

# PPP-BOTDA による複合材構造の温度補償された 分布ひずみ計測に関する基礎研究

学生証番号 47-66211 氏名 齋藤 正広

(指導教員 武田 展雄 教授)

Key Words : CFRP, PPP-BOTDA, FBG, Cure Monitoring, VaRTM, Autoclave

## 1. 緒言

宇宙航空分野において、炭素繊維強化複合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP)などの先進複合材料の使用が急速に進んでいる。CFRP は比強度、比剛性に優れた特長を持つが、複雑な破壊形態を有する。ゆえに航空機の製造段階と運用段階で、複合材料内部に生じた損傷の可視化や定量化が可能であれば、複合材料の最適設計や補修などが行なえる。そこで本研究では、複合材料内部のひずみと温度変化を計測できる光ファイバセンサに着目し、FBG センサと分布ひずみセンサを併用した温度補償ひずみ計測を CFRP の成形モニタリングに適用した。

## 2. 光ファイバセンサ

FBG(fiber Bragg grating)は、光ファイバのコアの屈折率を軸方向に周期的に変化させ、回折格子を形成したものである。回折格子に広帯域光が入射すると、ブラッグ波長に相当する光のみが反射される。

一方、PPP-BOTDA(pulse-prepump Brillouin optical time domain analysis)は、誘導ブリルアン散乱による後方散乱光の光時間領域解析法である。光ファイバにポンプ光とプローブ光を入射すると、自発ブリルアン散乱光と電気ひずみ効果による音波が干渉し、周波数変調を受けた誘導ブリルアン散乱光が生じる。さらにポンプ光を段階的なパルス状にし、光時間領域反射率測定法を用いることで、光ファイバ全長に渡り高精度な計測が可能である。

また本研究では、光ファイバに軸方向ひずみと温度変化が生じたとき、FBG センサでのブラッグ波長変化と、PPP-BOTDA でのブリルアン周波数変化の関係を定義し、温度依存項を評価することで、温度補償されたひずみの計測を行った。

## 3. ひずみ校正値と温度校正値の測定

FBG センサと PPP-BOTDA での、ひずみと温度変化に対する校正値を計測した。ただし校正値は、温度とひずみに依存しない定数値であるとした。温度校正値は無負荷状態での温度変化によるブラッグ波長変化とブリルアン周波数変化の測定、またひずみ校正値は定温状態での、荷重負荷によるブラッグ波長変化とブリルアン周波数変化の測定を行なった。光ファイバセンサはクラッド径 125 $\mu$ m(通常径)、比屈折率差 2.5%のシングルモード光ファイバ(東京特殊電線株)であり、また FBG センサは初期中心波長が 1,536nm、反射率が 0.73%(フジクラ株)である。これらの光ファイバ及び FBG の特性は、CFRP への埋め込みを視野に入れ、事前検討を行った結果から定められた特性である。

## 4. 成形モニタリングへの応用

埋め込み通常径光ファイバと細径光ファイバを用いた温度補償されたひずみ計測を、CFRP 積層板の成形モニタ

リングに適用した。CFRP はプリプレグ T700S/2500(東レ株)、通常径光ファイバでは積層構成[0<sub>2</sub>], サイズ 500mm × 100mm, 細径光ファイバでは積層構成[0<sub>8</sub>], サイズ 300mm × 70mm であり、光ファイバは積層板中央に配向角に沿って埋め込んだ。成形条件は 100°C で一次硬化、130°C で二次硬化であり、また温度計測には成型型のアルミニウム板表面に貼り付けた熱電対を用いた。

## 5. 光ファイバセンサの大型供試体への適用

### 5.1 VaRTM 工法による大型供試体への適用

複雑な複合材構造の一体成形が可能であり、安価に複合材料を製造できる VaRTM(Vacuum assisted Resin Transfer Molding)工法の成形モニタリングに、埋め込み細径光ファイバによる分布ひずみ計測を適用した。炭素繊維は T800S 24k(東レ株)、樹脂は DENATOOL XNR/H 6809(ナガセケムテックス株)、サイズ 1000mm × 500mm である。積層構成は[+45/0/-45/90]<sub>s</sub>であり、光ファイバは各配向角に沿って、各層間に埋め込み、細径光ファイバ同士は全て融着し一本化した。成形条件は 80°C にて一次硬化、120°C にて二次硬化である。しかし二次硬化後、埋め込み細径光ファイバセンサにおいて光強度損失が生じた。そのため細径光ファイバ埋め込み部に対して行った断面観察を行った。そして、炭素繊維を束ねるために使用したポリアミド樹脂により生じたマイクロベンディングが光強度損失を引き起こしていたことが明らかとなった。

### 5.2 オートクレーブ工法による大型供試体への適用

高い繊維体積含有率のため高い機械的特性の製品を製造できるオートクレーブ工法による大型供試体の加熱試験に、細径光ファイバセンサを用いた分布ひずみ計測を適用した。プリプレグは T800S/3900-2B(東レ株)、サイズは 1550mm × 600mm, 積層構成は[+45<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>/-45<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>であり、光ファイバセンサは各 0°層に埋め込んだ。加熱は大型恒温槽を利用し、30°C, 60°C, 90°C, 120°C, 150°C にて光強度損失を計測した。光強度損失は温度上昇により緩和され、0°/0°層間にて最も光強度損失が小さかった。また光計測系許容ロスを 5dB とすると、0°/0°層間にて約 7.8m の埋め込み細径光ファイバを用いた分布ひずみ計測が行えることがわかった。

## 6. 結言

本研究では、FBG センサと PPP-BOTDA を併用した温度補償ひずみ計測を CFRP 積層板の成形モニタリングに適用し、また埋め込み細径光ファイバを用いた分布ひずみを VaRTM 工法とオートクレーブ工法による大型供試体へ適用した。ゆえに航空機構造の製造・運用段階を通した、埋め込み細径光ファイバを用いた分布ひずみセンサによる構造ヘルスマニタリングの可能性を示した。