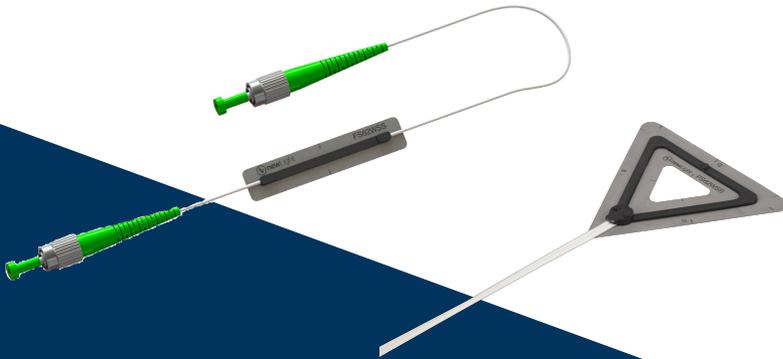


日本語

設置手順書



FS62WSS, FS62WSR (BRD)

溶接型ひずみセンサ（編組ケーブル）

溶接型ロゼットひずみセンサ（編組ケーブル）

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: A05406 02 J00 00
07.2022

© 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 | FS62WSSの設置 | 5 |
| 2.2.1 | 取付箇所の準備 | 5 |
| 2.2.2 | 計測箇所に印を付ける | 8 |
| 2.2.3 | センサの配置 | 10 |
| 2.2.4 | センサの溶接 | 11 |
| 2.3 | FS62WSRの設置 | 16 |
| 2.3.1 | 取付箇所の準備 | 16 |
| 2.3.2 | 計測箇所に印を付ける | 16 |
| 2.3.3 | センサの配置 | 16 |
| 2.3.4 | センサの溶接 | 18 |
| 2.4 | ケーブルの敷設と保護 | 19 |
| 2.5 | センサの保護 | 21 |
| 3 | センサ構成 | 25 |
| 3.1 | センサ関連の文書 | 25 |
| 3.2 | 計測結果の計算 | 25 |
| 3.2.1 | 温度 | 25 |
| 3.2.2 | ひずみ | 25 |

1 一般情報

本文は、編組ケーブルオプション付きの溶接型ひずみセンサ FS62WSS及び溶接型ひずみセンサロゼットFS62WSRの設置マニュアルです。

これらのセンサは、単独で、またはHBK FiberSensingの施設で事前に組み立てられたセンサアレイとして納品できます。

| 品番 | |
|----------------------|------------|
| ひずみセンサ | ロゼットひずみゲージ |
| K-FS62WSS | K-FS62WSR |
| センサアレイ ¹⁾ | |
| K-FS76BRD | |

- ¹⁾ K-FS76BRD材料を使用してFS62PSSおよびFS63LTSセンサをセンサアレイに組み込めるのはFS62WSSだけです。FS62WSRひずみゲージロゼットを含むセンサアレイについては、HBK FiberSensingにお問い合わせください。



お知らせ

本文では、編組ケーブルを使用したFS62WSSおよびFS62WSRの設置について説明します。溶接型ひずみセンサFS62WSSのアラミドケーブルとアーマーケーブル付きの設置手順はほぼ同じですが、センサの形状、サイズ、およびケーブルの取り扱いは異なります。アラミドケーブルとアーマーケーブルを使用したFS62WSSまたはFS62WSR溶接型ひずみセンサの取り付け方法の詳細については、それぞれの設置手順を参照してください。

2 センサの設置

2.1 材料一覧

| 同梱されている製品 |
|-----------|
| センサ |
| 溶接板サンプル |

| 必要な装置 |
|--|
| バリ取り機（オプション） |
| インパルス溶接装置 推奨：VBS FuegetechnikのC33と同等か類似した装置 |

| 必要とする資材 |
|---|
| 紙やすり |
| 表面洗浄剤 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 |
| 保護部材 推奨のHBK製品：1-ABM75 / AK22 |

2.2 FS62WSSの設置

2.2.1 取付箇所の準備

光学式ひずみゲージやセンサを取り付けるときは、まず計測対象物の表面を清掃し平らにする必要があります。取付箇所の溶接面が完全に露出するまで、塗料と錆をすべて取り除きます(図2.1)。溶接不良を起こす可能性があるような、大きな凹凸やバリが残っていないことを確認してください。必要ならば、布やすりを使用して表面を調整してください。



図2.1 溶接面のバリ取り



ヒント

ダミーセンサプレートを使用して、準備する領域を定義します。



図2.2 センサの溶接には不適切なさびた表面



図2.3 溶接面の研磨



図2.4 溶接の準備ができた表面

次に、表面の汚れを落として、溶接箇所にはホコリや油脂分が一切、残らないようにしてください。

適切な脱脂剤（RMS1を推奨）および不織布を使用して表面を清掃します（図2.5及び図2.6）。



図2.5 RMS1クリーナと不織布を使用します



図2.6 表面をクリーニングしています

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。

2.2.2 計測箇所印を付ける

計測方向とセンサの中心線を考慮しながら、センサの方向と位置を決定します。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。

