自動車軽量化技術の10年間 – 接合技術 –

櫻井 健夫

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 71, No. 10 (2021), 466-469
© 2021 The Japan Institute of Light Metals10 years review of lightweight technology for automotive
-Joining technology-

Takeo SAKURAI

Keywords: *aluminum alloy, dissimilar joining, friction stir welding, magnetic pulse welding, solid-state joining, interface*

1. はじめに

輸送機器に使われているアルミニウム合金は、プレス成形などの塑性加工により形状を確保し、その後、様々な形状をした部品を溶接や機械締結、接着などにより接合し組み立てることで自動車や航空機、船舶などの工業製品となる。

金属の接合は、紀元前から使われてきた技術であるとされているが、金属を溶融させて接合するという技術は19世紀に入ってからである。1800年にアークが発明され、そのアークを長時間持続するために必要な電池・電源の開発が進み、1880年フランスで蓄電池の鉛板の接合に炭素アーク熱を利用した方法から、改善を重ね実用的なアーク溶接法が開発された。その後、ロシアとアメリカで金属電極と金属板との間に発生させたアークで金属板を溶融溶接する金属アーク溶接法が開発され、工業的に利用されるようになったとされている。第二次世界大戦にかけてTIG (Tungsten Inert Gas) 溶接やMIG (Metal Inert Gas) 溶接などが開発され工業化がさらに発展した。これらの技術が日本に導入されるようになったのは、戦後になってからであるが、普及と発展は著しく、種々の改良がなされ、重工業の発展に大きな影響を与えたとされている¹⁾。

アルミニウム合金は、その軽量な素材であるがゆえに輸送機等に利用されるようになり、1900年前半にツェッペリン飛行船や航空機に適用され、日本でも戦中は零式戦闘機にジュラルミンが適用されている²⁾。零式戦闘機の接合はリベットによる機械締結などが用いられていた。ジャンボジェット機などの旅客機はアルミニウム合金でできているが、このボディの接合もリベットによる機械締結が多く用いられている。自動車は、1948年ランドローバー・シリーズIではアウターパネルをオールアルミニウム製とし、ランドローバー・シリーズの派生車であるランドローバー・ディフェンダー

は、1990年ラダーフレーム（鋼板）にオールアルミニウムボディを搭載し、さらに2020年では大幅なモデルチェンジを行い、ボディはオールアルミニウムモノコック製となった。自動車の接合は、素材が鉄鋼で作られている場合は、抵抗スポット溶接で組み立てられ、部分的にアーク溶接が用いられている。一方、アルミニウム合金を多用した車やオールアルミニウム車は、抵抗スポット溶接、機械締結、接着など様々な接合方法で組み立てられている。最近では、車体軽量化のために鋼板、ハイテン、アルミニウム合金、樹脂（含CFRP）で車体が構成されるマルチマテリアル車が出てくるようになり、これら、異種金属あるいは異種材料の接合技術が課題となっており、多くの研究開発が進められている。軽金属でも、この10年間の研究論文では異種金属・異種材料の接合関連の論文発表が多く、その組み合わせは、アルミニウム合金/鋼板（含めっき鋼板）、アルミニウム合金/銅合金、アルミニウム合金/樹脂など様々で、かつ接合方法も摩擦攪拌接合や電磁圧接など多種多様であった。ここでは、2010～2019年の10年間で軽金属に投稿された接合技術に関する研究論文をレビューした。

2. アルミニウムの接合技術

アルミニウムおよびアルミニウム合金に提供することができる接合方法を図1³⁾に示す。常温領域で行うボルト・ナットやリベットに代表される機械的締結、融点以上の温度で金属を溶融させて接合する溶融接合、融点以下の中間的な温度域で行う、ろう付けや圧着接合（摩擦攪拌接合、爆発圧接など）がある。それぞれ長所、短所があり、溶融溶接は、アルミニウムの融点を超える温度域で行うため、溶融継手部は信頼性が高いものの、高温で行うため技能が必要となることや合金によっては熱影響を受ける部位の強度（硬度）が低下するという現象がある。常温で行う機械締結などでは、熱を利用し

