

広波長域低損失大口径ファイバ

光事業部 宮地正己¹・麻野将弘¹・林和幸¹・愛川和彦²・工藤学³

Low-loss Large Core Fiber for Wide Wavelength Range

M. Miyachi, M. Asano, K. Hayashi, K. Aikawa, and M. Kudo

大口径ファイバのコアには、紫外および可視領域と近赤外領域で異なるタイプのシリカガラスが用いられてきた。紫外および可視領域で低損失な大口径ファイバには、OH基を高濃度に添加した高OHシリカガラスがコアに用いられている。一方、近赤外領域で使用する大口径ファイバには、OH基を除去しOH基吸収損失を低減した低OHシリカガラスがコアに用いられている。今回、大口径ファイバ母材の製造方法、紡糸条件などの最適化により、OH基吸収損失を抑制しつつ、紫外領域を含む 300 nm ~ 2150 nm の広い波長範囲で低損失な大口径ファイバを新規に開発した。特に分光分析への活用が期待される。

Various types of glass composition have been used for large core optical fibers. A fiber for ultra-violet and visible wavelength regions (UV-VIS region) uses high-OH content glass to minimize the transmission loss. On the other hand, a fiber for near infrared wavelength region (near-IR) is composed of low-OH content glass. Recently we have developed a universal type large core fiber which shows low-loss in a wide wavelength range from UV-VIS to near-IR. The excellent performance has been achieved by improved preform fabrication and optimized fiber drawing condition. The new large core fiber is expected to be applied to spectroscopy for a wide range of wavelength.

1. ま え が き

通信用光ファイバに比べてコア径および開口数 (NA) の大きな大口径ファイバは、大きな光エネルギーを効率的に伝送できる。また、通信用光ファイバと同様にフレキシビリティがあるため複雑な光学系を用いずに容易に遠方の目的の場所へと光を導くことができる。これらの特性をいかし、非通信分野の幅広い分野で使用されている。特に、エネルギー伝送や一般的な分光分析では、紫外、可視領域および近赤外領域の広い波長範囲 (300 nm ~ 2150 nm) で使用されている。

広い波長範囲で大口径ファイバを用いる場合には、その波長域で低損失である必要がある。近年、天文分野にも分光分析用ファイバは用いられており^{1) 2)}、大口径ファイバによる天体観測では、すばる望遠鏡³⁾のような天体望遠鏡の主焦点 (主鏡に垂直に入射した平行光線が像を結ぶところ) に数千本のファイバの端面を配置し、主焦点で集められた天体からの光を数十mにおよぶ大口径ファイバにより大型の分光器へ導き、一度にスペクトルを取得し観測を行う。観測対象により使用される波長

は 360 nm ~ 600 nm, 600 nm ~ 1000 nm, 1000 nm ~ 1300 nm にわかれるため、使用される大口径ファイバは 300 nm 付近から 1400 nm まで極低損失であることが望ましい。

従来の低OHシリカコア大口径ファイバ (OH基濃度: 1 ppm 以下) は、近赤外領域 (750 nm ~ 2150 nm) での損失は低いが、紫外領域 (300 nm ~ 400 nm) では深紫外領域 (~ 300 nm) に吸収帯を持つガラス中の欠陥による影響を受け損失は高かった。このため、紫外 (300 nm ~ 400 nm) および可視領域 (400 nm ~ 750 nm) では、ガラス中の欠陥を抑制するためOH基を高濃度 (600 ppm 以上) に添加できるダイレクト法によるコアを使用した高OHシリカコア大口径ファイバが使用されてきた。しかし、この高OHシリカコア大口径ファイバはOH基の添加により 1385 nm 帯に大きな吸収が生じ、近赤外領域での使用には適していない。

このように、従来の大口径ファイバは分光分析で使用される 300 nm ~ 2150 nm のような広い波長範囲で低損失を実現できていなかった。今回はガラス中にOH基を高濃度に添加する方法にかえて母材製造方法や紡糸条件を最適化することにより、紫外領域の欠陥を大幅に抑制し、この広い波長範囲で低損失である大口径ファイバを開発したので、その結果を報告する。

