

## 異種材料接合の現状と摩擦エネルギーを利用した最近の研究

### Current State on Dissimilar Materials Joining and Recent Research by Means of Friction Energy

中 田 一 博\*  
Kazuhiro NAKATA

**Key Words:** Joining, Dissimilar Materials Joining, Friction Energy, Metal, Plastics

#### 1. はじめに

自動車などの車両軽量化のために、高張力鋼薄板をはじめ、軽量金属材料であるアルミニウム合金やマグネシウム合金の適用や、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)の利用も実用化の視野に入ってきている。このような異なる特性を有する構造材料を、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」と呼ばれており、自動車の車体軽量化において特に注目されているキーワードとなっている。

このマルチマテリアル化を実現するためには、鉄鋼材料と非鉄金属材料であるアルミニウム合金などの異種金属接合が、まず求められる。しかし、その一方、鉄とアルミニウムの接合は困難であることがよく知られている。さらに、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(異材)接合技術が必要とされてきているのである。

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、新たな技術開発が求められており、特に、溶融溶接法よりも低温での接合が可能な固相接合法が注目されている。

本報では、異種材料接合技術の現状を解説し、特に金属と樹脂・CFRPとの接合について著者らの提案による摩擦エネルギーを利用する固相接合法を用いた検討例について紹介する。

#### 2. 異種材料接合のニーズと現状

##### 2.1 異材接合のニーズ

過去の異材溶接に関するアンケート調査結果(NEDO調査研究「異材溶接技術の基礎研究」(平成12~13年度)に関する報告記事等<sup>1)3)</sup>によれば、当時において、将来的に

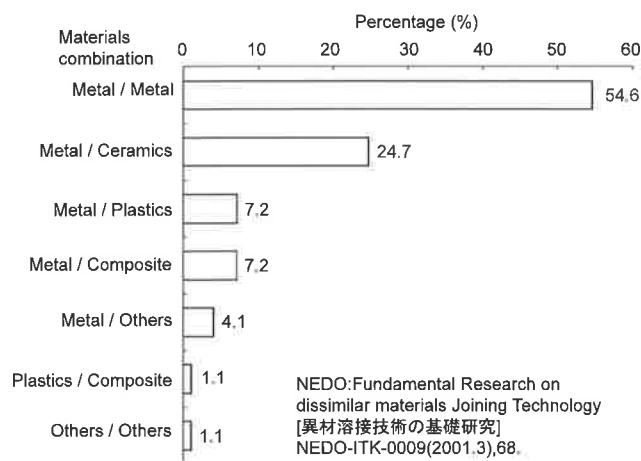


Fig.1 Combination of dissimilar materials joint required in the future.

必要な異材溶接継手の材料の組合せは Fig.1 のようになっており、金属/金属の組合せが約 55 % を占め、それ以外の材料組合せとして金属/セラミックスが約 25 %、次いで金属/プラスチック及び金属/複合材がそれぞれ約 7 % であった。

さらに、それぞれの材料組合せの内訳は Table 1 のようになっており、金属/金属の組合せでは鉄鋼(ステンレス鋼を含む)と他の金属との組合せが約 63 %、次いでアルミニウム(AI)と他の金属との組合せが鉄鋼との組合せを含むと約 46 % となり、この2つの金属材料が異材溶接の相手材として格段に多いことが分かる。この中でも注目すべきは、鉄鋼/アルミニウムが約 28 % と最も多いことである。その用途は省エネルギー対策としての自動車等の輸送機器や各種製品の軽量化であり、また福祉器具の軽量化も高齢化対策として注目されていた。次いで、銅及びチタンが挙げられているが、銅では良好な熱伝導特性を生かしたヒート

\* 大阪大学接合科学研究所 (〒 567-0047 大阪府茨木市美穂が丘 11-1)  
Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047 Japan)

Table 1 Combination of dissimilar metals joint required in the future.

Combination of Metals		Percentage (%)
Steel (including SUS) (62.6%)	Steel/Aluminum	27.9
	Steel/Steel	9.7
	Steel/Copper	6.7
	Steel/Titanium	5.7
	Steel/Magnesium	1.0
	Steel/Others	11.6
Aluminum (18.3%)	Aluminum/Copper	5.8
	Aluminum/Magnesium	2.9
	Aluminum/Titanium	1.9
	Aluminum/Aluminum	1.9
	Aluminum/Others	5.8
Copper (7.7%)	Copper/Copper	1.0
	Copper/Others	6.7
Titanium (3.9%)	Titanium/Titanium	1.0
	Titanium/Others	2.9
Others (7.5%)	Others/Others	7.7

NEDO[異材溶接技術の基礎研究]NEDO-ITK-0009(2001.3),68.

