

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870101

研究課題名(和文) 航空機用複合材構造の高度設計開発に向けた新規BBAの構築

研究課題名(英文) Establishment of a novel BBA for advanced design and development of composite structures for aircraft

研究代表者

松田 哲也 (MATSUDA, Tetsuya)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：90345926

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、航空機用複合材構造の高精度・高効率な設計開発を目指した新規BBA (Building Brock Approach) の構築を目的とし、まず、ミクロ・メゾ・マクロを完全にリンクしたトリプルスケール非弾性材料モデリング手法の構築、およびその実験的検証を行った。さらに、平織繊維強化複合材料のマクロ挙動を精度良く再現するマクロ構成モデルの作成、および汎用有限要素解析ソフトウェアへの組み込みを実施し、それにより複合材構造の高精度有限要素解析を可能にした。

研究成果の概要(英文)：In this study, to establish a novel BBA (Building Brock Approach) for highly accurate and efficient design and development of composite structures for aircraft, a triple-scale inelastic modeling method fully linking the micro-, meso- and macro-scales was developed and experimentally validated. Moreover, a macroscopic constitutive model accurately reproducing macroscopic behavior of plain-woven fiber-reinforced composites was developed, and then was implemented into commercial finite element analysis software, enabling to perform accurate finite element analysis of composite structures.

研究分野：計算力学，材料力学

キーワード：複合材料 BBA マルチスケール 均質化 非弾性

1. 研究開始当初の背景

(1) 低炭素社会の実現に向け、重要なポイントの一つとなるのが、我が国の炭素排出量の約2割を占める運輸部門の低炭素化である。我が国では、宇宙航空研究開発機構(JAXA)を中心に、機体軽量化・エンジン軽量化による航空機の低炭素化が取り組まれてきた。この軽量化において切り札の一つとなるのが、複合材構造の積極的な導入である。実際、米ボーイング社のB787は、機体の約5割(重量比)を複合材構造とすることにより、燃料消費量を約2割削減した。

(2) 上記のように、複合材構造により航空機を製作する技術は、今日不可欠なものとなっており、この分野における我が国の学術的・産業的な競争力を国際的に維持・発展させることは、極めて重要な課題である。

(3) 航空機用複合材構造を設計開発するにあたり有用な手法に、BBA(Building Block Approach)がある。これは、航空機構造をミクロレベルからマクロレベルまで階層的に捉えた上で、まず下層を実験等によるデータ蓄積に基づき確立し、それを一段上層での設計に反映させるという行程を積み重ねることで、最終的に最上層の実構造まで到達するというものである。

(4) しかしこの手法では、一つの階層を確立するのに相当数の実験を要するという問題点がある。すなわち、複合材においては、繊維と母材の組み合わせや繊維の体積率・配列の仕方等のパターンが無数に存在するため、十分なデータを蓄積するためには、膨大な数の実験が必要となる。

(5) 上述の問題を解決するために極めて有用な手法として、マルチスケール解析の導入が考えられる。この手法を用いて、複合材のミクロ・メゾ・マクロの各スケールをダイレクトにリンクできる材料モデリング手法を開発し、それを用いた新規BBAを構築できれば、航空機用複合材構造の設計開発の精度・効率を飛躍的に向上させられる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、航空機用複合材構造の高精度・高効率な設計開発を目指した新規BBA(Building Block Approach)を構築する。これは二つのステージからなり、第一ステージでは、ミクロ・メゾ・マクロを完全にリンクしたトリプルスケール非弾性材料モデリングにより、繊維強化複合材のマクロ非弾性特性を得る。第二ステージでは、非弾性マクロ構成モデリングにより上記で得たマクロ挙動を精度良く再現するマクロ構成モデルを作成し、それを汎用有限要素解析ソフトウェアに組み込むことで、複合材構造の有限要素解析を可能にする。以上からなる新規BBAを確立し、機体・エンジン軽量化を通じた航空機の省エネルギー化に寄与するとともに、航空機設計開発における我が国の国際

