

金属の塑性流動を利用した新たな接合技術の開発

広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター

副部長 坂村 勝

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016025)

キーワード：摩擦アンカー接合，亜鉛めっき鋼（GA 鋼），アルミニウム合金

1. 研究の目的と背景

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．現在，この異種金属接合に対してセルフピアシングリベットや摩擦攪拌接合などの様々な接合技術が検討され，実用化されている¹⁻⁵⁾．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ものが数多く見受けられる．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合せを視野に入れる必要がある．

一方，筆者らは，アルミニウム合金と鋼の重ね点接合を行う手法として摩擦アンカー接合を考案し，これまで，A5052 と SPCC の 2 枚重ね継手，A5052/SPCC/SPCC の 3 枚重ね継手の機械的性質について報告を行ってきた^{6,7)}．摩擦アンカー接合は，一般的な摩擦攪拌点接合同様に，重ねて配置された 2 枚以上の供試体に，接合ツールを回転させながら押し当てる接手法である．本手法では先端が球面の接合ツールを用い，この接合ツールを回転させながら下板の鋼側まで押し込む．そして，下板の鋼からなる突起部を上板のアルミニウム合金中に形成し，その突起部のアンカー効果により接合する．本手法で得られた接合材は，特に，十字引張強度が高いことを特徴としている．

しかし，本手法を A5052 と溶融亜鉛めっき鋼（GI 鋼）の重ね継手に適用すると，A5052 中に鋼突起を形成することができず，そのために得られた継手の接合強度が低位となることが分かった⁸⁾．また，本手法を A5052 と合金化溶融亜鉛めっき鋼（GA 鋼）の重ね継手に適用すると，以下の現象が発生し十分な継手強度が得られないことが判明した⁹⁾．①A5052/SPCC の場合（図 1）に比し鋼突起は高さが低くなり，ひだ形状を呈する．②鋼突起の周辺に多量の化合物層が存在する（図 2）．これらの原因は，GA めっき膜とアルミニウムの直接接触であると考えている．そこで本研究では，この対策として，表面に陽極酸化被膜を有するアルミニウムと GA 鋼に摩擦アンカー接合を適用し，上記①，②の現象を抑制することを試みた．

ところで，アルミニウム合金を対象とする摩擦攪拌接

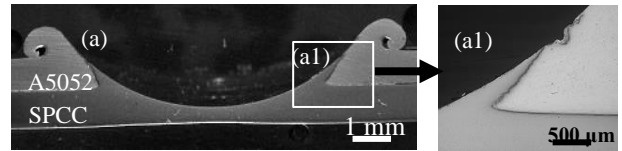


図1 A5052/SPCC 接合材の断面マクロ及び光学顕微鏡写真（押込量 1.5mm）

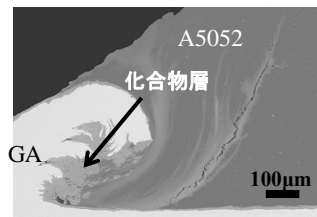


図2 A5052/GA 接合材の断面 SEM 写真（押込量 1.5 mm）

合では工具鋼ツールで十分な耐久性が確保できていた．しかし，最近では，本接合法を鋼等の高融点材料へ適用する研究が活発に行われている．その際に問題になるのが接合ツールの耐久性であり，Ir 合金，Co 合金等の合金系接合ツール¹⁰⁻¹²⁾や，厚膜コーティングを施した超硬合金等の報告¹³⁾がなされている．しかし，いずれの材料もコスト面に問題があり，自動車等の大量生産に適用するのは困難な状況にある．

これに対して，筆者らはツール形状に着目し，安価な窒化珪素球面を先端に有する接合ツールを提案し，これまで，東芝マテリアル㈱と共同で研究開発を行っている．窒化珪素は超硬合金や Co 合金等と異なり，地球上に大量に存在する“窒素”と“珪素”から構成され，量産を行えば行うほど製造コストを低減できるという特徴を有している．したがって，今後，接合ツール用窒化珪素の更なる耐久性向上が達成できれば，1 円/打点以下の低コストでの接合が可能であると推定している．（なお，川崎重工業㈱も鋼の摩擦攪拌点接合の当面のコスト目標を 1 円/打点以下としている¹⁴⁾．）これらの背景より，本研究では，摩擦アンカー接合ツール用材料として用いている窒化珪素球の耐久性向上についても取り組んだので，その結果についても併せて報告する．

