

つなげないをつなぐ

最新 接合技術の可能性

第5回 異種材料接合(1) 基礎と課題 中田一博 ● 大阪大学 接合科学研究所 教授

状態図から異種金属の接合の可否を判断

近年、部材や製品の高機能化の要求に合わせて、使用する構造材料にもより高い材料特性を持つものや特別な機能を有するものが求められている。しかし、そのような材料は汎用材料に比べて材料コストや加工コストが高いという欠点がある。

そこで、高機能とコスト削減を同時に満たす材料として、2つ以上の材料を組み合わせる「マルチマテリアル」という考え方がものづくりの現場で広がっている。必要な機能を有する材料を局所的に配置するのだ。そのために必要な技術が、金属同士

もしくは金属と非金属を接合する異種材料接合技術である*1。

経済産業省の2013年度未来開拓研究プロジェクト「革新的新構造材料等技術開発」でも、新構造材料の開発と併せて異種材料接合技術の開発が主要課題の1つとして取り上げられている。

実は、異種材料接合技術は、必ずしも目新しいものではない。炭素鋼や合金鋼、ステンレス鋼などの異なる鋼種をアーク溶接などの熔融溶接を用いて接合する「異材溶接技術」として発達してきた歴史がある。こうした異材溶接は、鋼材、溶接材料の両面で技術開発が進んでおり、鉄鋼や造船などの重厚長大産業を

(a) 全率固溶体タイプCu-Ni系

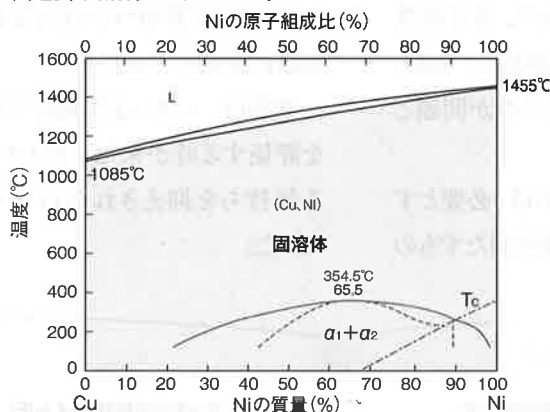
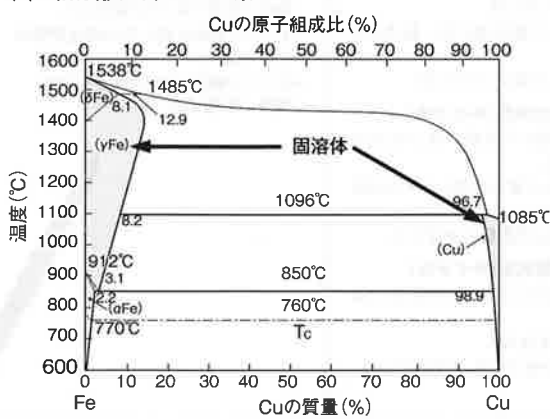
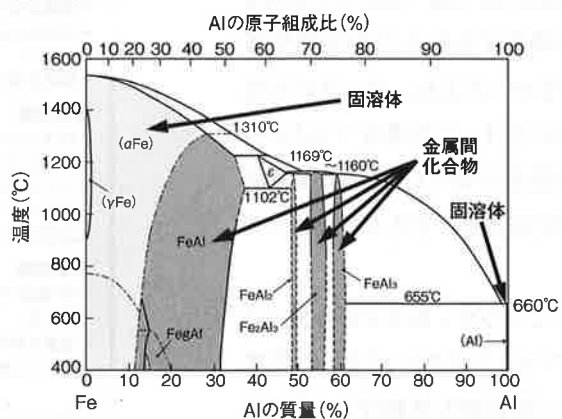


図1●金属の2元系状態図
広い組成範囲で固溶体ができるタイプ(a)、固溶体のできる組成が分かれるタイプ(b)、金属間化合物を形成するタイプ(c)に分けられる。金属同士の異種材料接合の可否はこの状態図からほぼ判断できる。

