



# 世界初0.14dB/kmの極低損失光ファイバ

World's First 0.14 dB/km Ultra-low Loss Optical Fiber

長谷川 健美\*  
Takemi Hasegawa

田村 欣章  
Yoshiaki Tamura

佐久間 洋宇  
Hiroataka Sakuma

川口 雄揮  
Yuki Kawaguchi

山本 義典  
Yoshinori Yamamoto

小谷野 裕史  
Yasushi Koyano

低い伝送損失を実現する純シリカコアファイバを当社は1980年代から製品化し、伝送損失と非線形性を継続的に低減することで海底光ケーブル網の発展に貢献してきた。さらに、純シリカコアの密度ゆらぎを低減することで、伝送損失が0.14 dB/kmと極めて低い光ファイバを世界で初めて実現した。

We have been producing pure-silica core fibers that enable low-loss transmission since as early as 1980s, contributing to the development of submarine optical cable networks through continuous reduction in transmission loss and nonlinearity of fiber. We have succeeded in further reducing the density fluctuation of a pure-silica core and developed an optical fiber with a transmission loss of 0.14 dB/km.

キーワード：光ファイバ、純シリカコアファイバ、海底用光ファイバ

## 1. 緒言

光ファイバによる情報通信ネットワークは全世界で拡大しており、現在では毎年4億km以上の光ファイバが全世界で生産されている。光ファイバの本質的機能は光を遠方へ伝達させることであるが、そのためには、距離当たりの光の減衰を表す伝送損失が低いことと、伝送できる光パワーを制限する非線形性が低いことが重要である。さらに、ケーブル内でのマイクロバンドや、中継器等における曲げや異種ファイバとの接続による損失も低い必要がある。

本稿では、当社が究極の低損失光ファイバとして他社に先駆けて実用化したZ-Fiber、その低損失性と低非線形性を継続的に改善して到達した、最高性能のZ-PLUS Fiber 150、さらに、世界で最も低い0.14 dB/kmの極低損失光ファイバ、の一連の成果をレビューする。

## 2. 純シリカコアファイバの歴史

### 2-1 Z-Fiber

不純物を含まない石英ガラス ( $\text{SiO}_2$ ) で低損失の光ファイバを実現しうることをKaoが1966年に提唱し<sup>(1)</sup>、その後の技術開発によりKeckらが17 dB/kmを1970年に<sup>(2),(3)</sup>、Miyaらが0.20 dB/kmを1979年に<sup>(4)</sup> 実証したことで、光ファイバによる通信網の可能性が拓かれた。これら初期の光ファイバは、光を導波するために中心のコアに  $\text{TiO}_2$  や  $\text{GeO}_2$  を添加して屈折率を高め、その周囲のクラッドに石英ガラスを用いていた<sup>(3),(4)</sup> (図1)。しかし、光ファイバの本質的機能である光伝達の観点では、純粋な石英ガラスをコアとし、クラッドの石英ガラスにF (フッ素)などを添加して屈折率を下げた純シリカコアファイバ (Pure Silica-

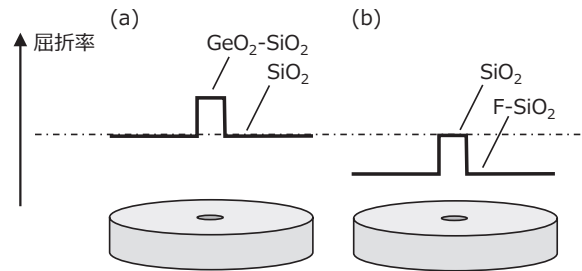


図1 標準的な光ファイバ (a) と純シリカコアファイバ (b) の模式図

Core Fiber : PSCF) の方が、伝送損失が下がると当社は考えた。

この発想に基づき、当社の白石らは1972年にPSCF構造の特許を出願し、国内では1980年、米国では1978年に特許権を得た<sup>(5),(6)</sup>。金属などの不純物を除去する事で伝送損失を低減していた黎明期に、根本的に損失の低い構造を検討し始めたことは、特筆に値する。

