

特集：マルチマテリアルの接合技術

## マルチマテリアルによる 輸送機器の軽量化の意義と技術開発

東 北 大 学  
佐 藤 裕

### 1. はじめに

持続可能な社会を構築するには、地球温暖化の抑制が不可欠であり、運輸部門における二酸化炭素排出量の低減が強く求められている。日本では、二酸化炭素の総排出量の約 17%を運輸部門が占めている。例えば、自動車においては、図 1 に示すように、重量が低下するほど燃費は向上するため、自動車を含めた輸送機器の軽量化は持続可能な社会構築に大きく貢献することとなる。

輸送機器の軽量化を達成する方法として、異なった機能を有する材料を適材適所で使用し、製品や部品の多機能化、高機能化、高付加価値化とコスト削減を同時に達成する“マルチマテリアル化”が注目されている<sup>2)</sup>。マルチマテリアル構造を実現するためには、異なった材料同士を接合する“異材接合”技術が不可欠であるが、異材接合により高い信頼性を有する継手を得るのは難しい。本報では、マルチマテリアルの必要性、異材接合技術の種類と特徴、適用が期待される構造物について平易に解説する。

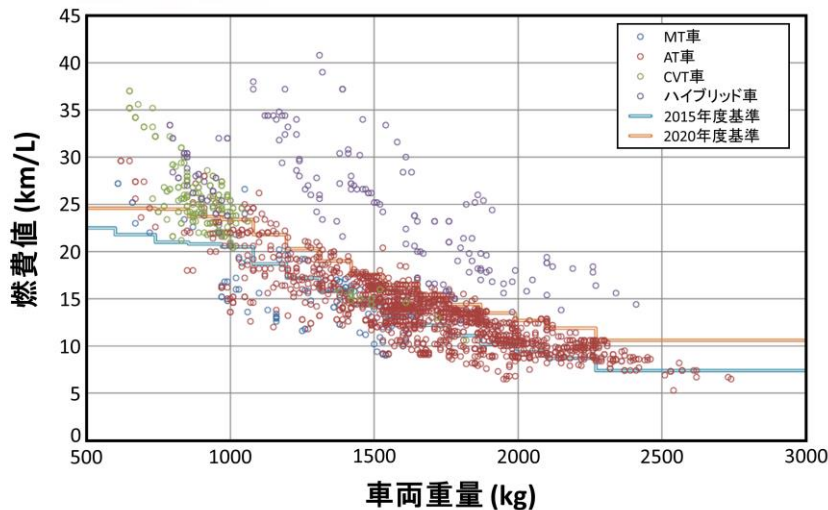


図 1 ガソリン乗用車の車両重量と燃費 (JC08 モード) の関係<sup>1)</sup>

### 2. マルチマテリアルの必要性

マルチマテリアル構造では、鉄鋼、軽金属材料、プラスチックなどを適切に組み合わせることで、製品の性能を向上させることができる。工業製品に要求される性能は場所により異なるため、場所ごとに適する材料を使用することができれば、製品の高性能化に寄与できるが、性能を重視するあまり高価な材料の使用比率を増加させるのは、製品価格の上昇に繋がるため好ましくない。すなわち、各種材料を適材適所で使用することで、性能向上とコスト低減のバランスをとる必要があり、その技術がマルチマテリアルと言える<sup>2)</sup>。

例えば、自動車車体の製造には鉄鋼が多く利用されており、これまで高張力鋼（ハイテン）への材料置換による車体の軽量化が進められてきたが、設計変更やハイテン化による軽量化は限界を迎えており、鉄鋼からアルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽金属材料や炭素繊維強化プラスチック（CFRP）への置換が必須と考えられている。しかし、これら軽量材料は鉄鋼に比べれば高価であるため、全てを軽量材料に置換するのは好ましくなく、例えば図2<sup>3)</sup>に示すように、材料を適材適所で使い分けることでコストの大幅な増加を抑制する必要がある。他にも輸送機器ではないが、海洋構造物における鉄鋼とチタンのマルチマテリアル構造なども一例として挙げられる。鉄鋼は、ステンレス鋼であっても海水により腐食するため、海水に対して完全耐食性を有するチタンを用いて、海洋構造物を製造することが性能上好ましいが、チタンは鉄鋼に比べれば非常に高価なため、海水に接触する部分のみを純チタンへ置換するのが有効である。

