

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420309

研究課題名(和文) 光通信容量の飛躍的な拡大のための空間分割多重技術の基盤形成

研究課題名(英文) Foundation of Space Division Multiplex Technology for Extremely Enhancing Optical Transmission Capacity

研究代表者

齊藤 晋聖 (Saitoh, Kunimasa)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20333627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マルチコアファイバ技術と、モード分割多重伝送技術を駆使することにより、伝送容量の飛躍的な拡大を可能にする空間分割多重伝送技術に関する研究を実施した。マルチコアファイバにおけるコア間クロストークを高精度に評価可能な理論を構築し、従来型のシングルコア単一モード光ファイバに比べて20倍以上の空間多重度を有するマルチコアファイバの設計が可能であることを明らかにした。また、マルチモード伝送を実現するためのモード合分波器に関しては、平面光導波路におけるLP11aモードを空間的に90度回転させるモード回転子を考案し、3つの空間モードの合分波が可能でモード合分波器を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated space division multiplexing technology for extremely enhancing optical transmission capacity by using multicore fiber technology and mode division multiplexing technology. For multicore fiber design, a theory for accurately estimating inter-core crosstalk in few-mode multicore fibers has been developed. Through detailed numerical simulations, it was found that the few-mode multicore fibers with a spatial multiplicity of 20 times larger than that of conventional single-core single-mode fibers can be achieved. In addition, for realizing mode division multiplexing, a planar lightwave circuit (PLC) based LP11 mode rotator was proposed in order to excite LP11b mode in the same plane, and the PLC-type 2LP-mode (3 mode) multiplexer/demultiplexer with uniform waveguide height has been developed.

研究分野：光通信工学

キーワード：空間分割多重 マルチコアファイバ 数モードファイバ マルチモードファイバ

### 1. 研究開始当初の背景

光ファイバ通信の伝送容量は、過去 20 年間に 1000 倍の大容量化を実現してきたが、今後 20 年間には、さらに 1000 倍以上の増強が必要であることが予想されている。しかしながら、光増幅器の帯域制限や光ファイバへの入力光パワー制限などの観点から、1 本の光ファイバで伝送できる容量はすでに限界に近づきつつある。こうした状況のもとで、ペタビット級、さらにはエクサビット級の光ファイバ通信を目指し、時間分割多重 (TDM) や波長分割多重 (WDM) および多値変調技術に加えて、新たな多重軸である空間分割多重 (SDM) の導入による、伝送容量の増大に関する研究開発が注目されている。SDM 技術としては、1 本の光ファイバに多数のコアを収容したマルチコアファイバ技術と、一つのコアの中を伝搬する複数の固有モードを利用したモード分割多重伝送技術があり、こうした SDM 技術の高度化が急務な状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、従来のシングルコア単一モード光ファイバの限界を打ち破る方法として、マルチコアファイバ技術とモード多重伝送技術を駆使することにより、伝送容量の飛躍的な拡大を可能にする空間分割多重伝送技術の高度化を目指す。具体的には、コア間クロストーク特性を考慮に入れたマルチコアファイバの最適構造を明らかにするとともに、モード分割多重伝送を可能にするための導波路型モード合分波器の実現方法を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) マルチコアファイバの設計の上では、隣接コア間の光の漏洩による信号干渉 (コア間クロストーク) をできるだけ低減することが重要となる。本研究では、いかなる構造のマルチコアファイバにも適用可能なクロストーク解析理論を構築する。具体的には、コア間の結合の度合い (結合係数) の評価には、有限要素法を適用し、マルチコアファイバの長手方向への曲げや捻じれによる確率的な変動までも含めたクロストーク特性の予測には、電力結合方程式に基づく解析理論を適用する。さらに、開発したマルチコアファイバ設計理論を用いて、高い空間多重度を有するマルチコアファイバの設計指針を明らかにする。

(2) モード分割多重伝送において、それぞれの空間モードを励振する方法や合分波器として、光学系 (空間系) を用いた手法が主流となっているが、挿入損失が大きいという問題がある。本研究では、光ファイバとの接続性や低損失化などを図る上で導波路型のモード合分波器を研究対象とする。具体的には、石英系ガラスによる平面光導波路 (PLC 光導波路) を基本構造とし、非対称方向性結

