

特集「鋳物・ダイカストの接合・複合化」

最新の溶接・接合技術と今後の展開

大阪大学接合科学研究所 中 田 一 博

解説 特集「鑄物・ダイカストの接合・複合化」

最新の溶接・接合技術と今後の展開



中田一博*

Review Paper

J. JFS, Vol. 83 No. 12 (2011) pp. 676~682

Special Issue on Joining and Materials Processing of Castings and Die Castings.

Recent Welding and Joining Processes and Their Advances

Kazuhiro Nakada*

キーワード：溶接・接合法，アーク溶接，レーザ溶接，摩擦攪拌接合，異材接合

1. 緒言

溶接・接合は金属素材を基にして目的機能を有する部材を作り，さらに幾つもの部材を組み立てて一つの構造体を作り上げる上で必要不可欠な基盤的な科学技術である。その役割には，力学的に構造体を構成する構造接合と，電磁氣的，熱的，化学的特性などの機能を伝達する機能接合がある。どちらを主体にするかの違いはあるが，使用環境下において溶接・接合継手が十分な力学的強度を有し，機能を維持できることが必須の条件である。これらの要求に対応するとともに，さらに生産効率の向上や生産コストの低減などの対応のために，新しい溶接・接合プロセスが開発され実用化されてきている。

一方，鑄物・ダイカスト材はいわゆる一品ものとして完結した部材が多いが，高機能化の観点から他の材料や部材との組合せが必須となってきたり，それらの溶接・接合が求められるケースが増加してきている。

本稿では溶接・接合法の概説と最近の展開を鑄物・ダイカスト材への応用を考慮しつつ述べることにする。

2. 溶接・接合法の分類

溶接・接合プロセスは表1に示すように被接合材（以下母材と呼ぶ）を溶融して接合する溶融溶接法（一般的に呼ばれている溶接法），母材を溶融せずに溶加材のみを溶融して接合するろう付け（ブレイジング），母材を溶融せずに塑性変形や拡散現象を利用して接合する固相接合法，接着剤を用いて接合する接着法，リベットやボルト，あるいはかしめなどを利用する機械的接合法に分類される。最も多く利用されているのが溶融溶接法であり，材料を加熱するのに用いる熱源によってさらに幾つもの種類に分類される。最近では新しい熱源としてレーザビームを用いるレーザ溶接法や，固相接合においてもアーク溶接のように連続した接合継手が得られる摩擦攪拌接合法が注目されている。

る。さらに幾つかの溶融熱源の組み合わせや異なるプロセスの組み合わせによるハイブリッドプロセスが現れてきている。このため，それぞれのプロセスの特徴を把握し，適材適所で使いこなすことが重要である。

3. 溶融溶接法の展開

3.1 アーク溶接

アーク溶接はエネルギー効率的に優れた熱源であり，簡単な装置，容易な維持管理，低コスト，さらに材料及び継手形状の適用範囲が広いなどの特長がある。このため我国産業界においても，構造物等の製作に用いられる溶接の中でアーク溶接が適用されている割合は約80%に達する¹⁾。

この古くから使用されてきたアーク溶接においても電源のインバータ化及びトーチ・ワイヤ・シールドガス供給システムやシールドガス及び溶加材の開発の進展により，さらなる高効率化，高効率化，高品質化，省エネ・環境対応化が進められている。ここでは幾つかの最新タイプのミグ・マグアーク溶接法を紹介する。

(1) 薄板溶接

輸送機器等の軽量化のために薄板構造の適用が進めら

表1 溶接・接合法の分類



依頼原稿 受付日：平成23年9月13日，受理日：平成23年10月7日

* 大阪大学接合科学研究所

Joining and Welding Research Institute, Osaka University

れている。薄板の溶接においては、溶融部の溶け落ちや穴あきを防いで安定な溶接ビードを形成するために、小入熱の溶接条件が選定され、従来より主としてティグ溶接が用いられてきたが、高能率化のためにミグ・マグ溶接の適用拡大が求められている。タングステン電極を用いる非消耗電極式のティグ溶接では、溶加材ワイヤは一般的には通電せずに、アーク熱により溶融したワイヤ先端部を溶融池表面に接触させて表面張力現象を利用して溶融金属のスムーズな移行を行う。しかし消耗電極式のミグ・マグ溶接では溶加材ワイヤ（この場合は電極ワイヤとも呼ばれる）には電極として溶接電流が流れているために、溶融池に接触すると電氣的に短絡し、いわゆるヒューズ効果によって短絡部分が爆発的に溶融飛散し、激しいスパッタが発生する²⁾。特に品質を重視する自動車関連ではこのスパッタの防止が大きな課題であり、また溶接作業環境対策の観点からも重要である。このようなスパッタを抑制し、ワイヤ先端からの溶滴移行をスムーズに行うための方法として、パルス電流法と、短絡移行法がある。

