

氏名	いし だ ゆきのり 石 田 之 則
授与学位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 10 月 14 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 42 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 修士課程修了
学位論文題目	光ケーブルの損失特性に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 重井 芳治      東北大学教授 川上彰二郎 東北大学教授 宮城 光信

## 論 文 内 容 要 旨

1970年に損失20 dB/kmの低損失光ファイバが発明されて以降、光ファイバの研究や光ファイバを通信ケーブルとする研究（光ファイバのケーブル化の研究）が盛んに行われている。なかでも、光伝送方式の性能を支配する光ファイバの損失特性に関しては光ファイバの発明後ただちに精力的な研究が行われ、損失要因の解明、新しい光ファイバ製造法の開発等によって、1979年には1.5 $\mu$ mの波長帯で0.2 dB/kmという理論限界に達する損失値が実現されるに至った。一方、光ファイバの低損失化の研究が進展するのに伴って、光ファイバのケーブル化の研究も積極的に行われるようになり、1974年頃には光ケーブルに関する研究発表も多数なされるようになった。この初期の研究によりケーブル化に関する研究課題が明らかにされ、特に損失が増加することが大きな問題であることが示された。その後、この問題解決を目指して、種々の観点から研究が進められ、光ファイバ光軸の微小なランダム曲がりによる損失増加（マイクロバンド損失）が主要因となりえることが判明した。また、光ファイバにヤング率の異なる2層のプラスチック被覆を施して光ファイバ心線とする（光ファイバの心線化）と、マイクロバンド損失を低減できることが示された。しかし、光ファイバ心線の適切なプラスチック被覆寸法設計法等が明らかにされていないため、光ファイバの有する低損失な特性を十分に生かした光ケーブルを実現するには至らず、その設計技術についてさらに研究する必要があった。また、光ケーブルは屋外に長期間放置して使用されるため、種々の環境要因に対して損失が安定なことが重要であるが、この問題に関してはこれまで十分研究が行われて

おらず、光ケーブルの損失安定性に関する研究が必要であった。

本論文においては、以上のような従来の光ファイバのケーブル化に関する研究の不十分、ないしは不備の点を克服するために光ファイバ心線から構成される光ケーブルについて、低損失化を図ることを目的に基礎的研究を行うものである。

第2章では、光ファイバの損失要因を述べ、光ファイバ固有損失と曲げにより付加される損失に大別されることを示す。つぎに、光ファイバ固有損失の安定性について検討した結果を述べ、固有損失は側圧、張力、温度変化等に対して安定なことを示す。これらの事実をもとに、光ファイバの心線化、光ファイバ心線を用いた光ケーブルの作製および光ケーブルを通信管路に布設する時に生じる損失増加を防止するための研究課題を明らかにする。

第3章では、光ファイバ内に水素の拡散が発生した時の損失増加現象を検討する。金属材料を含む光ケーブルに注水すると金属の電気分解によりケーブル内に水素が発生する。この時ケーブル内の光ファイバについて、損失を測定すると1.2  $\mu\text{m}$ より長波長帯で損失が増加する現象が観測される。光ケーブルを解体して、光ファイバ心線を取り出し、通常的环境条件に放置すると損失はもとの値に回復される。また、1.2  $\mu\text{m}$ 帯の損失増加ピーク波長について、水素の光吸収ピーク波長と比較すると両者はよく一致する。さらに、拡散方程式を用いて光ファイバ内の水素分圧を求めると、損失増加量と水素分圧は比例することを把握できた。これらの検討により、水素は光ファイバ内に容易に拡散し、光通信に対して重要な波長帯に損失増加を生じることが明らかにできた。つぎに、シリコンとナイロンの2層被覆を有する光ファイバ心線を約200℃の高温に加熱して損失を測定する実験を行った。シリコン被覆は高温に加熱されると水素を発生するので、この実験により高温条件での水素拡散による損失増加を検討できる。この場合は1.3  $\mu\text{m}$ より長波長帯に、水素拡散による損失増加とは異なる波長特性を有する損失増加を生じる結果が得られた。また、常温に戻しても損失の回復は観測されず、恒久的に損失増加が残る。プラスチック被覆のない裸光ファイバについて同一の実験を行っても損失の変化はまったく観測されないことおよび損失増加の波長特性を詳細に分析すると、Si-OH基、Ge-OH基、P-OH基の各吸収ピークに対応する波長に大きな損失増加を生じることから、光ファイバ内に拡散した水素が光ファイバを構成する物質と化学結合し、OH基を形成することを明らかにできた。また、常温環境でも長時間水素が光ファイバ内に滞留すると、OH基が形成されてOH基の吸収ピークに対応する波長に損失増加が発生する。P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を含む光ファイバは1.5  $\mu\text{m}$ 帯に数十dB/kmの損失増加を生じるが、GeO<sub>2</sub>のみをドープした光ファイバは安定な損失特性を示すことを併せて明らかにした。以上の検討で光ファイバ内に水素が拡散すると、OH基が形成されることが明らかになったので、Si-OH基が1.3  $\mu\text{m}$ 帯の損失に及ぼす作用を定量化する検討を行い、Lorentzian型の吸収特性に対しては吸収の半値幅を0.025  $\mu\text{m}$ とする必要があることを示した。

