光ファイバセンサ入門

これから光ファイバセンサをはじめる方必携

PhoSC
特定非営利活動法人
光ファイバセンシング振興協会

初　版（PDF 版）

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（東京大学）
村山　英晶（東京大学）

見本

PhoSC
特定非営利活動法人
光ファイバセンシング振興協

出版にあたって

1970 年代に低損失の光ファイバ、室温連続発振可能な半導体のレーザが実現し、これらを期に光ファイバを基盤とする新しいフォトニクス機能システムの研究・開発が目覚ましく発展してきました。そのなかでも光ファイバ通信技術は、現在情報インフラという重要な社会基盤の形成に大きな役割を果たしています。

光ファイバセンサは、通信技術の分野での発展と歩調を合わせて展開されてきた、いわば双子の兄弟で、センサとして情報を創る機能と伝送路として情報を送るという機能を光ファイバという一つのデバイスで達成できる、大変興味深いさまざまな魅力を持った技術であるといえます。国内外において、土木・建設、輸送機器、機械・設備、石油・ガスといった、広い産業・市場で活用されるようになってから２０数年がたち、さらに農業や医療といった分野からも注目を集めるようになっています。

しかし、実用化が進み、応用分野が広がる一方で、光ファイバセンサをこれから使ってみたい、さらに理解を深めたいという方々から、基本的な知識、技術、応用事例などがまとまった参考書が見当たらない、という声がよく聞かれました。

本書は、特定非営利活動法人光防災センシング振興協会における啓発・普及の事業の一環として光ファイバセンサに興味のある方々のご期待に応えるため、協会会員企業で活躍する光ファイバセンサの専門家が中心に執筆を担当してまとめたものです。初心者の方にもわかりやすいように心がけたこともあり、1 年以上におよぶ時間を要しましたが、基礎から応用まで広く網羅する参考書として完成させることができました。特に、現場利用にあたって重要なノウハウを含む施工・保守に関して技術的な要点を含めたことは、これまでにない新しい試みといえます。

