

第8回試験技術ワークショップ

2010.11.12

## 光ファイバセンサによる大型CFRP構造体の成形モニタリング

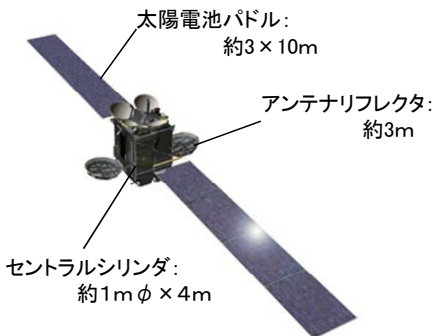
○関根一史、竹谷元、世古博巳(三菱電機株式会社)  
三浦末志((財)無人宇宙実験システム研究開発機構)

### 内容

1. 背景
2. 目的
3. 光ファイバセンサ(FBG)の原理と特長
4. 実験方法
5. 結果
6. まとめ

謝辞

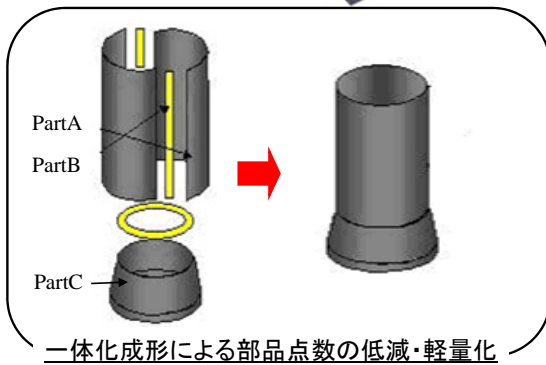
## 1. 背景



衛星構造の大型化  
軽量化・コスト低減のための一体成形化



CFRP構造の成形時の残留熱歪みの影響大  
 ・初期の機械特性の低下  
 ・成形型からの脱型時の変形



★成形プロセス時の温度・歪みモニタリングによる高精度成形技術  
 ・成形パラメータのモニタ  
 ・プロセス条件へのフィードバック

FBG\*センサを用いたプロセスモニタ技術を開発中

\*FBG: Fiber Bragg Grating

## 2. 目的

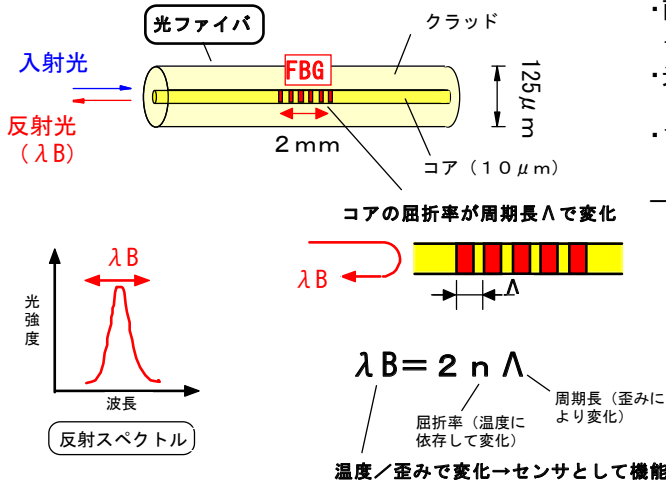
実機大のセントラルシリンダを対象に、光ファイバセンサであるFBGセンサによって、オートクレーブ内の製造プロセスのモニタリングを行い、設計・製造へフィードバックできるデータを取得する。



セントラルシリンダ  
(アウトースキン積層中)

### 3. FBGの原理と特長

\*FBG: Fiber Bragg Grating



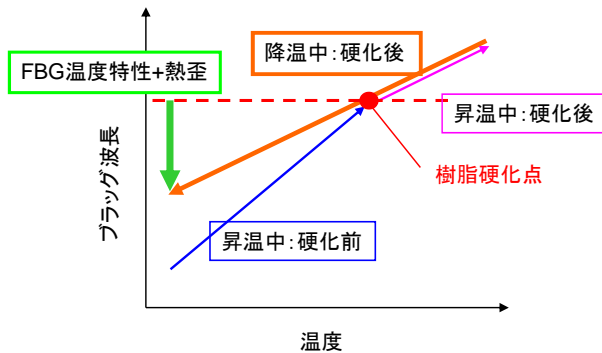
#### 特長

- ・直径125 μm、長さ数mmの小型センサ
- ・CFRP構造中への埋め込みが可能
- ・光ファイバーの特長を生かした長距離の伝送が可能
- ・1本のファイバに多数のゲージ形成可能

