



T. Tanaka

付加製造法を利用した 革新的マルチマテリアル化技術の開発

田中 努*

1. 研究の背景と目的

ものづくり産業においては、機能性に富んだ新材料が求められており、現有素材を適材適所で組み合わせる、いわゆる「マルチマテリアル化」が注目されている。マルチマテリアル化の達成には、特性の異なる材料同士を接合する技術の確立が必須条件となる。輸送機器分野では、脱炭素社会実現に向けて、車両のさらなる軽量化が求められており、鉄鋼とアルミニウムのマルチマテリアル化は最も関心の高い技術の一つとなっている。しかしながら、鉄鋼とアルミニウムの溶融溶接では、両材料の反応により接合界面に脆い金属間化合物が形成し、十分な継手強度が得られないため、構造部材への適用は困難とされてきたり。

近年、福本ら²⁾は、摩擦攪拌接合法(Friction Stir Welding : FSW)を用い、鉄鋼とアルミニウム合金の突合せ接合において、アルミニウム母材で破断するような接合材を作製することに成功した。FSW の模式図を図 1 に示す。アルミニウム同士のような同種材を FSW で接合する場合には、ツールの中心は両ワークの突合せ位置(接合界面)上に配置される。一方、鉄鋼とアルミニウムのような異種金属材料の FSW では、図 1 に示すようにプローブが鋼板をわずかに削ることによって、鉄鋼の接合面において新生面を現出させ、塑性流動しているアルミニウムを凝着させることで接合が達成される。過度な切削は接合温度の上昇と金属間化合物の形成を促進させ、継手強度の低下を招く^{3,4)}。そのため、高品質な接合材を安定的に作製するためには、接合前の被接合材と接合ツールの正確な位置調整が必須となり、これが異種金属 FSW 施工上の課題の一つとなっている。そこで、プローブによる切削を必要としない異種金属 FSW 技術を確立すれば、接合前の正確な位置調整が不要になると考え、アンカー効果を利用した異種金属

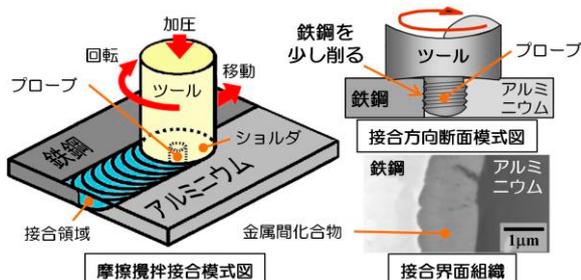


図 1 異種金属摩擦攪拌接合の模式図

FSW に着目した。具体的には、あらかじめ切削等で加工されたワーク表面の凹凸に、FSW によって塑性流動した材料を流入させて機械的に接合する。これまでに、機械加工によって溝形状を付与して FSW した研究報告⁵⁾はあるが、機械加工では付与できる凹凸形状に制限があり、凹凸形状と継手強度との関係は明らかになっていない。本研究では、任意の凹凸形状を形成できる付加製造法(Additive Manufacturing : AM)を活用することで、アンカー効果が最大限得られる凹凸形状の最適化を図り、高品質な異種金属 FSW 材をより安定して作製する接合技術を開発することを目的とする。

