

# 衛星用太陽電池パネルの健全性評価手法

関根一史\* 小林裕希\*\*\*  
竹谷元\*\* 宇都宮真†  
世古博巳\*\*

## Health Monitoring Method for Satellite Solar Array Panel

Kazushi Sekine, Hajime Takeya, Hiromi Seko, Yuki Kobayashi, Shin Utsunomiya

### 要旨

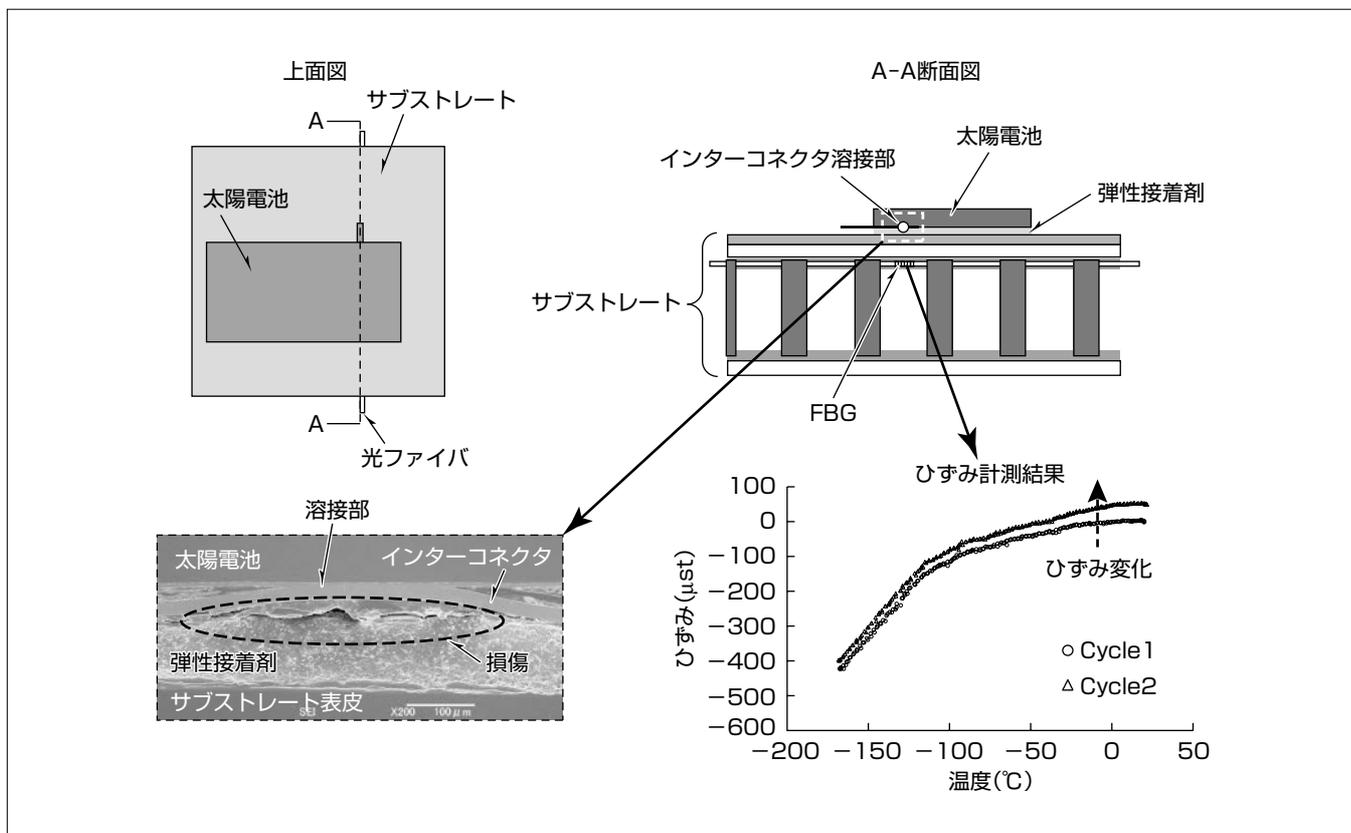
衛星用太陽電池パネルは、軽量かつ高剛性であることが求められており、その構造部材(サブストレート)には、炭素繊維強化プラスチック製の薄い表皮とアルミハニカムコアとを接着したサンドイッチ構造が用いられている。

