

学位論文題名

A Study on Design and Applicability of Holey Fibers toward Large Capacity Photonic Networks

(超大容量光ネットワークに向けたホーリーファイバの設計および
応用技術に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年の FTTH サービスの急速な普及に伴い、光伝送システムの高速・大容量化に向けた研究開発が盛んに行われている。基幹系ネットワークでは高密度波長分割多重 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 方式が広く用いられ、光ファイバ 1 心当たり十数 Tbit/s の伝送実験が報告されている。また、アクセス系においても 1 Gbit/s 光サービスが実用化され、さらなる高速化に向けた検討が進められている。

このような光伝送システムの高速・大容量化に伴い、伝送媒体や中継器等、光コンポーネントに要求される条件はより厳しくなる。基幹系の伝送媒体では、広帯域 WDM 伝送における伝送速度の高速化に伴い、分散マネジメントおよび非線形効果の抑圧が必須となる。中継器では伝送媒体中で累積した波長分散を集中的に補償するために分散補償ファイバ (DCF: Dispersion Compensating Fiber) が広く用いられているが、伝送帯域拡大に伴い、DCF の補償帯域の広帯域化も重要な研究課題となっている。また、光サービスが普及するにつれ、光ネットワークの高信頼化も要求される。特に近年、中継器の入出力における光パワーの増加に伴う強い光パワー下では、作業時における安全性も重要な研究課題となっている。さらには、光ネットワーク設備の保守を行うための計測技術も重要な課題であり、遠隔から精度良くセンシングが行える光センシング技術についても関心が高まっている。

ここで近年、ホーリーファイバ (HF: Holey Fiber) と呼ばれる、光ファイバの長手方向に沿って複数の空孔を有する新しい構造の光ファイバに多くの関心が寄せられている。HF は光波の導波原理から、全反射型とフォトニックバンドギャップ (PBG: Photonic Band Gap) 型に大別される。特に全反射型の HF は比較的製造性に優れ、従来の光ファイバと同等の損失特性が実現されている。全反射型 HF は、高屈折率コアを有し、空孔によって補助的に光学特性を制御する空孔アシストファイバ (HAF: Hole-Assisted Fiber) と、高屈折率コアがなく母材と空孔層との実効的な屈折率差で光波を伝搬するフォトニック結晶ファイバ (PCF: Photonic Crystal Fiber) に大別される。HAF や PCF の空孔層は、空孔の位置や大きさによって比屈折率差を十数 % まで制御することができ、従来の光ファイバ (比屈折率差 0.3~1%) に比べて構造の自由度が非常に高い。HAF では簡易な構成で優れた曲げ損失特性が得られるのみならず、空孔構造によって波長分散を自在に制御することができる。また、PCF では空孔構造を適切に設計することによって、非常に広い波長帯にわたり、単一モード動作や波長分散、非線形性を柔軟に制御できる。

本研究は、HFの上述のような優れた特性を活用して、光伝送システムにおける超大容量化を実現するため、HFの設計およびその適用性について検討を行い、今後のWDM光伝送システムの実現に寄与するとともに、新たな応用分野を見出すことにある。本論文は6章から構成されており、各章を要約すると以下ようになる。

第1章は、序論であり、単一モードファイバの歴史的背景および課題、ホーリーファイバの研究動向について述べる。また、本研究の目的、位置づけ、構成について述べる。

第2章では、広帯域にわたり波長分散および非線形性を低減した伝送媒体を実現するためのHFの適用性について検討している。均一な空孔構造を有するPCFについて数値計算を行い、広帯域な波長分散低減と非線形効果抑圧とのトレードオフについて明らかにしている。さらに、このトレードオフを解消するために、大きさの異なる2層の空孔層で構成されるダブルクラッドPCFを提案し、その設計法を提示している。数値計算により設計した結果として、全通信バンド帯で4~5 ps/(nm・km)の低い波長分散と同時に、従来の単一モードファイバ(SMF: Single-Mode Fiber)と同等の非線形性が得られることを明らかにしている。

