

ホールアシストファイバの設計・作製とパルス圧縮器への応用

Design and Fabrication of Hole- Assisted Fiber and Its Application to Optical Pulse Compressor

宮部 亮* 廣石 治郎* 味村 裕*
Ryo Miyabe Jiro Hiroishi Yu Mimura
井上 崇* 坂野 操* 八木 健*
Takashi Inoue Misao Sakano Takeshi Yagi

概要 近年、FTTHが普及する中、一般家庭への光ファイバの引き込みに伴って、宅内配線に柔軟に対応する光ファイバの研究・開発が検討されている。これに対応する光ファイバとして、小さな半径の曲げに起因する損失増加を抑制するために様々なファイバ構造が提案され、その中でゲルマニウムがドーブされたコアと空気の孔を設けたクラッド部で構成されるホールアシストファイバ(HAF: hole-assisted fiber)が1つの候補として挙げられている。我々はHAFの開発を進めるとともに、このファイバが有する特性を利用して、光パルス圧縮器への応用展開を行った。本報告では、光パルス圧縮器に適用可能なHAFの構造の検討、試作及びその光学特性について紹介する。また、試作したHAFを用いて小型光パルス圧縮器モジュールを作製し、光パルス圧縮実験により圧縮動作を確認したので、その結果を報告する。

1. はじめに

FTTH (fiber to the home) の進展に伴い、ドロップからインドア配線において、通常のSMF (single mode fiber: ITU-T G.652) が保証する曲げ半径30 mmよりも小さい半径での敷設や余長収納が可能な光ファイバが必要とされている。これまで通常のSMFと同等の光学特性を保ちつつ、15 mmの最小曲げ半径を許容できるアクセスケーブル用光ファイバ (FlexiWave) が開発され、実用化されている¹⁾。また局所配線に特化した、許容曲げ半径7.5 mmに対応するファイバも検討されている²⁾。

近年、極小曲げ環境に対応したファイバとして、ゲルマニウムがドーブされたコアと、空気の孔を設けたクラッドから構成されるHAFが提案されている³⁾。HAFの特徴として、コア部の周囲に空気の層を設けることにより、コア部への光の閉じ込めを非常に大きくすることができ、曲げ半径5 mmの局所配線においても損失増加が発生しないようにすることができる。我々もこのような極小曲げ環境において損失増加が発生せず、かつ既存のSMFと低損失で接続可能な光ファイバの研究開発を行ってきた⁴⁾。

今回、この曲げ損失低減型HAFの開発技術を利用し、コンパクトな光パルス圧縮器モジュールの実現を目的として、新しい構造のHAFを作製した。本報告では、新しいHAFの構造の検討並びにその光学特性について紹介し、更にこのHAFを応用して作製した小型光パルス圧縮器モジュールのパルス圧縮動作を確認したので、その結果について報告する。

2. HAFの光パルス圧縮器への展開

当社では、高効率かつ高品質な光パルス圧縮を可能とするパルス圧縮器、CPF (comb-like profiled fiber) の開発を行っている^{6), 7)}。CPFとは図1に示すように、非線形媒体である高非線形ファイバ (HNLF: highly nonlinear fiber)⁵⁾と分散媒体である通常のSMFとを交互に接続した構造からなる。またCPFは、数十～数百mの上記ファイバが数cmから十数cmの径でコイル化され、各々が融着接続されて1つの箱に収納されたモジュール形態をとる。このモジュールはA5版の教科書程度の大きさであり、実験室内で取り扱う際には実用的なサイズといえる。しかし、将来の光ネットワークで用いられ、超短パルスを必要とする各種の機器内に組み込むという観点からは、よりいっそうのモジュールの小型化が望まれている。

CPFで用いられる分散媒体に求められる特性として、大きな異常分散値、低非線形性、低伝搬損失、使用波長帯域でのシングルモード動作、そして低損失でHNLFとの融着接続が可能であることが挙げられ、これまでその条件に適したファイバとしてSMFが用いられてきた。しかしながら、HNLFは小径に曲げたときでも伝搬損失が増加せず、超小型コイル (モジュール

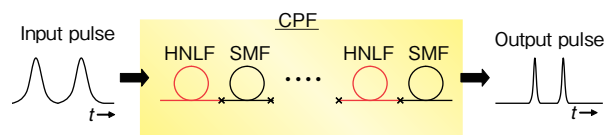


図1 CPFの構成
Schematic configuration of CPF.

