

軽金属部材の摩擦攪拌接合を最適化するための
接合継手評価法マニュアル

平成22年3月

財団法人中部科学技術センター

目次

第1章	はじめに	1
1 - 1	マニュアルの意義	1
1 - 2	使用対象者	1
1 - 3	局所超音波探傷装置およびロボット摩擦攪拌スポット接合装置の利用の注意	1
1 - 4	担当機関	1
第2章	超音波探傷試験法の原理および試験概要	3
2 - 1	超音波探傷試験の原理	3
2 - 2	一般的な超音波探傷試験方法の概要	5
第3章	局所超音波探傷装置の概要および取り扱いに関する注意事項	7
3 - 1	局所超音波探傷装置の特徴および測定原理	7
3 - 2	局所超音波探傷装置の取り扱いに関する注意	9
第4章	摩擦攪拌スポット接合法の原理	13
4 - 1	摩擦攪拌スポット接合法の原理	13
4 - 2	ロボット摩擦攪拌スポット接合装置の特徴	14
第5章	摩擦攪拌スポット接合継手の破壊試験による品質評価方法と評価事例	16
5 - 1	接合継手外観の評価方法との評価事例	16
5 - 2	接合継手部の組織学的評価方法とその評価事例	21
5 - 3	接合継手のせん断引張試験評価方法とその評価事例	28
5 - 4	接合継手の欠陥の特徴	38
第6章	平板の重ね合せ接合継手の超音波探傷試験の手順	41
6 - 1	基準試験片によるゲート設定の調整	41
6 - 2	超音波探傷試験の手順	42
第7章	C スキャン画像解析による接合継手の評価方法	42
7 - 1	各種継手の超音波探傷試験によるC スキャン画像事例	44
7 - 2	超音波探傷試験評価および破壊試験評価による接合継手の総合的評価	47

第1章 はじめに

1 - 1 マニュアルの意義

本書は、軽金属材料を対象とした摩擦撈拌接合継手の性能評価について、接合継手の作製から接合継手の非破壊検査法による評価までを、「ロボット摩擦撈拌スポット接合装置」および「局所超音波探傷装置」を使用して、実施できるように作成したものである。

したがって、単にこれらの装置の取り扱いに関する説明に留まらず、接合継手の作製や評価に関するノウハウ的な事項も要点をまとめて記述している。

本装置は、中部イノベーション創出共同体管内の企業におけるものづくりとそれに関する性能評や大学・公的研究機関の研究開発のツールとして活用されることを期待するものである。

1 - 2 使用対象者

- ・中部イノベーション創出共同体管内の製造業者等
- ・中部イノベーション創出共同体に参加している公的研究機関および大学等

1 - 3 局所超音波探傷装置およびロボット摩擦撈拌スポット接合装置の利用の注意

「局所超音波探傷装置」の使用を希望する者は、次項の担当機関に使用許可を得た後、本装置の取扱説明書および本マニュアルに基づき使用するものとする。

また、「ロボット摩擦撈拌スポット接合装置」の利用を希望する者は、当該装置のメーカーが指定するロボットスクールにて操作方法を習得した後、担当機関に使用許可を得て利用するものとする。

本書は、アルミニウム合金を対象材料として、本装置を利用した局所超音波探傷試験を主とし、接合継手外観試験、金属組織試験や引張試験を組み合わせる摩擦撈拌接合法による接合継手の品質評価する手法を記述した。なお、借受人の責に帰すべき事由により故障等が発生した場合は、借受人は、修理・交換等の処置を講じることとする。また、作業中の事故等による被害にあっても、担当機関は一切の責任を負わない。

1 - 4 担当機関

富山県工業技術センター

〒933-0981 富山県高岡市二上町 150

TEL 0766-21-2121 FAX 0766-21-2402

石川県工業試験場

〒920-8203 石川県金沢市鞍月 2-1

TEL 076-267-8082 FAX 076-267-8090

岐阜県機械材料研究所

〒501-3265 岐阜県小瀬 1288

TEL 0575-22-0147 FAX 0575-24-6976

愛知県産業技術研究所

〒448-0013 愛知県刈谷市恩田町 1-157-1

TEL 0566-24-1841 FAX 0566-22-8033

第2章 超音波探傷試験法の原理および試験概要

2 - 1 超音波探傷試験の原理

超音波とは、一般に人間の耳に聞こえない高周波数の音響振動として区分され、非破壊検査用語としては、JIS Z 2300 に「周波数が 20kHz 以上の音波 (Ultrasonic wave)」と定義されている。この高周波振動は、媒質の弾性（ばね定数）に依存し伝播する弾性波である。すなわち、空気、水、金属など媒質によってその伝わる速度（音速）が異なるほか、重要な性質として異なる媒質の境界では反射を生じる。この反射現象が、工業や医療など多くの分野において、超音波探傷の基本原理として利用されている。

この境界における超音波の反射は、媒質の音響インピーダンス（音の伝わり易さを示す指標）に差がある場合に生じる。音響インピーダンス Z は媒質の密度 ρ とその音速 c の積で表され、その反射率は、次の音圧反射率 R にて求められる。

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

ここで、超音波の伝播は添え字 1 から 2 の媒質へ向かう。この式から、音波は媒質間の音響インピーダンスの差が大きい場合によく反射することが理解できる。例えば、金属接合面の剥離（極わずかな空隙）を検査対象とした場合は、気体の音響インピーダンスが金属のそれに対し極めて小さいため $R \approx 1$ となりよく反射する。従って接合不良界面からの反射波を受信することで、超音波探傷が可能となる。表 2-1 に代表的な物質の音響インピーダンスを示す。

表 2 - 1 代表的な物質の音響特性

物質名	音響インピーダンス	密度	縦波音速 (m/s)	横波音速(m/s)
鉄	46.02	7.8	5900	3230
アルミニウム	16.9	2.69	6260	3080
水 (20)	1.48	1.0	1480	伝播しない
空気	0.0004	0.0013	340	伝播しない

次に、この反射波を利用した超音波探傷の試験方法について説明する。通常、反射波法における超音波の送受信は 1 つの探触子（プローブ）により行われる（図 2-1）。プローブは電歪振動子であり、電圧を印加すると変位（力）が生じ、また変位を与えると電圧が生じる性質をもつセラミック材料（圧電素子）で構成される。超音波発振のためにプローブに電圧を短時間印加し、超音波パルスを検査試料内部に伝播させ、音響インピーダンス

の異なる界面となる欠陥あるいは試料底面からの反射波を受信しその変位を電圧に変換することで、試料内部の反射源の位置情報を伝播時間から読み取るものである。この方法は、一般にパルスエコー法と呼ばれ、キャッチボールのように、送信と受信について処理タイミングを分けて行う。



図 2-1 反射波法における超音波プローブの例

図 2-2 にパルスエコー法で得られる受信波形例を示す。横軸が伝播時間、縦軸が受信波の音圧であり、この表示モードを通常 A モード (A スキャン) と呼ぶ。 t は音波が反射源までの距離を往復するのに要した伝播時間であり、媒質の音速 V が既知であれば、その反射源の位置 (深さ d) が算出できる ($d = V \times t / 2$)。A スキャンでは、原理の通り、プローブ径領域における面あるいは深さ方向の反射源情報を取得することができる (図 2-3 および図 2-4)。

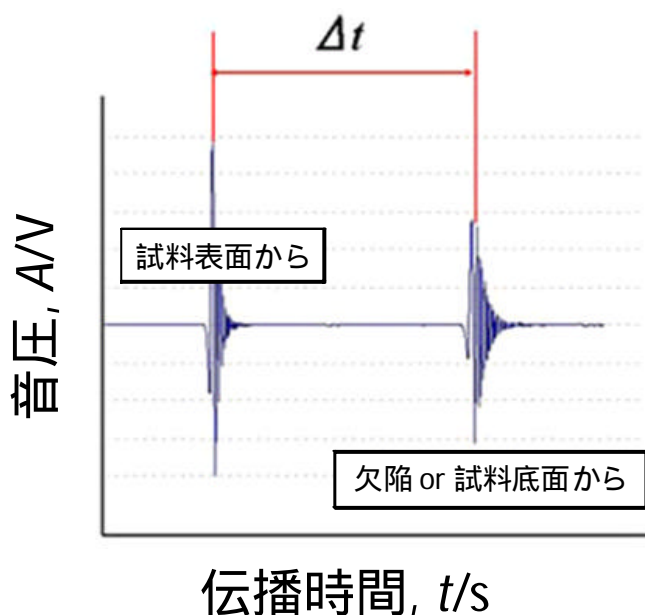


図 2-2 パルスエコー法における受信波形の例 (A スキャン)

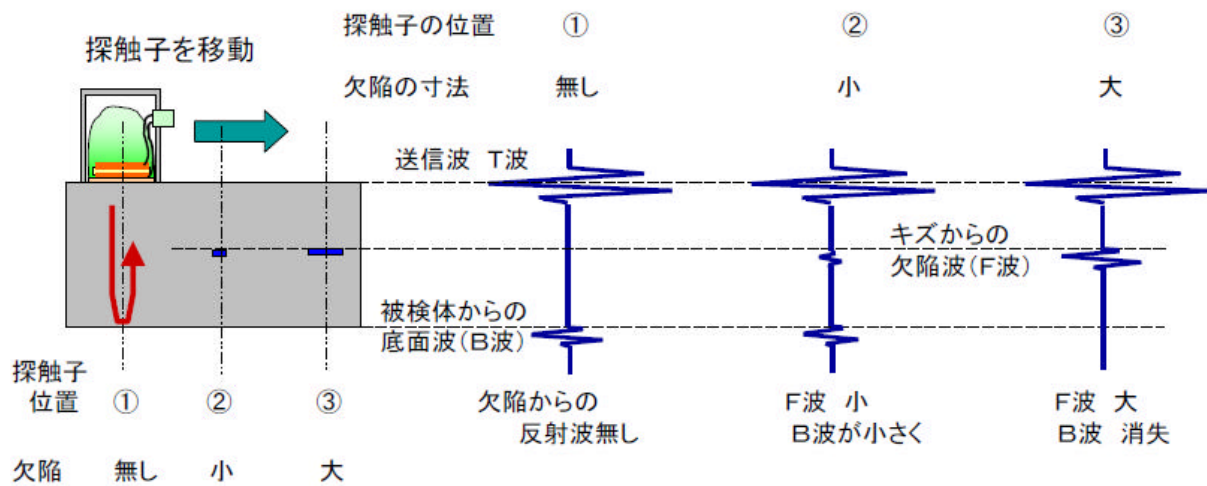


図 2-3 A スキャンによる探傷試験のイメージ (欠陥の面積が異なる場合)

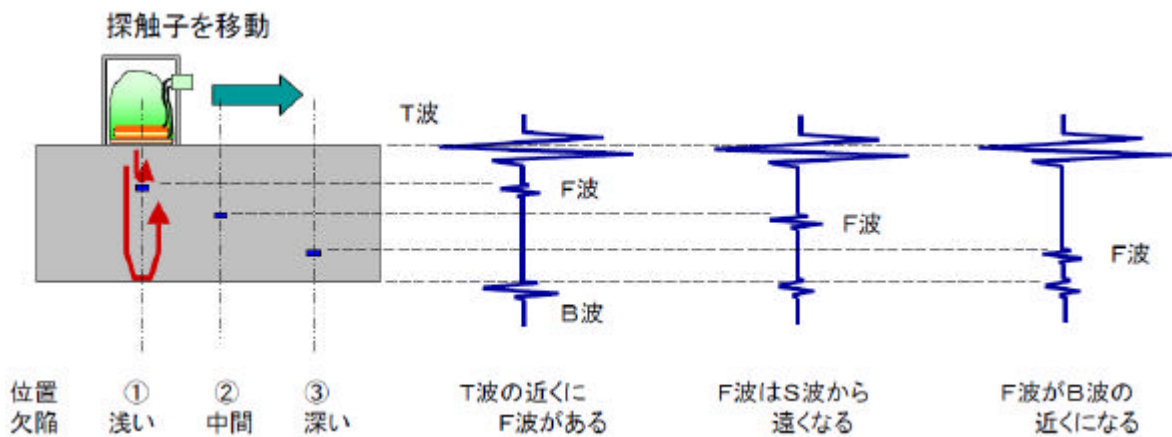


図 2-4 A スキャンによる探傷試験のイメージ (欠陥の位置が異なる場合)

(<http://www.dia-elec.com> より)

2 - 2 一般的な超音波探傷試験方法の概要

(1) 垂直探傷法

超音波を探傷面に対して垂直に送受信する。健全部では、オシロスコープなどの画面に底面のエコーだけが現れるが、キズがあると底面のエコーの前にキズのエコーが現れる。位置は、超音波の伝搬速度（音速）と反射波が戻ってくるのに要した時間の関係から求められる。実際にはブラウン管の横軸のメモリが何ミリに相当するかを標準の試験片を用いて調整することにより簡単に求めることができる。本方法は、板材等に適した方法である。

(2) 斜角探傷法

本方法は図 2-5 に示すように超音波を探傷面に対して斜めに送受信して行う。欠陥がある場合、反射エコーが現れるが、エコーの高さは入射角などに依存する。試験体に向かって探触子を前後に走査して、探触子からでた超音波を直接欠陥に当てる直接法と、底面で反射した超音波を当てる反射法を併用することにより、広い範囲を検査することができる。欠陥の位置は超音波の入射角度と路程から求めることができ、反射エコーの高さや広がりから欠陥の性状を推察することができる。斜角探傷法は、溶接部や鋼管等に適用される。

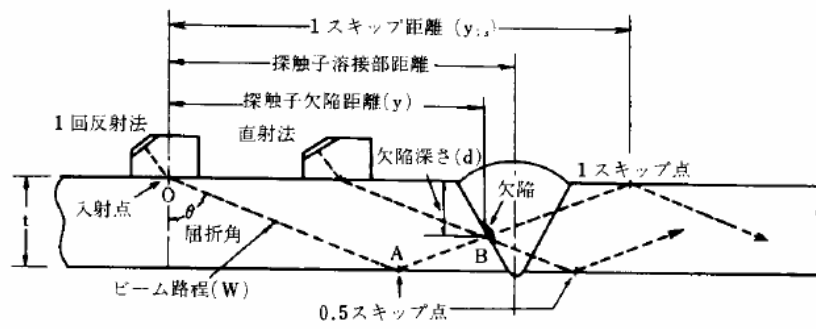


図 2-5 斜角探傷法の概要

第3章 局所超音波探傷装置の概要および取り扱いに関する注意事項

3-1 局所超音波探傷装置の特徴および測定原理

図 3-1 に局所超音波探傷装置の外観を示す。装置は自走式探触子が内蔵されているスキャンユニット（図 3-1(a)）とコントロールユニット（図 3-1(b)）で構成されており、総重量は 14kg である。

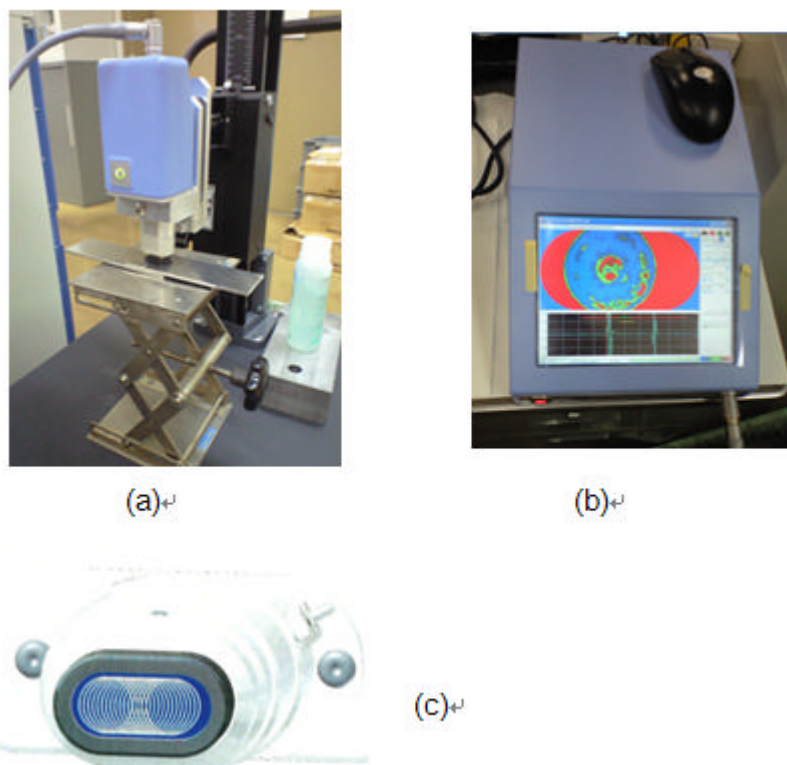


図 3-1 局所超音波探傷装置の外観

スキャンユニットは、手で持ち運びが可能であり、ユニットの先端部（スキャンヘッド 図 3-1(c)）の内部には水が充てんされており、探触子がある、探触子は試験体と接触する面内を自走し、 $10 \times 20\text{mm}$ の範囲を 5 秒で走査し、内部を探傷する。

本装置は、先に述べた A スキャンをプローブの機械的な駆動により連続的に多点実施し、プローブ径以上の広域面積における試料内部反射波源の位置情報を二次元的に描画するものである。通常、このような面スキャンモードは C スキャンと呼ばれる。

図 3-2 に本装置による探傷試験方法の原理を示す。測定の原理は、スキャンヘッドを押し当てた領域内を探触子が走査しながら、内部反射エコー（A スキャン）を測定する。各地点での A スキャン波形において、あらかじめ対象物の厚さ方向での内部探傷面に相当する位置にゲートを設定する。このゲートに入るエコーは反射強度(電圧)に応じて、色に変

