

複合材構造の損傷許容設計実現のための  
光ファイバセンサ監視システム  
Optical Fiber Sensor Monitoring System of Composite Structures  
for Damage Tolerance Design

武田 展雄 (TAKEDA NOBUO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授



研究の概要

本研究では、航空宇宙機複合材構造の損傷許容設計実現のための光ファイバセンサ監視システムを実用化するための基礎・基盤研究として、まず土台となる「損傷プロセスの観察と定式化」を進めるとともに、「弾性波計測による監視システム」、「分布ひずみ計測による監視システム」両者の適用化に取り組みとともに、両者の特性を組み合わせることで、より信頼性と診断精度の高い監視システムを構築する。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学、複合材料・物性、光ファイバセンサ、モニタリング

1. 研究開始当初の背景

近年、航空機の軽量化を図るため、主要な一次構造部材にも、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 複合材料を適用されている。しかし、CFRP 複合材料の破壊プロセスは複雑であり、微視的な内部損傷は、従来の金属材料用非破壊検査手法のみでは検出することは困難である。そのため、センサを構造材料自身に組み込んで、健全性を常時診断できるヘルスマニタリング技術の適用が、構造健全性確保の面から、また、実用メンテナンスコストの削減要求の面からも強く要望されている。

2. 研究の目的

本研究では、航空宇宙機を想定した複合材構造の損傷許容設計実現のための光ファイバセンサ監視システムを実用化するための基礎・基盤研究として、まず土台となる「損傷プロセスの観察と定式化」を進めるとともに、「弾性波計測による監視システム」、「分布ひずみ計測による監視システム」両者の適用化に取り組みとともに、両者の特性を組み合わせることで、より信頼性と診断精度の高い監視システムを構築する。

3. 研究の方法

「損傷プロセスの観察と定式化」では、複合材料構造の損傷進展プロセスの解明と定式化による損傷発生・進展シミュレーション手法の提案と実証を行う (購入設備：微視損傷観察用試料結合ホルダ+ピエゾドライバ)。「弾性波計測による監視システム」では、接着層剥離損傷検出を想定した弾性波受振 FBG センサシステムの提案と実証を

行う (購入設備：光ファイバ自動調芯装置)。

「分布ひずみ計測による監視システム」では、空間分解能 10cm、ひずみ計測精度  $\pm 25 \mu \varepsilon$  の特徴を最大限に生かしたグローバル損傷検出法の検討や実証を行う (購入設備：PPP-BOTDA システム及びその改善)。

4. これまでの成果

(1) 「損傷プロセスの観察と定式化」

実用的なノッチ部や円孔部などの応力集中部が存在する構造部材中の樹脂中亀裂・層間剥離の損傷発生・進展シミュレーションを行い、それに伴う応力集中部近傍のひずみ分布変化を計算し、さらにその結果より光導波理論を用いて光反射スペクトル分布を計算し、複合材積層板に埋込まれた FBG センサによる測定結果との良い一致を得ることに成功している。また、上記理論解析法を拡張し、光反射スペクトル分布変化からひずみ分布変化を、さらには損傷形態・寸法を推定する逆問題アルゴリズムを構築し、その有効性を実証している。図 1 に、FBG センサゲージ中の格子間隔が線形に増加する、チャープ型 FBG センサを用いて CFRP 直交積層板の円孔部周りに生じる複雑な多数の損傷形態・寸法を推定することに成功した例を示す。また、CFRP サンドイッチ構造の表皮剥離を防止する亀裂アレスタに埋め込んだ FBG センサによる亀裂位置検出にも成功し、実用航空機構造への応用性の高い研究として、国際的にも注目されている。

(2) 「弾性波計測による監視システム」

圧電素子で発振し、CFRP 積層板中を伝播させた数百 kHz 程度の弾性波を FBG センサで高速検出する装置を用いて、その弾性波の伝播

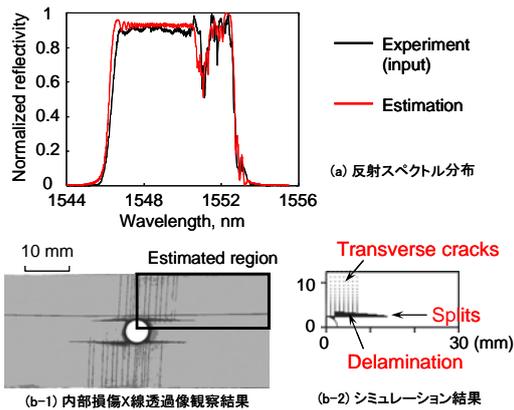


図1 チャープFBGセンサの反射スペクトル分布を目的関数とした、CFRP直交積層板内部損傷の同定

特性から接着層剥離損傷検出を行う弾性波受振FBGセンサシステムの基礎・応用研究を行った。CFRPハット型補強構造の接着層剥離長さ同定を行った。剥離長さに伴い、初動弾性波が迂回し到達時間が遅れること、最大振幅が減少していくことをウェーブレット変換結果により明確化するとともに、波形変化を定量化する損傷指標により、接着層剥離長さの定量評価に成功した。

