

# 主要記事

## CMT 溶接法を用いた亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金の溶接

九州工業大学 加藤光昭\* / 西尾一政\*\* / 山口富子\*\*\*  
愛知産業社 古川一敏\*\*\*\* / 谷垣 尚\*\*\*\*\*

金属材料を接合するための条件として次の2つがある。

- (1) 金属表面を非常に滑らかに研磨することによって、接合しようとするそれぞれの金属に属している自由電子が界面を横切ってお互に行き来ができるようにする。
- (2) 金属表面を清浄にすることによって、酸化物フィルムだけでなく水や有機物質などの

ような吸着物が存在しないようにする。

一般に広く行われている熔融溶接においてもこれらの条件が満足されている。ところで、自動車、家電製品および配管などにおいては、アルミニウム合金と鋼の接合が必要とされる場合がある。しかし、アルミニウム合金と鋼をティグ溶接などを用いて熔融溶接しようとする、金属間化合物が容易に形成されるため、これらの組合せの異材溶接は困難とされてきた。この際に形成される金属間化合物の種類としては、図1に示したFe-Al 2元状態図から明らかなように、Al濃度の増大とともに $Fe_3Al$ 、 $FeAl_2$ 、 $Fe_2Al_5$ および $FeAl_3$ がある。これらは硬くもろいため、継手の引張強さは数MPa程度しかない。

しかし、新しいアーク溶接技術としてCMT

\* (かとう みつあき) : 名誉教授  
 \*\* (にしお かずまさ) : 大学院 生命体 工学研究所  
 \*\*\* (やまぐち とみこ) : 大学院 工学研究所  
 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1  
 TEL/FAX (093)884-3357  
 \*\*\*\* (ふるかわ かずとし) : 第一事業本部  
 \*\*\*\*\* (たにがき たかし) : 第一事業本部  
 〒141-0001 東京都品川区北品川5-5-12  
 TEL (03)3447-0201 FAX (03)3449-2143

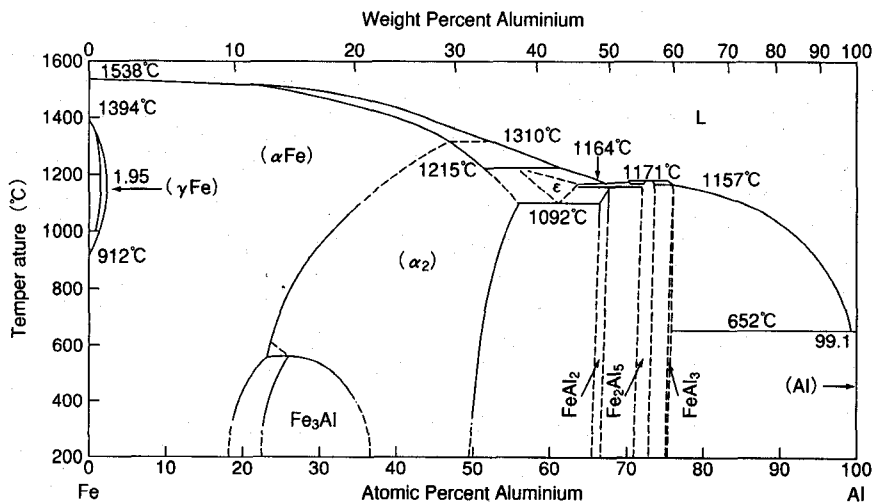


図1 鉄-アルミニウム2元状態図

(Cold Metal Transfer) 溶接が、近年、オーストリアの Fronius 社によって開発された<sup>1),2)</sup> (これは、アークろう付けとも呼ばれている<sup>3)</sup>)。CMT 溶接ではミグ溶接法を応用している。通常のミグ溶接では、アーク時間が長いいため溶接入熱が大きくなり、溶込みを制御することは難しい。しかし、CMT 溶接では短絡移行をさせるワイヤの動作をプロセス制御に組み込み、1秒間に70回程度、繰り返し短絡移行を機械的に行うことによってアークの発生を少なくしている。これによって、通常のミグ溶接よりも低入熱で溶接することができる特徴がある<sup>1),2)</sup>。

