



Smart composites
system lab.
Univ. of Tokyo

2011年度JAXA航空プログラムグループ公募型研究報告会, 2011.12.26(調布)

埋込光ファイバセンサを用いた CFRP構造ライフサイクルモニタリング技術 構築に関する研究

水口 周(東大・新領域)

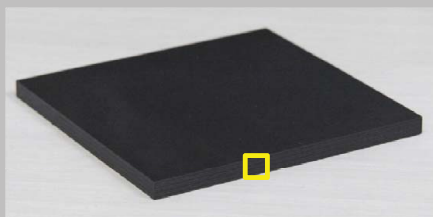
Outline

- ・ライフサイクルモニタリング
- ・CFRP成形品質予測
- ・アングル材ライフサイクルモニタリング

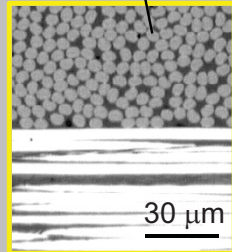
研究背景

Smart composites
system lab.
Univ. of Tokyo

CFRP (Carbon fiber reinforced plastic)



炭素繊維(直径約5μm)



0°層
(繊維断面)

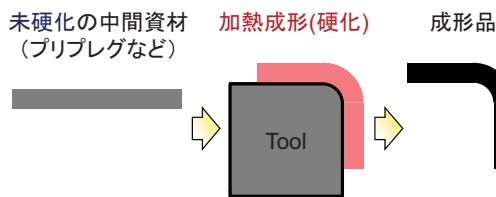
90°層
(繊維側面)

30 μm

航空機主要一次構造部材への適用が急速に進んでいる

CFRPの特徴

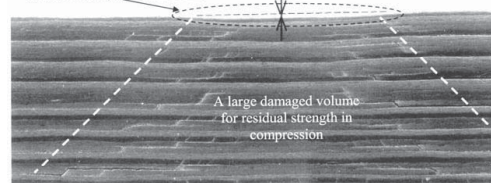
加熱成形時に材料物性と形状が決定



(金属構造: 熱処理された部材を加工・組立)

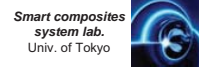
内部に複雑な亀裂が発生

衝撃損傷の断面写真
A small dent depth for detectability



検査で発見できない損傷が
強度を大幅に低下させる

研究背景



依然として大型CFRP構造を精度良く一体成形・組立し
さらに運用時の長期健全性を保証することは困難

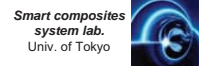
Boeing787の翼パネルの製造(MHI)



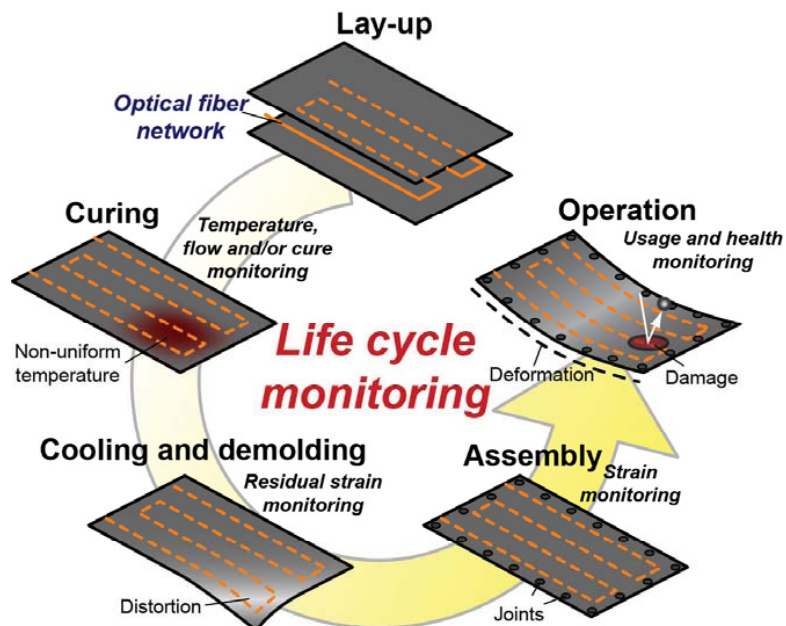
- ・オートクレーブ内の温度不均一性
- ・厚板内部での温度分布
- ・材料特性のばらつき/分布
- ・熱残留変形/歪み
- ・歪んだ部材同士の接合
- ・内部損傷による強度の大幅な低下
(例: 層間剥離、衝撃損傷)

設計手法の革新、製造・メンテナンス技術の向上を通して
CFRP構造の信頼性・安全性向上、更なる軽量化を実現するために
構造内部の状態を連続的にモニタする新たな技術の開発が重要