2. 実験方法

造形には、Yb ファイバーレーザを搭載したレーザ積層造形(L-PBF : Laser Powder Bed Fusion)装置(EOS 製

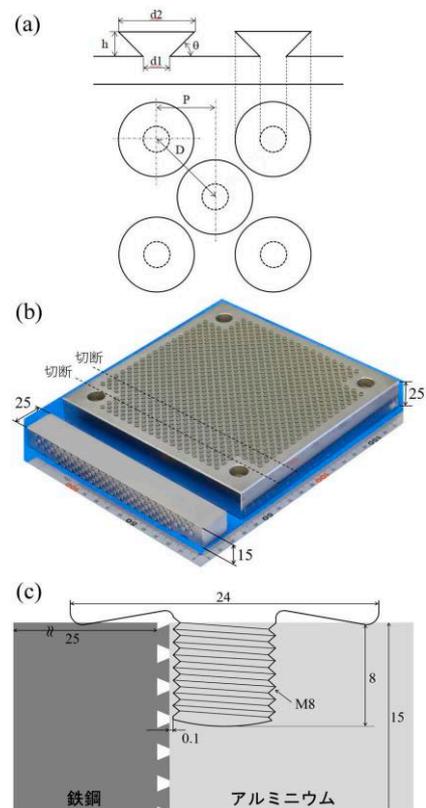


図 2 (a)突起形状の模式図、(b)AM 後のサンプル外観、(c)接合時の模式図

*大阪産業技術研究所 金属材料研究部 主任研究員

EOSINT M280)を使用した。平均粒径約 20 μm のマルエージング鋼ガスアトマイズ粉末を用いて、図 2(a)に示すような形状の突起を、厚さ 25 mm の S50C プレート上に造形した。図 2(b)に造形サンプルの外観を示す。作製した造形サンプルに対して図 2(b)に示すように、造形面を 15 mm 間隔で切断することによって、側面に突起形状を有する厚さ 15 mm、幅 25 mm の FSW 用板材を作製した。この FSW 用板材に対して、図 2(c)に示すように、厚さ 15 mm の A5052 アルミニウム合金を突き合わせて FSW を行った。FSW は、プローブ直径 8 mm、プローブ長さ 8 mm、ショルダ直径 24 mm の接合ツールを用い、プローブ外周を突起先端から約 0.1 mm 離れた位置にて、回転速度 1800 rpm、接合速度 25 mm/min で行った。なお、接合材の厚みに対して、プローブ長さが短いため、同じ接合条件で裏からも FSW することで厚さ 15 mm の接合材を作製した。

3. 実験結果および考察

3.1 FSW の塑性流動が突起形状に及ぼす影響

表 1 に示す 3 種類の造形物を用いて、図 2(b)に示す条件で接合し、突起形状に及ぼす FSW の塑性流動の影響を調査した。図 3 に、形状 A、B、C の FSW 材における接合界面の光学顕微鏡写真を示す。図より、形状 C では、図

表 1 積層造形の形状寸法

	D (mm)	P (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	h (mm)	θ (deg.)
A	5.7	4	1.7	3.7	1	45
B	4.2	3	1.1	2.1	1	45
C	2.8	2	0.6	2.6	1	45

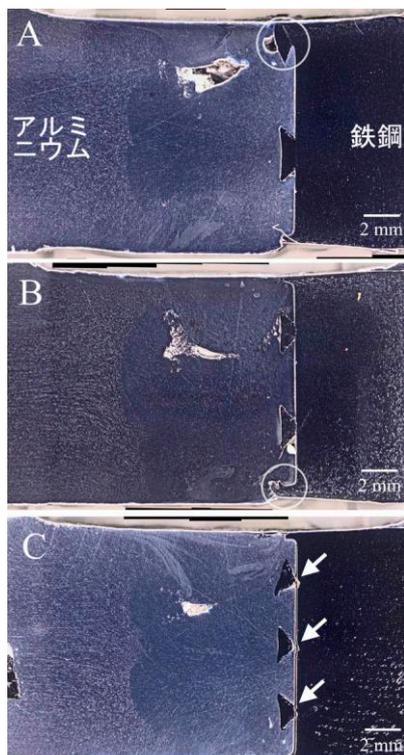


図 3 各突起形状の接合材断面光学顕微鏡写真

中矢印で示すように、FSW の塑性流動により突起が根元から破断していることが確認された。形状 A および B については、図中○で示す接合ツールのショルダの直接的な押圧による突起の変形が一部観察されるが、突起の根元から破断する様子は観察されなかった。以上のことから突起の根元直径が少なくとも 1.1 mm 以上であれば、FSW の塑性流動が接合後の突起形状に影響を及ぼさないことが明らかとなった。次に、形状 A および B の接合材の引張応力を調査したところ、それぞれ 44 MPa および 29 MPa となり、形状によって引張応力が変化することがわかった。

3.2 突起形状および配置の最適化

前節で、突起形状により接合材の引張応力が変化することがわかった。また、d1 が 1.1 mm 以上であれば、FSW 中に突起が破損しないことを確認できたことから、本節では、d1 を 1.1 mm に固定し、接合材の引張応力が最大となる突起形状と配置を、数値解析を用いて明らかにする。数値解析ソフトウェアは Simufact Forming を用い、解析モデルは図 4 に示すように、突起同士が最近接する領域を切り出した最小単位で評価した。要素はテトラ要素 (tetrahedral247)、メッシュサイズは 0.045 mm である。

はじめに、接合面に設ける突起の数 (密度) が接合材の引張応力に及ぼす影響を調査する。突起形状を $\theta = 45$ に固定し、突起の配置間隔である図 2 の P を変化させたときの応力変化を数値解析で算出した結果を図 5 に示す。図より、引張応力は、P が 3 mm から低下するに伴い増加し、P が 2.4 mm で最大ピークを示した後、低下することを確認し

