

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03779

研究課題名（和文）衝撃荷重下での繊維-樹脂界面の応力波伝播様相と界面強度の評価およびその向上

研究課題名（英文）Investigation and improvement of interfacial strength between fiber and matrix under impact loading

研究代表者

小武内 清貴（Obunai, Kiyotaka）

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：30614367

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）：本研究課題では、複合材料の衝撃荷重下における各種特性について調査を行った。特にこれまで殆ど調査されてこなかった衝撃荷重下における強化繊維-母材樹脂間の見掛けの界面せん断強度について調査を行い、その結果、炭素繊維-エポキシ樹脂系の複合材料において、負荷ひずみ速度の増加に伴って、複合材料中の炭素繊維の破壊形態が引張型から引張・圧縮混合型に遷移することを見出した。またサブミクロンガラス繊維を母材に適量添加することにより、サブミクロンガラス繊維とエポキシ樹脂間での剥離を生じさせ、炭素繊維の圧縮破壊を抑制し、見掛けの界面せん断強度を向上できることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では衝撃荷重下における複合材料の強度特性および破壊形態と、繊維-樹脂間の界面せん断強度について調査を行い、両者の関係性を説明するモデルを構築した。本モデルを用いることによって、衝撃荷重下での複合材料の特性を定性的に予測可能となった。また、本課題にて確立した衝撃荷重下における複合材料の界面せん断強度評価手法を応用することによって、衝撃荷重下での複合材料の信頼性向上が可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, various characteristics of composites under impact loading were investigated. Especially, the apparent interfacial shear strength between the reinforcing fibers and the matrix resin under impact loading, which has not been investigated before, was studied. As a result, it was found that in CF/Epoxy composite materials, with an increase in the strain rate, the fracture mode of carbon fibers in the composite changed from tension-dominated to a mixed mode of tension and compression. Additionally, by adding an appropriate amount of submicron glass fibers to the matrix, delamination between the submicron glass fibers and the epoxy resin occurs, suppressing the compressive fracture of carbon fibers and improving the apparent interfacial shear strength.

研究分野：複合材料

キーワード：複合材料 衝撃 界面せん断強度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

繊維強化プラスチックは繊維によって樹脂基材を強化した複合材料の総称であり、繊維強化によって基材の強度や剛性、変形能といった諸特性を改善することが可能である。特に炭素繊維を強化材とする CFRP および CFRTP は比剛性、比強度に優れることから、航空宇宙機器への適用を始め、車輛、船舶、スポーツ用品などに広範囲に採用されている。これらのアプリケーションにおいて、CFRP もしくは CFRTP 製の構造部位に衝撃的な負荷が作用することは容易に想定される。安心・安全な複合材料構造物の設計には、複合材料の衝撃応答および衝撃破壊様相を把握・予測しておく必要がある。具体的には 衝撃負荷下での複合材料の動的損傷発生メカニズムと損傷度合いの定量的記述、 損傷に伴い低下する物性の評価とその定量的記述とが必要不可欠であると考えられた。

一般に、衝撃負荷は静的負荷と次の点で異なる。第 1 に構造中の応力波伝播を考慮する必要がある。静的負荷においては、応力、変形、ひずみエネルギーは構造全体に分布される。一方衝撃負荷においては、衝撃ひずみエネルギーが作用する部位の体積は、応力波の伝播速度によって制限される。第 2 に、複合材料を構成する強化繊維、基材、およびそれらの界面の強度や剛性は、ひずみ速度依存性を示すことが多い。また複合材料特有の特徴である異方性や不均一性は、前述の 2 点にも綿密に関連している。

これまでの複合材料の衝撃特性に関する研究を俯瞰すると、総体としての複合材料を対象とした研究や、複合材料の構成部材単体の衝撃特性を研究した例がある。しかし、これら広範な研究がなされているにも関わらず、複合材料の衝撃特性は、ある強化繊維と基材樹脂を組み合わせた複合材料を、ある衝撃負荷によって評価した場合の、特定の・定性的な評価に留まっていた。また、複合材料において、その強度特性や破壊形態は構成する繊維単体、基材単体の強度特性だけでなく、両者の界面の強度特性によって大きく変化することが知られていたにも関わらず、衝撃荷重下において、繊維 - 基材樹脂間の界面特性を調査した例は殆どなかった。

