

複動式ツールを用いた 金属と樹脂の異材摩擦攪拌接合法の開発

The Development of Dissimilar Friction Stir Welding for Joining Metal to Resin with an Adjustable Tool

高 業飛* 山本尚嗣*

Yefei Gao

Naotsugu Yamamoto

近年、輸送機器の軽量化のため、軽金属および樹脂材料の適用可能性が検討され、金属と樹脂の異材接合技術も注目されている。本研究では、複動式ツールを用いた摩擦攪拌接合法による金属と熱可塑性樹脂の異材接合技術を開発した。この方法は、ツールのプローブとショルダを独立のパラメータで回転させることができる複動式摩擦攪拌接合装置を用いて、上板の樹脂部材と下板の金属部材を直接接合する重ね接合法である。本方法を最適接合条件で適用することで、上板の樹脂に健全なビードを保持しながら、下板の金属のバリが牛の角のように上板の樹脂板に差込まれることで、接合界面において相互ロック界面構造を有する継手を得た。この相互ロック接合構造の形成によって、優れた接合特性が得られる。

開発した接合法は、複数種類の金属 (Mg 合金、Al 合金および純 Cu) と複数種類の樹脂部材 (ナイロン、CFRTP および PE) との接合に使用できることが示された。

In recent years, in order to reduce the weight of transportation equipment, the applicability of light metals and resins has been studied, and dissimilar joining techniques for joining metal to resin have also attracted attention. In this study, a dissimilar joining technique for joining metal to resin with friction stir welding using an adjustable tool was developed. This joining technique is a kind of lap joining technique for joining metal to resin with a tool which the rotation speed of the probe and shoulder can be adjusted independently, while the resin sheet was set at the top and the metal sheet was set at the bottom. With optimum conditions, the resin sheet obtained a good surface appearance and an interlock interface in which metal burrs shaped like ox horns were inserted into the resin sheet. The formation of the interlocking structure provided excellent joining properties.

This developed joining technique can be used for joining multiple types of metals (Mg alloy, Al alloy, and pure Cu) to multiple types of resins (Nylon, CFRTP, and PE).

1 緒言

近年、輸送機器の軽量化ニーズが高まる中、軽金属および樹脂の輸送機器への適用拡大の可能性が検討され、金属と樹脂の異材接合技術も注目されている。特に、当社が開発した難燃 Mg 合金および炭素繊維強化樹脂 (CFRP) の支援技術として、金属と樹脂の異材接合技術の開発は必要不可欠である。従来、ボルトによる機械的接合や接着剤による接着などが用いられたが、これらの接合・接着方法では生産効率が低く、また、接着剤を使用する場合は作業環境に留意する必要がある。一方、金属と樹脂の加熱接合技術として、近年レーザー接合法および摩擦重ね接合法についての報告がある^{1), 2)}。これらの方法の接合メカニズムとして、金属表面に形成された酸化物と樹脂中の極性官能基の間に作用する水素結合などが挙げられている³⁾。そのため、一部の極性を持つ樹脂に対しては直接接合が可能であるが、非極性樹脂に対しては前処理が必要である。

金属と樹脂との異材接合において、樹脂の極性に左右

されることなく良好な継手を得るためには、接合界面において、アンカー効果を有する構造あるいは相互ロック界面構造を作ることが有効であると考えられる。摩擦攪拌接合 (FSW) 法は、1991年に英国溶接研究所 (TWI) が開発し、ツール (Tool) と呼ばれる棒状の工具を高速で回転させながら材料と接触させ、材料との摩擦熱を利用して接合する方法である。固相 (低温) 接合法である摩擦攪拌接合法は金属と樹脂の異材接合法としても期待されている。これまで、摩擦攪拌接合法による金属と樹脂との接合界面において、相互ロック界面構造を作製した報告例はあるが、健全なビードを得られないなどの問題があった^{4)~6)}。以上の問題を解決するため、複動式ツールを用いた金属と樹脂の異材摩擦攪拌接合法を開発した。

