

1-5 FSW*



藤井 英俊**

FSW*

by FUJII Hidetoshi**

キーワード 回転ツール, 装置, 適正接合条件, 入熱, 間隙

1. はじめに

これまで、1-1章～1-4章においては、アーク溶接、ろう付・はんだ付、レーザ溶接について解説してきた。本章で取り扱うFSW（摩擦攪拌接合：Friction Stir Welding）は、これらの接合法とは異なり、材料が固相状態で接合が行われ、従来の溶接法にない種々の優れた特徴を有している。このため、本手法は1991年に開発された比較的新しい手法¹⁾であるにもかかわらず、既に種々の分野で実用化されている²⁻⁹⁾。

また、その後の進歩も目覚ましく、当初は問題点とされていた事項に関して解決されたものも多い。Al合金以外にも、Mg合金、Cu合金等のFSWはすでに実用化されており、最近、炭素鋼¹⁰⁻¹⁶⁾やさらに融点が2620℃のモリブデン¹⁷⁾などのFSWも可能になり、種々の産業分野から注目を浴びている。

FSWは、図1(a)に示すように、ツール（Tool）と呼ばれる $\phi 10\sim 20\text{mm}$ 程度の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接合法である⁴⁾。前述のように、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熔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。図1(b)に示すように、ツールは径の大きいショルダ（Shoulder）部とその先端にあるプローブ（Probe）部からなる。接合中はプローブのみを材料中に押し入れ、接合すべき突合せ面に沿って移動させる。この時、材料は裏当て板に拘束し、固体の状態を維持しながら、ツールによる塑性流動によって接合を行う。

2. 回転ツール

回転ツールは接合部に発熱と攪拌を生じさせ、接合品質を左右する重要な要素である。アルミニウム合金を接合する際には、回転ツールにSKD61等のSKあるいはSKD工具鋼を使うのが一般的である。プローブには、通常ネジがきってあり、右ネジは左回転、左ネジは右回転で用いる。また、ショルダ部は平面ではなく、通常はわずかに凹面状になっていることが多いが^{18, 19)}、逆に凸形状になっているものもある²⁰⁾。

プローブの長さは、板厚とほぼ等しく、裏あての板と

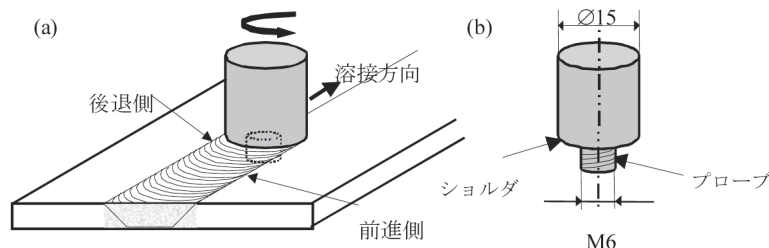


図1 FSWの原理図

*原稿受付 平成21年5月2日
 **正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and Welding
 Research Institute, Osaka University

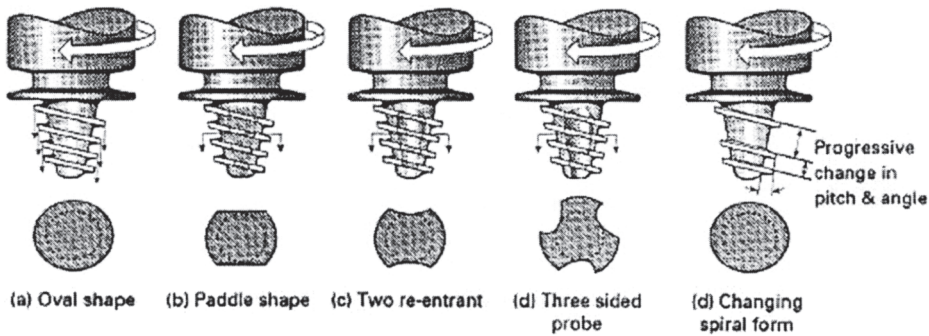


図2 Whorl™ ツール

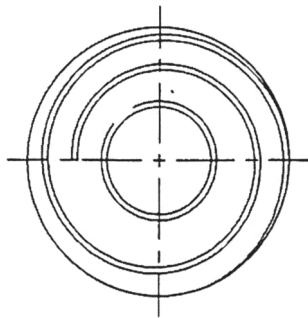


図3 スクロールショルダツールのショルダ面



図4 MX Triflute™ ツール

接触しないように0.2mm程度短いのが普通であるが、熱伝導率が悪い材料を接合する際には、この長さをより板厚に近づける必要がある。直径に関しては、例えば5mm厚の板材を接合する際にはショルダが15mm程度、プローブがM5~6が標準である⁴⁾。これらの値は、一般に板厚が大きければ増加し、小さければ減少する。また、回転ツールはプローブ先端が先行するように進行逆方向に1~5度程度傾け、回転速度は1分間に数百から数千回転、接合速度は数十~数百mm/minが一般的であるが、数m/minも可能である。

前述のように、プローブ形状はねじ溝を設けた円柱状が一般的であるが、Dawesら²⁰⁾は図2に示す、断面が非円形(楕円, 太鼓型)をした特殊なプローブ(Whorl™ tool)や図3に示す、ショルダ底面に螺旋状の突起を設けた(Scroll shoulder tool) ツール(図3)を開発し、厚板材の接合に効果があるとしている。ショルダ底面に螺旋状の突起を付けるとツールを傾ける必要がなくなる利点もある。図4は、らせん状の溝が切っただけのMx-Triflute™

表1 Mx-Triflute™ ツールを用いた限界接合速度

板厚(mm)	材 質	限界接合速度 (mm/min)
1.2	2024-T4	960
	6013-T4	6000
	7075-T6	720
6.0	2024-T3	480
	5083-H111	570
	6082-T6	2100
	7075-T7	470

