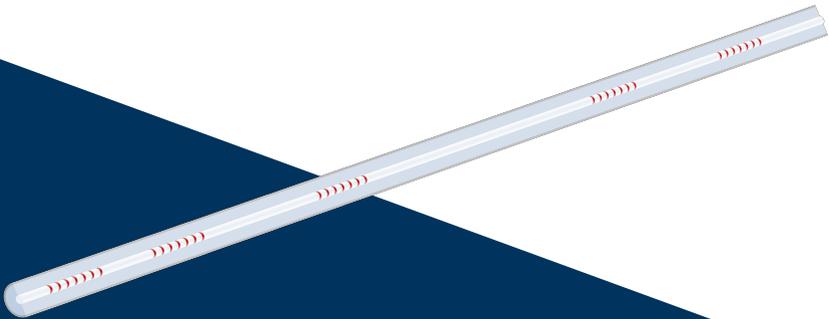


日本語

設置手順書



FS70FBG

FBGベアファイバアレイ

Hottinger Brüel & Kjaer GmbH
Im Tiefen See 45
64293 Darmstadt
Germany
Tel. +49 6151 803-0
Fax +49 6151 803-9100
info@hbkworld.com
www.hbkworld.com

HBK FiberSensing, S.A.
Rua Vasconcelos Costa, 277
4470-640 Maia
Portugal
Tel. +351 229 613 010
Fax +351 229 613 020
info.fs@hbkworld.com
www.hbkworld.com

Mat.:
DVS: A05409 03 J00 00
11.2022

© Hottinger Brüel & Kjaer GmbH

本書の内容は変更される場合があります。
本書に記載のすべての内容は製品説明のための一般
情報です。品質や耐久性を保証するものではありません。

目次

1	一般情報	4
2	センサの設置	5
2.1	材料一覧	5
2.2	取付箇所の準備	5
2.3	計測箇所に印を付ける	8
2.4	センサを接着する	10
2.4.1	EP310接着剤を使用する	10
2.5	ファイバ配線経路の保護	19
2.5.1	エポキシ接着剤を使用しているところ	19
2.6	ケーブルの敷設と保護	21
3	センサ構成	23
3.1	ひずみ	23

1 一般情報

本書は光ファイバ式傾斜センサFS70FBGの設置手順について説明します。

品番
K-FS70FBG

2 センサの設置

以下の手順は、ひずみを測定するための滑らかな表面にベアFBGのFS70FBGアレイを取り付けるためのガイドラインを示しています。
複合材料への埋め込み、または不均一な表面への適用（FBG長さを超えるひずみ勾配が発生する場合）については、HBK FiberSensingにお問い合わせください。

2.1 材料一覧

同梱されている製品
FBGアレイ FS70FBG

必要とする資材
サンドペーパー
表面洗剤 推奨のHBK製品：1-RMS1 または 1-RMS1-SPRAY
不織布 推奨のHBK製品：1-8402.0026
仮止め用粘着テープ 推奨のHBK製品：1-KLEBEBAND
接着剤 推奨のHBK製品：1-EP310S、1-X60 推奨されるサードパーティ製品：3M製のDP490
保護 推奨のHBK製品：1-ABM75、1-AK22

2.2 取付箇所の準備

表面の汚れを落として、接着表面にホコリや油脂分が一切、残らないようにしてください。

ひずみゲージ用洗剤RMS1(図2.1) および不織布(図2.2)の使用を推奨します。



図2.1 試験体上に1-RMSクリーナーをスプレーで塗布する

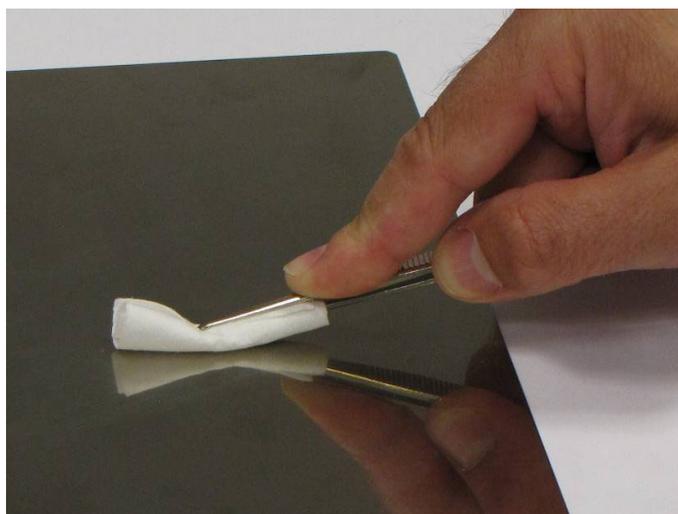


図2.2 不織布によるクリーニング

拭き取りは、不織布を常に同一方向に移動させて行い、不織布に付着する汚れがなくなるまで、続けてください。

EP310S接着剤を使用して設置する場合は、設置面の表面を荒くするために、220グレインのエメリークロス(布ヤスリ)またはより細かいエメリークロスを円を描くような動作で使用してください(図2.3)



図2.3 エメリークロス(布ヤスリ)を使って表面を粗くする

RMS1と不織布パッドを使用して、粗くした設置面をもう一度清掃します(図2.4)



