

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06057

研究課題名（和文）層間強化CFRP積層板のマルチスケールインピーダンスモデリング

研究課題名（英文）Multi-scale electric impedance modeling of CFRP laminates with interlayers

研究代表者

黄木 景二 (Ogi, Keiji)

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：70281194

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）：層間を樹脂層で強化したCFRP積層板は航空機構造等に使用されているが、耐雷撃性にとって電氣的インピーダンス特性の予測が重要である。本研究ではこれを予測する数理モデルを実験と等価回路モデルによって構築した。その結果、厚さ方向導電率は積層板の大きさに依存し、対数正規分布によって表されることが、負荷によるインピーダンスの変化は層間のないものと比較して複雑であるが、正のゲージ率を持つことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機の機体や風力発電のブレードにCFRP（炭素繊維強化プラスチック）が使用されているが、特に、耐衝撃性を向上させたCFRPでは層間樹脂層のおかげで導電率が低下している可能性がある。そこで層間強化型CFRP積層板の導電率（インピーダンス）特性を実験と数理モデルによって明らかにした。これにより、耐雷撃性を向上させるためのCFRPの材料設計に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Since CFRP (carbon fiber reinforced plastic) laminates toughened with interlayers have been used as aircraft structure, it is essential to predict electric impedance characteristics for lightning resistance. In this study, we developed a mathematical model to predict impedance of the laminate from experiment on the basis of an equivalent circuit model. As a result, it is proved that through-the-thickness resistivity depends on the size of the laminate and obeys a log-normal distribution, and that the gage factor is positive although its piezo-impedance (impedance change against load) exhibits complex behavior.

研究分野：複合材料工学

キーワード：CFRP インピーダンス モデリング

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、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック(Carbon fiber reinforced plastic; CFRP)は軽量高強度という特徴を生かして、航空機の主翼・胴体を含む一次構造部材としてすでに適用されている。しかし従来材であるアルミ合金と比較して、2~3桁以上、導電率が低く、雷撃損傷の抑制が課題となっている。現在、銅メッシュで被覆して雷撃電流を逃がす構造となっているが重量増加を招いている。一方、航空機構造用として、面外衝撃による層間剥離を抑制するため、層間に熱可塑性粒子を含む層(層間粒子層、図1のA/B間のC層)を挿入させた層間粒子CFRP積層板が使用されている。これにより、耐衝撃性は向上するが、積層板の厚さ方向の導電性は層間粒子層を含まないものより低下する。CFRPの電気的性質を説明するための従来のモデルとして、Schulteら(1989)、轟ら(2002)、Parkら(2003)、申請者ら(2006)¹⁾の研究が挙げられる。Schulteら、轟らはCFRPをマクロ均質体とみなして、抵抗とコンデンサの並列回路で表現した。Parkらは繊維破断による抵抗増加を表現する六角柱抵抗網モデルを提案した。申請者ら piezo 抵抗特性(応力に伴う抵抗変化)を等価な抵抗回路網および抵抗(R)成分とコンデンサ(C)成分からなる等価回路として定式化した。以上の従来モデルでは規則的な繊維配列・配向を仮定しているが、実際には不規則な配列・配向をしており、従来モデルでは導電率のパラッキと寸法依存性を定量的に説明することは困難である。また、コイル(L)成分についても、その有無も含めて、合理的な説明は与えられてこなかった。

