

非破壊検査技術

第6回 最近の超音波探傷

荒川 敬弘*

Takahiro Arakawa

1. はじめに

連載講座も6回目を迎えることができました。半年に1回の発刊であるので、丁度3年間お付き合いいただいたことになる。そろそろ最終回としよう。

第1回の講座では、「非破壊検査の動向」と題して、浸透探傷試験、磁粉探傷試験、放射線透過試験や超音波探傷試験の概要を述べると共に、最近の動向として注目されている状態監視のためのグローバル検査法としてのアコースティックエミッション法やガイドウェーブ法などを紹介した。

第2回以降は超音波探傷試験を対象として、第2回に「超音波の性質」について解説し、第3回に実際に多く用いられている一般の「探傷方法」について解説した。これを受けて第4回には「超音波探傷試験の検出性」について触れ、前回の第5回には「超音波探傷試験のサイジング」を解説し、超音波探傷試験による自然欠陥の定量的評価について議論してきた。

非破壊検査の概要についてご理解いただけたと思う。一方、近年のコンピュータ技術の進歩は著しく、従来のCRTを用いたアナログ探傷器も、デジタル探傷器に置き換わりつつある。また、ホログラフィー探傷、フェーズドアレー探傷やTOFD探傷などのコンピュータ技術を用いた新し

い探傷手法が実用化されてきている。ここでは、フェーズドアレー探傷やTOFD探傷について解説する。

また、筆を置くに当たり、今後の非破壊検査の更なる発展も期待して、超音波探傷試験がより困難となるオーステナイト系ステンレス鋼溶接部やインコネル溶接部などの異方性材料の超音波探傷について簡単に触れることにした。

2. フェーズドアレー探傷

訓練された合唱団の歌声に感動したり、スポーツなどの大声援に興奮したりした経験をお持ちであろう。一人一人の声は、点音源として、ほぼ同心円状に広がっていく。これらの音源が隣接し、同様の音を発するとき、互いの音が干渉し、特有の音場を形成する。これによって、感動したり興奮したりするのであろう。

超音波探傷試験においては、通常、圧電素子によって超音波を発生させる。このとき、一定のサイズの振動子が一般に用いられ、これによって形成される音場については、第2回の「超音波の性質」で触れている。

一方、小さな圧電素子を多数隣接させ、同時に励起させても、合唱団や応援団のように特有の音場が得られるに違いない。振動子前方における平

* 技術研究所 所長 工学博士

面波の形成の様子は図1のホイヘンスの原理により説明されることがある。振動子は、無数の点音源が隣接しているとして、各点音源からのたくさんの同一周波数の球面波（素元波）によって形成される包絡線として波面が形成されていく。同様に、全ての波面はその前の波面を原点とした素元波の包絡線として表わすことができる。

このことは、振動子を微小に分割して、分割された素子を独自に励起させても、互いの素子からの波が十分に干渉しあえば一つの連結した振動子と同様に音場を形成させることができることを意味している。このように微小分割した素子を並べ、それぞれを独自に励起できるようにした探触子をフェーズドアレー探触子と呼んでいる。

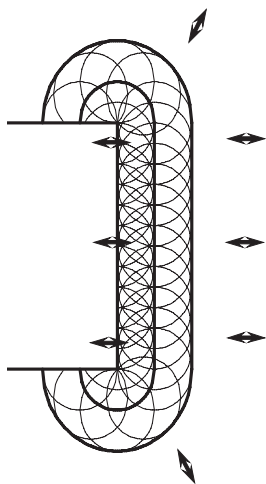


図1 素元波による波面の形成（ホイヘンスの原理）

この探触子を用いたフェーズドアレー探傷には、様々な優れた特長があり、探傷効率の著しい向上をもたらし、結果としてきずの評価精度向上に寄与している。例えば隣接する複数の素子を同時に励起させて、一つの垂直探触子と同様の音場を形成させ、励起する素子を順次一つ毎ずらしていけば、図2(a)に示すように垂直探触子を機械的に走査する代わりに電気的な走査が可能になり、高速な画像表示ができる。

より重要な活用方法は、各素子を励起させるタイミングを順次ずらすことによって得られる。例えば図2(b)に示すように、隣接する素子の励起させるタイミングを順次片側に遅らせていくと、A-A'面のように素子面に傾いた向きに進行する超音波が発生し、斜角探傷の電子走査が可能になる。また、順次励起させるタイミングを少しずつ変えることで、潜水艦のソナーのように、超音波の進行方向の角度が順次変化する扇状の走査（セクタ走査）が可能になる。