しかしながら、太陽電池パネルでは、宇宙の低温環境で発生する熱応力によって、太陽電池の割れや出力端子の剥離等の損傷が発生し、発生電力の低下が起こる懸念がある。この問題を防止するためには、熱応力を考慮してパネルを設計し、地上試験で健全性を確認することが重要である。

そこで三菱電機は、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)とともに、光ファイバセンサの一種であるFBG(Fiber Bragg Grating)センサを用いて、太陽電池パネルの健全性を評価する手法を開発した。FBGセンサは、小型軽量、

耐電磁干渉性、低損失等の特長を持ち、ひずみや温度を多点で計測できるセンサである。この手法では、宇宙環境を模擬してクーボンパネルの低温環境試験を実施し、FBGセンサでパネル内部の見えない箇所の損傷を検知する。損傷が検知された場合、その断面を観察して損傷箇所を特定し、パネルの健全性を評価する。

FBGセンサによるパネル内部の損傷検知性能の検証を行い、ひずみの変化から内部損傷を検知できることを実証した。さらに、損傷が検知された箇所の断面を観察して損傷箇所を特定し、この手法の有効性を確認した。今後は、この手法の標準化を進めて整備し、ほかの衛星コンポーネントへの適用拡大を進めていく。



### 衛星用太陽電池パネルの損傷検知結果の一例

損傷を検知するためのFBGセンサを内蔵した太陽電池パネルの構成図(左上、右上)である。FBGで計測したひずみの変化(右下)からパネル内部の見えない箇所の損傷(左下)を検知する手法を開発した。

1. ま え が き

衛星用の太陽電池パネルは、軽量であり、高剛性であることが要求されている。このため、太陽電池を貼り付ける構造部材(サブストレート)には、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)製の薄い表皮とアルミハニカムコアとを構成材料とするハニカムサンドイッチパネルが使用されている。

しかしながら、表皮の薄いサブストレートでは、CFRP表皮とアルミハニカムコア間の熱膨張差に起因して、表皮にハニカム形状に応じた周期的な凹凸(ディンプル)が発生する<sup>(1)(2)(3)</sup>。太陽電池をディンプルの残留したサブストレートに接着したパネルでは、宇宙の低温環境でディンプルの深さが増大して熱応力が発生し、太陽電池やその出力端子(インターコネクタ)に損傷を与えて、発生電力の低下が起る懸念がある。そのため、熱応力を考慮してパネルを設計し、地上試験でパネルの損傷検知を行って健全性を評価し、軌道上での不具合を未然に防止することが重要であり、その評価手法が必要である。

太陽電池パネルのような構造内部の損傷を検知するデバイスとして、光ファイバセンサの一種であるFBGセンサが考えられる。FBGセンサは、小型軽量、耐電磁干渉性、低損失等の特長を持ち、温度やひずみを多点で計測できるセンサである。図1に示すように、FBGセンサは、光ファイバのコア中に屈折率を周期的に変化させた回折格子(グレーティング)を形成したものである。広帯域の光をFBGに入射させると、式(1)のブラッグ波長( $\lambda_B$ )と呼ばれる特定波長の光スペクトルを反射し、それ以外の波長の光は透過する。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $n$ は光ファイバの有効屈折率、 $\Lambda$ は格子間隔である。屈折率や格子間隔が温度やひずみに依存するため、ブラッグ波長の変化量を計測することで、ひずみや温度を求めることができる。

そこでこの開発では、太陽電池パネルの健全性評価手法の開発を目的として、FBGセンサを用いた太陽電池パネル内部の損傷検知に関する検討を行ってきた<sup>(4)</sup>。

