

音場,音場の測定,ベクトル図,オランダの涙,ニードル型マイクロホン,メムレン型マイクロホン,

音波のよもやま話 (その36)

音場、音圧場とその測定

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

今回は音場の話である。音場は直接測る事が出来ないの、音圧場やエコー高さの等高線が代用される。実際の音圧のより正しい測定法などについて言及する。

◆「音圧」を示す図

第1図や同様の図が平面振動子からの「音場」又は「音圧場」の例として多くの本に掲載されている。が、図の左側にスケッチで加筆したが、平面振動子の前に回折格子を配置して、6個の隙間から出た音の「音圧」相当をシュリーレン法で観測したもので、平面振動子の音圧場の観測例ではない。寧ろ平面振動子からの平面波の送信音圧場と複数の疑似点音源からの音圧場は異なる事を示している。アレイ探触子も素子ピッチと制御位相を等価波長より十分小さくしないと、更には複数素子をほぼ同時に励振しない



第1図 1959 Rinhrtd と Rieckmann によるシュリーレン法音圧場像

と上手く機能せず、大きなグレイティング・ロブ等の問題が発生する。激しい干渉は各隙間から出てきた音のBED (Beam Edge Diffraction and Diffraction)による。「音圧が低い場所」≡「反射が弱い場所」とは限らず、誤解されている。

圧力による密度の変化が屈折率の変化をもたらすので、透明物に音波が伝播し、圧力のある部分の屈折率が変わり、その状況を透過光で観測する方法をシュリーレン法とよんでおり、画

像の輝度は概略「圧力」を表していると考えられる。前回のFDTDの話で、正の音と負の音が重なると、圧力が無いが粒子運動が存在する。従って以下と考えられる。

白い部分 = 圧力有 = 静圧、音、または両方
黒い部分 = 圧力無 = 何にも無か粒子運動有

図の左側の干渉部分の白い部分は主に静圧であり、音の圧力(音圧)では無い。干渉部分の黒い部分は主に運動があり、音では無いが、音が干渉し変化した運動エネルギーがある。グレーの部分は音が弱い又は色々な状態が混じっている。ビームの幅が一度狭くなっている様にみえるが、実際にはその外側に運動がある。局所にある静圧又は運動は、波動方程式の初期条件の様なもの、前回のFDTDの音の干渉で判る様に、直ぐに音に変化する。単純に黒い部分で音は弱いと考えること自体が間違いである。

従って黒い部分に欠陥等反射源があると、音の反射が発生し、それが探触子に戻った時、傷の形状だけで観測される。音が有る白い部分であっても、音圧の符号が反対の同じ絶対値の2つの音波が同時に探触子に戻る様な欠陥は検出できない。同様に黒い部分でも反射源の条件次第で、検出出来たり出来なかったりする。第1図の画像の輝度からどこに有ったら、欠陥が見つかるかどうかの判断はできない。むしろ欠陥の反射特性の方の影響が大きい。

◆「音場」の図による表現は不可能

前回までに話した様に音(音波、超音波、弾性波など)は、「圧力」と「粒子速度」が相互変換しながら、それもその比率が常に1:1でなく、干渉し変化しながら伝わる。音と言うのは1:1の状態、1:0や0:1の状態は静圧や運

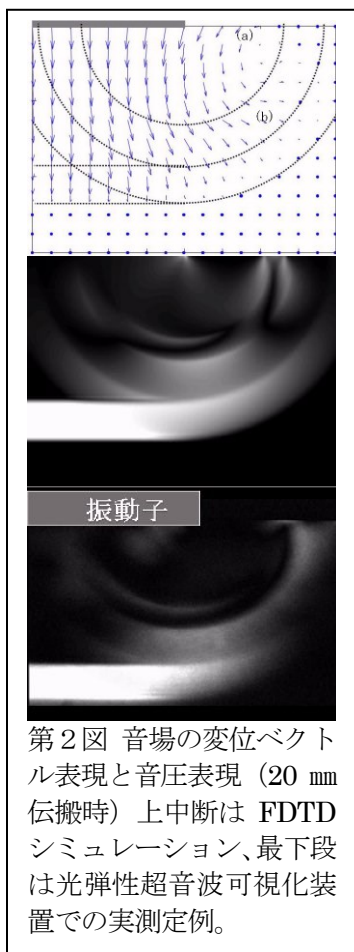
音場,音場の測定,ベクトル図,オランダの涙,ニードル型マイクロホン,メムレン型マイクロホン,

