

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

航空機燃料タンク用光ファイバ温度計測 システムの耐環境試験

西山 道子, 井川 寛隆, 峯岸 正勝,
少路 宏和, 清水 隆之

2014年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

航空機燃料タンク用光ファイバ温度計測システムの耐環境試験^{*1}

Enviromentally-resistant tests of fiber optic temperature sensing system for fuel tanks

西山道子^{*2}
Michiko NISHIYAMA

井川寛隆^{*2}
Hirotaka IGAWA

峯岸正勝^{*2}
Masakatsu MINEGISHI

少路宏和^{*2}
Hirokazu SHOJI

清水隆之^{*3}
Takayuki SHIMIZU

Key Words: fiber optic temperature sensor, durability, WLPI, FBG, BOF

Abstract: 本報告では、航空機の燃料タンク内に取り付け可能な小型かつ耐環境性のあるセンサの実用化に向けて、光ファイバ温度計測システムの信頼性を検証するため、リスク評価試験を実施した結果と考察を述べる。光ファイバ温度センサは、OpSens社のOTP-A、fiber Bragg grating(FBG)、BOFセンサを採用し、振動衝撃耐久試験、部分構造試験、温度・高湿度耐環境試験、燃料浸漬長期試験を実施した。

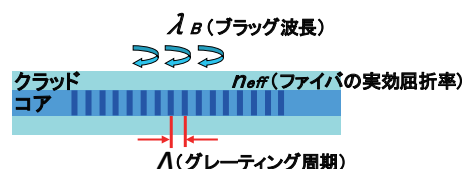
1. はじめに

燃料タンク内の温度を計測するためには、厳しい防爆要求を満足するため、メタルワイヤや電気を使用しない光ファイバセンサを適用するのが最適である。このために、航空機の燃料タンク内に取り付け可能な小型かつ耐環境性のあるセンサの実用化に向けて、光ファイバ温度計測システムの信頼性を検証する試験を実施した。

2. 光ファイバ温度計測システムの概要

2.1 OTP-A センサ OTP-A センサは、OpSens社で開発された白色偏光干渉技術 (White Light Polarization Interferometry: WLPI) を利用した光ファイバ温度センサである⁴⁾。センサ部に、温度によって複屈折が増幅される単結晶を用い、インタロゲータ部には低コヒーレンス干渉計を利用している。そのため、熱変形の影響を受けにくくなり、光ファイバセンサが本来有している耐環境性、防爆性といった特徴に加え、再現性、信頼性の高いセンサである。

2.2 Fiber Bragg grating(FBG) センサ 第1図に、FBG センサの構造を示す。光ファイバ線路のコア部に、伝搬光波長程度の周期の屈折率変調を持たせることで、ひずみ、温度に対して鋭敏に Bragg 中心反射波長がシフトし、波長シフト量からその物理量を検出できる。光ファイバセンサの中で、現在最も広く研究開発が行われている²⁾。JAXA では、ロングゲージ FBG と光反射周波数領域分布計測 (Optical Frequency Domain Reflectometry: OFDR) と組み合わせることで、1mm 以下の高分解能でのひずみ、



第1図: FBG センサ

温度分布を計測できる技術の提案を行っている³⁾。温度とひずみの両方に感度を持つため、信号の分離が求められるが、JAXA では複屈折分布ファイバを利用することで1本のファイバ伝送路でのひずみ、温度の分離に成功している⁴⁾。

2.3 BOF センサ 第2図に、BOF センサの構造を示す。光ファイバ終端に、屈折率の異なる誘電体薄膜を交互に成膜することで光周波数フィルタを作り、温度、圧力によってその積層膜の光学厚みが増減し、フィルタ周波数が変化する。その周波数変化から物理量を検出する⁵⁾。株式会社渡辺製作所において開発されている技術で、BOF センサと、擬似ランダム光連続パルスを用いたインタロゲータ光とした、光ファイバ時分割多重2波長計測方式 (Dual-Wavelength Push-Pull Reflectometry: DWPR) を組み合わせることで、1秒以下のリアルタイムで、分布計測を実現する⁶⁾。

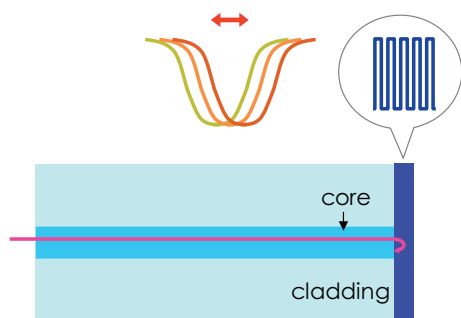
3. 振動・衝撃耐久試験

3.1 試験目的 光ファイバ温度計測システムのセンサ及びコネクタ部を、RTCA-DO-160F で規定されている振動環境 (標準ランダム振動/ロバスト振動) 及び衝撃環境 (運用衝撃/非常着陸時衝撃) 環境下での計測を行い、航空機搭載時の計測耐久性試験を評価する。

^{*1} 平成 25 年 12 月 12 日受付

^{*2} 航空本部 構造技術研究グループ

^{*3} 三菱重工業株式会社 航空宇宙事業本部



第2図: BOF センサ

第1表: 試験供試体 OTP-A センサ試験

| 部品名称 | 型式, 仕様等 | 単体 | 個数 |
|---------|---------------------|----|----|
| 温度センサ | OTP-A(5m)(端部 ST) | 1 | 2 |
| アダプタ | ST アダプタ | 1 | 2 |
| 光ケーブル | 両端部 ST | 1 | 2 |
| フィードスルー | OFT-N38 | 1 | 2 |
| 多芯コネクタ | MIL38999#22D(両端 ST) | 1 | 1 |

第2表: 試験供試体 BOF センサ試験

| 部品名称 | 型式 | 単体 | 個数 |
|-------|------------------|----|----|
| 温度センサ | BOF ケーブル | 1 | 2 |
| アダプタ | SC アダプタ | 1 | 2 |
| 光ケーブル | センサ側 SC, 計測器側 FC | 1 | 2 |

3.2 試験供試体 OTP-A, FBG, 及びBOF のセンサ及びコネクタを試験供試体として使用した。供試体仕様及び評価対象部位の第1表, 第2表, 第3表, 第3図に示す。

3.3 試験器材 試験には第4表に示す試験器材を使用した。

3.4 試験条件及び評価項目 本試験は, RTCA-DO-160F で規定されている振動環境及び衝撃環境を試験条件とし, 光ファイバ温度計測センサ, コネクタ, フィードスルーに付与し, 光ファイバ温度計測システムの以下の項目を評価する。

1. 光ファイバ温度計測システムの計測可否 (計測精度)。
2. 光ファイバセンサ, コネクタ及びフィードスルーの振動・衝撃環境における損傷, 緩みの発生有無。

3.4.1 振動環境試験条件 振動環境試験として, 標準ランダム試験とロバスト・ランダム試験を行う。また, 取り付け部や出力の変化を確認するために, ランダム振動試験の前後にスイープ試験を実施する。試験条件を第5表に示す。

第3表: 試験供試体 FBG センサ試験

| 部品名称 | 型式 | 単体 | 個数 |
|-------|----------|----|----|
| 温度センサ | FBG ケーブル | 1 | 2 |
| アダプタ | FC アダプタ | 2 | 4 |
| 光ケーブル | 両端部 FC | 2 | 4 |

第4表: 試験機材一覧

| 部品名称 | 仕様概要 | 備考 |
|-----------------------------|---|---|
| 全自動振動試験装置 | 製造会社: エミック 型式: F-600BM/A | |
| 光ファイバ温度計測システム (シグナルコンディショナ) | OPSens 社 FieldSens Watanabe Co. Ltd. DWPR システム レーザック OFDR システム 佐藤計量器製作所 | OTP-A センサ計測装置 BOF センサ計測装置 FBG センサ計測装置 |
| 熱電対温度計測 | SK-L200TII SK-LTII-5 | (雰囲気温度) |

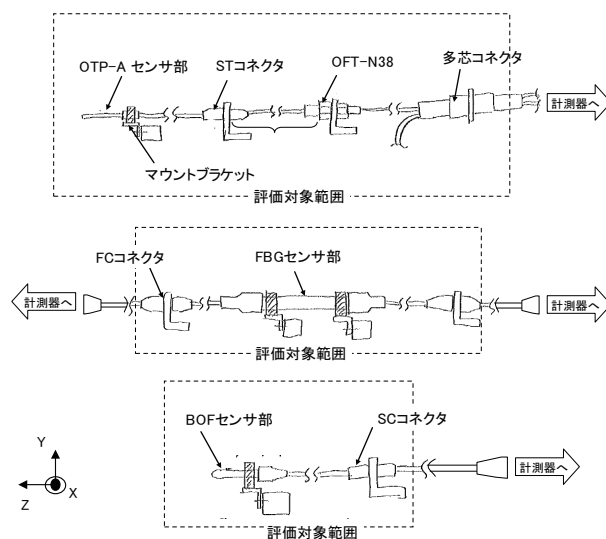
第5表: 振動環境試験条件

| | スイープ試験 | 標準ランダム振動試験 | ロバストランダム振動試験 |
|-------|--------------|------------|--------------|
| 周波数範囲 | 10~2,000Hz | 10~2,000Hz | 10~2,000Hz |
| 加振時間 | 1.0 オクターブ /分 | 10 分 | 180 分 |
| 振動強度 | 0.5g-PK | ランダムスペクトル | ランダムスペクトル |
| 加振方向 | X,Y,Z 方向 | X,Y,Z 方向 | X,Y,Z 方向 |

3.4.2 衝撃環境試験条件 衝撃環境試験は運用衝撃試験と非常着陸衝撃試験を行う試験条件を第6表に示す。

3.5 試験手順と結果 OTP-A センサ, FBG センサ, BOF 別々に, X 軸振動試験, X 軸衝撃試験, Y 軸振動試験, Y 軸衝撃試験, Z 軸振動試験, Z 軸衝撃試験の順で試験を実施する。それぞれの試験手順を以下に示す。各試験で取得するデータを次に示す。

1. 光ファイバセンサをセットアップする。試験セット



第3図: 試験供試体及び評価対象範囲

第6表: 衝撃環境試験条件

| | 運用衝撃試験 (Standard operation) | 非常着陸時衝撃試験 (Crash safety) |
|----------|--------------------------------|-----------------------------|
| 最大加速度 | 6G | 20G |
| Duration | 11ms | 11ms |
| 衝撃付与方向 | X,Y,Z 方向 (各+/-方向) | X,Y,Z 方向 (各+/-方向) |

アップ概要を第4図に示す。

2. スイープ振動試験 (ランダム振動試験前) 周波数 10Hz から 2000Hz まで, 0.5g-PK (1.0 オクターブ/分以下のスイープ・レート) の正弦波加振負荷し, 加振器加速度, 供試体加速度および光ファイバ温度, 参照温度 (熱電対) を計測する。

3. 標準ランダム試験標準ランダム振動試験スペクトルを, 10 分以上間負荷し, 供試体加速度, 光ファイバ温度, 参照温度 (熱電対) を計測する。

4. ロバスト・ランダム試験ロバストランダム振動試験スペクトルを, 180 分間負荷し, 供試体加速度, 光ファイバ温度, 参照温度 (熱電対) を計測する。

5. スイープ振動試験 (ランダム振動試験後) 周波数 10Hz から 2000Hz まで, 0.5g-PK (1.0 オクターブ/分以下のスイープ・レート) の正弦波加振負荷し, 加振器加速度, 供試体加速度および光ファイバ温度, 参照温度 (熱電対) を計測する。

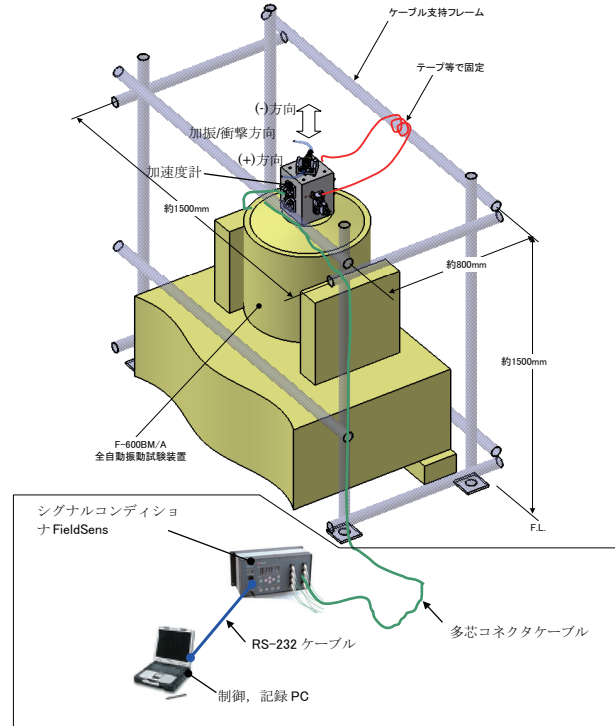
6. 運用衝撃試験運用衝撃試験プロファイル (Standard operational) に従い $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ 方向それぞれ衝撃試験を行う。

7. 非常着陸衝撃試験非常着陸時衝撃試験プロファイル (Crash safety) に従い $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ 方向それぞれ衝撃試験を行う。

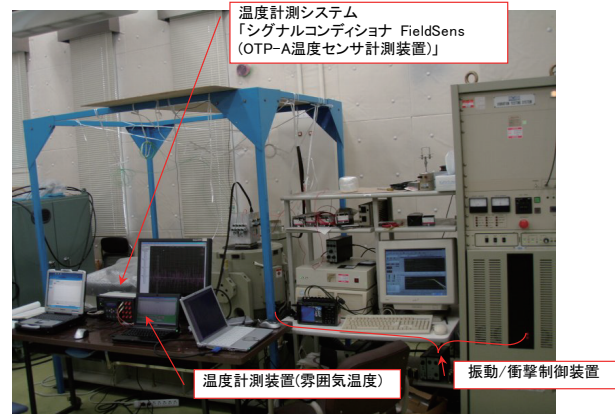
取得データ (計測項目)

- 加速度データ (振動試験装置の加速度計データ)
加速度の時系列を 200 μsec 以上のレートで取得し, 試験開始後/試験終了前, 及び 30 分間隔でスペクトルデータを取得する。
- 加速度データ (加振治具上の加速度計データ)
加速度の時系列を 200 μsec 以上のレートで取得し, 試験開始後/試験終了前, 及び 30 分間隔でスペクトルデータを取得する。
- 温度データ (光ファイバ計測器シグナルコンディショナ)
加振時間の前後 5 秒間 (加振無し) を含み, 1 秒間に 1 回以上 (BOF センサは 3 秒に 1 回以上) のデータを取得する。
- 温度データ (参照温度)
加振時間, 衝撃付与時間の前後 5 秒を含み, 2 秒間に 1 回以上のデータを取得する。

ここに代表的な計測結果として, 標準ランダム振動試験の OTP-A センサ, FBG センサ, BOF センサの結果をそれぞれ第 7, 9, 11 図に示す。



第4図: 試験セットアップ概要図

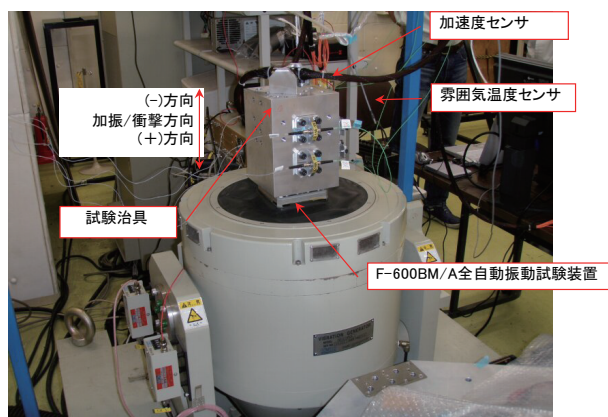


第5図: 振動・衝撃環境試験セットアップ全体

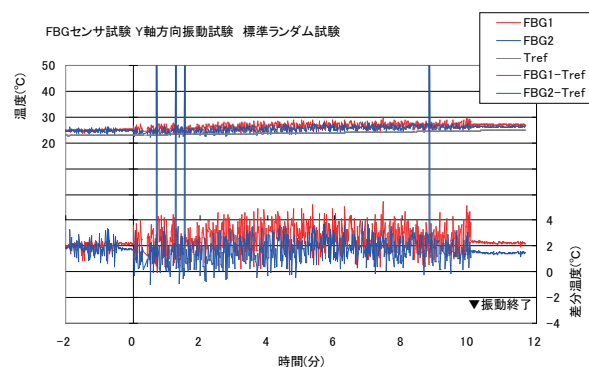
3.6 試験結果まとめ

3.6.1 OTP-A センサ試験 振動環境試験及び衝撃環境試験において, OTP-A 温度センサ, コネクタ, フィードスルー及びケーブル支持部にゆるみ, ガタ, などの異常は発生せず, 計測することができた。また, 計測値は試験室の空調作動時の過渡応答を除き, 参照温度 (熱電対計測) との差が, 計測精度要求 ($\pm 1^\circ\text{C}$ 以下) を満たしており, 振動及び衝撃環境に対する耐久性があるといえる。

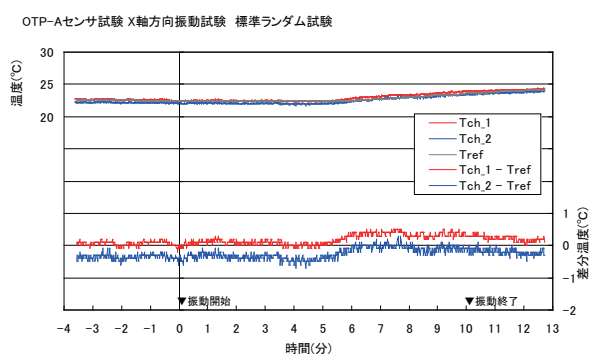
3.6.2 FBG センサ試験 振動環境及び衝撃環境において, FBG 温度センサ, コネクタ, フィードスルー及びケーブル支持部にゆるみ, ガタ, などの異常は発生せず, 計測することができた。しかしながら, 両端支持された温度繊維内部の FBG が環境の影響を受け, 振動・衝撃環境下で



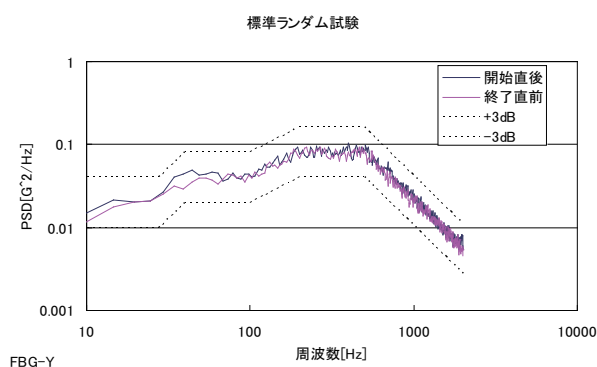
第6図: 振動・衝撃環境試験セットアップ (加速器近傍)



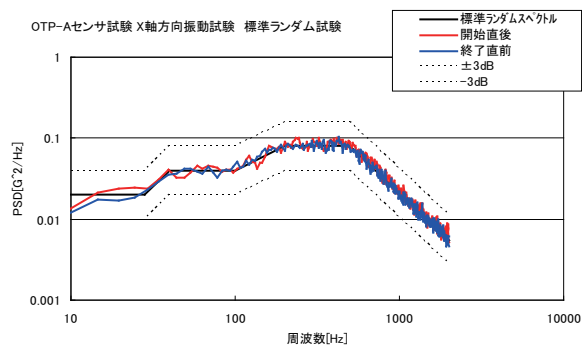
第9図: 標準ランダム振動試験 (FBG センサ, Y 軸方向) 温度データ



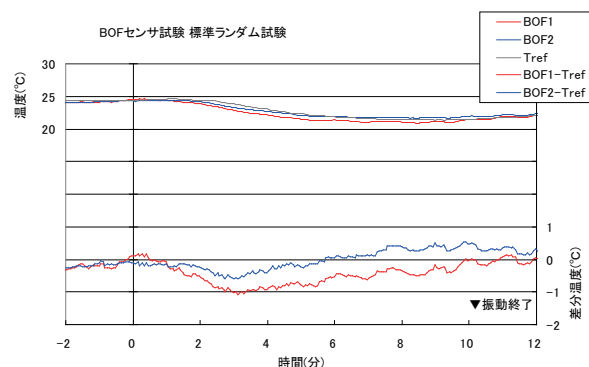
第7図: 標準ランダム振動試験 (OTP-A センサ, X 軸方向) 温度データ



第10図: 標準ランダム振動試験 (FBG センサ, Y 軸方向) 加振スペクトル



第8図: 標準ランダム振動試験 (OTP-A センサ, X 軸方向) 加振スペクトル



第11図: 標準ランダム振動試験 (BOF センサ, Y 軸方向) 温度データ

は温度出力が大きく (50°C 以上) 変動或いは 0.8°C 程度のドリフトが発生した。振動・衝撃環境下で使用するには FBG 温度センサの設計を見直す必要がある。

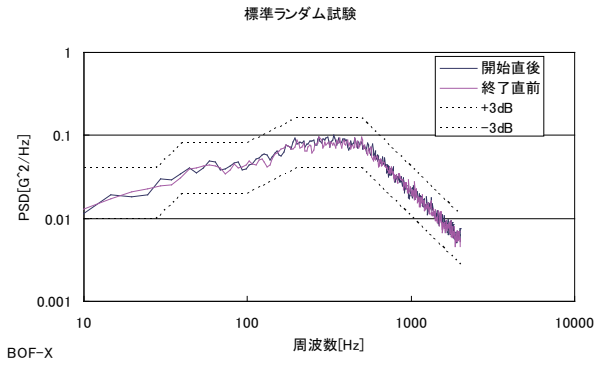
3.6.3 BOF センサ試験 振動環境及び衝撃環境において、BOF 温度センサ、コネクタ及びケーブル支持部にゆりみ、ガタ、などの異常は発生せず、計測することができた。しかしながら、光ファイバケーブルのルートの変更や振動などにより BOF センサの温度出力が精度要求 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以

下) を超えるケースが見られた。計測較正値確認を適宜行う必要がある。

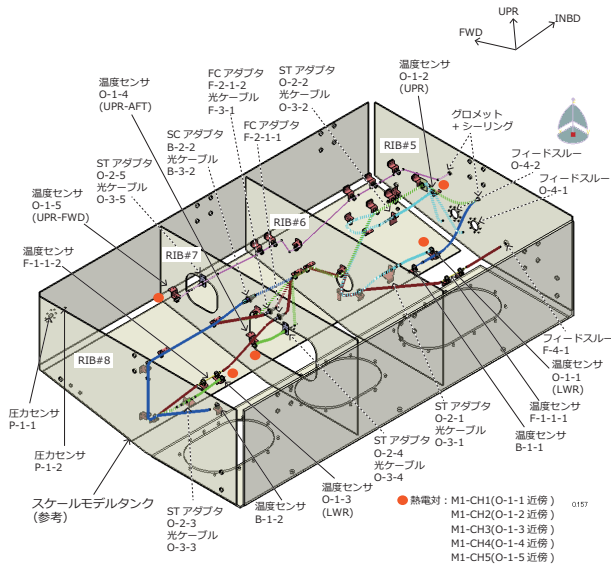
4. 部分構造試験

4.1 目的 OpSens 社製光ファイバ温度計測システム、JAXA 開発中の BOF、FBG 計測システムの実用化に向けて実施した部分構造検証試験の結果をまとめる。

4.2 試験実施場所および試験期間



第12図: 標準ランダム振動試験 (BOF センサ, Y 軸方向) 加振スペクトル



第13図: 供試体概要

4.2.1 試験実施場所 宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センター 飛行場分室

4.2.2 試験時期

- 平成 23 年 2 月 (静的試験, 第 1 回動的試験, 疲労試験)
- 平成 23 年 11 月 (第 2 回動的試験)

4.3 試験供試体及び試験器材

4.3.1 試験供試体 燃料タンクの一部を模擬した部分構造タンクを製作し, タンク内に OTP-A 光ファイバ温度センサを 5 個, BOF 温度センサを 2 個, FBG 温度センサを 2 個, 比較用の熱電対を 5 個, また, OPP-B 圧力センサおよび FBG 圧力センサを各 1 個設置した. 供試体概要を第 7 表及び第 13 図に示す.

