

## 平成 25 年度研究開発成果概要書

課題名 : 革新的光通信インフラの研究開発  
採択番号 : 150 ウ 01  
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

### (1) 研究開発の目的

光通信技術は過去 40 年間、超低損失光ファイバ、狭線幅半導体レーザ、低雑音光検出器、高速電子回路、広帯域光増幅器などの数多くの革新的な発明により着実に伝送容量を増加させており、特に過去 20 年間では 1,000 倍の大容量化を実現している。現在、我が国の基幹系商用システムでは 1 ファイバあたり 1.6 Tb/s が、また実験レベルでは 100 Tb/s 伝送が実現している。

この超大容量光通信技術は伝送路である光ファイバや光増幅器の物理的限界に達しつつある。具体的には、超大容量化に伴う光信号の高パワー化により光ファイバ中に誘起される非線形光学効果と、パワー集中により光ファイバのコア部が熔融して光ファイバを逆走するファイバフューズ、光ファイバの低損失波長域と光増幅器の帯域制限などである。これに対して、現在我が国の通信トラヒックは依然として年率 1.4 倍で伸びており、20 年後には 1,000 倍の需要が予想される。

技術が確立している石英系光ファイバを使用しつつこの物理限界を打破するためには、コア部に集中する光信号パワー密度の最大値を下げる事が必要になる。

光信号パワー密度低減方法として最も有効なものは複数のコアに光信号を分散させるマルチコア伝送である。マルチコア伝送によって、通常の単一モードファイバを使用した場合に比べるとコア数分の伝送容量の拡大が期待できる。光信号パワー密度低減の別法としては単一モードファイバに比べてコア径の大きいマルチモードファイバを用いる伝送がある。従来マルチモードファイバ中をシングルモード伝送させる研究は行われているが、各伝搬モードを個別の伝送チャンネルとして用いるモード多重伝送を行う事により伝送容量の拡大も可能となる。また、モード多重伝送においては、伝搬モードごとにコア断面中の強度分布が異なるため、光信号パワー密度の最大値を低減できる可能性がある。

さらに、マルチコア・マルチモードに加え、3 つ目の超多重化技術としてマルチレベル（超多値）伝送方式を導入することにより、光ファイバの伝送能力をさらに向上させることが出来る。光の振幅と位相を同時に用いる QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 方式は、周波数利用効率を 10 b/s/Hz 以上に拡大できるため、限られた帯域の中で伝送容量を飛躍的に増大させることが出来る。この技術に空間多重を組み合わせることが出来れば、ファイバ 1 本あたりの周波数利用効率を一挙に 100 b/s/Hz にまで引き上げることが可能となり、光通信のパラダイムシフトを引き起こすことが出来るものと期待される。

本研究開発では、これらマルチコア伝送とマルチモード伝送、およびマルチコア伝送と超多値伝送を併用した革新的光伝送方式を採用することで将来の超大容量光通信の需要に対応する技術を開発する。

### (2) 研究開発期間

平成 23 年度から平成 27 年度 (5 年間)

(3) 委託先

日本電信電話株式会社<代表研究者>、国立大学法人東北大学、国立大学法人島根大学、国立大学法人大分大学、国立大学法人横浜国立大学、国立大学法人九州大学

(4) 研究開発予算（契約額）

総額 419 百万円（平成 25 年度 84 百万円） ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発課題と担当

課題ウ-1：マルチコア伝送技術の開発

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）
2. マルチコア MIMO 信号処理技術（日本電信電話株式会社）
3. マルチコア光増幅中継技術（国立大学法人島根大学）
4. マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術（国立大学法人大分大学）
5. マルチコア伝送の実証（日本電信電話株式会社）

課題ウ-2：超多値マルチコア伝送技術の開発

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

課題ウ-3：マルチモード伝送技術の開発

1. マルチモード伝送系設計技術（日本電信電話株式会社）
2. マルチモード光増幅中継技術（国立大学法人島根大学）
3. 単一コア伝送モード合分波技術（日本電信電話株式会社）
4. 結合マルチコア伝送モード合分波技術（国立大学法人横浜国立大学）
5. マルチモード光源技術（国立大学法人九州大学）
6. マルチモード伝送の実証（日本電信電話株式会社）

