

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22360028

研究課題名（和文）

超高速非線形光学効果を用いた広帯域高次機能モノサイクル光周波数コム光源の開発

研究課題名（英文）

Development of wideband highly functional mono-cycle optical frequency comb source using ultrafast nonlinear optical effect

研究代表者

西澤 典彦 (NISHIZAWA NORIHIKO)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30273288

研究成果の概要（和文）：本研究では、光ファイバ等で誘起される非線形効果を駆使して、高機能な超短パルス光源の開発を行った。まず、カーボンナノチューブを用いた超短パルスファイバレーザの数值解析を行い、高機能化を図ることで、これまでの約30倍も高出力な、最大平均出力285mWのファイバレーザを開発した。次に、開発したナノチューブファイバレーザを用いてファイバレーザベースの光周波数コム光源を実現した。更に、シミラリトンファイバ増幅器を駆使して50fsの高強度超短パルスを生成し、それを用いて1オクターブ広がるコヒーレントなコンティニューム光の生成に成功した。また、相互相関FROGを駆使して、コヒーレントSC光のスペクトログラムの計測に初めて成功した。

研究成果の概要（英文）：In this work, we investigated highly functional ultrashort pulse source using nonlinear fiber effects. First, we demonstrated numerical analysis of ultrashort pulse fiber laser using carbon nanotube. Considering the numerical results, we succeeded in the demonstration of 285 mW highest power fiber laser using carbon nanotube. Next, optical frequency comb system using developed nanotube fiber laser was demonstrated. Then, 50 fs high power ultrashort pulse was successfully generated using similariton fiber amplifier, and an octave spanning coherent supercontinuum was generated. Finally, the spectrogram of generated coherent supercontinuum was observed using X-FROG for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2012年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，応用光学・量子光工学

キーワード：光制御，超短パルス，ファイバレーザ，光ファイバ，非線形光学効果，光周波数コム，パルス捕捉，スーパーコンティニューム

## 1. 研究開始当初の背景

超短パルス光と光ファイバを用いると、顕著な非線形光学効果を得ることができる。申請者等はこれまでに、超短パルスファイバレーザと光ファイバの超高速非線形光

学効果を用いて、可視～近赤外域において、広帯域に波長可変な超短パルス光源や、超広帯域スペクトル光の生成に世界に先駆けて成功した。

超短パルスレーザは、周波数域で見る

と、スペクトルが等周波数間隔で並ぶ、ノーベル物理学賞も授与された光周波数コムになっている。光周波数コムは精密光距離計測や精密分光計測の分野においてこれまでの測定精度を飛躍的に向上させるブレークスルーとなっている。また、光の周波数情報を用いる次世代の光通信においても、基準光源として不可欠な技術である。超短パルス光の光周波数コムとしての特性を保持したまま、非線形効果を用いてスーパーコンティニューム光や波長可変超短パルス光を生成することができれば、波長可変な、又は超広帯域な新しい光周波数コム光源を生成することができる。また超広帯域光を用いると、分散補償によって極短パルスを生成することができる。

近年、申請者は光ファイバにおいて、パルス光がパルス光を捕まえるパルス捕捉という現象を世界で初めて見出した。パルス捕捉の一つである直交偏光パルス間のパルス捕捉では、長波長側のパルス光が短波長側のラマン利得を受けて増幅されるため、パルスでパルスを捕まえ、更に整形・増幅することができる。この現象を用いると、時間的に完全に重なった超短パルス対が生成され、2波長パルスの重ね合わせによって、ピーク強度の高い、極短パルスを生成することができる。この極短パルスを用いると、非線形効果を効率よく誘起できることが期待される。そこで、本研究では、超高速非線形光学効果を用いた広帯域モノサイクル光周波数コム光源の開発を着想するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、光ファイバにおける超高速非線形光学効果を用いて、広帯域波長可変光周波数コム光源やモノサイクル光周波数コム光源などの高次機能光周波数コム光源を開発することにある。

