

A_{eff} 拡大型SMFとSC-DCFを用いた広帯域分散フラット複合線路

光電子技術研究所 松尾 昌一郎*1・愛川 和彦*1・齋藤 学*1
姫野 邦治*2・原田 光一*3

Dispersion-flattened Hybrid Optical Fiber Link with Enlarged-effective-area Single-mode Fiber and SC-DCF

S. Matsuo, K. Aikawa, M. Saito, K. Himeno & K. Harada

A_{eff} 拡大型SMFとSC-DCFを用いた分散スロープ補償型の複合線路について検討を行った。非線形実効断面積 (A_{eff}) を110から125 μm^2 まで大きくした A_{eff} 拡大型SMF, およびこれらの A_{eff} 拡大型ファイバの分散ならびに分散スロープを補償する分散補償ファイバを試作した。試作したファイバを用いた複合線路は, 70 μm^2 を越える等価 A_{eff} を示し, 非線形光学効果の低減に有効であること, C-band, L-bandにわたる一括分散補償が可能であることを確認した。

A dispersion-flattened hybrid optical fiber link with an enlarged-effective-area (A_{eff}) single-mode fiber and a slope compensating and dispersion compensation fiber (SC-DCF) is presented. The enlarged-effective-area of the single-mode fibers in front ranges from 110 to 125 μm^2 , and the SC-DCF is concatenated on the back to almost fully compensate the dispersion and its slope of the single-mode fiber. The hybrid link shows an equivalent A_{eff} of about 70 μm^2 , which is effective for suppression of nonlinear effects. This hybrid link also shows a small residual dispersion over both C-band and L-band.

1. ま え が き

近年, 波長多重通信システムの発展により, 光通信システムの伝送容量は飛躍的に拡大した。この波長多重通信システムの発展の中で, 非線形性の抑制と波長分散の制御が光ファイバに対する主要な課題となり, 種々のファイバが開発されてきた。例えば, 波長多重通信向けのファイバとして, 非線形実効断面積 (Effective Area, A_{eff}) の拡大あるいは分散スロープの低減を狙って, 数種類のNon-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZ-DSF) が開発され, 陸上幹線系を中心に導入されてきた。一方, 海底ケーブルに代表される超長距離伝送システムにおいては, 非線形性の抑制と波長分散制御を両立するために, 複数のNZ-DSFを組み合わせた複合線路 (NZ-DSF複合線路)¹⁾が提案され, 数100Gb/s \times 10,000kmクラスの伝送が実用化されている。

しかしながら, 1テラビット級の超長距離伝送を行う場合には, NZ-DSF複合線路は非線形抑制および分散抑制の点で不十分である。たとえば, NZ-DSF複合線路に用いられているファイバは, いずれも正の分散スロープをとる

ため, 分散スロープを補償することができない。このため, 伝送帯域内の端のチャンネルにおいて波長分散が累積し, この累積分散による信号劣化が問題になる。また, 分散スロープと A_{eff} の間にはトレードオフの関係がある。このためNZ-DSFの設計で用いられる数ps/nm/km程度の波長分散値の領域において, 超長距離の伝送を行えるような分散スロープを考慮すると, A_{eff} は70 μm^2 程度に制限される。このような問題点を解決するために, 波長分散を +20ps/nm/km程度の領域においた A_{eff} 拡大型シングルモードファイバ (A_{eff} 拡大型SMF) と, 大きな負の波長分散 (正常分散) と負の分散スロープを持った分散スロープ分散補償ファイバ (Slope Compensating and Dispersion Compensation Fiber, SC-DCF) を用いた分散スロープ補償線路の提案がなされている^{2) 3) 4) 5)}。

さらに伝送容量を拡大するために, 伝送に用いる波長帯を拡大する動きもある。従来, 伝送に用いられてきたC-band (1,530 ~ 1,565nm) に加えて, 長波長側のL-band (1,565 ~ 1,625nm) も伝送に用いられようとしており, A_{eff} 拡大型SMFとSC-DCFを用いた複合線路においても, L-bandも含めた波長分散特性の平坦化はひとつの課題である。