* 研究開発本部 ファイタルフォトンクス研究所

ル)化が可能^{8),9)}であるのに対し、SMFは小径に曲げたときに伝搬損失が大きく増加するため、曲げ半径の小径化には制約がある。その結果、SMFのコイル径はHNLFのコイル径よりも大きくなり、CPF全体の小型モジュール化は困難であった。

一方、曲げ損失低減型HAFは、小径曲げによる小型コイル化が可能であり、また空孔構造を調整することにより、使用する波長帯域においてシングルモード動作が実現可能であると報告されている¹⁰⁾。更にHAFは大きな異常分散値、低非線形性、低伝搬損失を有し、SMF及びHNLFと低損失で融着可能であることから、CPFの分散媒体として望ましい特性を備えている。特に異常分散特性に関してはHAFがSMFを含む従来のシリカ系ファイバの限界値よりも大きな異常分散値を有するため、同じ累積分散値を与えるファイバ長を比較すると、HAFのファイバ長はSMFのそれよりも短くなる。つまりHAFは短尺化及び小型コイル化を同時に実現できるため、CPFの異常分散媒体としてSMFの代わりにHAFを用いることは、CPFモジュールの小型化に非常に有効である。

我々は上記CPFの要求特性を満たすHAFの構造について検討を行い、新しい構造のHAFを開発した。そして作製した新構造のHAFをCPFの分散媒体として適用し、ファイバ条長短縮とファイバコイル小径化の両面から、CPFモジュールのコンパクト化を試みた。

3. HAFの設計

空孔を有するファイバ構造の場合、横断面における周方向の屈折率分布が等しくないため、従来のファイバ設計で用いられるスカラ近似手法が適用できない。そこで、2次元断面構造を直接扱える有限要素法(FEM:finite element method)¹¹⁾を用い、HAFの構造の設計を実施した。設計のアプローチは次のとおりである。

まず第一に、HAFの低伝搬損失及び通常のSMFとの接続性を考慮し、通常のSMFと同等の屈折率分布を有するゲルマニウムがドープされたコアをファイバ中心に配置する。コア部にゲルマニウムドープ層を設けることで、空孔部を設けた際に懸念される空孔部への導波光の染み出し、いわゆる漏れ損失(confinement loss)による伝搬損失の増加を抑えることが容易となる。また、HAFとSMFとの接続は、融着接続及びメカニカル接続のいずれにおいても、何らかの方法によりHAFの空孔を封止した状態で行うため、この際ファイバ端部の屈折率分布はコア部のみとなる。したがって、HAFのコア部の屈折率分布を通常のSMFと同等とすることにより、接続時のMFD(mode field diameter)ミスマッチによる損失を最小限に抑えることができる。更に、SMFと同等の屈折率分布を有することは、HNLFとの低損失融着を可能とする点でも優位である。

次に、コア部への光の閉じ込めをより強くするために空孔部を配置する。例えばFTTH用途の場合、コア部の周りに空孔を密に配置することで、基底モード及びいくつかの高次モードの光の閉じ込めを非常に強くすることができ、曲げ半径5 mmの環境においても伝搬損失増加を抑制することが可能となる。コアの大きさ及びコア部と空孔部との間隔の調整により、曲げ損失を低減しつつMFDを通常のSMFに近い値に保つことも可能である。また、コア近傍に空孔を密に配置することにより

大きな構造分散が得られ、上記CPFに適した高異常分散特性を有するようになる。

しかしながら、上記のCPF用途においては、使用波長帯域である1550 nm近傍においてシングルモード動作化が必須であり、基底モード以外のすべてのモードの光の閉じ込めを弱くする必要がある。この低曲げ損失とシングルモード化を両立する構造の検討については次のように行った。