本書が光ファイバセンサを利用しようとする方々のお役にたち、ひいては安全・安心な社会の発展に寄与できることを願っております。

最後に本書の出版にあたり、お忙しいなか執筆いただいた協会会員企業、多大な労をとってくださった協会事務局には、深く感謝申し上げます。

2012 年 4 月

監修　保立　和夫（東京大学）
監修　村山　英晶（東京大学）

（注）所属・役職等は執筆当時のものです。

出版にあたって

推薦のことば

― 目　次 ―

頁

1　光ファイバセンサ概論

1-1　光ファイバのセンサ利用　16

1-2　光ファイバセンサシステムの構成　18

1-3　光ファイバセンサシステムの構築　28

1-4　光ファイバセンサ概論のまとめ　31

2　基礎編

2-1　光ファイバセンサの種類と原理　34

2-1-1　光ファイバの構造と伝送原理と種類にはどのようなものがありますか　35

2-1-2　光にはどのような性質がありますか　39

2-1-3　光ファイバセンサシステムに使用する光ファイバには、どのような種類がありますか　57

2-1-4　光ファイバセンサの寿命はどのように考えたら良いですか　64

2-1-5　光ファイバセンサでは何が計測できますか　65

2-1-6　光ファイバセンサシステムの接続はどのようにしますか　68

2-1-7　光ファイバセンサにはどのような光を使いますか　77

2-1-8　光ファイバセンサシステムに使用する光源にはどのようなものがありますか　79

2-1-9　光ファイバセンサに使用する光源はどのように選択したら良いですか　83

2-1-10　光ファイバを分岐したり、光ファイバセンサを多点配置したりする場合には、どのような光部品を使いますか　85

2-1-11　光ファイバセンサの特長はなんですか　90

2-1-12　光ファイバセンサと従来の電気式センサの違いはなんですか　93

2-1-13　電磁誘導障害に強い特長は何に生かされていますか　96

2-1-14　長距離伝送出来る光ファイバの特長は何に生かされていますか　97

2-1-15　センサに電源が不要という特長は何に生かされていますか　98

2-1-16　光ファイバセンサシステムは断線しても復旧が容易なのはなぜですか　101

2-1-17　分布型計測の後方散乱光にはどのような種類がありますか　105

2-1-18 OTDR はどのように計測を行うものですか 107
2-1-19 ROTDR はどのように計測を行うものですか 109
2-1-20 BOTDR はどのように計測を行うものですか 111
2-1-21 FBG どのような原理でセンサとして使用できるのですか 118
2-1-22 FBG センサはどのように計測を行うものですか 121
2-1-23 PNCR はどのように計測を行うものですか 126
2-1-24 BOF はどのように計測を行うものですか 131
2-1-25 ファラデー近接センサはどのように計測を行うものですか 133
2-1-26 干渉計はどのように計測を行うものですか 137
2-1-27 光ファイバジャイロはどのように計測を行うものですか 142
2-1-28 偏光型センサはどのように計測を行うものですか 145
2-1-29 透過／遮断型センサはどのように計測を行うものですか 147
3 設計編
3-1 どのように光ファイバセンサを選択したら良いですか 152
3-2 光ファイバセンサの精度、分解能および適用用途の目安 156
3-2-1 OTDR 方式での精度、分解能および適用用途の目安にはどのようなものがありますか 157
3-2-2 ROTDR 方式での、精度、分解能の比較および適用用途の目安にはどのようなものがありますか 161
3-2-3 BOTDR 方式での、精度、分解能の比較および適用用途の目安にはどのようなものがありますか 166
3-2-4 FBG 方式での、精度、分解能および適用用途の目安にはどのようなものがありますか 167
3-2-5 BOF/PNCR 方式での、精度、分解能および適用用途の目安にはどのようなものがありますか 170
3-2-6 ファラデー近接センサの精度、分解能および適用用途の目安にはどのようなものがありますか 172
3-2-7 干渉計の精度、分解能および適用用途の目安にはどのようなものがありますか 174
3-3 光ファイバセンサシステムの設計方法 175
3-3-1 センサの配置設計とはどのようなものですか 177

3-3-2 線路設計とはどのようなものですか 180
3-3-3 システム設計はどのように行ったら良いですか 182
3-4 データ解析の設計はどのように行ったら良いですか 185
4 施工・保守編
4-1 光ファイバセンサシステムの施工で注意する点 190
4-1-1 光ファイバセンサの施工ではどのようなことに特に気をつける必要がありますか 194
4-1-1-1 施工にはどのような機器が必要ですか 196
4-1-1-2 光ファイバセンサシステム特有の理解すべき概念 207
4-1-2 どのような環境を考慮して施工したら良いですか 211
4-1-2-1 化学的反応性について考慮すべき事項 213
4-1-2-2 力学的反応性について考慮すべき事項 215
4-1-2-3 物理的反応性について考慮すべき事項 220
4-1-2-4 生物による害や自己変質性について考慮すべき事項 223
4-1-2-5 環境特性を総合的に検討することについて 224
4-2 各センサ方式での設計・施工の留意事項 225
4-2-1 OTDR 方式での設計・施工の留意事項は何ですか 226
4-2-2 ROTDR 方式での設計・施工の留意事項は何ですか 230
4-2-3 BOTDR 方式での設計・施工の留意事項は何ですか 232
4-2-4 FBG 方式での設計・施工の留意事項は何ですか 233
4-2-5 BOF/PNCR 方式での設計・施工の留意事項は何ですか 235
4-3 光ファイバセンサの設置の対象物にはどのようなものがありますか 236
4-3-1 光ファイバセンサはどのような場所で使えますか 239
4-3-2 コンクリート構造物ではどのように取付けますか 244
4-3-3 鋼構造物ではどのように取付けますか 246
4-3-4 地中および地面ではどのように取付けますか 248
4-3-5 岩盤、水中、盛土などではどのように取付けますか 250
4-4 光ファイバセンサにはどのような取付け方法がありますか 254
4-5 適用環境に応じてどのような光ケーブルを使ったら良いですか 259
4-6 光ファイバセンサでは保守点検は必要ですか 268
4-6-1 保守点検はどのようにしたら良いですか 271

4-6-2 光ケーブルが切れたらどのように修復させたら良いですか 273
4-6-3 光ファイバセンサシステムの費用は高いのではないですか 275

コラム 波長と周波数について 27
光のモード 37
光の散乱 52
フレネル反射とは？ 56
レーザとは？ 81
コヒーレントとは？ 84
デシベル(dB)、dBm、ダイナミックレンジとは？ 103
光相関領域法によるブリルアン散乱を利用した分布型光ファイバセンサ 114
FBG の製造方法 119
PN 信号とは？ 129
光ファイバセンサの用語に良く用いられる人名 149