### (3) 「分布ひずみ計測による監視システム」

パルス・プリポンプ式BOTDA (PPP-BOTDA) システムを用いて、FBG計測では困難な広領域に渡るひずみ計測を有効に利用した航空宇宙複合材構造の内部損傷検出にも適用するための基盤研究を行った。図2には、接着層埋込み光ファイバネットワークを用いたCFRPサンドイッチ構造の衝撃損傷検出を行った例を示す。衝撃損傷後の除荷時に残るCFRP表皮の凹みや残留ひずみを計算できる理論モデルを構築し、光反射スペクトル分布を計算するソフトを開発した。距離分解能10cm内のひずみ分布状態は反射スペクトルのスペクトル幅と対応する事実を利用し、スペクトル幅の空間分布を可視化することにより衝撃損傷(とくに接着層剥離領域)の定量化に成功した。

### 5. 今後の計画

上記3つのテーマをさらに詳細に進めるとともに、PPP-BOTDA用細径光ファイバと細径FBGセンサを複合材構造中に埋込み、樹脂硬化中にも、センサ出力を取得することで成形モニタリングを行い、成形中に発生する熱残留応力の発生メカニズムの解明に取り組む。この研究は、JAXA及びオーストラリアの研究機関CRC-ACSとの共同研究として行う。さらに、研究途中で得られた成果を活用して、次世代航空宇宙構造への実用化のために必要な光ファイバセンサ監視システムとしての目途付けのための試作・試験研究を行う予定である。

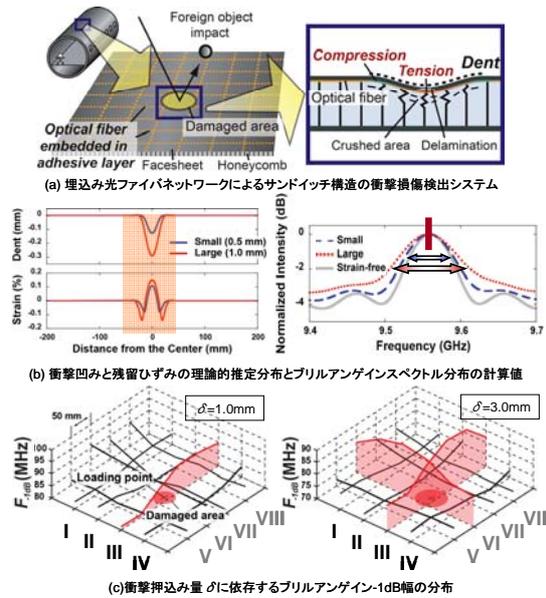


図2 ppp-BOCDA分布ひずみ計測システムを用いたCFRPサンドイッチ構造の衝撃損傷検出結果

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(研究代表者:太字, 研究分担者:一重下線, 連携研究者:一重上線)

### 原著論文 (17件)

1. **S. Minakuchi, T. Mizutani, H. Tsukamoto, M. Nishio, Y. Okabe, and N. Takeda**, "Brillouin Spectral Response depending on Strain Non-uniformity within Centimeter Spatial Resolution and its Application to Internal Damage Detection in Large-scaled Composite Structures," *Structural Durability & Health Monitoring*, in press (2009).
2. **S. Minakuchi, Y. Okabe and N. Takeda**, "Segment-Wise Model" for Theoretical Simulation of Barely Visible Indentation Damage in Composite Sandwich Beams: Part I- Formulation," *Composites Part A*, Vol. 39, 2008, pp. 133-144.
3. **S. Minakuchi, Y. Okabe and N. Takeda**, "Segment-Wise Model" for Theoretical Simulation of Barely Visible Indentation Damage in Composite Sandwich Beams: Part II - Experimental Verification and Discussion," *Composites Part A*, 38, 2008, pp. 2443-2450.
4. **S. Yashiro, T. Okabe and N. Takeda**, "Damage Identification in a Holed CFRP Laminate Using a Chirped Fiber Bragg Grating Sensor," *Compos. Sci. Tech.*, Vol. 67, 2007, pp. 286-295.
5. **Y. Okabe, J. Kuwahara, K. Natori, N. Takeda, T. Ogisu, S. Kojima and S. Komatsuzaki**, "Evaluation of Debonding Progress in Composite Bonded Structures Using Ultrasonic Waves Received in Fiber Bragg Grating Sensors," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 16, No. 4, 2007, pp. 1370-1378.

### 解説 (4件)

1. **N. Takeda, Y. Okabe and T. Mizutani**, "Damage Detection in Composites Using Optical Fibre Sensors," *Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Engineering*, Vol. 221, 2007, 497-508.

### 招待講演 (16件)

1. **N. Takeda**, "Recent Development of Structural Health Monitoring Technologies for Aircraft Composite Structures", 26<sup>th</sup> Cong. Inter. Coun. of Aeronautical Sci. (ICAS 2008), Sept. 14-19, 2008, Anchorage, AL, USA.

### 国際会議発表論文 (26件)

1. **N. Takeda and S. Minakuchi**, "Detection of Barely Visible Impact Damage in CFRP Sandwich Structures by Optical Fiber Based Distributed Strain Measurement", *Proc. 4th Euro. Workshop Struct. Health Monitor.*, 2008, July 2-4, Cracow, Poland, pp. 847-854.

ホームページ等

<http://www.smart.k.u-tokyo.ac.jp>