

異材溶接の基礎とその展開

第1回

—異材溶接の基礎—

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

1 はじめに

金属材料はその種類により融点，密度，熱伝導度，熱膨張係数などの物理定数や，強度・靱性等の機械的性質，耐食性等の化学的性質及び高温・低温などの各種環境におけるこれらの機械的・化学的特性等，電磁気特性などにおいて，それぞれ異なる性質すなわち機能を有している。

各種大型プラント，輸送機器，機械装置，電機・電子機器等，金属材料を中心とした工業製品の製造においては，単独の金属材料で作上げられた製品は今日では少なく，ほとんどの金属製品はいわゆる「適材適所」でそれぞれの金属材料の機能を生かした組合せ設計が行われている。これには製品への要求性能を満たすために，機能別に異なる金属材料を組合せる場合や材料コスト低減のために取り入れる場合がある。

すでに鉄鋼材料における異なる鋼種間の異材溶接に関しては実用的にも溶接技術が確立されているものが多

く，また解説等も多く見受けられる¹⁻³⁾。本連載講座では，技術的にはまだ確立されていないが今後の展開が予想される異材溶接の組合せや溶接プロセスについて取りまとめたい。

2 アンケートに見る異材溶接技術開発への要望

本誌等⁴⁻⁵⁾でもすでに紹介したが，NEDO調査研究「異材溶接技術の基礎研究」(平成12～13年度)における異材溶接に関するアンケート結果を見てみると，図1のように将来的に必要な異材溶接継手の組合せは金属/金属が過半数の約55%を占めるが，金属/セラミックスが約25%と大きな需要があり，また金属/プラスチックと金属/複合材もそれぞれ約7%と比較的大きな値を示した。

金属/金属の内訳では表1に示すように，相手材として鉄鋼(ステンレス鋼を含む)との組合せが約63%，アルミニウムと他の金属との組合せが鉄鋼との組合せを含

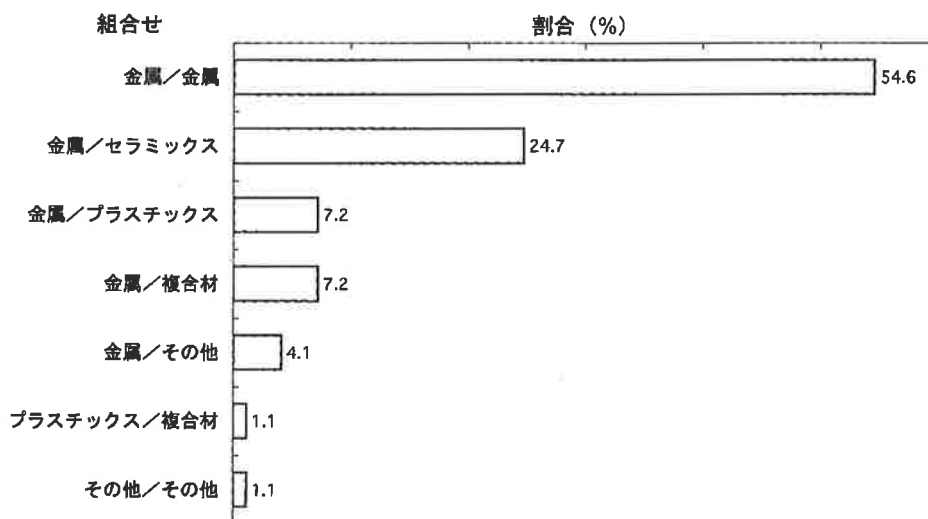


図1 将来的に必要なと考えられる異材継手の組合せ

表1 将来的に必要と考えられる異材金属継手の組合せ

金属の組合せ		割合 (%)
鉄鋼 (SUSを含む) (62.6%)	鉄鋼/アルミ	27.9
	鉄鋼/鉄鋼	9.7
	鉄鋼/銅	6.7
	鉄鋼/チタン	5.7
	鉄鋼/マグネシウム	1.0
	鉄鋼/その他	11.6
アルミ (18.3%)	アルミ/銅	5.8
	アルミ/マグネシウム	2.9
	アルミ/チタン	1.9
	アルミ/アルミ	1.9
銅 (7.7%)	銅/銅	1.0
	銅/その他	6.7
チタン (3.9%)	チタン/チタン	1.0
	チタン/その他	2.9
その他 (7.5%)	その他/その他	7.7

