

研究成果報告6

「異材貼り合わせ構造の負荷試験測定とマルチスケールFEM数値解析」

馬 志 剛(千葉工大), ○鈴木 浩治(千葉工大),
秋田 剛(千葉工大)

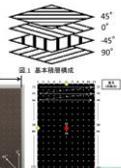
平成29年 2月22日



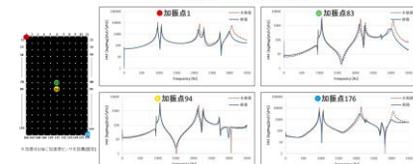
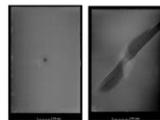
● 当該研究テーマにおける同定・逆解析の必要性

試験片

- ・材質
CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic
(三菱レーヨン/バイロフィル/プリプレグ)
- ・積層構成
疑似等方
[45/0/-45/90]_n (層数: 32層)
- ・寸法
150mm × 100mm × 4mm
- ・研究で使用する枚数
3枚



CT撮像



● 当該研究テーマにおける同定・逆解析の必要性

機械インピーダンス(F/V)の測定
共振周波数の読み取り



Transverse Crack Density

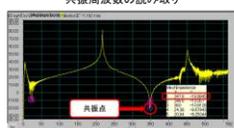
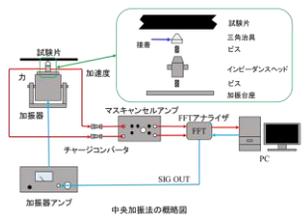
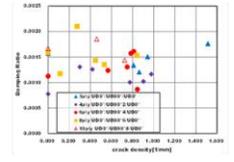
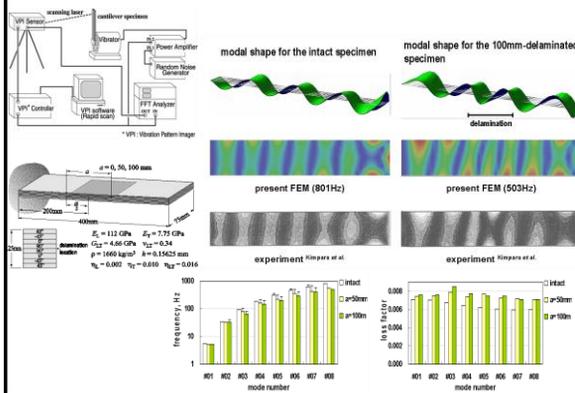


図5 振動波形の例(振動前試験片番号10)

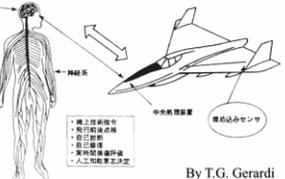
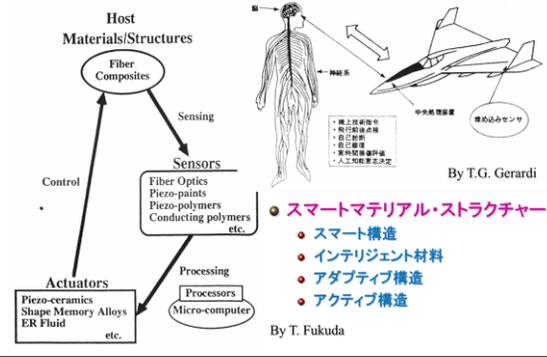
X軸: 周波数[Hz] Y軸: 機械インピーダンス[dB]



● 当該研究テーマにおける同定・逆解析の必要性



● 損傷同定・構造ヘルスマモニタリング・スマート構造.



- スマート構造
- インテリジェント材料
- アダプティブ構造
- アクティブ構造

● 損傷同定・構造ヘルスマモニタリング・スマート構造.

- 『その中に人間の筋肉, 神経, 頭脳に相当するアクチュエータ, センサ, コントローラを備えている構造』
- 既存の制御構造物やロボットとは異なり『アクチュエータやセンサ, コントローラ機能を内包して, かつ複雑化を避けるのがその目的』

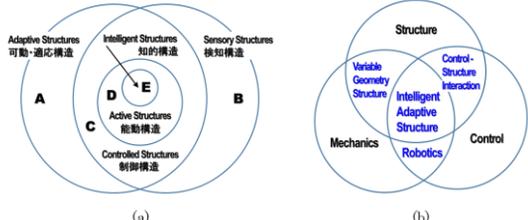
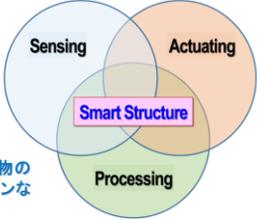


図1 スマートマテリアル・ストラクチャーの古典的定義(10)

7/17

● 損傷同定・構造ヘルスマニタリング・スマート構造.

- 『先進複合材料の構造体に、繊維あるいは箔状にしたセンサ材料・素子(神経)やアクチュエータ材料・素子(筋肉)を一体融合化し、情報処理・制御(脳)を行う。生命体と同様な知覚・判断・応答といった知的機能を付与した構造システム』
- 『その究極の目標は、材料・構造システムに知能と生体機能を持たせ、環境状況に適應する機能を発現させること』
- 実質的(狭義)には
 - 圧電素子などを用いた柔軟構造物のセルフセンシングアクチュエーションなどアクティブ制御技術
 - 光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマニタリング技術



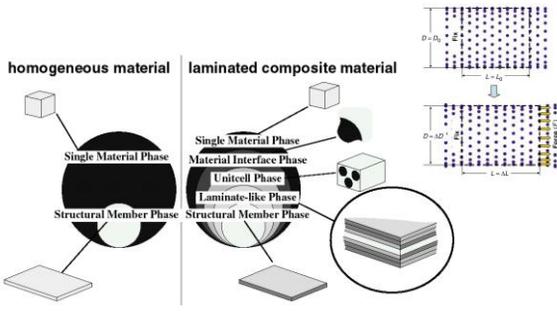
8/17

● 損傷同定・構造ヘルスマニタリング・スマート構造.

- 本技術とは『目的とする機能を発現させるために、活用できる全ての技術のインテグレーション(統合)によって作られる構造体』であり、『特定の機能(サイズ)を持つ材料系を指すハードウェアと考えるよりも、さまざまなニーズに柔軟かつ速やかに対応可能となるインテグレーション技術のソフトウェア的プラットフォーム(共通基盤)』と捉えるべき
- この解釈に従うと、その適用範囲は飛躍的に拡大
 - 受動制御(パッシブダンピング)技術
 - 航空機構造のモーフィング技術
 - き裂損傷などを対象としての自己診断機能・自己修復機能
 - 環境発電(Energy Harvesting)技術
 - 非線形ダイナミクス・カオス・複雑系など異分野との合流
 - 人工知能・機械学習などとの融合
 - X線CT撮像や3Dプリンタなどを活用した位相(トポロジー)最適化
 - 構造/制御同時最適化、知的最適化

9/17

● マルチスケールなモデル化:コメント



homogeneous material | laminated composite material

Single Material Phase | Single Material Phase, Material Interface Phase, Unitcell Phase, Laminate-like Phase, Structural Member Phase

10/17

本報の位置づけ・目的

本研究では、ベース部と補強部からなる接着貼り合わせ構造はりの3点曲げについて、実測と有限要素法(FEM)による数値解析を実施し、相互に比較する。材料としてはアルミ合金および炭素繊維強化プラスチック(CFRP)一方向強化材とする。それにより FEM 解析に必要なモデルパラメータを推定するために有益な情報を得ることを目指し、解析結果の信頼性を評価して、接着状態との対応関係について検討する。

参考文献

- S. Budhe, M.D. Banea, S. de Barros, L.F.M. da Silva, "An updated review of adhesively bonded joints in composite materials", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 72 (2017), pp.30-42.
- X. He, "A review of finite element analysis of adhesively bonded joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 31 (2011), pp.248-264.
- A. Reburn, "Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminum/GFRP co-cured and adhesively bonded single-lap joints", *The Plymouth Student Scientist*, Vol.9 (2016), pp.195-230.

