

音波よもやま話（その18）

BED と音波波形変形、ビームプロファイル

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

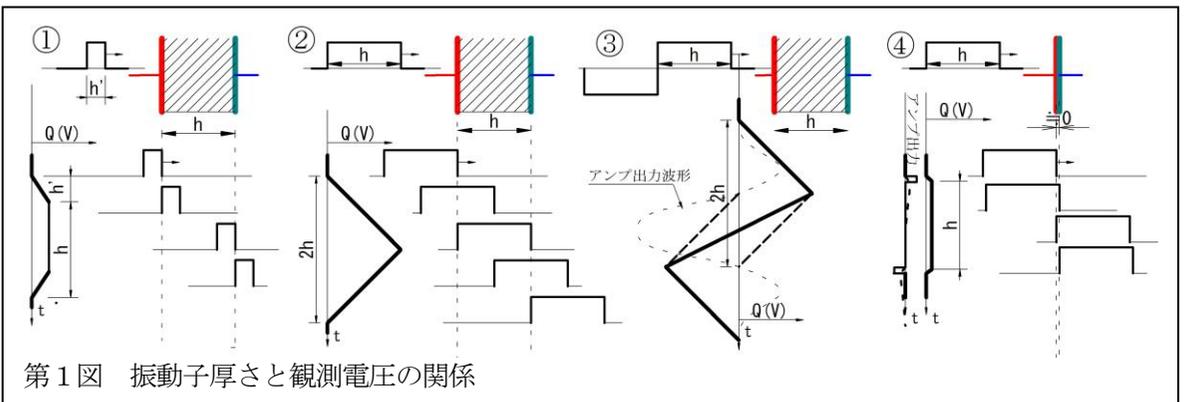
前回に続き、BED の話である。振動子から出た音波は、その波形形状のまま伝わる様に思えるが、実際にはビックリするほど変化する。その変化の話である。減衰の無い媒質中の「無限幅」の音波ビームは伝搬するにつれて波形形状が変化する事はない。我々の使う探触子は「有限幅」なので、ビーム端から BED が発生し、その為従来理論で説明できない現象が現れる。なお今回減衰は無いものとして説明する。パルス波の減衰に関して従来理論は、実体を正確には表していない為で、その辺は後の回で説明する。なお、減衰の多い媒質ではその影響が波形に影響して以下の説明とかけ離れた結果になる場合があるので注意が必要である。

◆受信音波波形と振動子厚さの関係

音波波形を受信用探触子で計測するには、見たい時間分解能より高い周波数の振動子で計測する必要がある。先ずこの話をする。第1図で

数矩形波の重ね合わせで考えればよい。①では h の厚さの振動子に、それより時間幅が h' と狭い音が入る。図では音速は媒質と振動子を同じとして表示している。即ち h や h' は等価時間幅である。振動子は内部音圧の合計に比例した電荷 Q を発し、それに比例した無負荷電圧 V が発生するので、ここでは $Q(V)$ としている。 H の厚さ内の何処に幅 h' の音があっても、同じ電荷が発生する。振動子に音が入りかけるときと、出るときに傾斜状電圧が発生する。入射音パルスの幅が振動子厚さより狭い場合は、常に（振動子等価厚 $h+2 \times$ 入射波幅 h' ）相当幅の台形電圧が振動子電極に発生する。伝搬の様子を時系列で振動子の下に、その結果の電圧波形をその左に示す。

振動子に同じ幅の音圧波が入射する場合は図の②で、音が段々振動子に入るに依り電圧が上がり、出ていくと段々電圧が下がり、三角の山の電圧が発生する。振動子厚 h の 2 倍の三角波である。通常アンプ入力でこの波形は疑似微分



第1図 振動子厚さと観測電圧の関係

は斜線で厚さ h の振動子を示す。その振動子の左から矩形音波が入射する場合を考える。矩形波以外の音圧波形では、矩形波を単位として複

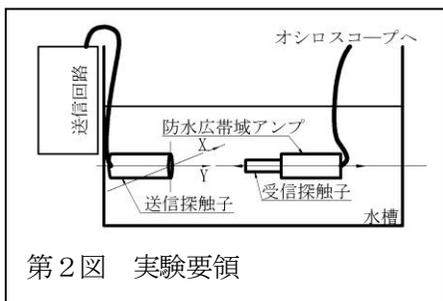
され、且つアンプの周波数帯域の為高周波成分が失われ、更に媒質中の減衰の為、一波のサイン波に近い波形で観測される。

