

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 5 月 30 日現在

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22360134
 研究課題名（和文） シングルコア光ファイバの限界を打ち破るマルチコアファイバ技術の基盤形成
 研究課題名（英文） Basic Research on Multi-core Optical Fibers Breaking Through Limitations of Single-core Fibers
 研究代表者
 小柴 正則（KOSHIBA MASANORI）
 北海道大学・大学院情報科学研究科・特任教授
 研究者番号：40101521

研究成果の概要（和文）：非結合型マルチコアファイバのクロストーク特性を解析するために、モード結合理論ならびに電力結合理論に基づくモデルを構築した。具体的には、光ファイバの曲げやねじれを組み込むとともに、光ファイバの伝搬方向における不均一性をも組み込んだアルゴリズムの開発を行った。特に、電力結合理論においては、指数型自己相関関数に基づく平均電力結合係数の解析的厳密解を導出し、数値計算を不要とした。ここで設計、試作した 12 コアファイバは、世界初となる 1 ペタを超える伝送実験に用いられた。

研究成果の概要（英文）：Coupled-mode and coupled-power theories were described for multi-core fiber design and analysis, and inter-core crosstalk in multi-core fibers with bend-induced random perturbations was investigated. Furthermore, an analytical expression of the average power-coupling coefficient based on an exponential autocorrelation function was derived, resulting in no need for heavy numerical computations. A 12-core fiber investigated here was installed in the transmission experiment with the record capacity of 1.01-Pb/s.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2011 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2012 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光ファイバ、マルチコアファイバ、空間分割多重、クロストーク、有限要素法、モード結合理論、電力結合理論、自己相関関数

1. 研究開始当初の背景

(1) 我が国の幹線系の光通信インフラは、1987 年に 1.6 Gbps（毎秒 1.6 ギガビット）、2007 年に 1.6 Tbps（毎秒 1.6 テラビット）と、過去 20 年間に 1000 倍の大容量化を実現

してきた。新世代ネットワークが普及する今後 20 年間には、超高精細動画や 3 次元画像を含む超臨場感通信の普及に伴い、ペタビットの時代を迎えることになる。これに対応できるペタビット級の光通信インフラを構

築するには、伝送容量を、さらに 1000 倍増強する必要がある。

(2) これまでの光通信インフラは、時分割多重 (TDM) と波長分割多重 (WDM) とで、その伝送容量を拡大してきたが、多重数の増大とともに入力光パワーも増大し、非線形効果による信号劣化やファイバフーズ現象による伝送路の熱損傷が問題になっている。これまでの光通信インフラの伝送容量の限界は、変復調方式や中継器の雑音特性の改善等を考慮しても、たかだか 100 Tbps (1.6 Tbps の数十倍) と予想される。

(3) 次世代の 100 Tbit/s 超光伝送の実現には、従来のシングルコア光ファイバの限界を打ち破る革新的光ファイバの登場が強く望まれている。このような状況のもとで、1 本のファイバに多数のコアを収容したマルチコアファイバに対する関心が世界的に高まっており、コア多重度の向上に向けて、コア間クロストークの発生メカニズムを明らかにするとともに、コアの最適配置や収容可能コア数を明確化することが急務になっている。

2. 研究の目的

(1) ファイバ 1 本あたりのコアが一つだけの現在のシングルコア光ファイバでは、耐非線形性、耐フーズ性の観点から、いずれ伝送容量の限界に突き当たると予想されている。本研究では、こうしたシングルコア光ファイバの限界を打ち破るファイバとして、1 本のファイバに多数のコアを収容したマルチコアファイバを新規に開発し、空間分割多重のためのマルチコアファイバ技術の基盤形成を目指す。

(2) マルチコアファイバの最も重要な課題はコア間クロストークの低減であり、このクロストークの発生メカニズムを明らかにするとともに、コアの最適配置や収容可能コア数の明確化に必要なクロストークの解析技術を開発する。また、コア多重度の向上に向けて、通常のマルチコアファイバのみならず、トレンチ付加型マルチコアファイバや空孔付加型マルチコアファイバをも検討対象として、コア間クロストーク低減のための諸課題を抽出し、マルチコアファイバの基本設計パラメータを定める。