と呼ばれるツールで、高速の接合に適した形状とされている²²⁾。このツールを用いると、1.2mmの板厚の場合で通常のねじ溝を設けた円柱状ツールの約175%の高速化を図ることができる。各々の材料において表1に示した速度で接合が可能である²³⁾。

Al合金のFSWと異なり、鉄鋼材料のFSWにおいては、ツール材料に高温における高い強度と靱性、耐摩耗性、非反応性などの特性が要求される。研究初期においては、ツール材料にW合金^{11, 24)}、Mo合金¹⁰⁾などが用いられたが、最近では、高融点金属材料の他、多結晶立方晶窒化ホウ素(PCBN)^{25, 26)}を始めとしたセラミックス材料や超硬合金^{13-15, 27-29)}が用いられ始めている。その後、さらに高強度、長寿命なIr合金ツール¹⁷⁾なども開発されており、実用化に向けて大きく前進している。尚、超硬合金は、1000℃以上の接合には適さないが、650℃~850℃程度まで接合温度を低下させることにより、他のツールと比較して強度、靱性にすぐれ、実用化に問題がない程度に長時間使用できる^{13-15, 27-29)}。また、スポットFSWにおいては、Si₃N₄にコーティングを施した素材が実用的に有望であることが示されている³¹⁾。

ツール形状に関しても、それぞれの被接合体に特化した、形状の最適化が必要である。上述のように、鉄鋼材料などの高融点金属に用いるツールに関しては、高温での強度や耐摩耗性を保持するセラミックス、超硬合金や高融点金属などのツール材料が不可欠であるが、一般にこれらの材料は加工が難しく、仮に複雑な形状を作製しても、それが割れの起点になりやすいため、できるだけ単純な形状でツールを作製することが必要である^{32, 33)}。

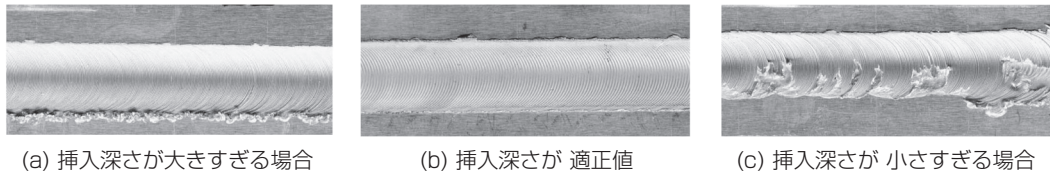


図5 ツール挿入深さと接合部表面性状の関係

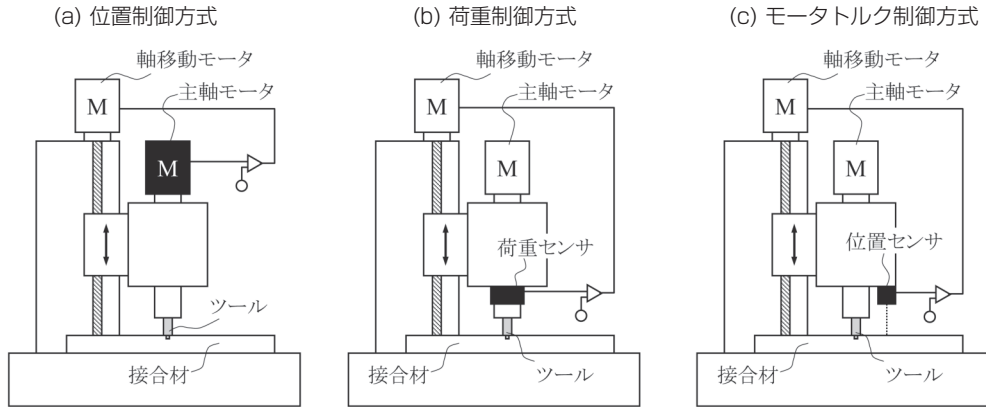


図6 FSWの制御方式

3. FSW装置

FSW装置に要求される特性はアーク溶接などと比較して大きく異なり、以下の項目が挙げられる⁹⁾。

- (1) 材料に対してツールを大きな力（ツール荷重）で押し付けるため、ツール荷重に耐える構造および剛性が必要である。
- (2) ツール荷重に伴う材料の変形およびずれを防止するため、継手構造、ジグ構造および拘束方法を工夫する必要がある。
- (3) 材料へのツールの挿入深さが接合部の品質に敏感に影響するため、ツールを被接合材料に挿入する深さを精密に制御する必要がある。

図5にツール挿入深さを変化させた場合における接合部の表面性状変化の一例⁹⁾を示す。図5(a)に示すように、挿入深さが適正值よりも大きい場合には表面欠陥は発生しないが、大きなバリが発生している。図5(b)に示すように、挿入深さが適正值の場合には、表面欠陥は発生せず、大きなバリも発生していない。一方、図5(c)に示すように、挿入深さが適正值よりも小さい場合には、表面欠陥が発生している。このように、ツール挿入深さは接合部品質を一定にする上で重要なパラメータである。特に挿入深さが適正值よりも小さい場合、欠陥発生に対して敏感となるため、挿入深さが適正值よりも小さくならないように制御することが重要である⁹⁾。

図6に示すように、挿入深さを制御する方法として、(1)位置制御、(2)荷重制御、(3)モータトルク制御等が開発されている³⁴⁻³⁷⁾。荷重制御およびモータトルク制御は、接合温度や材質の影響を受けやすいが、曲面等の

形状に対しても対応が可能である等の利点がある。今後、現地施工が可能な可搬式の装置³⁸⁾や接合材寸法を制約しない装置構造の開発が行われることで、FSWの適用範囲が拡大していくことが期待される。