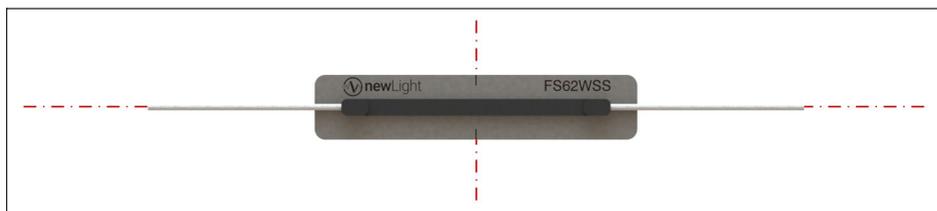


図2.7 センサ位置決め用のマーカ



ヒント

表面の材質に応じて、鋭利な工具またはボールペン(インクのない)を使用してセンサの位置をマークします。



図2.8 マーカーラインを作成

2.2.3 センサの配置

仮止め用接着テープを4枚準備します。約3cmの2枚と約7cmの2枚です (図2.9)。

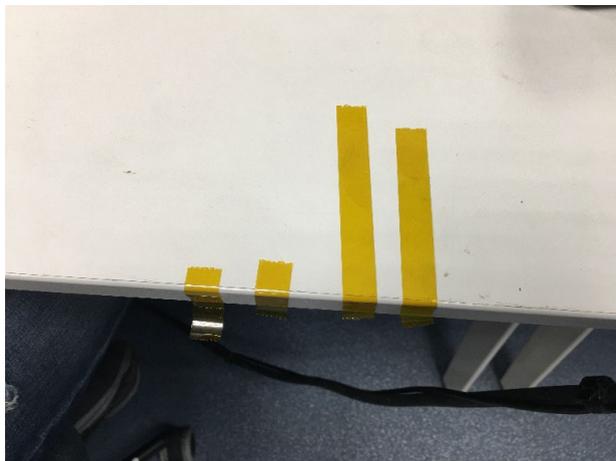


図2.9 仮止め用テープの準備

ブリスターからセンサを慎重に取り外し、事前に記入してある設置マークに合わせます。

準備した短いほうのテープを使用して、センサケーブルを所定の位置に固定します (図2.10)。

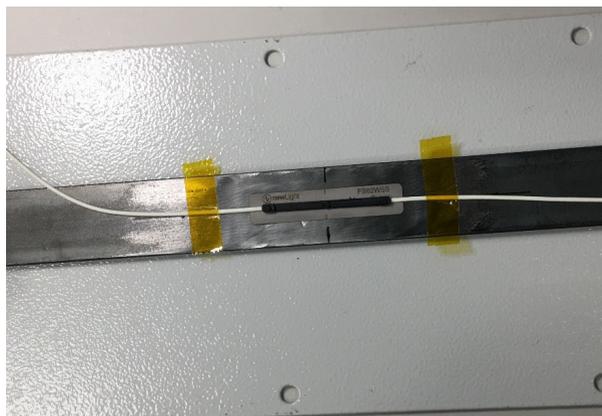


図2.10 最初の位置合わせ

長いほうのテープを使用して、センサの長手方向の淵の部分を使用して試料に固定します。センサプレートの淵の部分の約1mmをテープで覆います (図2.11参照)。これにより、溶接工程中にセンサが動かなくなります。

メモ

溶接エリアにテープがないことを確認します。テープまたは接着剤を使用した部分で溶接を行うと、放電によりセンサが作動しなくなるおそれがあります。



図2.11 センサを完全に固定して、溶接工程を適切に実施します。

2.2.4 センサの溶接

HBK FiberSensingは、VBS Fuegetechnik(www.vbs-fuegetechnik.de)のC33と同等のモデルの使用を推奨します。



図2.12 推奨されるインパルス溶接装置

溶接パラメータの設定

理想的な溶接パラメータは対象により異なります（使用するスポット溶接機だけでなく、材料の厚さ、電極の位置によっても異なります…）そのためパラメータ調整用のダミー溶接プレートが納品されます。清浄なダミー溶接プレートで、試験的に溶接をおこない溶接パラメータを調整します。



ヒント

ダミープレートをスポット溶接し、引っ張って設置表面から引き外します。良好な溶接を行うと、引きはがすことが困難になります。強引に引きはがすと、溶接ポイントには、図2.13に示すようにダミープレートに穴ができる必要があります。一般的な設定は40～60 Vの電圧で行います。



図2.13 溶接設定の確認を修正します

電極チップは、直径約1 mmの平らな面になるようトリミングすることをお勧めします
図2.14。



図2.14 電極チップ



ヒント

最良の結果を得るために、溶接工程中に電極を適宜トリミングしてください。

溶接を正しく行うためには、溶接ピストルを溶接面に対して垂直に押し下げてください (参照：図2.15)。一方の手でピストルをもち、もう一方の手でピストルのヒールを持って上からピストルを押し下げます。

