

石英光ファイバーの低損失化と広帯域化の動向

笹 岡 英 資

Trend of Low Loss and Wideband Silica Based Optical Fibers

Eisuke SASAOKA

The introduction of digital coherent detection and multi level modulation into optical fiber communication systems changes requirements and priority for optical fiber characteristics. After reviewing these changes, two meanings of “wide band” in optical fibers, which are high bit rate and wide wavelength band, are discussed and inseparable relation between “wide band” and “low loss” in optical fibers is shown. Finally, trends of low loss optical fibers are described for three aspects, which are historical transition, consistency with productivity and suppression of loss increase due to cabling.

Key words: optical fiber, low loss, wide band

インターネットトラフィックは1年で1.2~1.4倍の増加といわれており、これに代表される光ファイバー通信のトラフィック増に光ファイバー自体の改良で対処することを考えた場合、低損失化・広帯域化は昔ながらのアプローチといえる。しかしながら、光ファイバー通信技術の進展に伴い、光ファイバーの低損失化・広帯域化の与えるインパクトは変化してきていると考えられる。本稿では、この変化を俯瞰した上で、光ファイバー通信における広帯域化の2つの意味である高ビットレート化と広波長帯域化について検討し、これら2つが低損失化と深い繋がりがあることを示す。その後、光ファイバーの低損失化の動向・課題について記す。

1. 光ファイバー通信技術の進展

図1に、光ファイバー通信関連の二大国際学会であるOFCおよびECOCにおいて発表された、その時点で最高の伝送性能実現を狙ったいわゆるヒーロー実験の結果を示す。横軸には伝送距離、縦軸には波長多重伝送時の究極的な伝送容量の指標となる周波数利用効率（周波数幅1 Hzあたりのビットレート）を示した。図1 (a) に示した2002年から (b) に示した2008年の7年間で、同一伝送距離における周波数利用効率はおおむね1桁の改善がみられてお

り、究極的には約10倍の伝送容量増が実現されていることを意味する。

このような大幅な伝送性能の改善には、近年研究開発が活発なデジタルコヒーレント受信が大きく寄与している。コヒーレント受信自体は以前から研究開発が行われており、光信号の振幅とともに位相情報も活用可能となるため、無線通信等で実用化されている多値変調による伝送容量増、あるいは、局発光パワーを増大させることによる受信感度の改善が図られ、伝送距離の伸長が期待できる。一方で、信号光と局発光の位相および偏波同期が必要であり、これらを光学的に行うことは困難と考えられてきた。近年、位相や偏波の補正を光-電気変換後のデジタル信号処理で実施する方法が提案され、実用化の機運が高まっている。さらに、デジタル信号処理を活用することで、光ファイバー中の波長分散・偏波モード分散による信号波形歪みを補正する技術も実現されている。

このような変化に伴い、ヒーロー実験に使用される光ファイバーの種類も変化している。2002年にはノン零分散シフトファイバー (NZ-DSF)、分散マネジメントファイバー (DMF) が主流であったのに対して、2008年にはシングルモードファイバー (SMF、本稿では波長分散特性を積極的に変化させていない光ファイバー全般をSMFと総

