

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420048

研究課題名(和文)超音波加振を利用した異種材料薄板接合法の開発

研究課題名(英文)Development of Joining Method of Various Kinds of Metal Plates Using Ultrasonic vibration

研究代表者

安原 鋭幸 (YASUHARA, Toshiyuki)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70282829

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：超音波応力振動を重ね合わせた異種材料の薄板に印加し、接合の可否について検討を行った。アルミニウムと軟鋼板について、直径3mmのパンチによる超音波スポット接合を行ったところ十字引張荷重は200Nに達する良好な接合が得られた。次に、高周波誘導加熱によって熱可塑性炭素繊維強化プラスチック(CFRTP)の炭素繊維のみを加熱してアルミニウムとの接合を試みた。アルミニウムに高さ1mm程度に加工した突起を、CFRTPの母剤樹脂であるPMMAが溶融した状態でプレスして接合させた。引張せん断試験において70MPaという、母材プラスチックであるPMMAの強度の約1.8倍の接合強度が得られた。

研究成果の概要(英文)：Joining method of dissimilar metal by ultrasonic vibrations was investigated. In the case that an aluminum plate was joined to a steel plate by using 3mm punch, peeling load was about 200 N. In the same way, an aluminum and a titan sheet, an, an aluminum and copper sheet were joined well. However joining strength between an aluminum and a magnesium sheet was 60 % compared with the case of aluminum and steel. The deformation of magnesium was limited due to its hexagonal crystal. Next, joining method between Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics sheet and aluminum sheet were discussed. At first CFRTP sheet was softened by induction heating. Then fabricated small aluminum anchors stuck into CFRTP. Then tensile shear test of joined specimens were carried out. Maximum of tensile stress was about 70MPa. This value was about twice larger than that of pristine PMMA. This result indicates that the mechanical anchors of the aluminum sheet contribute to the enhancement of the joining strength.

研究分野：機械材料・材料加工

キーワード：超音波振動 高周波誘導加熱 異種材料 接合 炭素繊維強熱可塑性

### 1. 研究開始当初の背景

化石燃料消費の削減が喫緊の課題となっている昨今、航空機や自動車などの移動体の軽量化が喫緊の課題となっている。航空機はすでに採用されているが、自動車でも従来の鉄鋼材料に代わり、アルミニウムなどの軽金属のみならず炭素繊維複合材料 (CFRP) の使用が検討され始めている。一方で、所望の機械的特性・成形上の問題・コストの観点から、車体全体を同じ材料で作ることは難しく、軽金属・CFRP・鉄鋼材料を適材適所で組み合わせ使用することが望ましい。異種材料を接合する技術は端緒についての段階で実用化に至っていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究は、移動体の軽量化に重要な異種材料同士の接合を目的として、超音波応力振動を利用した軽金属薄板同士の接合強度向上と、高周波誘導加熱を利用した金属とプラスチック (CFRTP) の異種材料の接合の実現を試みるものである。

### 3. 研究の方法

超音波加振による薄板の接合に関しては、既存の超音波加振用電源とマッチングボックスにより、重ね合わせた薄板に超音波振動を印加して接合状態を調べる。次に引張試験により接合強度の調査を行う。

はじめに、金属薄板を対象にした異種材料の接合を試みる。ダイセット、超音波振動子を準備、ホーンの設定・製作を経て、接合装置を作製する (図1)。



図1 超音波接合用実験装置

被接合材はアルミニウム、マグネシウム、チタン、鉄鋼材料、銅に対して接合を行い、十字引張試験により強度を調べる。

次に、熱可塑性プラスチック強化炭素繊維複合材料 (CFRTP) に対して誘導加熱を行い、プラスチックを熔融させて加工する。その際に、加熱時に誘導加熱コイルが被接合材と干渉しないように保持する方法を工夫して作製した。

高周波誘導加熱によって、非接触で炭素材料付近だけを効率良く加熱することができ、なおかつ母材となるプラスチックを治具で保持することが可能となるため、加熱しながら繊維方向に圧縮力をかけることで容易にCFがゆるむと考えられる。そこに剣山状に加工したアルミニウム合金を差し込むことで、接合強度を向上させる方法について検討を行う。

### 4. 研究成果

超音波を印加して薄板の接合を試みた。軟鋼板 (SPCC) の強度 (スポット径約 3mm, 十字引張荷重 200N) を 100% とした場合、純アルミ (A1050-H22) と銅 (C1020-H1/2) では 115% チタン (TP340C) と純アルミは 120%, 超高力鋼板 (1180MPa 級) と純アルミは 125% の接合強度が得られた。しかしマグネシウム合金 (AZ31-F) と純アルミは 60% の強度にとどまった。

