

称号及び氏名 博士（工学） 丸山 遼

学位授与の日付 平成31年3月31日

論文名 「2モード光ファイバ伝送路の設計と評価法に関する研究」

論文審査委員 主査 大橋 正治  
副査 山田 誠  
副査 小西 啓治  
副査 久保田 寛和

## 論文要旨

光ファイバを用いた通信の可能性が Charles K. Kao 氏によって論じられた 1966 年から 2019 年現在に至る約 50 年の間に、光ファイバおよび光通信は目覚ましい発展を遂げ、今日の私たちの日常生活を支えている。光ファイバ技術の発展に焦点を当てると、コアの直径が大きなマルチモードファイバから始まり、汎用的なシングルモードファイバ (SMF: Single-mode fiber)、波長分散を制御した分散シフト光ファイバ、コアが純粋石英で構成された超低損失光ファイバなどが通信容量の増加の要求に応えるべく登場した。一方、通信トラフィック量は、今後、ますます増加していくと考えられており、将来的には SMF を用いた既存の光通信システムの通信容量の限界を上回ると予想されている。そして、この通信容量の限界を打破するためには、光通信システムだけでなく伝送路である光ファイバにおいても技術革新が必要になる。

そこで、近年、注目を集めている新しい光ファイバの一つが、フェューモードファイバ (FMF: Few-mode fiber) である。FMF とは複数の伝搬モードを導波する光ファイバで、それらのモード毎に信号を載せて伝送することで光ファイバ 1 本あたりの通信容量を増大させる。このような FMF を伝送媒体に用いた伝送方式は、モード分割多重 (MDM: Mode division multiplexing) 伝送と呼ばれている。MDM 伝送では、伝搬モードが光ファイバ中を伝搬するとき、モード間で互いに干渉するため信号品質の劣化を招いてしまう。このようなモード間の干渉はモード結合と呼ばれており、モード結合によって混信した信号の補償には、MIMO (Multiple-input-multiple-output) と呼ばれるデジタル信号処理技術が主に用いられる。MIMO 技術を併用する MDM (MIMO-MDM) 伝送には、超大容量伝送を実現する通信方式として高い期待が寄せられている。

しかしながら、超大容量 MIMO-MDM 伝送を達成するためには、伝送路である FMF の伝送特性にいくつかの克服すべき課題が課せられる。それには以下に示すようなものがある。

FMF は 2 つ以上のモードが伝搬するのでモード間に群遅延差が生じる。FMF を伝搬するモードは、光ファイバ中を異なる群速度で伝搬するため、単位長さあたりの信号の遅延時間を表す群遅延が異なる。したがって、

伝搬モード間にモード間群遅延差 (DMD: Differential modal group delay) が生じる。MIMO-MDM 伝送では、DMD が大きいほど受信端で信号を復元するための演算量が増加することが知られている。MIMO-MDM 伝送は、既存技術である波長分割多重 (WDM: Wavelength division multiplexing) 技術と併用することで、超大容量伝送を実現する。したがって、MIMO-MDM 伝送に適用する FMF には、WDM を適用する波長範囲全域において DMD を低減することが必要不可欠である。

さらに、FMF は、モード結合およびモード依存性損失 (MDL: Mode dependent loss) と呼ばれる各モードの損失特性を有する。MIMO によって復調される信号の品質は、モード結合量が大きいほど MDL による信号劣化は大きくなることが報告されている。したがって、FMF のモード結合や MDL を抑制することも超大容量伝送実現のためのキーポイントとなる。特に、モード結合はファイバ設計によって大きく左右される特性である。しかしながら、ファイバ構造とモード間のモード結合の関係を定量的に解明した例はほとんど報告されていない。

FMF の伝送特性に関する課題は以上に述べた通りであるが、将来、FMF 伝送路を実用に供することを考えた場合、製造性に優れた FMF の構造を明確にすることは非常に重要な要素の一つである。

最後に、FMF の伝送特性に関する新しい測定技術が求められる。特に、FMF を用いる MDM 伝送は、モードを分離して扱うため、各モードの伝送特性を評価する必要がある。そして、各モードの伝送特性を評価するためには、モード間の干渉 (モード結合) の影響を考慮して測定する必要があり、これも、課題の一つである。

