

令和元年5月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06885

研究課題名(和文) 計算機シミュレーションによる繊維配向制御に基づく複合材料構造生産・設計の高度化

研究課題名(英文) Advancement in Manufacturing and Design of Composite Structures Based on Fiber Orientation Control Using Computer Simulations

研究代表者

西川 雅章 (Nishikawa, Masaaki)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60512085

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、炭素繊維複合材料構造の生産・設計の高度化を目的として、計算機シミュレーションを用いた繊維配向制御により製造プロセスから力学特性までを統合的に評価するフレームワークを提案した。特に、製造プロセスにおける繊維配向予測手法を構築するとともに、局所繊維配向による構造強度への影響についての理論解析手法について検討した。まず複雑構造形状への賦形プロセスを例として、局所繊維配向を解析可能なモデルの構築とその実験的検証を実施した。さらに、製造された材料内部の繊維配向が構造強度に与える影響について、peridynamics解析に基づいて損傷発生過程から見積もるための手法について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素繊維複合材料(CFRP)は、大型で複雑形状の構造を一体成形できるという特徴を有しており、従来の材料特性と構造形状の設計のみならず、製造プロセスと設計の最適化が求められている。本研究では、特に製造プロセスにおいて変化する材料内部の繊維配向に着目して、計算機シミュレーションを援用して、構造製造時の賦形プロセスに依存して変化する繊維配向の予測法と、製作された局所繊維配向に対して強度予測を行う手法を確立した。得られた解析的評価手法を応用することにより、複合材料構造強度向上のための繊維配向の最適化を製造プロセスから評価することにつながり、複合材料工学の発展に寄与する成果と考える。

研究成果の概要(英文)：The present study proposed an integrated framework to evaluate the manufacturing process and the mechanical properties of carbon fiber reinforced composite structures via fiber orientation control with aid of computer simulations, for pursuit of their improved production and design methodology. Specifically, a method to predict manufactured fiber orientation after the production process was constructed, and a theoretical analysis procedure was examined for the effect of local fiber orientation on the structural strength as well. First, a model simulating local fiber orientation was made and experimentally verified for the preforming process to the complex structural shape as an example. Furthermore, a method to estimate the effect of the manufactured fiber orientation inside the material on the structural strength was examined based on peridynamics analyses.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料 計算機シミュレーション 繊維配向制御 賦形プロセス 破壊解析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 工学的背景

軽量航空機構造への適用が拡大している炭素繊維複合材料（CFRP）は、プリプレグと呼ばれる半硬化の樹脂が含浸した繊維基材である中間素材を構造形状に賦形することにより、一体成形できる特徴を有している。複合材料構造の強度特性は、原料である素材の特性により一義的に決まるわけではなく、製造時に中間素材を積層させるなどの特性設計が可能である特徴を有しており、材料設計と構造設計との間の垣根が低くなってきている。従来の航空機の構造設計においては、構造が支える荷重の流れを最適化するため、胴体のスキン・ストリッガー構造や、翼構造へのリブ部材の導入など、構造部材の単位で荷重の流れを制御する。複合材料を用いた場合、繊維方向とその直交方向の強度が異なることから、強度の異方性の特徴を活用した設計がなされている。

近年、複合材料の製造技術の進展に伴い、例えば中間素材の自動積層技術により、繊維方向を自在に変化させて積層させる曲線繊維配置技術や、構造形状に合わせて製造時に素材にしわ等の欠陥が発生しないように設計する賦形技術が欧米を中心に注目されている。完全に自由に繊維を配向することはできない制約はあるものの、構造を形成する材料の繊維配向を制御しようとする新しい試みである。炭素繊維複合材料を構成する炭素繊維と樹脂材料では剛性も強度も桁違いに異なるため、航空機構造中の荷重は繊維の方向に流れ、繊維方向以外の方向に無理な荷重が加わると樹脂が破壊する。例えば窓枠など大きな孔を形成する必要のある外板構造材においては、荷重の流れを最適化した繊維方向の設定により、圧縮負荷時の初期座屈荷重を、繊維配向の制御がないが孔のない構造とほぼ同等にすることができていることが Lopes らにより最近示されている。つまり繊維配向制御による構造強度の最適化が実現可能となってきている。また、一方向で荷重を支えるという構造の設計において、材料設計や成形プロセスには繊維配向を精密に制御し、配向を揃えることが求められるが、繊維配向が数度ずれただけでも、引張負荷においてはスプリッティングという樹脂破壊が生じ、圧縮負荷下では繊維キック損傷の発生要因になり、繊維の強度を十分に活用できない。つまり製造プロセスにおける繊維配向制御は構造強度の最適化にとって重要な課題である。

