

異種材料接合はどこまで進んだか

中田 一博

大阪大学 名誉教授 / 大阪大学接合科学研究所 特任教授

1 異種材料接合技術が注目される時代背景

戦後の高度成長期において、各種のエネルギー・石油化学プラントや各種産業機械、自動車などの輸送機器、ビルなどの建築、橋梁などのインフラ構造物などにおいて主要構造材である鉄鋼材料の開発が大きく進み、多様な特性を有する鉄鋼材料が出現してきた。そしてこれらを適材適所で組合せるために、異材溶接技術が発展してきた。これにはアーク溶接法の進歩や、電子ビーム溶接、拡散接合、爆接、摩擦圧接などの特色ある溶接法が貢献してきた。

一方、半導体・電子機器における異種材料接合技術は独自の発展を遂げてきており、もはや溶接技術の範疇には含まれないような、いわゆるナノテクノロジー製造技術になっている。

最近、とくに異種材料接合が注目されているが、これには自動車産業における強いニーズが背景にあると思われる。すなわち、地球温暖化防止や大気環境保全の観点から、自動車の排ガス規制が一段と強化され、燃費向上のためにも自動車車体の軽量化が急務となっている。

車体の軽量化の方法として、強度の高い高張力鋼を用いて薄板構造にする、あるいは鉄よりも軽い軽量金属材料であるAl合金やMg合金を使用する、さらに、より軽量化が期待できる樹脂材料や炭素繊維強化複合材料(CFRP)を利用するなどの方法が実用化の視野に入ってきている。しかし材料コストと製造コストを考慮すると、もはや単独材料での車体軽量化は実用的には困難な状況であり、このために、これらの材料をうまく組合せて、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動きが出てきている¹⁾。このような異なる特性

を有する構造用材料を、適材適所で組合せて、総合的に優れた特性を有する部材や製品を作り出す設計思想は「マルチマテリアル化」と呼ばれている。なかでも、自動車の車体軽量化においてはとくに注目されるキーワードとなっている。

このマルチマテリアル化による軽量化を実現するためには、鉄鋼材料と軽量非鉄金属材料であるAl合金との異種金属接合が真っ先に求められている。しかし、鉄とアルミニウムの接合は困難であることはよく知られているところであり、さらに最近では、金属材料同士のみならず、まったく材料構造が異なる金属と樹脂、あるいはCFRPとの接合までもが要求されてきている。すなわち文字どおりの異種材料接合技術が必要とされているのである^{2),3)}。

しかし、残念ながら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では、このような技術要求に応えるのは困難であり、新たな異種材料接合技術の開発が求められているのが、現状である。

2 異種材料接合技術の現状

異種材料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すると、表1のようになると思われる。すなわち、すで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、金属/金属の組合せの中でも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間や、異なる種類のAl合金間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、後述するように接合が難しいものが多く、これらは第2世代に分類される。鉄/アルミニウムや鉄/チタンなどがこれに該当する。

表1 異種材料接合における各種材料組合せにおける実用化度の俯瞰的分類

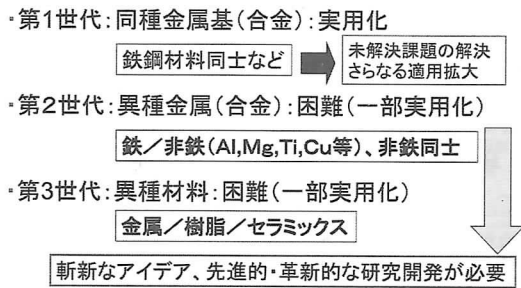


表2 接合プロセスの異種材料接合への適用性

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
溶融溶接	アーク溶接	○	△	×	×
	電子ビーム溶接	○	○	×	×
	レーザー溶接	○	○	○*	×
ろう接	ろう付	○	○	×	○
固相接合	拡散接合	○	○	×	×
	圧接	○	○	△	×
	FSW	○	○	○*	×
接着	接着	○	○	○	○
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

これに対して、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異なっている材料間の異種材料接合は第3世代となり、新しい発想からの異種材料接合の考え方が求められる。例えば金属/CFRPとの接合などがこれに該当し、その接合技術の開発が期待されている。

表2は、もう少し具体的に、各種異種材料接合の組合せに対する接合プロセスの適用の可能性を、材料間の接合原理の観点から取りまとめたものである。すなわち、第1世代の組合せとなる同種金属を基とした異なる合金の組合せ(同種金属基)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が、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手法により適用が可能である。同じ第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 第1世代: 同種金属基材料間の接合