第4回の「超音波探傷試験の検出性」で、割れなどの面状欠陥の場合に、きずの検出性は面への超音波の入射角に大きく依存することを述べた。もちろん、フェーズドアレー探傷を用いなくても、従来の探傷で、屈折角が5度間隔で異なるような斜角探触子を用いた数多くの探傷を行って、得られるエコー高さを評価することでも斜めに傾いた割れなどの検出性を向上することができよう。

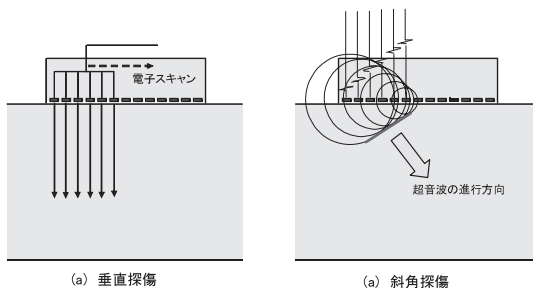


図2 フェーズドアレー探傷（電子走査式超音波探傷法）の原理

しかし、超音波探傷を一度経験した人ならば、即座に答えるであろう。屈折角5度間隔の探傷など気の遠くなる話である。通常の探傷に比べて十数倍の探傷工数が必要である。一方、フェーズドアレー探傷によれば、電気的なセクタスキャンを行うことで、通常の1回の走査と同じ時間で、従来の探傷では気の遠くなるほどの情報をコンピュータに取り込むことができるのである。図3にセクタスキャンの探傷例を示す。

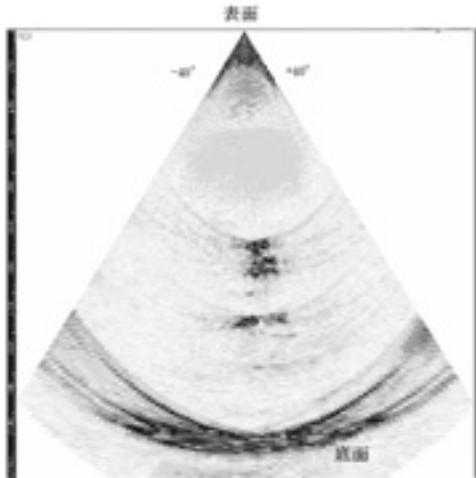


図3 フェーズドアレイ探傷セクタスキャンの例

一方、素子の励起の時期を対象的に変化させることで、超音波ビームを集束させたり、より拡散させたりもできる。通常は、両端の素子から順次励起させることで得られる集束ビームがより重要である。励起させる素子の数（振動子の大きさ）と素子を励起させるタイミングを調整することで、集束深さをある程度自在に変化できる。

従来の凹型の振動子を用いた集束探触子の場合には、特定の深さでのみ超音波ビーム径が最小になる。このため、きずの深さ位置で最も超音波ビーム幅が小さくなるように探傷するには、きず毎に最適の集束探触子を選んで用いる必要がある。集束探触子の集束範囲（距離振幅特性曲線を求め、最大エコー高さの1/2のエコー高さが得られる範囲）を用いても、数十mmの試験体に対して、数個の集束探触子を使い分ける必要があろう。

図4は、凹面振動子を用いた従来の集束探触子とフェーズドアレイ探触子による、種々の深さ位置の横穴を探傷した結果を比較したものである。フェーズドアレイ探傷では、電気的に集束深さを変化させつつ、かつ集束位置における情報のみを画像化するダイナミックフォーカシング行っているため、それぞれの深さの横穴が鮮明に描かれ

ている。一方、従来の集束探触子では、超音波ビームが集束する深さの横穴の像は鮮明であっても、集束位置から離れた深さの横穴の像は、急激に幅の広い不鮮明な像として示されているのがわかる。

前回の講座「超音波探傷試験のサイジング」で、きずの寸法測定精度を改善するのに集束探触子が有効であることを述べた。従来の集束探触子では、きずの深さによって、集束深さの異なる探触子を使い分ける必要があり、検査工数の増大が課題であったが、フェーズドアレイ探傷はこの欠点を克服し、効率よく精度よい探傷が可能になる。

なお、フェーズドアレイ探触子は、細長い素子を一行に配置したリニアアレイがより多く用いられているようである。この場合には、集束したビームは素子の配列方向にのみ集束し、これと直行した方向には集束の効果はなく、結果として、細長く集束したビームの形となる。集束した方向のきずの寸法測定精度のみが改善されることに留意する必要がある。いずれの方向にも集束させ、点集束させる場合には、リング状の振動子を並べたリングアレイ探触子が用いられる。

