

平成 24 年度工学系共通経費による顕彰と研究助成 成果報告書

所 属	大学院理工学研究科 機械物理工学専攻
研究者（ふりがな）	鈴木 良郎（すずき よしろう）
タイトル	均質化法を用いたマルチスケール連成構造解析の改良
助 成 名	新任助教研究助成
採択金額	100 万円

研究の背景

繊維強化プラスチック（FRP: Fiber Reinforced Plastic）は金属材料に比べて軽量かつ高強度、高剛性であり、近年航空宇宙産業への適用が急速に拡大している。FRP は硬く細い繊維（直径: 5–20 $\mu\text{m}$ ）と柔らかい樹脂から成る複合材料である。微視的な構造の非均質性により複雑な力学特性を示すため、構造設計は難しい。そこで、均質化法によるマルチスケール技術が注目されている。FRP のマイクロ構造は、 $\mu\text{m}$  スケールの繊維と樹脂から成る。一方、一般的な FRP 部材は m スケールであり、これをマクロ構造とする。代表的なマイクロ構造を 1 つ取り出し各種解析を行った後、マイクロ構造の挙動（マイクロ解析の結果）をマクロ解析に連成させることで、計算規模を低く抑えながら、非均質性の影響を上手く取り入れたマクロ解析が実現できるが、均質化法は大きな誤差を生じるケースがあった。本研究ではこの誤差の低減を目的とした。

結果と考察

**均質化法と問題点：** 均質化法では、巨視構造から代表的な微視構造を取り出し、これを均質体とみなした場合の等価な物性（均質化物性）を算出する。図 1 の左上に FRP の微視構造の一例を示す。炭素繊維（円は繊維断面を示す）もつ上部は、エポキシ樹脂のみから成る下部より硬い。均質法では、繊維と樹脂の中間の硬さを持つ均質体に置き換える。この微視構造に勾配を有する強制変移を与えると、実際には硬い上部が大きく変形することが、均質化構造では上手く反映されず、誤差を生じることがわかった。

**提案手法の原理：** 上記誤差の低減のため、図 2 に示すように微視構造を薄くスライスする。各構成物質をそれぞれバネとみなし、スライスはそのらの合成バネと考える。こうしてスライス全体の平均弾性率と各構成物のひずみを計算し、全スライスの情報を重ね合わせることで、微視構造全体のひずみ分布、応力分布、弾性ひずみエネルギー分布を得る。スライスの理論により、せん断・垂直の両ひずみ分布を取得できる。

**数値解析例：** 図 1 の左上に示す勾配変移を課した微視構造（縦 24 $\mu\text{m}$ 、横 12 $\mu\text{m}$ 、繊維直径 8 $\mu\text{m}$ ）を対象とし、均質化法と提案手法の比較を行う。有限解析モデルには 2 次元 4 節点アイソパラメトリック要素を用いた。繊維は弾性率 15.5GPa、ポアソン比 0.49 とし、樹脂は弾性率 3.5GPa、ポアソン比 0.35 とした。構造上端に課す変移と構造下端の変移の比を様々に変化させ、微視構造内に生じる弾性ひずみエネルギーを計算した結果を図 3 に示す。縦軸は、繊維と樹脂を別々にモデル化した厳密な有限要素解析解との誤差比率を示し

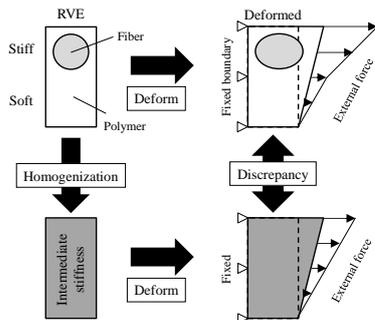


Fig. 1 Calculation error traceable to the approximation of homogenization.

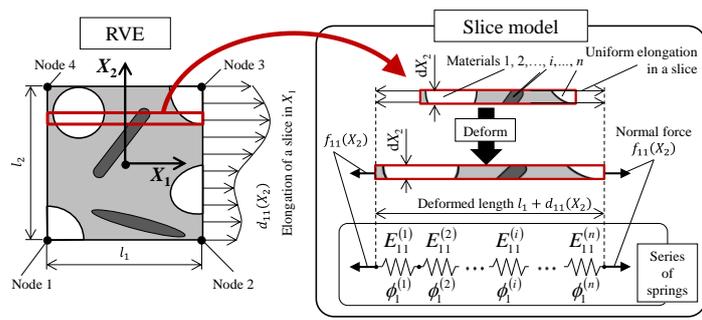


Fig. 2 Calculation error traceable to the approximation of homogenization.

