



# 多心海底ケーブルシステムに適した光ファイバ

## Optical Fibers for High Fiber Count Submarine Cable Systems

山口 秀樹\*  
Hideki Yamaguchi

川口 雄揮  
Yuki Kawaguchi

平野 正晃  
Masaaki Hirano

国際通信のデータトラフィック需要は年率30~40%で増加を続けており、それに追従するよう海底ケーブルの伝送容量も増加を強く要求されている。近年では、低伝送損失化など光ファイバの性能改善に加え、海底ケーブルに収納される光ファイバの多心化によって伝送容量の増加を実現している。本稿では、この多心海底ケーブルシステムに適した光ファイバについて、システムの性能やトータルコストの観点から議論する。さらに将来の技術として期待される海底細径ファイバ、海底マルチコアファイバについてもあわせて述べる。

Global data traffic demand has been growing by 30 to 40% per year, and there is a strong need to increase the transmission capacity of submarine cables. Recently, transmission capacity has increased with performance improvement of submarine optical fibers, including reduced transmission loss, and with the increase in the number of optical fibers installed in a submarine cable. This paper discusses the appropriate performance of submarine optical fibers in terms of system performance and total cost. It also discusses the prospects for optical fibers with smaller outer diameters and multi-core fibers for future capacity expansion of submarine cable transmission systems.

キーワード：光ファイバ、純シリカコア、低損失ファイバ、海底ファイバ、マルチコアファイバ

### 1. 緒 言

5G モバイル通信の普及、クラウドサービスの拡大や世界各国におけるデータセンタの建設等に伴い、国際通信のデータトラフィック需要は、年率30~40%で増加を続けており(図1)<sup>(1)</sup>、この需要の増大に応えるため、海底ケーブルの伝送容量の拡大が強く要求されている。

実際に海底ケーブル伝送容量は、通信技術および光ファイバ技術の進展に伴って増加を続けている(図2)<sup>(2)</sup>。1990年代以前は汎用シングルモードファイバ(SMF)が用いられた。光ファイバ増幅器(EDFA)を用いた波長多重技術(WDM、DWDM)が導入され、波長分散が伝送容量の主な制限要因となり、分散シフトファイバ(DSF)、ノンゼロ分散シフトファイバ(NZDSF)や分散マネージメントファイバ(DMF)が採用された。2010年代にはデジタルコヒーレント技術<sup>\*1</sup>の導入により、制限要因が光信号対雑音比(OSNR)となった。OSNR改善には非線形性および伝送損失の低減が重要で、実効断面積( $A_{eff}$ <sup>\*2</sup>)を130~150  $\mu\text{m}^2$ に拡大し極低非線形性で、0.15 dB/kmと極低損失である光ファイバが最適となる。これは汎用SMFの $A_{eff}$ : 80  $\mu\text{m}^2$ 、伝送損失: 0.18~0.20 dB/kmと比較して非常に高性能である。

一方、2020年頃には光ファイバ当たりの伝送容量が理論的な限界に近付いたため、ケーブルに収納する光ファイバの多心化によって伝送容量を増加する、空間分割多重(SDM)技術が導入された。今日では純シリカコア技術を適用し、 $A_{eff}$ : 80~130  $\mu\text{m}^2$ 、伝送損失: 0.15 dB/kmの光ファイバが主流となっている。

