

氏名	大橋正治
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和 62 年 12 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最終学歴	昭和 54 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 前期 2 年の課程修了
学位論文題目	単一モード光ファイバの伝送特性に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 川上彰二郎      東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 宮城 光信

## 論文内容要旨

今日のような多種多様な情報が氾濫している情報化社会において、いかに情報を効率的かつ経済的に伝送するかということは重要な課題である。そのために、各種伝送媒体を用いた伝送方式が検討されており、特に光ファイバを用いた伝送方式の研究は現在盛んに行われている状況である。

光ファイバに関する研究は、1966年に STL の Kao 等により低損失な光ファイバの実現が論じられて以来、急速な進展を遂げ石英系光ファイバの損失値は材料固有の理論限界値にまで低減されている。また、光源、受光器の発展、接続技術、ケーブル化技術、布設技術等の急速な進展もあった。光ファイバは低損失であるばかりでなく、広帯域であること、軽量で可とう性に富み、電磁誘導の影響を受けにくいこと、さらに材料が豊富にあるなどの特徴を有している。光ファイバ伝送路は、光ファイバの機械特性を補強し、環境による特性の劣化を防ぐために光ファイバケーブルという形で、管路や洞道に布設し、接続することで構成される。ある伝送システムを構築する場合には、システム上の要求条件を満足する伝送路を実現する必要があるが、そのためにはあらかじめ中継区間長および損失配分を決定し、光ファイバケーブルの特性の規格値を決定することが必要となる。従って、適切な伝送路の設計および良好な伝送特性を有する光ファイバケーブルの実現が実用上重要な課題である。

単一モード光ファイバは、低損失性と広帯域性を有しているため、その特性を劣化させないように伝送路を設計する必要がある。そのためには、光ファイバをケーブル化する際に生ずるマイクロ

ベンディングや曲げ損失を小さくすることが必要である。また、接続損失を同時に小さくすることも重要な問題である。更に、伝送速度に適した帯域を有する光ファイバを設計することが不可欠である。

本研究は、このような背景のもとで単一モード光ファイバを公衆通信伝送媒体として実用化することを第一目的としている。このため、単一モード光ファイバの伝送特性を記述するパラメータである、モードフィールド径、実効遮断波長、および色分散等の特性の実験的、理論的な把握を行い、実用化され得る単一モード光ファイバの最適構造パラメータの設計を行った。次に、新たに考案した、階段形分散シフトファイバ(Dual Shape Core Fiber)の種々の伝送特性について検討した。その結果、階段形分散シフトファイバは、曲げ特性が良好で、分散のパラメータ依存性の小さい、従来の分散シフトファイバに較べて優れた特性を有するファイバであることを明らかにした。

以下に本論文の概要を各章ごとにまとめる。

第2章では、接続損失の実用的な評価の観点から3つの定義式について比較検討した。その結果、接続損失を評価する場合にはPetermannによるFFPのモーメントによる定義式が最適であることを明らかにした。また、接続損失の評価において、動作V値によってモードフィールド径の定義式の差が現れるが、通常の1.3 μm帯光ファイバでは定義式の差は実用上問題でないことを示した。NFP法、FFP法によるモードフィールド径を高精度に測定するための最適測定条件を決定した。このためにNFP法に対しては、赤外ビジコンカメラの感度特性、モードフィールド径の定義式に基づく数値計算上の積分範囲、およびAD変換による量子化誤差等を明らかにした。また、FFP法では、測定系の所要ダイナミックレンジ、FFPを測定するサンプリング間隔、および積分範囲等を明らかにした。測定精度および再現性を確認するために、ステップ形に近い光ファイバのモードフィールド径を最適測定条件下で測定した。その結果、図1に示すように、理論値と実験値とは、±0.2 μmの範囲内で良く一致することを確認した。また、測定の再現性は、0.05 μm以内であり、十分実用性のあることがわかった。

