

テキスタイル・短繊維強化プラスチックの ランダムなマイクロ構造モデリングと 確率的マルチスケールシミュレーション

Random Microstructure Modeling and Stochastic Multiscale Simulation
of Textile and Short Fiber Reinforced Plastics

高野直樹¹⁾

Naoki Takano

1) 博(工) 慶應義塾大学 (〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1, E-mail: naoki@mech.keio.ac.jp)

This paper concisely summarizes the applications of conventional deterministic multiscale simulation to the fabrication process simulation of fiber reinforced plastics such as resin transfer molding and deep-draw forming, and the recent stochastic modeling and simulation of composite materials with random microstructures. The first example is the textile composites fabricated by hand layup considering the nesting. The next one is the short fiber reinforced composites fabricated by injection molding, using Meshman_FiberPacking and first-order perturbation based stochastic homogenization method.

Key Words : Composite Materials, Random Microstructure, Multiscale Simulation, Stochastic Simulation

1. はじめに

繊維強化プラスチック複合材料(FRP)を使用するには、素材(繊維と母材)の選択、繊維の形態(一方向整列、織物/編物/組物、短繊維など)の選択、部品の構造設計、製造方法の決定を同時に考える必要があるという点で難しさがああり、さらに設計段階でシミュレーションによって製品の品質保証も行うことが望ましい。品質保証の評価項目としては、剛性、強度などがあげられるが、製品の性能は製造方法に強く依存する。なぜなら、製造方法によって、強化材への樹脂含侵が異なり、FRPの特性を決めるマイクロ構造に差が出るからである。品質保証のためのシミュレーションにおいて、教科書で見る理想的なマイクロ構造ではなく、現実のマイクロ構造に即したモデリングをいかに行うかが鍵である。

本稿では、まず、テキスタイルFRPの成形加工プロセスシミュレーションとして、RTM成形を想定した平織布への樹脂含侵係数(permeability)の予測と含侵の様子 of 可視化事例[1]、ならびに、平編布強化FRPの深絞り成形プロセスシミュレーションの事例[2]を示す。

上記のシミュレーションはいずれも確定論的なものであったが、現実のマイクロ構造に即したモデリングのためには、ばらつきを考慮すること、あるいは、不確かさを考慮することが肝要であり、後半では確率的モデリング・シミュレーションの事例を示す。現実のマイクロ構造をモデリングする方法として、マイクロCTイメージベースモデリングも有効であり、粒子分散型複合材料[3]や多孔質材料[4]、生体組織[5]のモデリングにも応用されてきたが、これはFRPの製造前のシミュレーションには利用できず、製造後に実験を代替するバーチャルテストであり、事前

評価には向かない。事前に行う品質保証に向けた確率的モデリング・シミュレーションとして、まず、平織布強化FRPのハンドレイアップ成形を想定したネスティングを考慮したモデリング法[6]について述べる。次に、射出成形された短繊維強化FRPのモデリングと確率論的な損傷進展シミュレーション[7]について述べる。ランダムな短繊維強化FRPのモデリングツールとして、株式会社インサイトと共同でMeshman_FiberPackingを開発したので(<http://www.meshman.jp/meshman/FiberPacking.html>)、あわせて紹介する。ソルバーは、物理的ランダムパラメータの一次漸近近似に基づく自作の確率的シミュレーションソルバー[8]を用いた。

2. テキスタイルFRPの成形加工プロセスシミュレーション

FRPの成形において樹脂含侵の良否は最も重要であるため、Darcy則における含侵係数(permeability tensor)の予測と、RTM(resin transfer molding)成形における樹脂含侵挙動の可視化を行った。これは、寺田先生との共同研究[1]であり、均質化法に基づくソルバーは寺田先生が開発されたものである。図-1(a)にマイクロ構造モデルを、図-1(b)に積層方向の樹脂含侵挙動を示す。RTM成形では強化布のプリフォーミングを行うため、図-2のように、変形した強化布への樹脂含侵挙動のシミュレーションも行った。

