

# アルミニウムと樹脂の重ね合わせ点接合

## ——摩擦攪拌接合と超音波接合の比較——

増井孝実\*

### The Research on the Superposition Point Junction of Aluminum and Resin —Comparison Between Friction Stir Joining and Ultrasonic Joining—

Takami MASUI

A study for the superposition point junction of aluminum plate and resin plate is presented. Friction stir joining and ultrasonic joining were selected as the joining method. For this research, tensile strength for the test pieces made by the two joining method were compared adhesive strength. Test pieces made by friction stir joining had good performance, and particularly high shear tensile strength was obtained at joining of PET resin, CFRTP resin and aluminum. Those made by ultrasonic joining had weaker strength than those made by friction stir joining because the resin melting area at the joint interface was narrow. Friction stir joining was found to be a suitable method for joining aluminum and resin.

Key words: Friction Stir Joining, Ultrasonic Joining, Resin, Aluminum Alloy, Point Junction, Tensile Strength

#### 1. はじめに

自動車や航空機など輸送機器において、環境性能向上のための軽量化は永遠の課題である。その中で金属材料の代わりに樹脂材料が適用される範囲は拡大し、比強度の高い炭素繊維強化樹脂(以後 CFRTP と称す)も、高価ではあるが付加価値の高い製品向けに増加している。

しかしながら、樹脂材料は量産性、成形性などで優れた材料ではあるが、単一材料で構成するとき強度が不足する場合もあり、例えば樹脂製のケースであればジョイント部の応力の集中する部分や、開口部の枠の部分に金属部材が組み込まれていることも多い。樹脂材料と金属材料を結合する方法として

は、インサート成形や接着、またはねじ止め、はめ込み等の多様な方法が用いられている。

本研究では接着剤を使わない、樹脂を熔融してアルミニウム板と直接接合する方法として、摩擦攪拌接合及び超音波接合を選択し、薄板の重ね合わせの点接合を行った。構造体への利用を想定し、母材強度以上の接合を目指し実験を行った。金属材料としてはアルミニウムを、樹脂材料には、ペット樹脂(以後 PET と称す)、ポリカーボネート樹脂(以後 PC と称す)、CFRTP を用いて、それぞれの接合方法による試験体の比較を行った。

なおアルミニウム板の表面は、摩擦攪拌接合を用いたアルミニウム合金と樹脂の接合の岡田ら<sup>1)</sup>による報告のように、樹脂を熔融接合するとき、アルマイト処理をすると接合強度が向上することが

\* ものづくり研究課

知られている。また、筆者らの行った炭素繊維強化プラスチック(CFRP)とアルミニウム合金のレーザ点接合<sup>2)</sup>においても、アルマイト処理によりせん断引張強度が増すことが確認されているため、今回用いるアルミニウム板は予めアルマイト処理したものをを用いた。

## 2. 実験方法

### 2. 1 試験材

試験材の金属材料としては純アルミニウム A1100 の板を用い、表面には硫酸によるアルマイト膜を 20 μm の厚さで成膜を行った。封孔処理は未処理である。その表面は図 1 に示すように 0.1 μm 以下の微細な多孔質な形状となっている。