執筆者一覧 279
広告の頁 281

１．光ファイバセンサ概論

1-1 光ファイバのセンサ利用

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）やフォトダイオード（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とおりです。

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に、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生かし、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概念をまとめました。

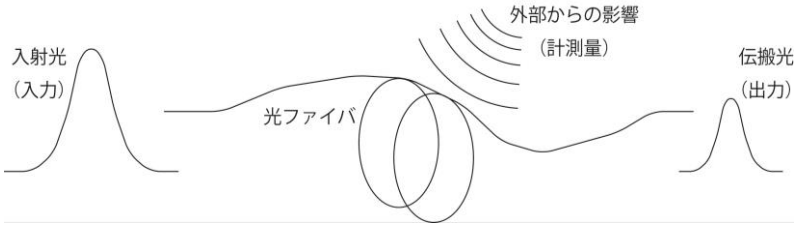


図１　光ファイバのセンサ利用

1-2 光ファイバセンサシステムの構成

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っ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、さらに伝送路を通っ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。外部から光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ほかに化学量も計測することができます。

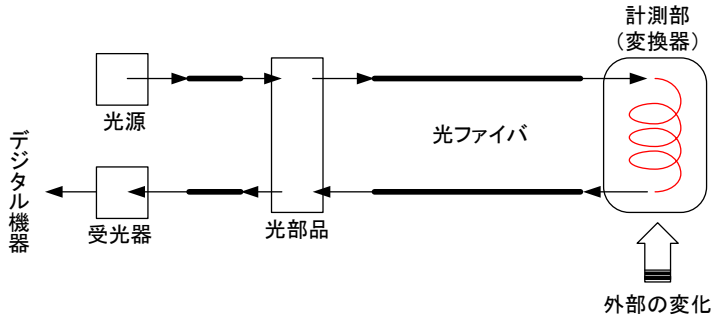


図２　光ファイバセンサの基本構成（透過型）

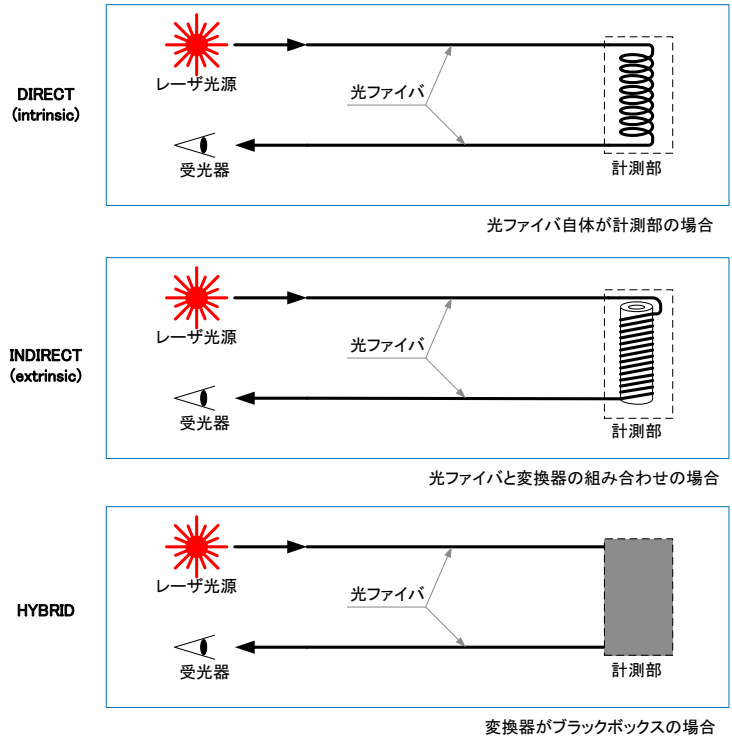


図３　計測部の形態による光ファイバセンサの分類（透過型）

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。たとえば、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。

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。

つぎに、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、たいへん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２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。

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１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、１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と同様に、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。

つぎに領域計測とは、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１つの領域の情報が１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な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はなく、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。

