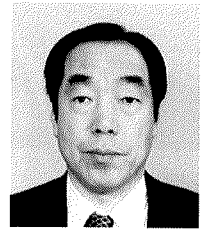




## 異材接合の接合機構

### Joining Mechanism of Dissimilar Materials Joining

中田 一博\*  
Kazuhiro Nakata\*



#### 1. 異材接合の目的

機能の異なる材料を適材適所で組合せて、部材の高機能化・多機能化による特性向上を図る、あるいは適用箇所を限定して高級材料の使用量を削減しコスト低減を図ることなどにより、部材・製品の競争力を高めることなどが異材接合の目的である。

近年、車体の軽量化のために、高張力鋼、軽量金属材料であるAl合金やMg合金、さらに、樹脂材料や炭素繊維強化複合材料(CFRP)などをその材料特性を生かして組合せて軽量化と生産コストの両方の課題を同時に克服しようとする「マルチマテリアル化」の考え方<sup>1)</sup>が注目されている。このためには、鉄鋼材料とAl合金やMg合金との異種金属接合や、さらに、まったく材料構造が異なる金属と樹脂、あるいはCFRPとの接合が必要とされており<sup>2),3)</sup>、アーク溶接や抵抗スポット溶接などの汎用的な溶融溶接法のみならず、接着や機械的締結などの間接的な接合法と共に、新たな直接的な接合法を含めた異材接合技術が求められている。

本講演では、このような異材接合における接合機構に注目して、その概要を説明する。

#### 2. 異材接合技術の現状

表1は、異材接合の材料組合せにおける実用化の程度を俯瞰的に分類したものである。すなわち、既に技術的に確立されて多くの構造物に実用化されているものを第1世代とすると、同種金属を基とした合金同士の組合せがこれに該当する。例えば、炭素鋼や合金鋼などの鉄鋼材料同士の組合せなどである。

一方、金属/金属であっても、異種金属間の組合せには、鉄/アルミニウムや鉄/チタンなどの接合が難しい組合せが多く、これらは第2世代に分類される。

一方、金属/樹脂(高分子材料)/セラミックス間の接合のように材料構造・原子構造そのものが根本的に異なる材

表1 材料組合せによる異材接合技術の進展度

技術の進展度	接合継手の組合せ	技術的難易度	実用化の程度	課題
第1世代	同種金属基合金 (鉄鋼同士等)	容易	既に実用化	適用拡大
第2世代	異種金属・合金 (鉄鋼/非鉄(Al, Mg, Ti等), 非鉄/非鉄)	困難	限定的	技術革新
第3世代	異種材料 (金属/樹脂/セラミックス)	困難	限定的	技術革新

(中田作成)

表2 各種異種材料の組合せに対する接合プロセスの適用可能性

接合プロセス		異種材料の組合せ			
		同種金属基	異種金属基	金属/樹脂 金属/CFRP	金属/セラ ミックス
溶融溶接	アーク溶接	◎	△	×	×
	電子ビーム溶接	◎	○	×	×
	レーザ溶接	◎	○	◎*	×
ろう付	ろう付	◎	◎	×	◎
固相接合	拡散接合	◎	○	×	×
	圧接	◎	○	△	×
	FSW	◎	◎	◎*	×
接着	接着剤	◎	◎	◎	◎
機械的締結	リベット、ボルト、かしめ	◎	◎	◎	△

異材接合の可能性：◎高い、○材料に大きく依存、△低い、×不可、\*特別な手法  
(中田作成)

料間の異種材料接合は第3世代となる。例えば金属/CFRPとの接合などがこれに該当し、新しい発想からの革新的な接合技術の開発が期待されている。

表2は、異種材料接合の組合せに対する接合プロセスの適用性を、接合原理の観点から概念的に取りまとめたものである。すなわち、第1世代では、表示したすべての接合法で接合が可能である。第2世代の異種金属の組合せでは、後述するように金属間化合物を形成しやすい組合せでは、一般的な溶融溶接法や固相接合法の適用は難しい。

\* 大阪大学名誉教授 Professor emeritus, Osaka University  
原稿受付：2017年4月20日  
(2017年度年次講演会資料(2017.6.13))

しかし、FSWでは適用の可能性は高くなる。第3世代の金属/樹脂・CFRPでは、金属/金属の組合せで適用される溶融溶接法、ろう接法および固相接合法は基本的には困難であり、接着法や機械的締結法が適用される。しかし、後述するようにレーザー溶接やFSWを応用した特殊な接合法により適用が可能である。同じく第3世代の金属/セラミックスの組合せでは、適用可能な接合法はろう接法と接着法にほぼ限定される。

### 3. 金属材料における異材接合の可能性

#### 3.1 第1世代：同種金属基材料間の接合

鉄鋼材料同士の異材接合に代表されるように基本的には一般的な溶融溶接法（アーク溶接法）を用いて実用化されている。炭素鋼、合金鋼及びステンレス鋼等の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明らかにされており、その防止対策に留意する必要がある<sup>4),5)</sup>。それぞれの組合せごとの溶接施工法はほぼ確立されているので、その溶接指示書に従った溶接施工を実施することが良好な溶接継手を得る上で重要である。もちろん新たな高効率・高能率・高品質接合法や溶接材料の開発は継続した開発課題として、研究開発が進められている。

#### 3.2 第2世代：異種金属間の接合

##### 3.2.1 異種金属間の接合の難しさ

同じ材料構造を有する金属材料同士であれば、異種材料接合は容易のように思われるが、実際には接合が困難な組合せが多い。例えば過去のアンケート調査<sup>6)~8)</sup>でアルミニウムと鉄は最もニーズの多い金属材料同士の組合せであるが、その直接接合はむしろ不可能と考えられてきた。その理由は、硬くて、極めて脆い金属間化合物が接合部に形成されるためであり、割れの発生や、低強度・低延性の脆弱な継手となり、実用的には使用できないものになる。

