

長距離大容量空間多重伝送に向けた マルチコアファイバ

林 哲也*・樽 稔樹・永 島 拓 志
島 川 修・佐々木 隆・笹 岡 英 資

Multi-Core Fiber for High-Capacity Long-Haul Spatially-Multiplexed Transmission — by Tetsuya Hayashi, Toshiki Taru, Takuji Nagashima, Osamu Shimakawa, Takashi Sasaki and Eisuke Sasaoka — Data traffic is exponentially growing due to the emergence of various network services. Although the transmission capacity of optical fibers has been dramatically increased thanks to advanced communication technologies such as wavelength-division multiplexing and multi-level modulation, the transmission capacity is rapidly approaching its fundamental limit as the amplification bandwidth has been used up and drastic improvements in the signal-to-noise ratio cannot be expected. As a potential solution, space-division multiplexing technology has been drawing attention. We have conducted research and development on the multi-core fiber (MCF) and achieved positive results. This paper reviews the major achievements of our MCF research and development.

Keywords: optical fiber communication, space-division multiplexing, spatial multiplexing, multi-core fiber, inter-core crosstalk

1. 緒 言

動画配信やスマートフォンに代表される様々なネットワークサービスの登場により、ネットワークを流れるトラフィックは年々指数関数的な増加を続けている。一方、それを支える光ファイバの伝送容量は、これまで波長分割多重 (WDM) *¹ や多値変調*² などの技術により改善が続けてきたが、伝送帯域の枯渇*³ や、非線形雑音*⁴ による信号対雑音比 (SNR) 改善の限界により、従来のシングルモードファイバ (SMF) を用いた光ファイバネットワークの伝送容量改善は原理的限界に近付きつつある^{(1),(2)}。この限界を打破し得る技術として、近年、大きな注目を浴びているのが空間多重技術である^{(2),(3)}。光ファイバの伝送容量の大幅な改善を目指して、様々なグループにより盛んに空間多重技術が研究されている。

当社においても、従来の光ファイバの容量限界を打破する技術として、マルチコアファイバ (MCF) に着目し、実用化に向けた研究開発を進めてきた。MCFは、**図1**に示す様に、1つのクラッド内に複数のコアを備えるため、従来のシングルコアファイバ (SCF) においては見られなかった特性劣化が懸念され、これを抑圧できるかどうか、実用化に向けた重要な課題である。なかでも、最も懸念されるのが、コア間でのクロストーク (XT) である。各コアで独立に信号を送る為には、雑音となり得るコア間でのXTを抑圧することが極めて重要である。我々は、実際のMCFにおけるXTを (その確率論的な振る舞いを踏まえた上で) 予測可能な解析手法の提案と実証^{(4)~(8)}、超長距離大容量伝送に適した低ロス・極低XT MCFの試作実証^{(6)~(9)}、

XTの雑音としての振る舞いの理論的解明^{(9),(10)}、更には、XTを雑音として考慮した上での各コアSNR改善^{(11),(12)}などをそれぞれ世界で初めて達成した。本論文では、これらのMCFに関する主要な研究開発成果について紹介する。

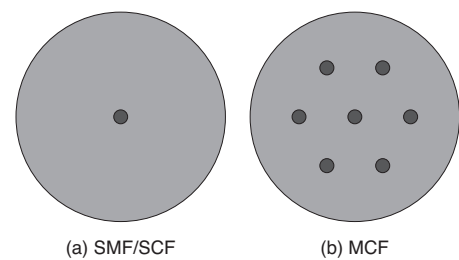


図1 光ファイバの断面概略図 (色の濃い部分が高屈折率部分を表す)

2. コア間クロストークの振る舞い

2-1 先行研究における理論予測 従来、MCFのXTについて理論的な検討により、コア間にわずかな実効屈折率 n_{eff} の差があればXTを抑制できるとの報告がなされていた^{(13)~(15)}。これらの理論検討に基づけば、コア m からコア n へのXTは、

$$\frac{dA_n}{dz} = -j\kappa_{nm} \exp [j(\beta_n - \beta_m)z] A_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表されるモード結合方程式⁽¹⁶⁾により表すことができる。ただし、 A_n はコア n の複素電界振幅、 κ_{nm} はコア m からコア n へのモード結合係数、 $\beta_n = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff},n}$ はコア n の伝搬定数、 z はファイバ長手方向位置を表す。式(1)に基づいて計算すると、例えばコア m のみに光を入射したとき [$A_m(0) = 1, A_n(0) = 0$] のコア n の光強度は、

$$|A_n|^2 = F \sin^2 qz \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F = \left[1 + \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{2\kappa_{nm}} \right)^2 \right]^{-1}, \quad q = \sqrt{\kappa_{nm}^2 + \left(\frac{\beta_n - \beta_m}{2} \right)^2} \quad \dots\dots (3)$$

で表せ⁽¹⁶⁾、確かに図2に示す様に、わずかな n_{eff} の差で最大パワー移行率 F 、そしてXTを抑制できると考えられる ($\lambda \sim 10^{-6}$ では、わずかな n_{eff} の差が大きな β の差になり、コア間の位相差が長手方向で大きく変化し(位相不整合)、効率的なモード結合が妨げられるため)。

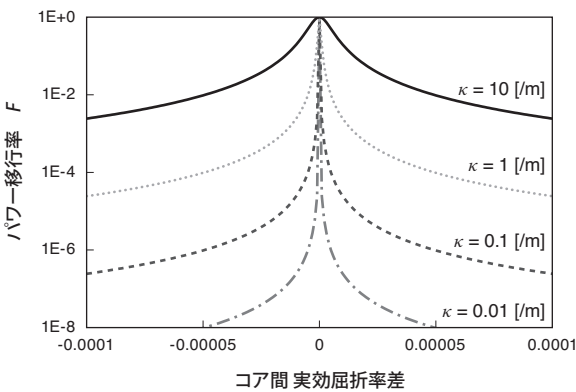


図2 波長1550nmにおける、コア間の実効屈折率差とパワー移行率Fの関係

2-2 クロストークへのファイバ曲げの影響 しかしながら、これらの検討は、各コアが長手方向に摂動を受けない理想的な状態を仮定したシンプルなモード結合理論に基づいたものであり、種々の摂動を受ける実際のMCFには適用不能であることが懸念される。我々は、特にファイバ曲げの影響は無視できないと予測し、理論・実験双方からの検討を行った^{(4),(5)}。

