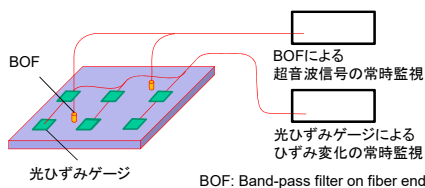


研究成果9

炭素繊維複合材料の光ヘルスマニタリング方法の開発

長瀬 亮

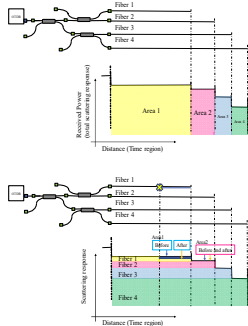
複合材料のマルチスケール損傷評価と構造ヘルスマニタリング



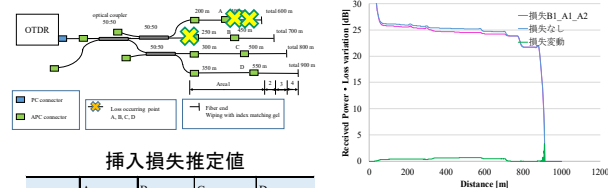
複合材料の損傷評価を目的とし、2種類の光センシング法を試みる。

- 分岐光線路による多点ひずみ計測
- 損傷時AE波のBOFによる検出

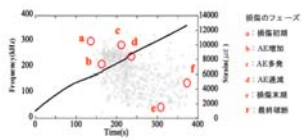
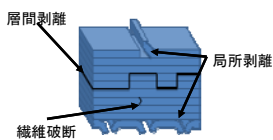
分岐光線路による多点ひずみ計測



Fiber-End Differential法 (FED法)