第4章では、側圧作用時および低温環境下での光ファイバ心線の損失特性を検討し、この結果をもとに適切な光ファイバ心線被覆寸法の設計法を示す。光ケーブルを地下に埋設された通信管路に布設する時は管路の曲がり部等で側圧が光ケーブルに作用する。その際、ケーブルに収容されている光ファイバ心線にも大きな側圧が負荷される。これまで、微小な側圧に対しては光ファイバに

作用する側圧を低減する観点からプラスチック被覆の寸法を設計する方法が明らかにされていたが、大きな側圧による被覆の変形が及ぼす作用は考慮されていなかった。そこで、大きな側圧が作用した時の光ファイバ心線の変形について、理論および実験の両面から検討するとともに、側圧による損失増加が発生する荷重と変形量の関係を検討した。この結果、プラスチック被覆が弾性変形から塑性変形に移行すると損失増加が発生することを明らかにできた。また、弾性変形から塑性変形に移行する側圧を、被覆材料の基本特性から求める一般式を導き、これにより側圧による損失増加を防止できる被覆寸法の設計を可能とした。一方、低温環境下では光ファイバ心線はプラスチック被覆の熱収縮による損失増加を示す。これは光ファイバの構成材料である石英ガラスの熱膨張係数がプラスチック被覆の熱膨張係数より約2桁小さく、被覆の熱収縮に伴って光ファイバ光軸に曲げが発生するためと考えられる。しかし、この時発生する光ファイバ光軸の曲げ形状は十分に解明されていなかった。そこで、低温環境で光ファイバ心線に損失増加を発生させ、この状態で曲げ形状を実測して螺旋変形していることを把握した。また、螺旋変形している条件のもとに単一モード光ファイバ心線の損失増加量を理論計算し、測定値とよく一致することを明らかにした。低温環境下で光ファイバ心線内の光ファイバに曲げを発生させない被覆寸法の条件と温度との関係を定量的に求め、低い温度まで曲げを生じさせないためには、被覆厚を薄くすることが有効な結果を得た。以上の検討をもとに、側圧と温度の2つをパラメータとして被覆寸法を設計する方法を検討し、両条件を同時に満足できる適切な被覆寸法領域が存在することを明らかにした。

第5章では、撚り合された光ファイバ心線の曲げ損失特性を検討する。光ファイバ心線を用いて光ケーブルを構成する場合、光ファイバは通常2重の撚りを受ける。すなわち、細いテンションメンバの周囲に少心数の光ファイバ心線を撚り合せてユニットをまず構成し、つぎにこのユニットを太径のテンションメンバの周囲に撚り合せてケーブルを構成することが行われる。光ケーブルは実用に供されたとき曲げを受けることが多いので、2重に撚り合された光ファイバ心線の曲げ形状を解明することが光ケーブルの曲げ損失特性を研究するのに必要となる。光ファイバ心線あるいはユニットをテンションメンバの周囲に撚り合せるとき、外径が一定であれば幾何学的に無駄のないテンションメンバ径の選定が可能である。しかし、光ファイバ心線の外径をその長手方向に沿って実測したところ、数十 $\mu\text{m}$ オーダの変動があることが分かった。そこで、外径変動を考慮して、光ファイバ心線をテンションメンバの周囲に撚り合せたとき相互に側圧が発生しない最小テンションメンバ径を検討し、統計的手法を用いた設計法を明らかにした。つぎに、この条件で構成された光ケーブルについて、まずケーブルが真直であるとしてケーブル内の光ファイバが受ける曲げを記述する一般式を導いた。この式で撚り合せ条件を1重とすると螺旋の式に一致する。さらに、光ケーブルが曲げを受けた場合は曲げ半径がケーブルの半径より大きい条件での光ファイバの曲げを記述する一般式を導いた。この結果を用いて、光ファイバの曲げ損失から光ケーブルの曲げ損失を理論計算できる式を求め、実測される光ケーブルの曲げ損失と計算値は一致することを明らかにした。

第6章では、単一モード光ファイバの実効しゃ断波長距離特性をまず明らかにし、この結果をもとに光ケーブルのマイクロバンドの統計的特性を定量化する。光ファイバの実質的な単一モード伝送が可能な最長波長を求める方法として、曲げ法による実効しゃ断波長の測定が通常行われる。し

