

光波センシング技術の進展

光電子技術研究所 田中 大 一 郎¹

Recent Progress in Lightwave Sensing Technology

D. Tanaka

光波センシングの根幹をなす技術のひとつに、光ファイバセンシングがあげられます。光ファイバ自体をセンサとして活用するこのセンシング方法では、多種多様な分野でニーズに応じた計測をおこなうために、計測環境に適した特殊ファイバと計測目的にあわせた光計測技術が必要とされています。本稿では、特殊ファイバと光計測技術の開発事例を紹介しながら、光ファイバセンシング技術の進展を解説します。

“Fiber-optic sensing” is one of the key techniques in lightwave sensing technology. Since the fibers also work as “sensors”, various measurement techniques and various specialty fibers that are optimized for each specific measurement object are required. In this paper, recent progress in the measurement techniques and the specialty fibers for the lightwave sensing are reviewed.

1. ま え が き

光波センシングとは、光波がもつ強度、周波数、位相、偏波、干渉性、非線形性などのパラメータを活用し、形状、距離、ひずみ、温度、圧力などを計測する技術です。この光波センシングの根幹をなす技術のひとつに、光ファイバセンシングがあげられます。光ファイバをセンシングに用いる研究は、石英ガラス系光ファイバが通信に実用化された 1970 年代に始められ、1983 年には第 1 回光ファイバセンサ国際会議（International Conference on Optical Fiber Sensors, OFS）が開催されました。研究当初より、光ファイバは単なる伝送路として利用されるだけでなく、ひずみ、温度、圧力、電界、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てきました。航空宇宙分野で実用化が進む光ファイバジャイロが、その代表例です。その後、光ファイバ中に生じる光散乱を利用して 1 本の光ファイバ長手方向に沿って分布計測する技術、FBG に代表されるファイバ型デバイスを用いて局所部を高速計測する技術が提案されました。これにより光ファイバセンサの適用範囲は大きく拡大し、現在では、橋梁やトンネルなどのインフラ構造物、風力発電機、航空機、天然資源の採掘現場などで積極的に活用されています。このように多種多様な分野でニーズに応じた計測をおこなうために、計測環境に適した特殊ファイバと計測目的にあわせた光計測技術が、数多く開発されています。当社でも、光通

信で培った技術をベースとして特殊ファイバと光計測技術の開発に取り組んでいます。本稿では、その取組みの一例を紹介します。

2. 特殊ファイバ

光ファイバセンシングで用いる特殊ファイバは、光通信で培われた技術をベースとし、用途に応じて様々な設計変更、改良がおこなわれています。

2.1 偏波保持ファイバ

代表的な偏波保持ファイバである PANDA ファイバの断面構造を図 1 に示します。このファイバは、2 つの応力付与部によりコアに複屈折を生じさせ、直交する 2 つの偏波モード間に伝搬定数差を与えています。通常のシングルモードファイバでは、直線偏光を入射しても、コ

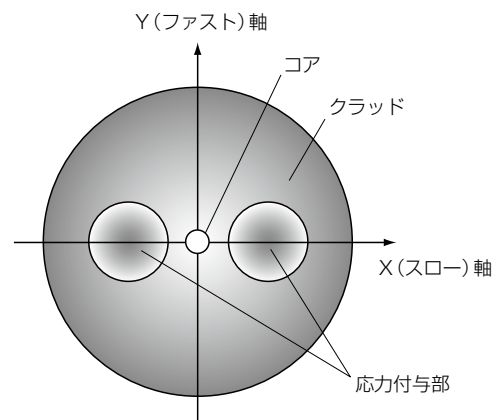


図 1 PANDA ファイバの断面構造
Fig. 1. Cross-sectional diagram of PANDA fiber.

¹ 応用電子技術研究部部長

略語・専門用語リスト		
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。
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。
ROTDR	Raman Optical Time Domain Reflectometry	ラマン光時間領域反射測定法。ラマン散乱光の強度変化を時間領域で測定する分布計測方法。
BOTDA	Brillouin Optical Time Domain Analysis	ブリルアン光時間領域分析法。ブリルアン散乱光の波長変化を時間領域で測定する分布計測方法。
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry	光周波数領域反射測定法。反射光の波長変化を光周波数領域で測定する分布計測方法。