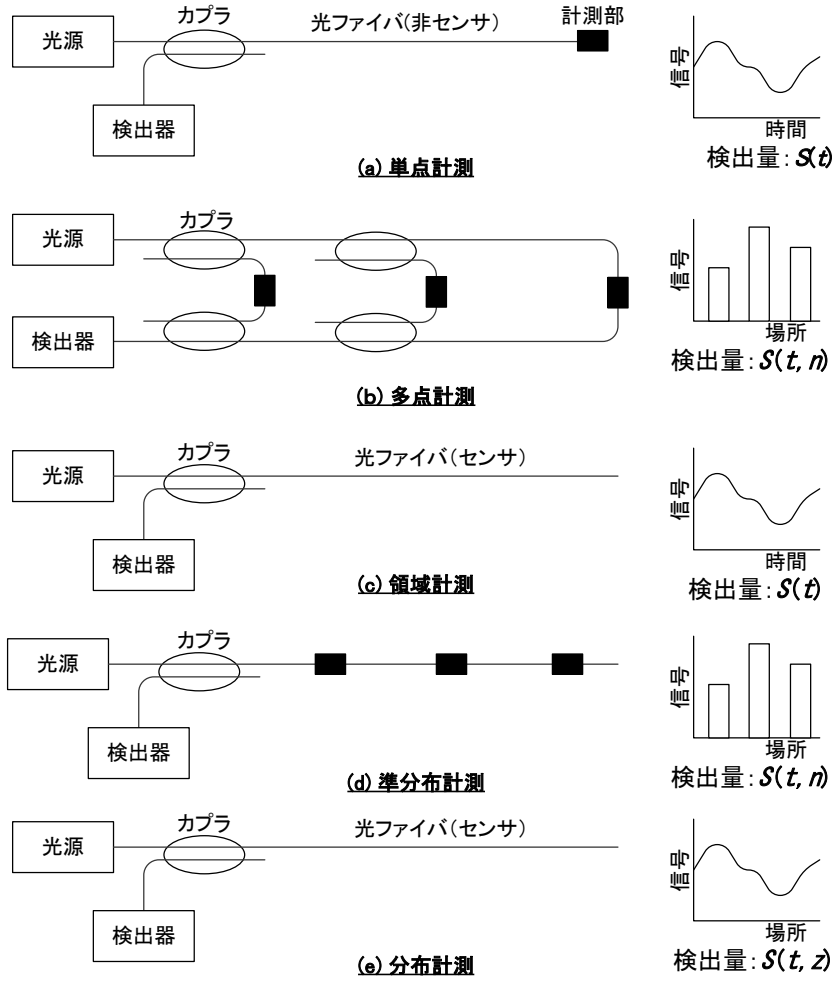
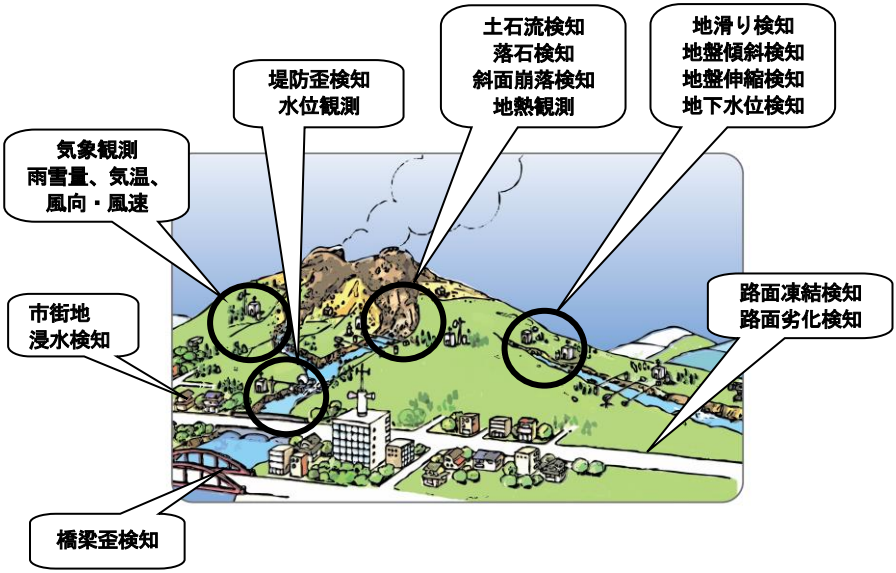