1 光ファイバ開発部

2 光ファイバ開発部部长 (工学博士)

3 佐倉第2光製造部部长

2. 目標特性

目標特性を表 1 に示す。目標とするファイバは、可視よりも長い波長領域では低OHシリカコア大口径ファイバの特性を有し、紫外から可視領域では高OHシリカコアファイバと同等の低損失化を実現したファイバである。すでに、数ppmのOH基をコアに含む広波長域低損失大口径ファイバは存在する^{4) 5)}が、紫外領域や近赤外領域での低損失性については十分に満足する結果は得られていない。分光分析用には、双方の波長での低損失性を維持したファイバが求められている。したがって、伝送損失は紫外領域の 300 nm で 200 dB/km 以下、400 nm で 40 dB/km 以下、近赤外領域の 1300 nm で 8 dB/km 以下、2150 nm で 130 dB/km 以下を目標とした。一般に大口径ファイバは使用長が数m～数十mと短いため、この目標値のファイバは十分使用可能なレベルである。NAは微弱な光も効率的に取り込む必要があるため大きいほうが望ましく、分光器との接続を考慮し 0.22 以上とした。また、広い波長範囲でファイバを使用する場合、NAの波長依存性は小さいことが望ましいため、使用波長域でのNAの変化許容値を 0.01 以下とした。

3. 設計

紫外および可視領域で低損失な高OHシリカコア大口径ファイバと近赤外領域で低損失な低OHシリカコア大口径ファイバの特性を表 2 に示す。また、それぞれの損失特性を図 1 に示す。紫外および可視領域で低損失な大口径ファイバは、コアにOH基を高濃度に添加された高OHシリカガラスが用いられている。これは、ガラス中の構造欠陥による紫外領域での損失への影響を低減するためである⁶⁾。

表1 広波長域低損失大口径ファイバの目標特性
Table 1. Target characteristics of low-loss large core fiber over wide wavelength range.

項目	単位	広波長域低損失大口径ファイバ
コア径	μm	128
クラッド径	μm	170
被覆径(被覆材)	μm	190 (ポリイミド)
NA	-	0.22 以上
波長に対するNAの変化量	-	波長 400 nm ~ 1300 nm において 0.01 以下
伝送損失		
300 nm	dB/km	200 以下
400 nm		40 以下
1300 nm		8 以下
2150 nm		130 以下

紫外領域での損失に影響を与えるシリカガラスの構造欠陥としては下記のものなどが報告されている。

酸素過剰型欠陥 (peroxy linkage : POL, ≡Si-O-O-Si≡) : 160-180 nm 帯のブロードな吸収

(peroxy linkage : POL, O₃≡Si-O-O-Si≡O₃) : 330 nm に光吸収帯

酸素欠乏型欠陥 (oxygen deficient center : ODC, ≡Si-Si≡) : 163 nm に光吸収帯

パーオキシラジカル (peroxy radical : POR, ≡Si-O-O·) : 163 nm に光吸収帯

E' センター (≡Si·) : 220 nm に光吸収帯

非架橋酸素欠乏欠陥 (non-bridging oxygen hole center : NBOHC, ≡Si-O·) : 260 nm と 180 nm に光吸収帯

合成シリカガラス中に水素が多量に含有されていると、NBOHCとE' センターが 180 nm から 260 nm の紫

表2 高OHシリカ・低OHシリカコアファイバの特性
Table 2. Optical characteristics of High-OH core fiber and Low-OH core fiber.

項目	単位	高OHシリカコアファイバ	低OHシリカコアファイバ
コア(OH基濃度)	-	高OHシリカガラス (600 ppm 以上)	低OHシリカガラス (1 ppm 以下)
クラッド	-	フッ素添加シリカガラス	
被覆材料	-	UV 硬化型樹脂	
NA	-	0.22	
伝送損失			
300 nm	dB/km	~ 200	300 以上
400 nm		39 (typ.)	170 (typ.)
1300 nm		-	2 (typ.)
2150 nm		-	120 (typ.)

