

光ファイバーセンシング

保 立 和 夫

Optical Fiber Sensing

Kazuo HOTATE

Optical fiber sensing has been developed since 1970's, and several systems have already been used in practical applications. Through looking at the activities shown in the International Conference on Optical Fiber Sensors, history of this technological field is reviewed, at first, in this paper. Next, history and the state-of-the-art of fiber optic gyros are reviewed as an example that has already entered into the practical application stage. Fiber optic nerve systems are also discussed as a hot topic of the optical fiber sensing.

Key words: optical fiber sensing, fiber optic gyros, fiber optic nerve systems, smart materials and smart structures

光ファイバーセンシングの研究が開始されたのは1970年代に遡る。情報化社会の中核技術として広く利用されている「光ファイバー通信技術」と歩調を合わせて進展してきた双子の兄弟が「光ファイバーセンシング」である。光ファイバーの損失が20 dB/kmを切り、また半導体レーザーが室温連続発振を成し遂げた1970年を光ファイバー機能システムの研究元年とすれば、この年がこれら技術の誕生年といえよう。本稿では、すでに長い研究・開発の歴史を有し、光ファイバージャイロ、光ファイバー電流センサー、光ファイバー分布型温度センシング等、実用域に達した複数の技術を社会に送り出してきた「光ファイバーセンシング」の歴史を手繰り、そして最近のトピックに関して述べる。

1. 光ファイバーセンシングの歴史と現在

光ファイバーセンシング^{1,2)}を光システム構成で分類すると、以下の3つに大別される。

- (1) 光ファイバーを情報伝送路とした構成
- (2) 光ファイバーをセンサーとして活用した構成
- (3) 光ファイバーに沿う分布量ないしは光ファイバーに沿って配置された多数のセンサーからの情報を取得する構成

第1の構成は最も簡単であるが、それでも、遠隔計測、強電磁場計測、高電圧下計測等、従来の電気式センサーシステムでは得がたい特徴を実現する。第2の構成では、光ファイバーが温度、圧力、歪み、音、磁界等によってその長さや密度を変化させる様子を干渉によって高精度に測定する干渉測定型構成や、電流や磁界により光ファイバーが示すファラデー効果を活用した偏波測定型構成、被測定量による光伝送損失の変化を捉える損失測定型構成など、多様な研究が蓄積されている。光ファイバージャイロもこの構成分類に属し、光ファイバーリング干渉計によって慣性空間に対する回転角速度を測るセンサーを実現し、宇宙・航空、民生分野で実用化が進展している。

第3の構成は、光ファイバーに沿う温度や歪みあるいは側圧を分布的に捉える「分布型構成」、光ファイバーに沿って複数配置したセンサー情報をひとつの光源とひとつの受光器によって取得する「多点型構成」、そして比較的短尺な分布型センサーを光ファイバーに沿って多数配置した「准分布型構成」に分類される。図1にこれらの概念図を示した。

持続可能社会、そして環境にやさしい社会の実現が求められる中、社会は使い捨てからメンテナンス重視へと舵を切った。橋梁・橋脚やビル等の社会インフラや航空機の翼

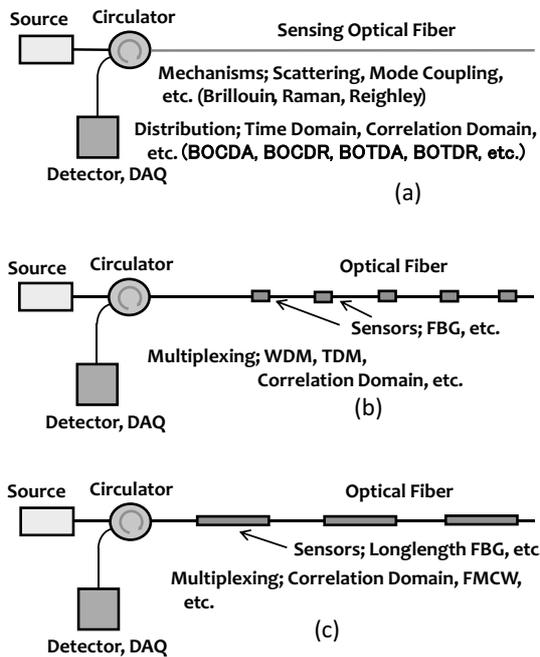


図1 分布型 (a), 多点型 (b), 準分布型 (c) 光ファイバーセンシングシステム。

表1 光ファイバーセンサー国際会議の歴史。

	開催日程	開催地	論文数
OFS-1	1983/4/26-28	London, UK	50
OFS-2	1984/9/5-7	Stuttgart, Germany	85
OFS-3	1985/2/	San Diego, USA	85
OFS-4	1986/10/7-9	Tokyo, Japan	88
OFS-5	1988/1/27-29	New Orleans, USA	103
OFS-6	1989/9/18-20	Paris, France	84
OFS-7	1990/12/2-6	Sydney, Australia	103
OFS-8	1992/1/29-31	Monterey, USA	106
OFS-9	1993/5/4-6	Firenze, Italia	108
OFS-10	1994/10/11-13	Glasgow, Scotland	140
OFS-11	1996/5/21-24	Sapporo, Japan	167
OFS-12	1997/10/28-31	Williamsburg, USA	158
OFS-13	1999/4/12-16	Kyongju, Korea	149
OFS-14	2000/10/11-13	Venice, Italy	218
OFS-15	2002/5/6-10	Portland, USA	152
OFS-16	2003/10/13-17	Nara, Japan	199
OFS-17	2005/5/23-27	Bruges, Belgium	271
OFS-18	2006/10/23-27	Cancun, Mexico	293
OFS-19	2008/4/14-18	Perth, Australia	246
OFS-20	2009/10/5-9	Edinburgh, UK	292
OFS-21	20011/5/15-19	Ottawa, Canada	363

や圧力隔壁の健康診断を行って、適当な改修を施しつつライフサイクルコストを低減することが重要である。構造ヘルスマニタリング機能をもつ「痛みのわかる材料・構造」を実現するための「光ファイバー神経網」として、上記の分布型・多点型光ファイバーセンシングが注目されている。

光ファイバーセンシングに関するこれまでの歴史と現状を、本分野の国際会議「光ファイバーセンサー国際会議」

表2 光ファイバーセンサー国際会議での技術カテゴリー分類の例。

Physical, Mechanical, Electromagnetic
Chemical, Environmental, Biophotonic
Passive and Active Devices
Distributed Sensing
Interferometric / Polarimetric Sensors
Micro- and Nano-Engineered Sensors
Smart Structures and Materials
Multiplexing / Networking
Systems / Fields Test
Security / Defense

(International Conference on Optical Fiber Sensors: OFS) の動向を振り返りつつ概観しよう³⁻⁵⁾。本会議は、1983年にロンドンで第1回が開催され、以来、表1に示したように、ヨーロッパ、アメリカ、アジア・オセアニアを1年半ごとに巡回開催されてきた。

第1回 OFS での発表件数は約 50 件と比較的少数であり、またヨーロッパを中心とする会議であった。しかし、第2回のシュツットガルト会議からは、わが国を含む世界から論文が集められて国際会議として定着した。筆者は、この第2回から直近の第21回に至るまでの27年間、本国際会議に出席している。わが国でも第4回、第11回、第16回が開催され、また第13回の韓国開催ではプログラム委員会の運営をわが国が担当した。

表1に示したように、本会議の論文数は順調に伸び、第21回会議では350件を超えた⁵⁾。わが国からの発表件数は、ほぼ毎回、開催国に次ぐ件数あるいは最多の発表であったが、ここ数回は中国の躍進が目立つ。それでも、第21回でのわが国の発表件数は38件で、中国(95件)には及ばなかったものの、開催国カナダを抑えて第2位に返り咲いた⁵⁾。

OFS 会議での技術カテゴリー分類は、その時々の研究・開発動向を反映している。ここでは、一例として第20回大会のそれを表2に示した⁴⁾。

初期の OFS 会議から、物理量、機械量、電気量、化学量センサー、Interferometry, Polarimetry センシング、関連デバイスといったカテゴリーは変わらない。一方、初期から中期にかけては、光ファイバージャイロ、光ファイバー電流センサー、光ファイバーハイドロホンといった具体的なセンサーがカテゴリーとして掲げられていた。現在では、これらは Interferometry, Polarimetry に含まれており、技術が進展して実用期に入ったことを物語っている。