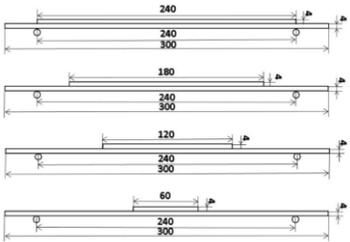
↓

後続の損傷同定研究・構造ヘルスマニタリング研究における実測データおよび材料特性同定済みのFEM数値解析モデルの提供

11/17

供試体および3点曲げ試験測定

図1に本試験で使用した試験片の形状・寸法・材質を示す。アルミ材はA6063アルミ平板で、CFRPは一方向20ply積層材を成形したものである。接着剤はエポキシ接着剤を用い、硬化条件は室温で25時間とした。ベース部と補強部に用いる素材として前述のアルミ材とCFRPのどちらかとするにより、4種類の組み合わせ、つまりベース部:アルミ材またはCFRP×補強部:アルミ材またはCFRPを検討した。



3点曲げ試験
10mm/min のクロスヘッド速度

12/17

有限要素法(FEM)解析

本CFRP/アルミ合金貼り合わせ構造の試験片について、有限要素法(FEM)解析により接着状態を推定した。表1にFEM解析で用いた材料定数を示す。FEM数値解析は、4節点2次元ソリッド平面ひずみ要素を用いた。メッシュ分割については、1辺の長さ0.5mmの正方形メッシュ分割とした。また、ベース部と補強部との接着には、界面に垂直および平行なLagrange未定乗数(層間応力)を独立変数として新規に導入して接触要素のガウス積分点における変位の連続条件を満たすような定式化を行った。なお、今回は、ベース部と補強部の寸法と剛性が理想的な接合状態に対してどのように影響を与えるかを数値的に検討することとし、よって、数値モデル化にあたり接着剤層は考慮しなかった。

Table 1 Material properties of aluminum and CFRP

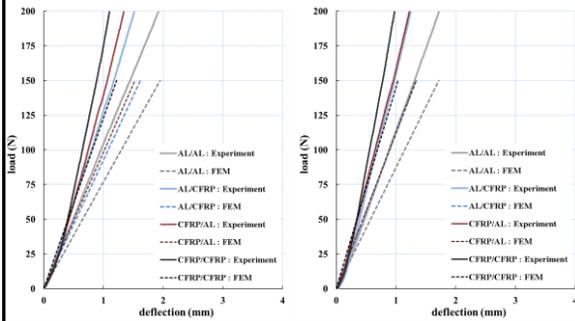
Materials	Moduli of elasticity	Poisson's ratio
CFRP	$E_{xy}=130.0\text{GPa}, G_{xy}=4.0\text{GPa}, E_{yz}=9.9\text{GPa}, G_{yz}=7.5\text{GPa}, E_{zz}=9.9\text{GPa}, G_{zx}=4.0\text{GPa}$	$\nu_{xy}=0.31, \nu_{yz}=0.21, \nu_{zx}=0.0236$
	Aluminum alloy	$E=71.6\text{GPa}, \nu=0.33$

結果および考察

13/17

180mm-reinforcement case

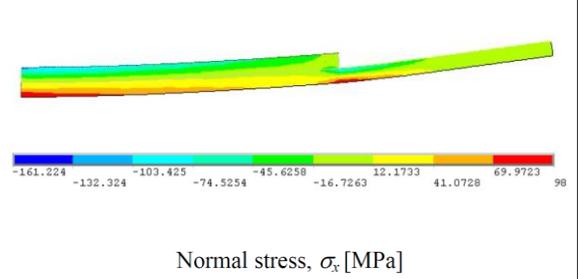
240mm-reinforcement case



結果および考察

14/17

Typical FEM analysis results for the case of CFRP-base / 180mm-Aluminum-Reinforcement

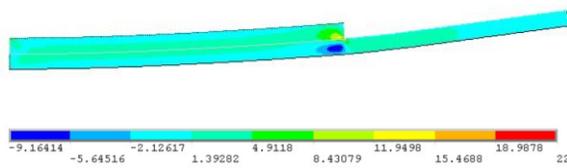


Normal stress, σ_x [MPa]

結果および考察

15/17

Typical FEM analysis results for the case of CFRP-base / 180mm-Aluminum-Reinforcement

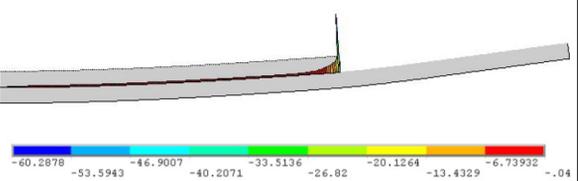


Shear stress, τ_{xy} [MPa]

結果および考察

16/17

Typical FEM analysis results for the case of CFRP-base / 180mm-Aluminum-Reinforcement



Peeling stress, σ_y [MPa] at the interface

結 言

17/17

本研究では、アルミ合金および CFRP 一方向材を組み合わせたベース部と補強部からなる接着貼り合わせ構造の3点曲げについて、実測と有限要素法 (FEM) による数値解析を実施し、曲げ荷重-たわみ線図を相互に比較した。それにより FEM 数値解析に何らかのモデルパラメータを導入して実測結果にフィッティングすることで、接着部の状態を同定することができるものとの目処を立てることができた。

本研究の一部は文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(事業番号:S1511002)からの援助を受けて実施された。ここに記して謝意を表す。

研究成果報告 7

ひずみ計測を用いた 構造パラメータのデータ同化

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)

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

① 計測・検出

- 運用時
 - ・ ひずみ計測

② システム同定・診断

- 処理形態
 - ・ 逐次処理

- ・ FBGセンサー等の**多点ひずみ同時計測システム**が**発展**
- ・ 運用状態では、**逐次システム同定法**が望ましい。

ひずみ計測を用いた
逐次システム同定法
の検討

逐次データ同化の適用

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

データ同化法

・古典的方法

- カルマンフィルタ.....線形問題, ホワイトガウシアンノイズ
- 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
 - ・ 状態遷移を計算できれば良く, 線形化も不要
 - ・ 非線形有限要素法を物理モデルとして採用可能

非線形FEMにおける状態空間モデル

非線形状態空間モデル

$$\text{非線形のつり合い方程式} \quad f_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) = \mathbf{0}$$

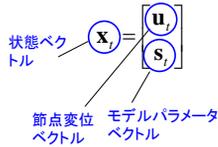
$$\text{観測モデル} \quad \mathbf{y}_t = g_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{w}_t$$

非線形FEMにおける状態空間モデル

非線形状態空間モデル

非線形のつり合い方程式 $f_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) = \mathbf{0}$

観測モデル $\mathbf{y}_t = \mathbf{g}_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{w}_t$



7

非線形FEMにおける状態空間モデル

非線形状態空間モデル

非線形のつり合い方程式 $f_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) = \mathbf{0}$

観測モデル $\mathbf{y}_t = \mathbf{g}_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{w}_t$

f_t : \mathbf{x}_{t-1} から \mathbf{x}_t を計算する手続き
(FEM計算コードを利用！)

\mathbf{v}_t : システムに与えるゆらぎ(システムノイズ)
(確率分布で与える)

8

非線形FEMにおける状態空間モデル

非線形状態空間モデル

非線形のつり合い方程式 $f_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) = \mathbf{0}$

観測モデル $\mathbf{y}_t = \mathbf{g}_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{w}_t$

\mathbf{y}_t : ひずみ計測データからなるベクトル

\mathbf{g}_t : \mathbf{x}_t から計測点のひずみを計算する手続き
(FEM計算コードを利用！)