③は等価時間幅 h の正負一波の波の場合で、この場合は正負の三角山電圧が発生する。通常のアンプでは前述同様に疑似微分され、所謂 1.5 波の広帯域波形が観測される。一般的アンプでの出力波形例を破線で示す。中央の振幅が大きく、前後の振幅は低い、よく広帯域一探触子法探触子で観測される波形となる。

④は入射波幅 h より極薄い振動子で受信した場合で、この場合入射音圧波形とほぼ同じ電圧波形が発生する。入力インピーダンスが低いアンプやダンピングを強く掛けた場合、アンプの周波数帯域が狭い場合等では図のアンプ出力で示した様に、 h 幅パルス前後のみ正負のパルス波形が観測され、実際の入力音波とは異なる。 h 幅の音圧波形を計測するには、入力インピーダンスの高いアンプで受信する必要がある。さらに市販探傷器やパルサーレーザバのアンプでは、アンプの帯域の為にさらに微分されるので、アンプの帯域はオシロスコープ同様 DC から、或いはほぼ DC から増幅できる広帯域アンプで測る必要がある。電荷を電圧に変換するチャージアンプやトランス・インピーダンス・アンプでは受信振動子に電流が流れる為、その電流で音を発生して自分自身で波形が歪む場合があるので注意が必要である。感度の悪い受信振動子を使用する場合はこの歪が少ないので、これらのアンプでも良い。以降の実験結果は、これらの条件を考慮して行われた。また、受信探触子の構造も波形歪に大きく影響するが、その話は別の機会とする。

◆実験要領

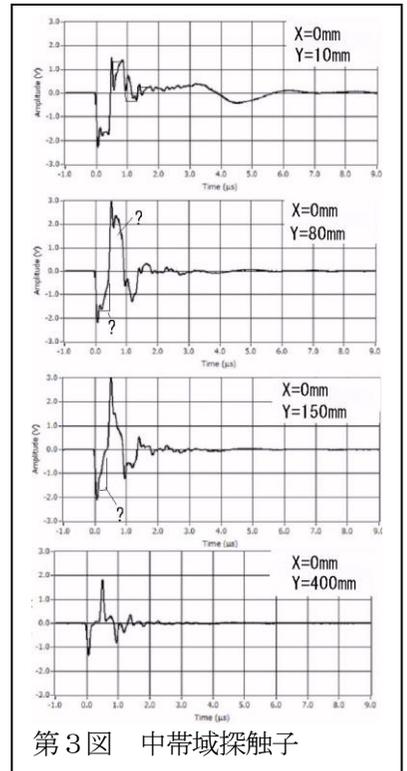
実験した要領を第 2 図に示す。先ず媒質としては水を使う。新しい水道水などは気体を含み、



第 2 図 実験要領

減衰しやすいと言われるので、念のため汲み置きの水を使った。24 時間沸騰させると実験用に問題なくなると大学時代に超音波の先生から聞いた。どの程度良くなるか知らないが、試すのも良かろう。水槽内に送信用探触子を固定するが、水面の影響がないよ

うな深さに配置する。探触子は周波数が高いと水の減衰の影響、探触子ケーブル（同軸）の影響が考えられるので、成るべく低い周波数とする。経験上 2MHz 以下が良い。それ以上の周波数では各種歪を排除するのが難しい。探触子から励振する送信電子回路までのケーブル長が長いと送信波に歪を生じるので成るべく短くする。同軸は 4.5ns/m の信号伝搬速度なので、50cm 程度なら、10 回往復反射しても 45ns で、2MHz（半波長で 250ns）のパルスを観測するには無視できる時間となる。水槽直ぐ脇に探傷器又はパルサーを配置した。水晶時代の超音波スキャナーでは、探触子ケーブルの歪を最小にする為、水槽上を移動するブリッジ



