

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14047

研究課題名（和文）ミクロスケールの欠陥を起点とした炭素繊維複合材料の損傷挙動評価と寿命予測

研究課題名（英文）Damage evaluation and lifetime prediction of CFRP composites initiated from microdefects

研究代表者

大島 草太 (Oshima, Sota)

東京都立大学・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：90885112

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高強度・軽量であり航空宇宙分野で広く使われる炭素繊維複合材料の製造過程で避けることのできない欠陥を起点とした損傷進展挙動を評価した。任意の大きさの欠陥を導入する技術を開発し、最小で2.5 $\mu\text{m}$ の人工欠陥を材料中に導入した。欠陥から発生する亀裂を高倍率の光学顕微鏡で観察した。試験機と同期した観察装置を構築することで、実用上重要となる繰返し（疲労）荷重下での観察も行った。さらに、数値解析によって実験からはわからない欠陥周辺の応力分布も可視化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素繊維複合材料中の欠陥は寸法や位置、分布を制御できないため従来は欠陥を起点とする亀裂進展挙動を定量的に評価することは困難とされてきた。本研究では位置と大きさが制御された欠陥をひとつだけ材料中に導入できるため、欠陥の影響を定量的に評価することが可能となった。これにより、これまでは「材料のばらつき」として取り扱われてきた積層板の寿命をより正確に予測できるようになることが期待される。これは航空宇宙分野をはじめとした複合材料の信頼性が求められる分野で重要な知見である。

研究成果の概要（英文）：Carbon fiber composite polymers (CFRPs) are widely used in the aerospace industry because of their strength and weight. The presence of defects is inevitable during the manufacturing process of CFRPs. In this study, the damage progression behavior was evaluated initiated from defects. Artificial defects with different sizes were introduced in CFRPs. The minimum size of the artificial defects was as small as 2.5  $\mu\text{m}$ . Cracks initiation and propagation from the defects were observed using a high-magnification optical microscope. A trigger system synchronized with the testing machine was developed to capture crack growth behavior under cyclic (fatigue) loading. In addition, the stress distribution around the defects was visualized using a numerical approach.

研究分野：材料強度学

キーワード：複合材料 欠陥 亀裂 破壊力学 疲労破壊 有限要素解析

### 1. 研究開始当初の背景

近年、航空宇宙分野を中心に、軽量で力学的特性に優れた炭素繊維複合材料 (CFRP) の適用が拡大している。CFRP は繊維方向には強く、それと直交する方向には弱いという特徴を有するため、実構造では異なる繊維配向の層を重ね合わせた積層板として使用される。したがって、実用上は積層板としての特性評価が重要となる。積層板では最初に繊維が負荷方向と直交する層にトランスバースクラックと呼ばれる初期損傷が発生・進展する。トランスバースクラックそのものは構造物の大きな剛性低下を引き起こさないものの、各層間のはく離進展を誘発し、最終的に荷重を受け持つ繊維の破断 (最終破壊) を招く。

トランスバースクラックが発生する要因の一つとしては、CFRP 成形時に混入する気泡や異物などの欠陥が挙げられる。しかし、これらの欠陥は、実構造においては偶発的に導入されるため、トランスバースクラックの発生起点の予測ができず、微視的欠陥を起点に発生するトランスバースクラックの実験的評価はこれまで困難とされてきた。積層板の寿命を予測するうえで、トランスバースクラックの発生メカニズムを明らかにすることは必須であるが、そのメカニズムは十分に明らかになっているとはいえない。また、実験的評価が行われていないため、トランスバースクラック発生予測手法も未確立であり、この手法を明らかにすることも課題として挙げられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、超微細欠陥を有する CFRP のトランスバースクラック発生メカニズムを実験的に明らかにするとともに、その発生予測モデルを構築することである。前述の通り、積層板に発生するトランスバースクラックの起点を予測するのは困難である。そこで本研究では、超微細人工欠陥 (最小目標直径  $2.5\mu\text{m}$ ) を導入した CFRP の成形手法を開発する。欠陥を導入した試験片に静的荷重ならびに繰返し負荷を与え、トランスバースクラック発生・進展の過程をその場観察する。これにより、実構造における現象に極めて近い状態でトランスバースクラックの発生・進展の過程を評価することを目的とする。さらに、実験結果に基づいた損傷発生のクライテリアを明らかにするとともに、欠陥が存在することによる応力場への影響を数値解的に評価する。