従来より曲がり導波路の解析に用いられている等価屈折率法⁽¹⁷⁾に基づけば、屈折率分布が n_{mat} で曲げ半径 R_b の曲げを付与されたファイバは、等価屈折率分布

$$n_{\text{eq}} \approx n_{\text{mat}} \left(1 + \frac{r \cos\theta}{R_b} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

を持つ直線状のファイバとして表せ、MCFの場合、各コアの等価実効屈折率は、

$$n_{\text{eff,eq},n} \approx n_{\text{eff},n} \left(1 + \frac{r_n \cos\theta_n}{R_b} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表せる。式(5)は単純に、コアが曲げの外側にあるか内側にあるかによる、わずかな光路長の変化を屈折率の変化として表しているとも考えることもできる。単純の為に、コア m がMCFの中心に位置する場合を考え、コア m とコア n の中心間距離(コア間隔)を D_{nm} とおくと、曲げ半径が

$$R_{\text{pk}} = \frac{n_{\text{eff},n}}{|n_{\text{eff},m} - n_{\text{eff},n}|} D_{nm} \quad \dots\dots\dots (6)$$

以下のときは、図3に示す様に、コア間の僅かな実効屈折率差は曲げによって打ち消されてしまうことから、XTが大幅に悪化することが考えられる。

我々は、このような曲げの影響を定量的に評価するため、モード結合理論に等価屈折率法を導入しての理論検討と、試作評価により、XTの曲げ半径依存性を調査した。曲げの影響を考慮すると、式(5)より伝搬定数は長手方向に変化し得るので、モード結合方程式は、

$$\frac{dA_n}{dz} = -j\kappa_{nm} \exp \left[j \int_0^z (\beta_{\text{eq},n} - \beta_{\text{eq},m}) dz' \right] A_m \quad \dots\dots\dots (7)$$

とおく必要がある。ただし、 β_{eq} は等価伝搬定数で $\beta_{\text{eq},n} = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff,eq},n}$ である。MCFに、 R_{pk} 以下の一定の曲げ半径の曲げと、2回転/mで一定の捻じれ率での一方向捻じれを付与した場合の、2コア間の等価実効屈折率と、式(7)を用いて計算したXT(正確には結合光強度:式(1)~(3))

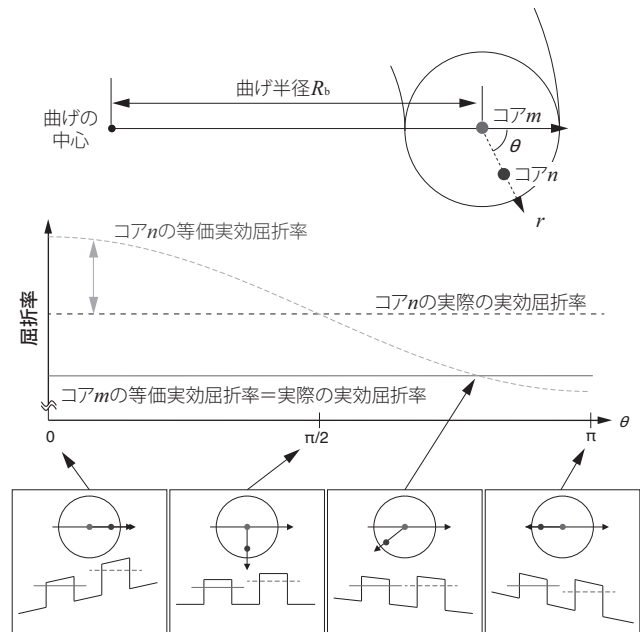


図3 ファイバ曲げによる等価屈折率変化

における $|A_n|^2$ に相当) の長手方向変化の例を、**図4**に示す。曲げが付与された状態でのXT変化は、**式(2)、(3)**で表される様な単純な変化ではなく、2コア間で等価実効屈折率が等しくなる位相整合点で一見ランダムな支配的变化が生じ、それ以外の位置では微小に振動する様な変化となっている。

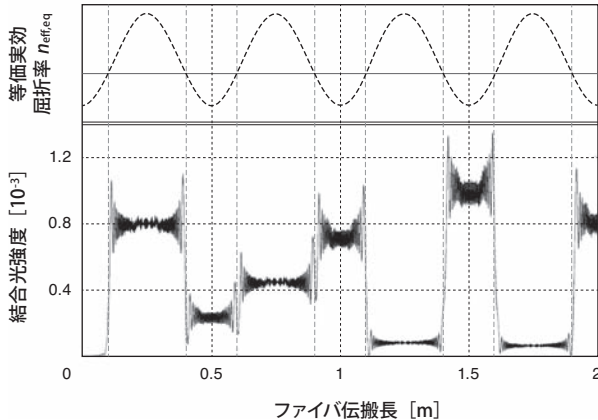


図4 MCFに一定の曲げ半径 ($R_b < R_{pk}$) と捻じれ (2回転/m) を付与した場合の、2コア間の等価実効屈折率とクロストーク (結合光強度) の長手方向変化の計算例

XTの支配的变化が一見ランダムに増えたり減ったりしているのは、各位相整合点でのコア間位相差がそれぞれ異なるために、XTを強める様な位相関係で結合が起こる場合や、弱めあう様な位相関係で結合が起こる場合があるためであるが、計算上は一意的条件を与えれば一意の変化が求められる。しかし、実際のファイバを考えると、このコア間位相差は、ファイバの曲げ半径や捻じれ率などの僅かな変動の影響を大きく受けて簡単に変動してしまうと考えられ、そのため、各位相整合点でのクロストークの変化は、実際にはランダムで統計論的な変化になると推定される。そこで我々は、この様なランダム性を考慮に入れる為に、**式(7)**にランダムな位相シフトを導入したシミュレーションを行うことで、XTの統計平均値を求め、曲げ半径とXTの関係を調べた。また、併せてMCFの試作評価を行い、上記考察及びシミュレーション手法の妥当性の確認を行った。**図5**に、曲げ半径とXTの関係について、実際の試作評価から得られた測定値と、上記シミュレーションから得られた理論計算値の比較を示す。四角い点とエラーバーが実測値を表し、点は10回巻き替えと測定を繰り返して得た平均値、エラーバーは最大・最小値を表す。実線は、シミュレーション計算 (600試行分) によって得た平均値を表す。実測値と計算値が良く整合していることが分かる。この結果から、曲げの影響を考慮した理論的枠組みにより実測したクロストークの値をよく説明できること、XTが