異種金属接合の可能性を決めるこの金属間化合物の形成は、基本的には接合相手の2つの金属からなる2元系平衡状態図<sup>9)</sup>から判断できる。代表的な状態図を図1に示すが、Cu-Ni系のように両金属がすべての組成で混ざり合って固溶体を形成する全率固溶体型の組合せや、Cu-Fe系のように逆にまったく混ざり合わない2相分離型の組合せでは、金属間化合物は形成されず、したがって異材接合は比較的容易になる。

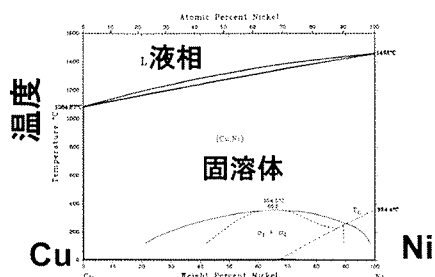
一方、Al-Fe系やAl-Mg系のように、ある組成範囲において硬くてろい金属間化合物を形成する組合せは接合が困難になる。状態図におけるこのような判断例は表としてまとめられており、例えばレーザー溶接を対象にして異材接合の難易度が表3<sup>10)</sup>のように示されている。

表3 状態図による異材接合の可能性（レーザー溶接）

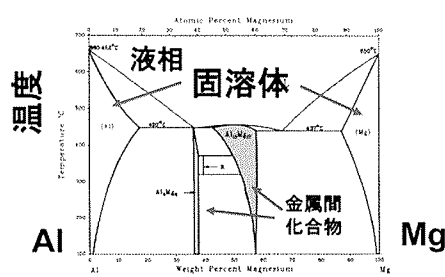
	Ag	Al	Au	Be	Ca	Cu	Fe	Mg	Mo	Nb	Ni	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	W
Al	2																
Au	1	5															
Be	5	1	5														
Cu	3	5	2	5													
Cu	2	2	1	5	2												
Fe	3	5	2	5	2	2											
Mg	5	2	5	5	5	5	3										
Mo	3	5	2	5	5	3	2	3									
Nb	4	5	4	5	5	2	5	4	1								
Ni	2	5	1	5	1	1	2	5	5								
Pt	2	5	1	5	1	1	1	5	2	5	1						
Re	3	4	4	5	1	3	5	4	5	5	3	2					
Sn	2	2	5	3	5	2	5	3	5	5	5	3					
Ta	5	5	4	5	5	3	5	4	1	1	5	5	5	5			
Ti	2	5	5	5	5	5	5	3	1	1	5	5	5	5	1		
W	3	5	4	5	5	3	5	3	1	1	5	1	5	3	1	2	
Zr	5	5	5	5	5	5	5	3	5	1	5	5	5	5	2	1	5

平衡状態図的には  
Al/FeやTi/Feの  
溶接は不可能

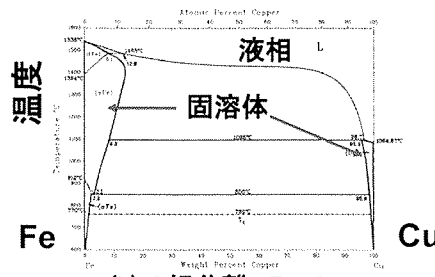
1：溶接可能（固溶体形成） 2：ほぼ溶接可能（複雑な組織形成）  
3：溶接には注意が必要（溶接に関するデータが不十分） 4：溶接には極めて注意が必要（信頼できるデータ無し）、5：溶接不可能（金属間化合物形成）\*）Welding handbook, Vol.2, 8<sup>th</sup> edition, America Welding Society, Miami, FL, 1991



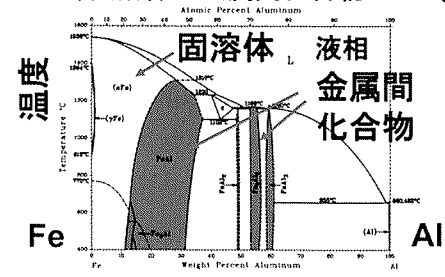
(a) 全率固溶体 Cu-Ni



(c) 一部固溶体+金属間化合物 Al-Mg



(b) 2相分離 Fe-Cu



(d) 一部固溶体+金属間化合物 Fe-Al

図1 異種金属接合の基礎となる2元系平衡状態図

### 3.2.2 アルミニウムと鉄の組合せ

#### (1) 直接接合が可能な接合界面構造

第2世代の代表的な異材接合の組合せ例として、鉄鋼とAl合金の組合せを例に取り、これまでに報告された検討結果に基づき、接合プロセスとその可能性をまとめると表4のようなになる。接合プロセスは例えば、溶融現象や金属原子の拡散現象による高温反応型と、材料の塑性流動現象などを利用する低温反応型に大別される。高温反応型には、溶融溶接、ろう接、拡散接合などが該当する。接合部は溶融状態や固相状態であっても元素拡散に十分な高温にさらされるために、状態図に従った組織が接合部に形成される。したがって、鉄鋼とAl合金の組合せでは接合界面には必然的にAl-Fe系金属間化合物層が形成されるために、その厚さが継手強度の支配因子となる。すなわち、このような場合には、金属間化合物層の形成そのものを抑制することは難しいが、その厚さを約1 $\mu\text{m}$ 以下に制御することにより良好な継手が得られる可能性が高くなる<sup>11)</sup>。