動のみの状態である。粒子速度は方向のあるベクトル量で、音圧は方向の無いスカラー量だ。ニュートン力学から粒子速度はベクトル量として保存則が成り立つ。2つの状態が入り混じっているの、音の場を1枚の図で表せない。

例えば気象図では、ある時点の風の方向強度(ベクトル)と気圧配置(スカラー)で表す。風

は気圧差によっても発生するが、既に風が有る場合、気圧配置からだけでは風の向きは分らない。それも刻々変わるので、各時刻の多数の図が必要となる。音も同様、伝播に従い、多くの図が必要となる。最低自分が知りたいビーム路程(伝搬時間)付近の複数の図が必要となる。

前回書いた様に、変位の「時間微分が粒子速度」、「変位の空間微分」が音圧に相当する。そこで「ある時刻の音場」を表現するのに、良く変位のベクトル



第2図 音場の変位ベクトル表現と音圧表現(20mm伝搬時)上中断はFDTDシミュレーション、最下段は光弾性超音波可視化装置での実測定例。

表示が用いられる。第2図はその例で、振動子から出た音が約20mm伝搬した時の、振動子端付近の各点の動き(変位)をベクトルで表現したものである。平面波付近は図下に向かっているが、(a)付近は振動子側に押し込まれ、(b)付近は外に向かって押し出される。

前回の歪みFDTDシミュレーション結果の音圧表現と光弾性可視化装置で実測した画像を下段に示す。光弾性可視化の図の輝度は概略音

圧の二乗に比例する。上段ベクトル図は中段シミュレーション結果の元のデータの変位を用いて作った。

中央の図のシミュレーションの音圧の輝度表現では、どの部分がどちらに移動したかは、一切分からない。単に20mm程度音が振動子から伝搬した時の音圧である。振動子から出たことを前提にしているの、平面波は多分下に行くと想像できるが、その事を知らなければ、上に伝搬すると考えても良い。円弧の部分も広がるのではなく、フォーカスプローブの様にこれから上に収束するとも考えられる。

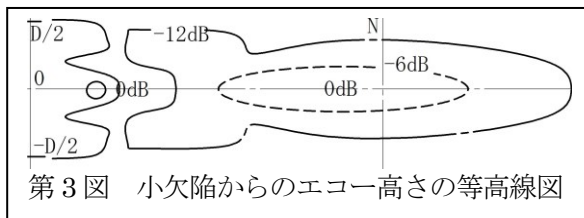
上の図の変位ベクトル表現では、今までにどれだけ粒子が移動したかは分かるが、今後どこに向かうのか判断できない。各点の現状の運動方向と圧力が不明なためである。このベクトル図の次の時刻での計算結果の図の差を比較して、やっと判るのである。

粒子速度のベクトル表現もあるが、これも今何方に進んでいるか分かるが、圧力情報がないと、どちらに伝播するか分らない。

以上の様に音場の表現は一つの図ではほぼ不可能となる。連続した複数の図が必要になる。

◆小反射体からエコー高さ等高線図

水槽内で、小さな反射体を走査し、一探触子法でエコーのピーク振幅の分布図を作る事が1960~1980年代によく行われた。第3図がその例で、海外では「小反射体からのエコーのピーク高さの等高線図」と呼ばれる。日本の書物



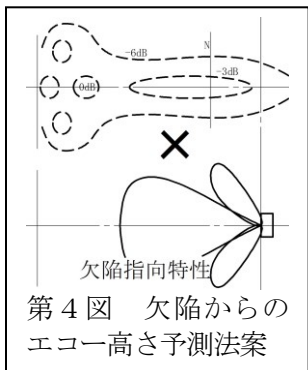
第3図 小欠陥からのエコー高さの等高線図

やJNDIの教科書では「音圧図」や「音場図」と書かれているものに相当する。日本での記述は間違っており、「音圧図」や「音場図」ではない。読者が誤解する。音場は図では表現できないので、どうも(連続波の場合)エコー高さが音圧に比例すると単純に考えた間違った名称を付けた様である。平面波と球面波では、音圧とエコー高さは比例するが、探触子の平面振動子

音場,音場の測定,ベクトル図,オランダの涙,ニードル型ハイドロホン,メンブレン型ハイドロホン,

からの音は平面波でも球面波でもない、一般探触子からの音の音圧とエコー高さは比例するとは限らない。相似で音圧が増える場合、当然エコー高さも比例する。大きな欠陥と小さな欠陥では実際には反射音圧波形は変化するが、大まか相似なので大きな欠陥は小さな欠陥より高いエコー高さとなる。

