

# 卒業論文要旨

## 硬化プロセスがCFRP 積層板の残留応力に与える影響

### Effect of Curing Process on Residual Stress in CFRP Laminates

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1240037 大脇滉介

#### 1 緒言

熱硬化性 FRP (Fiber Reinforced Plastic) はプリプレグを加熱、加圧することで成型される複合材料の一つであり、近年ではその軽量さ、高強度、高耐環境性という特徴から自動車や航空機への利用が進んでいる。

FRP はプリプレグを加熱、加圧することで完全硬化させて成型されるが、冷却時に熱残留応力がでてしまう。残留応力が大きいと製品の強度低下につながるため、これを小さくするのが FRP 成型における一つの目標である。残留応力を低減させるには成型温度を小さくすればいいが、その場合完全硬化に至らないことがある。

一方で FRP 成型法の一つであるオートクレーブ成型では加圧しながら温度を上昇させ、ある一定の温度になったら数時間その温度を保つことでプリプレグを完全硬化させる。しかし、ある一定の温度になった時点で硬化度は 80% 程度になることが知られているため、この時点で成型を打ち切り、安価な炉で完全硬化まで成型を行うことも可能である。しかし、この成型方法で FRP に生じる残留応力はこれまで調べられていない。

そこで、本研究では硬化度 80% で成型を打ち切り、二次成型 (ポストキュア) にて完全硬化させる場合に生じる残留応力を調べた。温度の測定には熱電対、硬化度の測定には高屈曲センサ、残留応力の測定には FBG を用いた。

#### 2 FBG センサ

本研究ではひずみの計測に FBG センサを使用した。図 1 に FBG センサの仕組みを示す。FBG センサは光ファイバのコア内に回折格子があり、光源から光が通過すると、ある特定の波長 (ブラッグ波長) のみを反射するセンサである。センサに力が加わり変形すると、回折格子間隔が変化し、結果的にブラッグ波長が変化する。このブラッグ波長の変化からひずみを導出することが可能である。

また、FBG センサは断面に非軸対称応力が加わった場合、光ファイバの有効屈折率に方向性が生じる。これにより、2 種類のブラッグ波長をもつ狭帯域反射光が生じる。得たブラッグ波長が互いに近い値ならば、スペクトル幅の増加として表れる。一方でブラッグ波長の値が互いに大きく異なる場合は 2 つのピークを持つ波長が得られる。よって、本研究では FBG センサのこの性質を利用することでスペクトル幅から層内の残留応力を調べる。

#### 3 実験方法および解析方法

##### 3.1 材料および試験片作成方法

本研究では CFRP プリプレグを横 100 mm、縦 20 mm に切ったものを 20 枚積層し、ホットプレス機と炉を用いて加圧・

加熱することで、硬化プロセスを進めた。CFRP プリプレグは直交積層板として使用するので、 $0^\circ$  を外側に 5 枚ずつ、 $90^\circ$  を内側に 10 枚積層した。また、図 1 のように、硬化度測定用の高屈曲センサと温度測定用の熱電対、ひずみ測定用の FBG