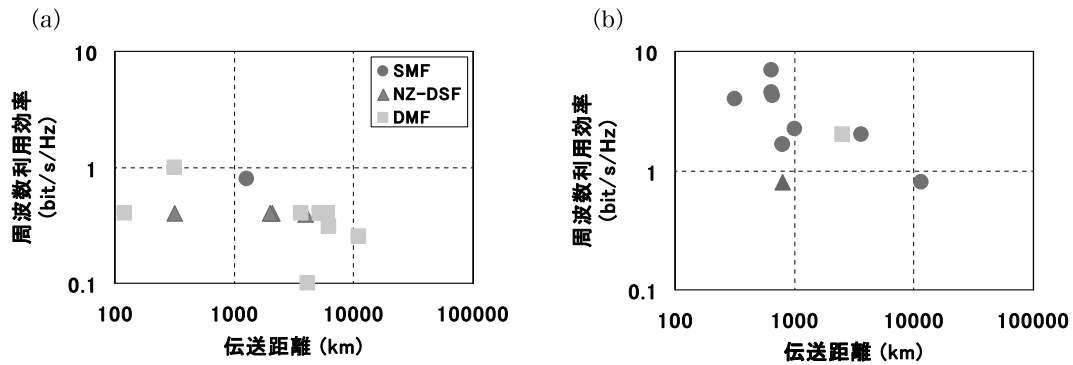


図1 光ファイバー通信国際学会 (OFC & ECOC) でのヒーロー実験結果. (a) 2002年, (b) 2008年.

称した) 主流へ推移している. この光ファイバー種類の推移の理由を明らかにするため, デジタルコヒーレント受信における伝送性能と光ファイバー特性の関係について検討してみる.

光ファイバーの波長分散や偏波モード分散はデジタルコヒーレント受信で補償可能であるため, 光ファイバーの特性としては, 伝送損失と非線形性に着目する. 光ファイバーの伝送損失および非線形性と伝送性能を結びつけるパラメータとして, 受信端での光信号対雑音比 (OSNR) が挙げられる. 光増幅中継システムにおける受信端での OSNR は波長 1550 nm において式 (1) で表される¹⁾. ここで, P_{in} は波長チャンネルあたりの光ファイバー入力パワー, NF は光増幅器の雑音指数, L_{sp} はスパン損失, N_{amp} は光増幅器台数である.

$$OSNR (dB) = 58 + P_{in} - NF - L_{sp} \cdot 10 \log N_{amp} \quad (1)$$

光ファイバーの低非線形化により光ファイバー中の非線形性を従来レベルに保ちつつ P_{in} を増大させることが, また, 光ファイバーの低損失化により L_{sp} を低減させることが可能であり, いずれも OSNR の向上に貢献する. これらを定量的に検討するため, 低損失化の指標として 80 km スパンにおける伝送損失低減量を, 低非線形化の指標として 1 スパンにおける自己位相変調による位相シフトの低減量を考える. おおむね同一の伝送方式・伝送装置を使用した伝送実験における 2 つの指標と伝送距離の関係を図 2 に示した²⁻⁴⁾. 図 2 においては分散シフトファイバー (DSF) を基準に, 2 つの指標とも dB 単位で表記しており, これらの合算値である OSNR 改善量と伝送距離の間には明確な相関があることがわかる.

一方, スパン数が一定であれば, 光ファイバーの低損失化・低非線形化は受信端での OSNR 向上につながる. また, 無線通信等で実用化されている多値変調による周波数利用効率の改善を行う場合, 従来と同等の誤り率を維持するためには, 従来以上の受信端での OSNR が要求される.

このため, 光ファイバーの低損失化・低非線形化は, 多値変調による周波数利用効率の向上を可能にする.

以上のように, 受信端における OSNR の改善は伝送距離の伸長 (図 1 の横軸方向の改善) および周波数利用効率の向上 (図 1 の縦軸方向の改善) の両面で重要であり, これに対して, 光ファイバーの低損失化および低非線形化は大きく貢献する. このため, NZ-DSF や DMF よりも屈折率分布構造がシンプルであり, この結果として, 低損失化, および実効断面積 (A_{eff}) の拡大による低非線形化が実現しやすい SMF が, ヒーロー実験で主として使用される光ファイバーになったと考えられる.

2. 2つの広帯域化

光ファイバー通信において「広帯域」という場合, 2通りの意味が考えられる. 1つは伝送容量が大きいという意味であり, もう1つは利用可能な波長 (あるいは周波数) 帯域幅が広いという意味である. 本稿では, 前者の意味での広帯域化を「高ビットレート化」, 後者の意味での広帯域化を「波長帯域幅の拡大」として以下に記載する.

