

FSW 継手の超音波探傷による検査技術検討

Ultrasonic Testing Technology applied to Friction Stir Welding Joint

武井 徹 Toru TAKEI
吉澤正皓 Masaaki YOSHIKAWA
福元 誠一 Seiichi FUKUMOTO

岡田 寿 Hisashi OKADA
石川 武 Takeshi ISHIKAWA

FSW 継手はトンネル状の内部欠陥や、キッシングボンドと呼ばれる線状の表面欠陥が発生しやすい。そのため、これらの欠陥発生を未然に防ぐとともに、欠陥を検出できる検査方法の確立が品質保証において重要となる。そこでこれらトンネル状の内部欠陥やキッシングボンドを検出する方法として、超音波探傷試験による検査方法を検討、適用したので報告する。

FSW joint is easy to produce a tunnel-formed internal defect and linear surface defect called kissing bond. Therefore, it is very important for quality assurance to prevent these defect from occurring, and to establish inspection method. And so in this study, we established the inspection procedure by the ultrasonic testing, as a method to detect these defects.

1 はじめに

FSW（摩擦攪拌接合）はアーク溶接と比較し、低入熱でひずみが少なく、ヒュームやスパッタが発生せず、溶加材が不要であるため、主にアルミニウム合金などで適用が拡大している。また固相接合であるため、熔融接合に見られる凝固割れやブローホールなどの溶接欠陥の発生が少ない。さらに鉄道車両構体で多用されるA6N01S-T5などアルミニウム熱処理合金では、アーク溶接と比較して熱影響による軟化域が狭く、継手効率が低下しにくい利点もある。

一方でツール荷重や回転速度、ツール移動速度などの接合条件が適正值から外れた場合や、狙い位置のずれ、ツールの磨耗や変形があった場合、被接合物の拘束が十分でなかった場合などには、トンネル状の内部欠陥や、キッシングボンドと呼ばれる開口欠陥が発生する場合がある。内部欠陥は断面積の欠損により継手の静的強度に影響を与えるほか、鋭角的形状のため応力集中係数が高く、疲労強度にも影響を与える。またキッシングボンドは、一般に溶接部の表面欠陥の検出に使用される浸透探傷試験では検出できないことがあるにもかかわらず、曲げ試験で開口し、また疲労強度を低下させる。よって品質保証上、これらの欠陥を確実に検出することが求められる。しかし、一般に溶接継手の非破壊検査に用いられる放射線透過試験では撮影、現像、判定までに時間を要するうえ、放射線を使用するため安全上の配慮も必要になる。また、航空宇宙産業などでは超音波探傷試験の発展形であるフェイズドアレイも適用されているが⁽¹⁾、装

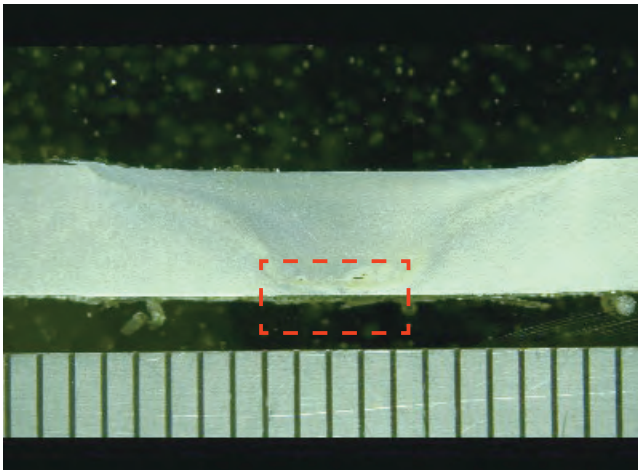
置が高価であり、探触子の選定に注意を要する。そこで今回、これらの内部欠陥とキッシングボンドを検出するために汎用の超音波探傷器で、ペン型垂直探触子と小型斜角探触子、表面波探触子を用いて検出する方法を検討、適用したので報告する。