本稿では、SDM海底ケーブルに適した光ファイバについて

、システム性能やトータルコストの観点から議論した後、更なる伝送容量の拡大を期待される海底細径ファイバ、海底マルチコアファイバについて述べる。

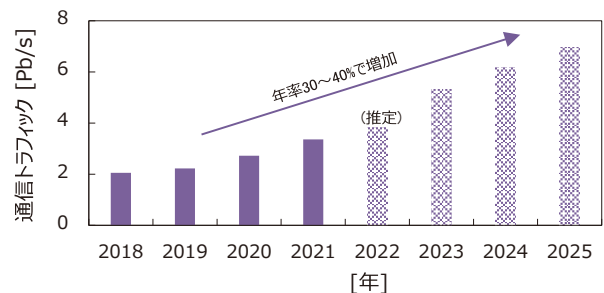


図1 国際間の通信トラフィック需要の推移

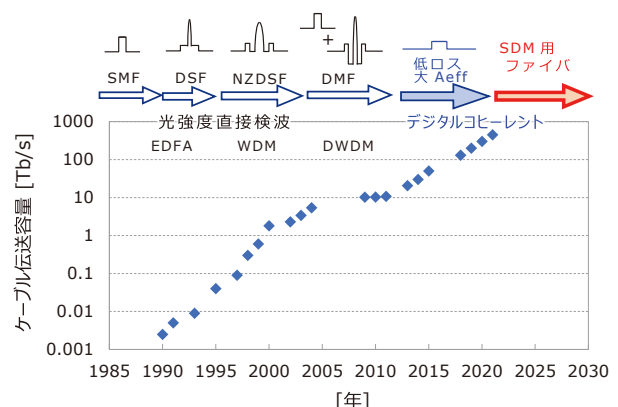


図2 ケーブル伝送容量と光ファイバ技術の推移

## 2. 海底ケーブルの伝送容量の拡大

シャノンの定理<sup>(3)</sup>を用いると、光ファイバおよび光ケーブルあたりの通信容量の理論限界  $C_{\text{fiber}}$  および  $C_{\text{cable}}$  は、それぞれ式 (1)、(2) で示される (B: 使用する信号の帯域幅、N: ケーブル内の光ファイバ心数)。

$$C_{\text{fiber}} = B \cdot \log_2 (1 + \text{OSNR}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_{\text{cable}} = N/2 \cdot C_{\text{fiber}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

従って光ケーブルの伝送容量の拡大には、

1. 信号帯域Bの拡大、2. OSNRの向上、3. ケーブル内の光ファイバ心数Nの増加

が重要となり、以下にそれぞれについて述べる。

### 2-1 信号の高帯域化

一般的に海底ケーブルシステムでは伝送波長帯としてC帯 (1530nm~1565 nm) を用いるが、C帯に加えL帯 (1565nm~1610 nm) の利用も検討されており<sup>(4)</sup>、実際にC、L両帯域を用いた大洋横断海底ケーブルが敷設されている。これにより帯域幅はおおよそ2倍に拡大するが、光増幅中継器の設計が複雑となる、C帯に比べL帯の光信号増幅効率が悪いなど課題もあり、実用化は一部に留まっているが、今後の開発によって解決が強く期待されている。

### 2-2 OSNRの改善

光ファイバ伝送システムにおける光雑音は、光増幅の過程で不可避免的に発生する自然放光による線形雑音と、信号光と光ファイバとの相互作用により発生する非線形雑音とに主に分類される。

線形雑音によるOSNRは、光増幅器への入射光が強いほど抑制されるため、光増幅器間の間隔 (スパン長) を狭くしたり、光ファイバの伝送損失を低減したりすると良い。しかし、海底伝送システムにおける光増幅器の収納装置 (中継器) は非常に高価であるため、スパン長は長い方がトータルコストの抑制が可能である。従って、低い伝送損失は、システムの伝送容量の増大とトータルコストの低減に貢献するため、特に海底用光ファイバでは最も重要な伝送特性とすることができ、当社は研究開発及び量産製品ともに世界記録となる低損失ファイバを実現してきた<sup>(5)</sup>。

非線形雑音は、光ファイバを伝搬する光信号の密度が低いほど小さくなるため、コア部の面積  $A_{\text{eff}}$  が大きいほど望ましい。一方、 $A_{\text{eff}}$  が大きいほど曲げ損失も大きく、また海底ケーブルシステムでは供給電力が制限されるため信号光強度には制限があるため、伝送距離、光ファイバ心数など伝送システム構成に依存して最適な  $A_{\text{eff}}$  が存在する。