合器を利用することにより、入力ポートからの基本モードを所望の高次モードへ変換しマルチモードファイバへ合波 (あるいは、マルチモードファイバからの各モードを出力ポートの基本モードへ分波) することが可能な、PLC 導波路型モード合分波器の構成方法を明らかにする。

### 4. 研究成果

非結合型マルチコアファイバを長距離伝送媒体として利用する場合、コア間クロストークの低減とファイバ 1 本当たりの空間多重度にはトレードオフの関係があるため、目標とする伝送容量や伝送距離に応じて、コアパラメータやコア間隔を適切に設定する必要がある。コア間クロストーク低減と空間多重度向上の両立のため、本研究では、2 種類の 2LP モードコア (低 コア、高 コア) を利用した 3 モードマルチコアファイバを提案した。コア配置としては、図 1(a) に示すような正方格子状配置 12 コアファイバを検討した。また、コアの屈折率分布としては、図 1(b) に示すようなトレンチ構造を有するグレーデッドインデックス型を検討した。ここで、コア半径を  $r_1$ 、トレンチ内半径を  $r_2$ 、トレンチ幅を  $W$ 、コア、トレンチの比屈折率差をそれぞれ  $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2 = -0.70\%$  とし、 $\Delta n_2$  の値により

状態屈折率分布を決定している。また、C バンド (1530 nm ~ 1565 nm) における 2LP モード伝送 ( $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$ ) を想定し、実効的 2LP モード伝送条件を、 $LP_{21}$  モードの曲げ損失が、曲げ半径  $R=140$  mm、波長 1530 nm において 1.0 dB/m 以上とするとともに、低曲げ損失条件を、 $LP_{11}$  モードの曲げ損失が、曲げ半径  $R=30$  mm、波長 1565 nm で 0.5 dB/100turns 以下とする。さらに、 $LP_{01}$  モードの実効断面積 ( $A_{eff\_LP_{01}}$ ) は  $110 \mu m^2$  を設計目標とした。

図 2 に、 $LP_{01}$  モードと  $LP_{11}$  モード間の群遅延時間差 (DMD) の構造依存性を示す。ここで、青線、緑線、赤線はそれぞれ DMD が 100、0、-100 ps/km を示す。また、実線、破線、点線はそれぞれ  $(r_2/r_1, \Delta n_2 [\%]) = (9.0, 0.40)$ 、 $(9.5, 0.44)$ 、 $(9.75, 0.46)$  の場合である。 $r_2/r_1$ 、 $\Delta n_2$  はこの範囲において、 $r_2/r_1$  に対する  $A_{eff\_LP_{01}}$  の変化が非常に小さく、ほぼ  $110 \mu m^2$  となる。ここで、図 2 中の網掛け領域は、3 組の  $(r_2/r_1, \Delta n_2)$  に対して  $|DMD| < 100$  ps/km となる条件を示す。図 2 より、赤点の構造 ( $r_2/r_1=1.3$ 、 $\Delta n_2=-2.2$ ) が、 $\Delta n_2=0.40\% \sim 0.46\%$  の範囲で低 DMD を実現可能であることがわかる。ここでは、2 種類のコアとして、低 コア (コア 1) を  $(r_1, \Delta n_1) = (9.1 \mu m, 0.41\%)$ 、高 コア (コア 2) を  $(r_1, \Delta n_1) = (9.65 \mu m, 0.46\%)$  とする。また、実効的 2LP モード条件、低曲げ損失条件、および低 DMD スロープ条件を考慮して、 $W/r_1$  をそれぞれのコアにおいて 0.7、0.3 とする。図 3 に、各コアにおける DMD の波長依存性を示す。C バンドにおいて、いずれのコアも  $|DMD| < 10$  ps/km となることがわかる。

