

つなげないをつなぐ

最新 接合技術の可能性

最終回

異種材料接合(2) 現状と展望

中田一博 ● 大阪大学 接合科学研究所 教授

難しいが不可能ではない

前回(2013年8月号)述べたように、材料接合技術は大きく3世代に分類できる。今回は、特に異種金属・合金同士の接合である第2世代、および金属と樹脂などの異種材料の接合である第3世代を中心に、各世代の現状と今後期待される技術について解説する。

第1世代: 同種金属・合金間

鉄鋼材料同士の溶接に代表されるように、同種金属・合金間の接合技術としては、基本的には一般的な溶融溶接法(アーク溶接法)が実用化されている。炭素鋼、合金鋼およびステンレス鋼など異なる鋼種間の溶接では、それぞれに発生しやすい特有の溶接欠陥があるものの、組み合わせごとに溶接施工法がほぼ確立されている¹⁾。

良好な溶接継手を得る上で肝心

なのは、それらの材料に応じた適切な溶接方法や溶接条件を選ぶということだ。ただし、第1世代の技術も既に完成形というわけではない。引き続き新たな高効率・高品質の溶接・接合法や溶接材料の開発が進められている。

第2世代: 異種金属・合金間

金属同士でも異種金属や異種合金間の接合は難しい場合が多い²⁾。しかし、それはあくまで「困難」であって「不可能」ではない。

例えば、第2世代の代表的な組み合わせ例として鉄鋼材料とアルミニウム(Al)合金の異種金属接合を考えてみよう。この組み合わせは、特に軽量化が重要課題である自動車業界などで大きなニーズがある。確かに、前回解説したように鋼とAl合金の接合において溶融溶接法であ

「最新接合技術の可能性」連載内容	
第1回	鋼板を高純度で溶接できるクリーンMIG(1)
第2回	鋼板を高純度で溶接できるクリーンMIG(2)
第3回	摩擦攪拌接合(1)基礎と進化
第4回	摩擦攪拌接合(2)最新技術と今後の展開
第5回	異種材料接合(1)期待と現状
最終回	異種材料接合(2)現状と展望

るアーク溶接などを適用しようとすると、接合部に脆弱な鉄(Fe)-Al系金属間化合物が形成されるため直接接合は難しい。

しかし、詳細は後述するが、接合条件を見極めて金属間化合物層の厚さを十分に薄くなるようにしたり、金属間化合物が形成されない摩擦攪拌接合(FSW)などを適用したりすれば接合は可能だ。

表は、これまでに溶接学会などに報告された検討結果に基づいて、鋼とAl合金の接合における接合方法とその可能性をまとめたものだ。接合方法は、高温における金属原子の拡散現象を主体とした「熱的平衡型」と、低温で材料の塑性流動現象などを利用する「熱的非平衡型」の2タイプに大別できる。以下では、それぞれのタイプで期待される技術について考察する。

表●鋼/Al合金の異種金属接合方法と接合界面の特徴

	接合方法	接合界面の特徴
熱的平衡型 (高温反応)	<ul style="list-style-type: none"> ・溶融溶接 ・抵抗溶接 ・ろう付け ・拡散接合 	<ul style="list-style-type: none"> ・高温反応のため金属間化合物層が形成される ・金属間化合物層の厚さが支配因子となる ・金属間化合物層が数μm以下なら良好な継手強度となる
熱的非平衡型 (低温反応 塑性流動現象)	<ul style="list-style-type: none"> ・摩擦圧接 ・超音波圧接 ・爆発圧接(爆接) ・摩擦攪拌接合 	<ul style="list-style-type: none"> ・光学顕微鏡で金属間化合物層が認められないレベル ・界面に厚さ数$n\sim$数十nmの酸化物のアモルファス層を形成

「つなげない」を「つなぐ」最新接合技術の可能性は今号で終了します。2013年10月号から、曙ブレーキ工業が若手技術者教育の一環として実施

している研修プログラム「生産ラインのミニチュア模型製作プロジェクト」を解説します。

金属間化合物の厚さを抑制

熱的平衡型の接合方法にはアーク溶接に代表される熔融溶接の他、抵抗溶接、ろう付け、拡散接合*1などがある。接合部は元素拡散し得る高温にさらされるため、状態図ののりとした組織ができる。従って、接合界面にはFe-Al系の金属間化合物層が形成される。