Table 2 Joining and welding process required in the future.

Joining and Welding Process		Percentage (%)
Fusion Welding (41.3%)	Arc welding	16.2
	Laser welding	12.9
	Resistance welding	6.8
	Electron beam welding	3.8
	Gas welding	0.8
	Others	0.8
Brazing (9.1%)		9.1
Solid State Welding (28.6%)	Diffusion welding	4.5
	Ultrasonic welding	4.5
	Friction welding	3.0
	Cold pressure welding	3.0
	Explosion welding	2.3
	Electromagnetic pressure welding	1.5
	Hot pressure welding	1.5
	Gas pressure welding	4.5
	Others	3.8
	Mechanical Joining (6.1%)	Bolting
Crimping		0.8
Riveting		0.8
Others		3.0
Adhesion (10.6%)		10.6
Others (4.3%)		4.3

NEDO[異材溶接技術の基礎研究]NEDO-ITK-0009(2001.3),68.

シンク材や放熱材、電気伝導特性を生かした導電部材、また耐食部材等への用途があり、チタンでは優れた耐海水耐食特性を生かした造水プラントや海上構造物等であった。

さらに、将来的に望まれる異材溶接法では、コストや継手自由度などから Table 2 に示すように溶融溶接法が最も多く、ろう付を含めると約 50 % に達していた。また新し

い異材溶接法として特に注目されたものに、摩擦攪拌接合 (FSW) と高エネルギービーム溶接法 (レーザ溶接、電子ビーム溶接) が挙げられた。

なお、平成 24 年度に NEDO により実施された異材接合の関する調査結果でも同様の傾向が現れており、特に必要性が高い異材の組合せとしては、鉄鋼/樹脂・CFRP、アル

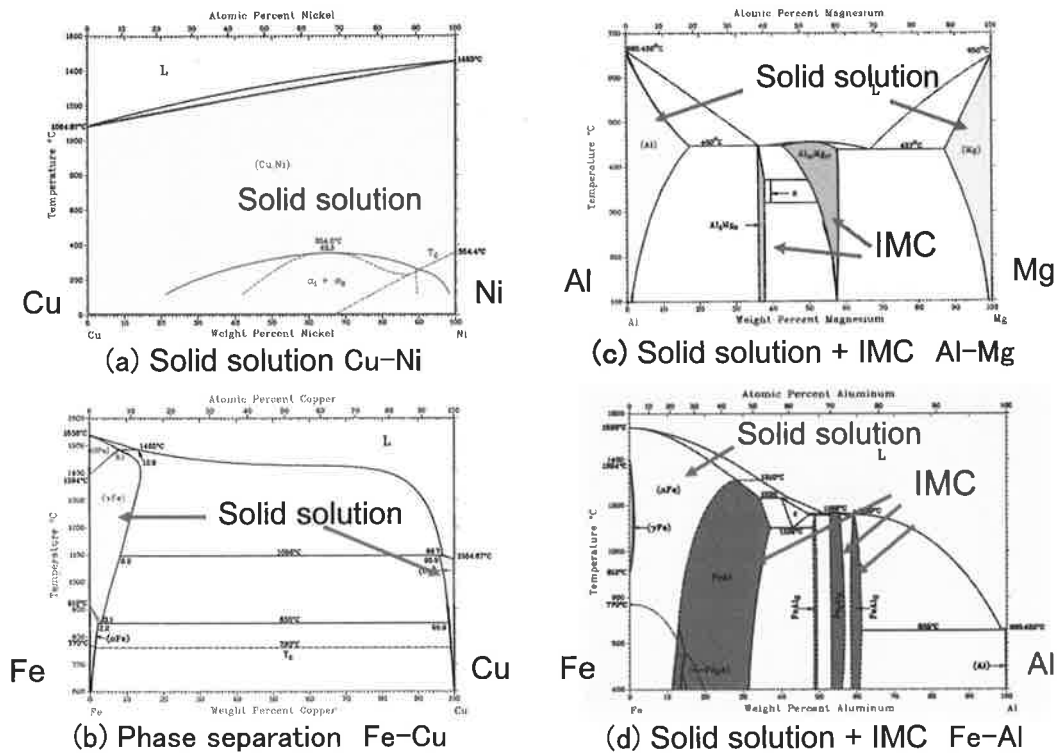


Fig.2 Evaluation of feasibility of dissimilar metals joining based on phase diagram.

