

連携記事

異材接合技術の現状

Current Trends of Dissimilar Materials Joining

廣瀬明夫

Akio Hirose

大阪大学
大学院工学研究科
教授

1 はじめに

自動車分野のみならず、各産業分野で構造物の高機能化、省コスト化のために、複数の材料を適材適所に組み合わせたマルチマテリアル構造が必要とされている。マルチマテリアル構造を実現するためには信頼性の高い異材接合技術の確立が必要である。異材接合は、古くは重工、造船分野で腐食環境、高温、低温用途に用いられる構造物を対象に実用化されてきた。近年では自動車を初めとした輸送用機器において、軽量化の観点からさらに必要性が増しており、その実用化のために国家プロジェクトも行われてきている。本稿では、産業界での異材接合開発と適用のトレンドを国家プロジェクトの動向も含めて概観するとともに、その基礎となる異材接合研究の現状と動向を述べる。また、最後に現在「革新的新構造材料等研究開発」(ISMA) プロジェクトにおいて筆者らが実施している異材接合に対する新たな評価手法について紹介する。

2 各産業分野におけるマルチマテリアル構造と異材接合技術

重工、造船、プラントなどの産業分野では、耐食性に優れたステンレス鋼と比較的安価で機械的特性の良好な低合金鋼、炭素鋼との溶接が代表的な異種材料接合であり、古くから行われている。この場合は、熔融溶接が可能であり、溶接材料の選定、希釈率の制御および適切な予熱・パス間温度の選択によって、健全な継手を形成できる溶接施工法が確立されている^{1,2)}。一方、耐食性に優れ軽量であるチタニウムや低温特性に優れたアルミニウム合金と鋼との異種材料接合の産業的必要性も高いが、これらは異種金属接合となり、両者の間で脆い金属間化合物が生成するため一般に熔融溶接の適用は困難であると考えられている²⁾。このため、爆着接合など

の固相接合によって予めチタニウム合金あるいはアルミニウム合金と鋼の異材接合継手(トランジション継手)を作製し、これを介して溶接する手法が採用されている^{2,3)}。トランジション継手のチタニウム合金側(あるいはアルミニウム合金側)と鋼側に、それぞれ熔融溶接によってチタニウム合金(あるいはアルミニウム合金)と鋼が同種材溶接され異材継手が施工される。鋼とアルミニウム合金のトランジション継手はLNG船に適用されている⁴⁾。一方、最近、図1に示すように、重ね摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding: FSW)を用いてアルミニウム合金とステンレス鋼厚板の異材継手が良好に作製できることが報告されており⁵⁻⁷⁾、多パス接合することで爆着接合同等の継手強度が得られている⁸⁾。

自動車を中心とした輸送用機器では、地球温暖化対策の観点から排出ガス規制が進められており、燃費改善のために軽

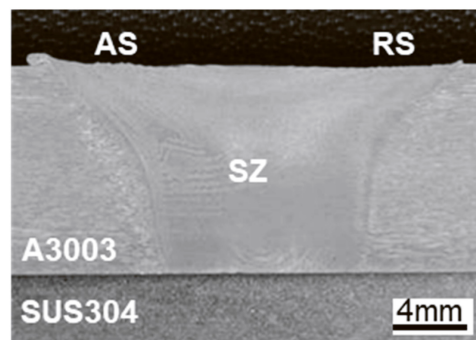
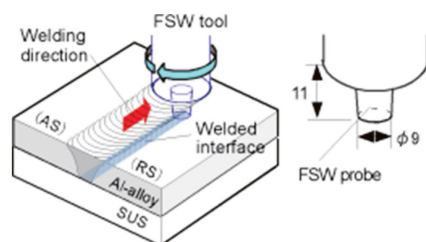


図1 重ね摩擦攪拌接合によるアルミニウム合金とステンレス鋼の異材接合継手

量化に対するニーズが大きい。車体軽量化のためには材料置換が有効であり、鉄鋼材料からアルミニウム合金や樹脂への材料置換が進められている。オールアルミニウム車体やオール炭素繊維強化プラスチック（CFRP）車体も一部で実用化されているが、コストや性能面からむしろ鉄鋼材料と軽合金、樹脂、CFRPなどを適材適所に用いたマルチマテリアル構造が指向されている。これらの材料を有効に車体構造に適用するためには、材料間の異種材料接合技術が必要であり、各自動車メーカーでの研究・開発とともに、国のプロジェクトとしても採択され技術開発が促進されている。

平成14年～18年には、省エネルギー技術開発プログラムとして「自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術」プロジェクトが実施されている⁵⁾。本プロジェクトでは、次の3項目の研究開発が実施された。

- ① 高成形性自動車用板材料の開発
- ② アルミニウム／鋼ハイブリッド構造の開発
- ③ 高信頼性ポーラスアルミニウム材料の開発

図2に本プロジェクトにおける自動車軽量化のための開発対象部材を示す⁹⁾。上記の② アルミニウム／鋼ハイブリッド構造の開発において、アルミニウム合金と鋼の接合技術の開発が実施され、抵抗スポット溶接、フラックス入りワイヤによるミグ溶接、レーザ溶接による溶接技術が提案されている。結果として、抵抗スポット溶接で剥離強度1.5kN／点（溶融亜鉛めっき鋼板（GI材）とアルミニウム合金との溶接）を、ミグ溶接で継手効率60％以上を達成している⁹⁾。

平成25年度からは、輸送用機器の軽量化を目的としたマルチマテリアル化をさらに促進するために、複合材料も含めた広範な材料の開発とこれらの接合技術の確立を目指した「革新的新構造材料等研究開発」（ISMA）プロジェクトがスター

