

現在と同じ細さの光ファイバで世界最大の伝送容量を実現

～既存光ファイバの標準技術を有効活用してマルチコア光ファイバの実用化を加速～

学校法人千葉工業大学(千葉県習志野市、学長:小宮一仁、以下 千葉工大)と日本電信電話株式会社(東京都千代田区、代表取締役社長:鶴浦博夫、以下 NTT)、株式会社 KDDI 総合研究所(本社:埼玉県ふじみ野市、代表取締役社長:中島康之、以下 KDDI 総合研究所)、住友電気工業株式会社(本社:大阪府中央区、社長:井上治、以下 住友電気)、株式会社フジクラ(本社:東京都江東区、取締役社長:伊藤雅彦、以下 フジクラ)、古河電気工業株式会社(本社:東京都千代田区、代表取締役社長:小林敬一、以下 古河電気)、日本電気株式会社(本社:東京都港区、代表取締役執行役員社長 兼 CEO:新野 隆、以下 NEC)、は、現在広く使用されている光ファイバと同じ細さで、1本に4個の光の通り道(コア)を有するマルチコア光ファイバを用い、世界最大の毎秒118.5テラ・ビット^{※1}伝送を実現しました。

今回、現在の光ファイバと同じ細さの国際規格に準拠したガラス直径(125 μm)^{※2}を採用したことにより、既存の光ファイバ製造技術や、光ファイバ同士を接続する光コネクタなど既存の周辺技術が活用できると同時に、複数メーカーの要素技術を組み合わせて長距離かつ大容量のマルチコア伝送システムが構築できることを実証しました。この研究で、マルチコア光ファイバを活用した光通信システムの実用化に向け大きく前進したと言えます。

今後、本光ファイバ技術を2020年代前半に実用化することをめざすとともに、将来の多様なデータ通信需要に対応可能な光伝送基盤の実現に貢献していきます。

今回の成果は7月31日～8月4日にシンガポールの Sands Expo and Convention Centre で開催された光通信技術に関する国際会議(OECC2017)のポストデッドライン論文^{※3}として報告されました。

なお、本研究開発の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究成果を用いています。

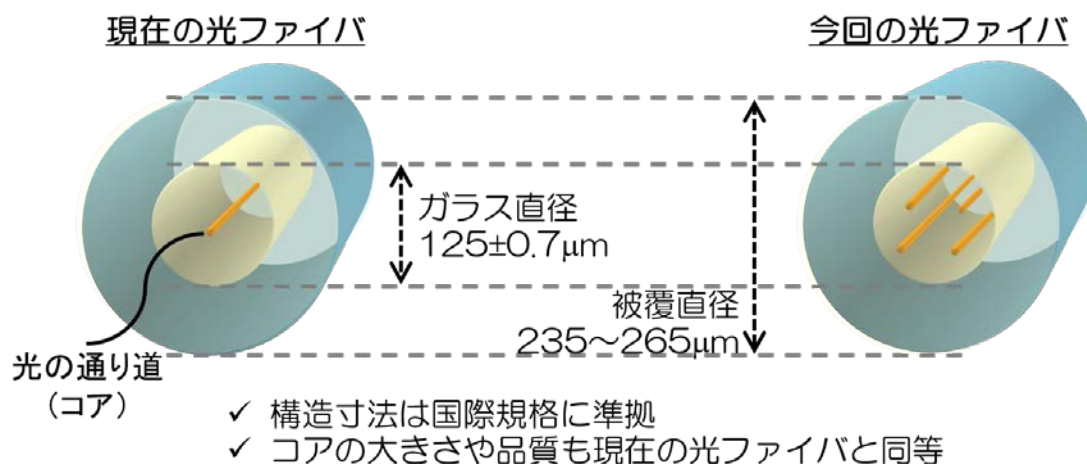


図1 今回のマルチコア光ファイバの特長

【研究の背景】

携帯端末や多様な通信サービスの普及に伴い、データ通信容量は年率 10%を上回る勢いで世界的に増大し続けており、2020 年代の後半には現在使用している光ファイバの伝送容量限界が顕在化すると予測されています。また、光ファイバの普及とデータ通信容量の増加に伴い、サービスプロバイダが保有するビル内やデータセンタ内における光ファイバ設備量の肥大化と光ファイバ配線の輻輳も深刻化しつつあります。