本論文では、最もシンプルな FMF である 2 モード光ファイバ (TMF: Two mode optical fiber) に照準を絞り、TMF に関する上述した諸課題に関して研究することを目的とする。具体的には、まず、DMD を低減する TMF 伝送路の設計を提案し、実際に作製してその設計の有用性を明らかにする。また、LP (Linearly polarized) モード間のモード結合を定量的に評価し、ファイバ構造とモード結合の関係を定量的に解明する。測定技術においては、光ファイバの長手方向の特性分布の評価法および高次モードの波長分散の評価法を提案し、その妥当性を確認する。さらに、DMD を低減する製造性に優れた TMF 伝送路の構造設計を提案し、実際に作製してその設計の有用性を明らかにする。

本論文は、上記の研究内容を以下の 8 章にまとめている。

第 1 章では、本研究の背景、目的、および本論文の構成についてまとめた。

第 2 章では、製造性に優れたステップインデックス (SI: Step index) 型を屈折率分布に採用し、DMD を低減する SI 型 TMF (SI-TMF) 伝送路の設計を検討した。SI-TMF では、シミュレーションより、構造パラメータの変化に対する DMD の変化が大きいことがわかった。そこで、本研究では、2 本の異なる DMD 特性を有する TMF で構成される補償伝送路を提案し、単一波長 (1550 nm) においてゼロに近い DMD 特性を得る光伝送路の設計を行った。その設計に基づいて試作した 2 本の TMF で構成された補償伝送路は、波長 1550 nm で零に近い DMD となり、提案の妥当性が明らかになった。しかしながら、C band (1530-1565 nm) における最大 DMD は、約 400 ps/km と大きく、広い波長範囲全域で DMD を低減するためには、さらなる構造パラメータの最適化が必要であることを明らかにした。

第 3 章では、第 2 章で明らかになった課題を加味して、屈折率分布にグレーデッドインデックス (GI: Graded index) 型を採用して、広波長範囲で DMD を低減する TMF 伝送路の設計について検討した。本章では、まず、TMF 単体としてどのような DMD 特性が要求されるのかを明確にした。さらに、DMD と DMD の波長に対する傾き  $S_{D\lambda}$  の両方を補償する DMD-slope 補償型 TMF ( $S_{D-C}$ -TMF) を用いた補償伝送路、 $S_{D\lambda}$  が零となる DMD-slope フラット型 TMF ( $S_{D-F}$ -TMF) で構築される単一伝送路および補償伝送路を提案した。次に、GI 型のコアを有しディプレスト構造を付与した GID (Graded-index core with depressed cladding) 型の TMF を基準構造として、上述した要求特性を満足する構造パラメータをシミュレーションより設計した。

設計に基づいて試作した前述の 3 つの TMF 伝送路は、いずれにおいても C band 全域で十数 ps/km 以下の DMD を達成し、本研究で提案する TMF 伝送路が有用であることを実証した。特に、 $S_{D-F}$ -TMF を用いて構

築した補償伝送路では、100 km を超える伝送路において C band の DMD を 0.5 ps/km にまで低減させることに成功した。これは、これまでに報告された DMD の記録を約 1 桁下回る研究成果であり、世界記録を達成した。

第 4 章では、モード結合の定量的な解明について研究した。本研究では、モード結合理論に基づいたインパルス応答 (IR: Impulse response) 波形からファイバ中のモード結合および接続点におけるモード結合を定量的に評価する手法を提案した。測定した IR 波形は、励振モードおよび非励振モードのどちらにおいても、モード結合理論より計算した IR 波形と良く一致し、本評価手法はモード結合の評価法として有用であることを確認した。この評価手法を用いて LP<sub>01</sub> モードと LP<sub>11</sub> モードの実効屈折率の差 ( $\Delta n_{\text{eff}}$  Effective index difference) の異なる 7 本の FMF を測定したところ、 $\Delta n_{\text{eff}}$  の減少に伴ってモード結合係数  $h$  が指数関数的に増加する領域と  $\Delta n_{\text{eff}}$  に依存せず一定である領域が存在することがわかった。この結果より、TMF や FMF を設計する際に  $h$  を小さくするには限界があることが明らかとなった。また、その  $h$  の限界値は約 41 dB/km であった。さらに、その  $h$  の限界値を得る  $\Delta n_{\text{eff}}$  の最小値は、側圧がほとんど加わらない状態において、 $1.7 \times 10^{-3}$  であることも明らかとなった。これらの結果は、世界で初めて明確にしたものである。

接続点におけるモード結合についても、IR 波形を用いて定量的に評価できることを確認した。また、接続点におけるモード結合比率 ( $XT_s$ ) は入射光と被励振モードの電界分布の重なり積分に従うことを実験より確認した。さらに、接続点における LP<sub>11</sub> モードから LP<sub>01</sub> モードへのモード結合比率  $XT_{s11-01}$  は、軸ずれ方向によっても変化することを理論的および実験的に明らかにした。