2. 研究の目的

以上の研究背景を基に、本研究課題の目的は、複合材料構造の衝撃荷重下での動的損傷発生メカニズムを定量的に記述すること、とした。先に述べたとおり、これまでの複合材料の衝撃荷重下での損傷発生は、複合材料総体として、または複合材料を構成する強化繊維単体、基材樹脂単体として定性的に評価されており、複合材料の特性を大きく左右する繊維 - 樹脂間の界面特性を衝撃荷重下で定量的に調査した例は無い。繊維 - 樹脂界面においては、複合材料が有する異方性および不均一性に起因する応力波伝播様相の変化、強度や剛性、破壊形態といった機械的特性の変化を全て含有する。これらを詳細に調査することにより、複合材料の衝撃特性を包括的に議論する知見が得られると考えた。また強化繊維 - 基材樹脂界面の調査だけでなく、総体としての複合材料の衝撃荷重下での動的損傷発生を調査し、これらに関連付けることによって、複合材料の衝撃損傷メカニズムの解明、及び衝撃特性の事前予測が可能となると考えた。また、サブミクロンガラス繊維による樹脂改質が複合材料総体および界面に与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 繊維 - 樹脂間の見掛けの界面せん断強度調査

本研究課題では、炭素繊維 - エポキシ樹脂間の界面せん断強度の調査にフラグメンテーション法を用いた。単繊維埋没試験片を用いて、これに静的もしくは動的引張負荷を繰り返し負荷し、試験片中の破断した単繊維の長さ(図 1 参照)を調査することによって界面せん断強度を調査した。また本研究課題では、基材樹脂をサブミクロンガラス繊維の添加によって改質した試験片でも同様の試験を行い、基材樹脂の改質が界面せん断強度に及ぼす影響を調査した。

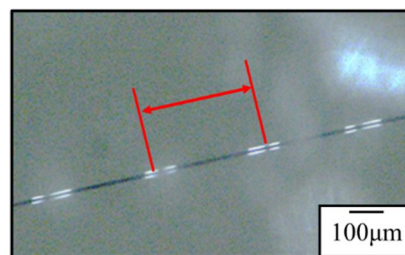


図 1 破断繊維

(2) 複合材料の衝撃試験

複合材料の面外衝撃強度の評価

本研究課題では、複合材料の衝撃強度評価として、落錘による面外衝撃試験を行った。一方向炭素繊維/エポキシ複合材料を対象に、衝撃負荷中の衝撃荷重-変位挙動、衝撃エネルギー吸収能、衝撃負荷による内部損傷形態、衝撃後圧縮強度を調査した。また本研究課題では、基材樹脂をサブミクロンガラス繊維の添加によって改質した試験片でも同様の試験を行い、サブミクロンガラス繊維の添加が複合材料の面外衝撃強度に及ぼす影響を調査した。

複合材料の見掛けの層間せん断強度の評価

一方向炭素繊維/エポキシ複合材料を対象に、その見掛けの層間せん断強度を目違い切り欠き試験片を用いて調査した。図 2 に試験片形状を示す。試験片の長手方向に対し圧縮荷重を負荷し、切り欠き(図中赤実線および赤破線)間にせん断負荷を作用させる。本研究課題では静的圧縮荷

重および動的圧縮荷重を作用させることによって、静的および動的荷重下における複合材料の見掛けの層間せん断強度を評価した。繊維長手方向、および繊維直交方向の層間せん断強度を調査した。また本研究課題では、基材樹脂をサブミクロンガラス繊維の添加によって改質した試験片でも同様の試験を行い、サブミクロンガラス繊維の添加が複合材料の層間せん断強度に及ぼす影響を調査した。