→ CFRP構造中に機械特性に影響を与えることなく大規模のセンサネットワークの埋め込みが可能であり、成形プロセスモニタ時のみでなく、その後の、衛星構体の環境試験時にもセンサとして使用可能

### 4. 実験方法

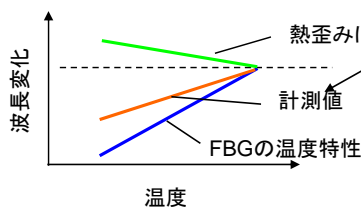
#### FBGセンサによる成形プロセスモニタの原理



①硬化点ばらつき計測法の検討  
硬化により、昇温時にブラッグ波長の温度係数が変化する現象を利用して計測。

②熱歪みの計測法の検討  
降温時の温度とブラッグ波長の関係から導出

#### 成形時のFBGセンサのブラッグ波長の変化



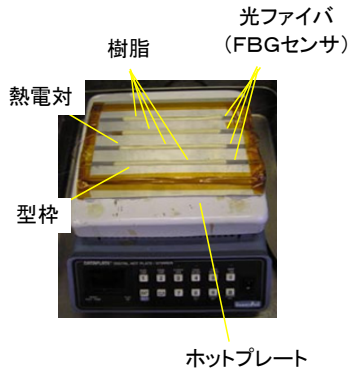
樹脂が硬化すると、FBGセンサは成形体と一体化する。  
このため、

- ①硬化後のブラッグ波長の変化は、
- ②成形体の熱歪みと
- ③FBGの温度特性

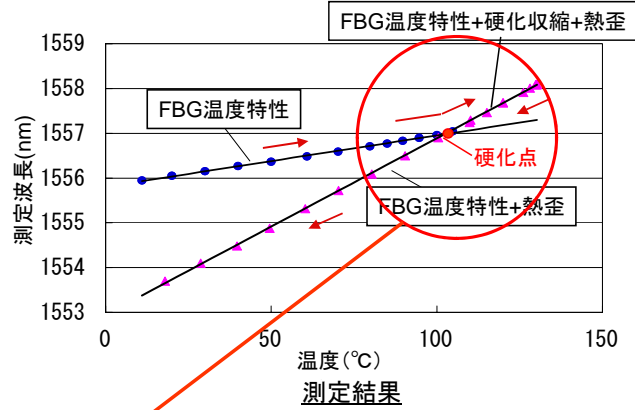
によって、生じる。  
FBGの温度特性(0.01nm/°C)は既知であるため、  
・降温時のブラッグ波長変化を計測し、  
FBGの温度特性(0.01nm/°C)を差し引くと、熱歪みが導出できる。

## 4. 実験方法

### 樹脂硬化点モニタ実験



測定コンフィギュレーション  
(樹脂硬化前)