今回, C-band, L-bandの一括分散補償を行うことを目標として, A_{eff} 拡大型SMFとSC-DCFの設計, 試作を行い,

*1 光プロセス研究部

*2 光プロセス研究部グループ長

*3 光プロセス研究部長

両者で構成した複合線路の特性を評価したので報告する。

2. A_{eff}拡大SMF, SC-DCFの特性

2.1 A_{eff}拡大SMF

通常の1.3 μm帯用のシングルモードファイバ (SMF) の1,550nmにおけるA_{eff}は、80 μm²程度であり、NZ-DSFより大きい。しかしながら、超長距離システムへの適用を想定した場合、非線形効果抑制のためにさらなるA_{eff}拡大が要求される。

SMFとA_{eff}拡大型SMFの屈折率分布を図1に示す。A_{eff}拡大型SMFでは、カットオフ波長と曲げ損失特性を両立させるために、デプレストクラッド型の屈折率分布を採用した²⁾。

試作したA_{eff}拡大型SMFの光学特性を表1に示す。今回は、A_{eff}が110 μm², 125 μm²の2種類の設計、試作を行った。RDSは、Relative Dispersion Slopeの略称であり、分散スロープと波長分散の比として以下の式で定義されるパラメータである。

$$RDS = (\text{Dispersion Slope}) / (\text{Dispersion})$$

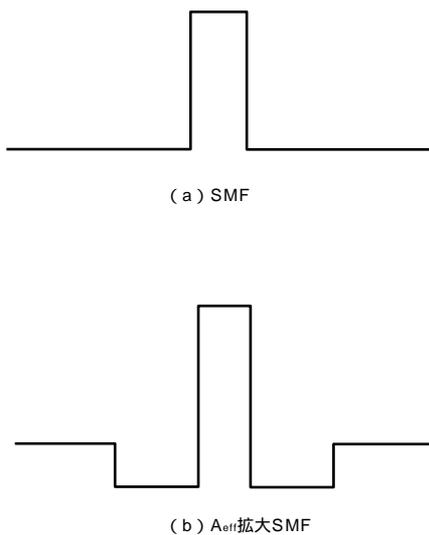


図1 A_{eff}拡大型SMF屈折率分布

Refractive index profiles of enlarged A_{eff} single mode fiber

表1 A_{eff} 拡大SMF測定値

Measurement results of enlarged A_{eff} single mode fiber

項目	110 μm ² タイプ	125 μm ² タイプ
伝送損失 (dB/km)	0.189	0.188
ケーブルカットオフ波長 (μm)	1.48	1.53
A _{eff} (μm ²)	113	125
MFD (μm)	11.6	12.3
波長分散値 (ps/nm/km)	+ 19.9	+ 20.4
分散スロープ (ps/nm ² /km)	+ 0.061	+ 0.062
RDS (nm ⁻¹)	0.0031	0.0030
曲げ損失at20 (dB/m)	0.5	0.5
PMD (ps/km)	0.05	0.05

波長はすべて1,550nm

110 μm²タイプ, 125 μm²タイプともに、ほぼ設計とおりのA_{eff}が得られている。曲げ損失については、デプレストクラッド構造を採用したことで、大きなA_{eff}にもかかわらず、1dB/m以下の小さな値が得られている。

非線形光学効果低減の効果は、A_{eff}のみではなく非線形定数n₂/A_{eff}で評価するのが妥当である。図2にCW光を用いたSPM法⁶⁾を用いて測定したn₂/A_{eff}を示す。SPM法による測定では、SMFのn₂/A_{eff}が2.6 × 10⁻¹⁰W⁻¹程度であるのに対して、今回試作したファイバは1.6 ~ 2.0 × 10⁻¹⁰W⁻¹程度となっており、非線形光学効果の低減に有効なファイバであることが確認できた。

