

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03758

研究課題名（和文）超音波振動によるRTM成形の樹脂流動制御および繊維界面強度向上に関する研究

研究課題名（英文）Study on resin flow control and improvement of fiber interface strength in RTM molding by ultrasonic vibration

研究代表者

和田 明浩（WADA, Akihiro）

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号：60321460

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）：本研究では、RTM成型型の一部に高強度の超音波振動を付与することで、樹脂流れを制御するとともに、繊維/樹脂界面の密着性の向上を試みた。超音波振動の付与は繊維束への樹脂含浸を促進する効果があることが確認された。しかし、その効果は振動子付近に限定されるため、複数の振動子を選択的に駆動して樹脂流れをコントロールするには至らなかった。また、超音波振動による繊維束の発熱がみられたことから、樹脂の温度上昇による粘度低下の影響もあることがわかった。成形品の機械特性向上の観点からは、成形過程における超音波振動の付与は有効であるが、過度な振動付与は成形品の機械特性を低下させることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FRPは軽量でありながら高強度・高剛性であり、耐食性にも優れることから、構造体のさらなる軽量化が求められる輸送機器分野において利用が拡大している。近年、高品質のFRPを低コストで製造する成形法としてRTM成形法が注目されているが、成型型内での樹脂流れのコントロールが難しいという問題がある。本研究では、RTM成型型の一部に高強度の超音波振動を付与することで繊維束への樹脂含浸を促進し、樹脂流れをコントロールする手法を示した。また、成形過程における適切な超音波振動の付与により、成形品の機械特性が向上することを見出した。これらは、FRP製品の品質改善に寄与する研究成果であり、社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, it was attempted to control resin flow and improve adhesion of the fiber/resin interface by applying high-intensity ultrasonic vibration to a part of the RTM mold. It was confirmed that the application of ultrasonic vibration was effective to promote resin impregnation into the fiber bundles. However, since the effect is limited to the vicinity of the transducer, the resin flow could not be controlled by selectively driving multiple transducers. In addition, it was found that the ultrasonic vibration causes the fiber bundles to heat up, indicating that the decrease in resin viscosity due to temperature increase is one of the effects that promote resin impregnation. Although the application of ultrasonic vibration during the molding process is effective to improve the mechanical properties of molded products, it was found that excessive vibration degrades the mechanical properties of the molded product.

研究分野：材料力学および機械材料関連

キーワード：FRP RTM成形 超音波 振動付与 力学特性

1. 研究開始当初の背景

FRP (Fiber Reinforced Plastics) は軽量でありながら高強度・高剛性であり、耐食性にも優れることから、スポーツ用具から航空宇宙分野まで幅広く使用されている工業材料である。近年、輸送機器の燃費向上ニーズの高まりを受けて構造体のさらなる軽量化が求められており、軽くて強いFRPの重要性は益々高まっている。FRPは樹脂と強化繊維を組み合わせる複合材料であり、その成形過程では強化繊維に液状の樹脂を効率よく含浸させることが求められる。FRPの最も基本的な成形法としてハンドレイアップ法があるが、手作業によるローラーがけで繊維への樹脂含浸を行うため、作業者の熟練度が成形品の品質を左右する。高品質なFRP製品の成形法として、大型の圧力容器内で加熱・加圧をしながら成形するオートクレーブ法があるが、成形サイクルが長く成形コストが高いのが問題となっている。このような背景のもと、大型設備を必要とせず作業者の技量に依存する要素が少ないRTM (Resin Transfer Molding) 成形法が注目されている。