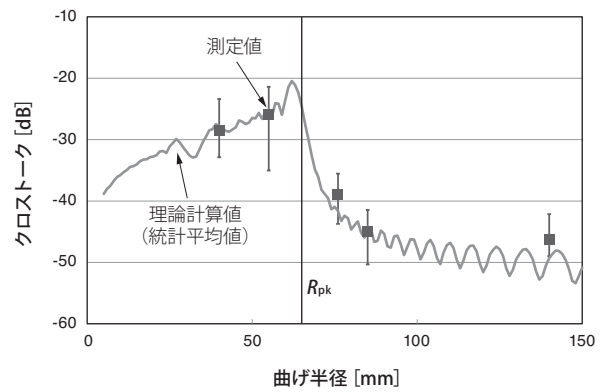


図5 MCFクロストークの曲げ半径依存性の例

曲げの影響を強く受けること、低XTを実現するためには、曲げの影響を考慮することが必須であることを、初めて明らかにした^{(4),(5)}。

2-3 同種コア型MCFにおけるクロストーク 前節での検討から、曲げを考慮した十分な実効屈折率差をコア間に付与すれば、XTを低減できることが分かったが、同時にXTが劣化しだす曲げ半径である R_{pk} を十分小さくするためには、コア間での光学特性に大きな差を持たせる必要があることも分かった。一方、MCFに様々な特性のコアを收容するのは、敷設した光ファイバ線路でコアごとに個別に特性を管理する必要が生じるため、実用上望ましくないと考えられる。そこで我々は、ファイバ曲げの影響を逆に活用して位相不整合を引き起こすことで、全コアが同種コアにより構成された低クロストークMCFを提案した^{(6)~(9)}。

ここではまず、同種コア型MCFのXTの確率分布や統計値を、シミュレーションによらずに簡単な計算で求めることを可能とした、近似モデルを構築しての解析解導出について紹介する。

曲げの影響が大きい場合、**図5**に示される様に、離散的な位相整合点ごとにXTの支配的変動が発生するので、この離散的変動を、

$$A_{n,N} = A_{n,N-1} - jK_{nm,N} \exp(j\varphi_{rnd,N}) A_{m,N-1} \dots \dots \dots (8)$$

で表される様な“離散的かつランダムなモード結合”で近似することができる。ここで、 $A_{n,N}$ はN番目の位相整合点後のコアnの複素電界振幅であり、 $\varphi_{rnd,N}$ はN番目の位相整合点でのコア間位相差であり、 $K_{nm,N}$ はコアmからコアnへの結合による“離散的变化”に関する“結合係数”である。コア間位相差 $\varphi_{rnd,N}$ はランダム変数となる。コアmのみ励起する場合 ($A_{m,0} = 1, A_{n,0} = 0$)、クロストークが十分小さいという仮定の下では、 $|A_{n,N}| \ll 1, A_{m,N} \approx A_{m,0} = 1$ と近似でき、更にXTの値Xを $|A_{n,N}|^2$ で近似でき、**式(8)**は

$$A_{n,N} \approx -j \sum_{l=1}^N K_{nm,l} \exp(j\varphi_{rd,l}), \dots\dots\dots (9)$$

と書き直すことができる。

$\Re [K_{nm} \exp(j\varphi_{rd})]$ と $\Im [K_{nm} \exp(j\varphi_{rd})]$ の確率分布は、正規分布ではないが、 N が十分大きいときは、中心極限定理により、 $\Re [A_{n,N}]$ と $\Im [A_{n,N}]$ の確率分布は正規分布に収束する。いくつかの仮定を置き、 L をファイバ長とすると、2つの偏波モードそれぞれの $\Re [A_{n,N}]$ と $\Im [A_{n,N}]$ の分散は、

$$\sigma_{4df}^2 \approx \frac{1}{2} \kappa_{nm}^2 \frac{\lambda R_b}{2\pi n_{eff,n} D_{nm}} L, \dots\dots\dots (10)$$

という解析的近似解として求めることができる⁽⁸⁾。このとき、 X は、2つの偏波モードそれぞれの $\Re [A_{n,N}]$ と $\Im [A_{n,N}]$ の2乗の和、すなわち、分散 σ_{4df}^2 の正規分布を確率分布とする4つの確率変数の2乗の和となる。それぞれの分散で正規化された、正規分布を確率分布とする N 個の確率変数の2乗の和の確率分布は、自由度 N のカイ二乗分布に従い、その平均は N になることを利用すると、 X の確率分布 (XT 分布) は、 σ_{4df}^2 でスケールされた自由度4のカイ二乗分布:

$$f(X) = \frac{X}{4\sigma_{4df}^2} \exp\left(-\frac{X}{2\sigma_{4df}^2}\right), \dots\dots\dots (11)$$

で表せ、 X の平均値は、

$$\mu_{X,nm} \approx 4\sigma_{4df}^2 \approx \kappa_{nm}^2 \frac{\lambda R_b}{\pi n_{eff,n} D_{nm}} L \dots\dots\dots (12)$$

で表すことができ、曲げ半径 R_b を小さくすることで XT が小さくなることが分かる⁽⁸⁾。また、 XT 分布の99.99%値はデシベル値で μ_X に約7.7dBを加算したものとなる(デシベル軸上での XT 分布形状は μ_X によらず一定となる)。

