

# 音波よもやま話 (その15)

## なぜ超音波探傷は割れ欠陥検出能が高いか?

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫  
一般財団法人電子科学研究所 小堀 修身  
東北大学大学院教授 三原 毅

### ◆はじめに

X線検査に比べ超音波による非破壊は、割れの検出能が高いと言われる。今回は何故割れの検出がし易いかについて述べる。

### ◆X(γ)線での検出

X(γ)線は電波であるが、可視光より周波数が高く、光子として直線で伝搬する。また、伝搬途中で物質が存在すると、相互作用で吸収散乱され透過強度が弱まる。周波数のより低い電波の可視光が半透明な物体を透過する時、物体の厚さが厚いほど透過強度が低くなるのと同じである。均質な平板状物質をX線が透過した場合、入射X線強度  $I_i$  と透過X線強度  $I_o$  との関係は以下で示される。

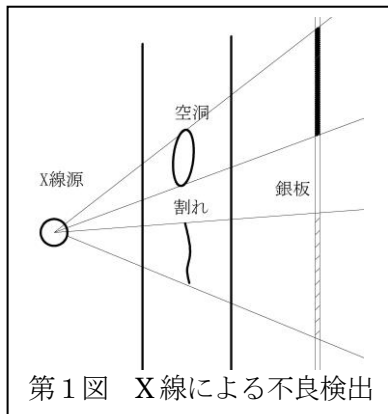
$$I_o = I_i \times e^{-\mu x} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $x$ は透過距離、 $\mu$ は吸収係数と呼ばれる値で、X線の周波数(X線のエネルギー)により異なる。因みにX線のエネルギー  $E$ は通常keVの単位で表現され以下となる。

$$E = h \times \nu \quad \text{式(2)}$$

ここに  $\nu$ は周波数(1/s)、 $h$ はプランクの定数

( $6.6 \times 10^{-34} \text{Js} = 6.6 \times 10^{-15} \text{eVs}$ )である。因みに100keVのX線の波長は0.12 Å = 0.000012 μmで、一番小さな原子、水素の径の1/10程度である。



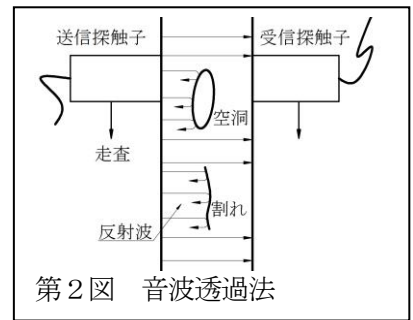
第1図 X線による不良検出

第1図の様にX線を

透過させ、裏面に銀板を配置すると、空洞の部分は物質の厚さが薄いので良く透過し、銀板がより感光する。結果現像すると、空洞部分が黒くなる。空洞でなく、他の物質が存在する場合は、その吸収係数に応じて現像後、黒く成ったり白く成ったり、グレースケースのX線写真の模様が現れる。割れがある部分の透過厚さが周囲と差が無いので、感光度合の差が僅かしか無く、画像からの検出が困難となる。

### ◆一般的な説明

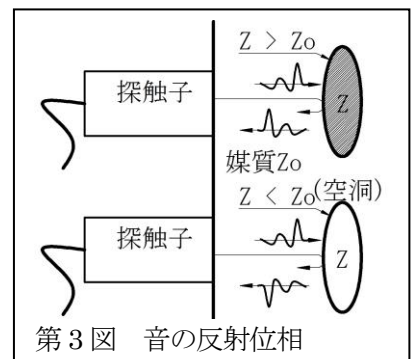
面状の割れが探触子ビームと直交する場合に第2図の様に、その割れが薄くても、割れの両面間で音波が透過



第2図 音波透過法

しない状態では、受信探触子への透過エコーの差が大きい為、容易に割れが検出できる。従って割れの検出にはX線より有利であると言われる。

送信探触子を受信にも兼用する一探触子法で反射エコーをとらえても良い。この場合反射エコー振幅が割れの面



第3図 音の反射位相

積に概略比例するので欠陥のサイズの推定が出来る。又第3図の様に媒質との欠陥の音響インピーダンスの大小に応じ、位相が反転したりする。例えばアルミ材の中の空洞の割れであれば反射エコーは位相が反転するが、硬い酸化物インクルージョンなどでは、反射エコーの位相は送信波の位相と同じである。エコーの位相で反射体の音響的性質がある程度分かる。第3図の空洞が割れであっても、密着していなければ音は反射し観測できるので、X線より超音波の方が検出能は有利である。