トしている^{10,11)}。本プロジェクトでは、鉄鋼材料、アルミニウム材料、チタニウム材料、マグネシウム材料、CFRP等、輸送機器に適用される各種構造材料の高性能化とともに、これらの材料の同種および異種材料接合を実現するための革新的接合技術の開発を目的としている^{10,11)}。接合技術に関しては、図3¹⁰⁾に示すようにFSWなどの固相接合、抵抗スポット溶接、アーク溶接、レーザ溶接および接着接合を用いて、高強度高張力鋼同士、鋼／軽合金、鋼／樹脂、鋼／CFRPの異種材料接合の確立を目指している^{12,13)}。本プロジェクトには、我が国を代表する企業や大学が多数参画しており、産業応用面ならびに学術面の両面で、その成果が期待されている。

異材接合を用いた自動車のマルチマテリアル化の実用化例としては、鋼とアルミニウム合金のFSW接合が自動車のハイブリッドサブフレームの鋼製サイドメンバーとアルミニウムダイカスト製リアメンバーの接合に適用され量産化されている¹⁴⁾。接合ツールはアルミニウムダイカスト側から挿入されプローブ位置を鋼表面に制御することで鋼の新生面にアルミニウムが塑性流動して接合し0.25μm程度の薄い金属間化合物層を介して接合が達成されている¹⁴⁾。また、アルミニウム合金製ルーフと鋼板の接合に、機械的な締結であるセルフピアシングリベットと接着剤を併用して量産化した例もある¹⁵⁾。

3 異材接合技術の研究開発動向

3.1 界面反応層と接合強度

異材接合は、鋼／軽合金接合のような異種金属接合と鋼／樹脂あるいは鋼／CFRP接合のような金属と非金属の異種材料接合に大別できる。さらに異種金属接合における接合性は両者の金属の反応性によって、図4に示すように、全率固溶型、

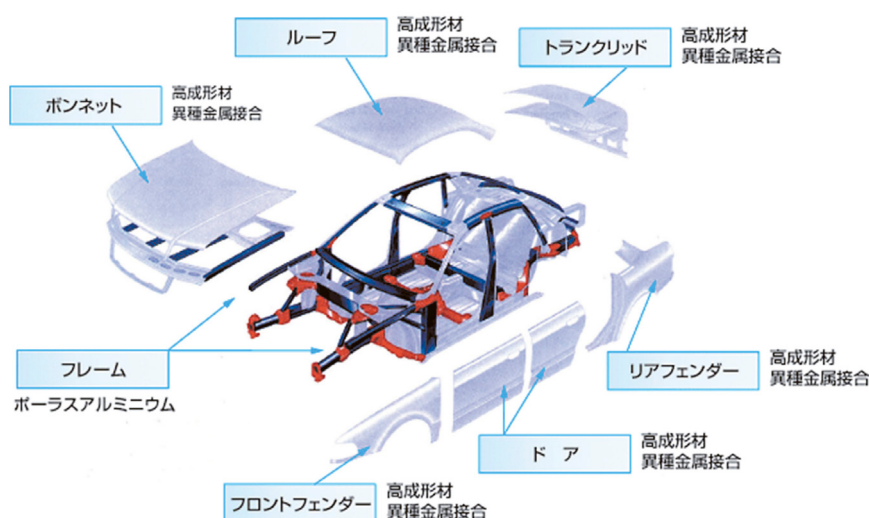


図2 「自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術」プロジェクトにおける自動車軽量化のための開発対象部材⁹⁾

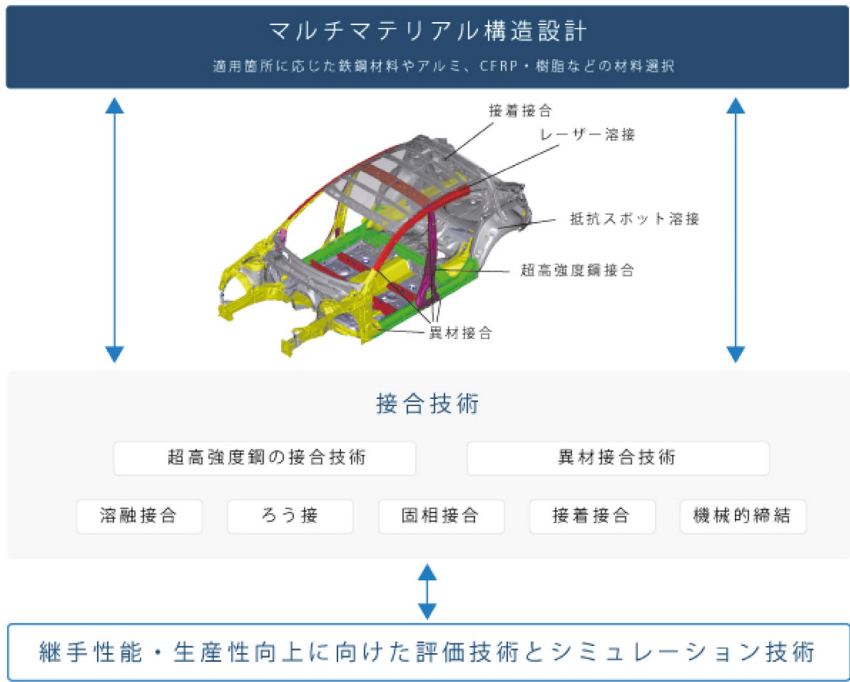


図3 「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトにおける車体軽量化に向けたマルチマテリアル化のための接合技術開発¹⁰⁾

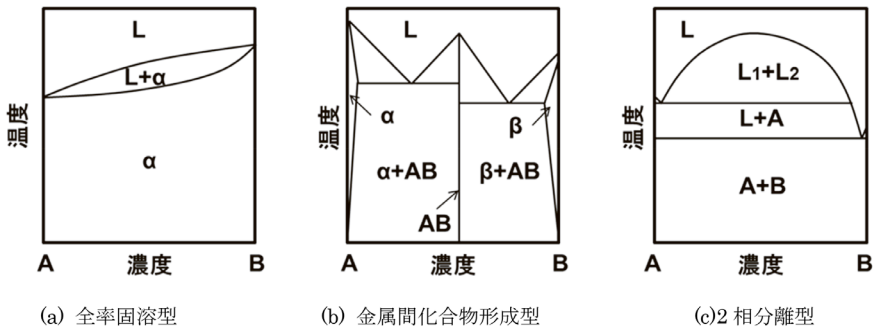


図4 2元系平衡状態図の分類

金属間化合物形成型および2相分離型に分類できる。全率固溶型は両者の金属が固相で完全に混じり合って全ての組成で固溶体を形成する組み合わせである。このような金属の組み合わせでは、接合界面に両者の固溶体を形成するため一般に接合性は良好である。銅・ニッケル系がこれに該当し、銅とニッケルの超音波接合部では高温放置試験後にも高い熱的信頼性が得られることが報告されており、エレクトロニクス分野で適用されている¹⁶⁾。しかし、一般的には、2つの金属間に1種類以上の化合物(金属間化合物)を形成する場合が多い。鉄とアルミニウム、鉄とチタニウム、アルミニウムとマグネシウムなどの組み合わせは金属間化合物を形成する系である。