### 3. 研究の方法

本研究では超微細人工欠陥を導入した試験片を作成し、その場観察試験と画像解析を用いた評価技術により、トランスバースクラック発生・進展メカニズムを実験的に明らかにすることを試みた。最初に超微細人工欠陥を導入した CFRP の製造方法を確立するために、 $0^\circ$  と  $90^\circ$  方向に繊維が配向された直交積層板を対象に、トランスバースクラックが生じる  $90^\circ$  層中に欠陥を導入した。極細タングステンワイヤを繊維と平行に埋め込むことで、最小で直径  $2.5\mu\text{m}$  の欠陥を導入した。これにより、機械加工では実現できない超微細な欠陥を試験片幅方向全てにわたって導入した。樹脂との接着を防ぐためのワイヤには表面処理を施し、欠陥を空孔として取り扱えるように配慮した。

次に、単調荷重下におけるその場観察試験を行った。人工欠陥を導入した試験片に対して単調荷重を与え、トランスバースクラックの発生・進展の過程を観察した。観察には光学顕微鏡 (空間分解能  $0.1\mu\text{m}$  未満) を用いて、 $1\mu\text{m}$  未満の亀裂発生と進展の様子を観察した。これにより、微視的その場観察技術を確立するとともに、単調荷重における基礎特性を取得した。

その後、繰返し荷重下における人工欠陥を起点としたトランスバースクラック発生・進展の様相を光学顕微鏡によって観察した。亀裂発生時の繰返し数、進展挙動 (亀裂進展経路と進展速度) を評価の対象とした。亀裂の発生・進展を支配する因子を特定するため、負荷応力と欠陥寸法 ( $20\sim 50\mu\text{m}$ ) を変えた試験を行った。

実験的評価に加えて、有限要素法を用いた数値的な検討も実施した。観察画像をもとに有限要素モデルを構築する画像ベースモデリングを採用し、欠陥と欠陥周辺の応力分布を評価した。

### 4. 研究成果

本研究では CFRP 中に  $2.5\sim 50\mu\text{m}$  の人工欠陥を導入した。欠陥の材料として伸線加工後に電解研磨を施したタングステンワイヤを用いることで、最小で  $2.5\mu\text{m}$  の人工欠陥の導入に成功した (図 1)。制御された人工欠陥の直径としては世界最小クラスと思われる

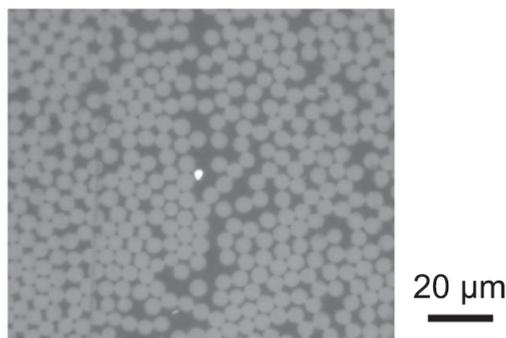


図 1 本研究で導入した最小の欠陥寸法 (直径  $2.5\mu\text{m}$ )

る。

人工欠陥を導入した試験片に対して静的荷重下で亀裂進展挙動を評価した例を図 2 に示す。図 2 は欠陥直径  $20\mu\text{m}$  の場合の例であり、図中の  $\sigma_L$  は試験片長手方向の公称ひずみを表す。試験片に応力を負荷するとまず欠陥周辺の炭素繊維と母材樹脂の間ではく離が発生し、その後、はく離が連結することでトランスバースクラックが形成された。