※ ID のネーミングルールは以下の通りとする.

- 1 番目 O: OTP-A, B: BOF, F: FBG, P: 圧力センサ
 2 番目 1: センサ, 2: アダプタ, 3: 光ケーブル, 4: フィードスルー
 3 番目 系統
 4 番目 連番 (FBG センサ, アダプタのみ)

第 7 表: 供試体概要

| 部品名称 | 型式, 仕様等 | 個数 | ID |
|----------------|-----------------------------|----|-------------------------|
| OTP-A 温度センサ | OTP-A(L=221mm) (端部 ST) | 3 | O-1-1 O-1-2 O-1-3 |
| | OTP-A(L=258mm) (端部 ST) | 1 | O-1-4 |
| | OTP-A(L=262mm) (端部 ST) | 1 | O-1-5 |
| BOF 温度センサ | BOF(L=1.5m) (端部 SC) | 1 | B-1-1 |
| | BOF(L=1130mm) (端部 SC) | 1 | B-1-2 |
| FBG 温度センサ | FBG(L1=1730, L2=170mm) | 1 | F-1-1-1 |
| | FBG(L1=1111, L2=360mm) | 1 | F-1-1-2 |
| アダプタ | ST アダプタ | 5 | O-2-1 ～ O-2-5 |
| アダプタ | SC アダプタ | 1 | B-2-2 |
| アダプタ | FC アダプタ | 2 | F-2-1-1 , F-2-1-2 |
| 光ケーブル | ST-ST(L=1265mm) | 1 | O-3-1 |
| | ST-ST(L=1007mm) | 1 | O-3-2 |
| | ST-ST(L=10m) | 3 | O-3-3 ～ O-3-5 |
| 光ケーブル | SC-FC(L=10m 以上) | 1 | B-3-2 |
| 光ケーブル | FC-FC(L=10m 以上) | 1 | F-3-1 |
| フィードスルー | OFT-N38 | 2 | O-4-1 , O-4-2 |
| フィードスルー | FC-DRY HP adapter | 1 | F-4-1 |
| 圧力センサ | Kulite 社 ETL-DC-375M-25A | 1 | P-1-1 |
| 光ファイバ 圧力センサ | OpSens 社 OPP-B | 1 | P-1-2 |

第 8 表: 試験器材一覧

| 器材名称 | 仕様概要 | 個数 | 備考 |
|-----------------|----------------------------|----|----------------------|
| シグナル コンディショナ | OpSens 社 FieldSens | 1 | OTP-A, OPP-B 計測用 |
| PC | Panasonic Tough CF-30 | 1 | OTP-A, OPP-B モニタ用 |
| BOF センサ 計測装置 | 株式会社 渡辺製作所 DWPR システム | 1 | |
| FBG センサ 計測装置 | 株式会社 レーザック OFDR システム | 1 | |
| 熱電対 | 林電工社 TC-K-F-0.32-5MP-C1 | 5 | 温度センサ 比較用 |
| 電圧計測用 データロガー | オムロン株式会社 ZR-RX70 | 1 | 熱電対計測装置 |
| ユニバーサル 温度変換器 | 横河電気株式会社 VJU7 | 1 | 熱電対計測装置 |

4.3.2 試験器材 試験器材一覧を第 8 表に示す.

4.4 試験実施要領

4.4.1 試験概要 メイン燃料タンクを模擬した, スケールモデルタンク (以下タンク) を用いて, 模擬燃料を搭載した条件下で揺動試験を行い, 機能及び性能を維持することを確認する.

4.4.2 試験項目及び試験条件 試験項目及び試験条件を、第11表に示す。圧力は大気圧下、揺動時間は各ケースで動的試験は5分間、疲労試験は6時間とした。また、水量設定概要図を第14図に示す。模擬燃料は水道水を使用する。タンクに3ケースの量*1の水道水を注入し、最大揺動角度まで*2 4種類*3の周波数で揺動させ、各周波数でのセンサの挙動を確認する。

※試験ケースネーミングルールは、以下の通りとする。

1番目 試験項目 1: 静的試験, 2: 動的試験, 3: 疲労試験

2番目 揺動方向 1: ピッチ, 2: ロール

3番目 水量 1: LOW, 2: MID, 3: HIGH

4番目 連番

第9表: 試験項目及び試験条件 (疲労試験)

| 揺動方向 | 試験 No. | 水量 | 揺動角度 | 揺動周波数 |
|------|---------|------|------------|---------|
| ピッチ | 3-1-X-1 | HIGH | -5° ~ +25° | 0.132Hz |
| ロール | 3-2-X-1 | HIGH | -5° ~ | 0.033Hz |

4.4.3 計測項目 本試験では、以下のデータを取得した。また、配線計測概要図を、第15図に示す。

1. アクチュエータ変位データ
2. 各温度センサ (供試体) 計測データ
3. 熱電対温度計測データ (供試体周辺温度)
4. 圧力計測データ
5. ビデオデータ
6. センサ及びケーブルのマウント部のずれ、外れ

4.5 第1回 動的ピッチ揺動試験

試験ケース No.2-1-1-1~2-1-3-4

*1 水量の設定は下記の通りとする。水量に対する公差は± 5mm にする。

LOW LWR 側温度センサ ID:F-1-1-2 が水面下 5~10mm になる水量

MID カットアウト上面より 92mm

HIGH UPR 側温度センサ ID:O-1-4 が水面上 5~10mm になる水量

*2 最大揺動角度の設定は下記による。角度に対する公差は± 1° とする。

1. ピッチダウン 5°, ピッチアップ 25°
2. ロール± 12°

*3 揺動周波数は下記の通りとする。

1. 0.033Hz ± 0.005(最大揺動速度 ピッチ 3.1deg/sec., ロール 2.5deg/sec.)
2. 0.066Hz ± 0.005(最大揺動速度 ピッチ 6.2deg/sec., ロール 5.0deg/sec.)
3. 0.132Hz ± 0.01(最大揺動速度 ピッチ 12.4deg/sec., ロール 10.0deg/sec.)
4. ピッチ揺動試験: 0.3Hz, 揺動角度± 5deg. ロール揺動試験: 0.3Hz, 揺動角度± 6deg.

油圧アクチュエータの能力可能限界

第10表: 試験項目及び試験条件 (第1回 動的試験)

| 揺動方向 | 試験 No. | 水量 | 揺動角度 | 揺動周波数 |
|------|---------|------|--------|---------|
| ピッチ | 2-1-1-1 | LOW | -5° ~ | 0.033Hz |
| | 2-1-1-2 | | +25° | 0.066Hz |
| | 2-1-1-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-1-1-4 | | ± 5° | 0.3Hz |
| | 2-1-2-1 | MID | -5° ~ | 0.033Hz |
| | 2-1-2-2 | | +25° ~ | 0.066Hz |
| | 2-1-2-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-1-2-4 | | ± 5° | 0.3Hz |
| | 2-1-3-1 | HIGH | -5° ~ | 0.033Hz |
| | 2-1-3-2 | | +25° | 0.066Hz |
| | 2-1-3-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-1-3-4 | | ± 5° | 0.3Hz |
| ロール | 2-2-1-1 | LOW | +12° | 0.033Hz |
| | 2-2-1-2 | | | 0.066Hz |
| | 2-2-1-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-2-1-4 | | ± 6° | 0.3Hz |
| | 2-2-2-1 | MID | +12° | 0.033Hz |
| | 2-2-2-2 | | | 0.066Hz |
| | 2-2-2-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-2-2-4 | | ± 6° | 0.3Hz |
| | 2-2-3-1 | HIGH | +12° | 0.033Hz |
| | 2-2-3-2 | | | 0.066Hz |
| | 2-2-3-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-2-3-4 | | ± 6° | 0.3Hz |

第11表: 試験項目及び試験条件 (第2回 動的試験)

| 揺動方向 | 試験 No. | 水量 | 揺動角度 | 揺動周波数 |
|------|---------|------|-------|---------|
| ピッチ | 2-1-3-1 | HIGH | -5° ~ | 0.033Hz |
| | 2-1-3-2 | | +25° | 0.066Hz |
| | 2-1-3-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-1-3-4 | | ± 5° | 0.3Hz |
| ロール | 2-2-2-1 | MID | +12° | 0.033Hz |
| | 2-2-2-2 | | | 0.066Hz |
| | 2-2-2-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-2-2-4 | | ± 6° | 0.3Hz |
| | 2-2-3-1 | HIGH | +12° | 0.033Hz |
| | 2-2-3-2 | | | 0.066Hz |
| | 2-2-3-3 | | | 0.132Hz |
| | 2-2-3-4 | | ± 6° | 0.3Hz |

試験実施要領または方法

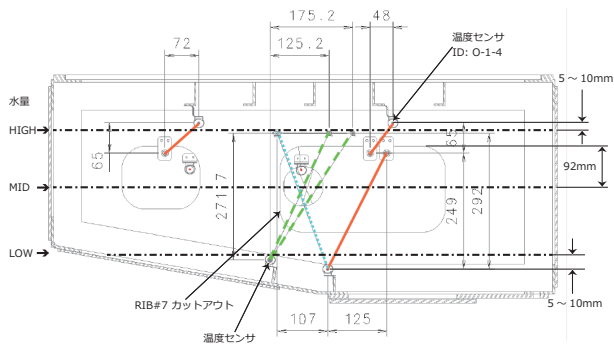
1. 油圧アクチュエータの変位が0 (タンク水平) 状態にする。
2. 温度、圧力計測、ビデオ撮影を開始する。
3. 油圧アクチュエータを用いて揺動を開始する。
4. 既定の揺動周波数に達した後、5分間タンクを揺動させる。
5. 油圧アクチュエータの変位が0で停止していることを確認する。

計測項目及び結果

6. 計測を修了する
 7. 供試体の目視点検により異常がないことを確認する。
- 以下、揺動試験では、同様の試験実施要領または方法で実施した。

計測項目及び結果

- タンク内ビデオ撮影を実施した。



第14図: 水量設定概要図

- 試験状況写真撮影を実施した。
- 代表的に、水量LOWの試験ケース No.2-1-1-1 の温度計測グラフを、OpSens センサについて第16図、BOF センサについて第17図、FBG センサについて第18図に示す。

4.6 疲労揺動試験

試験ケース No.3-2-X-1

計測項目及び結果

- 代表的に、試験ケース No.3-2-X-1 の温度計測グラフを、OpSens センサ第19図、BOF センサについて第20図、FBG センサについて第21図に示す。

4.7 第2回 動的ピッチ揺動試験 (HIGH)

試験ケース No.2-1-3-1 ~ 2-1-3-4

計測項目及び結果

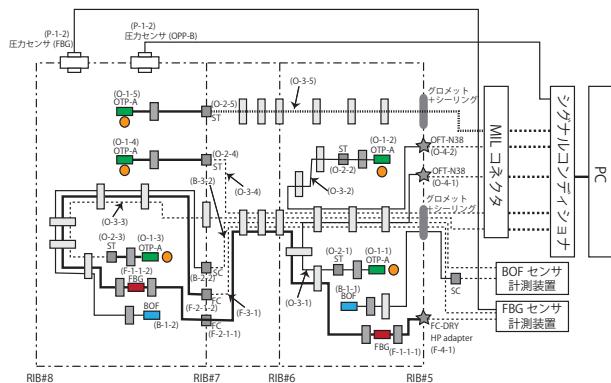
- タンク内ビデオ撮影を実施した。
- 試験状況写真撮影を実施した。
- 代表的に、試験ケース No.2-1-3-1 の温度計測グラフを、OpSens センサ、熱電対計測について第22図、BOF センサについて第23図、FBG センサについて第24図に、圧力計測グラフを、OpSens センサについて第25図、FBG センサについて第26図に示す。

4.8 第2回 動的ロール揺動試験 (MID)

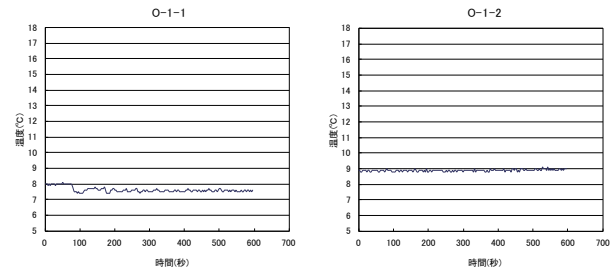
試験ケース No.2-2-2-1 ~ 2-2-2-4

計測項目及び結果

- タンク内ビデオ撮影を実施した。

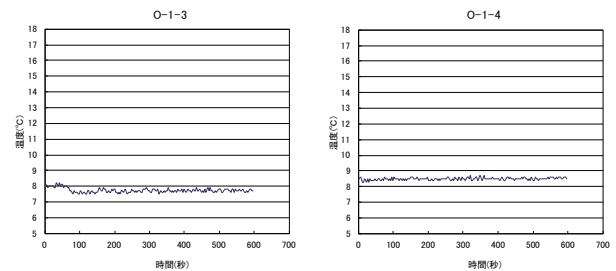


第15図: 配線計測概要図



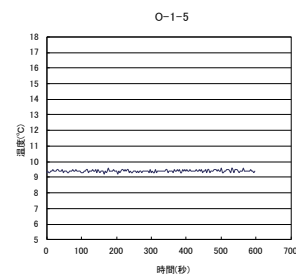
(a)

(b)



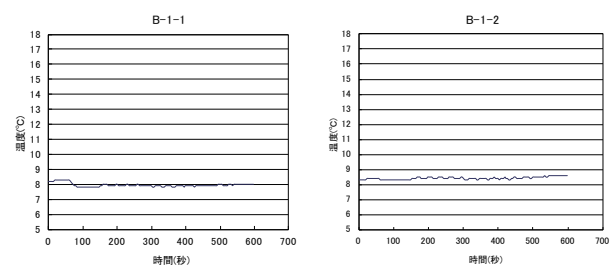
(c)

(d)



(e)

第16図: 試験ケース No.2-1-1-1 OpSens 光ファイバセンサ温度計測結果



(a)

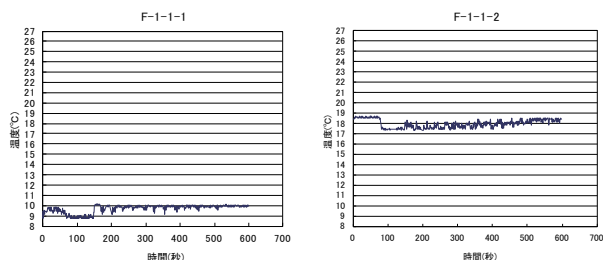
(b)

第17図: 試験ケース No.2-1-1-1 BOF 温度計測結果

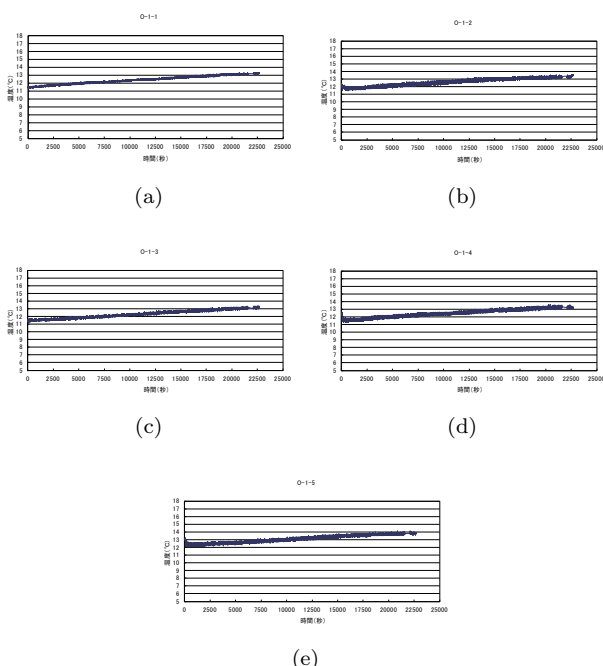
- 試験状況写真撮影を実施した。
- 試験ケース No.2-2-2-1 の温度計測グラフを、OpSens センサ、熱電対計測について第27図、BOF センサについて第28図、FBG センサについて第29図に、圧力計測グラフを、OpSens センサについて第30図、FBG センサについて第31図に示す。

4.9 第2回 動的ロール揺動試験 (HIGH)

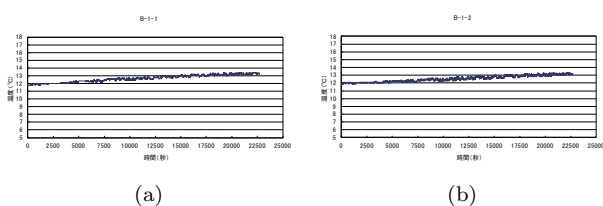
試験ケース No.2-2-3-1 ~ 2-2-3-4



(a) (b)
第18図: 試験ケース No.2-1-1-1 FBG 温度計測結果



第19図: 試験ケース No.3-2-X-1 OpSens 光ファイバセンサ温度計測結果

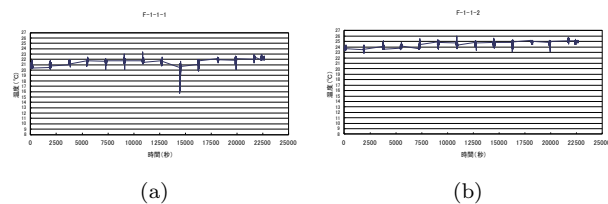


(a) (b)
第20図: 試験ケース No.3-2-X-1 BOF 温度計測結果

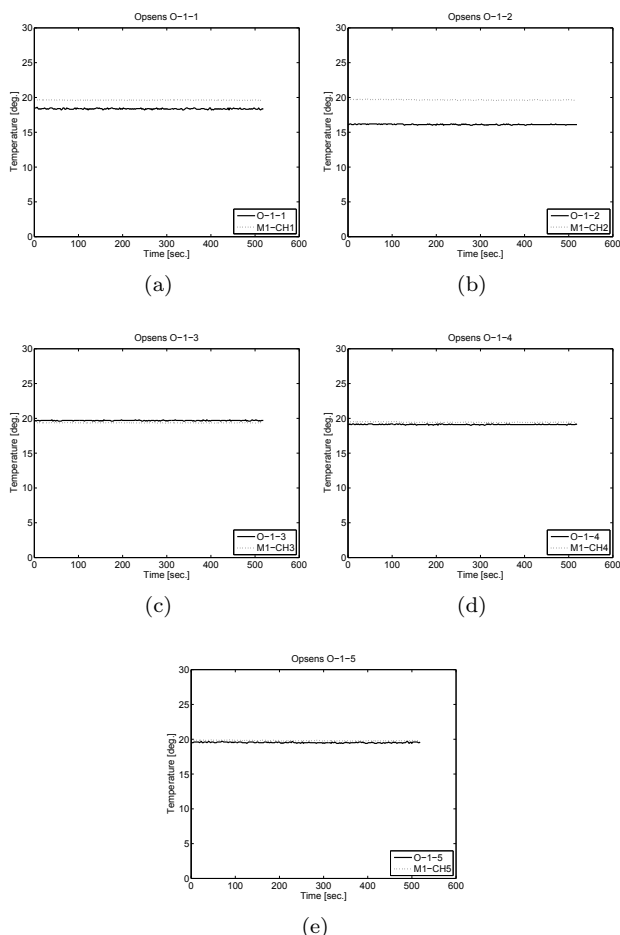
計測項目及び結果

- タンク内ビデオ撮影を実施した。
- 試験状況写真撮影を実施した。
- 試験ケース No.2-2-3-1 の温度計測グラフを、OpSens センサ、熱電対計測について第32図、BOF センサについて第33図、FBG センサについて第34図に、圧力計測グラフを、OpSens センサについて第35図、FBG センサについて第36図に示す。

4.10 試験結果まとめ



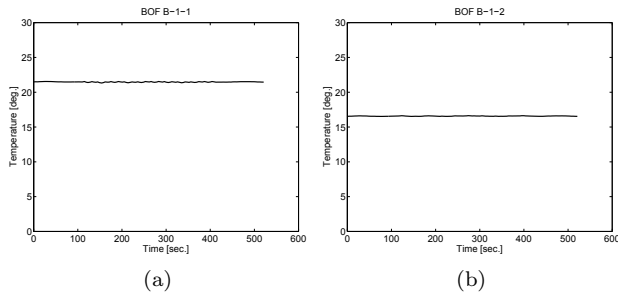
(a) (b)
第21図: 試験ケース No.3-2-X-1 FBG 温度計測結果



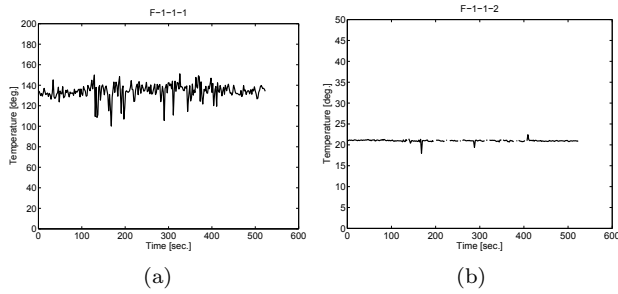
(e)
第22図: 試験ケース No.2-1-3-1 OpSens 光ファイバセンサ温度計測結果，熱電対計測結果と比較

4.10.1 第1回動的試験 水量 MID, HIGH の各状態において、部分構造タンクを周波数 0.033Hz, 0.066Hz, 0.132Hz, 0.3Hz でピッチ方向（水量 HIGH のみ）、及びロール方向に5分間揺動させた。揺動付与中及び付与後、OTP-A 光ファイバセンサの温度データ計測は正常であり、またセンサ、配線取り付けに損傷や外れ等の問題が無いことを確認した。

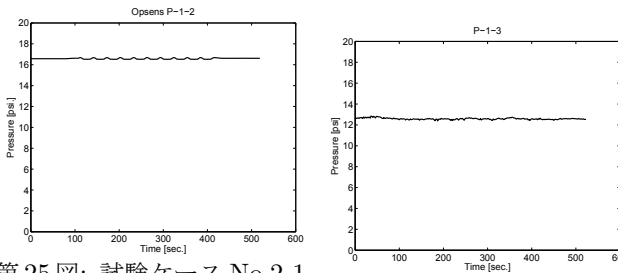
4.10.2 疲労試験 上記動的試験のビデオ画像から、ピッチ方向では水量 High, 揺動周波数 0.132Hz が、ロール方向では水量 High, 揺動周波数 0.033Hz が、センサ、及び配線に最も厳しい負荷がかかると判断し、これらの条件において、各々6時間加振を実施した。振動付与中及び付与後、OTP-A センサの温度データ計測は正常であり、またセン



第23図: 試験ケース No.2-1-3-1 BOF 温度計測結果



第24図: 試験ケース No.2-1-3-1 FBG 温度計測結果

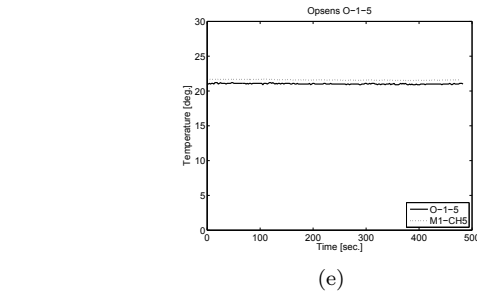
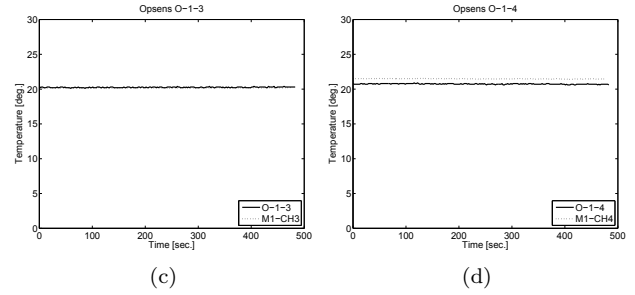
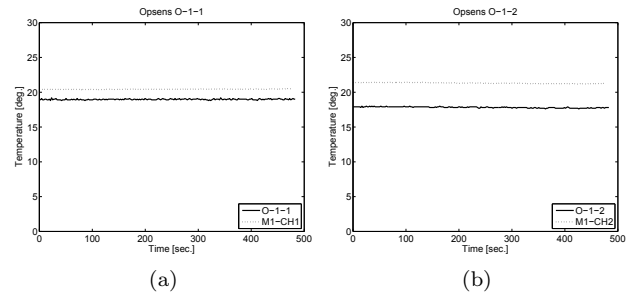


