

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04182

研究課題名（和文）レイリー散乱型分布センサを用いたCFRP構造の生涯監視技術の開発

研究課題名（英文）Development of life-time monitoring technology of CFRP structures using Rayleigh scattering-based distributed sensors

研究代表者

高坂 達郎（Kosaka, Tatsuro）

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：80315978

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：効率化と安全性向上に、FRP構造の成形や内部損傷のリアルタイムモニタリング手法が提案されている。本研究では、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いて、RTM成形における樹脂流動と、FRPの層間剥離を検出する手法を確立することを目的とした。実験および解析結果から、RTM成形における樹脂流動のフローフロント位置をグリッド配置したセンサで測定可能であることが分かった。また、剥離としてモードI剥離、モードII剥離そして接着剥離に着目し、どの剥離においても表面ひずみ分布測定結果から検出可能であることを示した。さらに加熱時の裏面温度測定によって内部剥離の検出が可能になることも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた樹脂流動は世界に例が無く、またひずみ分布測定による剥離検出の例も多くない。よって本研究はオリジナリティが高く、また検出の仕組みを明らかにすることには学術的な価値が高い。これらの成果は、FRP製造における歩留まりを改善し、また開発コストを低下させる。さらに運用時のFRP構造のリアルタイム剥離検出は、航空機の安全性を高め、また定期検査のコストを軽減することから、航空機業界では重要な命題である。本研究成果を応用すれば1本のセンサで小型航空機構造全体のモニタリングが可能であり、特に近年話題の空飛ぶクルマの安全性確保において重要な意義があると考えている。

研究成果の概要（英文）：Recently, real-time monitoring methods for the molding condition and internal damage of FRP structures have been proposed to improve efficiency and safety. This study aims to establish a method to detect resin flow in RTM molding and FRP delamination using a Rayleigh scattering optical fiber distribution sensor. Experimental and analytical results showed that the flow-front position of resin flow in RTM molding can be measured using the sensor embedded into preform and arranged on a grid. In addition, we focused on Mode I delamination (DCB test), Mode II delamination (ENF test), and adhesive delamination (SLJ test). From the experimental and FEM analytical results, it was found that all types of delamination could be detected with 1mm special resolution from the surface strain distribution measurement results. It was also found that internal delamination can be detected by measuring the temperature of the back surface during heating.

研究分野：Composite materials

キーワード：Composite materials Resin flow Delamination Optical fiber sensor Strain measurement Process monitoring Structural monitoring Rayleigh scattering

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 構造は比強度、比剛性に優れるため、近年では様々な分野の構造材料として利用が広がっている。しかし高い製造および運用コストのため、航空機等の一部の分野に利用が限られていた。高コストとなる原因は、多くの試行製造を必要とする製造時の高い開発コストと、目視困難な内部損傷を発見するための非破壊検査とそれによるダウンタイムの増加である。

CFRP の製造プロセスにおいては、成形誘起ひずみに起因する脱型後の寸法精度の問題が良く知られており、また近年注目されている CFRP 構造の低コスト製造法である OOA(Out of Autoclave)成形では、液状樹脂を強化繊維プリフォームに流し込む RTM(Resin Transfer Molding)における樹脂流動過程で欠陥が生じる問題が報告されている。

一方で、CFRP 構造には目視で確認できない内部損傷が生じるという問題があり、超音波法や X 線法などの非破壊検査手法が航空機の検査において活躍している。しかしながら、表面からの検査が困難な接合個所には適用が難しく、また全体を検査するには時間がかかりすぎるため、検査によるダウンタイムが航空機の運航コストを増加させるという欠点がある。そこで、信頼性が高く、運用コストを抑えることが可能な、より進んだ手法として組み込みセンサを用いたリアルタイムでの健全性モニタリング手法が提案されている。特に近年では構造物への組み込みが容易な様々なセンサが開発されている。中でも直径 125 $\mu\text{m}$  の光ファイバセンサは材料内部への組み込みも可能であり、損傷進展をモニタリングするセンサとして有望視されている。

レイリー散乱型光ファイバ分布センサは 1mm という非常に高い空間分解能で数十 m の長い距離の測定が可能である。しかしこれを用いた樹脂流動モニタリングの試みは未だなく、また損傷同定に関する研究もほとんど見られない。

