



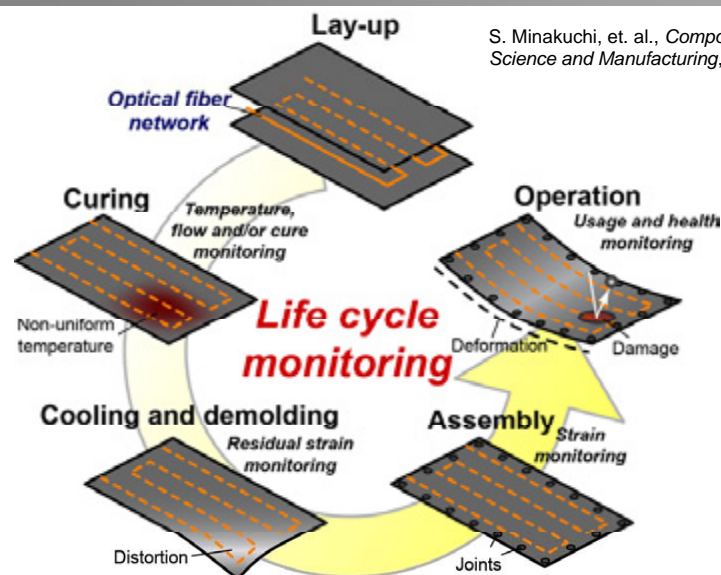
2012.12.7 JAXA航空プログラムグループ公募型研究報告会

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, 武田 展雄
東京大学新領域

1/15

ライフサイクルモニタリング



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

2/15

L型複合材部材

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



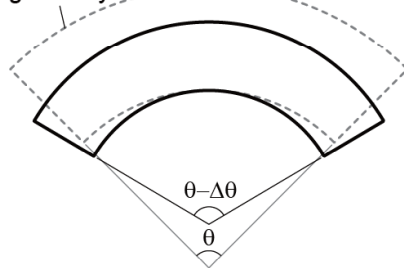
L型材は複雑形状を有する
複合材航空機構造で多用される

翼ボックス構造のコーナ部を構成する
主要な構造要素



成形後のスプリングイン変形

Original
geometry



- 複合材の異方性に起因する熱変形
- 主要因は面内方向と面外方向のCTEの差
 - ✓ 繊維が支配的な面内方向は小さなCTE
 - ✓ 樹脂が支配的な面外方向は大きなCTE
- 部材間の隙間や干渉が発生し、組立後に著しい応力が生じたり予期せぬ破壊の要因になる

3/15

L型複合材部材

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo

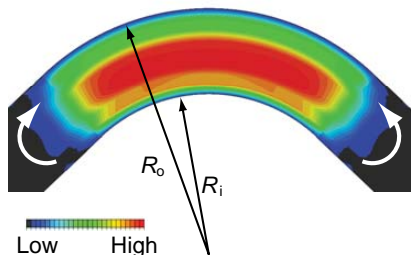


L型材は複雑形状を有する
複合材航空機構造で多用される

翼ボックス構造のコーナ部を構成する
主要な構造要素



運用時の面外方向応力



- 鋭い曲線形状のため運用荷重により面外方向（径方向）の引張応力が発生することがある
- 複合材の面外方向強度は面内方向強度と比較して著しく弱い（5%程度）、面外方向応力の発生は予期せぬ破壊につながりやすい

