

薄板の重ね突合せ摩擦攪拌接合法の開発

The Development of Lap-Butt Friction Stir Welding Technique for Joining Ultra-Thin Metal Sheet

高 業飛* 山本尚嗣* 閻師昭彦*

Yefei Gao Naotsugu Yamamoto Akihiko Koshi

本研究では、従来の溶融溶接では困難であった亜鉛めっき鋼薄板の突合せ接合を達成するため、固相接合の1つである摩擦攪拌接合を用いて、簡便的な重ね突合せ摩擦攪拌接合法を開発した。開発した重ね突合せ摩擦攪拌接合法は、一般的な突合せ接合法と異なり、接合前に被接合材を約5 mm重ねて摩擦攪拌接合を行い、回転ツールの押込みにより接合部の厚さを被接合材の厚さまで減少させ突合せ接合のような継手を得る方法である。本方法での最適接合条件および接合機構を明らかにし、引張強さが母材の引張強さの約95%の良好な継手を得た。

重ね突合せ摩擦攪拌接合法は、接合前に高精度位置合わせは不要であり、金属薄板の種類および被接合材の表面状態に関係なく接合できる。今後、重ね突合せ摩擦攪拌接合法の接合速度を向上する方法を検討し、当社建材事業部の商品に応用することを目指す。さらに、重ね突合せ摩擦攪拌接合法は、異なる板厚の接合のほか、異材接合にも適用可能であり、様々な分野への応用が期待できる。

In this study, for obtaining the butt joint of ultra-thin galvanized steel sheets which hardly to be joined by conventional fusion welding methods, a convenient Lap-Butt friction stir welding method has been developed. Before the friction stir welding process, an ultra-thin galvanized steel sheet is lapped on another one with the overlap width of 5 mm, which is different from the general butt welding method. After the friction stir welding process, the thickness of the joint approximated to the thickness of galvanized steel sheet by the indentation of rotation tool. Therefore, this new welding method was called as Lap-Butt friction stir welding. The optimum joining conditions and joining mechanism were investigated, the maximum fracture load of lap-butt joint was equivalent to 95% fracture load of the base metal.

The high degree of positional accuracy was not necessary before the Lap-Butt friction stir welding, and the lap-butt joint can be obtained regardless of the kinds or surface condition of the metal. Henceforward, the methods for improving the joining speed of the lap-butt friction stir welding need to be investigated, and aim to apply this new welding technique to the products of our Building Materials Business Division. Additionally, lap-butt friction stir welding can also be used for joining the different thickness or dissimilar thin metal sheets, the application to various fields of this new welding technique can be expected.

1 緒言

当社建材事業部の溶接ダクトの主力製品は板厚0.6～1.6 mmの極薄板を使用している。薄板、特に亜鉛めっき鋼薄板の溶融溶接では、亜鉛（沸点約906℃）の蒸発によるブローホール、ピットなどの欠陥発生を防止し、品質良好な溶接部を安定して得るために、溶接パラメータや溶接材料等の選定を工夫する必要がある。これに対して、固相接合である摩擦攪拌接合法（Friction stir welding; FSW）は、固相線温度以下で接合が行われるため、亜鉛の蒸発が抑制できることから、亜鉛めっき鋼薄板接合に対して有望な技術であると考えられる。

摩擦攪拌接合法は、1991年に英国の溶接研究所（TWI）で考案された後、世界各国で精力的に研究・開発が進められ、すでに鉄道車輛、船舶、土木構造物、自動車を中心として種々の産業分野で実用段階に入っている。摩擦攪拌接合法は、図1に示すように、ツールと呼ばれる棒

状の工具を高速で回転させながら材料と接触させ、材料との摩擦熱を利用して接合する方法である。最高到達温度が融点に達せず、固相状態で接合するため、接合部における強度低下がこれまでの溶融溶接に比べて小さいのが特長で、場合によっては接合部のほうが母材より高強度化されるという画期的な手法である¹⁾。

