

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分  
平成29年3月3日現在

光ファイバライフサイクルモニタリング援用  
革新複合材構造の知的ものづくり科学の構築  
Intelligent Manufacturing Science of Innovative  
Composite Structures Based on Optical-Fiber Life  
Cycle Monitoring

課題番号：26220912

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、[1]光ファイバ援用成形中その場物性評価基盤技術、[2]低圧成形 CFRP、[3]熱可塑 CFRP、[4]CFRP 二次接着接合構造、[5]複雑形状 CFRP 構造、を主な対象とした光ファイバライフサイクルモニタリング技術を構築し、これらを用いた構造部材の品質保証・保守技術を確立する。また、[6]実用模擬 CFRP 構造、の実用環境下でのライフサイクルモニタリング実証を行う。

研究分野： 航空宇宙工学、複合材料・物性

キーワード： 複合材料、光ファイバセンサ、成形プロセス、モニタリング

1. 研究開始当初の背景

航空機構造の軽量化を図るため、主要一次構造部材にも CFRP（炭素繊維強化プラスチック）が適用されているが、成形・組立など製造上の問題及び損傷後強度保証の難しさがあり、従来金属製航空機と比較して製造コストが高く、十分な軽量化にも至っていない。

そのための新規材料・製造プロセスの有力な技術として、熱可塑 CFRP、低圧成形 CFRP、接着接合構造等に注目が集まっている。しかし、これら新規製造プロセスは従来熱硬化性 CFRP 製造プロセスと比較してより複雑なものであり、航空機のような大型構造へ適用した際の品質のばらつきが実用化への最大の障害である。損傷部位を検知する非破壊検査手法のみでは製品の強度保証に不十分であり、製造プロセス中の情報に基づいた新たな品質保証技術が求められている。

2. 研究の目的

この状況を打破するためには、これまで主に試行錯誤により進められてきた CFRP 製造プロセスに、最先端計測技術とマルチスケール・マルチフィジックスに基づく計算科学を融合した、学問的に十分な裏付けを持った「複合材構造の知的ものづくり科学」を構築することが不可欠であると考え。本研究では、次世代航空宇宙機複合材構造への適用を目指し、熱可塑・低圧成形複合材料及び接着接合技術の低コスト・高機能性と光ファイバライフサイクルモニタリングによる高信頼化技術を融合させることにより初めて実現

可能となる、革新的複合材構造コンセプトを世界に先駆けて提案・実証する（図1）。

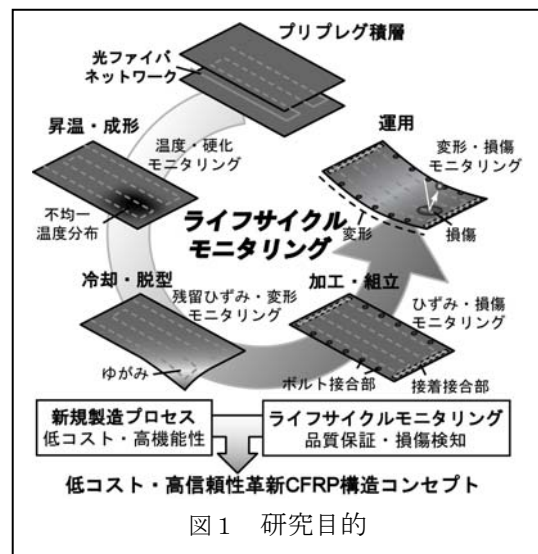


図1 研究目的

3. 研究の方法

これまでに構築してきた光ファイバ温度・ひずみ同時計測技術を新規成形プロセスに適用可能なレベルまで向上させるとともに、光ファイバを考慮した複合材料モデルによる新規成形プロセスシミュレーション及び損傷発生・進展解析を行い、実際の試験から得られる光ファイバ応答と照らし合わせることで CFRP の品質・健全性を評価する手法を確立する。最終的に補強板構造の部分構造供試体を用いて模擬実用環境下でのライ

フサイクルモニタリング実証を行う。

#### 4. これまでの成果

**[1]光ファイバ援用成形中その場物性評価基盤技術**：CFRP材料の成形シミュレーションコードは、煩雑な成形プロセスを効率的に最適化する上で重要な役割を果たすが、解析に必要な材料成形パラメータの多くは、現実の成形条件とは異なる材料特性評価実験に基づいて得られたものである。本研究では、CFRPプリプレグ積層時に予め内部に埋め込まれた光ファイバセンサを用いて、現実のオートクレーブ成形中に、成形過程での材料パラメータを測定し、成形シミュレーションコードに組み込み、これまで達成できなかった精度で合理的な成形シミュレーションを行うことに世界で初めて成功した。本技術は欧米にはないもので、独自の手法として国際的にも高く評価されている。今後は世界標準の方法となるものと期待する。