(i) パルス電流法

図1に示すように溶接電流をパルス波形として平均電流を下げることで小入熱とし、さらにピーク電流時にワイヤ端の溶滴が溶融池にスムーズに落下するようにピーク電流値を臨界電流値以上にするなどの波形調整を行い、1パルスで溶滴が1ドロップする方式であり、溶接時のスパッタも低減できるために一般的に広く用いられている。ピーク電流期間は数ms単位であり、パルス周波数は100Hz前後の中周波数域である。

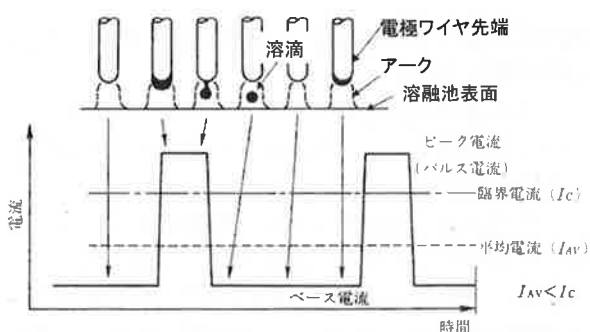


図1 パルス溶接に用いる一般的なパルス電流波形

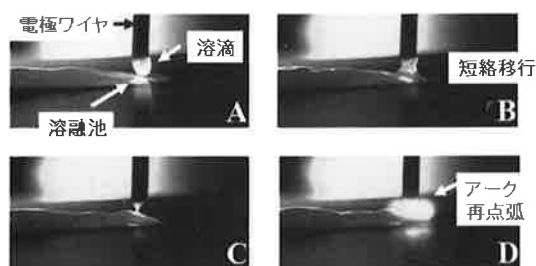


図2 パルスマグ溶接における溶滴の短絡移行状況 (CBT法) : A短絡開始, B溶滴の溶融池への短絡移行, C短絡解除直前, D短絡解除・アーク再点弧, AからDまで約6ms

(ii) 短絡移行法

電源のインバータ化とワイヤ供給システムの急速な進展に伴い、(i)で示した一般的なパルス溶接よりもさらに薄板対応の小電流溶接に適用可能な短絡移行タイプの新しいパルスミグ・マグ溶接法 (CMT法³⁾, CBT法⁴⁾) が提案されている。図2⁴⁾に示すように、いずれもワイヤ先端の溶滴を溶融池表面に接触させ、表面張力により移行させる短絡移行において、短絡解除時期を予測して、その直前に十分に低い値まで電流を急減させる方法 (CBT法)、あるいはワイヤ供給系の自動制御により瞬間的にワイヤを引き上げて機械的に短絡解除を促進し、短絡解除時のアーク電流をほとんど零とする方法 (CMT法) である。スパッタやヒュームの大部分はワイヤ端の溶滴が溶融池表面に短絡し、その短絡が切れてアークが再点弧するときが発生するが、これらの方法によりこれまで困難とされたスパッタレス化を実現しつつある。また溶接入熱を必要最低限にまで減少させることができ、板厚がサブmmの薄板の低変形溶接はもちろんのこと、Al/Feなどの異材溶接においてはもろい金属間化合物の形成を抑制する効果なども期待されている。

(2) 低周波パルス溶接

一般的な中周波数域のパルス溶接法に対して、パルス波形制御によりパルス周波数を溶融池の固有振動数域の0.5Hzから10Hzとして、溶融池内の溶融金属を周期的に効率的に振動させることにより、結晶粒の微細化、ブローホールの低減、さらにビード形状の整形などの効果を得るものである⁵⁾。図3はアルミダイカスト材のミグ溶接部における低周波パルス周波数とブローホール抑制効果を示す。ブローホールが顕著に減少する効果的な周波数域が存在している。溶融池の固有振動数に相当する効果的な溶融池振動がブローホールの浮上及び溶融池表面からの離脱を促進していると考えられている⁶⁾。なおレーザー溶接は後述するようにアーク溶接よりも小入熱であり、その溶融池の凝固速度は速くなるためにブローホールが形成しやすくなる。