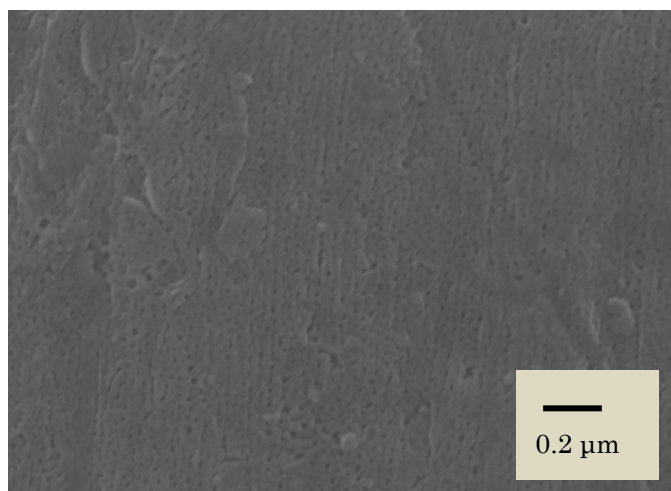


図 1 アルミニウムの表面の SEM 写真

表 1 使用材料

アルミニウム	A1100 アルマイト処理品(膜厚 20 μm) 厚さ 2 mm 短冊形状 25 mm × 100 mm
樹脂	① ペット樹脂(PET) 厚さ 1.5 mm 短冊形状 25 mm × 100 mm
	② ポリカーボネート樹脂(PC) 厚さ 1.5 mm 短冊形状 25 mm × 100 mm
	③ CFRTP シート型 ポリアミド(PA6)基材 3K 平織 3 層 (一村産業(株)製) 厚さ 0.5 mm 短冊形状 25 mm × 100 mm
	④ CFRTP 射出成型型 ポリプロピレン(PP)基材 2-3 mm 炭素短繊維 20%含有 厚さ 3 mm 短冊形状 25 mm × 100 mm

樹脂材料として PET, PC に, CFRTP としてポリアミド(以後 PA6 と称す)基材の平織りの炭素繊維を 3 枚重ねて固めたシート型のもの、ポリプロピレン(以後 PP と称す)基材の 2-3 mm の短繊維のカーボンを 20%含有させて射出成形したものをを用いた。使用試験材は表 1 に示す。樹脂材料の引張強度の実測値は PET:50 N/mm<sup>2</sup>, PC:58 N/mm<sup>2</sup>, CFRTP シート型:604 N/mm<sup>2</sup>, CTRTP 射出成型型:66 N/mm<sup>2</sup>であった。

### 2. 2 接合方法

摩擦攪拌接合は図 2 に示すように、樹脂薄板の上にアルミニウム板を重ね合わせ治具に固定して、アルミニウム側から高速回転したツールを板厚内の深さで挿入し、アルミニウム母材を摩擦熱で軟化させ攪拌するとき生じる熱により接合を行った。

ツールはショルダー径 φ10 mm で、プローブは径 φ4 mm、長さ 1.5 mm、M4 ねじ形状のものをを用いた。接合条件はアルミニウム母材を突き抜けない範囲で、入熱量が最大となるように設定し、ツール回転数 2000 rpm、挿入深さ 1.3 mm とし、挿入保持時間は 5 sec とした。

超音波接合は図 3 に示すように、摩擦攪拌接合同様に樹脂薄板の上にアルミニウム板を重ね合わせて下側のアンビル上に置き、上側のアルミニウム板に 8 mm 角の矩形型の圧子を 1000 N の荷重で押し当て、1.5 kHz の超音波振動を 0.5 sec 付加し、界面の摩擦熱により接合を行った。接合条件は摩擦攪拌接合同様に、圧子がアルミニウム板を突き抜けない範囲で入熱量が最大となるように設定した。

