# 均質化理論に基づく一方向CFRTPの熱弾粘塑性特性評価

## EVALUATION OF THERMO-ELASTO-VISCOPLASTIC PROPERTIES OF UNIDIRECTIONAL CFRTP BASED ON HOMOGENIZATION THEORY

後藤 圭太<sup>1)</sup>,野川 直翔<sup>2)</sup>,荒井 政大<sup>3)</sup>,松田 哲也<sup>4)</sup>

Keita GOTO, Naoto NOGAWA, Masahiro ARAI and Tetsuya MATSUDA

1) 名古屋大学大学院工学研究科	( <b>〒</b> 464-8603	名古屋市千種区不老町,	E-mail: goto@nuae.nagoya-u.ac.jp)
2) 名古屋大学大学院工学研究科	( <b>〒</b> 464-8603	名古屋市千種区不老町,	E-mail: nogawa.naoto@d.mbox.nagoya-u.ac.jp)
3) 名古屋大学大学院工学研究科	(〒 464-8603	名古屋市千種区不老町,	E-mail: arai@nuae.nagoya-u.ac.jp)
4) 筑波大学システム情報系	(〒 305-8573	つくば市天王台 1-1-1,	E-mail: matsuda@kz.tsukuba.ac.jp)

In the present paper, the thermo-elasto-viscoplastic behavior of carbon fiber reinforced thermoplastics (CFRTP) were evaluated using the homogenization theory for time dependent composites. For this, temperature dependence was introduced into the elasto-viscoplastic constitutive equation of the thermoplastic resin. The thermo-elastoviscoplastic properties of the thermoplastic resin was then evaluated by the unidirectional tensile tests under several strain rate and temperature conditions. Using the analysis method, the thermo-elasto-viscoplastic analysis of the unidirectional CFRTP was performed. From the results of some numerical demonstration, it was revealed that the unidirectional CFRTP showed nonlinear stress-strain relation depending on the loading direction, strain rates and temperature conditions.

**Key Words** : CFRTP, Unidirectional Reinforced Composite, Thermo-Elasto-Viscoplasticity, Homogenization Theory, Numerical Analysis

### 1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、エポキシなどの 樹脂を母材として,強化材に炭素繊維を用いた複合材料であ り,金属材料などの従来の構造材料に比べ高い比強度・比剛 性を有する.そのため,軽量化が要求される航空機や自動車 をはじめ,様々な分野で利用が進んでいる.しかし,現在使 用されている CFRP の多くは熱硬化性樹脂を母材としてオー トクレーブにより成形されるため,生産コストが高く,さら なる普及への課題となっている.そこで現在,成形加工時間 が比較的短く,低コストで大量生産に適する熱可塑性樹脂を 母材とした炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(CFRTP)が 注目されている<sup>(1)</sup>.CFRTP は CFRP の一種であるが,プ レス成形や溶着技術といった金属材料の成形加工技術が応用 できることから,自動車部品等への利用が期待されている.

しかし、CFRP は炭素繊維と樹脂母材からなる複雑な微 視構造を有している上に、各構成材料の力学的特性が大きく 異なるため、CFRP としての巨視的特性も非常に複雑なもの となる.また、CFRP の樹脂母材は単なる弾性体ではなく、 構成式が時間と温度の両方に依存する熱弾粘塑性体であるこ

2016年9月17日受付, 2016年11月1日受理

とも、CFRPの力学的特性を複雑化する一因となっている. 特に、CFRTPはCFRPの中でも成形温度が高く,熱可塑性 樹脂の力学的特性は温度によって大きく変化することから、 その温度依存性を正確に評価することが、CFRTP製成形品 の設計や運用といった観点から重要となる.CFRPの力学的 特性を材料試験により調査する研究は多数取り組まれてい るが<sup>(2)(3)</sup>、CFRPは構成材料の組合せや繊維含有率といっ た要因で特性が大きく変化するため、それぞれの構成に対し て、負荷条件や温度条件を変更して試験を行うことは多大な コストを要する.したがって、数値解析によってCFRPの熱 弾粘塑性特性を評価可能な手法を確立することは、工学的に 大きな意義がある.

