



海底ケーブル向け極低損失コア拡大光ファイバ

Ultralow-Loss Large-Core Fiber for Submarine Cables

森田 圭省*
Keisei Morita

山本 義典
Yoshinori Yamamoto

長谷川 健美
Takemi Hasegawa

本間 祐也
Yuya Honma

相馬 一之
Kazuyuki Sohma

藤井 隆志
Takashi Fujii

増加する通信データ情報量の需要に応えるため、海底通信ケーブルに使用される光ファイバには伝送損失及び非線形性の低減が求められる。純シリカコアファイバ（PSCF）は、光を導波するための添加物がコア中に添加されないため、本質的な低損失性・低非線形性を有する。今回、商用化されている光ファイバの中で最高の伝送性能を有するPSCFであるZ-PLUS Fiber 150（Z+150）を開発した。これは、2013年にリリースしたZ-PLUS Fiber 130 ULL（Z+130）に比べ、ガラス品質及びガラスを被覆する樹脂物性がさらに改善されたPSCFであり、伝送損失が0.154 dB/kmから0.152 dB/kmへ、実効コア断面積（ A_{eff} ）が $130 \mu\text{m}^2$ から $150 \mu\text{m}^2$ へ、それぞれ改善されている。また、約4,000 kmのZ+150の量産試作を行ない、製造安定性についても良好であることを確認した。

Reduction in the transmission loss and nonlinearity of optical fibers used for submarine cables is important for meeting the ever-growing demand for telecommunication traffic. Pure silica core fiber (PSCF) has substantial advantages of low transmission loss and low nonlinearity because no dopant is added in its core. We have developed a PSCF having the highest transmission performance among commercialized optical fibers. The fiber, Z-PLUS Fiber 150 (Z+150), has been realized by improving our previous Z-PLUS Fiber 130 ULL (Z+130) in terms of both the glass quality and the mechanical performance of the protective coating. As a result, the transmission loss reduced from 0.154 dB/km to 0.152 dB/km, and the effective core area (A_{eff}) enlarged from $130 \mu\text{m}^2$ to $150 \mu\text{m}^2$. We have further confirmed an excellent manufacturability of Z+150 by the trial mass production of about 4,000 km fibers.

キーワード：光ファイバ、光通信、低損失、大容量伝送、長距離

1. 緒言

モバイル端末の急速な普及や、サービスコンテンツの多様化により通信データ情報量の需要は指数関数的な増加を続けており、この増加は今後も続くと予想されている。この需要に応えるため、光ファイバ通信システムの情報容量を拡大していくことが要求されている。中でも、海底通信ケーブルのように敷設できるケーブルの本数やケーブルに収納できる光ファイバの本数に制限がある状況では、1本の光ファイバで伝送する情報量を増やすことが重要となる。海底通信システムでは、光の強度と位相を検出するコヒーレント検波とデジタル信号処理による波形歪み補正とを組合せた通信方式である、デジタルコヒーレント技術が主流となっている。このデジタルコヒーレント技術を用いた通信システムでは、光ファイバの波長分散や偏波分散による波形歪みはデジタル信号処理で補正される一方、光ファイバの損失や非線形性によって生じる雑音は、伝送できる情報量を制限する要因となる。理論的には、限られた周波数帯域を持つ1本の光ファイバで伝送できる情報量の上限は、非線形シャノン限界⁽¹⁾により与えられ、限界の情報容量は光信号対雑音比（Optical signal to noise ratio: OSNR）に対して単調に増加する。そのため、1本の光ファイバで伝送できる情報量を増やすためにはOSNRの改善が必要とな

る。OSNRは一般的に2種類の雑音により支配され、その1つは光ファイバの損失を補償する光増幅器で発生する増幅器雑音であり、もう1つは光ファイバ中の非線形光学現象で生じる非線形雑音である。従って、海底通信ケーブルに用いる光ファイバには、伝送損失及び非線形性の低減が求められる。

