

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月14日現在

機関番号：25301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860045

 研究課題名（和文） 縫合織物とニードルパンチによる炭素繊維強化複合材料の
最適な修繕方法の提案

 研究課題名（英文） Proposing of repair method of CFRTP by needle punching and patch
bonding

研究代表者

小武内清貴（Kiyotaka Obunai）

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号：30614367

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は曲げ損傷を受けた炭素繊維強化熱可塑複合材料(以下CFRTP)の修繕性を明らかにすることである。強化材を平織炭素繊維布，母材をPA6とするCFRTPを作製し，4点曲げを行うことによって曲げ負荷に伴うCFRTPの損傷形態を調査した。その結果，作製したCFRTPでは2.0%程度の曲げひずみを与えた時に圧縮側で初期層間はく離が発生した。また2.5%程度の曲げひずみを与えた時，試験片の圧縮側に局所的な座屈の発生が確認できた。本研究では2.0%の曲げひずみ負荷を与えた試験片を軽損傷材，2.5%の曲げひずみ負荷を与えた試験片を重損傷材とし，これらの損傷材のパッチ貼付に伴う曲げ特性回復様相を調査した。その結果，圧縮側に適切な枚数のパッチを貼付することにより，軽損傷材，重損傷材共に処女材の曲げ特性と同程度まで回復させることが可能であった。次に，ニードルパンチ処理がCFRTPの曲げ特性に与える影響を調査した。その結果，ニードルパンチ処理によって層間強度が向上し，曲げ負荷初期に発生する層間はく離を抑制できることがわかった。そこで損傷材の修繕にパッチ貼付とニードルパンチ処理を併用したところ，修繕材の曲げ特性はパッチ貼付のみによって修繕したもののそれよりも向上した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to investigate the fracture morphology and repairability of CFRTP. Four-point bending test was conducted to investigate the fracture morphology of CFRTP subjected to bending load. Test results showed that the local delamination was first appeared when the 2.0% of bending strain was applied. When the 2.5% of bending strain was applied, the damage of fiber due to the local buckling was observed at compression side of specimen. The effect of patch bonding on bending strength and modulus was also evaluated. Test results showed that damaged specimen would be repaired when appropriate layer of patch was bonded, and the patch bonding at compression side was more effective than that at tension side. The effect of needle punch on bending characteristics of CFRTP was also evaluated. Test results showed that the interlaminar strength of CFRTP was improved due to the delamination was suppressed by needle punch. Moreover, bending strength and modulus of CFRTP repaired by needle punching and patch bonding was higher than that repaired by only patch bonding.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2011年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2012年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |

研究分野：機械材料・材料力学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：複合材料，熱可塑性樹脂，曲げ損傷，修繕

1. 研究開始当初の背景

CFRTPは軽量（比重が 1.5g/cm^3 ～），高強度（ 400MPa ～），高弾性率（ 150GPa ～）等，高い機械的特性を持ち，また繊維配向を変更することによってポアソン比を変更できるなど使用用途に合わせた材料設計を行える先端材料である．これらの優れた特性から，鉄やアルミ等の金属材料に替わる素材として，車輛や航空機への応用が増加している．

これらのアプリケーションでは，事故や疲労等に伴い修繕を行うことが一般的である．しかし，現状ではCFRTPの修繕を行う方法が確立されていないため，パネル全体やアセンブリ交換を行い，交換部品は廃棄されている．またCFRTPは先に挙げた優れた特性を有する一方，その強化繊維である炭素繊維を製造する際に必要なエネルギー使用量およびCO₂排出量は鉄やガラス繊維等に比べて約10倍である．また現状では廃棄されたCFRTPのほとんどが焼却・埋め立て処分されている．環境への負荷および，Reduce, Reuse, Recycleの3Rの観点から，CFRTPの新規製造量の抑制と，CFRTP廃棄物の低減が社会的に急務である．

一般にFRPは

- ①母材樹脂にき裂発生
- ②層間剥離の発生
- ③繊維破断

の3段階を経て最終破壊に至ることが知られている．これまでの研究では①や②の段階で，欠陥を発見する技術開発が行われてきた．また，②の状態に部材が陥っても全体設計として安全となるような損傷許容設計についても研究が行われてきた．しかし，これらの技術開発はすべて，最終的な部材の交換を前提としたものであり，CFRPの修繕・再使用について研究したものはほとんどない．