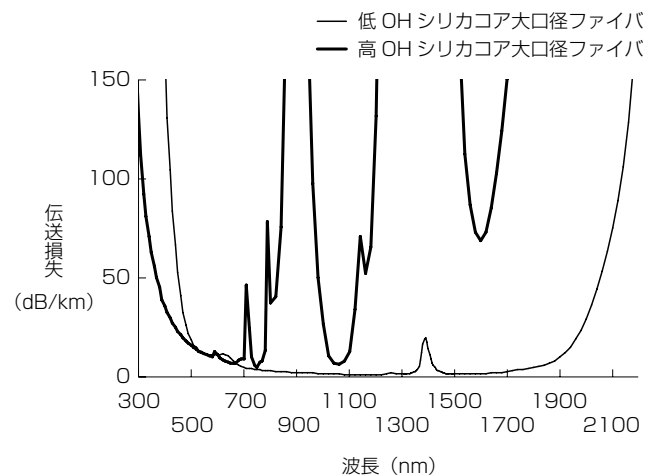


図1 高OHシリカ・低OHシリカコア大口径ファイバの損失波長特性
Fig. 1. Attenuation spectrum of high-OH core fiber and low-OH core fiber.

外領域に吸収を持たない≡ SiOHおよび≡ SiHに修復される⁷⁾。このように紫外領域では欠陥の少ないシリカガラス、または積極的に欠陥を埋めるような物質を添加するのが効果的である。しかし、OH基が意図的に添加されたシリカガラスを用いたファイバは、1385 nmを吸収ピークとするOH基吸収損失が生じ、可視光より長い波長で損失が増加してしまう。

このため、近赤外領域で使用する大口径ファイバは、OH基を除去しOH基吸収損失を低減した低OHシリカガラスをコアに用いている。図1と表2から、低OHシリカコア大口径ファイバは700 nm以上では高OHシリカコア大口径ファイバよりも低損失である。しかし、500 nmよりも短い波長では、シリカガラスの構造欠陥に起因する損失により、非常に高い損失となることがわ

かる。そこで、高OHシリカガラスをコアに用いて近赤外領域での目標特性を得ることは難しいと判断し、コア材は低OHシリカガラスを採用し、構造欠陥を抑制するための製造方法を検討した。また、NA 0.22を得るために、クラッドガラス中に含まれるフッ素濃度は5.0 wt%とした。一般的に大口径ファイバには、被覆材としてシリコンもしくはUV樹脂が使用されている。今回の大口径ファイバは使用時のスペースや強度の観点から、より細径の被覆径とするため、ポリイミドを採用した。広波長域低損失大口径ファイバの各寸法の設計値、材質および構造図を表3と図2に示す。

4. 製造方法

構造欠陥の発生を抑制するため、製法の最適化を行った。まず、光ファイバ母材製造方法の一つであるVAD法によりOH基濃度が1 ppm以下のコア用シリカガラスを製造した。そして、プラズマ活性型化学的気相堆積法(Plasma activated Chemical Vapor Deposition: PCVD法)により、クラッド用シリカガラス母材を製造した。上記製法を用いて、目標のコア/クラッド構造を有する大口径ファイバ母材を作製した。

光ファイバの製造において、ガラス中の構造欠陥の生成は光ファイバ母材製造条件にくわえて線引き条件にも依存する。つまり、線引き条件の最適化を行うことでガラス中の構造欠陥生成を抑制し、損失を低く抑えられる。広波長域低損失大口径ファイバの試作にあたり、線引き速度と紫外領域における損失との相関を調査した。線引き速度の関係は、線速1 < 線速2 < 線速3である。各線引き速度における損失特性を図3に示す。線速3から線速2および線速1へ線引き速度を下げることで紫外領域での損失を低く抑えられることが確認できた。線速1および線速2では、大きな損失の違いが確認されなかった。

紫外および可視領域での損失を低減するため、通常の大口径ファイバの紡糸と比較して低速(線速2)かつ最適な張力にて線引きを行った。

5. 試作ファイバの特性

5.1 損失特性

試作した広波長域低損失大口径ファイバの主な特性を表4に示す。また、その損失波長特性を図4に示す。損失特性は、波長300 nm ~ 2150 nmでカットバック法にて測定した。波長300 nmで129 dB/km、波長400 nmで36 dB/km、波長1300 nmで2 dB/km、波長2150 nmで110 dB/kmの結果が得られた。400 nmでの伝送損失は、従来の低OHシリカコア大口径ファイバが166 dB/kmであるのに対して、今回試作したファイバは36 dB/kmであり、約130 dB/kmの損失低減が認められた。また、1385 nmのOH基吸収損失も10 dB/km程度で

表3 広波長域低損失大口径ファイバの寸法と材質
Table 3. Dimension and materials of low-loss large core fiber for wide wavelength range.

