

平成 26 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246146

研究課題名(和文) CFRP構造ライフサイクルモニタリングシステムの構築

研究課題名(英文) Establishment of life cycle monitoring of CFRP structures

研究代表者

武田 展雄 (Takeda, Nobuo)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：10171646

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,200,000円、(間接経費) 11,160,000円

研究成果の概要(和文)：航空機CFRP構造のライフサイクル、すなわち成形、加工・組立、運用の全過程にわたって構造内部のひずみと温度の履歴を評価可能な光ファイバライフサイクルモニタリング技術の構築を行った。材料強度特性を把握した上で構造に蓄積するひずみに基づく構造健全性診断を行うことが可能になる。接合部、コーナー部および厚板、厚いパイプを対象としたライフサイクルモニタリングに取り組み、光ファイバ応答履歴に基づく新たな品質保証・保守技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：Life cycle monitoring of aircraft CFRP structures was established using optical fiber sensing which measures strain and temperature throughout the life including curing process, assembly and operation. Structural health diagnosis can be performed based on the accumulated strain history and material strength data. A new methodology was proposed for quality assurance and maintenance of complex CFRP structures based on the optical fiber sensor responses, and successfully applied to bolted joints, curved corner parts, thick plates and pipes.

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：CFRP 光ファイバセンサ 成形 接合部 残留ひずみ サンドイッチ構造

1. 研究開始当初の背景

CFRP は、金属材料に対して密度あたりの強度・剛性に優れており、航空機構造の軽量化を図るため、主要な一次構造部材にも CFRP を適用することが世界的に試みられている。しかし、航空機のような大型構造を CFRP 化する場合に、成形・加工・組立などの製造上の問題およ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十分な軽量化には至っていないのが現状である。具体的には、構造を均一に加熱することができず成形品質にばらつきが生じる、また成形時に生じたゆがみなどに起因して部材同士の接合の際に初期不良が発生する、さらにはこの初期不良や運用時の異物衝突による衝撃損傷が原因となって材料強度が大幅に低下する、といった懸念があり、結果として過度に安全よりの余剰が多い設計にならざるを得ないのが現状である。

2. 研究の目的

航空機 CFRP 構造のライフサイクル、すなわち成形、加工・組立、運用の全過程にわたって構造内部のひずみと温度の履歴を評価可能な光ファイバライフサイクルモニタリング技術の構築を行う。成形中の温度・硬化分布にはじまり、加工・組立時のひずみ変化、さらには運用中の損傷・変形を連続的にモニタリングすることで、材料強度特性を把握した上で構造に蓄積するひずみに基づく構造健全性診断を行うことが可能になる。一本の光ファイバのみでひずみと温度を同時分布計測可能な新規計測装置を開発すると同時に、CFRP 構造軽量化に向けたボトルネックとなっている、接合部、コーナー部および衝撃損傷を受ける平板部を対象としたライフサイクルモニタリングに取り組み、光ファイバ応答履歴に基づく新たな品質保証・保守技術を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、ひずみ・温度分布同時計測技術の基礎研究、厚板平板の成形モニタリングおよび材料特性評価、CFRP 接合部の損傷モニタリング、コーナー部を含む局面部材の成形・ライフサイクルモニタリング、CFRP フォームコアサンドイッチ構造の押し込み損傷評価・モニタリング、厚肉 CFRP パイプにおけるライフサイクルモニタリングと残留応力軽減、について研究を行った。

4. 研究成果

研究成果のうち、残留応力軽減手法の提案 について述べる。- については、下記の発表論文などを参照されたい。

(1) 緒言

観測衛星では高度なミッションを達成するために高い観測精度が要求される(図1)。そのため観測機器等の支持構造には $0.1 \times 10^{-6} / K$ 以下という極めて低い熱膨張率が求

