

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月3日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06019

研究課題名(和文)高周波誘導加熱・レーザー重畳によるCFRTP成形法の開発

研究課題名(英文)Forming of CFRTP sheet by using non-contact heating devices

研究代表者

安原 鋭幸 (YASUHARA, TOSHIYUKI)

日本工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：70282829

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：CFRTPシートの加工において、金属との接合、立体成形、穴開けについて高周波誘導加熱を援用させることで実験を行った。接合では、アルミニウム表面にアンカーを加工して、加熱しながら圧着するという方法で、表面が荒れることなく、接着剤とほぼ同程度の接合強度が得られることがわかった。立体成形においては逐次成形の要領でハット型形状の成形を行った。弾性回復量が顕著であるが、面内せん断試験を行うことで、回復量の予測を行った。高温で低速かつ長時間の保持の条件になるほど、変形時の荷重と除荷時の回復率は減少する傾向になった。穴開け加工は針によって穴を広げるように加工した結果、切削加工よりも強度が高いことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(CFRTP)を非接触で加熱し、アルミニウム板の接合、金型や真空装置などを用いない3次元形状加工、繊維を切断することなく穴開け加工を行うことを提案した。アルミニウム板の接合においては、表面性状を維持しながら、接着剤と同程度の接合力を得られ、再加熱することにより簡単に採りはずしできるなどこれまでにないリサイクル特性を有している。金型を用いない立体成形においては、CFRTPシートの弾性回復を考慮した変形モデルを提示した。穴開け加工においては、炭素繊維にダメージを与えない加工法を提案し、穴の強度が炭素繊維専用のドリルで加工したものより高いことを示した。

研究成果の概要(英文)：In the processing of the CFRTP sheet, experiments were performed by using high frequency induction heating for joining with metal, three-dimensional forming, and drilling. Regarding joining, it was found that the method of processing the anchor on the aluminum surface. Joining strength substantially the same as that of the adhesive could be obtained. In the case of three-dimensional molding, the hat-shaped shape was formed in the same way as incremental forming. Since elastic recovery occurs, prediction of the amount of recovery was performed by performing an in-plane shear test. The load and recovery tended to decrease as the conditions of high temperature, low speed and long holding time were obtained. As a result of processing of a hole which expanded with a tapered needle, it turned out that strength of hole is higher than cutting processing.

研究分野：機械材料・材料加工

キーワード：炭素繊維強化プラスチック 高周波誘導加熱 立体成形 逐次成形 穴開け加工

## 1. 研究開始当初の背景

移動体の軽量化においては、鉄鋼材料の薄肉化、アルミニウム等の軽金属の使用などが急速に進んでいる。その一方で、高付加価値製品として、一部のスポーツカーや高級車には比強度が極めて高い炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) が用いられている。CFRP を鉄鋼材料の代替材料として用いる点については、炭素繊維が高コストという課題を筆頭にして、成形に時間がかかり、大量生産が難しい点が更なる高価格につながり、大衆車に適用するにはコスト面が大きな障害となっている。

その解決策として、10年ほど前から熱硬化性プラスチックに替わり、熱可塑性プラスチックを母材として用いる炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics: CFRTP) が注目を集めてきた。NEDO の発表によると、鉄鋼材料に換えて CFRTP を用いることで、自動車の重量が 1380kg → 970kg に大幅に軽量化できると試算されているため極めて有用な材料として期待されている。自動車部品の多くは、熱硬化性プラスチックを母材とするような耐熱性が必要なものは少なく、大かたは先述の汎用熱可塑性プラスチックを母材とした CFRTP でも代用が可能であると考えられる。

CFRTP はポリプロピレン (PP)、ポリアミド (PA)、アクリル樹脂 (PMMA) などを母材とするシートとして供給されることが多い。これらは汎用プラスチックであるため、成形条件はほぼ確立されているが、炭素繊維と複合化されているため、成形後に弾性回復による予期せぬ変形が生じる。

