

残留応力軽減のための CFRP 積層板のスマート成形に関する研究

Study on Smart Molding of CFRP Laminates for Reduction of Residual Stress

知能機械工学コース

先端機械・航空材料工学研究室 1275015 塩田 貴晴

1. 緒言

熱硬化性樹脂基 FRP の製造過程では、高価なオートクレーブにより一定の温度で概ね硬化させ、型から外し、安価な炉に移し替え、その後より高温な条件で完全硬化させる手法を用いることがあり、この完全硬化させる工程をポストキュアという。一次硬化では完全硬化させる必要がなく、一次硬化炉の使用時間を短くすることが出来る。筆者らはこれまで、単純な光学系を持ち、応答速度の速く、硬化度を精度よく推定することが出来る、フレネル反射型光ファイバセンサに着目した硬化度測定システムの開発を行ってきた⁽¹⁾。しかし、未硬化前に冷却した場合、硬化度が精確に測定できないことが明らかとなった。

また、プリプレグを用いた熱硬化性 FRP 積層板の製造過程では、ある一定の温度で完全硬化させた場合、冷却時に層内に熱残留応力が生じることはよく知られており、残留応力が引張の場合は、トランスバースクラック発生応力を低下させる。積層板の強度を上げるためには、残留応力の低減は有効な手段となり、より低い温度で硬化させるとよいが、その場合完全硬化に至らないことが懸念される。一方で、完全硬化させるために、数時間温度を保持して成形する手法が一般的である。しかし、実際には成形温度に達したときには硬化度は 80% 以上に達しており、ポストキュアを掛けることも可能である。そのため、完全硬化しない温度に達した時にオートクレーブ成形を打ち切ることで、成形コスト削減と残留応力低下を同時に実現できる可能性がある。

以上より本研究では、一次硬化からポストキュアまでのプロセスで冷却過程を含めた樹脂の硬化度を測定できるセンサシステムの開発および、FBG センサを用いたプリプレグ成形のポストキュア過程で生じる残留応力の評価を試みた。

2. フレネル反射型光ファイバセンサによる硬化度測定法

光ファイバの端部では、ガラスと樹脂の屈折率の違いによりフレネル反射が生じる。筆者らは、フレネル反射型光ファイバセンサによって測定された光量から屈折率変化を算出し、得られた屈折率変化から硬化度を推定する手法を提案してきた。図 3 左の温度—屈折率変化曲線は、硬化度に比例して屈折率が変化するというモデルを用いたものである。完全硬化時の屈折率は、完全硬化時のガラス転位点(T_g)に変化するが、実際には硬化度が低い場合、 T_g は現れない。また、硬化度が 60% を超えるとセンサ先端には熱および硬化応力が発生し、屈折率に影響を与える。図 3 左の完全硬化時の曲線はこの応力の影響を含んだものになるが、硬化度が低い場合はこの影響は現れない。以上から、本研究では図 3 右に示す解析モデルを提案する。硬化度が低い場合は、センサ先端に生じる応力の影響を受けない屈折率曲線(図中の点線)に到達するように硬化度に比例して屈折率が変化するが、硬化度が 60% を上回るとセンサ先端に生じる応力の影響を受けた曲線に達するように、変化するものと考えられる。本研究では、この曲線を求めるために加熱冷却を繰り返した樹脂の屈折率測定試験を行った。

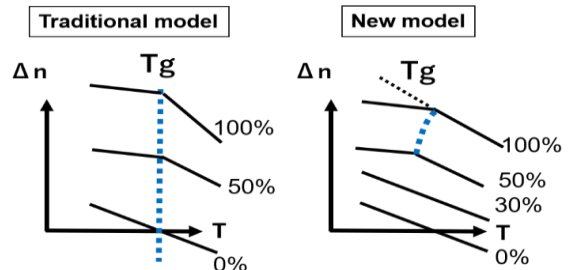


Fig.1 Analysis model of calculation of degree of cure from relationship between temperature and refractive index.

3. FBG センサによる非軸対称応力の推定

FBG センサは、グレーティングを介して高出力ビームをコア照射することで、周期的な屈折率分布を生じさせたものである。広帯域光がブラッグ格子に達すると、ブラッグ波長をもつ狭帯域光が反射する。このピーク波長を調べることで、ひずみを得ることができる。一方で、FBG センサの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。それにより、2種類のブラッグ波長をもつ狭帯域反射光が生じる。ブラッグ波長が互いに近い値であるならば、その影響はスペクトル幅の増加として現れる。ブラッグ波長が互いに十分異なるならば、2つのピークを持つ反射スペクトルが得られる。よって本研究では、スペクトル幅から、層内残留応力を評価することを試みた。