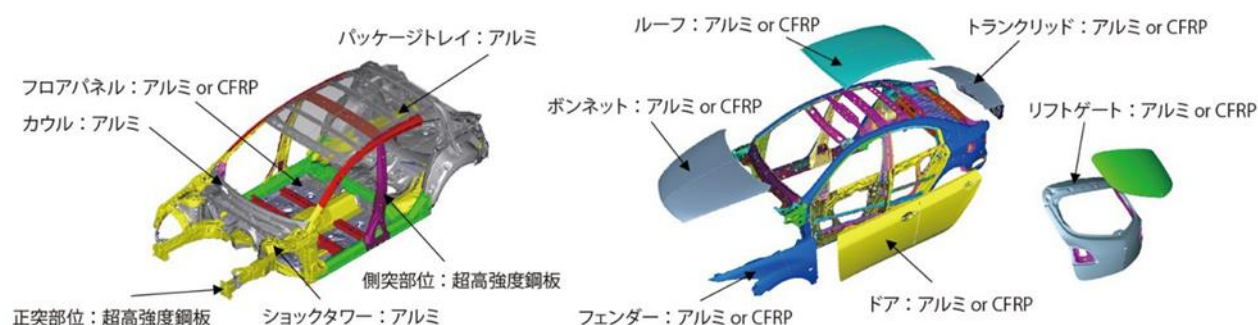


図2 車体軽量化に向けたマルチマテリアル化の一例<sup>3)</sup>

このように、マルチマテリアル技術は製品のコストパフォーマンスを最適化できるが、異種材料を信頼性高く接合できる異材接合技術が不可欠である。種々の接合技術が研究・開発され、多くの解説や研究論文にて公表されているが、オールマイティな接合技術はなく、それぞれ一長一短あり、使用材料や製品などにより使い分けなければならない。次に代表的な異材接合技術について紹介する。

### 3. 異材接合技術の種類と特徴

#### 3.1 機械的締結

機械的締結には、ボルトやリベットなどの副資材を用いた手法やクリンチングなどが挙げられる。副資材を用いた機械的締結としては、セルフピアスリベット（SPR：Self-Piercing Rivet）が広く普及している。図3<sup>4)</sup>に示すようなリベットを、重ねた被接合材中に押し込むことで、被接合材を点で固定することが可能である。他にも、Flow Drilling Screw (FDS)やFriction Element Welding (FEW)なども開発されている<sup>5)</sup>。副資材を用いる機械的締結法は、主に欧州において自動車車体の製造で実用化されている。これらの手法は、局所的な加熱・冷却による材質変化や変形がなく、異材間の反応や物性違いによる不具合が生じにくいという利点があるが、副資材による重量やコストの増加、生産性の低下、製品形状の制限、接合部の応力集中などの欠点もある。一方、クリンチングは、図4<sup>6)</sup>に示すように、被接合材自身を塑性変形させて、接合する手法である。副資材を使うことがなく、重量増を最小限にできるが、接合部に突起ができてしまうという欠点がある。