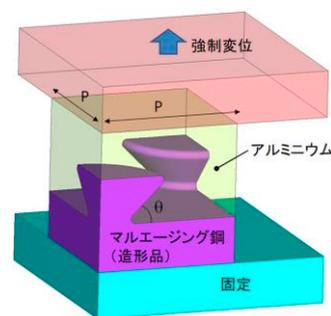


図 4 数値解析モデル

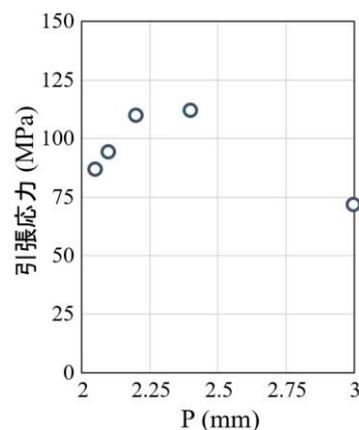


図 5 引張応力に及ぼす P の影響

た。接合材の引張応力は、突起傾斜角度(θ)によっても高くすることが可能と考えられる。そこで、引張応力に及ぼす θ の影響を調査した。図6は、引張応力と θ の関係を数値解析で求めた結果である。図より、引張応力は θ の増加とともに上昇し、 θ が 70° で極大を示し、 80° では少し低下することがわかる。これは、アンカー効果の低下によって突起の傾斜部ですべりが生じたためと予想される。以上の結果より、図2(a)に示す逆円錐台形状の突起において、最大引張応力を示す形状は、 $\theta = 70^\circ$ 、 $P = 1.5$ であることを数値計算によって導き出すことに成功した。

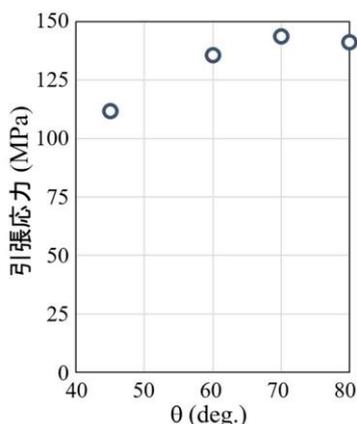


図6 引張応力に及ぼす θ の影響

次に、実際に突起形状試料を作製し、引張試験を行うことで、数値解析結果の妥当性を検証する。ここでは、数値解析を行った① $P = 3.0 / \theta = 45^\circ$ 、② $P = 2.7 / \theta = 45^\circ$ 、③ $P = 2.4 / \theta = 45^\circ$ 、④ $P = 2.3 / \theta = 45^\circ$ 、⑤ $P = 2.2 / \theta = 45^\circ$ 、⑥ $P = 1.5 / \theta = 70^\circ$ 、⑦ $P = 1.3 / \theta = 80^\circ$ の7つの突起形状を有する試料を用いてFSWし、接合材の引張応力を評価した。図7に引張試験結果を示す。図より、実験で得られた引張応力は、数値計算よりも4割ほど低い値となった。しかしながら、①から⑤の $\theta = 45^\circ$ 一定条件において、 P が小さくなるに従い引張応力が上昇し、 $P = 2.3$ で極大値を示した後、 $P = 2.2$ では応力が低下したことから、図5と同様の傾向が確認された。さらに、④($\theta = 45^\circ$ での最大引張応力値)、⑥、⑦を比較すると、 θ を高くすることで引張応力が上昇してお

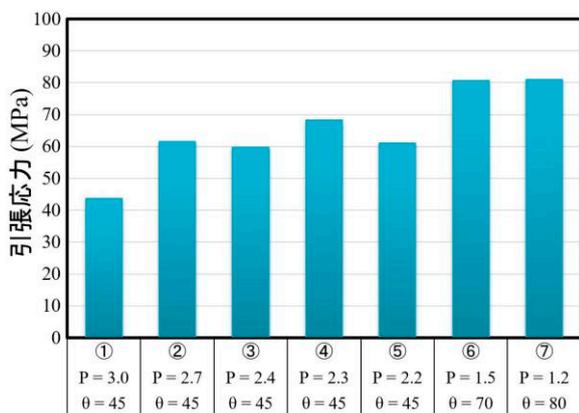


図7 種々の突起形状の接合材における引張応力

り、 θ が 70° および 80° で最大値を示したことから、引張応力の θ 依存性についても、数値計算結果と同様の傾向が確認された。以上のことから、絶対値については、今後の課題が残されたが、突起形状が接合材の引張応力に及ぼす影響の傾向は的確に予測できており、数値計算が突起形状設計に有効活用できることが示された。