光ファイバークレーティング (FBG) が登場してからは、そのブラッグ反射波長の温度や歪み依存性を活用したセンサー構成について数多くの研究が行われ、FBG を光ファイバーに沿って多点配置した「多点型光ファイバーセ

ンシング」の実現技術が豊富に提案・実現されている。

通信線路である光ファイバーを監視する技術として、1976年に考案された optical time domain reflectometry (OTDR) 技術は、光ファイバーセンシング分野でも新たな技術の種となった。英国サザンプトン大の J. P. Dakin 教授により、1984年に、ラマン散乱のストークス光とアンチストークス光の強度比が温度情報を与えることを活用して、OTDR 技術による分布型温度センシングが提案・実証された⁶⁾。現在、本技術は実用化が進展している。堀口らは、1989年に、ブリュアン散乱の周波数シフトから温度あるいは伸縮歪みが測定できることを示し、やはり OTDR 技術によって分布型歪 (温度) センシングを提案・実証した⁷⁾。

分布センシング原理としては、上記の OTDR とは別に、連続光を用いる技術も提案されてきた。たとえば筆者らは、1998年に連続光波の相関特性を合成することによって、光ファイバーに沿うブリュアン散乱スペクトルの分布を高い空間分解能と速い高測定速度で測定できる「ブリュアン光相関領域解析法」(Brillouin optical correlation domain analysis: BOCDA) を提案した⁸⁾。

これらの分布型・多点型光ファイバーセンシングは、OFS会議でも、その中期以降に大きな話題となっている。表2中の Distributed Sensing, Multiplexing/Networking, Smart Structures and Materials が本技術に対応する。

フォトリック結晶光ファイバー、プラスチック光ファイバーなどの特殊光ファイバーの提案・研究の展開に合わせて、これらを活用したセンシング技術の研究も目立つ。第20回会議では、Photonic Crystal Fibers for Sensing という名称で Workshop が開催された⁴⁾。

PCF 光ファイバーの一種である photonic band-gap fiber (PBF) では、光が伝搬するコア部分は空隙である。このため本質的に、散乱、非線形性、ファラデー効果、温度係数等が小さくなる。そこで、PBF を干渉型光ファイバージャイロのセンシングコイルに利用して、上記物理現象から発生していた雑音を低減する提案が、米国スタンフォード大からなされている⁹⁾。干渉型光ファイバージャイロでは、種々の雑音を低減するために、低コヒーレンス光源が必須であるとされてきた。しかし、PCF ジャイロでは、むしろ干渉性のよいレーザーで駆動するべきとの発表もある⁹⁾。新たなデバイスの登場が新たな発想と新たな機能発現の基となることを再確認させている。

本稿では、以降で、実用化が図られたセンサーの好例として「光ファイバージャイロ」について述べる。そして、21世紀社会で安全・安心を実現するために期待されてい

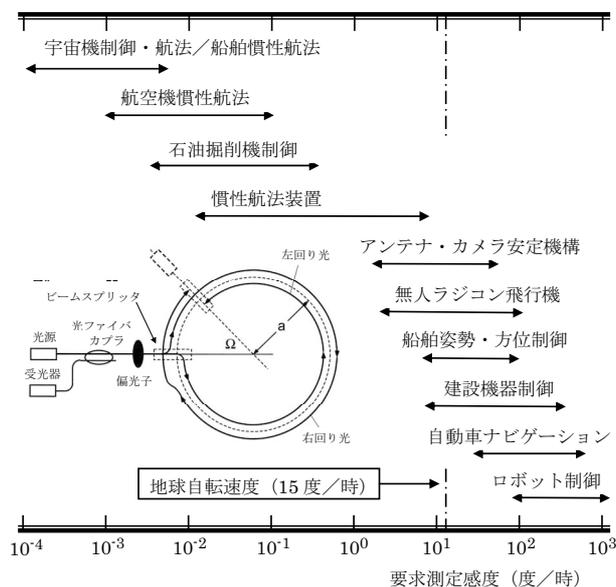


図2 ジャイロの応用分野・要求性能と干渉方式光ファイバージャイロの光学系構成。

る「光ファイバー神経網」についても、最近の展開を述べよう。

2. 光ファイバージャイロ技術の発展と最近の研究動向

慣性空間に対する回転センサーをジャイロとよぶ。航空機が飛行中に転回する様子を定量測定し、その姿勢安定化や航法に用いること等が、その用途である。光ファイバージャイロ (fiber optic gyro: FOG) は相対性理論に立脚したサニャック効果に基づく光センサーであり、可動部分が皆無、瞬間起動、メンテナンスフリー、広ダイナミックレンジ等の特徴を有する^{10,11)}。

図2に、本ジャイロの応用分野と要求性能を示す¹⁰⁾。航空機の慣性航法用には、 $0.01^\circ/\text{h}$ (地球の公転速度相当) というきわめて高い分解能が要求される。また、航空機の転回の速さは上記分解能より7桁も速く、通常の機械式ジャイロではこのように広いダイナミックレンジを直接測定することはできない。光ファイバージャイロでは入力回転角速度に比例した周波数を出力する信号処理手法が開発されて、広いダイナミックレンジが実現されている。

図2中に示したように、光波が閉じた光路を伝搬するのに要する時間は、この光路が慣性空間に対して回転すると変化する^{10,11)}。これがサニャック効果であり、左右両回り光間の時間差 (位相差) を計ることでジャイロ機能を得る。1976年に提案された干渉方式光ファイバージャイロ (interferometer FOG: I-FOG) では、長尺光ファイバーを小半径のコイルにすることで小型化と高感度化を両立させ

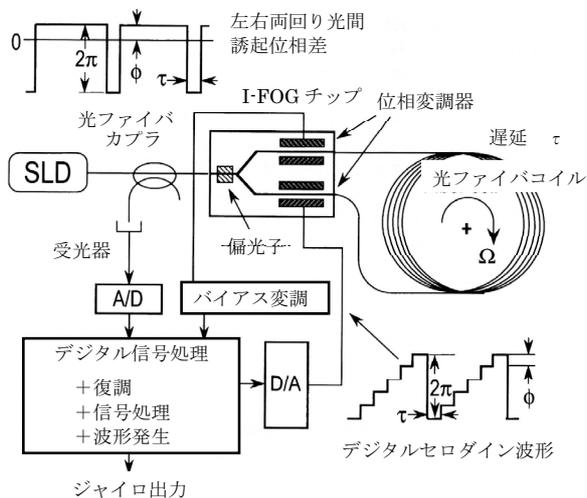


図3 デジタルセロサイン技術による干渉方式光ファイバージャイロ¹²⁾.

た。

しかし、直径 10 cm 長さ 1 km のコイルでも、航空機用ジャイロへの要求性能は両光間位相差にして $1 \mu\text{rad}$ にしなければならない。光ファイバ中で生じる偏波変動、後方散乱、光カー効果、地磁気によるファラデー効果、不均一な温度分布の時間変動等により、相対的に大きな雑音が生じる。しかし、これまでに多くの研究が蓄積されて、有効な対策が考案されている^{10,11)}。たとえば、光源として低コヒーレンス光源を用いると、複数の雑音を低減できる¹⁰⁾。

図3は、高性能な I-FOG のための光学系構成および信号処理方法を示している¹²⁾。周波数特性にすぐれた光位相変調器を信号処理に活用する構成で、光分岐器と一体化した光集積回路がニオブ酸リチウム結晶を基盤にして作られている。この系には、上記の雑音要因への対策がすべて施されている。偏波変動対策としては、偏波維持光ファイバを用いる方法や、通常の単一モード光ファイバとデポライザーを用いる方法が考案されている^{10,11)}。光源には、ペクトル線幅の広いスーパーミネセントダイオード (SLD) が開発され、活用されてきた^{10,11)}。

