

称号及び氏名 博士（工学） 堤 康宏

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 31 日

論文名 「後方散乱光を利用した
光ファイバの伝送特性評価法に関する研究」

論文審査委員 主査 大橋 正治

副査 勝山 豊

副査 山下 勝己

論文要旨

光ファイバからの後方散乱光は、散乱位置でのファイバパラメータなどの情報を含み、ファイバの距離特性をファイバ端から非破壊で測定できるため、既設光ファイバの光ファイバパラメータ測定や、分布センシングの方式として有用である。

本研究は、光ファイバからの後方散乱光を利用した測定法を開発することである。本測定法により大容量、長距離光伝送システムの実現に寄与することおよび光ファイバセンシングにもとづいた安価で簡便な広域モニタリングの実現に寄与することを目的としている。

本研究では、後方散乱光の情報を解析することで、種々の特性を評価する方法について次の2つの方法について明らかにしている。一つは、「後方散乱光強度の情報をそのまま利用する方法」であり、もう一方は「後方散乱光に情報をのせる方法」がある。これらの2つの方法において、後方散乱光から必要となる情報を取り出すことにより測定が可能となる。

これらを実現する上で、必要な測定技術とその現状、本研究での取り組みについて以下に述べる。

GeO₂添加コア光ファイバで構成された伝送線路の伝送特性の分布測定法についてすでに実現されているが、純石英コア光ファイバあるいは、低損失化が期待されているフォトニッククリスタルファイバの伝送特性の分布評価法については、十分検討されていない。そこで、本論文では、純石英コア光ファイバの基本ファイバパラメータの距離特性測定法について提案を行いその有効性を示す。

また、分布ラマン増幅技術を用いたWDMシステム的设计には、光伝送路のラマン利得効率を把握することが重要である。しかしながら、敷設されている大部分の光ファイバは、敷設当時に、ラマン利得効率は重要なパラメータではなかったため測定されておらず未知である場合が多い。そのため、光ファイバ伝送路のラマン利得効率を測定する方法が必要となっている。現在、光ファイバのラマン利得効率の距離特性評価法として複数の方法が報告されている。しかし、これらの方法では、原理的に、被測定光ファイバの両端に装置を配する必要があることや、測定利便性があまりよくない。また、励起光、信号光のパルスの同期をとる必要があることや、遅延線の遅延時間の設定や、パルス繰り返し時間など、装置の構成や操作が複雑であった。また、これらの測定法は、すべての種類の光ファイバに対してラマン利得効率を測定できるという利点はあるものの、被測定光ファイバに励起光を伝搬させる必

要があるため、励起光の減衰による測定精度の低下および測定距離の制約などを強く受ける。さらに、励起光と信号光の相対偏光状態に依存した偏光依存性利得を抑えるため、光波を無偏光にするデポラライザ等の装置が必要であり、測定系が複雑で高価になる傾向があった。

本論文では、OTDR を利用した後方散乱光強度分布を解析してラマン利得効率を測定する 2 種類の方法を提案する。一つは、「後方散乱光に情報をのせる方法」であり、先行研究と同様に、励起光を用いて誘導ラマン散乱によるラマン増幅を発生させ、増幅された後方散乱光を測定し解析する方法であるが、提案法は、片端に配した CW 励起光源と汎用 OTDR によりラマン利得効率を測定するので、測定の利便性もよく、難しい設定を必要としない。他の一つは、「後方散乱光強度の情報をそのまま利用する方法」であり、励起光を用いずに、後方散乱光強度解析により求められる。この場合には、GeO₂ 添加コア光ファイバのパラメータとラマン利得効率の関係から間接的に測定する方法である。一般的にラマン散乱などの光非線形現象は、使用する光波の相対偏光状態に強く依存する性質がある。そのため、「後方散乱光に情報をのせる方法」のような、励起光により誘導ラマン散乱を発生させる方法では、その偏光依存性の抑制が重要な課題である。本提案法は、励起光を利用しないため、測定系が簡易になる。