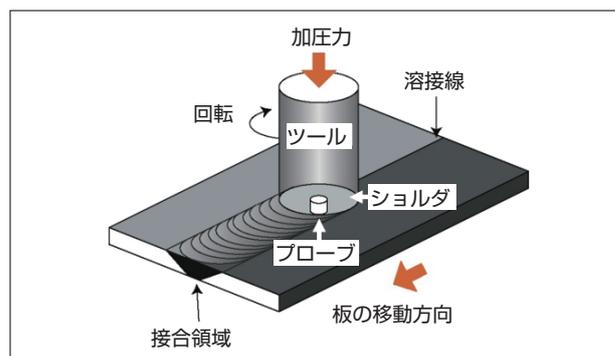


図1 摩擦攪拌接合の模式図

しかし、従来の摩擦攪拌接合による厚さ1 mm以下の金属薄板の突合せ接合は、被接合材の寸法精度（板厚の差、板の水平度など）に対する制約が多いこと、突合せ面の高精度な位置合わせが難しいこと、ツールの押込みにより接合部厚さが減少することなど問題点が多いため、困難である。以上の問題を解決するため、重ね突合せ摩擦攪拌接合法を開発した²⁾。

2 重ね突合せ摩擦攪拌接合法について

開発した重ね突合せ摩擦攪拌接合法とは、図2に示すように、一般的な突合せ接合法と異なり、被接合材を約5 mm重ねて、摩擦攪拌接合を行う。回転ツールの押込みにより接合部厚さが被接合材の厚さに減少し、仕上がり形状が突合せ接合のような継手を形成できる。この方法を重ね突合せ摩擦攪拌接合法と称する。

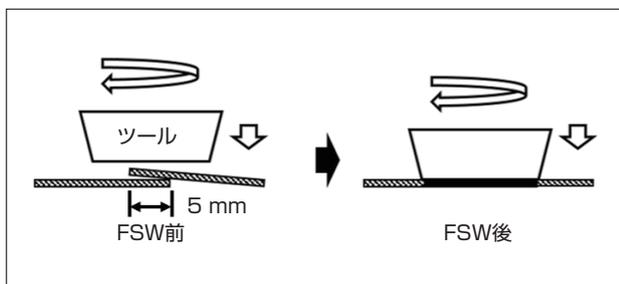


図2 重ね突合せ摩擦攪拌接合法の模式図

3 実験方法

供試材として、T0.6 × W70 × L100 mmの亜鉛めっき鋼板を用いた。亜鉛めっき層の厚さは約15 μmである。摩擦攪拌接合には、シオルダ径15 mm、プローブなしのSKD61製ツールを使用し、ツール回転速度1000-2000 rpm、接合速度100-600 mm/min、ツールの前進角度1°、ツールの挿入深さ0.5 mm（位置制御）、重ね幅5 mmの条件で、接合を行った。継手の組織は光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡（SEM）およびエネルギー分散X線分析（EDS）で評価した。機械的特性はASTM-E8に基づく引張試験で評価し、試験片は放電加工機によって切出した。試験片の幅は4 mmであり、引張速度は1 mm/minにて実施した。

4 実験結果および考察

4.1 重ね突合せ摩擦攪拌接合法に及ぼす接合パラメータの影響

図3に、ツールの回転速度および接合速度を変化させ、重ね突合せ摩擦攪拌接合法に及ぼす接合パラメータの影響を検討した結果を示す。良好な重ね突合せ摩擦攪拌接合継手が得られる条件は、高回転速度かつ低接合速度の領域である。摩擦攪拌接合は、ツールの回転速度の増加

および接合速度の減少に伴い、ツールと被接合材表面の摩擦が強くなって、入熱（摩擦熱）が大きくなる。

摩擦攪拌接合中に継手に投入される入熱を評価するパラメータ Q は式 (1)

