

## 平成26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1.6Tb/sが、また実験レベルでは100Tb/s伝送が実現している。

この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、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10b/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100b/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) 実施機関

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（実施責任者 教授 中沢正隆）、  
 国立大学法人島根大学（実施責任者 教授 増田浩次）、  
 国立大学法人大分大学（実施責任者 教授 古賀正文）、  
 国立大学法人横浜国立大学（実施責任者 教授 國分泰雄）、  
 国立大学法人九州大学（実施責任者 教授 浜本貴一）

## (4) 研究開発予算（契約額）

総額 419 百万円（平成 26 年度 79 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. 単一コア伝送用モード合分波技術（日本電信電話株式会社）
4. 結合マルチコア伝送用モード合分波技術（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. マルチコア・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) これまで得られた成果（特許出願や論文発表等）

		(累計) 件	(当該年度) 件
特許出願	国内出願	8	3
	外国出願	0	0
外部発表	研究論文	18	5
	その他研究発表	157	47
	プレスリリース・報道	17	1
	展示会	13	2
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

・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】

遠隔励起光増幅を用いた多重数7のマルチコア伝送方式の長距離化を検討する。また、設計した伝送システムの有用性を検証するために、伝送実験系を構築する。

【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、遠隔励起光増幅器、ファンイン・ファンアウトデバイスおよび7コアファイバを用いた遠隔励起マルチコア伝送系を設計・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】

平成 25 年度まで行っていたマルチコア MIMO 信号処理を、マルチコア・マルチモード光伝送に拡張するため、モード間クロストーク補償の実現に向けた MIMO 信号処理技術の検討を行う。

【実施内容および成果】

MIMO 信号処理をマルチコア・マルチモード光伝送に拡張して伝送実験を行い、3 モードのモード間クロストーク補償が可能であることを確認した。

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】

多重数が7以上、伝送容量が数 100Tb/s 以上の中継伝送を実現するための、マルチコア光増幅中継器構成法に関する設計技術の確立を行う。また、利得・パワー制御及びモニタ法に関する回路構成明確化と実験による動作検証を行う。さらに、遠隔励起型マルチコア EDFA を用いた多中継伝送実験を課題 150 アと連携して行う。その際、多中継光増幅中継系の設計及び評価を行う。

【実施内容および成果】

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利得一定制御方式の提案と、動作特性の実験検証を行った。本方式が、高い励起効率を有し、高励起効率・低消費電力のマルチコア EDFA を用いた光増幅中継システムに使用可能であることを明らかにした。また、遠隔励起型マルチコア EDFA を用いた多中継伝送実験を課題 150 アと連携して行い、多中継光増幅中継系の設計及び評価を行った。

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】

マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術に関して、平成 26 年度信号光とその位相共役光を用いて2コアダイバーシティ伝送すると、Q-factor の復元が3 dB 以上となり得ることが予想できる。非線形現象であるパラメトリック過程に基づいて発生した雑音が相関性を示し、その雑音の相殺できるだけでなく、非線形位相回転も相殺されることを明らかにする。

【実施内容および成果】

マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術に関して、昨年度信号光とその位相共役光を用いて2コアダイバーシティ伝送すると、Q-factor の復元が3 dB 以上となり得ることが分かった。

- (SNR 数値シミュレーション)

WDM 伝送では、XPM と波長分散とのエネルギー変換、FWM が非線形雑音として支配的となる。Q 値回復を最大ならしめる伝送系条件を明らかにする。平成 26 年度検討では、すでに 3dB を大きく上回れる回復が期待できることが分かっている。

- (光ダイバーシティ WDM 伝送実験)

NTT 未来ねっと研の協力を得て、WDM 伝送により条件によっては Q 値が 6dB 以上回復する。本方式の効果を実証するとともに、理論的解析を進める。シングルコアでは困難である 32 または 64 値 QAM による伝送距離に対して伝送実験を実施する。

## 5. マルチコア伝送の実証 (日本電信電話株式会社)

### 【目標】

課題 150 ア (マルチコア光増幅技術) および課題 150 イ (マルチコアファイバ接続技術) と連携して、遠隔励起光増幅を用いた伝送実験を行い、遠隔励起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】

課題 150 ア (マルチコア光増幅技術)、課題 150 イ (マルチコアファイバ接続技術) および課題 170 (マルチコアファイバ技術) と連携して、遠隔励起光増幅を用いた伝送実験を行った。その結果、7 コアファイバ 204.6km 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記録である総容量 120.5Tb/s、周波数利用効率 53.5b/s/Hz が得られた。

- 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】

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、7 コア空間多重伝送 (無中継伝送) を実現する。

### 【実施内容および成果】

55 km の 7 コアファイバとファンイン・ファンアウトデバイスで構成される超多値マルチコア伝送系を構築し、3 Gsymbol/s、420 Gbit/s (60 Gbit/s×7 コア) 1024 QAM 伝送を実現した。本ファイバにおいて中心コアと周辺コアとのクロストークは -55 ~ -58 dB と小さく、コアごとに誤り率の差異は見られないことから、クロストークが 1024QAM 伝送に及ぼす影響は十分小さいことを明らかにした。このとき、1 コアあたりの周波数利用効率は 15.6 bit/s/Hz に達し、ファイバ 1 本あたり  $7 \times 15.6 = 109$  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実現した。