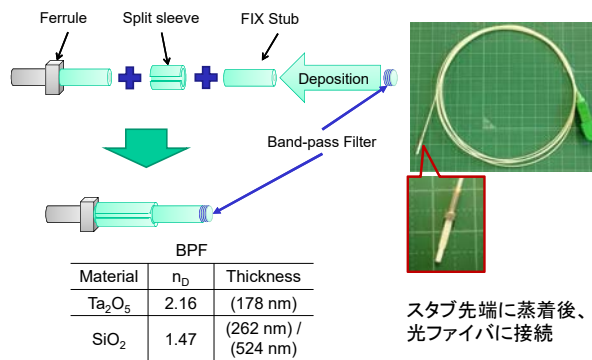


AE波のBOFによる検出

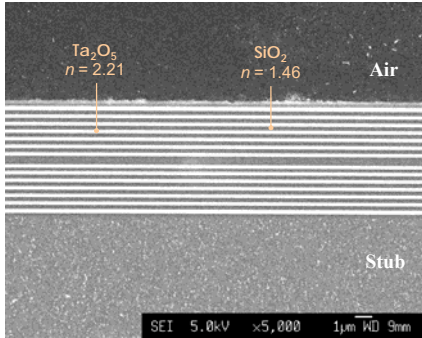


複合材料損傷時に発生するAE波をBOF (Band-pass filter on fiber-end) により検出

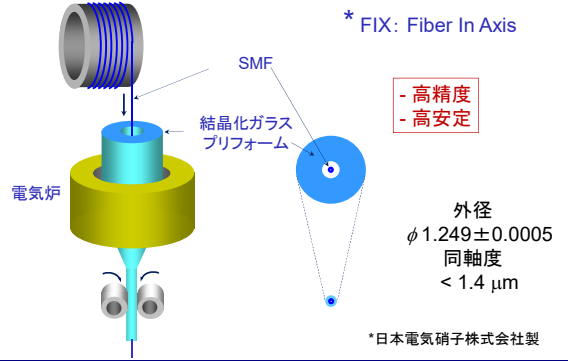
BOF (Band-pass filter on fiber-end) の構造



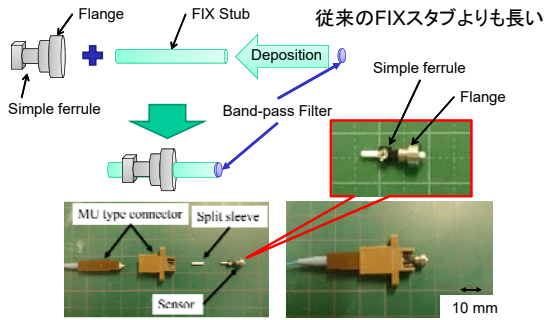
BPFの断面



FIXスタブ*

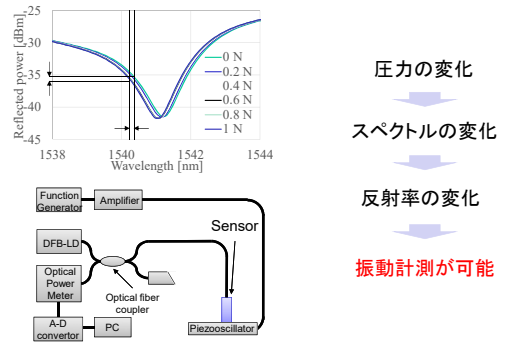


簡易レセプタクル型BOF



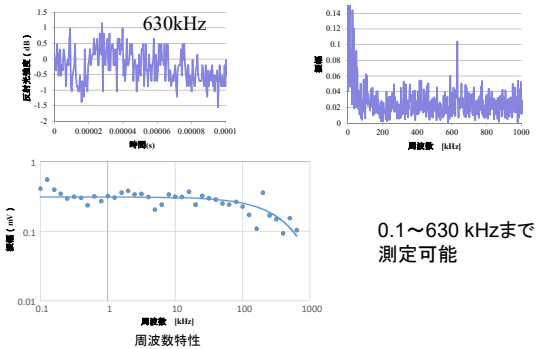
センサと接続部を一体化することによる小型化と安定化

BOFの特性



圧力の変化
↓
スペクトルの変化
↓
反射率の変化
↓
振動計測が可能

BOFによる超音波測定結果



まとめ

複合材料の損傷検出を目的とし、2種類の光センシング法を試み、原理を確認した。

- (1) 分岐光線路による多地点ひずみ計測
光ファイバケーブルにより分岐した光線路に複数のセンサを配置した場合でも、後方散乱光の応答の差から損失増加点の位置を特定できる計算法を提案した。
- (2) 損傷時AE波のBOFによる検出
複合材料損傷時に発生するAE波を捉えるセンサを目指し、ファイバ端面に誘電体多層膜フィルタを構成したBOF (Band-pass filter On Fiber-end) による振動検出を試みた結果、0.1~630 kHzまで測定可能であり、AE波の検出に可能性があることを見出した。

成果報告 10

ひずみ計測を用いた データ同化の活用について

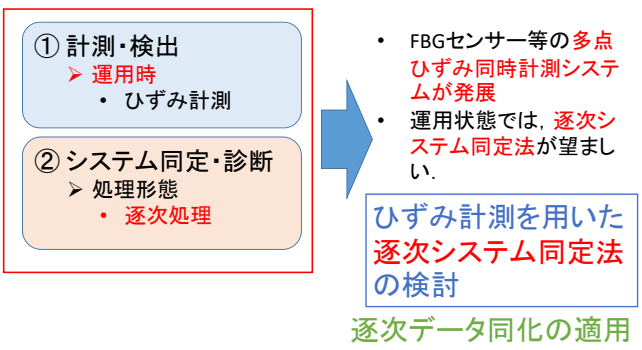
研究テーマ2「高分子基複合材料のマルチスケール損傷評価手法の
開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用」

○秋田剛(千葉工大), 鈴岡拓也(千葉工大院)

複合材料の構造ヘルスマニタリング

- ① 計測・検出
 - 非運用時
 - ・ 目視による検査, X線による検査, 超音波診断, etc.
 - 運用時
 - ・ 振動計測, ひずみ計測, etc.
- ② システム同定・診断
 - システム表現
 - ・ パラメトリック, ノンパラメトリック
 - ・ 時間領域, 周波数領域
 - 処理形態
 - ・ 一括処理, 逐次処理
- ③ 補修

本研究のターゲット



データ同化の適用について

現状の数値シミュレーション(決定論的アプローチ)

- ・ ノミナルの数学モデルに基づく予測計算

境界条件や物性値を指定して, 物理計算を行う!

データ同化手法の適用(統計論的アプローチ)

境界条件や物性値を計測データから同化して, 物理計算を行う!