しかし、例えば接合温度が熔融溶接よりも低い拡散接合法を用いれば、接合条件をうまく制御することで金属間化合物層の厚さを数 μm 以内に抑えられる。すると継手引張りせん断試験で、接合面ではなくAl合金の母材が破断する十分な接合強さを持った異材継手が得られる(図1)^{3),*2}。つまり、金属間化合物の厚さが継手の強さの支配因子となるのだ。金属間化合物層を薄くすることによって接合部の強さが高まるメカニズムは学術的にまだ十分解明さ

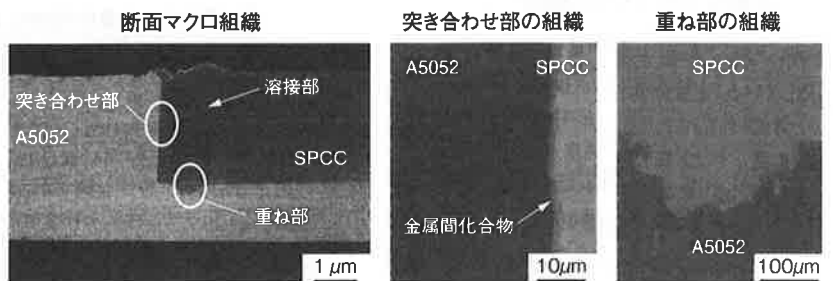
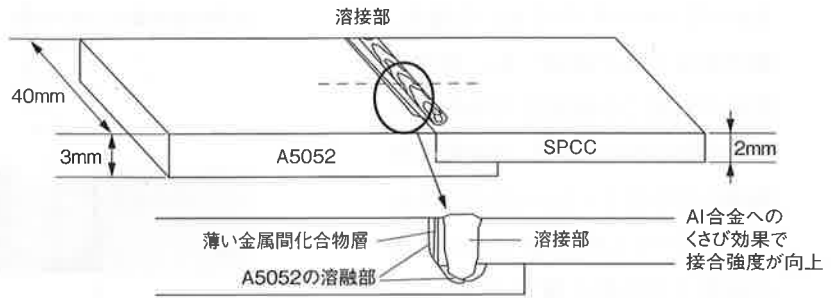
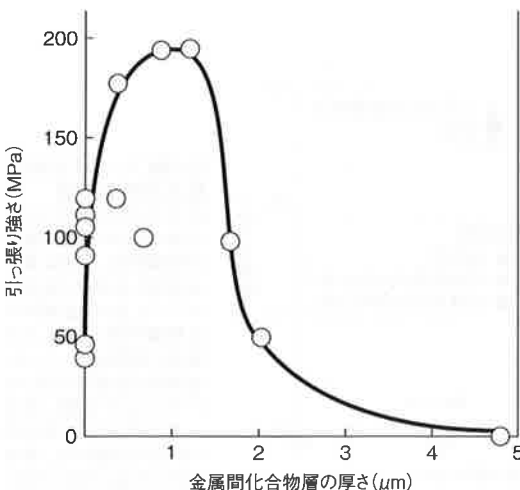


図2●レーザー溶接による鋼とAl合金の異種金属溶接例
冷間圧延材(SPCC)とAl合金(A5052)を接合したものの、溶けたSPCCがAl合金に食い込んでくさびのような効果を果たしている。突き合わせ部の金属間化合物層は数 μm と薄い。参考文献5)を基に本誌が作成。

れていないものの、金属間化合物層内の内部欠陥や残留応力の減少が寄与していると考えられている。

エネルギー密度が高く、指向性の強い電子ビームやレーザーを使って、鋼

もしくはAl合金を選択的に溶融して接合する方法も検討されている。例えば、図2に示すように、継手形状を工夫するとともに、レーザー溶接により主に鋼母材を溶融させて金属間化合物の形成を抑制することで良好な異材溶接継手が得られる^{4,5)}。

ろう付けの一種である「ブレード溶接」も有望だ⁶⁾。ブレード溶接は、鋼材を溶かさずにAl合金母材とろう材である合金ワイヤ(溶加材)のみを溶融する、ろう付けと熔融溶接との中間的な溶接方法である。

例えば、不活性ガスでシールドしたアークでブレード溶接するMIG(Metal Inert Gas)ブレード溶接において、ろう材としてAl-シリコン(Si)