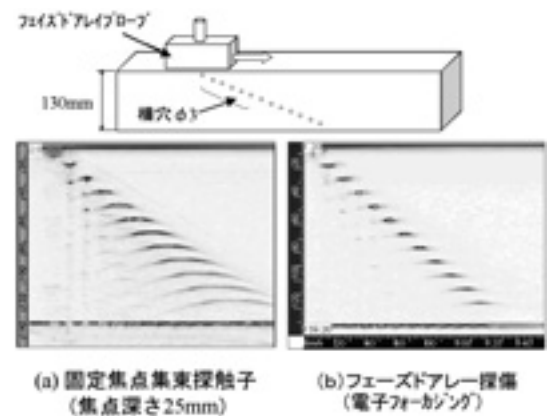


図4 固定焦点（深さ25mm）集束探触子法とフェーズドアレイ探傷（電子フォーカシング）の探傷結果の比較

このように述べてくると、このような設備が古くから病院で使われていることにお気づきであろう。お母さんのお腹の中で動く胎児の画像をテレビなどでご覧になられたこともあろうかと思う。病院では、装置がいかに大きくても、人が装置のところに歩いていけばよい。

近年の、コンピュータ技術の著しい発展によって、このような複雑な装置も、実にコンパクトになった。これによって、我々の非破壊検査の分野においても実用に供することが可能になった。狭いマンホールの中や、長い垂直梯子の上にも容易に持ち運べるようになり、近年様々な形で普及され始めたのであろう。

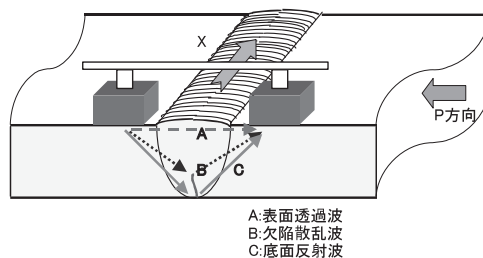
3. TOFD法⁽¹⁾⁽²⁾

同じく前回の講座で、きずの端部エコーを捕らえてきずを評価する端部エコー法が、きずの板厚方向の寸法（きず高さ）の測定精度に優れていることを述べた。これに似た方法に超音波TOFD法がある。この方法は、第1回の「非破壊検査の動向」において、PISC II計画のラウンドロビメントで優れた探傷結果を示した6つの手法の中に含まれていたことを示した。ここで、TOFD法について紹介したい。

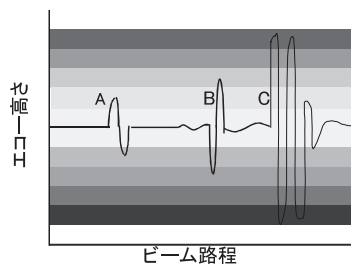
TOFD法は、BS規格のBS7709「Guide to Calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaws」がよく知られている。また、国内においても、2001年に、日本非破壊検査協会のNDIS2423「TOFD法によるきず高さ測定方法」が、きず高さ測定に限定しつつも、規準化されている。

TOFD法は、図5(a)に示すように、きずを挟んで二つの斜角探触子を対抗して配置し、きずの長手方向に直線的に探触子を走査する方法である。このとき、二つの探触子間の距離は一定となるように、ジグを用いて固定しておく。

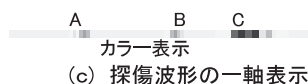
きずのない健全部では、表面を伝搬するラテラル波（A波）と裏面で反射する反射波（C波）のみが得られる。内部にきずが存在すると、更にきずの端部で回折して得られる回折波（B波）が得られる（図5(b)）。得られた信号波形の振幅値（エコー高さ）をカラー（または濃淡）表示させると、一本の線でエコー高さを表示でき（図5(c)）、これを探触子の直線走査に対応して並べると探傷画像が得られる（図5(d)）。従って、探傷画像は探触子位置と超音波が送受信される伝搬時間の関係を示し、得られた音圧はカラー（または濃淡）で表示される。