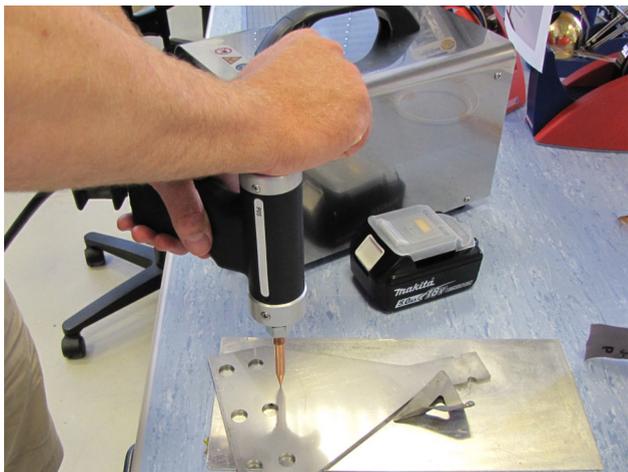


図2.15 正しい溶接位置

溶接手順

溶接の順番は、センサの中央から外側に向かって、約1 mmの間隔で行ってください。
図2.16に示されているような手順で溶接します。

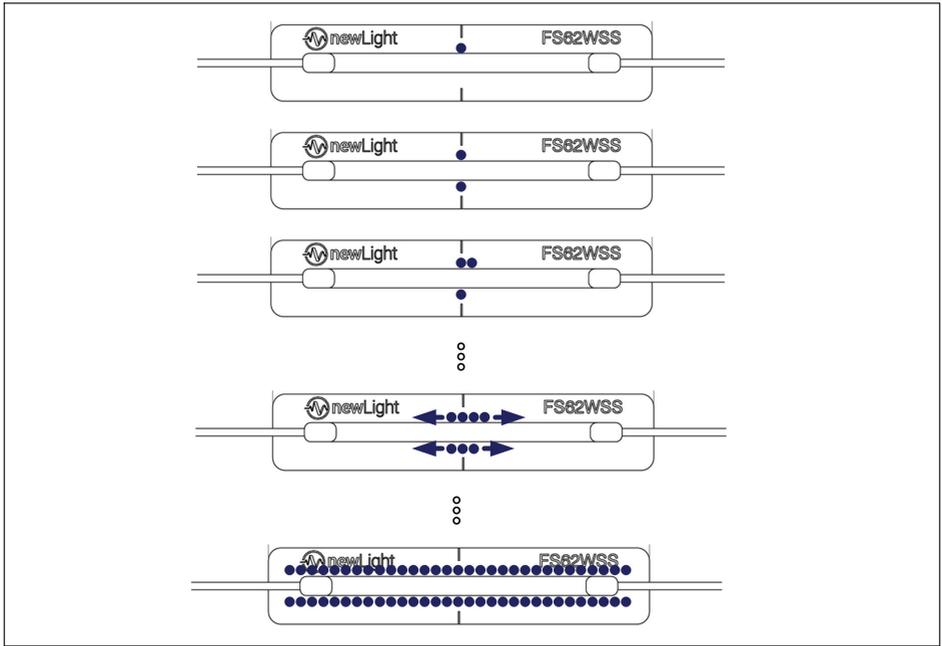


図2.16 FS62WSS BRDの溶接手順



図2.17 センサの溶接



ヒント

編組ケーブルバージョンのFS62WSSを完全に溶接する場合、各線ごとに約35箇所の溶接ポイントが必要です。



図2.18 溶接を完了した状況

2.3 FS62WSRの設置

2.3.1 取付箇所の準備

2.2.1ページのセクション5で説明されているように、取付面のクリーニングを行います。ダミープレートを基準として、クリーニングが必要な設置面を確認します。

2.3.2 計測箇所に印を付ける

FS62WSRロゼットには、 $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ の位置に合計3つのFBGセンサが配置されています。各FBGの位置合わせは、に示すように、ローゼットの各コーナーにあるセンサガイドによって確認できます。このガイドは、図2.19に示されているように、方向「a」、「b」、および「c」として定義されます。

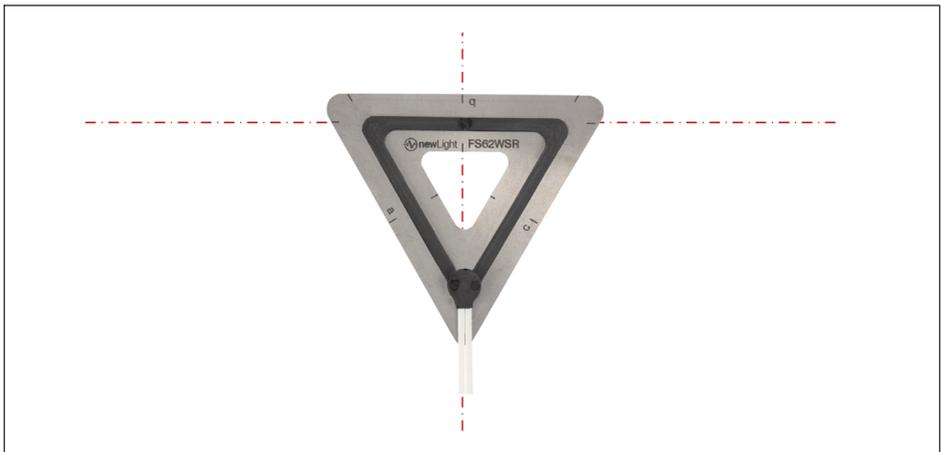


図2.19 FS62WSRの位置決め用のマーク

最初に、8ページの、セクション2.2.2に説明されているような方法で、例えば「b」などのFBGの一つを選んでその直角方向を考慮して、十字線のマークを書き込みます。