ミニウム/樹脂・CFRP、鉄鋼/アルミニウムの3種類が他の組合せに比して格段に高い注目度を示した。

十数年前のNEDO調査結果と現状の技術開発状況を比較してみると、当時は実現困難であったが将来には必要とされた異材接合技術として挙げられたもののうち、幾つかは十数年を経た現在に至り、ようやく実用化段階に到達したと言えるようである。例えば、鉄鋼とAl合金の異材溶接では、固相接合であるFSWを用いた自動車部品への実用化が報告<sup>4)</sup>されたところであり、また鉄鋼とチタンとの異材溶接では羽田沖海上滑走路支柱への適用例<sup>5)</sup>などがある。一方、金属(特に、Al合金)と樹脂、あるいは複合材料であるCFRPとの直接接合は自動車関係を中心に、最近特に注目されており、射出成型を用いる方法や、レーザービームエネルギーやFSW等の摩擦エネルギーを用いる新しい連続接合方法での異材接合法が提案されている<sup>6),7)</sup>。

## 2.2 異材接合の現状

最もニーズの多い金属同士の組合せでは、その異材接合の可能性は基本的にはそれぞれの金属からなる2元系平衡状態図<sup>8)</sup>から判断することができる。代表的な状態図をFig.2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、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もろ

い金属間化合物を形成する組合せは一般的に異材接合が困難である。例えばレーザー溶接を対象に異材接合の難易度がTable 3<sup>9)</sup>のように表されている。

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すると、Table 4のようになると思われる。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、金属/金属の組合せのなか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、異なる種類のアルミニウム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、Table 3に示した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が、既に述べたように一部で実用化に耐えうる接合技術の開発が進んできている。これに対して、金属/樹脂(高分子材料)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材接合は第3世代となり、新しい発想からの異材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。

### 第1世代：同種金属をベースとした合金間の異材接合

鉄鋼材料同士の異材溶接に代表されるように基本的には一般的な熔融溶接法(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

Table 3 Feasibility of dissimilar metals welding related to phase diagram (for laser welding).

	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

Welding of dissimilar metal joint of Al/Fe and Ti / Fe is very difficult

1:Excellent(Solid solution) 2:Good(complex structure) 3:Fare(Unsufficient welding data) 4:Difficult(No reliable data) 5:Unweldable( Intermetallic compound)

Table 4 Present state of dissimilar materials joining technology.

Combination of Dissimilar Materials Joining and Present State in Industrial Application

1st generation: Same Kind of Metal and Alloy Joint  
: Already applied

Steel / Steel, Al alloy / Al alloy, etc.

2nd generation: Different kind of Metals and Alloys Joint  
: Difficult, but partly applied depending on the combination

Steel / Non Ferrous metals (Al, Cu, Ti, Mg, Ni, etc.), etc.

3rd generation: Dissimilar Materials Joint  
: Difficult

Metal / Ceramics / Plastics

Requirement for Advanced and Evolutional Research based on New Idea

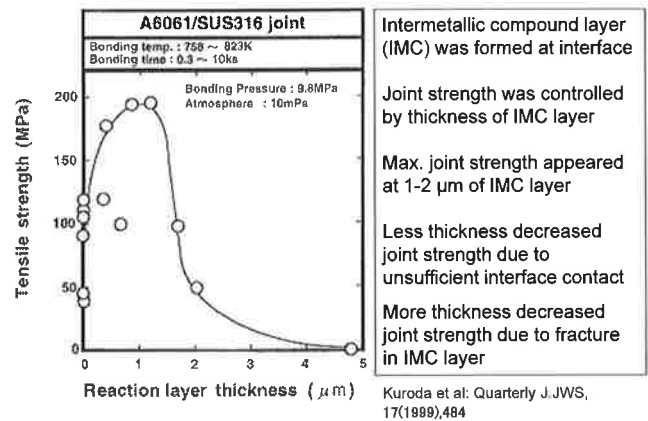


Fig.3 Effect of reaction layer thickness on dissimilar metals joint strength of Al alloy/Steel by diffusion welding (High temperature process).

間の異材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>10)</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・高エネルギー・高品質の溶接・接合法や溶接材料の開発は継続した開発課題である。

第2世代：異なる金属間の異材接合

異材接合が困難な第2世代の金属間の異材組合せにおい

て、異材接合が困難とされる組合せ (Table 3) でもそれはあくまで“困難”なのであって“不可能”ではない。接合部に金属間化合物層が形成しても、その厚さが十分に薄ければ異材接合が可能である。例えば自動車軽量化のために鉄鋼材料とアルミニウム合金の異材接合が求められるが、脆弱な Al-Fe 系金属間化合物が形成されるために熔融溶接による直接接合は困難である (Fig.2 (d))。しかし例えば Fig.3 に示すように接合温度がより低温の拡散接合法 (固相接合の一種) を用いて、金属間化合物層の厚さを数 μm 以

**Table 5** Weldable interface structure for possible joining and welding process evaluated from the result of published articles.

