

1. 研究課題・実施機関・研究開発期間・研究開発予算

- ◆ 課題名 革新的光通信インフラの研究開発
- ◆ 個別課題名 課題ウ マルチコア・マルチモード伝送技術
- ◆ 副題 マルチコア／マルチレベル／マルチモード光伝送技術の研究
- ◆ 実施機関 日本電信電話(株)(代表研究者)、東北大学、島根大学、大分大学、横浜国立大学、九州大学
- ◆ 研究開発期間 平成23年度から平成27年度(5年間)
- ◆ 研究開発予算 総額419百万円(平成27年度 74百万円)

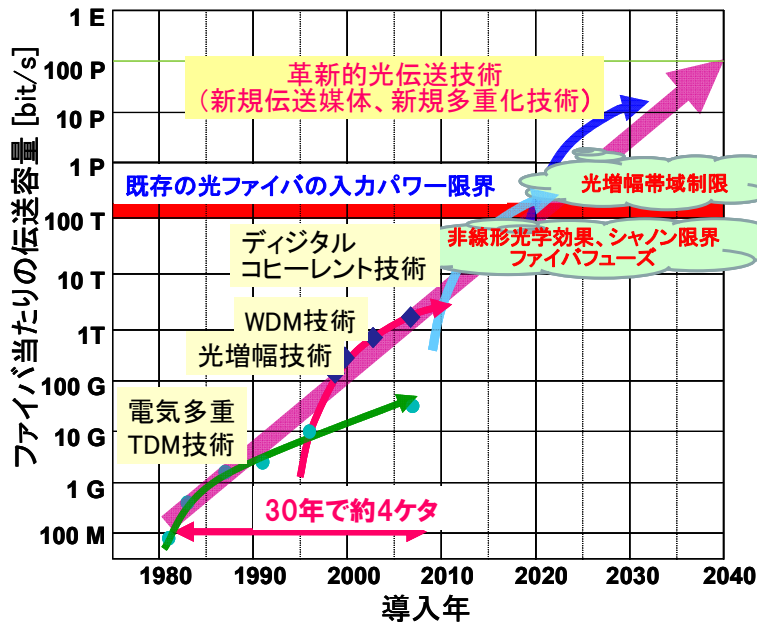
2. 研究開発の目標

- ◆ マルチコアファイバを用いた大容量空間多重光伝送技術、「周波数」および「空間」の2つの資源を最大限に活用した超多重化コヒーレント伝送技術、およびマルチモード伝送技術を研究開発し、1 Eb/s・kmを達成する大容量空間多重光伝送技術の見通しを得る。

3. 研究開発の成果

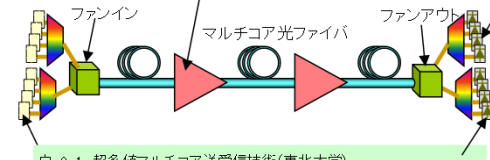
革新的光通信インフラの研究開発

マルチコア／マルチレベル／マルチモード光伝送技術の研究開発



課題ウ-1 マルチコア伝送技術 目標コア数: 7~12

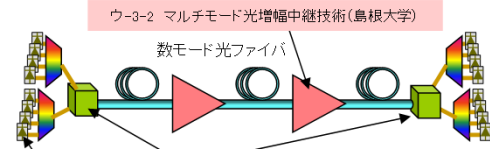
- ウ-1-1 マルチコア伝送系設計・評価技術(日本電信電話株式会社)
- ウ-1-5 マルチコア伝送の実証(日本電信電話株式会社)
- ウ-1-2 マルチコアMMO信号処理技術(日本電信電話株式会社)
- ウ-1-4 マルチコア位同期化ダイバーシティ伝送技術(大分大学)
- ウ-1-3 マルチコア光増幅中継技術(島根大学)



- ウ-2-1 超多値マルチコア送受信技術(東北大学)
- ウ-2-2 超多値信号のマルチコア伝送評価および総合実験(東北大学)

課題ウ-2 超多値マルチコア伝送技術 目標多値数: 64-512

- ウ-3-1 マルチモード伝送系設計技術(日本電信電話株式会社)
- ウ-3-6 マルチモード伝送の実証(日本電信電話株式会社)