第 3 図 中帯域探触子

上に探傷器を置いたものが多かったが、最近の探触子での波形歪は探傷性能に大きな影響がないので、現在では別置きとなっている。送信探触子の音波ビームの軸を一度測りその軸上に受信探触子を別置する。一般に送信ケーブルより受信ケーブルによる歪が大きいため、防水のアンプを水中に沈め、それに直接受信探触子を接続し、探触子ケーブルは除いた。実質の配線ケーブル長は、探触子内部配線も含め 10cm 以下となる。防水アンプは、前述の様に歪を最小にする為に、第一に入力インピーダンスが高く、第二に帯域は直流から増幅するアンプとした。第 1 図③の様な上下対称の場合直流成分は無いが、①②④の場合は直流成分があり、低周波成分が波形に大きく影響する。パルス波観測の場合原則直流から観測したい最大周波数の帯域の

アンプを使うのが無難だ。アンプの出力インピーダンスは 50Ω で、オシロスコープへ特性インピーダンス 50Ω 減衰の少ない同軸で配線する。オシロスコープの入力は 50Ω で終端する。オシロスコープは高価な機種は 50Ω ターミネータを内蔵しているが、安価な機種は外付けする必要がある。

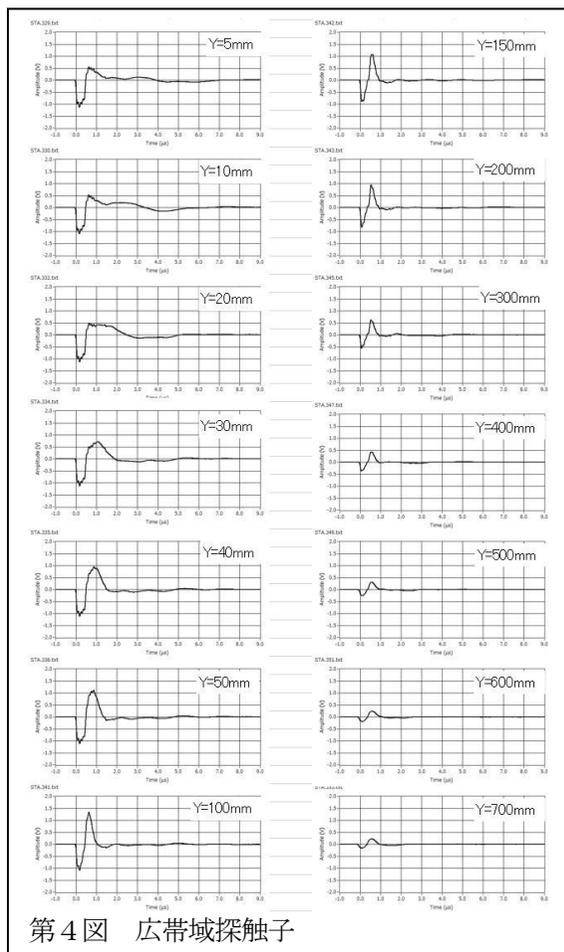
◆探触子中心軸での波形（尻食い現象）

送信用として市販水浸用 $1\text{MHz}20\phi$ の「中帯域探触子」、受信として $20\text{MHz}3\phi$ の広帯域探触子を使って、波形の変化を調べた。 $1\text{MHz}20\phi$ の探触子の電気的インピーダンスは比較的大きく、通常のパルサーの負荷としては軽い。その為、振動子厚さ相当の正の矩形音圧が振動子から発生し、保護膜を通して水中に放射される。広帯域探触子では保護膜厚さは $\lambda/10$ 以下と薄い膜を使うのが一般的だ。この探触子では中帯域だが、周波数が低いので、保護膜厚さは $\lambda/10$ 以下で設計されている。放射直後 10mm の水中距離で受信した受信探触子の電圧波形が第3図上である。本来理想の広帯域振動子を負電圧のスパイク励振した場合、矩形の正の音圧が発生する。探傷器のパルサーは負電圧パルス励振なので、理想の広帯域探触子で受信すると負の矩形電圧波形が観測される事になる。この探触子では振動子のバックグが理想からずれているので矩形の負の矩形電圧とそれに続く正、負の減衰矩形波が受信されている。更に送・受信探触子の保護膜などの幅の狭い凸凹歪が重なった波形となる。また振動子の横振動が重なる。送信時の横振動は、音として水中放射しない様に思えるが、物質にはポアソン比があり、探触子内の径方向の振動は、厚さ方向の振動となり放射される。基本波の矩形の減衰振動を細線で加筆した。水距離 80mm では同図2段目となる。負の矩形波の後ろが斜めに削られる。正の矩形部分は振幅が増え 10mm の場合の倍ほどに増える。この送信探触子の近距離音場限界は計算上約 70mm で、探触子中心軸上では、この付近から波形が変わり始める。更に水距離が 150mm 、 400mm となると、下段の様に正負のパルスの幅が段々狭くなっていく。

