

均質化法による一方向CFRP積層板の熱粘塑性特性の評価

CHARACTERIZATION OF VISCOPLASTIC PROPERTY OF UNIDIRECTIONAL
CFRP LAMINATE USING HOMOGENIZATION METHOD荒井 政大¹⁾, 諏訪 貴昭²⁾, 長谷 智行³⁾, 西村 正臣⁴⁾, 松田 哲也⁵⁾

Masahiro ARAI, Takaaki SUWA, Tomoyuki NAGAYA, Masaomi NISHIMURA and Tetsuya MATSUDA

- | | | | |
|-----------------------|-------------|----------------|-------------------------------------|
| 1) 信州大学工学部機械システム工学科 | (〒 380-8553 | 長野市若里 4-17-1, | E-mail: arai@shinshu-u.ac.jp) |
| 2) 新光電気工業株式会社 | (〒 381-2287 | 長野県長野市小島田町 80) | |
| 3) 信州大学工学部工学系研究科 | (〒 380-8553 | 長野市若里 4-17-1, | E-mail: nagaya@str.shinshu-u.ac.jp) |
| 4) 信州大学工学部機械システム工学科 | (〒 380-8553 | 長野市若里 4-17-1, | E-mail: nishimu@shinshu-u.ac.jp) |
| 5) 筑波大学大学院システム情報工学研究科 | (〒 305-8573 | つくば市天王台 1-1-1, | E-mail: matsuda@kz.tsukuba.ac.jp) |

In the present paper, viscoplastic constitutive equation of unidirectional carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is investigated by numerical approach based on finite element method (FEM) and homogenization theory. Thermo viscoplastic constitutive equation of epoxy resin have been estimated by uni-axial tensile tests and compression creep tests. The parameter of approximation equation of the constitutive equation was identified based on J_2 flow theory. The constitutive equation of the CFRP laminate can be identified by the thermo viscoplastic property of epoxy resin and elastic moduli of carbon fiber using finite element method and homogenization theory. The effect of strain rate, volume fraction of fiber and temperature for the viscoplastic property of CFRP was clarified by some numerical demonstration with the present method.

Key Words: Finite Element Method, Constitutive Equation, Viscoplasticity
Composite Material, Homogenization Method, Numerical Analysis, Strain Rate

1. 緒言

樹脂基複合材料は、優れた機械的特性、耐食性、耐熱性、絶縁性などの特徴を生かし、飛行機や自動車の構造材、スポーツ用具、電気・電子機器の外装材など、さまざまな用途で利用されている。中でも、強化材として長繊維型の炭素繊維を用いた強化プラスチック (CFRP) は、比強度、比剛性などに優れているため、航空宇宙分野を中心として幅広く利用されている。近年、複合材料のさらなる需要の拡大とともに、その材料特性の高精度な評価方法が求められている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

一般的に、複合材料は複数の材料から構成されるため内部構造に不均質性を有しており、その巨視的な構成式 (応力 - ひずみ関係式) は複合材料を構成する複数の材料の構成式と、材料特性は内部の微視的構造によって決まる。すなわち、マクロな材料特性を得るために複雑な微視的構造の影響を考慮した評価手法を用いなければならない。

材料の構成式の評価手法としては、マイクロメカニクスに基づく評価手法や古典的な複合則などが知られているが、円柱状、球状、楕円状といった限られた形状の強化材が周期的に配列するような場合のみに有効な手法であり、やや汎用性

に欠けると言わざるを得ない。他方、均質化法による評価手法は任意の形状の強化繊維や強化粒子を取り扱えるだけでなく、局所的な不均一性も表現可能な手法であり、構成式の評価に対して一般性の高い手法として近年注目を集めてきた。

CFRP 積層板のマトリクスに用いられている樹脂は、粘弾性特性や粘塑性特性を有しているため⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、その構成式が時間と温度に依存する。当然ながら、CFRP 積層板の構成式もマトリクス樹脂の粘塑性特性の影響を受けることになる。つまり、CFRP 積層板はクリープ特性や⁽⁹⁾、応力 - ひずみ特性のひずみ速度依存性といった、粘塑性材料に特有の性質を示すことになる。

そこで、本研究では一方向 CFRP 積層板の周期的な内部構造をユニットセルを用いてモデル化し、均質化法を用いた構成式の評価を行った。均質化法では個々の材料の非線形的な特性が、マクロ的な構成方程式に及ぼす影響を統一的に議論することが可能であり、マトリクス樹脂のひずみ速度依存性および温度依存性、すなわち樹脂の熱粘塑性特性を考慮した CFRP 複合材料の構成方程式の評価が可能となる。