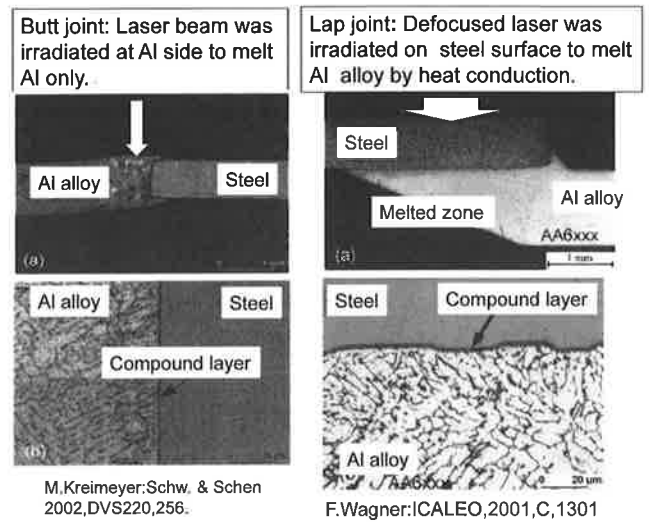
Possible joining process		Interface structure
High temperature reaction	Fusion weld.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermetallic compound IMC due to heating at high temp.</li> <li>• Thickness of IMC is a major control factor</li> <li>• Good joint can be obtained with less than 1 - 2<math>\mu</math>m in thickness of IMC</li> </ul>
	Resistant weld.	
	Brazing	
Low temperature reaction with plastic metal flow	Diffusion Weld.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IMC can not be detected by OM and SEM observation</li> <li>• Amorphous layer of oxide was detected by TEM with several to several ten nm</li> <li>• Oxide + IMC layer</li> </ul>
	Pressure weld.	
	Friction Ultrasonic Explosion FSW	

内となるように接合条件を選定すれば、継手引張試験では破断位置がアルミニウム合金の母材破断となる異材継手が得られる<sup>11)</sup>。この改善機構の学術的な解明はまだ不十分であるが、金属間化合物層内の内部欠陥の減少や残留応力の減少などが考えられている。このように接合プロセスの観点からの技術開発により、異材接合を可能とできる。

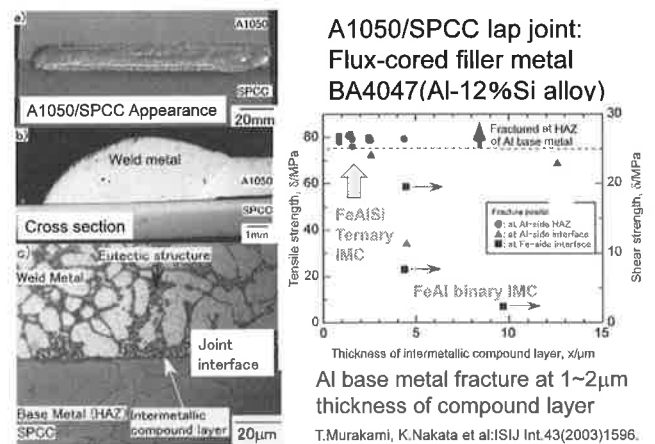
第2世代の代表的な異材組合せ例として、鉄鋼材料とアルミニウム合金の組合せを例に取り、これまでに報告された検討結果に基づき接合プロセスとその可能性をまとめるとTable 5のようになる。接合プロセスは例えば、金属原子の拡散現象を主体とする高温反応型と、材料の塑性流動現象などを利用する低温反応型に分けられる。高温反応型プロセスには熔融溶接、ろう付、拡散接合などが該当し、接合部は元素拡散に十分な高温にさらされるために状態図に従った組織が形成される。したがって、接合界面にはAl-Fe系金属間化合物層が形成されるために、その厚さが継手強度の支配因子となる。しかしこの場合には、既に述べたようにその厚さを数 $\mu$ 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。

一方、低温反応型プロセスは材料の熔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ないうが、アルミニウム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でこのような接合が可能になる。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ナノレベルの層厚さの非晶質相が形成される場合が見られ、これが結晶構造の異なる鉄とアルミニウムを接合する、いわば“のり”の役目を果たしていると考えられ、良好な継手が得られている。以下に幾つかの代表的な異材接合例を見てみる。

代表的な熔融溶接法であるアーク溶接では、熔融制御が困難であり溶接部に多量の金属間化合物が形成されるために適用が困難である。このためにエネルギー密度が高く、



**Fig.4** Microstructures of cross section of laser welded dissimilar joint of Al alloy/Steel (High temperature process).