図1●拡散接合による異種金属接合の継手強度
Al合金(A6061)とステンレス鋼(SUS316)を接合したものの。A6061の引張り強さは125MPa。金属間化合物層が薄ければ十分な継手強度が得られる。なお、金属間化合物層が形成されていない場合でも継手強度が低下しているのは、接合界面に清浄な金属接触面が十分に形成されない接合条件だったためである。参考文献3)を基に本誌が作成。

*1 拡散接合 融点以下の温度で母材を加圧密着させ、接合面の原子の相互拡散を利用して接合する方法。

*2 図1の例は、元素の拡散現象を利用しており、加熱時間も数時間から十数時間を要する熱的平衡型プロセスだが、材料の溶融を伴わないため固相接合の一種といえる。

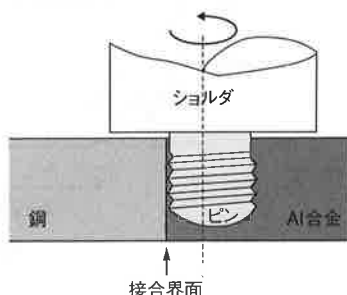
系のフラックスワイヤを用いた場合、鋼材をほとんど溶融しない条件で溶接すれば、金属間化合物層の成長を抑制できる。実際、金属間化合物層の厚さが1~3 μm 以内であれば引っ張りせん断試験ではAl母材が破断する良好な継手が得られると報告されている(図3)⁷⁾。

ポイントは、溶融したAl合金とろう材が母材である鋼に十分濡れること。そのためにフラックスの使用や鋼材表面への亜鉛めっきの適用、ろう材としての亜鉛合金ワイヤの利用などが検討されている。

FSWに期待

一方、熱的非平衡型の接合は材料の溶融を伴わない固相接合法で、圧接法やFSWなどがこれに該当する。接合温度が低いため元素拡散が十分に行われないものの、軟化させたAl合金に圧力を加えて塑性流動させ、鋼との接合界面に押し付け

(a) 接合部断面とピン挿入位置



(b) SUS304とA6061の突き合わせ接合部の断面組織

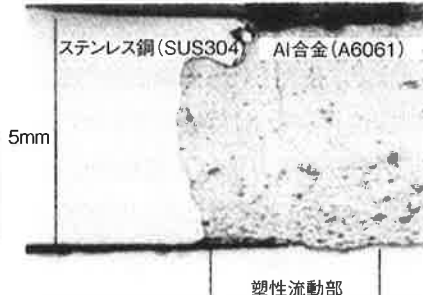


図4 ● 鋼とAl合金のFSWによる接合例

鋼とAl合金を突き合わせて、Al合金側に回転ブロープのピンを挿入する(a)。これにより接合界面が清浄化・活性化されるとともに、Al合金が塑性流動を起こして鋼(この場合はステンレス鋼SUS304)に押しつけられて接合する(b)。参考文献8)を基に本誌が作成。

て接合させる。いわば“無理やり”くっつけるのである。接合界面には金属間化合物層に代わって、酸化物を主体としたnmレベルの厚さの非晶質(アモルファス)層が形成される場合があり、鋼とAl合金の組み合わせでは、これが結晶構造の異なる2つの材料を接合する“のり”の役目を果たすと考えられる。

一般に固相接合として実用化が進んでいるのは、摩擦圧接や爆発圧接である。しかし、継手の形状や

接合条件の制約が大きく、その用途は限定されてきた。これに対して、本連載第3回(2013年6月号)および第4回(同7月号)で解説したFSWは、回転ツールをAl合金側に挿入するとともに、回転ツールの接触により鉄鋼界面を清浄化し、Al合金のみを塑性流動させて、そこに押しつける方法である(図4)^{8,9)}。

