

# 光ファイバセンサ入門

これから光ファイバセンサを始める方必携

監修 保立 和夫



特定非営利活動法人(NPO)

光防災センシング振興協会

## 4. 光ファイバセンサ概論

光学（オプティクス）と電子工学（エレクトロニクス）が融合して生まれた光電子工学（オプトエレクトロニクス）により、レーザ（発光素子）や受光器（受光素子）に代表されるデバイスが実用化され、それらのデバイスはレーザプリンタや大容量光ディスク、太陽電池などに利用されています。また、光電子工学は光ファイバの登場によって通信分野も進歩させてきました。低損失、高信頼性、低コストの光ファイバが、現在のブロードバンドネットワークの基幹線を担っていることはご存じの通りです。

通信用光ファイバは、ある地点でレーザから入射させた光を損失や分散を最小限にとどめて、他の地点、場合によっては増幅器なしで数十キロメートルも先の地点まで届けることができます。通信の世界では、光ファイバの中を光が伝搬するとき、その光が外部からの影響を受けないようにしなければなりません。一方、伝搬光が外部から影響を受けるという事実は、実は外部の影響そのものを計測する、すなわちセンサとして利用できるということを意味します。

光ファイバをセンサとして利用する試みは、低損失の石英系光ファイバが実用化された1970年代当初から始まりました。その後、新しい計測原理やデバイスの発見・発明、様々な分野でのセンサ活用の拡大・高度化、光通信の発展に伴ったデバイスの低コスト化によって、多くの新しい計測手法が産み出され、実用・応用されてきました。その中には、従来の電気式のセンサにはない性能や特徴を活かし、これまでに測れなかった対象や場所にも適用ができるものがあります。また、より高い信頼性・精度が必要、広い領域を効率的に測りたい、といった要望に応えることもできます。

本章では、新しい計測技術として期待が寄せられている光ファイバセンサについて、その概要を述べ、利用する上で重要なシステムの問題をまとめました。

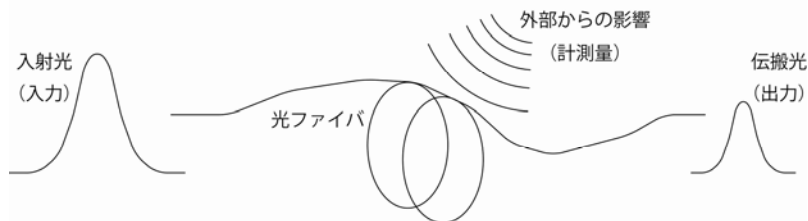


図1 光ファイバのセンサ利用

光ファイバセンサは基本的に光源、伝送路となる光ファイバ、計測部、そして受光器から構成されます。図2に示した光ファイバセンサの基本構成では、伝送路となる光ファイバに、光ファイバ同士を接合したり、光を分配・結合したりするための部品が含まれています。図2は光源からの光が受光器まで一方通行で伝搬する透過型ですが、計測部で反射あるいは散乱によって光が伝送路を逆に戻る構成方式（反射型）もあります。反射型の場合、光ファイバを逆方向に伝搬する光を光源ではなく受光器に導くため、必ず分岐用の部品が利用されます。図3のように、計測部は光ファイバ自身である場合（intrinsic）と変換器と組み合わせた形態（extrinsic）があります。さらに、光が一度光ファイバの外に出て変換器に入力され、出力となる光を光ファイバに戻すというように、変換器が「ブラックボックス」となる形態（hybrid）があります。どの形態においても、光源から伝送路を通過して計測部に到達した光の特性がその場の外部環境に応じて変化し、その特性変化は、さらに伝送路を通過して光が最後に到達する受光器の出力から検出することになります。ここで検出量として利用される光の特性には、強度、位相、周波数、波長、偏波などがあります。

光ファイバ自身が計測部となる場合は、外部から直接的に光ファイバに加えられた変化が伝搬光の特性を変化させます。変換器と組み合わせた場合には、変換器を通して外部の変化が光ファイバに伝えられます。最後の形態では、変換器の中で計測量にしたがって何らかの変化を受けた光が光ファイバに戻されます。外部からファイバに加えられる変化には、物理的な量（歪、温度、磁界など）と化学的なもの（液体、ガスなど）がありますが、一般的に、光ファイバ自身が計測部となるセンサは物理量の計測が可能で、変換器を用いるものは物理量の他に化学量も計測することができます。