2 複動式ツールを用いた 金属と樹脂の異材摩擦攪拌接合法について

複動式ツールは、ツールのプローブとショルダが一体化している一般的な摩擦攪拌接合用ツールと異なり、ツールのプローブとショルダが独立している。そのた

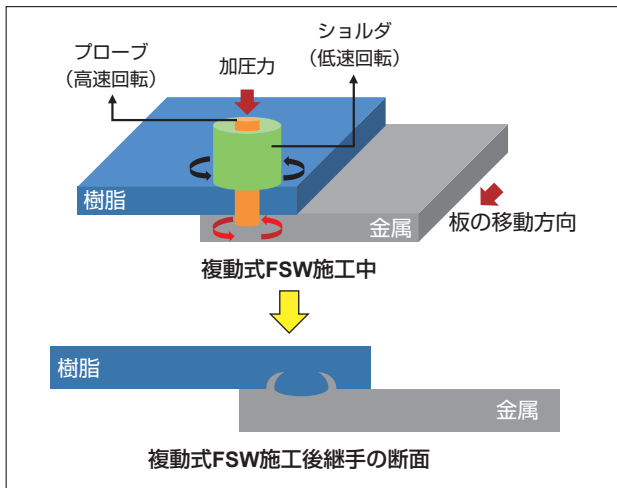


図1 複動式摩擦攪拌接合による金属と樹脂の異材接合法の模式図

め、プローブとショルダの回転速度を独立のパラメータで制御できる。図1に示すように、高速回転のプローブ(600 rpm以上)を上板の樹脂板から挿入し、プローブの先端が下板の金属板と接触すると、攪拌の効果によって、下板の金属板から牛の角のようなバリが形成され、上板の樹脂板に差込まれることで相互ロック界面構造が形成される。同時に、低速回転のショルダ(50 rpm)によって健全な継手ビードが得られる。

なお、本技術は金属と熱可塑性樹脂との異材接合には適用できるが、金属と熱硬化性樹脂の異材接合へは適用できないので注意が必要である。

3 実験方法

供試材は、当社が開発した難燃Mg合金(KEHMA-HR、工業用純Mg、Al、CaおよびMnなどの合金組成材料で作製)のダイカスト板材と、炭素繊維強化熱可塑性樹脂(CFRTP)に使用したナイロン6(以下ナイロンと表記)の板材(市販材)である。試験片のサイズは、いずれも厚さ2×幅75×長さ150mmである。SKD61製複動式ツールは、ショルダ径15mm、プローブ径6mmである。ショルダ回転速度50rpm、プローブ回転速度300-1200rpm、接合速度30-150mm・min⁻¹、ツールの前進角度3°、ショルダの挿入深さ0.1mm(位置制御)、プローブの挿入深さ2.7mm、重ね幅30mmの条件で、接合を行った。継手の断面は光学顕微鏡で観察した。機械的特性はJIS Z3136:1999に基づく引張試験で評価した。試験片は接合線に対して垂直に作製し各試料から3本ずつ採取した。試験片の幅は15mm、引張速度は1mm・min⁻¹とした。

4 実験結果および考察

4.1 接合パラメータの影響とマクロ組織

健全なビードを得るため、予備テストの結果に基づいて、ショルダの回転速度を50rpmに設定した。プローブ

の回転速度および接合速度を変化させ、プローブの回転速度および接合速度が継手のビードに与える影響を検討した結果を図2に示す。また、代表的なビードの外観写真を図3に示す。プローブの回転速度が900rpm以上の場合はすべての接合速度で接合が可能であった。良好なビード外観を有する継手の外観写真を図3(a)に示す。プローブの回転速度が600rpmの場合は、接合