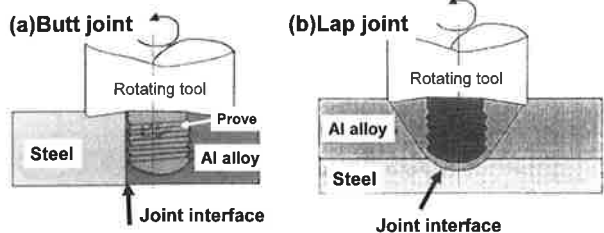
**Fig.5** Dissimilar lap joint of Al alloy/Steel by MIG arc brazing.

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を用いて、Fig.4に示すように鉄鋼もしくはアルミニウム合金を選択的に熔融して溶接する方法が検討され、金属間化合物の形成を抑制することにより良好な異材溶接継手が得られた<sup>12),13)</sup>。

ろう付の一種であるが熔融溶接との中間的な溶接プロセスであるブレイズ溶接も有望な結果が報告された<sup>14)</sup>。これは基本的には鉄鋼材料を溶かさずにアルミニウム合金母材とろう材である溶加材合金ワイヤのみを熔融する方法である。例えばミグアーク溶接によるAl-Siフラックスコードワイヤを用いたミグブレイズ溶接では鉄鋼をほとんど熔融しない条件を選択すると、Fig.5<sup>15)</sup>に示すように金属間化合物層の成長を抑制して良好な継手が得られ、金属間化合

Application of FSW to dissimilar metals joining:  
Cleaning and activation of interface surface by rotating prove  
Low temperature and short time joining using plastic metal flow

Cross section of joint and prove position



Okada et al: J.JWS 72(2003)436.

Okamoto et al: J.LMWC42(2004)49.

Fig.6 Application of FSW to dissimilar materials joining.

物厚さが 1 ~ 3 μm 以内であればアルミニウム合金母材破断を示した<sup>15)</sup>。また化合物が Fe-Al-Si 3 元系化合物の場合には Fe-Al 2 元系化合物と比べて、層成長が抑制される傾向にあった。このような結果を受けて、ろう材として、アルミニウム合金及び鉄鋼の母材との濡れ性が良好であり、かつ化合物も形成しにくい亜鉛に注目し、Si 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ビームを用いるレーザブレード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 厚さに抑制し、ピール破断試験においてもアルミニウム合金母材側熱影響部で破断する良好な Fe-Al 異材継手が得られている<sup>16)</sup>。

一方、塑性流動現象を利用する低温反応プロセスとして、従来から固相接合法である摩擦圧接や爆発圧接（一部溶融を伴う）が実用化されてきたが、継手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。これに対して同じ固相接合でも FSW を用いる方法<sup>17),18)</sup>は Fig.6 に示すようにツールをアルミニウム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、アルミニウム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。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にはほとんど金属間化合物が形成せず、代わってごく薄い非晶質層が形成して良好な接合強度が得られ、かつ連続した突合せ接合継手が得られた。同様の手法で重ね継手も得られている<sup>19)</sup>。また、Fig.7 は FSW を応用したスポット接合法であり、接合界面にはアルミニウム合金の合金成分を主体とした Mg-Si-O 系非晶質層が 2 ~ 4 nm の厚さで形成していた<sup>20)</sup>。

このように FSW を異材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、鉄鋼とアルミニウム合金の FSW による直接異材接合が自動車製造技術としての実用化段階に入ってきたことが報告されている<sup>4),21)</sup>。

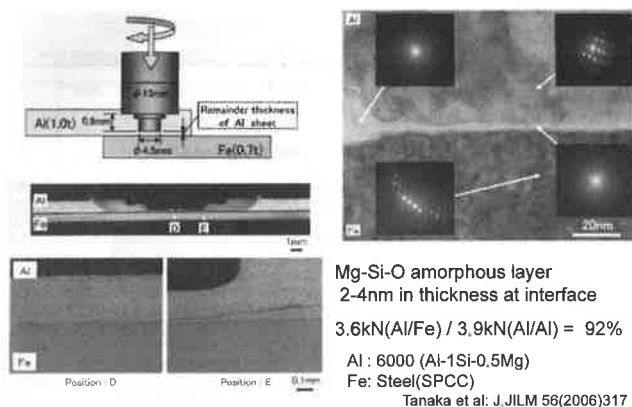


Fig.7 Friction stir spot joining of Al alloy/Steel dissimilar lap joint (Low temperature process).