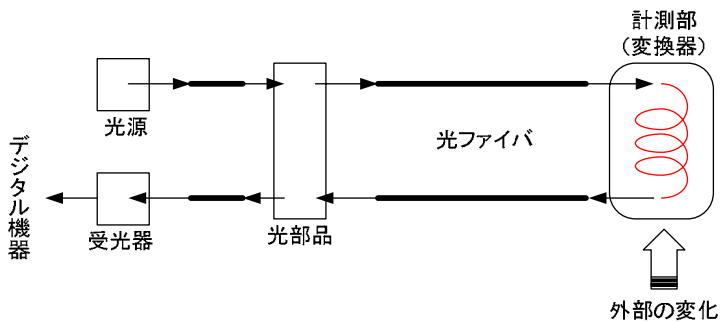


図2 光ファイバセンサの基本構成（透過型）

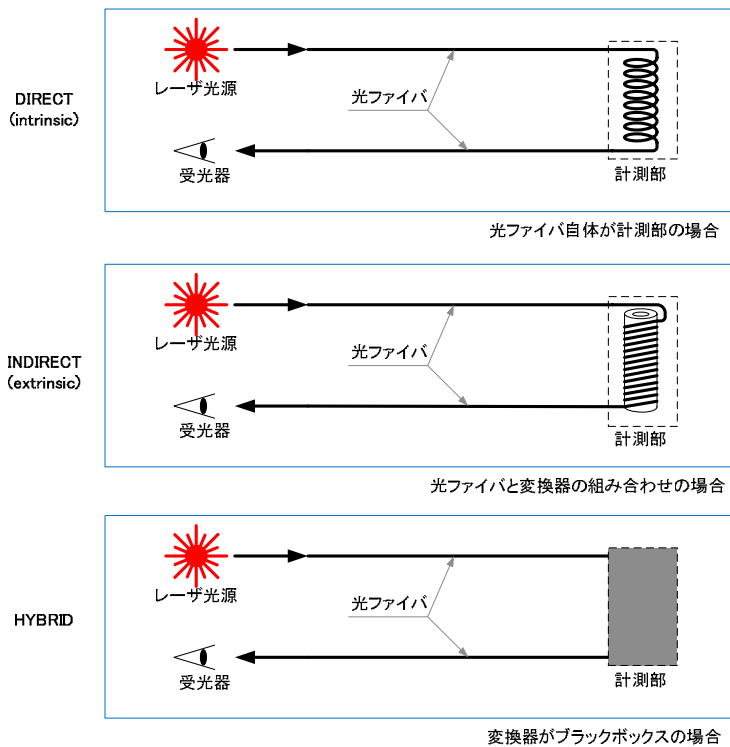


図3 計測部の形態による光ファイバセンサの分類（透過型）

本書では、主に光ファイバ自身が計測部となる光ファイバセンサを取扱います。その光ファイバセンサには、次のような特長や優位性があります。

- ① 細径・軽量
- ② 可とう性
- ③ 高強度・耐久性・耐食性
- ④ パッシブな計測部
- ⑤ 耐電圧性・耐電磁誘導性
- ⑥ 安全防爆性
- ⑦ 遠隔計測
- ⑧ 分布・準分布計測

これらの特長や優位性が、実際の計測現場でユーザーに対してどのようなメリットを発揮するのでしょうか。センサを利用する場所は、一般的に様々な障害を含んでいます。例えば、アクセスしにくい狭隘な空間や、運動性能や輸送効率が重要な輸送機器（航空機や船舶）では、細径で軽量、可とう性といった特長が設置・施工や運用の際に役立ちます。また、常時かつ長時間の使用を求められる場合、センサは計測対象とする機器や構造物よりも丈夫で長持ちすることが理想的です。光ファイバの引張特性は約3%までは弾性変形し、6%では破断します。さらに、電気式のセンサでは、計測部に電源を備えなければならなかったり、その電源部や計測部の電子部品が雷、サージ電流によって破壊されたりすることがあります。また、近傍に電子・電気機器がある場合、電磁誘導を受けない(EMI : electromagnetic immunity)センサや対策が求められます。これらに加えて、絶対に火花を出さない「本質安全性」を持つ光ファイバセンサは、利用を阻む様々な障害に対して特に対策を施さずに利用できるという利点を持っているのです。

