

# 粘弾性 RVE モデルによる FRP の硬化変形解析

## Cure-Induced Deformation Analysis of FRP Based on a Viscoelastic RVE Model

航空宇宙工学コース

先端機械・航空材料工学研究室 大西 利桜

### 1. 緒言

繊維強化プラスチック (FRP) は、高比強度・高比剛性を有する材料として航空宇宙分野や自動車分野をはじめとする幅広い分野で用いられている。特に熱硬化性樹脂を母材とする FRP では、成形過程における樹脂の硬化および粘弾性挙動により、材料の力学特性が時間および硬化度に依存して変化することが知られている。FRP はミクロスケールでは繊維と樹脂からなる不均質材料である一方、マクロスケールでは均質体として扱われることが多い。このため、成形解析や構造解析においては、ミクロ構造を考慮したうえで、マクロな力学特性を適切に評価する材料モデルの構築が重要となる。とりわけ、硬化過程を考慮した FRP の力学挙動を精度良く表現するためには、樹脂の粘弾性特性とミクロ構造の影響を同時に取り入れた均質化手法が有効である。本研究では、一方向ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) を対象とし、粘弾性樹脂モデルを組み込んだ代表体積要素 (RVE) に基づく均質化解析を用いて、マルチスケール解析手法を確立することを目的とする。

### 2. 解析方法

#### 2.1 ミクロ方程式

成形中のエポキシ樹脂の粘弾性構成方程式には、以下の Maxwell モデルを用いていた。

$$G(t_T, \lambda) = G_0(\lambda) \left( 1 - \sum_{i=1}^{N_p} g_i \left( 1 - \exp \left[ -\frac{t_T}{\tau_i} \right] \right) \right) \quad (1)$$

ここで、 $t_T$  は任意温度での換算時間、 $\lambda$  は硬化度であり、 $N_p$  はプロニー級数の項数、 $g_i$  は各項の無次元係数、 $\tau_i$  は緩和時間である。本モデルでは、各項の剛性は硬化度に対して同じ比率で変化すると仮定し、各係数は完全硬化後のクリープ試験から求めた。

硬化度に対する完全緩和せん断剛性の変化は、レオメーターを用いた動的粘弾性測定試験より硬化度に比例することが分かった。温度が粘弾性特性に与える影響については、時間-温度換算則で表す。温度シフトファクタは、完全硬化後のクリープ試験から求め、以下の式を用いて計算した。

$$A_T = \exp \left[ -\frac{E_T}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_g} \right) \right] \quad (2)$$

本研究で用いたエポキシ樹脂は、主剤が jER801N、硬化剤が jERCURE3080 であり 1:0.45 の混合比で混ぜて 80°C で完全硬化させたものである。硬化収縮ひずみ  $\epsilon_\lambda$  はディラトメーターを用いて測定され、その結果から硬化度 70% 以上で硬化収縮ひずみが硬化度に比例するモデルを用いた。なお、レオメーターを用いた動的粘弾性測定試験では硬化させながら測定した。

#### 2.2 マクロ構成方程式

成形過程における FRP の力学挙動を、異方性の粘弾性モデルを用いて表す。ミクロモデルの樹脂と同様に、以下に示す一般化 Maxwell モデルに基づく構成方程式を用いた。

$$\begin{aligned} \sigma(t_T, \lambda) \\ = Q_\infty(\lambda) \epsilon(t) + \sum_{i=1}^{N_p} Q_i(\lambda) \int_0^{t_T} \exp \left( -\frac{t_T - s}{\tau_i} \right) \dot{\epsilon}(s) ds \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma$  は応力テンソル、 $\epsilon(t)$  はひずみテンソルである。 $Q_\infty$  は長時間後に残留する剛性テンソル、 $Q_i$  はそれぞれ第  $i$  項の剛性テンソルである。この構成式は、緩和剛性テンソル  $Q(t)$  を用いることで、次式のように表すこともできる。

$$Q(t, \lambda) = Q_\infty(\lambda) + \sum_{i=1}^{N_p} Q_i(\lambda) \exp \left( -\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (4)$$

#### 2.3 RVE モデルによる等価剛性計算

本研究では図 1 に示す代表体積要素 (Representative Volume Element: RVE) を用いた有限要素解析を行った。RVE 内のガラス繊維は周期的に配置されていると仮定し、繊維体積含有率は 50% とした。解析モデルは三次元モデルとして構築し、RVE の各境界面に周期境界条件を付与することで、隣接する周期セル間の変位連続性を満たしつつ、所定のマクロひずみ状態を再現した。この周期境界条件により、RVE に与えたマクロひずみが材料全体に様に作用する状態を表現することができる。

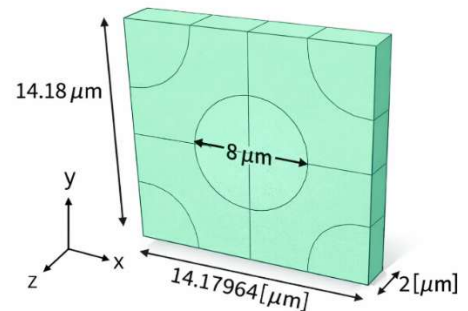


Fig. 1 Finite element model of the representative volume element (RVE) used for the homogenization analysis.