第3章では、広帯域な波長分散補償を実現するためのHFの適用性について検討している。ここでは、第2章で提案したダブルクラッドPCFを用い、零分散波長および任意の波長における分散対分散スロープ比を設計パラメータとした簡便な設計法を提案している。数値計算により設計した結果として、SMFに対する全通信バンド帯にわたる分散補償を実現できることを明らかにしている。

第4章では、光増幅器で高入力となる部分での光配線に対するHFの適用性について検討している。高入力下では急峻な曲げなどによって曲げ損失が発生した場合、漏洩光により光ファイバの発熱・損傷・破壊が問題となる。ここでは、HAFにおいて小径曲げ部に高入力した場合の温度上昇特性を検討している。実験結果から、HAFは優れた曲げ損失特性を有することに加え、空孔があることで漏洩光を長手方向に伝搬させることで、SMFと比べて温度上昇を著しく抑圧できることを明らかにしている。

第5章では、光センシング技術におけるHFの適用性について検討している。ここでは、第4章で検討したHAFにおいて、簡易かつ経済的な光センサを実現できる前方ブリルアン散乱(GAWBS: Guided Acoustic-Wave Brillouin Scattering)特性について検討している。数値計算および実験結果から、HAFがSMFと全く異なるGAWBS特性を有することを示すとともに、HAFのGAWBSは限られた周波数帯のみで得られ、この周波数帯は空孔構造によって制御できることを明らかにしている。また、HAFのGAWBS特性を活用した簡易かつ経済的な擬似分布型温度センサを提案し、その特性を明らかにしている。

第6章は、以上の章の結論として、本研究で得られた結果の要点を述べる。

本研究は、超高速・大容量光ファイバ伝送路の構築に必要な設計技術および評価技術に寄与するとともに、次世代の光ネットワーク実現に貢献することが期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則
副 査 教 授 宮 永 喜 一
副 査 教 授 野 島 俊 雄
副 査 教 授 小 川 恭 孝
副 査 准教授 齊 藤 晋 聖

学 位 論 文 題 名

A Study on Design and Applicability of Holey Fibers toward Large Capacity Photonic Networks

(超大容量光ネットワークに向けたホーリーファイバの設計および
応用技術に関する研究)

近年の FTTH サービスの急速な普及に伴い、光伝送システムの高速・大容量化に向けた研究開発が盛んに行われている。基幹系ネットワークでは高密度波長分割多重 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 方式が広く用いられ、光ファイバ 1 心当たり十数 Tbit/s の伝送実験が報告されている。また、アクセス系においても 1 Gbit/s 光サービスが実用化され、さらなる高速化に向けた検討が進められている。

このような光伝送システムの高速・大容量化に伴い、伝送媒体や中継器等、光コンポーネントに要求される条件はより厳しくなる。基幹系の伝送媒体では、広帯域 WDM 伝送における伝送速度の高速化に伴い、分散マネジメントおよび非線形効果の抑圧が必須となる。中継器では伝送媒体中で累積した波長分散を集中的に補償するために分散補償ファイバ (DCF: Dispersion Compensating Fiber) が広く用いられているが、伝送帯域拡大に伴い、DCF の補償帯域の広帯域化も重要な研究課題となっている。また、光サービスが普及するにつれ、光ネットワークの高信頼化も要求される。特に近年、中継器の入出力における光パワーの増加に伴う強い光パワー下では、作業時における安全性も重要な研究課題となっている。さらには、光ネットワーク設備の保守を行うための計測技術も重要な課題であり、遠隔から精度良くセンシングが行える光センシング技術についても関心が高まっている。

ここで近年、ホーリーファイバ (HF: Holey Fiber) と呼ばれる、光ファイバの長手方向に沿って複数の空孔を有する新しい構造の光ファイバに多くの関心が寄せられている。HF は光波の導波原理から、全反射型とフォトリックバンドギャップ (PBG: Photonic Band Gap) 型に大別される。特に全反射型の HF は比較的製造性に優れ、従来の光ファイバと同等の損失特性が実現されている。全反射型 HF は、高屈折率コアを有し、空孔によって補助的に光学特性を制御する空孔アシストファイバ (HAF: Hole-Assisted Fiber) と、高屈折率コアがなく、母材と空孔層との実効的な屈折率