小さな反射体は指向性が鈍いので、小さな反射体のエコー高さ分布を測定して、欠陥の形状による反射特性を掛け合わせれば、特定の欠陥形状のエコーの計算出来るという発想があった(第4図)。この発想の元、色々な探触子で計測



第4図 欠陥からのエコー高さ予測法

された。当時、等高線図を描くための超音波スキャナーが販売された。1980年代にはデジタル化され、一部のメーカーは欠陥の反射特性をソフトウェアでデジタル探傷器に組み込む検討もなされた。なお、

◆小反射体

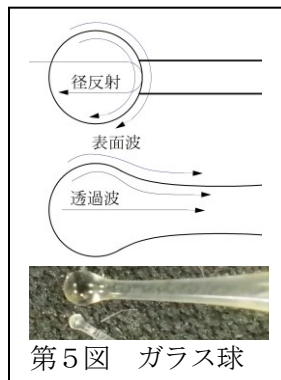
日本(多分世界)初のデジタル制御スキャナーは筆者が1970年代中に開発した。

エコー高さ等高線図を得る為、水槽内で、小さな反射体を走査するのだが、初期は小さなボール・ベアリングや薄いアルミの空洞ディスクが使われた。

実際に各種形状の反射体を作って実験すると判るが(歪 FDTD でシミュレーションでもよい)、反射体形状や材質により、反射からのエコー波形は異なる。第5図上の様に表面波やボール径の多重など意外と多くの反射波が絡んでいて、単純な点に近い場合に想定される反射エコーは得られないと気が付いた。

その為、反射体はなるべく「癖」の無いものが良い。極小さな鋼球やガラスや樹脂製の小さなバブル球をまず思い付くだろう。が、何れも径と周がある。実際に使うと、径相当の振動、周囲を回る球壁の内外の表面波の多重エコーが尖端反射波形に加わる。

そこで、ガラスで作った第5図中段の様なオランダ(ルパート)の涙と呼ばれるものが使われた。理由や根拠は聞いたことが無いが、当時海外ではこの形が一番良いと言われていた。

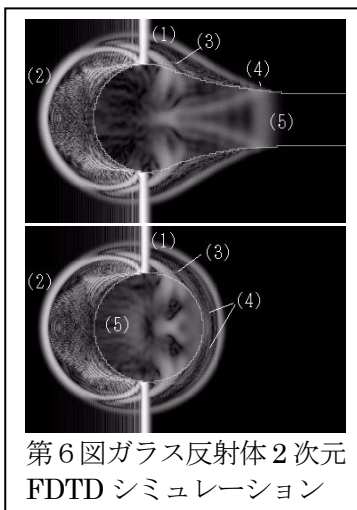


第5図 ガラス球

1980年までは日本でもガラス反射体で音圧場を測定している人を見かけたが、その後は殆ど見なくなった。同図の写真

は1.2Φと0.4Φの筆者が作ったものである。全体の形は多少悪いが、だれが作っても溶けたガラスの表面張力のお陰で先端面は綺麗な球面になる。

二次元 FDTD シミュレーションで観測すると第6図となる。波長が球形径程度で反射波が



第6図ガラス反射体2次元 FDTD シミュレーション

二次元 FDTD シミュレーションで観測すると第6図となる。波長が球形径程度で反射波が激しく歪むが、その程度の波長だと何が起きているか分からないので、伝搬挙動を観察しやすくする為、球径に比べ波長は短く且つ半波とした。通過する平面波は(1)の真っ白の部分、反射エコーになるのが(2)である。

まあまあ指向性はブロードだが、球面ではなくサイクロイドの様な曲線をしている。

球体では表面横波(3)縦波(4)が球を回ったり、内部に透過した波(5)が戻ってくる様子が判る。経験上実験ではこれらの経路の音によりエコー高さが数~30%程度変化する。

◆小反射体を用いたエコー等高線図の価値

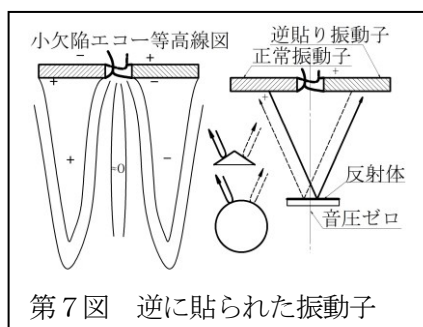
ガラスの反射体などで作った、エコー高さの等圧線図が探触子のカタログに載せる様になっ

