

# K-0617 CFRP 積層板の室温形状の熱粘弾性解析

Thermoviscoelastic Analysis of Room - Temperature Shapes of CFRP Laminate

○正 清水 理能 (富山大) 正 五嶋 孝仁 (富山大)

Masayoshi SHIMIZU, Toyama University, 3190, Gofuku, Toyama-shi, Toyama  
Takahito GOSHIMA, Toyama University

In the present paper, room-temperature shapes of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates are analyzed theoretically by means of classical lamination theory, correspondence principle and anisotropic thermoviscoelastic constitutive equations. The analyzed model was CFRP laminate plate having a stacking sequence  $[0^\circ_n/90^\circ_n]$ . And shapes were calculated under various condition of cooling time.

**Key Words :** Structural Analysis, Composite Material, Reinforced Plastics, Anisotropy, Thermal Visco Elasticity, Thermal Environment

## 1. 緒 言

近年、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)積層板は様々な用途に使用されている。CFRP 積層板は樹脂と繊維の複合材料であり、長繊維で強化した CFRP は繊維方向を繊維に垂直方向でその機械的特性が異なる。そのため積層する繊維配向によっては線膨張係数の違いによってそりを生じ、設計とは異なる形状になることも考えられる。このため成形時に生じるそりの解析を行う必要がある。しかしながら CFRP は樹脂をマトリックスとしているため熱粘弾性挙動を示すことを考慮する必要がある。

そこで本研究では成型時に生じるそりの熱粘弾性解析を行うため、CFRP の熱粘弾性特性および線膨張係数を測定し、同定した異方性熱粘弾性構成方程式をもとに板理論および対応原理を用いて解析を行った。板の寸法および冷却条件を変えることにより生じる変位の解析を行い検討を行った。

## 2. CFRP の機械的特性

### 2.1 CFRP の熱粘弾性特性

試験片には炭素繊維/エポキシ樹脂から成る一方向プリプレグシート(東レ製, T300/#2500)を加圧成形したものを用いて、動的粘弾性測定器(オリエンテック製, RHEOVIBRON DDV-III-EA)を用い熱粘弾性特性の測定を行った。熱粘弾性理論における時間-温度換算則に従ってマスターカーブを作成した。得られた実験結果から  $20^\circ\text{C}$  を基準温度として換算した  $0^\circ$  方向と  $90^\circ$  方向の CFRP 試験片の動的弾性率  $E'$ ,  $90^\circ$  方向の試験片の損失弾性率  $E''$  のマスターカーブをそれぞれ周波数  $f$  に対してまとめたものを図 1 に示す。

### 2.2 CFRP の線膨張係数

線膨張係数を調べるため用いた CFRP は熱粘弾性測定に用いたものと同様である。測定には横型熱膨張計(真空理工, DL-7000Y-H)を用いて  $-150^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$  の温度範囲で、 $5^\circ\text{C}/\text{min}$  で昇温し、そのときの伸びを測定することにより線膨張係数を求めた。その結果、繊維方向の線膨張係数は高温域でも低温域でも一定で小さい値となった。それに対して繊維に垂直方向については、データは曲線となり  $-75^\circ\text{C}$ ,  $52^\circ\text{C}$ ,  $140^\circ\text{C}$  付近で線膨張係数の値が変わるため、それぞれの範囲での線膨張係数を求めた。その結果を表 1 に示す。ここで  $\alpha_L$  は繊維方向の線膨張係数、 $\alpha_T$  は繊維に垂直方向の線膨張係数である。

## 3. CFRP 積層板の構成方程式

CFRP を一定温度下の繊維方向、すなわち異方性主軸を  $x$  軸とする横等方性熱粘弾性体とすれば、応力成分  $\sigma_i$  とひずみ成分  $\epsilon_j$  の関係は複素弾性率  $C_{ij}(t, a_{T_0})$  を用いて一般的に次のように表すことができる。

$$\sigma_i = C_{ij}(0, a_{T_0}) \epsilon_j + \int_0^t C_{ij}(t - \tau, a_{T_0}) \dot{\epsilon}_j d\tau \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで  $t$  は時間である。ここでは一定温度環境下  $T$  にあることを仮定するため温度差により発生する項は無視されている。複素弾性率は温度時間換算則に従い、通常シフトファクター  $a_{T_0}$  により温度  $T$  あるいは時間  $t$  に対して変化する。具体的な構成方程式については文献<sup>(1)</sup>の通りである。

