

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06597

研究課題名(和文) CFRPの損傷・破壊に関するマルチスケールモデリングの構築と構造設計への応用

研究課題名(英文) Establishment of multiscale modeling for the CFRP and its application to the structural design

研究代表者

岡部 朋永 (OKABE, Tomonaga)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50344164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：一般に、CFRPは、炭素繊維とマトリクス樹脂による微視的な構造を有している。これにより複雑な損傷挙動を示す。これらスケールの異なる力学挙動を、正確に把握することがCFRPの特性を活かした設計につながると考えられる。これまでマルチスケールシミュレーションはあくまで補足的に用いられており、積極的に機体設計にまで組み込んだ例は見当たらない。そこで、本研究ではこれらの現象を体系的に取り扱うマルチスケールモデリングに基づく機体設計手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：Recently, instead of conventional metal, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites are applied to the main structural members in the transport aircrafts. For example, 50% volume percent of the main body of Boeing 787 consists of CFRP. It is well known that the design approach of metal aircrafts cannot be applied to CFRP aircrafts because the damage and failure process of CFRP is quite unique owing to the hierarchical microstructure. However, in the real design, the strain criterion which is used in the design of metal aircrafts has been applied to the development of new transport aircrafts. This approach cannot cover with the several problems including edge delamination, impact damage, transverse cracks and micro damages seen in the CFRP structures. Based on these backgrounds, multiscale modeling which addresses plural damages and systematically organizes the models has been presented in this study.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料 マルチスケールモデリング 分子シミュレーション 機械特性評価

### 1. 研究開始当初の背景

近年航空機の構造部材として、金属に代わり炭素繊維強化プラスチック複合材料 (CFRP) が用いられてきている。例えば、ボーイング 787 は体積比の 50% までが CFRP によりできており、エアバス社もそれに追従している。この CFRP を用いた航空機体設計においては、金属に用いられてきた設計法のそのままの転用では、CFRP の高い比強度、比剛性を十分活かすことができない。よって、航空機構造に一般に用いられる CFRP では、繊維と樹脂といった材料内部の微細構造から構造様式に至るまでの幅広いスケールの特性が包括的に検討されるべきである。これらを考慮しない従来通りの設計の場合、設計者は複合材料特有の力学挙動を予測できない不安感から、どうしても保守的な設計となってしまう。更に革新的な設計を行うためには、材料構成から航空機構造における巨視的な強度・剛性だけでなく、機体性能を決定する空力特性に至るまでの、出来るだけ多くの情報を設計に組み入れるのが望ましい。また、CFRP においては、構成素材であるマトリックスに大きく影響を受ける。このマトリックス樹脂の特性は材料内部の分子構造に強く影響を受ける。このため、ボーイングを始めとする OEM では機体開発に分子シミュレーションを組み込もうという試みがなされている。

### 2. 研究の目的

一般に、CFRP は炭素繊維とマトリックス樹脂による微視的な構造を有している。また、航空機体では炭素繊維を所定の向きに積層した積層板として使用することで、面内に必要な弾性特性を得ている。よって、積層板内の層ごとには異なる応力・ひずみが生じ、これにより複雑な破壊挙動を示す。加えて、積層板では、所定のひずみが負荷されると特に自由端部あるいは応力集中部にてメソスコピックな損傷の発生が見られることが知られている。これらスケールの異なる力学挙動を、正確に把握することが CFRP の特性を活かした設計につながると考えられる。これまでマルチスケールシミュレーションはあくまで補足的に用いられており、積極的に機体設計にまで組み込んだ例は見当たらない。つまり、航空機構造に CFRP を用いるために強度解析を行う上では、複合材構造部材としてのマクロスケール、応力集中部等のメソスケール、繊維・マトリックスなどのミクロスケールといった全てのスケール (マクロ・メソ・ミクロ) 間の相互作用を考慮して設計することが重要となる。そこで、本研究ではこれらの現象を体系的に取り扱うマルチスケールモデリングに基づく機体設計手法を構築した (図 1)。加えて、複合材料を構成するマトリックス樹脂の特性を分子シミュレーションにより再現し、それを機体設計にまで結びつける取り組みを行う。分子レベルから構造部材レベル

までの複合材料における損傷・破壊現象を統一的に体系づける。このような取り組みは複合材料分野においては世界でも類を見ない。本取り組みにより、多スケールにわたる損傷・破壊を統一的に扱った複合材構造の解析が可能となり、信頼性・安全性の高い構造設計が可能となる。