図2.4 粗面化した設置面の清掃

2.3 計測箇所に印を付ける

計測方向を考慮して各FBGセンサの位置を決定します。FBGは、マーキングライン間の中間点を中心にして配置します。

センサの位置決めが計測方向を決定するので、このステップはひずみセンサにとって特に重要です。

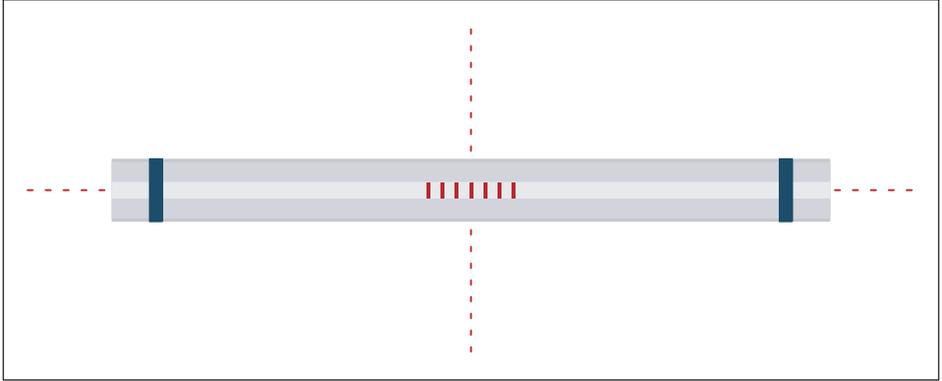


図2.5 FBG位置決め用のマーキング

取付け箇所のマーキング付けには、ボールペンの空芯(インクがないもの)が理想的です。マーキングの長さは、計測方向に 60 mm です。縦のマーキングライン、長さ40 mm、は取り付け位置の中心に引いてください参照 図2.6。

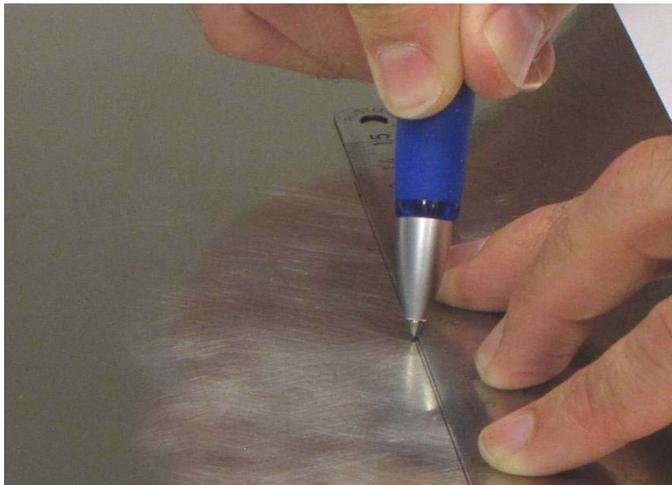


図2.6 マーキングラインを付ける

マーカー付けが完了したら、取付箇所のクリーニングを徹底的に行ってください(参照：図2.7)。ポイントを1回クリーニングするたびに新しい不織布を使用する必要があります。このクリーニング作業は、不織布に汚れがつかなくなるまで、繰り返します。



図2.7 取付箇所の仕上げクリーニング

FBGセンサを計測点の中心に合わせて設置し、光ファイバが取付方向に対してできるだけ真っ直ぐになるように小さな張力を加えています。2つのポリイミド接着テープ（発注コード：1-KLEBEBAND）を使用して、マーキングラインの外側で光ファイバを固定します(図2.8)



図2.8 光ファイバを固定する

2.4 センサを接着する

接着剤の選択と接着プロセスにより、FS70FBGの測定範囲と動作温度に関連して、ひずみセンサの操作性が決定されます。詳細は必ず接着剤の取り付け説明書を参照してください。

! 重要

接着プロセスによりFBGのスペクトル特性が変化し、計測精度に影響を与える可能性があります。

2.4.1 EP310接着剤を使用する

EP310による接着は、高温および高ひずみにおけるクリープ現象に関して最適な結果を提供します。EP310は熱硬化型接着剤です。この接着剤は、試験体が接着剤硬化に必要な熱に耐えられる場合のみ使用できます。EP310の最低硬化温度は80℃です(硬化時間8時間)。

FBGセンサの接着面全体に沿ってEP310接着剤（発注コード：1-EP310）を塗布します。接着面の長さは、少なくともマーカの位置まで越える必要があります。接着剤を室温で5分間乾燥させます。

EP310で接着する場合は、接着面の全長にわたって、ファイバが試験体表面に直接接触していることが重要です。

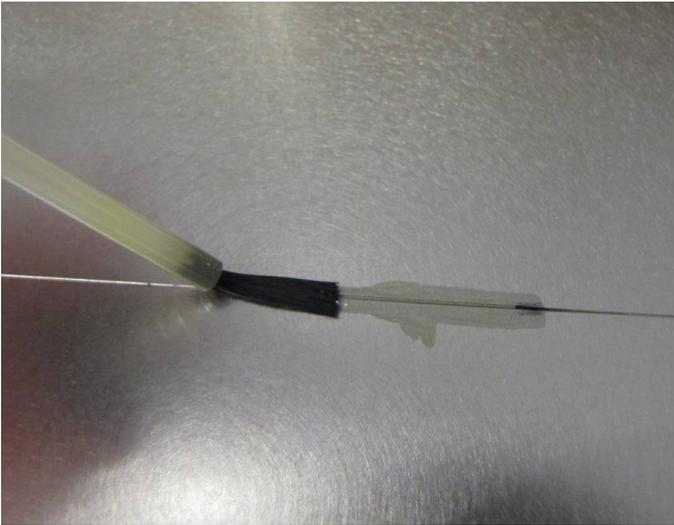


図2.9 接着剤EP310でFBGセンサの接着面を覆う

設置ポイントの上に、テフロン箔（注文コード：1-Teflon）1枚とシリコンゴムテープ（EP310付属）2枚を置きます。シリコンゴムテープの大きさは2 cm x 4 cmです。