換され、C スキャン画像として表示される。

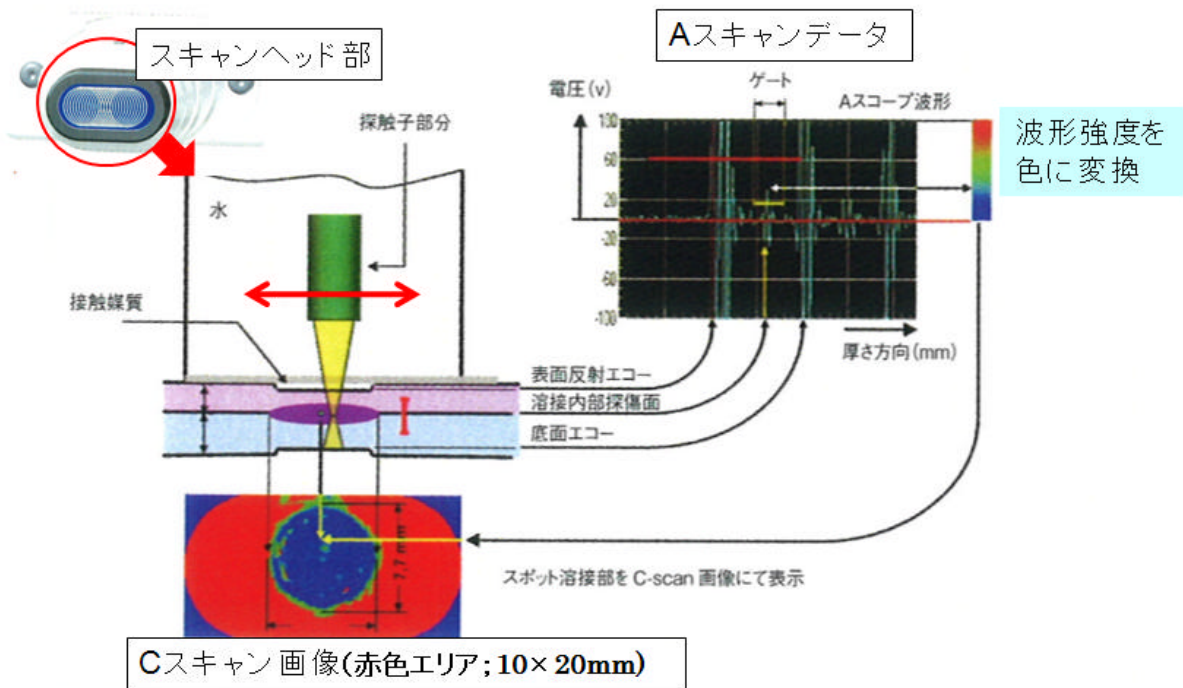


図 3-2 局所超音波探傷装置による測定原理

図 3-3 に本装置により取得された実際の音圧強度マップを示す (FSJ 加工部)。設定した任意の時間帯 (深さ位置) において、反射波が強い領域を区別するため、反射波の音圧強度に応じた色付けがされている (図 3-3 では、未接合界面に相当する時間帯の音圧が赤色になるように表示してある。青色は音圧が低い、すなわち反射波がほとんどないことを示す)。

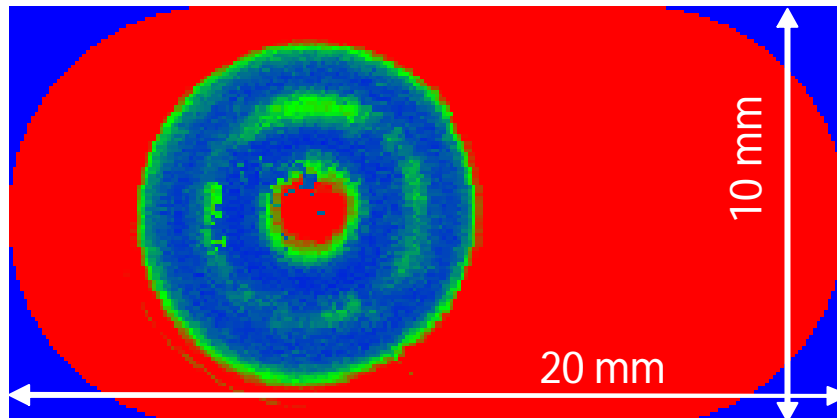


図 3-3 局所超音波探傷装置による C スキャン表示例 (FSJ 加工部)

一般に非破壊検査では、接合界面の不良箇所分布など C スキャンの要求が多く、従来はビーム集束型探触子を用いて、探触子を平面的に走査させることでこれを実施してきた (X-Y の直線走査)。しかしながら、水中で行わねばならず適用用途が限られていたほか、その測定には時間がかかり、そのため測定精度にも問題があった。本装置は、20×10 mm の範囲を約 5 秒で試験完了する。また探触子は密閉されたヘッドカバー内部に浸水しており、検査試料とのカップリングはグリスを塗布して行うため、水中で行う必要がなく、現場での検査作業を可能とするものである。

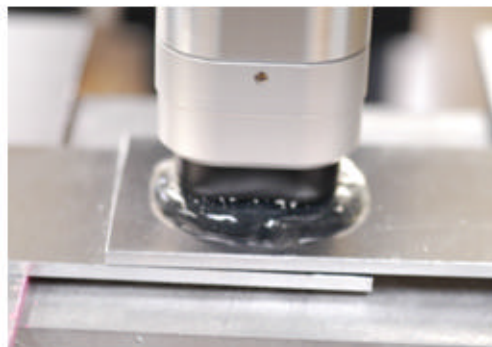
3 - 2 局所超音波探傷装置の取り扱いに関する注意

本装置を使用する上で取扱説明書での記載事項以外に、特に重要な注意事項を以下に述べる。

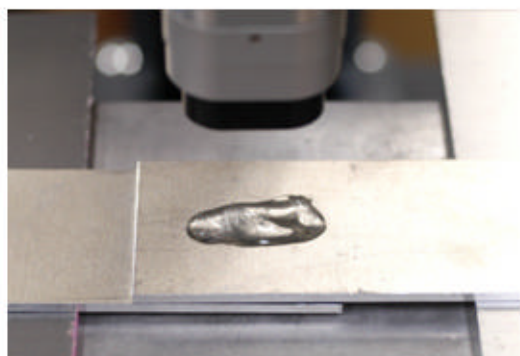
- (1) 注入量は、空気穴をあけて、注水口に専用の注水器(注射器)で水があふれる程度まで注水すること
- (2) 排水する場合、注水口から排水を行い、最後にドレインストッパを外して内部の拭き掃除を行う。この際、ドレインストッパーは、2 か所でねじ止めしてある。このねじを完全に緩めてから、ドレインストッパーを外すこと。(ハウジングがアルミ合金製であるため傷がつきやすく水漏れの原因となるため)
- (3) 測定の間隔が長時間になる場合、スキャナケーブルはスキャンユニットからはずすこと。(ケーブルが接続されているとトランスデューサが動作状態にあり、寿命の低下に繋がるため)
- (4) ゲルの塗布量は、図 3-4(a),(b)のように多めに塗布する方がよい。(図 3-4(c),(d)は、ゲルが少ない例)ゲルが少ない場合、空気の巻き込みにより図 3-5 のように空気層が認められる。
- (5) スキャンヘッドは、試験体に垂直にセットすること (A スキャンデータがシフトするため、正確な C スキャン画像が得られなくなる可能性が高くなる)



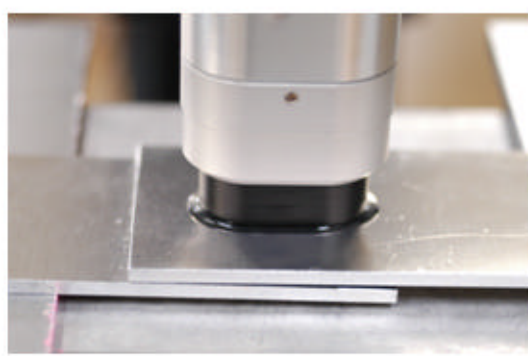
(a) ゲルの塗布状況(多い)



(b) スキャンヘッド取り付け後(ゲル多い)



(c) ゲル塗布量が少ない場合の塗布



(d) スキャンヘッド取り付け後(ゲル少ない)

図 3-4 ゲルの塗布状態

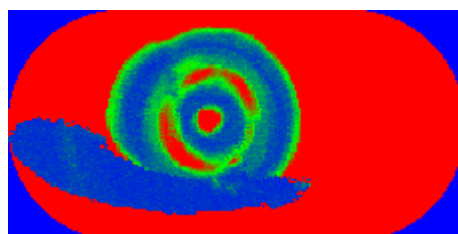


図 3-5 空気層が存在する C スキャン画像 (少量ゲルの場合)

第4章 摩擦攪拌スポット接合法の原理

4-1 摩擦攪拌スポット接合法の原理

図4-1に摩擦攪拌スポット接合（Friction Spot Joining, FSJ と略す）方法の原理を示す。FSJは、ツールと呼ぶ工具を用いて接合を行う。接合では、接合ツールを試験片表面に垂直になるように位置決めを行った後、ツールを所定の加圧力で試験片表面に押し当てて、プローブとの摩擦熱により、試験片が軟化して、プローブが試験片の中に圧入される（図4-1(a)）。ショルダーが試験片と接触しても所定の加圧力を所定の時間負荷できるような制御方式（加圧力制御方式）で接合を行う。この間プローブ周囲では塑性流動域が形成されることにより、重ね接合継手が作成できる。

図4-2に接合継手における試験片内部の塑性流動状況を示す。プローブおよびショルダーが侵入することと、プローブに施されている左ねじが右回転するためねじ溝によって上方の材料が下方へ押し込まれることとによって、接合部では上下板境界面が上方へ移動している。そしてプローブ周辺においては上下材料が混合する領域がドーナツ状に形成される。接合条件、材料によって異なるものの、接合部断面のマクロ写真は概ねこのような形態を示している。

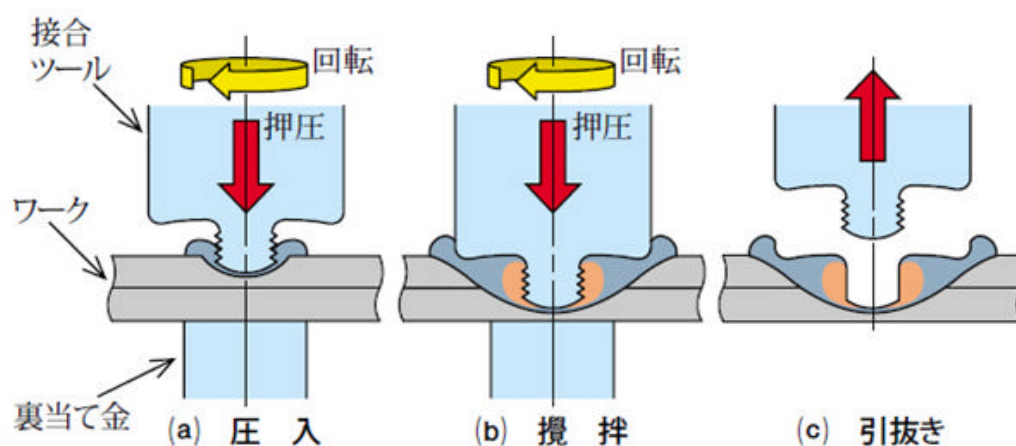


図4-1 摩擦攪拌スポット接合法の原理

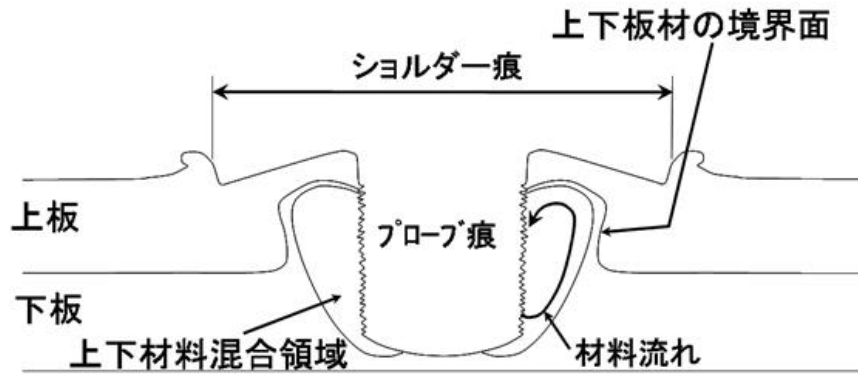


図 4-2 接合継手断面の模式図

4 - 2 ロボット摩擦攪拌スポット接合装置の特徴

ロボット摩擦攪拌スポット接合装置の外観および接合装置部の拡大を図 4-3 に示す。本装置の主な仕様は、主軸回転速度が最大 3000rpm、加圧力が 1470～最大 5880N、最大出力トルクが 9.8N・m である。また、ロボットは、可搬重量 165kg の 6 軸多関節型マニピュレータである。



図 4-3 ロボット摩擦攪拌スポット接合装置の外観

本装置を利用した接合継手の代表例としては、重ね合わせ接合継手がある。具体的には、2 枚の試験片を重ねてその中央を接合する事例である。摩擦攪拌接合においては、接合中の試験片の変形を防ぐための固定治具及び固定方法が重要である。

一例として、図 4-4 に本研究で使用した試験片の固定治具の外観を示す。試験片は、治具

中央部の直径 30mm の穴の上側で重ね合うように設置し、4 つのバイスで確実に固定する。

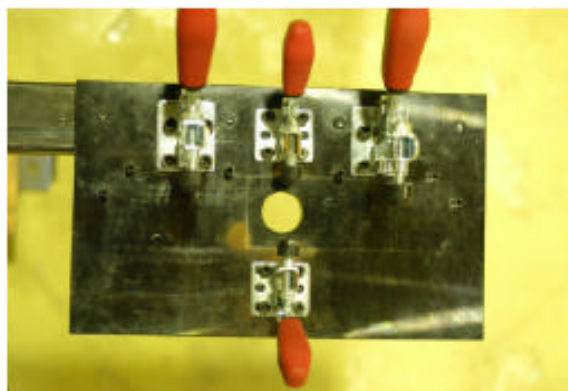


図 4-4 接合試験片の固定治具の外観例

本接合で使用する接合ツールの一例を図 4-5 に示す。ショルダー直径は 12mm、プローブは長さ 4mm で M5 の左ねじが施されている。ショルダー面は凹面形状であり、プローブ先端部は曲面形状 (R5) である。なお材質は SKD61 が一般的に利用されている。

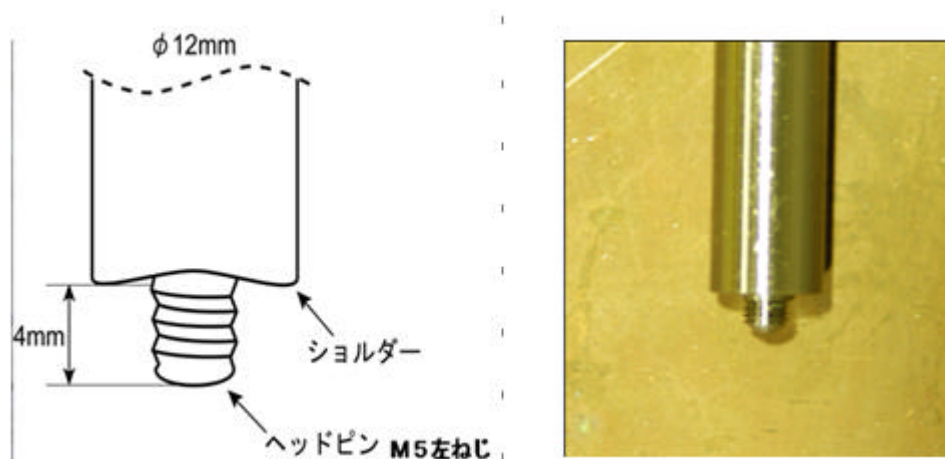


図 4-5 ツール外観およびツールの寸法・形状

第5章 摩擦攪拌スポット接合継手の破壊試験による品質評価方法と評価事例

接合継手の品質評価方法としては、一般的には外観観察試験、組織観察試験、機械強度試験および非破壊試験などにより総合的に評価することが推奨される。

本マニュアルでは、外観観察試験、断面組織観察試験、せん断引張試験および超音波探傷試験による評価手法について事例をもとに説明する。

5 - 1 接合継手外観の評価方法との評価事例

重ね合わせ接合継手を事例として、評価手法を述べる。図 5-1 に接合継手の外観および寸法を示す。図 5-2 には継手外観の拡大写真の一例を示す。摩擦攪拌スポット接合では、表面はツール痕が残るが、裏面では、熱影響による接合部の模様が観察される。

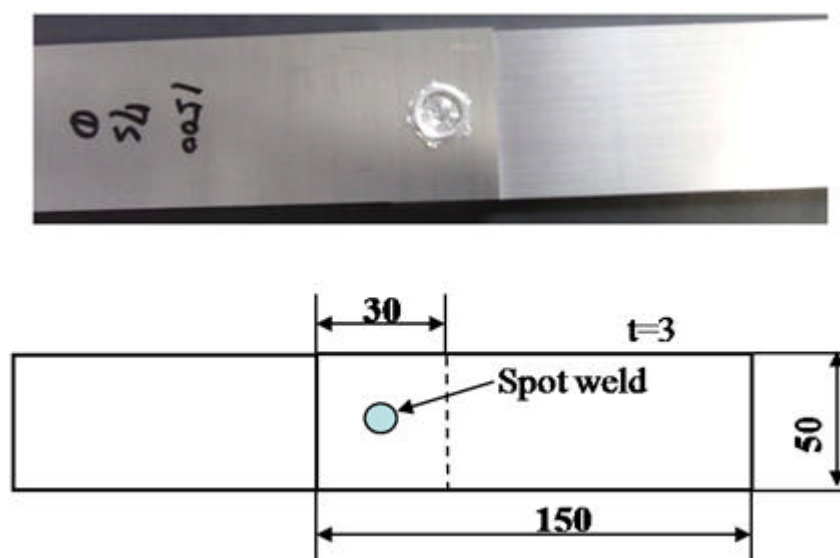


図 5-1 接合継手の外観および寸法の一例

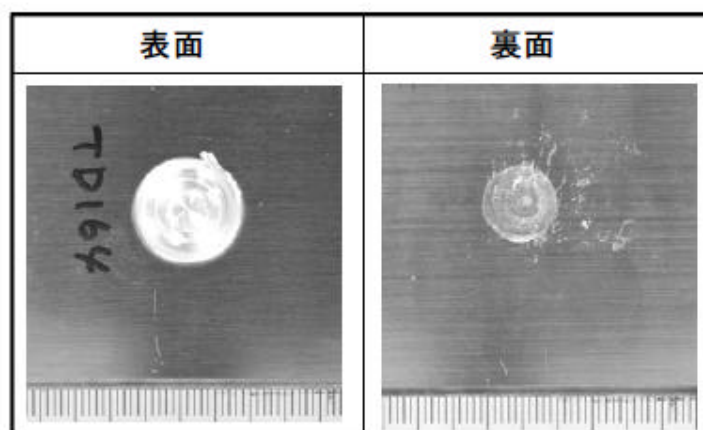


図 5-2 接合部の外観例 (A6061, 3mm, 5390N, 2500rpm, 10s)

図 5-2 にスポット接合部の外観を示す。接合部中心は、プローブの痕跡により凹みがある。接合部の大きさはツール外径よりやや大きめとなっており、外周にはバリが観察された。また、試験片の裏面は、熱影響により接合の痕跡が認められた。

接合性を継手外観より推測する指標として、

接合部の外径 プローブの進入深さ
が考えられる。

接合部の外径

図 5-3 は、A6061 合金について、加圧力 5390N、接合時間 6s の条件で回転速度を変化させた場合の接合部外観を示したものである。回転速度の増加と共に外径 (Rr0) は減少する傾向を示した。また、図 5-4 に加圧力 5390N、回転速度 2500rpm を一定とし、接合時間を変化させた場合の接合部外観を示す。外径はほとんど変化が認められなかった。回転速度の増加により遠心力は高まり、外径が広がる傾向を示したと考えられる。