樹脂が硬化すると、FBGセンサは成形体と一体化するため、成形体の熱変形によって、歪む。

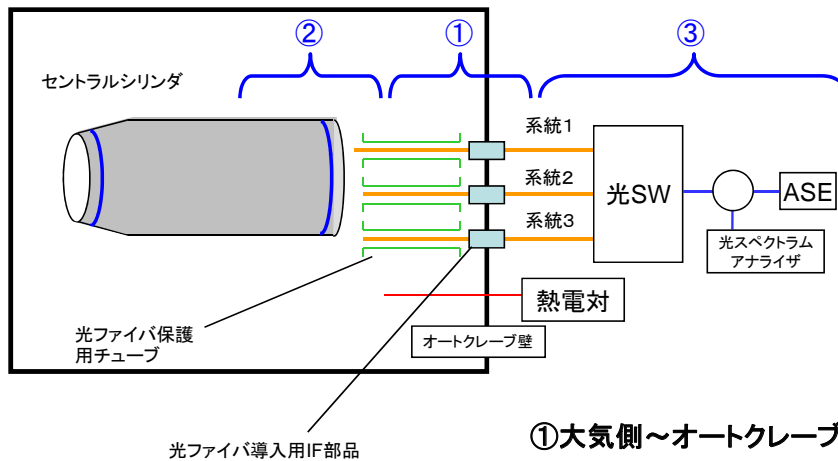
樹脂(単独)硬化成形時のFBGセンサのブラッグ波長と温度の関係

FBG単体のブラッグ波長の温度係数と、成形体の熱歪みによる波長変化は、勾配が異なるため、この変化を観測し、硬化点を推定する。

## 4. 実験方法

### 光ファイバのセットアップ方法

#### 大型オートクレーブ

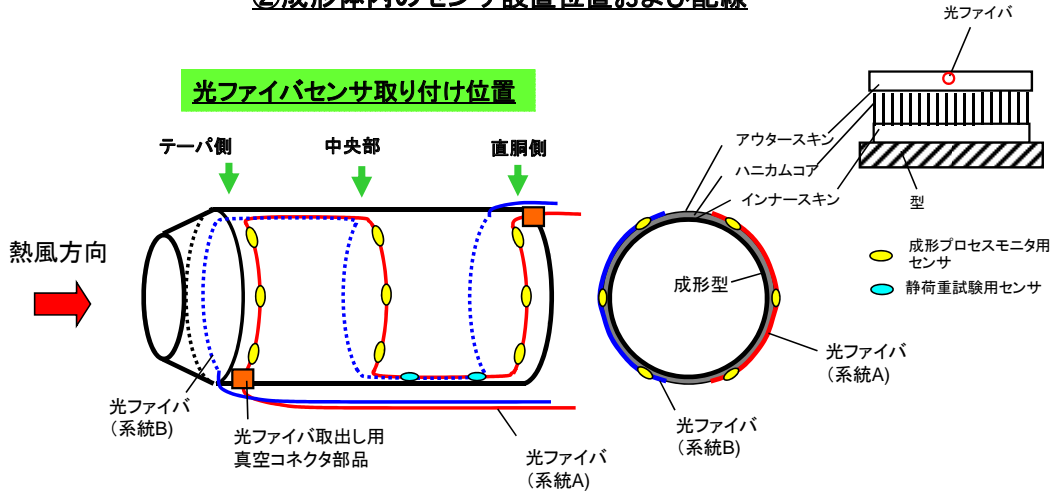


#### ①大気側～オートクレーブ壁～成形体

- 光ファイバ導入用IF部品により、圧力シールをしながら光ファイバを導入
- オートクレーブ内は、光ファイバの断線防止のためチューブへ挿入

### 4. 実験方法

#### ②成形体内のセンサ設置位置および配線



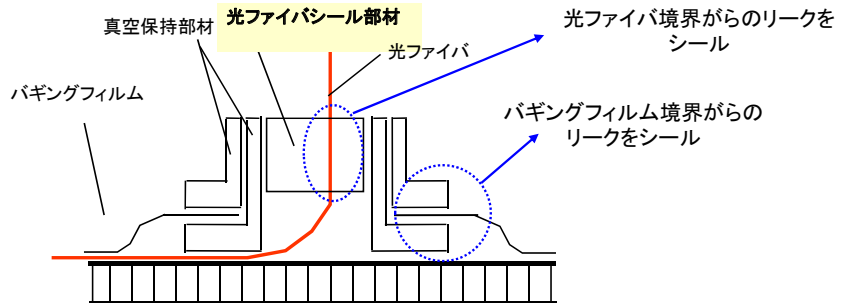
- ・オートクレーブ成形中の周方向の歪みを計測
  - 3ヶ所 : シリンダの両端部および中央部
  - 光ファイバ2系統: 歪み計測用17点、静荷重試験用3点
- ・光ファイバーはアウトースキン中に埋め込み
- ・光ファイバは、真空コネクタ部品により、製品表面から面外に取り出し