2.3.3 センサの配置

仮止め用のテープ（マスキングテープなど）を4枚用意します。三角形のロゼットの3つの側面を固定するのに十分な長さのテープ3枚と、ケーブルを固定用に4つ目のテープを準備します。



図2.20 仮止め用テープの準備

十字マーク上に光ファイバー式ロゼットを配置します。希望する方向にセンサの位置決めを行います。例えば、「b」の方向を水平マークに合わせます。この位置を判断するには、センサラベルにある白い位置合わせマークを参照してください。次に、「b」方向の中心を指す線と「a」方向と「c」方向の間にあるケーブルの方向を目安に、垂直方向を決定します。

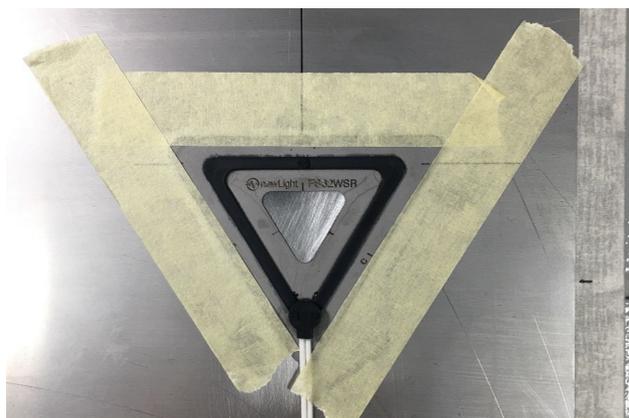


図2.21 光学式ロゼットの位置を合わせて固定します

仮止めテープを使用して、ゲージの淵部分の約1mmを使用して側面に沿ってテープを貼り付け、ロゼットを所定の位置に仮止めします。

溶接エリアにテープがないことを確認します。テープまたは接着剤がある部分で溶接を行うと、放電によりセンサが作動しなくなるおそれがあります。

2.3.4 センサの溶接

溶接パラメータの設定

まず、11ページのセクション 2.2.4のセンサの溶接項の手順に従って溶接設定をテストします。

溶接手順

溶接シーケンスは、センサの中央から外側に向かって、約1 mmの間隔で行ってください。

図2.22に示されているような手順で溶接します。残りの測定方向についても同じ手順を繰り返します。

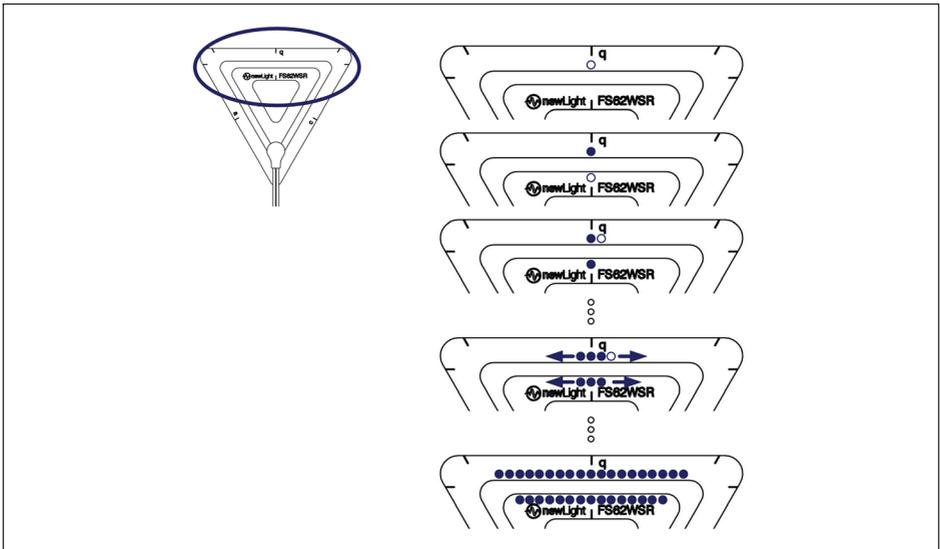


図2.22 FS62WSR(編組)の溶接手順を各測定方向に沿って実施します。

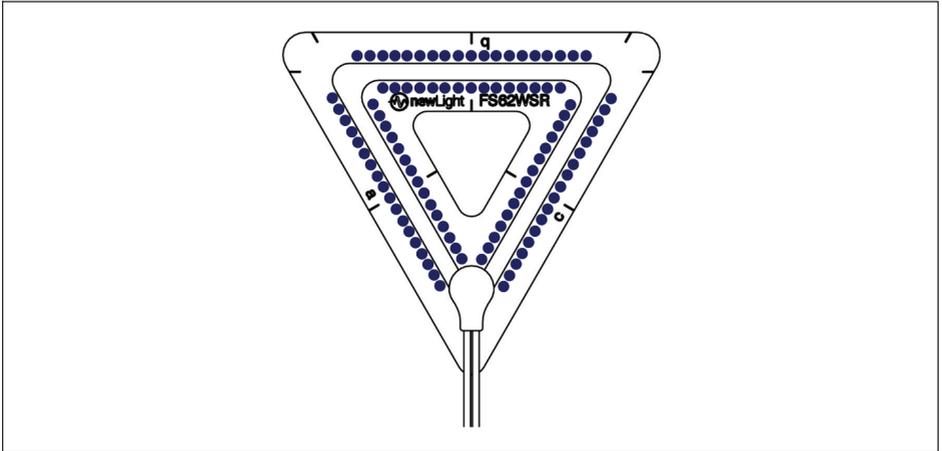


図2.23 FS62WSR(編組)の完成した溶接パターン。



ヒント

編組ケーブルバージョンのFS62WSRを完全に溶接した場合は、各方向に約35箇所溶接ポイントを外側のラインに配置する必要があります。

2.4 ケーブルの敷設と保護

センサーケーブルは、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。

