

# 長繊維強化複合材料のマルチスケール材料モデリング

## Multiscale Material Modeling of Long Fiber-Reinforced Composites

田中真人<sup>1)</sup> 笹川崇<sup>2)</sup>

Masato Tanaka and Takashi Sasagawa

<sup>1)</sup>博 (工) 株式会社豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手市横道 41 番地の 1, E-mail: tanamasa@mosk.tytlabs.co.jp)

<sup>2)</sup>株式会社豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手市横道 41 番地の 1, E-mail: sasagawa@mosk.tytlabs.co.jp)

One type of long fiber-reinforced composite is sheet molding compound (SMC), which can be molded in a short time and is increasingly used in mass-produced CFRP products. SMC is a sheet-like, pseudo-isotropic material composed of randomly chopped fibers, several inches long, impregnated with a thermosetting resin. Its random internal structure results in variations in material properties. In this contribution, a method is proposed for predicting the relationship between the microstructure, specifically the shape, arrangement, and orientation of fiber bundles, and the macroscopic mechanical properties of SMC using multiscale analysis based on the homogenization method.

**Key Words :** Fiber-Reinforced Composites, Multiscale Material Modeling, Homogenization method

### 1. はじめに

昨今の燃費規制や CO<sub>2</sub> 排出規制の強化に伴い、車体軽量化への関心が高まっている。そのため、自動車部材のマルチマテリアル化や、鋼材の代替としてアルミニウムや樹脂などの軽量素材の積極的な活用が盛んに議論されている。特に、炭素繊維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は、その比剛性・比強度に優れ、最も有望な軽量材料のひとつとして注目されている。しかし、成形サイクル時間の長さや高価な炭素繊維が課題となり、CFRP の適用は主に生産台数が限定的な高級車向けに進められてきた。

このような状況の中で、炭素繊維シートモールディングコンパウンド (Sheet Molding Compound, SMC) は、比較的短いサイクル時間で成形品を得ることができるため、量産車への採用が増えている。SMC は、インチ単位にカットされたチョップド繊維束を熱硬化性樹脂ペーストにランダムに分散・含浸させたシート状の疑似等方性材料であり、プレス成形によって 2~5 分程度の短時間で部材へと加工できる。また、連続繊維の中間基材であるプリプレグと比較して、SMC は複雑形状の部品を生産するのに適しており、優れた成形性を有する [1]。しかし、SMC はその内部構造のランダム性に起因して、鋼材と比べて力学特性のばらつきが大きい。SMC の破壊形態は、チョップド繊維束の配置や繊維束周囲の亀裂進展モードに大きく影響を受けることが報告されている [2]。特に、SMC を衝撃吸収材として使用する場合には、そのマイクロ構造を考慮することが不可欠である。

本報告では、チョップド繊維束の形状・配置・配向といったマイクロ構造の形態が SMC の機械特性に及ぼす影響について、均質化法を用いたマルチスケールシミュレーション [3] による予測事例を提示する。

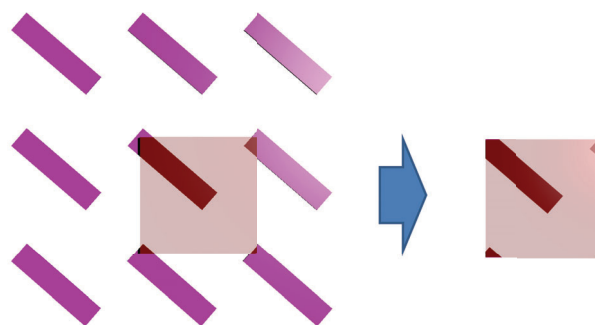


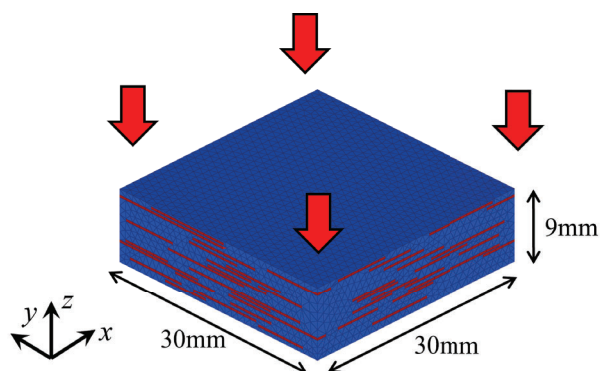
図-1: 周期構造を考慮した繊維束のランダム配置

### 2. SMC の代表体積要素の構築

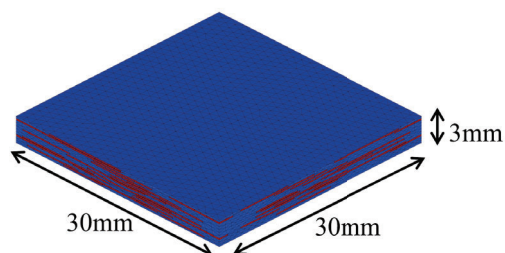
ランダム配置やプレス変形シミュレーションを用いて SMC の代表体積要素 (Representative Volume Element, RVE) を構築する方法を示す。