コアに  $\text{GeO}_2$  が添加された標準的な光ファイバに比べて、PSCFは伝送損失が0.154 dB/kmと低く、水素や放射線による損失増も大幅に小さいことを、当社の金森らが1986年に報告した<sup>(7)~(9)</sup>。これらの長所は、PSCFが海底光ケーブルに最適であることを意味した。海底光ケーブルは距離が長く、永く使用され、破損時にはケーブル内の金属と水が反応して水素ガスが生じるためである。当社は、0.17 dB/kmの低損失を有するPSCFを他社に先駆けて量産し、伝送損失が低い「究極の光ファイバ」という思いを込め、「Z-Fiber」の商標で1988年に製品化した。

## 2-2 Z-PLUS Fiber

海底用の光ファイバでは、低い伝送損失に加えて低い非線形性も求められる。それにより、高いパワーの信号を送送することができ、より遠方まで信号が到達する。低い非線形性は、非線形性が低い材料をコアに用い、コアの面積を拡大してパワー密度を下げることで実現されるが、前者はコアの非線形屈折率<sup>\*1</sup>  $n_2$ が低いこと、後者は実効コア面積<sup>\*2</sup>  $A_{\text{eff}}$  (Effective core area) が大きいことにそれぞれ相当する。GeO<sub>2</sub>は $n_2$ を高める効果を持つため、これをコアに含まないPSCFは $n_2$ の点でも標準的な光ファイバに比べて優れる。一方、 $A_{\text{eff}}$ に関しては、コアの物理的面积を拡大すると、低い曲げ損失を維持したまま $A_{\text{eff}}$ を拡大できるが、同時に高次の導波モードが発生して雑音となりうる。そこで当社の加藤らは、クラッド構造をマッチド型からディプレスト型に変更し(図2)、高次モードを遮断して $A_{\text{eff}}$ を従来の80  $\mu\text{m}^2$ から110  $\mu\text{m}^2$ に拡大できることを1999年に提唱した<sup>(10)</sup>。当社は $A_{\text{eff}}$ を110  $\mu\text{m}^2$ に拡大したPSCFをZ-PLUS Fiber (Z+)として製品化した。当社の永山らは、この構造を用いて0.1484 dB/kmの低損失が究極的に可能であることを2002年に実証した<sup>(11)</sup>。

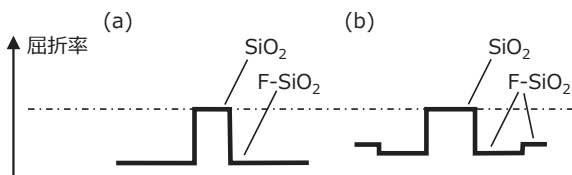


図2 マッチド型 (a) とディプレスト型 (b) の模式図

## 2-3 Z-PLUS Fiber 130

実効コア面積 $A_{\text{eff}}$ を更に拡大するためには、光ファイバがケーブル化されて敷設される際に生じる微小な曲がり(マイクロバンド)による損失を抑えることが課題であった。そこで、光ファイバのガラスを被覆する樹脂層の柔軟性を高めて、ガラスに生じるマイクロバンドを抑えることで、 $A_{\text{eff}}$ を130  $\mu\text{m}^2$ まで拡大できることを当社の山本らが2010年に示した<sup>(12),(13)</sup>。しかし、このように $A_{\text{eff}}$ が標準シングルモードファイバ(Standard Single-Mode Fiber: SSMF)の80  $\mu\text{m}^2$ に比べて大幅に大きくなると、SSMFとの間での融着接続損失が大きくなる問題が生じうる。この問題に対しては、コアの屈折率分布をリング型(図3)とすることで接続損失を低減できることを、当社の平野らが2012年に実証した<sup>(14)</sup>。接続損失は、光パワーの広がり幅の指標であるモードフィールド径<sup>\*3</sup>(Mode-Field Diameter: MFD)の不連続性によって生じるが、リング型のコアでは小さなMFDで大きな $A_{\text{eff}}$ を実現できるため、SSMFとの