同種金属同士の異種材料接合は、鉄鋼材料同士の異種材料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^{4),5)}。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。

4 第2世代: 異種金属材料間の接合

4.1 異種金属材料間の接合の難しさ

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^{6)~8)}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、その接合はむしろ不可能なほど困難と考えられてきている。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やすいからであり、接合部における割れの発生や、低強度・低延性の脆弱な継手のために実用的には使用できないものになる。

異種材料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⁹⁾から判断することができる。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

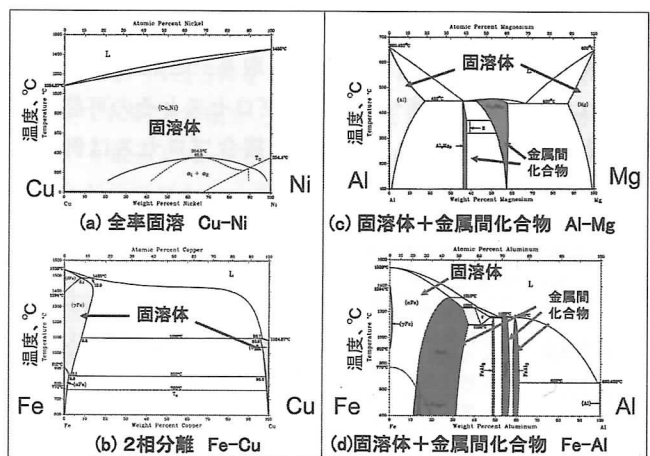


図1 異種金属材料接合における代表的な金属組合せとその2元系平衡状態図⁹⁾

表3 2元系平衡状態図に基づく異種材料接合の可能性評価（レーザ溶接を対象）¹⁰⁾

	Ag	Al	Au	Be	Co	Cu	Fe	Mg	Mo	Nb	Ni	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	W
Al	2																
Au	1	5															
Be	5	2	5														
Co	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	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	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, Ti/Fe, Al/Ti の溶接は極めて困難

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, 8th edition, America Welding Society, Miami, FL, 1991

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、金属間化合物を形成せず、したがって異種材料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もろい金属間化合物を形成する組合せは異種材料接合が困難になる。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、例えばレーザ溶接を対象にして異種材料接合の難易度が表3¹⁰⁾のように示されている。

4.2 アルミニウムと鉄の組合せ

第2世代の代表的な異種材料接合の組合せ例として、鉄鋼材料と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のようになる。接合プロセスは例え

表4 アルミニウム/鉄の異種材料接合において良好な継手が得られる可能性が高い接合法とその接合界面組織

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

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きく分けられる。高温反応型プロセスには溶融溶接、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、鉄鋼材料と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¹¹⁾。

一方、低温反応型プロセスは、材料の溶融をとまわずに塑性流動現象を利用する固相接合法であり、加熱温度が低いため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¹²⁾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合金と鉄鋼材料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。

(1) 高温反応型接合プロセスの適用例

(i) 溶融溶接法

代表的な溶融溶接法であるアーク溶接では、Al合金と鉄鋼材料とが溶融して混合する割合を制御することが困難であり、このため、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

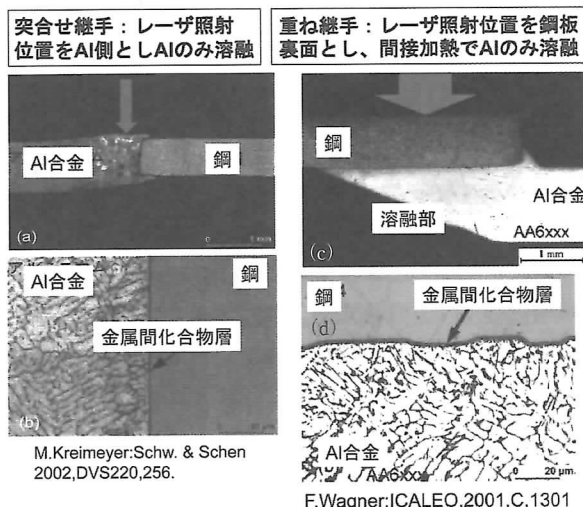
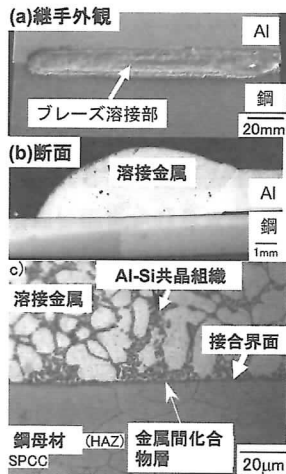