光伝送路の長距離大容量化の制限要因のひとつである非線形効果は、非線形定数と密接に関連しているため、その測定法が重要課題となっている。非線形定数の測定法としては、自己位相変調 SPM 法や XPM 法等の種々の測定法が提案されている。しかし、これまで提案された測定法は、複雑であり、簡便に測定できなかつた。また、ラマン利得効率の測定で述べたのと同様に、非線形定数の測定結果は、測定に使用する光波の相対偏光状態に強く依存する性質がある。さらに、光ファイバの非線形屈折率の分布特性を評価する方法は、筆者の知る限り報告されていない。そこで、本論文では、光ファイバの実効的な非線形屈折率の分布特性を簡単に評価する方法を提案する。本提案法は、「後方散乱光強度内に含まれる情報をそのまま利用する方法」で、後方散乱光強度解析により求められる光ファイバのパラメータと非線形屈折率の関係を用いて測定する方法である。ラマン利得効率の測定で述べたように、非線形現象を発生させずに非線形屈折率を測定するため、非線形現象の偏光依存性を考慮する必要がない。また、非線形現象を発生させるための複雑な装置が必要ないため、提案法は簡単かつ単純な装置構成である。後方散乱光強度の解析により光ファイバパラメータの距離特性が測定できるため、従来法では不可能であった非線形屈折率の分布特性を可能としている。

次に、OTDR を用いたセンシングシステムについて検討を行う。温度の広域モニタリングの方法として、様々な光ファイバ温度センシングの方式が提案されている。ファイバブラッググレーティング (FBG : Fiber Bragg Grating) は、反射光の減衰スペクトルが温度に応じてシフトすることにより、減衰ピーク波長付近の反射強度が、大きく温度に依存する性質がある。この性質を利用して、OTDR によりこの FBG 反射光強度を測定することで温度を測定する OTDR 方式がある。この OTDR によるセンシングは、光ファイバ伝送路のなかにセンサを挿入し、センサからの戻り光を解析することによってセンシングしている。この方法は、OTDR により、複数の光ファイバセンサの特性を測定することで、センシングシステム全体の構成費用を抑えている。しかし、このセンシングで利用されている光ファイバセンサの作製には高価な作製装置が必要であり、その作製法は複雑であるため、個々の光ファイバセンサの費用が高い。そのため、より安価で信頼性の高い光ファイバセンシングが求められている。そこで、OTDR を用いた温度センシングについて検討を行う。温度センサとして比較的安価に作製できる光ファイバセンサとして長周期ファイバグレーティング (LPFG : Long Period Fiber Grating) がある。特に、簡単な作成法として、光ファイバに機械的な圧力を加えることにより密度変化を誘起し、屈折率を変化させ、LPFG を作製する光弾性効果を利用した方法がある。しかし、効率的に圧力を加える方法に関してはあまり検討されず、周期的な凹凸を持つ金属板で挟み込み、上に重りをのせる構造など、重量のある比較的大きな構成であった。そこで、本論文では、光弾性効果を利用して作製した小型かつ軽量の LPFG の提案とこの LPFG と OTDR を用いた温度センシングについて提案する。さらに、提案した温度センシングの性能を向上するために、LPFG の温度感度を高める方法について提案する。

第 1 章は、序論であり、本研究の背景、目的および、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、純石英コア光ファイバの基本ファイバパラメータの距離特性測定法について、測定原理および、測定法の妥当性検証実験結果について述べる。提案法は、後方散乱光強度内に含まれる光

