

分離・リサイクルのための副資材を必要としない接合技術*

池田 剛司**, 戸次 洋一郎***

Welding Technology without Secondary Materials
for Separation and Recycling*

Takeshi Ikeda** and Yoichiro Bekki***

1. はじめに

近年、地球環境保護とエネルギー危機の観点から輸送機器の軽量化が重要になっており、自動車においてはCO₂排出量削減を目的とした燃費規制が行われている。日本では米国のCAFÉ方式 (Corporate Average Fuel Economy: 企業別平均燃費基準方式) が採用され、国土交通省及び経済産業省が設置した燃費規制に関する審議会がまとめた「乗用車の新たな燃費基準に関する報告書(概要)」によれば、JC08モードによる燃費値をWLTCモードによる燃費値に換算した2016年度実績値の19.2km/lに対し、2030年度目標は25.4km/lと32.4%の燃費改善を目標としている¹⁾。2019年に設定されたこの燃費規制では、従来のガソリン自動車、ディーゼル自動車及びLPG自動車に加えて電気自動車及びプラグインハイブリッド自動車が対象に加えられたが、自動車メーカーは台数で大部分を占めるガソリン及びディーゼルなどの内燃機関車での燃費改善が求められている。

自動車の燃費改善のためには軽量材料への置換による軽量化が効果的であり、ボデー及び部品へのアルミニウム合金の適用が盛んである。また、更なる軽量化のために樹脂やCFRPへの置換も検討されている。これらの軽量化は単一で使われるケースもあるが、多くは複数の素材を適材適所で用いるマルチマテリアル化がトレンドである。このように、アルミニウム合金の適用が拡大する環境にあるが、コスト、強度、成形性及び使いやすさの観点では主要材料としての鉄鋼材料の地位は依然として揺るぎない。従ってマルチマテリアル化において、鉄鋼材料とアルミニウム合金、樹脂

やCFRPとアルミニウム合金の接合が必須となる。この場合、副資材を用いる接合法では廃車後の分離・リサイクルする際のコンタミとなるため、副資材を必要としない接合技術も求められている。

2. アルミニウム合金のリサイクル

アルミニウム合金は、リサイクルの優等生と言われており、実際に廃棄物となるスクラップは少なく、大部分がリサイクルされて新たな製品として再生されている。日本で生産されるアルミニウム製品は板材や押出材といった展伸材と鋳物・ダイカスト等がほぼ半分以上である²⁾。一方、発生するスクラップの大部分は鋳物、ダイカスト用原料としてリサイクルされており、展伸材用途としては、アルミニウム缶材以外は殆ど使われていない。これは同じアルミニウム合金であっても鋳物・ダイカストと展伸材では合金組成と不純物の許容量が大きくことなることが原因である。鋳物・ダイカストでは溶湯を型に流し込み凝固させて製造するために湯流れ性や、型離れ性が要求されるため、Si, Feが多く添加されている。これらの元素を添加すると展性、延性が低下することが知られているが、鋳物、ダイカストでは凝固後は切削加工される程度で、塑性加工は施されないため問題とならない。一方、展伸材は素材製造段階でも圧延、押出、鍛造といった塑性加工がなされ、さらに最終製品となるまでに絞り、張出し、曲げ等の塑性加工が必要とされるため、高い展性、延性が必須となる。したがってSi, Feの添加量は厳しく制限されている。さらに用途別に細かく成分範囲が決

* 本稿の主要部分は、軽金属溶接, 59 (2021), 475-480に掲載

The main part of this paper has been published in Journal of Light Metal Welding, 59 (2021), 475-480.