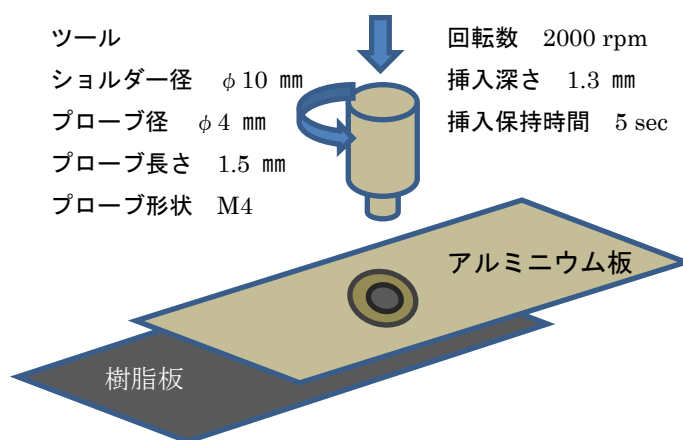


図 2 摩擦攪拌接合実験装置

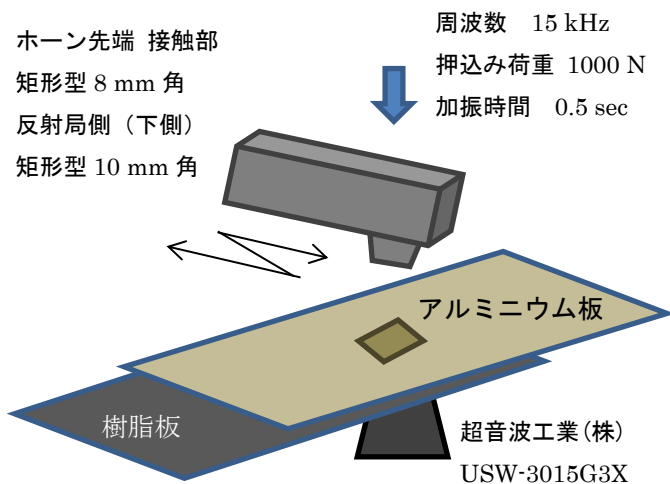


図 3 超音波接合実験装置

### 2. 3 評価方法

接合強度の評価はせん断引張試験にて行った. 接合面の断面観察は金属光学顕微鏡で, せん断引張試験後の破断面の観察は走査電子顕微鏡(SEM)で行った.

## 3. 結果と考察

### 3. 1 外観

摩擦攪拌接合と超音波接合による PET とアルミニウムの重ね合わせ点接合の試験片を図 4 に示す. それらの裏の樹脂側からの写真を図 5 に示す. 各方法により, PET の溶け込みの範囲に差が見られ, 摩擦攪拌接合では試験片幅全域まで広がっているのに対し, 超音波接合は圧子下部の周りにとどまっている. また両接合法共に  $\phi 1.2$  mm 程の気泡の発生も確認できる.