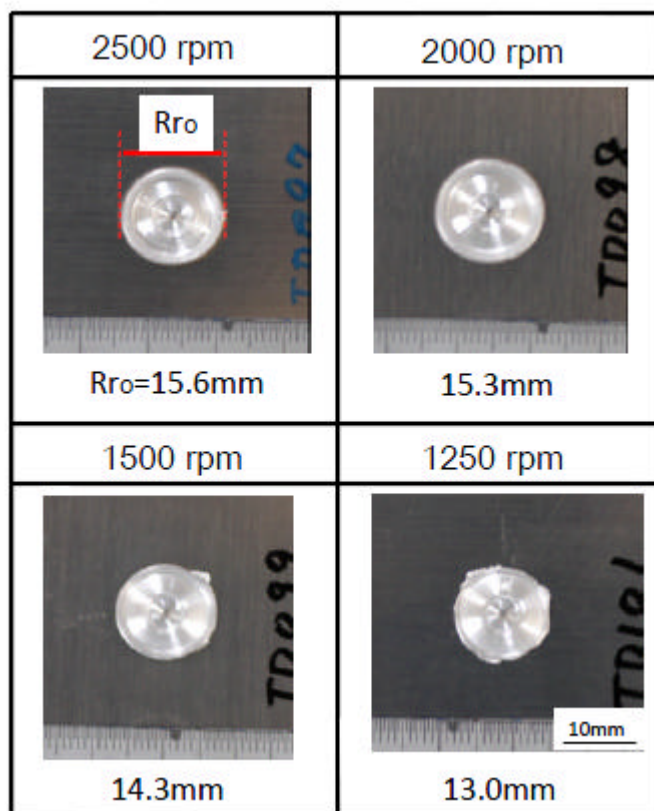


図 5-3 接合部外径に及ぼす回転速度の影響 (A6061, 6s, 5390N)




6s	8s	10s
		
R _{r0} =15.8mm	15.4mm	15.8mm

図 5-4 接合部外径に及ぼす接合時間の影響 (A6061, 2500rpm, 5390N)

プローブの進入深さ

ロボット摩擦攪拌スポット接合装置について、接合中の制御方法は、加圧力一定に保つ制御方法が採用されている。したがって、材料の変形能の温度依存性の程度によっては、塑性流動作用が変化し、プローブの進入深さが変化すると考えられる。また、本接合は非定常状態での現象であるため、時間の影響も受けることになる。進入深さが変化することは、プローブの周囲に形成される塑性流動域すなわち接合領域（ナゲットの形状に相当）に影響することを意味する。そこで、接合外観からプローブの進入深さの相対関係にあるものとして、接合部のプローブ痕跡の中心での板厚（接合部中心部の板厚）を測定し、加工条件の影響を評価した。図 5-5 に A6061, A5083 および A7075 について、接合部中心の板厚に対する接合時間の影響を示す。なお、回転速度は、A6061 の場合で 2500rpm、A5083 および A7075 で 1500rpm とした。いずれの合金も接合時間の増加と共に、中心部の厚さは減少する傾向を示した。特に変形能が高い A6061 合金は、塑性流動作用が活発になると推測され、プローブが深く進入し、中心部の板厚は減少する傾向を示した。

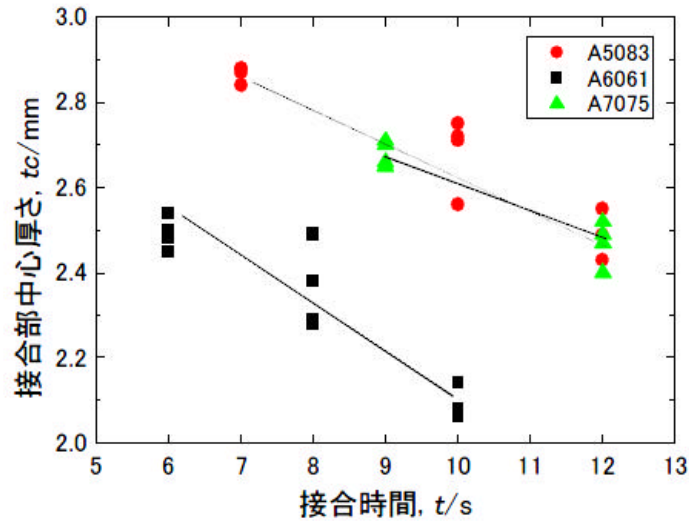
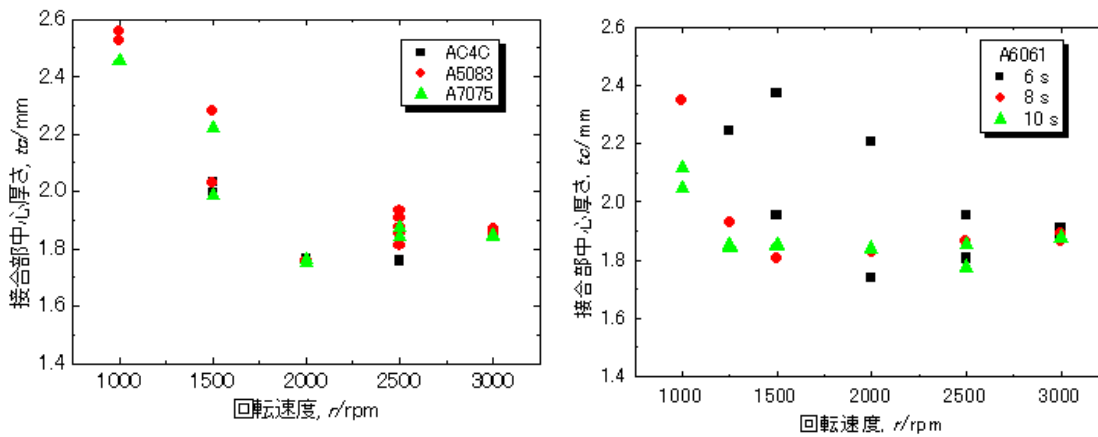


図 5-5 接合時間と接合部中心の板厚の関係



(a) A6061

(b) A5083, A7075, AC4C

図 5-6 接合部中心厚さに及ぼす回転速度の影響

図 5-6 に各種材料について接合部中心厚さに及ぼす回転速度の影響を示す。回転速度の増加と共に中心部厚さは、減少する傾向を示した。また、A6061 合金の場合、同一回転速度では、接合時間の増加に伴い厚さは減少する傾向を示した。すなわち、回転速度や接合時間の増加により摩擦熱による入熱が増加し、内部の塑性流動作用が大きくなり、プローブの圧入が進展したものと考えられる。

摩擦攪拌スポット接合は、その原理から考えて、汎用のフライス加工機を使用しても接合が可能であるかについて検討をしてみた。ただし、フライス加工機では、主軸回転数の選択に自由度がないため、最適な接合加工条件が選定されるかどうかについては、疑問が

残る。本マニュアルでは、薄板（板厚 < 1mm）アルミニウム合金の接合継手についての事例を紹介する。

図 5-7 に A5052(0.6t)材を用い、ツール回転速度は 1300 と 1800rpm、押込量 0.1mm で 3 秒間攪拌した FSJ 接合継手の外観を示す。ツール回転速度 1300rpm では、発熱不足でショルダーとの摩擦面がむしれた状態になるが、ツール回転速度 1800rpm では、ショルダーとの摩擦面にツール旋削加工時のツールマークが転写された良好な外観となる。しかし、ショルダー下首径を 8mm としたツールでは、1800rpm でも発熱不足となり、接合できなかった。主軸回転速度に制限のある NC フライス盤を使用した薄板の FSJ では、発生させた摩擦熱の伝熱ロスを如何に小さくするか工夫がポイントとなる。

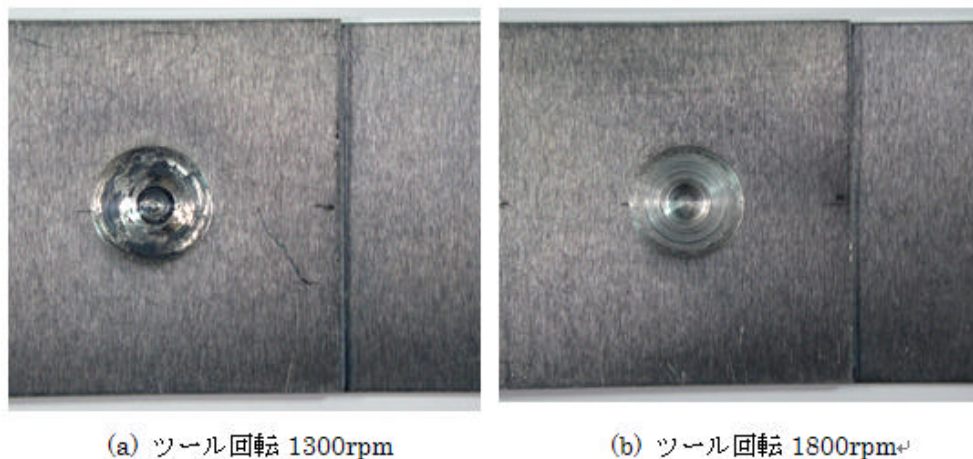


図 5-7 ツールの回転速度と接合部の外観（A5052、0.6t）

これに対して、A1050 (1t)材では、接合ツールのショルダー径とプローブ径を 0.6t 材より大きくできるため、攪拌プロセスで生じる摩擦熱量が大きくなる。そのため、FSJ 接合は 0.6t 材よりずっと簡単になる。A1050 (1t)材を用い、ツール回転速度は 920、1300、1800rpm、押込量 0.15mm で 3 秒間攪拌した FSJ 接合継手の外観を図 5-8 に示す。いずれの継手も強固に接合されているが、ツール回転速度 920 と 1300rpm では、ショルダーとの摩擦面の中心付近が若干粗くなっている。一方、ツール回転速度 1800rpm では、ショルダーとの摩擦面にツール旋削加工時のツールマークが転写された平滑な外観である。

しかし、920rpm で 1.5 秒以下の攪拌では、摩擦発熱温度が不十分であるためにツールと母材が凝着し、図 5-9 に示すようにツール引抜き時に軟化した攪拌部位がむしり取られて、FSJ 接合が不可能となることもある。このことから、1t の薄板材の FSJ 接合では 1300rpm 以上のツール回転速度が必要である。

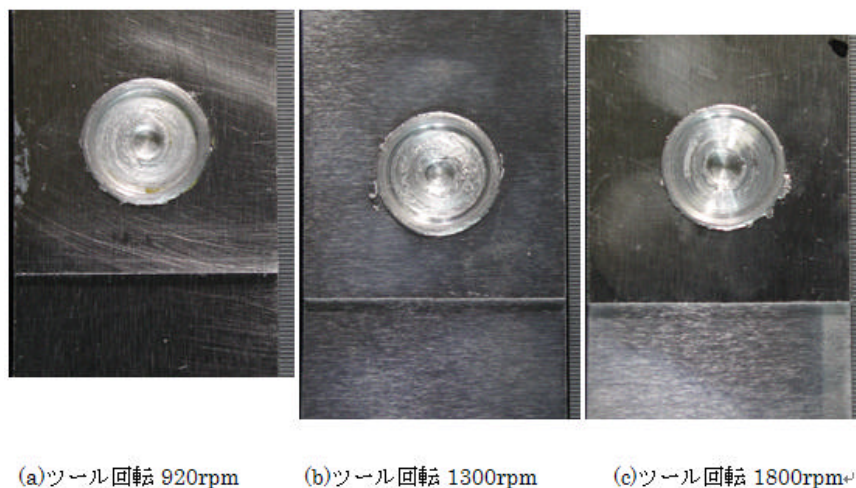


図 5-8 ツールの回転速度と接合部の外観 (A1050、1t)

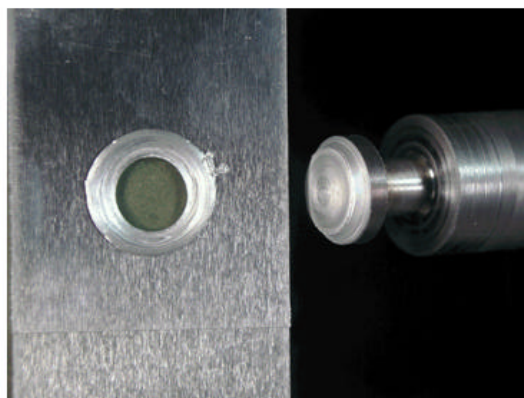


図 5-9 ツールに母材が凝着した FSJ 加工例 (A1050、920rpm)

5 - 2 接合継手部の組織学的評価方法とその評価事例

つぎに、接合継手の断面マクロ組織の観察することにより、接合品質に及ぼす接合条件の影響を評価する方法について事例をもとに紹介する。

同種アルミニウム合金の接合継手の場合

図 5-10 に A6061 について、回転速度 1500rpm の条件で接合時間を変化させた場合の接合継手の断面マクロ組織を示す。プローブ痕跡の周囲で白くエッチングされているリング状の領域が塑性流動により攪拌された領域である。攪拌領域は接合時間の増加により幅や板厚方向に広がる傾向を示した。

図 5-11 に A6061 について、加圧力 5390N、接合時間 6s の条件で回転速度を変化させた場合の接合継手の断面マクロ組織を示す。また、図 5-12 には A5083 について、加

圧力 5880N, 接合時間 10s の条件でのマクロ組織を示す。いずれも回転速度の増加と共に攪拌領域はプローブの周方向に拡大する傾向にあった。このことは、接合領域すなわちスポット溶接でのナゲット径に相当する領域が拡大することを意味している。そこで、断面マクロ観察からナゲット径を測定したところ、例えば、図 5-11 の A6061 合金の場合、1250rpm では、5.4mm であったが、1500、2000、2500rpm の順に 6.0、9.0、9.5mm と増加する傾向を示した。また、接合中心での板厚は、回転速度の増加と共に減少する傾向を示しており、図 5-5 で示した接合時間の影響と同様な傾向を示した。これは、一定加圧条件下であるため接合時間及び回転速度の増加により、摩擦熱は増加し、攪拌・軟化が進展しプローブが内部に進入し易くなるため、中心部の厚さは、減少したものと考えられる。

また、図 5-12 の A5083 合金の場合は、3000rpm の条件では、上下の板の間に塑性流動した材料が排出され、すき間が発生した。

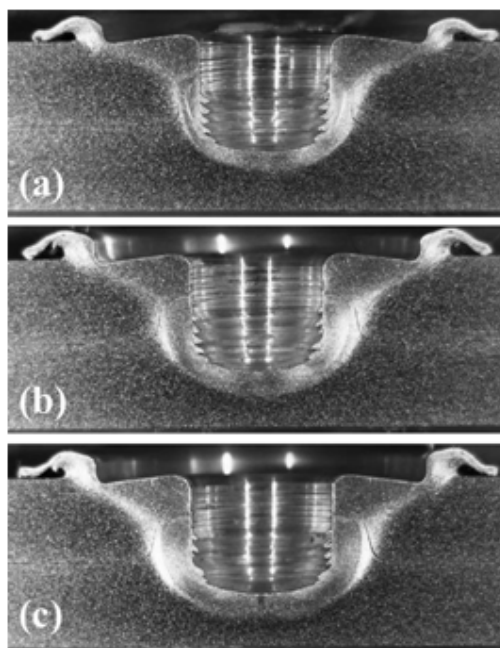


図 5-10 A6061 での接合時間を変化させた場合の断面マクロ組織

(a)1s, (b)4s, (c)7s

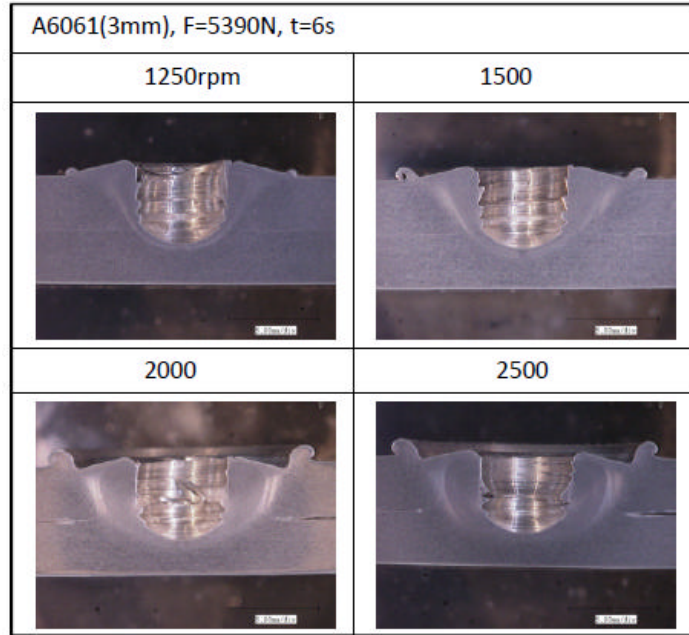


図 5-11 A6061 での回転速度を変化させた場合の断面マクロ組織

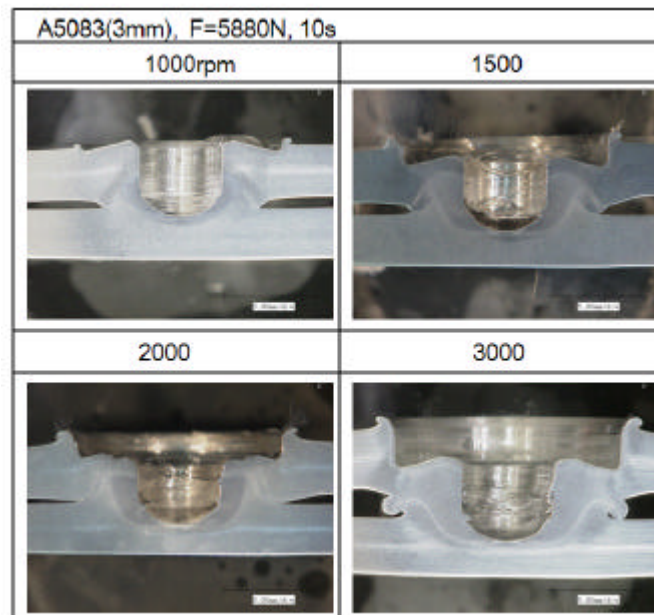


図 5-12 A5083 での回転速度を変化させた場合の断面マクロ組織

異種アルミニウム合金の接合継手の場合

図 5-13 に異種アルミニウム合金の接合継手の断面マクロ組織を示す。異種アルミニウム合金板材の重ね合わせスポット接合を行う場合の主な加工パラメータとして、接合時間と回転速度が挙げられる。接合時間および回転速度の増加により摩擦熱は増加し、

接合領域の拡大、継手品質の安定化に繋がると考えられる。しかし、異種アルミニウム合金の場合、同一加工条件でも被接合材の機械的性質により攪拌領域が異なる。また同じ組み合わせの場合でも、上板と下板の違いで接合状態が異なるので注意する必要がある。