この技術はミグおよびマグ溶接に適用することが可能であり、0.3 mm 程度の薄板の溶接や、亜鉛メッキ鋼板とアルミニウムの溶接が容易に接合できるなど、今まで不可能だった条件の溶接が可能となった。特に、アルミニウムと鋼の溶融溶接が可能になると、種々の産業分野への適用が期待される。また、ロール加工システムを用いたレーザによる鋼とアルミニウムとの接合も可能であることが報告されている<sup>4)</sup>。

一方、真空圧延接合法を用いることによって、通常の溶融溶接は困難とされているアルミニウム合金と鋼またはチタンなどの異材継手が作製可能であり<sup>5),6)</sup>、この方法では界面に金属間化合物は形成されていないことが報告されている<sup>6)</sup>。しかし、真空圧延接合法では、クラッド材など用途が限られている短所がある。

本報告では CMT 溶接の概要を紹介するとともに、CMT 溶接を用いて、亜鉛めっき層の厚さを

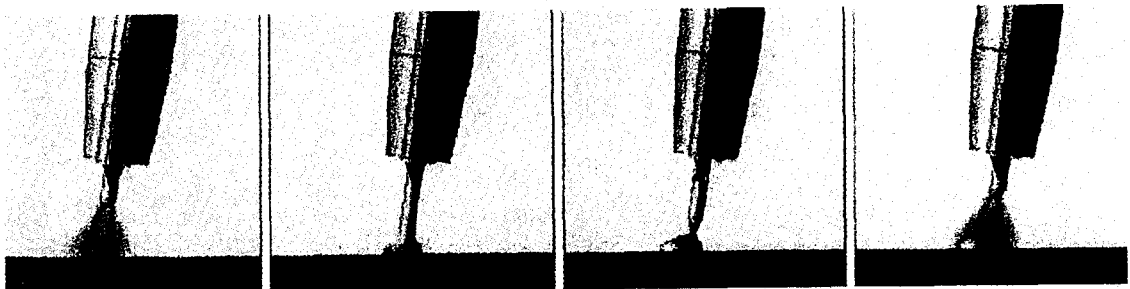
変化させた亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金の接合を行い、接合部の特性を検討した結果を紹介する。

## CMT プロセス<sup>1),2)</sup>

CMT プロセスでは、一種のミグ/マグ溶接法で短絡移行型の溶滴移行が行われている。溶接電源としては、フルデジタル制御の溶接機を使用している。また、ワイヤプッシュ型のワイヤフィードのほかに、ロボットに搭載した CMT トーチにはワイヤブルのサーボモータを装着してある。

通常のミグ/マグ溶接の場合は、アークが発生してワイヤの先端が溶融池に接触浸漬すると、アーク電圧はほぼゼロになるとともに大きな短絡電流が流れ、瞬間的にワイヤが溶融し始め、ホットプロセスで溶融池の表面張力によって溶滴が移行する。溶滴移行が終了すると同時に再点弧されてアークが発生し、ホットプロセスが連続する。

一方、CMT プロセスでは、ワイヤの先端が溶融池に接触するとアーク電圧はほぼゼロになるとともに、デジタルプロセス制御によって溶接電流は限りなくゼロに近づいてコールドプロセスとなり、溶接トーチのサーボモータは逆転してワイヤを戻し、溶滴の切断を促進する。溶滴移行時の電流はほぼゼロになり、スパッタは発生しない特徴もある。溶滴が切断されて溶融金属の移行が終了するとアークは再点弧し、ワイヤは再び前進送給され、設定電流が流れてホットプロセスとなる。すなわち、CMT プロセスではアークは機械的に切断され、ホットプロセスとコールドプロセスが