ライフサイクルにわたった面外方向のひずみ・応力変化が重要な挙動であり
光ファイバセンサに基づく内部ひずみモニタリング技術が構造の信頼性向上に有効

3/15

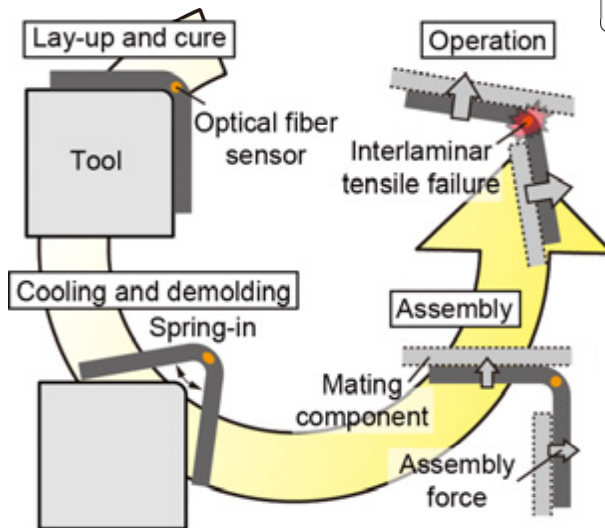
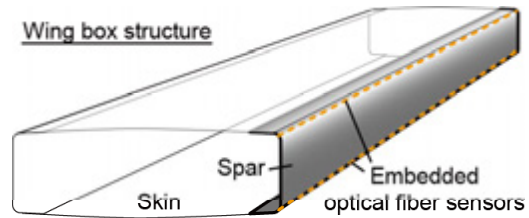
L型材ライフサイクルモニタリング

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



光ファイバセンサをL型材コーナ部長手方向に埋め込み、面外方向ひずみの変化履歴をライフサイクルにわたり連続して取得

Wing box structure



•光ファイバセンサの埋め込み位置は面外ひずみが支配的な厚さ方向中央

•成形時・脱型時のスプリングイン変形や運用時の層間引張破壊などに起因するひずみ変化を取得

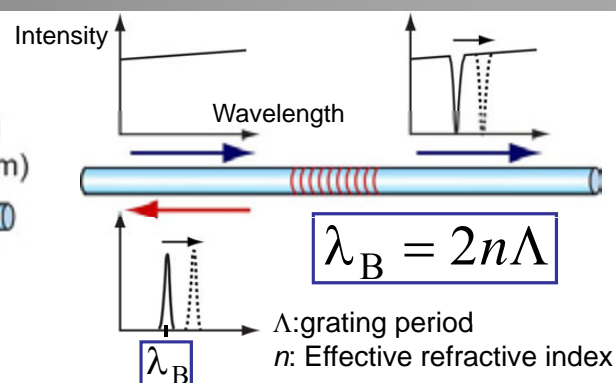
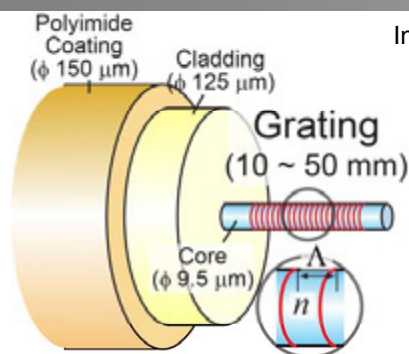
•L型材の品質・健全性保証あるいは設計法の改善などに有用な情報を取得することが可能

*S. Minakuchi, T. Umehara, K. Takagaki, Y. Ito, N. Takeda
Composites Part A, 48: 153–161 (2013)

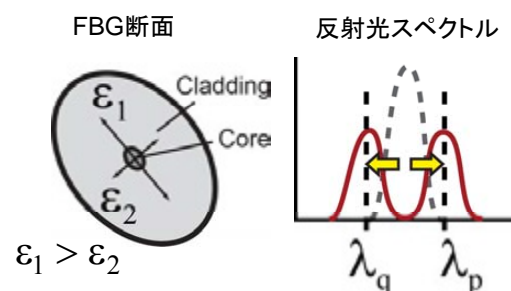
4/15

Fiber Bragg grating センサ

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



複屈折効果



$$|\lambda_p - \lambda_q| = k \frac{|\epsilon_1 - \epsilon_2|}{2} = k \epsilon_d$$