\mathbf{w}_t : 計測ノイズ

9

データ同化における状態量推定

1. 事前情報として、モデルパラメータの初期値の確率分布を仮定

$\mathbf{s}_0 \propto N(\bar{\mathbf{s}}_0, \Sigma)$ 正規分布を仮定することが多い

2. 上記の分布に従うM個のパラメータ実現値を作成

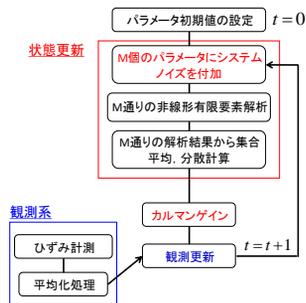
$\mathbf{s}_0^{(1)}, \mathbf{s}_0^{(2)}, \dots, \mathbf{s}_0^{(M)}$ パラメータ数がk個ならk次元ベクトルをM個作成

3. M個のパラメータでFEM解析を行い、状態量の離散確率分布を算出

観測量からベイズの定理に基づき推定量を算出
推定量にシステムノイズを加えて更新
上記2に戻り、この手順を繰り返す。

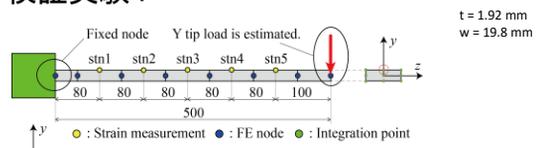
10

データ同化手順(EnKF)

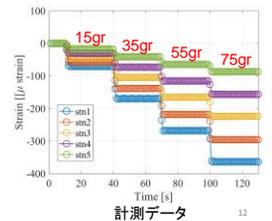


11

検証実験1

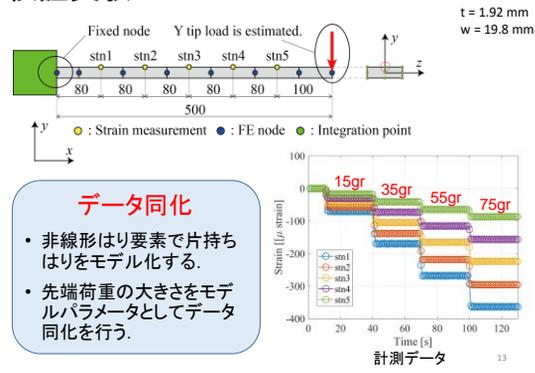


- 先端におもりを載せを、5点の歪みゲージで歪み計測する。
- おもりを逐次追加し、荷重レベルを変化させる。

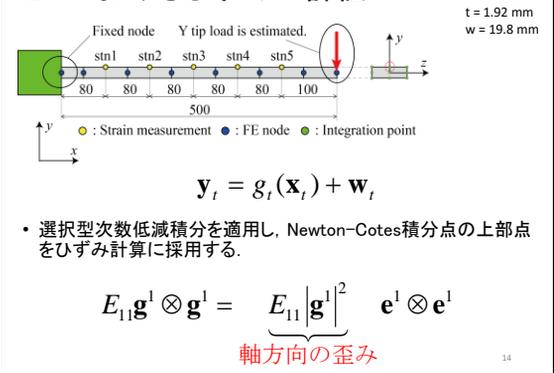


12

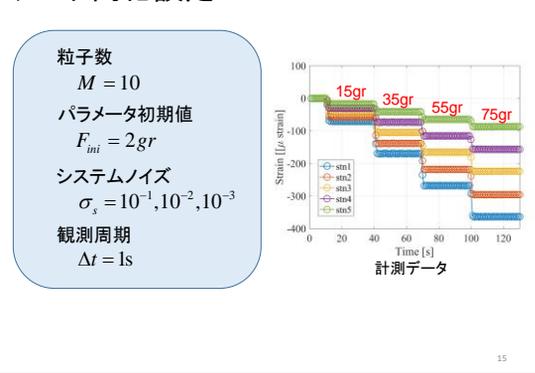
検証実験1



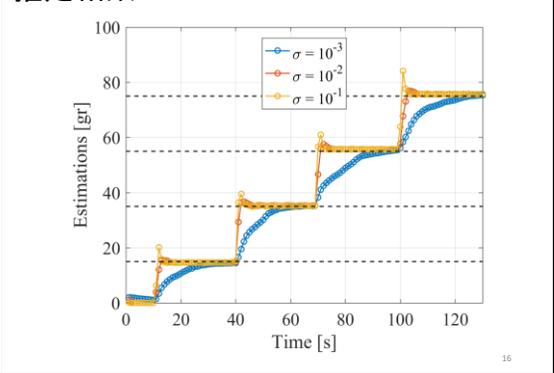
FEMにおけるひずみの評価



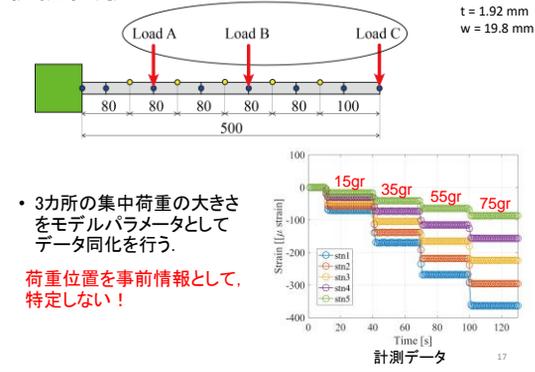
データ同化設定



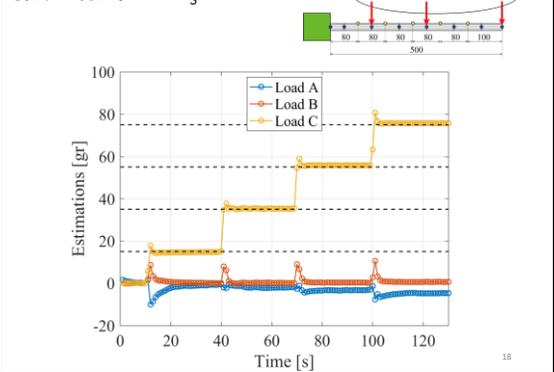
推定結果1



検証実験2



推定結果2 ($\sigma_s = 0.1$)



まとめと今後の課題

• ひずみ計測によるデータ同化

- 非線形有限要素法のはり要素モデルを利用し、ひずみ計測を用いて、データ同化によるパラメータ推定を行った。
- 片持ちはりの荷重推定問題において、有効性を確認した。



- システムノイズ・計測ノイズのチューニングを行う。
- 複合材料の損傷評価に繋がるパラメータ同定問題を検討する。
- 今回の推定値は、モンテカルロ粒子の集合平均で評価しているが、より統計的に妥当な評価方法を検討する。
- 推定に有効な計測システムの構築法について検討する。

研究成果報告 8

分岐光線路による損失変動測定法

長瀬 亮
遠藤 隆昭

発表の流れ

1. 研究背景
2. 分岐光線路について
3. 分岐光線路に発生した損失の検出方法
4. 複数個所に損失が発生した場合
5. まとめ

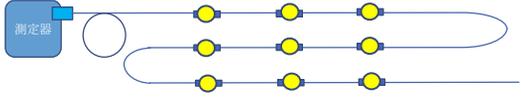
研究背景 - 構造ヘルスマonitoringシステムに光ファイバを用いる利点 -



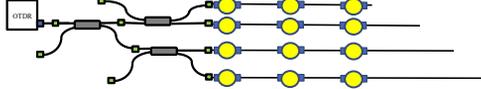
センシングに光ファイバを用いる利点	防災モニタリングシステムに光ファイバを組み込む利点
信号の損失が小さい	長距離の通信が可能である
電磁ノイズ・水の腐食に強い	メンテナンスが少なくて済む
センサ部に電源を必要としない	電池が要らない・停電時もセンサ部は動作する
金属線と比べ軽量である	敷設が容易である
分布・多点での測定ができる	複数のセンサを設置できる
測定器により障害点の探索が可能である	障害発生時の復旧が容易である