第25図: 試験ケース No.2-1-3-1 OpSens 圧力センサ計測結果

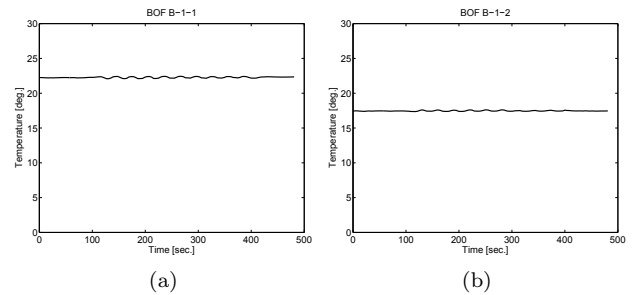
第26図: 試験ケース No.2-1-3-1 FBG 圧力センサ計測結果

サ、配線取付に損傷や外れ等の問題がないことを確認した。

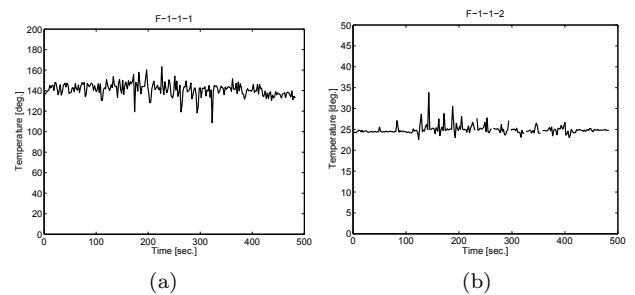
4.10.3 第2回 動的試験 水量 MID, HIGH の各状態において、部分構造タンクを周波数 0.033Hz, 0.066Hz, 0.132Hz, 0.3Hz でピッチ方向（水量 HIGH のみ）、及びロール方向に 5 分間揺動させた。揺動付与中及び付与後、OTP-A 光ファイバセンサの温度データ計測は正常であり、またセンサ、配線取り付けに損傷や外れ等の問題が無いことを確認した。5 個のセンサのうち 2 個は、比較用熱電対計測に比べて、1℃ないし 3～4℃程度低くなっていた。BOF 光ファイバ温度センサ計測も正常であった。FBG 光ファイバ温度計測は、2 個中 1 個は計測値が大きく外れていた。原因としては、光ファイバセンサ部がセンサ筐体の中で歪フリー状態になっていないことが考えられる。OPP-B 圧力センサは、データ計測は概ね正常であり、センサ、配線に損傷などの異常は見られなかった。FBG 圧力センサは、大気圧レベルに対して低い値を示していた。これは、タンクからセンサ部への圧力配管が長かったため、光ファイバ圧力センサ部に十分に加圧されていなかったことが原因とし



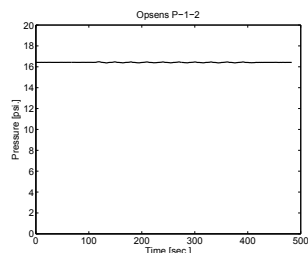
第27図: 試験ケース No.2-2-2-1 OpSens 光ファイバセンサ温度計測結果、熱電対計測結果と比較



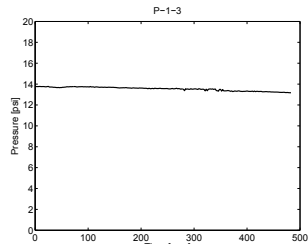
第28図: 試験ケース No.2-2-2-1 BOF 温度計測結果



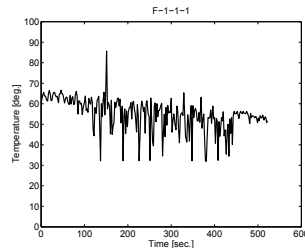
第29図: 試験ケース No.2-2-2-1 FBG 温度計測結果



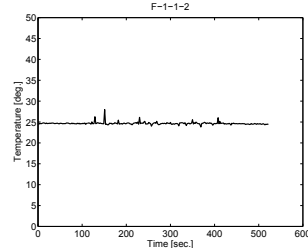
第30図: 試験ケース No.2-2-2-1 OpSens 圧力センサ計測結果



第31図: 試験ケース No.2-2-2-1 FBG 圧力センサ計測結果

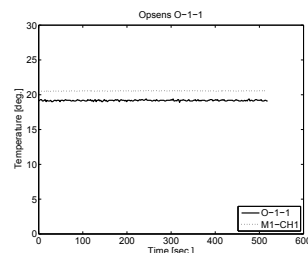


(a)

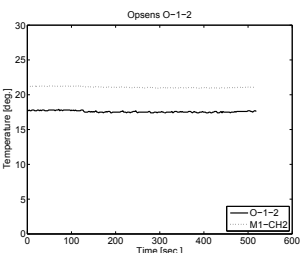


(b)

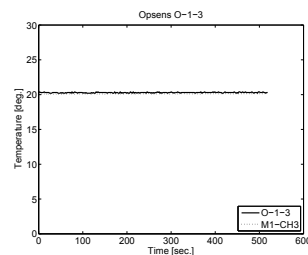
第34図: 試験ケース No.2-2-3-1 FBG 温度計測結果



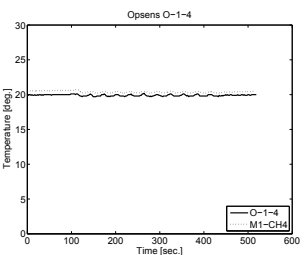
(a)



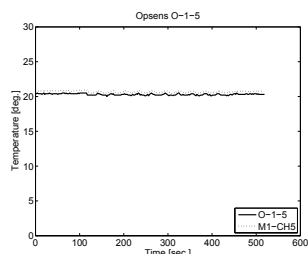
(b)



(c)

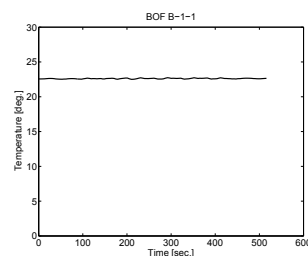


(d)

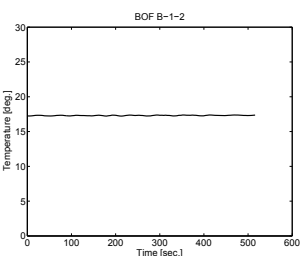


(e)

第32図: 試験ケース No.2-2-3-1 OpSens 光ファイバセンサ温度計測結果, 熱電対計測結果と比較



(a)



(b)

第33図: 試験ケース No.2-2-3-1 BOF 温度計測結果

第12表: 試験供試体 (1)OTP-A センサ試験

| 品名 | 型式 メーカ | 数量 | 識別番号 |
|------------------|------------------------------|----|--------|
| OTP-A 温度センサ | OTP-A(L=200) OpSens | 1 | OTP-A1 |
| OTP-A 温度センサ | OTP-A(L=385) OpSens | 1 | OTP-A2 |
| フィードスルー | OFT-N38 OpSens | 1 | - |
| ST アダプタ | 504021-1 Tyco Electronics | 11 | - |
| ST アダプタ 付ケーブル | OpSens | 11 | - |
| シグナル コンディショナ | FieldSens OpSens | 1 | - |
| 多芯コネクタ | MIL38999#22D | 1 | - |

て考えられる。

5. 光ファイバ温度計測システムセンサの艤装検証試験

5.1 試験目的 燃料タンク内の光配線の艤装性を向上させるためには、ファイバ長を約3ベイ間隔で切断し、STアダプタ (P/N: 504021-1) で接続することで、改善を図ることができると考えられる。しかしながら、接続部が増えることで光レベルの損失が懸念されることから、STアダプタを多数接続した時の光ファイバ温度センサデータを取得し、計測への影響について確認を実施した。

5.2 艤装試験概要

5.2.1 試験供試体 試験供試体一覧を、第12表に示す。

5.2.2 試験器材 試験器材一覧を、第13表に示す。

第13表: 試験機材一覧

| 品名 | 型式(メーカー), 図番 | 数量 |
|-------------------|-----------------------------|----|
| OTP-A センサ計測 PC | ToughBook CF-30 (Panasonic) | 1 |
| 測温抵抗 (RTD) 計測用 PC | 富士通 | 1 |
| 環境槽 | | 1 |
| 測温抵抗体データ収集装置 | Agilent 34970A | 1 |
| 測温抵抗体 | RTR-100 | 2 |
| OTP-A 温度センサ試験治具一式 | NA222853-101 | 1 |

5.2.3 試験実施要領 第37表に示す試験条件で試験セットアップを行い。以下の項目の計測を行った。

- 波長 (光ファイバ温度センサ)
- 温度 (光ファイバ温度センサ)
- 光信号健全性診断パラメータ (光ファイバ温度センサ)
- 温度 (測温抵抗体) - 光ファイバ温度センサの波長/温度計測時に同時計測

試験セットアップの概要図を第37図に示す。健全性診断パラメータを第15表に示す。

また、各光信号健全性診断パラメータの意味は次の通りとなる。

- Lg (Light level)

シグナルコンディショナ内の CCD 光検出器のセンサから戻ってきた光信号強度を電圧変換したもので、通常は 2.2~2.5V に調整されている。測定器の回路動作の確認に使用される。

- Ga (Amplifier gain)

ゲインレベルのことで、測定器の電圧増幅回路の確認に使用される。

- Lm (Lamp driving level)

ランプ光源の駆動レベルを確認しているもので、通常はランプの最大光強度出力の 40% 付近に設定されている。光ファイバが曲がったりしてセンサからの光信号が低下すると、光信号レベルを上げるためにランプ光源の光強度が高くなる。(センサが動作しなくなると、この値は 100% のフル出力となる。したがって、Lm 値が大きいほど光ファイバの曲がり等により光信号ロスが大きくなっていることを表す。)

- Ct (Signal contrast)

光信号レベルのバックグラウンドに対する比のことで、光信号のビジビリティ(visibility) レベルをモニタしている。測定器の動作確認に使用される。

- SNR (Signal to Noise Ratio)

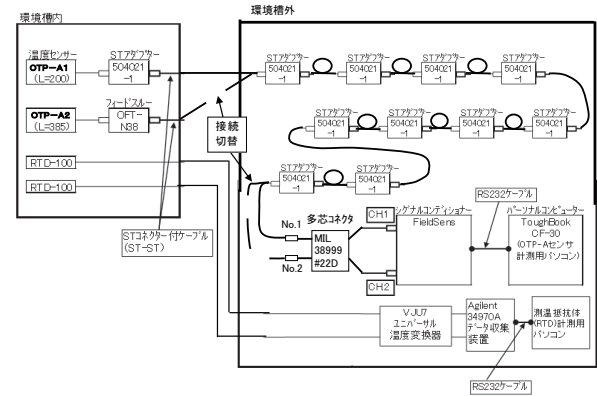
SNR は SN 比 (Signal-to-Noise Ratio) のことで、この値が低下するほど光信号レベルが低くなり、ノイズ分が増加していることを示す。(SNR 値が小さいほど、光ファイバの曲がり等により光信号ロスが大きくなっていることを表す。)

第14表: OTP-A センサ機装検証試験 試験ケース一覧

| 試験ケースNo | STアダプタ 個数 | OTPセンサ ID | 多芯コネクタ No. |
|----------|--------------|--------------|------------|
| 試験前 | 1 | OTP-A1 | |
| | 1* | OTP-A2 | |
| 多芯コネクタ接続 | 1 | OTP-A1 | No.1 |
| | 1* | OTP-A2 | No.2 |
| ケース1 | 5 | OTP-A1 | No.1 |
| | 5* | OTP-A2 | No.2 |
| ケース2 | 7 | OTP-A1 | No.1 |
| | 7* | OTP-A2 | No.2 |
| ケース3 | 9 | OTP-A1 | No.1 |
| | 9* | OTP-A2 | No.2 |
| ケース4 | 11 | OTP-A1 | No.1 |
| | 11* | OTP-A2 | No.2 |
| ケース2A** | 7 | OTP-A1 | No.3 |
| ケース2B** | 7* | OTP-A2 | No.1 |
| ケース2C** | 7* | OTP-A2 | No.3 |

* STアダプタ1個に代えてフィードスルーを使用した

**多芯コネクタのコネクタ毎の影響を確認するため、追加ケースを実施した。



第37図: OTP-A センサ機装検証試験 試験セットアップ概要図 (ST セットアップ最大個数接続時)

第15表: 光ファイバ温度センサ 光信号健全性診断パラメータ

| Parameter | Good signal | Poor Signal | Fault |
|-----------|-------------|-------------|-------|
| Lg | > 2.2 | < 2.2 | — |
| Ga | < 2.0 | > 2.0 | — |
| Lm | < 90 % | > 90 % | — |
| Ct | > 15 % | < 15 % | — |
| SNR | > 200 | < 200 | < 100 |

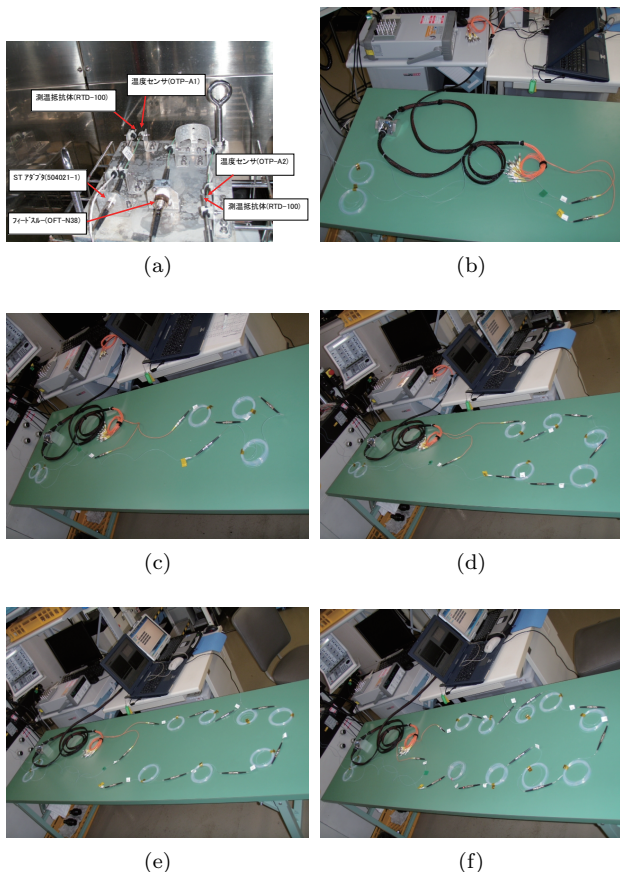
5.2.4 試験場所 宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センター飛行場分室 : 耐環境試験室

5.2.5 試験実施日 平成 23 年 3 月 4 日

5.3 機装検証試験結果

5.3.1 試験実施状況 試験実施状況を、第38図に示す。

5.3.2 波長計測結果 光ファイバセンサ (OTP-A1) の波長、及び温度計測結果を第16表に示す。光ファイバセンサ (OTP-A2) の波長、及び温度計測結果を第17表に示す。



第38図: OTP-A センサ機装検証試験 試験セットアップ状況写真:(a) センサ設置状況、(b) 多芯コネクタ設置時、(c)ST アダプタ 5 個設置時、(d)ST アダプタ 7 個設置時、(e)ST アダプタ 9 個設置時、(f)ST アダプタ 11 個設置時

第16表: 光ファイバ温度センサ波長・温度計測結果 (OTP-A1)

| 日付 | 試験ケースNo | STアダプタ 個数 | OTP-A | RTD-100 | OTP-A | RTD-100 | 備考 |
|---------|----------|--------------|--------|---------|--------|---------|-------------|
| | | | 波長(nm) | 温度(℃) | 波長(nm) | 温度(℃) | |
| H23.3.4 | 試験前 | 1 | 14609 | 21.6 | 21.0 | 21.6 | |
| H23.3.4 | 多芯コネクタ接続 | 1 | 14609 | 21.5 | 20.9 | 21.5 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース1 | 5 | 14610 | 21.6 | 21.0 | 21.6 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース2 | 7 | 14608 | 21.5 | 21.0 | 21.6 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース3 | 9 | 14609 | 21.5 | 21.0 | 21.5 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース4 | 11 | 14609 | 21.5 | 21.0 | 21.5 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース2A | 7 | 14610 | 21.5 | - | - | No.3コネクタへ接続 |

全ての計測において、波長、及び温度に有意差は見られなかった。

5.3.3 波長計測結果 光ファイバセンサ (OTP-A1) の診断結果を第18表に示す。光ファイバセンサ (OTP-A2) の診断結果を第19表に示す。光ファイバセンサ (OTP-A1) に対し多芯コネクタ (コネクタ No.1) を接続し、ST アダプタを5個、7個、9個、及び11個接続し、光信号の健全性を診断したところ、全て Good signal であった。しかしながら、ST アダプタ7個時に多芯コネクタのコネクタ No.3 に接続し、光信号の健全性診断したところ、Ct(コントラスト) が Poor Signal (Good signal 条件 15% 以上の

第17表: 光ファイバ温度センサ波長・温度計測結果 (OTP-A2)

| 日付 | 試験ケースNo | STアダプタ 個数 | OTP-A | RTD-100 | OTP-A | RTD-100 | 備考 |
|---------|----------|--------------|--------|---------|--------|---------|-------------|
| | | | 波長(nm) | 温度(℃) | 波長(nm) | 温度(℃) | |
| H23.3.4 | 試験前 | 1 | 14692 | 21.6 | 20.9 | 21.6 | |
| H23.3.4 | 多芯コネクタ接続 | 1 | 14692 | 21.6 | 20.8 | 21.6 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース1 | 5 | 14691 | 21.6 | 20.8 | 21.6 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース2 | 7 | 14691 | 21.6 | 20.9 | 21.6 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース3 | 9 | 14691 | 21.6 | 20.8 | 21.6 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース4 | 11 | 14692 | 21.6 | 20.9 | 21.6 | No.2コネクタへ接続 |

第18表: 光ファイバ温度センサ 光信号健全性診断結果 (OTP-A1)

| 日付 | 試験ケースNo | STアダプタ 個数 | Lg | Ga | Lm | Ct | SNR | 備考 |
|---------|----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| | | | > 2.2 | < 2.0 | < 90% | > 15% | > 200 | |
| H23.3.4 | 試験前 | 1 | 2.6 | 1.3 | 56 | 26.5 | 4466 | |
| H23.3.4 | 多芯コネクタ接続 | 1 | 2.6 | 1.3 | 57 | 25.0 | 3225 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース1 | 5 | 2.6 | 1.3 | 57 | 23.5 | 2933 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース2 | 7 | 2.7 | 1.3 | 60 | 22.3 | 3282 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース3 | 9 | 2.6 | 1.3 | 59 | 21.6 | 2523 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース4 | 11 | 2.6 | 1.3 | 63 | 20.3 | 2130 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース2A | 7 | 2.3 | 1.3 | 44 | 13.9 | 1013 | No.3コネクタへ接続 |

第19表: 光ファイバ温度センサ 光信号健全性診断結果 (OTP-A2)

| 日付 | 試験ケースNo | STアダプタ 個数 | Lg | Ga | Lm | Ct | SNR | 備考 |
|---------|----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| | | | > 2.2 | < 2.0 | < 90% | > 15% | > 200 | |
| H23.3.4 | 試験前 | 1 | 2.8 | 1.4 | 66 | 28.8 | 4248 | |
| H23.3.4 | 多芯コネクタ接続 | 1 | 2.6 | 1.3 | 47 | 17.6 | 1853 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース1 | 5 | 2.6 | 1.3 | 50 | 16.6 | 1338 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース2 | 7 | 2.6 | 1.3 | 51 | 14.6 | 1469 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース3 | 9 | 2.6 | 1.3 | 51 | 14.4 | 1131 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース4 | 11 | 2.6 | 1.3 | 49 | 13.7 | 935 | No.2コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース2B | 7 | 2.6 | 1.3 | 62 | 23.5 | 2481 | No.1コネクタへ接続 |
| H23.3.4 | ケース2C | 7 | 2.6 | 1.3 | 46 | 13.2 | 845 | No.3コネクタへ接続 |

ところ 13.9%) となった。Poor Signal 時と Good Signal 時において波長に差異は見られなかった。光ファイバセンサ (OTP-A2) に対し多芯コネクタ (コネクタ No.2) を接続し、ST アダプタを4個、6個、8個、10個、及びフィードスルーを接続し、光信号の健全性を診断したところ、ST アダプタ6個以上で Ct(コントラスト) が Poor Signal (最小 13.7%) となった。ST アダプタ6個時に多芯コネクタのコネクタ No.1 では、Ct は Good Signal (23.5%) で、多芯コネクタのコネクタ No.3 では Poor Signal (13.2%) となった。ただし、Poor Signal 時と Good Signal 時において波長、及び温度の計測データに差異は見られなかった。

5.4 試験結果まとめ

1. 機装検証試験

- 光ファイバセンサに対し多芯コネクタを接続し、ST アダプタを11個まで接続しても、波長、及び温度の計測に有意な変化は見られなかった。
- 多芯コネクタのコネクタ No.1 を接続した場合、ST アダプタを11個まで接続しても、光信号は全て Good Signal であった。多芯コネクタのコネクタ No.2、及び No.3 に接続した場合、ST アダプタを7個接続時に Ct(コントラスト) が Poor Signal となった。Poor Signal 時と Good Signal 時での波長、及び温度の計測データに差異は見られなかった。

- 本試験結果より、ST アダプタより多芯コネクタの接続損失が大きいことがわかった。

2. 多芯コネクタ調査

- 機装検証試験結果から、多芯コネクタの接続損失が大きいことが判明したため、要因の究明及び、温度測定に及ぼす影響を調査した。
- 多芯コネクタのピン部を清掃し診断したが、Ct 値に改善は見られなかった。従って、ピン部の汚れが原因ではないと考えられる。
- 多芯コネクタの接続損失を計測した所、出荷状態とほぼ同じレベルであり、多芯コネクタの損傷/劣化が無いこと確認した。
- Ct 値減少度と反射光強度に相間関係が見られ、多芯コネクタ部での光反射が Ct 値減少の要因であると特定できた。しかしながら、光反射を抑える多芯コネクタ製造技術は確立されておらず、多芯コネクタ側での改善は困難な状況である。
- Ct 値と計測温度のバラツキとの関係を調査した。Ct 値の減少に伴い温度バラツキは大きくなったが、Ct 値が 10% 以上であれば、 $\sigma < 0.25^{\circ}\text{C}$ であり、実用上問題ないレベルであると考えられる。

6. 耐環境・燃料長期浸漬試験：OTP-A センサ

6.1 目的 航空機主翼燃料タンクに計装することを想定し、光ファイバ計測システム (OTP-A センサ) の耐環境試験において燃料長期浸漬試験を実施した。

6.2 試験概要 OTP-A センサが、 $-50^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ の高温環境に耐えられるか試験を実施した。また、温度較正試験を実施した後、1 年間の燃料浸漬試験を実施し、浸漬後の温度環境較正試験を実施した。下記の条件にて試験を実施した。

1. 耐環境試験 (環境槽内)：燃料無

- 温度環境付与
温度範囲： $-50^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$
(較正試験： $-60^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$)
温度プロフィール：第 39 図参照
サイクル数：2 サイクル
- 湿度環境付与
湿度環境： $+38^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$, 85%RH \sim 95%RH
温度/湿度プロフィール：第 40 図参照
サイクル数：6 サイクル

2. 燃料長期浸漬試験：燃料有 (JET-A1)

浸漬期間：1 年間

(平成 23 年 4 月 4 日～平成 24 年 4 月 6 日)