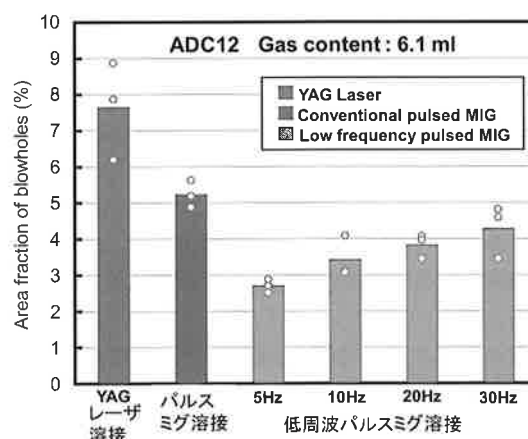


図3 低周波パルスミグ溶接によるブローホール抑制効果; YAG レーザ溶接及び通常パルスミグ溶接との比較

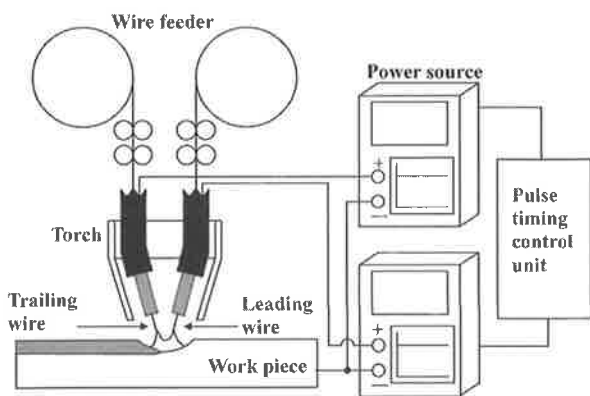


図4 タンデムパルスアーク溶接システム

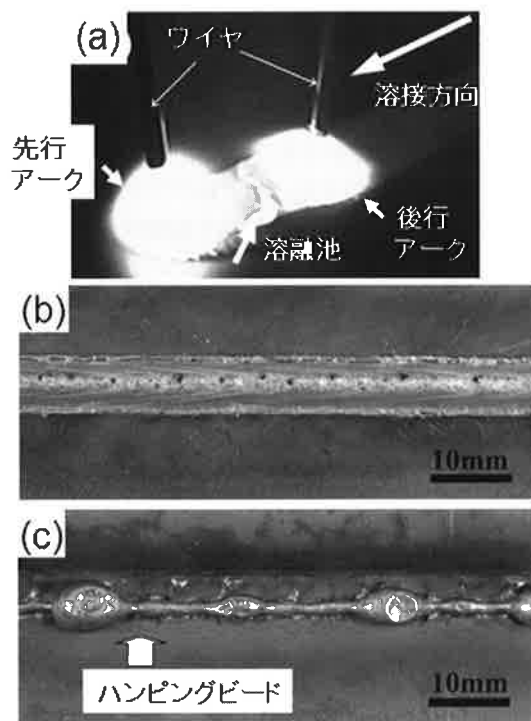


図5 (a)タンデムパルスマグ溶接中の溶融池の赤外線写真, (b)タンデム及び (c)シングルパルスマグ溶接部外観

(3) タンデムパルスアーク溶接

高能率・高効率アーク溶接法としてタンデムパルスアーク溶接法が注目されている。高能率化のためには高速溶接が求められるが、溶接速度の増加には溶接欠陥の一種であるハンピングビード形成による上限が存在する。これは溶接速度の高速化により、ある速度以上から溶接ビードが蛇行し不連続ビードとなる現象である。溶融池が後方に細長く伸び、溶融池内温度差による表面張力流やアーク圧力による溶融金属の溶融池後方(低温側)への湯流れにより発生する。

タンデムアーク溶接は図4に示すように1つのトーチ内に2つの電極を溶接方向の前後にセットし、それぞれ異なる電源から2つの溶接アークの放電条件(パルス電流波形、パルス位相、電極間距離等)を制御することにより溶融池内の湯流れなどを最適化し、ハンピングの発生を抑制して

高速溶接化を図るプロセスであり、鉄鋼のみならずアルミニウム合金などへの対応も可能である^{7,8)}。この方法も溶接電源のインバータ化による高度な溶接電流制御システムにより可能となったものである。図5は軟鋼薄板のタンデムパルスマグ溶接中の赤外線写真(a)及びタンデムパルスマグ溶接部外観(b)と通常のシングルパルスマグ溶接部(c)を比較して示す。タンデム化により(c)に示すようなハンピングビードを防止し、(b)のような滑らかな溶接ビードを4m/minもの高速溶接で形成することが可能となっている。また厚板の溶接に際してはタンデム化により溶着量を増加することができるために、いわゆる溶接パス数を減少して、高速溶接と合わせて高能率化を図ることができる。