第3章では、単一モード光ファイバの理論遮断波

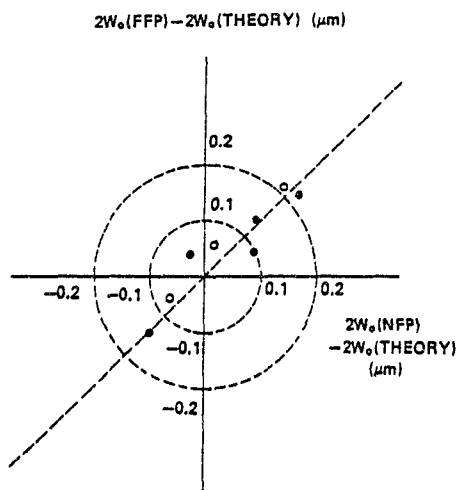


図1 モードフィールド径の実験値と理論値の比較

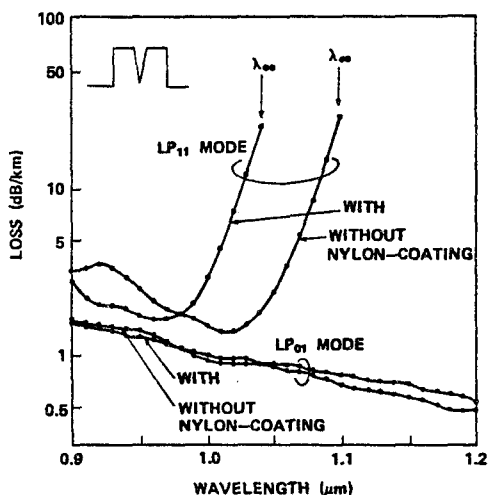


図2 LP<sub>11</sub>モードとLP<sub>01</sub>モードの損失特性測定結果

長より短い波長領域でのLP<sub>01</sub>とLP<sub>11</sub>モードの伝送特性について理論的、実験的に検討した。まず、LP<sub>01</sub>モードとLP<sub>11</sub>モードのモード損失の測定法について検討し、それぞれの損失特性について明らかにした。その結果、図2に示すように、LP<sub>11</sub>モードの損失は実効遮断波長に近づくにつれて急激に大きくなることがわかった。実効遮断波長 $\lambda_{ce}$ をLP<sub>01</sub>モードとLP<sub>11</sub>モードの間の結合係数とそれぞれのモード損失を考慮し、電力結合方程式を解析することにより定式化した。更に、実効遮断波長の距離依存性を測定し、本解析の妥当性を確認した。

第4章では、単一モード光ファイバの分散特性の概要について述べ、次に代表的な屈折率分布を有する単一モード光ファイバの導波路分散および零分散波長の近似式を導出した。これらの分散および零分散波長の近似式の精度は、それぞれ0.3%および0.03%である。また、1.6Gbit/sec伝送方式に1.3 $\mu$ m零分散光ファイバを使用する場合の色分散とファイバパラメータの関係について明らかにした。この結果、ここで検討した4つのタイプの単一モード光ファイバの1.3 $\mu$ mでの分散値は $\sigma = 0 \sim 3$  ps/km/nmの範囲にあることがわかった。更に、分散の近似式は、光伝送方式に心要な光ファイバの分散特性を評価する上で十分実用的であることを明らかにした。

第5章では、単一モード光ファイバの構造設計法を検討した。種々の屈折率分布に対して伝送特性を統一的に記述できる単一モード光ファイバの構造設計の基本パラメータとしてモードフィールド径と実効遮断波長とを選定し、一中継区間の全損失をこれらのパラメータで評価した。この設計法を用いて1.3 $\mu$ m帯光ファイバおよび1.5 $\mu$ m帯専用光ファイバのファイバパラメータの設計を行った。その結果、中継距離20km、伝送速度400Mb/sの1.3 $\mu$ m帯の伝送方式における最適ファイバパラメータの領域として、種々の屈折率分布を有する単一モード光ファイバに対して、図3に示すような、モードフィールド径、 $9.0 \mu\text{m} \leq 2W \leq 11.0 \mu\text{m}$ 、実効遮断波長、 $1.1 \mu\text{m} \leq \lambda_{ce} \leq 1.28 \mu\text{m}$ を得た。また、1.5 $\mu$ m帯専用光ファイバでは、中継距離80km、伝送速度400Mb/sの伝送方式におけるファイバパラメータの領域として、モードフィールド径、 $11.0 \mu\text{m} \leq 2W \leq 13.0 \mu\text{m}$ 、実効遮断波長、 $1.35 \mu\text{m} \leq \lambda_{ce} \leq 1.53 \mu\text{m}$ を得た。今後の検討課題としては、各種伝送方式に適用できる単一モード光ファイバの構造パラメータの決定である。

