

令和 3 年 6 月 27 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01896

研究課題名（和文）新設計マルチコアファイバーによる自己収束限界を超える高出力反位相モード光発生

研究課題名（英文）Generation of high power out-of-phase mode exceeding self-focusing limit by newly-designed multicore fiber

研究代表者

白川 晃（Shirakawa, Akira）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授

研究者番号：00313429

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：マルチコアファイバー(MCF)レーザーの位相同期の研究に取り組んだ。提案したMCFの作製には至らなかったが、その過程で多くの研究成果を挙げた。7コアYb添加フォトニック結晶ファイバーを用い、可飽和吸収体による位相同期モード同期MCFレーザーに世界で初めて成功し、平均出力5.8W、パルスエネルギー137nJのピコ秒パルスファイバー直接発生した。また深層強化学習による複数ファイバー増幅器のコヒーレントビーム結合を提案・実証し、MCF増幅器にも適用可能であることを示した。レーザーの高出力化だけでなく反位相状態も含めた時空間特性の自在制御への展望を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ファイバーレーザーの高出力化・高エネルギー化は喫緊の課題である。本研究で実証したマルチコアファイバー(MCF)レーザーのout-of-phaseモードの選択励振、位相同期とモード同期の同時実現等の成果により、パルスファイバーレーザーのエネルギースケールアップの方向性を示すことができた。また人工知能(AI)の手法を複数レーザーの位相同期に適用できると示したことも光科学における金字塔と確信する。一般に用いられている能動法と比べ、コア数の増大による系の複雑化なしにコヒーレントビーム結合が可能であり、スケラビリティに優れる。

研究成果の概要（英文）：We studied phase-locking of multicore fiber (MCF) lasers and achieved lots of noticeable results while the proposed MCF could not be fabricated. We have succeeded in phase-locked and mode-locked MCF laser for the first time in the world by use of a 7-core Yb-doped photonic crystal fiber and a saturable absorber. It generates picosecond pulses with as high as 5.8W of average power and 137nJ of pulse energy directly from the fiber. We also proposed and demonstrated a new scheme of coherent beam combining of multiple fiber amplifiers by use of deep reinforcement learning, and showed it can be applicable to MCF amplifiers. An outlook not only for power scaling but for controlling freely the spatio-temporal properties including an out-of-phase state.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：ファイバーレーザー マルチコアファイバー 位相同期 ビーム結合

## 1. 研究開始当初の背景

近年、高効率、高輝度、堅牢性、可搬性など多くの優位点を持つファイバーレーザーが目覚ましく進展し、高平均出力分野では固体レーザーを急速に置き換えつつある。パルス光源についてもファイバーレーザーが強く囑望されているが、状況は大変厳しい。光ファイバーはコア径が小さく、かつ長尺相互作用のため、誘導ラマン散乱などの非線形性が卓越し、ピークパワーが厳しく制限されるためである。単体では限界のあるファイバーレーザーのパワー/エネルギー向上のために、複数のファイバーレーザーの電界位相を一致（同期）させて輝度を重畳するコヒーレントビーム結合の研究が近年極めて重要になっている[1]。

申請者は 2006 年より単一ファイバーに複数の利得コアを施したマルチコアファイバー(MCF)レーザーの研究を推進してきた。単一ファイバーのためコア間で環境が等しく、生来の安定性が高い。コア数分形成されるスーパーモードの中には、受動的に位相同期し遠視野で輝度加算できる **in-phase** (同位相) モードが存在し、その選択励振の方法としてエンドシール自己イメージング法を考案し、マルチコアフォトニック結晶ファイバー(MCPCF, 図 1, 2)によるファイバーレーザーのコヒーレントビーム結合の研究を開始した。モード純度 80%以上の **in-phase** モード動作を達成したが、他のスーパーモードも励振される問題があり、またその構成モード分布が不明であった。よりモード純度の高い高輝度高出力動作の可能なビーム結合法、モード解析技術、更なるパワースケーリングのためのコヒーレント MCF 増幅器等の開拓が重要な課題になっていた。

