

## 光ファイバ応用センシング

**Optical Fiber Sensing** 

保立和夫 Kazuo Hotate

東京大学 大学院工学系研究科 電子工学専攻 教授

## し はじめに

IT革命におけるハードウェア面での中核技術は光通信で ある。そして、これを支える情報伝送線路は、直径約0.1 ミ リ、つまり毛髪程に細いガラス繊維、「光ファイバ」である。 光ファイバは、低損失で、軽く、電磁誘導に強くて、耐水性、 耐火性を持つ。この特性を活用するだけで、様々な特殊環境 や悪環境下での遠隔センシングを可能にする。

一方で、光ファイバ自体をセンサとしたユニークな技術も 登場してきた。光ファイバ通信においては、弱った光を強い 光に戻す特殊光ファイバ(光ファイバ増幅器)も登場して、1 万kmの光ファイバを通ってきたレーザ光でも通信ができ る。既に、太平洋横断ならびに大西洋横断光ファイバ海底ケ ーブルが稼動しており、地球規模の光ファイバ通信網ができ あがっている。つまり、光通信における光ファイバでは安定 してレーザ光を送ることができる。しかし、これは1か0か を判断することで情報を送るデジタル通信技術のお陰であ る。光ファイバ中を通る光の物理的な諸量は、実は、外界の 影響で変化している。

この性質を活用することによって、光ファイバを長い長い センサとして利用する技術も開発されている。たとえば、光 ファイバを、歪分布センサとして働かせて橋や高層ビルディ ングなどの社会インフラや航空機の翼などの材料に、人間の 神経のように張り巡らせて、これらに加わる損傷、劣化や温 度変化を、その程度のみならず位置をも検出する技術が開発 されている。

この「痛みの分かる材料・構造のための光ファイバ神経網」 は、安全・安心のための技術として注目されているが、使い 捨てからメンテナンスの時代へという社会の潮流に整合した 新技術でもある。地震国「日本」には、特に、重要な技術と 言えよう。

本稿では、光ファイバ応用センシングを概観したあとで、

光ファイバ神経網に関する最近の技術展開例を紹介する。

# (2) 光ファイバ応用センシングの概要

IT 革命の中核をなす光通信技術の中で情報伝送路として 活用されている光ファイバは、光センシング技術にも大きな 変革をもたらしてきた<sup>1-7)</sup>。直径約100 µmという細径ガラ ス繊維である光ファイバの中心部分には約10 µmの範囲で 周囲より0.5%程屈折率の高いコアが設けられていて、光は この部分を伝搬する。損失は0.2dB/Km (1kmあたり5%) と極少なく、軽くて、可とう性に富み、絶縁性にも優れ、伝 搬光は電磁雑音の影響を受けにくく、漏水にも強い。表面に 傷が入れば折れるが、UV効果樹脂等のコーティング技術に よる対策が確立されていて、引張強度はピアノ線以上であ る。

このような特徴を持つ光ファイバは、単にこれを情報伝送 路として用いるという単純な活用によっても、特徴ある種々 のセンシング技術を提供する。

図1は、光ファイバセンシング技術の構成法の分類を示す。 図1(a)の伝送路としての利用法は単純であり、既に電圧、 電流、温度、加速度、音響等々のセンシング技術が検討され てきた<sup>1-7)</sup>。図1(b)のように光ファイバの持つ光学的・材 料的性質そのものがセンサとしても機能する。この点に着目 した技術開発も進められてきた<sup>1-7)</sup>。たとえば、光ファイバ に圧力が加わると屈折率と長さに変化が生じて伝搬光の位相 が変化する<sup>1)</sup>。位相変化は、図1(b)の上に示したような干 渉計を構成することで光強度に変換できて、受光器出力電流 として読み出せる。水中音響波センサ、圧力センサ等が開発 されている。機械的なトランスジューサを工夫すれば、磁界 や電界を歪に変換することも可能であり、被測定対象は拡が る<sup>1)</sup>。光ファイバを光路とする干渉計は個別光学部品を高精 度に配置する従来型の干渉計よりも安定である。 光ファイバリング干渉計を用いた光ファイバジャイロで は、1 μradの位相変化を測定することも可能となり、宇 宙・航空応用のための絶対回転センサであるジャイロが開発 されている<sup>7,8)</sup>。磁界により光波偏波面が回転するファラデ ー効果を用いた電流・磁界センサも開発されており<sup>3)</sup>、また、 光ファイバの微小曲がりや振動による伝搬損失の変化を活用 したセンサや、油や水の浸潤により変形する材料をトランス ジューサとした油漏れ・水漏れセンサの研究等、光ファイバ 自体をセンサとする技術開発が蓄積されてきた<sup>1-7)</sup>。