4. FSWの特徴

FSWは、従来の溶接法とは異なり、左右非対称な接合法である。図1に示すように、ツールの回転方向と接合方向が一致する側を前進側(Advancing side)、反対を向いている側を後退側(Retreating side)という⁹⁾。

接合部の断面組織の一例として、図7に1080アルミニウム合金の断面図とそれぞれの組織^{4,39)}を示す。これらを模式的に書くと図8のようになり、接合部中央には、攪拌部と言われる数 μm の等軸晶からなる再結晶組織が存在する。攪拌部の外側には、塑性変形により結晶粒が伸びた形状を持つ熱加工影響部(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)、その外側には、塑性変形は受けていないが、熱の影響を受けた熱影響部(Heat Affected Zone, HAZ)が存在する。

FSWの特徴をまとめると以下のようになる。

- (1) 固相接合である。したがって、接合部における結晶粒の粗大化が抑制され、強度低下が小さい。また、回転ツールによる攪拌効果のため、結晶粒を微細化することも可能で、母材より強度が向上する場合もある。
- (2) 変形が小さい。アーク溶接(ミグ)の数分の1以下である。
- (3) これまで接合が困難であった2000系や7000系のアルミニウム合金、あるいは鋳造材や複合材料の接合も可能である。

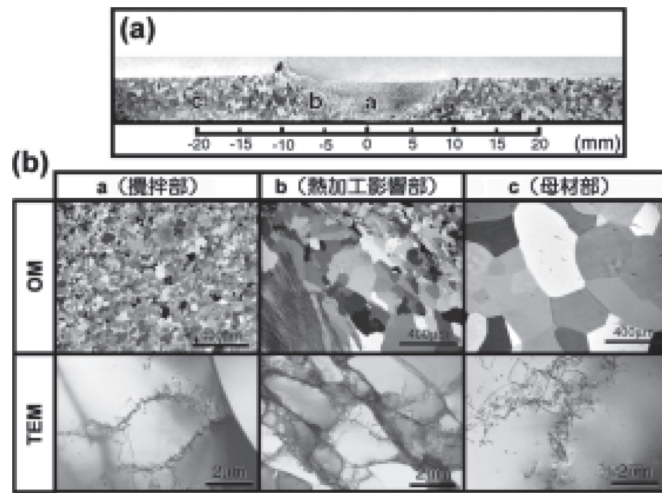


図7 1080 アルミニウム合金摩擦攪拌接合部の (a)断面写真, (b)光学顕微鏡写真と TEM 写真

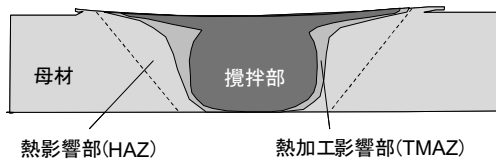


図8 断面組織の模式図

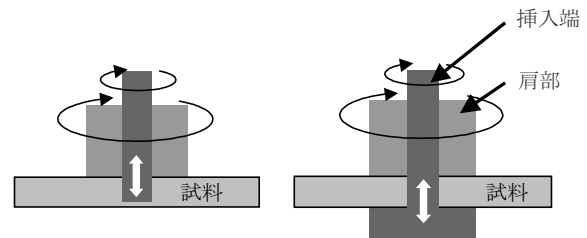


図10 複動式ボピンツール (Self Reacting Pin Tool)

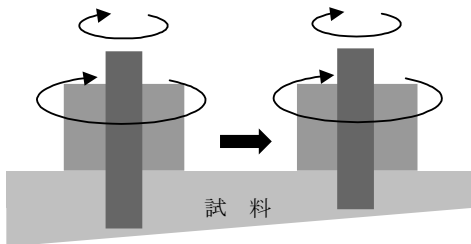


図9 プロブ-ショルダー複動式ツール

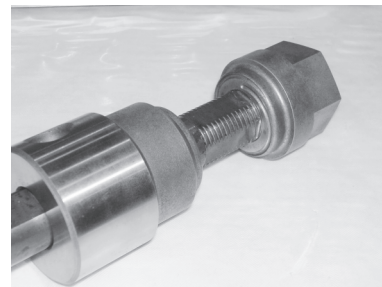


図11 厚板用複動式ボピンツール

- (4) 異種材料の接合に適している。
 - (5) 開先加工や接合時の前処理が不要である。
 - (6) 接合中にヒューム、スパッタ、紫外線等の発生がない。
 - (7) 気孔、割れなどが発生しにくい。
 - (8) アルミニウム合金の接合の場合には、シールドガスが不要である。
 - (9) 原則、フィラーが不要である。
 - (10) 接合部から合金成分の蒸発がほとんどない。
 - (11) 熟練技術が不要である。
- 一方、以下のような問題点がある。
- (1) 剛性のある拘束治具が必要である。
 - (2) ギャップの許容範囲が狭く、接合部の目違い、ギャップの制御が必要である。
 - (3) すみ肉継手などの複雑形状の部材の接合が困難である。
 - (4) 接合終端部に穴が残る。
 - (5) 裏面にキッキングボンドといわれる未接合部が生成しやすい。

- (6) 低融点金属に限られる。
- しかし、これらの問題点に関しても、これまでにさまざまな角度から検討され、解決の方向にある。特に、(6)に関しては、鋼のFSWが可能となり、大幅に改善した。詳細については、専門書⁴⁾や解説⁴⁰⁾を参照して頂きたい。問題点の(2), (4), (5)も改善のためのいくつかの提案が行われている。
- (2)に関しては、ギャップが大きい箇所に粉末を充填しながらFSWを行う方法^{41, 42)}が提案され、(4), (5)に関しては、ツールのプローブとショルダが別々に駆動する複動式ツールが有効である⁴³⁾。これにより、図9に示すように、板厚が場所により変化する材料の接合が可能になる。また、接合終了時に徐々にプローブを短くしていくことで、接合部終端に残る孔を無くすことできる。この構造に対して、図10に示すように、ピン先端に材料を支持する部材を取り付けた、いわゆるボピンツールを適用することでツール荷重をツールの内部応力で打ち消す構