有限要素解析には汎用有限要素解析ソフトウェア ABAQUS を用いた。材料モデルとして、ガラス繊維は線形弾性体として扱い、樹脂は前節で示した線形粘弾性構成モデルに従うものとした。樹脂の粘弾性構成式を差分化し、ユーザーブルーチン (UMAT) として実装して、時間依存挙動および硬化度依存性を考慮した解析を行った。

### 3. 解析結果および考察

#### 3.1 均質化剛性

表2に、瞬時および十分時間が経った後の剛性を示す。表より、繊維方向の Q33 はほぼ一定であるが、繊維直交方向成分 Q11 では時間の経過とともに緩やかな剛性低下が確認されることが分かった。またせん断剛性成分である Q44 および Q66 は、時間の経過に伴って顕著な剛性緩和を示し、長時間後には正規化剛性がほぼゼロに近づいていることが分かった。この結果は、せん断変形においては繊維よりも樹脂の寄与が支配的であり、樹脂の粘弾性特性が FRP 全体の剛性低下に強く反映されることを示している。

Table. 2 Instantaneous and long-term homogenized stiffness components of unidirectional GFRP at full cure ( $\lambda = 1.0$ )

Element	Instantaneous [GPa]	Long term [GPa]
Q11	10.56	7.138
Q12	6.445	7.098
Q13	5.707	5.684
Q33	40.19	39.55
Q44	2.735	0.02748
Q66	3.491	0.06717

#### 3.2 硬化度による剛性変化

図3に、完全硬化状態( $\lambda=1.0$ )において、十分に時間が経過した後の長期剛性を瞬時剛性で正規化した各均質化剛性成分の硬化度依存性を示す。図より、Q11, Q12, Q13, Q33 の正規化長期剛性は、硬化度が変化してもほぼ一定の値を示しており、硬化度依存性が小さいことが分かる。一方 Q44 および Q66 では、硬化度の低下に伴って正規化長期剛性が顕著に低下しており、せん断剛性成分が硬化度に強く依存することが確認できる。

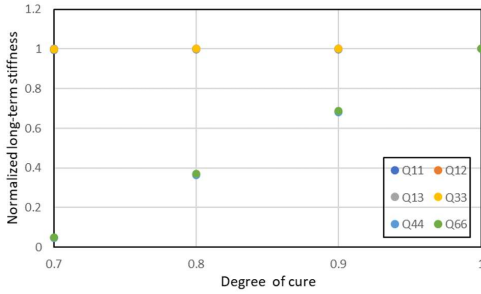


Fig. 2 Normalized long-term stiffness components of FRP as a function of degree of cure ( $T = 52^{\circ}\text{C}$ )

#### 3.3 マクロ計算による剛性緩和曲線

2.2 節で示したマクロ構成方程式を差分化し、FRP の粘弾性モデルを UMAT として実装した。マイクロモデルで得られた均質化物性を用いて、3次元1要素ソリッドモデルを用いて、緩和剛性の計算を行った。境界条件として、 $10^{-7}$ 秒で単軸ひずみ  $1000\mu\epsilon$  を与えて応力を計算し、与えたひずみで除することで剛性緩和曲線を求めた。なお、温度シフトファクタおよび緩和時間はマイクロモデルと同じものを用いた。

図3に Q11, Q12, Q66 の剛性緩和曲線を、マクロモデル及びマイクロモデルの結果を併せてしめす。グラフからマクロモデルの緩和曲線はマイクロモデルと完全に一致しており、作成したマクロモデルのアルゴリズムが正しいことが示された。

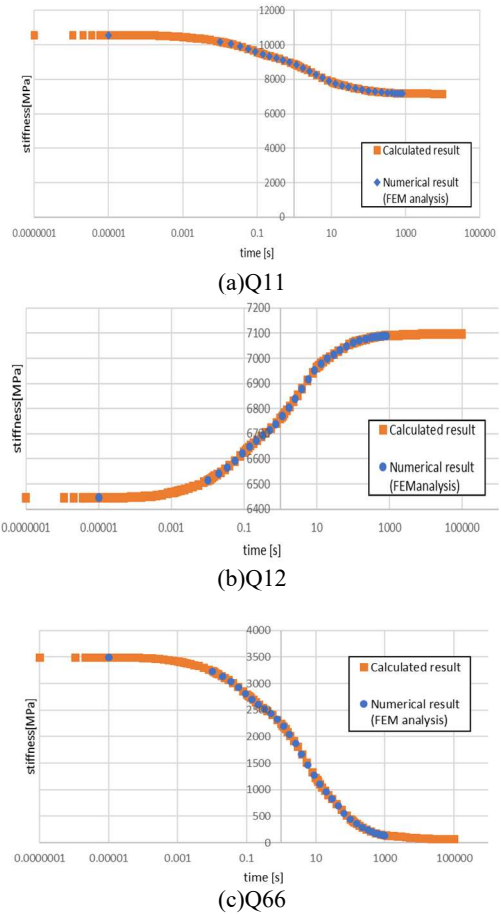


Fig. 3 Comparison of normalized long-term stiffness components of GFRP between finite element analysis and homogenized viscoelastic model

### 4. 結言

本研究では、粘弾性樹脂モデルを組み込んだ代表体積要素 (RVE) に基づく均質化解析を用いて、一方向ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) の成形過程における粘弾性力学挙動を評価した。また、得られたマイクロモデルの特性を用いてマクロモデルの応力-ひずみ応答を計算するマクロモデルの構成方程式を提案した。

マイクロモデルからは、各剛性要素に対して時間応答が異なることが分かった。また緩和量も各剛性要素に対して異なり、特にせん断成分に顕著に表れることが分かった。硬化度の影響については、成分ごとに異なることが分かった。さらに異方性 FRP の粘弾性応答を計算するマクロモデルの構成方程式を実装し、その計算結果が妥当であることを示した。以上により、マルチスケール計算を行うことが可能になった。

#### 参考文献

- (1) 寺田賢二郎, 平山紀夫, 山本晃司, “数値材料試験 有限要素法によるマルチスケール解析”, 丸善出版株式会社, 2021