むと約46%となり、この2つの材料が異材の相手材として格段に多いことが分かる。さらに注目すべきは、具体的な異材組合せでは鉄鋼/アルミニウムが約28%ともっとも多いことである。用途は自動車等の輸送機器や各種製品の軽量化であり、省エネルギーを通じた炭酸ガス排出抑制や、高齢化・福祉対策としても注目されている。次いで、銅及びチタンが挙げられるが、これらは銅では熱伝導特性を生かしたヒートシンク材や放熱材、また電気伝導特性を生かした導電部材への目的用途があり、チタンでは耐海水耐食特性等がある。

将来的に望まれる溶接法の観点では、表2に示すように溶融溶接法がもっとも多く、ろう付を含めると約50%になるが、これは継手形状の自由度やコスト面からも当然であろう。しかし、後で述べるように継手形成に困難を伴う組合せが多いのも事実である。また、異材溶接法としてとくに注目されている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。

3 状態図から分かる異材溶接の可能性

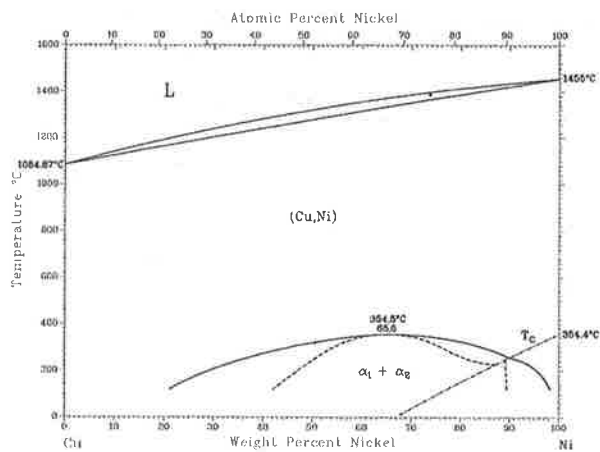
材料の組合せが決められた場合に、これが溶接可能か

表2 将来的に使用したい異材溶接法

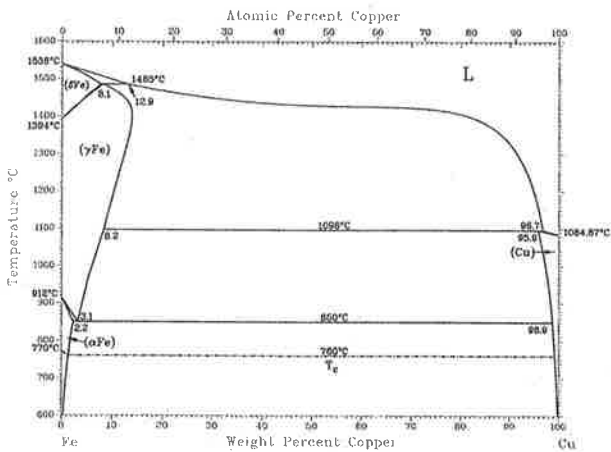
接合法		割合 (%)
溶融溶接 (41.3%)	アーク溶接	16.2
	レーザ溶接	12.9
	抵抗溶接	6.8
	電子ビーム溶接	3.8
	ガス溶接	0.8
	各種	0.8
ろう接 (9.1%)		9.1
固相接合法 (28.6%)	拡散接合	4.5
	超音波接合	4.5
	摩擦圧接	3.0
	常温圧接	3.0
	爆発圧接	2.3
	電磁圧接	1.5
	熱間圧接	1.5
	ガス圧接	4.5
	各種	3.8
機械的接合 (6.1%)	ボルト	1.5
	かしめ	0.8
	リベット	0.8
	各種	3.0
接着剤 (10.6%)		10.6
その他 (4.3%)		4.3