光ファイバにストレインリリーフを施すことをお勧めします(図2.24を参照)。余分な光ファイバケーブルを緩やかな曲線でまとめ、ポリイミド粘着テープで固定します。また、接着剤(例えばX60)も使用できます。

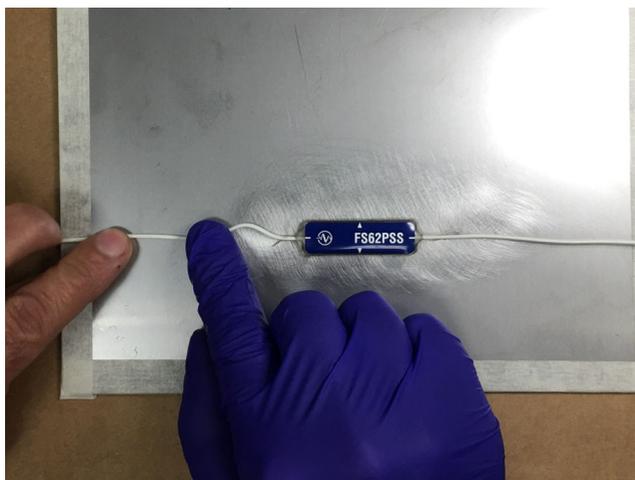


図2.24 光ファイバケーブルに対するストレインリリーフ



図2.25 テープでファイバーストレインリリーフを固定しています

スプライス保護がある場合は、スプライスもしっかり固定されていることを確認してください。

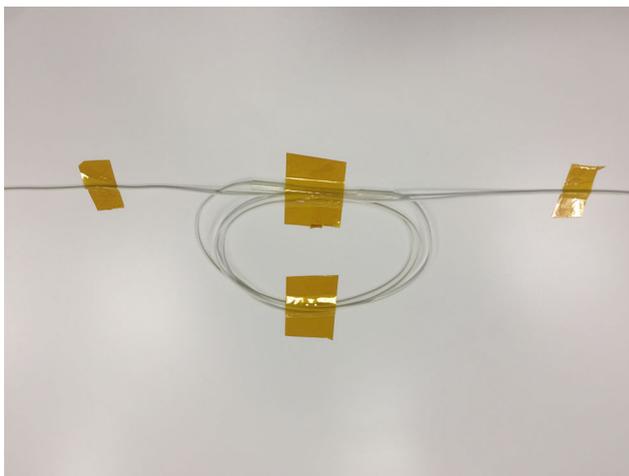


図2.26 編組ケーブルの配線

屋外で使用する場合は、ケーブル経路を湿気や機械的損傷からさらに保護することをお勧めします。これは、ケーブルコンジットを使用するか、シリコンなどのシーリングペーストで全長を覆うことで実現できます（例：3M製DP490使用）。

i お知らせ

編組ケーブルは、管理された環境を持つ実験室での設置に適しています。広い温度範囲に耐えることができますが、機械的損傷に対しては、完全に保護されていません。センサが過酷な環境で使用される場合は、ケーブルの保護を強化する（プラスチックチューブ、コンジットを使用するか、ケーブルを保護材で覆う）ことをお勧めします。

2.5 センサの保護

FS62WSSとFS62WSRはラボ用に設計されたセンサです。しかし、正しく保護すれば他の環境でも使用できます。

カバー剤AK22やABM75を使用して、センサを湿度の影響から保護する必要があります。最初にすべての接着剤の残留物（この場合はZ70）をパテで大きめにカバーしてください。すべてのセンサ側面に対してパテを押し付けてください（図2.27）。

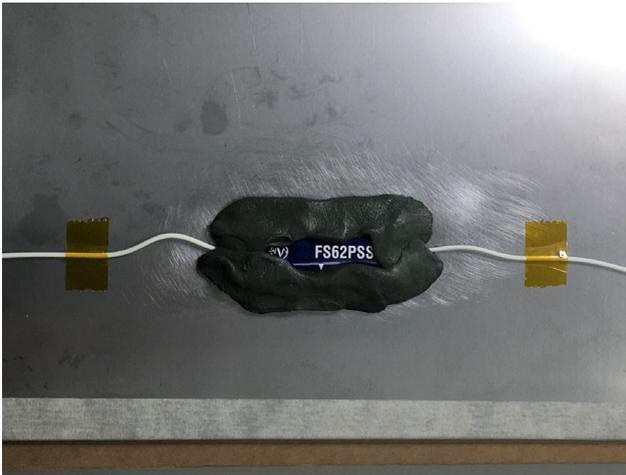


図2.27 AK22でセンサ側面をカバー

カバー状態をより完全にするため、必ずケーブルの下にAK22を適量配置してください。これは、センサの横の接続部分、および残りの保護レイヤの接続部分でも行う必要があります(図2.28)。