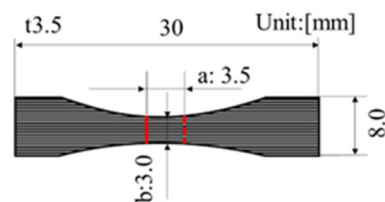


図2 自違い切り欠き試験片

複合材料の層間破壊じん性試験

一方向炭素繊維/エポキシ複合材料を対象に、その Model および Model II 層間破壊じん性を調査した。Model については、静的荷重では DCB 試験片を、動的荷重では CT 形状の試験片を用いて破壊じん性を調査した。Model II については、ENF 試験片を用い、静的荷重下にて破壊じん性を調査した。

4. 研究成果

(1) 炭素繊維 - エポキシ樹脂間の見掛けの界面せん断強度調査

負荷ひずみ速度の違いが繊維 - 樹脂間の見掛けの界面せん断強度に及ぼす影響

図3に炭素繊維 - 樹脂間の見掛けの界面せん断強度と負荷ひずみ速度との関係を示す。図に示す様に、炭素繊維 - エポキシ樹脂間の界面せん断強度は負荷ひずみ速度の増加に伴って低下した。一方、改質樹脂を用いた場合 (Modified)、高ひずみ速度下において、見掛けの界面せん断強度の低下が抑制された。試験片中の破断した炭素繊維を SEM にて観察した結果、負荷ひずみ速度の増加に伴って、未改質樹脂を用いた試験片中の破断した炭素繊維の端部形状が変化することが分かった。また、試験後の基材樹脂中の応力状態を偏光顕微鏡下で観察したところ、高ひずみ速度条件下において、添加したサブミクロンガラス繊維と基材樹脂間の剥離に起因する偏光が確認された。

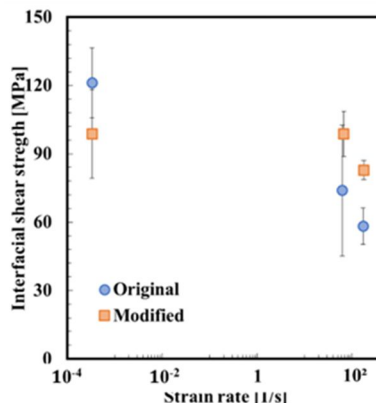


図3 界面せん断強度の変化

繊維中の応力波伝播様相

フラグメンテーション試験中の試験片内部での繊維破断を模擬した動的解析を行い、試験片中の応力波伝播を調査した。繊維 - 樹脂間の接着状態を変化させ、解析を行ったところ、繊維 - 樹脂間を滑り状態とした場合、破断した繊維中に大きな圧縮応力弾性波が生じることが分かった。一方、繊維 - 樹脂間を接着状態とした場合、圧縮応力弾性波が抑制されることが分かった。

高ひずみ速度条件下での界面せん断強度変化メカニズム

これまでの結果より、高ひずみ速度条件下において、未改質樹脂を用いた場合、繊維 - 樹脂間に滑りに起因する圧縮応力弾性波によるマクロなせん断破壊が発生することが分かった。この繊維のせん断破壊と引張破壊とが生じることにより、繊維のフラグメンテーション長さが増加し、見掛けの界面せん断強度が低下したと考えられる。

一方、サブミクロンガラス繊維添加を添加し、樹脂を改質した場合、高ひずみ速度下において、添加したサブミクロンガラス繊維と基材樹脂とが剥離することによって、炭素繊維 - 改質樹脂間の剥離が抑制される。これにより、破断繊維中の圧縮応力弾性波の発生およびそれによる繊維のせん断破壊が抑制され、見掛けの界面せん断強度が向上したと考えられる。