この中で、自動車分野で最もニーズの高い鋼とアルミニウム合金との接合に関しては、界面反応によりAl-Fe系平衡状態図に存在する金属間化合物の中で、多くの場合、図5に示

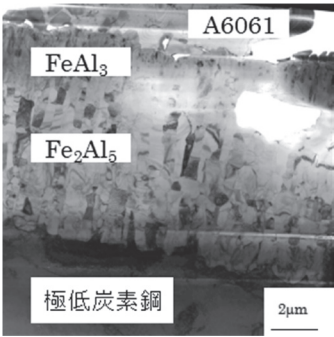


図5 極低炭素鋼とアルミニウム合金A6061の拡散接合継手の接合界面に形成した金属間化合物層のTEM写真

すようにアルミニウム合金側に Al_3Fe 、鋼側に Fe_2Al_5 が界面反応層として形成することが知られている¹⁷⁾。拡散接合継

手では接合界面に形成するこれらの反応層は、一定の潜伏時間を経た後に形成し、図6に示すように、反応層厚さは保持温度が高いほど、また保持時間が長くなるほど厚く成長して、その成長挙動は次式の放物線則で表されることが知られている¹⁸⁾。

$$x^2 = K(t - t_0) \quad (1)$$

ここで、 x は反応層厚さ、 K は成長速度定数、 t は保持時間、 t_0 は潜伏時間である。

接合界面に形成したAl-Fe系金属間化合物は、母材のアルミニウム合金や鋼に比べて非常に硬くて脆いため¹⁹⁾、継手特性に大きな影響を及ぼす。拡散接合継手では図7に示すように、反応層厚さが $1\mu\text{m}$ 程度以上に成長すると急激に継手強度

が低下する^{18,20)}。 $1\mu\text{m}$ より反応層厚さが薄い場合にも継手強度が低下するのは、拡散接合では拡散による接合が十分に進行していない接合初期では、一部の接合界面で未接合部が生じるためである^{18,20)}。これに対して、摩擦圧接のように接合初期から接合界面の密着性が高く、未接合部が生じない接合プロセスでは、界面の反応層厚さが薄いほど継手強度は上昇することが報告されている^{21,22)}。しかし、これまでの行われてきた異材接合強度に及ぼす界面反応層の影響の評価は、反応層観察に用いた試験片と強度評価に用いた試験片が同一でないために同一接合条件で接合した場合でも再現性の観点から直接的な相関関係が必ずしも担保されていない。これに関して、筆者らは接合部から採取した微小試験片を用いることで、界面組織を観察した試験片を用いて引張荷重下で強度試験を行い、界面反応層と接合強度の直接的な相関を評価した^{22,23)}。

