

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14844

研究課題名（和文）CFRP深部欠陥のイメージングのための渦電流試験法

研究課題名（英文）Deep penetrating eddy current testing for visualization of internal defects in CFRP

研究代表者

水上 孝一（Mizukami, Koichi）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・講師

研究者番号：20794019

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：CFRP内部の層間はく離と繊維うねりを検出、定量化するための渦電流試験法を開発した。CFRPに対する渦電流試験では、導電率の非均質性によって健全部であっても渦電流センサの信号のばらつきが起こることが問題となる。また、従来の試験法では検査できるのは表層付近のみであるという課題があった。本研究では、まずCFRP内部の導電性のばらつきとその渦電流センサ信号への影響を調査した。健全部での信号変化に埋もれずに深部の層間はく離と繊維うねりを明瞭に可視化するための渦電流プローブと信号処理法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軽量かつ高強度な材料である炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の製造時や使用時に発生する欠陥、損傷を検出しその寸法を推定するための渦電流試験技術を開発した。渦電流試験は非接触で大面積を高速で検査可能な手法であるが、従来法は非均質材料であるCFRP内の導電性のばらつきの影響を受けやすく、かつ材料の深部にある欠陥、損傷の検出が難しいという課題があった。本研究では、導電性のばらつきによる信号変化に影響を受けにくく、より深部まで感度よく検査可能な試験法や信号処理法を調査し、CFRPの強度低下につながる層間はく離と繊維うねりを明瞭に可視化できるようにした。また、それらの寸法推定手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：This study proposed eddy current testing methods for detection and quantification of delamination and fiber waviness in CFRP. Inhomogeneity of conductivity in CFRP is often problematic in eddy current testing because it causes signal variation even in non-defective zone. Moreover, conventional testing methods are limited to inspection of near-surface region. In this study, the effect of the variation of conductivity in CFRP on eddy current sensor signal was investigated. We successfully developed an eddy current probe and signal processing methods that enable visualization and characterization of deep-lying delamination and waviness without being masked by signal variation in non-defective zone.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料 非破壊検査 渦電流試験 炭素繊維

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は軽量で高い剛性と強度を有する材料であるが、層間にはく離や繊維うねりといった特有の欠陥が発生し、機械的特性や強度の低下につながる。非破壊検査法の一つである渦電流試験は非接触検査が可能であるという利点を有するが、渦電流はCFRP表面近傍に集中するため、表面から離れた深部欠陥の検出が困難であるという問題がある。また、CFRPの渦電流試験では、導電性のばらつきにより健全部であっても渦電流センサ信号のばらつきが起こり、欠陥箇所の同定が困難になることがある。渦電流試験をCFRP検査に適用するためには、上記の問題を解決する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、CFRPに発生する欠陥として特に非破壊検査技術が求められている層間にはく離と面外繊維うねりを検出するための渦電流試験法を開発する。まず、CFRPの導電性のばらつきを調べ、導電性のばらつきが渦電流場および渦電流センサ信号にどのような変動を生じさせるかを明らかにする。次に、層間にはく離の検出に特化した渦電流プローブを考案し、健全部でのセンサ信号のばらつきに埋もれずに、はく離部を検出できるかを明らかにする。表層から離れた位置にあるはく離の信号のSN比を向上させるための試験法、信号処理法を構築する。また、得られたデータから層間にはく離寸法を適切にクラスタリングすることを目指す。最後に、面外繊維うねりによって生じる渦電流センサ信号を調査し、面外うねりを明瞭に可視化するための試験条件を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) CFRPの導電率の調査

CFRP試験片を作製し、それらに対して異方性導電率の測定を行った。使用したCFRPは8層の直交積層板であり、積層構成は $[0/90/0/90]_s$ である。同じ成形条件で2つの直交積層CFRPサンプルA、Bを作製した。サンプルの中心部を大きさが $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ の9個のセクションに分割し、合計18個の $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 領域のピースを切り出した。それぞれのサンプルの表面に四電極法のための二重矩形電極を銀ペーストで形成し、厚さ方向導電率 σ_t を測定した。また、繊維方向導電率 σ_0 を測定するために、30層の一方方向CFRP積層板を4枚作製した。4枚の積層板から13個のサンプルC1からC13を切り出し、それらの σ_0 を測定した。 σ_0 測定用サンプルにも、四か所に銀ペーストで電極を形成し、四電極法により導電率を取得した。