(b) 2相分離タイプFe-Cu系



(c) 一部固溶体+金属間化合物タイプFe-Al系



「『つなげない』を『つなぐ』最新接合技術の可能性」では、専門の技術者・研究者が、従来は難しいとされていた接合を実現する最新技術のメカニズム

や既存技術の基礎と新たな応用展開の広がりなどについて、6回にわたって解説します。

中心に既に広く利用されている。

一方、昨今注目されている異種材料接合技術は、より広範囲の材料間の接合を対象にしており、鉄鋼以外の非鉄金属や、金属以外のセラミックスや樹脂までを含めるものである。その応用範囲は、重厚長大産業にとどまらず、環境やエネルギー、医療・バイオ産業など、今後の新しい成長産業分野での適用が期待されている (p.120の「鋼とアルミを中心に金属同士の接合技術を求める声多し」参照)。

構造材料は一般的に固体材料からなり、化学構造や原子結合によって金属材料、セラミックス材料、高分子材料(樹脂)の3種類に大別される。ただし、近年は、新たな材料として複合材料や半導体材料、生体材料を加えることもある。

本稿では、異種材料接合の基本ともいえる異種金属同士の溶接の基礎と課題をあらためてみる。

金属間化合物か固溶体か

端的に言うと、構造材料の主力である金属同士の異種材料の溶接の可能性は、状態図を見ればほぼ判断できる。異なる種類の金属が接合できるかどうかは、接合部に形成されるのがもろい金属間化合物なのか、あるいは韌性に富む固溶体なのかでおおむね決まるからである。

金属間化合物とは2種類の金属元素が一定の比率で結合して形成

される化合物のこと。硬くて伸びがほとんどないもろい性質を有するものが多い。従って金属間化合物が接合継手部に多量に形成されると、継手強度を維持することが困難となる。場合によっては溶接終了後の冷却時の収縮に伴う引っ張り応力によって割れが発生することさえある。

これに対して、片方の金属がもう一方の金属に完全に溶け込んだ状態を固溶体と呼ぶ。一般に固溶体は延性や剛性といった機械的性質に優れており、固溶体を形成する場合は、異種材料接合が容易である。このような金属間化合物や固溶体の形成傾向は前述した通り、2元系状態図により判断できる。

2元系状態図は、基本的に全率固溶体、2相分離および金属間化合物形成の3タイプに分けられる。図1にそれぞれの代表的な状態図として、銅(Cu)-ニッケル(Ni)系、鉄(Fe)

-Cu系、およびFe-アルミニウム(Al)系のそれぞれの2元状態図を示す¹⁾。

図1(a)の全率固溶体は、全ての組成域でお互いの金属が完全に溶け合うタイプであり、基本的に異種材料同士でも容易に溶接できる。同(b)の2相分離タイプはお互いに混ざり合わずに、あるいは僅かにお互いの金属を固溶した2つの固溶体に分かれる。しかし、金属間化合物を形成しないため、やはり異種材料の溶接は容易である。

同(c)のタイプは、金属間化合物を形成する。実は異種金属の2元系状態図としては、むしろこちらの方が一般的だ。しかし、前述のようにこのタイプは異種金属間の溶接が難しい。特にFe-Al系のような系では、Al側での固溶体の存在領域がほとんどなく、広い成分範囲で幾つもの金属間化合物(この場合は4種類)を形成するため、異材溶接はほぼ不

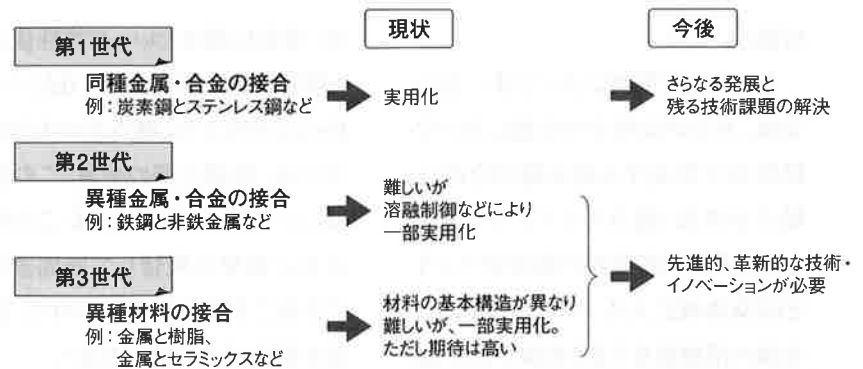


図2●異種材料接合の現状と課題

異種材料接合は大きく3世代に分類できる。異鋼種などの金属/合金同士の接合(第1世代)は実用化されている。鉄と非鉄や異なる非鉄同士などの異種金属の接合(第2世代)、および金属と樹脂や金属とセラミックスといった異種材料の接合(第3世代)は一部実用化されているが、今後の技術開発に期待が集まっている。