2.1 高ビットレート化

高ビットレート化と波長帯域幅の拡大を独立に扱うためには, 単位波長幅 (あるいは単位周波数幅) あたりのビットレートを考える必要がある. したがって, 本稿における高ビットレート化の指標としては, 図 1 で縦軸とした周波数利用効率が適切と考えられる. 前記した通り, 多値変調による周波数利用効率向上のためには, 受信端での OSNR 向上が重要であり, 光ファイバー特性の観点からは, 低損失化, および実効断面積 (A_{eff}) 拡大等による低非線形化が必要となる.

究極的にはシャノンリミットに迫る OSNR と周波数利用効率の関係が実現可能と想定すると, 周波数利用効率を 1 bit/s/Hz 向上させるには, OSNR を 3~4 dB 向上させる必要がある⁵⁾. 図 2 に示した例を考えると, 伝送損失が

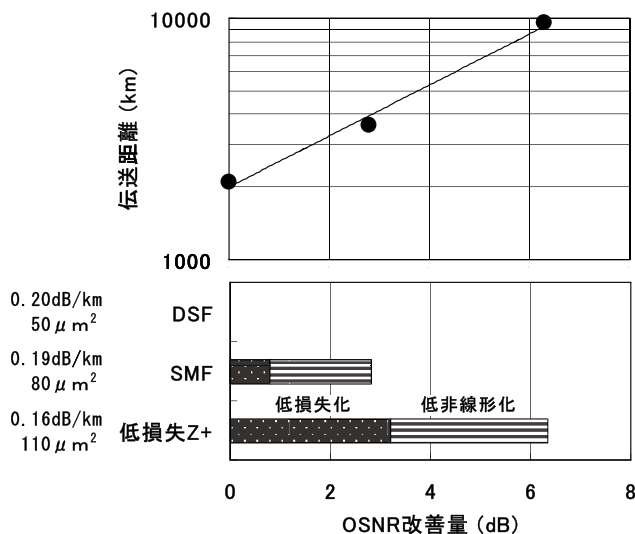


図2 OSNR改善による伝送距離の伸長。

0.20 dB/km, A_{eff} が $50 \mu\text{m}^2$ の DSF から, 伝送損失が 0.16 dB/km, A_{eff} が $110 \mu\text{m}^2$ の低損失 Z+ に光ファイバーを変更することにより, 6 dB 以上の OSNR 向上が可能であり, この結果として, 周波数利用率も 1.5 bit/s/Hz 以上向上できる可能性がある。基準となる伝送方式として, 100 Gbps 伝送用に最有力となっている偏波多重 QPSK による周波数間隔 50 GHz での波長多重伝送を想定すると, 本方式での周波数利用率は 2 bit/s/Hz であるため, 前記の光ファイバー変更により, 2 bit/s/Hz から 3.5 bit/s/Hz 以上へと 2 倍弱の周波数利用率の向上, つまり高ビットレート化が可能となる。

2.2 波長帯域幅の拡大

SMF を使用した光ファイバー通信において, 光ファイバー起因の波長帯域幅制限要因としては以下の 3 点が考えられる。

- (1) シングルモード動作となっているか否か (カットオフ波長の設定)
- (2) 許容伝送損失を満たすか否か
- (3) 許容波長分散を満たすか否か

長距離・大容量の光ファイバー通信を考えた場合, 使用される波長帯域としては, エルビウム添加光ファイバー増幅器 (EDFA) の利用が可能な C バンド (1530~1565 nm), あるいは, L バンド (1565~1625 nm) が主流となる。一方, 一般的な SMF は O バンド (1260~1360 nm) でのシングルモード動作が保証されているため, C バンドから短波長側へ波長帯域を拡大する場合でも, シングルモード動作か否かが波長帯域幅制限の主要因となる可能性は低いと考えられる。