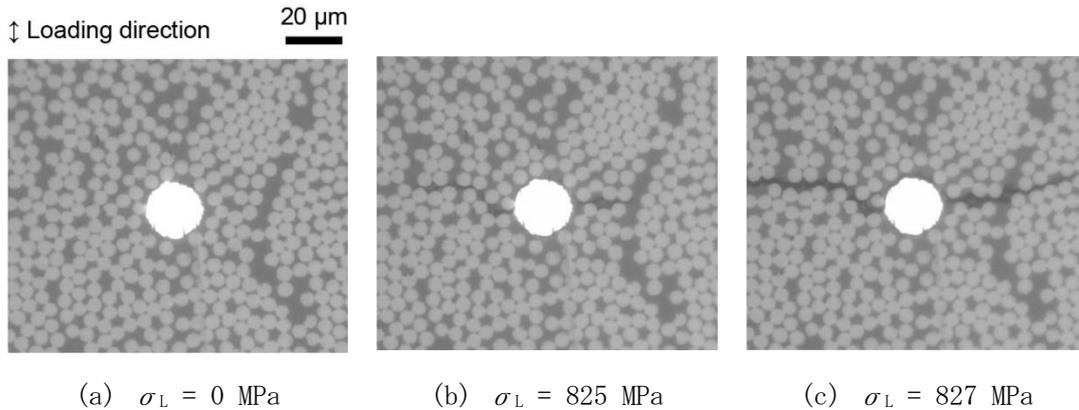


図 2 欠陥周辺の損傷進展 (欠陥直径  $20\mu\text{m}$ )

図 3 に静的荷重下における亀裂進展時のひずみと欠陥直径の関係を示す。欠陥径が  $50\mu\text{m}$  と  $20\mu\text{m}$  の場合にはすべての試験片で亀裂が進展した。欠陥から亀裂が発生した際のひずみは欠陥径が小さいほうが大きかった。一方、欠陥径が  $10\mu\text{m}$  の場合には試験片 3 本中 1 本のみで亀裂が進展し、 $5\mu\text{m}$  よりも小さい場合には最大ひずみ (1.5%) まで欠陥から亀裂が進展しなかった。このことは、亀裂が発生する欠陥寸法に下限界があることを示唆している。光学顕微鏡を用いた観察の結果から、欠陥から亀裂が発生しない場合でも欠陥寸法  $5\mu\text{m}$  までは欠陥周辺の炭素繊維と母材樹脂の間ではく離がみられたものの、欠陥寸法  $2.5\mu\text{m}$  の場合にははく離も観察されず、単独できわめて小さい欠陥が CFRP 中に存在したとしても亀裂発生には影響を与えないことが示唆された。

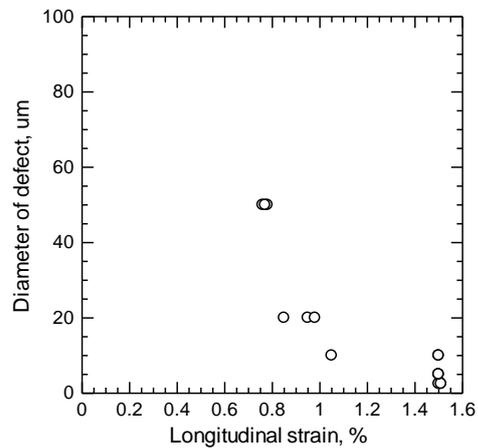


図 3 欠陥寸法と亀裂発生時のひずみの関係

図 4 に疲労荷重下における欠陥周辺の連続顕微鏡写真を示す。欠陥寸法は  $20\mu\text{m}$  のものであり、図中の  $N$  はサイクル数を表す。疲労荷重下では試験片が常に動き続けるため、ここでは試験機の疲労波形に撮影を同期させる機構を構築した。これにより、顕微鏡を用いた高倍率の観察で各サイクルの写真を定点で取得することに成功した。疲労荷重下では試験片周辺で明白なはく離が確認されてから数 1000 サイクル程度ではく離が板厚 (紙面左右) 方向に貫通した。しかし、欠陥以外から発生する亀裂の影響を受けて、最大荷重と亀裂発生サイクルに明白な関係は確認されなかった。このことから、欠陥周辺以外の亀裂との相互作用を考慮したモデルの構築が必要であると考えられる。