まずシングルモード動作には、基底モード以外のすべてのモードがカットオフである必要がある。従来のファイバ構造の場合、導波する光の波動方程式をスカラ近似することで、そのファイバの有する屈折率分布から規格化周波数 V が得られ、 $V < 2.405$ となる領域においてシングルモード動作とすることができた。しかしながら、空孔を有する構造の場合、空孔部と媒質部との屈折率の差が大きいためスカラ近似を適用することができず、また周方向の屈折率分布が等しくないため、上記手法でシングルモード動作領域を求めることは困難である。

そこで我々は、基底モード以外のモードの伝搬損失を十分大きくすることで実質上シングルモード動作とみなすことができるとし、高次モードの伝搬損失が大きくなる構造を探索した。伝搬損失の計算に関しては、FEMで計算するファイバ構造の基本モデル領域の最外層に完全吸収境界(PML:perfect matched layer)条件を与え、複素伝搬定数を求めることで、各モードの伝搬損失を求める手法を用いた。なお、各モードの伝搬損失はPMLを用いて計算した各モードの実効屈折率の虚部から求めることができ、その計算式は式(1)のとおりである。我々は便宜上、最低高次モードの伝搬損失が20 dB/m以上となる波長においてシングルモード動作すると定義した。

$$Loss = \frac{20}{\ln 10} \beta_I = \frac{4\pi}{\ln 10} \cdot \frac{n_I}{\lambda} \times 10^7 \quad (1)$$

ここで、 $Loss$:伝搬損失(dB/m)、 β_I :伝搬定数虚部(1/m)、 n_I :実効屈折率虚部、 λ :波長(μm)である。

上記の手法を用いて、コア周辺に空孔を1層設けたHAF構造について検討したが、通常のSMFと同等のコアを有する場合に、低曲げ損失とシングルモード化を同時に満たすことは困難であったため、空孔2層構造を採用することとした。直行する2軸の屈折率分布が等しくなるように、コア部の周りに4個の空孔を配置し、その周りに8個の空孔を設けた基本モデルを作製した。なお、製造の容易性を考慮し、空孔の径は全て同径である。このモデルを図2に示す。

このモデルに対し、空孔径及び空孔位置パラメータを変えて、低曲げ損失化及びシングルモード化(高次モードの伝搬損失)について検討を行った。検討例として、上記モデルの構造パラメータを変えた3パターン(#1、#2、#3)の構造において空孔径パラメータを変えたときの特性について以下に示す。図3は空孔径と、曲げ半径 $r = 5 \text{ mm}$ における基底モードの曲げ損失との関係を示し、図4は空孔径と、最低次高次モードの伝搬損失との関係を示す。

図3に示すように、#1～#3いずれのモデルにおいても、空孔径を大きくすることでコアの周囲における平均屈折率が下がり、曲げ損失が小さくなる。これに対し、図4に示すように高次モードの伝搬損失は空孔径を大きくするとともに小さくなるが、これはコア部へ光の閉じ込めが強まり、カットオフ波長

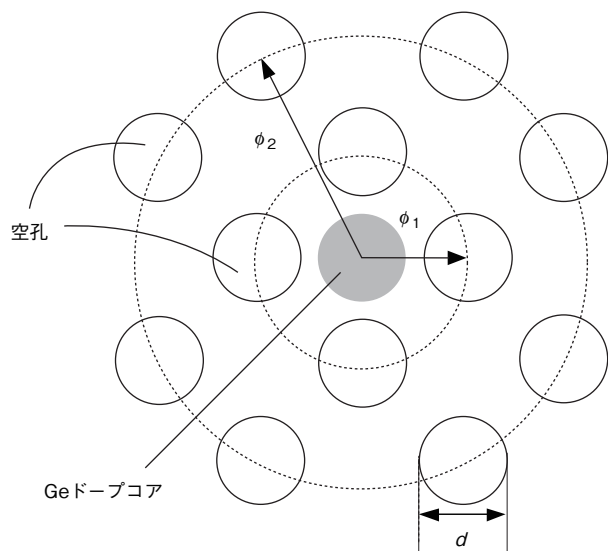


図2 開発したHAFの構造
Structure of the developed HAF.

