

音波よもやま話（その16）

割れからのエコー＝BED

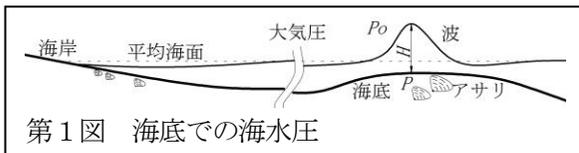
(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

超音波探傷は割れの検出能が高い話を前回はした。今回は、その理由に関して述べる。

◆海の波

半世紀前、学校の夏休みは友達の田舎に居候していた。九十九里の浜で毎日海水浴、貝とり、釣りなど楽しんでいた。当時は第1図の様に50～100m 沖に浅瀬があって、ハマグリかと思間違える大きさのアサリが取れた。そこから浜辺に戻る時は人間サーフィンで波に乗って浜辺へ戻ると、若さを満喫していた。海が荒れる日は、港の防波堤の上から釣りを楽しむ。天候の悪い日は魚が餌を食わないので、何時間も港に入ってくる大きな波を眺めることになる。ふと波の運動が高校の物理の教科書の様になっていない事に気がついた。

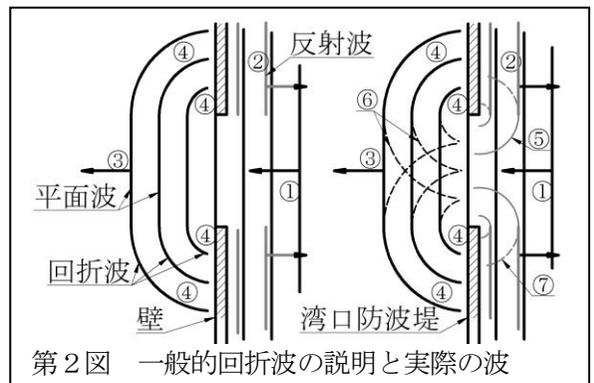


第1図 海底での海水圧

第2図の左図に高校の物理の説明を描く。平面波①が壁の隙間部に当たると、壁でそのまま反射する②。壁の隙間を通過する平面波③の両側が壁の裏に回り込む④。これを回折波と呼ぶ。ここまでは、物理の本の内容と同じ現象が観測される。

ところが実際の防波堤の波をよく見ると第2図の右図の様に防波堤で反射した平面波②の端は⑤の様に広がっていく。通過した平面波は単純な平面でなく凸凹に見える。凹を繋げると④の回折波に繋がった⑥が存在する。平面波③は凸で、④も凸であるが、⑥は凹である。防波堤からの反射波をよく見ると凸の⑤と凹の⑦の波も発生しているようにも見える。湾口を通過し

た波の端と防波堤で反射した波の端の様子は似ていると言える。物体の裏に回り込む様に観測されるので、回折波と名前が付けられたが、⑤⑦の様に障害物が無くても円弧状の波が発生している事が判る。



第2図 一般的回折波の説明と実際の波

有限幅の波を音波の場合ビームと呼ぶが、ビームの端があると、即ち波の端があると、この現象が発生する事から、その事を明確にする為、我々は敢えて BED (Beam Edge Diffraction and Diffusion、ビーム端回折拡散) 波と呼んでいる。④⑤を外側 BED、⑥⑦を内側 BED と呼んでいる。④⑤は発生源のビームと同相、⑥⑦は発生源のビームと逆相である。

音に関しても、後述の観測例等でわかる様に、割れなどの壁があるから、回折するのでなく、壁により切断された「ビームの端」があるから拡散回折する。それが一見、ビームの端が拡散し、壁の裏に回折する様に観測されるのである。壁がある事が絶対条件ではない。更にはビームがその伝搬方向と直角方向に音圧差があれば、同様の現象が起きる。理想上の均等圧力の波、即ち平面波、円柱波、球面波以外は、大小の差があるが、BED が常に起きると考える必要がある。平面状ビームの音圧が下がった部分があると、そこからも BED が発生する。

高校時代にこの現象を知ったが、その原因を追究し始めたのは60歳を超えて、再び超音波に興味を持ってからの話である。

専門用語と言うのはややこしい。「波の干渉」という用語があるが、2つ以上の波が重なった状況を示すが、実際には波が互いに干渉しているとは観測されない。2つの波は干渉しなかったかのように伝搬する。通り過ぎれば単独で発生した波と同じに観測される。(ここでは「通り過ぎる」と書いたが、これは間違いであることを後の連載で示す)この物理的に現象を詳しく解析すると波が重なった時干渉は起きていて、外観上は波が重なった時だけ波紋が崩れるだけである。名称が付けられた時と今の時代背景が異なり、それぞれの時代で意味が変わる。古い理論書等を読む場合は、それぞれの言葉が何を意味するか注意が必要である。

波と言っても海の波と音波とは伝搬機構が異なる。似たところもあるが、異なる所も有ろう。高校の物理では光も波に含める事が多いが、光は電波やX線の仲間で光子と呼ばれ、量子と考えられ、光子力学に基づいている。光子と電子などが相互作用する場合、運動エネルギーや慣性力が保存される。一方多くの光子の平均的現象、例えば干渉は波として扱っても説明が付き、工学的応用に使える。が、近似値として説明できるだけで、物理現象を正確に説明しているわけではなく、厳密には誤った説明である。光に質量と慣性運動量が無いと説明できないコンプトン効果などもある。光は海の波とは挙動がまるっきり異なる。光の波動的現象は他の波の参考にならない。が分子原子までニュートン力学が成り立つ事から、その集合体の現象、海の波、音などの波は、力学的波動であり、ニュートン力学で説明や解析ができるものであると20世紀中頃に物理学者の基本的考えになった。残念ながらその後真面目にニュートン力学で各種の波の現象説明はされなかった。最近は力学的波動として説明している高校物理の本も増えてきた。