4. 実験方法

図 2 に樹脂の加熱冷却試験および CFRP 積層板のひずみ測定の概略図を示す。樹脂の加熱冷却試験での温度条件は、設定温度まで昇温させた後炉を開放し、5°C 急冷後再び設定温度まで昇温させる。この加熱冷却を完全硬化するまで繰り返した。なお設定温度は 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C とした。次に、CFRP 積層板のひずみ測定では、プリプレグを 0° 層と 90° 層でそれぞれ 2cm×10cm に切り分け、0° 5枚、90° 10枚、0° 5枚の順で重ねた。90° の 5枚目と 6枚目の間には、光ファイバと熱電対、FBG センサを繊維方向に埋め込んだ。温度条件 1 は 25°C から 1°C/min で 130°C まで昇温、保持して完全硬化させた (Pattern1)。また、温度条件 2 では、1°C/min で硬化度 80% まで加熱し、その後水冷で室温 25°C まで冷却を行い、その後、炉を用いて 130°C まで昇温、保持して完全硬化させ、再び冷却した。

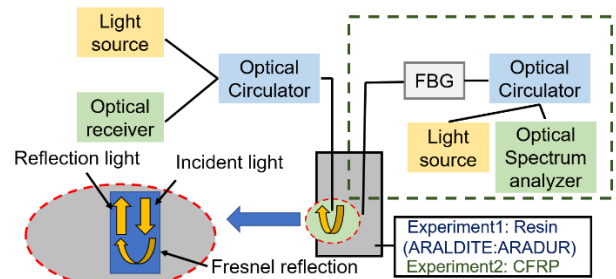


Fig.2 Schematic view of measurement of Refractive index of Resin and Residual Stress of CFRP laminates.

5. 実験結果

実験結果から、設定温度 70℃以下の屈折率変化は温度に対して直線となることが分かった。よって、 T_g を含まない温度範囲において、屈折率の温度依存性は硬化度により依存することが分かった。一方で設定温度 80℃では、74℃前後において T_g が現れ、屈折率曲線の傾きが変化することが分かった。硬化進展に伴い T_g が高温側に移動していることも分かる。

図 6 に、各設定温度での屈折率 n —温度 T の曲線の傾き dn/dT と硬化度の関係を示す。図より、設定温度が 70℃以下の温度条件では、硬化度 70%付近まで、 dn/dT が一定となることが明らかとなった。さらに硬化度 70%を超えると傾きは上昇し、硬化度に比例して完全硬化時の傾きに近づくことが分かった。よって、従来のモデルでは全ての硬化度で傾きが硬化に比例すると仮定していたが、これが誤りであることが明らかになった。

80℃、90℃および 100℃の温度条件では、 dn/dT は硬化度に比例して減少し、 T_g 温度以上での完全硬化時の傾きに近づいていくことが分かった。しかし硬化度の上昇と共に T_g が発現すると、 T_g 温度以下での傾きに近づくように傾きは急激に上昇した。これらの振る舞いは、図 3 右に示した新しいモデルが妥当であることを示すものである。 T_g の発現していない硬化度においては、傾きはファイバ先端の応力の影響の無い完全硬化時の傾きに硬化度に比例して近づくと考えられるので、応力の影響の無い完全硬化時の傾きは未硬化時とほぼ同じであることが分かる。しかし T_g が発現すると応力の影響により傾きは上昇する。よって、屈折率変化の傾きは以下の式で表すことが出来る。

$$\frac{dn}{dT} = \beta_0 + (\tilde{\beta}_1 - \beta_0)\alpha \quad T > T_g \text{ or } \alpha < \alpha_{Tg}$$

$$\frac{dn}{dT} = \beta_0 + (\tilde{\beta}_1 - \beta_0)\alpha_{Tg} + (\beta_1 - \tilde{\beta}_1) \left(\frac{\alpha - \alpha_{Tg}}{1 - \alpha_{Tg}} \right) \quad T \leq T_g \text{ and } \alpha \geq \alpha_{Tg}$$

ここで β_0 は未硬化時の傾き、 $\tilde{\beta}_1$ はファイバ先端応力の影響の無い完全硬化時の傾き、 β_1 は応力の影響を受けた完全硬化時の傾き、 α_{Tg} は T_g の発現する硬化度である。

次に、CFRP 積層板でのひずみの測定結果を評価した。結果より、冷却後のスペクトル値は加熱時よりも減少しており、幅が広がっていることから残留応力の発生が伺えた。なお、室温から加熱時でスペクトルが大幅に上昇しており、FBG センサ挿入時に局所曲げの発生が考えられた。これらのことからピーク波長の 25%地点でのスペクトル値幅を抜き取り、初期波長の 25%でのスペクトル値幅との差を図 3 に示す。図 3 より、25℃から 130℃までの加熱時は値幅が一定であることが分かる。幅が 60℃付近で上昇しているのは、成形時の加圧が原因だと考えられる。また、冷却中は 80℃まで加熱時と同様の振る舞いをした。また、80℃以下になると値幅が上昇し、温度に比例して約 0.09nm 広がったことから、熱残留応力の発生が明らかとなった。