最後に遠隔計測とは、光ファイバセンサならではの優位性である遠隔計測と分布・準分布計測にはどんなメリットがあるのでしょうか。

まず遠隔計測とは、図2の基本構成にあるパッシブな計測部と電源を要する光源・受光器をもつ部分（計測器）を遠く離すことができるということです。一般的な電気式のセンサでは計測器と計測部を結ぶリード線はおおよそ100メートル程度までしか拡張できません。計測方式にもよりますが、光ファイバセ

ンサでは、伝送路あるいは計測部自体を数十キロメートルまで伸ばすことができます。電源を設置するのが難しい場所で計測したい場合や、ネットワーク環境やバックアップ電源が整備された場所から計測したい場合に大きな利点となります。

次に、聞きなれない用語かもしれませんが、光ファイバセンサ以外のセンサでは実現が難しく、大変魅力的な特長である、分布計測(distributed sensing)および準分布計測(quasi-distributed sensing)について説明します。図4は、これら二つに加えて単点計測(point sensing)、多点計測(multiplexed point sensing)、領域計測(integrating sensing)を加えた計測形態を示しています。

まずは単点計測とは、ある一点を凝視して情報を取得する方法です。この場合、計測器からはある時間にある一点の情報(検出量)が一つだけ得られ、時間を  $t$  とすれば検出量は  $S(t)$  と表せます。これは、たとえば抵抗線歪ゲージや熱電対などのように最も一般的な方法で、比較的簡単な光学部品で構築できるタイプの光ファイバセンサです。

多点計測とは、多数の点情報を一挙に取得することができる構成で、一つ以上の計測部を持つ多数の光ファイバを最終的に一本の光ファイバにまとめることで実現されます。それぞれの計測部の検出量は、時間差や周波数、波長などの二次的な情報(計測量に影響されない情報)をもとに分離検出することができます。この場合、各計測部を  $n$  とすれば検出量は  $S(t, n)$  と表せます。図4(b)にははしご型(ladder)のトポロジーを示していますが、いわゆるネットワーク機器のトポロジー同様に、スター型(star)、ツリー型(tree)、バス型(bus)などの構造をとることができます。

次に領域計測とは、任意の長さの光ファイバを計測部領域とし、その領域の平均的な物理量を計測するものです。この場合単点計測と同様に、計測器からはある時間にある一つの領域の情報が一つだけ得られます。

準分布計測とは、一本の光ファイバの特定位置に計測部を配置した構成で、多点計測と同様の方法によって分離検出します。この場合、各計測部の情報は不連続な位置情報の情報も合せて得ることができます。準分布計測は直列型(serialまたはline)の多点計測として分類することもできますので、検出量は多点計測と同じように表すことができます。

最後に分布計測とは、光ファイバ全長にわたり任意の位置を計測部として作

用させることができる構成で、計測部の情報は連続名位置の情報と合せて取得することができます。この場合位置を  $z$  とすれば検出量は  $S(t, z)$  と表せます。

多点、準分布、分布計測における計測器は、計測量の時間変化だけでなく、信号処理などを介して位置情報を含めて出力するため、アナライザ (analyzer)、インターロゲータ (interrogator) などと呼ばれることもあります。