式(11)で示される XT 分布は、波長掃引法により測定することができる⁽⁹⁾。これは、伝搬定数が波長に依存することにより、波長掃引によってコア間の位相差をランダム化することができ、 XT 値 X を統計的に十分にばらつかせ

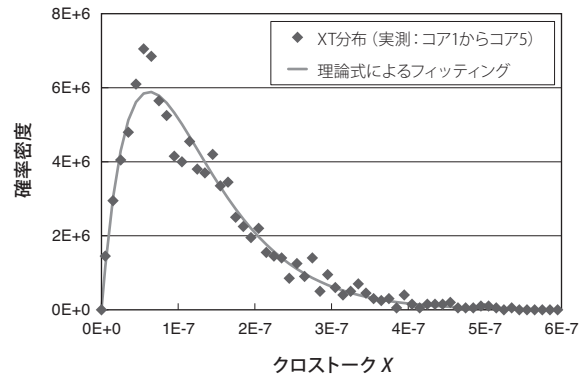


図7 XT分布の例(波長1625nm)

ることができる為である。実際に、 XT の波長特性を測定した結果を図6に示し、図6の XT スペクトルのデータを母集団として X の確率分布を求めた結果を図7に示す。波長の変化に対して XT 値 X が激しく変化の様子と、実際の XT 分布が、式(11)に良く従うことが確認できる。

3. 長距離伝送に耐え得る極低クロストーク同種コア型MCFの実現可能性実証

式(11)、(12)の導出により、MCF中での XT の複雑な振る舞いを、統計論的に容易に予測することが可能となったので、これらの式を用いて、同種コア型低 XT -MCF (MCF-A) の設計試作を行った^{(6)~(9)}。

純石英コアを採用して実際に試作した MCF-A の断面写真を写真1に示す。MCF-A のコア間隔、クラッド径、被覆径は、それぞれ $45\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 、 $256\mu\text{m}$ であった。MCF-A の各コアの光学特性を表1に示す。伝送損失(ロス)は、純石英コアの採用により、 1550nm で $0.175 - 0.181\text{dB/km}$ (平均 0.178dB/km)、C+Lバンド全域で

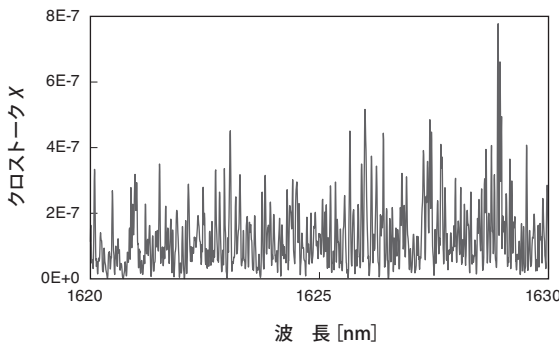


図6 XTの波長特性の例

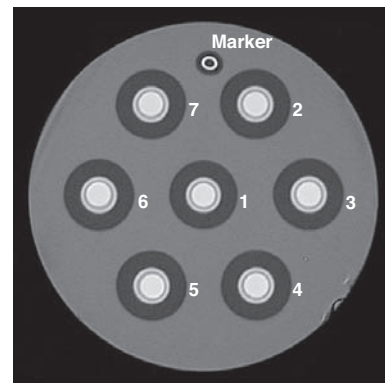


写真1 MCF-Aの断面写真

0.192–0.202dB/km以下を実現しており、外周コアにも有意な損失増は見られない。その他光学特性も長距離大容量伝送で用いられるC+Lバンド（1530～1625nm）での伝送に適した光学特性のMCFが得られた。

表1 MCF-Aの各コア光学特性

	伝送損失 [dB/km]	λ_{cc} [nm]	MFD [μm]	A_{eff} [μm^2]	波長分散 [ps/(nm \cdot km)]	分散スロープ [ps/(nm 2 \cdot km)]
λ [nm]	1550 1625		1550	1550	1550	1550
平均	0.178 0.198	1497	9.8	79.9	22.2	0.062
最小	0.175 0.192	1483	9.7	78.2	22.1	0.062
最大	0.181 0.202	1509	9.9	81.3	22.2	0.062

波長掃引法⁽⁹⁾を用いて測定した、MCF-Aの隣接コア間クロストークの平均値 μ_X を図8に示す。コア間 μ_X の最大/平均は、1550nmでは-77.6dB/-79.5dB、1625nmでも-67.7dB/-69.7dBと極めて低く、式(12)を用いた計算による予測とも整合することが確認できた。外周6コアから中心コアへの μ_X （中心コア μ_X ）も、1550nmで-72.3dB、1625nmで-62.1dBと極めて低いことが確認できた。

MCF-Aの長さは17.4kmであったが、式(12)からXT平均値 μ_X のファイバ伝搬長 L 及び曲げ半径 R_b への依存性を推定することができるので、波長1550nmにおける中心コア μ_X の $L \cdot R_b$ 依存性を図9に示す。中心コア μ_X は10,000km伝搬後でも R_b が約4m以下であれば-30dB以下を維持し、 X の99.99%値（ μ_X に約7.7dBを加算）でも R_b が約0.7m以下であれば-30dB以下を維持するという、極めて低いXTを実現しており、MCFを用いた超長距離伝送が低XTで実現可能であることを初めて実証した。

本MCFを用いて情報通信研究機構を中心に行われた伝送実験により、世界で初めて光ファイバ1本当たり100Tb/sを超える伝送容量を実現した^{(18)~(22)}。