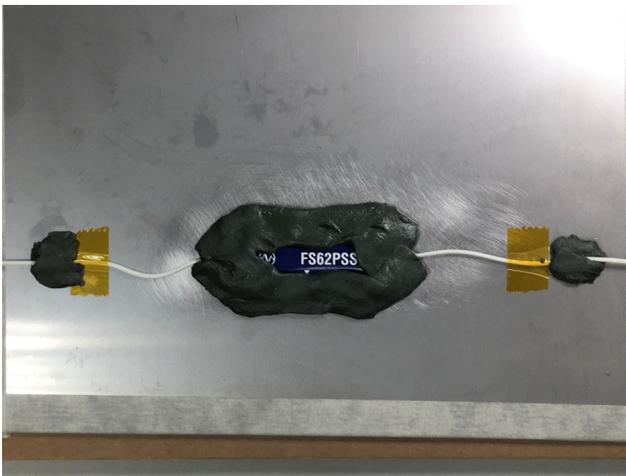


図2.28

センサ領域全体をカバーできるように、十分な大きさのフィルムABM75(図2.29)を切り取り(単一のセンサまたは互いに近接した複数のセンサ(例:FS62LTS x 1と温度補正用のFS62WSSx1)全体をカバーするように配置します。

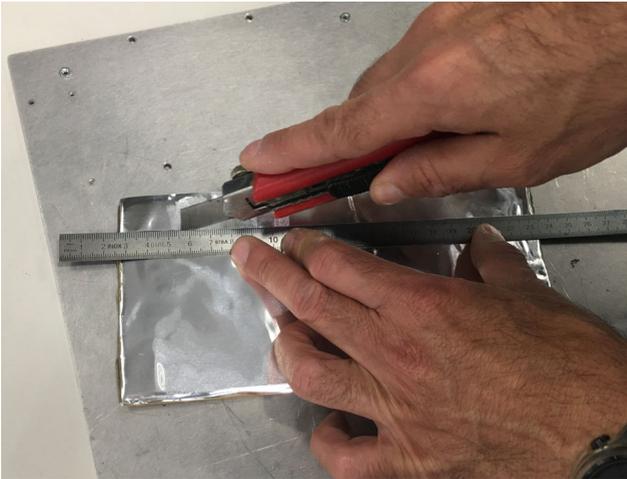


図2.29 センサエリア全体をカバーできる大きさのフィルムABM75を切っているところ。

硬い道具でフィルムカバーの端を、測定対象物の表面にしっかりと押し付けて固定します。

メモ

ケーブル部分に圧力をかけないように十分注意してください。センサのファイバが損傷して読み値を損なう可能性があります。ケーブル部分では、指でこのシール状態を確認してください。



図2.30 カバーホイルABM75の貼り付け



図2.31 完全に覆われた計測点

3 センサ構成

3.1 センサ関連の文書

HBK FiberSensing製の校正済みセンサは、校正証明書を添付してお届けいたします。それ以外のセンサは、センサの構成にかかわる、重要な情報を記載したセンサ特性データシートを添付してお届けいたします。

事前にセンサを組み立てたセンサアレイの形で、センサをお届けする場合は、上記に代えて、校正に関連する情報を記載した要約表をご提供いたします。

この設置マニュアルは、印刷版としてセンサ包装品の中に同梱して、お届けいたします。またHBK社のWebサイト(www.hbm.com)からダウンロードできます。

3.2 計測結果の計算

3.2.1 温度

波長の計測結果を温度に変換する計算は、以下の式で行えます：

図3.1温度センサの温度値は、二次多項式により与えられますが、その係数は、センサの校正により決定します。

$$T = S_2(\lambda - \lambda_0)^2 + S_1(\lambda - \lambda_0) + S_0$$

図3.1 温度の計算式

ここで、

- T は、計測される温度で単位は $^{\circ}\text{C}$
- λ は、温度センサで計測されたブラッグ波長で単位は nm
- λ_0 は、基準温度に対して温度センサが計測するブラッグ波長で単位は nm
- S_0 は、ゼロ次校正係数(基準温度)で単位は $^{\circ}\text{C}$
- S_1 は、1次校正係数で単位は $^{\circ}\text{C}$
- S_2 は、2次校正係数で単位は $^{\circ}\text{C}/\text{nm}^2$

Catman®を使用している場合、 λ_0 , S_0 , S_1 および S_2 を温度センサ設定用のメニューに入力します。

3.2.2 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 (FBG)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3.2

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

図3.2 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物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、基準温度と実際の温度計測値との差で単位は $^\circ\text{C}$ 。

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3.3

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

図3.3 単純ひずみ計算式 (温度補正なし)

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：図3.4に示します。

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

図3.4 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、

- 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、温度センサによって測定された実際の温度で、単位は $^\circ\text{C}$ です
- T_0 は、三種温度に対して補正に使用される温度センサによる実際の計測値、単位は $^\circ\text{C}$

