

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760064  
 研究課題名（和文） マルチスケール解析に基づく FRP 積層板の高精度クリープ予測技術の開発および検証  
 研究課題名（英文） Development of accurate prediction techniques for creep behavior of FRP laminates based on multi-scale analysis and its verification  
 研究代表者  
 松田 哲也（MATSUDA TETSUYA）  
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・講師  
 研究者番号：90345926

研究成果の概要（和文）：本研究では、時間依存変形の均質化理論に基づくマルチスケール解析により、FRP 積層板のクリープ挙動を精度良く予測する手法を開発した。本手法を用いて、代表的な FRP 積層板である CFRP 積層板の高温クリープ挙動を解析したところ、解析結果は試験結果と良く一致し、本手法の有用性が示された。さらに、本手法により平織 GFRP 積層板のクリープ解析を行ったところ、強化材である平織布の積層パターンが、平織 GFRP 積層板のクリープひずみに大きく影響を及ぼすことを見いだした。

研究成果の概要（英文）：In this study, a numerical method for predicting the creep behavior of FRP laminates accurately, was developed using the multi-scale analysis based on the time-dependent homogenization theory. The present method was applied to the analysis of the creep behavior of CFRP laminates at an elevated temperature. The results of analysis agreed with the experimental results, showing the usefulness of the present method. Moreover, the present method was also applied to the creep analysis of plain-woven GFRP laminates. It was shown that the laminate configuration of plain fabrics significantly affected the creep strain of plain-woven GFRP laminates.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料，材料力学

キーワード：均質化，マルチスケール，FRP 積層板，クリープ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 次世代エネルギーシステムとして期待されている水素エネルギーシステムでは、そのエネルギー源である水素を貯蔵するため

の圧力容器が不可欠であり、軽量で設置性・可搬性に優れる FRP（Fiber-Reinforced Plastics; 繊維強化プラスチック）製圧力容器が注目されている。この種の圧力容器は、

水素充填後、高温・高圧状態となるから、FRP がクリープ（一定応力下においても変形が進行する現象）を生じる可能性がある。このような FRP のクリープは、容器の劣化・損傷の原因となり、水素漏洩や容器の急激な破壊を招く恐れがあるから、FRP のクリープ挙動を予測することは極めて重要な課題である。

(2) 次期主力旅客機ボーイング 787 では、機体の約 5 割（重量比）が FRP で製造される。このような機体においては、主翼・胴体等の一次構造にまで広く FRP 構造が採用されるため、高温・高応力下における FRP のクリープ挙動が問題になると考えられる。

(3) その他にも FRP は、風力発電における風車のブレードや、ドライブシャフト等の自動車部品など、クリーンエネルギー・低燃費・環境適合性等のキーワードのもと、その適用範囲を加速的に拡大させつつあり、いずれも過酷な環境下での使用が想定される。

(4) 以上から、FRP のクリープ挙動を精度良く予測する技術が求められているが、このような技術は未だ十分とは言えない。この原因としては、FRP が顕著な微視的不均質性を有しており、その変形解析が容易ではないことが挙げられる。このような不均質材料のクリープ挙動を高精度に予測するためには、ミクロレベルでの内部構造・材料特性を陽に考慮でき、かつそのようなミクロ情報と材料のマクロ挙動を合理的に連成して解析できるマルチスケール解析が有力な手段となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、マルチスケール理論の一つである均質化理論に基づき、FRP 積層板のクリープ挙動をマルチスケールの精度良く予測する技術の開発を目指す。このためまず、申請者らがこれまでに定式化した時間依存変形の均質化理論を適用し、FRP 積層板のクリープ変形を解析し得る手法を提案する。つづいて、特に主要な FRP 積層板である長繊維強化型 FRP 積層板および平織物強化型 FRP 積層板に対して本手法を適用し、それらのクリープ挙動を解析する。さらに、本手法の実用性を検証するため、解析結果と実験結果を比較する。