これらの光ファイバセンシング技術にあって最近特に注目 されているのが、図1(c)の多点型・分布型構成である。図 1(a)、(b)のセンサを光ファイバを加工して作られる光分 岐デバイス(光ファイバカプラ)で繋いだセンサネットワー ク構成(図1(c)左)が実現されている他、光ファイバ自体 のセンサ機能を活用して完全分布型センシング技術(図1(c) 右)も開拓されている。これは、光ファイバのどの部分でも 歪や温度を感じることのできる構成で、他のセンシング原理 では実現不可能なユニークな機能である。

#### 3 分布型・多点型光ファイバ センシング

光ファイバ中で生じる種々の散乱や、直交した2つの偏光 の間の結合、あるいは光強度に比例して光ファイバの屈折率 が変化するという非線形現象等、光ファイバ中での光学現象 そのものをセンシング原理とすれば、図1 (c) 右図に示した 完全分布型センシングが実現できる。そのために、これら現 象を位置分解してセンシングする技術が複数提案・開発され ている。

ラマン散乱光は、光ファイバの材料である2酸化珪素の熱 振動によって入射光の周波数が変化した光である。入射光よ り数10THzほど低周波数と高周波数の1対の散乱光が得ら れる。それぞれ、ストークス光、アンチストークス光と呼ば れ、両者の強度比は温度の関数となり温度センシング原理と なる。位置分解法として通常用いられるのは、図1 (c) 右図 にあるように、光ファイバに光パルスを打ち込み、後方ラマ ン散乱を時間分解測定する技術であり、OTDR法 (Optical Time Domain Reflectometry) と呼ばれている。この温度 分布センシング技術は既に実用化されていて、高速道路トン ネル内の温度分布センシング、電力線の温度監視、ダム建造 下コンクリートの温度による固化モニタリング、道路面の凍 結モニタリング等々、フィールドテストが蓄積されている<sup>9</sup>。

この他、最近特に注目されるセンサ原理として、光ファイ バ中のブリルアン散乱を活用した歪分布センシングがあ る<sup>10,11)</sup>。ブリルアン散乱は、入射光よりおよそ11GHz周波 数がダウンシフトした散乱光であり、後方に生じる。このシ フト周波数は歪に依存し、OTDRにより歪分布センシング が可能となる。本技術は、我が国のNTTによって発明され 各国で研究されて<sup>10,11)</sup>、ダム建造中のコンクリート固化モ ニタリング(温度依存性の活用)、10km以上の長距離歪分 布計測、河川堤防の状態監視等々、やはりフィールドテスト が活発である。ただし、その空間分解能は、ブリルアン散乱 の性質から、約1mに制限される。

一方で、図1(c)右と同様の構成で、光ファイバに沿って



図1 光ファイバセンサの構成分類

センサを多数配置する構成も実現されている。ここで活用さ れているセンサは、光ファイバブラッググレーティング (FBG)である<sup>12)</sup>。光ファイバの横から紫外線を照射すると 2酸化ゲルマニウムを含むコア部分の屈折率が変化する。光 ファイバ伝搬光波長の半分の周期で屈折率を変化させること で、光ファイバ内にブラッググレーティングが形成できる。 この反射波長は、光ファイバへ加わる歪、温度で変化するの で、センサとして働く。複数のFBGセンサを光ファイバに 沿って配置し、それぞれの反射波長をあらかじめ違えておけ ば、波長によって位置情報が分かり、個々の波長変化から多 点の歪が分かる。つまり、準分布型システムが構築できる。 橋、船体、さらにはスペースシャトル燃料タンク等にFBG 多点センシングシステムを設置して、その振動や、変形解析 等が行われている<sup>1-6,12)</sup>。