** (株) UACJ マーケティング・技術本部 R&Dセンター 第二開発部

Development Department II, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation

*** (株) UACJ マーケティング・技術本部 R&Dセンター 第一研究部

Research Department I, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation

められているため、スクラップから展伸材へリサイクルするためには、スクラップの高度な選別が必要である。アルミニウム缶で例外的にCan to Canのリサイクルが成り立っているのは、製品外観から選別が容易なこと、合金組成が世界的に統一されていること、生産からスクラップ発生までの時間が短く、生産量に対応した量のスクラップが時間差なしで発生すること、アルミ地金価格が高いためスクラップの価値が高く、回収、選別のコストをかけても利益がだせることなどの好条件が重なっているためである。逆に言えば、このような条件が整っていないスクラップは展開が容易な鋳物、ダイカストに流れることになり、さらに日本ではスクラップ発生量以上の鋳物、ダイカスト需要があるため、全体としてこのマテリアルフローが成り立っている。

従来、アルミニウムのリサイクルは経済性、すなわち新地金より安いスクラップを使用することによる原価低減が主な目的で進められてきたが、近年はそれに加えてアルミニウム製品製造時のCO₂発生量の減少効果が注目されている。

Table 1に、新地金製造時に発生するCO₂量と、スクラップから再生塊を製造する際に発生するCO₂量を比較して示す³⁾。このようにスクラップをリサイクルすることで、新地金を使用することに比べてCO₂発生量を大幅(1/20～1/30程度)に減らすことが可能となる。これは新地金を精錬する際に多量の電力を消費し、かつ電解に使用するカーボンが酸化されてCO₂が発生するのに対し、アルミニウムの融点が低いいためスクラップの溶解に必要なエネルギーが小さいためである。地球温暖化防止のため、各国がCO₂発生量抑制に取り組んでおり、パリ協定で各国が目標値を定めている。さらに持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)ともなっており、CO₂発生量が少ないことは、新たな商品価値として認められてきている。その意味でもアルミニウムのさらなるリサイクル促進は大きな期待が持たれている。前述のとおり、国内で発生するアルミニウムスクラップはカスケードリサイクルとして鋳物、ダイカストに再利用されているので、さらにリ

Table 1 Basic unit of CO₂ emission by region of aluminum production³⁾.

	Primary production [t-CO ₂ /t]	Secondary production [t-CO ₂ /t]
Europe	8.6	0.48
USA	10.0	0.43
Japan [*]	9.2	0.31
China	18.2	0.62

* Average of basic unit of import countries

サイクル率を上げるためには展伸材に使用されている新地金をアルミスクラップに代替する以外に方法はない。そのためには展伸材から展伸材へ戻す水平リサイクル、さらには鋳物を含む雑スクラップから展伸材に戻すアップグレードリサイクルが必要となる。

展伸材の水平リサイクルを考えた場合、スクラップ中への異材混入が大きな問題となる。今後、大幅に使用量が増えることが期待されている自動車用アルミニウム合金を例にすると、自動車は多くの部品から構成されており、同種、異種の接合部が数多く存在している。接合方法もMIGやTIGなどのアーク、レーザ、抵抗スポットなどの溶融溶接から摩擦かくはん接合(FSW: Friction Stir Welding)、摩擦かくはん点接合(FSSW: Friction Stir Spot Welding)などの固相接合、セルフピアシングリベット(SPR: Self Piercing Rivet)、フロードリルスクリュー(FDS: Flow Drill Screw)などの機械締結等様々であるが、車体のマルチマテリアル化が進み、異材接合が多くなるにつれてSPRやFDSなどの副資材を使用する接合方法が採用される傾向にある。これらの副資材の多くはFe系であり、自動車用アルミニウム展伸材を水平リサイクルする際の障害となることが予想される。そのため、今後は副資材を使用しない接合法で如何にアルミニウム合金と異材を接合するかが注目されている。

次項では異材接合法のうち、分離・リサイクルの観点で主要因となるアルミニウム合金と鉄鋼材料の接合法について述べる。なお、鉄鋼材料以外との異材接合事例として、アルミニウム合金と炭素繊維強化プラスチック(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)の副資材を使用しない接合はFSSWの事例⁴⁾を、アルミニウム合金と銅合金の副資材を使用しない接合は電磁圧接の事例⁵⁾を例示する。

3. 異材接合法

3.1 接合法の特性比較

自動車の車体製造に用いられる代表的な接合法の特性を**Table 2**に示す⁶⁾。各接合法に対する適用可能な厚み、設計自由度に影響する継手形式、隙間に対する接合部の精度、タクトタイムに影響する接合速度などに加えて、異材接合の可能性についても比較した。いずれの接合法でも異材接合は不可能ではないが、溶融溶接となるアーク溶接、抵抗溶接、及びレーザ溶接は難易度が高い。

アルミニウム合金と鉄鋼材料の異材接合を溶融溶接や固相接合で行うと、後述するように接合界面に生成

Table 2 Comparison with welding and joining technologies for vehicles⁶⁾.