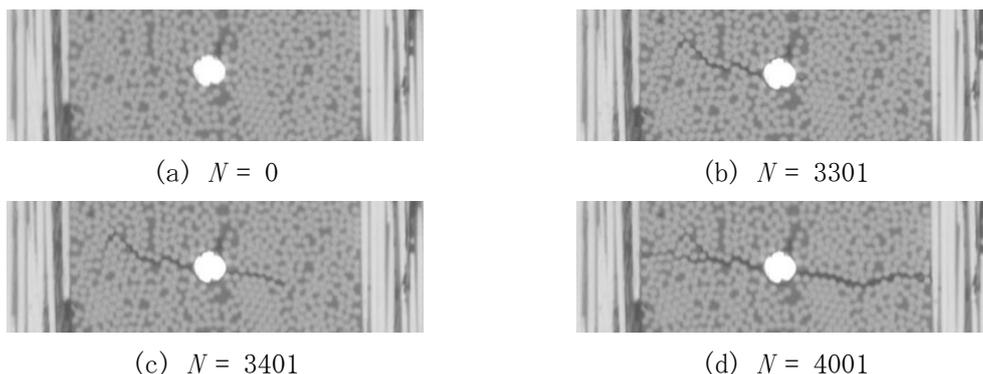


図 4 疲労荷重下における連続顕微鏡写真 (欠陥直径  $20\mu\text{m}$ )

図5に数値解析により取得した欠陥周辺の荷重方向応力分布を示す。ただし、荷重方向のひずみが0.3%時点での比較である。温度変化をモデルに与えることで熱応力の影響も考慮した。欠陥寸法が小さい場合には欠陥のごく近傍のみで炭素繊維間の応力が高くなっている領域が確認されるものの、欠陥寸法が大きい場合には欠陥から離れた領域でも炭素繊維の間でも応力集中が確認された。均質材料中の円孔縁における応力集中係数は円孔の直径によらず3であるが、応力が一定以上となる領域は直径に比例する。したがって、欠陥の寸法が大きい場合には広い範囲で応力が高くなる。このことが、欠陥寸法によって亀裂進展挙動が異なる要因のひとつであると考えられる。

