

## 学位論文題名

## Study on Eigen-modes Propagated in Externally Deformable Birefringent Single-mode Fiber and Their Application to Fiber-optic Sensors

(外的に変形し得る複屈折単一モード光ファイバの  
伝搬固有モードとそのセンサ応用に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

1966年、光伝送媒体として損失が20 dB/kmの光ファイバが実現できれば、これは光通信に十分利用可能であるという理論予測がなされて以来、長距離光ファイバ通信を目的とした光ファイバの研究開発が積極的になされてきた。特に、光パルス信号の伝送を可能とする広帯域単一モード光ファイバが開発され、現在、実用化に至っている。

一方、1980年代に新しい通信方式として、光の波動としての性質を利用するコヒーレント光通信が提案された。このコヒーレント光通信においては、光ファイバ伝搬光波の偏光状態を制御あるいは保持して伝送することが要求され、これを満たす一つの解決策として複屈折単一モード光ファイバ(Highly Birefringent Single-mode Fiber [HiBiSMF])が開発された。これは、単一モード光ファイバに複屈折を持たせることによって作製され、この光ファイバの一つの複屈折軸に直線偏光の偏光方向を一致させて入射すると、直線偏光の状態を保持したまま伝搬させることができる。コヒーレント光通信は、未だ実用化に至っていないが、HiBiSMFは光の波動としての性質を利用する干渉型の光ファイバセンサ、および光学素子への有力なデバイスとしても大きな期待が寄せられている。

従来、HiBiSMFを伝搬する光波の偏光状態に関して、積極的な研究がなされるとともに、HiBiSMFの偏波保持能力の向上が図られてきた。しかしながら、他の光ファイバと同様に、HiBiSMFを伝搬する固有モードの位相も外力や温度変化等の外的要因に対して、敏感に応答することが知られているが、これらの要因となる定量的な固有モードの伝搬特性については、必ずしも明らかになっていない。本論文は外力によって静的あるいは動的に変形を受けたHiBiSMFを伝搬する固有モードの特性を明らかにするとともに、これらの特性に基づいて、新しい偏波干渉光ファイバセンサの基本原理を示すことを目的とする。

本論文は、7章で構成されている。以下、各章について概要を述べる。

第1章は、HiBiSMFに関する研究動向を概説し、本研究の背景と目的を述べている。

第2章は、HiBiSMFの引張応力誘起複屈折について述べている。楕円ジャケット型、およびサイド・ホール型の2種類のHiBiSMFについて、引張応力に対するリタデーション

ン変化が理論、および実験の双方から調べられ、HiBiSMF の伸び歪に対してリタレーションが線形に変化することが明らかにされている。有限要素法を用いた応力解析により、伸びに対するリタレーション変化が主に引張応力誘起複屈折によって決定されるとともに、HiBiSMF の断面形状に強く依存していることが示されている。また、光ヘテロダイン検出法を用いて、動的に変動する引張応力に対するリタレーション変化のインパルス応答、伝達関数、およびコヒーレンシが調べられ、コヒーレンシからは、リタレーション変化が伸び歪と線形関係を示す範囲が求められている。

第3章は、第2章で述べた引張応力誘起複屈折を利用した新しい偏波干渉光ファイバセンサについて述べている。このセンサでは、2本のHiBiSMFの速軸と遅軸の間で各々2組のマッハーツェンダ干渉計が構成され、2本のHiBiSMFに共通に加わる環境擾乱の影響が相殺されるとともに、高感度センシングが可能となっている。この動作原理は歪センサ、および磁場センサを構成して実証されている。さらに、この方式に信号処理回路を加えることによって、ダイナミックレンジの広い低感度位相出力の特定領域において、高感度出力が取り出せることが示されている。

第4章は、振動性外力が加えられたHiBiSMF伝搬固有モードの位相変動の統計処理について述べている。外力によるモード結合によって生じた結合モードと結合せずに伝搬するモードの位相変動を独立に検出して、それらの統計処理が行なわれている。異なる周波数で変調を受けた3光波による光ヘテロダイン検出法を用いることによって、結合モードと伝搬モードが分離されるとともに、信号処理回路を用いて、抽出された各々のモードの位相変動の、相関関数および、パワースペクトルが求められている。

第5章は、HiBiSMFの曲げ誘起複屈折について述べている。HiBiSMFに曲げを加えた場合、リタレーション変化は曲げの曲率の自乗に比例し、光ファイバの速軸と遅軸の方向に曲げた場合では互いに符号が異なることが知られている。これらの性質を利用することによって、環境擾乱の除去、センシング部の局在化、およびモード結合による不要な干渉成分の除去が可能な新しい偏波干渉光ファイバセンサが提案されるとともに、実験によってその有用性が実証されている。

第6章は、スペクトル光源を用いた新しい偏波干渉法について述べている。HiBiSMFに沿って多点で加えられた外力によって生ずるモード結合の解析と実験により、伝搬モードの特性が明かにされた。多点で加えられた外力の位置が求められ、かつ、各々の大きさが推定可能であることが示されている。