図1 接合方法の分類³⁾

ていないことから、特殊な技能を必要とせず取り扱いが容易であるが、継手の耐久性や信頼性は溶融溶接に比べ低いと言われている。しかしながら、接着との併用により強度や剛性を高めることが可能なため、航空機などの輸送機器に実用化されている。ろう付けは、熱による影響が少なく、軟化や変形が少ないことからブレージングシートのろう付けに使われるようになり、ラジエータやエバポレータなどの熱交換器として実用化された技術である。また、摩擦攪拌接合は、アルミニウム合金を溶融させることなく、回転ツールにより摩擦熱を発生させ、ツール先端の特殊なプローブで塑性流動を起こしながら継手先端を攪拌することで接合する方法である。この接合法は、鉄道車両のボディなどに適用され、自動車分野ではパネル系部品の一部にスポット溶接的に点接合のように工夫され実用化されている^{3), 4)}。

2.1 アルミニウム合金同士の接合

6000系合金は、自動車パネル部品用として適用されている合金であり、時効硬化性があることから塗装焼付時の熱処理により強度が向上することで広く用いられるようになった。また、複雑な断面形状を可能とするアルミニウム押出形材は、鋼板では複数の部品を溶接して組立てて構造物にするとところを一つの部品で構成させることができることから、自動車のバンパーレインフォースなどの構造部品に適用されている。また、押出形材は、オートバイのフレームなどに実用化されており、その構造は複雑であるが、溶融溶接により接合されている。6000系合金のような熱処理型合金の溶接技術は、溶接熱による熱影響部の軟化や溶接マイクロ割れなどが課題となっており、様々な研究が行われている。笹部は、A6082合金に添加されているMnに着目し、6000系合金の溶接時の溶接マイクロ割れに及ぼすMn添加の影響を調査している。主添加元素であるMgとSiはA6082合金に準じ0.9 mass%Mg-1.1 mass%Siとし、Mnを0.01~0.72 mass%と変化させ、フラットバー押出材を製作し溶体化-焼入れ後、人工時効処理を施しT6材として実験に供した。溶接は、溶加材A5356WY-φ1.2 mmを用いミグ溶接（溶接電流DC110 A、アーク電圧22 V、溶接速度80 cm/min、シールドガス20 L/min アルゴン）による突合せ継手溶接を行った。継手部を引張試験や組織観察を行い、継手性能に及ぼすMn添加量の影響を調査している。その結果、Mnの添加は、溶接マイクロ割れを抑制させる効果があり、その要因としてAl-Fe-Si-Mn化合物の形成によるマトリックス

ス中のSi濃度の減少あるいは、溶接熱サイクルで局部溶融する結晶粒界に低融点共晶（ Mg_2Si-Si ）の生成が抑制され、熱サイクル時の素材における脆性温度の下限値が上昇するためと考えられている。これらのことから、溶接マイクロ割れの指標として「溶接金属部の凝固温度<素材の脆性温度範囲低減値」としている⁵⁾。近年、自動車のバンパーレインフォースに用いられるアルミニウム合金押出形材は、衝突安全性の確保と更なる軽量化を目的に国内外で7000系合金の採用が検討され一部実用化している。溶融溶接において、7000系特有の組織変化による、溶接部および熱影響部の強度低下と溶接マイクロ割れが課題と考える。7000系の溶融溶接についての論文は一部発表されているが、メカニズム解明による実用化への信頼性向上に向けた研究と更なる機能性、耐食性、溶接性の改善に期待したい。