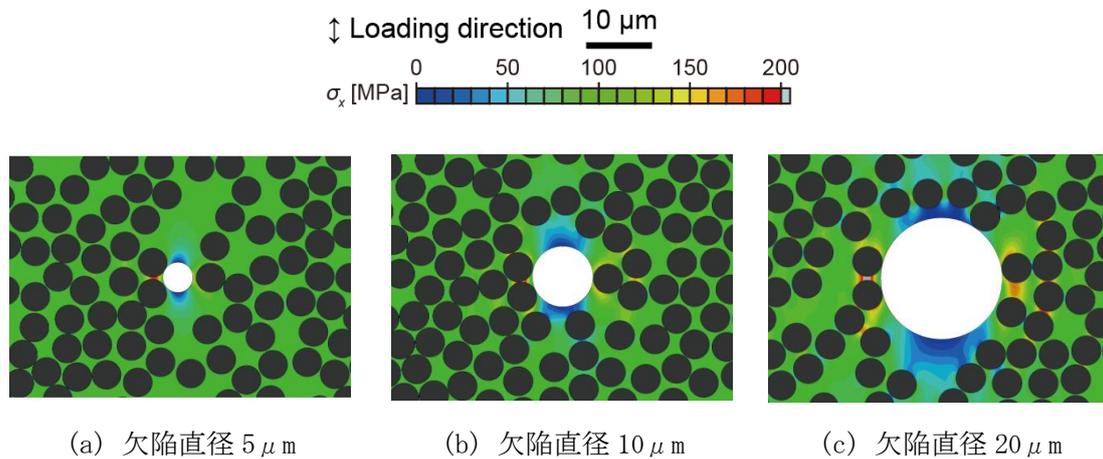


図5 数値解析により取得した欠陥周辺の応力分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Oshima Sota, Higuchi Ryo, Kobayashi Satoshi	4. 巻 281
2. 論文標題 Experimental characterization of cracking behavior initiating from microdefects in cross-ply CFRP laminates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 109116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2023.109116	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 Oshima Sota, Higuchi Ryo, Kato Masaya, Minakuchi Shu, Yokozeki Tomohiro, Aoki Takahira	4. 巻 164
2. 論文標題 Cooling rate-dependent mechanical properties of polyphenylene sulfide (PPS) and carbon fiber reinforced PPS (CF/PPS)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 107250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2022.107250	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 Oshima Sota, Higuchi Ryo, Kato Masaya, Minakuchi Shu, Yokozeki Tomohiro, Aoki Takahira	4. 巻 46
2. 論文標題 Experimental data for cooling rate-dependent properties of Polyphenylene Sulfide (PPS) and Carbon Fiber Reinforced PPS (CF/PPS)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Data in Brief	6. 最初と最後の頁 108817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dib.2022.108817	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Oshima Sota, Mikami Tomoisa, Yoshimura Akinori, Hirano Yoshiyasu, Ogasawara Toshio	4. 巻 305
2. 論文標題 In situ optical observation of damage and failure process in adhesively bonded CFRP joints under mixed-mode loading	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 116453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2022.116453	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 Sota Oshima, Aya Mamishin, Masaki Hojo, Masaaki Nishikawa, Naoki Matsuda, Manato Kanasaki	4. 巻 260
2. 論文標題 High-resolution in situ characterization of micromechanisms in CFRP laminates under mode II loading	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 108189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2021.108189	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 大島草太、日下貴之、野村泰稔	4. 巻 50
2. 論文標題 DIC法を用いた亀裂検出システムの開発とCFRP積層板における疲労亀裂進展評価	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 55-61
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12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 大島草太, 樋口諒, 小林訓史
2. 発表標題 CFRP直交積層板における欠陥を起点としたトランスバースクラックの進展挙動評価
3. 学会等名 第14回日本複合材料会議
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sota Oshima
2. 発表標題 Crack growth behavior in CFRP laminates under mode II loading characterized by high-resolution microscopy
3. 学会等名 JSPS-DST, Japan-India Workshop 2023, Innovative Carbon Fiber Polymer Composite Structures: Material, Design and Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大島草太, 樋口諒, 小林訓史
2. 発表標題 CFRP積層板における欠陥を起点としたトランスバースクラックの損傷進展過程
3. 学会等名 日本界面学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sota Oshima, Ryo Higuchi, Satoshi Kobayashi
2. 発表標題 Experimental and numerical evaluation of cracking behavior in cross-ply CFRP laminates initiated from micro defect
3. 学会等名 International Conference on Materials & Processing 2022 (ICM&P2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島草太, 樋口諒, 小林訓史
2. 発表標題 CFRP直交積層板におけるトランスバースクラックの発生・進展に及ぼす欠陥寸法の影響
3. 学会等名 第64回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島草太, 樋口諒
2. 発表標題 ミクロスケールの欠陥を起点とするトランスバースクラックの進展挙動評価
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 大島草太
2. 発表標題 微視的欠陥がトランスバースクラックの発生・進展に及ぼす影響の実験的評価
3. 学会等名 2021年度JCOM若手ウェビナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大島草太
2. 発表標題 CFRP構造のき裂進展挙動に及ぼす微視的損傷の影響
3. 学会等名 日本材料学会第174回破壊力学部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sota Oshima, Masaki Hojo, Kohei Yamada, Toshio Ogasawara
2. 発表標題 Deformation Behavior of Neat Epoxy Resin under Loading and Unloading Conditions
3. 学会等名 8th International Conference on Fatigue of Composites (ICFC8)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sota Oshima, Ryo Higuchi, Satoshi Kobayashi
2. 発表標題 Cracking behavior in cross-ply CFRP laminates initiating from microdefects under monotonic and cyclic loading
3. 学会等名 2023 US-Japan Joint Symposium for Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sota Oshima, Ryo Higuchi, Satoshi Kobayashi
2. 発表標題 Experimental characterization of fatigue crack growth in cross-ply CFRP laminates initiating from microdefects
3. 学会等名 9th International Conference on Fatigue of Composites (ICFC9) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sota Oshima, Ryo Higuchi, Satoshi Kobayashi
2. 発表標題 Micromechanisms of defect induced cracking in cross-ply CFRP laminates
3. 学会等名 48th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2024) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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