製造プロセスにおける材料内部の繊維配向やその構造強度への影響を適切に把握し、破壊のメカニズムを製造時の材料構造を基に検討するフレームワークを確立することが重要であるとともに、繊維配向を制御した複合材料構造の設計革新に向けた理論的基礎の構築に対するニーズは極めて高い。

#### (2) 学術的背景

製造時に材料内部の繊維配向を最適化することにより強度向上を図る試みは、軽量複合材料構造の特徴を活用する上で重要な課題であるが、それを議論する基礎となる解析的評価方法は確立されていない。そこで本研究では、複合材料構造の繊維配向制御による構造生産・設計の革新を目指し、複合材料構造製造時の賦形プロセスにおける繊維配向予測手法と、得られた局所繊維配向に対する強度予測手法を確立することを目的としている。

製造時の材料内部の繊維配向を制御して、その繊維配向を基に強度予測を行う上では、様々な課題が残っている。例えば、賦形変形における繊維配向変化の予測性能を向上するための適切な材料試験の実施と材料パラメータを適切に決定することが重要となる。また、複合材料が任意の局所的な繊維配向を有する場合に、損傷発生プロセスを模擬しながら強度評価につなげる解析方法は確立されていない。このような視点に立ち、材料内部の微視的な「繊維配向」を基礎としている点が本研究の特徴である。本研究は特に、メゾスケールモデルとして製造後の繊維配向を反映した力学モデルによる計算機シミュレーションに焦点をあて、複合材料分野で発展してきたマルチスケール解析技術のさらなる展開につなげることを試みた。

### 2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ、本研究では、計算機シミュレーションを用いた複合材料構造の繊維配向制御による生産・設計の高度化において重要な課題として、製造プロセスにおける繊維配向予測手法を構築するとともに、局所繊維配向による構造強度への影響についての理論解析手法について検討した。製造プロセスにおける繊維配向予測については、複雑構造形状への賦形プロセスを例として、局所繊維配向を解析可能なモデルの構築とその実験的検証を実施した。さらに、これらの局所繊維配向が構造強度に与える影響について損傷発生プロセスから構造強度への影響を見積もるための手法を構築した。

### 3. 研究の方法

上記の目的のため、まず炭素繊維織物の賦形プロセスのモデル化からスタートし、賦形プロセスに関連のある材料特性の評価法と賦形解析について検討した。この評価方法を、熱可塑性中間基材の賦形プロセスに応用した。力学解析に関しては **peridynamics** 解析により任意の繊維配向をモデル化する方法を検討し、材料内部の損傷発生を扱うことを可能とした。最後に、**AP-PLY** (Advanced Placed Ply) 積層を対象として、製造後の繊維配向を介して、賦形解析と力学解析を統合して解析するフレームワークを構築した。

### (1) 製造プロセスにおける賦形変形に関する実験と有限要素モデリング

炭素繊維複合材料構造の製造低コスト化を目的として、液相成形技術が幅広く検討されている。液相成形で製作された成形品においては、最終的な繊維配向は主に基材の賦形プロセスによって決まり、これが成形品の強度に影響を及ぼすと考えられる。そこで、これらの成形に用いられる炭素繊維織物を対象として賦形時の変形に関する予測を試みた。

特に、炭素繊維織物基材の賦形プロセスにおいて発生する目ずれに着目し、シェル膜モデルによる有限要素解析によってモデル化することを目的とした。まず、目ずれ発生メカニズムにおいて重要と考えられる特性として、繊維束引き抜き試験による繊維束方向の基材変形特性（繊維束同士の摩擦すべり特性）、および、Bias-extension 試験による基材の面内せん断特性（繊維束同士の回転摩擦すべり特性）を取得した。これらの特性を Yu らの非直交モデルに組み込んで解析を実施し、異なる織物基材間で結果を比較・検討した。