図 3 には各種光ファイバーの典型的な波長分散特性を示

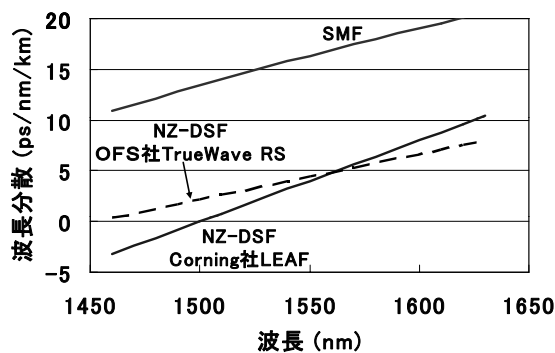


図3 各種光ファイバーの典型的な波長分散特性。

す。SMF は C バンドから L バンドにかけて 15~20 ps/nm/km 程度の波長分散値を有しているが, 前記のデジタルコヒーレント受信による電気信号処理で対処可能な範囲である。また, C バンドから短波長側へ波長帯域を拡大する場合は, 波長分散値は減少するため, 許容波長分散を満たすか否かが波長帯域制限の主要因となる可能性も低いと考えられる。なお, 波長多重伝送を行う場合, 波長分散値がゼロに近づくと光ファイバー中での非線形現象が顕著となり, これが伝送性能の劣化主要因となることが予想される。NZ-DSF において, C バンドから短波長側へ波長帯域を拡大する場合には, この点が波長帯域制限の主要因になると考えられる。

次に, 光ファイバーの本質的な伝送損失要因であるレイリー散乱損失と構造不整損失 (波長無依存成分) に起因する波長帯域制限の可能性について検討する。これら二要因のみを考えた場合, 光ファイバーの伝送損失波長依存性は式 (2) で表される。式 (2) において, $\alpha(\lambda)$ は波長 λ における伝送損失, A はレイリー散乱係数, B は損失の波長無依存成分を表す。

$$\alpha(\lambda)(\text{dB/km}) = A/\lambda^4 + B \quad (2)$$

B の値として典型的な 0.03 dB/km を想定し, 波長 1550 nm での伝送損失がそれぞれ 0.21, 0.19, 0.17, 0.15 dB/km とする A の値について, スパン長 80 km におけるスパン損失の波長依存性を式 (2) から求めた結果を図 4 に示す。

許容可能なスパン損失値は光ファイバー通信システム的设计によって異なるが, 一例として 20 dB まで許容されると想定すると, 図 4 に示した結果から, 波長 1550 nm での伝送損失が 0.21, 0.19, 0.17, 0.15 dB/km の場合には, 伝送損失により制限される波長帯域はそれぞれ 1480 nm 以上, 1440 nm 以上, 1390 nm 以上, 1340 nm 以上と, 伝送損失の値により大きく異なる。このことから, 許容伝送損失を満たすか否かが波長帯域制限の主要因となる可能性が高いと考えられ, 波長帯域幅を拡大するためには, レイ

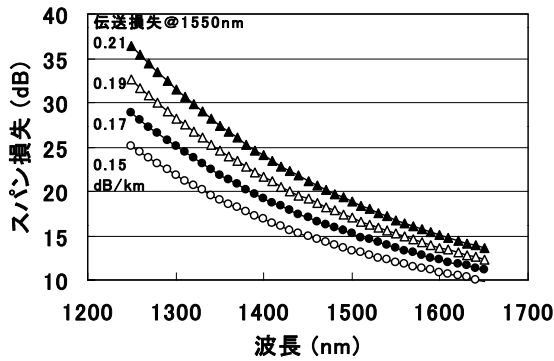


図4 スパン損失の波長依存性計算例.