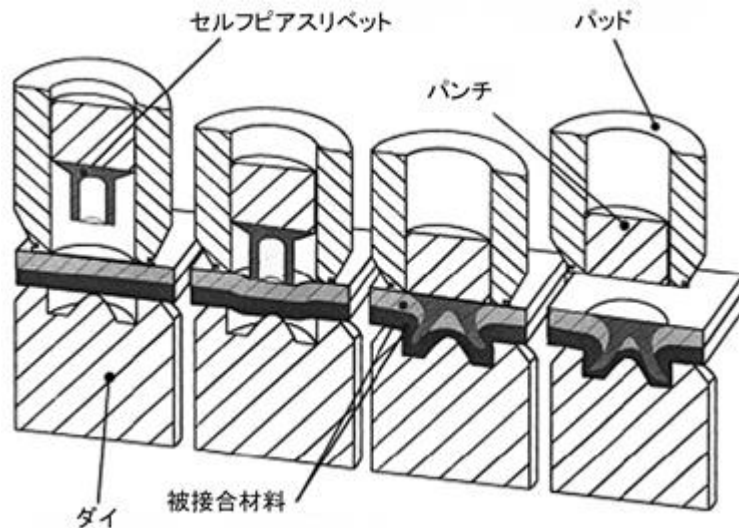


図3 セルフピアスリベット (SPR) の概念図<sup>4)</sup>

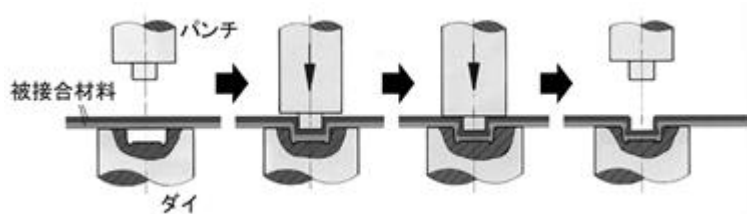


図4 クリンチングの概念図<sup>6)</sup>

### 3.2 接着

異材接合を達成する技術として、接着も注目されている。接着剤との相性がよい材料の接合においては、強固な接合が可能であり、異材接合でも有用である。特に、金属とプラスチックや CFRP との接合において、重要な技術と考えられる。接着の利点としては、面接合が可能のため、接合面積を稼げる場合には高い強度が発揮できる、気密性、水密性、制振性などの機能を付与できる、熱による被接合材の材質変化がないなどの利点がある一方、接着剤の選定が難しい、接着の評価や管理が難しいなどの欠点もある。詳細は次の記事を参照いただきたい。

### 3.3 冶金的接合

マルチマテリアル構造の工業製品の製造においては、特殊な設備を用いることなく、簡便なプロセスで良好な異材接合継手を作製する必要があるため、既存の加熱を伴う溶接・接合技術（以後、冶金的接合と呼ぶ）の適用が期待されている。冶金的接合は、原子レベルで冶金的に2つの異種材料を一体化することで達成されるが、そのためには金属表面の活性化（酸化膜などの除去）と活性表面同士との接触が不可欠である。一般に、これらを達成するには、被接合材を加熱・溶融もしくは変形させる必要がある。例えば、アーク溶接やレーザー溶接などの溶融溶接法では、被接合材を加熱して溶融させて一体化しているし、摩擦攪拌接合（FSW）や摩擦圧接、超音波接合などの固相接合法では、被接合材を変形させることで接合している。材料を変形させると発熱するため、冶金的接合では、ほとんどの場合、被接合材は高温へ加熱される。そのため、異種材料の冶金的接合では、高温への加熱に伴って生じる問題が発生する。

