

称号及び氏名 博士（工学） 五藤 幸弘

学位授与の日付 平成 31 年 3 月 31 日

論文名 「大容量化および高信頼化のための
光ファイバ設計に関する研究」

論文審査委員 主査 大橋 正治
副査 山田 誠
副査 石亀 篤司
副査 久保田 寛和

論文要旨

光ファイバ通信は多種多様なサービスを支える必要不可欠な社会基盤となっている。サービス、並びに利用者の増加に併せてインターネットトラフィックは指数関数的な伸びを続けている。インターネットトラフィックの増加に対応するため、時分割多重、波長分割多重および偏波分割多重などの多重伝送技術が研究・開発され、実用化されてきた。しかし、多重数の増加に伴い、光ファイバへの入力光パワーが増加することで、非線形現象による信号劣化や、ファイバヒューズと呼ばれる光ファイバのコアの長手方向への周期的な損傷が発生することから、入力可能な光パワーにも限界があることが明らかになってきている。そのため、現在利用されているシングルモード光ファイバ（SMF: Single Mode Fiber）の伝送容量は、100 Tbit/s が限界であると予想されている。この伝送容量限界を打破するために1つのクラッドの中に複数のコアを有するマルチコア光ファイバ（MCF: Multi Core Fiber）や、1つのコアで複数のモードを伝搬するフューモード光ファイバ（FMF: Few Mode Fiber）を用いた空間分割多重（SDM: Space Division Multiplexing）技術が精力的に研究開発されている。MCF および FMF は、従来の SMF の設計に加えて、コア間およびモード間のクロストーク（XT: Cross Talk）を小さくする設計も必要となる。特に、コア間の XT を抑制するためには、コア間距離を十分に離すことが効果的であることが知られている。そのため、コア間距離を離すためにファイバ外径を従来の SMF より大きくし、コア間の XT を小さくする設計が必要となってくる。しかしながら、ファイバ外径を大きくすることは、光ファイバの信頼性を劣化させる。そのため、可能な限りファイバ外径を小さくすることが望ましい。MCF のファイバ外径は、コア間距離とクラッドの最も外側に配置されたコアとファイバ外径の境界までの距離（以降、クラッド厚と呼ぶ）によって決定される。ファイバ外径を小さくするためには、クラッド厚を小さくすることが有効な手段であるが、クラッド厚と伝送損失の関係は十分に明らかになっていない。一方、サービスの増加に伴い、データセンタおよび通信設備ビル内に設置された光ファイバ収容装置に接続される光ファイバ心線数も増加しており、光ファイバ心線を接続す

る、取替えるなどの作業を行う頻度も高まっている。さらに、不慮の作業により光ファイバが小さな半径で曲げられることで曲げ損失の増加、最悪光ファイバの物理的な破断により通信断が発生することが懸念され、光ファイバは信頼性および取り扱い性の向上も求められている。信頼性の向上は、光ファイバケーブル製造時の光ファイバのガラス表面への傷の発生を防ぐことや、光ファイバに加わる外部応力を小さくすることが有効であり、これまで光ファイバ母材をふっ酸洗浄し火炎研磨によって表面を平滑化する方法や、紫外線硬化樹脂による被覆や抗張力体と共にケーブル化するなどにより、20年以上破断しないような信頼性が実現されてきた。また、取り扱い性も小さな半径の曲げによる曲げ損失を低減した低曲げ損失光ファイバが実用化され飛躍的に改善された。しかし、光ファイバの曲げに対する物理的な破断を抑制することはできていない。小さな曲げによる物理的な破断の抑制には、ファイバ外径を小さくすることが有効な手段の1つである。しかし、ファイバ外径と伝送特性の関係は十分に明らかにされていない。

本研究の目的は、MCFの更なる伝送容量の拡大、並びに細径光ファイバによる信頼性の向上を実現する要素技術として、クラッド厚およびファイバ外径を考慮した光ファイバ設計技術を確認することである。クラッド厚およびファイバ外径と伝送損失（閉じ込め損失、曲げ損失、マイクロバンド損失）、並びにカットオフ波長との関係を理論的および実験的に明らかにする。また、MCFの伝送容量の指標としてコア占有率（CMF: Core Multiplicity Factor）を用いて、クラッド厚と伝送損失の関係から、CMFを最大にするMCFについて検討を行う。さらに、ファイバ外径と伝送損失およびカットオフ波長を用いて、国際電気通信連合（ITU-T: International Telecommunication Union - Telecommunication sector）に規定されている伝送特性を満足する細径低曲げ損失光ファイバの設計法について検討を行う。この設計値に基づいて作製した細径低曲げ損失光ファイバおよび光ファイバコードの伝送特性の実験結果より設計法の有用性について確認する。

本論文は6章から構成されており、各章を要約すると以下のようになる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的、構成を示している。

第2章では、伝送損失モデルに基づいて、ファイバ外径およびクラッド厚と閉じ込め損失、曲げ損失およびマイクロバンド損失の関係を実験的および理論的に検討した結果を述べる。曲げ損失特性を用いることで任意のファイバ外径を有する光ファイバの閉じ込め損失およびマイクロバンド損失特性が評価できることを実験的に示した。ファイバ外径を小さくすると閉じ込め損失およびマイクロバンド損失が増加するが、被覆厚を大きくすることで抑圧できることを明らかにした。さらに、閉じ込め損失を用いて最小クラッド厚および最小ファイバ外径を導出できることを示した。

