

分散補償ファイバモジュール

光機器・コンポーネント事業部 愛川 和彦¹・吉田 順司²・齊藤 伸³・工藤 学⁴
株式会社青森フジクラ金矢 鈴木 一成

Dispersion Compensating Fiber Module

K. Aikawa , J. Yoshida , S. Saitoh , M. Kudoh , and K. Suzuki

光通信システムの広帯域化には伝送用光ファイバで生じる累積波長分散の補償が必要である。現在最も多く使用されている分散補償デバイスは分散スロープ分散補償ファイバ (Slope Compensating and Dispersion Compensating Fiber : SC-DCF) を用いたモジュールである。この SC-DCF モジュールに対しては、大きく二つの高性能化要求がある。ひとつは、モジュールの低損失化である。モジュールの低損失化により光増幅器に対しての利得の要求は緩和され、雑音指数などが改善されることによりシステム全体の特性が向上する。もうひとつの要求はモジュールの小型化である。波長多重伝送システムは多くのデバイスから構成されており、それぞれのデバイスを小型化することは大きな課題のひとつである。これらの要求に対してそれぞれの SC-DCF を開発しモジュールの各種特性、信頼性を検証した結果、製品への適用が可能であることを確認したので報告する。

In order to widen the bandwidth of optical fiber transmission systems, dispersion compensation for the accumulated chromatic dispersion of the fibers is required. Currently, slope compensating and dispersion compensating fiber (SC-DCF) modules are widely used as dispersion compensation devices. There are two requirements for improving the performance of SC-DCF modules. The first requirement is to lower the insertion loss of the module in optical fiber transmission systems. Low-loss SC-DCF module contributes to the relaxation in gain requirement of optical amplifiers, which improves the noise figure of the optical amplifiers as well as the overall performance of the optical fiber transmission systems. Downsizing of the SC-DCF module is the other requirement. Wavelength division multiplexing transmission system consists of a large number of devices ; therefore, downsizing of each device is one of the major developmental challenges. Each of our new SC-DCF modules has been developed to meet these requirements, and by confirming the optical characteristics and reliability of SC-DCF module. We can ensure that each SC-DCF module has excellent performance and high reliability.

1. ま え が き

光ファイバを用いたデータ通信の需要の増加に対応するために、光ファイバ伝送システムに対する大容量化の要求は高い。現在一般的に使用されている伝送用光ファイバは 1.3 μm 帯零分散シングルモード光ファイバ (Standard Single-Mode Fiber : SSMF) であり、引き続き標準的な伝送用光ファイバとして広く敷設されている。しかし、この SSMF は 1.55 μm 帯の通信波長では約 17 ps/nm/km の波長分散を有するため、この波長

分散が累積することで高速伝送の障害となってしまう。通信容量の増大には、ビットレートの高速化と高密度波長多重 (Dense Wavelength Division Multiplexing : DWDM) 伝送が必須である。ビットレートの高速化には、伝送路の累積波長分散の補償が必要であり、DWDM 伝送には、より広い波長範囲にわたる残留分散の補償技術が重要である。

変調方式が異なると、そのスペクトル広がりの違いから許容される分散値は異なるが、許容分散値は伝送速度の 2 乗に反比例して小さくなる。例えば、Nonreturn to Zero (NRZ) 40 Gbit/s の信号に対する許容分散量は約 100 ps/nm であり、伝送速度の高速化が進めば進むほど、許容される残留分散は小さくなる¹⁾。そのため、伝送距離が長い状態で伝送速度を上げようとする、中継

1 光応用製品事業推進室 光応 F グループ長 (博士 (工学))

2 光応用製品事業推進室 光応 F (博士 (理学))

3 光応用製品事業推進室製造部 製造 1 グループ長

4 光応用製品事業推進室製造部 製造 3 グループ長

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説 明
SC-DCF	Slope Compensating and Dispersion Compensating Fiber	分散スロープ分散補償ファイバ 負の分散と負の分散スロープをもち、伝送用光ファイバで累積した波長分散を使用波長域全体にわたって補償するファイバ
SSMF	Standard Single-Mode Fiber	国際規格の ITU-T G.652 に準拠したシングルモード光ファイバ 1.3 μm 帯にゼロ分散波長をもち、通信波長の 1.55 μm 帯では約 +17ps/nm/km の波長分散を有する
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重 一本の光ファイバに、狭い波長間隔でかつ高密度で光信号を同時に乗せることにより、大容量の情報を伝送する手段
NRZ	Nonreturn to Zero	デジタル符号化方式の一つで、1 が連続しても信号をいったん 0 に戻すということとはしないというもの
RDS	Relative Dispersion Slope	比分散スロープ 分散スロープ / 波長分散で求める値であり、分散スロープ補償率の指標
A_{eff}	Effective area	実効断面積
FOM	Figure of Merit	性能指数 単位損失あたりに補償できる分散量
MFD	Mode Field Diameter	光ファイバ中を伝搬するモードの電界分布の広がりを直径として表現したもの
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	誘導ブリリユアン散乱 光ファイバ中の非線形光学効果のひとつ

器毎の分散補償は必須となる。図 1 に伝送路で累積した波長分散の補償の概念図を示す。ある距離ごとに分散補償ファイバモジュールを挿入し、伝送路に要求される残留分散以下となるように累積波長分散を補償している。