RTM成形法は、樹脂を含浸させる前のドライ繊維を成形型内にあらかじめ配置して型締めした後、液状樹脂を注入して繊維に樹脂を含浸させて成形品を得る手法である。RTM成形品の良否は繊維への樹脂含浸状態により決まり、図1に示すような樹脂未到達領域(ドライスポット)や未含浸領域の発生を防ぐ必要がある。しかし、本成形法では、型内の圧力差のみで樹脂を流動させるため、樹脂流動のコントロールが難しい。また、熟練したハンドレイアップ成形やオートクレーブ成形で作製した成形品に比べて、RTM成形品の材料特性が低くなる場合がある。これは、ハンドレイアップ法で行われるローラーがけによる機械的振動の付与やオートクレーブ法における高圧負荷がないことで繊維/樹脂界面の密着性が低下したことが要因と考えられる。これまでに、成形型に低周波数の機械振動を付与することで樹脂流れの促進を試みた研究⁽¹⁾、微弱な超音波振動により成形品の機械特性の改善を試みた研究⁽²⁾が報告されているが、高強度の超音波振動を局所的に付与して、樹脂流れの制御や成形品の機械特性の改善を試みた研究はなかった。

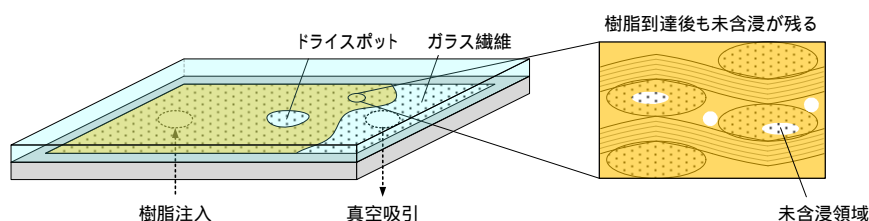


図1 RTM成形における従来手法の問題点 (ドライスポット・樹脂未含浸領域が残る)

2. 研究の目的

本研究では、成形型の一部に選択的に高強度の超音波振動を付与することで、樹脂流れを制御するとともに、繊維/樹脂界面の密着性の向上による成形品の機械特性向上を試みた。これまでに超音波振動が固液界面の濡れ性を改善するという研究報告⁽³⁾はあるが、その定量評価は十分に行われておらず、超音波振動が巨視的な樹脂流れおよび繊維束への樹脂含浸に及ぼす影響は不明であった。そこで、成形型に複数の超音波振動子を取り付け、成形型の一部に選択的に高強度の超音波振動を付与することで、樹脂流れの制御および繊維束への樹脂含浸促進を試みた。さらに、超音波振動を付与して作製したRTM成形品と従来法で作製した成形品の機械特性や破壊様相を比較することで、成形過程における超音波振動の付与が繊維/樹脂界面の密着性に及ぼす影響を調査することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) を評価対象とし、強化繊維形態としてチョップドストランドマットとロービングクロスを用いた。また、母材樹脂として比較的低粘度のビニルエステル樹脂、比較的高粘度の不飽和ポリエステル樹脂の2種類を用いて、樹脂粘度がRTM成形プロセスに及ぼす影響を調査した。以下に具体的な研究方法を示す。

(1) 局所加振可能なRTM成形型の設計製作

本研究で必要となる局所加振が可能な模擬RTM成形型を設計製作した。実際のRTM成形では上下ともに金型が用いられるが、型内部の樹脂含浸状態を目視確認できるように上型をアクリル板に置き換え、顕微鏡カメラで繊維束への樹脂含浸状態を拡大観察できるようにした。図2のように、樹脂が流れるキャビティのサイズは200 mm × 100 mm × 2.5 mmとし、中央に樹脂注入口を設けた。また、成形型の一部に掘り込み加工を施して超音波振動子を接着し、高強度の超音波振動を付与できるようにした。図2の成形型を用いて、樹脂含浸に及ぼす超音波振動の影響を調査したあと、図3のように超音波振動子を格子状に8個取り付け付けた成形型を製作し、多点振動による成形実験を行った。

