

光ファイバセンシングの発展に貢献する特殊光ファイバ技術

光電子技術研究所 シリコン技術研究部 大道 浩 児¹
コーポレートR&D 開発企画センター 山内 良 三²

Specialty fibers and relevant technologies for fiber optic sensing

K. Omichi, and R. Yamauchi

光を活用したセンシング技術のひとつに、光ファイバセンシングがある。光ファイバ自体をセンサとして用いるこの技術は、航空宇宙、橋梁やトンネルなどの社会インフラ、原子力設備、天然資源の採掘現場などへ応用が広がっている。これらの応用ではセンサが特殊環境下におかれることが多く、光ファイバには計測目的と測定環境に応じたカスタマイズが必要となる。本稿では、センシング用途として開発された特殊光ファイバについて、具体例を挙げながら、その技術進歩を報告する。

Fiber optic sensing is one of the most important technologies in phonic sensing. Novel specialty fibers and relevant technologies have been developed for various application fields, such as avionics, infrastructures, atomic plants and oil & gas industries. In this paper, recent progress in the fiber optic sensing is reviewed with a focus on the specialty fibers.

1. ま え が き

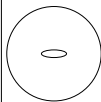
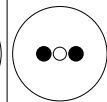
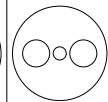
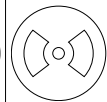
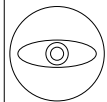
光ファイバを用いたセンシング技術は、石英ガラス系光ファイバが通信に実用化された1970年代に研究開発が始まり、すでに約40年もの歴史を有している。光ファイバセンシングの研究が開始された当初より、光ファイバを単なる伝送路として利用するだけでなく、ひずみ、温度、圧力、磁界などに応じてファイバ中を伝搬する光の様々なパラメータが変化する特性を活用し、光ファイバ自体をセンサとして利用する手法が多く提案された。航空宇宙分野で実用化が進む光ファイバジャイロがその代表例である。そして近年では、ひずみ、温度、圧力などに加えて形状や画像を計測するセンサが提案され、橋梁やトンネルなどの社会インフラ、原子力設備、天然資源の採掘現場などへ応用が広がっている。これらの応用ではセンサが特殊環境下におかれることが多く、光ファイバには計測目的と測定環境に応じたカスタマイズが必要となる。本稿では、センシング用途として開発された特殊光ファイバについて、具体例を挙げながら、その技術進歩を報告する。

2. 偏波保持ファイバ

光ファイバセンシングの代表的な計測手法である光干渉計では、ファイバ中を伝搬する光の偏波変動が計測精

度に大きな影響を与えるため、偏波面を保持したまま光伝送できる偏波保持ファイバが必要となる。この光ファイバは、コアに大きな複屈折を誘起することにより直交する2つの偏波モード間に大きな伝搬定数差を与え、偏波モード結合を抑制している。その結果、入射光の偏波面を保持して伝搬することができる。これまでに報告されている主な偏波保持ファイバを表1に示す。楕円コア型、サイドトンネル型は、屈折率分布を非軸対称にして複屈折を誘起する構造複屈折型に分類され、PANDA (Polarization-maintaining AND Attenuation-reduced) 型、ボウタイ型、楕円ジャケット型は応力分布を非軸対称にする応力複屈折型に分類される¹⁾。このうち、現在もっとも多く利用されているのはPANDA型(以下、PANDAファイバと記す)である。PANDAファイバは、コアが真円形状であるため通常のシングルモードファイバとの整合性が良い。また、2本のファイバの偏波軸を合わせて融着接続する技術も確立されている¹⁾。

表1 偏波保持ファイバ
Table 1. Cross sectional images of polarization-maintaining fibers.