Technology	Thickness (mm)	Joint type			Joint precision	Welding speed (m/min)	Degree of difficulty on automation	Cost		HAZ area	Controlling inner imperfection	Work environment	Degree of difficulty on dissimilar joint
		Butt	Fillet	Lap				Initial	Running				
Arc welding	MIG	1.0 ~	OK	OK	OK	~ 1.0	OK	Mid	Mid	Large	Care	Care	Care
	TIG	~ 3.0	OK	OK	OK	~ 0.5	Care	Small	Mid	Large	OK	Care	Care
Resistance spot welding	Total 10	NG	NG	OK	OK	~ 1.8	OK	Mid	Large	Small	OK	Care	Care
Adhesion	Total 10	NG	NG	OK	OK	-	Care	Small	Mid	Small	OK	Care	OK
Friction stir welding	~ 50	OK	Care	Care	NG	~ 6.0	OK	Mid	Small	Mid	OK	OK	OK
Friction stir spot welding	Total 6.0	NG	NG	OK	OK	~ 1.8	OK	Mid	Small	Small	OK	OK	Care
Self piercing rivet	Total 6.0	NG	NG	OK	OK	~ 1.8	OK	Mid	Large	Small	OK	OK	OK
Laser welding	~ 10	OK	OK	OK	NG	~ 10	OK	Large	Large	Small	Care	Care	Care
Hybrid laser welding	~ 10	OK	OK	OK	Care	~ 5.0	OK	Large	Large	Small	OK	Care	Care

する脆弱な金属間化合物層の抑制が課題となるため、副資材を必要とする機械締結や接着接合が先行して採用された。2003年発売のBMW5シリーズでは、車体の前部を鉄鋼材料からアルミニウム合金板に変えることによって操縦安定性を向上させるため、フロントインサイドパネルに異材接合部位がある。ここにSPRと接着接合を併用したウェルドボンドを採用し、さらに電蝕を防ぐためにシーラを塗布して接合界面への浸水を防止している。また、2011年発売のRange Rover Evoqueでは、アルミニウム合金のルーフと鉄鋼材料のサイドメンバの全長を接着接合している。一部にSPRを併用しているが、接合強度の大部分を構造用接着剤によって担保している。

3.2 溶融溶接

鉄鋼材料との溶融溶接による異材接合の技術的課題を述べる。母材の組合せが変わると、同材、溶融亜鉛めっき鋼板、裸鋼板、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の順に溶接の難易度が上がる。特に、合金化溶融亜鉛めっき鋼板は、入熱量が不足すると鋼側表面に溶接金属が濡れないためアルミニウム合金と鉄鋼材料の母材を架橋することができない。一方、入熱量が過剰になると接合界面に金属間化合物層が厚く形成し、割れや剥離などを引き起こす⁷⁾。その形成する金属間化合物層は5種類前後と推定されており、各相の機械的性質として圧縮試験を行った結果をFig. 1に示す。FeリッチなFe₃Al及びFeAlが延性的な性質を示すのに対し、AlリッチなFe₂Al₅及びFeAl₃は脆性的な性質を示した⁸⁾。また、Fig. 2に示すように、金属間化合物層の厚さを10µm以下に制御することによって良好な継手の性質が得られるとの報告がMIG溶接の事例としてある⁹⁾。