2 FSW継手の超音波探傷試験の概要

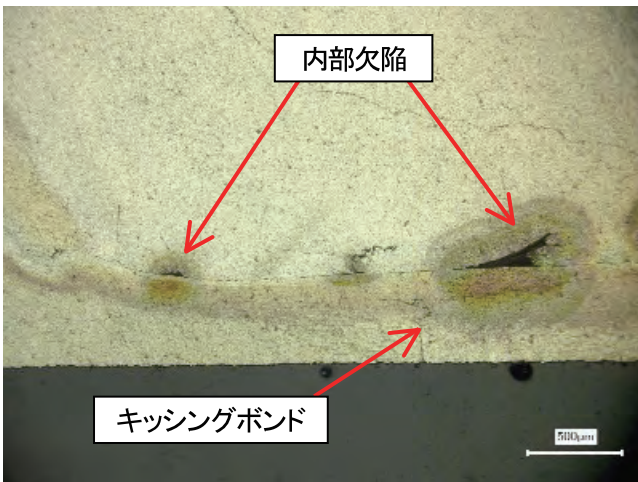
2.1 アーク溶接とFSWの相違点がもたらす課題

アルミニウム合金のアーク溶接では球状のブローホールや、線状の溶込み不良、融合不良、割れなどの欠陥が発生しやすい。これらは放射線透過試験や超音波探傷試験、浸透探傷試験などで検出され、検出すべき欠陥の種類や構造物の形状、試験の実施場所などに応じて選択する。

それに対しFSWで発生する内部欠陥は、板の圧延方向に平面で密着した形状である場合、放射線透過試験では放射線透過量の変化によって生じる透過写真の濃淡の差が少なく、きずを検出できない可能性がある。またキッシングボンドは小さいもので数 μm 程度⁽²⁾と、アーク溶接で発生する溶込み不良と比較して幅が極めて狭いため、微細なきずの検出能力が染色浸透探傷試験よりも高い蛍光浸透探傷試験⁽³⁾でも検出が難しいとされる⁽²⁾。そこで内部欠陥とキッシングボンドの両方を検出できる方法として超音波探傷試験の適用を検討した。FSW継手の断面マクロ観察写真を図1に示す。



(a) 継手断面全体



(b) 点線部拡大図

図1 FSW 継手の断面マクロ観察写真

2. 2 超音波探傷試験の原理

超音波探傷試験は、探触子から発生する超音波が物質中を伝播し、伝播経路中の欠陥などからの反射波（エコー、垂直探傷における健全部で見られるエコーを底面エコー、きず、欠陥からのエコーをきずエコー、欠陥エコーという）を検出し、欠陥の位置、大きさを調べるものである。

音は空気の圧力振動による波であり、空気が圧力変化（疎密）の振動を繰り返しながら前方に進んでいく。音の高低は、1秒間あたりの振動数によって決まり、高い音は振動数が多いことを意味し、周波数が高いという。周波数の単位は通常、Hz（ヘルツ）を使用する。耳に聞こえる音の周波数はおよそ20Hz～20000Hz（20kHz）で、20kHz以上の周波数の音波を超音波と呼んでいる⁽³⁾。超音波には振動の種類により、縦波（固体、液体および気体中に存在できる）、横波（固体中のみで存在できる）、表面波（横波の一種）などがある。

縦波は粒子間隔の伸び縮みの方向、すなわち粒子の振動方向が、振動の伝わっていく方向と一致している波である。縦波は主に垂直探傷で板材の圧延きず、余盛を削除した平滑な溶接部の内部欠陥の探傷や、板厚測定などに用いられる。縦波の模式図を図2に示す。

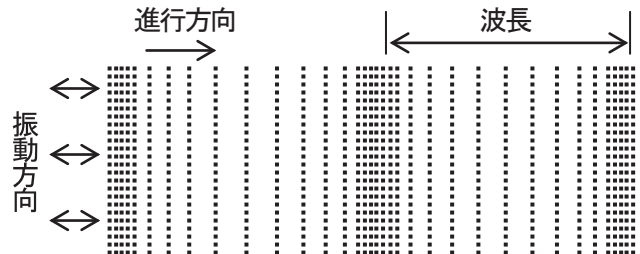


図2 縦波の模式図

横波は粒子の移動方向、すなわち粒子の振動方向が振動の伝わっていく方向と直角になっている波である。横波は主に斜角探傷で、余盛ありの溶接部の溶込みの探傷などに用いられる。横波の模式図を図3に示す。

