

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18310

研究課題名（和文）CFRP航空宇宙構造の内部微小欠陥のモデル化とマルチスケール損傷解析

研究課題名（英文）Multiscale modeling and damage simulation of CFRP aerospace structure including microscopic imperfection

研究代表者

吉村 彰記 (Yoshimura, Akinori)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20462898

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、CFRP内の繊維よれがマクロな材料特性に与える影響を評価するため、以下の2つの研究に取り組んだ。CFRP中の繊維よれを定量化する手法の提案 繊維よれを考慮に入れたマルチスケール解析手法の提案。

では、織物CFRPのマイクロフォーカスX線CT像を用いて、画像解析技術を組み合わせることにより、織物CFRP内の繊維うねりを定量化する方法を提案した。

では、繊維うねりを繊維の理想的な位置からの摂動であるとし、摂動法を用いてこれを解析に導入する手法を提案した。この手法により、繊維うねりを考慮しない、理想的な解析モデルを準備し、繊維うねりをモデルへの入力として解析することが可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

で得られた繊維うねりの定量化方法は、様々なCFRPに対して容易に使用することが可能である。したがって、CFRP内のうねりの定量化に対する寄与は大きい。広く複合材料工業に適用が期待される。

で得られた摂動法を用いた有限要素解析手法については、うねりを単一のモデルを用いて表現できることから、うねりの解析のコストを大幅に下げることが可能であり、複合材料工学に与える利点は大きい。このような解析は世界的にも類例はなく、今後、解析を非線形解析にも展開することが今後の課題である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted the following two subtopics in order to evaluate the effect of fiber waviness in CFRP on the macroscopic material properties: (a) To propose a method for evaluating the fiber waviness in CFRP, (b) To propose a multi-scale finite element analysis method that considers the effect of fiber waviness.

In (a), we proposed a method for evaluating the fiber waviness in the 3-dimensional woven CFRP by applying image analysis technologies to the micro-focus X-ray CT technology.

In (b), we regarded the fiber waviness as perturbation of the fiber position from the nominal position. We, therefore, proposed the model that considers the fiber waviness by using perturbation method. By using the method, the effect of the fiber waviness can be simulated by idealized CFRP model, in which fiber waviness is not included. Fiber waviness is given as the input to the model.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料 有限要素解析 材料欠陥 損傷解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空宇宙構造は軽量であることが求められる。このため、軽量・高剛性・高強度な炭素繊維複合材料(CFRP)の適用が進んでいる。CFRPはその製造コストが高価であることが大きな問題になっており、従来のプリプレグ-オートクレーブ成形プロセスに代わり、真空樹脂含浸法(VaRTM法)や、Out-of-autoclave(OoA)成形法などの低コスト成形法を適用する動きが進んでいる。

CFRPには繊維のよれ、樹脂中の空隙(ポイド)、樹脂の未含浸領域などの微視的な材料欠陥(微小欠陥)が不可避免的に発生する。特に低コスト成形法ではこれらの微小欠陥は従来の成形法よりも生じやすい。微小欠陥による剛性・強度の低下は構造の最終的な強度を決定する可能性があることから、微小欠陥が構造のマクロな力学特性に与える影響を評価することが重要である。

近年の技術の進歩により、工業用マイクロフォーカス X 線 CT を用いて CFRP 内の微小欠陥を三次元的に観察することが可能になった。既存の研究では、これを用いて炭素繊維一本ごとのモデル化を行っている例が多く見られる。しかし、主に計算機リソースの制約から、このようなアプローチではせいぜい数本から数十本の繊維を含んだモデルを作成することが限界であり、構造解析にまで結びつく、実用的な解析にはなりえない。微小欠陥の影響が構造の力学特性に与える影響を評価する方法論は確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、CFRPの微小欠陥がマクロな材料特性に与える影響を評価する手法を確立することを最終目的とした。CFRPの内部では剛性の高い炭素繊維がほとんどの荷重を負担するため、微小欠陥の中でも繊維よれが最重要項目であると考えた。このため本研究では、繊維よれの影響を含んだマルチスケール損傷シミュレーション技術を開発することを目的とした。