2. 研究の目的

以上より，本研究課題の目的はCFRTPの効果的な修繕方法の確立である．具体的にはパッチ貼付による修繕効果の定量的評価，並びにニードルパンチ処理を併用した修繕方法の確立である．

3. 研究の方法

3. 1 CFRTP 作製方法

本研究課題では，CF/PA6複合材料をプリプレグから作製した．プリプレグは0.1 mm厚のPA6シートと平織炭素繊維をヒートプレスすることにより作製した．まず，ペレット状のPA6樹脂（TORAY，CM1017）から0.1 mm厚の

シートをヒートプレスにより作製した．ペレット状のPA6樹脂を 240°C で1 min予熱した後， 240°C ，5 MPaで2 min加圧した．

次に，作製した0.1 mm厚シートと平織炭素繊維（TORAY，C06343）を重ね合わせヒートプレスすることによりプリプレグを作製した．作製条件は， 240°C で1 min予熱した後， 240°C ，5 MPaで3 min加圧とした．

作製した10枚のプリプレグをテフロンバッグ内に設置し，真空ポンプによりバッグ内の空気を吸引した．プリプレグを密封したテフロンバッグを 240°C で1 min予熱した後， 240°C ，5 MPaで3 min加圧しプリプレグ同士を圧着させた．作製したCFRTPの積層構成は $[0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ-90^\circ]_s$ とし，厚みは約2.5 mm，繊維体積含有率は50%程度のCF/PA6複合材料を作製し供試材とした．

3. 2 四点曲げ試験法

JIS-K 7074に基づき4点曲げ試験を行った．内部支点間距離，外部支点間距離をそれぞれ17，51 mmとし，曲げ試験速度は5 mm/minとした．作製したCF/PA6複合材料から $0^\circ-90^\circ$ 方向の繊維と平行にダイヤモンドカッタを用いて $10\times 70\times 2.5$ mmに切り出し，試験片とした．有効試験片本数（n）は少なくとも4本以上とした．曲げ応力，曲げひずみは以下の式を用い簡易的に算出した．

$$\sigma_B = \frac{3}{2} \cdot \frac{(L_1 - L_2)}{wt^2} \cdot F \quad (3-1)$$

$$\varepsilon_B = \frac{6t(L_1 - L_2)\delta}{L_1^3 - 3L_1L_2^2 + 2L_2^3} \quad (3-2)$$

3. 3 修繕方法

予め損傷を与えた試験片に対し修繕を施し，曲げ特性の回復度を定量的に評価した．本研究課題では，異なる損傷度の試験片に対し，パッチ貼付およびパッチ貼付とニードルパンチ処理を併用した修繕を行った．ここでパッチとは $0^\circ-90^\circ$ のプリプレグから繊維に対して平行に 10×30 mmのサイズで切り出したものを指す．

まず，パッチ貼付のみで修繕する場合の手順を示す．図3-1に示す修繕用金型に試験片とパッチを設置し，ヒートプレスを用いて 240°C ，1 min予熱した後， 240°C ，5 MPaで3 min加圧しパッチを試験片表面に圧着した．

次に，パッチ貼付にニードルパンチ処理を併用した修繕手順を以下に示す．ニードルパンチ処理は図3-2に示す特殊な形状を有する針を試験片厚み方向に繰り返し刺突し，面内の繊維を面外に配向する処理である．本研究

課題ではパッチと試験片間の層間強度が修繕の曲げ特性に与える影響を評価するため、損傷部およびパッチに対しニードルパンチ処理を施し、パッチ-試験片間の層間強度を変化させた。図 3-3 に示すニードルのガイド用孔を設けた型内に予め損傷を与えた試験片とパッチを設置し、電気炉（ヨシダ製、1001-SS）内にて 240°C で 30 min 間加熱、母材樹脂を軟化させた。その後、電気炉から型を取り出し、ガイド孔からニードルを刺突した。最後に、ニードルを刺突した試験片を金型内に入れ、ヒートプレスを用いて加圧した。加圧条件は、240°C、5 MPa で 3 min とした。このとき、本研究課題では単位面積当たりのニードル刺突回数を 16 /cm² とし、ニードルパンチ処理を行った。