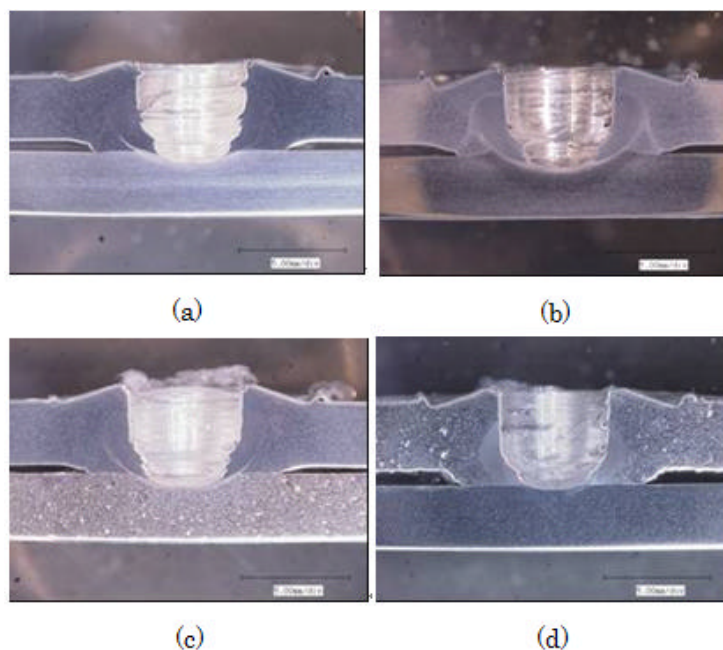


図 5-13 接合材の組み合わせによるマクロ組織の変化
(加圧力：5390N，接合時間：5sec，回転速度：2500rpm)

薄板アルミニウム合金の接合継手の場合

板厚が 1mm 以下の薄板を上板として重ねスポット接合を行う場合、攪拌時間は短時間で済む利点があるが、わずかな時間の差が接合性の良否を左右する結果にもなる。ここでは、接合時間の影響を断面組織観察から検討した事例を紹介する。また、位置制御方式の FSJ ではツールの押し込み量も薄板の場合では、接合性に及ぼす影響が大きくなると懸念されるため、押し込み量の影響の評価についても検討した結果を紹介する。

(1)接合時間の影響評価

1) 初期段階

図 5-14 に、A1050 1t 材をツール回転速度 1800rpm、押し込み深さ 0.1mm、接合時間 0.1 秒で FSJ 接合した継手の断面、図 5-15 に同継手断面を拡大した視野を示す。合わせ面のショルダー外周エッジ下が摩擦熱を受けて圧着され、ネジプローブとの接触部

は強い攪拌を受けて界面が上方に塑性流動して一体化しているが、板表面には連続した酸化皮膜が残存している。プローブと外周の中間部分にある摩擦攪拌領域では、ツールの押し付け圧力や混錬が不十分であり、数十ミクロンの微細な空孔欠陥が散在している。界面における押し付け力が高いところ、界面攪拌力の強いところから優先的に接合面が形成されている。また、ナゲットの上板側では、プローブの挿入時に押しつけられた母材がショルダーのヌスミ部に充填されて山形を形成しており、山形部分には黒色の流動組織が見られる。

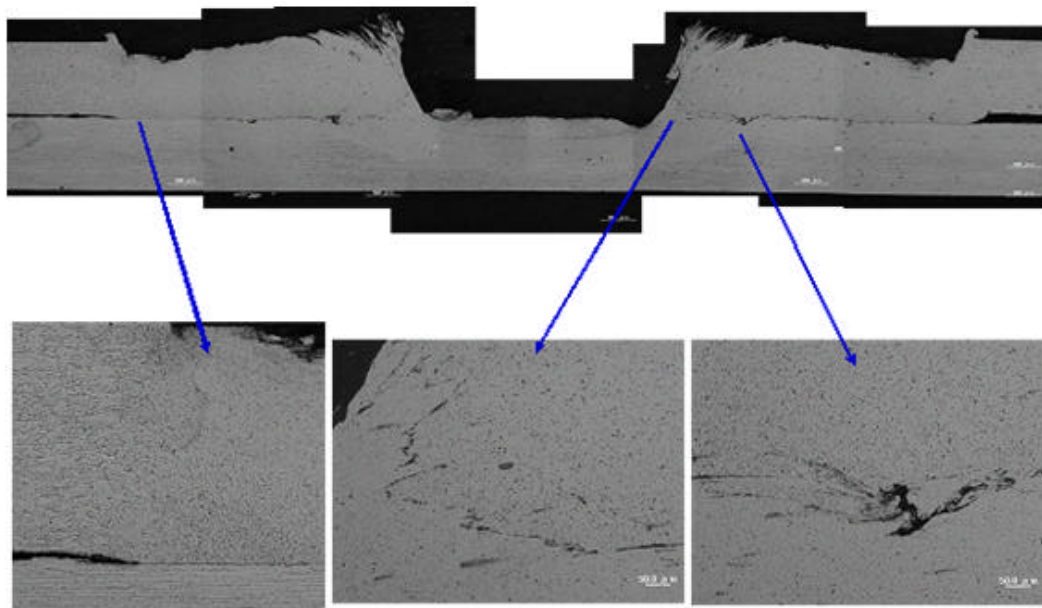


図 5-14 接合時間 0.1 秒の FSJ 継手断面 (A1050、1t)

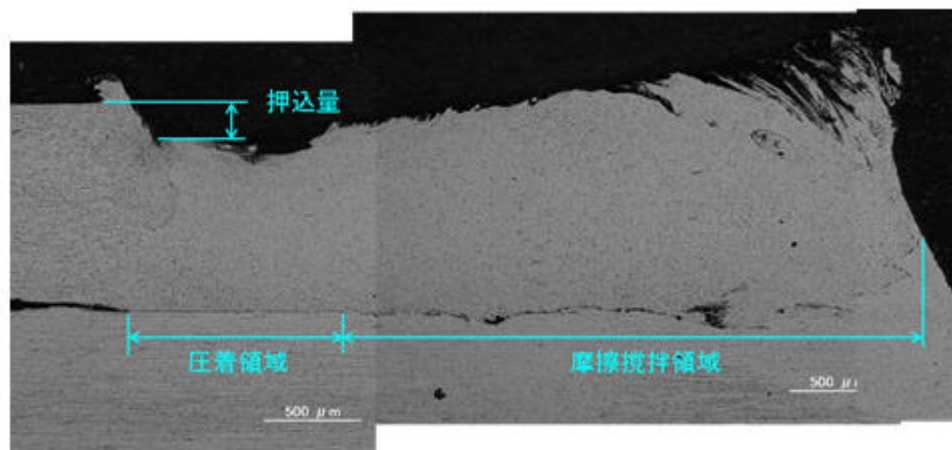


図 5-15 同上拡大視野

2) 成長段階

図 5-16 に、A1050 1t 材をネジプローブツール回転速度 1300rpm、押し込み深

0.1mm、接合時間 0.5 秒で FSJ 接合した継手の断面を示す。ショルダー下の接合部分では、元の合わせ面が消失し、上板下板は互いに混ざり合っている。接合時間 0.1 秒で観察された板表面に存在した酸化皮膜は、回転攪拌力を受ける上板内に混錬・分散している。また、摩擦熱で軟化した母材が合わせ面からはみ出して上板下板のすきま高さが大きくなるとともに、継手強度を受け持つ最小板厚が小さくなる。回転周速が小さいプローブ底面では、混錬不足により小さな亀裂を生じている。

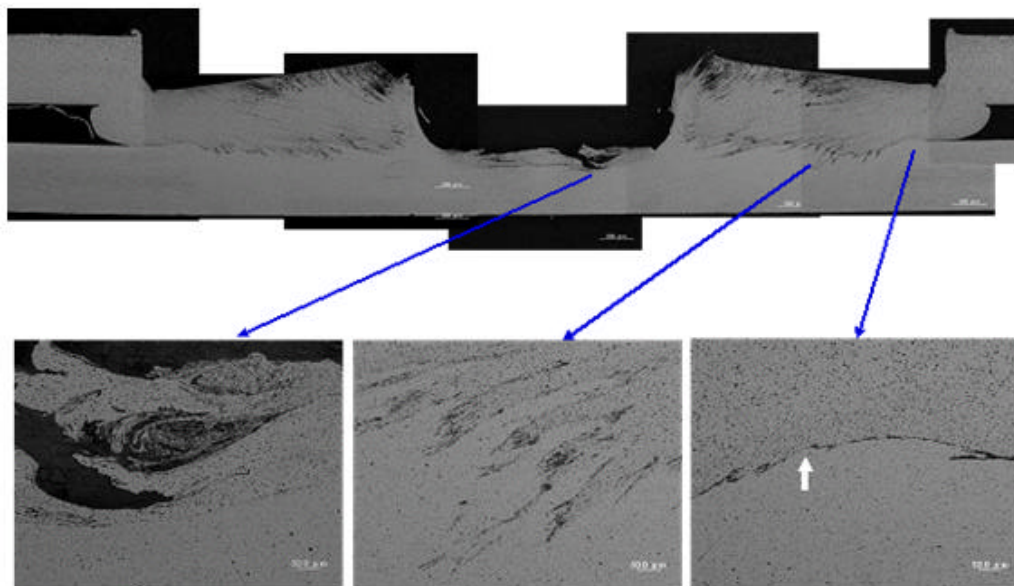


図 5-16 接合時間 0.5 秒の FSJ 継手断面 (A1050、1t)

3) 完成段階

図 5-17 に、A1050 1t 材をツール回転速度 1300rpm、押し込み深さ 0.1mm、接合時間 3 秒で FSJ 接合した継手の断面を示す。ショルダー下に形成された接合部分では、ネジプローブの回転によって母材を下方へ押し出すように攪拌混錬を受け、合わせ界面が下板側に広がり、界面における連続した酸化膜は完全に消失している。接合時間 0.5 秒で FSJ した継手 (図 7) に比べて、合わせ界面が下板側に広がった分だけナゲットの高さが低くなり、軟化した上板母材が回転するショルダー面に引きずられ、下流側へと塑性流動する。写真の右側ですきま高さが大きくなっていることが確認できる。また、上板側に存在する酸化膜の巻き込みが多い黒色層が非常に少なくなったことから、回転ツールにより十分な攪拌混錬を受けて、母材への酸化膜の均一分散が進んだことがわかる。

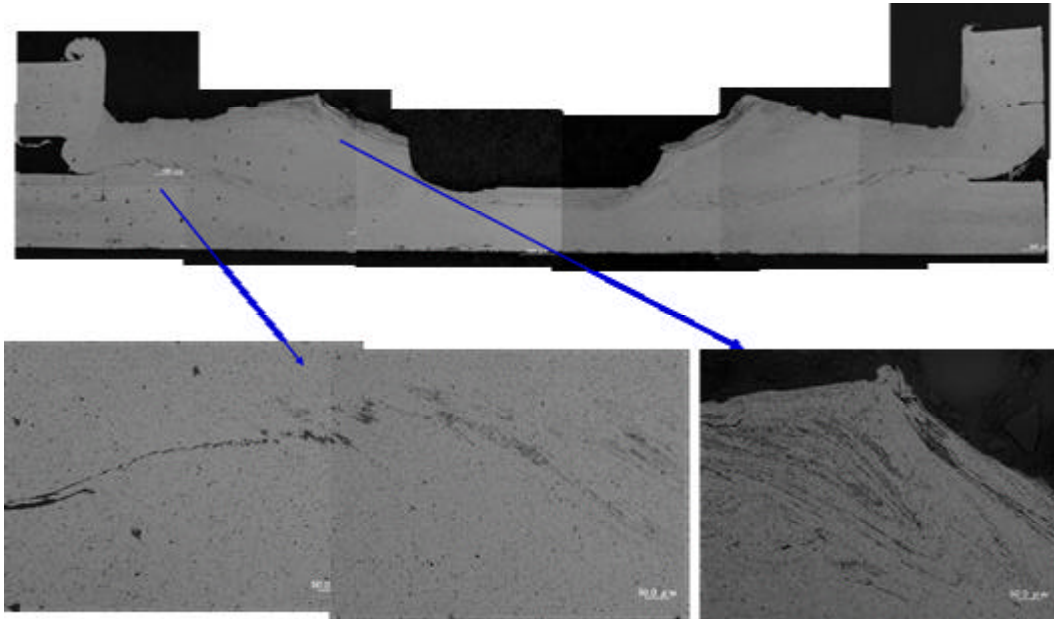


図 5-17 攪拌時間 3 秒の FSJ 継手断面 (A1050、1t)

(2)押し込み深さの影響評価

ツール押し込み深さは継手強度に大きく影響する。これにはナゲット攪拌混錬状態の差が影響しており、図 5-18 に、A1050 1t 材をネジプローブツール回転速度 1800rpm、攪拌時間 3 秒の条件で、押し込み深さを 0~0.2mm の範囲で変化させて FSJ 接合したナゲットの断面について、継手品質の判断見本として示す。

(a) 押し込み深さ 0mm では、中心に近い一部分のみがショルダー面と接触し、攪拌混錬を受けた領域はネジプローブの周囲に 1mm の範囲で確認される。攪拌混錬領域では、合わせ界面が圧着されて上方へ垂直に屈曲している。接合不良の継手の組織である。

(b) 押し込み深さ 0.1mm では、山形のショルダーとの接触面が形成され、外周に小さなバリを生じた。ショルダー下の合わせ界面では圧着や攪拌混錬が起こり、ショルダー径に相当するナゲットが形成される。強攪拌を受けるプローブの根元やショルダー外周部などには、攪拌混錬が不十分な黒色の塑性流動組織が観察される。高い継手強度を示すが、摩擦攪拌が不足したナゲットの組織である。

(c) 押し込み深さ 0.15mm では、ナゲット外周のバリが少し大きくなるとともに、合わせ界面での攪拌混錬がショルダー径全域に広がり、下板界面が適度に蛇行している。最適条件で FSJ 接合された健全なナゲットの組織である。

(d) 押し込み深さ 0.2mm では、ナゲット外周のバリがさらに大きくなるとともに、下板界面がナゲット高さ方向に大きく蛇行している。過剰な摩擦条件で FSJ 接合され

た過熱ナゲットの組織である。高い摩擦熱を受けて、軟化した母材がプローブの下方方向に押し出され、ナゲット裏面に局部的なヒケや開口穴を生じていた。

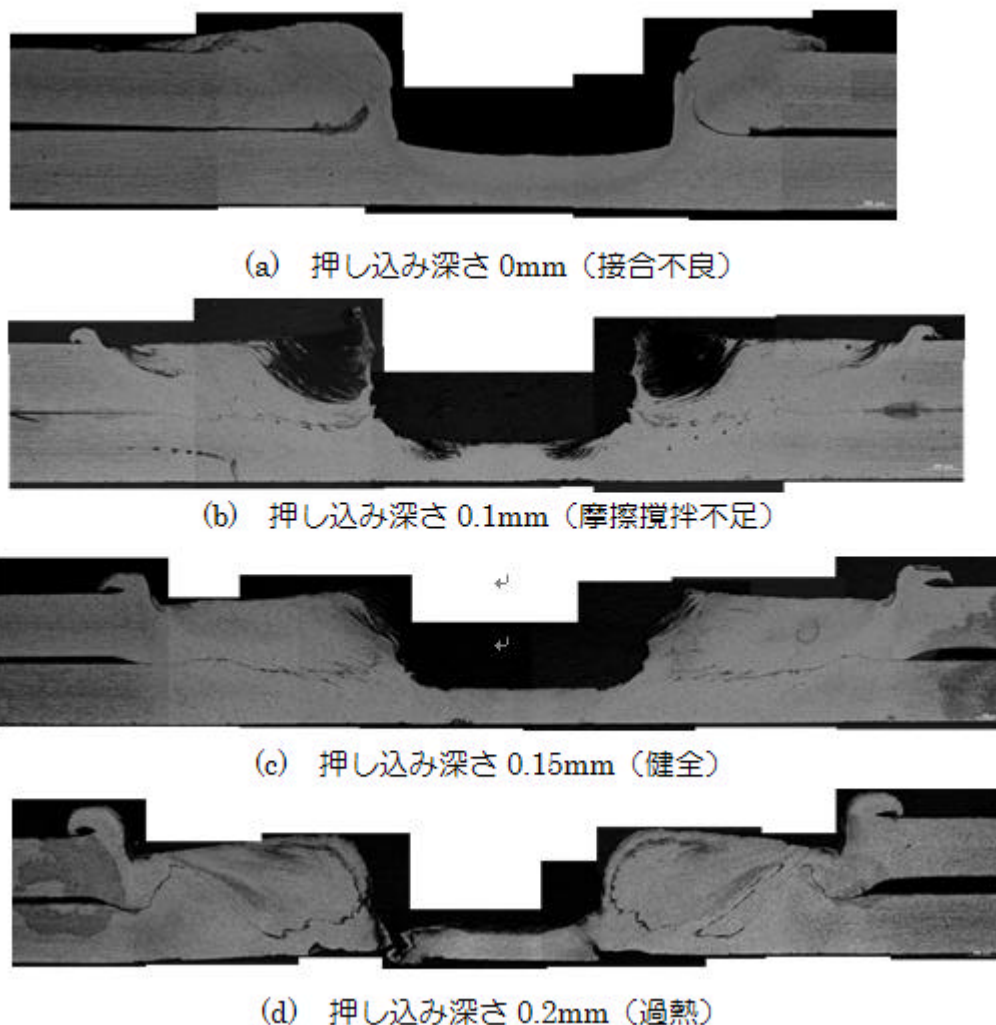


図 5-18 ツール押し込み深さとナゲット組織の変化 (A1050、1t)

5 - 3 接合継手のせん断引張試験評価方法とその評価事例

本項では、接合継手の機械的性能の評価方法としてせん断引張試験を行って破断時の最大せん断引張荷重を評価指標とし、各種接合条件の影響について検討結果を述べる。

(1) せん断引張試験方法

図 5-1 で述べたように重ね合わせ接合継手を図 5-14 のような万能材料試験機に取付け、上下方向に引張荷重を付与することでせん断引張試験を行う。試験片の取り付け時の状況を図 5-15 に示す。中心軸がずれるため厳密にはせん断引張試験とは異なるが、この方法で評価する。



図 5-14 万能材料試験機の外観



(a)



(b)

図 5-15 試験片の取り付け状況(a)および試験片の形状例(b)

(2) 接合継手のせん断引張試験による評価方法

図 5-16 に A6061 合金継手のせん断引張試験後の破断部の外観の一例を示す。展伸材の場合は、ナゲット部で破断する傾向を示した。

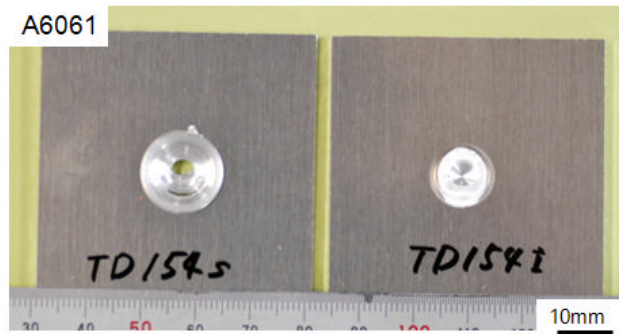


図 5-16 せん断引張試験後の破断部の外観（A6061 接合継手）

図 5-17 に鋳物材である AC4C 合金接合継手について、せん断引張試験後の破断部外観の一例を示す。鋳物材の場合、いずれも接合部を横断する形態で破断した。ナゲット部では亀裂は攪拌領域の周囲を伝播していた。