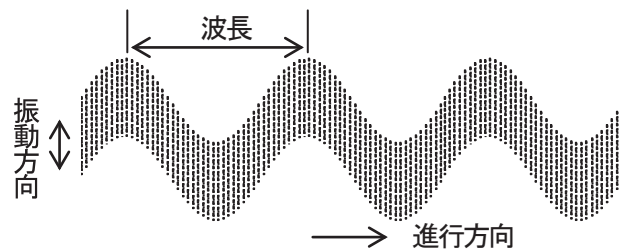


図3 横波の模式図

表面波は材料の表面層だけを伝わっていく波である。表面から1波長分の非常に浅い層にエネルギーの大部分が集中しており、表面付近の粒子は縦振動と横振動を混合したような挙動を示す。表面波は主に板材の表面きずの探傷などに用いられる。表面波の模式図を図4に示す。

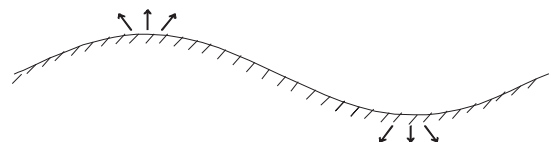


図4 表面波の模式図

3 FSW継手の超音波探傷方法検討

3. 1 探傷対象の継手形状

探傷対象は板厚4mmのアルミニウム合金A6N01S-T5

押出型材の平板をFSWで接合した片面突合せ継手である。継手外観を図5に示す。継手止端部に発生する突起物はトウフラッシュまたはバリと呼ばれる。なお、探傷方法を検討するあたり、トウフラッシュは除去しないことを前提とした。

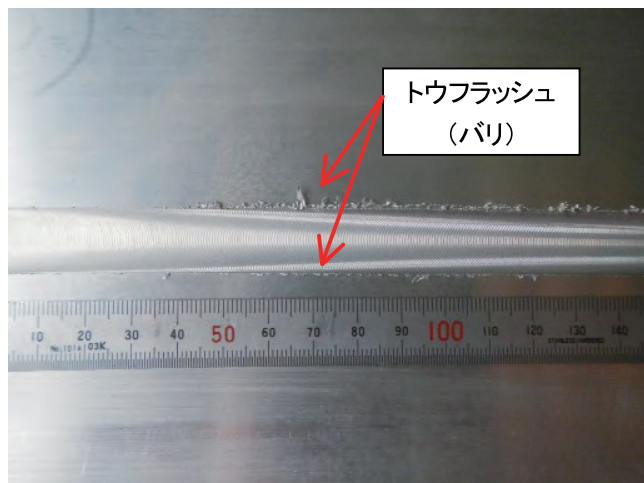


図5 継手外観

3.2 垂直探傷

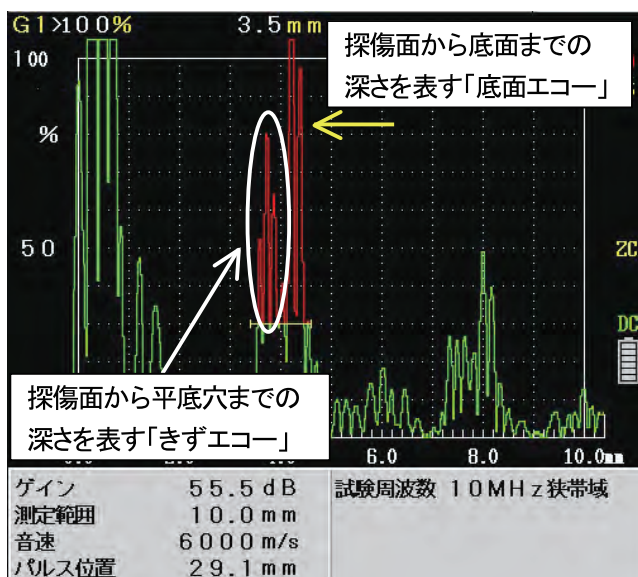
継手中に発生する内部欠陥は、板の圧延方向に平面形状であることが多いことから、FSW施工面（以下、表面とする）からの垂直探傷を検討した。探触子は二振動子探触子10C5 / 2NDとペン型探触子15K4Nの2つを用いた。検討用として、平板にφ0.6mm、φ0.8mmの2種類の平底穴を裏面から深さを0.5～2.0mmで段階的に変えた試験片を作製し、表面から探傷を行った。探傷結果を表1に、ペン型探触子による探傷を図6に示す。表中の○は平底穴が検出でき、底面エコーとの分離が可能、×は平底穴の検出ができない、またはできても底面エコーとの分離が困難であったことを示す。探傷画面を図7に示す。探傷器の画面で縦軸は反射エコーの強さを表しエコー高さと呼び、横軸は探触子から反射源までの距離でビーム路程と呼ぶ。垂直探傷の場合、きずエコーのビーム路程が探傷面からきずまでの深さとなる。

