

異材溶接の基礎とその展開

第2回

—アルミニウムと鉄の溶融溶接—

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

1 はじめに

前稿¹⁾で述べたように、異材溶接に関するアンケート調査結果により、今後必要な異材組合せとして、鉄/アルミニウムが特に注目されていることが分かった。

その用途は、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。また、プロセスの観点からはろう付を含む溶融溶接法が継手形状の自由度やコスト面からその開発が望まれている。

しかし、後で述べるように鉄/アルミニウムの溶融溶接継手の形成は困難とされている。このため現在実用化されているプロセスはいずれも固相接合法によるものであり、中でもロール圧延法、爆着法、摩擦圧接法等が信頼性のある鉄/アルミニウム異材継手を形成できる方法

として知られている。

本稿ではまだ実用化には至っていないが、鉄/アルミニウムの直接溶融溶接に関する過去の検討例と最新の試みについて紹介する。

2 鉄/アルミニウム状態図

図1に鉄/アルミニウム2元系状態図を示す。典型的な金属間化合物形成型の状態図であり、かつ両者の融点差も極めて大きく、異材接合が困難な状態図である。アルミニウムへの鉄の溶解度はごく僅かであり、アルミニウム側では鉄はアルミニウムと反応して金属間化合物である Al_3Fe 、 Al_5Fe_2 、 Al_2Fe を形成する。これらはいずれも固くて(HV700~800)脆いものである。一方、鉄側では、アルミニウムは鉄に多く溶解して固溶体を形成する。さらに金属間化合物である $FeAl$ は広い合金組成範囲を有