一方、低温反応型は、材料の溶融を伴わずに塑性流動現象を利用する固相接合法であり、加熱温度が低い為に元素拡散が十分に行われませんが、Al合金を軟化し、圧力を加えて塑性流動させ、鉄との接合界面に押し付けることで接合する方法である。各種の圧接法やFSW法<sup>12)</sup>によりこのような接合が可能であり、接合界面の金属間化合物層の形成を抑制すると共に、酸化物を主体としたナノメートル(nm)レベルの層厚さの非晶質相が形成される場合もある。以下にAl合金と鉄鋼との組合せに関する幾つかの代表的な接合例を紹介する。

#### (2) 高温反応型接合プロセスの適用例

##### (i) 拡散接合法

図2は、拡散接合により得られたAl合金とステンレス鋼との接合継手強度と接合界面に生成した金属間化合物層厚さとの関係である<sup>11)</sup>。化合物層厚さが1 $\mu\text{m}$ 前後で最も高い強度を示すが、化合物層厚さの増加と共に強度は急激に低下しており、継手強度に及ぼす接合界面の金属間化合物層厚さの影響が顕著である。なお、より薄い場合にも強度が低下しているのは、拡散条件によって接合界面の接

触面積が減少しているためである。

##### (ii) 溶融溶接法

代表的なアーク溶接では、Al合金と鉄鋼とが溶融混合する割合を制御することが困難であり、溶融部に多量の金属間化合物が形成され、その適用が困難となる。これに対して、エネルギー密度が高く、かつエネルギー指向性の良い電子ビーム溶接やレーザー溶接では、鉄鋼、もしくはAl合金を選択的に溶融して両者の溶融混合をできるだけ防ぐことにより、溶融部での金属間化合物の形成を抑制し、かつ早い冷却速度により加熱時間を短縮して接合界面での金属間化合物層の成長を抑制することができ、これにより良好な異材溶接継手が得られている<sup>13),14)</sup>。

##### (iii) ブレーズ溶接法

ろう接の一種であるブレーズ溶接<sup>15)</sup>は、溶融溶接との中間的な溶接プロセスであり、基本的には鉄鋼を溶かさずに、Al合金母材とろう材である溶加材ワイヤのみを溶融する方法である。例えばAl-Siフラックスコアードワイヤを用いたミグアークブレーズ溶接では、鉄鋼母材と溶接金属との接合界面において、金属間化合物層の厚さが1~3 $\mu\text{m}$ 以内であればAl合金母材破断となる良好な継手強度が得られ、さらに、金属間化合物の種類がFe-Al-Si3元系化合物の場合にはFe-Al2元系化合物と比べて、層成長が抑制される傾向にあることが明らかにされている<sup>16)</sup>。最近では、図3に示すように、ろう材として、Al合金及び鉄鋼の母材との濡れ性がいずれも良好であり、かつ化合物も形成しにくい亜鉛(Zn)に注目し、シリコンを添加したZn-Si合金ろう材ワイヤが開発され、さらにアーク溶接よりも入熱量が格段に少なく、かつ制御性に優れたレーザーブレーズ溶接を適用することにより、金属間化合物層厚さを数十nm厚さに抑制することが可能であり、接合継手の厳しい評価法であるピール破断試験においてもAl合金母材の熱影響部で破断する良好なAl合金/鉄鋼材料の異種材料継手が得られている<sup>17)</sup>。

#### (2) 低温反応型接合プロセスの適用例

一方、塑性流動現象を利用する低温反応型プロセスとして、従来から固相接合法である摩擦圧接や爆発圧接(一部

表4 Al/Fe 直接異材接合が可能な接合界面構造と接合プロセス (過去の文献等からの取り纏め)

接合プロセス		接合界面構造
高温反応	溶融溶接 抵抗溶接 ろう付 拡散接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温反応のため金属間化合物層形成</li> <li>金属間化合物層の厚さが支配因子</li> <li>数<math>\mu\text{m}</math> (1<math>\mu\text{m}</math>) 以下で良好な継手強度</li> </ul>
	圧接 (摩擦圧接) 超音波 爆接 FSW	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属間化合物層がSEM程度では認められない</li> <li>界面にアモルファス層形成 (数nm~数十nm厚さ、酸化層)</li> <li>化合物との複合層</li> </ul>

(中田作成)

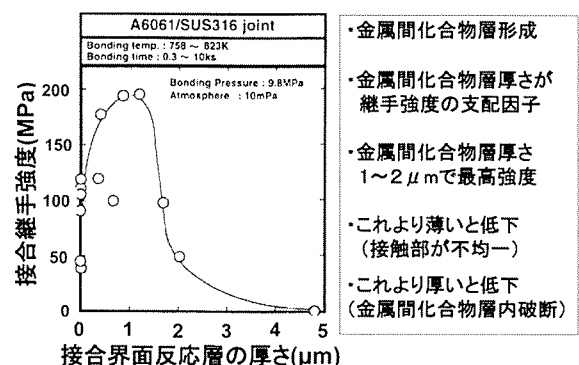


図2 Al-Fe 異材接合継手強度に及ぼす金属間化合物層厚さの影響 (拡散接合)<sup>11)</sup>

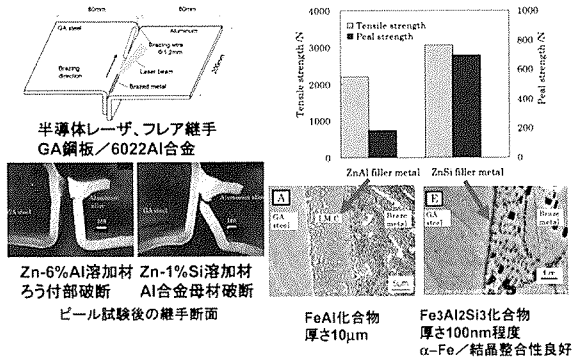
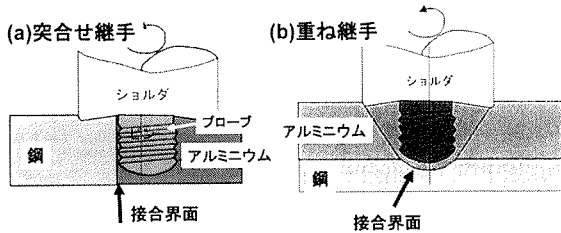


