

# 光ファイバセンシング総論

日本大学 藤井陽一  
東京大学 村山英晶

近年、光ファイバを用いたセンシング技術の発展は著しく、数十キロメートルの広域から数ミリメートル以下の微小領域での計測、また、さまざまな物理・化学量の計測が可能になっている。先端技術に関わる実験での利用の他に、橋梁、航空機、船舶といった実構造物の応答を計測し、その情報から健全性を評価する試みがなされている。また、防災という観点から、鉄道、道路、ライフラインといった社会基盤インフラの安全性を高める活動が、計測器メーカーを中心とした協会により活発化している。本稿では、光ファイバセンシングが新しいプラントメンテナンスを切り拓く期待を込めて、その技術を紹介するシリーズの第一段として、その概要について解説する。

## 1. 光ファイバセンシング

光ファイバによる通信技術の発展は目覚ましく、現在では通信システムの基幹を担い、またFTTH(Fiber To The Home)に代表されるように各家庭までのアクセス回線にも用いられている。一般的な光ファイバは、光の伝搬経路となるコアと、光をコア内に閉じ込めるクラッド、応力を吸収し緩衝層として機能する被覆から構成される。コアはクラッドよりもわずかに屈折率が高いため、光は全反射を繰り返しながら特定のモードとして伝搬していく。コア径を十分に小さくしたシングルモードファイバ(SMF)では、単一のモードだけが伝搬し、石英系のものでは伝搬損失は理論限界に近い0.2 dB/kmを実現している<sup>1)</sup>。10 km伝送しても半分以上の光が届くことになる。

光ファイバのセンサ利用について、開発初期の

1986年に技術全般がまとめられた文献では<sup>2)</sup>、変位や振動計測が可能な干渉型センサ、強度型センサとしてOTDR(Optical Time Domain Reflectometry)による分布計測手法が主な技術として紹介されている。これら初期のセンサは、現在、干渉型は高精度の音響・振動・地震計測、強度型はファイバの曲げ損失や端面での反射光の変動に変換するトランスデューサを利用することで、広域の変位・水位・雨量計測、落石・土石流検知などに利用されている。

現在の光ファイバセンサの主流となっている分布計測技術に関する重要な発明<sup>3)</sup>・発見<sup>4)</sup>が報告されたのは、ともに1989年で、前者はファイバ側面から紫外線を照射してFiber Bragg Grating(FBG)と呼ばれる周期的な回折格子をコア内に作成する方法の発明であり、ひずみあるいは温度により回折格子の周期と屈折率が変化するため、FBGはひずみ・温度センサとして利用できる。後者は媒質中のフォノン(音波)との相互作用によって生じるBrillouin散乱光の周波数シフト量が、ひずみあるいは温度により変化することが発見され、これもひずみ・温度センサとして利用される。分布計測の原理については後述する。

一方、1988年に起きたアロハ航空243便の事故は、ヘルスマニタリングと呼ばれる、センサによる構造健全性の常時またはオンデマンド監視を基本とする新しい構造物の保守管理技術概念が広く普及する契機となった。機体前方から主翼付近までの天井が吹き飛ぶという致命的な破壊を受けながらも、奇跡的に帰還したことで有名である。飛行回数が多い(離着陸が極端に多い)経年機体において、疲労による複数のき裂損傷が同時

進行的に進展し、それが一気に結合して破壊に至ったというのが事故概要である。また、整備士は見つけることができなかったが、事故飛行直前にき裂に気付いていた乗客もいた。航空機分野では信頼性設計技術として損傷許容設計が発展してきたが、このように設計時に考慮されていない厳しい運用条件、経年劣化、マルチサイト損傷、整備・点検作業の不備といったことを原因とする事故経験によって、従来の設計・保守管理技術の限界が認識され、ヘルスマonitoringが注目されるようになった。そしてヘルスマonitoringというニーズが、光ファイバセンシング分野での多くのシーズ開発をドライブし、かつニーズ指向の研究のモチベーションとなった。

ヘルスマonitoringは構造物の状態基準保全の一手法と考えてもよいが、生物や人間を手本として状態監視のための自動化されたシステム(センサとプロセッサ)を構造物自身に装備させ、自己診断機能により適切な運用と保守管理を促すものであり、常時・オンデマンドを基本としている。そのため一般的な状態基準保全の効能に加え、異常事態、たとえば地震直後の健全性の把握など緊急時への迅速な対応も可能であり、またモニタリング結果を、構造物に大きなストレスを生じさせない運用支援に利用できる<sup>5)</sup>。

