

分布型光ファイバひずみセンサ 建設分野向けマニュアル (改訂 2 版)

2024 年 11 月



特定非営利活動法人

光ファイバセンシング振興協会

本マニュアルの一部または全部を許可なく複製・転載・引用することを禁じます。

改訂 2 版にあたって

光ファイバセンサの建設分野における更なる展開のために、同センサの導入を手助けするためのマニュアルを、分布型センサ（2021 年 8 月発刊）とポイント型センサ（2022 年 7 月発刊）についてそれぞれとりまとめ、HP での公開などを通じて、広く頒布している。さらに、（一財）光産業技術振興協会における技術資料（TP）としてもまとめ直し、様々なユーザが同センサの特長に触れられる機会の拡大を進めてきた。

同マニュアルは、ユーザ視点でまとめられた稀有な資料である。様々な製品がとりまとめられ、適用例なども含めて充実したマニュアルである。しかしながら、いくつかの点で十分に織り込めなかった内容がある。それは、光ファイバセンサの校正方法ならびに長期信頼性についてである。例えば、ひずみ係数を得るための試験方法（装置だけでなく光ケーブルも含めた全体システムとして）に関する“標準”は存在せず、各ユーザやメーカーに委ねられていた。また、耐久性があるとされている光ファイバセンサの寿命予測について統一の見解は存在しない。そこで、ユーザが安心して使用するために必要なエビデンスを整備するために、主に前述の二点（校正方法、長期信頼性）について検討を進めてきた。

本マニュアルはそれらの検討結果に基づいて改訂を行ったものであり、主な改訂内容は以下のとおりである。

- ・光ファイバセンサの長期運用実績（新規作成）
- ・光ファイバセンサの校正係数試験（新規作成）
- ・分布型光ファイバセンサに関する国際標準化動向（新規作成）
- ・光ファイバセンサは長寿命か？（新規作成）

本マニュアルを通じて、同センサの導入が一層進むことを期待したい。

目 次

1	はじめに	1
1.1	本マニュアルの目的.....	1
1.2	分布型光ファイバひずみセンサの概説	2
2	分布型光ファイバひずみセンサの導入手順	6
2.1	導入フロー	6
2.2	計測方式.....	13
2.3	光ファイバセンサケーブル.....	28
2.4	その他留意事項.....	36
3	コンクリートへの適用例.....	48
3.1	ひび割れ検知.....	48
3.2	ひずみモニタリング.....	50
3.3	PC ケーブルの張力監視.....	53
4	土工構造への適用例.....	57
4.1	補強土の安定性モニタリング	57
4.2	道路舗装への適用	62
4.3	グラウンドアンカーの張力監視	65
5	光ファイバセンサの長期運用実績.....	68
5.1	橋梁の長期監視（ひずみ分布）	68
5.2	補強土壁の健全性評価（ひずみ分布）	69
5.3	補強土壁の健全性評価（ひずみ分布）	71
5.4	補強土壁の健全性評価（ひずみ分布）	72
5.5	地層の温度変化（温度分布）	74
5.6	炉体表面の温度監視（温度分布）	75
6	光ファイバセンサの校正係数試験.....	76
6.1	ひずみ係数（ひずみ分布）	76
6.2	ひずみ係数（ひずみ分布）	77
6.3	温度係数（温度分布）	79
7	その他.....	82
7.1	語句の定義	82
7.2	レーザーの安全性	85
7.3	ひずみゲージとの違い	85
7.4	屈折率の確認.....	86
7.5	性能検証試験.....	87
7.6	分布型光ファイバセンサに関する国際標準化動向	88

7.7 光ファイバセンサは長寿命か？	90
問い合わせ先一覧.....	95
参考資料	97
執筆者一覧.....	100
マニュアル作成 WG（2020 年 6 月～2021 年 3 月）メンバ構成	101
光ファイバセンサ普及 WG（2022 年 7 月～2024 年 5 月）メンバ構成	102