図4に、コア間クロストーク(XT)のコア間距離依存性を示す。XTの最悪値をとるLP<sub>11</sub>モード間のXT<sub>11-11</sub>において、コア間距離35 μmでXT < -30 dB/kmを実現可能である。また、最外クラッド厚は、過剰損失を抑圧する条件から42.5 μm以上必要である。図1(a)に示すような正方格子状に12コアを配置する場合を考えると、コア間隔を Δ<sub>1</sub> = 43 μmとしてもクラッド外径は220 μmとなり、従来のシングルコア単一モード光ファイバと比較した相対コア多重度指数は26.5となる。

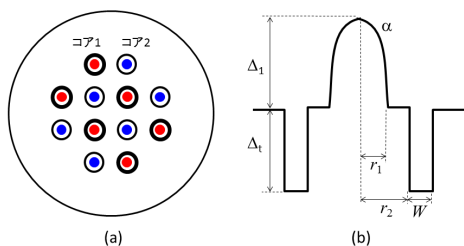


図1 (a) 正方格子型12コアファイバ、(b) トレンチ型グレーデッドインデックス分布

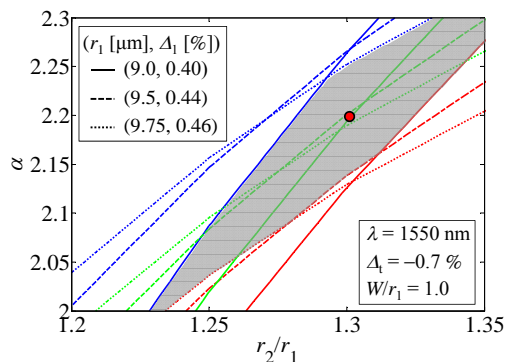


図2 群遅延時間差の構造依存性

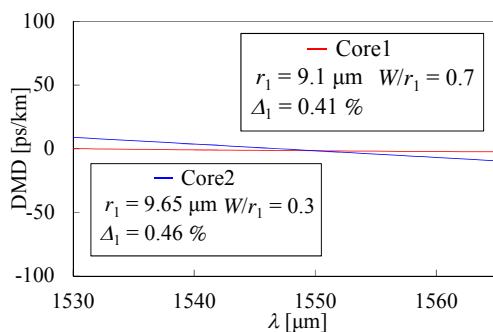


図3 群遅延時間差の波長依存性

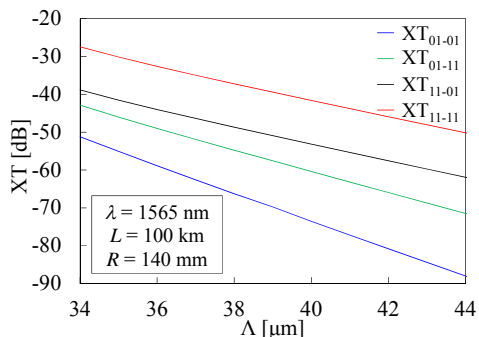


図4 クロストークのコア間隔依存性

モード分割多重伝送システムの送受信側では、いずれも従来型の送受信デバイスを利用し、基本モード(LP<sub>01</sub>モード)を用いて処理することを想定すると、送信側では各信号を所望のモードへ変換するモード変換機能を備えたモード合波器が必要である。また、受信側では各モードを基本モードへ変換するモード消光比特性に優れたモード分波器が求められる。モード合分波器としては、これまで種々の構成方法が提案されているが、なかでも、PLC型モード合分波器は、小型で低損失であり、かつ低コストで大量生産が可能であるという特長を有している。

図5に、LP<sub>01</sub>モード(導波路モードではE<sub>11</sub>モード)とLP<sub>11a</sub>モード(導波路モードではE<sub>21</sub>モード)の2モードを合分波可能なPLC型モード合分波器の構成例を示す。導波路高さhとコアr<sub>1</sub>が同一で、導波路幅の異なる方向性結合器を用いている。ポート1(導波路1)側の導波路幅w<sub>1</sub>を固定し、ポート2(導波路2)側の導波路幅w<sub>2</sub>を変化させることにより、所望の動作波長において導波路1におけるLP<sub>01</sub>モードの実効屈折率neff\_LP<sub>01</sub>と導波路2におけるLP<sub>11a</sub>モードの実効屈折率neff\_LP<sub>11a</sub>を整合させることができ、モード変換機能を備えたモード合分波器として利用することができる。例えば、w<sub>1</sub>=h=7.5 μm、Δ<sub>1</sub>=-0.4%とすると、w<sub>2</sub>=19.3 μmと設定することにより、波長1550 nmにおいてneff\_LP<sub>01</sub>とneff\_LP<sub>11a</sub>の位相整合条件が満足される。