本報ではエポキシ樹脂の粘塑性構成式を J_2 流れ理論⁽⁶⁾⁽⁷⁾ に基づいて定式化し、ひずみ硬化性を表す関数である流れ応

力をひずみ速度依存の形で表したのち、粘塑性ひずみ速度を相当応力と累積粘塑性ひずみの関数として表現した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。なお、粘塑性パラメータの導出にあたり、ひずみ速度を変化させた上で一軸引張試験を実施した。また、供試材料の温度を変化させたくてエポキシ樹脂の一軸圧縮クリープ試験を実施し、粘塑性特性の温度依存性をシフトファクターを用いて表現し、温度依存性を考慮した熱粘塑性構成式を導出した。

得られた樹脂の粘塑性構成式を用いて CFRP 積層板の構成式を均質化法によって評価し、その熱粘塑性特性について評価した。炭素繊維の体積含有率、ひずみ速度、環境温度が CFRP 積層板の材料特性に及ぼす影響について、数値シミュレーションを用いた詳細な評価を行った。

2. 粘塑性構成式

一般的に固体の変形量を表すひずみ ε は弾性ひずみ ε^e および塑性ひずみに分けられ、以下に示す形で表される。

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (1)$$

上式の関係は時間微分して速度形にしても変わることがないため、次式が成り立つ。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}_{ij}$ は全ひずみ速度、 $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ は弾性ひずみ速度、 $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ は塑性ひずみ速度を表す。一般的に塑性ひずみ速度には速度依存性や温度依存性などが含まれ、評価対象および評価方法によって異なる関数となる。本論文では式(2)の塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ を次式のように粘塑性関数 β_{ij} を用いて表す⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \dot{\varepsilon}_{ij} - \beta_{ij} \quad (3)$$

弾性体の応力、ひずみ関係を以下のように速度形で表す。

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}^e \quad (4)$$

上式に式(3)を代入することで粘塑性体の構成式が導出できる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} (\dot{\varepsilon}_{kl} - \beta_{kl}) \quad (5)$$

ここで、粘塑性関数 β_{ij} は以下に示す形で定義する⁽⁶⁾。

$$\beta_{ij} = \frac{3}{2} \dot{\varepsilon}_y \left[\frac{\bar{\sigma}}{g(\bar{\varepsilon}^{vp})} \right]^{1/m} \frac{\sigma'_{ij}}{\bar{\sigma}} \quad (6)$$

ここで、 m はひずみ速度感受性、 $\dot{\varepsilon}_y$ は基準ひずみ速度、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 σ'_{ij} は偏差応力、 $g(\bar{\varepsilon}^{vp})$ は相当粘塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^{vp}$ に依存する硬化関数(流れ応力)である。

3. 均質化法

本論文では複数の材料からなる周期的なマイクロ構造の変形特性を均質化法⁽¹¹⁾により取り扱う。一般的な均質化法の手順に従い、周期構造を代表するユニットセルにおけるマイクロ変位速度の導出過程を示す。ユニットセルの変形は、マクロ構造による変形とマイクロ構造の不均質性により生じる変形

の重ね合わせとして表現できる。マイクロ構造の変位速度をマクロ構造のひずみ速度勾配 \dot{F}_{ij} と擾乱変位速度 $\dot{u}_i^{\#}$ 、マイクロ構造の局所座標 y_i で表すと次式ようになる。以上の関係から、マイクロ変位速度は次のように表される。

$$\dot{u}_i = \dot{F}_{ij} y_j + \dot{u}_i^{\#} \quad (7)$$

次に、支配方程式を解くことで得られた特性関数を用いて均質化弾性係数および応力緩和関数を算出する。式(5)に式(7)を代入して整理すると、ユニットセルの構成方程式は特性関数 χ_i^{kl} 、 φ_i を用いて次のように表せる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

$$\dot{\sigma}_{ij} = a_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} - r_{ij} \quad (8)$$

ここで、

$$a_{ijkl} = D_{ijpq} \left(\delta_{pk} \delta_{ql} + \chi_{p,q}^{kl} \right) \quad (9)$$

$$r_{ij} = D_{ijkl} (\beta_{kl} - \varphi_{k,l}) \quad (10)$$

式(9)、式(10)に含まれる特性関数 χ_i^{kl} 、 φ_i はユニットセルに対する境界値問題を解くことによって得られる関数であり、ユニットセルの周期境界条件を満たすように決定する。

式(8)に対してユニットセルに関する体積平均を求めると、ユニットセルの構成式は次のように書ける。

$$\langle \dot{\sigma}_{ij} \rangle = \langle a_{ijkl} \rangle \langle \dot{\varepsilon}_{kl} \rangle - \langle r_{ij} \rangle \quad (11)$$