### 3. 研究の方法

本研究では、ボーイング 787、777、797 や MRJ 等の長距離から近距離リージョナルジェットといった様々な規模の航空機を対象とし、機体設計上重要となる航空機主翼構造について、CFRP を使用した場合を想定し、材料内部のミクロスケールから構造全体のマクロスケールまでのマルチスケールモデリングを実施した。まず、概念設計に必要な旅客数、航続距離、離発着の滑走路距離、エンジン推力といった最低限の諸元情報だけで翼形状、部分構造様式、補強材および翼面の厚さに至るまでを詳細に設計出来る統合解析ツールを 2016 年度までに開発した。加えて、主翼にかかる荷重も CFD により算出した。荷重下での CFRP 主翼の解析には 3 つのスケールが存在する。巨視的解析には従来の設計手法に基づき、構造要素を用いた有限要素解析により検討を行った。積層板内には製造時に少なからず発生していると考えられる層間剥離等の欠陥つまりメソスケールの損傷・クラックには、結合力要素あるいは XFEM といった近年開発された要素メッシュ技術を駆使した。最も小さなスケールであるマイクロスケールには均質化解析を用いた。均質化解析では繊維と樹脂で構成された内部の損傷発生挙動を解析することができる。これら必要なデータを相互に受け渡すことで解析した。このように複数のスケールをブリッジし、その解析結果を制約条件等で CFRP 主翼の設計に組み込んだ。さらに、マトリックスの特性評価手法として、分子動力学シミュレーションを構築し、これより得られた物性を均質化法に組み込んだ。

### 4. 研究成果

先に述べた方法に基づき、次のような成果を得た。

#### (1) マクロからミクロ (業績 )

CFD により算出された空力荷重を構造部材に負荷した際の各部材のひずみを、6 成分全てにおいて算出し、均質化解析に組み入れることで、破壊の形態をシミュレートした。設計上の制約条件となりうる。

#### (2) ミクロからマクロ (業績 )

均質化解析により、横等方性に関する 5 つの弾性定数と各種強度を算出した。弾性定数は有限要素解析による構造解析に、強度はテンソル形式にて与えられた破壊則に導入する。このことで、スケール間の橋渡しが可能となる。(図 2)

(3) マクロからメゾ(業績 , )  
各構造部材における応力集中部の巨視的なひずみを算出し、ソリッド要素からなる重合メッシュを用いたズームイン解析の境界条件として与えた。与えられた境界条件を基に結合要素あるいは XFEM を用いてクラック進展を解析した。(図3)

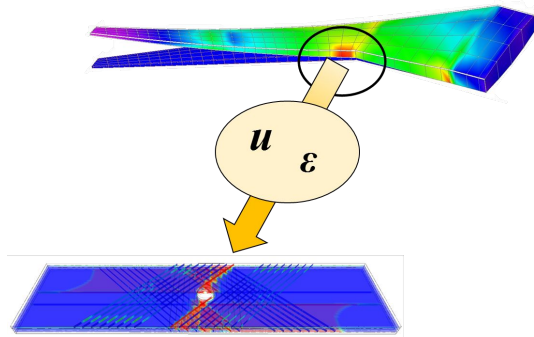


図3 マクロからメゾの図

(4) メゾからマクロ(業績 , )  
メゾモデルから得られたクラック進展解析を基に、巨視的等価物性あるいは強度に変換することで、有限要素解析による構造解析に反映させた。(図4)

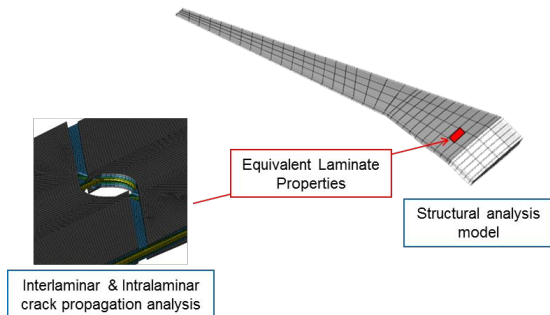


図4 メゾからマクロの図

(5) 分子からミクロ(業績 , , )  
マトリクス樹脂分子構造に力学的負荷や温度変化を与えた際、分子構造がどのように変化するかを明らかにするため、分子シミュレーションコードを作成した。また、分子シミュレーションにより得られた樹脂特性を用いた連続体損傷力学による微視構造破壊シミュレーション技術を開発した(図5)。これらは実験により検証している。(図6、7)

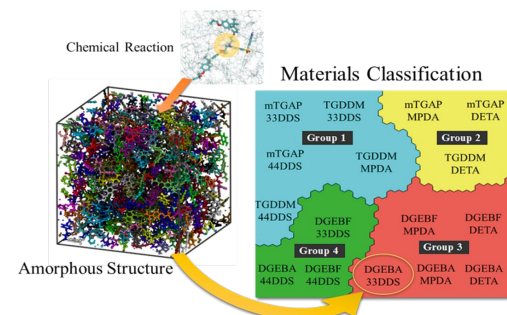


図5 分子からミクロおよび材料選択

これら要素技術により、構造解析に利用する巨視的剛性の算出だけでなく、構成素材ごとに異なる力学挙動あるいは損傷プロセスを正確に再現でき、最適な設計が行なえるようになった。