### 2. 研究の目的

本研究では、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いて、製造時の樹脂流動と運用時の剥離損傷の発生・進展をリアルタイムで同定する手法を確立することを目的とする。センサは製造時にプリフォームに埋め込まれ、また製造後にもそのまま用いることも出来る。樹脂流動で生じるプリフォームのひずみ分布からフローフロント位置を同定する。運用中に荷重を受けた場合に生じるひずみ場の乱れから、剥離の発生・進展をモニタリングする。さらに本研究では温度測定による CFRP 積層板剥離検出の可能性を探ることを目的とした研究も行った。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 レイリー散乱型光ファイバ分布ひずみセンサ

光ファイバのコアとクラッドの不整合によって生じるレイリー散乱光分布を OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) 手法を用いて、1 $\mu\text{m}$  以下の空間分解能で測定する。この分布形状は変形を受けても大きく変わらず、温度やひずみによって空間周波数のみがシフトする。ゲージ長で区切ったデータにフーリエ変換 (FFT) を行って、長さに沿った周波数シフトの分布を求める。周波数シフト量と温度およびひずみが線形関係であることから、周波数シフト分布から温度やひずみを取得することが可能となる。本研究で使用したセンサは ODiSI A-50(Luna Technologies)である。測定範囲は 1m ~ 50m, 最小測定ピッチ 1mm, ひずみ測定範囲 $\pm 10000\mu$ , ひずみ分解能 1, 最小測定ピッチ 1mm, 測定サイクルは ~5Hz でひずみ分布と温度分布を取得する事が可能である。

#### 3.2 研究方法

##### (1) VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) 成形時の樹脂流動モニタリング

光ファイバセンサをガラスクラスに縫込み、VaRTM 法により樹脂を模擬したシリコンオイルを含浸させてひずみ測定を行った。流動方向とセンサのなす角度を変えて、センサ角度が検出に与える影響を探る実験も行い、得られた結果から、フローフロントを検出する手法を確立した。さらに図 3.1 に示す様に光ファイバをグリッド配置することにより、一本の光ファイバでフローフロント形状の検出を試みた。

##### (2) CFRP 積層板のモード I き裂進展モニタリング

CFRP プリプレグ (TR350C100S, 三菱ケミカル製) を 80 枚積層した一方向 CFRP 積層板を用いて図 3.2 に示す DCB 試験片を作製した。モード I き裂進展試験を行い、き裂が進展した時に停止させ、き裂長さを目視で読み取った後試験を再開し、これを繰り返した。また、同じ実験条件下で解析モデルを作成し、FEM 解析により光ファイバ位置のひずみ分布計算を行った。

##### (3) SLJ (Single Lap Joint) CFRP 積層板の層間剥離進展モニタリング

CFRP プリプレグを 60 枚積層した一方向 CFRP 積層板と 2 液エポキシ系接着を用いて図 3.3 に示す SLJ 試験片を作製した。引張試験を行い、表面のひずみ分布を測定した。

##### (4) FRP 積層板のモード II き裂進展モニタリング

図 3.4 に試験片を示す。GFRP クロスまたは CFRP プリプレグを積層し、厚み 4.5mm の試験片を作製した。また図に示すように試験片の下側表面に往復させるように光ファイバセンサを接

着剤で固定した。モードIIき裂進展試験は、三点曲げ試験によって行った。

(5)加熱による CFRP 積層板剥離モニタリング

図 3.5 に試験片寸法と光ファイバ設置位置を示す。CFRP 積層板の中央に疑似剥離を作製し、裏面から加熱して表面温度分布をレイリー散乱型光ファイバセンサで取得した。繊維方向 90°、0°の試験片をそれぞれ 2 枚ずつ用意した。シリコンラバーヒーターに試験片を載せて、温調器は室温の 24°C から 43°C まで昇温するように設定した。定常に達したところで運転を停止し、30°C まで下がったところで再度定常になるまで昇温させ、これを 3 回繰り返し行った。