まず、図8に示すようにA6061とSUS304あるいはHT780

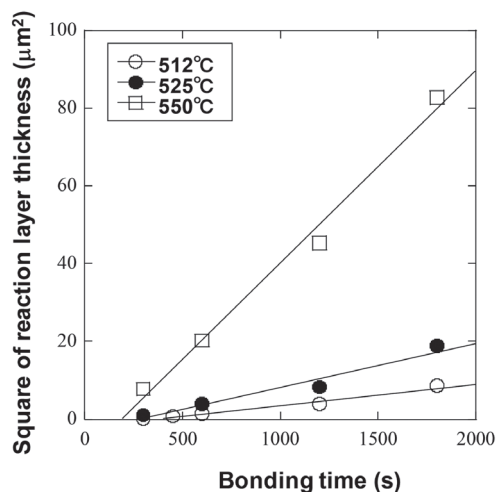


図6 高張力鋼HT980と6061アルミニウム合金との拡散接合継手におけるAl-Fe系金属間化合物厚さの2乗と接合時間との関係

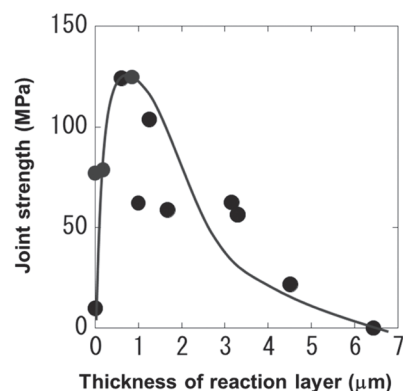


図7 A6061と極低炭素鋼拡散接合における接合強度に及ぼす界面反応層厚さの影響

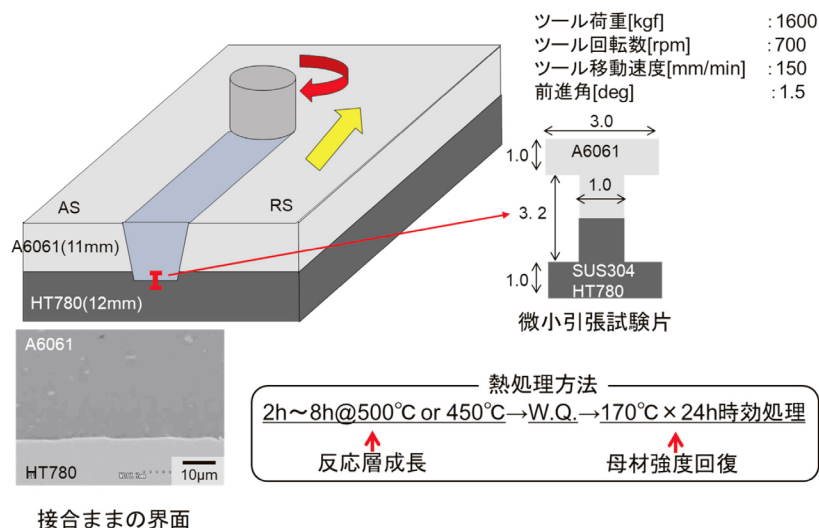


図8 A6061/SUS304およびHT780重ねFSW継手からの微小引張試験片採取方法

の異材重ね摩擦撚拌接合 (FSW) を行った。Al 合金側からのツールの押込み位置を適性に制御することで、良好な接合が達成された。図8に示すように接合界面で Al-Fe 系金属間化合物層をほとんど形成せずに接合が達成された。次に接合界面を挟む接合部から図8に示す微小引張試験片を採取した。反応層厚さが接合強度に及ぼす影響を評価するために、各試験片に図に記した熱処理を施し、反応層厚さを 0~2.5 μ m 程度まで変化した試験片を作製した。これらの試験片の反応層を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察し反応層厚さを測定した後に引張試験に供した。これによって、反応層厚さと接合強度の直接的な相関を得ることができる。図9は A6061/SUS304 および A6061/HT780 継手から採取した微小引張試験片の引張強さをそれぞれの試験の界面反応層厚さで整理して示す^{22,23)}。A6061/SUS304 継手では接合ままで若干の未接合部があったが、これを除くといずれの継手でも反応層厚さが薄くなるほど強度が上昇することが分かった。しかし、A6061/SUS304 継手では反応層厚さ 1 μ m 程度までは A6061 母材強度に匹敵する接合強度を維持したが、A6061/HT780 継手では、反応層が成長すると急激に強度低下が生じた。このことは、鋼の強度レベルが接合強度の反応層厚さに対する感受性に影響していることを示しており、降伏応力の高い HT780 の方が、界面での応力集中がより厳しくなることに起因することが示唆されている²³⁾。今後、このような評価手法を用いて、各種異材接合部の界面構造や強度レベル差が接合強度や破壊形態に及ぼす影響を系統的に評価していくことが必要である。また、この評価手法は後述する異材接合のトランススケール評価手法の一環として位置付けられる。

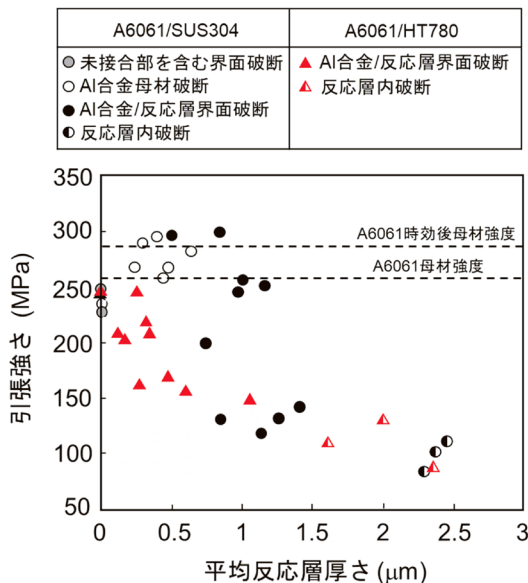


図9 A6061/ SUS304 および HT780 の接合強度と破断形態に及ぼす界面反応層厚さの影響

3.2 各接合プロセスにおける異材接合

抵抗スポット溶接を用いたアルミニウム合金/鋼異材接合においては、未接合部がなく接合界面全体で反応層をできるだけ薄く均一に制御するために、溶融垂鉛めっき (GI) 鋼板を用いることが有効である。アルミニウム合金との接合時に、溶融した垂鉛とアルミニウムが反応して酸化皮膜が有効に除去されるために均一な通電経路が確保されることで、薄い反応層が接合界面全域に形成され接合される。このために、裸鋼板を用いた場合よりアルミニウム合金との接合性が大幅に向上し、良好な接合が達成できることが報告されている^{24,25)}。

一方で、合金化垂鉛めっき (GA) 鋼板では、めっき層は鉄と垂鉛の化合物であり、アルミニウム合金との反応過程で、Fe-Zn 化合物中の垂鉛とアルミニウムが反応して液相を生じるものの固液混合状態を経て反応が進行するために、GI 鋼に比べて反応相の排出性が悪く、同一の接合条件では、最終的に Fe-Zn 化合物が Al-Fe 化合物に置換する形で 10 μ m 程度の厚い界面反応層が残留する²⁴⁾。このためにアルミニウム合金との接合性は良好でない²⁵⁾。これを解決するためには、固液混合状態の反応相を溶接過程で外部に排出する必要がある。この観点から、抵抗スポット溶接では、排出性を考慮した電極の採用と加圧力の増加によって、GA 鋼との接合においても抵抗スポット溶接で高い接合強度が達成されている²⁵⁻²⁷⁾。これらの鋼とアルミニウム合金との抵抗スポット溶接では、継手強度は単純なナゲット径ではなく、反応層が薄く形成された有効な接合領域によって決定される。図10はアルミニウム合金と GI 鋼、GA 鋼との異材抵抗スポット溶接において、ナゲット中央断面で反応層が 2 μ m 以下の有効ナゲット径と十字引張強度との関係を示す²⁵⁾。GI 鋼は R 形電極で GA 鋼は DR 形電極でそれぞれ高強度が得られている。GA