- モデル修正の自動化が可能
- 既存のシミュレーションコードとの組み合わせが可能

逐次データ同化法

・古典的方法

- カルマンフィルタ.....線形問題, ホワイティングノイズ
- 拡張カルマンフィルタ.....弱非線形問題
 - ・ 状態空間表示できる低次元の物理モデルが対象!

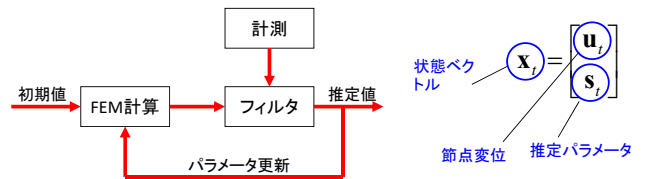
・計算統計学的方法

本研究で適用

- アンサンブルカルマンフィルタ.....任意の非線形問題
- 粒子フィルタ.....任意の非線形問題, 任意の確率分布
 - ・ 既存のFEMコードを利用可能
 - ・ 応力や変位等のFEMで求められる種々の量の推定量を逐次的に算出可能

FEMにおけるデータ同化

- FEM計算 $f_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) = \mathbf{0}$ (システムノイズ, 観測ノイズ)
- 観測モデル $\mathbf{y}_t = g_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{w}_t$ (観測ノイズ)
- フィルタリング $\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{x}_t + \mathbf{K}_t [\mathbf{y}_t - g_t(\mathbf{x}_t)]$



研究項目

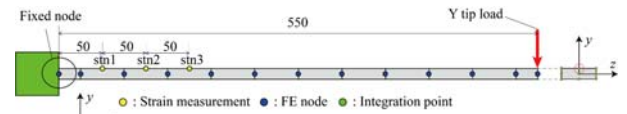
① データ同化の高精度化

- システムノイズの設定法について
 - 予測残差や尤度関数を使ったノイズチューニング法

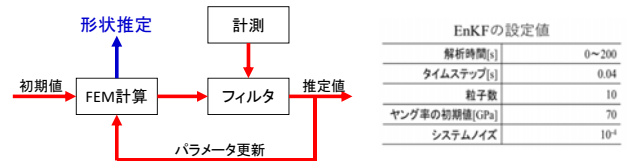
② データ同化の活用

- ひずみ計測を使った構造物の形状推定
 - パラメータ推定と同時に求められるFEM計算の節点変位からの形状推定
- 損傷箇所の推定問題
 - 要素のヤング率を推定パラメータとしたデータ同化

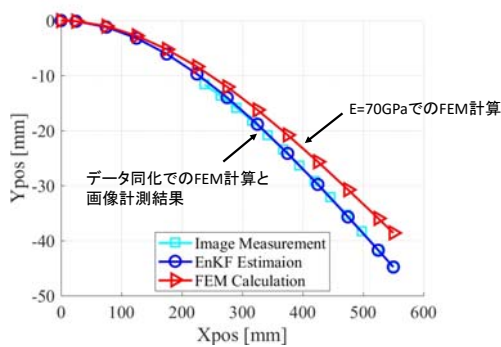
検証実験1: ひずみ計測からの形状推定



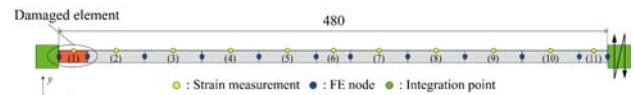
- 片持ちはりの先端に荷重を与え、3カ所でひずみ計測。
- ヤング率を推定パラメータとしてデータ同化。
- データ同化のFEM計算で求められる節点変位から形状推定。



ひずみ計測からの形状推定結果



検証実験2: 損傷箇所の推定

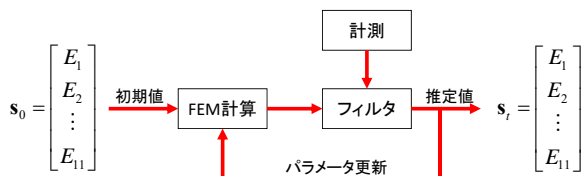
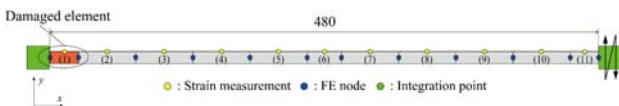