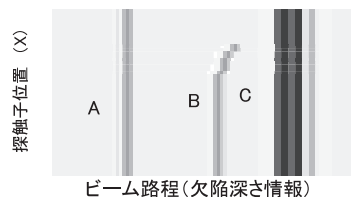
(a) 探傷要領



(b) 探傷波形



(c) 探傷波形の一軸表示



(d) TOFD画像表示

図5 超音波TOFD法の概要

図6に、裏面に開口した高さが順次異なる三角形状のノッチを探傷したときの探傷画像の例を示している。あたかも、きずを側面方向から見たような情報が得られている。また、ノッチが裏面表面に開口しているため、底面での反射波はノッチ部を迂回して受信する必要があるため、きずの無い位置に比べて、底面エコーの得られる伝搬時間が長くなっている。一方、探傷面側にきずが開口している場合には、ラテラル波の伝搬が阻害され、ラテラル波の透過エコーの振幅値が低下する。

なお、きずの端部からの回折波の伝搬時間は、きずが探触子間のどの位置にあるかによっても変化する。伝搬距離が最も短くなるのは、幾何学的に、きずが二つの探触子間の中央にあるときである。

このためにきずの端部位置を正確に測定するには、探触子をきずの長手方向に直交する方向にも走査させる必要がある。このときに、きず端部の探傷画像は、円弧状の軌跡を示す。この軌跡のほぼ中央の最も伝搬時間の短いときの値を用いて、幾何学的にきず端部の深さ位置を求めることになる。

なお、物に光が当たると影ができるが、波長の比較的長い超音波などがきずなどに当たると、これを回り込む波が生じ、やがて影をなくしていく。これを回折現象とよんでいる。かつて、光が粒子か波かの大議論が起こったときに、粒子論を唱えた学者の根拠の一つに、光では影ができることがあげられたと聞いたことがある。今は波長の大小によって理解されている。

いずれにせよ、TOFD法では、きずの端部（き裂などが内部にあるときには、上端と下端）を経由して得られる回折波の伝搬時間を用いて、幾何学的に端部位置を求めることになる。時間軸の値は極めて精度よく測定できるので、結果として、きずの端部位置を正確に求めることができ、またきずの高さ（板厚方向の寸法）を正確に測定できる。

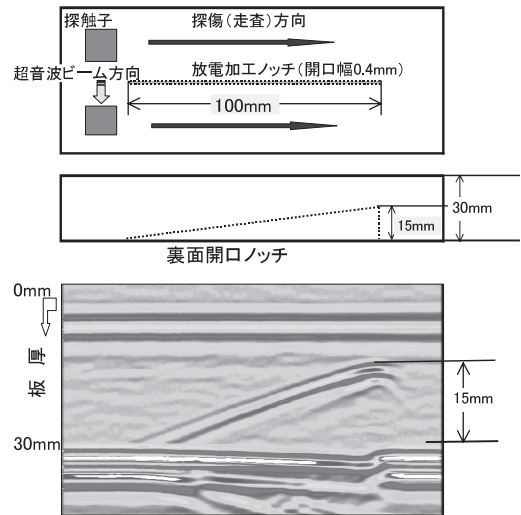


図6 TOFD法による表面開口ノッチの探傷結果例

図7は、疲労き裂を三点曲げ試験で進展させ、き裂の進展過程でTOFD法によりき裂高さを測定して、測定時のきずの実測値と比較した結果である。TOFD法でき裂高さを測定した時点で、破面にビーチマークを残しておき（荷重を変えたサイクルで少しき裂を進展させ、その時点のき裂進展位置を残しておき）、試験終了後に破断した破面のき裂に残されたビーチマークを読み取って、TOFD測定時のき裂高さの実測値を求めた。き裂の進展を精度よく監視できているのがわかる。