図3 Zn-Si 溶加材の出現とレーザーブレイジングによるAl合金/亜鉛めっき鋼板の異材接合<sup>17)</sup>

- ・回転プローブによる接合界面の清浄化/活性化
- ・低温・短時間接合と金属の塑性流動の活用

接合部断面とピン挿入位置



岡村ら：溶接学会誌 72(2003) 436. 岡本ら：軽金属溶接 42(2004) 49.

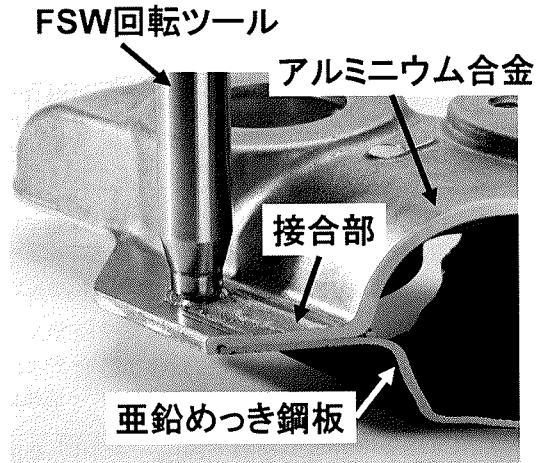
図4 FSWによるAl合金/鉄鋼の異材接合の提案<sup>18),20)</sup>

溶融を伴う)が実用化されてきた。しかし、これらの接合法では継手形状や接合条件の制約が大きいために、その用途は限定されていた。これに対して同じ固相接合でもFSWを用いる方法は、図4に示すようにツールをAl合金側に挿入して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り、ツールの回転方向等の接合条件の最適化により接合界面の金属間化合物層の形成は抑制され、またごく薄い非晶質層が形成する場合もあり、良好な接合強度が得られている。突合せ継手<sup>18),19)</sup>や重ね継手<sup>20)</sup>、及び点接合継手(FSSW, FSJ)<sup>21)</sup>も可能である。

このようにFSWを異種材料接合に応用するアイデアは既に約十年前から提案されてきたものであるが、ようやく最近になって、鉄鋼とAl合金のFSWによる直接接合が自動車車体のサブフレーム継手に適用され、図5に示すように自動車製造における実用化技術となったことが報告されている<sup>22)~24)</sup>。

3.2.3 Al合金とその他の難しい組合せ

鉄/アルミニウム以外の組合せにおいても、Al合金/銅、Al合金/Ti合金<sup>25)~28)</sup>、Al合金/Mg合金<sup>29)~32)</sup>などに対して、アーク溶接、レーザーブレイジング、FSWなどによる接合継手形成例が報告されている。例えば、Al/Tiの組合せのように融点差のある金属間の場合では、図6に示す



(本田技術研究所提供)

図5 鋼板とAl合金のFSWによる直接異材接合の実用化例：車体サブフレーム重ね継手への展開(ホンダ)

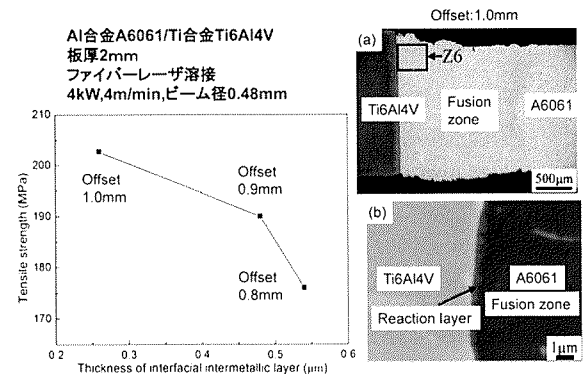


図6 Al合金A6061とTi合金Ti6Al4Vとのレーザー異材溶接例<sup>25)</sup>

ように、レーザー溶接を用いてレーザー狙い位置を低融点のAl合金側に適量オフセットすることにより、いわば一種のブレイズ溶接を行い、Ti側界面における金属間化合物層厚さをサブミクロンに制御して、継手引張試験においてAl合金HAZ破断を示す良好な継手を得ている。一方、Al/Mgの異材接合では、既に図1にも示したように両金属の融点がほぼ同じであり、かつ2つの共晶反応が存在するために、溶融溶接の適用は困難であり<sup>32)</sup>、FSWによる低温接合が可能性のあるプロセスとなる<sup>29)~31)</sup>。

4. 第3世代：異種材料間の接合

4.1 金属と樹脂・CFRPの直接接合法

あらかじめ板やシート状に加工された樹脂・CFRP材料と金属材料との異種材料接合法として、これまでに、接着剤を用いる接着法、リベットなどの機械的締結法、金属材料を加熱して樹脂を溶融して接合する熱圧着(融着)法などが用いられている。これらの接合法の特徴をまとめる