3. 4 数値解析

ニードルパンチ処理の有無による CFRTP の Mode I 層間はく離強度の違いを明らかにするため有限要素解析を行った。一般に、Mode I 層間はく離強度は DCB 試験により実験的に評価可能であるが、本研究課題では有限要素解析を用いた逆解析によって層間はく離強度の同定を試みた。解析モデルは対称性を考慮し、試験片の長手、幅方向に対し 1/2 をモデル化した。直交異方性を有する層を 10 層積層し、それぞれの材料主軸方向を変化させることにより [0°-90°/ ± 45°/0°-90°/ ± 45°/0°-90°]_s の積層構成を再現した。各層には別途行った引張試験によって決定した材料特性および Hoffman 則に基づくはく離基準を与え、曲げに伴う層間はく離挙動を再現した。

パッチ貼付を施していない試験片を対象に、ニードルパンチ処理を行ったものと、行っていないものの 2 種類の試験片を用意し、曲げ強度、曲げ剛性、吸収エネルギーを 4 点曲げ試験によって実験的に評価した。その後、前述した解析モデルと実験結果を基に逆解析を行い、Mode I 層間はく離強度を算出した。

4. 研究成果

4. 1 作製した CFRTP の破壊形態

図 4-1 に 4 点曲げ試験により得られた曲げ応力-曲げひずみ線図の代表例および 4 点曲げ試験中の、試験片中央部を側面から観察した結果をそれぞれ示す。図より 2.0% の曲げひずみを与えたとき、局所的な層間はく離が確認された。また、2.5% の曲げひずみを与えたとき、試験片の圧縮側では局所的な座屈が、試験片の引張側では層間はく離がそれぞれ確認できた。

曲げひずみの増加に伴う各層の損傷形態を詳しく調査するために、予め 2.0、2.1、2.2、2.3、2.4 および 2.5% の曲げひずみを与えた 6 種類の試験片を用意した。これらの試験片を電気炉（ヨシダ製、1001-SS）を用いて加熱し、母材樹脂を熱分解することにより、各層

の繊維を抽出した。熱分解条件は、240°C、120 min とした。図 4-2 に異なる曲げひずみを与えた際の各層の損傷状態を示す。図より、2.0% の曲げひずみを与えたとき、圧縮側最外層の 0-90° 層で繊維の破壊が確認できた。そ

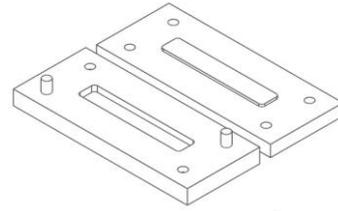


Fig. 3-1 Mold for patch bonding.

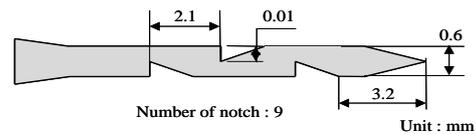


Fig. 3-2 Dimension of needle.

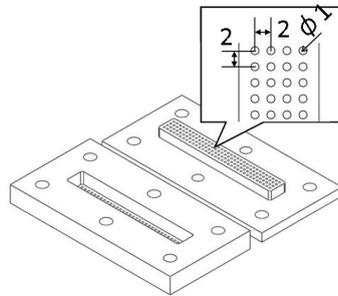


Fig. 3-3 Mold for needle punching.

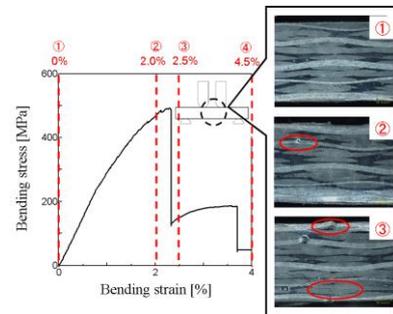


Fig. 4-1 S-S diagram and side view observations of specimen.