間でのMFDの不連続性が小さい。当社の平野らは2013年にリング型コアを持つPSCFで0.148 dB/kmの低損失を実現した<sup>(15),(16)</sup>。このPSCFは損失0.154 dB/kmのZ-PLUS Fiber 130 (Z+130)として量産された。これらの一連の開発成果が海底光ケーブル網の発展に大きく貢献したことで、当社は2015年に一般財団法人光産業技術振興協会より櫻井健二郎氏記念賞を授与された。

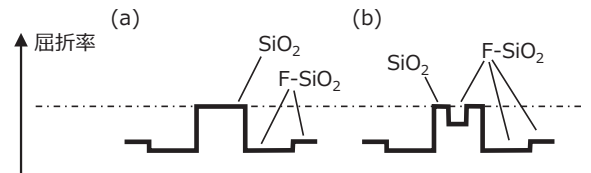


図3 ステップ型コア (a) とリングコア (b) の模式図

## 2-4 Z-PLUS Fiber 150

海底光中継器が高出力化するに従い、より大きな $A_{\text{eff}}$ が必要となる。そこで当社は、被覆の柔軟性を更に高めてマイクロバンド損失を抑制し、 $A_{\text{eff}}$ を150  $\mu\text{m}^2$ まで拡大したZ-PLUS Fiber 150 (Z+150)を2017年に製品化した<sup>(17)</sup>。Z+150は大きな $A_{\text{eff}}$ に加えて0.152 dB/kmの低損失を有する。当社はZ+150を50,000 km以上量産し、伝送損失の標準偏差が0.003 dB/kmと安定していることを実証した(図4)。

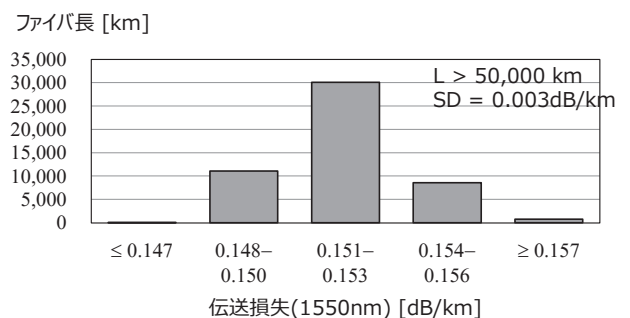


図4 Z+150ファイバの伝送損失の分布

本節で紹介した一連の製品を表1にまとめる。Z+150およびZ+130は低い損失および大きい $A_{\text{eff}}$ の点で最も優れた性能を有し、主に大洋横断級の長距離伝送で用いられるが、コアの面積が小さいZ+、Zは生産性がより高く価格が抑えられることから、中距離や地域系の海底伝送に用いられる。

表1 純シリカコアファイバの種類と用途

|                                      | Z     | Z+    | Z+130 | Z+150 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 伝送損失 [dB/km]                         | 0.171 | 0.154 | 0.152 | 0.152 |
| $A_{\text{eff}}$ [ $\mu\text{m}^2$ ] | 78    | 112   | 130   | 150   |
| 用途                                   | 短～中距離 |       | 長距離   |       |

### 3. 世界新記録の極低損失ファイバ

#### 3-1 極低損失ファイバの特性

不純物を含まない石英ガラス ( $\text{SiO}_2$ ) でコアが構成されるPSCFでは、 $\text{SiO}_2$ の密度ゆらぎによる光散乱が伝送損失の主要因となる。石英 ( $\text{SiO}_2$ ) の結晶ではSi原子とO原子が規則的に配列しているのに対し、石英ガラスでは図5に模式的に示すようにSi原子とO原子が不規則的に配列している。6個のSi原子からなる6員環が基本構造であるが、不規則性が高まると3員環や4員環が増え、密度ゆらぎの原因となる。このような不規則性の起源は熱的振動であり、光ファイバを線引する際の約2000 °Cの高温によって不規則性が生じ、線引される光ファイバが急速に冷却されることによって不規則性が凍結される。冷却途中のガラスでは、原子配列がより規則的になろうとする構造緩和が起こるので、この構造緩和を促進すると、密度ゆらぎが少なく、それによる散乱損失が低い光ファイバが得られる。