センサの 3 つのセンサはプリプレグ積層板の  $90^\circ$  層の真ん中に埋め込んだ。この時、センサはプリプレグの繊維方向と平行になるようにした。

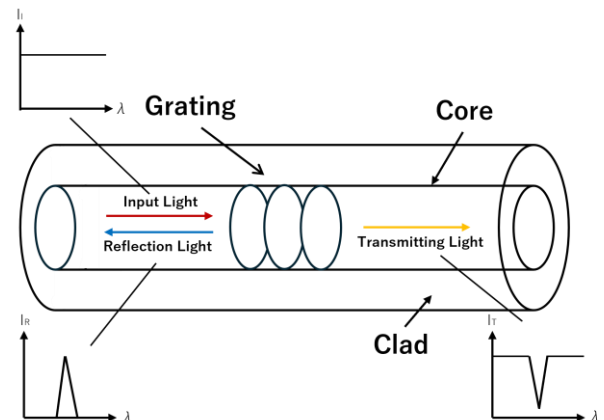


Fig.1 Principle of FBG sensor

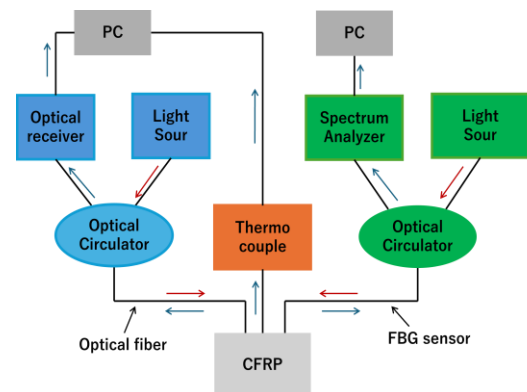


Fig.2 An illustrated outline of experiment

##### 3.2 実験方法

作成した試験片をホットプレス機で一次成型 (プレキュア) し、炉で二次成型 (ポストキュア) を行う。二次成型後の残留応力と二次成型を行わずに完全硬化させた場合の残留応

力を比較したいので、まず、ホットプレス機で試験片を完全硬化させ、この時に生じる残留応力を調べた。ホットプレス機は一分に一度の昇温速度で室温から 130℃まで加熱し、そこから 40 分間、130℃を保たせることで試験片を完全硬化させた。残留応力は完全硬化したあと、室温に戻る過程で生じるので、完全硬化後にホットプレス機を冷却することで CFRP を室温に戻し、この過程の間をセンサで測定をした。

その後、二次成型を行う場合の残留応力を調べた。ホットプレス機の昇温速度は先の実験と同じで室温から 130℃まで加熱し、130℃になった時点で硬化度が 80%程度になるため、すぐに冷却する。室温まで冷却した後は炉で 130℃まで加熱し、完全硬化させる。完全硬化後は保冷剤を CFRP の下に置くことで室温まで冷却する。

プリプレグに埋め込んだセンサは光源、サーキュレーター、PC とスペクトルアナライザに繋ぎ、成型中の温度、硬化度、ひずみを測定した。図 2 に実験の模式図を示す。

#### 4 実験結果と考察

図 3 にポストキュアを行わない場合の成型プロセスで FBG センサから得られたブラッグ波長の変化を示す。横軸が波長 [nm] で縦軸がスペクトル [V] を示す。グラフを見ると、加熱前のスペクトルが加熱後、冷却後と比べて非常に小さいことが読み取れる。これは FBG の挿入部で局所曲げが発生している可能性があることが原因として考えられる。冷却時にスペクトルが下がっているが、これは残留応力が発生して幅が広がったため、相対的に小さくなったからである。図 4 にポストキュアを行わない場合の波長の幅と温度の関係を表すグラフを示す。幅の値は測定開始時の幅とその時点での幅との差を示す。横軸が温度 [℃]、縦軸が幅 [nm] である。冷却時は 117℃を境に温度が下がるほど幅が広がっている。このことから冷却時に熱残留応力が生じていることが分かる。

図 5 にポストキュアを行った場合の成型プロセスで FBG センサから得られたブラッグ波長の変化を示す。図 3 と同様に加熱前のスペクトルが小さいことと、冷却後にスペクトルが小さくなっていることが分かるが、先ほど述べた原因と同じだと考えられる。図 6 にポストキュアを行った場合の幅と温度の関係を表すグラフを示す。一次成型（プレキュア）では加熱、冷却で幅に大きな変化はないが、ポストキュアでの冷却で 80℃を境に急激に幅が広がっており、40℃付近になると急激に幅が小さくなっている。幅がこれほどまでに急激に大きくなり、その後すぐに小さくなることは考えにくいので、FBG センサが剥離したのではないかと考えた。