## 3. 研究の方法

(1) 長繊維強化型 FRP 積層板のクリープ挙動をマルチスケール解析するにあたり、まず、最も単純な場合として一方向強化 FRP（ラミナ）を解析対象に考え、そのクリープ挙動を均質化理論に基づき解析する。このためまず、

申請者らが提案した時間依存変形の均質化理論に関して検討を行い、一方向強化 FRP のクリープ解析に対応し得る理論展開を行う。さらに、理論に基づき計算アルゴリズムを構築し、それに従い解析コードを作成する。この解析コードに基づき一方向強化 CFRP（Carbon Fiber-Reinforced Plastics; 炭素繊維強化プラスチック）のクリープ解析を行い、その結果が文献で見られる一方向強化 CFRP のクリープ挙動を定性的に再現するかを確認する。

(2) さらに、本解析法を多方向積層板の場合に拡張する。まず、時間依存均質化理論に積層理論を導入し、多方向積層板のクリープ挙動を解析可能な定式化を行う。つづいて、この場合の解析コードを開発し、上述の一方向強化 CFRP の場合と同様の解析条件にて、多方向 CFRP 積層板（クロスプライ、アングルプライ）のクリープ解析を行い、解析コードの妥当性を確認する。

(3) 長繊維強化型 FRP 積層板と並んで代表的な FRP 積層板である平織物強化型 FRP 積層板のマルチスケールクリープ解析を行う。解析対象として平織 GFRP（Glass Fiber-Reinforced Plastics; ガラス繊維強化プラスチック）積層板を考え、上記開発コードを用いて解析した結果が、文献で見られる平織 GFRP 積層板のクリープ挙動と定性的に一致するかを確認する。

(4) 解析結果と実験結果を比較し、本手法による解析の妥当性を検証する。

## 4. 研究成果

(1) 本研究においては、まず、FRP 積層板のクリープ解析に適用可能なマルチスケール解析手法を、時間依存変形の均質化理論に基づき下記のように提案した。

ラミナを対称積層して得られる FRP 積層板（図 1）を考え、ラミナの総数と  $\alpha$  番目のラミナの体積率を、それぞれ  $N$  および  $f^{(\alpha)}$  とする。各ラミナは周期的内部構造を有するとする。また、図中に示すような 3 つの直交座標系  $X_i$ 、 $x_i^{(\alpha)}$  および  $y_i^{(\alpha)}$  ( $i=1,2,3$ ) を設ける。

いま、 $\alpha$  番目のラミナのユニットセル  $Y^{(\alpha)}$  における微視的応力速度  $\dot{\sigma}_{ij}^{(\alpha)}$  とひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(\alpha)}$  が、次式のような弾性-クリープ構成式により関係付けられるとする。

$$\dot{\sigma}_{ij}^{(\alpha)} = c_{ijkl}^{(\alpha)} \left[ \dot{\epsilon}_{kl}^{(\alpha)} - \beta_{kl}^{(\alpha)} \right] \quad (1)$$

ここで  $(\cdot)$  は、時間に関する微分を示す。また  $c_{ijkl}^{(\alpha)}$  と  $\beta_{kl}^{(\alpha)}$  は、それぞれ弾性剛性テンソルとクリープ関数である。このとき、時間依存