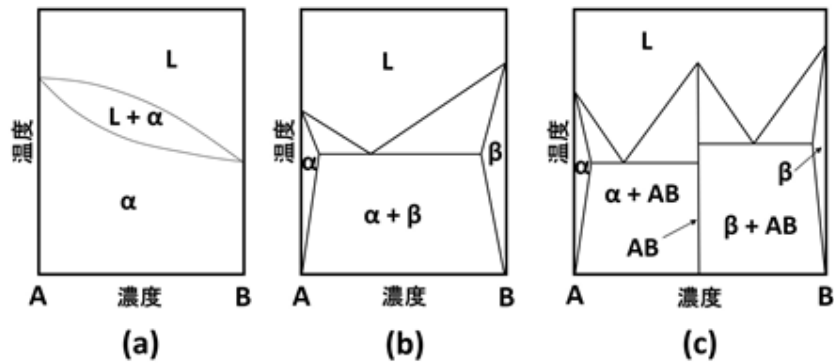


図5 二元系状態図の分類 (a)全率固溶型, (b)二相分離型, (c)金属間化合物形成型

異種材料の冶金的接合で生じる問題としては、界面反応層の形成と熱応力の発生が挙げられる。異種金属間の接合性（接合のしやすさ）は、図5に示す二元系状態図によって分類できる。(a)は全率固溶型、(b)は二相分離型、(c)は金属間化合物形成型である。このうち、(a)全率固溶型は全ての組成域で2つの金属は固溶体を形成するため、接合性は良好である。(b)二相分離型の場合も比較的接合性が良好な組み合わせが多いが、FeとMgのように接合が難しい組み合わせもある。実用上、異材接合の要望が高い金属の組み合わせのほとんどは、(c)金属間化合物形成型に分類される。金属間化合物は、2種類以上の金属原子で構成される化合物であるが、構成する金属とは全く異なる性質を示すものであり、一般的に硬くて脆い。金属間化合物形成型の場合、接合時に異材界面が加熱されているため、お互いの原子が移動（相互拡散）して反応し、接合界面に硬くて脆い金属間化合物が形成される。接合時の温度が高く、高温に保持される時間が長いほど、相互拡散が進むため、金属間化合物は厚くなる。継手に機械的な負荷が加わると、塑性変形することなく、金属間化合物からぜい性的に破断するケースが多く、問題となる。

一般的に、界面での金属間化合物の層が厚いほど、継手強度は下がることが知られている<sup>7)9)</sup>。例えば、図6に6061Al合金と種々の鋼を拡散接合した継手界面の金属間化合物層の厚さと継手強度の関係を示す<sup>10)</sup>。金属間化合物の層が非常に薄い場合、接合されている界面積が小さいため、強度は低い。層が厚くなるにしたがって強度は増加するが、厚さが約1μmを超えると低下する。そのため、異材接合においては、広い接合面積を達成しつつ、金属間化合物層の厚さを抑制することが、高い継手強度を確保するのに必要である。薄い金属間化合物層を広い領域で達成するため、投入される熱量の低い冶金的接合法、特に図7に示したFSWや摩擦攪拌点接合(FSSW)<sup>11)</sup>、超音波接合などの固相接合法の適用が世界中で検討されている。