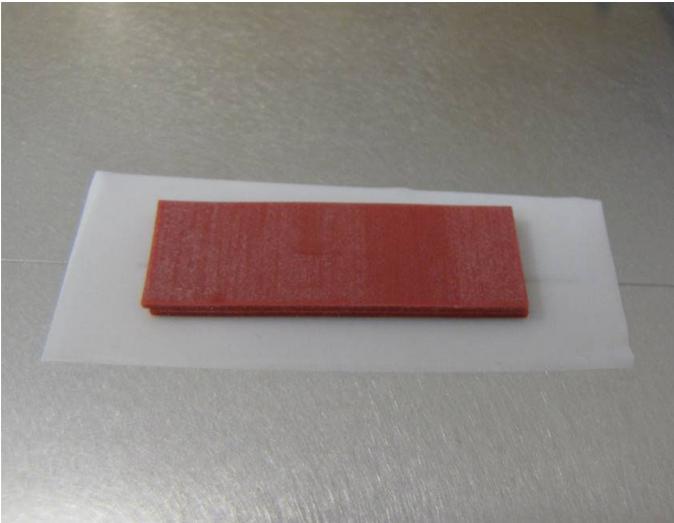


図2.10 テフロン箔と2枚のシリコンゴムテープで光ファイバの接着面全体を覆います。

その上から1kgの荷重をかけます。荷重はFBGセンサの接着面上に均等にかける必要があります。



図2.11 光ファイバFBGセンサの接着面上に荷重をかける

接着剤EP310の硬化時間は150℃で2時間、または80℃で最低8時間です。

2.4.2 エポキシ接着剤を使用した設置

2液混合式のエポキシ接着剤（たとえば推奨のDP490：3M製）を使用するときは、FBGセンサの接着面全体（長さ方向）を接着剤で覆う必要があります。接着面（長さ方向）は少なくとも2つのマーキングの間になければなりません(50mm、FBGセンサを中心に)。

- ▶ まず、2本のポリイミドテープストライプ（発注番号 1-KLEBEBAND）を使用して溝を作成します。このストライプは、接着エリアに十分な長さで、ファイバに対して平行かつ対称に配置されます。

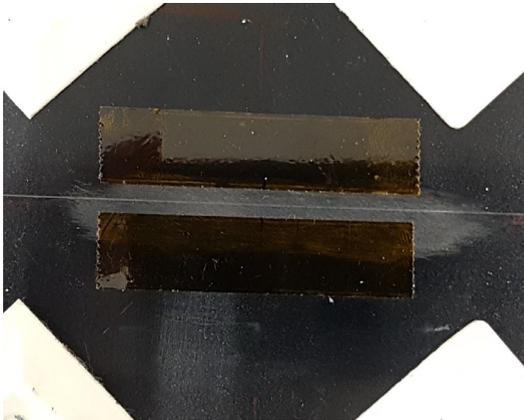


図2.12 接着溝。

- ▶ 接着面の長さ方向に沿って、エポキシ接着剤を非常に薄く線を引くように塗布します。

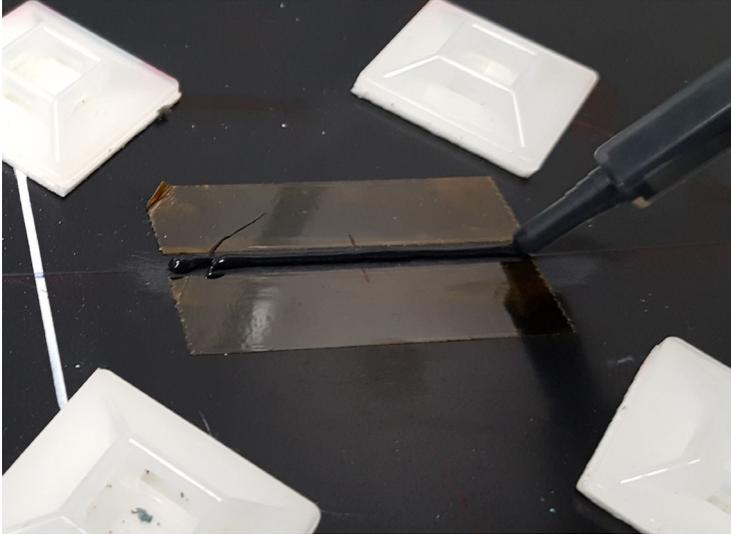


図2.13 エポキシ接着剤の塗布しているところ。

- ▶ ファイバを片側から反対側に少しずつ軽くひねり、最初の位置で終了します。これにより、繊維が接着剤に完全に関与し、測定表面にできるだけ近い位置に保持されます。

i お知らせ

ファイバの端の位置は、まっすぐに、目的の測定方向に位置合わせする必要があります。

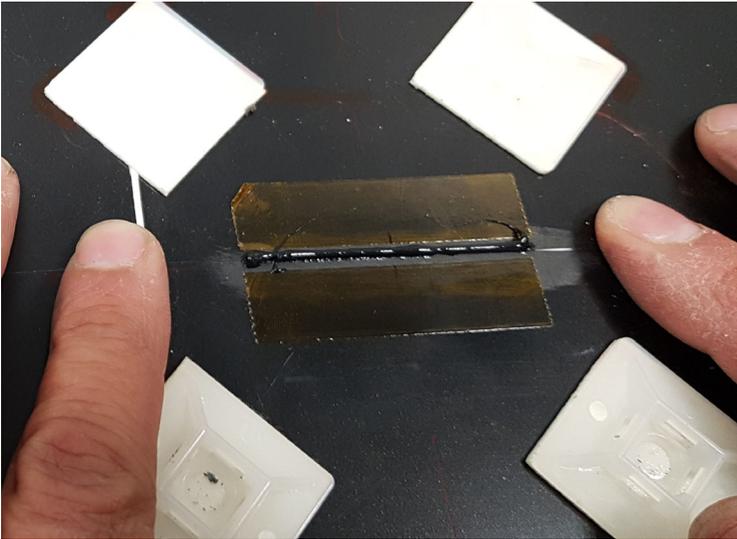


図2.14 ファイバをねじる。

- ▶ 非金属製のへらまたは同様の平らな工具を使用して、一方向に連続した動作で接着剤を溝に沿って広げます。移動は中断しないでください。つまり、一方の端からもう一方の端まで一気に連続した動作で移動する必要があります。このステップは溝の間の全区域に接着剤を広げ、側面にはみ出た接着剤は取除きます。