CFRP の力学的特性を数値解析的に評価する際に有効な 手法の一つとして,ユニットセル解析に基づく均質化理論<sup>(4)</sup> が挙げられる.均質化理論とは,CFRP のようにその微視的 内部構造に周期性が仮定できる材料に対し,微視的周期構造 の最小構成単位であるユニットセルを定義することで,各構 成材料の力学的特性から,複合材料の巨視的な力学的特性を マルチスケール解析により評価することが可能な手法であ る.そのため,CFRP を構成する強化繊維と樹脂母材の力学 的特性を予め用意すれば,その繊維含有率や配向角,積層構 成等が異なる CFRP に対しても解析モデルの変更のみで解 析が可能であり<sup>(5)(6)(7)</sup>,材料設計の最適化が比較的容易と なると考えられる.

そこで本研究では、均質化理論に基づき一方向 CFRTP の 熱弾粘塑性特性を評価することを目的とした.まず、母材で ある熱可塑性樹脂の構成式として、弾粘塑性構成式<sup>(6)(7)(8)</sup> を基に温度依存性を取り扱うことが可能な形式へと拡張し、 時間および温度による影響を考慮した熱弾粘塑性体について のモデル化を試みた.つづいて、母材である熱可塑性樹脂に ついて、異なるひずみ速度条件および温度条件における単軸 引張試験を実施し、弾粘塑性特性とその温度依存性を同定し た.試験により得られた熱可塑性樹脂の熱弾粘塑性特性と、 炭素繊維の弾性特性を用いて、一方向 CFRTP の熱弾粘塑性 特性を均質化理論に基づく解析手法によって評価した.

## 2. 熱弾粘塑性材料に対する均質化理論

#### 2.1. 熱弹粘塑性構成式

本研究で用いる熱可塑性樹脂は等方熱弾粘塑性材料であ るとし、以下の構成式に従うとする.

$$\dot{\sigma}_{ij} = c_{ijkl} (\dot{\varepsilon}_{kl} - \beta_{kl}) \tag{1}$$

上式において, $\dot{\sigma}_{ij}$ および $\dot{\epsilon}_{kl}$ はそれぞれ微視的応力速度および微視的ひずみ速度, $c_{ijkl}$ および $\beta_{ij}$ は構成材料の弾性剛性テンソルおよび粘塑性関数をそれぞれ表す.また,()は時間 t に関する微分である.まず,温度の影響を考慮しない弾粘塑性構成式について考えると,粘塑性関数 $\beta_{ij}$ は次式で表現される<sup>(9)</sup>.

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

上式において, m はひずみ速度感受性,  $\dot{\epsilon}_y$  は基準ひずみ速 度,  $\sigma$  および  $\sigma'_{ij}$  は相当応力および偏差応力をそれぞれ表す. また,  $g(\bar{\epsilon}^p)$  は相当粘塑性ひずみ  $\bar{\epsilon}^p$  に依存する硬化関数であ り,  $J_2$  流れ則に基づき次式のように定める <sup>(10)</sup>.

$$g(\bar{\varepsilon}^p) = \sigma_y \left(\frac{\bar{\varepsilon}^p}{\varepsilon_y}\right)^n + C \tag{3}$$

ここで, n は加工硬化指数, σ<sub>y</sub> および ε<sub>y</sub> はそれぞれ基準応 力および基準ひずみであり, C は材料定数である.式(1),式 (2) および式(3) で表されるこれらの弾粘塑性構成式に対し, 本研究では c<sub>ijkl</sub>に含まれるヤング率 E と, m, n および C が 温度に依存して変化するパラメータとみなすことで,温度依 存性を考慮した弾粘塑性構成式,すなわち熱弾粘塑性構成式 を表現する.

#### 2.2. 時間依存均質化理論

本研究では解析対象として,炭素繊維と熱可塑性樹脂から なる一方向 CFRTP 積層板を考え,微視的周期構造の最小構 成単位であるユニットセル Y を定義する.ユニットセルにお ける微視的変位速度  $\dot{u}_i$  は,巨視的変位速度  $\dot{F}_{ij}y_j$  と擾乱変 位速度  $\dot{u}_i^{\sharp}$ の和として次式で表すことができる.

$$\dot{u}_i = \dot{F}_{ij} y_j + \dot{u}_i^{\sharp} \tag{4}$$

ここで、 $F_{ij}$ は巨視的一様変形の勾配を表す. $\dot{u}_i^{\sharp}$ はユニット セルを単位として周期的に分布しており、これはY – 周期 性と呼ばれる.同様に微視的ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ についても、巨 視的ひずみ速度 $\dot{E}_{ij}$ と擾乱ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{\sharp}$ の和として次式の ように表現される.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{E}_{ij} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{\sharp} \tag{5}$$

ここで, $\dot{E}_{ij}$ および $\dot{\varepsilon}_{ij}^{\sharp}$ は以下の関係を満たす.

$$\dot{E}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \dot{F}_{ij} + \dot{F}_{ji} \right) \tag{6}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\sharp} = \frac{1}{2} \left( \dot{u}_{i,j}^{\sharp} + \dot{u}_{j,i}^{\sharp} \right) \tag{7}$$

上式において,(), $_i$ は直交座標系  $y_i$ に関する微分を表す.