音場,音場の測定,ベクトル図,オランダの涙,ニードル型マイクロホン,メムブレン型マイクロホン,

た。その後、水中と金属中では音速が異なるので、それを補正し、特定形状の欠陥の反射特性と掛け合わせて、実際の測定と比較すると、必ずしも合わない事が判った。結論から言うと、それぞれの探触子、探傷器、欠陥形状の組み合わせで測定しないと、無意味と言う事になり、計測自体のコストもかかる事から、カタログからは削除された。

◆正負の音の干渉帯と欠陥形状

音場ではメインビームと内側 BED などが重なったりする。正負異なる音圧が重なり、音圧がゼロになる事もある。干渉で音圧ゼロになった状態での欠陥検出能を調べる為、第7図の様に2枚の振動子を分極の方向を逆にして左右に並べ貼ったものが作られ実験された。2枚の電極は接続して一個の探触子とする。中央軸の音圧がゼロの音場を作るためである。



このよう
な状況は現実に大きなマルチやアレイ探触子の製造ミスで発生する。複数の振動子を使うので、分極の方向を間違える可能性がある。小欠陥からの反射は左図の様に中央では探傷器画面のエコー高さ（音圧）ゼロに計測される。ところが少し大きな丸、山型や少し大きな平面の反射体を配置するとエコーが観測される。丸と山だと送信した振動子自身に音が主に戻り、逆貼りした振動子では送・受信2回逆になるので、結局逆に貼っていない振動子と同じ電荷が振動子に発生し、正常な探触子同様な反射エコーが観測される。平面反射体では送信とは別の振動子に音が主に伝搬し、どちらの振動子が受信しても、反転した信号であり、丸とは正負反転したエコーが観測される。通常の探傷器などは全波表示が原則なので、反転したかどうかは RF 表示に切り替えて拡大してみないと気が付かない。

大きさや形状しだいで、エコーの振幅の等高線図が変化するので、特定の形状の反射源のエコーの振幅の等高線図が得られても、あまり意味の無いと言う事になった。

と言う事で、前述のソフトウェアで欠陥の特性を探傷器に組み込む開発案件は不可能と言う結論に至り、製品化は中止された。

音圧がゼロであっても、運動があれば、欠陥の形状次第で反射エコーが有られ、音圧場を測定しても、エコー観測する非破壊では余り意味がない事が判る。その為、非破壊検査では基準試験片による比較試験が原則である。

◆音圧場の測定

「音場」が測定出来ないとしても、「音圧場」のみでも測定すると、探触子の特性の改良などの為の資料になる。また、医療関係では人体に対する安全性の観点から、音のエネルギーが制限されている。この場合音のエネルギーを直接測定できないので、音圧から換算している。探傷目的では距離振幅特性が判れば十分で、測定する価値がある時のみ測定する事となる。

◆音圧場の測定法(1)シュリーレン、光弾性

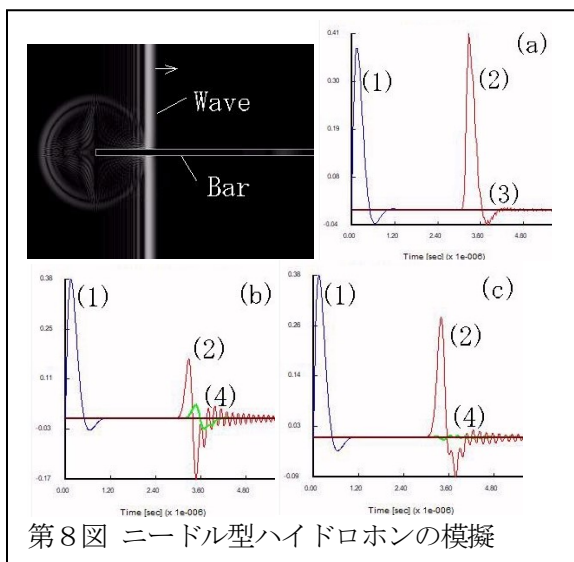
音に限らず場を測るには場を荒らさない計測方が良い。音圧を測るシュリーレンや光弾性の様な光学的な方法は場を荒らさない。連載の4で詳しく述べたので其方を参照願いたい。

