

Fe/Alティグ溶接部および摩擦攪拌点接合部における金属間化合物の挙動

日大生産工 (院) ○三富 均
日大生産工 (非常勤) 長谷川 利之
日大生産工 大久保 通則

1. 緒言

鋼材とアルミニウム合金の異材接合は、現代の構造物の大型化、多様化、そして軽量化に大きな効果をもたらす技術として、期待が増している。最近の研究報告によれば、鋼とアルミニウム合金の異種材料に対して、レーザ溶接の研究¹⁾や摩擦攪拌接合および固相拡散接合²⁾を適用した研究が行われ、その溶融現象と溶接継手の機械的性質を解明している。特に固相拡散接合においては150MPa程度の引張強さを得ているが、いまだに研究レベルである。

著者らにおいても、板厚1.0mmの鋼とアルミニウム合金の重ね異材継手にティグ溶接を適用した研究³⁾を行い、Fe/Al間の金属間化合物の発生と著しい硬さの関係性について明らかにしてきた。しかし、まだ異材溶接技術は確立されていないのが現状である。そこで本研究では、ティグ溶接を用いて鋼とアルミニウム合金との異材溶接を行い、筆者らがこれまで明らかにしてきたFe/Al間の金属間化合物の発生と著しい硬さの関係性の組織制御を基に、Fe/Al間の金属間化合物の挙動について検討し報告をする。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材はJIS G 3141 およびJIS H 4000に準拠した板厚1.0mmの冷間圧延鋼板SPCC-SD (以下、SPCCと略す) およびAl-1.03%Mg-0.63%Siアルミニウム合金A6061-T6 (以下、A6061と略す) を使用した。供試材の寸法は200mm^L × 100mm^w × 1mm^t と100mm^L × 50mm^w × 1mm^tの2種類を用いた。供試材の化学組成をTable 1, 予備実験で得られた母材の機械的性質をTable 2に示す。

2.2 実験方法

予備実験において上板にA6061, 下板に SPCC として行った場合, 上板のA6061が完全に溶融して

しまい, 溶接が困難であった。そこで継手形状は上板にSPCC, 下板にA6061を配置した継手で行った。試験には, 供試材をリユーター (エメリー紙, #180 程度の粗さ) により酸化被膜の除去後, プタノンで脱脂・洗浄し, 溶接を実施した。

2.2.1 ティグ溶接

金属間化合物の挙動を簡易的に観察するために2種類の実験を試みた。

1つ目の方法は上板にSPCC, 下板にA6061として重ね幅30mmを設け, 溶接速度を300mm/minに一定として, 溶接電流 (以下, アーク熱と略す) を120 ~ 150Aの範囲で変化させた (以下, 線溶接と略す)。

2つ目の方法には上板にSPCC, 下板にA6061を3枚重ね合わせた, 4枚の重ね継手溶接で行った。重ね幅は上板のSPCCと下板のA6061の間を30mmとし, アーク熱を170 ~ 215Aの範囲で変化させ1点に30秒間放出させた。これによりSPCCのFeを意図的にA6061に混入させた (以下, 点溶接と略す)。溶接装置は最大溶接電流300Aのティグ溶接機に最大溶接速

Table 1 Chemical compositions of base metals.

SPCC-SD				
Elements (mass%)				
C	Si	Mn	P	S
0.048	0.01	0.18	0.20	0.016

A6061-T6							
Elements (mass%)							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.63	0.44	0.29	0.03	1.03	0.24	0.01	0.04

Table 2 Mechanical properties of base materials.