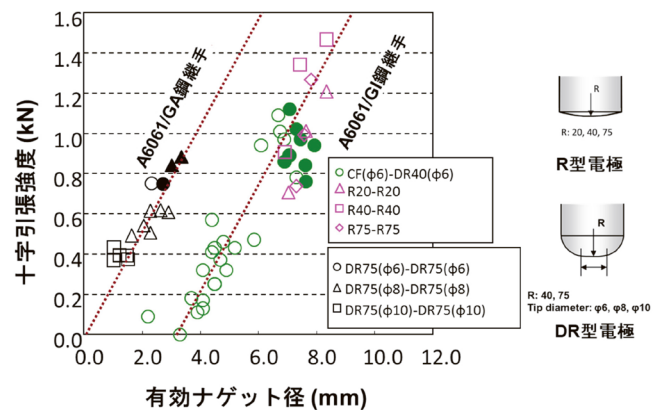


図10 A6022/GI 鋼および A6022/GA 鋼抵抗スポット溶接における反応層厚さ 2 μ m 以下の有効ナゲット径と十字引張強度との関係 (ソリッドマークはプラグ破断)

鋼では界面での固液相の排出性の良好なDR形電極が有効である。また、GI鋼では直線が原点を通らずに2 μ m以下の有効ナゲット径の内、3mm程度が接合に寄与しない。これは、GI鋼ではナゲット外周部で十分な電流が確保されず、液相が排出されても未接合となる領域が存在するためであると考えられている²⁵⁾。この結果からも未接合部を生じないで界面反応層を薄く形成することが強度向上に有効であることが分かる。

また、鋼とアルミニウム合金との接合では、両者のイオン化傾向の差異により接合部で電食が発生することが懸念される。これに対しては、被接合材の間にシール剤を挟んで抵抗スポット溶接するシールスポット溶接を適用することで、溶接後に被接合材間の隙間にシール剤が充填されて、外部からの水分の侵入を遮断し電食を防止することができる^{27,28)}。シールスポット溶接継手は、静的強度、疲労特性、耐食性、高速引張特性についても自動車車体適用に対する要求性能を満足することが報告されている^{27,28)}。

鋼とアルミニウム合金との接合では、アーク溶接、レーザ溶接での直接接合は困難であるが、Al-Si系フラックス入りワイヤを用いたMIGブレイジング^{29,30)}やレーザブレイジング³¹⁾、亜鉛合金系ワイヤを用いたレーザブレイジング³²⁾などで接合が可能となっている。この場合も、ろう材と鋼の濡れ性を確保し入熱を制御することで金属間化合物の成長を抑制して接合することが重要である。また、鋼製のエレメントを上板のアルミニウム板に挿入して、下板の鋼板とアークスポット溶接することで、アルミニウム合金板を溶融することなく接合するエレメントアークスポット溶接法が開発され、既存の機械的接合法より高強度が得られることが報告されている³³⁾。

固相接合法であるFSWでは、接合界面での摩擦攪拌作用を利用して低温下で異種材料間の接合が可能であるため金属間化合物の形成と成長を抑制できる。鋼とアルミニウム合金との接合では突合せ接合^{34,35)}でも重ね接合³⁶⁻⁴¹⁾でもアルミニウム合金側に接合ツールを挿入して、鋼の接合面にツールを僅かに接触させて攪拌することで、アルミニウム合金の塑性流動と鋼表面の酸化皮膜除去によって両者の新生面が短時間に接触することで、100~150nm程度の非常に薄い金属間化合物層を介して接合が達成される。摩擦攪拌点接合 (Friction Stir Spot Welding : FSSW) ではGI鋼や低融点のZn-Al-Mgめっき鋼板を用いることによって接合が達成されることが分かっているが^{42,43)}、めっき成分を有効に外部に排出するための適切な接合条件の設定が重要である。この観点から、図11に示すように、ツール回転数を高くするほど、またツール荷重を大きくするほどめっきの排出が促進されたために、短時間の接合で高強度が得られている⁴³⁾。

マグネシウム合金の異種材料接合はアルミニウム合金に

比べて研究報告は多くない。マグネシウムと鉄は図4 (c) のタイプで、相互に溶解度が殆どなく、また両者の間に化合物も形成しないため、マグネシウム合金と鋼との異種材料接合では、両者と反応性を有する元素を利用する接合法が有効である^{44,45)}。アルミニウムを添加したマグネシウム合金を用いて、亜鉛を接合界面にインサートして鋼と接合すると、亜鉛がマグネシウム合金と共晶反応して液相を形成し表面の酸化皮膜が除去されるとともに、マグネシウム合金中のアルミニウムが液相中に溶解、拡散して鋼と反応しAl-Fe系金属間化合物を形成して接合される⁴⁴⁾。これによりFSWおよび抵抗スポット溶接を用いて接合が達成されている^{46,47)}。また、亜鉛インサートの代わりにZn-Al-Mg合金インサートを用いると反応にあずかるアルミニウム量をマグネシウム合金の組成とは独立に制御することができるのでマグネシウム合金側の材料選択の自由度が高まる。マグネシウム合金とアルミニウム合金の接合は、両者がともに融点の低い軽合金であるためFSWを用いた接合が比較的古くから行われているが⁴⁸⁻⁵⁰⁾、両者の間には硬くて脆い Al_3Mg_2 および $Al_{12}Mg_{17}$ 金属間化合物が形成し、しかもその成長速度が極めて速いため、FSW接合部においてもこれらの金属間化合物が容易に形成し難接合である。重ね接合でも突合せ接合でもツール位置と接合条件の制御によって金属間化合物の形成をできるだけ抑制することが必要であるが、母材破断する継手は得るのは困難である⁴⁸⁻⁵⁰⁾。

近年、輸送機器分野を初めとして種々の産業分野でエンジニアリングプラスチックやCFRPの適用が増加しており、これらと金属を接合するニーズも高まっている。金属とプラスチックの接合は、従来接着や機械的締結で行われていたが、レーザによる直接接合 (LAMP接合) が開発されている^{51,52)}。本接合法では重ね継手で金属あるいはプラスチック側からレーザを照射して、金属に接したプラスチックを溶融させて、