分類	構造複屈折型		応力複屈折型		
	楕円コア	サイドトンネル	PANDA	ボウタイ	楕円ジャケット
偏波保持ファイバ					

¹ シリコン技術研究部 グループ長

² 常任顧問

略語・専門用語	正式表記	説明
PANDAファイバ	Polarization-maintaining AND Attenuation-reduced fiber	入射光の偏波面を保持して伝搬する光ファイバの一種.
モード複屈折率	—	直交する偏波 (x 偏波, y 偏波) に対する実効屈折率の差. モード複屈折率 B は, 以下の式で表される. $B = n_x - n_y = (n_{x0} - n_{y0}) + C (\sigma_x - \sigma_y)$ ここで, n_x と n_y は x 偏波および y 偏波の実効屈折率, n_{x0} と n_{y0} はコア構造に起因する x 偏波および y 偏波の実効屈折率, C は光弾性定数, σ_x と σ_y は x 偏波および y 偏波に対する応力を示す.
FBG	Fiber Bragg Grating	ファイバブラッググレーティング. 特定の波長 (ブラッグ波長) のみを反射する光ファイバ型デバイス.
RFBG	Regenerated Fiber Bragg Grating	FBG を 1000 °C 近くまで加熱し, いったんほぼ消失した屈折率変調を再生した FBG.
PCF	Photonic Crystal Fiber	フォトニック結晶ファイバ. 空孔の低屈折率性を利用して等価的なクラッドを構成した光ファイバ.
PBGF	Photonic Band-Gap Fiber	フォトニックバンドギャップファイバ. 屈折率の周期構造を局部的に崩し, その領域に光を閉じ込めた光ファイバ.
MCF	Multi Core Fiber	マルチコアファイバ. 複数のコアを備え, それぞれのコアに独立した光信号を伝送することができる光ファイバ.

代表的な光干渉計に光ファイバジャイロが挙げられる. PANDA ファイバで構成された干渉型光ファイバジャイロは, 角速度の計測誤差要因となるファイバ中の偏波変動と地磁気によるファラデー効果とが抑制される²⁾. また, PANDA ファイバの偏波面を 90 ° 回転させて接続した共振型光ファイバジャイロも提案されている³⁾. これらのなかでも, 航空機やロケットの姿勢制御や慣性航法に用いられる高精度の干渉型光ファイバジャイロでは, すべての光伝送路に PANDA ファイバが使用される. 角速度を検出するセンサ部は百~数千 m の PANDA ファイバを直径 50 ~ 200 mm 程度のコイルにしたものであり, ファイバが曲げや周囲温度変化に対して安定な特性を有するように, コアとクラッドの比屈折率差, モード複屈折率が最適設計されている⁴⁾.

PANDA ファイバのもうひとつの応用事例として, ひずみと温度の同時計測がある^{5),6)}. 長期間にわたってセンシングを行う場合, 外気温や計測対象物の温度変化による光ファイバ特性変動の補償が必須であり, 同時計測はこの技術課題を解決する手段として期待されている. この同時計測は, ひずみと温度に対する感度が直交 2 偏波で異なることを利用するものであり, 2 偏波間の感度差が大きいほど計測精度が向上する. 感度差の向上にはモード複屈折率の大きな PANDA ファイバが必要となり, B₂O₃ 濃度を高めた応力付与部をコアに近づける設計とすることで実現できる⁷⁾. 図 1 は, 高複屈折 PANDA ファイバおよび通信用 PANDA ファイバに作製したファイバブラッググレーティング (Fiber Bragg Grating, FBG) について,

ひずみと温度に対するブラッグ波長差の変化を比較したグラフである. モード複屈折率を高めることで, 温度に対するブラッグ波長差の変化が大きくなる結果が得られた. このグラフに示されるひずみ依存性と温度依存性の傾きの差が, ひずみと温度の分離精度を示すことから, 高複屈折 PANDA ファイバによる計測精度向上が実証された.

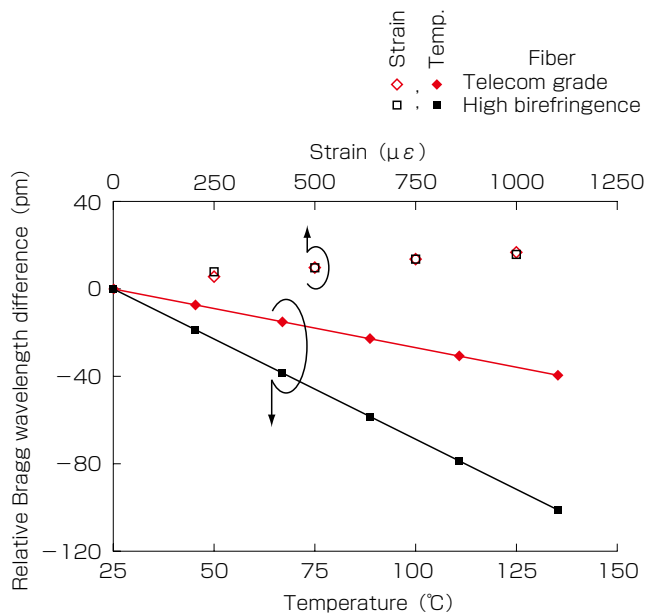


図 1 PANDA ファイバに作製した FBG におけるひずみと温度に対するブラッグ波長差の変化
 Fig. 1. Strain and temperature dependences of Bragg wavelength difference for PANDA fiber gratings.