どうかを判断する決め手は継手が要求強度を満足できるかどうかである。異材溶接継手では、これは脆い金属間化合物が形成するかどうかにかかっている。金属間化合物とは互いの金属が一定の比率で結合して形成される化合物であり、一般に硬さが高く伸びがほとんどない脆い性質を有するものが多い。したがって金属間化合物が継手部に多量に形成すると、継手強度を維持することが困難となり、ひどいときには溶接終了直後に溶接部の冷却時の収縮応力により割れが発生することになる。これに対してお互いの金属が完全に溶け合っている合金は固溶体と呼ばれており、一般に機械的性質に優れており、異材溶接は容易である。異材溶接におけるこのような金属間化合物や固溶体の形成傾向は、状態図により判断することが可能である。

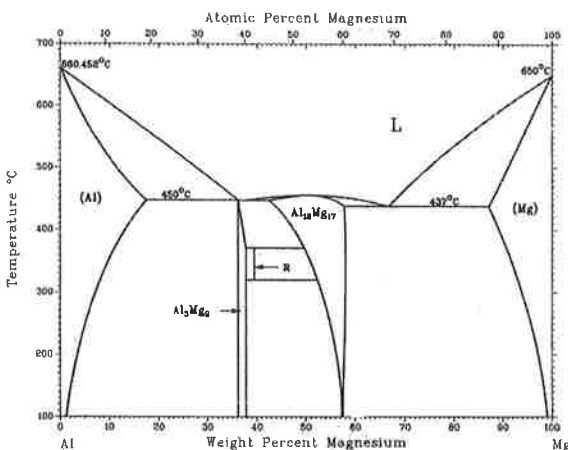
状態図は全率固溶体、2相分離及び金属間化合物形成の3タイプに分けられる。図2 (a), (b), (c) にそれ



(a) 全率固溶体タイプ Cu-Ni



(b) 2相分離タイプ Cu-Fe



(c) 金属間化合物タイプ (一部固溶体形成の場合) Al-Mg

図2 代表的な状態図

それぞれの代表的な状態図としてCu-Ni系, Cu-Fe系, Al-Mg系を示す⁶⁾。(a)の全率固溶体は全ての成分域で異材金属がお互いに完全に溶け合うタイプであり、基本的に異材溶接は容易である。2相分離タイプはお互いに混ざり合わずに、あるいはわずかにお互いの金属を固溶した

2つの固溶体に分かれるが、金属間化合物を形成しないためにやはり異材溶接は容易である。ただし、(b)に示すように鉄/銅継手のように融点差の大きい場合には、低融点側の金属(銅)融液が高融点側の金属(鉄)粒界に残留すると凝固割れを引き起こす危険性があるので、溶融量制御を行う必要がある。金属間化合物形成タイプはむしろ一般的であるが、(c)に示すように状態図によっては一方の金属あるいは両方の金属でそれぞれ比較的広い成分範囲で固溶体域を有するタイプがある。このような場合には溶接部の成分がちょうど固溶体域に入るようにお互いの金属の溶融量制御を行うことにより金属間化合物の生成を抑制することができる。表3は状態図と関連づけた異材溶接の可能性判定例を示す⁷⁾。

4 物理的性質の影響

物理定数とも呼ばれるが、融点の違いや熱伝導度の違いが大きすぎると溶接アークを用いてもお互いの金属を均一に溶融することが困難となってくる。例えば、鉄とアルミニウムでは融点はそれぞれ1,538°Cと660°Cであり、その差は実に878°Cに達するために、図3に示すように溶融はアルミニウム側で起こり、両者を均一に溶融するのは困難である。また銅の融点は1,083°Cであり、鉄より455°Cも低い。しかし、良く知られているように熱伝導度は394W/m・kときわめて大きく、鉄の73.3W/m・kの約5.4倍に達する。この高い熱伝導度のために融点と比較的に低いにも関わらず銅を溶融するのは困難となり、銅を相手材とした異材溶接を難しくする。