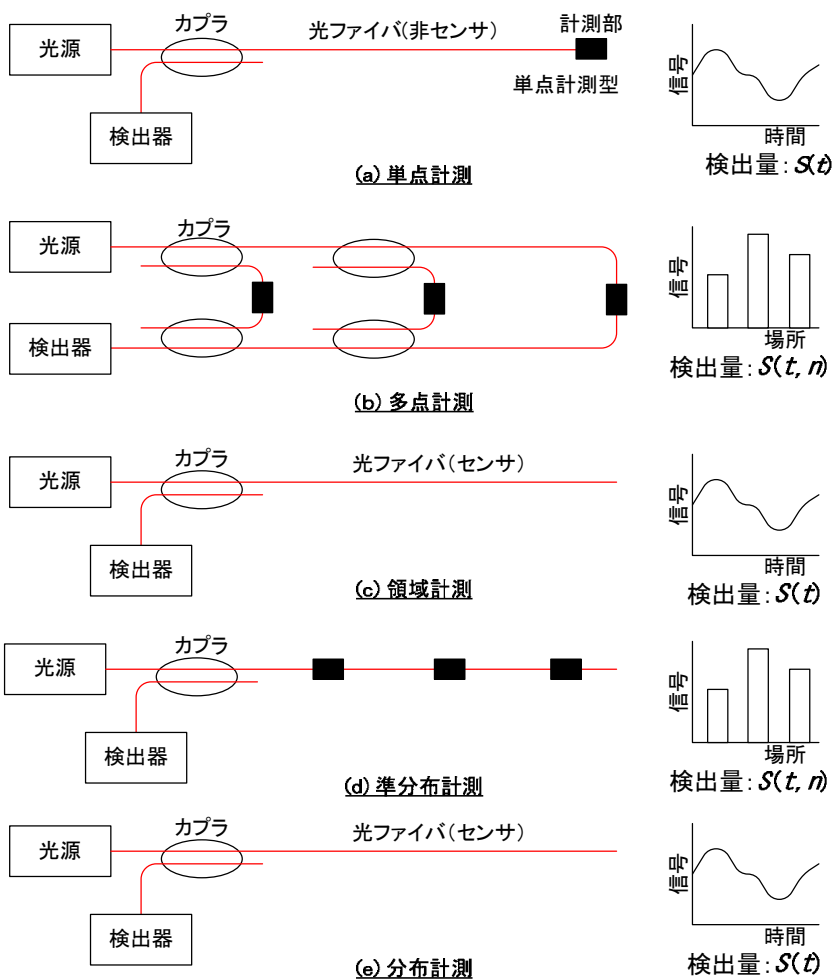
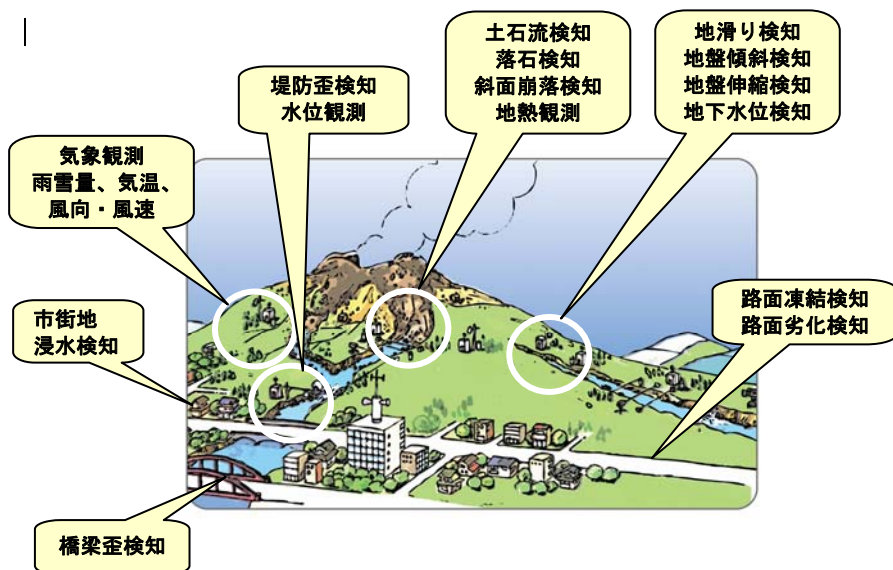


図4 | 光ファイバセンサの各種計測形態

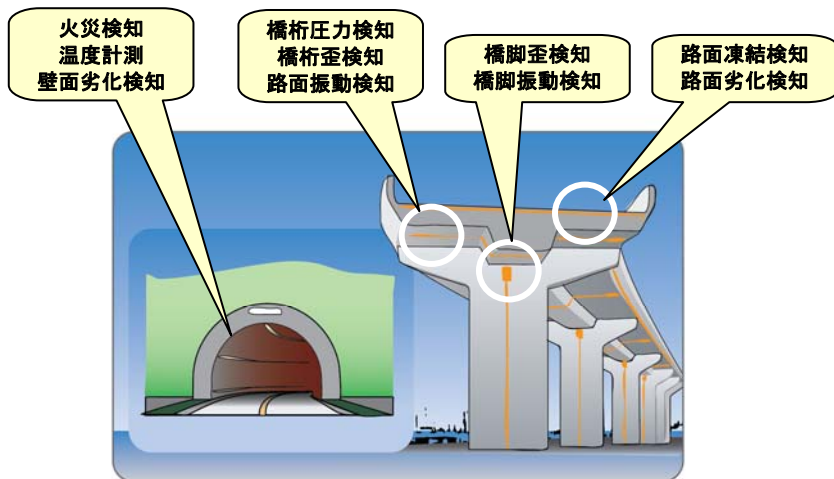
単点計測と多点計測は図3に示したいずれの構成でも実現が可能です。領域、準分布、分布計測は光ファイバ自身を計測部とする光ファイバセンサ (intrinsic) で多くみられる形態ですが、任意の計測部に変換器を取付けること (extrinsic) も可能です。計測部毎に変換器を変えれば、一つの計測器で複数の計測量を多点で取得することもできます。また図4では(b)の多点計測以外は反射型の構成方式で示されていますが、透過型で構成することも可能です。