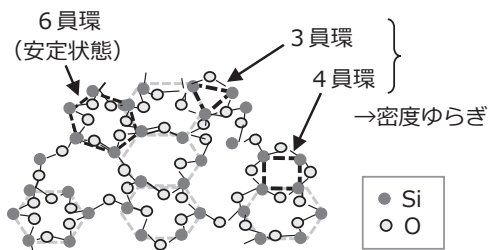


図5 ガラス構造の不規則性の模式図

我々は、PSCFの純シリカガラスコアに微量のフッ素 (F) を添加した光ファイバを用いて、密度ゆらぎを低減した。その結果、伝送損失が最も低い波長1560 nmにおいて0.1419 dB/km、代表的な通信波長である1550 nmにおいて0.1424 dB/kmの極低損失を実現した (図6) (18)。これらの値は、従来の世界記録(19)よりも0.004 dB/km低い、新たな世界記録であるとともに、小数第2位までに丸めた値で0.14 dB/kmとなる、初めての光ファイバでもある。また、実効コア面積  $A_{\text{eff}}$  も147  $\mu\text{m}^2$ であり、前述のZ+150ファイバと同等の低い非線形性をも有する。

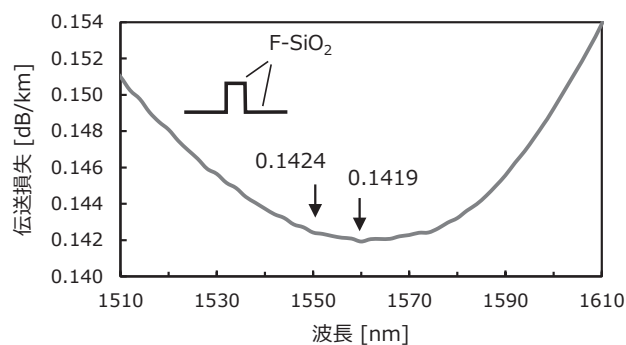


図6 極低損失ファイバの損失波長特性と構造

極低損失光ファイバは、海底光ケーブルの中継器数を削減する利益をもたらす。現在の最先端であるFASTER太平洋横断光ケーブルでは、1波長当たり150 Gbit/sの大容量伝送が行われているが(20)、この容量で10,000 kmを伝送する場合、本成果の極低損失光ファイバは、それ以前の世界記録の光ファイバに比べて、中継器の数を7%を削減できることが、Figure-Of-Merit (FOM) 理論(21)~(23)に基づく計算により見積もられる (図7)。中継器数を削減すると、コストと消費電力を抑制できるが、大容量の海底光ケーブルでは供給可能な電力によって最大容量が制限される(24)~(26)ので、消費電力を削減した分で、ケーブル中の光ファイバ芯数を増やし、ケーブルの伝送容量を拡大することができる。

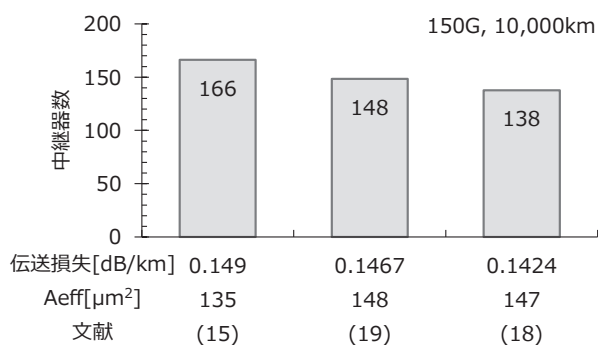


図7 極低損失ファイバによる中継器数低減効果

#### 3-2 密度ゆらぎの低減

我々は、0.14 dB/kmの極低損失を実現できた要因が密度ゆらぎの低減であることを確かめるために、ラマン分光による仮想温度測定を行なった。ラマン分光測定では、光ファイバのコアの端面に波長532 nmのレーザー光を集光し、発生したラマン散乱光の周波数スペクトルを測定する。ラ