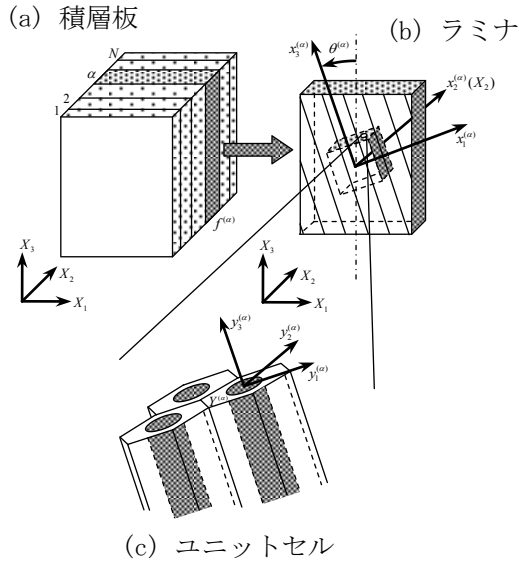


図1 FRP 積層板のマルチスケールモデリング

均質化理論を  $Y^{(\alpha)}$  に適用すると、微視的応力  $\sigma_{ij}^{(\alpha)}$  と巨視的応力  $\Sigma_{ij}^{(\alpha)}$  の時間変化がそれぞれ次式のように表される。

$$\dot{\sigma}_{ij}^{(\alpha)} = c_{ijpq}^{(\alpha)} (\delta_{pk} \delta_{ql} + \chi_{p,q}^{kl(\alpha)}) \dot{\epsilon}_{kl}^{(\alpha)} - c_{ijkl}^{(\alpha)} (\beta_{kl}^{(\alpha)} + \phi_{k,l}^{(\alpha)}) \quad (2)$$

$$\dot{\Sigma}_{ij}^{(\alpha)} = \langle c_{ijpq}^{(\alpha)} (\delta_{pk} \delta_{ql} + \chi_{p,q}^{kl(\alpha)}) \rangle \dot{\epsilon}_{kl}^{(\alpha)} - \langle c_{ijkl}^{(\alpha)} (\beta_{kl}^{(\alpha)} + \phi_{k,l}^{(\alpha)}) \rangle \quad (3)$$

ここで、 $\langle \# \rangle$  は  $Y^{(\alpha)}$  に関する体積平均を表し、また、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタ、 $(\cdot)_{,i}$  は  $y_i$  に関する微分を示す。さらに  $\chi_{i,j}^{kl(\alpha)}$  と  $\phi_{i,j}^{(\alpha)}$  は、次の境界値問題を解くことで決定される  $Y$ -周期的な関数であり、特性関数と呼ばれる。

$$\int_{Y^{(\alpha)}} c_{ijpq}^{(\alpha)} \chi_{p,q}^{kl(\alpha)} v_{i,j}^{(\alpha)} dY^{(\alpha)} = - \int_{Y^{(\alpha)}} c_{ijkl}^{(\alpha)} v_{i,j}^{(\alpha)} dY^{(\alpha)} \quad (4)$$

$$\int_{Y^{(\alpha)}} c_{ijpq}^{(\alpha)} \phi_{p,q}^{(\alpha)} v_{i,j}^{(\alpha)} dY^{(\alpha)} = \int_{Y^{(\alpha)}} c_{ijkl}^{(\alpha)} \beta_{kl}^{(\alpha)} v_{i,j}^{(\alpha)} dY^{(\alpha)} \quad (5)$$

ここで  $v_i^{(\alpha)}$  は、 $Y$ -周期性を満足する任意の速度場である。

式(3)を  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(\alpha)}$  に関して解き、有限要素解析用のマトリックス表示を行うと、

$$\{ \dot{\epsilon}_{ij}^{(\alpha)} \}_{6 \times 1} = [B^{(\alpha)}]_{6 \times 6} \{ \dot{\Sigma}_{ij}^{(\alpha)} \}_{6 \times 1} + \{ C^{(\alpha)} \}_{6 \times 1} \quad (6)$$

となる。巨視的平面応力状態を考え、 $x_i^{(\alpha)}$  と  $X_i$  の間の座標変換行列を応力とひずみに対してそれぞれ  $[P^{(\alpha)}]$  および  $[Q^{(\alpha)}]$  とすると、積層板の面内変形に対する弾性-クリープ構成式が次式のように導かれる。

$$\{ \dot{\Sigma} \}_{3 \times 1} = [A]_{3 \times 3} \{ \dot{\epsilon} \}_{3 \times 1} - \{ \bar{R} \}_{3 \times 1} \quad (7)$$