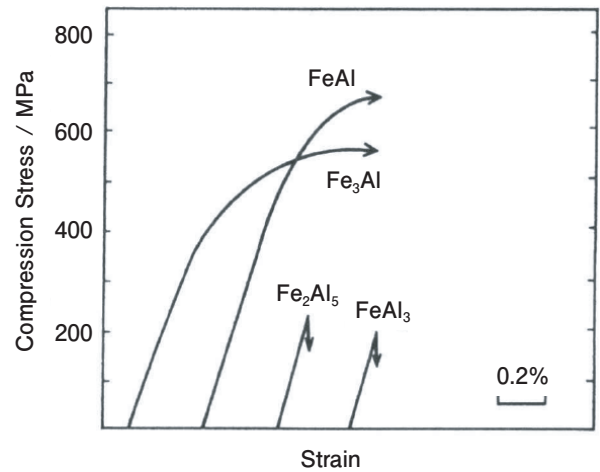


Fig. 1 Compression stress - strain curves of Al-Fe series inter metallic compounds⁹⁾.

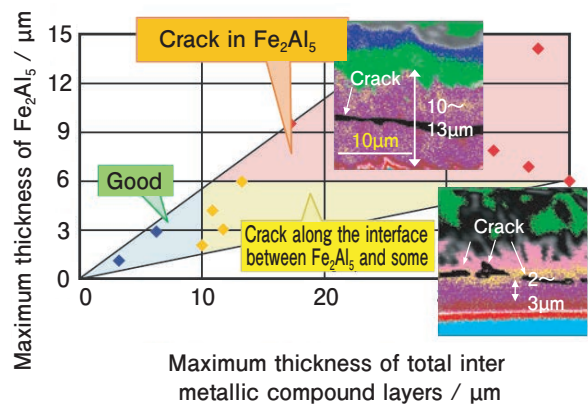


Fig. 2 Relationship between inter metallic compounds and interface properties of aluminum and steel⁹⁾.

このように、冶金学的にアルミニウム合金と鉄鋼材料を接合する場合、架橋のための加熱、金属間化合物層成長抑制のための入熱制御とのバランスを図る必要がある。入熱制御が容易な熱源としてはレーザーが挙げられる。5052-Oアルミニウム合金と裸軟鋼板 (SPCC) と

の異材接合においてSPCCにのみレーザー加熱したのちロール圧接した事例では、金属間化合物層を4~5μmに制御することによって継手強度を向上させている¹⁰⁾。

副資材を用いない溶融溶接方法として抵抗スポット溶接も挙げられる。その模式図をFig. 3に、一例として、アルミニウム合金どうしの抵抗スポット溶接断面写真をFig. 4に示す。電極で加圧された被接合材に通電し、その抵抗発熱を利用する溶融溶接工法で、自動車用鉄鋼材料では最も多く用いられている。鉄鋼材料と比べて電気抵抗が低いアルミニウム合金では、表面抵抗や接触抵抗による発熱を利用する。6000系アルミニウム合金と鉄鋼材料との異材抵抗スポット溶接において、金属間化合物層の形成を抑制するためアルミニウム合金のみが溶融するような通電制御を行った事例がある¹¹⁾。鉄鋼材料には裸軟鋼板 (SPCC) のほか、自動車用として使用頻度の高い合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (GA), 及びGAよりも亜鉛めっき目付量が小さく、めっき融点が高い電気亜鉛めっき鋼板 (EG) を用いて6000系アルミニウム合金との異材抵抗スポット溶接を行ったところ、SPCCでは鋼板の酸化被膜の影響により金属間化合物層の形成が不連続となり、GAでは入熱不足によりめっき層の残留が見られた。EGでは厚さ1~2μm程度の均一な金属間化合物層が形成され、高い

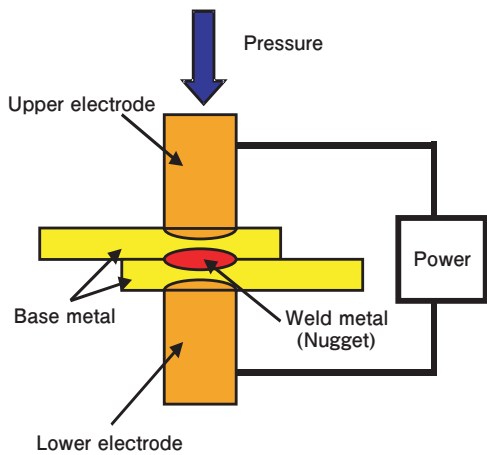


Fig. 3 Schematic drawing of resistance spot welding.