Materials	Tensile strength		Hardness HV0.05
	σ (MPa)	ε (%)	
SPCC-SD	339	43	118
A6061-T6	285	13	85

Behavior of Intermetallic Compound in Fe/Al Welds by GTA and FSSW

Hitoshi MITOMI, Toshiyuki HASEGAWA and Michinori OKUBO

度900mm/minの自動送り装置を併合させたものである。アークは供試材に対して、垂直に発生させ、電極にはφ2.4mmの純タングステンを使用した。タングステン先端部を常時、鈍角に研磨したものをを用いた。シールドガスにはArガス(100%)を25l/minの流量で供給し、H、O、N等の不活性ガスの浸入を防止した。なお、溶加剤は使用しなかった。

2.2.2 摩擦攪拌点接合

一般に、回転速度が大きすぎるとショルダー部が接触する供試材表面への入熱が攪拌内部よりも大きくなってしまふ。そのため塑性流動のバランスが悪くなり欠陥が発生する。

そこで摩擦攪拌点接合(以下、FSSWと略す)の接合条件は、ツール回転数を100~1000rpmの範囲で変化させた。実験装置には出力2.2kW、最大回転数2000rpmの低出力装置を用いた。接合に使用したツール材は高炭素鋼であり、ショルダー径10mm、プローブ径3mm、プローブ長さ1.8mmの形状を用いた。なお、摩擦攪拌点接合は現在実験中である。

2.3 試験方法

得られた継手に対して、ビード外観観察、継手横断面の組織観察、硬さ試験および引張せん断試験を実施し評価した。各試験に使用した試験片は時効硬化を考慮して72時間以上経過した試験片を用いた。

試料作製には、得られた溶接継手に対して垂直に切断、手研磨(#120~#1200)およびバフ研磨し、化学腐食液で観察面をエッチング後、光学顕微鏡による組織観察を行った。なお、腐食液には、0.5%HF水溶液、3%ナイトールおよびkeller試液の3種類を用いて金属間化合物の種類と挙動を推察した。

硬さ試験はマイクロビッカース硬さ試験機(荷重0.49N、保持時間15s)を用いて、溶接方向に対し垂直に溶接部、熱影響部および母材にまたがって測定した。測定した間隔は0.2mmである。

溶接継手部の引張せん断試験には、線溶接の試験片のみ余盛りの除去は行わずJIS Z 2202 5号を準拠として試験片を作製した。平行部の形状は60mm^L×25mm^w×2mm^tである。試験片は溶接方向に対して直角に採取し、インストロン型試験機を用いて引張速度3.0mm/min、室温にて実施した。点溶接の引張せん断試験には、3種類の方法を

Table 3 GTA conditions.

Welding current (A)	Line welding	Spot welding
100	×	-
110	×	-
120	○	-
130	○	-
140	○	-
150	○	×
160	×	×
170	×	○
180	-	○
190	-	○
200	-	○
210	-	○
220	-	○
230	-	×
240	-	×
250	-	×

○: Good

×: Bad

用いた。それは上板をSPCC 1枚だけの状態、SPCC 1枚とA6061 1枚の計2枚の状態、SPCC 1枚とA6061 2枚の計3枚の状態である。

3. 実験結果および考察

3.1 溶接条件の選定とビード外観観察

予備実験により選定した溶接条件をTable 3に示す。アーク熱の増加にともない、ビード幅の増大はもちろん、割れや溶込み不足およびビード外観の粗悪などの溶接欠陥が認められた。線溶接では主に上板のSPCCの溶込み不足、点溶接の場合では溶融地の周縁から中心部に向かって割れの進展が肉眼で確認できた。FSSWは接合表面にツール挿入時の圧痕が観察され、ティグ溶接の割れは認められないが、ツールの損傷があった。

そこで本研究では、予備実験により選定したTable 3に示す○印の範囲で実験を試みた。

3.2 溶接部における組織

溶接方向に対して垂直な横断面における線溶接(a)、点溶接(b)溶接部の組織写真をFig.1に示す。著者らの研究³⁾によればEPMAを用いて金属間化合物の推定を行った場合、上板のSPCCと下板のアルミニウム合金との間に約20μmの極めて薄いFe/Al層が形成された。その層からはFeAl₃の発生が認められ、マイクロビッカース硬さ試験機で硬さ測定を

