

溶接管理技術者の体験紹介**合金化溶融亜鉛めっき鋼とアルミニウム合金の
摩擦アンカー接合における問題点と対策**広島県立総合技術研究所
坂村 勝**1. はじめに**

近年、地球温暖化防止策として輸送機器産業では燃費向上を目的とした車体の軽量化が推進されている。その一つとして、アルミニウム合金と鋼のハイブリッド構造が推奨されており、これに伴い、アルミニウム合金と鋼の異種金属接合が必要となっている。また、現在、輸送機器に利用されている鉄鋼材料の多くは防食のために亜鉛めっきが施されている。したがって、接合対象としてアルミニウム合金と亜鉛めっき鋼の組み合わせを視野に入れる必要がある。

本稿では、筆者らが開発した異種金属接合方法である摩擦アンカー接合について紹介するとともに、本接合法を合金化溶融亜鉛めっき鋼（GA 鋼）に適用した際の問題点とその対策について解説する。

2. 摩擦アンカー接合とは

一般的な摩擦攪拌点接合技術による異種金属接合は、**図 1 (a)** に示すように、重ねて配置された 2 枚（アルミニウム合金／鋼）の供試体に、接合ツールを回転させながら押し当てる接合手法である。本接合手法では、先端に突起（プローブ）のある接合ツールを用いるが、接合ツールの耐久性の観点から上板のアルミニウム合金のみを攪拌し接合している事例が多い。この場合、3 枚以上の複数枚の重ね継手に適用することができず、電食対策としてアルミニウム合金と鋼の間にシール剤などを挟んだ条件では接合が困難という課題が残る。そこで、著者らは、接合ツールの耐久性を高めるために、先端が球面形状の接合ツールを考案した。本接合ツールによる接合手法は、**図 1 (b)** に示すように、接合ツールを回転させながら下板の鋼側まで押し込むことにより、**図 1 (c)** に示すように下板の鋼からなる突起部を上板のアルミニウム合金内へ形成し、その突起部のアンカー効果により接合する方法である。前述のとおり、一般的な摩擦攪拌点接合による異種金属接合法では、3 枚以上の重ね継手を接合することができず、摩擦攪拌点接合を 3 枚以上のアルミニウム合金／鋼に適用した事例は見当たらない。これに対して、摩擦アンカー接合は 3 枚以上の重ね異材点接合にも適用が可能である。

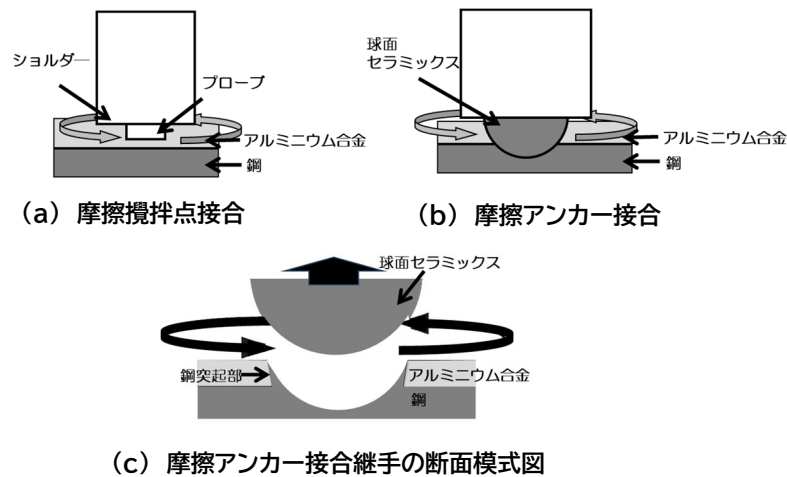


図1 摩擦攪拌点接合と摩擦アンカー接合及び断面模式図

3. アルミニウム合金/鋼の摩擦アンカー接合

図2に上板 A5052 (板厚 1mm)、下板 SPCC (板厚 1mm) の重ね材に、ツール押込量 (Plunge depth (Pd)) 1.5mm で摩擦アンカー接合した際の断面写真の一例を示す。下板である鋼が球面に沿って突起を形成していることが分かる。図3にはツール押込量を 1.2~1.75mm に変化させた際の引張せん断強度及び十字引張強度試験結果を示す。図に示すように、引張せん断強度、十字引張強度ともツール押込量の増加とともに高くなる傾向を示し、それぞれ最大で約 3.6kN/点、約 2.3kN/点に到達した。宮川ら¹⁾は A5052 と SPCC をプローブ無し接合ツールで重ね点接合し、引張せん断強度約 2.7kN/点を達成しているものの、十字引張強度は約 0.6kN/点にとどまっている。この結果と比較すると、摩擦アンカー接合で作製した接合継手の強度 (特に十字引張強度) は明らかに高く、鋼突起部のアンカー効果が強度向上に寄与したものと考えられる。

