

接合技術の21世紀への展望*

Perspective of Joining Technology for 21 Century

中田 一博¹⁾

Kazuhiro Nakata

New welding and joining processes which were developed in recent ten years were reviewed and the applicability of these processes to weld or join the newly-developed metallic structural and functional materials were also reviewed and discussed.

Key Words : Production Engineering, Welding, Brazing, Metallic Material / Arc Welding, Laser Welding, Friction Stir Welding, Joining

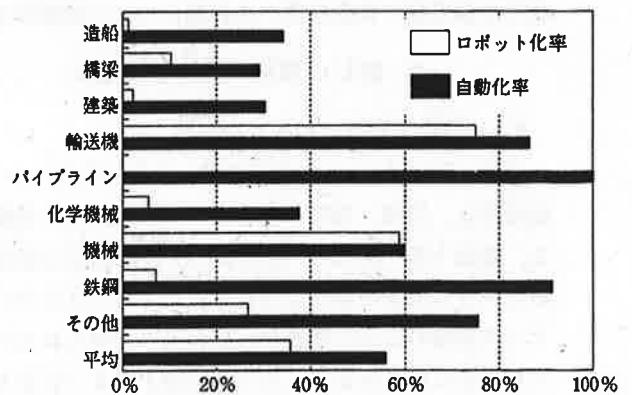
1. 緒 言

溶接・接合プロセスには古くから高効率、高能率、高品質が指向され、最近では環境対応性がこれに加わってきている。後者には、グローバルな環境問題からの省エネルギー対策(結果的にはこれが低コスト化につながる)と生産現場における労働安全衛生面での環境対策がある。

溶接は製造工程の中では品質保証が難しい「特殊工程」に位置づけられている。その品質保証のために、溶接作業者が関与することによる品質のばらつきを低減するためと、合わせて労働コストの低減のために自動化が積極的に押し進められてきた。図1は2003年時点での各種工業分野におけるミグ・マグ溶接の自動化率と、その内のロボット化率を示したアンケート結果¹⁾である。平均的には自動化率は約55%、その内、ロボット化率は約35%である。興味深いのは、自動車を含む輸送機器関係でそれぞれ約90%及び75%と一段と高い水準に至っていることである。このような高度な自動化/ロボット化を達成するためには人間の五感に代わって溶接現象をリアルタイムで判断できる各種のインプロセスモニタリング/センシング技術が不可欠である。さらにこれに加え

てモニタリング/センシング情報に瞬時に応答可能な溶接電源やトーチ・ワイヤ送給・シールドガス供給システムの発展がなければ不可能である。

図1にもみられるように自動化/ロボット化の適用も工業分野で大きく違っているが、究極の溶接技術としては完全自動化/完全ロボット化システムになるのであろう。データベースの完備とシミュレーション支援技術の進歩により人間の関与をどこまで減らすことができるの



自動化率 = $(A+R) \times 100 / (S+A+R)$	ロボット化率 = $R \times 100 / (S+A+R)$
S: 半自動溶接による溶材量(またはトーチ数)	
A: 自動化溶接による溶材量(またはトーチ数)	
R: ロボット溶接による溶材量(またはトーチ数)	

図1 各種工業分野におけるミグ・マグ溶接自動化率・ロボット化率(2003年)¹⁾

* 2007年1月9日受付

1) 大阪大学接合科学研究所加工システム研究部門エネルギープロセス学分野 (567-0047 茨木市美穂ヶ丘 11-1)

E-mail: nakata@jwri.osaka-u.ac.jp

表1 連続した接合継手を得ることができる新しい溶接・接合プロセス例

タイプ	プロセス	分類
既存プロセスの改善・発展型	A-TIG法, AA-TIG法	熔融溶接
	タンデムアーク溶接	
	ブレイズ溶接(アーク, プラズマ, レーザ)	ブレイズ溶接
ハイブリッド型	レーザー・アークハイブリッド溶接	熔融溶接
新概念型	摩擦攪拌接合(FSW)	固相接合
	電磁パルス圧接	

であろうか、興味深いところである。しかしデータを取得し、インプットするのは人間であり、新しいプロセスや新しい材料が出現すればその対応は技術者の能力にかかってくることはいうまでもないことである。

自動車産業は航空機産業と並んで20世紀の近代産業を牽引し、常に時代の最先端の技術を用いて、かつ新しい材料を積極的に使用してきた。21世紀に入った今日でもその傾向はむしろより大きくなっており、新素材・新機能材を適材適所で使いこなしている。一方、新素材・新機能材の部材化・製品化のためには溶接・接合が必須であるが、しかし、それが困難なことが多いのもまた事実である。一方、既存材料においても溶接・接合が極めて難しいか、もしくは高コストが要求される材料があり、これらに対して低コストの簡便な溶接・接合プロセスが出現すれば、同様の効果が期待できる。

溶接・接合プロセスにおいても最近になって新しいプロセスが出現してきており、本稿では、特にアーク溶接のように連続した接合継手が得られるプロセスを中心に、その特徴を概説するとともに、金属系の新素材・新機能材料や難溶接・接合材料への展開について概観する。

2. 新しい溶接・接合プロセス

2.1. 溶接・接合プロセスの分類

溶接・接合プロセスは熔融溶接、ろう付(ブレイジング)、固相接合、接着、機械的接合(リベットなど)に分類される。最近十数年間の20世紀末~21世紀初頭に出現した新しいプロセスや新たに注目されたプロセスについて、アーク溶接のように連続した接合継手が得られるプロセスを中心にみると、たとえば表1のようになり、既存プロセスの改善・発展型、既存プロセスのハイブリッド型、そして新しい概念で開発された型となる。それぞれの特徴を把握し、うまく使いこなすことが鍵である。