A_{eff}を拡大したファイバでは、マイクロバンド特性が劣化する傾向があることが報告されている^{7) 8)}。マイクロバンドに対する感受性が強いファイバは、ケーブル化などの際にロス増などの問題を起こす可能性がある。そこで、A_{eff}拡大SMFおよびSMFのマイクロバンド特性の評価、比較を行った。マイクロバンド損失は、サンドペーパーを巻き付けた380mmのポビンに素線を100gで巻き付けたときに生じる損失増加で評価した⁷⁾。A_{eff}拡大SMFのマイクロバンド特性のA_{eff}依存性を評価するため、屈折率分布を調整し、種々のA_{eff}のサンプルを試作した。このサンドペーパー巻き試験の結果を図3に示す。A_{eff} = 110 μm²タイプの損失増加は1dB/km以下であり、SMFと同程度である。一方、A_{eff} = 125 μm²タイプは、2dB/km程度であり、SMFの倍以上の損失増加を示している。A_{eff} = 125 μm²タイプは、マイクロバンドの観点からは、A_{eff} = 110 μm²タイプよりも劣るため、ケーブル化に際しては、ケ

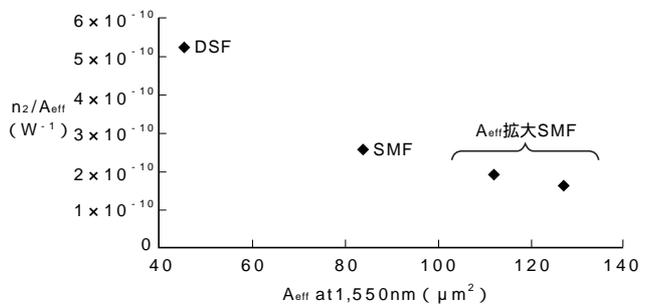


図2 n₂/A_{eff}測定結果

Measurement results of n₂/A_{eff}

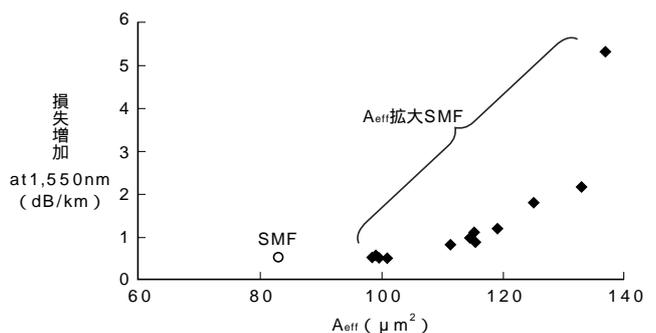


図3 マイクロバンド特性評価結果

Measurement results of microbend sensitivity

ケーブル構造に注意を払う必要がある。

2.2 SC-DCFの特性

SC-DCFは、図4に示すような屈折率分布で得られることが知られている。今回は A_{eff} 拡大と曲げ損失低減の両立の点で有利なセグメントコア型プロファイルを採用し、設計および試作を行った。セグメントコア型プロファイルを採用しても、SC-DCFの A_{eff} には限界があり、あまり大きな値に設計することはできない。このため、SC-DCFの波長分散値の絶対値をある程度大きく取り、 A_{eff} 拡大SMFの分散値を補償するのに必要なSC-DCFを短くすることにより、SC-DCFに入射する光のパワーを抑制することが線路としての非線形性の抑制に有効である。この点を踏まえ、SC-DCFの波長分散値の設計目標を -50ps/nm/km に設定した。条長比としては、 A_{eff} 拡大SMF : SC-DCF = 2.5 : 1で、分散を完全に補償できることになる。

試作したSC-DCFの光学特性を表2に示す。1,550nmにおいて、波長分散値は -53ps/nm/km であり、ほぼ目標とおりの値が得られた。また、RDSは A_{eff} 拡大SMFとほぼ同等の $RDS = 0.0029\text{nm}^{-1}$ が得られた。RDSがほぼ同じと言うことは、広い波長帯にわたり、波長分散を補償できることを意味している。曲げ損失も、 0.7dB/m と非常に良好である。また、サンドペーパー張力巻きによる損失増加