しかし、自己診断性を構造物に付与するには、生物や人間の神経網に匹敵する高精度かつ高密度な、そして構造物が運用される環境のなかでも高い信頼性をもつセンシングシステムが必要となることは容易に想像できる。このことがヘルスマonitoring、あるいは広域・多様なモニタリング情報をもとにした高度な状態基準保全、防災を実現し得る計測技術として光ファイバセンサが注目される理由である。すなわち、従来の電気センサにはない、または実現困難な細径・軽量、可とう性、耐久性・耐食性、耐電磁ノイズ・耐電圧性、遠隔・分布計測、センサ部に電源供給が不要といった優位性、特徴に大きな期待がかけられたと言える。

以下に、光ファイバセンシングが適用可能な計測量、上述した分布計測技術の原理とその応用事

例について述べ、最後に著者らが参画する光防災センシング振興協会について紹介する。

## 2. 適用可能な計測量

光ファイバを用いたセンシング技術の特長の1つとして、光ファイバという共通のデバイスによって、多様な物理・化学量を計測・検知できることが挙げられる。以下に代表的な計測量・検知対象について紹介する。

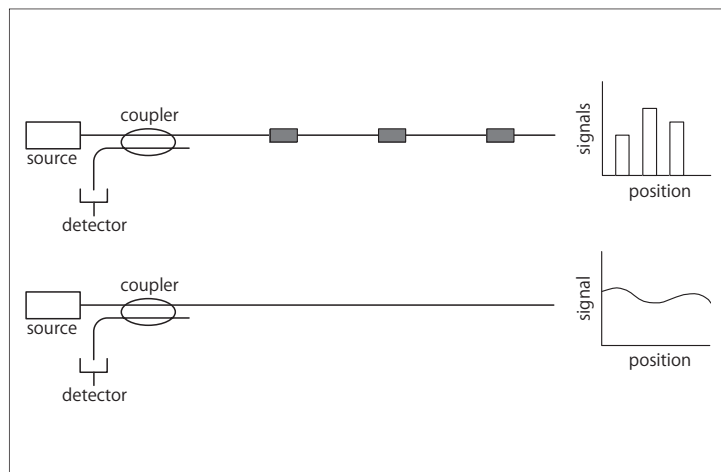
### (1) 温度

温度を計測できる代表的なセンシング原理は、Raman 散乱光、Brillouin 散乱光、FBG、Fabry-Perot、蛍光発光などである。Raman 散乱光はガラスの格子振動とエネルギーの授受を伴う非弾性的な相互作用によって生じ、振動数が入射光より低いストークス光と高いアンチストークス光がある。Raman 散乱光の強度は温度に依存し、アンチストークス光とストークス光の強度比から温度を求める。Brillouin 散乱光同様に OTDR を用いれば光ファイバに沿って温度を計測することができる。一般的な測定精度と範囲は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $-200 \sim 350^{\circ}\text{C}$ であるが、金属管で保護したファイバ(日鐵住金溶接・ピコセンサ)を用いれば $500^{\circ}\text{C}$ まで計測可能である。Brillouin 散乱光を用いた温度センサはRaman 散乱光と同様の精度・範囲があると考えてよいが、FBG の反射光スペクトルは高温領域で時間とともに弱くなることがある。Fabry-Perot 干渉型の温度センサは、分布計測には使えないが、より高温領域( $\sim 600^{\circ}\text{C}$ )に適している。サファイア光ファイバを用いれば $1800^{\circ}\text{C}$ まで適用できると考えられている。蛍光発光材料のスペクトルあるいは蛍光緩和時間の温度依存性を利用したセンサは $-40 \sim 250^{\circ}\text{C}$ で動作するが、低コストという利点がある。温度センサは最も早くから実用化が進んだ。

### (2) ひずみ・変位

ひずみ計測に最もよく使われるのは、FBG と Brillouin 散乱光である。FBG は後述する単点計測あるいは分布計測に利用できる。精度はひずみゲージとほぼ同様と考えてよいが、温度補償をす