当社は  $A_{\text{eff}}$ : 80~150  $\mu\text{m}^2$ 、伝送損失: 0.14~0.16 dB/km を持つ種々の海底ファイバを製品化している<sup>(6)</sup>。また、 $A_{\text{eff}}$  や伝送損失などの光ファイバの光学特性を用いて伝送システム性能を定量化可能な性能指数 (FOM) の定式化<sup>(7)</sup> に成功しており、最適な光ファイバの提案によって海底ケーブルシステムの高性能化に貢献している。

## 2-3 光ファイバ心数の増加

送受信技術が向上した現在、光ファイバ中の伝送容量は理論限界  $C_{\text{fiber}}$  に近づいており、これ以上の増加は困難となっている。従って海底ケーブル中の光ファイバ心数を増加したSDM技術が、ケーブル伝送容量の増加には有効である。2021年には48心の海底ケーブルが実用化されている<sup>(8)</sup>。2-2項で述べた通り適切な光ファイバの  $A_{\text{eff}}$  は、光増幅器への供給電力に依存するが、海底ケーブルシステムでは陸揚げ局舎に備えられた給電装置からの給電に限定されるため、供給電力には制限がある。従って多心化すると、光ファイバ1心を増幅する光増幅器への供給電力が小さくなるため適切な  $A_{\text{eff}}$  は小さくなる<sup>(9)</sup>。また、多心化によってケーブル内の光ファイバが高密度化し、ファイバに加わる曲げの影響も大きくなるため、 $A_{\text{eff}}$  が非常に大きなファイバは曲げロスが発生する懸念がある。今日では大洋横断海底ケーブルには80~130  $\mu\text{m}^2$  の光ファイバが主に用いられている。

## 3. 多心海底ケーブルに適した光ファイバ

本章では多心海底ケーブルシステムに適した光ファイバを議論する目的で、ファイバ心数48心、伝送距離7,000 km、中継器への供給電力に制限のあるシステムにおいて、伝送性能及びトータルコストの観点から検討した結果を一例として述べる。

伝送損失と  $A_{\text{eff}}$  に対し、FOMによって計算したスパン長の等高線を図3に示した。加えて当社の海底用光ファイバ製品<sup>(6)</sup>として、Z Fiber LL (Z LL)、PureAdvance-110 Submarine (PA110S)、Z-PLUS Fiber ULL (Z+ULL)、Z-PLUS Fiber 130ULL (Z+130ULL)、Z-PLUS Fiber 150 (Z+150) の典型特性 (表1) におけるスパン長も併せてプロットで示した。

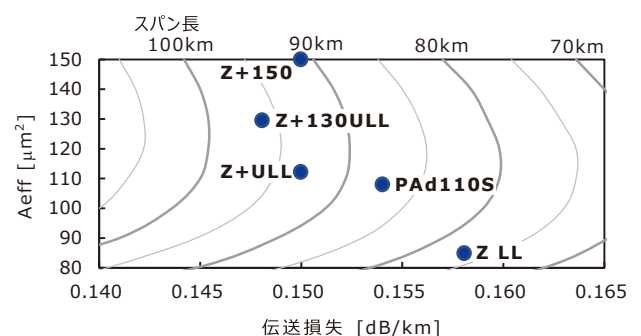


図3  $A_{\text{eff}}$  及び伝送損失に対するスパン長 (伝送距離7,000 km、48心、ケーブル伝送容量0.5 Pb/s)

表1 当社海底ファイバの特性典型値 (波長: 1550 nm)

品名	Z LL	PAd 110S	Z+ ULL	Z+130 ULL	Z+150
伝送損失 [dB/km]	0.158	0.154	0.150	0.148	0.150
Aeff [ $\mu\text{m}^2$ ]	85	110	112	130	150

図3に示す通り、光ファイバの伝送損失が低いほど、また Aeff が 110~130  $\mu\text{m}^2$  程度の最適値であると、スパン長が延伸可能であることが本検討によって判った。スパン長が長いほど海底ケーブルシステムにおける中継器の台数は少なくなり、トータルコストを削減することが可能となる。また一般的に光ファイバは、伝送損失が低いほど/コア部の径が大きいほど、製造コストが高くなる。