送信直後の音圧波形が、伝搬するに従って各半波の後ろ側から削られて来ることから、我々は「尻食い現象」と呼んでいる。

図4に市販 $1\text{MHz}20\phi$ の「広帯域探触子」の例を示す。こちらは少し電気的インピーダンス

が低い（振動子容量が大きい）がダンピングの効いた波形である。矩形の立ち上がり立下りが緩やかになって、その分第3図の中帯域探触子より訛った波形になっている。 200mm 付近では尻食い現象が観測される。 700mm では水の高周波の減衰によりサインカーブに近づく。金属では水より減衰が大きく、高周波成分の減少による波形の訛りが大きく、第3図下段の様な尖ったパルス列は中々観測されない。送信直後以外



は内側 BED の影響で半波の音は観測されず 1波となる。 2000 年頃までは、特に医療関係では、探触子から半波の音の発生出来ないと言われていたが、これは計測システムが適切でないので観測できなかった為で昔から半波は発生していたのである。

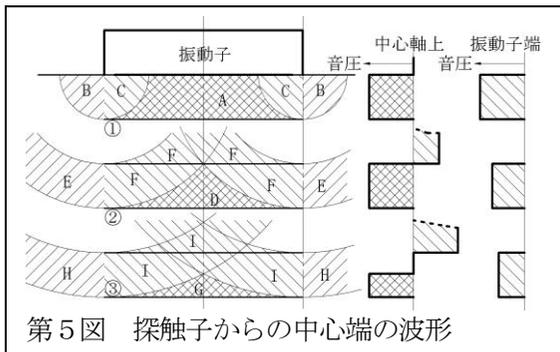
送信探触子を一探触子法として使う場合、受信時に振動子に音が入ると、第3図の 150mm や 400mm の波形も第一図①の様になり、振動子厚さ相当の波形に変換される。従って、送・受信とも同じ周波数の振動子を使う一般探傷等では、探

触子の公称周波数の音が受信されているかのように観測される。画面に現れる波形をエコー波形と呼ぶが、あくまで画面上の波であり、受信音波の音圧波形ではない。

同じ様な意味では、人の可聴周波数は一般に 20Hz～20kHz と言われるが、これは連続波の場合であって、パルス波音の場合 10MHz の探触子からの音も耳を近づければ聞こえる。PRF が聞こえるのではない。一回のみの 10MHz の探触子からの音も聞こえる。オーディオ機器の周波数帯域を広げる価値はここにある。帯域 20Hz～20kHz では HiFi オーディオとしては十分ではない。帯域が広げれば広いほど、実際の音に近づいて聞こえる。

◆BED による波形変化の説明

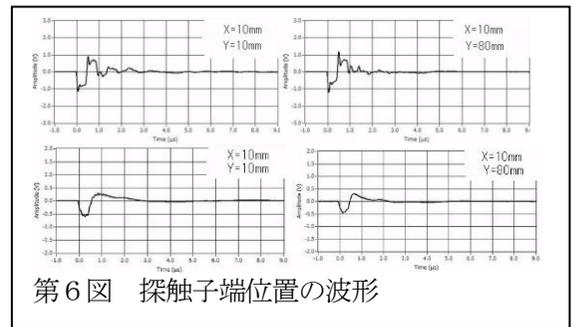
「尻食い現象」は以下の様に BED で説明できる。第 5 図で理想的な矩形半波の音が発生した時の BED などの発生を図示する。ここでは振動子は誇張して厚めに描いている。①は音が