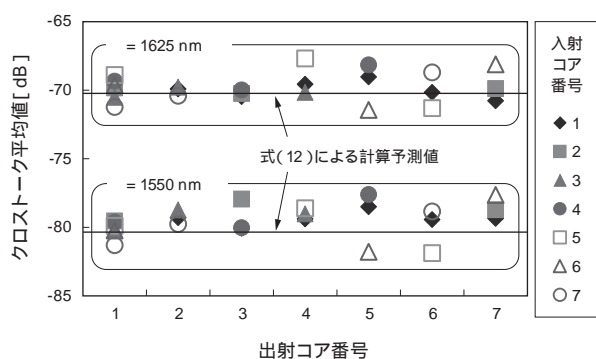


図8 17.4km伝搬後のMCF-Aの隣接コア間XT平均値

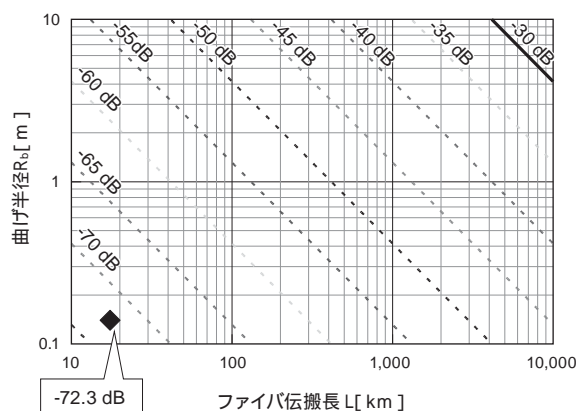


図9 波長1550nmにおけるMCF-Aの中心コア μ_X の伝搬距離・曲げ半径依存性（菱形の点： μ_X の測定が行われた R_b と L 。等値線：測定により得られた中心コア μ_X から、式(12)を用いて計算した、各 $R_b \cdot L$ における中心コア μ_X の推定値。）

4. クロストークの伝送特性への影響

MCF-Aの設計においては、XTの目標を99.99%値で-30dB以下としていたが、これは先行研究⁽¹⁵⁾において隣接コア間のXTの目標を-30dB以下としていたことに倣ったもので、必ずしもXTの雑音としての振る舞いを踏まえた上での裏付けのある目標ではなかった。そこで、前節で明らかとなったXTの統計論的振る舞いから、XTの伝送品質への影響について、理論的検討を行った^{(9),(10)}。

第2節の結果から、ファイバ長手に変化する曲げ・振れ・構造ばらつき等から生じるコア間位相差の変化により、MCFのXTに統計的ばらつきが生じ、その際、結合光（XT光）の各偏波モードのI/Q成分^{*5}は、それぞれが分散 $\mu_X/4$ の正規分布に従う確率変数となると言える。波長の変化によっても十分なコア間位相差は生じるので、信号光帯域が十分広ければ、XTは、自然放出光（ASE）雑音⁽²³⁾や非線形雑音⁽²⁴⁾などと同様に、事実上のガウス雑音として扱うことができると考えられる。

伝送システムの伝送品質の評価に用いられる代表的な指標である Q 値は、隣接する信号点（constellation point）の平均位置 μ_i と標準偏差 σ_i を用いて

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma_1 + \sigma_2} \dots\dots\dots (13)$$

の様に定義され⁽²⁵⁾、デシベル値は

$$Q_{dB} = 20 \log_{10} Q = 10 \log_{10} Q^2 \dots\dots\dots (14)$$

で表される。よって、以下では、 Q^2 値に関して議論する。XTを含まない雑音の標準偏差を等しく $\sigma_n = \sigma_1 = \sigma_2$ と見なし、シンボル間距離を $S = |\mu_1 - \mu_2|$ とおくと、XTを含まない雑音に対する Q^2 値は、

$$Q_n^2 = \frac{S^2}{4\sigma_n^2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

と表すことができる。ここで、他コアからの総XTの平均値 ($\mu_{X, total}$) を、XT光の平均パワーを信号光パワー P_s で割った比と考えると、XT光のI/Q平面上での分散 σ_x^2 は、

$$\sigma_x^2 = P_s \frac{\mu_{X, total}}{4} \quad \dots\dots\dots (16)$$

と表すことができる。統計的に独立な変数の和の分散は、各変数の分散の和に等しいので、XTを含む雑音に対する Q^2 値は、

$$Q_x^2 = \frac{S^2}{4(\sigma_n^2 + \sigma_x^2)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

と表せ、これを式 (15)、(16) を用いて整理するとXT起因の Q^2 ペナルティ (Q_n^2/Q_x^2) は、

$$\frac{Q_n^2}{Q_x^2} = 1 + Q_n^2 \mu_{X, total} \frac{P_s}{S^2} = \left(1 - Q_n^2 \mu_{X, total} \frac{P_s}{S^2}\right)^{-1} \quad \dots\dots (18)$$

となる。 P_s/S^2 は変調方式によって定まる値であり、代表的な変調方式に於ける値を表2にまとめる。 $Q_x^2 = 9.8$ dB (ビット誤り率 1×10^{-3} 相当) としたときのXT起因の Q^2 ペナルティ (Q_n^2/Q_x^2) を式 (18) から計算した例を図10に示す。 Q_n^2/Q_x^2 を1dB以下に抑えるには、 $\mu_{X, total}$ が、PDM-QPSKの場合-16.7dB以下、PDM-16QAMの場合-23.7dB

表2 代表的な変調方式に於ける P_s/S^2 の値

変調方式	P_s/S^2
PDM-QPSK	1
PDM-8PSK	$2^{1/2} / (2^{1/2} - 1)$
PDM-16QAM	5
PDM-32QAM	10
PDM-64QAM	21
PDM-128QAM	41

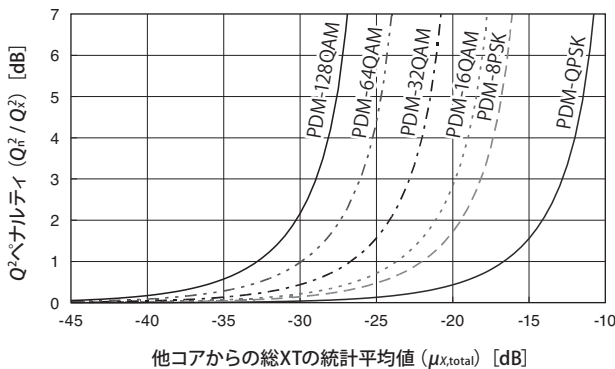


図10 XTの Q^2 値への影響

以下、PDM-64QAMの場合-29.9 dB以下であれば良いことが分かる。

これらのことから、MCFリンク全長の累積での他コアからの総XTの平均値 ($\mu_{X, total}$) が約-30dB以下であれば、周波数利用効率 (SE) が10bit/s/Hzを超える多値変調でも大きなペナルティなしに伝送が可能であることと、MCF-Aを用いれば10,000km程度の超長距離でもXTの観点からは十分に高SEの伝送が可能であることが分かった。