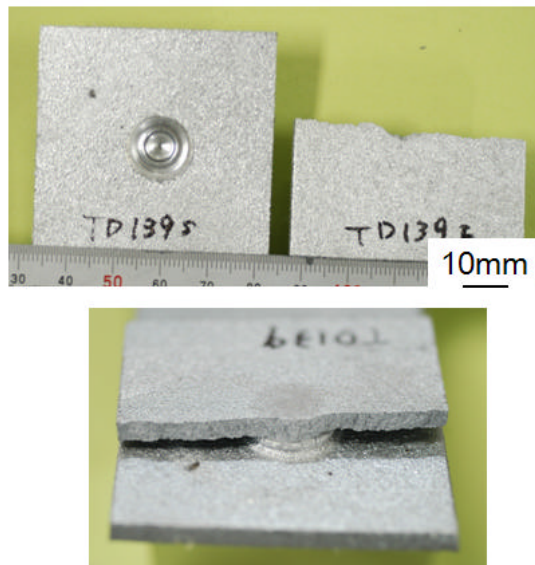
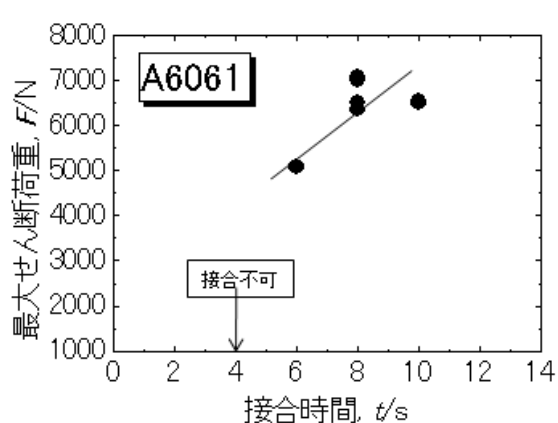


図 5-17 AC4C 合金の接合継手のせん断引張試験後の破断部外観

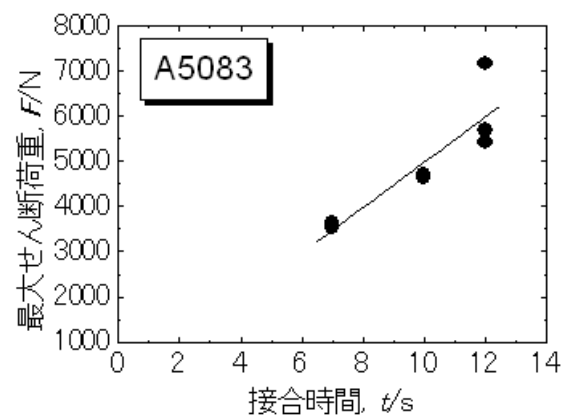
図 5-18 に各合金の接合継手のせん断引張荷重に及ぼす接合時間の影響を示す。いずれの合金についても接合時間の増加と共にせん断引張荷重は増加する傾向を示した。

また、図 5-19 に A6061 合金接合継手のせん断引張試験での最大せん断荷重に及ぼす回転速度及び接合時間の影響を示す。せん断引張荷重は、回転速度の増加と共に増加する傾向を示すが、2500rpm 以降は、せん断荷重は低下する傾向を示した。また、1500rpm 以下では、接合時間が長いほどせん断荷重は高くなる傾向も示した。

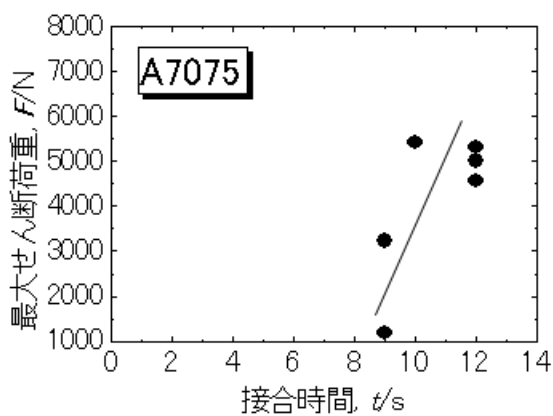
図 5-20 に A6061 合金のせん断引張試験後の破断面の外観を示す。回転速度の増加と共に、接合領域を示すナゲットは大きくなる傾向を示し、回転速度 1250rpm での接合領域の直径は 5.5mm であったが、2500rpm では、9.7mm であった。



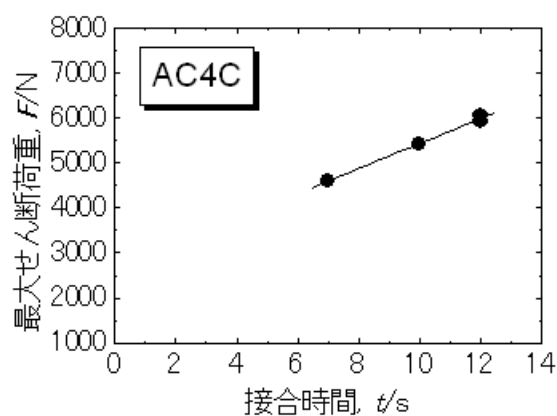
(a) A6061



(b) A5083



(c) A7075



(d) AC4C

図 5-18 各種合金継手のせん断引張荷重に及ぼす接合時間の影響

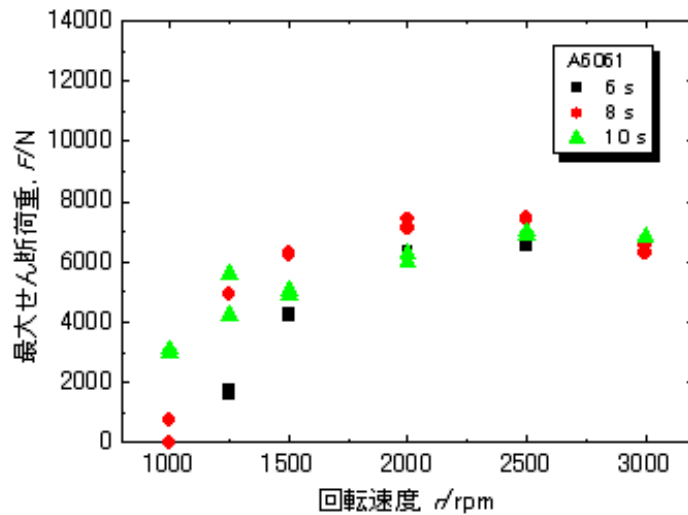


図 5-19 せん断引張荷重に及ぼす回転速度及び接合時間の影響(A6061 合金)

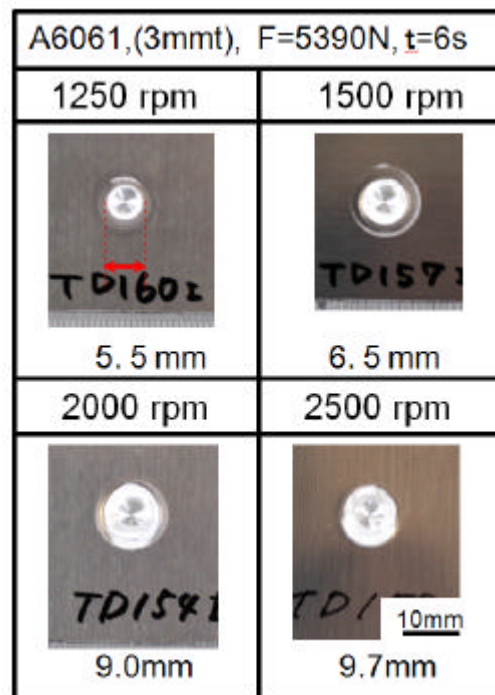


図 5-20 せん断引張試験後の破断面の外観 (A6061 合金)

せん断引張試験では、接合時間や回転速度の増加と共にせん断引張荷重は増加する傾向を示していた。これは前述したように接合時間及び回転速度の増加と共に接合部のナゲット径が増加する傾向と同じである。図 5-21 はマクロ組織試験で得られたナゲット径 (Rri) とせん断引張荷重との関係を示したものである。多少のばらつきはあるものの良い相関にあると考えられる。

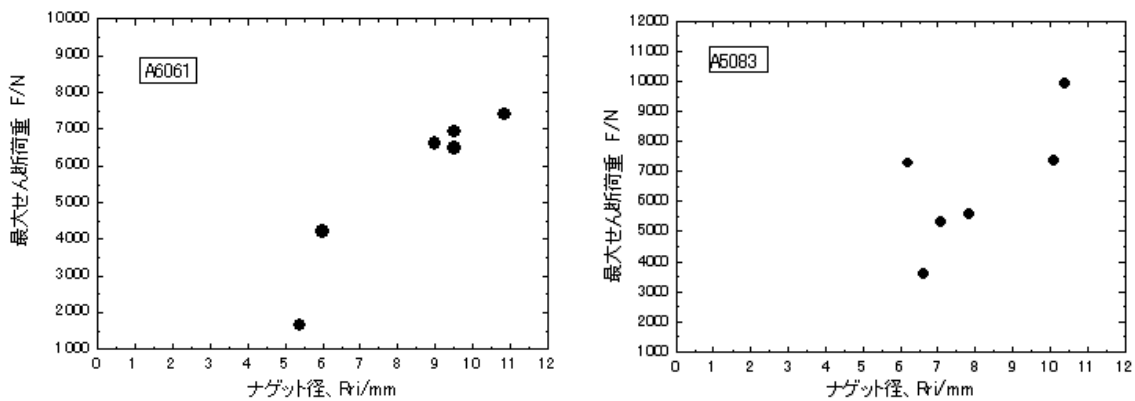


図 5-21 ナゲット径と最大せん断引張荷重の関係

(3) 薄板アルミニウム合金継手のせん断引張試験による評価

(a) 摩擦攪拌時間の影響

図 5-22 にアルミニウム合金薄板 A1050 1t 材を回転速度 920~1800rpm、ツール押込量 0.15mm で FSJ した時の接合時間とせん断引張強さの関係を示す。回転速度 1800rpm では、接合時間 0.1s でも高いせん断荷重が得られ、その後は時間と共にゆるやかに減少した。また、1300rpm では接合時間 0.5s、920rpm では 1.5s 以上攪拌することで高い継手強度が得られた。

図 5-23 に、同継手のすきま高さをノギスで測定した結果を示す。接合時間の経過に伴って、すきま高さが比例的に大きくなる。十分な引張強さを得るためには、すきま高さが 0.2mm 以上になることが必要であり、すきまは、接合面における攪拌状態を示すパラメータと考えることができる。また、接合時間に伴う継手強さの低下は、すきまが成長して最小板厚が変化するためと考えられ、必要以上の攪拌時間は継手の強度にとってマイナスである。

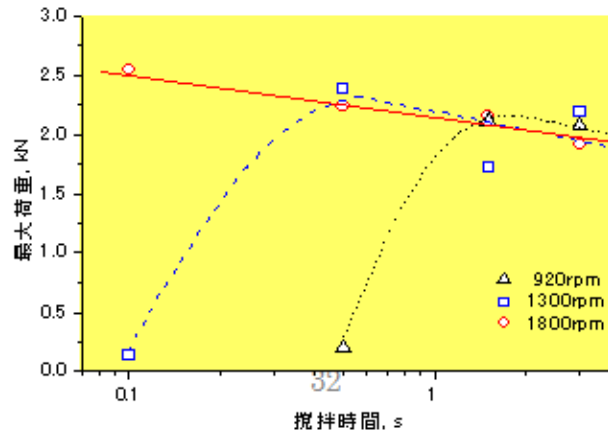


図 5-22 摩擦攪拌時間と引張強さ (A1050、1t)

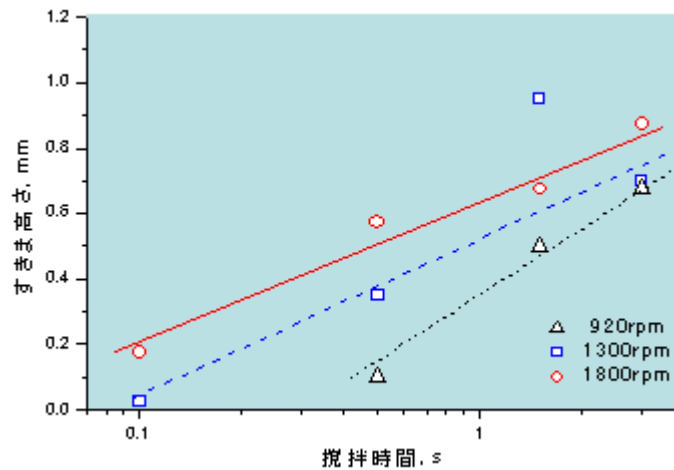


図 5-23 摩擦攪拌時間とすきま高さ (A1050、1t)

(b) ツール押込深さの影響

ツール押込深さを図 5-24 に示すように、ショルダーの外縁をワーク表面に食い込ませる量と定義する。本実験では NC 制御によりツール位置を制御しているが、FSJ 接合プロセス中では、軟化した母材が回転ツールのプローブネジのピッチによって下方方向に送られる塑性流動を生じ、下板側の合わせ界面が隆起してすきまを生じる。その結果、上板が持ち上げられることになり、継手外観上の押込は若干深く仕上がる。

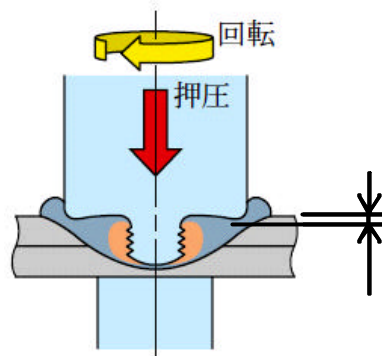


図 5-24 ツール押し込み深さの模式図

また、プローブの挿入時に押しつけられた母材はショルダー面のヌスミ部に収納され、回転ツールの摩擦熱と引きずり攪拌を受けてナゲット領域に混錬される。引きずり攪拌における塑性流動効果を高めるためにはツールの押し込みが必要であるが、ツール直下の攪拌領域の内部圧力も上昇するため、重ね合わせ面からの軟化母材流出によるすきま高さを大きくし、継手の強度を低下させるので押し込み深さの適正量を把握しておく必要がある。

図 5-25 に A1050 1t 材をツール回転速度 1800rpm、接合時間 3 秒で FSJ した時のツールの押し込み深さに伴うナゲット外観の変化を示す。押し込み深さ 0mm では、ツール直下の混錬攪拌が不十分なため、ヌスミ部に収納された軟化した母材が一部崩れている。押し込み深さ 0.1mm で平滑なナゲットが形成されたが、細かな引っ掻き条痕が残っており、まだ混錬攪拌が不十分である。押し込み深さ 0.2mm では、ナゲット表面の引っ掻き条痕が消失したが、ツールショルダーからあふれ出す母材の量が多く、ナゲット外周に大きなバリが形成された。ナゲット外観上からだけ言えば、押し込み深さの適正量は 0.1mm と 0.2mm の間と判断される。

継手のすきま高さも外観上の重要な因子であり、図 5-26 に A1050 1t 材と A5052 0.6t 材を回転速度 1800rpm、接合時間 3s で FSJ した時のツール押し込み深さと継手のすきま高さ関係を示す。いずれの材料も押し込み深さ 0.15mm までは、すきま高さの増加は緩やかで、それ以上ではすきま高さの増加が大きくなり、材料間で開きを生じた。

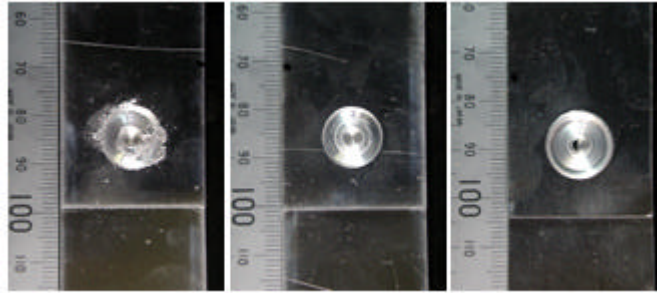


図 5-25 ツール押し込み深さに伴うナゲット外観の変化 (A1050、1t)

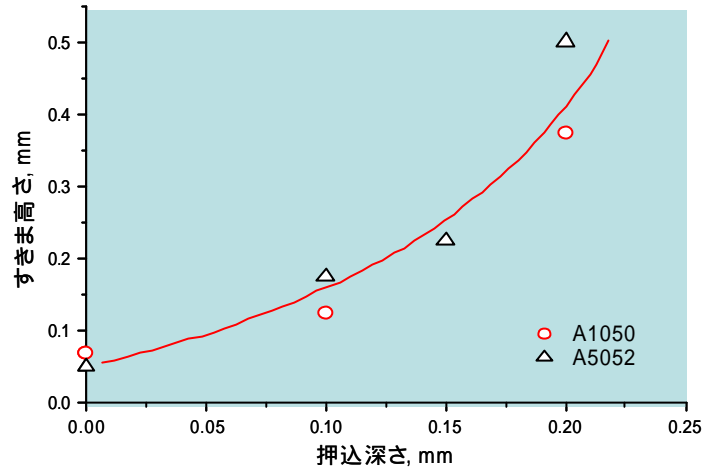


図 5-26 ツール押し込み深さと継手のすきま高さ

板厚の薄い A5052 では曲げ強度が小さく、合わせ面からの軟化母材流出量の差によるものであろう。

また、ツール押し込み深さとの関係を図 5-27 に示す。ツール押し込み深さ 0.1mm では、A1050 1t 材が 2.6kN と高い継手強度を示したが、A5052 0.6t 材ではナゲット部の接合不良のため 0.2kN と低かった。これはツールのネジプローブを板厚に合わせていることから、プローブ挿入時にショルダーヌスミ部へ収納される母材の体積は 0.6t 材の方が小さく、ワーク表面とツールの摩擦発生に差が出たものと思われる。ショルダーが押し込まれて十分な摩擦が得られると、両材料ともに押し込み深さが 0.1～0.15mm で継手強度は最大となった。

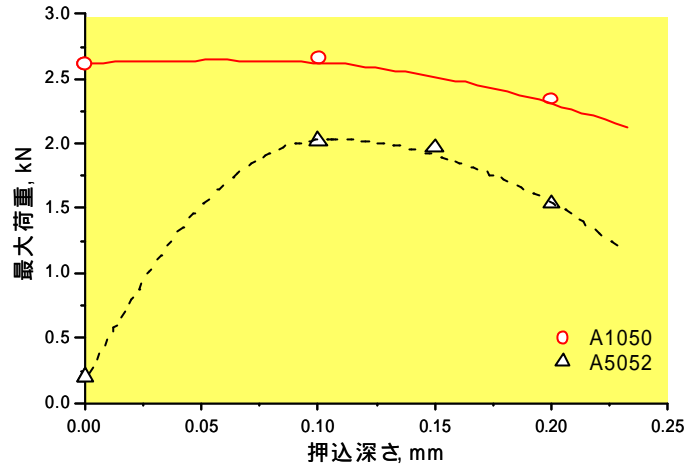


図 5-27 ツール押し込み深さと継手の引張強さ

押し込み深さ 0.2mm では、摩擦攪拌プロセスの進行に伴って下板界面が隆起し、図 5-28a に示すショルダー外周端部における最小板厚が小さくなり、継手の引張強さは低下する。図 5-28b で最小板厚部から亀裂が発生していることが確認される。なお、図 5-29 に示すように、A5052 0.6t 材を除くすべての継手が最小板厚となるナゲットの外周部で破断し、接合部分のはがれは観察されなかった。