3.2 レーザ溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接

レーザー溶接は、深い溶け込みと幅の狭い溶融部を、高速溶接速度で、かつ小溶接入熱で得ることができるために古くから注目されてきた。しかしその実用化は、母材への熱影響や溶接変形を最小に抑制できるなどの特徴を生かした、半導体・電子機器関連の小型部材などのいわゆるマイクロ溶接や精密溶接分野に制約されてきた。

最近になって優れたビーム集光性と30%にも達する高いレーザー発信効率を有し、かつファイバー伝送が可能なファイバーレーザーやデスクレーザーの出現によりレーザー溶接の適用が急速に拡大されようとしている^{9,10)}。レーザー溶接の特徴は、細く絞ったレーザービームを用いることであるが、直径が0.2~0.5mm程度の小径のレーザービームが適用されるようになると、溶加材の適用が困難なこともあり、継手開先にビーム径程度のわずかの隙間が開くだけで溶接ビード形成が難しくなる。このため、一般にアーク溶接が適用されるような構造部材の溶接継手へのレーザー溶接の適用は限定されてきた。

このような欠点を克服してレーザー溶接の特徴を生かすために二つの新しいレーザー溶接プロセスが実用化段階に入ってきている。

一つの方法は、溶接継手開先に隙間ができないように組み立て部材をしっかりと金型タイプの治具に固定して、レーザービームをスキャナーミラーと長焦点集光レンズ(焦点距離500mm程度)を用いて、短時間に多数の溶接箇所を高速度で溶接して、部材組み立てを完成させるリモート溶接(あるいはスキャナー溶接とも呼ばれる)¹¹⁾方法であり、自動車部品などの薄板小型部材の製造への適用が始まっている。

もう一つは、レーザー・アークハイブリッド溶接であり、図6(a)に示すように性質の大きく異なるレーザーとアークの2つの熱源を同時に1カ所に集中することにより、レーザー溶接の持つ高速溶接性あるいは深溶け込み性を生かしながら、なおかつ図6(b)にも示すアーク溶接の持つ大きな開先隙間許容度と溶加材の適用性を生かすプロセスである。レーザー溶接単独では0.5mmの隙間が開けば溶接は不可能であるが、ハイブリッド溶接では図6(c)に示

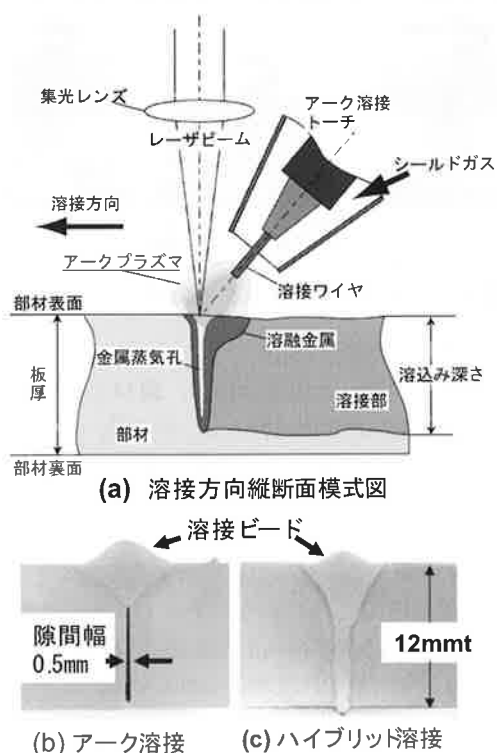


図6 (a) レーザ・アークハイブリッド溶接法の模式図例と (b) アーク溶接単独及び (c) ハイブリッド溶接部横断面マクロ写真：板厚12mm炭素鋼，アーク電流300A，ファイバーレーザ出力6KW，溶接速度1.3mm/min

すように両者の特長を生かして板厚12mmの1パス貫通溶接がレーザ溶接単独時と同等の高速で可能である。またロボット化も容易であり、垂鉛めっき鋼板を含む鉄鋼やアルミニウム合金の薄板の高速溶接^{12,13)}や、さらに中・厚板鋼板の1パス貫通溶接などへの展開が大いに期待される新しいプロセスである¹⁴⁾。実用化のためにはアークとレーザの位置関係や出力、溶接方向など多くの条件の最適化が必要である。

4. 固相接合法の展開

固相接合法には、高真空中で加圧・加熱して界面での原子の拡散を利用して接合する拡散接合法や摩擦発熱を利用して材料を加熱、加圧してその塑性変形現象を利用する摩擦圧接法などがあり、汎用性は低いがその特性を生かして利用されている。近年、汎用性の高い画期的な新しい固相接合法として摩擦攪拌接合法が注目されている。