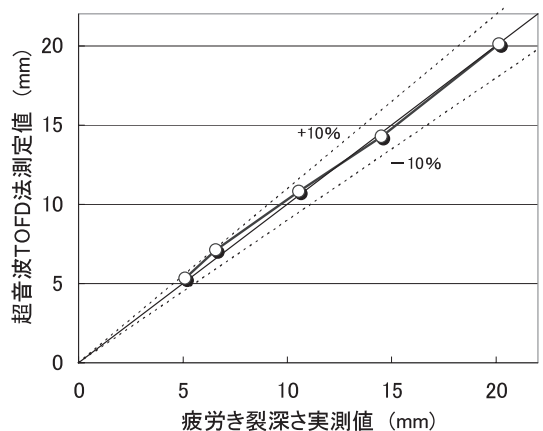


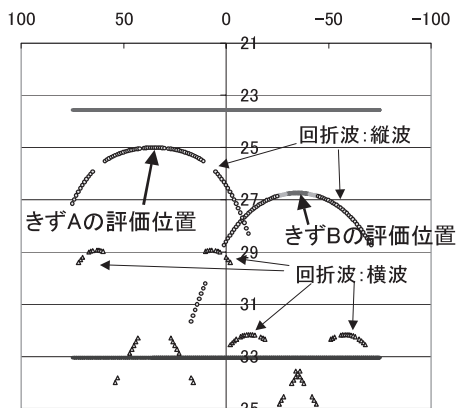
図7 超音波TOFD法による疲労き裂の進展計測精度

このように、TOFD法は比較的簡便にき裂の高さを得ることができ、またきずの検出に用いる場合には、溶接線方向に探触子を直線的に走査するだけでかなりの範囲を探傷でき、探傷速度も速いなどの優れた特長を持っている。反面、面での反射波に比べるとはるかに微弱な端部の回折波を受信するために、探傷の感度は極めて高く、探傷に留意すべき点も多い。このため、同じ試験体を複数の探傷者によって行い、結果を比較するラウンドロビンテストで、探傷者によって探傷結果が異なることもあるようである。

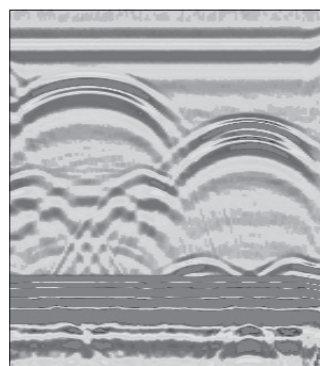
留意すべき一つには、きずの端部で超音波のモード変換が生じることである。横波を用いて探傷すると、きずの端部での回折波に縦波と横波が生じる。縦波の音速の方が早いので、画像化すると、より浅い位置に縦波にモード変換した回折波による虚像が現われることがある。一方、TOFD探傷に縦波を用いると、逆により深い位置に横波にモード変換した回折波による虚像が現われる。一般には、TOFD探傷には縦波が用いられ、原則としてより浅い位置に得られた像をきずとして評価する。

図8は、深さ19 mmと29 mmにある2つの横穴を、きずの長手方向に直交する方向に走査したとき（探触子間距離80 mm、屈折角50度、5 MHz）に計算で予測したTOFD画像と、実際に探傷して得られたTOFD画像を比較している。画像からきずを評価する場合に、予め得られる探傷画像を予測することが必要であり、評価にそれなりの知識が必要である。

また、表層部のきずの評価にも留意が必要である。表層部のきずは、試験体表面を伝搬するラテラル波との伝搬時間差が幾何学的に小さくなる。このために、ラテラル波にきずの端部の回折波が埋没して評価が困難になることもある。図9は、各深さにおける端部の回折波とラテラル波の伝搬時間差を計算した一例を示している。5 MHzの場



(a) 計算結果



(b) 探傷結果

図8 深さ19 mmと29 mmにある2つのきずを直交する方向に走査したときの予測探傷画像と実際の探傷で得られた探傷画像の比較

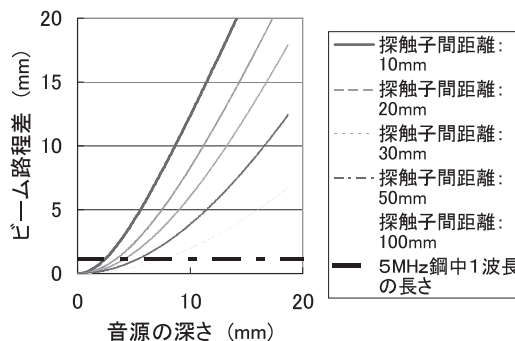


図9 各探触子間距離におけるラテラル波との伝搬時間差と音源深さとの関係

合の1波長分の時間を一点鎖線で示しているが、特に探触子間距離を長くした場合に、浅い位置のきずの評価が顕著に困難になることがわかる。探傷に先立って、評価しにくいきずの深さ範囲を予測しておくことも重要であろう。

また、一つは、微弱な回折波を識別するために、SN比の改善に努めることにある。図10は、用いる探触子によって、SN比に差が生じることを示している。波数の少ない探触子（広帯域型探触子）と波数の多い探触子（狭帯域型探触子）による疲労き裂を探傷した超音波 TOFD 画像を比較した結果である。SN比に差のあることがわかり、波数の少ない広帯域型探触子の方が端部を明瞭に識別できている。また、TOFD画像のSN比を向上させる目的で、ウェーブレット解析を用いた信号処理を行い、効果を得たとの報告も見られる⁽³⁾。