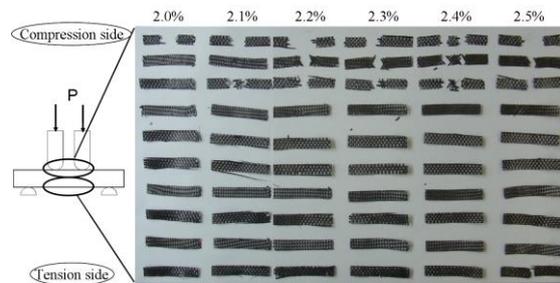


Fig. 4-2 Damage state of each layer at different bending strain.

その後、曲げひずみの増加に伴い、圧縮側から三層目まで破壊が進展した。そして、曲げひずみが 2.5%に達したとき、引張側最外層の 0-90° 層でも破壊が確認できた。以上のことから、本研究課題では、損傷状態を以下の 2 種類に分類した。予め 2.0%の曲げひずみを与えたものを軽損傷材、2.5%の曲げひずみを与えたものを重損傷材と定義した。また、損傷を与えていない試験片は、以降バージン材と呼称する。

4. 2 パッチ貼付による修繕効果

図 4-3, 4-4 に軽損傷材および重損傷材に対し、パッチ貼付による修繕を行った結果をそれぞれ示す。修繕の結果を定量的に議論するために、以下の式に示す正規化曲げ強度および正規化曲げ弾性率を導入し、実験結果を整理した。

$$\sigma_n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{BI}} \quad (4-1)$$

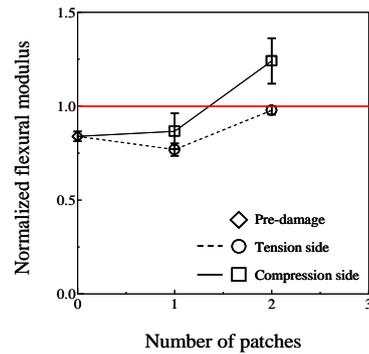
$$E_n = \frac{E_B}{E_{BI}} \quad (4-2)$$

ここで、 σ_n 、 σ_B および σ_{BI} はそれぞれ正規化曲げ強度、修繕を行った試験片の曲げ強度およびバージン材の曲げ強度を示している。また、 E_n 、 E_B および E_{BI} は正規化曲げ弾性率、修繕を行った試験片の曲げ弾性率およびバージン材の弾性率をそれぞれ示している。

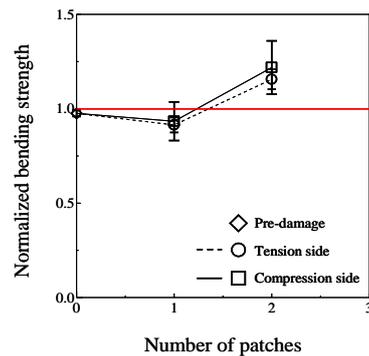
本研究では、正規化曲げ強度および正規化曲げ弾性率が 1.0 に達するまでパッチの枚数を増やして修繕を行った。図より、軽損傷材の場合、試験片の引張側と圧縮側に問わずパッチを 2 枚貼付することにより、バージン材の曲げ特性と同程度まで回復できることが分かった。一方、重損傷材の場合、少なくとも 3 枚のパッチを貼付することにより、バージン材の曲げ特性と同程度まで回復できることが分かった。さらに、一部逆転があるが概ね圧縮側にパッチを貼付する方が引張側にパッチを貼付するよりも効果的であった。

4. 3 ニードルパンチを併用した修繕

図 4-5 に重損傷材に対し、パッチ貼付とニードルパンチ処理を併用した修繕を行った結果を示す。パッチ修繕に及ぼすニードルパンチ処理の影響を調査するため、重損傷材に対してパッチ貼付のみにて修繕を行った結果を併せて示す。前節にてパッチ貼付による修繕は圧縮側の方が効果的であると示唆されたため、ニードルパンチ法を併用した修繕は圧縮側にパッチを貼付した場合のみ行った。結果より、パッチ貼付法およびニードルパンチ処理を併用した修繕において、パッチ枚数の増加に伴い曲げ特性の回復度は増大した。また同じパッチ貼付枚数にて比較すると、ニードルパンチ処理を併用することにより修繕効果が増大することがわかった。

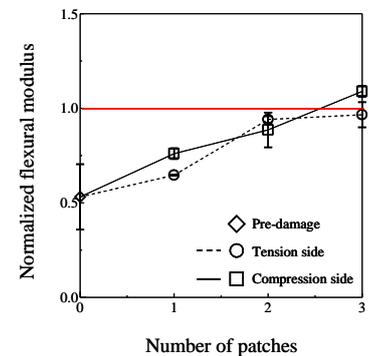


(a) Normalized flexural modulus.