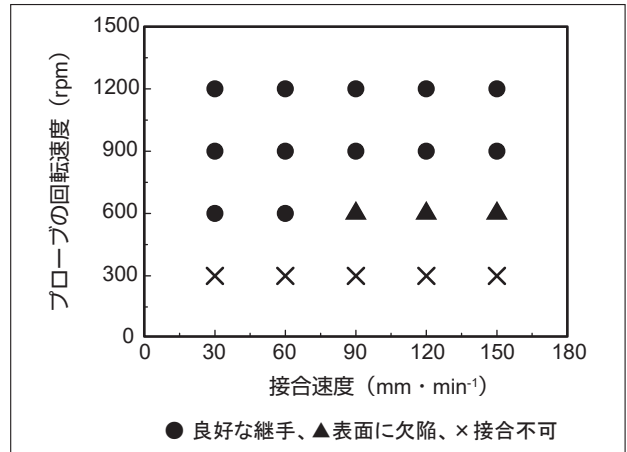
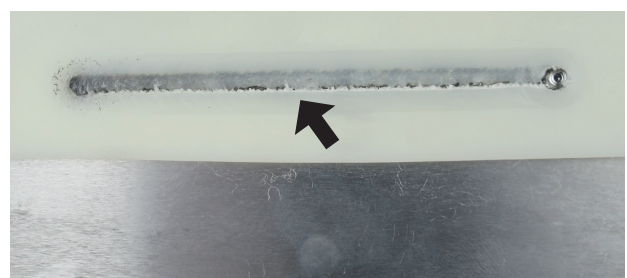


図2 Mg合金とナイロンの複動式摩擦攪拌接合のプロセスウィンドウ

(a) 良好な継手(900 rpm/60 mm・min⁻¹)



(b) 表面に欠陥が発生した継手(600 rpm/120 mm・min⁻¹)



(c) 接合不可(300 rpm/30 mm・min⁻¹)

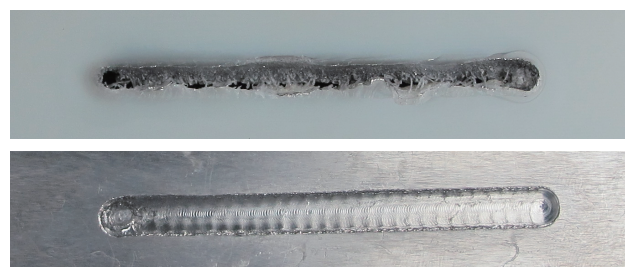


図3 代表的なMg合金とナイロンの複動式摩擦攪拌接合継手の外観写真

速度 $90 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上の条件では図 3 (b) の矢印に示すように継手の表面に溝状欠陥が発生した。この現象は、Mg 合金とナイロンの接合界面において、相互ロック界面構造が形成されたが、接合速度の増加に伴い、接合過程中的入熱が減少し、低入熱によって攪拌したナイロンの再一体化過程が不十分であったためと考えられる。プローブの回転速度が 300 rpm の場合は、すべての接合速度において接合できなかった (図 3 (c))。この原因は、プローブの回転速度が 300 rpm では、攪拌不足により Mg 合金が接合界面において十分なバリを形成できなかったためと考えられる。

図 4 に代表的な異材接合継手 ($900 \text{ rpm}/90 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) の断面写真を示す。下板の Mg 合金のバリが牛の角のように上板のナイロン板に差込まれ、相互ロック界面構造が形成されている。しかし、攪拌したナイロン母材の中心部にボイドが観察され、接合中の温度がナイロンの熱分解温度である $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ を超えて、ナイロンの一部が熱分解したことが示唆された⁷⁾。

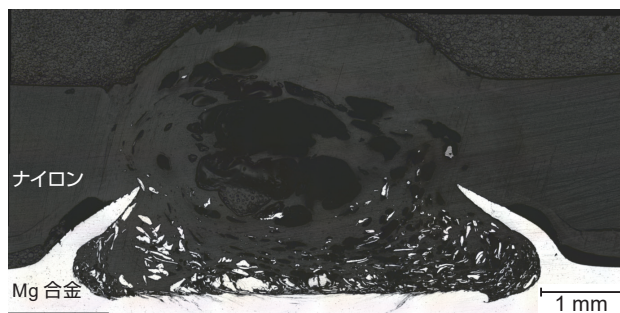


図4 代表的なMg合金とナイロンの複動式摩擦攪拌接合継手の断面光学顕微鏡写真 ($900 \text{ rpm}/90 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)