図４　光ファイバセンサの各種計測形態

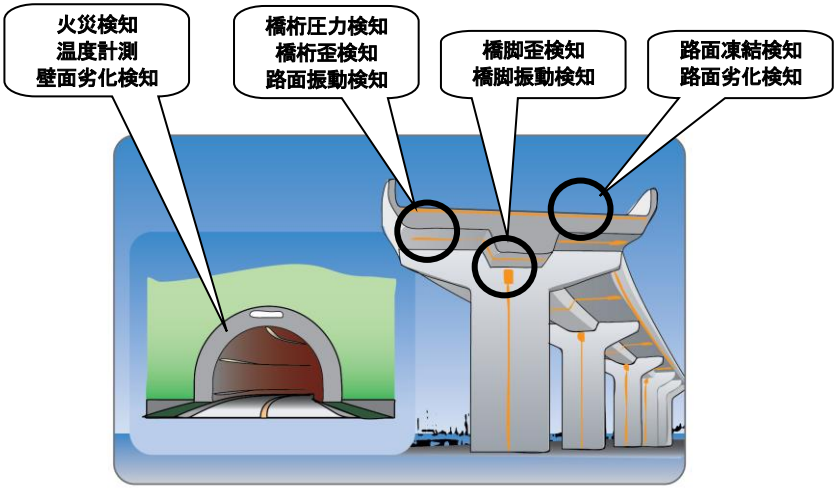
単点計測と多点計測は図３に示したいずれの構成でも実現が可能です。領域、準分布、分布計測は光ファイバ自身を計測部とする光ファイバセンサ(intrinsic)で多くみられる形態ですが、任意の計測部に変換器を取付けること(extrinsic)も可能です。計測部ごとに変換器を変えれば、１つの計測器で複数の計測量を多点で取得することもできます。また図４では(b)の多点計測以外は反射型の構成方式で示されていますが、透過型で構成することも可能です。

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、光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ほかにも海や山、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。



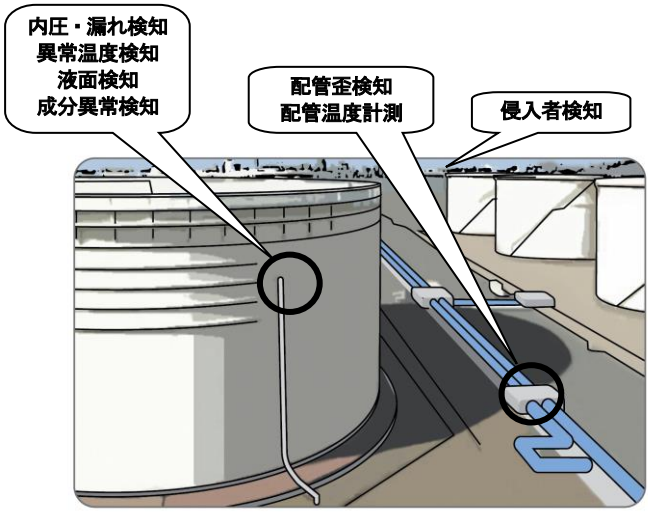
社会的インフラ（自然災害状況をモニタし被害を事前に察知）

図５−１　光ファイバセンサによる遠隔・広域モニタリング



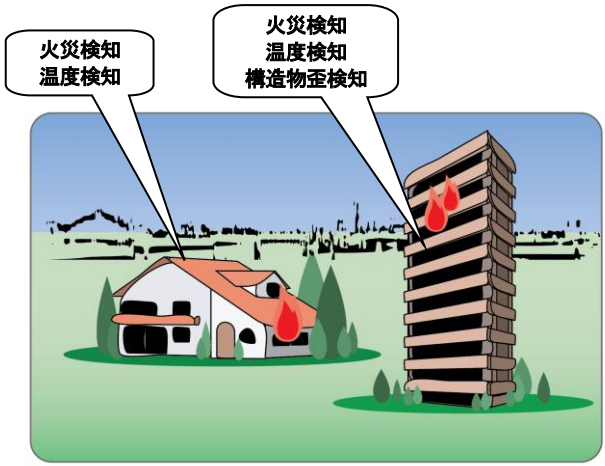
道路や鉄道などの公共交通機関（異常や施設劣化状況を監視）

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

コラム：波長と周波数について

波長とは波の 1 周期の長さで、山と山あるいは谷と谷の間隔です。周波数は 1 秒間の波の数であり、ヘルツ(Hz)で表します。真空中で光は 1 秒間に約 30 万 km の速度で進みます。波長をλ(m)、光速を c(m/s)、周波数を f(Hz)とすると、以下の関係が成り立ちます。