表5 実用化されている金属/樹脂の異材接合法の特徴

接合法	接手法	特 長	欠 点
接着法	接着剤	<ul style="list-style-type: none"> <li>継手形状、寸法の自由度大</li> <li>熱可塑性及び熱硬化性樹脂に適用可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>消耗品（接着剤）必要</li> <li>溶媒溶液の安全性</li> <li>接着剤固化時間の確保</li> </ul>
機械的締結法	<ul style="list-style-type: none"> <li>リベット</li> <li>ボルト</li> <li>かしめ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>継手形状、寸法の自由度大</li> <li>熱可塑性及び熱硬化性樹脂に適用可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>リベット、ボルトなどの消耗品必要</li> <li>かしめでは消耗品不要</li> </ul>
熱圧着法	<ul style="list-style-type: none"> <li>高周波加熱</li> <li>抵抗加熱</li> <li>超音波加熱</li> <li>レーザ加熱</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>継手形状、寸法の自由度大</li> <li>熱可塑性樹脂に適用</li> <li>消耗品不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱硬化性樹脂への適用困難</li> </ul>
インサート成形法	金型を用いる溶融樹脂の射出成形	<ul style="list-style-type: none"> <li>小物部品の大量生産可能</li> <li>熱可塑性及び熱硬化性樹脂に適用可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部品形状、寸法に大きな制約有り</li> </ul>

(中田作成)

と表5のようになる。

接着剤を用いる接着法では、接着剤の硬化時間が必要なこと、有機溶媒の周辺環境への影響、さらに接着剤の経年劣化等の対策が必要である。また機械的締結においては工程の効率化やリベット材等のコストが指摘されている。

一方、熱圧着（熱融着）法には、高周波加熱などにより金属材料を加熱して樹脂を局部的に溶融して接合する方法や、樹脂が透明な場合には樹脂を透過してレーザビームを照射し、金属との接合界面で金属を加熱してその熱で樹脂を局部的に溶融して接合する方法などがある。これらの熱圧着法ではいずれの方法でも接合可能な樹脂は熱可塑性樹脂に限定される。

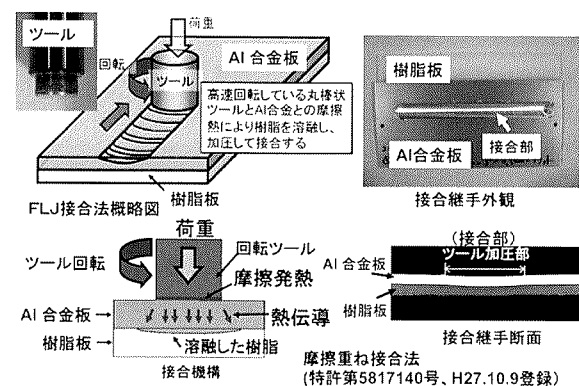
また適用製品は異なるが、最近特に注目されている方法に、溶融した樹脂を金型内に高圧で注入して成型する射出成形法を応用したインサート成形法があり、小型部材の作製法として実用化されている<sup>33)</sup>。しかし、形状やサイズに大きな制約がある。

このため最近では接着剤やリベット等を用いずに金属と樹脂等を直接接合する方法も求められており、熱圧着法において、新しい加熱源として、レーザ加熱や摩擦発熱を用いる方法が注目されている。

以下では、熱圧着法の接合機構について、著者らの摩擦発熱を用いる方法を例に取り、説明する。

#### 4.2 摩擦重ね接合法（FLJ法）における金属/樹脂・CFRPの直接接合機構

図7に摩擦重ね接合法（Friction Lap Joining, FLJ）接合法の原理図を示す。金属と樹脂を重ねて、金属の表面に高速回転する棒状のツールを押し付けることにより、摩擦発熱により金属表面を加熱し、その熱伝導により接合界面の樹脂を溶融する方法<sup>34)</sup>であり、ツールを移動させることにより金属/樹脂の連続した重ね継手が得られ、密着性に優れ、かつ、引張せん断試験では樹脂母材破断を示す良好な継手強度が得られる。これまでに金属材料としてAl合金、Mg合金、炭素鋼、ステンレス鋼、銅およびチタン

図7 摩擦エネルギー利用の金属/樹脂の直接接合法<sup>35)</sup>

において樹脂材料との接合が確認されている。

FLJ法は、その接合原理から熱可塑性樹脂に適用され、熱硬化性樹脂への適用は困難である。さらに構造式中に極性官能基を有しているポリアミド（PA）やポリエチレンテレフタレート（PET）などの樹脂は良好な接合性を示すが、極性官能基の無いポリエチレン（PE）やポリプロピレン（PP）などの樹脂の接合性は困難であり、プラズマ処理などの特別な表面処理が必要である。

図8は、極性官能基であるCOOH基を有するエチレンアクリル酸コポリマー（EAA）と極性官能基を持たないポリエチレン（PE）の2種類の熱可塑性樹脂を用いて、Al合金A2017との接合を行った結果であり、継手引張せん断破断荷重を示す<sup>35)</sup>。Al合金の表面状態の影響についても、受入のままの状態と、アルマイト皮膜処理を施したものを比較検討したものである。極性官能基を有するEAA樹脂では、Al合金の表面状態にかかわらず継手が形成され、受入材のままでは破断は主として接合界面であったのに対して、ポーラス皮膜であるアルマイト皮膜処理材ではすべて樹脂母材破断となり、このことは接合界面の強度は樹脂母材の強度よりも強いことを意味しており、良好な接合継手が得られた。その一方、極性官能基が無いPE

樹脂では、Al合金の表面状態が受入材のままでは溶解したPEとAl合金は接合されなかったが、アルマイト皮膜処理材では接合が可能となり、かつ樹脂母材破断を示し、良好な接合継手が形成された。