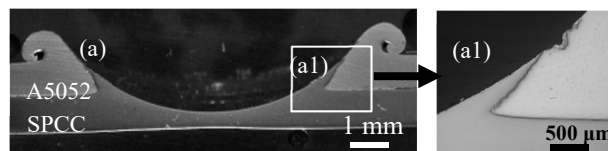


図2 A5052/SPCC 接合材の断面マクロ及び光学顕微鏡写真 (ツール押込量 1.5mm)

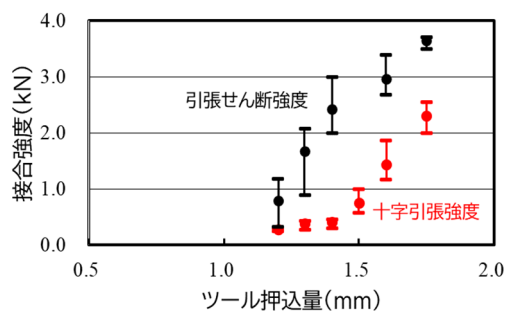


図3 A5052/SPCC 接合材のツール押込量と接合強度の関係

4. アルミニウム合金/GA 鋼の摩擦アンカー接合の問題点

次に、図 4 に上板 A5052 (板厚 1mm)、下板 GA 鋼 (板厚 1.2mm、めっき厚 8 μ m) の重ね材に摩擦アンカー接合を適用した際の断面写真の一例を示す。図 4 に示すとおり、A5052/SPCC の場合 (図 2) に比し鋼突起の高さが低く、ひだ形状を呈し、鋼突起の近傍には大量の化合物層 (薄灰色の領域) が認められる。そして、鋼突起の右側には、Zn が A5052 中に流入し、割れが発生している。Al-Zn 系は共晶温度 381 $^{\circ}$ C の共晶点を有していることから、この割れは共晶液相化によるものと思われる。なお、これらの現象は、熱が加わった状態で GA めっき層とアルミニウム合金が直接接触し、GA めっき層が Zn 液相と FeAl 金属間化合物を含む層に変質することに起因すると推察している。詳細は既報^{2,3)}を参照されたい。

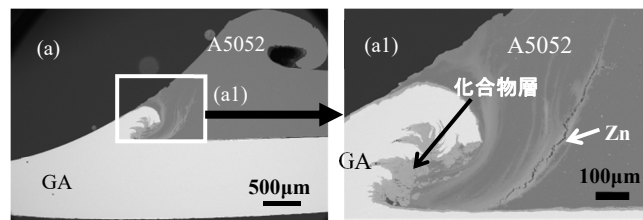


図 4 A5052/GA 鋼接合材の断面 SEM 写真 (ツール押込量 1.5mm)

次に、得られた継手のツール押込量と引張せん断強度及び十字引張強度の関係を図 5 に示す。引張せん断強度は最大で約 2.7kN/点であるのに対し、十字引張強度は約 0.8kN/点と非常に低位となっている。これは、前述の突起高さが低いこと、鋼突起近傍に大量の化合物層が存在すること、及び A5052 中に Zn 流入起因の割れがあることが原因であると思われる。

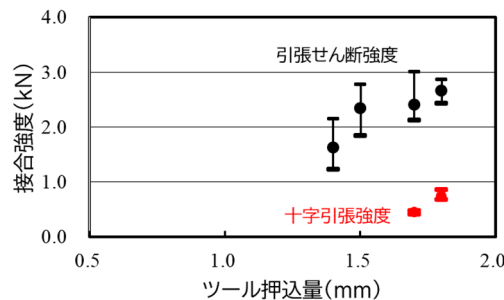


図 5 A5052/GA 鋼接合材のツール押込量と接合強度の関係

5. アルミニウム合金/GA 鋼接合の強度向上対策

5.1 薄鋼板インサートの効果

前述のとおり、A5052 と SPCC の重ね継手のような接合ができないのは、熱が加わった状態で GA めっき層に A5052 が接することが原因であると推定している。一方、摩擦アンカー接合は 3 枚以上の重ね点接合が可能である⁴⁾ことから、A5052 と GA 鋼の重ね点接合において、その間に鋼インサート材を挿入して、A5052 と GA めっき層の直接接触を防止することを試みた。図 6 に、上板 A5052 (板厚 1mm)、下板 GA 鋼 (板厚 1.2mm、めっき厚 8 μ m) として、間に板厚 0.6mm の SPCC をインサートし、ツール押込量を 1.4~2.4mm と変化させた際の、鋼突起部と A5052 の接合部近傍の SEM

写真を示す。図 6 に示すように、インサート材を挟むことで A5052 中に接合ツールの球面に沿った、真っ直ぐな鋼突起が形成され、鋼突起の周辺に化合物層は存在せず、割れも認められない。

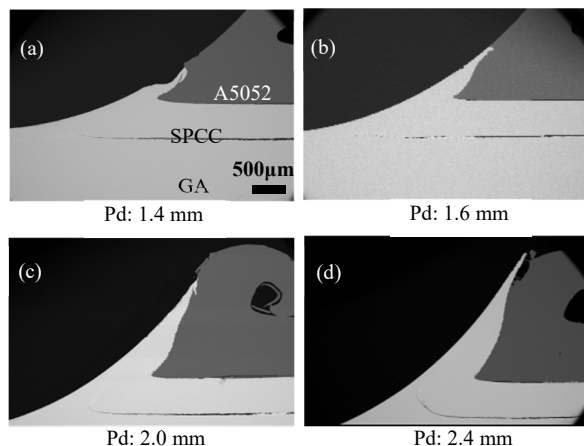


図 6 SPCC をインサートした A5052/GA 鋼接合材の鋼突起部近傍 SEM 写真

図 7 に接合強度評価結果を示す。引張せん断強度はツール押込量とともに増大し、ツール押込量 2.4mm で約 3.2kN/点に達している。一方、十字引張強度はツール押込量 2.4mm では低下しているものの、2.2mm までは増大し約 2.6kN/点に達している。

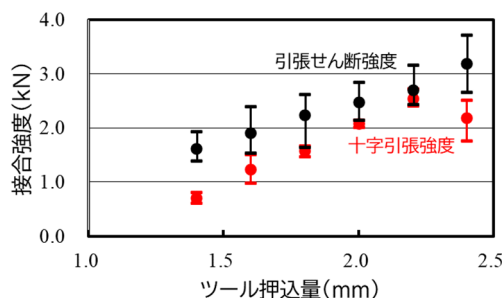


図 7 SPCC をインサートした A5052/GA 鋼接合材のツール押込量と接合強度の関係

5.2 アルマイト皮膜の効果

次に、GA めっき層とアルミニウム合金の接触を防止する方法として陽極酸化処理を行ったアルミニウム合金の適用を検討した。但し、本実験では比較的入手が容易な陽極酸化処理を行った A1100（陽極酸化 A1100）を用いた。図 8 に、陽極酸化 A1100（板厚 1mm、皮膜厚さ 10 μ m）と GA 鋼を用い、ツール押込量を 1.5mm として接合した際の突起部近傍の断面 SEM 写真を示す。図 4 の A5052/GA 鋼接合材の突起部近傍と比較すると、鋼突起の高さ、ひだ形状は改善され、金属間化合物層生成は大幅に抑制されていることが分かる。

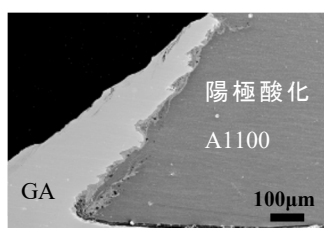


図 8 陽極酸化 A1100/GA 鋼接合材の断面 SEM 写真（ツール押込量 1.5mm）

図9に接合強度評価結果を示す。ツール押込量 1.8mm の条件で、引張せん断強度は約 1.2kN/点、十字引張強度は約 0.6kN/点に達している。本実験で用いた陽極酸化 A1100 と 4（アルミニウム合金と GA 鋼の摩擦アンカー接合の問題点）及び 5.1（薄鋼板インサートの効果）で用いた A5052 の引張試験を行ったところ、引張強度は陽極酸化 A1100 で約 130MPa、A5052 で約 230MPa であった。このように陽極酸化 A1100 は、A5052 に比し母材強度が低位であるため、得られた強度そのものの比較はできない。そこで、これまでに得られている摩擦アンカー接合継手の引張せん断強度と十字引張強度の比^{2,4,5)}をグラフ化したものを図10に示す。鋼突起が図2に示したように球面ツールに沿って細く長く伸びた形状を呈した場合は、十字引張強度の引張せん断強度に対する比は 0.5~1.0 になることが分かる（図中の①、②、③）。これに対して、A5052/GA 鋼継手の場合は、その比が約 0.3 と非常に低位となっている。一方、本実験で得られた陽極酸化 A1100/GA 鋼の継手は約 0.45 となっている。これは、鋼突起の高さ及び形状が改善され、鋼突起近傍の金属間化合物生成が抑制されたことに起因するものと推定している。

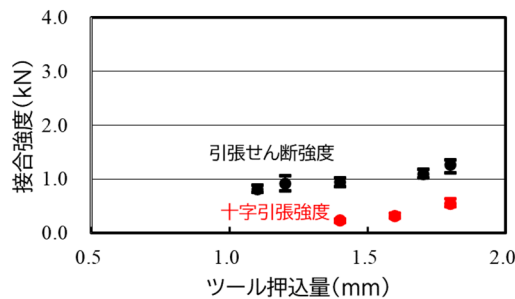


図9 陽極酸化 A1100/GA 鋼接合材のツール押込量と接合強度の関係

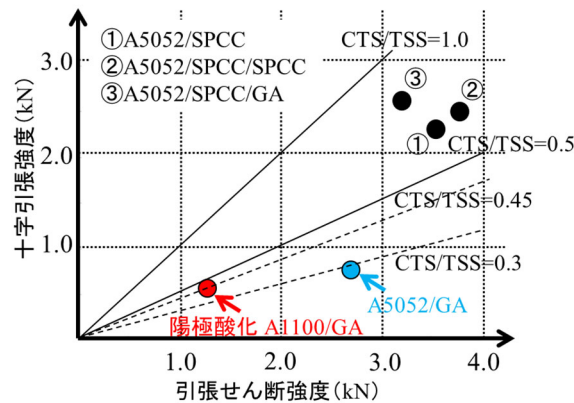


図10 各種摩擦アンカー接合継手の引張せん断強度と十字引張強度の関係

6. おわりに

本稿では、まず、摩擦アンカー接合について紹介をし、特に本接合方法で得られた継手の十字引張強度が高いことを示した。しかし、世の中で利用されている鋼板にはめっきが施されていることが多く、その中でも自動車用としては亜鉛めっきが施されていることがほとんどである。そこで、次に、アルミニウム合金と合金化溶解亜鉛めっき鋼（GA 鋼）に摩擦アンカー接合を適用した際の問題点について紹介した。本接合ではアルミニウム合金と GA 鋼の界面で起こる化学反応をいかに抑制するかが課題である。その対策として直接接触を抑制する方法の効果を確認することができた。しかしな

がら、コスト、製造し易さ等を勘案するともっとシンプルな方法が好ましく、そのような方法を開発すべく現在も鋭意努力しているところである。

なお、本稿で紹介した摩擦アンカー接合を含め、摩擦攪拌現象を利用した接合技術の開発を継続的に実施するため、広島県では経済産業省の補助金を利用して令和2年3月に新たに摩擦攪拌接合装置（芝浦機械(株)製 MPF2114FS）を導入した（図11）。本装置は先端の加工ヘッドが取り換え可能であることを特徴とし、現在のところ表1に示す3種類のヘッドを有しており、最大荷重2tonの低速回転接合から最大回転数30000rpmの超高速回転接合まで対応可能である。本装置は、広島県内の企業だけでなく、全国の中小企業等にもご利用頂けるため、ご興味のある方がいらっしゃれば、是非、広島県立総合技術研究所東部工業技術センターまでお問い合わせ頂ければと考えている。本稿を読まれた読者の皆さんが摩擦攪拌現象を用いた接合技術に少しでもご興味を持って下さると大変ありがたく存じます。



図11 新たに導入した摩擦攪拌接合装置

表1 加工ヘッドの種類と特徴

	通常ヘッド	高速ヘッド	超高速ヘッド
最大回転数	2000rpm	4000rpm	30000rpm
最大荷重	2ton	1.5ton	-
傾斜角度	0~5°	0~5°	±90°
対象材料板厚	中板	中板~薄板	極薄板

参考文献

- 1) 宮川堅, 椿正己, 安井利明, 福本昌宏: 溶接学会論文集, 26-1 (2008), 42-47.
- 2) 坂村勝, 大石郁, 大田耕平, 竹保義博, 水成重順, 藤井英俊: 溶接学会論文集, 34-1 (2016), 8-19.
- 3) 坂村勝, 船木開, 藤井英俊: 軽金属溶接, 58-8 (2020), 281-286.
- 4) 坂村勝, 大石郁, 大田耕平, 竹保義博, 水成重順, 藤井英俊: 軽金属溶接, 52-12 (2014), 453-461.
- 5) 大石郁, 坂村勝, 大田耕平, 藤井英俊: 溶接学会論文集, 32-1 (2014), 1-7.

<略歴>

坂 村 勝 (さかむら まさる)

- 1992年 京都大学大学院 工学研究科 金属加工学専攻 修士課程修了
- 1992年 住友金属工業株式会社 (現 日本製鉄株式会社) 入社
- 1996年 広島県立東部工業技術センター (現 広島県立総合技術研究所東部工合技術センター) 入庁 機械金属部配属
- 2003年 溶接管理技術者 特別級 国際溶接学会 IWE 取得
- 2016年 大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 博士後期課程修了 (博士 (工学))
- 2023年 広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター 加工技術研究部長
現在に至る