#### (1) RSA による繊維束のランダム配置

まず、図-1 に示すように、Random Sequential Adsorption (RSA) と呼ばれるアルゴリズムを用いて SMC の RVE を構築する。RSA は、所望の体積含有率に達するまで、位置と向きをランダムに変えた繊維束を次々に母材の領域内に配置していくアルゴリズムである。このとき、新たに配置しようとした繊維束が既に配置されている繊維束のいずれかと交差する場合は、その繊維束を削除するルールを取る。繊維束の形状を平板として与え、xy 平面と平行に配置する。RVE として使用することを想定し、図-1 に示すような繊維束配置を行って周期構造をつくる。ただし、本 RSA アルゴリズムを用いると繊維束体積含有率が 27.1% 程度に留まってしまう。この現象は Jamming limit と呼ばれ、RSA アルゴリズムの実質的な限界値となる。これは各繊維束が曲げの無いプレート状の形状をとっているため、交差を避けると高充填化できないことが主な原因である。



(a) 変形前



(b) 圧縮変形後

図-2: RVE のプレス変形シミュレーション

## (2) RVE のプレス変形シミュレーション

前節でつくった RVE を上面から一様にプレス変形することで、繊維束を力学的な計算によって自然に曲げて高充填化する方法を考える。繊維束と母材の両方をソリッド要素でモデリングし、陰解法を用いて圧縮変形解析を行う。圧縮変形が大きくなると母材の要素が大きく歪むため、本研究ではエレメントフリーガラキン法を用いた。RVE の境界条件は、境界上の節点の周期性を保ったまま図-2 のように x,y 方向の変形を固定して、RVE の上面上の節点に一様に z の負方向に強制変位を与えた。圧縮変形後、繊維束体積含有率は 63.3% となり、文献値 [1] と概ね一致した。図-3 の変形後の繊維束をみると、樹脂リッチな部位がみられるが、概ね密に繊維束が分散している様子がわかる。図-4 は変形後の繊維束の側面図であり、繊維束が圧縮によって自然に曲がった状態で充填している様子がわかる。

## 3. RVE の引張解析と実験値との比較

文献 [2] によると、繊維束端部で損傷が発生し、長手方向には層間剥離として亀裂が進展、または同一面内の繊維束界面で縦割れ（スプリッティング）が生じて分離が進むことで、破壊が進行することが観察されている。そこで、本解析では母材の破壊のみを考慮し、前章で構築した RVE と、文献 [4] に記載された繊維束および母材の物性値を用いて SMC の力学特性を予測する。図-5 は、RVE による SMC の引張解析から得られた RVE 内での体積平均応力-ひずみ曲線を示し、試験回数 5 回の実験結果と比較したものである。その結果、引張弾性率は誤差 4.7%、引張強度は誤差 8.0% で予測できており、本手法の有効性が確認された。

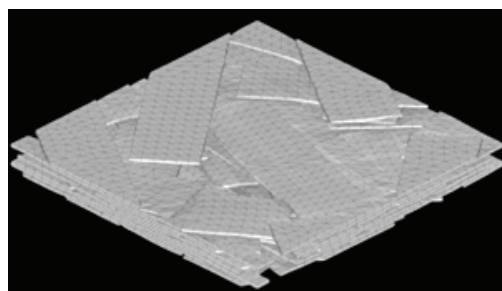


図-3: プレス変形シミュレーション後の繊維束



図-4: 圧縮変形後の繊維束の側面図

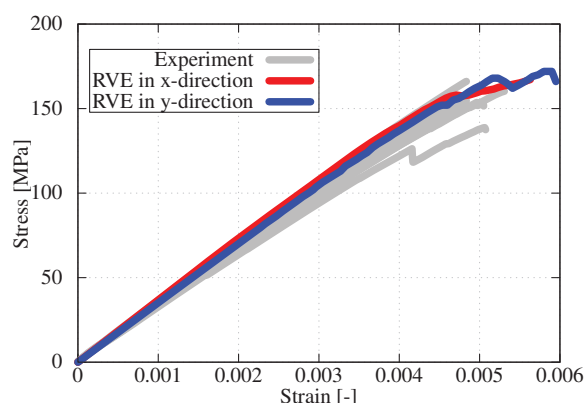


図-5: 引張変形の応力ひずみ曲線

## 4. 結言

本報告では、SMC のチョップド繊維束や母材樹脂などのマイクロ構造情報を基に、剛性や強度といったマクロな機械特性を予測するマルチスケールシミュレーションについて検討した。引張解析を実施し、実験値との整合性を確認した。講演では、紙面の都合上記載できなかった 3 点曲げ解析の結果や、SMC 以外の長繊維強化複合材料に関するマルチスケール材料モデリング [5] についても紹介する予定である。

## 参考文献

- [1] 三菱ケミカルホールディングスグループ: Automotive Materials, 通巻 38 号, Vol.15, No.1, 2018.
- [2] 黄木 景二, 山内 雅浩: SMC の強度予測のための簡易な破壊力学モデル, 日本複合材料学会誌, 36 巻, 5 号, pp.198-204, 2010.
- [3] Terada, K., Kikuchi, N.: A class of general algorithms for multi-scale analyses of heterogeneous media, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol.190, pp.5427-5464, 2001.
- [4] Martulli L. M., et al.: Predictions of carbon fibre sheet moulding compound (CF-SMC) mechanical properties based on local fibre orientation, *ECCM18*, 2018.
- [5] Sasagawa, T., Tanaka, M., Omote, R., Balzani, D.: Numerical material testing for discontinuous fiber composites using statistically similar representative volume elements, Vol.10, 10608, *Sci. Rep.*, 2020.