ツールの回転方向などの接合条件を最適化すれば、接合界面にはほとんど金属間化合物が形成され

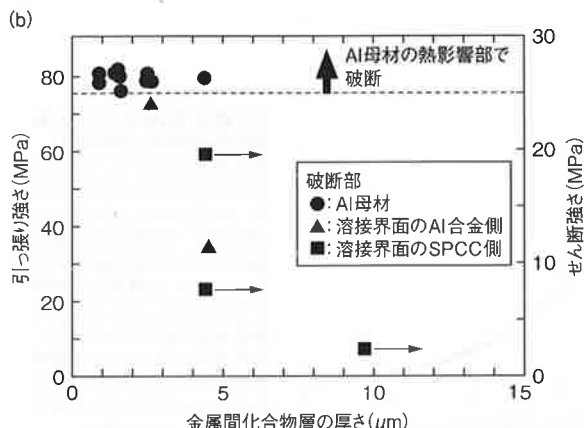
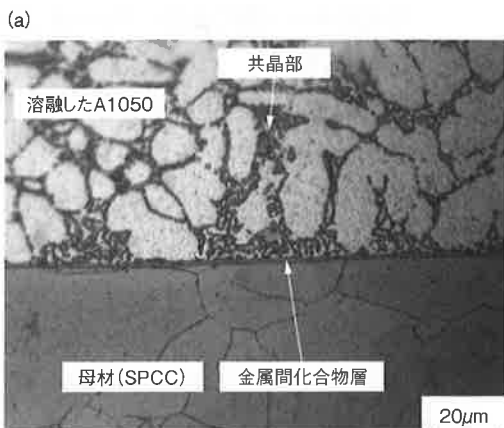


図3 ● ブレーズ溶接の重ね継手の評価
純Al(A1050)とSPCCを溶接したものの。(a)は断面の組織写真。界面に薄い金属間化合物層が形成されている。(b)は金属間化合物層の厚さと引っ張り強度の相関を示している。金属間化合物層の厚さが1~3 μm と十分薄い場合は、接合面ではなく母材のA1050が破断する。参考文献7)を基に本誌が作成。

ない。代わりにごく薄い非晶質層を形成して、良好な強さを持った継手が得られる。

FSWを応用したスポット接合法も報告されている。接合界面にはAl合金の合金成分を主体としたマグネシウム(Mg)-Si-酸素(O)系の非晶質層が2nm~4nmの厚さで形成されたとしている¹⁰⁾。

実は、FSWを異種金属接合に応用するアイデアは、10年ほど前から提案されていたが、近年、鋼とAl合金の直接接合が自動車部品で実用化段階に入ったところである^{11,12)}。加えて、FSWはより広範囲な異種金属の接合に適用できる可能性を秘めている。

例えば、鋼と純チタン(Ti)の重ね接合における適用例では、引っ張りせん断試験で純Tiの母材が破断する良好な重ね継手が得られている(図5)¹³⁾。その他にも、セラミックス粒子分散Al基複合材料とAl合金との接合や、鋳造材と展伸材の接合などへも適用できると報告されており、今後の適用の広がりが大いに期待できる^{*3)}。

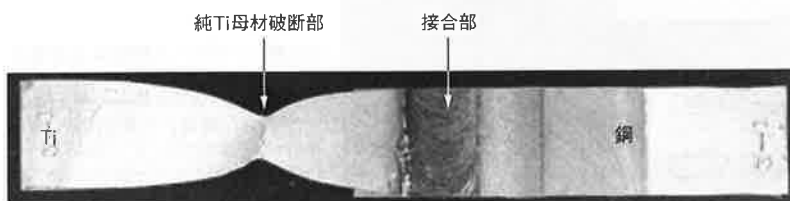


図5●FSWによる純Tiと鋼の重ね接合継手の引っ張りせん断試験結果
接合部の強度が高いため接合部ではなく純Tiの母材側で破断している。

*3 実用化に当たっては、継手強度のみならず耐食性などの特性も考慮しなければならない。

*4 活性ろう材としては、例えば銀(Ag)-銅(Cu)-Ti合金ろうがある。

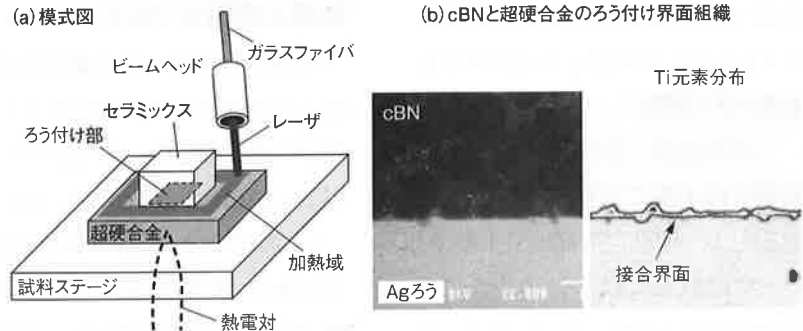


図6●レーザーブレイジング法によるろう材接合法

(a)はレーザーブレイジング法の模式図。(b)はAg-Cu-Ti系ろう材を用いた超硬合金と立方晶窒化ボロン(cBN)との接合界面。Ti元素が接合界面に集中して分布している。透過型電子顕微鏡(TEM)による詳細な解析では、ろう材中のTiがcBNとの界面に厚さ数十nmの極薄いTi窒化物(TiN)を形成して強固な接合を維持していることが分かっている。