ここで、体積平均理論を用いるとユニットセル内の応力速度およびひずみ速度の体積平均はマクロ構造上の任意点における応力速度およびひずみ速度と一致すると仮定できる。そのため、応力速度およびひずみ速度は次のように書き表すことができる。

$$\dot{\Sigma}_{ij} = \langle \dot{\sigma}_{ij} \rangle, \quad \dot{E}_{kl} = \langle \dot{\varepsilon}_{kl} \rangle \quad (12)$$

式(12)の関係を式(11)に代入することで、マクロ構造での構成式を以下のように得る。

$$\dot{\Sigma}_{ij} = \langle a_{ijkl} \rangle \dot{E}_{kl} - \langle r_{ij} \rangle \quad (13)$$

よって、マクロ構造の均質化弾性係数 C_{ijkl} および応力緩和関数 R_{ij} は次式により求められる。

$$C_{ijkl} = \left\langle D_{ijpq} \left(\delta_{pk} \delta_{ql} + \chi_{p,q}^{kl} \right) \right\rangle \quad (14)$$

$$R_{ij} = \langle D_{ijkl} (\beta_{kl} - \varphi_{k,l}) \rangle \quad (15)$$

4. エポキシ樹脂の熱粘塑性構成式の評価

樹脂複合材料ではマトリクスであるエポキシ樹脂の非線形的材料特性がマクロ的な材料特性に影響を及ぼす。すなわち、エポキシ樹脂単体の粘塑性特性を把握する必要がある。本論文では、複数のひずみ速度下において引張試験を行うことでひずみ速度依存性を示すエポキシ樹脂の応力-ひずみ特性を求めた。

ところで、粘塑性構成式の温度依存性を評価する場合、恒温炉中にて引張試験を行うのが一般的である。しかしながら、引張試験では棒状ないしは帯状の寸法の大きな試験片を

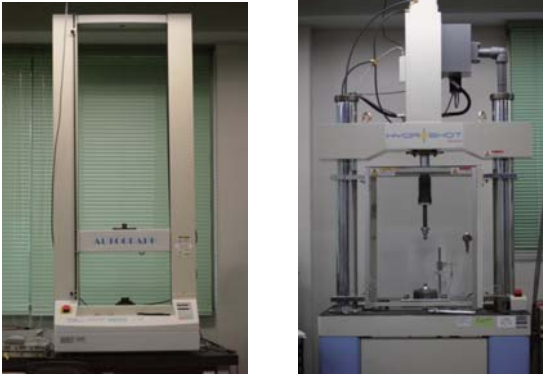


Fig. 1 Universal tensile testing machine AGS-J-5kN (left), High-rate tensile testing machine HITS-T10 (right).

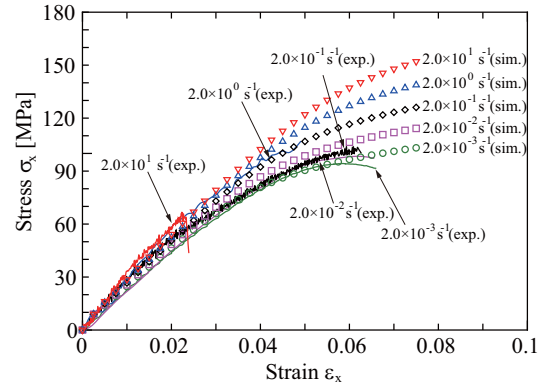


Fig. 2 Stress-strain curve in Epoxy resin obtained by uni-directional tensile tests and its numerical simulation.

用いるため、供試材の温度を均一にすることが難しく、温度が高い部位にて局所的なクリープ変形が発生するといった問題点がある⁽¹⁰⁾。そこで本論文では以下に述べるように試験片内の温度分布の影響が小さい小型の試験片を用いた圧縮クリープ試験⁽³⁾を行うことで構成式の温度依存性について評価・検討した。

4.1. 構成式のひずみ速度依存性

本報ではエポキシ樹脂にDENATool(ナガセケムテック株式会社)を用いた。真空引きによる脱泡処理を施したエポキシ樹脂を、オープンを用いて80°で4時間、120°で2時間硬化させてバルク材を作製した。エポキシ樹脂の応力-ひずみ特性に及ぼすひずみ速度依存性を評価するために、バルク材をJIS-7113(1/2)号形の試験片形状に加工して引張試験を実施した。