マンスペクトルは、石英ガラスに固有のSi-O-Si変角振動に起因する幅広い $\omega 3$ ピークを $800\text{ cm}^{-1}$ に、密度ゆらぎの原因となる3員環の伸縮振動に起因する狭いD2ピークを $605\text{ cm}^{-1}$ に有するので、D2/ $\omega 3$ のピーク面積比を算出することで、密度ゆらぎの程度を定量化できる。密度ゆらぎの程度は、平衡状態で同程度の密度ゆらぎを持つSiO<sub>2</sub>融液の温度として定義される仮想温度によって表すことができる。従って、既知の仮想温度を持つ石英ガラスサンプルで上記のD2/ $\omega 3$ 比を測っておけば、新たに測定されたD2/ $\omega 3$ 比から仮想温度を求めることができる。

このようにして仮想温度を測定した結果、図8に示すように、仮想温度が $100^\circ\text{C}$ 下がるごとに伝送損失が $0.006\text{ dB/km}$ 下がる傾向を確認した。本報告の極低損失ファイバは、これと同じ傾向線上にあることから、仮想温度が表す密度ゆらぎの低減によって極低損失が実現されたことがわかった。

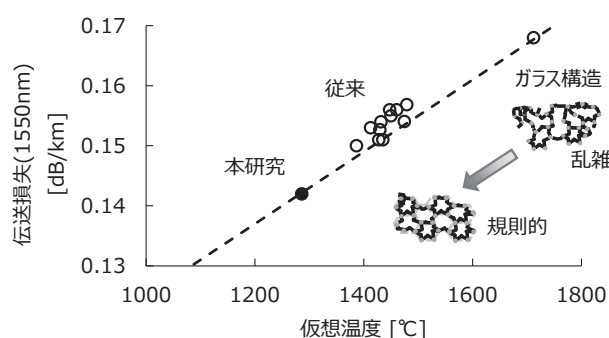


図8 伝送損失と仮想温度の関係

#### 4. 今後の展望

純シリカコアファイバ (PSCF) の伝送損失は、30年以上に渡って着実に低減されてきたが、本成果の極低損失ファイバにおける2年で $0.004\text{ dB/km}$ の低減は、PSCFの歴史の中でも特に急速な低減である (図9)。近年では、海底ケー

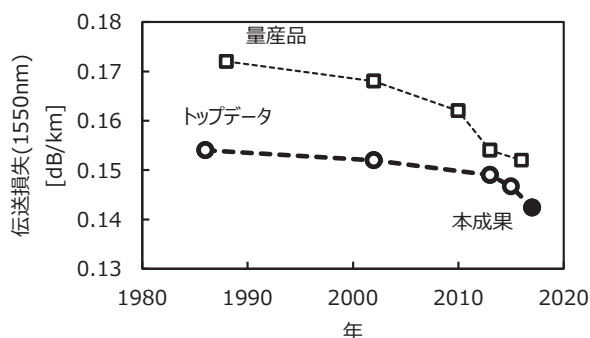


図9 伝送損失低減の歴史

ブルや陸上の長距離ケーブルでPSCFが大量に用いられるようになったことで、量産製品の伝送損失も急速に改善されていることから、現在のトップデータ級の伝送損失も近い将来に量産製品で得られるようになると期待される。