新しい高速固相接合法による異なるアルミニウム合金の接合技術についての研究が行われている。熊井らは、ピンやねじなどの金属製スタッドを金属板に接合するスタッド接合を、従来の方法からスタッド形状の工夫、放電電流経路の制御を行い、接合材の温度上昇や変形、溶接痕の発生を抑止し、短時間で強固に接合する「新しい高速固相接合法」を用い、高力合金A2024スタッドと汎用材A5052板を接合し、接合メカニズムを検討した。A2024スタッドピンの底部に円弧状の突起を持つ形状（プロジェクションと呼称）とし、管状電極の配置を工夫し固相接合法を基盤とした手法とすることで、被接合材（A5052板）にダメージを与えることなく接合を可能とし、高い接合強度が得られることを確認している⁶⁾。さらに、被接合材（A5052板）の板厚を1~4 mmと変化させ、接合メカニズムを詳細に検討している。板厚が厚い場合は、プロジェクション先端の内側、外側に均等なプロジェクションの被接合体表面に塑性変形が観察され、プロジェクションの内側、外側で二重環状に広範囲で固相接合され、高い接合強度が得られた。一方、薄い場合は、変形挙動やマイクロ組織が大きく異なり、主に外側のみで接合され、かつ、一部爆飛も確認され、固相接合ではない部位があり、接合強度の低下が認められたとしている。被接合材の板厚を厚くし、放電電圧を増加させることでより高い接合強度が期待できるとされている⁷⁾。さらに、本技術は、6N01合金（A6005C）でも強固な接合が可能⁸⁾であり、SS400スタッドとA5052板やA2024スタッドとMg合金板（AZ80）などの接合も試み、異種金属や異種材料の接合のための新たな手法として研究している⁹⁾。

糸井らは、電磁圧接法によりアルミニウム合金同士の接合と接合界面メカニズムについて研究をしている。A2017-T3とA2024-T3を用い、放電エネルギーを1.5~3.5 kJまで変化させ、A2017、A2024同士の接合を行った。放電エネルギー1.7 kJ以上で、これら合金同士の接合が可能であり、3.0 kJ以上で強固な接合を可能とした。接合界面には電磁圧接特有の波状模様が観察され、放電エネルギーの増加とともにその振幅は増加し、かつ接合幅は増加した。その界面には酸化物は観察されず、未接合部から100 μm以下の微細は粒子の凝集が確認され、これは接合時に排出されるメタルジェットによるものと考えられている。また、接合界面のTEM観察により、溶融接合ではなく、格子レベルでの接合であるとしている¹⁰⁾。

3. 異種金属接合技術

異種金属接合で工業的に実用化されているのは、アルミニウム/鉄、アルミニウム/銅、アルミニウム/マグネシウムなどがある。また接合方法では、リベットなどの機械締結、摩擦攪拌接合、ろう付けや接着などが挙げられる。特に、アルミニウム合金/銅板の異種金属接合は、自動車の軽量化課題を解決するため、従来銅板を使用していた部品を軽量素材であるアルミニウム合金に置換させる際に重要な技術となる。小椋らは、アルミニウム合金/銅板の異種金属接合において、摩擦攪拌接合、抵抗スポット溶接（溶融溶接）などによる接合技術について接合界面組織を中心に接合メカニズムを解説している。アルミニウム合金と銅板の接合の場合、接合界面にアルミニウム原子と鉄原子の拡散による反応層（Al-Fe系化合物）が形成され、その形成状態や厚さが接合強度に寄与し、高い接合強度を得るためには適正な界面組織とする必要がある¹¹⁾。

3.1 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合は、輸送機器等のアルミニウム合金製の車体や骨格部品、シャーシ部品の接合として量産適用されている。ツールの摩擦熱を利用し、融点温度以下で塑性流動を利用した接合方法である。従来、アルミニウム合金同士に突合せや重ね接合に活用されていたが、最近では、自動車のマルチマテリアル化とともに、同じ金属同士ではなく異種金属への適用の研究が進められている。