アの非軸対称性や外乱などによって 2 偏波間にモード結合が生じて出射光の偏光状態がランダムに変化するのに対し、偏波保持ファイバでは、あらかじめ伝搬定数差が与えられているためにモード結合が生じにくく、入射光の偏波面を保持して伝搬することができます。光ファイバセンシングでは、この偏波保持特性を利用し、光ファイバジャイロなどの干渉計を構成するファイバとして活用されています。PANDAファイバで構成された光ファイバジャイロは、ファイバ中に生じる偏波面変動と地磁気によるファラデー効果とが抑制されるため、角速度の計測誤差を大きく低減できることが実証されています。

また、このファイバの新たな応用として、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した、ひずみ・温度同時計測センサが提案されています。このセンサは、最初にFBGで実証され、近年ではブリルアン散乱光を用いた計測でも報告されています。当社では、同時計測の精度向上を目的として、応力付与部をコア近傍に配置した高複屈折PANDAファイバを開発しました。図 2 は、モード複屈折の異なるファイバに作製したFBGの、ひずみと温度に対する直交 2 偏波のブラッグ波長差

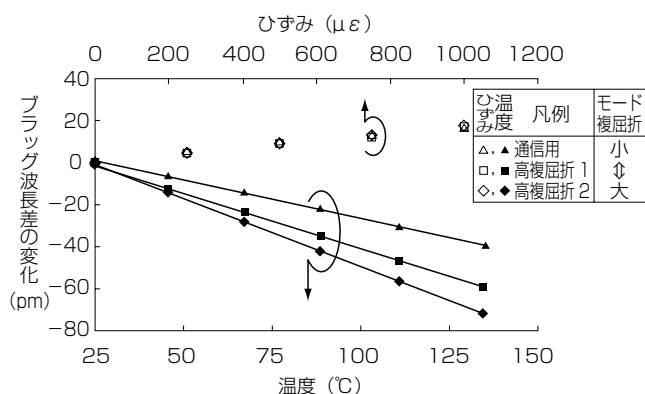


図 2 PANDAファイバに作製したFBGのひずみと温度に対するブラッグ波長差変化

Fig. 2. Strain and temperature dependence of Bragg wavelength difference for PANDA fiber grating.

変化を示すグラフです。ファイバのモード複屈折に依り、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ています。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ました。当社では、このファイバを用いて、ひずみ誤差±20 με (単位: マイクロ・ストレイン、1 με は百万分 1 歪)、温度誤差±2℃の計測精度を実現しています¹⁾。

2.2 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ており、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ました。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 (≡ Si-Si ≡) などの構造欠陥やガラスの共有結合 (≡ Si-O-Si ≡) から、E' センター (≡ Si·) や非架橋酸素正孔センター (≡ Si-O·) などの欠陥が生成されます。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ますが、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います。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ます。水酸基は、非架橋酸素正孔センターを終端 (Si-OH) する役割を果たします。近年、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ます。図 3 は、原子炉内部

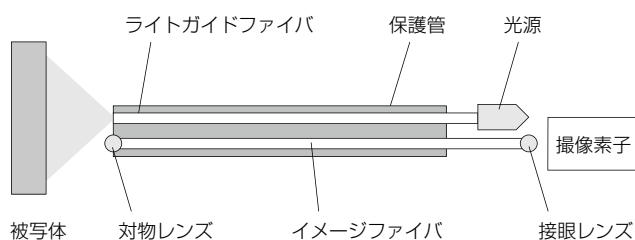


図 3 ファイバスコープ

Fig. 3. Schematic diagram of fiber-optic scope.

観察のために開発したファイバ스코ープの構造です²⁾。プローブ光を伝送す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ます。

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ます³⁾。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(≡Si-F)する効果があります。当社で開発したフッ素添加コアファイバは、CERN (the European Organization for Nuclear Research) のような高エネルギー物理実験を目的とした加速器の研究施設で情報伝送媒体として用いられているほか、超短パルスレーザーを用いてFBGを作製し、センシングに活用する研究も進められています⁴⁾。

2. 3 分布計測用ファイバ、ファイバケーブル

石油や天然ガスなどの地下資源を効率的に採掘するためには、地中に分布する油層やガス層を特定することが重要とされています。一例として、水溶性天然ガス坑井のイメージを図4に示します。ガス層付近では水圧や温度が変化することから、光ファイバを用いて坑井深さ方向に沿って水圧と温度を分布計測することで、効率の良い採掘が可能となります。石油・ガス坑井における分布計測では、坑井環境に耐えるファイバ被覆構造、分布測定を可能とするケーブル構造が必要とされています。