$$Q = \frac{R}{V} \dots\dots(1)$$

で表される。ここで、 R はツールの回転速度 (rpm)、 V は接合速度 (mm/min) である³⁾。

すなわち、本研究において、良好な重ね突合せ摩擦攪拌接合継手が得られる条件は、 Q が7.5以上の高入熱な条件である。 Q が7.5未満の入熱不足の場合、継手は接合不可あるいは継手の裏面に段差が生じた。図4にツールの回転速度2000 rpmおよび接合速度100 mm/minで接合した亜鉛めっき鋼板の重ね突合せ摩擦攪拌接合継手の表面、裏面、端面および断面の外観写真を示す。摩擦攪拌接合後の継手の表面に欠陥および大きなバリは観察されず(図4(a))、継手の裏面には段差が認められなかった(図4(b))。接合前は図4(c)の手前側に示すような重ね構造を呈しているが、重ね突合せ摩擦攪拌接合後、突合せのような継手が形成された(図4(d))。図4(d)に重ね突合せ継手の各位置の厚さを示す。ツールの押込みにより接合中心部の厚さが母材の厚さ程度まで減少した。また、被接合部の表面において、白い粉末が観察されたことから、被接合部表面の亜鉛めっき層は蒸発したと考えられる。

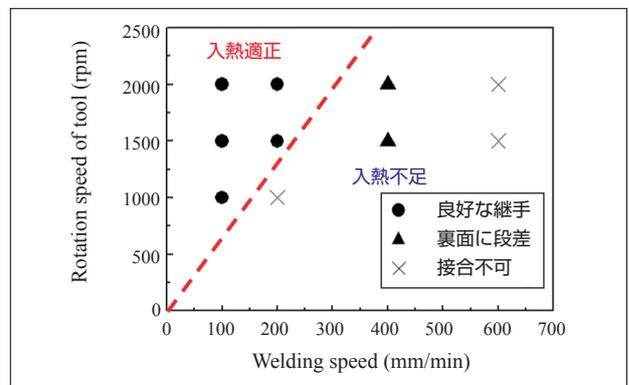


図3 重ね突合せ摩擦攪拌接合のプロセスウインドウ

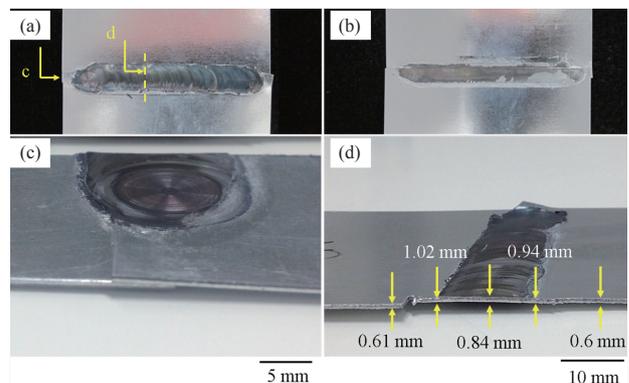


図4 重ね突合せ摩擦攪拌接合継手の表面、裏面、端面および断面の外観写真

- (a) サンプルの表面写真
- (b) サンプルの裏面写真
- (c) サンプルの端面写真
- (d) サンプルの断面写真

4.2 重ね突合せ継手のマクロおよびミクロ組織

図5にツールの回転速度 2000 rpm および接合速度 100 mm/min で接合した亜鉛めっき鋼板の重ね突合せ摩擦攪拌接合継手の断面写真を示す。図5 (a) に示すように、化学エッチング前の継手の中心部において、上の板材と下の板材の接合界面が観察されず一体化しており、接合部に空孔欠陥が認められない良好な継手を得られた。空孔欠陥が観察されなかったことから、亜鉛の蒸発を抑制できたと考えられる。化学エッチング後は、図5 (b) に示すように、上の板材と下の板材の接合界面が明瞭に観察され、上の板材が摩擦熱および圧力により薄くなり、重ね構造が形成された。図3中に示した良好な接合条件で得られた重ね突合せ継手の化学エッチング後の断面写真を図6に示す。高入熱によって接合した継手(図6 (a))は低入熱によって接合した継手(図6 (d))に比べて、上の板材が薄くなっている。また、Qが7.5である低入熱(図6 (d))の場合およびQが10で低回転速度(図6 (e))の場合、下の板材の端部に未接合部が観察された。これは上の板材の塑性流動が不十分であったためと考えられる。