これらを考慮すると、SDM 技術を適用した多心海底ケーブルシステムを高性能化しつつトータルコストを削減するためには、低伝送損失で適切な Aeff (本ケースでは 110~130  $\mu\text{m}^2$ ) を有する光ファイバの活用が望ましく、当社製品の Z+130ULL、Z+ULL、PAd110S が適切な光ファイバと結論することができる。

#### 4. 将来の海底用光ファイバ

図1の通り海底ケーブルの伝送容量は今後も継続して拡大し、2025年頃には 1 Pbit/s に達すると推測されている。単純に既存光ファイバを更に多心化するよう、海底ケーブルを太径化し大容量とするのは、海底ケーブルの製造・部材コストや、敷設船へのケーブル積み込み長の減少による敷設コストなどの大幅な上昇を伴うため、容易ではない。

そこでケーブル外径の太径化を伴わず 1 Pbit/s 超のケーブル容量を実現する将来の海底用光ファイバとして、細径海底光ファイバや海底マルチコアファイバが盛んに議論、研究されており、実用化が強く望まれている。

##### 4-1 光ファイバの細径化

光ファイバは、光が伝搬するガラス部とそれを保護する被覆部で構成される。一般的にガラス部、被覆部の直径はそれぞれ 125、250  $\mu\text{m}$  だが、陸上超高密度ケーブル用途にガラス部の径は変えずに被覆部を 200  $\mu\text{m}$  等として外径を細径化した光ファイバが実用化されており<sup>(10)</sup>、海底用光ファイバへの適用が議論されている。外径の 250 から 200  $\mu\text{m}$  への細径化によって断面積は約 1.5 分の 1 となり、海底ケーブルに 1.5 倍の心数の光ファイバを収納が可能となる。従って上述の海底ケーブルや敷設の大幅なコスト増を伴わずに伝送容量の拡大が可能となると期待されている。

海底用光ファイバには低伝送損失など優れた伝送特性に加え、25年間程度の長期使用に耐え得る高い機械、環境信頼性が要求される。当社は表1の海底ファイバのうち、200  $\mu\text{m}$  ファイバとして Z LL および Z+ULL の開発を行っており、典型特性を表2にまとめた。伝送損失、Aeff は 250  $\mu\text{m}$

ファイバと同等の高い伝送特性を持つと確認した。加えてプルーフテストとして汎用 SMF の 2 倍にあたる 1.4 GPa を印加、高温高湿エージング試験や浸水試験などは国際標準 IEC60793-2-50<sup>(11)</sup> の基準を満たし、高い機械、環境信頼性を有することも確認した。このように 200  $\mu\text{m}$  外径の Z LL、Z+ULL ファイバは海底ケーブル用途へ適用可能と確認した。商用製品化は 2023 年を計画している。

表2 海底用 200  $\mu\text{m}$  ファイバの典型特性

品名	Z LL		Z+ULL	
ファイバ外径 [ $\mu\text{m}$ ]	250	<b>200</b>	250	<b>200</b>
伝送損失 [1550nm, dB/km]	0.156 <sup>#1</sup>	<b>0.156</b>	0.150	<b>0.150</b>
Aeff [1550nm, $\mu\text{m}^2$ ]	85	<b>85</b>	112	<b>112</b>
プルーフテストレベル [GPa]	$\geq 1.4$	<b><math>\geq 1.4</math></b>	$\geq 1.4$	<b><math>\geq 1.4</math></b>
損失増 [dB/km]: 高温高湿試験 (85°C/85%RH, 30日)	0.00 合格 <sup>#2</sup>	<b>0.00 合格<sup>#2</sup></b>	0.00 合格 <sup>#2</sup>	<b>0.00 合格<sup>#2</sup></b>
損失増 [dB/km]: 温度サイクル試験 (-60°C~+85°C, 5サイクル)	0.00 合格 <sup>#2</sup>	<b>0.00 合格<sup>#2</sup></b>	0.00 合格 <sup>#2</sup>	<b>0.00 合格<sup>#2</sup></b>
損失増 [dB/km]: 浸水試験 (23°C, 30日)	0.00 合格 <sup>#2</sup>	<b>0.00 合格<sup>#2</sup></b>	0.00 合格 <sup>#2</sup>	<b>0.00 合格<sup>#2</sup></b>