2.2. 熔融溶接における新プロセス

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特長がある。このため構造

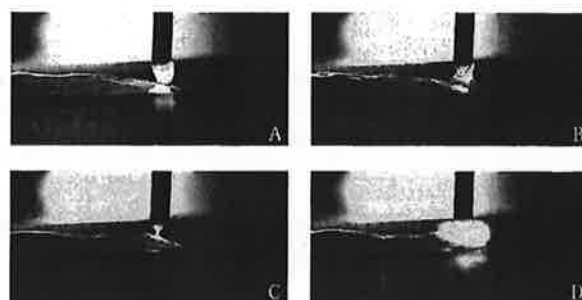


図2 パルスミグ溶接における溶滴の短絡移行状況：AからDまで約6ms (CBT法)⁽⁴⁾

物などの溶接の大部分はアーク溶接が適用されている。

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・シールドガス供給系やシールドガス及び溶加材の開発の進展により、さらなる高能率化、高効率化、高品質化、環境対応化が進められている。自動車関連では薄板高強度材料、軽量非鉄金属材料や小物部材への適用性も重要であろう。

(1) スパッタレスGMA溶接 ミグ・マグ溶接は高能率溶接法として知られているが、熔融金属粒子が飛び散るスパッタが問題となってきた⁽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るとともに、また溶接作業環境対策の観点からも重要である。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、低電流溶接において新しいタイプのパルスミグ・マグ溶接法(CMT法⁽³⁾、CBT法⁽⁴⁾)が提案されている。図2⁽⁴⁾に示すように、ワイヤ先端の溶滴を熔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)、あるいは瞬間的にワイヤを引き上げて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熔融池表面に短絡し、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/ヒュームレス化を実現しつつある。またこれらの方法では溶接入熱を必要最低限まで減少させることができ、板

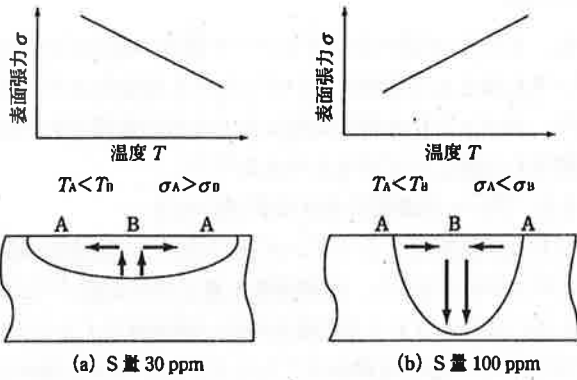


図3 硫黄(S)量の違いによって誘起されるマランゴニ対流の向きと溶け込み形状の関係(A-TIG)⁽⁶⁾

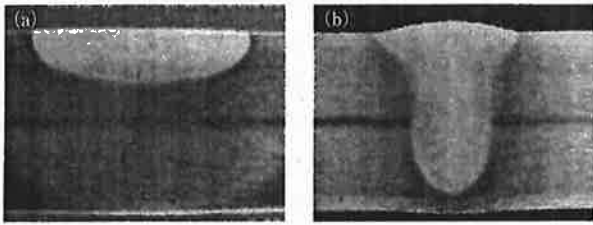


図4 AA-TIG 法によるステンレス鋼の溶け込み形状、(a)従来 TIG 溶接、(b)AA-TIG 法；SUS304 (S : 20 ppm)、板厚 10 mm⁽⁶⁾

厚がサブ mm の薄板の低変形溶接や Al / 鉄の異材接合などへの適用が期待されている。

さらに溶接材料及びシールドガスの観点からのスパッタレス化 / ヒュームレス化の提案もなされており⁽²⁾、溶接装置システムと合わせた進展が望まれている。

(2) AA-TIG 鉄鋼材料のティグ溶接時において溶融池内の表面張力流(マランゴニ対流)の向きを制御することにより深溶け込みの溶接ビードを形成することができる。図3に示すように、ステンレス鋼における S 量の大小により、表面張力の温度依存性が逆転し、S 量が約 30 ppm 以下では周辺溶け込み型に、約 100 ppm 以上では深溶け込み型になることが知られている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。S 以外にも表面活性元素である Se, Ti, O などが同様の効果をもたらす。TiO₂ を主成分とするフラックスを溶接前に塗布した後にその上を溶接することにより深溶け込みビードが得られ、A-TIG 法として実用化されているが、スラグが発生することが問題となっている。これに対してシールドガスに CO₂ ガスなどを微量添加して、酸素を溶融池表面に供給する方式⁽⁷⁾ではスラグ発生もなく、図4に示すようにステンレス鋼においては極端なまでの深溶け込みビードも得られ、AA-TIG 法とも呼ばれる⁽⁶⁾。この場合、タングステン電極の酸化を防止するためにトーチは二重シールドノズルが用いられる。このようにシールド

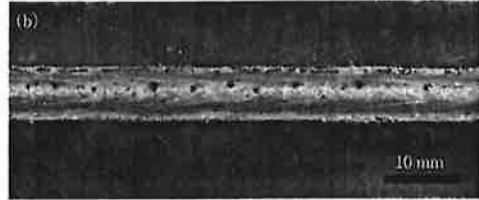
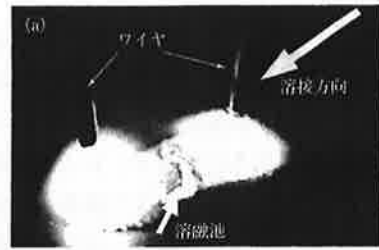


