

# CFRP 積層板の成形誘起変形

## Molding induced deformation of CFRP laminates

知能機械システム工学コース

先端機械・航空材料工学研究室 1225017 川上 明哲

### 1. 諸言

繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics : FRP)とは炭素 (Carbon) やガラス (Glass) などの繊維を合成樹脂 (Plastics) に含ませた複合材料である。現在では FRP が軽量で高い強度、錆びない特性などを持っていることから、幅広い分野で用いられるようになってきている。FRP 積層板の成形では金型が曲率の強い曲面を持っている場合は、脱型後に spring-in あるいは spring-out と呼ばれる意図しない変形が残留応力の影響で生じることがある。さらに、非対称積層板は成形過程で面外変形を生じることがよく知られている。そのため近年では、脱型後に生じる成形誘起変形を考慮した金型設計の需要が高まっている。この FRP 積層板の成形誘起変形の原因には、各層の物性が異なるために生じる熱変形や、温度分布が生じる事によって樹脂の硬化度が一樣にならないことなどが挙げられる。

これまでの研究では、主として加熱成形における熱変形を原因として、FRP 積層板の成形誘起変形を計算する手法が提案されてきた。しかしながら、熱硬化性樹脂基 FRP の硬化反応で生じる硬化収縮が成形誘起変形に与える影響については、十分に明らかになっていない。以上より本研究では、硬化収縮が FRP 積層板の成形誘起変形に与える影響を明らかにすることを目的として、非対称クロスプライ積層板の成形中に生じるひずみ測定を、FBG(Fiber Bragg Grating)光ファイバセンサ<sup>(1)</sup>を埋め込むことで測定した。また、得られた結果の考察を行うために、各層を等方性と仮定した粘弾性モデルを用いて硬化過程における成形誘起変形解析を行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 非対称 CFRP 積層板の成形方法

本研究では、樹脂が含浸されていない一方向炭素繊維シートを強化繊維として CFRP 積層板を作製した。母材としてエポキシ樹脂 (三菱ケミカル (株), 主剤 801N, 硬化剤 3080, 混合比 100:45) を用いた。一方向炭素繊維を繊維方向と直行方向にそれぞれ 20×140mm のサイズに 3 枚ずつカットした。図 1 に示すように、アルミニウム板と PTFE で構成した型上でハンドレイアップ法によってエポキシ樹脂を炭素繊維に含浸させて成形した。CFRP 積層板は 0 度層を 3 層、90 度層を 3 層の構成で積層した。なお、CFRP とアルミニウム板の間には固着を防ぐために薄いテフロンシート (厚さ 0.05mm) を配置した。積層後の CFRP の上から同サイズの PTFE 板を置き、その上から重り (0.16kg) を加えて余分な樹脂を除去した。その後、重りを除去して炉の中で熱を加えて硬化させた。

#### 2.2 成形誘起ひずみ測定方法

本研究では CFRP 積層板の層間に生じる成形誘起ひずみを、層間に埋め込んだ FBG 光ファイバセンサを使用して測定した。図 2 に FBG 光ファイバセンサおよび熱電対の配置位置を示す。FBG 光ファイバセンサの埋め込み位置は、CFRP 積層板の 0 度層の上から 1/2 層間と、0/90 度層間 (3/4 層間) である。また、熱電対はセンサに干渉しないように、2/3 層間に配置した。成形プロセスでは、室温 25°C から昇温速度 2.5°C/min. または 1.0°C/min. で 100°C まで試験片を加熱し、100°C を三時間維持した後に 30°C まで冷却させた。

図 3 に FBG センサによるひずみ測定装置の概略図を示す。広帯域光源 (SLD, 中心波長 1550nm) から出た光はサーキュレータを通して埋め込まれた FRG に入射し、ブラッグ回折波長を中心波長に持つ単色光としてセンサから反射する。この反射光を、光スペクトラムアナライザを用いて測定し、中心波長のシフト量を得る。波長シフトと温度変化はひずみと線形を持つため、波長シフトからひずみを換算することができる。5 秒間隔で測定を行い、成形中のひずみ変化を求めた。なお、本センサのひずみ測定精度は 1 $\mu\epsilon$  であった。

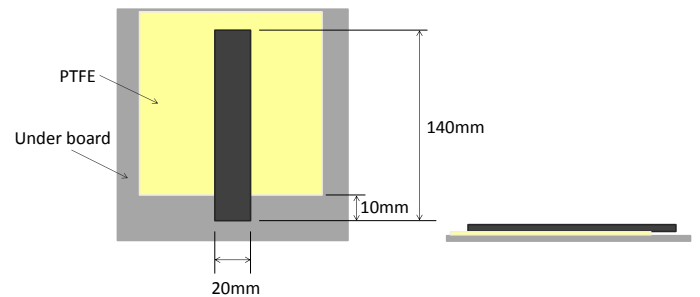


Fig.1 Schematic view of molding method of [90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] CFRP laminates.