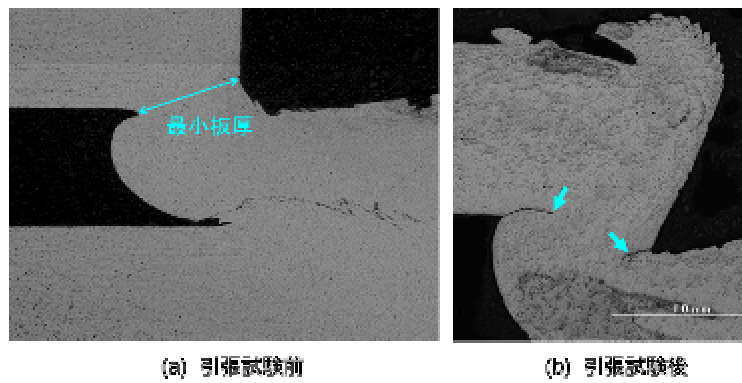


図 5-28 引張試験前後のナゲットの外周端部

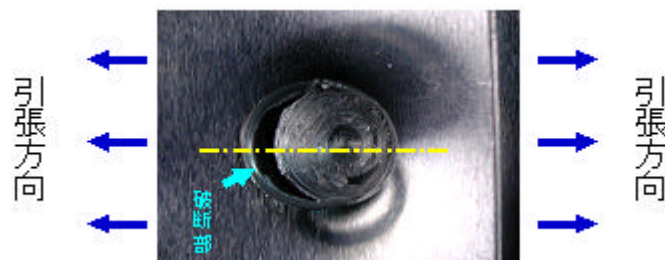


図 5-29 継手の引張破断状況 (A1050、1t)



図 5-30 引張試験後のナゲット部断面 (A1050、1t)

また、引張試験後のナゲット部断面は、図 5-30 に示すように、ナゲット表面の傾斜に沿うようにせん断破壊している。

5 - 4 接合継手の欠陥の特徴

(1) 接合不良

摩擦攪拌接合による加工条件と接合状態との関係は被接合材の材種によって変わるため、注意が必要である。図 5-31 は全て同じ加工条件でスポット接合したものであるが、A5083 と A6061 では接合できているものの、A7075 では写真右側において上下の板が混じり合わず接合不良となるものが観察されることもある。せん断引張試験評価の結果でも A7075 は全体的に接合強度が低いため、摩擦攪拌スポット接合では接合しづらい材料といえる。

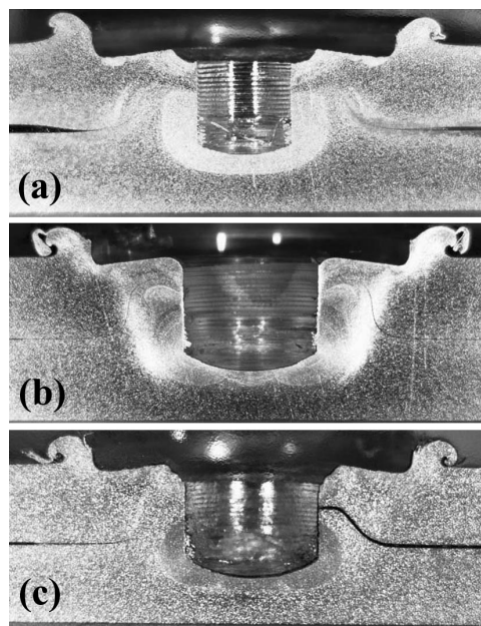


図 5-31 材種の違いによるマクロ組織の変化、(a)A5083, (b)A6061, (c)A7075

位置制御型では、ショルダー部の侵入深さを適切に設定しないと十分な接合継手強度が得られない。表面が鋳肌のままの AC4C 板材をスポット接合する際、被接合材の表面粗さが粗いため板厚を過大評価してしまい、接合が不十分となった例を図 5-32 に示す。上下の板の混じり合いが少なく、継手強度は低いことが予想される。

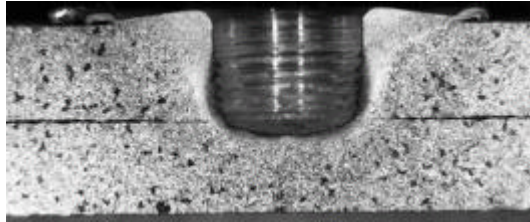


図 5-32 ショルダー侵入深さが浅く接合が不十分な例

図 5-33 に A7075 合金のミクロ組織の例を示す。攪拌された金属が板の隙間に排出されていた。その領域は、下板との境界が明瞭に認められることから接合不良であることがわかる。

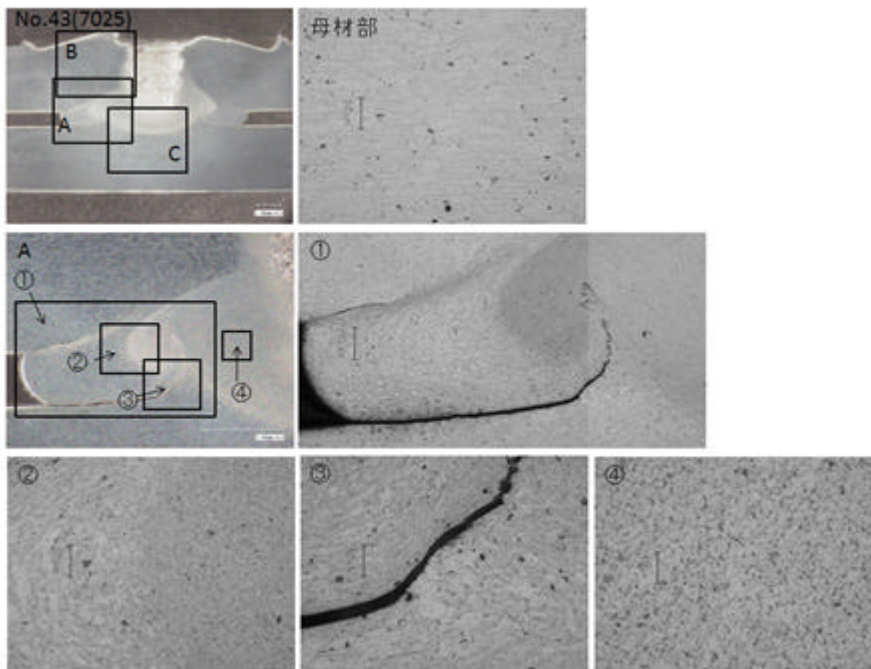


図 5-33 A7075 合金の接合継手の断面ミクロ組織例
(板厚 3mm、1500rpm、12s、5880N)

(2) 重ね合わせ面のすきま

アルミニウム合金薄板は曲げ強度が低いため、FSJ 接合において重ね合わせ面を封止するために十分な拘束力が得られず、摩擦熱で軟化した母材が重ね合わせ面から押し出され、継手の上板と下板の間で図 5-34 に示すような「すきま」を生じやすい。すきまは、接合時間とともに重ね合わせ面から混錬された母材が張り出すため、重ね合わせ部位の変形が大きくなる。A1050 (1t)材を用い、回転速度 1800rpm で FSJ を行った際に生じるスポット接合界面の経時変化を図 5-35 に示し、すきまの成長過程を説明する。回転ツールをワーク表面に押し付けることにより、ショルダーとの摩擦熱によって接合部の軟化と接合面の圧着が起こる。このプロセスはショルダーが接触した直後に生じ (a)、その後、ツールの押し付け力を受けてツール直下の攪拌領域に内部圧力を生じ、重ね合わせ面を押し上げるように軟化した母材がせり出し始める (b)。さらに、プローブのネジによる効果で中心部板厚方向の攪拌流動が起こり、上板から下板へ母材が流入した結果、下板側の合わせ界面が隆起する (c)。合わせ面から軟化母材が流出して攪拌領域の内部圧力が低下すると、すきまの成長が止まり、接合界面の消失が起こる (d)。



図 5-34 重ね合わせ面に生じたすきま (A1050、1t)

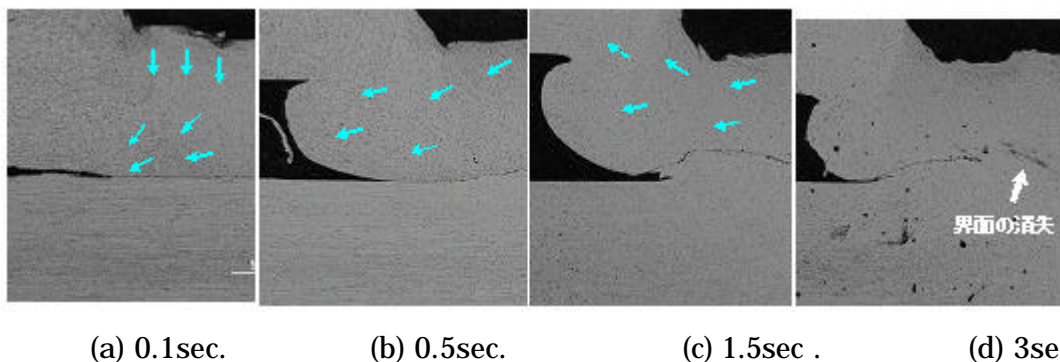


図 5-35 攪拌時間に伴うすきまの成長 (A1050、1t)

第6章 重ね合わせ接合継手の超音波探傷試験の手順

6-1 基準試験片によるゲート設定の調整

実際の接合継手の探傷試験を行う前にCスキャン画像の色は、被測定物の厚さ方向の長さ情報を示す。そこでゲートを設定するに当たり、あらかじめ厚さの決まっている標準的な試験片を作成し、この試験片で調音場探傷試験を行ったのちゲートを設定した。

図6-1に板厚の標準試料となる基準試験片の形状・寸法を示す。本研究で用いたA6061合金板(3mm)に対して、0.5、1.0、1.5、2.0mmの溝加工を行い製作した。

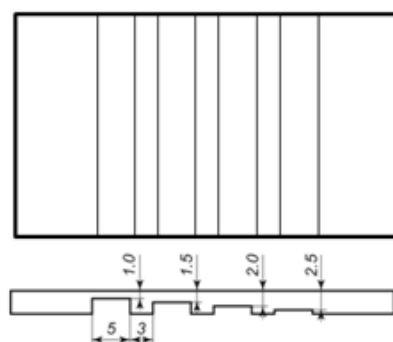


図6-1 超音波探傷試験に用いた基準試験片の形状・寸法

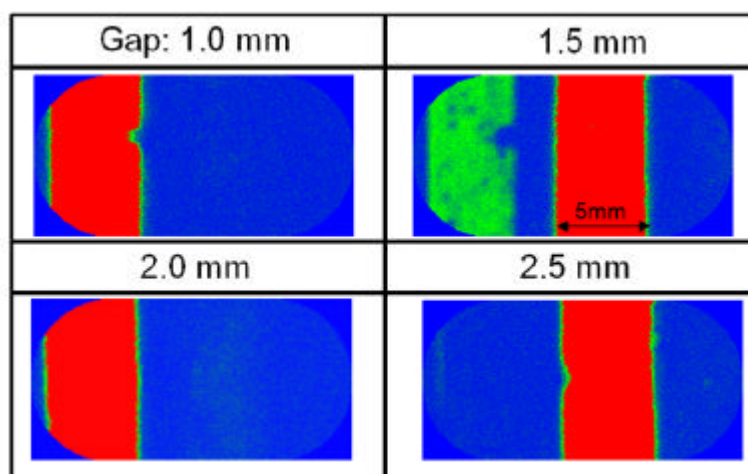


図6-2 基準試験片のCスキャン画像

図6-2にそれぞれの深さの溝のCスキャン画像を示す。このようにあらかじめ探傷面の位置に相当するギャップにAスキャン波形でのゲートを設定することにより、正確な色表示が可能となる。

6 - 2 超音波探傷試験の手順

まず、図 6-3 に示すように試験片の表面に接触媒質（シリコンジェル）を塗る。探傷試験の場合、表面性状が重要であり、凹凸が激しい表面では計測が困難であり、データの信頼性も劣る。また、スキャナーヘッド面に損傷を与える場合もあるため、比較的平滑な接合継手の裏面で探傷試験を行った。また、画像データの信頼性を高めるため、スキャンヘッドを正確に垂直に押し当てることができるように固定治具（図 3-1(a)）を用いた。

AC4C 合金のように鋳物材については、鋳肌そのままの状態では正確な画像が得られないため、図 6-4 のように測定前に表面をエメリー紙で研磨した後に測定を行った。

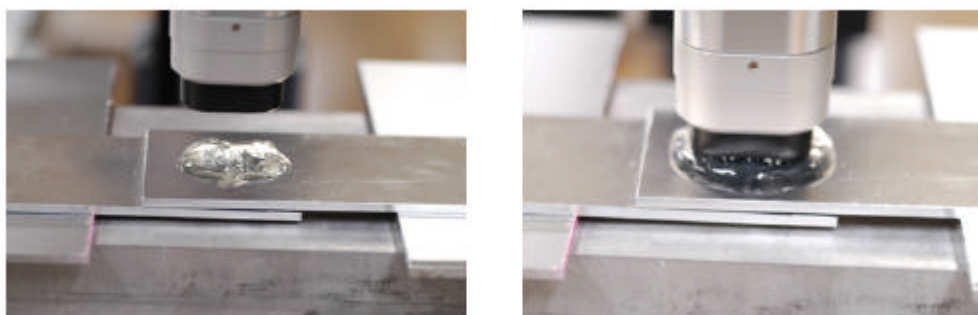


図 6-3 超音波探傷試験のための接触媒体（シリコンジェル）の塗布状況



図 6-4 AC4C 合金継手の外観

図 6-5 に接合継手の C スキャン画像及びその画像と接合継手との位置関係を模式図にして示す。探傷試験では、ゲートを 3mm に設定しているため、接合部以外は下板（厚さ 3mm、図では上側の板）の端面からのエコーを計測するため赤色に表示される。いっぽう、リング状の画像は、3mm を超える位置からのエコーを計測していることから接合部からのエコーであることが判断できる。中心部の赤色領域は、プローブの痕跡の画

像であり、この場合は、試験片板厚（3mm）に相当しているため、赤色に表示されたと判断される。

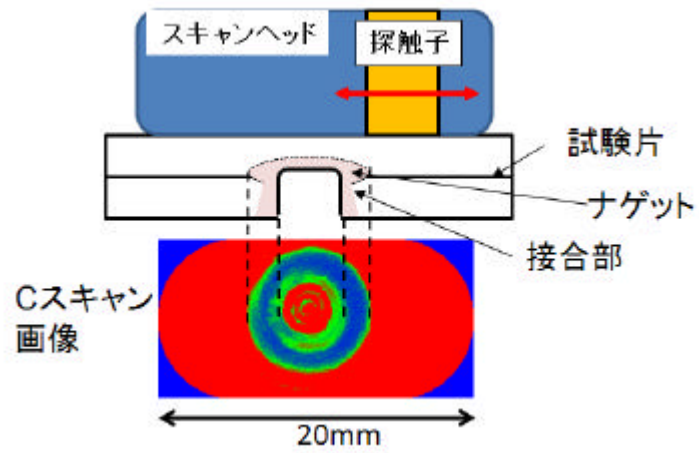


図 6-5 C スキャン画像の例及び探触子と試験片との位置関係

第7章 C スキャン画像解析による接合継手の評価方法

7 - 1 各種継手の超音波探傷試験による C スキャン画像事例

図 7-1 に A6061 合金の接合継手について回転速度及び接合時間を変化させた場合の C スキャン画像を示す。回転速度の増加と共にナゲットは大きくなる傾向を示した。特に 1500rpm 以下の回転速度の条件では、接合時間の増加と共にナゲットは大きくなる傾向を示した。また、ナゲットの内部のプロープに相当する円形部分の径も回転速度の増加と共に増加する傾向を示した。

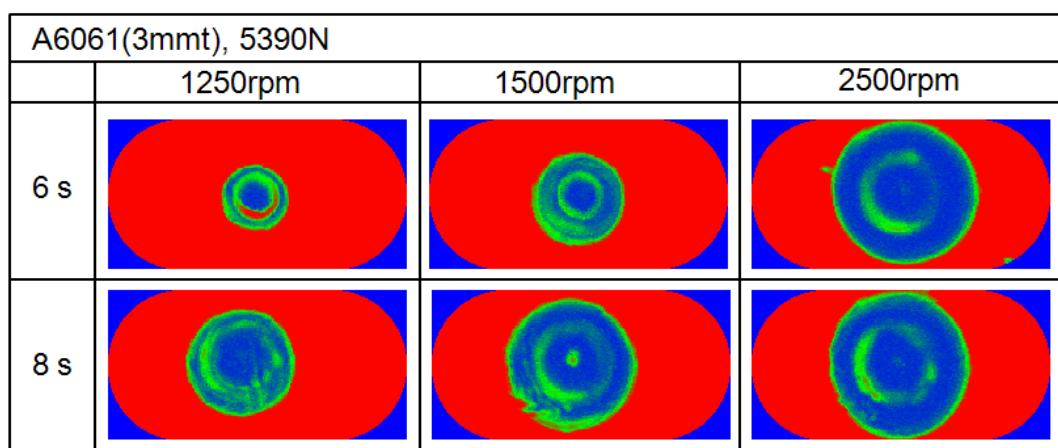


図 7-1 A6061 合金の接合継手の C スキャン画像

図 7-2 には A5083 合金の接合継手について回転速度及び接合時間を変化させた場合の C スキャン画像を示す。A6061 合金の場合と同様に、回転速度及び接合時間の増加と共にナゲットの径は増加する傾向を示した。

図 7-3 に A7075 合金の接合継手について回転速度及び接合時間を変化させた場合の C スキャン画像を示す。A6061 や A5083 の場合と異なり、ナゲットの大きさは、接合条件が変化に対して大きな差異は認められなかった。