図9は接合界面の高倍率透過型電子顕微鏡観察結果を示す。極性官能基であるCOOH基を有するEAA樹脂では(a)に示すようにAl合金受入材表面に存在する数ナノの厚さの酸化アルミニウム層を介して接合されており、反応層は認められなかった。接合機構として図中に示すように、分極した極性官能基と、同様に分極していると考えられる酸化アルミニウム層との間で、強い静電引力による分子間力(水素結合)により接合されたと考えられる。一方、PEの場合では(b)に示すようにアルマイト皮膜表面に

は多数の細孔が存在しており、(c)に示すようにさらに接合界面を拡大すると、ナノサイズレベルの細孔の中に溶解したPE樹脂が流入して固まった形跡が認められ、いわゆるアンカー作用が発生し、機械的締結により接合されたことを示唆している<sup>35)</sup>。

鉄鋼として軟鋼 (SPCC) やステンレス鋼と樹脂ポリアミド (PA) との継手においても、引張せん断試験では樹脂母材破断を呈する良好な接合継手が得られ、接合界面には鉄酸化物層やクロム酸化物層の存在が確認されており、酸化物層を介しての水素結合効果による接合機構が示唆された<sup>36),37)</sup>。

さらにFLJ法は、極性官能基を有する熱可塑性樹脂をマトリックス材料とするCFRPと金属との接合にも適用可能であり、図10は、Al合金A5052と、熱可塑性樹脂であるポリアミドPA6をマトリックス樹脂として、射出成

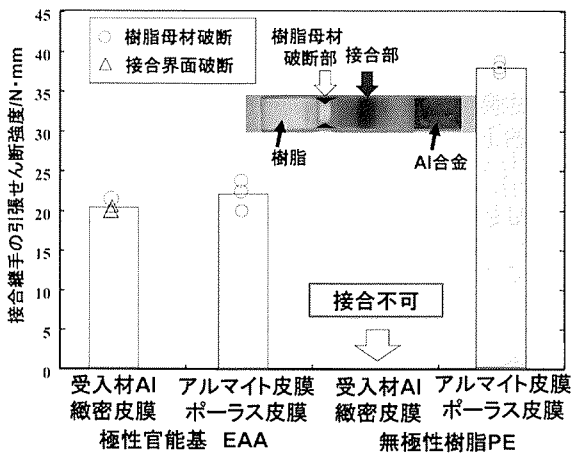


図8 接合性に及ぼす樹脂特性とAl合金表面状態の影響

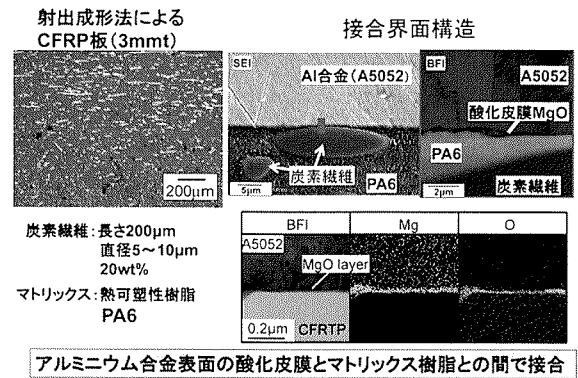


図10 摩擦重ね接合法によるAl合金A5052/熱可塑性CFRP (PA6マトリックス) の直接接合<sup>40)</sup>

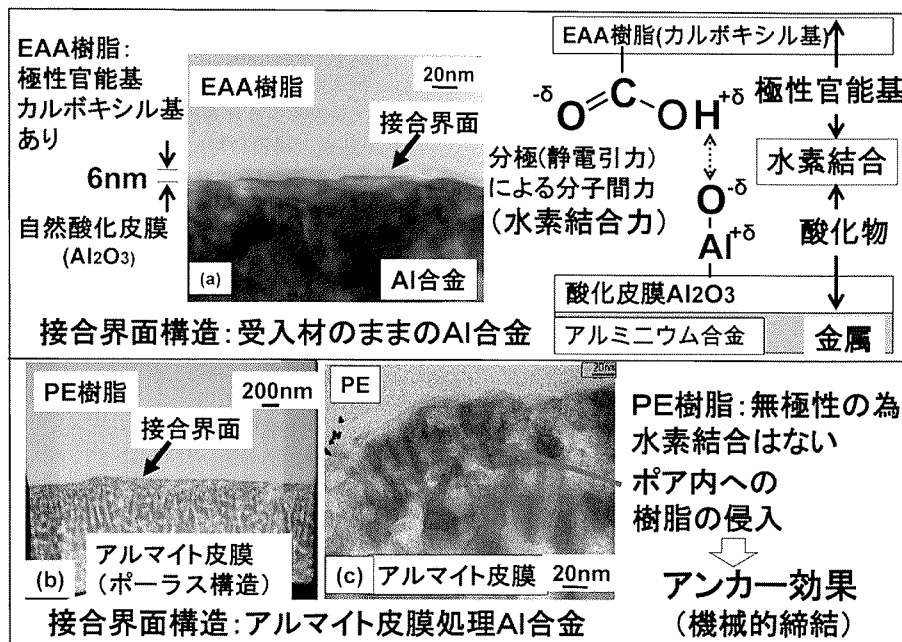


図9 想定される金属/樹脂の直接接合機構

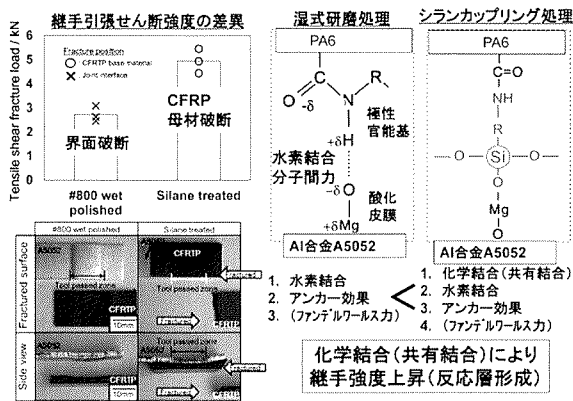


図11 摩擦重ね接合法によるAl合金A5052/熱可塑性CFRP (PA6マトリックス)の異材接合継手強度に及ぼすAl合金表面へのシランカップリング処理の効果<sup>41)</sup>