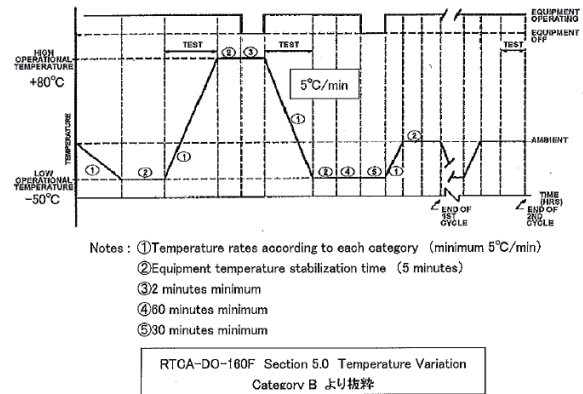
6.3 試験内容

6.3.1 試験供試体 試験供試体について、第 20 表に示す。

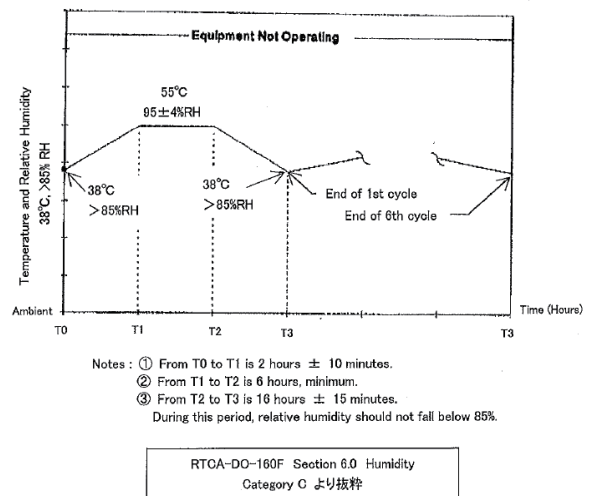
6.3.2 試験器材 試験器材について、第 21 表に示す。

6.4 実施試験条件、手順および結果

6.4.1 OTP-A センサ較正試験 後述の温度環境付与試験、湿度環境付与試験の前後で、本章に記載の温度較正試験を実施した。



第 39 図：温度環境プロフィール



第 40 図：湿度環境プロフィール

第 20 表：試験供試体

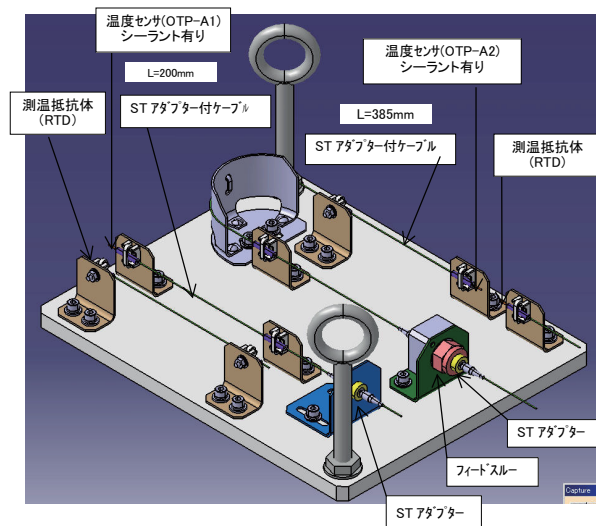
| 品名 | 型式 | メーカ | 数量 | 識別記号 |
|----------------|------------------|---------------------|----|--------------|
| 【S/N】 | | | | |
| OTP-A 温度センサ | OTP-A (L=200) | OpSens | 1 | L004-0203-01 |
| | | | | 【較正係数】 |
| | | | | Type T1 |
| | | | | ゲージ係数 |
| | | | | GF0 = 236 |
| GF1 = 111 | | | | |
| 【S/N】 | | | | |
| OTP-A 温度センサ | OTP-A (L=385) | OpSens | 1 | L004-0205-01 |
| | | | | 【較正係数】 |
| | | | | Type T1 |
| | | | | ゲージ係数 |
| | | | | GF0 = 277 |
| GF1 = 115 | | | | |
| フィード スルー | OFT-N38 | OpSens | 1 | - |
| ST アダプタ | 504021-1 | Tyco Electronics | 1 | - |
| ケーブル | | OpSens | 2 | - |
| 集録機 | FieldSens | OpSens | 1 | - |

第21表: 試験器材

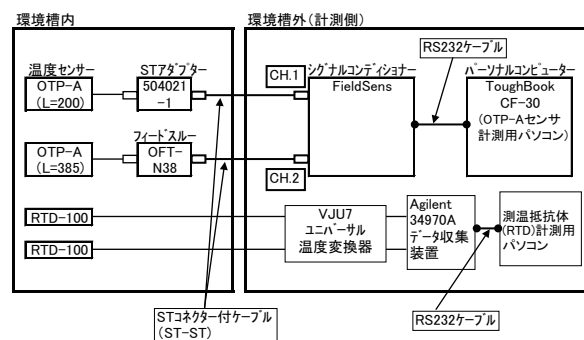
| 品名 | メーカー/型式 | 数量 | 定期 検定 要否 |
|------------------------|-----------------------------------|----|----------------|
| OTP-A センサ 計測 PC | Panasonic ToughBook CF-30 | 1 | - |
| 測温抵抗 (RTD) 計測 PC | 富士通 型式: - | 1 | - |
| RS-232C ケーブル | 市販品 | 2 | |
| 環境槽 | タバイエスペック EY-101 | 1 | ○ |
| 測温抵抗体 計測装置 | 横河電機 VJU7 温度変換器 | 2 | ○ |
| 測温抵抗体 データ収集 装置 | Agilent Technologies 34970A | 1 | ○ |
| 温湿度計 データ収集 装置 | ブイサラ HMI41 HMP45(プローブ) | 1 | - |
| 測温抵抗体 データ収集 | 岡崎製作所 RTD-100 | 2 | ○ |
| OTP-A 温度センサ 試験治具 | 図番: NA22853 -101 | 1 | - |
| 燃料 | JET-A1 | 適量 | |

試験準備は以下の通り行った。

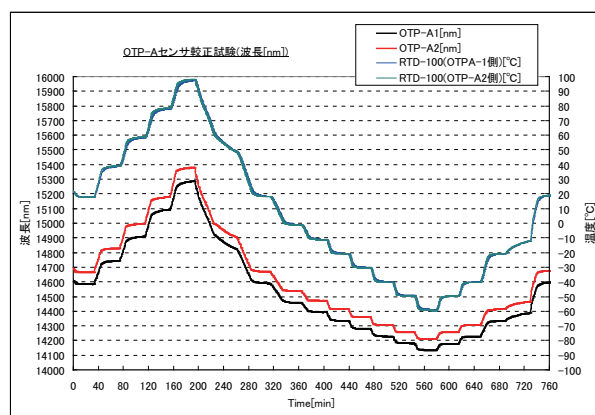
1. 測温抵抗体および測温抵抗体計測装置の検定状況を確認する。
 2. 光ファイバケーブル変形確認用（燃料長期浸漬試験）として、試験開始前のケーブル長さを計測する。
 3. 第41図のように温度センサ（供試体）を治具にセットする。
 4. 環境槽内に治具をセットする。
 5. 第42図のように、温度センサをフィードスルー／STアダプタを介して、シグナルコンディショナーに接続する。
 6. センサの診断を実施する。以下の規定値以内であることを確認する。
 - Lg 2.2 (Lg : Light level)
 - Ga 2.0 (Ga : Amplifier gain)
 - Lm 90% (Lm : Lamp driving level)
 - Ct 15% (Ct : Signal contrast)
 - SNR 200 (SNR : Signal to Noise Ratio)
 7. 環境槽に第39図に示す温度プロファイルを入力し、プログラム制御できるように設定する。
 8. 計測システムの電源を入れ、センサ出力の集録を開始する。
 9. 環境槽の温度プロファイルを実行し、較正を実施する。（計測データ：温度、波長）
- ここで、環境槽温度範囲を-60℃から+100℃に設定し、各較正試験取得温度で30分間保持し、環境槽設定温度と測



第41図: OTP-A センサ試験セットアップ



第42図: OTP-A センサ 耐環境試験 システムブロック図

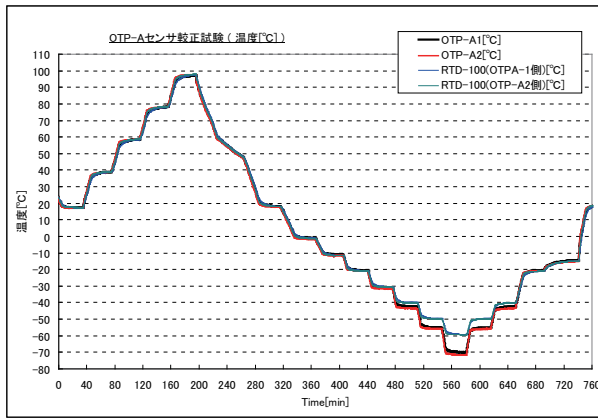


第43図: OTP-A センサ較正試験 (波長計測)

温抵抗体温度が安定させてからデータを記録した。
温度環境付与試験前に実施した温度較正試験の結果を第43、44図に示す。

6.4.2 OTP-A センサ温度環境付与試験 温度較正試験ののち、温度環境付与試験を実施した。試験セットアップは温度較正試験と同様とした。試験実施については、

1. 試験前点検（計測器材、試験治具及び供試体の目視



第44図: OTP-A センサ校正試験 (温度計測)

第22表: OTP-A センサ 温度環境付与試験結果記録 (1回目)

| サイクル数 | 設定条件 | 環境槽内温度 (°C) | OTP-A ₁ [L=200mm] シフトNo.: L004-0203-01 | RTD-100 (OTP-A ₁ 側) | OTP-A ₂ [L=385mm] シフトNo.: L004-0205-01 | RTD-100 (OTP-A ₂ 側) |
|-------|------------|-------------|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| | | | 波長 (nm) | 温度 (°C) | 波長 (nm) | 温度 (°C) |
| 1 | 開始前 | 20.0 | 14575.0 | 9.8 | 14676.2 | 12.8 |
| | -50°C (開始) | -50.0 | 14167.8 | -51.3 | 14239.4 | -53.5 |
| | -50°C (終了) | -50.0 | 14174.1 | -50.7 | 14250.5 | -51.3 |
| | +80°C (開始) | 80.0 | 15124.0 | 80.0 | 15214.5 | 80.6 |
| | +80°C (終了) | 80.0 | 15143.8 | 82.4 | 15247.3 | 85.0 |
| | -50°C (開始) | -50.0 | 14183.0 | -48.6 | 14253.7 | -50.7 |
| | (30分経過) | -53.4 | 14173.0 | -50.9 | 14249.6 | -51.4 |
| | (60分経過) | -53.4 | 14172.2 | -51.1 | 14248.9 | -51.5 |
| | (90分経過) | -53.4 | 14171.4 | -51.2 | 14248.9 | -51.5 |
| | 常温 | 20.0 | 14620.1 | 22.2 | 14705.8 | 23.1 |
| 2 | -50°C (開始) | -53.3 | 14176.4 | -50.6 | 14251.5 | -51.4 |
| | -50°C (終了) | -53.3 | 14172.9 | -50.8 | 14249.6 | -51.3 |
| | +80°C (開始) | 80.0 | 15107.2 | 80.0 | 15220.6 | 81.9 |
| | +80°C (終了) | 80.0 | 15122.5 | 83.6 | 15237.3 | 85.3 |
| | -50°C (開始) | -53.4 | 14180.9 | -49.0 | 14253.7 | -50.3 |
| | (30分経過) | -53.4 | 14172.7 | -51.0 | 14248.7 | -51.4 |
| | (60分経過) | -53.4 | 14171.7 | -51.2 | 14248.4 | -51.5 |
| | (90分経過) | -53.4 | 14175.0 | -51.2 | 14252.5 | -51.3 |
| | 常温 | 20.0 | 14616.1 | 21.5 | 14702.2 | 22.5 |

点検等)を実施する。

2. 第39図のプロファイルに基づき、データシート(第22表)の設定条件でのデータを計測する。2サイクル実施する。

- 温度変化率は、最低 5 °C / min とする。
- 安定状態は公差 ± 1 °C 以内で 5 分間保持とする。
- PC での間隔は 2 秒以下とする。

取得したデータを第22,23表に示す。

3. 試験終了後点検(計測機器、試験治具及び供試体の目視点検等)を実施する。

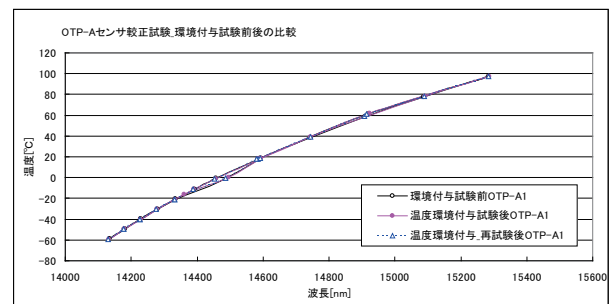
4. 本試験終了後、温度校正試験を実施した。温度環境付与試験前後の比較結果を第45,46図に示す。センサ破損等なく、各センサのパラメータは許容範囲内であることを確認した。

6.4.3 OTP-A センサ湿度環境付与試験 試験は、以下の通り行った。

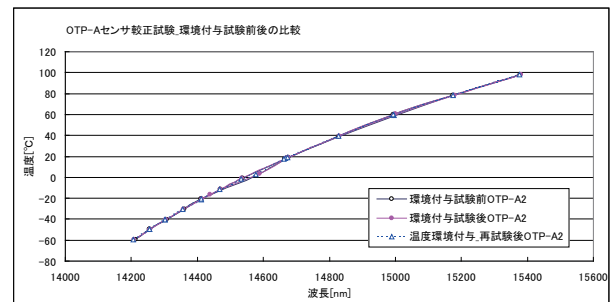
1. 温度校正試験のセットアップ状態から、測温抵抗体

第23表: OTP-A センサ 温度環境付与試験結果記録 (2回目)

| サイクル数 | 設定条件 | 環境槽内温度 (°C) | OTP-A ₁ [L=200mm] シフトNo.: L004-0203-01 | RTD-100 (OTP-A ₁ 側) | OTP-A ₂ [L=385mm] シフトNo.: L004-0205-01 | RTD-100 (OTP-A ₂ 側) |
|-------|------------|-------------|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| | | | 波長 (nm) | 温度 (°C) | 波長 (nm) | 温度 (°C) |
| 1 | 開始前 | 20.0 | 14573.4 | 23.8 | 14643.5 | 23.2 |
| | -50°C (開始) | -50.0 | 14163.6 | -50.2 | 14237.0 | -50.3 |
| | -50°C (終了) | -50.0 | 14215.7 | -51.0 | 14303.3 | -49.1 |
| | +80°C (開始) | 80.0 | 15176.9 | 80.8 | 15272.2 | 80.3 |
| | +80°C (終了) | 80.0 | 15000.1 | 79.7 | 15087.1 | 79.6 |
| | -50°C (開始) | -50.0 | 14157.4 | -50.2 | 14238.0 | -50.8 |
| | (30分経過) | -60.0 | 14111.4 | -63.5 | 14188.0 | -63.9 |
| | (60分経過) | -60.0 | 14110.4 | -63.8 | 14187.0 | -64.1 |
| | (90分経過) | -60.0 | 14144.4 | -63.3 | 14225.7 | -63.0 |
| | 常温 | 20.0 | 14608.3 | 20.1 | 14689.9 | 20.0 |
| 2 | -50°C (開始) | -50.0 | 14152.4 | -50.3 | 14236.8 | -50.1 |
| | -50°C (終了) | -50.0 | 14219.5 | -51.1 | 14293.8 | -51.1 |
| | +80°C (開始) | 80.0 | 15170.9 | 80.2 | 15262.9 | 79.8 |
| | +80°C (終了) | 80.0 | 15014.3 | 80.8 | 15108.5 | 81.5 |
| | -50°C (開始) | -50.0 | 14157.3 | -50.0 | 14239.5 | -50.5 |
| | (30分経過) | -60.0 | 14111.8 | -63.4 | 14187.3 | -63.9 |
| | (60分経過) | -60.0 | 14110.2 | -63.9 | 14186.4 | -64.2 |
| | (90分経過) | -60.0 | 14109.5 | -64.1 | 14185.9 | -64.3 |
| | 常温 | 20.0 | 14609.8 | 20.3 | 14688.7 | 20.2 |



第45図: OTP-A1 センサ校正試験 温度環境付与試験前後比較結果

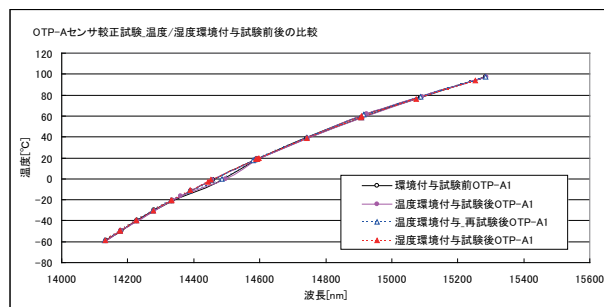


第46図: OTP-A2 センサ校正試験 温度環境付与試験前後比較結果

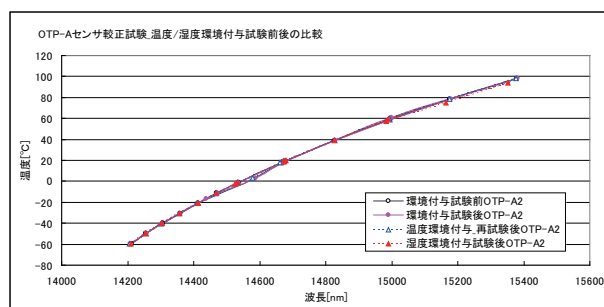
を外した。

2. 第40図のプロファイルに基づき、試験を6サイクル実施した。

- 安定状態は、温度の公差 ± 2 °C 以内、湿度の公差 ± 4%RH 以内とする。
- 湿度を下げる区間では、極力 85%RH 以下とならないこと。



第 47 図: OTP-A1 センサ較正試験 湿度環境付与試験前後比較結果



第 48 図: OTP-A2 センサ較正試験 湿度環境付与試験前後比較結果

第 24 表: OTP-A センサ 診断結果 燃料長期浸漬試験

[OTP-A1, L=200mm] シリコン L004-0203-01

| 経過 月数 | 日付 | 時刻 | Lg | Ga | Lm | Ct | SNR | 備考 |
|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 開始前 校正 | 2011.3.09 | 11:08 | > 2.2 | < 2.0 | < 90% | > 15% | > 200 | |
| 開始日 | 2011.4.04 | 15:40 | 2.6 | 1.3 | 55 | 26.2 | 4500 | |
| 1ヶ月目 | 2011.5.13 | 13:45 | 2.6 | 1.3 | 52 | 26.9 | 5428 | 計測なし |
| 2ヶ月目 | 2011.6.09 | 14:55 | 2.6 | 1.3 | 54 | 28.1 | 3499 | |
| 3ヶ月目 | 2011.7.07 | 14:18 | 2.6 | 1.3 | 56 | 26.4 | 3990 | |
| 4ヶ月目 | 2011.8.05 | 12:08 | 2.6 | 1.3 | 58 | 25.1 | 4191 | |
| 5ヶ月目 | 2011.9.08 | 14:34 | 2.6 | 1.3 | 61 | 25.0 | 3625 | |
| 6ヶ月目 | 2011.10.13 | 15:58 | 2.6 | 1.3 | 57 | 25.2 | 3509 | |
| 7ヶ月目 | 2011.11.16 | 15:15 | 2.6 | 1.3 | 55 | 26.8 | 3079 | |
| 8ヶ月目 | 2011.12.16 | 15:59 | 2.7 | 1.3 | 57 | 26.3 | 4083 | |
| 9ヶ月目 | 2012.1.13 | 10:55 | 2.6 | 1.3 | 56 | 25.7 | 3470 | |
| 10ヶ月目 | 2012.2.09 | 14:55 | 2.7 | 1.3 | 59 | 26.2 | 3121 | |
| 11ヶ月目 | 2012.3.05 | 11:58 | 2.8 | 1.3 | 57 | 25.1 | 3569 | |
| 12ヶ月目 | 2012.4.05 | 11:26 | 2.6 | 1.3 | 57 | 26.3 | 3429 | |
| 試験後 校正 | 2012.4.09 | 11:00 | 2.7 | 1.4 | 56 | 26.0 | 3708 | 波長校正終了後 |

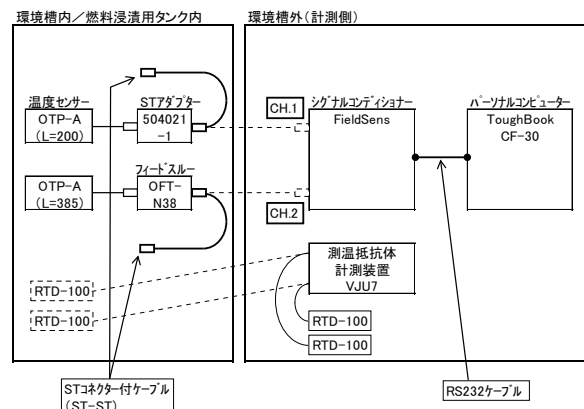
3. 本試験終了後、温度較正試験を実施した。湿度環境付与試験前後の比較結果を第 47, 48 図に示す。

6.4.4 OTP-A センサ燃料長期浸漬試験 温度環境付与試験、湿度環境付与試験の後、容器内に燃料を入れ、OTA-A センサを浸漬させ、1 年間の燃料浸漬試験を実施した。以下にその試験手順と結果を示す。

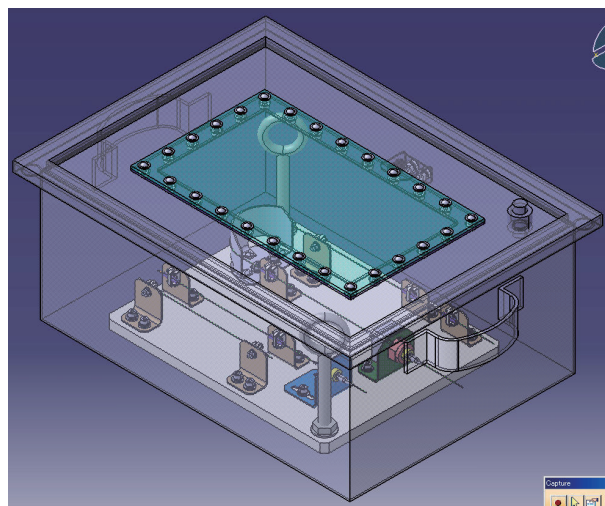
1. 燃料浸漬用に供試体が浸かるまで燃料を入れる。システムブロック図を第 49 図、セットアップ図を第 50 図、セットアップ状況写真を第 51 図に示す。

2. 1 か月に 1 度、定期点検として、供試体および治具の目視点検、センサ診断、常温でのセンサ応答を計測する。定期点検時のセンサ診断記録を第 24, 25 表に示す。