研究背景 - 分岐光線路をセンシングに用いる利点 -

単線路を用いた測定

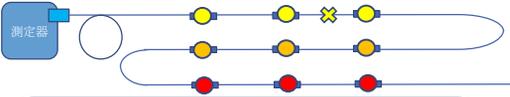


分岐線路を用いた測定



研究背景 - 分岐光線路をセンシングに用いる利点 -

単線路を用いた測定

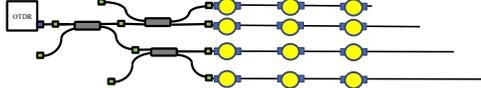


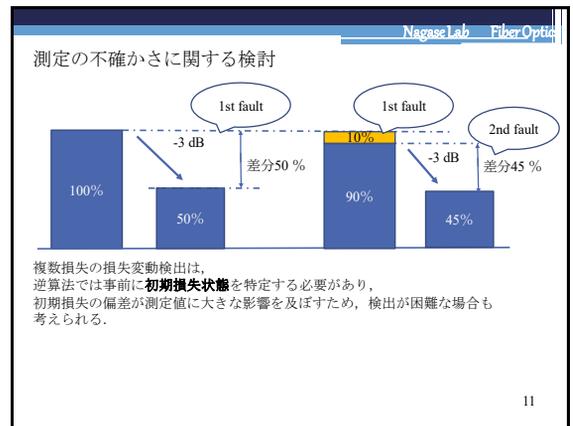
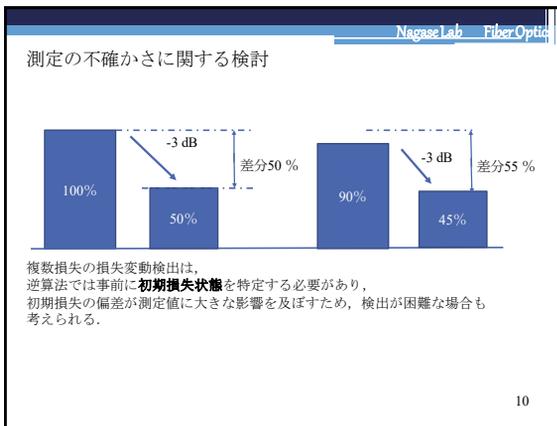
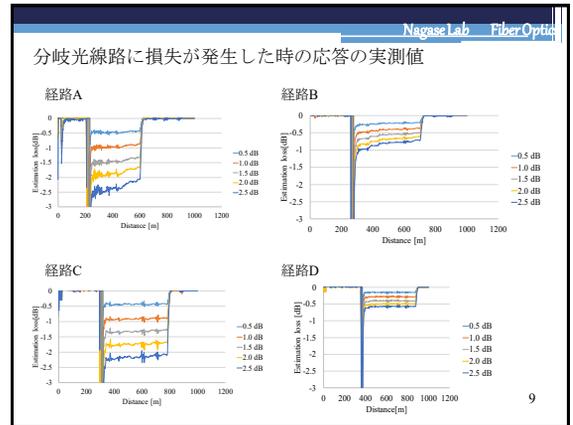
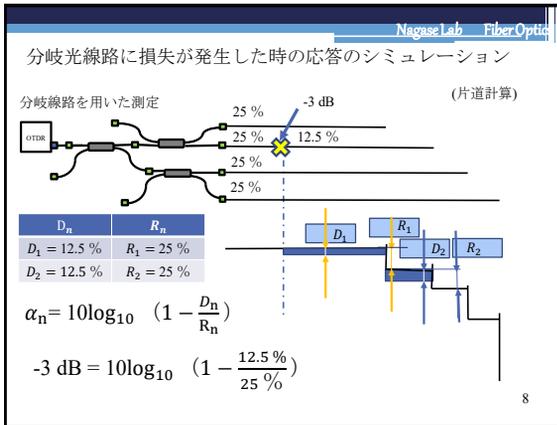
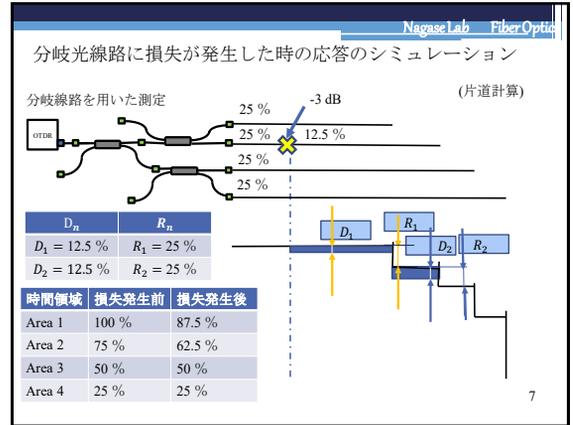
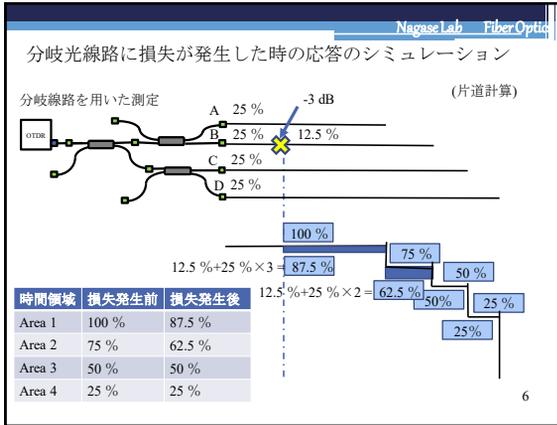
- ・ 単線路なのでシステム上、途中のファイバ破断に弱い。
- ・ 測定器から遠方になるほど検出が難しくなるため、同一線路に設置できるセンサの数は限られる。
- ・ 測定器とファイバ線路が1対1でコストがかかる。
- ・ 単線路上の測定になるため、面の測定の場合に損失箇所把握にやや難がある。

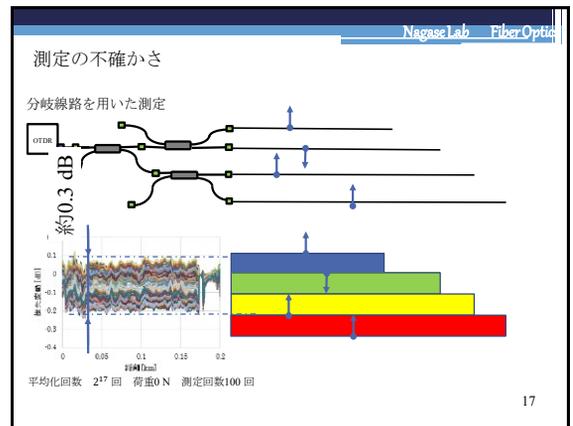
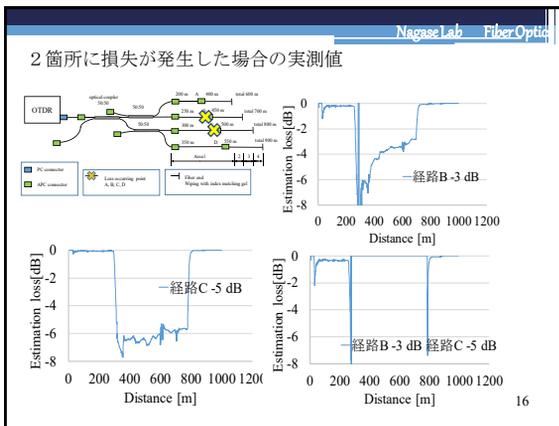
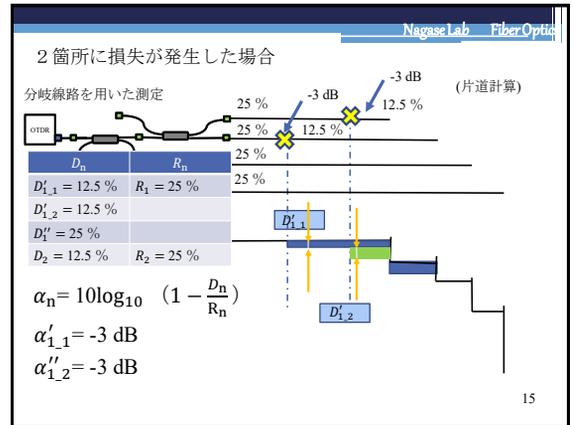
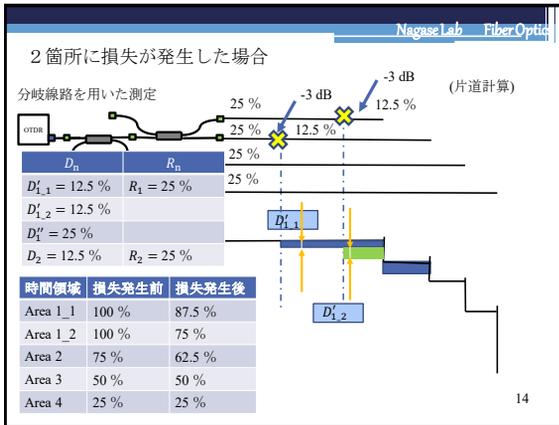
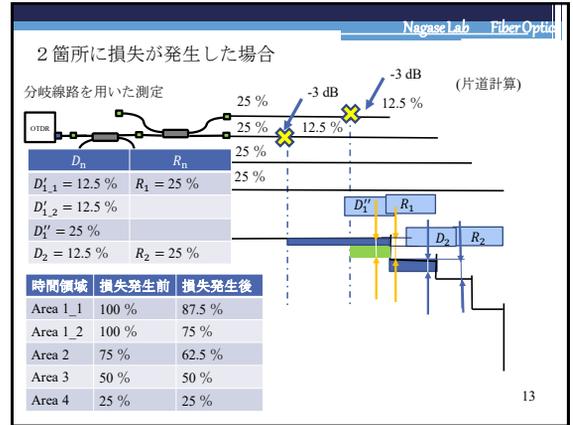
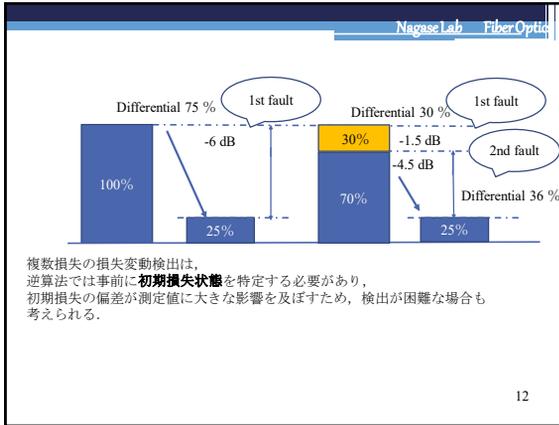
研究背景 - 分岐光線路をセンシングに用いる利点 -