第3世代：異種材料間接合

金属とセラミックス、金属と高分子材料といった、材料構造が基本的に異なる異種材料接合は、近年特に実用化への期待が高まっている。その現状と可能性をみてみよう。

金属とセラミックスをつなぐ

実は、金属とセラミックスの異種材料接合はろう付けにより既に実用化されている。一般には、溶融した合金ろう材とセラミックスとの濡れ性を確保するために、Tiなどの活性金属を少量含む活性ろう材を用い

る。添加された活性金属の酸化を防ぐため、通常は高真空雰囲気中で実施する炉中ろう付け法が用いられる^{*4)}。

しかしこの方法は、真空排気や炉全体の加熱・冷却などの処理工程に時間がかかる、金属とセラミックスとの熱膨張係数の差に起因する熱応力によってセラミックスに割れが発生する場合がある、といった問題を抱えている。

そこで、これらの問題を解決すべく超硬合金とセラミックスとの接合の新しい方法として「レーザーブレイジング法」が提案されている^{*5)}。レーザーによる局所的かつ短時間の加熱によって接合する方法だ。

具体的には、シート状のろう材を超硬合金とセラミックスの間に挟んで軽く押し付け、簡易チャンバ内のアルゴン(Ar)ガス雰囲気中で、超硬合金表面をレーザー照射により局所

*5 レーザーブレイジング法は、アーク溶接よりも入熱量が格段に少なく、制御性に優れることから、鋼とAl合金の接合など第2世代の接合技術としても期待されている。

加熱する。超合金からの熱伝導によりろう材が溶融しろう付けする仕組みだ(図6)。

この方法は、セラミックスへの熱影響を最小限にできるという利点がある¹⁴⁾。レーザー照射時間は数十秒で、レーザー照射後に試料は速やかに自然冷却されるため、すぐにチャンバから取り出せる。ろう付け工程時間は全体でわずか十数分と、炉中ろう付け法と比べて大幅に短い*6。

このレーザーブレイジング法は、炭化ケイ素(SiC)やアルミナ(Al_2O_3)、サイアロン(SiAlON)などの各種セラミックスやダイヤモンドと超合金との接合にも適用できることから、切削工具などへの応用が期待されている¹⁵⁾。それ以外では、既に宝飾品の加工に適用されている。指輪などで宝飾ダイヤモンドをプラチナ台に固定する際に、爪によるかしめ固定法ではなく、ダイヤモンドをプラチナ台に直接ろう付けする方法が実用化されている^{16,17)}。

金属と樹脂をつなぐ

金属板と樹脂や炭素繊維強化樹脂(CFRP)の板材の接合には、一般的に接着剤を用いる方法やリベットによる機械的締結が用いられる。しかし接着には、接着工程の効率化や信頼性、有機溶媒の環境への影響、接着剤の経年劣化といった課題がある。機械的締結においても工程の効率化やリベット材などのコストが問題となる。

そこで、金属と樹脂などを直接接合する方法が求められている。幾つかの方法が提案されているが、中でもレーザーを用いる「レーザー溶着法」が注目されている。金属板と透光性を有する樹脂板を重ねて、樹脂側からレーザーを照射し、透過したレーザーで接合界面の金属表面を加熱し、接触している樹脂を溶融して接合するものである(図7)。