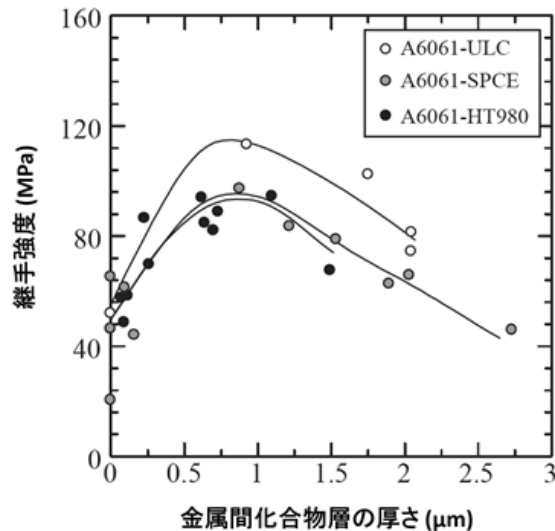


図6 6061Al合金／鋼の拡散接合継手における継手強度に及ぼす金属間化合物層厚さの影響<sup>10)</sup>

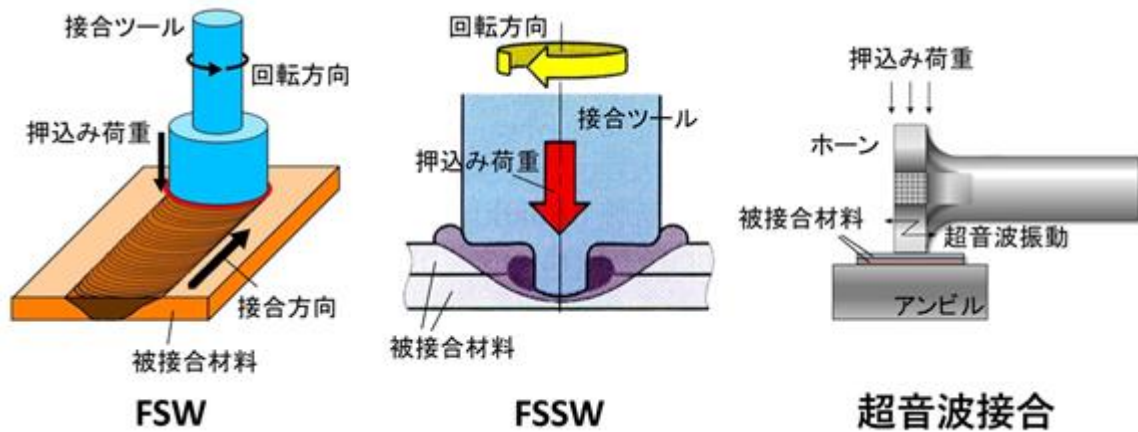


図7 異材接合への適用が検討されている代表的な固相接合法の模式図

冶金的接合はほとんどの場合、加熱された状態で接合されるため、接合後に継手は冷却される。材料は温度低下とともに収縮するが、収縮量は材料によって異なるため、異材接合界面には熱応力が発生する。収縮量の差が大きな材料の組合せでは、冷却に伴う熱応力により界面に亀裂が発生する場合もある。熱応力を緩和するには、中間の収縮量を示す材料や熱応力により塑性変形する材料を間に挟むなどの対策が必要となる。

また異種金属接触腐食が問題になる場合もある。異なる金属を水や水溶液中で接触させたとき、イオンになりやすい金属（標準電極電位が低い金属）のイオン化（水や水溶液への溶出）、すなわち腐食が促進される。この現象は異種金属接触腐食（ガルバニック腐食）と呼ばれる。金属のイオン化傾向（標準電極電位）は決まっているため、異材接合継手が水などを介して電気が流れやすい環境に晒されると、イオンになりやすい金属が急激に腐食する。異種金属接触腐食を防止するには、塗料やシール材などにより腐食環境から接合界面を隔離する、金属間に絶縁体を挟む、イオンになりやすい金属に対して、イオンになりにくい金属の面積比を小さくするなどの対策が必要である。

#### 4. 適用が期待される構造物

##### 4.1 自動車

マルチ材料が最も期待されている構造物は自動車車体であろう。車体に多く利用されている鉄鋼を軽量材料へ置換することで、二酸化炭素排出量削減、衝突安全性確保、低価格を同時に満たすことができるためである。自動車車体へのマルチ材料化では、鋼/Al 合金の接合が広く研究されている。SPR などの機械的締結に加え、冶金的接合に関する研究も多く報告されている。また、エジヨット社が開発した EJOWELD<sup>®12)</sup>や神戸製鋼所が開発したエレメントアークスポット溶接 (EASW)<sup>13)</sup>のように、冶金的接合と機械的締結を組み合わせた接合技術も注目されている。

鋼/Al 合金の冶金的接合において、アーク溶接やレーザ溶接、抵抗溶接などの熔融溶接法、アークやレーザを熱源としたろう接法、FSW や超音波接合などの固相接合法が用いられた例が多数報告されている。熔融溶接法を用いた場合には、低融点の Al 合金のみを熔融して、鋼は溶かさずに界面接合される場合が多い。

鋼/Al 合金の冶金的接合における最大の問題は、極めて脆い金属間化合物が界面に形成される点である。Fe と Al の組合せは金属間化合物形成型であり、これらの接合界面には、図 8 に示すような、

大部分が  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  から成る金属間化合物の層が形成される。 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  は塑性変形しにくく、小さな機械的負荷で脆性的に破断するため、良好な継手強度を得ることが難しい。 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  層を薄くするには、入熱が低い接合法の適用が不可欠であるが、Al への Si 添加も有効であることが報告されている<sup>14),15)</sup>。最近では、Ni を添加すると、 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  の結晶粒組織が微細化し、継手強度を向上させることも示されている<sup>16)</sup>。