#1: 0.158→0.156 dB/kmへ低減、2023年に商用開始を予定

#2: IEC60793-2-50基準に対する。表の試験項目は全て、 $\leq 0.05$  dB/km

##### 4-2 マルチコアファイバ (2コアファイバ)

2コアファイバ (2CF) や 4コアファイバ (4CF) などの 1本の光ファイバ中に複数コアを持つマルチコアファイバ (図4) は、通信ケーブルの大容量化や細径化技術として期待が大きい。外径に制限のある海底ケーブルへの応用は検討が盛んで、特に 2CF を用いた伝送システムは数年内の実用化が期待されている<sup>(12)</sup>。これは、各コアを伝搬する光信号は FIFO (Fan-in/Fan-out) デバイスによって分離可能で、既存の送受信器や光信号増幅器などが活用可能 (図5) であり、技術ハードルが比較的低いためである。

2CF への要求特性について以下に議論する。大きな特徴は、各コアを伝搬する光信号間のクロストーク (XT) である。図6に 2CF 伝送時の、単一コアファイバ (1CF) に対する OSNR ペナルティの計算結果を示す。XT は 1スパン当たり -45~-50 dB 程度以上で急激に悪化し、それ以下への抑制が必要と判った。また、伝送損失を 0.17 から 0.15 dB/km へ低減すると 1 dB 以上も OSNR が改善するなど、2CF の伝送損失低減が伝送システム性能の向上に最重要であることも判った。試作 2CF の伝送損失スペクトルを図7に示す。波長 1550 nm における各コアの伝送損失はそれぞれ 0.152、0.155 dB/km と海底用 1CF と同等と極めて低く、XT も -50 dB と上述の閾値より低いことを確認した<sup>(12)</sup>。