ライフサイクルモニタリング



“生体における神経網”のように
積層時に構造内部に形成された埋込光ファイバネットワークを用いて
構造のライフサイクルにわたり、連続的に構造内部の状態を監視



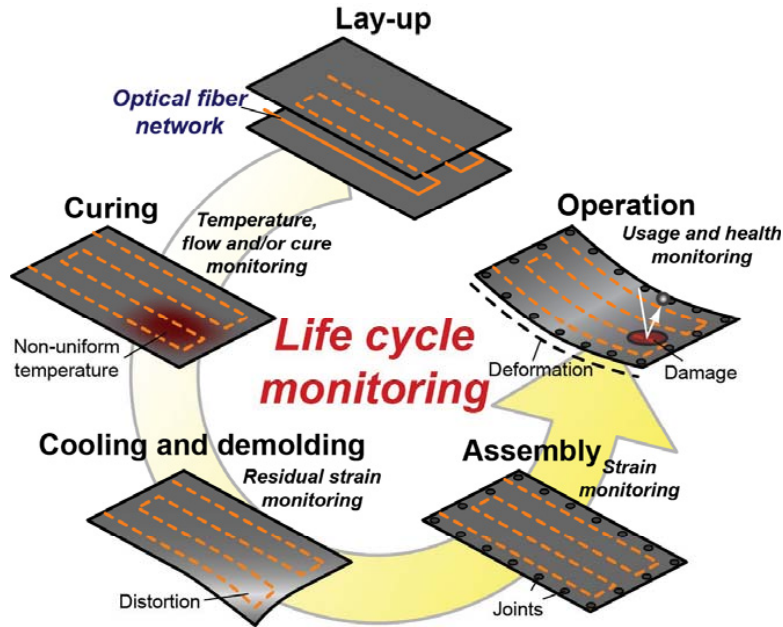
ライフサイクルモニタリング

Smart composites system lab. Univ. of Tokyo



全光ファイバセンシング情報を統合することで構造の健全性をより正確に評価

成形時に形状・材料特性が決定し
ライフサイクルを通したひずみ蓄積によって最終破壊に至るCFRPに有効

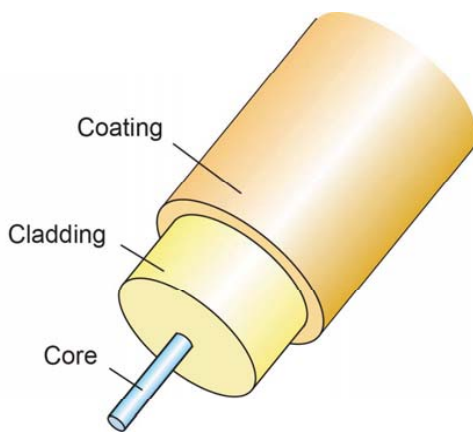


モニタリング用光ファイバ

Smart composites system lab. Univ. of Tokyo



光ファイバの構造



クラッド: 石英ガラス
 コア: ゲルマニウムドープ石英 (直径<10μm)
 被覆: ポリイミド

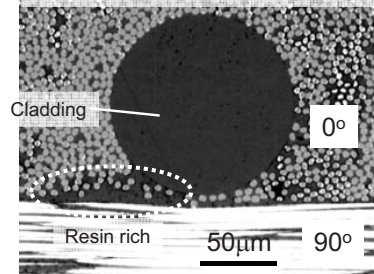
埋め込み、成形・運用時の計測のため
耐熱・耐損傷性に優れる構成

複合材料への埋め込み

強化繊維に沿う方向に配置し
成形することで層内に埋没

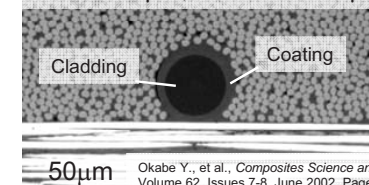
通常径光ファイバ

(被覆を除去, クラッド径: 125μm)



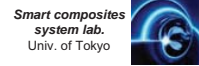
細径光ファイバ

(被覆径: 52μm, クラッド径: 40μm)



Okabe Y., et al., Composites Science and Technology Volume 62, Issues 7-8, June 2002, Pages 951-958

本年度の研究目的

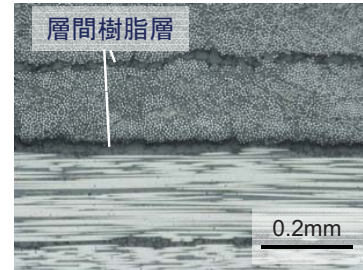


ライフサイクルモニタリング技術の確立に向け 特に成形過程に着目した基礎検討を実施

FBG光ファイバセンサを埋込、成形時のセンサ応答履歴を用いることでCFRPの成形品質を予測する手法を構築

- 層間に樹脂層を有するT800S/3900-2Bを対象に成形時に樹脂層に発生する熱残留ひずみ計測手法を構築
- 成形条件を変化させた実験を行い品質予測手法を検討

T800S/3900-2Bの断面



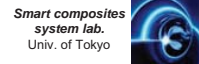
埋込FBG光ファイバセンサを用いたCFRPコーナ部のライフサイクルモニタリングを実証