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

n_0 : 初期屈折率
 λ_0 : 初期中心波長
 p_{11}, p_{12} : 光弾性定数

FBGセンサの非軸対称ひずみから
L型材の面外方向ひずみを間接的に評価

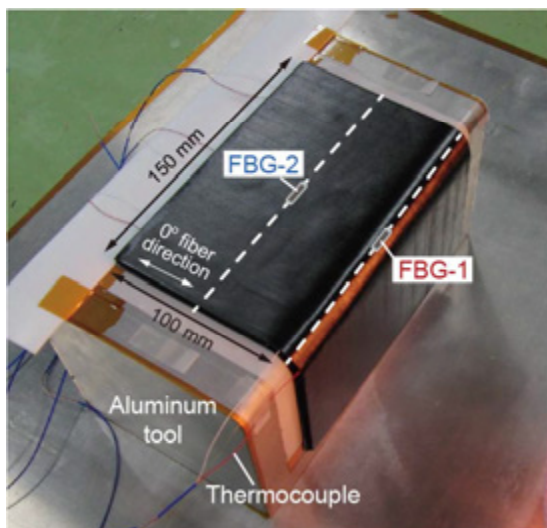
5/15

成形モニタリング

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



アルミ成型型上で積層された未硬化試験片



- 形状はASTM D6415 を参考に決定
- アルミ成型型コーナは角度90°および曲率半径 6.4mm
- 材料は 32 層の CF/epoxy prepreg T700S/2592 (Toray, $[0_4/90_4]_{2S}$).
- 2本のFBGセンサ (クラッド径 125 μ m, ポリイミド被覆径 150 μ m, センサ長 10mm)をコーナ部およびフランジ部の厚さ方向中央に埋め込み
- 供試体と成型型の間の摩擦を抑えるために2枚のテフロンフィルム (厚さ 0.1mm)を挿入
- 真空バッグ後にオートクレーブ内で3気圧 130°C環境下で硬化したのち冷却・脱型

異なる場所に埋め込まれた2本のセンサ応答を比較することで
コーナ部特有のひずみ応答を明らかにする

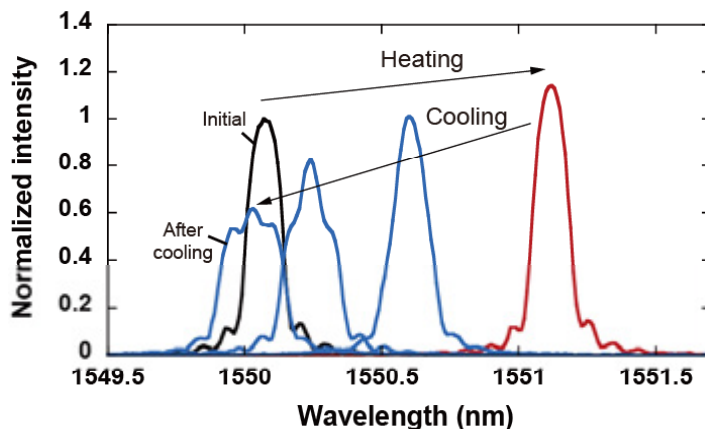
6/15

FBGセンサ応答

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



加熱中および冷却中に計測されたFBG反射光スペクトル



- 初期スペクトルは急峻な単一のピークを有した
- 加熱時にはFBGスペクトルは形状を保ったまま、温度上昇にともない高波長側にシフト
- また硬化中にもFBGスペクトルは有意な変化を示さなかった
- しかし冷却過程においては、FBGスペクトルは温度低下にともない短波長側にシフトすると同時に徐々に形状が崩れていった