この要求に応える光ファイバとして、信号光が伝搬するコア中に屈折率を調整するための添加物を含まない純シリカコアファイバ（Pure silica core fiber: PSCF）^{*1}が本質的に低損失・低非線形となることから有用である。当社は、いち早くPSCFの商用化に成功し、その品質改善を進めてきた。光ファイバの伝送損失は、一般的な汎用シングルモードファイバ（SMF）の場合、波長1550 nmにおいて0.19 dB/kmであるのに対し、当社は1988年には0.170 dB/kmのZ Fiber、2002年には0.168 dB/kmのZ-PLUS Fiber、2011年には0.162 dB/kmのZ-PLUS Fiber LL、2013年には0.154 dB/kmのZ-PLUS Fiber ULL、及び、Z-PLUS Fiber 130 ULL（Z+130）をリリースしてきた^{(2),(3)}。これらのPSCFは、その性能の高さが高く評価され数多くの長距離海底ケーブルに採用されてきた。特にZ+130は、デジタルコヒーレント専用設計の光ファイバとして世界で初めて製品化に成功したもので、今日までに50万km以上も

の出荷を記録するベストセラー製品となっており、グローバルな大容量光通信ネットワークの構築に大きく貢献している。

このたび、我々はZ+130から更に性能を高めたZ-PLUS Fiber 150 (Z+150)を開発した。Z+150は、従来の最高性能ファイバであったZ+130に比べ、伝送損失を0.154 dB/kmから0.152 dB/kmに低減するとともに、低非線形性の指標である実効コア断面積 (Aeff)^{*2}を130 μm²から150 μm²に拡大した。これらの改善は、光の伝送媒体であるシリカガラスの品質と、そのガラスを被覆する樹脂の物性を改善することで実現され、量産試作においても安定した性能が実証された。本稿では、これらの開発成果について述べる。

2. Z+150の優れた特性

Z+150ファイバの構造を図1に示す。Z+150はリングコア構造を有し、リングの中心部は微量のフッ素 (F) が添加されたシリカガラス (SiO₂) で構成され、外周部は純粋なシリカガラスで構成される。リングコアを包囲するクラッドはフッ素添加シリカガラスで構成され、内側の層の屈折率が低くなるW型クラッド構造を有する。これらの構造はZ+130⁽²⁾と同様であるが、Z+150では構造をさらに最適化することで、150 μm²の大きなAeffと低い曲げ損失を両立した。

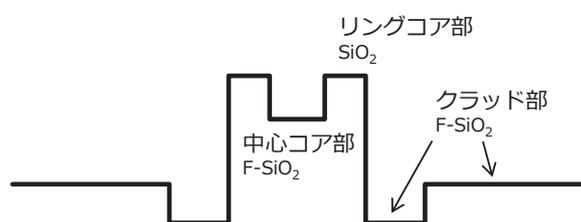


図1 Z+150の屈折率分布

また、Aeffを拡大すると非線形性が低減される一方で、光増幅器などに用いられるAeff ~80 μm²の汎用SMFとの間での接続損失が増大する問題が生じうが、リングコア構造はAeffを拡大してもモードフィールド径 (Mode field diameter: MFD) を小さく抑える効果を有し⁽²⁾、接続損失はMFDの不整合比の増加関数で与えられることから、リングコア構造により接続損失が低減される。我々は、リングコア構造で150 μm²のAeffを持つ光ファイバは1箇所あたり0.18 dBの低損失で汎用SMFと融着接続できることを示した⁽⁴⁾。これは、150 μm²のAeffを持つ従来の光ファイバと汎用SMFとの融着接続損失として報告されている0.30 dBに比べ、0.12 dBの大幅な改善である。

Z+150は図2に示す伝送損失スペクトルを有す。伝送損失は波長1550 nmにおいて0.152 dB/kmであり、これは本稿執筆時点の2017年4月において、製品としては最も低い伝送損失である。図2に示すように、光通信において一般的に使用される波長範囲1530~1610 nmに亘り、伝送損失は汎用SMFよりも大幅に低い。このような低い伝送損失を実現するためには、波長1550 nmにおける伝送損失の約80%を占めるレイリー散乱損失を低減することが重要である。レイリー散乱は、シリカガラスが持つ波長スケールの密度ゆらぎによって光が散乱される現象である。この密度ゆらぎは、ガラスが高温で溶融される際に生じ、冷却過程で残留するものであるが、光ファイバの量産技術の成熟とともに改善されてきた。