近年、超短パルスファイバレーザーの研究は進展してきており、最近では、その高出力化が推進されてきている。しかし、広帯域波長可変化に対する取り組みは、申請者らがパイオニアで、最近になって世界的にも少しずつ広がってきているところであり、今後の益々の展開が求められている。また、光周波数コム光源は近年注目を集めている新しい光源である。今後の益々の進展の為に、より高機能で実用的な光源の開発が不可欠である。

本研究ではまず、パルス内誘導ラマン散乱を用いた波長可変超短パルス光源における縦モードの特性を解析・制御し、波長可変超短光周波数コム光源を開発する。次に、この光源と高非線形ファイバを用いて、1オクターブ以上広がる光周波数コムの特性を保持した高精度スーパーコンティニューム

光を生成する。更に、このSC光のスペクトルの時間分布を補償し、1.5 $\mu$ m帯では世界最短のモノサイクルパルスの生成を実現する。また、申請者が見出したパルス捕捉という新しい現象を用いて、時間的に重なった2色の超短パルス対を生成し、その合成による極短パルスを用いて高精度・広帯域な光周波数コム型SC光を高効率に生成する技術を開発する。

## 3. 研究の方法

(1)パルス内誘導ラマン散乱による波長可変超短パルス光の縦モードの特性解析と制御

波長可変超短パルス光周波数コム光源の実現を目指し、パルス内誘導ラマン散乱効果を用いて生成した波長可変超短パルス光の縦モードの特性を解析する。ここでは、申請者が開発したEr添加超短パルスファイバレーザーを発振器として用い、非線形ファイバを用いて長波長側に波長シフトしたソリトンパルスを生成する。そして生成したソリトンパルスを安定化した波長可変半導体レーザーと重ね合わせ、バランス型ヘテロダイナミクス検出の手法を用いてビート周波数信号を検出し、縦モードの線幅や背景雑音との強度比から特性の変化を評価する。

(2)波長可変超短光周波数コムの生成

上記の成果を元に波長可変超短パルス光周波数コム光源を開発する。また、上記の成果を元に超短パルスファイバレーザー増幅システムを適宜改良し、より高精度な波長可変光周波数コム光源を実現する。特に、超短パルス光を増幅する光ファイバ増幅器において、縦モードの特性が劣化しないよう、数値解析と実験の両面から、チャープパルス増幅システムの最適化を図る。

(3)高精度光周波数コムスーパーコンティニューム光の生成

前記の研究を更に発展させ、まず高強度の光周波数コム超短パルス光を生成する。ここでは、超短パルス光ファイバ増幅器において、過剰な非線形効果や増幅自然放出光を抑えながら増幅率を上げ、大口径フォトニック結晶ファイバを用いて高強度なソリトンパルスを生成する。更に、生成した高強度な光周波数コムパルスを用いて光周波数コムの特性を保持し、且つ平坦に超広帯域に広がる高精度スーパーコンティニューム光を生成する。各部のファイバ長や非線形係数、分散値を適宜調整し、縦モードの劣化を抑えながら、生成系の最適化を図る。

(4)高精度光周波数コムスーパーコンティニューム光を用いたモノサイクルパルスの生成

上記の研究で生成した高精度スーパーコンティニューム光のチャープを補償し、ファイバレーザベースのモノサイクルパルスの生成を試みる。高精度スーパーコンティニューム光はほぼ線形なチャープ特性を有している。そこで、回折格子や分散補償ファイバを用いて線形なチャープを補償し、更に空間光変調器を用いて残留する高次のチャープを補償して、最短のパルス光を生成する。申請者らはこれまでに、波長 1.5 $\mu\text{m}$  帯では世界最短の 13fs の極短パルス光の生成に成功している。今回は、1.5 $\mu\text{m}$  帯で世界記録を更新する 5fs のモノサイクルパルスの生成を目標とする。