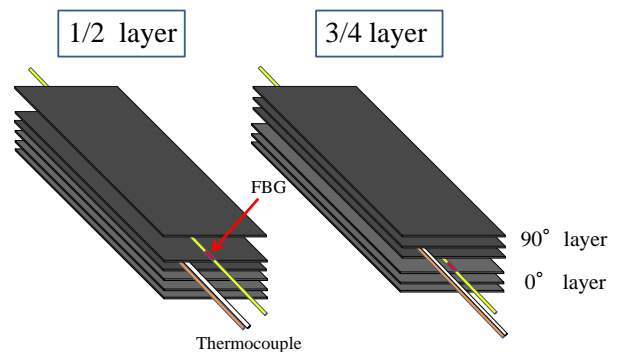


Fig.2 Schematic view of embedding of FBG sensor and thermocouple in [90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] CFRP laminates

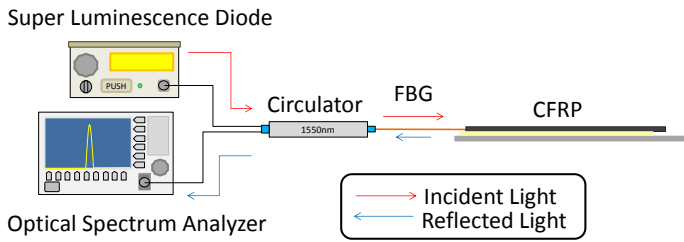


Fig. 3 Measurement system of stain of CFRP laminates by FBG sensors during cure process.

### 3. 成形誘起変形シミュレーション

得られた実験結果を検証するために、本研究では CFRP を等方性粘弾性体と仮定して、試験体を模擬したモデルについて FEM により構造・硬化度の連成解析を行った<sup>(2)</sup>。その構成方程式は以下の式(1)に示す。

$$\sigma(t) = \int_0^t 2G(\alpha_i \tau - \tau') \dot{\epsilon} dt' + I \int_0^t K(\alpha_i \tau - \tau') \dot{\phi} dt' \quad (1)$$

$$G(\alpha, t) = G_0 A_\alpha (\alpha) \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right\} \quad (2)$$

また硬化プロセス中の粘弾性特性式を硬化度をパラメータとするプロ-二級数で式(2)のように表した。ここで、 $\sigma$  は応力テンソル、 $\epsilon$  は偏差ひずみテンソル、 $G$  はせん断弾性率、 $K$  は体積弾性率、 $I$  は単位テンソル、 $\phi$  は体積ひずみ、 $\tau$  は擬似時間、 $g_i$  はプロニー級数の係数、 $\tau_i$  は緩和時間、 $A_\alpha$  は正規化長期弾性率の硬化度依存性を表す係数であり、本研究では剛性シフトファクタと呼ぶ。硬化度の計算には以下に示す Kamal モデル(式(3)、(4))を用いた。

$$\dot{\alpha} = (k_1 + k_2 \alpha^m) \times (1 - \alpha)^n \quad (3)$$

$$k_1 = A_1 \exp(-E_1/RT), \quad k_2 = A_2 \exp(-E_2/RT) \quad (4)$$

ここで、 $R$  は気体定数、 $E_1$ 、 $E_2$  は活性化エネルギー、 $m$ 、 $n$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  は材料定数である。

以上の式を差分化し、ユーザーサブルーチンとして汎用有限要素法ソフトウェア ABAQUS に組み込んだ。本研究では、0 度層と 90 度層のヤング率がそれぞれ 130GPa、10GPa となるようにモデル材の物性を求めた。また 0 層と 90 度層に生じる硬化収縮ひずみはそれぞれ樹脂の 0.01、0.1 倍とし、プロ-二級数のパラメータは樹脂と同じものを使用した。また解析に使用した FEM モデルを図 4 に示す。FEM モデルは CFRP 積層板の 1/2 のサイズであり、このモデルの解析条件には 25℃ から 100℃ まで昇温速度 2.5℃/min. と 1.0℃/min. のパターンを使用している。また硬化度 0.686 でのひずみを 0 とし、経過時間および温度 (2.5℃/min. では 2709[s]、100℃、1.0℃/min. では 5014[s]、87.675℃) からのひずみ計算をした。