以上のことから、光ファイバセンサは、線状の計測対象において連続的な計測量を得ることができ、ファイバを往復させることで面的な情報を得ることも可能です。また遠隔計測と各種の変換器を組み合わせることで、大規模構造物などの人工物や市街地の他にも海や山、川といった自然環境を対象として、広範囲で多様な情報が一挙に取得できます (図5)。このとき、安価な通信用の光ファイバおよび光部品をそのまま利用できる光ファイバセンサは、コストの面でも優位性を持つことができるのです。



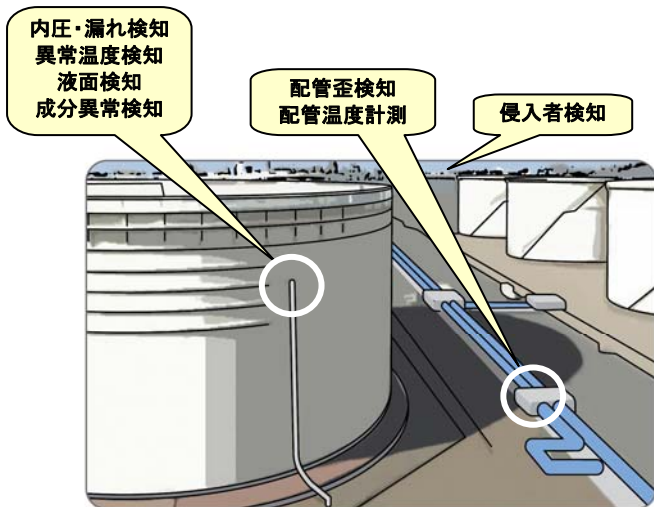
社会的インフラ (自然災害状況をモニターし被害を事前に察知)

図5-1 光ファイバセンサによる遠隔・広域モニタリング



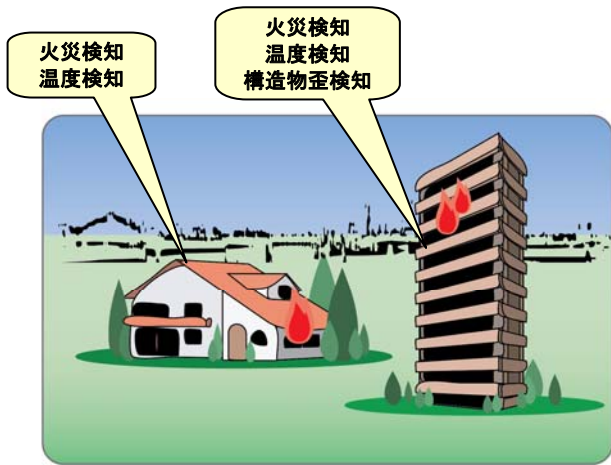
道路や鉄道などの公共交通機関（異常や施設劣化状況を監視）

図 5-2 光ファイバセンサによる遠隔・広域モニタリング



プラント施設（設備の異常監視、省エネルギーやエコに貢献）

図 5-3 光ファイバセンサによる遠隔・広域モニタリング



防 災 (異常温度や火災などを監視)

図 5-4 光ファイバセンサによる遠隔・広域モニタリング

光ファイバセンサを実際の現場で使用する場合、計測対象に対してはもちろんのこと、図2に示した光ファイバセンサの各構成要素の他に、出力データの処理方法や設計・施工方法など、計測を担う光ファイバセンサシステムおよびその構築に対して広く体系化された概念・知識を持つことが重要です。