このため、既存光ファイバの伝送容量限界の打破や、光ファイバ設備の高密度化・省スペース化の実現に向け、1本の光ファイバ内に複数の光の通り道(コア)を有するマルチコア光ファイバの研究開発が世界的に推進されており、1本の光ファイバに 10 個以上のコアを配置したマルチコア光ファイバで伝送容量を劇的に増やす研究開発も行われてきました^{※4}。しかし、このようなコア数の多いマルチコア光ファイバでは、ガラスの直径が既存の光ファイバよりも太くなるため、製造技術の飛躍的な向上と周辺技術の更なる研究開発が不可欠で、実用化には 10 年程度を要すると言われてきました。

そこで、NTT、KDDI 総合研究所、住友電工、フジクラ、古河電工、NEC、千葉工大は、マルチコア光ファイバ技術の早期活用に向け、1本の光ファイバに配置するコア数は 4~5 個にとどめるものの、現在使用されている光ファイバと同じ国際規格に準拠した細さで、既存技術が活用しやすいマルチコア光ファイバの研究開発を進めてきました。

【今回の研究概要とその成果】

今回の研究では、

「既存光ファイバと同じ細さで国際規格に準拠した標準外径マルチコア光ファイバの設計指針の明確化」

「複数のメーカーが共通仕様で作製した標準外径マルチコア光ファイバを相互接続した伝送路の実現」

「標準外径マルチコア光伝送路を用いた 100 テラ・ビット超伝送の実証」

を行い、以下の 3 点を成し遂げました。

- ① 既存の光ファイバと同じ細さであるガラス直径 125 μm の光ファイバに、既存の光ファイバと同等の品質を有する 4~5 個のコアを配列できることを明らかにしました。
- ② 異なるメーカーが作製した標準外径マルチコア光ファイバ(4 コア)を相互接続し、平均損失 0.21 dB/km^{※5}、全長 316 km の低損失なマルチコア伝送路を実現しました。
- ③ 標準外径マルチコア光ファイバとマルチコア光増幅技術、既存の光コネクタ技術を用いたマルチコア光伝送システムを構築し、標準外径の光ファイバで世界最大となる毎秒 118.5 テラ・ビット伝送を実現しました。

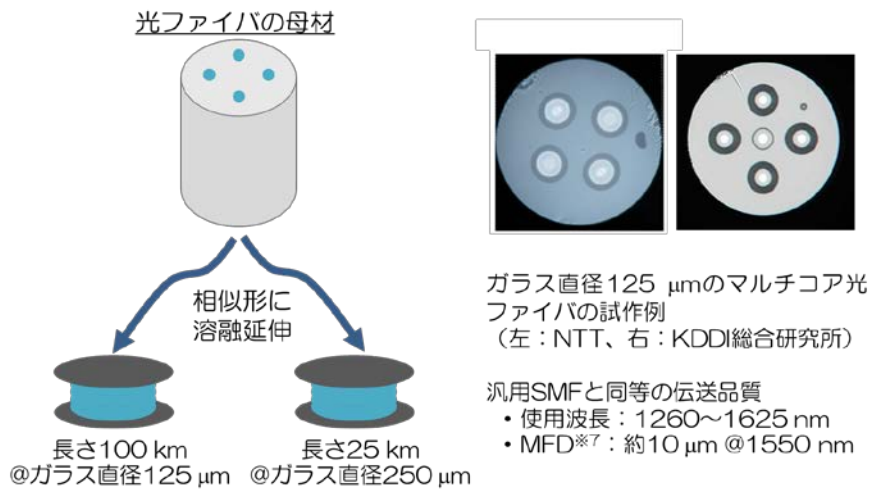
以上の結果により、現在利用されている光ファイバの国際規格に準拠したマルチコア光ファイバによる伝送容量の拡張性と、既存技術との親和性の高さを明らかにすることができました。

【研究の詳細】

1. 設計指針

光ファイバは直径が数 cm~10 cm 程度の母材と呼ばれる比較的大きなガラス棒を作製し、これを相似形に熔融・延伸していくことで実現されています。仮に同じサイズの母材を用いるとして、光ファイバの直径を通常の 125 μm から 2 倍の 250 μm にすると、製造できる光ファイバの長さは 4 分の 1 に減少します。マルチコア光ファイバのガラス直径の増大は、光ファイバの製造性に直接的に影響します。また、今日の光通信では、1260 nm~1625 nm の広波長域で使用可能で、コアの直径が約 10 μm 程度の単一モード光ファイバ(SMF: Single-Mode Fiber)が最も汎用的に利用されています。