(1) 摩擦攪拌接合 FSW

1991年にTWIにより開発された、摩擦発熱と金属の塑性流動を利用して固相状態で接合する新しい概念の接合プロセスが摩擦攪拌接合 (FSW) である¹⁵⁾。その原理を図7に示す。突合わせた2枚の板の1開先部に長さ板厚相当のねじ状の突起 (プローブ) を先端に有する棒状のツールを高速回転させながら押しつけると、摩擦発熱により開先部の金属が軟化しプローブは開先内に挿入される。軟化した金属はプローブ及びツールの回転により容易に

プローブの周囲を塑性流動し、攪拌混合され、拡散現象等により金属として一体化して接合される。固相接合である為に、熔融溶接に特有のブローホールや高温割れが無く、また接合温度が低い為に、いわゆる溶接変形も極めて小さい。溶接ワイヤやシールドガスなどの溶接材料も不要である。もちろんスパッタやヒューム、紫外線、騒音などは無く、極めてクリーンなプロセスであり、省エネ効果も大きく、環境対応性に優れた接合法である。また母材組織が铸造や圧延組織にかかわらず、攪拌部と呼ばれる接合部は結晶粒が微細再結晶粒化し、一般に母材よりも強度、靱性が增加する特徴を有する。この為、鋳物材などの組織改質や補修法としても注目されており、この目的で用いる場合には摩擦攪拌プロセス (FSP) と呼ばれる。

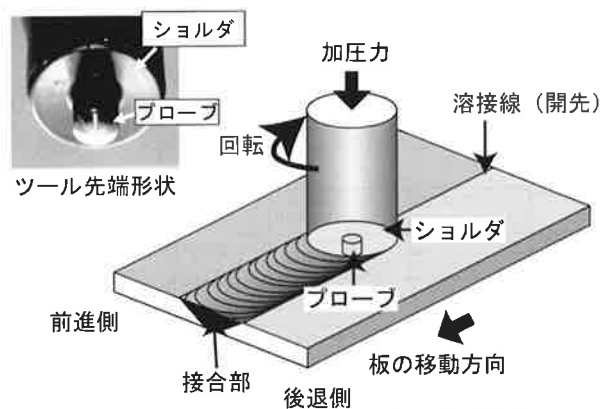


図7 摩擦攪拌接合 (FSW) 法の原理模式図

図8はマグネシウム合金AZ91D鋳物材のFSW接合部断面を示す。アーク溶接では多数のブローホールの発生のために溶接は不可能であるが、FSWでは母材の粗大な铸造組織は微細な再結晶組織となり、金属間化合物相は再固溶により消滅している¹⁶⁾。

また図9はダイカスト材ADC12のFSW部組織であり、母材の粗大な共晶Siが接合部では粒子状に微細分散している。

図10はダイカスト材ADC12の板材表面にFSP処理を行い、その疲労強度を铸造のままの状態と比較した結果であ

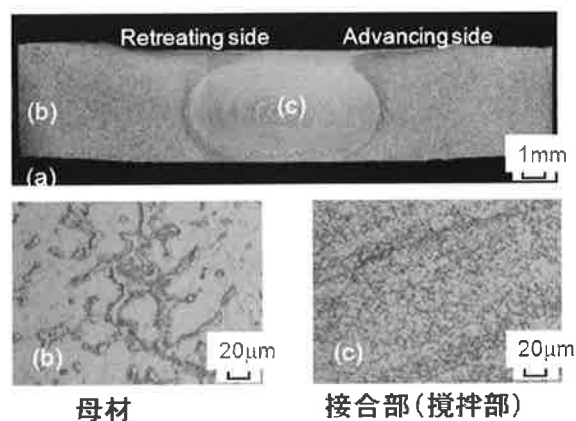


図8 AZ91Dダイカスト材のFSW継手断面組織 (1750rpm, 50mm/min)