- 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】

多重度向上を向上するため、5 以上のモード分離を行うための MIMO 処理技術によるクロストーク補償の検討を行い、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】

- MIMO 処理の検討を行い、マルチキャリアによる並列処理がモード分散補償量の増加に有効であることを確認した。
- 5モードの数モードファイバおよびモード合分波器を用いてマルチモード伝送実験系を設計し構築した。

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】

2モード以上かつ各モード2波長以上の中継伝送を実現するための、マルチモード光増幅中継器構成法に関する設計技術の確立を行う。また、利得・パワー制御及びモニタ法に関する回路構成明確化と実験による動作検証を行う。

【実施内容および成果】

マルチモード光増幅中継システムの励起方式に関する課題抽出の検討を行った。集中型マルチコアEDFAおよび分布ラマン増幅/遠隔励起EDFAシステムに適用可能な励起光波長多重型の励起方式の提案を行った。

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】

モード数5以上のPLC型モード変換・合波・分離器を実現する構成を検討するとともに、多重度を上げた時に広帯域特性や低損失特性との両立に必要な問題把握を行う。

【実施内容および成果】

PLC方向性結合器型モード合分波器の多段接続実験を行い、5モードを原理損なしで変換・合分波できる見通しを得た。

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】

非対称結合逐次テーパ分岐型モード合分波器の作製技術を改善して、低損失化と低クロストーク化を図る。また、ハイブリッド型マルチコアファイバ対応のための基本的設計条件や同ファイバとの接続デバイスの構造を明らかにする。

【実施内容および成果】

- (モード合分波器の製作)

非対称テーパ結合モード遷移型モード合分波器を、ポリマー導波路を用いて製作して、合波器としての挿入損失とクロストーク特性を評価した。また、分波を意図するモードと隣接する2つのモードの合計3モード間のクロストークを近視野像強度分布から評価する方法を考案して、実際のモード合波器からの出射近視野像強度分布から3次モードに対する2次モードと1次モードのクロストーク量を算出した。

- (FMFのモード励振分布の定量的評価法)

数モードファイバからの出射光近視野像を、偏光子を透過させて測定し、偏光子角度を0度、45度、90度に設定した場合の強度分布から、LP<sub>01</sub>モードと縮退したLP<sub>11</sub><sup>even</sup>モード及びLP<sub>11</sub><sup>odd</sup>モードをも分離して、かつ各モードの偏光状態まで求めることができる新しいモード分析技術を開発した。

## 5. マルチモード光源技術（国立大学法人九州大学）

## 【目標】

平成 25 年度に確認した単一の 1 次モードデバイスについて、その評価詳細を進めるとともに、課題を明確化する。

加えて、昨今の他の研究開発環境を勘案し、垂直方向を考慮した高次モード発振実現の検討を併せて進める。

## 【実施内容および成果】

単一の高次モード光源の開発を進めるため、各高次モードのみで定在波が生じる導波路構造について、次の項目に従い検討を進めていく。

## ・（横高次モードデバイスの評価解析）

単一の横 1 次モードデバイスについて評価・詳細分析を進めた。その結果、横 1 次モードが得られる波長範囲および偏光に関して、MMI 導波路幅依存性があることを把握した。理論的な解析から設計理論を導いた。また、前記設計理論に基づき試作したデバイス特性が実験的にもほぼ実現できることを確認した。

## ・（更なる高次マルチモード光源の原理検討）

昨今の他の研究開発環境を勘案し、垂直方向を考慮した高次モードデバイス、特に擬似 LP<sub>21</sub> モード対応デバイス実現の検討を併せて進めた。今年度は垂直方向に 1 次モードを許容する導波層厚 0.6 $\mu$ m にてデバイス実現を試みたが、明確な垂直方向の高次モードは確認されなかった。この原因分析を進め、導波層厚が 0.6 $\mu$ m 程度の場合、安定的には高次モードが励振されないことを確認した。

さらに今年度は、昨今の対外的研究開発状況に鑑み、一層の伝送容量拡大に寄与できると期待される OAM（Orbital Angular Momentum）モードについても新たに検討を行い、MCF 上に a-OAM（advanced OAM）モードを用いた伝送方式を世界に先駆け提案した。

## 6. マルチモード伝送の実証（日本電信電話株式会社）

## 【目標】

モード合分波技術および MIMO 処理技術を用いて 5 モード以上のマルチモード伝送の実験を行い、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】

・ MIMO 処理を用いてマルチモード伝送実験を行い、3 モードで多中継のマルチモード伝送実験ができる見込みを得た。

・ 数モードファイバとモード合分波器を用いることで、5 モードのマルチモード伝送が実現できる見込みを得た。

・ 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. マルチコア・マルチモード伝送系設計技術

## 2. マルチコア・マルチモード伝送の実証

## 【目標】

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。

## 【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。空間多重数拡大とモード分散補償量増大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、世界最大のモード分散補償量 33.2 ns を実現し、昨年度の 12 倍以上の長距離化となる 527km のマルチコア・マルチモード光伝送に成功した。