1 はじめに

1.1 本マニュアルの目的

分布型光ファイバセンサは、光ファイバそのものがセンサとして機能することから、予め発生箇所が分からないイベントを検知できるなど既存センサとは異なる利点をもつ。光ファイバに沿って連続的に分布計測ができるため、これまでにない多チャンネルの計測を、一本の光ファイバで実現できる。また、電気式センサと異なり化学的に安定していることから、長期耐久性の点で圧倒的に有利である。同センサのこうした特長は、特に建設分野における長大構造物への長期的な適用に期待されてきたが、現状では十分に展開が進んでいるとは言えない。その原因のひとつとして、同センサのこれまでにない特長が、広く理解されていない点が挙げられる。

一方、分布型光ファイバセンサのなかでも、“温度センサ”は分布計測の利点を活かしてその展開が進んでいる。“温度センサ”では光ファイバ敷設上の課題が少ないのに対して、“ひずみセンサ”では光ファイバを構造的な一体性をもって対象に敷設する必要があることがその一因である。また、測定結果の観点からは、温度データはその結果の判断や評価がしやすいが、ひずみデータは直接的に構造健全性を評価しづらい。つまり、“ひずみセンサ”の適用にあたっては、測定器だけに限らず、光ファイバ敷設からデータ評価に至るまでを包括的に捉える必要がある。そのため、具体的な実施例の紹介などを通じて、同センサの留意点や効果についてまとめたマニュアルが、その理解を助けるうえでも重要である。

分布型光ファイバひずみセンサについては、今までのところ国内では、技術的な標準や拠り所となる基本的資料がない。建設分野だけに限らず、新技術の展開にあたっては、その標準に類する資料は不可欠である。現在、国際機関である国際電気標準会議（略称 IEC）において標準化の取組みがなされているが、こうした測定器に対する標準化の動向を注視しながら、光ファイバ敷設からデータ評価までも含めたユーザ視点でとりまとめることが求められている。

上記のような事情から、建設分野における導入マニュアルを作成し、分布型光ファイバひずみセンシング技術の適用を容易にすることを目的とした。本マニュアルを通じて、同センサの概要とともに、その利点や留意事項、また活用方法を事例として紹介することで、導入を進めるための一助としたい。

1.2 分布型光ファイバひずみセンサの概説 [1]

光ファイバは、石英ガラスやプラスチックで形成される細い繊維状の光デバイスで、中心部のコアとその周囲を囲むクラッドの二層構造になっている（図 1.2-1）。コアの部分は、クラッドの部分よりも屈折率を高くしているため、光は全反射という現象により、コアの内部に閉じこめられた状態で伝搬する（図 1.2-2）。特殊な場合を除き、分布型ひずみセンサとして用いられる光ファイバは、コア・クラッドともに石英ガラスでできているもののうち、伝搬するモード（光の伝わり方）がひとつのシングルモード光ファイバである（通信用で用いられる）。これに被覆などが施されたものとして、様々な種類のセンシング用光ファイバセンサケーブルがある（2.3 節に後述）。以下、特記ない限り「光ファイバ」はシングルモード光ファイバである。

光ファイバセンサの一般的な特長を以下に示す。

- ・細径・軽量
- ・可とう性（外力によってしなやかにたわむ性質）
- ・高強度・耐久性・耐食性
- ・パッシブな計測部（外部から給電不要）
- ・耐電圧性・耐電磁誘導性
- ・安全防爆性
- ・遠隔計測

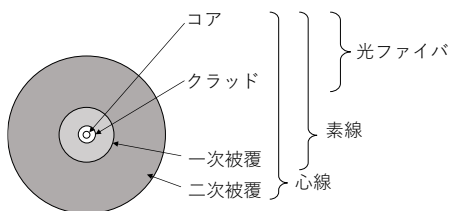


図 1.2-1 光ファイバの断面図

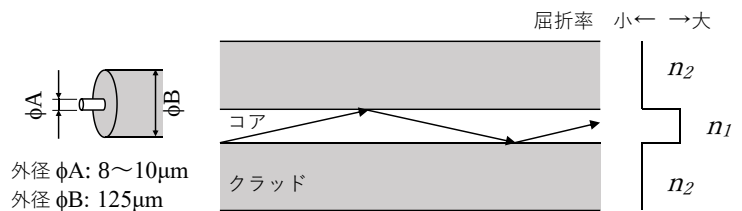


図 1.2-2 光ファイバ中の光の伝搬
(シングルモード光ファイバ)