部品として使用するためには、所望の形状に加工する必要があるが、大まかに分類すると、a. 3次元形状付与、b. 穴あけ c. 接合、が、挙げられる。CFRTP の成形については前述のシート成形が主流であり、小さな部品を自由に3次元加工を行うことも検討が必要な項目であると考えられる。

## 2. 研究の目的

炭素繊維強化熱可塑性プラスチックは熱硬化性プラスチックを母材として利用している従来の CFRP と比較して、プラスチック材料自体が低価格であり、生産性が高いという特徴があり、軽量化を切望する移動体への適用が喫緊の課題となっている。

一般的に CFRTP はシート形状で供給されることが多く、その加工方法として大型のプレス機を利用することが多いが、本研究では、小型部品の少量生産における「3次元形状付与」、「穴あけ」および「接合」について炭素繊維への直接的な高周波誘導加熱および CO<sub>2</sub> レーザーを用いた樹脂材料への加熱の両方を重畳して行い、新しい加工技術の提案をはじめとして、成形特性および成形品の機械的特性を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

高周波誘導加熱によりシート状の CFRTP を外部から加熱し、母材の熱可塑性プラスチックを軟化させて、上述の加工を行う。全ての実験において用いた CFRTP は三菱レイヨン製 TR6110 である。図1に示す高周波誘導加熱コイルにダイセットを組み合わせ、穴開けと接合に用いた。

## 4. 研究成果

### (1) CFRTP シートとアルミニウム薄板の接合



図1 高周波誘導加熱コイルと圧縮用ダイセット

$t=0.5$  mm の A5052 板と PMMA を母材とする CFRTP を接合し、引張せん断試験によって接合強度の評価を行った。A5052 には作製したパンチとダイスにより片側から半分打ち抜くことで、図2に示すようなアンカー加工を施した。CFRTP シートは平織りのクロス材であり、一枚あたりの厚さは 0.5mm 程度である。実験では 5 枚を加熱しながら圧着して積層することで  $t=2$  mm の試験片を作製した。

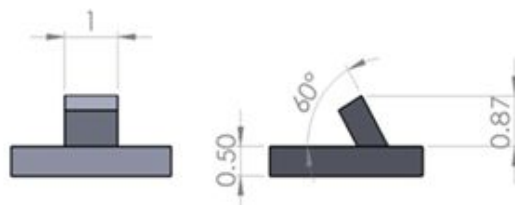


図2 アルミニウム板に施したアンカー

アンカー加工を施した A5052 板と積層した CFRTP を高周波誘導加熱によって 200℃ まで加熱しダイセットを用いて圧着する。接合形状は重ね合わせ継手である。接合部のサイズは 10×10 mm である。本実験では成形荷重 1000 N で接合を行い、アンカー角  $\theta$  を 60° から 70° に変更した試験片を用いて引張せん断試験を行う。

アンカー角  $\theta = 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ$  のときの代表的な引張せん断試験結果を図 3 に示す。最大試験力はアンカーの角度が大きくなるにつれて増加し、90° の時に最も高い値を示している。この結果から、アンカーの角度が 90° に近づくにつれて荷重の不均一性が小さくなり、すべてのアンカーが均等に荷重を受けていることが考えられる。アンカーの列数が増えることにより、アンカーが 1 本が強度を受け持つ割合が下がり、全体的な接合強度も低下することから、行数、列数を考慮した予測を行った。

アンカーの角度による強度の低下の影響を定量化するため、以下の式(1)よりそれぞれの角度での変化率  $a$  を求める。

ここで、 $L$  は列番号、 $n$  は  $L$  列に含まれるアンカーの数、 $L_n$  は列数、 $s$  はアンカー単体の強度、 $a$  は変化率、 $F$  は最大試験力である。 $F$  は実験によって得られた値を用い、未知数である  $a$  を求める。変化率をアンカーの角度で表す方法を検討したところ、 $\sin$  良い近似が見られることがわかった(図 4)。このことはアンカーが CFRTP に刺さっている長さに大きく関わっていることが推測される。

良好な近似を得られる  $\sin$  を式(1)の変化率  $a$  に適応させ式(2)を得る。このことから、接合強度は  $\sin^L$  に従って低下することがわかった。