が長波側にシフトすることを意味する。このように、低曲げ損失化とシングルモード化はトレードオフであり、また空孔パラメータにより特性が敏感に変化することがわかる。ここでは、波長 $1.4\ \mu\text{m}$ より長波長において高次モードの伝搬損失が $20\ \text{dB/m}$ 以上を示し、かつ曲げ損失が非常に小さくなるよう、HAF構造の最適化を行った。

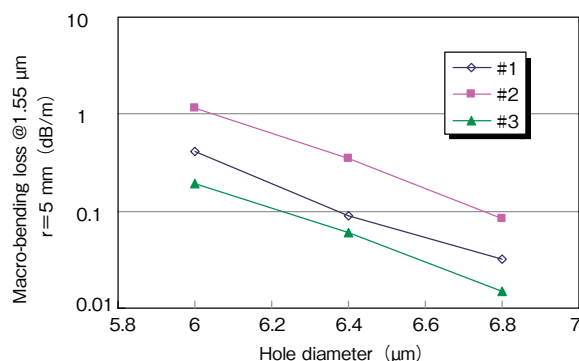


図3 曲げ損失と空孔径との相関例
Relationship between macro-bending loss and hole diameter.

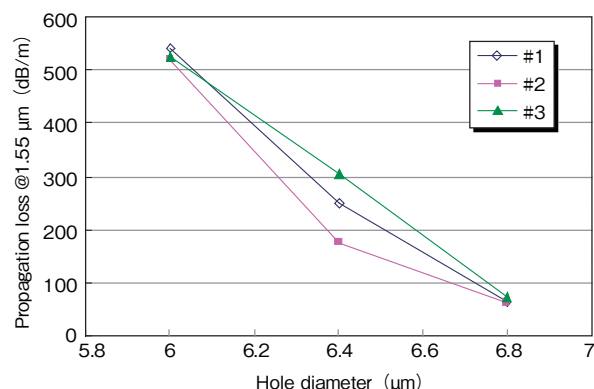


図4 高次モードの伝搬損失と空孔径の相関例
Relationship between the propagation loss of a higher-order mode and hole diameter.

最適化を行ったHAFの空孔構造パラメータは以下のとおりである。空孔部の直径 d は $6.4\ \mu\text{m}$ であり、異なる2つの同心円周上に位置する。コア近傍の4個は、それぞれコア中心から距離 $\phi_1 = 7.7\ \mu\text{m}$ の距離に位置し、その周りに8個の空孔が配置され、コア中心に対して $\phi_2 \div 16.4\ \mu\text{m}$ の円周上に位置する。

この構造における波長 $1550\ \text{nm}$ での基底モード HE_{11x} 、及び最低次高次モードである TE_{01} モードの、フィールドのx成分の強度分布を図5及び図6に示す。基底モードはコアの中心部に閉じ込められ、 TE_{01} モードはコア中心部からクラッド部への染み出しが見てとれる。高次モードは伝搬損失の十分大きいリーキーモードであり、長尺においては基底モードのみが伝搬する。

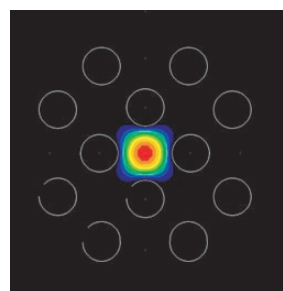


図5 基底モード (HE_{11x})
Fundamental mode.

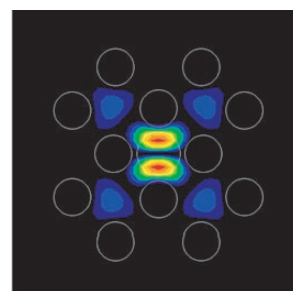


図6 高次モード (TE_{01})
Higher-order mode.