4.2 継手の機械特性

得られた異材接合継手の最大引張試験力を図 5 に示す。継手の最大引張試験力は 603 N であった (プローブ回転速度 900 rpm 、接合速度 $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。この最大引張試験力有する継手は他の最近報告された一般的な摩擦攪拌接合法によって接合した相互ロック界面構造を有する金属と樹脂の異材継手に比べて良好なビード外観を有し、接合強度が強くなった^{4)~6)}。しかし、この最大引張試験力はナイロン母材強さの約 25 % であった。今後、接合強度を向上する方法を検討する必要がある。すべての引張試験片は、図 6 に示す 2 種類の形態で破断した。1 つは図 6 (a) に示すように Mg 合金のバリの側面に沿って、攪拌によって再固化したナイロンとナイロン母材の界面から破断する形態であり、もう 1 つは図 6 (b) に示すように Mg 合金のバリが破断し、接合界面から破断する形態である。摩擦攪拌接合中に継手に投入される入熱と最大引張試験力および破断形態との関係を図 7 に示す。図 7 中の各ポイントに対応する接合条件はプローブの回転速度/接合速度の形式で表示している。接合界面から破断した継手は青色、ナイロンから破断した継手は赤色で表示している。

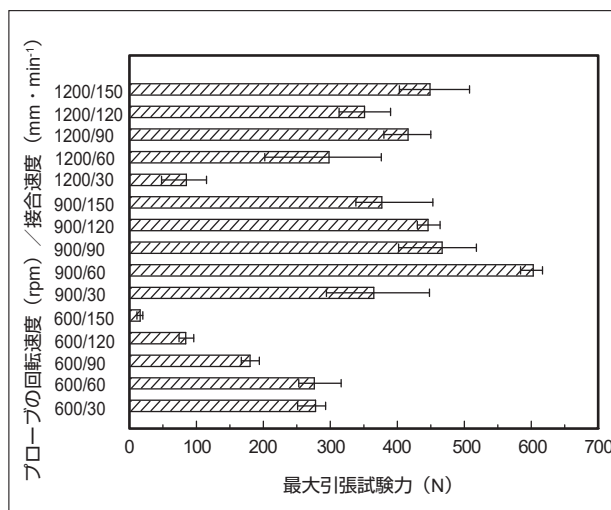
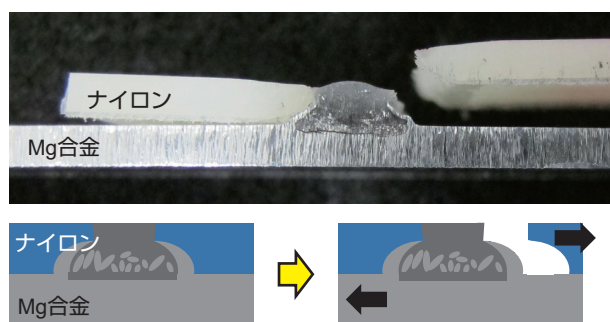