本稿では、低温におけるサブストレート表皮のひずみ挙

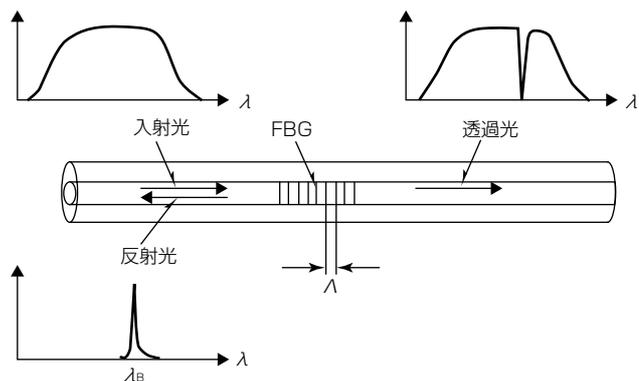


図1. FBGセンサの計測原理

動から、ディンプルの深さ変化挙動を評価し、FBGセンサによる太陽電池パネル内部の損傷検知性能の検証を行った結果について述べる。

2. 試験方法

2.1 材料及び試験片

まず始めに、FBGセンサを実装した縦90mm、横90mmのサブストレートの試験片を用いて実験を行った。試験片の表皮は、厚さ50 $\mu$ mのポリイミドフィルムと、平織りのピッチ系炭素繊維とエポキシ樹脂を材料とするプリプレグ一層とを180 $^{\circ}$ Cで一体成形した厚さ130 $\mu$ mのCFRP製平板である。試験片のコアは、アルミハニカムコア(HEXCEL社製、AL3/8-5056-.0007P)であり、その高さは25.4mmである。これらの表皮とハニカムコアとを、厚さ60 $\mu$ mのエポキシ系のフィルム接着剤を用いて120 $^{\circ}$ Cでプリキュア成形し、試験片を製作した。このとき、CFRP表皮の一方の繊維方向とコアのリボン方向が一致するようにした。

FBGセンサは、外径250 $\mu$ m(クラッド径125 $\mu$ m)であり、グレーティングの長さが5mmのものを使用した。試験片におけるFBGセンサの配置図を図2に示す。図の(a)に示すように、ハニカムコアのリボン方向と光ファイバの軸方向を合わせて、ハニカムセル中央部にFBGの中心部が位置するようにFBG-Aを、ハニカムコア壁部にFBGの中心部が位置するようにFBG-Bを配置した。図の(b)に示すように、FBG-Aは、サンドイッチ成形時に表皮とフィルム接着剤との間の接着層内に埋め込んだ。このとき、FBG周りの接着層に空孔(ボイド)が残存しないように実装した<sup>(5)</sup>。