また,ユニットセルにおける微視的応力の釣合式は,速度 系で次式のように表される.

$$\dot{\sigma}_{ij,j} = 0 \tag{8}$$

式(8)は,部分積分および発散定理を適用し,さらに境界積 分項の周期性を考慮することで,次の弱形式へと変換できる.

$$\int_{Y} \dot{\sigma}_{ij} v_{i,j} dY = 0 \tag{9}$$

ここで、v<sub>i</sub> は擾乱変位速度場の任意の変分である.

各構成材料は前節で述べた構成式(1)に従うとすると,式(9)に式(1)および式(5)を代入することで,次式が得られる.

$$\int_{Y} c_{ijpq} \dot{u}_{p,q}^{\sharp} v_{i,j} dY = -\dot{E}_{kl} \int_{Y} c_{ijkl} v_{i,j} dY + \int_{Y} c_{ijkl} \beta_{kl} v_{i,j} dY$$
(10)

式 (10) は, 擾乱変位速度  $u_i^{\sharp}$  に関して次の解を有している.

$$\dot{u}_i^{\sharp} = \chi_i^{kl} \dot{E}_{kl} + \varphi_i \tag{11}$$

ここで $\chi_i^{kl}$ および $\varphi_i$ は特性関数と呼ばれるY – 周期関数で, 以下に示す境界値問題を解くことにより得られる.

$$\int_{Y} c_{ijpq} \chi_{p,q}^{kl} v_{i,j} dY = -\int_{Y} c_{ijkl} v_{i,j} dY$$
(12)

$$\int_{Y} c_{ijpq} \varphi_{p,q} v_{i,j} dY = \int_{Y} c_{ijkl} \beta_{kl} v_{i,j} dY$$
(13)

これらの境界値問題 (12) および (13) より算出された特性 関数  $\chi_i^{kl}$  および  $\varphi_i$  を用いて, 微視的応力発展式と巨視的構 成式がそれぞれ次のように導かれる <sup>(8)</sup>.

$$\dot{\sigma}_{ij} = a_{ijkl} \dot{E}_{kl} - r_{ij} \tag{14}$$

$$\dot{\Sigma}_{ij} = \langle a_{ijkl} \rangle \, \dot{E}_{kl} - \langle r_{ij} \rangle \tag{15}$$

上式において、〈〉は、ユニットセルに関する体積平均を意味 し、 |Y| をユニットセルの体積とすると、〈 $\sharp$ 〉 =  $|Y|^{-1} \int_{Y} \sharp dY$ と定義される.また、 $a_{ijkl}$ および $r_{ij}$ はそれぞれ

$$a_{ijkl} = c_{ijpq} \left( \delta_{pk} \delta_{ql} + \chi_{p,q}^{kl} \right) \tag{16}$$

$$r_{ij} = c_{ijkl} \left( \beta_{kl} - \varphi_{k,l} \right) \tag{17}$$

であり、 $\delta_{ij}$ は Kronecker のデルタを表す.

なお,境界値問題 (12) および (13) は,ユニットセルに Y – 周期境界条件を適用することで,一般に有限要素法を用いて 解くことが可能である.

#### 3. 熱可塑性樹脂の熱弾粘塑性特性評価

#### 3.1. 試験条件

熱可塑性樹脂の熱弾粘塑性特性を同定するため,異なるひ ずみ速度条件および温度条件における単軸引張試験を実施し た.材料は熱可塑性樹脂 PA6(東レ)とし,JIS-K7113 を参 考に Fig. 1 に示す 1/2 寸法に切り出して試験片を作成した. 試験には万能材料試験機 AG-100kNXplus(島津製作所)を使 用し,ひずみの計測には光学式非接触伸び計 TRViewX500D (島津製作所)を用いた.また,室温(23°C)以外の試験で は,電気式恒温槽 TCR1WF(島津製作所)を用いて試験片 を加熱した.加熱試験の際には温度分布が一様となるよう に,恒温槽の内部温度が目標温度に到達後,一時間の保持時 間を設けて試験を実施した.