3. 研究の方法

(1) コア間クロストークの解析理論として、まず、モード結合理論を導入し、長尺のマルチコアファイバへの適用性について検討する。このとき、個々のコアの伝搬定数やコア間のモード結合係数を定める必要があるが、これには、高精度で高信頼度の有限要素法を採用する。また、モード結合理論に光ファイバの曲げやねじれの影響を組み込み、コアの

長手方向の不規則な揺らぎがコア間クロストークのファイバ長 (条長) 依存性に与える影響を明らかにする。

(2) モード結合理論では、平均クロストークを算出するために、数多くのサンプルについてシミュレーションを繰り返す必要があるため、コアの長手方向の不規則な揺らぎがあらかじめ理論に組み込まれている電力結合理論に基づくコア間クロストークの解析理論を開発する。電力結合理論では、電力結合係数を適切に設定する必要があり、ここでは、具体的に、指数型、ガウス型、三角型の 3 種類の自己相関数を導入し、電力結合係数を閉じた形で導出する。

4. 研究成果

(1) 従来のモード結合理論では、曲げやねじれの長手方向のランダム性を考慮するために、すべてのコアにランダムな位相オフセットを与えているが、この位相オフセットを与える位置は、周期的に発生する位相整合共振点の中心に固定されている。こうした位相オフセットを与えると、その前後の光ファイバは互いに無相関となり、位相オフセットを与える距離は、対象としている光ファイバの相関長に関係すると考えられる。

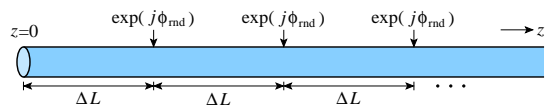


図 1 ランダムな位相オフセットが印加された光ファイバ

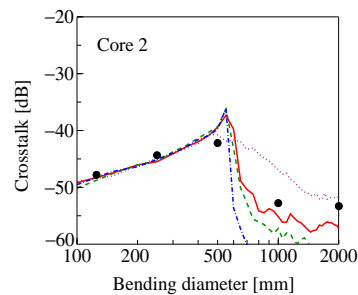


図 2 モード結合理論によるクロストークの曲げ直径依存性

点線: $\Delta L=1$ cm、実線: $\Delta L=5$ cm、破線: $\Delta L=10$ cm、一点鎖線: $\Delta L=50$ cm、●: 実験値

そこで、図 1 に示すように、位相オフセットを与える距離をセグメント長 ΔL と定義し、長さ 100 m の準均一 7 コア光ファイバについて、中心コア 1 から外側コア 2 への平均クロストークの曲げ直径依存性を、セグメント長 ΔL をパラメータとして図 2 に示す。この計算では、コア間隔を $39.2 \mu\text{m}$ 、中心コアの直径

を $8.05 \mu\text{m}$ 、外側コアの直径を $7.63 \mu\text{m}$ (コア 2)、 $7.83 \mu\text{m}$ (コア 3)、 $7.69 \mu\text{m}$ (コア 4)、 $7.93 \mu\text{m}$ (コア 5)、 $7.70 \mu\text{m}$ (コア 6)、 $7.94 \mu\text{m}$ (コア 7) と仮定している。図中の点線、実線、破線、一点鎖線はそれぞれ $\Delta L=1 \text{ cm}$ 、 5 cm 、 10 cm 、 50 cm の場合の結果である。

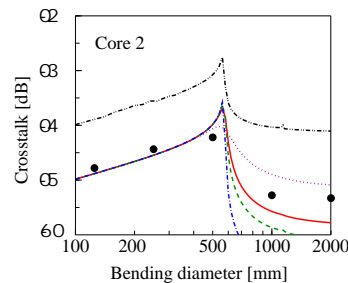
クロストークが曲げによって支配される曲げ直径の小さい領域では、クロストークのセグメント長依存性は見られない。これに対して、曲げ直径の大きい領域では、明らかにセグメント長依存性が認められ、クロストークは統計的性質に依存することになる。言い換えると、セグメント長は、いわゆる相関長に対応すると考えられ、この光ファイバの相関長は、実験値との比較から 5 cm 前後と推定される。なお、異種コアを用いた場合、モード結合係数の対称性がなくなり、パワーの保存則が保証されないことになるので、モード結合係数を対称化する必要があることも明らかにした。