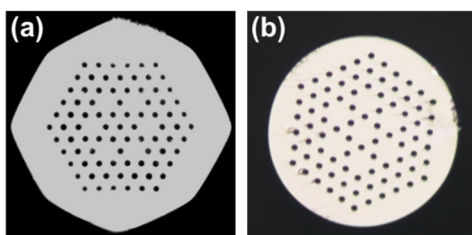


図 1.(a) Yb 添加 6 コアおよび (b) 7 コア MCPCF の断面顕微鏡写真。

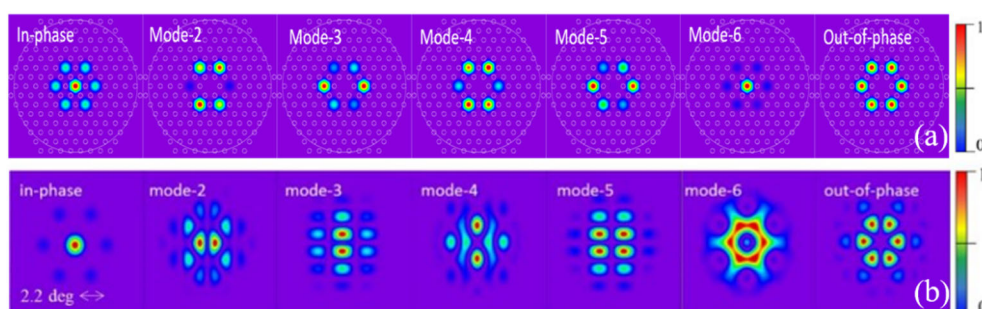


図 2. 7 コア MCPCF の 7 つのスーパーモードの強度分布。(a) 近視野像 (b) 遠視野像。一番左が **in-phase** モード、一番右が **out-of-phase** モード。

## 2. 研究の目的

MCF レーザーにおいて、従来のコア電界間で位相の揃った **in-phase** モードだけではなく、位相が交互に反転する **out-of-phase** (反位相) モードにより、従来の非線形不安定性を克服し、自己収束限界のコア数分スケールアップが可能なコヒーレントビーム結合を提案する。高品位な受動コヒーレントビーム結合を実現し、ファイバーレーザーの絶対限界である自己収束限界を超えるような高出力動作を目指す。

## 3. 研究の方法

新しい MCF を作製し、他スーパーモードの競合を抑圧し **out-of-phase** モード動作を実証する。干渉法によるモード解析法を改良し、スーパーモードの構成割合をより高精度に決定できるようにする。また超短パルスレーザーの位相同期を目指し、高速な可飽和吸収体を用いた受動モード同期位同期 MCF レーザー、スーパーモードによる繰り返し周波数の違いを利用した能動モード同期等の新しいモード選択法の研究に取り組んだ。さらに MCF 増幅による高出力化を目指し、深層強化学習を用いた複数ファイバー増幅器のコヒーレントビーム結合に取り組んだ。

## 4. 研究成果

### (1) 新規 MCF の作製検討と既存 Yb 添加 7 コア MCPCF の **in-phase** モード増幅特性

7 コアのうち周回の 6 コアのみ Yb を添加し中央コアは非添加とする MCF を設計し、Yb 添加コアのプリフォーム作製までは行った。しかし国内メーカーの多くがフォトニック結晶ファイバー製造から撤退しており見つからず、国外の研究機関との共同研究を模索するも、新型コロナウイルス感染症拡大の影響もあり作製に至らなかった。また改めて挑戦したい。

新規 MCF の増幅特性を評価するために現有の Yb 添加 7 コア MCPCF の増幅特性を評価した。図 3 のようにシングルモードファイバー(SMF)出力をレンズ系で最適に結合することで、他のス