図1 (c) 左図に示した多点型構成も、種々実現されている。 センサネットワークとも呼びうるこの構成では、波長多重 (WDM) や時間多重 (TDM) 等の手法が研究され、高感度 な干渉計型センサの多点化に適している<sup>12)</sup>。

### 4 痛みの分かる材料・構造のための 光ファイバ神経網

光ファイバ分布型・多点型センシング技術により、温度や 歪をセンシングするための神経網として、光ファイバをビル、 橋、トンネル、高速道路等の構造物や、航空機や車両の重要 部位材料等に貼り付けたり、埋め込んだりすることで、「痛 みの分かる材料・構造」を実現することができる。この機能 により、これら構造物や材料の状態を監視すれば、メンテナ ンスのための情報取得が可能となるばかりでなく、地震や台 風といった災害時における危険情報の発令やその解除にも役 立って、防災・危機管理の面からも重要視されてきている。 この従来型センシングとは一線を隔する新しい光センシング 機能の適用分野は、石油産業、土木・建築、航空機、交通、 エネルギインフラ、通信インフラ等々、広範である。図2に 光ファイバ神経網によって実現される痛みの分かる材料・構 造の概念図を示す。

第3章で述べたこれまでの分布型センシングのための信号 処理技術は、主にパルス光を用いた時間領域での手法であっ た。このような分布量計測技術では、高い空間分解能や高い S/N比を得ようとした場合、不充分な点を残してきた。た とえば、ブリルアン散乱を活用した分布型光ファイバ歪セン シング技術では、空間分解能を高めるために光パルスを狭め ると、そのスペクトルが広がってしまい、ブリルアン散乱が 有効に生じなくなってしまう。つまり、時間分解法では空間 分解能に制限が生じ、約1mが限界であった<sup>10)</sup>。

これに対し、連続光 (CW光)を用いることができれば、 このような問題を解決できる。また、CW光によれば、S/N 比向上による測定速度の向上等、メリットが出てくる。CW 光による分布量計測技術として、FMCW法<sup>13)</sup>や低コヒーレ ンス干渉法<sup>14)</sup>等が研究されてきた。しかし、前者では多量 データの解析が必要となり、後者では機械的可動部分が不可 欠となる。これに対して、データ解析も、可動部分も不要な CW光による分布量計測技術として、筆者らは、光波の干渉 特性を制御・合成する技術を提案・研究している<sup>15)</sup>。

ブリルアン周波数シフト分だけ周波数の異なる2光を光フ ァイバ中で対向伝搬させると、誘導作用によりブリルアン散 乱を強めることができる。図3は、対向伝搬する連続光の干 渉状態を制御することによって光ファイバ中の誘導ブリルア ン散乱の発生位置を局在化させた技術である<sup>16)</sup>。光強度変 調器をマイクロ波で変調することにより、約11GHzダウン シフトしたプローブ光を生成する。このプローブ光と元の周 波数を有するポンプ光とを光ファイバ内で対向伝搬さて、誘 導ブリルアン散乱を生じさせる。マイクロ波の周波数を掃引 することで、ブリルアンスペクトル形状が測定される。

さらに、光源に光周波数変調を施すことで、ポンプ・プロ ーブ光間の相関を制御して、散乱発生場所を局在化するのが



図2 光ファイバ神経網による痛みの分かる材料・構造の概念図

809

本手法の特徴である<sup>16)</sup>。ポンプ・プローブ光間の相関の強いところのスペクトル形状を光ファイバの端からとらえることができる。さらに、この相関の高い場所は光周波数変調の パラメータで掃引できる。この技術により、光ファイバに沿 うブリルアンスペクトルの分布を計測することができ、その ピーク周波数の変化量から歪分布センシングが可能となる。

この BOCDA法 (Brillouin Optical Corelation Domain Analysis) ではパルス変調は行わないので、上記の空間分解 能限界が打破でき、既に1 cm が実証されている<sup>17)</sup>。