一方、強化布と熱可塑性プラスチックシートのホットプレスにより作成したFRPを、再加熱して深絞りする二次加工のシミュレーションを行った。大変形を考慮した非線形均質化法を用いた[2]。この研究を行った約30年前は、二次加工はコストが高いと思われたが、いまではD-LFT成

形 (Direct Long Fiber Thermoplastic molding) のように熱可塑性プラスチックの成形法の一つとして注目されている。図-3(a)にシミュレーションの様子を、図-3(b)には布のcourse方向に最も伸びる部位での代表寸法を示しており、実験結果と比較して非常によい一致を得ることができた。もしも微小変形であれば計測は困難であったであろうが、大変形すればマイクロ構造の変化を容易に計測できる。Validationとして、マクロ特性の比較の例は多いが、マイクロ挙動を用いたValidationをに成功した初期の研究成果である。

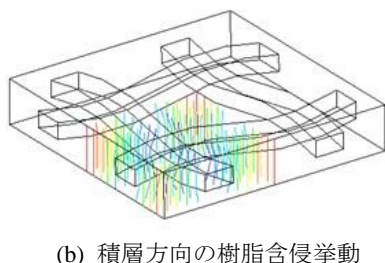
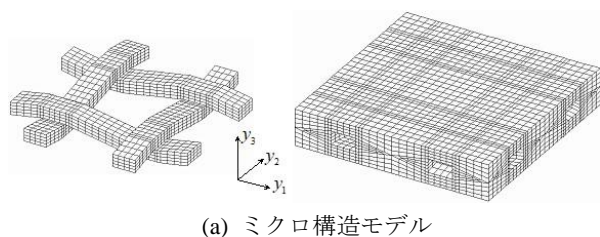


図-1 平織布への樹脂含浸シミュレーション

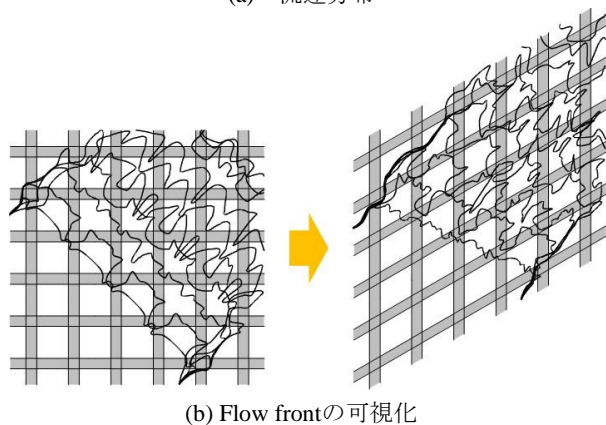
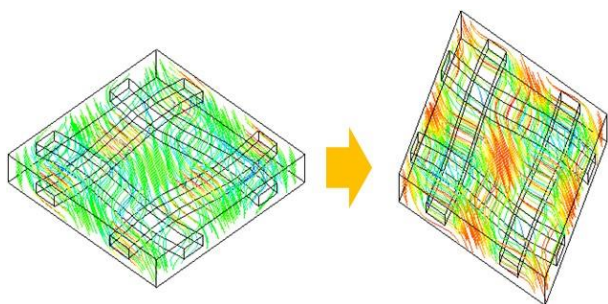