航空機の慣性航法用等に要求される 7 桁というダイナミックレンジや、数 ppm というジャイロ出力の直線性の実現には、入力回転に比例した周波数出力を得ることが必須となる。図3で、光ファイバコイルの一端に設けた位相変調器により光波に階段状の位相変化を与える。階段一段の時間は光がファイバコイルを伝搬する時間と等しく、左右両回り光間には一段の高さに相当する位相差が与えられる。これによりサニャック位相を打ち消すように一段の高さに帰還をかけて、この波形の振幅が 2π になったところでリセットする。この鋸歯状波形の周波数は入力回

表3 干渉方式光ファイバージャイロの応用開拓例。

航空・宇宙 応用
+ 航空機姿勢制御装置 ボーイング 777, ドルニエ 328, 等
+ ロケット姿勢制御 NASDA TR-1A ロケット (1991 年から 5 回) JAXA/ISAS M-V ロケット (1 号機から 8 号機)
+ 人工衛星制御 ISAS 「はるか」, JAXA 「 μ -Labsat」, JAXA/ISAS 「れいめい」, USEF 「SERVICE」, JAXA 「SDS-1」, JAXA 「IKAROS」, 等
船舶
+ ジャイロコンパス, 等
民生応用
+ カーナビゲーション (1990 年代に 10 万台利用)
+ 自動走行車制御・ナビゲーション
+ アンテナ・カメラ安定機構
+ 無人ラジコンヘリコプター制御・ナビゲーション
+ 無人ダンプトラック制御・ナビゲーション
+ トラクター等農業機器制御・ナビゲーション
+ クレーン制御
+ 管路ルート計測器
+ ヒューマノイドロボット制御, 等

転に比例し、ジャイロ出力が周波数として得られる¹²⁾。

表3に I-FOG の実用化例をまとめた。ボーイング 777 の開発にあたって、I-FOG が採用された。宇宙開発事業団の TR-1A ロケットにも 1991 年に I-FOG が使用され、世界初の I-FOG の宇宙応用となった。宇宙科学研究所 (現、JAXA 宇宙研) では、M-V ロケットに I-FOG を用いた慣性航法装置を搭載してきた。M-V 第 1 号機 (1997 年) で打ち上げられた人工衛星 Muses-B (はるか) にも、その制御用に I-FOG が用いられた。2005 年夏に JAXA 宇宙研が打ち上げた小型人工衛星「れいめい」でも I-FOG が使われた¹³⁾。その後、2010 年に打ち上げられたソーラー電力セイル実証衛星「IKAROS」等も、I-FOG で航行している¹⁴⁾。

民生応用も開拓していて、カーナビゲーション、自動走行車の姿勢制御・ナビゲーション、アンテナ/カメラの安定台、ラジコンヘリコプター制御、クレーン制御、農業機器の制御、管路のルーティング、ヒューマノイドロボットの姿勢制御等に活用されてきた¹⁰⁾。ヘリコプターから望遠カメラで地上を捉えたぶれのない画像も、I-FOG によるカメラ安定台が提供している。

宇宙望遠鏡や宇宙機の制御には、数 ppm を超える高いスケールファクターの安定性と $0.001^\circ/\text{h}$ 以上の分解能も要求される。これらのために、高強度で波長安定性の高いエルビウムドープ光ファイバを用いた低コヒーレント光源が開発された¹⁵⁾。この結果、 $0.0001^\circ/\text{h}$ (1 世紀に 1 回転) という超高感度へ向けた I-FOG の開発も進んでいる¹⁶⁻¹⁸⁾。

光ファイバージャイロの雑音要因は、光ファイバがガ

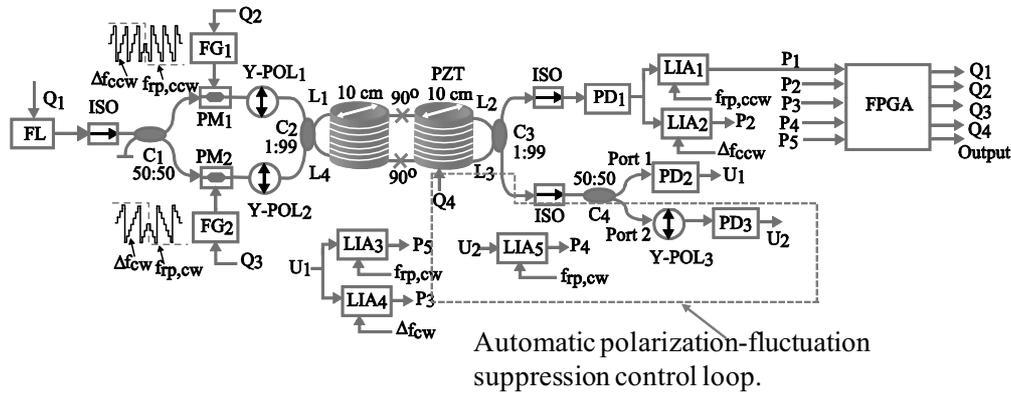


図4 バイポーラデジタルゼロダイン方式共振型光ファイバージャイロの実験系構成. 偏波変動誘起雑音を自動低減するシステム構成²⁶⁾.

ラスでできていることに起因する. そこで, 最近, 導波部分が中空である「フォトニックバンドギャップファイバー」(PBF)が注目されている¹⁹⁾. 偏波変動, 後方散乱, 光カー効果, ファラデー効果, 不均一な温度変動とともに, 通常ガラスファイバーに比べて桁違いに少なくなることが期待され, その実証が進んでいる^{9, 20, 21)}. この研究の中で, 光ファイバー長よりもコヒーレンス長の長いレーザーを用いれば, 後方散乱雑音も小さくできることが示された³⁾. これまでの常識を覆す成果で, PBF干渉方式光ファイバージャイロでは光源にレーザーを利用する可能性も出てきた⁹⁾.

光ファイバーに沿って温度が分布していて時間的に変化すると, 大きなジャイロドリフトが生じる²²⁾. 光ファイバーのコイル化に工夫を施すことで低減できるが, 一方で, ファイバー長を短くすることがさらに有効である. そこで, 光ファイバーリング共振器の鋭い共振特性を活用し, 光ファイバー長をI-FOGに比べ圧倒的に短くできる「共振方式光ファイバージャイロ」(resonator FOG: R-FOG)が注目される²³⁾. ここでは, 高強度で高コヒーレントなレーザーを光源とする.

R-FOG共振器をPBFファイバーで構成し, 雑音低減に活用しようとの研究もみられる²⁴⁾. 筆者らのグループでは, R-FOGの雑音要因の挙動把握とその対策に関する研究を蓄積してきた¹⁰⁾. また, I-FOGチップを用いて光学系を圧倒的に簡素化し, 「デジタルゼロダイン波形」でI-FOGチップ中の光位相変調器を駆動することで, すべての雑音に対処できる独自方式も提案している²³⁾.

これらの成果を活用して, 新たなR-FOG実験系を構築した^{25, 26)}. 共振器は偏波維持光ファイバーで構成し, 偏波軸を2か所で90度振り融着する技術を提案・導入している. これにより, 本質的に2つ存在する共振偏波状態(固有偏波状態: ESOP)のうちから1つだけを選択的に励振

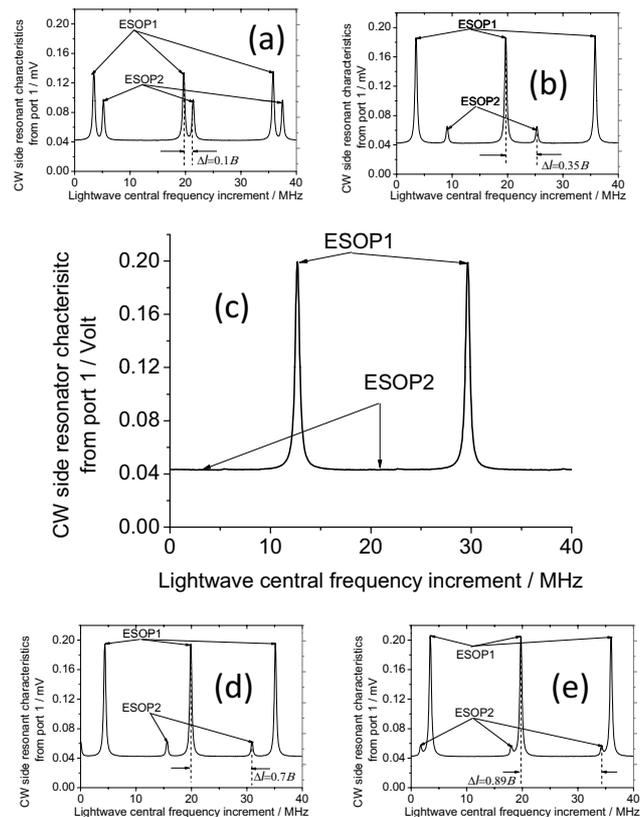


図5 図4の共振型光ファイバージャイロにおける単一固有偏波状態の自動励振. 図(c)が単一の固有偏波状態が励振された様子を示す²⁶⁾.