累積波長分散の補償は使用波長帯すべてにわたって要求されるので、伝送路の累積分散スロープを同時に補償することも必要となる。波長分散補償の概念図を図 2 に示す。この図からわかるように伝送路である SSMF の波長分散はプラスの波長分散と分散スロープを有している。一方、分散スロープ分散補償ファイバ (Slope Compensating and Dispersion Compensating Fiber : SC-DCF) は、マイナスの波長分散と分散スロープを有している。この SC-DCF は、コアの屈折率を高くし、コア径を細くするなど、屈折率分布を最適化することで、マイナスの波長分散を得ることができ、さらにコア

とクラッド間にクラッドよりも屈折率の低い層を設けることで分散スロープもマイナスにすることができる²⁾³⁾。ここで、分散スロープ補償の性能を求めるときに用いる値として波長分散に対する分散スロープの比 (Relative Dispersion Slope : RDS) がある。波長分散を D 、分散スロープを S とすると RDS は式 (1) のように表わすことができる。

$$RDS = \frac{S}{D} \quad \dots (1)$$

SC-DCF の RDS を伝送用光ファイバの RDS と等しくすると、波長分散を補償したときに分散スロープも完全に補償することが可能となる。

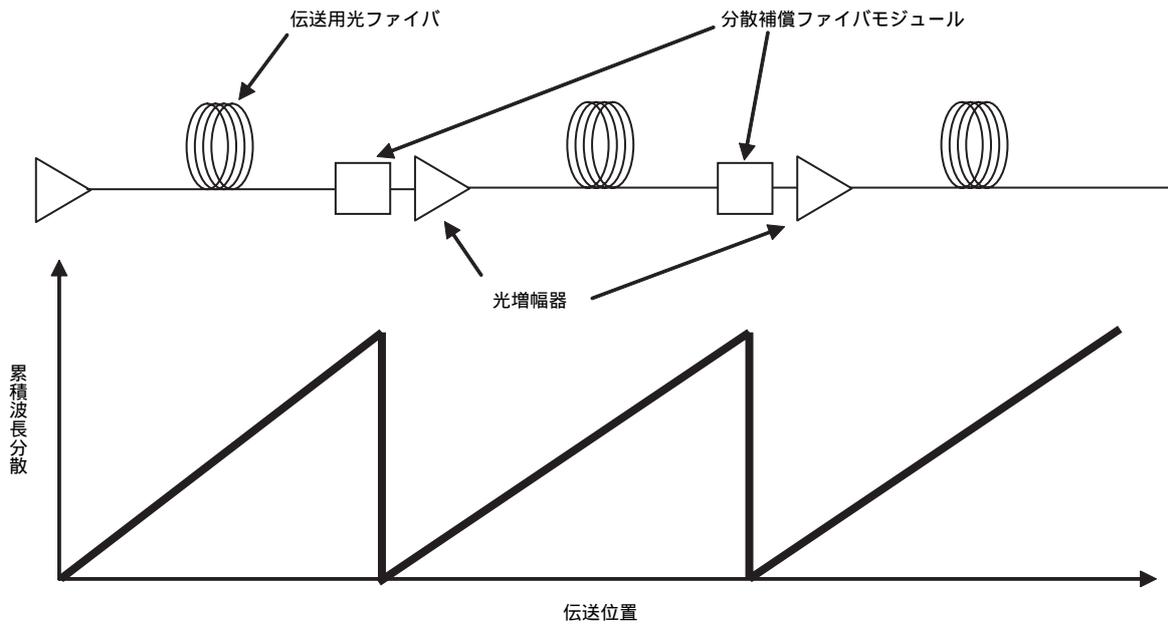


図1 累積波長分散補償の概念図

Fig. 1. Basic concept of compensation of accumulated dispersion.

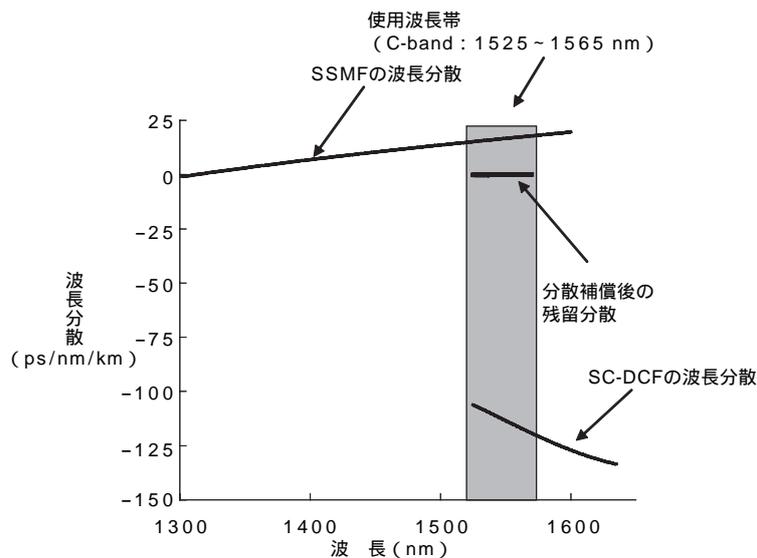


図2 波長分散補償の概念図

Fig. 2. Basic concept of chromatic dispersion compensation.