なお、波の回折現象が高校の物理の本と合わない実験結果はウェブに各種見られる。適切な実験をしているものもあるが、間違った実験をしているものもある。よく吟味して情報を選択する必要がある。

◆海の波の高さと圧力

九十九里の沖の浅瀬でアサリを取るのだが、深さは1m前後ある。足で探って、見つかったら潜って取る。波が来ると、体が移動するので、折角見つけたアサリを逃す事になる。これを避ける為、潜って海底にうつ伏せになる。波が来ても海底付近の海水はほとんど移動しないので、そのまま体の位置を保てる。海水の移動は余り感じないが、体の上を波が通過する圧力を感じる。高い波は圧力が大きい。圧力が下がる前に立ち上がると、波に攫われるので、圧力が確実に元に戻ったと感じた後立ち上がる。第1図の様に海底からの波の高さを H とすると、海底面では次式相当の圧力 P になるであろう。

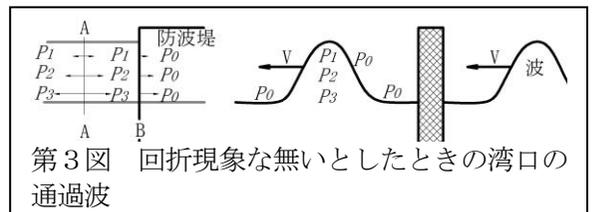
$$P = P_0 + K\rho gH$$

ここに P_0 は大気圧、 g は重力加速度、 ρ は海水の比重、 K は比例係数である。 K は比例定数で、波の幅(波長)が H に比べ十分大きいと1であり、小さいと1以下となろう。実際には動圧もあるので、浅瀬では1を超える事もあろう。

大津波の早期検出の為に太平洋側深海に多数の圧力計を設置している。プレート境界で発生する津波は波長が数kmになり、深さ程度或いはもっと長いので、 K は1に近づく。

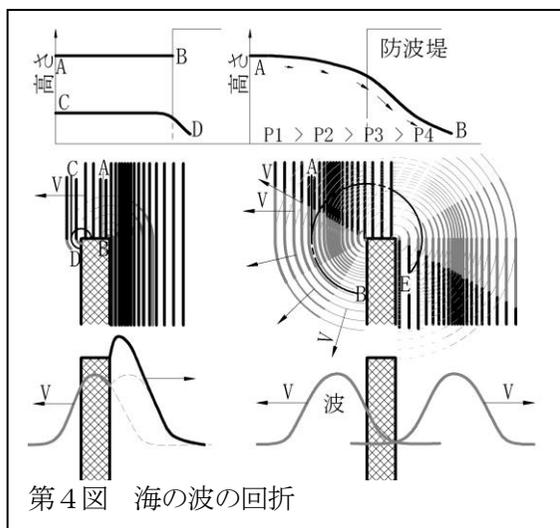
◆湾口部での海の波の伝搬

前述の海の波が湾口防波堤を通過する現象を考える。回折しなかったらどうなるかと考える。「背理法」と呼ばれる、数学物理では重宝する証明法に近い手法を取る。第3図右の側面図の様に波が防波堤を通過する。湾口以外はそのまま反射し、湾口幅内はそのまま通過する。どちらも断面は同じである。海表面は何処でも約大気圧 P_0 である。波の部分の上部表面は P_0 であるが深さと共に $P_1 P_2 P_3$ と大きく成る。図左の

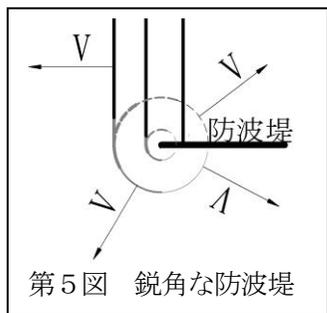


波の進行方向前面から見た前面図で、AA断面位置では左右の圧力は同じで、海水の各分子は移動する様な力は受けない。B断面では図右側は大気で圧力は P_0 なので、深さに応じて海水の分子は $P_1 P_2 P_3$ の圧力を受け防波堤側に移動し、崩れる。波はそのまま通過することはない。低い位置の方がより圧力は高いので、下の水分子

ほど大きな移動力を受ける。波はその先端から徐々に防波堤を通過するので、防波堤を低い部分から抜けて徐々に広がる。元々波は平均速度 V を持っているので、上から見たら円弧に広がる事に成る。一定速度の人工衛星が地球の重力を受け同じ速度の回転運動になる事を考えれば速度が変わらないのは頷けるだろう。地上で実験するなら、ビリヤード・ボールを R 状コーナーに沿って通過させて、進行方向に直角の力を受けても速度変化が無い事からも判る。第4図中下段に上面図と側面図を示す。上に断面の圧力分布を示す。上面図の線の密度は界面高さを示す。図左の様に防波堤を少し抜けた直後の防波堤の中は AB の様に一定の波高であろう。防波堤を出た部分 CD の様に回折して、外ほど徐々に低くなる。もっと波が防波堤に入ると、