アーク発生時、ワイヤは溶融プールに向かって前進する

ワイヤが溶融プールに浸かるとアークは消える。溶融電流は一気に下がる

ワイヤを引き戻すことによって短絡中の溶滴切断を促進する。短絡電流はほぼゼロと低いまま

ワイヤが再び前進送りとなってプロセスの始めに戻る

図2 CMT プロセスの基本原則

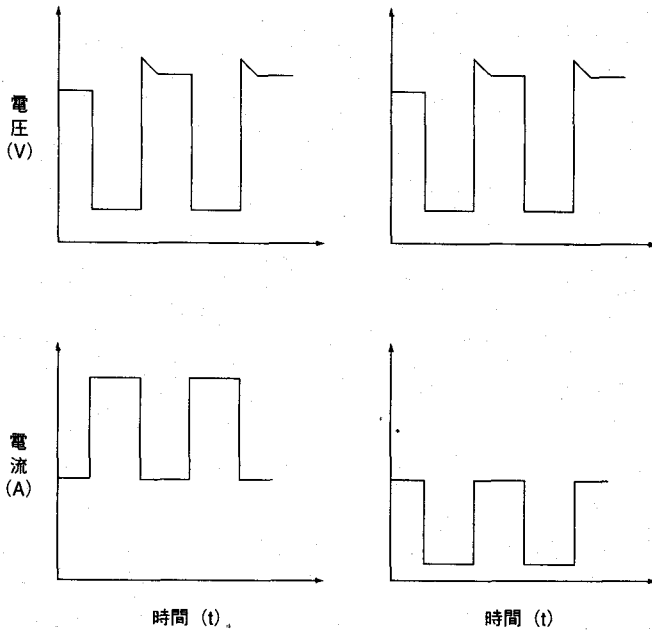


図3 電圧と電流変化

繰り返される。この様子を図2に示す。また、図3(a)および(b)に通常の短絡移行時とCMTプロセスにおけるアーク電圧と溶接電流の時間的変化を比較した結果を、それぞれ示す。

CMTプロセスにおけるワイヤの前進・後進の動作は1秒間に平均して約63回と多く、短絡回数は通常のショートアークの場合の約2倍で、ホットプロセスとコールドプロセスが交互に繰り返されるため、溶接入熱は低減し、溶接速度も速く設定できる。

### 使用材料および実験方法

本実験で用いた材料は、厚さ0.8×幅100×長さ200mmの冷間圧延鋼板 (SPCC) に7~22 $\mu$ mの厚さで溶融亜鉛めっきを施した鋼板 (以下、亜鉛めっきSPCCという) とアルミニウム合金板 (A5052-O、厚さ0.8×幅100×長さ200mm) である。溶接ワイヤはA4043 (主成分は4~5mass

表1 CMTプロセスの溶接条件

試料	溶接電流 I (A)	アーク電圧 E (V)	溶接速度 V (mm/min)	亜鉛めっき層の厚さ t ( $\mu$ m)
A	48	9	600	7
B	48	10		8
C	48	10		13
D	49	10		16
E	48	10		17
F	48	10		18
G	48	10		19
H	49	10		22

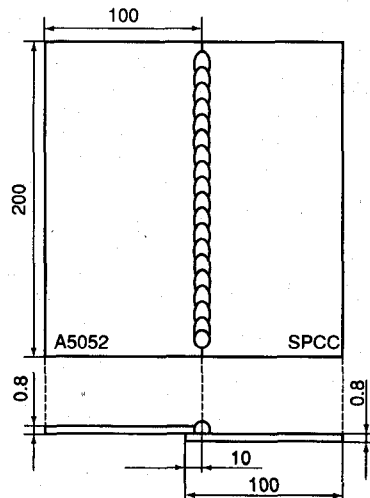


図4 CMTプロセス試験片の形状寸法

%Si;  $\phi$  1.2 mm) を用いた。試料の形状・寸法を図4に示す。亜鉛めっき SPCC および A 5052 を 10 mm 重ねて、その端部を溶接した。

種々の亜鉛めっき層の厚さに対して行った試料の記号と溶接条件を表1に示す。

マイクロ組織の観察に際しては、腐食液としてナイトールを用いた。また、TEM 観察に際しては、FIB (Focused Ion Beam) 法を用いて薄膜の作製を行い、透過型電子顕微鏡〔日立製作所(株)製 H 9000 NAR (加速電圧: 300 kV)] を用いた。さらに、溶接界面付近の元素分布は、EPMA〔日本電子(株)製 JXA 8900 R] を用いて行った。