図5 タンデムパルスマグ溶接中の(a)溶融池の赤外線写真、(b)タンデム及び(c)シングルパルスマグ溶接部外観⁽¹⁰⁾

ガスからの溶け込み制御も可能となっている。

(3) タンデムパルスアーク溶接 薄板の高速溶接を阻害している溶接欠陥にハンピングがある。溶接速度を高速化すると、ある速度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、温度差による表面張力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一つのトーチ内に二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、電極間距離など)を制御することにより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 Al 合金などへの対応も可能である⁽⁹⁾。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⁽¹⁰⁾。タンデム化により 4 m/min もの高速溶接が可能となっている。

(4) レーザ溶接及びレーザ・アークハイブリッド溶接 レーザ溶接は古くから注目されてきたが、実用化は限定されてきた。最近になってファイバー伝送が可能でロボットへの装着も容易であり、かつビーム集光性に優れるとともにレーザ発信効率が飛躍的に向上したファイバーレーザやデスクレーザの出現によりレーザ溶接の適用

が急速に拡大されようとしている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。高速溶接で、溶融部の幅が狭く、変形が小さいレーザー溶接の特徴は理想的である。一方レーザーの集光性が良くなり、より細いビーム径が適用されるようになると、レーザー溶接の欠点である小さな開先ギャップ裕度がより狭められることになる。すなわち溶融金属量が少なく、かつ溶加材ワイヤの適用性が困難になるために、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。このために実用的なレーザー溶接システムとしては、開先が開かないように部材をしっかりと金型などの治具に固定して溶接するリモート溶接(スキャナ溶接とも呼ばれる)⁽¹¹⁾が注目されている。しかしこのことは逆にレーザー溶接の適用範囲が限定されかねない危険性を示唆している。

一方、レーザー・アークハイブリッド溶接はたとえば図6⁽¹³⁾に示すように性質の大きく異なるレーザーとアークの二つの熱源を同時に1カ所に照射することにより、レーザー溶接の高速溶接性を生かしながら、かつアーク溶接のもつ大きな開先ギャップ裕度と溶加材の適用性を生かすプロセスである。溶接速度はレーザー溶接単独時よりも若干遅くなり、溶融部幅もより広がるが、亜鉛めっき鋼板を含む薄板の高速溶接法として大きな適用性を有して

いる。また(1)で述べたようにアーク電源の進歩によりスパッタもほとんど発生しないプロセスも開発されており、ロボット化も特に問題はなく今後の展開が大いに期待される新しいプロセスである⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。

2.3. プレーズ溶接における新プロセス

プレーズ溶接はブレイジング(ろう付)と溶融溶接の間の子のプロセスである。溶融溶接と異なるのは図7⁽¹⁶⁾に示すように母材よりも十分に融点の低い溶加材ワイヤ(ろう材)を用いて、母材を溶かすことなく溶加材のみを溶かして開先を充填し、連続した継手を得るものである。インラインで、高速接合が可能である。熱源にはすでに述べたレーザーやアーク、プラズマあるいはこれらのハイブリッドなどの溶接熱源が適用可能である。古から知られているがこれらの熱源を用いた構造部材への積極的な展開は最近になってからである。母材溶融を避けて入熱を減らしたい場合などに有効であり、亜鉛めっき鋼板の接合や異材接合への応用などで注目されている。鉄鋼材料に対するろう材として現状ではCu-3%Si系合金が使用されているが、高強度鋼や各種の異材接合への適用可能なろう材の開発が期待されている⁽¹⁷⁾。

2.4. 固相接合における新プロセス

固相接合の分野でいくつかの新しい概念の接合プロセスが注目されている。

(1) 摩擦攪拌接合/摩擦攪拌点接合 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接合プロセスが摩擦攪拌接合(FSW)である⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾。その原理を図8に示す。突合わせた2枚の板のI開先部に長さが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。軟化した金属はブ

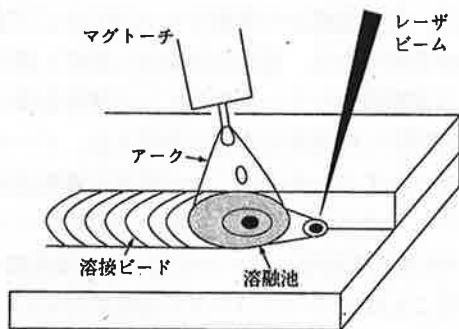


図6 レーザ・アークハイブリッド溶接模式図(重ね継手例)⁽¹³⁾

継手	溶融溶接	プレーズ溶接
突合せ	溶接金属(溶加材+母材) 母材	ろう材 母材
重ね	溶接金属(溶加材+母材) 母材(上板) 母材(下板)	ろう材 母材(上板) 母材(下板)

図7 溶融溶接とプレーズ溶接の違い

ロープ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、拡散現象などにより金属として一体化して接合される。固相接合であるために、熔融溶接に特有のブローホールや高温割れがなく、また接合温度が低いため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、騒音などはなく、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、靱性が増加する特徴を有する。このため、鋳物材などの組織改質や補修法としても注目されている。

現在は、Al合金、Mg合金、銅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。これに対して鉄鋼材料の実用化はまだなされていない。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、たとえばAl合金では450~500℃であり、既存のSKD61など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1000~1200℃の高温と推定されており、鋼製のツールでは高温強度が不足する。したがって現状