そこで本検討では、ガラス直径と被覆直径を、現在の光ファイバの国際規格に準拠する 125 \pm 0.7 μm と 235~265 μm として光ファイバ 1 本あたりの製造性を維持するとともに、1 つ 1 つのコアが汎用 SMF と同等の伝送品質を有するマルチコア光ファイバの実現を目的としました。マルチコア光ファイバでは隣り合うコア間の光信号の干渉^{※6} を十分に低減する必要があり、NTT および KDDI 総合研究所は 125 μm のガラス直径で 4~5 個のコアを配列できることを明らかにしました。



- ✓ ガラス直径 125 μm の光ファイバを 100 km 製造できる母材があった場合、光ファイバのガラス直径が 2 倍になると製造可能な長さは 1/4 に制限されてしまいます。
- ✓ 標準のガラス直径を用い汎用 SMF と同等品質のコアを 4~5 個配列することができます。

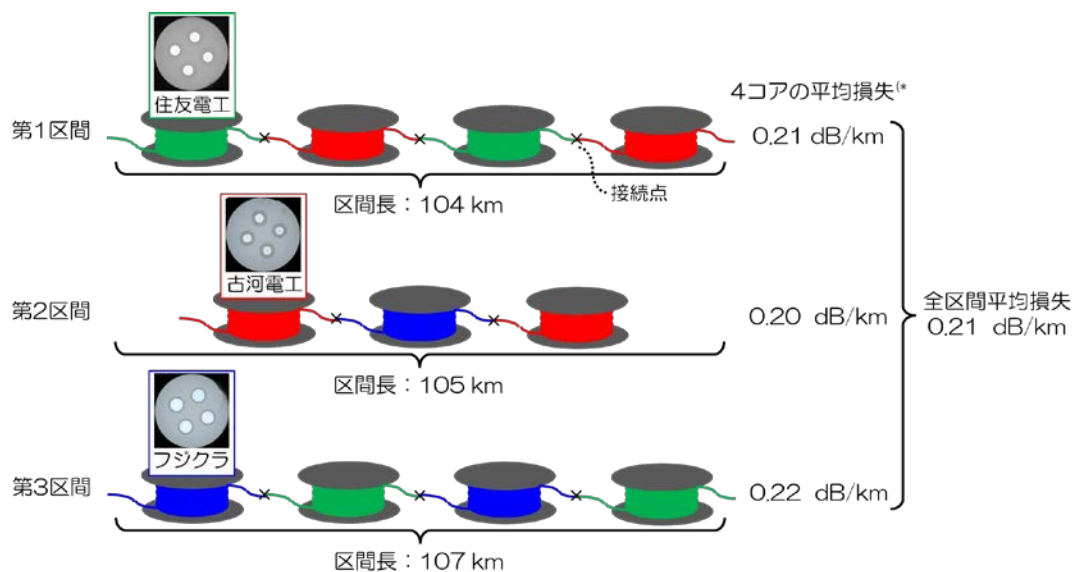
図 2 ガラス直径の拡大による製造性低下のイメージと標準ガラス直径を用いたマルチコア光ファイバの試作例

2. 相互接続伝送路

上述の設計指針に基づき、住友電工、フジクラ、および古河電工にて、長さ 100 km 以上のマルチコア光ファイバ(4 コア)を各社で作製しました。いずれのマルチコア光ファイバも 1260 nm~1625 nm の波長範囲で使用可能で、汎用 SMF と同等の伝送特性を実現できました(波長 1550 nm のモードフィールド径(MFD: Mode Field Diameter)^{*7} が約 9~10 μm)。

作製したマルチコア光ファイバを 20~40 km のピースに分割し、意図的に製造元が異なるマルチコア光ファイバを相互接続し、長さが 104~107 km の 3 つの伝送区間を構築しました。そして、汎用 SMF と比べても遜色のない低損失なマルチコア伝送路を複数メーカーの光ファイバで実現できました。各区間の波長 1550 nm における 4 コアの平均伝送損失は、マルチコア光ファイバ同士を溶かして接続(融着接続)した接続点の減衰量を含めても 0.22 dB/km 以下、3 区間全長での平均損失は 0.21 dB/km でした。

これは、標準外径を採用し汎用 SMF と同等の伝送特性(MFD 特性)を実現したことにより、既存の製造技術とノウハウの活用を容易にし、マルチコア光ファイバの製造性が飛躍的に向上されたことの表れであると言えます。



- ✓ 共通仕様で作製した標準外径マルチコア光ファイバを、意図的に製造元が異なるマルチコア光ファイバを相互接続し、汎用 SMF と比べても遜色のない区間損失を実現しました。