左図 AB 相当の同相の部分は図右の様に防波堤の裏に大きく回折し、直線と円弧で構成される。右上の断面圧力図で海面の傾斜が強いほど、矢印が示す様に外側に向かって海水分子は早く移動する。その移動で、元々海水分子の在った位置の圧力低下し、まわりの粒子を引きずり第2図の⑥を作る。この運動の速度は波の速度であり、その影響域は B-E の円弧となる。港湾の深さは場所により異なり、波の速度も異なるので、完全な円弧ではないであろう。が、波紋がハッキリ観測で



きるのは湾口近傍で、深度は十分あり、大体同じ深さ、即ち同じ速度として良からう。

この回折は波面方向に第4図の上右図の様に P1、P2 と外に行くほど弱くなる圧力傾斜があり、この圧力傾斜の力により広がっていくと言える。第5図の様な湾口の形の場合は90度を超えて広がっていく。圧力傾斜が無くなるまで広がる事に成る。湾口から離れると圧力傾斜は僅かとなり、ほぼ均質な円形の波紋となる。

海の波の場合、BED は防波堤の厚さに拠らない。波を切断できればよいのである。これが非破壊検査では重要な事となる。後述の第9図の③の様に壁の薄さに拠らず一定のエコーが観測される。BED にはエネルギーが元のメインビームから連続的に供給されるので、単純に音源から円形に広がっていく波よりも強い。

遠距離に伝搬した時点では、元々の平面波部分が大半の BED のエネルギーとなる。この段階では円形に広がっていき、距離に反比例して減衰していく。

◆音の場合の圧力傾斜

広がろうとする原動力が海の波では、波の高さ即ち圧力であった。音の場合は音圧で、波面方向に音圧傾斜があると同時に広がると考えられる。音は三態（気体、液体、固体）で伝搬するが、音即ち力の伝搬機構は異なる。特に固体は横波が存在する。せん断力を伝えられるためである。液体は粘性が高いと、同様せん断力が発生し横波を伝えられるが、直ぐに減衰する。気体も粘性があると横波を伝えらそうだが、粘性の原因が液体とは異なる。アインシュタインが証明した様に、熱運動の拡散が粘性の原因である。音速が遅い、弱い横波が伝搬すると考えられるが計測されていない。気体用の高感度な横波センサーが存在しない事が原因かもしれない。

いずれにしても、固体と粘性の高い液体は横波が関与し、回折現象を複雑にしている。以降は非破壊検査の主対象の固体の回折に関して述べる。液体と気体は海の波と似ていると認識しておけば非破壊検査上は十分だ。

◆気体、液体、固体内音の伝搬

気体、液体固体内の音の伝搬は、それぞれ挙動が異なる。気体はビリヤードの様に気体分子の玉と玉が衝突しながら、伝搬していく。液体はこれに似ているが、気体ほど分子が自由運動できず、位置はある程度制限されるが、それで

もブラウン運動をしながら、相対位置は移動する。水の中にインクを垂らすと拡散するのはこのためである。とは言うものの、マクロ的には気体、液体固体内の音の BED の場合は、大体上記の波と同じように考える事ができる。海の波は波の高さによるポテンシャル・エネルギーと運動エネルギーを交換しながら伝搬していく。一方音は圧力によるポテンシャル・エネルギーと運動エネルギーを交換しながら伝搬していく。ミクロ的には、例えば気体では気体分子が熱運動していて、熱運動に音の運動エネルギーが加わって伝わっていく。多数のごく小さなビリヤードの様な球が気体分子の平均大きさの 400 倍程度毎に衝突しながら運動エネルギーのみが伝わっていく。が、マクロ的には圧力エネルギーと気体の移動運動エネルギーの伝搬の様を観測される。正面衝突しないと、回転運動などに変わり音は音として計測できない熱運動に変化して減衰する。

固体の場合は、原子同士が電子による共有結合などで結合していて、原子間距離が変化する変位により発生する力で、応力弾性エネルギーと運動エネルギーが交互変換しながら伝わっていく。

液体は分子が押し合いへし合いしていて、分子があまり移動できないので固体に近いが、熱運動（ブラウン運動）で位置が時々ランダムに近くの粒子と入れ替わりながら伝わっていく。音が流れに変化する事がある。

ミクロ的には三態で同じ音の伝搬機構と言いたい。ここでは、それぞれの様態の伝搬挙動に付いて話すことはしない。固体内での BED に関しては参考文献を参照してほしい。また、連載のその 11 の探触子からの BED を含む音の実測データ画像等は色々な音波情報が得られるので参照してほしい。

◆BED の解析とシミュレーション

BED、即ち探触子からの音の伝搬を簡単な数式などで求めたいが、現状解析的に解く方法が見つかっていない。筆者らが色々試すと、近距離が近似的に求まる場合もあるが、遠距離までは合わない。解析的に解く方法は無いのではと思われる。一方シミュレーションは変位を FDTD 法に依って計算した結果と、光弾性法の超音波可視化像と殆ど同じ事は 1980 年代から数多くの事例で確認している。ガラスや鋼の様に減衰の少ない材料に対して、変位 FDTD 法が