造も開発されている⁴⁰⁾。この構造を採用することで、FSWの欠点であるツール荷重を無害化することが可能になるが、ツールの耐久性が実用上の課題である。図12に25mmの厚板用に開発された複動式のツール⁴⁰⁾を示す。

図12⁴⁰⁾はFSWで接合可能と考えられる継手形式である。突合せ継手(a)や重ね継手(c)また、その組み合わせ(b)。T継手(e)、(f)、へり継手(g)、などが可能である。また、(h)に示すように、継手構造の工夫により、すみ肉継手も可能とされている。

5. 適正接合条件範囲

図13は代表的なアルミニウム合金である2024-T6、

5083-O、6061-T6、7075-T5材(いずれも板厚4mm、シヨルダ径15mm)について、ツールの回転速度と接合速度の適正範囲を示した例である^{4、47)}。それぞれの材料によって適正条件範囲が異なることがわかる。高回転速度、低接合速度領域では、接合部に過剰な熱を与えるため、バリが発生しやすくなり、外観は著しく悪くなる。一方、低回転速度、高接合速度領域では、入熱不足のため材料の塑性流動が不完全となり、図14に示すように、入熱量が不足するに従い、トンネル状の欠陥(Tunnel hole)、溝状の欠陥(Groove like defect)、プローブの欠損につながる⁴⁸⁾。

2024-T6、5083-O、7075-T5材は6061-T6材に比べて、はるかに適正条件範囲が狭く、接合しにくいことが分かる。接合のしやすさは、接合温度における塑性流動のし

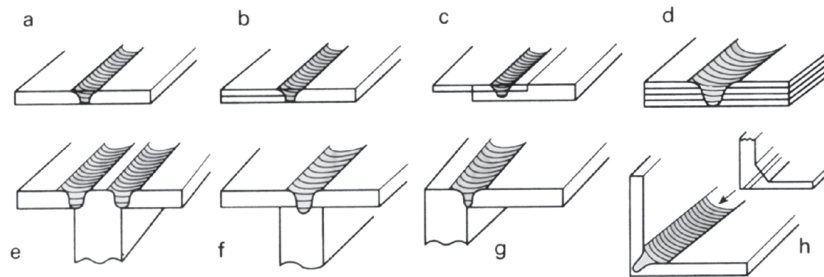


図12 継手形式

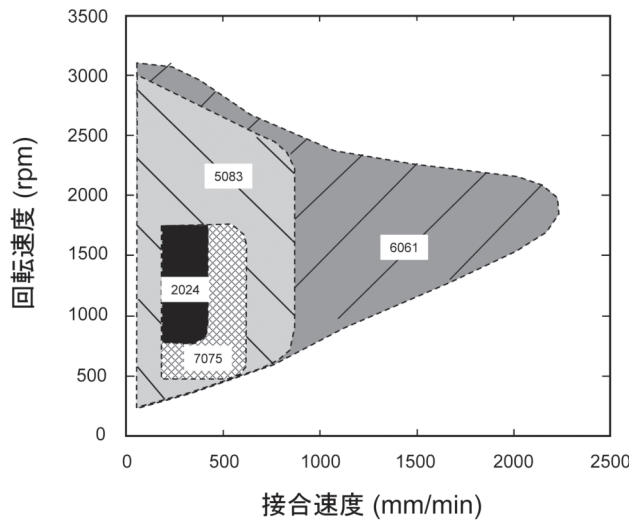


図13 種々のAl合金の適正接合条件

	ビード外観	透過X線	断面
健全なビード	前進側 後退側		後退側 前進側
内部欠陥		↑	↑
溝状欠陥		↑	↑
ツールの破損		↑	↑

図14 入熱量が不足の場合の欠陥の種類

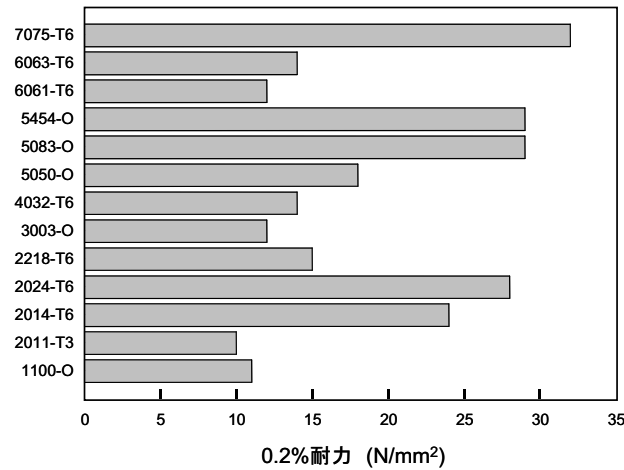


図 15 370°Cにおける種々のアルミニウム合金の耐力

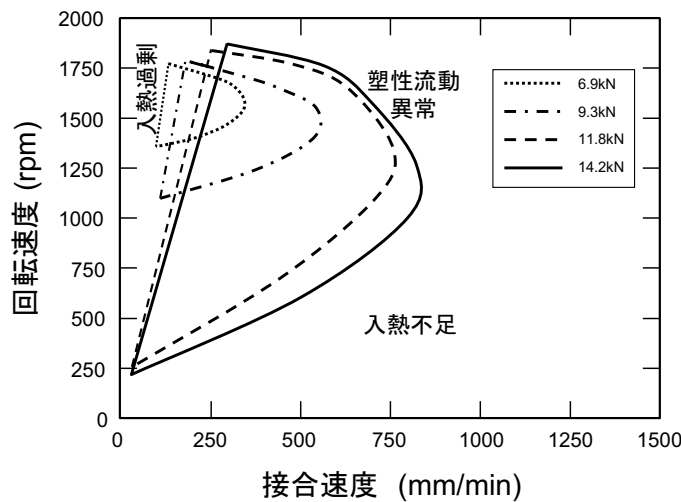


図 16 荷重一定制御の場合の適正接合範囲 (ADC12, 厚さ 4mm)