何れの方法も光を透過し、その光の屈折や偏光を観測する為、X線同様、透視となる。各点の情報はX線CTの様な方法である程度測定できるが、今の所精度が悪い。

◆音圧場の測定法(2)ニードル型マイクロホン

水中で音圧を測定するマイクロホンを一般にマイクロホンと呼ぶ。マイクロホンをそのまま、或いはラップして水に浸けても使えるが、多くは圧電体を用いた専用センサーとしている。音場を荒らさないと言う意味で、誰しも小さければ小さい程良いと思うが、実際には小さいと、センサーの感度が悪くなるし、センサーの径に対しての圧電素子の径比が受信音圧歪に影響し、この比が小さくなるので、逆に歪が大きくなることが多い。

音場,音場の測定,ベクトル図,オランダの涙,ニードル型マイクロホン,膜型マイクロホン,



第8図 ニードル型マイクロホンの模擬

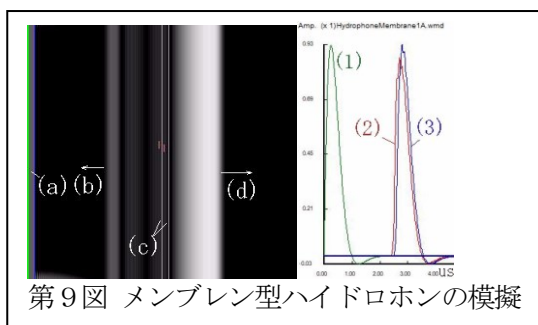
第8図はニードル型マイクロホンで水中の1MHzの正負音圧のパルス波を測定する時の測定歪みを模擬したものである。センサーの代わりに0.3mmの鋼の棒(Bar)を差し込んで歪 FDTD の模擬をさせた変位を図で、棒端付近の歪 RF 波形を示した。棒がない場合(a)の棒の先端位置で、当然僅かな媒質の影響があるが、送信音波(1)とほぼ同じ波形(2)が観測される。(3)に細かな凸凹があるが、計算メッシュによるもので、メッシュを細かくすると多少小さくなる。次に棒を入れ、先端から0.1mm左側の水中では(b)図となり、正負の変位、1.5波の音圧に観測される。(4)は棒の径共振相当の周波数のリングングである。棒の鋼中深さ0.1mmの所、仮想の振動子の位置では、感度を20dB上げて(c)の波形となる。負の部分が増え径振動も見られる。

場にセンサーを入れると、場が歪むため、結局、場にセンサーが無い状態を観測できない。電波などでも同じように導波管開口付近の電波の場の測定は出来ない。金属棒の代わりにプラスチックなど音響インピーダンスが水に近い棒材料を挿入すると、歪が少なくなる。ポリマー圧電振動子と樹脂でマイクロホンを作り、厚さ0.1μ以下の電気的シールドを施す方法が現状一番歪を小さく出来る。折れやすいのが欠点である。また、次に述べる極薄い(10μ程度)大きなポリマー振動子による円形型や短冊型膜型・マイクロホンも音響インピーダンスが水に近い部材で構成され、歪が少ない。

なお、ニードル型のマイクロホンの場合、多くは圧電素子が小さく、高インピーダンス・プリアンプを設置しないと、電気的歪が大きくなる。筆者の経験では、余り小さくなく、誘電率が高めの振動子を使う方が、高インピーダンス・プリアンプを設置したとしても、音圧波形が光弾性可視化装置などのとの比較からより正しく測れていると思われる。

◆音圧場の測定(3)膜型マイクロホン

膜型(薄い膜)型のマイクロホンは音響的歪が非常に少ない。膜の厚さは観測周波数の波長より十分小さくする必要がある。前後の媒質と振動子の音響インピーダンスの比のλ/10以下の膜厚にすると、膜が無いかのような音場となる。音響インピーダンスは媒質に近い方が歪は少ないので、水浸ではポリマー系振動子、媒質が金属で、その中に組み込む場合はセラミック系振動子が使われる。ポリマー系では2~10μ程度の厚さが電極も含め作り易く絶縁層も含め10μ程度には仕上がる。共振周波数は100MHz程度である。面積はA4サイズ



第9図 膜型マイクロホンの模擬

も可能である。セラミック系では押し出し法で、50MHz程度まで製造可能であるが、取り扱いで割れやすく、50mm程度のサイズが限界である。第9図に歪 FDTD シミュレーション結果を示す。(a)が振動子で、(b)は膜からの反射波、(c)は膜、(d)が透過音波である。送信音波(1)と、膜の前(2)と内部(3)の変位波形を示すが、殆ど差が無い。図では大きく表示されるが、設定した膜の厚さはλ/20である。