ーパーモードを励振せずに in-phase モードに高効率に結合でき、またモード特性を維持して増幅できることを明らかにした。

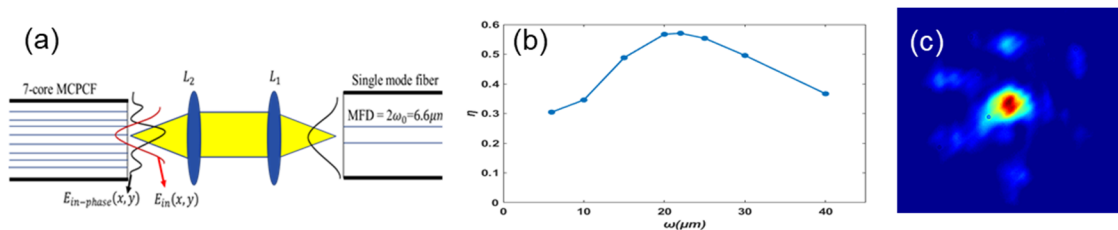


図 3. SMF と 7 コア MCPCF の自由空間結合による in-phase モード励振。(a) 概念図 (b) 重なり積分により計算した in-phase モード結合効率の MCPCF 端面でのビーム半径依存性 (c) MCPCF 増幅後の遠視野強度分布。

## (2) MCF レーザーのモード解析の高精度化

研究室で開発した干渉法による MCF レーザーのモード解析装置の測定精度向上のために、光学系を最適化し、また計算プログラムを改良した。レーザー光の一部を SMF を通し平面波参照光として、レーザー光の近視野像と干渉縞を形成し、2次元フーリエ変換を行い干渉縞の空間周波数スペクトルを取り出すことで、電界分布や位相の情報を得、各スーパーモードの割合を算出する。Yb 添加 6 コア MCPCF のエンドシール位相同期で、シール長を最適化して out-of-phase モード選択励振に取り組んだ。開発したモード解析装置で out-of-phase モードの占有率は 75% と分かり、既存 MCPCF の out-of-phase モード発振でも十分なモード純度が得られていることが分かった (図 4)。

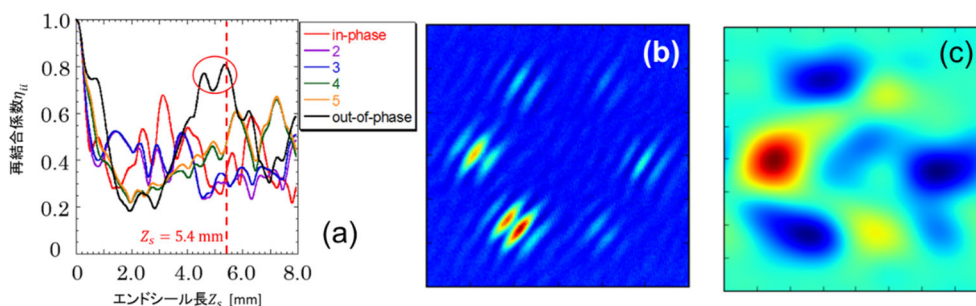


図 4. エンドシール位相同期 6 コア Yb 添加 MCPCF レーザーによる out-of-phase モード選択励振。(a) 各スーパーモードの再結合係数のシール長依存性 (b) 干渉縞 (c) 再構成された電界分布。

また本解析法を、従来の MCF レーザーに加え、新しくマルチモードファイバーレーザーにも適用し、解析方法の課題の洗い出しと改善に取り組んだ。偏光の不確定性を解決するために偏光を水平と垂直方向で分別できる干渉計の開発を行った。シミュレーションの解析により、主要モードに関しては比較的良い精度で解析できることを明らかにした。更にファイバーの曲げ損失と空間モードの依存性について有意な結果を得た。これまで困難であったマルチモードレーザーの空間モード評価の簡易で強力な手法であることを明らかにした。

## (3) 位相同期モード同期 MCF レーザー [2,3]

可飽和吸収体を MCF の遠視野に配置し強度の強い in-phase モードのみ選択励振させる位相同期 MCF レーザーを 2011 年に提案し、位相同期 Q スイッチについては実証していたが、本研究課題で位相同期モード同期動作に世界で初めて成功した。図 5 のように 7 コア Yb 添加 MCPCF レーザーの外部共振器の近視野に半導体可飽和吸収体鏡 (SESAM) の一種である半導体出力鏡 (SOC) を配置することで、位相同期とモード同期を同時に実現した (図 6)。ノイズライクで 333nJ、平均出力 14.1W、シングルパルスで平均出力 5.8W、137nJ の高平均出力高エネルギーピコ秒パルスを直接発生し、MCF レーザーによりパルスファイバーレーザーのエネルギースケールアップが可能であることを実証した。