油井では、光ファイバが高温で高圧水素雰囲気中に晒されるため、水素分子がガラス中を透過し、比較的短時間でコアまで拡散する現象が知られています。この水素分子は近赤外波長域に吸収を有するため、光ファイバの伝送損失は時間とともに変化してしまいます。油井の温度分布計測に用いられるROTDRは、入射する測定光よりもはるかに強度が低いラマン散乱光の強度変化を温度に換算するため、伝送損失が増加すると、シグナル/ノイ

ズ比が温度計測精度に影響を及ぼす程度まで小さくなるうえ、測定レンジも制限されてしまいます。この環境に耐える被覆構造は長年にわたって研究され、現在では、ファイバへの水素透過を遮断するためにアモルファスカーボンをガラス表面にコーティングし、さらに耐熱性を高めるためにポリイミドを被覆した光ファイバが用いられています⁵⁾。また、さらなる信頼性向上のために、光ファイバをステンレスチューブに挿通し、そのファイバの周囲を水素捕捉ゲルで充填したケーブルも実用化されています。

ガス坑井では、図5に示す水圧センサケーブルが用いられています⁶⁾。圧力計測光ファイバは、ケーブル長さ方向に対してらせん状に巻いて固定されており、水圧が加わるとファイバ支持層が変形して圧縮ひずみが生じる構造となっています。この圧縮ひずみをBOTDAによりファイバ長手方向に沿って分布計測することで、坑井深さ方向に沿った水圧分布に換算することができます。また、水圧の影響を受けないように温度計測光ファイバを挿入することで、1本のケーブルで温度分布も計測することができます。

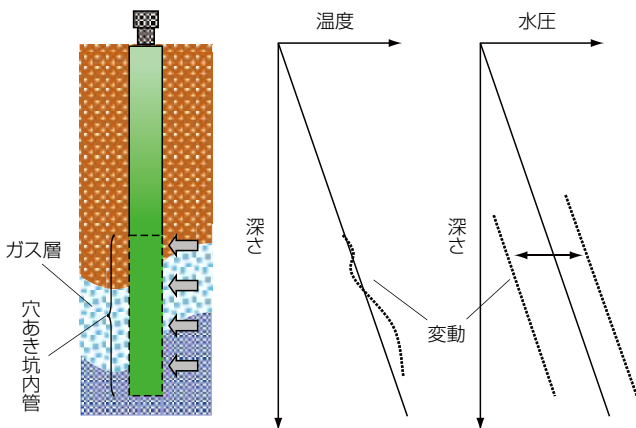


図4 水溶性天然ガス坑井のイメージ図
Fig. 4. Illustrated well of natural gas dissolved in water.

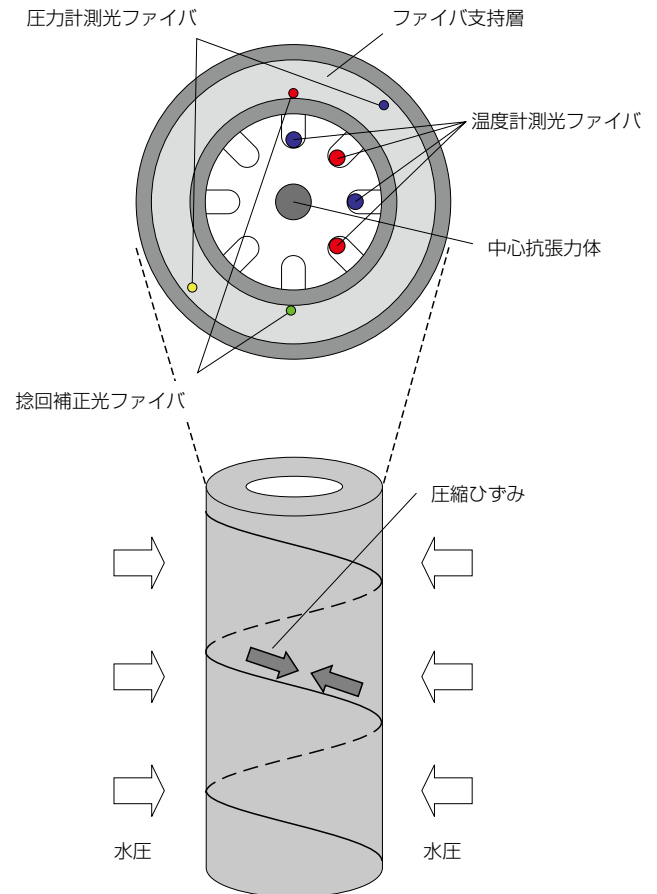


図5 水圧センサケーブル
Fig. 5. Schematic diagram of water pressure sensing cable.