(2) 一方向炭素繊維/エポキシ複合材料の衝撃試験

面外衝撃強度の評価

図4に落錘衝撃試験により得られた負荷衝撃エネルギーとエネルギー吸収能との関係を示す。図に示す様に、試験片の固定方法の違いによって、サブミクロンガラス繊維添加によるエネルギー吸収能の向上効果が異なった。試験片の4辺を固定した場合、高負荷衝撃エネルギーの条件において、エネルギー吸収能が向上した。一方、試験片の長手方向両端のみを固定した場合、低負荷衝撃エネルギーの条件において、エネルギー吸収能の向上が確認され

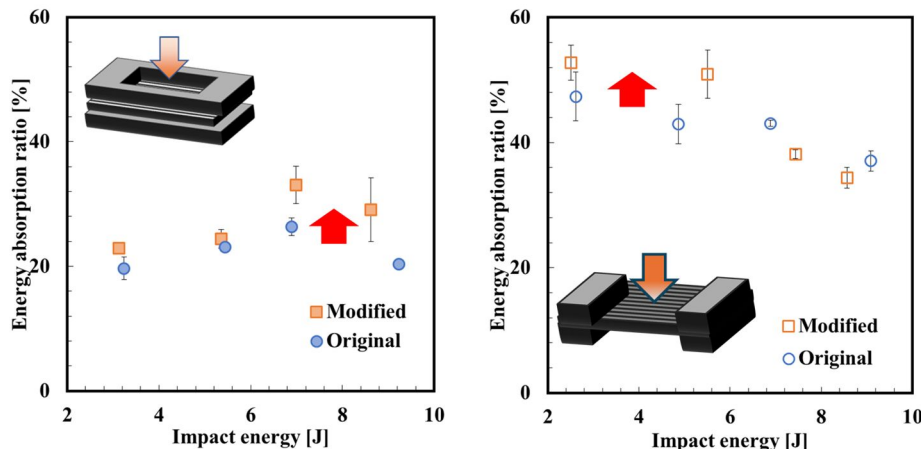


図4 試験片固定方法の違いによるエネルギー吸収能の違い

た。試験片の内部損傷を超音波探傷装置によって調査したところ、エネルギー吸収能と同様に、試験片固定方法の違いによって、サブミクロンガラス繊維添加による内部損傷形態の違いが確認された。いずれの固定方法においても、エネルギー吸収能が向上した条件において、内部損傷の投影面積の低下が確認された。衝撃後圧縮強度についても、エネルギー吸収能の結果と同様に、サブミクロンガラス繊維の添加による向上が確認された。衝撃試験後の試験片内部の剥離部分を調査したところ、サブミクロンガラス繊維の添加によって炭素繊維表面への樹脂残留が確認された。これは先の見掛けの界面せん断強度の実験結果と併せて考えると、添加したサブミクロンガラス繊維と樹脂間での剥離が生じ、この剥離に沿って樹脂が破壊し、炭素繊維-樹脂界面での剥離が抑制されたと考えられる。

複合材料の層間せん断強度

図5に一方向炭素繊維/エポキシ複合材料の層間せん断強度とひずみ速度ならびに繊維角度との関係を示す。図より繊維方向と平行に負荷を与えた場合(0deg)、その層間せん断強度はサブミクロンガラス繊維の添加によって向上した。一方、繊維方向と直交方向に負荷を与えた場合(90deg)、サブミクロンガラス繊維の添加による層間せん断強度の向上は見られなかった。

複合材料の層間破壊じん性

サブミクロンガラス繊維の添加によって、複合材料の静的 Model および Model II 破壊じん性は向上した。また、動的 Model 破壊じん性についても向上が確認された。以上より、サブミクロンガラス繊維の添加は、複合材料の層間破壊じん性の向上にも有効であることが確認された。