馮らは、A6022アルミニウム合金と各種めっき銅板（ZAM, GI, AS, GA）を用い、摩擦攪拌スポット溶接（FSSW）により接合し、界面ミクロ組織と接合強度について研究している。FSSWは、ツール（SKH51製）としてシオルダ部φ10 mm、プローブ部φ5 mm×0.8 mmを使用し、回転速度3000 rpm、挿入速度4 mm/min、保持時間3 sとした。プローブが回転し摩擦圧接するときの中央部直下と外周部における接合界面の温度がそれぞれ最高温度約430°Cと約350°Cであることを測定している。めっき銅板のめっき層の溶融温度がそれぞれ異なる（330～880°C）ことから、接合界面の形態や領域の広さ、破壊強度が接合界面の温度とめっき層の溶融温度に依存し、各接合材の異なる界面組織について詳細に観察している。めっき層の溶融温度が低いZAMやGI銅板では接合界面に約1 μmの中間層の生成が確認され、それはプローブ直下の合わせ面では接合されず、外周部近傍の合わせ面で接合される形式であった。一方、溶融温度が高いASやGA銅板では、AS材では中間層の生成は確認されず、GA銅板では界面に厚さ約20 μmの中間層の生成とその下部には空隙や孔の観察が認められる¹²⁾。このような、界面組織変化と接合強度、破壊等の接合メカニズムについて詳細に研究することは異種金属接合において接合信頼性のための接合方法と条件を確立する上で重要であると考えられる。

安井らは、異種金属の接合メカニズムを明確化するため、アルミニウム合金板A6061-T6と銅板S45Cを用い、摩擦攪拌接合により、入熱条件やプローブの形状を変化させ突合せ接合を行い、接合体内部の材料流動を観察し、材料流動に及ぼす入熱条件やプローブ形状の影響について研究している。その結果、入熱条件やプローブ形状の差により接合体の条件および断面の状態が変化するのは、アルミニウム合金の流動状

態が変化するためである。ねじ溝付きのプローブは、プローブの下方および周方向へ強い材料流動が誘起されることで接合体内部の欠陥生成を抑制し、高い継手強度が得られる。細目ねじプローブでは、接合体表面に平滑で欠陥のない接合体を得ることができるとしている¹³⁾。

3.2 電磁圧接

電磁圧接は、固相接合方法の一つであり、電磁力を利用して材料を圧接する。例えば、円管の圧縮による接合法としてよく用いられ、その原理は、コンデンサからの放電による瞬間大電流をコイルに流し、コイル内に設置した金属管に電磁力を作用させて圧縮させ、その内部に置いた心材（丸棒または管）との間で接合を行う。このとき、電磁力により外管は高速で心材と衝突して、衝突部に金属的結合を生じ、接合界面には波形模様がみられる。アルミニウム、銅など薄肉小径管の接合において、外管をアルミニウム合金とした場合、アルミニウム合金、銅、鋳鉄、銅、チタンなどの異種金属心材との接合が可能となる。電磁圧接は、原理は前述の通りで、可動板に急激に磁束を加えることで超高速に固定板に衝突させて接合する方法で、爆発圧接と同様の固相接合法であり異種金属や異種材料の接合技術として、その接合メカニズムを解明すべく研究が進められている。

糸井らは、可動板側にA6061-T6板（板厚1.0 mm）、固定板をSPCCおよびDP590鋼板（各板厚1.0 mm）とし、放電エネルギーを1.1～3.0 kJ、間隙長さを1.0 mmと1.4 mmに調整して電磁圧接を行った。その結果、SPCCでは、放電エネルギー1.1 kJ以上で接合は可能であり、2.0 kJ以上では母材破断となる強固な接合が可能であった。DP590鋼板では、放電エネルギー3.0 kJ以上で間隙長さ1.4 mmの条件で強固な接合が可能であったとしている。また、接合界面は接合されたものについてはいずれも電磁圧接特有の波状模様が確認され、不連続なFeとAlからなる中間層が生成していた。A6061-T6/DP590鋼板接合板は、接合界面において塑性ひずみの蓄積と結晶粒が母材と比較し微細化していることを確認し、これらが強固な接合界面の因子であるとしている。さらに、TEMやHAADF-STEMによる分析において、中間層は、FeAl、Fe₂Al₃およびFeAl₃で構成されており、FeとAlの分布に濃度差が生じていることから、界面で部分的に溶解した領域が急速冷却され形成されたと考えられている¹⁴⁾。

さらに、A6061-T6とDP780およびDP980鋼板の電磁圧接による接合も研究している。DP780鋼板の場合、放電エネルギー3.0 kJの時、間隙長さ1.17～1.42 mm（衝突速度430～459 m/s）の条件で母材破断に至る接合が可能であった。DP980鋼板では、放電エネルギー3.0 kJの時、間隙長さ1.17～1.31 mmの条件で接合可能となり、DP780と比較し間隙長さが狭くなった。接合体の接合界面は、いずれも波状模様が観察され、不連続的にFeとAlから構成させる中間層が生成していた¹⁵⁾。