*1 ここでは、鋼種の異なる同種金属同士の接合も含めて異種材料接合とする。

可能といえる。

ただし、状態図によっては一方の金属、あるいは両方の金属において固溶体を形成する組成範囲を持つ場合がある(混合タイプ)。そのような2元系は、溶接部の組成がちょうど固溶体域に入るように、お互いの金属の溶解量をうまく制御すれば金属間化合物の形成を抑制できる。

ただし、異種金属の溶接の可否には、金属間化合物の形成傾向以外に、融点や熱膨張係数、熱伝導

率、電気伝導率といった物性値の差も関係する。例えば図1(b)に示すFe-Cu系のように融点差の大きい場合には、低融点側の金属(この場合はCu)が高融点側の金属(この場合はFe)粒界に残留して凝固割れを引き起こす危険性があるので、溶接量を制御する必要がある*2。

3世代に分類

金属同士の接合の可否は前述のように2元系状態図からある程度判

断できるものの、実用上は鋼やステンレス鋼、非鉄合金などの合金を接合するため、他の条件も加味してはならない。加えて、冒頭に述べたように、昨今はセラミックスや樹脂と金属との接合も求められている。

そこで、現在の異種材料接合を実用化の程度に基づいて分類し、現状のレベルと今後の課題を考えてみると、異種材料接合技術は、大きく3世代に分けられる(図2)。

第1世代は、同類の金属・合金同

鋼とアルミを中心に金属同士の接合技術を求める声多し

異種材料接合に対する市場の期待は高い。少し古いデータだが、2000~2001年の異種材料溶接に関する新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のアンケート調査などからは、金属同士の他に金属とセラミックスなどへの期待の高さがうかがえる⁽¹⁾⁽²⁾。具体的には、将来的に必要な異材溶接継手の材料の組み合わせとして、約55%が金属同士を挙げている。それ以外の材料としては、金属とセラミックスが約25%、金属と樹脂、金属と複合材がそれぞれ約7%となっている(図)。

表Aはそれぞれの材料の組み合わせの内訳である。金属同士では約63%が鉄鋼(ステンレス鋼を含む)と他の金属とを挙げている。次いでアルミニウム(Al)と他の金属との組み合わせが、鉄鋼を含むと約46%となり、この2つの金属が、異材溶接の相手として高く期待されていることが分かる。注目すべきは、鉄鋼とAlが約28%と最も多いこと。その背景には、自動車などの輸送機器や、高齢化対策における福祉器具の軽量化などがある。

この他、銅(Cu)およびチタン(Ti)が組み合わせの有力な対象に挙げられている。Cuは高い熱伝導特性と電気伝導性を生かしてヒートシンク材や放熱材、導電部材として利用したいとの狙いがある。一方、Tiは海水への耐食性に優れることから、造水プラントや海上構造物などへの適用の期待が掛かっている。

メインは溶融溶接

同じくNEDOの調査によれば、将来的に望まれる異材溶接法としては、コストや継手の自由度などから溶融溶接法に対する期待が最も大きい。ろう付けを含めると、約50%が将来的に利用したい異材接合法として古典的な溶融溶接法を挙げている(表B)。新しい異材溶接法としては、摩擦攪拌接合(FSW)やレーザー溶接、電子ビーム溶接といった高エネルギービーム溶接法が挙げられている。

表A、Bの調査結果を現状と比較してみると、当時は実現困難だったが将来に期待する異材接合技術として挙げたもののうち、幾つかは実用段階に到達している。例えば、鉄鋼とAl合金の異材溶接では、FSWを用いた自動車部品への実用化例が報告されている⁽³⁾。

一方、樹脂あるいは炭素繊維強化樹脂(CFRP)と金属(特にAl合金)との直接接合は、普及段階とは言えないものの自動車関係を中心に最近特に注目されている。射出成形を用いるもの、レーザーを用いるもの、FSWなど、新しい連続接合による異材接合法が提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

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」

*2 融点は、Cuが1085℃、Feが1538℃である。ただし、一般に炭素鋼の融点は1538℃よりも低い。

士の組み合わせであり、既に技術的に確立されて多くの構造物に適用されている。例えば、鋼種の異なる鉄鋼材料間やAl合金間の組み合わせ

などである。

一方、金属同士であっても、異種金属間の組み合わせには接合が難しいものが多い。これらは第2世代に分類できる。鉄とアルミニウムや鉄とチタン(Ti)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得る接合技術の開発が進んできている。