- 左端固定されたはりの右端に強制加振を与え、ひずみ計測。
- 11個のはり要素でモデル化。要素ごとにひずみ計測。
- 各要素のヤング率を全て推定パラメータとしてデータ同化。

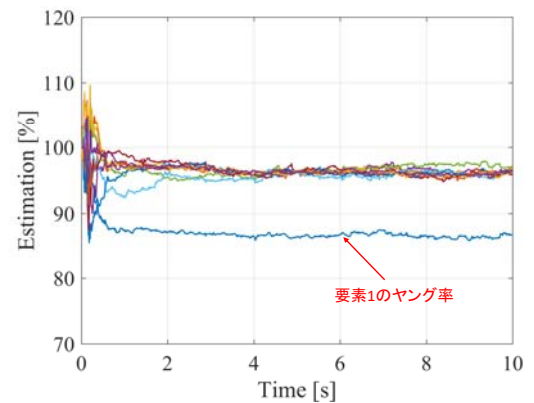
双子実験

- 要素1のヤング率が10%低下した場合の応答を事前に有限要素解析により求める。
- 有限要素解析から求めた各要素のひずみ値に測定誤差としてランダムノイズを付与し擬似的な測定データを作成する。
- 擬似的な測定データを利用してデータ同化を実行する。

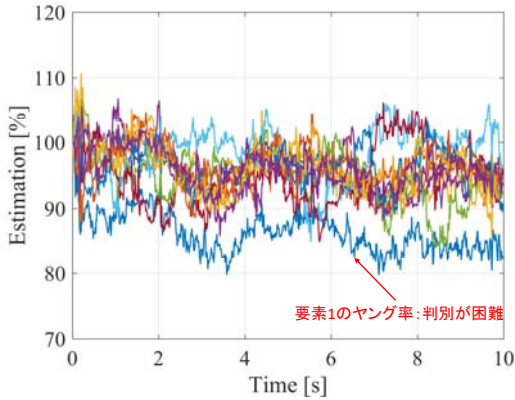
検証実験2: 損傷箇所の推定



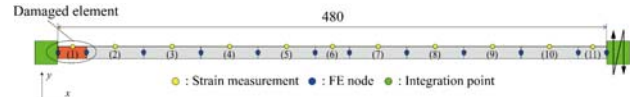
ヤング率推定結果: 計測誤差 $\sigma = 10^{-7}$



ヤング率推定結果: 計測誤差 $\sigma = 10^{-6}$



検証実験3

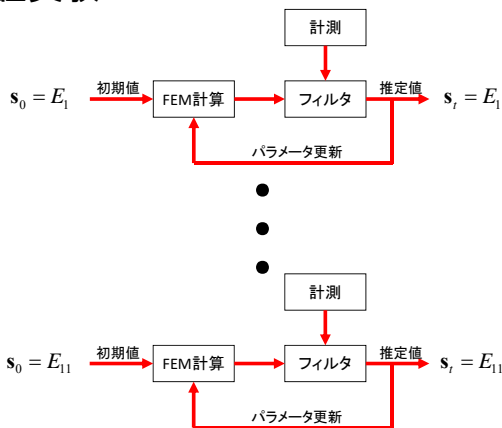


- 左端固定されたはりの右端に強制加振を与え、ひずみ計測。
- 11個のはり要素でモデル化。要素ごとにひずみ計測。
- 要素のヤング率を個別に推定パラメータとしてデータ同化。

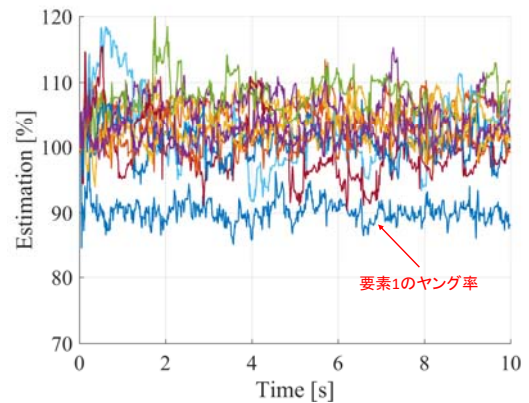
双子実験

1. 要素1のヤング率が10%低下した場合の応答を事前に有限要素解析により求める。
2. 有限要素解析から求めた各要素のひずみ値に測定誤差としてランダムノイズを付与し擬似的な測定データを作成する。
3. 擬似的な測定データを利用して各要素のヤング率を推定パラメータとしたデータ同化を11回実行する。