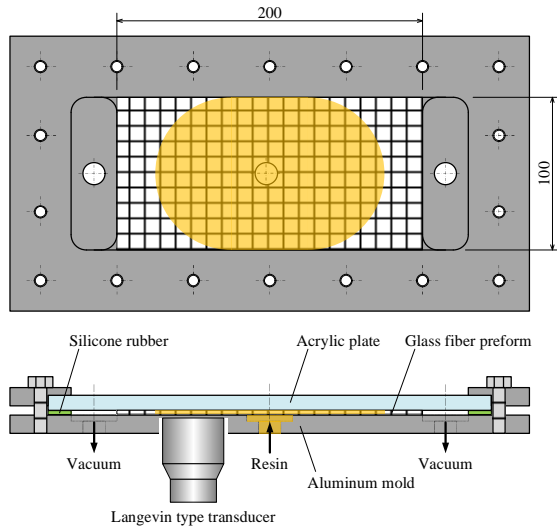


図 2 超音波振動子付の模擬 RTM 成形型

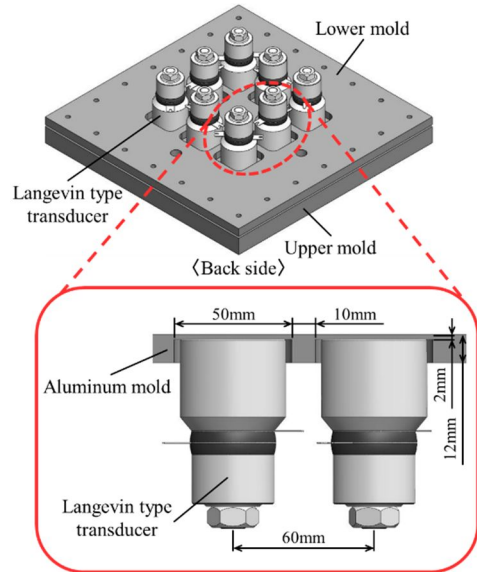


図 3 多点加振用の模擬 RTM 成形型

(2) 超音波による樹脂含浸モニタリング

図 4 に樹脂含浸モニタリングのための超音波計測の様子を示す。本実験では、図 2 の成形型と同様の構成で、振動子を設置せず樹脂注入口を片側に設けた成形型を用いた。また、超音波測定では反射法を用い、上面の亚克力板に設置した探触子から超音波を入射し、FRP 層からの反射波を同じ探触子で受信した。超音波探触子は素子径が 0.5 インチ、中心周波数が 2.25MHz のものを使用した。また、超音波計測点の近傍に光学顕微鏡を設置し、成形過程における繊維束への樹脂含浸状態を拡大観察した。本モニタリングシステムで検出できる反射波は、図 5 に示すように界面（亚克力/FRP 界面）および界面（FRP/アルミ型界面）からの反射波である。界面からの反射波は樹脂到達判定用、界面からの反射波は樹脂含浸評価用に用いた。