また、熱膨張係数の違いは変形や残留応力の発生要因となり、とくに金属/セラミックス接合ではその影響は大きい。

5 異材溶接に適した溶接プロセス

溶接プロセスをその接合原理により分類し、それぞれの長所、短所を含めた特徴を異材溶接の観点から見ると例えば表4のようなになる。もちろん個々のプロセスにより特徴に幅があるのは当然である。一般論として、継手強度を考慮せずに、単に異材継手形成のしやすさのみから判断すると、異材溶接に適したプロセスはろう付、固相接合および接着になる。しかし、継手強度や継手形状・サイズの自由度等を考慮するとアンケート結果からも分かるように溶融溶接への期待度は大きいのである。

溶融溶接について代表的なプロセスをまとめると表5のようなになる。もっとも一般的なアーク溶接では異材溶接は難しいことが多い。これは以下の理由による。

(1) すでに述べたようにエネルギー密度が比較的低い

表3 状態図と関連づけた異材溶接の可能性判定例（レーザー溶接）

	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

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

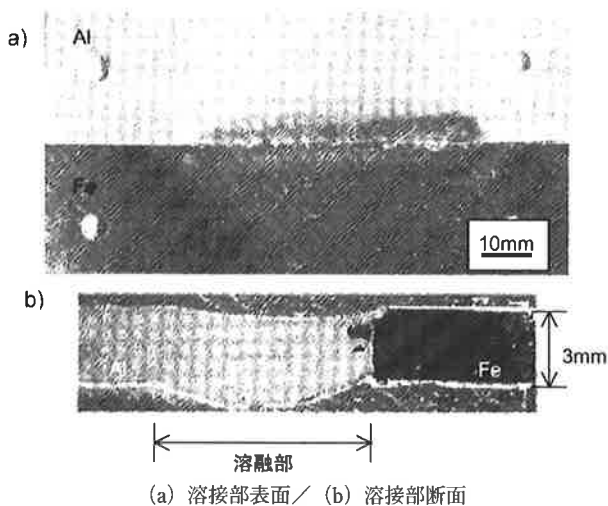


図3 ティグ溶接による鉄/アルミ異材溶接部の溶込み形状

ために物理定数の大きく異なる異材継手では均一溶融が難しい。

(2) 熱源のサイズが大きく、溶融幅が広いために、異材をそれぞれの程度溶融するのか、その溶融量制御が難しい。

(3) 入熱が大きいために冷却速度が遅くなり、これに

より金属間化合物の生成量が増加しやすい。

一方、同じ溶融溶接でも、高エネルギービームプロセスであるレーザー溶接や電子ビーム溶接ではエネルギー密度が十分に高いために上記の(1)~(3)の問題点はいずれも克服されており、これらの高エネルギービームプロセスは溶融溶接でありながらむしろ異材溶接に適したプロセスとも考えられる。欠点は高い装置コストである。

プラズマ溶接はアーク溶接と高エネルギービーム溶接の中間的な特徴を備えたプロセスであり、異材溶接プロセスとして今後見直されると考えられる。

ろう付は基本的に母材は非溶融であり、またろう材を介した接合のため、異材金属は直接的には接触しない。このために異材金属間の反応性や物理定数の相違の影響をあまり受けることなく接合が可能である。また、金属/セラミックスへの適用が可能であり、異材溶接に適したプロセスと言える。近年、従来の炉中ろう付とは異なるブレイズ溶接⁸⁾と言う新しい概念が提案され、さらにその適用範囲が広がることが期待されている。