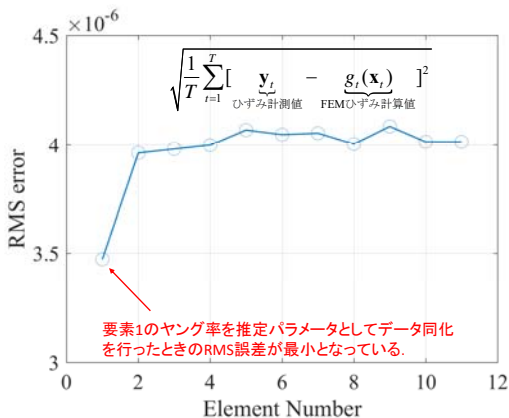
検証実験3



ヤング率推定結果2: 計測誤差 $\sigma = 10^{-6}$



(計測値-計算値)のRMS誤差の比較



まとめと今後の課題

• ひずみ計測によるデータ同化の活用

- データ同化によってひずみ計測とFEM計算を融合し、ひずみ値からの形状推定の有効性を確認した。
- 要素ごとのヤング率を推定パラメータとして、部材の損傷箇所推定問題にデータ同化を適用し、数値実験で有効性を確認した。



• 計測について

- 光ファイバーを利用した計測やデジタル画像相関法を使った計測とデータ同化を組み合わせる有効性を検証する。

• 損傷箇所の推定問題について

- 実部材を使った実験による検証や損傷評価モデルの高度化を行い、有効性を検証する。

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業
「エネルギー・航空運輸機器の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系の構築」
平成29年度研究成果報告会
金沢工業大学津田沼校舎5号館6階会議室

発表番号: 11

繊維断面を基準点とするデジタル画像相関法に基づく直交積層板のき裂進展挙動評価

金沢工業大学
斉藤博嗣, 金原 勲

2018年02月27日 金沢工業大学 1

損傷形態

Micro scale

Interfacial debonding¹⁾

Meso scale

Transverse crack & Delamination¹⁾

Macro scale

Fiber failure¹⁾

- 多数の損傷が複雑に混在しながら損傷が進展する
- 積層構成によって、損傷進展の様相が異なる
- 界面はく離が損傷起点となる

破壊挙動の予測が困難
損傷挙動を予測するうえで微視的損傷に関する検討の必要性

…CFRP積層板の損傷挙動に関して、各手法による研究が進められている

2018年02月27日 金沢工業大学 2

損傷挙動の評価例

Acoustic Emission法: AE

- 損傷発生時の音波からき裂検知
- 内部損傷の検知が可能
- 界面はく離等の微小き裂の検知が困難

マクロな損傷挙動を追跡するうえで特に有効な手法

Digital Image Correlation法: DIC

Fig.10 Strain distribution of specimen surface obtained by DIC strain analysis²⁾

- 変化前後画像の基準点の変位量を計測
- ひずみ分布の可視化から損傷箇所の判別
- 繊維数本レベルから大域的な評価

マルチスケールな損傷挙動の追跡に有用性のある手法

本研究では内部損傷における微視的き裂について検討し、評価手法としてDICに着目した

2018年02月27日 金沢工業大学 3

DIC評価手法の選定

本研究では、**繊維断面を直接ランダムマーカとして**局所的なひずみ分布に着目した評価

ナノ粒子等のランダムマーカを散布した評価例
Fath E. Oz et al. Loading direction, ϵ_x of strain map, Random marker

繊維断面をランダムマーカとした評価例
修正局所濃淡差法 (LAGT)
画像解析より繊維断面の中心位置を同定し、それらをついでCFRP断面を要素分割することで、要素の変形からひずみを導出する。

その場観察に基づく簡易な画像解析手法により、CFRP断面に生じるひずみ分布を可視化し、損傷箇所の同定と予測を試みた。

各計測画像領域の繊維パターンを認識させ同領域の変位量のみを追跡する解析手法

2018年02月27日 金沢工業大学 4

研究目的

Step.1 実験的評価

- 積層板を構成する層単位を観察対象とした損傷挙動評価
- 界面はく離、き裂進展の追跡および評価

Step.2 解析的評価 (DIC)