Z+150の典型的な光学特性を表1に示す。低い伝送損失と大きなAeffに加えて、21 ps/nm/kmと大きな波長分散を有する。波長分散が大きいことは、光信号の伝搬速度の波長依存性が大きいことを意味し、波長多重伝送において隣接する波長チャネルからもたらされる非線形雑音を低減する効果を持つ。また、曲げ損失も低く抑えられており、図2に示した伝送損失スペクトルは直径170 mmのポビンに巻かれた状態での伝送損失であるが、曲げ損失による伝

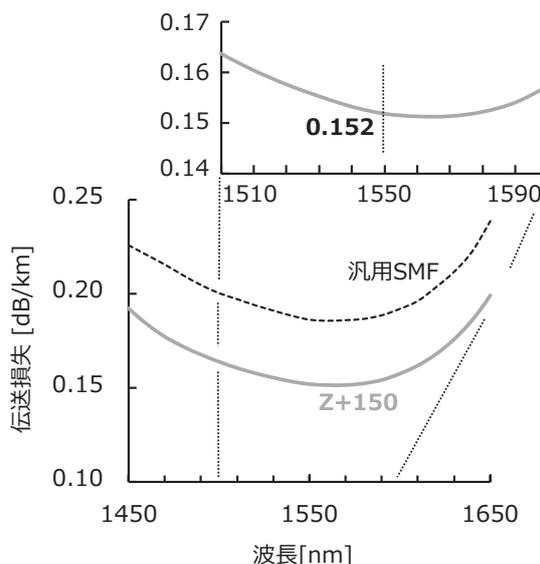


図2 Z+150の伝送損失スペクトル

表1 典型的な光学特性

	Z+150	SMF
伝送損失 [dB/km]	0.152	0.186
Aeff [μm ²]	150	80
分散 [ps/(nm·km)]	21	17
分散スロープ [ps/(nm ² ·km)]	0.06	0.06
ケーブルカットオフ波長 [nm]	≤1530	≤1260

*ケーブルカットオフ以外の特性は、全て波長1550 nmにおける値

送損失増は見られず、Lバンドの波長1610 nmにおいても伝送損失は0.162 dB/kmと低い。

Z+150ではAeffを150 μm^2 に拡大するために、シリカガラスファイバを保護する樹脂被覆も改善されている。光ファイバには使用環境に存在する様々の外乱により微小な曲がり（マイクロバンド）が生じるが、一般にAeffが大きくなるほど光の閉じ込めが弱まり、マイクロバンドによって光が漏洩することによる損失（マイクロバンドロス）が生じやすくなる。従って、Aeffを拡大するためには樹脂被覆を改良してマイクロバンドロスを低減することが有効である。具体的には、樹脂被覆は図3に示すような弾性率の低い内側層と弾性率の高い外側層の2層構造からなるが、内側層の弾性率を従来よりもさらに低減することにより、外乱を遮断する性能が高まり、ガラスに生じるマイクロバンドが低減される。

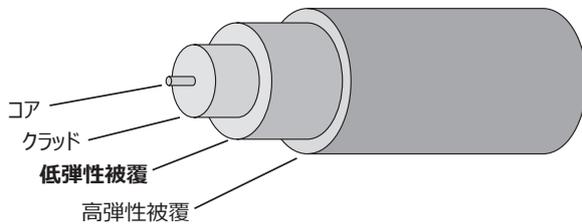


図3 光ファイバの構造

樹脂被覆の改善によってマイクロバンドロスが低減されることを確認した結果を図4に示す。図4は、ワイヤメッシュドラム法^{(2),(5),(6)}によって測定されたマイクロバンドロスとAeffの関係を示す。この方法では、太さ50 μm の金属ワイヤが100 μm の間隔で編まれたメッシュで胴面が形成された胴径405 mmのドラムに、長さ500 mの測定対