ここで、

$$[A] = \sum_{\alpha=1}^N f^{(\alpha)} [P^{(\alpha)}]^{-1} [B^{(\alpha)}]^{-1} [Q^{(\alpha)}] \quad (8)$$

$$\{ \bar{R} \} = \sum_{\alpha=1}^N f^{(\alpha)} [P^{(\alpha)}]^{-1} [B^{(\alpha)}]^{-1} \{ \bar{C}^{(\alpha)} \} \quad (9)$$

であり、 $(\cdot)$  は面内成分のみからなることを意味している。

上式(7)を用いることで、FRP 積層板のクリープ変形挙動を増分的に解析することができる。

(2) 上記手法を用いて、一方向 CFRP 積層板の高温クリープ解析を行った。解析対象として、T800H/#3631 一方向炭素繊維/エポキシ積層板 (東レ㈱製) を考えた。ラミナの繊維配列として六方配列を仮定して正六角形ユニットセルをとり、有限要素分割した (図2)。繊維体積率はカタログ値に従い 51.7% とした。炭素繊維は横等方弾性材料とし、マトリックス (エポキシ) は等方弾性-クリープ材料とした。負荷方向として 3 種類の非主軸角 ( $\theta^{(\alpha)} = 10^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ) を考え、各負荷方向に対してそれぞれ 3 種類の一定応力 (クリープ応力) を与え、クリープ変形解析を行った。負荷履歴については、まず  $X_3$  軸方向に一定ひずみ速度で引張を行い、負荷方向応力がクリープ応力に達したところで応力一定となるようにした。温度は  $100^\circ\text{C}$ 、クリープ時間は 5 時間に設定した。

このようにして得られた解析結果の代表例として、 $\theta^{(\alpha)} = 45^\circ$  の場合の解析結果を図3の実線で示す。これを見ると、はじめクリープひずみ速度が大きい遷移クリープが発生し、程なくクリープひずみ速度がほぼ一定の定常クリープとなっていることがわかる。また、クリープ応力の上昇に伴って顕著なクリープひずみの増大が生じており、明らかなクリープ応

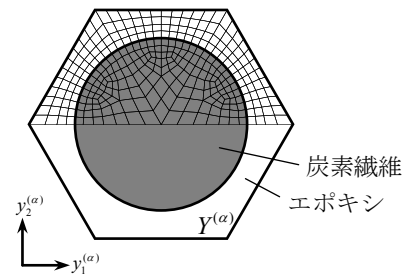


図2 CFRP のユニットセルモデルおよび有限要素分割

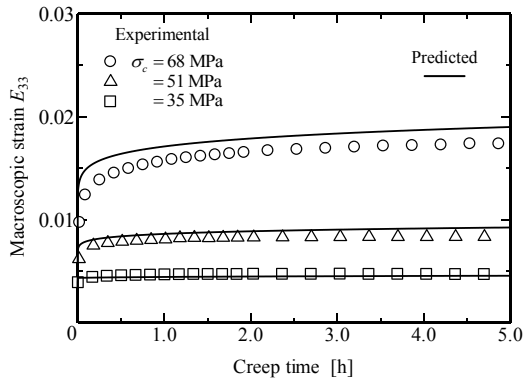


図3 一方向CFRP積層板のクリープ曲線 ( $\theta^{(\alpha)} = 45^\circ$  の場合)

力依存性が確認される．このような解析結果を図中のプロットにて表示された実験結果と比較すると，両者は非常に良く一致しており，本手法が一方向CFRP積層板のクリープ挙動を精度良く予測することが示された．