することを可能にし, 偏波変動誘起ドリフトの低減を実証した²⁵⁾. 図4は, このバイポーラデジタルゼロダイン方式R-FOGの構成である²⁶⁾. 2か所の90度振り融着部分で二分される光ファイバー長の差を, 偏波維持光ファイバーの両偏波モードの位相差が 2π となる長さ(ビート長)の半分にする必要があり²⁵⁾. この条件を自動的に実現するシステムを考案・導入した系が図4である²⁶⁾. 図5は, この自動制御系により, 1つのESOPを自動的に選択した実験結果である. 制御系を働かせることで, 常に図5(c)の状

表4 ブリュアン散乱を測定原理とする分布型光ファイバーセンシングシステムの構成分類, R:リフレクトメトリー, A:解析法, T:時間領域法, C:相関領域法.

	T	C
R	BOTDR 法 ・入射光パルスに対する自然散乱を時間分解測定 ・参照光とヘテロダイン干渉させてブリュアン周波数シフトを測定 ・空間分解能の基本限界は約 1 m ・多数パルス応答を時間平均 (測定速度に限界)	BOCDR 法 ・光源に周波数変調を施して参照光との干渉を制御し, 位置選択的に自然ブリュアン散乱を測定 ・cm オーダー空間分解能 ・数 10 Hz サンプリング速度 ・測定位置へのランダムアクセス機能
A	BOTDA 法 ・ポンプ光 / プローブ光を対向伝搬させ誘導散乱を活用 ・一方をパルスとして位置情報を取得 ・空間分解能の基本限界は約 1 m ・空間分解能向上技術も開拓中	BOCDA 法 ・光源に周波数変調を施し位置選択的に誘導ブリュアン散乱を発生 ・mm オーダー空間分解能 ・kHz オーダーサンプリング速度 ・測定位置へのランダムアクセス機能 (多点動的歪みセンシング)

態を維持できる²⁶⁾.

I-FOG の実用化は着実であり, 表3に示したように人工衛星への利用も活発である. 民生用途も数多く開拓されてきた. 宇宙を遙か遠くまで航行する探査機や宇宙望遠鏡に要求される超高感度 (1世紀に1回転) を有しつつ稼働部分が全くないジャイロは, 光ファイバージャイロのみである.

3. 痛みのわかる材料構造のための光ファイバー神経網

持続可能な社会の実現に向けて「使い捨て」からの脱却へと舵を切った現在, さまざまな社会的インフラのライフサイクルを延伸することが必要である. また, 安全・安心も切望されている. 光ファイバーセンシングにおいては, 上記の要求の実現に向け, 「痛みのわかる材料・構造のための光ファイバー神経網」が研究されている.

光ファイバー中で生じるレイリー散乱, ラマン散乱, ブリュアン散乱は, 温度や歪みにより変化する. これら散乱が生じた場所を特定する技術も導入して, 分布型光ファイバーセンシング技術が種々開拓されている²⁾. また, 光ファイバーに沿って多くのセンサーを多点配置した多点型光ファイバーセンシングも, 提案・開発されている²⁾. これら「光ファイバー神経網技術」に関し, 本稿では, ブリュアン散乱の活用技術を中心に, 最近の技術的展開を述べる.

光ファイバーの材料分子 (SiO_2) の熱振動は微弱な音波を作る. この音波の波長が入射光波長の半分になると, 音波による位相回折格子はブラッグ条件を満たし光は反射さ

れる. これがブリュアン散乱である. 速度を有する音波による反射光であるので, ブリュアン散乱光はドップラーシフトを受けて周波数が低下する. この周波数シフト量 (ブリュアン周波数シフト: BFS, 約 11 GHz) は, 温度 (1 MHz/°C) ならびに歪み (500 MHz/%) に対して線形に変化する²⁾.

表4に, ブリュアン散乱を活用して光ファイバーに沿う歪みあるいは温度を分布センシングする技術をまとめた. 自然ブリュアン散乱を活用する reflectometry (リフレクトメトリー: R) では, 自然散乱と参照光を干渉させて両者のビートとしてブリュアン利得スペクトル (BGS) を測定し, そのピーク周波数として BFS を得る. 誘導ブリュアン散乱を活用する analysis (解析法: A) では, 光ファイバーの両端から BFS だけの周波数差を有するポンプ光とプローブ光を対向伝搬させて誘導散乱を得る. この周波数差を掃引させつつ散乱強度を測定することで, BGS を測定し BFS を得る. 前者は光ファイバーの片端のみから光を入射することでセンシングができる利点を有し, 後者は相対的に強い誘導散乱を利用できるので SN 比にすぐれ, 速い測定が可能となる.

分布測定原理としては, 光パルスを入射し後方散乱を時間分解測定して位置情報を得る time domain 法 (時間領域法: T) と^{7,27)}, 連続光の干渉特性を合成して位置情報を得る correlation domain 法 (相関領域法: C) とがある⁸⁾. 前者は相対的にシンプルであるが, 基本システムでは空間分解能が本質的に約 1 m に制限される²⁾. BGS は 30 MHz のスペクトル幅をもつ. 一方, 空間分解能を 1 m にするためには幅 1 m の光パルスが必要である. この光パルスは約 100 MHz のスペクトル幅をもつので, 歪み感度が低下する. 時間領域法では, 空間分解能と歪み感度にトレードオフの関係がある. 最近この問題を解決する手法がいくつか提案されているが²⁷⁾, 得られるスペクトルの形状が複雑であり, また, 本質的に超高速なデータ取得エレクトロニクスが要求される (1 cm 分解能は数 10 G サンプル/秒を必要とする) といった困難さを伴う²⁷⁻³¹⁾.

一方, 相関領域法では, 連続光の相関特性を合成することによって分布計測機能を実現する. 本技術には, 時間分解法で生じた空間分解能制限要因は働かない. また, 連続光であるのでエネルギー利用効率もよく, 高速測定に適している. 光ファイバーに沿う任意の複数点にランダムアクセスできるという特徴もある.

図6 (a) は BOCDA 法のシステム構成例である³²⁾. 被測定光ファイバーに BFS 程度の光周波数差を有するポンプ光とプローブ光を対向伝搬させて, 誘導ブリュアン散乱を

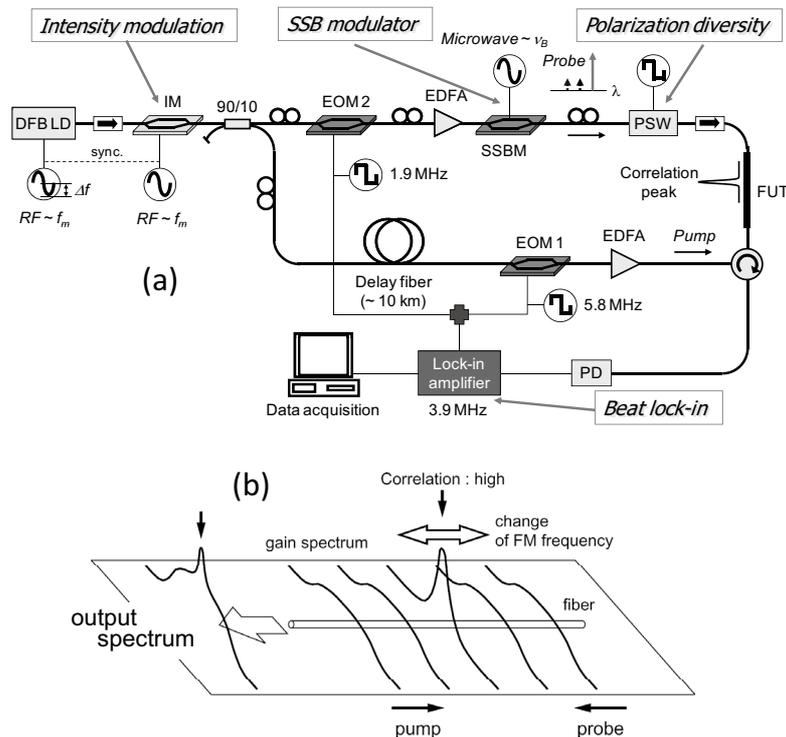


図6 プリュアン光相関領域解析法 (BOCDA 法) による分布型歪みセンシング³²⁾. (a) システム構成, (b) 位置選択的な誘導プリユアン散乱の励振.