これに対して、金属と樹脂(高分子材料)間の接合のように材料構造や原子構造が異なる材料間の異種

材料接合が、第3世代である。例えば金属と炭素繊維強化樹脂(CFRP)との接合などがこれに該当する。これらの接合には、新しい発想が求められ、その接合技術の進展に大きな注目が集まっている。

今回は、各世代ごとに技術の現状と課題、今後の展望について詳しく解説する。

参考文献

1) T.B.Massalski, Binary Alloy phase Diagrams, 『ASM International』, 1990.

「最新接合技術の可能性」連載内容	
第1回	鋼板を高純度で溶接できるクリーンMIG(1)
第2回	鋼板を高純度で溶接できるクリーンMIG(2)
第3回	摩擦撈拌接合(1)基礎と進化
第4回	摩擦撈拌接合(2)最新技術と今後の展開
第5回	異種材料接合(1)期待と現状
第6回	異種材料接合(2)今後の展開

『平成12年度調査報告書(NEDO-ITK-0009)』, pp.68-82, 2001年3月。

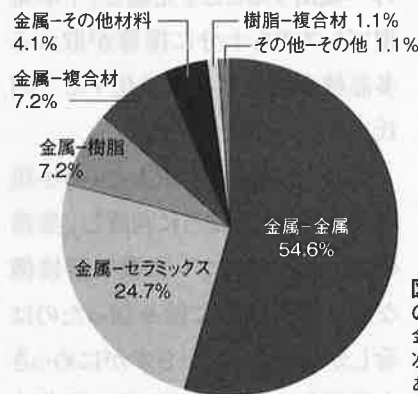
ii) 中田一博, 牛尾誠夫, 「異材溶接・接合のニーズと今後の技術開発の動向」, 『溶接学会誌』, 71巻6号, pp.418-421, 2002.

iii) 中田一博, 「異材接合への期待とその展望」, 『溶接技術』, 50巻2号, pp.64-68, 2002.

iv) 近岡, 「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」, 『日経ものづくり』, 2012年10月号, pp.18-19.

v) 木崎ほか, 「溶接で樹脂も固定」, 同上, 2011年6月号, pp.52-53.

vi) 近岡, 「設計をここまで変える 金属・樹脂接合」, 同上, 2011年11月号, pp.66-70.



図●将来必要と考えられる異種材料接合の組み合わせ
金属同士の接合に対する要求が最も大きい。次いで大きいのは金属とセラミックスの接合である。NEDOの報告書を基に本誌が作成。

表A●将来的に必要と考えられる金属同士の異種材料溶接の組み合わせ
鉄鋼とAlの接合を求める声が多い。NEDOの報告書を基に本誌が作成。

金属の組み合わせ		
鉄鋼 (ステンレス鋼を含む) 62.6%	Al	27.9%
	鉄鋼	9.7%
	Cu	6.7%
	Ti	5.7%
	Mg	1.0%
	その他	11.6%
	Al 18.3%	Cu
Mg		2.9%
Ti		1.9%
Al		1.9%
その他		5.8%
Cu 7.7%	Cu	1.0%
その他	6.7%	
Ti 3.9%	Ti	1.0%
その他	2.9%	
その他	その他	7.5%

表B●将来使用したい異種材料接合法
幅広い材料に対応できるアーク溶接やレーザー溶接などの溶融溶接を望む声が多い。NEDOの報告書を基に本誌が作成。

接合法			
溶融溶接法 41.3%	アーク溶接	16.2%	
	レーザー溶接	12.9%	
	抵抗溶接	6.8%	
	電子ビーム溶接	3.8%	
	ガス溶接	0.8%	
	その他	0.8%	
	ろう付け	9.1%	
固相接合法 28.6%	拡散接合	4.5%	
	超音波接合	4.5%	
	ガス圧接	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%	
	その他	3.8%	
	機械的接合法 6.1%	ボルト締め	1.5%
		かしめ	0.8%
リベット		0.8%	
その他		3.0%	
接着剤	10.6%		
その他	4.3%		

中田一博(なかた・かずひろ): 1977年に大阪大学接合科学研究所助手となり、助教授を経て2002年から同大教授。2009年4月~2013年3月は同研究所長。専門は、材料工学および溶接・接合工学、表面改質工学。