4. ファイバの作製

検討結果の最適な空孔構造を有するファイバを試作した。この試作の簡単な製造プロセスを図7に示す。最初に一般の光ファイバと同様の工程を経て、プリフォームを作製する。次にこのプリフォームに対し、最適な空孔構造の検討結果に基づき機械式ドリルを用いて穿孔加工を行う。空孔内面については穿孔後の微小クラックを取り除くために研磨を行う。作製した空孔を有する母材を相似形で線引きを行う。線引きの際、表面張力により空孔の大きさが小さくしようとしますが、これを防ぐため空孔内部に適切な圧力でガスを流し、所望の空孔径を保つように線引きを行う。作製したファイバの断面写真を図8に示す。

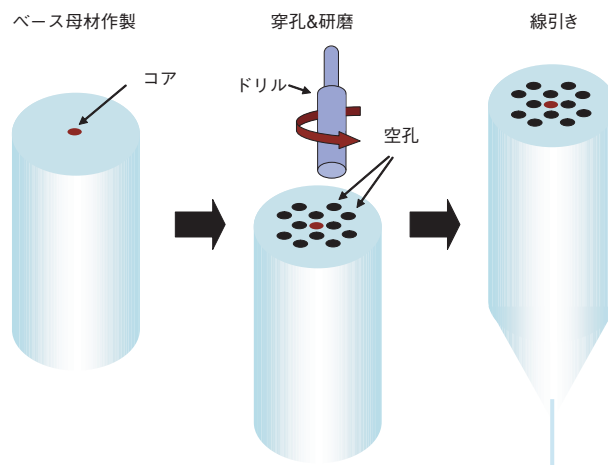


図7 母材作製
Manufacturing process of fiber preform.

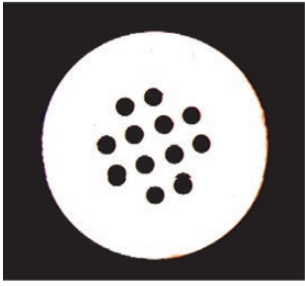


図8 HAFの断面写真
Cross-section of the fabricated HAF.

5. 試作ファイバの光学特性

表1に作製したHAF、及びCPFに使用するHNLFと、比較として従来のCPFに使用されているSMFの光学特性を示す。HAFの曲げ損失は非常に小さく、半径5 mm曲げにおいて0.01 dB/m、半径8 mm以上においては測定不能ほど小さい。図9に各種ファイバの曲げ損失特性を示す。HAFと通常のSMFとの違いは顕著であり、HAFがHNLFと同等の曲げ損失を有することがわかる。通常のSMFの場合、曲げ損失が大きいため直径60 mmのコイルが小型化の限界であるが、HAF、HNLFともにその低曲げ損失特性からより小径のコイル化が可能である。長さ200 m、直径30 mmのファイバコイルを作製したところ、損失増加及び偏波モード分散の劣化は見られなかった。またHAFは、非常に小さい曲げ損失を有しながら、カットオフ波長はITU-T-methodにより測定した結果、1390 nmであった。このことは、1550 nmの帯域において高次モードの伝搬が抑制されていることを示しており、上記構造検討の妥当性が確認された。

表1 光学特性一覧
Fiber characteristics.

@ 1550 nm		HAF	HNLF	SMF
Dispersion	$\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$	32.4	-0.66	16.3
Dispersion slope	$\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$	0.071	0.0015	0.0586
Attenuation Loss	dB/km	0.78	1.2	0.2
Cut-off wavelength	nm	1390	1310	≤ 1260
MFD	μm	6.9	3.5	10.4
Bending loss $r = 15 \text{ mm}$	dB/m	≤ 0.001	≤ 0.001	0.16
Bending loss $r = 5 \text{ mm}$	dB/m	0.01	≤ 0.001	> 100
γ [CW-SPM法]	$\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$	≈ 2	13.5	1.3

試作したHAFの波長1550 nmにおける分散値は $+32.4 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ と通常のSMFの約2倍の異常分散を有し、CPFにおける分散媒体としてのファイバ長を半減することが可能である。また、分散に対する分散スロープの比が通常のSMFに比べて小さく、累積分散値の波長依存性が小さくなるため、従来のSMFを用いたCPFに比べ、HAFを用いたCPFは広帯域でのパルス圧縮動作においても有利である。