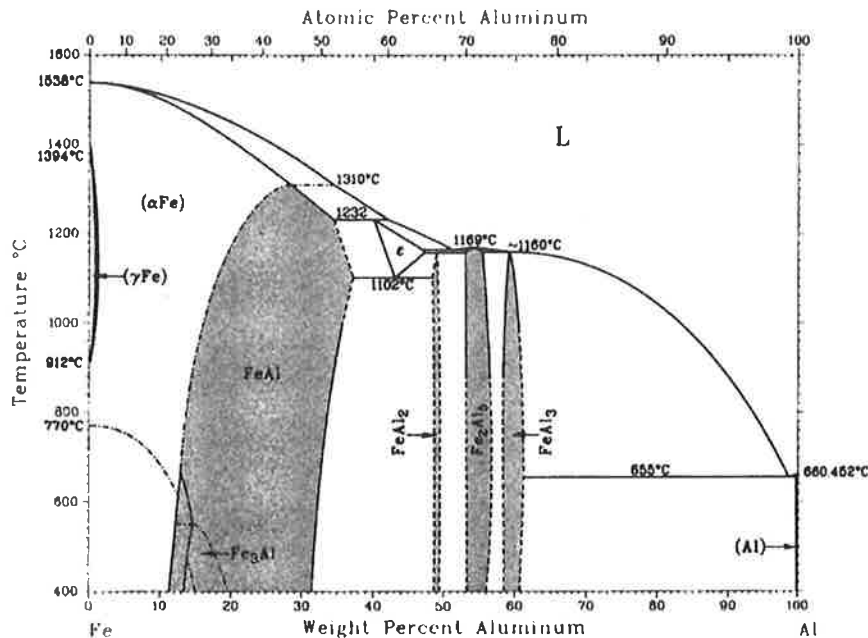


図1 鉄/アルミニウム2元系状態図

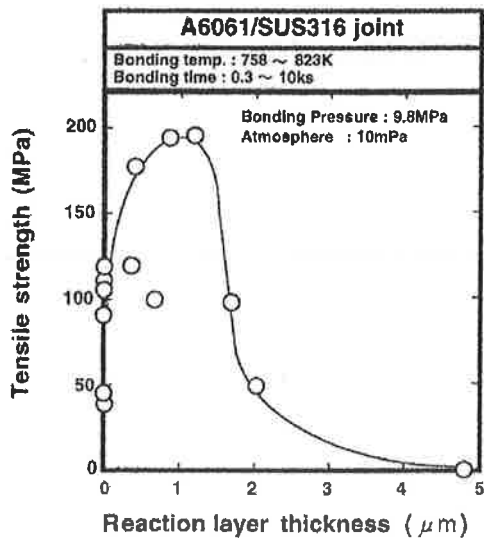


図2 アルミニウム合金6061/ステンレス鋼SUS316異材継手の引張強さに及ぼす界面反応層厚さの影響(拡散接合)²⁾

しており、耐熱構造材料としても注目されているものである。このため状態図からは異材溶接金属の組成を鉄側の固溶体に合わせることで異材接合が可能になるようにも考えられる。がしかし、鉄とアルミニウムを接触させて加熱すると界面には脆い Al_3Fe 、 Al_5Fe_2 の金属間化合物が優先的に形成される。このため鉄/アルミニウムの異材溶接は容易ではない。

すでに述べた実用化されている固相接合継手でも同様な金属間化合物が形成されている。しかし、固相接合では接合界面の金属間化合物層の厚さを制御して一定の厚さ以下に抑制することができ、例えば、継手引張試験では金属間化合物層で破断せずにアルミニウム母材で破断する異材継手を得ることができる。

図2²⁾は拡散接合で得られた異材継手における金属間化合物層厚さと継手強度との関係である。厚さの減少とともに強度は明らかに増加し、1~2 μm で最高値を示すことが分かる。なお、化合物層が形成されないのに強度が低下するのは界面の酸化皮膜の存在等により十分な界面反応が行われなかったためである。これに対して溶融溶接では継手が高温にさらされ、また反応温度の制御も困難なために一般にこの界面層の制御は難しい。このため金属間化合物層は厚く成長し、その部分で破断するために十分な強度を得ることは困難となる。しかし、このことは溶融溶接においても金属間化合物層の厚さ制御ができれば鉄/アルミニウムの異材溶接ができる可能性を示している。最近の溶接プロセスの進歩により、溶接入熱の制御が高精度で可能な溶接プロセスが開発されてきており、これを受けて鉄/アルミニウムの異材溶融溶

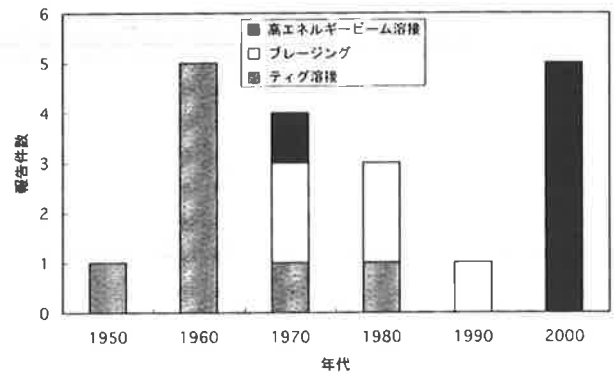


図3 年代別の各プロセスによるアルミニウムと鋼の異材接合に関する研究報告数³⁾

接の試みが行われ、一定の成果が得られてきている。

3 溶融プロセスによる鉄/アルミニウム異材接合に関する研究例

図3は溶融プロセスによる鉄/アルミニウム異材接合に関する研究報告数を年代ごとの推移を示したものである³⁾。全体として件数は少ないものの、1950年から1980年代においてはティグ(TIG)溶接による検討が行われているが、時代とともに減少し、1990年代ではほとんど見られなくなっている。これは、継手信頼性の問題と当時はまだ鉄/アルミニウム異材接合に対するニーズがそれほど大きくなかったことが関係しているであろう。