2. 開発背景

既にこのSSMF用SC-DCFについては、標準的なファイバ外径である125 μmのタイプと小型モジュール用にファイバを細径化したタイプがある。被補償ファイバとなるSSMF、従来の標準的なSC-DCF、および従来の小型モジュール用SC-DCFの特性を表1に示す。

本報告では、SC-DCFモジュールの低損失化という要求と小型化という二つの要求に対してそれぞれのSC-DCFについて最適な構造を設計した。市場要求が二つの方向であり、また二つの要求を同時に達成させるこ

とが困難であるため、それぞれの目的に適したSC-DCFを開発した。まず、SC-DCFモジュール低損失化のためには、実効断面積 (Effective area : A_{eff}) を従来品と同等の値に維持しながら損失特性劣化を抑え、かつ単位損失あたりの波長分散をより大きくして高性能化を図った。また、SC-DCFモジュールの小型化のためには、SC-DCFの巻き体積を小さくする必要があり、高分散化による使用ファイバ長の短尺化とファイバ自体の細径化を行った。それぞれのSC-DCF、およびモジュールの試作結果について以下に報告する。

表 1 SSMF, 従来品の標準的な SC-DCF, および小型モジュール用従来型細径 SC-DCF の特性

Table 1. Optical properties of SSMF, conventional standard SC-DCF and conventional SC-DCF for compact modules.

項 目	単 位	SSMF	標準的なSC-DCF	小型モジュール用 従来型細径SC-DCF
測定波長	μ m	1.55		
ファイバ外径	μ m	125	125	90
被覆外径	μ m	250	240	175
波長分散	ps/nm/km	+17	-115	-115
RDS	nm ⁻¹	0.0034	0.0034	0.0034
伝送損失	dB/km	-	0.40	0.53
性能指数 (FOM)	ps/nm/dB	-	288	217
A _{eff}	μ m ²	80	21	17

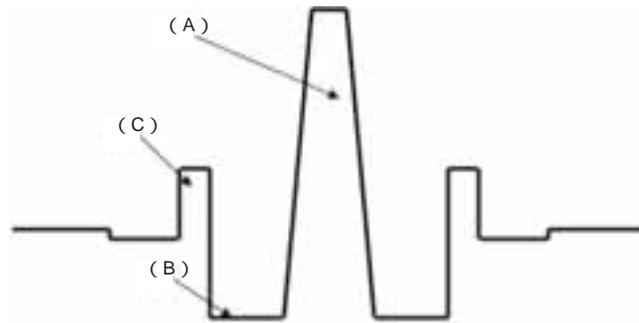


図 3 SC-DCF の屈折率分布

Fig. 3. Refractive index profile of SC-DCF.

3. 分散補償ファイバモジュールの低損失化

3.1 ファイバ設計

SC-DCF モジュールの低損失化のために、まず表 1 に記載の“標準的な SC-DCF”の高性能化を行った。

単位損失あたりに補償できる分散量を性能指数 (Figure of Merit : FOM) といい、SC-DCF の波長分散を D_{SC-DCF} 、ファイバ損失を L_{SC-DCF} とすると FOM_{SC-DCF} は、式 (2) のように表すことができる。

$$FOM_{SC-DCF} = \frac{D_{SC-DCF}}{L_{SC-DCF}} \dots (2)$$

この FOM は、SC-DCF モジュール低損失化のための重要な特性の一つである。一般的に FOM を高くするとファイバの曲げ損失が高くなり、コイルへの巻き込み時に損失が高くなる傾向がある。この損失特性劣化を抑えながらモジュール化することにより、低損失な SC-DCF モジュールの作製が可能となる。

SC-DCF の設計は、許容される曲げ損失、カットオフ波長の制限のもとで、目標とする分散スロープ補償率をほぼ 100 % に維持しながら、できるだけ大きな波長分散係数と A_{eff} を求めることを主眼とした。できるだけ大きな波長分散係数を目標とするのは、巻き込みフ

ィバ長を短くするためである。 A_{eff} を大きくする理由は 3.3 項で後述するが、非線形光学特性による SC-DCF モジュールの特性劣化を抑制するためである。許容される曲げ損失はモジュール製造の際の最小曲げ径やモジュール形状、被覆構造に依存する。またモジュールとしての実効的なカットオフ波長はファイバ長依存性があるため、許容されるカットオフ波長は使用されるファイバ長、モジュール形態に依存する。SC-DCF は分散スロープ補償性能の向上、および A_{eff} 拡大による非線形光学効果抑制などを目的として図 3 のような屈折率分布を用いている。

図 3 中の屈折率の一番高い部分 (A) を中心コア、中心コアを囲むように位置し屈折率が下がっている (B) をトレンチコア、屈折率の低い部分を囲みクラッドよりも屈折率が高くなっている (C) をリングコアと称している。各層の屈折率と径の比を変化させて、光学特性を計算し、許容される曲げ損失、カットオフ波長などを考慮しながら設計を行った。計算の結果、屈折率分布を調整しカットオフ波長を長波長側にシフトさせることで、現状の伝送損失を維持しながら目標とする RDS と A_{eff} 、および大きな波長分散係数が得られることがわかった。

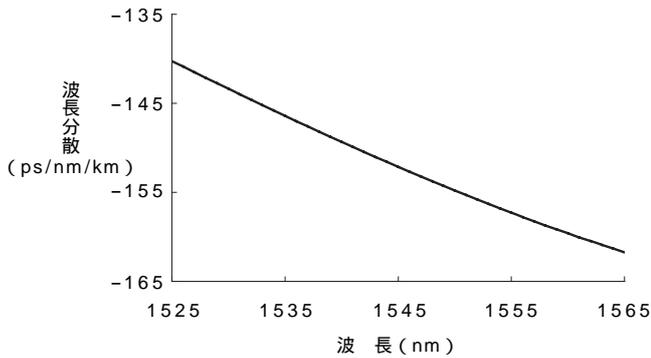


図4 SC-DCFの波長分散特性

Fig. 4. Chromatic dispersion characteristics of SC-DCF.