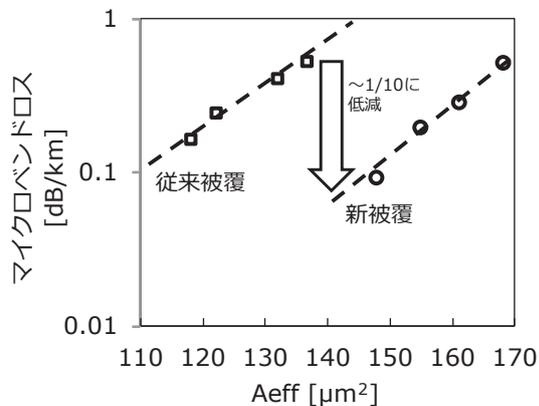


図4 マイクロバンドロスの測定結果（波長：1550 nm）

象光ファイバを80 gfの張力で巻き付け、それによるロスの増加分をマイクロバンドロスとして測定する。図4に示すように、被覆ごとに層別すると、マイクロバンドロスはAeffに対して概ね単調に増加する。これは、Aeffが大きいほど光の閉じ込めが弱まりマイクロバンドによる損失が発生しやすくなることを示す。さらに、被覆を改善することでマイクロバンドロスは大幅に低減され、従来のZ+130に用いられた被覆に比べて、Z+150のために新たに改善された被覆ではマイクロバンドロスが約1/10に低減される。その結果、Aeffを130 μm^2 から150 μm^2 に拡大することが可能となった。

3. Z+150の安定した量産製造

我々はZ+150の量産技術も開発し、安定した供給が可能であることを確認した。図5に約4,000 kmの量産試作における伝送損失の分布を示す。波長1550 nmにおける伝送損失は、平均0.152 dB/km、標準偏差0.003 dB/kmで安定している。伝送損失以外の光学特性の点でも同様に安定して量産できることを確認した。また、海底通信ケーブル用の光ファイバに要求される耐環境性及び機械強度について、国際規格IEC60793-2-50に基づき評価を実施し、全試験において良好な結果を示し、十分な信頼性と耐久性を有することを確認した。これらの良好な量産試作結果から、今後の大洋横断ケーブルプロジェクトへの採用が期待される。

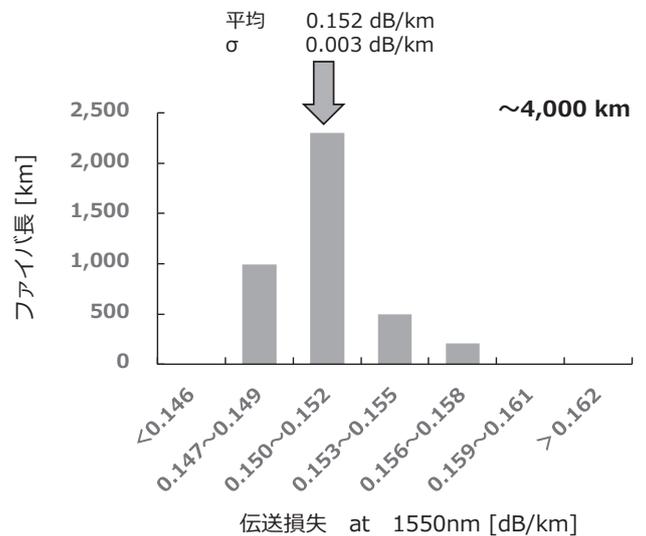


図5 Z+150量産試作での伝送損失実績

4. Z+150が光通信システムにもたらす効果

低損失かつ低非線形なZ+150は、光ファイバ伝送路の信号対雑音比OSNRを改善する効果を持つが、この効果は

ファイバ性能指数（ファイバFOM）により定量的に表される。ファイバFOMは、伝送損失、 A_{eff} 、分散、接続損失などの光ファイバの光学特性の改善量から、OSNRの改善量を算出する式として当社により導出されたものであり⁽³⁾、ファイバFOMが大きいほどOSNRが高く情報容量の理論限界が大きいことを意味する。例として、中継器間のスパン長を70 km、中継器が出力する信号光パワーの上限を-1 dBm/chとしたシステムにおけるFOMを伝送損失および A_{eff} の関数として計算した結果を図6に示す。また、Z+150のFOMと対比して、本稿を執筆した2017年4月時点における他の製品^{(7)~(9)}のFOMの値も示す。図6に示すように、伝送損失が低く、 A_{eff} が大きいほどFOMは高く、Z+150は製品の光ファイバの中では最も高いFOM、すなわち最も高い伝送性能を有していることがわかる。