図表—1 準分布型(上)と分布型(下)センサ



れば絶対ひずみが計測でき、クリープ変形などの定量評価にも利用できるだろう。通常2～3%のひずみまで耐えることができる。Brillouin 散乱光を用いたひずみセンサは分布計測を特長としている。変位計測にはさまざまな原理が利用できるが、Fabry-Perot などの干渉型では高精度の計測が可能である。また、光ファイバのコアを曲げの中立軸からずらして複数配置し、それらにFBGを直列に設置すれば、曲率、すなわち形状を計測できる<sup>6)</sup>。

### (3) 振動

振動計測に対しては干渉型、FBG がよく用いられる。干渉型センサは、ハイドロフォンとして水中音響波の計測に Mach-Zehnder 型のセンサが利用されたのをきっかけに、地震計や材料が破壊する際に放出される弾性波、acoustic emission (AE) の検知に利用されているほか、配管の板厚モニタリングに応用されている。FBG は、多点で DC～数百 Hz の振動計測が可能である。干渉型と同様に数百 kHz～数 MHz オーダーの超音波計測へも応用されている。電気的なノイズに強く、高温領域での利用も可能であることが、振動計測における利点である。

### (4) 圧力

圧力計測は、ひずみゲージ式のものと同様にダイヤフラムとFBGやFabry-Perotなどを組み合わ

せたものが一般的である。水位計などに応用されている。また、ファイバ先端にMEMSやシリコン膜をつけた極細径圧力センサの開発も行われている<sup>7)</sup>。圧力センサだけでなく、MEMSや微細加工技術と融合させた超小型センサの開発は、今後盛んになると予想される。

### (5) ガス・放射線

分光分析を利用したガスの種類や濃度を計測する光ファイバセンサは古くからある。他の手法として、特定ガスの反応物質を膜としてファイバ側面あるい

は端面に形成し、透過光・反射光の強度変化から水素などのガス検知を行う方法が開発されている<sup>8)</sup>。側面に膜を形成する場合は、コアからクラッドに浸み出して伝搬するエバネッセント波を利用する。またシンチレーションファイバと呼ばれる特殊な光ファイバを用いて放射線の分布計測が可能となっている<sup>9)</sup>。

### (6) 腐食

保守管理の上で非常に有効な技術となるため、腐食を早期に検知するセンサのニーズは高い。蛍光色素分子とエバネッセント波を利用した腐食センサや、ファイバ端面に金属薄膜を蒸着して反射強度の変化から腐食進行を検知するものなど、いくつかの研究例がある<sup>10)</sup>。実用化には感度など改善すべき点があると思われる。

## 3. 分布計測技術

光ファイバに沿って特定あるいは任意の位置で計測ができるものを準分布型センサ・分布型センサと呼ぶ。図表—1にそれぞれの形態とセンサ出力のイメージを示す。以下に準分布型センサとしてFBGを、分布型センサとしてBrillouin-OTDR (BOTDR)の原理を述べる。またこれらの応用事例について紹介する。

### 3-1 FBG

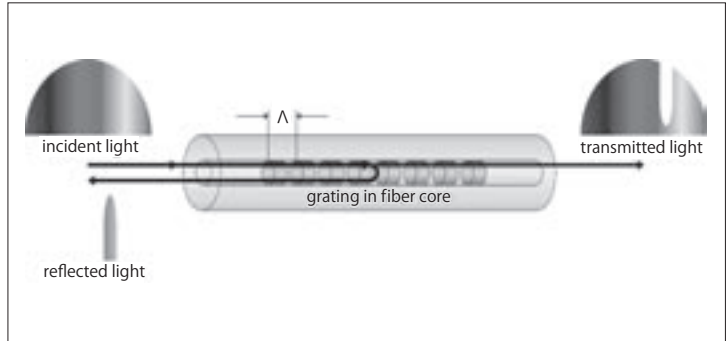
図表—2に示すように、コアにFBGを形成した光ファイバに広帯域の光を入射すると、特定の波長の光が反射され、残りは透過する。FBGは通信分野では波長フィルタとして利用できる。反射される特定波長 $\lambda_B$ はブラッグ波長と呼ばれ、コアの有効屈折率 $n_{eff}$ と回折格子の間隔 $\Lambda$ を用いて $\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$ と表せる。格子間隔と屈折率がひずみや温度によって変化すると、ブラッグ波長がシフトするため、センサとして利用できる。