したところ、400~600HVを呈していることが明らかにされている。本研究においては、0.5%HF水溶液でエッチングにより腐食された色調で検討したところ、暗褐色または淡褐色を示していることから $FeAl_3$ または $FeAl_6$ であると推察されるが、これらが金属間化合物であるかは現在も検討中である。またこれらの組織は本研究範囲内であるアーク熱に関係なく、線溶接および点溶接の板厚方向に向かって発生している。

3.3 点溶接における溶接部の割れ

肉眼で確認することができるほど、形成された溶融地周縁から中心部方向に向かって割れが発生し、進展していることが認められた。アーク熱の増大により形成された溶融地の面積は、最少で約120mm²、最大で350mm²程度であった。割れの発生はこの溶融地の面積の拡大に比例して増加する傾向がある。総割れ長さについて調査したところ、溶融地の面積が最少であるもので約24.2mm、最大では69.4mm程度であった。

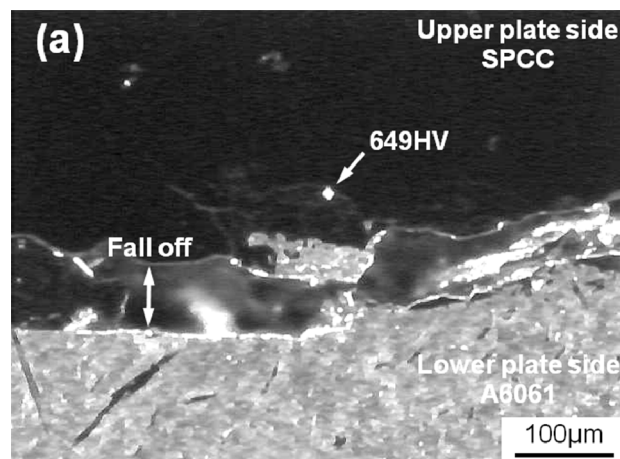
3.4 SPCC/A6061溶接継手の硬さ分布

溶接方向に対して接合界面から垂直に計測した線溶接の硬さ試験結果をFig.2に示す。120A、130Aの条件のみ、母材の硬さと比較して軟化したが、その他の溶接条件では硬化する傾向を示した。なお、各溶接条件において他の溶接部で硬さ計測をしたところ、140Aで407HV、150Aで649HV程度の硬さを示した領域も存在した。

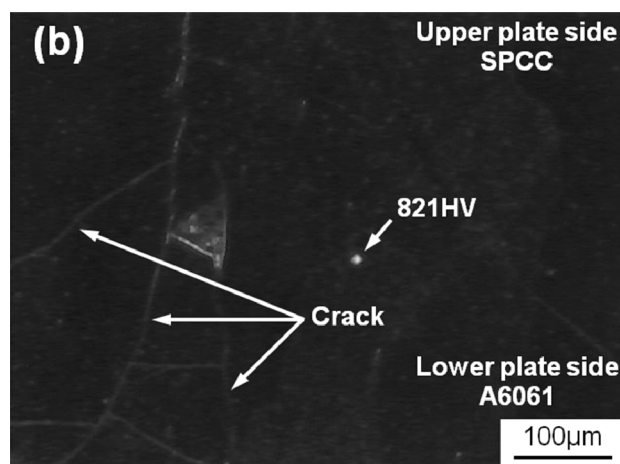
接合界面から垂直に計測した点溶接の硬さ試験結果をFig.3に示す。全溶接条件で溶接部の硬さは600~880HV程度の硬さを示し、硬化域の形成が認められた。この硬さはアーク熱の増加にともない、硬化する傾向がある。Fig.2の140A時に硬さが著しく上昇している。その位置はSPCCとA6061の剥離近傍である。またFig.3の170Aにおける硬さの極端な低下については、点溶接の場合では4枚の重ね溶接を行っているため170Aでは1番下のA6061が溶融しなかったことが原因だと推察される。

3.5 溶接継手の引張せん断試験

インストロン型試験機を用いた線溶接によるビード幅と引張せん断試験結果の関係をFig.4に示す。Fig.4に示す引張せん断強さは、試験片の平行部の25mmの幅と接合界面との積がせん断



(a) Line welding : 150A,300mm/min



(b) Spot welding : 215A,30s

Fig.1 Microstructures of welds.