ひずみ速度が 2.0×10^{-3} , $2.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の場合については卓上型引張試験機 AGS-J-5kN(島津製作所, Fig. 1 左)を用い、ひずみ速度が 2.0×10^{-1} , 2.0 , $2.0 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ の場合には高速引張試験機 HITS-10T(島津製作所, Fig. 1 右)を用いた。

引張試験により得られたエポキシ樹脂の応力-ひずみ線図を Fig. 2 中に実線にて示す。粘塑性特性に起因して、ひずみ速度が増加するに伴い応力が増加する傾向が認められる。

エポキシ樹脂の試験結果より、本論文では式(6)における流れ応力を、志澤らの式⁽¹²⁾を参考にして次式のように近似することとした。

$$g(\bar{\varepsilon}^{vp}) = Y + \sigma_y \left(\frac{\bar{\varepsilon}^{vp}}{\varepsilon_y} \right)^n \tanh(k\bar{\varepsilon}^{vp}) \quad (16)$$

ここで、 σ_y は基準応力、 ε_y は基準ひずみ、 n は加工硬化指数、 Y, k は材料定数を表す。そして、式(16)を用いて試験結果を近似することによって式中の各粘塑性係数を同定する。カーブフィッティングにより同定された粘塑性係数を Table 1 に、また、同定された粘塑性係数により計算された各ひずみ速度における樹脂の応力-ひずみ関係を Fig. 2 上に丸、四角、三角等のシンボルにて示す。時間後半でやや誤差が生じる場合があるものの、本論文で提案された流れ応力の式(26)により、比較的良好な精度で各ひずみ速度の粘塑性特性が近似できることが確かめられる。

Table 1 Material constants of epoxy resin.

E [GPa]	3.59	$\dot{\varepsilon}_y$ [s^{-1}]	0.02
ν	0.36	σ_y [MPa]	90.0
n	0.2	Y [MPa]	10.0
m	0.05	k	100
ε_y	0.02		

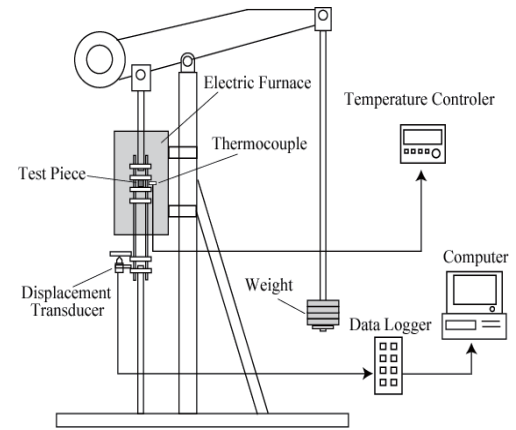


Fig. 3 Equipment of creep test.

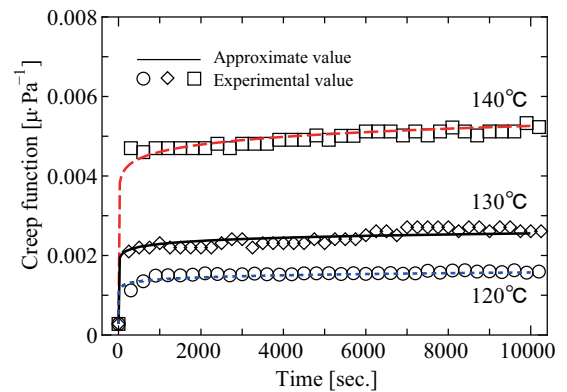


Fig. 4 Creep function of epoxy resin obtained by unidirectional creep test.

4.2. 構成式の温度依存性とシフトファクター

エポキシ樹脂の応力-ひずみ関係における温度依存性を評価するため、一軸圧縮クリープ試験を実施した。試験装置の概要は Fig. 3 に示すとおりであり、一定温度下にて重錘を用いて試験片に一定の荷重を与え、変位の時刻歴を計測し

Table 2 Shift factor of epoxy resin at 120, 130, 140°C.

Temp.[°C]	Shiftfactor $\alpha_{T_0}(T)$
120	3.54×10^{14}
130	7.79×10^{18}
140	9.37×10^{24}

た．試験片は 10mm×10mm×5mm の直方体形状であり，上下面を鏡面に研磨したうえで供試材とした．試験温度は 120, 130, 140°C，試験荷重は 196N とした．クリープ試験の結果を Fig. 4 に示す．グラフ縦軸のクリープ関数 (Creep function) は，単位応力あたりのひずみ [μ /Pa] として定義した．なお，グラフ中には後述の近似モデルによる計算結果も併記してある．