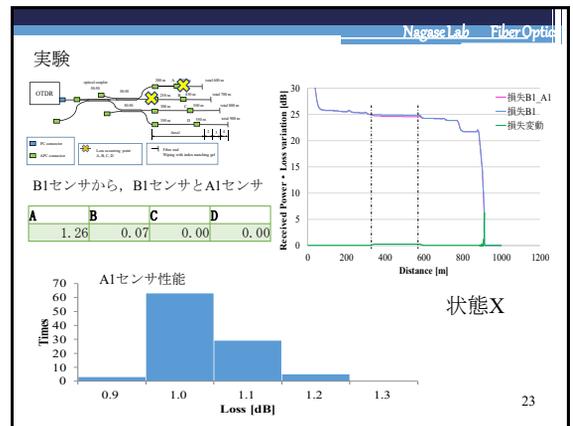
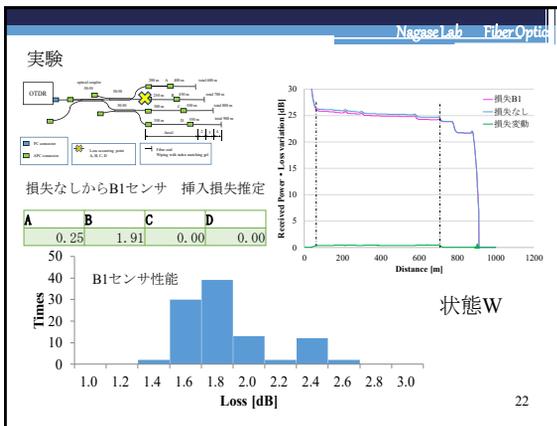
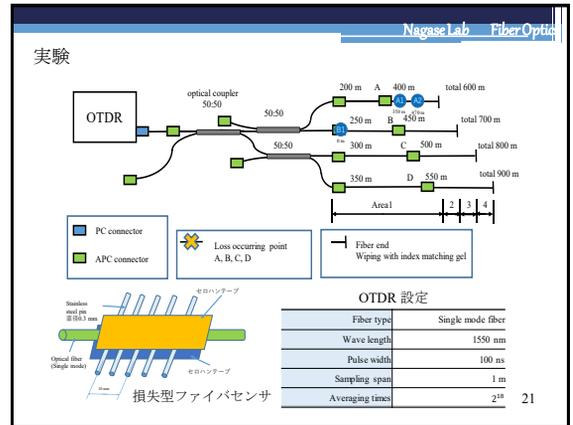
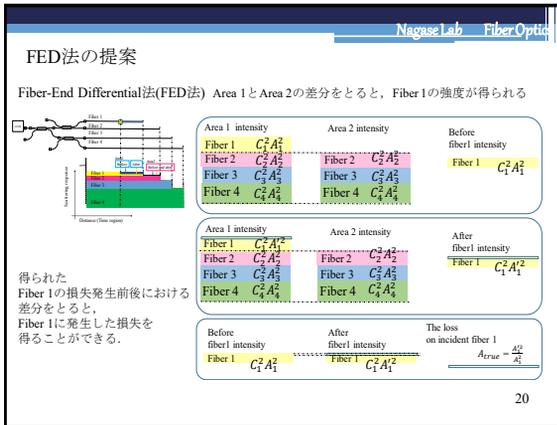
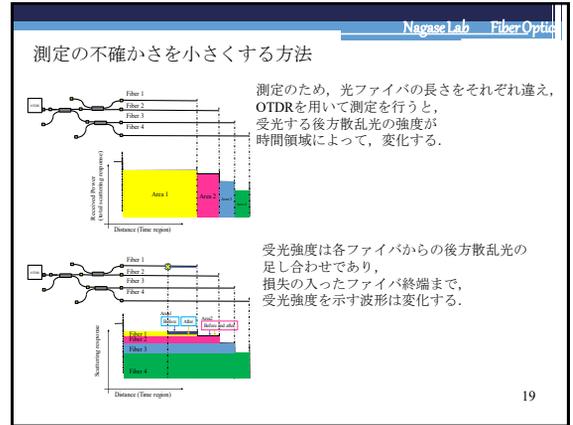
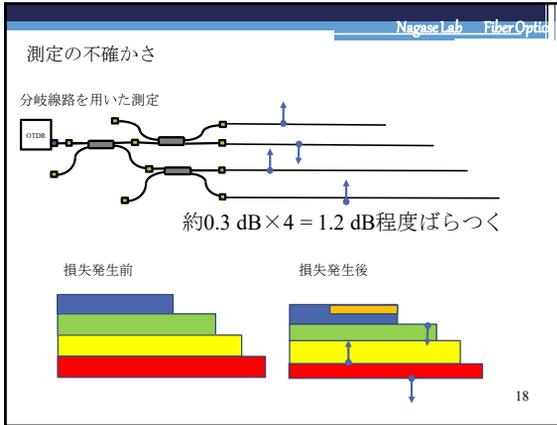
- ・ 1台の測定器で、より広範囲に渡るセンシングが可能になる。
- ・ 面的にセンサを配置できるので、2次元的な解析状況の把握に向いている。
- ・ 1台でより多くの解析結果を得られるので、測定対象の推移を追うことが容易である。