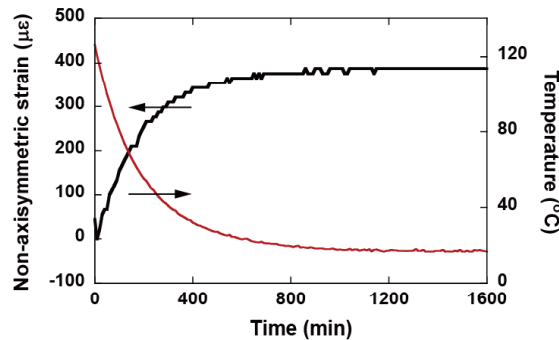
7/15

成形モニタリング結果

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo

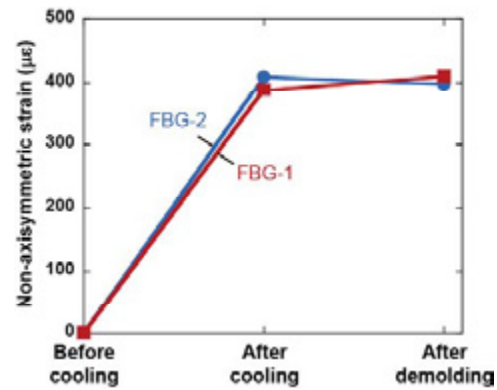


コーナ部に埋め込まれたFBG-1の
非軸対称ひずみ $\varepsilon_d = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|/2$



- 温度低下にともない、非軸対称ひずみが増加し、最終的に390 $\mu\epsilon$ に収束
- フランジ部のFBG-2も同様のひずみ変化を見せたが、最終的な値は410 $\mu\epsilon$ でありFBG-1よりも若干大きな値

2本のFBGセンサの
非軸対称ひずみの変化履歴

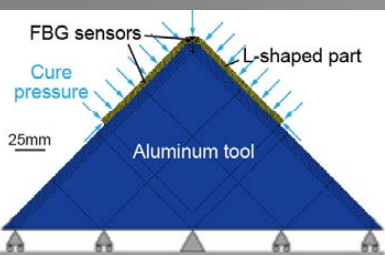


- 脱型過程において、コーナ部のFBG-1では非軸対称ひずみが20 $\mu\epsilon$ 増加したのに対し、フランジ部のFBG-1では変化せず

8/15

有限要素解析(2次元モデル)

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo

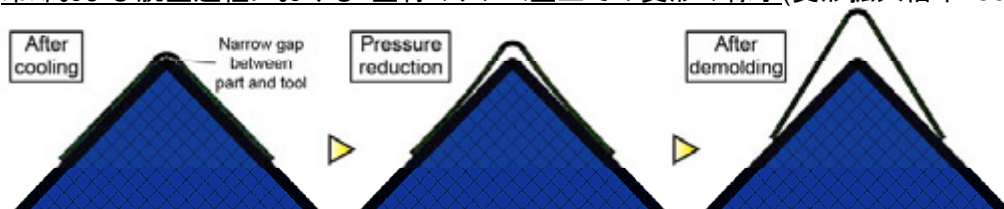


- 平面ひずみを仮定 ・接触干渉を定義
- 摩擦はゼロと定義(フィルム挿入を模擬)

解析手順

1. 成形圧力をL型材上面に負荷
2. 冷却過程のシミュレーション:
硬化温度から室温まで変化
3. 脱型のシミュレーション:
成形圧力を除荷

冷却および脱型過程におけるL型材のアルミ型上での変形の様子(変形拡大倍率: 50)



- 冷却後に熱収縮によりL型部材とアルミ成形型の間にわずかな隙間が生じたが、全体としては90°の形状を保持→成形圧がL型材の熱変形を拘束
- しかしその後の減圧過程において、変形拘束が緩まるにつれてL型部材は徐々に成形型から離れていき、コーナ角度が減少(スプリングイン変形)