かし、この方法で光ファイバの長さを変えて実効しゃ断波長を測定すると、測定値が測定長依存性を有することが分かった。そこで、基本モードと第1次高次モードの結合を考慮して実効しゃ断波長の距離特性を解析した。各モードの損失波長特性をそれぞれ測定し、この値をもとにモード結合係数を仮定して実効しゃ断波長の距離特性を計算すると、モード結合係数が $0.02 \text{ km}^{-1}$ のとき測定値と良く一致することを把握できた。また、測定長を3 km以上とすると、実効しゃ断波長は一定値に収束することを見いだした。これは基本モードと第1次高次モード間のパワーのやり取りが定常状態に達するためと考察される。以上の検討により、実効しゃ断波長から理論しゃ断波長を求めるには測定長を2 mとしたとき得られる実効しゃ断波長を1.15倍すればよいことを明らかにできた。この結果をもとに、比屈折率差の小さな単一モード光ファイバを用いて光ファイバの心線化、ケーブル化さらに光ケーブルの布設実験を行い、それぞれ損失増加量を求めた。理論しゃ断波長が明らかでない単一モード光ファイバはその損失増加量の波長特性からマイクロバンドの統計的特性を評価できるので、実験で得た損失増加波長特性からマイクロバンドの統計的特性を定量化した。これにより、広い波長帯において低損失な特性を有する光ケーブルを実現できる単一モード光ファイバの構造パラメータを明らかにできた。

第7章では、中継区間における損失の分布を推定する方法を示す。曲げやマイクロバンド損失のない光ケーブルを用いても光ファイバの損失およびその接続損失が分布量となるため、中継区間における損失は分布量となる。光伝送方式の設計に関して中継区間の最大損失を推定することは極めて重要である。そこで、光ファイバの損失とその接続損失の分布から中継区間における損失分布を推定する方法を検討し、正規分布近似で精度のよい推定ができることを示した。

以上、本論文における研究の主要な理論的および実験的結果により、光ファイバ心線から構成される光ケーブルによって、光ファイバの有する低損失な特性を十分に生かした光ケーブルの実現が可能ながことが明らかにされた。しかしながら、細径、軽量の光ファイバの構造的長を十分生かした光ケーブルは実現されていない。今後、光ファイバを通信の広い分野で活用していくためにはその構造的長も十分考慮した光ケーブルの研究が必要であると思われる。

## 審 査 結 果 の 要 旨

光ファイバに関する工学は1970年以来急速な進歩を遂げた。しかし、光ファイバを束ねた光ケーブルという実用的な形態および実際に使用される環境下における安定性など、実用化に必要な光ファイバケーブルの内容に関しては、本研究開始の時点では、殆ど研究されていなかった。

著者は、ケーブルの構造、製造、布設、経年変化などと、光ファイバ心線の伝送損失増加発生機構との関係を解明し、光ファイバ固有の低損失特性を十分に発揮する光ファイバのケーブル化技術を確立した。本論文はその成果をまとめたもので、全文8章よりなる。

第1章は序論で、本研究の目的について述べている。第2章では、光ファイバの損失要因について考察し、光ケーブル低損失化に関する問題点を明らかにしている。

第3章では、水素拡散による光ファイバ吸収損失の増加現象について述べている。光ファイバ内に拡散した水素によって、1.24  $\mu\text{m}$  帯にピークをもつ損失増加を生ずるが、水素滞留時間が1か月程度と短い場合には水素発生源を除去する初期値に戻ることで、長期または高温環境では、P-OH基が形成されて恒久的な損失増加になるが、Ge-OH基は結合し難く、これによる損失増加も殆どないことを見出し、Geドープファイバを提案している。これは優れた成果であり、また実用的価値も大である。

第4章では、光ファイバ心線の側圧作用時の損失増加および低温環境でナイロン被覆が熱収縮したときの損失増加を解明し、両者を同時に低減できる適切な光ファイバ心線被覆寸法設計法の提案を行っている。

第5章では、光ファイバ心線束で構成する、ケーブルコアという撚り合された心線集合体内で、光ファイバが受ける曲げ特性を解明し、光ファイバを曲げたとき殆ど損失増加しない光ファイバ心線の撚り合せ条件を導出している。

第6章では、単一モード光ファイバの実効しゃ断波長・距離特性を明らかにし、この結果をもとに光ファイバ損失の統計的特性を解明している。これにより、マイクロバンド損失が少ない単一モード光ファイバの構造パラメータを明らかにしている。

第7章では、光ファイバケーブルの損失および接続損失の分布から中継区間を構成する光線路の損失分布を推定する方法を明らかにしている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、光ファイバケーブルの伝送損失に関する安定性を解明し、システム実用化に必要な重要な資料を提供するもので、通信工学の発展に寄与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。