やすさで決定される。2024-T6, 5083-O, 7075-T5 などの材料は、塑性流動性が悪いため、低回転速度、低接合速度でないと健全な継手は得られない。接合のしやすさは、接合温度における材料の耐力を比較してもある程度予測できる。図 15 に各種アルミニウム合金の 370°C での耐力⁴⁹⁾を示すが、6000 系の高温での耐力が低いことがわかる。一方、2000 系、5000 系、7000 系は高温での耐力が高く、FSW しにくいと言える。

しかしながら、2000 系や 7000 系は適正条件範囲が狭くても、従来の溶融溶接法では接合が不可能であったことを考えると、FSW が有効な接合法であることには変わりない。尚、厳密には接合のしやすさは、接合温度における高温変形抵抗と比較するとより正確に推定できる⁴⁾。

荷重一定制御の場合の適正接合範囲は ADC12 を例にとると、図 16⁴⁸⁾ のようになる。荷重が大きくなるにつれて、適正条件範囲が大きくなり、荷重も重要な接合条件の一つであることが分かる。しかし、ある程度荷重が大きくなると、欠陥の発生が起りにくくなり、荷重依存性は小さくなる。荷重一定制御の場合、十分な荷重を与えると、位置一定制御に比べ、内部欠陥が発生しにくい特徴がある一方で、位置制御と比較して、入熱過多の場

合に、よりバリの発生が顕著になる。荷重一定制御の場合には、一旦、温度が上昇し材料の軟化が始まると、よりツールが押し込まれる傾向になるため、適正な荷重の設定が重要である。

図 16 に示すように、主な欠陥の発生原因をまとめると以下のようなになる。

- (1) 入熱過多 (バリの発生、表面の荒れ)
- (2) 入熱不足 (トンネル状欠陥、溝状欠陥、プローブの欠損)
- (3) 塑性流動異常 (トンネル状欠陥)

(1) 入熱過多は、試料の温度上昇によって塑性流動がより容易に起こり、バリ等の発生が顕著になる場合である。(2) 入熱不足は図 14 に示すような種類の欠陥を生じる場合があり、入熱の不足量が増大するにつれ、トンネル状の欠陥 (Tunnel hole)、溝状の欠陥 (Groove like defect)、プローブの欠損と変化していく。

しかし、図 16 の右上の領域、高接合速度、高回転速度の場合には、トータルの入熱量と直接関連のない欠陥が発生する。これは後述するように、塑性流動の異常により発生する欠陥である。

適正領域の右下、すなわち接合速度が大きく、回転速

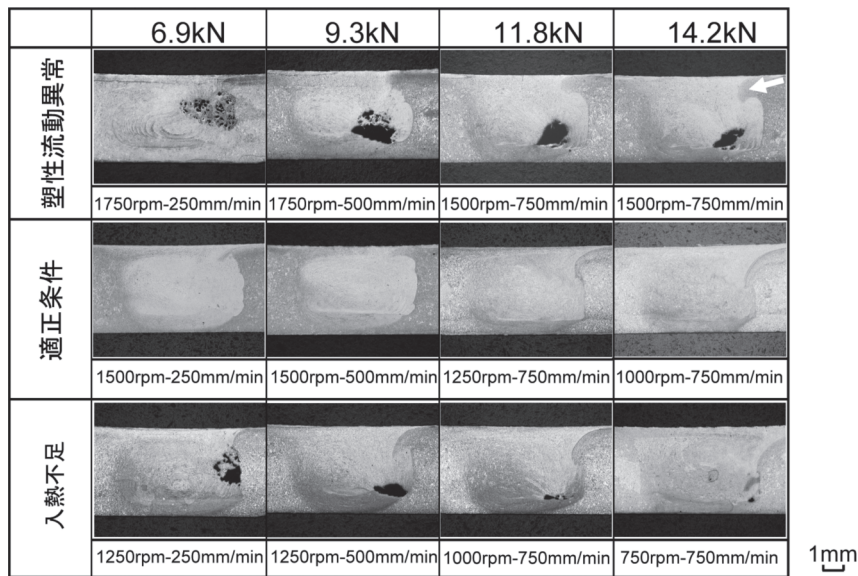


図 17 塑性流動異常および入熱不足による欠陥（右側が前進側）

度が小さい場合には、ツールの回転速度の増加とともに、適正な接合速度も大きくなるので、入熱量と直接関係があるといえるが、適正領域の右上のツールの回転速度が大きすぎる場合には、接合速度の増加とともに、適正なツール回転速度はむしろ減少する。

図 17⁴⁸⁾に塑性流動異常および入熱不足の場合の接合部の断面写真を適正条件で接合された場合の結果と合わせて示す。これからわかるように、入熱不足の場合の欠陥と塑性流動異常の場合の欠陥は、欠陥の発生位置も前進側でほぼ同様なため、これまで明確に区別されていなかった。しかし、回転速度が小さすぎる（入熱不足）の場合には、攪拌部の形状が適正条件範囲とほぼ等しいのに対し、回転速度が大きすぎる（塑性流動異常）の場合には、図 17 中の矢印で示すように、前進側の試料表面近傍で攪拌の流れがスムーズでない領域が存在するのが分かる。このように、回転速度が大きすぎる（塑性流動異常）場合には、塑性流動のバランスが悪くなり、欠陥が発生する。これは、材料中の熱の伝達に比べ、回転ツールから材料表面への入熱量が大きくなりすぎ、表面温度のみが上昇するため、局部的に塑性流動が促進されたものと推察されている⁴⁸⁾。

