

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03144

研究課題名(和文) 損傷許容性に優れた炭素繊維複合材料構造の創成を目的とした破壊じん性発現機構の解明

研究課題名(英文) Mechanism of fracture toughness improvement for carbon-fiber composite structures with superior damage tolerance

研究代表者

北條 正樹 (Hojo, Masaki)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70252492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：炭素繊維複合材料一体成形構造の損傷許容性を向上するための知見を得ることを目的として、複合材料の特性をマルチスケールな視点から検討した。(1)モードII破壊じん性に関して、実験、画像解析や有限要素解析により評価し、樹脂の塑性変形等の影響についての知見を得た。(2)材料の破壊じん性を考慮したperidynamics解析法に基づき、層厚さの違いに対してき裂発生を評価可能な解析モデルを構築した。(3)エポキシ樹脂の架橋反応による構造形成と力学特性発現の関係を原子・分子スケールから評価するため、複合材料の粘弾性特性や成形性の基礎となる樹脂の粘度特性を解析する分子シミュレーションを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複合材料の破壊じん性に関するこれまでの研究は、構成する材料の塑性変形や粒子強化等の材料付与の影響が、具体的に微視的な破壊機構をどのように変化させ、破壊じん性に影響するかを十分に明らかにできていなかった。マルチスケールな視点からの検討により、破壊じん性の制御につなげるための基礎を検討したことが学術的な意義である。また、樹脂特性を分子シミュレーションにより検討することで、成形・硬化時の材料特性変化の傾向を把握することができる。このような材料特性は複合材料構造の残留応力評価において重要とされており、成形・硬化プロセスを考慮したより先進的な構造の破壊特性の評価につながる第一歩となる。

研究成果の概要(英文)：In order to obtain the knowledge for improving the damage tolerance of carbon fiber reinforced composite monolithic structures, we examined the properties controlling the mechanical properties and fracture properties from multiscale viewpoints. (1) We obtained the knowledge about the effect of matrix plastic deformation on the mode II fracture toughness, using the experiments, image analyses and finite element analyses, as an important parameter for damage tolerance of composite structures. (2) Based on the peridynamics simulations considering the fracture toughness of materials, we constructed numerical models to evaluate matrix crack initiation for different ply thickness as examples. (3) To evaluate the relationship between crosslink structures and mechanical properties of epoxy resin at the atomistic/molecular scale, we constructed a method to evaluate the viscosity as typical matrix properties controlling the composite viscoelastic properties and processability.

研究分野：先進材料強度学

キーワード：炭素繊維複合材料 破壊じん性 破壊力学 メゾ構造 損傷許容性

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

炭素繊維複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は Boeing 787 の機体への採用以来、構造材料としての地位を確立してきており、その分野は自動車分野、宇宙機用材料、鉄道車両部材など、幅広く適用されてきている。一方で、炭素繊維複合材料は外部負荷に対して複雑な損傷形態を取るため、それらの損傷発生を非破壊検査により把握しながら効率的にメンテナンスして運用するのが現状である。損傷許容性を高めた設計が構造および材料レベルから実現できれば、これらのメンテナンスコストの削減や炭素繊維複合材料構造の信頼性向上につながる。一方で、破壊じん性の特性改良という課題に対しては、本質的に材料の改良を伴って進展する必要がある。Boeing 787 に活用されている材料の例では、層間の樹脂層に熱可塑性粒子を分散させて材料の高じん化を図る方法により、飛躍的に衝撃後圧縮 (Compression After Impact, CAI) 特性を向上させたことがキー技術となり、機体への採用の足がかりとなった。すなわち、炭素繊維複合材料の損傷許容性の向上には、構成する材料の観点から力学的に破壊特性を理解して制御することが必要とされている。そのアプローチは、巨視的な構造スケールから、繊維と樹脂という材料のミクロスケール、樹脂の分子オーダーの設計まで階層的な検討が本質的に必要である。このようなマルチスケールな視点から炭素繊維複合材料の力学特性や破壊特性を実験や理論・シミュレーションにより理解していくことが求められている。

### 2. 研究の目的

炭素繊維複合材料構造の設計においては、衝撃負荷など板厚方向の負荷により層間にはく離等の損傷が生じやすいため、その損傷許容性の確保は長らくの課題である。この損傷許容性は主に、材料の破壊じん性という特性に起因するものである。破壊じん性の発現機構は構成材料 (繊維・樹脂) のみならず、それらから成る複雑なメゾ構造や積層設計の結果であり、学術的に未解明の課題も山積している。本研究では特に、炭素繊維複合材料一体成形構造の損傷許容性を向上するための知見を得ることを目的として、力学特性や破壊特性に寄与する特性について、マルチスケールな視点から実験・解析を用いて検討した。主に3つの観点で研究を遂行した。