第6章では、1.5 $\mu$ m帯零分散ファイバ、特に $\alpha$ 乗分布形分散シフトファイバと新たに考案した階段形分散シフ

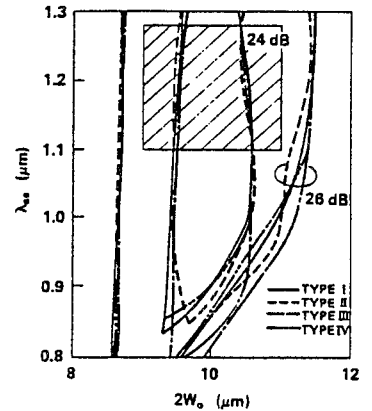


図3 ファイバパラメータの許容範囲

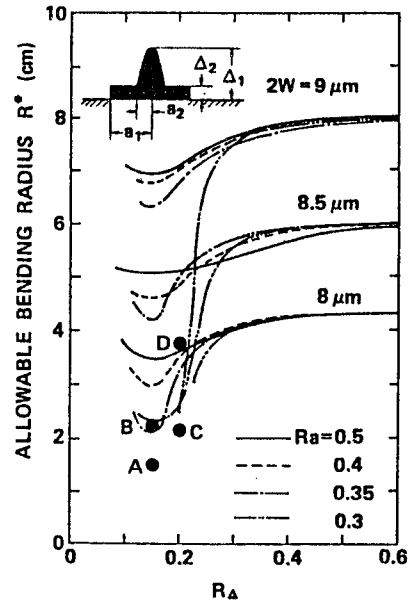


図4 階段形分散シフトファイバの曲げ損失特性

トファイバ（図4参照）の $1.55\ \mu\text{m}$ での零分散条件，レーリ散乱損失，曲げ損失特性および分散のパラメータ依存性について理論的，実験的に検討した。曲げ損失特性に関しては，分散シフトファイバは，モードフィールド径が大きくなるほど曲げ特性が劣化するのがわかった。また，モードフィールド径 $7\ \mu\text{m}$ の $\alpha$ 乗分布形分散シフトファイバは， $1.3\ \mu\text{m}$ 帯単一モードファイバの $1.3\ \mu\text{m}$ の曲げ特性と同等であり，階段形分散シフトファイバにおいてはパラメータの自由度が大きいためパラメータをうまく選択することによって，図4に示すように，所望なモードフィールド径に対して $1.3\ \mu\text{m}$ 帯単一モードファイバの曲げ特性と同等にすることができるのがわかった。更に，階段形分散シフトファイバは $\alpha$ 乗分布形分散シフトファイバに比較して，分散のコア半径依存性は小さく，曲げ損失特性は良好であることを明らかにした。更に分散のコア半径依存性と分散の波長依存性はトレードオフの関係にあることが実験的に確認した。

第7章では，本研究の成果をまとめた。

## 審 査 結 果 の 要 旨

高度情報化社会において大容量情報伝達の要となるのが単一モード光ファイバであって、その研究開発には今まで多くの努力が積み重ねられてきた。本論文は著者が単一モード光ファイバの特性評価ならびに特性向上に関しておこなった研究をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であって、歴史的背景と本論文の位置づけを行っている。

第2章ではモードフィールド半径( $w$ )の測定を、第3章では単一モード光ファイバにおける第2モードの実効遮断波長( $\lambda_{ce}$ )の性質とその測定を述べている。単一モード光ファイバの構造設計においては、ステップ状屈折率分布を仮定してコア半径とコア・クラッド屈折率差の二つのパラメータがよく用いられるが、実際のファイバについてそれらを定義することも計測することも容易でない。計測し易く、システム設計に直結したパラメータとして、前述の $w$ と $\lambda_{ce}$ とを用いることができれば有用である。著者は近視野像や遠視野像に基づく $w$ の測定法を開発・比較して何れの方法によっても高い精度で測定できることを示した。また遮断波長の近くで、基本モードと第2のモードがそれぞれの減衰定数と、ケーブル化により生ずる相互間の結合を伴って伝搬する系のパラメータを実測し、基本モード、第2モードの電力の比の距離依存性を明らかにした。これは従来意味づけがあいまいなまま用いられてきた実効遮断波長という量に明確な意義づけを行ったもので、有用な成果である。

第4章は単一モード光ファイバの分散特性を正規化周波数の有理式によって近似する手法に関するものである。

第5章では、単一モード光ファイバの構造設計を述べている。光ファイバをケーブル化する際の付加損失、光ファイバ間の接続損失を含めて伝送損失を最小とするよう、 $w$ と $\lambda_{ce}$ の最適設定を論じている。わが国の公衆通信に用いられている $1.3\mu\text{m}$ 帯システム用ファイバの仕様の決定には著者のこの研究が役立っている。

第6章では、伝送損失が最小になる $1.5\mu\text{m}$ 帯光伝送において問題である波長分散を零とする光ファイバについて論じ、階段型と称する新しい構造を提案・解析している。この型の光ファイバでは、従来の分散補償光ファイバに比し、同じ $w$ に対する許容曲げ半径を小さくすることができることを述べ、実証を与えている。これは重要な知見である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、光ファイバの特性把握の方法を確立するとともに特性向上の方法を示すもので、通信工学、光伝送工学の進展に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。