図2 レーザ溶接法によるAl合金/鉄の異種材料接合継手断面組織例, (a), (b) 突合せ継手, (c), (d) 重ね継手



AI(A1050)/鋼(SPCC)
フラックス内蔵
溶加材ワイヤ:
BA4047(AI-12%Si合金)

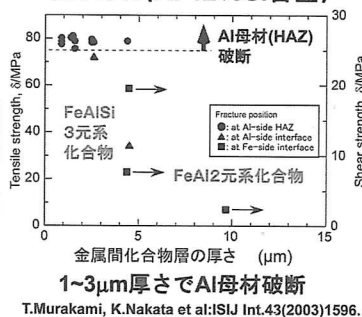


図3 ミグレーザー溶接法によるアルミニウム合金/鉄の異材接合継手断面組織とその継手強度に及ぼす接合界面の金属間化合物層厚さの影響¹⁶⁾

ビーム溶接やレーザー溶接を用いて、図2に示すように鉄鋼、もしくはAl合金を選択的に溶融して溶接する方法が検討されている。この基本的な考え方は、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であり、これにより良好な異種材料溶接継手が得られている^{13), 14)}。

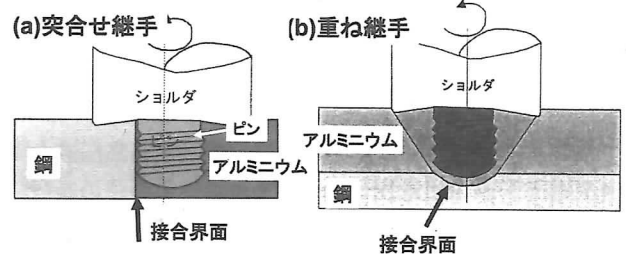
(ii) プレーズ溶接法

ろう接の一種であるが溶融溶接との中間的な溶接プロセスであるプレーズ溶接も有望な結果が報告された¹⁵⁾。これは基本的には鉄鋼材料を溶かさずに、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。例えばミグアーク溶接によるAl-Siフラックスコアードワイヤ(溶融したAl合金と鉄鋼との濡れ性を改善する効果のあるフラックスを包含したもの)を用いたミグプレーズ溶接では、Al合金母材は溶融するが鉄鋼材料母材はほとんど溶融しない溶接条件を選択すると、図3¹⁶⁾に示すように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成長を抑制することができ、溶接割れの無い良好な継手が得られている。またこのとき、金属間化合物層の厚さが1~3 μm以内であればアルミニウム合金母材破断となる良好な継手強度が得られた。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。

最近では、ろう材として、Al合金およ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、さらに接合プロセスとし

異種材料接合へのFSWの応用:
・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 摩擦攪拌接合法によるアルミニウム/鉄の異種材料接合法の提案例^{18), 20)}

て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プ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¹⁷⁾。

(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(一部溶融をとまなう)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、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おり、突合せ継手^{18), 19)}や重ね継手²⁰⁾、および点接合継手²¹⁾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すで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による直接接合がサブフレーム継手に適用され、自動車製造における実用化技術に入ってきたことが報告されている^{22)~24)}。

4.3 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、鉄/チタン^{25)~28)}、鉄/黄銅²⁹⁾、Al合金/Ti合金^{30)~32)}、Mg合金/Ti合金³³⁾、Al合金/Mg合金³⁴⁾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。

5 第3世代：異種材料間の接合

5.1 金属と樹脂・CFRPの直接接合

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と表5のようになる。

接着法では接着剤が用いられるために、十分な接合強度が得られるまでに一定の時間（接着剤の硬化時間）が必要なことと、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も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ービームを照射し、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、最近とく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る。あらかじめ金型内に設置した金属と、注入された樹脂を直接接合して部材を作成するもので、小型部材の作製法として一部で実用化されている³⁵⁾。しかし、その一方、金型を用いるために形状やサイズに大きな制約があり、大型部材や複雑な形状の部材などへの適用や、あるいは現場での組立工程などへの対応は難しいのが現状である。

