

卒業論文要旨

レイリー散乱型分布センサを用いた温度分布測定による CFRP の損傷同定

The identification of delamination in CFRP by temperature distribution measurement using optical fiber sensors

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1220097 田尻 史弥

1. 緒言

軽量で高強度、高剛性という特徴を持つ炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic : CFRP)は、その特徴から主に航空機の材料として取り扱われている。しかし、CFRP 積層材に負荷がかかり続けると、表面からの直接観察が困難である層間剥離などの内部損傷が生じてしまう。

検査法の一つに、赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査がある。パルス状熱負荷を被測定物に与えた直後の非定常温度分布をもとに損傷を画像計測することができ、非破壊かつ非接触に損傷検査が可能で、損傷の位置・形状を温度分布から視覚的に同定できる⁽¹⁾。しかし、この検査法は温度分布を計測するためのカメラを必要とし、検査のために内装を剥がす必要がある部位には適用が難しい。

本研究では、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いて温度分布測定を行うことにより、CFRP の層間剥離をリアルタイムで検出する技術の確立を目的とした。まず、表面加熱した CFRP の裏面の温度分布を有限要素解析により検証した。その後、光ファイバセンサを裏面に張り付けて温度分布測定を試みた。

2. 材料および実験方法

2.1 試験片

150×150mmに切り出したCFRPプリプレグ(TR350C100S, 三菱ケミカル製)を積層した一方向 CFRP 積層板を用いて試験片を作成した。試験片寸法を図1に示す。プリプレグを40枚積層し、中央に30mm幅のき裂を入れた試験片を用意した。き裂を作成するために厚さ0.1mmのテフロンシートを2枚重ね、20枚目と21枚目の間に繊維方向と直交になるよう挿入した。積層後はホットプレス機を用いて、圧力4MPa下で130°Cまで1時間かけて加熱し、圧力を40MPaまで上げ130°Cの状態を2時間保持した後、自然冷却する成形条件で加熱成型を行った。成型後、ファインカッターを用いてCFRP積層板を切り出した。その後、テフロンシートをピンセットで削り取り、試験片の損傷部を中空にした。

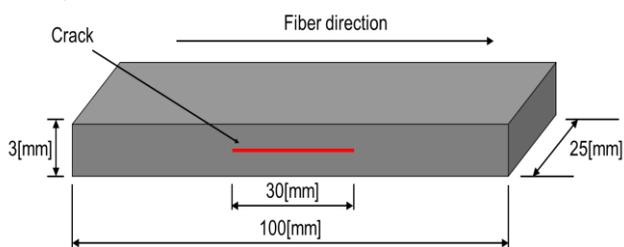


Fig.1 Dimensions of specimen

2.2 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ

本研究で使用したセンサは、米国 LUNA Technologies が開発した ODiSI A-50 である。この光ファイバは光を閉じ込めるコア、それを同心円状に囲むクラッド、ファイバ表面を保護するためのポリアミド被膜から構成されており、コアとクラッドの不整合によりわずかに光の照射側に散乱する後方散乱光が存在し、その光をレイリー散乱光という。このレイリー散乱光強度分布を持つ空間周波数スペクトルの周波数シフトから温度やひずみを得ることができる⁽²⁾。ひずみ分解能は1 μ m、温度分解能は0.1°C、空間分解能は最小1mmである。

2.3 解析方法

解析で用いた物性値⁽³⁾を表1、使用したモデルを図2で示す。モデルの寸法は作成した試験片の寸法と同じにし、繊維方向が0°、90°の場合の線形解析を行った。損傷部の熱伝導率は断熱と仮定した。加熱面を60秒かけて40°Cまで昇温させ40°Cの状態を300秒間保持し、光ファイバセンサを接着させる裏面を大気解放とした。