出たばかりの時点。②は近距離音場限界付近、③はその倍程度の距離を図示した。振動子から音が媒質に伝わった瞬間、振動子端の媒質はせん断力を受けるので、振動子端から一見強い横波が発生した様に観測されるが、円形振動子の場合ドーナツ状波で距離と共に直ぐに減衰するし、特に水の場合、殆ど横波は伝搬しないので、ここでは横波成分は図から除いている。図中の B は平面波 A が音圧に無い部分に広がった外側 BED 部分で、A と同じ位相である。A が正圧の場合、物質が広がる方向に移動する B の分を埋めるために発生した負圧が C、内側 BED である。元々の平面波 A と重なって A より低い音圧となる。B と C にエネルギーが A から流れるので、C の位置の平面波も元々の強度より僅か弱い。

②の位置まで平面波が伝搬すると、B は平面波からのエネルギーの供給を得てより広がり E の外側 BED となる。同様に F は D, E と位相逆の内側 BED である。振動子中心軸では平面波 D に位相逆の F が付いて第 4 図の距離 50 や 100 mm の位置の状態になる。

もっと平面波が進むと、振動子中心軸上では平面波 G が内側 BED の I と重なり平面波の後ろが食われ、第 3, 4 図の 150 mm の距離の波形の尻食い現象となる。第 5 図の右に各伝搬時点での中心軸上と振動子の端の部分相当の音圧波形の想像図を示す。振動子端では波数が増えず、送信時点と同じ半波である。探傷時の波形の波数は欠陥が中心にある場合よりビーム端に近い方が少ない現象の経験と合致する。第 6 図に第 3, 4 図と同じ探触子の振動子端垂線上水中距離 Y=10 mm と 80 mm での受信波形を示す。振動子中心に比べ波形変化が少ない事が判る。なお、H と I の平面波から出た部分での強度は位相が逆ではあるが、同じ強度である。円形振動子の



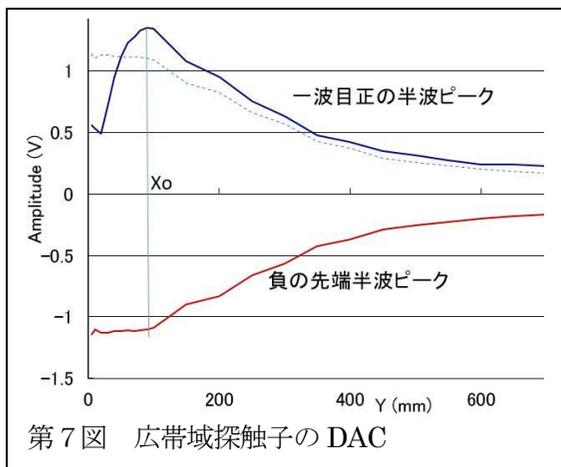
場合は、外側 BED は広がるに従って弱くなるが、内側 BED は径が縮まることにより強くなる。減衰が少ない材料では、伝搬と共に高周波成分が増える為、その成分を使って高調波探傷が行われる事がある。送信に高い周波数の径の大きな探触子を使うと、電気的インピーダンスが低く、パルサーが駆動できない時に応用する。

◆BED と距離振幅特性 DAC

第 4 図の広帯域探触子の波形の先端負の半波（正音圧）のピークと続く正の半波のピーク振幅をグラフにすると第 7 図となる。先端負の半波はメイン・ビームとその外に広がった BED と内側に広がった BED の合成である。次の正の半波は先端から発生したこれらの BED のみである。負の半波は近距離音場限界 X_0 までほぼ同じ振幅で、平面波の送信直後の振幅が尻食い現象があるものの、波の先端部で維持されてい