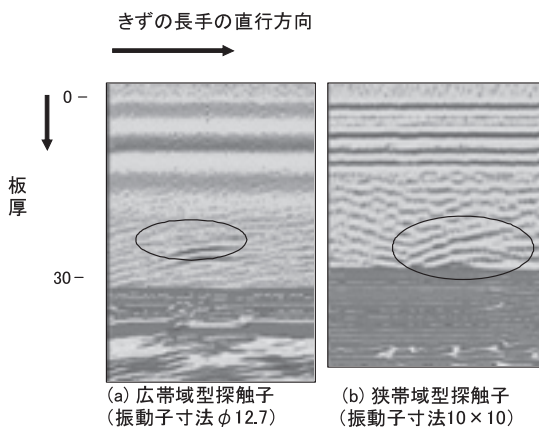


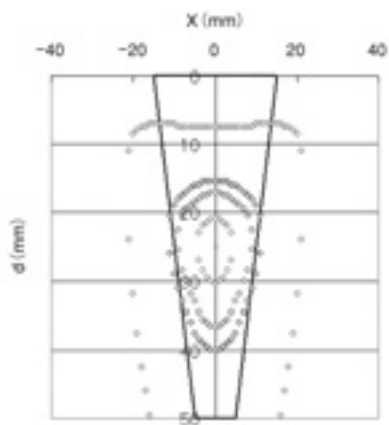
図10 広帯域型探触子と狭帯域型探触子による TOFD 画像の比較

また、一つは、超音波ビームの広がりを考慮して、一回の走査でどの程度の範囲の領域のきずを識別できるかを確認しておくことが必要である。ビームの広がりが大きい指向性の鈍い探触子を用いれば、一回の走査で広い領域を一度に検査でき、検査の効率に優れるが、あまり広い範囲を検査しようとする、SN比が悪くなり、きずの端部の

識別が悪くなる。

送波の指向性と受波の指向性を掛け合わせて、探傷領域の音圧分布を求めた例を図11に示す⁽⁴⁾。図の下に示した表の各探傷条件において、交軸点で得られる最大エコー高さの1/4 (-12 dB) 以上の音圧が得られる範囲を計算で求めて示した。用いる探触子によって、音圧分布が大きく異なり、きずを検出できる領域が大きく変化することを示唆している。

また、一つは、きずの端部における回折波の振幅値は、端部の形状や超音波の端部への入射方向にも依存することにも留意する必要がある。図12は円柱の中心に疲労き裂、スリット及び円柱の端部を配置し、円柱の外周より、TOFD法を模擬して、垂直探触子できずの端部での回折波の音圧を測定した結果である⁽⁴⁾。このとき、きずの端部での超音波のビームの交差角を変えて（TOFD探傷における探触子の屈折角の違いを模擬して）測定している。



図中の記号	○	○	○	○
探触子の屈折角 (度)	45	45	45	45
探触子間距離 (mm)	50	50	50	50
振動子の直径 (mm)	6	12	6	12
周波数 (MHz)	2	2	5	5

図11 送波と受波の指向性を掛け合わせて求めた TOFD 法での音圧分布の探触子による変化の様子（交軸点での最大音圧の1/4 (-12 dB) 以上の音圧範囲を示す）