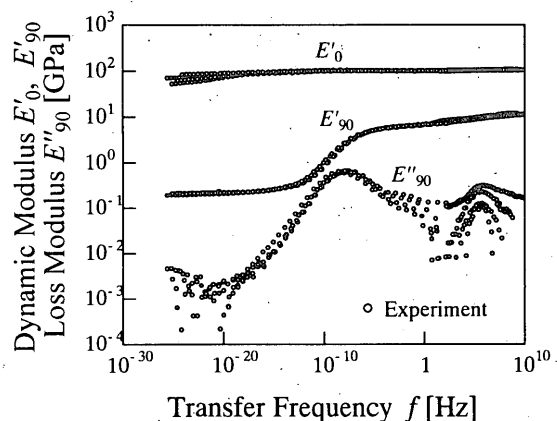


Fig. 1 Master Curve of Dynamic Modulus  $E'$  and Loss Modulus  $E''$

Table 1 Thermal Expansion Coefficient of CFRP

	$\sim -75^\circ\text{C}$	$-75^\circ\text{C} \sim 52^\circ\text{C}$	$52^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$	$140^\circ\text{C} \sim$
$\alpha_L$	$1.75 \times 10^{-6}$			
$\alpha_T$	$1.67 \times 10^{-6}$	$3.34 \times 10^{-6}$	$6.86 \times 10^{-5}$	$1.39 \times 10^{-4}$

#### 4. CFRP 積層板の室温形状解析

##### 4.1 理論解析

解析モデルは縦  $2a$ , 横  $2b$ , 厚さ  $2h$  の, 積層板中央に原点がおかれた  $(x, y, z)$  座標系において  $x$  軸方向を  $0^\circ$  方向として繊維配向を  $[0^\circ_n/90^\circ_n]$  とした CFRP 積層板とする.

ひずみエネルギー密度を式(2)とすると, ひずみエネルギー  $U$  は式(3)のように表すことができる.

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2} \bar{C}_{ijkl} \bar{\epsilon}_{ij} \bar{\epsilon}_{kl} - \bar{\beta}_{ij} \bar{\epsilon}_{ij} \Delta T \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{U} = \int \bar{\omega} dx dy dz \quad \dots\dots\dots (3)$$

このとき,  $\Delta T$  は温度変化,  $\bar{\beta}_{ij}$  は弾性定数と線膨張係数により求まる定数である.

ここでひずみエネルギーは未定係数  $\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4$  および CFRP の機械的特性を用いた関数を使うことで次式のように表せる.

$$\bar{U} = \int_{x=-a}^a \int_{y=-b}^b \int_{z=-h}^h \bar{\omega}(\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4, \bar{C}_{ij}, \bar{\alpha}_x, \bar{\alpha}_y, \Delta T, x, y, z) dx dy dz \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここでひずみエネルギーの変化量は次式のようになる.

$$\begin{aligned} \delta \bar{U} = & f_1(\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4) \delta \bar{g}_1 \\ & + f_2(\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4) \delta \bar{g}_2 \quad \dots\dots\dots (5) \\ & + f_3(\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4) \delta \bar{g}_3 \\ & + f_4(\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4) \delta \bar{g}_4 = 0 \end{aligned}$$

式(5)の 4 つの項がそれぞれ 0 となるように未定係数  $\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4$  を求める..

##### 4.2 数値計算条件

CFRP 積層板を成形する際に生じるそりを解析することとする. 解析において繊維配向が  $[0^\circ_n/90^\circ_n]$  で一辺が 200mm, 厚さが 3mm である非対称に積層した CFRP 積層板を解析モデルとした. 温度条件として成形温度である  $130^\circ\text{C}$  より室温である  $20^\circ\text{C}$  まで一定の割合で冷却するものとして解析を行った. なお冷却時間の条件は 1 時間および 10 時間とした.

