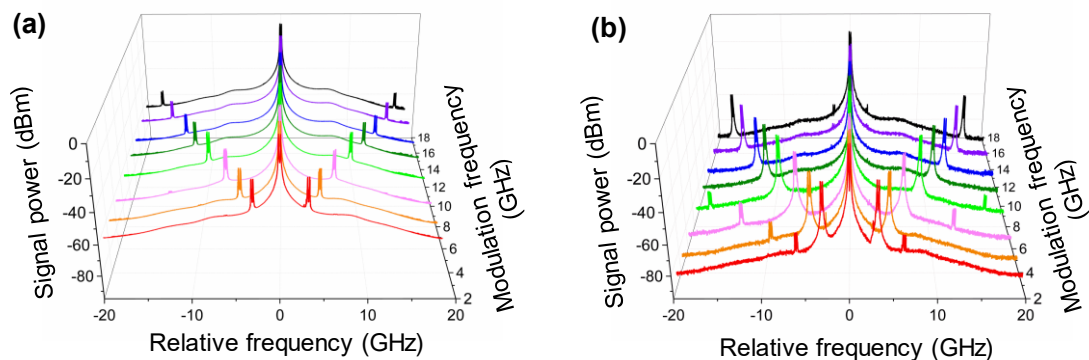


図 7 光スペクトルの測定結果 (a) ロックイン検出無の場合、(b) ロックイン検出有の場合

このような手法を用いて、被測定半導体レーザの変調周波数応答を測定した。図 8 に示すように、3 dB 帯域幅は 11 GHz であり、コヒーレント OSA にロックイン検出を適用しない場合では、30 GHz 付近から周波数応答が雑音レベルに到達して折れ曲がっている。一方、ロックイン検出

を適用することで 75 GHz まで応答を測定することができている。比較のため、一般的な電気スペクトラムアナライザを用いた構成により測定した場合、30 GHz までの測定範囲においてコヒーレント OSA にロックイン検出を適用した場合と同様の周波数応答が確認できた。また、以下の式で表される典型的な半導体レーザの周波数応答との一致も確認することができた。

$$H(\omega) = \frac{\omega_r^2}{\sqrt{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2}} \quad (1)$$

ここで、 ω は変調信号の角周波数、 ω_r は共鳴角周波数、 γ は減衰係数であり、 $\omega_r = 2\pi \times 7.5 \text{ GHz}$ と $\gamma = 20 \text{ GHz}^{-1}$ とした。

以上の結果から、開発手法を用いることで半導体レーザの周波数応答を広帯域かつ高感度で測定できることが確認できた。本手法を用いることで、電極や高周波実装系の周波数応答の影響を排除しつつ、半導体レーザの本質的な周波数応答を広帯域かつ高感度で評価できる。

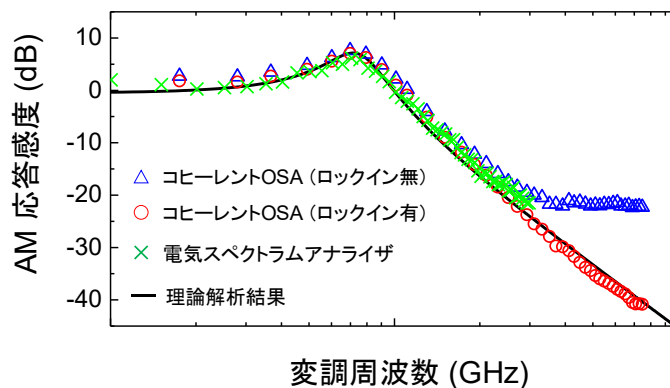


図 8 半導体レーザの変調周波数応答の測定結果

(4) InP 系モノリシック集積デバイスの設計・試作

ファウンドリを利用して InP 系モノリシック集積型の相互注入同期半導体レーザの設計および試作を進めた。図 9 に示すように、各半導体レーザは分布ブラッグ反射鏡 (DBR) と半導体光増幅器 (SOA) を有するレーザ構造の共振器内部に光損失を高速変調するための電界吸収型光変調器 (EAM) を備えている。各半導体レーザはリング共振器を介して結合しており、リングの通過成分に位相差を与えて直交位相の関係で合波し、QAM 信号光を生成することができる。無変調時の静特性の評価に適したデバイス配置や半導体レーザ単体の配置も別途行っており、系統的な評価が可能となっている。ファウンドリメーカーにおける製造装置の不具合によって計画に遅れが生じたものの、無事にデバイスを作製することができた。現在、プローバを用いた評価実験系の構築を完了しており、デバイスのマウント上へのボンディング工程が完了した後に、相互注入同期半導体レーザの評価に着手する。

このように、InP 系モノリシック集積デバイスを初めて試作することができ、今後実験的に評価するための環境を構築することができた。

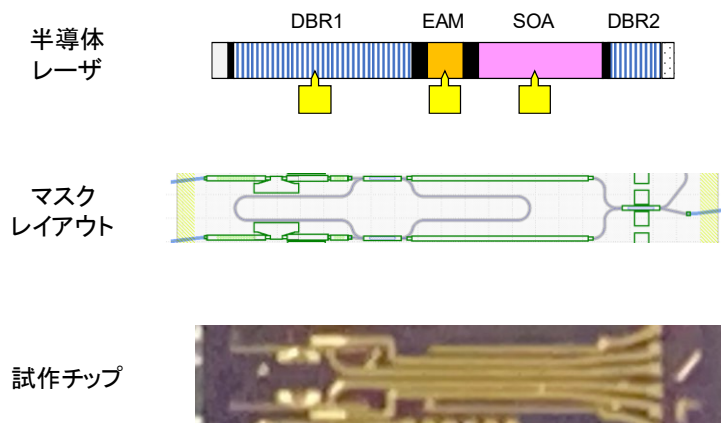


図 9 半導体レーザの構成、マスクレイアウト、試作チップ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yokota Nobuhide, Nohara Tomoharu, Yasaka Hiroshi	4. 巻 15
2. 論文標題 Wide-Bandwidth and High-Sensitivity Measurement Technique of Intrinsic Modulation Response of Semiconductor Lasers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	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） 10.1109/JPHOT.2023.3296203	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平野 諒介, 横田 信英, 八坂 洋
2. 発表標題 直接電流変調を用いた透過型PDH法による半導体レーザーの周波数安定化
3. 学会等名 2024年第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 横田信英, 野原友治, 八坂洋
2. 発表標題 光変調および光スペクトル測定による半導体レーザーの広帯域・高感度周波数応答評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野原友治, 横田信英, 八坂洋
2. 発表標題 ロックイン法を用いた半導体レーザーの広帯域・高感度光変調周波数応答評価
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横田信英, 八坂洋
2. 発表標題 光共振器を介した相互注入同期半導体レーザーの周波数ノイズ特性
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023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
---------	---------