**[2]低圧成形 CFRP**：脱オートクレーブ(OoA)プリプレグを用いて、低コスト化・高生産性を目指す成形技術であるが、成形品に空孔が残存しやすく、また、成形品の残留変形の予測も難しく、オートクレーブ成形品と同等の品質を保証することは困難である。本研究では、これまで測定があまり行われてこなかった、FBGセンサにより測定可能な成形熱残留ひずみに着目し、これを低減する成形条件を新たに提案し、実証した。

**[3]熱可塑 CFRP**：耐衝撃性や成形性にも優れるものの、成形条件の自由度が高く、成形条件の最適化には多大な努力が必要となる。本研究では、多点 FBG センサや分布ひずみ計測技術を駆使して、厚板 CFRTP の Skin-core 効果の定量的評価を行うことにより、多様な成形プロセス条件でも残留成形ひずみを予測できる成形シミュレーション技術の構築に成功した。

**[4]CFRP 二次接着接合構造**：接着フィルム内に光ファイバセンサを挿入し、成形圧力により生じるファイバ非軸方向の偏差ひずみに起因する偏光現象を光ファイバセンサで検出する手法を提案し、圧力不足を検出できることを実証した。また、分布型ひずみ分布センサを用いた成形圧力分布計測にも成功しており、実用的な接着接合構造品質保証技術の構築を目指している。

**[5]複雑形状 CFRP 構造**：L型やU型の局面部を有する複雑形状 CFRP 積層構造部材では、Spring-in と呼ばれる成形品形状不備が発生する。本研究では、面外方向に45度、-45度傾いた端部距離の短い2本のFBGセンサを用いて、成形中の面外方向垂直ひずみ・せん断ひずみを同時に同定する技術を開発し、成形過程での両ひずみの変化の相違が成形品最終形状に与える効果を定量的に解明することに成功した。

**[6]実用模擬 CFRP 構造**：光ファイバ援用成

形中ひずみ測定や成形品の運用時のひずみ測定における有効性の証明や問題点把握のため、実用模擬 CFRP 構造において多点 FBG または分布ひずみ計測実験とモデル検証解析を行い、実用化への道筋を明らかにしている。

(a)低熱膨張宇宙望遠鏡用 CFRP 厚肉パイプ構造：非対称積層構成による板厚方向応力軽減設計とその実証、(b)高分子フォームコア CFRP サンドイッチ構造：内部損傷検出技術実証、(c)宇宙用アルミハニカムコア CFRP サンドイッチ構造：成形時ディンプル発生モニタリングと特性評価

#### 5. 今後の計画

[1]については、その優位性を確立するためにも、従来方法との相違や有効性の証明を行う。[2]、[3]については、現状の CFRP 材料に加え、新規 CFRP 材料開発にも適用していく。[4]については、FAA 認証をターゲットにした光ファイバ援用品質保証技術の構築への道を模索する。[5]、[6]については、材料メーカー、構造設計メーカーとの綿密な情報共有を行い、実用化を支える基盤学術研究としていく。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- (1) K.Takagaki, S.Hisada, S.Minakuchi and N.Takeda, "Process Improvement for Out-of-Autoclave Prepreg Curing Supported by In-Situ Strain Monitoring", J. Comp. Mater., Published on line Oct 13, 2016, in press (2017).
- (2) T.Tsukada, S.Takeda, S.Minakuchi, Y.Iwahori and N.Takeda, "Evaluation of Influence of Cooling Rate on Residual Strain Development in Unidirectional Carbon Fibre/Polyphenylenesulfide Laminates Using Embedded Fibre Bragg Grating Sensors," J. Comp. Mat., Published on line Aug 3, 2016, in press (2017).
- (3) S.Minakuchi, S.Niwa, K.Takagaki and N.Takeda, "Composites Cure Simulation Scheme Fully Integrating Internal Strain Measurement", Composites: Part A, Vol.84, 2016, pp.53-63.
- (4) N.Takeda, "Optical Fiber Based Structural Health and Process Monitoring of Adv. Compos. Structures", SPIE Smart Structures NDE., March 9, 2015, San Diego, USA. (Plenary)

原著学術論文10件、国際会議基調講演7件、国際会議論文26件  
ホームページ等

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

[takeda@smart.k.u-tokyo.ac.jp](mailto:takeda@smart.k.u-tokyo.ac.jp)