

# FRP 積層板の成形ひずみ解析

知能材料学研究室 堀内貴文

## 1. 緒言

FRP 加熱成形時には熱ひずみと樹脂の硬化収縮ひずみが生じ、その結果、残留応力が発生する。これらは反りなどの残留変形を引き起こす原因となる。残留変形の予測ができれば成形品の材料強度の低下及び寸法精度悪化を防止することが出来る。本研究では有限要素法(FEM)を用いて、一方向ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)の成形中のひずみ解析を行った。母材となるエポキシ樹脂を硬化反応によって物性の変化する粘弾性体として取扱、FRP のユニットセルについて、熱および硬化収縮によって生じるひずみを汎用 FEM プログラム ABAQUS を用いて解析した。

## 2. 樹脂の構成式

本研究では樹脂を硬化によって物性の変化する線形等方性粘弾性体として扱い、その構成方程式は以下の式(1)に示す畳み込み積分の形で表される。

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

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、 $\mathbf{I}$  は単位テンソル、 $\phi$  は体積ひずみ、 $\tau$  は擬似時間(Reduced time)である。体積弾性率  $K$  は温度に対してほとんど変化しないことを考慮し、式(1)を偏差応力テンソル  $\mathbf{S}$  と圧力  $p$  の式にそれぞれ分けると

$$\mathbf{S}(t) = \int_0^t 2G(\alpha, t-\tau') \frac{d\mathbf{e}}{d\tau'} d\tau', p(t) = \int_0^t K(\alpha) \frac{d\phi}{d\tau'} d\tau' \quad (2)$$

となる。ここで、硬化中の粘弾性特性の式を

$$G(\alpha, t) = G_0 A_\alpha(\alpha) \left\{ 1 - \sum_{i=1}^{n_G} g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right\} \quad (3)$$

と定義すれば

$$\mathbf{S}(t) = 2G_0 \left( \tilde{\mathbf{e}} - \sum_{i=1}^{n_G} g_i \tilde{\mathbf{e}}_i \right) \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{e}} = \int_0^t A_\alpha(\alpha) \frac{d\mathbf{e}}{d\tau'} d\tau', \tilde{\mathbf{e}}_i = \int_0^t A_\alpha(\alpha) (1 - e^{-(t-\tau')/\tau_i}) \frac{d\mathbf{e}}{d\tau'} d\tau' \quad (5)$$

となる。ここで、 $\tilde{\mathbf{e}}$  は疑似偏差機械ひずみ、 $\tilde{\mathbf{e}}_i$  は疑似粘性ひずみである。式(2)と(4)が硬化中の粘弾性構成式であり、これを ABAQUS のユーザー関数 UMAT としてプログラミングし、計算を行った。

## 3. FEM モデルおよび境界条件

本研究ではエポキシ樹脂 (主剤 JER 801N 硬化剤 jERcure3080, 配合比は 100:45) と GFRP についてのユニットセルの FEM モデルを作成し、成形ひずみに関して解析を行った。GFRP のガラス繊維含有率 Vf を 30%, 40%, 50%, 60% として解析を行った。成形温度条件は一定昇温速度 0.75K/min (Vf 50% については dT/dt=0.375, 0.75, 1.875 K/min) で 25°C から 100°C まで加熱し、100°C を 3 時間維持し、2 時間かけて 25°C まで冷却させた。

## 4. 解析結果および考察

図 1 に dT/dt が 0.75K/min の時の GFRP の繊維方向の成形ひずみを示す。図より、Vf が 30% と低い場合でも、樹脂の硬化過程に生じる繊維方向のひずみはほとんどないことが分かる。また、熱収縮ひずみに関しては、Vf によって異なるひずみが生じている。しかし、その大きさは Vf が 30% の場合でも  $-220\mu\epsilon$  と小さい。図 2 に dT/dt が 0.75K/min の時の GFRP の繊維と直交方向の成形ひずみを示す。繊維方向のひずみと比べると著しく大きいひずみが生じている。

100 分までは硬化収縮と熱膨張が相殺しあい、小さな圧縮ひずみが生じている。冷却後は Vf が 60% でも  $-8186\mu\epsilon$  のひずみとなり、Vf が高い場合でも大きなひずみになることが分かる。図 3 に異なる温度条件による GFRP の繊維と直交方向の成形ひずみを示す。図より、硬化速度が遅くなると硬化収縮と熱膨張が相殺し合うため、硬化終了時の圧縮ひずみが小さくなることが分かる。よって、本研究で用いた材料では昇温時間が短い方が残留ひずみは大きくなることが分かった。

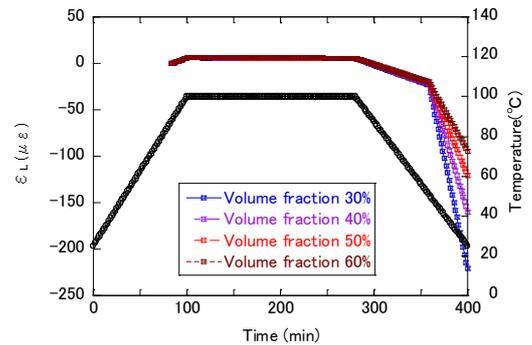


図 1 GFRP 繊維方向の成形ひずみ(dT/dt=0.75K/min)

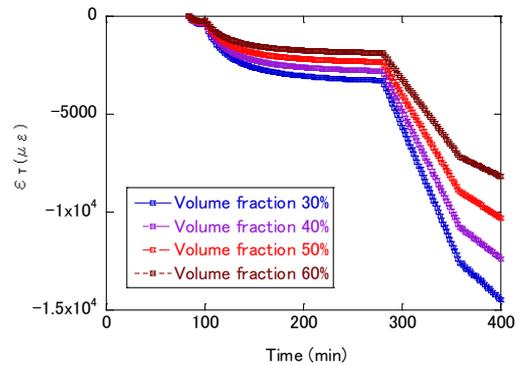


図 2 GFRP 繊維と直交方向の成形ひずみ(dT/dt=0.75K/min)

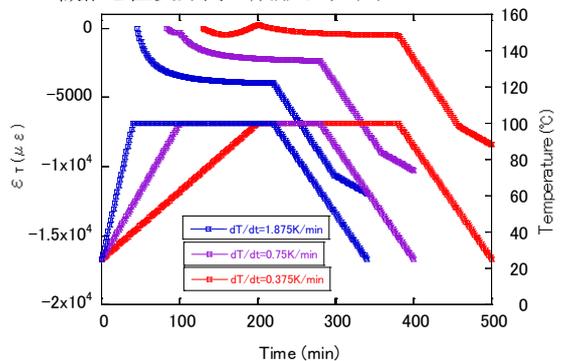


図 3 異なる温度条件による GFRP 繊維と直交方向のひずみ (Vf=50%)

## 5. 結言

本研究では、樹脂を硬化進展に伴い物性の変化する粘弾性体として GFRP の成形ひずみ解析を行った。その結果、GFRP 成形の繊維方向のひずみに対して、繊維と直交方向のひずみは著しく大きいことが分かった。また、昇温時間が短ければ残留ひずみが大きくなることも分かった。