課題ウ-4：マルチコア・マルチモード伝送技術の開発

1. マルチモード伝送系設計技術（日本電信電話株式会社）
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）

(6) これまで得られた研究開発成果

		(累計) 件	(当該年度) 件
特許出願	国内出願	7	2
	外国出願	0	0
外部発表	研究論文	12	6
	その他研究発表	108	56
	プレスリリース	16	2
	展示会	11	5
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な成果実施内容と成果

・課題ウ-1：マルチコア伝送技術の開発

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）

【目標】

多重数 7 以上、伝送容量 数 100 Tb/s 以上を実現するためのマルチコア伝送系

の基本構成を明確化する。

設計した伝送システムの有用性を検証するために、周回伝送実験等の評価技術を構築する。

**【実施内容および成果】**

- ・課題 150 ア、イおよび課題 146 と協力して、マルチコア EDFA、ファンイン・ファンアウトデバイスおよび 12 コアファイバを用いたマルチコア周回伝送系を設計・構築した。

2. マルチコア MIMO 信号処理技術（日本電信電話株式会社）

**【目標】**

伝送容量 数 100 Tb/s 級の WDM 信号における 7 以上のコア間のクロストーク除去の実現に向けた MIMO 信号処理技術の検討を行う。

**【実施内容および成果】**

- ・伝搬方向インタリーブ光中継伝送方式を利用することにより、MIMO 処理に必要なコア数を 7 から 2 に低減した。
- ・2 コアでの周回伝送系によるマルチコア MIMO 原理確認実験を行い、クロストーク ( $-20 \sim -10$  dB) を MIMO 処理により除去できることを確認した。

3. マルチコア光増幅中継技術（国立大学法人島根大学）

**【目標】**

マルチコア光増幅中継器構成法および制御・モニタ法の設計明確化と評価測定による検証を行う。

**【実施内容および成果】**

- ・マルチコア DRA 中継システムにおける混在系の提案と、クロストーク特性の明確化を行った。
- ・一括励起型マルチコア EDFA に関する全光型利得一定制御 (AGC) の提案と実験検証を行った。

4. マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術（国立大学法人大分大学）

**【目標】**

マルチコアファイバによる 2 コアダイバーシティ伝送系において最大比合成後 Q 値向上特性が理想値 3 dB より低下する原因を明らかにする。

**【実施内容および成果】**

シミュレーションならびに理論的解析により、最大比合成後理想値より低下する原因は、パラメトリック過程によって増強された ASE 雑音が空間相関を示し、最大比合成条件から逸脱していることを明らかにした。その結果を踏まえて伝送実験を行ったところ、空間相関の程度と理想値の低下の程度が一致することを実証した。

5. マルチコア伝送の実証（日本電信電話株式会社）

**【目標】**

多波長での一中継の原理確認伝送実験を行い、マルチコア伝送を実現する上での問題点・課題を抽出する。

**【実施内容および成果】**

- ・双方向伝送によるクロストーク低減および信号処理による光非線形補償、およびマルチコア EDFA により WDM 多中継伝送を行い、総合容量距離積 1 Eb/s・km を超える長距離・大容量 (1,500 km、 $2 \times 344$  Tb/s) マルチコア伝送に成功した。

・課題ウ-2：超多値マルチコア伝送技術の開発（国立大学法人東北大学）

1. 超多値マルチコア送受信技術
2. 超多値信号のマルチコア伝送評価および総合実験

【目標】

5 ~ 10 G symbol/s のシンボルレートで1波長・1コアあたり 10 bit/s/Hz 以上の周波数利用効率を可能にする QAM 変復調技術、ならびにコア間クロストークを補償可能な MIMO 処理を実現する。

【実施内容および成果】

37 km の 7 コアファイバとファイバカプラで構成される超多値マルチコア伝送系を構築し、7×80 Gbit/s (5 G symbol/s) 256 QAM 伝送を 1 コアあたり 13.3 bit/s/Hz の周波数利用効率で実現した。さらに、SMF を用いて超多値伝送の基盤技術として 2048 QAM 超多値コヒーレント光伝送に世界で初めて成功し、14 bit/s/Hz を上回る周波数利用効率を実証した。