適していると思われる。このシミュレーション方法（他のシミュレーション手法も同様であるが）の欠点は、帯域の広い探触子で減衰が絡む場合は、現実と合わない事である。FDTD 法シミュレーションでは減衰を減衰定数として与えている為である。鋼は小さな結晶が集まったもので、その小さな結晶は異方性である。ミクロの減衰原理をシミュレーション内に取り入れる為に、メッシュを極小さくして、それぞれのメッシュの物理定数を現実の材料と同じように異方性にすれば、ほぼ同じ結果になる。海外ではこう言った研究もされているが、メッシュが細かい分計算時間がスーパー・コンピュータでも一回の計算に日単位を要し実用的でない。とは言うもののメッシュが大きくても、変位 FDTD によるシミュレーションで傾向は把握できる。感に頼って何度も失敗を繰り返すより、時間の節約である。検査手法や探触子の開発には十分役立つ。1970 年代の PC がオモチャだった時代にドイツの機械学科の学生が変位伝搬の FDTD による高速計算法を編み出しており、これは音の伝搬計算そのものであり、これを利用して分単位で計算できる変位 FDTD 法シミュレーション・ソフトが販売されているので、傾向を知るにはこれで十分だ。なお、実際の探傷の探触子の受信特性をシミュレーションに含む市販ソフトは現在存在しない。これはフリーの電気的送・受信特性ソフト P2R などで傾向を掴む事で実用に役立つ。

現実には、ある程度シミュレーション傾向を掴み、それを元に、実際に探触子や試験片を作って試すのが一番手取り速い。シミュレーションしないまでも、後述の模式化で多くの場合は事足りる。模式化と実際の対応を光弾性可視化やシミュレーションで確認し、記憶に留めることが重要である。

◆BED の模式化とシミュレーション結果

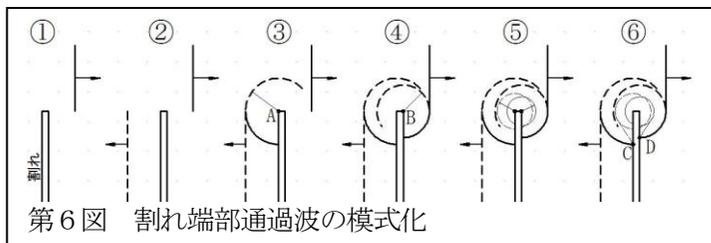
BED の考え方で端部エコー法など探傷法を考える際に模式化に慣れると、色々な現象を理解しやすいし、新しい探傷手法も考案できる。

位相が絡むので、以下実線は元々の位相、破線は逆位相としよう。本来は強度情報も作図に表現すると良いが、複雑になるので行わない。常にメインビームから離れるほど弱く成る事を気にする必要がある。多くの非破壊では観測のダイナミックレンジが広いので、強度表示が無くても殆ど不便を感じない。

固体内はモード変換が顕著に起きる。モード変換した場合は細い線で描く。

探傷器画面のエコー波形は 1.5 波から 10 波程度が多いが、この波形全体を 1 本の線で示す。

以降の図では音は平面波が左から右に伝わって来た場合とする。FTDT 法による音波シミュレーション結果は光弾性偏光を用いた超音波可視化とほぼ一致する。可視化と FDTD シミュレーション結果のいずれかまたは両方を示す。輝度は変位の絶対値相当を示す。輝度の空間傾斜(変化)が音圧相当である。変位で示すと透過の際、変位は変化しないので、音響インピーダ



第6図 割れ端部通過波の模式化

ンスの異なる材料に拠らず音を映像表示できる。音圧表示は比較的音響インピーダンスが近い場合しか、伝搬挙動が判らない。水から鋼への伝搬では水内を見える様にすると、鋼内は全く分からない。慣れると音圧表示より変位表示の方が多くの情報が得られる。変位の変化が音圧であるが、同じ媒質中は、そのまま輝度=音圧と考えても伝搬の様子はほぼ変わらない。以降シミュレーション画像では、媒質は鋼 45MRayls とし、割れは音響インピーダンスが鋼より小さな空気又はより大きいタングステン 104MRayls で満たされているとした。通常探傷器画面で 1.5 波エコーが観測される場合、実際の受信音波の先頭が一番高い 1 波程度の音波である。シミュレーションでは 1 波程度の減衰振動波形とした。

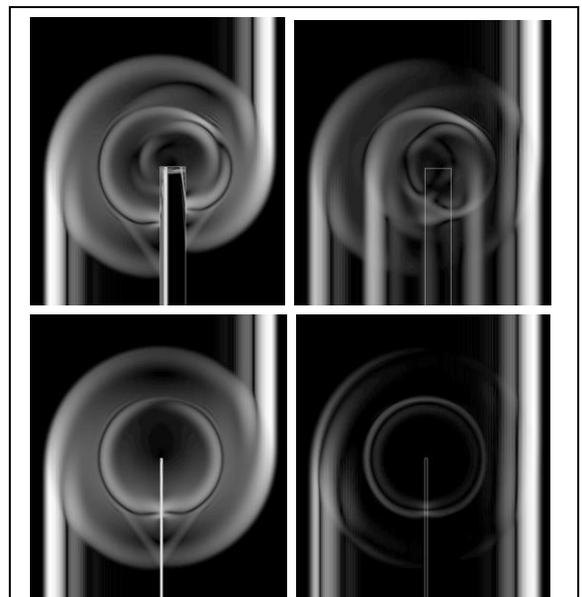
第 6 図に幅がある空気の割れに図左から音が伝搬する場合を模式化する手順を示す。入射波は平面波とするが、円柱波、球面波なども同様に描ける。まず割れを通過する音を描く①。割れの左に反射した波を位相反転するので破線で描く②。反射波の外側 BED を反射波と同じ位相破線で描く。またこれと位相が逆の内側 BED を実線で描く③。円の中心は反射面端 A である。同様に通過した波の外側 BED を透過波と同じ実線で、内側 BED を破線で描く④。円の中心は割れの右上端 B である。通過するメインビームが AB 間を接触しながら移動する時、この面か