光は、媒質の不均質性や媒質中の粒子の影響により微小な反射をするが、光ファイバ内でも同様の反射現象が生じ、散乱光と呼ばれる（図 1.2-3）。散乱光のうち、コア内を全反射しながら入射光側に戻るものを、後方散乱光として観測することができる。

観測される後方散乱光には、レイリー、ラマン、ブリルアン散乱光があり、それぞれ特徴をもつ（図 1.2-4）。分布型光ファイバセンサは、一般的にはこれらの後方散乱光を利用したもので、光ファイバ全長にわたり任意の位置をセンサ部（以下、センサとして働く光ファイバを「センサ部」という）として作用させることができる。分布型光ファイバひずみセンサでは、光ファイバに付与されたひずみ（ $\Delta \varepsilon$ ）に応じて変化するブリルアン周波数シフトまたはレイリー散

乱光スペクトルの変化量 (Δv_B または Δv_R) を検出している (2.4 節①に後述)。

$$\Delta v_B = C_{\varepsilon B} \cdot \Delta \varepsilon \quad \text{式(1)}$$

$$\Delta v_R = C_{\varepsilon R} \cdot \Delta \varepsilon \quad \text{式(2)}$$

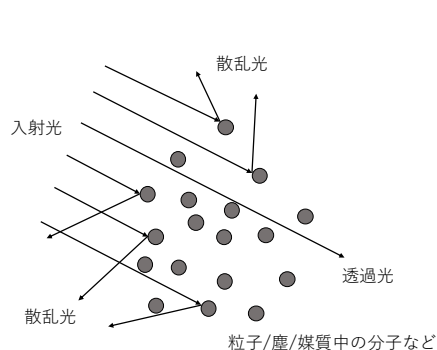


図 1.2-3 光ファイバ中の光の散乱

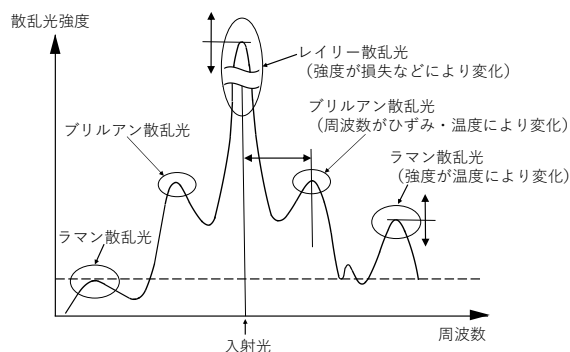


図 1.2-4 散乱光のスペクトル

分布型光ファイバセンサは、光ファイバそのものがセンサ部となることから、全長にわたり任意の位置で測定することができる。時間領域 (Time Domain) 法と呼ばれる同センサの最もシンプルな構成を図 1.2-5 に示す。光源からパルス光が光ファイバに入射され、伝送路を通じてセンサ部となる光ファイバで生じた後方散乱光を検出器で受ける。パルス光を入射してから後方散乱光が戻ってくるまでの時間差から、光ファイバのどの位置で発生した後方散乱光なのか (=位置情報 x) が、後方散乱光のスペクトルから、その位置で光ファイバに加わった物理量 (ひずみに比例するブリルアン周波数シフトまたはレイリー散乱光スペクトルの変化量) $\Delta v(x)$ が、それぞれ分かることとなる。センサ部を片端だけ接続するものや両端接続するものなど接続構成や使用する散乱光から、様々な種類の計測方式がある (表 2.1-1 に後述)。