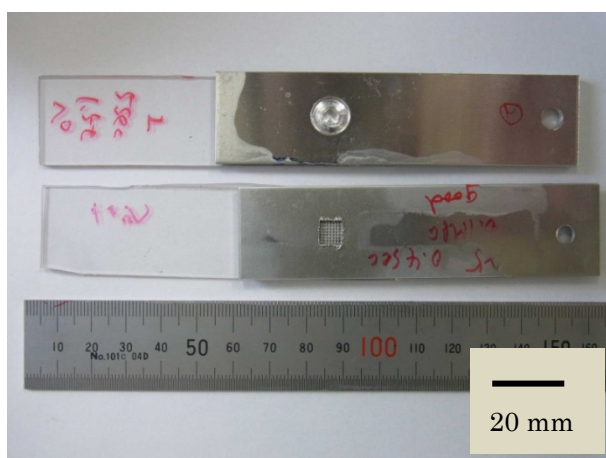


図 4 接合試験片 PET 樹脂  
 上が摩擦攪拌接合 下が超音波接合

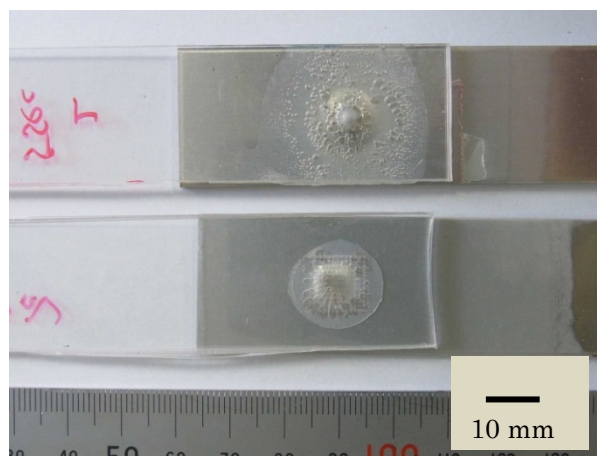


図 5 接合試験片 PET 樹脂  
 樹脂側から撮影 上が摩擦攪拌接合 下が超音波接合

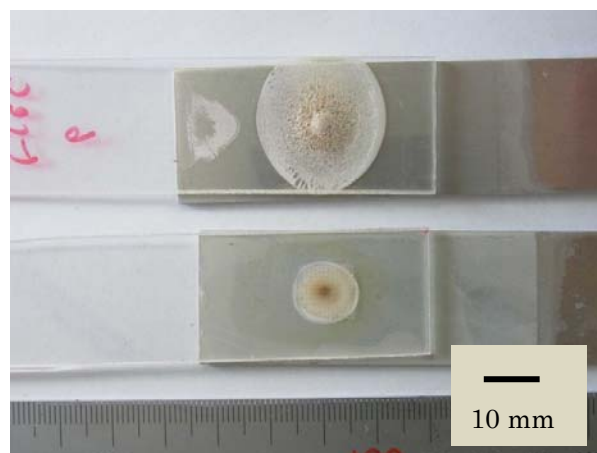


図 6 接合試験片 PC 樹脂  
 樹脂側から撮影 上が摩擦攪拌接合 下が超音波接合

摩擦攪拌接合はツールを挿入した状態での保持時間が 5 sec と長く, 溶け込み範囲は試験片幅全体にまでいきわたっている. それに比べ超音波接合は加振時間が 0.5 sec と短く, アルミニウム板と樹脂板の界面での摩擦熱による局所的な発熱であるため, 溶け込み範囲は広がらなかった. 当実験における一度の接合では超音波接合は摩擦攪拌接合と同等の溶け込みの試験片の作製は出来なかった.

PC を用いた接合についても樹脂側から接合状態を観察すると, PET と同様に接合範囲に差が見られ, 接合界面の樹脂部には気泡が観察された. それは PET のものと比べると微細で, 1 mm に満たない細かい泡が全面に生じて白色化しており, 更に中央部は過剰な加熱により生じた褐色部も見られる(図 6). また CFRTP シート型の接合においても同様に樹脂側から観察すると, 摩擦攪拌接合によるものは試験片幅全域まで基材の PA6 が溶けた跡が観察されたが, 超音波接合では裏面まで溶けてはいなかった(図 7).

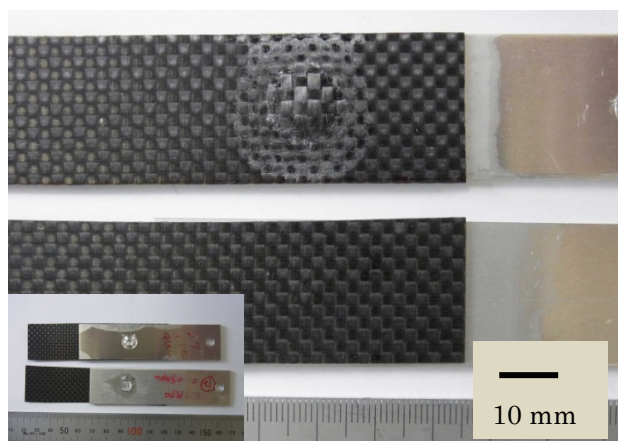


図7 接合試験片 CFRTPシート型  
樹脂側から撮影 上が摩擦攪拌接合, 下が超音波接合

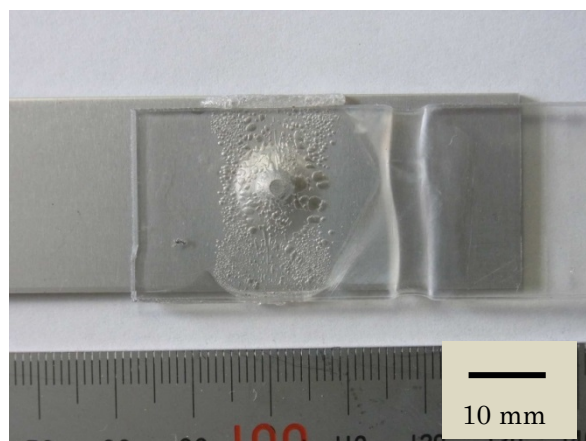


図8 せん断引張試験片 PET  
接合部右側に塑性変形部

### 3. 2 せん断引張強度及び破断面観察

せん断引張試験の結果を表 2 に示す. 接合方法により樹脂の溶け込み範囲に差があるため参考値である. 溶け込み範囲の狭い超音波接合のせん断引張強度は低い値となっている.

表 2 せん断引張強さ

接合法	アルミニウム表面処理	樹脂種類	せん断強度 (N)	破断位置
摩擦攪拌接合	A1100アルマイト	PET	1886	母材
		PC	1876	接合界面
		CFRTP射出成型型	2482	母材
		CFRTPシート型	4071	接合界面
超音波接合	A1100アルマイト	PET	1408	接合界面
		PC	1470	接合界面
		CFRTP射出成型型	877	接合界面
		CFRTPシート型	498	接合界面

#### 3. 2. 1 摩擦攪拌接合について

PET の接合試験片は溶け込み範囲が広く, 試験片幅全体に至っているためせん断引張強度は高く, PET の母材の引張強度を上回り, 接合界面で破断することなく母材部が伸びて破断した(図 8).