(2) 層間にはく離の検出実験

図1に層間にはく離検出実験のセットアップを示す。CFRPサンプルの積層構成は $[(0/45/-45/0)_2]_s$ である。使用したプローブは1つの励磁コイルと5つの検出コイルからなるアレイプローブであり、プローブのx軸に対する回転角を θ とする。プローブの励磁コイル(コイル1)には波形発生器から振幅10V、周波数3MHzの交流電圧を供給した。波形発生器の出力信号は分岐され、ロックインアンプの参照信号として入力された。測定対象の検出コイルはロックインアンプに接続され、ロックインアンプのX、Y成分出力はオシロスコープによって測定された。層間にはく離周辺の $63\text{ mm} \times 63\text{ mm}$ の領域をアレイプローブによってスキャンした。層間にはく離を第1層と第2層の間に有するサンプルに対して渦電流試験を行った。このとき、プローブの回転角 θ は 0° とした。さらに、この渦電流試験法で検出できる最小はく離寸法を調べた。次に、 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の層間にはく離を様々な深さに有するサンプルを作製し、それらに対して試験を行った。励磁コイル、検出コイルの中心間の距離 d_c は 22.5 mm で固定とした。プローブの回転角 θ を $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ$ の4通りに変化させた。プローブの回転角度の変更によって、より深部にある層間にはく離の視認性が向上するかを調査した。

(3) 面外繊維うねりの検出実験

渦電流試験に使用するための、面外繊維うねりを有するCFRPサンプルを作製した。サンプルの積層構成は $[(0_2/90_2)_3]_s$ となっている。渦電流試験に用いられた測定装置は、はく離検出実験と同様である。渦電流プローブは互いに隣接する2つの円筒形励磁コイルと検出コイルで構成されている。図2に渦電流試験の方法と作製したサンプルの断面写真を示す。プローブの検出コイル電圧はロックインアンプによって測定され、ロックインアンプは励磁電圧の同位相成分Xと直交位相成分Yを出力する。渦電流試験はサンプルの表面と裏面からの両方を行った。表面検査ではうねりは上に凸、裏面検査では下に凸となっている。プローブの方向が感度に与える影響を調べるために、プローブ回転角 θ を $0, 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$ と変化させて試験を行った。励磁周波数は6MHzとした。

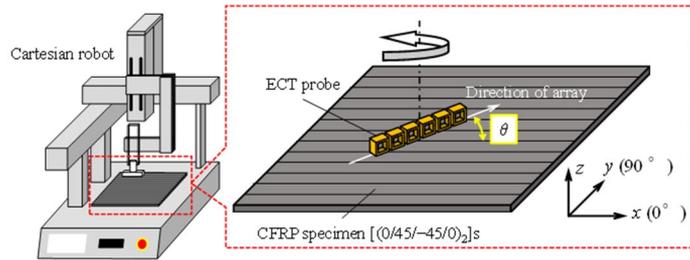


図 1. 層間はく離検出のためのアレイプローブと実験方法.

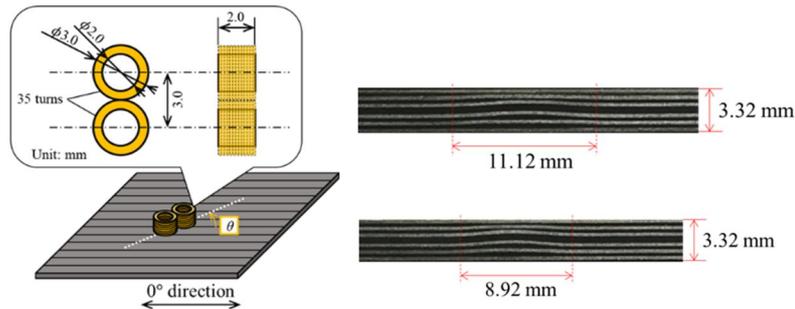


図 2. 面外うねり検出実験の方法と作製した試験体の断面画像.