3. 耐放射線ファイバ

光ファイバは、放射線環境下における情報伝送媒体としても注目され、古くから耐放射線特性に関する研究が多くおこなわれてきた⁸⁾。光ファイバに放射線が照射されると、ファイバ中に存在する酸素欠乏結合 ($\equiv\text{Si-Si}\equiv$) などの構造欠陥やガラスの共有結合 ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$) から、E' センター ($\equiv\text{Si}\cdot$) や非架橋酸素正孔センター ($\equiv\text{Si-O}\cdot$) などの欠陥を生成する。これらの欠陥種は元来、紫外から可視波長域に吸収を生じるが、欠陥量が大幅に増加すると、光ファイバの伝送帯域である近赤外波長域まで吸収テールを引き、伝送損失の増加につながってしまう。この損失増加を抑制する手段として、適度な濃度の水酸基 (-OH) を導入したファイバが知られている。水酸基は、非架橋酸素正孔センターを終端 (Si-OH) する役割を果たす。この水酸基含有光ファイバを用い、原子炉内部の温度測定や画像観察が試みられている^{9),10)}。図2は、原子炉内部観察のために開発されたファイバスコープの構造である。プローブ光を送るライトガイドファイバとイメージ伝送用のファイバは、コアに水酸基を含有した純粋石英ガラス、クラッドにフッ素添加石英ガラスが用いられている。

また、水酸基に変えて、コアにフッ素を添加したファイバも耐放射線特性に優れている¹¹⁾。フッ素は、E' センターと非架橋酸素正孔センターのいずれをも終端 ($\equiv\text{Si-F}$) する効果がある。図3は、Co-60 γ 線照射量に対するファイバの伝送損失変化を示すグラフである。純粋石英コアファイバでは線量に対して損失が単調増加するのに対し、フッ素添加コアファイバは低線量ですぐに飽和傾向を示し、総線量 10,000 Gy において、わずか 2 dB/km の損失増加であった。このフッ素添加コアファイバは、紫外線照射によるFBGの作製が困難とされていたが、現在では超短パルスレーザーによる作製技術が進歩し、センサへの活用が積極的に進められている¹²⁾。

4. 厳温環境光ファイバ温度センサ

石英ガラスを主成分とする光ファイバは、極低温から 1000 °C 前後の高温環境まで安定した性質を示す。この性質をいかして、厳温環境で活用できる光ファイバ温度センサの研究が精力的に行われている。

高温環境では、紫外線照射により作製したFBGの屈折率変調が、熱エネルギーにより消失する課題があった。しかしながら近年、FBGを 1000 °C 近くまで加熱すると、いったんほぼ消失した屈折率変調が再生する現象が報告されている。この再生現象を経たFBGは、Regenerated FBG (RFBG) と呼ばれている¹³⁾。図4は、RFBGの再生過程を示すグラフである。このFBGの反射率は、900 °C まで昇温した直後に 0.01 % (-40 dB) 以下にまで下がるものの、その後すぐに 3 % (-15 dB) 程度まで回復する。再生した屈折率変調は、再生温度で

ある 900 °C で再消失することがないため、高温容器や発電用熱交換器の温度を計測するセンサとして応用が期待されている。

一方、極低温環境で用いるセンサは、金属被覆による

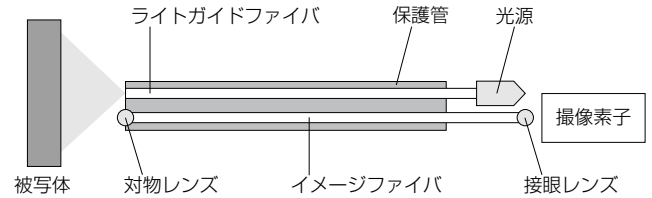


図2 ファイバスコープ

Fig. 2. Schematic diagram of a fiber optic scope.

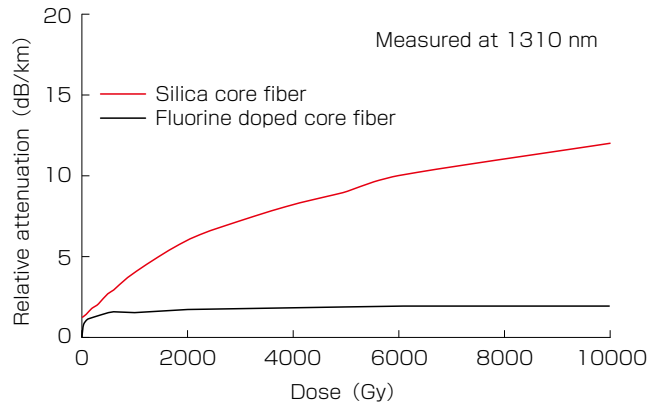


図3 Co-60 γ 線照射量に対する耐放射線ファイバの伝送損失変化

Fig. 3. Attenuation variation of a radiation resistant fiber for Co-60 γ ray irradiation.

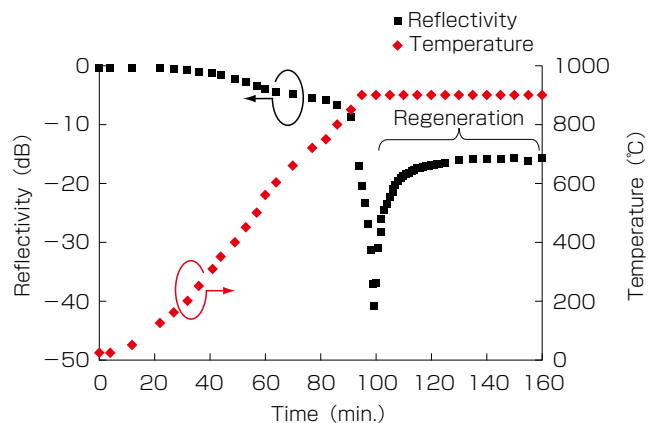


図4 RFBGの再生過程

Fig. 4. Regeneration process of an RFBG.

感度向上が試みられている。温度変化に対するFBGのブラッグ波長シフト $\Delta\lambda_B$ は、ファイバの実効屈折率 n 、グレーティング間隔 Λ 、線膨張係数 α 、実効屈折率の温度依存性 dn/dT を用いて、式(1)で表すことができる。

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left[\alpha + \frac{dn/dT}{n} \right] \Delta T \quad \dots (1)$$

$$\text{ただし, } \alpha = \frac{A_{\text{fiber}} E_{\text{fiber}} \alpha_{\text{fiber}} + A_{\text{coating}} E_{\text{coating}} \alpha_{\text{coating}}}{A_{\text{fiber}} E_{\text{fiber}} + A_{\text{coating}} E_{\text{coating}}}$$

ここで、 A は断面積、 E はヤング率を示し、添え字はファイバおよび被覆材の値であることを示す。石英ガラスは線膨張係数 α が小さいうえ、極低温では実効屈折率の温度依存性 dn/dT も小さくなることから、センサ感度が小さくなる課題があった¹⁴⁾。そこで α を大きくするために、ヤング率と線膨張係数が大きい金属を被覆して感度を向上する検討が行われている。図5は、ニッケル被覆FBGのブラッグ波長温度依存性を示すグラフである。ニッケル被覆により大きなブラッグ波長シフトが得られ、温度分解能の高いセンサ実現の可能性が示された。このセンサは、被覆材のヤング率と線膨張係数が既知であれば、ブラッグ波長シフトの被覆径依存性を計算することができるので、自由度の高い感度設計が可能である。

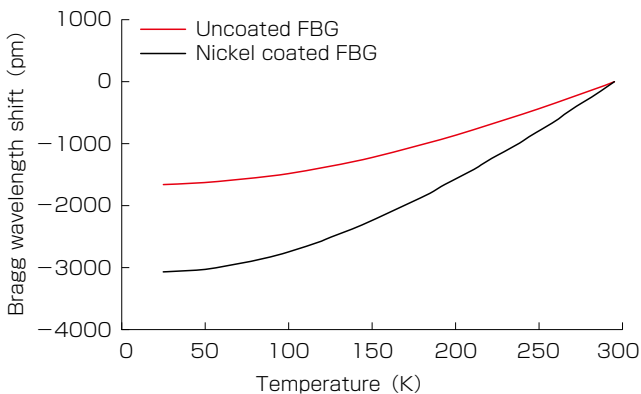


図5 ニッケル被覆FBGのブラッグ波長温度依存性
Fig. 5. Temperature dependence of Bragg wavelength for a nickel coated FBG.

