

3次元表面形状制御を利用した革新的マルチマテリアル化技術の構築

大阪産業技術研究所 金属材料研究部

主任研究員 田中 努

(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019013-B2)

キーワード：摩擦攪拌接合，異種金属，付加製造，アンカー効果

1. 研究の目的と背景

近年、ものづくり産業においては、高機能で多様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」に高い関心が集まっている。特に、軽量化を目的とした鉄鋼とアルミニウムは、最も注目されている組み合わせの一つであるが、一般的な溶融溶接では、接合時の熱により接合界面に金属間化合物(以下、IMC)が大量に生成し、接合強度が著しく低下することが問題となっている¹⁾。最近、接合温度の低い摩擦攪拌接合(以下、FSW)の適用により、IMCの生成を抑制し、高品質な異種金属接合材を作製できることが見出された²⁾。異種金属FSWでは、図1に示すように、硬質ワーク(鉄鋼)をツールで削ることで清浄面を露出させ、その面に対して塑性流動した軟質材料(アルミニウム)を押し付けることによって、材質的に接合する。しかしながら、接合時におけるツールとワークの過剰な接触は、過度の発熱とそれによる多量のIMCの生成をもたらすことから、限られた接合条件でしか高品質な異種金属FSW材を作製できない^{3,4)}。そのため、適正接合条件範囲の広い異種金属FSW技術の開発が強く求められている。そこで、本研究では、アンカーを利用した接合法に着目した。これは、あらかじめ切削等で加工されたワーク表面の凹凸に、FSWにより塑性流動した材料を流入させ、機械的に接合する技術である。しかしながら、これまで報告されている切削加工では、付与できる凹凸形状に制限があり、凹凸形状と接合強度との関係は明らかになっていない。そこで、本研究では、付加製造法を用いることで、鉄鋼表面に任意の凹凸形状を形成させ、接合強度を最大化できる凹凸形状を明らかにするとともに、接合時の課題を抽出し、その改善法について検討した。本報告では、その検討結果を述べる。

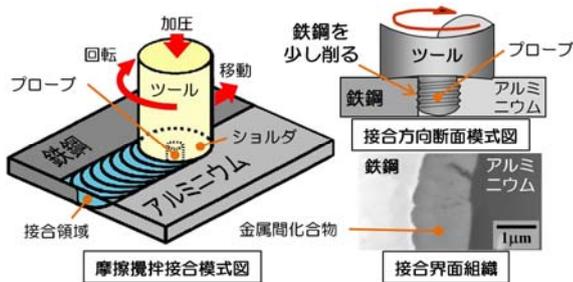


図1 異種属摩擦攪拌接合模式図

2. 実験方法

鉄鋼表面への凹凸形状の造形には、Ybファイバーレーザを搭載したレーザ積層造形(L-PBF)装置(EOS製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)に示す形状の突起を、厚さ20mmのS50Cプレート上に造形した。ここで、突起高さは1mmとし、Pはxおよびy方向における近接する突起の中央間距離、Gは近接する突起間の最小間隙、d1、d2およびθは逆円錐台突起の根元部直径、先端部直径、プレート面からの傾斜角度である。造形後、造形面を9mm間隔で短冊状に切断し、図2(b)に示す側面に突起を有した、厚さ9mm、幅20mmの板材を準備した。接合に用いるアルミニウム材は、厚さ10mmのA5052である。FSWには、プローブ直径8mm、プローブ長さ8mm、ショルダ直径24mmの接合ツールを使用した。接合ツールは、プローブ外周を突起先端から約0.2mm離れた位置に挿入し、回転速度1800rpm、接合速度20mm/minで接合を行った。FSWの塑性流動により突起が破損しないd1を調査したところ、d1が1.1mm以上であれば、FSWの塑性流動により突起が破損しなかったことから、d1を1.1mmで固定した。接合強度を最大にする凹凸形状の数値解析には、Simufact Formingを用いた。解析モデルは図3に示す通りである。要素はテトラ要素(tetrahedral1247)、