PLC型モード合分波器においてモード多重数を拡大するには、図5に示すような非対称方向性結合器を所望のモード数に応じて多段に接続すればよい。しかしながら、全ての導波路の高さが同一であるというPLC構造の条件下では、基本モード(E<sub>11</sub>モード)からモード変換可能な導波路の高次モードはE<sub>m1</sub>モード(m>1)のみであり、縦方向に節を有する高次モード、すなわちE<sub>mn</sub>モード(n>1)へは結合できないことに注意する必要がある。ただし、LP<sub>11b</sub>モード(導波路モードではE<sub>12</sub>モード)が励振できれば、LP<sub>21</sub>モード以上への多重数拡大が可能であり、モード多重数拡大のためにはLP<sub>11b</sub>モードの励振方法が必要である。

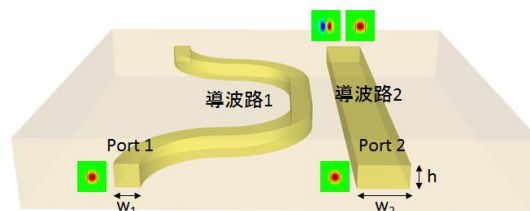


図5 PLC型2モード合分波器の構成例

本研究では、導波路高さを変えずにLP<sub>11b</sub>モードを励振する方法として、図6(a)に示すようなLP<sub>11</sub>モードに対するモード回転子を提案した。本モード回転子は、導波路の非対称性を導入するために、導波路端から距離tの位置に、幅s、深さdの溝(トレンチ)を設けている。LP<sub>11</sub>モードに対する光学軸を導波路

水平方向から約 45 度傾けるようにトレンチ構造を設定することにより、LP<sub>11</sub> モードに対するモード回転子として利用することができる。本回転子に LP<sub>11a</sub> モード(あるいは LP<sub>11b</sub> モード)を入射すると、図 6(b)に示すモード回転子内の 2 つの直交する LP<sub>11</sub> モードがほぼ均等に励振される。この 2 つの LP<sub>11</sub> モードの伝搬定数をそれぞれ  $\beta_a$ 、 $\beta_b$  とすると、モード回転子の導波路長を半ビート長、すなわち  $L = (\beta_a - \beta_b)^{-1}$  に設定することにより、LP<sub>11a</sub> モードを LP<sub>11b</sub> モードへ、あるいは LP<sub>11b</sub> モードを LP<sub>11a</sub> モードへ変換させるモード回転子として利用することができる。

図 7 に、モード回転子に LP<sub>11a</sub> モードを入射した場合のモード回転の様子を示す。ここで、コア  $\Delta = 0.45\%$ 、導波路高さ  $h = 11 \mu\text{m}$ 、導波路幅  $w = 11.3 \mu\text{m}$ 、 $t = 2 \mu\text{m}$ 、 $s = 1.5 \mu\text{m}$ 、 $d = 5.4 \mu\text{m}$  である。入射した LP<sub>11a</sub> モードは伝搬とともに反時計回りに回転し、伝搬長 1.46 mm において LP<sub>11b</sub> モードに変換されていることが確認できる。図 8 に、LP<sub>11a</sub> モードを入射した場合の LP<sub>11b</sub> モードへの変換効率の波長依存性の計算結果を示す。変換効率は波長に対してほぼ無依存であり、波長 1450 nm ~ 1650 nm の範囲で 90 % 以上の変換効率となっている。また、クロストークについても、波長 1450 nm ~ 1650 nm の範囲において -16 dB 以下となっており、広帯域で動作するモード回転子として利用可能であることがわかる。