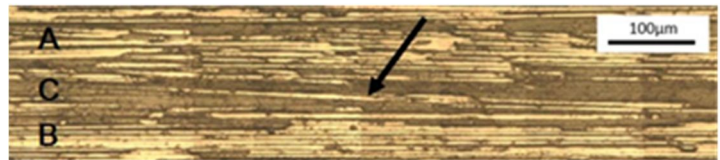


図1 層間強化CFRPの層間樹脂層の様子

2. 研究の目的

本研究の目的は図1で示される層間強化CFRPについて、等価な電気素子(L, C, R)成分を特定するとともに、積層板内での炭素繊維配向の不規則な空間分布を考慮したマイクロおよびマクロな等価回路を考案すること、および、インピーダンスに及ぼす因子として特に、応力と周波数に着目し、寸法依存性と導電率の値のパラッキを予測できるマルチスケールモデルを構築することである。より具体的には、応力0の状態でのインピーダンス特性および応力印加時のインピーダンス特性(piezo インピーダンス特性)を明らかにする。さらに、雷撃特性にとって重要な厚さ方向導電率を渦電流法による推定法も付加的に行う。

3. 研究の方法

(1) 概要: 層間強化CFRPは層間粒子層が絶縁体であるため、理想的には板厚方向の導電率はゼロ(抵抗率 ∞)のはずであるが、実際には有限の抵抗率を示す²⁾。これは繊維直交方向と同様に繊維どうしの接触が導電パスを形成しているためである(図1の矢印)。このような導電繊維(Interlayer Conductive Fiber; ILCF, 図2(a))の不規則な空間分布(図2(b))をインピーダンスの応力・周波数・寸法依存性およびパラッキの原因と考へて、インピーダンス挙動を調べた。まず、2, 8, 16層からなる層間強化CFRP一方向板のインピーダンス応答を調べた。次に、2層からなる層間強化CFRP一方向板に対して、周波数10 Hzから100 kHzまでの引張負荷に対する piezo インピーダンス特性を実験的に調べた。最後に、これらのインピーダンス特性を表現するための等価回路モデルを提案した。

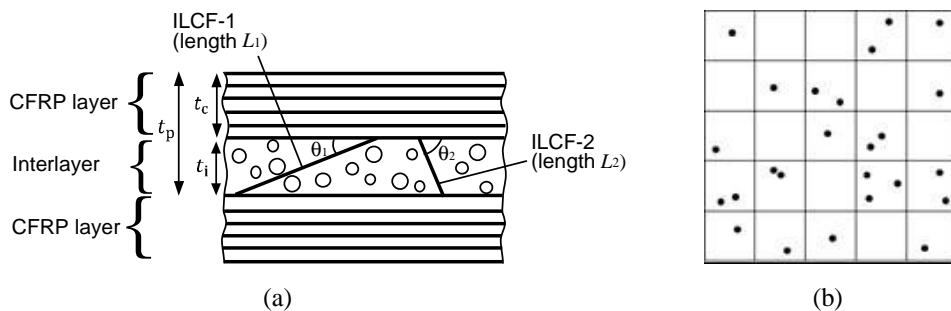


図2 (a)ILCFを含む層間強化CFRPの断面の模式図と(b)マイクロユニットセルに含まれるILCFの不規則分布

(2) インピーダンス挙動: 層間強化CFRP一方向積層板 $[0^n_n]$ ($n=2, 8, 16$) (200 mm x 200 mm, 厚さ0.4, 1.6, 3.2 mm)をオートクレーブにより成形し、表面と裏面の樹脂リッチ部を除去後、導電性接着剤を塗布し、リード線をつけることにより、電極と端子を形成した。次に、LCRメータを用いて10 Hz~1 MHzのインピーダンスの大きさ $|Z|$ と位相角 θ を測定した。この積層板を順次、切断して n 分割した試験片(以下、 n 分割試験片)(図3)を作製し、リード線を付け直して、上記と同様にインピーダンスを測定し、体積抵抗率を計算した。

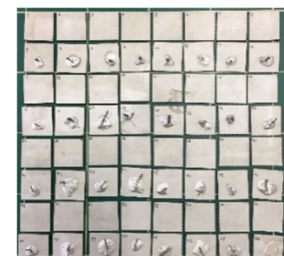


図3 インピーダンス測定用 n 分割試験片

(3) piezo インピーダンス挙動: 繊維配向角依存性を調べるために2層(厚さ約0.4 mm)からなる一方向板(210 mm x 210 mm)を成形し、これを切断して0度試験片(幅10 mm, 長さ150 mm)を作製した。試験片表面の一部を