前節で定式化したひずみ速度依存の粘塑性構成式に対して温度依存の係数を乗じることでエポキシ樹脂の温度依存性を考慮する．本論文では，温度依存性を考慮したひずみ速度硬化則を次式のように定義する．

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \dot{\epsilon}_y \alpha_{T_0}(T) \left[\frac{\bar{\sigma}}{g(\bar{\epsilon}^{vp})} \right]^{1/m} \quad (17)$$

ここで， $\alpha_{T_0}(T)$ は熱粘弾性材料のシフトファクター⁽¹⁾⁽³⁾に相当する温度依存係数である．すなわち，室温状態における粘塑性構成式の流れ応力をマスターカーブとし，そこに温度依存係数を乗じることで高温領域の流れ応力における温度依存性を表現することとした．Fig. 4 に示すように式 (17) を用いてエポキシ樹脂のクリープ試験を近似することで， $\alpha_{T_0}(T)$ の値を求めた．シフトファクターの同定結果は温度 $T=120, 130, 140^\circ\text{C}$ のときのシフトファクターは Table 2 に示されるとおりである．

5. 数値シミュレーション

5.1. 解析条件

一方向 CFRP 積層板の一軸引張試験を均質化法および有限要素法により模擬することで CFRP 積層板の応力-ひずみ関係を算出し，本解析手法の妥当性について評価・検討を行う．本研究では，一方向 CFRP 積層板のミクロ構造を Fig. 5 に示されるような六角柱状のユニットセルを用いてモデル化した．六角柱モデルは繊維直交方向の面内等方性 (横等方性) を表現できるため，一方向 CFRP 積層板のモデル化に適している^(8, 3)．なお，炭素繊維の長手方向には一様な変形が生じるため， y_1 軸方向の要素長は相対的に短くするとともに，要素分割も 1 要素とした．本解析では，3 次元要素をすべて 4 面体一次要素に離散化した．

以下の解析では，応力 - ひずみ特性におけるひずみ速度依存性を評価する．そして，いずれの数値解析においても，マクロひずみ増分を $\Delta E_{33} = 1.0 \times 10^{-5}$ ，計算点数を 10000 とし，マクロひずみが 0.1 に達するまでの計算を実施した．ユニットセル内のエポキシ樹脂の粘塑性特性に関する材料特性は前章にて同定した値を用いた．炭素繊維 (三菱化学，リペラーク MRK-M2-40) の弾性定数を Table 3 に示す．

CFRP 積層板内の炭素繊維の占める割合が複合材料の熱粘塑性特性に及ぼす影響を評価するために，繊維体積含有率

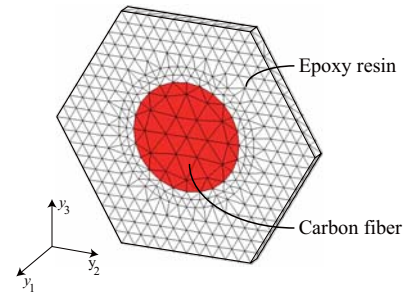


Fig. 5 Unit cell model of unidirectional CFRP laminate.

Table 3 Elastic moduli of carbon fiber MRK-M2-40.

E_L	217.3GPa
E_L	26.0GPa
G_{LT}	26.4GPa
ν_{LT}	0.337
ν_{TT}	0.530

の異なる 0, 20, 40, 60vol% の 4 種類のモデルを用いて数値解析を行った．ユニットセルモデルの要素数は，0, 20, 40, 60vol% のそれぞれにおいて，663, 1179, 1199, 1173 要素である．なお，当然ながら繊維体積含有率 0vol% の複合材料のマクロ場における熱粘塑性構成式はエポキシ樹脂単体の 1 次元熱粘塑性構成式に一致する．

5.2. マクロ構造における熱粘塑性特性

ユニットセルに対し，炭素繊維の軸方向 (0° 方向) にマクロひずみを作用させた際の，室温における相当応力と相当ひずみの関係を求めた．繊維体積含有率 (0, 20, 40, 60vol%) およびひずみ速度 ($\dot{E}_{33}=0.002, 0.2, 20\text{s}^{-1}$) を変化させた場合の解析結果を Fig. 6 に示す．

Fig. 6 に示されるように，エポキシ樹脂単体 (0vol%) の挙動は明らかな粘塑性特性を示すものの，繊維体積含有率が増加するに従い，粘塑性的特性は相対的に弱まり，線形的な応力-ひずみ関係を示すことが確かめられる．ひずみ速度依存性の影響に関しては，繊維含有率が増加するに従い，その影響は小さくなる．本論文で取り扱われている樹脂と繊維の組み合わせに関しては， 0° 方向の応力-ひずみ関係におけるひずみ速度依存性は極めて小さいものと考えて良い．