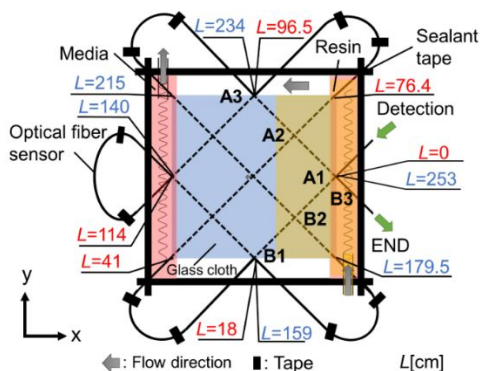


図 3.1 フローフロント検出試験

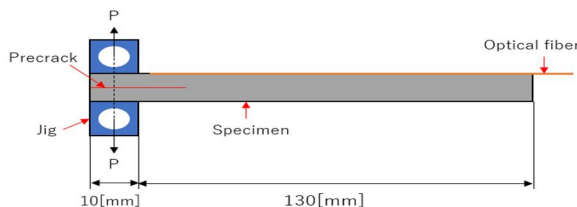


図 3.2 DCB 試験

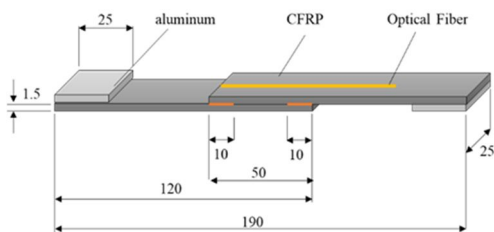


図 3.3 SLJ 試験片

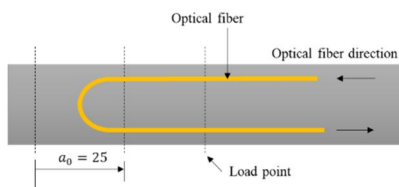


図 3.4 ENF 試験片

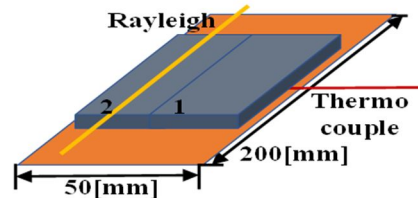
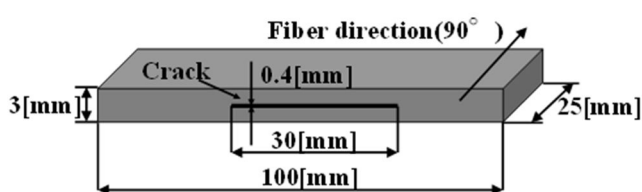