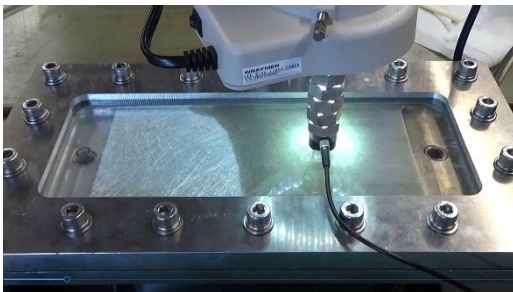


図 4 超音波による樹脂含浸モニタリング

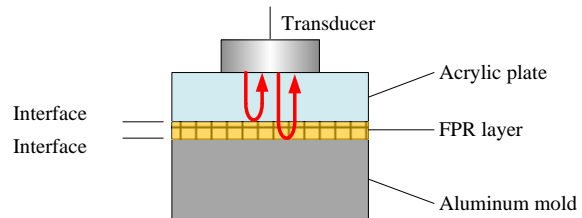


図 5 超音波計測の概念

(3) 成形型振動様式の計測

RTM 成形実験に先立ち、局所加振による成形型の振動様式の計測を行った。図 6 に示すようにレーザドップラ振動計（Polytec 社、Vibro One）を使用し、成形型表面を走査しながら多点で波形を取得した。レーザドップラ振動計では計測対象の前面に亚克力などの光透過性の材料がある場合でも振動計測が可能であることから、成形型を組み立てた状態、下型だけの状態の 2 通りについて計測を行った。測定位置は、縦横 5mm 間隔の格子点とし、中央注入成形型で合計 741 点、多点加振成形型で合計 1521 点において波形を取得した。また、取得した波形から振動振幅を計測し、振動パターンをグレースケール画像に変換した。

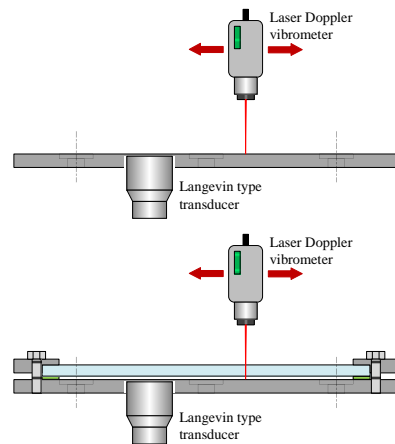


図 6 成形型振動様式の計測

(4) 超音波振動を付与した RTM 成形

図 2, 3 に示した RTM 成形型を用いて、超音波振動が樹脂流動および樹脂含浸に及ぼす影響を調査した。中央注入成形型の片側に超音波振動子を取り付けることで、型の左右での樹脂流れの比較が可能となり、実験ごとのばらつきの影響を排除した。また、研究期間の後半では、多点加振成形型を用い、最大 2 個の振動子を同時駆動し、駆動する振動子の位置を変えて成形実験を行った。さらに、赤外線サーモグラフィを用いて、超音波加振による温度変化を調査した。

(5) RTM 成形品の機械特性調査

成形型への超音波振動の付与が成形品の機械特性に及ぼす影響を調査するため、成形品から短冊状の試験片を切り出して引張試験を行った。試験片幅は 20mm、ゲージ長は 60mm であり、引張速度は 1mm/min とした。応力 - ひずみ線図の比較に加えて、ビデオカメラによる損傷破壊形態の観察、SEM による破壊様相の観察を行い、振動有無による比較を行った。

4. 研究成果

(1) 超音波による樹脂含浸モニタリング

図 7 に比較的低粘度のビニルエステル樹脂を用いて RTM 成形を行った際の顕微鏡写真および対応する時間の超音波受信波形を示す。樹脂フローフロントが通過した直後 (40sec) は、未含浸繊維が多く、樹脂中には多数の球状気泡が観察された。その後、時間経過とともに繊維束への樹脂含浸が進行し、残存気泡も徐々に減少していった。超音波波形をみると、計測点に樹脂が到達するとともに界面 (アクリル板 / FRP 界面) からの反射波が減少し、その後の樹脂含浸の進行に合わせて、FRP 層を往復した界面 (FRP / アルミ型界面) からの反射波が成長する様子が確認できた。

図 8 は、界面 ① からの反射波の時間変化であり、顕微鏡写真の画像解析から算出した未含浸領域の面積率と比較したグラフである。未含浸領域は時間経過とともに減少しており、界面 ① からの反射波の飽和時間と気泡消滅時間は近い値となった。このことから、界面 ① からの反射波は含浸状態の評価指標となることがわかった。