競争力の向上に資する。

3. 研究の方法

(1) まず、複合材に対するトリプルスケール非弾性材料モデリング手法を構築する。このため、複合材構造に用いられる代表的な複合材である平織繊維強化複合材をターゲットとし、そのトリプルスケールモデルを考える。さらに、応募者が開発してきた時間依存変形の均質化法に検討を加え、上記トリプルスケールモデルに対応可能な定式化を行う。

(2) つづいて、トリプルスケール材料モデリングの妥当性を検証するため、平織繊維強化複合材の引張試験を実施し、試験結果をトリプルスケール解析の結果と比較する。

(3) さらに、トリプルスケール材料モデリングにより得られた平織繊維強化複合材のマクロ挙動をできるだけ精度良く再現する非弾性マクロ構成モデルを構築する。

(4) 最後に、得られたマクロ構成モデルを汎用有限要素解析ソフトウェアにユーザーサブルーチンを用いて組み込み、実際の複合材構造の変形解析を試みる。

4. 研究成果

(1) まず、複合材に対するトリプルスケール非弾性材料モデリング手法を構築した。その概要は下記の通りである。

図1のようなマクロ・メゾ・ミクロ構造を有する平織繊維強化複合材を考える。すなわち、複合材全体としてのマクロ構造、繊維束と母材からなるメゾ構造、繊維と母材からなるミクロ構造の三つのスケール構造である。いま、メゾ構造の最小構成単位として基本セルAを、ミクロ構造の最小構成単位として半ユニットセルBを定義する。なお本研究では、マクロ・メゾ・ミクロ各スケールにおける変数に、上付き添え字0,1および2をそれぞれ付すこととする。

まず、Bにおける応力とひずみをそれぞれ

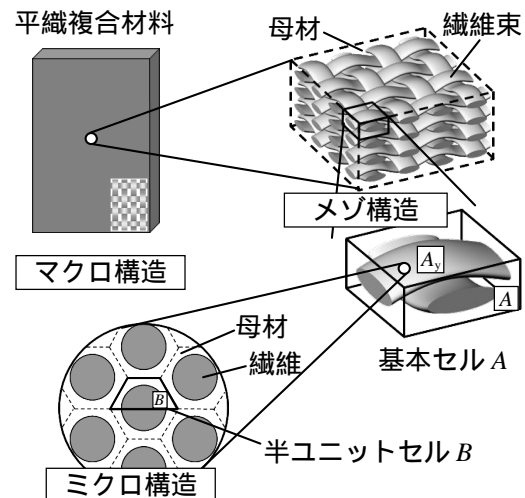


図1. 平織複合材料のトリプルスケールモデル。

${}^2\sigma_{ij}$ および ${}^2\varepsilon_{ij}$, 繊維と母材の弾性剛性テンソルおよび粘塑性関数をそれぞれ ${}^2c_{ijkl}$ および ${}^2\beta_{kl}$ と表し, ミクロ/メゾ間に時間依存均質化理論を適用すると, ${}^2\sigma_{ij}$ の発展式が次のように導かれる.

$${}^2\dot{\sigma}_{ij} = {}^2c_{ijpq} \left(\delta_{pk} \delta_{ql} + {}^2\chi_{p,y_q}^{kl} \right) {}^1\dot{\varepsilon}_{kl} - {}^2c_{ijkl} \left({}^2\beta_{kl} - {}^2\varphi_{k,y_l} \right) \quad (1)$$

ここで $(\cdot)_{,y_i}$ および $(\cdot)_{,y_i}$ は, それぞれ時間 t および y_i に関する微分, δ_{ij} はクロネッカーのデルタを表す. また χ_i^{kl} と φ_i は, ユニットセル問題を解くことで得られる特性関数である. さらに, 上式に B に関する体積平均 $\langle \cdot \rangle_B$ を作用させることで, メゾスケールにおける構成式が次のように導かれる.

$${}^1\dot{\sigma}_{ij} = \left\langle {}^2c_{ijpq} \left(\delta_{pk} \delta_{ql} + {}^2\chi_{p,y_q}^{kl} \right) \right\rangle_B {}^1\dot{\varepsilon}_{kl} - \left\langle {}^2c_{ijkl} \left({}^2\beta_{kl} - {}^2\varphi_{k,y_l} \right) \right\rangle_B \quad (2)$$