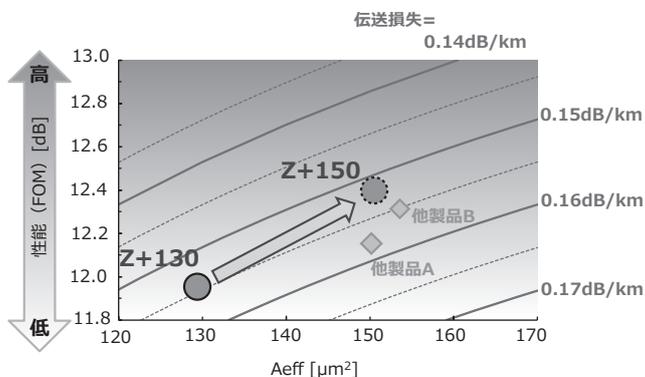


図6 光ファイバの伝送性能比較

5. 結 言

当社は、実効コア断面積 A_{eff} を150 μm^2 に拡大し、伝送損失を0.152 dB/kmに低減することで、製品として最も高い伝送性能を有する光ファイバZ-PLUS Fiber 150 (Z+150)を開発した。 A_{eff} の拡大は、内側層の弾性率を低減した被覆により実現された。伝送損失の低減は、シリカガラスの密度ゆらぎを低減することで実現された。

今後も継続する海底通信ケーブルの大容量化の要求に応えるため、当社は光ファイバの伝送損失をさらに低減する開発を進めている。2017年3月には、伝送損失の世界記録となる0.1419 dB/km（波長1560 nm）を実現した⁽¹⁰⁾。今後も低損失技術の研究開発と量産技術の開発を進め、社会の要請に応える製品を提供していく。

用語集

※1 純シリカコアファイバ

Pure silica core fiber (PSCF)：汎用的に使用されている光ファイバのコアは、屈折率を高めて光を閉じ込めるために GeO_2 が添加されたシリカガラス (SiO_2) からなるのに対し、コア中に屈折率を調整するための添加物を添加していないファイバの総称。

※2 実効コア断面積

Effective core area (A_{eff})：光ファイバ中のコアに閉じ込められた光のパワー分布の拡がりの程度を表す指標。 A_{eff} が大きいほど光のパワー密度が低減され、非線形光学現象の発生が抑制される。

・Z-PLUS Fiberは、住友電気工業㈱の登録商標です。

参考文献

- (1) R. J. Essiambre, et al., "Capacity limits of optical fiber networks," J. Lightwave Technol. vol. 28, no. 4, pp. 662-701 (2010)
- (2) 山本ら、「大容量伝送に適した低ロス低非線形純シリカコアファイバ」、SEIテクニカルレビュー第182号, pp. 69-74 (2013)
- (3) 川口ら、「極低損失純シリカコアファイバ」、SEIテクニカルレビュー第186号, pp. 45-50 (2015)
- (4) M. Suzuki, et al., "Low-loss splice of large effective area fiber using fluorine-doped cladding standard effective area fiber," OFC2017, M2F.4 (2017)
- (5) J. F. Libert, et al., "The new 160 Gigabit WDM challenge for submarine cable systems," 47th IWCS, pp. 375-384 (1998)
- (6) F. Palacios, et al., "Ultra-large effective area fibre performances in high fibre count cables and joints. A new technical challenge," SubOptic 2016, TU1A-2 (2016)
- (7) Sumitomo Electric Industries, Ltd., Fiber line up, http://global-sei.com/fttx/product_e/opticalfibers_e/optical-fiber01.html
- (8) Corning Vascade optical fiber, http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1445_07_14_English.pdf
- (9) OFS TeraWave SCUBA ocean fibers, <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/item/single-mode-optical-fibers/ocean-fibers-2/terawave-scuba-ocean-fibers>
- (10) Y. Tamura, et al., "Lowest-ever 0.1419-dB/km loss optical fiber," OFC2017, Th5D.1 (2017)

執筆者

森田 圭省* : 光通信研究所 主席



山本 義典 : 光通信研究所 主席



長谷川 健美 : 光通信研究所 グループ長



本間 祐也 : 光通信研究所 主査



相馬 一之 : 光通信研究所 主席



藤井 隆志 : 光通信研究所 グループ長



*主執筆者