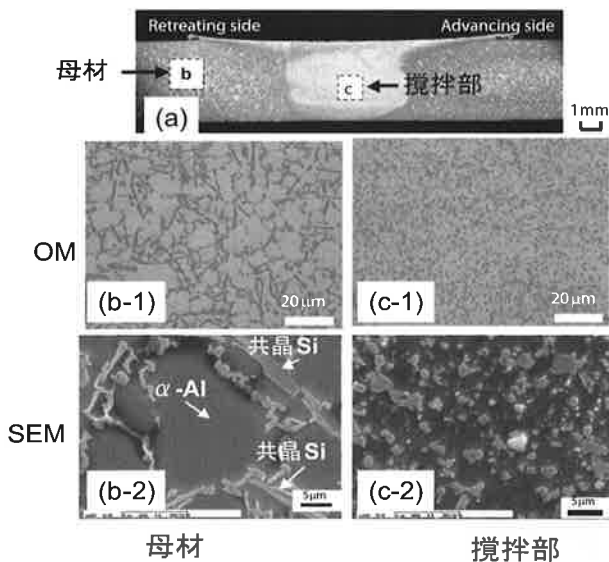


図9 (a)ADC12ダイカスト材のFSW接合部の継手断面組織, (b)母材及び(c)搅拌部のOM及びSEMマイクロ組織

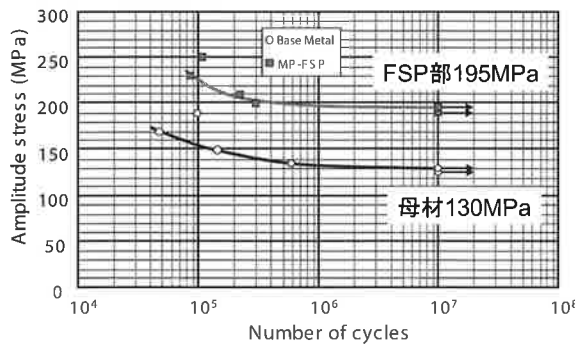


図10 ダイカスト材ADC12のFSP処理による疲労強度の改善効果

り、疲労破断強度は母材の約1.5倍にまで増加した。FSP処理部では粗大な破断チル相が消滅し、かつ铸造組織が微細な再結晶組織となるため疲労強度や引張強さなどの機械的性質が著しく改善される¹⁷⁾。

現在はアルミニウム合金などの塑性流動が容易な、いわゆる軟質金属に対して実用化されているが、鉄鋼材料などへの実用化はまだである。この理由は、使用するツール材質に依存している。すなわち、軟質金属に対しては接合部の温度は、例えばアルミニウム合金では400~450℃程度であり、既存のSKD61等の工具鋼製のツールで十分に接合に耐え得る。一方、鉄鋼材料では接合時の温度は一般には1000~1200℃の高温であり、鋼製のツールでは高温強度が不足する。現状ではセラミックスである多結晶立方晶窒化ボロン(PCBN)製や窒化珪素製などを用いて各種の鉄鋼材料への適用が可能となっている¹⁸⁾。さらに700℃程度のAc₁変態点以下でのFSWも可能であり、中・高炭素鋼や鋳鉄では炭化物などが微細に分散した興味深い組織が得られ、新たな用途展開がツール開発を含めて期待されている¹⁹⁾。

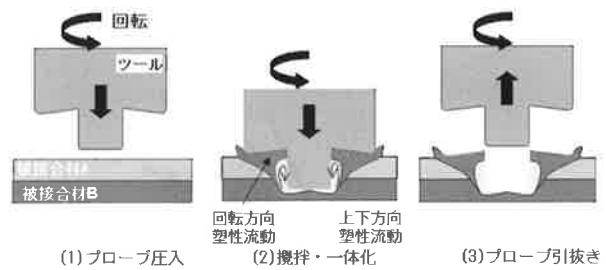


図11 摩擦搅拌点接合法の原理模式図(断面図)

(2) 摩擦搅拌点接合 FSSW

摩擦搅拌を利用した点接合法は、図11に示すように回転プローブを重ね継手部に挿入し、その後、直ちに引き抜くことにより接合が完了する簡便な新しい点接合法である^{20,21)}。ちょうどFSWの開始部に相当するため中心部にプローブ穴が残るが、穴の周囲にはドーナツ状に塑性流動域が形成される。この部分では重ね接合界面は完全に消滅して接合部が形成されており、アルミニウム合金やマグネシウム合金では微細再結晶粒組織となり抵抗スポット溶接継手と同等の継手強度が得られている。このためアルミニウム合金では自動車部材への実用化が始まっており、FSWと同様に鉄鋼材料への展開が注目されている²²⁾。

5. 異材接合の展開

5.1 金属/金属

材料の適材適所を積極的に進めるためには、異なる性質を有する材料を自由自在に、その機能を損なうことなく接合できるプロセスが求められる。金属同士の異材接合の可否あるいは困難性はその組み合わせにより、両金属元素の状態図において接合部に固溶体が形成される場合には容易であり、脆い金属間化合物が形成される場合には困難として判断され、例えば表2のように推定されている²³⁾。

表2 状態図から見た異材接合の可能性評価

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

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(データ不十分) 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, American Welding Society, Miami, FL, 1991)

これに対して接合プロセスからの挑戦もなされている。例えば自動車の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²⁴⁾、表2に示すように脆弱なAl-Fe系金属間化合物が形成されるために熔融溶接では