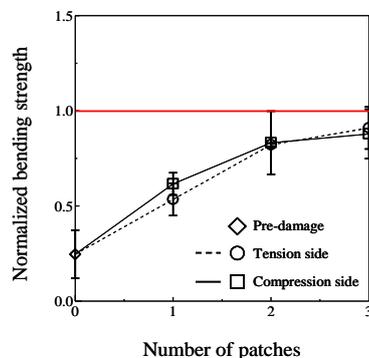


(b) Normalized bending strength.

Fig.4-3 Results of repair of moderate damage.



(a) Normalized flexural modulus.



(b) Normalized bending strength.

Fig.4-4 Results of repair of severe damage.

前節で、パッチ貼付法では重損傷材の曲げ特性をバージン材のそれと同程度まで回復させるために少なくとも3枚のパッチが必要であったが、ニードルパンチ処理を施すことにより、バージン材の曲げ特性と同程度まで回復させるために必要なパッチ枚数は2枚に減少した。

これらのことから、パッチ貼付とニードルパンチを併用したニードルパンチ法が、曲げ特性の回復に有効であることが確認できた。

4. 3 ニードルパンチ処理がCFRTP層間はく離強度に与える影響

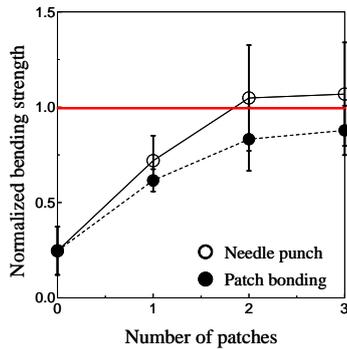
図4-6にバージン材に対しニードルパンチ処理を施した試験片およびニードルパンチ処理を施していない試験片を4点曲げし得られた曲げ応力-曲げひずみ線図の代表例を示す。ニードルパンチ処理を施すことにより、曲げ剛性および曲げ強度は約5%向上し、吸収エネルギーは約12%増加した。

図4-7に4点曲げ試験中の試験片中央部を側面から観察した結果を示す。図中の①、②および③はそれぞれ曲げひずみ0.0、2.0および2.5%時の観察結果となっている。ニードルパンチ処理を施していないものは、②の時点で圧縮側に層間剥離と繊維破損が確認できた。しかし、ニードルパンチ処理を施したものは、②の時点で層間剥離と繊維破損は

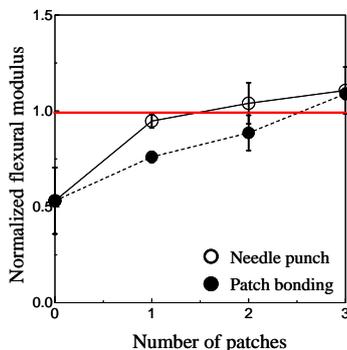
確認できず、③の段階で圧縮側に層間はく離と繊維破損が確認できた。

以上の実験結果より有限要素法を用いた逆解析を行い、Mode I層間はく離強度を算出した。表4-1に逆解析によって決定したMode I層間剥離強度の基準値を示す。ニードルパンチ処理を施すことにより、Mode I層間剥離強度が約216%に増加した。ニードルパンチ処理を施した条件の解析結果では、ニードルパンチ処理を施していない条件での解析結果に比べ、層間はく離の発生が減少していた。これは実験結果と同様の損傷過程であり、ニードルパンチ処理を施すことにより層間はく離が抑制されていることが分かった。

以上のことから、ニードルパンチ処理を併用した修繕は、パッチの繊維を厚み方向に押し込むことにより、パッチ-損傷部の層間はく離強度の増加させ、パッチ貼付の効果を増大させたものと考えられる。



(a) Normalized flexural modulus.