#### (5) 直交偏光パルス捕捉の増幅特性の解析

複屈折ファイバ中で、偏光の直交した 2 つのパルス光が重なったとき、群速度整合の条件が満たされると、二つのパルスが非線形効果を介してお互いを捕まえ合いながら時間的に重なって共に伝搬する、パルス捕捉の現象が現れる。ここでは、制御光と信号光の光強度やパルス幅などを変化させ、分散値や複屈折の大きさの異なる数種の複屈折ファイバを用いて、パルス捕捉における増幅特性を、実験と数値解析の両面から解析する。これまでの実験によって、300m の低複屈折ファイバにおいて 30dB の利得が観測されている。今回は、ファイバ長や諸条件を更に変化させ、増幅特性や捕捉効率の諸特性を明らかにする。また、cw 光をパルス捕捉・増幅することにより、cw 光からの超短パルス光の生成を試みる。

#### (6) パルス捕捉増幅特性における縦モードの特性評価

前記 2 の研究で開発した波長可変超短光周波数コム光源を用いてパルス光を捕捉・増幅し、捕捉パルスの光周波数コムとしての特性を評価する。捕捉パルスにおいても縦モードの特性を保持することができれば、パルス捕捉・増幅によって光周波数コムの特性を保持した超短パルスや超短パルス対を生成・増幅できることが期待される。ここでは、実験と並行して、上記で開発した数値解析プログラムも用いてパルス捕捉における光周波数コムの特性を解析する。

#### (7) パルス捕捉による極短合成パルスを用いた SC 光の生成

パルス捕捉によって生成させるパルス対は、異なる中心波長を持ち、時間的に安定に重なるパルス対になっている。この合成パルスは元の超短パルスよりもパルス幅が数分の一に細い極短パルスになっている。ここでは、パルス捕捉により生成した超短パルス対による極短合成パルスを用いて超広帯域に広

がるスーパーコンティニューム光を生成する。縦モードの特性を高いレベルで保持し、且つ 1 オクターブ以上広がる SC 光の生成を目標とする。

#### (8) 本研究のまとめ

本研究の考察・検討・解析を行う。更に本研究の総括を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 光周波数コムの高度化のためのカーボンナノチューブファイバレーザの解析と開発

まず、光周波数コムシステムにおいてキーとなる種光源であるカーボンナノチューブファイバレーザの高度化に取り組んだ。まず、カーボンナノチューブファイバレーザの数値解析モデルを構築し、ナノチューブを用

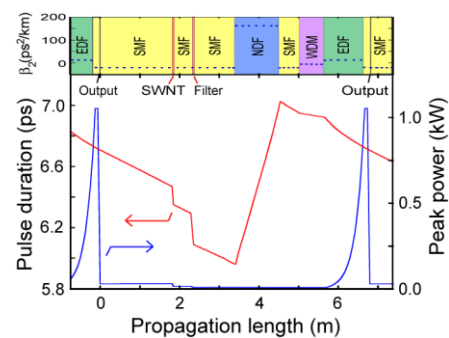


図 1 共振器内のパルス伝搬の計算結果

いた時の受動モード同期の過程や、共振器構成に対する出力パルスの特性の変化を解析した。その結果、共振器が異常分散によるソリトンモード同期の状態にある場合には、パルスが分散波による背景雑音成分を持つことが分かった。また、高出力化の鍵となる、共振器の分散値の制御が可能な構成を見出すことができた。

#### (2) 高出力カーボンナノチューブファイバレーザの開発

解析の結果を元に、高出力ファイバレーザの開発を行った。高出力励起 LD を 2 ヶ用い、また共振器内の分散値を大きな正常分散とすることで、高出力な散逸性ソリトンモー

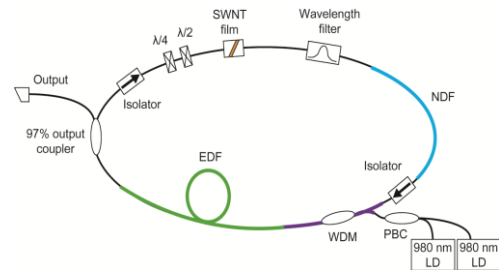


図 2 開発した高出力ファイバレーザの構成

ド同期ナノチューブファイバレーザを実現した。共振器の取り出し効率や共振器構成の最適化を図ることで、ナノチューブに照射される光強度を抑え、ダメージを防ぎ、これまでの約 30 倍に当たる、285 mW の最大平均出力を達成した。