- CFRPにとってクリティカルな板厚方向ひずみのライフサイクルモニタリング技術基盤の構築
- 擬似的な組立荷重を加えた試験での強度予測手法の検討

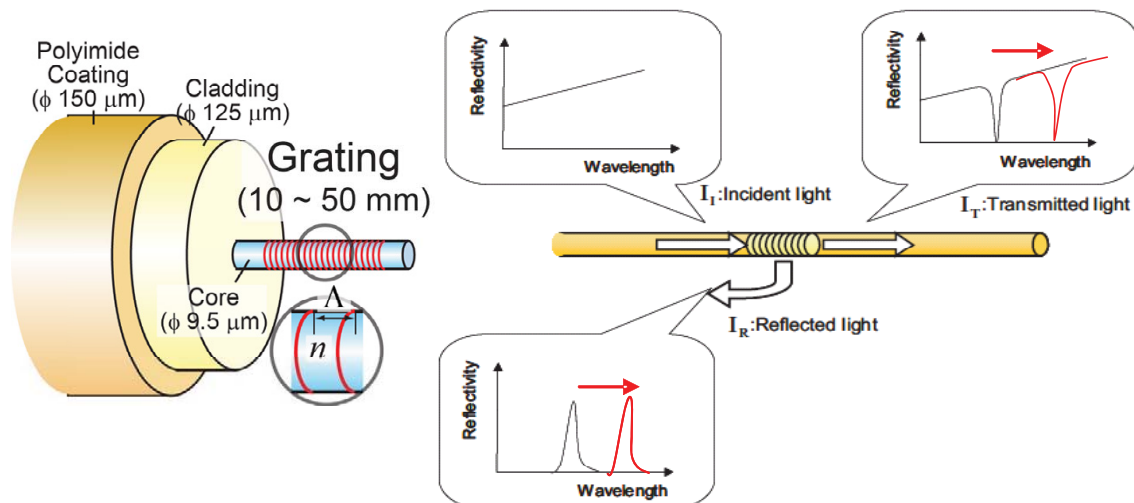
Wing spar of A350



FBGセンサ



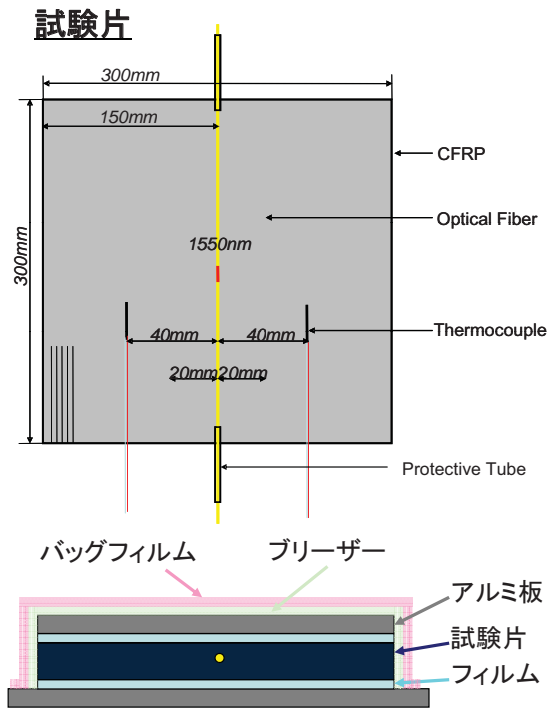
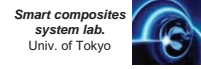
コア、クラッド、被覆の3層構造からなる光ファイバのコアに周期的屈折率変化を生じさせ、回折格子(グレーティング)を形成したもの



広帯域の光 I_i を入射すると、狭帯域の光 I_R を反射
反射光の中心波長やスペクトル形状は、ひずみや温度の影響を受けると変化

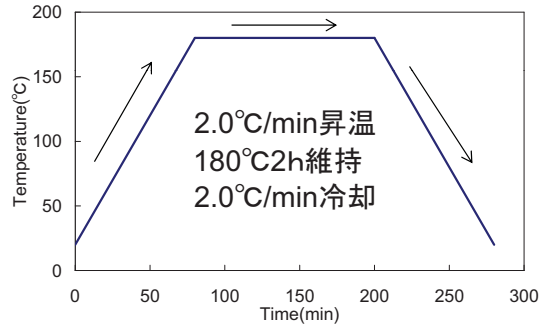
ひずみ・温度センサとして用いられる

実験方法



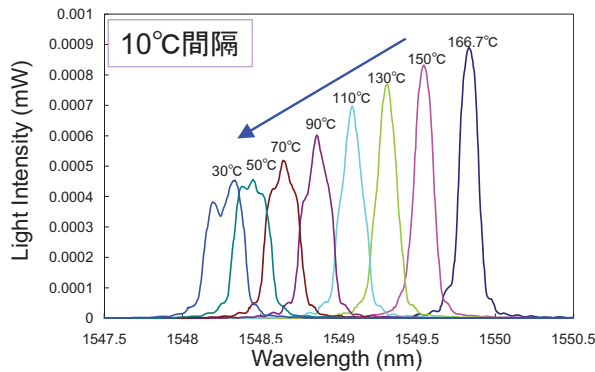
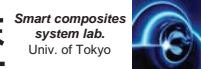
試験条件