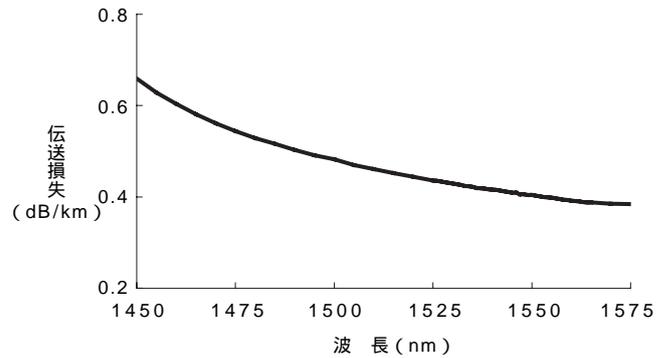


図5 SC-DCFの損失波長特性

Fig. 5. Attenuation spectrum of SC-DCF.

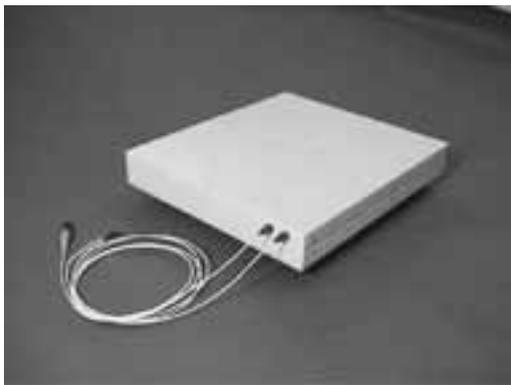


図6 SC-DCFモジュール

Fig. 6. SC-DCF module.

表2 試作したSC-DCFの光学特性
Table 2. Optical properties of fabricated SC-DCF.

項目	単位	測定値
測定波長	μm	1.55
ファイバ外径	μm	125
伝送損失	dB/km	0.40
波長分散	ps/nm/km	-152
RDS	nm^{-1}	0.0034
FOM	ps/nm/dB	380
カットオフ波長	μm	1.55
A_{eff}	μm^2	21
曲げ損失	dB/m, 曲げ直径=20mm	3

表3 SC-DCFモジュールの光学特性
Table 3. Optical properties of SC-DCF modules.

項目	単位 測定波長	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
分散量	ps/nm 1550 nm	-150	-350	-651	-1003	-1370	-1700
補償 SSMF長	km -	10	20	40	60	80	100
RDS	nm^{-1} 1550 nm	0.0037	0.0035	0.0040	0.0036	0.0034	0.0033
モジュール 損失	dB 1550 nm	0.9	1.4	1.8	2.7	3.7	4.6
モジュール PMD*	ps 1525 nm- 1565 nm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3

* 偏波モード分散 (Polarization Mode Dispersion : PMD)

3.2 ファイバ特性

試作したSC-DCFの光学特性を表2に示す。波長分散、および分散スロープ補償率の指標となるRDSの値は目標どおりの値が得られた。波長分散特性、損失波長特性を図4、5に示す。曲げ損失による長波長側での損失特性劣化もなく良好な特性であった。

3.3 モジュール特性

表2の試作例を含む数ロットのSC-DCFを用いて6台のSC-DCFモジュールを試作した。SC-DCFは小型のリールに巻き込まれ、両端にコネクタ付SSMFを融着接続してモジュールとした。モジュールの外観図を図6に、光学特性一覧を表3に示す。

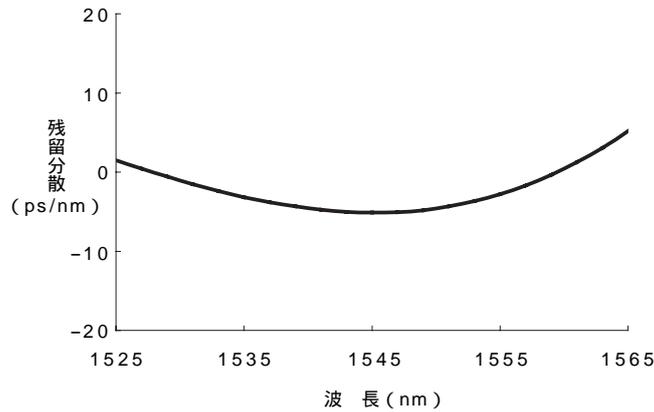


図7 80 km のSSMFを補償した後の残留分散特性

Fig. 7. Residual dispersion after chromatic dispersion compensation for 80-km SSMF.

