

長距離大容量通信に適した低損失純シリカコアファイバ

住友電気工業(株) 光通信研究所

田村 欣章

Low-loss pure silica core fiber for long haul transmission

Yoshiaki Tamura

Sumitomo Electric Industries

Optical Communications Laboratory

背景

スマートフォンの普及やクラウドネットワークの進展により、インターネットトラフィックは指数関数的に増加を続けている。その為、光通信システムには更なる大容量化が求められており、今日までに1本の光ファイバあたり100 Gb/s×100 chに達する大容量通信が、1万 kmを超える大洋横断の海底通信伝送路に導入されている。このような長距離、大容量の伝送において光ファイバに求められる特性は、高い信号雑音比 (Optical Signal-to-Noise Ratio : OSNR) である。その為、光ファイバには伝送損失および非線形性の低減が求められる。これまでに様々な低損失・低非線形ファイバが提案されてきた^(1,2,3)が、中でもコア部を純シリカとした光ファイバ(純シリカコアファイバ: PSCF)は、添加物による散乱損失を抑えるこ

とができることから、0.150 dB/kmを下回る極低損失が実現されており^(4,5)、長距離大容量通信の光ファイバとして有効である。本稿では、長距離大容量通信に適した極低損失純シリカコアファイバの重要性とそれを実現する技術について概説する。

低損失・低非線形ファイバによる OSNR の改善

図1は光ファイバ伝送路において、送信端から受信端に向けた信号光のパワーの減衰と、低損失化と低非線形化による OSNR の改善の様子を示す。OSNRは、受信端における信号光出力パワーとノイズとの比で表される。低損失化は入力パワーに対する出力パワーを向上させることができ、OSNRの改善に寄与する(図1①)。一方、入力パワーを上げると光カー効果により非線形現象が発生し信号品質が劣化することから、光ファイバの非線形性を低減して入力パワーを上げることも OSNR の改善につながる(図1②)。開発した純シリカコアファイバでは、コア断面積を広くすることで、パワー

〒244-8588 神奈川県横浜市栄区田谷町1

TEL 045-853-7172

FAX 045-851-1565

E-mail: tamura-yoshiaki@sei.co.jp

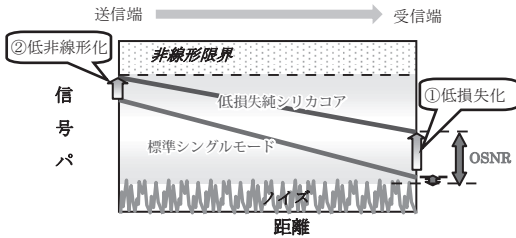


図1 光ファイバの特性と OSNR の改善

密度を下げて低非線形化を達成している。

これら低損失化や低非線形化が伝送性能に与える影響を、解析的に推定するファイバ性能指数 (FOM) が提案されている⁽⁶⁾。これによると、例えば 80 km 間隔で中継器を設置した長距離伝送システムを仮定すると、伝送損失を 0.19 dB/km (標準シングルモードファイバ: SSMF) から 0.15 dB/km (純シリカコアファイバ: PSCF) へとわずか 0.04 dB/km 低減することで、伝送距離を約 1.5 倍に延伸できると予想できる。このように、長距離伝送システムにおいては、光ファイバの低損失化は非常に重要となる。

光ファイバの伝送損失低減技術

光ファイバの伝送損失は図 2 に示すように、①レーリー散乱損失 ②構造不整損失 ③吸収損失に大別される。このうち吸収損失はガラス自体の赤外の吸収に加え、製造工程で混入する遷移金属や水分の不純物による吸収が大きな要因となる。

2009 年にノーベル物理学賞を受賞した C. K. Kao が 1966 年の論文⁽⁷⁾で石英ガラス中の遷移

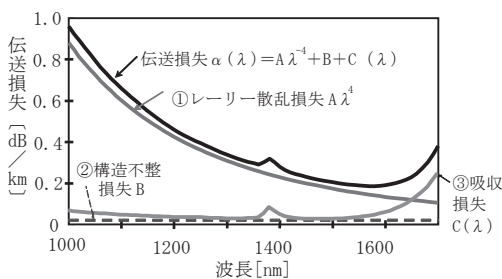


図2 伝送損失の成分

金属不純物を ppm 以下まで除去することにより伝送損失を 20 dB/km 以下に低減できると予想し、その 4 年後に Kapron らによって実際に 20 dB/km が実現された⁽⁸⁾。さらに、1970 年代には低損失化の研究が盛んにおこなわれ 1979 年には NTT の宮らが 0.20 dB/km 以下の低損失を実現したことで、光ファイバの実用化が大きく進展した⁽⁹⁾。

純シリカコア光ファイバによる 0.149 dB/km の実現

上記の草創期の開発により不純物による吸収損失が低減された結果、光ファイバの低損失化には長距離光通信で使用する波長 1.55 μm において損失の 80% を占めるレーリー散乱損失の低減が課題となる。このレーリー散乱損失を低減する光ファイバとして、純シリカコアファイバが商用化されている。