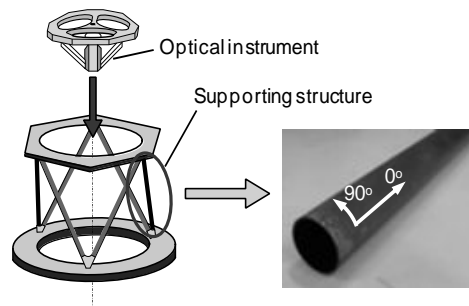


図1 衛星支持構造と CFRP パイプ

められている。そこで衛星の支持構造には低熱膨張率を有する CFRP 製のパイプが使用されている。近年では観測機器の大型化に伴い、CFRP パイプの厚肉・高剛性化が進んできているが、厚肉・高剛性の CFRP では円筒形状への拘束により板厚方向の残留応力(図2)が生じ、結果として成形時あるいは低温環境下において層間はく離が発生する。将来衛星における構造要求を満たす、より厚肉のパイプを実現するためには残留応力を低減させることが重要である。

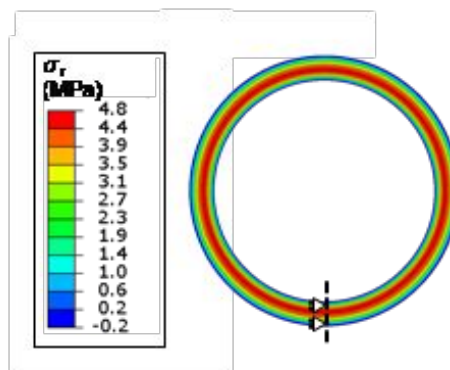


図2 厚肉 CFRP パイプの板厚方向垂直応力の例

(2) 残留応力軽減手法の提案

積層構成に注目し、成形時冷却過程における残留応力軽減手法を提案する。初めに積層構成が残留応力に与える影響を考察するために、Abaqus 6.11を用い、有限要素解析を行った。解析では図1に示すように対称モデル $([90_2/0_2]_{4S})$ 、外側 90° 非対称モデル $([0_{24}/90_{24}])$ および外側 0° 非対称モデル $([90_{24}/0_{24}])$ の3つの積層構成を考察した。 0° はパイプ長手方向、 90° は円周方向を表わす。モデルは2次元平面ひずみ状態を仮定し、対称性からパイプの1/4部分のみをモデル化した(図3)。このモデルに円周方向の変位拘束、および $-105^\circ C$ の温度変化を与えることで、パイプ材の冷却過程を模擬した。なお、内径は $r = 15 \text{ mm}$ 、板厚は実験での計測を基に1層あたり 0.11 mm とした。

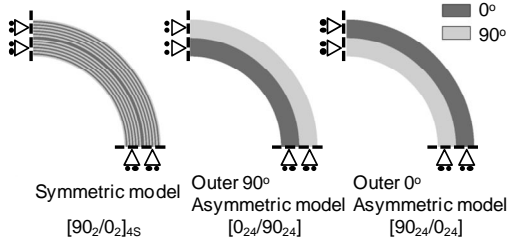


図3 解析に使用した積層構成

図4にそれぞれの積層構成における径方向応力の分布を示す。図の横軸は板厚で正規化された距離 R であり、

$$R = \frac{r - r_0}{t} \quad (0 \leq R \leq 1) \quad (1)$$

である。ここで r は中心からの距離、 r_0 は内径、 t は板厚を示す。図4より非対称積層に比べ対称積層で応力が高くなるのがわかる。一般に曲率を有する複合材積層板では、その異方性に起因して曲率が増加する方向の熱残留変形 (spring-in 変形) が発生する。CFRP パイプ内部の応力は図3の円周方向拘束がない場合に発生するこの spring-in 変形を円筒形状へ補正することにより発生し、円周方向への曲げ剛性が大きいほど高い応力が発生する。対称積層では 90° 層が板厚方向に分散しているため曲げ剛性が大きく、結果として高い応力となる。

一方、2つの非対称積層では外側 0° 積層の方が外側 90° 積層に比べ応力が抑制されている。外側に 0° 層を配置した場合、この 0° 層の円周方向への熱収縮により spring-in 変形が抑制されるのに対し、内側に 0° 層を配置した場合、熱収縮は Spring-in 変形を促進する。この結果、外側 0° 層の場合、外側 90° 層に比べ補正する変形が小さくなり、発生する応力が低減される。以上から、CFRP パイプ内部に生じる残留応力を低減させるためには 0° 層を板厚方向で集中させ、かつ外側に配置すればよいことがわかった。