形により形成された短繊維CFRP板(繊維径数 $\mu\text{m}$ , 繊維長 $200\sim 300\mu\text{m}$ , 添加量20質量%)との重ね継手の外観写真(継手側面)であり, 接合条件の最適化によりCFRP母材破断やCFRPの一部母材破断を呈する良好な継手が得られている<sup>38), 39)</sup>. 接合は, マトリックス樹脂とAl合金表面の酸化皮膜(この場合は, 合金元素のMgが酸化したMgO)との間の水素結合によると考えられ, 炭素繊維が直接, 接合に寄与した形跡は認められていない.

以上のように, 金属/樹脂の接合には, 樹脂の極性官能基と金属表面の酸化皮膜との間で作用する水素結合力, ならびに金属表面の微小凹凸に由来するアンカー作用による機械的締結力が接合性に影響することが明らかになってきている<sup>35)~40)</sup>.

一方, 更なる接合強度の向上のためには, 分子間力である水素結合力よりも強力な接合力が必要であり, その方法として, 例えばシランカップリング反応を利用した化学結合力による接合が挙げられる. 金属表面に塗布された反応剤が加熱処理により金属表面の酸化皮膜及び樹脂の両方と化学結合を起こすものである. 図11は一例としてAl合金/CFRP継手強度に及ぼすシランカップリング処理の効果を示している. シランカップリング処理を施したAl合金との継手はCFRP母材破断を示し, 接合強度は接合界面破断を呈した水素結合力による継手強度の約2倍まで増加した<sup>41)</sup>.

さらに, 射出成形の一種であるインサート接合法においては, 特殊な表面処理法によって金属表面に予め数十~数百nmサイズ径の多数の微細な孔を形成して接合することにより, 孔内へ溶融樹脂が侵入し固化することによるアンカー作用で高い接合強度が得られており, 既に実用化も始まっている<sup>3)</sup>. 既に図8で述べたポーラスアルマイト皮膜は数十nmサイズのアンカー作用の例である.

また, 細く絞ったレーザビームを高速で金属表面に照射して局所溶融させると, 例えばAl合金A5052に対する図

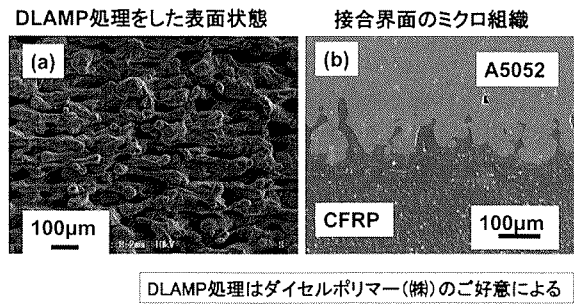


図12 摩擦重ね接合法による熱可塑性CFRP (PA6マトリックス)とDLAMP処理を行ったAl合金A5052との接合界面組織

12(a)に示すような, 数十~数百 $\mu\text{m}$ サイズの複雑な凹凸形状の表面溶融部が得られる. これがアンカー作用を有効に発揮する特殊表面処理法として注目されている<sup>42)</sup>. 図12(b)は, (a)に対してFLJ法でCFRP (PA6マトリックス)を直接接合した接合界面組織である. Al合金表面の深さ約 $100\mu\text{m}$ の細長い細孔の先端部にまで溶融した樹脂が浸入しており, 接合継手の引張せん断試験ではCFRP母材破断を呈し, 優れたアンカー効果を示した.

## 5. おわりに

以上, マルチマテリアルに関わる異材接合の現状と接合機構について, 最近の話題も含めて概略を紹介した. 詳しくは参考文献などを参照して頂きたい.

## 参考文献

- 1) 例えば, 「BMW7シリーズ, 骨格心材へのCFRP適用で130kg軽量化」日経テクノロジーonline, (2015年10月12日).
- 2) 「異種材料一体化のための最新技術~溶接・接着剤・一体成形・加飾~」, サイエンス&テクノロジー, (2012年1月).
- 3) 「異種材料接合, 何でもくっつける技術が設計を変える」, 日経BP社, (2014年12月).
- 4) 例えば, 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会編: ステンレス鋼溶接トラブル事例集, 産報出版, 平成5年4月.
- 5) 「最新「異種材料」の接着・接合トラブル対策事例集」, 技術情報協会, (2006年4月).
- 6) 新エネルギー・産業総合開発機構: 異材溶接技術の基礎研究, 平成12年度調査報告書, NEDO-ITK-0009 (2001.3), 68-82.
- 7) 中田一博, 牛尾誠夫: 異材溶接・接合のニーズと今後の技術開発の動向, 溶接学会誌, 71-6(2002), 418-421.
- 8) 中田一博: 異材接合への期待とその展望, 溶接技術, 50-2(2002), 64-68.
- 9) T.B. Massalski, Binary Alloy phase Diagrams, ASM International (1990).
- 10) Welding Handbook, Vol.2, 8th edition, AWS (1991).
- 11) 黒田晋一, 才田一幸, 西本和利: 溶接学会論文集, 17-31(1999), 484.
- 12) 溶接学会編: 「摩擦攪拌接合-FSWのすべて」, 産報出版(1996年1月).
- 13) 中田一博: アルミニウムと鉄の溶融溶接, 溶接技術, 52-10(2004), 126-130.
- 14) 片山聖二他: 溶接学会全国大会講演概要集, 67(2000),