図 17 に示すように、入熱不足によって発生した欠陥は、荷重を増やすにつれてその大きさは小さくなるが、表面の攪拌過剰によって生成する欠陥は、荷重を増やしても、あまりその大きさが変化しないのが特徴である。このように、(2) 入熱不足と (3) 塑性流動異常の欠陥は一見、区別しにくい。しかしながら、これらを誤って判断すると、本来回転速度を減少させるべき場合に、増加させてしまうなどの間違いを起こしてしまうので、十分な注意が必要である。

6. 接合条件と入熱量の関係

Frigaard ら⁵⁰⁾によると、FSW 中に材料に投入される

熱量 Q (W) は、

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3 \quad (1)$$

と表せる。ここで、 μ ：摩擦係数、 P ：攪拌部の圧力 (N/m^3)、 N ：ツール回転速度 (s^{-1})、 R ：シヨルダ径 (m) である。この式では、回転ツールのシヨルダ部と接合金属の間のみで発熱すると仮定している。ここで、攪拌部の圧力 P とはシヨルダ部を押圧する単位面積あたりの荷重である。式 (1) より発熱量 Q は、圧力 P および回転速度 N に比例し、シヨルダ部の直径 R の 3 乗に比例することになる。したがって、シヨルダ径の小さいマイクロ接合等を考える場合には、1 分間に 10000 回以上の高速回転が必要となる⁵¹⁾。

一方で、式 (1) を圧力でなく、荷重 L (N) を用いて表現すると、

$$Q = \frac{16}{3} \pi \mu L N R \quad (2)$$

となり、数式上では、入熱は荷重、ツール回転速度、シヨルダ径のいずれにも比例することがわかる。

式 (1) および (2) は、回転ツールを移動させない場合のモデルである。回転ツールを移動させる場合には、接合速度 V をツールの回転速度 N で割った回転ピッチ (Revolution Pitch) が一つの指標となる。

$$\text{回転ピッチ} = V/N \quad (3)$$

回転ピッチはツールが 1 回転する間に移動する距離で、図 18 に示すような FSW 後に接合部表面に形成する筋の間隔に相当する。回転ピッチが大きいということは、筋の間隔が大きい、すなわち 1 回転の間に移動する距離が大きいことに相当するため、入熱が減少すると言える。

入熱量と接合強度は密接な関係にある。図 19 は A1050-

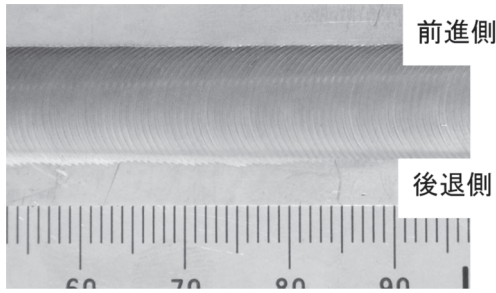


図 18 FSW後に接合部表面に形成される筋 (この筋の間隔が回転ピッチ (接合速度/回転速度) に相当する)

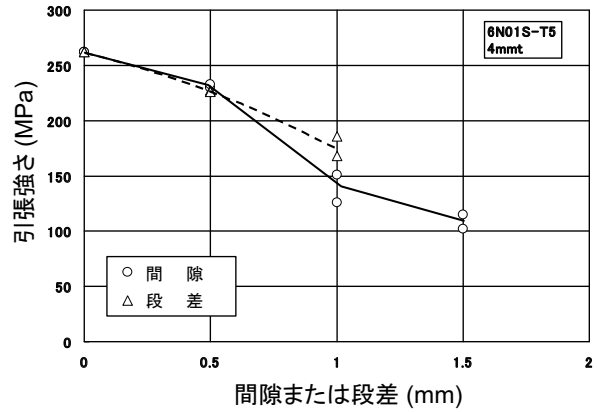


図 20 継手の引張強さに及ぼす間隙と段差の影響

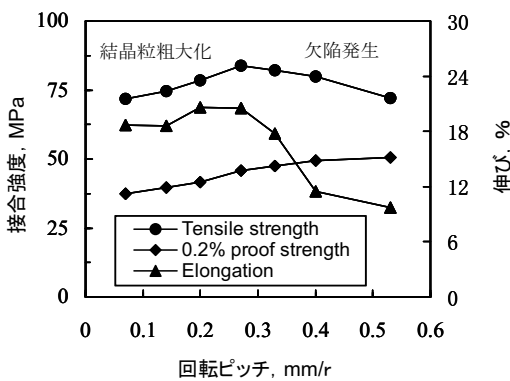


図 19 強度と入熱量 (回転ピッチ) の関係 (A1050-H24, 5mm 厚)

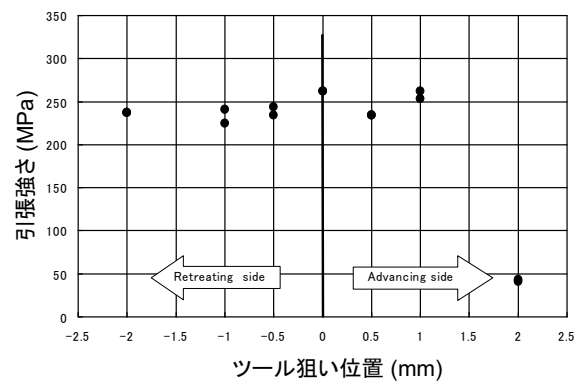


図 21 継手の引張強さに及ぼすツールの狙い位置の影響

H24 材 (板厚 5mm) の引張強度と回転ピッチ (接合速度 / ツール回転速度) の関係を示している⁵²⁾。(シオルダ径 15mm, プローブ M6) 回転ピッチが 0.28 の時, 引張強度は最大値を示し, それより回転ピッチが大きく (入熱が小さく) ても, 小さく (入熱が大きく) ても強度が低下することが分かる。これは, 入熱が大きすぎる場合には, 結晶粒の粗大化が起こり, 強度が低下するのに対し, 入熱が小さすぎる場合には, 内部に欠陥が生じ強度が低下することに起因する。尚, 回転ピッチが 0.3 を超えても, 結晶粒そのものは小さくなる傾向にあるため, 耐力は上昇し続ける⁵²⁾。