以上のように、2CF は海底ケーブルに適用可能と考えられ、早期の実用化が期待されている。

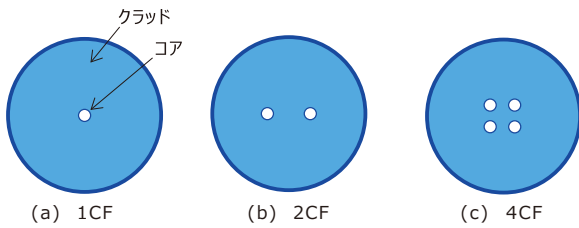


図4 マルチコアファイバの断面模式図

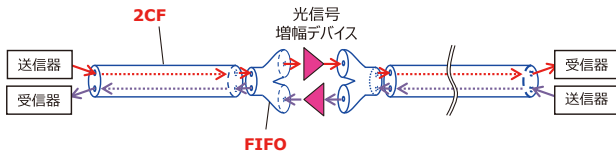


図5 2CFを適用した伝送システムの概略図

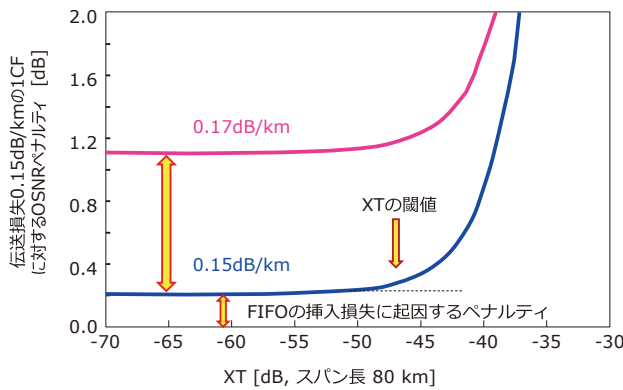


図6 1CFに対する2CFのOSNRペナルティ

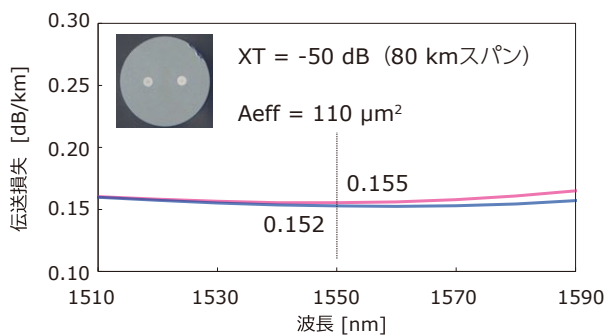


図7 2CFの伝送損失の波長特性

## 5. 結 言

Aeff : 110~130  $\mu\text{m}^2$ 、伝送損失 : 0.15 dB/kmの伝送特性を有する海底光ファイバが、多心海底ケーブルシステムにおける大容量化とトータルコスト低減を両立し、適切であることを示した。さらに、将来技術として外径200

$\mu\text{m}$ の細径ファイバやマルチコアファイバに関して述べ、それぞれ実用化が可能であることを示した。

当社の高い設計、製造技術に基づく海底ファイバによって、数年内のPbit/s級大容量海底ケーブルシステム実現など、グローバルな情報化社会の発展に貢献していく。

## 用語集

### ※1 デジタルコヒーレント技術

光の強度および位相を用いた通信方式であり、受信端で光信号を電気信号に変換し、信号処理を行う。光信号の歪を電気処理によって等価できるため、大容量通信が可能となる。

### ※2 実効断面積 (Aeff)

光ファイバ中を伝搬する光パワー分布の広がりを表す指標。Aeffが大きいほど伝搬光のパワー密度が低減し、非線形効果を抑制することができる。

・ Z Fiber、Z-PLUS Fiber、PureAdvanceは住友電気工業(株)の登録商標です。

## 参考文献

- (1) W. Nielsen et al., Industry Report, Issue 11, Submarine Telecoms Forum, Inc (2022)
- (2) S. Grubb, "The future of fiber optic innovation: Part IV," Light reading Dec/8 (2021)
- (3) C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," Bell Syst. Tech. J. Vol.27, Issue3, pp. 379-423 (1948)
- (4) J. X. Cai et al., "70.4Tb/s Capacity over 7,600 km in C+L Band Using Coded Modulation with Hybrid Constellation Shaping and Nonlinearity Compensation," OFC 2017, Th5B.2 (2017)
- (5) 長谷川健美、田村欣章、佐久間洋宇、川口雄揮、山本義典、小谷野裕史、「世界初0.14dB/kmの極低損失光ファイバ」、SEIテクニカルレビュー第192号、pp. 14-19 (2018)
- (6) <https://global-sei.com/ftx/optical-fibers/z-fiber/>
- (7) T. Hasegawa et al., "Optimal Fiber Design for Large Capacity Long Haul Coherent Transmission," Optics Express, Vol.25, No.2, pp.706-712 (2017)
- (8) "NEC qualifies 24 fiber pair subsea telecom cable system," NEC corporation, Mar. 19, 2021 ([https://www.nec.com/en/press/202103/global\\_20210319\\_04.html](https://www.nec.com/en/press/202103/global_20210319_04.html))
- (9) K. Balemarthy et al., "Optimum Fiber Properties and Pair Counts for Submarine Space Division Multiplexing," Suboptic2019, OP18-2 (2019)
- (10) 佐藤文昭、鈴木洋平、高見正和、西川二郎、武田健太郎、「間欠テープ心線を用いた空気圧送用高密度マイクロダクト光ケーブル」、SEIテクニカルレビュー第195号、pp.13-17 (2019)
- (11) International standard IEC 60793-2-50 (Dec. 2018)
- (12) M. Hirano, "Subsea MCF Advances," ECOC2022, Tu4B (2022)

執 筆 者

山口 秀樹\* : 光通信事業部 主席



川口 雄揮 : 光通信研究所 主席  
情報科学博士  
2015年度 櫻井健次郎氏記念賞受賞



平野 正晃 : 光通信事業部 グループ長  
2015年度 櫻井健次郎氏記念賞受賞



\*主執筆者