図-2 RTM成形におけるプリフォーミング前後の樹脂含浸挙動の違いのシミュレーション

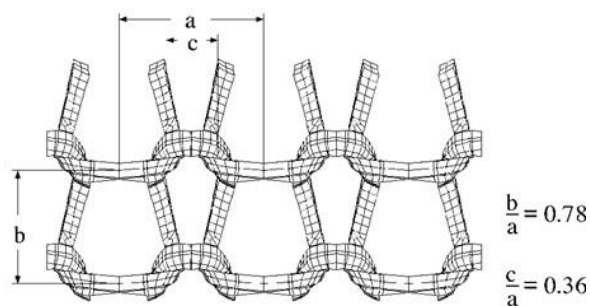
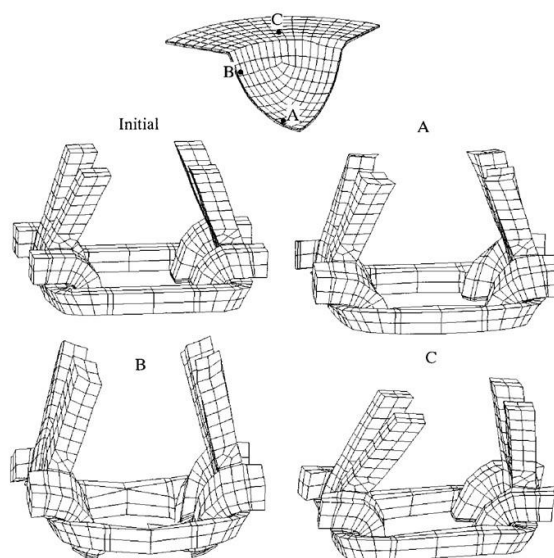


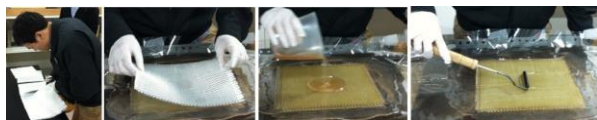
図-3 平編布強化プラスチックの深絞り成形プロセスシミュレーション

3. 確率的マルチスケールモデリング・シミュレーション出し

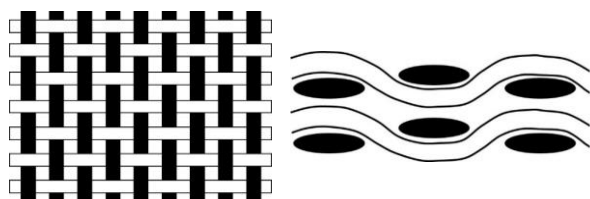
本章ではまず、ハンドレイアップ成形による平織布強化プラスチック積層板のマイクロ構造モデリングについて述べる。強化布にはガラス繊維クロスを、樹脂には熱硬化性樹脂である不飽和ポリエステルに硬化剤を混ぜて用いた。成形の様子を図-4(a)に示す。

平織布のマイクロ構造は教科書には図-4(b)のように表現されるが、脱泡のためのローラーがけによるプレス工程で糸（繊維束）は移動・変形し、図-4(c)のようなネスティングが生じる。糸の変形により、図-4(d)のように糸の内部にも繊維含有率の分布が生じる。そこで、幾何学的パラメータを多数定義し、統計的計測を行い、起こりうるマイクロ構造を確率的に生成した。4層よりなる積層板の板厚と層の位相ずれのパラメータを変化させたマイクロ構造モデルの一例を図-5に示す。

このような幾何学的ランダムパラメータの定義法は一義的ではなく、難しい上に、統計的計測には膨大な労力を必要とするが、データは文献[6]に公開しているので、活用いただければ幸甚である。図-3(a)の実験は、5名の学生が