引張せん断試験に際しては、溶接継手を幅 20 mm に切断し、曲げが加わらないようにアルミニウム板で当て板を施した(試験片枚数は3枚とし、その平均値を用いた)。

## 実験結果および考察

### 1. マクロおよびマイクロ組織

図5に溶接継手の外観を示す。スパッタのない良好なビードが形成されている。ビード幅は約 7 mm であった。また、図6に横断面のマクロ組織を示す。A 5052 側は溶融しているが、亜鉛めっき SPCC 側の溶込みはほとんどない。しかし、止端部は余盛角も小さく、溶接金属と亜鉛めっき鋼板とのぬれ性は良好であり、さらに界面には割れは認められなかった。一方、亜鉛めっきを施していない SPCC の場合には、溶接金属と鋼板のぬれ性は悪く、溶接は不可能であったため、溶接

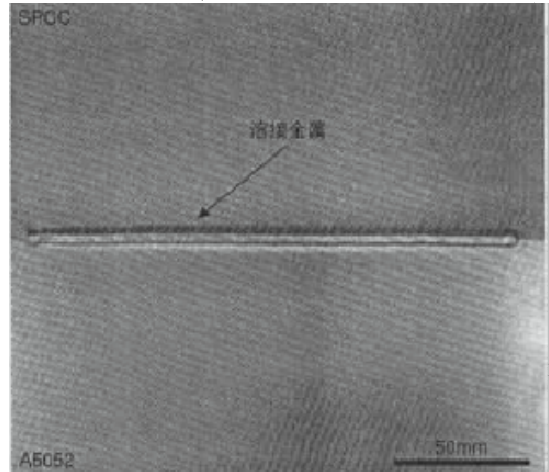


図5 亜鉛めっき鋼板と A 5052 の溶接継手の外観

金属と亜鉛めっき SPCC との良好なぬれ性が両者の接合性に寄与していると考えられる。

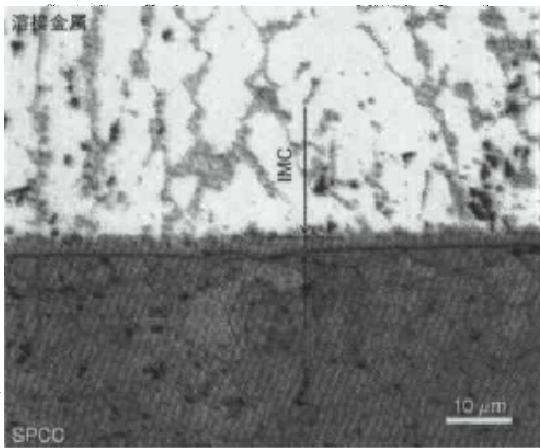
図7(a)および(b)に、それぞれ試料 B および G の溶接界面付近のマイクロ組織を示す。上部は溶接金属で、デンドライトが認められる。デンドライトの境界には、溶加材の主成分である Si および A 5052 の主成分である Mg が偏析していた。また、界面には厚さが数  $\mu$ m の薄い層が認められたが、これは4項で述べるように金属間化合物であることを確認したため、ここでは IMC (Inter-Metallic Compound) と表記した。

### 2. 熱影響部の亜鉛めっき層の挙動

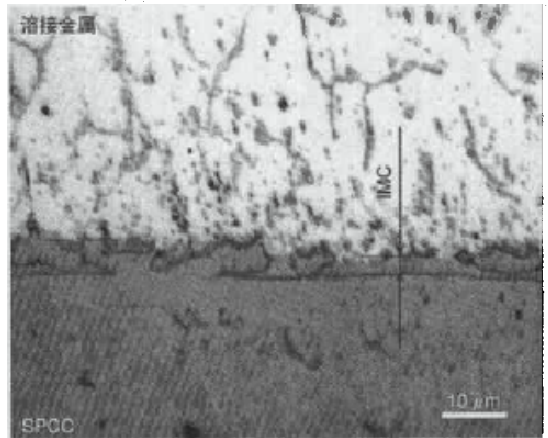
亜鉛めっき層は、溶接部では溶融すると考えられる。また、亜鉛の蒸気圧は低いため、熱影響部