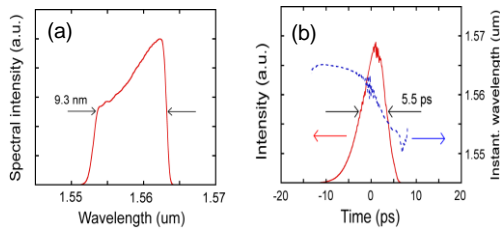


図3 最大出力時のパルスの波形，  
(a)時間波形，(b)スペクトル波形

### (3) カーボンナノチューブファイバレーザを用いた光周波数コム光源の開発

カーボンナノチューブをポリイミドに分散させ、フィルム化したデバイスを可飽和吸収体として使い、Er添加ファイバと組み合わせ超短パルスファイバレーザを開発した。更に、このレーザからの出力をファイバ増幅器で増幅し、高非線形ファイバに入射して1.1~2.4μmに渡って広がるスーパーコンティニューム(SC)光を生成した。そして、生成したSC光を周期分極LiNbO<sub>3</sub>結晶を用いたf-2f干渉計に入力し、fceoを観察した。更に、ファイバレーザ中に位相変調器を用い、励起LDの電流制御と合わせてフィードバック制御をすることで、光周波数コムシステムを開発し

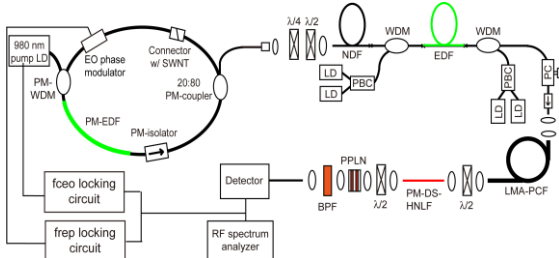


図4 ナノチューブファイバレーザを用いた光周波数コムシステムの構成

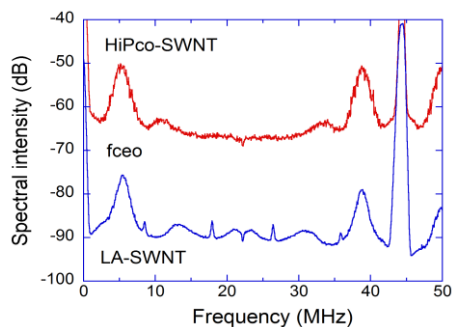


図5 ナノチューブファイバレーザを用いた光周波数コムシステムのfceoビート信号

た。その結果、従来の非線形偏波回転を用いたファイバレーザよりも線幅は太いものの、全ファイバ型で安定なシステムを構築することができた。

### (4) 直交偏光パルス捕捉を用いたcw光からの超短パルス光の生成

代表者が見出した複屈折ファイバにおける直交偏光パルス捕捉現象を用いて群速度整合条件を満たすcw光成分を捕捉し、増幅することで、cw光から超短パルス光を生成することに成功した。このとき、常に時間的に重なっている超短パルス光によって増幅することで、40dB以上の大きな利得を得ることができた。この増幅手法は広い波長帯域において増幅