同種材の場合には、超音波による攪拌作用により一体化することができたとしても、攪拌作用によるマクロ的な塑性流動の変化に対し未攪拌部の接合界面形状敏感に変化し、それにより接合強度が大きく変化した。そのため良好な継手強度を得るためにはマクロ的な塑性流動制御について十分な検討が必要となる。

また、上板と下板の変形抵抗の差が小さい場合のうち、マグネシウムを含む場合には一様に良好な接合強度が得られなかった。これは、マグネシウム合金が六方晶のためにすべり方位が少なく、急激に共振状態が変化するために有効な振幅において共振状態を維持することが困難だったと考えられる。その他、良好な凝着力が得られた組み合わせの場合にも継手形状がマクロ的に変化するため、マクロ的な塑性流動制御にも注意を要する。

変形抵抗の差が大きい組み合わせに対しては、攪拌作用による形状変化がなく、特別な注意を必要とせず高い接合強度を得ることができる。

次に CFRTP とアルミニウム合金の接合を試みた。まず、高周波誘導加熱による CFRTP の温度特性の変化を測定した。熱可塑性プラスチックの成形加工において温度制御は重要な要素であり、高周波誘導加熱には温度制御が容易で再現性が高いという特徴があるため、電源の出力や CFRTP の積層数の変化による温度上昇の傾向を調べた。図2に購入した高周波誘導加熱と接合用のダイセットを設置した状態の写真を示す。コイルの周辺に金属を用いると加熱されるため、パンチ部はセラミックス材料を用い、自作の真空チャックにより上面の薄板を固定する。

本実験で用いる CFRTP はクロス材であり、マトリクスであるアクリル樹脂は、成形温度が 150~260°C で揮発温度が 350~400°C となっている。積層数が 1 層 3 層 5 層の CFRTP を製作し、積層数の違いによる加熱特性の変化を調べたところ、図3に示す結果となった。この際、出力の違いによる変化をみるため、装置の電圧計の表示で 0~90V まで変化させた。試験片は 5 巻のソレノイド中心に配置し、磁界に対して垂直な向きとする。CFRTP1 枚の厚みが約 0.4mm であるため、5 層積層すると約 2mm となる。90V を印加した場合、CFRTP シートを十分に加工できる温度まで加熱されることがわかった。なお、今回の温度測定は線径 0.1mm の T 型熱電対を使用した。



図 2 購入した高周波誘導加熱装置および設計・作製したプレス接合装置

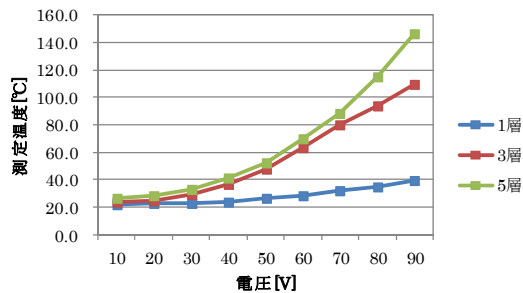
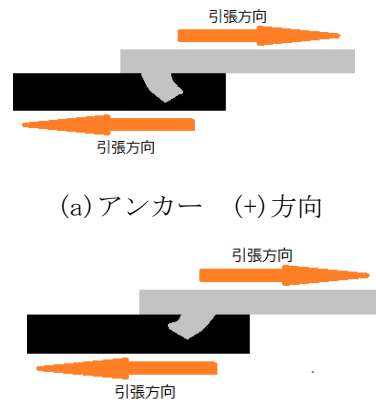


図 3 CFRTP シートの積層数に対する誘導加熱装置の電圧と CFRTP シート表面の温度変化

アルミニウムを剣山状にする、アンカー加工装置を製作した。装置はパンチとダイからなり、板厚  $t=0.2\sim 0.5\text{mm}$  の金属板の加工が可能である。パンチの材質は SKH51 である。金属板の位置決めはダイに取り付けられている板押さえと位置決め治具によって行い、パンチをガイドピンに通して油圧ジャッキで加圧する。

板厚  $t=0.5\text{mm}$  のアルミニウム (A5052) を供試材として用い、その一部にアンカーを製作した。まず幅 15mm に切出し、バリや反りを除去する。長いシート状の A5052 をダイに固定し、パンチをガイドピンに通して加圧すると、装置の構造上、加工されたアンカーは両端で爪の向きが異なる。それぞれの向きを 1 本目の爪に着目して図 4 に示すように +・- と分類し、アンカーの向きが引張強度に与える影響を明らかにする。



(a) アンカー (+) 方向  
(b) アンカー (-) 方向  
図 4 アンカーの向きの概略図

ダイとパンチには試験片を設置する位置をマーキングしておき、ダイに CFRTP、パンチにアンカーを設置する。パンチホルダーの昇降は手でジャッキを操作して行った。手順は以下の通りである。