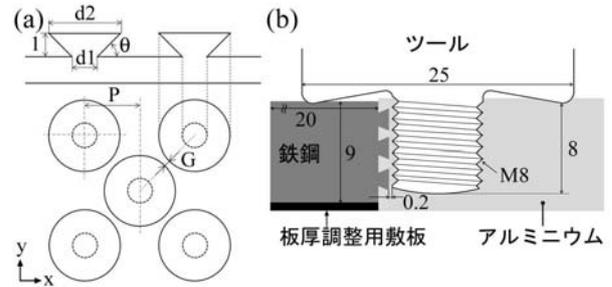


図2 (a)造形の基準形状と(b)接合の模式図

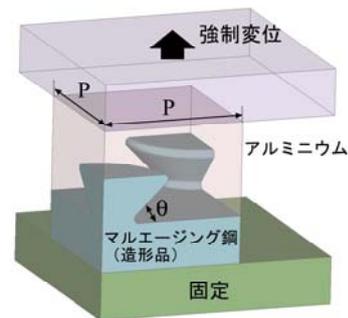


図3 数値解析モデル

メッシュサイズは0.045 mmとした。また、接合材に対し、接合方向の垂直断面における組織観察および接合面垂直方向の引張試験を行った。

3. 実験結果

3. 1. 数値解析による最適形状の検討

まずはじめに、突起の間隔である P が引張荷重に及ぼす影響を調査した。 θ を 45° とし、 P を 3、6、9 mm に変化させたときの荷重変位曲線を図 4 に示す。図より、最大引張荷重は P の値によらず、ほぼ一定であることがわかる。図 5 には、 $P = 3$ の場合の最大主応力の分布を示す。図中の円で示す、アルミニウムが突起上面先端に引っ掛かる領域において、アルミニウムの引張強さを超える 300 MPa 以上の応力が局所的に負荷されていることから、この領域で変形・破断すると予想される。この局所応力部は突起先端部の円に沿って生じることから、単位面積当たりには占める突起先端円の周長を長くすれば、応力の局所化が抑制され、引張応力が上昇すると考えられる。突起先端円の周長を長くするためには、 P を小さくすること、もしくは θ を大きくすることで突起の数密度を増加させる必要がある。しかしながら、 P の低下は、突起間の隙間(図 2 の G)の狭小化による応力集中をもたらすことから、破断位置が突起間の隙間に移行する P の値が存在すると考えられる。また、 θ の増加は、突起の数密度が増加する一方、アンカー効果は低下すると予想されるため、応力が最大となる θ 値が存在すると考えられる。そこで、 θ を 45° に固定し、 P を変化させたときの引張応力を計算した。その結果を図 6 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、低下した。また、 P が 2.2 mm において、突起間の隙間(図 2 の G 部近傍)で 300 MPa 以上の応力集中が確認され、この領域で変形・破断することが示唆された。以上のことから、 $P=2.4$ における G (この場合約 0.29 mm) を維持することで、最大引張応力を引き出せると予想できる。次に、G を 0.29 mm で固定し、 θ を変化させたときの引張応力の計算結果を図 7 に示す。図より、引張応力は、 θ の増加とともに上昇し、 θ が 70° でピークを示した後、低下した。この結果から、 θ が 80° で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、引張応力が低下したと考えられる。以上の結果より、図 2 に示す形状において、最大引張応力を示す形状は、 $\theta = 70^\circ$ 、 $P = 1.5$ であることが数値解析によって導き出された。

3. 2. 接合材の特性評価

数値解析結果を基に、① $P = 3.0 / \theta = 45$ 、② $P = 2.7 / \theta = 45$ 、③ $P = 2.4 / \theta = 45$ 、④ $P = 2.3 / \theta = 45$ 、⑤ $P = 2.2 / \theta = 45$ 、⑥ $P = 1.5 / \theta = 70$ 、⑦ $P = 1.3 / \theta = 80$ の 7 つの突起サンプルを作製し、FSW および引張試験を行った。図 8 に引張試験結果を示す。実験で得られた引張強度は、数値解析よりも 4 割ほど低い値となっているが、引張強