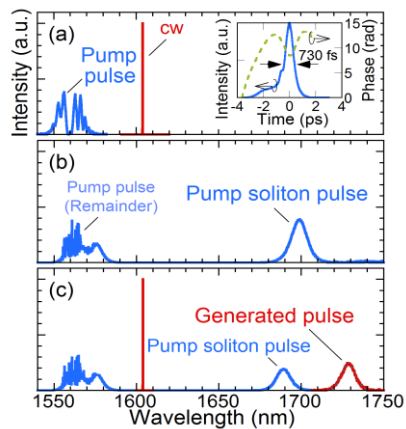


図6 直交偏光パルス捕捉によるcw光からの超短パルス生成

作用を得ることができ、高機能な光増幅器を実現することができる。また、cw光からの超短パルス光の生成を比較的容易に実現することができる。

### (5) シミラリトン光増幅器の開発と極短パルス光の生成・オクターブスパン SC 生成

極短パルス光の実現に不可欠なコヒーレントなスーパーコンティニューム(SC)光の生成のため、非線形性と分散値の最適化により、ほぼ線形チャープを有し、且つ単峰なパルススペクトルを生成するシミラリトン光増幅器を開発した。そして、増幅器の出力を大口径フォトニック結晶ファイバに導入し、分散補償をすることで、時間幅 52 fs、パルスエネルギー4.4 nJ でほぼペDESTALフリーな高出力超短パルス光の生成に成功した。更に、生成した超短パルス光を高非線形ファイバに入射し、1.05~2.1 μmまで、1オクターブ以上広がるコヒーレントなスーパーコンティニューム光の生成に成功した。

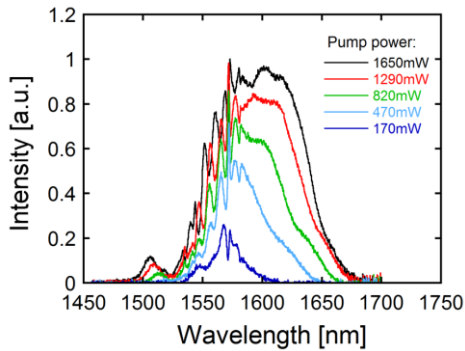


図7 シミラリトン増幅器出力パルスのスペクトル

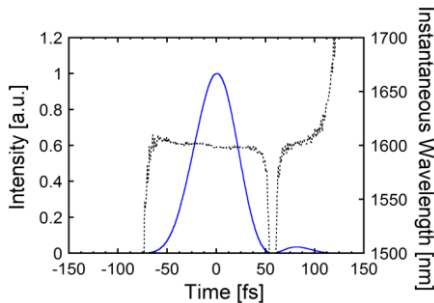


図8 分散補償後のパルスの時間波形

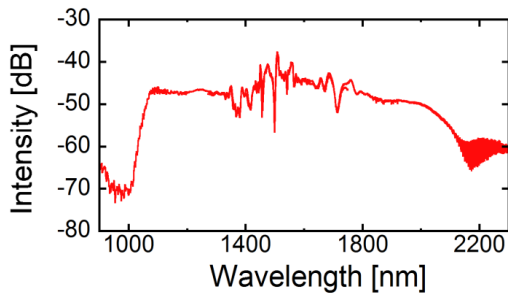


図9 生成した広帯域SC光のスペクトル

(6) 高精度スーパーコンティニューム光の生成とスペクトログラム計測

極短パルス光の生成のため、生成した高精度 SC 光のスペクトルの時間分布を、相互相関周波数分解光ゲート法を用いて実測した。プローブパルスには、ソリトン自己周波数シフトを用いて 200 fs の超短ソリトンパルス

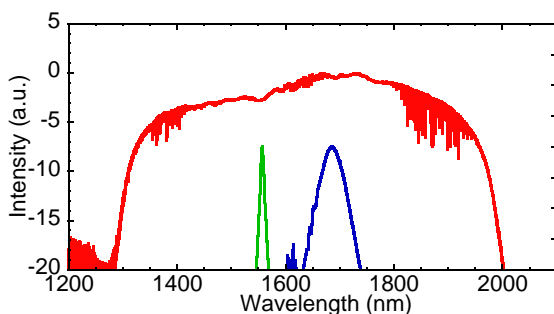


図10 生成した高精度 SC 光のスペクトル

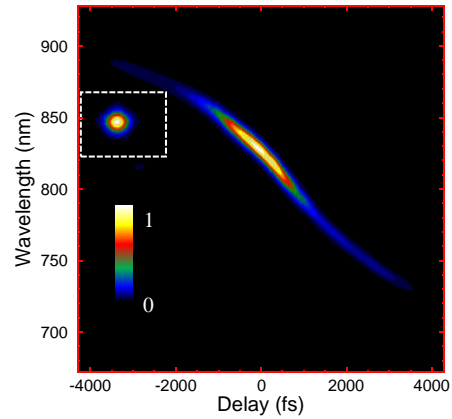


図11 X-FROGにより計測した高精度 SC 光のスペクトログラム

号を生成し、時間差を掃引しながらスペクトルを分光計測することで、スペクトログラムの観測に成功した。

(7) まとめ

本研究の考察と総括を行った。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計13件)