6.4.5 OTP-A センサ 燃料長期浸漬試験 (1 年後) 較正試験 燃料長期浸漬試験 (1 年間) 終了後、前節記載と同様



第 49 図: OTP-A センサ 燃料長期浸漬試験 システムブロック図



第 50 図: OTP-A センサ 燃料長期浸漬試験 試験セットアップ図

第 25 表: OTP-A センサ 診断結果 燃料長期浸漬試験

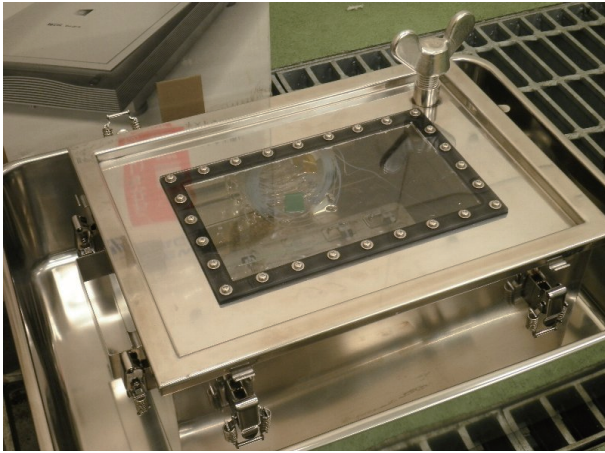
[OTP-A2, L=385mm] シリコン L004-0205-01

| 経過 月数 | 日付 | 時刻 | Lg | Ga | Lm | Ct | SNR | 備考 |
|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 開始前 校正 | 2011.3.09 | 11:08 | > 2.2 | < 2.0 | < 90% | > 15% | > 200 | |
| 開始日 | 2011.4.04 | 15:40 | 2.6 | 1.3 | 62 | 29.3 | 4076 | |
| 1ヶ月目 | 2011.5.13 | 13:45 | 2.6 | 1.3 | 60 | 28.4 | 4408 | 計測なし |
| 2ヶ月目 | 2011.6.09 | 14:56 | 2.6 | 1.3 | 61 | 28.4 | 4334 | |
| 3ヶ月目 | 2011.7.07 | 14:18 | 2.7 | 1.3 | 61 | 28.4 | 5509 | |
| 4ヶ月目 | 2011.8.05 | 12:09 | 2.6 | 1.3 | 61 | 29.1 | 4030 | |
| 5ヶ月目 | 2011.9.08 | 14:34 | 2.6 | 1.3 | 62 | 28.6 | 4397 | |
| 6ヶ月目 | 2011.10.13 | 15:58 | 2.6 | 1.3 | 61 | 28.7 | 4281 | |
| 7ヶ月目 | 2011.11.16 | 15:15 | 2.6 | 1.3 | 62 | 29.4 | 4253 | |
| 8ヶ月目 | 2011.12.16 | 16:03 | 2.6 | 1.3 | 63 | 29 | 4348 | |
| 9ヶ月目 | 2012.1.13 | 10:55 | 2.7 | 1.3 | 62 | 29.8 | 4357 | |
| 10ヶ月目 | 2012.2.09 | 14:55 | 2.6 | 1.3 | 63 | 29.5 | 3630 | |
| 11ヶ月目 | 2012.3.05 | 13:55 | 2.7 | 1.3 | 63 | 29.4 | 4147 | |
| 12ヶ月目 | 2012.4.05 | 11:26 | 2.6 | 1.3 | 62 | 29.1 | 4858 | |
| 試験後 校正 | 2012.4.09 | 11:00 | 2.8 | 1.4 | 66 | 29.4 | 4778 | 波長校正終了後 |

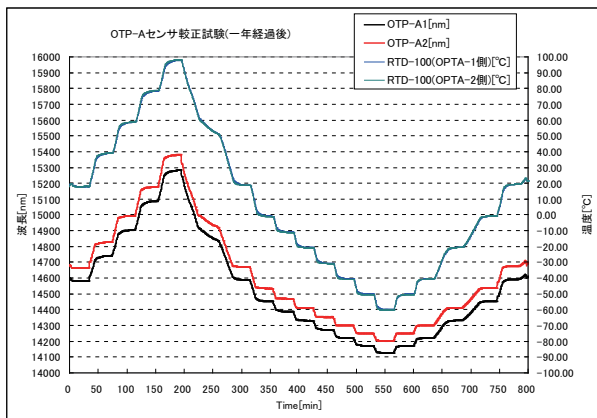
の温度較正試験を再度実施した。温度較正試験の結果を第 52, 53 図に示す。各較正試験で取得した波長データを温度換算した結果を第 26, 27 表に示す。

環境試験前 (波長)、環境付与試験後 (波長)、燃料長期浸漬 1 年経過後 (波長) 比較グラフを第 54, 55 図に示す。

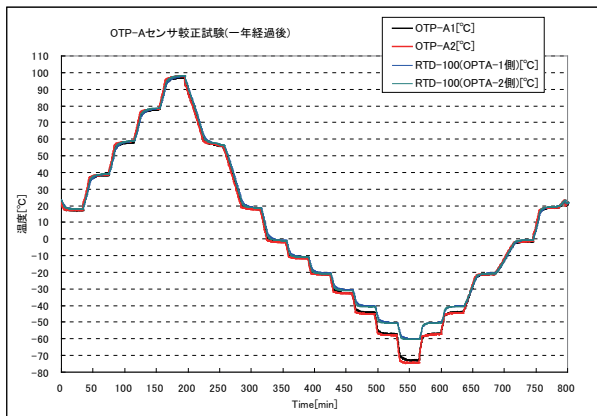
6.5 試験結果まとめ



第51図: OTP-A センサ 燃料長期浸漬試験 試験セットアップ状況



第52図: OTP-A センサ 較正確認試験結果（一年経過後：波長）



第53図: OTP-A センサ 較正確認試験結果（一年経過後：温度）

1. 温度環境付与試験

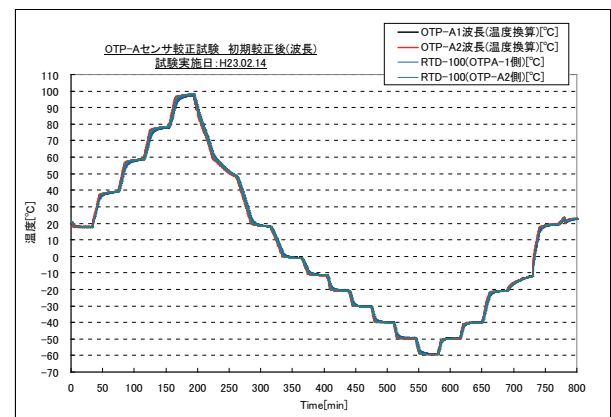
環境槽の温度を-50℃から+80℃の範囲で2サイクルの温度環境付与試験を行い、OTP-A センサ出力を波長で計測した。1回目の試験では温度条件の温度範囲-50℃から+80

第26表: OTP-A センサ (OTP-A1:波長計測)/测温抵抗体 (RTD-100:温度計測) 較正試験データ比較

| 温度槽 設定温度 (℃) | 初期較正試験 試験実施日: H23.02.14 OTP-A1 (℃) | RTD-100 [OTP-A1側] (℃) | 温度環境付与試験後 試験実施日: H23.02.21 OTP-A1 (℃) | RTD-100 [OTP-A1側] (℃) | 温度環境付与試験後 試験実施日: H23.03.02 OTP-A1 (℃) | RTD-100 [OTP-A1側] (℃) | 温度環境付与再試験後 試験実施日: H23.03.09 OTP-A1 (℃) | RTD-100 [OTP-A1側] (℃) | 長期燃料浸漬試験後 試験実施日: H24.04.09 OTP-A1 (℃) | RTD-100 [OTP-A1側] (℃) |
|--------------------|---|-----------------------------|--|-----------------------------|--|-----------------------------|---|-----------------------------|--|-----------------------------|
| 20 | 17.2 | 17.7 | 17.6 | 17.8 | 19.4 | 19.9 | 17.8 | 18.1 | 17.3 | 18.0 |
| 40 | 38.5 | 38.5 | 38.5 | 39.0 | 38.5 | 39.1 | 38.7 | 39.2 | 38.2 | 39.0 |
| 60 | 58.3 | 58.3 | 58.5 | 58.6 | 58.0 | 58.3 | 58.2 | 58.7 | 58.0 | 58.8 |
| 80 | 77.6 | 77.6 | 78.0 | 78.1 | 76.2 | 76.2 | 77.7 | 78.3 | 77.6 | 78.5 |
| 100 | 97.3 | 97.3 | 97.5 | 97.5 | 94.3 | 93.9 | 97.3 | 97.8 | 97.2 | 97.9 |
| 20 | 18.6 | 18.8 | 18.2 | 18.2 | 18.3 | 18.8 | 17.1 | 17.8 | 17.8 | 18.7 |
| 0 | -0.7 | -0.9 | -1.0 | -1.1 | -1.6 | -1.1 | -1.4 | -1.2 | -1.7 | -0.9 |
| -10 | -11.1 | -11.1 | -11.3 | -11.3 | -11.7 | -11.1 | -11.9 | -11.5 | -12.0 | -11.0 |
| -20 | -20.7 | -20.8 | -20.6 | -20.8 | -20.7 | -21.4 | -21.4 | -20.9 | -21.6 | -20.7 |
| -30 | -30.4 | -30.2 | -30.5 | -30.5 | -30.9 | -30.3 | -31.1 | -30.5 | -31.7 | -30.8 |
| -40 | -39.8 | -39.8 | -40.1 | -40.1 | -40.6 | -39.8 | -40.4 | -40.0 | -41.4 | -40.5 |
| -50 | -49.4 | -49.4 | -49.5 | -49.6 | -50.1 | -49.4 | -49.9 | -49.5 | -51.2 | -50.3 |
| -60 | -59.0 | -58.9 | -59.1 | -59.2 | -59.6 | -59.0 | -59.6 | -59.1 | -60.8 | -60.0 |
| -70 | -68.6 | -68.6 | -68.7 | -68.8 | -69.1 | -68.6 | -69.6 | -69.5 | -71.0 | -70.2 |
| -80 | -78.0 | -78.0 | -78.0 | -78.0 | -78.6 | -78.0 | -79.0 | -78.0 | -81.3 | -80.3 |
| -20 | -20.9 | -21.0 | -18.3 | -16.5 | -21.0 | -20.7 | -21.4 | -21.0 | -21.4 | -20.7 |
| 20 | 18.9 | 18.8 | 18.9 | 18.9 | 18.7 | 19.2 | 18.5 | 18.9 | 18.8 | 19.5 |

第27表: OTP-A センサ (OTP-A2:波長計測)/测温抵抗体 (RTD-100:温度計測) 較正試験データ比較

| 温度槽 設定温度 (℃) | 初期較正試験 試験実施日: H23.02.14 OTP-A2 (℃) | RTD-100 [OTP-A2側] (℃) | 温度環境付与試験後 試験実施日: H23.02.21 OTP-A2 (℃) | RTD-100 [OTP-A2側] (℃) | 温度環境付与試験後 試験実施日: H23.03.02 OTP-A2 (℃) | RTD-100 [OTP-A2側] (℃) | 温度環境付与再試験後 試験実施日: H23.03.09 OTP-A2 (℃) | RTD-100 [OTP-A2側] (℃) | 長期燃料浸漬試験後 試験実施日: H24.04.09 OTP-A2 (℃) | RTD-100 [OTP-A2側] (℃) |
|--------------------|---|-----------------------------|--|-----------------------------|--|-----------------------------|---|-----------------------------|--|-----------------------------|
| 20 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 17.8 | 19.8 | 19.8 | 17.8 | 18.2 | 17.7 | 18.0 |
| 40 | 38.9 | 38.9 | 39.1 | 39.1 | 38.9 | 39.2 | 38.9 | 39.3 | 38.9 | 39.1 |
| 60 | 58.6 | 58.6 | 58.7 | 58.9 | 57.2 | 57.4 | 58.5 | 58.9 | 58.6 | 58.9 |
| 80 | 78.2 | 78.2 | 78.6 | 78.5 | 77.1 | 76.1 | 78.3 | 78.7 | 78.5 | 78.7 |
| 100 | 97.9 | 97.9 | 98.1 | 98.1 | 96.7 | 94.2 | 97.8 | 98.1 | 98.1 | 98.3 |
| 20 | 18.4 | 18.5 | 18.4 | 18.2 | 18.6 | 18.9 | 17.3 | 17.8 | 18.1 | 18.6 |
| 0 | -1.0 | -1.1 | -1.3 | -1.2 | -1.3 | -1.1 | -1.6 | -1.2 | -1.5 | -1.1 |
| -10 | -11.4 | -11.3 | -11.4 | -11.4 | -11.7 | -11.1 | -12.0 | -11.5 | -11.9 | -11.2 |
| -20 | -21.0 | -20.8 | -20.7 | -20.9 | -21.0 | -20.7 | -21.1 | -21.0 | -21.4 | -20.9 |
| -30 | -30.2 | -30.5 | -30.6 | -30.7 | -30.6 | -30.4 | -31.0 | -30.7 | -31.4 | -30.5 |
| -40 | -40.1 | -40.2 | -40.4 | -40.5 | -40.3 | -40.0 | -40.8 | -40.2 | -41.5 | -40.8 |
| -50 | -49.9 | -49.8 | -49.6 | -49.9 | -50.1 | -49.6 | -50.1 | -49.8 | -51.3 | -50.7 |
| -60 | -59.3 | -59.4 | -60.0 | -59.6 | -59.6 | -59.3 | -60.3 | -59.5 | -60.9 | -60.5 |
| -70 | -69.0 | -68.9 | -69.9 | -69.0 | -69.7 | -69.9 | -69.9 | -69.8 | -70.8 | -70.5 |
| -80 | -78.1 | -78.0 | -78.0 | -78.0 | -78.6 | -78.0 | -79.0 | -78.0 | -81.3 | -80.3 |
| -20 | -20.9 | -21.0 | -18.6 | -16.5 | -20.8 | -20.6 | -21.2 | -21.0 | -21.1 | -20.8 |
| 20 | 19.2 | 19.0 | 19.1 | 19.1 | 19.0 | 19.3 | 18.8 | 19.1 | 19.2 | 19.4 |

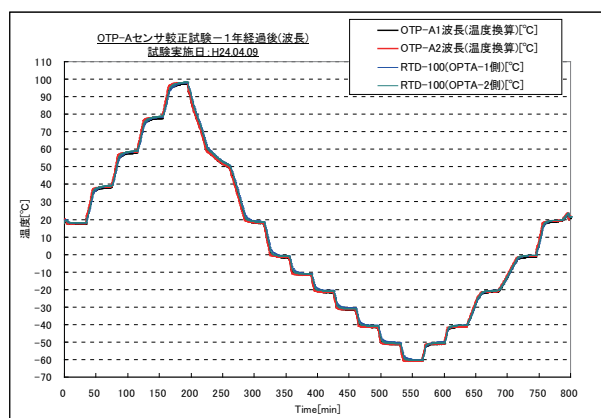


第54図: OTP-A センサ 較正試験比較グラフ 初期校正後（波長：温度変換）

℃及び+80℃から-50℃での温度変化率5℃/minの試験要求を満たさなかった為、再試験を行なった。2回目の試験では試験要求の温度変化率を満足できた。また、試験前後の温度較正試験の結果は再現性もあり、OTP-A センサが本温度環境に耐えられることが確認できた。

2. 湿度環境付与試験

環境槽の温度/湿度範囲-38℃から+55℃, 85%RH から95%RHで6サイクルの湿度環境付与試験を行なった。試験前後の温度較正試験の結果、高温時(80℃, 100℃)でのOTP-A センサと测温抵抗体との温度差が1℃以上となった



第 55 図: OTP-A センサ 較正試験比較グラフ 1 年経過後
(波長: 温度変換)

が、これはセンサ周りの水分蒸発の影響と考えられる。その後実施した温度環境付与再試験後の温度較正試験では、OTP-A センサと測温抵抗体の温度差が 1℃未満と小さくなっていることから、センサは健全性を保っていると考えられ、OTP-A センサが本温湿度環境に耐えられることが確認できた。

3. OTP-A センサ燃料長期浸漬試験

容器内に燃料を入れ、OTP-A センサを浸漬し、1ヶ月毎に燃料容器から取り出しセンサ診断及び温度/波長計測を実施し、燃料浸漬1年後にOTP-A センサ較正試験を実施した結果、燃料長期浸漬後のOTP-A センサは、测温抵抗体との温度差は大きくなるものの、正常であり燃料浸漬環境に耐えられることを確認した。また、燃料長期浸漬試験中に、OTP-A センサケーブルを引くとセンサケーブルが移動(滑り)する事象が発生した。この移動(滑り)は、温度センサケーブルとニトリルゴムとの間の滑りであり、ニトリルゴムはタイマウントに、タイラップでしっかり固定されていることが確認できた為、ニトリルゴムが外れることは無く、問題は無いと判断できる。

7. 耐環境・燃料長期浸漬試験：BOF、FBG センサ

7.1 目的 航空機主翼燃料タンクに計装することを想定し、光ファイバ計測システム(BOF, FBG センサ)の耐環境試験において燃料長期浸漬試験を実施した。

7.2 試験概要

1. 耐環境試験（環境槽内）：燃料無

- 温度校正試験
温度範囲：-60℃～+100℃
温度プロファイル：第 56 図参照
サイクル数：2 サイクル
- 湿度環境付与試験
湿度環境：+38℃～+55℃，85%RH～95%RH
温度/湿度プロファイル：第 58 図参照
サイクル数：6 サイクル
- 温度環境付与試験

温度センサー校正試験用環境槽設定

TABAI ESPEC Corp. 温度環境装置用プログラム設定器(EY-101)

プログラム名: SYO-B 温度センサー校正試験用

2011.2.04 (Fri)
2011.2.09 (Wed) 改1
2011.10.20 (Thu) 改2
2011.2.14 (Mon) 改3

| Step | Temp | → Temp | HUM I | TIME | RELE Y on | RELEY off | 計測 |
|------|------|-----------|----------|------------|--------------|--------------|----|
| 1 | 25 | 20 | 0 | 0:05 0:08 | 2 | | ◎ |
| 2 | 20 | 20 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 3 | 20 | 40 | 0 | 0:10 0:17 | | 2,4 | ◎ |
| 4 | 40 | 40 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 5 | 40 | 60 | 0 | 0:10 0:17 | | | ◎ |
| 6 | 60 | 60 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 7 | 60 | 80 | 0 | 0:10 0:17 | | | ◎ |
| 8 | 80 | 80 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 9 | 80 | 100 | 0 | 0:10 0:17 | | | ◎ |
| 10 | 100 | 100 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 11 | 100 | 60 | 0 | 0:30 0:50 | 2,4 | 2 | ◎ |
| 12 | 60 | 60 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 13 | 60 | 20 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 14 | 20 | 20 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 15 | 20 | 0 | 0 | 0:10 0:17 | | | ◎ |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 17 | 0 | -10 | 0 | 0:05 0:08 | | 2,4 | ◎ |
| 18 | -10 | -10 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 19 | -10 | -20 | 0 | 0:05 0:08 | | | ◎ |
| 20 | -20 | -20 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 21 | -20 | -30 | 0 | 0:05 0:08 | | | ◎ |
| 22 | -30 | -30 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 23 | -30 | -40 | 0 | 0:05 0:08 | | | ◎ |
| 24 | -40 | -40 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 25 | -40 | -50 | 0 | 0:05 0:08 | | | ◎ |
| 26 | -50 | -50 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 27 | -50 | -60 | 0 | 0:05 0:08 | | | ◎ |
| 28 | -60 | -60 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 29 | -60 | -50 | 0 | 0:05 0:08 | | | ◎ |
| 30 | -50 | -50 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 31 | -50 | -40 | 0 | 0:05 0:08 | | | ◎ |
| 32 | -40 | -40 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 33 | -40 | -20 | 0 | 0:20 0:33 | | | ◎ |
| 34 | -20 | -20 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 35 | -20 | 0 | 0 | 0:30 0:50 | | 4 | ◎ |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 37 | 0 | 20 | 0 | 0:10 0:17 | | 2 | ◎ |
| 38 | 20 | 20 | 0 | 0:30 0:50 | | | ◎ |
| 39 | 20 | 25 | 0 | 0:10 0:17 | | | ◎ |
| 40 | 25 | 25 | 0 | 12:00 12:0 | 2 | | ◎ |

end

25.2

2011.2.04 (Fri)
2011.2.09 (Wed) 改1
2011.10.20 (Thu) 改2
2011.2.14 (Mon) 改3

第56図: 温度較正試験の温度プロフィール

温度センサー校正試験用環境槽設定

プログラム名: SYO-C

| Step | Temp (°C) | 一 Temp | HUMI (%) | TIME (HM) | RELE Y on | RELE Y off |
|------|--------------|-----------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 23 | 38 | 95 | 0:10 | | 2,3,4 |
| 2 | 38 | 55 | 95 | 2:00 | | |
| 3 | 55 | 55 | 95 | 6:00 | | |
| 4 | 55 | 38 | 85 | 16:00 | 3 | |
| 5 | 38 | 55 | 95 | 2:00 | | 3 |
| 6 | 55 | 55 | 95 | 6:00 | | |
| 7 | 55 | 38 | 85 | 16:00 | 3 | |
| 8 | 38 | 55 | 95 | 2:00 | | 3 |
| 9 | 55 | 55 | 95 | 6:00 | | |
| 10 | 55 | 38 | 85 | 16:00 | 3 | |
| 11 | 38 | 55 | 95 | 2:00 | | 3 |
| 12 | 55 | 55 | 95 | 6:00 | | |
| 13 | 55 | 38 | 85 | 16:00 | 3 | |
| 14 | 38 | 55 | 95 | 2:00 | | 3 |
| 15 | 55 | 55 | 95 | 6:00 | | |
| 16 | 55 | 38 | 85 | 16:00 | 3 | |
| 17 | 38 | 55 | 95 | 2:00 | | 3 |
| 18 | 55 | 55 | 95 | 6:00 | | |
| 19 | 55 | 38 | 85 | 16:00 | 3 | |
| 20 | 38 | 25 | 0 | 0:00 | 1 | |
| 21 | 25 | 25 | 0 | 20:00 | | 3 |

end

第57図: 湿度環境付与試験の温度・湿度プロファイル

湿度環境：-65℃～+100℃，
温度プロファイル：第57図参照
サイクル数：2サイクル

2. 燃料長期浸漬試驗：燃料有 (JET-A1)

浸漬期間：1年間

(平成23年4月4日～平成24年4月6日)

7.3 試驗內容

7.3.1 試験供試体 試験供試体について、第28表に示す。

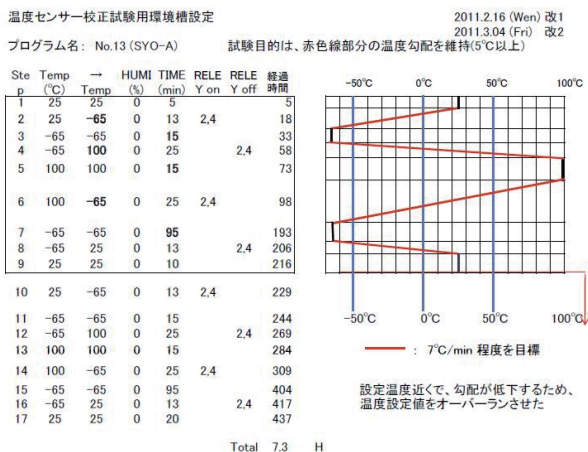
7.3.2 試験器材 試験器材について、第 29 表に示す。

7.4 試験実施手順と試験結果

7.4.1 FBG / BOF センサ温度較正試験

1. 試験実施要領, 又は方法

- 第59図のように、測温抵抗体センサ、FBG 温度セン



第58図: 温度環境付与試験の温度プロファイル

第28表: 試験供試体

| 品名 | 型式 | メーカー | 数量 |
|----------|-----------|----------|----|
| FBG | | 株式会社 | 1 |
| 温度センサ | | フジクラ | |
| BOF | BOF-0007 | 株式会社 | 1 |
| 温度センサ | | 渡辺製作所 | |
| FBG センサ | OFDR | 株式会社 | 1 |
| 計測用干渉計 | | レーザック | |
| FBG センサ | 波長可変光源 | NewFocus | 1 |
| 計測用レーザ光源 | | | |
| BOF センサ | DWPR システム | 株式会社 | |
| 計測装置 | | 渡辺製作所 | |

第29表: 試験器材

| 品名 | メーカー/型式 | 数量 |
|---------------|-----------------------------|----|
| 測温抵抗 (RTD) | 富士通 | 1 |
| 計測 PC | 型式: - | 1 |
| RS-232C ケーブル | 市販品 | 2 |
| 環境槽 | タバイエスベック EY-101 | 1 |
| 測温抵抗体 計測装置 | 横河電機 VJU7 温度変換器 | 2 |
| 測温抵抗体 データ収集装置 | Agilent Technologies 34970A | 1 |
| 温湿度計 データ収集装置 | ファイサラ HMI41 HMP45(プローブ) | 1 |
| 測温抵抗体 データ収集 | 岡崎製作所 RTD-100 | 2 |
| 燃料 | JET-A1 | 適量 |