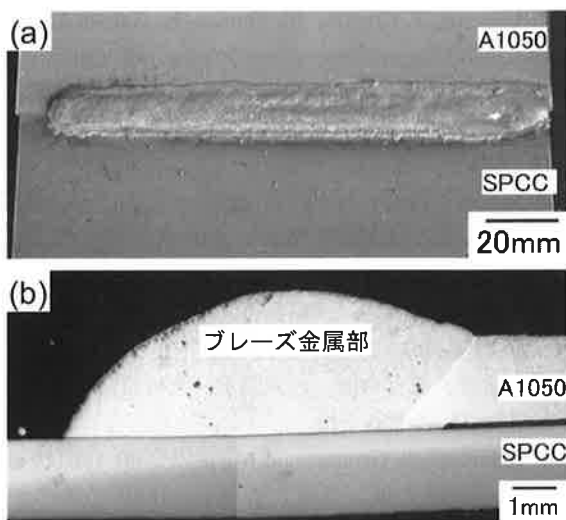


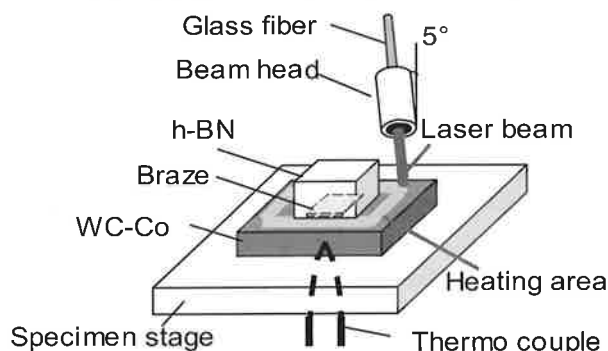
図12 (a)ミグブレーズ溶接による鉄 (SPCC)/Al異材溶接部, 外観, (b)断面マイクロ組織; 重ね継手, 上板工業用純Al, 下板SPCC; フラックス入りコアードワイヤ使用



図13 FSWによる異材接合部断面組織: (a) ダイカスト材ADC12と展伸材A5052, (b) 10%Al₂O₃粒子分散6061基MMCと展伸材6061

直接接合は困難である。しかし金属間化合物層が形成してもその厚さを1~2μm以内に抑制することにより、継手引張試験において破断位置がアルミニウム合金側母材破断となる異材継手が得られることが種々のプロセスで示されている²⁵⁾。エネルギー密度が高く、指向性の良いレーザービームを用いた溶接により入熱を最小限に押さえて、かつ継手形状を工夫する方法²⁶⁾や基本的に鉄母材を溶かさないうブレーズ溶接も有望な結果が報告されている²⁵⁾。例えば通常のミグ溶接機によるAl-Siフラックスコアードワイヤを用いたミグブレーズ溶接でも鉄側母材をほとんど溶融しない条件を選択すると、図12²⁷⁾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を得られている。今後ブレーズ溶接用のろう材ワイヤの開発が進めば他系の異材接合への展開も期待できる。

またAl/Fe系の異材接合には従来より固相接合である摩擦圧接や爆発圧接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い。これに対して同じ固相接合でも最



(a)レーザーブレージング法模式図



図14 (a)レーザーブレージング法の模式図と (b)セラミックスh-BNと超硬合金との接合部界面組織: Ag-Cu-Tiろう材使用

近提案されたFSWを用いる方法^{28,29)}は、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界面を清浄化し、そこにアルミニウム合金のみを塑性流動させて、押しつける方法である。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ることが示され³⁰⁾、かつ連続した接合継手が得られており、新しい異材接合法として注目される。同様の方法は各種の異材組合せへの可能性を有しており、例えばTiとAZ系マグネシウム合金との異材接合ではマグネシウム合金中のAlがTiと反応して接合に寄与していることが示唆されている³¹⁾。

またFSWによる異材接合への適用範囲は広く、図13に示すようなセラミックス粒子分散Al基複合材料とアルミニウム合金板との異材接合や鋳造材と展伸材の異材接合など従来の熔融溶接では困難な組合せも適用可能である。

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考慮する必要がある。

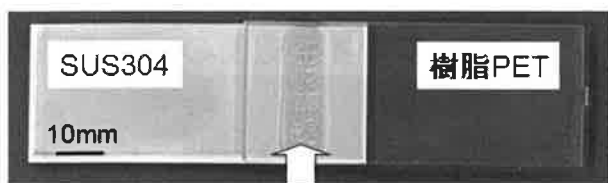
5.2 金属/セラミックス

金属とセラミックスの異材接合は微量のTiなどを含む活性ろう材を用いるろう付法が適用されている。通常は炉中ろう付法が用いられるが、新しい方法としてレーザービームによる局所・短時間加熱で、セラミックスへの熱影響を最小とする方法が提案されている。図14はAg-Cu-Ti系ろう材を用いた超硬合金と窒化ボロン (h-BN) との接合界面を示す。TEMによる詳細な解析ではろう材中のTiがBNとの界面で数十nm厚さの極薄い反応層TiNを形成して強固に接合され、継手せん断試験では窒化ボロン母材で破断