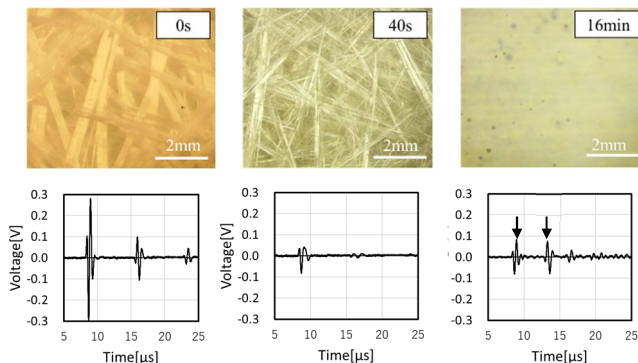


図 7 顕微鏡写真と対応する超音波波形

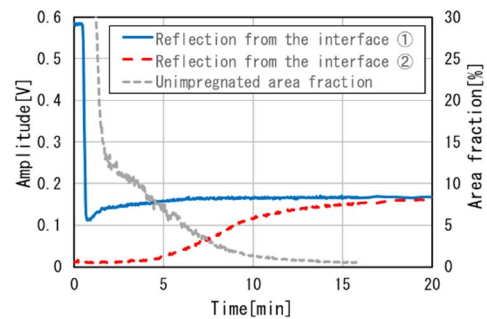


図 8 超音波波形と画像解析結果の比較

(2) 成形型振動様式の計測

図 9 に図 2 で示した中央注入成形型に対する振動様式の計測結果を示す。上型の有無によらず赤丸で示す振動子付近で強い振動が励起できているが、振動は加振領域だけでなく成形型全体に及んでいる。下型の場合には、振動子付近に加えて型中央付近を起点とする対称位置でも強い振動が観察されていることから、型の固有振動モードが励起されたと考えられる。一方、成形型を組み立てた状態では、空間的に細かい周期パターンがみられることから、高次モードの振動も励起されていると考えられる。図 3 の多点加振成形型についても計測を行ったが、中央注入成形型と同様の傾向であった。

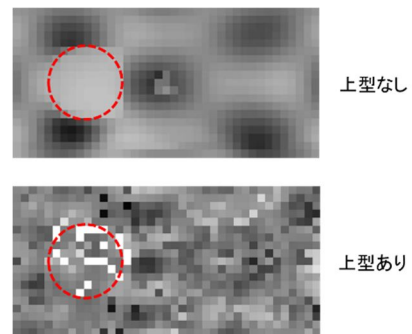


図 9 成形型の振動様式の計測結果

(3) 超音波振動を付与した RTM 成形

図 10 に振動を付与した RTM 成形における樹脂流れの様子を示す。樹脂は比較的低粘度のビニルエステル樹脂を用い、超音波振動子への入力信号は、振幅 240V、周波数 28kHz の正弦波とした。樹脂注入に合わせて振動付与を開始し、樹脂が型全面に概ね充填するまで振動付与を継続した。図 10 より、赤丸で示す振動子側の樹脂流れがやや速く、樹脂流れの対称性が崩れているのが観察できる。図 11 は、超音波探触子による樹脂含浸モニタリング結果である。樹脂含浸の指標となる界面 ① からの反射波は加振側でより早く立ち上がっており、収束値も加振側の方が相対的に大きい。これらのことから、超音波モニタリングにおいても加振側において樹脂含浸が促進されていることが確認できた。次に、図 3 の多点加振成形型を用いた RTM 成形実験の結果を図 12 に示す。本実験では事前検討の結果、振動の影響が比較的に出やすかった高粘度の不飽和ポリエステル樹脂を用いた。赤丸で示す振動子付近で樹脂流れが促進される傾向はみられるが、樹脂が振動子の直上付近に達しないと振動の影響が現れにくいことから、樹脂流れを大きく変えることはできなかった。

図 13 に振動付与開始 5 分後の温度計測結果を示す。ここでは比較のため、下型のみでの温度計測結果も合わせて示している。下型のみでは振動による温度変化はほとんど見られなかったが、ガラスプリフォームをセットして型締めした場合は、振動子付近で約 15 の温度上昇が確認できた。このことから、超音波振動がガラス繊維間の摩擦を引き起こし、その摩擦熱により発熱することがわかった。以上より、超音波振動による繊維束への樹脂含浸促進効果には振動による濡れ性の向上に加えて、樹脂の温度上昇による粘度低下の影響も含まれることがわかった。