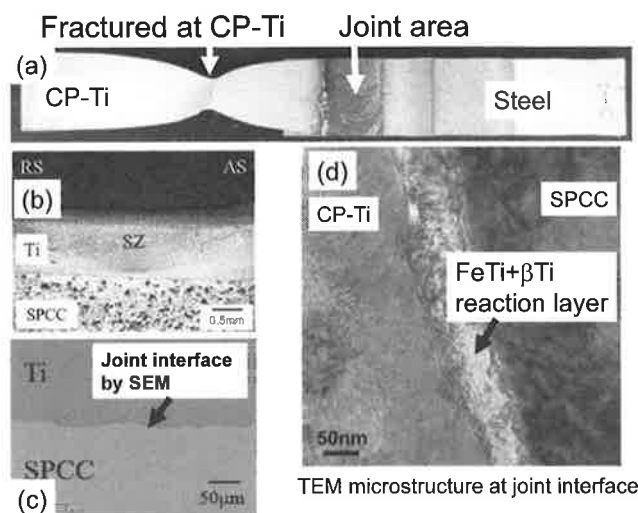


Fig.8 CP-Ti/Steel (SPCC) dissimilar lap joint by FSW: (a) Joint appearance after tensile shear test, and Cross sectional microstructure of the joint interface by (b) OM, (c) SEM and (d) TEM.

FSW は各種の異種金属材料の組合せへの可能性を有しており、他にも鉄とチタンの重ね異材接合において Fig.8 に示すようにチタン母材破断となる良好な異材重ね継手が得られている<sup>22),23)</sup>。さらに FSW による異材接合への適用範囲は広く、セラミックス粒子分散アルミニウム基複合材料とアルミニウム合金との異材接合や鍛造材と展伸材の異材接合なども適用可能である。もちろん実用的には継手強度のみならず耐食性などの特性も合わせて考慮する必要がある。

第3世代：材料間異材接合

金属、セラミックス及び高分子材料間の異材接合は、材料構造が基本的に異なるために困難であるが、かつてのアンケート調査結果 (Fig.1) から分かるようにその期待は、

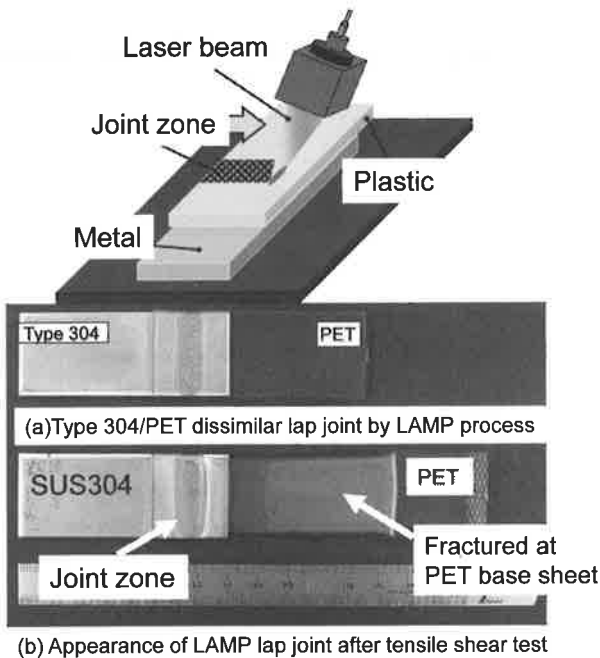


Fig.9 New laser Joining Process of metal/plastic direct joining.

最近、一段と大きくなっている。

#### 金属／セラミックス

金属とセラミックスの異材接合は既にろう付により実用化されている。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為に、少量のチタン (Ti) などの活性金属を含む活性ろう材（例えば銀-銅-Ti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為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。このような方法では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大きな熱膨張係数の差により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、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硬合金とセラミックスとの接合で提案されており<sup>24),25)</sup>、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、バッチ的に代わりうる方法として注目される。

#### 金属／樹脂・CFRP

金属と樹脂やCFRPとの異材接合法として、一般的には接着剤を用いる接着やリベットなどの機械的締結が用いられている。しかし接着では接着工程の効率化や信頼性、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。

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いる。幾つかの

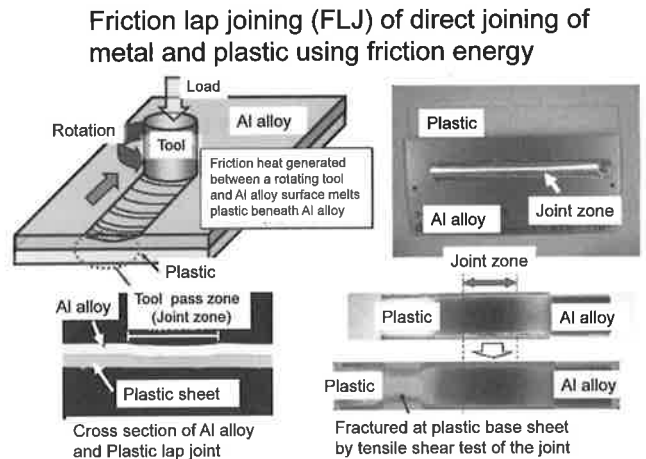


Fig.10 Friction lap joining of metal/plastic direct joining using friction energy.