図5 得られた異材接合継手の最大引張試験力

(a) ナイロンから破断した継手



(b) 界面から破断した継手

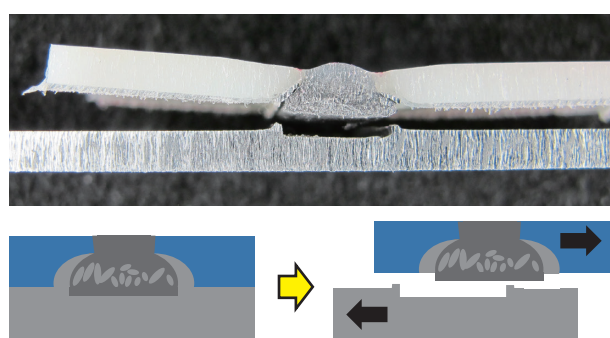


図6 異材接合継手の破断形態の模式図

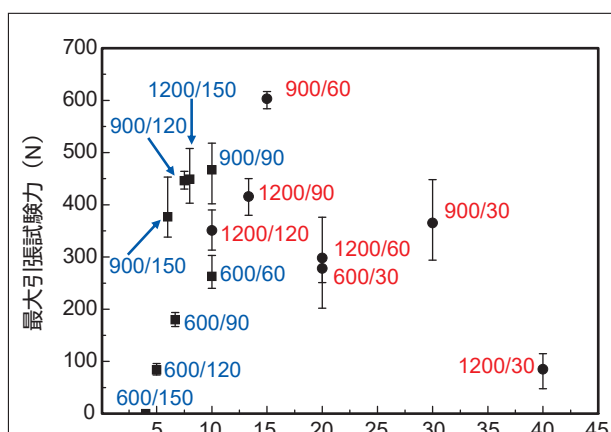


図7 入熱と最大引張試験力および破断形態の関係図

一般的な摩擦攪拌接合中に継手に投入される入熱を評価するパラメータ Q は式 (1)

$$Q = \frac{R}{V} \cdots \cdots (1)$$

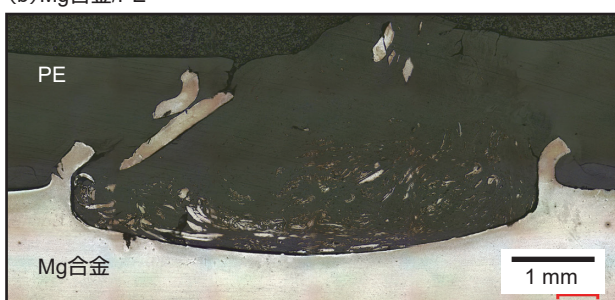
と表せる。ここで、 R はツールの回転速度 (rpm)、 V は接合速度 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) である⁸⁾。摩擦攪拌接合は、ツールの回転速度の増加および接合速度の減少に伴い、ツールと被接合材表面の摩擦が強くなって、入熱が大きくなる。本研究は一般的な摩擦攪拌接合と異なり、投入される入熱はプローブの先端と下層金属板との摩擦熱であり、そのため、プローブの回転速度 (R) の増加および接合速度 (V) の減少に伴い、入熱が大きくなり、式 (1) によって簡易的に投入される入熱の変化傾向を評価できる。本研究の検討範囲では、最大引張試験力が入熱の増加に伴い増加し、 Q が 10 から 15 の間で最大となり、その後、入熱の増加に伴い減少した。 Q が 10 より小さい低入熱の場合に継手が接合界面から破断し、 Q が 10 より大きい高入熱の場合に継手がナイロンから破断する傾向であった。その原因は、低入熱条件では形成した Mg 合金のバリが低くかつ細いため、バリが破断し界面から破断したと考えられる。逆に高入熱条件では、形成したバリは高くかつ太くなりバリの強度は増加するが、バリの高さの増加に伴いバリの先端からナイロン表面までの残厚が薄くなるため、最大引張試験力が減少したと考えられる。したがって、高接合強度を得るためには、接合パラメータの調整によって金属のバリの形状を制御する必要がある。

本研究では、図 8 に示すように、Mg 合金と CFRTP、Mg 合金とポリエチレン (PE)、Al 合金とナイロンおよび Cu とナイロンの組合せにおいても、接合界面において、相互ロック構造を形成し、接合できることを確認しており、今後金属と樹脂の接合方法として、さまざまな分野への応用が期待できる。