(2) モード結合理論では、平均クロストークを算出するために、数多くのサンプルについてシミュレーションを繰り返す必要があり、設計に利用するには難がある。ちなみに、図 2 の結果を得るのに用いたサンプル数は 100 である。このため、1 回の計算で平均クロストークを算出できる電力結合理論の開発を行った。電力結合理論を適用するためには、電力結合係数を適切に設定する必要がある。ここでは、指数型、ガウス型、三角型の 3 種類の自己相関関数を導入し、電力結合係数を閉じた形で導出することに成功した。

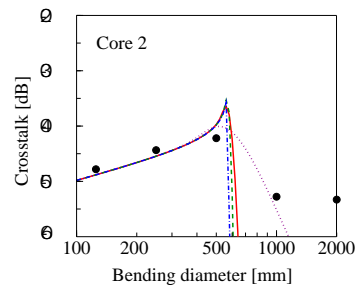
図 3 (a)、(b)、(c) は、それぞれ指数型、ガウス型、三角型自己相関関数に基づく電力結合係数を用いて算出された準均一 7 コアファイバのクロストークの曲げ直径依存性を示したものである。図中の点線、実線、破線、一点鎖線はそれぞれ相関長が $d=1 \text{ cm}$ 、 5 cm 、 10 cm 、 50 cm の場合の結果である。曲げ直径の小さい領域では、クロストークは相関長に依存しておらず、いずれの自己相関関数によっても、ほぼ同様な結果が得られており、改めて、この領域におけるクロストークは統計的性質に依らず、曲げによって支配されていることが確認できる。曲げ直径の大きな領域におけるクロストークは統計的性質に依存しており、ガウス型では、モード結合理論との差異が大きい。ここでも実験値との比較から、対象とした光ファイバの相関長が 5 cm 前後であることが再確認できる。

ところで、三角型自己相関関数に基づく電力結合係数を用いた場合には、クロストークが統計的性質に依存する領域、依存しない領域のいずれにおいても実験値とよく一致した結果が得られている。特に、図 2 に示したモード結合理論による結果とほとんど同じ結果が得られていることは興味深い。ただし、

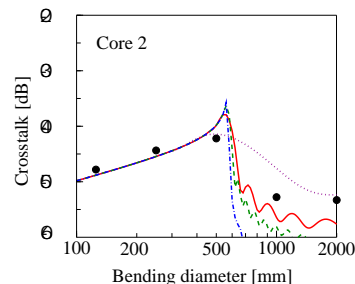
三角型自己相関関数に基づく電力結合係数では、相関長を超える 2 点間の揺らぎにまったく相関がなく、コア間の伝搬定数差と相関長との積が 2π の整数倍になると電力結合係数の値が 0 になるなど、非現実的な側面がある。これと同様なことは、曲げやねじれの僅かな変動を考慮するために、ある距離ごとにランダムな位相オフセットを与えて (この距離が電力結合理論における相関長に対応する) クロストークを評価するモード結合理論においても起こっていると考えられる。また、モード結合理論では、平均クロストークを算出するために多数のサンプルについてシミュレーションを繰り返す必要があり、計算に時間を要する。このため、MCF のクロストークを効率よく評価には、指数型自己相関関数に基づく電力結合係数を用いた電力結合理論が適していることを明確化した。



(a) 指数型自己相関関数



(b) ガウス型自己相関関数



(c) 三角型自己相関関数

図 3 電力結合理論によるクロストークの曲げ直径依存性

点線： $d=1 \text{ cm}$ 、実線： $d=5 \text{ cm}$ 、破線： $d=10 \text{ cm}$ 、一点鎖線： $d=50 \text{ cm}$ 、二点鎖線：最大電力移行率を結合長で除した電力結合係数による計算値、●：実験値

なお、研究を開発した当時、電力結合係数を閉じた形で導出することが世界的にできていなかったため、最大電力移行率を結合長で除した簡易な電力結合係数を用いていたが、これによる結果を、図 3 (a)に二点鎖線で示している。実験値とは、10 dB 前後の差異が認められる。また、ここでは、中心コアから外側コア 2 へのクロストークを示したが、残りの外側コア 3~7 へのクロストークについても、実験値と一致した結果が得られている。

