

新たな伝送帯域を実現する空孔構造ファイバ

Microstructure Optical Fibers for New Transmission Bands

武笠和則* 今村勝徳* 宮部 亮* 味村 裕* 八木 健*
Kazunori Mukasa Katsunori Imamura Ryo Miyabe Yu Mimura Takeshi Yagi

概要 将来の超大容量伝送に向けて、研究ベースでは、従来の通信帯（例えば、1300-1650 nm）以外の伝送波長帯域を開拓する伝送実験の検討が始まっている。例えば、ファイバレーザ用として近年盛んに検討されてきたイットリビウム添加ファイバ（YDF）が増幅器として使用可能であることから、1.0 μm 帯に非常に注目が高まっている。しかしながら、従来の伝送路では単一モード特性や分散特性などの点から、1.0 μm 帯を含むような超広波長帯域での伝送を行うことは極めて困難である。今回、この問題に対応するべく、新しいタイプの伝送路であるホールアシスト型ファイバ（HAF）とホーリーファイバ（HF）の開発を行なったので報告する。

1. はじめに

現在までに、各時代の要請に応えるべく、様々なタイプの伝送用光ファイバが開発されてきたが、インターネットトラフィックの伸びは留まるところを知らず、今後、陸上伝送用の光ファイバにおける飛躍的な特性改善が要求されるものと考えられる。そのような要求に応える新しいタイプの光ファイバとして、断面中に空孔構造を配置した空孔構造ファイバ¹⁾が提案されている。例えば、空孔構造ファイバの一つであるホーリーファイバ（HF）は、従来型光ファイバでは実現不可能であったESM（endlessly single mode）と言う特殊な特性を有しており、将来の超広波長帯域伝送路の候補として非常に注目されている^{2),3)}。特に近年、1.0 μm 帯での増幅可能なイットリビウム添加ファイバ（YDF）を用いたファイバレーザ技術が成熟してきたことに伴い、1.0 μm 帯を用いた光伝送システムが、非常に注目されている^{4),5)}。しかしながら、一般的な石英系光ファイバの場合、1.0 μm 帯においては、負分散側に大きな値を有する材料分散の影響が支配的であり、構造分散の影響が小さいため、1.0 μm 帯にゼロ分散波長（ λ_0 ）を得ることは困難である。一方、空孔構造ファイバの場合、光伝播のフィールド近傍に大きな屈折率差を設けることで、正分散側に大きな値を有する構造分散を得られるため⁶⁾、構造分散と材料分散とを相殺することで1.0 μm 帯のような短波長帯でも、 λ_0 を得ることが可能となる。また、空孔構造ファイバの断面構造を最適化することで、特殊な分散制御だけでなく、広波長帯域での閉じ込め損失抑制とシングルモード（SM）の光伝播の両立が可能であり、従来の光ファイバと比べ、広波長帯域伝送路として好ましい特性が実現可能となる。

ゲルマニウム（Ge）がドーピングされたコア部とその周囲に配置される空気の孔（空孔）から構成されるホールアシスト型ファイバ（HAF）は、構造が単純であるため作製が比較的容易であり、また、Geドーピングコアを有することで接続時に空孔が潰れても低損失での接続が可能という特長を有する。このようなHAFの応用例として低曲げ損失特性を活かしたものが提案されてきた⁷⁾。

このHAFは空孔構造を制御することで大きな構造分散が得られるため⁸⁾、短波長に λ_0 をシフトさせることも可能であるので、我々は、これらの利点を考慮し、1.0 μm 帯で λ_0 を有する分散シフト型HAFの開発を行った。

更に、シリカガラス中に、規則的な配列の空孔構造を設けることで光の伝搬を実現するHF、あるいはフォトン結晶ファイバ（PCF）においては、全ての波長範囲で単一モード（SM）を実現できるESM特性を有するとともに、広波長帯域での波長分割多重（WDM）伝送に適していると言う特長を有する。HFの使用可能帯域は、閉じ込め損失と曲げ損失により制限されてしまうが、構造パラメータを最適化することで、1.0 μm 帯及び1.55 μm 帯でも伝搬可能な特性を実現することが可能である。そこで、このHFに関してもファイバの設計と試作を行い、このファイバを使って広帯域WDM伝送を実現するための分散補償技術について検討を行ったので報告する。

2.1 HAFの設計

HAFの設計手法としては、有限要素法（FEM）を用いて、最適化検討を行った。また、空孔構造に起因する閉じ込め損失については、吸収境界条件としてPML（perfectly matched layer）を利用し計算した。今回検討に用いた、1.0 μm 帯に λ_0 を有する分散シフトHAFの断面構造を図1に示す。図1に示すHAF設計モデルは、断面がGeドーピングコア部、コア部を取り囲む4つの空孔部、及びシリカガラスクラッド部で構成されている。4つ孔のHAF構造を選択した理由は以下のとおりである。