・課題ウ-3：マルチモード伝送技術の開発

1. マルチモード伝送系設計技術（日本電信電話株式会社）

【目標】

モード多重伝送に波長多重を組み合わせるための伝送系の基本構成を検討する。

【実施内容および成果】

モードクロストークは数モードファイバ内よりも、接続部での調心ずれで生じるものが支配的であることを明らかにした。

2. マルチモード光増幅中継技術（国立大学法人島根大学）

【目標】

マルチモード光増幅中継器構成法および制御・モニタ法的设计明確化と評価測定による検証を行う。

【実施内容および成果】

- ・マルチモード光増幅中継技術における課題の抽出および整理を行った。
- ・数モード EDFA を用いた中継伝送および分布ラマン増幅を併用した中継伝送の見通しを得た。

3. 単一コア伝送用モード合分波技術（日本電信電話株式会社）

【目標】

- ・モード合分波器の広帯域化検討と、伝送ファイバと整合するモジュール化検討を行い、合分波器チップの作製と評価を行う。
- ・波長多重に対応するため、動作波長範囲の拡大。

【実施内容および成果】

- ・PLC 方向性結合器型モード合分波器について検討し、2つのモードを合分波できる光導波路回路を作製し、C帯で-25 dB以下の低クロストーク特性であることを確認した。

4. 結合マルチコア伝送用モード合分波技術（国立大学法人横浜国立大学）

【目標】

- ・結合 MCF 用モード合分波器の低クロストーク化
- ・MIMO 技術との併用を考慮した検討を開始
- ・ハイブリッド型 MCF 対応のための基本的設計条件明確化および接続デバイスの構造の探索

【実施内容および成果】

- ・平成 24 年度に実施した結合型 MCF 用モード合分波器の低クロストーク化と素子長短縮の設計 ( $XT < -25$  dB) に基づき、平成 25 年度はフォトマスクパターンを設計して素子試作を目指したが、誘電体導波路では装置不具合で導波路を製作できず、導波路材料をポリマーに変更して素子試作を続行中。
- ・結合型 MCF 用に開発したモード励振分布の定量的評価法を、平成 24 年度には階段屈折率数モードファイバに適用してモード励振分布への適用性を確認したが、平成 25 年度は分布屈折率型 FMF へ適用して、モードの選択的励振法の評価に応用した。

#### 5. マルチモード光源技術 (国立大学法人九州大学)

##### 【目標】

今年度は下記項目を目標として研究を進めた。

- ・単一の高次モードで発振する半導体レーザ構造の実現
- ・2 モード以上の伝送のための基礎検討

##### 【実施内容および成果】

特に、単一の高次モードで発振するレーザ構造として、パッシブの MMI 導波路構造を利用した構成にて検討を行った。

その結果、単一の 1 次モード光が得られていること等を実験的に確認した。また、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をシミュレーションにより確認した。

#### 6. マルチモード伝送の実証 (日本電信電話株式会社)

##### 【目標】

2 モード以上かつ各モード 2 波長以上で 1 中継光増幅中継伝送の実験を行い、波長多重マルチモード伝送のための課題点を抽出する。

##### 【実施内容および成果】

数モードファイバと試作した PLC 方向性結合器型モード合分波器を用いてマルチモード伝送実験を行い、2 波長で 2 つ以上のモードを伝送できることを示した。

#### ・課題ウ-4: マルチコア・マルチモード伝送技術の開発 (日本電信電話株式会社)

##### 1. マルチモード伝送系設計技術

##### 【目標】

多重数 20 以上を実現するためのマルチコア・マルチモード伝送系の構成を明確化する。

##### 【実施内容および成果】

課題 150 ア、イおよび課題 170 と協力して、マルチコア・数モードファイバ、ファンイン・ファンアウトデバイスおよびモード合分波器を用いたマルチコア・マルチモード伝送系を設計・構築した。

##### 2. マルチコア・マルチモード伝送の実証

##### 【目標】

ファイバおよび光結合系を用いて、マルチコア・マルチモード伝送を実現する上での問題点・課題を抽出する。

##### 【実施内容および成果】

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・MIMO 信号処理技術により、世界最大の空間分割多重数 36、および世界最高の全周波数利用効率 247 b/s/Hz の高密度空間分割多重光伝送に成功した。