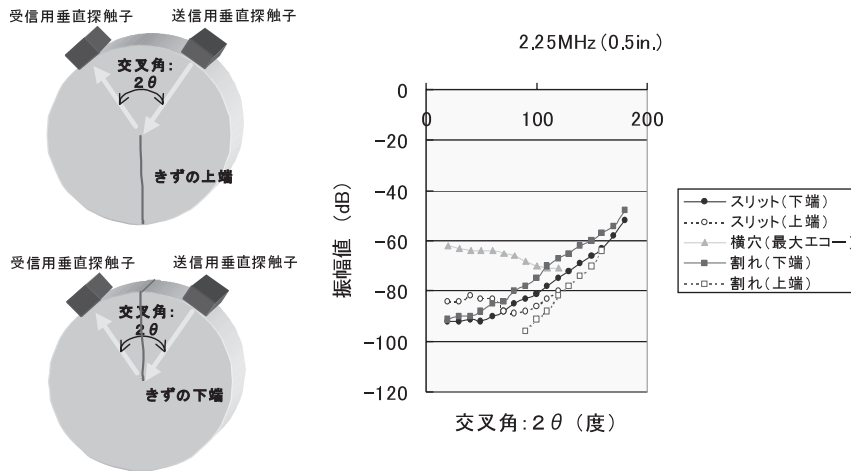


図12 TOFD法を模擬した円盤試験体で求めたきず端部の回折波の音圧の比較

超音波ビームの交叉角が100度以下の場合に、特に端部の形状によって回折波の音圧が大きく異なることがわかる。すなわち、スリットや円柱に比べて疲労き裂の先端が捕らえにくくなる。このことは、特に屈折角50度以下の斜角探触子を用いてTOFD探傷する場合に、感度を調整するための対比きずとして実欠陥に近い形状を用いる必要があることを意味しよう。

この他、きずの上端と下端では、波形の位相が一般に逆転するなど、TOFD画像を評価するには必要最低限の知識を習得しておく必要がある。しかし、板厚方向のきずの寸法を精度よく求めることは、破壊力学によって構造物の健全性を評価する上で極めて重要である。この目的で、極めて優れた探傷法の一つであるTOFD探傷は、近年活躍の場が増えてきている。正しい知識と十分な技量によって、課題が克服され、構造物の健全性評価の重要な手段として今後も適用の機会が増えていくと考えている。

4. オーステナイト系の溶接部の超音波探傷

今までの講座では、全て異方性のない均質な材質における超音波探傷について解説してきた。講

座の終わりにあたり、異方性のある材料の代表であるオーステナイト系組織を持つ溶接部の超音波探傷試験について簡単に触れたいと思う。

音速は、ヤング率の関数である。一方、結晶は、結晶の方位によってヤング率が変化するので、音速も結晶方位によって変化することになる。通常の鋼材は、小さな結晶粒がランダムに配置された多結晶体である。このために、マクロ的に見れば方位による音速の差異は見られなくなる。しかし、オーステナイト系ステンレス鋼やインコネル溶接部においては、特定の方角で結晶粒が成長し、柱状晶組織を作るために、マクロ的に見ても方位によって音速が異なる現象が起こる。

図13に、オーステナイト系ステンレス鋼の柱状晶を超音波ビームが進む方向と音速の関係の測定例を示している^(5, 6)。通常の横波斜角に用いられるSV波(板厚方向に振動する横波)を用いて探傷した場合には、最も著しい音速異方性の影響を受けることがわかる。最小の音速は、最大の音速の約60%で、変化の度合いが極めて大きい。一方、縦波も音速は変化するが、比率で言えば、最小の音速は最大の約80%で、変化率は横波よりかなり小さい。

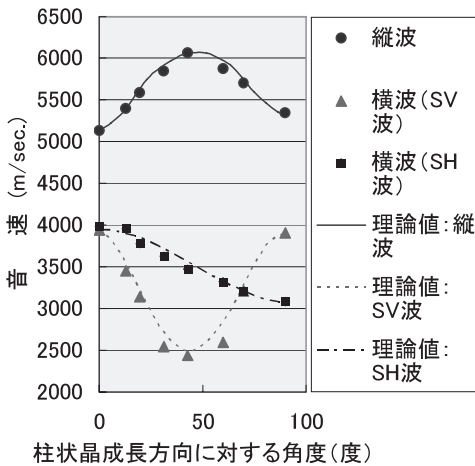


図13 オーステナイト系ステンレス鋼溶接部における音速の異方性の例

この著しい音速異方性は、超音波の直進を阻害し、時には擬似エコーを発生させ、探傷を著しく困難にする。図14にこの様子を示している(5, 6)。横波SV波が溶接部を伝搬するように探触子を置き、溶接部を順次切削しながら超音波が伝搬している経路を、ダイナミックセンサーで測定した結果である。超音波ビームは湾曲し、やがて柱状晶の方向に沿って進み、試験体の表面に直角に近い

角度で反射する。この時に表面での反射波が探触子に戻り、擬似エコーを形成する。このエコーの音源を、超音波が直進しているとして求めると、あたかも溶接部に欠陥が存在するように評価してしまう。

炭素鋼や低合金鋼では、熱処理によって組織を微細化できる。すなわち、高温では面心立方晶のオーステナイト組織であり、温度が低温になると体心立方晶の組織に変態し、組織も微細化する。オーステナイト系ステンレス鋼やインコネルでは、変態が生じないために、結晶粒も粗くなりがちで、超音波の減衰が生じやすいことも探傷をより困難にする要因に挙げられる。異方性のある溶接部では、超音波の方位によっても減衰の度合いは変化する。