7. 突合せ面の間隙, 段差, 狙い位置

FSW 接合を行う際, 接合条件が不適切な場合に加えて開先のギャップや目違いなどがあると継手部に種々の欠陥を生じる。溶融溶接の場合に生じる粒界の液化割れやブローホールなどは認められないが, 塑性流動の不足によって生じる特有の欠陥が生成する。

図 20^{53), 54)}に突き合わせ試料の間隙と段差が継手の引張強さに及ぼす影響を示す。これは板厚 4mm の 6N01 合金を FSW 接合した場合の例であるが, いずれも 0.5mm をこえると継手の引張強さは急激に低下する。突合せ面の間隙を増すと内部にトンネル状の欠陥を生じる。これは

間隙を埋めるだけの材料が不足するためであり, 接合部の板厚を母材よりも増しておくなどの対策もなされている⁵⁴⁾。したがって, 基本的には間隙は 0.5mm 以下に保つ必要があると言える。また, 間隙の許容範囲を大きくするためには, シオルダ径を大きくするのが一つの方法である。間隙の許容範囲はシオルダ径に比例し, シオルダ径が 40mm であると, 間隙が 1.5mm を超えても欠陥は発生しないという報告がある。また, 最近の研究で間隙に粉末を充填すると, 3mm 程度まで良好な継手が得られるという報告^{41), 42)}がある。

間隙がない場合であっても, 段差があれば, 大きな欠陥が発生する。特に, プローブが先に片方の板のみに接触するような場合には接合すら不可能である。

プローブの狙い位置が突合せ面から外れた場合, 開先面が前進側にあるか後退側にあるかによって内部に生じる欠陥が異なる。図 21 にはツールの狙い位置が継手の引張強さに及ぼす影響を示す。ツールが開先面に対して後退側にずれた場合には, 2mm 程度ずれても引張強さの低下は少ないが, 前進側にずれた場合には 1mm を超すと引張強さは急激に低下する^{53), 54)}とされている。

8. おわりに

最近の FSW に関する進歩は目覚ましく, こうして解

説記事をまとめても、しばらくすると古くなってしまふ。

特に、鉄鋼材料のFSWに関する研究が盛んに行われ、刃物等の表面改質においてはすでに実用化されている²⁰⁾。この他にも、変態を伴わないFSW^{13-15, 56)}やレーザとFSWを組み合わせて、結晶粒および炭化物をともに100nm程度に抑制できる技術²⁹⁾は、実用化に向けて極めて有用である。また、ステンレス鋼を1m/min以上で接合する技術⁵⁷⁾や、鉄鋼材料のスポットFSWにおいて、1つのツールで3000打点以上接合可能となったこと³¹⁾等は今後につながる技術と思われる。