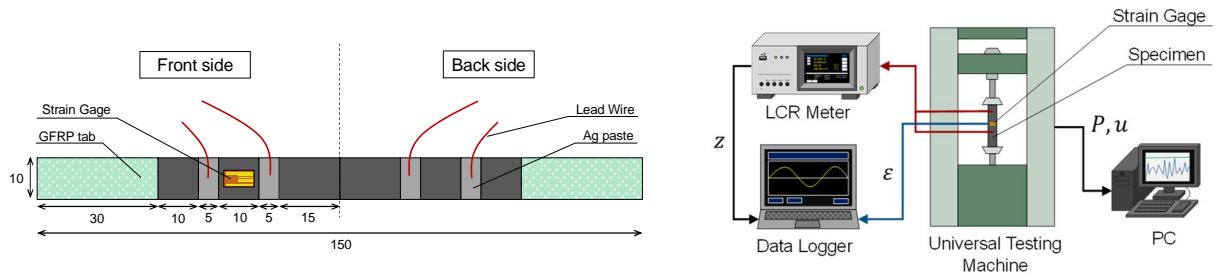


図4 ピエゾインピーダンス測定のための試験片と測定系

研磨した後、図4左に示すように表面と裏面に四端子電極を形成した。図4右に測定システムを示す。雰囲気温度 25 °C の下、万能試験機を用いてクロスヘッドスピード 0.5 mm/min で単調引張負荷を与え、インピーダンスの大きさ $|Z|$ と位相角 θ の変化を LCR メータを用いて測定した。

4. 研究成果

(1) インピーダンス特性³⁾

実験結果：図5に $[0_2^0]$ 試験片の周波数 $f = 10$ Hz における体積抵抗率を示す。ここで縦軸は初期寸法試験片の体積抵抗率で除した無次元抵抗率である。試験片が小さいとき、体積抵抗係数のばらつきが大きい、試験片が大きくなるにつれて、ある値に収束する。本試験片は2層積層板であり、層間樹脂層を1層しか有しないため、寸法が小さくても有限の抵抗係数を有するが、積層数が増大するにつれて、十分に小さいサンプルの中には絶縁体（体積抵抗率が無限大）を示すものが現れると推測される。

図6に $[0_8^0]$ の 256 分割試験片 40 個の 10 Hz における無次元体積抵抗率および $[0_8^0]$ の 256 分割試験片の $f = 1$ MHz におけるキャパシタンスの値を表す。変動係数はそれぞれ 3.26 と 0.297 であり、抵抗率に比べてキャパシタンスのばらつきは小さい。後述の等価回路を考えると次式が得られる：

$$z_p = \frac{\rho_p}{\sqrt{1 + (\omega\rho_p\varepsilon_p)^2}} \quad (1)$$

(1)式は低周波で $z_p = \rho_p$ 、高周波で $z_p = 1/\omega\varepsilon_p$ と近似される。これは高周波ではキャパシタンス成分の小さいばらつきに起因して体積抵抗率のばらつきが小さいことを意味する。

確率分布モデリング⁴⁾：図5のデータを用いて、無次元導電率に対して、無次元面積をヒストグラムとして表したものを図7に示す。無次元面積は試験片の累積面積に相当する。この分布は次式のと対数正規分布によって近似できる：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