第7章は、本論文で得られた結果を総括し、結論を述べている。力学的な変形を受けたHiBiSMFの伝搬固有モードの特性は、モード複屈折変化、および屈折率変化を反映している。また、外力によって生じたモード結合は、外力の位置、およびその大きさに依存している。これらのHiBiSMFの伝搬固有モードの性質を応用して、いくつかの新しい偏波干渉光ファイバセンサが考案され、実証実験によってそれらの有用性が示されている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 塚 喜 弘  
副 査 教 授 大 場 良 次  
副 査 教 授 山 下 幹 雄  
副 査 教 授 小 柴 正 則

学 位 論 文 題 名

## Study on Eigen-modes Propagated in Externally Deformable Birefringent Single-mode Fiber and Their Application to Fiber-optic Sensors

(外的に変形し得る複屈折単一モード光ファイバの  
伝搬固有モードとそのセンサ応用に関する研究)

複屈折単一モード光ファイバ (Birefringent Single-mode Fiber [BSMF]) は、伝搬光波の偏光状態を保持したまま光伝送を行うことを目的として開発された。この BSMF を伝搬する直交偏波固有モードの位相は、外力や温度変化等の外的要因によって容易に変調されることが知られているが、位相変動の定量的な扱いは、必ずしも確立されていない。本論文は、外力によって静的あるいは動的に変形を受けた BSMF を伝搬する直交偏波固有モードおよびそれらの結合モードの伝搬特性を明らかにするとともに、それらの特性に基づいた応用として、いくつかの新しい偏波干渉光ファイバセンサを提案し、その動作原理と実証実験を示している。

第 1 章は、BSMF に関する研究動向を概説し、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章は、BSMF の引張応力誘起複屈折について述べている。楕円ジャケット型およびサイド・ホール型の 2 種類の BSMF の引張応力に対するリタデーション変化を理論および実験の双方から解明するとともに、BSMF の伸び歪に対するリタデーション変化は線形応答することを明らかにしている。さらに、有限要素法を用いた応力解析により、伸びに対するリタデーション変化は、主に引張応力誘起複屈折によって支配され、かつ、BSMF の断面形状にも強く依存することが示されている。また、光ヘテロダイン検出法によって、動的引張応力に対するリタデーション変化のインパルス応答、伝達関数、および、コヒーレンシが求められることを述べるとともに、コヒーレンシから、リタデーション変化が伸び歪に対して線形応答する範囲が求められている。

第 3 章は、第 2 章で述べた引張応力誘起複屈折を利用した新しい偏波干渉光ファイバセンサについて述べている。このセンサでは、2 本の BSMF の速軸と遅軸の間で夫々 2 組

のマッハ・ツェンダ干渉計を構成することにより、2本のBSMFに共通に加わる環境擾乱の影響を相殺し、かつ、高感度センシングを実現している。具体的には、歪センサおよび磁場センサへの応用が図られている。さらに、この方式は、信号処理回路に若干の工夫を加えることによって、広帯域ダイナミックレンジの位相出力を実現するとともに、その特定領域において、極めて高感度な出力が得られることを示している。

第4章は、振動性外力下にあるBSMFに関して、直交偏波固有モードおよびそれらの結合モードの位相変動の統計処理について述べている。異なる周波数で変調を受けた3周波光ヘテロダイン検出法によって、外力誘起結合モードと結合せずに伝搬するモードの位相変動を独立に検出するとともに、それらの統計処理が行われている。結合モードと伝搬モードを分離することにより、検出された夫々のモードの位相変動の相関関数、および、パワースペクトルが求められている。

第5章は、BSMFの曲げ誘起複屈折について述べている。BSMFを長手方向に曲げた場合、リタデーション変化は曲げの曲率の自乗に比例し、光ファイバの速軸と遅軸の方向に曲げた場合では、その変化の符号は互いに逆になることが知られている。この性質の利用によって、環境擾乱の除去、センシング部位の局在化、および、モード結合による不要な干渉成分の除去が可能な新しい偏波干渉光ファイバセンサを提案し、実験によって、それらの有用性を実証している。

第6章は、広帯域スペクトル光源を用いた偏波干渉に基づく新しいフーリエ分光技術について述べている。BSMFに沿って多点で加えられた外力による結合モードの理論解析と実験により、伝搬モードの特性を明らかにしている。さらに、BSMFの長手方向の多点において加えられた外力の位置が求められ、かつ、夫々の大きさが推定可能であることが示されている。

第7章は、本論文で得られた結果を総括し、結論を述べている。

これを要するに、著者は外的に変形し得るBSMFの直交偏波固有モードおよびそれらの結合モードの伝搬特性を、理論および実験にわたり明らかにするとともに、それらの特性に基づいた応用として、いくつかの新しい型の偏波干渉光ファイバセンサを提案し、かつ実験によって、それらの有用性を実証したものであり、光ファイバを主体としたフォトニクス分野の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。