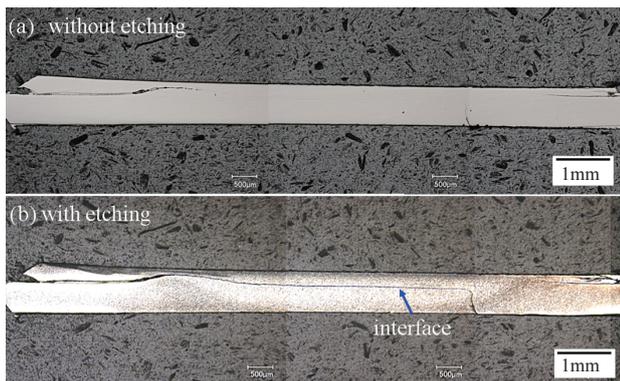
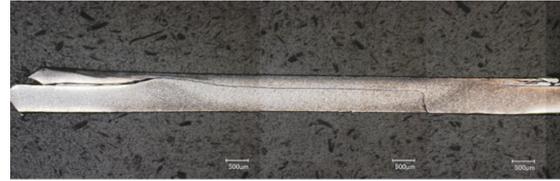


図5 重ね突合せ接合継手の断面光学顕微鏡写真

(a) 化学エッチング前の断面写真 (b) 化学エッチング後の断面写真

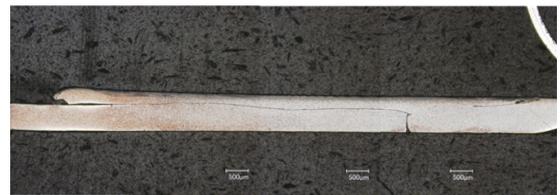
(a) 2000 rpm-100 mm/min Q=20



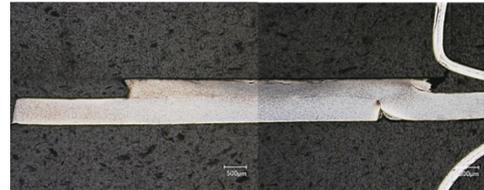
(b) 2000 rpm-200 mm/min Q=10



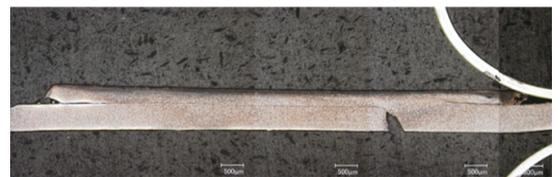
(c) 1500 rpm-100 mm/min Q=15



(d) 1500 rpm-200 mm/min Q=7.5



(e) 1000 rpm-100 mm/min Q=10



R: ツールの回転速度 (rpm) V: 接合速度 (mm/min)
Q=R/V: 入熱評価パラメーター

図6 良好な継手の断面光学顕微鏡写真

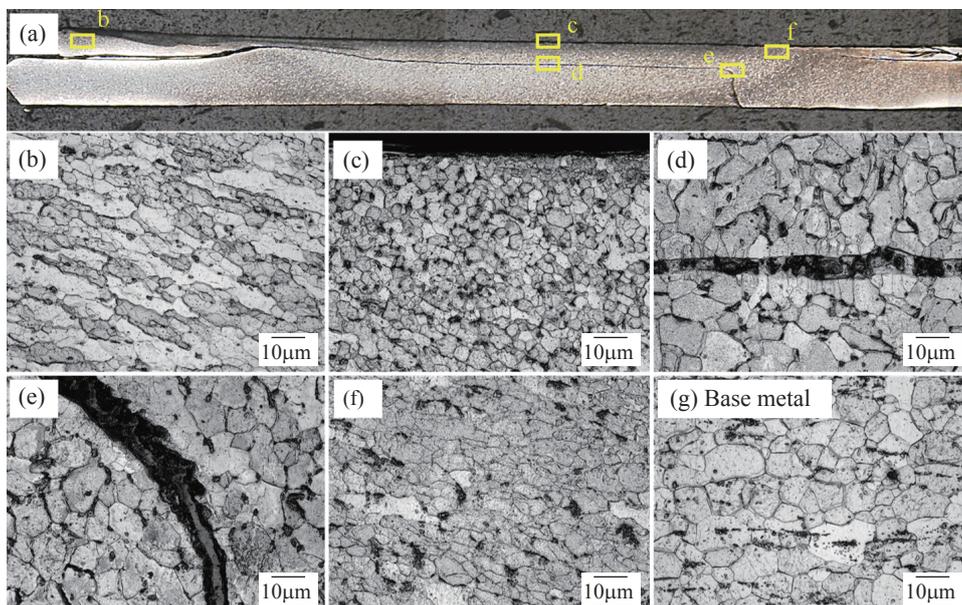


図7 重ね突合せ継手断面各部分の微細組織の光学顕微鏡写真

図7に、Qが20で入熱が一番高い接合パラメータ(2000 rpm - 100 mm/min)で接合した接合部の各部分と母材の微細組織を示す。図7(c)は接合部の中心部の表面近傍の微細組織であるが、結晶粒径が図7(g)に示す母材に比べて小さくなっていた。これは、金属表面とツールの表面との摩擦で生じた発熱と加工ひずみにより、動的再結晶が起こったためと考えられる。一方、図7(d)に示すように、接合界面近傍の結晶粒径は摩擦熱の影響で母材より大きくなっていた。多結晶金属および合金の変形応力 σ と結晶粒径 d との関係は式(2)のホール・ペッチの式(Hall-Petch equation)

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \dots\dots(2)$$