ている。急勾配、緩やかな勾配いずれの強制変移を与えた場合でも、提案手法の方が、誤差が小さいという結果が得られた。最も一般的な有限要素法は、仮想仕事の原理に基づくものであり、ひずみエネルギーを正確に予想することが節点力や節点変移の精度に直接影響する。続いて、上端のみ横方向に引張り、下端は変移させなかったケースの、微視構造内の横方向垂直ひずみを図4に示す。図4左の繊維と樹脂を区別した厳密な解析では、繊維のひずみは小さく、繊維周りの樹脂が大きく変形している。これは、硬い繊維が変形しにくい分、樹脂が大きく伸ばされているためである。しかし、図4中央の均質化法モデルは、硬い箇所と柔らかい箇所の情報が欠落してしまうため、繊維周りのひずみは厳密モデルと大きく乖離してしまう。一方、図4右の提案手法では、均質化方と比べ厳密モデルに似通ったひずみ分布が形成されている。このようなひずみ分布の精度が、図3に示したひずみエネルギーの精度に影響を与えているものと思われる。

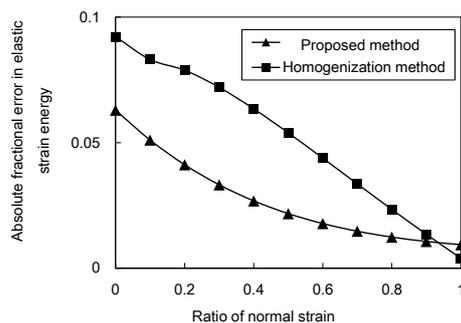


Fig. 3 Elastic strain energy of one RVE when applying various gradients of normal strain.

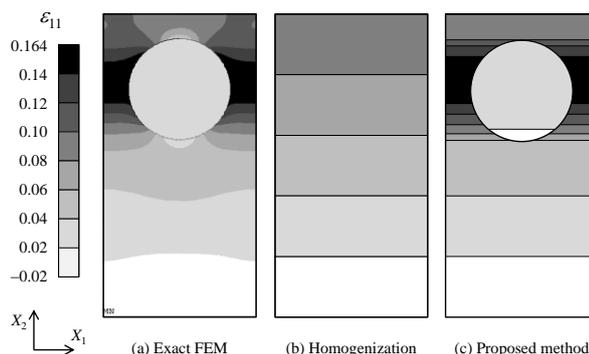


Fig. 4 Normal strain distribution calculated.

結論と今後の課題

微視的な異種構成物から成る複合構造の複雑な力学特性を、低コストかつ正確に計算するマルチスケール技術を提案し、FRPを対象とした2次元線形弾性の有限要素解析により、その有効性を実証した。

構造が、勾配変移や勾配を持つひずみが生じている場合、均質化法では誤差を生む可能性があることを示した。その誤差を提言する手法として、微視構造を多数の薄いスライスに分けて合成バネ近似することで、微視構造のひずみ分布や応力分布を取得する方法を提案した。提案手法や均質化法を、樹脂と繊維を別々にモデル化した厳密な有限要素解析と比較した結果、提案手法の方が、弾性ひずみエネルギーやひずみ分布を高精度で計算することができることがわかった。今後は、提案手法を熱や電気解析に拡張する予定である。

使用内訳書

費目	内訳	金額
備品1	科学技術演算用 PC workstation(解析用コンピュータ)	229,800
備品2		
消耗品		440,085
旅費	US-Japan Conference on Composite Materialsの旅費	295,780
その他	英文論文の文章校正費	34,335
合計		1,000,000

記入上の注意：

備品は、品名ごとに記入。  
 差額が生じた場合は、消耗品で調整。  
 消耗品を購入しなかった場合は、経費の差額と補填した予算科目名を合計額の内訳欄に記入。