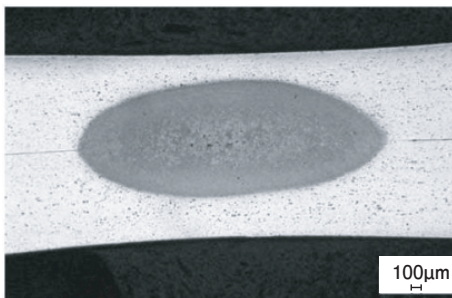


Fig. 4 Cross section of resistance spot welding of aluminum.

接合強度が得られた。車体用鉄鋼材料として一般的なGAにも適用するためには、接合界面からのめっき成分の排出を促進する必要がある。そのため、多段通電パターンや電極形状の検討が進められている。

3.3 固相接合

抵抗スポット溶接などの溶融溶接では接合界面の金属間化合物層成長の抑制が課題であったが、固相接合となるFSW及びFSSWではその抑制が容易と考えられる。また、副資材を用いない点でも優位性がある。Fig. 5にFSSWの模式図を示す。6000系アルミニウム合金板T4調質材と裸軟鋼板 (SPCC) との重ね接合にFSSWを用い、連続打点性を考慮して回転工具が摩耗しないようにアルミニウム合金側からSPCC直上まで差込み、界面近傍を強くかくはんする方式で十分な接合強度が得られる可能性を調査した事例がある¹²⁾。引張せん断荷重の最大値を示した継手の接合界面を電子回折パターン観察した結果をFig. 6に示す。接合界面には回折斑点が存在しないことから、結晶構造を持たないアモルファス層であることが確認され、ほぼ全域で厚さ数nmの薄い層であった。

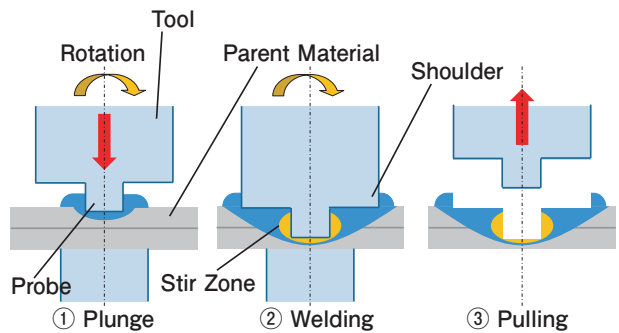


Fig. 5 Schematic drawing of friction stir spot welding.

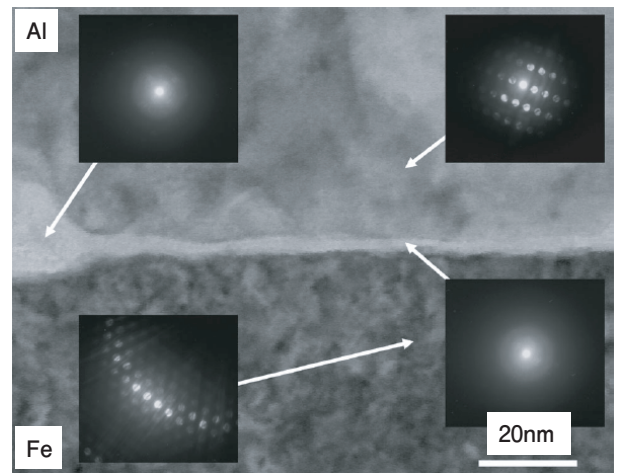


Fig. 6 TEM micrographs of weld interface of the FSSW dissimilar joint and selected area diffraction pattern¹²⁾.