固相接合は接合機構により拡散接合と圧接に分類される。拡散接合は金属の変形をほとんどともなわずに金属元素の相互拡散により継手を形成する。

表4 異材溶接の観点から見た溶接プロセスの特徴

接合 プロセス	特 性						
	プロセス温度	母材溶融状況	処理時間	母材の物理的 性質の影響	適用異材組合せ	継手形状・サ イズの自由度	継手組成制御
溶融溶接	高温 母材融点以上	母材溶融	短い	大	金属/金属	大	一般に困難 但し、プロセスによる
ろう付	低温～中温 母材融点以下	母材非溶融 ろう材のみ溶融	長い (炉中ろう 付)	小	金属/金属 金属/セラミックス 金属/複合材	中	容易 (ろう材)
固相接合	低温～中温 母材融点以下	母材非溶融	拡散：長い 圧接：短い	小	金属/金属 金属/セラミックス 金属/複合材	小	容易
接着	低温 母材融点以下	母材非溶融	短い	無し	全て可	大	容易 (接着剤)
機械的 接合	低温 非加熱	母材非溶融	短い	無し	金属/金属	小	容易 (リベット等)

表5 異材溶接の観点から見た溶融溶接プロセスの特徴

溶接 プロセス	エネルギー密度 (W/mm ²)	熱源サイズ	熱影響 の程度	異材溶融部 組織制御	装置コスト
ティグアーク (TIG)	～150	大 (10mm～)	大	困難	100～200万円
ミグアーク (MIG)	～150	大 (10mm～)	大	困難	100～200万円
プラズマ (PTA)	～1,000	中 (～5mm)	中	やや 容易	200～500万円
レーザビーム (LB)	10,000以上	小 (～1mm)	小	容易	1～2億円
電子ビーム (EB)	10,000以上	小 (～1mm)	小	容易	1～2億円

一方、圧接は接合界面における金属の塑性変形を積極的に利用して接合する方法であり、摩擦発熱を利用する摩擦圧接、火薬爆発時の爆圧を利用する爆発圧接、超音波の振動エネルギーを利用する超音波圧接、圧延技術を利用するロールボンディング等がある。いずれも異種金属が直接接触するために異材継手形成は金属間化合物の生成傾向に大きく依存する。しかし、加熱温度が溶融温度以下で比較的低温であることや、接合界面に中間層あるいはインサート材と呼ばれる第3の金属を挟むことな

どにより金属間化合物の生成量を抑制可能である。このため継手形状・サイズの制約や装置・施工条件の制約があるにも関わらず異材溶接への適用例は多い。

また、最近では摩擦攪拌接合が溶融溶接と同様の連続した継手を得ることができるために異材溶接法としても注目されている。また金属/ガラスの接合には陽極接合法⁹⁾があり、印加電圧により接合界面に発生する静電引力を利用した接合法であり、マイクロセンサの封止法として利用されている。

接着や機械的接合法は異材接合法として古くから知られている方法であるが、最近の新しいプロセスとして前者ではプラスチックを対象としたレーザ溶着法^{10, 11)}、後者では薄板金属の重ね継手を対象としたセルフピアシングリベットやクリンチングがある。

参考文献

- 1) 溶接学会編：溶接・接合便覧，丸善，(1990)，964.
- 2) 夏目：溶接技術，47-6 (1999)，98-104.
- 3) 横島：溶接技術，48-11 (2000)，103-109.
- 4) 中田：溶接技術，50-2 (2002)，64-68.
- 5) 中田，牛尾：溶接学会誌，71-6，(2002)，418-421.
- 6) T.B.Massalski：Binary Alloy Phase Diagram, 2nd edi., ASM, (1990) .
- 7) Welding Handbook, Vol.2, 8th edition, AWS, (1991) .
- 8) U.Draugelates et al:W.J., 81-3 (2002)，38-42.
- 9) 池内：溶接学会誌，71-6，(2002)，422-426.
- 10) 佐藤，早川，甲山：溶接技術，50-7 (2002)，67-69.
- 11) 坂井，深谷，中村：溶接技術，51-11 (2003)，75-80.