Fig. 7, 8 は繊維に対して 45° 方向，直交方向 (90° 方向) に一軸引張を行った場合の相当応力 - 相当ひずみ線図の解析結果である．繊維方向と荷重方向のなす角度が大きくなるほど，樹脂の粘塑性特性が顕著に現れることが確かめられる．

5.3. 一軸引張特性に及ぼす温度の影響

繊維直交方向 (90° 方向) にひずみ速度一定で一軸引張を行った場合について相当応力 - 相当ひずみと温度の関係を求めた結果を Fig. 9 に示す．なお，マクロひずみ速度は $\dot{E}_{33}=0.2\text{s}^{-1}$ とした．Fig. 9 にはエポキシ樹脂単体と，繊維体積含有率 20vol% の一方向 CFRP について，温度を 120, 130, 140°C の 3 通りに変化させた場合の数値シミュレーション結果を示している．

グラフより，温度が上昇するに従って応力の値が相対的に低下していることが確認できる．またその傾向は繊維含有率

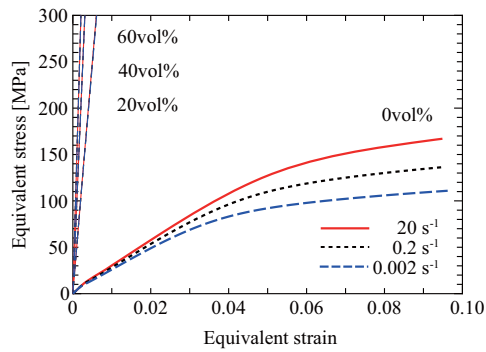


Fig. 6 Relation between macro stress and macro strain estimated by homogenization theory (0° direction).

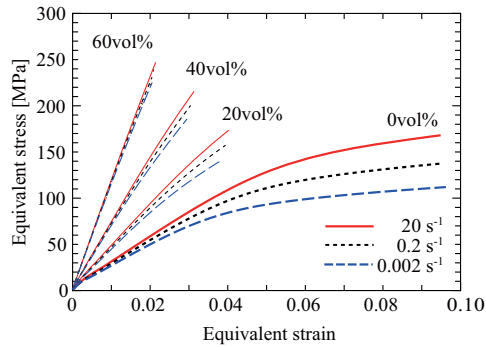


Fig. 7 Relation between macro stress and macro strain estimated by homogenization theory (45° direction).

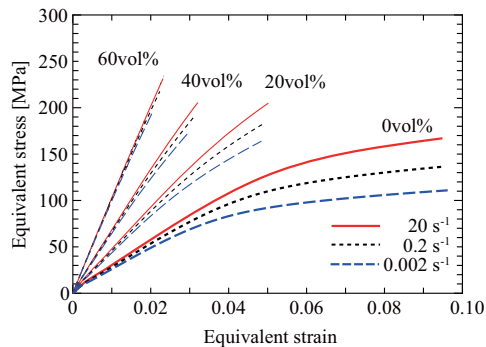


Fig. 8 Relation between macro stress and macro strain estimated by homogenization theory (90° direction).

が低下するに従って顕著となる．繊維含有率 20vol%の結果についてみると、高温時の場合はエポキシ樹脂と比べて炭素繊維の材料特性が支配的となることから、応力-ひずみ関係も概ね線形的な挙動に近づくことが確かめられる．

高温時における一軸引張特性のひずみ速度依存性を評価するために、繊維体積含有率 20vol%、環境温度 25、130°Cで、繊維直交方向にマクロひずみを作用させた際のひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_{33}=0.002, 0.2, 20 \text{ s}^{-1}$) ごとのマクロ構造における相当応力-相当ひずみ線図を Fig. 10 に示す．室温と比べて高温時ではひずみ速度依存性が大きく現れなかった．これは、Fig. 9 で確認されたように、エポキシ樹脂の応力分担が減少するためであると考えられる．

5.4. 一軸圧縮クリープ解析

均質化法による数値解析により一軸圧縮クリープ試験を模擬し、実験結果と比較することにより考察を行った．解析モデルおよび解析における材料パラメータは前節までと同様

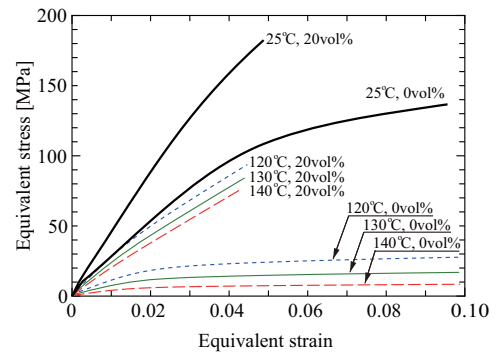


Fig. 9 Relation between macro stress and macro strain under several temperature ($\dot{\epsilon}=0.2 \text{ s}^{-1}$, 0 and 20vol%).