$$\lambda(\mathrm{m}) = c(\mathrm{m/s}) \div f(\mathrm{Hz})$$

光は電磁波の一種です。電磁波は、大きく分けると波長が長いものから、電波、光、X線、γ線になります。波長で 0.1 ㎜より長いものを電波、0.1 ㎜より短く、10 nm より長いものを光、10 nm より短いものをX線あるいはγ線といいます。波長が長いほど、周波数は低くなりエネルギも低くなります。

光は波長が長いものから、赤外線、可視光線、紫外線に分類されます。人間が見える光は、波長が約 380～780 nm の可視光です。波長の長い可視光は赤色に、波長の短い可視光は紫色に見えます。昆虫や鳥類の中には、紫外線の波長を感知できるものもいます。

一般的に、光は波長で、電波は周波数で表しています。

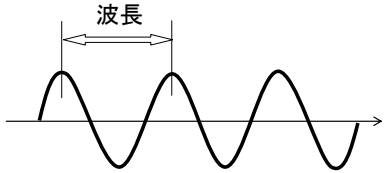


図１　波長

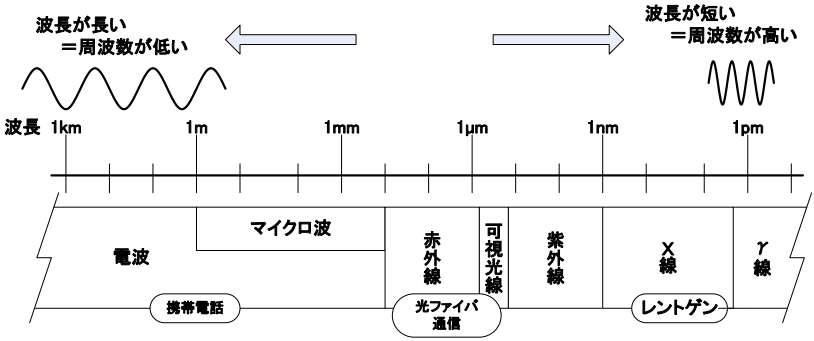


図２　電磁波の種類

執筆者一覧（五十音順）

足立　正二（横河電機株式会社）
安齋　康広（古河電気工業株式会社）
小川　雅英（古河電気工業株式会社）
加藤　一　（株式会社 ジェイ・パワーシステムズ）
川村　研二（日鐵住金溶接工業株式会社）
銀島　考一（日鐵プラント設計株式会社）
小松　康俊（株式会社 渡辺製作所）
斉藤　崇記（アンリツデバイス株式会社）
田畑　和文（日鐵住金溶接工業株式会社）
野村　卓司（株式会社 アドバンテスト）
府川　隆　（株式会社 信光社）
藤川　富夫（株式会社 アサノ大成基礎エンジニアリング）
藤島絵里子（株式会社 共和電業）
保立　和夫（東京大学）
村山　英晶（東京大学）
森　孝之　（静岡沖電気株式会社）
山田　利行（新川電機株式会社）
特定非営利活動法人 光ファイバセンシング振興協会
啓発・普及事業委員会

【執筆者の所属は 2012 年 3 月 20 日執筆当時のものです（敬称略）】

無断転載禁止

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

平成２４年　４月２４日　初版発行
令和　２年　１月１０日　PDF 版発行
編集者　特定非営利活動法人　光ファイバセンシング振興協会
啓発・普及事業委員会

発行者　特定非営利活動法人　光ファイバセンシング振興協会
〒104-0061
東京都中央区銀座６丁目１３－１６
ヒューリック銀座ウォールビル７階
電　話：０３－６８６９－５７３８
ＦＡＸ：０３－６２７８－７４２０
http://www.phosc.jp

特定非営利活動法人
光ファイバセンシング振興協会

PhoSC