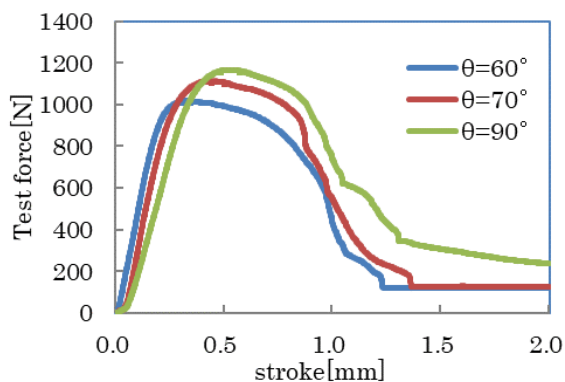


図 3 アンカー角度による接合試験力の比較

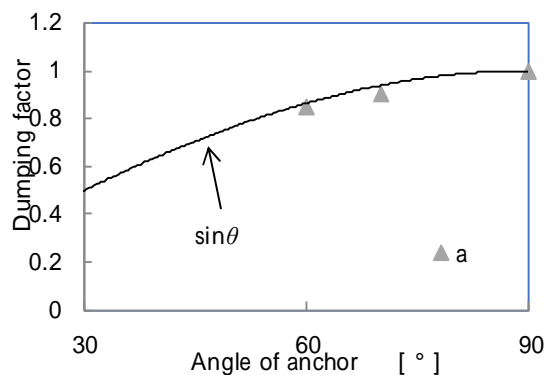


図 4 アンカー角度と接合強度減少率

$$\sum_{L=1}^{L_n} n s a^L = F \quad (1)$$

$$\sum_{L=1}^{L_n} \sin^L \theta n s \quad (2)$$

(2)式を用いてアンカーの配列パターン、アンカーの角度、母材金属の材料特性を変化させたときの強度予測を行った。予測式による計算値と実験による実測値の比較した。実測値と予測値は良好な一致を示していたため、その他の条件での強度の予測を行うことができると考えられる。しかし、アンカー角  $\theta$  が接合困難なほど小さい場合には、(2)式による接合強度予測は困難である可能性がある。(2)式によって、鋼板の材質を一般的な構造物に用いられる高張力鋼板に変更して時の強度予測を行ったところ、接合強度は 50 MPa を超えると予想され、航空機などに使用される接着剤よりも高い接合強度を示した。しかし、アンカーの高強度化によって CFRTP 側が大きく損傷することが考えられる。

### (2) 3次元形状の試作

CFRTP シートを IH コイル内で加熱しながら、工具を押し当てて円錐形状を成形する。そして、ひずみ速度、保持時間を変化させた場合の工具軸力と回復量を測定する。立体成形の概略図を図 5 に示す。試験片を高周波誘導加熱により軟化させながら、絶縁体の棒によって、逐次成形の要領で加工を行う。

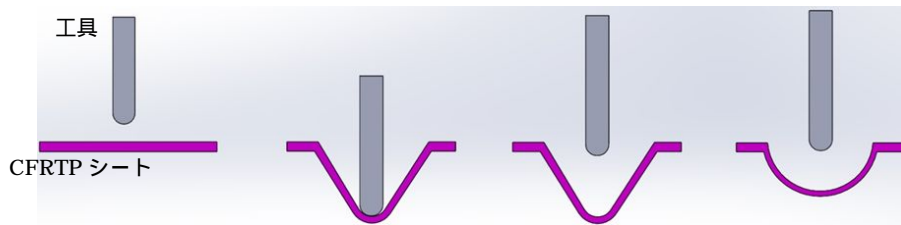


図5 立体成形実験の概略図

図6に成形前の試験片(a)と成形後(b)、弾性回復後の試験片(c)の外観図を示す。本実験において立体成形が可能であることが示されたが、熱可塑性プラスチックを使用していることから、完全に冷却が完了する前に除荷することにより、所望の形を得られないことがわかった。



(a) 成形前

(b) 成形後

(c) 弾性回復後

図6 ハット型形状の成形における試験片外観図(直径50mm)