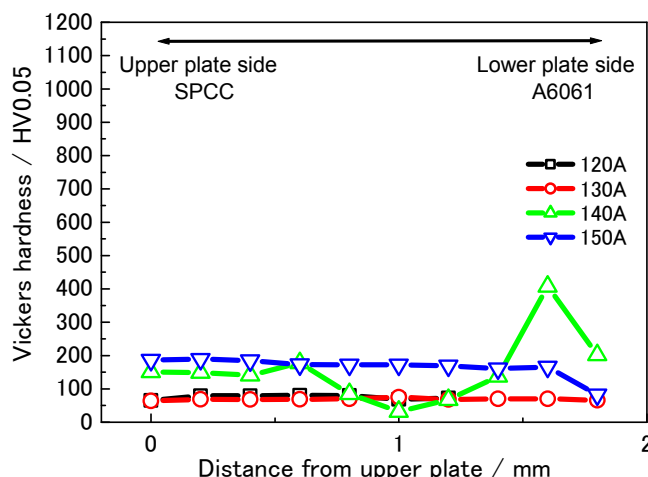


Fig.2 Micro vickers hardness distributions of welds by GTA. (Line welding)

荷重を負担する面積であると考え、最大引張荷重を面積で除した値を引張せん断強さとした。アーク熱の増加にともない、引張せん断強さの低下が

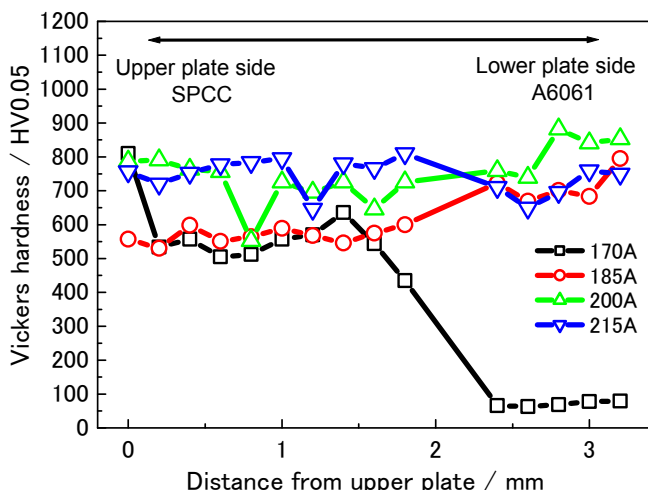


Fig.3 Micro vickers hardness distributions of welds by GTA. (Spot welding)

見られる。どの条件においても脆弱なFe/Al金属間化合物が形成され、健全な継手が得られていない。これは、アーク熱を大にすることにより、熔融凝固部とその近傍でFe/Al金属間化合物が発生し、引張強さの低下に起因されるものと示唆される。さらにビード幅はアーク熱を大にすることで増大する傾向を示し、供試材に対して130Aから140Aに入熱量を増やすことでせん断引張強さの大きな低下に結びついている。破断位置は、すべて溶接部であった。

Fig.5に点溶接の形成された熔融地の面積と引張せん断試験結果を示す。線溶接と同様に、アーク熱を大にすることで熔融地の面積が増大し引張せん断強さの低下が認められた。また溶込む面積が減ると、引張強さが増大する。これは供試材に対するアーク熱により溶込む面積が減少するためである。これも溶接時に生じた金属間化合物の特性によりもたらされた影響が関係していると示唆される。破断位置は、すべて溶接部であり、その破断の多くは溶接部の割れを起点に発生し、進展している。