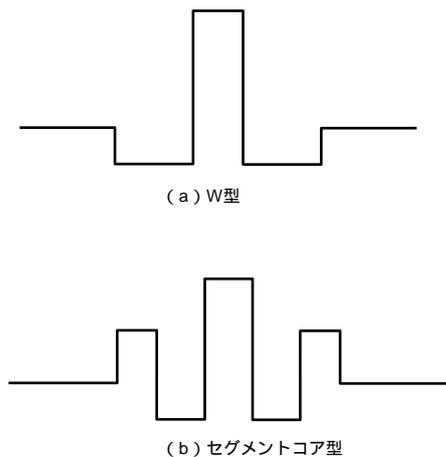


図4 SC-DCF屈折率分布
Refractive index profiles of SC-DCF

表2 SC-DCF測定値
Measurement results of SC-DCF

項目	測定値
伝送損失 (dB/km)	0.280
ケーブルカットオフ波長 (μm)	1.4
A_{eff} (μm^2)	23
MFD (μm)	5.6
波長分散値 (ps/nm/km)	- 53
分散スロープ ($\text{ps/nm}^2/\text{km}$)	- 0.156
RDS (nm^{-1})	0.0029
曲げ損失 at20 (dB/m)	0.7
PMD (ps/km)	0.07

波長はすべて1,550nm

は、 0.1dB/km 程度であり、マイクロバンド特性上、ケーブル化に問題のないことを確認した。今回試作した A_{eff} 拡大SMFと同程度の曲げ損失を有するにも関わらず、マイクロバンド損失では A_{eff} 拡大ファイバより小さいのは、SC-DCFは A_{eff} 拡大SMFよりもモードフィールドが小さいため、屈折率分布の摂動を受けにくいことによると考えられる。

3. 複合線路の特性

ここでは、今回試作した A_{eff} 拡大SMFとSC-DCFとを組み合わせた分散スロープ補償型複合線路の特性について述べる。複合線路はスパン長を50kmとし、 A_{eff} 拡大SMFとSC-DCFを2.58 : 1の条長比で構成した。 A_{eff} 拡大SMFとSC-DCFはモードフィールドの大きさおよび形状が大きく異なるため、通常の接続方法では、1dBを越える大きな接続損失を生じる。この接続損失を低減するために、 A_{eff} 拡大SMFとSC-DCFの間に両者の中間的なモードフィールド特性を有するブリッジファイバを挿入する方法を採用した。ブリッジファイバを用いることにより接続損失を0.4dBに低減することが可能になった。

表3に、 A_{eff} 拡大SMFとSC-DCFを組み合わせ構成した複合線路の主要特性を示す。 A_{eff} 拡大SMFとしては、 $A_{eff} = 125\mu\text{m}^2$ タイプを用いた。等価 A_{eff} は、 $A_{eff} = 45\mu\text{m}^2$ 、 $n_2 = 2.4 \times 10^{-20}\text{m}^2/\text{W}$ 、伝送損失 0.210dB/km となるファイバを基準とし、スパンロス considering 複合伝送路50kmの出射パワーと基準ファイバ50kmの出射パワーが同一となるようなパワーの光をそれぞれに入射した場合に得られる両線路の非線形位相シフト量の比から算出した⁹⁾。従来のNZ-DSFを用いた複合線路の等価 A_{eff} が $59\mu\text{m}^2$ 程度であ

表3 複合線路特性
Measurement results of fabricated hybrid link

項目	測定値
伝送損失 (dB/km)	0.225
等価 A_{eff} (μm^2)	71.5
波長分散値 (ps/nm/km)	- 0.02
分散スロープ ($\text{ps/nm}^2/\text{km}$)	- 0.001
PMD (ps/km)	0.06