発生させる。ここで、レーザー光源の発振周波数を正弦波で変調するのが本技術のポイントであり、これによって、図6 (b) に示したように、誘導プリユアン散乱を位置選択的に発生させる。局在発生位置は変調周波数の変化で掃引でき、分布センシングを実現する。図6 (a) 中には、偏波変動の影響を低減する技術、不要反射光の影響を除去する技術、さらに大きな歪み量の測定も可能にする技術が導入されている。

本 BOCDA 法により実現された性能を以下に示す。

- ・分布型センシング機能：空間分解能 7 cm で 1 km を超える測定レンジ³³⁾
- ・空間分解能：1.6 mm (世界最高の分解能)³⁴⁾
- ・高速測定：BGS 形状の測定速度 1 kHz³⁵⁾

BOCDA 技術により、以下のような「痛みのわかる材料・構造」を実現する研究・開発も複数展開されている。

- ・小径パイプ (直径 15 cm, 周囲約 50 cm) 周囲歪み分布測定：1 cm 空間分解能³⁶⁾
- ・鉄筋コンクリートクラックの検出：0.1 mm クラック検出³⁷⁾
- ・高層ビルモデルでの地震振動下での多点・動的歪みセンシング：振動下で塑性変形限界を超える状況把握³⁸⁾
- ・航空機機体の歪み分布計測と多点・動的歪み計測：

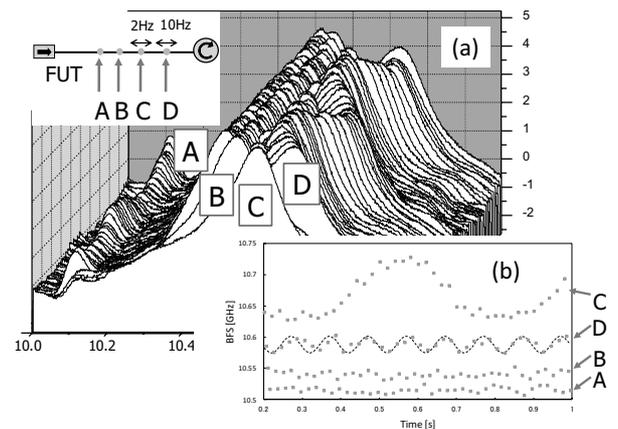


図7 ランダムアクセス測定の高速度化⁴¹⁾. (a) 任意の4点におけるプリユアン散乱スペクトルの測定結果, (b) プリュアン周波数シフトの4点同時・動的測定結果.

実機の飛行状態でのヘルスマonitoring機能実証³⁹⁾。

- ・航空機用カーボンファイバー強化樹脂のボルト接続部分での劣化モニタリング：CFRP に埋め込んだ光ファイバー神経網でボルト周りの劣化診断⁴⁰⁾

図7は、BOCDAのランダムアクセス機能を高速化した最近の研究成果である。光ファイバーに沿う任意の4点で、200 サンプル/秒にて順次 BGS 形状を測定した。これより4点での BFS を時間関数としてプロットしたのが同図 (b) である⁴¹⁾。任意の複数点で歪みを同時・動的センシ

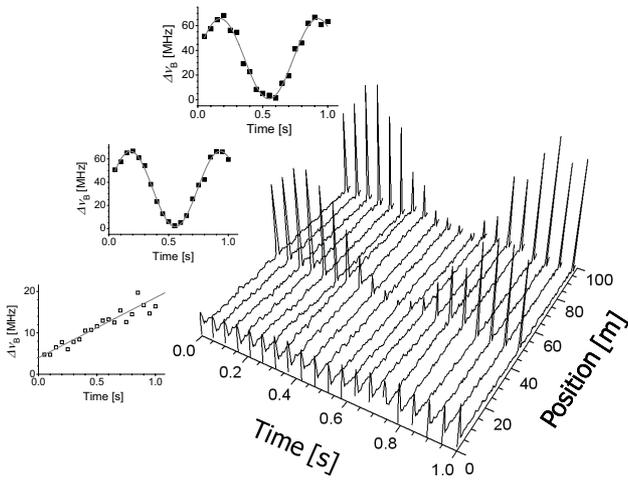


図8 ブリュアン光相関領域解析法 (BOCDA 法) における測定位置の自動掃引技術による全分布情報の高速測定⁴²⁾。

ができる。

BOCDA での位置選択測定用光源周波数変調の周波数をポンプ部とプローブ部で若干違えることによって、測定位置を光ファイバーに沿って自動掃引できる技術も提案・実証した⁴²⁾。これにより、光ファイバーに沿う全分布情報を高速に取得できる。図8は20トレース/秒で全分布情報を高速測定した例であり、すべての位置で動的歪みを20サンプル/秒で取得できる⁴²⁾。

光相関領域リフレクトメトリー (Brillouin optical correlation domain reflectometry : BOCDA 法) は、光ファイバーの片端のみから光を導入して歪み分布センシングを実現する方法である⁴³⁾。図9が基本システムであり、光ファイバーから戻る自然ブリュアン散乱と参照光を干渉させる。ここで、光源周波数を正弦波で変調すると、ある特別な位置からのブリュアン散乱のみが参照光と強く干渉できる。受光器出力を電気スペアナに掛けると、この特別な位置でのBGSが得られる。すでに、13 mm 空間分解能、50 Hz サ

ンプリング速度、1000 m 超の測定レンジが達成されている⁴³⁻⁴⁵⁾。

最近、光源の周波数変調に同期させて強度変調も併用することで、不要なスペクトル成分を低減することに成功した⁴⁶⁾。図10に、いろいろな強度変調波形による雑音低減の様子を示す。最適波形での強度変調によって、測定位置での歪みを表すスペクトルピーク (○印) よりも雑音成分を大幅に低減することに成功している。本技術により、空間分解能 10 mm と歪みダイナミックレンジ 7000 $\mu\epsilon$ を実現した⁴⁶⁾。

1本の光ファイバーで温度と歪みを同時に分布センシングできる技術も実現している (図11)⁴⁷⁾。筆者らは、偏波維持光ファイバーの x 偏波光で誘導ブリュアン散乱を起した際に発生している超音波により、y 偏波光もブラッグ反射されることを実証した⁴⁸⁾。この y 偏波光の反射波長 (周波数) は偏波維持光ファイバーの複屈折に対応し、x 偏波光のそれより数十 GHz シフトする (図11 (b))⁴⁸⁾。

この実験において得られる BFS と複屈折による周波数シフトの温度と歪依存性を精査したところ、温度に関しては互いに符号が異なることがわかった。これは、両シフト量の測定から温度と歪みを精度よく測定できることを示している⁴⁹⁾。図11 (a) は、BOCDA 法により上記の2量を分布測定して温度と歪みの分布を得る実験系であり、測定レンジを延伸する技術も導入してある⁴⁷⁾。500 m レンジと 40 cm 分解能が得られている。図12は実験結果である。図 (a) と (b) はそれぞれ BGS とブリュアンダイナミックグレーティング (BDG) 反射スペクトル分布であり、図 (c) はそのピークの分布である⁴⁷⁾。図13は、温度と歪みの分離・分布測定結果である⁴⁷⁾。