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が求められており、熱圧着（融着）法において、新しい加熱源として、レーザーを用いる方法や摩擦発熱を用いる方法が注目されている。

(1) 摩擦重ね接合法（FLJ法）

加熱熱源として摩擦エネルギーを利用する摩擦重ね接合法（Friction Lap Joining, FLJ）接合法の原理図を図5に示す。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

表5 実用化されている金属／樹脂異種材料接合法の特徴

接合法	接手法	特長	欠点
接着法	接着剤	・継手形状・寸法の自由度大 ・熱可塑性および熱硬化性樹脂に適用可	・消耗品（接着剤）必要 ・溶媒溶液の安全性 ・接着剤固化時間の確保
機械的締結法	・リベット ・ボルト ・かしめ	・継手形状・寸法の自由度大 ・熱可塑性および熱硬化性樹脂に適用可	・リベット、ボルトでは消耗品必要 ・ただし、かしめでは不要
熱圧着法	・高周波加熱 ・抵抗加熱 ・レーザー加熱	・継手形状・寸法の自由度大 ・熱可塑性樹脂に適用 ・消耗品不要	・熱硬化性樹脂への適用不可
インサート成形（射出成形法）	金型を用いた溶融樹脂の射出成形	・小物部品の大量生産可能 ・熱可塑性および熱硬化性樹脂に適用可	・部品形状、寸法に大きな制約有り

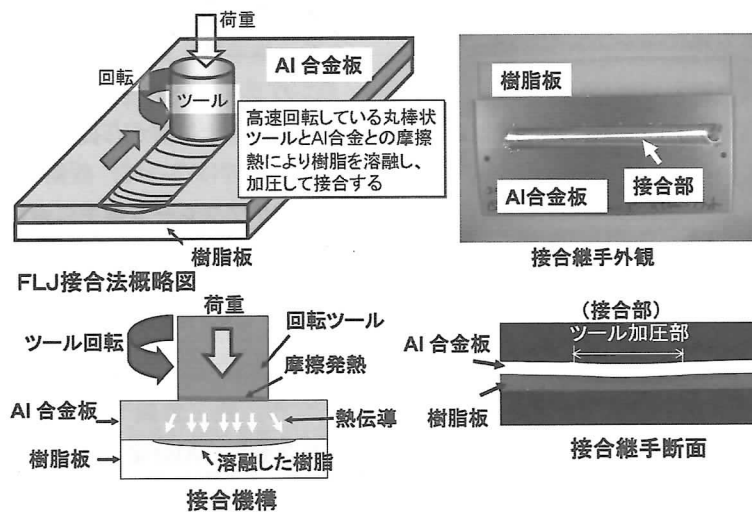


図5 摩擦エネルギーを利用した金属と樹脂との直接接合法：摩擦重ね接合法

脂を溶融する方法³⁶⁾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ている。これまでに金属材料としてはAl合金、Mg合金、炭素鋼、銅およびチタン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、特別な対策が必要である。

図6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

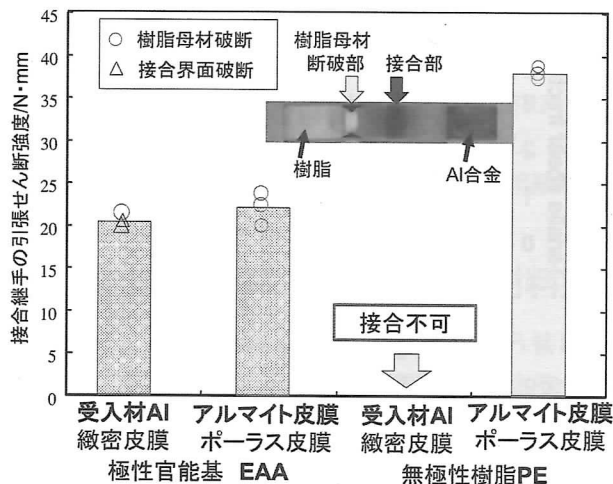


図6 接合性に及ぼす樹脂特性とAl合金の表面状態の影響³⁷⁾

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、得られた継手の引張せん断破断荷重を示す³⁷⁾。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、表面に人工的に酸化アルミニウム皮膜を形成する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、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融したPEとAl合金は接合されなかった。しかし、アルマイト皮膜処理材では接合が可能であり、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7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融したPE樹脂が流入して固まった形跡 (接合界面の破線で囲った部分) が認められ、いわ