2. 分散シフトHAFの開発

2.1 HAFの設計

9

* 研究開発本部 ファイナルフォトニクス研究所

- (1) Ge ドープコアによる光の閉じ込めの効果が大きく、4つ孔の空孔構造においても閉じ込め損失の低減が可能である。
- (2) 4つ孔の空孔構造においても、 λ_0 の短波長シフトに必要な大きな構造分散を得ることが可能である。
- (3) 少ない空孔数であれば、精度よく作製することが比較的容易となり、分散値や光の閉じ込め等の制御精度が向上する。
- (4) 同一円周上の空孔占有率が高いと、高次モードの光をコア中心部への閉じ込め効果が非常に強くなり、シングルモード化がより困難となる。

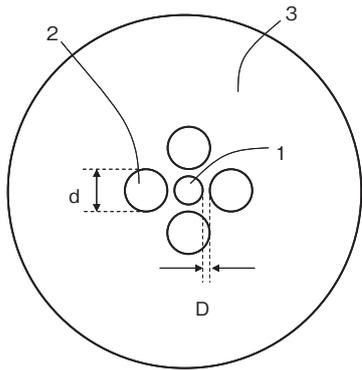


図1 HAF設計モデル (1: Ge ドープコア部, 2: シリカガラスクラッド部) Structure of the HAFs.

HAFが図1のような構造を採ることでコア近傍の平均屈折率が下がり、構造分散が正分散側にシフトする。構造分散が大きいほど、 λ_0 をより短波長にシフトさせることが可能となる。特に中心コア部と空孔部との間隔 (D) を狭くすることで、大きな正分散を有する構造分散が効果的に得られ、 λ_0 は短波側にシフトする。例として、コア径=4.5 μm 、コア部のクラッド部に対する比屈折率差 (Δ) =0.6%の条件におけるHAFの間隔 D 及び空孔径 d と λ_0 の関係を図2に示す。図2から間隔 D は λ_0 の制御に重要であるが、空孔径 d のパラメータ寄与度は比較的小さ

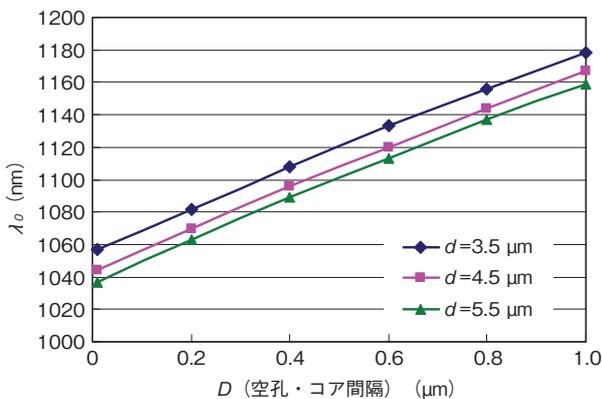


図2 λ_0 の空孔・コア間隔 (D) 及び空孔径 (d) への依存性 Dependence of λ_0 on D for different d .

いことが分かる。また、他の構造パラメータであるコア径及び Δ も λ_0 に対して大きな影響を及ぼし、実効屈折率を小さくする方向、即ちコア径を小さくして、 Δ を下げることも λ_0 の短波長化に有効であることが知られている。一方、間隔 D やコア径及び Δ というコアパラメータの調整による λ_0 の短波長化は、実効屈折率の低下を伴うため、光伝播可能な帯域を短波長側にシフトさせ、使用可能波長帯域の狭帯化を伴うことが考えられる。しかしながら、 Δ を0.6%まで高くすることで、 λ_0 を1.0 μm 帯に、カットオフ波長を900 nm以下に維持しながら、1200 nmまで低い閉じ込め損失 (0.01 dB/km以下) を実現できることが、シミュレーション結果より明らかになっている。

2.2 HAFの試作

シミュレーションをベースにして作製した試作ファイバ (HAF.1) の断面構造を図3に、光学特性を表1に示す。試作は、穿孔法と空孔内圧力制御線引きとで行った。 λ_0 は1094 nmとなり、これは設計値の1078 nmに近い値を有している。また、穿孔法で穴あけを行った後、表面研磨による円滑化処理を行ったことにより、波長1000 ~ 1150 nmにおいて2 dB/km以下の低伝送損失特性を実現している。カットオフ波長も、シミュレーションで予想されたように、900 nm以下の値を示しており、1.0 μm 帯でのSM動作が実現した。

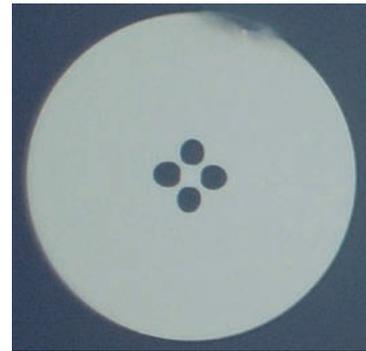


図3 試作したHAFの断面図例 Typical cross-section of the fabricated HAFs.