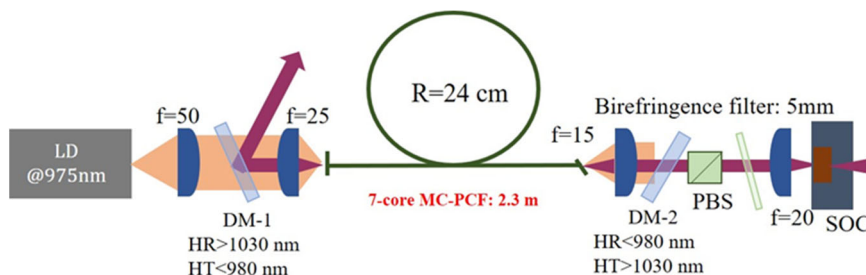


図 5. 可飽和吸収体による位相同期モード同期 7 コア Yb 添加 MCPCF レーザー



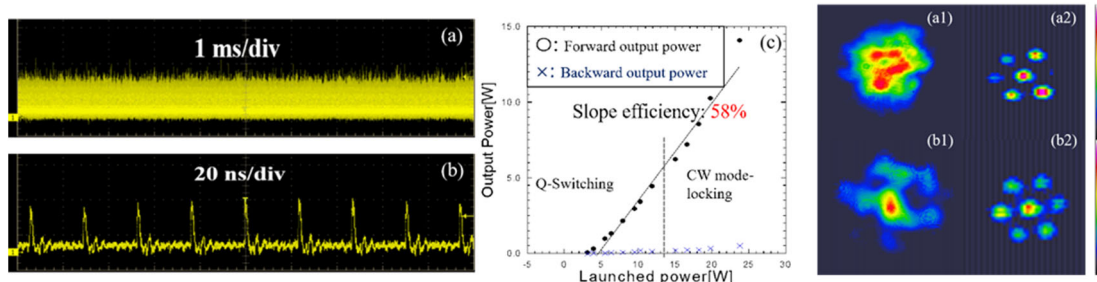


図 6. 位相同期モード同期 7 コア Yb 添加 MCPCF レーザーの特性。(a)(b) パルス列。(c) 入出力特性。SOC に代えて全反射鏡を用いた CW 発振時の(a1)遠視野像と(a2) 近視野像。SOC によるモード同期時の (b1) 遠視野像と(b2) 近視野像。

近視野配置の可飽和吸収体で in-phase モードが優先発振するメカニズムの解明を今後行う必要がある。また完全な in-phase モードではなく他のスーパーモードも一定程度含んだ状態でのモード同期発振はごく最近 MCF レーザーで報告された時空間(spatio-temporal)モード同期[4]と同原理と考えられ、スーパーモード間の縦モード間隔や群速度の違いの評価、最適化を行うことでビーム形状の自在制御の可能性を見いだした。

#### (4) 深層強化学習によるファイバー増幅器のコヒーレントビーム結合 [5,6]

これまで発振器主体に取り組んできたが、更なるパワー・エネルギーのスケールアップには増幅器が不可欠である。人工知能(AI)の一手法である深層強化学習を用いた複数ファイバー増幅器のコヒーレントビーム結合に取り組んだ。

図 7(a)のように 1.55 $\mu\text{m}$  帯フェムト秒モード同期 Er ファイバー発振器を分岐しそれぞれ増幅し、ビーム結合出力と PZT 駆動電圧の応答関係について深層強化学習を行う。図 7(b)のように 2,3 時間の学習を一度行えば、あとはスイッチオンで瞬時に位相同期が可能になる。残留位相雑音は PID を用いた従来手法と同等であることを示した。