なお、BDG に関しては、その基本特性の研究や応用開拓が活発化している^{31, 50, 51)}。

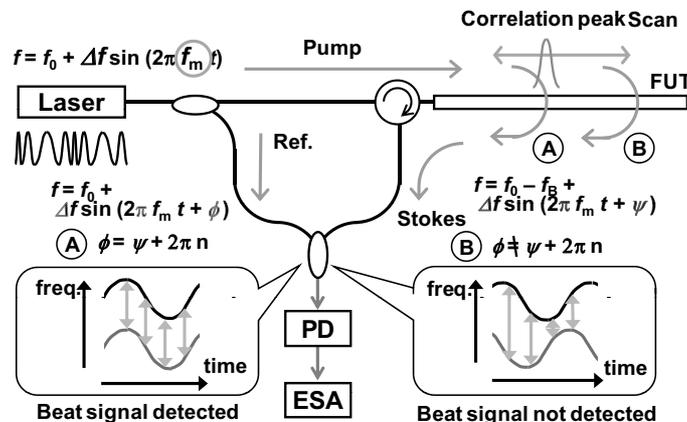


図9 ブリュアン光相関領域リフレクトメトリー (BOCDA 法) のシステム構成⁴³⁾。

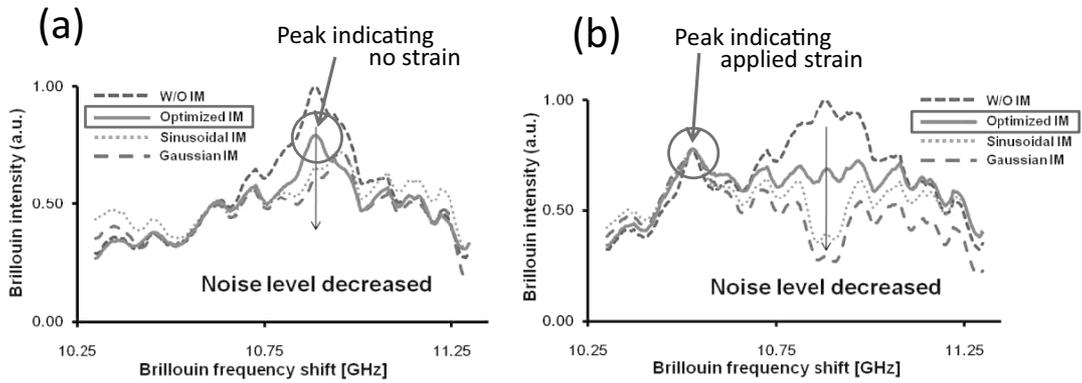


図10 ブリュアン光相関領域リフレクトメトリー (BOCDR法)における強度変調による不要スペクトルの低減⁴⁶⁾.

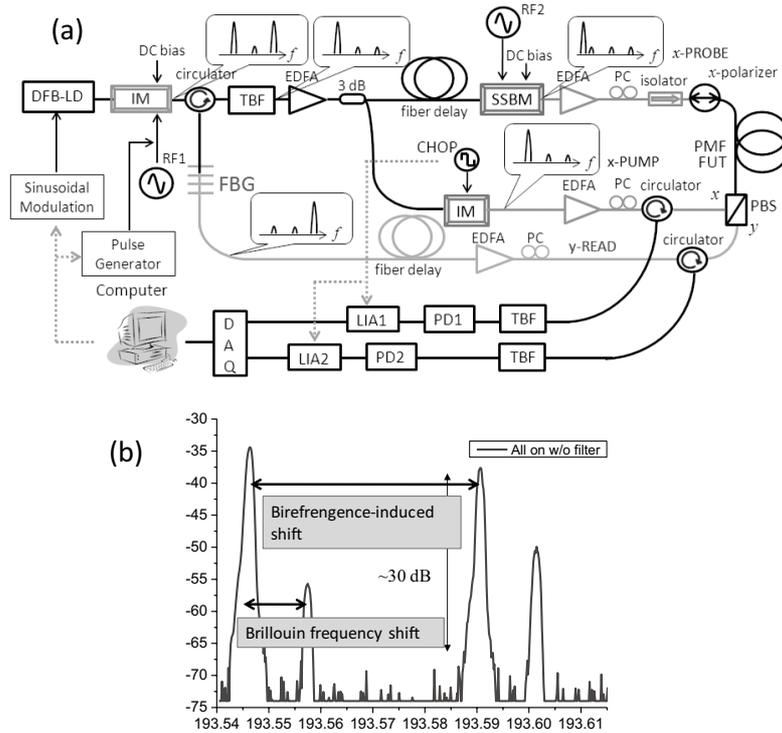


図11 ブリュアン散乱特性とブリュアンダイナミックグレーティング特性の測定による温度と歪みの同時・分離・分布センシング⁴⁷⁾. (a) システム構成, (b) ブリュアン周波数シフト (BFS) とブリュアンダイナミックグレーティング (BDG) スペクトルの関係⁴⁸⁾.

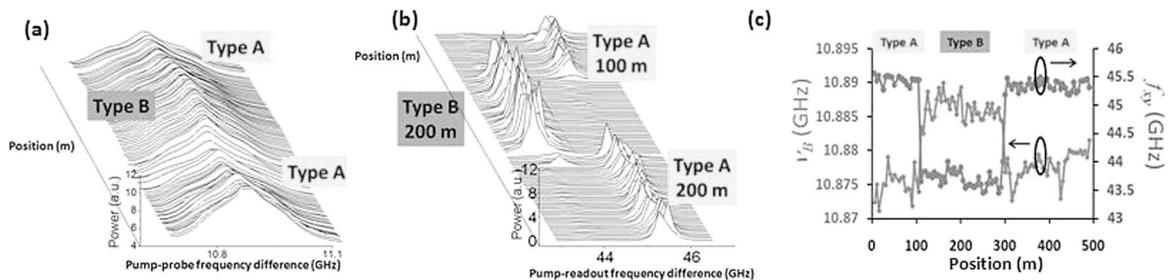


図12 (a, b) ブリュアンゲインスペクトル (BGS) とブリュアンダイナミックグレーティング (BDG) スペクトルのブリュアン光相関領域解析法 (BOCDA) による分布測定結果⁴⁷⁾. (c) ブリュアン周波数シフト (BFS) とBDGスペクトルピークの分布測定結果.