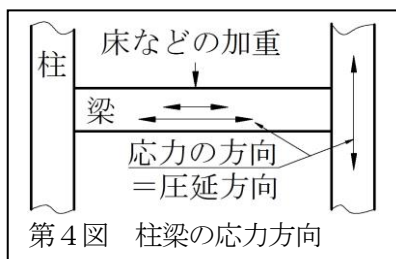
#### ◆ヘア・ラミネーション

1cm～40cm厚さの厚鋼板の製造ラインでは、余り圧延されていないライン速度の遅い、板厚が厚く、200～300℃の高温の段階で、圧延方向に伸びた二枚割れ等不良を検査する。主に何十個～何百個もの探触子を約5m幅に配置した自動超音波探傷器が使われている。検出対象の欠陥サイズは50円硬貨程度である。

戦艦大和、武蔵には40cmの鋼板が使われたが、10cmを超える事は少ない。例えばPWR原子力の格納容器の鋼板厚は8cm程度、都市ガスの球形タンクは5cm程度、スカイツリーの下部の約2.3m径鋼管が約10cm厚さである。高層ビルに使うH形鋼のウェブ厚さは2cm程度である。構造材は、厚いと加工や溶接が大変なので、強度が必要な丸や四角、形鋼形状を工夫している。

厚い段階で検査した厚鋼板は、さらに圧延する為、元々小さな欠陥が長く薄く延ばされ、一般にヘア・ラミネーションと呼ばれる、髪の毛の様に極小さな割れとなる。幅が1～数mmで厚さは計測できないほど薄い、圧延方向に長い。H形鋼やレール製造では溶鋳炉から出た真っ赤な熱く太い角型鋼材を圧延しながら目的の形にする。

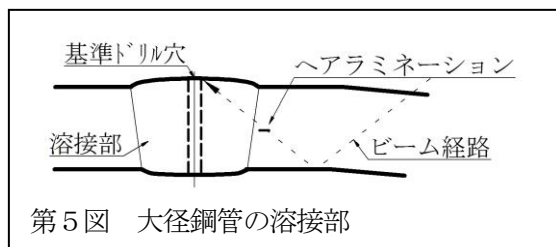
鋼材に力が働く場合、例えば梁では第4図の様に、鋼材内の応力は長手方向となるので、ヘア・ラミネーションがあっても強度に殆ど影響しない。



第4図 柱梁の応力方向

#### ◆溶接部の検査

半世紀以上前までは鋼材はリベットで繋いでいた。東京タワーの柱を近くで見ると沢山のリベットが観測される。最近の高層ビルは溶接やネジ止めにより結合される。ネジ止めする場合でもフランジ構造にする為、板を溶接する。大きな丸や角型パイプも板を曲げて溶接して作られる。大径管と呼ばれる50cm～400cmのパイプは厚鋼板を曲げて作られる。連続製造では、約3cmまでの肉厚の大径管はロール状になった厚板のコイルをスパイラル状に巻き戻して繋ぎ目を溶接する。構造物の基礎など土木関係に使われる。径200cm、肉厚約5cmまでの厚肉管はUOE鋼管が多い。厚鋼板の端を少し曲げ、その後Uの字状、Oの字状として繋ぎ目を溶接し、内部から機械的拡張(Expand)して形を整えて作る。石油のパイプラインなどに多量に使われている。こ



第5図 大径鋼管の溶接部

これらの強度が必要な鋼板や大径管の溶接部はユーザの検査規格に基づいて超音波検査がされる。例えば石油大手のシェルズ仕様では溶接部に開いた1.6φ又は3.2φの貫通ドリルを基準感度とする事が多い。第5図の様に1.6φのドリルホルの端部を狙って斜角超音波探触子で感度設定する。溶接部近傍にある強度に殆ど影響しないヘア・ラミネーションが検出される事が多い。溶接部から離れた所からのエコーは時間軸上区別できるが、溶接部近傍は溶接部不良の可能性もある。本当は溶接不良でない製品が不良として自動検査判別される。後工程の手動超音波試験で区別確認している。