- (1) 複合材料構造の損傷許容性の指標として重要であるモード II 破壊じん性について、粒子強化や樹脂の塑性変形の影響について知見を得ること。
- (2) 材料の破壊じん性を考慮したシミュレーションにより、積層板スケールのき裂発生・進展を評価可能な解析手法を構築すること。
- (3) 樹脂の架橋反応と特性評価シミュレーションにより、分子スケールで樹脂の分子構造と力学特性の関係を解析可能な手法について検討すること。

### 3. 研究の方法

#### (1) 複合材料のモード II 破壊じん性に関する実験と解析による評価

CFRP 構造の損傷許容設計において、特に層間のはく離が発生した後、いかに進展し、構造の残留強度や寿命に影響するかを把握することが重要とされている。このような層間のはく離進展特性を評価する手法の一つであるモード II 破壊じん性試験について、その破壊機構を微視的に観察することで新しい知見を得る研究を実施した。通常、CFRP 積層板のモード II 破壊じん性試験では、き裂が開かないため、き裂長さを直接計測することは難しい。そのため、現行の方法では、線形弾性変形を仮定し、原点コンプライアンスとき裂長さを一対一対応させる。この方法で得た R 曲線は、一般的には初期に急上昇し、その後一定となる挙動を示す。微視観察・内部観察などの結果から、R 曲線の初期上昇領域について、実際には連続するき裂は進展していないことが明らかになった。真のき裂進展開始点が異なって計測された原因としては、層間樹脂層中に塑性域・損傷域が生じることにより、真のき裂進展前に原点コンプライアンスが変化していることが考えられている。その他には、試験片と負荷点・支点の接触位置の移動や、き裂面間で作用する摩擦など、材料の破壊機構に依らない因子がコンプライアンスに影響を及ぼす。そこで本研究では、4ENF 法を模擬した有限要素法による数値解析を行い、各要素がコンプライアンスに対しどの程度影響を与えるかを検討した。また、塑性変形の効果の検討については、解析に加えて、4ENF 法により破壊じん性試験を実施し、微視観察に基づいた破壊機構の検討および層間樹脂層中の塑性域長さの計測を行った。

#### (2) peridynamics 解析法を用いた材料の破壊じん性を考慮したき裂発生・進展シミュレーション

積層板スケールでの負荷時の損傷発生の影響を把握することは CFRP 構造の損傷許容性を検討する上で重要とされてきた。特に実用上重要となる衝撃負荷後特性 (CAI 特性) において検討される低速衝撃～中速衝撃域で有用と考えられる動的破壊解析法として Sandia National Laboratory の Silling らによって提案された peridynamics 解析法を検討した。本研究では、peridynamics 解析法による解析プログラムを作成し、特に積層板におけるき裂発生・進展過程について評価可能であるかを検討した。この手法は、破壊力学特性との関連を調査するのに適していると予想している。すなわち、複合材料内部における損傷発生・進展とエネルギー吸収量の関係を解析し、材料の破壊じん性との関連を検討することが原理的に可能である。本研究では、複合材料積層板への適用を試み、一例として、層の繊維配向や厚さが OHT (Open Hole Tension) 条件下でき裂発生に及ぼす影響について評価し、解析の有用性を検討した。

(3) 分子シミュレーションによる樹脂の架橋反応と特性評価のシミュレーション

上記の(1)や(2)の研究方法では、材料特性を実験的に評価する必要があり、複合材料の特性を向上させる具体的な方策について議論することが容易ではない。複合材料の破壊特性は繊維の優れた強度のみならず、繊維を支えている周囲の樹脂特性に支配される部分も大きく、特に初期損傷であるマトリクスクラックや層間の樹脂層におけるはく離といった損傷は、樹脂の材料特性の設計に依存する部分も大きい。特に最近では、分子シミュレーションを活用して、原子・分子スケールの分子構造が樹脂の特性に及ぼす影響を把握し、それにより樹脂設計を最適化して複合材料の特性向上につなげるアプローチが国内外で盛んに研究されるようになってきた。そこで、本研究では、航空機用 CFRP の樹脂として多用されるエポキシ樹脂を対象として、硬化反応時に変化する分子構造が樹脂の材料特性にいかに関与するかを評価可能な解析手法の構築を目的とした。ここでは樹脂の材料特性として、特に粘度特性を対象としたが、その理由は、Poursartip らの研究グループによって系統的に硬化に伴う複合材料の特性変化を扱う多孔質弾性モデルが提案されており、樹脂の粘度特性を決定することで、複合材料の粘弾性特性・成形性を系統的に解析可能とすることを目標としているからである。最終的にはこのような複合材料の力学特性を評価したうえで、負荷時の変形を精密に評価して適切な破壊クライテリオンを設定することで、破壊特性の議論につなげることが可能と予想される。本研究ではそのための第一ステップとして、分子シミュレーションにより樹脂の粘度特性評価を検討した。

具体的な手法は以下の通りである。架橋反応分子シミュレーションとしては、反応障壁と生成熱を考慮した岡部らの解析手法を用い、硬化の進展に伴って架橋構造を形成していく過程をシミュレーションにより再現し、硬化度に対して分子構造を得た。さらに、Lees-Edwards の境界条件を適用した NVT アンサンブルによるせん断流れのシミュレーションを行った。架橋反応解析で取得した硬化過程の構造群を初期構造とし、せん断ひずみ速度 0.1 /ps で 100ps シミュレーションを行い、5~100ps 間の粘度の平均値を対象構造の粘度として評価した。(なお手法を検討する過程で、反応力場 ReaxFF による架橋反応解析の加速化についても試み、一定の有用性を確認したが、より簡便な手法として本研究では最終的には反応障壁と生成熱を考慮した解析手法を用いている。)

4. 研究成果

(1) 複合材料のモード II 破壊じん性に関する実験と解析による評価

モード II 破壊じん性試験 (Fig. 1) における塑性域に関する検討の結果、以下の結論が得られた。まず、微視的な観察の結果、モード II き裂進展は、初めに層間樹脂層で塑性域が拡大し、次に繊維/樹脂界面はく離が生じ、界面はく離に伴って界面近傍で樹脂破壊が生じるという順序で起こることがわかった (Fig.2)。

また、4ENF 法を模擬した有限要素法による数値解析およびモード II 破壊じん性試験の結果から、試験片と負荷点・支点との接触位置の移動、き裂面間の摩擦や層間樹脂層中で生じる塑性域が原点コンプライアンスに与える変化を検討した。弾性解析、弾塑性解析を比較した結果、荷重-変位関係において、塑性変形によりコンプライアンスの増加が見られた。負荷が小さいときには接触点移動による減少効果と塑性変形による増大効果が相殺し、見かけ上コンプライアンスが一定になった。負荷が大きくなるにつれて、塑性域・損傷域が拡大し、上述の増大効果と減少効果の相殺を上回ることでコンプライアンスが増大した。摩擦係数が一定であれば、摩擦力の有るときとないときとで、コンプライアンスの変化の仕方は同じであった。

なお、荷重-変位関係において非線形性開始点以降では樹脂破壊が急速に増加する。このことから、塑性域の形成に加えて、繊維/樹脂界面はく離や樹脂破壊が生じることで、各因子によるコンプライアンス変化の合計が正になり、真のき裂進展前に計算上き裂進展開始したと判断していることが予想される。

以上、モード II 破壊じん性試験における微視的な破壊機構に関する詳細な知見が得られた。

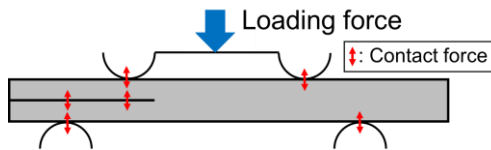


Fig. 1. Schematic view of 4ENF-test

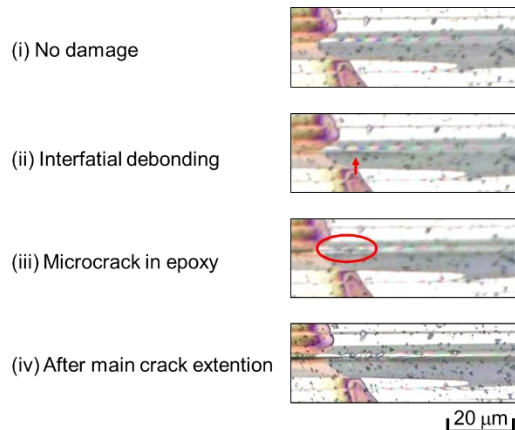


Fig.2. Fracture process and mechanism based on microscopic observation.

(2) peridynamics 解析法を用いた材料の破壊じん性を考慮したき裂発生・進展シミュレーション

CFRP 積層板に対して、層の薄層化を用いた場合の曲げ負荷や衝撃負荷時の損傷形態を評価する実験的検討を行うことで、薄層化がマトリクスクラックの抑制に有効であることが判明している。また、この損傷抑制効果を用いることで CAI 特性の向上に有効な設計につなげることが可能であることがわかってきている。一方で、有孔引張 (Open Hole Tension) 条件では必ずしも損傷抑制効果が有益に作用するとは限らず、特に、薄層化によって Notch sensitivity (有孔に対する感度) が上がり、より脆性的な破壊形態を示すという報告もある。

ここでは、peridynamics 解析法を積層板の損傷を扱うように拡張した解析プログラムを作成し、層厚さの効果について解析的に評価した。計算コストの短縮のため、縮小モデルで解析を検討した。解析の結果 (Fig. 3)、孔周囲の 90 度層の損傷は、層厚が薄い方がクラック密度が高くなるのがわかり、これは 90 度層における応力回復挙動の違いによるものと考えられる。このように本手法はき裂発生・進展を解析する手法としては有用である。一方で、実際には、実験的には損傷抑制効果により Notch sensitivity が上がると考えられているため、解析に使用した層厚さの範囲では実験現象を十分には再現できていない。計算コスト短縮やさらなる損傷メカニズムの考慮など、今後の検討課題である。

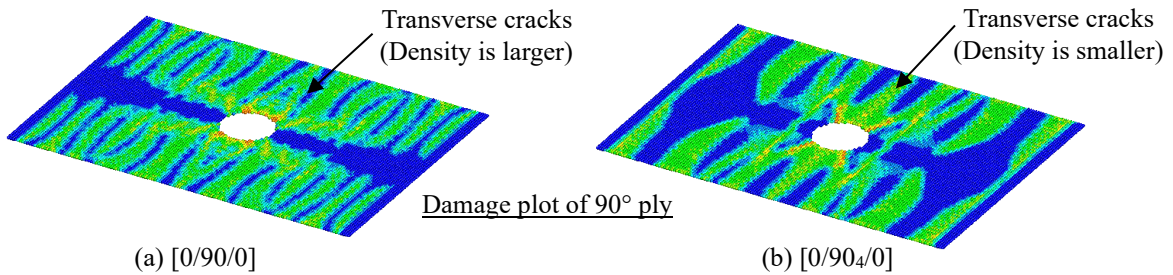


Fig. 3. Comparison of the damage in cross-ply laminates with different thickness of 90° ply when 1.2 % tensile strain was applied

(3) 分子シミュレーションによる樹脂の架橋反応と特性評価のシミュレーション

硬化剤を 4,4'-Diaminodiphenyl sulfone (4,4'-DDS) とし、主剤として 2 官能エポキシの Diglycidyl ethers of bisphenol A (DGEBA) を用いて解析を行った例を示す。Lees-Edwards 境界条件 (Fig. 4) で解析を実施して得られた粘度を Fig. 5 に示す。ここでは、393K、423K および 453K の 3 種類の温度における硬化に伴う粘度変化を示す。全てのモデル系において Castro-Macosko の式(1)に従う温度依存性 (図における線) が存在することが明らかとなった。

なお、本解析においては、全原子分子動力学法のタイムスケールの制限により、現実にとりうるせん断ひずみ速度に比べて、極めて大きな速度 (10<sup>11</sup> 倍程度) で変形させているが、このような状況下においても、熱硬化性樹脂のマクロな粘度モデル式に従う温度依存性の傾向を再現できることを示唆している。

$$\eta = \eta_0 \left( \frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha} \right)^{c_1 + c_2 \alpha} \quad (1)$$

$$\eta_0 = A \exp \left( \frac{T_b}{T} \right)$$

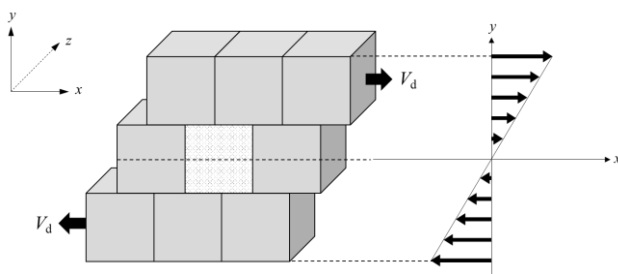


Fig. 4. Schematics of Lees-Edwards boundary condition

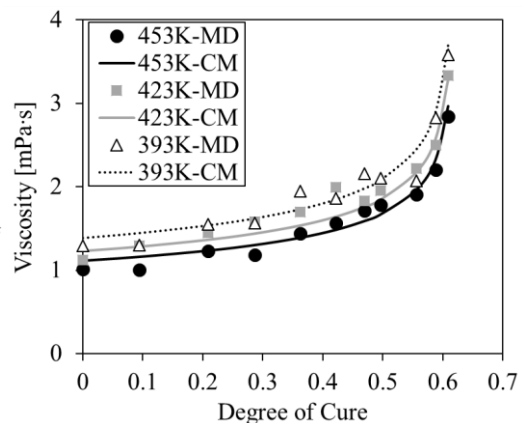


Fig. 5. Effect of degree of cure and temperature on viscosity, and comparison with Castro-Macosko equation (DGEBA-4,4'-DDS)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山田耕平, 山本慧, 金崎真人, 西川雅章, 松田直樹, 川邊和正, 北條正樹	4. 巻 46(1)
2. 論文標題 薄層化CFRP積層板の衝撃損傷挙動に及ぼす層厚さの影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 21-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 山田耕平, 川邊和正, 山本慧, 松田直樹, 西川雅章, 北條正樹	4. 巻 45
2. 論文標題 薄層化CFRP積層板の曲げ特性に及ぼす層厚さおよびマトリクス樹脂の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 61-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 新玉重貴, 橋爪良輔, 古賀貢史, 西川雅章, 北條正樹	4. 巻 43
2. 論文標題 ポイドがCFRP積層板強度に及ぼす影響の負荷方向による差異についての微視的観点からの考察	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 181-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 新玉重貴, 橋爪良輔, 古賀貢史, 西川雅章, 北條正樹, 松田直樹	4. 巻 44
2. 論文標題 X線CTを利用したポイド形状の特徴観察とCFRP樹脂支配型強度へのポイドの影響の評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -



1. 著者名 西川雅章, 後藤聡, 北條正樹, 松田直樹	4. 巻 67
2. 論文標題 マイクロボンド法を用いた炭素繊維へのエポキシ樹脂の接着・硬化過程のその場観察と樹脂硬化収縮率の測定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 北條正樹, 馬見新彩, 足立勇, 宗宮陸朗, 佐藤成道, 金崎真人, 松田直樹, 西川雅章
2. 発表標題 CFRPのモード 層間破壊におけるき裂進展初期特性の再検討
3. 学会等名 第44回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Yamada, K. Kawabe, M. Kanesaki, S. Yamamoto, N. Matsuda, M. Nishikawa, and M. Hojo
2. 発表標題 Effect of ply thickness on impact damage mode of thin ply CFRP laminates
3. 学会等名 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM22) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Aratama, R. Hashizume, K. Koga, M. Nishikawa, M. Hojo, and N. Matsuda
2. 発表標題 Modeling of effect of voids on matrix-dominated strength of CFRP based on X-ray CT observation
3. 学会等名 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM22) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Nishikawa, Kohei Yamada, Satoru Yamamoto, Manato Kanesaki, Naoki Matsuda, Kazumasa Kawabe, Masaki Hojo
2. 発表標題 Elastic-plastic finite element analysis on three-point bending tests for thin-ply CFRP laminates
3. 学会等名 16th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE-16) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮木孝輔, 足立勇, 佐藤成道, 北條正樹, 松田直樹, 西川雅章
2. 発表標題 層間高じん化CFRPのモードI疲労き裂伝ばにおける微視的破壊機構
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Hojo, Yu Adachi, Aya Mamishin, Rikuo Somiya, Narumichi Sato, Naoki Matsuda, Masaaki Nishikawa, Manato Kanesaki
2. 発表標題 In-situ high-resolution microscopic characterization on mode II fatigue delamination in CFRP laminates
3. 学会等名 1st Russia-Japan Joint Workshop on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Nishikawa, Naoki Matsuda, Masaki Hojo
2. 発表標題 Approaches to damage modeling for advanced composite materials and structures based on peridynamics
3. 学会等名 1st Russia-Japan Joint Workshop on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宗宮陸朗, 佐藤成道, 北條正樹, 日下貴之, 馬見新彩, 松田直樹, 西川雅章
2. 発表標題 CFRP のモードII 破壊じん性試験におけるき裂進展初期コンプライアンス変化の発現因子
3. 学会等名 第19回破壊力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮木孝輔, 足立勇, 宗宮陸朗, 佐藤成道, 北條正樹, 松田直樹, 西川雅章
2. 発表標題 き裂先端の微視的破壊機構を考慮した層間高じん化CFRPの疲労き裂伝ばの応力比依存性の検討
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議 (JCCM-11) (講演論文集収録)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Naito, Shimpei Matsuda, Masaaki Nishikawa, Naoki Matsuda, Masaki Hojo
2. 発表標題 Multi-Scale Evaluation for Effect of Reinforcements on Viscoelasticity of Shape-Memory Polymer Composites
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 西川雅章, 内藤悠太, 松田直樹, 北條正樹
2. 発表標題 ReaxFFを用いたエポキシ樹脂の粘弾性特性に関する分子シミュレーション法の検討
3. 学会等名 日本材料学会 2018年度JCOM若手シンポジウム
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 山田耕平, 川邊和正, 山本慧, 松田直樹, 西川雅章, 北條正樹
2. 発表標題 薄層化CFRP積層板の衝撃損傷挙動に及ぼす層厚さの影響
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本慧
2. 発表標題 有限要素法による薄層化CFRP擬似等方積層板における曲げの検討
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuta Naito, Masaaki Nishikawa, Naoki Matsuda, Masaki Hojo
2. 発表標題 Molecular Dynamic Simulation of Curing Process for Epoxy Resin Using ReaxFF with fbMC Method
3. 学会等名 The 12th SPSJ International Polymer Conference (IPC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宗宮陸朗, 足立勇, 佐藤成道, 北條正樹, 松田直樹, 西川雅章
2. 発表標題 微視的なひずみ計測による層間高じん化CFRP のモードII 層間き裂進展機構の検討
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議 (JCCM-10)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 若山航瑠, 松田直樹, 加藤久弥, 北條正樹, 西川雅章
2. 発表標題 擬似等方積層CFRPの圧縮破壊における面外方向せん断応力の影響
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議 (JCCM-10)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西川雅章
2. 発表標題 粗視化分子シミュレーションを利用した分子力学特性からの動的粘弾性特性の理解
3. 学会等名 日本複合材料学会 分子シミュレーション研究会 第13回 分子シミュレーション講義 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 若山航瑠, 松田直樹, 加藤久弥, 北條正樹, 西川雅章
2. 発表標題 NAL-II法による擬似等方積層CFRPの圧縮破壊挙動
3. 学会等名 第42回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 足立勇, 井上太久真, 佐藤成道, 北條正樹, 松田直樹, 西川雅章
2. 発表標題 CFRPのモードII層内・層間疲労き裂進展機構の検討
3. 学会等名 第42回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nishikawa, N. Matsuda, M. Hojo
2. 発表標題 Modeling of Multiple-Type, Multiple-Site Damage in Composite Laminates Using Peridynamics Theory
3. 学会等名 American Society for Composites (ASC), 32nd Annual Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 馬見新彩, 大橋一輝, 井上太久真, 佐藤成道, 北條正樹, 松田直樹, 西川雅章, 金崎 真人
2. 発表標題 CFRPのき裂進展初期における損傷領域がモードII破壊じん性値に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 磯野大志, 杉原良哉, 日下貴之, 岩崎康彦, 北條正樹, 西川雅章, 松田直樹, 金崎真人
2. 発表標題 Zanchor-CFRP積層板の層間強化機構の負荷モード依存性
3. 学会等名 高温強度・破壊力学合同シンポジウム - 第55回高温強度シンポジウム/第18回破壊力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 足立勇, 馬見新彩, 井上太久真, 佐藤成道, 北條正樹, 松田直樹, 西川雅章, 金崎真人
2. 発表標題 微視的その場観察によるCFRPのモードII層間疲労き裂進展機構の検討
3. 学会等名 第9回日本複合材料会議 (JCCM-9)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 若山航瑠, 松田直樹, 加藤久弥, 北條正樹, 西川雅章
2. 発表標題 NAL-II法におけるCFRP積層板の圧縮変形挙動に関する実験的検討
3. 学会等名 第9回日本複合材料会議 (JCCM-9)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ <a href="http://ams.me.kyoto-u.ac.jp">http://ams.me.kyoto-u.ac.jp</a>
--

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
研究分担者	西川 雅章  (Nishikawa Masaaki)  (60512085)	京都大学・工学研究科・准教授    (14301)	
研究分担者	松田 直樹  (Matsuda Naoki)  (90756818)	京都大学・工学研究科・助教    (14301)	