コンデンサー・マイクロホンは膜型型の代表で、携帯電話に使っているのは径8mm以下と小さいが、高級オーディオ用はΦ20を超え、膜の厚さは0.1μと極薄い。空中で100kHzの

音場,音場の測定,ベクトル図,オランダの涙,ニードル型マイクロホン,メムレン型マイクロホン,

波長は約 3 mmあり、1/3000 という厚さにしている。空気に比べ膜の比重が大きく音響インピーダンス比が大きいため、この程度にしないと高い周波数まで歪を少なくできない。コンデンサー型の問題は径を小さくすると静電容量が小さくなり周波数特性が悪くなる事である。その為、携帯電話用マイクロホンの多くはアンプを内蔵したもの又は MEMS を使っている。

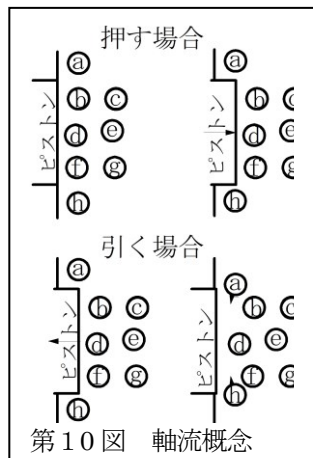
メムレン型マイクロホンではポリマー振動子で誘電率はコンデンサー・マイクロホンより数~十倍有利だが、空間分解能を良くする目的で、電極径を 1 mm以下と小さくしている。又水浸の為にアンプをメムレンからかなり離して配置し、高周波と低周波の電氣的歪が多くなる。極一部メーカーは振動子電極直近のメムレン上にアンプ IC をモールドしたり、防水プリアンプを使ったりして改善しており、理に適った方法である。色々な問題があるが、MHz 帯の計測には一番歪は少ないようである。

その他、ニードル型の様に小さくするのではなく、大きくして、形状と材料音響インピーダンスを選択し、歪の発生を少なくした砲弾型マイクロホンはメムレン型より低周波で電氣的歪みが少なく、低周波(主に 5MHz 以下)で使われる。

◆液体、気体や音がセンサーに垂直でない場合

以上は音による振動の方向がセンサーに常に垂直で有り、界面での移動が起きない事を前提に話をした。流体や気体とセンサーの面では音が伝わると流れが起きる。FDTD シミュレーションはこの流れを無視している。例えば探触子を連続励振すると、

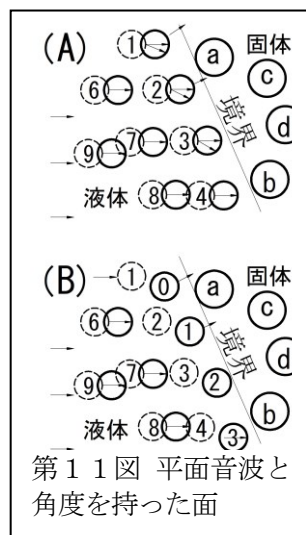
振動子面から軸方向に軸流が発生する。第 10 図の概念図の様に、振動子面を出っ張らすときは主にピストン振動面が、その面の前の粒子 b~g を押すが、戻るときは大気圧で周りの粒子 a, h を吸い込む。一種の



第 10 図 軸流概念

ポンプである。FDTD シミュレータの現状のアルゴリズムでは気体液体中の音の送信にはこの様な誤差が生じる。

第 11 図の様に傾いた面に音が伝わると、滑りが生じる。左から平面波が伝搬する。図 (A) は①~④の液体の粒子は固体側の a~d を境界を



第 11 図 平面音波と角度を持った面

介して押す。正負の交番音波の場合は、押ししたり引いたりする。FDTD シミュレーションではどんな音が伝わるうが、①~⑨や a~d の位置関係は変わらない。a は①か②より力を受ける。

一方自然は異なる現象で、図 (B) の様に、境界に近い粒子は移動する。正負の交番音波の場合でも、押すと引くで、運動のし易さが異なるので、図の場合は斜面に沿って右下に移動する。長い時間音が通過すれば、⑥~⑨なども右下に移動する。