- ウ-3-3 単一コア伝送用モード合成分波技術(日本電信電話株式会社)
- ウ-3-4 結合マルチコア伝送用モード合成分波技術(横浜国立大学)
- ウ-3-5 マルチモード光源技術(九州大学)

課題ウ-3 マルチモード伝送技術 目標モード数: 5~8

課題ウ-4
マルチコア・マルチモード
伝送技術

**容量距離積 1Eb/s・km級
実現のための
要素技術の確立**

(例: 5 Pb/s × 200 km = 1 Eb/s・km)

- ウ-4-1 マルチコア・マルチモード伝送系設計(日本電信電話株式会社)
- ウ-4-2 マルチコア・マルチモード伝送の実証(日本電信電話株式会社)

「革新的光通信インフラの研究開発

課題ウ マルチコア・マルチモード伝送技術の研究開発」の目標・成果

①マルチコア伝送技術（課題ウー1）

目的: マルチコア伝送について伝送設計および伝送特性向上技術の開発を行い、大容量空間多重光伝送技術を確立する。

成果:

◆マルチコア伝送系設計・評価技術、マルチコア伝送の実証(NTT)

- ・課題 150 ア、イおよび課題 146 と協力して、世界で初めて光ファイバ当り 1 Pb/s を超える大容量光伝送に成功した。
- ・伝搬方向インタリーブ方式によるクロストーク低減および DSP による光非線形補償により、総合容量距離積 1 Eb/s・km を超える多中継伝送実験 (1,500 km、2 × 344 Tb/s) に成功した。
- ・7 コアファイバ 204.6 km を用いた遠隔励起光伝送実験に成功し、無中継光伝送において世界最大容量である 120.5 Tb/s を達成した。

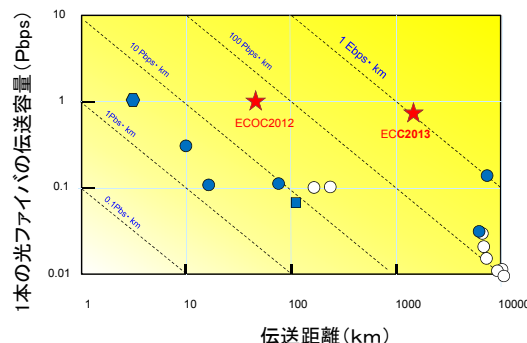


図1-1 主な大容量光伝送実験

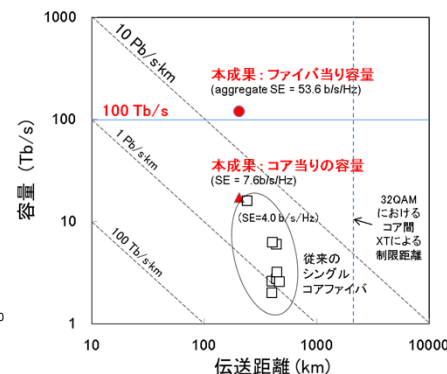


図1-2 主な遠隔励起光伝送実験

◆マルチコア光増幅中継技術(島根大学)

- ・励起光源共有型のマルチコア EDFA に適用可能な全光型フィードフォワード AGC 方式の提案と、高速 AGC 動作の実験検証を行った。本方式により、WDM チャンネル数変動に起因する利得変動を、AGC なしの場合の 7.9dB から 0.65dB に抑圧できることを実験確認した。

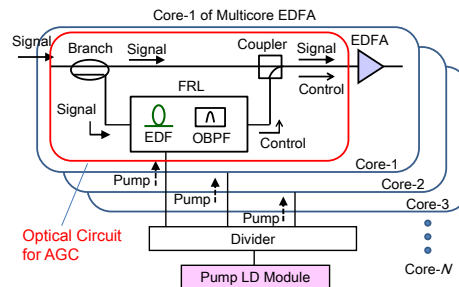


図1-3 AGC光回路を有するEDFA構成

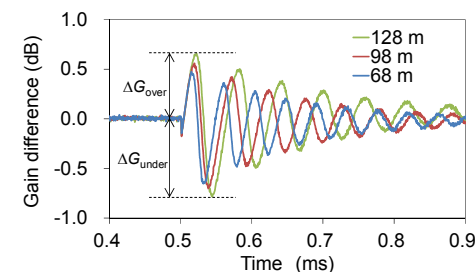


図1-4 高速AGC特性

◆マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術(大分大学)