(2)式によりフィットしたものを図7に曲線で示す。試験片が小さくなると、最頻値（ピーク）が導電率の低い側にシフトする。

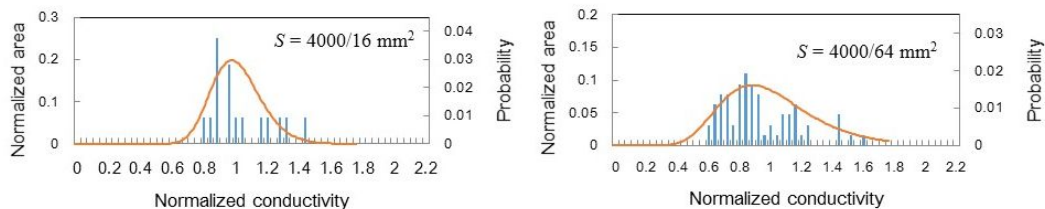


図7 無次元導電率のヒストグラムと対数正規分布曲線

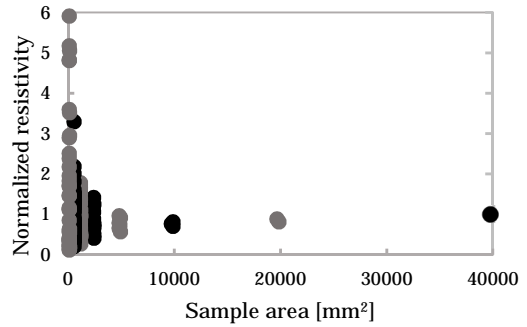


図5 無次元抵抗係数と面積の関係

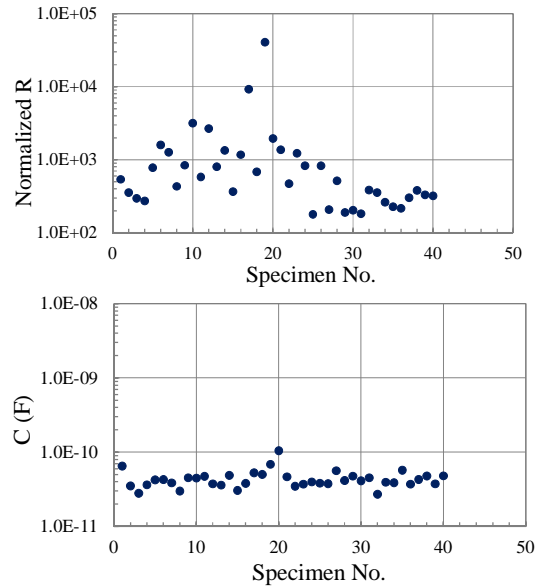


図6 256 分割試験片の(上)無次元抵抗係数、(下)キャパシタンス

(2) ピエゾインピーダンス挙動⁵⁾

実験結果：図8に周波数10 Hz, 1 kHz, 100 kHzにおける単調引張負荷下でのひずみとインピーダンスの絶対値の変化率および位相角の関係を示す。いずれの周波数においてもインピーダンスは負荷ひずみとともに増大するが、必ずしも線形的に増加しない。この挙動は、層間樹脂層のないCFRPの挙動¹⁾と類似している。一方、位相角については、10 Hz, 1 kHzではほぼ0度のまま変化しないが、100 kHzの場合、わずかに負の値をとった後、約7000 $\mu\epsilon$ 以上で正の値に転じる。高周波数で位相角がわずかに負の値をとるのは、後述のモデルで示すようにキャパシタンス成分が顕著になるからである。

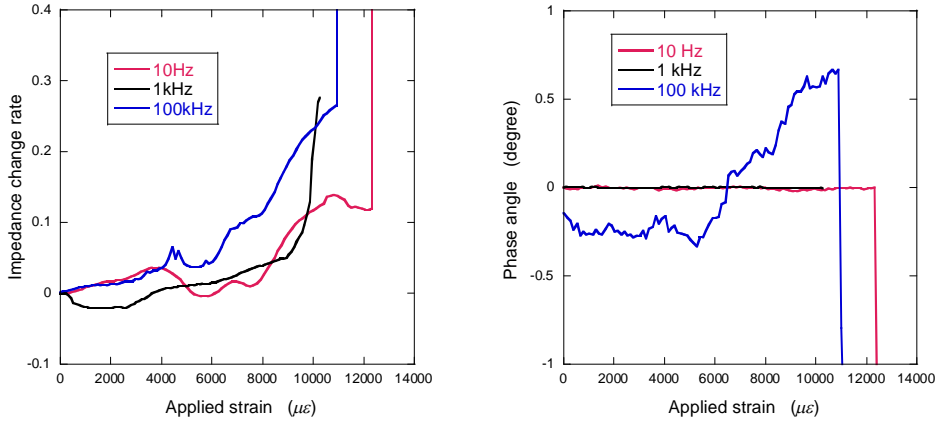


図8 左：インピーダンスの大きさの変化率，右：位相角

ピエゾインピーダンスモデル^{3,5)}：図1のようなCFRP層（面積 S ，厚さ t_c ）と層間樹脂層（厚さ t_i ）からなる一つのプライ（厚さ $t_p = t_c + t_i$ ）の厚さ方向のインピーダンス特性を表すために、図9に示す抵抗とキャパシタンスからなる等価インピーダンス回路を考える。すなわちCFRP層および層間樹脂層の抵抗要素をそれぞれ R_c, R_i ，キャパシタンス要素をそれぞれ C_c, C_i とする。 R_c と C_c, R_i と C_i はそれぞれ並列に接続されて等価インピーダンス要素 Z_c と Z_i を形成しており、 Z_c と Z_i が直列に接続されてプライのインピーダンス要素 Z_p を形成する。 ρ_k, ϵ_k を各層の抵抗係数，誘電率とすると、

$$R_k = \rho_k \frac{t_k}{S}, \quad C_k = \epsilon_k \frac{S}{t_k} \quad (k = c \text{ or } i) \quad (3)$$

である。このとき各層のインピーダンス係数は

$$z_k = \left(\frac{1}{\rho_k} + j\omega\epsilon_k \right)^{-1} = \frac{\rho_k}{1 + j\omega\rho_k\epsilon_k} \quad (k = c \text{ or } i) \quad (4)$$

と書ける。プライの合成インピーダンス係数 z_p は

$$z_p = z_c v_c + z_i v_i \quad (5)$$

で与えられる。ここで $v_k = t_k/t_p$ は各層の体積含有率である。 f を周波数， $\omega = 2\pi f$ を角周波数とすると、

$$z_p = \left(\frac{1}{\rho_p} + j\omega\epsilon_p \right)^{-1} = \frac{\rho_p}{1 + j\omega\rho_p\epsilon_p} \quad (6)$$

と書ける。(4),(5),(6)式より、

$$\rho_p = \frac{1 + (\omega A)^2}{1 + (\omega\rho_c\epsilon_c)^2} v_c \rho_c + \frac{1 + (\omega A)^2}{1 + (\omega\rho_i\epsilon_i)^2} v_i \rho_i, \quad \epsilon_p = \frac{A}{\rho_p} \quad (7)$$

が得られる。ただし、

$$A = \frac{\{1 + (\omega\rho_i\epsilon_i)^2\}\rho_c^2\epsilon_c v_c + \{1 + (\omega\rho_c\epsilon_c)^2\}\rho_i^2\epsilon_i v_i}{\{1 + (\omega\rho_i\epsilon_i)^2\}\rho_c v_c + \{1 + (\omega\rho_c\epsilon_c)^2\}\rho_i v_i} \quad (8)$$

である。よってプライの抵抗係数，誘電率ともに周波数依存性がある。比較的低周波 ($f \leq 100$ kHz) で、ほぼ導体とみなせる場合、キャパシタンス要素成分は十分に小さいため、(7)式は

$$\rho_p = v_c \rho_c + v_i \rho_i, \quad \epsilon_p = \left(\frac{\rho_c}{\rho_p} \right)^2 v_c \epsilon_c + \left(\frac{\rho_i}{\rho_p} \right)^2 v_i \epsilon_i \quad (9)$$