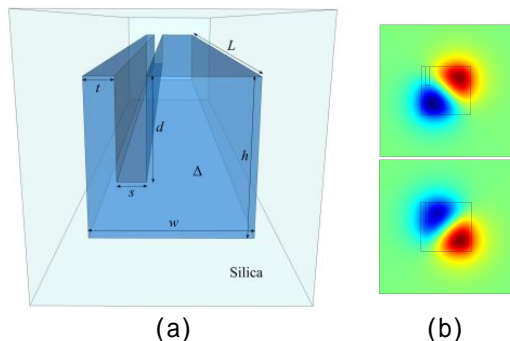


図 6 LP<sub>11</sub> モード回転子の構造と回転子内の固有モード

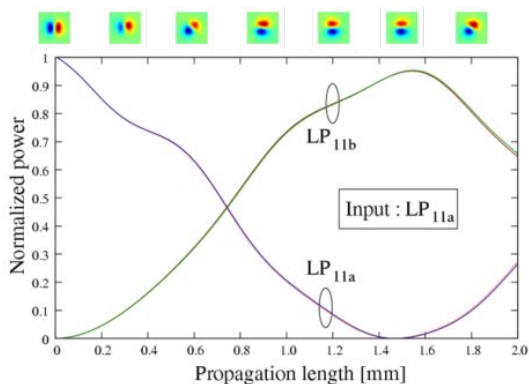


図 7 LP<sub>11a</sub> から LP<sub>11b</sub> モードへの変換効率の伝搬長依存性

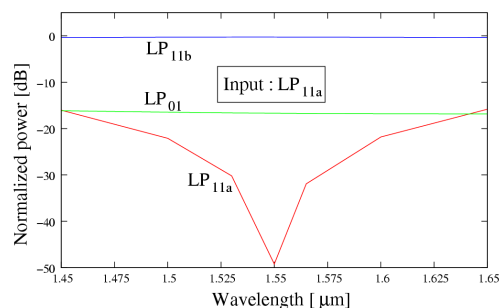


図 8 モード回転子の変換効率の波長依存性

図 9 に、LP<sub>01</sub> モード、LP<sub>11a</sub> モード、LP<sub>11b</sub> モードの 3 モードを合分波可能なモード回転子を利用したモード合分波器の構成法を示す。Port 1 から入射された基本モード(CH1)は 1 段目の結合器部分で LP<sub>11a</sub> モードとして中央の導波路に合波されるが、モード回転子を通過後、LP<sub>11b</sub> モードに変換される。また、Port 2 から入射された基本モード(CH2)はモード回転子の影響を受けずにそのまま LP<sub>01</sub> モードとして出力される。さらに、Port 3 から入射された基本モード(CH3)は 2 段目の結合器部分で LP<sub>11a</sub> モードとして中央の導波路に合波されることになる。

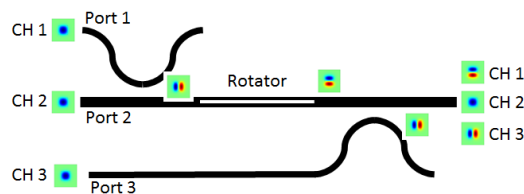


図 9 PLC 型 3 モード (LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>) 合分波器の構成法

## 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 10 件)

- [1] K. Saitoh and S. Matsuo, “Multicore fiber technology”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 1, pp. 55-66, Jan. 2016. 【査読有】
- [2] J. Tu, K. Saitoh, Y. Amma, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with graded-index profile and square-lattice layout for low differential mode delay”, Optics Express, vol. 23, no. 14, pp. 17783-17792, July 2015. 【査読有】
- [3] 齊藤晋聖, 半澤信智, 植村 仁, “マルチコア・マルチモード用入出力デバイス”, オプトロニクス, vol. 33, no. 396, pp. 54-58, Dec. 2014. 【査読なし】
- [4] K. Saitoh, T. Uematsu, N. Hanzawa, Y. Ishizaka, K. Masumoto, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, and F. Yamamoto, “PLC-based LP<sub>11</sub> mode rotator for mode-division multiplexing transmission”,