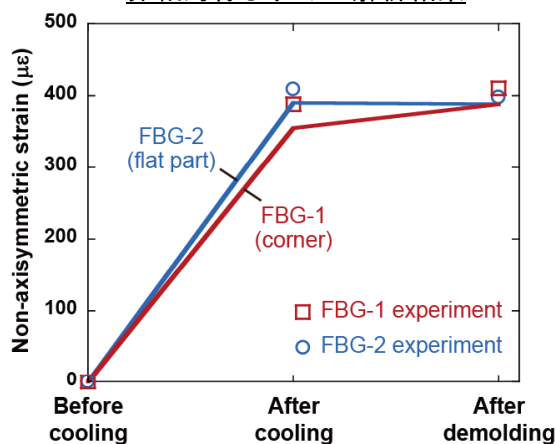
9/15

結果と考察

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



非軸対称ひずみの解析結果



•解析結果は実験値と良く一致

•脱型後に発生した非軸対称ひずみは複合材の異方性に起因

✓面内CTE(繊維支配)が面外CTE(樹脂支配)に比べて著しく小さい

✓スプリングイン変形発生の要因

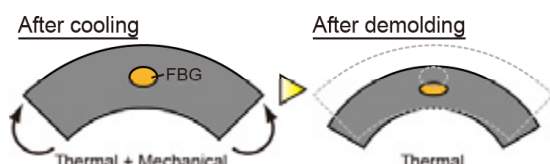
✓ひずみ値は積層構成のみによって決定されるので、2つのFBGで同じ値を示す

•冷却後のひずみ差は前述の成形圧による変形拘束に起因

✓成形圧とそれに対する成形型からの反力によりコーナ部に開口モーメントが負荷され、面外方向引張ひずみが発生

✓成形圧はフランジ部にはひずみ変化を発生させない

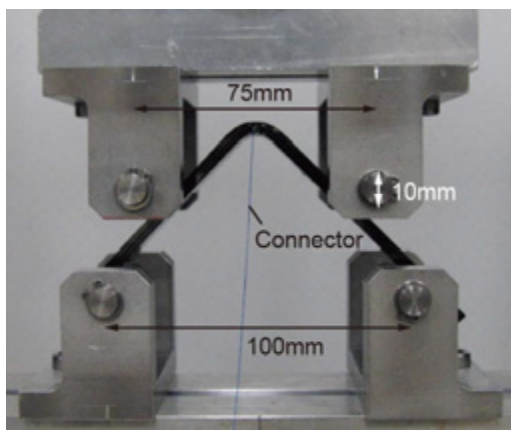
コーナ部とFBGセンサの変形



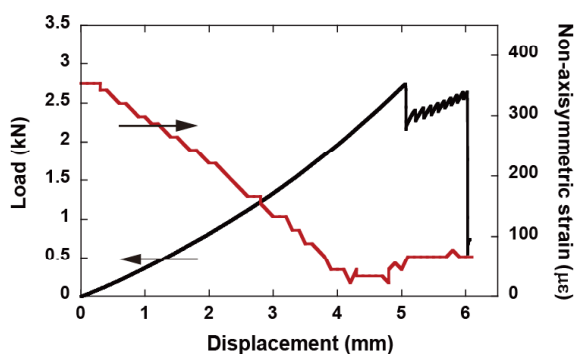
10/15

4点曲げ試験(運用過程を模擬)