① Y. Nozaki, N. Nishizawa, E. Omoda, H. Katura, and Y. Sakakibara, "Power scaling of dispersion-managed Er-doped ultrashort pulse fiber laser with single wall carbon nanotubes," Optics Letters, vol.37, pp.5079-5081 (2012) (査読有)

② N. Nishizawa, Y. Nozaki, E. Itoga, H. Katura, and Y. Sakakibara, "Dispersion managed, high-power, Er-doped ultrashort pulse fiber laser using carbon nanotube polyimide film," Opt. Express, vol.19, pp.21874-21879 (2011) (査読有)

③ E. Shiraki, N. Nishizawa, and K. Itoh, "Ultrashort pulse generation from continuous wave by pulse trapping in birefringent fibers," Opt. Express, vol.18, pp.23070-23078 (2010) (査読有)

④ Y. Seno, N. Nishizawa, Y. Sakakibara, K. Sumimura, E. Itoga, H. Katura, and K. Itoh, "Ultralow-repetition rate, high-energy, polarization maintaining, Er-doped ultrashort pulse fiber laser using single wall carbon nanotube saturable absorber," Opt. Express, vol.18, pp.20673-20680 (2010) (査読有)

⑤ N. Nishizawa, K. Takahashi, Y. Ozeki, and K. Itoh, "Wideband spectral compression of wavelength tunable ultrashort soliton pulse using comb profile fiber," Opt. Express, vol.18,

pp.11700-11706 (2010) (査読有)

〔学会発表〕 (計 2 3 件)

① N. Nishizawa, Y. Nozaki, and Y. Sakakibara, "Dynamics of dispersion managed Er-doped ultrashort pulse fiber laser using carbon nanotube saturable absorber," The 1st Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'12) APLS5-2, April 26-27, 2012, Yokohama, Japan.

② N. Nishizawa, Y. Nozaki, Y. Sakakibara, E. Itoga, and H. Sakakibara, "Dynamics of Er-doped ultrashort pulse fiber laser using single wall carbon nanotube polyimide film," IQEC/CLEO PR2011, 2230-CT-1, Aug.28-Sept.1, 2011, Sydney, Australia.

③ N. Nishizawa, Y. Sakakibara, E. Itoga, and H. Katura, "Optical frequency comb using polarization maintaining Er-doped ultrashort pulse fiber laser with carbon-nanotube polyimide film," CLEO2011, JThB125, May 1-6, 2011, Baltimore, USA.

④ E. Shiraki, N. Nishizawa, and K. Itoh, "Ultrashort pulse generation from cw beam by trapped pulse amplification in birefringent fibers," CLEO2010, CMC7, May 16-21, 2010, San Jose, USA.

⑤ Y. Senoo, N. Nishizawa, Y. Sakakibara, K. Sumimura, E. Itoga, H. Katura, and K. Itoh, "154 kHz, Ultra-low repetition rate, high-energy pulse, polarization maintaining, Er-doped fiber laser using single wall carbon nanotube polyimide film," CLEO2010, JTuD47, May 16-21, 2010, San Jose, USA.

⑥ N. Nishizawa, K. Sumimura, and K. Itoh, "Fiber laser based optical frequency comb system using fiber chirped pulse amplification technique," CLEO2010, JWA40, May 16-21, 2010, San Jose, USA.

〔図書〕 (計 2 件)

① N. Nishizawa, et al, PWC Publishing, *Polymer Photonics and Novel Optical Technologies*, 2011.

② 西澤典彦, 他, オーム社, 光エレクトロニクスとその応用, 2011.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: スペクトル幅狭窄化方法, および光学素子ならびに光源装置

発明者: 西澤典彦, 小関泰之, 伊東一良

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: 特願 2010-103592

出願年月日: 2010 年 4 月 28 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/optel1lab/nishizawagroup.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西澤 典彦 (NISHIZAWA NORIHIKO)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 30273288

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし