

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04482

研究課題名（和文）層間特性コントロールによる繊維強化複合材料の擬似的延性挙動の発現

研究課題名（英文）Design of Pseudo-ductility in Fibre Reinforced Composites by Controlling Interlaminar Properties

研究代表者

中谷 隼人（Nakatani, Hayato）

大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90584417

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）：脆性破壊を示すことで知られるCFRP（炭素繊維強化プラスチック）の層間特性を層間メッシュ層導入によりコントロールして大規模な層間はく離を抑制することで、材料全体で小規模な微視的損傷が蓄積することにより擬似的な延性挙動を発現させる独自技術を実験的に構築した。さらに、この層間特性コントロールによる微視的損傷の蓄積挙動を応用し、アングルプライCFRPが応力集中部を有する場合の引張強度低下を10%未満にとどめ、疲労寿命が大幅に向上することも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ほぼ前触れがない脆性破壊を示すCFRP積層板において、微視的損傷の蓄積により擬似的な延性を発現させるこの独自技術の構築は、層間メッシュ層の導入により従来とは異なる特性の発現が可能となるCFRP積層板の新たな材料デザイン手法の展開につながる画期的なものである。損傷を許容したCFRP積層板の強度・破壊メカニズムを理解するという点で学術的に取り組む意義は深く、同時に今後のCFRPの適用拡大に大きく貢献できる技術として社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：An original technique for developing pseudo-ductile behaviour in CFRP laminates, that are known to exhibit brittle fracture, has been experimentally established based on accumulation of microscopic damage throughout the material which is accomplished by selective interlaminar toughening by introducing mesh interlayers to suppress large-scale interlaminar delamination. It has been shown that the microscopic damage accumulation behaviour achieved by the interlaminar property control using the mesh interlayers can also suppress the tensile strength reduction of less than 10% and significantly improved fatigue life of angle-ply CFRP laminates with stress concentrations.

研究分野：複合材料工学

キーワード：CFRP 擬似的延性 フラグメンテーション 層間破壊靱性 メッシュ構造 アコースティックエミッション  
オン 応力集中部 耐疲労性

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

CFRPをはじめとする繊維強化複合材料は、優れた比剛性・比強度を有していることから、航空宇宙構造への適用が進んで久しく、最近では一般的な自動車の構造への適用も加速している。金属材料が延性挙動を示すことに対し、繊維強化複合材料はほぼ前触れもなくカタストロフィックな脆性破壊を示すことで知られる。このため、破壊まで線形弾性的な応力 - ひずみ挙動を示す複合材料による構造設計では、き裂などの損傷が発生しない、または発生してもこれが進展することがないように、安全率を大きくせざるを得ず、軽くて強いという複合材料の特性が十分に生かされていない場合がほとんどである。

そこで、破壊の前兆が容易に認識できるように、繊維強化複合材料の応力 - ひずみ挙動に延性的な領域を付与し、構造材料としての使いやすさを改善することが望まれている。繊維強化複合材料では、繊維方向においては脆性破壊を示す一方、それ以外の方向ではマトリックス樹脂の塑性流動等による非線形応力 - ひずみ挙動が見られるものの強度や剛性が低下する。このような機械的特性に異方性を有する繊維強化複合材料に対して、強度・剛性のある程度維持しつつ、破壊に至るまでに延性挙動を付与し、さらにこれを目的に応じてモディファイする技術の実現が必要不可欠である。場所ごとによって異なる要求に対して、繊維強化複合材料の応力 - ひずみ関係をひとつひとつ適切なものにするすることで、構造設計が容易になり、複合材料の適用範囲も拡大するものと考えられる。

### 2. 研究の目的

金属材料の塑性変形による延性とは異なり、繊維強化複合材料では構成する材料自身に延性を期待するのは困難である。そこで、複合材料が比較的低荷重で微視的なき裂等の損傷が多く発生することを利用し、材料内に発生した損傷を徐々に進展させる、もしくは蓄積させることで、擬似的に延性を表現することを考える。

複合材料積層板では、局所的な繊維破断や母材き裂が板幅方向に進展するか、局所的な損傷が層間はく離につながりこれが急激に全体に進展することでカタストロフィックな破壊を示す。どちらの破壊モードを示すかは、積層板の層間破壊靱性に依存するため、複合材料積層板の層間破壊靱性をコントロールし、材料のフラグメンテーション (Fragmentation, 多数の小規模な破壊が広範囲に分布した状態) を引き起こすことで、擬似的な延性を実現できる。ここでは、CFRP積層板に種々の層間メッシュ層を導入することで様々な層間特性 (層間強度や層間破壊靱性) を発現する研究代表者独自の技術を、材料のフラグメンテーションによる擬似的延性挙動の実現に適用する。

以上のように、繊維強化複合材料での層間特性をコントロールし、材料のカタストロフィックな破壊につながる損傷を抑制しつつ、材料のフラグメンテーションを発生させる。これにより、複合材料の適用範囲の拡大につながる擬似的延性挙動の付与が可能となる技術を確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

はじめに、 $\pm 45^\circ$ のアンギュラプライ層と繊維不連続部を1か所有する $0^\circ$ 層を組み合わせたCFRP積層板に層間メッシュを導入することで、繊維不連続部が損傷発生 の起点となり、その周辺でフラグメンテーションが発生しこれが擬似的延性の発現につながることを引張試験より評価する。同時に、層間メッシュ層の挿入位置や切り込みの導入など、より多くの微視的損傷の蓄積が可能となる積層構成について検討する。また、層間メッシュ層を有するCFRP積層板の引張負荷における各損傷モードのAE (Acoustic Emission) の周波数帯域を分類し、これをもとに材料内部の微視的損傷発生・蓄積挙動と擬似的延性の発現メカニズムの関係について明らかにする。

また、層間メッシュ層の導入による層間特性コントロールを利用したCFRP積層板での微視的損傷の蓄積挙動の応用についても取り組む。ここではアンギュラプライCFRP積層板が面外衝撃損傷といった応力集中部を有する場合の引張試験や疲労試験を実施し、応力集中部を起点とした損傷モードの変化と微視的損傷の蓄積が、残留引張強度や疲労寿命に及ぼす影響について評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 層間メッシュ層の導入によるCFRP積層板の擬似的延性とAE特性

一方向Carbon/Epoxyプリプレグ (T700SC/2592, 140 $\mu$ m/ply, 東レ) と、ポリアミド (Polyamide, PA) メッシュ (線径50 $\mu$ m, NBCメッシュテック) を積層しオートクレーブ法にてCFRP積層板を成形した。微視的損傷蓄積の場となる $\pm 45^\circ$ のアンギュラプライ層と、損傷発生 の起点となる繊維不連続部を1か所設けた $0^\circ$ 層を組み合わせたCFRP積層板を基本とし、これに層間メッシュ層を導入し繊維不連続部付近にてギャップを設けたものなどのいくつかの積層構成 (図1) を評価対象とした。引張試験の結果、全ての層間にメッシュ層を導入し、かつ、繊維不連続部に隣接した層間メッシュ層にギャップを設けある程度の層間はく離を許容することにより、繊維直上

での擬似的延性ひずみが増加することを示した(図2: Laminates A)。ここで擬似的延性ひずみは、破断ひずみと、応力-ひずみ関係の初期勾配の近似直線の延長線が引張強度に達した時点でのひずみの差として算出した。DIC (Digital Image Correlation) による引張負荷中の表面ひずみ測定からも、同積層板にて繊維不連続部周辺のより広範囲において比較的大きなひずみが計測された(図3)。試験後の断面観察の結果(図4)から、同積層板では繊維不連続部から $-45^\circ$ 層、 $45^\circ$ 層へと段階的にフラグメンテーションが発生し、擬似的延性が増大したと考えられる。

炭素繊維/エポキシ層のみを含むCFRP積層板およびPA繊維層やPAメッシュを用いた層間メッシュ層も有する種々のCFRP積層板に対して引張試験中のAE測定を実施し、層間メッシュ層を有するCFRP積層板に発生し得る各損傷モードのAE測定を実施した。例えば、クロスプライCFRP積層板にPAメッシュより取り出したPA繊維を $90^\circ$ 方向に配向させた $[0_2/90_6/PA(90)_6/90_6/0_2]$ の積層構成では、図5に示すように母材き裂だけでなく、炭素繊維/エポキシやPA繊維/エポキシ間での引張界面はく離が発生しており、これら損傷モードに対応したAEの周波数帯域が得られた。ここでは詳細は割愛するが、種々の積層板に対する結果を比較することで、発生し得る損傷モードのAEの周波数帯域の分類を得ることに成功した。

先に微視的損傷の蓄積により擬似的延性が発現することが示された積層構成(Laminates A)に対して引張試験中のAE測定を実施した。得られた応力-ひずみ線図、および、検出したすべてのAE波形のFFT強度(最大値1で正規化)を、横軸にひずみ、縦軸に周波数をとり強度をコンター図として示したものを重ねて図6に示す。損傷モードのAEの周波数帯域の分類結果にもとづくと、ひずみが $0 \sim 0.5\%$ の領域においては主に炭素繊維/エポキシのせん断界面はく離とエポキシ樹脂のせん断破壊が、ひずみが $0.5 \sim 1.5\%$ の領域では、PA繊維/エポキシのせん断界面はく離が主に発生し、同時にPA繊維/エポキシの引張界面はく離や炭素繊維の引き抜きも発生していることがわかった。最後に、ひずみが $1.5\%$ 以降の領域では炭素繊維の引抜きが減り、PA繊維/エポキシの引張界面はく離が多数発生したことが示された。

以上より、層間メッシュ層を導入したCFRP積層板においては、炭素繊維の引き抜きやPA繊維/エポキシ界面はく離といった微視的損傷を層間メッシュ層周辺に蓄積しつつ、早期の層間はく離による破断を抑制し材料全体のひずみを増加させることが擬似的延性の発現につながっていることを明らかにした。

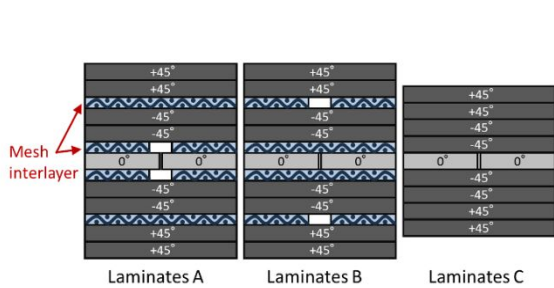


図1 層間メッシュ層と繊維不連続部を有するCFRP積層板の積層構成

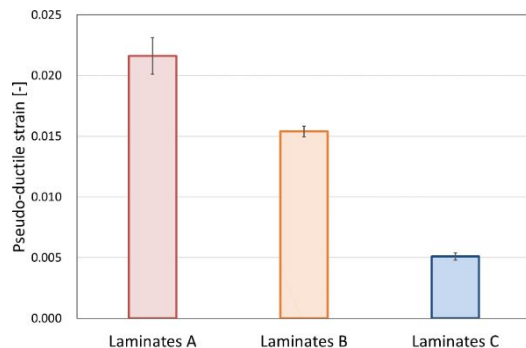


図2 各積層板の擬似延性ひずみ

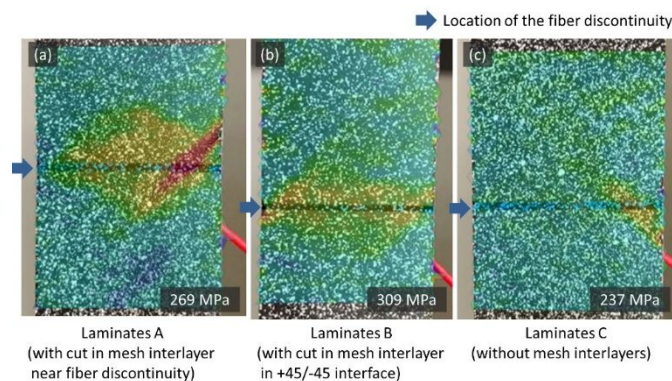


図3 引張負荷中の表面ひずみ測定

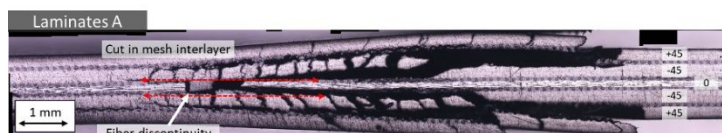


図4 引張破断後の試験片断面 (Laminates A)

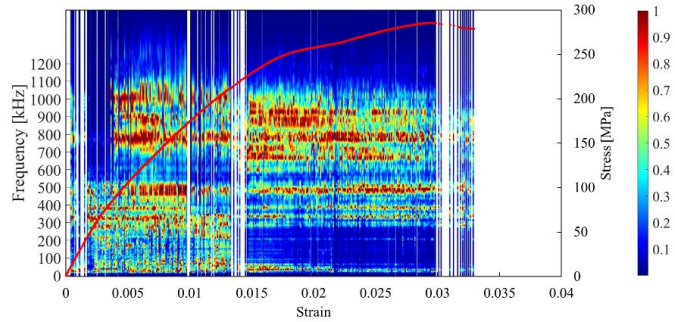
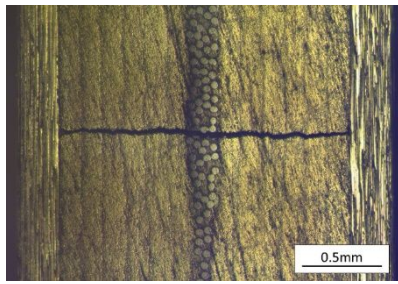


図 5 PA 繊維を含む CFRP 積層板の 図 6 擬似的延性を示す CFRP 積層板の応力 - ひずみ線図と引張負荷中の端面観察  
引張負荷中の端面観察  
FFT 強度

(2) 層間メッシュ層を有するアングルプライ CFRP 積層板の衝撃後疲労負荷における損傷挙動

一方向 Carbon/Epoxy プリプレグ (T700SC/2592, 140 $\mu$ m/ply, 東レ) と、ポリアミド (Polyamide, PA) メッシュ (線径 50 $\mu$ m, NBC メッシュテック) を積層しオートクレーブ法にてアングルプライ CFRP 積層板 [45<sub>2</sub>/-45<sub>2</sub>]<sub>S</sub> および [45<sub>2</sub>/PA/-45<sub>2</sub>]<sub>S</sub> を成形した。これら積層板に対し、落錘衝撃試験機を用いて衝撃エネルギー 5J での面外衝撃損傷を与えた。衝撃により衝撃点直下の母材き裂と +45°/-45° 層間はく離が発生するが、層間メッシュ層を有する積層板では、特に層間はく離が明らかに抑制されていることがわかった。これは層間でのメッシュ構造による生成表面積の増加やはく離 (き裂) 先端での応力集中緩和等に起因する層間での破壊靱性値増加によるものだといえる。

面外衝撃試験後、衝撃点を中心とし衝撃損傷が試験片内におさまるよう幅 36mm に切り出したアングルプライ CFRP 積層板に対し引張試験を実施した。その結果、衝撃損傷を付与した積層板では、層間メッシュ層を有さない場合は、与えた衝撃エネルギーの増加とともに破断荷重・変位ともに大幅に減少したことにに対し、層間メッシュ層を有する場合は、衝撃荷重を負荷した後も、衝撃損傷なしの場合と比べて最大変位はほぼ変わらず、最大荷重も 90% 以上を維持することを見出した (図 7)。

次に、5J の衝撃エネルギーを付与し幅 36mm に切り出したアングルプライ CFRP 積層板に対し、周波数 5Hz、応力比 0.1、最大荷重を準静的破断荷重  $P_{max}$  の約 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 倍とした引張 - 引張疲労試験を実施した。得られた最大荷重と破断までの繰返し数の関係を図 8 に示す。例えば最大荷重を  $0.6P_{max}$  とした場合、層間メッシュ層あり・なしでそれぞれ疲労試験の最大荷重は 4.80kN および 2.64kN となる。この条件での破断サイクル数はそれぞれ  $1.17 \times 10^4$  回 (層間メッシュ層あり),  $8.89 \times 10^4$  回 (層間メッシュ層なし) となり、層間メッシュ層の導入により耐疲労性が低下しているように見える。これについては図 7(b) に示すように、この最大荷重では、層間メッシュ層を有さない試験片では弾性域内であるのに対し、層間メッシュ層を有する場合はすでに損傷発生による非線形がみられる領域に入っているためであると考えられる。同等の最大荷重のもとで比較した場合には、層間メッシュ層の導入により、耐疲労性が大幅に向上していることを示した。

最大荷重を 2.64kN とした疲労負荷中の内部損傷の発生・進展をマイクロフォーカス X 線 CT により観察した結果 (図 9)、層間メッシュ層を導入していない場合、衝撃負荷によって大きく層間はく離が発生し、繰返し数が大きくなるとこの層間はく離が徐々に進展した。層間メッシュ層を導入した場合は、衝撃負荷によって発生した小さな層間はく離はほとんど進展せず、破断前の試験片では全体に多数の母材き裂が観察された。また母材き裂が層間はく離に進展しているものも観察されたが、材料の破壊に繋がるほど大きくは進展していないことを示した。

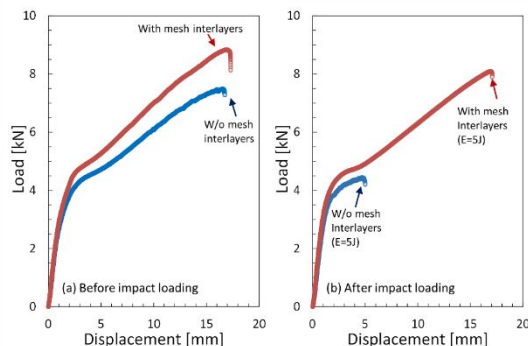


図 7 層間メッシュ層を有するアングルプライ CFRP 積層板の引張荷重 - 変位曲線

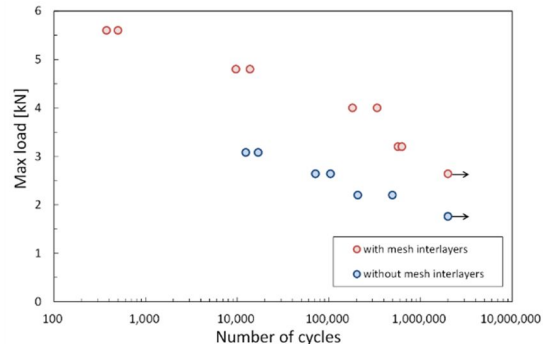


図 8 引張 - 引張疲労試験結果

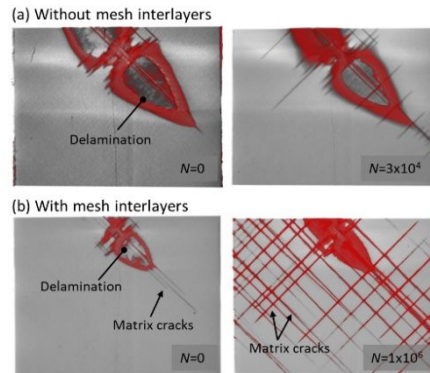


図 9 低速衝撃損傷 (E=5J) を有するアングルプライ CFRP 積層板の疲労負荷における損傷進展の様子 (X 線 CT による撮影)

以上より、衝撃負荷部からの層間はく離進展による早期破壊やそこでの応力集中を層間メッシュ層が抑制することで、応力集中部以外での母材き裂の発生・進展として損傷モードをコントロールし、積層板全体での微視的損傷の蓄積が可能となったために、疲労寿命が大幅に増加したことを明らかにした。

このように、CFRP 積層板に対する層間メッシュ層導入による選択的な層間高靱性化といった層間特性のコントロールにより、母材き裂等の微視的損傷の蓄積による擬似的な延性が発現できること、またこの擬似的延性によるエネルギー吸収能を応用し応力集中部を有する CFRP 積層板の残留強度や疲労寿命が改善することを明らかにした。これは、層間メッシュ層の導入により、従来の脆性破壊挙動とは異なる挙動を発現する CFRP 積層板の新たな材料デザイン手法の展開につながる独自技術である。今回の研究課題では、局所的な擬似的延性の発現やこの応用について評価するのみであったが、材料全体の擬似的延性を実現する CFRP 積層板のデザインやこれを用いた設計手法への拡張については、今後の検討課題としたい。

#### < 引用文献 >

- 中谷隼人, 中谷健志, 松葉朗, 河野洋輔, 荻原慎二, 繊維不連続部を有する一方向強化 CFRP 積層板の損傷挙動, 日本機械学会論文集 A 編, 79 巻, 799 号, 2013, pp.294-303.
- R.Gutkin, C.J.Green, S.Vangrattanachai, S.T.Pinho, P.Robinson, P.T.Curtis, On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.25, Issue 4, 2011, pp.1393-1407.
- 白石知久, 坂井建宣, 蔭山健介, CFRP の損傷モード評価における AE センサの周波数特性の影響, 実験力学, Vol.23, No.2, 2023, pp.145-151.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 伊村信祐, 中谷隼人
2. 発表標題 層間メッシュ層を用いた微小損傷蓄積によるCFRP積層板の擬似的延性
3. 学会等名 日本材料学会第72期学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中谷隼人
2. 発表標題 層間特性モディファイによるCFRP積層板の微小損傷蓄積
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中谷隼人, 坂本結香, 伊村信祐
2. 発表標題 層間メッシュ層を有するアングルブライCFRP積層板の衝撃後疲労負荷における損傷挙動
3. 学会等名 日本機械学会 第30回機械材料・材料加工技術講演会（M&P2023）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊村信祐, 松井駿弥, 中谷隼人
2. 発表標題 繊維不連続部を起点とした微小損傷蓄積によるCFRP積層板の擬似的延性
3. 学会等名 日本機械学会 第30回機械材料・材料加工技術講演会（M&P2023）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hayato Nakatani
2. 発表標題 Effect of Mesh Interlayers on Damage Accumulation in Angle-plyed CFRP Laminates under Post-impact Fatigue
3. 学会等名 The 2nd Japan-China-Korea Joint Symposium on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中谷隼人, 松井駿弥, 伊村信祐
2. 発表標題 層間メッシュ層導入によるCFRP積層板の擬似的延性とAE特性
3. 学会等名 第15回日本複合材料会議(JCCM-15)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 米倉開途, 坂本結香, 中谷隼人
2. 発表標題 繊維不連続部を有するCFRP積層板の損傷挙動と擬似的延性
3. 学会等名 日本材料学会第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本結香, 中谷隼人
2. 発表標題 アングルプライCFRP積層板の疲労損傷に及ぼす層間メッシュ層の影響
3. 学会等名 日本材料学会第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中谷隼人, 坂本結香
2. 発表標題 層間メッシュ層を有するアングルプライCFRP積層板の衝撃後疲労特性
3. 学会等名 第47回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuika Sakamoto and Hayato Nakatani
2. 発表標題 Effect of Mesh Interlayers on Damage Behavior of Angle-plyed CFRP Laminates under Post-impact Fatigue
3. 学会等名 JSME International Conference on Materials and Processing 2022 (ICM&P2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Isamu Tani and Hayato Nakatani
2. 発表標題 Evaluation of Interfacial Strength between Matrix and Fibers with Different Stiffnesses and Diameters
3. 学会等名 JSME International Conference on Materials and Processing 2022 (ICM&P2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊村信祐, 中谷隼人
2. 発表標題 繊維不連続部および層間メッシュ層の導入によるCFRP 積層板の擬似的延性
3. 学会等名 日本材料学会2022年度JCOM若手シンポジウム
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 坂本結香, 中谷隼人
2. 発表標題 層間メッシュ層が応力集中部を含むアングルプライCFRP 積層板の疲労特性に与える影
3. 学会等名 日本材料学会2022年度JCOM若手シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中谷隼人, 伊村信祐, 坂本結香
2. 発表標題 繊維不連続部を有するCFRP積層板の層間メッシュ層導入による擬似的延性
3. 学会等名 第14回日本複合材料会議(JCCM-14)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuika Sakamoto and Hayato Nakatani
2. 発表標題 Fatigue Damage Accumulation in Notched Angle-plyed CFRP Laminates with Mesh Interlayers
3. 学会等名 SAMPE China 2021 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本結香, 中谷隼人
2. 発表標題 CFRPアングルプライ積層板の疲労特性に及ぼす層間メッシュ層の影響
3. 学会等名 第46回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hayato Nakatani and Yuika Sakamoto
2. 発表標題 Fatigue Damage Accumulation in Angle-plyed CFRP Laminates with Mesh Interlayers
3. 学会等名 China-Germany-Japan Workshop on Advanced Manufacturing of New Energy Vehicles (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hayato Nakatani and Yuika Sakamoto
2. 発表標題 Effect of Mesh Interlayers on Fatigue Damage Accumulation in Angle-plyed CFRP Laminates
3. 学会等名 The 6th Asian Symposium on Materials and Processing 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hayato Nakatani and Yuika Sakamoto
2. 発表標題 Damage Accumulation in Angle-plyed CFRP Laminates with Mesh Interlayers under Fatigue Loading
3. 学会等名 46th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪公立大学 研究者情報  
[https://kyoiku-kenkyudb.omu.ac.jp/html/100000127\\_ja.html](https://kyoiku-kenkyudb.omu.ac.jp/html/100000127_ja.html)

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------