FBGを準分布型センサとして利用する方法はいくつかあるが<sup>11)</sup>、図表—3に波長分割多重(WDM)方式の原理を示す。格子間隔の異なるFBGをファイバの特定位置に配置すれば、それぞれのFBGからの反射光の波長スペクトルが観測される。温度やひずみによってそれらのスペクトルがシフトしたとき、それぞれが重ならないよう注意する必要があるため、一般的には1本の光ファイバにつき10~30の計測点に制限されるが、時間分割多重(TDM)や光周波数領域反射測定法(OFDR)を用いれば、より多くの計測点を配置できる。

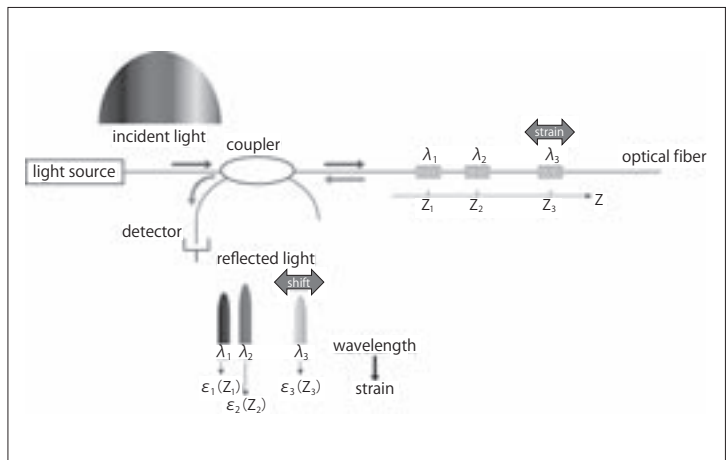
### 3-2 BOTDR

光はファイバ中を伝搬しながらあらゆる方向に散乱するが、その内伝搬方向と逆方向に散乱するものを後方散乱光と呼ぶ。観測される後方散乱光には、図表—4に示すようにRayleigh、Brillouin、Raman散乱光があ

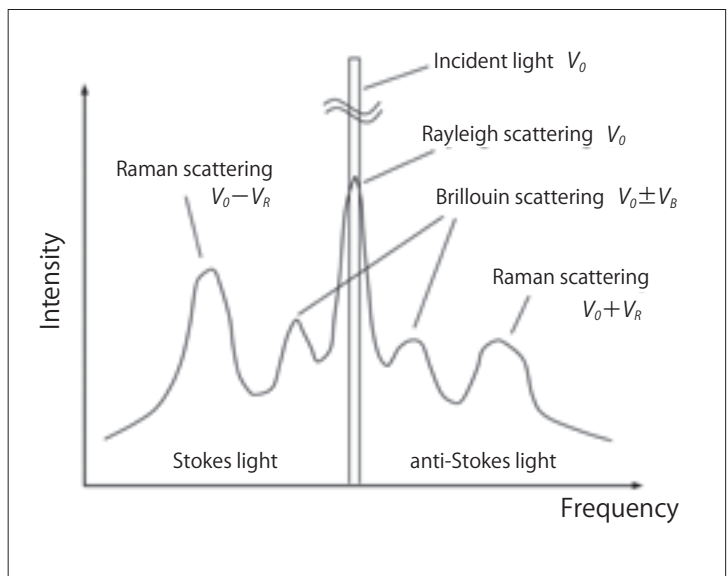
図表—2 FBGの原理



図表—3 準分布計測の原理



図表—4 光ファイバ内に発生する3つの散乱光





る。パルス光を入射した場合、観測時と入射時の時間差から、ファイバ中のどの位置からの後方散乱光かがわかる。これが OTDR の原理であり、通常の OTDR は入射光と同じ周波数を持つ Rayleigh 後方散乱光の強度をファイバ位置に對