で表されることが経験的に知られている。ここで、 σ_0 は単結晶の強度に相当する応力、 k は材料による定数である。多結晶金属および合金の強度は結晶粒の大きさに依存し、室温においては結晶粒が細かいほど強度は大きくなる⁴⁾。この強化機構は、結晶粒微細強化と呼ばれる。以上のことから、重ね突合せ継手の接合部の表面層の強度が上昇していると考えられる。

図8(a)、(b)および(c)に接合界面部分の元素面分析結果を示す。図8(a)中の1と2の個所の点分析結果を表1にまとめる。接合界面に鉄と亜鉛が検出されたことから、鉄と亜鉛の金属間化合物層によって上板と下板が接合されていると考えられる。

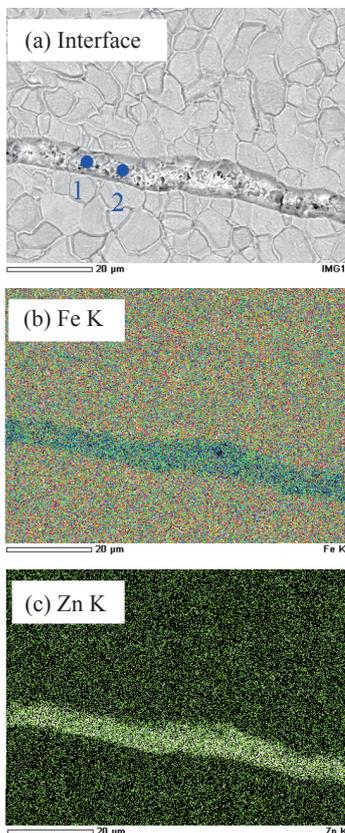


図8 接合界面における元素面分析の結果
(a)SEM像 (b)Feの元素マッピング
(c)Znの元素マッピング

表1 接合界面層における元素点分析の結果

| Position | Element (at.%) | | Phase |
|----------|----------------|-------|-------------------------------------|
| | Fe | Zn | |
| 1 | 80.08 | 19.92 | Fe+Fe ₃ Zn ₁₀ |
| 2 | 77.23 | 22.77 | Fe+Fe ₃ Zn ₁₀ |

4.3 重ね突合せ継手の機械特性

良好な接合条件範囲で得られた継手の引張強さを図9に示す。継手の最大引張強さは母材の強さの約95%であった。すべての引張試験片において、図10に示すように接合部で破断していた。破断箇所は図11(b)中の黄色破線で示すように、上の板材の板厚が薄くなった領域と接合界面領域である。これらの二つ領域の破断面をSEMにより観察した結果をそれぞれ図11(c)および図11(d)に示す。図11(c)に示す上の板材の破断面においては、延性破断の特長であるディンプル(凹凸)が観察された。一方、図11(d)に示す接合界面領域の破断面は凹凸のない平滑な破断形態であり、鉄と亜鉛の金属間化合物層中での脆性破断であったと考えられる。継手の強度が母材強度の95%と高い値が得られたのは、4.2で述べたように上の板材の表面近傍の結晶粒径が微細化し、材料の強度が増加していたためと考えられる。