解析には汎用動的陽解法有限要素解析プログラム LS-DYNA を用いた。シェル膜モデルについては、西らによって提案された手法を利用し、基材の引張方向特性と面外曲げ特性の違いを考慮した。このモデル化は、Layup Modeler (JSOL) を用いて実施した。Layup Modeler では、面内引張、面内せん断、面外曲げ特性 (0°および 45°方向) に、繊維束方向引張試験、Bias extension 試験および FAST (Fabric Assurance by Simple Testing) 法といった織物の基礎試験データを入力することで、解析に必要な応力-せん断角特性等の構成関係式に自動的に変換される。これにより、LS-DYNA の解析入力を与えることが可能である。これらの実験データから構成関係式への変換の具体的な方法は西らの文献に詳しい。また、構成関係式は Yu らの非直交モデルを用いたが、ここでは、繊維束方向の引張特性に、繊維束引き抜き試験による結果を代入した。この点が本解析の特徴であり、これにより、目ずれの状況を再現できるか検討した。

上記の解析方法および基材の物性を用い、半球ドーム状の圧子押し込み試験による基材の賦形変形の解析を実施した。解析モデルにおいて、半径 50 mm の半球状圧子を球剛体としてモデル化し、炭素繊維織物基材をシェル膜モデルによってモデル化し、それらの間の接触として圧子押し込み試験をモデル化した (厚さは基材ごとに実測値を代入した)。織物基材は 2 枚の剛体ブラケットホルダーによって挟まれており、ブラケットホルダーとの間には接触条件を定義している。ブラケットホルダーは半径 51 mm の円孔が中央に設けられている。圧子を変位速度 5.0 mm/s で移動させ、マススケーリングを実施し、準静的な解析に近い条件とした。実験条件とは最大押し込み変位 (48 mm) を合わせることで比較した。解析によって得られた繊維束方向の引張りひずみを評価することにより、基材に生じた目ずれ量を評価した。なお、接触解析の安定性のため、正の接線剛性を持つ範囲のみを代入した。

### (2) 局所繊維配向を有する複合材料の損傷発生に関する peridynamics 解析の検討

炭素繊維複合材料を用いた構造の製造技術の高度化を目的として、Automated Tape Laying (ATL) や Automated Fiber Placement (AFP) という自動積層技術が注目されている。この自動積層技術を発展させ、繊維を蛇行させて配向させることで構造の座屈強度や有孔引張強度を向上させる研究がおこなわれている。本研究では、このような局所的に異なる繊維配向を有する複合材料の強度向上について検討するための基礎として、任意の繊維配向角を有する複合材料中の損傷を扱える peridynamics 解析法に基づく損傷解析を検討した。

peridynamics 解析とは、固体を粒子とそれをつなぐ結合で表現し、粒子の運動方程式を解くことによって物体の運動やつり合い状態を解析する方法である。結合の強さを適切に表現することで、通常の連続体と等価な解析を実施することができる。また、結合の破断により物体の破壊を扱い、その破断条件をエネルギー条件で定めることにより、破壊力学的アプローチと等価な解析が行えることが知られている。

ここでは、Ghajari らによって提案された異方性弾性体の peridynamics モデルを用いた解析を行った。複合材料をモデル化する場合、繊維の結合とマトリクスの結合を別々に定義することで、複合材料の層の物性を表現する peridynamics モデルが用いられる場合もあるが、この場合、繊維方向に繊維の結合を配置しなければならず、繊維配向角や粒子配置によってはそのような配置が困難である場合も多い。より自由に繊維配向角を設定するためのアプローチとして、Ghajari らのモデルは有用である。

Ghajari らのモデルは、Silling-Askari によって提案された式に対して、結合定数に異方性を考慮した式へと一般化しており、繊維配向角  $\phi$  に依存する結合定数  $c(\phi)$  を associate Legendre 関数を用いて表現している。これにより、結合定数に対する繊維配向角依存性が表現できる。

### (3) 製造プロセスの解析と製造後の繊維配向を考慮した力学解析の統合化に向けた研究

最後に、上記項目(1)と項目(2)の手法を統合化することに試みた。詳細は研究成果欄で述べる。

## 4. 研究成果

### (1) 製造プロセスにおける賦形変形に関する実験と有限要素モデリング

織物基材の特性を取得するため、面内せん断特性および繊維束引き抜き試験の実験を実施した (図 1(a))。4 種類の炭素繊維織物 (3K 平織(P3), 3K 綾織(T3), 12K 平織(P12), 12K 綾織(T12)) に対してその特性を取得した。得られる特性は異なっており (図 1(b))、目ずれの発生に影響を与えていることが示唆された。

解析によって得られた半球ドームにおける繊維束方向引張ひずみおよび面内せん断ひずみを図 1(d), (e)に示す. ここでは, 綾織の織物 T3 の物性 (経糸方向と緯糸方向の平均値) を代入し, 賦形時の目ずれ発生の傾向について検討した結果を示す. また, 同様の押込み試験における押込み後の基材の目ずれやせん断変形の状況の観察結果を図 1(c)に示す.

目ずれが大きい T3 においては, 半球ドームの頂点からブランクホルダーに向かって引張ひずみが上昇し, ブランクホルダーの縁で大きな引張ひずみが生じており (図 1(d)), 図 1(c)に見られる目ずれの状況に近い. 半球面上の実測繊維束本数  $N_e$  を目ずれがないときの繊維束本数  $N_i$  で除した値を目ずれ量の指標として定義した結果, その値は 0.72 であった. 解析における 20 %を超える高い引張ひずみに対応しているものと考えられる. また, 基材の 45°方向のブランクホルダーに接する近傍の領域において, 基材の面内せん断変形が大きくなっており, 実験結果とも同様の傾向であった.

以上により, 繊維束引抜き特性と面内せん断特性を考慮した賦形シミュレーションを構築し, 実験における基材の目ずれや面内せん断変形の傾向を評価可能であることを明らかとした. すなわち, 適切な材料特性を取得して代入することで, 製造プロセスにおける材料の繊維配向を予測可能とするものである.

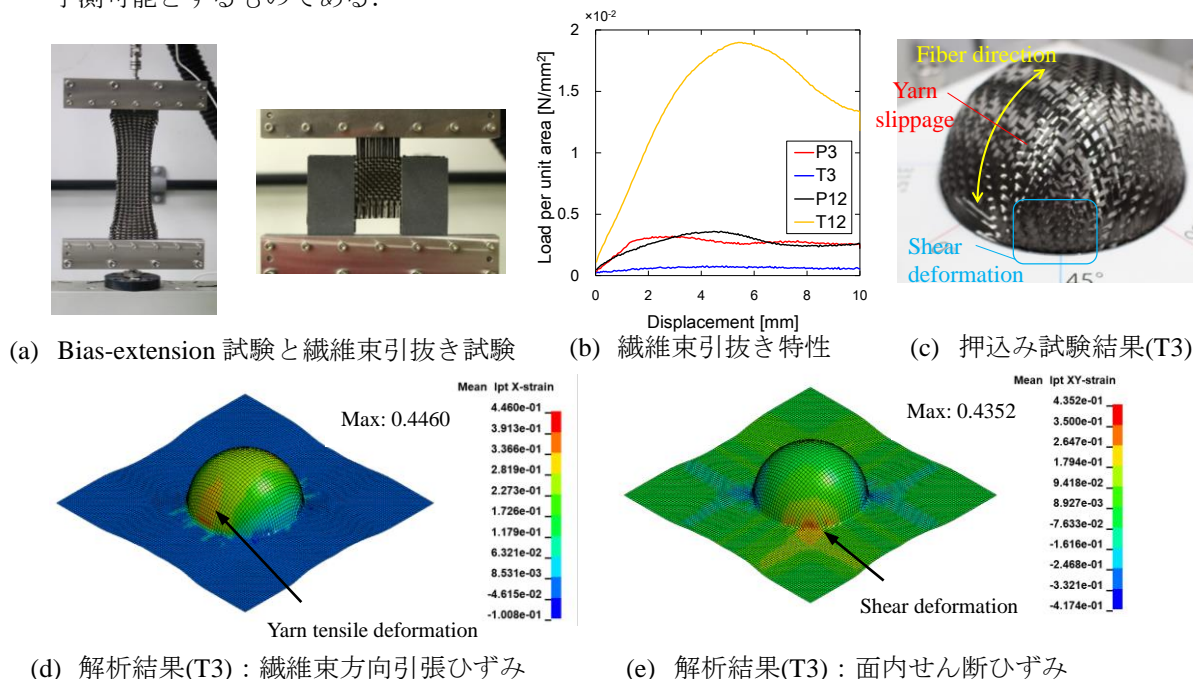


図 1 炭素繊維織物を対象とした賦形シミュレーションと実験の比較

## (2) 局所繊維配向を有する複合材料の損傷発生に関する peridynamics 解析の検討

任意の繊維配向を有する複合材料の損傷発生を扱うことが可能な peridynamics 解析による解析事例を述べる. ここでは, 局所繊維配向を有する複合材料単層板の有孔引張 (Open Hole Tension) 条件で損傷発生解析を実施した. 解析モデルは, 図 2(a)に示すモデルを用いた. 板厚 0.18 mm であり, モデル寸法は 50 mm × 70 mm である. モデル中央に半径 5 mm の円孔を設け, 二次元平面応力条件で解析を実施した.