- 248-249.
- 15) 中田一博：アルミニウムと鉄のブレイズ溶接，溶接技術，52-11(2004)，126-130.
  - 16) T. Murakami, K. Nakata, H.J. Tong, M. Ushio: Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel by MIG Arc Brazing Using Flux Cored Wire, *ISIJ International*, 43-10(2003), 1596-1602.
  - 17) 脇坂康成，鈴木孝典：亜鉛合金ワイヤによるアルミニウム合金と亜鉛めっき鋼板のレーザーブレイジング，溶接学会論文集，30-3(2012)，274-279.
  - 18) 岡村久宣他：摩擦攪拌接合 (FSW) の開発状況と適用上の課題，溶接学会誌，72-5(2003)，436.
  - 19) 福本昌宏，椿正己，下田陽一郎，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，22-2(2004)，309.
  - 20) 岡本他：摩擦攪拌接合 (FSW) による異種金属の接合，軽金属溶接，42-2(2004)，49.
  - 21) 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，56-6(2006)，317-322.
  - 22) 日経ものづくり：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，No.10(2012)，18-19.
  - 23) Motor Fan，最新接合事情 鉄とアルミを接合する，73(2012)，62-65.
  - 24) 佐山 満：サブフレームのスチールとアルミ合金の FSW 接合，軽金属溶接，52-1(2014)，3-9.
  - 25) Z.H. Song, K. Nakata, A.P. Wu, J.S. Liao: Interfacial microstructure and mechanical property of Ti6Al4V/A6061 dissimilar joint by direct laser brazing without filler metal and groove, *Materials Science & Engineering A* 560(2013), 111-120.
  - 26) Z.H. Song, K. Nakata, A.P. Wu, J.S. Liao, L. Zhou: Influence of probe offset distance on interfacial microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded joint of Ti6Al4V and A6061 dissimilar alloys, *Materials and Design* 57(2014), 269-278.
  - 27) A.P. Wu, Z.H. Song, K. Nakata, J.S. Liao, L. Zhou: Interface and properties of the friction stir welded joints of titanium alloy Ti6Al4V with aluminum alloy 6061, *Materials and Design* 71(2015), 85-92.
  - 28) 青沼昌幸，中田一博：摩擦攪拌接合法による異種金属接合，塑性と加工 (日本塑性加工学会誌)，第53巻，第621号(2012-10)，869-873.
  - 29) N. Yamamoto, J.S. Liao, S. Watanabe and K. Nakata: Effect of Intermetallic Compound Layer on Tensile Strength of Dissimilar Friction-Stir Weld of a High Strength Mg Alloy and Al Alloy, *Materials Transactions*, 50(2009), 2833-2838.
  - 30) 榎本正敏，柿内茂樹，佐藤智，Al 合金 A6N01 と難燃性 Mg 合金 AZX611 の摩擦攪拌接合，連載講座アルミニウム合金の溶接と接合 第3回，溶接技術，63(2015)，10，131-136.
  - 31) B.L. Fu, G.L. Qin, F. Li, X.M. Meng, J.Z. Zhang, C.S. Wu, Friction Stir Welding Process of Dissimilar Metals of 6061-T6 Aluminum Alloy to AZ31B Magnesium Alloy, *J. Materials Processing Technology*, 218(2015), 38-47.
  - 32) P. Wang, S.S. Hu, J.Q. Shen, Y. Liang, Microstructure and Mechanical Behaviour of Cold Metal Transfer Welded Mg/Al Dissimilar Joint Using Wire AZ31 As Filler Metal, *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(2017), 353-361.
  - 33) 日経ものづくり：設計をここまで変える金属・樹脂接合，2011年11月号66-69.
  - 34) 中田一博他，特許第817140号 (2015年10月9日)，特願2011-035001，金属部材と樹脂部材との接合方法.
  - 35) 岡田俊哉，内田壮平，中田一博，摩擦重ね接合によるアルミニウム合金と樹脂材料の直接接合特性に及ぼすアルマイト皮膜処理の影響，軽金属溶接，53(2015)，298-306.
  - 36) 北川大喜，永塚公彬，山岡弘人，中田一博：溶接学会全国大会講演概要集，95(2014.9)，56-57.
  - 37) B.L. XIAO 他：溶接学会全国大会講演概要集，97(2015.9)，16-17.
  - 38) K. Nagatsuka, S. Yoshida, A. Tsuchiya, K. Nakata, Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using lap joining, *Composites: Part B*, 73(2015), 82-88.
  - 39) 三輪剛士，北川大喜，永塚公彬，山岡弘人，伊藤和博，中田一博：摩擦重ね接合によるステンレス鋼と炭素繊維強化熱可塑性樹脂との異材接合，溶接学会論文集，35(2017)，29-35.
  - 40) 永塚公彬，斧田俊樹，岡田俊哉，中田一博，摩擦重ね接合による Mg 添加量の異なる種々のアルミニウム合金/樹脂の直接異材接合，溶接学会論文集，32(2014)，235-241.
  - 41) 永塚公彬，田中宏宣，肖 伯律，土谷敦岐，中田一博：摩擦重ね接合によるアルミニウム合金と炭素繊維強化樹脂の異材接合特性に及ぼすシランカップリング処理の影響，溶接学会論文集，33-4(2015)，317-325.
  - 42) <http://www.daicelpolymer.com/ja/topics/archive/1404DLAMP/>