このように異方性の顕著な材料の超音波探傷試験には特に留意が必要である。音速変化率の小さな縦波を用いて探傷することが多い。但し、縦波斜角探傷では、横波も同時に発生していることに注意が必要である。

また、ノイズも大きくなるので、できるだけSN比を改善するため、一つの探触子に二つの振

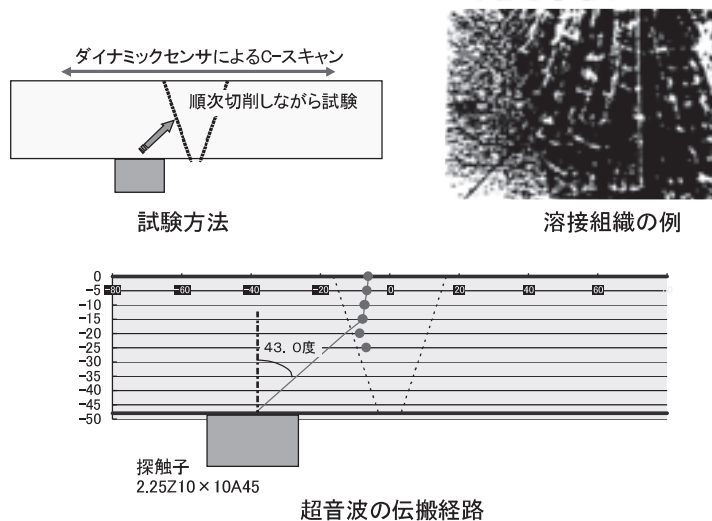


図14 オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波（横波SV波）の伝搬経路の測定結果例

動子を持ち、片方を送信用として、残りを受信用として用いる二振動子型や、波数の少ない広帯域型の探触子を用いるなどの留意が必要である。オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷規格としては、日本非破壊検査協会規格 (NDIS) 2424-2004「オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷試験方法」がある。

一方、銅であっても、TMCP (熱加工制御鋼) で音響異方性が盛んに議論されたことがある。再結晶温度以下の低温で圧延がほとんど行われるために集合組織 (結晶方位がある特定の方位に揃ったもの) が生じることによる。JIS 3060:2002「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」でも、STB 標準試験片との音速比を求め、異方性の大きい場合には探傷する材料での探傷屈折角を求めて用いるなどの配慮がなされている。

4. まとめ

今回6回の講座の最終回にあたり、近年のコンピュータ技術の発展に伴って、現場での適用が進められているフェーズドアレー探傷やTOFD探傷について触れた。これらの技術によって、以前では夢物語の解析評価が短時間で可能になってきている。また、最後に、超音波探傷試験が最も難しい、異方性の大きなオーステナイト系組織の溶接部の検査について触れた。今後の更なる非破壊検査技術の発展を期待してやまない。

3年間の長きに渡りお付き合いいただいたことに多大の感謝を示すと共に、これらの連載講座が、

少しでもお役に立つところがあったとすれば、望外の喜びとするところである。

参考文献

- (1) 芝田、米山、荒川、笹原：超音波TOFD法の適用拡大、石川島播磨技報、38巻、2号、pp.119-123
- (2) 荒川、中西、加藤、芝田、久保：球形ホルダーへの超音波TOFD法の適用、非破壊検査、第49巻、第12号、pp.828-833
- (3) 井戸伸和、畠中宏明、降駒尊爵、荒川敬弘、芝田三郎、大黒光輝、上野康弘、山下真輝：9% Ni 鋼製 LNG 貯槽溶接継手への超音波TOFD法の適用、平成13年度秋季大会講演概要集 (日本非破壊検査協会)、pp.45、46
- (4) H.Asano, K.Kawahara, T.Arakawa, M.Kurokawa : Qualification of Final Closure for Disposal Container II -Applicability of TOFD and Phased Array Technique for Overpack Welding-, 28th MPA-Seminar, Oct. 2002, (Stuttgart Germany)
- (5) 岸上他:オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷方法の研究、石川島播磨技報、第20巻 (昭和55年)、第6号
- (6) H.Yoneyama et al : Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless Steel Weldments by Means of Transmitter-Receiver Type Longitudinal-Wave Angle-Beam Probe, Materials Evaluation, Vol.40 (April 1982), 554-559 Evaluation in the Nuclear Industry, Nov.1983



技術研究所
所長 工学博士
荒川 敬弘

TEL. 045-759-2927
FAX. 045-759-2155