- ・WDM 信号光とその位相共役光を用いた 2 コア ダイバーシティ伝送とその最大比合成による非線形位相回転の相殺が可能となり、4 dB を超える Q 値利得に関する実証結果が得られた。上記の結果は、容量距離積で単一コア2本の伝送性能を上回ることを意味する。また、分散値は 6 ps/nm/km 程度と小さいほど、また中継スパンごとに分散補償する方が高い相殺効果が得られている。

S-by-S

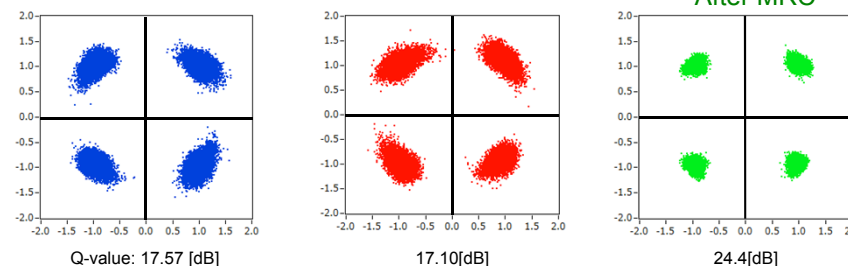


図1-5 WDM信号光&位相共役光2コアファイバ伝送による3dBを超えるQ値利得

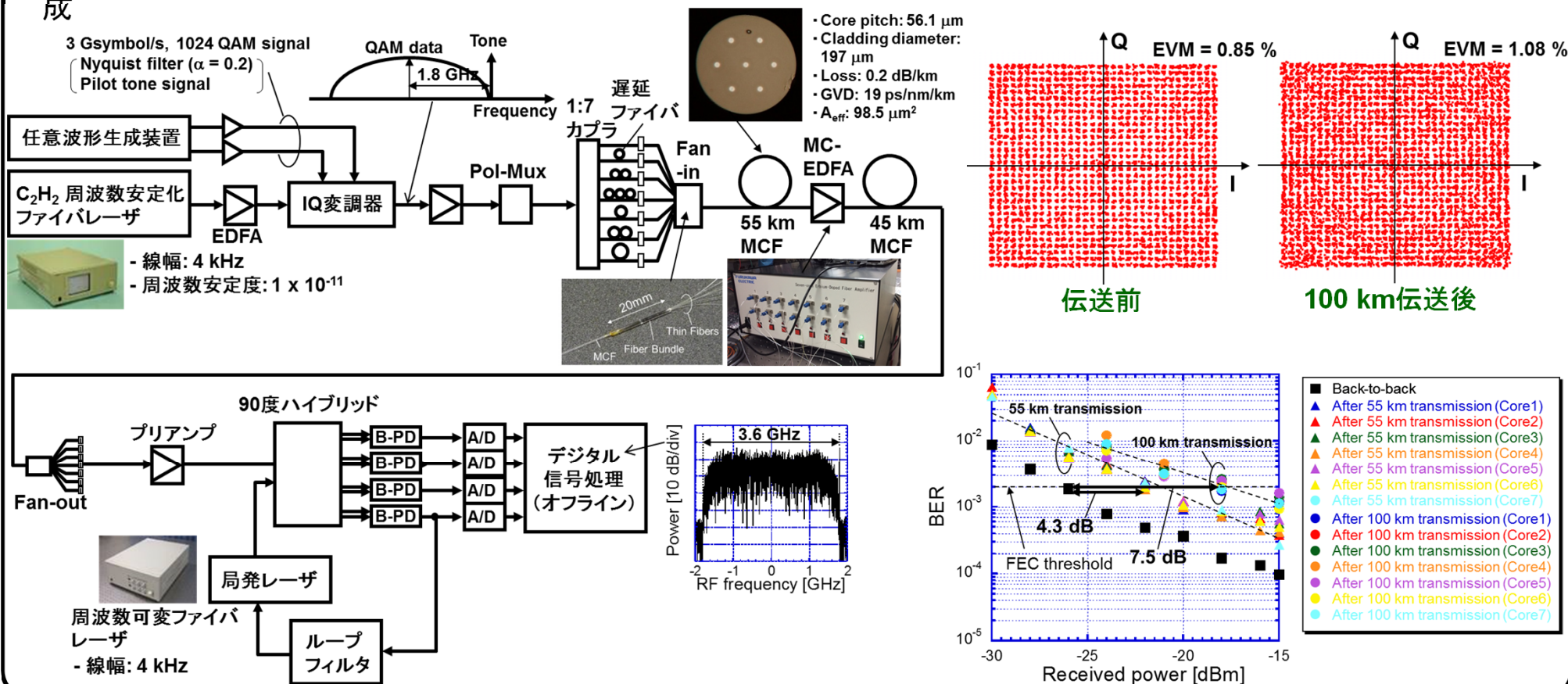
「革新的光通信インフラの研究開発

課題ウ マルチコア・マルチモード伝送技術の研究開発」の目標・成果

②超多値マルチコア伝送技術（課題ウー2）（東北大学）

・ 目標:ファイバ 1 本あたり 100 bit/s/Hz の超高周波数利用効率を目指して、変調多値度の拡大により 1 コアあたり 14 bit/s/Hz を上回る周波数利用効率(7 コア伝送で 100 bit/s/Hz に相当)を実現する。超多値コヒーレント QAM 信号空間多重送受信部を構築し、マルチコアEDFAを介して7 コア空間多重中継伝送を実現する。

・ 成果:7 コアファイバ、ファンイン・ファンアウトデバイス、7コアEDFAで構成される超多値マルチコア中継伝送系を構築し、3 Gsymbol/s、420 Gbit/s (60 Gbit/s × 7 コア) 1024 QAM信号の100 km伝送を実現。1 コアあたり 15.6 bit/s/Hz、ファイバ 1 本あたり 109 bit/s/Hz の高い周波数利用効率を単一モードのマルチコアファイバで初めて達成



「革新的光通信インフラの研究開発 課題ウ マルチコア・マルチモード伝送技術の研究開発」の目標・成果