同様に, マクロ/メゾ間に均質化理論を適用することで, メゾ応力の発展式および平織複合材料のマクロ構成式は次のように導出される.

$${}^1\dot{\sigma}_{ij} = {}^1c_{ijpq} \left(\delta_{pk} \delta_{ql} + {}^1\chi_{p,x_q}^{kl} \right) {}^0\dot{\varepsilon}_{kl} - {}^1c_{ijkl} \left({}^1\beta_{kl} - {}^1\varphi_{k,x_l} \right) \quad (3)$$

$${}^0\dot{\sigma}_{ij} = \left\langle {}^1c_{ijpq} \left(\delta_{pk} \delta_{ql} + {}^1\chi_{p,x_q}^{kl} \right) \right\rangle_A {}^0\dot{\varepsilon}_{kl} - \left\langle {}^1c_{ijkl} \left({}^1\beta_{kl} - {}^1\varphi_{k,x_l} \right) \right\rangle_A \quad (4)$$

ここで, $(\cdot)_{,x_i}$ は x_i に関する偏微分, $\langle \cdot \rangle_A$ は A に関する体積平均, ${}^1c_{ijkl}$ と ${}^1\beta_{kl}$ はそれぞれ A における繊維束と母材の弾性剛性テンソルおよび粘塑性関数を表す. ここで, 繊維束においては, 式(2)より次の関係がある.

$${}^1c_{ijkl} = \left\langle {}^2c_{ijpq} \left(\delta_{pk} \delta_{ql} + {}^2\chi_{p,y_q}^{kl} \right) \right\rangle_B \text{ in } A_y \quad (5)$$

$${}^1c_{ijkl} {}^1\beta_{kl} = \left\langle {}^2c_{ijkl} \left({}^2\beta_{kl} - {}^2\varphi_{k,y_l} \right) \right\rangle_B \text{ in } A_y \quad (6)$$

以上の関係を用いることで, 全てのスケールを関連付けたトリプルスケール解析が実施可能となる.

(2) つづいて, 上記のトリプルスケール材料モデリング手法の妥当性を検証するため, 平織複合材料の引張試験を実施し, 試験結果をトリプルスケール解析の結果と比較した. その概要は下記の通りである.

まず, TR3110/381GMX炭素繊維/エポキシ平織複合材料平板(三菱レイヨン株製)を入手し, 平板より短冊形試験片(繊維束配向角0, 15, 30, 45度)を切り出した. この試験片を用い, マクロひずみ速度 $10^{-5}[\text{s}^{-1}]$ による単軸引張試験を室温にて実施し, 引張方向における応力-ひずみ関係を取得した.

つづいて, 本研究で開発したトリプルスケール材料モデリング手法による解析を行うため, 平織複合材料の断面を顕微鏡観察し, その結果を用いて, 基本セル A および半ユニットセル B の有限要素モデルを作成した. この解析モデルによりトリプルスケール解析を実施し, 得られた応力-ひずみ関係を実験結果と比較したところ, 非常に精度良く一致し(図2), 開発手法の妥当性が検証された. さらに, 従来手法では考慮できなかったメゾ・ミクロ構造における粘塑性挙動についても, 図3および図4のように解析することが可能となった. なお, SL-E-1ガラス繊維/エポキシ平織複合材料(日東シンコー株製)についても同様の検討を行い, 構成材料が異なる場合にも開発手法が有効に機能することを確認した.

(3) さらに, トリプルスケール材料モデリングにより得られた平織複合材料のマクロ挙動

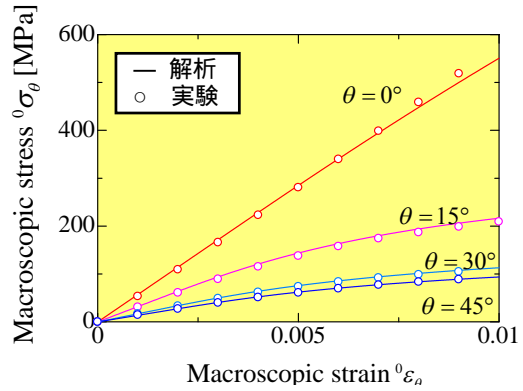


図2. 平織複合材料の応力-ひずみ関係.

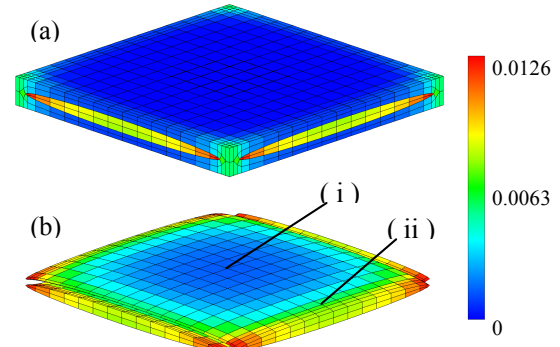


図3. メゾ構造における粘塑性ひずみ分布 (繊維束配向角45度).

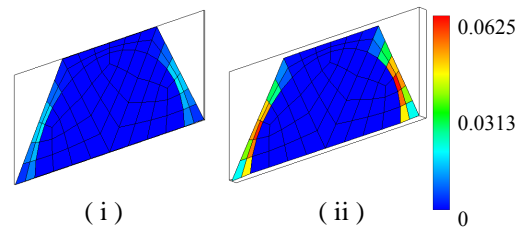


図4. ミクロ構造における粘塑性ひずみ分布 (繊維束配向角45度).

をできるだけ精度良く再現する非弾性マクロ構成モデルを構築した。その概要は下記の通りである。

いま、マクロ応力を Σ_{ij} とすると、その弾-粘塑性構成式は、

$$\Sigma_{ij} = [A](E_{ij} - E_{ij}^p) \quad (7)$$

となる。ここで $[A]$ は均質化弾性剛性であり、また、マクロひずみ E_{ij} は次のように弾性成分 E_{ij}^e と粘塑性成分 E_{ij}^p の和で表されるとする。

$$E_{ij} = E_{ij}^e + E_{ij}^p \quad (8)$$

さらに、マクロ粘塑性変形を表現するため、次の構成式に従うとした。

$$\dot{E}_{ij}^p = \frac{3}{2} \dot{E}_0 \left(\frac{\Sigma_{eq}}{G(\bar{E}^p)} \right)^n \frac{[M]\Sigma_{ij}}{\Sigma_{eq}} \quad (9)$$

ここで、 \dot{E} はマクロ参照ひずみ速度、 Σ_{eq} は相当応力、 n は母材の材料定数、 $G(\bar{E}^p)$ はマクロ相当粘塑性ひずみ \bar{E}^p に依存する硬化関数である。また $[M]$ は、粘塑性変形におけるマクロ異方性を表現するための4階のテンソルである。この $[M]$ を前述したトリプルスケール解析の結果と合うように適切に決定することで、マクロ構成モデルにより複合材料の異方性弾-粘塑性挙動を精度良く表すことに成功した(図5)。

(4) 最後に、上記で得られたマクロ構成モデルを汎用有限要素解析ソフトウェア LS-DYNA にユーザーサブルーチンを用いて組み込み、複合材梁構造の変形解析を実施した(図6)。これにより、マクロ構成および非弾性特性を反映した複合材料の構造解析を極めて効率良く実施可能にした。