サ、BOF 温度センサを治具にセットする。

- 環境槽内に治具をセットする。
- FBG センサを FBG センサ計測装置 OFDR に接続

する。

OFDR 計測ソフトにて、生波形、スペクトログラムから以下を確認する。

- － FBG センサの反射波形の形、
- － スペクトログラム上で反射波形がでている位置と、実際のセンサ設置位置が一致しているか。(接続反射面の干渉によるゴーストを誤検知していないか確認)
- － FBG の反射率 (S/N)

第60図にFBG-OFDR 計測システム構成セットアップ写真を、第61図にFBG-OFDR スペクトログラムの例を示す。

- BOF センサを BOF センサ計測装置 DWPR に接続する。DWPR 計測ソフトにおいて、以下確認する。
 - － 仮想シリアルポートの接続を確認する。
 - － 一度、生波形を集録し、校正基準用のリファレンス BOF と BOF 温度センサの位置を、集録した波形から確認し、DWPR ソフト設定値のセンサ位置 に反映させる。
 - － センサ出力である2波長強度差を温度に変換するための係数が入力されているか確認する。

第62図にBOF-DWPR 計測システム構成セットアップ写真を、第63図にBOF-DWPR 取得波形を示す。

- 測温抵抗体センサを、シグナルコンディショナーに接続する。PC を RS-232 ケーブルにて接続する。
- 環境槽に温度プロファイルをプログラム制御できるように設定する
- シグナルコンディショナー、OFDR、DWPR 計測システムの電源を入れ、実行させる。
- 環境槽の電源を入れ、温度プロファイルを実行する。

2. 校正試験

- 環境槽にて、測温抵抗体、FBG 温度センサ、BOF 温度センサの時間プロファイルを取得する。第64図にFBG 温度センサの環境温度校正試験結果(反射波長計測)の時間プロファイルを、第65図にBOF 温度センサの環境温度校正試験結果(2波長強度差計測)の時間プロファイルを示す。

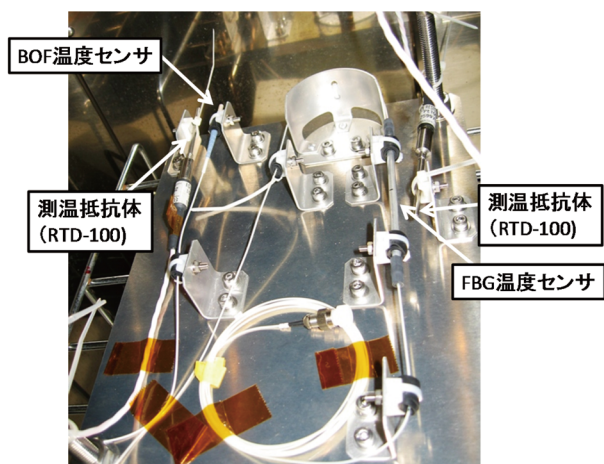
- 同時に、環境槽の温度・湿度/時間データを記録する

7.4.2 湿度環境付与試験

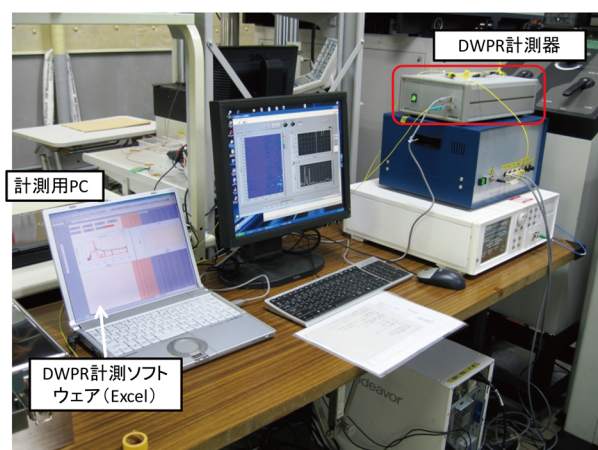
1. 試験実施要領、又は方法前項と同様のセットアップ状態とする。ただし、データ集録間隔を5秒とする。

2. 湿度環境付与試験

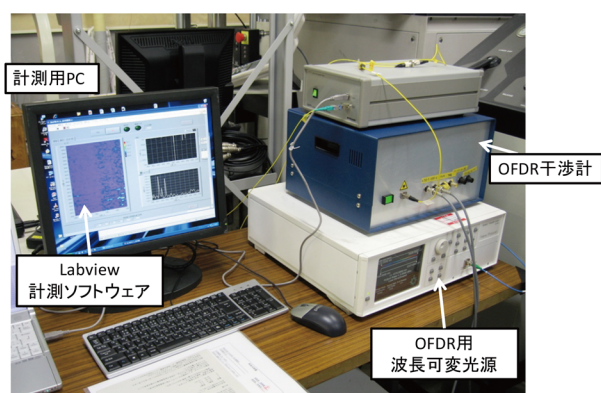
- 試験前点検(計測器材、試験治具及び供試体の目視点検等)を実施する。特に異常は見られなかった。
- 第58図の温度プロファイルに基づき、試験を実施する【6サイクル実施】。
- 環境槽にて、測温抵抗体、FBG 温度センサ、BOF 温度センサの時間プロファイルを取得する。第66図にFBG 温度センサの湿度環境試験結果(反射波長計測)の時間プロファイルを、第67図にBOF 温度センサの湿度環境試験結果(2波長強度差計測)の時間プロ



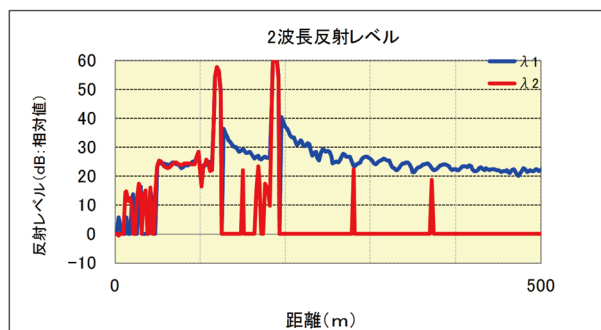
第59図: 試験供試体セットアップ状況写真



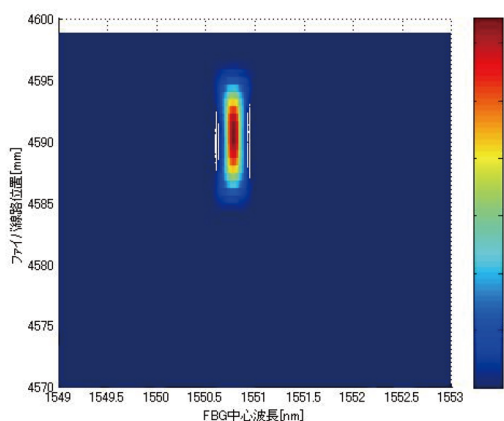
第62図: BOF-DWPR 計測システム構成セットアップ写真



第60図: FBG-OFDR 計測システム構成セットアップ写真



第63図: BOF-DWPR 取得波形

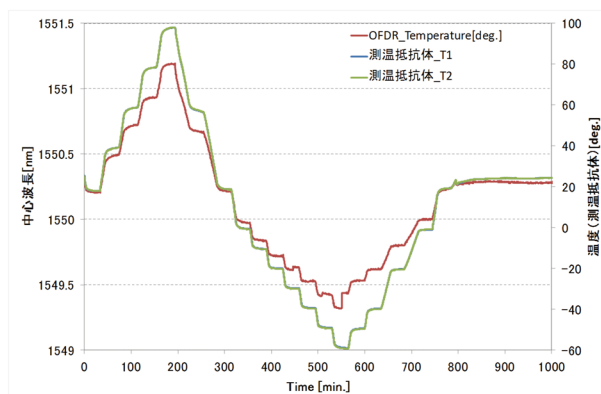


第61図: FBG-OFDR スペクトログラム

ファイルを示す。

7.4.3 温度環境付与試験

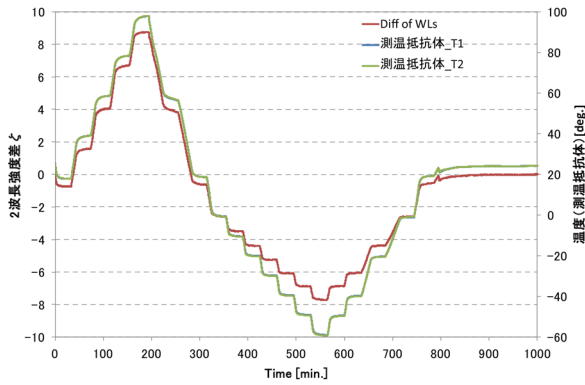
1. 試験実施要領，又は方法前項と同様のセットアップ状態とする。ただし，データ集録間隔を5秒とする。
2. 温度環境付与試験
 - 試験前点検（計測器材，試験治具及び供試体の目視点検等）を実施する。特に異常は見られなかった。



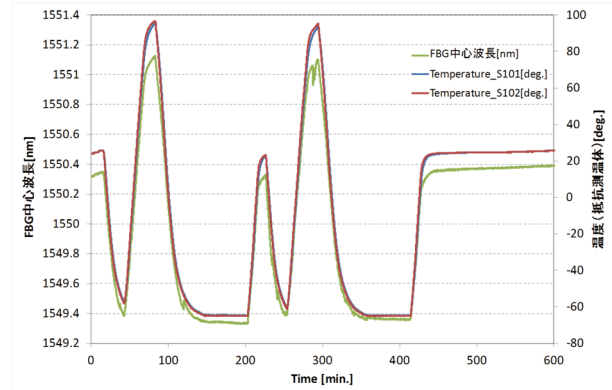
第64図: FBG 温度センサ 環境温度較正試験結果

- 第58図の温度プロファイルに基づき，試験を実施する【6サイクル実施】。
- 環境槽にて，測温抵抗体，FBG温度センサ，BOF温度センサの時間プロファイルを取得する。第68図にFBG温度センサの温度環境試験結果（反射波長計測）の時間プロファイルを，第69図にBOF温度センサの温度環境試験結果（2波長強度差計測）の時間プロファイルを示す。

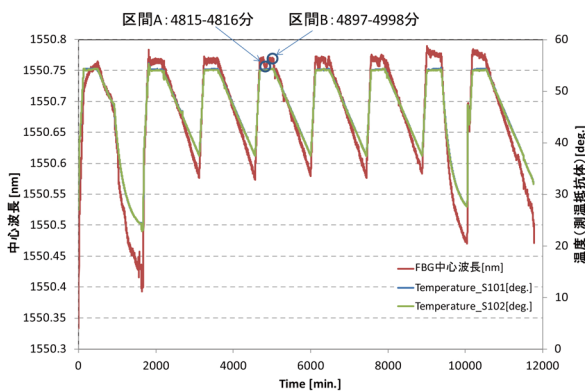
7.4.4 FBG / BOF センサ温度較正試験 2回目



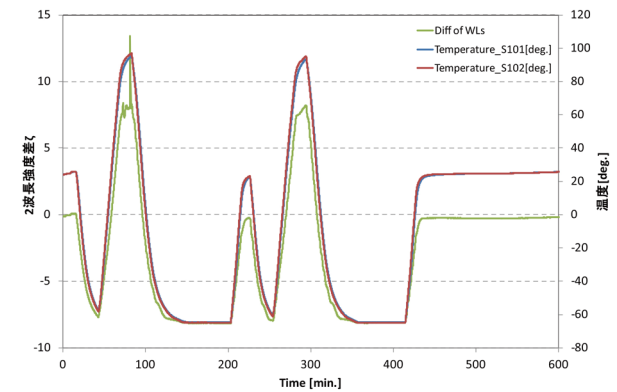
第65図: BOF 温度センサ 環境温度較正試験結果



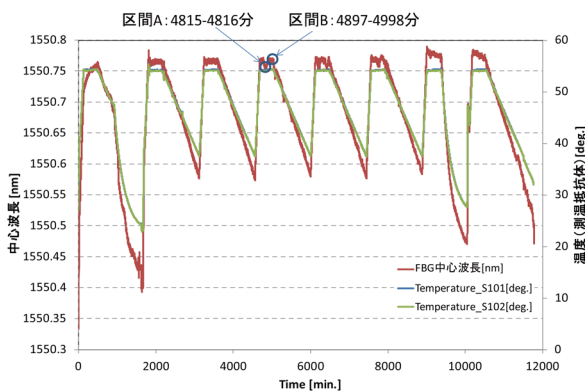
第68図: FBG 温度センサ 温度環境試験結果



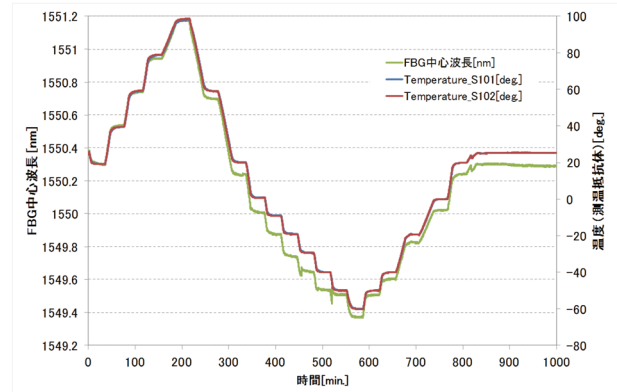
第66図: FBG 温度センサ 湿度環境試験結果



第69図: BOF 温度センサ 温度環境試験結果



第67図: BOF 温度センサ 湿度環境試験結果

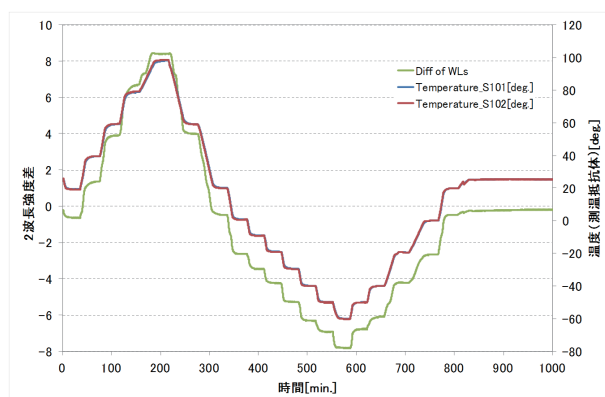


第70図: FBG 温度センサ 環境温度較正試験結果

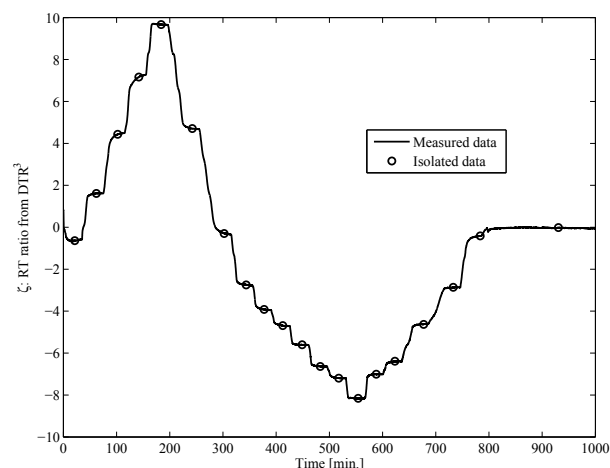
1. 試験実施要領, 又は方法前項と同様のセットアップ状態とする。ただし, データ集録間隔を5秒とする。
2. 温度環境付与試験
 - 第56図の温度プロファイルに基づき, 試験を実施する。
 - 環境槽にて, 測温抵抗体, FBG 温度センサ, BOF 温度センサの時間プロファイルを取得する。第70図にFBG 温度センサの環境温度較正試験結果 (反射波長計測) の時間プロファイルを, 第71図にBOF 温度センサの環境温度較正試験結果 (2波長強度差計測) の時間プロファイルを示す。

7.4.5 BOF/FBG センサ燃料長期浸漬試験 前節の温度環境付与試験, 湿度環境付与試験の後, 容器内に燃料を入れ, OTP-A センサを浸漬させ, 1年間の燃料浸漬試験を実施した。試験手順は, OTP-A センサと同様とした。1ヶ月に1度の定期点検時のセンサ診断記録を第30表に示す。

7.4.6 BOF/FBG センサ燃料長期浸漬試験 (1年間) 後の温度較正試験 燃料長期浸漬試験 (1年間) 終了後, 前節記載と同様の温度較正試験を再度実施した。環境槽にて, 測温抵抗体, FBG 温度センサ, BOF 温度センサの時間プ



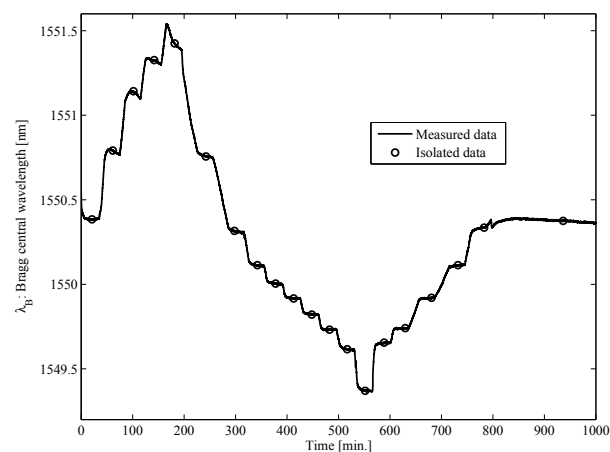
第71図: BOF 温度センサ 環境温度較正試験結果



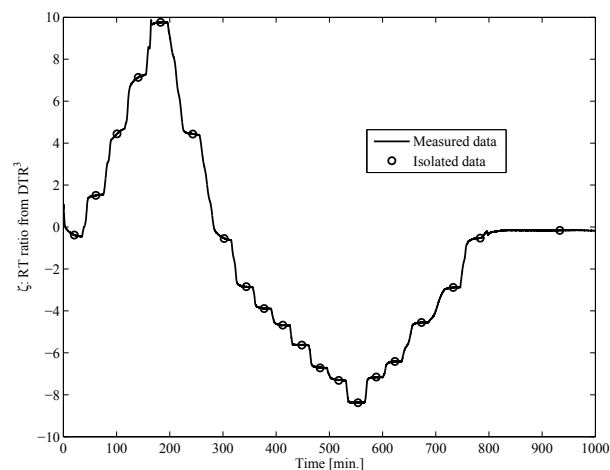
第72図: BOF 温度センサ 環境温度較正試験結果 1 回目

第30表: BOF/FBG センサ 診断結果 燃料長期浸漬試験

| 経過月 | 日付 | 時刻 | BOF-DWPR | | FBG-OFDR | | RTD-100 | |
|-------|------------|-------|-------------|-------------|------------|---------------|---------|---------|
| | | | [L=200mm] | | [L=200mm] | | T1 | T2 |
| | | | シリアルNo.L001 | シリアルNo.*** | シリアルNo.*** | シリアルNo.*** | | |
| | | | 温度 (°C) | Diff of WLs | 温度 (°C) | 中心波長 校正係数(nm) | 温度 (°C) | 温度 (°C) |
| 開始日 | 2011.10.13 | 15:58 | 22.94 | -0.1202 | 23.83 | 1550.289 | 25.31 | 25.1 |
| 1ヶ月 | 2011.11.16 | 15:30 | 18.6 | -0.572 | 46.29 | 1550.553 | 19.74 | 19.56 |
| 2ヶ月 | 2011.12.16 | 15:59 | 16.32 | -0.8059 | 52.47 | 1550.525 | 17.79 | 17.59 |
| 3ヶ月① | 2012.1.13 | 10:46 | 15.61 | -0.8795 | 27.03 | 1550.327 | 17.28 | 17.03 |
| 3ヶ月② | 2012.1.16 | 10:59 | 8.30 | -1.6180 | 20.79 | 1550.254 | 12.45 | 12.54 |
| 4ヶ月① | 2012.2.09 | 15:23 | 14.11 | -1.0317 | 71.1 | 1550.843 | 15.58 | 15.4 |
| 4ヶ月② | 2012.2.13 | --- | 12.43 | -1.203 | 41.25 | 1550.494 | 12.52 | 12.49 |
| 4ヶ月③ | 2012.2.14 | 10:59 | 12.44 | -1.20196 | 41.74 | 1550.499 | 14.57 | 14.53 |
| 5ヶ月② | 2012.3.05 | 13:59 | 16.90 | -0.747 | 49.46 | 1550.590 | 13.84 | 13.79 |
| 5ヶ月④ | 2012.3.13 | 11:34 | 16.90 | -0.747 | 49.46 | 1550.590 | 13.84 | 13.79 |
| 6ヶ月① | 2012.4.10 | 14:30 | 18.26 | -0.607 | 29.42 | 1550.355 | 19.03 | 18.96 |
| 6ヶ月③ | 2012.4.16 | 16:20 | 18.23 | -0.610 | 19.45 | 1550.238 | 18.25 | 18.23 |
| 7ヶ月① | 2012.5.16 | 11:35 | 27.04 | 0.31238 | 92.25 | 1551.091 | 22.01 | 21.77 |
| 7ヶ月② | 2012.5.16 | 12:05 | 22.05 | -0.21327 | 33.09 | 1550.398 | 22.55 | 22.32 |
| 7ヶ月② | 2012.5.20 | 13:00 | 21.05 | -0.3175 | 24.57 | 1550.298 | 22.95 | 22.91 |
| 7ヶ月③ | 2012.5.22 | 11:09 | 20.93 | -0.3306 | 21.99 | 1550.268 | 22.15 | 21.91 |
| 8ヶ月① | 2012.6.18 | 14:09 | 22.21 | -0.1965 | 89.03 | 1551.054 | 24.85 | 25.01 |
| 8ヶ月② | 2012.6.18 | 17:16 | 23.08 | -0.1056 | 45.03 | 1550.538 | 25.41 | 25.25 |
| 8ヶ月③ | 2012.6.19 | 10:51 | 23.87 | -0.0230 | 35.20 | 1550.423 | 25.01 | 24.91 |
| 8ヶ月④ | 2012.6.20 | 16:40 | 22.87 | -0.1278 | 34.76 | 1550.417 | 25.81 | 25.68 |
| 8ヶ月⑤ | 2012.6.21 | 17:17 | 23.44 | -0.0675 | 31.15 | 1550.375 | 25.95 | 25.85 |
| 8ヶ月⑥ | 2012.6.22 | 17:31 | 22.41 | -0.1755 | 31.58 | 1550.380 | 24.75 | 24.72 |
| 8ヶ月⑦ | 2012.6.25 | 17:31 | 22.45 | -0.1715 | 24.63 | 1550.30 | 24.76 | 24.64 |
| 9ヶ月① | 2012.7.24 | 11:26 | 23.83 | -0.0269 | 78.7 | 1550.932 | 26.85 | 26.82 |
| 9ヶ月② | 2012.7.24 | 11:45 | 26.38 | 0.24309 | 45.14 | 1550.539 | 27.71 | 27.62 |
| 9ヶ月③ | 2012.6.27 | 16:29 | 29.84 | 0.61232 | 37.41 | 1550.448 | 29.51 | 29.49 |
| 10ヶ月① | 2012.8.13 | 14:40 | 22.86 | 0.23386 | 85.56 | 1551.013 | 27.63 | 27.49 |
| 10ヶ月② | 2012.8.13 | 11:50 | | | 26.74 | 1550.323 | 27.69 | 27.58 |
| 10ヶ月③ | 2012.8.16 | 17:00 | 28.66 | 0.48567 | 26.69 | 1550.323 | 27.73 | 27.64 |
| 11ヶ月① | 2012.9.11 | 14:46 | 26.40 | 0.24505 | 91.96 | 1551.078 | 27.33 | 27.29 |
| 11ヶ月② | 2012.9.11 | 15:02 | 27.76 | 0.38958 | 26.97 | 1550.321 | 27.97 | 27.79 |
| 11ヶ月③ | 2012.9.14 | 14:22 | 27.43 | 0.35448 | 26.51 | 1550.321 | 28.07 | 27.82 |