3.3 金属とCFRPの異材接合への展開

前節で、表面に突起形状を付与することで、"異種金属接合材を容易に作製できること"および"AMにより突起形状を最適化することで、接合材の高強度化が図れること"を明らかにした。本節は、本技術が金属と炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)の異材接合技術として適用できるかを検証する。突起形状は表1におけるCとし、図8に示すように、長さ35 mm、幅9.5 mm、厚さ6 mm、突起高さ0.3 mmの試験片に切削加工した。接合に用いる樹脂は熱硬化性炭素繊維プリプレグ(樹脂含有率25%、繊維直径 $7\mu\text{m}$ 、シート厚さ0.1 mm)である。接合材の引張せん断応力に及ぼすプリプレグの積層方向の影響も調査するため、図8に示すように、引張試験時の引張方向と炭素繊維との方向が異なる3種類(TP1~TP3)の試料を作製した(AM接合材と称す)。プリプレグの硬化兼接合条件は、真空、 180°C 、1時間である。また、比較材として、過去の研究報告⁹⁾を参考にし、ファイバーレーザー溶接機を用いて幅約 $50\mu\text{m}$ 、深さ約 $100\mu\text{m}$ の溝を約0.3 mm間隔で基盤目状に加工し、TP1と同じ積層方法でCFRPを加熱硬化・接合させた試料を作製した(レーザー接合材と称す)。図9(a)および(b)は、TP1の接合部近傍における炭素繊維の軸方向および垂直方向の断面

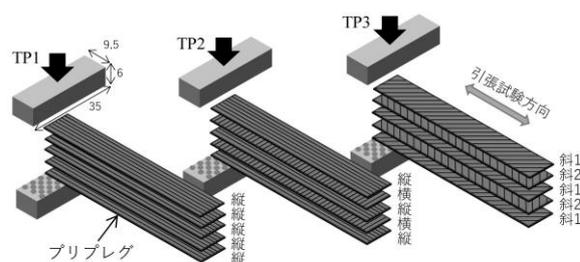


図8 プリプレグの積層方法模式図

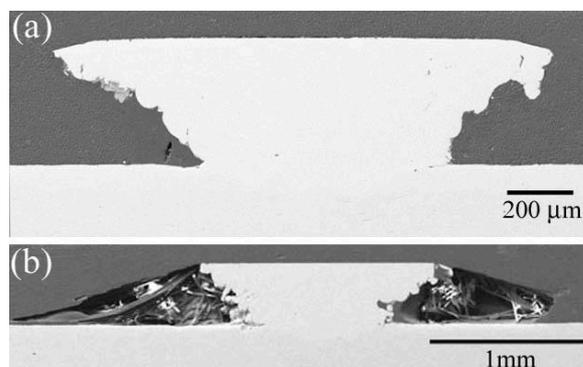


図9 積層造形接合試料の断面SEM写真 (a)炭素繊維軸方向断面 (b)炭素繊維垂直方向断面

SEM 写真である。図 9(a)では、突起裏側の隙間まで炭素繊維が侵入していたが、図 9(b)では、炭素繊維が突起裏側の隙間まで侵入しておらず、炭素繊維の方向によって、突起の隙間への侵入のしやすさが異なることがわかった。図 10 に引張せん断試験結果を示す。なお、図の縦軸の引張せん断応力は、破断荷重を CFRP の断面積で除した値である。図より、炭素繊維が引張方向に平行な TP1 が最も高い引張せん断応力を示した。斜めに積層した TP3 は最も高い伸びを示したが、引張せん断応力は最も低くなった。また、TP1 はレーザー接合材よりも高い応力を示した。図 11 に、レーザー接合材の接合部近傍における炭素繊維の軸方向および垂直方向の断面 SEM 写真を示す。図より、レーザー加工では溝幅が狭く、炭素繊維が溝内部まで侵入していないことが確認できる。一方、AM 接合材では、図 9 に示すように、突起裏側まで炭素繊維が侵入していない箇所が一部で存在するが、多くの炭素繊維が突起の隙間に侵入していることから、炭素繊維のアンカー効果が働いたため、AM 接合材がレーザー接合材より高い引張せん断応力を示