図 3.5 温度測定用 CFRP 試験片と実験方法

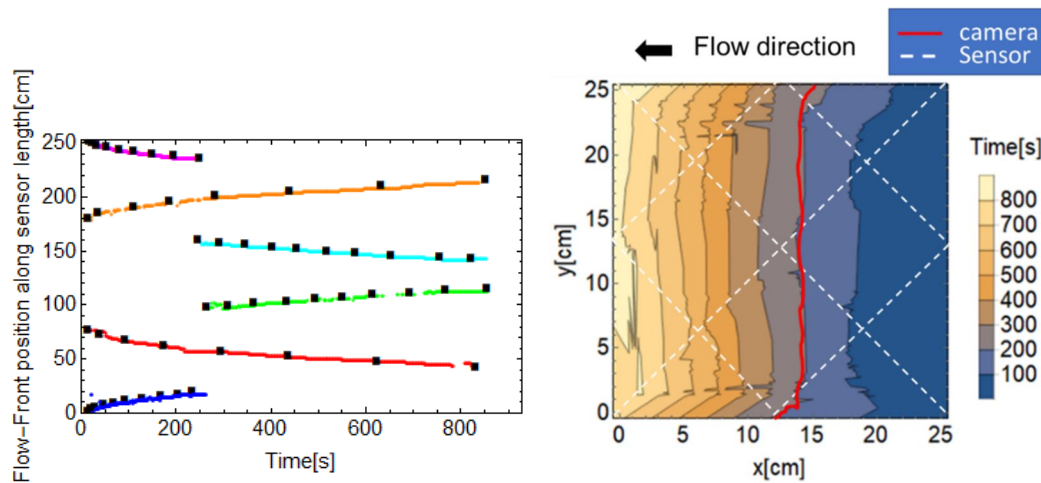
4. 研究成果

(1)VaRTM ( Vacuum assisted Resin Transfer Molding ) 成形時の樹脂流動モニタリング

実験結果より、ひずみ勾配のピークがフローフロント位置を示すことが分かった。また光ファイバの向きと流れ方向が同じときに正のピーク、逆の時に負のピークとなることが分かった。流動方向と光ファイバセンサのなすセンサ角度のひずみ感度への影響は大きいですが、フレーム間差分法の適用することにより、センサ角度 45° までは測定可能であることが分かった。以上の成果を踏まえて、1 本の光ファイバをグリッド配置することでフローフロント形状の検出を試みた。図 4.1(a) にセンサおよび目視で得た光ファイバ長に沿ったフローフロント位置を、(b) にセンサから得たフローフロント位置コンター図と目視で得た形状の比較を示す。図より、光ファイバをグリッド配置することにより、フローフロントの 2 次元形状検出が可能であることが示された。

(2)CFRP 積層板のモード I き裂進展モニタリング

図 4.2 に、き裂長さ  $a=31.5, 42.5, 61.5$  mm に到達したときのひずみ分布を示す。実線と点線はそれぞれ測定値と有限要素解析結果を示している。実験結果と解析結果はよく一致し、ひずみ分布の鋭いピークから剥離先端位置の検出が可能であることが明らかになった。



(a) 光ファイバ長に沿った位置 (b) フローフロント位置コンター図

図 4.1 フローフロント位置 (グリッド配置)

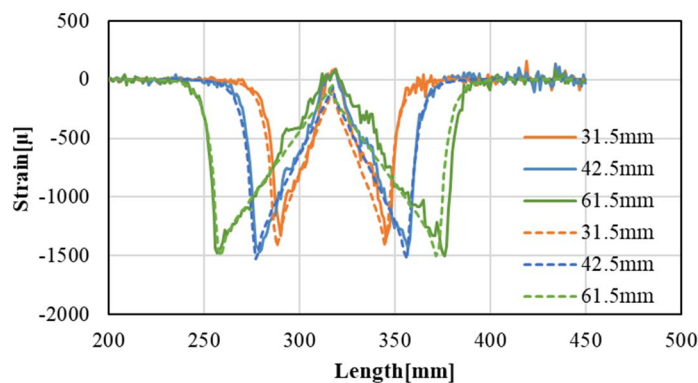


図 4.2 モード I き裂進展によるひずみ分布 (実験および解析結果)

(3)SLJ ( Single Lap Joint ) CFRP 積層板の層間剥離進展モニタリング

図 4.3 にクロスヘッド変位 1.5mm のときのひずみ分布測定結果と FEM 解析結果を示す．図中 A は左側の剥離端，B は右側の剥離端を示す．A 点および B 点でひずみのピークを示しており，測定結果とよく一致していることがわかる．A 点の圧縮ピークの大きさは小さいが，ひずみ勾配が急激に変化していることから剥離検出には十分有用であると言える．

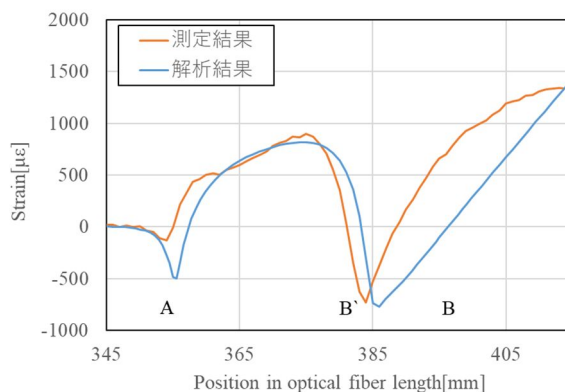


図 4.3 SLJ 試験片の引張試験によるひずみ分布 (実験および解析結果)

(4)FRP 積層板のモード II き裂進展モニタリング

図 4.4 に GFRP 積層板のひずみ分布測定結果を示す．図より，負荷点とクラック先端でひずみ分布にピークが生じ，クラック進展とともにその位置が移動することが明らかになった．この分布は FEM 解析結果ともよく一致することが分かった．