第73図: FBG 温度センサ 環境温度較正試験結果 1 回目

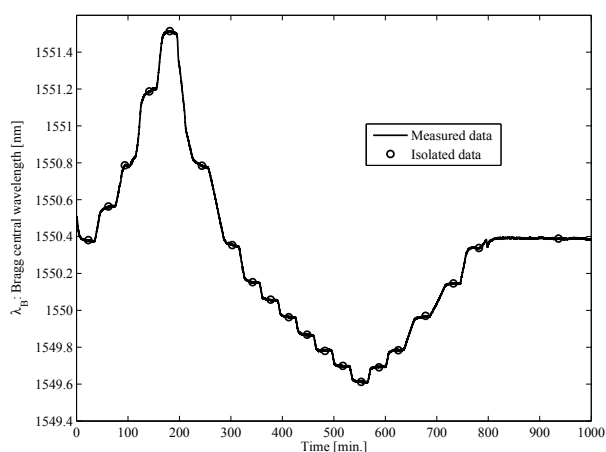


第74図: BOF 温度センサ 環境温度較正試験結果 2 回目

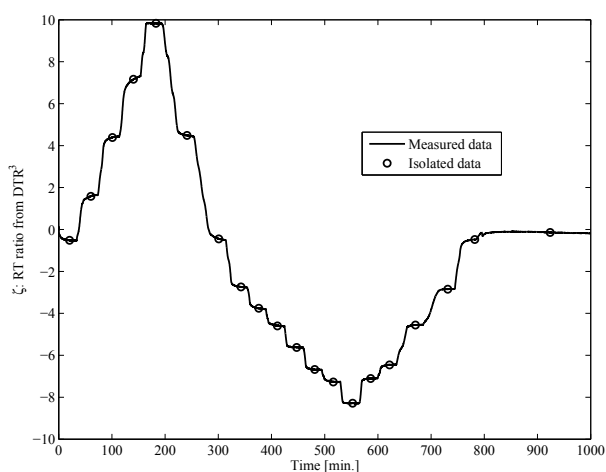
ロファイルを3回取得した。第72, 74, 76図にBOF温度センサの環境温度較正試験結果(2波長強度差計測)の時間プロフィールを、第73, 75, 77図にFBG温度センサの環境温度較正試験結果(反射波長計測)の時間プロファイ

ルを示す。同時に、環境槽の温度・湿度/時間データを記録する

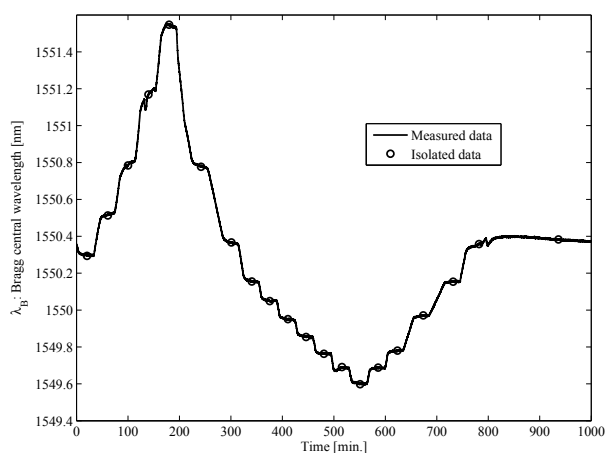
7.5 考察



第75図: FBG 温度センサ 環境温度較正試験結果 2 回目



第76図: BOF 温度センサ 環境温度較正試験結果 3 回目



第77図: FBG 温度センサ 環境温度較正試験結果 3 回目

7.5.1 温度較正試験

● FBG 温度センサ

1. 較正係数の算出

温度一定とした時の FBG 反射波長の平均を抽出、そのとき測温抵抗体で測定した温度に対する特性を線形近似し、温度較正特性を求める。FBG 温度センサの温度較正特性を第 78 図に示す。

FBG 反射波長は、最大ピーク強度を示す波長のピーク強度 30%以上を持つ波長で、強度の重みづけをして平均化処理をした値とした。

また、温度を一定にした時の FBG 反射波長を抽出するために、まず較正試験の結果平均化処理を施した中心波長の時間プロファイルデータを、ウィンドウ幅 $t_i=150[\text{sec}]$ (データ点数 10 点) でコンボリューションによる平滑化を施す。次に、300 秒後の中心波長と比較した時に、波長差が $0.02[\text{nm}]$ 以上となる値を抽出することで、温度一定時の中心波長を抽出する。抽出した中心波長から得られた、温度較正特性の式は以下の通りとなった。ここで、 λ [nm] は FBG 反射波長、 $T[\text{deg.}]$ とする。

$$T = 85.313\lambda - 1.3224 \times 10^{-5}[\text{deg.}] \quad (1)$$

2. 較正係数の温度計測精度検証

前項で導出した温度較正係数による計測結果の較正の精度を確認するため、温度較正試験の温度一定時の FBG 中心波長を前述した通りに抽出し較正係数で温度に換算し、測温抵抗体の示す温度に対する温度計測精度を評価した。測温抵抗体指示値に対するずれを示す R2 乗値は、0.9929 と比較的高い値を示し、温度較正の妥当性を確認した。第 79 図にその較正係数の温度計測精度検証結果を示す。

3. ヒステリシスの影響

環境温度の増減に対するヒステリシスの影響を検討する。第 80 図に、FBG 温度センサと測温抵抗体の中心波長/温度のプロファイルの比較を示す。

最大ヒステリシスは、第 78 図より、FBG 中心波長 $1549.427[\text{nm}] \sim 1549.435[\text{nm}]$ において、 $9.956[\text{deg.}]$ のヒステリシス差が見られた。ヒステリシスは低温側の変化の時に比較的大きくみられた。ここで、 $560[\text{min.}]$ で温度一定とみなして抽出された箇所においては、第 80 図の、測温抵抗体が示す温度変化と FBG 中心波長の変化を比べてみると分かる通り、環境槽温度はまだ設定温度の $-60[\text{deg.}]$ から変化していないにも関わらず、FBG センサの中心波長は長波長側にシフトし、温度が上昇する方向に動いている。また、第 80 図の経過時間 $500[\text{min.}]$ 付近に注目すると、温度を下げた後に中心波長が下がった後、少し長波長側に戻り、その後定常状態になる現象が起きているのが分かる。従って、FBG の周囲のスリーブの温度低下による収縮などの変形に伴い、スリーブと FBG センサ部における摩擦の影響で FBG が収縮するように引っ張られた影響で、ヒステリシス差が増大したと考えられる。

● BOF 温度センサ

1. 較正係数の算出

FBG 温度センサの校正係数の算出の方法と同様に、温度一定とした時の BOF2 波長強度差の平均を抽出、そのとき測温抵抗体で測定した温度に対する特性を線形近似、多項式（2 次）近似し、温度校正特性を求めた。BOF 温度センサの温度校正特性を第 81 図に示す。

また、温度を一定にした時の BOF2 波長強度差を抽出するために、まず校正試験の結果平均化処理を施した 2 波長強度差の時間プロファイルデータを、ウィンドウ幅 $t_i=250[\text{sec}]$ （データ点数 10 点）でコンボリューションによる平滑化を施す。次に、50 秒後の 2 波長強度差と比較した時に、2 波長強度差の差が 0.02 以上となる値を抽出することで、温度一定時の 2 波長強度差を抽出する。

温度校正特性の線形近似式、多項式近似式はそれぞれ以下の通りとなった。ここで、 ζ は BOF2 波長強度差とする。

$$T = 9.5081 * \zeta + 20.155[\text{deg.}] \quad (2)$$

$$T = -0.1577 * \zeta^2 + 9.5013 * \zeta + 24.084[\text{deg.}] \quad (3)$$

R2 乗値は、それぞれ、0.9936、0.9996 となり、多項式（2 次）近似の方が高いため、多項式近似を校正係数として採用することにする。

2. 校正係数の温度計測精度検証

前項で導出した温度校正係数による計測結果の校正の精度を確認するため、温度校正試験の温度一定時の BOF2 波長強度差を抽出し線形近似による校正係数で温度に換算し、測温抵抗体の示す温度に対する誤差を評価した。測温抵抗体指示値に対するずれを示す R2 乗値は、0.9936 と比較的高い値を示し、温度校正の妥当性を確認した。第 82 図にその校正係数の温度計測精度検証結果を示す。

3. ヒステリシスの影響

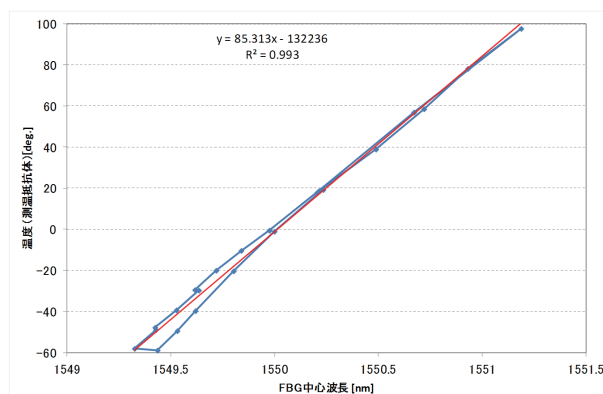
FBG 温度センサのヒステリシスの影響の検討と同様に、BOF 温度センサの環境温度の増減に対するヒステリシスの影響を検討するため、BOF 温度センサの校正後の温度の測温抵抗体で計測した温度に対する分布を取得した。第 83 図に、BOF 温度センサと測温抵抗体の 2 波長強度差／温度のプロファイルの比較を示す。校正係数を算出する際に抽出した温度一定の計測データをサンプルとした。第 83 図から分かる通り、ヒステリシスはほとんど見られなかった。

7.5.2 湿度環境付与試験

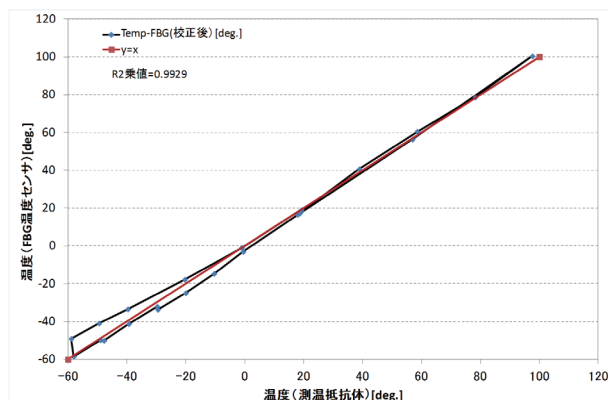
● FBG 温度センサ

1. 校正係数の温度計測精度検証

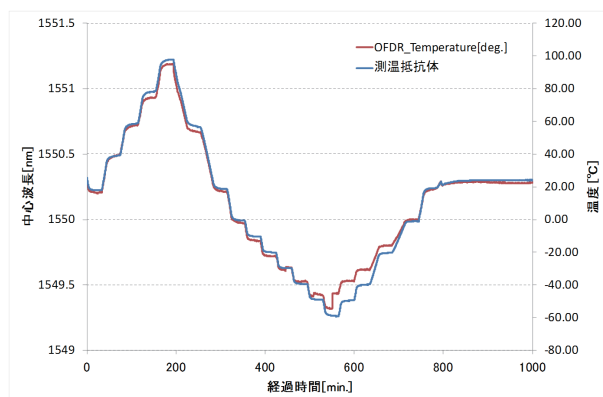
湿度環境付与試験試で得られた反射波長を、温度校正試験で得られた校正係数を用いて換算し得られた、FBG 温度センサの温度の、測温抵抗体の温度の特性を取得し、基準となる測温抵抗体の温度と比較し、温度計測精度の検証を行った。第 84 図に、FBG 温度セ



第 78 図: FBG 温度センサ 温度校正特性

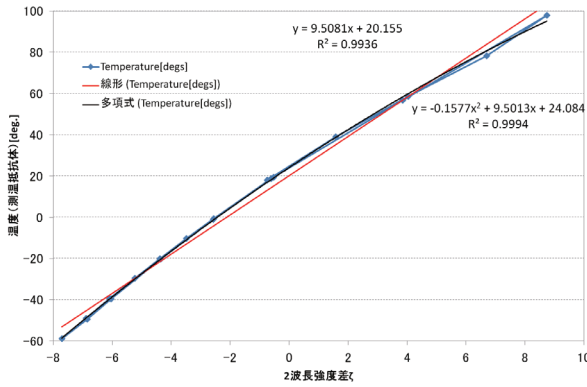


第 79 図: FBG 温度センサ 温度校正特性 校正係数の温度計測精度検証

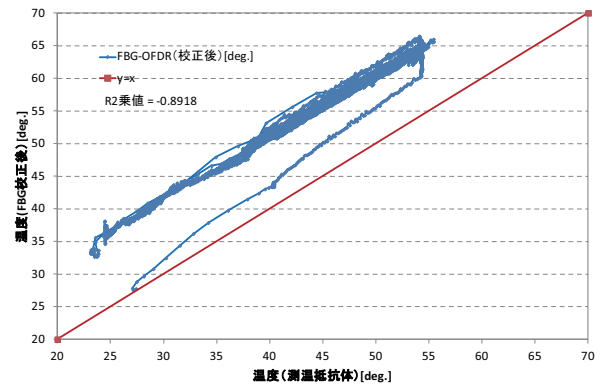


第 80 図: FBG 温度センサと測温抵抗体の中心波長／温度のプロファイルの比較

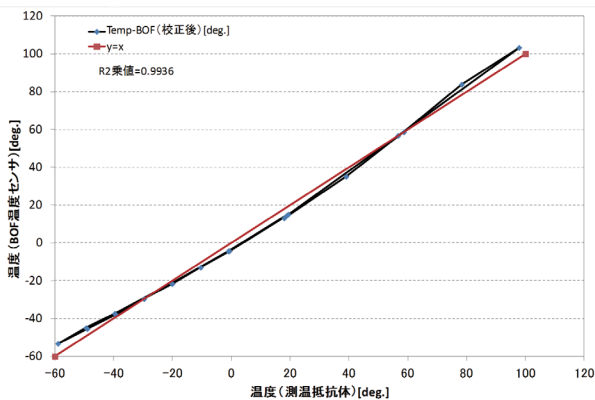
ンサの湿度環境試験における校正係数に基づく計測結果の温度計測精度検証について示す。FBG 温度センサの出力は、線形補間をかけて、測温抵抗体の温度出力と同時刻の FBG 温度センサの温度出力を取得し、R2 乗値を見積もった。R2 乗値は-0.8918 と負の値となり大変に小さくなった。これは、高湿度環境で FBG 中心波長が長波長側にバイアスがかかっている状態となり、FBG に引っ張りの張力がかかったためと思われる。



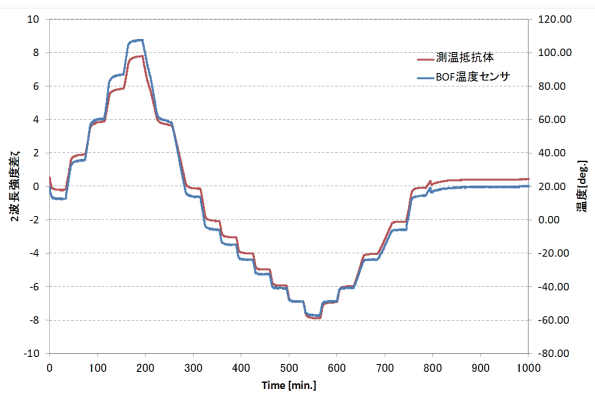
第81図: BOF 温度センサ 温度較正特性



第84図: FBG 温度センサ 湿度環境試験における較正係数に基づく計測結果



第82図: BOF 温度センサ 温度較正特性 較正係数の温度計測精度検証



第83図: BOF 温度センサと測温抵抗体の2波長強度差／温度のプロファイルの比較

る。その原因としては、FBG 周囲のスリーブの膨張、FBG の皮膜の影響が考えられる。

2. 波長分解能の違いによる比較

本試験で、湿度環境試験の時間プロファイルにおいて、時間に対する中心波長の変動が 20 pm 程度見られたため、解析時の波長分解能を 20pm から 5pm に変えて再度較正特性を取得した。変動幅は、温度一定時において、波長分解能 20pm の時は 22.7 pm、波長分

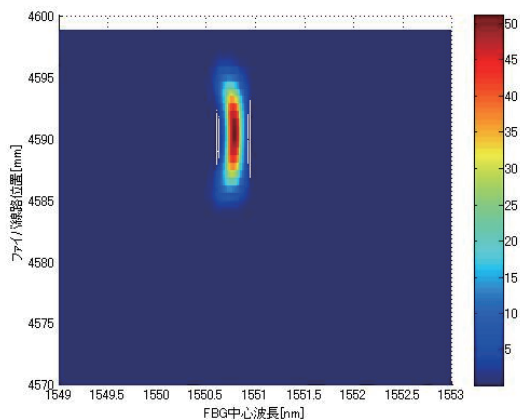
解能 5pm の時は 23.3 pm と、ほぼ同様の結果となったため、この影響は無いと考えられる。

3. 高温時の反射波長の変動の検討 第 66 図に示す通り、湿度 85%RH 以上、温度 50deg. 以上の時に、FBG 反射波長の揺らぎが見られた。FBG 反射波形を検討するため、第 81 図に示すように、経過時間 4815～4816[min.], 4897～4998[min.] の、それぞれ FBG 反射波長プロファイルが谷と一定の時の FBG-OFDR スペクトログラムを抽出し、波形に異常があるか確認する。第 85 図 (a)-(b) に示す、区間 A におけるスペクトログラムに着目すると、分布の位置方向の両端が短波長側に引っ張られるような波形になっているのが分かる。この影響で、環境槽温度を 55deg. 一定時の FBG 中心波長は、第 85 図から、約 20pm の変動が見られた。温度に換算すると、約 1.68[deg.] となる。これは高湿度環境によって、スリーブからの応力が FBG センサに働いたためと考えられる。OFDR システムは位置分解能 1mm の詳細な反射波長分布を捉えられるため、このような外乱の影響も見ることが可能である。

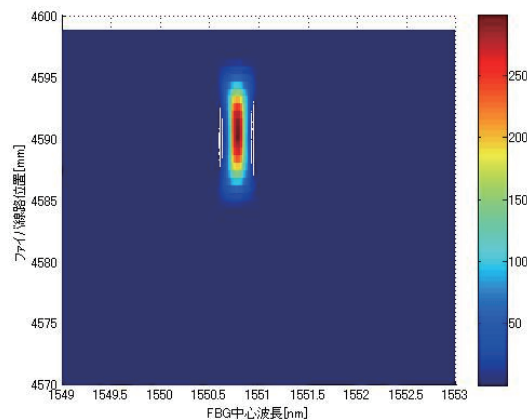
● BOF 温度センサ

1. 較正係数の温度計測精度検証

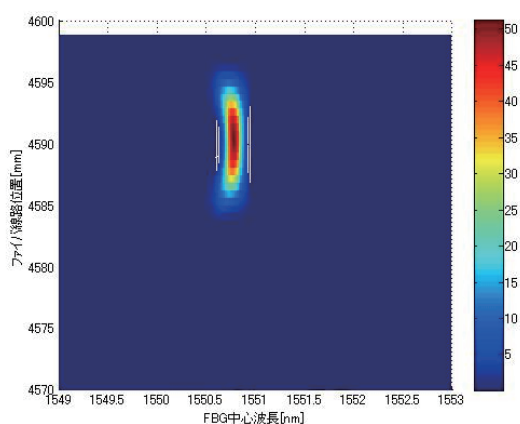
湿度環境付与試験で得られた反射波長を、温度較正試験で得られた較正係数を用いて換算し得られた、BOF 温度センサの温度の、測温抵抗体の温度の特性を取得し、基準となる測温抵抗体の温度からのずれ量の検討を行った。BOF 温度センサの出力は、線形補間を施し、測温抵抗体の温度出力と同時刻の BOF 温度センサの温度出力を較正係数を用いて取得し、R2 乗値を見積もった。R2 乗値は 0.9637 と比較的高くなり、計測精度は確保されていることを確認した。また、環境温度に対して BOF 温度センサ出力に周期的揺らぎが見られた。温度環境サイクルを繰り返しても同様の動きが見られたため、センサ特有の傾向であると考えられる。第 87 図に BOF 温度センサの湿度環境試験における較正係数に基づく計測結果の温度計測精度検証結果を示す。



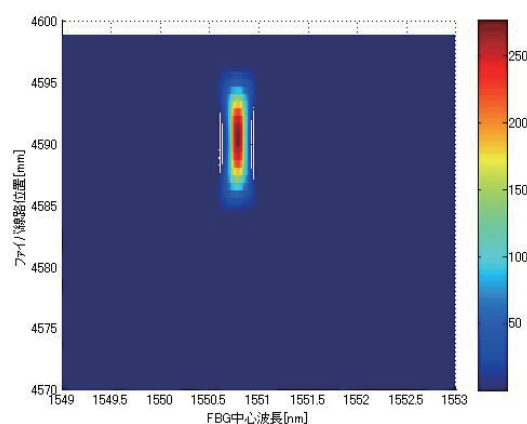
(a)



(a)



(b)



(b)

第85図: 湿度環境試験におけるFBG-OFDR スペクトログラム異常箇所・区間 A (谷)

第86図: 湿度環境試験におけるFBG-OFDR スペクトログラム異常箇所・区間 B (一定)

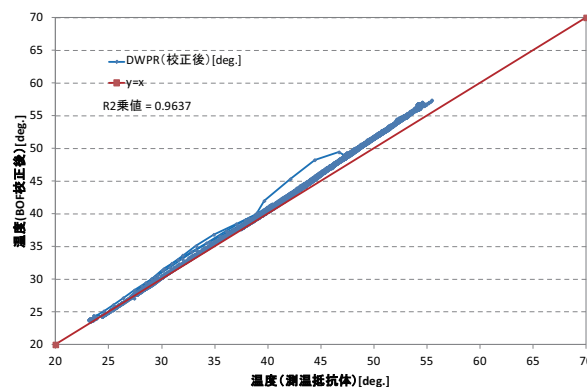
7.5.3 温度環境付与試験

● FBG 温度センサ

温度環境付与試験で得られた FBG 温度センサの反射波長を、式 (1) で示す温度校正試験で得られた校正係数を用いて温度に換算し、基準となる測温抵抗体の温度からのずれ量の検討を行った。第 88 図に FBG 温度センサの温度環境試験における校正係数に基づく計測結果の温度計測精度検証結果を示す。FBG 温度センサの出力に線形補間を施し、測温抵抗体の温度出力と同時刻の FBG 温度センサの温度出力を 4 秒毎に取得し、測温抵抗体の温度に対する R2 乗値を見積もった。R2 乗値は 0.9714 となり、多少の誤差が見られたが、これは式 (1) で示す校正係数がヒステリシスの影響を大きく受けたためと考えられる。

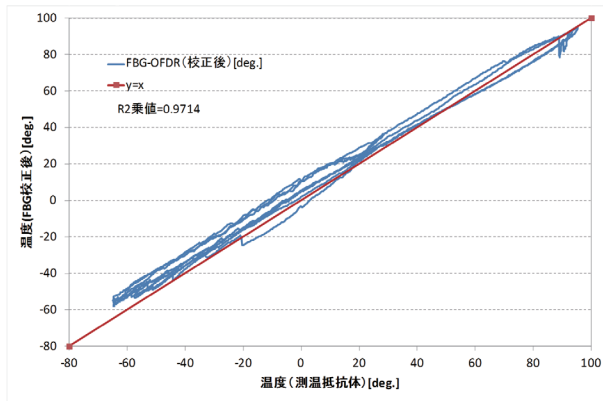
● BOF 温度センサ

前項の FBG 温度センサの理想温度からのずれ量の検討と同様に、式 (3) で示す温度校正試験で得られた校正係数を用いて BOF 温度センサの温度を換算し、基準となる測温抵抗体の温度からのずれ量の検討を行った。第 89 図に BOF 温度センサの温度環境試験にお