(3) つづいて，本手法を多方向CFRP積層板の高温クリープ解析に適用した．解析対象として，一方向積層板の場合と同じプリプレグを二方向に積層させたT800H/#3631クロスプライ炭素繊維/エポキシ積層板，およびアングルプライ炭素繊維/エポキシ積層板（ともに東レ(株)製）を考えた．積層構成は，クロスプライが $\theta^{(\alpha)}$   $[\cdot \cdot \cdot]$ ，アングルプライが $\theta^{(\alpha)}$   $[\cdot \cdot \cdot] [\cdot \cdot \cdot]$ の2種類とした．クリープ応力として，それぞれの積層板の静的破壊応力の40%，60%および80%を $X_3$ 軸方向に与えた．繊維体積率，ユニットセルモデル，材料特性，温度条件，クリープ時間は一方向積層板の場合と同じとした．

得られた解析結果の代表例として，クリープ応力が静的破壊応力の40%の場合におけ

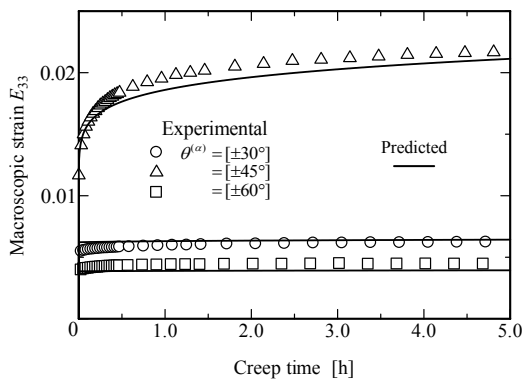


図4 多方向CFRP積層板のクリープ曲線 (クリープ応力が静的破壊応力の40%の場合)

る結果を図4の実線で示す．これを見ると，一方向積層板の場合と同様の遷移クリープおよび定常クリープが確認される．また，クロスプライ積層板の場合が最も顕著にクリープを生じており，次いで $[\cdot \cdot \cdot]$ アングルプライ積層板， $[\cdot \cdot \cdot]$ アングルプライ積層板となっていることがわかる．このような解析結果と実験結果を比較すると，この場合も一方向積層板の場合と同様に，両者が非常に良く一致していることがわかる．

以上(2)，(3)の結果から，本研究で開発した手法は，CFRP積層板のクリープ挙動を精度良く予測すると言え，本研究の大きな成果である．このようにマルチスケールのCFRP積層板のクリープ挙動を精度良く予測する技術は世界的にも希少であり，この成果は国際学術誌に掲載された．

なお，クロスプライおよびアングルプライ積層板の場合，クリープ応力が静的破壊応力の80%のように極めて高くなると，予測精度が低下したが，この原因は，高応力による大変形に伴い各ラミナ内の繊維軸が負荷方向に向かって回転したためと考えられた．そこで，このような繊維回転を考慮に入れ解析を行ったところ，予測精度を大きく改善することができた．これは当初の研究計画には含まれていなかったが，今回新たに明らかにすることができた．今後はさらに，解析手法に有限変形理論を導入することで，さらなる予測の高精度化を行えると期待される．

(4) さらに，本手法を平織GFRP積層板のクリープ解析に適用した．解析対象としてSL-E-1ガラス/エポキシ平織積層板(日東シンコー(株)製)を考えた．まず，微視構造の顕微鏡観察に基づきユニットセルモデルを作成し，有限要素分割した(図5)．ガラス繊維は等方弾性材料，マトリックス(エポキシ)は等方弾性-クリープ材料とした．負荷方向として $\theta = 45^\circ$ の非主軸角負荷を考え，60MPaの一定応力(クリープ応力)を与え，クリープ変形解析を行った．温度は室温，クリープ時間は5時間に設定した．