差で光波を伝搬するフォトニック結晶ファイバ (PCF: Photonic Crystal Fiber) に大別される。HAF や PCF の空孔層は、空孔の位置や大きさによって比屈折率差を十数 % まで制御することができ、従来の光ファイバ (比屈折率差 0.3~1%) に比べて構造の自由度が非常に高い。HAF では、簡易な構成で優れた曲げ損失特性が得られるのみならず、空孔構造によって波長分散を自在に制御することができる。また、PCF では空孔構造を適切に設計することによって、非常に広い波長帯にわたり、単一モード動作や波長分散、非線形性を柔軟に制御できる。

本研究は、HF の上述のような優れた特性を活用して、光伝送システムにおける超大容量化を実現するため、HF の設計およびその適用性について検討を行い、今後の WDM 光伝送システムの実現に寄与するとともに、新たな応用分野を見出すことにある。本論文は 6 章から構成されており、各章を要約すると以下ようになる。

第 1 章は、序論であり、単一モードファイバの歴史的背景および課題、HF の研究動向について述べている。また、本研究の目的、位置づけ、構成について述べている。

第 2 章では、広帯域にわたり波長分散および非線形性を低減した伝送媒体を実現するための HF の適用性について検討している。均一な空孔構造を有する PCF について数値計算を行い、広帯域な波長分散低減と非線形効果抑圧とのトレードオフについて明らかにしている。さらに、このトレードオフを解消するために、大きさの異なる 2 層の空孔層で構成されるダブルクラッド PCF を提案し、その設計法を提示している。数値計算により設計した結果として、全通信バンド帯で 4~5 ps/(nm・km) の低い波長分散と同時に、従来の単一モードファイバ (SMF: Single-Mode Fiber) と同等の非線形性が得られることを明らかにしている。

第 3 章では、広帯域な波長分散補償を実現するための HF の適用性について検討している。ここでは、第 2 章で提案したダブルクラッド PCF を用い、零分散波長および任意の波長における分散対分散スロープ比を設計パラメータとした簡便な設計法を提案している。数値計算により設計した結果として、SMF に対する全通信バンド帯にわたる分散補償を実現できることを明らかにしている。

第 4 章では、光増幅器で高入力となる部分での光配線に対する HF の適用性について検討している。高入力下では急峻な曲げなどによって曲げ損失が発生した場合、漏洩光により光ファイバの発熱・損傷・破壊が問題となる。ここでは、HAF において小径曲げ部に高入力した場合の温度上昇特性を検討している。実験結果から、HAF は優れた曲げ損失特性を有することに加え、空孔があることで漏洩光を長手方向に伝搬させることで、SMF と比べて温度上昇を著しく抑圧できることを明らかにしている。

第 5 章では、光センシング技術における HF の適用性について検討している。ここでは、第 4 章で検討した HAF において、簡易かつ経済的な光センサを実現できる前方ブリルアン散乱 (GAWBS: Guided Acoustic-Wave Brillouin Scattering) 特性について検討している。数値計算および実験結果から、HAF が SMF と全く異なる GAWBS 特性を有することを示すとともに、HAF の GAWBS は限られた周波数帯のみで得られ、この周波数帯は空孔構造によって制御できることを明らかにしている。また、HAF の GAWBS 特性を活用した簡易かつ経済的な疑似分布型温度センサを提案し、その特性を明らかにしている。

第 6 章は、以上の章の結論として、本研究で得られた結果の要点を述べている。

これを要するに、著者は、HF の優れた特性を活用して、超高速・大容量光ファイバ伝送路を実現するための HF の適用性について、理論と実験の両面から詳細な検討を行ったもので、光ファイバの設計・評価技術に関する有益な知見を得ており、光通信工学の学術分野に貢献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。