HAFのMFDは $6.9 \mu\text{m}$ であり、非線形性はCW-SPM法で測定した結果、約 $2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ と通常のSMFよりも若干大きい

程度であり、CPFの分散媒体として用いることに特に問題はない。HAFのSMF及びHNLFとの融着損失はそれぞれ0.1 dB以下及び約0.1 dBであり、良好な接続性を有する。また、小径曲げでのファイバ破断を考慮し、HAFのファイバ外径は $80 \mu\text{m}$ としてあり、コイル化した際の占有体積の観点からも有効である。なお今回試作したHAFの波長1550 nmにおける伝搬損失は0.78 dB/kmであったが、上記試作後に製造プロセスを改善した結果、伝搬損失を0.274 dB/kmまで低減することができた。

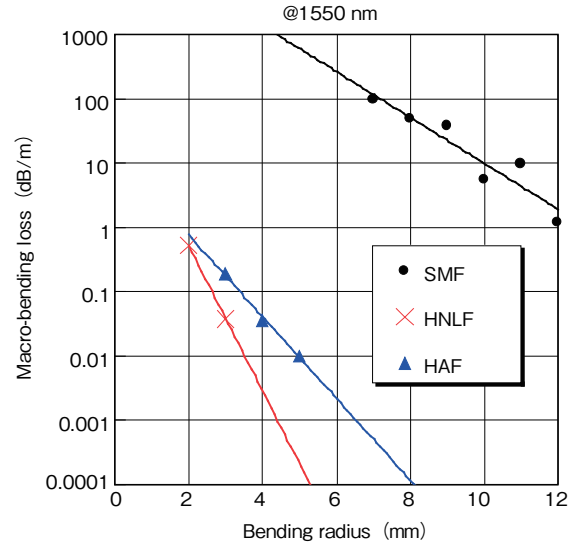


図9 曲げ半径と曲げ損失の関係
Macro-bending loss vs. bending radius.

6. CPFの設計及び作製

HNLF及び作製したHAFを、それぞれ非線形媒体及び分散媒体として交互に接続し、CPFパルス圧縮器を構成する。CW光をLN変調器で強度変調して得られる、40 GHz繰り返しRZパルス列の幅を3 psに圧縮するための三段CPFを設計した。設計結果を図10に示す。図10は、CPFを構成するHNLFとHAFそれぞれの分散値と非線形定数がファイバ長手方向の距離に従って櫛状に変化する様子を示している。なおHAFとHNLFのパラメータは、表1に示すとおりである。

図10に示したCPFでは、HNLFの総長が370 m、HAFの総長が365 mであり、CPF全体の長さは735 mである。一方、HNLFと通常のSMFとを交互に組み合わせた従来の構成で同じ特性を持つCPFを設計する場合、HAFとSMFの分散値の比

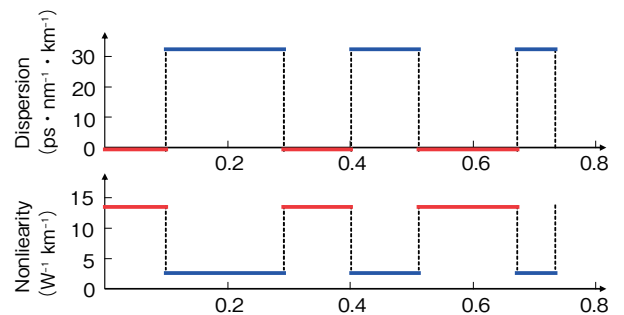


図10 CPF設計
Design of CPF.