CFRP : T800S/3900-2B (東レ), [0]₁₆
 8-9層間 : FBGセンサ(10mm), 熱電対
 圧力条件 : 0.7MPa加圧
 温度条件 :



成形プロセス中のFBGセンサ
 スペクトル応答履歴を連続計測
 (特に冷却中に着目)

FBGセンサスペクトルの変化履歴



- FBGスペクトルは短波長側にシフト (温度応答)
- 冷却過程初期には埋め込み前と同様に単一の急峻なピークを有する形状
- 温度低下にともないスペクトル幅が広がり最終的にはスペクトルがスプリット

FBGセンサの複屈折効果

センサ断面形状

反射光スペクトル

$$\lambda_p - \lambda_q = k (\epsilon_1 - \epsilon_2)$$

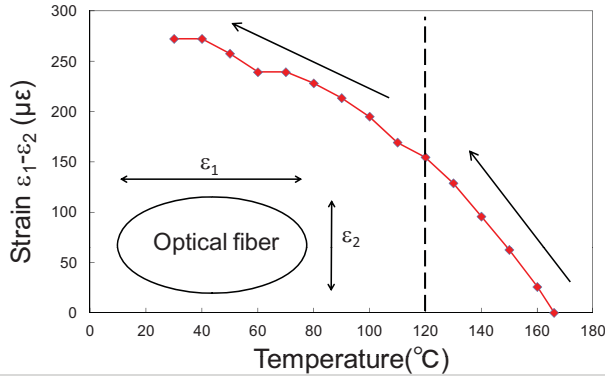
$$k = \frac{n_0^2 \lambda_0}{2} (p_{12} - p_{11})$$

n_0 : 初期平均屈折率
 λ_0 : 初期波長
 p_{11}, p_{12} : 光弾性定数

ピーク間距離は
 断面方向の主ひずみの差に依存

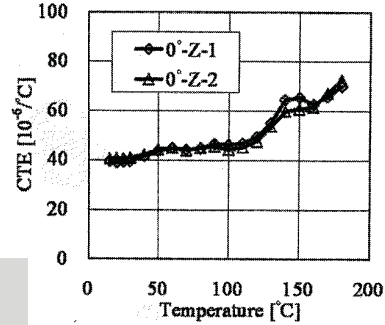
計測されたスペクトル変化は、冷却過程において光ファイバ断面が初期の真円形状から楕円形状に押しつぶされていることを示している

主ひずみ差の変化履歴



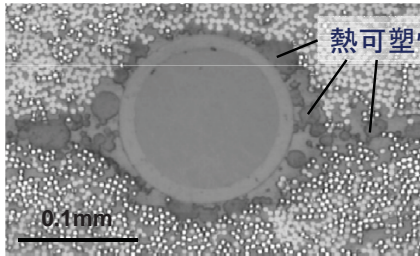
厚さ方向の熱膨張係数(T800S/3900-2B)

清水隆之, et al.日本複合材料学会誌. 37 (1), 21-28 (2011).



傾きが変化した温度(約120°C)は厚さ方向CTEが熱可塑性粒子の影響で非線形性を示す温度と一致

光ファイバ埋め込み断面観察



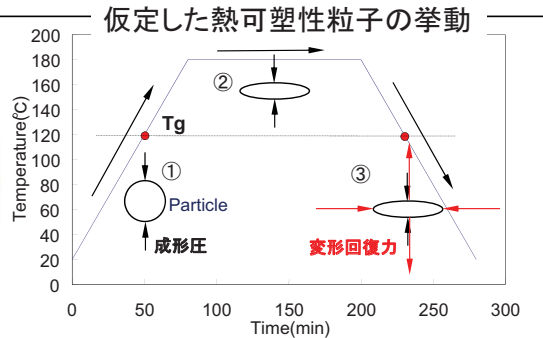
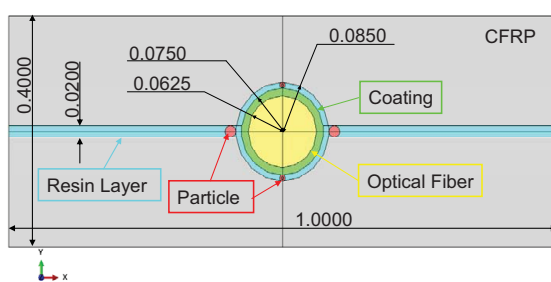
熱可塑性粒子