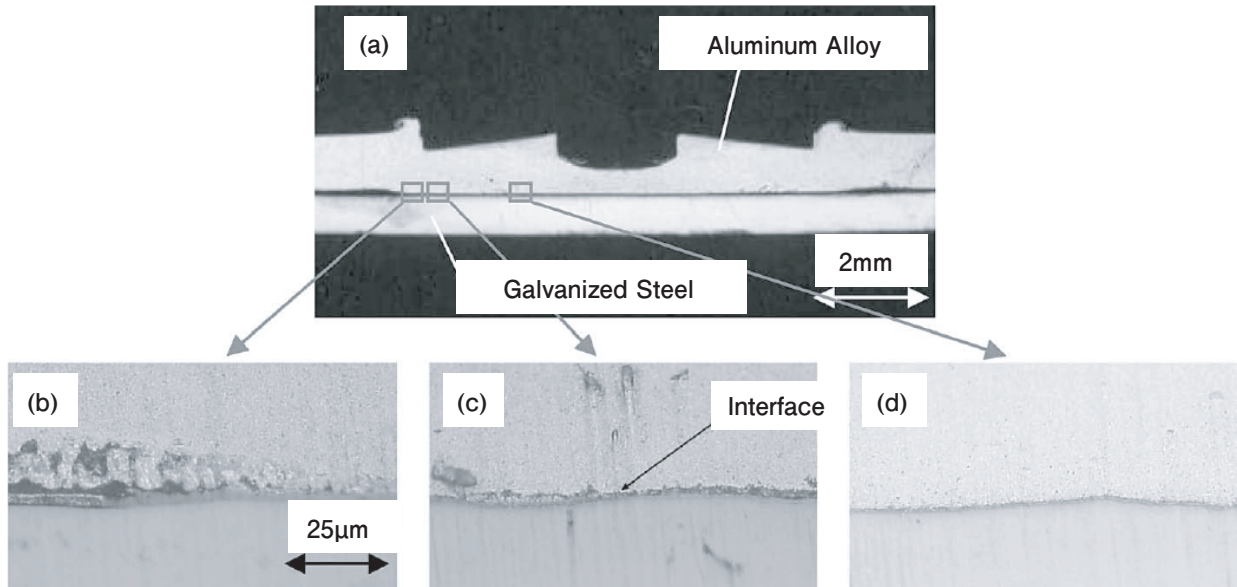


Fig. 7 Cross section of FSSW joint: (a) is whole image, (b), (c), (d) are close section view of interface¹³⁾.

めっき鋼板との接合にFSSWを適用した事例もある¹³⁾。アルミニウム合金側の酸化被膜は容易に破壊できるが、めっき鋼板側の酸化被膜除去が不十分であると、アルミニウム合金と鋼板の新生面を直接密着できないため、十分な継手強度が得られないと考えられた。そこで、アルミニウム合金及びめっき層を摩擦熱により軟化させるときに、めっき表面に形成した酸化被膜をめっき層と共に接合界面から除去することにより、アルミニウム合金とめっき鋼板の新生面を直接密着させようと試みた。種々のめっき鋼板を用いて継手強度を評価したところ、めっきの溶融温度が高くなるにつれて継手強度が低下する傾向を示した。高融点のめっき種では界面からの除去が困難なためと考えられる。Fig. 7に接合部断面写真を示す。接合端に近い(b)及び(c)では、アルミニウム合金とめっき鋼板の界面に中間層が存在している。Fig. 8に示すように、マツダでは本接合技術を2005年に発売したロードスターのアルミニウム合金製のトランクリッドインナパネルに採用し、ヒンジインフォースメントとめっき鋼板製ボルトリテーナを接合している。

上述のように上板のアルミニウム合金のみをかくはんするのではなく、下板の鉄鋼材料まで押し込むことで、下板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摩擦アンカー接合が提案されている。これにより3枚以上の複数枚の重ね継手への適用が可能とされている¹⁴⁾。回転工具は耐久性を高めるために先端を球面形状としている。車体用鉄鋼材料として一般的な合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA)との摩擦アンカー接合を行っ



Fig. 8 FSSW of aluminum to steel used in an aluminum trunk lid¹³⁾.