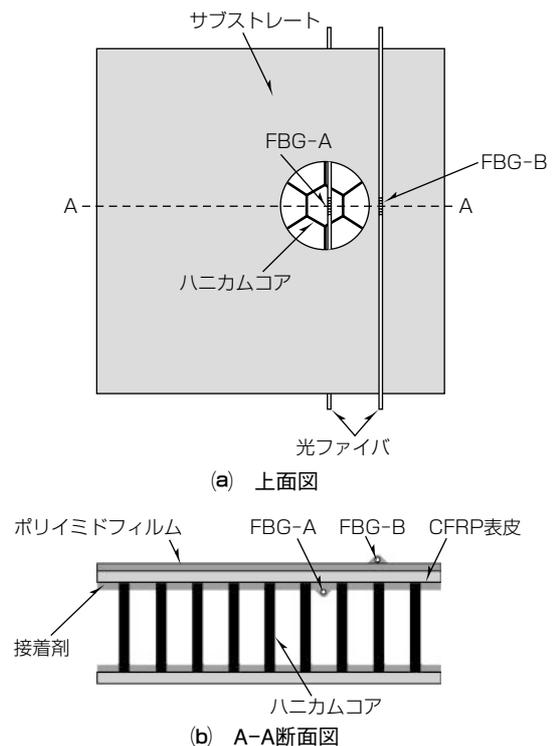


図2. サブストレート試験片のFBGセンサの配置図

また、FBG-Bは、成形後のサブストレートの表面にシアノアクリレート接着剤で接着した。

次に、太陽電池をサブストレート試験片の表面に接着した太陽電池パネルの試験片を用いて実験を行った。試験片の太陽電池は、表面にカバーガラスを接着し、裏面にインターコネクタを溶接したCIC(Connector and Coverglass Integrated Cell)である。CICの裏面とサブストレートの表面にプライマー処理を行い、シリコン系接着剤(弾性接着剤)を用いて常温で接着し、試験片を製作した。太陽電池パネル試験片におけるFBGセンサの配置図を図3に示す。図に示すように、インターコネクタの溶接部の下方にFBGの中心部が位置するようにFBG-Aを配置した。

### 2.2 低温環境試験

サブストレート試験片を恒温槽(Despatch Industries社製, 935E)内に設置し、常温から-170℃まで-2.0℃/minで降温して、試験片のひずみを計測した。このとき、試験片の表面に取り付けた熱電対を用いて、温度を計測した。また、ASE(Amplified Spontaneous Emission)光源(三菱電線工業(株)製, LA158-D16FSSI)と光スペクトラムアナライザ(株)アドバンテスト製, Q8384)からなる光計測系を用いて、FBGの反射光スペクトルを計測し、その半値全幅の中心波長を求めた。

次に、反射光スペクトルの中心波長の変化をひずみに換算した。FBGは温度とひずみに感度を持つため、反射光スペクトルの中心波長の変化には、温度とひずみの両方の寄与が含まれる。そのため、計測された中心波長の変化量から、熱電対で計測した温度変化から換算した中心波長の変化量をひずみに引き、ひずみの寄与分を抽出してから、ひずみに換算した。このとき、温度と中心波長変化の関係及びひ

ずみと中心波長変化の関係は、光ファイバ固有の定数であり、約0.01nm/℃, 0.0012nm/ $\mu$ stである。

同様に、太陽電池パネル試験片を恒温槽内に設置し、常温から-170℃まで-2.0℃/minで降温する試験を二回実施し、試験片のひずみを計測した。

## 3. 試験結果

### 3.1 サブストレート表皮のひずみ挙動の評価

非接触三次元形状測定装置(三鷹光器(株)製, NH-3N)を用いて、サブストレート試験片の表面形状を計測した。その結果、FBG-A接着箇所のディンプル深さは常温で41 $\mu$ mであった。

次に、低温環境でのディンプル深さの変化を評価するために、ディンプル中央位置に接着したFBG-Aのひずみ変化を計測した。低温への温度変化によって表皮に発生するひずみを説明するためのサブストレート断面図を図4に示す。図に示すように、低温への温度変化に伴い、ハニカムセル中央位置の表皮に接着したFBG-Aには、ディンプルの深さ変化による局所的な曲げひずみと熱ひずみの両方が加わると考えられる。そこで、ディンプル深さ変化に対応する曲げひずみを求めるためには、ハニカムコア壁上位置の表皮に接着したFBG-Bによる熱ひずみを計測し、FBG-Aのひずみから引き算する必要がある。

FBG-AのひずみからFBG-Bのひずみを引いて求めた曲げひずみの計測結果を図5に示す。図から、低温への温度変化に伴って、曲げひずみが線形的に増大していることが分かる。これは、FBG-Aが表皮とコアとの接着層内に、すなわち表皮の局所的な曲げに対して引張りひずみが発生する位置に接着されていることから、ディンプルの深さが増大していると考えられる。これによって、低温への温度変化に伴って、ディンプルの深さは線形的に増大することが分かった。