繊維配向については, Lopes らによって用いられた曲線配置を用いた. この曲線繊維配置は Gürdal らの文献で提案されたものである. 任意の位置での繊維配向角を次式で与えた.

$$\theta(x) = T_0 + (T_1 + T_0) \frac{|x|}{d} \quad (1)$$

ここで,  $T_0$  は板中央 ( $x = 0$ ) における繊維配向角であり,  $T_1$  は距離  $d$  だけ離れた点における繊維配向角の変化分を表している.

図 2(b)に, peridynamics 解析によって得られた変位分布および損傷変数分布を示す. 図に示された損傷発生位置は周期的となっている. なお, 解析条件によっては, 計算が不安定となる場合もあったが, 概ね, き裂が明確な不連続部として予測可能であった. (粒子法同様に, 不連続部を明確に扱うことが難しく, 精度劣化の原因にはなることに注意しておく.) Lopes の文献で述べられているように, 曲線配置を用いた場合に円孔による応力集中が緩和されて損傷発生位置が円孔から遠い位置となるが, 本解析においてもその傾向を示した.

したがって, 本手法は, 局所繊維配向を有する複合材料の損傷発生を解析する上で有効である. 本モデルでは単純な結合で複合材料層を表現しているが, このモデルは有限要素解析における低次要素を用いたモデルに対応すると考えられ, 曲げ負荷に対する精度が劣ることが懸念される. 特に衝撃負荷などへの応用にあたっては解析精度の検証はさらに必要であり, 今後の課題としたい.

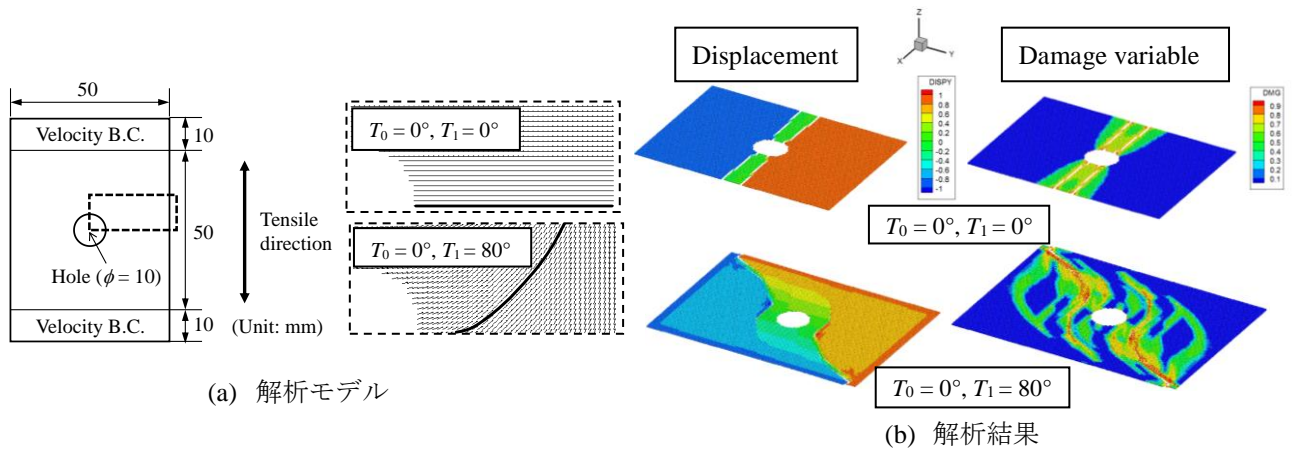


図2 任意の繊維配向を有する複合材料の損傷評価のための peridynamics 解析

(3) 製造プロセスの解析と製造後の繊維配向を考慮した力学解析の統合化に向けた研究  
 上述した解析手法を AP-PLY 積層した複合材料に応用し、製造プロセスの解析と力学解析を統合し、統合型解析システムを構築するため、以下のことに取り組んだ。

- ① 熱可塑性 CFRP 中間基材の賦形プロセスにおける摩擦試験とその解析  
 中間基材（プリプレグ基材/セミプレグ基材）の賦形プロセスにおいて重要な基本的な材料特性の評価法を構築した。
- ② AP-PLY 積層時の面圧負荷による成形（賦形）シミュレーション  
 基材スケール（メゾスケール）における成形（賦形）シミュレーションにより、繊維配向を評価する手法を構築した。
- ③ 賦形プロセスの評価により得た繊維配向を代入した結合ベース peridynamics 解析  
 評価した材料内部の繊維配向を考慮して、力学負荷時の損傷解析を実施するシミュレーションを構築することが可能となった。この際、②で得た繊維配向を基にスリット基材のモデルを項目(2)の解析手法と同様のモデルで得るとともに、Oterkus and Madenci のモデルを利用して、製造後のスリット基材間の結合を表現している。この剛性と破断伸びの調節により、実際の材料における損傷発生の特徴を表現可能とするものである。

構築してきた解析の妥当性について解析精度の検証や実験的検証はまだ十分には実施できていないものの、製造プロセスによって変化する材料内部の繊維配向を考慮して、解析を実行することが可能となってきた。「繊維配向」をベースにして、複合材料の材料設計と構造設計を一体的に評価していく試みは重要であり、さらに、製造プロセスから力学特性までを評価する統合型解析システムを確立していく必要がある。今後の検討課題としたい。

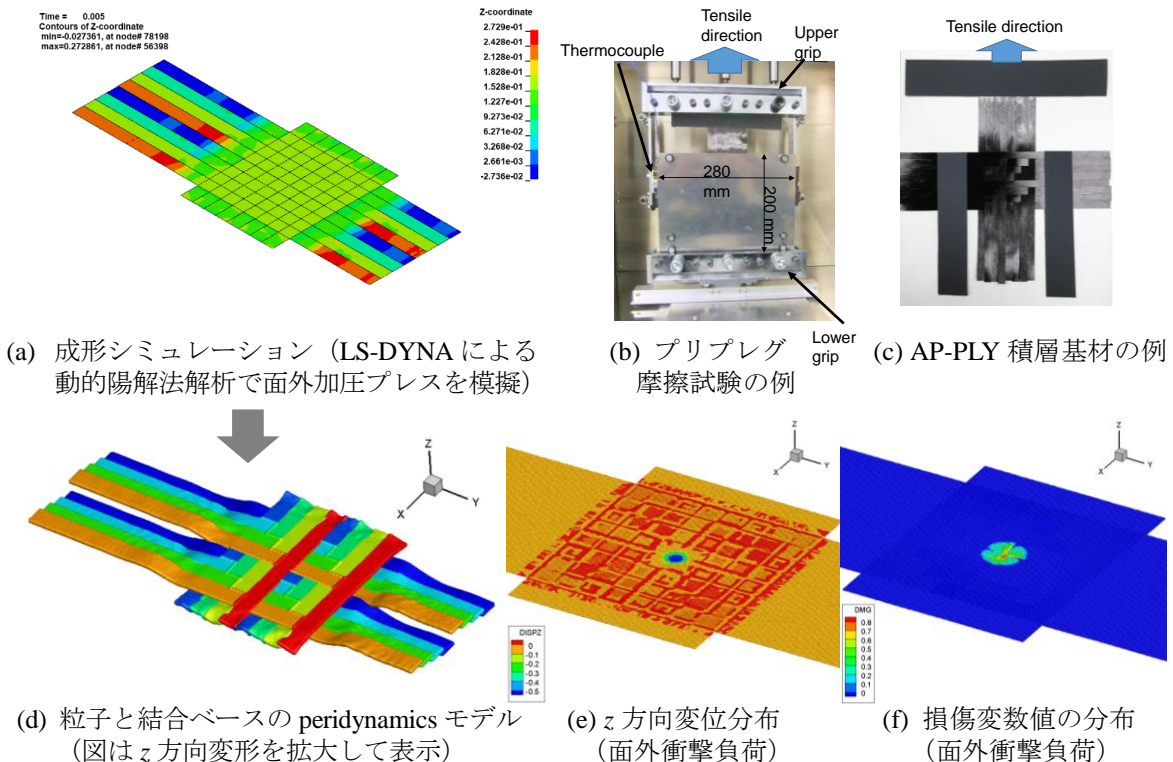


図3 賦形解析と損傷解析を組み合わせた統合型解析システムの構築：製造後の繊維配向を考慮した損傷評価に向けた試み（AP-PLY 積層材の例）

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 金崎真人, 北口尚紀, 西川雅章, 北條正樹, 融点近傍における CF/PA6 一方向板の粘度と流動特性の関係, 日本複合材料学会誌, Vol.44(5), 2018, pp.173-182, 査読有.
- ② Masaaki Nishikawa, Akira Fukuzo, Naoki Matsuda, Masaki Hojo, Evaluation of Elastic-Plastic Response of Discontinuous Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastics: Experiments and Load-Transfer-Based Micromechanical Simulation, Composites Science and Technology, Vol.155(8), 2018, pp.117-125, 査読有. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.12.003

〔学会発表〕(計16件)

- ① M. Nishikawa et al., Finite element modeling of layup process with heat transfer and deformation process of CFRTP, 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM22), 2019 (発表予定).
- ② M. Nishikawa et al., Peridynamic modeling of the impact-induced damage in composite materials with AP-PLY configuration, The Fourth International Symposium on Automated Composites Manufacturing(ACM4), 2019 (発表予定).
- ③ 阿保勇治, 西川雅章 他, 熱可塑性 CFRP 中間基材の高温下引抜き特性, 第43回複合材料シンポジウム, 2018.
- ④ M. Nishikawa et al., Development of Preforming Simulation and Material Characterization Methods to Predict Fiber Orientation Change during CFRP Manufacturing Process, International Conference on Manufacturing of Advanced Composites (ICMAC2018), 2018.
- ⑤ M. Nishikawa et al., Numerical simulation of fiber orientation change and defect generation during preforming process of CFRP, 10th European Solid Mechanics Conference (ESMC-10) "Symposium: Mechanics of Textile Composite Reinforcements and Fibrous Materials", 2018.
- ⑥ 西川雅章, 炭素繊維複合材料の材料メカニクスと構造の製造プロセスを考慮した先進的設計に向けた研究, 日本複合材料学会 2018 年度定時社員総会 受賞記念講演, 2018.
- ⑦ 西川雅章 他, 炭素繊維織物の賦形プロセス後の繊維配向と欠陥発生に関する検討, 第55回飛行機シンポジウム, 2017.
- ⑧ 西川雅章 他, 局所繊維配向を有する複合材料の損傷発生に関する Peridynamics 解析法の検討, 日本機械学会 第30回計算力学講演会, 2017.
- ⑨ 西川雅章 他, 炭素繊維織物の賦形時の変形に関する実験と有限要素モデリング, 日本材料学会 2017 年度 JCOM 若手シンポジウム, 2017.
- ⑩ M. Nishikawa et al., Development of dynamic deployment simulation of thin composite layer for shape morphing structure, 21st International Conference on Composite Materials (ICCM-21), 2017.
- ⑪ M. Nishikawa et al., Experimental characterization of yarn slippage mechanism in the preforming of carbon woven fabrics, 3rd Joint Turkey-Japan Workshop on Polymeric Composite Materials, 2017.
- ⑫ 西川雅章 他, 炭素繊維複合材料の微視損傷過程と力学特性に関する計算力学的研究, 日本材料学会 複合材料部門委員会 第254回定例委員会, 2017.
- ⑬ M. Nishikawa et al., Peridynamics modeling of the damage in an open-holed composite plate with curvilinear fiber reinforcement, Third International Symposium on Automated Composites Manufacturing (ACM3), 2017.
- ⑭ 西川雅章 他, 炭素繊維複合材料の微視構造と力学特性の関係についての解析的研究, 日本材料学会 複合材料部門委員会 第252回定例委員会, 2017.
- ⑮ 高橋奈緒子, 西川雅章 他, 炭素繊維織物の曲げ特性に及ぼす構成因子の影響, 第41回複合材料シンポジウム, 2016.
- ⑯ 西川雅章 他, 炭素繊維熱可塑性複合材料の加熱成形プロセスに関する熱伝導特性と粘弾性変形の連成解析, 日本材料学会 2016 年度 JCOM 若手シンポジウム, 2016.

〔その他〕研究室ホームページ <http://ams.me.kyoto-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 北條 正樹  
ローマ字氏名: (HOJO, masaki)  
所属研究機関名: 京都大学  
部局名: 大学院工学研究科  
職名: 教授  
研究者番号 (8 桁): 70252492

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。