弾性回復量の予測を行うには、加工時のひずみ速度、保持時間が大きく関与していることがわかった。そこで、短冊状の試験片にせん断応力を付加して、ひずみを0.5与え、その後除荷することで、回復量を予測する実験を行った。図7に面内せん断試験の概略図、図8に作製した実験装置を示す。

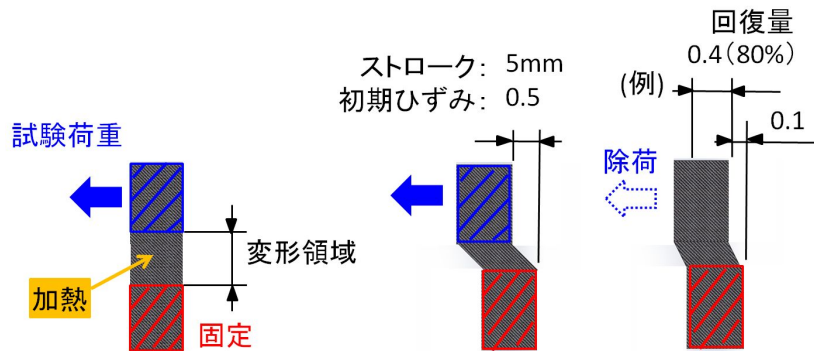


図7 せん断実験の概略図

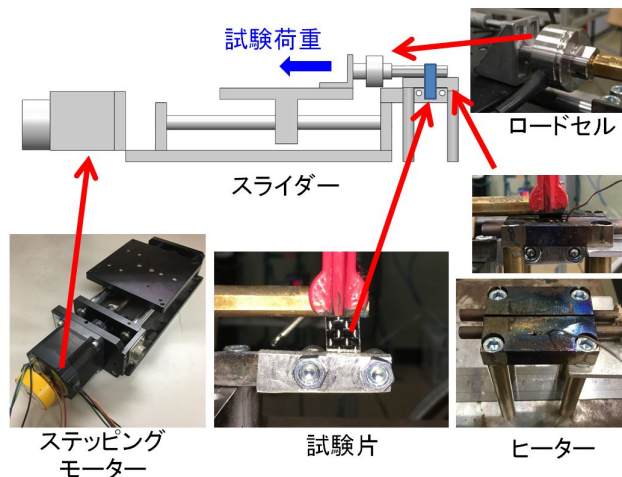


図8 弾性回復量測定用実験装置

実験を行った結果、試験荷重は低温になるほど大きくなり、高温になるほど小さくなること  
が分かった。また、ひずみ速度が小さいほど小さくなり、速いほど大きくなること  
が分かった。これらは、高温かつ低速ほど樹脂の分子の絡みが解けやすいためと考える。さらに、保持時間  
が0sから10sにかけて急激に荷重が減少し、10sから90sにかけて緩やかに荷重が減少する  
ことが分かった。これは10sの時点で樹脂の分子の絡みの緩和が完了するためと考える。

回復率はおおむね、低温になるほど高くなり、高温になるほど低くなること  
が分かった。また、ひずみ速度が遅いほど低くなり、速いほど高くなること  
が分かった。これらも、高温かつ低速ほど樹脂の分子の絡みが解けやすいためと考える。しかし、140と150はおおむねひず  
み速度が速いほど荷重は高くなったが、160、170、180ではひずみ速度 $0.4\text{ s}^{-1}$ を境に減少す  
ることが分かった。これは、 $0.4\text{ s}^{-1}$ 以上速く、160以上高温では、速さよりも温度の方が分子  
の絡みの緩和に寄与しているのではないかと考える。

これらの結果から半径寸法の予測を行った。成形領域の繊維方向から $45^\circ$ の方向の半径は、  
工具により引き伸ばされ、除荷後は温度が低い中心部に近いほど大きく弾性回復が生じる。そ  
のため、せん断実験で得た回復率を、各ブロックの温度、ひずみ速度、保持時間を考慮して割  
り当て、ブロックの対角寸法の和で弾性回復後の半径寸法を予測できると考え、実測値と比較  
した。その結果、ひずみ速度における予測値と実測値に関してはおおよそ同様の傾向を示した  
が、保持時間が長いほど予測値と実測値に差が生じた。今後は炭素繊維の挙動を詳細に考慮す  
ることが必要である。

