



Title	ミクロ構造の不確定性を考慮したFRPのマルチスケール解析手法に関する研究
Author(s)	藤田, 雄三
Citation	大阪大学, 2012, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/59233">https://hdl.handle.net/11094/59233</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名	ふじ た へう ぞう 藤 田 雄 三
博士の専攻分野の名称	博 士 (工学)
学位記番号	第 2 5 5 4 9 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻
学位論文名	マイクロ構造の不確定性を考慮したFRPのマルチスケール解析手法に関する研究
論文審査委員	(主査) 准教授 倉敷 哲生 (副査) 教授 上西 啓介 教授 大村 悦二 教授 南 二三吉

## 論文内容の要旨

地球温暖化や化石資源枯渇による環境・エネルギー問題の深刻化を受け、次世代用車両や航空分野では比強度、比剛性に優れるFRP（繊維強化複合材料）が構造部材として期待されている。さらなる高機能化に向け3次元繊維強化構造やナノファイバーなど複雑な強化形態が開発される中で、安全性・信頼性確保の面から繊維と樹脂から成るマイクロ構造の不確定性因子（幾何形状や物性）が力学的特性に及ぼす影響の評価や、マイクロ構造から実構造物への力学的特性評価に供するマルチスケール解析技術が求められている。本研究ではマイクロ構造の不確定性として繊維配置のランダム性、成形時の残留応力、繊維／樹脂界面挙動を扱い、マイクロ構造の力学的特性の評価手法の構築とマイクロ構造の不確定性を考慮したマルチスケール解析手法の構築を目的とした。

第1章では、FRPのマイクロ構造の力学的特性評価手法およびマルチスケール解析技術の現状・問題点を整理し、研究目的、研究手順を示した。

第2章では、マルチスケール解析手法として、繊維束の強化形態であるメゾ構造モデルの非主軸方向へ負荷を可能とする周期境界条件と、樹脂と繊維束を独立してモデルを生成しマクロモデルに重畳させる手法を提案した。また、マルチスケール解析においてマイクロ構造の不確定性を考慮する解析手法の概要について述べた。

第3章では、マイクロ構造のモデルとして、解析コストの軽減のために2本の繊維によってランダムな繊維配置を扱うモデリング手法を提案した。繊維／樹脂界面挙動の評価には界面要素を導入し、単繊維埋蔵試験片の引張試験とFEMとの比較により界面要素の損傷条件を同定した。また、残留応力を考慮し評価を行う手法についても述

べた。

第4章では、マイクロ構造の解析結果について述べ、繊維周辺の応力状態の非周期性から提案するモデリング手法の妥当性を示し、残留応力や繊維間距離が損傷挙動に及ぼすメカニズムについて考察した。また、2本の繊維から多数本繊維が含まれるスケールへの展開を図り、その強度推定手法を提案した。強度のばらつきが実験結果とも良い整合性を有することから提案手法の妥当性と有用性を示した。

第5章では、前章までの手法に基づきマイクロ構造の不確定性に起因する強度のばらつきを考慮し、マルチスケール解析によりメゾ構造モデルの繊維束の破壊確率を評価した。特に、一次近似法の適用により解析の高効率化を可能とした。本手法によりマイクロな特性からマクロの挙動を評価することでFRP製構造物の設計コストの削減および設計期間の短縮化への寄与を示した。

第6章では、得られた結果と知見を記述し、結論とした。

## 論文審査の結果の要旨

地球温暖化や化石資源枯渇による環境・エネルギー問題の深刻化を受け、次世代用車両や航空分野では比強度、比剛性に優れるFRP（繊維強化複合材料）が構造部材として着目されている。さらなる高機能化に向け3次元繊維強化構造やナノファイバーなど複雑な強化形態が開発される中で、安全性・信頼性確保の面から繊維と樹脂から成るマイクロ構造の不確定性因子（幾何形状や物性）が力学的特性に及ぼす影響の評価や、マイクロ構造から実構造物への力学的特性評価に供するマルチスケール解析技術が求められている。かかることから、マイクロ構造の不確定性として繊維配置のランダム性、成形時の残留応力、繊維／樹脂界面挙動を扱い、マイクロ構造の力学的特性の評価手法の構築とマイクロ構造の不確定性を考慮したマルチスケール解析手法の構築を研究目的としている。

まず、相対変位ベクトルに基づく周期境界条件を用いて、繊維束の強化形態であるメゾ構造モデルを対象に任意の引張負荷方向での力学的特性評価を可能とする手法を提案している。さらに、樹脂と繊維束を独立してモデルを生成しマクロモデルに重畳させるマルチスケール解析を実施し、織物複合材料の非主軸荷重下での力学的挙動評価などに適用可能であることを示している。

さらに、一方向繊維強化複合材料を構成するマイクロ構造のモデルとして、解析コストの低減のために2本の繊維に着目し、その繊維配置をランダムに扱うことが可能である傾斜ユニットモデルを用いたモデリング手法を提案している。単繊維埋蔵試験片の実験結果と数値解析を併用して繊維／樹脂界面特性を評価し、残留応力も考慮したマイクロ構造の力学的特性評価を行っている。既往の古典的モデルと提案手法でのモデルを用いた繊維配置のランダム性を評価した結果、繊維周辺の応力状態の非周期性から提案手法の妥当性を示し、残留応力や繊維間距離が損傷挙動に及ぼすメカニズムを明らかにしている。また、2本の繊維から多数本繊維が含まれるスケールへの展開を図り、強度推定手法を提案している。強度のばらつきが実験結果とも良い整合性を示すことから提案手法の有用性を示している。

また、上述の手法に基づきマイクロ構造の不確定性に起因する強度のばらつきを考慮し、マルチスケール解析により織物複合材料の破壊確率評価に展開している。特に、傾斜ユニットモデルと織り構造モデルとのスケール差を考慮すべく、繊維が複数本存在するモデルを設け、計算の効率化を高めるためボクセル要素で構成されたモデルを提案している。ボクセル要素で得た強度のばらつきを織り構造モデルに反映し、一次近似法を用いた破壊確率評価を行っている。その結果、非主軸負荷下において、マイクロ構造の強度のばらつきにより織物複合材料が異なる損傷挙動を示す点を明確にしている。

以上のように、本論文は、不確定性を有するFRPのマイクロ構造に対し適用可能なマルチスケール解析手法について研究したものであり、新規性、独創性及び有用性に優れており、FRP製構造物の設計コストの削減ならびに開発期間の短縮化へ寄与するところは大きいと考える。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。