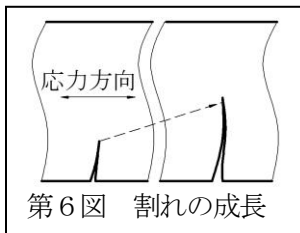
なお、鋼板の製造時圧延方向と溶接シームが平行な場合にヘア・ラミネーションが顕著に検出される。また、UOEパイプの様に鋼板を曲げ加工したり、溶接の熱影響があると、超音波的に反射できない密着したヘア・ラミネーションが隙間を開き反射しやすくなる。

超音波探傷は亀裂の検出能力が高い証拠でもあるが、基準穴より小さい、反射面積は殆どゼロと思えるヘア・ラミネーションからエコーが

戻ってくるのは不思議である。また、ヘア・ラミネーションが空洞でもインクルージョンでもエコーの位相に変化が無い。第3図の一般的音の反射の位相に関する理論と合わない。

◆表面に垂直な割れ検査（端部エコー）

鋼材の長手方向の割れは多くの場合実用強度に影響しないので検出したくない。加わる応力に垂直な割れは危険で、検出対象の多くはこれである。第6図左



の様に垂直な亀裂に応力が加わると段々進展し、最後は破断する。原子炉の压力容器、一次配管など重要な部位に発生した割れ欠陥は定期点検で検査し、欠陥の成長をモニタリングして修理計画等に役立っている。この割れの深さは、端部エコー法と呼ばれる方法で計測される。端部エコーは垂直法でも観測されるが、多くは斜角法が使われる。割れ欠陥の発生は溶接部が多く、溶接部表面は凸凹している事が多く、探触子を安定して接触する事が難しいからである。一部の自動探傷では、水の柱で音を伝搬する方法で

とコーナー・エコーの高さの差はあまり無い。コーナーではモード変換で縦波成分が失われるからコーナー反射は弱いのである。割れが内部にある場合同図右の様に割れ下端からも端部エコーが観測される。下端エコーと上端エコーの高さの差はそれほど大きくない。

屈折角  $A$  の探触子を使った2つのピーク・エコーが観測される探触子位置間隔  $L$  から割れの高さ  $H$  は以下で計算される。

$$H = L \tan^{-1} A \quad \text{式(3)}$$

また、探傷器でピーク・エコーのビーム路程差  $W$  が計測される場合は以下となる。

$$H = W \cos A \quad \text{式(4)}$$

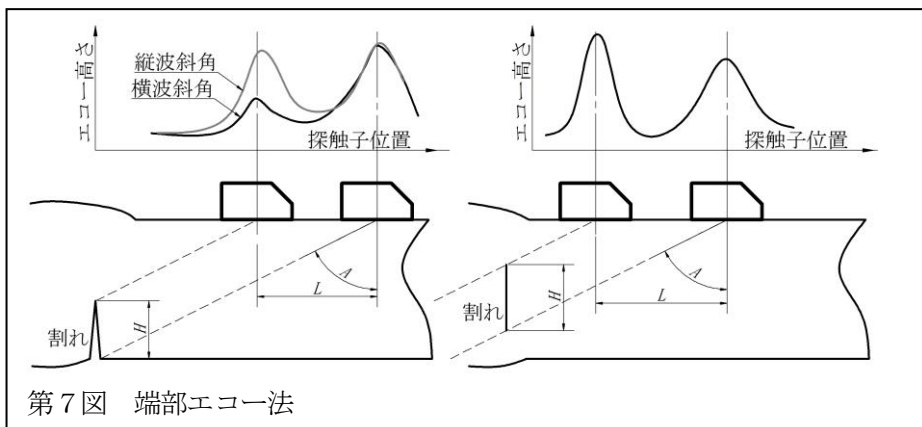
自然割れ欠陥の場合、先端が凸凹して、同位相の反射波が探触子に戻るとは限らない。また、割れが一度開いて又閉じて割れの両面が接触し、正常部位と同じ様に超音波が透過してしまう状態になったりしている。従って実際には端部エコー法で、割れの先端が検出されるとは限らない。

端部エコー法の説明図に端部から回折波が発生して音が戻ってくる様に描かれているものがあるが、そうなっている証拠は存在しない。端部エコーはコーナー・エコーと大して変わらない

振幅のエコーである。端部は無限小であり、それが有限のコーナーと同じ様な強さの音を発生する理由は見当たらない。が、端部相当位置の相当強いエコー信号が観測されるのは揺るぎない事実である。