##### 4.3 計算結果

$130^\circ\text{C}$  から  $20^\circ\text{C}$  へ冷却した場合での積層板の変形の数値結果を示す. 一辺が 100mm, 厚さが 3mm の積層板において, 冷却時間 1 時間および 10 時間での計算結果を図 2 に示す.

原点と積層板の角ではたわみは 0 となり,  $x=100, y=0$  で最大値を  $x=0, y=100$  で最小値をとる. この最大値と最小値を比較すると  $w_{\max} = -w_{\min}$  であった. また図 2 (a), (b) のたわみの最大値を比較すると 1 時間冷却の場合は  $w_{\max} = 2.093[\text{mm}]$  となり, 10 時間冷却の場合は  $w_{\max} = 2.081[\text{mm}]$  であった. このことから冷却時間を長くしたほうが成形時に生じるそりが小さいことがわかる.

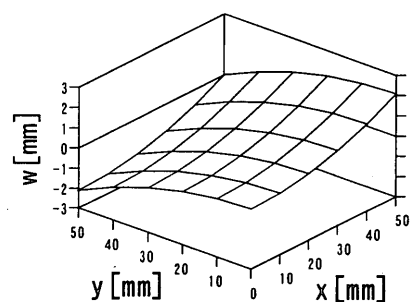
同様に一辺が 200mm, 厚さ 3mm の場合の解析結果を図 3 に示す. 一辺が 100mm の解析の結果と同様の履歴となっている. またこのときの最大値は  $w_{\max} = 8.363[\text{mm}]$  となり, 10 時間冷却の場合は  $w_{\max} = 7.755[\text{mm}]$  であった.

#### 文 献

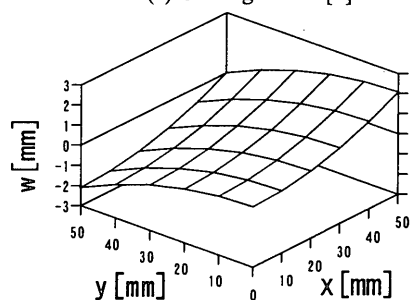
- (1) Shimizu, M., Adachi, T., Arai, M., Matsumoto, H.,

Experimental Mechanics (ed. Allison, I. M.), 2(1998), 1387-1392.

- (2) Hyer M. W., J. Composite Materials, 15 (1981), 296-310.

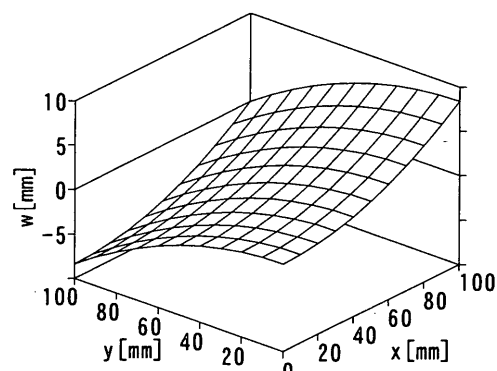


(a) Cooling Time 1[h]

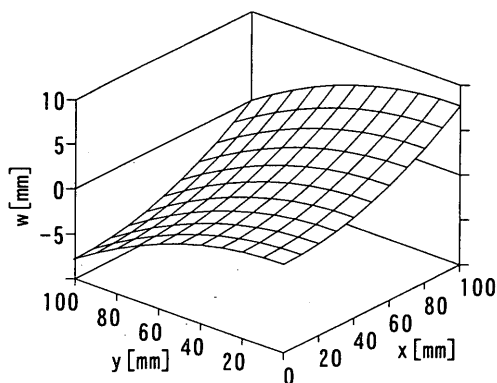


(b) Cooling Time 10[h]

Fig. 2 Room-Temperature Shape (100×100×3mm)



(a) Cooling Time 1[h]



(b) Cooling Time 10[h]

Fig. 3 Room-Temperature Shape (200×200×3mm)