4. 研究成果

(1) CFRP の導電率の調査

図 3 に四電極法によって測定された CFRP の導電率を示す。繊維方向導電率 σ_0 、繊維直交方向導電率 σ_t とともにばらつきがあり、特に繊維直交方向導電率の変動係数は非常に大きい。有限要素法解析により、多方向強化 CFRP 板のプライの三方向の導電率と、渦電流センサ信号の関係を調べたところ、プライの面内繊維直交方向導電率のセンサ信号への寄与は小さく、主に繊維方向と厚さ方向の導電率によってセンサ信号が変動することが明らかになった。

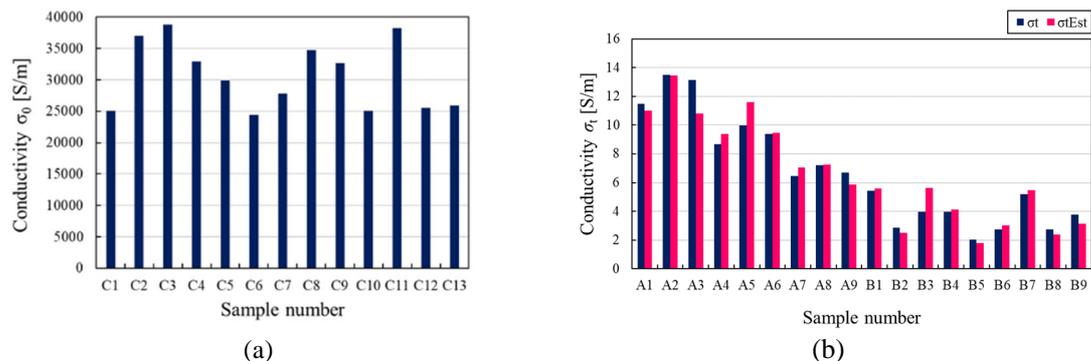


図 3. 四電極法により測定した CFRP の導電率。(a)繊維方向導電率 σ_0 。(b)繊維直交方向導電率 σ_t 。

(2) 層間はく離の検出実験

図 4 に 15 mm × 15 mm のサイズのはく離を 1-2 層間に有する試験片の、代表的な探傷画像を示す。適切なコイル間距離 d_c を設定することで、層間はく離を明瞭に可視化することができ、励磁と検出のコイルが近接したプローブでははく離検出が困難となることも明らかになった。また、 d_c を変えると、探傷画像内のはく離による像の寸法も変わることが分かった。この現象により、探傷画像から直接はく離寸法を評価することが困難であることが分かったので、はく離寸法ごとにコイル間距離とはく離信号の SN 比の関係を調査した。図 5 に横軸にコイルの組合せ、縦軸に SN 比をとった実験結果を示す。このグラフより、はく離寸法 15 mm × 15 mm 以下ではコイル組合せ 1-4、はく離寸法 20 mm × 20 mm 以上ではコイル組合せ 1-5 で SN 比が最大となっている。これにより、コイル間距離と SN 比の関係からはく離寸法の大まかな分類が可能であることが分かった。1-2 層間であれば、提案したプローブにより 7.5 mm × 7.5 mm のサイズのはく離まで明瞭に検出できることが確認された。