表1 探傷結果

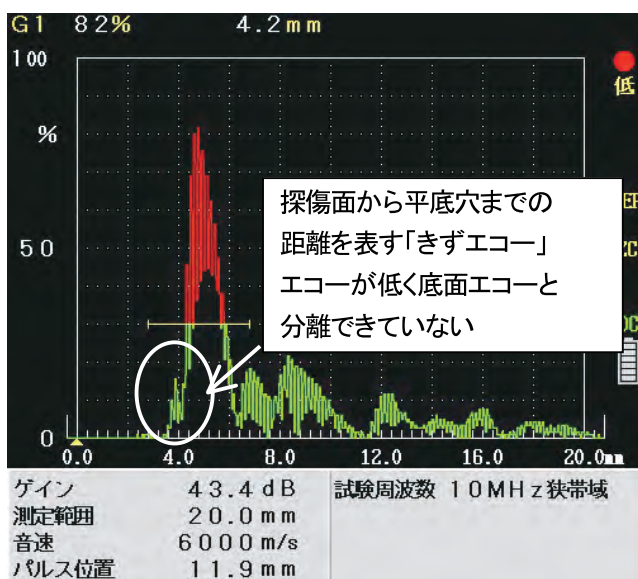
| 裏面からの きず深さ | | 探触子 穴径 | | | |
|---------------|------|--------|-----|-----|-----|
| | | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| 二振動子 探触子 | φ0.6 | × | × | ○ | ○ |
| | φ0.8 | × | × | ○ | ○ |
| ペン型 探触子 | φ0.6 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | φ0.8 | ○ | ○ | ○ | ○ |



図6 ペン型探触子による探傷



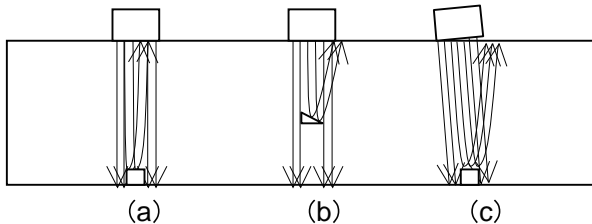
(a) きずエコーの分離が可能な場合（ペン型φ0.6深さ0.5）



(b) きずエコーの分離が困難な場合（二振動φ0.6深さ0.5）

図7 探傷画面

超音波探傷は一般に周波数が高いほど、また振動子の大きさが小さいほど、きず検出能力は高いと言われ、本結果も同様となった。しかし、ペン型垂直探触子は超音波ビームの幅が非常に狭いため、超音波ビームがきずに対してわずかでも斜めに入射した場合、きずを検出できない恐れがあり、走査が難しい結果となった。超音波ビームの入射角度ときずエコーの関係を図8に示す。



- (a) 超音波ビームときずが直角のとき
 (b) きずが傾きを持っているとき
 (c) 探触子が斜めするとき

(a) ではきずエコーが高く、(b) や (c) ではきずエコーが低い

図8 超音波ビームの入射角度ときずエコーの関係

3.3 斜角探傷

内部欠陥とキッシングボンドの両方を検出できる方法として斜角探傷を検討した。しかし一般的なアーク溶接継手に使用される5C10×10A70や5C10×10A45などの斜角探触子をFSW継手に使用する場合、以下の不都合が生じる。

- ・アーク溶接継手中に発生するブローホールや溶込み不良、融合不良と比較して、FSW継手中に発生する内部欠陥とキッシングボンドは非常に小さい場合があり、反射エコーが小さく、きずが検出できない可能性がある。また探傷感度を高くするとSN比が悪くなる。
- ・FSW後、止端に発生するトウフラッシュによる段差に探触子が乗り上げ、超音波がうまく入射できない。