- Optics Express, vol. 22, no. 16, pp. 19117-19130, July 2014. 【査読有】
- [5] M. Kasahara, K. Saitoh, T. Sakamoto, N. Hanzawa, T. Matsui, K. Tsujikawa, and F. Yamamoto, "Design of three-spatial-mode ring-core fiber", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 7, pp. 1337-1343, Apr. 2014. 【査読有】
- [6] J. Tu, K. Saitoh, K. Takenaga, and S. Matsuo, "Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with low differential mode delay", Optics Express, vol. 22, no. 4, pp. 4329-4341, Feb. 2014. 【査読有】
- [7] T. Uematsu, T. Kitayama, Y. Ishizaka, and K. Saitoh, "Ultra-broadband silicon-wire polarization beam combiner/splitter based on a wavelength insensitive coupler with a point-symmetrical configuration", IEEE Photonics Journal, vol. 6, no. 1, pp. 4500108, Feb. 2014. 【査読有】
- [8] K. Saitoh and S. Matsuo, "Multicore fibers for large capacity transmission", Nanophotonics, vol. 2, no. 5-6, pp. 441-454, Dec. 2013. 【査読有】
- [9] M. Kasahara, K. Saitoh, T. Sakamoto, N. Hanzawa, T. Matsui, K. Tsujikawa, F. Yamamoto, and M. Koshihara, "Design of few-mode fibers for mode-division multiplexing transmission", IEEE Photonics Journal, vol. 5, no. 6, pp. 7201207, Dec. 2013. 【査読有】
- [10] J. Tu, K. Saitoh, M. Koshihara, K. Takenaga, and S. Matsuo, "Optimized design method for bend-insensitive heterogeneous trench-assisted multi-core fiber with ultra-low crosstalk and high core density", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 15, pp. 2590-2598, Aug. 2013. 【査読有】
- 〔学会発表〕(計38件)
- [1] T. Fujisawa, R. Tojo, S. Saitoh, S. Matsuo, and K. Saitoh, "Extremely small group delay spread six-core fiber with air-holes for mode-division-multiplexing: A principal mode analysis", OFC, W2A.30, Anaheim, USA, March 20-24, 2016.
- [2] 山下陽子, 石坂雄平, 半澤信智, 藤澤剛, 坂本泰志, 松井隆, 辻川恭三, 山本文彦, 中島和秀, 齊藤晋聖, "PLC型6モード合分波器に関する検討", 電子情報通信学会総合大会, C-3-45, 福岡, Mar. 15-18, 2016.
- [3] 伏見直人, 西本笙子, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 佐々木雄佑, 植村仁, "2段コア屈折率分布を有する4LPモードマルチコアファイバ対応溶融延伸型ファンイン/ファンアウトデバイスの検討", 電子情報通信学会総合大会, B-13-27, 福岡, Mar. 15-18, 2016.
- [4] 西本笙子, 藤澤剛, 植村仁, 佐々木雄佑, 松尾昌一郎, 齊藤晋聖, "溶融延伸型マルチコアファイバカプラを用いた6モード合分波器の設計", 電子情報通信学会総合大会, B-13-25, 福岡, Mar. 15-18, 2016.