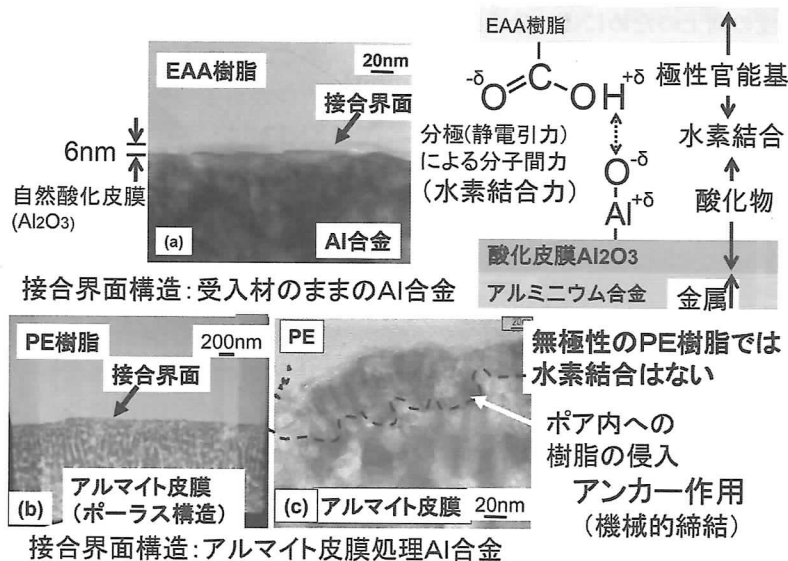


図7 Al合金/樹脂直接接合界面の微細構造と想定される金属/樹脂の接合機構³⁷⁾

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³⁷⁾。

鉄鋼材料として軟鋼 (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ている^{38), 39)}。この場合にも、接合界面には鉄鋼材料由来の鉄酸化物層やクロム酸化物層の存在が確認され、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ている。

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8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、射出成形により形成された短繊維CFRP板 (繊維径数 μm , 繊維長200~300 μm , 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^{40), 41)}。接合界面の解析により、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。CFRPの特長を生かして接合するためには、炭素繊維とAl合金との直接反応や、あるいはアンカー作用への直接寄与などのさらなる工夫が必要と考えられる。

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^{37)~42)}。

一方、さらなる接合強度の向上のためには、分子間力

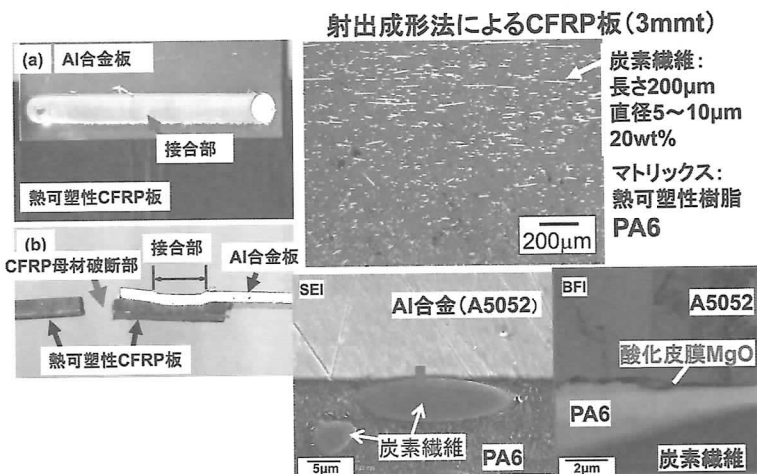


図8 摩擦重ね接合法によるAl合金/熱可塑性CFRPの直接接合継手と接合界面構造

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9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⁴³⁾。