一般的に光ファイバセンサシステムは図6のように表すことができます。図6には例としてバス型の多点計測のシステムを示しています。計測器は主に光源と受光器から構成され、前述したように各計測部から得られた検出量が時間と計測部を変数とした信号  $S(t, n)$  として出力されます。信号はそのまま計測量である場合もありますが、信号処理系により計測量としての情報  $M(t, z)$  に変換されます。ここで  $z$  は計測対象における位置や部位になります。必要に応じて、この情報は通信系を介してより上位のシステムへ伝送され、また上位系から信号処理系や計測器が制御されます。計測器・信号処理系からの情報をもとに計測対象の状態を把握し、ユーザーが何らかの意思決定をしたり、上位系から別のシステムを介して計測対象を制御したりするといった高度な要求がある場合は、経験や物理モデルをもとにどのような情報を得るべきか事前によく検討した上で、計測器から上位系の連係を設計・構築しなければなりません。

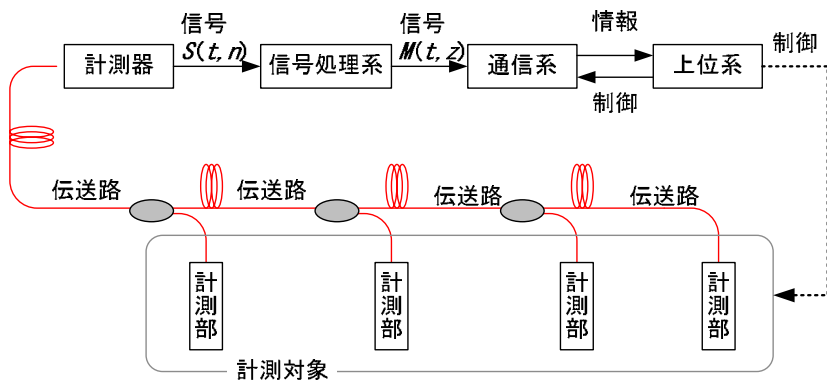


図6 多点計測（バス型）に用いられる光ファイバセンサシステム

また、信頼性の高い、効率的な光ファイバシステムを実現するには、伝送路・計測部の設計・施工が重要となります。伝送路を確実に保持するためには、外部からの様々な攻撃から光ファイバを守る必要があります。そのため丈夫な被覆で覆われたケーブルを使用することもあります。光源のパワーや帯域、受光器の感度、光ファイバを接合するコネクタや光を分配・結合するカプラといった光部品での光損失によって、接続可能な計測部の数や計測範囲が限られてきます。したがって、光が伝搬する全体構成を明確にした上で、個々のデバイスの性能・仕様を理解し、システムがうまく動作するように設計しなければなりません。従来の電氣的なセンサでシステムを構築しようとするときに、各部品の適切な容量やインピーダンスなどを考えることと同じことだと言えます。

計測部の施工は、計測量を正確かつ長期間にわたって安定的に得るために大変重要となります。実験室での事前検討ではうまく測れたが、現場では欲しいデータが取れなかった、ということは避けたいものです。一般的に電子部品が含まれない光ファイバセンサの計測部は信頼性の高いものとなりますが、たとえば計測対象の変形を観測する場合などに精度や感度を長期間保証するためには確実な固定方法をとる必要があるのです。



図7 光ファイバセンサの構築

現在、光ファイバセンサを用いることで、様々な物理量や化学量を計測できるようになりました。今まで述べたように分布計測や準分布計測といった、これまでになかった計測形態をとることもできます。

光ファイバセンサを皆さんのシステムの中に組み込んで上手に使いこなすためには、数あるセンサ方式やその性能、光ファイバセンサシステムの設計・施工方法などを理解する必要があります。また、これまでの適用事例も役に立つことでしょう。次章ではQ&Aの方式で、光ファイバセンサの基礎と原理、設計方法、施工・保守方法などについてまとめました。加えて、代表的な適用事例も紹介しています。

光ファイバセンサは、従来の電氣的なセンサの代替としても十分に利用価値があります。そして大規模なシステムになるほどに多くの利点に気付くことになるでしょう。これまで以上に、多様かつ多数のセンサを組み合わせたパッケージ、あるいはシステムをもとにして魅力あるソリューションを提供できることと思います。システムが大規模で複雑になるほど、その設計や施工、保守が難しくなることは皆さんがよくご存じのことと思いますが、本書にちりばめられた勘所を押さえれば、きつとうまくいくはずです。

本書が、皆さんの光ファイバセンサへの理解を深めるとともに、光ファイバセンサを用いた新しいシステムの構築の一助となれば幸いです。