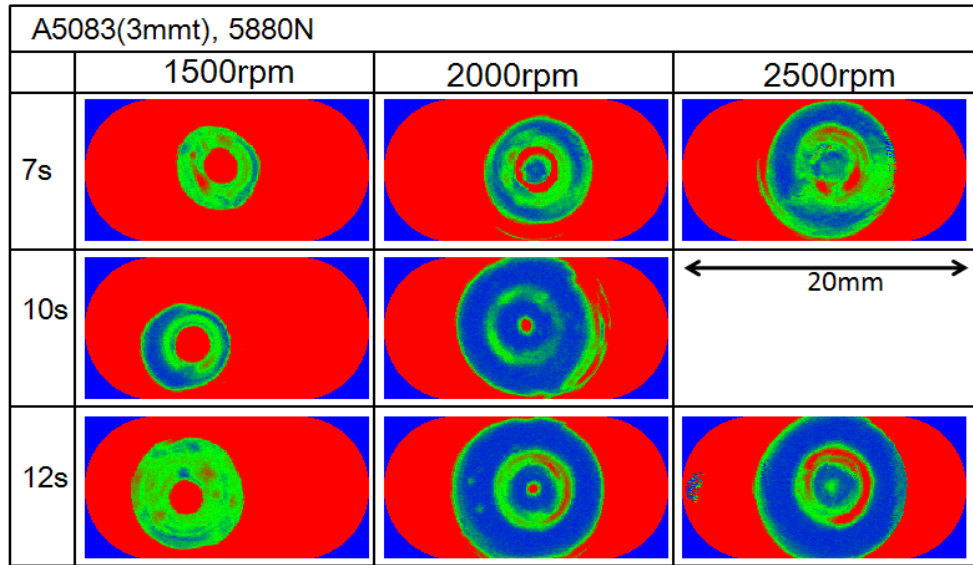


図 7-2 A5083 合金の接合継手の C スキャン画像

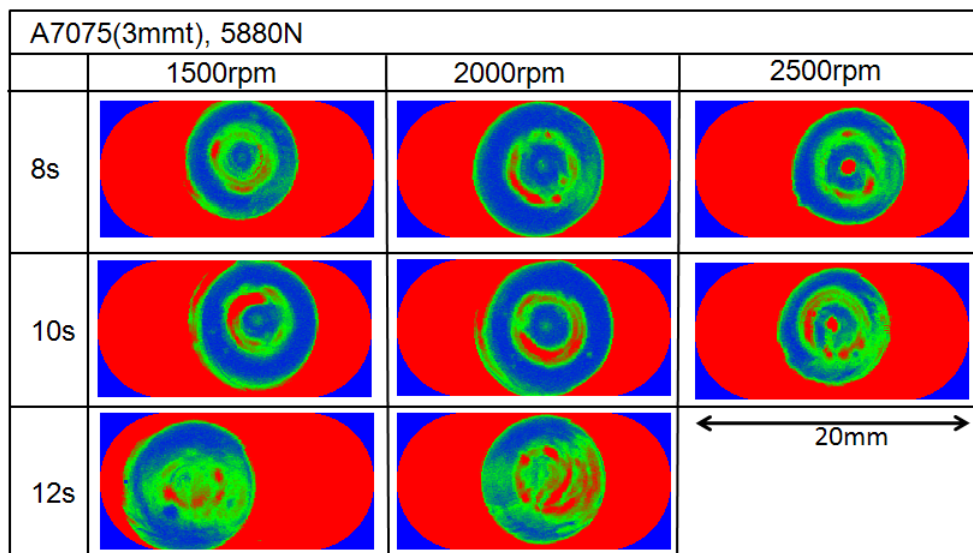


図 7-3 A7075 合金の接合継手の C スキャン画像

AC4C 合金の接合の場合、図 7-4(a)のように鑄放し面をそのままの状態で接合するため、凹凸が大きい試験片表面、裏面での超音波の散乱等の影響を受けると予想される。一例として、図 7-5(a)に鑄放し面の状態での接合継手の C スキャン画像を示す。ナゲットの形状及び輪郭が不鮮明な画像となった。

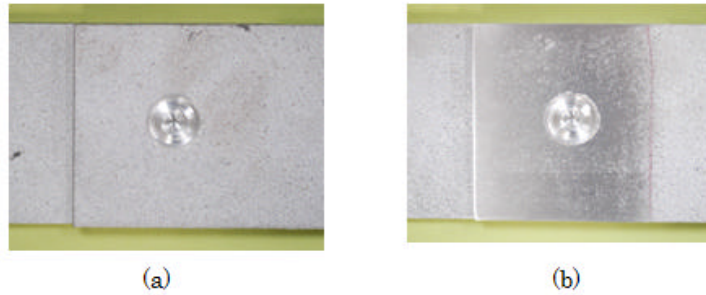


図 7-4 AC4C 合金接合継手の外観 ((a) 鋳造ままの表面 (b)表面研磨)

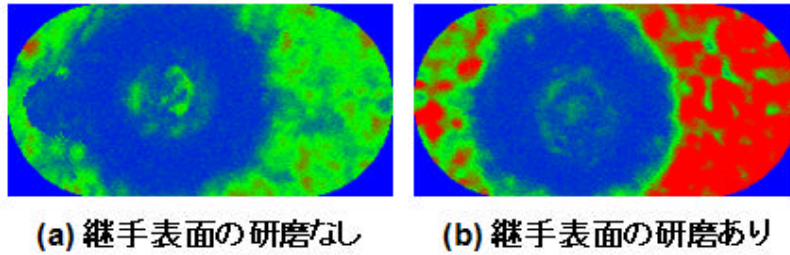


図 7-5 AC4C 合金継手 (5390N, 2500rpm, 12s) の C スキャン画像

つぎに、図 7-4(b)のように継手表面をエメリー紙 (#1000) で研磨した場合の C スキャン画像を図 7-5(b)に示す。ナゲットの輪郭は(a)に比べて明瞭に表示されるようになった。しかし、継手作製後の表面を磨いただけであり、接合面は鋳放しのみであるためナゲット周辺の画像は不明瞭のままであった。そこで、接合実験前に接合面および超音波探傷面をエメリー紙 (#1000) で研磨した後に接合した継手の C スキャン画像を図 7-6 に示す。接合条件は、加圧力 5390N、接合時間 10s 一定とし、回転速度を 1500、2000 及び 2500rpm とした。鋳物材 AC4C の場合も回転速度の増加と共にナゲット径は増加する傾向を示した。

研磨しない場合に比べてナゲットの輪郭ははっきりしているが、ナゲットの周囲は不鮮明のままであった。本実験では、試験片の最表面を磨いたのみあり、十分な平滑度が得られなかったため不鮮明な画像となったものと考えられる。

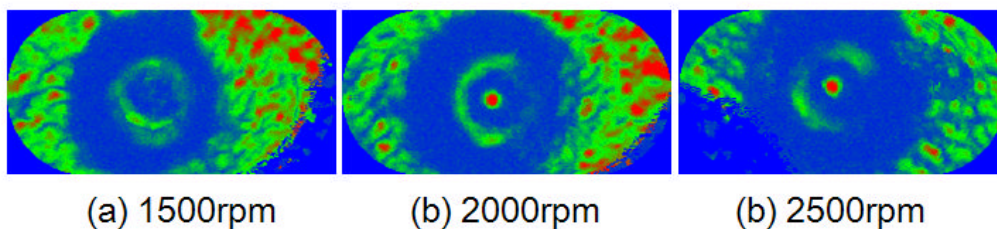


図 7-6 AC4C 合金の接合継手の C スキャン画像

したがって、鋳放し状態の試験体や凹凸のある表面を有する試験体に対する超音波探傷試験において鮮明な C スキャン画像を得るには、試験片の表面および超音波が反射する裏面は、機械加工などにより平滑な面にする必要があることが留意点としてあげられる。

つぎに、異種アルミニウム合金接合継手の C スキャン画像の事例を図 7-7 に示す。

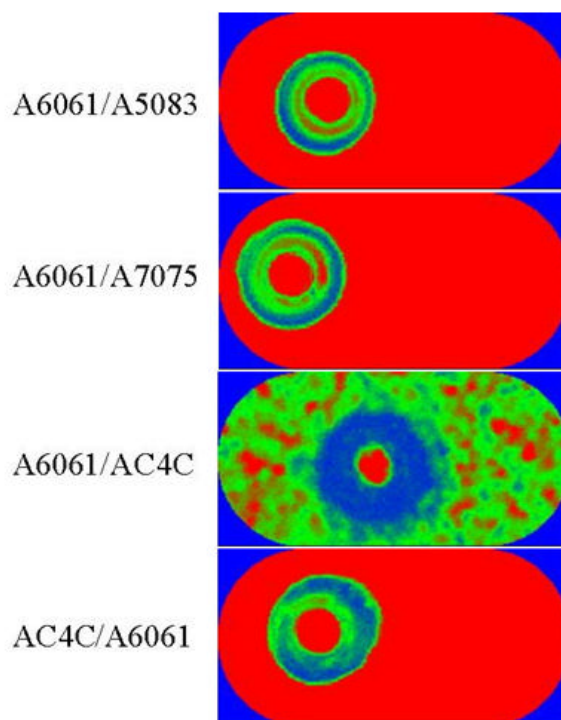


図 7-7 各種異種アルミニウム合金接合継手の C スキャン画像の事例

AC4C 合金と A6061 合金の組み合わせでは、AC4C 合金側から超音波を入射した場合は、前述のようにナゲットの周囲の画像は乱れるが、A6061 側からでは平滑度が良いため鮮明な画像が得られる。

7 - 2 超音波探傷試験評価および破壊試験評価による接合継手の総合的評価

つぎに、超音波探傷試験で可視化された C スキャン画像と実際の継手の組織観察及びせん断引張試験結果と比較し、画像情報からの指標と破壊試験で得られた継手性能との相関について述べる。

図 7-8 に A6061 合金について加圧力 5390N、接合時間 6s、回転速度 2500rpm の条件での接合部断面マクロ組織を示す。上下の板が接合されている領域であるナゲット部

の直径 (Rri) は、図 5-11 で述べたように回転速度の増加と共に増加する傾向を示した。そこで、C スキャン画像で測定されるナゲット径との関係を検討した。

図 7-9 に A6061 合金の接合継手について、回転速度を変化させた場合の C スキャン画像を示す。接合領域を示すナゲットの画像の直径 (a) がナゲット径に相当する。その内側はツールのプローブ痕に相当する領域でこの部分の直径 (b) は、いずれも回転速度の増加と共に増加する傾向を示した。

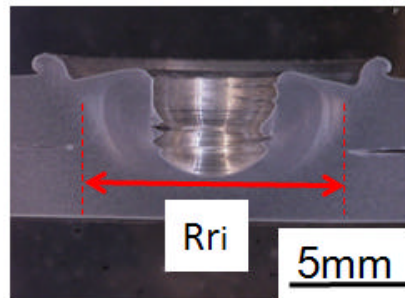


図 7-8 接合継手の断面マクロ組織 (A6061、5390N、6s、2500rpm)

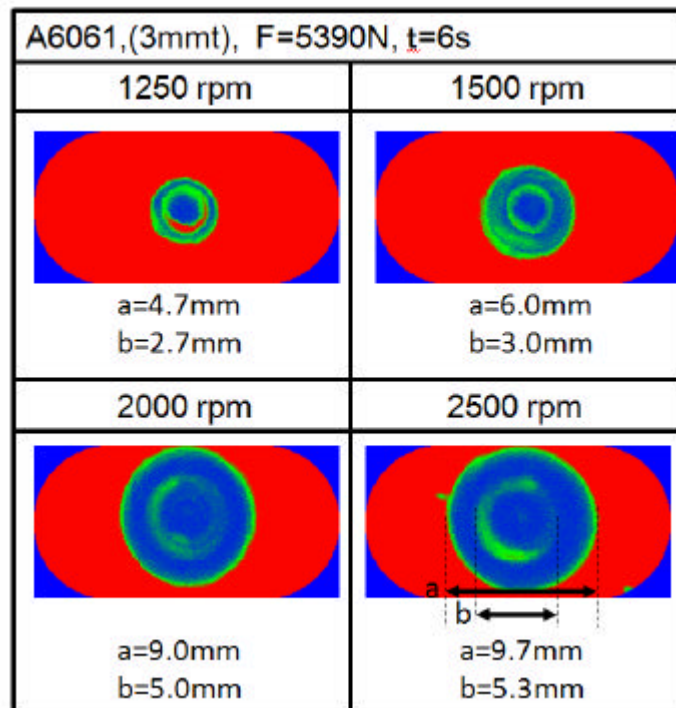


図 7-9 C スキャン画像でのナゲット径と回転速度の関係 (A6061 合金継手)

図 7-10 に C スキャン画像で測定したナゲット径(a)及びプローブ痕の径(b)とマクロ組織観察で測定したナゲット径 (Rri) の関係を示す。いずれの材料においても C スキャ

ン画像でのナゲット径とマクロ組織観察から測定されるナゲット径 R_{ri} は良い相関があることが分かる。プローブ痕(b)については、ナゲット径と相関関係は認められるが、画像の輪郭が不鮮明な場合が多く、定量的な指標としては十分ではないと考えられる。

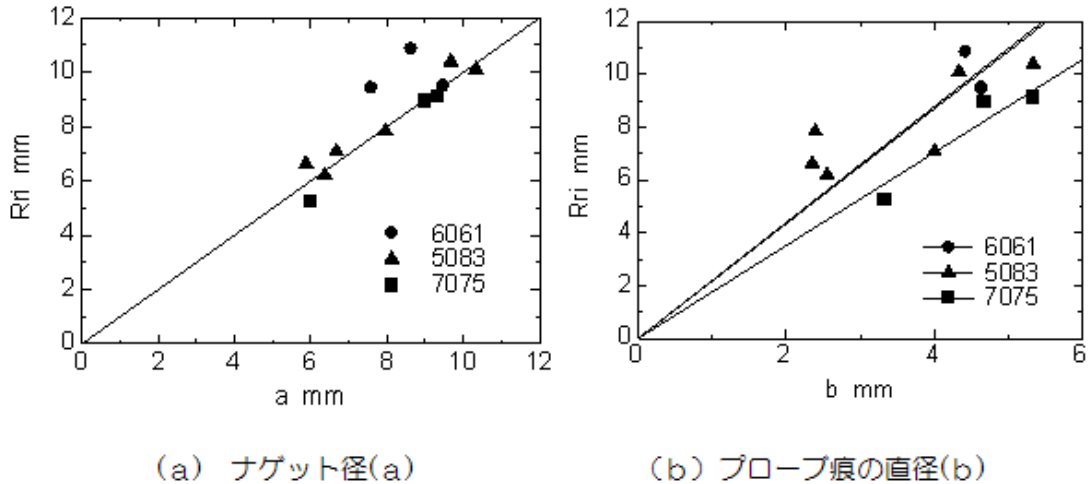


図 7-10 超音波探傷試験での接合部指標 (ナゲット径(a)、プローブ痕(b)) とマクロ試験でのナゲット径の関係

つぎに、C スキャン画像と継手品質として重要な指標であるせん断引張荷重との比較をした事例を紹介する。

図 7-11 および 7-12 に超音波探傷試験の C スキャン画像とせん断引張荷重の関係を示す。それぞれ、A5083, A6061 を接合時間 1s で一定とし、回転速度を変化させた場合の C スキャン画像とせん断引張荷重を示してある。C スキャン画像において青色で表示される接合部の領域が増加するとせん断引張荷重が増加する傾向を示している。A5083 では回転速度が 3500rpm の場合、青色で表示された接合部は小さくなり、それに対応してせん断引張荷重も低下した。図 7-12 の A6061 では接合部領域が大きくなるに従い、せん断引張荷重は増加した。

したがって、図 5-21 で述べたように接合継手のせん断引張荷重はマクロ組織観察で測定したナゲット径 (R_{ri}) と良い相関関係にあること、図 7-10 においてこの R_{ri} と C スキャン画像から計測されるナゲット径(a)も良い相関関係にあることから超音波探傷試験での C スキャンによって得られるナゲット画像は接合継手のせん断引張強さの大小を類推する指標として有効であることが示された。

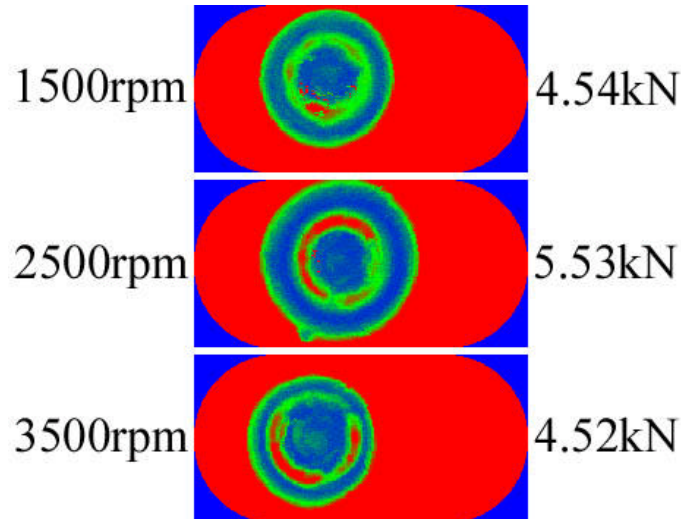


図 7-11 A5083 接合継手の C スキャン画像とせん断引張荷重
(接合時間 ; 1s, ツール押し込み量 ; 0.2mm)

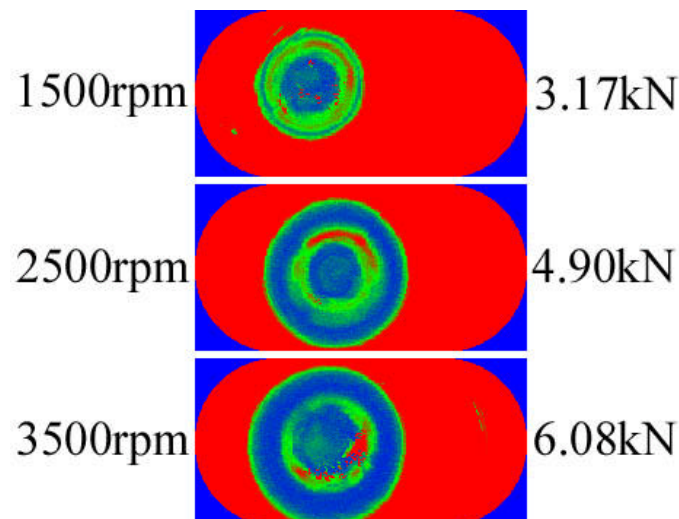


図 7-12 A6061 接合継手の C スキャン画像とせん断引張荷重
(接合時間 ; 1s, ツール押し込み量 ; 0.2mm)

つぎに、薄板アルミニウム合金の接合継手について、接合部の外観観察、超音波探傷試験、マイクロフォーカス X 線探傷、断面組織観察を行い、比較検討した事例を紹介する。

図 7-13~16 に、A1050 1t 材をツール回転速度 1300rpm、攪拌時間 0.1 秒の条件で、押し込み量を 0~0.15mm の範囲で変化させた場合の各試験結果を示す。

なお、超音波探傷画像では、下板の厚さ (1mm) 以下で反射した信号を赤色で表示し、

赤? 緑? 青の順で板厚が増加（接合）していることを意味している。X線透視像と超音波探傷画像中に示した2つの円は、ショルダーとプローブの外径を表している。

図 7-13 にツール押し込み量 0mm の場合の接合継手の例を示す。スポット表面に山形が形成されているが、超音波探傷画像では、青色で表示された接合部の大きさがショルダー径よりも小さい。一方、マイクロフォーカス X 線透視像でプローブ穴周囲に見えるコントラストは肉厚によるもので、継手表面より突出した山形部分に対応している。母材に対する X 線吸収の差により、プローブホール等の欠陥は白く現れるはずであるが、ここでは観察されていない。同ナゲットを超音波探傷画像中に一点鎖線に沿って切断して断面組織を観察したところ、矢印で示すショルダー外周下の界面が圧着されていなかった。超音波探傷画像では、攪拌混練領域と圧着領域を含めた接合部分の大きさを非破壊で観察できることがわかった。