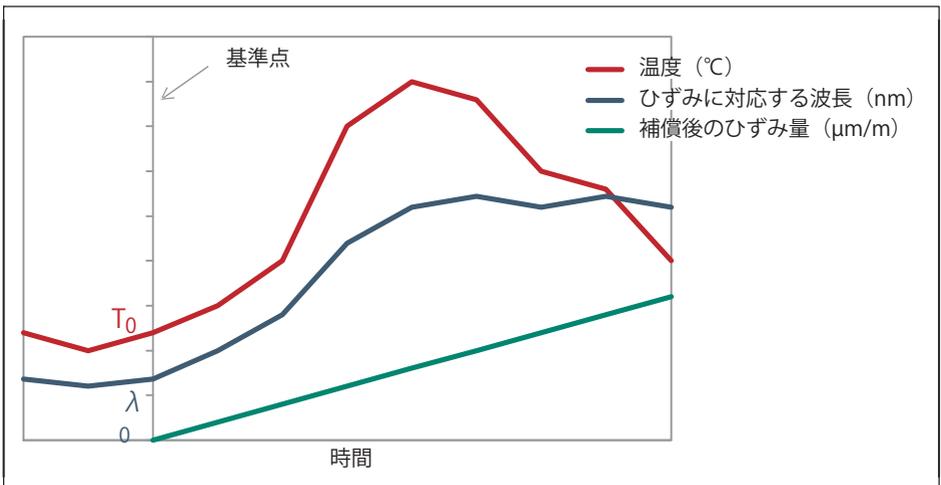


図3.5 補償に温度センサを使用して、温度補償ひずみ量を計測するときの基準点

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3.6に示す式により、ひずみの計算を実行できます。

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

図3.6 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3.7に示す式により、TCFを算出できます。

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

図3.7 温度補償係数を求める計算式

ここで、

- k は、ひずみセンサのゲージ率(kファクタ)で無次元係数
- CTE_{TC} は、温度補償エレメントの材料の熱膨張係数 $(\mu\text{m}/\text{m})/^\circ\text{C}$ です

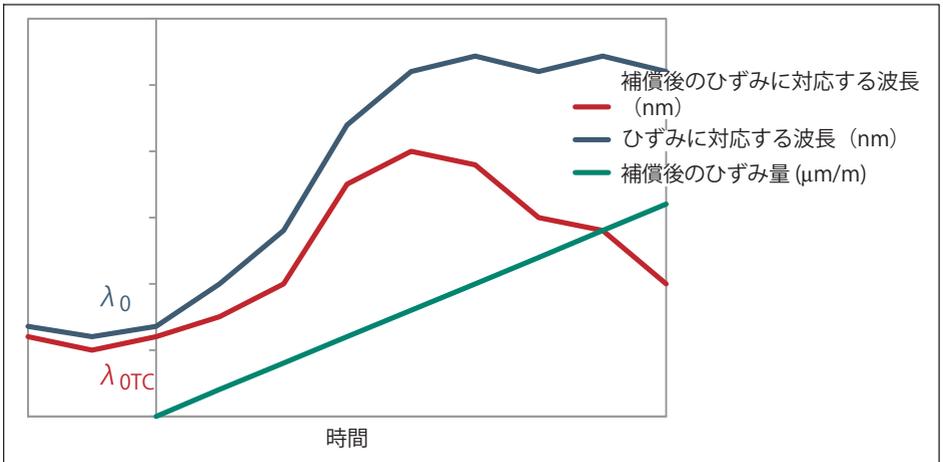


図3.8 補償にFBGベースの補償用センサを使用して、温度補償ひずみ量を計測するときの基準点

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、測定点/位置合わせと中立軸との距離が、設置面と中立軸との距離とは異なるためです。