ではこれに耐え得るツール材質としてセラミックスである多結晶立方晶窒化ボロン(PCBN)製などが試作され、各種の鉄鋼材料への適用性が検討され、実験室レベルでの接合は可能となっている⁽²⁰⁾。しかし、実用的なFSWの鉄鋼材料への適用には今しばらくの時間が必要である。

一方、摩擦攪拌を利用した点接合法は、図9に示すように回転プローブを重ね継手に挿入し、その後引き抜くだけで接合が完了する簡便な新しい点接合法である⁽²¹⁾⁽²²⁾。ちょうどFSWの開始部に相当する。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、この部分では重ね接合界面は完全に消滅し、Al合金やMg合金では微細再結晶粒となり、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。Al合金では自動車部材への実用化が始まっており⁽²²⁾、FSWと同様に鉄鋼材料への展開が注目されている⁽²³⁾。

プローブ穴を残さない方法や三次元ロボット化などが今後のFSWの課題である。

(2) 電磁パルス圧接 材料の衝撃エネルギーを利用した接合法として古くから爆発圧接が知られており、特に異材接合に威力を発揮してきた。しかし火薬取扱の制限により一部の水中での爆発圧接以外ではわが国では適用が困難となっている。これに対して強力な電磁力を瞬間的に発生させ、その衝撃エネルギーを利用する方法が提案されている⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。

Alや銅などの良導電性金属に適した圧接法であり、薄板金属のシーム溶接の原理を図10⁽²⁴⁾に示す。ワンターンコイルの中に間隔(1mm)を開けて配置された同じ板厚のAl薄板に対して、コンデンサ電源よりコイルにパルス大電流を流すと高密度の磁束が発生し、これによりAl薄板には渦電流が流れ、ジュール発熱により加熱されるとともに、発生する電磁力によりAl薄板はお互いに押しつけられて圧接される。標準的な条件では、最大電流は

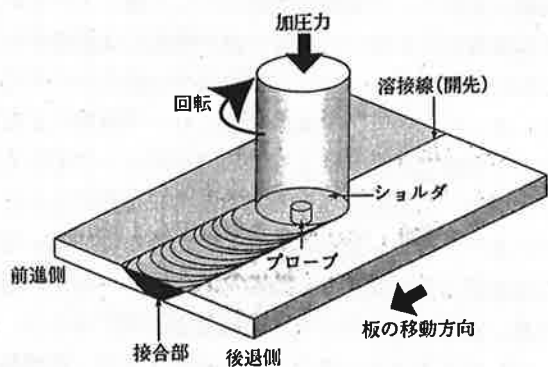


図8 摩擦攪拌接合(FSW)法の原理

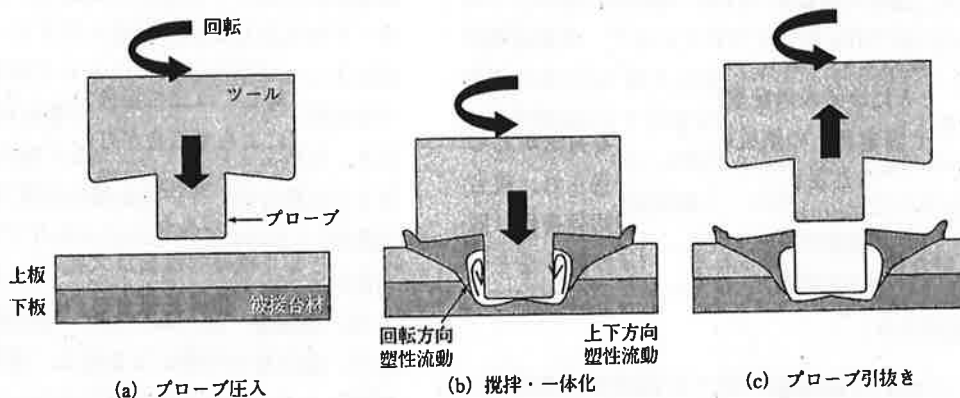


図9 摩擦攪拌点接合法の原理(断面図)⁽²²⁾

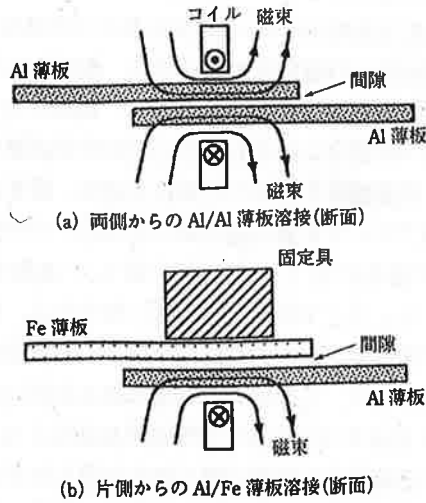


図10 電磁圧接法の原理図⁽²⁴⁾

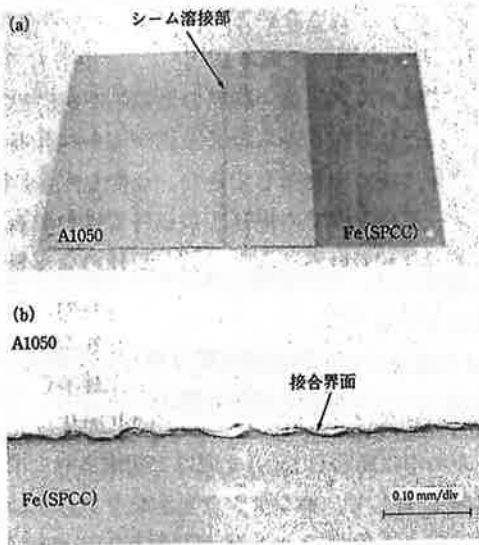


図11 電磁圧接法によるAl/Fe異材シーム溶接(a)と接合界面組織(b)⁽²⁴⁾

150~200 kA, 通電時間は約 50 ms, 電磁力に相当する最大磁気圧力は 300 MPa 以上とされている⁽²⁴⁾。本法は異材接合法として注目されており, たとえば Al と鉄の組合せでは(b)のようにコイルの配置を変えて Al 板側のみから磁束をかけて固定具上の鉄板に押しつける方法がとられる。図 11⁽²⁴⁾のような異材シーム接合材が得られ, 接合界面は爆接特有の波面状模様を呈し, 金属間化合物は認められず良好な接合強度が得られる。パイプ継手などにも適用可能である。

3. 新しい材料や難溶接材料への接合技術の展開

すでに構造材料として用いられているが一般に難溶接

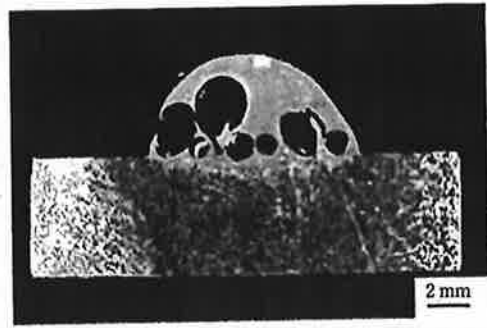


図12 Mg合金AZ91Dダイカスト材のミグ溶接部断面マクロ組織, AZ61ワイヤ使用⁽²⁸⁾

材料とされているものと, いわゆる新素材であり構造・機能部材として実用化が期待されている材料に対して, その溶接・接合プロセスの展開例を示す。

3.1. 難溶接材料

(1) 亜鉛めっき鋼板 亜鉛めっき鋼板は自動車などに多用されているが, 重ね溶接継手においては亜鉛蒸気によりブローホールやピットが発生しやすい欠点がある。この対策のためにマグ溶接やレーザー溶接では溶接条件や開先形状などに工夫が凝らされてきた⁽²⁶⁾。しかし依然として制約が多いのが現状である。すでに述べたブレース溶接は亜鉛めっき鋼板用溶接法として適しているが, 銅合金製溶加材を用いた場合の継手強度には限界がある⁽¹⁷⁾。これに対してハイブリッド溶接法では先行レーザーによるキーホールでの亜鉛蒸気の発散とレーザー照射による後行アークの安定化効果により重ね継手ギャップがなくてもブローホールを抑制しつつ高速溶接が可能になるとされている⁽²⁷⁾。今後, 亜鉛めっき鋼板でも 1000 MPa を越える超高張力鋼の適用が視野に入ってきているが, 信頼性の高い溶接・接合プロセスの確立が必須であろう。

(2) ダイカスト・チクソモールドディング・鋳物材 これらの材料では材料内に必然的に内包されたガスにより, 溶融溶接に際して溶接部には図 12⁽²⁸⁾に示すようなブローホールや大きな空洞が発生しやすく, 内包ガス量やガス圧によっては溶融溶接がほとんど不可能となる。このような材料に対しては固相接合である FSW が極めて有利であり, 材質によらず接合が可能である。さらに図 13 に示すように接合部では鋳造組織の改質(組織微細化, 鋳造欠陥除去)も同時に行える利点があり⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾, 接合部は微細再結晶粒となり機械的性質は大幅に改善される。

(3) 複合材 金属基複合材の溶融溶接は一般に困難であり, 強化材の分解による気孔, 空洞の発生や強化材の凝集による劣化などが避けられない。粒子分散型の複合材に対しては, FSW が適しており, 図 14⁽³¹⁾に示すよう