PC の接合試験片が接合界面で破断したのは, 前述のように接合界面に細かい気泡が全面に発生しており, 亀裂がその気泡を伝って進展したためと考えられる(図 9). SEM 観察すると破面の気泡部の断

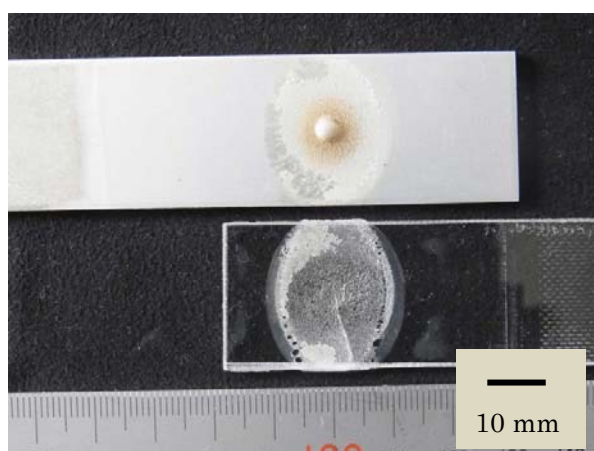


図9 せん断引張試験片 PC  
接合界面の破断面 中心部は褐色に変色

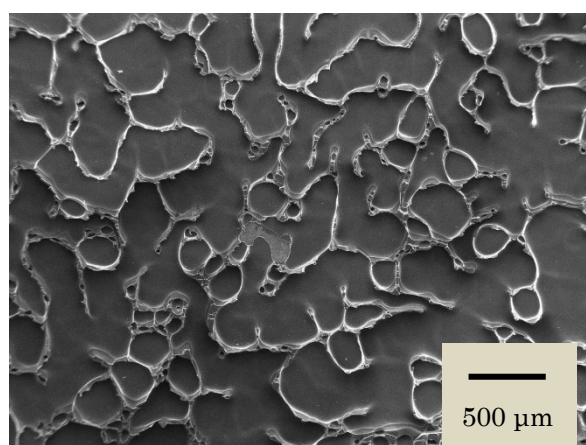


図10 SEM写真 接合部破断面破面 PP側  
気泡発生部での破断

面積はわずかであった(図 10). 気泡は PET の接合界面にも存在するが大きく疎らであるため, それらを伝うような界面での割れは発生せず, 母材破断に至ったと考えられる. これらの PET, PC の接合界面の気泡は, 急速な加熱により, 吸湿されている

水分が放出されて発生するもので、炉にて加熱試験を行うと PET については 150°C, PC については 180°C の温度で発生した。

ちなみに今回使用した樹脂材料の中で PET だけは接合性が高く、摩擦攪拌接合法によると、アルミニウムの表面が板材そのままの未処理のものでも接合が可能であり、せん断引張試験においてもアルマイト処理品と同じく樹脂母材が伸びる強度が得られている。

CFRTP 射出成型型においては樹脂母材部で破断したが、せん断引張強度は本来の母材強度に満たなかった。断面の光学顕微鏡写真(図 11)に見られるように界面には気泡もなく密着性は良かったが、破断面を観察すると図 12 のように接合界面側 1/2 程の領域で白くなっており、これは基材の PP が溶融して固化した部分であり、引張強度は低下している部分である。参考として CFRTP 射出成型型を 170 °C で溶融・固化させたものは、引張強度は 30 N/mm<sup>2</sup> となり、加熱前に比べると半分に低減していた。