4. 結言

鋼とアルミニウム合金に対して金属間化合物に着目した結果、入熱量を小さくすることで、溶接部の割れと引張強度の低下を防止することが可能となる。つまり、アルミニウム合金の熔融量を制限することで健全な継手が得られる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、大久保研究室全員の協力を頂いた。特に、平成20年度卒業生の鈴木 崇央氏、平成21年度学部生の畠山 陽平氏、飛田 和也氏、

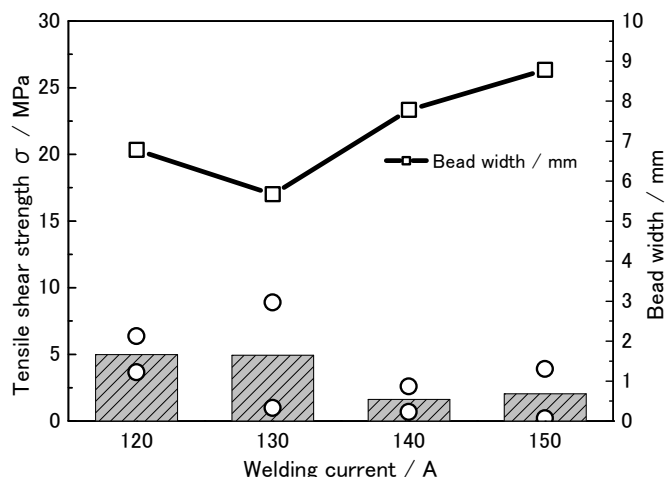


Fig.4 Results of tensile shear strength and bead width by GTA. (Line welding)

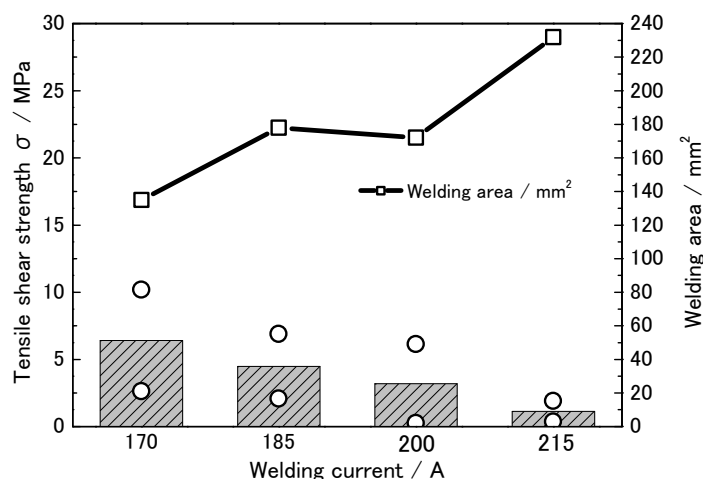


Fig.5 Results of tensile shear strength and bead width by GTA. (Spot welding)

山崎 謙一氏を始めとして熱心な実験が推進された。ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 蒔田 光明, 鈴木 実平, 尾崎 仁志, 川上 博士: Fe/Alレーザー溶接部の継手強度の検討, 溶接学会全国大会講演概要, 第83集(2008), pp240-241
- 2) 小椋 智, 廣瀬 明夫, Al合金/鋼異材接合における界面組織形成, 接合強度に及ぼす合金元素の影響と微小領域特性評価, 軽構造接合加工委員会, 85, (2009)
- 3) 三富 均, 長谷川 利之, 大久保 通則, ティグ溶接および摩擦攪拌接合によるSPCCおよびAl-Mg-Si合金の異材継手特性, 溶接学会全国大会講演概要, 第84集(2009), pp52-53