表1 HAF.1の光学特性 Typical optical properties of the fabricated HAFs (HAF.1).

	λ_0	nm	1094
損失@ ($\lambda = 1.00 \mu\text{m}$)	dB/km	1.571	
損失@ ($\lambda = 1.05 \mu\text{m}$)	dB/km	1.095	
損失@ ($\lambda = 1.15 \mu\text{m}$)	dB/km	1.998	
カットオフ波長	nm	839	

図4に、HAF.1の伝送損失曲線を示す。1.0 μm 帯において、フラットな低損失特性を示している。設計上の閉じ込め損失の臨界波長は1200 nmであるが、それよりも短波側にシフトした急峻な損失増加が見られる。この損失増は、実際にポビンに巻いた場合の曲げ損失曲線の計算値とは同じ傾向を示しているため、ポビンに巻いたことによる曲げ損失の影響であると考えられる。

試作したHAF.1の分散曲線を図5に示す。図5中の「分散曲

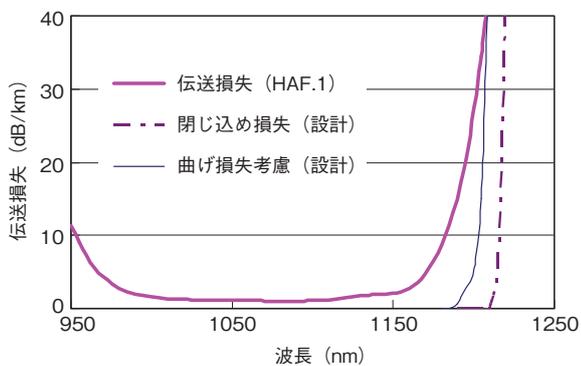


図4 伝送損失特性 (HAF.1)
Attenuation loss properties (HAF.1).

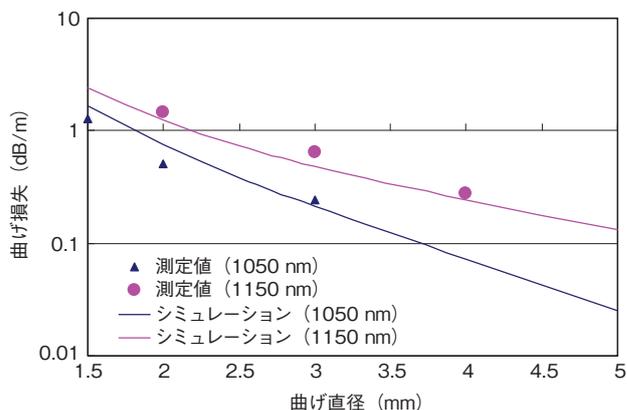


図6 曲げ損失特性 (HAF.1)
Macro-bending loss properties (HAF.1).

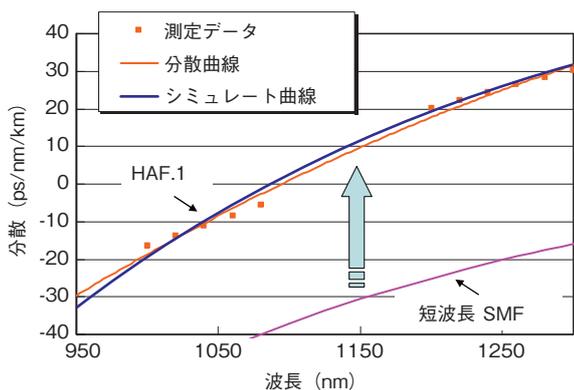


図5 波長分散特性 (HAF.1)
Dispersion properties (HAF.1).

線」として示した実線は、波長975～1075 nm及び1200～1300 nmの波長域の分散測定値から近似して得られた曲線であり、 λ_0 は1094 nmの値を示している。また、「シミュレート曲線」は、作製したHAF.1の断面を基に再計算した分散曲線であり、測定結果と良い精度で一致した。一方、図5の短波長SMF (シングルモードファイバ)の曲線は、HAF.1の空孔がない場合の分散曲線であり、空孔部を設けたことで、分散値が正分散側に効果的にシフトしていることが確認できる。