(3) 指数型自己相関関数に基づく電力結合係数を用いた電力結合理論によって、曲げやねじれがあるマルチコアファイバの平均クロストークを、モード結合理論のように多数のサンプルについて計算を繰り返すことなく、一度の計算で評価できることになった。しかし、電力結合係数が長手方向の関数になっているので、この方向に電力結合方程式を逐次的に解かなければならず、数値計算が必要であることに変わりはなく、結果に対する見通しは必ずしも良くない。そこで、平均電力結合係数の解析的厳密解の導出を試みた結果、実験値をよく説明できる指数型自己相関関数に基づく平均電力結合係数に関して、その解析的厳密解を見出すことに成功した。

本研究によって開発された結合特性の解析技術を駆使して、クロストークとコア多重度との関係を詳細に調査し、マルチコアファイバの最適設計に資するデータを提供した。また、こうしたデータを基に、2 種ピッチ構造 10 コア光ファイバや単リング構造 12 コア光ファイバの設計を行った。特に、単リング構造 12 コア光ファイバは、世界初となる 1 Pbps (毎秒 1 ペタビット) を超える伝送実験に用いられた。

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 14 件)

- ① T. Hayashi, T. Sasaki, E. Sasaoka, K. Saitoh, and M. Koshihira, “Physical interpretation of intercore crosstalk in multicore fiber: effects of macrobend, structure fluctuation, and microbend,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 21, No. 5, pp. 5401-5412, Mar. 2013
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.21.005401>
- ② S. Matsuo, Y. Sasaki, T. Akamatsu, I. Ishida, K. Takenaga, K. Okuyama, K. Saitoh, and M. Koshihira, “12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 20, No. 27, pp. 28398-28408, Dec. 2012
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.028398>
- ③ Y. Sasaki, K. Takenaga, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshihira, “Large-effective-area uncoupled few-mode multi-core fiber,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 20, No. 26, pp. B77-B84, Dec. 2012
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.000B77>
- ④ K. Takenaga, Y. Sasaki, N. Guan, S. Matsuo, M. Kasahara, K. Saitoh, and M. Koshihira, “A large-effective-area few-mode multi-core fiber,” *IEEE Photonics Technology Letters*, 査読有, Vol. 24, No. 21, pp. 1941-1944, Nov. 2012
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6307819>
- ⑤ K. Saitoh, M. Koshihira, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Crosstalk and core density in uncoupled multi-core fibers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, 査読有, Vol. 24, No. 21, pp. 1898-1901, Nov. 2012
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6296690>
- ⑥ M. Koshihira, K. Saitoh, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Analytical expression of average power-coupling coefficients for estimating intercore crosstalk in multicore fibers,” *IEEE Photonics Journal*, 査読有, Vol. 4, No. 5, pp. 1987-1995, Oct. 2012
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6316044>
- ⑦ J. Tu, K. Saitoh, M. Koshihira, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 20, No. 14, pp. 15157-15170, July 2012
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.015157>
- ⑧ K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshihira, “A large effective area multi-core fiber with an optimized cladding thickness,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 19, No. 26, pp. B543-B550, Dec. 2011
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.00B543>

- ⑨ M. Koshiba, K. Saitoh, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Multi-core fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 19, No. 26, pp. B102-B111, Dec. 2011
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.00B102>
- ⑩ S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about 200 μm ,” *Optics Letters*, 査読有, Vol. 36, No. 23, pp. 4626-4628, Dec. 2011
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.004626>
- ⑪ S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Crosstalk behavior of multi-core fiber with structural parameter drift in longitudinal direction,” *IEICE Electronics Express*, 査読有, Vol. 8, No. 17, pp. 1419-1424, Sept. 2011
<http://dx.doi.org/10.1587/elex.8.1419>
- ⑫ K. Imamura, Y. Tsuchida, K. Mukasa, R. Sugisaki, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Investigation on multi-core fibers with large Aeff and low micro bending loss,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 19, No. 11, pp. 10595-10603, May 2011
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.010595>
- ⑬ S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Crosstalk behavior of cores in multi-core fiber under bent condition,” *IEICE Electronics Express*, 査読有, Vol. 8, No. 6, pp. 385-390, Mar. 2011
<http://dx.doi.org/10.1587/elex.8.385>
- ⑭ K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction,” *IEICE Transactions on Communications*, 査読有, Vol. E94-B, No. 2, pp. 409-416, Feb. 2011
<http://dx.doi.org/10.1587/transcom.E94.B.409>

[学会発表] (計 18 件)

- ① Y. Sasaki, Y. Amma, K. Takenaga, S.

- Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Investigation of crosstalk dependencies on bending radius of heterogeneous multicore fiber,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2013)*, Mar. 21, 2013, Anaheim Convention Center, USA
- ② S. Matsuo, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Recent progress on multi-core fiber and few-mode fiber,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2013)*, Mar. 18, 2013, Anaheim Convention Center, USA
- ③ H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, and T. Morioka, “1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency,” *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2012)*, Sept. 20, 2012, Amsterdam RAI Convention Center, The Netherlands
- ④ Y. Sasaki, K. Takenaga, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Large-effective-area uncoupled few-mode multi-core fiber,” *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2012)*, Sept. 18, 2012, Amsterdam RAI Convention Center, The Netherlands
- ⑤ I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Investigation of longitudinal power decay of a MCF by using a 50-km weakly-coupled multi-core fibre,” *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2012)*, Sept. 17, 2012, Amsterdam RAI Convention Center, The Netherlands
- ⑥ K. Saitoh, M. Koshiba, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Homogeneous and heterogeneous multi-core fibers,” *IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting (SUM 2012)*, July 10, 2012, Renaissance Seattle Hotel, USA
- ⑦ K. Takenaga, Y. Sasaki, N. Guan, S. Matsuo, M. Kasahara, K. Saitoh, and M. Koshiba, “A large effective area few-mode multi-core fiber,” *IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting (SUM 2012)*, July 10, 2012,

- Renaissance Seattle Hotel, USA
- ⑧ J. Tu, K. Saitoh, M. Koshiba, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Large-effective-area heterogeneous trench-assisted twelve-core fiber under bending condition,” OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2012), July 5, 2012, BEXCO Convention Center, Korea
- ⑨ M. Koshiba, K. Saitoh, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Recent progress in multi-core fiber design and analysis,” OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2012), July 5, 2012, BEXCO Convention Center, Korea
- ⑩ K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Characterisation of MC fibers: new techniques and challenges,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2012), Mar. 6, 2012, Los Angeles Convention Center, USA
- ⑪ Y. Sasaki, K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Large-effective-area uncoupled 10-core fiber with two-pitch layout,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2012), Mar. 5, 2012, Los Angeles Convention Center, USA
- ⑫ M. Koshiba, K. Saitoh, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Multi-core fiber design and analysis,” European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2011), Sept. 19, 2011, Palexpo, Switzerland
- ⑬ K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “A large effective area multi-core fiber with an optimized cladding thickness,” European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2011), Sept. 19, 2011, Palexpo, Switzerland
- ⑭ Y. Arakawa, K. Takenaga, S. Tanigawa, Y. Sasaki, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Length dependence of cutoff wavelength of trench-assisted multi-core fiber,” OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2011), July 6, 2011, The Splendor Kaohsiung, Taiwan
- ⑮ K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, and M.

Koshiba, “Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2011), Mar. 9, 2011, Los Angeles Convention Center, USA

- ⑯ M. Koshiba, “Recent progress in multi-core fibers: their prospects and potentials,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2011), Mar. 6, 2011, Los Angeles Convention Center, USA
- ⑰ K. Saitoh, T. Matsui, T. Sakamoto, M. Koshiba, and S. Tomita, “Multi-core hole-assisted fibers for high core density space division multiplexing,” OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010), July 7, 2010, Sapporo Convention Center, Japan
- ⑱ M. Koshiba, “Recent progress in multi-core fibers for ultralarge-capacity transmission,” OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010), July 6, 2010, Sapporo Convention Center, Japan

[その他]
ホームページ等

<http://icp.ist.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小柴 正則 (KOSHIBA MASANORI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・
特任教授
研究者番号：40101521

(2) 研究分担者

齊藤 晋聖 (SAITOH KUNIMASA)
北海道大学・大学院情報科学研究科・
准教授
研究者番号：20333627