項目	単位	広波長域低損失大口径ファイバ
コア径 (コア材質)	μm	128±3 (低OHシリカガラス)
クラッド径 (クラッド材質)	μm	170±3 (5.0 wt%フッ素添加シリカガラス)
被覆径 (被覆材料)	μm	190±3 (ポリイミド)
NA	-	0.22

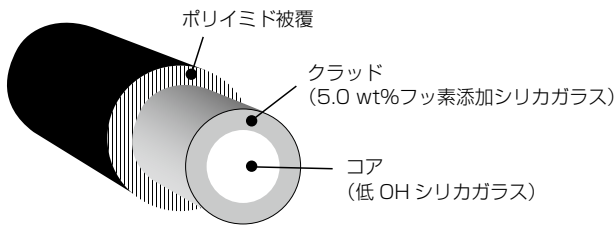


図2 ファイバ構造

Fig. 2. Structure of polyimide coated fiber.

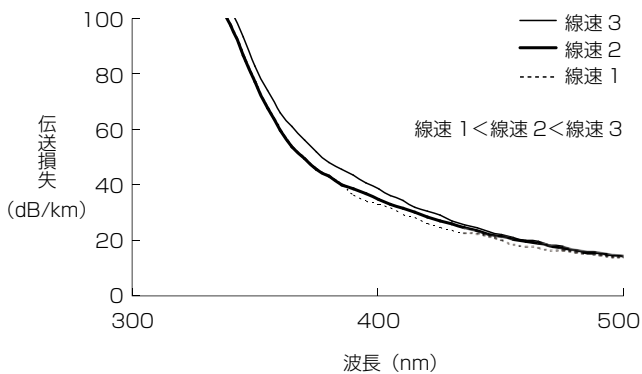


図3 各速度で線引きしたファイバの損失波長特性
Fig. 3. Attenuation spectrum of fibers drawn with various speed.

表4 広波長域低損失大口径ファイバの光学特性
Table 4. Optical characteristics of low-loss large core fiber for wide wavelength range.

項目	単位	広波長域低損失大口径ファイバ
コア径	μm	128
クラッド径	μm	170
被覆径	μm	190
NA	-	0.22
波長に対するNAの変化量	-	波長 400 nm ~ 1300 nm において 0.01
伝送損失		
300 nm	dB/km	129
400 nm		36
1300 nm		2
2150 nm		110

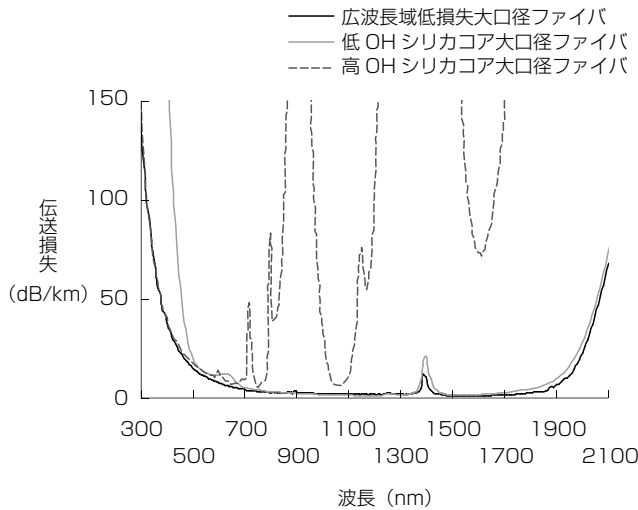


図4 広波長域低損失大口径ファイバの損失波長特性
Fig. 4. Attenuation spectrum of low-loss large core fiber for wide wavelength range.