以上の結果は剥離が試験片中央にある場合であるが，深さがひずみ分布に与える影響を調べるために 60 層の下から ( センサ側から ) 10 および 50 層目に剥離がある場合の測定も試みた．

その結果を図 4.5 に解析結果とともに示す．実験結果と FEM 結果はよく一致しており，剥離がセンサに近い場合は谷として，遠い場合はピークとして剥離先端におけるひずみ集中の影響が現れることが分かった．これは剥離検出に剥離深さ位置を考慮する必要があることを示しているが，同時に剥離深さの検出の可能性も示している．

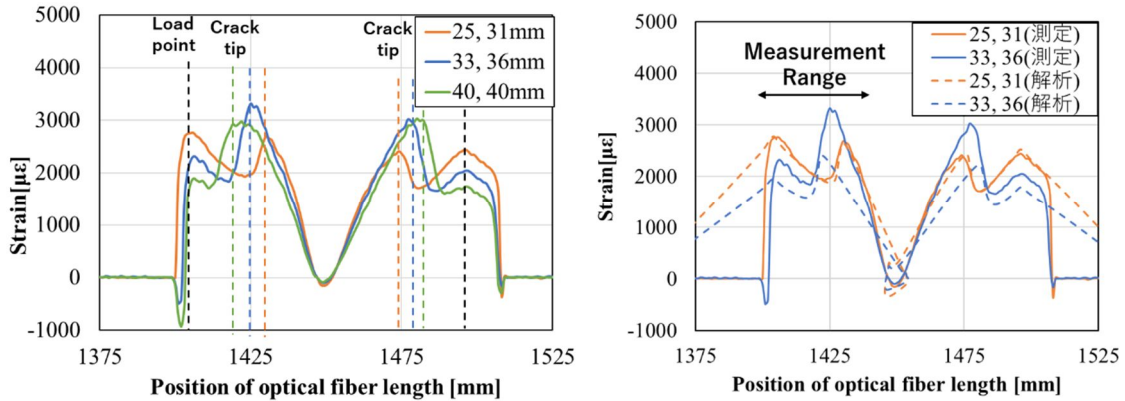


図 4.4 ENF 試験片の 3 点曲げ試験によるひずみ分布（実験および解析結果）

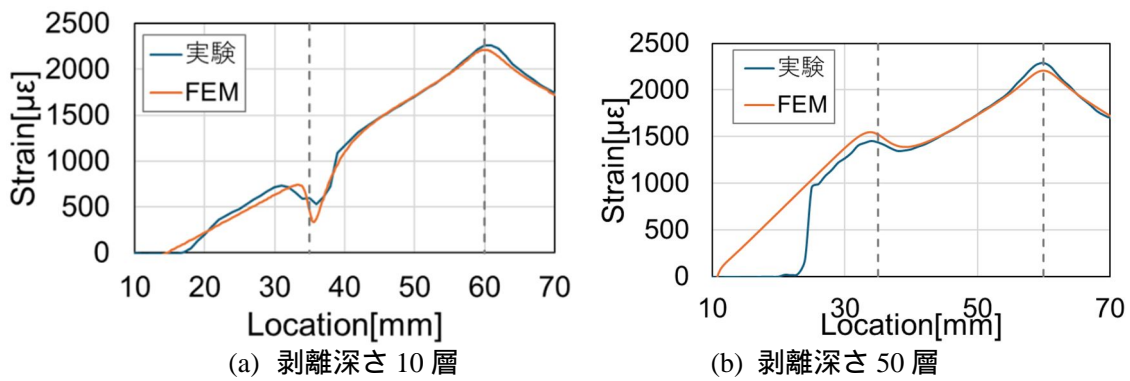


図 4.5 ENF 試験片の 3 点曲げ試験によるひずみ分布（実験および解析結果）

#### (5)加熱による CFRP 積層板剥離モニタリング

図 4.6 は測定された CFRP 上面の温度分布を定常温度（150 秒）で正規化したものである．定常温度で正規化することで温度上昇の遅れのみ注目した．図より，加熱から 40 秒後に 90°積層については温度分布から明確な剥離が見られることが分かった．また，0°積層についても，剥離の存在を確認することが可能であることが示された．