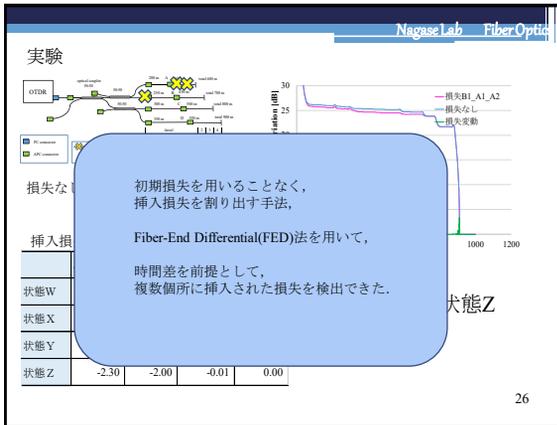
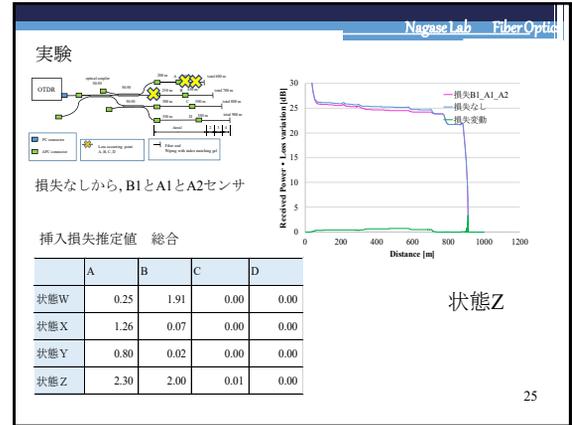
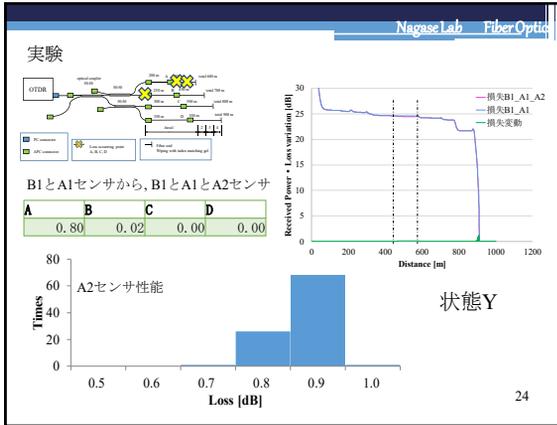
分岐線路を用いた測定











実験 Nagase Lab FiberOptics

まとめ

- 光損失が発生するセンサを分岐光線路に配置する構造ヘルスマニタリングシステムの提案
- 分岐光線路に損失が発生した場合に発生箇所と損失量を特定する手法を考案
- 複数箇所に損失が発生した場合にも適用できることを確認

27

研究成果報告9

「CFRP直交対称積層材層内樹脂割れ
損傷の観察および検出の試み」

高石 竜矢(千葉工大), ○鈴木 浩治, 岡太一樹,
松田卓也, 斉藤 博嗣(金沢工大), 金原 勲

平成29年 2月22日



研究背景

- エネルギー, 航空宇宙・運輸関連分野などにおいて, 近年, 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の使用量が増えており, その信頼性や安全性の要求が強まっている。
- したがって, その多形態な損傷の非破壊観察および発生・進展メカニズムの解明をマルチスケールな視点から丹念におこなっていくことが, 今後ますます重要となる。
- 特に実測とシミュレーションを組み合わせることで, 簡便な損傷検出・非破壊検査技術の提案は価値ある試みであると考えられる。

研究目的

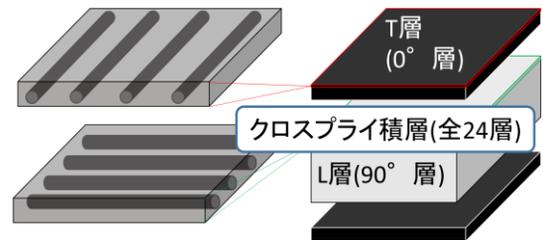
- 本研究では, 多様な損傷の中でも初期の損傷として発生する層内樹脂割れに注目し, CFRP直交対称積層材に対して引張負荷によって導入した同タイプの損傷を定量的に検出することを試みる。
- 検出手法として, デジタルマイクロスコープによる観察, マイクロフォーカスX線CT撮像の観察および中央加振法による機械インピーダンス測定を用いる。

供試体の素材・寸法・積層構成など

中間基材(プリプレグ)

UD材: 三菱レイヨン パイロフィル(TR350C150S)

繊維目付(FAW)	樹脂含有量(RC)	プリプレグ目付(TAW)	厚み
150 g/m ²	25 wt%	200 g/m ²	0.125 mm



供試体の素材・寸法・積層構成など

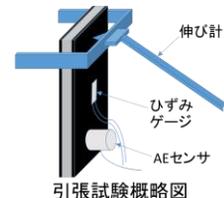
積層構成
[0₈/90₄]_s
[0₆/90₆]_s
[0₄/90₈]_s
[0₃/90₉]_s
[0₂/90₁₀]_s

実際の試験片

オートクレーブ成形
切り出し
ウォータージェット加工

研磨
耐水ペーパー
420, 600, 800, 1000,
1200, バフ研磨

引張試験



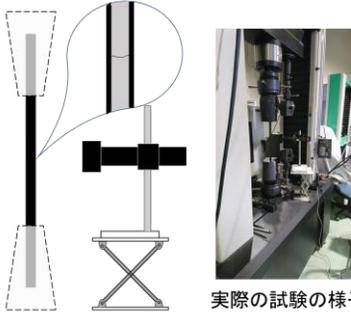
引張試験の試験条件		ひずみの測定
ねじ式万能試験機	: 5587型	・ 伸び計(標点距離50mm)
試験速度	: 1.0mm/min	・ ひずみゲージ
ロードセル最大荷重	: 300kN	
チャック間距離	: 100mm	AE測定
		・ 周波数域20kHz~120kHz

与損傷試験

7/16

引張試験から得られた物性値を元に負荷する荷重を決定。
試験片を10本用意し、それぞれに所定の引張負荷をかける。

例: [0_z/90₁₀]_sの場合
4kN, 5kN, 6kN, 7kN,
8kN, 9kN, 10kN, 12kN,
14kN, 16kN

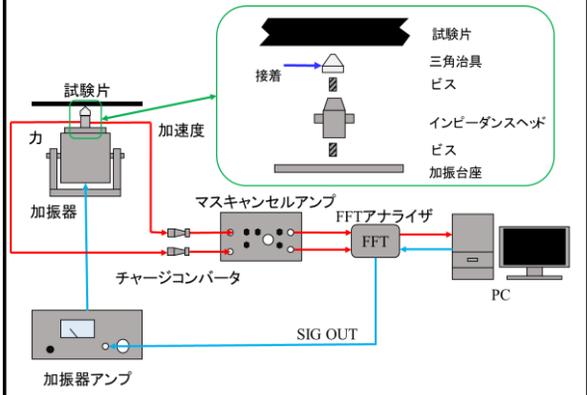


与損傷試験概略図

実際の試験の様子

中央加振法による機械インピーダンス測定

8/16



中央加振法による機械インピーダンス測定

9/16

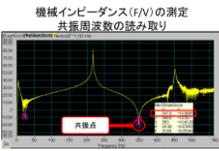
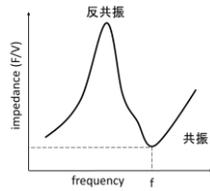
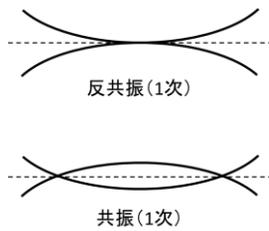


図5 振動波形の例 (識別前試験片番号0)

X軸: 周波数[Hz] Y軸: 機械インピーダンス[dB]