一方で、大洋横断級の海底ケーブルでは、光ファイバの伝送損失で失われた光パワーを回復させるための電力が伝送容量の制約要因となっている。電力効率を改善するためには、ケーブル中のファイバの芯数を増やして1芯当たりの光パワーを抑えることが有効であることが示されている<sup>(25)</sup> ため、芯数を増やした多芯ケーブルや、複数のコアを有するマルチコアファイバによる大容量化が進むと予想される。その場合においても、光ファイバの低損失化は電力効率を根本的に改善するので益々重要になると予想される。我々は、マルチコアファイバにおいても最も低い $0.158\text{ dB/km}$ の伝送損失を実現する<sup>(27)</sup> など低損失化を進めており、今後も技術開発を進めて将来の大容量システムの実現に貢献したい。

#### 5. 結 言

低い伝送損失を実現する純シリカコアファイバの開発に当社はいち早く取り組み、海底光ケーブル網の発展に貢献してきた。更に、純シリカコアの密度ゆらぎを低減することで、世界で初めて、伝送損失が $0.14\text{ dB/km}$ と極めて低い光ファイバを実現した。

#### 用語集

##### ※1 非線形屈折率

媒質の屈折率が光のパワー密度によって微小に変化する際の、パワー密度に対する屈折率変化の係数。

##### ※2 実効コア面積

光ファイバ中では光のパワー密度はコアの中心で最も高く、外周に向かって緩やかに減少する分布を持つが、同じ合計パワーが、等価な非線形性を有するように一定の密度で分布した場合の分布の面積。