③マルチモード伝送技術 (課題ウー3)

目的: 伝送技術、合分波技術、光源技術、伝送ファイバに要求される特性等の検討を行い、大容量モード多重伝送の見通しを得る。

◆結合型マルチコア伝送用モード合分波技術 (横浜国立大学)

- ・空孔アシスト2段クラッド異種コアによる低クロストーク超高密度 MCF を設計。
- ・19 コア MCF 用導波路型 Fan-in/Fan-out デバイスを実証。
- ・4 コア結合型マルチコアファイバ用のモード合波器を実証。(図 3-1)
- ・モード多重用 3 モードファイバの各モードのモード励振比(クロストーク)評価を偏光状態まで含めて分析する方法を開発。

◆マルチモード光源技術 (九州大学)

- ・MMI 型 LP11 モードデバイス(図 3-2)を検討し、2 モード 対応デバイス構造を実現。
- ・さらなる高次モード対応構造を提案し、LP21 モード対応デバイス構造(図 3-3)を実現した。
- ・新たに、a-OAM モードによる伝送チャンネル数拡大方式を提案した。

◆マルチモード光増幅中継技術 (島根大学)

- ・マルチモード光増幅中継器の基本構成を提案し、モード間利得偏差低減を可能とする励起方法の提案と光増幅特性の明確化を行った。

◆単一コア伝送用モード合分波技術 (NTT)

- ・非対称方結型 PLC 回路で、単一コア高次モード光の変換・合分波を実現。
- ・ダブルゲート構成により高クロストーク化を実現した。
- ・開発した技術を応用し PLC 型 MDL 等化器等を検討・試作した(図3-4)。

◆マルチモード伝送技術 (NTT)

- ・光学的モード分離実証の為の伝送系の構築、マルチモード伝送系要求条件明確化、および MIMO 信号処理法的设计・実装した。
- ・上記技術の組合せにより、6モード以上のモード多重光伝送実験に成功した。