Table 1 Material properties of CFRP⁽³⁾

Direction	Longitudinal	Transverse	Through-thickness
Thermal conductivity (W/mm/K)	11800	609	609
Specific heat (J/kg)	1065 × 10 ⁶		
Density (kg/mm ³)	1.52 × 10 ⁻⁶		
Heat transfer coefficient (W/mm ² /K)	38.8		

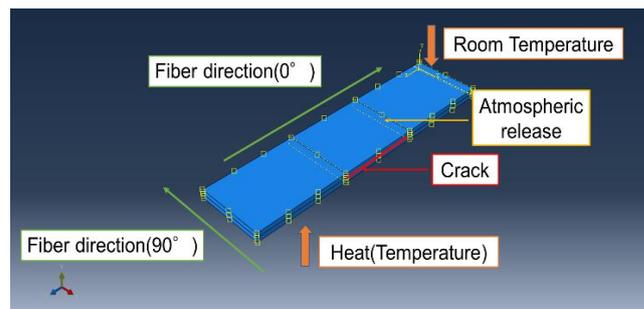


Fig.2 FEM model of CFRP

2.4 実験方法

実験装置の略図を図3に示す。光ファイバセンサを繊維方向に沿って中央に配置し、全面を接着剤で固定した。センサのゲージ長を3mm、空間分解能を1mm、サンプリングタイムを2秒と設定して温度分布測定を行った。ヒーターにはシリコンラバーヒーターを使用した。ヒーターを60秒で室温24°Cから40°Cまで昇温させ、900秒間保持した。

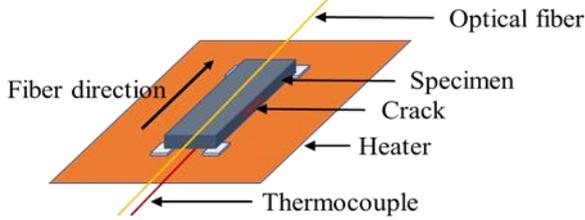


Fig.3 Experimental set-up of heating test

3. 実験結果および考察

3.1 解析結果

繊維方向0°の温度分布を図4、90°を図5に、両方の大気解放部の面の温度分布を比較したグラフを図6に示す。どちらも温度が定常となった時に得たデータである。0°では温度差が3°C程度だったのに対し、90°では12°C程度となっていた。この結果から、繊維の向きによって温度差に違いが生じることが分かった。これは、CFRPが異方性の材料であり、熱伝導率は直交方向に対し繊維方向のほうが大きいため熱の伝わりが速く、損傷部を超えた直後の温度分布が均一に近い状態でセンサに伝わっていったからであると考えられる。

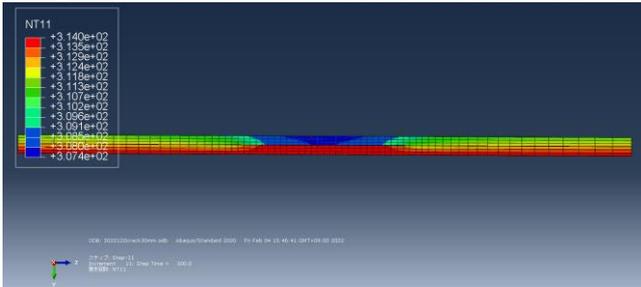


Fig.4 Temperature distribution of heat test(0°)

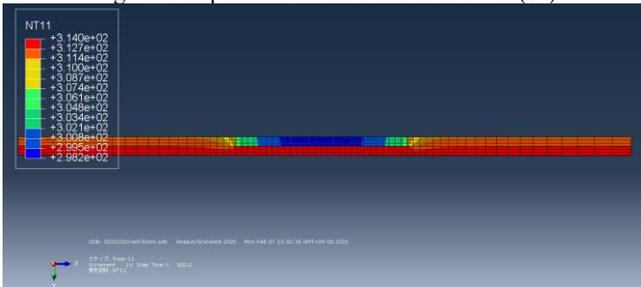


Fig.5 Temperature distribution diagram of heat test(90°)