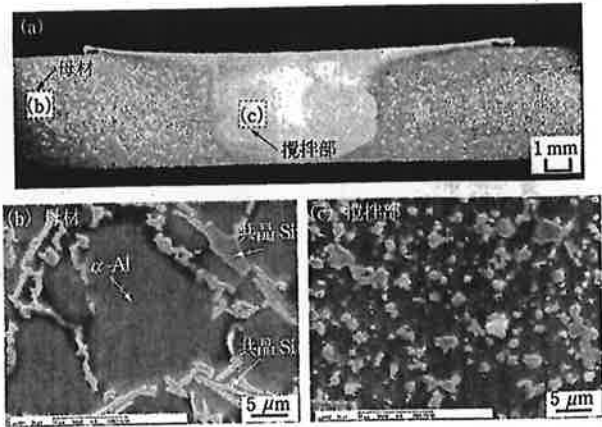


図 13 Al 合金ダイカスト ADC12 材の FSW 接合部、(a) 断面マクロ組織、(b) 母材ミクロ組織、(c) 攪拌部ミクロ組織

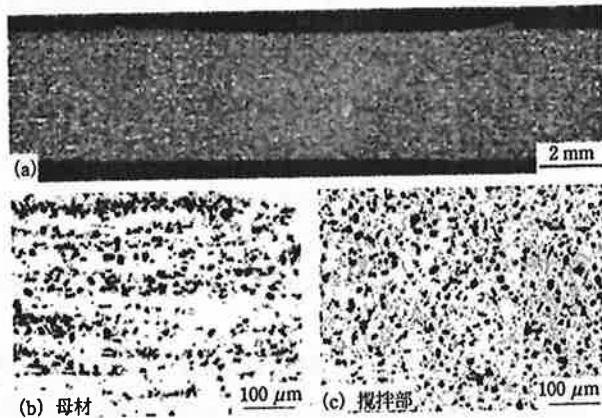


図 14 アルミナ粒子分散 6061Al 合金基複合材の FSW 接合部、(a) 断面マクロ組織、(b) 母材ミクロ組織、(c) 攪拌部ミクロ組織⁽³¹⁾

に粒子が均一に分散した接合部が得られ、機械的性質も良好である。強化粒子の種類や含有体積率によっては FSW のツールプローブの摩滅が著しくなるためその解決が今後の課題である。

(4) 異材接合：鉄／Al 合金の異材接合 材料の適材適所を積極的に進める自動車製造では、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。たとえば自動車の軽量化のために鉄鋼材料と Al 合金の異材接合がある⁽³²⁾。この異材組合せでは脆弱な金属間化合物の形成のために熔融溶接では直接接合は困難とされてきた。しかし金属間化合物層が形成しても厚さを 1~2 μm 以内とすることにより Al 合金側での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⁽³³⁾。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⁽³⁴⁾や

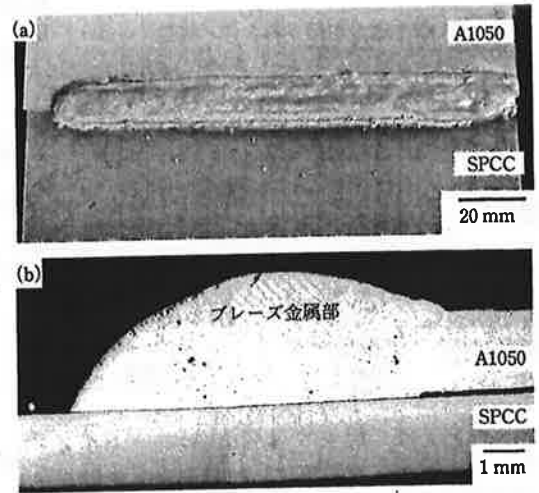


図 15 ミグブレイズ溶接による鉄 (SPCC) / Al 異材溶接部、(a) 外観、(b) 断面ミクロ組織；重ね継手、上板工業用純 Al、下板 SPCC；フラックス入りワイヤ使用⁽³⁵⁾

基本的に鉄母材を溶かさないうブレイズ溶接も有望な結果が報告されている⁽³⁵⁾。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イ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 15⁽³⁵⁾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ている。今後ブレイ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。

Al / 鉄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近提案された FSW を用いる方法⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾は開先の Al のみを塑性流動させて鉄母材に押しつける方法であり、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。塑性流動を利用して界面を清浄化して固相接合する方法では、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最近示され、注目されている⁽³⁸⁾。これまでの本系の異材接合研究結果を概観すると表 2 のようにまとめることができ、今後の展開が期待される。

3.2. 新材料

いくつかの新材料ではその構造化・部材化のために溶接・接合性が検討されている。しかし連続した接合継手が得られた例はまだ少なく、適用可能な新しい接合プロセスの出現が待たれる。

(1) 発泡・ポーラス金属 現在、Al 基の発泡金属が単に軽量構造材料としてのみならず、断熱・防音材や衝撃吸収材として注目されており、その接合法が検討されて

表 2 高い接合強度が得られた Al/鉄系異材接合界面構造

接合プロセス		高い接合強度が得られた接合界面構造
熱的平衡(準平衡)	溶融溶接	・金属間化合物層の厚さが支配因子
高温反応	抵抗溶接 ろう付 拡散接合	
熱的非平衡	圧接	・金属間化合物層が認められない(光顕) ・界面にアモルファス層形成 〔数 nm ~ 数十 nm 厚さ〕 〔酸化物層〕
低温反応	〔摩擦圧接〕 〔超音波〕	
塑性流動現象	爆接 FSW	

いる。たとえば、図 16⁽³⁹⁾は発泡 Al サンドイッチ材のミグ溶接例であり、サンドイッチ材を介した間接的な溶接である。しかし、発泡材はいわば箔材の構造体であり、その直接接合はかなり困難である⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾。さらに、一方に細長く配向した気孔を有するロータス型ポーラス金属もその特徴的な性質を生かした用途開発が進められており⁽⁴²⁾、接合プロセスの検討も行われている⁽⁴³⁾。

(2) 金属ガラス 非晶質金属の中でも特にアモルファス形成能が高く、また結晶化の直前にガラス遷移現象と呼ばれる過冷却液体状態を有する金属ガラス⁽⁴⁴⁾は cm 級のバルク材が製造法によって作製可能であり、さらに過冷却液体状態では塑性加工も可能である。最近では Ni 基や鉄基の金属ガラスが創製されており、高強度(2700 MPa)、高硬度(HV 900)、さらにステンレス鋼をはるかに上回る優れた耐食性を有しており、部材や構造用材料としての期待が高まっている⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾。これらの金属ガラスの実用化のためには接合技術の確立が不可欠である。現在までに Zr 基金属ガラスを中心に固相接合である摩擦圧接、爆発圧接、パルス通電接合や溶融溶接である電子ビーム溶接、レーザービーム溶接により金属ガラスを結晶化させることなく、良好な溶接継手が得られることが示されている⁽⁴⁷⁾。