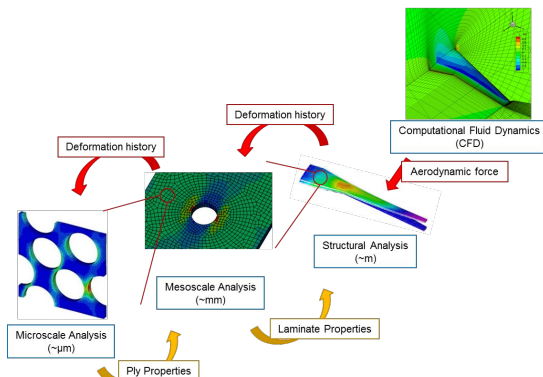


図1 先進複合材主翼に関するマルチスケールデザイン

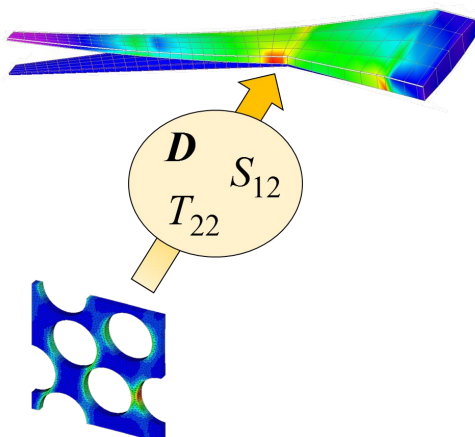


図2 ミクロからマクロの図



図6 マトリクス樹脂の物性評価：熱物性測定

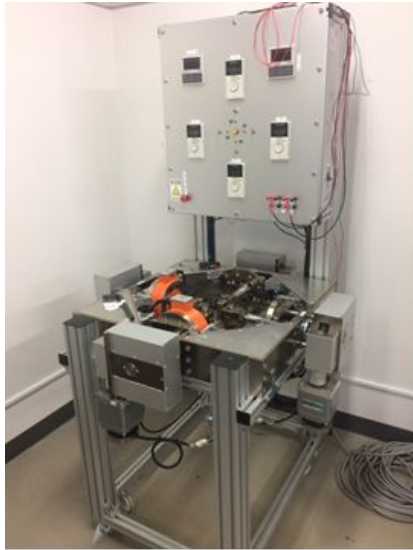


図7 マトリックス樹脂の物性評価：  
機械的特性測定

## 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 10 件)

Yutaka Oya, Kyosuke Inuyama, Tomonaga Okabe, Jun Koyanagi & Ryosuke Matsuzaki, Analysis of structure characteristics in laminated graphene oxide nanocomposites using molecular dynamics simulation、Advanced Composite Materials、査読有、未定(巻)、2018年、1-12、DOI: [10.1080/09243046.2017.1407278](https://doi.org/10.1080/09243046.2017.1407278)

Yuta Kumagai, Sota Onodera, Yoshiko Nagumo, Tomonaga Okabe, Kenichi Yoshioka, Multiscale modeling of free-surface effect on crack formation in unidirectional off-axis laminates、Composites: Part A、査読有、98巻、2017年、136-146、

DOI:

[10.1016/j.compositesa.2017.03.016](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.016)

Tomonaga Okabe, Sota Onodera, Yuta Kumagai and Yoshiko Nagumo、

Continuum damage mechanics modeling of composite laminates including transverse cracks、

International Journal of Damage Mechanics、査読有、未定(巻)、2017年、1-19、

DOI: 10.1177/1056789517711238

Sota Onodera, Yoshiko Nagumo & Tomonaga Okabe、Prediction for progression of transverse cracking in CFRP cross-ply laminates using Monte Carlo method、Advanced Composite Materials、査読有、26巻、2017年、477-491、

DOI: [10.1080/09243046.2017.1325076](https://doi.org/10.1080/09243046.2017.1325076)

R. Higuchi, T. Okabe, A. Yoshimura, T. E. Tay、"Progressive Failure under High-Velocity Impact on Composite Laminates; Experiment and Phenomenological Mesomodeling"、Engineering Fracture Mechanics、査読有、178、(2017)、346-361

R. Higuchi, T. Okabe, T. Nagashima、"Numerical simulation of progressive damage and failure in composite laminates using XFEM/CZM coupled approach"、Composites Part A: Applied Science and Manufacturing、査読有、95、(2017)、197-207

Yutaka Oya, Gota Kikugawa and Tomonaga Okabe、"Clustering approach for multidisciplinary optimum design of cross-linked polymer"、Macromolecular Theory and Simulations、査読有、26、(2017)、1600072

Tomonaga Okabe, Yutaka Oya, Koichi Tanabe, Gota Kikugawa, Kenichi Yoshioka、"Molecular Dynamics Simulation of Crosslinked Epoxy Resins: Curing and Mechanical Properties"、European Polymer Journal、査読有、80、(2016)、78-88

Tomonaga Okabe, Yuta Kumagai, Ryo Higuchi and Masaaki Nishikawa、"Onset of Matrix Cracking in Fiber Reinforced Polymer Composites: A Historical Review and a Comparison Between Periodic Unit Cell Analysis and Analytic Failure Criteria"、Advanced Structured Materials、査読有、64、(2015)、299-317

T. Okabe、"Recent studies on numerical modelling of damage progression in fibre-reinforced plastic composites"、Mechanical Engineering Reviews、査読有、2(1)、(2015)、1-11

[その他]

ホームページ等

<http://www.plum.mech.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

岡部 朋永 (OKABE, Tomonaga)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50344164