ら横波が発生するが、幅が狭いので、ここから受信探触子に伝搬する間に弱くなるので、通常これは描かないで良い。後の割れ縦側面の様に必要に応じて描く。ビームが A 点と B 点通過時に横波が発生するのでこれを描く⑤。振動方向は対応する縦波の破線から実線方向になる。図では A 点からの横波は反時計回りなので、細い破線で描き、B 点からの横波は時計回りなので、細い実線で描く。縦波と横波の円の半径は縦波と横波の音速比率である。

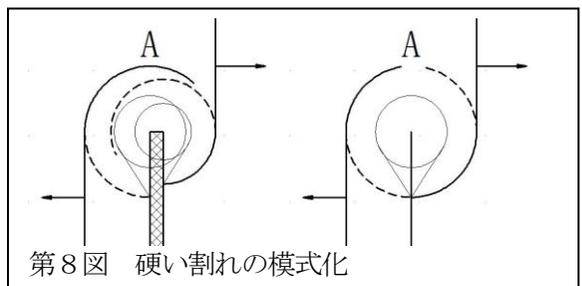
媒質の境界を縦波の端部が走査する場合、その点からモード変換の横波が発生する。点 C、

D から横波円に対して円と同じ線種の接線を引く⑥。これで完成である。

以上を同様の条件で変位 FDTD シミュレーションすると第 7 図上左となる。割れの中の気体中の音波の伝搬も表現されている。図上右は割れがタングステンで満たされている場合である。大半の音波が通過するの



第7図 割れ端部通過シミュレーション

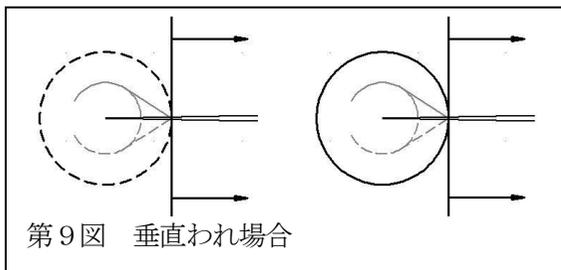


第8図 硬い割れの模式化

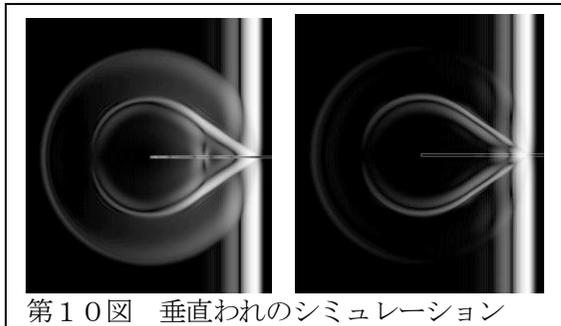
で通過側の BED は弱い。タングステンの厚さを往復反射している波も観測される。図の下は割れの幅を狭くした場合である。メインビームの反射で位相反転しないので、タングステン内多重反射を除けば模式化は左から音が入射する第 8 図となる。図右のように割れ幅が狭い場合、図右のように点 A 付近の BED は位相が逆の波が重なるので弱くなる。一般的にインクルージョンが検出しにくい理由でもある。インクルージョンなどが詰まった薄い割れの検出の場合、この方向に受信探触子を置く V 透過法では全く見つからない事がある。

◆割れへの垂直入射の BED

溶接部に発生する縦割れを溶接部の上から局部水浸法などで検査する場合がある。この模式化を第 9 図に示す。割れ先端でビームが切断され、両方のビームと割れの境界から強い縦波と横波の BED が発生する。第 10 図に変位 FDTD シミュレーション結果を示す。左は空気、右はタンクステンで割れに満ちている場合である。割れの幅が波長より十分狭いと、幅に拠らず画像は殆ど変わらない。端部エコーは BED だけ



第 9 図 垂直われ場合



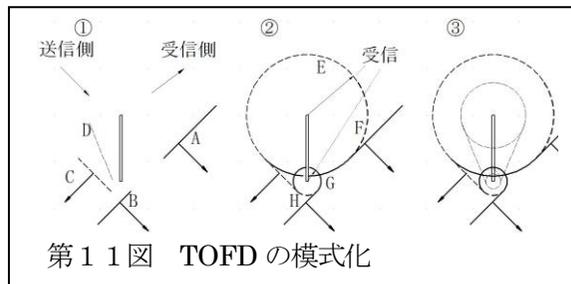
第 10 図 垂直われのシミュレーション

らである。

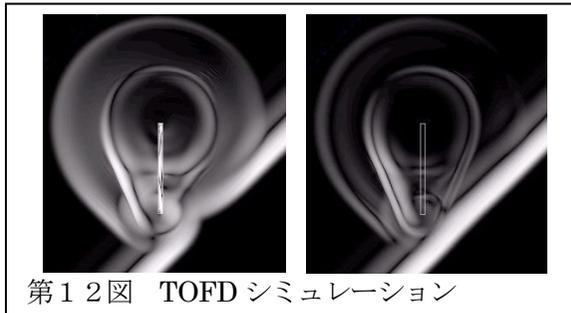
◆TOFD 法の場合

TOFD 法の場合の模式化を第 11 図に示す。左上から音が入射し、右上の探触子で受信する。①のように割れの両脇を通過する A、B を描く。次に左側面で反射する C を描く。割れが空洞の