### 4. 実験方法

#### ②成形体内のセンサ設置位置および配線

##### 成形品へのFBGセンサの導入方法(バギングフィルムからの光ファイバの取り出し方法)

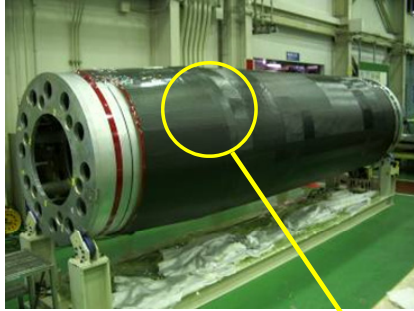
バギングフィルム内は減圧、フィルム外は加圧(数気圧)されるため、フィルムの内外を貫通する光ファイバのシールは確実に実施する必要がある。そのため、面外、面内の光ファイバの取り出し方向に応じて下記構成をする。



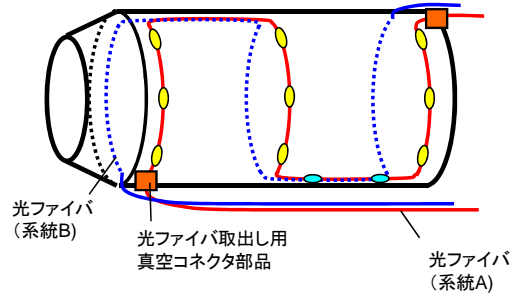
【光ファイバを成形面外方向に取り出すシール部材】

## 4. 実験方法

### ②成形体内のセンサ設置位置および配線



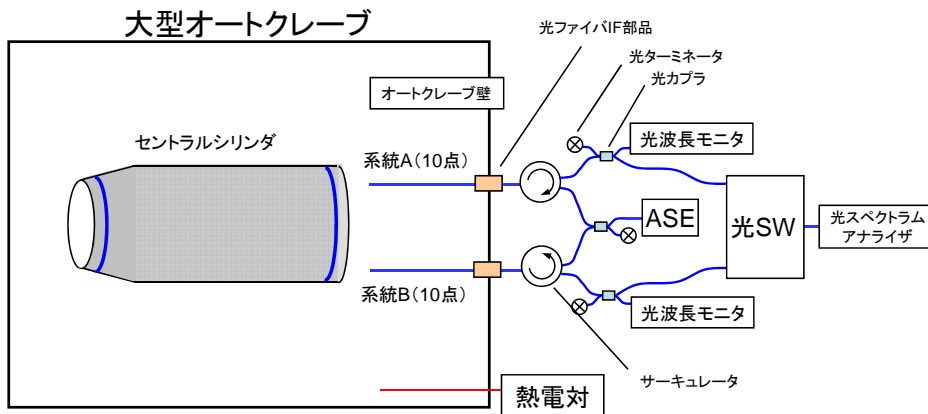
セントラルシリンダ  
(アウトースキン積層中)