図4は、直径約15 cmのパイプ外周に光ファイバを巻いて その変形による周囲歪の変化を測定した結果である。システ ムの空間分解能を高めるに従い、パイプ周囲50 cmにわたる 歪分布が精度良く測定されることが示されている<sup>17)</sup>。空間 分解能1 cm はパルス法の限界を100 倍凌ぐ値である。

図5は、BOCDA法により鉄筋コンクリートに発生するク ラックの検知を試みた結果である。内部に強度補強被覆を施 した光ファイバを埋め込んだ鉄筋コンクリートに張力を掛 け、クラックを発生させた。発生位置で光ファイバに歪が生 じ、0.数mm幅のクラックの拡大に伴ってその歪が増大して いることが分かる。空間分解能1mの光パルス法では実現不 可能であった測定である。本実験は、清水建設と共同で行っ た<sup>18,19)</sup>。

光パルス法では、平均操作なくしては十分な信号が得られ ない。このため、数分に一度のサンプリング速度となり、歪 の時間分解測定はできない。これに対して、BOCDA法によ れば、ある測定点に対しては常に連続光が到来しており、高 速測定が可能である。図6は、光ファイバに沿うある部分に 0.1Hzの正弦波的な振動歪を与えた際のブリルアン散乱スペ クトルの変化を数Hzのサンプリング速度で動的にセンシン グした結果である<sup>20)</sup>。ピーク周波数が歪に対応している。 現在、サンプリング速度は57Hzにまで高速化されている。



図4 小径パイプの周囲歪分布センシング17)







図3 ブリルアン散乱光相関領域解析法(BOCDA法)による高空間分解能・高速光ファイバ分布型歪センシングシスム<sup>16)</sup>

これは、パルス法の1万倍の速度である。

図7は、2層構造のビルディングモデル(高さ約50 cm)を 作成して、ここに貼り付けた光ファイバにてある位置の歪の 時間変化をBOCDA法で測定した結果である。モデルは加 振機の上に載せて実際の地震波形を加えている<sup>21,22)</sup>。高空 間分解能で高速な歪分布測定ができる唯一の光ファイバ神経 網技術ならではの測定結果である。鹿島建設との共同実験で ある。

## **5** まとめ

光ファイバ応用センシングについて概要を述べたのに続い て、光ファイバ神経網による痛みの分かる構造・材料の研究 動向をご紹介した。この技術は安全・安心のための技術であ るとともに、使い捨てからメンテナンス重視の時代へと変化



図6 ブリルアン散乱スペクトルの動的測定<sup>20</sup>



図7 BOCDA法による地震波形振動下でのビルディングモデルの 動的歪測定結果<sup>21,22)</sup>

しつつある趨勢とも整合している。FBG多点型センサや、 時間分解法に基づく分布型温度・歪センサは既に実用期を迎 え、フィールドテストが盛んである。さらに、その測定時間 や空間分解能の限界を打破できるBOCDA法も開発されて、 光ファイバ神経網技術は今後より活性化されて行くものと期 待される。当研究室では、関連技術として光ファイバ側圧分 布センシング<sup>23)</sup>、同一FBGの多点化技術<sup>24)</sup>、光ファイバ加 入者系の診断技術<sup>25)</sup>も開発中である。