しかし、2000年代に入ると再び研究報告が急増している。溶接プロセスとして高エネルギービームであるレーザーが主として用いられていることが大きな特徴である。すでによく知られているように、レーザーは電子ビームとともに入熱制御性に極めて優れた熱源であり、レーザーを用いることにより接合界面の金属間化合物層厚さの制御の可能性が出てきたこととレーザー加工装置そのものが一般化してきたこと、さらに、自動車産業において軽量化の観点から鉄/アルミニウム異材接合に対する強いニーズが発生していることが相乗的に関係していると思われる。

4 アーク溶接による過去の検討例

アーク溶接としてティグ溶接が用いられており、1960年代に集中的に行われている⁴⁻¹¹⁾。鋼に関してはAlやZnなどを表面に被覆しなければ健全な継手が得られないため、ほとんどすべての研究において表面処理が施されている。また、母材の鋼は溶かさないとという前提があり、この方法はアークブレイズ溶接であるともいえる。

写真1⁹⁾に代表例として板厚3.2mmの軟鋼板に40度の

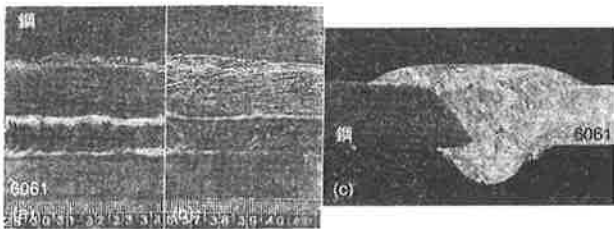


写真1 AlまたはZnを被覆した鋼と6061合金の異材継手の外観および断面マクロ組織⁹⁾

開先を取り、それぞれAlおよびZnを被覆した後に、6061合金板と4043溶加材で突合せ溶接した場合の溶接部の外観と断面の一例を示す。溶加材は5356よりも4043の方が適している。継手強度は100から170MPa程度の値が得られている。破断は主に溶接部界面で起こり、軟質アルミニウム合金では母材破断もあるが、硬質材では母材破断を起こす継手は得られない。

継手の機械的性質に及ぼす軟鋼の被覆層の影響は大きい¹⁰⁾。被覆金属の種類や被覆方法よりも被覆の良否の方がより重要であり、鋼表面との密着性の良い被覆層であればかなりの継手強度が得られる。被覆のしやすさと耐食性の点で、ZnもしくはAlの溶融めっきがもっとも適しているとされている。また、継手の強度には溶接金属の大きさおよび溶接金属と被覆金属の接触面積が大きく影響する。重ね継手では表1¹⁰⁾に示すように、アルミニウムと鋼のいずれが上板になるかによって溶接金属と鋼表面の被覆金属との接触面積が大きく異なるため、強度にかなりの違いがでる。

また、パイプ継手のアルミニウム／鋼異材溶接も検討されており、報告例は少ないものの、板材と比較すると良好な継手を得ることが可能である^{6, 9, 11)}。杉山⁹⁾は外径22mm、肉厚2mmのA1100アルミニウム管とZn被覆軟鋼管の1260および4043溶加材による継手の引張強さと耐圧試験の結果について、引張試験ではどちらの溶加材を用いてもアルミニウム母材で破断し、耐圧試験ではアルミニウム母材が変形する程度の圧力に対しても溶接部が十分耐えうると報告している。写真2⁹⁾に試験後の継手の外観写真を示す。