本稿では、紙面の都合上、すでに実用化されているAl合金を中心に解説したが、FSWはすでに2620℃の融点を有するMoまで接合可能となっている¹⁷⁾。このような高融点の金属のFSWについて興味のある方は、別報を参照して頂きたい⁴⁰⁾。また、FSW全般や最新情報に関しては、詳しい著書⁴⁾がある。最後に、本書の出版にあたり、多くの論文、ホームページ等を引用させて頂いた関係各位に、深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith, and C. J. Dawes: *International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8*, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
- 2) R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, *Prog. Mater. Sci.*, 53 (2008) 980-1023.
- 3) R. S. Mishra and Z. Y. Ma, *Mater Sci Eng R* 50 (2005) 1-78.
- 4) 摩擦攪拌接合—FSWのすべて—, 溶接学会編, 産報出版(2006).
- 5) H. Okamura, K. Aota, and M. Ezumi: *J. Jpn. Inst. Light Met.*, 50 (2000), 166-171.
- 6) G. Campbell and T. Stotler: *Welding J.*, 78 (1999), 45-47.
- 7) M. R. Johnsen: *Weld. J.*, 78 (1999), 35-39.
- 8) K. E. Knipstron and B. Pekkari: *Weld. J.*, 76 (1997), 55-57.
- 9) C. J. Dawes and W. M. Thomas: *Weld. J.*, 75 (1996), 41-45.
- 10) W. M. Thomas, P. L. Threadgill and E. D. Nicholas: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 4 (1999), 365-371.
- 11) A. P. Reynolds, W. Tang, M. Posada and J. DeLoach: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 8 (2003), 455.
- 12) A. Ozekcin, H. W. Jin, J. Y. Koo, N. V. Bangaru and R. Ayer: *Intern. J. Offshore Polar Eng.*, 14 (2004), 284.
- 13) H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata and K. Nogi: *Mater. Sci. Eng. A*, 429 (2006), 50-57.
- 14) L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji and K. Nogi: *Scripta Mater.*, 56 (2007), 637-640.
- 15) L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji, K. Nakata, K. Nogi, R. Ikeda and M. Matsushita: *ISIJ Int.*, 47-2 (2007) 299-306.
- 16) Y. S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Furuhashi: *Scripta Mater.*, 57 (2007) 557-560.
- 17) H. Fujii, H. Kato, K. Nakata and K. Nogi: *Proc. 6th Int. FSW Symp.*, Montreal, Canada, 10-13 October, 2006, CD-ROM.
- 18) E. D. Nicholas: *Proc. Int. Conf. ICCA-6*, Toyohashi, July 1998, 139.
- 19) K. Colligan: *Proc. 1st Int. Symp. FSW*, Thousand Oaks, USA, 14-16 June, 1999, 5-2.
- 20) 粉川博之, 佐藤裕, *溶接技術*, 55-12 (2007) 55-59.
- 21) C. J. Dawes & W. M. Thomas: *Proc. 1st Int. Symp. on FSW*, (1999) CD-ROM.
- 22) W. M. Thomas, D. G. Staines, I. M. Norris, R. de Frias: *Welding in the world*, 47-11/12 (2003), 10.
- 23) G. Wylde and W. G. Thomas: FSW シンポジウム「摩擦攪拌接合の基礎と応用」(2005年4月19日) 溶接学会編 p62.
- 24) T. J. Lienert, W. L. Stellwag, Jr., B. B. Grimmer and R. W. Warke: *Weld. J.*, 82 (2003), 1-S.
- 25) C. D. Sorensen, T. W. Nelson and S. M. Packer: *Proc. 3rd Int. Sympo. Friction Stir Welding*, TWI, Kobe, Japan, (2001), CD-ROM.
- 26) M. Collier, R. Steel, T. W. Nelson, C. Sorensen and S. Packer: *Mater. Sci. Forum*, 426 (2003), 3011.
- 27) R. Ueji, H. Fujii, L. Cui, A. Nishioka, K. Kunishige and K. Nogi: *Mater. Sci. Eng. A*, 423 (2006), 324-330.
- 28) H. Fujii, R. Ueji, Y. Takada, H. Kitahara, N. Tsuji, K. Nakata and K. Nogi: *Mater. Trans.*, 47 (2006), 239-242.
- 29) Y. Morisada, H. Fujii, M. Mizuno, G. Abe, T. Nagaoka and M. Fukuzumi, *Mater. Sci. Eng.*, A505 (2009) 157-162.
- 30) T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, H. Assadi and F. Malek Ghaini: *Mater. Sci. Eng. A* 496 (2008) 262-268.
- 31) R. Ohashi, M. Fujimoto, S. Koga, R. Ikeda, M. Ono: *Proc. 7th Int. FSW Symp.*, Awaji, Japan, 20-22 May, 2008, CD-ROM, 2-2.
- 32) H. Fujii, L. Cui, M. Maeda, K. Nogi: *Mater. Sci. Eng. A*, 419 (2006), 25-31.
- 33) 藤井英俊, “鉄鋼材料の摩擦攪拌接合 (FSW) の現状”, *溶接技術*, 53-12 (2005), 60-67.
- 34) S. Hirano, K. Okamoto, K. Aota, H. Okamura, Y. Aono & T. Odakura: *3rd Int. Symp. on FSW*, (2001) CD-ROM.
- 35) Z. Loftus, R. Venable & Glynn P. Adams: *Proc. 1st Int. Symp. on FSW*, (1999) CD-ROM.
- 36) 古賀信次, 犬塚雅之, 西田英人: *溶接学会全国大会技術セッション*, 75 (2004).
- 37) 平野聡, 岡本和孝, 稲垣正壽, 小田倉富夫: *溶接学会全国講演概要*, 72 (2003), 28-29.
- 38) 西田英人, 古賀信次, 犬塚雅之, 西山五郎, 山崎健太郎: *溶接学会全国大会講演概要集*, 77 (2005) 164.
- 39) Y. S. Sato, S. H. C. Park and H. Kokawa, *Metall. Mater. Trans.*, 32A (2001) 3033.
- 40) 藤井英俊: *溶接学会誌*, 77 (2008) 731-744.
- 41) 福田孝治, 藤井英俊, 池英洙, 野城清, 森貞好昭: *溶接学会全国大会講演概要集*, 84 (2009) 78-79.
- 42) K. Inada, H. Fujii, Y. S. Ji, Y. Morisada and K. Nogi, *Mater. Sci. Forum* (2009) in press.
- 43) R. J. Ding & P. A. Oelgoetz: *Proc. 1st Int. Symp. on FSW*, (1999) CD-ROM.
- 44) M. Skinner, R. L. Edwards, Glynn Adams & Zhixian Li: *4th Int. Symp. on FSW*, (2003) CD-ROM.
- 45) 藤井英俊: *軽金属溶接*, 43 (2005) 325.
- 46) 福田哲夫: *溶接学会誌*, 69 (2000) 560-564.
- 47) K. Nakata, S. Inoki, Y. Nagano and M. Ushio, *Mater. Sci. Forum*, 426-432 (2003) 2873-2878.
- 48) Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki and K. Nakata, *Mater. Sci. Eng. A* 415 (2006) 250-254.
- 49) 高井英夫, 戸取征二郎, 福寄一成, 江角昌邦, 川崎健, 松永徹也: *軽金属溶接*, 39-1 (2001) 29.
- 50) Frigaard et al., *Proc. 1st Int. Symp. FSW*, Thousand Oaks, USA, 14-16 June, 1999, 8-2.
- 51) 青田欣也: *溶接学会誌*, 72-3 (2003) 185-188.
- 52) H. Liu, M. Maeda, H. Fujii and K. Nogi, *J. Mater. Sci. Lett.*, 22 (2003) 41-43.
- 53) 榎本正敏: *軽金属溶接*, 36 (1998) 25-29.
- 54) 橋本武典: *溶接学会全国大会講演概要* 67 (2000) 62-63.
- 55) <http://www.diamondbladeknives.com/>
- 56) Y. D. Chung, H. Fujii, R. Ueji and K. Nogi, *Sci. Tech. Join. Weld.* 14 (2009) 233-238.
- 57) 石川武, 藤井英俊, 玄地一夫, 松岡茂樹, 野城清: *鉄と鋼*, 94 (2008) 539-544.