(2) レーザエネルギーを利用した方法

レーザーを用いる方法もレーザー融着法として注目されており、透光性を有する樹脂と金属を重ねて、樹脂側から

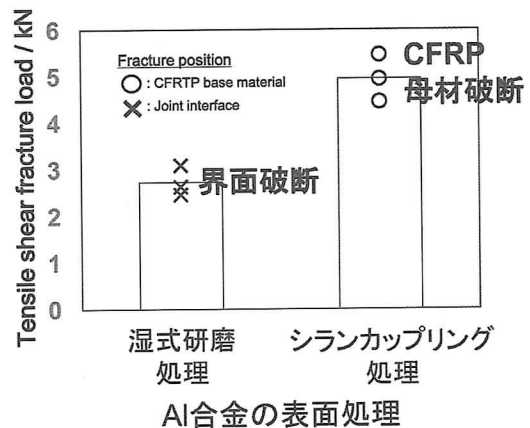


図9 接合性に及ぼすシランカップリング処理の効果

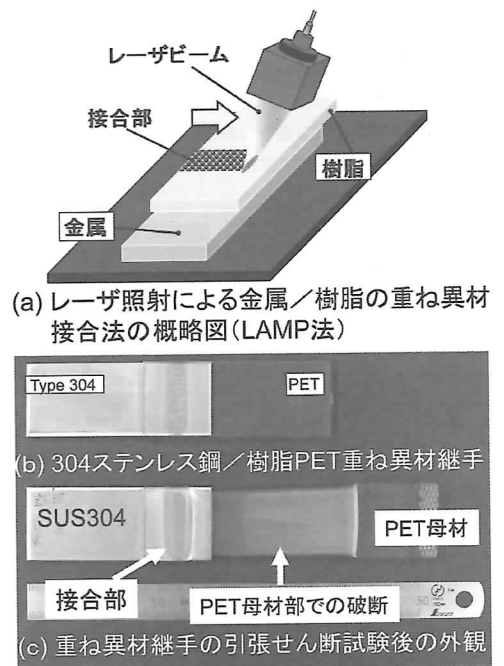


図10 レーザ照射による金属/樹脂の重ね異材接合法の概略図 (LAMP法)^{44), 45)}

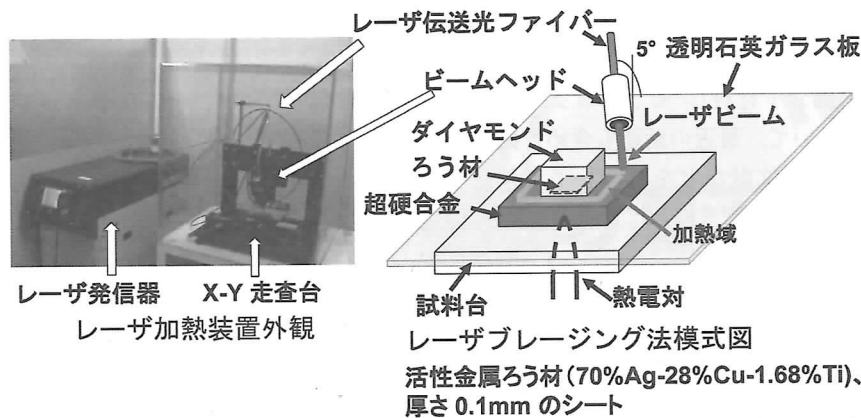


図11 セラミックス/金属異材レーザーブレイジング法

レーザービームを照射し、透過したレーザービームで接合界面の金属表面を加熱し、接触している樹脂を熔融して接合する方法が実用化されている。例えば図10に示すように金属SUS304と樹脂ポリエチレンテレフタレート(PET)の重ね異材継手において、PET母材破断を呈する良好な継手が得られており、LAMP法^{44), 45)}と名づけられている。この方法は非透光性の樹脂やCFRPにも適用可能であり、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熔融して接合することが可能であり、注目されている。

5.2 金属とセラミックスの異種材料接合

金属とセラミックスの異種材料接合は、ろう接により実用化されており、実用的には、熔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、少量のチタンなどの活性金属を含む活性ろう材（例えば銀-銅-チタン合金ろう）を用いるろう付法が適用されている。添加された活性金属の酸化を防ぐために通常は高真空雰囲気中での炉中ろう付法が用いられるが、真空排気や炉全体の加熱・冷却等の処理工程に時間がかかることや、金属とセラミックスとの間の大きな熱膨張係数の差により、冷却時に発生する熱応力によって、しばしばセラミックスに割れが発生するなどの問題を抱えている。

最近になって、このような問題点を解決すべく、図11に示すように、レーザービームによる局所・短時間加熱を用いる新しい試みが超合金とセラミックスとの接合で提案されており^{46), 47)}、局所・短時間加熱によりセラミックスへの熱影響を最少とするなどの特長があり、真空炉を用いる従来のバッチ式に代わりうる新しいインライン式の可能性を示す方法として注目されている。この接合法により、ダイヤモンドや黒鉛、アルミナ、窒化けい素および炭化けい素などのセラミックスと超合金との異種材料接合が可能であり、精密切削工具などへの