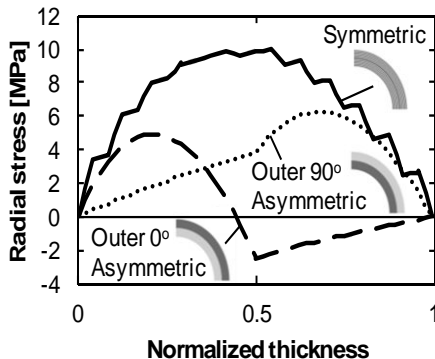


図4 直径方向応力分布の相違

(3)手法の検証および crack-free 厚肉パイプの作製

複屈折現象を利用した径方向ひずみ計測手法

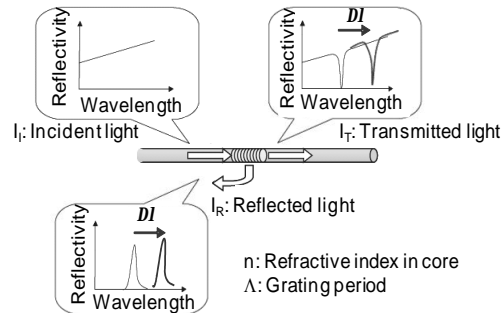


図5 FBG センサの動作原理

本研究では材料内部に生じる径方向ひずみの計測および破壊検知のために光ファイバセンサの一つである fiber Bragg grating (FBG) センサを利用した。FBG センサはシングルモードファイバの一部分の屈折率を周期的に変化させ回折格子を形成したものである。図5に示すようにセンサに広帯域の光 I_i を入射すると、格子間隔に応じた狭帯域の光 I_r が反射する。この反射スペクトラムの変化からひずみおよび温度を計測することができる。FBG センサは初期状態では図6左図に示すように、一つのピークのみを持つ。

しかし、センサ断面に非軸対称なひずみが生じた場合、複屈折現象により2つのピークが発生する(図6右)。従来FBG センサはセンサ軸方向のひずみ計測に用いられてきたが、著者らは先行研究で、この複屈折現象を利用した板厚方向ひずみ計測手法を構築した。その概略を以下に示す。

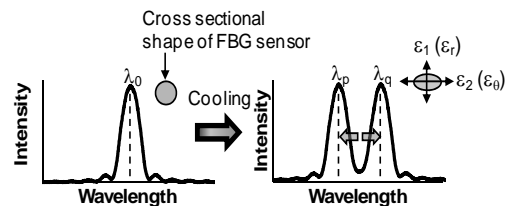


図6 反射スペクトルに及ぼす複屈折効果

図6の右図に示す2つのピーク中心波長 λ_p 、 λ_q の差 $\Delta\lambda$ は

$$\Delta\lambda = |\lambda_p - \lambda_q| = n_0^2 (p_{12} - p_{11}) \lambda_0 \frac{|\epsilon_1 - \epsilon_2|}{2} \quad (2)$$

と表わされる。ここで n_0 は初期屈折率、 p_{11} 、 p_{12} は光弾性率、 λ_0 は初期波長、 ϵ_1 、 ϵ_2 は光ファイバ断面方向の主ひずみである。式(2)から $\Delta\lambda$ はセンサ断面の扁平率を表わす量である非軸対称ひずみ $\epsilon_a = |\epsilon_1 - \epsilon_2|/2$ に比例することがわかる。つまり、反射光スペクトラムからパイプ材の円周方向ひずみと径方向ひずみ

の差 $|\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_r|$ をモニタリングすることができる。本研究では径方向応力が最大で、破壊の起点となる中立軸付近に FBG センサを埋め込みモニタリングを行う。この点では円周方向ひずみの影響が小さいため、非軸対称ひずみを計測することで板厚方向ひずみのモニタリングが可能となる。

内部ひずみ計測による応力低減手法の検証

(2)で提案した応力低減手法を検証するため、同じ層数を有する対称および非対称積層パイプを作製し、FBG センサ応答を計測した。使用した材料は高弾性ピッチ系プリプレグ HYEJ15M65PD-25 (三菱樹脂株) であり、 0° および 90° 層はそれぞれ 18 層、6 層とした。またパイプ表面からのき裂発生を防ぐために最内・最外層には織物材 (Woven Fabric: 以下 WF) を配置した。積層構成は図 7 に示すように $[WF/90_2/0_6/90_0/0_3]_s$ (対称積層)、 $[WF/90_3/0_2/90_3/0_{16}/WF]$ (非対称積層) とし、FBG センサおよび熱電対を対称積層は 13-14 層間、非対称積層は 5-6 層間に埋め込んだ。埋め込み位置は事前の有限要素解析により中立軸に近いことを確認している。プリプレグを一度に巻回・成形すると肉厚の変化により大きなしわが発生するため、対称積層は 9, 7, 10 層の 3 回、非対称積層は 9, 17 層の 2 回に分けて成形した。

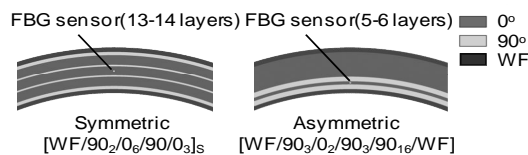


図 7 対称、非対称積層試験片の積層構成

成形時冷却過程における非軸対称ひずみ変化を図 8 に示す。横軸は温度、縦軸は非軸対称ひずみを表わす。冷却時には熱膨張率の異方性から FBG センサ断面は横長の楕円になる (図 6)。そのため、径方向に引張応力が生じている場合、非軸対称ひずみは相対的に小さな値となる。図 8 より、非対称積層の非軸対称ひずみは対称積層に比べ大きく、板厚方向ひずみが抑制されていることがわかる。また図 8 に有限要素解析の結果を示す。それぞれの積層構成において実験を再現する結果となっている。以上から (2) で考察した応力低減手法の有用性が示された。

crack-free 厚肉 CFRP パイプの実証

先行研究で $[0_2/90_2]_{68}$ の 48 層パイプでは成形途中に層間にはく離が生じることを明らかにした。そこで本試験では $[0_2/90_2]_{68}$ と同じ数の 0° 層、 90° 層を有する試験片を非対称積層により作製した。積層構成はここまでで提案・実証した応力低減手法に基づき、 $[WF/90_{24}/0_{24}/WF]$ とした。WF は前節と同様に、

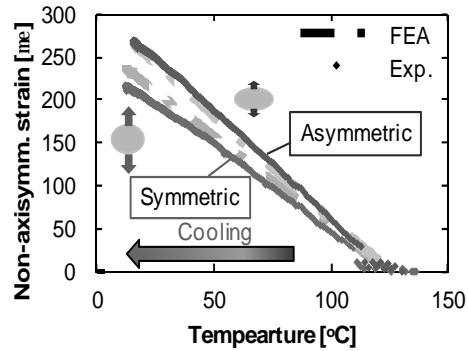


図 8 硬化中の非対称ひずみの変化 (26 層試験)

表面から生じる樹脂割れを抑制するために配置されている。FBG センサを中立軸付近の 13-14 層間に配置した場合、隣接する 90° 層によりスペクトラムが乱されるため、本試験では板厚方向中央 25-26 層間に配置した。この位置においては円周方向ひずみが無視できないため、センサの非軸対称ひずみから径方向ひずみをモニタリングできない。しかし、ひずみの不連続変化により破壊の検知は可能であるため、本試験では FBG センサを破壊検知に用いた。

図 9 に非軸対称ひずみの温度履歴を示す。ここでは先行研究で作製した対称積層 48 層試験片の結果も併せて示している。図 7 において、対称パイプでは室温に近い領域でひずみの不連続変化が見られるのに対し、本研究で作製した非対称パイプではひずみが連続的に変化した。また、図 10 に示す断面写真においても、対称積層のみに層間にはく離が生じていることがわかる。なお、対称積層は 39 層まで成形した時点で破壊を生じたためこれ以上の成形を行っていない。

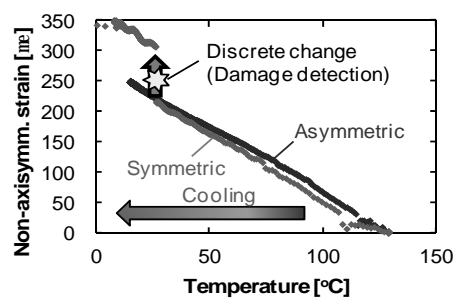


図 9 硬化中の非対称ひずみの変化 (厚肉パイプ)

以上のことから本研究で提案された非対称積層による残留応力低減手法を用いることで、対称積層では破壊が生じる厚肉のパイプを作製可能であることが示された。

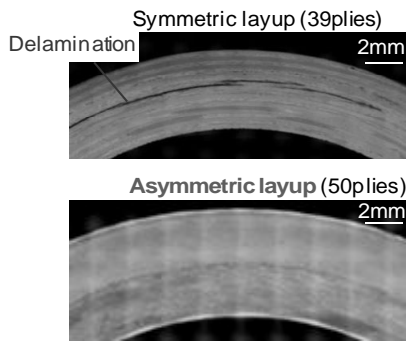


図 10 厚肉パイプの断面写真

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(全て査読あり)(計 18 件)

Y. Ito, t. Obo, S. Minakuchi and N. Takeda, "Cure Strain in Thick CFRP Laminate: Optical-Fiber-Based Distributed Measurement and Numerical Simulation", *Adv. Compos. Mater.*, 2014,

DOI:10.1080/09243046.2014.906914

S. Minakuchi and N. Takeda, "Recent Advancement in Optical Fiber Sensing for Aerospace Composite Structures", *Photonic Sensors*, Vol. 3, No. 4, 2013, pp.345-354.

DOI:10.1007/s13320-013-0133-4

K. Takagaki, S. Minakuchi and N. Takeda, "Fiber-Optic-Based Life-Cycle Monitoring of Through-Thickness Strain in Thick CFRP Pipes", *Adv. Compos. Mater.*, 2013, pp. 195-209.

DOI:10.1080/09243046.2013.844901

S. Minakuchi, T. Umehara, K. Takagaki, Y. Ito and N. Takeda, "Life Cycle Monitoring and Advanced Quality Assurance of L-Shaped Composite Corner Part Using Embedded Fiber-Optic Sensor", *Composites Part A*, Vol. 48, 2013, pp. 153-161. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X13000328>

S. Minakuchi, T. Uezono, N. Takeda, "Formation and Relaxation of Residual Facesheet Dent on Foam-core Sandwich Structures by Localized Transverse Loading," *J. Sandwich Structures and Materials*, Vol. 15, No. 1, 2013, pp. 71-91. DOI:10.1177/1099636212456862

S. Minakuchi, H. Banshoya, S. Ii and N. Takeda, "Hierarchical Fiber-optic Delamination Detection System for Carbon Fiber Reinforced Plastic Structures", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 21, No. 10, 2012, 105008(8pp).

DOI:10.1088/0964-1726/21/10/105008

S. Minakuchi, I. Yamauchi, N. Takeda and Y. Hirose, "Memorizing and Detecting an Arrested Crack in a Foam-Core Sandwich Structure Using Embedded Plastic Materials and Fiber-Optic Sensors", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 21, No. 5, 2012, 055025(8pp).

doi:10.1088/0964-1726/21/5/055025

〔学会発表〕(計 40 件)

K. Uhira, S. Minakuchi and N. Takeda, "Fiber-Optic-Based Pressure Detection and Quality Assurance of CFRP Secondary Bonding", *Proc. 13th Japan Int. SAMPE Symp. & Exhibition (JISSE13)*, Nov.11-13, 2013, Nagoya.

J. T. Siivola, S. Minakuchi and N. Takeda, "Application of Fiber-Optic Distributed Sensing System to CFRP-Foam Core Sandwich Panel and its Detection Ability of Local Indentation Damage", *Proc. Am. Soc. for Composites, 27th Tech. Conf.*, Oct. 1-3, 2012, Arlington, Texas, CD-ROM Structural Sensing.

N. Takeda, S. Minakuchi and T. Nadabe, "Damage Detection in CFRP Bolted Joints Using Embedded Optical Fiber Strain Distribution Monitoring", *23rd Int. Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM)*, Aug. 23, 2012, Beijing, China, Paper No. SM08-020. (Invited)

武田 展雄, "先進 CFRP 構造のライフサイクルモニタリングの構築", 第 3 回日本複合材料合同会議(JCCM-3), 2012 年 3 月 8 日, 京都. (基調講演)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

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

研究者番号：10171646

(2)研究分担者

水口周 (MINAKUCHI, Shu)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：70512359

(H23-H24 まで)