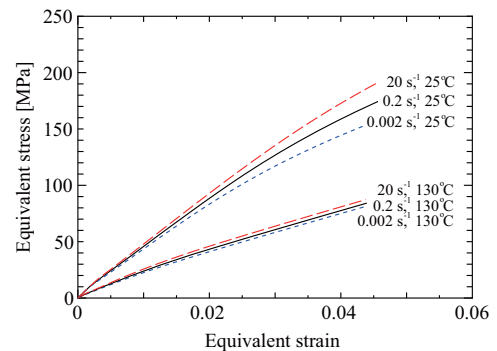


Fig. 10 Relation between macro stress and macro strain under several strain rate (20vol%, 25 and 130°C).

であり、ここでは体積含有率 40%、60%のモデルについて、環境温度 120°C、130°C、140°C の状態における繊維直交方向 (90° 方向) の一軸圧縮クリープ試験に関する数値シミュレーションを行った．

実験においては、先のエポキシ樹脂の試験片と同様に、10mm × 10mm × 5mm の板状試験片を用い、厚さ方向に圧縮荷重 196N (圧縮応力 1.96MPa) の条件で一軸圧縮クリープ試験を実施した．数値シミュレーションについても実験と同様に、繊維直交方向のマクロ応力を 1.96MPa としてクリープひずみの解析を行った．

Fig. 11 は、数値シミュレーションにより得られた繊維直交方向のクリープ特性に及ぼす繊維含有率と温度の影響を示している．繊維含有率が増加するとクリープひずみは相対的に減少する．また、温度の増加に伴いクリープひずみも増加し、その傾向は繊維含有率が低いほど顕著となることが確かめられる．

Fig. 12 は、130°C および 140°C における繊維直交方向 (90° 方向) のクリープ関数を一軸圧縮クリープ試験により測定した結果である．なお、実験に用いた一方向 CFRP 積層板の繊維含有率は約 60% である．現状、繊維強化複合材料のクリープ関数の測定は試験片ごとのばらつきが非常に大きく、再現性も乏しい状況であった．実際、Fig. 12 に示されるように、実際のクリープ変形量は $7 \mu\text{m}$ (ひずみ量 = 1400μ) 程度と非常に小さいため、測定値には非常に多くの誤差振動が重畳していることがわかる．比較的安定的にデータを得ることができた 130°C と 140°C における結果を示しているが、実験結果は数値シミュレーション結果の 2 倍を超える非常に大きな値

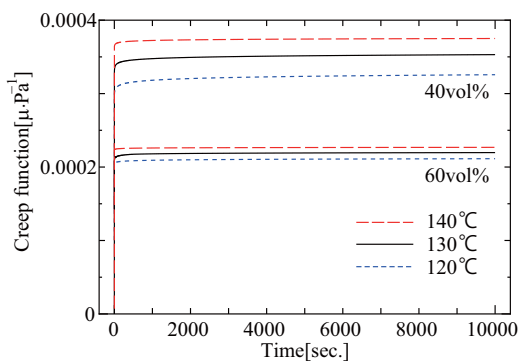


Fig. 11 Creep function of the CFRP laminate for 90° direction obtained by homogenization analyses.

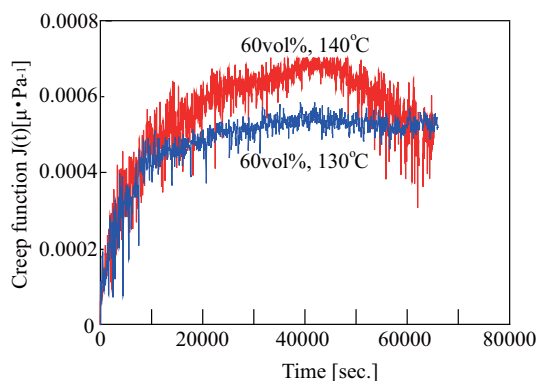


Fig. 12 Creep function of the CFRP laminate for 90° direction obtained by experimental creep tests.