5. クロストーク考慮したSNR改善MCF

MCF-AのXTは十分に低減できていることが確認できたが、長距離大容量伝送を実現するためには、その他の雑音の抑圧も非常に重要である。

近年、デジタルコヒーレント検波の実用化により、光の位相情報を受信してデジタル信号処理を行うことが可能になったため、波長分散などの線形ひずみは補償可能となっている。このため、大容量伝送向けのSCFにおいて最も重要になっているのは、補償が困難なASE雑音と非線形雑音の抑圧であり⁽²⁾、最近のSCFを用いた大容量伝送実験においては、ASE雑音を抑制の為に伝送損失を低減し、非線形雑音を抑制の為に実効断面積 A_{eff} を拡大した光ファイバが用いられている⁽²⁶⁾。

MCF-Aでは、XTは極めて良く低減されている。一方、伝送損失は、汎用SMFより低減できており、MCFとしては報告されている中で最も低い値を実現してはいたものの、一般的な純石英コアSCF (伝送損失 ≤ 0.17 dB/km) に比べれば、まだ若干高く、 A_{eff} も汎用SMFから拡大されてはいない。そこで我々は、低伝送損失化と大 A_{eff} 化により、ASE雑音と非線形雑音の抑圧と、XTの適切な抑圧を同時に実現するMCFについて検討・提案を行った^{(11)、(12)}。

5-1 クロストーク影響下でのSNR 大容量伝送に一般に用いられる、1種類のSCFと集中型増幅器 (光ファイバ増幅器など) で構成された伝送路での、ナイキストWDM^{*6} 伝送時のSNRを数式により予測可能なことが報告されており⁽²⁴⁾、実現できる最大SNR (SNR_{sc}: ASE雑音と非線形雑音を考慮) を導出できる。

第4節で述べた様に、信号光帯域が十分広ければ、XTは、ASE雑音や非線形雑音などと同様に、事実上のガウス雑音として扱うことができると考えられるので、文献(24)の数式を拡張することで、MCFにおいてXTの影響を受けた状態で実現できる最大SNR (SNR_{mc}) も導出することができる^{(11)、(12)}。ここから求められるXT起因のSNRペナルティ (SNR_{sc}/SNR_{mc}) は、光増幅器の雑音指数 F やWDMの総帯域 B_{WDM} 、スパン長 (増幅器間隔) などには依存するが、スパン数 (或いは伝送リンク長=スパン長×スパン数) には無依存である。これは、 F 、 B_{WDM} 、スパン長が、単位長さ当たりに発生するASE/非線形雑音とXTの比率に影響を与えるのに対し、スパン数は影響を与えないためである。

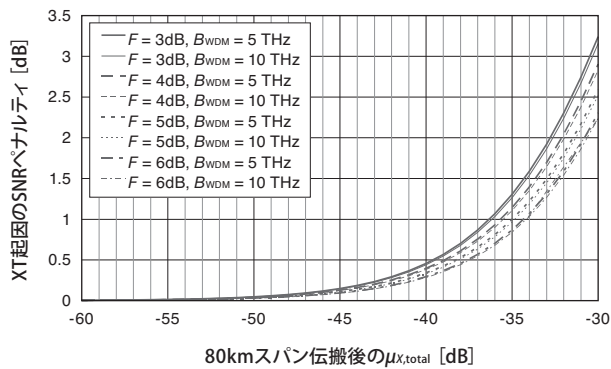


図11 汎用SMFコア($A_{\text{eff}} \sim 80\mu\text{m}^2$)を用いたMCFにおけるXT起因のSNRペナルティの計算値 (F : 光増幅器の雑音指数、 B_{WDM} : WDMの総帯域)

汎用SMF相当のコア (伝送損失: $\sim 0.19\text{dB/km}$ 、 A_{eff} : $\sim 80\mu\text{m}^2$) を用いたMCFで、スパン長80kmを想定した場合の、波長1550nmにおけるXT起因のSNRペナルティを図11に示す。80kmスパン当たりの $\mu_{X,\text{total}}$ が 10^{-4} (-40dB)を超えた辺りで急激にSNRペナルティが悪化することや、一定以上のXT低減の効果は限定的であることが見て取れる。

5-2 低損失・大 A_{eff} ・低クロストークMCFの試作MCF-Aの $\mu_{X,\text{total}}$ は、波長1550nmでは80km伝搬後で約-66dBと、XT起因のSNRペナルティ抑圧の観点からは、ある意味で“過剰”に抑圧されていたといえる。そこで、 $\mu_{X,\text{total}}$ を80km伝搬後で-40dB以下程度まで緩和し、その分を各コアの大 A_{eff} 化に振り向けることで、低損失・大 A_{eff} ・低XTを同時に実現する同種コア型MCF (MCF-B) の設計試作を行った。

試作したMCF-Bの断面写真を写真2に、各種特性を表3と図12、13に示す。伝送損失は波長1550nmで0.163~0.172dB/km (平均0.168dB/km)、C+Lバンドでも0.183~0.194dB/km以下という既報MCFの中で最も低い値を実現できた。 A_{eff} は121~127 μm^2 (平均124.1 μm^2)

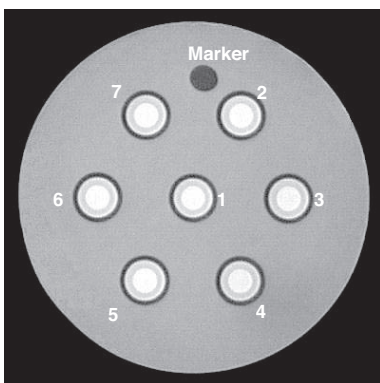


写真2 MCF-Bの断面写真

と全コアで $120\mu\text{m}^2$ 以上は確認した。試作MCFのコア間隔は $51\mu\text{m}$ 、クラッド径は $188\mu\text{m}$ でおおよそ設計通りである。1550nmでのXTも $L = 6.99\text{km}$ をポピン巻き状態 ($R_b = 140\text{mm}$)で、隣接コア間 μ_X が $-62.8 \sim -59.2\text{dB}$ (平均 -61.3dB)、中心コア μ_X が -53.1dB を実現し、 $L = 80\text{km}$ 換算で中心コア μ_X が -42.5dB 以下となるMCFを得た。