具体的な研究目的としては(1)CFRP中の繊維よれを定量化する手法を提案し、繊維よれを数値モデル化する、(2)繊維よれを考慮に入れたマルチスケール解析手法を提案する、の2つの目的を設定した。

3. 研究の方法

(1) CFRP中の繊維よれを定量化する手法の提案・繊維よれの数値モデル化

本研究では、まずマイクロフォーカス X 線 CT を用いて撮影した CFRP の三次元断層画像から、繊維よれを定量化する手法を提案した。三次元織物複合材料に対してマイクロフォーカス X 線 CT 断層撮影を実施し、その各層ごとの画像に画像解析を施すことにより、繊維束の位置を二値化して抽出し、定量化を行った。

(2) 繊維よれを考慮に入れたマルチスケール解析手法の提案

マルチスケール解析手法としては、均質化法に基づくマルチスケール有限要素解析を行った。繊維よれの考慮については、繊維のよれを繊維の名目上の位置(ノミナル位置)からのずれ(摂動)であると考え、摂動理論(Perturbation theory)を用いてモデル化した。解析結果は従来の有限要素法と比較することによって検証した。

4. 研究成果

(1) CFRP中の繊維よれを定量化する手法の提案・繊維よれの数値モデル化

本研究では、マイクロフォーカス X 線 CT を用いて三次元織物 CFRP 中の繊維よれを定量化した。研究に用いた研究に用いたマイクロフォーカス X 線 CT 装置は Carl Zeiss 社の Xradia MicroXCT-200 という機種であり、 $11.6 \mu\text{m}/\text{voxel}$ の解像度で断層画像を取得することが可能である。繊維よれを定量化するために用いた三次元織物複合材料の断層画像を図 1 に示す。図には繊維束と樹脂がとらえられているが、この解像度では数 μm という直径を持つ炭素繊維一本一本を分解することはできない。

得られた CT 画像データを元に、画像解析を施すことにより、繊維位置を定量化した。まず、各画像に対して Non-Local Means フィルタを適用することによりノイズ処理を行った^①。次に Deriche フィルタによる境界検出^②を用いることにより、繊維束境界を取り出した。CT 画像をそのまま用いると解析コストが非常に大きくなるため、 $4 \times 4 \times 4$ ボクセルを平均して 1 ボクセルとして解像度を落として画像の二値化を行った。この後、途切れた繊維束境界を手動で補間している。境界線を補間した画像を図 2 に示す。

これにより、境界の内部をすべて炭素繊維束であるとし、残った部分をすべて樹脂であると仮定した三次元モデルを作成したこれにより、三次元的な繊維束の配置を抽出することが可能となった(図 3)。繊維束のうねりやくびれ、よれを定量化できていることがわかる。