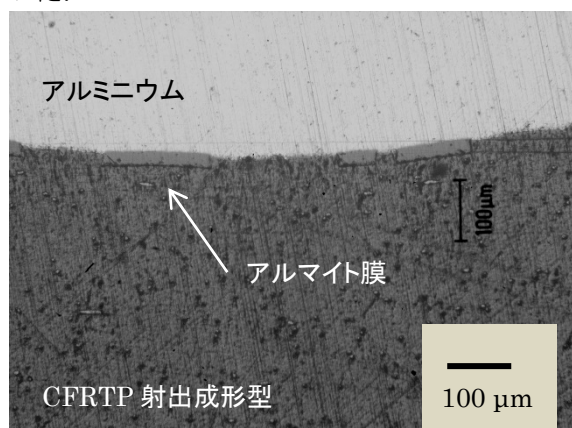


図 11 摩擦攪拌接合部断面 CFRTP 射出成型型  
接合界面に気泡の発生は見られない

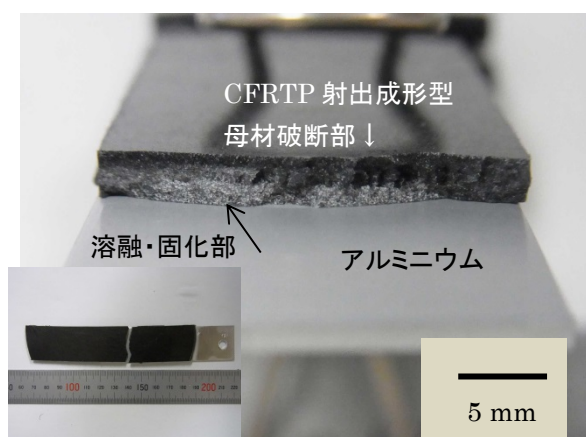


図 12 せん断引張試験片 CFRTP 射出成型形  
CFRTP 母材の破断面 下側が接合面

CFRTP シート型のせん断引張強度が最も高いのは、溶け込み範囲が広いことに加え、接合界面でアルミニウムに接する炭素繊維を覆う表面の PA6 の厚さが 20 μm と薄いためその層内で剥離が起こり難いことと、接合界面に気泡が生じることなく密着性が高いことによる。しかしながら CFRTP シート形の母材強度が高いために、破断は CFRTP シート型の接合界面の PA6 と炭素繊維との間で起こっている。(図 13,14)

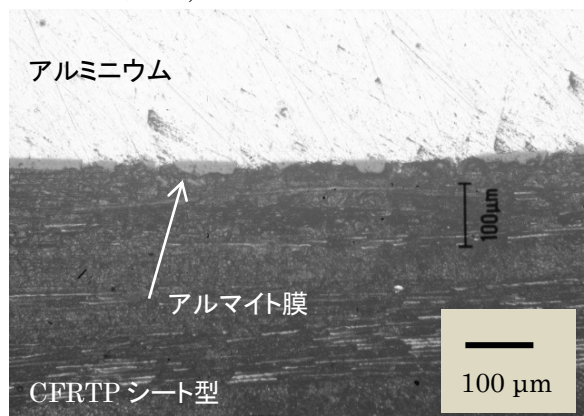


図 13 摩擦攪拌接合部断面 CFRTP シート型  
接合界面に気泡の発生は見られない

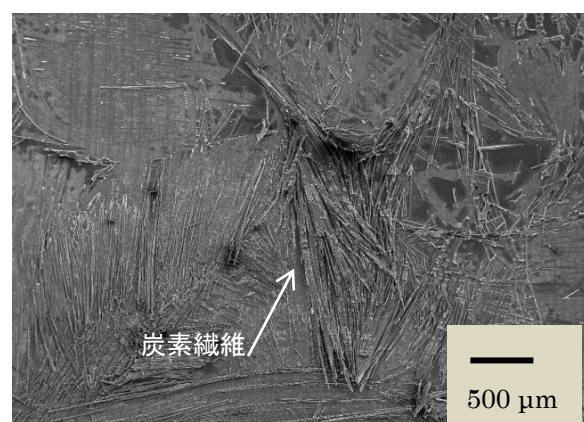


図 14 SEM 写真 接合部破断面  
アルミニウム側 CFRTP シート型

### 3. 2. 2 超音波接合について

せん断引張強度は摩擦攪拌接合より総じて低い結果となった。PET, PC においては接合界面で樹脂の溶け込みの範囲が 1/4 程であることによる(図 5,6)。CFRTP 射出成型型のせん断引張強度が低いのは、溶け込みの範囲が狭く、更に基材の PP が溶融・固化して強度低下していることも起因する。また CFRTP シート型において極めて低いせん断強度となっているのは、入熱された熱が CFRTP 内のカーボン繊維を伝い逃げてしまい、溶融される範囲

が更に少なくなってしまうことによると考えられる。(写真 15.16)

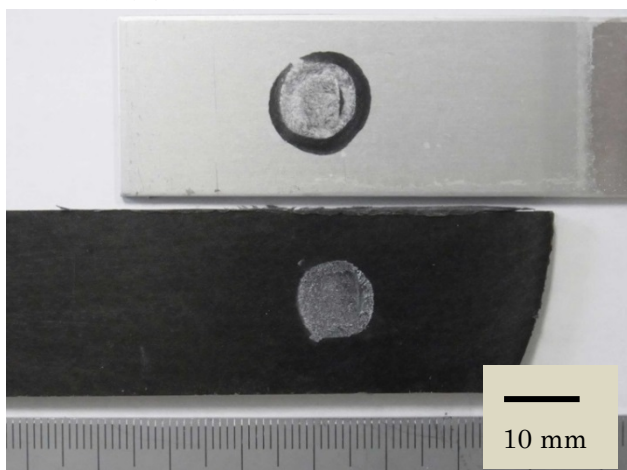


図 15 超音波接合破断面  
CFRTP 射出成型型 PP 基材

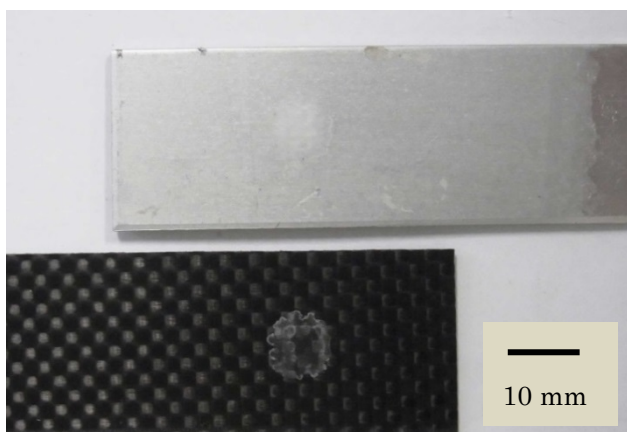


図 16 超音波接合破断面  
CFRTP シート形 PA6 基材

### 3. 3 摩擦攪拌接合と超音波接合の比較

両方法とも、機械的に発生させた摩擦熱により樹脂をアルミニウムに溶着するものであるが、摩擦の仕方・発熱個所が異なるため、入熱量は一定にすることはできず接合範囲に差が生じた。

摩擦攪拌接合は、アルミニウム母材内での攪拌時間の調節によりで発熱状態を維持できるため、溶融範囲を広くすることが可能であった。また接合界面にはツールによる圧力も加わり高い密着性も望める。

超音波接合は、接合面の 2 つの材料の摩擦熱によるため、局所的に温度上昇してしまい圧子下のアルミニウムが軟化して突き抜けるので、加振時間は短時間にせざるをえなく広い範囲を溶融することは難しかった。また接合界面は圧子により圧縮力が負荷されているが、擦り合わせられて振動して樹脂側は攪拌されているので、摩擦攪拌接合のように固定されたまま加熱されるものと密着性は異なると考えられる。

加熱時の昇温速度は両方法とも速くなってしまい、どうしても吸湿性のある樹脂では気泡が発生は防げなかった。

### 4. 結論

アルミニウム A1100 のアルマイト処理品と各種樹脂の薄板の重ね合わせ点接合を、摩擦攪拌接合法と超音波接合法で行ったところ、下記のことかわかった。

- ・摩擦攪拌接合による樹脂材料の PET, CFRTP シート型(PA6 基材)とアルマイト処理されたアルミニウムとの接合性は良好でせん断引張強度は母材破断する高い値が得られた。
- ・超音波接合は接合時間が短く、樹脂を溶融できる範囲が狭いため、摩擦攪拌接合に比べ高強度のものは得られなかった。同等の接合強度を得るためには、接合点数を増やすことが必要である。
- ・PC のように、加熱により接合界面に細かい気泡が発生してしまうものは、材料を事前に乾燥する。または生じさせないように加熱を複数回に分けて段階的に行うなどの前措置が必要である。

### 参考文献

- 1) 岡田俊哉ほか：“摩擦重ね接合におけるアルミニウム合金と樹脂材料の直接接合特性に及ぼすアルマイト皮膜処理の影響”．軽合金溶接 53,p298-305(2015)
- 2) 増井孝実：“炭素繊維強化プラスチック(CFRP)とアルミニウム合金のレーザ点接合”．三重県工業研究所 研究報告 39, p22-26(2015)