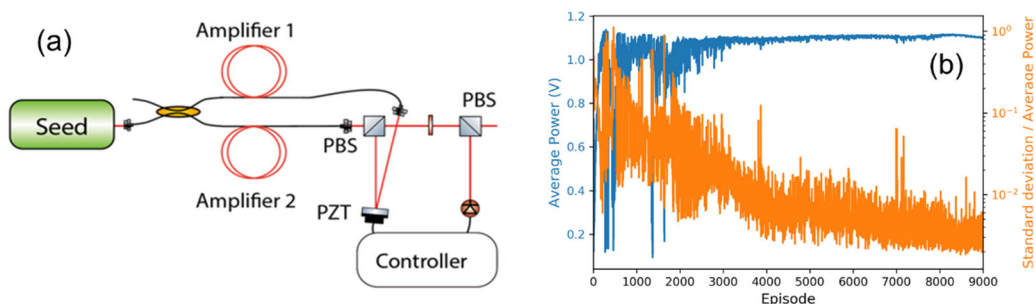


図 7(a)2つのフェムト秒ファイバー増幅器の深層強化学習によるコヒーレントビーム結合の実験配置図。(b) ビーム結合出力(青)と標準偏差(橙)。数千回のエピソード(繰り返し)学習でニューラルネットワークが最適化される。

この手法を MCF 増幅に適用できないか取り組んだ。遠視野像からリワード関数を得ることにより、コア数の増加に対し優れた拡張性を持つ。シミュレーションにより、4 コア、6 コア、7 コア、19 コアで同手法の適用性を確認した(図 8)。コア数やコア配置により適切なリワード関数が異なるが、多くの場合強度の 2 乗の積分が適用できることが分かった。

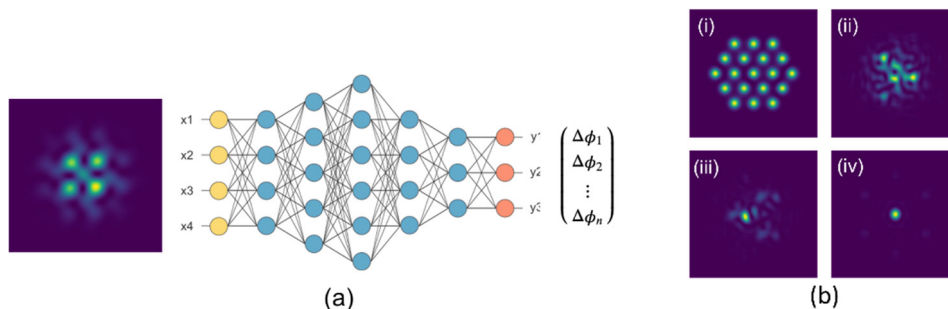


図 8 (a) MCF 出力の遠視野像(左)を取得し、リワード関数を求めて、各コアの位相(PZT 駆動電圧に相当)との応答関係について深層強化学習を行い、ニューラルネットワークを最適化する。(b)19 コアファイバーのシミュレーション。(i)コア配置(近視野像)、(ii)(iii)学習中の遠視野像、(iv)学習後の遠視野像。

このように、深層強化学習によるコヒーレントビーム結合はコア数の増大による系の複雑化

なしにコヒーレントビーム結合が可能である。MCFは単一ファイバーのためコア間で環境が等しく、生来の安定性が高い。本手法が適用しやすいと期待される。パルスエネルギーの向上の、最も有用な手法のひとつと確信する。