のみで考えると、SMFの総長は730 mとなり、CPF全体の長さは1.1 kmと見積られる。つまりSMFに代えてHAFを用いたことにより、CPF全体の長さが従来比67%と大幅に短尺化できたことになる。これに加え、上述のようにHAFを内径30 mmでコイル化することで、各ファイバコイルの体積が低減され、CPFモジュール全体を著しく小型化することが可能である。

我々はHNLF及びHAFをともに直径30 mmのコイル状にして各々接続し、図11の右下に示すCDケースサイズ[120 mm (W) × 130 mm (D) × 15 mm (H)]の箱にこれらのコイルを収納し、CPFモジュールを作製した。図11の左側に示す従来型モジュールと比較すると、HAFを用いたことによりモジュールのサイズが大幅に小型化できた。

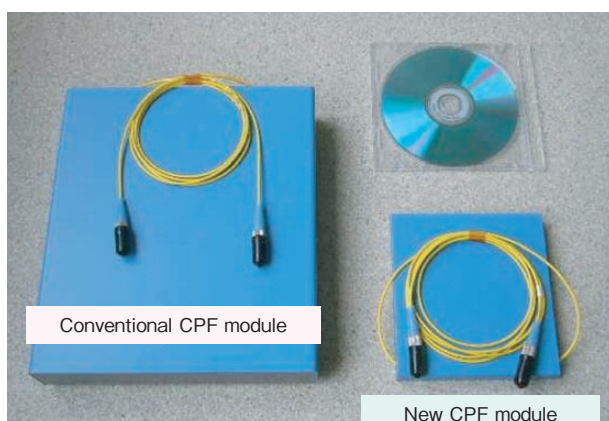


図11 従来のCPFモジュール及び新規CPFモジュール
Conventional (left) and proposed (right) CPF modules.

7. パルス圧縮実験

作製したCPFモジュールの動作を確認するため、図12に示す実験系で、40 GHz繰り返しパルス列に対するパルス圧縮実験を行った。波長が1530, 1550, 及び1570 nmのいずれかの、Cバンド(1530 ~ 1570 nm)波長可変光源(TLS)より出力される連続光を、LN変調器(LNM)で強度変調し、40 GHz繰り返しRZパルス列を発生させる。そのパルス列をEDFAで増幅した後、BPF (band-pass filter)でASE雑音を抑制し、さらにVOA (variable optical attenuator)で入力パワーを調整し、CPFに入力する。各入力波長におけるCPF入力パルス列の幅は8.5 ps、入力パワーは約21 dBmである。

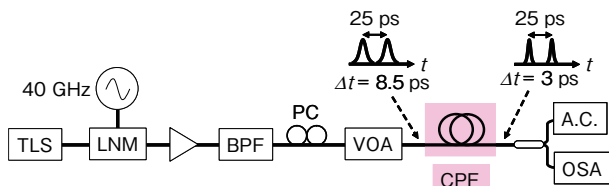


図12 実験系
Experimental setup for optical pulse compression.

入力パルスとCPF出力パルスの両方の自己相関波形とスペクトルを、それぞれ図13および図14に示す。図13の自己相関波形が示すように、出力パルスの幅はいずれの波長でも約3.0 psの値が得られた。また出力パルスの形状は、出力パルス

の形状としてsech²関数を仮定したときのフィッティング結果により精度で一致する。また図14に示すスペクトル測定結果も、sech²関数によるフィッティング曲線により精度で一致している。TBP (time-bandwidth product) $\Delta t \Delta \nu$ についても、理想的なソリトンパルスの値である0.315に近い値が得られた。以上の結果から、HNLFとHAFで構成された小型CPFモジュールを用いて、変調器より出力される40 GHz繰り返しパルス列に対する、Cバンド波長可変高品質パルス圧縮動作が実現されていることを確認した。

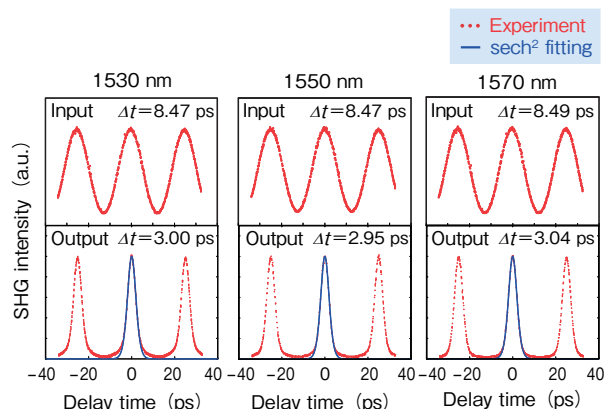


図13 CPF入出力パルス自己相関波形
Autocorrelation traces of the input and output optical pulse trains of the CPF.