る。 X_0 以降で減衰する。続く正の半波は近距離音場限界付近で最大となり、その後減衰する。減衰域は距離に反比例する拡散減衰相当である。

多くの市販探傷器は正のみ表示、負のみの表示、両方の最大値の表示の切り替え機能があるが、正負のエコー電圧波形を検波して、そのピークを表示するのが一般である。第7図で負側を折り返し、点線で表示している。点線と実線の高い振幅が探傷器の画面上にエコーとして表示される。このピークは $Y=0$ 付近では負側点線が実線より高く、 $Y=X_0$ の半分程度から実線が点線より高く成る。その為、内側BEDがピークとして画面に表示される。 X_0 付近に高い部分が計

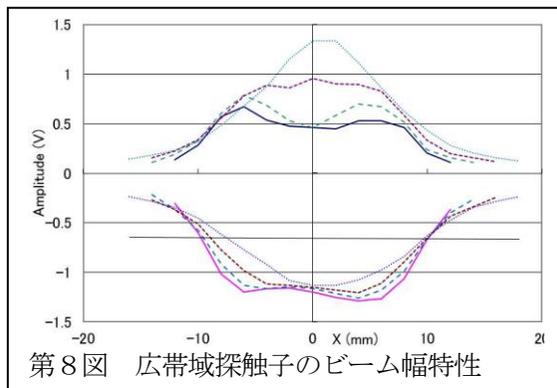


測される一因はBEDによるのである。円形振動子ではビーム周囲からの内側BEDが中心で集中して第7図の様に絶対値ではメイン・ビームより強くなる事が多い。一方角型振動子など円形以外で周囲からの内側BEDがそれほど集中しない場合はそれほど強く観測されない。なお、一般探傷器では探傷器入力で疑似微分されるので、第7図の正負の差相当に近いエコー高さが観測される。従って、 X_0 付近がより高く観測される。

◆BEDとビーム幅特性

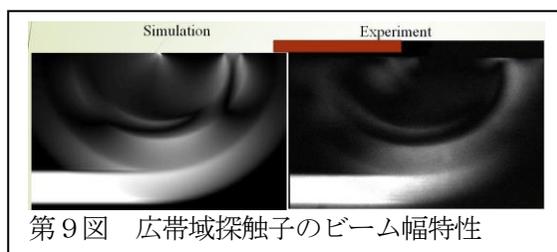
大昔の超音波教科書では近距離音場限界 X_0 付近でビームが一度絞られ、その後指向角相当で広がると書かれている。これは X_0 付近で内側BEDが重なって高く計測されるのが一つの理由である。更に受信時には極近距離の反射源からの音は振動子に傾いて入射し、場合によっては全反射するので、感度が低い事にもよる。第8図に第4図の探触子の送信ビーム幅特性を先端半波の負電圧ピークと正の次の半波、即ち

内側BEDのピークで纏めたグラフを示す。実線は水距離 $Y=10$ mm、破線は20 mm、点線は40 mmと80 mmである。図で負の先端半波は、元々平面波で左右に均一音圧であったのが、段々両端からBEDに変換され中央が高いプロフィールとなる。一方次の正の半波は、外側から段々内側に集中し80 mmでは最大になる。その結果10 mmより80 mm水距離の方がビーム幅は狭く観測される。ビームが一度絞られて、近距離音場限界付近から広がり始めるという従来観測される一因である。



◆固体の場合

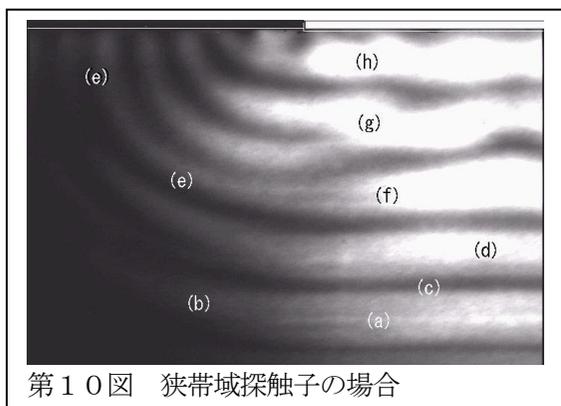
固体の場合、横波も伝搬する。受信探触子が縦波用圧電振動子を使っても、また振動子を厚さ振動に感度の高い異方性振動子であっても、横波が入射すると、程度の差はあるが信号が出る。特に横振動の影響の多いPZT系の振動測定