これらのことから、探触子は振動子サイズが小さい小型斜角探触子5K3×3A45を使用し、FSW後の表面からの直射法による探傷とした。

アルミニウム溶接部の超音波探傷試験に関するJIS規格には、JIS Z 3080:1995.アルミニウムの突合せ溶接部の超音波斜角探傷試験方法があるが、適用範囲を厚さ5mm以上としているためそのままの適用はせず、規定されるRB-A4 ALを参考に、標準穴の径を $\phi 0.8\text{mm}$ として作製した。穴径はISO25239-5:2011.Friction stir welding - Aluminum - Part5:Quality and inspection requirementsに、断面観察時の内部欠陥許容値が、板厚 $\times 0.2$ 以下または4mmのいずれか小さいほう、とある規定を参考にした。作製した対比試験片形状を図9に示す。

対比試験片での探傷の様子を図10に、そのときの探傷

器の画面を図11に示す。斜角探傷は超音波が探傷面に斜めに入射するため、超音波の入射角度とビーム路程の三角関数で探傷面からの位置を求める。画面中の3本の黄線をエコー高さ区分線と呼び、上から順にH線、M線、L線と呼ぶ。H線は標準穴からの反射エコーを異なるビーム路程でプロットしたもので、探傷中にH線と同レベルの反射エコーが得られた場合、そのきずを横穴と仮定した場合、標準穴と同じ大きさであるとみなせる。

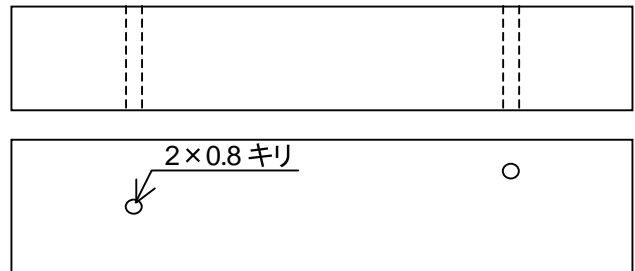


図9 対比試験片形状

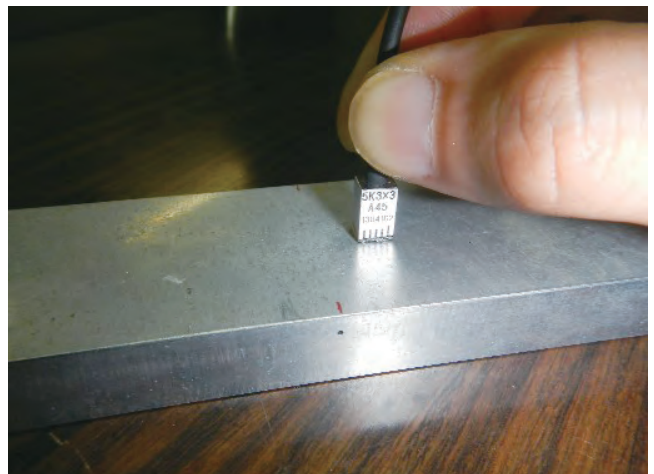


図10 対比試験片での探傷の様子

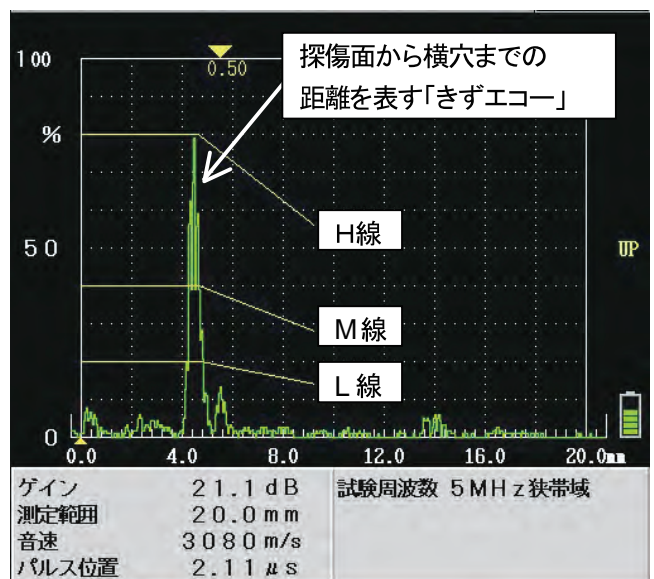


図11 探傷器の画面

3. 4 表面波探傷

斜角探傷では、内部欠陥とキッシングボンドが超音波ビームの線上に混在した場合、内部欠陥のみしか検出しない、または両方を検出してもエコーが分散して小さくなり、きずの大きさが正しく判定できないおそれがある。またキッシングボンドが単独で存在した場合でも、きずの深さ方向の長さが短いと、きずエコーを見落とす可能性もある(図12)。そこで、キッシングボンドのみを検出する方法として表面波探傷の適用を検討した。表面波探傷を図13に示す。表面波探傷はキッシングボンドを検出するのが目的であるため、FSW後の裏面から探傷した。