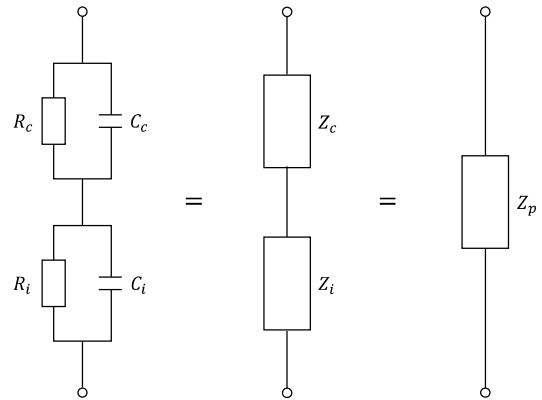


図9 層間強化CFRPの等価回路モデル

のように複合則として近似できる。ここで $\rho_c \ll \rho_i$ と考えられるので、

$$\rho_p = v_i \rho_i, \quad \varepsilon_p = \frac{\varepsilon_i}{v_i}, \quad Z_p = \frac{v_i \rho_i}{1 + j\omega \rho_i \varepsilon_i} \quad (10)$$

つまり、プライの抵抗係数と誘電率は層間樹脂層のそれによって決まる。2層積層板の場合、層間は一つであるため、上記の1プライモデルが適用でき、そのインピーダンス要素は(10)式で表される。ただし $v_i = t_i / (2t_c + t_i)$ と置く。図5で示したように、この ρ_i は寸法に依存したバラツキが見られるため、インピーダンスの初期値(無負荷時の値)のバラツキは大きい。一方、 ε_i の寸法依存性が小さい。よって piezoelectric impedance挙動は ρ_i すなわち ILCF のそれを反映した結果となっている。試験片内に存在する ILCF の数は少ないため、同一サンプルでも引張負荷の大きさに伴い、抵抗が増えたり、減少したりする点は注意が必要である。

(3) 渦電流法による厚さ方向導電率推定⁶⁾

非接触で異方性導電率を測定する方法として渦電流法を用いた。ただし、層間強化のない通常型 CFRP を用いた。(i) 電極測定と渦電流試験による推定法、(ii) FEM解析と渦電流試験による推定法、(iii) FEM解析と複数周波数渦電流試験による推定法を考案したが、ここでは最も簡易な方法として(i)の結果を述べる。

本手法は渦電流試験による試験片の有無に抵抗変化 ΔR と、試験後に電極を形成して実測した厚さ方向導電率 σ_t の回帰曲線を求めるものである。 ΔR は σ_t の3次関数で近似され、決定係数は 0.9716 である。図10に予測値と測定値の比較を示す。ほとんどのサンプルで両者はよく一致している。層間強化 CFRP に本手法を用いる場合、サイズ効果とバラツキを考慮して、サンプル数を増やす必要がある。

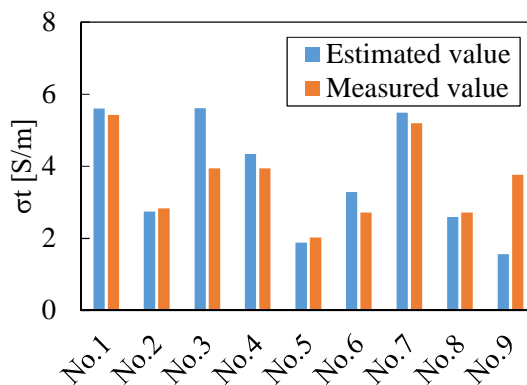


図10 厚さ方向導電率の推定値と測定値

5. 本研究の位置づけ、インパクトおよび今後の展望

層間強化 CFRP の導電率に関する研究例は数少なく、データそのものが少ないのが現状である。特に、サイズ依存性とばらつきが発現メカニズムの解明とそのモデル化は本研究が世界初と言える。本研究の成果は、層間強化 CFRP を航空機の機体や風力発電のブレードに用いる際、雷撃損傷メカニズムの解明と耐雷撃性向上のための新規材料設計に大いに貢献するものである。