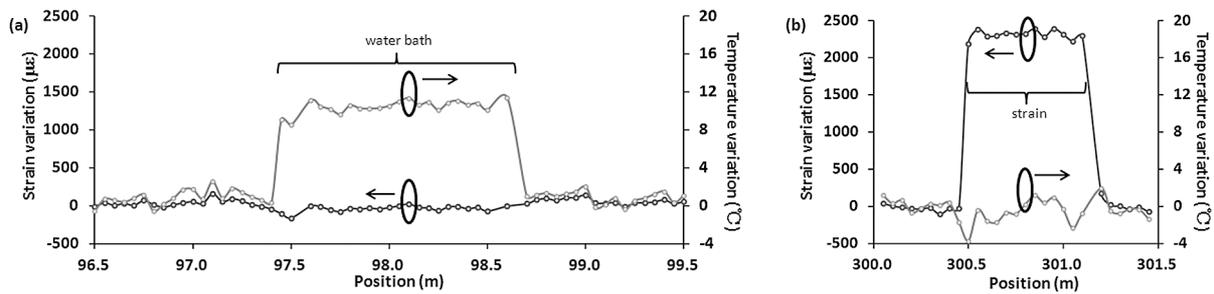


図13 温度と歪みの同時・分離・分布測定結果⁴⁷⁾。

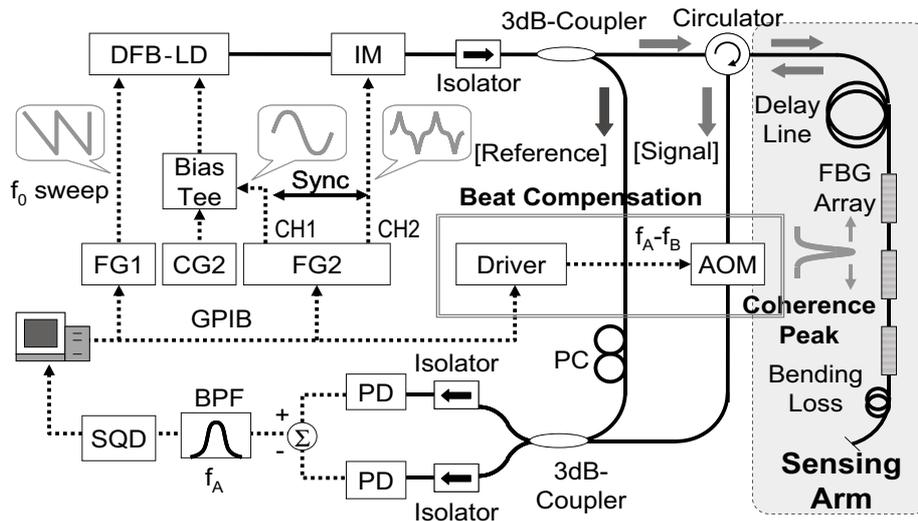


図14 光相関領域法による長尺光ファイバグレーティングの多点配置システム⁵⁴⁾。

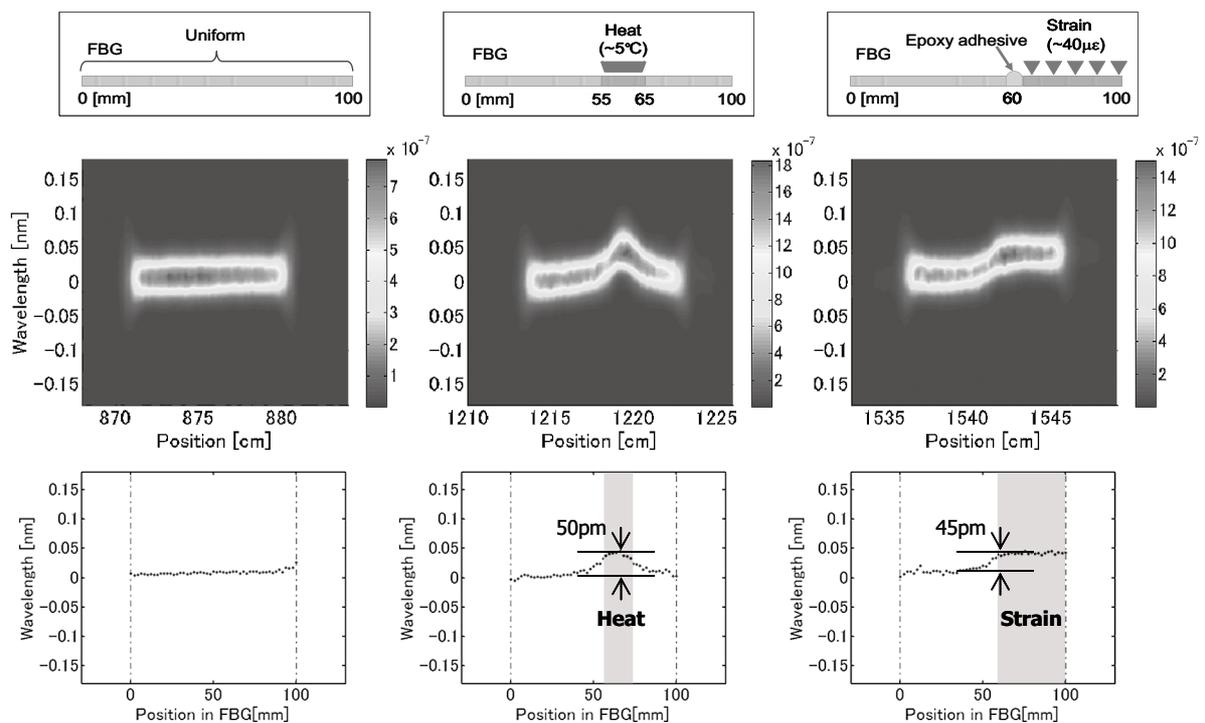


図15 長尺光ファイバグレーティング内のブラッグ反射スペクトルの分布測定結果⁵⁴⁾。

FBGのブラッグ反射波長は歪みと温度への依存性を示す²⁾。この現象を利用した歪みセンサーとして、長尺(10 cm) FBGの内部歪み分布を光相関領域法の原理により測定するシステムも提案されている⁵²⁻⁵⁴⁾。図14がシステム構成である⁵⁴⁾。図15は、3つの長尺FBGの内部ブラッグ波長分布を測定した結果である⁵⁴⁾。

光ファイバーセンシング技術の研究・開発の経緯を、光ファイバーセンサー国際会議の歩みを振り返りつつ、概観した。実用化が進化した光ファイバーセンサーの好例として「光ファイバージャイロ」について、歴史と現状、さらには今後への期待を述べた。また、「痛みのわかる材料・構造のための光ファイバー神経網技術」について概要を述べたのに続き、筆者らが研究している光相関領域法による技術開発の現状も紹介した。mmオーダー空間分解能、kHzオーダー高速サンプリング、さらにはランダムアクセス機能等が実現されている。温度と歪みの高精度・同時・分布測定法も提案・実証されている。