図3のような屈折率分布を有するSC-DCFはガウス型と異なる電磁界分布を持つ。そのためガウス型電磁界分布を持つSSMFとの接続損失は、ガウス型近似で算出する接続損失よりも大きくなる。本モジュールではSC-DCFと同等の電磁界分布形状を有しSSMFと同等までMFDを拡大しても特性劣化しない中間ファイバを用いてSC-DCFとSSMFの接続損失を低減している。表3のNo.5のモジュールはSSMF 80 km補償用であるが、従来のモジュール挿入損失が6～7 dBであった³⁾のに対して3.7 dBと低くなっている。これは、SC-DCF自体の高FOM化、および接続損失低減化によるものである。

長距離伝送の場合には、SN比向上のため光ファイバ伝送路への入射パワーを大きくする必要がある。しかしながら、光ファイバへの入射パワーを大きくすると、光ファイバの非線形光学効果により、入射パワーに依存して信号波形に歪みが生じる。SC-DCFモジュールについてもこの非線形光学効果を考慮する必要がある。この非線形光学効果にはいくつかあるが、SC-DCFで問題になるのは、自己位相変調と誘導ブリリュアン散乱(Stimulated Brillouin Scattering: SBS)である。

自己位相変調の影響を評価するには、SC-DCFモジュールに光を通過させたときの非線形位相シフト量を評価するのが妥当である⁴⁾。非線形位相シフト量()は、波長を λ 、非線形屈折率を n_2 、実効ファイバ長を L_{eff} 、入力パワーを P_0 として式(3)のように表すことができる。

$$= \frac{2}{A_{eff}} \frac{n_2}{A_{eff}} L_{eff} P_0 \dots (3)$$

この式から非線形位相シフト量を抑えるためには、 A_{eff} の拡大や n_2 の低減と共に、モジュール全体の損失を低くして入力パワーを低減すること、およびファイバの低

損失化、短尺化も有効であることがわかる。今回試作したモジュールと従来の80 kmのSSMF補償用SC-DCFモジュール³⁾について式(3)の値を比べると、 $2 / A_{eff}$ 、 n_2 / A_{eff} の項にはほとんど差がない。しかし、モジュール内で使用されるファイバ長に依存する L_{eff} の観点では、80 kmのSSMF補償用SC-DCFモジュールとして必要な分散補償量の1360 ps/nmを得るためには、従来のSC-DCFで16 kmが必要であるのに対して、今回試作したファイバだと約9 kmとなる。これは、今回の試作ファイバの波長分散の絶対値が大きいからである。そのため使用されるファイバ長と損失から算出される実効ファイバ長 L_{eff} は従来の約3分の2となり、さらにモジュール損失も低くなったことから入力パワー P_0 も60%前後に低減され、最終的な非線形位相シフト量は従来の80 km SSMF補償用SC-DCFモジュールの30%前後に低減することができた。

SBSは低損失で長手方向に構造が均一で長尺ファイバほど発生閾値が低くなることが知られている⁵⁾。今回試作したSSMF用SC-DCFを用いると短い長さでモジュール化することができる。例えば、従来の標準的なSC-DCFを用いて80 kmのSSMFの累積波長分散を補償する場合、必要なファイバ長は16 kmとなり、7.5 dBm前後がSBS閾値となる³⁾が、今回試作したSC-DCFを用いると必要なSC-DCF長は約9 kmとなるためSBS閾値は8.5 dBm程度まで改善される。これらのことから今回のSC-DCFを用いた場合、従来品に比べて大きく非線形光学効果の影響が抑制されているといえる。

SSMF 80 kmの累積波長分散をNo.5モジュールで補償したときの残留分散特性を図7に示す。図7の分散補償後の残留分散特性から、1525 nm～1565 nmの波長範囲において、残留分散はおおよそ ± 5 ps/nm以内に抑えられていることがわかる。

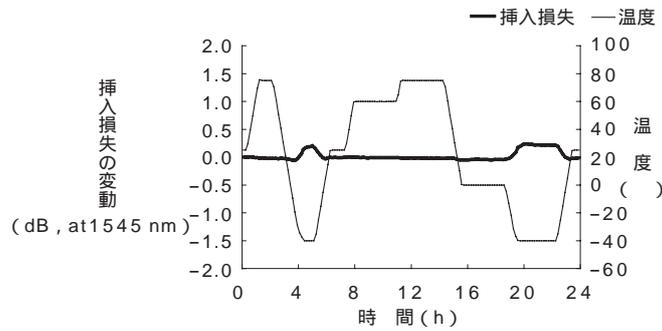


図8 No.4 モジュールのモジュール損失温度依存性
Fig. 8. Temperature dependence on insertion loss of No.4 module.

表4 信頼性試験項目一覧

Table 4. Test items and conditions of reliability test.

No.	試験項目	試験内容
1	振動試験	振動数10~500 Hz, 振幅1.5 mm, モジュールに対し上下・左右・前後方向1.5 G
2	衝撃試験	梱包無しで4インチの高さから落下 梱包状態で30インチから落下
3	ヒートサイクル試験	-40 / +85 , 100 サイクル
4	高温・高湿試験	85 , 湿度85 %, 1000 時間

表5 各試験前後の光学特性の変動

Table 5. Variation of optical characteristics after each test.