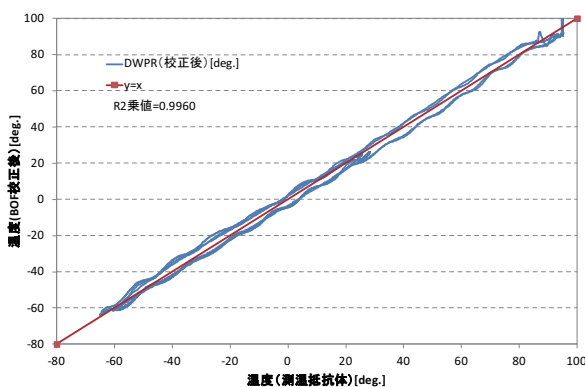


第87図: BOF 温度センサ 湿度環境試験における校正係数に基づく計測結果

ける校正係数に基づく計測結果の温度計測精度検証結果を示す。BOF 温度センサの出力に線形補間を施し、測温抵抗体の温度出力と同時刻の BOF 温度センサの温度出力を 4 秒毎に取得し、測温抵抗体の温度に対する R2 乗値を見積もった。R2 乗値は 0.9960 となった。



第88図: FBG 温度センサ 温度環境試験における校正係数に基づく計測結果



第89図: BOF 温度センサ 温度環境試験における校正係数に基づく計測結果

100deg. 近くの高温時に BOF 温度センサの出力が急激に大きくなり不安定になる現象が見られたが、概ねよく温度を計測できていると思われる。

7.5.4 温度校正試験 2 回目

● FBG 温度センサ

1. 校正係数の算出

温度一定とした時の FBG 反射波長の平均を抽出、そのとき測温抵抗体で測定した温度に対する特性を線形近似し、温度校正特性を求める。ここでは平滑化は行わずに、校正試験の出力値で算出を行った。抽出した中心波長から得られた、温度校正特性の式は以下の通りとなった。ここで、 λ [nm] は FBG 反射波長、 T [deg.] とする。

$$T = 85.948\lambda - 1.3322 \times 10^5 [\text{deg.}] \quad (4)$$

得られた温度校正特性は、R2 乗値 0.9946 と、7 月試験時より R2 乗値は高くなったものの、線形性からのずれがみられる第 90 図の 520[min.] 頃において、環境温度が変化するタイミングで FBG 反射波長が短波長側に移動できていないのが分かる。これも、スリーブからの応力が働き、FBG 温度センサが摩擦によって収縮できなかったためと考えられる。

2. 温度校正試験による計測再現性の確認 2 回目の温度校正試験で得られた反射波長を、1 回目の温度校正試験で得られた校正係数を用いて換算し得られた、FBG 温度センサの温度の、測温抵抗体の温度の特性を取得し、基準となる測温抵抗体の温度との比較をし、温度計測精度の検証を行った。FBG 温度センサの出力は、ヒステリシスの影響の検討の時と同様に、線形補間をかけて、測温抵抗体の温度出力と同時刻の FBG 温度センサの温度出力を取得し、R2 乗値を見積もった。R2 乗値は 0.9929 と比較的高い値を示し、計測の再現性を確認した。

● BOF 温度センサ

1. 校正係数の算出

FBG 温度センサの校正係数の算出の方法と同様に、温度一定とした時の BOF2 波長強度差を抽出する。ただし、2 波長強度差の抽出条件は、50 秒後の 2 波長強度差と比較して差が 0.18 以上となる箇所とした。そのとき測温抵抗体で測定した温度に対する特性を線形近似、多項式 (2 次) 近似し、温度校正特性を求める。ここで、FBG 温度センサ校正と同様に、平滑化は行わず、校正試験の出力値で算出を行った。温度校正特性の線形近似式、多項式近似式はそれぞれ以下の通りとなった。ここで、 ζ は BOF2 波長強度差、 T [deg.] は温度とする。

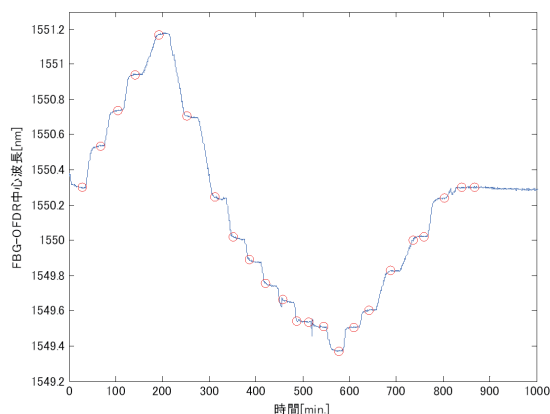
$$T = 9.6617 * \zeta + 21.28 [\text{deg.}] \quad (5)$$

$$T = -0.1759 * \zeta^2 + 9.6166 * \zeta + 25.471 [\text{deg.}] \quad (6)$$

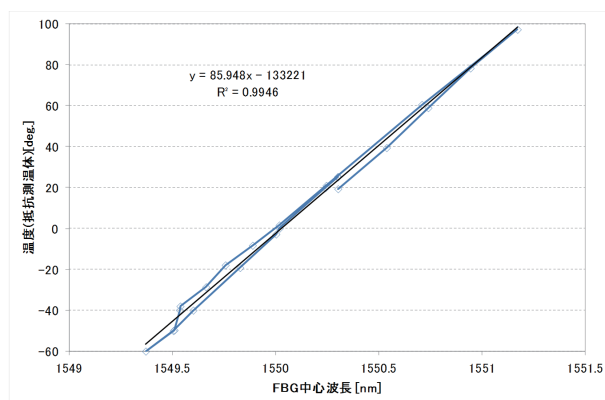
R2 乗値はそれぞれ、0.991、0.9982 となり、1 回目の BOF 温度センサ校正試験結果とほぼ同様の R2 乗値となる温度校正特性が得られた。

2. 温度校正試験による計測再現性の確認 2 回目の温度校正試験で得られた 2 波長強度差を、1 回目の温度校正試験で得られた校正係数の線形近似、多項式近似を用いて換算する。その BOF 温度センサの温度と、基準となる測温抵抗体の温度との比較をし、温度計測精度の検証を行った。第 93、94 図にそれぞれ、BOF 温度センサの温度校正試験 2 回目の、校正係数 1 次と 2 次に基づく計測結果の温度計測精度検証結果を示す。BOF 温度センサの出力は、線形補間を施し、測温抵抗体の温度出力と同時刻の BOF 温度センサの温度出力を取得し、R2 乗値を見積もった。R2 乗値は線形近似校正係数で 0.9894、多項式近似校正係数で 0.9978 と比較的高い値を示し、計測の再現性を確認した。ここでも、前回温度校正試験と同様に、環境温度に対して周期的な揺らぎが見られた。

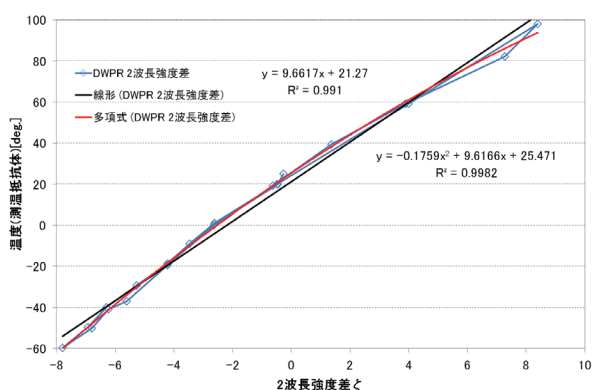
7.5.5 BOF/FBG センサ燃料長期浸漬試験 1 年間の燃料浸漬の間に、月に 1 度温度計測を実施し定期点検を行った。BOF センサ、FBG センサを燃料浸漬から取り出し、1 時間後に計測を行った。BOF センサは、燃料から取り出し



第90図: FBG 温度センサ 環境温度校正試験結果 (2 回目) と校正用データサンプル抽出点



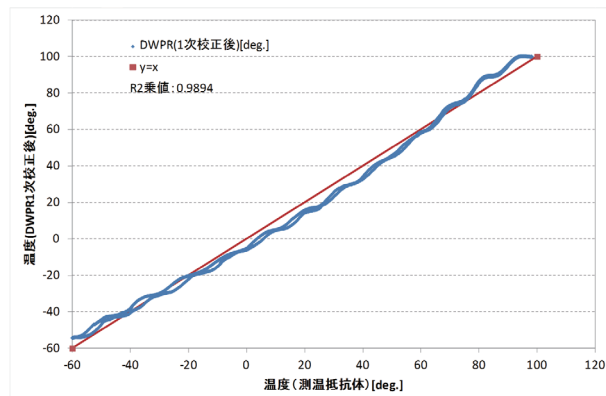
第91図: FBG 温度センサ 温度校正特性 (2 回目)



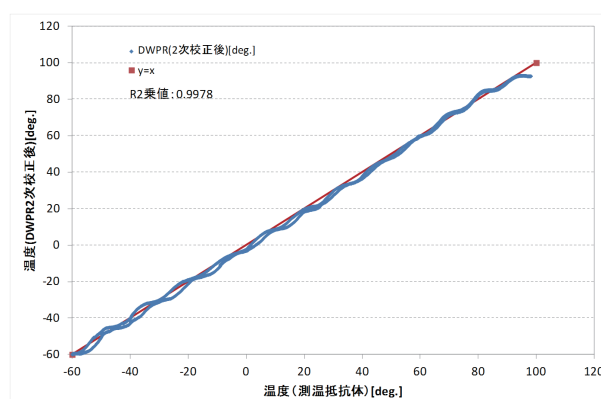
第92図: BOF 温度センサ 温度校正特性 (2 回目)

1~2 時間後では、参照用温度センサの測温抵抗体 RTD-100 に比べ、5℃前後高い温度を示していたが、24 時間経過後には同程度の温度となっていた。

一方、FBG センサは、24 時間経過後も大幅に大きい温度を示し、4 日~7 日経過後に参照用の測温抵抗体とほぼ同じ温度値を示していた。これは、燃料浸漬時に FBG センサのファイバが組み込まれているスリーブ内部に燃料が浸



第93図: BOF 温度センサ 温度校正特性 (2 回目) 校正係数 (1 次) に基づく計測結果



第94図: BOF 温度センサ 温度校正特性 (2 回目) 校正係数 (2 次) に基づく計測結果

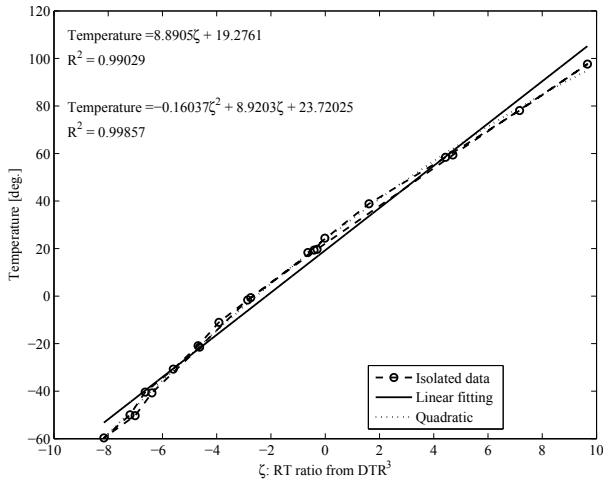
食し、何らかの応力が FBG センサ部に働いたためと推測する。FBG センサは、温度上昇にともない計測物理量である Bragg 中心波長が長波長側にシフトするが、ひずみに対しても Bragg 中心波長のシフトが生じるため、温度上昇とみられた現象は、ひずみが発生したためと考えられる。したがって、FBG センサスリーブの構造を検討する必要があると考えられる。

7.5.6 BOF/FBG センサ燃料長期浸漬試験後温度校正試験

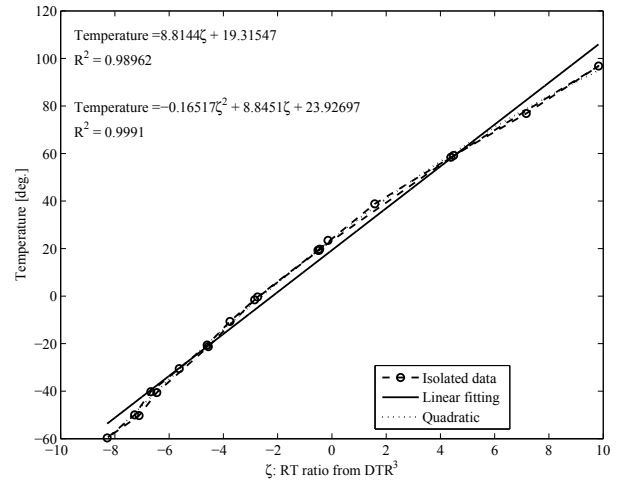
● BOF 温度センサ

1. 校正係数の算出

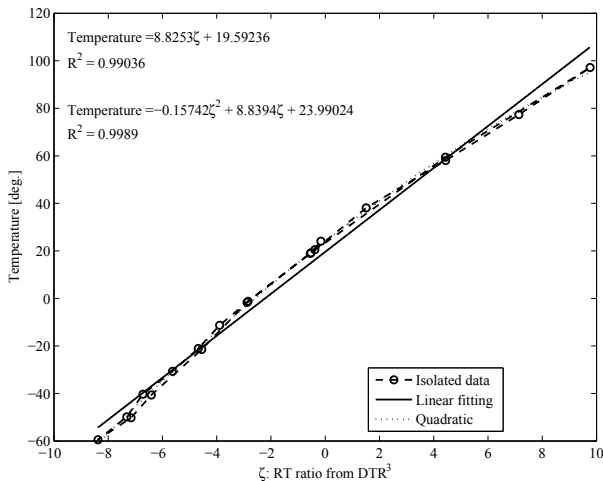
FBG 温度センサの校正係数の算出の方法と同様に、温度一定とした時の BOF2 波長強度差を抽出する。ただし、2 波長強度差の抽出条件は、50 秒後の 2 波長強度差と比較して差が 0.18 以上となる箇所とした。そのとき測温抵抗体で測定した温度に対する特性を線形近似、多項式 (2 次) 近似し、温度校正特性を求める。平滑化は行わず、校正試験の出力値で算出を行った。3 回の温度校正試験で得られた温度校正特性を、第 95、96、97 図に示す。温度校正試験 1 回目、2 回目、3 回目に対する、温度校正特性の線形近似式、多項式近似式



第95図: BOF 温度センサ 温度較正特性 温度較正試験 1 回目



第97図: BOF 温度センサ 温度較正特性 温度較正試験 3 回目



第96図: BOF 温度センサ 温度較正特性 温度較正試験 2 回目

はそれぞれ以下の通りとなった。ここで、 ζ は BOF2 波長強度差、 $T[\text{deg.}]$ は温度とする。

$$T = 8.89 * \zeta + 19.276[\text{deg.}] \quad (7)$$

$$T = -0.16 * \zeta^2 + 8.92 * \zeta + 23.72[\text{deg.}] \quad (8)$$

$$T = 8.825 * \zeta + 19.592[\text{deg.}] \quad (9)$$

$$T = -0.157 * \zeta^2 + 8.840 * \zeta + 23.99[\text{deg.}] \quad (10)$$

$$T = 8.814 * \zeta + 19.315[\text{deg.}] \quad (11)$$

$$T = -0.165 * \zeta^2 + 8.845 * \zeta + 23.927[\text{deg.}] \quad (12)$$

R2 乗値は温度較正試験 1 回目が 0.990, 0.999, 2 回目が 0.990, 0.999, 3 回目が 0.990, 0.999 となり、燃料浸漬試験実施前の BOF 温度センサ較正試験結果とほぼ同様の R2 乗値となる温度較正特性が得られた。

● FBG 温度センサ

1. 較正係数の算出

温度一定とした時の FBG 反射波長の平均を抽出、そのとき测温抵抗体で測定した温度に対する特性を線形近似し、温度較正特性を求める。ここでは平滑化は行わずに、較正試験の出力値で算出を行った。3 回の温度較正試験で得られた温度較正特性を、第 98, 99, 100 図に示す。抽出した中心波長から得られた、温度較正試験 1 回目, 2 回目, 3 回目に対する温度較正特性の式は以下の通りとなった。ここで、 λ [nm] は FBG 反射波長、 $T[\text{deg.}]$ とする。

$$T = 76.643\lambda - 1.1880 * 10^5[\text{deg.}] \quad (13)$$

$$T = 87.092\lambda - 1.3501 * 10^5[\text{deg.}] \quad (14)$$

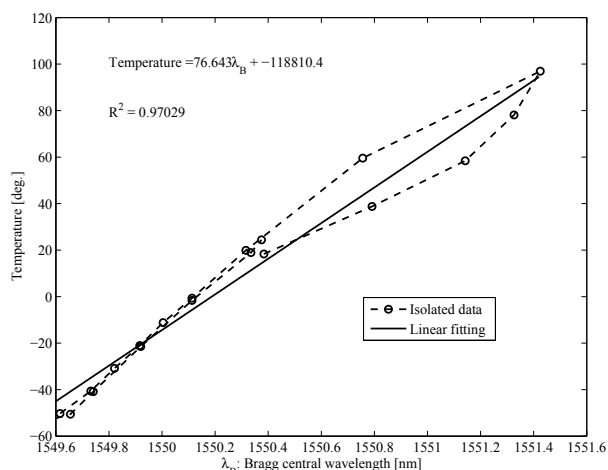
$$T = 86.236\lambda - 1.33682 * 10^5[\text{deg.}] \quad (15)$$

得られた温度較正特性は、R2 乗値がそれぞれ、0.9703, 0.9767, 0.9708 となった。1 回目の温度較正試験で高温側でヒステリシスがおきているが、これも、燃料浸漬試験前の温度較正試験で見られたような、スリーブからの応力が働き、FBG 温度センサが摩擦によって収縮できなかったためと考えられる。2 回目以降はヒステリシスの現象が緩和され、温度較正特性も 2 回目, 3 回目は同様の特性が得られた。

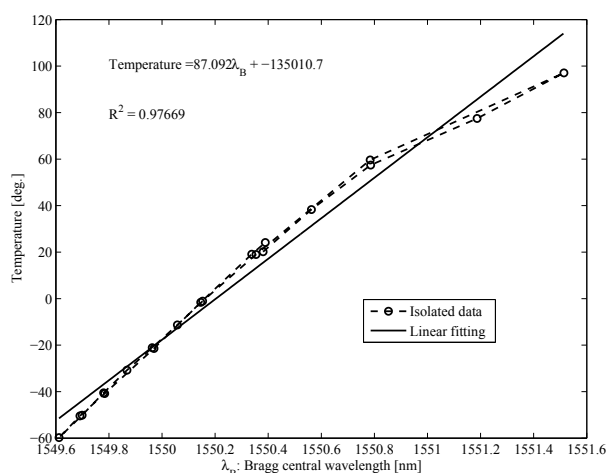
7.6 試験結果まとめ

7.6.1 温度較正試験 環境槽の温度を $-60\text{deg.} \sim +100\text{deg.}$ の範囲で 2 サイクルの温度環境付与試験を行い、测温抵抗体出力を温度で、FBG センサ出力を Bragg 中心反射波長、DWPR センサ出力を 2 波長強度差で計測した。試験の結果では再現性があることを確認し、本結果を較正データとして利用できることを確認した。

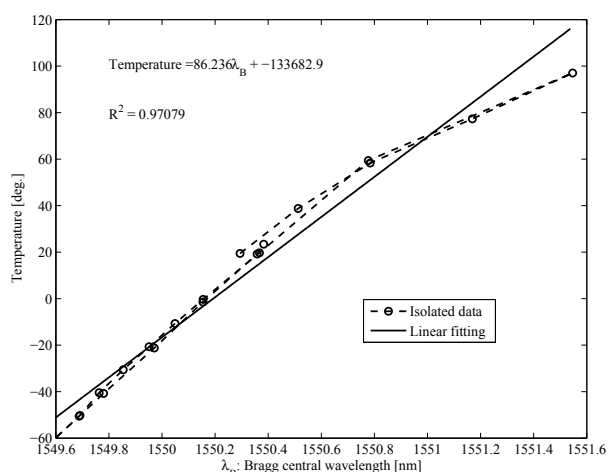
7.6.2 湿度環境付与試験 環境槽の温度/湿度範囲を、 $+38\text{deg.} \sim +55\text{deg.}$, 湿度範囲を 85%RH \sim 95%RH で 6 サイクルの湿度環境付与試験を行った。試験結果から、FBG センサ, BOF センサが、本温度環境に耐えられることが確



第98図: FBG 温度センサ 温度較正特性 温度較正試験 1 回目



第99図: FBG 温度センサ 温度較正特性 温度較正試験 2 回目



第100図: FBG 温度センサ 温度較正特性 温度較正試験 3 回目

認できた。

7.6.3 温度環境付与試験 環境槽の温度を-65deg.～+100deg. の範囲で 2 サイクルの温度環境付与試験を行っ

た。試験結果は、FBG センサ、BOF センサが、本温度環境に耐えられることが確認できた。

7.6.4 燃料長期浸漬試験 温度環境付与試験、湿度環境付与試験の後、容器内に燃料を入れ、BOF、FBG センサを浸漬させ、1 年間の燃料浸漬試験を実施した。本燃料浸漬試験は、OTP-A と同じ手順で実施した。試験結果は、BOF センサ出力は安定していたが、FBG センサは燃料から取り出した後に出力値が高くなっている現象が見られた。燃料浸漬から取り出し、燃料無の環境下で数日経過させると、出力は通常値を示す結果となった。これは、FBG センサは温度測定時の物理量である Bragg 反射波長はひずみにも感知するために、燃料が FBG センサのスリーブ内部に浸食し、FBG に応力がかかるようになり Bragg 反射波長が長波長側にシフトし、温度が上昇した時と同じ変化を生じたためと考えられる。BOF センサは使用に耐えることを確認した。FBG センサは燃料浸漬に関して、センサスリーブと内部の FBG 設置構造を今後検討する必要がある。

8. ま と め

航空機の燃料タンク内に取り付け可能な小型かつ耐環境性に優れたセンサとして、光ファイバ温度計測システムを採用し、その信頼性の検証試験を実施した。OpSens 社の OTP-A は、振動衝撃試験、1 年間の燃料浸漬長期試験、耐環境性試験において、使用に耐える性能を有していることを確認した。FBG センサは、試験結果から、振動環境、燃料浸漬試験においてスリーブ内で働く応力の影響が働いていると見られたため、今後スリーブ内の設置構造を改善が必要と考えられる。BOF センサは、振動環境試験で温度出力の揺らぎが僅かに確認され、計測較正の方法を今後検討していく必要があるものの、耐環境試験、燃料浸漬長期試験では出力は安定しており使用に耐える性能を有していることを確認した。

今後は、OpSens 社の OTP-A に関しては引き続き燃料浸漬試験を実施し、長期の耐環境性能の検証を行っていく。

9. 謝 辞

本報告に記載の試験実施に際し、IHI ジェットサービス(株) 丹諭氏、蓮實理雄氏、小塚雄一郎氏にご協力頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) OpSens 社: <http://www.opsens.com/en/industries/products/temperature/otp-a/>.
- 2) Kersey, A.D., Davis, M.I., Patrick, H.J., LeBlanc, M., Koo, K.P., Askins, C.G., Putman, M.A. and Friebele, E.J.: Fiber Grating Sensors, J. Lightwave Technol. 15 (8) (1997), pp. 1441-1463.
- 3) H. Igawa, K. Ohta, T. Kasai, I. Yamaguchi, H. Murayama and K. Kageyama, "Distributed Measurements with a long gauge FBG sensor using optical frequency domain reflectometry (1st report, system investigation using optical simulation model), JSMME., 2 (2008), pp. 1242-1252.
- 4) D Wada, H Murayama, H Igawa, K Kageyama, K Uzawa and K Omichi, "Simultaneous distributed measurement of strain and temperature by polarization maintaining fiber Bragg

- grating based on optical frequency domain reflectometry”, Smart Mater. Struct. 20 (2011) 085028.
- 5) Onoda, S.; Tsukamoto, N.; Ogino, M.; Yamashita, K.; Yumoto, O.; Inoue, K.; Komatsu, Y., ”A Proposal of Temperature Sensing Using a Thin-Film Bandpass Filter and Dual-Wavelength Push-Pull Reflectometry,” Photonics Technology Letters, IEEE , vol.20, no.9, pp.688,690, May1, 2008.
- 6) Seiichi Onoda ; Keiichi Inoue ; Masayuki Nakano ; Yasutoshi Komatsu; Fiber optic multipoint pressure and temperature sensing system using BOF/DWPR. Proc. SPIE 8197, 2011.