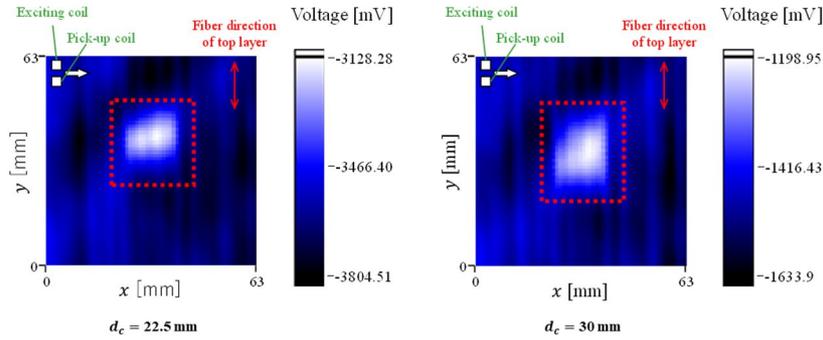


図 4. 15 mm × 15 mm のはく離を 1-2 層間に有する試験片に対する渦電流試験結果 .

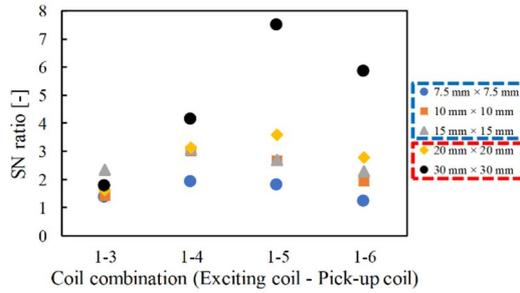


図 5. 各はく離寸法に対する励磁-検出コイルの組み合わせとはく離信号 SN 比の関係 .

図 6 にプローブ方位を変えたときの代表的な実験結果として、3-4 層間にはく離を有する試験片の試験結果を示す。1-2 層間にはく離を有する試験片では $\theta = 0^\circ$ で最も SN 比が高くなっていたが、3-4 層間にはく離を有する試験片では $\theta = 45^\circ$ で最も SN 比が高くなった。各プローブ方位での探傷画像を比較すると、 $\theta = 0^\circ$ で顕著であった導電率のばらつきに由来する健全部での電圧変化が $\theta = 45^\circ$ では抑制されていることが分かる。これにより、適切なプローブ方位を選択することで、従来は健全部の電圧変化に埋没し検出できなかった深部のはく離を検出できることが明らかになった。

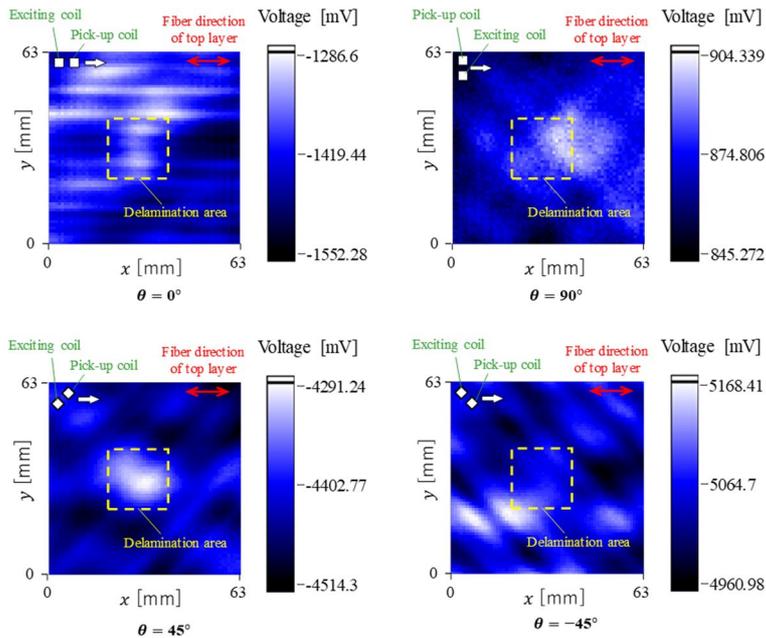


図 6 . 20 mm × 20 mm のサイズのはく離を 3-4 層間に有する試験片に対する渦電流試験結果 .