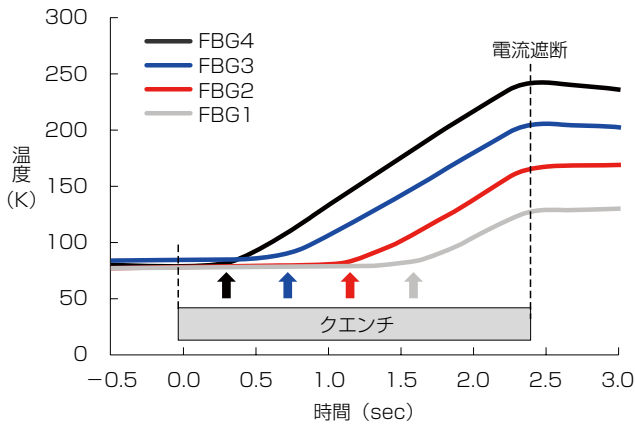


図6 クエンチ発生時における超電導線材温度の経時変化
Fig. 6. Real-time response of superconducting wire temperature during quenching.

3. 光計測技術

光ファイバセンシングの研究が開始された当初は、新しい計測技術が数多く提案されました。一方、センサの実用化が進む現在では、これまで産み出されてきた計測技術とニーズとをいかにマッチングさせるかが重要となっています。

3.1 超電導線材の常電導転移検出

超電導線材コイルからなる強磁場マグネットは、磁気浮上鉄道、核磁気共鳴画像装置、核融合炉などへの応用が期待されており、実用化に向けて、安全性、信頼性を確保する研究が精力的におこなわれています。なかでも、超電導線材に通電して強磁場を発生させた際に線材の一部が温度上昇して常電導転移を示す“クエンチ”と呼ばれる現象を早期に検出し、線材の損傷を未然に防止することができれば、マグネットの安全性、信頼性を大きく向上させることができます。当社では、光ファイバセンサにより超電導線材の温度を常時計測し、線材の温度上昇からクエンチを検出する技術を開発しています⁷⁾。図6は、FBGを用いて計測した線材温度の経時変化を示すグラフです。この実験では、FBG近傍に配置したヒータにより線材を加熱し、意図的にクエンチを発生させています。その結果、ヒータに近接するFBG4が最も早く温度上昇し、続いてヒータに近いFBGから順に等時間差で温度上昇が検出されました。そして、ヒータから最も遠いFBG1が温度上昇を検出した後に線材への通電を遮断したところ、遮断と同時にすべてのFBGの温度上昇が止まり、その後は徐々に温度が低下しました。この結果は、ヒータを起点としたクエンチが線材長手方向に伝播し、電流遮断と同時に消滅したことを意味します。したがって、光ファイバセンサを用いてクエンチを早期に検出し、超電導線材への通電を遮断することで、線材の損傷を防止することができます。また、計測結果から線材に生じ

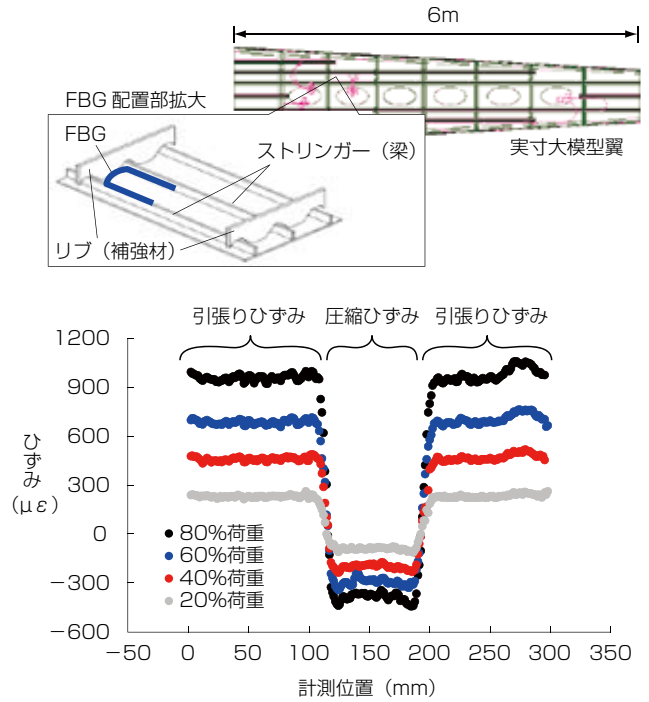


図7 模型翼局所のひずみ分布計測結果
Fig. 7. Measured strain distribution of local position in wing structure.