以上、ティグ溶接による検討結果で得られた重要な留意点は以下ようになる。

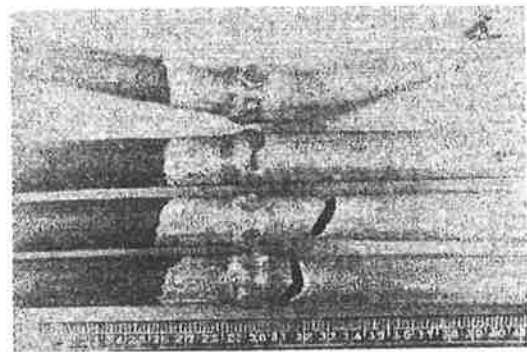


写真2 耐圧および引張試験後の純アルミニウムとZn被覆軟鋼の異材継手の外観⁹⁾

- ・鋼の開先表面にはAlもしくはZn等の被覆材が必要であり、密着性に優れた良好な被覆状態であることが望まれる。
- ・鋼を溶融しないように溶接条件、アーク狙いを設定する必要がある。
- ・継手強度向上のためには鋼と溶接金属との接触面積を確保することが重要である。

5 高エネルギービーム溶接による検討例

高エネルギービーム溶接である電子ビームおよびレーザービーム溶接を用いて作製したアルミニウム合金と鋼の引張およびせん断強さを表2³⁾(次ページ)にまとめて示す。

(i) 電子ビーム溶接

電子ビーム溶接では細く絞ったビームの狙い位置を変化させることにより溶融部の組成制御が可能である。例えば、A1050アルミニウムと鋼との異材継手において溶融比率を種々変えると、Fe中にAlが32～62%の組成範囲の溶接金属部ではFeAl₂、Fe₂Al₅、FeAl₃などの化合物が形成し、非常に脆くなり、割れが発生する。しかし、30%Al以下ではα-Fe固溶体、65%Al以上ではAl+FeAl₃共晶組成となる溶接金属が得られ、割れは発生せず、図1の状態図に沿った結果を得ることができる¹²⁾。しかし、それでも母材と溶接金属部との境界部では金属間化合物層が生成する。薄いAg材を突合せ界面に挟んでビーム狙い位置をFe/Ag界面としてFeとAlが直接接触しないよ

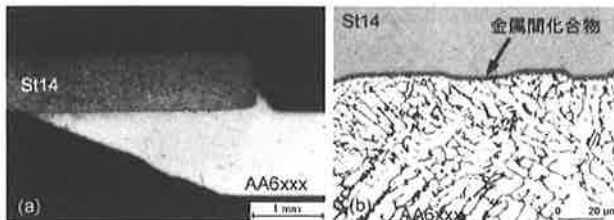
表1 ティグアーク溶接によるアルミニウム合金板と鋼板の重ね異材接合¹⁰⁾

Al	Fe	表面処理	溶加材	溶接電流 (A)	溶接速度 (cm/min)	上板	引張せん断強さ (MPa)	破断位置
A5052	steel	Al	4043	80	16	steel	43.1	界面
						A5052	145.0	界面

引張せん断強さ=破断荷重/母材断面積

表2 高エネルギービームを用いて作製したアルミニウム合金と鋼の引張およびせん断強さ³⁾

方法	Al	Fe	Insert	引張強さ (MPa)	破断位置	文献
EBW	A1050	鋼	Ag	118-157	Al母材	松田
YAG-LBW	A5052	SPCC	—	44		片山
YAG-LBW	AA6xxx(1mm)	steel	AlSi ₁₂	171	Al母材	Wager
YAG-LBW CO ₂ -LBW	Al(240Mpa)	steel	—	166-188 144-149		Kreimeyer
LRB	A5052	SPCC		22.9-55.9	(せん断)	杓名