(3) 面外繊維うねりの検出実験

図 7 にプローブ回転角 $\theta = 0^\circ$ のときの、面外うねり入りサンプルに対する渦電流試験の結果を示す。図 7(a), (c), (e) は表面検査で得られたデータ、図 7(b), (d), (f) は裏面検査で得られたデータである。図 7(a), (b) は各測定点で取得した検出コイル電圧を、ロックインアンプの出力である X と Y を軸に取った平面上にプロットしたものである。図 7(c), (d) は検出コイル電圧の振幅 R の分布である。検出コイル電圧の振幅は健全部でも大きな変動が起こっており、うねりによる信号変化と区別は困難である。表面検査と裏面検査を比較すると、表面検査ではうねり部で電圧振幅が増大し、裏面検査では電圧振幅が減少している。健全部のプロットは X-Y 平面内で大きな

ばらつきがみられるが、これは CFRP 内の導電性の非均質性によるものである。図 7(a), (b) に示すように、うねり部のプロットと健全部のプロットは X-Y 平面内でおおよそ直線的な分布となっている。さらに、うねり部のプロットは健全部のプロットとは異なる傾きの直線に沿って分布していることがわかる。そこで、X 軸から角度 φ 回転した軸への X-Y データの投影を計算し、その 2 次元マップを φ 画像として作成した。図 7(e), (f) にうねり信号の SN 比が最大となる φ を選択したときの φ 画像を示す。うねり部が孤立したスポットとして可視化されており、表面検査と裏面検査における SN 比はそれぞれ 1.03 から 2.40 と、1.32 から 1.84 に増加した。複数のサンプルに対する試験及び有限要素法解析から、表面検査の方が渦電流プローブの信号変化率が大きく、より高い SN 比でうねりを検出できることが明らかになっている。

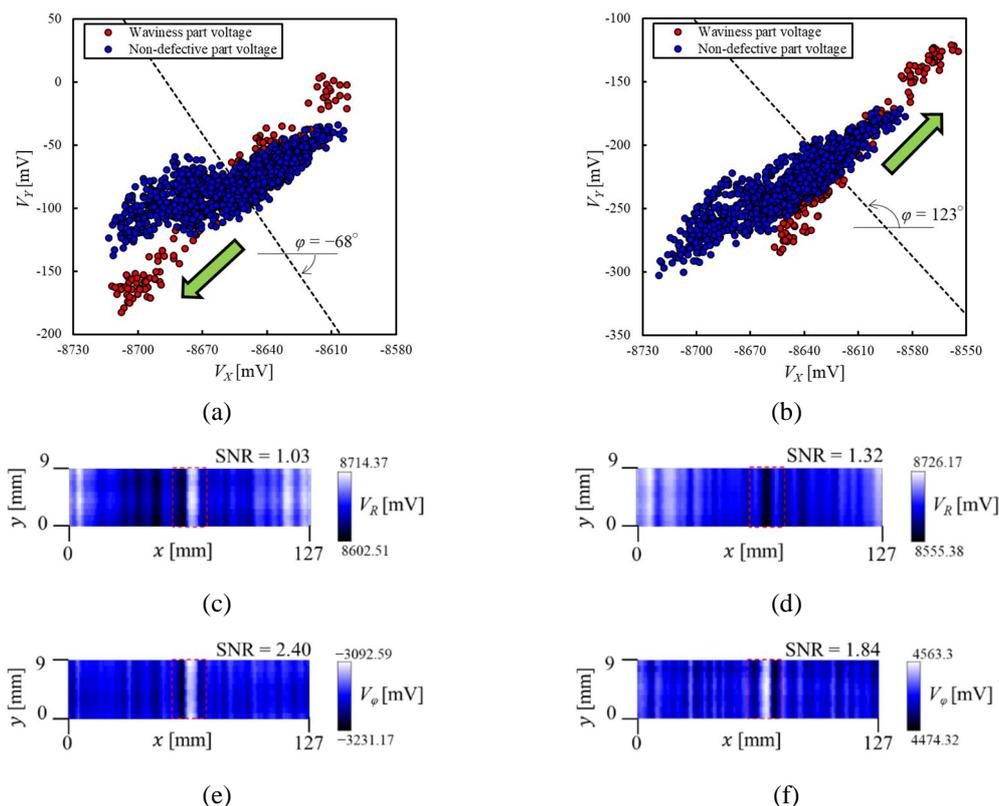


図 7. プローブ角度 $\theta = 0^\circ$ のときの渦電流試験の結果. (a) 表面検査におけるロックインアンプ X-Y データ. (b) 裏面検査における X-Y データ. (c) 表面検査における検出コイル電圧振幅分布. (d) 裏面検査における電圧振幅分布. (e) 表面検査における検出電圧の位相 φ 画像. (f) 裏面検査における位相 φ 画像.