このようにして解析を行ったところ，図6のようなクリープ曲線が得られ，遷移クリープおよび加速クリープ等の実験

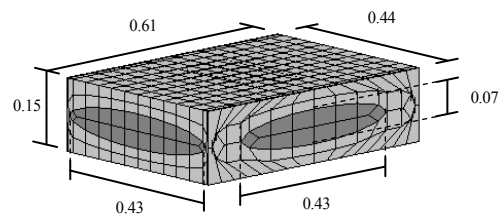


図5 平織GFRP積層板のユニットセルモデルおよび有限要素分割

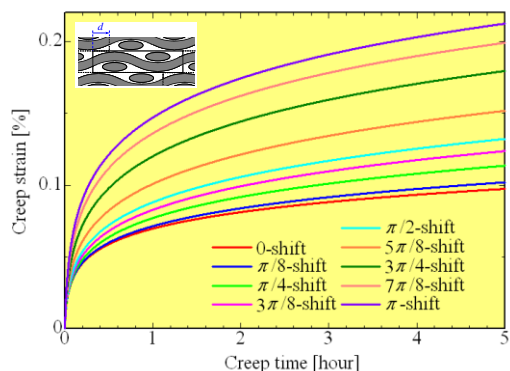


図6 平織 GFRP 積層板のクリープ曲線

で観察される平織 GFRP 積層板のクリープ挙動を再現可能であることが示された。また、当初の研究計画にはなかったが、図6に示されるように、強化材である平織布の積層パターンが、発生するクリープひずみに大きく影響を及ぼすことを新たに見いだした。これらのマルチスケール解析に基づく平織 GFRP 積層板のクリープ解析結果は、世界的にも報告例がなく、新規性が高いと言える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① T. Matsuda, Y. Fukuda, Multi-Scale Creep Analysis of Angle-Ply CFRP Laminates Based on a Homogenization Theory, Proceedings of 2010 JSME M&M Symposium for Young Researchers, 査読無, CD-ROM, 2010.
- ② T. Matsuda, K. Nakata, M. Kawai, Homogenization Creep Analysis of Plain-Woven GFRP Laminates, Proceedings of 17th International Conference on Composite Materials, 査読無, CD-ROM, 2009.
- ③ K. Nakata, T. Matsuda, M. Kawai, Multi-Scale Creep Analysis of Plain-Woven Laminates Using Time-Dependent Homogenization Theory: Effects of Laminate Configuration, International Journal of Modern Physics B, 査読有, Vol. 22, 2008, pp. 6173-6178.
- ④ Y. Fukuta, T. Matsuda, M. Kawai, Homogenized Creep Behavior of CFRP Laminates at High Temperature, International Journal of Modern Physics B, 査読有, Vol. 22, 2008, pp. 6161-6166.

[学会発表] (計 17 件)

- ① T. Matsuda, Y. Fukuda, N. Yamamoto, K.

Nakata, Homogenization Theory for Periodic Materials with Misaligned Unit Cell Arrangements (招待講演), 2nd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, 2010年3月31日, パシフィコ横浜

② 松田哲也, 福田祐三, 河井昌道, ユニットセル配置にずれを有する周期材料に対する均質化理論の適用, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会, 2009年10月12日, 金沢大学

③ 松田哲也, 福田悠一, 河井昌道, 均質化理論による CFRP 積層板の高温クリープ解析, 日本学術会議第 58 回理論応用力学講演会, 2009年6月10日, 日本学術会議

④ 松田哲也, 中田啓介, 河井昌道, 平織積層板のマルチスケールクリープ解析 (積層構成の影響), 日本機械学会第 21 回計算力学講演会, 2008年11月3日, 琉球大学

⑤ 福田悠一, 松田哲也, 河井昌道, 一方向 CFRP 積層板のマルチスケールクリープシミュレーション, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008年9月17日, 立命館大学

[図書] (計 1 件)

- ① T. Matsuda, N. Ohno, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, Predicting the elastic-viscoplastic and creep behaviour of polymer matrix composites using the homogenization theory, In: R.M. Guedes, Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites, (in press).

[その他]

ホームページ等

<http://www.trios.tsukuba.ac.jp/Profiles/0004/0002030/profile.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 哲也 (MATSUDA TETSUYA)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・講師

研究者番号: 90345926