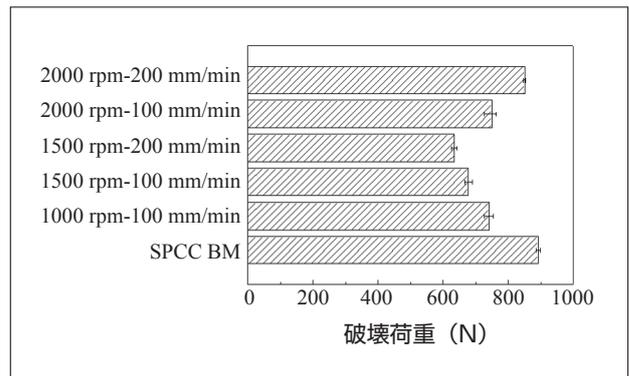


図9 良好な接合条件範囲で得られた継手の引張強さ



図10 引張試験後サンプルの外観写真



図11 破断箇所の説明写真および破断面のSEM写真

5 まとめと今後の展開

本研究では、簡便な亜鉛めっき鋼薄板の突合せ接合法を開発し、以下のことが明らかになった。

1. 亜鉛メッキ鋼薄板の接合において、プローブ無しのSKD61製ツールを用いて重ね突合せ摩擦攪拌接合を実現した。ツールの押し込みにより接合部中心の厚さが母材の厚さ程度まで減少し、突合せのような継手が形成された。
2. 接合界面において、鉄と亜鉛が検出されたことから、鉄と亜鉛の金属間化合物層によって上板と下板が接合されていると考えられる。
3. 重ね突合せ継手の最大引張強さは母材強さの約95%であった。

重ね突合せ摩擦攪拌接合法は、接合前に高精度位置合わせは不要であり、金属薄板の種類および被接合材の表面状態に関係なく接合できる。しかし、実用化のためには、重ね突合せ摩擦攪拌接合法の接合速度を向上させる必要があると思われる（現段階での最大接合速度は200 mm/min）。今後重ね部分に対して予熱を行うなど、重ね突合せ接合法の接合速度向上を達成し、当社建材事業部の製品に応用することを目指す。また、重ね突合せ摩擦攪拌接合法は、図12に示すように、異なる板厚の接合および異材接合が可能であり、様々な分野への応用が期待できる。

(a) 異なる板厚の接合



(b) 異材接合

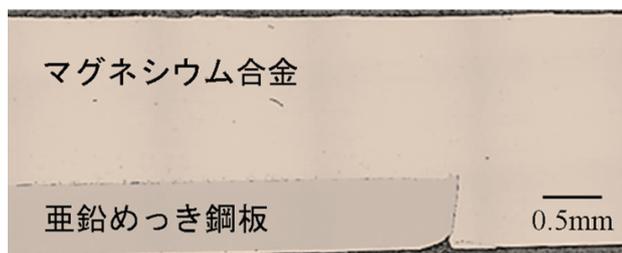


図12 重ね突合せ摩擦攪拌接合法による異なる板厚の接合例と異材接合例の断面光学顕微鏡写真

参考文献：

- 1) 社団法人溶接学会編：摩擦攪拌接合-FSWのすべて - 産報、(2006) pp.12.
- 2) Gao Y., Morisada Y., Fujii H and Liao J.: Microstructure and mechanical properties of friction lap-butt welded ultra-thin galvanized steel sheets, J.Manuf. Process., Vol.45 (2019), pp.22-32
- 3) 社団法人溶接学会編：摩擦攪拌接合-FSWのすべて - 産報、(2006) pp.22.
- 4) 金属材料技術研究所編：金属材料技術用語辞典、(2000) pp.429.

執筆者：

高 業飛

2015年入社
博士（工学）
異材接合技術の研究開発に従事



山本尚嗣

2006年入社
博士（工学）
鋳鉄管の溶接や当社開発
マグネシウム合金の接合など
溶接・接合に関する技術開発に従事



閻師昭彦

1998年入社
材料開発・プロセス開発に従事