図6 試験片 G (亜鉛めっき厚  $t=19 \mu$ m) の溶接継手の横断面マクロ組織



(a) 試料B ( $t=8\ \mu\text{m}$ )



(b) 試料G ( $t=19\ \mu\text{m}$ )

図7 溶接界面近傍のマイクロ組織

で高温にさらされた場合には蒸発することも考えられる。そこで、熱影響部の亜鉛めっき層の厚さの変化を調べた結果を図8に示す。いずれの試料においても、止端部に近い領域では亜鉛めっき層の厚さは薄くなっているのが認められる。これは、溶接時の入熱によって熱影響部の亜鉛めっき層が部分的に溶解して、蒸発したためであると考えられる。一部の試料では、止端部のごく近傍で亜鉛めっき層が部分的になくなっているところがあった。しかし、いずれの試料においても止端部から400~800 $\mu\text{m}$  離れると母材の亜鉛めっき層の厚さになっており、溶接による亜鉛の溶解・蒸発は止端部のごく近傍に限られていた。

### 3. EPMA 分析

図9(a)、(b)、(c)および(d)に、EPMAによる

試料A、D、FおよびHの溶接界面付近（脚長方向の中央部）のFe、Al、ZnおよびSiの線分析結果をそれぞれ示す（それぞれの図中で、右側が亜鉛めっきSPCC、そして左側が溶接金属である）。界面でFeおよびAlの分布は急激に変化しているが、約5 $\mu\text{m}$ の範囲で相互拡散が起こっているのが認められた。また、この遷移層の部分にはSiの濃化も認められた。

一方、Znの分布状態は試料によって傾向が異なっていた。最も亜鉛めっき層の薄い試料Aでは、亜鉛めっきSPCC側に比べて溶接金属側ではZnが少し減少しているのが認められた。しかし、亜鉛めっき層が厚くなるとともに亜鉛めっきSPCC側よりも溶接金属側の方がZnは増大しており、溶接金属側のZnは、亜鉛めっきSPCCの

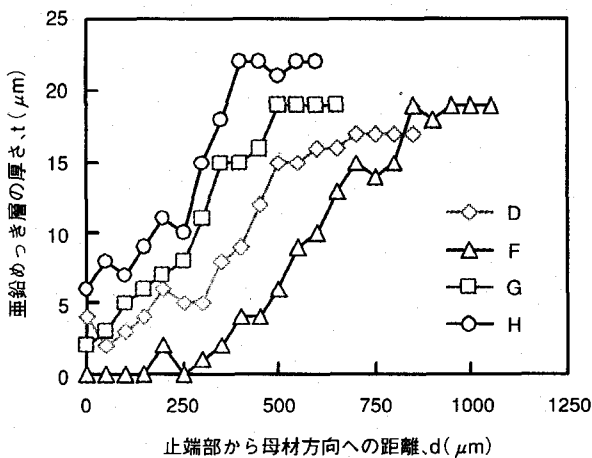
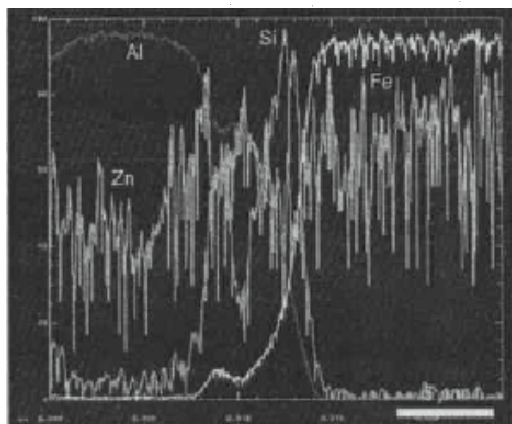
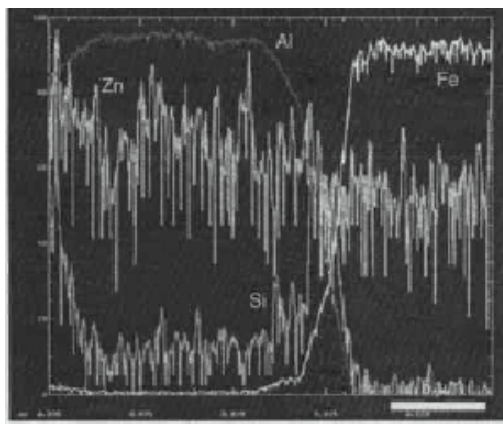