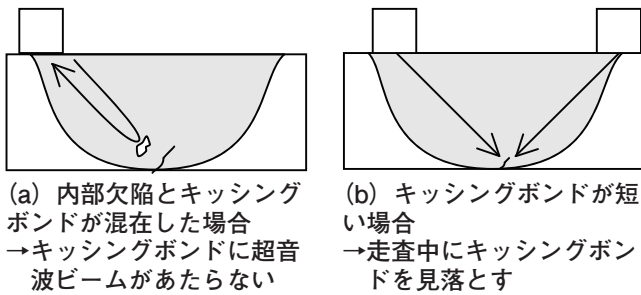


図 12 欠陥の見落とし

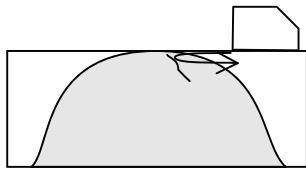


図 13 表面波探傷

アルミニウム合金の溶接部に関する表面波探傷のJIS規格がないため、長さ10mm、幅60 μ m、深さ100 μ mのスリットを入れた対比試験片を作製した。対比試験片の形状を図14に示す。

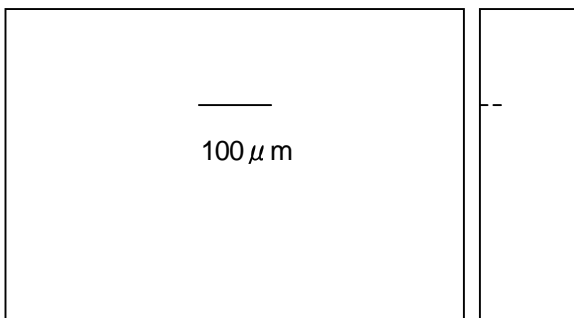


図 14 対比試験片形状

探触子は、5C10 \times 10R ALを使用した。対比試験片での探傷の様子を図15に、またそのときの探傷器の画面を図16に示す。表面波探傷は超音波が探傷面表面に沿って