て問題点及び対策を考察した事例がある¹⁵⁾。5052アルミニウム合金との重ね接合を裸軟鋼板(SPCC)及びGAで行ったとき、十字引張強度がGAとの接合において低位であった。GAは亜鉛めっきを施した鋼に熱処理を行ったもので、めっき層はFe-Zn金属間化合物で構成されている。接合中の摩擦熱によってGAめっき層内には5052からAlが、GA基材からはFeが拡散侵入するとともに、Zn液相が加圧によって排出されることで、元のGAめっき層であるFe-Zn金属間化合物からFe-Al金属間化合物へと変質し、脆弱なFe₄Al₁₃が生成したと考えられる。アルミニウム合金とGAの界面で生じるこの化学反応を抑制するため、GAとの直接接合を避ける方策として、薄い裸軟鋼板を挟んだ3枚重ねとする方策と、アルミニウム合金側に陽極酸化被膜を施す方策が検討された。双方とも十字引張強度が改善されたが、コストや製造しやすさの面で劣るため開発途上である。

4. おわりに

アルミニウム合金と鉄鋼材料の異材接合のうち、副資材を必要としない接合技術について現状と課題を述べた。いずれの接合方法でも接合界面に生成する脆弱な金属間化合物層の抑制が必要である。そうなると、低入熱な固相接合に分があるといえるため、実用化事例も存在した。しかし、車体用鉄鋼材料として一般的な合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (GA) への適用には、溶融溶接である抵抗スポット溶接、固相接合であるFSW及びFSSWのそれぞれにおいて解決策が練られている現状である。また、電蝕対策として接着剤やシーラが併用されるため、これらの分離技術も並行して開発する必要がある。分離・リサイクル促進によりアルミニウム合金のコストダウンを図ることが、軽量材料の置換促進による自動車の軽量化・燃費改善につながるため、基盤としての接合技術が重要になっていくと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：「乗用車の新たな燃費基準に関する報告書」の公表，<https://www.mlit.go.jp/common/001295001.pdf>
- 2) 日本アルミニウム協会：日本のアルミ産業概念図，<https://www.aluminum.or.jp/basic/japanindustry.html>
- 3) 畑山博樹，醍醐市朗，松野泰也：第七回日本LCA学会研究発表会講演要旨集(2012)，244-245
- 4) 西口勝也，田中耕二郎，森田泰博，杉本幸弘：マツダ技報，**35** (2018)，95-100

- 5) 糸井貴臣，鈴木 亮，佐々木雅史，岡川啓悟：軽金属溶接，**55** (2017)，290-299
- 6) 福田敏彦：UACJ Technical Reports, **2** (2015), 152-160
- 7) 福田敏彦，熊谷正樹，難波圭三：溶接学会全国大会講演概要，**82** (2008)，102-103
- 8) 泰山正則，小川和博，高 隆夫：溶接学会論文集，**14** (1996)，314-320
- 9) 福田敏彦，中山英介，西畑ひとみ：溶接学会全国大会講演概要，**90** (2012)，60-61
- 10) 杵名宗春，ラソッドマノーヂュ：溶接学会論文集，**21** (2003)，282-294
- 11) 田中耕二郎，杉本幸弘，西口勝也：マツダ技報，**33** (2016)，124-129
- 12) 田中晃二，熊谷正樹，吉田英雄：軽金属，**56** (2006)，317-322
- 13) 玄道俊行，西口勝也，麻川元康：日本金属学会誌，**70** (2006)，870-873
- 14) 大石 郁，坂村 勝，竹保義博：日本国特許第5854451号 (2016)
- 15) 坂村 勝，船木 開，藤井英俊：軽金属溶接，**58** (2020)，281-286



池田 剛司 (Takeshi Ikeda)
(株)UACJ マーケティング・技術本部
R&D センター 第二開発部



戸次 洋一郎 (Yoichiro Bekki)
(株)UACJ マーケティング技術本部
R&D センター 第一研究部