方法の中でレーザーを用いる方法がレーザー溶着法として注目されている。透光性を有する樹脂と金属を重ねて、樹脂側から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である。例えば Fig.9 に示すように金属 SUS304 と樹脂 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、LAMP 法<sup>6),26)</sup>として提案されている。この方法は非透光性の樹脂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。

### 3. 摩擦エネルギーを利用した金属と樹脂・CFRP との直接異材接合

#### 3.1 摩擦重ね接合 (FLJ) 法

摩擦エネルギーを利用する接合方法も提案されている。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熔融する方法<sup>27)</sup>であり、著者らは摩擦重ね接合法 (Friction Lap Joining, FLJ) と名付けている。既に述べた FSW とは異なり、プローブと呼ばれる突起のない回転ツールを用いており、材料の攪拌効果はない。樹脂の加熱・熔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施する方法である。ツールを移動させることにより Fig.10 に示すようにアルミニウム合金／樹脂 (PE) 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を示した。これまでに金属材料としてはアルミニウム合金、マグネシウム合金、炭素鋼、銅、チタンにおいて樹脂材料との接合が確認された。しかし接合が可能となる樹脂材料には、必要とされる材料特性があり、

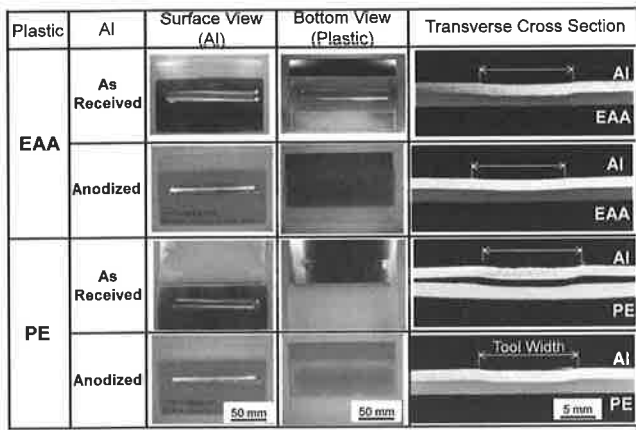


Fig.11 Appearance and cross section of Al alloy (A2017)/plastics (EAA, PE) direct dissimilar joints by FLJ process.

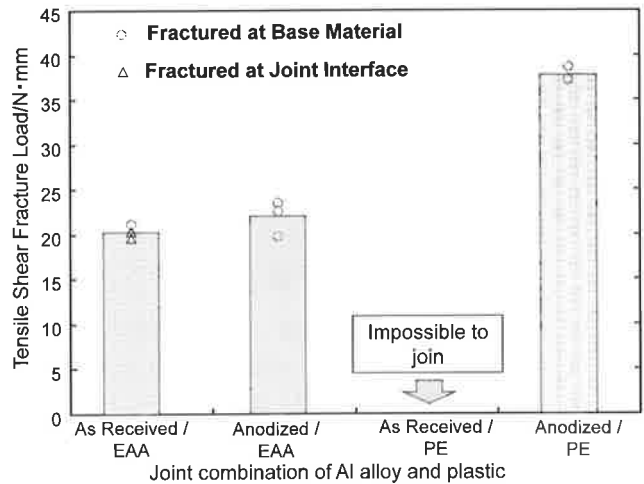


Fig.12 Effect of surface treatment of Al alloy on joint strength of dissimilar lap joint of A2017/plastics (EAA, PE) by FLJ process.