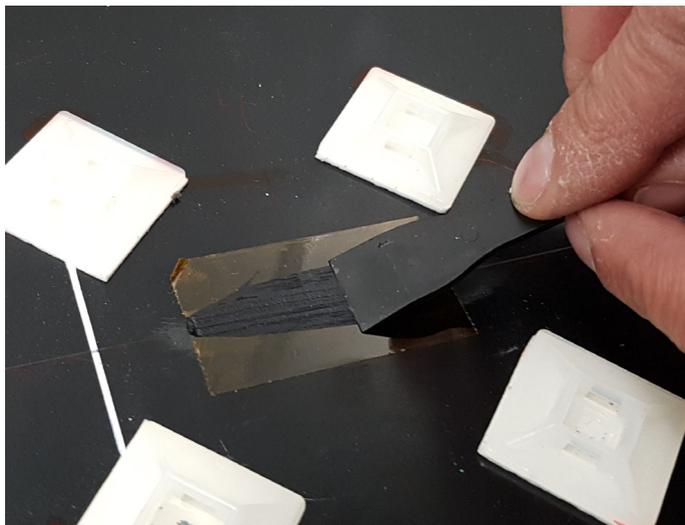


図2.15 へらで接着剤を伸ばします。

▶ ポリミドテープをFBGと接着剤の上に貼ります。

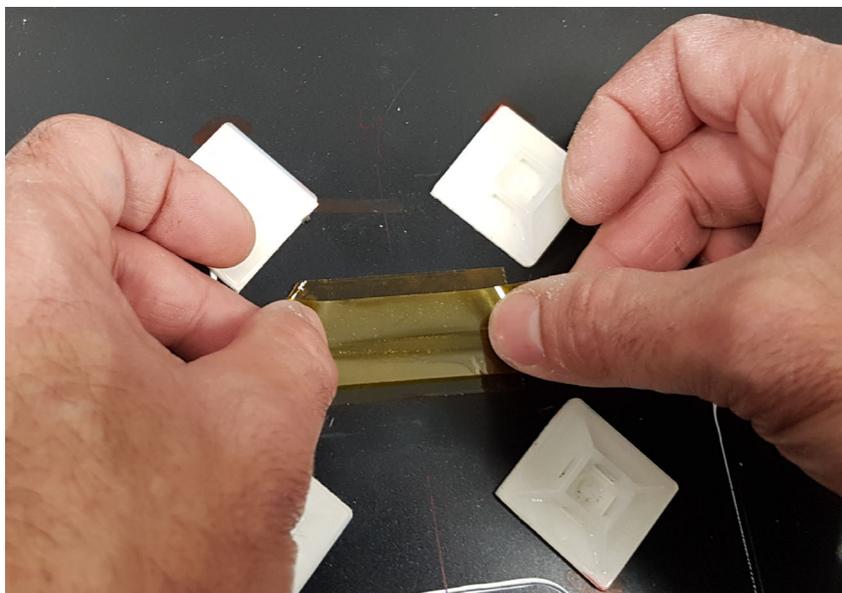


図2.16 新しいポリイミドテープを貼り付けます。

- ▶ ポリミドテープ上で、へらを使用して接着剤を広げる手順を繰り返します。

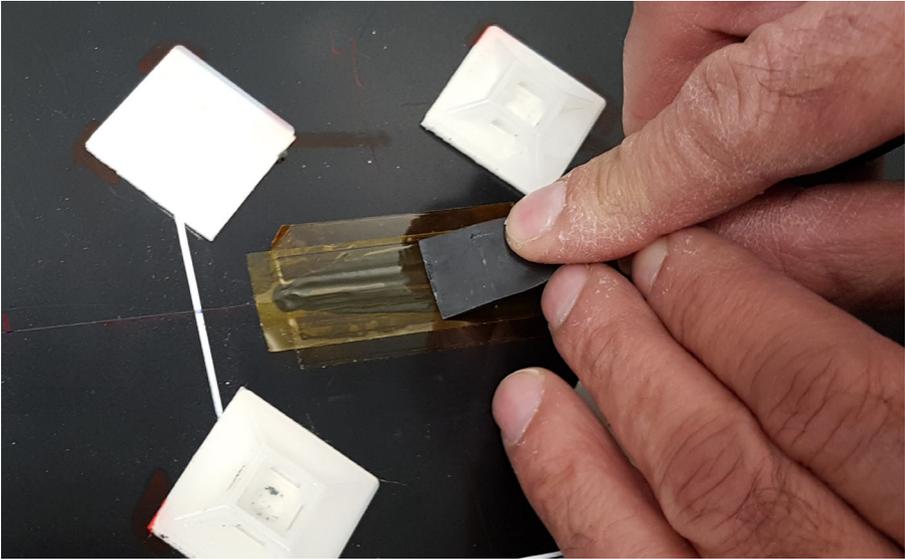


図2.17 へらで接着剤を伸ばします。

- ▶ 固定テープを調整する必要がある場合は、ファイバーに再度応力をかけます。

i お知らせ

ファイバの端の位置は、まっすぐに、目的の測定方向の直線に沿って位置合わせする必要があります。

- ▶ 接着部分の上にゴムを置き、硬い板状のブロックを使用して、連続した圧力をかけます。

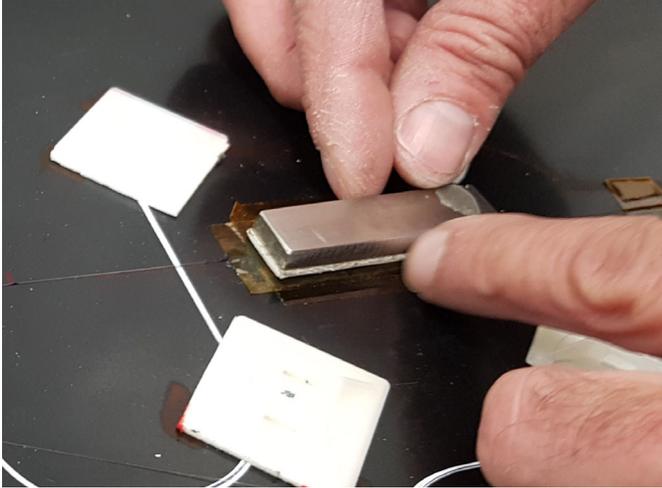


図2.18 ラバーと硬い補助部品的位置合わせ。

- ▶ 1～2分間押し続けます。



図2.19 FBG に均一な圧力をかけます。

- ▶ この後、ブロックとゴムを取り外し、ファイバを両極端を持って引っ張るようにして、FBGのアライメントが正しいことを確認します。最初に貼り付けたテープを再度貼り付けて、ファイバをこの張力のかかった位置で固定します。