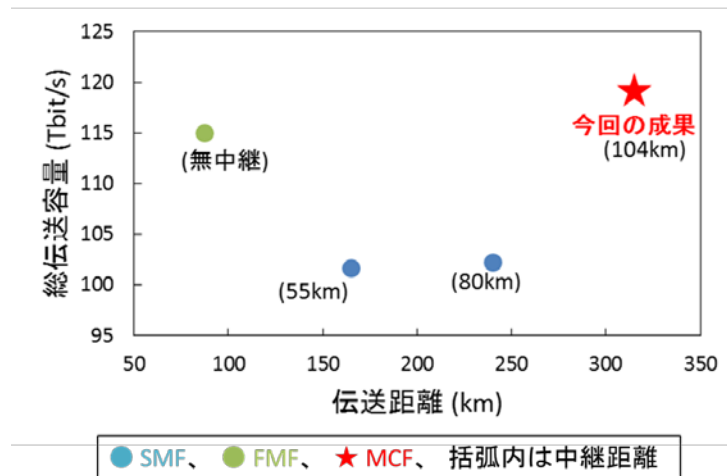
図 3 相互接続伝送路の構成と損失特性

3. 毎秒 100 テラ・ビット超伝送

さらに、上述した 3 つの伝送区間をつなげてマルチコア伝送路を構築しました。各々の伝送区間の終端に、NEC、KDDI 総合研究所、NTT、および古河電工が作製した、3 台のマルチコア光増幅器を接続し、各区間の光の減衰を補償しました。マルチコア光増幅器には消費電力の低減が期待されるクラッド励起を適用し、今回の光増幅器では約 16%の低減効果を確認しました^{※8}。全長 316 km のマルチコア伝送路の毎秒 100 テラ・ビット超の伝送ポテンシャルを確認するため、116 波長の 16QAM 信号^{※9}を生成し、316 km 伝送後の伝送品質を評価しました。

なお、マルチコア光ファイバの各コアとの入出力は、NTT および古河電工で作製した Fan-In・Fan-Out デバイス^{※10}を用いて実現しました。また、マルチコア伝送路の入出力端と Fan-In・Fan-Out デバイスは、千葉工大と NTT で作製した既存の MU 形および SC 形インタフェースを有する光コネクタ^{※11}を用いて接続しました。本光コネクタはマルチコア光ファイバの 4 つの対向するコアが適切な対応で接続されるように、光ファイバの回転軸方向の調心を行う機能を有しており、マルチコア構造の低損失な光コネクタ接続を実現できます。

伝送実験の結果、全てのコア・全ての波長で伝送限界を上回る良好な伝送品質を確認し、標準外径の光ファイバを用いた伝送実験では世界最大となる毎秒 118.5 テラ・ビット^{※12}の伝送容量を達成しました。これらの結果は、現在の光ファイバの伝送容量限界を上回る大容量伝送システムが、標準外径を有するマルチコア光ファイバを用いて実現できることを示したものとと言えます。



- ✓ 標準外径の光ファイバを用いた伝送実験で世界最大となる毎秒 118.5 テラ・ビットの伝送容量を実現しました。

図 4 標準外径マルチコア光ファイバを用いた世界最大伝送容量の実現

【今後の展望】

今回の研究成果は、既存の光ファイバと同等の標準外径を有するマルチコア光ファイバを用いることで、光ファイバの製造性向上と既存の周辺技術の有効活用しながら、毎秒 100 テラ・ビット超の伝送容量が実現できることを示したものであり、マルチコア光ファイバ技術の早期実用化に向けた道を切り拓くものと位置づけられます。

今後も、本光ファイバの 2020 年代前半における実用化を目指すとともに、増大し続けるデータ通信需要に持続的に対応可能な光伝送基盤の実現に貢献していきます。

<参考・用語解説>

※1 テラ・ビット

テラ(単位:T)は 10^{12} の大きさを表し、500 枚のブルーレイディスク(容量:25 ギガ・バイト)を 1 秒で伝送できる容量に相当します。

※2 国際規格に準拠したガラス直径

現在の光通信で使用されている光ファイバは、相互接続性を担保するためガラスの直径が $125 \pm 0.7 \mu\text{m}$ 、光ファイバを保護する被覆層を含む直径が $235 \sim 265 \mu\text{m}$ となるよう、国際規格により定められています。