5. 微細構造ファイバ、マルチコアファイバ

ホーリーファイバ、フォトニック結晶ファイバ (Photonic Crystal Fiber, PCF)、フォトニックバンドギャップファイバ (Photonic Band-Gap Fiber, PBGF) などと呼ばれる微細構造ファイバは、設計によって、(1) 伝送帯域の拡大、(2) 非線形性のコントロール、(3) 複屈折性、などの機能を発現することができる。表2は、これまで当社が試作した微細構造ファイバの一例である。全反射型 (屈折率導波型) PCFは、空孔の低屈折率性を利用して等価的なクラッドを構成したファイバである。光ファイバセンサとしては、ひずみ、圧力、温度が、空孔構造に依存して特異な変化を示すことを利用したものが報告されている¹⁵⁾。PBGFは、屈折率の周期構造を局部的に崩し、その領域に光を閉じ込めるファイバである。このうちエアコア型PBGFは、光ファイバジャイロへの適用が検討されている¹⁶⁾。一般に光ファイバジャイロでは、レイリー散乱光による干渉雑音を低減させるため、低コヒーレンスの広帯域光源が使用されるが、エアコア型PBGFではレイリー散乱光が極めて少ないので、高コヒーレンスのレーザ光源が使用でき、結果として測定誤差要因となる種々の雑音を低減できることが示されている。

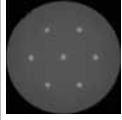
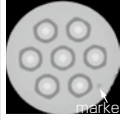
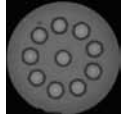
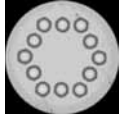
マルチコアファイバ (Multi Core Fiber, MCF) は1本の光ファイバに複数のコアを備え、それぞれのコアに独立した光信号を伝送することができるファイバである。MCFは、光通信の伝送容量限界を打ち破るブレイクスルー技術として注目されており、2012年には12コアのMCFを用いて1.01 Pb/s/fiberという世界記録が樹立された¹⁷⁾。表3は当社が試作したMCFの一例である。開発当初は単純なステップ構造の屈折率分布を持つコアを六方最密に配置するファイバが提案されていたが、その後すぐに、コア間のクロストーク低減と実効コア断面積拡大の両立を目的としてトレンチ型の屈折率分布をもつファイバが主流となった。また、二種ピッチ、環状配置のように独特のコア配置構造を有するファイバも提案されている。ファイバの性能向上に加え、MCFをコア本数分のシングルコアファイバに分岐する入出力 (ファンイン・ファンアウト) デバイス¹⁸⁾やコネクタ接続技術の

表2 微細構造ファイバ
Table 2. Cross sectional images of micro-structured fibers.

分類	全反射型 (屈折率導波型)				フォトニックバンドギャップ型	
	ホールアシスト型	偏波保持型	大 A_{eff} (実効コア断面積) 型	高NA (開口数) 型	エアコア型	全固体型
微細構造ファイバ						
特徴, 応用	・低曲げ損失	・偏波保持型光部品 ・センサ	・広波長帯域伝送 ・低非線形性	・光増幅器 ・ファイバレーザ	・ハイパワー伝送 ・光ファイバジャイロ	・ファイバレーザ

表3 マルチコアファイバ

Table 3. Cross sectional images of multi core fibers.

マルチコア ファイバ	六方最密構造		二種ピッチ 構造	環状配置 構造
				
屈折率分布	ステップ	トレンチ	トレンチ	トレンチ
コア数	7	7	10	12

進歩により、MCFの実用性は急速に高まっている。光ファイバセンサでは、ファイバの曲げ方向を検出して光ファイバ長さ方向に沿った形状を計測する試みが始まっており¹⁹⁾、これに適用可能な入出力デバイスとコネクタも報告されている²⁰⁾。これらの例のように、微細構造ファイバやマルチコアファイバは、新たなセンシング技術を産み出す可能性を秘めている。