た最大温度やクエンチ伝播範囲を推定することができるので、クエンチ発生後の運転継続判断や点検範囲の限定化にも役立てることができます。

3.2 実寸大航空機翼のひずみ計測

近年、風力発電機、航空機などに代表される大型構造物の安全性・健全性を診断する構造ヘルスマonitoringのニーズが高まっており、このモニタリングに光ファイバセンサが活用されています。とくに設計、試作段階で行う負荷試験で構造物に生じるひずみを精密に計測するために、空間分解能の高い分布計測技術が注目を集めています。当社では、独立行政法人宇宙航空研究開発機構と共同で、実寸大模型翼の負荷試験時に生じるひずみの分布計測をおこないました⁸⁾。この試験では合計260個のFBGを翼全体に配し、独自に開発した光周波数領域法の計測器(OFDR)を用いてひずみ計測をおこないました。結果の一例として、図7に翼長手方向の梁と翼垂直方向の補強材に沿ってU字状に配置したセンサ長300mmのFBGで計測した局所部のひずみ分布を示します。翼長手方向に生じる引張りひずみと翼垂直方向に生じる圧縮ひずみが、1本のファイバ長手方向に沿って計測され、得られた圧縮ひずみ値と引張りひずみ値からポアソン比を定量化することができました。この試験で用いたOFDRの空間分解能は最高0.6mmです。この空間分解能は、一般的に用いられる時間領域法の分布計測技術の空間分解能(1~2m)と比較して数千倍の性能であり、光相関領域法により報告されている従来の最高空間分解能(1.6mm)をも上回っています。空間分解能が高

いほど局所部に生じる最大ひずみを正確に測定できることから、OFDRの計測精度はきわめて高いといえます。なお、FBGを用いた分布計測技術は、計測範囲がFBGのセンサ長に制限されますが、近年ではセンサ長をメートル級まで拡張した例も報告されており⁹⁾、今後さらに適用範囲が広がると期待されます。

4. む す び

光波センシングの根幹をなす技術のひとつである、光ファイバセンシングについて、フジクラの研究活動状況を説明しました。光ファイバセンシング技術は本稿の範囲にとどまらず、ファラデー効果を用いた電流センサや表面プラズモン共鳴を用いたバイオセンサなど多岐にわたりますが、いずれの応用においても特殊ファイバと光計測技術が日々進歩し、センサの機能向上に大きく貢献しています。当社では、今後も光ファイバセンサの開発に携わることで、光波センシング技術の発展に貢献していきます。

参 考 文 献

- 1) K. Omichi, et al.: "Simultaneous Measurement of Strain and Temperature by Means of Polarization Division Multiplexing Optical Frequency Domain Reflectometry," OFS-20, Proc. of SPIE, 7503-191, 2009
- 2) 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스코ープの開発 (その2)」, 原子力学会 2010年秋の大会, J-40, 2010
- 3) 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
- 4) D. Grobnic, 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
- 5) C. H. Wang, et al.: "High Reliability Hermetic Optical Fiber for Oil and Gas Application," OFS-17, Proc. of SPIE, Vol. 5855, pp. 563-566, 2005
- 6) 佐山忠嘉ほか:「分布型光ファイバ水圧センサケーブルの開発」, 信学技報, OFT2009-59, pp. 31-34, 2009
- 7) K. Omichi, et al.: "Temperature Monitoring of Superconducting Wire for Quench Detection," OFS-21, Proc. of SPIE, 7753-197, 2011
- 8) 井川寛隆ほか:「ミリメートル空間分解能光ファイバひずみセンサ」, フジクラ技報, No. 116, pp. 6-13, 2009
- 9) K. Igawa, et al.: "Measurement of Distributed Strain and Load Identification Using 1500 mm Gauge Length FBG and Optical Frequency Domain Reflectometry," OFS-20, Proc. of SPIE, 7503-191, 2009