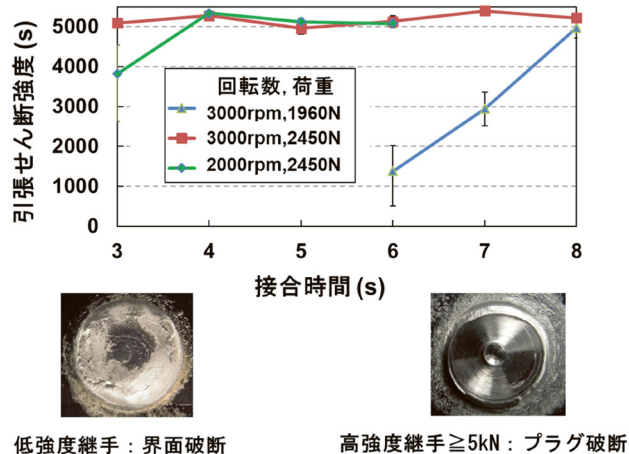


図11 GI鋼と6061アルミニウム合金との摩擦攪拌点接合における継手引張せん断強度に及ぼすツール回転数とツール荷重の影響

溶融部に微小な気泡を発生させて接合する方法である^{51,52)}。これによって金属とCFRPの接合も可能である⁵³⁾。CFRPを金属に溶着する熱源として、レーザ以外に摩擦熱⁵⁴⁻⁵⁶⁾や抵抗発熱⁵⁷⁾を用いたプロセスも提案されている。また、FSSW接合で、アルミニウム合金を上板、CFRPを下板として上板側からツールを挿入して、CFRPを加熱、溶着するプロセスで6kNを超える引張せん断強度が得られている⁵⁸⁾。これらの接合法では、リベットなどの締結金具や接着剤を用いずに、短時間で高強度の継手が得られるため工業的にも有用性が高いと考えられる。その接合機構は、アンカー効果、ファンデルワールス力および化学的結合が寄与していると推察されているが⁵²⁾、実用化のためには詳細な機構の解明が必要と言える。

以上のようにマルチマテリアル化に対する産業的なニーズから異材接合の研究・開発は、この10年程度でかなり進展しており、自動車分野を中心に新しい実用化例も増えてきている。現状の課題としては、異種材料間の接合機構が必ずしも解明されていない場合も多いので、接合機構の解明に基づいて接合プロセスの最適化と制御に繋げる必要がある。特に、異材接合では、接合界面のマイクロ～ナノレベルの構造や特性がマクロな継手特性に大きな影響を及ぼすので、両者の関係を定量的に評価する必要がある。そのために、ナノ～マクロに至るトランススケールでの接合部の評価解析とそれに基づく継手特性予測のためのシミュレーション技術の開発が必要である。この観点から、筆者らがISMAプロジェクトで行っている研究の概要を紹介する。

4 ISMAプロジェクトにおけるマルチマテリアル接合技術の基盤研究

ISMAプロジェクト¹⁰⁾における基盤研究テーマとして、2019年より「マルチマテリアル接合技術の基盤研究」が実施されている。本テーマの研究開発は、大阪大学大学院工学研究科と同接合科学研究所が主体となって実施しており、茨城大学、群馬大学、大阪工業大学、帝京大学、日本原子力研究開発機構、量子科学技術研究開発機構が再委託先として参画している。本テーマでは、車体適用が想定される各種アルミニウム合金と鋼との異材接合ならびに金属とCFRPとの異材接合を対象に、各種接合プロセスにおける接合性の評価と接合現象の解明を行うとともに、接合プロセスのシミュレーション手法を確立し、次いで、これらの異材継手に対して、ナノ～マクロに至るトランススケールでの実験的な解析・評価を行い、併せて、理論的な変形・破壊特性のシミュレーションを行うことで、界面構造や強度発現機構を定量的に解明することを目的としている。この目的を達成するために、図12に示すように、①異材接合プロセスとその現象解析、②異材接合界面構造の評価・解析と強度発現機構の解明、③異材接合継手の性能予測の3課題をサブテーマとして設定して、研究開発を実施している。サブテーマ①では、高性能・高信頼な異材接合プロセスを確立するため、接合条件の最適化とその理論的裏付けを提示すると共に、接合現象のその場観察結果に基づいて接合プロセスのシミュレーション技術および接合部組織形成過程の予測手法の開発を行っている。サブテーマ②では、各種異材接合継手に対して、メゾスケールからマイクロスケールさらにナノスケールまでのトランススケールで

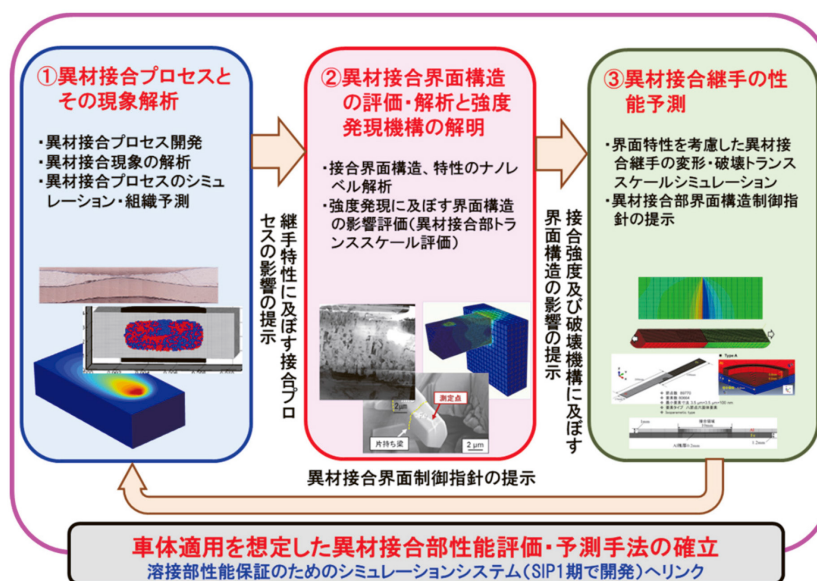


図12 「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトにおける「マルチマテリアル接合技術の基盤研究」の構成