- [5] 千田泰之, 東城蓮, 藤澤剛, 齊藤晋聖, "同種結合型6コアファイバのインパルス応答解析", 電子情報通信学会総合大会, B-13-24, 福岡, Mar. 15-18, 2016.
- [6] 西本笙子, 藤澤剛, 植村仁, 佐々木雄佑, 松尾昌一郎, 齊藤晋聖, "溶融延伸型マルチコアファイバカプラを用いた5モード合分波器の設計", 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, OFT-2015-72, 那覇, Feb. 18-19, 2016.
- [7] 東城蓮, 千田泰之, 藤澤剛, 齊藤翔太, 竹永勝宏, 齊藤晋聖, "同種3,6コア結合型ファイバの群遅延広がりに関するプリンシパルモード解析", 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, OFT-2015-71, 那覇, Feb. 18-19, 2016.
- [8] 山下陽子, 牧野俊太郎, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 半澤信智, 坂本泰志, 松井隆, 辻川恭三, 山本文彦, "3次元スカラ有限要素ビーム伝搬法に基づく波面整合法による低損失・広帯域PLC型2モード合分波器に関する検討", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE-2015-116, 別府, Oct. 29-30, 2015.
- [9] Y. Yamashita, S. Makino, T. Fujisawa, K. Saitoh, N. Hanzawa, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, and F. Yamamoto, "Broadband LP01/LP11 PLC-based mode multi/demultiplexer designed by wavefront matching method", FiO/LS, FM1E.5, San Jose, USA, Oct. 18-22, 2015.
- [10] T. Fujisawa and K. Saitoh, "Impulse response analysis of strongly-coupled three-core fibers", FiO/LS, FM1E.3, San Jose, USA, Oct. 18-22, 2015.
- [11] Y. Tobita, T. Fujisawa, K. Saitoh, S. Matsuo, and K. Takenaga, "Comparison of homogeneous and heterogeneous 2LP-mode multicore fibers for high spatial multiplicity", FiO/LS, FM1E.2, San Jose, USA, Oct. 18-22, 2015.
- [12] T. Fujisawa and K. Saitoh, "A principal mode analysis of strongly-coupled 3-core fibres", ECOC, We.1.4.6, Valencia, Spain, Sept. 27-Oct. 1, 2015.
- [13] 山下陽子, 牧野俊太郎, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 半澤信智, 坂本泰志, 松井隆, 辻川恭三, 中島和秀, 山本文彦, "円弧状トレンチを装荷したPLC型LP11モード回転子に関する検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-2, 仙台, Sep. 8-11, 2015.
- [14] 東城蓮, 千田泰之, 藤澤剛, 齊藤翔太, 松尾昌一郎, 齊藤晋聖, "モード多重伝送用空孔付加結合型6コアファイバの検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-13-27, 仙台, Sep. 8-11, 2015.
- [15] 天野翔, 藤澤剛, 齊藤晋聖, "グレーデッド型数モード空孔アシスト12コアファイバによる伝送容量拡大の検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-13-21, 仙台, Sep. 8-11, 2015.
- [16] 千田泰之, 東城蓮, 藤澤剛, 齊藤晋聖, "同種3コア結合型ファイバのインパルス応答解析", 電子情報通信学会ソサ