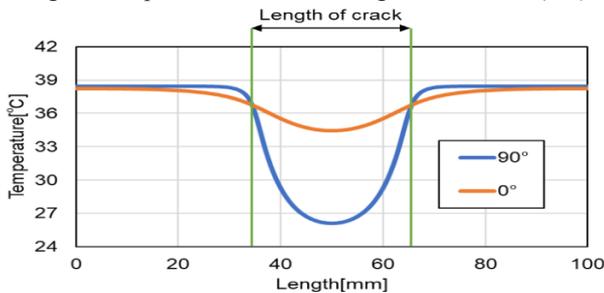


Fig.6 Temperature distribution on surface of 0 or 90 degrees' specimen during heating

3.2 加熱条件の温度分布

図7に加熱している表面温度が30°C、40°C、47°C(最高温度)、44°C(定常)となった時、光ファイバセンサが検出した温度分布を示す。解析の結果から、まずは繊維方向0°の試験片で実験を行った。試験片に接着したセンサの位置が、センサ全体の測定範囲の0.434mから0.534mの範囲だったので、測定範囲を0.4mから0.6mまでと設定した。昇温過程から定常状態に至るまでのデータを検出したが、損傷部との温度差は確認することができず、解析結果のようなデータは得られなかった。以上から、0°の試験片を、ヒーターを用いて定常状態になるまで表面を加熱し、昇温状態も含めてセンサで温度分布測定を行っても層間剝離位置の同定はできないことが分かった。これは、解析では損傷部を断熱と仮定して行ったが実際は空気が入っており、熱が完全に遮断されていないため、解析結果のような温度差が生じなかったと考えられる。

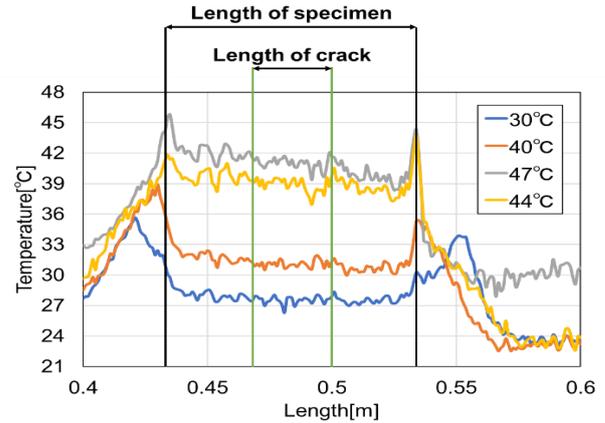


Fig.7 Measurement results by optical fiber for heating test

4. 結言

本研究では、汎用有限要素法ソフトウェア Abaqus を用いて表面加熱時の温度分布解析を行い、その結果からレイリー散乱型光ファイバ分布センサを、裏面を大気解放とした状態で設置し、定常時の温度分布を取ることで、CFRPの層間剝離位置の同定を試みた。

- (1) FEMの解析結果から、CFRPの材料特性の異方性により、繊維方向の違いでセンサに伝わる温度分布が異なることが分かった。
- (2) 繊維方向0°の試験片ではデータが得られなかったため、今後は90°の試験片での実験を行っていききたい。また、冷却中の非定常状態ではどのような結果が得られるのかを解析し、実験していききたい。

謝辞

本研究は科研費(20K04182)の助成を受けたものである。

文献

- (1) 阪上隆英, “赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査”, 溶接学会誌, Vol. 72, No. 4 (2003), pp. 27-31.
- (2) 保立和夫, 村上英昌, “光ファイバセンサ入門”, 光防炎センシング振興協会, (2013), pp. 52.
- (3) 小笠原俊夫, 平野義鎮, 吉村彰記, “模擬雷撃を受ける炭素繊維複合材料の熱-電気連成解析”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 57, No. 667 (2009), pp. 336-343.