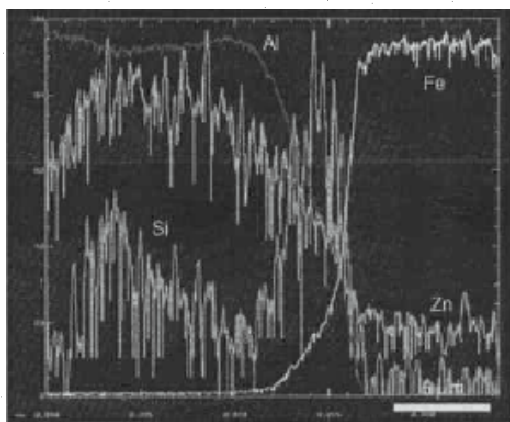
図8 溶接熱影響部の亜鉛めっき厚さの変化



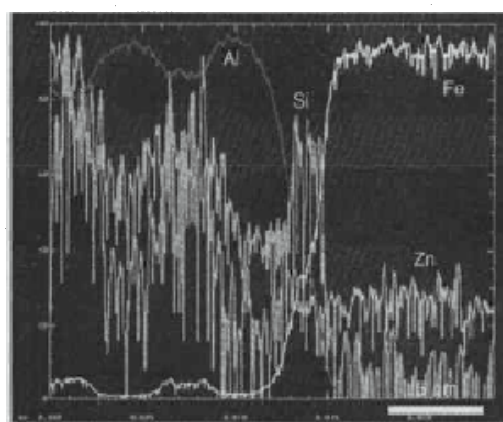
(a) 試料A (t=7 μm)



(b) 試料D (t=16 μm)



(c) 試料F (t=18 μm)



(d) 試料H (t=22 μm)

図9 EPMA線分析結果

Znが拡散したものと考えられる。また、次項で述べる制限視野回折の結果ではZnを含む金属間化合物は同定されなかったため、このZnは溶接金属中に固溶しており、これが良好な接合に寄与しているものと考えられる。

#### 4. TEMによる組織観察

図10に、試料Aの明視野による低倍率のTEM写真を示す(白く線状に認められるのは、試料作成時に生じた割れが金属間化合物に沿って伝播したものである)。図10の右側の黒い部分は垂鉛めっきSPCC、そしてその左側に約1 μmの幅で灰色に認められるのが金属間化合物である。次に、図10の領域AおよびBについて詳細に観察した。

図11(a)および(b)に、図10の領域Aに認められた粒子(金属間化合物)の明視野像および暗

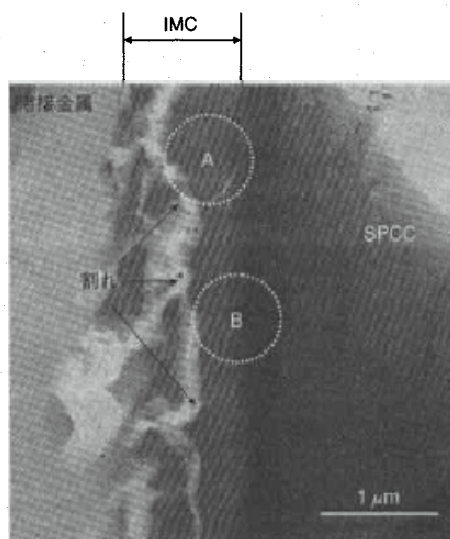


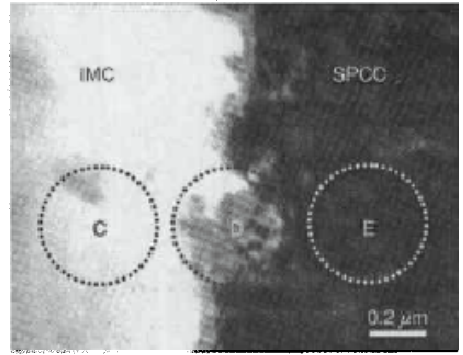
図10 試料Aの溶接継手面近傍のTEM像(t=7 μm)