光ファイバ貼り付け部分

## 4. 実験方法

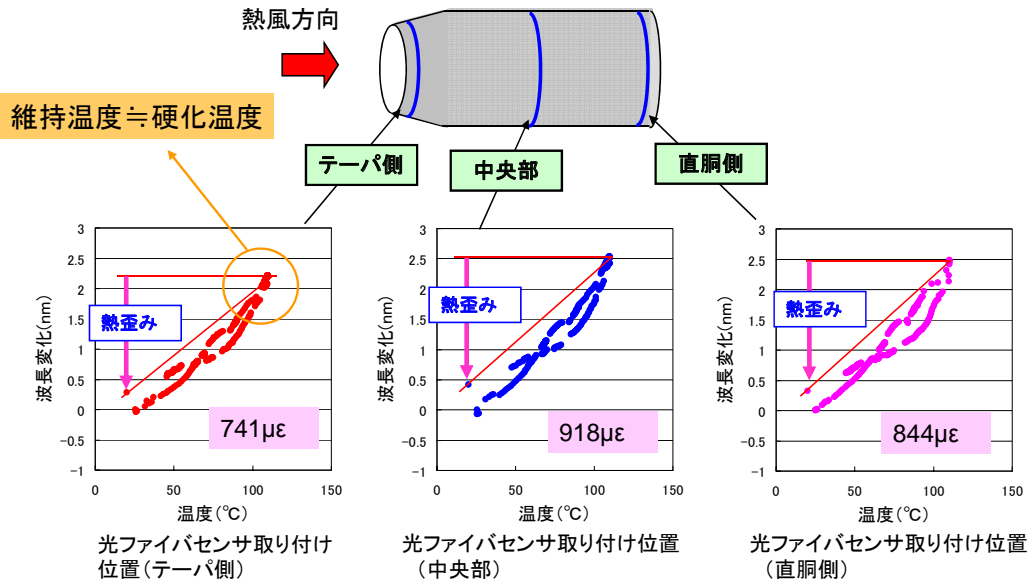
### ③計測装置の構成



- ・2系統の光ファイバに対し、光波長計でブラッグ波長の連続データを計測
- ・光スイッチで切り替えながら光スペクトラムアナライザにより波長スペクトルを観測

### 5. 結果

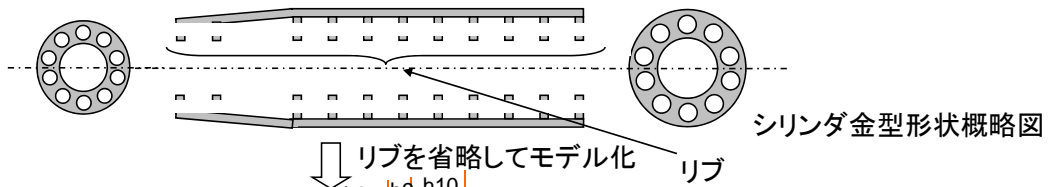
#### 計測結果 ~各周方向位置の熱歪み~



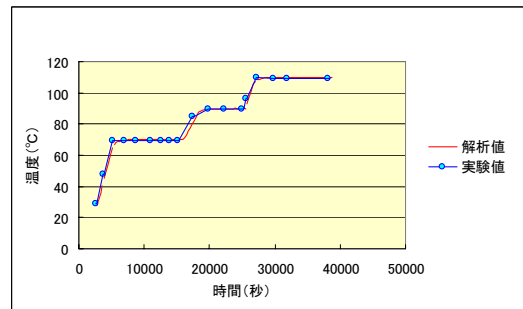
### 5. 結果

#### シリンダ解析シミュレーション

・金型のモデル化



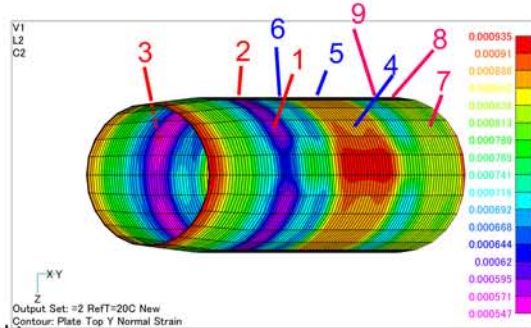
見かけの熱伝達係数	(W/K・mm <sup>2</sup> )
h1	25.00E-5
h2	23.11E-5
h3	21.52E-5
h4	20.67E-5
h5	18.94E-5
h6	16.86E-5
h7	15.49E-5
h8	11.82E-5
h9	7.87E-5
h10	5.00E-5



温度履歴合わせこみ結果の一例

### 5. 結果

#### シリンダ解析シミュレーションと実験結果との比較



高密度コアの影響

熱歪み見積もり(実験値と解析値の比較)

軸方向位置	測定位置		測定値		解析値 ( $\mu\epsilon$ )
	周方向	箇中	系統A ( $\mu\epsilon$ )	系統B ( $\mu\epsilon$ )	
テーパ部	上	1	741	911	587
	中	2	766	823	579
	下	3	669	912	587
中央部	上	4	918	953	882
	中	5	843	972	866
	下	6	1006	973	882
直胴部	上	7	844	---	830
	中	8	872	657	831
	下	9	908	1017	830