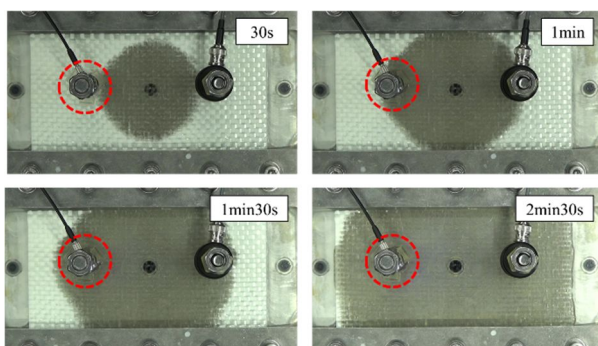


図 10 超音波振動が樹脂流れに及ぼす影響

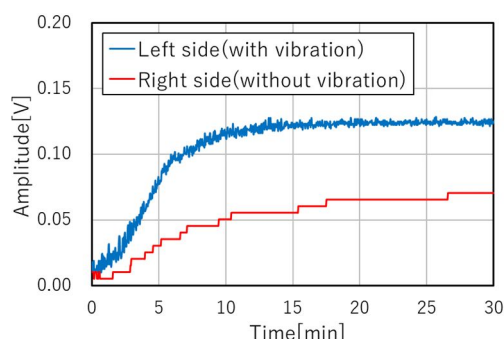


図 11 超音波モニタリングによる含浸比較

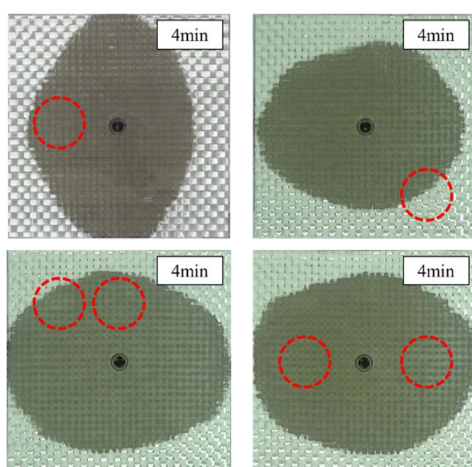


図 12 多点加振成形型を用いた樹脂流れ比較

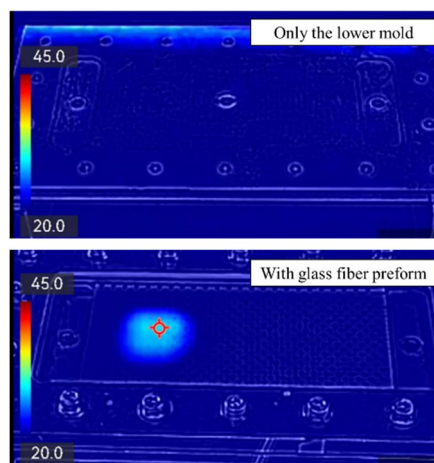


図 13 超音波加振による温度変化

(4) RTM 成形品の力学特性調査

図 14 に振動付与成形板の振動側 (V - 1, 2, 3), および振動を付与せず成形した成形板 (NVP - 1, 2, 3) から切り出した試験片の応力-ひずみ線図の比較を示す。また, 図 15 に振動付与成形板の振動側 (V - 1, 2, 3) と非振動側 (NV - 1, 2, 3) から切り出した試験片の比較を示す。引張試験では, 繊維 / 樹脂界面の影響が出やすいように, 繊維方向が $\pm 45^\circ$ に配向した試験片を用いた。振動有無による比較では, 振動付与成形板の方が損傷の発生が遅れる傾向がみられたが, 加振側と非加振側の比較では, 加振側において破断ひずみが低下する傾向がみられた。これらのことから, 振動付与は成形品の機械特性を向上させるが, 過度な振動付与は成形品の機械特性を低下させることがわかった。