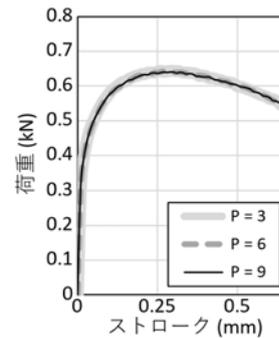


図 4 引張荷重におよぼす P の影響

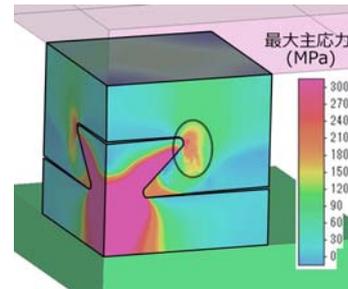


図 5 $P = 3$ の時の最大主応力分布

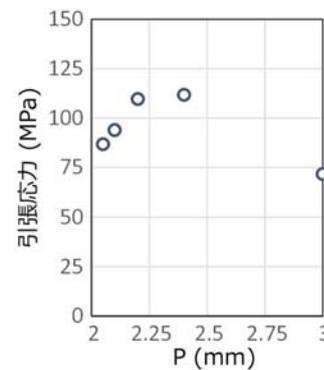


図 6 引張応力に及ぼす P の影響

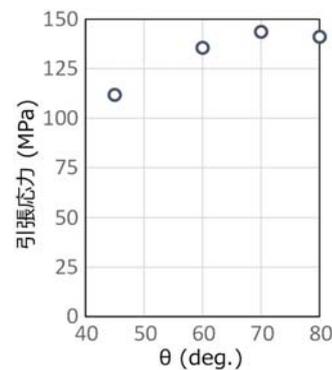


図 7 引張応力に及ぼす θ の影響

度に対する P および θ の影響については、図 6 および 7 に示した数値解析結果と同じ傾向を示した。また、数値解析では P が 1.5 mm、 θ が 70° の突起において最大引張強度を示しており、実際の引張試験においても最大引張強度 81 MPa を記録した。以上のことから、数値解析が突起設計に有効に活用できることを明らかにした。図 9 には、① $P = 3.0 / \theta = 45$ を用いた接合材の突起部の断面組

織写真を示す。図より、特に突起の付け根部において、アルミニウムが充填されていない領域が一部観察されたが、摩擦攪拌によって、傾斜 45° の突起の裏側でも、アルミニウムが充填されていることがわかった。ただし、接合界面に着目すると、拡大写真からも明らかなように、鉄鋼とアルミニウムは連続しておらず、その間には黒いコントラストで確認される欠陥（隙間）が存在している領域が多く観察された。すなわち、図 8 の引張試験結果は、充填されたアルミニウムの引掛り（アンカー効果）のみで得られた強度であり、従前技術である切削を利用した異種金属 FSW で見られるような鉄とアルミニウムの材質的接合力は寄与していないことがわかった。

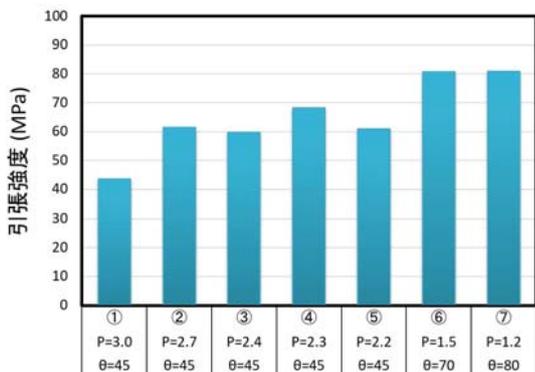


図 8 種々の突起形状を用いた接合材の引張試験結果

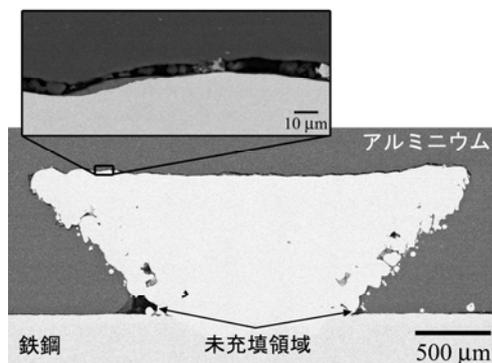


図 9 ①P = 3.0/θ = 45 を用いた接合材の突起部断面

3. 3. 接合強度に及ぼす表面処理の影響

前節の組織観察により、鉄鋼とアルミニウムは材質的に接合しておらず、引張強度はアンカー効果のみで得られることがわかった。したがって、アンカー効果に加え、鉄とアルミニウムを材質的に接合できれば、さらなる強度上昇が期待できる。そこで、鉄鋼を削ることなく、発熱と材料流動だけで鉄とアルミニウムを材質的に接合する方法について検討する。金属表面には、汚れや酸化スケールが存在するため、金属を接合する際には、これらの汚染層を除去することが必須となる。異種金属 FSW では、これらの汚染層を除去する方法として、接合ツールにより接合面を切削するが、金属めっきの前処理工程として知られる脱脂や酸洗いによっても、汚染層を除去することができる。つまり、めっきと接する素材表面（本

研究では鉄鋼の接合面を想定）は、汚れや酸化スケールのない清浄な面を維持していることから、FSW 中の発熱と材料の塑性流動により、めっき層を剥離し清浄な鉄表面を現出させれば、接合ツールで鉄鋼を削ることなく、鉄とアルミニウムを材質的に接合できると考えられる。しかしながら、上記のような挙動が期待できるめっきの種類は、明らかになっていない。そこで、突起のない平坦な鉄鋼表面に、金、銀、クロム、銅、ニッケル、ニッケル-リン、錫の 7 種類の金属めっきを施した後、アルミニウムと FSW することで、鉄とアルミニウムが材質的に接合するめっきの有無を調査した。表 1 に、めっきの種類と接合可否の結果を示す。表より、銀とニッケルめっきを施したサンプルでは、FSW 後、鉄鋼とアルミニウムが分離することなく一体化しており、接合が可能であることが確認できた。一方、それ以外のめっきについては、FSW 後も鉄鋼とアルミニウムは分離したままであり、接合できなかった。そこで、銀めっきとニッケルめっきにおいて、断面組織観察および成分分析を実施し、接合状態を調査した。図 10 および図 11 に、銀およびニッケルめっき鋼の FSW 後の接合界面の分析結果を示す。銀めっきの接合材断面を分析した図 10 より、銀は鉄鋼表面には観察されず、アルミニウム内に分散していた。また、接合界面には 5 μm 以上の厚さを有する鉄とアルミニウムの IMC が生成していることから、FSW 中の塑性流動により、鉄鋼表面の銀めっきが剥離（消失）し、露出した鉄の清浄面とアルミニウムが金属拡散反応を起こしたと考えられる。一方、図 11 のニッケルめっき鋼の接合材の場合には、ニッケルは接合後も鉄鋼表面に存在しており、FSW による発熱と塑性流動では、ニッケルめっきを鉄鋼表面から引き離すことはできなかった。しかしながら、ニッケルとアルミニウムの界面で金属拡散反応が起こり、ニッケルとアルミニウムの IMC が生成することで、鉄鋼とアルミニウムが材質的に接合することが認められた。以上の結果より、鉄鋼表面に、銀もしくはニッケルめっきを施すことにより、接合界面を削ることなく、鉄とアルミニウムを材質的に接合できることがわかった。そこで、前項の 3. 2. で示した②から⑦の突起形状に対し、銀およびニッケルめっきを施し、FSW 後、引張試験を行うことで、各めっきが引張強度に及ぼす影響を調査した。図 12 に引張試験結果を示す。比較のため、図 8 で示した未処理の場合の結果も示している。図中の銀めっき鋼の接合材に着目すると、θが 45° の場合は、未処理に比べ

表 1 めっきの種類と接合可否

Au	×
Ag	○
Cr	×
Cu	×
Ni	○
Ni-P	×
Sn	×

て引張強度に及ぼす影響は小さいが、 θ が 70° もしくは 80° では、未処理材よりも引張強度が約 1.3 倍高くなっていることがわかる。一方、ニッケルめっき鋼の接合材に着目すると、すべての突起形状において最大の引張強度を示しており、特に形状⑦において、最大引張強度 125 MPa を示した。これは、未処理材の 1.5 倍、アルミニウム母材強度の約 63% に相当する。ニッケルめっき鋼と銀めっき鋼の接合材で、引張強度の差が現れた要因としては、接合界面に生成する IMC の種類や厚さ、金属拡散反応のしやすさなどが考えられる。今後、めっきの種類や金属拡散反応のしやすさに着目した研究開発を行うことにより、本接合技術による異種金属接合材の更なる高強度化が期待できる。

4. 結論

本研究では、数百 μm の突起および摩擦攪拌接合を利用した鉄鋼とアルミニウム合金の接合に着目し、接合強度を最大化するための突起形状および接合手法を調査した。鉄鋼の接合面に逆円錐台の突起を配列した構造に注目し、鉄鋼とアルミニウムの接合材において、接合面垂直方向応力に及ぼす突起の間隔や錐台の傾斜角度の影響を数値解析で求めるとともに、その突起形状を付加製造法で作製し、FSW によって接合した試験片を引張試験に供することで、数値解析との比較を行った。実験によって求めた引張強度は、数値計算の値よりも低くなったが、突起形状と引張強度との相関性はほぼ一致しており、数値解析が突起形状設計に活用できることが確認できた。また、付加製造のままで FSW した接合材では、金属拡散反応が起らず、鉄とアルミニウムが材質的に接合されていないため、引張強度は突起によるアンカー効果のみに依存することがわかった。そこで、金属めっきに着目し、FSW 時のツールにより接合面を切削することなく、鉄とアルミニウムの金属拡散反応を促進させるめっきの種類を調査したところ、銀とニッケルめっきによって、材質的接合がなされることを見出した。この知見を活かし、めっきした突起を設けた接合材で引張試験を行ったところ、引張強度は未処理材に比べて、銀めっきでは 1.3 倍、ニッケルめっきでは 1.5 倍、改善させることに成功した。今後、めっきや突起形状のさらなる最適化により、より高強度な異種金属接合材の作製が期待できる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2019 年度一般研究開発助成 (AF-2019013-B2) により実施したものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森田泰、藤田幾雄、溶接技術 11 (1974) 20-26.
- 2) 福本昌宏、椿正己、下田陽一郎、安井利明、溶接学会論文集 22、2 (2004) 309-314.

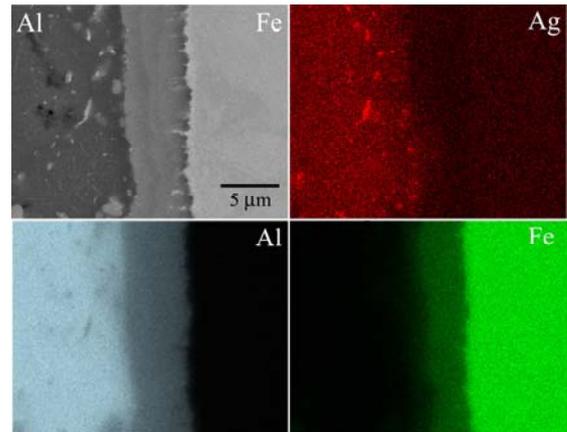


図 10 Ag めっきを施した鉄鋼とアルミニウムの接合材断面の接合界面近傍における EDS 分析結果

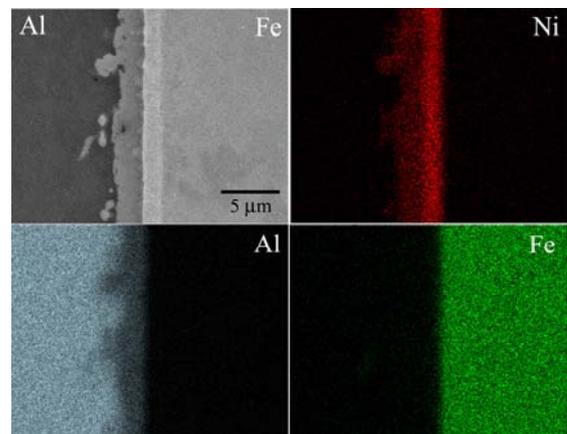


図 11 Ni めっきを施した鉄鋼とアルミニウムの接合材断面の接合界面近傍における EDS 分析結果

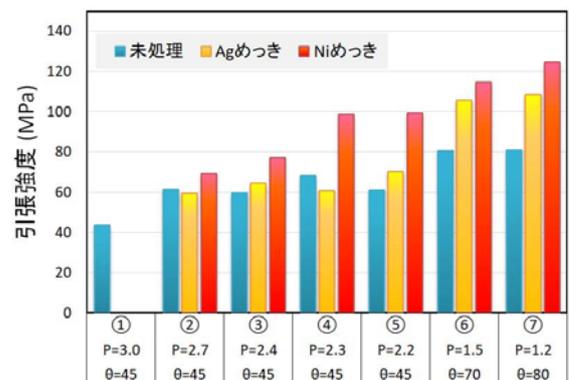


図 12 Ag および Ni めっき施した鉄鋼とアルミニウムの接合材における引張試験結果

- 3) T. Tanaka, T. Morishige, T. Hirata, Scripta Mater. 61-7 (2009) 756-759.
- 4) 田中努、根津将之、内田壮平、平田智丈、軽金属 70、11 (2020) 503-509.