

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289004

研究課題名(和文) 計算画像診断から展開する先進複合材料の複雑系力学

研究課題名(英文) Complex Mechanics of Advanced Composite Materials Evolving from Computational Image Diagnosis

研究代表者

北條 正樹 (Masaki, Hojo)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70252492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：複合材料構造生産の高度化のためには、繊維・樹脂から成る力学微視構造に依存する三次元微視的変形を追跡し、製造後の残留応力低減や強度・長期耐久性向上の観点から、複合材料の力学微視構造を最適化することが必要不可欠である。そこで、赤外線サーモグラフィに基づく複合材料の疲労損傷累積過程の評価法、および、イメージベース計測に基づく織物プリフォームの賦形に伴う局所変形の評価法を確立した。これらの評価法により、材料の疲労損傷累積過程および基材の賦形過程に影響する微視力学因子を明らかとした。さらに、材料内の繊維配置等の微視力学的情報を考慮して複合材料の巨視的力学特性を解析する繊維変形シミュレーションを構築した。

研究成果の概要(英文)：For improving the manufacturing process of composite structures, it is essential to evaluate three-dimensional microscopic deformation that depends on mechanical microstructures consisting of fibers and polymer matrix, and to optimize the microstructures of composites from viewpoints of the reduction of manufacturing-induced residual stress and the enhancement of composite strength and durability. For this purpose, we established a method to evaluate fatigue damage progress of composites based on infrared thermography and a method to evaluate local deformation caused by preforming process of woven fabrics based on image-based measurements. Utilizing the methods, we clarified micromechanical factors which influence the fatigue damage process of materials and forming process of preforms. Furthermore, we presented fiber-based simulations to analyze macroscopic mechanical properties of composite materials considering micromechanical information including fiber architecture in composites.

研究分野：先進材料強度学

キーワード：計算画像診断 先進複合材料 複雑系マイクロメカニクス 力学微視構造 サーモグラフィ 変形評価

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は軽量で剛性に優れており、ボーイング 787 やエアバス A350 といった最新の航空機の一次構造部材に活用され、大幅な燃費向上を実現している。しかしながら、従来の CFRP の構造生産においては、プリプレグと呼ばれるシート状の中間材料を積層して構造を形成しているため、二次元の繊維強化にとどまり繊維配向に限界があり、設計できる材料としての本来の可能性はまだ十分発揮されていない。

一方、次世代で期待されている複合材料においては、材料設計により最適かつ三次元に繊維が配置された織物や組物を構造物の最終形状に賦形し (プリフォーム)、樹脂を含浸して、複雑構造物を形成する。この手法では材料設計と形状設計が同時進行し、一体成形が可能となる。このような成形法を液相成形法と呼び、RTM (Resin Transfer Molding) 法や VaRTM (Vacuum assisted RTM) と呼ばれる手法がある。特に後者は両面型を必要とせず、大型構造を製作することが可能であり、短時間の生産が可能であるため、生産レートの高い小型航空機の一次構造 (例えば、国産旅客機 MRJ の尾翼など) への適用や、低コストで生産スピードも求められる自動車部材への応用拡大が期待されている。また、自動車用途では、熱可塑性樹脂を用いた単糸分散型の中間基材を用いてプレス成形により高速に生産する方法も研究開発が進んでいる。

このような構造形成において、プリフォームと呼ばれる炭素繊維基材や、不連続繊維を分散した中間基材は、材料内部において繊維束がうねっていたり、配向が一方向に揃っておらず分散していたり、三次元的に複雑な繊維配置を有している。そのため、微視的に複雑な応力場を受け、力学的特性 (塑性変形や強度特性など) は一方向材を積層した従来の積層板と比べて複雑となる。例えば、不連続繊維強化複合材料においては、繊維配置に依存する樹脂への微視的応力集中によって疲労損傷累積過程が変化すると考えられている。構造の強度や長期耐久性を検討する上で、製造プロセスと材料設計を密接に連携し、複合材料の力学微視構造の最適化へつなげるための学術的基盤の確立が望まれている。

2. 研究の目的

複合材料構造成形におけるプリフォーム技術や中間基材開発の高度化のためには、プリフォーム基材の賦形時の変形評価を通じて、製造後の初期微視構造を制御し残留応力低減を図る試みや、強度・長期耐久性の観点から中間基材や最終的に成形された材料の力学微視構造を最適化する試みが必要不可欠である。