更に、試作したHAFの曲げ損失特性に関して検討を行った。図6は、1050 nmと1150 nmの波長での曲げ損失特性の測定値及びシミュレーション結果を示している。測定結果は、シミュレーションでの予測とよく一致している。その値は、1050 nm及び1150 nmで、曲げ直径5 mmで1 dB/m以下の低曲げ損失が確認された。よって、ケーブル化時に生じる1.0 μ m帯での曲げ損失が抑制されるだけでなく、比較的短距離の小さい曲げ半径が要求されるようなエリアでの使用も可能になると思われる。

また、HAFは中央にGeドープ部コアを有しているため、融着接続によって空孔が潰れても、低損失での接続が可能である。更に、このファイバのコアは空孔がない場合でもカットオフ波長が900 nm以下になるように設計されており、接続後も1.0 μ m帯でのSM動作が維持される。実際に、古河製S183融着器を用いて接続実験を行った結果、平均でHAFと短波長SMFの接続損失は0.2 dB、HAF同士の接続損失は0.05 dBとなった。

HAF同士よりもHAFと短波長SMFの方の接続損失が大きい原因は、約1.5 μ mのモードフィールド径(MFD)のミスマッチによるものである。この結果により、接続においてもコアの変形が抑制され、良好な接続特性が維持されていることが分かる。

上記の検討により、このようなHAFを用いることで、例えば新波長帯である1.0 μ m帯を用いた比較的安価でシンプルな伝送システムの構築が可能になるものと思われる。

3. ホーリーファイバ (HF) の開発

3.1 HFの設計

シリカガラスに規則的な配列の空孔構造を設けることで光の伝搬を実現するHFの断面図を図7に示した。このファイバに関しては、1.0 μ m帯から現在の通信帯にわたる超広波長帯域でWDM伝送を実現すべく、FEMシミュレーションで最適化を行った。HFは図7に示すように通常はシリカガラス1と空孔2で構成される。空孔は図7で示されるように、規則的な構造をしており、平均屈折率効果で中心のシリカコア部4に光が閉じ込められる。また、空孔は、中心から一層目に6個、二層目に12個、三層目に18個というように配置されている。なお、断面の中心部5に空孔コアを有するフォトニックバンドギャップ

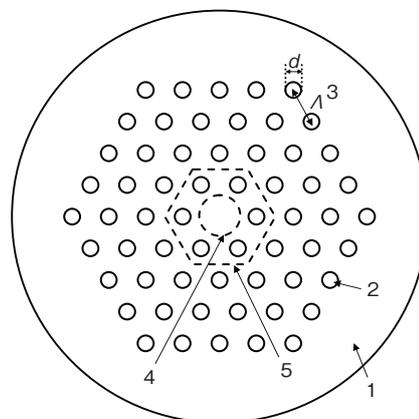


図7 HFの断面構造 (1:シリカガラス, 2:空孔, 3:規則的な構造, 4:シリカコア部, 5:中心部)
Structure of the HFs. (1: Silica glass, 2: Hole, 3: Periodic structure, 4: Silica glass core, 5: Central portion)

プファイバ(PBGF)も提案されているが⁹⁾、今回の検討には、このPBGFを含まない。HFの特性は、構造パラメータである空孔間距離 $\Lambda[\mu\text{m}]$ と空孔径 $d[\mu\text{m}]$ により支配される。また、規格化空孔径 d/Λ も、パラメータとしてよく使用される。今回は、 Λ と d/Λ をパラメータとして最適化を検討した。

HFの特性は、 Λ と d/Λ により任意に制御が可能であるが、 d/Λ が大きい場合には、ESM特性を得ることが不可能となる。これは、広波長帯域での伝送に応用しようとすると、大きな問題となる。ある波長帯域でのSM条件を満たすには、規格化周波数(V 値)を2.405以下にする必要があるため¹⁰⁾、ESM条件を維持するには、例えば波長500 nmで V 値を2.405より小さくする必要があり、各 Λ に対して、ESM条件を満たすことが可能な最大の d/Λ を図8に示す。この図から Λ が10 μm 以下ならば、 d/Λ を0.43以下にすればESM条件を満たすことが可能であることが分かった。

曲げ損失等の影響を考えると、 d/Λ はESM条件を実現できる範囲で、なるべく大きい方が望ましいため¹¹⁾、 $d/\Lambda=0.43$ の5層構造の条件下において Λ を変化させたときの、直径20 mmでの曲げ損失と閉じ込め損失の波長依存性の変化を調べ、その結果を図9及び図10に示した。

前記の図9と図10より、曲げ損失は短波長において増大する傾向があり、 Λ を短くするにつれて伝送可能波長帯域が短波長

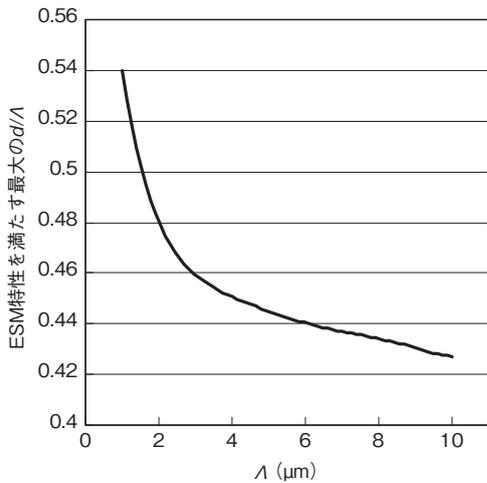


図8 各 Λ におけるESM特性を満たす最大 d/Λ の関係
The maximum d/Λ that satisfy ESM for each Λ .