No.	試験項目	挿入損失 変動 (dB)	波長分散 変動 (ps/nm)	PMD 変動 (ps)	PDL 変動 (dB)
	測定波長	1550 nm			
1	振動試験	< 0.2	< 1.0	< 0.2	< 0.02
2	衝撃試験	< 0.2	< 1.0	< 0.2	< 0.02
3	ヒートサイクル試験	< 0.2	< 1.0	< 0.2	< 0.02
4	高温・高湿試験	< 0.2	< 1.0	< 0.2	< 0.02

3.4 モジュール信頼性

SSMF 60 km 補償用モジュールに相当する No.4 モジュールの挿入損失温度依存性を図8に示す。測定波長は 1545 nm とした。SC-DCF モジュールは、使用温度範囲として $-5 \sim +70$, 保存温度範囲として $-40 \sim +75$ が一般的である。この図から、保存温度範囲の下限となる -40 でモジュール挿入損失が高くなっていることがわかるが、その後、室温に戻すことでその損失が回復していることがわかる。また、使用温度範囲の下限となる -5 において 0.05 dB の損失変動があったが、実用上問題のないレベルであり、製品要求仕様も十分満足できるものである。

試作した SC-DCF モジュール全てに対して各種信頼性試験を行った。試験項目と試験内容を表4に示す。本試験は Telcordia の規格を基準としている⁶⁾⁷⁾。また各試験前後の挿入損失、波長分散、偏波モード分散 (Polarization Mode Dispersion : PMD)、偏波依存損失 (Polarization Dependent Loss : PDL) 変動の結果を表

5に示す。振動・衝撃試験、ヒートサイクル試験、長期高温高湿試験のいずれの試験においても光学特性の劣化は認められなかった。

4. 小型分散補償ファイバモジュール

4.1 ファイバ設計

SC-DCF モジュールの小型化のためには、ファイバ自体の細径化、および使用ファイバ長の短尺化が必要である⁸⁾。小型 SC-DCF モジュールに使用されている従来品の細径 SC-DCF は、90 μm クラッド、175 μm 被覆外径であり、平均的な波長分散は -115 ps/nm/km となっている。今回の目標特性は、巻き体積を2分の1にするために、ファイバ被覆外径と実現可能な光学特性をシミュレーションし、クラッド径 80 μm 、被覆外径 145 μm 、波長分散は -150 ps/nm/km 以下とし、FOM は 300 ps/nm/dB 以上とした。

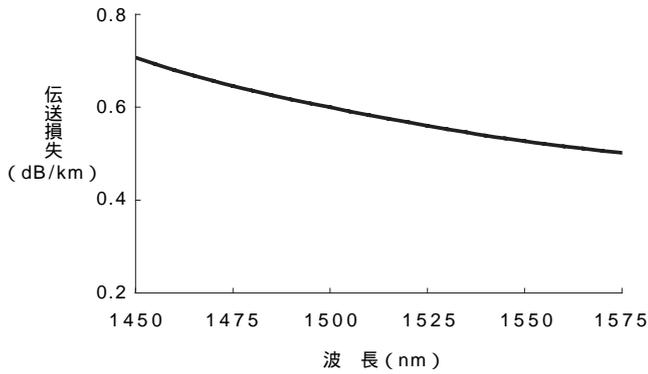


図 9 細径 SC-DCF の損失波長特性

Fig. 9. Attenuation spectrum of SC-DCF with small diameter.

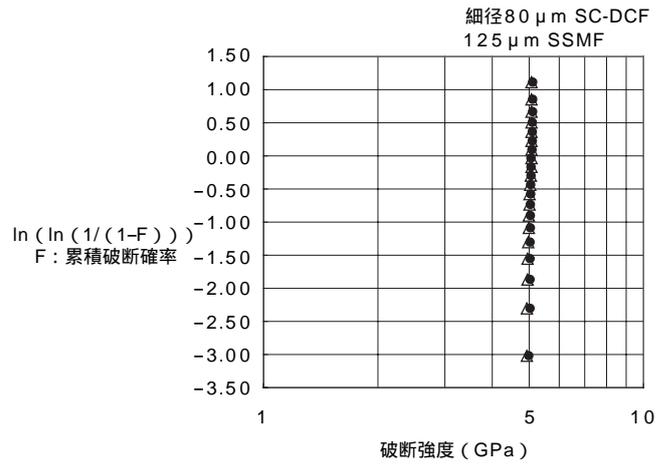


図 10 ワイブル分布プロット

Fig. 10. Weibull distribution of tensile strength on fabricated SC-DCF with small diameter.

表 6 従来の 90 μm SC-DCF の特性と新規細径 80 μm SC-DCF の目標値，および試作した細径 80 μm SC-DCF の特性

Table 6. Optical properties of conventional 90 μm SC-DCF, target 80 μm SC-DCF for compact modules and fabricated 80 μm SC-DCF with small diameter.

項目	単位	細径 90 μm SC-DCF (従来品)	細径 80 μm SC-DCF (目標値)	細径 80 μm SC-DCF (試作結果)
測定波長	μm	1.55		
ファイバ外径	μm	90	80	80
被覆外径	μm	175	145	145
波長分散	ps/nm/km	-115	-150	-160
RDS	nm ⁻¹	0.0034	0.0034	0.0034
伝送損失	dB/km	0.53	-	0.53
FOM	ps/nm/dB	220	300 以上	302
A _{eff}	μm ²	17	17	17
PMD	ps/km ^{1/2}	0.1	0.1	0.1

4.2 試作ファイバの特性

従来の小型モジュール用細径 SC-DCF の特性と今回の目標特性，および試作したファイバの特性を表 6 に示す．波長 1550 nm において，波長分散 = -160 ps/nm/km，損失 = 0.53 dB/km，RDS = 0.0034 nm⁻¹，A_{eff} = 17 μm² の値が得られた．試作した細径 SC-DCF の損失波長特性を図 9 に示す．曲げ損失による長波長側での損失特性劣化もなく良好な特性である．細径 SC-DCF は，クラッド外径を細くし，被覆厚も薄くしていることからマイク