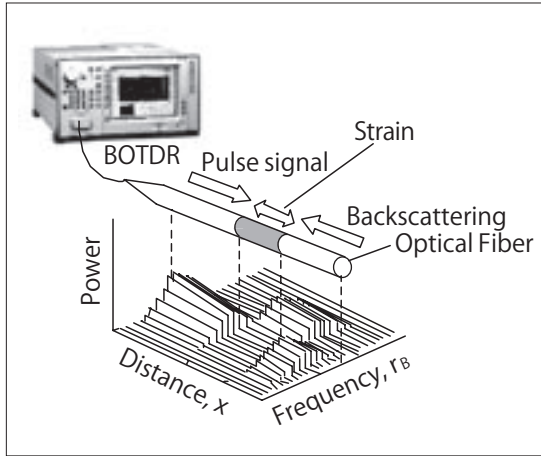
して表示できる。OTDR を用いた分布型センサも多く開発されている。

OTDR と組み合わせて Brillouin 後方散乱光と Raman 後方散乱光を観測するものをそれぞれ BOTDR と ROTDR と呼ぶ。BOTDR は図表—5 に示すように、ファイバに沿って Brillouin 周波数スペクトルを得ることができる。各位置の周波数スペクトルは、その位置でのファイバに加わるひずみあるいは温度によってシフトする。図表—5 ではファイバの中央付近の領域でひずみによって周波数スペクトルが高周波数側にシフトしている様子を表している。このシフト量から各位置のひずみを求めることができる。

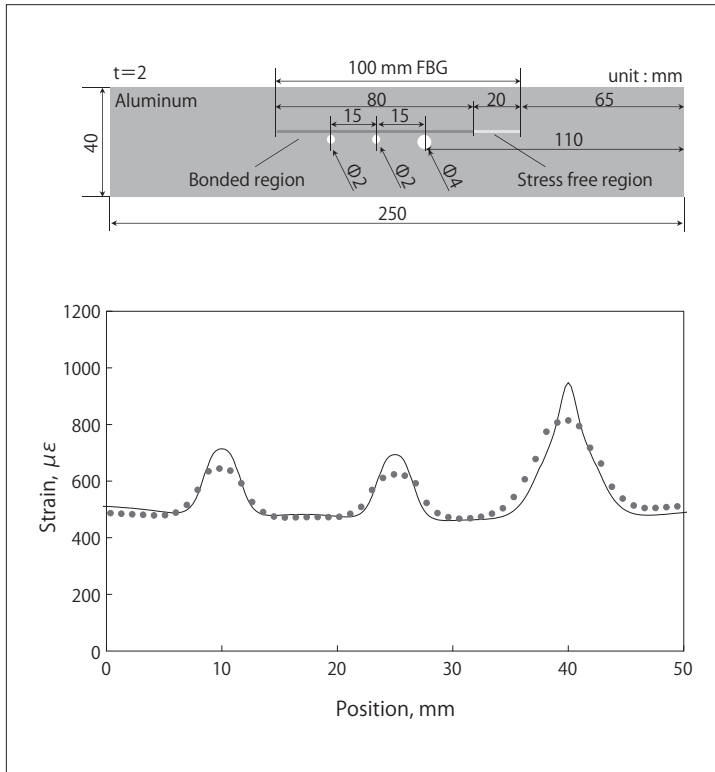
OTDR を用いた分布計測では空間分解能がしばしば問題となる。空間分解能とは、計測量を識別可能な 2 点間の最小距離であり、たとえば、空間分解能が 1m の BOTDR で計測されるひずみ分布がファイバに沿って 10 cm ごとに出力されたとしても、各点のひずみは前後 50 cm の平均的なひずみと考えられる。

正確ではないが、1m のひずみゲージを 10 cm 間隔に並べて計測したものに相当する。これはパルス光を用いるため、その幅の分だけ情報が重畳することによるが、パルス光の幅を小さくしていくと精度とのトレードオフが生じるため、BOTDR や ROTDR の空間分解能は 1m が一般的な限界とされる。現在では、さまざまな技術により空間分解能の向上が図られ、Brillouin 光相関領域解析法(BOCDA)によれば数 mm を達成している<sup>12)</sup>。

図表—5 BOTDR の原理



図表—6 孔周りのひずみ分布計測(上：試験片、下：計測結果)