熱可塑性粒子がセンサ周囲にほぼ均等に分散している

FBGスペクトル形状変化にも熱可塑性粒子が関与していると考えられる

有限要素解析

有限要素モデル(Abaqus 6.10)

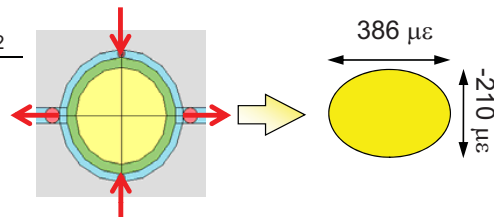


熱可塑性粒子が降伏応力程度(100MPa)の力を発生したと仮定して
それに相当する点荷重を熱可塑性粒子位置に負荷し
FBGセンサに発生する残留ひずみ(熱ひずみ含む)を算出

解析結果

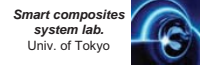
樹脂層なし	-8 με
樹脂層のみ	27 με
樹脂層+熱可塑性粒子	298 με
実験値	270 με

主ひずみ差 $\epsilon_1 - \epsilon_2$



FBGスペクトル形状の変化要因は熱可塑性粒子であり
硬化の際の成形加圧によって上下方向に潰されることがキーとなる現象

成形条件に依存したFBG応答履歴



成形加圧によって上下方向に潰されることがキーとなる現象

加圧条件が変化することで、FBGセンサ応答履歴が変化する可能性

複雑形状のCFRP成形では
真空バッグフィルムのたるみや張り
あるいはプリプレグの突っ張りが発生



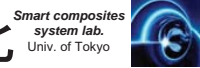
オートクレーブの設定圧力と
材料に加わる圧力(局所圧力)が異なり
成形不良を起こす例が多数報告