歪 FDTD を含むメッシュを切る方法でのシミュレーションや面が動かないとする解析手法では、(A)の状態を仮定していて、(B)の状態の計算ではない。

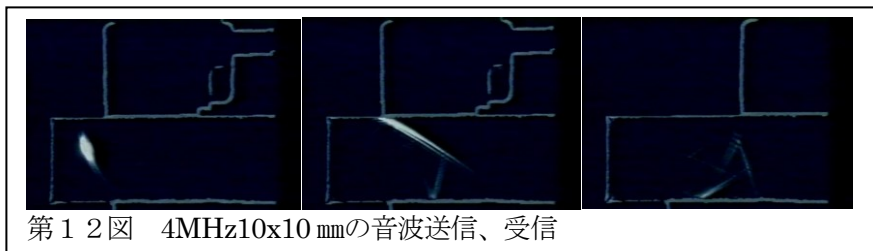
液体液体間の境界は、間に極薄い膜がある事を仮定していると書かれている場合が多い。屈折の計算式も境界面の粒子は移動しないことを前提に導いている。

今でも解析やシミュレーションと実際の比較実験研究の論文が出されているが、理想に近い平面波の生成が難しく、理論と実際の差のデータが得られていない。

◆音圧波形と受信波形

音圧場でさえも測定するのは大変である。前述の様にセンサー自体の形が場を荒らすし、探触子に音が入っても、それがそのままの形でエコーとして観測される事は減多になく、大きな問題である。受信探触子を実際に近い形でモデ

音場,音場の測定,ベクトル図,オランダの涙,ニードル型ハイドロホン,メンブレン型ハイドロホン,



第 1 2 図 4MHz10x10 mmの音波送信、受信

ル内に配置して受信歪波形を観測しないと不味い。そうしたとしても、実際の探傷器での結果と合う事は滅多にない。簡単に一致してしまう場合は、何かの問題があると考えた方が良い。1980年代に光弾性可視化装置を使って、宮城高専に居られた故伊達一博東北大学教授と探傷器のエコー画面と可視化装置の画像を同時に見ながら観測した。探触子に入って来る、どの音波がエコーとして強く観測されるかは、画像からは殆どわからなかった。第12図にその一例を示す。図左画像が縦波斜角探触子の送信直後の画像である。中央は戻ってきた強い音波であるが、この状態では探傷器にはエコーが一切表示されない。受信波面の角度が、送信時とは異なる事が判る。波面が振動子と一致していないので、受信感度が頗る小さい。図右は探触子の位置をずらして、探傷器画面で一番エコーが高い状態での可視化像で、探触子に戻ってくる音は輝度が極弱い。歪 FDTD シミュレーションでは、輝度が1ビットに達せず、感度を上げないと画像上では観測できない事となる。可視化の結果と実探傷とはイメージが異なる。

別の例では、波面角度は振動子角度と一致するが、周波数が推移し、音波波形は探触子に入

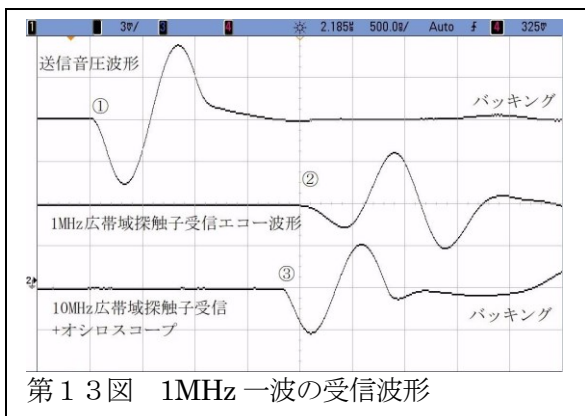
るが、探傷器の帯域外になって、実際の探傷器にエコーが観測できない場合もある。

従って、FDTD など音のシミュレータを使うより、実際に探触子と試験片で試験した方が早く正しい結論が出ることが多い。

◆計測周波数帯域

以前の回でも説明したが、パルス波の場合、計測する時の帯域は、基本波の0.01~10倍、できれば0.001~20倍の帯域が良いと言われる。そうしないと大きく歪む例を第13図に示す。25MHz 広帯域探触子で、1MHzの1波を発生させ、4mm厚さのポリスチレン板を通過した時の波形等を示す。なお1MHzの探触子で送信し、一波の波形を出すことは、1MHzの共振特性の為にほぼ不可能である。目的の周波数の最低でも10倍の周波数の探触子を共振点を除いて使う必要がある。この1波の平面波が透過法で受信探触子に入っていく。①は25MHzの探触子から出た音圧を25MHz広帯域探触子とオシロスコープを用い計測したものである。1MHzの1波が発生している事が判る。25MHzのバックキンは薄いので、1MHz成分は余り減衰せず、バックキ裏面の波形も観測される。②は1MHz広帯域探触子を通常の探傷器に繋ぎ、初段アンプで観測した波形、即ちエコーである。1波の入射音波が1.5波になっている。10MHzの広帯域探触子で受信し、直接探触子を、入力1MΩとしたオシロスコープに繋いで観測すると、③の様に1波のみである。この10MHzの広帯域探触子のバックキンの厚さは25MHzより薄く画面右にはバックキ裏面エコーが観測される。10MHz受信探触子の特性が加味されるので①とは多少異なる。オシロスコープでなく探傷器やパルサーレーザに繋ぐと10MHz成分が主体の波形になり1MHzの1波とは観測されない。