波形からどの部分が何の影響かをハッキリ示すことが困難である。ここでは光弾性による超音波可視化と、変位FDTD法によるシミュレーション結果を第9図に示し、参考とする。超音波可視化と、変位FDTD法によるシミュレーション結果は似ており、媒質を水としても、似た画像が得られるので、前述の尻食い現象など水浸と同じ現象が発生していると考えられる。

◆狭帯域の場合

狭帯域の場合、探触子には多くは $\lambda/4$ の整合保護層があり、送信音はかなり歪む。横波の発生も多い。広帯域探触子と同様にビーム端からBEDが発生するが、波数が多いので、あちらこちらでメイン平面波とBED、或いはBED同士が重なって沢山の干渉が起きる。状況を図などで説明する事はほぼ不可能である。狭帯域の場合は、広帯域に比べ少しの製作要領の違いが音場に与える影響が大きい。参考までに保護膜を除いた0.5MHz 40φ広帯域探触子をバースト励振した時のビーム端の状況を第10図に示す。40φの振動子の端を画像中央とし、振動子を白



第10図 狭帯域探触子の場合

枠で示した。先端(a)はバースト励振の最初の負の半波で外に広がるBED(b)が見られる。よく見ると内側BED(c)が観測され、正の次の半波(一波目)の中央(d)は内側BED(c)が重なり、より強く観測される。(e)は振動子端付近媒質中で発生した横波である。1.5波目(f)に重なり、さらに1波目の内側BEDの影響で1.5波目の中央は変形している。更に2波目(g)、2.5波目(h)となると色々な波が重なり、何が何だか分からなくなる。

(g)(h)では振動子端付近の媒質内のせん断力で発生した横波が重なって振動子付近の音圧が凸凹しているが、狭い範囲から発生した横波の為、直ぐに拡散減衰する。(e)(g)間の周囲に観測されるように横波音速が遅い分、周期が短いので画像上から区別できる。

大半の探触子には $\lambda/4$ 等の整合保護層があり、保護膜内を何度も往復反射するので送信音は更に歪む。広帯域と同様ビーム端からBEDが発生するが、保護膜の径振動が加わり、あちらこちらでメイン平面波とBED、或いはBED同士が重なって沢山の干渉が起きる。状況を図などで説明する事は困難である。BEDに関連した部分は変位FDTDシミュレーションで傾向を掴

み、保護膜や電氣的影響はフリーソフトP2Rなどで傾向を掴むのが良からう。

◆あとがき

今回ビームのプロファイルをBEDで説明する試みをした。次回はBEDの考えが探触子設計にどう使われているかを示す。

◆今回知った事

- (1) 音場を測定するには、観測したい周波数に比べ十分薄い振動子と広帯域で高入力インピーダンス・アンプの組み合わせで測定する。
- (2) 振動子等価時間厚さhに狭い音波幅h'の矩形音が入ると $h+2 \times h'$ の台形電圧が観測される。
- (3) 振動子等価時間厚さhに同じ時間幅のhの矩形音が入るとh幅の2倍の三角波電圧が観測される。
- (4) 探触子を出た音のメイン・ビームは、自分が発生した内側BEDにより「尻食い現象」を生じる。
- (5) 尻食い現象で遠距離での高周波成分が多くなる。
- (6) これを利用して、高周波では電氣的インピーダンスが低くなりパルサーが十分駆動できない場合に高調波探傷として使える。
- (7) 低周波広帯域探触子をスパイク・パルサーで励振するとビーム中心軸上では半波の音が観測される。
- (8) が、直ぐに内側BEDの影響で1波になる。
- (9) 探傷器画面で観測される「エコー波形」は「受信音波の音圧波形」と同じではない。
- (10) ビーム幅が近距離音場限界付近で狭まってフォーカスされているように観測されるのは内側BEDの影響で一因である。
- (11) 距離振幅特性の近距離音場限界付近で感度が上がるのは、内側BEDの影響が一因である。

<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