※3 ポストデッドライン論文

一般論文投稿締め切り後(ポストデッドライン)に受け付けられる論文です。光通信国際会議では、本分野の研究機関が会議直前の最新技術によって光通信技術の最高性能を競い合います。会議期間内に論文選考が行われ、極めて高い

評価を受けた研究成果のみが報告の機会を得ることができます。

※4 10 コア以上のマルチコア光ファイバの研究開発例

<http://www.ntt.co.jp/news2012/1209/120920a.html>

<http://www.ntt.co.jp/news2016/1605/160516a.html>

<http://www.kddi-research.jp/newsrelease/2016/101401.html>

<http://www.ntt.co.jp/news2017/1703/170323a.html>

※5 光ファイバの損失

0.21 dB/km の損失には、ファイバ同士を溶かして接続(融着接続)した接続点の減衰量も含まれています。15 km 伝搬後の光の強さが約半分に減衰するレベルで、現在使用されている光ファイバと同等の損失レベルといえます。

※6 コア間の光信号干渉

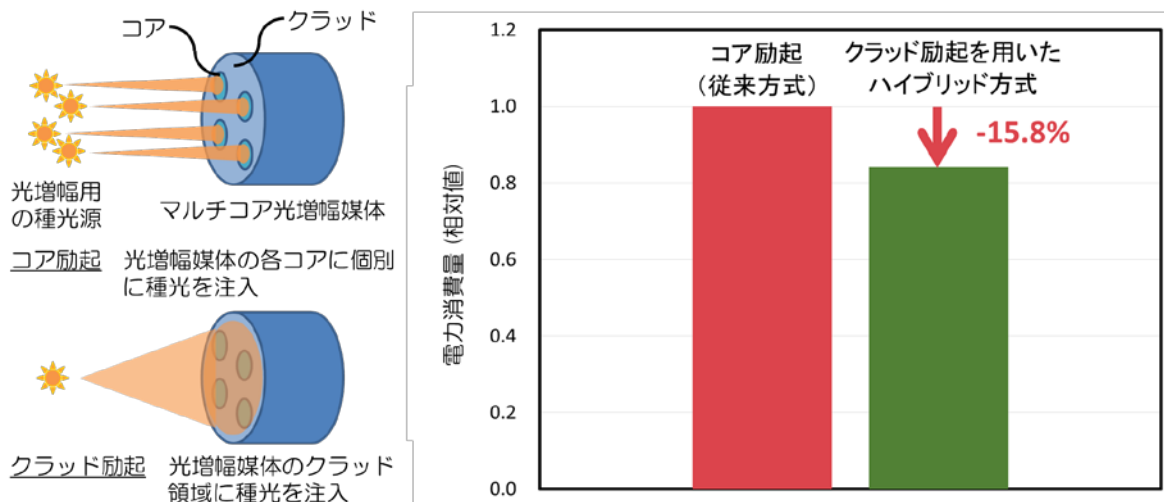
光ファイバ中を伝搬する光はわずかながらコアの外周に染み出して伝搬していきます。このため、マルチコア光ファイバでは、隣接するコア間の距離が近すぎると各コアを伝搬する光信号間の干渉により伝送品質が劣化してしまいます。

※7 モードフィールド径(MFD: Mode Field Diameter)

光ファイバ中を伝搬する光の光ファイバ断面内における広がり(直径)を表す尺度です。光ファイバ間の MFD の偏差が大きくなると接続損失が増大するため、光ファイバの相互接続性を担保する上で重要なパラメータとなります。

※8 クラッド励起を適用したマルチコア光増幅器

クラッド励起を適用したマルチコア光増幅器では、光増幅の種となる励起光を複数のコアを包含する共通のクラッド領域に、共通の光源から出射された光増幅の種となる励起光を一括して注入するため、各コアに個別の光源からの励起光を注入するコア励起型の光増幅器に比べ消費電力の低減が図れると期待されます。今回の実験では、従来のコア励起方式にクラッド励起を組み合わせた NEC 社製のハイブリッド励起型の光増幅器で約 16%の電力削減効果を確認しました。



✓ コア励起とクラッド励起を組み合わせたハイブリッド励起型のマルチコア光増幅器の適用により、今回の実験では約 16%の消費電力の低減効果が確認できました。

図 5 クラッド励起型マルチコア光増幅のイメージと消費電力の低減効果

※9 16QAM 信号

従来の光通信では光の ON/OFF と情報の 0/1 を対応させることが一般的でしたが、16QAM (Quadrature Amplitude Modulation: 振幅位相変調) 信号では、光信号電界の 2 つの独立した成分 (I 成分と Q 成分) を 4 個のレベルで変調します。これにより、4 × 4 の 16 値の信号情報を生成・伝送することが可能となります。