応用が期待されている。

6 継手特性評価や品質評価法などの課題

一般的に、新たな技術の研究開発段階では要求性能を満足する結果が得られても、実際の実用化に向けては、大きな高い壁、あるいは深い谷が横たわっていることが知られている。異種材料接合では、初期段階の課題としては、まず継手形成とその静的継手強度であるが、さらに、例えば以下のようなことが実用化に向けての課題として挙げられる。すなわち、

- (1) 動的機械的性質（疲労強度、衝撃特性など）
- (2) 化学的性質（とくに耐食性）
- (3) 接合プロセス
 - (a) 継手強度の安定性／再現性の保証
 - (b) 生産現場への適用性（研究から大量生産の現場へ）
 - (c) 品質評価法（非破壊検査が望ましい）
 - (d) コスト（接合設備、消耗品、維持・管理など）
- (4) 知財化
- (5) 規格化・標準化

以上のように、実用的には単に継手強度のみならず、部材や最終製品の用途により、要求性能は多岐に亘ることが想定される。このためには静的強度以外にも、疲労強度や衝撃特性、耐食性、耐候性、耐熱性などの諸特性も合わせて考慮する必要がある。もちろん、特許等の知財化や、規格化・標準化も経済的に事業を展開するためには必要不可欠とされよう。

これらの課題が解決して、初めて実用化技術として、部材、部品、あるいは最終製品に使用されることになる。したがって、実用化のためには一般的には十年単位といった長い期間が必要とされるのも理解できる。

7 おわりに

以上、金属/樹脂（高分子材料）/セラミックス間の異種材料接合の現状について、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、「BMW 7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 (999) 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ード溶接, 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, 下田陽一朗, 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: サブフレームのステールとアルミ合金のFSW接合, 軽金属溶接, 52-1 (2014) 3-9
- 25) 村井康生, 小橋泰三: チタンの鋼板への直接ライニング技術, 溶接技術, 61-6 (2013) 76-81
- 26) 香川祐次, 中村俊一, 長谷泰治, 山本章夫: 鋼製橋脚飛沫干

- 満部防食用チタンクラッド鋼板の基本特性と溶接加工法について, 土木学会論文集, No.435/VI-15 (1991.9), 69-77
- 27) J.S. Liao, N. Yamamoto, H. Liu, K. Nakata: Microstructure at friction stir lap joint interface of pure titanium and steel, Materials Letters, 64 (2010) 2317-2320
- 28) Y. Gao, K. Nakata, K. Nagatsuka, F.C. Liu and J. Liao: Interface microstructural control by probe length adjustment in friction stir welding of titanium and steel lap joint, Materials and Design, 65 (2015) 17-23
- 29) T. Matsuyama, T. Tsumura, K. Nakata: Novel Solid State Cladding of brass to Steel Plate by Friction Stir Welding, 溶接学会論文集, 31 (2013), 73s-77s
- 30) Z.H. Song, K. Nakata, A. P. Wu, J.S. Liao: Interfacial microstructure and mechanical property of Ti 6 Al 4V/A6061 dissimilar joint by direct laser brazing without filler metal and groove, Materials Science & Engineering A 560 (2013) 111-120
- 31) 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 Ti 6 Al 4 V and A6061 dissimilar alloys, Materials and Design 57 (2014) 269-278.
- 32) 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 Ti 6 Al 4 V with aluminum alloy 6061, Materials and Design 71 (2015) 85-92
- 33) 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
- 34) 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
- 35) 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
- 36) 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.
- 37) 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
- 38) 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
- 39) B.L.XIAO他: 溶接学会全国大会講演概要集, 97 (2015.9) 16-17
- 40) 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
- 41) 三輪剛士, 北川大喜, 永塚公彬, 山岡弘人, 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, 溶接学会全国大会講演概要集, 97 (2015-9) 12-13
- 42) 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
- 43) 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
- 44) 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フタレートとのレーザー直接接合と信頼性評価, 溶接学会論文集, 28-1 (2010) 16-21
- 45) 日経ものづくり: 溶接で樹脂も固定, 2011年6月号52-53
- 46) 瀬知啓久, 中田一博: セラミックスと金属の異材レーザーブレイジング, ぶれいず, 44-115 (2010) 17-24
- 47) 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ー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 (2013) 16-22