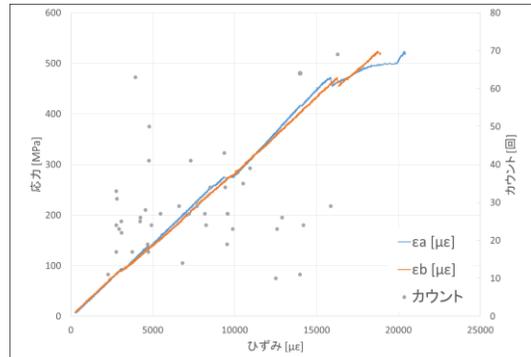
機械インピーダンス法より
損失係数 $\eta = \frac{Z}{2 \times \pi \times f_0 \times m}$

f_0 : 固有振動数 m : 試験片の質量

結果および考察: 引張試験

10/16

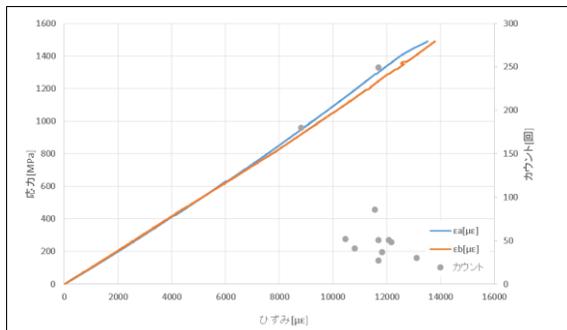
応力-ひずみ線とAEカウンターの発生頻度 ([0_z/90₁₀]_s)



結果および考察: 引張試験

11/16

応力-ひずみ線とAEカウンターの発生頻度 ([0_z/90₁₀]_s)



結果および考察: 与損傷試験

12/16



[0_z/90₁₀]_sの試験片の0kN負荷時マイクログラフ画像

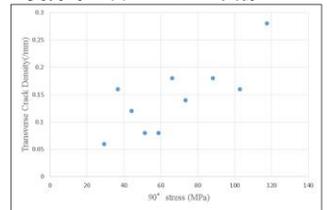


[0_z/90₁₀]_sの試験片の16kN負荷時マイクログラフ画像

平均のき裂間距離 $L_m = \frac{L}{n}$ (mm)

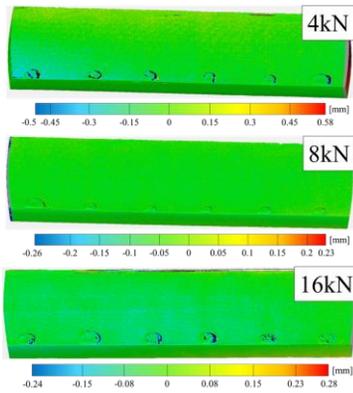
(L =測定区間: 50mm, n =き裂の数)

き裂密度 $C = \frac{1}{L_m}$ (/mm)



[0_z/90₁₀]_sの試験片における90° 層応力-き裂密度線図

結果および考察: CT撮像の重ね合わせ 13/16



結果および考察: 中央加振法: 1次共振点 14/16

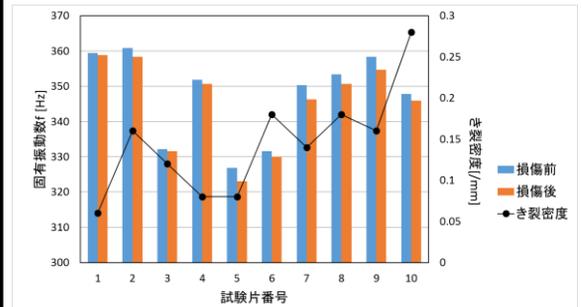


図6 固有振動数

結果および考察: 中央加振法: 1次損失係数 15/16

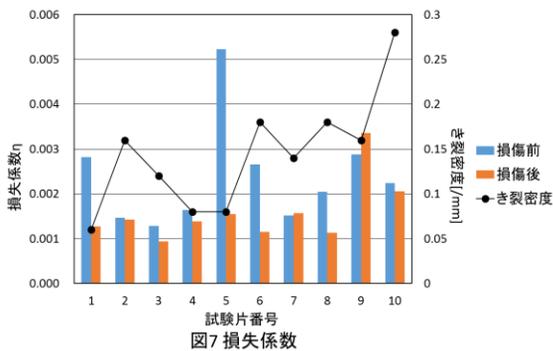


図7 損失係数

結言

- 本研究では、多様な損傷の中でも初期の損傷として発生する層内樹脂割れに注目し、CFRP直交対称積層材に対して引張負荷によって導入した同タイプの損傷を定量的に測定した。
- 検出手法として、デジタルマイクロスコープによる観察、マイクロフォーカスX線CT撮像の観察および中央加振法による機械インピーダンス測定を用いた。
- 今回の解像度のX線CT撮像の重ね合わせだけでは、層内樹脂割れ損傷は検出はできなかった。
- 機械インピーダンス測定からは、損傷前後での剛性変化を検出することができた。一方、ダンピング特性についてはさらなる高精度化の必要性が確認された。

研究成果報告10

「CFRP疑似等方積層材衝撃損傷の観察および検出の試み」

○鈴木 浩治(千葉工大), 青木 勇樹, 斉藤 博嗣(金沢工大), 金原 勲

平成29年 2月22日



研究背景

- エネルギー, 航空宇宙・運輸関連分野などにおいて, 近年, 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の使用量が増えており, その信頼性や安全性の要求が強まっている。
- したがって, その多形態な損傷の非破壊観察および発生・進展メカニズムの解明をマルチスケールな視点から丹念におこなっていくことが, 今後ますます重要となる。
- 特に実測とシミュレーションを組み合わせることで, 簡便な損傷検出・非破壊検査技術の提案は価値ある試みであると考えられる。

研究目的

- 落錘衝撃損傷の導入されたCFRP積層板のマイクロフォーカスX線CT撮像を取得する。
- CT画像解析(リヴァースエンジニアリング的)により内部損傷状態を定量化する何らかの測定方法を提案する。
- インパルスハンマ加振実験モード解析による損傷導入前後のモードパラメータ測定を実施する。
- 後続の損傷同定・非破壊検査に関するサブテーマへのデータ提供

供試体

材質
CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)

寸法
150mm × 100mm × 4mm

層数
32層

積層構成
[45/0/-45/90]_{4s}

加振点
16点 × 11点の計176点

釣り糸の取り付け位置

1 6 11

78~89

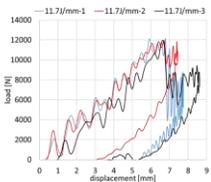
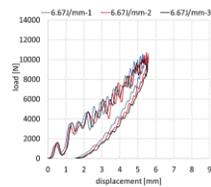
165 176

積層構成

試験片(9枚)

落錘衝撃試験

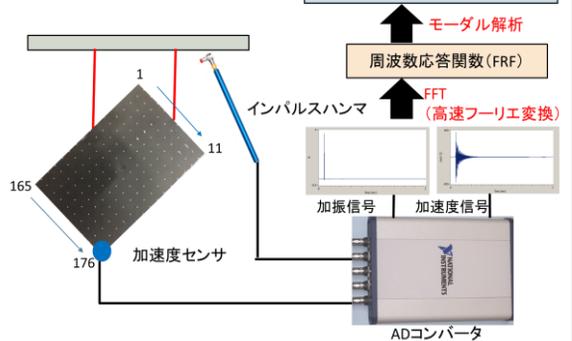
落錘衝撃試験装置
 総重量97kg
 打撃部4.346kg
 試験高さ1800mm
 幅500mm
 奥行き300mm
 打撃部最大落下高さ1100mm