しており、超硬合金と各種セラミックスやダイヤモンドなどとの接合も可能である³²⁾。

5.3 金属/樹脂

金属と樹脂の異材接合には一般的には接着剤が用いられるが、信頼性や効率化、あるいは環境への配慮などから、接着剤を用いない直接接合法が求められている。幾つかの方法の中でレーザーを用いる方法がLAMP法として提案され、例えば図15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を得ることができ、注目されている³³⁾。



レーザー照射による直接接合部

図15 金属SUS304板と樹脂PET板とのレーザー照射による直接接合法(LAMP接合)による異材接合継手

6. 結 言

本稿では、溶接・接合法における新しいプロセスの紹介とその最近の応用展開について述べた。鑄物・ダイカスト等鑄造工学会関係各位の一助となれば幸いです。

謝辞

本稿では引用文献等から多くの資料を引用させて頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)溶接学会溶接法研究委員会編：溶接法ガイドブック5「溶接プロセスの高効率化」, I-74 (2003)
- 2) 恵良哲生, 上山智之：溶接学会誌 **75** (2006) 552
- 3) 古川：軽金属溶接 **43** (2005) 469
- 4) 上山智之, 恵良哲生, 井出章博, 上園俊郎, 廣田周吾：溶接技術 **54** (2006) 60
- 5) 山本英幸, 原田章二, 上山智之, 小川俊一, 松田福久, 中田一博：溶接学会論文集 **12** (1994) 64
- 6) 内山正裕, 中田一博, 津村卓也, 駒崎徹：軽金属学会講演概要 (2004)
- 7) 大縄登史男, 上山智之：溶接技術 **51** (2003) 60
- 8) T. Ueyama, T. Ohnawa, M. Tanaka, K. Nakata：Science and Technology of Welding and Joining, **10** (2005) 750
- 9) カート・マン：自動車のボディ製造における高出力固体レーザー, 溶接学会誌, Vol. 73, No. 8 (2004) p. 551-554
- 10) 杏名宗春：最新レーザー利用生産システムについて, 溶接技術, Vol. 54, No. 6 (2006) p. 82-90
- 11) 中村佳巳：溶接技術 **57** (2009) 102
- 12) 全紅軍, 上山智之, 木原貴行, 中田一博：溶接学会論文集 **22** (2004) 27
- 13) 小野守章, 真保幸雄, 吉武明英, 大村雅紀：溶接学会論文集 **21** (2003) 515
- 14) F. Vollertsen, S. Grunenwald：溶接学会 **80** (2011) 94
- 15) (社)溶接学会編；摩擦攪拌接合—FSWのすべて—, 産報出版 (2006)
- 16) 中田一博：軽金属溶接 **46** (2008) 347
- 17) 金永坤, 藤井英俊, 津村卓也, 駒崎徹, 中田一博：鑄造工学 **78** (2006) 451
- 18) 藤井英俊：溶接技術 **59** (2011) 46
- 19) Y. C. Cung, H. Fujii, R. Ueji, N. Tsuji; Scripta Materialia, **63** (2010) 223
- 20) 古賀信次：軽金属溶接 **42** (2004) 523
- 21) 藤本光生, 附柴祐一, 野村浩二：溶接学会誌 **80** (2011) 227
- 22) 池田倫正：溶接学会全国大会講演概要, 78 (2006) 218
- 23) 中田一博：溶接技術 **52** (2004) 141
- 24) 中田一博, 牛尾政男：溶接学会誌 **71** (2002) 418
- 25) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「異材接合技術の基礎研究」平成13年度研究基盤施設活用型先導的基礎研究調査事業, (2002)
- 26) 片山聖二：溶接技術 **50** (2002) 69
- 27) 中田一博：溶接技術 **52** (2004) 126
- 28) 渡辺健彦, 柳沢敦, 高山博史：溶接学会論文集 **22** (2004) 141
- 29) 福本昌宏, 椿正巳, 下田陽一郎, 安井利明：溶接学会論文集 **22** (2004) 309
- 30) 田中晃二：軽金属 **56** (2006) 317
- 31) 青沼昌幸, 津村卓也, 中田一博：鑄造工学 **80** (2008) 219
- 32) 瀬知啓久, 中田一博：溶接技術 **59** (2011) 58
- 33) 川人洋介, 丹羽悠介, 片山聖二：溶接学会論文集 **28** (2010) 16