場合、位相反転するので、破線で描く。割れの側面反射波は割れに傾いて入射するのでモード



第 11 図 TOFD の模式化



第 12 図 TOFD シミュレーション

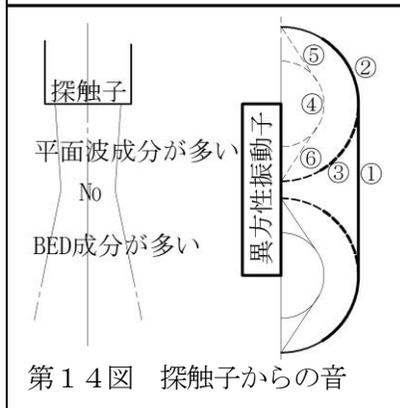
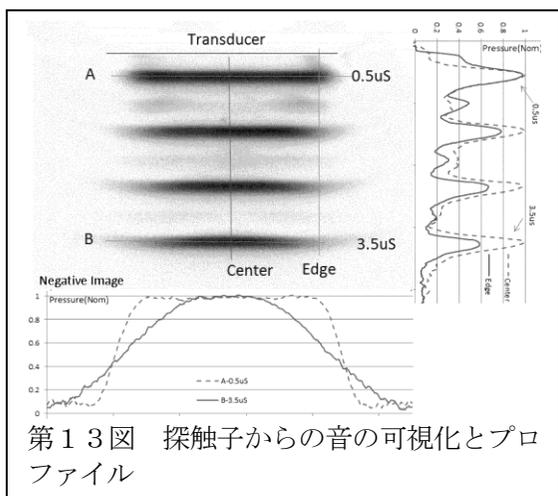
変換で大半が横波に変換するので、これを D の様に描く。前述縦波の両端から発生する円状 BED を描くと、②の様に右上の探触子で受信する C の外側 BED の E と A の内側 BED の F を描く。EF は同じ位相である。割れの両端を中心として円状の為に一見割れの端から来ているように観測されるが、割れ先端から来たエネルギーは少なく、切断されたメインビーム端から供給されたものである。割れの下端側から発生した、BED の GH を描く。G が割れの下端相当エコーとして観測される。更に割れ両端と表面で発生した横波を書き加えると③である。変位 FDTD シミュレーション結果を第 12 図に示す。同図左は割れが気体で満ちている場合、右は割れがタングステンで満たされている場合である。第 11 図の EF と G 相当の波が観測される。

◆振動子からの送信音波の場合

厚さ振動しかしない理想の異方性振動子から出た直後の音はほぼ平面波と考えられる。日本では異方性振動子は斜角探触子によく使われている。1-3 コンポジットも異方性でこれも厚さ振動が主になる。保護膜を除いた 1-3 コンポジット 1MHz の幅広帯域探触子の送信波音を光弾性法超音波可視化装置で観測すると、第 13 図左上となる。送信後 0.5 μ s 毎に撮った 4 画像を合成してある。センターの音圧プロファイルを右に、0.5 と 3.5 μ s の左右方向の音圧プロファ

イルを下に示す。共に近距離音場限界内の伝搬時間である。振動子直後はほぼ縦波平面波であり、ビーム中央はこの範囲では音圧は変わらず伝搬する。段々端から広がっていく様子が分かる。保護膜の無い探触子を使ったら、保護膜の影響は大きく、保護膜の厚さの僅かの違いで波形が変化する事を探触子メーカーは知っている。保護膜内部では多重反射と横波発生が多く、奇麗な平面波が得られない為である。基礎試験には保護膜無が必修条件である。

異方性振動子は一部の探触子に使われているが、必ず少し横振動もするし、振動子は縦振動していても、この縦振動が振動子端では媒質に対しては瞬間せんだん力となり、横波を発生す

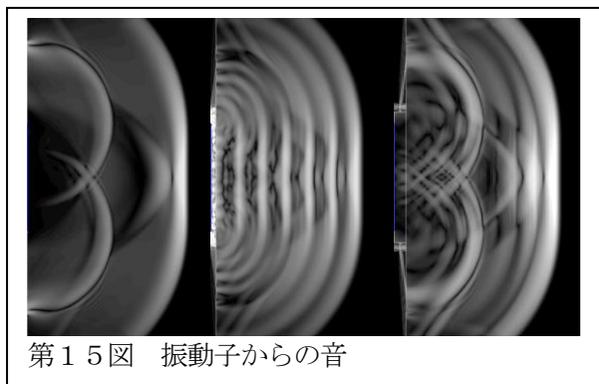


る。これは円柱面状に急速に広がるので $0.5 \mu\text{S}$ では弱くなって観測されない。探触子から出た平面波には端があるので前述

同様ビームが段々BEDに変換していく。近距離音場限界の範囲は平面波がBEDに変換していく過程で、それ以降は元のメインビームのエネルギーの大半はBEDに置換される。近距離音場限界を超えると大半の波はBEDと見た方が良く、ビームに直角方向に釣鐘状の音圧分布の指向性で広がっていく。探触子からの音の伝搬を描くには第14図右の様に、振動子からの平

