



Title	Multi-Core Fiber for High-Capacity Spatially-Multiplexed Transmission [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	林, 哲也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11075号
Issue Date	2013-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/53805
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Tetsuya_Hayashi_review.pdf, 「審査の要旨」



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 林 哲也

審査担当者 主 査 教 授 齊藤 晋聖
 副 査 教 授 宮永 喜一
 副 査 特任教授 野島 俊雄
 副 査 特任教授 小川 恭孝

学位論文題名

Multi-Core Fiber for High-Capacity Spatially-Multiplexed Transmission
(大容量空間多重伝送用マルチコアファイバ)

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や多値変調などの技術により改善を続けてきたが、伝送帯域の枯渇や、非線形雑音による信号対雑音比改善 (SNR) 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。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り、様々な空間多重技術が研究されている。本論文では、空間多重技術のうち、クラッド内に複数のコアを備えるマルチコアファイバ (MCF) に着目し、実用化を目指して進めてきた研究開発の成果を報告している。本論文は 8 章からなり、構成は以下の通りである。

第 1 章では、上述のように今日空間多重が必要とされる背景、過去の MCF に関する研究、また、現在 MCF を含め様々な空間多重伝送技術が研究されていることについて簡単に紹介している。また、本論文の構成を説明している。

第 2 章では、MCF の実用化可能性に関する基礎検討として、MCF に特有の特性劣化について調査し、抑圧の可否について検討した結果について報告している。MCF は、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。特に、各コアで独立に信号を送るためには、雑音となり得るコア間でのクロストーク (XT) を抑圧することが極めて重要である。本検討において、MCF の実際の XT が従来のシンプルなモード結合理論では予測できないことを発見し、ファイバ曲げの影響を考慮したシミュレーション手法を提案するとともに、実際の XT を予測可能なことを確認している。従来、極わずかなコア間実効屈折率差により XT は低減可能と予測されていたが、本検討により、MCF の XT がファイバ構造のみならず、ファイバ曲げに依存すること、コア間に実効屈折率差があっても小径曲げ時には XT が大きく劣化すること、また、これを防ぐためにはコア構造に非常に大きな差を持たせる必要があることを、理論・実験の両面から明らかにしている。また、XT が確率的な振る舞いをすることを明らかにしている。XT 以外にも、MCF においては、被覆に近いコア (外周コア) において伝送損失 (ロス) が悪化することを実験により発見し、考察とシミュレーションにより、このロス悪化は、クラッドモードの伝搬抑圧の為に高屈折率となっている被覆への結合に起因することを明らかにしている。

第 3 章では、前章の結果を踏まえ、超長距離大容量伝送に適した低ロス・極低 XT-MCF の試作実証を行った結果を報告している。前章の結果から、異種コア型 MCF では、XT 低減には設計に様々な工夫が必要となり容易ではないと考えられることや、敷設後の伝送線路の特性管理が煩雑化すると考えられることから、ファイバ曲げを活用した同種コア型 MCF における XT 低減法を提案している。更に、設計検討簡略化の為に、XT のファイバ長手方向変化の近似モデルを考案し、同種コア型 MCF の XT の統計論的特性の解析表現を導出している。導出により得られた XT の統計平均値を表す式は極めて簡潔であり、今日、同種コア型 MCF の XT の予測に広く用いられている。近似モデルからは更に、XT が自由度 4 のカイ二乗分布に従う確率分布をとることを明らかにし、新たに開発した測定手法により実測した XT 分布が確かに理論予測と良く一致することを確認している。これらの結果と前章の結果を踏まえて、設計・製造した同種コア型 MCF により、汎用 SMF 同等の実効

断面積 (A_{eff}) $80 \mu\text{m}^2$ を維持しつつ超長距離伝送も十分実現可能な極低 XT (10,000 km 伝搬後でも $< -30 \text{ dB}$ 相当) を実現可能なことを実証している。