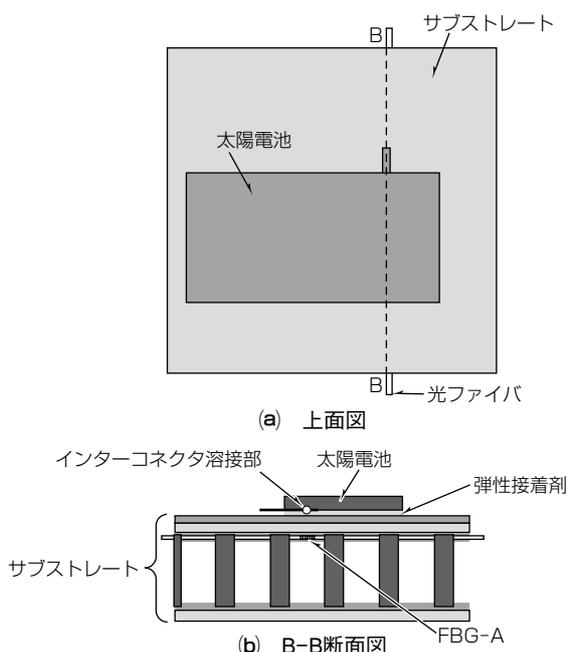


図3. 太陽電池パネル試験片のFBGセンサの配置図

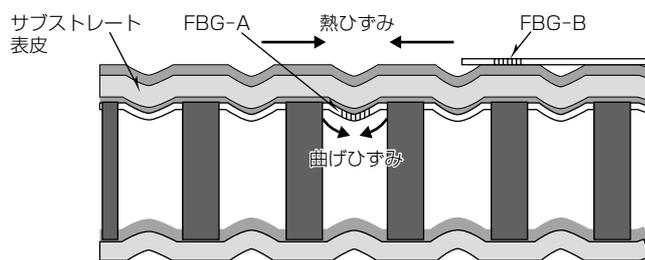


図4. 低温への温度変化時のサブストレート断面図

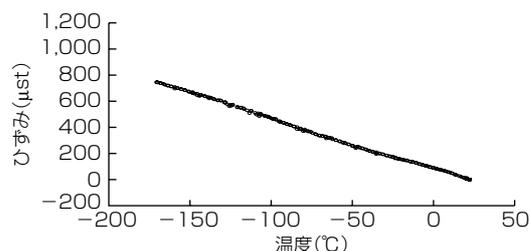


図5. サブストレート表皮の曲げひずみの計測結果

3.2 パネル内部の損傷検知性能の評価

太陽電池パネル試験片の低温環境試験を繰り返し2回実施し、その内部ひずみを計測した。FBG-Aによるひずみの計測結果を図6に示す。Cycle1のひずみと比較して、Cycle2のひずみは正側に変化しており、差が見られた。この結果から、FBG-Aの接着位置上方のパネル内部で損傷が発生し、熱応力が解放されてディンプルが深くなり、ひずみが正側に変化した可能性が考えられる。

そこで次に、FBG-Aの接着位置上方の試験片断面を観察し、損傷の有無を確認した。FBG-Aの接着位置を通り、ハニカムコアのリボン方向に平行な図3のB-B断面で試験片を切断して研磨し、SEM(Scanning Electron Microscope)を用いて断面を観察した。FBG-A上方の太陽電池パネル断面のSEM画像を図7に示す。図から、弾性接着剤の凝集破壊と思われる損傷が発生していることが分かった。