面波①を描き、外側BED②と位相逆の内側BED③を描く。振動子端部付近媒質内で発生した横波を④とする。外側BED②が媒質表面で横波に変換した⑤、内側BED③が横波に変換した⑥を描く。

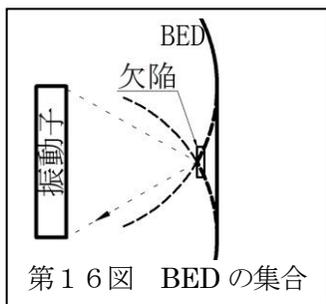
振動子からの音を変位 FDTD シミュレーションした結果を第15図に示す。振動子内部まで正確にシミュレーションできる市販ソフトウェアは現状無いし、有っても複雑な画像の解析が大変である。振動子は広帯域の厚さ振動のみをして縦波のみを発生するとしてシミュレーションした。左図は保護膜が無い場合、中と右図は保護膜が水浸法に使われるエポキシ (2.7MRayls) と直接接触探触子に使われる音響インピーダンスが 60MRayls と鋼に近いタンゲステン・カーバイト WC とした。厚さは共に $\lambda/4$ とした。振動子から半波に近い広帯域な音が発生しても、保護膜があると、波数が増える事が判る。その為市販広帯域探触子の保護膜は $\lambda/10$ 程度と薄くしている。更にエポキシ保護膜内は多重往復反射する波のBEDにより斑のある音場となっている事が判る。近距離音場内の基礎研究の場合、保護膜の音場に対する影響が大きいので注意が必要である。特に連続波やパースト励振ではこの画像よりもっと激しい音場の凸凹が発生する。



なお、シミュレーションや可視化或いは圧電素子による音場測定で音圧がゼロの部分で観測され、そこに欠陥があると音が反射しない様に思えるが、実際にはそこに正負の音圧が来て、干渉で音圧がゼロに観測されているだけで、粒子の移動運動はあり、反射波やそのBEDが観測される。単純に「音圧が低い」=「欠陥検出できない」と常には成り立たない。探触子からの送信音場を測定して、音圧低いから使わないと言う結論は間違いである。スパイクパルサーなど

による超音波パルス法の場合、送信直後は先端又は次の半波の音圧が高く、減衰が激しくない限り、色々な干渉が激しくなる前に欠陥に当たるので、この画像の様な音場の荒れは、あまり考慮する必要はない。一方、受信時の合成開口の方が検出能に大きく影響する。更には探傷器アンプとの相性も影響する。実際に欠陥を狙って、探傷器画面上のエコーが検出できるかどうか確認する事が重要である。

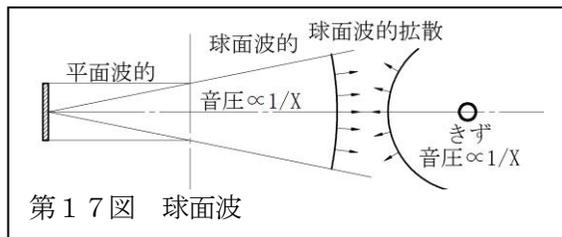
例えば円形振動子では第16図の様に内側BEDが重なると強い音圧を作る。ここに欠陥があると大きなエコーが観測しそうだが、反射波は図の点線の様に振動子の端に斜に入射するのでエコー波形はそれほど高くない。多くは先端の平面波の部分の方が強いエコー表示となる。送信音のシミュレーションの結果だけで受信を判断すると間違いを犯す。



第16図 BEDの集合

◆遠くでのBED

メインビームが強くまだ、エネルギーをBEDに供給できる間はメインビーム近くのBEDの強度は強い。探触子の音の場合は近距離音場限



第17図 球面波

界を超え遠距離になると、メインビームのエネルギーは大半BEDに移り、波面方向の音圧傾斜は弱くなり、エネルギーの周囲への移動は弱くなる。球面波同様、距離に反比例して弱くなる。

一般的探傷範囲は探触子径又は幅の10~20倍である。これ以上でも使う事があるが、感度が下がるので小さな傷の検出には使えない。近距離音場限界を超え距離が遠くなると、平面波部分は球面波的BEDに変わっていく。音波の