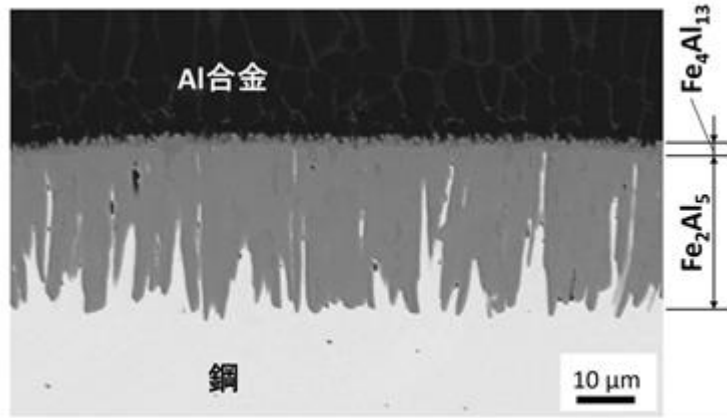


図8 鋼/Al合金の接合界面に形成された金属間化合物層の電子顕微鏡写真の一例

さらなる軽量化を目指して、金属/CFRPの接合も精力的に研究・開発が行われている。金属表面にシランカップリング処理を行って樹脂との親和性を向上させた後、金属/樹脂の直接面接合を達成する手法なども報告されているが、金属表面に微細な多孔質構造を付与し、そこへ樹脂を含浸させて、アンカー接合する方法<sup>17)</sup>も多く検討されている。金属表面に微細な多孔質構造を付与する方法としては、化学エッチングを用いる手法<sup>17)</sup>、レーザー照射を用いる方法<sup>18)</sup>などが報告されている。図9にレーザー照射を用いてTi-6Al-4V合金表面に細孔を付与し、熱可塑性樹脂PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）と接合した例を示す<sup>18)</sup>。せん断引張試験を実施した結果、細孔根元でPEEK樹脂が切れるように破断し、良好なせん断強度を示すことが報告されている。

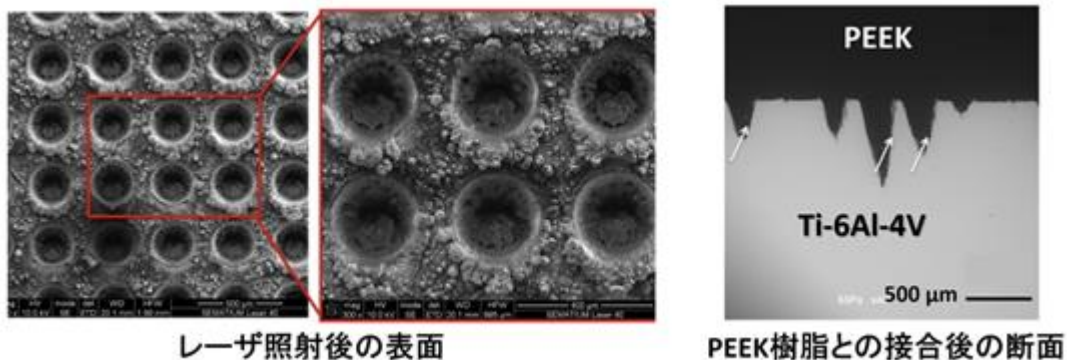


図9 レーザー照射で得られたTi合金の表面パターン、およびPEEK樹脂との接合後の断面写真<sup>18)</sup>

自動車においては、ワイヤーハーネスの異材接合も重要である。ワイヤーハーネスは電子制御が進む自動車において、電気・電子部品をつなぐ電線類を束にして纏めた部品のことであり、人間でいう神経や血管のようなものである。現在、1台の自動車に搭載される電線数は2000本以上と言われており、その総延長は2~3kmにおよび、質量は合計20~30kgになると言われている<sup>19)</sup>。今後電動