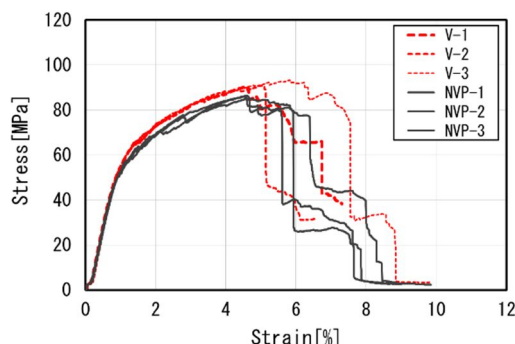


図 14 加振板と非加振板の比較

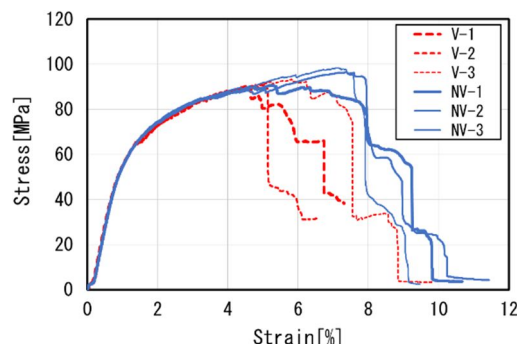


図 15 加振側と非加振側の比較

参考文献

- (1) N.G. Pantelulis et al., ICCM-13 Beijing, China, June, 2001.
- (2) Y. Kuratani et al., Open Journal of Composite Materials, Vol.8(2018), pp.1-10.
- (3) 中西治通ら, 軽金属, 43 (1), pp. 8-13 (1993).

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 Riku AOKI, Akihiro WADA, Kazuyoshi WASEDA	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultrasonic monitoring of resin impregnation in resin transfer molding based on reflected wave analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of JSME International Conference on Materials and Processing	6. 最初と最後の頁 -
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 WADA Akihiro, WASEDA Kazuyoshi, YAMAMOTO Hiroya, Fujii Yoshimichi	4. 巻 71
2. 論文標題 Ultrasonic Monitoring of Resin Impregnation and Curing Process in Resin Transfer Molding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 439 ~ 445
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.71.439	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8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 青木陸駆, 和田明浩, 山本浩也
2. 発表標題 超音波による繊維束への樹脂含浸モニタリングおよび超音波振動による樹脂含浸促進に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田明浩
2. 発表標題 超音波による樹脂含浸モニタリングに関する取り組み
3. 学会等名 第21回 高分子基複合材料の成形加工に関する研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田明浩, 青木陸駆
2. 発表標題 超音波振動によるRTM成形時の樹脂含浸促進の試み
3. 学会等名 第14回自動車用途コンポジットシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木陸駆, 和田明浩, 早稲田一嘉
2. 発表標題 RTM成形における樹脂の流動および含浸に与える超音波振動の影響
3. 学会等名 第14回日本複合材料合同会議講演論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 和田明浩, 酒井太柊, 早稲田一嘉, 山本浩也, 藤井善通
2. 発表標題 超音波反射率に基づくRTM 成形の樹脂含浸モニタリング
3. 学会等名 日本材料学会 第70期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井太柊, 早稲田一嘉, 和田明浩, 山本浩也, 藤井善通
2. 発表標題 RTM成形における残留気泡が超音波伝播特性に与える影響
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田明浩, 早稲田一嘉, 山本浩也, 藤井善通
2. 発表標題 超音波による樹脂含浸モニタリングに与える成形型音響インピーダンスの影響
3. 学会等名 第13回日本複合材料合同会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木陸駆, 川合哲司, 和田明浩, 山本浩也
2. 発表標題 RTM成形プロセスにおける超音波モニタリングに関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会 学生員卒業研究発表講演会
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

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