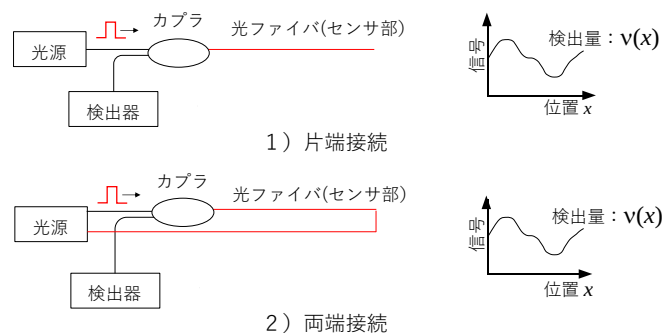


図 1.2-5 分布型光ファイバセンサの構成

光ファイバ同士の接続は、光コネクタを用いて接続する方法と、光ファイバ

の先端を融かして接続する融着接続による方法がある。光コネクタでは、接続アダプタを介して光コネクタ同士を突き合わせて接続するが、光コネクタのタイプにはいくつかあることに注意が必要である（図 1.2-6）。また、突き合わせる端部の研磨形状にもいくつかのタイプがあり、接続光コネクタ同士は研磨形状を合わせる必要がある（表 1.2-1）。測定する上で、好ましいのは接続部の反射が最も小さい APC 研磨である。

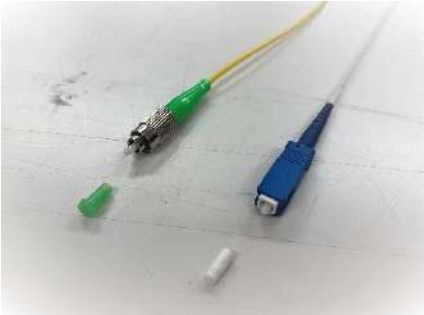


図 1.2-6 光コネクタのタイプ例

表 1.2-1 研磨のタイプ例

研磨種類	形 状	挿入損失(dB)	反射減衰量(dB)
PC研磨 (Physical Contact)		0.5以下	25以上
SPC研磨 (Super PC)		0.5以下	40以上
APC研磨 (Angled PC)		0.5以下	60以上

光コネクタによる接続は、アダプタを介して簡単に誰でもできるものの（図 1.2-7）、接続時には留意すべき点がある。かみ合わせ部分に異物が混入した場合、光が通らない原因となる。そのため、光コネクタ接続時には、専用のクリーナーで清掃のうえ（図 1.2-8）、マイクロスコープで観察して端面にほこりなどの異物がないことを確認してから接続することが望ましい（図 1.2-9）。また、使用していない光コネクタ端部には常にキャップを取り付けるべきである。

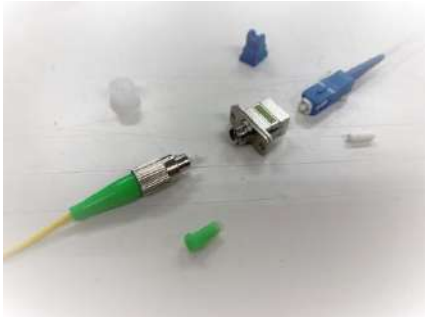


図 1.2-7 アダプタによる光コネクタ接続

光コネクタのうち、FC コネクタ（ねじ込み式）については、コネクタの切り欠きの形状によってワイドキー／ナローキーの二種類がある．その形状に応じたアダプタを用意する必要がある．