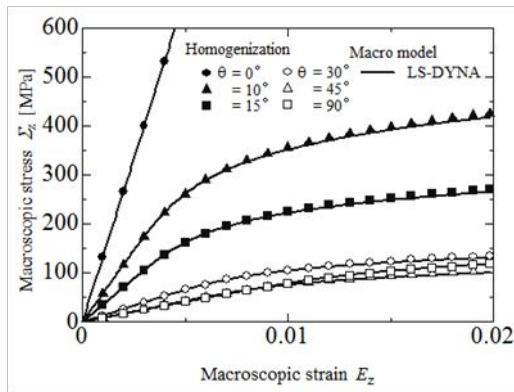


図5. マクロ構成モデルによる複合材料の応力-ひずみ関係。

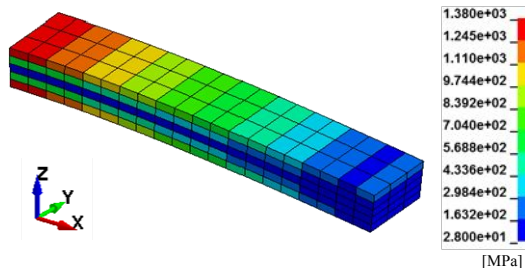


図6. 複合材梁構造の非弾性変形解析(相当応力分布)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計21件)

T. Matsuda, K. Goto, N. Ohno, Effects of Fiber Arrangement on Negative Poisson's Ratio of Angle-Ply CFRP Laminates: Analysis Based on a Homogenization Theory, *Advanced Structured Materials*, Vol. 64 (2015), pp. 219-230, 査読有。

doi:10.1007/978-3-319-19440-0_10

松田哲也, 均質化理論に基づく繊維強化複合材料の時間依存変形解析, *材料*, 64 巻 (2015), pp. 493-500, 査読有。

doi:10.2472/jsms.64.493

荒井政大, 長谷智行, 角孝平, 西村正臣, 松田哲也, Kelvin14面体モデルを用いたCNT強化樹脂の粘塑性特性評価, *日本航空宇宙学会論文集*, 63 巻 (2015), pp. 129-136, 査読有。

https://www.jsass.jp/journal/paper63_4.php

K. Oide, T. Matsuda, Macro/Meso/Micro Elastic-Viscoplastic Analysis of Plain-Woven Laminates Using Homogenization Theory, *Key Engineering Materials*, Vol. 626 (2015), pp. 365-371, 査読有。

doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.626.365

T. Matsuda, K. Goto, N. Kubota, N. Ohno, Negative Through-the-Thickness Poisson's Ratio of Elastic-Viscoplastic Angle-Ply Carbon Fiber-Reinforced Plastic Laminates: Homogenization Analysis, *International Journal of Plasticity*, Vol. 63 (2014), pp. 152-169, 査読有。

doi:10.1016/j.ijplas.2014.05.007

〔学会発表〕(計47件)

松田哲也, 久保凱, 佐藤仁彦, 大垣翼, 豊村仁, 岩下結城, 複合材料の非弾性マルチスケールモデリングとその適用事例, *土木学会関東地区応用力学フォーラム*, 中央大学後楽園キャンパス(東京都文京区), 2016/03/07 発表, 招待講演。

T. Matsuda, K. Goto, N. Ohno, Negative Poisson's Ratio of Elastic-Viscoplastic Angle-Ply CFRP Laminates: Homogenization Analysis, *International Symposium on Plasticity, Damage & Fracture 2015, Montego Bay (Jamaica)*, 2015/01/08 発表, 基調講演。

大出航平, 松田哲也, 後藤圭太, 平織積層板のマクロ/メゾ/ミクロ非弾性解析手法の開発と実験的評価, *日本機械学会第27回計算力学講演会*, 岩手大学(岩手県盛岡市), 2014/11/23 発表。

K. Oide, T. Matsuda, F. Kawasaki, Development of a triple-scale analysis method for plain-woven laminates based on a homogenization theory for time-de-

pendent composites, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, Singapore (Singapore), 2013/12/12 発表.

大出航平, 松田哲也, 平織積層板のトリプルスケール弾-粘塑性解析手法の開発と検証, 日本複合材料学会第 38 回複合材料シンポジウム, 鹿児島大学郡元キャンパス(鹿児島県鹿児島市), 2013/09/24 発表.

〔図書〕(計 1 件)

H. Altenbach, T. Matsuda, D. Okumura, From Creep Damage Mechanics to Homogenization Methods, Advanced Structured Materials, Vol. 64, Springer International Publishing AG, (2015), 総ページ数 601.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~matsuda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 哲也 (MATSUDA, Tetsuya)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号: 90345926