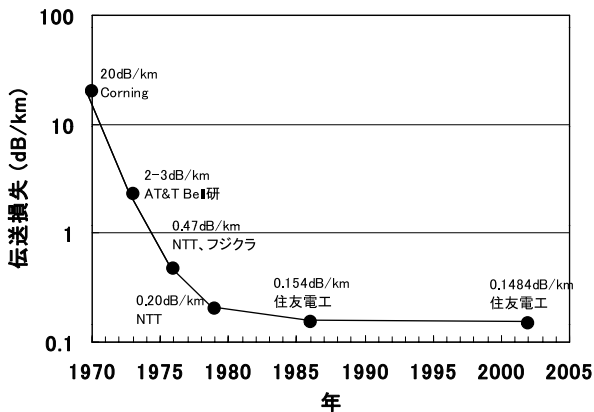


図5 光ファイバー伝送損失低減の経緯.

リー散乱損失を低減させることが有効であることがわかる。

3. 低損失化の動向

前章に記載した通り、光ファイバー通信における広帯域化の2通りの意味である「高ビットレート化」「波長帯域幅の拡大」のいずれについても、光ファイバーの低損失化は重要なポイントとなる。本章では、低損失化の動向を、過去の経緯、生産性との両立、ケーブル化による損失増防止（マクロ/マイクロバンド損失低減）の3点から以下に記載する。

3.1 低損失化の経緯

2009年にノーベル物理学賞を受賞したチャールズ・カオ氏による1966年の論文での低損失光ファイバーの提言、および1970年の米Corning社による伝送損失20 dB/kmの光ファイバーの実証以降、光ファイバー研究開発の主要課題は低損失化であった。先人の努力により、図5に示した通り、光ファイバーの伝送損失は劇的な低減を果たした（図5の縦軸はデシベル表示した伝送損失の対数である点に注意）。当初は光ファイバーを構成する石英ガラス中のOH基および遷移金属イオンによる吸収損失が伝送損失の主要因であったが、光ファイバー製造プロセスの改善

により、OH基および遷移金属イオンの低減が実現され、現在では前章に記載した通り、石英ガラスのレイリー散乱が伝送損失の主要因となっている。レイリー散乱損失は、屈折率分布を形成するための添加物による組成ゆらぎに起因する成分と、石英ガラスの密度ゆらぎに起因する成分に大別できる。前者については、光ファイバー中を伝搬する光パワーの大半が集中するコア部分を純石英ガラスとすることで低減可能であり、図5中の1986年の0.154 dB/km⁶⁾、および2002年の0.1484 dB/km⁷⁾は純石英コア光ファイバーによって実現されている。

3.2 低損失化と生産性の両立

レイリー散乱のもうひとつの要因である石英ガラス密度ゆらぎは、光ファイバーの母材から光ファイバーを線引きする工程において高温から常温へ5000°C/s以上の速度で冷却されるため、高温での密度ゆらぎが大きな状態で凍結されることに起因する。密度ゆらぎを低減するひとつの方法としては、線引き工程における光ファイバーの冷却速度を低下させ、密度ゆらぎが低減された状態で石英ガラスを硬化させることが考えられる。このための具体的な手段としては、低線速線引きや徐冷炉の追加等が考えられるが、生産性低下や設備の大型化といったトレードオフがある。

別法として、P₂O₅、あるいはアルカリ・アルカリ土類元素を微量添加することで、石英ガラスの粘度を下げ、より低温で石英ガラスを硬化させることが考えられる。ただし、添加物や添加量および製造条件等によっては、組成ゆらぎ増大の影響が密度ゆらぎ低減の効果を上回り、逆にレイリー散乱損失を増大させる可能性もあるため、注意が必要である。

3.3 ケーブル化による損失増加の防止

実際の光通信システムにおいては、光ファイバーをケーブル化し敷設する必要がある、この過程で損失が増加する可能性も考えられる。損失増加要因としては、ケーブル化、あるいはケーブル状態で温度変化等の環境変化にさらされた結果、光ファイバーに曲げが加わることが原因で発生するマクロバンド損失およびマイクロバンド損失、あるいは複数のケーブルを接続する際に発生する接続損失が挙げられる。これらに対しては、ケーブル化技術、接続技術の寄与が大きい、光ファイバー設計等の工夫により損失増加を抑制することも可能である。