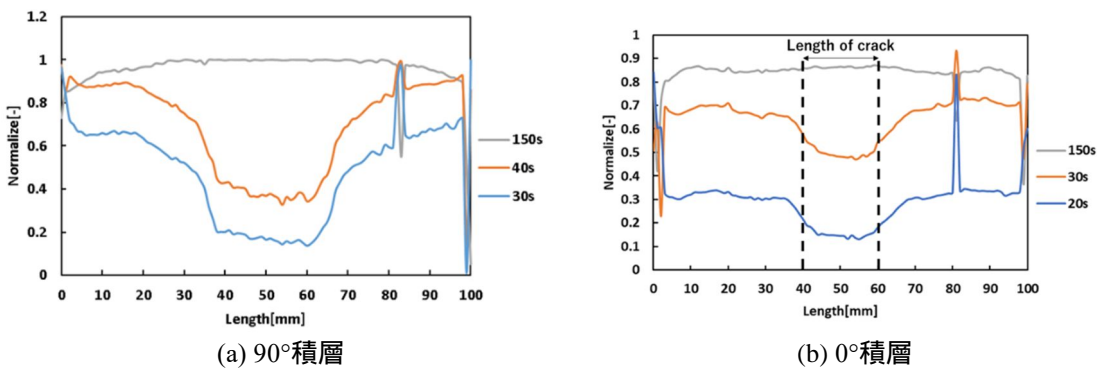


図 4.6 CFRP 上面の正規化温度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 高坂 達郎
2. 発表標題 レイリー散乱型分布センサによる剥離進展モニタリング
3. 学会等名 JCCM-12（第12回日本複合材料会議）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島 星良
2. 発表標題 レイリー散乱型センサによる FRP の 2次元剥離検出
3. 学会等名 機械学会中四国支部 第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuro Kosaka
2. 発表標題 Monitoring of Delamination of FRP by Rayleigh Scattering-Based Sensors
3. 学会等名 Leading Edge Manufacturing/Material and Processing (LEM&P2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuro Kosaka
2. 発表標題 Monitoring of Impregnation Process of VARTM by Rayleigh Scattering Optical Fiber Sensors
3. 学会等名 17th Japan International SAMPE symposium and exhibition (JISSE-17) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高坂 達郎
2. 発表標題 レイリー散乱型分布センサのCFRP積層板き裂進展モニタリングへの適用
3. 学会等名 日本機械学会第29回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西 一輝
2. 発表標題 レイリー散乱型分布センサを用いたCFRP積層板のモードⅡ損傷モニタリング
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 Kazuki Ohnishi
2. 発表標題 Growth Monitoring of Delamination and Adhesive Debonding of CFRP Structures by Rayleigh Scatting-Based Distribution Sensors
3. 学会等名 American society for composites, 36th technical conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuro Kosaka
2. 発表標題 GROWTH MONITORING OF MODE II DELAMINATION BY RAYLEIGH SCATTERING-BASED SENSORS
3. 学会等名 12th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM12) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高坂 達郎
2. 発表標題 ひずみ分布測定による層間剥離形状同定
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 Seira Nakajima
2. 発表標題 Delamination Detection of CFRP Laminates by Rayleigh Scattering-Based Sensor
3. 学会等名 The 2nd Japan-China-Korea Joint Symposium on Composite Materials Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田尻 史弥
2. 発表標題 イリー散乱分布センサを用いた温度分布測定によるCFRPの損傷同定
3. 学会等名 日本材料学会 第72期通常総会・学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島 星良
2. 発表標題 レイリー散乱型センサによるCFRP積層板の層間剥離検出
3. 学会等名 日本材料学会 第72期通常総会・学術講演会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 中島 星良
2. 発表標題 レイリー散乱型センサを用いた表面ひずみ分布測定による CFRP 積層板の剥離検出
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第62 期総会・講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田尻 史弥
2. 発表標題 レイリー散乱型分布センサを用いた温度分布測定による CFRP 積層板の損傷検出
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第62 期総会・講演会
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
---------	---------