ロバンド損失などの光学特性と共に機械強度特性も十分考慮する必要がある．図 10 に 125 μm クラッド，250 μm 被覆の SSMF と今回試作した細径 80 μm SC-DCF の機械強度特性を評価した結果をワイブル分布プロットとして示す．この結果から今回試作した細径 80 μm SC-DCF は通常ファイバと同等の機械強度特性を維持していることが確認された．

4.3 モジュール特性

試作したファイバを用いて，SSMF 40 ~ 100 km 補

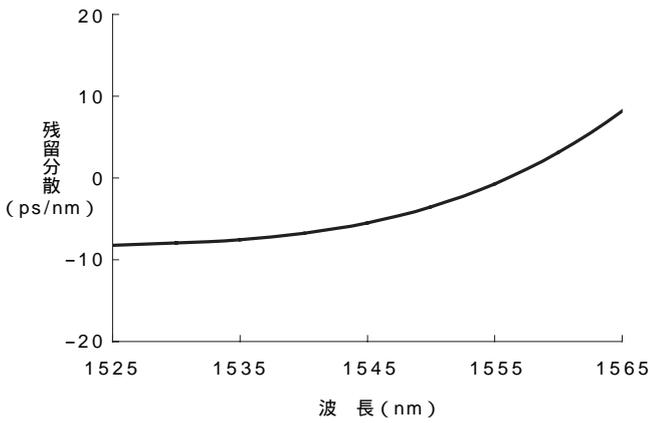


図 11 100 km の SSMF 分散補償後の残留分散特性
Fig. 11. Residual dispersion after chromatic dispersion compensation for 100-km SSMF.

表 7 小型 SC-DCF モジュールの光学特性
Table 7. Optical properties of compact SC-DCF modules.

項目	単位	サンプル1	サンプル2	サンプル3	サンプル4
分散量	ps/nm 1550 nm	-680	-1020	-1020	-1700
補償 SSMF長	km	40	60	60	100
RDS	nm ⁻¹ 1550 nm	0.0035	0.0034	0.0035	0.0034
モジュール損失	dB 1550 nm	2.7	4.0	3.9	6.2
モジュール PMD	ps 1525- 1565 nm	0.1	0.1	0.2	0.3

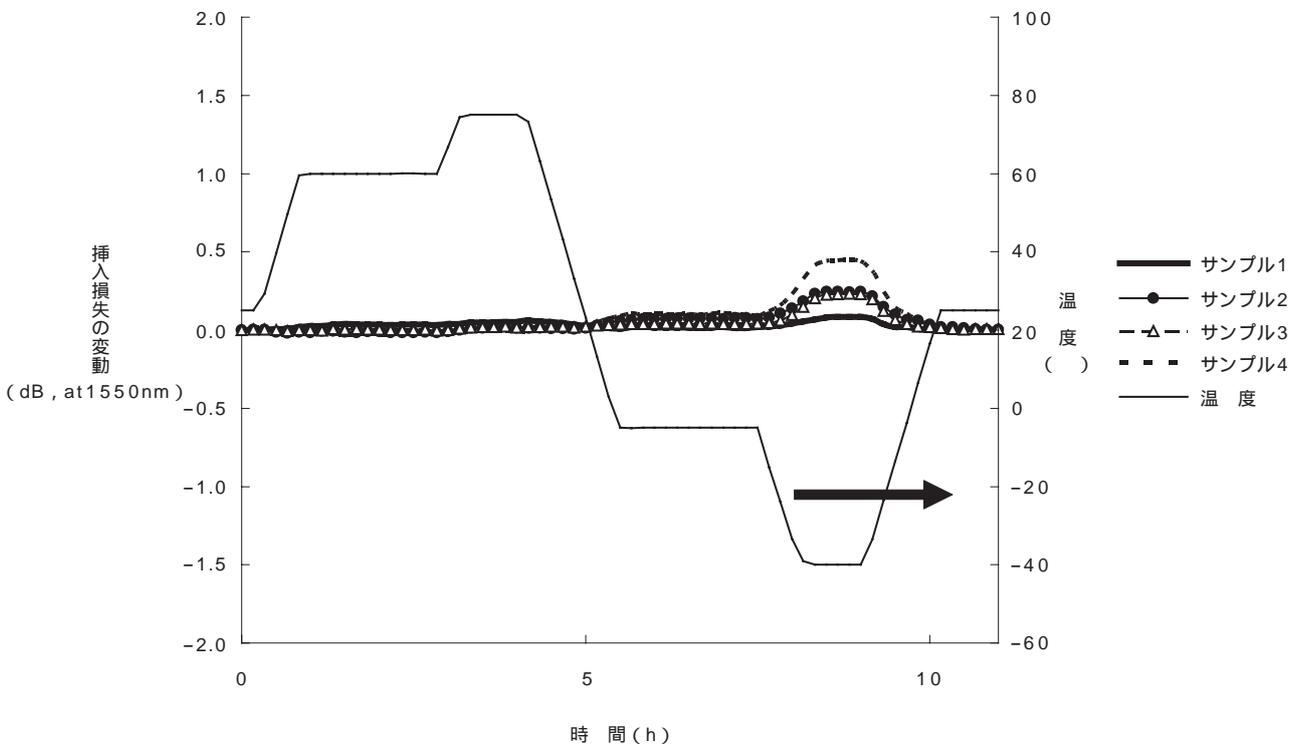


図 12 サンプル 1 ~ 4 モジュールのモジュール損失温度依存性
Fig. 12. Temperature dependence on insertion loss of Sample1-4 modules.