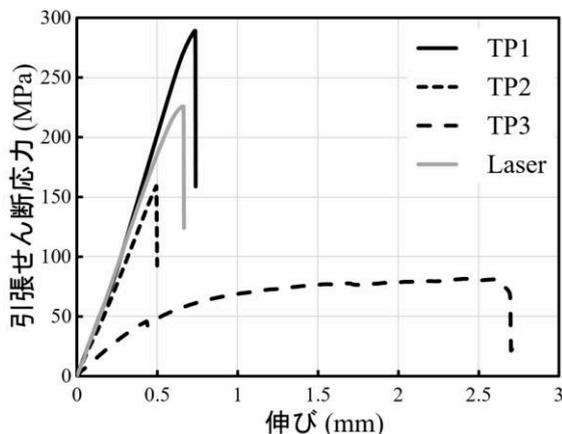


図 10 種々の接合材の引張せん断応力と伸びの関係

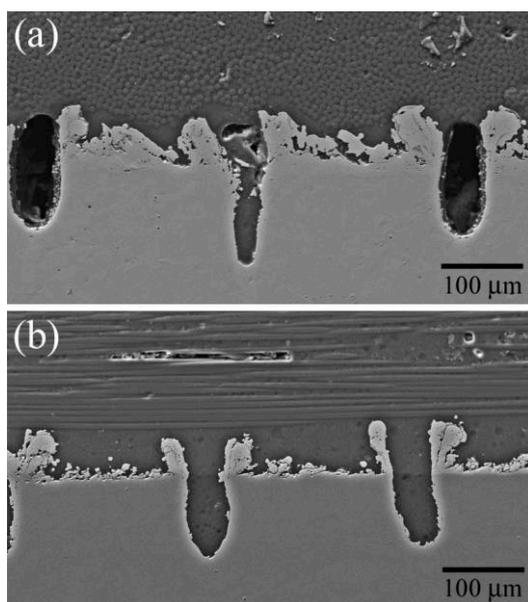


図 11 レーザ加工接合材の断面 SEM 写真 (a)炭素繊維軸方向断面 (b)炭素繊維垂直方向断面

したと考えられる。以上のことから、表面形状を制御することで、従前技術以上の引張せん断応力を有する金属と CFRP の接合材を作製できることを明らかにした。今後、数値計算を活用し、炭素繊維が突起の隙間に侵入しやすかつアンカー効果がより働く形状を明らかにすることができれば、さらなる応力上昇が期待できる。

4. まとめ

本研究では、数百 μm から数 mm の突起を表面に作製し、突起によるアンカー効果を利用した異材接合方法を開発することを目的とし、突起形状が接合材の引張応力に及ぼす影響を数値計算および実験により検証した。その結果、接合材の引張応力は、突起の形状に強く依存し、数値計算によってその依存性を予測できることを明らかにした。また、本技術を金属と CFRP の異材接合に適用したところ、従前技術よりも高い引張せん断応力を示すことを確認した。本技術は、“突起の形成”と“接合”の 2 つのプロセスに分けられる。本研究では、“突起の形成技術”として AM を、“接合技術”として FSW および熱圧着を用いたが、これら以外の技術でも適用できることが本技術の特徴である。例えば、“突起の形成技術”であれば、切削・鋳造・鍛造などが、“接合技術”であれば、摩擦圧接・鍛造・熱間等方圧加圧法(Hot Isostatic Pressing: HIP)・鋳造・アーク溶接・レーザー溶接などが挙げられる。また、金属や CFRP を含む樹脂材料、セラミックスなど様々な材料の組合せで接合できる可能性を秘めている。以上のように、本技術は、従前技術に比べて適用可能な加工技術が多く、様々な生産技術分野で利用できるため、今後、新しいマルチマテリアル化技術として大きく発展することが期待される。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成 (AF-2019013-B2)により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 森田泰・藤田幾雄：溶接技術, 11 (1974), 20.
- 2) 福本昌宏・椿正己・下田陽一朗・安井利明：溶接学会論文集, 22-2 (2004), 309.
- 3) T.Tanaka・T.Morishige・T.Hirata：Scripta Mater., 61-7 (2009), 756.
- 4) 田中努・根津将之・内田壮平・平田智丈：軽金属, 70 (2020), 503.
- 5) 社団法人溶接学会編：摩擦攪拌接合—FSW のすべて—, (2006), 産報出版.
- 6) 平成 29 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「CFRP と金属材料の直接接合技術の開発」研究開発成果等報告書