接続損失に関しては、光ファイバー中の光分布を表すモードフィールド径(MFD)に依存するため、従来から国際標準等で中心値および公差が規定され、原理的な接続損失を一定レベル以下に抑える処置がなされている。

マクロ/マイクロバンド損失とも MFD を小さくすることで低減可能であるが、これは前記の接続損失低減に反するため、MFD は一定値以上に保ったまま、マクロ/マイクロバンド損失を低減させる工夫が必要となる。マクロバンド損失に対しては、曲げにより光ファイバー中の光分布が変化しにくくすることが有効であり、コア近傍のクラッド部分の一部にクラッド部分より屈折率の低い石英ガラス⁸⁾あるいは空孔を使用することにより局所的に屈折率を低下させて光分布の変化を抑制した光ファイバーが実用化されている。ただし、これらの手段でマクロバンド損失を低減させる場合には、屈折率を低下させる材料そのもの、あるいは屈折率が急激変化する界面が損失増加要因にもなりうるため、屈折率分布設計、屈折率を低下させる材料、光ファイバーの製造プロセスには十分配慮が必要である。一方、マイクロバンド損失に対しては、光ファイバーに外力が加わっても石英ガラス部分には微小曲げが発生しにくくすることが有効であり、石英ガラス外周の被覆設計を工夫して微小曲げを抑制した光ファイバー⁹⁾が実用化されている。

文 献

- 1) I. Kaminow, T. Li and A. E. Willner: *Optical Fiber Telecommunications V B: Systems and Networks* (Elsevier, Burlington, 2008) pp.65-68.
- 2) 山崎悦史, 山田英一, 佐野明秀, 増田浩次, 小林孝行, 吉松俊英, 吉田英二, 宮本 裕, 石原浩一, 工藤理一: “111 Gb/s/ch \times 10 ch CO-OFDM の 50 GHz 間隔 2,100 km DSF 伝送”, 電子情報通信学会 2009 総合大会講演論文集, B-10-47 (2009) 366.
- 3) 佐野明秀, 山田英一, 増田浩次, 山崎悦史, 小林孝行, 吉田英二, 宮本 裕, 松岡伸治, 工藤理一, 石原浩一: “ガードインターバルを用いない偏波多重コヒーレント OFDM による 13.4 Tb/s (134 \times 111 Gb/s) 3,600 km SMF 伝送”, 電子情報通信学会 2009 総合大会講演論文集, B-10-46 (2009) p. 365.
- 4) H. Masuda, E. Yamazaki, A. Sano, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, S. Matsuoka, Y. Takatori, M. Mizoguchi, K. Okada, K. Hagimoto, T. Yamada and S. Kamei: “13.5-Tb/s (135 \times 111-Gb/s/ch) No-Guard-Interval coherent OFDM transmission over 6,248 km using SNR maximized Second-Order DRA in the extended L-band,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, PDPB5 (2009).
- 5) 水落隆司: “長距離・超高速・大容量光通信の現状と将来展望”, 光学, 5 (2009) 226-237.
- 6) H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshida, T. Kakii, S. Itou, Y. Asano and S. Tanaka: “Transmission characteristics and reliability of pure silica core single mode fibres,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, LT-4 (1986) 1144-1150.
- 7) K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, T. Saitoh and Y. Chigusa: “Ultralow-loss (0.1484 dB/km) pure silica core fibre and extension of transmission distance,” *Electron. Lett.*, 38 (2002) 1168-1169.
- 8) 池田真拳, 松尾昌一郎, 姫野邦治: “接続損失低減型低曲げ損失光ファイバ”, 電子情報通信学会 2004 年総合大会講演論文集, B-10-1 (2004) p. 372.
- 9) B. Overton, X. Meersseman and F. Gooijer: “Microbending-resistant fiber,” *Proceedings of the 57th IWCS*, 9.5 (2008).
(2011 年 1 月 5 日受理)