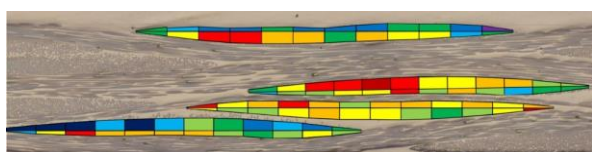
(a) ハンドレイアップ成形



(b) 教科書にあるマイクロ構造の模式図



(c) ネスティングの模式図

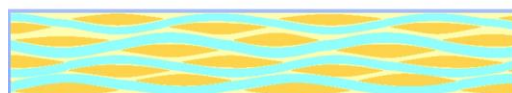


(d) 試験片の断面図と糸の変形による糸内部の繊維体積含有率の分布

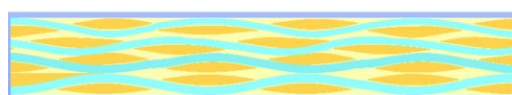
図-4 平編布FRPのマイクロ構造



$$t = 1.5 \text{ mm}, \phi = (1/4, 1/6, 1/5)$$



$$t = 1.7 \text{ mm}, \phi = (1/4, 1/4, 1/4)$$



$$t = 1.7 \text{ mm}, \phi = (1/2, -1/6, 1/5)$$

図-5 統計データに基づき生成した確率的モデルの例

計25本（一人5本ずつ）の引張試験片を作成し、静的試験を行ったが、引張強度は大きくばらつき、その原因はマクロ変数では説明できず、マイクロ構造の違いにあると考察された[6]ことを付記する。

2例目として、短繊維強化プラスチック（short fiber reinforced plastic, SFRP）の確率的モデリングと、損傷進展の確率的シミュレーションについて述べる。射出成形したSFRP板は繊維配向が異なるコア層とスキン層からなるが、各層内で代表体積要素（representative volume element, RVE）モデルを作成することを想定し、株式会社インサイトと共同でMeshman_FiberPackingを開発した。マイクロ構造

モデル寸法を入力した後、ランダムネスを特徴づけるパラメータとして、繊維本数、繊維長分布、および図-6の2つの角度を用いた繊維配向を用いた。角度はある範囲内で一様分布と仮定した。繊維長分布は、累積分布関数（CDF）を用いてcsvファイルから入力することとした。図-7には繊維本数1215本、繊維体積含有率22.48%のモデルの例を示す。モデルの表示は株式会社くいと製のVOELCONを用い、繊維長による色分けを行っている。VOXELCONを用いれば均質化法によるマクロ特性予測が行える。ここでは、前記のFirst-order Perturbation based Stochastic Homogenization法（FPSH法）[8]による自作ソフトを用いた確率的損傷進展シミュレーションの結果[7]を示す。図-8(a)に損傷域を、図-8(b),(c)に剛性低下の予測結果の一例を示す。非線形解析のような時刻ステップをとるシミュレーションにおいては、初期時刻においてシナリオを確定することができず、シナリオが無限に存在しうる課題と、計算コストの問題の解決が必要である。

4. 結言

織物／編物／組物といったテキスタイルFRPや短繊維強化FRPでは、一方向繊維強化FRPとまったく異なり、無視できない寸法での幾何的ばらつきがマイクロ構造に見られ、確率的モデリング・シミュレーションが有効と考えられるが、非線形問題に対してはモデリング法、シミュレーション法ともに課題も残されており、多くの若手研究者の参入を期待したい。

参考文献

- [1] Takano, T., Zako, M., Okazaki, T. and Terada, K.: Microstructure-based evaluation of the influence of woven architecture on permeability by asymptotic homogenization theory, *Composites Science and Technology*, Vol.62, pp.1347-1356, 2002.

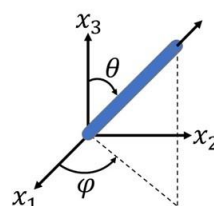


図-6 短繊維の繊維配向を記述するパラメータ

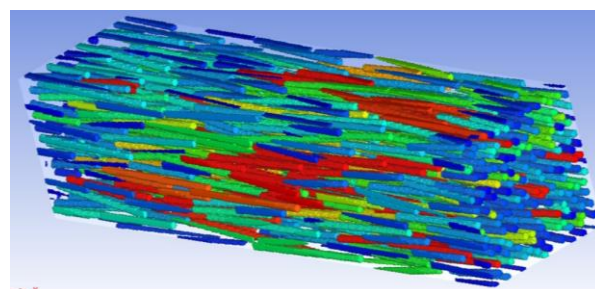
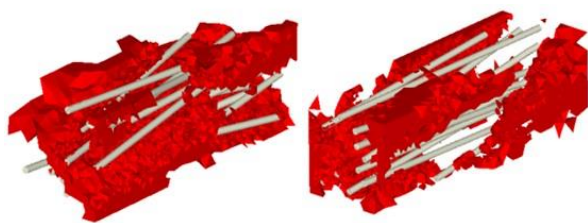