写真3 AA6XXX/St14継手の断面マクロおよび界面近傍のミクロ組織¹³⁾

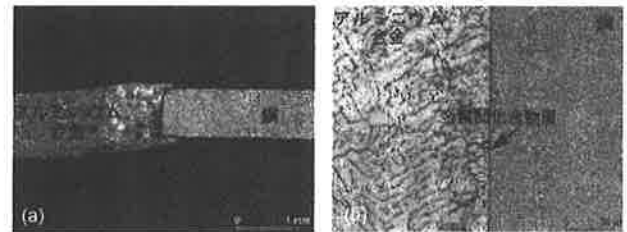
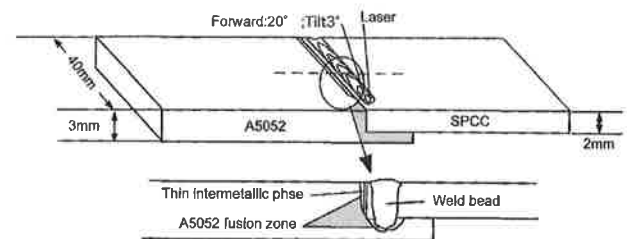
うに溶接することにより、引張試験でアルミニウム母材破断を示す良好な異材継手が得られる¹²⁾。状態図で見るとAgはFeとは2相分離型で金属間化合物を形成しない。またAlとは広い組成範囲で共晶反応を示す。このような金属はインサート材と呼ばれ、両者を分離する中間層として異材接合ではしばしば用いられる。

(ii) レーザ溶接

レーザー溶接はアーク溶接と同様に大気中で適用が可能であり、かつ電子ビームに近い高エネルギービームである。最近、このエネルギー制御性に優れたレーザー溶接による新しい異材溶接の試みが成果を上げている。

(a) 重ね継手

Wagerら¹³⁾はAlSi₁₂溶加材を使用したYAGレーザーを用いた6000系アルミニウム合金と低炭素鋼St14鋼の重ね継手の作製を行っている。写真3 (a) および (b) に継手の断面マクロおよびミクロ組織を示す。溶接界面には約3 μmの化合物層が生成するが、その継手強度は平均171MPaであり、疲労強度も良好であった。この継手ではアルミニウム合金の上に鋼薄板が重ねられ、レーザービームは焦点外しにより適度とそのビーム径を大きくし、重ねエッジ部に照射する。これにより鋼は熔融せずに加熱される(約1,200℃)にとどまり、一方、重ね部のアルミニウム合金は低融点のために鋼からの熱伝導のみでも熔融する。継手ギャップ制御のために特殊なローラにより押さえられ、また溶加材の使用も有効である。アーク溶接に比して冷却速度が格段に速いために界面の金属間化合物層の成長を抑制することができる。また、半導体レーザーはビーム径を細く絞ることが難しかったが、この

写真4 レーザ溶接によるAl/Steel異材継手の断面マクロおよびミクロ組織¹⁴⁾図4 レーザによるアルミニウム合金/SPCC異材溶接による重ね・突合せ食い違い継手の模式図¹⁵⁾

ような継手に対してはその欠点は問題にはならず、かつ、装置コストやYAGレーザーよりもアルミニウムに対するレーザー吸収特性が良好なことを加味すると、むしろ有効なプロセスとなる。

(b) 突合せ継手

Kreimeyerら¹⁴⁾はYAGおよびCO₂レーザーを用いて240MPa級のアルミニウム合金と鋼の突合せ継手を作製した。断面マクロおよびミクロ組織を写真4 (a) および (b) に示す。鋼を溶かすことなく溶接することにより界面の金属間化合物層厚さを1~2 μmに抑えることにより、その継手強度はYAGで166~188MPa、CO₂で144~149MPaと良好な値を得ている。

(c) 食い違い継手(重ね・突合せ複合継手)

片山ら¹⁵⁾は良く絞られたYAGレーザーを用いる方法で、図4に示すA5052アルミニウムと工業用冷間圧延鋼板(SPCC)の食い違い突合せ開先を提案した。写真5 (a) ~ (c)の断面マクロ組織に示すように割れの無い良好な継手が得られている。表面の突合せ部ではレーザーはアルミニウム合金に当たらないようにSPCC側に照射し、