6. む す び

本稿では、光ファイバセンシング用途として開発された特殊光ファイバに焦点をあて、その進歩を報告した。本稿で取り上げたファイバは、ほんの一例であり、実際には数多くの特殊ファイバが計測目的と測定環境に応じて提案、試作されている。センシングニーズに応じたファイバ改良は日々進められており、今後も光ファイバセンシング技術の発展に寄与できるものと考えられる。

謝 辞

耐放射線ファイバ研究の一部は、独立行政法人日本原子力開発機構と共同でなされたものである。極低温センサ研究の一部は、公益財団法人鉄道総合技術研究所と共同でなされたものである。マルチコアファイバ研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究／革新的光ファイバ技術の研究開発の一環としてなされたものである。関係諸氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 大道浩児ほか：「偏波保持ファイバとその応用」, 第51回光波センシング技術研究会講演論文集, LST51-6, pp. 41-48, 2013
- 2) K. Okamoto, et al. : "All-PANDA-Fiber Gyroscope with Long Term Stability," Electron. Lett., Vol. 20-10, pp. 429-430, 1984
- 3) X. Wang, et al. : "Reduction of Polarization-Fluctuation Induced Drift in Resonator with Twin 90° Polarization-

- Axis Rotated Splices," Optics Express, Vol. 18, No. 2, pp. 1677-1683, 2010
- 4) 姫野邦治ほか：「偏波保持光ファイバ」, フジクラ技報, Vol. 85, pp. 1-9, 1993
- 5) M. Sudo, et al. : "Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using PANDA Fiber Grating," OFS-12, Proc. of OFS-12, pp. 170-173, 1997
- 6) W. Zou, et al. : "High-Accuracy Discriminative Sensing of Strain and Temperature by Use of Birefringence and Brillouin Scattering in a Polarization-Maintaining Fiber," OFS-19, Proc. of SPIE, 7004-105, 2008
- 7) 林和幸ほか：「高機能偏波保持光ファイバ」, 信学技報, Vol. 114, No. 64, OFT2014-6, pp. 25-30, 2014
- 8) E.J. Friebele, et al. : "Radiation-induced optical absorption bands in low loss optical fiber waveguides," J. Non-Cryst. Solids, Vol. 38 & 39, pp. 245-250, 1980
- 9) 角田恒巳ほか：「光技術による原子炉計測システムの開発 (Ⅶ) : 炉内マルチ計測システム」, 原子力学会2002年秋の大会, I-34, 2002
- 10) 内藤裕之ほか：「高速炉の炉容器内観察のための高耐放射線性ファイバスコープの開発 (その2)」, 原子力学会2010年秋の大会, J-40, 2010
- 11) 愛川和彦ほか：「耐放射線シングルモード光ファイバ」, フジクラ技報, No. 113, pp. 10-14, 2008
- 12) D. Grobncic, et al. : "Radiation sensitivity of Bragg gratings written with femtosecond IR lasers," Fiber Optic Sensors and Applications VI, Proc. of SPIE, Vol. 7316, 73160C, 2009
- 13) J. Canning, et al. : "Helium and Regeneration in Optical Fibres," OFS-22 PDP, OF200-20, 2012
- 14) M. Frövel, et al. : "Multiplexable fiber Bragg grating temperature sensors embedded in CFRP structures for cryogenic applications," Proc. of the 3rd EWSHM, pp. 938-945, 2006
- 15) W. Urbanczvk, : "Birefringent microstructured fibers : new opportunities for sensing," OFS-20, OF101-04, 2009
- 16) M.J.F. Dignonnet, et al. : "Coherent backscattering noise in a photonic-bandgap fiber optic gyroscope," OFS-20, Proc. of SPIE, Vol. 7503, 750302, 2009
- 17) H. Takara, et al. : "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," Proc. of ECOC 2012, Th.3.C.1, 2012
- 18) H. Uemura, et al. : "Fused Taper Type Fan-in/Fan-out Device for Multicore EDF," Proc. of OECC 2013, TuS1-4, 2013
- 19) C.G. Askins, et al. : "Bend and Twist Sensing in a Multiple-Core Optical Fiber," OFC/NFOEC2008 Technical Proceedings, OMT3, 2008
- 20) K. Omichi, et al. : "Multi-core to 7 single-core-fibers fan-out device with multi-core fiber pigtail connector," OFS-23, Proc. of SPIE, 9157-501, 2014