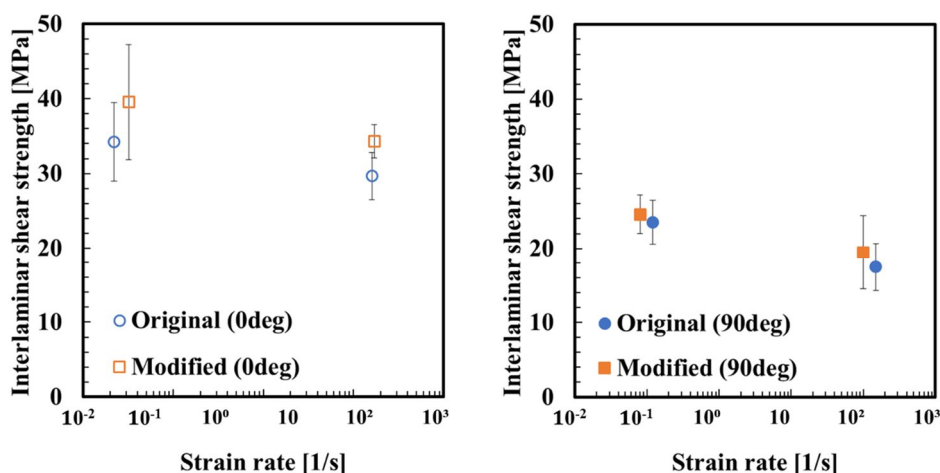


図5 層間せん断強度の繊維角度依存性

サブミクロンガラス繊維添加による複合材料の衝撃特性向上メカニズム

以上より、サブミクロンガラス繊維の添加による一方向炭素繊維/エポキシ複合材料の衝撃特性向上メカニズムは以下の様に説明された。複合材料が面外衝撃負荷を受け、その内部にき裂が発生し、進展する際に、樹脂に添加したサブミクロンガラス繊維がき裂のまわりの大変形を抑制したため(図6中緑丸印)、き裂進展するためのエネルギー解放が大きくなったと考えられる(図6中橙丸印)。これは、繊維方向の層間破壊じん性や層間せん断強度などの層間特性の改善と対応する。また、層間特性が改善したことにより、面外衝撃によって受ける吸収エネルギーの総量が向上したと考えられた。試験片の固定方法の違いによってエネルギー吸収能が変化したメカニズムは、4辺を固定した場合、負荷衝撃エネルギーが低い条件では試験片の衝撃荷重点近傍の変形も小さく、き裂まわりの開口変形が小さくなる。そのため、き裂まわりの開口変形を抑制するサブミクロンガラス繊維添加の効果が現れなかった。一方、試験片長手方向両端を固定した場合、試験片の衝撃荷重点近傍の変形が比較的大きく、低負荷衝撃エネルギーの条件においてエネルギー吸収能が改善された。しかし、高負荷衝撃エネルギーの条件では、過度の開口変位が生じ、サブミクロンガラス繊維添加の効果が得られなかったと考えられる。つまり、サブミクロンガラス繊維添加による複合材料の衝撃特性改善効果は、内部に生じたき裂の開口変形の大きさに依存して変化すると考えられた。

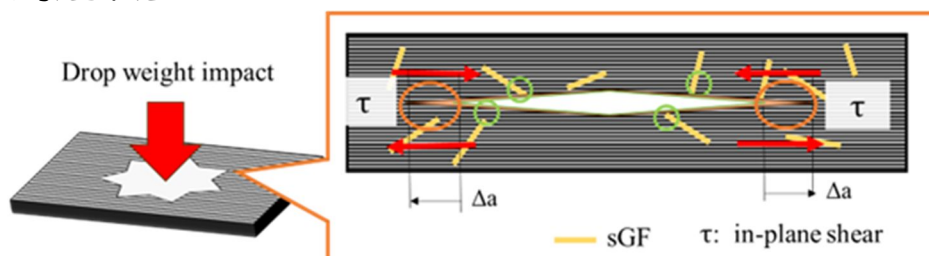


図6 サブミクロンガラス繊維による衝撃損傷抑制モデル

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 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Murayama Ryotaro, Obunai Kiyotaka, Okubo Kazuya	4. 巻 10
2. 論文標題 Effect of sub-micron glass fiber addition on CAI strength of UD-CFRP	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements	6. 最初と最後の頁 271 ~ 281
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2495/CMEM-V10-N3-271-281	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 村山凌太郎, 小武内清貴, 大窪和也	4. 巻 59
2. 論文標題 炭素繊維 / 樹脂間の界面接着せん断強度に及ぼす繊維表面のサイジング処理効果の負荷ひずみ速度の違いによる変化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本接着学会誌	6. 最初と最後の頁 65 ~ 72
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 -