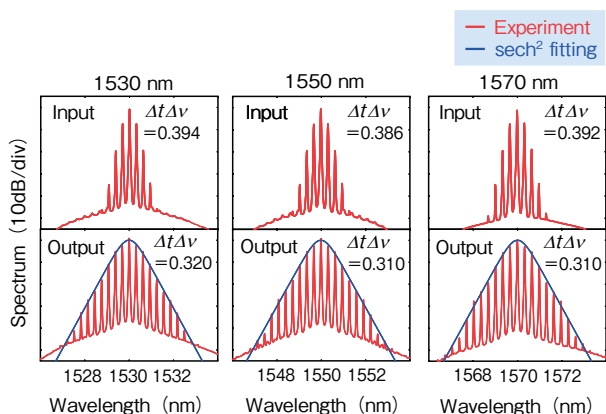


図14 CPF入出力パルスのスペクトル
Spectra of the input and output optical pulse trains of the CPF

8. おわりに

CPFパルス圧縮器モジュールの小型化に適したHAFの開発を目的として、曲げ損失低減HAFの構造の検討を行い、試作を行った。試作したファイバはシングルモード動作と曲げ損失の低減を両立し、大きな異常分散値を有する。試作したHAFとHNLFとを組み合わせ、従来よりも大幅に小型化したCPFモジュールを作製した。このCPFを用いてCバンド波長可変パルス圧縮実験を行い、圧縮動作が良好であることも確認した。

本稿では、光パルス圧縮器への提供を例としてHAFの低曲げ損失、高異常分散という特長を活かしたデバイスやコンポーネントへの適用を検討し、その有用性を示した。このような技

術検討，用途展開はFTTH用HAFの特性向上，製造技術改善にも活かせるものと期待している。

参考文献

- 1) T. Yasutomi et al.: "Development of optical drop and indoor cable for small radius bending," Proceedings of 53rd IWCS 11-12, (2004), 409.
- 2) R. Sugizaki et al.: "A study of optical fiber for FTTH," Technical Digest of OECC 5D2-2, (2005).
- 3) J. Zhou et al.: "Application of Hole-Assisted Type PCF with Good Bending Loss Performance," Proceeding of 52nd IWCS 2-1, (2003), 48.
- 4) R. Sugizaki et al.: "Benefits and Applications of smaller diameter fibers," proc. SPIE, **6019** (2005), 300.
- 5) J. Hiroishi et al.: "Dispersion slope controlled HNL-DSF with high gamma of 25W-1km-1 and band conversion experiment using this fiber," Proc. ECOC 2002, PD1.5, (2002).
- 6) K. Igarashi et al.: "Comb-like profiled fibre for efficient generation of high quality 160 GHz sub-picosecond soliton train," Electron. Lett., **41** (2005), 688.
- 7) K. Igarashi et al.: "Widely wavelength-tunable 40 GHz femtosecond pulse source based on compression of externally-modulated pulse using 1.4 km comblike profiled fibre," Electron. Lett., **41** (2005), 797.
- 8) M. Takahashi et al.: "Study of Down-sized Silica Highly Nonlinear Fibre," ECOC2005, We3.4.2, (2005).
- 9) M. Takahashi et al.: "Low-Loss and Low-dispersion-slope Highly Nonlinear Fibers," J. Lightwave Technol., **23** (2005), 3615.
- 10) T. Hasegawa et al.: "Recent advances in application of Holey Fiber," MOC2003, K2, (2003).
- 11) M. Koshiba et al.: "A vector finite element method with the high-order mixed-interpolation type triangular elements for optical waveguide problems," J. Lightwave Technol., **12**, (1994), 495.