償用のモジュールを試作した。モジュールの特性を表 7 に示す。モジュールに使用したリールのサイズは幅 23 mm，フランジ直径 138 mm である。従来の細径 90 μm SC-DCF を用いたモジュールに比べて，ファイバの短尺化とさらなる細径化により巻き体積を小さくすることができ，従来の 90 μm SC-DCF を用いたモジュールと比較すると同一サイズで 2 倍の分散補償をすることが可能となった。従来の 125 μm SC-DCF を用いたモジュールと比較すると約 4 分の 1 にまで小型化することに成功した。本モジュール試作時の SC-DCF 接続作業では SC-

DCF を十分加熱することで MFD の拡大，および電磁界分布形状をガウシアンに近づけることなどの接続条件最適化を進めて接続損失の低減化を行った。さらに従来は中間ファイバを用いて接続損失の低減を図ったが，この小型モジュールでは 80 μm 細径 SC-DCF と 125 μm SSMF を直接接続しモジュール化を行った。

SSMF 100 km の累積波長分散をこのモジュールで補償したときの残留分散特性を図 11 に示す。この分散補償後の残留分散特性から，1525 nm ~ 1565 nm の波長範囲において，残留分散が ± 10 ps/nm 以下に抑えられ

ていることがわかる。

4.4 モジュールの信頼性

試作したモジュールの挿入損失温度依存性を図 12 に示す。測定波長は 1550 nm とした。SC-DCF モジュールは、使用温度範囲として $-5 \sim +70$ ，保存温度範囲として $-40 \sim +75$ が一般的である。図 12 から、保存温度範囲の下限となる -40 でモジュール挿入損失が高くなっているが、その後、室温に戻すことでその損失が回復していることがわかる。また、使用温度範囲の下限となる -5 においては 0.1 dB の損失変動があるが、この変動は十分小さく実用上問題のないレベルであり、製品要求仕様も十分満足できるものである。

試作した小型 SC-DCF モジュールに対して各種信頼性試験を行った。試験項目と試験内容は表 4 に示したように低損失タイプのモジュールに対して行ったものと同様である。各試験前後の挿入損失、波長分散、PMD、PDL 変動の結果も、ここでは具体的なデータを示すことは行わないが、表 5 に一括して記載した通りのレベルであった。いずれの試験においても光学特性の劣化は認められなかった。

5.むすび

SC-DCF モジュールのさらなる高性能化要求に対応するために、通常被覆外径の SC-DCF の高分散化、および高 FOM 化の検討を行い -152 ps/nm/km, FOM=380 ps/nm/dB の SC-DCF を作製することができた。この SC-DCF を用いたモジュールは従来品の SC-DCF を用いたモジュールの 2 分の 1 程度の挿入損失となった。そして、SSMF 80 km の累積波長分散を補償した後の 1525 nm から 1565 nm における最大残留分散特性も ± 5 ps/nm 以下に抑えられており、高速伝送にも十分耐えられることを確認した。モジュールの挿入損失の温度変動についても大きな変動がないことを確認した。

また、小型 SC-DCF モジュールに適応可能なファイバを設計・試作した。この細径 SC-DCF の波長分散は 100 % 分散スロープ補償性能を維持しながら、波長 1550 nm において、 -160 ps/nm/km であり、モジュール化しても特性劣化はほとんど見られず、また挿入損失の温度変動も実用上問題のないレベルであり、顧客要求を十分満足できるものであることを確認した。モジュールのサイズは従来の 90 μ m 細径 SCDCF を用いたモジュールの 2 分の 1 にまで小型することができた。

参 考 文 献

- 1) 鳥羽ほか：「次世代超高速伝送技術」, NTT R&D, Vol.48, No.1, pp.33-41, 1999
- 2) L. Gruner-Nielsen, et al. : " Dispersion-compensating fibers ", J. Lightwave Technol., Vol.23, No.11, pp.3566-3578, 2005
- 3) K. Aikawa, et al. : " High-performance dispersion-slope and dispersion compensation modules ", Fujikura Technical Review, No.31, pp.59-64, 2002
- 4) T. Kato, et al. : " Design optimization of dispersion compensating fiber for NZ-DSF considering nonlinearity and packaging performance ", Proc. Optical Fiber Communication Conference, No.TuS 6, 2001
- 5) A. Wada, et al. : " Suppression of stimulated Brillouin scattering by intentionally induced periodical residual-strain in single-mode optical fibers ", IEICE Trans. Commun. Vol.E76-B, No.4, pp.345-351, 1993
- 6) Telcordia-GR-2854 Generic Requirements for Fiber Optic Dispersion Compensators (Issue 2, Dec. 1997)
- 7) Telcordia-GR-63 NEBS Requirements: Physical Protection (Issue 3, Mar. 2006)
- 8) P. Kristensen, et al. : " Dispersion and slope compensating module for G.652 fiber with x4 reduced physical dimensions ", Proc. European Conf. on Opt. Commun., No. We4P.15, 2003