次に、ポストキュア過程を含めた場合の成形中のスペクトルと比較した。Pattern2 でも同様に局所曲げが発生していると考えられ、また、1 次硬化の加熱後よりもポストキュアの加熱後の方がスペクトル値は大きくなったが、Pattern1 と同様に、冷却後にスペクトルは減少しており、幅が広がっていることが分かった。Pattern 1 との比較を行うために図 4 に、ピーク波長の 25%地点でのスペクトル値幅と初期波長の幅の差を示す。図 4 より、1 次硬化での加熱時の値幅は、図 3 と同様に初期値とほとんど変わらず一定となった。また 1 次硬化での冷却時は、Pattern 1 と同様で約 80℃以下から温度に比例して幅が上昇していることが分かった。また、ポストキュアでの再加熱時も他の加熱時と同様にほぼ

一定となった。しかし、ポストキュア後の冷却中は 80℃以下から急激に上昇し、約 1nm 広がった。また、一次硬化の終了点とポストキュアでの開始点がずれていることや、冷却中の温度が 40℃以下になると値幅が急激に減少したことから、センサの剥離が考えられた。

このことから、硬化度 75%では非軸対称応力はほとんど現れず、またポストキュア時の埋め込み不良が見られた。残留応力の低減を検証するには、埋め込み方法の改良と硬化度 80%以上でのポストキュア、また高温硬化でのプリプレグの使用が必要であると考えられる。

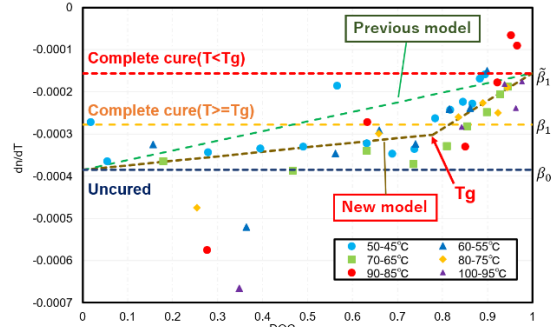


Fig.2 Relationship between slope of refractive index and DOC

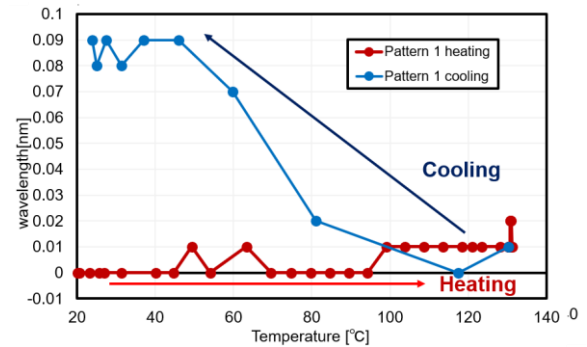


Fig.3 Relationship between Variation of spectral width and Temp

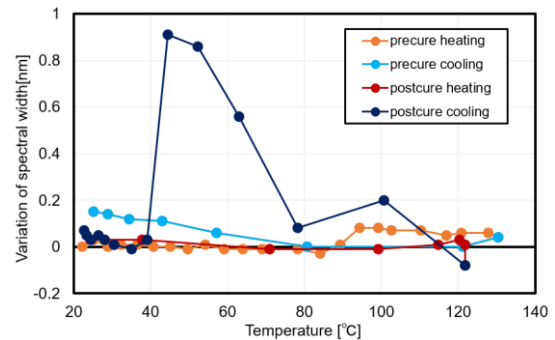


Fig.4 Relationship between Variation of spectral width and Temp

6. 結言

フレネル光ファイバセンサを用いて繰り返し加熱試験を行った結果、 T_g が発現する前と後では屈折率の温度依存性の硬化度に対する振る舞いが異なることが分かった。さらに実験結果より屈折率の温度依存性を表すモデルを求めることが出来た。一方で CFRP 積層板のひずみ測定では、一次硬化での残留応力が明確に現れず、またポストキュア過程において FBG センサが剥離し測定が出来なかった。そのため、硬化度 80%以上での測定や 180℃硬化のプリプレグの使用、埋め込み方の改良をする必要があると考えた。

参考文献

- (1) 藤岡玄紘, 高坂達郎, 日本複合材料学会誌, 47, pp.116-125, (2021).