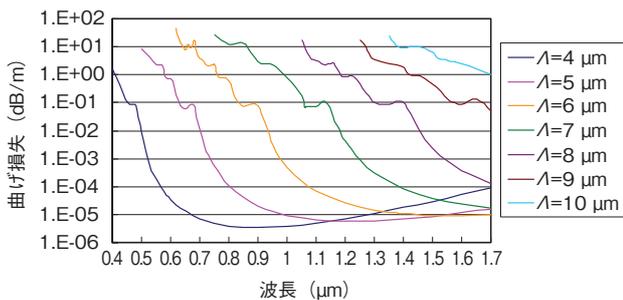


図9 HF ($d/\Lambda=0.43$)の直径20 mmでの曲げ損失の波長依存性
Macro-bending loss properties of the HFs ($d/\Lambda=0.43$).

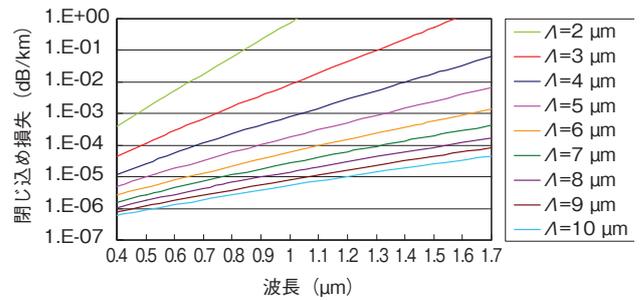


図10 HF ($d/\Lambda=0.43$)の閉じ込め損失の波長依存性
Confinement loss properties of the HFs ($d/\Lambda=0.43$).

側に広がる様子が確認される。一方、空孔構造で閉じこめ切れなかった損失(閉じ込め損失)は長波長ほど増大する傾向があり、 Λ を大きくするにつれて伝送可能波長帯域が長波長側に広がる様子が確認される。伝送可能な波長帯域を、「直径20 mmでの曲げ損失が10 dB/mとなる波長並びに閉じ込め損失が0.001 dB/kmとなる波長に挟まれた波長間」と定義すると、 d/Λ が0.43の場合、1 μm 帯から1.55 μm 帯において伝送可能なHFを設計する際には、 Λ を7~8 μm に設定すれば良いということが分かった。

次に、 $d/\Lambda=0.43$ 、 $\Lambda=7 \mu\text{m}$ の場合の曲げ損失と閉じ込め損失の空孔層数依存性についても調査した。図9と図10は、空孔層数が5層の場合で計算されているが、層数を変化させることで、閉じ込め損失などの特性を変化させることが可能となる。シミュレーションの結果、空孔の層数を1層増やすと、閉じ込め損失が約2桁ずつ低減する様子が図11のように確認される。一方、曲げ損失は損失の小さな領域では層数依存性が見られるのに対し、0.1 dB/mを超える大きな曲げ損失領域では層数依存性が生じないことが図12のように確認される。

この図11及び図12より、層数が4層の場合には曲げ損失が10 dB/m以下で、閉じ込め損失が0.001 dB/km以下となる条件を同時に満たすことはできず、5層以上が必要であることが明らかとなった。すなわち、製造性を考慮すると、伝送路用のHFとしては5層構造が最適となる。そこで、5層構造の最適化シミュレーションで得られたHFの結果を表2に示す。十分に小さな閉じ込め損失を得ながら、60 μm^2 以上の大有効コア断面積(A_{eff})特性が得られていることが分かる。

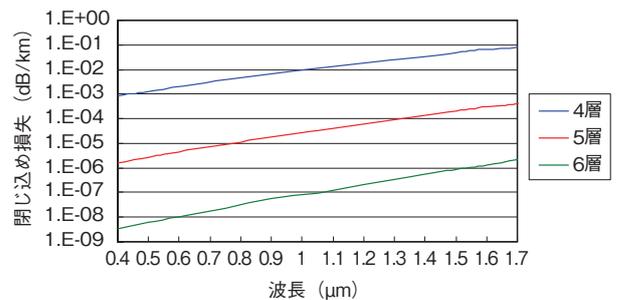


図11 HF ($d/\Lambda=0.43$, $\Lambda=7.0 \mu\text{m}$)の閉じ込め損失の層数依存性
Ring number dependence of the confinement loss of the HFs ($d/\Lambda=0.43$, $\Lambda=7.0 \mu\text{m}$).