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



荷重と非軸対称ひずみの変化



•荷重は幾何学的効果により非線形に増加したのち、コーナ部厚さ方向中央での面外引張破壊により急激な低下

•非軸対称ひずみはまず徐々に低下し変位4.5mmでゼロになったのち反転して増加

•最初の破壊以降はひずみはほぼ同じ値を保ち、荷重負荷点まで達する最終的な亀裂進展と同時にセンサ応答が消失

•変位速度: 1.0 mm/min

•25mm幅の試験片を切り出し光ファイバコネクタを再接続

✓光素子用自動調芯機を活用

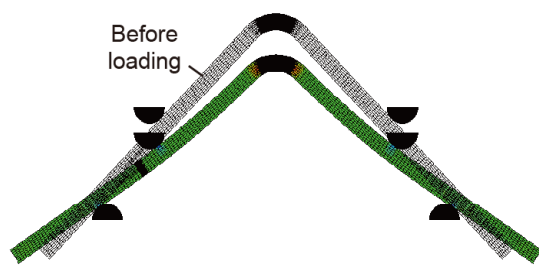
✓光損失は最小で0.2dB

✓補修やトリムの際にも利用可能

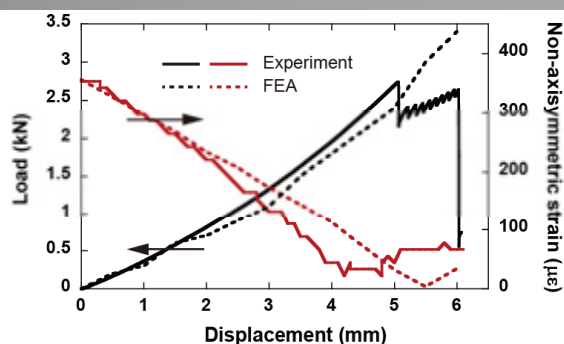
11/15

有限要素解析

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo

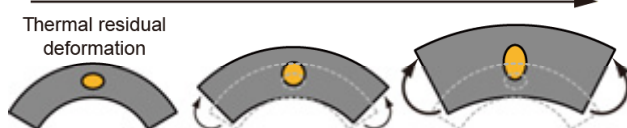


+平面応力を仮定 +圧子とL型材間に接触を定義
+幾何学的非線形を考慮 +損傷モデルは未導入



解析は破壊以降を除き計測値と良く一致

計算されたFBGセンサの変形



- 初期には荷重負荷による面外引張りひずみが熱残留ひずみを打ち消す方向に働き、非軸対称ひずみが減少
- さらに荷重を負荷することで面外方向の力学的ひずみが優位になり、非軸対称ひずみが反転して増加

ライフサイクルモニタリング技術によりL型材のキーとなるひずみ変化を取得可能
・スプリングインの要因となる熱残留ひずみ ・破壊の要因となる力学ひずみ

12/15

センサ応答に基づく品質保証技術

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



組立時のひずみ変化を用いることで組立品の強度を予測・保証する技術を構築

異なるコーナ角度を有する供試体3種



- 異なるコーナ角度(90.5°, 90° or 89.5°)を有するアルミ成型型を用いて3種の供試体を成形
- わずかな角度変化は製造上のばらつきや成形不具合によるゆがみを模擬
- すべてのL型材がコーナ部が90°の状態に組み立てられたのちに運用されると仮定
- 各供試体のコーナ部厚さ方向中央にFBGセンサを埋め込み

実験手順

1. 脱径後にコーナ角度を測定し4点曲げ荷重下で90°に角度矯正(荷重はFEAで計算)
2. 擬似的な組み立て過程におけるひずみ変動をFBGセンサで計測
3. 矯正後に4点曲げ試験を実施し、組立L型材の強度を評価
(強度は最初の荷重低下があった荷重で定義)