ビーム中央音圧Pは近距離音場限界内の平面波の状態では一定であるが、近距離音場限界外の球面波になると距離Xに反比例して強度が下がる。小さな傷などからの受信エコー(Echo)は、球面波的なのでやはり距離Xに反比例する。

$$P \propto \frac{1}{X} \quad \text{式(1)}$$

$$Echo \propto \frac{1}{X^2} \quad \text{式(2)}$$

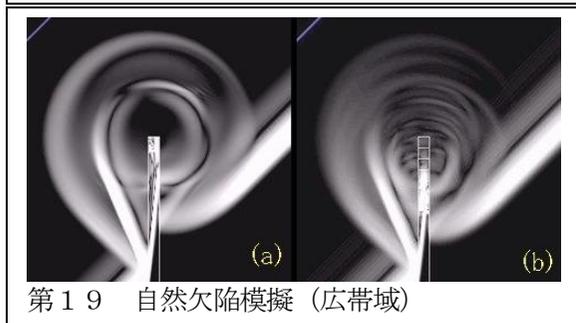
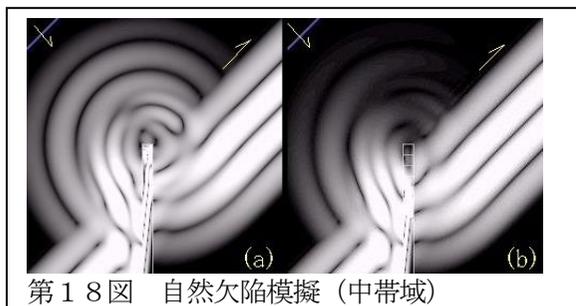
一探触子法の場合、遠くの欠陥からのエコー信号は距離の2乗に反比例する事に成る。この距離の要素だけで距離が2倍になると1/4のエコー振幅に、距離が10倍になると1/100=1%のエコー振幅に、距離が100倍になると1/10000=0.01%のエコー振幅になってしまう。探傷器のダイナミックレンジは80dB、即ち0.01%~100%であるが、透過損失や媒質の減衰によりエコーが低くなる事を考慮すると1%以下のエコー振幅の観測は辛い。その為、一般に遠くを検査するには、ビームが広がらない様に、大きな振動子径が有利である。大型鋼材で1m程度の遠く部分を検査するには50~200φの探触子、特にフォーカス探触子が良い。0.2mmほどの平底穴も検査できる。10φの探触子ではどう頑張っても検出できない。5mのコンクリートの厚さ測定ではφ50mmの探触子ではできないが、これを複数個並べ等価径Φ500mmとすると可能になる。

もちろん周波数を高くすると指向角が狭くなると同時に近距離音場限界が遠くなるので、減衰が少ない対象材料の場合は高い周波数の探触子も使える。

◆自然欠陥

自然欠陥の場合、音波ビームの進行方向に鋼中のブローホールの様に急激に鋼から空間(又は気体)に音響インピーダンスが変化する場合、上記の議論が成り立つ。一方亀裂の様な場合、先端は面同士が完全に接触し、鋼と同じ音響インピーダンスであるが、徐々に所々接触した状況で最後に隙間になり、空間の音響インピーダンスになる。中間は音の透過率が変化する。その為亀裂で切断されたビームの端の音圧変化が弱くなる。BEDは音圧変化に比例するので、弱いBEDしか発生しないし、徐々に変化する部分全体から発生するので、高周波成分は干渉してより弱まる。低周波成分を観測できる計測系にしないと、検出は難しい。第18、19図に亀裂先端が急に酸素になった場合と、徐々にと

言っても5ステップで音響インピーダンスが酸



素になった場合の FDTD シミュレーション結果を示す。左図(a)は先端が急に隙間になった場合、右図(b)は0.1 mmピッチ5段階で鋼から大気に変化した場合である。左上から平面音波が入射し、右上に配置した受信探触子で TOFD 法を想定している。ビームがスパッと切られた場合、右下に伝搬する音のビーム端より発生する BED が右上方向に強く伝搬する。一方ビームが綺麗に切られないと、当然右下に行く音波のビームの端は急激に音圧変化を生じないので、BED が弱まる。送信音の周波数は 5MHz で、徐々に変化する範囲が 0.5 mm と半波長程度なので、正負の音が干渉して弱めあっている。周波数を下げて干渉による感度低下を防げるが、低周波は指向角が広く距離拡散減衰が大きい。周波数を低くする分、振動子サイズを大きくする必要はある。

◆今回知った事

- (1) 海の波の反射でも回折現象が観測される。
- (2) 壁がある事が回折の絶対条件では無い。
- (3) 波に端があると、回折波が発生する。
- (4) その為、ビーム(Beam)に端(Edge)があるので回折(Diffraction)及び拡散(Diffusion)とあえて呼ぶ

- (5) 海の波、音などの波は、力学的波動であり、ニュートン力学で解析や説明できるものであると 20 世紀中頃に物理学者の基本的考えになった。
- (6) 平面波、円柱波、球面波以外は、大小の差があるが、ビームの伝播中常に BED が起きると考える必要がある。
- (7) 海の波の場合、BED は防波堤の厚さに拠らない。
- (8) BED の模式化で、端部エコー法や TOFD 法の現象を理解しやすい。
- (9) 端部エコーは BED。
- (10) 保護膜による送信音場に与える影響は大きい。
- (11) 近距離音場限界以降は BED が主体になり、釣鐘状音圧分布の波が伝搬する。
- (12) 送信音場測定して音圧ゼロの所は音が無い場合と、正負の音が重なってゼロに観測されている場合がある。後者では、その位置にある反射体は検出可能な場合が多い。音のシミュレーション結果の利用法で注意すべき点である。
- (13) むしろ、受信感度場の測定が重要で、欠陥など反射体からの振動子面開口合成の結果がゼロになる可能性がある。
- (14) 遠くを検査するには大きな振動子径の方が有利。
- (15) 自然欠陥はその性状により端部反射が得られない場合がある。

<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)
端部波の詳細伝搬挙動と超音波計測 宇田川義夫、三原 毅、田代 発造 2009/1 NDI シンポジウム