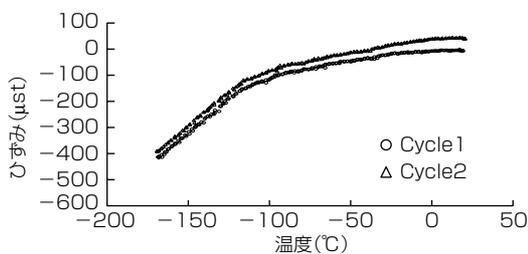


図6. 太陽電池パネル内部のひずみ計測結果

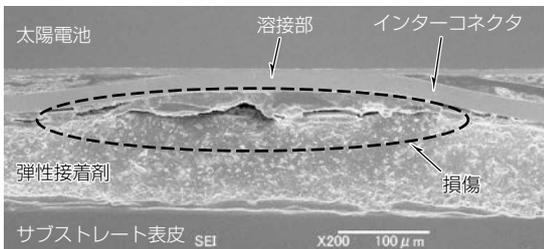
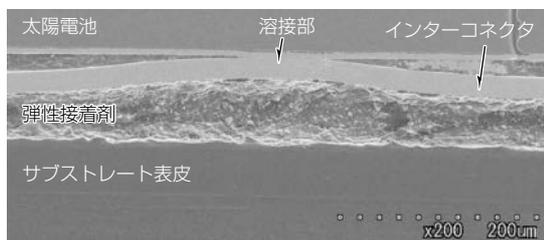
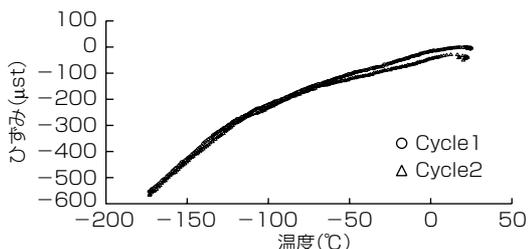


図7. FBG-A上方の太陽電池パネル断面のSEM画像



(a) FBG上方の太陽電池パネル断面のSEM画像



(b) 太陽電池パネル内部のひずみ計測結果

図8. パネル断面のSEM画像とひずみ計測結果

一方で、損傷が発生しない場合、これらのひずみ変化は起こらないことを確認した。同じ構成の試験片でのFBG上方の太陽電池パネル断面のSEM画像とひずみ計測結果を図8に示す。図のように損傷が見られない場合、Cycle1とCycle2のひずみはほぼ一致していた。なお、室温付近で若干のひずみ差が見られたが、Cycle2ではひずみが負側に変化しており、損傷の影響ではないと考えられる。

このように、ひずみ変化と損傷の有無との間に相関を確認できたため、FBGセンサで低温への温度変化時に発生するパネル内部の損傷を検知できることが示せた。なお、パネル内部で損傷が検知されたが、その損傷箇所は弾性接着剤であり、太陽電池やインターコネクタには損傷が発生していないため、パネルは健全であることが分かった。

4. むすび

太陽電池パネルの健全性評価手法の開発を目的として、低温温度変化時のサブストレート表皮のひずみ挙動の評価と、FBGセンサによる太陽電池パネル内部の損傷検知性能の検証を行い、次の結果を得た。

- (1) サブストレート表皮のディンプル中央位置のひずみ評価結果から、低温への温度変化に伴って、ディンプルの深さは線形的に増大することが分かった。
- (2) 低温への温度変化時のパネル内部のひずみ計測と断面観察の結果から、FBGセンサを用いてひずみ変化を計測することで、内部損傷の発生を検知できることが示せた。また、損傷が検知された箇所の断面を観察して損傷箇所を特定し、この手法の有効性を確認した。

参考文献

- (1) 井上登志夫, ほか: ハニカムサンドイッチパネルの熱変形と熱応力, 第34回構造強度に関する講演会, 1B11 (1992)
- (2) 本池 誠, ほか: 薄いCFRP表面板を有するハニカムパネルの曲げ特性, 第40回構造強度に関する講演会, 1B9 (1998)
- (3) Watanabe, N., et al.: Thermal Buckling Behavior of Very Thin CFRP Face in Al Honeycomb Sandwich Plates for Various Lamination, AIAA Paper 98-1994, 2413~2422 (1998)
- (4) Sekine, K., et al.: Study on Damage Detection for a Satellite Solar Array Panel using Optical Fiber Sensors, Proceedings of the 12th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (2012)
- (5) 三菱電機株: 光ファイバセンサを備えたハニカムサンドイッチ構造体およびその製造方法, 特開2013-156200 (2013)