表3 MCF-Bの各コア光学特性

	伝送損失 [dB/km]		λ_{cc} [nm]	MFD [μm]	A_{eff} [μm^2]	波長分散 [ps/(nm·km)]	分散スロープ [ps/(nm ² ·km)]
λ [nm]	1550	1625		1550	1550	1550	1550
平均	0.168	0.188	1462	12.2	124.1	21.7	0.063
最小	0.163	0.183	1457	12.1	121.3	21.7	0.062
最大	0.172	0.194	1470	12.4	126.9	21.7	0.063

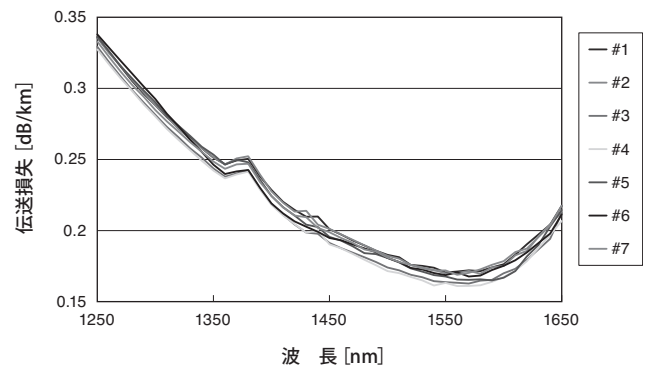


図12 MCF-Bの各コアの伝送損失スペクトル

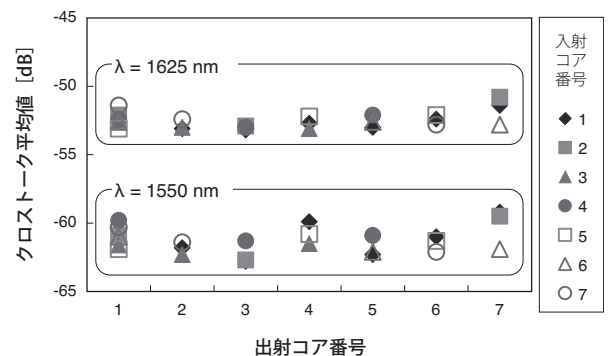


図13 6.99km伝搬後のMCF-Bの隣接コア間XT平均値

5-3 試作MCFの汎用SMFに対するSNR改善量MCF-AとMCF-Bについて、“XT起因SNRペナルティ (SNR_{SC}/SNR_{MC})”と“汎用SMFに対するSNR改善量 ($\Delta \text{SNR}_{\text{MC}}$)”の、1スパン伝送後のSNR_{SC}と $\mu_{X,\text{total}}$ への依存性を求めたものを図14に示す (計算の詳細は文献(12)を

参照)。図14は、WDM帯域10THz、光増幅器の雑音指数4dB、スパン長80kmの場合の結果であり、各等値線で表されたSNRペナルティ/SNR改善量は前述の通りスパン長に依存しない。この図からも、80km伝搬後の $\mu_{X, total}$ が-40dB前後で ΔSNR_{MC} の傾向が変わり、 $\mu_{X, total}$ がそれより大きい場合は A_{eff} 拡大や低ロス化によるASE・非線形雑音低減の効果をXTが打ち消してしまっていることが分かる。また、MCF-AからMCF-Bへの設計変更により、XTの抑圧を緩和し、各コアの大 A_{eff} 化に振り向けること（+更なる低損失化）によって、各コアのSNRが改善できていることが分かる。MCF各コアでのSNR改善には、 A_{eff} や伝送損失の改善とXT抑圧のバランスを適切に取る必要があると明らかになった。特に、 A_{eff} の拡大は、光のコアへの閉じ込めを弱めるために、XTの抑圧とトレードオフの関係にあるので、両者のバランスをとった設計が重要である。

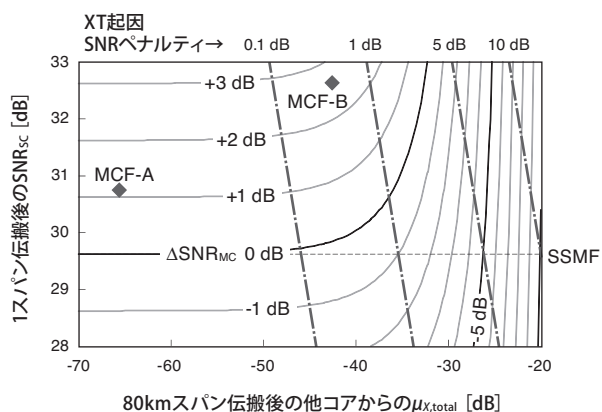


図14 試作MCFの汎用SMFに対するSNR改善量

6. 結 言

当社に於ける、長距離大容量空間多重伝送に向けたマルチコアファイバの研究開発成果について紹介した。従来のシングルコアファイバには無い、マルチコアファイバ(MCF)特有の性能劣化要因であるコア間クロストーク(XT)について、その振る舞いを詳しく調べることで、実際のMCFにおけるXTを(その確率論的な振る舞いを踏まえた上で)予測可能な解析手法の提案と実証、超長距離大容量伝送に適した低損失・極低XT MCFの試作実証と試作MCFを用いた光ファイバ1本当たり100Tb/sを超える伝送実験、XTの雑音としての振る舞いの理論的解明、そして、XTを雑音として考慮した上での各コアSNR改善などをそれぞれ世界で初めて達成した。

7. 謝 辞

本論文で紹介した研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究/革新的光ファイバ技術の研究開発の一環としてなされたものである。

用語集

※1 波長分割多重 (WDM)