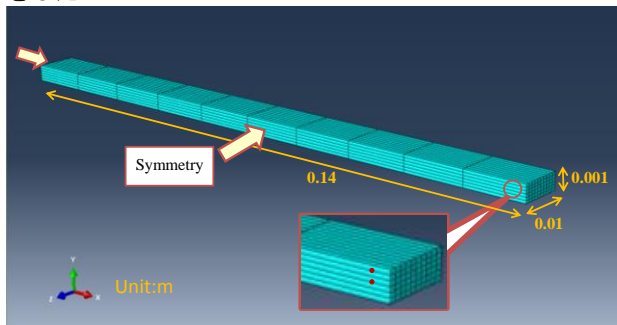


Fig. 4 FEM model of [90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>] CFRP laminates

### 4. 成形誘起ひずみ測定結果

図 5 に昇温速度 2.5℃/min. で加熱硬化させた CFRP 積層板のひずみ変化を温度とともに示す。なお、ひずみからは温度依存性が排除されており、また硬化度が 0.686 に達した時のひずみを 0 として換算した。図 5 より、90 度層 (1/2 層間) のひずみは、温度が緩やかに上昇しているにもかかわらず硬化収縮によって減少していることが分かった。

一方で、0/90 層間のひずみはほとんど 0 となっていた。これは、硬化収縮によって 90 度層では収縮するが、0 度層の硬化収縮は小さいことを示している。これより、硬化収縮によって反りが発生したと考えられる。冷却区間においてひずみがジャンプしている理由は、冷却時の熱ひずみによって金型と試験片にスリップが生じたためではないかと思われる。冷却後の最終的なひずみは、1/2 層間と 0/90 層間で大きく異なることにより、大きな反りが発生したことを示している。

図 6 に昇温速度 1℃/min. で加熱硬化させた CFRP 積層板のひずみ変化を温度とともに示す。図 5 と同様に、ひずみからは温度依存性が排除されており、また硬化度が 0.686 に達した時のひずみを 0 として換算した。なお、1/2 層間と 3/4 層間のデータでは初期温度が互いにやや異なっているため、硬化度が 0.686 に達した時間も多少異なっていた。図 6 より、昇温速度 2.5℃/min. の場合と異なり、温度が一定になるまで熱膨張が現れ、その後は硬化収縮がほとんど生じないことが分かる。この理由は、昇温中に硬化進展によって剛性が大きくなるためである。その一方で、100℃ に達したときには硬化度は 0.9 以上と大きくなっており、硬化反応終了までに現れる硬化収縮量が小さくなったことが分かる。また、昇温速度 2.5℃/min. の場合とは異なって、1/2 層間のひずみは 3/4 層間のひずみよりも大きくなった。これは、昇温速度 2.5℃/min. の場合とは逆方向に反りが生じたことを意味している。硬化終了時の反りによる 1/2 層間と 3/4 層間のひずみ差は昇温速度 2.5℃/min. では約 111μ $\epsilon$ 、昇温速度 1.0℃/min. では約 124μ $\epsilon$ 、冷却終了時の反りによる 1/2 層間と 3/4 層間のひずみ差は 2.5℃/min. は約 1181μ $\epsilon$ 、1.0℃/min. では約 1230μ $\epsilon$  であった。すなわちこの結果は冷却後の反りの大きさと比べて 1 割程度の変形が、硬化プロセスで生じている可能性があることを示している。

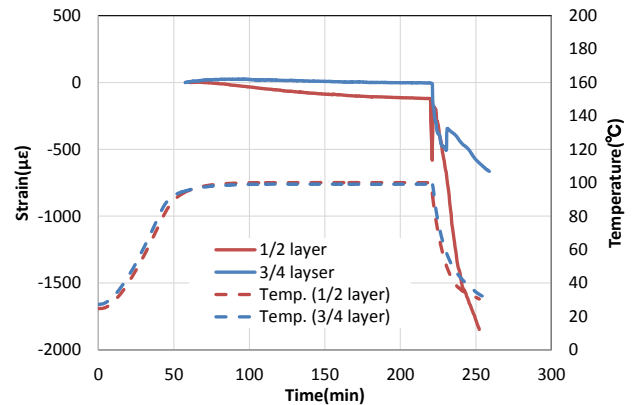


Fig.5 Strain and temperature of CFRP laminates during molding process (2.5℃/min.)