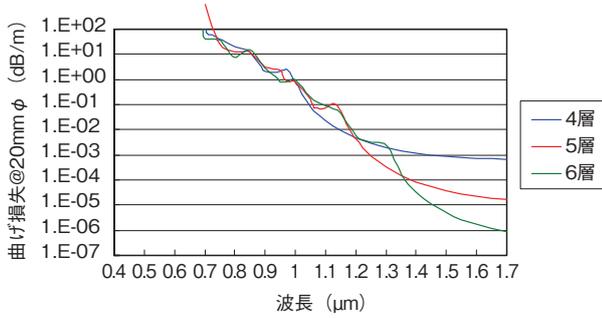


図12 HF ($d/\Lambda=0.43$, $\Lambda=7.0 \mu\text{m}$) の曲げ損失の層数依存性
Ring number dependence of the macro-bending loss of the HF's ($d/\Lambda=0.43$, $\Lambda=7.0 \mu\text{m}$).

表2 HF ($d/\Lambda=0.43$, 5層) のシミュレーション結果
($\lambda=1550 \text{ nm}$)
Simulation results of the HF's at 1550 nm
($d/\Lambda=0.43$, 5-rings).

Λ (μm)	損失* (dB/km)	分散 (ps/nm/km)	Slope (ps/nm ² /km)	A_{eff} (μm^2)
7.0	2.3E-6	32.8	0.070	63.4
8.0	1.1E-7	30.1	0.069	85.3

*) シミュレーションで得られる閉じ込め損失の値

3.2 HFの試作

実際に最適化シミュレーションで得られたHFをスタック法と穿孔法の2種類の手法で試作したファイバの諸特性及び波長損失特性を、表3と図13にそれぞれ示す。また、図13の内図には、HFの断面図及び1500 nm ~ 1650 nmの通信波長帯での損失特性拡大図を併せて示す。今回は、 $\Lambda=7 \mu\text{m}$ のHFをスタック法で、 $\Lambda=8 \mu\text{m}$ のHFを穿孔法で試作した。設計をベースに試作を行ったことにより、両方法ともに、設計に近い光学特性を実現することができた。1.0 μm 帯で曲げによる顕著な損失増加が見られないだけでなく、1550 nmでの曲げ損失も曲げ直径20 mmで0.5 dB/m以下と、良好な特性を実現している。また、伝送損失も比較的低い値に抑制されており、特に穿孔法で

表3 HFの試作結果 ($\lambda=1550 \text{ nm}$)
Fabrication results of the HF's ($\lambda=1550 \text{ nm}$).

特性	波長	単位	スタック法	穿孔法
Λ		μm	7.3	8.1
d/Λ			0.44	0.45
分散	1.55	ps/nm/km	31.5	30.0
slope	1.55	ps/nm ² /km	0.069	0.069
DPS*	1.55	nm	457	435
伝送損失	1.05	dB/m	1.84	1.22
	1.55		1.44	0.58
A_{eff} **	1.55	μm^2	65.1	82.6
曲げ損失 (直径20 mm)	1.55	dB/m	0.19	0.10

*) DPSは dispersion per slope (分散/分散スロープの値)

**) A_{eff} は、断面構造よりシミュレーションで算出

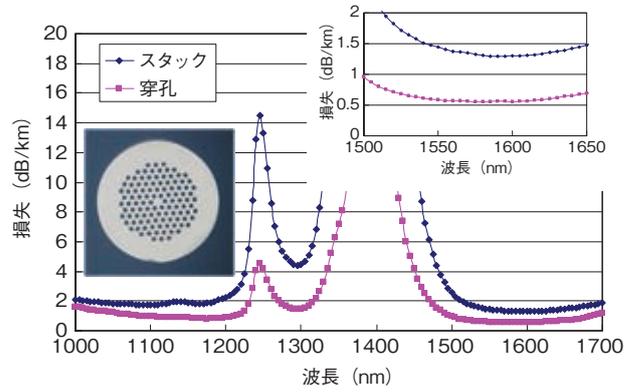


図13 HFの損失特性
Attenuation loss properties of the HF's.