#### 3.2. 弾粘塑性特性評価

まず, PA6の弾粘塑性特性を評価するため, 室温 (296K: 23°C) で異なるひずみ速度において引張試験を実施した. 負 荷条件はひずみ速度一定で制御を行い, ひずみ速度は  $1.0 \times 10^{-1}$ s<sup>-1</sup>,  $1.5 \times 10^{-2}$ s<sup>-1</sup>,  $2.0 \times 10^{-4}$ s<sup>-1</sup> の 3 種類とした. なお, それぞれのひずみ速度に対して試験数を n = 2 とした.

試験により得られた室温における応力-ひずみ関係をマー カーでプロットしたものが Fig. 2 である. この結果より,応 力が増加するにつれて応力-ひずみ関係に非線形性が生じて おり,さらにひずみ速度に応じて応力-ひずみ関係が変化し



Fig. 1: PA6 specimen for tensile test.



Fig.2: Relation between stress and strain for

PA6 at room temperature.

ていることから, PA6 が弾粘塑性材料であることが確認で きる.また,これらの試験結果より最小二乗法を用いて同定 した PA6 の材料定数を Table 1 に,同定された材料定数を 用いて弾粘塑性構成式より計算された曲線を Fig. 2 にそれ ぞれ示す.Fig. 2 より両者が概ね一致していることが確認で き,前章で述べた構成式を用いることで,PA6の弾粘塑性特 性を評価可能であるといえる.

#### 3.3. 熱弾粘塑性特性評価

次に、PA6の弾粘塑性特性における温度依存性を評価する ため、恒温槽を用いて異なる温度条件において同様の引張試験 を実施した.温度条件は313K(40°C),333K(60°C),353K (80°C),393K(120°C)および433K(160°C)の5種類とし、 負荷条件は前節と同じく $1.0 \times 10^{-1}$ s<sup>-1</sup>, $1.5 \times 10^{-2}$ s<sup>-1</sup>, $2.0 \times 10^{-4}$ s<sup>-1</sup>の3種類のひずみ速度とした.

試験の結果得られた,基準ひずみ速度 1.5×10<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> での 各温度条件における応力-ひずみ関係を Fig. 3に示す.こ の結果より,温度が高くなるにつれて応力-ひずみ関係が低 下していることから,PA6 は顕著な温度依存性を示すこと が確認できる.これらの試験結果より,2章で述べた4種類 の温度依存パラメータ *E*, *m*, *n* および*C* を各温度条件で変 更し,これらの値を同定した.各温度条件におけるこれらの 温度依存パラメータの変化の様子およびそれらの近似曲線を Fig.4に示す.なお,Fig.4の近似には,高分子材料におけ るガラスーゴム転移過程の弾性率の緩和を表す経験式の一つ である Kohlrausch-Williams-Watts (KWW)関数<sup>(11)</sup>を用 いている.試験結果より同定された温度依存パラメータの近

#### Table 1: Material parameters of PA6.

Matrix	E = 2.58GPa	$\nu = 0.31$	
(PA6)	$\dot{\varepsilon}_y = 0.015 \mathrm{s}^{-1}$	m = 0.037	
	$g(\bar{\varepsilon}^p) = 19.3(\bar{\varepsilon}^p/0.02)^{0.14} + 55.7$ [MPa]		





PA6 at reference strain rate.





似関数を以下に示す.

$$E(T) = 2.57 \exp\left\{-\left(\frac{T}{335.4}\right)^{21.1}\right\} + 0.286 \qquad (18)$$

$$m(T) = 0.172 \exp\left\{-\left(\frac{T}{292.9}\right)^{-23.8}\right\} - 1.48 \times 10^{-4} T$$
(19)

$$u(T) = 0.787 \exp\left\{-\left(\frac{T}{335.8}\right)^{-20.5}\right\} + 0.124$$
 (20)

$$Y(T) = 53.1 \exp\left\{-\left(\frac{T}{323.2}\right)^{22.3}\right\} + 9.65 \qquad (21)$$

弾粘塑性構成式(1),(2)および(3)に含まれる温度依存パラ メータを近似関数(18)-(21)で置き換えることで、樹脂母材 の温度依存性を考慮した一方向CFRTPの熱弾粘塑性特性解 析を均質化理論に基づき実施することが可能である.