を示している。また、定常変形に達するまでの時間は非常に長く、この点も理論値との大きな差異である。以上のように今回の実験により得られた粘塑性クリープ挙動に関して、理論値と大きな差異があることから、実験結果から本数値解析手法ならびに同定された熱粘塑性構成式の妥当性を検証することは難しい。

実験結果と計算結果の差異に関しては、繊維含有率の増加とともに試験片の剛性が増すことにより、変位の測定精度が低下することに起因するものと思われる。現状では変位変換機 (DTH-A-10, 共和電業) によって試験片上下面の相対変位を直接測定したうえでクリープひずみを求めているが、ひずみゲージを試験片に直接貼付するなど、より測定精度を高めるための工夫が必要であると考えられる。現状における解析結果と実験結果の比較は甚だ不十分な内容であるが、実験結果の精度改善については今後の課題とさせて頂きたい。

6. 結言

本研究では、有限要素法および均質化法を用い、CFRP 積層板の熱粘塑性構成式の評価する一連の定式化について数値シミュレーションを用いた基礎的な評価を実施した。

複数のひずみ速度下においてエポキシ樹脂の引張試験を実施するとともに、複数の環境温度下でのエポキシ樹脂の一軸圧縮クリープ試験を実施し、その応力 - ひずみ特性を評価した。得られた特性を J_2 流れ則に基づく粘塑性構成式を用いて近似し、さらに温度依存性に対してシフトファクターを用いた温度依存係数を導入することで、エポキシ樹脂の熱粘塑

性構成式に関する近似式を導出した。

得られた熱粘塑性構成式の近似式を用い、均質化法を用いて一方向 CFRP 積層板の熱粘塑性構成式を評価した。繊維直交方向の応力 - ひずみ関係における繊維体積含有率の影響、ひずみ速度の影響、温度の影響を数値シミュレーションを用いて明らかにし、本論文で提案した計算手法の有効性を示した。

クリープ試験結果と数値計算結果の比較からも明らかにように、本論文で示した熱粘塑性構成式の評価手法は、エポキシ樹脂の粘塑性変形特性を完全に記述しきれているとはいえない。CFRP 積層板の熱粘塑性特性をさらに高い精度でモデル化するためには、流れ応力の近似や温度依存係数の近似方法に、より一層の工夫が必要になると思われる。

参考文献

- (1) M. Arai, T. Sumida and M. Shimizu: Effect of Residual Stress on Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Laminates, *Journal of Thermal Stress*, Vol.30, 2007, pp.1099–1116.
- (2) M. Arai, Y. Noro, K. Sugimoto and M. Endo: Mode I and mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughened by carbon nanofiber interlayer, *Journal of Composites Science and Technology*, Vol.68, Issue 2, 2008, pp.516–525.
- (3) K. Kaku, M. Arai, T. Fukuoka, T. Matsuda: Evaluation of thermo-viscoelastic property of CFRP laminate based on a homogenization theory, *Acta Mechanica*, Vol.214, 2010, pp.111–121.
- (4) L. W. Morland and E. H. Lee: Stress Analysis for Linear Viscoelastic Materials with Temperature Variation, *Trans. Society of Rheology*, Vol.4, 1960, pp.233–263.
- (5) W. Araki, T. Adachi and A. Yamaji: Fracture Behaviour of Thermo-viscoelastic Materials: Epoxy Resin and Its Composite, *Recent Research Development in Applied Polymer Science*, Vol.3, 2006, pp.205–242.
- (6) 富田佳宏, 進藤明夫, 朝田誠治, 後藤広和: ひずみ速度依存性平面ひずみブロックの引張変形挙動の解析, *日本機械学会論文集 (A 編)*, Vol.54, No.501, 1988, pp.1124–1130.
- (7) 富田佳宏: 数値弾塑性力学, 養賢堂, 1990.
- (8) N. Ohno, X. Wu, T. Matsuda: Homogenized properties of elastic-viscoplastic composites with periodic internal structures, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.42, No.8, 2000, pp.1519–1536.
- (9) T. Matsuda, N. Ohno, H. Tanaka, T. Shimizu: Effects of fiber distribution on elastic-viscoplastic behavior of long fiber-reinforced laminates, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.45, 2003, pp.1583–1598.
- (10) Hiroaki Ito, Masahiro Arai, Tsutomu Kodera and Tomohiro Ino: Strain Rate and Temperature Dependencies on Strength Property of Glass Material, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.4, No.10, 2010, pp.1511–1519.
- (11) 寺田賢二郎, 菊池昇: 均質化法入門 (計算力学レクチャーシリーズ 1), 丸善, 2003.
- (12) 村上大介, 小林誠一, 鳥垣俊和, 志澤一之: ポリマの粘塑性大変形挙動に関する熱・力学的モデリングとシミュレーション (第 2 報, 流れ則に基づく尖り点モデルとその FEM 解析), *日本機械学会論文集 (A 編)*, Vol.68, No.688, 2002, pp.682–689.