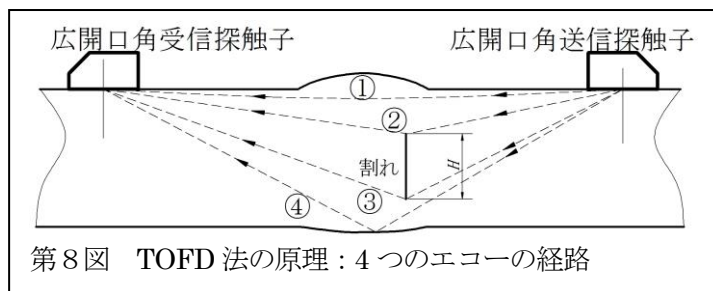
なお、原子力容

器など大型の最重要部は縦波フォーカス斜角、



垂直に音波を溶接部に安定入射させる垂直端部エコー法も使われている。外表面の割れ深さの測定は他に簡便な方法もある事から、超音波端部エコー法は主に内面や内部亀裂の計測に使われる。

裏面から成長した割れは第7図の様に一探触子法斜角探触子を前後走査させると、ビーム中心が割れの先端とコーナーに来た時に強いエコーが観測される。縦波斜角探触子では端部エコー



デルタ法など第7図とは少し異なる方法でも検査が行われている。

### ◆TOFD 法による割れの検出

端部エコー法に含めても良い方法である。前述と異なり、別の送信専用探触子、受信専用探触子を対向して配置している。探触子はビームが広角の物が使われる。多くの場合、溶接部の検査に使われ送・受信探触子は溶接部の両側に配置される。横波が使われる事は少なく、縦波が主である。探触子間距離は固定の場合が多い。第8図に4つの経路を示す。探傷器画面には送信から受信探触子間で表面近くを伝搬する縦波のエコー①が最初に観測される(ラテラル波と呼ばれる)。続いて割れの上端相当エコー②、下端相当エコー③そして板の底面の反射エコー④が観測される。

上端と下端相当エコーの振幅は割れの厚さによりあまり変わらない。割れの高さ  $H$  を両探触子間の伝搬時間から容易に計算でき、反射エコー強度から傷の大きさを推定する通常の探傷法より寸法推定精度が高い。溶接部によく発生する不良の検出に適している為、専用の装置も開発され広く使用されている。

### ◆割れ端部の反射特性

厚さの異なるノッチきずを人工的に作って実験すると反射エコー強度と傷の大きさが必ずしも比例関係に無い事に気が付く。第9図にその例を示す。横軸は反射面積としているが、 $N$  ノッチの場合、幅  $W$  に比例する。①は探触子の有効ビームの大きさより大きな傷の場合で当然無限大反射源と同じ挙動であり、大きさに拠らずエコー高さは一定になる。②の部分面積比例のエコーが観測される部分である。ノッチの幅  $W$  が波長より十分大きい部分でもある。ノッチの幅  $W$  が波長より十分小さい部分では③の様

に一定なる。人工のきずは作れないが、より薄い自然欠陥で試験すると④の様小さくなる。

前述の端部エコー法や TOFD では、傷の幅は波長より十分狭く③相当の観測をしていると考えられる。

音波の変位振幅より小さな隙間は振動の大半が通過して当然反射能力が弱まる事は想像できる。多くの自然きずは奇麗に劈開する訳でなく凸凹しており、応力の変化で閉じたりするので、割れ両面間の音の伝搬は一定しないであろう。

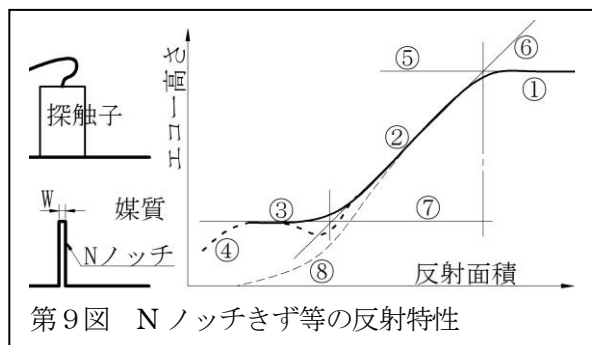
また、割れは応力変動を繰り返して成長していき、先端は開いているとは限らない。面の「接触」と「接続」の区別は音波的にはできない。従って、実際に検出される端部エコーは、音波的に媒質と異なる状態になっている部分である。実際に見つかった自然欠陥を切断すると、超音波により想定された大きさの数倍の場合がある。