2. 実験方法

2・1 供試材料及び接合法

供試材としては，表面に陽極酸化処理を施したアルミニウム合金 A1100（厚さ 1.0mm，被膜厚さ 10μm，以下，

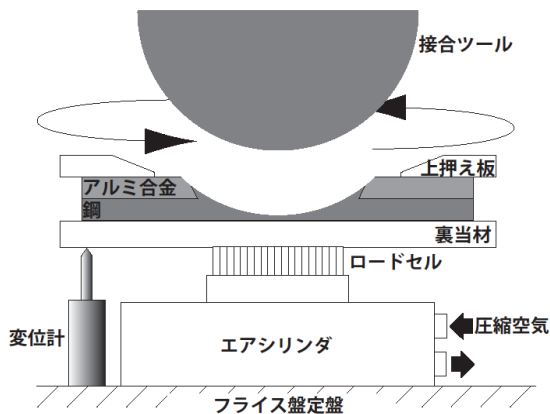


図3 摩擦アンカー接合用装置概略図

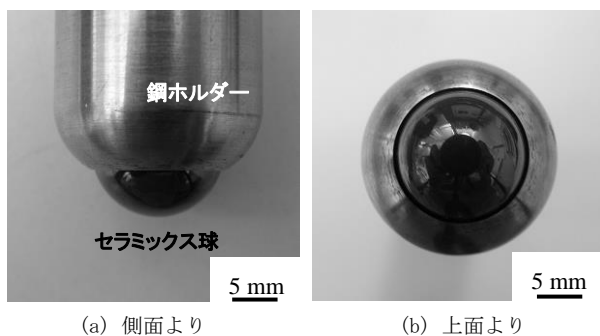


図4 摩擦アンカー接合用ツール外観

陽極酸化 A1100 とする) と合金化溶融亜鉛めっき鋼 (厚さ 1.2mm, めっき厚さ 8 μ m, 以下 GA 鋼とする) を用いた。供試材の形状は, 引張せん断試験用は 30mm \times 80mm, 十字引張試験用は 30mm \times 150mm とした。そして図 3 に示すように, 上側に陽極酸化 A1100, 下側に GA 鋼を配置し, 先端に窒化珪素球を埋め込んだ接合ツールを用いて, エアシリンダ上にセットした供試材を回転する接合ツールに押し込むことで接合した。使用したエアシリンダは最大 12kN の垂直荷重を発生させることができる。接合ツールは, 図 4 に示すように, 先端の球径が ϕ 12.7mm で鋼製ホルダーからの突出量は 5mm とした。また接合条件は, ツール回転数 1500rpm, ツール押込量 1.1~1.8mm, 接合時間 2.5 秒とし, シールドガスは用いなかった。なお, 本実験での接合時間はエアシリンダにエアを供給している時間を意味する。

2・2 接合材の断面評価及び接合強度測定

接合材の断面評価については, 切断及び研磨後, 日本電子(株)製走査型電子顕微鏡 JSM-6010LA (エネルギー分散型 X 線分析 (EDS) 装置付属) を用いて行った。強度試験として, JIS Z 3136 にしたがって引張せん断試験を, JIS Z 3137 にしたがって十字引張試験を(株)島津製作所製オートグラフ AG-10TB を用いて実施した。引張速度は 0.08mm/s とした。

2・3 窒化珪素の耐久性評価

評価対象を, 市販の窒化珪素球 3 種と東芝マテリアル

(株)で開発した摩擦アンカー接合用球の合計 4 種とした。接合ツールの寿命評価を行うための供試材として, 300mm \times 200mm \times 3.2mm の SPCC を用いた。この供試材に Stir in Plate を行った後, レーザ変位センサー (株式会社キーエンス製 LK-030) を用いて窪み部の断面形状測定を行った。これは試験片側の窪み形状を測定することによりツールの摩耗状況を推察することを目的としている。また, 適当な打数の Stir in Plate 後に, 30mm \times 80mm \times 1.0mm の SPCC の重ね点接合を行って引張せん断試験片を作製し, 2・2 (接合材の断面評価及び接合強度測定) と同様に引張せん断試験を実施した。なお, 接合条件は, ツール押込量: 1.6mm, 接合時間: 2.5 秒とした。

3. 結果及び考察

3.1 接合部の断面

図 5 に, ツール押込量を 1.5mm として接合した材料の突起部近傍の断面 SEM 反射電子像を示す。図 2 の A5052/GA 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。

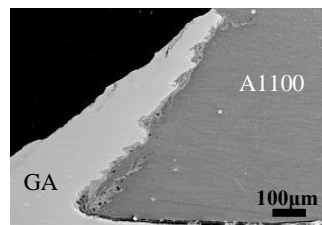


図5 陽極酸化 A1100/GA 接合材の断面 SEM 写真 (ツール押込量 1.5 mm)

3.2 接合強度

図 6 に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, 十字引張強度は約 0.55kN に達している。また, 図 7 には A5052 と GA 鋼の接合強度評価結果を示す。ツール押込量 1.8mm の条件で, A5052 と GA 鋼の接合材では引張せん断強度約 2.6kN, 十字引張強度約 0.8kN であった。

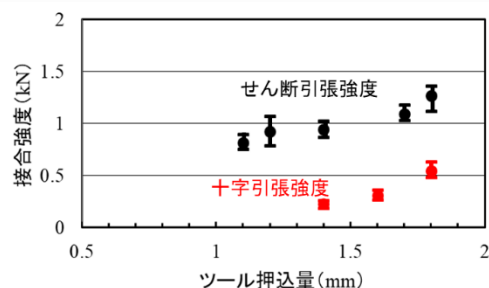


図6 陽極酸化 A1100/GA 接合材のツール押込量と接合強度の関係

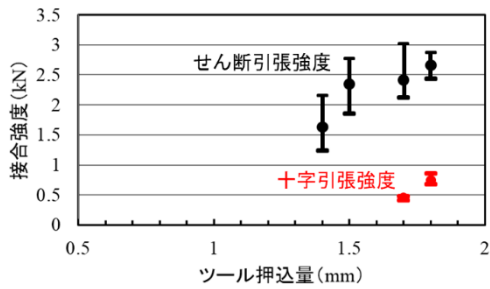


図7 A5052/GA 接合材のツール押込量と接合強度の関係

3.3 引張せん断強度と十字引張強度の比

今回の実験で用いた陽極酸化 A1100 と A5052 の引張試験を行ったところ、引張強度は陽極酸化 A1100 は約 130MPa, A5052 は約 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をグラフ化したものを図 8 に示す。鋼突起が図 1 に示す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 0.6~0.8 になることが分かる。これに対して、A5052/GA 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、今回得られた陽極酸化 A1100/GA 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。

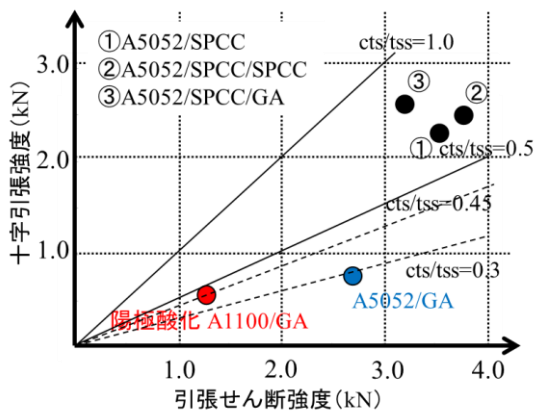


図8 各種摩擦アンカー接合継手の引張せん断強度と十字引張強度の関係

3.4 窒化珪素の耐久性評価

図 9 にレーザ変位センサーで測定して得られた SPCC の窪み測定結果の一例を示す。本研究では、図中の斜線部分の面積を求めることで摩耗の状態を定量化した。その結果を図 10 に示す。なお、図 10 の窪み部断面積は、各測定時の断面積を第 1 打点目の断面積で除し、規格化した値を示している。図 10 より、開発した窒化珪素球 (材種 T) の耐久性が他の材料に比し高いことが分かる。次に、市販材で最も耐久性の高かった材種 A と開発材(材

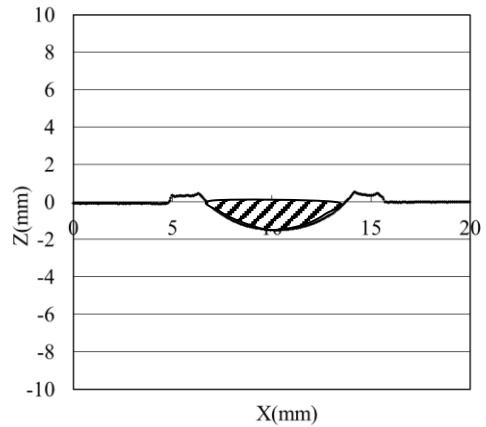


図9 窪み測定結果の一例

種 T) を用いて得られた接合材の引張せん断試験結果を図 11 に示す。図 11 より、材種 A ではツールの摩耗に伴い引張せん断強度が顕著に低下しているのに対して、開発材(材種 T) では 1000 打点後もほとんど低下しないことが分かった。

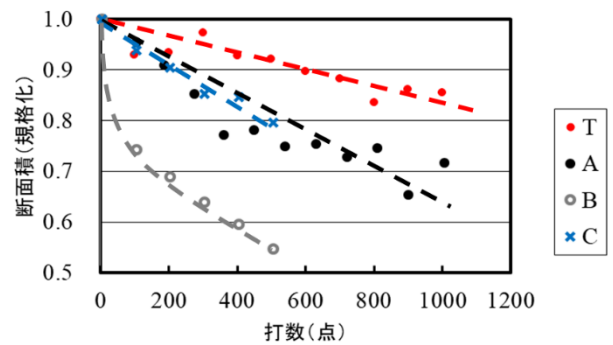


図10 各種窒化珪素球の打数と窪み部断面積の関係

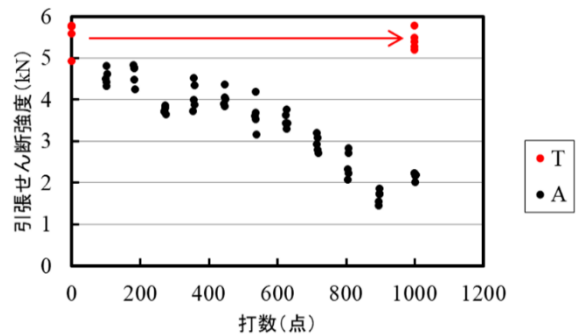


図11 材種 T,A の打数と引張せん断強度の関係

4. 結言

本研究では、摩擦アンカー接合を、陽極酸化処理を施した、板厚 1.0mm のアルミニウム合金 (A1100) と合金化溶融亜鉛めっき鋼 (GA 鋼) の 2 枚重ね継手に適用し、その断面と機械的性質を評価した。その結果、陽極酸化処理を施した A1100 と GA 鋼の摩擦アンカー接合では、A5052 と GA 鋼の摩擦アンカー接合継手に比し鋼突起の高さ及び形状が改善され、金属間化合物の生成が抑制さ

れた。これによって、特に十字引張強度の大幅な低減を一定程度抑制することが可能であることが分かった。これらの結果から、GA 鋼とアルミニウム合金の間に 10 μ m 程度の薄いインサート材が存在するだけでも、GA 鋼とアルミニウム合金の摩擦アンカー接合継手の強度向上に効果があることが明らかとなった。今後はこの知見をもとに実用レベルで適用できる手法を検討していく所存である。

また、耐久性の高い摩擦アンカー接合ツール用窒化珪素を開発することができたが、被接合材は軟鋼 (SPCC) である。一方、現在の自動車製造では大量の高張力鋼が使用されている。したがって、現在も高張力鋼や超高張力鋼等にも適用できるツール用窒化珪素の開発を引き続き行っている。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成及び大阪大学接合科学研究所共同研究員制度を利用して行われたものであり、ここに深く感謝の意を表します。

また、研究の推進に当たって適切なお指導を下さいました大阪大学接合科学研究所・藤井英俊教授及び産業技術総合研究所製造技術研究部門・村上敬主任研究員にこの場を借りて感謝いたします。

参考文献

- 1) 中西栄三郎：溶接学会論文集, 23-1 (2005), 151.
- 2) 藤本光生：軽金属溶接, 47-11 (2009), 12.
- 3) 松村吉修, 三崎利次, 吉田智美, 近藤崇敬, 佐久間淳

- 夫, 前田正幸, 吉原靖昌, 福本幸司, 杉浦裕, 奥村明敏：三菱自動車テクニカルレビュー, 18 (2006), 69.
- 4) 庄司庸平, 高瀬健治, 玄道俊行, 埴邦彦, 森川賢一, 野口竜弘：マツダ技報, 24 (2006), 90.
- 5) 畑恒久, 朝見明彦, 松本恵介, 平山貴邦, 宮原哲也, 大浜彰介, 佐山満, 小林努, 矢羽々隆憲：溶接学会全国大会講演概要, 93 (2013), 40.
- 6) 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) 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.
- 8) 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, 33-2 (2015), 187.
- 9) 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.
- 10) T. Miyazawa, Y. Iwamoto, T. Maruko and H. Fujii: Development of Ir based tool for friction stir welding of high temperature materials, Science and Technology of Welding and Joining, 16-2 (2011), 188.
- 11) 薄田真一, 三宅将弘, 佐藤裕, 粉川博之, 大森俊洋, 石田清仁, 今野晋也, 朴勝煥, 杉本一等, 平野聡：溶接学会全国大会講演概要, 95 (2014), 18.
- 12) 佐藤裕, 薄田真一, 粉川博之, 山崎繁一, 辻あゆ里, 上西昇, 池ヶ谷明彦, 森口秀樹, 石塚浩：溶接学会全国大会講演概要, 96 (2015), 60.
- 13) 宮崎博香, 内海慶春, 津田圭一：SEI テクニカルレビュー, 187 (2015), 70.
- 14) 大橋良司, 内海慶春, 泰山正則：溶接技術, 64-7 (2016), 48.