- 繊維断面を直接ランダムマーカとしたDIC評価
- 繊維/樹脂界面の局所的なひずみに着目
- ミクロスケールのひずみ変化および損傷箇所の検知

CFRP積層板における単層板内のメゾ損傷挙動の実験的検証

2018年02月27日 金沢工業大学 5

試験片作製

供試材料: CF/EP(T800SC / #2592)プリプレグシート (120 μ m)

成形法: オートクレープ法

成形条件: 成形温度130 $^{\circ}$ C, 圧力0.3[MPa], 保持時間2[h]

クロスプライ積層板を作製した

90 $^{\circ}$ 層厚は、繊維断面量を考慮して240 μ mとした

試験片端面の鏡面研磨をおこない、90 $^{\circ}$ 層内における損傷挙動を観察した

ゲージ間中央部にひずみゲージを取り付けた。

Mirror polished

2018年02月27日 金沢工業大学 6

試験条件および方法

CF/EP直交積層板の引張試験およびその観察

試験機器：電気油圧式万能試験機
試験速度：1.0 [mm/min]
観察倍率：300倍

1. 任意の公称ひずみで試験機を停止
2. 負荷状態の試験片端面のき裂進展を観察

※公称ひずみの範囲は0.05%毎に0～0.90%とした。

観察範囲は試験片中央部から試験片長手方向に±5mmの範囲とした。

2018年02月27日 金沢工業大学 7

試験結果

本試験では、界面はく離が2つ以上結合した瞬間をき裂初生とした

0.00 % 0.40 %

き裂初生の平均公称ひずみ：0.54 %

2018年02月27日 金沢工業大学 8

試験結果

0.60 % 0.80 % 0.90 %

crack

- 公称ひずみ0.60%：き裂(B枠)が確認された
- 公称ひずみ0.80%：き裂初生箇所(A枠)においてき裂進展が確認された。き裂(C枠)が確認された

2018年02月27日 金沢工業大学 9

き裂初生ひずみの比較

Research Results	90° Ply Thickness [mm]	Crack Initiation Strain [%]
Ref. 1 st (GF/EP)	1.2	0.3
Ref. 2 nd (GF/EP)	0.18	0.72
	0.36	0.64
	0.54	0.53
Ref. 3 rd (CF/EP)	0.16	0.7
	0.125	0.8
Ref. 4 th (CF/EP)	0.25	0.7-0.8
	0.5	0.6-0.7
Our Result (CF/EP)	0.24	0.54 (0.4-0.65)

本試験結果は、同評価例と比較して低ひずみで生じた

Ref.3 観察範囲による影響
観察範囲外において、より初期段階で損傷が生じた可能性が挙げられる

Ref.4 初期損傷の定義が異なる

より広い観察領域の損傷を追跡するメソスケールでのその場観察が有効であると考えられる

2018年02月27日 金沢工業大学 10

解析条件

引張試験において得られた観察画像に基づき、画像解析をおこなった

演算処理ソフト：MATLAB (Mathworks) プログラム：Digital Image Correlation and Tracking

繊維断面を直接基準点とすることで、繊維/樹脂界面近傍の局所ひずみに着目した

824 [pixel] 442 [pixel]

Step size: X × X [pixel] Subset size: N × N [pixel]

分解能 Step size: 5 [pixel] 探索領域 Subset size: 31 [pixel]

2018年02月27日 金沢工業大学 11

解析結果における全域ひずみ

各画像の線上におけるy方向ひずみの平均値を图示した。(0.10～0.90%)