### 3-3 分布計測の応用事例

分布計測の応用事例について、広域と微小領域のモニタリングに分けることができる。

広域の例として、BOTDR や FBG などのひずみセンサを用い

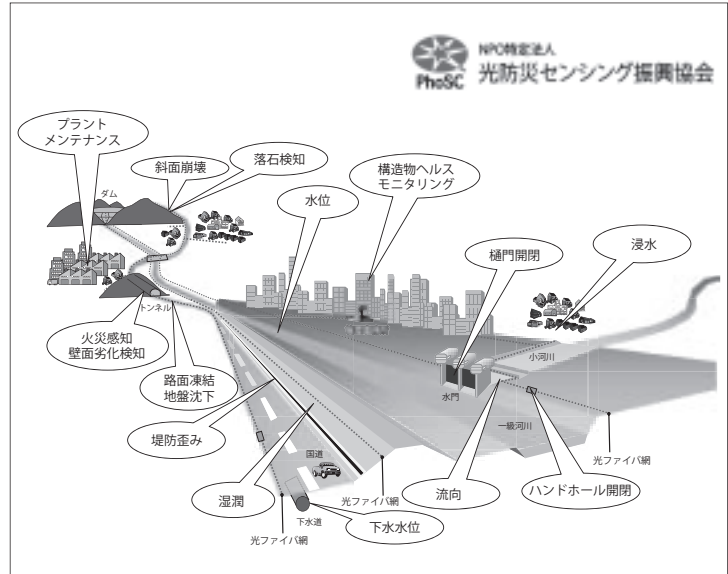
た地盤・堤防変状、地滑り、海底地震、河川水位、橋梁・トンネル変位、船体構造変位、ROTDRやFBGなどの温度センサを用いたトンネル・地下鉄構内防災システム、送電ケーブル・配管の温度モニタリングといったものがある。詳細は本誌にて別途紹介する。

高い空間分解能を持った分布計測技術を応用した微小領域のモニタリング例は、構造物の応力集中部、機械・溶接・接着継手構造、複合材料の内部損傷検知といったものに応用されている。図表—6はアルミの有孔引張試験片の応力集中部のひずみ分布を計測した例である。直径2mmの2つの孔、4mmの1つ孔が直列に並んでいる。グラフの実線および丸は、それぞれ有限要素解析および計測によるひずみ分布である。光ファイバ1本を使うだけで、高い精度かつ高密度の情報が得られることがおわかりになると思う。従来のひずみゲージによってこのような結果を得るのは困難であろう。

#### 4. 光防災センシング振興協会の活動

光ファイバを用いたセンシング技術は、性能、多様性の面で大きく進展・拡大してきた。また、国内外で各種モニタリングへの利用・普及も進んでいる。欧米・日本が先行してきたが、とくに橋梁関係では東アジアでの応用事例が近年増えている。一方で、長期的な視点から本技術の利用価値を向上させる、アプリケーションへの対応や新たなビジネス・サービスの創出、規格・標準化に向けた取組み、技術者の育成、普及活動を担うコンクリートな組織がなかった。約5年の準備期間を経て、平成21年4月からNPO法人光防災センシング振興協会(URL: <http://www.hikaribosai.com/>)が発足し、平成21年7月現在、26社が連携してこれらの取組みを企画・実施している

図表—7 主な活動対象



(図表—7)。今後、国内のみならず国際的にも存在感を高めることが期待されている。

この場を借りて、日本プラントメンテナンス協会会員の皆様のご支援・協力・連携をお願いするとともに、日本の保全技術と生産性をさらに向上させるための一助になるよう努力を続けていきたいと考えている。

#### ■参考文献

- 1) 黒澤宏他、ファイバー光学の基礎、オプトロニクス社、2003、p. 50.
- 2) 大越孝敬、光ファイバセンサ、オーム社、1986、pp. 125-206.
- 3) G. Meltz et al., *Opt. Lett.*, 14, 1989, p. 823.
- 4) T. Horiguchi, et al., *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1, 1989, p. 107.
- 5) 村山英晶他、強化プラスチック、55、2009、p. 136.
- 6) R. Ducan et al., *Materials Evaluation*, 61, p. 838.
- 7) URL : <http://www.sambasensors.com/>
- 8) S. Okazaki et al., *Sensors and Actuators*, B93, 2003, p. 468.
- 9) 西浦竜一他、三菱電機技報、73、1999、p. 560.
- 10) たとえば、J. F. Martins-Filho et al., *Proc. of SPIE*, 7004, 2008, 70043P-1.
- 11) A.D. Kersey et al., *Journal of Lightwave Technology*, 15, p. 1442.
- 12) K. Y. Song et al., *Opt. Lett.*, 31, 2006, p. 2526.