複数の信号をそれぞれ異なる波長の光で搬送し、光ファイバ1本当たりの伝送容量を増加させる伝送技術。

※2 多値変調

光の強度、振幅、位相などを多水準で変調することにより、1つの変調シンボルあたりの送信ビット数を高める変調手法。

※3 伝送帯域の枯渇

現在の長距離大容量光ファイバ伝送は、石英ガラスの低損失帯域であり、かつ、良質な光増幅器が利用可能なC+L帯(1530~1625nm)付近で行われているが、それ以外の帯域は、光ファイバの伝送損失の増加や、低雑音高利得の光増幅器が得られないなどの問題から、利用困難である。

※4 非線形雑音

強い光と誘電体の相互作用により生じる非線形な干渉により生じる雑音。WDMにおいて、強い光を光ファイバに入射すると、波長の異なる光が干渉しあい雑音が発生する。

※5 I成分、Q成分、I-Q平面

光の振幅と位相を、基準となる位相に対する同相(in-phase, I)成分と直交(quadrature, Q)成分の和として表す。複素振幅の実部がI成分に当たり、虚部がQ成分に当たる。I-Q平面は、I成分とQ成分を軸にとった平面(複素振幅の複素平面に相当)で、光の振幅と位相を表現する。

※6 ナイキストWDM

各光周波数チャンネルごとにナイキストフィルタをかけることで、ガードバンドなしでもチャンネル間干渉を抑え、シンボルレートと等しいチャンネル間隔を実現するWDM。

参 考 文 献 -----

(1) E. B. Desurvire, "Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades," J. Lightwave Technology, vol. 24, no. 12, pp. 4697-4710 (2006)

(2) R.-J. Essiambre and R. W. Tkach, "Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks," Proc. IEEE, vol. 100, no. 5, pp. 1035-1055 (2012)

(3) T. Morioka, "New generation optical infrastructure technologies: 'EXAT initiative' towards 2020 and beyond," in OptoElectron. Commun. Conf. (OECC), Hong Kong, 2009, paper FT4.

(4) T. Hayashi et al., "Crosstalk variation of multi-core fibre due to fibre bend," in Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC), paper We.8.F.6 (2010)

(5) 林哲也 他、「曲げ付与によるマルチコアファイバのクロストーク変化」、信学技報、vol.110、no.291、OCS2010-96、pp.51-56 (2010)

(6) T. Hayashi et al., "Low-crosstalk and low-loss multi-core fiber utilizing fiber bend," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), paper OWJ3 (2011)

(7) T. Hayashi et al., "Ultra-low-crosstalk multi-core fiber feasible to ultra-long-haul transmission," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), paper PDPC2 (2011)

(8) T. Hayashi et al., "Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber," Opt. Express, vol. 19, no. 17, pp. 16576-16592 (2011)

(9) T. Hayashi et al., "Characterization of Crosstalk in Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber," J. Lightwave Technol., vol. 30, no. 4, pp. 583-589 (2012)

(10) 林哲也 他、「マルチコアファイバのクロストークのQ値への影響」、信学技報、vol.112、no.193、OCS2012-34、pp.31-36 (2012)

(11) T. Hayashi et al., "Low-Loss and Large- A_{eff} Multi-core Fiber for SNR Enhancement," in Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC), paper Mo.1.F.3 (2012)

(12) T. Hayashi et al., "Uncoupled multi-core fiber enhancing signal-to-noise ratio," Opt. Express, vol. 20, no. 26, pp. B94-B103 (2012)

(13) G. Le Noane et al., "Ultra high density cables using a new concept of bunched multicore monomode fibers: A key for the future FTTH networks," in Int. Wire Cable Symp. (IWCS), pp. 203-210 (1994)

(14) S. Kumar et al., "Optical fibers having cores with different propagation constants, and methods of manufacturing same," U.S. Patent 6611648 (26-Aug-2003)

(15) M. Koshiba et al., "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," IEICE Electron. Express, vol. 6, no. 2, pp. 98-103 (2009)

(16) A. W. Snyder, "Coupled-Mode Theory for Optical Fiber," J. Opt. Soc. Am., vol. 62, no. 11, pp. 1267-1277 (1972)

(17) D. Marcuse, "Influence of curvature on the losses of doubly clad fibers," Appl. Opt., vol. 21, no. 23, pp. 4208-4213 (1982)

(18) 情報通信研究機構、プレスリリース、「光ファイバ1本の伝送容量109テラビットの世界記録を樹立」(2011/3/10) [Online]. Available: <http://www.nict.go.jp/press/2011/03/10-1.html>

(19) J. Sakaguchi et al., "109-Tb/s ($7 \times 97 \times 172$ -Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), paper PDPB6 (2011)

(20) 坂口淳 他、「均一7コアファイバを用いた109-Tb/s空間/波長/偏波多重QPSK信号の16.8km伝送」、信学技報、vol.111、no.92、OCS2011-16、pp.27-31 (2011)

(21) 坂口淳 他、「伝送容量の飛躍的向上へ向けた空間多重・マルチコアファイバ通信の基盤技術」、信学技報、vol.111、no.112、LQE2011-21、pp.29-34 (2011)

(22) J. Sakaguchi et al., "Space Division Multiplexed Transmission of 109-Tb/s Data Signals Using Homogeneous Seven-Core Fiber," J. Lightwave Technol., vol. 30, no. 4, pp. 658-665 (2012)

(23) R.-J. Essiambre et al., "Capacity Limits of Fiber-Optic Communication Systems," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), paper OThL1 (2009)

(24) P. Poggiolini et al., "Analytical Modeling of Nonlinear Propagation in Uncompensated Optical Transmission Links," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 23, no. 11, pp. 742-744 (2011)

(25) "ITU-T Recommendation G.975.1." (Feb-2004)

(26) A. Sano et al., "102.3-Tb/s (224×548 -Gb/s) C-and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), paper PDP5C.3 (2012)

執 筆 者 -----

林 哲也* : 光通信研究所



樽 稔樹 : 新規事業開発部 主席



永島 拓志 : 光通信研究所



島川 修 : 光通信研究所 主席



佐々木 隆 : 光通信研究所 プロジェクトリーダー



笹岡 英資 : 研究統轄部 主幹



*主執筆者