入射するため、探傷器画面に現れたきずエコーのビーム路程が探触子先端からきずまでの距離を意味する。

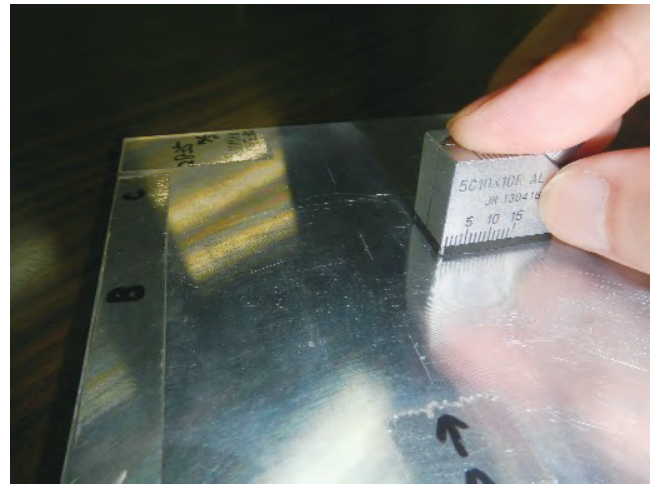


図 15 対比試験片での探傷の様子

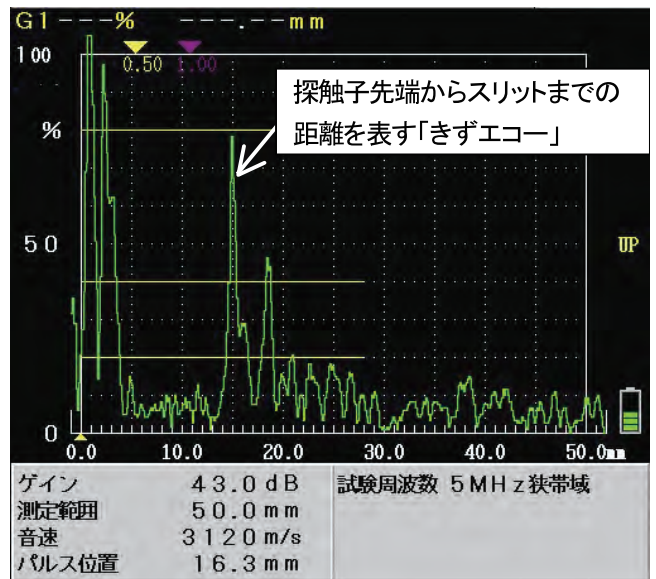


図 16 探傷器の画面

前述のとおり、表面波は表面から1波長分の非常に浅い層にエネルギーの大部分が集中し、波長と同程度の深さまでのきずが検出可能となる。探傷対象のアルミニウム合金A6N01S-T5の押出と直角方向の音速は約3000m/秒(実測値)であり、5MHzの探触子の場合、探傷面表面から0.6mm程度までが探傷範囲となる。これは表面波探傷ではキッシングボンドと探傷面近傍の内部欠陥を検出することになる。しかし内部欠陥は突合せ面から離れた位置に発生し、キッシングボンドは突合せ面に発生する。このことから表面波探傷の場合、内部欠陥とキッシングボンドが混在しても、突合せ面と探触子、ビーム路程の位置関係を正確に把握することで、両者を分離して捕らえることが可能であると考えられる。

4 まとめ

アルミニウム合金A6N01S-T5のFSW継手で超音波探傷による非破壊検査方法を検討し、以下の結果が得られた。

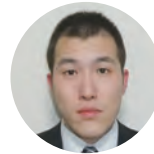
- (1) ϕ 0.6mm, 0.8mm平底穴の探傷を、垂直二振動子探触子10C5 / 2NDとペン型垂直探触子15K4Nで行った。垂直二振動子探触子では穴深さが1mm以下の場合、きずエコーと底面エコーとの分離が困難であった。ペン型垂直探触子15K4Nでは穴深さ0.5mmでもきずエコーと底面エコーが分離し、探傷できた。
- (2) FSW継手部のトウフラッシュを除去しない前提下、小型斜角探触子5K3×3A45を使用した探傷を検討した。そしてISO25239に規定される断面試験での内部欠陥許容値 ϕ 0.8mmで横穴の対比試験片を作製し、小型斜角探触子5K3×3A45で探傷することができた。
- (3) 表面波探触子5C10×10R ALを使用し、長さ10mm、幅60 μ m、深さ50 μ mの人工きずを探傷することができた。また表面波探傷では、キッシングボンドだけでなく、探傷面近傍の内部欠陥も検出可能である。そして内部欠陥とキッシングボンドが混在しても、突合せ面と探触子、ビーム路程の位置関係を正確に把握することで、両者を分離して捕らえることが可能であると考えられる。

今後は、今回検討した方法をもとに、一般的なアーク溶接継手向けに探触子選定や感度調整を行い、より簡便に短時間で実施可能な方法を、超音波探傷以外の方法も含めて検討していく。

参考文献

- (1) 立花直治, 他:「INTRODUCTION TO PHASED ARRAY ULTRASONIC TECHNOLOGY APPLICATIONS 日本語版」, 205-209, (2005), Olympus NDT
- (2) 大岩直貴, 他:「摩擦攪拌接合部における不完全部とその精密非破壊検査—構造用アルミニウム合金の摩擦攪拌接合継手の諸特性に関する研究 (第1報)—」, 軽金属溶接, 45 - 4, 11-21 (2007)
- (3) 続木武彦, 他:「非破壊検査シリーズ 浸透探傷試験 II」, 118, (2005), (一社) 日本非破壊検査協会
- (4) 裏垣博, 他:「非破壊検査シリーズ 超音波探傷試験 II」, 4, (2000), (一社) 日本非破壊検査協会

著者紹介



武井 徹
生産本部
技術部 (接合技術センター) 主任



吉澤正皓
生産本部
技術部 (接合技術センター)



福元誠一
生産本部
技術部 (材料センター) 主任



石川 武
博士 (工学)
生産本部
技術部 (接合技術センター) 課長



岡田 寿
生産本部
技術部 (接合技術センター) 課長