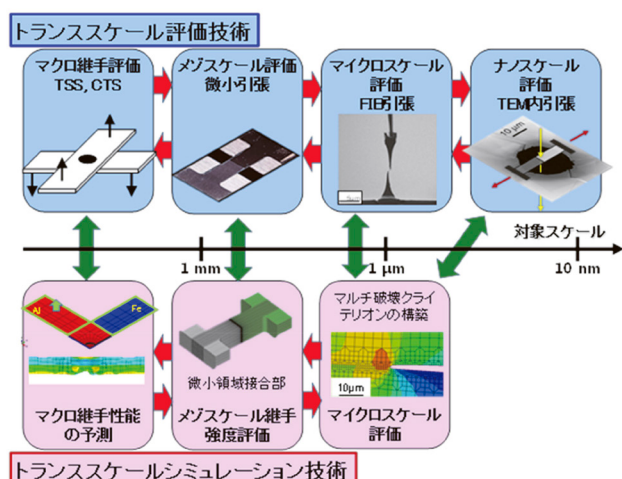


図13 「マルチマテリアル接合技術の基盤研究」におけるトランススケール評価技術とトランススケールシミュレーション技術

の接合界面の構造と特性を評価・解析する手法を開発し、それによって異材継手の破壊支配因子と強度発現機構の解明を行っている。また、これとサブテーマ①の結果から界面構造と継手強度発現に及ぼす接合プロセス条件の影響の明確化を行っている。サブテーマ③では、サブテーマ②の評価・解析結果をベースに実働荷重モード下での継手性能についてのトランススケールシミュレーション手法を構築し、材料組合せ、継手形式、接合プロセス条件、接合欠陥を考慮した異材接合継手の力学的性能予測手法の開発を行っている。

この中で、図13に示すように、トランススケール評価技術とトランススケールシミュレーション技術とが連成することで、接合界面のナノ構造を考慮した異材接合継手の力学的性能予測手法の構築が可能となる。自動車分野の異材継手の力学的特性評価は引張せん断試験 (TSS) あるいは十字引張試験 (CTS) で評価されるが、接合部の力学的状態が複雑であり、また得られた強度と界面構造の直接的な相関が得られないなどの問題があり、強度発現機構が明確化されていない。トランススケール評価技術では、メゾスケール評価において図9に示したように純粋な引張あるいはせん断応力下で接合強度評価ができ、かつミリ～サブミリレベルの界面構造と強度や破壊形態の直接的な相関が得られる。さらにマイクロスケール評価においては、数ミクロンサイズの試験片の力学的評価が可能であり、接合部の各位置での接合界面構造とその場所での接合強度および力学的特性の評価が可能である⁵⁹⁾。このようなナノ～マクロに至る一連の評価を行うことで、異材接合部の強度発現機構の解明が可能となる。また、マルチマテリアル構造に異材接合を適用するためには、異材接合部の強度予測が重要であるが、上記のトランススケール評価技術と連成したトランススケールシミュレーションを行うことでこれが可能となる。ナノスケールおよびマイクロスケール評価結果に基づいて構築し

たマイクロスケールでの破壊モデルをマルチ破壊モデル⁶⁰⁾に組み込むことによって、マイクロレベルの接合界面特性を考慮したマクロ継手の力学特性の予測が可能となる。

5 おわりに

本稿では主として冶金的な接合による異材接合を取り上げたが、接着や機械的締結による異材接合についても多くの研究開発が行われており、実用化例も多い。有効なマルチマテリアル構造を実現するためには、材料と共にこれらの各種接合法も適材適所に適用する必要がある、そのための最適設計手法も要望される。この場合に、異材接合部の精度の高い特性評価と予測技術の確立が不可欠であり、4で述べたトランススケール評価技術とトランススケールシミュレーション技術が有用であると考えている。

参考文献

- 1) 溶接学会溶接冶金研究委員会編：溶接学会技術資料 No.15 溶接冶金研究の進歩と今後の展望，溶接学会，(2003)，267.
- 2) 小川和博：溶接技術，61 (2013) 6，70.
- 3) 溶接・接合便覧，丸善，(2003)
- 4) 笹部誠二：軽金属溶接，50 (2012)，166.
- 5) 西田英人，藤本光生，小椋智，小宮山雄太，廣瀬明夫：軽金属溶接，52 (2014)，61.
- 6) 西田英人，倉嶋寛，藤本光生，小椋智，廣瀬明：軽金属溶接，52 (2014)，374.
- 7) 西田英人，小椋智，波多野遼一，倉嶋寛貴，藤本光生，廣瀬明夫：溶接学会論文集，33 (2015)，20.
- 8) 西田英人，小椋智，波多野遼一，廣瀬明夫：軽金属溶接，53 (2015)，510.
- 9) 新エネルギー産業技術開発機構 ホームページ，http://www.nedo.go.jp/activities/ZZ_00226.html
- 10) 新構造材料技術研究組合 ホームページ，<https://isma.jp/joining/>
- 11) 北岡康夫：溶接学会誌，83 (2014)，5.
- 12) 平田好則：溶接学会誌，86 (2017) 1，6.
- 13) 平田好則：溶接学会誌，89 (2020) 3，181
- 14) 佐山満，宮原哲也，畑恒久，矢羽々隆憲：溶接学会誌，82 (2013)，603.
- 15) 松村吉修：日本機械学会誌，110 (2007) 1061，306.
- 16) A.Hirose, T.Fujii, T.Imamura and K.F.Kobayashi : Mater. Trans., 42 (2001), 794.
- 17) A.Hirose, F.Matsui, H.Imaeda and K.F.Kobayashi : Mater. Sci. Forum, 475-479 (2005), 349.