第4章では、XT の確率論的振る舞いについて論じることで、XT の雑音としての振る舞いを明らかにし、XT の伝送品質 (Q 値) への影響を考察・定量化している。XT は、その確率論的な振る舞いにより、波長軸上で激しく、時間軸上で緩やかに、自由度4のカイ二乗分布に従って変化する。このため、XT の雑音としての振る舞いは、信号光の帯域に依存し、故に、XT の Q 値への影響も信号光帯域に依存する。信号光帯域が十分広い場合は、XT は I-Q 平面上で、ASE 雑音や非線形雑音同様に、事実上の白色ガウス雑音として振る舞うので、XT の Q 値への影響は容易に計算できる。例えば、ビットエラーレート 10^{-3} を仮定した場合、XT 起因の Q ペナルティが 1 dB 以下となるためには、伝送リンク全長で累積した他コアからの総 XT の統計平均値が、PDM-QPSK の場合 -16.7 dB 以下、PDM-16QAM の場合 -23.7 dB 以下、PDM-64QAM の場合 -29.9 dB 以下であることが求められる。このことから、第3章報告の MCF は、超長距離伝送後も“XT の観点”からは、 10 bit/s/Hz 以上の周波数利用効率が実現できることが分かる。逆に、信号光帯域が十分狭い場合、信号光帯域内での XT は、波長 (周波数) 軸上での変化は乏しくなる一方、時間軸上ではシンボルレートに対して十分静的であるものの緩やかに変化する結合となる為、各信号光帯域での XT において、その統計平均値に対して数～十倍程度大きな値を継続してとる時間帯が生じ得る。このため、信号光帯域が十分広い場合に比べて、一定のマージンをとった XT 低減を行う必要がある。

第5章では、各コアにおける SNR を改善する低ロス・大 A_{eff} MCF を提案している。第3章で報告した極低 XT-MCF は超長距離伝送に十分耐え得るほどの低 XT ではあるが、XT 以外にも ASE 雑音や非線形雑音も低減できなければ、長距離大容量伝送は実現できないので、更なる低ロス化と大 A_{eff} 化を図っている。本章 MCF の波長 1550 nm におけるロスは 0.17 dB/km 以下と既報の MCF の中で最も低い値を実現しており、 A_{eff} も $120 \mu\text{m}^2$ 以上を実現している。更に、前章での検討結果を踏まえ、信号光帯域が十分広い場合について、XT 存在下での SNR について理論的検討を行うことにより、本章 MCF や既報 MCF において、ロス・ A_{eff} ・XT が SNR にどのような影響を与えているのか明らかにしている。既報の A_{eff} 拡大 MCF の多くは、ASE・非線形雑音よりも大きな XT を生じさせる構造となっていた為、 A_{eff} 拡大の恩恵を享受できていなかったのに対し、本章 MCF においては、XT 存在下でも、汎用 SMF に比べて 2 dB 以上の SNR 改善可能な構造を実現していることを明らかにしている。

第6章では、これまでに明らかになった XT の詳細な特性について記述している。他グループの成果も含め XT 関連研究の要旨のレビュー・再整理を行い、またそれらにおいて曖昧であった点を明確化し、XT の統計平均値の新たな解析表現を導出している。これにより、様々な摂動の XT への影響や、XT の振る舞いの物理的な意味を容易に解釈できる様にした。導出した解析表現に基づき、ファイバの長手方向の構造変動やファイバ曲げ (マクロベンド) が XT にどのように影響を与えるのかを議論することで、これまでに提案されてきた主要な XT 低減手法について整理し、専門の研究者以外にはなかなか理解しづらかった XT の振る舞いを容易に理解できる様にしている。

第7章では、劣悪環境下での XT の振る舞い、特に、MCF の接続箇所、小径の曲げ (マクロベンド)、また、マイクロベンドの XT への影響について調べた結果を示している。これらの要素は、敷設した MCF に付与され得るものであり、実用化に向けてはこれらの要素の影響を踏まえた上でのファイバ・システム設計が重要となる。

第8章では、まとめを行い、今後の課題を示している。

これを要するに、著者は、光ファイバネットワークの伝送容量改善の限界を打破し得る空間多重技術である MCF に関し、コア間 XT を予測可能なシミュレーション手法の提案や、XT の統計論的特性を考慮した解析的表現式を導出するとともに、試作実証を通して MCF による長距離大容量伝送が実現可能であることを明らかにした。さらに、MCF の実用化のために重要となる各コアにおける SNR の影響や、ファイバの長手方向の摂動が XT 特性へ与える影響を詳細に明らかにしており、情報通信フォトンクスに関する学術分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。