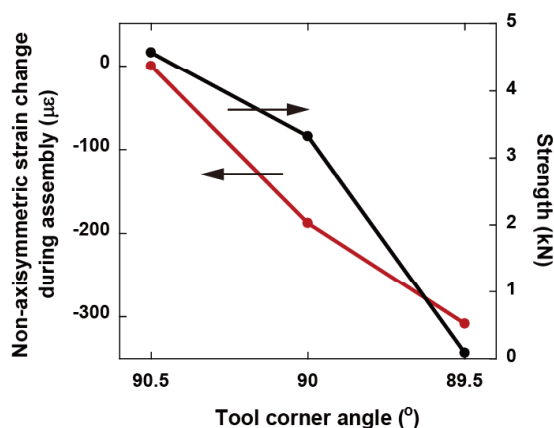
13/15

実証試験結果

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo

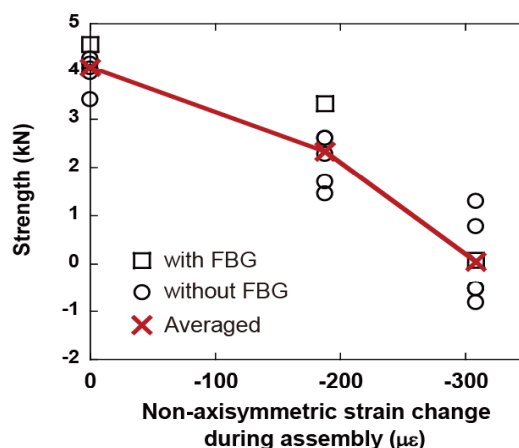


成形型角度に依存した
組立時の非軸対称ひずみ変化と強度



- 組み立てひずみと強度に正の相関
- 非軸対称ひずみの減少は、組立時の面外方向引張ひずみの発生を示唆

組立ひずみと強度の関係
ばらつき評価のための
追加試験(FBGなし)のデータを含む



組立時の非軸対称ひずみの減少量と
強度低下の平均値は比例

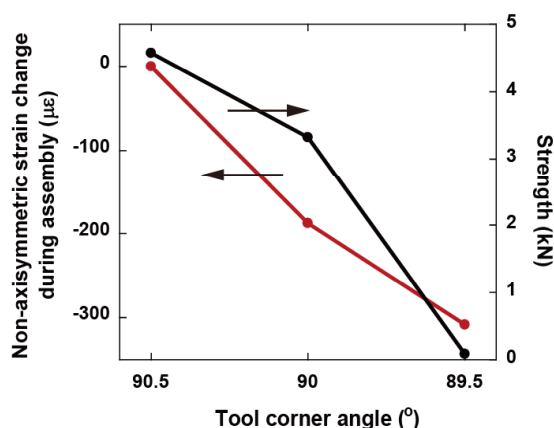
14/15

実証試験結果

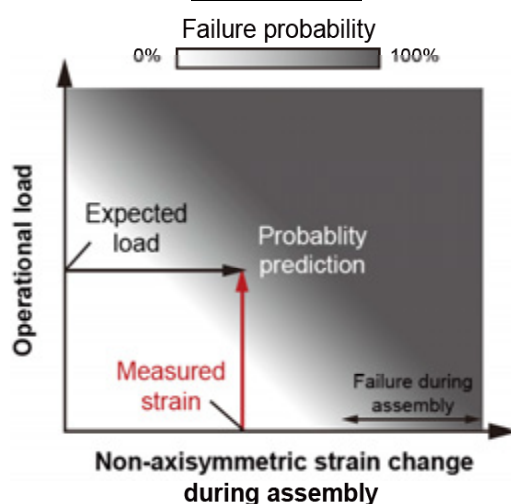
Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



成形型角度に依存した
組立時の非軸対称ひずみ変化と強度



強度予測手法



運用過程における予期せぬ破壊を回避可能

従来NDIの損傷情報とライフサイクルモニタリングシステムのひずみ情報を
組み合わせることで、より正確な品質保証と構造信頼性の向上が可能

14/15

まとめ

Smart Composites
System lab.
The University of Tokyo



L型複合材のライフサイクルモニタリング技術を実証

- FBGセンサをコーナ部厚さ方向に埋め込むことで、スプリングインの要因となる熱残留ひずみおよび破壊につながる面外方向引張ひずみを感度良くモニタ可能
- 組立時のセンサ応答を用いた組立品の強度予測・品質保証技術を構築

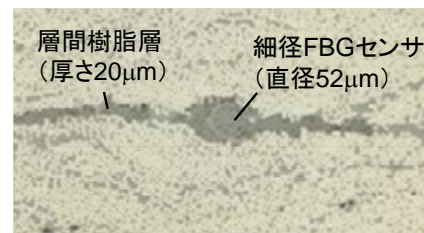
今後の予定

成形時の光ファイバセンサ応答を用いて
複合材料成形状態の可否を予測する技術



ライフサイクルモニタリング技術の高度化

層間樹脂層に埋め込んだ細径FBG



成形時の非軸対称ひずみ変化量と
層間破壊靱性値に正の相関