##### ※3 モードフィールド径

光ファイバ中での光のパワー分布の広がりの直径。

・Z-Fiber、Z-PLUS Fiberは、住友電気工業㈱の登録商標です。



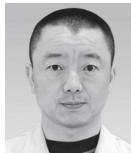
参考文献

- (1) K. C. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," *Proc. IEE*, vol. 113, no. 7, pp. 1151-1158 (1966)
- (2) F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, no. 10, pp. 423-425 (1970)
- (3) D. Keck, "A future full of light," *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1254-1258 (2000)
- (4) T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyashita, "Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55  $\mu\text{m}$ ," *Electron. Lett.*, vol. 15, no. 4, pp. 106-108 (1979)
- (5) 白石敏、藤原国生、黒崎四郎、「光伝送路及びその製法」、特許公報 昭55-15682号 (1980)
- (6) S. Shiraishi, K. Fujiwara, and S. Kurosaki, "An optical transmission fiber containing fluorine," *USP* 4,082,420 (1978)
- (7) H. Yokota, H. Kanamori, Y. Ishiguro, G. Tanaka, S. Tanaka, H. Takada, M. Watanabe, S. Suzuki, K. Yano, M. Hoshikawa, and H. Shimba, "Ultra-low-loss pure-silica-core single-mode fiber and transmission experiment," *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* 1986, PD3-1 (1986)
- (8) S. Tanaka, G. Tanaka, H. Yokota, H. Kanamori, T. Kakii, S. Ito, and S. Suzuki, "Pure silica core matched cladding singlemode fiber for submarine cable," *Proc. SubOptic* 1986, pp. 137-142 (1986)
- (9) H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshida, T. Kakii, S. Itoh, Y. Asano, and S. Tanaka, "Transmission characteristics and reliability of pure-silica-core single-mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 4, no. 8, pp. 1144-1150 (1986)
- (10) T. Kato, M. Hirano, M. Onishi and M. Nishimura, "Ultra-low nonlinearity low-loss pure silica core fibre for long-haul WDM transmission," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 19, pp. 1615-1617 (1999)
- (11) K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, T. Saitoh and Y. Chigusa, "Ultra-low-loss (0.1 484 dB/km) pure silica core fibre and extension of transmission distance," *Electron. Lett.* vol. 38, no. 20, pp. 1168-1169 (2002)
- (12) Y. Yamamoto, M. Hirano, K. Kuwahara and T. Sasaki, "OSNR-enhancing pure-silica-core fiber with large effective area and low attenuation," *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* 2010, OTu2 (2010)
- (13) 山本義典、平野正晃、佐々木隆、「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)
- (14) M. Hirano, Y. Yamamoto, Y. Tamura, T. Haruna and T. Sasaki, "Aeff-enlarged pure-silica-core fiber having ring-core profile," *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* 2012, OTh4I.2 (2012)
- (15) M. Hirano, T. Haruna, Y. Tamura, T. Kawano, S. Ohnuki, Y. Yamamoto, Y. Koyano, and T. Sasaki, "Record low loss, record high FOM optical fiber with manufacturable process," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* 2013, PDP5A.7 (2013)
- (16) 川口雄揮、田村欣章、春名徹也、山本義典、平野正晃、「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)
- (17) 森田圭省、山本義典、長谷川健美、本間祐也、相馬一之、藤井隆志、「海底ケーブル向け極低損失コア拡大光ファイバ」、SEIテクニカルレビュー第191号、pp. 11-15 (2017)
- (18) Y. Tamura, H. Sakuma, K. Morita, M. Suzuki, Y. Yamamoto, K. Shimada, Y. Honma, K. Sohma, T. Fujii and T. Hasegawa, "Lowest-ever 0.1419-dB/km loss optical fiber," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* 2017, Th5D.1 (2017)
- (19) S. Makovejs, C. C. Roberts, F. Palacios, H. B. Matthews, D. A. Lewis, D. T. Smith, P. G. Diehl, J. J. Johnson, J. D. Patterson, C. R. Towery, S. Y. Ten, "Record-low (0.1460 dB/km) attenuation ultra-large Aeff optical fiber for submarine applications," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* 2015, Th5A.2 (2015)
- (20) V. Kamalov, L. Jovanovski, V. Vusirikala, E. Mateo, Y. Inada, T. Ogata, K. Yoneyama, P. Pecci, D. Seguela, O. Rocher, H. Takahashi, "FASTER Open Submarine Cable," in *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.* 2017, Th2E.5 (2017)
- (21) M. Hirano, Y. Yamamoto, V. A. J. M. Sleiffer, and T. Sasaki, "Analytical OSNR formulation validated with 100G-WDM experiments and optimal subsea fiber proposal," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* 2013, OTu2B.6 (2013)
- (22) V. Curri, A. Carena, G. Bosco, P. Poggiolini, M. Hirano, Y. Yamamoto, F. Forghieri, "Fiber figure of merit based on maximum reach," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* 2013, OTh3G.2 (2013)
- (23) T. Hasegawa, Y. Yamamoto, and M. Hirano, "Optimal fiber design for large capacity long haul coherent transmission," *Opt. Exp.*, vol. 25, no. 2, pp. 706-712 (2017)
- (24) T. Frisch and S. Desbruslais, "Electrical power, a potential limit to cable capacity," in *Proc. SubOptic* 2013, TU1C-04 (2013)
- (25) E. Mateo, Y. Inada, T. Ogata, S. Mikami, V. Kamalov, V. Vusirikala, "Capacity limits of submarine cables," in *Proc. SubOptic* 2016, TH1A-1 (2016)
- (26) O. V. Sinkin, A. V. Turukhin, W. W. Patterson, M. A. Bolshtyansky, D. G. Foursa, and A. N. Pilipetskii, "Maximum optical power efficiency in SDM based optical communication systems," *Photon. Tech. Lett.*, vol. 29, no. 13, pp. 1075-1077 (2017)
- (27) T. Hayashi, Y. Tamura, T. Hasegawa, and T. Taru, "Record-low spatial mode dispersion and ultra-low loss coupled multi-core fiber for ultra-long-haul transmission," *J. Lightwave Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 450-457 (2017)

執筆者

---

長谷川健美\* : 光通信研究所 グループ長



田村 欣章 : 光通信研究所 主査  
2015年度 櫻井健二郎氏記念賞受賞



佐久間洋宇 : 光通信研究所  
博士 (工学)



川口 雄揮 : 光通信研究所  
情報科学博士  
2015年度 櫻井健二郎氏記念賞受賞



山本 義典 : 光通信研究所 主席  
2015年度 櫻井健二郎氏記念賞受賞



小谷野裕史 : 光通信事業部 主幹



---

\*主執筆者