は、1.55 μm の通信波長帯で0.6 dB/km程度の損失特性を実現した。また、今後、OH損失を低減することで、更なる低損失化が可能であると思われる。

3.3 分散補償の検討

前記のように、HFにおいて、超広波長帯域WDM伝送に最適な特性が実現されたが、将来の長距離高速伝送を実現するためには、分散補償技術が必要となる¹²⁾。1.55 μm 帯を補償する通常の分散補償ファイバ(DCF)を1.0 μm 帯の補償に用いるのは難しいので、今回は1.55 μm 帯は通常のDCFで、1.0 μm 帯を補償するDCFはHF構造で実現するための検討を行うこととした。

まずは、HFの1.55 μm 帯のDCFとして、従来より広く用いられている図14の内図で示したW-seg型屈折率プロファイルを用いて、最適化設計を行い、シミュレーションをベースにして気相軸付け(VAD)法で試作を行った。HFの分散特性及びHFをDCFで補償した後の分散特性を図14に示す。DCFで補償することで、30 ps/nm/km以上あったHFの補償後の残留分散が、C-Band全域(1530-1565 nm)で、約 ± 0.1 ps/nm/kmに抑制されていることが分かる。試作したDCFの1550 nmでの特性は、損失が0.687 dB/km、 A_{eff} は16.3 μm^2 、直径20 mmの曲げ損失は2.1 dB/m、偏波モード分散(PMD)は0.17 ps/km^{1/2}と良好であった。

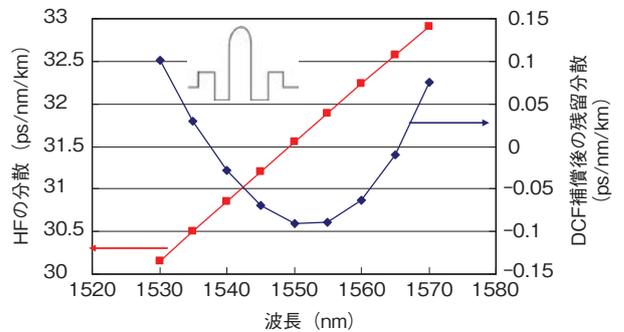


図14 HFの通信帯での分散補償特性
Dispersion compensation of the HF in telecom band.

続いて、1 μm 帯のDCFの可能性を調査すべく、FEMシミュレーションで、HFの分散特性を体系的に調査した。波長

1050 nmで行ったシミュレーション結果として得られた構造パラメータと分散の正負及び分散/分散スロープの値 (DPS) の関係を図15に示す。広波長帯域での分散補償を実現するためには、分散の符号が逆で、DPSが伝送路と同程度のHFを分散補償ファイバとして選択する必要がある。シミュレーションの結果、 $\Lambda=1.0 \mu\text{m}$ の付近に正分散でかつDPSが伝送用HFと同程度(-120 nm程度)のDCFに解が存在していることが分かった。他の特性に関して、今後、更なる調査が必要となるが、このようなHFを用いることで、 $1.0 \mu\text{m}$ 帯でも広波長帯域の分散補償が可能になるポテンシャルが確認できた。

上記のHFを用いることにより、例えば、OH損失の影響の少ない $1.0 \mu\text{m}$ 帯と $1.55 \mu\text{m}$ 帯の両波長帯を二重に用いたDual-WDM伝送も可能になると考えられる。また、HFと上記の分散補償ファイバを組み合わせることにより、両帯域での更なる高速伝送も可能になると考えられる。

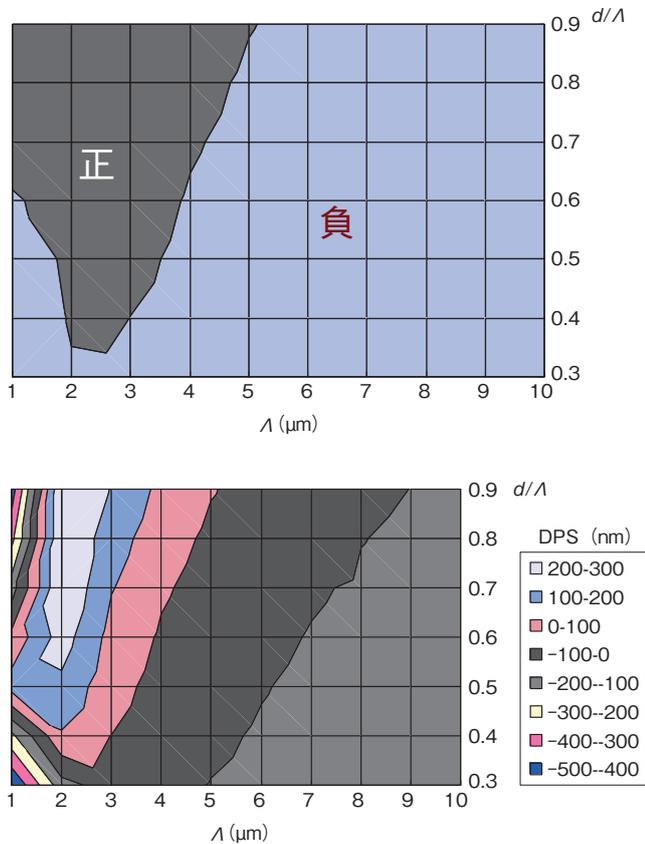


図15 HFの1050 nmでの分散(上図)とDPS(下図)の変化 Dispersion (Upper) and DPS (Lower) properties against HF's profiles at 1050 nm.