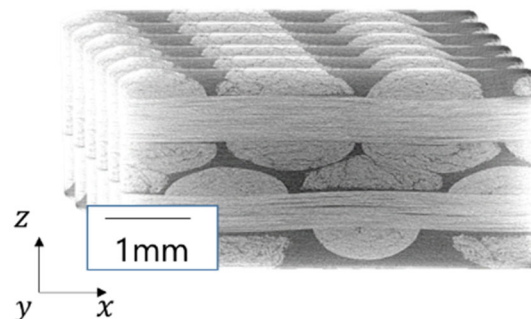


図 1 定量化に用いた三次元織物複合材料

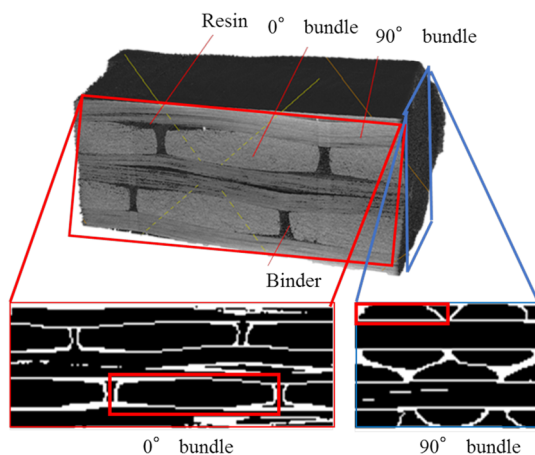


図2 繊維束境界の抽出

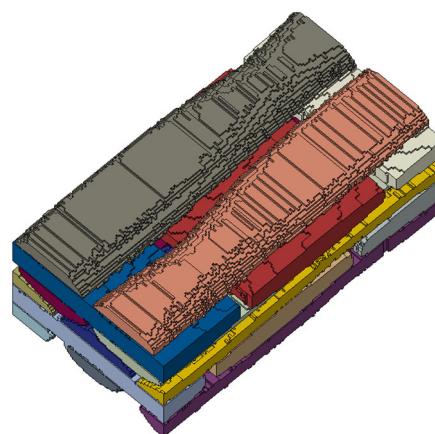


図3 二値化された繊維束

以上のようにして得られた繊維束モデルに対して、各繊維束の重心を抽出した。また、重心部から8方向に直線を引き、直線と繊維束の境界が交わる点を抽出した。これらの点を異なる断層ごとにつなぎ合わせることで、繊維束内部の繊維方向を抽出した(図4)。この方法により繊維のよれ、くびれに応じた繊維方向の変化を算出することができる。

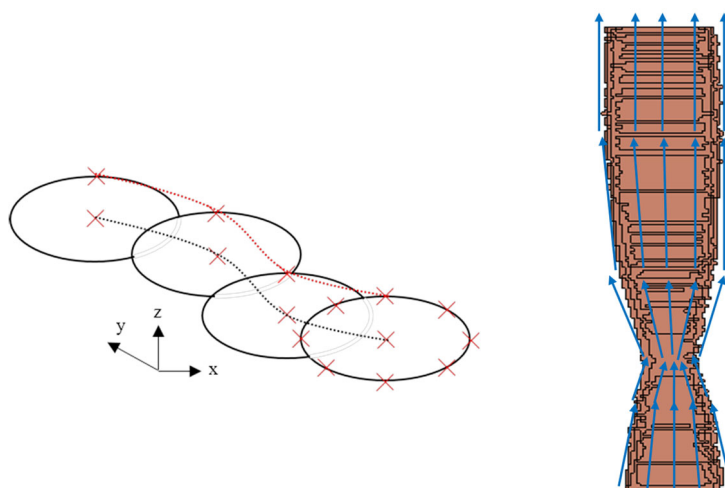


図4 繊維束方向の抽出手法

以上から、三次元織物複合材料中の CFRP 中の炭素繊維束の位置のずれ、繊維束内の繊維方向の変化の両方を定量化、モデル化できる技術確立した。繊維束状の構造のない、一方向 CFRP プリプレグを積み重ねて作成された CFRP については、報告者が以前に実施した研究^③によって繊維のよれを算出することができるため、プリプレグを用いた CFRP、織物 CFRP とともに、繊維よれを算出できる技術が確立された。

(2) 繊維よれを考慮に入れたマルチスケール解析手法の提案

繊維うねりの影響を有限要素法を用いて解析する際、最も単純な方法は、繊維うねりの形状を直接的に有限要素モデルに組み込んで解析を実施することである。しかし、この方法では、うねりのパターンが変化するたびに異なるモデルを作成する必要がある。また、このモデルの作成には大きな手間がかかる。したがって、より手間の小さな別の手法を提案する必要がある。

本研究では、繊維うねりを、繊維の幾何学的な位置が理想状態からずれたものとして考慮した。この際、うねりのない理想的な(繊維束が真っ直ぐな)CFRP の有限要素モデルを用意し、ここに繊維束の位置ずれを入力として与えることにより解析できる方法を提案した。これにより、多数のモデルを用意する必要がなくなった。