## 4. 一方向 CFRTP の均質化解析

#### 4.1. 解析条件

本解析では、炭素繊維 T700S と熱可塑性樹脂 PA6 からな る一方向 CFRTP を考える.樹脂母材である PA6 は等方熱弾 粘塑性材料とし、温度依存パラメータについては式 (18)-(21) の近似関数を、その他の材料定数については Table 1 に示す 値をそれぞれ使用した.また、炭素繊維である T700S は横 等方弾性材料とし、Table 2 に示す文献値を用いた<sup>(12)</sup>.解 析モデルは Fig. 5 に示す六方配列を仮定したユニットセル を使用した.この解析モデルは 8 節点アイソパラメトリック 要素を用いて有限要素分割されており、節点数は 1310、要 素数は 618、繊維体積率は 56%とした.負荷条件は、 $y_2$  軸を 回転軸として  $y_3$  軸から成す角度  $\psi$  の方向に巨視的ひずみ速 度  $E_{\psi}$  の引張負荷を与えた<sup>(6)</sup>.今回の解析では、負荷方向 として  $\psi = 0^\circ, 10^\circ$  および 45°, ひずみ速度は 3 章と同じく  $E_{\psi} = 1.0 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}, 1.5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}, 2.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ のそれぞ れ 3 種類とした.

Table 2: Elastic moduli of  $T700S^{(12)}$ .

Fiber	$E_L = 177.9 \text{GPa}$	$\nu_{LT} = 0.27$
(T700S)	$E_T = 26.1$ GPa	$\nu_{TT} = 0.77$
	$G_{LT} = 23.9 \text{GPa}$	



Fig. 5: Finite element model of unit cell.

#### 4.2. 解析結果

均質化解析により得られた室温(296K), 333K および 393K における T700S/PA6 一方向 CFRTP の巨視的応力-ひずみ関係を Fig. 6 に示す. これらのグラフより,  $\psi = 10^{\circ}$ および 45°の結果においては,顕著な温度依存性を示すこと が確認でき、温度が上昇するにつれて応力-ひずみ関係が 徐々に低下する傾向がみられる.また,室温(296K)および 333Kの結果についてみると(Fig. 6a, 6b), ひずみ速度に応 じて応力-ひずみ関係が大きく変化しており、一方向 CFRP が非主軸負荷に対してひずみ速度依存性を示すことがわか る.特に,室温(296K)の結果と比較して,333Kの結果は ひずみ速度の変化による影響がより大きく現れていることが わかる.一方で 393K における結果に着目すると (Fig. 6c), 他の温度条件の結果と比較して応力-ひずみ関係の非線形性 はわずかであり、ひずみ速度の変化による影響も小さくなっ ている.対照的に $\psi = 0^{\circ}$ の結果は、いずれの負荷条件・温 度条件においても大きな変化は確認できず、応力-ひずみ関 係は線形的に上昇している.これは、 $\psi = 0^\circ$ においては弾 性体である炭素繊維が荷重の大部分を負担しており, ひずみ 速度および温度の変化による影響をさほど受けないためで ある.

つづいて  $\psi = 10^{\circ}$ ,  $\dot{E}_{\psi} = 1.5 \times 10^{-2} \mathrm{s}^{-1}$ ,  $E_{\psi} = 0.01$  にお ける,ユニットセルの微視的相当粘塑性ひずみ  $\varepsilon^{p}$  の分布を Fig. 7 に示す.なお,Fig. 7 は変形後のユニットセルを示し ている.これらの結果より,温度によって相当粘塑性ひずみ 分布が大きく異なっていることがわかる.まず,室温 (296K) の結果についてみると (Fig. 7a),巨視的ひずみ  $E_{\psi} = 0.01$ を上回る相当粘塑性ひずみが,負荷方向に隣接する炭素繊維 間の樹脂母材に発生している.つづいて,333K の結果に着 目すると (Fig. 7b),炭素繊維/樹脂母材界面近傍に相当粘 塑性ひずみが集中している箇所が見られるが,全体的には室 温 (296K)の結果と比較して相当粘塑性ひずみの値は小さ くなっている.一方,393K においては相当粘塑性ひずみは わずかしか発生しておらず (Fig. 7c),これはFig.6cで示 した 393K における巨視的応力-ひずみ関係に,非線形性が ほとんど見られない傾向と一致するものである.