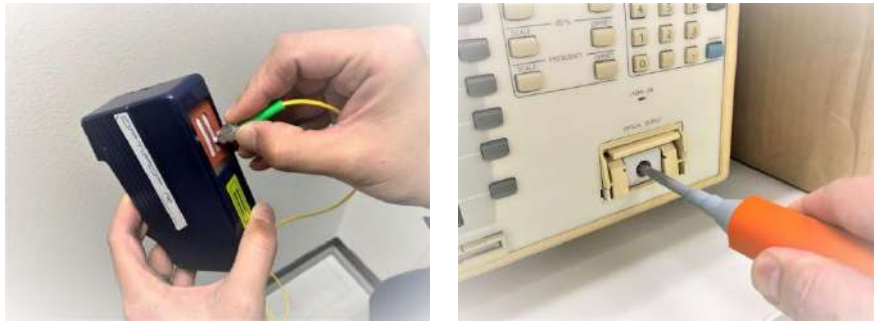


図 1.2-8 光コネクタ清掃

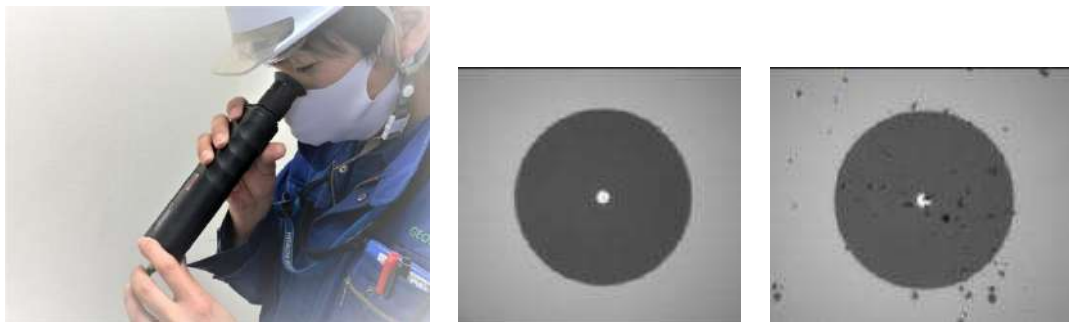


図 1.2-9 マイクロスコープによる光コネクタ端面検査

一方、融着接続による接続は、専用の機器（図 1.2-10）を用いて慣れた作業者が行う必要があるが、最近の融着機は性能が向上しており、0.05 dB 前後と、光コネクタによる接続と比べると 1/10 程度の接続損失で接続することができる．1 本の光ファイバ上の接続部の個数や、接続環境、接続部の脱着の頻度などをもとに接続方法を決めるべきである．



図 1.2-10 融着接続器の例

2 分布型光ファイバひずみセンサの導入手順

本章では、与えられた条件をもとに、分布型光ファイバひずみセンサを導入するために必要な技術的な指南を行う。具体的には、図 2-1 に示すフローに沿って、2.1 節で導入にあたって必要な手順を示すとともに、2.2～2.3 節で主要な検討項目である計測方式や光ファイバセンサケーブルについて記載する。さらに、2.4 節では分布型光ファイバひずみセンサ特有の課題や留意事項についてもそれぞれ記載する。

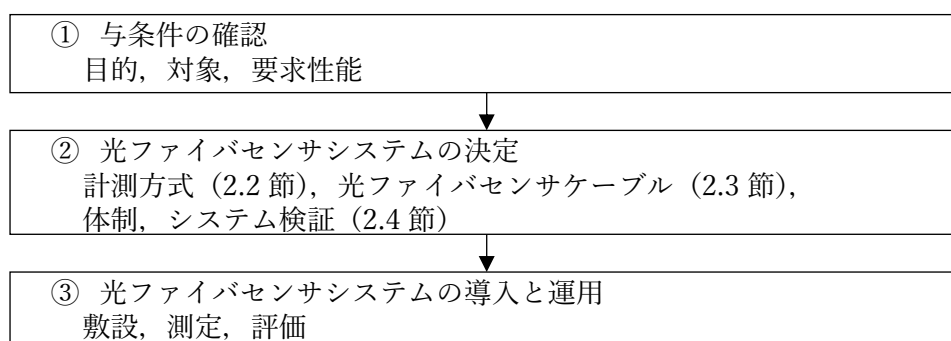


図 2-1 導入のフロー

2.1 導入フロー

① 与条件の確認

分布型光ファイバひずみセンサを導入するにあたっては、計測方式や光ファイバセンサケーブルなどを決定する必要がある。例えば、施工管理においてはその結果をフィードバックするためにも短い測定時間の計測方式が求められること、維持管理においては長期耐久性を有する光ファイバセンサケーブルと敷設方法が求められることなど、計測目的によって要求性能を明確化できる。そこで、与条件について以下に示すような順序で整理する。

(ア)計測目的

はじめに、計測の目的を明確にすることが重要である。その目的をもとに、光ファイバセンサの要求性能や適用期間などが決められるためである。代表的な計測の目的について、その概要を以下に示す。

- ・ 施工管理の例：施工中の建設構造物を対象に、そのひずみ状態を把握し、施工品質や安全性を向上することを目的とする (3.3 節など)。
- ・ 維持管理の例：供用中の建設構造物を対象に、そのひずみ状態を把握し、継続使用における安全性の判断、点検作業の補助などへ貢献することを目的とする (4.1 節など)。
- ・ 検証の例：施工中の建設構造物を対象に、そのひずみ状態を把握し、