- 18) T.Ogura, H.Umeshita, Y.Saito and A.Hirose : Q. J. JWS, 27 (2009), 174s.
- 19) T.Ogura, K.Ueda, Y.Saito and A.Hirose : Mater. Trans., 52 (2011), 979.
- 20) A.Hirose, F.Matsui, H.Imaeda and K.F.Kobayashi : Mater. Sci. Forum, 475-479 (2005), 349.
- 21) 山本尚嗣, 高橋誠, 有年雅敏, 池内建二 : 溶接学会論文集, 23 (2005), 622.
- 22) R.Hatano, T.Ogura, T.Matsuda, T.Sano and A.Hirose : Mater. Sci. Eng. A, 735 (2018), 361.
- 23) T.Matsuda, R.Hatano, T.Ogura, R.Suzuki, H.Shoji, T.Sano, M.Ohata and A.Hirose : Mater. Sci. Eng. A, 786 (2020) 139437.
- 24) 宮本健二, 中川成幸, 杉千花, 津島健次, 岩谷信吾, 北條慎治, 小椋智, 廣瀬明夫, 小林紘二郎 : 溶接学会論文集, 32 (2014), 83.
- 25) 宮本健二, 中川成幸, 杉千花, 桜井寛, 廣瀬明夫 : 自動車技術会論文集, 40 (2009), 867.
- 26) K.Miyamoto, S.Nakagawa, C.Sugi, H.Sakurai and A.Hirose : SAE Int. J. Mater. Manuf., 2 (2009), 58.
- 27) 宮本健二, 中川成幸, 杉千花, 小椋智, 廣瀬明夫 : 溶接学会論文集, 32 (2014), 95.
- 28) 中川成幸, 宮本健二, 小椋智, 廣瀬明夫 : 軽金属溶接, 54 (2016), 135.
- 29) T.Murakami, K.Nakata, H.Tong and M.Ushio : ISIJ Int., 43 (2003), 1596.
- 30) 松本剛, 笹部誠二 : 軽金属溶接, 48 (2010), 15.
- 31) 宋宇絃, 才田一幸, 安藤彰芳, 西本和俊 : 溶接学会論文集, 22 (2004), 315.
- 32) 脇坂泰成, 鈴木孝典 : 溶接学会論文集, 30 (2012), 274.
- 33) 陳亮, 鈴木励一 : 軽金属溶接, 57 (2019), 501.
- 34) 福本昌宏, 椿正己, 下田陽一郎, 安井利明 : 溶接学会論文集, 22 (2004), 309.
- 35) W.B.Lee, M.Schmuecker, U.A.Mercardo, G.Biallas and S.B.Jung : Scr. Mater., 55 (2006), 355.
- 36) 渡邊満洋, 大川武士, 熊井真次 : 軽金属, 11 (2007), 536.
- 37) T.Ogura, Y.Saito, T.Nishida, H.Nishida, T.Yoshida, N.Omichi, M.Fujimoto and A.Hirose : Scri. Mater., 66 (2012), 531.
- 38) T.Ogura, T.Nishida, Y.Tanaka, H.Nishida, S.Yoshikawa, M.Fujimoto and A.Hirose : Sci. Technol. Weld. Join., 18 (2013), 108.
- 39) T.Nishida, T.Ogura, H.Nishida, M.Fujimoto, M.Takahashi and A.Hirose : Sci. Technol. Weld. Join., 19 (2014), 609.
- 40) 西田英人, 藤本光生, 小椋智, 小宮山雄太, 廣瀬明夫 : 軽金属溶接, 52 (2014), 61.
- 41) 西田英人, 倉嶋寛, 藤本光生, 小椋智, 廣瀬明夫 : 軽金属溶接, 52 (2014), 374.
- 42) K.Feng, M.Watanabe and S.Kumai : Mater. Trans., 52 (2011), 1418.
- 43) 山本将貴, 小椋智, 大橋良司, 藤本光生, 廣瀬明夫 : 軽金属溶接, 51 (2013), 223.
- 44) T.Tachibana, S.Hojo, S.Iwatani, T.Ogura, S.Nakagawa, K.Miyamoto and A.Hirose : Q. J. JWS, 27 (2009), 183s.
- 45) T.Araki, M.Koba, S.Nambu, J.Inoue and T.Koseki : Mater. Trans., 52 (2011), 568.
- 46) Y.C.Chen and K.Nakata : Mater. Trans., 50 (2009), 2598.
- 47) 宮本健二, 中川成幸, 坂元宏規, 岩谷信吾, 北條慎治, 立花隆浩, 小椋智, 廣瀬明夫, 小林紘二郎 : 自動車技術会論文集, 43 (2012), 1413.
- 48) 平野聡, 岡本和孝, 土井昌之, 岡林久宣, 稲垣正寿, 青野泰久 : 溶接学会論文集, 21 (2003), 539.
- 49) T.Morishige, A.Kawaguchi, M.Tsujikawa, M.Hino, T.Hirata and K.Higashi : Mater. Trans., 49 (2008), 1129.
- 50) V.Firouzdor and S.Kou : Weld. J., 88 (2009), 213-s.
- 51) S.Katayama and Y.Kawahito : Scr. Mater., 59 (2008), 1247.
- 52) 片山聖二, 川人洋介 : 軽金属溶接, 51 (2013), 463.
- 53) K.W.Jung, Y.Kawahito, M.Takahashi and S.Katayama : J. Laser Applications, 25 (2013), 032003-1-6.
- 54) S.T.Amancio-Filho, C.Bueno, J.F.dos Santos, N.Huber and E.Hage : Mater. Sci. Eng. A, 528 (2011), 3841.
- 55) 小澤崇将, 加藤数良, 前田将克 : 軽金属, 65 (2015), 403.
- 56) 永塚公彬, 田中宏宜, 肖伯律, 土谷敦岐, 中田一博 : 溶接学会論文集, 33 (2015), 317.
- 57) 永塚公彬, 肖伯律, 呉利輝, 中田一博, 佐伯修平, 北本和, 岩本義昭 : 溶接学会論文集, 34 (2016), 267.
- 58) 西口勝也, 田中耕二郎, 杉本幸弘 : 軽金属溶接, 57 (2019), 10.
- 59) T.Matsuda, T.Sano, M.Munekane, M.Ohata and A.Hirose : Scr. Mater., 186 (2020), 196.
- 60) 大畑充, 庄司博人, 廣瀬明夫 : 自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集, (2019), 20195078.

(2020年6月4日受付)