<引用文献>

- [1] 白川晃：「ファイバレーザの高出力化のためのコヒーレントビーム結合」, レーザー協会誌 vol.43, no.1,10-15 (2018).
- [2] T. Kawamura, A. Shirakawa, and K. Saito, “Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with a saturable absorber,” *Optics Express* vol.29, no.11, 17023-17028 (2021).
- [3] T. Kawamura and A. Shirakawa, “Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with a saturable absorber,” *Proc. SPIE* vol.11665, 116651N-1-116651N-6 (2021).
- [4] L. G. Wright, D. N. Christodoulides, and F. W. Wise, “Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers,” *Science*, vol.358, no.6359, 94-97 (2017).
- [5] H. Tünnermann and A. Shirakawa, “Deep reinforcement learning for coherent beam combining applications,” *Optics Express* vol.27, no.17, 24223-24230 (2019).
- [6] H. Tünnermann and A. Shirakawa, “Deep Reinforcement Learning for Tiled Aperture Beam Combining in a Simulated Environment,” *J. Phys: Photonics* vol.3, no.1, 015004 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tomonari Kawamura, Akira Shirakawa, and Kazuya Saito	4. 巻 29
2. 論文標題 Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with a saturable absorber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 17023-17028
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.421083	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 Tomonari Kawamura and Akira Shirakawa	4. 巻 11665
2. 論文標題 Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with a saturable absorber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 116651N
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2582719	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 川村朋稔、白川晃	4. 巻 RTM-20-19
2. 論文標題 可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー学会第548回研究会報告	6. 最初と最後の頁 27-31
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 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 Henrik Tunnermann and Akira Shirakawa	4. 巻 3
2. 論文標題 Deep Reinforcement Learning for Tiled Aperture Beam Combining in a Simulated Environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys: Photonics	6. 最初と最後の頁 15004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2515-7647/abcd83	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 Tomonari Kawamura, Akira Shirakawa, and Kazuya Saito	4. 巻 29
2. 論文標題 Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with a saturable absorber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 17023-17028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.421083	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 H. Tunnermann and A. Shirakawa	4. 巻 27
2. 論文標題 Deep reinforcement learning for coherent beam combining applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24223-24230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.024223	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 白川晃	4. 巻 43
2. 論文標題 ファイバレーザの高出力化のためのコヒーレントビーム結合	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 レーザー協会誌	6. 最初と最後の頁 10-15
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 -

〔学会発表〕 計44件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Tomonari Kawamura and Akira Shirakawa
2. 発表標題 Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with saturable absorber
3. 学会等名 CLEO 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Sugimoto, Henrik Tunnermann, and Akira Shirakawa
2. 発表標題 Generation of high energy ultrashort pulse using chirped pulse amplification and divided pulse amplification
3. 学会等名 10th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomonari Kawamura and Akira Shirakawa
2. 発表標題 Phase-locked and mode-locked multicore photonic crystal fiber laser with saturable absorber
3. 学会等名 Photonics West 2021-LASE (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Henrik Tunnermann and Akira Shirakawa
2. 発表標題 Tiled aperture beam combining with reinforcement learning
3. 学会等名 CLEO 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomonari Kawamura and Akira Shirakawa
2. 発表標題 Mode-locked fiber laser aiming to phase-locked multicore fiber laser
3. 学会等名 9th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 杉本洸太、白川晃
2. 発表標題 チャープパルス増幅および分割パルス増幅による高エネルギー超短パルスの発生とその位相特性
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村朋稔、白川晃
2. 発表標題 可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本洸太、白川晃
2. 発表標題 分割パルスファイバー増幅およびチャープパルス増幅による高エネルギー超短パルスの発生とその結合効率
3. 学会等名 第5回超高速光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村朋稔、白川晃
2. 発表標題 可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー
3. 学会等名 第5回超高速光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本洸太、白川晃
2. 発表標題 チャープパルス増幅および分割パルス増幅による高エネルギー超短パルスの発生とその位相特性
3. 学会等名 レーザー学会第548回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村朋稔、白川晃
2. 発表標題 可飽和吸収体による位相同期モード同期マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー
3. 学会等名 レーザー学会第548回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 文全嘗、白川晃
2. 発表標題 Yb添加マルチコアフォトニック結晶ファイバーによるファイバー増幅
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 Coherent Beam Combining with Deep Reinforcement Learning
3. 学会等名 Advanced Fiber Laser Conference (AFL) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 AI Controlled Coherent Beam Combining
3. 学会等名 Advanced Solid-State Lasers (ASSL) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Henrik Tennermann and Akira Shirakawa
2. 発表標題 Reinforcement learning for tiled aperture beam combining
3. 学会等名 Photonics West 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 AI Controlled Tiled Aperature Coherent Beam Combining
3. 学会等名 CLEO-Europe/EQEC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 Neural Network Controlled Coherent Beam Combining
3. 学会等名 8th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白川晃
2. 発表標題 高出力ファイバーレーザーの基礎と最新動向
3. 学会等名 レーザーEXPO 2019レーザー特別セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成富未夢人、白川晃
2. 発表標題 マルチコアファイバーレーザーの能動モード同期によるスーパーモード選択の検討
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梯太郎、白川晃
2. 発表標題 マルチモードレーザーの横モード解析の研究
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村朋稔、白川晃
2. 発表標題 可飽和吸収体によるマルチコアファイバーレーザーの位相同期に向けたモード同期ファイバーレーザー
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村朋稔、白川晃
2. 発表標題 可飽和吸収体によるマルチコアファイバーレーザーの位相同期に向けたモード同期ファイバーレーザーの研究」
3. 学会等名 レーザー学会第538回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成富未夢人、白川晃
2. 発表標題 マルチコアファイバーにおける時間領域スーパーモード選択の検討
3. 学会等名 レーザー学会第538回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梯太郎、白川晃
2. 発表標題 マルチモードレーザーの横モード解析
3. 学会等名 レーザー学会第538回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 文全崇、梯太郎、白川晃
2. 発表標題 Yb添加マルチコアファイバー増幅の研究
3. 学会等名 レーザー学会第538回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川村朋稔、白川晃
2. 発表標題 可飽和吸収体によるマルチコアファイバーレーザーの位相同期に向けたモード同期ファイバーレーザーの研究
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Henrik Tunnermann and Akira Shirakawa
2. 発表標題 OAM Beam via Deep Reinforcement Learning based Coherent Beam Combination
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2019, 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ei Jo, H. Tunnermann, and A. Shirakawa
2. 発表標題 Combining efficiency in divided pulse amplification
3. 学会等名 Workshorp on high power lasers at Jiangsu Normal University (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 Reinforcement learning for phase control in coherent beam combining
3. 学会等名 Workshorp on high power lasers at Jiangsu Normal University (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 Reinforcement learning for coherent beam combination
3. 学会等名 Photonics West 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 End-to-end reinforcement learning for coherent beam combination
3. 学会等名 8th EPS-QEOD Europhoton Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 Reinforcement Learning for Coherent Beam Combining
3. 学会等名 CLEO-PR 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tunnermann and A. Shirakawa
2. 発表標題 Probabilistic Phase Control for Coherent Beam Combining
3. 学会等名 CLEO 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Shirakawa, Y. Kurosu, and H. Tunnermann
2. 発表標題 Mode analysis in phase-locked multicore fiber laser by interference method
3. 学会等名 Photonics Europe 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白川晃
2. 発表標題 高出力ファイバーレーザーの基礎と最新動向
3. 学会等名 レーザー学会東京支部セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川村朋稔、白川晃
2. 発表標題 可飽和吸収体によるマルチコアファイバーレーザーの位相同期に向けたモード同期ファイバーレーザーの研究
3. 学会等名 第19回レーザー学会東京支部研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ei Jo, Henrik Tunnermann, Akira Shirakawa
2. 発表標題 Nonlinear Effects and Combining Efficiency in Divided Pulse Amplification
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成富未夢人, 白川晃
2. 発表標題 能動モード同期によるマルチコアファイバーのスーパーモード選択
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梯太郎, Henrik Tunnermann, 白川晃
2. 発表標題 マルチコアファイバーレーザーの横モード解析
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ei Jo, Koji Iwata, Henrik Tunnermann, and Akira Shirakawa
2. 発表標題 Nonlinearities in Divided Pulse Amplification
3. 学会等名 レーザー学会第525回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 梯太郎, 白川晃
2. 発表標題 マルチコアファイバーレーザーの横モード解析
3. 学会等名 レーザー学会第525回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 成富未夢人、白川晃
2. 発表標題 音響光学変調器を用いたマルチコアファイバーのスーパーモード選択
3. 学会等名 レーザー学会第525回研究会「ファイバーレーザー技術」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Henrik Tunnermann and Akira Shirakawa
2. 発表標題 Coherent Beam Combination via deep reinforcement learning
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2018, 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白川晃
2. 発表標題 位相同期マルチコアファイバーレーザーの最近の展開
3. 学会等名 レーザー学会「ファイバーレーザー技術」専門委員会
4. 発表年 2018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	齋藤 和也  (Saito Kazuya)  (20278394)	豊田工業大学・工学部・教授    (33924)	

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