ファイバパラメータの情報を利用するもので、簡単な測定構成で、精度よく純石英コア光ファイバの基本ファイバパラメータの距離特性を評価できることを示す。

第3章では、励起光を用いたラマン利得効率の分布測定法について提案し、その測定原理、基本構成および検証実験結果について述べる。提案法は、励起光を用いて誘導ラマン散乱によるラマン増幅を発生させ後方散乱光にラマン増幅に関する情報をのせ、励起光を入力しない場合の後方散乱光特性との差分からラマン利得効率を求める方法である。この場合、ラマン増幅の偏光依存性が問題になるため、この影響についても理論的、実験的に検証を行い、提案法の有用性を実証する。

第4章では、ラマン利得効率の間接分布測定法について提案し、その測定原理、基本構成および検証実験結果について述べる。提案法は、ラマン利得効率と GeO_2 添加コア光ファイバパラメータの関係から測定する方法で、後方散乱光強度内に含まれる光ファイバパラメータの情報を解析し、ラマン利得効率を求める測定法である。提案法の測定限界距離や距離分解能は、OTDRにより測定した後方散乱光強度のSN比に依存するため、後方散乱光強度のばらつきによる提案法の測定誤差についても解析的に評価を行う。

第5章では、非線形屈折率の分布測定法について提案する。提案法は、非線形屈折率と GeO_2 添加コア光ファイバパラメータの関係から測定する方法で、後方散乱光強度内に含まれる光ファイバパラメータの情報から、非線形屈折率を求める。検証実験の結果から、提案法の有用性を示す。

第6章では、OTDRと熱収縮チューブによる長周期ファイバグレーティング(LPFG)を用いた温度測定法について提案し、その測定原理、基本構成および検証実験結果について述べる。さらに、提案LPFGの温度感度改善法についても提案し、その原理、検証実験結果についても述べ、提案法の有用性を明らかにする。

第7章は、本研究で得られた結果をまとめる。

審査結果の要旨

本論文では、光後方散乱光の情報を解析することで、光ファイバの種々の特性を評価する方法について次の2つの方法について明らかにしている。一つは、「後方散乱光強度の情報をそのまま利用する方法」であり、もう一方は「後方散乱光に情報をのせる方法」がある。これらの2つの方法において、後方散乱光から必要となる情報を取り出すことにより測定が可能となることを明らかにしている。得られた主な結果は、以下の項目に要約できる。

(1) 純石英コア光ファイバの基本ファイバパラメータの分布特性評価法について提案し、検証実験により提案法の妥当性を明らかにしている。提案法は、後方散乱光強度内に含まれる光ファイバパラメータの情報を利用するもので、簡単な測定構成で、精度よく純石英コア光ファイバの基本ファイバパラメータの距離特性を評価できることを明確にしている。

(2) 後方散乱光強度分布を解析してラマン利得効率を測定する2種類の方法を提案している。一つは、励起光を用いて誘導ラマン散乱によるラマン増幅を発生させ、増幅された後方散乱光を測定し解析する方法、他の一つは、「後方散乱光強度の情報をそのまま利用する方法」であり、励起光を用いずに、後方散乱光強度解析により求められる方法である。この2つの評価法の実験的な検証から有効性を明らかにしている。

(3) 光ファイバの実効的な非線形屈折率の分布特性の測定法として、「後方散乱光強度内に含まれる情報をそのまま利用する方法」で、後方散乱光強度解析により求められる光ファイバのパラメータと非線形屈折率の関係を用いた測定法を提案している。後方散乱光強度の解析により光ファイバパラメータの距離特性が測定できるため、従来法では不可能であった非線形屈折率の分布特性を可能としている。

(4) OTDR と熱収縮チューブによる長周期ファイバグレーティング(LPFG)を用いた温度測定法を提案している。また、LPFG と OTDR を用いた温度センシングの検証実験を行い、実用的に有用であることを明らかにしている。さらに、LPFG の温度感度改善法を提案し、検証実験により、その有用性を明らかにしている。

以上の研究成果は、後方散乱光を利用して光ファイバの伝送特性を評価するための測定法に関する重要な知見を与えるとともに、本分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。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。