波長はすべて1,550nm
等価 A_{eff} は計算値

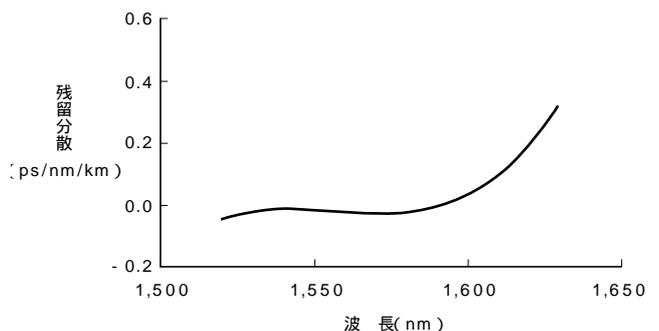


図5 複合線路残留分散特性
Residual dispersion of fabricated hybrid link

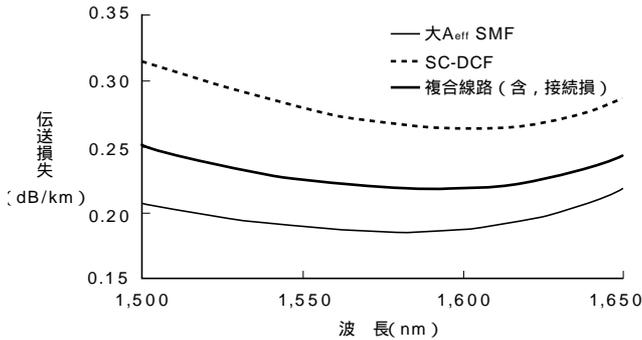


図6 複合線路損失波長特性
Spectral attenuation of fabricated hybrid link

るのに対して、本複合線路では20%程度大きなA_{eff}である71.5 μm²を確保できている。

図5は複合線路の波長分散特性の例を示している。C-bandでは、残留分散値は-0.02～-0.03ps/nm/kmという非常に小さな値に制御できている。一方、L-bandにおいても、+0.2ps/nm/km以下に制御されており、C-bandからL-bandにわたる広い波長帯において、平坦な波長分散特性が得られることが確認できた。図6は接続損失を含めた上記複合線路の損失波長特性を示している。1550nmにおける伝送損失は、0.225dB/kmであり良好である。また、L-bandにおける損失は0.23dB/km以下であり、C-band帯と遜色のないことが確認できる。

以上より、今回検討した複合線路は、残留分散、伝送損失のいずれについても、C-bandおよびL-bandにおける伝送に適したファイバであることが確認できた。

4. む す び

1本のファイバでテラビット級の伝送が可能な超長距離伝送線路用ファイバとして、A_{eff}拡大SMFとSC-DCFを組み合わせたC-band、L-band一括補償型の複合線路の試作を行った。

デプレストクラッド型プロファイルを用いることにより、A_{eff}が110 μm²以上のA_{eff}拡大SMFを試作した。また、試作したA_{eff}拡大SMFの分散および分散スロープを完全に補償可能なセグメントコア型プロファイルを有するSC-

DCFを試作した。さらに、両者を組み合わせて複合線路としての特性を評価した。等価A_{eff}は70 μm²を越え、非線形光学効果の低減に有効である。複合線路の残留分散は、C-band、L-bandにわたって、-0.03～+0.2ps/nm/kmという非常に小さな値であることを確認した。複合線路の損失波長特性も良好であり、今回試作した複合伝送線路が、超長距離用の伝送線路として有効であることを確認した。

参 考 文 献

- 1) H. Taga, et al. : Invention of Undersea Optical Fiber Cable, Suboptic2001, paper T4.1.2, 2001
- 2) K. Aikawa, et al. : Single-mode Optical Fiber with Effective Core Area Larger than 160 μm², ECOC'99, I, 302-303, 1999
- 3) T. Suzuki, et al. : Large-effective-area Dispersion Compensating Fiber for Dispersion Accommodation both in the C and L Band, OECC2000, paper 14C4-4, 554-555, 2000
- 4) E. Sasaoka, et al. : Dispersion Flatten Hybrid Transmission Lines (Pure couple) for Multi-terabit Submarine Transmission System , Suboptic2001, paper T4.2.3, 2001.
- 5) S. N. Knudsen, et al. : New Dispersion-slope Managed Fiber Pairs for Ultra Long Haul Transmission Systems, NFOEC2001, pp. 1599-1607, 2001
- 6) 二本柳ほか：SPM法による各種ファイバの非線形屈折率計数の評価，1999年電子情報通信学会総合大会 B-10-164，1999
- 7) 三ッ橋ほか：A_{eff}拡大ファイバを適用した光海底ユニットの開発，1999年電子情報通信学会総合大会 B-10-33，1999
- 8) 三ッ橋ほか：A_{eff}拡大ファイバを適用したルーズチューブケーブル特性の評価，2001年電子情報通信学会総合大会 B-10-33，2001
- 9) 築谷ほか：低分散スロープ，低非線形性を有する低非線形PSCF + DCF複合伝送路，電子情報通信学会技術研究報告，OCS-99-97，1997