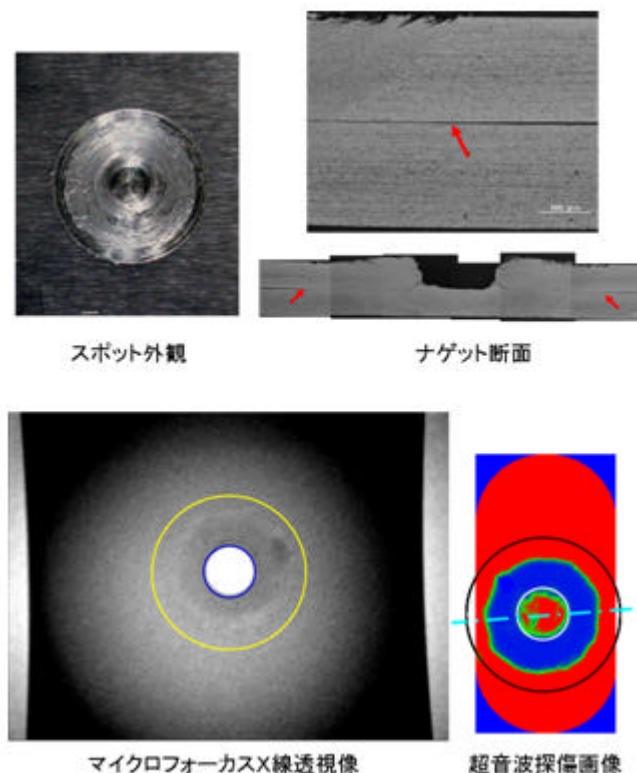


図 7-13 ナゲット部の超音波探傷画像（ツール押し込み量 0mm）

ナゲット径がツール径よりも小さくなる事例

図 7-14 にツール押し込み量 0.1mm の場合の接合継手の例を示す。外観上スポット表面に山形が形成されているが周囲のバリは小さく、超音波探傷画像では、ショルダー下で青色表示される接合面が観察されない。同ナゲットを超音波探傷画像中の一点鎖線に

沿って切断し、断面組織を観察したところ、プローブ周囲で皮一枚つながっていた。なお X 線透視像では、プローブ穴周囲に肉厚に起因したコントラストのみが観察され、重ね合わせ接合の良否評価に対しては無力である。

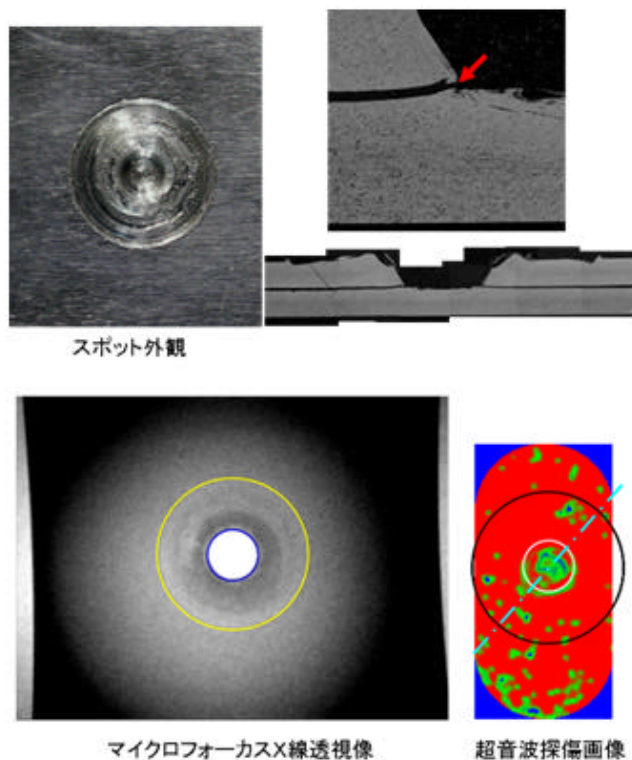


図 7-14 ナゲット部の超音波探傷画像（ツール押し込み量 0.1mm）

接合されていない事例

図 7-15 に押し込み量 0.15mm の場合の接合継手の例を示す。接合部表面ではバリが太く大きくなっている。超音波探傷画像にはショルダー径と同じ大きさの青色表示が現れ、接合状態は良好であると判断される。しかし、ナゲット径に近い内部で接合不良を示す赤や緑の表示が現れている。また、X 線透視像において、ショルダー下に白い環状領域が観察される。同ナゲットを超音波探傷画像中の一点鎖線に沿って切断し、断面組織を観察したところ、ショルダー下の界面は攪拌混錬を受けており、超音波探傷画像での異常に相当する接合不良は観察されなかった。ただし、ナゲットの表面近傍で黒色に見える混錬不足な領域が点在しており、黒色部では微細欠陥が集中しやすく、超音波の散乱反射や X 線吸収の差を生じたものと考えられ、FSJ 継手品質の非破壊評価では、ナゲットの摩擦混錬の程度も影響することを考慮しなければならない。

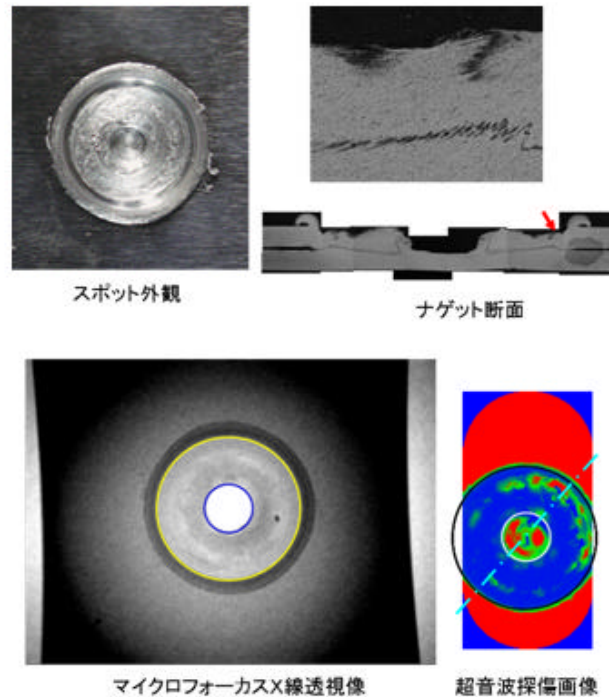


図 7-15 ナゲット部の超音波探傷画像（押し込み量 0.15mm）
摩擦攪拌不足の事例

図 7-16 に押し込み量 0.25mm、接合時間 3 秒の場合の接合継手の事例を示す。C スキャン画像にはショルダー径と同じ大きさで青色一色の表示が現れ、X 線透視像でも欠陥は観察されず、無欠陥な接合であると判断される。同ナゲットを超音波探傷画像中の一点鎖線に沿って切断し、断面組織を観察したところ、ショルダー下の界面は十分な攪拌混練を受けて一体化しており、ナゲットの表面近傍にも混練不足領域は存在していなかった。

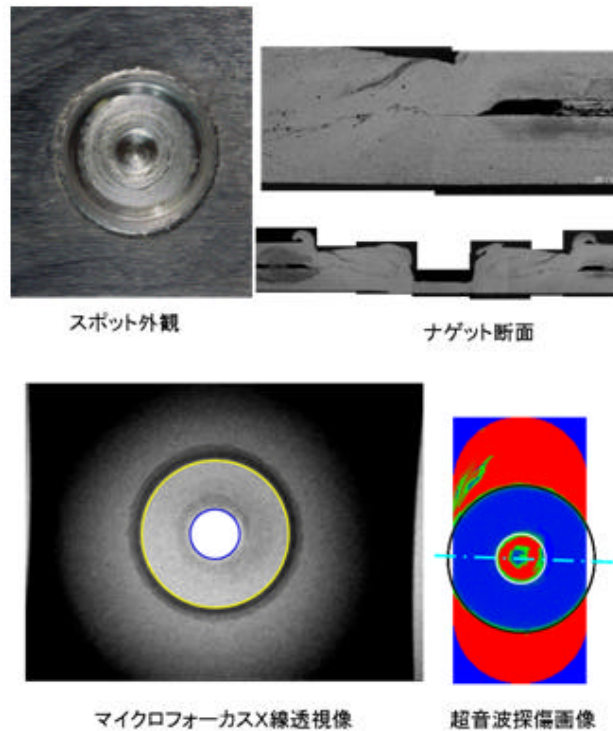


図 7-16 ナゲット部の超音波探傷画像（押し込み量 0.25mm、接合時間 3s）

無欠陥

図 7-17 に A1050 1t 材の FSJ 接合した継手について、超音波探傷画像で計測したナゲット径とツール押し込み量の関係を示す。接合時間は 3 秒である。ツール回転速度 1300rpm では、押し込み量 0.1mm 以下でのナゲット形成が不安定であるが、0.15mm 以上ではショルダー径に相当する接合面が形成される。

一方、ツール回転速度 1800rpm では、押し込み量に応じた大きさのナゲットが形成され、1300rpm と同様、0.15mm 以上ではショルダー径に相当する接合面が形成される。したがって、超音波探傷画像でナゲット径を計測することで、FSJ 接合時のツール押し込み量を推定でき、継手強度の品質管理手法として活用できる。

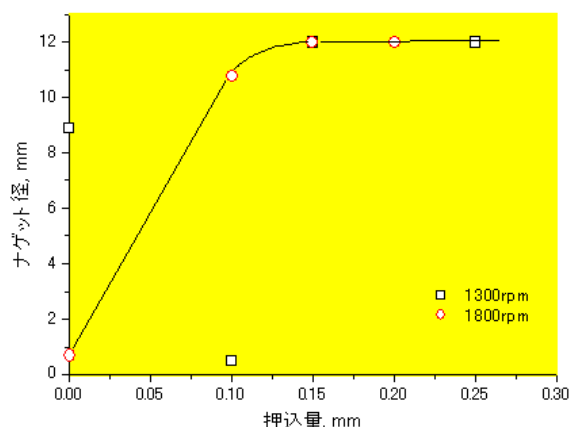


図 7-17 ツール押し込み量とナゲット径の関係 (A1050 1t 材)

つぎに、超音波探傷試験で得られた C スキャン画像の中には、特異な画像を示すものがある。そこで、その原因を調査する手法についての事例を紹介する。

図 7-18 に A5083 合金の接合継手の超音波探傷試験後の C スキャン画像、各地点での A スキャン波形及び継手断面のマクロ組織を示す。ナゲットの外周の一部に同心円状に接合部のような画像が測定された (図中の D、E、F)。まず、非接合部 (A 赤色) の A スキャン波形を抽出すると、一定間隔でエコーが測定された。接合部 (B、C) は、ゲート位置 (3mm) よりも遠い位置 (長時間側) からのエコーが測定された。それ以外の D、E 及び F では、ゲートに近いところからのエコーであるが、強度が低く、減衰が大きいエコー波形であった。この位置は、マクロ組織と比較すると図中の矢印の位置に相当しており、細い筋状の隙間が観察された。この位置は、超音波の進入方向に対して不規則な形状をしているため、一部エコーが計測されたものと考えられる。

図 7-19 は、A7075 合金の接合継手の超音波探傷試験後の C スキャン画像、各地点での A スキャン波形及び接合継手の側面の外観を示す。図の通り、本継手は、試験片の固定が十分でなかったため、変形によりそりが発生した。C スキャン画像では、ナゲットの周囲の一部にエコーが測定された。A 及び C はナゲットの内部でのエコーであるが試験片が変形したためエコーの位置がずれて計測された。そして、B の位置は、ゲート位置 (3mm) 付近からのエコーであるが強度は小さく、第 2 波はほとんど減衰してしまった。この場所は、攪拌された金属が板の間に排出されて形成されたものと考えられ、部分的に接合していたため、エコー像が測定されたものと考えられる。

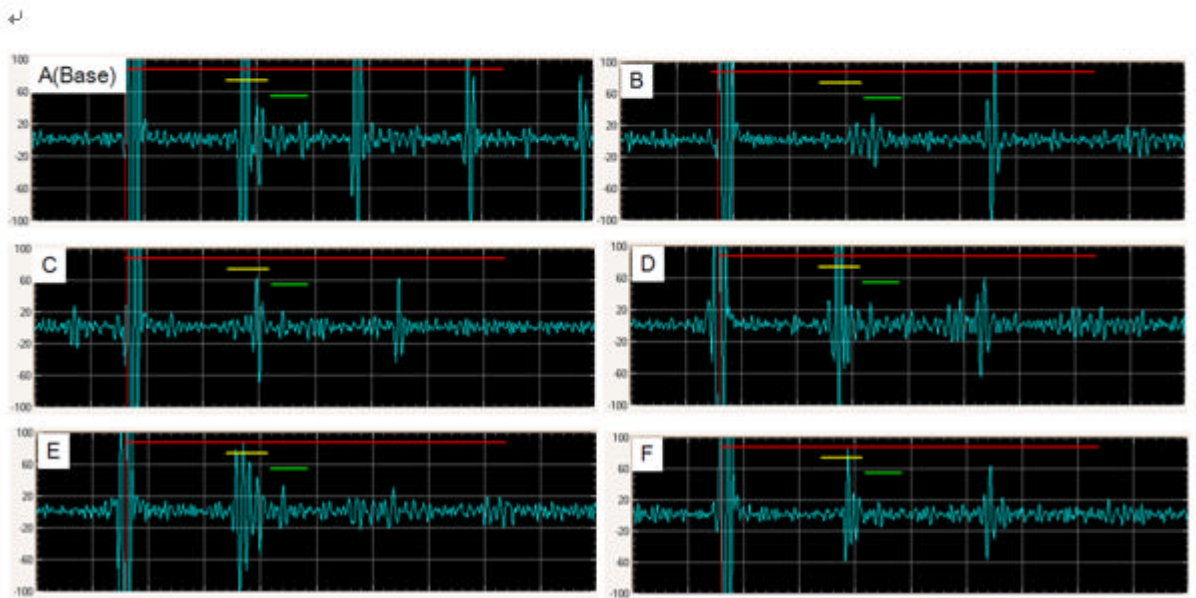
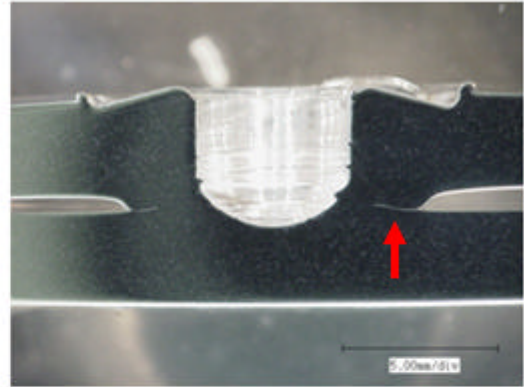
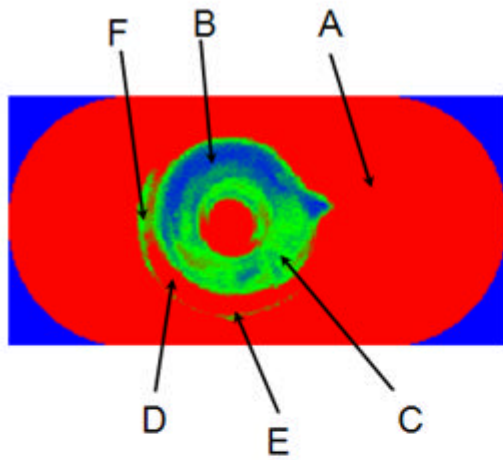


図 7-18 A5083 合金の接合継手の超音波探傷試験後の C スキャン画像、各地点での A スキャン波形及び継手外観

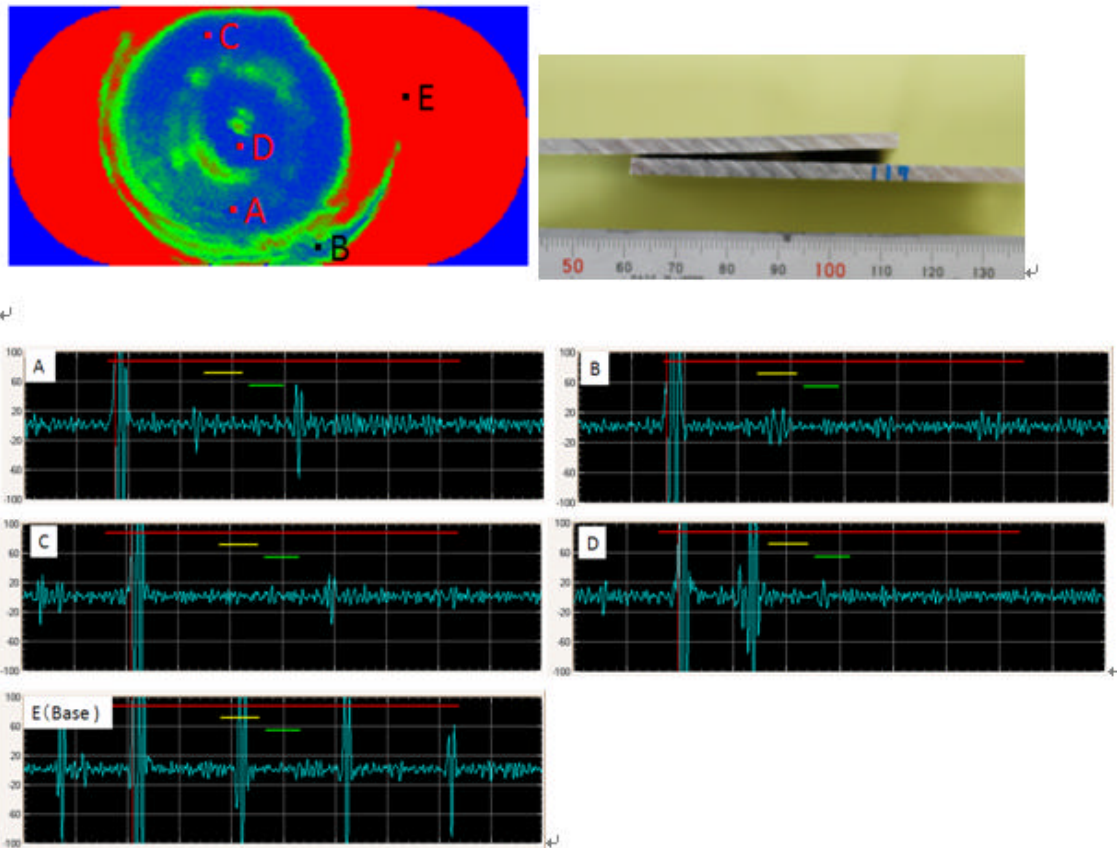


図 7-19 A7075 合金の接合継手の超音波探傷試験後の C スキャン画像、各地点での A スキャン波形及びマクロ組織