あり、低OHシリカコア大口径ファイバと同等のレベルであった。図4からもわかるように、紫外領域から近赤外領域の広い波長範囲で低損失であることが確認できた。

試作した広波長域低損失大口径ファイバの長手方向の損失安定性を確認するために大口径ファイバ用OTDR測定装置（サイエンテック社製、測定波長 850 nm）で測定を行った。ファイバ長は 1 km である。その結果を図5に示す。長手方向に安定した特性であることを確認した。

5. 2 NA特性

試作した広波長域低損失大口径ファイバの模式的な屈折率分布構造を図6に示す。同一の光学系を用いて広い波長範囲の信号を1本の光ファイバで伝送するような場合、NAの波長依存性は小さい方が望ましい。NAは光ファイバの屈折率分布構造と波長に依存し、クラッドが一次クラッドと、より屈折率の高い外周クラッドから

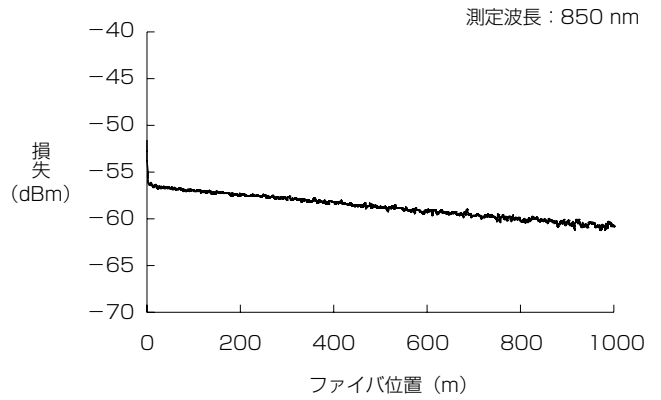


図5 広波長域低損失大口径ファイバのOTDR測定結果
Fig. 5. Measurement result of low-loss large core fiber over wide wavelength range by OTDR.

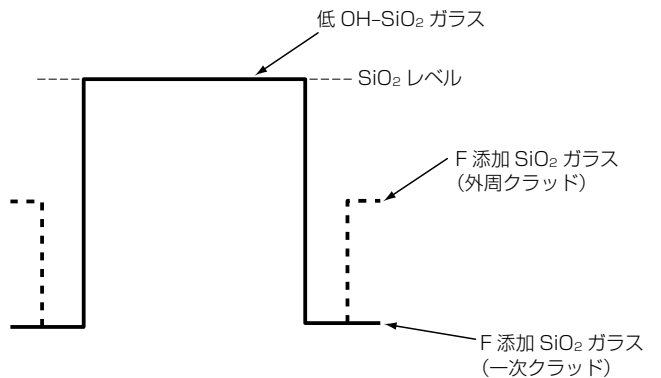


図6 広波長域低損失大口径ファイバの屈折率分布
Fig. 6. Refractive index profile of low-loss large core fiber over wide wavelength range.

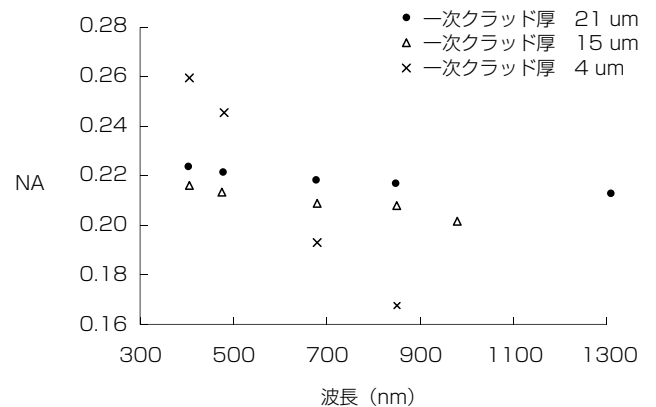


図7 一次クラッド厚に対するNAの波長依存性
Fig. 7. Wavelength dependence on NA of fibers with various first cladding thickness.