Line for strain profile

Nominal strain

Average strain of each image

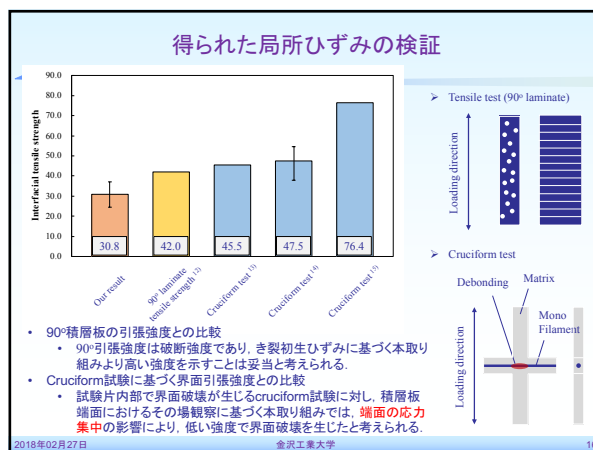
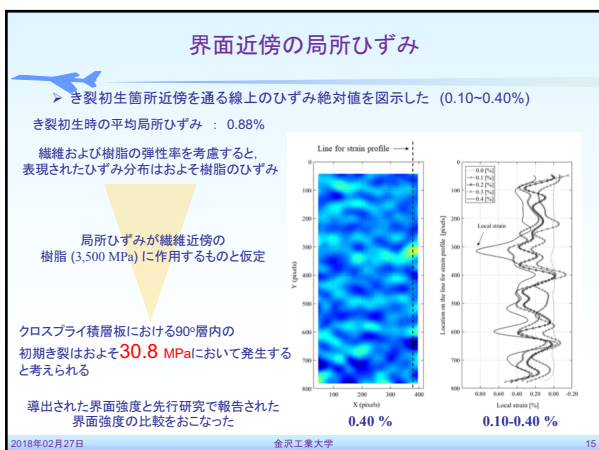
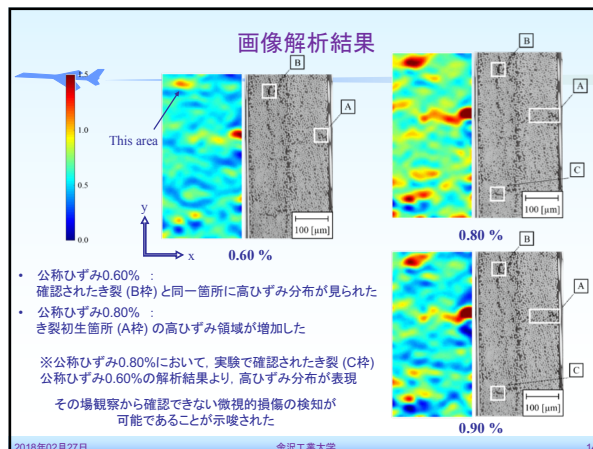
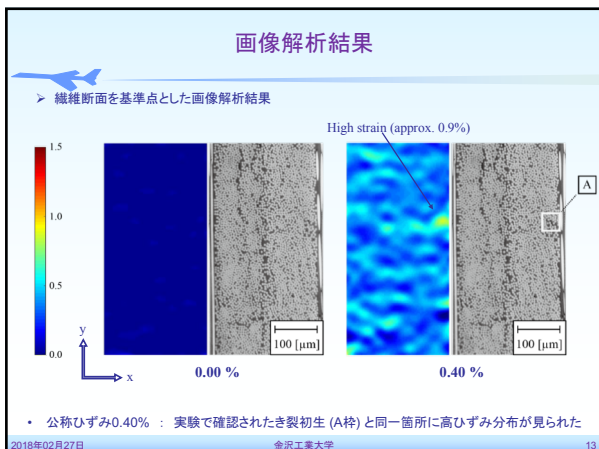
Location on the line for average of strain [%]

Number of image [-]

各解析画像の全域的なひずみは、試験機で測定される公称ひずみとおよそ一致している。

DICによる公称ひずみの測定結果が妥当であることから、局所ひずみの絶対値も妥当であると考えられる

2018年02月27日 金沢工業大学 12



結言

実験的評価

- メソスケールのその場観察から単層内における内部損傷を評価
- き裂初生時の平均公称ひずみ0.54%が明らかとなった
- 評価手法、観察範囲がき裂初生ひずみに顕著な影響をおよぼす
- より広範囲を観察対象とするメソスケールにおけるその場観察の有効性が示された

解析的評価

- 観察画像に基づく繊維断面を直接ランダムマーカとした画像解析結果
- き裂初生箇所において、高ひずみ分布が示されたことから良い一致が示された
- その場観察から確認できない微小き裂の損傷を予測できる可能性が挙げられた
- 公称ひずみの一致より、解析画像の局所ひずみはき裂初生ひずみに相当すると予測される
- 先行研究との比較より、間接的に局所ひずみの妥当性が示された

2018年02月27日 金沢工業大学 17

予備スライド

2018年02月27日 金沢工業大学 18