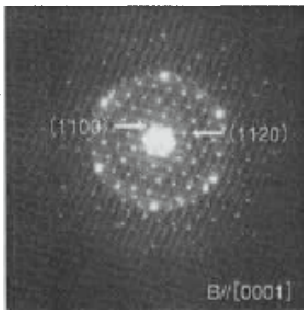
(a) 領域Aの明視野像



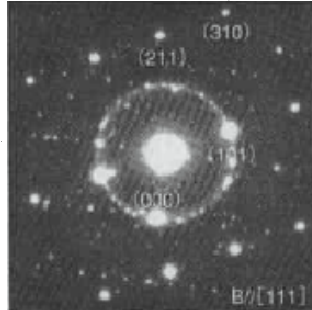
(b) 領域Aの暗視野像



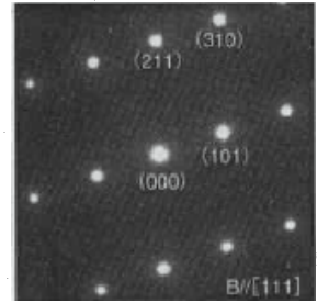
(c) 領域Bを拡大したTEM像



(d) 領域Cの電子回折像

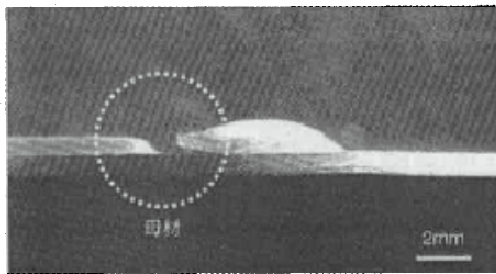


(e) 領域Dの電子回折像



(f) 領域Eの電子回折像

図 11 図 10 に示したいくつかの領域の TEM 像と制限視野回折像



(a) 母材破断の場合



(b) 溶接金属破断の場合

図 12 引張せん断試験後の試験片外観

視野像をそれぞれ示す。このように、金属間化合物の形状は不定形をしている。次に、図 10 の領域 B の拡大像を図 11(c) に示す。これは、垂鉛めっき SPCC と金属間化合物の境界付近に対応している。組織は明瞭ではないが、領域 C、D および E の制限視野回折像をそれぞれ図 11(d)、(e) および(f) に示す。図 11(d) の回折像を解析した結果、 $Al_3Fe_2Si$  と同定できた。また、図 11(e) の回折像は大きな斑点と非常に小さな斑点が混在している。大きな斑点は Fe からの回折に対応していたが、小さな斑点は規則性がなかったため同定はできなかった。さらに、図 11(f) は Fe と同定できた。図 11(d) および(e) にはハローパターンも観察されたことから、組織の一部はアモルファス化しているものと考えられる。

その他の試料についても検討した結果、界面近傍には大きさが  $0.1 \sim 0.6 \mu m$  の不定形状の粒子が認められ、制限視野回折像を解析した結果、 $Al_3Fe_4$ 、 $Al_3Fe_2Si$ 、および  $Fe_2Al_5$  と同定された。

## 5. 引張せん断試験

図 12 に、引張せん断試験後の破断面のマクロ写真を示す。A 5052 の母材から破断しており、溶接金属と亜鉛めっき SPCC の界面から破断した例は認められなかったため、溶接継手の引張強さは 180~190 MPa の値が得られた (JIS H 4000 では、A 5052-O 材の引張強さは 170 以上 215 MPa 以下と規定している)。したがって、溶接界面には金属間化合物が形成されたが、この引張せん断強さはかなり大きかったといえる。単純計算をすると、本研究で形成された Al-Fe 系の金属間化合物のせん断強さは、20 MPa ( $180 \text{ MPa} \times 0.8 \text{ mm} / 7 \text{ mm} = 20 \text{ MPa}$ ) 以上であった。