化が進むと大きな径の電線を多量に使用することになるため、さらなる重量の増加が予測される。そのため、ワイヤーハーネスの軽量化も必須であり、電線系統のシステム統合や絶縁体の薄肉化などによる軽量化対策が講じられてきたが、これまで電線に多用されてきた Cu を、電気伝導率は劣るものの、低価格で軽量の Al 合金へ置換することも必要である。Cu 電線を Al 電線へ置き換えるにあたり、重要な技術が Cu/Al の異材接合である。Cu と Al も典型的な金属間化合物形成型であり、溶接・接合を行うと  $Al_2Cu$ ,  $Al_4Cu_9$  のような金属間化合物が界面に形成されるため、良好な継手強度を得にくい。また金属間化合物は、Cu や Al よりも電気抵抗が高いため、これらが界面に形成されるのは好ましくない。そのため、超音波接合などの入熱が低い固相接合技術を用いて、接合条件やプロセスの最適化を通して、金属間化合物による特性劣化を防止する取り組みが行われている。

## 4.2 船舶

船舶においても、軽量化による燃費、温室効果ガス排出量低減は必須である。これまで主に鋼で製造されていた船舶の主要構造の一部を Al 合金や CFRP へ置換することで、軽量化を達成しようとする動きがある。ここでは、鋼船舶の上部構造を Al 合金化することを可能にした構造用異材継手 STJ<sup>®</sup> (Structural Transition Joint) について紹介する<sup>20)</sup>。図 10 に STJ<sup>®</sup> の模式図を示す<sup>20)</sup>。鋼と Al 合金が接合されたものであり、Al 合金側には Al 合金構造物を鋼側には鋼構造物を溶接することで、鋼と Al 合金のマルチマテリアル構造を作ることができる。STJ<sup>®</sup> において、鋼と Al 合金は、火薬の爆発エネルギーによる衝突で接合する爆発圧着（通称、爆着）により固相接合されている。爆着は極めて短時間で達成されるため熱影響が非常に小さく、強固な継手を得ることができる。この STJ<sup>®</sup> を用いた鋼と Al 合金のマルチマテリアル構造は、海上保安庁巡視艇や LNG タンカーなどにも採用されている。

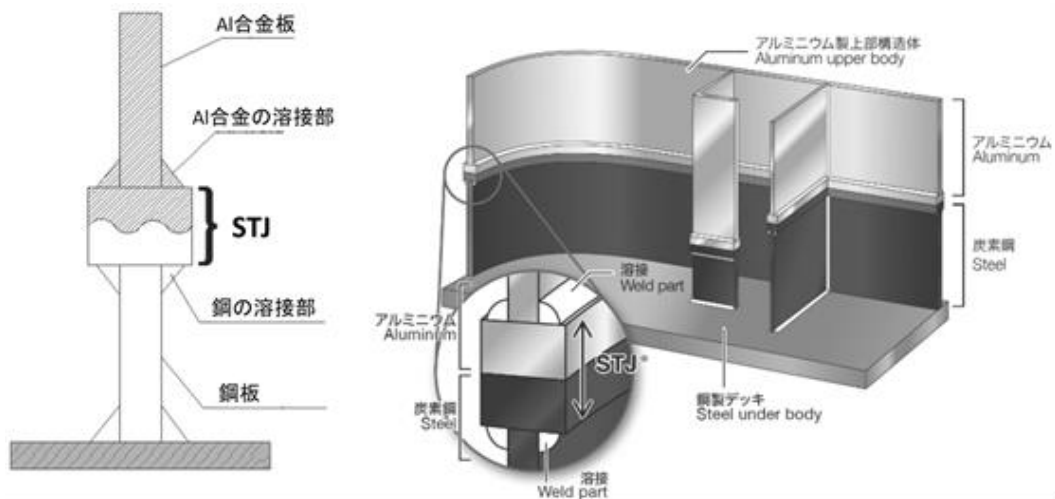


図 10 構造用異材継手 STJ<sup>®</sup>を用いた鋼と Al 合金のマルチマテリアル構造の一例<sup>20)</sup>

## 5. まとめ

マルチマテリアルは、工業製品の性能向上と低コストを両立する技術として非常に重要である。しかし、マルチマテリアル化に不可欠な異材接合において、オールマイティな技術はなく、マルチマテリアルを構成する材料特性を最大限に活用しきれていない現状がある。現時点では、異材接合のためのプロセス開発が広く行われているが、今後は化学反応などを上手く活用した新しい接合技術の誕生