例えばステンレス鋼SUS304とポリエチレンテレフタレート(PET)の重ね継手においては、引っ張りせん

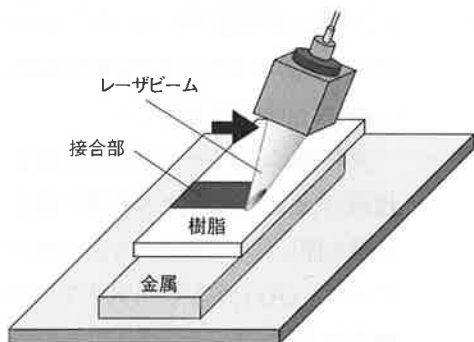
断試験でPET母材が破断する十分な接合強さが得られている¹⁸⁾。

実は、この方法は非透光性の樹脂にも適用できる。金属側にレーザービームを照射し、金属の熱伝導により接合界面に接触している樹脂を溶融して接合できることから、今後の研究の進展が注目されている。

金属と樹脂の接合においては、筆者らは摩擦エネルギーを利用する接合方法を提案している。「摩擦重ね接合法」(FLW: Friction Lap Welding)と呼ぶこの方法は、金属板と樹脂板を重ねた上で、金属の表面に高速回転する棒状のツールを押し付けて摩擦発熱によって金属表面を加熱し、その熱伝導により接合界面の樹脂を溶融するものである(図8(a))¹⁹⁾。

この方法の利点の1つは、樹脂の加熱・溶融と接合面の加圧を、回転ツールを押し付けることにより同時に実現できる点にある。ツールを移動させれば、金属と樹脂の接合部の

(a) 模式図



(b) ステンレス鋼(SUS304)/樹脂(PET)の重ね継手

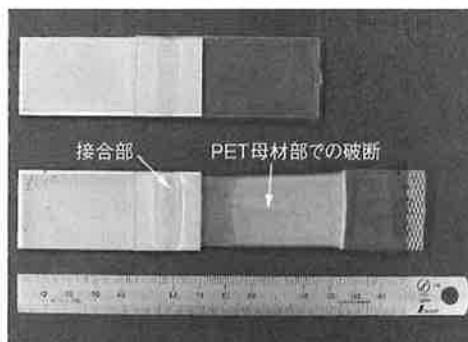


図7 ●レーザービーム照射による重ね接合

(a)は模式図。透明な樹脂の側からレーザーを照射して界面の金属を加熱し樹脂を溶かして接合する。(b)はSUS304とPETの接合継手の引っ張りせん断試験の結果。接合部ではなくPET部が破断(白く濁った部分)しており、接合部に十分な強度があることが分かる。

*6 ただし、炉中ろう付け法には一度に多くの試料を処理できるという利点がある。一概にこのレーザー溶着がよいとは言え切れず、それぞれのプロセスに適した使い方が望ましい。

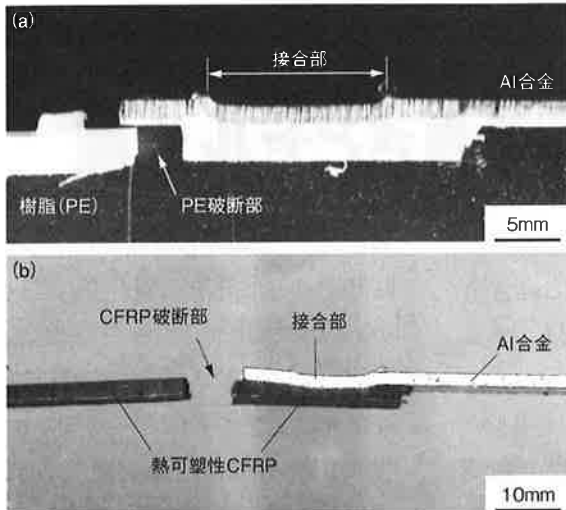


図8●FLWによるAl合金と樹脂およびCFRPの直接接合事例
(a)はAl合金とポリエチレン(PE)を接合した継手の、(b)はAl合金と熱可塑性CFRPとを接合した継手の引っ張りせん断試験の断面。いずれも、PEおよびCFRP母材部で破断している。

密着性に優れた重ね継手が得られる。これまでに金属材料としてAl合金やマグネシウム(Mg)合金、炭素鋼、銅、Tiなどと樹脂との接合を確認している。

FLWは、Al合金とCFRPとの接合にも適用できる。熱可塑性樹脂をマトリックスとしたCFRPとAl合金とを同法で接合した重ね継手では、引っ張りせん断試験においてCFRPの母材が破断する十分な強さの接合部が得られた〔図8(b)〕。ただし現状、FLWで接合可能な樹脂材料は一部の熱可塑性樹脂に限定されている。加えて、接合相手となる樹脂材料の種類によっては金属材料に表面処理が必要となる。