### (3) CFRTP シートの穴開け

CFRPは炭素繊維の切断により強度が大幅に低下することが知られている。そこで、CFRTPシ  
ートは加熱により軟化するため、高周波誘導加熱によりシートの温度を上昇させて、炭素繊維を  
切断することなく、穴開けを行うことを試みた。

実験概要を図9に示す。長さ60mmの針をダイセットに固定して、加熱しながらCFRTPシ  
ートに差し込んで直径5mmの穴を加工するという方法により実験を行った。針状の工具の先端角は  
 $1^\circ$ とした。

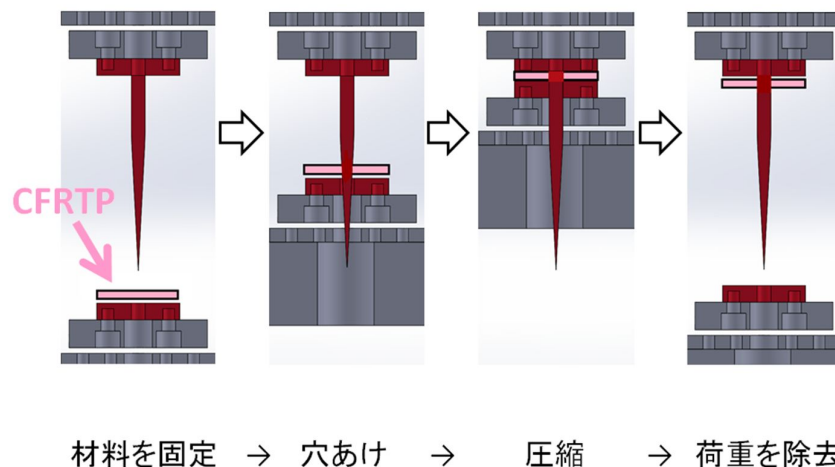


図9 CFRTPシートへの穴開け加工概略

比較のために炭素繊維切断用のドリルで穴開け(切削)加工を行った試験片を作製し、SS400  
の板にボルトで固定した後、引張試験によって加工穴の接合強度を調べた。その結果、CFRTPを  
3層重ねた試験片では、切削加工では3300Nであったものが、本研究で提案する非切削穴開け  
加工では4070Nと引張試験の最大荷重が高かった。1層のみの場合は、切削穴が900N、非切削穴  
では1500N程度と差が大きい。厚くなることで、炭素繊維の切断による影響が低下するもの  
と思われる。本研究で提案する方法は、CFRTPシートが薄いほど穴を開けやすいため、総数が少  
ない場合に有効であることが示された。

### (4) CO<sub>2</sub>レーザーによる加熱

今回、レーザー装置を高周波誘導加熱のダイセットに組み込むことはできなかったが、レー  
ザー装置単体でCFRTPシートの加熱を試みた。購入したレーザー装置は最大出力60Wであり、焦  
点距離を実際に加工する(切断加工に用いる)位置から30mm下方にずらした位置で加熱する  
ことにより温度変化を測定した。最大出力の30%の出力で、8秒後にCFRTPシートの背面が120  
に達することがわかった。また、40%に上げると10秒後に160に達することがわかったため、  
装置に組み込むことができれば、十分に加工に使用できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

1. 宮内崇成、安原鋭幸：高周波誘導加熱を用いた CFRTP シートの逐次成形 -第 2 報 弾性回復量の予測-、成形加工シンポジア ' 18, 331-332(2018)
2. 宮内崇成、安原鋭幸：高周波誘導加熱を用いた CFRTP シートの逐次成形、成形加工 ' 18 , 375-376 ( 2018 )
3. 桑原拳有、宮内崇成、安原鋭幸：高周波誘導加熱援用による CFRTP とアルミニウム板の接合、成形加工 ' 17、21-22 ( 2017 )

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。