#### 5 結言

本研究ではポストキュアによる残留応力の影響は FBG センサを用いた本研究手法では得られなかった。一方で、硬化度 75%で冷却した場合に生じる残留応力は加熱時と変わらないことが明らかになった。

また、残留応力は成型時の温度差に起因して発生するため、今後は成型温度が 180℃のプリプレグを用いた成型を検討する。

#### 謝辞

本研究をおこなうにあたり、ご指導・ご鞭撻をいただいた高坂達郎教授に心より感謝いたします。また、先端機械材料研究室の皆様に深く感謝いたします。

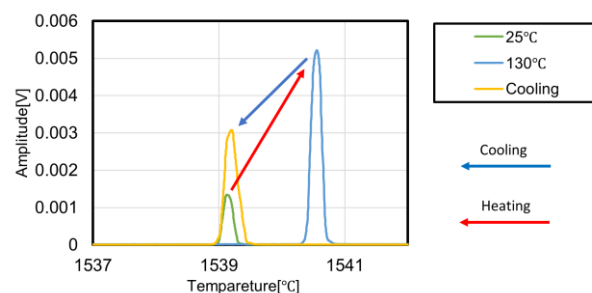


Fig.3 FBG spectra during full cure process

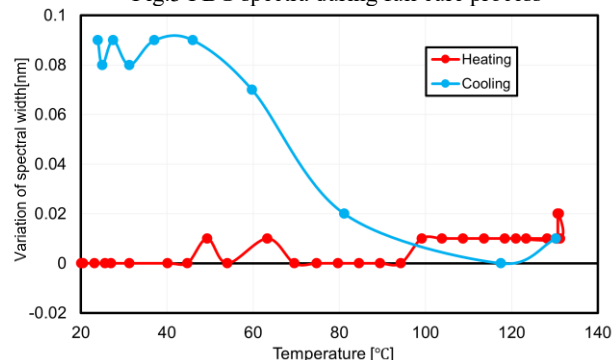


Fig.4 Relationship between variation of spectral width and temperature during full cure process

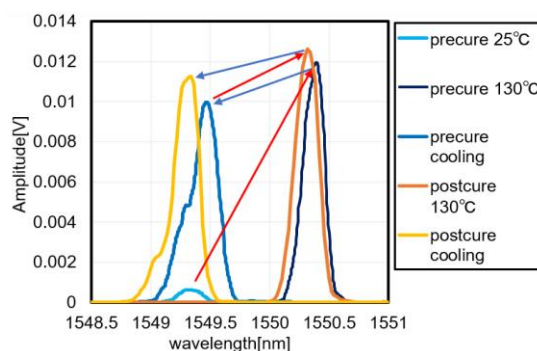


Fig.5 FBG spectra during 1st and post cure

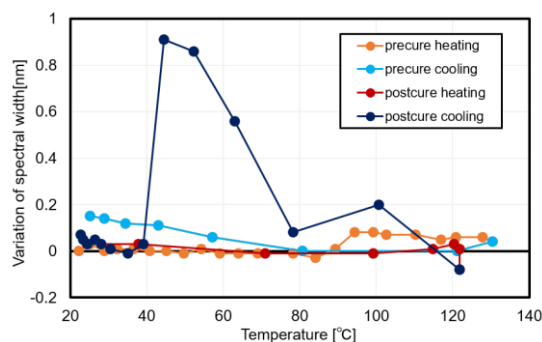


Fig.6 Relationship between Variation of spectral width and Temperature during 1st and post cure

#### 参考文献

- (1) 高坂達郎, “FBG センサを用いた樹脂のポストキュア過程のモニタリング”, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol61, No7, pp648-653, July 2012
- (2) 大西智樹, “卒業論文「細径光ファイバによる CFRP 積層板の硬化モニタリング」” 高知工科大学, 2021
- (3) 邊吾一, 石川隆司, “先進複合材料工学”, 培風館, 2005, ISBN4-563-06750-4 C3050