種々のプローブ回転角 θ に対して、SN 比が最大となる φ 画像を取得した。図 8 にうねりを有するサンプルに対する実験で得られた、回転角 θ と SN 比の関係を示す。図 8 に示すように、プローブの回転角は達成できる SN 比に大きな影響を与える。表面検査と裏面検査の両方で $\theta = 0^\circ$ において最も SN 比が高くなっている。つまり、 0° 層の繊維うねりを明瞭に検出するためには、プローブ角度 θ も 0° としておく必要がある。多方向積層板の繊維うねりを検出するためには、様々なプローブ角度で渦電流試験を行うことが有効であるということになる。

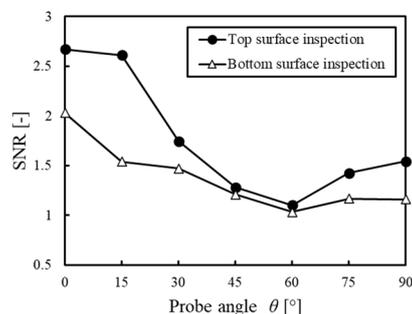


図 8. うねり信号の SNR とプローブ回転角の関係。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mizukami Koichi、Ishibashi Takahiro、Ogi Keiji	4. 巻 173
2. 論文標題 Non-contact strain monitoring of carbon fiber composites using spatial frequency domain eddy current imaging data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 108589 ~ 108589
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.measurement.2020.108589	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 Koichi Mizukami, Ahmad Syukri bin, Ibrahim Keiji Ogi, Nataliia Matvieieva, Ievgen Kharabet, Martin Schulze, Henning Heuer	4. 巻 226
2. 論文標題 Enhancement of sensitivity to delamination in eddy current testing of carbon fiber composites by varying probe geometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 111227
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruct.2019.111227	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 該当する
1. 著者名 Mizukami Koichi、Hioki Shuya、Moriyama Keisuke、Ogi Keiji、Miyaji Wataru、Kimura Kenshi	4. 巻 276
2. 論文標題 Eddy-current array-probe technique for imaging near-surface and deep-lying delaminations in multidirectional carbon fiber composites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 114537 ~ 114537
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruct.2021.114537	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 Mizukami Koichi、Watanabe Yudai、Ogi Keiji	4. 巻 143
2. 論文標題 Eddy current testing for estimation of anisotropic electrical conductivity of multidirectional carbon fiber reinforced plastic laminates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106274 ~ 106274
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compositesa.2021.106274	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4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 旭置 修哉, 森山 敬介, 水上 孝一, 宮地航, 木村憲志
2. 発表標題 CFRP層間はく離の可視化と寸法評価のためのアレイプローブ渦電流探傷試験
3. 学会等名 2020年度日本非破壊検査協会秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊 雄大, 水上 孝一, 黄木景二
2. 発表標題 渦電流試験による多方向強化 CFRP 積層板の異方性導電率の測定
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 水上孝一
2. 発表標題 渦電流試験におけるCFRPの層間はく離 の検出感度向上
3. 学会等名 日本複合材料会議JCCM10
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 旭置修哉, 森山敬介, 水上孝一, 宮地航, 木村憲志
2. 発表標題 CFRP層間はく離の可視化と寸法評価のためのアレイプローブ渦電流探傷試験
3. 学会等名 日本非破壊検査協会表面NDTワークショップ2021（招待講演）
4. 発表年 2021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
---------	---------