複雑形状CFRP構造を成形する際に生じる
バッグフィルムのしわ

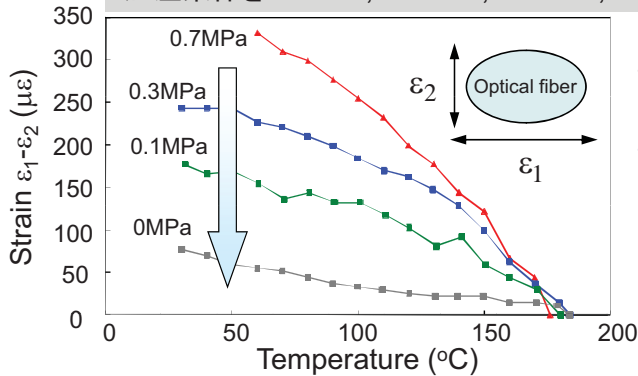


FBGセンサの応答履歴から材料に実際に加えられた圧力を知ることができれば
成形品の品質を保証することが可能

加圧条件に依存した主ひずみ差の変化



加圧条件を0.7MPa, 0.3MPa, 0.1MPa, 0MPaに変化させた試験を実施

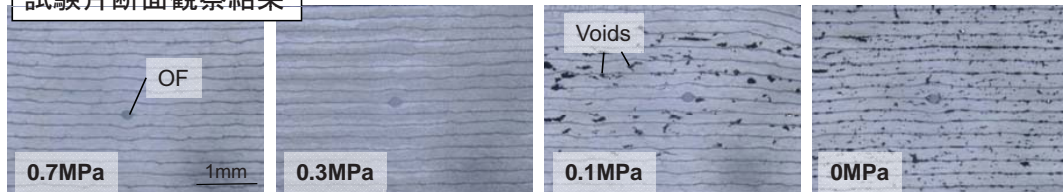


- 各試験条件において温度低下とともに非軸対称ひずみが増加
- 加圧が小さくなるとともに冷却過程で生じるひずみ量が減少



残留ひずみ量から
加圧不良の有無を判定可能

試験片断面観察結果



ひずみ量が200 $\mu\epsilon$ 以下であればポイドが形成していると予測することが可能

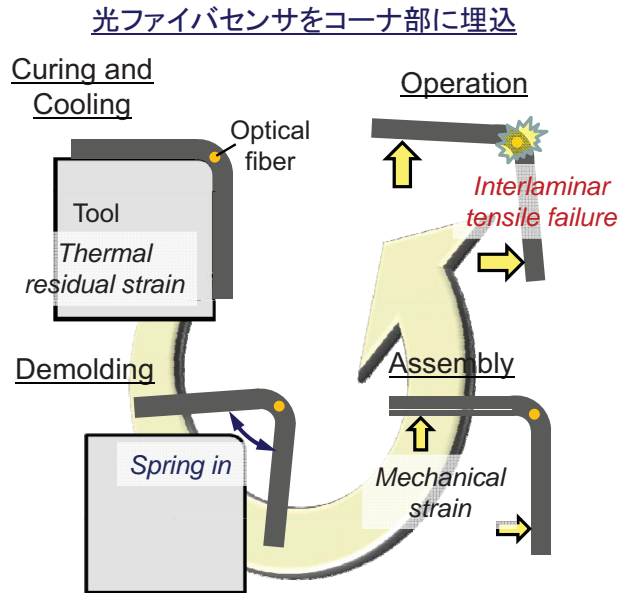
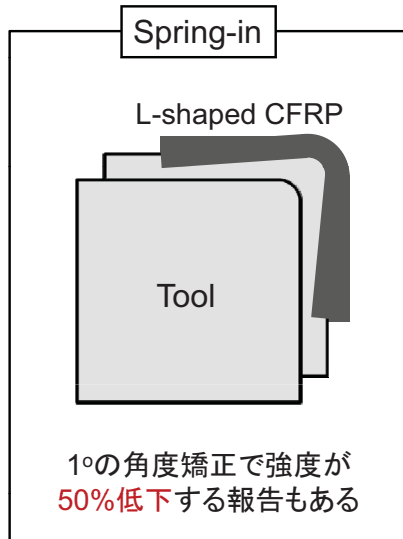
層間靱性値と光ファイバ応答の相関評価を実施中→品質・材料特性予測

コーナ部のライフサイクルモニタリング

Smart composites
system lab.
Univ. of Tokyo



L型コーナー部は成形時にSpring-inが発生するとともに
ライフサイクルにわたって板厚方向応力が負荷される
(CFRPの面外(板厚)方向の強度は面内強度の5%程度)

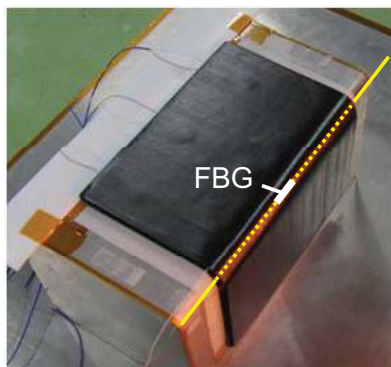


試験片作成の概要

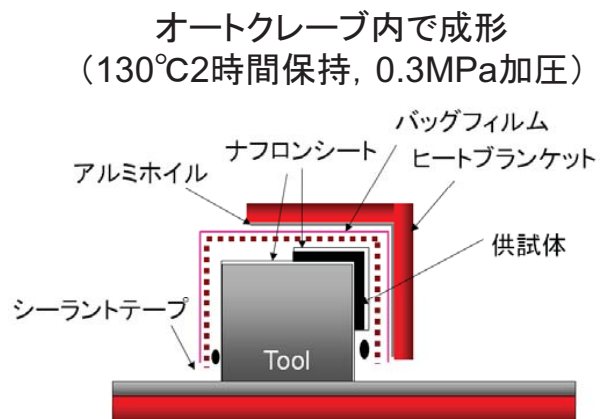
Smart composites
system lab.
Univ. of Tokyo



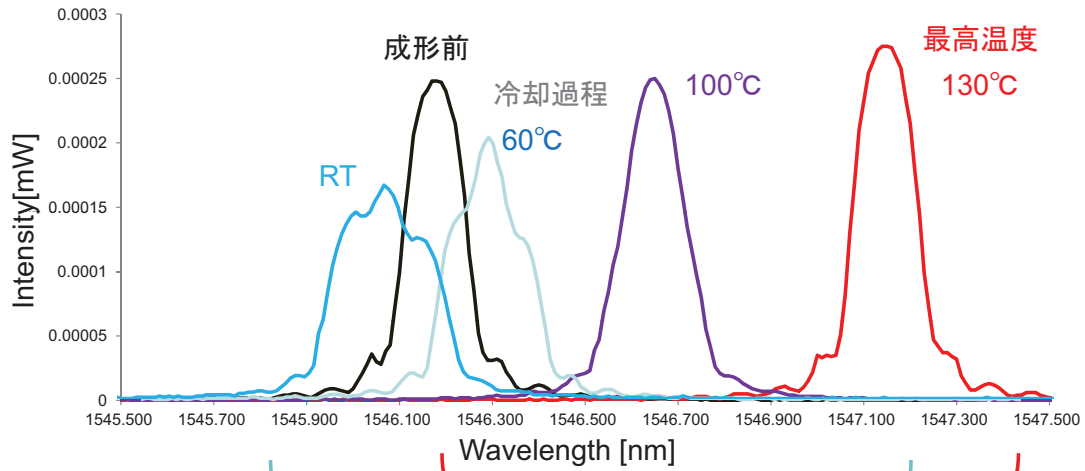
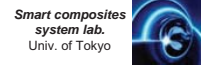
- ◆ 供試体 : T700S/Epoxy#2592 $[0_4/90_4]_{2S}$ 32層
- ◆ センサ : FBGセンサ (繊維方向埋込み)
-1546nm→コーナー部16-17層間
: 熱電対