光ファイバーセンサー技術は、新たなフォトニックデバイスの誕生と物理的考察の深化により、ユニークなセンシング機能を提供し続けてゆくものと期待される。

文 献

- 1) 大越孝敬編：光ファイバセンサ(オーム社, 1986)。
- 2) J. Dakin and B. Culshaw: *Optical Fiber Sensors Volume I-IV* (Artech House Publishers, 1997)。
- 3) 田中 哲：“第19回光ファイバセンサ国際会議(OFS-19)報告”，第41回光波センシング技術研究会, LST41-16 (2008) 67-72。
- 4) 中村健太郎：“会議報告 第20回光ファイバセンサ国際会議(OFS-20)”，第44回光波センシング技術研究会, LST44-10 (2009) 107-112。
- 5) 田中洋介：“国際会議報告 OFS-21 報告”，第47回光波センシング技術研究会, LST47-12 (2011) 85-90。
- 6) J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby and J. N. Ross: “Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector,” *Electron. Lett.*, **21** (1985) 569-570。
- 7) T. Horiguchi and M. Tateda: “BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory,” *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 1170-1176。
- 8) K. Hotate and T. Hasegawa: “Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique: Proposal, experiment and simulation,” *IEICE Trans. Electronics*, **E83-C** (2000) 405-412。
- 9) M. J. F. Digonnet, S. W. Lloyd and S. Fan: “Coherent backscattering noise in a photonic-bandgap fiber optic gyroscope,” *Proc. 20th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 750302 (2009)。
- 10) K. Hotate: “Fiber-optic gyros,” *Optical Fiber Sensors IV* (Artech House, 1997) pp. 167-206。
- 11) H. Lefevre: *The Fiber-Optic Gyroscope* (Artech House, 1993)。
- 12) H. C. Lefevre, P. Martin, T. Gaiffe, P. Graindorge and G. Le Boudec: “Latest advances in fiber-optic gyroscope technology at photonics,” *Proc. SPIE*, **2292** (1994) 156-165。
- 13) S. Sakai, Y. Fukushima, A. Ohno and H. Saito: “In-orbit performance evaluation of temperature controlled small fiber optical gyro on microsatellite “REIMEI,”” *Proc. of 18th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, TuE3 (Cancun, 2006)。
- 14) http://www.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/index_j.html。
- 15) M. J. F. Digonnet: “Status of broadband rare-earth doped fiber sources for FOG applications,” *Proc. SPIE*, **2070** (1993) 113-131。
- 16) S. P. Divakaruni and S. J. Sander: “Fiber optic gyros: A compelling choice for high precision applications,” *Proc. of 18th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, MC2 (Cancun, 2006)。
- 17) T. Buret, D. Ramecourt, J. Honthaas, E. Willemenot, Y. Paturel and T. Gaiffe: “Fibreoptic gyroscopes for space application,” *Proc. of 18th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, MC4 (Cancun, 2006)。
- 18) 巳谷真司, 石島義之, 岩田隆敬, 鈴木秀人, 坂井真一郎, 戸田知朗, 橋本樹明, 齋藤宏文, 大野有孝, 宮原聖明, 沖倉晴彦: “衛星搭載用高精度 FOG-IRU の開発”, 電子情報通信学会技術研究報告, 宇宙・航行エレクトロニクス, **108** (2008) 149-154。
- 19) P. Russell: “Photonic crystal fibers,” *Science*, **299** (2003) 358-362。
- 20) S. W. Lloyd, V. Dangui, M. J. F. Digonnet, S. Fan and G. S. Kino: “Measurement of reduced backscattering noise in laser-driven fiber optic gyroscopes,” *Opt. Lett.*, **35** (2010) 121-123。
- 21) V. Dangui, M. J. F. Digonnet and G. S. Kino: “Laser-driven photonic-bandgap fiber optic gyroscope with negligible Kerr-induced drift,” *Opt. Lett.*, **34** (2009) 875-877。
- 22) M. D. Shupe: “Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer,” *Appl. Opt.*, **19** (1980) 654-655。
- 23) K. Hotate and G. Hayashi: “Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation: Method to reduce the noise induced by the backscattering and closed-loop operation using digital signal processing,” *Proc. of 13th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors*, Tu-4-1 (1999) pp. 104-107。
- 24) G. A. Sanders, L. K. Strandjord and T. Q. Qiu: “Hollow core fiber optic ring resonator for rotation sensing,” *Proc. of 18th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, ME6 (Cancun, 2006)。
- 25) X. Wang, Z. He and K. Hotate: “Reduction of polarization-fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator with twin 90° polarization-axis rotated splices,” *Opt. Express*, **18** (2010) 1677-1683。
- 26) X. Wang, Z. He and K. Hotate: “Automated suppression of polarization-fluctuation in resonator fiber optic gyro with twin 90° polarization-axis rotated splices,” *CLEO/IQEC2010: Laser Science to Photonic Applications*, CFH6 (San Jose, 2010)。
- 27) 足立正二, 小山田弥平: “時間領域測定技術による光ファイバ分布型センシング,” 計測と制御, **51** (2012) 217-222。
- 28) C.-H. Li, K. Nishiguchi, M. Miyake, A. Makita, M. Yokoyama, K. Kishita, T. Mizutani and N. Takeda: “PPP-BOTDA method to achieve 2cm spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique,” *IEICE Technical Report*, OFT 2008-13 (2008)。
- 29) S. M. Foaleng, M. Tur, J. C. Beugnot and L. Thévenaz: “High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes,” *J. Lightwave Technol.*, **28** (2010) 2993-3003。
- 30) A. W. Brown, B. G. Colpitts and K. Brown: “Dark-pulse Brillouin optical time-domain sensor with 20-mm spatial resolution,” *J. Lightwave Technol.*, **25** (2007) 381-386。
- 31) K.-Y. Song, S. Chin, N. Primerov and L. Thévenaz, “Time-domain distributed fiber sensor with 1 cm spatial resolution based on Brillouin dynamic grating,” *J. Lightwave Technol.*, **28** (2010) 2062-2067。
- 32) K. Hotate, K. Abe and K.-Y. Song: “Suppression of signal fluctua-

- tion in Brillouin optical correlation domain analysis system using polarization diversity scheme,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (2006) 2653–2655.
- 33) K. Hotate, H. Arai and K.-Y. Song: “Range-enlargement of simplified Brillouin optical correlation domain analysis based on a temporal gating scheme,” *SICE J. Control, Meas. Syst. Integr.*, **1** (2008) 271–274.
 - 34) K.-Y. Song, Z. He and K. Hotate: “Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis,” *Opt. Lett.*, **31** (2006) 2526–2528.
 - 35) K.-Y. Song and K. Hotate: “Distributed fiber strain sensor at 1 kHz sampling rate based on Brillouin optical correlation domain analysis,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **19** (2007) 1928–1930.
 - 36) K. Hotate and Z. He: “Synthesis of optical-coherence function and its applications in distributed and multiplexed optical sensing,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 2541–2557.
 - 37) S. S. L. Ong, H. Kumagai, H. Iwaki and K. Hotate: “Crack detection in concrete using a Brillouin optical correlation domain analysis based fiber optic distributed strain sensor,” *Proc. 16th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, We3-3 (Nara, 2003).
 - 38) S. S. L. Ong, M. Imai, Y. Sako, Y. Miyamoto, S. Miura and K. Hotate: “Dynamic strain measurement and damage assessment of a building model using a Brillouin optical correlation domain analysis based distributed strain sensor,” *Proc. of 16th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, We3-2 (Nara, 2003).
 - 39) T. Yari, K. Nagai, M. Ishioka, K. Hotate and Y. Koshioka: “Aircraft structural health monitoring using on-board BOCDA system,” *Proc. of 15th Annual Int. Symp. on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 6933-29 (San Diego, 2008).
 - 40) 水口 周, 中村達也, 灘部岳晃, 西川雅章, 武田展雄, 岸真人, 保立和夫: “埋め込み光ファイバの分布型 BOCDA 計測による CFRP ボルト接合部の損傷検知,” *日本航空宇宙学会論文集*, **59** (2011) 176–182.
 - 41) K. Hotate, M. Numasawa, M. Kishi and Z. He: “High speed random accessibility of Brillouin optical correlation domain analysis with time division pump-probe generation scheme,” *3rd Asia Pacific Optical Sensors Conf. (APOS 2012)*, APO12-99, WB-3 (Sydney, 2012).
 - 42) K.-Y. Song, M. Kishi, Z. He and K. Hotate: “High-repetition-rate distributed Brillouin sensor based on optical correlation-domain analysis with differential frequency modulation,” *Opt. Exp.*, **36** (2011) 2062–2064.
 - 43) Y. Mizuno, Z. He and K. Hotate: “One-end-access high-speed distributed strain measurement with 13-mm spatial resolution based on Brillouin optical correlation-domain reflectometry,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **21** (2009) 474–476.
 - 44) Y. Mizuno, W. Zou, Z. He and K. Hotate: “Operation of Brillouin optical correlation-domain reflectometry: Theoretical analysis and experimental validation,” *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **28** (2010) 3300–3306.
 - 45) Y. Mizuno, Z. He and K. Hotate: “Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on double-modulation scheme,” *Opt. Exp.*, **18** (2010) 5926–5931.
 - 46) S. Manotham, M. Kishi, Z. He and K. Hotate: “1-cm spatial resolution with large dynamic range in strain distributed sensing by Brillouin optical correlation domain reflectometry based on intensity modulation,” *3rd Asia Pacific Optical Sensors Conf. (APOS 2012)*, APO12-51 Th-C23, (Sydney, 2012).
 - 47) R. K. Yamashita, W. Zou, Z. He and K. Hotate: “Measurement range elongation based on temporal gating in Brillouin optical correlation domain distributed simultaneous sensing of strain and temperature,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **24** (2012) 1006–1008.
 - 48) K.-Y. Song, W. Zou, Z. He and K. Hotate: “All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber,” *Opt. Lett.*, **33** (2008) 926–938.
 - 49) W. Zou, Z. He and K. Hotate: “Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber,” *Opt. Exp.*, **17** (2009) 1248–1255.
 - 50) Y. Dong, L. Chen and X. Bao: “Truly distributed birefringence measurement of polarization-maintaining fibers based on transient Brillouin grating,” *Opt. Lett.*, **35** (2010) 193–195.
 - 51) K.-Y. Song and H.-J. Yoon: “Observation of narrowband intrinsic spectra of Brillouin dynamic gratings,” *Opt. Lett.*, **35** (2010) 2958–2960.
 - 52) K. Hotate and K. Kajiwara: “Proposal and experimental verification of Bragg wavelength distribution measurement within a long-length FBG by synthesis of optical coherence function,” *Opt. Exp.*, **16** (2008) 7881–7887.
 - 53) K. Kajiwara and K. Hotate: “Measurement of Bragg-wavelength distribution in a long-length fiber Bragg grating with high speed sampling,” *Appl. Phys. Exp.*, **2** (2009) 082401.
 - 54) K. Kajiwara and K. Hotate: “Multiplexing of long-length fiber Bragg grating distributed sensors based on synthesis of optical coherence function,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **23** (2011) 1555–1557.

(2012 年 5 月 1 日受理)