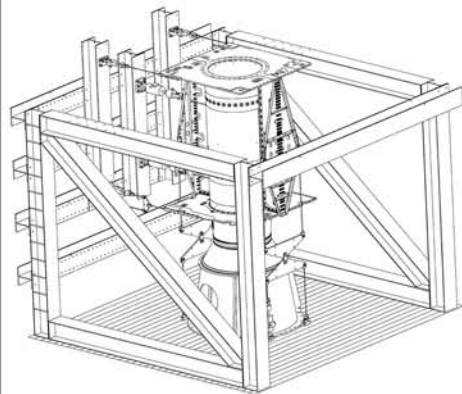
計測結果

- ①実験的・解析的に、熱膨張係数差による歪みの計測に成功。
- ②中央部、直胴部の解析と計測値のズレ量はおおよそ6%であり、良い一致が得られた。
- ③テーパ側は、高密度コアの影響を受け、ズレ量増大。(材料定数の高精度化により精度向上の見込み)

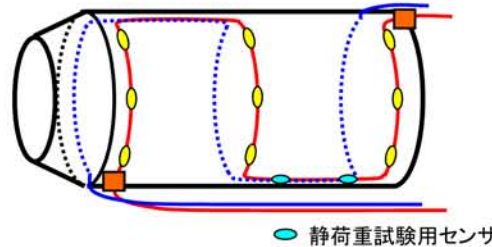
- 高精度化のため、次のパラメータについて検討
- ・高密度コアの影響
  - ・コア材、プリプレグ材継ぎ目の影響
  - ・バッキングフィルムなどの影響
  - ・樹脂硬化収縮の影響
  - ・成形圧力影響

成形体の歪みを反映(コア継ぎ目など)

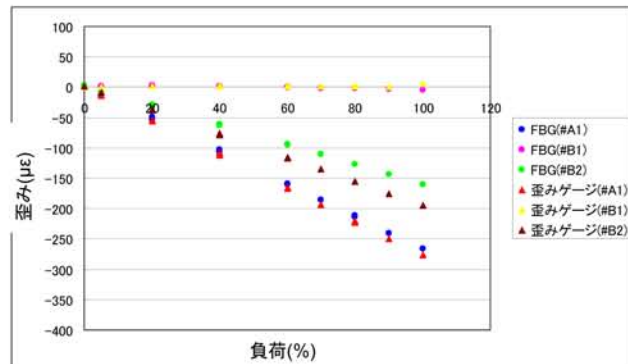
### 5. 結果



静荷重試験コンフィギュレーション



静荷重試験時の歪み測定結果





## 6. まとめ

- ・大型セントラルシリンダをオートクレーブによりコキユア成形するときのプロセス中の熱歪みの変化をFBG センサによって計測した。この結果、得られた熱歪みは解析により導出した値と良く一致しており、計測の妥当性を確認することができた。
- ・大型セントラルシリンダの静荷重試験中の歪みの変化をFBG センサによって計測した。この結果、得られた歪みは歪みゲージにより計測した値と良く一致しており、計測の妥当性を確認することができた。
- ・今後は高密度コアなどの影響についても取り入れることによって、計測精度の向上と、適用範囲の拡大に取り組んで行く。

## 謝辞

本研究は、「異種材料を含む大型構造体用複合材料製造設計技術開発」を経済産業省から委託を受けて(財)無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)が開発を進めているものである。当社は、USEF殿のご指導の下、本製造設計技術のツール化に係るアルゴリズムの設計及び検証、解析プログラムの製作を担当させて頂いた。関係者の皆様からの多くのご指導・助言を賜りここに、深く感謝の意を表します。

## 質疑応答

### 質問者①

FBG センサを用いて振動試験中にモニタできるとのことですが、私の知る限りではこういった FBG センサを用いた振動試験時に大きな振動を加えた例はないと思うのですが、衛星のような大きな加振に使えるのでしょうか。

### 発表者

宇宙機の振動試験への FBG センサの適用については、有用性があると思っております。ただし、まだ課題もございますので、今後クリアしていきたいと考えております。