積層中の様子



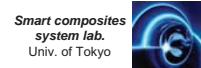
成形中のFBGスペクトル応答



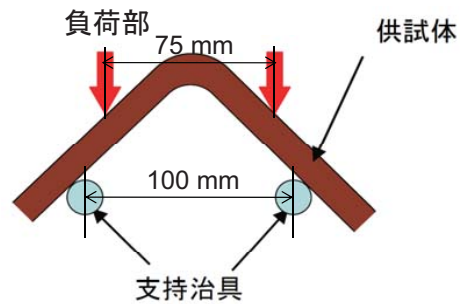
冷却過程において複屈折が発生

➡ 約 $300\mu\epsilon$ の非軸対称ひずみの検出

4点曲げ試験



- ◆ 供試体 : T700S/Epoxy#2592 $[0_4/90_4]_{2S}$ 32層, 幅25 mm
- ◆ センサ : FBGセンサ(1546nm)
→コーナー部16-17層間
- ◆ 負荷スパン : 75 mm
- ◆ 支持スパン : 100 mm
- ◆ 変位速度 : 1 mm/min

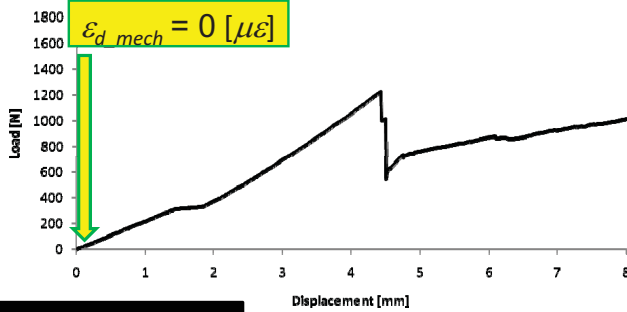


試験時はコーナー部を光学顕微鏡で観察

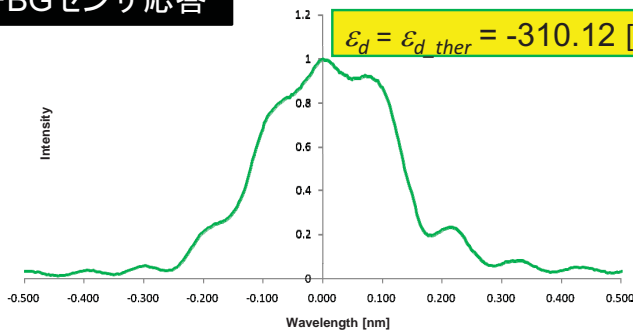


曲げ試験結果

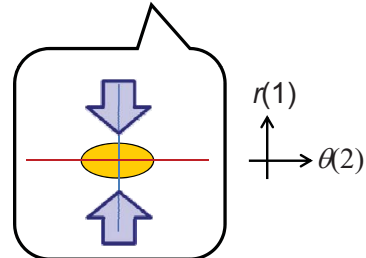
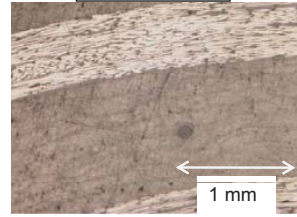
荷重一変位曲線



FBGセンサ応答



断面写真

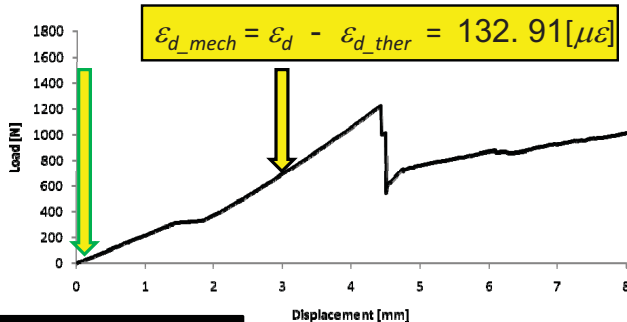


ファイバ断面

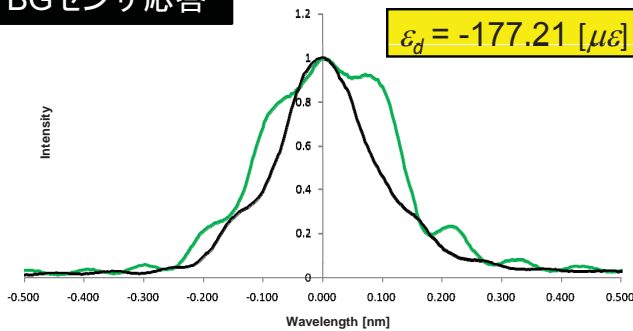
成形時の熱収縮による面外圧縮ひずみが残留

曲げ試験結果

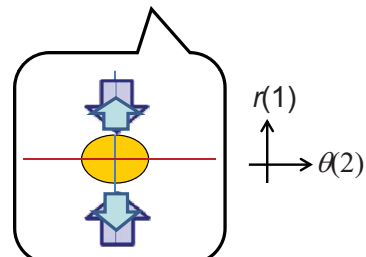
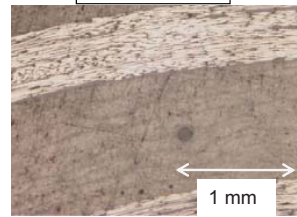
荷重一変位曲線