かつ樹脂材料の種類によっては相手材である金属材料にも適当な表面処理が必要となる。さらにこの方法はCFRPと金属材料との異材接合にも適用可能である。今後、接合に適したCFRP素材の開発が望まれるところである。

### 3.2 FLJ法による金属/樹脂・CFRP接合の検討例

金属と樹脂との接合においては、まず樹脂がその構造中に極性官能基を有しているかどうかで、接着性が判別される。極性官能基には、代表的なものにカルボキシル基COOH、水酸基OH、アミド基NHなどがある。このような極性官能基を有している樹脂は、いわゆる水素結合により接着性に優れているとされている。またFLJ法は、その原理から熱可塑性樹脂への適用が望ましい。

Fig.11は、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)の二種類の熱可塑性樹脂を用いて、アルミニウム合金A2017との接合を行った結果であり<sup>28)</sup>、継手表面および裏面外観、断面マクロ写真を示す。さらに、Fig.11はアルミニウム合金の表面状態の影響について、受け入れのままの状態と表面に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では、アルミニウム合金の表面状態にかかわらず継手が形成された。一方、極性官能基のないPEは、受け入れ材のままの状態では継手は形成されなかったが、アルマイト皮膜処理材では継手が形成されていた。

次に、Fig.12は得られた継手の引張せん断試験による継手破断荷重を示す<sup>28)</sup>。まずEAAでは、受け入れ材のままでは破断は主に接合界面であり、樹脂母材破断も認められたが、アルマイト皮膜処理材ではすべて樹脂母材破断となり、良好な接合継手が得られている。一方、PEでは、表面状態が受け入れ材のままでは溶解したPEとアルミニウム合金は接合されなかった。しかし、アルマイト皮膜処理

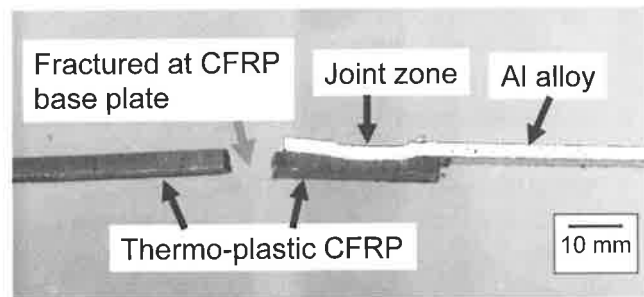


Fig.13 Appearance of dissimilar lap joint of A5052 Al alloy/thermoplastic CFRP by FLJ process after tensile shear test, which shows the fracture at CFRP base sheet.

材では接合は可能であり、かつ樹脂母材破断を示し、良好な接合継手が形成された。すなわち、樹脂の構造特性とアルミニウム合金の表面特性が、相乗的に接合性に影響することが分かる。なおこのようなアルマイト皮膜の接合性の改善効果については、皮膜表面細孔の存在による接合表面積の増加やアンカー効果などが考えられている。鉄鋼材料として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ボイドなどの接合欠陥がなく、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<sup>29)</sup>。

FLJ法は、熱可塑性樹脂をマトリックス材料とするCFRPやGFRPと金属との接合にも適用可能である。Fig.13は、アルミニウム合金A5052と、ポリアミドをマトリックス樹脂として、射出成型により形成された短繊維CFRP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>30)</sup>。



#### 4. おわりに

本稿では、異種材料接合技術の研究開発の現状と、固相接合の果たしてきた役割について各種接合プロセスと比較して概説するとともに、金属/樹脂・CFRP接合に関する著者らの固相接合法による検討結果も紹介した。当該分野の研究開発の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 日経ものづくり：「溶接で樹脂も固定」、2011年6月号 52-53.
- 7) 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.
- 8) T.B. Massalski, Binary Alloy phase Diagrams, ASM International (1990).
- 9) Welding Handbook, Vol.2, 8<sup>th</sup> edi. AWS (1991).
- 10) 例えば、溶接学会編、溶接・接合便覧、丸善、**964** (1990).
- 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) 中田一博：アルミニウムと鉄の熔融溶接、溶接技術、**52-10** (2004) 126-130.
- 13) 片山聖二他：溶接学会全国大会講演概要集、**67** (2000) 248-249.
- 14) 中田一博：アルミニウムと鉄のブレース溶接、溶接技術、**52-11** (2004) 126-130.
- 15) 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.
- 16) 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ブレージング、溶接学会論文集、**30-3** (2012) 274-279.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 「最新接合事情 鉄とアルミを接合する」、Motor Fan, **73** (2012) 62-65.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 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ージング、ぶれいず、**44-115** (2010) 17-24.
- 25) 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ー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、**31-1** (2013) 16-22.
- 26) 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、**28-1** (2010) 16-21.
- 27) 中田一博他、特願 2011-035001.
- 28) T. Okada, S. Uchida, K. Nakata : Direct joining of aluminum alloy and plastic sheets by friction lap processing, Materials Science Forum, **794-796** (2014) 395-400.
- 29) 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.
- 30) 永塚公彬、吉田昇一郎、土谷敦岐、中田一博：溶接学会全国大会講演概要集、**95** (2014.9) 54-55.