図-7 短繊維強化FRPのマイクロ構造モデルの例



(a) 損傷域

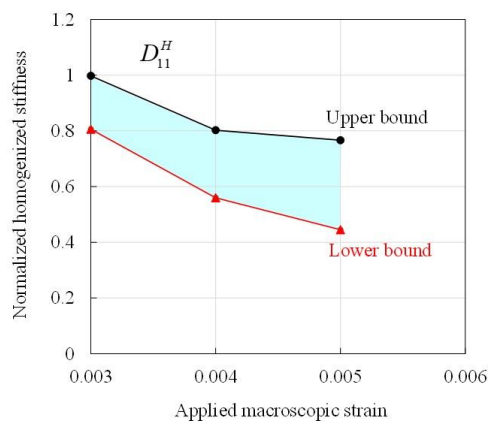
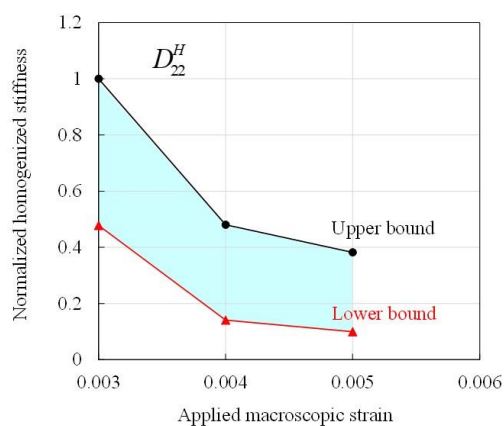
(b) マクロ特性 D_{11} の低下の様子(c) マクロ特性 D_{22} の低下の様子

図-8 短繊維強化FRPの確率的損傷進展シミュレーション結果

- [2] Takano, N., Ohnishi, Y., Zako, M. and Nishiyabu, K.: Microstructure-based deep-drawing simulation of knitted fabric reinforced thermoplastics by homogenization theory, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.38, pp.6333-6356, 2001.
- [3] Wen, P., Kamijo, K., Kurita, D. and Takano, N.: Probabilistic homogenization and sensitivity analysis for robust design of coated particulate composite material considering non-parametric geometrical uncertainty at microscale, *Transactions of Japan Society for Computational Engineering and Science*, Vol.2016, Paper No.20160005, 2016.
- [4] Takano, N., Zako, M., Kubo, F. and Kimura, K.: Microstructure-based stress analysis and evaluation for porous ceramics by homogenization method with digital image-based modeling, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.40, pp.1225-1242, 2003.
- [5] 山東篤, 櫛田慶幸, 高野直樹, 安達泰治, 中野貴由, 馬越佑吉, 石本卓也, 榎元孝俊, 河井まりこ, 山本敏男: 生体硬組織の高分解能イメージベース・マルチスケールモデリング, 日本計算工学会論文集, Paper No.20060017, 2006.
- [6] Hagiwara, K., Ishijima, S., Takano, N., Ohtani, A. and Nakai, A.: Parameterization, statistical measurement and numerical modeling of fluctuated meso/micro-structure of plain woven fabric GFRP laminate for quantification of geometrical variability, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.4, Paper No.17-00053, 2017.
- [7] Hoang, T.-D., Abe, Y., Nakamura, S., Miyoshi, A. and Takano, N.: stochastic nonlinear multiscale computational scheme for short fiber reinforced composites to study the influence of microstructural variability on damage propagation, *SN Applied Sciences*, Vol.2, Paper No.182, 2020.
- [8] Wen, P., Takano, N. and Akimoto, S: General formulation of the first-order perturbation based stochastic homogenization method using many random physical parameters for multi-phase composite materials, *Acta Mechanica*, Vol.229, pp. 2133-2147, 2018.