- イエティ大会, B-13-20, 仙台, Sep. 8-11, 2015.
- [17] K. Saitoh, "Multicore fibers for large space multiplicity", ISUPT/EXAT, T2.1, Kyoto, Japan, July 13-15, 2015.
- [18] J. Tu, K. Saitoh, Y. Amma, K. Takenaga, and S. Matsuo, "Design method of heterogeneous trench-assisted graded-index few-mode multi-core fiber with low differential mode delay", OECC, JTuC.32, Shanghai, China, June 28-July 2, 2015.
- [19] K. Saitoh, "Multicore Fibers for SDM Transmission", PGC, E4-1, Singapore, June 28-July 3, 2015.
- [20] 山下陽子, 増本浩平, 牧野俊太郎, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 半澤信智, 坂本泰志, 松井隆, 辻川恭三, 山本文彦, "波面整合法によるPLC型2モード合分波器の広帯域化に関する検討", 電子情報通信学会総合大会, C-3-50, 草津, Mar. 10-13, 2015.
- [21] 飛田勇紀, 猪狩章, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 安間淑通, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, "低DMD異種非結合型2LPモードGI-MCFの設計", 電子情報通信学会総合大会, B-13-25, 草津, Mar. 10-13, 2015.
- [22] 増本浩平, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, "二段コア屈折率分布を有する2LPモードマルチコアファイバ対応溶融延伸型ファンイン/ファンアウトデバイスの検討", 電子情報通信学会総合大会, B-13-10, 草津, Mar. 10-13, 2015.
- [23] 猪狩章, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, "ベクトル有限要素法とフィールド結合理論による同種3コア結合型ファイバの伝送特性解析", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE-2014-224, 鹿児島, Feb. 19-20, 2015.
- [24] K. Saitoh, "Multicore Fiber Technology", OFC, Th4C.1, Los Angeles, USA, March 22-26, 2015.
- [25] K. Saitoh, "Multicore fiber for space division multiplexing", ACP, AW3C.1, Shanghai, China, Nov. 11-14, 2014.
- [26] 猪狩章, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, "同種結合型3コアファイバにおけるDMGD低減に関する検討", 電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 札幌, Oct. 25-26, 2014.
- [27] 西本笙子, 藤澤剛, 竹永勝宏, 植村仁, 佐々木雄佑, 大道浩児, 後藤龍一郎, 松尾昌一郎, 齊藤晋聖, "マルチコアファイバを用いた3モード合分波器の設計", 電子情報通信学会サイエティ大会, 徳島, Sept. 23-26, 2014.
- [28] 石坂雄平, 千田泰之, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 坂本泰志, 半澤信智, 松井隆, 辻川恭三, 山本文彦, "シリカ系光導波路に接続された4LPモード光ファイバの励振特性に関する検討", 電子情報通信学会サイエティ大会, 徳島, Sept. 23-26, 2014.
- [29] 増本浩平, 藤澤剛, 齊藤晋聖, 植村仁, 大道浩児, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, "2モードマルチコアファイバ対応溶融延伸型ファンイン/ファンアウトデバイスのテーパ形状に関する検討", 電子情報通信学会サイエティ大会, 徳島, Sept. 23-26, 2014.
- [30] 東城蓮, 藤澤剛, 齊藤晋聖, "同心2重コア型数モードファイバによるDMD低減に関する検討", 電子情報通信学会サイエティ大会, 徳島, Sept. 23-26, 2014.
- [31] 天野翔, 猪狩章, 藤澤剛, 齊藤晋聖, "数モード空孔アシスト12コアファイバによる伝送容量拡大の検討", 電子情報通信学会サイエティ大会, 徳島, Sept. 23-26, 2014.
- [32] 齊藤晋聖, 松尾昌一郎, "大容量伝送用マルチコアファイバ," 電子情報通信学会マイクロ波・ミリ波フォトンクス研究会, 札幌, Apr. 17, 2014.
- [33] 齊藤晋聖, 植松卓威, 半澤信智, 坂本泰志, 松井隆, 辻川恭三, 山本文彦, "モード多重伝送用PLC型モード合分波器", 電子情報通信学会総合大会, 新潟, Mar. 18-21, 2014.
- [34] T. Uematsu, N. Hanzawa, K. Saitoh, Y. Ishizaka, K. Masumoto, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, and F. Yamamoto, "PLC-type LP<sub>11</sub> mode rotator with single-trench waveguide for mode-division multiplexing transmission," OFC/NFOEC, Th2A.52, San Francisco, USA, Mar. 9-13, 2014.
- [35] 植松卓威, 齊藤晋聖, 半澤信智, 坂本泰志, 松井隆, 辻川恭三, 増本浩平, 石坂雄平, 小柴正則, "モード多重伝送のための平面光導波路型モード合分波器の広帯域化に関する検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 福岡, Sept. 17-20, 2013.
- [36] 笠原基幹, 齊藤晋聖, 坂本泰志, 半澤信智, 松井隆, 辻川恭三, 小柴正則, "3モードリングコアファイバに関する検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 福岡, Sept. 17-20, 2013.
- [37] 猪狩章, 笠原基幹, 齊藤晋聖, 竹永勝宏, 松尾昌一郎, 小柴正則, "異種結合型3コアファイバに関する検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 福岡, Sept. 17-20, 2013.
- [38] J. Tu, K. Saitoh, M. Koshiba, K. Takenaga, and S. Matsuo, "Optimized design method for heterogeneous trench-assisted multi-core fiber," OECC, MS1.5, Kyoto, Japan, June 30-July 4, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齊藤 晋聖 (SAITOH KUNIMASA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号: 20333627