以上の結果より,一方向 CFRTP は,樹脂母材の熱弾粘塑 性特性の影響により,非主軸負荷に対して巨視的特性・微視 的特性のいずれも顕著なひずみ速度依存性および温度依存 性を示すことが明らかとなった.したがって,本研究で提案 した熱弾粘塑性構成式を用いることで,炭素繊維と樹脂母 材それぞれの力学的特性から,均質化理論に基づき一方向 CFRTP の熱弾粘塑性特性を解析可能であるといえる.なお, 本研究で得られた結果の実験的検証については,今後の検討 課題としたい.

## 5. 結言

本研究では,均質化理論に基づき一方向 CFRTP の熱弾粘 塑性特性を評価した.まず,樹脂母材のひずみ速度依存性に 加えて温度依存性を考慮するために,弾粘塑性構成式に温度





(c) 393K.

依存パラメータを導入することで,熱弾粘塑性構成式へと拡 張した.つづいて,樹脂母材の単軸引張試験を実施し,ひず み速度依存性および温度依存性を調査した.樹脂母材の温度 依存パラメータについては,各試験温度で得られた結果を KWW 関数を用いて近似した.これらの試験で得られた樹 脂母材の熱弾粘塑性特性と炭素繊維の弾性特性を用いて,均 質化理論に基づき一方向 CFRTP のマルチスケール熱弾粘塑

参考文献



Fig.7: Distribution of equivalent viscoplastic strain  $\bar{\varepsilon}^p$  for T700S/PA6 unidirectional CFRTP; (a) room temperature, (b) 333K and (c) 393K.

性解析を実施した.解析の結果,一方向 CFRTP は非主軸引 張負荷に対して顕著なひずみ速度依存性および温度依存性を 示すことが明らかとなった.

#### 謝 辞

本研究(の一部)は,総合科学技術・イノベーション会議 のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)革新的構造 材料「航空機用高生産性革新 PMC の製造・品質保証技術の 開発」(管理法人:JST)によって実施された.ここに記して 謝意を表する.

- 日本機械学会:先端複合材料, (1994), 技報堂出版株式 会社.
- (2) Bai, X., Bessa, M., Melro, A. R., Camanho, P. P., Guo, L., Liu, W. K.: High-fidelity micro-scale modeling of the thermo-visco-plastic behavior of carbon fiber polymer matrix composite, Composite Structures, 1348(2015) pp. 132–141.
- (3) 荒井政大,田中博己,松下寿暁,多田耕三,川久保洋一,杉本公一:カーボンナノファイバー強化熱可塑性樹脂のモールドプレス成形性の評価と数値シミュレーション,材料,57(2008) pp. 814-819.
- (4) 寺田賢二郎,松井和己:均質化法に基づく非線形力学挙動のミクロ-マクロ連成モデリング,日本機械学会論文集(A編),166(2000) pp. 516–523.
- (5) Ohno, N., Wu, X., Matsuda, T. : Homogenized properties of elastic-viscoplastic composites with periodic internal structures, International Journal of Mechanical Sciences, 42(2000) pp. 1519–1536.
- (6) Matsuda, T., Ohno, N., Tanaka, H., Shimizu, T. : Homogenized in-plane elastic-viscoplastic behavior of long fiber-reinforced laminates, JSME International Journal, Series A, 42(2002) pp. 538–544.
- (7) Matsuda, T., Ohno, N., Tanaka, H., Shimizu, T.: Effects of fiber distribution on elastic-viscoplastic behavior of long fiber-reinforced laminates, International Journal of Mechanical Sciences, 45(2003) pp. 1583–1598.
- (8) 荒井政大,長谷智行,角孝平,西村正臣,松田哲也: Kelvin14面体モデルを用いた CNT 強化樹脂の粘塑性特 性評価,日本航空宇宙学会論文集, 63(2015) pp. 129– 136.
- (9) 荒井政大, 諏訪貴昭, 長谷智行, 西村正臣, 松田哲也:均 質化法による一方向 CFRP 積層板の熱粘塑性特性の評 価, 計算数理工学論文集, 12(2012) pp. 25-30.
- (10) 冨田佳宏,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),54(1988) pp. 1124–1130.
- (11) Strobl, G. R.:高分子の物理-構造と物性を理解するために, (1998), シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社.
- (12) 荒井政大, 角孝平, 伏見祐介, 松田哲也: 均質化法を用いた CFRP 積層板の粘弾性構成式の評価, 計算数理工学論文集, 8(2008) pp. 53–58.