これらの金属ガラスでは、結晶化 TTT 線図と溶接部の冷却速度との関係により、溶接性が判定できるとされており、溶接時の冷却速度の速いプロセスほど有利である。現状では金属ガラスの創製とその特性評価に研究の主眼が置かれているが、その適用拡大のためには金属ガラスの結晶化 TTT 線図作成のような基礎データベースの構築が望まれる。なお平成 17 年度より大阪大学接合科学研究所と東北大学金属材料研究所及び東京工業大学応用セラミックス研究所の 3 研究所が連携して金属ガラスの接合に関する連携研究が行われており、その成果に期待したい⁽⁴⁸⁾。

(3) 高強度 Mg 合金 Mg 合金は Al 合金とともに軽量構造材料として注目されているが、いくつかの欠点のた

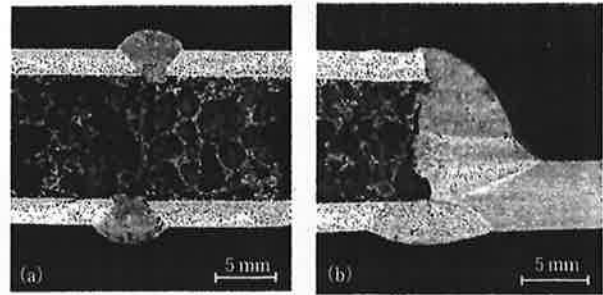


図 16 発泡 Al サンドイッチ材のミグ溶接部断面。(a)サンドイッチ材同士の溶接例、(b)サンドイッチ材と Al 合金板材との溶接例⁽³⁹⁾

めにその実用化は遅れている。最近、Mg 合金の欠点の一つである耐熱性(耐クリープ特性)を改善した高強度 Mg 合金がいくつか開発されてきており、その接合性も検討課題にあがってきている。たとえば希土類元素を添加した長周期積層構造を有する Mg-Zn-RE 合金では製造材の押出などによる塑性加工材では室温で 440 MPa 以上の降伏応力と 5% 以上の伸び、かつ 473 K でも 300 MPa 以上の降伏応力を示す⁽⁴⁹⁾。また超微細結晶粒粉末を用いる押出塑性加工法(RCP 法)では、市販の AM 60 合金でも RCP 処理材では室温引張強さ 380 MPa の高強度で伸び 6% を示す⁽⁵⁰⁾。

これらの高強度合金に対しては従来の溶融溶接では塑性加工の効果は消滅するためにせっかくの材料特性が生かせない。しかし新しい接合プロセスである FSW は塑性加工を利用した接合法であるために適用可能であり、実用化の大きな可能性を秘めている。

4. ま と め

本稿では、溶接・接合プロセスとしてアーク溶接のような連続した接合継手が得られるプロセスを中心に、新しい溶接・接合プロセスと新しい構造・機能材料との関係に注目して取りまとめた。開発スピードが要求される 21 世紀では、これら両分野とさらにこれにエンドユーザが融合した研究開発体制がこれまで以上に重要になってくることが示唆される。

謝辞

本稿では多くの図表を引用させて頂いた。関係各位に深謝致します。

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) (社)溶接学会：特集「溶接作業環境」, 溶接学会誌, Vol. 75, No. 7, p. 552-578(2006)