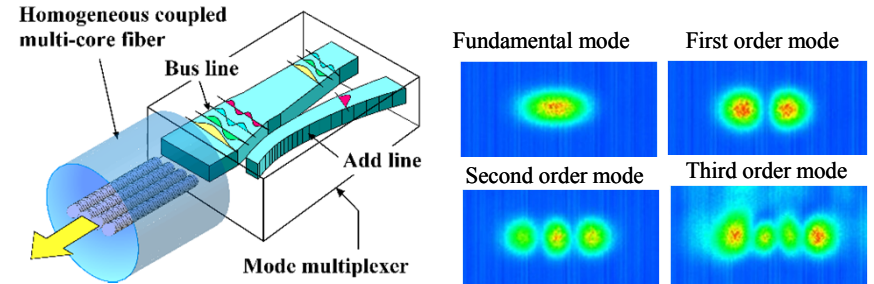


図3-1 4コア結合型マルチコアファイバ用モード合分波器の基本構造とモード合波器の出射光近視野像の測定結果

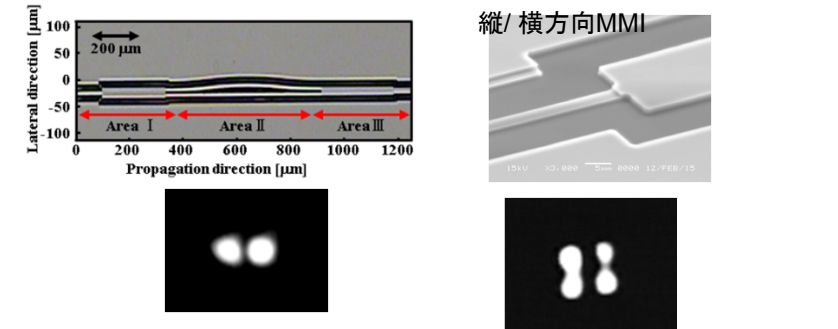


図3-2 LP11モードデバイス

図3-3 LP21モード対応デバイス

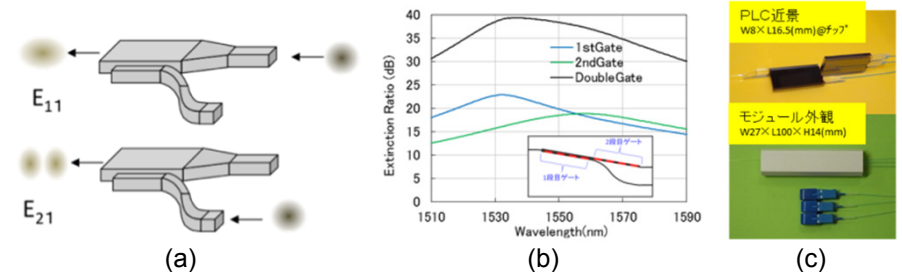


図3-4 PLC型モード変換・合分波回路の基本構成(a)と特性向上検討例(b)と作製したPLCモジュール(c)

「革新的光通信インフラの研究開発 課題ウ マルチコア・マルチモード伝送技術の研究開発」の目標・成果

④マルチコア・マルチモード伝送技術 (課題ウー4)

目的: 多重数 30 以上を実現するマルチコア・マルチモード伝送技術に関する基礎検討を行う。

◆マルチコア・マルチモード伝送の実証 (NTT)

- 課題ウの各技術を結集し、さらに課題 150 ア・イ、課題 170 と協力して、空間多重数拡大とモード分散補償の両立を可能とするマルチコア・マルチモード伝送設計、モード合分波技術、パラレル MIMO-TDE マルチモード信号処理技術により、世界で初めて空間多重数が 30 を超える、高密度空間分割多重(DSDM)光伝送(12コア×3モード、PDM-32QAM、40 km)に成功した。
- パラレル MIMO-FDE マルチモード信号処理技術、およびグレーテッド型マルチコア・マルチモードファイバによりモード分散の影響を抑圧し、モード依存損失(MDL)の低いマルチモード光増幅器および MDL 補償器により MDL を低減することで、マルチコア・マルチモード光伝送では世界初の中継光伝送を実現し、世界最大のモード分散補償量 33.2 ns の長距離 DSDM 伝送(12コア×3モード、PDM-QPSK、527 km)を実現した。