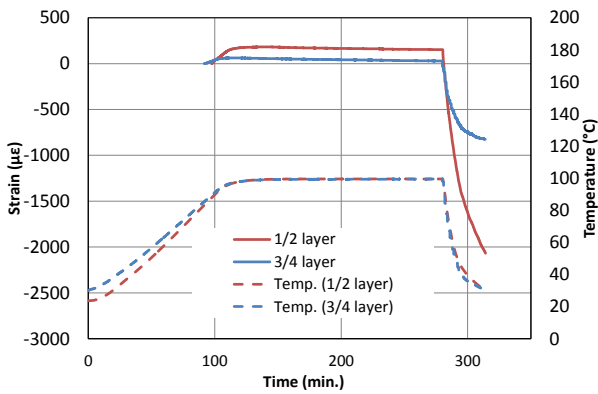


Fig.6 Strain and temperature of CFRP laminates during molding process (1°C/min.)

### 5. 成形誘起変形シミュレーション結果

解析結果を昇温速度 2.5°C/min.および 1°C/min.のそれぞれについて、図 7 および 8 に示す。図 7 より、昇温速度 2.5°C/min.の場合は 1/2 層間のひずみに硬化収縮が生じ、図 5 とよく似た振る舞いを示すことがわかる。一方図 8 より、昇温速度 1°C/min.の場合は最初の熱変形に差が現れ、それが原因で硬化終了時には 1/2 層間のひずみの方が大きくなること分かる。この振る舞いも図 6 に示した実験結果とよく一致している。この結果から本解析手法によって硬化過程における積層板の変形予測が可能であることが分かった。

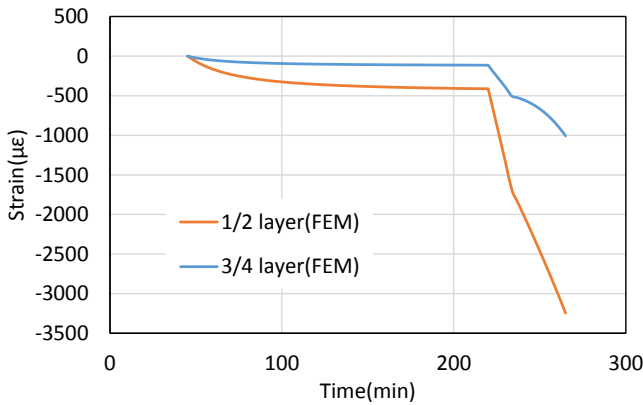


Fig.7 Strain of CFRP laminates calculated by FEM during molding process (2.5°C/min.)

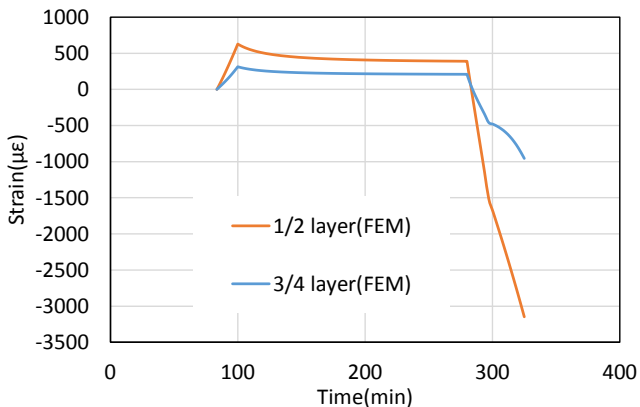


Fig.8 Strain of CFRP laminates calculated by FEM during molding process (1°C/min.)

### 6. 結 言

本研究では、非対称 CFRP 積層板の成形誘起変形について、埋め込み FBG センサと FEM 解析を用いて実験のおよび解析的な検証を行った。その結果、最高温度が同じであっても、昇温速度が異なる場合には、硬化プロセスで生じる反りの振る舞いは大きく異なり、結果として冷却後の反りに小さい影響を与えることが分かった。また、実験結果と解析結果の振る舞いがよく一致している事実は、硬化過程で生じる非対称積層板の反りは、硬化収縮と熱膨張、剛性によって支配することを意味している。

### 文献

- (1) 高坂達郎, 逢坂勝彦, 澤田吉裕 “光ファイバひずみセンサによる樹脂の硬化収縮ひずみ測定”, 日本機械学会論文集, Vol. 60, No. 5 (2011), pp. 432-438.
- (2) 高坂達郎, 逢坂勝彦, 澤田吉裕 “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”, 日本機械学会論文集, Vol. 61, No. 7 (2012), pp. 648-653