定式化の概要を以下に示す。節点が理想的な位置からずれたとき、各接点に対し、ずれを $e\hat{u}_i^l$ というベクトルとして与える(これは(1)で提案された手法から算出することが可能である)。ここで e は後に摂動法のパラメータとして用いる。繊維うねりを含まない、理想的な位置を参照配置、

ずれた後の配置を不完全配置、その後、メカニカルな荷重がかかって変位が生じた状態を現配置とする。メカニカルな変形に関するひずみは、不完全配置→現配置間の変位を、不完全配置で微分することによって求められる。本研究では、不完全配置→現配置間の変位を、偏微分の連鎖則を用いて、参照配置での微分に変換する手法を提案した。これにより、不完全配置→現配置間のひずみを、参照配置を用いて表現することが可能になった。すなわち、うねりを含まない、理想的な有限要素解析モデルを用いて、うねりを含んだ CFRP の解析が可能となった(図 5)。

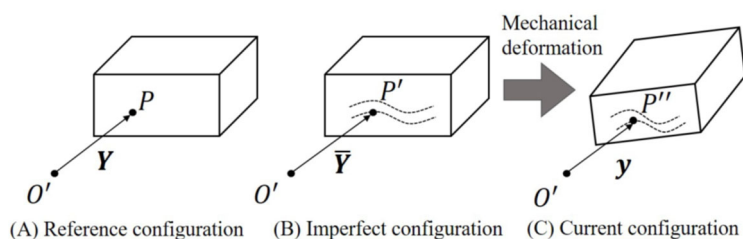


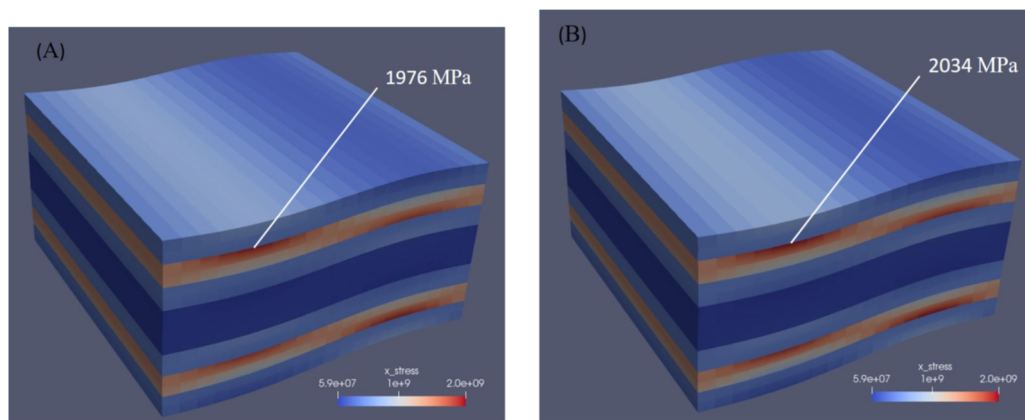
図 5 本研究で考慮した 3 つの配置

理想的な有限要素モデルを用いた解析は、摂動法(Perturbation method)を用いて実施した。摂動法とは、理想状態から微小にずれた問題に対する微分方程式の解を理想状態の解からの摂動展開によって表せると仮定して解く手法である。今回は、有限要素法の解である、変位を下記のような摂動展開を用いて表現した。

$$u_i^l = u_i^{l0} + e u_i^{l1} + e^2 u_i^{l2} \dots$$

ここで、本研究では 2 次のオーダーまでの摂動展開のみを考慮した。定式化の詳細はここでは省くが、詳細については参考文献^①を参照いただきたい。本手法を用いることにより、どのような繊維うねりのパターンであっても、単一の理想的な CFRP モデルを用いて解析することが可能となり、解析に必要なコストを大きく減少させることができる。