#### 参考文献

- 1)大越孝敬,西原浩,岡本勝就,久間和生,大津元一, 保立和夫(大越編):光ファイバセンサ,オーム社, (1986)
- Optical Fiber Sensors I~ IV, ed. by Dakin and B. Culshaw, Artech House Publishers.
- 3) K. Hotate : Optical Fiber Technology, 3, (1997),
  356, < Invited >.
- 4) K. Hotate : Sensors update, Wiley-VCH, 6 (1999), 131.
- 5) Proc. 14th In tern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-14), Venice, (Oct. 2001)
- Proc. 15th In tern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-15), Portland, (May 2002)
- 7) 保立和夫:レーザー研究, 29, (2001), 353.
- K. Hotate : A chapter in Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection, Elsevier Science, (2000), 487.
- 山本哲,橋場圭一,宮田康弘,光技術コンタクト,39, (2001),169.
- T. Horiguchi K. Shimizu, T. Kurashima, M. Tateda and Y. Koyamada : J. Lightwave Technol., 13, (1995), 1296.
- L. Thévenaz : A Chapter in Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection, Elsevier Science, (2000), 447.
- 12) A.D. Kersey : A Chapter 15 in Optical Fiber Sensors IV, Artech House Publishers, (1997)
- R. Passy, N. Gisin, J.P.von der Weid and H.H. Gilgen : J. Lightwave Technol., 12, (1994), 1622.
- 14) K.Takada, H. Yamada and Y. Inoue : J. Lightwave Technol., 14, (1996), 1677.
- K. Hotate : IOP Measuremen t Science and Technol., 13, (2002), 1746.
- 16) K. Hotate and M. Tanaka : IEICE Trans. on Electron., E84-C, (2001), 1823, <Invited>.

- 17) M. Tanaka and K. Hotate : IEEE Photon. Technol. Lett., 14, (2002), 675.
- 18) S.S.L. Ong, H. Kumagai, H. Iwaki and K. Hotate : Proc. 16th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, Nara, (Oct. 2003), We3-3.
- 19) 熊谷仁志,岩城英朗, S.S.G. Ong,保立和夫:コンク リート工学,41,(2003),29.
- 20) K. Hotate and S.S.L. Ong : IEEE Photon. Technol. Lett., 15, (2003), 272.
- 21) S.S.L. Ong, M. Imai, Y. Sako, Y. Miyamoto, S. Miura and K. Hotate : Proc. 16th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, Nara, (Oct. 2003), We3-2.

- 22) 今井道男, 酒向裕司, 宮本裕司, 三浦 悟, S. S. Ong, 保立和夫: 2003年度日本建築学会大会(東海)学術講演 会, 中部大学, (Sept. 2003), 1007.
- 23) 牧野弘治,保立和夫,石川光映,吉國裕三:応用物理 学会光波センシング技術研究会,(Jun. 2003),97.
- 24) K. Hotate and M. Enyama : Proc. 16th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, Nara, (Oct. 2003), Th1-2.
- 25) K. Hotate and M. Kashiwagi : IEICE Trans. on Electron., E86-C, (2003), 213.

(2003年8月22日受付)

ブックレビュー		
	溶融スラグ・ガラスの粘性 物性工学的アプローチによる多成分系複雑液体の高精度な粘度推算法 飯田孝道、喜多善史、上田 満、森 克巳、中島邦彦 著 2003年6月 (株)アグネ技術センター発行(Tel. 03-3409-5329) B5判 183頁 定価3,400円(消費税別)	
本 書 は 、 い て 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	鉄製錬、ガラス溶融、廃棄物溶融処理など、酸化物の複雑液体を取り扱う上で最も 溶融酸化物の構造との関係から実用データに至るまでを詳述した集大成である。 では、すべての融体の基礎である液体論概説、融体の不規則網目構造モデル、不規 粘性、溶融スラグに対する高温用粘度標準物質とその粘度(推奨値)および一般的な べている。第5章ではこれまでに研究報告されてきた粘度推算式について網羅する し、第6章では溶融スラグの粘度推算に関する国際的研究として注目されている「ラ トし、鋼の連続鋳造用モルールドフラックス、高炉系スラグ、コールスラグの種類・ トによる値と各種推算式との比較から著者らの導出した推算式の広範な適合性を評 異相が分散したサスペンジョンの粘度に対する代表的な式の概要や、高温における いて述べている。 る一般工学テキストでは、運動量流束・粘性に関する基礎事項は取り扱っているも なデータベース等、これほど実践的なものは本書以外にはない。各種工業プロセス	も 重要な物性であ 見 期 網 目 構 定 を つ 不 題 う ウンド 範 田 に 分 に が に の 問 思 光 で の 、 そ の に 思 知 度 、 そ の に 思 知 定 の の 思 知 度 、 そ の の に の に の の に の の に の の の の に の の の に の の の の の の の に の

(東京大学大学院工学系研究科 森田一樹)