第3章では、ファイバ外径とカットオフ波長の実験的および理論的に検討した結果を述べる。従来のSMFのようにコア周囲に空孔がない充実型構造と低曲げ損失特性を実現できるコア周囲に空孔を配置した空孔アシスト光ファイバ（HAF: Hole Assisted Fiber）構造のそれぞれで、ファイバ外径とカットオフ波長の間関係を検討した。充実型構造の場合、ファイバ外径が小さくなるに伴いカットオフ波長が短波長側にシフトすることを確認し、正規化周波数（V値）を用いて任意のファイバ外径の光ファイバにおけるカットオフ波長を推定できることを示した。一方で、HAF構造の場合、ファイバ外径が小さくなるに伴い、カットオフ波長は長波側にシフトすることを確認し、LP₀₁とLP₁₁モードの閉じ込め損失差を用いて任意のファイバ外径におけるカットオフ波長を評価できることを示した。

第4章では、第2章のクラッド厚と閉じ込め損失の関係を用いて伝送容量を最大化するMCFの設計について述べる。実効断面積に対する最小クラッド厚を第2章の結果から導出し、実効断面積とCMFの関係を明らかにし、4つのコア配置に対して、実効断面積とCMFの関係を導出した。コア間に空孔がないMCFでは、従来のSMFに比べてCMFを最大約6倍に増加できることを明らかにした。さらに、空孔をコア間に1つ付与することでXTを抑圧することを検討し、実測および計算共に空孔径が大きくなるにつれてMCFのXT（単位: dB）は線形的に小さくなることがわかった。さらに、コアの実効断面積、曲げ損失特性およびカットオフ波長特性に影響しな

い空孔径および空孔位置を明らかにし、空孔がある場合の MCF は、空孔がない MCF に比べて CMF を更に 1 以上増加できることを示した。

第 5 章では、第 2 章のファイバ外径と閉じ込め損失の関係、並びに第 3 章のファイバ外径とカットオフ波長の関係を用いて細径低曲げ損失光ファイバの設計法について述べる。充実型構造と HAF 構造それぞれで、ITU-T が規定している伝送特性を満足する光ファイバの設計を行った。充実型構造においては、従来の SMF と同じステップ型コアで ITU-T G.657.A1 に規定された伝送特性を満たすファイバ外径 $70\ \mu\text{m}$ の低曲げ損失光ファイバの設計解を示した。この設計値に基づいて光ファイバおよび光ファイバコードを試作し、設計値どおりの伝送特性が実現できることを実験的に確認した。さらに、光ファイバコードの挿入損失、反射減衰量およびマルチパス干渉特性を測定した結果、従来の SMF に比べて大きな劣化がないことを確認した。HAF 構造においては、ITU-T G.657.B3 で規定された光ファイバの曲げ損失特性と G.657.A1 で規定されている光ファイバの伝送特性を満足し、ファイバ外径を $60\ \mu\text{m}$ まで小さくできる設計例を明らかにした。ファイバ外径 $60\ \mu\text{m}$ は、現在利用されている最も細い光ファイバコード径 $\phi 1.1\ \text{mm}$ を二つ折りした $0.55\ \text{mm}$ の曲げが付与されても物理的に瞬断しない信頼性を実現することができ、不慮の作業等による破断を極限まで低減できる。

第 6 章はまとめであり、本検討結果、並びに総括を述べる。

審査結果の要旨

本論文は、将来の光ファイバとして期待されているマルチコア光ファイバ (MCF) の更なる伝送容量の増大、並びに、細径光ファイバによる信頼性の向上を実現するために、光ファイバのクラッド厚およびファイバ外径を考慮した光ファイバの設計技術についてまとめたものであり、下記に示すような成果が得られている。

- (1) クラッド厚およびファイバ外径と閉じ込め損失、曲げ損失およびマイクロバンド損失の関係を明らかにし、細径光ファイバの閉じ込め損失およびマイクロバンド損失の値を曲げ損失特性を用いて推定できることを明らかにした。また、閉じ込め損失を用いて最小ファイバ外径を設計できることを明らかにした。
- (2) ファイバ外径とカットオフ波長を充実型構造とコア周囲に空孔を有する HAF 構造に対して検討した。充実型構造では、ファイバ外径を小さくするに伴いカットオフ波長が短波長側にシフトすることを確認した。HAF 構造ではファイバ外径を小さくするに伴いカットオフ波長が長波長側にシフトすることを基本モードと高次モードの閉じ込め損失差を用いて算出できることを明らかにした。
- (3) コア間に空孔がない場合とある場合の MCF において、MCF の断面積内にコアの実効断面積が占める割合を示す CMF を最大にする MCF の設計を行った。コア配置を六方最密構造+円環構造の充実型構造では、従来の SMF に比べて 6.3 倍の CMF を実現できることを明らかにした。コア間に 1 つの空孔を配置することで、六方最密構造+円環構造においてコア数を 13 まで配置でき、CMF を従来の SMF に比べて 7.8 倍まで拡大できることを明らかにした。
- (4) ファイバ外径と閉じ込め損失の関係およびファイバ外径とカットオフ波長の関係を用いて細径低曲げ損失光ファイバの設計を行った。充実型構造では、ITU-T に規定されている伝送特性および曲げ損失特性を満足するファイバ外径 $70\ \mu\text{m}$ の低曲げ損失光ファイバの設計領域を明らかにした。設計値に基づき光ファイバ素線および光ファイバコードを作製し、従来の SMF コードと同等の反射減衰量および MPI を実現できることを実験的に確認した。

以上の研究成果は、MCF および細径ファイバに対する新しいファイバ設計法に関するものであり、今後の通信システムの大容量化を実現するための MCF および高信頼性を有する細径光ファイバの設計に多いに貢献できる技術として期待できる。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。