新たな材料や工法，設計方法などを検証することを目的とする（3.1節など）。

維持管理については，上記の他に，診断の補助，補修・補強の効果の確認，緊急時対応の補助など，その目的を明確にすることが重要である。

（イ）計測対象

対象となる建設構造物の構造種別（コンクリート，鋼構造，土工構造，岩盤構造など）はもちろん，光ファイバの設置環境（貼付・埋込，温湿度環境など），測定器の設置環境，計測期間などの項目を整理する．その整理によって，見積もりのために必要な数量がおおよそ算出でき，またシステム全体構成図（光ファイバセンサケーブル～測定器～電源など）が作成できることが望ましい．例えば，光ファイバセンサケーブルの敷設範囲（全長）や，敷設に伴う仮設の要否，必要なケーブル養生の程度，また測定器までの延伸や接続ボックスの要否，ケーブル本数と光スイッチの要否，測定器設置場所の電源や空調環境なども与条件として整理する．計測期間とともに，常設または定期計測（頻度）などについて決定しておくのが良い．

（ウ）要求性能

分布型光ファイバセンサの性能を規定する代表的なパラメータのひとつは「空間分解能」で，通常，長さ（単位[m]あるいは[mm]など）であらわされる．空間的に大まかなひずみの挙動を把握するためであれば長い空間分解能で構わないが，細かなひずみの挙動を把握するためであれば短い空間分解能が必要となる．計測目的に応じた空間分解能を決定するのが良い．

「ひずみ精度」も重要なパラメータのひとつであり，検知すべきひずみ変化に対して，最低でも $1/5 \sim 1/10$ 程度のひずみ精度を有することが望ましい．これも，計測目的に応じて決定するのが良い．

「測定時間」については，必要最低限許される測定時間を把握しておく．基本的に，測定時間内にひずみが増加しない場合，測定時間が短いほどひずみ精度が低下する．分布型光ファイバひずみセンサのほとんどで，一回の測定時間を長くすると加算平均によってひずみ精度を向上させることができるからである．そのため，様々な与条件下のなかで許容される時間範囲のなかで，出来るだけ長く測定時間をとることが多い．

② 光ファイバセンサシステムの決定

計測目的に応じた分布型光ファイバひずみセンサを導入するにあたっては、まず計測方式や光ファイバセンサケーブルなどを決定する。必要に応じたユーザーインターフェースなども含め、これらを総じて光ファイバセンサシステムと称する。

(ア) 計測方式の決定

与条件で決められた要求性能(「空間分解能」「ひずみ精度」「測定時間」)などを鑑み、計測方式を決定する。様々な計測方式については、2.2 節で詳述するが、計測方式の大まかな特徴を表 2.1-1 にまとめて示す。これらは、ブリルアン散乱光利用のもの、レイリー散乱光利用のものに大別される。概して、前者は測定の再現性などに優れ、後者は測定の精度などに優れる。

表 2.1-1 様々な計測方式 [2]

計測方式	特徴など	測定器例
BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)	• ブリルアン散乱光利用 • 光ファイバ構成：片端接続 • 空間分解能：1m • 実績多い	横河電機製 AQ8603 沖電気工業製 WX1033B VIAVI 製 BOTDR ニューブレクス製 NBX-5001 ほか
BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis)	• ブリルアン散乱光利用 • 光ファイバ構成：両端接続 • 空間分解能：数 cm～ • 両端接続で高性能	OZ-Optics 製 BOTDA ニューブレクス製 NBX-6026 ほか
BOCDR (Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry)	• ブリルアン散乱光利用 • 光ファイバ構成：片端接続 • 空間分解能：数 cm～	開発品
BOCDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis)	• ブリルアン散乱光利用 • 光ファイバ構成：両端接続 • 空間分解能：数 cm～ • 両端接続で高性能	開発品
OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry)	• レイリー散乱光利用 • 光ファイバ構成：片端接続 • 空間分解能：数 mm～ • 限られた範囲で高速測定可	レーザック製 OFDR LUNA 製 ODiSI™
TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry)	• レイリー散乱光利用 • 光ファイバ構成：片端接続 • 空間分解能：数 cm～ • 広範囲で高精度測定	ニューブレクス製 NBX7031 ほか

(イ) 光ファイバセンサケーブルの決定

与条件で決められた計測対象（光ファイバセンサの設置環境，計測期間など）などを鑑み，光ファイバセンサケーブルを決定する．様々な光ファイバセンサケーブルについては 2.3 節で詳述するが，光ファイバセンサケーブルの大まかな特徴を表 2.1-2 にまとめて示す．

表 2.1-2 様々な光ファイバセンサケーブル

タイプ	特徴など	センサケーブル例
光ファイバ心線	• 外径 0.9 mm • 安価，軽量で取り扱い容易 • 断線リスク高い	各光ファイバメーカー
樹脂被覆タイプ	• 光ファイバ周囲に樹脂被覆 • 端部処理含め取扱いが容易	ニューブレクス製 FN-SILL-3 宇部エクシモ製 FRP 光ファイバセンサケーブル など
金属タイプ	• 光ファイバ周囲に金属管や鋼より線で強化 • 断線リスク低い • 端部処理含め取扱いが手間	日鉄溶接工業製ピコストレインセンサ Solifos 製 BRUsens DSS 3.2mm V9™ ニューブレクス製 DPATS ケーブル など
建材一体タイプ	• 建材に光ファイバが組込み済 • 現地での敷設手間が省略可 • 断線リスク低い • 端部処理が手間	前田工織製センサアデム 住友電工製 SmART ストランド®

(ウ) 体制の確認

分布型光ファイバひずみセンサの導入をスムーズにするうえで，計画から敷設，測定，評価作業のそれぞれが途切れることなく，連携していることが望ましい．施工管理が主目的であれば施工管理を請け負うゼネコンなどが，維持管理が主目的であれば施設のメンテナンス主体である保全会社などが，それぞれ主体となって計画のうえ，発注者あるいは施設所有者と連携のうえ，光ファイバセンシングの専門社やこれまで現場計測や点検業務を行ってきた計測コンサルタント会社などと実施体制を構築することを検討するのが良い．表 2.1-3 に実施体制の例を示す．

表 2.1-3 実施体制の例

	施工管理の場合	維持管理の場合
計画	ゼネコン	保全会社
敷設	専門社（計測コンサルタントなど）	専門社（計測コンサルタントなど）
計測	専門社（計測コンサルタントなど）	専門社（計測コンサルタントなど）
評価	ゼネコン	保全会社
	専門社（計測コンサルタントなど）	専門社（計測コンサルタントなど）
保守	専門社（計測コンサルタントなど）	専門社（計測コンサルタントなど）

(エ) システムの検証

決定された計測方式と光ファイバセンサケーブルによる分布型光ファイバひずみセンサが、計測目的や計測対象に応じた必要な要求性能を満足しているかどうかを確認しなくてはならない場合がある。特に、これまで十分な実績がない敷設方法を適用する場合などは、検証する必要性が高い。検証は、実際の計測対象や敷設方法を用いて試験的に行われるべきであり、その最も一般的な検証方法は引張試験や図 2.1-1 に示すような曲げ試験によって光ファイバセンサの計測結果を理論値やその他計器（ひずみゲージなど）と比較することである（試験例などを 7.5 節に後述）。



図 2.1-1 検証試験の一例 [2]

③ 光ファイバセンサシステムの導入と運用

(ア) 敷設

決定された光ファイバセンサシステムに応じて、光ファイバセンサケーブルの敷設を行う。図 2.1-2 にその一例を示す。

それぞれの光ファイバセンサケーブルの特性をよく理解したうえで、敷設作業を行い、敷設やそれに前後する他作業などによって光ファイバセンサケーブルの損傷や断線がないように十分注意する必要がある。

敷設の進捗に応じて、光ファイバセンサケーブルの健全性を確認できるようにしておき、光ファイバセンサケーブルの損傷や断線があった場合に、迅速な対応ができるように進めることが望ましい。健全性の確認方法としては、可視光による導通状態のチェック、OTDR による透過損失のチェック、実際のひずみ測定器によるひずみ分布状態のチェックなどが考えられ、その目的に応じて使い分ける必要がある(2.4 節③参照)。