第 5 章では、モード結合を有する光ファイバとして 7 つのコアを有するマルチコアファイバ (MCF: Multi core fiber) をモデルとして、OTDR (Optical time-domain reflectometry) を用いた光ファイバのモードフィールド径 (MFD: Mode field diameter), 比屈折率差, および波長分散の長手分布の評価法を提案した。本研究で提案した評価方法の妥当性を確認するために、7 コア MCF の MFD の長手分布を、本評価法を用いて測定した。その結果、本評価法で得られた MFD の値は、従来法である FFP (Far field pattern) 法の測定値と良く一致した。また、MCF の比屈折率差および波長分散の長手分布を測定できることが確認できた。

第 6 章では、FMF の高次モードの波長分散を直接測定するために、モード変換器と干渉法を用いた簡易な評価手法を提案した。本評価手法の妥当性を明確にするために、TMF の LP<sub>11</sub> モードの波長分散の測定を行った。その結果、測定値が計算値とほぼ一致することを確認した。以上の結果より、本評価手法は、LP<sub>11</sub> モードを含む高次モードの波長分散を直接測定するのに有用であることを明らかにした。

第 7 章では、DMD を低減した製造性に優れた TMF 伝送路の設計手法を示した。従来の GI 型のコアを有する TMF では、コア半径  $a$  やコアの屈折率の変動に対する DMD の変化 (感度特性) が大きいことをシミュレーションにより確認した。そこで、GID 型の屈折率分布を採用し、構造パラメータの変動に対して DMD の感度特性が小さい TMF を設計した。本設計に基づいて試作した 23.50 km の TMF は C+L band で 60 ps/km 以下の DMD を有し、且つ、コア半径  $a$  の変動に対する DMD の感度特性が従来の TMF に比べて 98% 以上小さいことを実験より確認した。以上の結果より、本章で提案した TMF は、小さな DMD を得ることが可能で、且つ、高い生産性を有する構造であることを明らかにした。

本論文にまとめた以上の研究成果は、既存の通信システムの限界を超えた超大容量 MIMO-MDM 伝送を可能とする TMF 伝送路の実現に大きく貢献すると考えられる。

## 審査結果の要旨

本論文では、急激なトラフィックの増加に対応する新しい光ファイバの構造設計に関するもので、2 モード光ファイバ (TMF) に照準を絞り、モードの群遅延差 (DMD) を低減したステップ型およびグレーデッド型屈折率分布の TMF の最適構造設計、伝送路の構成法および評価技術について提案している。

また、FMFのLPモード間のモード結合のメカニズムを定量的に解明している。さらに、DMDを低減する製造性の良好なTMFの構造設計を提案し、その設計に関する有用性について実験的に明らかにしている。本論文で得られた主な成果は、以下の項目に要約できる。

(1)ステップ型SI-TMFファイバは、構造パラメータの変化に対するDMDの変化が大きいため、DMDを小さくすることが困難であった。この問題点を解決するために、2本の異なるDMD特性を有するTMFで構成される補償伝送路を提案し、単一波長においてゼロに近いDMD特性を得る伝送路設計を提案している。

(2)広波長範囲でDMDを低減するTMF伝送路の設計について検討しており、DMDとDMDのスロープの両方を補償する補償伝送路、DMDスロープが零となる単一伝送路および補償伝送路を提案している。この構造を最適化することにより、広い波長域でDMDが小さい伝送路を実現できることを実証している。

(3)モード結合理論に基づいたインパルス応答波形からファイバ中および接続点におけるモード結合を定量的に評価する手法を提案している。この評価手法を用いて2つのモード間の実効屈折率差の減少に伴ってモード結合係数 $h$ が指数関数的に増加する領域と実効屈折率差に依存せず一定である領域が存在することを明らかにしている。

(4)OTDRを用いたマルチコア光ファイバ(MCF)の構造パラメータおよび波長分散の長手分布の評価法およびモード変換器と干渉法を用いたFMFの高次モードの波長分散を直接測定する簡易な評価手法も提案し、これらの評価法の妥当性を実証している。

(5)DMDを低減する製造性に優れたTMF伝送路の設計手法を提案している。提案したTMFは、小さなDMDを得ることが可能で、且つ、高い生産性を有する光ファイバ構造であることを明らかにしている。

以上の研究成果は、既存の通信システムの限界を超えた超大容量伝送を可能とする伝送路に関する重要な知見を与えるとともに、本分野の学術的・産業的な発展に寄与するところが大きい。また、申請者が自立して研究活動を行う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最終試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。