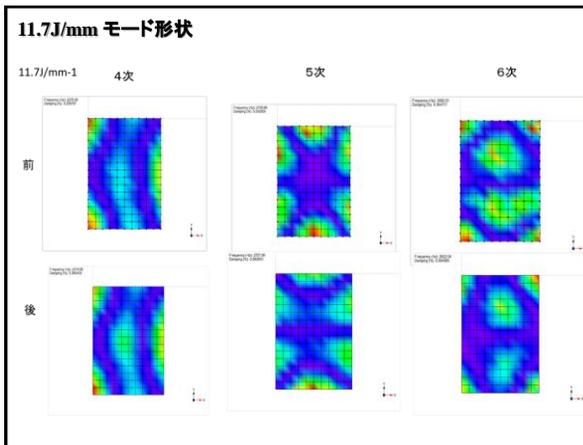
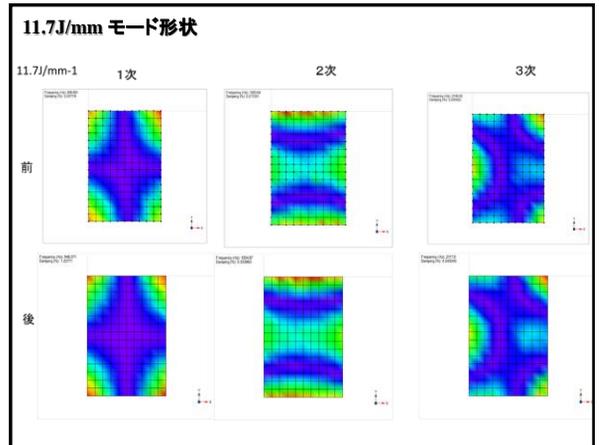
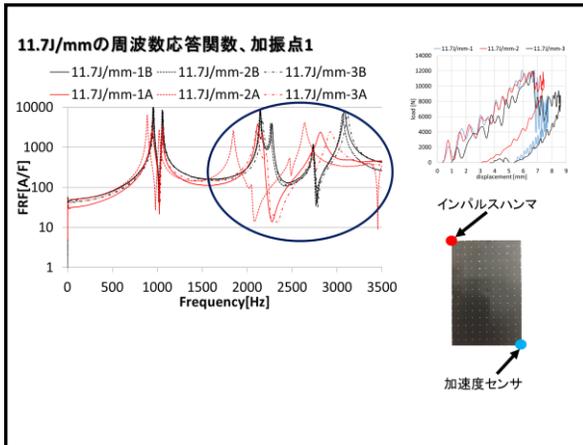
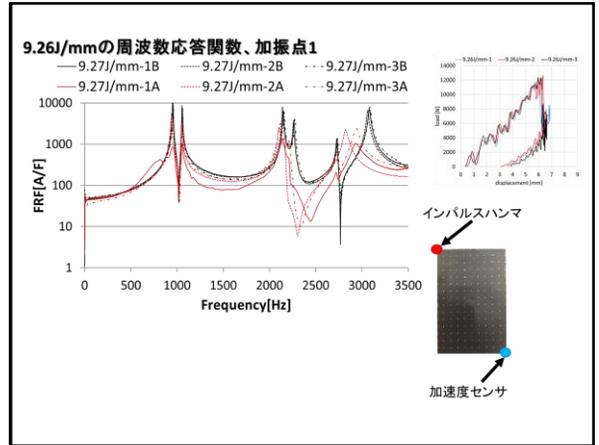
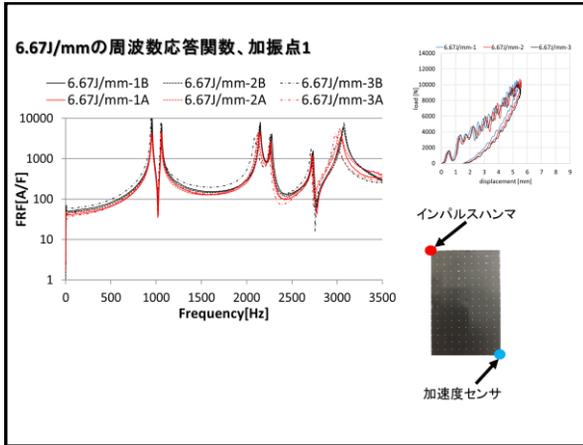


衝撃箇所



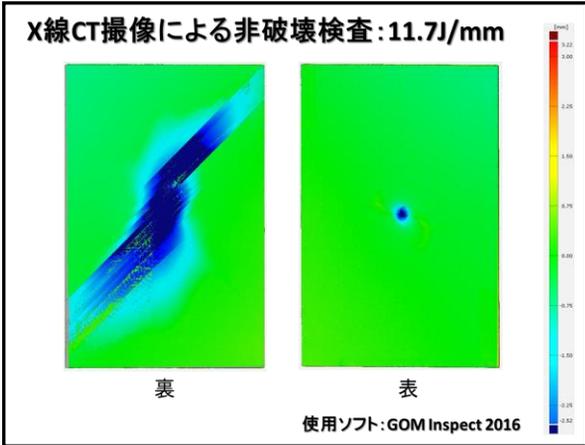
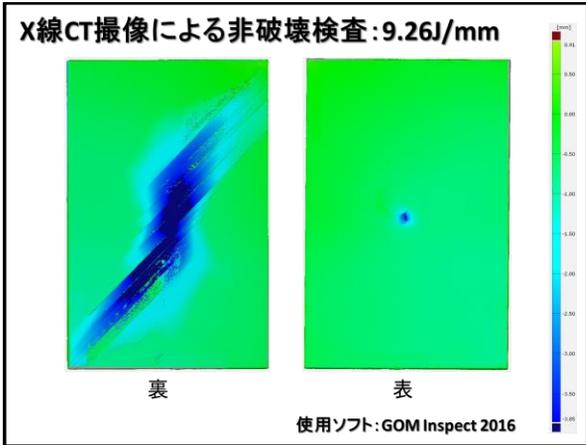
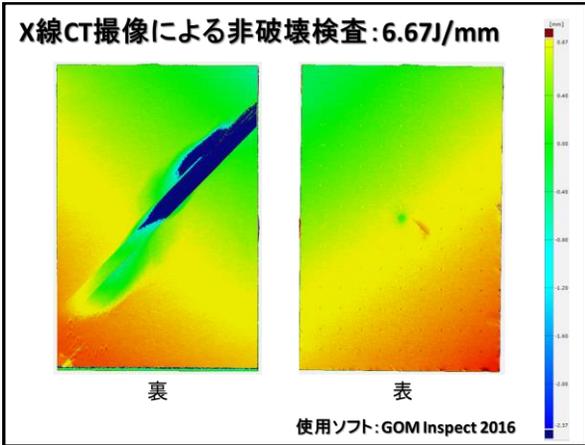
実験モード解析





X線CT撮像およびCT像解析

- マイクロフォーカスX線CT装置によるCT撮像条件
 - 画像解像度: 30 μ m/pixel / 1024pixel \times 1024pixel
 - スライスピッチ(x,y,z方向): ピュー数: 1024
 - アベレージ数: 8
 - X線管出力: 90kV-90 μ A
 - Feldcamp法による画像再構成後, 16bit-DICOMデータ出力
- GOM Inspect 2016によるCT画像解析
 - グレースケール値に閾値を設け, 供試体部として2値化抽出
 - STL形式のポリゴンデータに変換
 - 予損傷前後のCT撮像データを重ね合わせ, 寸法偏差を数値化



- 16/17
- ### まとめ
- 落錘衝撃損傷導入前後のCFRP積層板のマイクロフォーカスX線CT撮像を取得した。
 - CT画像解析(リヴァースエンジニアリング的)により内部損傷状態を寸法偏差として定量データとして取得することができた。
 - インパルスハンマ加振実験モデル解析による損傷導入前後のモーダルパラメータ測定を実施し、定量データを取得することができた。
 - 後続の損傷同定・非破壊検査に関するサブテーマへのデータ提供。

17/17

今後の展開

- X線CT撮像結果からイメージベースFEMモデリング
- 位相(トポロジー)最適化を適用した損傷同定

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} \{ \Lambda(\mathbf{x}) \mid h(\mathbf{x}) = 0, \mathbf{g}^{\text{low}} \leq 0, \mathbf{g}^{\text{up}} \leq 0 \}$$

design variables: normalized density $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}^T$, for each *element*

objective function: eigenvalue $\Lambda(\mathbf{x}) = \lambda_0 + \sum_{j=1}^m w_j \left(\sum_{k=1}^m \frac{w_k}{\lambda_k - \lambda_0} \right)^{-1}$

main constraints $h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N V_i \rho_i - \text{Mass}_{\text{target}} V_0 \rho_0 = 0$

side constraints $g_i^{\text{low}} = x_{\text{min}} - x_i \leq 0, g_i^{\text{up}} = x_i - 1 \leq 0$, for each *element*