また、光ファイバセンサケーブルの設置にあたって必要な仮設（足場などの安全設備、作業照度確保のための電源や照明、接着剤取扱いのた

めの養生シートなど）を十分検討のうえ準備しなければならない。こうした仮設は、作業する季節や時間帯、並行する他作業状況などによって大きく影響を受けるため、事前に現地を確認することが望ましい。



図 2.1-2 光ファイバセンサケーブル敷設の例

(イ) 計測

敷設された光ファイバセンサケーブルを測定器と接続し、計測を行う。図 2.1-3 にその一例を示す。計測に先立ち、敷設された光ファイバセンサケーブルの位置を確認する必要がある（2.4 節③参照）。また、測定器の計測パラメータを変えながら予備計測を何度か行い、所定の性能が達せられていることを確認するとともに、一回の計測にどのくらいの時間がかかるか、一回のデータでどのくらいの記録容量を必要とするか、確認しておくことが望ましい。



図 2.1-3 計測状況の例

敷設状態によっては、光ファイバセンサケーブルの透過損失が多く生じる場合もあり、そのときには計測パラメータ（加算平均の回数、入射する光強度など）を変更する必要がある。透過損失が多い場合には、空間分解能を広げる必要性が生じる場合もある。また、複数の光ファイバ

センサケーブルから構成される場合には、光スイッチのチャンネルの切り替えなどによって敷設状況に応じて再構成することも考慮するべきである。

ひずみは初期値に対する相対的な値であり、基準となる状態で初期値を計測する。このとき、温度補償（2.4 節④参照）を行う場合には、ひずみと同じタイミングで温度補償方法に応じた初期値を計測するのが良い。

（ウ） 評価

得られたひずみ分布計測結果をもとに、目的に応じた評価を行う。基本的なフローを図 2.1-4 に示す。計測方式に問わず測定器から得られるデータは、ある時点初期値（ $v_0(x)$ ）とした光ファイバ上の各位置 x における光の物理量（ $\Delta v(x)$ ：ブリルアン周波数シフトの変化またはレイリー散乱光スペクトルの変化）である。このデータをもとに、必要に応じて温度補償（ $\Delta v_m(x)$ ，2.4 節④）を施した後、所定の係数によってひずみ換算（ $\Delta \varepsilon(x)$ ，2.4 節②）するとともに、光ファイバの位置を現場座標系 X に合わせる（ $\Delta \varepsilon(X)$ ，2.4 節③）処理を施す。こうしたデータの一次処理は、現場でリアルタイムに行うか、あるいはオフラインで後処理するか、計測目的や期間など（2.4 節⑤⑥）に応じて、そのシステム化の可否（2.4 節⑦）を検討する。

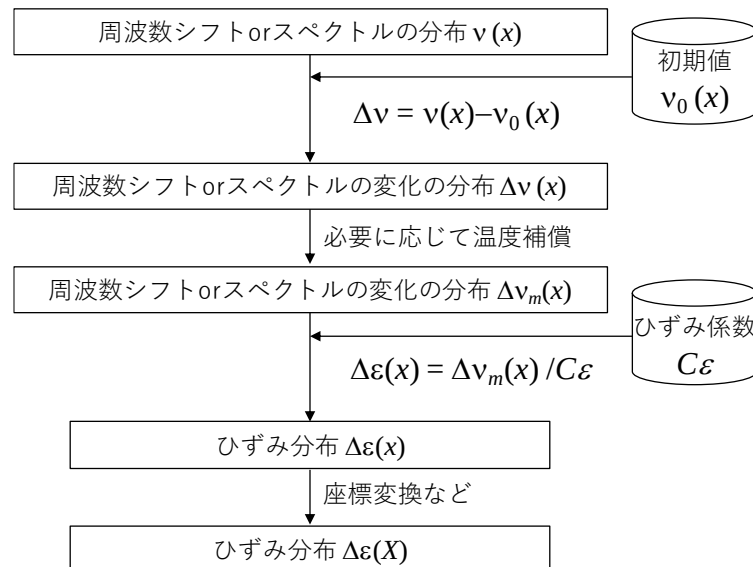


図 2.1-4 データの一次処理フローの例