なる場合、NAの波長依存性は一次クラッド厚に依存する。製造においては、一次クラッド厚が薄いほうがコスト的に有利ではあるが、一次クラッド厚が薄いと長波長でのNAが小さくなりNAの波長依存性は大きくなる。NAの一次クラッド厚依存性を図7に示す。

今回の広波長域低損失大口径ファイバは、一次クラッド厚を厚くしたシングルクラッド構造とし、クラッドの厚さは寸法内で許容されうる最大厚さの 21 μm とした。NAの変化は 400 nmから 1300 nmで 0.01 であった。

5. 3 紫外線劣化特性

紫外領域で光ファイバを使用すると紫外線によるシリカガラスの構造欠陥に起因する損失劣化現象がみられる。今回はエキシマレーザを広波長域低損失大口径ファイバに入射し、その劣化特性を高OHシリカコア大口径ファイバと比較した。条件は以下である。

照射波長：193 nm (ArF)

照射エネルギー：5 mJ/cm²

繰り返し数：100 pps

パルス数：10⁵ パルス

劣化特性の結果を図 8 に示す。各ファイバの照射前の損失は同等レベルであるので、一つのラインで示している。従来の高OHシリカコア大口径ファイバと同等の劣化特性であることを確認した。

6. む す び

紫外領域から近赤外領域 (300 nm ~ 2150 nm) で低損失な広波長域低損失大口径ファイバを開発した。このファイバの損失は波長 300 nmで 129 dB/km, 波長 400 nmで 36 dB/km, 波長 1300 nmで 2 dB/km, 波長 2150 nmで 110 dB/kmであった。特に低OHシリカコア大口径ファイバと比較して、紫外領域である 400 nmでは約 130 dB/kmの損失低減を達成した。近赤外領域では従来の低OHシリカコア大口径ファイバと同等の損失特性を有しつつ、紫外領域から可視領域では従来の低OHシリカコア大口径ファイバより優れた損失特性を有していることを確認した。

また、NAの波長依存性も小さく、紫外線による劣化特性も高OHシリカコア大口径ファイバと同等であることを確認した。分光分析用など広い波長範囲で低損失特性が求められる分野への適用が期待される。

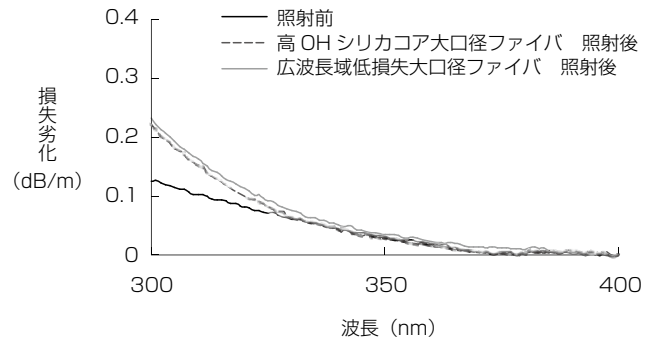


図8 エキシマレーザに対する劣化特性
Fig. 8. Solarization resistant property for ArF excimer laser.

参 考 文 献

- 1) 能丸淳一ほか：「光ファイバを使った多天体分光器」, 光技術コンタクト, vol.29, no.1, pp.27-35, 1991.
- 2) 山下卓也：「次世代超大型光赤外線望遠鏡 TMT」, 光技術コンタクト, vol.50, no.2, pp.4-9, 2012.
- 3) http://www.naoj.org/j_index.html
- 4) G. Lu, et. al: "Optical Fiber for UV-IR Broadband Spectroscopy," Proc. SPIE, 3355, pp.884-891, 1998.
- 5) Teodor Tichindelean: "Silica-Based Fiber Boosts Broad-Spectrum Spectroscopy," Photonics Spectra, November, p.60-63, 2013.
- 6) J. Vydra, et. al: "Improved all silica fibers for deep UV-applications," Proc. SPIE, 3596, pp.165-175, 1999.
- 7) J. Assmus, et. al: "Improvements in UV-transmission of all-silica optical fibers with low OH-content," Proc. SPIE, 3596, pp.108-114, 1999.