Al-Fe 系の金属間化合物の引張せん断強さは、その厚さによって大きく変化する。99.99% Al/SS 400 を真空圧延接合後に熱処理によって Al-Fe 系の金属間化合物層の厚さを変化させて引張せん断試験をした際の、引張せん断強さと金属間化合物の厚さの関係を検討した結果によると、厚さが  $1 \mu\text{m}$  までは 50 MPa と金属間化合物が存在しない場合と同じ強さをもっていたが、それ以上の厚さになると急激に減少した<sup>9)</sup>。

以上のことから、CMT 溶接によって得られた A 5052 と亜鉛めっきした SPCC の溶接継手では、金属間化合物に沿ったせん断破壊はせず、A 5052 からの母材破断が起こり、良好な溶接継手が得られることが明らかになった。

### ☆ ☆

- (1) 熱影響部の亜鉛めっき層の厚さは、止端部から  $400 \sim 800 \mu\text{m}$  の領域で母材の厚さよりも減少 (一部の試料では亜鉛めっき層が認められない場合もあった) したが、それ以外の領域では変化は認められなかった。
- (2) A 5052 部では溶加材との溶融が起こったが、亜鉛めっき SPCC 部では溶込みは認められなかった。しかし、溶加材と亜鉛めっき SPCC とのぬれ性は良好であった。
- (3) EPMA を用いて溶接金属と亜鉛めっき SPCC との界面近傍の元素分析をした結果、Zn が溶接金属側で濃化しているのが認められ、これも良好な継手の形成に寄与していると考えられる。

(4) 溶接金属と亜鉛めっき SPCC との界面には、 $1 \mu\text{m}$  程度の厚さの金属間化合物が形成されていた。

(5) TEM 観察の結果、金属間化合物は  $0.1 \sim 0.6 \mu\text{m}$  の細かな粒子で、主に  $\text{Al}_3\text{Fe}_4$ 、 $\text{Al}_3\text{Fe}_2$  Si および  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  で構成されていることが明らかになった。

(6) 引張せん断試験の結果、いずれの溶接継手においても溶接金属と SPCC 界面から破断した例はなかった。これは、形成された金属間化合物の厚さが薄いことに起因している。

(7) 溶接継手の引張せん断試験の結果、A 5052 の母材破断が認められた。すなわち、CMT 溶接をすることによって亜鉛めっき SPCC とアルミニウム合金の良好な異材溶接継手を得ることができる。

\* 本報告は、軽金属溶接に投稿中の論文“CMT 溶接法を用いた亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金の溶接部の特性”の内容に加筆・修正を施したものである。

### 参考文献

- 1) J. Bruckner: Arc Joining of Steel with Aluminum, Proc. Of Sheet Metal Welding Conference XI (2004), Paper 4-2
- 2) J. Bruckner, K. Himmelbauer: Potential areas of use for the CMT process, notably in joining steel to aluminium, IIW Doc. No. XII-1846-05
- 3) 松山欽一: 薄板金属溶接の現状と今後の動向, 軽金属溶接, Vol. 43, No. 9 (2005), 1-9
- 4) M. Kutsuna, M. J. Rathod: Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low Carbon Steel by Laser Roll Welding, Welding Journal, Vol. 83, No. 1 (2004), 16-19
- 5) 迎静雄, 西尾一政, 加藤光昭, 井上季明, 島中望: 真空圧延接合法によるクラッド材の製造とその特性 (第 1 報), 溶接学会論文集, Vol. 9, No. 1 (1991), 17-23
- 6) 杉山智志, 西尾一政, 加藤光昭, 山口富子: 真空圧延接合法により作製した Al/Ti クラッド材の接合特性, 溶接学会全国大会講演概要, Vo. 77 (2005), 342-343
- 7) 軽金属溶接技術会, アルミニウムおよびその合金のイナートガスアーク溶接, 軽金属溶接技術会, p. 113, (1971)
- 8) 迎静雄, 西尾一政, 加藤光昭, 井上季明, 住友賢治: 真空圧延接合法によるクラッド材の製造とその特性 (第 2 報), 溶接学会論文集, Vol. 12, No. 4 (1994), 528-533