以上で音圧波形に相当する波形を得るには、測定したい基本波の周波数より十分高い周波数の探触子を使う必要がある。また、低域側は繋



第 1 3 図 1MHz 一波の受信波形

音場,音場の測定,ベクトル図,オランダの涙,ニードル型マイクロホン,メムブレン型マイクロホン,

がる機器(探傷器等やオシロスコープ)の入力インピーダンスにより決まり、多くの場合オシロスコープ $1\text{M}\Omega$ で満足だが、ポリマー振動子など誘電率の低い振動子、振動子径が小さい等では $100\text{M}\Omega$ まで上げる必要も時に生ずる。

光弾性装置やレーザー変位計でも帯域が重要でも等価帯域は最低でも基本波の $0.01\sim 10$ 倍必要である。例えば 5MHz の音波波形を解析したければ、 $50\text{k}\sim 50\text{MHz}$ の帯域が必要となる。光弾性装置やレーザー変位計ではそこまでの帯域が有るものは少なく、歪があるとして観測結果を評価する必要がある。現実はこの帯域を満足するのは、高周波の圧電振動子とオシロスコープの組み合わせしかない。参考文献#423 の減衰材の測定では、 $100\text{Hz}\sim 50\text{MHz}$ と通常の広帯域探触子と専用プリアンプを使って 199.9% 帯域が実現されている。通常の探傷器等と探触子の組み合わせで、非破壊で言う広帯域 100% 帯域幅で送・受信する場合、エコー波形と受信音圧波形はまるっきり異なると言ってよい。共振現象を使った楽器や鐘の音から、どういった叩き方をしたかは判断できないのと同じである。

◆あとがき

今回は音場の話をした。多くの書物には音場を測定出来るものとして色々な理論が書かれているが、実際には音場は観測できない。その為、ある場合は理論と一致した様に観測されたり、別の時には、まるっきり異なって観測される。音の波形を持ち出すと、エビデンスの無い話になる。従って、「観測波形」=「エコー波形」のみで議論するのが好ましい。

◆今回知った事

- (1) 書物に載っている平面波の近傍の音圧が凸凹しているシュリーレン画像は粗い回折格子を平面波が通過した時の画像で、平面波ではない。
- (2) 圧力を測定した結果の圧が有る部分は、正確には静圧又は音がある部分
- (3) 圧力を測定した結果の圧が無い部分は、正確には運動が有るか、音が無い部分で、ここに欠陥があると反射が観測されることもある。

- (4) 「音場」は測定できないし、図として描くことも困難。
- (5) 日本で「音場」と書かれている図の大半は海外では「小欠陥のエコー高さの等高線図」に相当し、「音場」ではない。
- (6) 「音圧場」は垂直成分に関しては比較的良く観測でき、探触子の性能向上の為には使える。
- (7) 「音圧場」を測定するなら、全体が樹脂製のニードル型マイクロホンか、メムブレン型マイクロホンが良いが、電気的歪には注意。
- (8) マイクロホンは傾いた音波の計測には不向き。
- (9) 解析的手法と歪 FDTD シミュレータでは固体個体間以外の傾いた境界層伝搬の計算結果は怪しい。
- (10) 計測帯域は最低、基本波の $0.01\sim 10$ 倍必要
- (11) エコー波形と受信音圧波形は殆ど関係ないと言ってよい。

<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)
Y.Udagawa and Gay Reim, "Wave Propagation Simulation in Coarse Grain (attenuative) Materials "IUS 2012 #423
Y.Udagawa and A.Yamada, "Simulation and Verification Experiment of Radiation Sound Pressure Waveform from Finite Aperture Piezoelectric Transducer", The 34th Symp. Ultrason. Elect. (2013).
USE2013 Analysis and Observation of Sound Wave Field from Finite Aperture Piezoelectric Transducer - Fact-finding of Misfit between Conventional Analysis and Experiment Observation -