(a) Mg合金/CFRTP



(b) Mg合金/PE



(c) Al合金/ナイロン



(d) Cu/ナイロン

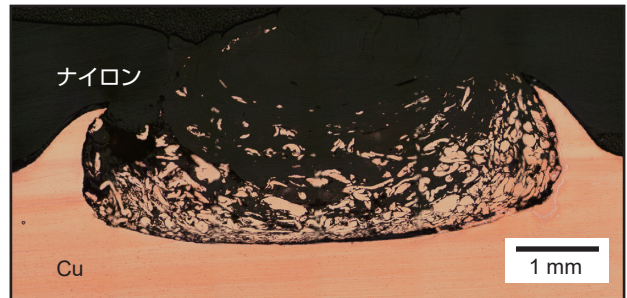


図8 複動式摩擦攪拌接合による異材接合の成功例

5 まとめと今後の展開

本研究では、複動式ツールを用いて金属と熱可塑性樹脂の異材摩擦攪拌接合法を開発し、以下のことが明らかになった。

- 1) Mg 合金とナイロン 6 の異材接合において、複動式摩擦攪拌接合を用いて簡便的な直接接合を実現した。健全なビードを保持しながら、Mg 合金とナイロンの接合界面において、相互ロック界面構造を形成し、優れた接合特性が得られた。
- 2) 接合メカニズムは、ツールの攪拌効果によって下板の Mg 合金板から形成したバリが牛の角のように上板のナイロン板に差込まれた相互ロック界面構造である。
- 3) 複動式ツールによって接合した継手の最大引張試験力は 603 N であった (試験片の幅は 15 mm)。

金属と樹脂の異材接合において、複動式摩擦攪拌接合法は、接合前の前処理は不要であり、複数種類の金属と複数種類の熱可塑性樹脂部材との接合が可能であり、接合界面において、相互ロック構造を形成できた。実用化のためには、今後接合パラメータの調整によって金属バリの形状を最適化し、継手の接合強度を向上し当社が開発した Mg 合金と CFRTP 品の接合技術として応用することを目指す。

謝辞：

本研究を遂行するあたり、適切な御助言、御指導を賜りました、大阪大学 接合科学研究所 教授 藤井英俊 博士、特任准教授 森貞好昭 博士に深く感謝致します。

参考文献：

- 1) Katayama S., Kawahito Y.: Laser direct joining of metal and plastic, Scripta Mater., Vol.59 (2008), pp. 1247-1250.
- 2) Liu F.C., Liao J., Nakata K.: Joining of metal to plastic using friction lap welding, Mater. Des., Vol.54 (2014), pp. 236-244.
- 3) 中田一博監修：異種材料接合技術－マルチマテリアルの実用化を目指して－シーエムシー、(2016) pp.161.
- 4) 小澤崇将、加藤数良、前田将克、野本光輝：3003 アルミニウム合金と ABS 樹脂の重ね摩擦攪拌接合、日本大学生産工学部第 47 回学術講演会講演概要、(2014) pp.87-88.
- 5) Huang Y., Meng X., Wang Y., Xie Y., Zhou L.: Joining of aluminum alloy and polymer via friction stir lap welding, J. Mater. Process. Technol., Vol .257 (2018), pp. 148-154.
- 6) Aghajani H., Khodabakhshi F., Simchi A.: Friction-stir-lap-joining of aluminium-magnesium/poly-methyl-methacrylate hybrid structures: thermo-mechanical modelling and experimental feasibility study, Sci. Technol. Weld. Join. Vol. (2018) pp. 35-49.
- 7) Gao Y., Morisada Y., Fujii H and Liao J.: Friction stir lap welding of plastic to metal using adjustable tool, Sci. Technol. Weld. Join. Vol. 3 (2020) pp. 190-197.
- 8) 社団法人溶接学会編：摩擦攪拌接合－FSW のすべて－産報、(2006) pp.22.

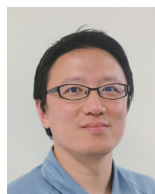
執筆者：

高 業飛

2015 年入社

博士（工学）

異材接合技術の研究開発に従事



山本尚嗣

2006 年入社

博士（工学）

鋳鉄管の溶接や当社開発

マグネシウム合金の接合など

溶接・接合に関する技術開発に従事