アンカーを設置したパンチは上死点で待機しておき、電源を入れて 90V で加熱する。モニターに表示されている温度を確認しながら、150°C を超えたところでパンチホルダーを降下させ約 2kN で圧着する。

重ね合わせ試験片 (図 5) の接合強度を、試験片の接合部に平行な引張を与え母材間にせん断方向の負荷を与える引張せん断試験によって測定した。引張試験には島津製作所オートグラフ (100kN) を使用した。

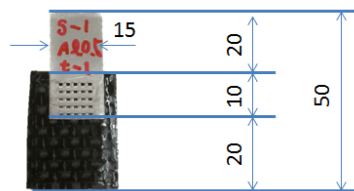
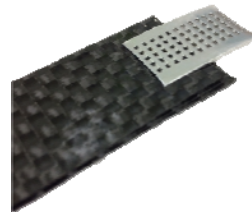


図 5 接合した試験片の例

今回、CFRTP-アンカー+4 個と CFRTP-アンカー-4 個、PMMA-アンカー+2 個と PMMA-アンカー-2 個の引張試験を行った。ストローク速度は 5mm/min で、純粋なせん断力を与えるため、試験片を引張り試験機のクロスヘッドに取り付ける際に、同じ板厚の端材を挟んでオフセットした。応力を求める際のせん断面積はアンカー影響部の面積とした。

試験後の CFRTP-アンカー(+)試験片はアンカー部分の根元から破断していた。図6に示す試験結果から、最大応力は約40MPaとなっており、約1mmストロークしたところで破断している。破断した部分の断面積は5mm<sup>2</sup>で、試験力の最大値1080Nを用いて応力を求めると216MPaになり、A5052の引張強度である230MPaに近い値になる。このことから、アンカー加工によって形成されるメッシュ部分の強度を接合強度が上回ったため、アンカー根元の破断に至ったと考えられる。

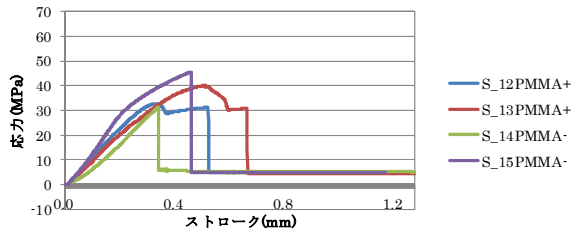


図6 アンカー(+)試験片の引張試験結果 (15mm幅)

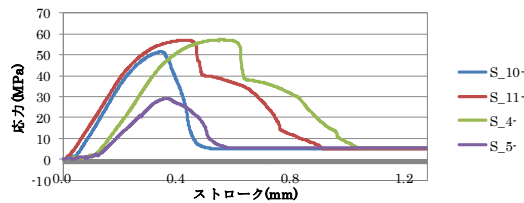


図7 アンカー(-)試験片の引張試験結果 (15mm幅)

試験後の CFRTP-アンカー(-)試験片は、アンカー(+)の時と同様にアンカー部分の根元から破断していた。しかし、図7に示す結果を見ると最大応力が約60MPaであり、アンカー+に比べて高い値を示した。これは、引張方向に対して破断したアンカー1列目の断面積が、アンカー-の方が大きくなるのが原因であると考えられる。+の破断面積が5mm<sup>2</sup>、-の破断面積が7.5mm<sup>2</sup>で1.5倍になっており、最大応力が+で40MPa、-は60MPaで1.5倍になっていることから、破断面積と応力の増加率はほぼ一致しており、引張を最初に受けるアンカー1列目の断面積が、結果に表れた差の主な原因であるといえる。また、グラフの線形にも明らかな差が見られる。両者のグラフを比べてみると、+のグラフはピークに達した後、アンカーの破断点まで徐々に減少しているのに対し、-のグラフはピークに達した直後に急激に減少している。試験後の接合界面を見てみると、+のアンカーが大きく変形しており、-にはこのような変形が見られなかった。つまり、+のアンカーは先端を支点にして引張力を受けているのに対し、-のアンカーは接触している面全体で荷重を受けているためと考えられ

る。このことから、接合強度の向上には材料同士を密に接触させる必要があり、輸送機器に求められる衝突安全性のような、外力が加わった時の塑性変形が求められる部分への適用では、アンカーが変形できる余地を与えることで伸びを確保するような設計も可能であることがわかった。PMMA単体とアルミニウムの接合試験片の場合は、全てPMMAの破断となり、その値は40MPaであった。