- ▶ へらで接着剤を伸ばし、重ねたゴムとブロックを使用して1～2分間再度圧力をかけます。
- ▶ エポキシ接着剤が完全に硬化するのを待ち、接着工程で使用したポリイミドテープを取り除きます。

i お知らせ

DP490の推奨硬化時間は室温で24時間です。他の条件での硬化温度については接着剤の説明書を参照してください。

2.5 ファイバ配線経路の保護

FBG間、またはFBGとケーブルへの移行の間では、ファイバ配線経路を保護することが重要になる場合があります。その必要性和正確な対応策は、主にアプリケーションと環境条件によって異なります。

2.5.1 エポキシ接着剤を使用しているところ

ファイバを保護する1つの方式として、推奨のDP490接着剤を使用することが有効です。次の図は、より見栄えの良い仕上げを行うためにフォームテープを使用した場合です。

- ▶ 厚さ1mm（TESAパワーバンド推奨）のフォームテープを配線経路に沿って両側に貼り付け、ファイバ配線経路の溝を作成します。



図2.20 フォームテープを使用してファイバに沿って溝を作成します（オプション）。

- ▶ パスに沿ってエポキシ接着剤を塗布します。
- ▶ へらを使用して接着剤表面を滑らかにし、フォームテープに軽く押し付けて溝の幅全体に接着剤を満たすために、一方向に連続してへらを動かします。



図2.21 へらで接着剤を伸ばします。

約2時間待ちます。

- ▶ テープの赤い保護フィルムを取り外します（オプション）。これはより外観をきれいに仕上げられます。



図2.22 赤い保護フィルムを取り外します。

接着剤が硬化するまで待ちます。

▶ テープを取り外します。

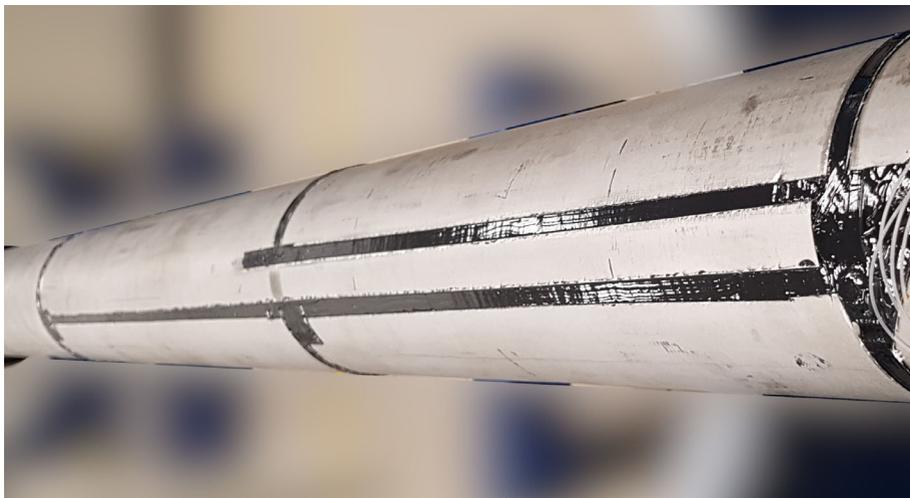


図2.23 保護が完了しました。

2.6 ケーブルの敷設と保護

FS70FBGセンサは、ケーブル付きまたはケーブルなしで供給できます。また異なった種類のケーブルを指定できます。

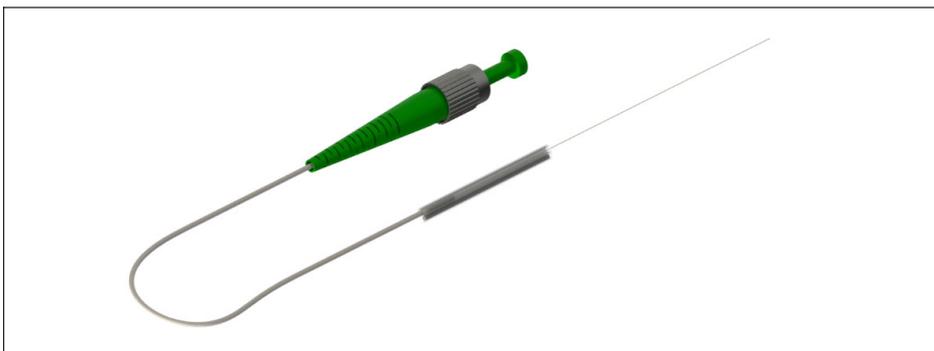


図2.24 編組ケーブルターミナル

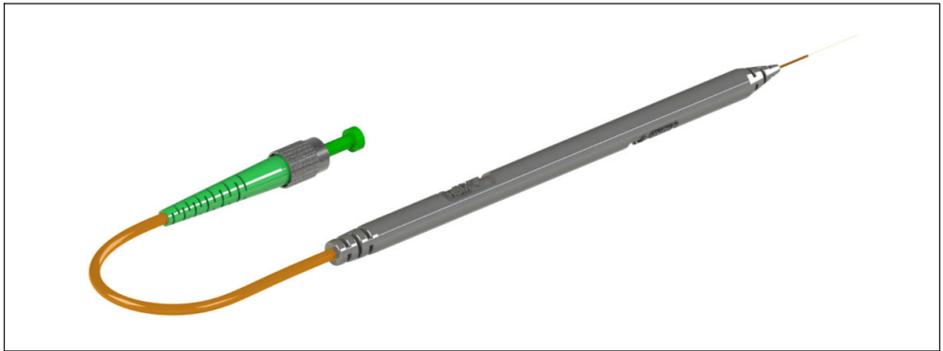


図2.25 アラミドケーブルターミナル

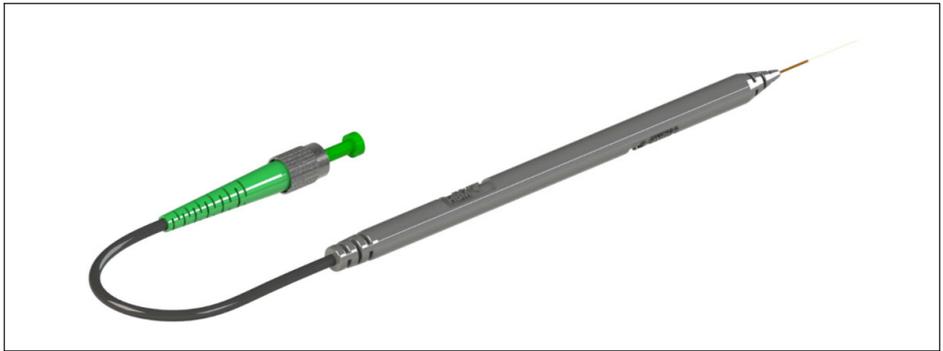


図2.26 装甲ケーブルターミナル

センサケーブルは、ケーブルが垂れ下がっていないこと、またケーブルを曲げて使用する場合は、その曲率が許容範囲以内であることを確認しながら配線する必要があります。ケーブルの固定には、プラスチック製のクランプまたは強力な粘着テープをお勧めします。スプライス保護部分もしっかり固定する必要があります。FS70FBGのスプライス接続部は、使用材料に剛性の違いがあるため脆弱な場所です。これは、3mmケーブル（アラミドまたは装甲被膜タイプ）を使用する場合に特に当てはまります。

3 センサ構成

3.1 ひずみ

ひずみセンサは、校正をしていないセンサです。センサとともにお届けする特性データシートには、センサのデータが記載され、これらは、ひずみの計算を正確に行う目的で利用します。

ファイバブラッググレーティングひずみセンサの場合、温度の影響を含む波長変動は、次の式で表されます：図3.1

$$\frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} = k \cdot (\varepsilon_{Load} + (TCS + CTE) \cdot (T - T_0)) \cdot 10^{-6}$$

図3.1 ひずみと温度の影響による、FBGひずみセンサの波長変動量

ここで、

- λ は、ひずみセンサで計測されるブラッグ波長で単位はnm
- λ_0 は、基準点において、ひずみセンサが計測するブラッグ波長で単位は nm
- k は、ひずみセンサのゲージ率(kファクタ)で無次元係数
- ε_{Load} は、計測対象に加わる機械的ひずみで単位は $\mu\text{m}/\text{m}$
- TCS は、ひずみセンサの熱ひずみで単位は $(\mu\text{m}/\text{m})/^\circ\text{C}$
- CTE は、ひずみセンサを取付ける計測対象の材質の熱膨張係数で単位は $(\mu\text{m}/\text{m})/^\circ\text{C}$
- $T - T_0$ は、基準点の温度から計測点の温度までの温度変動量で単位は $^\circ\text{C}$

温度補償をしない計測

温度補正が不要な場合は、次のようにひずみ計算を実行できます：図3.2.

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{k \cdot \lambda_0} \cdot 10^6$$

図3.2 温度補償しない、ひずみ量の計算式

ここで、

- ε は、ひずみ計測値で単位は $\mu\text{m}/\text{m}$
- λ は、ひずみセンサで計測されるブラッグ波長で単位はnm
- λ_0 は、基準点において、ひずみセンサが計測するブラッグ波長で単位は nm
- k は、ひずみセンサのゲージ率(kファクタ)で無次元係数

温度センサを使用して温度補償する計測

温度センサを使用して補償する、ひずみ量は、 $\mu\text{m}/\text{m}$ 単位で、その計算は、温度センサの出力が $^{\circ}\text{C}$ 単位の温度値であるため、単純です。計算は次のとおりです：図3.3.

$$\varepsilon_{\text{Load}} = \frac{(\lambda - \lambda_0) \cdot 10^6}{k \cdot \lambda_0} - (TCS + CTE)(T - T_0)$$

図3.3 温度センサを使用して温度補償する、ひずみ量の計算式

ここで、

- $\varepsilon_{\text{Load}}$ は、計測対象に加わる機械的ひずみで単位は $\mu\text{m}/\text{m}$
- λ は、ひずみセンサで計測されるブラッグ波長で単位は nm
- λ_0 は、基準点において、ひずみセンサが計測するブラッグ波長で単位は nm
- k は、ひずみセンサのゲージ率(k ファクタ)で無次元係数
- TCS は、ひずみセンサの温度クロス感度で単位は $(\mu\text{m}/\text{m})/^{\circ}\text{C}$
- CTE は、ひずみセンサを取付ける試験体の材料の熱膨張係数で単位は $(\mu\text{m}/\text{m})/^{\circ}\text{C}$
- T は、ひずみセンサを取付けた構造物の温度計測値で単位は $(\mu\text{m}/\text{m})/^{\circ}\text{C}$
- T_0 は、基準点に対する温度センサの温度計測値で単位は $^{\circ}\text{C}$

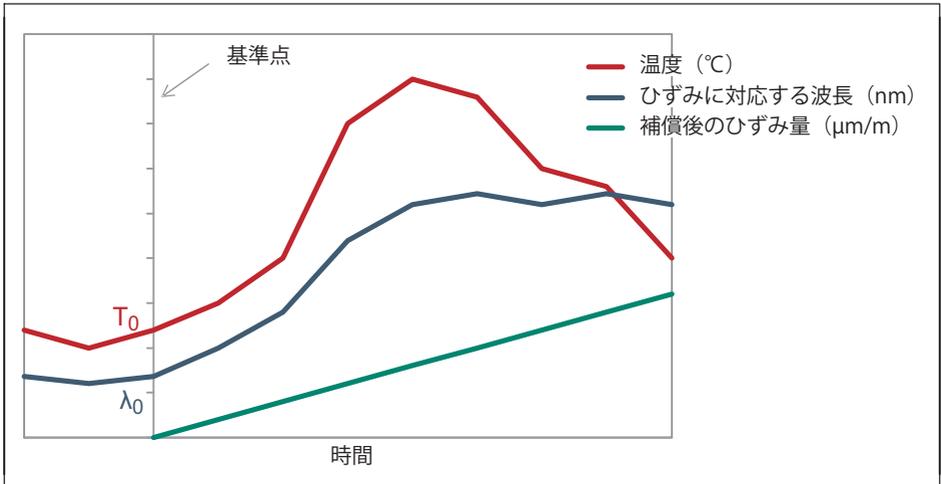


図3.4 補償に温度センサを使用して、温度補償ひずみ量を計測するときの基準点

補償用センサを使用して温度補償する計測

ひずみ計測は、FBG（ファイバ・ブラッグ・グレーティング）テクノロジーをベースとする、補償用センサを使用する場合においても、同様に正確な補償が可能です。補償の進め方として利用できるものは、以下のとおり、いくらかあります。

- 校正証明書なしの温度センサ
- 同一の材質上の、ひずみのない部分に取付けたひずみセンサ
- ひずみがなく、熱膨張率(CTE)が既知の材質上に取付けたひずみセンサ

図3.5に示す式により、ひずみの計算を実行できます。

$$\varepsilon_{Load} = \frac{\lambda - \lambda_0}{k \cdot \lambda_0} \cdot 10^6 - \frac{\lambda_{TC} - \lambda_{0TC} (TCS + CTE)}{\lambda_{0TC} TCF}$$

図3.5 FBGをベースとする、補償用センサを使用して温度補償する、ひずみ量の計算式

ここで、

- ε_{Load} は、計測対象に加わる機械的ひずみで単位は $\mu\text{m}/\text{m}$
 - λ は、ひずみセンサで計測されるブラッグ波長で単位は nm
 - λ_0 は、基準点に対して、ひずみセンサが計測するブラッグ波長で単位は nm
 - k は、ひずみセンサのゲージ率(k ファクタ)で無次元係数
 - λ_{TC} は、補償用センサで計測されたブラッグ波長で単位は nm
 - λ_{0TC} は、基準点において、補償用センサの示すブラッグ波長で単位は nm
 - TCS は、ひずみセンサの温度クロス感度で単位は $(\mu\text{m}/\text{m})/^\circ\text{C}$
 - CTE は、ひずみセンサを取付ける試験体の材料の熱膨張係数で単位は $(\mu\text{m}/\text{m})/^\circ\text{C}$
 - TCF は、補償用センサの温度補償係数で単位は $(\mu\text{m}/\text{m})/^\circ\text{C}$
- 未校正の温度センサでは、センサの特性データシートに、この数値が記載されています。ひずみセンサが特定の材質に取付けられている場合、図3.6に示す式により、TCFを算出できます。

$$TCF = (5.7 + k \cdot CTE_{TC})$$

図3.6 温度補償係数を求める計算式

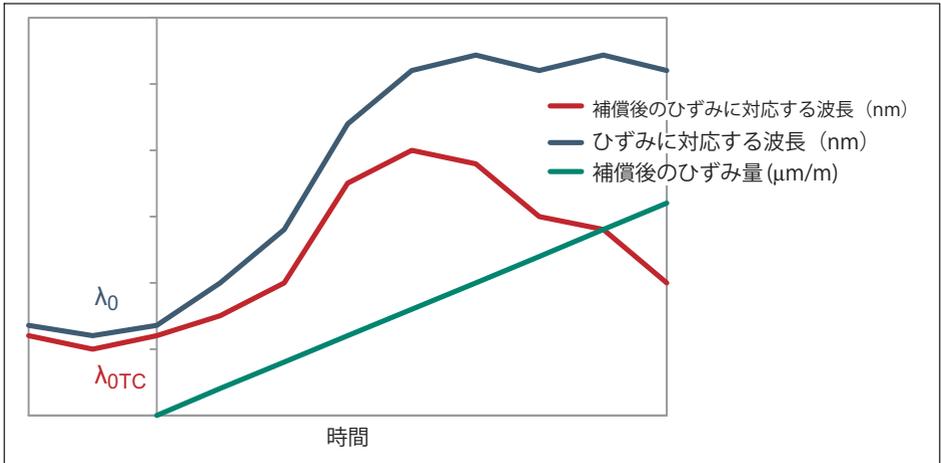


図3.7 補償にFBGベースの補償用センサを使用して、温度補償ひずみ量を計測するときの基準点

曲げモーメント補正を使用した計測

測定面から遠く離れた位置にあるセンサを使用して測定する場合、測定に「誤差」が発生する可能性があります。これは、センサが設置されている測定面と測定対象となるひずみ発生の中立軸の間に距離があるためです。

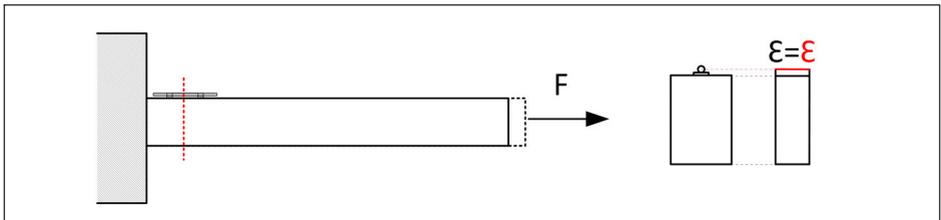


図3.8 純粋な軸方向の変形によるひずみ

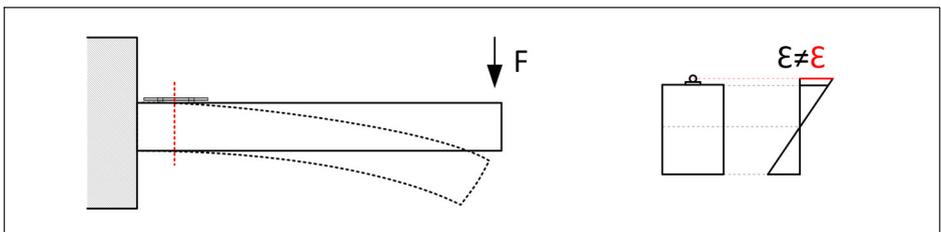


図3.9 純粋な曲げモーメントによるひずみ

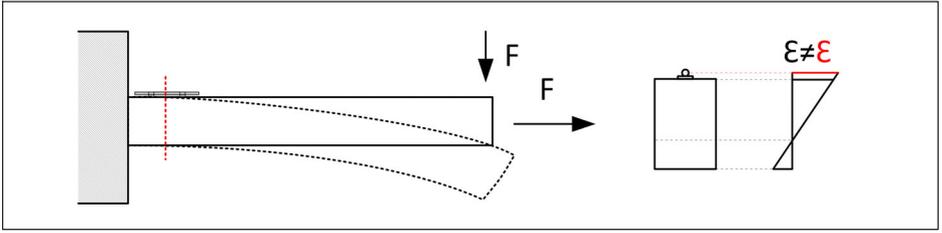


図3.10 軸方向の荷重と曲げモーメントによるひずみ

接着材やセンサ素子の厚みが、センサ検出素子と設置表面間の距離増加となり計測値に影響する場合、または測定対象が非常に薄い場合、非常に重要になります。FS70FBGベア・ファイバブラッググレーティング素材自体のこの距離は0.095mm (図3.11のh2参照)。

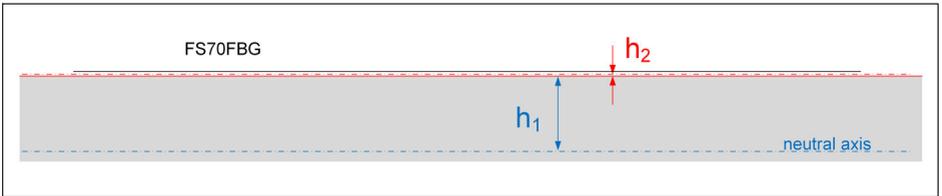


図3.11 FS70FBGにおける、FBGから実装表面までの距離

ただし、被測定物の中心軸(neutral axis)までの距離 (h_1) が既知である場合は、センサから計測された歪みは、幾何学的要因により計測表面の歪みに修正できます：

$$\varepsilon_{surface} = \frac{\lambda - \lambda_0}{k \cdot \lambda} \cdot \frac{h_1}{h_2 + h_1} \cdot 10^6$$

図3.12 ひずみ計算における曲げ効果補正

ここで、

- $\varepsilon_{surface}$ は、計測表面に加わる機械的ひずみで単位は $\mu\text{m}/\text{m}$
- λ は、ひずみセンサで計測されるブラッグ波長で単位はnm
- λ_0 は、基準点に対して、ひずみセンサが計測するブラッグ波長で単位はnm
- k は、ひずみセンサのゲージ率(kファクタ)で無次元係数
- h_1 計測面から中心軸までの距離出単位はmm
- h_2 は計測面からFBGまでの距離で単位はmm (FS70FBGの場合は0.095 mm)