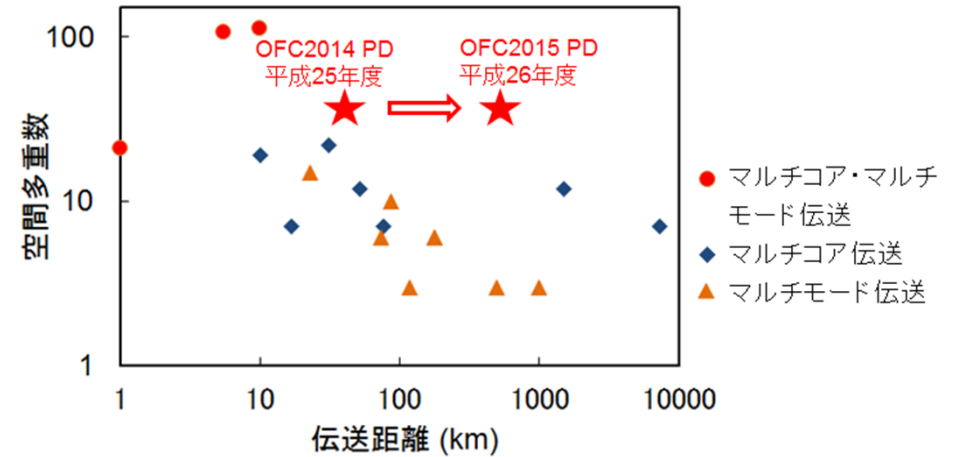


図4-2 空間多重と伝送距離の関係

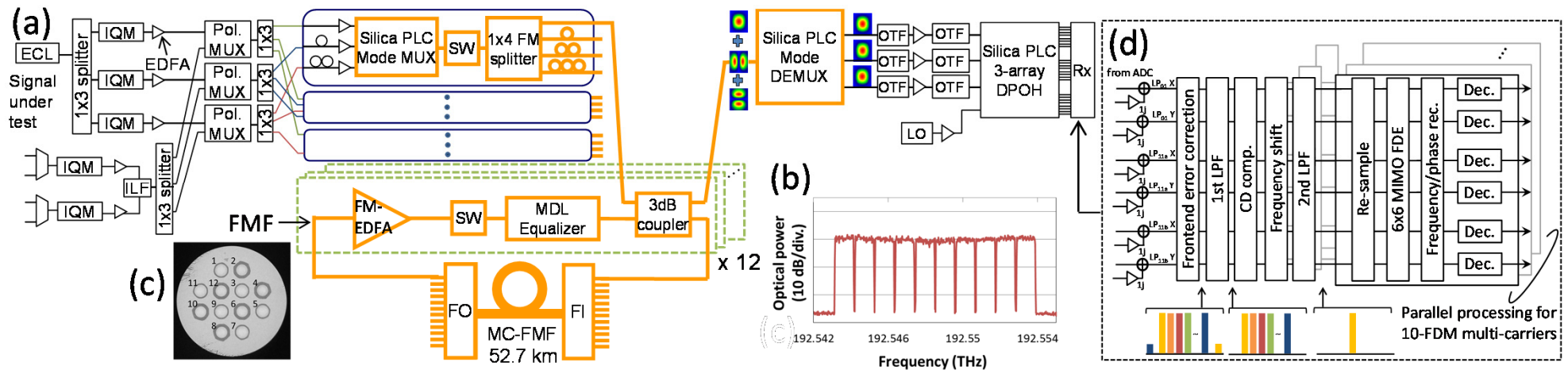


図4-1 マルチコア・マルチモード伝送実験系

4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等)

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース 報道	展示会	標準化提案
革新的光通信インフラ の研究開発 課題ウ	16 (2)	6 (2)	24 (6)	197 (39)	17 (0)	17 (4)	0 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) 学会発表・表彰