今後の展望として、厚さ方向導電率の空間分布と雷撃損傷の関係を明らかにすることで、本材料の雷撃損傷メカニズムの解明が進むことが期待される。

参考文献

- 1) 黄木景二, 井上宏樹, CFRP 一方向板のインピーダンスモデル, 日本複合材料学会誌, Vol. 32, No.2 (2006), pp.61-66.
- 2) T. Yamane, A. Todoroki, H. Fujita, A. Kawashima and N. Sekine, Advanced Composite Materials, 25 (2016), 497-513.
- 3) 黄木景二, 尾崎良太郎, 門脇一則, 水上孝一, 層間強化 CFRP 積層板のインピーダンスモデリング, 第8回日本複合材料会議講演論文集(2017).
- 4) Keiji Ogi, ELECTRO-CONDUCTIVITY IN THE THICKNESS DIRECTION OF A UNIDIRECTIONAL CFRP LAMINATE WITH INTERLAYERS, The 11th Asian-Australasian Conference on Composite Materials, Cairns, Australia (2018).
- 5) 黄木景二, 尾崎良太郎, 層間強化 CFRP 積層板の piezoelectric impedance挙動, 日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス(2019).
- 6) 渡邊雄大, 水上孝一, 黄木景二, 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, 第44回複合材料シンポジウム(2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Koichi Mizukami and Keiji Ogi | 4. 巻 27 |
| 2. 論文標題 Non-contact visualization of fiber waviness distribution in carbon fiber composites using eddy current testing | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Composite Materials | 6. 最初と最後の頁 135-146 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09243046.2017.1344917 | 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, | 4. 巻 226 |
| 2. 論文標題 Enhancement of sensitivity to delamination in eddy current testing of carbon fiber composites | 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 - |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Ogi |
| 2. 発表標題 ELECTRO-CONDUCTIVITY IN THE THICKNESS DIRECTION OF A UNIDIRECTIONAL CFRP LAMINATE WITH INTERLAYERS |
| 3. 学会等名 The 11th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Ogi, K. Mizukami, H. Matsutani and N. Sato |
| 2. 発表標題 MONITORING OF CURE AND THERMAL SHRINKAGE IN INTERLAYER-TOUGHENED CFRP LAMINATES |
| 3. 学会等名 18th European Conference on Composite Materials (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 渡邊 雄大, 黄木 景二, 水上 孝一 |
| 2. 発表標題 CFRP積層板の厚さ方向導電率について |
| 3. 学会等名 日本材料学会第67期通常総会・学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 脇 砂織, 田丸 寛太, 尾崎 良太郎, 弓達 新治, 門脇 一則, 中川 友哉, 水上 孝一, 黄木 景二 |
| 2. 発表標題 CFRP積層板の厚さ方向の電気特性に関する研究 |
| 3. 学会等名 2017年度 応用物理・物理系学会中国四国支部 合同学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 黄木景二, 水上孝一, 堤三佳 |
| 2. 発表標題 層間強化CFRP積層板の厚さ方向インピーダンス特性 |
| 3. 学会等名 日本材料学会四国支部第17回学術講演会 |
| 4. 発表年 2019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 黄木景二, 尾崎良太郎 |
| 2. 発表標題 層間強化CFRP積層板のピエゾインピーダンス挙動 |
| 3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| <p>黄木景二 https://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikaisei/zairiki/kogi/kogi-j.htm 愛媛大学炭素繊維複合材料研究ユニット http://ipst.adm.ehime-u.ac.jp/cfc/</p> |
|---|

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 |
|-------|---|--|----|
| 連携研究者 | 尾崎 良太郎 (Ozaki Ryotaro) (90535361) | 愛媛大学・理工学研究科・准教授 (16301) | |