4. おわりに

4つ孔構造のHAFのコアや空孔構造を最適化することにより、 $1.0 \mu\text{m}$ 帯にゼロ分散波長をシフトさせた分散シフトHAFを開発した。試作したHAFにおいて、曲げ損失や接続損失も含めて低損失な伝送路を構成できることが確認できた。また、HFの構造パラメータを最適化することで、超広波長帯域伝送が実現可能な特性を実現できた。更に、DCFの最適化を行い、

$1.0 \mu\text{m}$ 帯及び $1.55 \mu\text{m}$ におけるフラットな分散補償特性を得た。

分散シフト型のHAFは、接続性や曲げ損失特性にも優れており、 $1.0 \mu\text{m}$ 帯という新波長を用いた比較的短距離の安価な伝送システムへの展開が期待できる。

HFの方は、従来の通信帯だけでなく、新たな波長帯である $1.0 \mu\text{m}$ 帯を用いた将来の超大容量WDM伝送路としてのポテンシャルが期待できる。特に、今回検討したようなDCFを組み合わせて用いることで、40 Gb/s以上の超高速大容量伝送も実現可能になると考えている。今後、実用化に向けた更なる開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) J.C. Knight, T.A. Brisk, P.S.J Russel, and D.M. Atkin: "All-silica single mode fiber with photonic crystal cladding," Opt. Lett., **21** (1996), 1547.
- 2) K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa, C. Fukai, and I. Sankawa: "Ultra wide band 190Gbit/s WDM transmission over a long length and low loss PCF," Proc. of OFC'04, (2004), PDP23.
- 3) K. Ieda, K. Kurokawa, T. Shimizu, K. Tajima, K. Nakajima, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Shiraki, and I. Sankawa: "Visible to Infrared WDM transmission over PCF," Proc. of ECOC'06, (2006), Tu3.34.
- 4) K. Kurokawa, K. Nakajima, K. Tsujikawa, K. Tajima, T. Matsui, and I. Sankawa: "Penalty-free 40 Gb/s transmission in 1000nm band over low loss PCF," OFC'06 Technical digest, (2006), OThH2.
- 5) N. Yamamoto, H. Sotobayashi, K. Akahane, M. Tsuchiya, K. Takashima, and H. Yokoyama: "1-mm waveband 10-Gbit/s transmission over a 7-km single-mode hole assisted fiber using a harmonically mode-locked semiconductor laser," Proc. of CLEO, (2008), CuLL4.
- 6) J. C. Knight, J. Arriaga, T.A. Birks, A. Ortigosa-Blanch, W.J. Wadsworth, and P.S.J. Russell: "Anomalous dispersion in photonic crystal fiber," Photon. Technol. Lett., **12**, (2000), 807.
- 7) K. Ieda, K. Nakajima, T. Matsui, I. Sankawa, T. Shitaba, S. Ikeda, K. Tajima, K. Shiraki, S. Tomita and T. Haibara: "Characteristics of bending loss optimized hole assisted fiber," Optical Fiber Technology, **14**, Issue 1, (2008), 1.
- 8) R. Miyabe, T. Inoue, Y. Mimura, J.M. Fini, D.J. Trevor, J.Hiroishi, R. Sugizaki, M. Sakano, and T. Yagi: "Compact optical pulse compressor based on comb-like profiled fiber comprised of HNLf and hole-assisted fiber," Proceeding of OFC2006, (2006), OThA3.
- 9) N. Venkataraman, M.T. Gallagher, C.M. Smith, D. Muller, J.A West, K.W. Koch, and J.C. Fajardo: "Low loss (13dB/km) air core photonic band-gap fiber," Proceeding of ECOC2002, (2002), PD1.1.
- 10) K. Saitoh and M. Koshiba: "Empirical relation for simple design of photonic crystal fibers," Proceeding of ECOC2002, Opt. Exp., **13** (2005), 267.
- 11) M.D. Nielsen, N.A. Mortensen, M. Albertsen, J.R. Folkenberg, A. Bjarklev and D. Bonacinni: "Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers," Optics Express, **12** (2004), 1775.
- 12) L. Gruner-Nielsen, M. Wandel, P. Kristensen, C. Jorgense, L.V. Jorgensen, B. Edvold, B. Palsdottir and D. Jakobse: "Dispersion-Compensating Fiber," J. Lightwave Tech., **23** (2005), 3566.