1. 著者名 Murayama Ryotaro, Obunai Kiyotaka, Okubo Kazuya, Bao Li	4. 巻 11
2. 論文標題 Improvement in Impact Energy Absorption of UD-CFRP by Sub-Micron Glass Fiber into Its Matrix	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Open Journal of Composite Materials	6. 最初と最後の頁 82 ~ 93
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/ojcm.2021.114007	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 野村 知正, 小武内 清貴, 大窪 和也	4. 巻 47
2. 論文標題 母材へのセルロースナノファイバ(CNF)添加によるCFRPの振動減衰特性の改善	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 131 ~ 136
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11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ryotaro Murayama, Kiyotaka Obunai, Kazuya Okubo
2. 発表標題 Effect of sub-micron glass fiber addition on CAI strength of UD-CFRP
3. 学会等名 HPSM/OPTI/SUSI2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuya Okubo, Kiyotaka Obunai, Tomomasa Nomura
2. 発表標題 Improvement of Damping Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic Modified with Natural Cellulose Nano Fibers - Influence of Aspect Ratio -
3. 学会等名 The 11th International Conference on Green Composites (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇賀神友康, 小武内清貴, 大窪和也, 小倉孝太, 大坪雅之, 峯村淳
2. 発表標題 セルロースナノファイバーを添加したエポキシ系接着剤を用いた接着継手の衝撃強度
3. 学会等名 材料学会第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南梨子, 小武内清貴, 大窪和也
2. 発表標題 摩擦回転により穿孔された炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) 板のボルト 継ぎ手強度
3. 学会等名 66th FRP CON-EX 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 眞田一輝, 小武内清貴, 大窪和也
2. 発表標題 同軸押出ノズルを用いて積層造形した異材樹脂複合造形品の機械的特性
3. 学会等名 プラスチック成型加工学会第30回秋季大会成形加工シンポジア'22
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南梨子, 小武内清貴, 大窪和也
2. 発表標題 摩擦攪拌穿孔された CFRTP 積層板を用いたボルト締結継手の面圧破壊強度
3. 学会等名 日本材料学会 2022年度JCOM若手シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇賀神友康, 小武内清貴, 大窪和也, 小倉孝太, 大坪雅之, 峯村淳
2. 発表標題 母材へのセルローズナノファイバ(CNF)添加によるCFRP積層板のボルト軸力保持率の改善
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 村山 凌太郎, 小武内清貴, 大窪 和也
2. 発表標題 繊維/樹脂間の見掛けの界面せん断強度に及ぼす負荷ひずみ速度および繊維表面のサイジング処理の影響
3. 学会等名 日本材料学会 第70期通常総会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村山 凌太郎, 小武内清貴, 大窪 和也
2. 発表標題 落錘衝撃負荷を受けるUD-CFRPの衝撃吸収エネルギーに及ぼす微細ガラス繊維添加の影響
3. 学会等名 日本材料学会 JCOM若手ウェビナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村山 凌太郎, 小武内 清貴, 大窪 和也
2. 発表標題 UD-CFRPのCAI強度に及ぼす微細ガラス繊維の添加の影響
3. 学会等名 第13回 日本複合材料会議 JCCM-13
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Terasaki, Kiyotaka Obunai and Kazuya Okubo
2. 発表標題 Influence of Bending Bending-Twisting Coupling Deformation on Pure Bending Strength and Fracture Morphology of CFRP Angle - Ply Laminate
3. 学会等名 6th International Conference on Material Engineering and Manufacturing (国際学会)
4. 発表年 2022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
研究 分 担 者	大窪 和也	同志社大学・理工学部・教授	
	(Okubo Kazuya)		
	(60319465)	(34310)	

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
---------	---------