4. ま と め

近年、自動車のマルチマテリアル化による、自動車車体の軽量化が進められ、従来からのパネル系部品を銅板からアルミニウム合金などの軽量素材に置換することから、最近では、骨格系部品に対しても、高張力鋼板（ハイテン）や超高張力鋼板（超ハイテン）による薄肉軽量化のための材料置換だけでなく、アルミニウム合金の採用も検討されるように

なった。また、従来のオールアルミニウム車が衝突安全基準の強化から、アルミニウム合金では強度不足の部品をハイテンや超ハイテンに置換するなどが進められるようになっている。このような材料置換された車体を組み立てるために重要な課題の一つとして、接合技術があり、今回、軽金属で取り上げられている接合に関する論文をレビューし、アルミニウム合金同士の接合、アルミニウム合金と鋼板を主とした異種金属接合をまとめた。様々な接合方法と接合評価法、接合界面メカニズムについてまとめることができた。特に、アルミニウム合金板と鋼板との異種金属接合は、界面に生成する金属間化合物層の状態と厚さが接合強度に依存すると考えられ、接合条件により中間層がどのように変化するかメカニズムを解明するのは重要である。電磁圧接や爆発圧接など超高速での接合方法による接合界面ではメタルジェットにより、特有の波状模様が形成され、アンカー効果により強固な接合が得られるとされており、固相接合法のなかでも有効な方法の一つと考えられる。接合界面に生成する中間層は、接合条件で様々な構成と形態が認められ、その中間層をコントロールすることで、強固な接合が可能となると思われる。一方、実用面を考えるとアルミニウム合金と鋼板あるいはハイテンなどを構成する部品は、上述したとおり、自動車の骨格系部品などへの適用が考えられる。自動車部品への適用の場合、様々な接合方法で組立てられた車体は、塗装焼付の工程を経ることになる。固相接合の場合、この塗装焼付時の熱処理で

接合界面に生成する中間層が組織的な変化を生じることはないだろうか。固相接合した接合体に塗装焼付相当の熱処理を施し、その中間層の挙動と接合強度の関係についての報告はほとんどないので、最終製品の信頼性確保という観点から、今後の研究によりメカニズムの解明をすることで、将来の自動車のボディ構造に必要な技術の革新と高い信頼性を持った実用化技術への発展につながるものと期待したい。

参 考 文 献

- 1) 日本溶接協会HP：http://www.jwes.or.jp/jp/wh_weld/hist.html
- 2) 吉田英雄：軽金属，**65** (2015)，432-440.
- 3) 今村美速：軽金属，**66** (2016)，552-559.
- 4) 櫻井健夫：軽金属，**68** (2018)，487-493.
- 5) 笹部誠二：軽金属，**60** (2010)，213-219.
- 6) 熊井真次，林田慶祐，渡邊満洋：軽金属，**61** (2011)，206-212.
- 7) 熊井真次，高谷謙斗：軽金属，**62** (2012)，293-299.
- 8) 高谷謙斗，原田陽平，熊井真次，北山健二：軽金属，**62** (2012)，370-376.
- 9) 熊井真次，村井信二，原田陽平，糸井貴臣，前田将克：軽金属，**67** (2017)，447-459.
- 10) 糸井貴臣，井上祥一，岡川啓悟：軽金属，**67** (2017)，8-15.
- 11) 小椋 智，廣瀬明夫：軽金属，**66** (2016)，503-511.
- 12) 馮 科研，渡邊満洋，熊井真次：軽金属，**61** (2011)，463-468.
- 13) 安井利明，石田 将，福本昌宏：軽金属，**64** (2014)，604-610.
- 14) 糸井貴臣，井上祥一，中村晃貴，橘田駿一，岡川啓悟：軽金属，**68** (2018)，141-148.
- 15) 糸井貴臣，橘田駿一，岡川啓悟：軽金属，**69** (2019)，541-547.