次に、アンカー根元部分での破断を防止するためにブランクの幅を15mmから20mmに広くした試験片を製作し、試験後の試験片をみると、破壊の形態は最初に行った試験のものとは異なり、アンカー加工されたメッシュ部分の外周部での破断となった。図8、図9に示す試験結果から、せん断強度は向上しており、最大応力が(-)の試験片で約70MPa、(+の試験片で50MPaとなった。これは、根元で破断した試験片の傾向からもわかるように、接合強度が破断した部分(メッシュ外周部)の強度を上回ったためであると考えられる。以上の結果から、今回製作した条件のアンカーではメッシュ外周部の破断が最も高強度を示す破壊モードであり、接合強度は70MPa以上であると言える。

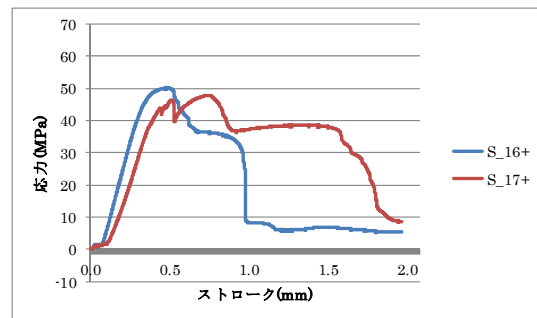


図8 アンカー(+)試験片の引張試験結果 (20mm幅)

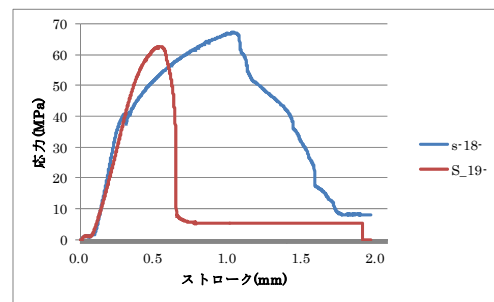
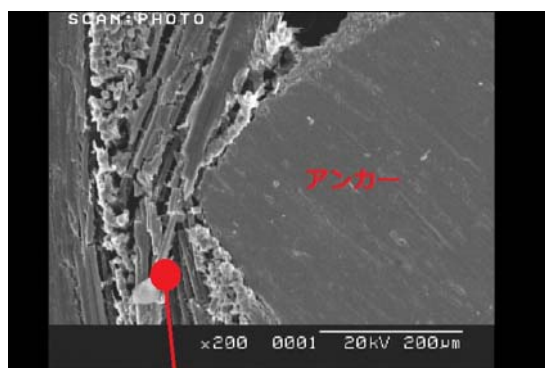


図9 アンカー(-)試験片の引張試験結果 (20mm幅)

次に、十字に接合した試験片を製作し、板厚方向の剥離強度を評価する。装置は引張せん断試験に使用した引張試験機のクロスヘッドに、製作した十字引張試験治具を取り付けたものを使用する。製作した試験片は3個で、製作手順は引張せん断試験片と同様である。試験結果は全て接合界面での剥離となり、

剥離応力は最大で 15MPa であった。ほとんどの試験片がストローク 1.8mm で剥離しており、それ以上にストロークしている試験片は治具の板押さえが不完全で滑ってしまった試験片である。引張せん断試験の結果と比べると結果の値は極めて小さく、一般に行われている化学的接合法による突合せ接合の強度 51MPa と比べて小さくなった。この結果より、今回使用した形状のアンカーではせん断方向に対するアンカー効果は発揮されたが、板厚方向の剥離に対しては効果的ではないことがわかった。

接合したアンカー影響部の炭素繊維の状態を、SEM を用いて観察した。試験片はせん断引張試験で破断したものを使用した。破断して残ったアンカー周辺を 20×20 程度の大きさに切断し、容器に入れて包埋樹脂 (LR White Resin: 日新 EM) で漬し、包埋樹脂が硬化した後に容器ごとファインカッターで切断して試験片を取り出す。その後、切断して露出した断面を耐水ペーパーで磨き、金蒸着を施した。図 10 に SEM 観察写真を示す。これより、アンカーの接触している辺に対して直交する繊維が破断していることがわかる。それに対し、アンカーに平行な繊維は目立ったダメージは見受けられなかった。このことより、直交する繊維を避けるようにアンカーを打ち込むことにより、より良好な接合が得られることが期待される。



直交する繊維

図 10 接合部の断面 SEM 観察写真

## 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)

[学会発表] (計 1 件)

① KUWABARA, Kou., YASUHARA, Toshiyuki: Mechanical Joining of Metal Sheets and CFRTP by Using High Frequency Induction Heating, The 32th International Conference of Polymer Processing Society, Lyon Conference Center, Lyon, France, July 25-29, 2016

[産業財産権]  
○出願状況 (計 件)

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

○取得状況 (計 件)

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

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安原 鋭幸 (YASUHARA, Toshiyuki)  
日本工業大学・工学部・准教授  
研究者番号：70282829

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：