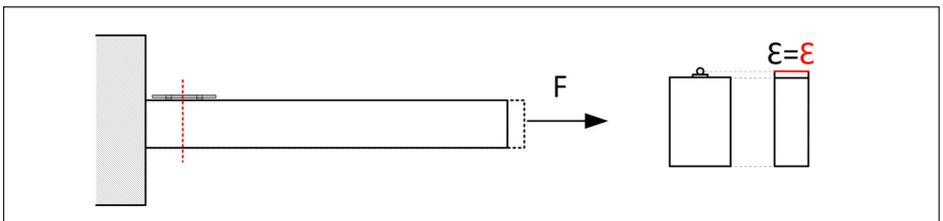


図3.9 純粋な軸方向の変形によるひずみ

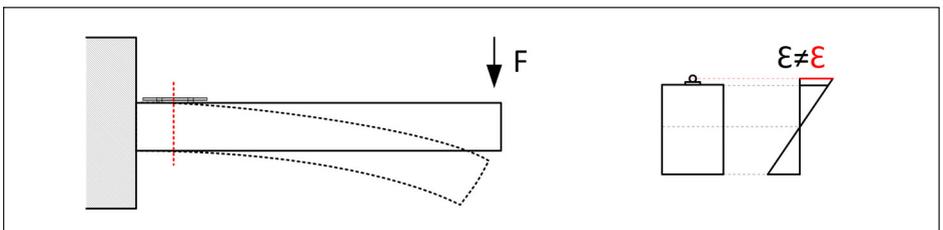


図3.10 純粋な曲げモーメントによるひずみ

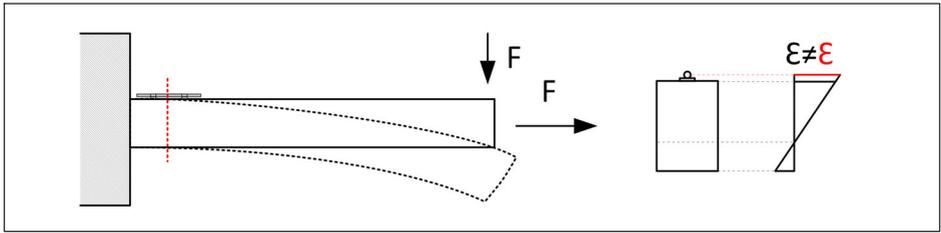


図3.11 軸方向の荷重と曲げモーメントによるひずみ

これは、センサ検出素子と設置表面間の距離が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。FS62PSSパッチひずみセンサおよびFS62PSRパッチひずみロゼットのこの距離は0.25mm (h_2 、図3.11) です。

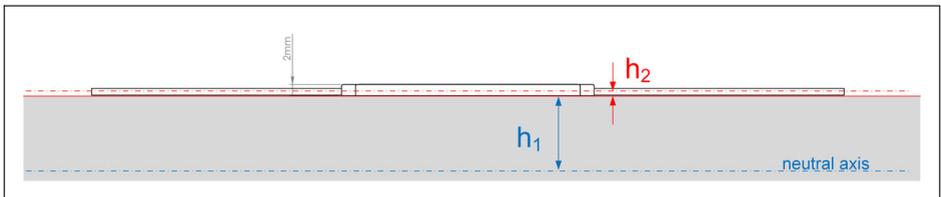


図3.12 FS62PSSにおける、FBGから実装表面までの距離

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3.13 ひずみ計算曲げ効果補正

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(FS62WSSとFS62WSRの場合は0.225 mm)

主応力を測定

溶接型ひずみローゼットひずみゲージFS62WSRを使用した主応力計算は、次の式に従って計算できます：

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$

ここで：

- $\sigma_{1/2}$ は主応力（単位MPa）
- E はヤング率（単位MPa）
- ν はポアソン比（無次元）
- $\varepsilon_{a/b/c}$ は、3方向のひずみをローゼットで測定した値（単位 $\mu\text{m}/\text{m}$ ）

主方向は、上記の方程式を使用して計算された主垂直応力 σ_1 and σ_2 が発生する方向です。主応力の法線方向は、ローゼットの測定方向を参照する角度 φ によって定義されます。これは、ローゼットで測定されたひずみ ε_a , ε_b and ε_c からの形状関係を使用して決定できます。

以下の処理の目的は、技術者に便利で信頼できる実用的な方法を提供することです。この処理の基礎となるモールの応力円の理論的側面は、一般的な文献に記載されています。

まず、補助角 ψ のタンジェントを計算します：

$$\tan \psi = \frac{\sqrt{3} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}$$

分子と分母の信号を考慮して、角度 φ は次のスキームを使用して決定する必要があります。

| | | 分子 $\sqrt{3} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)$ | |
|--|-------|---|--|
| | | ネガティブ | ポジティブ |
| 分母 (Denominator) $2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c$ | ポジティブ | $\varphi = \frac{1}{2} \cdot (180^\circ - \psi)$ | $\varphi = \frac{1}{2} \cdot (0^\circ + \psi)$ |
| | ネガティブ | $\varphi = \frac{1}{2} \cdot (180^\circ + \psi)$ | $\varphi = \frac{1}{2} \cdot (360^\circ - \psi)$ |

このようにして求められる角度 φ は、基準測定位置aの軸から数学的に正の方向（反時計回り）に適用する必要があります。測定方向「a」の軸は、角度 φ の1つのアームを形成します。もう一方のアームは、第1の主方向を表す。これは主垂直応力 σ_1 の方向（主ひずみ方向 ε_1 ）です。角度のポイントは、測定方向に垂直な軸の交点にあります。第2の主方向（主垂直応力 σ_2 の方向）の角度は $\varphi + 90^\circ$ となります。

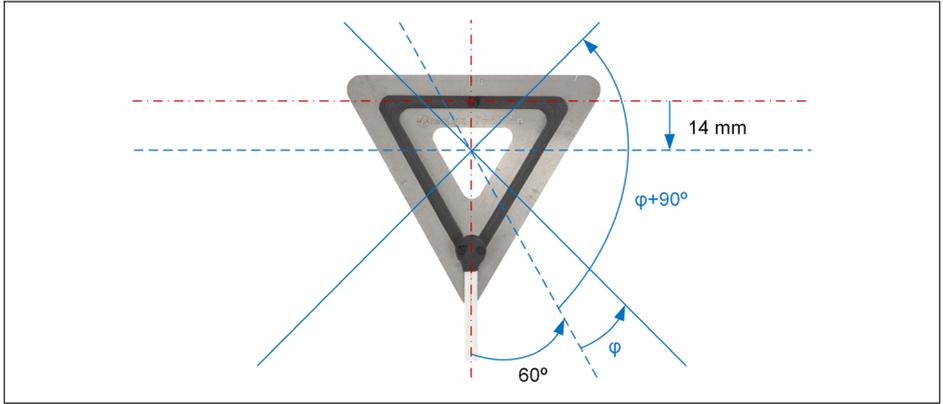


図3.14 主要ひずみの方向