解析の精度について、従来の有限要素法と比較することによって検証した。図 6 に、うねりを持った CFRP に対して従来の手法と提案手法の結果得られた応力分布を比較したものである。提案した手法は十分な精度で応力分布を表現することができていることがわかる。



(a) 従来の有限要素手法による結果

(b) 提案手法による解析結果

図 6 提案手法の従来手法との比較による検証

(3) 得られた成果の国内外における位置づけ、今後の展望

(1)で得られた繊維うねりの定量化方法は様々な CFRP に対して使用することが可能であり、うねりの定量化に対する寄与は大きいと考えている。研究背景にも記したとおり、X 線 CT を用いた研究は繊維一本を可視化する方向に向かっており、本研究のような繊維束レベルのうねりを定量化する手法については類例はないといえる。今後の展望については、様々な CFRP の実際の計測を進めていきたいと考えている。

(2)で得られた摂動法を用いた有限要素解析手法については、うねりを単一のモデルを用いて表現できることから、うねりの解析のコストを大幅に下げることが可能であり、複合材料工学に与える利点は大きいと考える。このような解析は世界的にも類例はない。現在、繊維方向の変化も考慮に入れた解析手法への拡張作業を実施しており、この拡張を導入した結果を投稿論文として公刊すべく準備中である。今後の展望については、今回の解析は線形解析のみに適用が可能なるものであることから、非線形解析への展開が今後の課題である。

<引用文献>

- ① A.Badess, B.Coll and J.M.Morel, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol2, pp.60-65, 2005
- ② R.Deriche, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol . 12, pp.78-87, 1990
- ③ A. Yoshimura, R. Hosoya, J. Koyanagi, T. Ogasawara, *Advanced Composite Materials*, Vol.25(1), pp. 19-30, 2016
- ④ 杉浦, 吉村, 荒井, 後藤, 第25回計算工学講演会論文集, 2020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Akinori Yoshimura, Anthony M. Waas, Yoshiyasu Hirano	4. 巻 153
2. 論文標題 Multiscale homogenization for nearly periodic structures	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 345-355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruct.2016.06.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Akinori Yoshimura
2. 発表標題 Multiscale Analysis of CFRP Laminates Including the Effect of Fiber Waviness
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉村 彰記, 橋本 裕之, 森本 哲也, 荻原 慎二
2. 発表標題 織物CFRPの材料不整の測定およびそれが材料特性に与える影響の評価
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本 裕之, 吉村 彰記, 森本 哲也, 荻原 慎二
2. 発表標題 三次元織物複合材料の微視構造モデル化と損傷観察に基づく検証
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akinori Yoshimura
2. 発表標題 Multiscale Simulation of CFRP Considering Geometrical Imperfection
3. 学会等名 Memorial Workshop on Composite Materials for Aircraft and Aero Space Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉村 彰記
2. 発表標題 微視的な幾何学的不整を含むCFRPのマルチスケール解析
3. 学会等名 第22回 計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉村 彰記
2. 発表標題 微視的な幾何学的不整を含むCFRPのマルチスケール解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2018年講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村 彰記
2. 発表標題 微視的な幾何学的不整を含むCFRPのマルチスケール解析
3. 学会等名 第23回 計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akinori Yoshimura
2. 発表標題 Multiscale Analysis of CFRP Laminates Including the Effect of Fiber Waviness
3. 学会等名 American Society for Composites 33rd Annual Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村 彰記, Anthony M. Waas
2. 発表標題 微視的な幾何学的不整を含むCFRPのマルチスケール解析
3. 学会等名 第22回 計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akinori Yoshimura, Takanori Sugiura, Keita Goto, Masahiro Arai
2. 発表標題 Perturbation Analysis for Microscopic Imperfection in the CFRP Laminates
3. 学会等名 16th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉浦 孝典, 吉村 彰記, 荒井 政大, 後藤 圭太
2. 発表標題 繊維うねりを有するCFRPの摂動法に基づくマルチスケール解析
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----