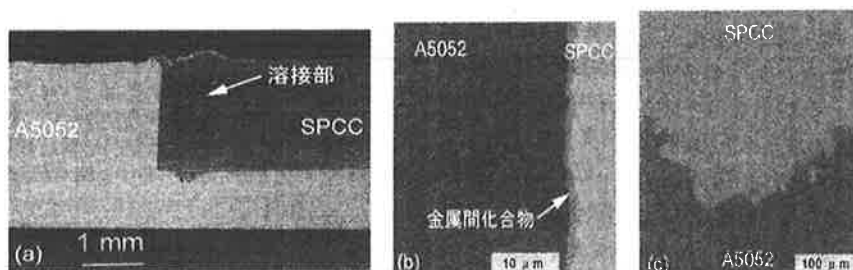


写真5 A5052/SPCC重ね・突合せ食い違い継手によるYAGレーザー溶接部の断面マクロ組織 (a) およびそのSEM組織 (b) 突合せ部, (c) 重ね部¹⁵⁾

かつ裏面側の重ね部では下板のA5052合金板の溶融を制御するように溶接条件を選定する。SPCC側の突合せ界面には熱伝導で溶融したアルミニウム合金との反応のために金属間化合物層が生成するがその厚さは $2\ \mu\text{m}$ 以下と薄く、かつ、重ね部では鉄溶融部がアルミニウム側に巻き込まれるためにこれが一種のアンカー効果を発揮し、これらの相乗効果で引張剪断強度3500N（試片幅40mm）以上で破断する良好な継手が得られている。

(d) レーザロール圧接重ね継手

また、杓名ら^{16, 17)}はA1050およびA5052アルミニウム合金とSPCCのレーザロール圧接重ね継手を作製し、その継手のせん断強さはA1050で15~37MPa, A5052で23~56MPaを得ている。

6 おわりに

鉄/アルミニウムの直接異材溶接はまだ実用化段階にはないが、1960年代の経験で前処理として鉄表面へのAlやZn被覆が有効なことが明らかにされており、これに最近の高エネルギービーム溶接、中でもレーザー溶接の利用により接合界面の金属間化合物層の制御が可能となってきたことをうまく組み合わせると、より高いレベルの異

材継手を得ることができるのではないかと考えられる。なお、高エネルギービーム溶接ではこのプロセス特有の開先精度に対する要求解決は、アルミニウム表面酸化皮膜の除去法とともに大きな課題である。

参考文献

- 1) 中田：溶接技術, 52-9 (2004), 141.
- 2) 黒田ら：溶接学会論文集, 17-3 (1999), 484.
- 3) 助金属系材料研究開発センター：「溶融プロセスアルミ/鋼異材接合技術に関する調査研究」平成14年度成果報告書
- 4) G.A.Belchuk：Welding Production, 1961, 14.
- 5) G.A.Belchuk：Svar.Proiz., 1963, 3.
- 6) D.R.Andrews：British Welding Journal, Dec, 1962, 650.
- 7) D.M.Rabkin and V.R.Ryabov：Automatic Welding, 1962, 1.
- 8) V.R.Ryabov et al: Svar.Proiz, 4, 1971, 9.
- 9) 杉山：溶接学会誌, 47 (1965), 408.
- 10) 今泉：軽金属溶接, 22 (1984), 310.
- 11) M.A.Miller and E.W.Mason：Welding Journal, July 1956, 323s.
- 12) 松田：溶接技術, 11, 1974, 15.
- 13) F. Wagner, I. Zerner, M. Kreimeyer, T. Seefeld and G. Sepold: Proc. ICALEO 2001, Oct. 2001, section C, 1301.
- 14) M. Kreimeyer, S. Sepold, F. Wagner, Bremen, B. Criqui and M. Joly: Schweißen and Schneiden 2002, 2002, DVS220, 256.
- 15) 片山ら：溶接学会全国大会講演概要集, 67, 2000-9, 248.
- 16) 杓名ら：溶接学会全国大会講演概要集, 69 (2001), 92.
- 17) 杓名ら：溶接学会全国大会講演概要集, 71 (2002), 40.