第9図のグラフは3つの直線で形成されていると思われる。割れ端面幅がビームより大きく飽和している領域の⑤。割れ端面の面積に相当する反射エコーの得られる⑥。割れの厚さに拠らない領域⑦である。⑥と⑦が重なったカーブに⑤が飽和限界として最大エコーを抑えたと言える。⑦がある事によって超音波は割れに対する検出能力が高いと言える。

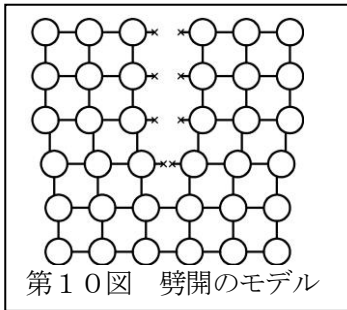
円形平底の人穴きずからの反射エコーの場合、第9図の①の飽和、②の面積比例の部分は同じであるが、割れと相対的に比較すると、⑧の様に③が低くなる。また水平ではなさそうだ。後の回で述べるが、③は反射面の周長に比例する為である。割れでは  $W$  が変わっても周長は殆ど変わらないが、円形平底では面積が変わると周長も変わるためエコーは変化する。

### ◆傷の自己修復

引っ張り応力で発生した割れは、応力が無くなる或いは圧縮応力が加わると、割れが無くなる事がある。一度割れた両面間に気体分子や異物などが入り込まない状況だと、そうなる。ある定期検査で傷が超音波検査で見つかり、次の検査では、見つからなかったり、エコーが弱まったりする事がある。環境、探触子、探傷器や探傷操作状の変化もあるが、そういった事では説明できない事も多い。これは傷が自己修復している可能性がある。水晶腕時計を間違って落下させ大きな衝撃を受けると、時刻表示が遅れ始める。落下の衝撃でマイクロクラックが水晶に発生し、全体の弾性率が下がるので、発振周



波数が下がる。1日～1週間程度すると、この時刻表示が遅れは無くなり、元に戻る。水晶内部で劈開した小さな割れが、再結合したと考えられている。劈開した面は表面となっているより、結晶として結合した方が安定している。小さな割れを壊さずに確認する方法は無いが、水晶時計同様の事が起きてても不思議ではない。シリコン結晶からできている半導体の表面も結晶の端が出ていると不安定なので、必ず安定化処理している。



結晶内で共有結合して過不足ない電子の腕が、大10図の様に劈開や割れの部分では余っていて不安定なのである。何でも「表面性質」＝「内部性質」で

はない事を気に留める必要がある。

陶器の茶碗などを床に落として、直ぐに高感度超音波受信センサーを茶碗に接触させるとパルス・ノイズ音が数分間観測される。これも水晶同様自己修復の過程で音を出しているものと考えられる。

金属などでは、真空中では同様の現象が起きると考えられるが、大気中では直ぐに原子の余った電子の腕は、汚染物質（酸素、水など）と結合し、元に戻らない。電子顕微鏡でこの状態は分るが、狭い場合、音波は何もないかの様になってしまう。接触と接続の話の前章でしたが、実際には隙間が有っても音＝力は透過する。何で計測するかで、隙間の定義も異なる。後の回で極薄膜の話はする。

#### ◆あとながき

第8図の TOFD の②と③は回折波と説明している書物が多い。③は回り込むので回折波と呼んでよかろうが、②には疑問を持った人が居るだろう。今回はこの当たりの話をする。

#### ◆今回知った事

- (1) 溶接部の超音波探傷などで、応力にあまり影響しない様な小さなヘア・ラミネーションが検出される事が多い
- (2) 鋼板の圧延方向と溶接線が平行な場合ヘアラ・ミネーションが良く検出される

- (3) 端部エコー法により割れ高さが容易に検査できる
- (4) TOFD 法によって内部割れの高さが容易に検査できる
- (5) 薄い割れからのエコー高さは割れの厚さにあまり影響されないが、割れの界面性質に影響される
- (6) 「表面性質」＝「内部性質」ではない
- (7) 割れも自己修復する事があるので、経時変化に注意

#### <参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで(2015/04初版2刷、日刊工業新聞社) Analysis of transient acoustic radiation field from pulse-driven finite(2015 International Congress on Ultrasonics, 2015 ICU Metz)

・  
・