レーリー散乱損失はガラス中の屈折率の揺らぎに由来し、波長の 4 乗に反比例する損失成分である。屈折率揺らぎの発生原因は大きく分けて 2 つあり、1 つはガラス添加物の濃度の不均一による濃度揺らぎ成分で、もう一つはガラス構造の不均一によるガラス分子の密度揺らぎに由来する成分である。光ファイバは、コア部の屈折率をわずかに高くすることで、光を閉じ込めて伝搬するが、SSMF の場合、コアの屈折率を高くする目的で Ge が添加される (図 3 (a))。濃度揺らぎはこの Ge 濃度の不均一によるものである。そこでコアに添加物を含まず、コア外側に F を添加して外側の屈折率低くすることで、コアの屈折率を相対的に高くする構

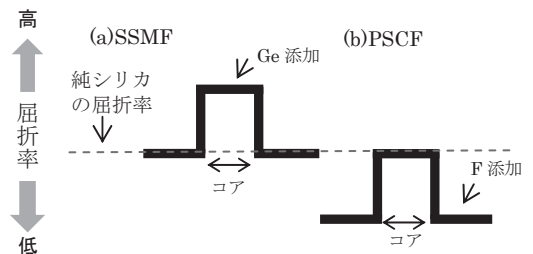


図3 SSMF と PSCF の屈折率構造

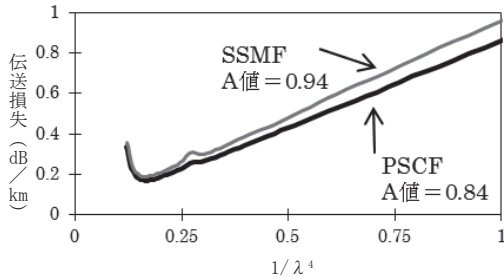


図4 SSMFとPSCFのA値

造のPSCF(図3b)の開発が進められている。図4はSSMFとPSCFの損失波長特性を、波長の4乗分の1に対してプロットした図で、この傾きがレーリー散乱係数(A)となる。図からコア部にGeを添加したSSMFのA値が0.94 dB/km/μm⁻⁴であるのに対してPSCFは0.84 dB/km/μm⁻⁴と低いことが確認できる。

しかしPSCFのA値0.84 dB/km/μm⁻⁴はバルクの純シリカガラスで報告されているA値0.6 dB/km/μm⁻⁴と比較すると高い。これは光ファイバの製法上の原因から、密度揺らぎが発生している為である。光ファイバはその製造過程で加熱加工する際に、ガラスが急冷されてしまい高温の無秩序なガラス構造をある程度維持したまま凍結される。構造が無秩序な状態のガラスはそこにミクロな密度の揺らぎを持っており、この密度揺らぎがレーリー散乱損失要因となる。ガラス構造の不均一性については、ガラスが凍結された温度である仮想温度を使い評価する方法が良く使われる。我々はさまざま条件で製造した光ファイバの仮想温度測定を行い、製造条件を改善することで、A値を0.72 dB/km/μm⁻⁴まで低減することに成功している(図5)。これにより伝送損失がR&Dで0.149 dB/kmを、製品でも平均伝送損失0.154 dB/kmと極低損失な光ファイバを量産化しており、長距離伝送システムに採用されている。

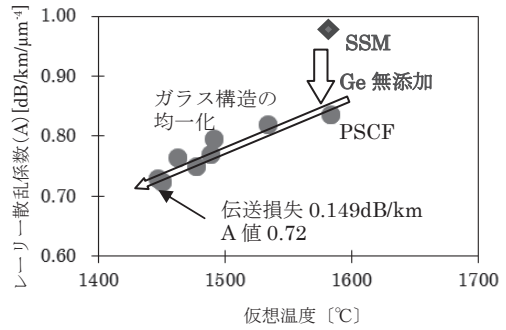


図5 PSCFによる低損失化の実現

おわり

今回、長距離大容量光通信システムを支える伝送損失が低い純シリカコア光ファイバについて説明した。将来の通信容量の増大にむけて、光ファイバには更なる伝送損失の低減が求められる。今後も低損失化の開発が進むとともに、伝送容量を飛躍的に増大する新しい技術が開発されることを期待する。

参考文献

- [1] M. Hirano, Y. Yamamoto, Y. Tamura, T. Haruna, and T. Sasaki, OFC/NFOEC 2012, OTh 4 I. 2, (2012)
- [2] S. Ohnuki, K. Kuwahara, K. Morita, and Y. Koyano, SubOptic 2010, THU3A03, (2010)
- [3] S. Bickham, OFC / NFOEC 2011, OWA 5, (2011)
- [4] M. Hirano, T. Haruna, Y. Tamura, T. Kawano, S. Ohnuki, Y. Yamamoto, Y. Koyano, and T. Sasaki OFC/NFOEC 2013, PDP5A7, (2013)
- [5] S. Mkojevs, C. C. Roberts, F. Palacios, H. B. Matthews, D. A. Lewis, D. T. Smith, OFC 2015, PDP5A2, (2015)
- [6] V. Curri, A. Carena, G. Bosco, P. Poggiolini, M. Hirano, Y. Yamamoto, and F. Forghieri, OFC/NFOEC 2013, OTh3G. 2, (2013)
- [7] K. C. Kao and G. A. Hockham, Proc. IEEE, Vol. 113, No. 7, pp. 1151-1158, (1966)
- [8] F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, Appl. Phys. Lett., Vol. 17, No. 10, pp. 423-425, (1970)
- [9] T. Miya, Electron. Lett., Vol. 12, No. 4 pp. 106-108, (1976)