が必要ではないだろうか。特性劣化のない異材接合界面を、特殊な工程や設備を用いることなく作り込む技術が達成されれば、さまざまなマルチマテリアル構造が輸送機器以外にも広く使われるようになり、便利で快適な社会生活に不可欠なものになっていくだろう。マルチマテリアル構造の使用後に必要となる材料分離技術の進展とともに、今後の技術開発を大いに期待したい。

## 参考文献

- 1) 国土交通省 HP <http://www.mlit.go.jp/common/001225519.pdf>
- 2) 廣瀬明夫: 軽金属, 71-4 (2021), 189-196.
- 3) 新構造材料技術研究組合 (ISMA) HP <https://isma.jp/works/>
- 4) X. He, I. Pearson, K. Young: Journal of Materials Processing Technology, 199 (2008), 27-36.
- 5) 小橋泰三, 岩瀬哲, 前田恭兵: 神戸製鋼技報, 67-1 (2018), 98-103.
- 6) J. Varis: Journal of Materials Processing Technology, 174 (2006), 277-285.
- 7) 泰山正則, 小川和博, 高隆夫: 溶接学会論文集, 14-2 (1996), 314-320.
- 8) 及川初彦, 斉藤亨, 永瀬隆夫, 切山忠夫: 鉄と鋼, 83-10 (1997), 641-646.
- 9) T. Murakami, K. Nakata, H. Tong, M. Ushio: ISIJ International, 43-10 (2003), 1596-1602.
- 10) T. Ogura, H. Umeshita, Y. Saito, A. Hirose: 溶接学会論文集, 27-2 (2009), 174s-178s.
- 11) 藤本光生: 金属, 78-10 (2008), 10-15.
- 12) エジヨット社カタログ EJOWELD®
- 13) 鈴木励一: 溶接技術, 67-5 (2019), 36-42.
- 14) H. Springer, A. Kostka, E.J. Payton, D. Raabe, A. Kaysser-Pyzalla, G. Eggeler: Acta Materialia, 59 (2011), 1586-1600.
- 15) K. Zhang, X. Bian, Y. Li, Y. Liu, C. Yang: J. Mater. Res., 28 (2013), 3279-3287.
- 16) H.S. Furuya, Y.T. Sato, Y.S. Sato, H. Kokawa, Y. Tatsumi: Metallurgical and Materials Transactions A, 49A (2018), 527-536.
- 17) 板橋雅巳: 表面技術, 66-8 (2015), 359-362.
- 18) B. Henriques, M. Sampaio, M. Buciumeanu, J.C.M. Souza, J.R. Gomes, F. Silva, O. Carvalho: Materials Science and Engineering C, 79 (2017), 177-184.
- 19) 巻頭記事「新世代の自動車に重要な役割を果たすワイヤーハーネス」, まてりあ, 60-12 (2021), 769-772.
- 20) 花野嘉紀: 溶接学会誌, 87-1 (2018), 76-79.

<略歴>

**佐藤 裕 (さとう ゆたか)**

1997年 東北大学 大学院工学研究科 材料加工学専攻 博士前期2年の課程修了  
1997年 東北大学 大学院工学研究科 助手  
2001年 博士(工学)取得  
2003年 米国ブリガムヤング大学博士研究員(～2004年)  
2007年 東北大学 大学院工学研究科 助教(名称変更)  
2008年 東北大学 大学院工学研究科 准教授  
2017年 東北大学 大学院工学研究科 教授  
現在に至る