力学微視構造は成形時の樹脂流動や賦形時の変形によっても変化するため、例えば、成形においては、繊維や樹脂に加わる残留応

力を最小限にするような材料設計が可能となれば、製造プロセスの高度化につながる。また、構造製造時の賦形のしやすさ (ドレープ性等) は、材料固有の複雑な微視構造に依存して変化するが、これらを詳細に検討する上では、繊維や繊維束といった単位の局所的な変形を考慮した評価が必要である。構造内部においてミクロレベルで繊維や繊維束が三次元的に変形する様相を直接観察しモデル化することで、グローバルな変形を制御するための指針を得ることが可能となる。

そこで本研究では、複雑な力学微視構造を有する CFRP 複合材料内部の局所変形を可視的に捉えるために、他分野で発展してきた赤外線画像や光学撮影画像等を援用した画像計測技術を導入することで、三次元的に複雑な局所変形を追跡し、製造後の初期微視構造を制御し残留応力低減を図るための評価法や、強度・長期耐久性の観点から力学微視構造を最適化するための基礎となる評価法の確立を目的とした。また、これらの評価法に基づき、複雑な力学微視構造を有する複合材料の力学特性について、プリフォーム複合材料、炭素繊維織物プリフォーム、不連続繊維強化複合材料を題材として、微視力学的観点を考慮して把握することを試みた。

3. 研究の方法

本研究では、赤外線サーモグラフィを用いてプリフォーム複合材料の長期耐久性評価を行う手法、画像計測による三次元変形計測を利用して炭素繊維織物プリフォームの賦形時における三次元局所変形を評価する手法を構築した。また、これらの評価法を実材料に適用し、炭素繊維織物プリフォームの賦形過程やプリフォーム複合材料の長期耐久性評価の指標となる疲労損傷累積過程に及ぼす微視力学因子について検討した。さらに、繊維配置といった力学微視構造に関する情報を基に、不連続繊維強化複合材料の巨視的力学特性 (塑性変形など) を解析するための繊維変形シミュレーションを構築した。

(1) 赤外線サーモグラフィによるプリフォーム複合材料の疲労損傷累積の評価

プリフォーム複合材料における微視的疲労損傷累積過程を評価する方法の検討を行った。この目的のため、均質化法を援用して三次元力学微視構造に対して疲労損傷累積過程を評価する解析方法の構築を行うとともに、実際に、赤外線サーモグラフィを用いて疲労損傷累積過程に応じた温度変化を計測可能であるか検討した。前者は解析の仮定に課題が残されているため、ここでは主に後者の研究内容について記す。

長期耐久性の指標の一つであるプリフォーム複合材料の疲労損傷累積過程に関して、赤外線サーモグラフィによる温度計測を用いて散逸エネルギーを定量化する手法を構築し、実験で見られる疲労損傷過程と対比した。

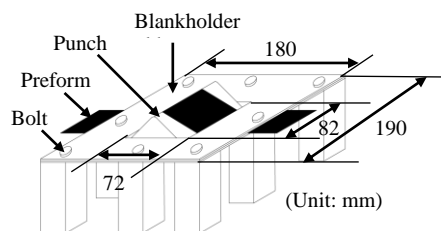
疲労試験はサーボパルサ（島津製作所製 EHF-ED1, 最大荷重 10 kN）を用いて行い、繰返し速度 10 Hz, 正弦波形, 応力比 $R = 0.1$ の条件で実施した。試験片は平織・綾織炭素繊維エポキシ複合材料（茨木工業製, PAN 系高強度標準弾性率繊維）の 2 種類について実施し、寸法を 200 mm × 20 mm (評定部 100 mm, 厚み約 0.2 mm, V_f の実測値: 平織 0.52, 綾織 0.60), 負荷方向を ±45° とした。温度計測にあたり、室温の時間的ばらつきを除外するため、特殊空調で室温を制御し、20 ± 2 °C の試験環境とした。また、最大繰返し応力を変化させて検討を行った。

赤外線サーモグラフィは非冷却マイクロボロメータ型赤外線センサ（アピステ製, FSV-1200-L16）を用い、測定フレームレートを 30 fps とした。また、試験片とサーモグラフィ間の距離を 140 mm とした。試験片の評定部には放射率 0.94 の黒体塗料を塗布し、放射率および接写リング使用に伴う補正を測定ソフトウェア（IR Manager Pro II, FSV-S500）上で実施した。また、試験片のひずみ測定のため、白色マーカーで 5 mm 間隔のグリッドを評定部中央に設け、グリッド間隔の変化を高速カメラ（ディテクト製, HAS-L1）により撮影した。測定フレームレートは 100 fps とし、運動解析ソフトウェア DIPP-Motion PRO を用いて、画像処理により、ひずみを算出した。

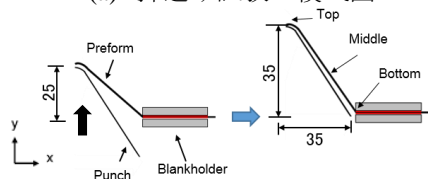
(2) 画像計測技術を用いた織物プリフォーム賦形時の繊維束変形評価法の構築

① イメージベース計測による賦形時の織物プリフォームの変形評価

低コストで CFRP 複雑形状部材を一体成形可能な液相成形においては、樹脂含浸に先立ってプリフォームを賦形する際、基材に繊維束方向の変化や繊維束同士の滑り、目隙などが生じ、見かけのひずみが生じる。これらの局所的な基材賦形時の残留変形は、最終成形品の材料特性を不均質にし、強度低下や外観不良の要因となる。



(a) 押し込み試験の模式図



(b) y 軸対称モデルによる解析の模式図

図 1 賦形を模擬した押し込み試験

そこで、賦形を模擬した圧子押し込み試験を実施し、三次元ステレオ画像計測を利用した繊維束変形の評価と有限要素解析によるモデル化を行うことで、賦形によって織物プリフォームに生じる残留変形を評価する手法を構築した。押し込み試験の模式図を図 1(a) に示す。既存の研究では織物を構成する経糸と緯糸の成すせん断角変化に着目した研究が多く、基材に生じる繊維束間隔変化を評価した研究例はあまりない。そこで、繊維束間隔の変化を画像計測によって求め、型形状による残留変形の違いについて検討した。特に、賦形時には型の角部においては引張や曲げを含む複雑な変形をするため、異なる二つの曲率の角部をもつ形状の賦形を想定した押し込み試験を行った。

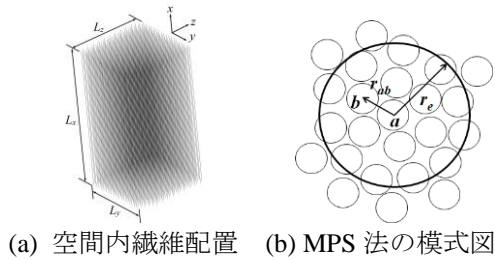
供試体として、炭素繊維プリフォーム（丸勝：3K 平織(tex200), 12.5 × 12.5 本/25mm, 200g/m²）を用いた。200 mm × 40 mm（厚さ 0.25 mm）の試験片をブランクホルダーで固定し、試験速度（圧子の上昇速度）0.01 mm/s で押し込み試験を実施した（試験機は前項と同じ。室温環境）。プリフォームの変形の限界を考慮し、圧子の変位量は 10 mm とし、角部で生じる繊維束間隔の変化を観察した。ここで、圧子先端の曲率半径を $R = 3$ mm, 10 mm とした 2 種類の負荷治具を用いた。

② 有限要素解析による織物プリフォームの賦形時の変形評価

次に、織物プリフォームにおける残留変形の発生を解析的に評価するため、プリフォーム一層を弾性体としてモデル化した有限要素解析を行い、実験結果と比較した。解析には MSC.Marc を用いた。二次元有限要素解析によりモデル化し（図 1(b)）、角部の曲率が繊維束変形に及ぼす影響を評価した。織物プリフォームは引張と曲げの特性が異なるため、この特性の違いを表現するため、三層モデルによりモデル化した。モデルの厚みを三層で同じにとり、実験により求めた引張弾性率 2300 MPa, 曲げ弾性率 (FAST (Fabric Assurance by Simple Testing) 法) 650 MPa から、表面層と中央層の弾性率をそれぞれ、440 MPa, 6000 MPa と求めた。剛体圧子とプリフォームの摩擦係数を 0.3 とし、接触解析を行った。ブランクホルダーの把持力は測定できなかったため、解析においては、プリフォームを挟む二枚のブランクホルダーの間隔 h を 0.245 mm, 0.243 mm, 0.24 mm, 0.22 mm と変化させて検討した。

(3) 微視力学解析のための繊維変形シミュレーションの構築

繊維強化複合材料の微視構造と巨視的力学特性を評価する微視力学解析の確立を目的として、繊維変形シミュレーションを構築した（図 2）。計算コストを削減した非線形三次元解析を構築するため、樹脂の変形を MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法と呼ばれる



(a) 空間内繊維配置 (b) MPS 法の模式図

図 2 繊維変形シミュレーションの模式図

粒子法の勾配モデルにより粗視化し、繊維の三次元変形を主として再現する高効率なモデルを提案した。三次元空間内に配置された各繊維を軸方向にセグメントに分割し、それぞれの繊維セグメントを構成する節点の運動方程式を動的陽解法により解く方法である。それぞれの繊維セグメントに対して局所軸対称座標系を割り当ててひずみ場を近似して応力や節点力を求めている。そのため、これらの計算における近似精度が課題となる。塑性変形などの構成則については樹脂の応力算出時に考慮可能である。

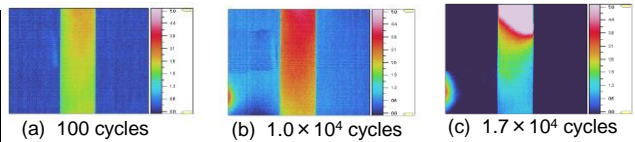
この手法を用いて、不連続繊維強化複合材料の塑性変形特性に及ぼす力学微視構造の影響を解析した。材料特性として炭素繊維 T700S、母材を PA6 と想定して解析を行った。繊維配置は六角形配列の一方配向モデルである。繊維の半径 r_f を $3.5 \mu\text{m}$ とし、繊維本数は繊維体積含有率 ($V_f = 0.21$: 射出成形材を想定) から定めた。ここで繊維は軸力のみを負担するとし、繊維のせん断変形および断面積変化は無視している。ここでは繊維を不連続とし、繊維長 l_f を変化させた場合の解析例について示す。

4. 研究成果

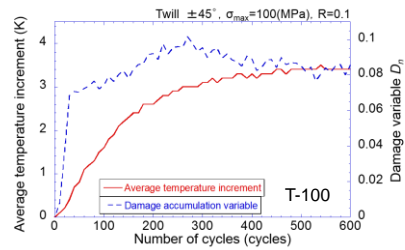
(1) 赤外線サーモグラフィによるプリフォーム複合材料の疲労損傷累積の評価

実験により、平織および綾織複合材料ともに、疲労サイクル数の増加に伴い、温度とひずみの変化が現れ、両者の増加傾向が定性的に同様の傾向を示すことが確認された。図 3(a) に示すように、温度分布は疲労サイクル数の増加に伴ってより局所的となり、高温測定部において最終破断に至った。綾織複合材料の場合 (最大繰返し応力 100 MPa) について温度推移、およびひずみの測定結果から求めた弾性率変化を基に算出した損傷累積度 (弾性率低下率) を図 3(b) に示す。両グラフは定性的に同様の傾向であった。

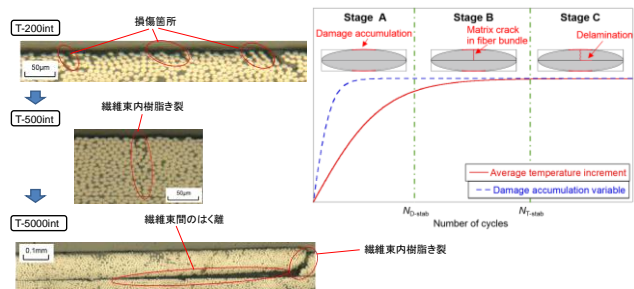
この結果をさらに考察するため、損傷観察を実施した結果を図 3(c) に示した。疲労損傷累積過程は大きく 3 つの段階に分けられる。**Stage A:** 繰返し負荷開始から疲労損傷累積値一定 (N_{D-stab}) までは、繊維束表面における損傷や端面き裂が発生・進展し、急激な弾性率低下と試験片全体で一様な温度上昇が起きる。



(a) 疲労試験中の赤外線画像 (平織, 100 MPa)



(b) 温度と損傷度の推移 (綾織, 100 MPa)



(c) 疲労損傷累積の観察 (綾織, 100 MPa)

図 3 サーモグラフィ計測による疲労損傷累積過程の評価例

Stage B: 疲労損傷累積値一定 (N_{D-stab}) から温度変化が見られなくなる (N_{T-stab}) までは、繊維束表面において損傷進展が起きるが、進展量は僅かである。大きな剛性低下は示さず、損傷に伴う発熱と外部への放熱が徐々に釣り合う。

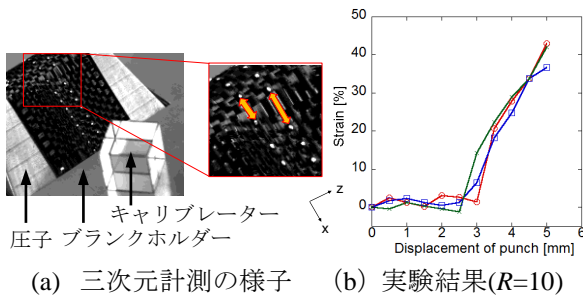
Stage C: 温度変化が見られなくなった (N_{T-stab}) 以降においては、繊維束内の樹脂き裂や繊維束間のはく離を誘発する。温度変化が局所的となり、最も発熱量 (損傷量) の多いところが破断の起点になる。

このように、赤外線サーモグラフィによる温度測定結果と疲労損傷累積過程の傾向について対比可能となった。また別途の検討で、試験片の熱伝導、自然対流と輻射を考慮した補正を行うことで、散逸エネルギー量の定量評価が可能となっており、疲労損傷累積過程の違いを評価する上で赤外線サーモグラフィを用いるための基礎を構築できた。

(2) 画像計測技術を用いたプリフォーム基材賦形時の繊維変形評価法の構築

① イメージベース計測による賦形時の織物プリフォームの変形評価

二種類の曲率半径をもつ角部を想定した押し込み試験の結果の例を図 4 に示す。いずれの曲率半径においても、図 4(a) に示すように、圧子の変位が大きくなると、圧子先端近傍において、緯糸の間隔の広がり (これをプリフォームのひずみと定義) が大きくなった。



(a) 三次元計測の様子 (b) 実験結果(R=10)

図 4 イメージベース計測による織物プリフォーム内の繊維束間隔変化の評価例

より詳細な繊維束の挙動を調べるため、ステレオ画像計測により求めた繊維束間隔変化を 図 4(b)に示す. いずれの曲率半径の圧子を用いた場合も、途中でひずみの急激な増加が確認できる. 初期段階では、圧子の上昇に伴ってプリフォームに生じる張力により、 x 軸方向の沿った繊維束（経糸）が弾性変形したことにより、緯糸の間隔が広がるがこのひずみは小さい. その後、摩擦が生じていた繊維束同士、または繊維束と圧子間で滑りが生じることで、繊維束間隔の広がりが生じたと考えられる. この繊維束同士の滑り変形が開始して繊維束間隔変化が生じる閾値について、圧子先端形状（曲率半径）の影響はあまり見られなかった.

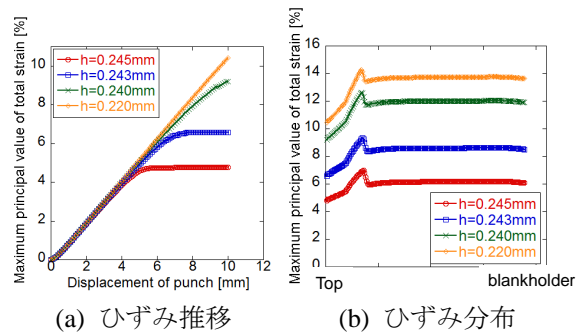
別途の実験で、圧子の変位量がさらに増加すると、ひずみ量が飽和する挙動も確認できた. これは、blankholder 把持部から繊維束の引き抜けが生じたためである. 本検討により、ひずみが生じる形態として、三種類の要因があることがわかった.

②有限要素解析による織物プリフォームの賦形時の変形評価

織物プリフォームに生じるひずみについて、三層モデルを用いた有限要素解析によって評価した結果を図 5 に示す. 実験で見られたひずみ増加の傾向を概ね表現できているが、織物プリフォームの引張時の非線形性を考慮していないため、解析においては、実験と異なり、繊維束間隔変化の小さい領域は再現されなかった. また、賦形時のblankholderの把持力の違いは、プリフォーム中の初期のひずみ増加にはほとんど影響せず、最終的な圧子先端のひずみ量に主に影響することが明らかとなった.

上記の実験および力学モデルにより、圧子形状について、先端の曲線部（引張変形と曲げ変形）と直線形状部（主に引張変形）との境界で圧子との摩擦状態の違いから繊維束間隔の大きな広がりが見られること（例えば、図 5(b)）が確認でき、圧子形状との関係が重要であることが明らかとなった.

これらの検討により、賦形時の材料内部構造（繊維束配置）の変化をイメージベース計測により実験的に評価することが可能となった. また、有限要素解析モデルによって賦形したい形状と賦形に伴う残留変形の関係



(a) ひずみ推移 (b) ひずみ分布

図 5 有限要素解析による賦形時のひずみ評価例 ($R=10$ mm)

について検討可能となったと言える. 賦形に伴う残留変形予測の高精度化やその成形品強度への影響は、さらに系統的な検討が必要である.

(3) 微視力学解析のための繊維変形シミュレーションの構築

これまでの研究で、繊維長・繊維配向の異なる不連続繊維複合材料について実験的に引張特性、曲げ特性の評価を行い、繊維長の長い材料では、繊維長の短い材料で見られる塑性変形（非線形特性）が消失することを確認している. この状況を模擬可能な三次元繊維変形シミュレーションを構築し、複合材料全体の塑性変形に与える微視構造の影響について定性的な傾向を明らかとした（図 6）.

提案した繊維変形シミュレーションについて弾性率に関しては配向角変化などの特性を再現可能であることを理論解との比較により検証しているが、塑性変形特性については、実験結果との比較において定量的にまだ課題が残されている.

強化繊維の幾何学的配置と力学特性の関係を解析可能とする三次元繊維変形シミュレーションは、適切な破壊クライテリオンの設定により、強度解析・評価法にも応用可能と考える. 繊維単位のみならず、繊維束単位でのモデルの構築により、織物プリフォームやその複合材料への応用も期待できる. このような応用により、複雑な力学微視構造を有する複合材料の力学特性を発現する微視力学因子について理解が進むものとする.

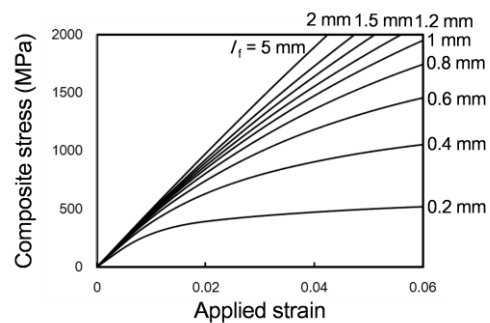


図 6 不連続繊維強化複合材料の非線形特性の解析例（繊維長 l_f の変化による影響）

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件) (すべて査読有)

- ① Y. Hirose, H. Matsuda, G. Matsubara, M. Hojo, K. Yoshida, F. Inamura, “Numerical analysis of splice-type crack arrester with a filler under mode-I type loading”, Composite Structures, Vol. 100, pp.127-134, (2013).
- ② Y. Hirose, H. Matsuda, G. Matsubara, M. Hojo, K. Yoshida, F. Inamura, “Experimental evaluation of splice-type crack arrester with a filler under mode-I type loading”, Composite Structures, Vol. 100, pp.300-306, (2013).
- ③ H. Matsuda, G. Matsubara, A. Kuraishi, Y. Hirose, M. Hojo, “Effect of crack arrester on fatigue crack growth in foam core sandwich panel under mode I type loading”, Composites Part A, Vol. 56, pp. 36-43, (2014).
- ④ 津村祐介, 新玉重貴, 西川雅章, 北條正樹, “CFRP のトランスバースひずみ分布計測を目的とした繊維位置探索による画像解析手法の開発”, 日本複合材料学会誌, Vol. 40, pp. 71-80, (2014).
- ⑤ 金崎真人, 内城千翔, 田中基嗣, 齊藤博嗣, 西川雅章, 北條正樹, 金原勲, “熱可塑性を利用した CF/PA6 積層板の衝撃損傷修復と残留圧縮強度の評価”, 日本複合材料学会誌, Vol. 40, pp. 106-117, (2014).
- ⑥ 金崎真人, 内城千翔, 田中基嗣, 齊藤博嗣, 西川雅章, 北條正樹, 金原勲, “CF/PA6 積層板の熱融着を利用した衝撃損傷修復と圧縮強度の回復”, 日本複合材料学会誌, Vol. 41, pp. 33-44, (2015).
- ⑦ N. Sato, M. Hojo, M. Nishikawa, “Intralaminar fatigue crack growth properties of conventional and interlayer toughened CFRP laminate under mode I loading”, Composites Part A, Vol. 68, pp. 202–211, (2015).
- ⑧ 佐藤成道, 北條正樹, 西川雅章, “CF/Epoxy 積層板のモード I 層間/層内疲労き裂進展抵抗のき裂長さ依存性に関する検討”, 日本複合材料学会誌, Vol. 42, pp. 34-45, (2016).

[学会発表] (計 23 件, 主要 9 件を記載)

- ① 塚本匠, 西川雅章, 北條正樹, “プリフォーム複合材の力学微視構造と疲労損傷累積過程との相関に関する解析”, 第 38 回複合材料シンポジウム, 鹿児島大学工学部 (鹿児島県鹿児島市), 2013 年 9 月 24 日.
- ② 森田早紀, 西川雅章, 北條正樹, “三次元画像再構築技術による不織布中の繊維位置の評価”, 第 38 回複合材料シンポジウム, 鹿児島大学工学部 (鹿児島県鹿児島市), 2013 年 9 月 26 日.
- ③ 後藤聡, 西川雅章, 北條正樹, “繊維基材を用いた複合材料の硬化に伴う残留ひずみの評価”, 日本機械学会 第 21 回機械材料・材料加工技術講演会, 首都大学東京

南大沢キャンパス (東京都八王子市), 2013 年 11 月 9 日.

- ④ 塚本匠, 西川雅章, 北條正樹, “疲労負荷下における平織複合材料の損傷評価に対する散逸エネルギー計測法の有用性の検討”, 第 5 回日本複合材料会議 (JCCM-5), キャンパスプラザ京都 (京都府京都市), 2014 年 3 月 6 日.
- ⑤ 森田早紀, 西川雅章, 北條正樹, “角部を有する構造のための織物プリフォーム賦形における繊維束変形の評価”, 第 39 回複合材料シンポジウム, 秋田大学 手形キャンパス (秋田県秋田市), 2014 年 9 月 19 日.
- ⑥ 高橋奈緒子, 森田早紀, 西川雅章, 北條正樹, “炭素繊維織物の織り構造の違いによる曲げ特性への影響の評価”, 日本機械学会関西学生会平成 26 年度学生員卒業研究発表会, 京都大学 桂キャンパス (京都府京都市), 2015 年 3 月 14 日.
- ⑦ M. Nishikawa, S. Morita, M. Hojo, “Techniques of finite element analysis for evaluating drape performance for CFRP components,” South-East-Asia-Japan Conference on Composite Materials (SEAJCCM), University Town, National University of Singapore, Singapore, 2015 年 9 月 23 日.
- ⑧ 福造晃, 西川雅章, 北條正樹, “不連続 CFRTP の塑性力学特性の微視的解析”, 第 1 回材料 WEEK 若手学生研究発表会, 京都テルサ (京都府京都市), 2015 年 10 月 15 日.
- ⑨ 高橋奈緒子, 西川雅章, 北條正樹, “炭素繊維織物の曲げ負荷下における変形過程に関する実験的評価”, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 慶應義塾大学 矢上キャンパス (神奈川県横浜市), 2015 年 11 月 21 日.

[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) 研究代表者

北條 正樹 (HOJO, Masaki)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70252492

(2) 研究分担者

西川 雅章 (NISHIKAWA, Masaaki)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60512085

松田 直樹 (MATSUDA, Naoki)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90756818