- H. Takara et al, *Proc. ECOC2012*, (postdeadline paper) Th.3.C.1, 2012. 光ファイバ1心で世界初の1Pb/s光伝送実験に成功 (H24)
- T. Kobayashi, et al, *Proc. ECOC2013*, (postdeadline paper) PD3.E.4, 2012. 世界初の1Eb/s・kmの長距離・大容量光伝送実験に成功 (H25)
- H. Takara, H. Masuda et al, *Proc. ECOC2014*, (postdeadline paper) PD3.1, 2014. マルチコア遠隔励起光増幅中継技術による世界最大容量120 Tbit/s-204km無中継伝送実験に成功 (H26)
- K. Shibahara et al, *Proc. OFC2015*, (postdeadline paper) Th5C.3, 2015. パラレルMIMO-FDE等化による高密度空間多重(多重数36)長距離伝送(527km)に成功 (H27)
(2016年 OSA Tingye Li Innovation Prize 受賞)
- Chitose International Forum on Photonics Science & Technology (H21年)、Optics & Photonics Japan 2011 (H21年)の基調講演にて研究概要を発表 (H23)
- M. Nakazawa, "Ultrahigh spectral efficiency systems - pushing the limits of multi-level modulation, multi-core fiber, and multi-mode control," *Proc. OECC 2014* (tutorial), WE7G-1.
- M. Nakazawa, "Exabit Optical Communication Infrastructure Using 3M Scheme," *Proc. ACP 2014*, (plenary talk), 2014. (H26)
- 中沢正隆、第103回日本学士院賞 (H25)、2013年度NEC C&C賞 (2013年11月) (H25)、Charles Hard Townes Award (H26)、第64回河北文化賞 (H26)
- T. Watanabe, Y. Kokubun, "Fan-in/Fan-out Three-dimensional Polymer Waveguide for Uncoupled Multi-core Fibers," *Proc. ECIO/MOC2014*, (invited talk) Tu3bI2, 2014. (H26)
- Y. Kokubun, T. Watanabe, "Scaling of space division multiplexed transmission using heterogeneous single-mode and few mode multi-core fibres," *Proc. ACP2014*, (invited talk) AW4C.1, 2014.
- M. Koga, "Optical Diversity Transmission with Signal and its Phase-conjugate Lights through Multi-core Fiber," *Proc. OFC2015*, Th1D.4, 2015. (H27)
- M. Koga, "Nonlinear Phase-shift Cancellation by Maximum-Ratio Combining WDM Phase-conjugate Diversity lights Transmitted Through Multi-core Fiber," *Proc. ECOC2015*. (H27)
- M. Koga, "Optical phase lock loop circuit for Non-degenerate optical parametric phase sensitive amplifiers with wide signal-idler optical frequency spacing," *Proc. CLEO2015*, SM1M.2, 2015.
- Y. Chaen, Z. Zhao, Y. Satou and K. Hamamoto, "Quasi-LP21 Mode Converter by Using Simple Step-Core Structure," *Proc. OECC/PS 2013*, TuPL-14, 2013. (H25)
(2013年IEEE福岡支部学生研究奨励賞(第13回), 2014年2月21日受賞)
- 浜本貴一(招待講演)、「マルチモードを利用した光集積回路」、電子情報通信学会第3回集積光デバイスと応用技術研究会予稿集、IPDA13-23, pp. 89-96, 2014. (H26)

(2) 展示会

- H24年度 パネル展示: 第26回 光通信システム(OCS)シンポジウム(2012年12月、静岡県三島市)、九州大学筑紫地区オープンキャンパス(2013年5月、九州大学)、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究発表会(2013年2月、東北大学)、フォトニックネットワークシンポジウム2013(2013年3月、神奈川県横須賀市)
- H25年度 パネル展示: CLEO-PR & OECC/PS 2013 (2013年7月、京都府京都市)、NICTオープンハウス2013(2013年11月、東京都小金井市)、第27回 光通信システム(OCS)シンポジウム(2013年12月、静岡県三島市)、フォトニックネットワークシンポジウム2014(2014年3月、東京都小金井市)
- H26年度 パネル展示: 第28回 光通信システム(OCS)シンポジウム(2014年12月、静岡県三島市)、フォトニックネットワークシンポジウム2015(2015年3月、東京都小金井市)
- H27年度 パネル展示: 第29回 光通信システム(OCS)シンポジウム(2014年12月、静岡県三島市)、フォトニックネットワークシンポジウム2015(2016年2月、東京都小金井市)

(3) 報道発表

- 毎秒1ペタビット、50kmの世界最大容量光伝送に成功～光ファイバ1本でハイビジョン映画 約5000本分を1秒で伝送可能に～ (H24)
- 「光ファイバー通信量5倍に 東北大開発 ハイビジョン1000時間分 1秒で転送」日本経済新聞(夕刊)2014.11.15

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

- 本研究課題で明確化された要素技術をもとに、今後の課題170における空間多重光ファイバ研究開発の研究成果も考慮し、標準化技術を検討する。
- 将来の通信会社における陸上・海底ネットワーク大容量化への適用をめざしつつ、一方でユーザ施設・設備における実装密度の高い短距離インターコネクション等の特殊用途への展開等を広く検討する。
- 大学においては、特に得られた成果の権利化をすすめ特許として成立させるとともに、外部パートナーを含めた新たな共同研究等により実用化をめざす。