異種材料接合継手をどう使うか

溶接・接合においては、品質保証上、割れや気孔などの溶接欠陥が

なく、かつ必要な静的強さを確保しなくてはならない。これは、同種材料間、異種材料間によらず必須の条件だ。その上、個々の使用環境下によって、耐熱性、耐食性、耐摩耗性といった要求性能が求められる。

既に実用化されて久しい第1世代の材料の組み合わせは、多様な使用環境下での継手特性の評価がなされており、上記のような要求性能を満たしている。しかし、開発途上にある第2世代や、これから開発が本格化する第3世代の技術においては、異材接合継手を構造部材、あるいは機能部材として適材適所で使いこなすための新たな構造や設計、品質評価法などの開発も合わせて必要となる。今後、接合技術の開発だけではなく、こうした実用化に向けた使いこなしや適用範囲の見極めなどが重要になる。

参考文献

- 1) 溶接学会編,『溶接・接合便覧』,丸善,p.964,1990.
- 2) Welding Handbook, Vol.2, 8th ed.AWS, 1991.
- 3) 黒田晋一, 才田一幸, 西本和俊,『溶接学会論文集』,17巻3号, pp.484-489, 1999.
- 4) 中田一博,『アルミニウムと鉄の溶融溶接』,『溶接技術』,52巻10号, pp.126-130, 2004.
- 5) 片山聖二, 水谷正海, 松嶋朗, 深津憲一,『溶接学会全国大会講演概要集』67巻, 248, 2000.
- 6) 中田一博,『アルミニウムと鉄のブレイズ溶接』,『溶接技術』,52巻11号, pp.126-130, 2004.
- 7) T.Murakami et al,『Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel by MIG Arc Brazing Using Flux Cored Wire』, ISIJ International, Vol.43, No.10, 1596, 2003.
- 8) 岡村久宣, 青田欣也, 高井英夫, 江角昌邦,『摩擦攪拌接合(FSW)の開発状況と適用上の課題』,『溶接学会誌』,72巻5号, 436, 2003.
- 9) 福本昌宏, 椿正己, 下田陽一, 安井利明,『摩擦攪拌作用によるADC12/SS400材料間の接合』,『溶接学会論文集』,22巻2号, p.309, 2004.
- 10) 田中晃二, 熊谷正樹, 吉田英雄,『摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金板と鋼板の異種金属接合』,『軽金属』,56巻6号, pp.317-322, 2006.
- 11) 近岡,『ホンダ、鋼とAl合金の接合技術を開発 新型「アコード」で量産化』,『日経ものづくり』,2012年10月号,pp.18-19.
- 12)『最新接合事情 鉄とアルミを接合する』,『Motor Fan』,Vo.73, pp.62-65, 2012.
- 13) J.S.Liao, N.Yamanoto, H.Liu, K.Nakata, Materials Letters,『Microstructure at friction stir lap joint interface of pure titanium and steel』, Vol.64, 2317-2320, 2010.
- 14) 瀬知啓久, 中田一博,『セラミックスと金属の異材レーザブレイジング』,『ぶれいず』,日本溶接協会, Vol.44, No.115, pp.17-24, 2010.
- 15) 永塚公彬, 吉田昇一郎, 瀬知啓久, 中田一博,『Ag-Cu-Ti活性ろう材を用いたレーザブレイジングによるサイアロンと超硬合金の異材接合性に及ぼすTi添加量の影響』,『溶接学会論文集』,31巻1号, pp.16-22, 2013.
- 16)『T&Tジュエリー, カタログ』.
- 17)『宝石の四季』,219号, Autumn, 2012.
- 18) 川人洋介, 丹羽悠介, 片山聖二,『ステンレス鋼とポリエチレンテレフタレートとのレーザ直接接合と信頼性評価』,『溶接学会論文集』,28巻1号, pp.16-21, 2010.
- 19) 中田一博, 岡田俊哉, 長野喜隆,『金属部材と樹脂部材との接合方法』,特願2011-035001.

中田一博(なかた・かずひろ):1977年に大阪大学接合科学研究所助手となり、助教授を経て2002年から同大教授。2009年4月~2013年3月は同研究所所長。専門は、材料工学および溶接・接合工学、表面改質工学。