※10 Fan-In・Fan-Out デバイス

4 本の汎用 SMF 中の光信号をマルチコア光ファイバの 4 個のコアに結合、あるいはマルチコア光ファイバ中の 4 個のコアの光信号を 4 本の汎用 SMF に分離させる光デバイスで、今回の実験では光ファイバ型および光導波路型の 2 種類のデバイスを用いました。

※11 MU 形および SC 形光コネクタ

既存の光システムで使用されている着脱型の光接続技術で、コネクタの形状により MU、SC、FC 形等の国際規格があります。

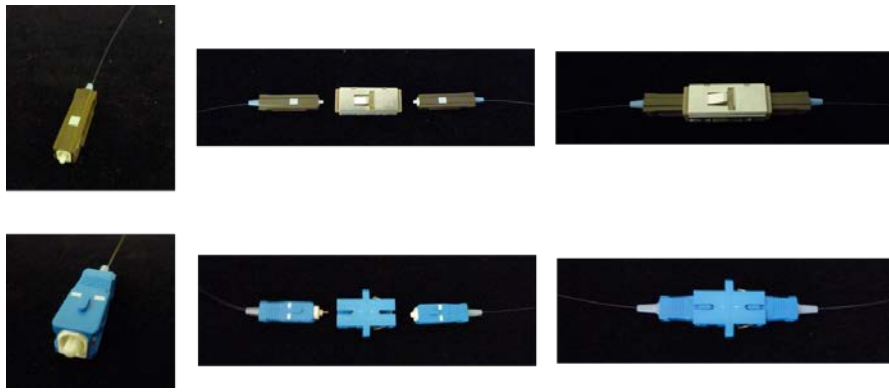
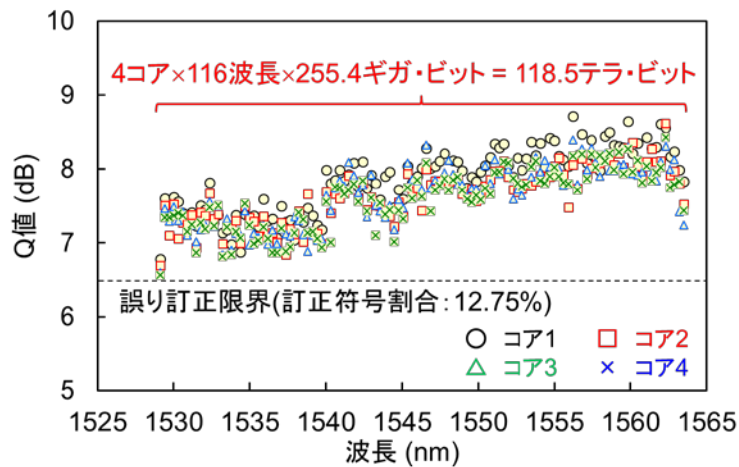


図6 MU形(上)およびSC形(下)光コネクタの外観写真と接続イメージ

※12 世界最大の 118.5 テラ・ビット伝送

今回の伝送実験では 116 波長にボーレート 36 ギガ(単位:G、 10^9)の信号を 16QAM 変調し偏波多重して伝送しました。このうち、誤り訂正のため 12.75%の符号を用いているので、実質的な総伝送容量は、次式のように 118.5 テラ・ビットとなります。

$$116 \text{ 波長} \times 36 \text{ ギガ} \times \log_2 16 (16 \text{ 値} = 2^4) \times 2 (\text{直交偏波}) \times 4 \text{ コア} \div 1.1275 (\text{誤り訂正}) = 118.5 \text{ テラ・ビット}$$



✓ 全ての波長・全てのコアで伝送限界の 6.5 dB を上回る伝送品質(Q 値)が得られました。

図7 116 波・16QAM 信号の 316 km 伝送後の伝送特性

<本件に関するお問い合わせ先>

- 学校法人千葉工業大学
千葉工業大学
入試広報部・入試広報課
- 日本電信電話株式会社
情報ネットワーク総合研究所 企画部 広報担当
- 株式会社 KDDI 総合研究所
- 住友電気工業株式会社
広報部 広報グループ
- 株式会社フジクラ
総務・広報部
- 古河電気工業株式会社
IR・広報部
- 日本電気株式会社
コーポレートコミュニケーション部 中村・増田