- (3) 古川一敏：新アーク溶接法 CMT プロセス，軽金属溶接，Vol. 43，No. 10，p. 469-475(2005)
- (4) 上山智之ほか：CBT 法による低入熱・低スパッタ CO₂/ マグ溶接システムの開発，溶接技術，Vol. 54，No. 12，p. 60-67(2006)
- (5) W. Lucas, et al. : A-TIG Flux for Increasing the Performance and Productivity of Welding Processes, IIW Doc.XII-1448-96(1996)
- (6) 田中学：TIG 溶接における活性フラックスによる溶込み促進機構，溶接学会誌，Vol. 71，No. 2，p. 95-99(2002)
- (7) Shanping Lu, et al. : Influence of Welding Parameters and Shielding Gas Composition on GTA Weld Shape, ISIJ International, Vol. 45, No. 1, p. 66-70(2006)
- (8) 佐藤豊幸ほか：酸化性シールドガスによる超深溶込みティグ溶接，溶接技術，Vol. 54，No. 11，p. 65-70(2006)
- (9) 大縄登史男ほか：タンデムパルス GMA 溶接プロセス，溶接技術，Vol. 51，No. 2，p. 60-64(2003)
- (10) T. Ueyama, et al. : Effect of Torch Configuration and Welding Current on Weld Bead Formation in High Speed Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding of Steel Sheets, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, No. 6, p. 750-759(2005)
- (11) 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，p. 551-554(2004)
- (12) 香名宗春：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，p. 82-90(2006)
- (13) 全紅軍ほか：レーザー・交流パルスミグハイブリッド溶接法による薄板アルミニウム合金溶接の高速化，溶接学会論文集，Vol. 22，No. 1，p. 27-36(2004)
- (14) U. Dilthy : Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc welding Processes, IIW Doc.XII-1565-99(1999)
- (15) 小野守章ほか：レーザー・アークハイブリッド溶接法による薄鋼板重ね溶接特性，Vol. 21，No. 4，p. 515-521(2003)
- (16) 中田一博：アルミニウムと鉄のブレース溶接，溶接技術，Vol. 52，No. 11，p. 126-130(2004)
- (17) 岡村興作ほか：ハイテン対応ろう付材料の強度とぬれ性に及ぼす材料組成の検討，溶接学会全国大会講演概要，Vol. 75，p. 68-69(2004)
- (18) W. M. Thomas, et al. : International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UKPatent Office, London, December 6, 1991
- (19) C. J. Dawes, et al. : Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys, Welding Journal, Vol. 75, No. 3, p. 41-45(1996)
- (20) 出溶接学会編：摩擦攪拌接合—FSW のすべて—，産報出版(2006)
- (21) 古賀信次：フリクションスポット (FSJ) の開発，軽金属溶接，Vol. 42，No. 11，p. 523-529(2004)
- (22) 加藤喜久生ほか：摩擦点接合技術の開発と自動車への応用，軽金属溶接，Vol. 42，No. 11，p. 530-535(2004)
- (23) 池田倫正：薄鋼板の摩擦攪拌点接合における組成流動挙動，溶接学会全国大会講演概要，Vol. 78，p. 218-219(2006)
- (24) 相沢友勝：金属薄板の電磁シーム溶接法，軽金属，Vol. 54，No. 4，p. 153-158(2004)
- (25) 相沢友勝：Al/Fe 薄板の電磁圧接シーム溶接法，軽金属溶接，Vol. 42，No. 2，p. 79-84(2004)
- (26) 鈴木：連載講座—亜鉛めっき鋼板のアーク溶接—第3回，溶接技術，Vol. 54，No. 11，p. 112-124(2006)
- (27) 公開特許公報 (A) : 亜鉛めっき鋼板の重ね溶接方法及び溶接結合薄板，特開 2002-160082
- (28) 中田一博：マグネシウム合金の溶接・接合，軽金属溶接，Vol. 39，No. 12，p. 582-591(2001)
- (29) 金永坤ほか：マルチパス摩擦攪拌プロセスによる ADC12 ダイカスト材の組織と機械的性質の改善，鋳造工学，Vol. 78，No. 9，p. 451-456(2006)
- (30) 中田一博ほか：AZ91D マグネシウム合金チクソモールド薄板の摩擦攪拌溶接性，軽金属，Vol. 51，No. 10，p. 528-533(2001)
- (31) K. Nakata, et al. : Friction Stir Welding of Al₂O₃ Particulate 6061 Al Alloy Composite, Materials Science Forum, Vols.426-432, p. 2873-2878(2003)
- (32) 中田一博ほか：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，Vol. 71，No. 6，p. 418-421(2002)
- (33) 新エネルギー・産業総合開発機構：平成 13 年度「異材溶接技術の基礎研究」，公開用報告書 PDF (公開用11401046-0-1.pdf) (2001)
- (34) 片山聖二：レーザー異材接合，溶接技術，Vol. 50，No. 2，p. 69-73(2002)
- (35) 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, p. 1596-1602(2003)
- (36) 渡辺健彦ほか：回転ピンによる鉄鋼とアルミニウム合金の固相接合，溶接学会論文集，Vol. 22，No. 1，p. 141-148(2004)
- (37) 福本昌宏ほか：摩擦攪拌作用による ADC12/SS400 材料間の接合，溶接学会論文集，Vol. 22，No. 2，p. 309-314(2004)
- (38) 田中晃二ほか：摩擦攪拌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，Vol. 56，No. 6，p. 317-322(2006)
- (39) U. Dilthey, et al. : Lichtbogenschweissen von Aluminiumschaumverbindungen, DVS-Berichte Band, Vol. 220, p. 216-218(2002)
- (40) A. G. Pogibenko, et al. : The Weldability of Aluminium-Based Foam Materials, Welding International, Vol. 15, No. 4, p. 312-316(2001)
- (41) T. Bernard, et al. : Mechanical Properties of Structures of Semifinished Products Joined to Aluminium Foam, J. Materials Processing Technology, 115, p. 20-24(2001)
- (42) 中嶋英男：ロータス型ポーラス金属，ふえらむ，6-9，p. 701-707(2002)
- (43) H. Yanagino, et al. : Laser Welding of Lotus-Type Porous Iron, Materials Transactions, Vol. 47, No. 9, p. 2254-2258(2006)
- (44) A. Inoue : Bulk Amorphous Alloys, Preparation and Fundamental Characteristics, Trans Tech Publications, NH, USA (1998)
- (45) たとえば，川村能人ほか：高速超塑性を利用した金属ガラスの粉末固化・鍛造加工技術の開発とゴルフクラブへの応用，まてりあ，Vol. 40，No. 3，p. 280-282(2001)
- (46) 奥村潔：ピーニング向け高強度，長寿命アモルファス合金投射材アモビーズの開発，まてりあ，Vol. 43，No. 2，p. 142-144(2004)
- (47) Y. Kawamura, et al. : Development of Welding Technologies in Bulk Metallic Glasses, Materi. Sci, Forum, Vols. 386-388, p. 553-558(2002)
- (48) JWRI, Osaka University : Abstract of 2nd ICCCI and Joining Technology for New metallic Glasses and Inorganic Materials, Kurasaki, Japan (2006)
- (49) 河村能人：長周期積層構造型マグネシウム合金，軽金属，Vol. 54，No. 11，p. 503-504(2004)
- (50) K. Kondoh : High Strength Wrought Magnesium Alloy by Employing Grain-Refined Powder, Magnesium Technology 2005, TMS, p. 77-80(2005)

□フェース



中田一博

高エネルギー・高効率・高品質の溶接・接合プロセスの開発と新たに開発された新構造・機能材料への適用最適化に関する研究を進めている。