FBGセンサ応答



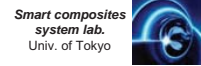
断面写真



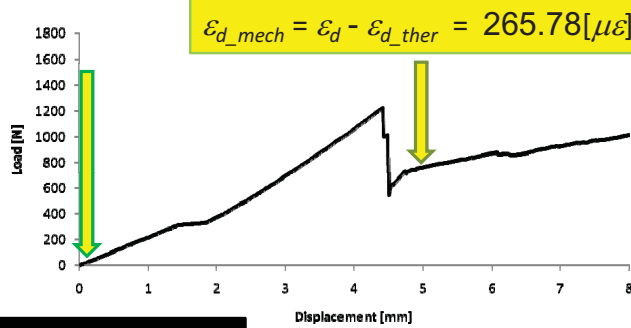
ファイバ断面

力学的変形による面外圧縮ひずみの緩和

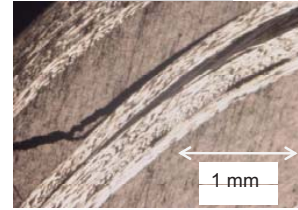
曲げ試験結果



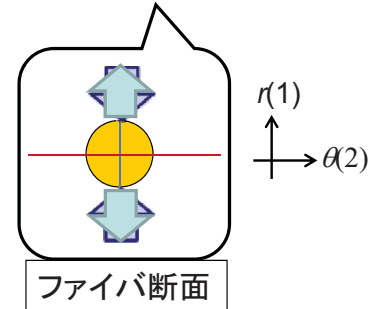
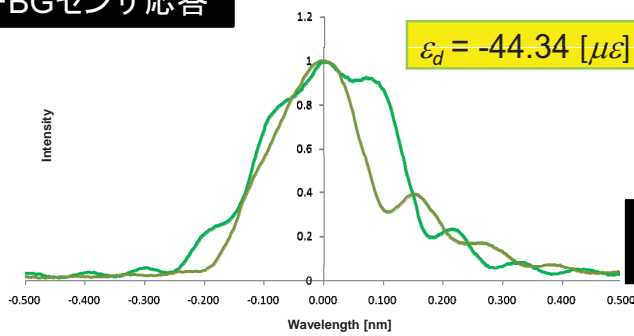
荷重—変位曲線



断面写真



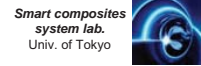
FBGセンサ応答



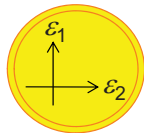
ファイバ断面

非軸対称ひずみがほぼ見られない
→熱変形と力学的変形の釣り合い

有限要素解析

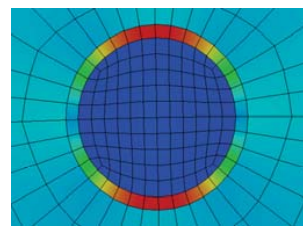
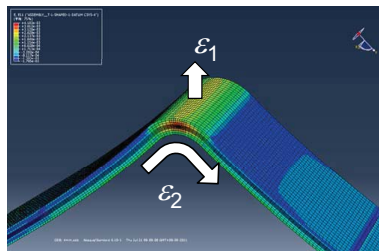


解析モデルによる非軸対称ひずみの算出



$$\epsilon_d = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$$

径方向ひずみ ϵ_1 と周方向ひずみ ϵ_2 から
非軸対称ひずみを算出

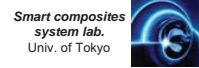


ϵ_{1_pred}

	$\epsilon_{d_mech_pred}$	ϵ_{d_mech}
Displacement [mm]		
1	49.132	44.299
2	97.395	88.603
3	144.791	132.906

非軸対称ひずみの発生は面外方向ひずみ ϵ_1 の寄与が主であり
埋込光ファイバを用いることで面外方向ひずみ ϵ_1 をライフサイクルにわたってモニタ可能
コーナ部角度を変化させた供試体に擬似組立荷重を加えた試験で強度予測手法を検討中

結論



ライフサイクルモニタリング技術の確立に向け 特に成形過程に着目した基礎検討を実施

- 埋込光ファイバを用いて層間樹脂層の熱残留ひずみを計測し
光ファイバ応答からボイド形成の有無を判定可能
- CFRPコーナ部の面外方向ひずみのライフサイクルモニタリング技術を実証

現在の取り組み

- 成形条件を変化させた試験片を用いて
光ファイバ応答と材料物性の相関を評価
- 角度の異なるアングル材に擬似組立荷重を加えた破壊試験を行い
光ファイバ応答から最終強度を予測する試験を実施