(b) Normalized bending strength.

Fig.4-5 Comparison of patch bonding and needle punching.

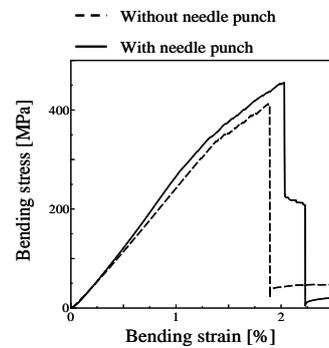


Fig. 4-6 S-Typical results of S-S diagram.

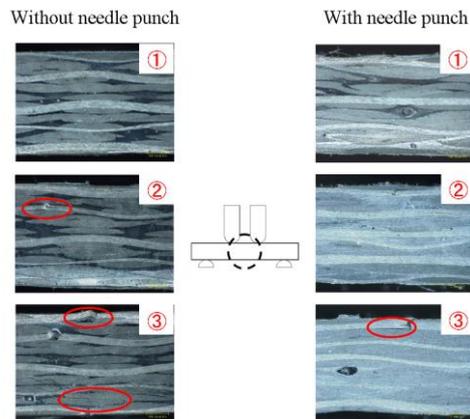


Fig. 4-7 Side view observations of specimen.

Table.4-1 Criterion of interlaminar debonding.

| | Breaking normal stress [MPa] |
|----------------------|------------------------------|
| Without needle punch | 18 |
| With needle punch | 39 |

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

①小武内清貴, 大窪和也, 藤井透, 立体網目構造を有する炭素粉末の添加による C/C 複合材料の曲げ強度および破壊じん性の向上, 材料, Vol. 61, No. 5, pp. 468-473, 2012.

②山本真大, 山岸鈴, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, 曲げ損傷を有する CF/PA6 複合材料の修繕, 機械学会論文集 A 編,

③Kiyotaka Obunai, Tadao Fukuta, Koichi Ozaki, Rei Yamagishi, Masahiro Yamamoto, Study on Patch Bonding for Recovery of Damaged Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics by Four-Point Bending Method, Journal of Materials Science Research, Vol. 2, No. 3, pp. 60-67, 2013.

[学会発表] (計 9 件)

①山岸鈴, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, 曲げ損傷を受けた CFRTP の修繕性に関する基礎的研究, 日本材料第 61 期通常総会講演会 (岡山), 2012/05/26

②山本真大, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, マイクロ波による廃 CFRP からの炭素繊維抽出メカニズム, 2012 年度 JCOM 若手シンポジウム(岐阜), 2012/09/02

③小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, 炭素繊維の熱劣化の評価, 2012 年度 JCOM 若手シンポジウム(岐阜), 2012/09/02

④山本真大, 山岸鈴, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, 曲げ損傷を有する CF/PA6 複合材料の修繕, 日本機械学会 M&M2012(愛媛), 2012/09/22

⑤Rei Yamagishi, Kiyotaka Obunai, Tadao Fukuta, Koichi Ozaki, Study on Patch Bonding for Repair of Damaged CFRTP under Bending Load, 8th Asian-Australian Conference of Composite Materials(Kuala Lumpur), 2012/11/07

⑥Rei Yamagishi, Kiyotaka Obunai, Tadao Fukuta, Koichi Ozaki, Study on Patch Bonding for Repair of Damaged CFRTP under Bending Load, Seminar on Green Composites 2012(Kuala Lumpur), 2012/11/09

⑦山本真大, 山岸鈴, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, マイクロ波を用いた CFRP からの炭素繊維抽出条件の検討, 第 4 回自動車用途コンポジットシンポジウム(京都), 2012/12/01

⑧山岸鈴, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, パッチ貼付による曲げ損傷を受けた CFRTP の修繕, 第 4 回自動車用途コンポジットシンポジウム(京都), 2012/12/01

⑨小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, CF/PA6 複合材料の曲げ特性に及ぼすニードルパン

チ処理の影響, 第 4 回自動車用途コンポジットシンポジウム(京都), 2012/12/01

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小武内 清貴 (KIYOTAKA OBUNAI)

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号: 30614367

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし