

従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

## 音波のよもやま話 (その37)

### 従来の音波理論の問題

The Problem of Traditional Sound Wave Theory

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

#### ◆はじめに

従来の音の理論が間違っていることを、前回までに色々示したが、これらを含めここで整理しておく。

#### ◆間違った基礎理論や計測を基にした理論

従来理論は、間違いのある仮定、或いは間違った計測をもとに、組み立てられた。結果は一見、実験と同じ結果となるが、偶々同じ結果になった、或いは偶々同じ結果に成ったり論が残ったと言える。

2000年頃から英国の高校物理の教科書は全面改訂された。従来は日本と同様に、「ニュートン力学」「波」に大きく分かれていたが、新しい教科書は「計測」「ニュートン力学」「光子」などと、計測が最初に記載されている。計測上の間違いによる間違った学術論文が多い為、高校時代から計測の重要性を認識してもらう為である。

計測の難しさは、計測結果はそのまま物理量と考えられない事である。例えばオシロスコープなどで音圧を測定し、その波形としての結果は必ずしも音圧と言う物理量ではない事である。計測系の特性を含む情報である。

音圧の計測結果 ≠ 実際の音圧

音圧はセンサーにより測定されるが、センサーの性質により、例えばセンサー方向により測定結果が異なる。センサーはセンサーに垂直な成分だけしか測定しない為、横波と縦波を区別して測定ができない。センサーは探触子ケーブル等で接続されているとその長さや終端条件で結果が変化する。アンプの特性でも結果が変わる。色々な歪が加わり、波形として観測される。そ

の歪の原因が明確なら、ある程度元の物理量の音圧を逆算できるが、計測上ノイズや誤差が付き物で正確な音圧の測定は困難である。従って、証明自体が大掛かりの実験と精査が必要となる。

新しい英国の物理の教科書では、従来からの物理的には存在しない光の「波」は、その概念を過去の間違った技術史とし説明する。例えば光は、光子=素粒子として説明している。光は「波」として説明すると多くの現象を簡単に説明できるが、一部の現象は説明できなかつたり、エネルギー保存則に反したりし、「波」による説明は物理的には正しい説明と言えない。理解は難しいが、現象をより正しく把握できる「光子」として説明している。

#### ◆数学と物理の違いの認識不足

波の測定結果は多くはオシロスコープで観測される。オシロスコープの出力の波形情報は、数学上情報として処理を出来るが、物理的音圧に対して同じ数学上の処理が適切ではない場合が多く、その判断が難しい。実験研究においては、数学者である熱力学の父ギブスの言葉「数学は（人が作ったもので）辻褄さえ合えば何をしても良いが、物理は（自然が作ったもので）それ相応の配慮が必要である」を常に思い出す必要がある。（）内は筆者が追加した。

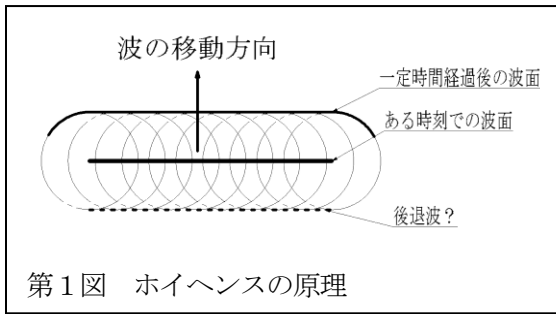
例えばフーリエ変換が典型例である。パルス波の音波は有限エネルギーである。そのパルス波形をフーリエ展開して、連続波の無限級数として表せる。無限級数相当の音の全エネルギーは無有限で、有限とならない。形は同じでも、同じエネルギーではない。即ち、同じ現象を引き

従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

起こさない。物理はエネルギーの科学とも呼ばれる。理論仮説を作る時には、エネルギー的に辻褄が合うか確認する必要がある。

◆点音源

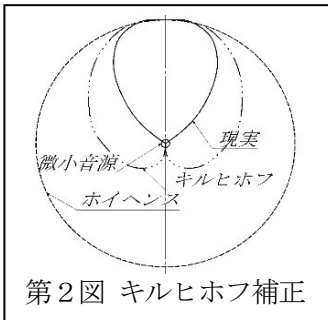
多くの理論が現実には存在しない点音源と重



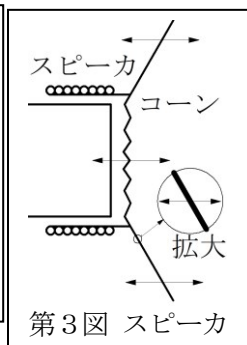
第1図 ホイヘンスの原理

ね合わせの理を仮定している。点音源の存在は大昔から問題になっていた。ホイヘンスの原理は1678年にオランダのクリスティアーン・ホイヘンスが考えた。ホイヘンスの点音源と言う考え方には、当時の著名な学者ポアソンが後退波(第1図)の発生を無視しているなど疑問が持たれ、フルネルやキルヒホッフ等が補正案を出したが(第2図)、厳密解析には無理があった。その後波動方程式で解くしかないのではとの認識になった。ここでは示さないが波動方程式を解くと、平面波や球面波に対して点音源の物理的意味がなくなる事を証明できる。

音源、例えばスピーカの動きを見ると、振動



第2図 キルヒホッフ補正

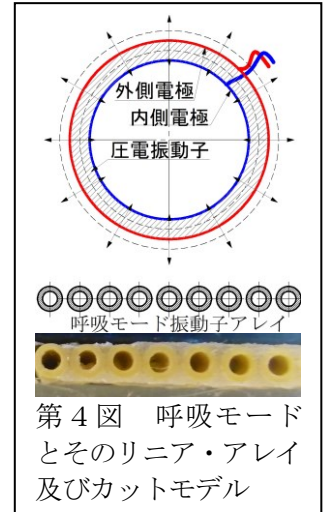


第3図 スピーカ

方向は幾ら小さく細分化しても、細分化要素の運動は一定の方向である(第3図)。コーン面の直ぐ外の空気も同じように前後運動し、ホイヘンスの言う点音源は存在しないと考えるのが妥当だ。

◆呼吸モード音源

点音源又は線音源と同じ様な球面波や円柱面波を発生する呼吸モード振動子がある(第4図)。薄い壁の内外面に電極を配置した振動子で、電極引き出し部を除けば綺麗な呼吸振動をする。風船に空気を出し入れすると膨らんだり縮んだりするのと同じだ。同様に円柱体の呼吸モード



第4図 呼吸モードとそのリニア・アレイ及びカットモデル

振動子をリニア・アレイ振動子の代わりに使うアイデアは、送信時にビームを大きく振れると考えられ試作されたが、結論的には使い物にならなかった。全方向に音を出すので、拡散減衰により直ぐに音圧が下がり、近距離以外感度が取れず、又目的以外に伝播した超音波により散乱エコーが増えSNが低下する。「超音波探傷は超音波が直進する事を利用した技術」の基本が成り立たない。点音源により平面波が構成されるという考えは、自然界には当てはまらないと言える。なおアレイ装置のカタログは同時励振素子指数が明記されている。この素子数を少なくすると、音が設定した方向に行かず、単に点音源から拡散して、使い物にならない装置になる。アレイ装置の初期の開発者は開発初期に点音源の集合との考えに依るアレイ装置が出来ない事に気が付く。

◆ニュートン力学、エネルギー保存則

日常我々が関与する現象の大半はニュートン力学に基づいている。光速に近い現象はアインシュタインの相対論を考慮する必要があるが、そういう現象に出会う場面はまずない。

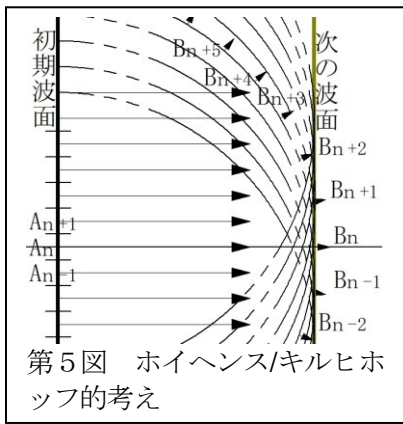
従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

ニュートン力学では「慣性の法則」即ち「慣性力の保存則」がある。また、一般物理学では「(運動) エネルギーの保存則」が成り立つ。

従来の音波理論の大半の欠点はこれらを考慮しない事である。音波波動方程式はニュートン力学から導かれ、これらを考慮している。FDTDシミュレーションは音波波動方程式の差分表現と考えられ、ニュートン力学が考慮されている。一方従来から音波理論に使われる積分形式の速度ポテンシャルを使う計算展開は、ベクトルを失うので、球面波や平面波などベクトルの方向が一定な場合以外では、ニュートン力学を考慮して無いと言える。

ニュートンが有名な力学体系の解説書「プリンシピア」(日本語訳「自然哲学の数学的原理」)を出版したのは1687である。

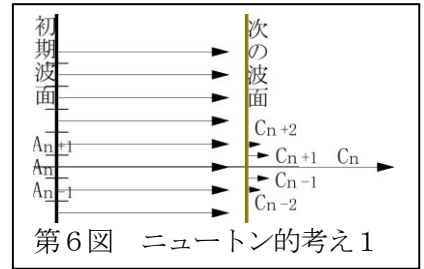
ホイヘンスが点音源などを考えた当時は、「プリンシピア」出版前で、ニュートン力学の認識が広まった後で有れば、彼は違う考え方をしたかもしれない。ニュートン力学を使って点音源を考えてみよう。ホイヘンスの原理で後退波は無いとする。第5図に示すように初期の無限幅



とすると、垂直成分は  $A_n$  の  $1/17$  が  $B_{n-7}$  から  $B_{n+7}$  に分配される。 $B_n$  以外は次の波面とは異なり、次の波面の要素にはならない。従って、次の波面の慣性力は元の  $1/17$  に減衰する。即ち波面は慣性力保存されない。分割数が多ければもっと小さくなる。 $B_{n0}$  以外は波面から左右位置がずれるので波面への強度の影響が殆どない。

慣性力を考慮したホイヘンス的考えでは急激な減衰が起きると言う事になり、現実とは異なる。なお元々ホイヘンスは波面の位置の求め方に付いては言及しているが、物理量即ち圧力(や力)に関しては何も言及していない。

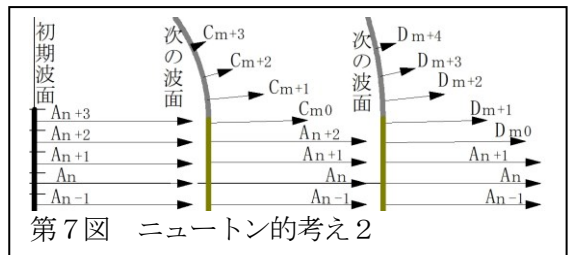
ニュートン力学的に考えてみよう。第6図で前図同用に区間  $n$  で  $A_n$  の慣性力がある。他の区間の  $A_{n+1}$  等何れも  $A_n$  と同じ量である。



それが次の波面まで伝わる。水や大気の子分子は完全弾性体なので慣性力は損失無で伝わる。ビリヤード同様綺麗に並んでいれば、直線的に運動が伝わるが、実際はランダムなので、 $A_n$  の慣性力を保持しながら  $C_{n-1}$  などと広がっていく。右向きの慣性力は保存され、広がろうとする慣性力は  $C_n$  の上下で反対で合計ゼロである。実際は熱運動しているので、広がりの様子はビリヤードとは異なる。大気の場合は平均自由行程毎に左右にふらつきながら慣性力が伝わると言える。

隣の  $A_{n+1}$  なども同様に広がるので、互いに反対方向なので、自分自身に戻ってくると考えてよく、結局  $A_n$  は保存されることになる。 $C$  の広がり方の解析的な汎用解法は見つかっておらず、ニュートン力学をそのまま繰り返し計算するFDTD法による。

次に有限ビーム幅の場合を考える。第7図で  $A_{n+3}$  の慣性力のビーム外には運動がないので、 $C_{m0}$  の様に振幅が減ると共に無かった部分に



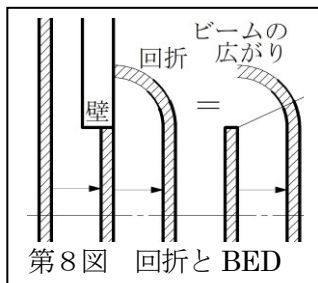
従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

慣性力  $C_{m+1}$ 、 $C_{m+2}$  等が発生する (第7図)。連載の前回に述べた様に、音は弾性 (圧力) と慣性 (粒子速度) のエネルギーが交互変換し伝わり、圧力には方向が無く、慣性には方向が有るため、慣性方向と直角方向に広がる。更に右に行った波面を考えると、 $C_{m0} \sim C_{m+2}$  等も同様に外側に広がり、 $D_m$  などの様に更に広がっていく。右に向かう慣性力の合計には変化ない。広がる方向、即ち図中垂直方向の慣性力はビームの両側で符号が逆で、大きさが同じなので合計はゼロと成る。平面波部分は  $A_{n+3} \Rightarrow A_{n+2} \Rightarrow A_{n+1}$  までと伝播に従い狭くなっていく。これが慣性力保存から考える有限平面波面の伝播である。

ビームが隙間から出る場合、ビームが広がり、その現象を「回折」と呼んでいる。物に波がぶつかって裏側に「回り」込む意味である。物が無くても端があると広がる。物が有ると、その裏に回り込むのは、物が有るからではなく、物によって波 (ビーム) が切断され、波 (ビーム) に端が発生するから回り込むのである。ビームの端部の圧力により、圧力の無い外に膨らむ。物が有ることが回り込む直接の原因ではない。波 (ビーム) に端が有ることが原因であるので、これを明確にする為、筆者らは **BED (Beam Edge Diffusion)** と呼んでいる。回折とビームが広がる現象 (BED) は全く同じ現象である。壁は無くてもビームの端が有れば開設するのである (第8図)。

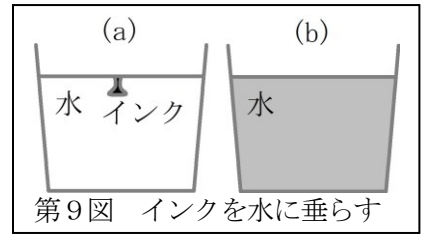
◆エントロピー

第9図の様にコップにインクを垂らす(a)と、水の中を拡散していく。少し経つと、均一な色になる(b)。この変化は誰が行っても同じである。自然の摂理である。自発的な自然現象は、一定の方向にしか進まない。エントロピー増大の法則(熱



第8図 回折と BED

力学第二法則) と呼ばれる。ニュートンから2世紀経った1865にド



第9図 インクを水に垂らす

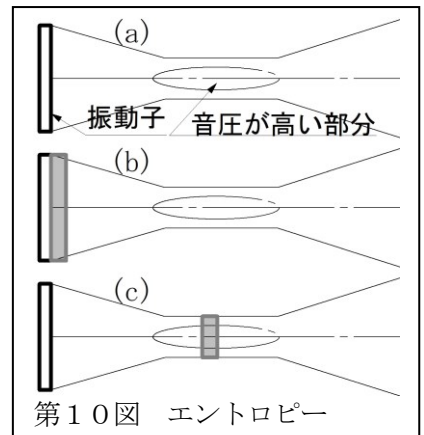
イツのルドルフ・クラウジウスがエントロピーを名付けた。その後ボルツマンやギブスによって統計力学的な取り扱いが始まった。ボルツマンにより分子原子の乱雑さの指標であると証明された。微視的な状態数が  $W$  の時エントロピー  $S$  はボルツマンの原理で示され

$$S = k \ln W (E, N, V) \text{ (式1)}$$

と表せ、 $k$  はボルツマン定数、 $E$  はエネルギー、 $N$  は粒子数、 $V$  は体積である。エントロピーに関してより詳しくは熱力学や統計力学の専門書を参考にするとい。外部とエネルギーのやり取りの無い範囲を孤立系と呼ぶが、孤立系内では、エントロピー  $S$  が大きくなる方向に現象が進む。逆には進まない。 $W$  はエネルギー、粒子数と体積の関数で、同じエネルギー、粒子数の場合、体積が小さい程小さな値になる。

コップの水にインクを垂らした場合、狭い体積にインクが有るのでエントロピーは小さく(a)、大きな体積に広がるとエントロピーは大きく(b)なる。

探触子で音をコップの水に入射した場合を考えよう。教科書等には第10図(a)の様一度ビーム幅が狭まって再び広がる様に、或いは近距離音場限界付近で音圧が高い部分がある様に書かれている場合



第10図 エントロピー

従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

がある。半波長の音を出した場合を考えると、振動子から音が出た直後はほぼ振動子と同じ幅(b)になる。仮に狭まったとすると(c)はより狭い体積にエネルギーが集中する事になり(b)より(c)の方がエントロピーはより小さいとなる。これは自然摂理(エントロピー増大の法則)に反することでありえない。

探触子の送信特性を測定する場合多くは水槽内で試験するが、一探触子法で試験する場合が多く、その場合送・受信特性を同時に測っており、受信時の振動子面での開口合成の結果、近距離音場付近に受信感度の高い部分が発生する。これを送信特性と勘違いしたものと思われる。

送信特性と受信特性が同じと言う「二律背反定理」があるが、これは理想点音源が存在すると仮定すると成り立つが、理想点音源が存在しない為、「二律背反定理」は間違いである。この誤った認識が広がっている事も間違いを起こしている原因である。ここでは述べないが「二律背反定理」が常には成り立たない事は容易に証明できる。

一般に近距離音場限界付近を自然焦点と呼ぶことが多い。探触子の焦点距離は自然焦点より長くは出来ないと書かれている。これも間違った考えで、送信時に自然焦点は無く、受信時の開口合成の結果、感度の高く、有効ビーム幅が狭い領域が発生し、焦点の様に観測される。これを送信での現象と考え、これより遠くに焦点は設けられないと書かれているが、実際には受信の問題なので、近距離音場限界より遠くに焦点は設けられる。しかし、遠距離では明確な開口合成焦点が発生しなく、焦点はぼやける。

#### ◆大気圧、結合エネルギー 重ね合わせの理

殆どの音波理論が大気圧や結合エネルギーを無視している。固体内では結合エネルギーは結合力と呼んでも良い。この無視は音波理論以外例えば流体力学等にも見られる。その為理論と現実の矛盾が発生する。例えばエネルギー保存則が正しければ(正しくないと言う現象は今だ観測されていない)、2つの波のエネルギー $E_1$ 、 $E_2$ に対して以下の式が成り立つ。

$$E \equiv E_1 + E_2 \quad (\text{式 } 2)$$

従来理論では音のエネルギー(強度)は音圧の二乗に比例する。よってそれぞれの音圧を $P_1$ 、 $P_2$ とすると圧力 $P$ は

$$P^2 \equiv P_1^2 + P_2^2 \therefore P \equiv \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \quad (\text{式 } 3)$$

となり、圧力に関する単純な重ね合わせの理が成り立たないとなる。圧力と強度と共に重ね合わせの理が成り立つ様にするには、オフセットが必要になる。大気中の場合大気圧 $P_0$ を考えると、エネルギー保存から

$$(P_0 + P)^2 \equiv (P_0 + P_1 + P_2)^2 \quad (\text{式 } 4)$$

で展開し、小さな部分を無視すると

$$P \cong P_1 + P_2 \quad (\text{式 } 5)$$

と音圧に関する重ね合わせの理が成り立つ。この場合、エネルギー $E$ と音圧 $P$ は比例する。

$$P \propto E \quad (\text{式 } 6)$$

大気中の音の場合は大気圧を、固体中の場合原子間結合エネルギーを考慮する必要がある。それらに対して音のエネルギーが十分小さい場合に音の重ね合わせの理が成り立つ。この「十分小さい」でない場合は、非線形として音を扱う必要がある。

通常の市販探傷器と探触子の組み合わせで探触子から出る音の圧力は大気圧の1/10程度(0.01MPa)で、吐息の圧力程度である。大半の金属の引張強度は100MPa以上で、プラスチックなどでも数十MPaはある。従って、ほとんどの材料中の音の現象は重ね合わせの理が成り立つ線形と考えられる。

#### ◆圧と変位の非線形関係

前述の様に、音圧は元々非線形でその一部を線形として観測している。簡単な例は大気を考えたと良い。正圧は標準大気圧の数万倍でも実現可能であるが、負圧側は真空即ち大気圧から1気圧の圧力までしかない。圧力は変位に関して対称ではない。

例えば大気中に置かれた第11図(a)の様なピストンに変位を圧縮方向に $L/2$ 与えれば、大気は圧縮され、2倍の2気圧になる(b)。一方同じ変位 $L/2$ を膨張方向に与えると、0気圧に成らずに、約0.67気圧に成る(c)。スピーカのコー

従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

ンを前後に振動させ低音を出すとき、振幅が小さければ正負同じ音圧の音が出るが、振幅が大きいと同一にならない。空中パルス超音波法が飛行機のコンポジット部材検査に使われているが、必ず正の圧力を出す方式をとっている。大気から、コンポジット材への音

の透過量が僅かなので、フォーカスをさせ圧力を上げようとする、負圧では真空になり音が伝わらない。水中での負圧送信フォーカスではキャビテーションが発生する。正圧だと強いフォーカスが得られ、空中超音波での反射法検査が実用化されている。

固体内も同じで、変位が大きいと、変位と応力の関係は線形ではない。固体内の場合も歪が十分小さい場合の近似として成り立っている。土木建築で歪(たわみ)と応力(外力)は比例するが、これも歪のエネルギーが結合エネルギーに比べ小さいからである。

◆画面上の波形 ガウシアン・サイン

一般探傷器の画面に表示される波形は、ガウシアン・サインに近い場合が多い。これはエコー波形の実効帯域が狭い結果である。元々ガウシアン・サイン波形とは、その振幅の包絡線がガウス分布(正規分布)曲線に成る様な連続サイン波形である。始まりも終わりも無い。探傷器に現れるパルス波形の先端(初動)は材料の伝播時間で制限され、始まりが有る。実際には異なる曲線であるが、似ているので、パルス超音波の研究ではよく使われる。*a*、*b*、*c*を定数、角周波数を *w*、時刻を *t* として以下で示される。

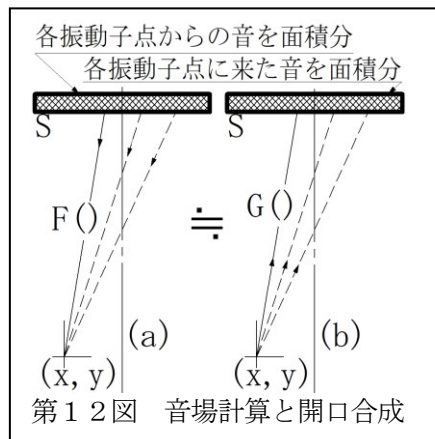
$$F = a \exp(b(t - c)^2) * \sin wt \quad (式7)$$

研究にガウシアン・サイン波形を理論計算や実験等の送信波形に使うことが多い。しかし、これは間違った研究の仕方である。ガウシアン・サインは帯域が狭く、積分しても微分してもほぼ同じ波形である。

その為、実験結果と仮説理論が一致しても、証明とはならない。本来は理論に微分または積分等のファクターが余分に必要なのに、なくても同じような計算結果になる。帯域の広いパルス波形(インパルス、ステップ等)を使って実験し理論との整合性を調べる必要がある。より詳しくは連載の20回目を参照願いたい。

◆一般の音圧場を求める計算手法

音圧場を計算する場合、レーリー積分が使われることが多い。これも含め一般の音圧場を求める理論式を見ると、振動子面から特定の点への影響の関数を作り、その関数を振動子面で積分している。これは求めたい特定の点に球面波を発生する音源があっ



第12図 音場計算と開口合成

て、この音を振動子面で積分するのと等価の計算手法である。要は送信の音場を計算している積りが、受信時の振動子面の開口合成を計算している。音場計算と言いながら、受信感度分布を計算しているのである。関数 *F* と *G* が同じなら信号 *E* は

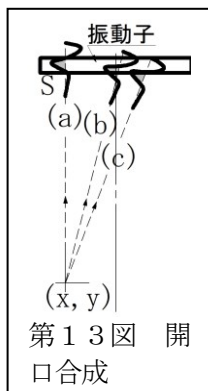
$$E = K \int^S F ds \equiv H \int^S G ds \quad (式7)$$

となる。*K*、*H*は定数。*S*は振動子面。

前述の様に熱力学第二法則を考慮すれば、探触子からの送信波単にエネルギーは広がるだけで、自然焦点を作ったり、ゼロの音圧になる事は無い。一方振動子面の開口合成は、振動子面

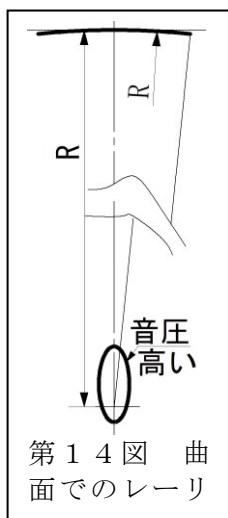
従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

と波源の距離により波形の位相が異なる事から、連続波では受信信号としてゼロにもなるし、フォーカスも発生する。第13図の(a)の様に負の音圧部分が振動子内に入ったり、(b)の様に正負同量入ったり、(c)の様に正の音圧が振動子部分に入ったりする。これらの合計圧力に従った電荷が振動子で発生して、電気信号になる。合計圧力は位置(x,y)により正負色々な値を取る。



第13図 開口合成

レーリー積分の様に振動子面を積分して特定位置の音圧を計算する方法で、平面振動子の場合は実際に近い音圧場を計算できる場合もある。しかし、同じ手法を用いて、円柱面や球面振動子を計算すると、その曲率中心に音圧の高い部分が発生する。例えば5MHz10x10mmで100mm Rの曲率の振動子にすると、100mm附近に音圧の高い部分が発生する。エントロピー増大の法則を考えると当たり前だが、実際に平面振動子の近距離音場限界より遠い所に音圧の高い部分は計測されない。100mm Rの曲面の各点を積分するので、数学的には当然であるが、自然現象としては存在しない。平面で実際に近い計算が可能な手法が見つかったら、必ず曲面振動子で計算して実際に近くなるか確認する必要がある。



第14図 曲面でのレーリ

#### ◆サイドローブ

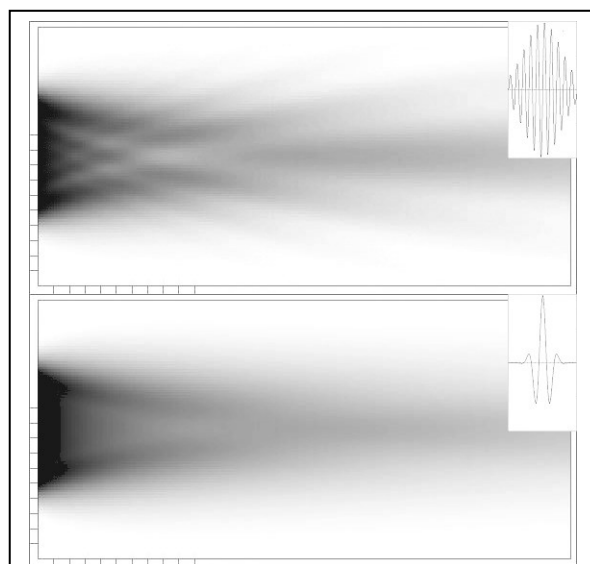
サイドローブは受信時の開口合成で発生する。送信時はありえない。これも熱力学第二法則に反するからである。

高級市販マイクロホンの指向性のデータシートには、サイドローブが明確に書かれている。

一方高級市販スピーカの指向性データシートにはサイドローブは描かれていない。誰が測定しても存在しないからである。

書物に送信音場にサイドローブが有ると書かれているが間違いである。また、連続波で実験的に観測されたとの論文が有るが、放射面がピストン運動していなのに、ピストン運動しているとの勘違いなど、測定上の間違いが大半である。なお、BEDは外側と内側の2種が同時に発生し、左右の外と内のBEDの干渉による音圧の凸凹は発生するが、外側BEDの方がビーム端からの距離が近いので、外側BEDの影響が大きく、音圧が弱くは成るが振幅がゼロに成る事は無い。

受信特性はアレイの開口合成そのもので、振動子が垂直圧力のみ受けるとしての計算は誰でも同じ結果になる。その例を第15図に示す。5MHz10x10mm狭帯域と広帯域探触子の鋼中の受信の感度分布を示す。実際には振動子面での屈折や横振動に対する感度が素材や構造により異なり、誤差が生じる。狭帯域では近距離音場限界内(図中央付近)に感度の凸凹が見



第15図 計算表示領域20x40mmの受信時のサイドローブと近距離音場内凸凹 スケールは波長相当

従来の超音波理論の間違い、重ね合わせの理、エネルギー、点音源、呼吸モード、エントロピー、エネルギー保存則、音は元々非線形現象、ニュートンのゆりかご、チップ・エコー、端部エコー

られ、その前に低い音圧部分もある。サイドローブ的な物も発生しており、輝度が変わる毎に正負の振幅が交互になっている事は画像の生データで判る。一探触子法の場合、送信波単に振動子からの平面波が広がるだけなので、その音圧分布特性と受信の開口合成の積となり、エコー高さの等高線図と同じ様な結果となる。異なる部分は送信時に徐々にビームが広がるため、ビーム外のサイドローブの振幅が減る事と近距離音場以遠で振幅の下がり方が大きい事である。

なお、図下の同様に、中帯域や広帯域では感度の凸凹やサイドローブは殆ど発生しない。狭帯域でも、可成り波長が長くないと明確なサイドローブは発生しない。なお、圧電素子の横感度特性などの別の要因で発生する事は有る。

#### ◆音の減衰

連載の「音速と減衰」の数回にわたって述べた話である。音が音以外のエネルギーのタイプに変換しない限りエネルギー保存則が成り立つ。従って、「音が減衰する」ことは無い。「音が減衰して観測される」と考えられる。その主な理由は、受信帯域に起因する。物質は色々な音速の粒子の集まりである。個々の物質の音速の差により、伝播時間の差がランダムに表れ、結果として、音速分散として観測される。特定帯域の受信では、帯域が狭いため、その全体像をつかめず、一見減衰すると観測される。

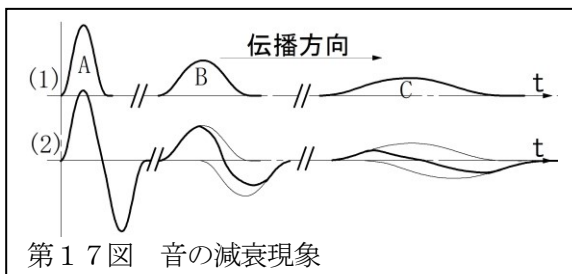
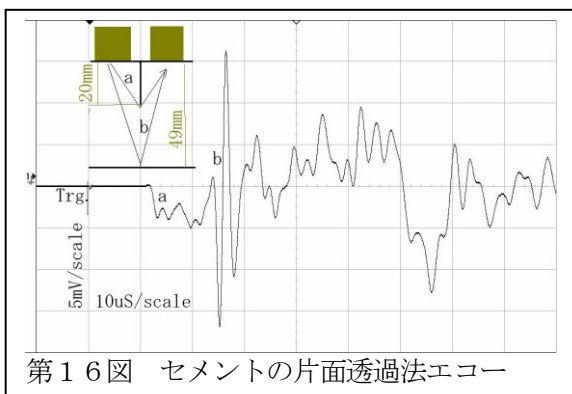
音速分散すると考えると、減衰が周波数に比例する事は簡単に導かれる。なるべく大きな振動子から平面波を出し、BEDが影響しない距離で小さなセンサーで観測すると、実験値も同じ傾向を示す。

一般に粒界が大きいと減衰が多い。市販の探傷器で鋼の探傷は容易であるが、その元のインゴットは粒界が数cmあり、コンクリートより低い周波数を使う必要がある。

セメントに人工割れを設け、割れの両側型面に探触子を配置した。0.5MHz20Φ広帯域探触子で送信し、5MHz10Φの広帯域探触子で受信した場合の例を第16図に示す。受信には探傷器を使わずオシロスコープの1MΩ入力に同軸

ケーブルで探触子を直接繋いだ。20mm深さの割れを迂回した縦波aと0.4MHz程度の49mm裏面B1反射b以外に色々な低周波のエコーが観測される。aは幅の有る負の電圧であるが、送・受信の探触子振動子面相互の距離は色々あるので、その分パルス幅が広がる。本来はこのように広い周波数帯のエコーが観測されるが、通常の探傷器等と探触子の組み合わせでは、低い周波数の情報が失われて、例えばaは小さな凸凹のみが観測される。単に厚さを測定したい超音波肉厚計などではバックエコーのみが誰でも間違いなく計測できるように帯域を狭めている。探傷器等は鋼の検査に特化した計測器で邪魔な波形は表示しない様に設計してある。他の材料や目的が異なる場合はそれに適した計測システムが必要になる。

音が熱となり、減衰すると言う人もある。熱は音と同じ媒質の振動運動であり、媒質の入力された音の慣性力は媒質の慣性力として保存される。熱振動に加わる事になり、それを人は音センサーで測定できるとき音と呼び、測定できない時熱と呼ぶ。要は計測できるか出来ないか



で呼び方が変わるだけである。



従来の超音波理論の間違い、重ね合わせの理、エネルギー、点音源、呼吸モード、エントロピー、エネルギー保存則、音は元々非線形現象、ニュートンのゆりかご、チップ・エコー、端部エコー

探触子等により送信された慣性力に正負ゼロに成る場合、例えば連続波では、元々合計の慣性力がゼロなので、遠くで減衰して測定されても慣性力保存に反するとはならない。第17図(1)の様に半波の場合初期の慣性力はAで伝播すると前後に分散しBとなり、更に伝播するとCとなる。がA,B,Cとも面積が同じ、即ち総慣性力に変化がない。帯域の狭い探傷器等ではCなどは周波数が低く殆ど観測できず、Bでは探傷器の感度が下がり画面上減衰したと観測される。

一方正負の連なる慣性力を与えると、伝播するに従い正負の慣性力が重なって振幅が減っていく。遠くではほぼゼロである。元々慣性力の合計がゼロなので、遠くでゼロでも良い。

波数が多く、波長が短い程、同じ伝播距離で、より減衰して観測される。

大きなコンニャクの片端を押せば、反対側はゆっくり押しした距離移動する。素早く前後に押引き、即ち慣性力の合計が同じに成る様にするると反対側は止まったままである。

#### ◆欠陥からの反射が反射エコーでなく、欠陥により切断を通過した主ビームのBEDが反射エコー

欠陥からの戻ってくるエコーを「反射エコー」と言う。割れの先端からのエコーも観測されて、チップ・エコーとも呼ばれる。先端面積がほぼゼロと小さいのに大きなエコーが観測される。これを先端から反射してきた音と思われる方が多いが、割れによって切断された、割れを通過した強いメイン・ビームの端からの回折波で、意味を明確にするために我々がBED(ビーム端からの拡散)と呼んでいるものである。割れの様に先端形が小さい物は反射にかかわる面積は小さく、反射波は弱い。先端面積のほぼ無い割れなどでビームが綺麗に切断されると、先端音幅に関係なくBEDは同じ量が発生する。割れの内部が空間で音を殆ど通さない場合、割れ先端が1 $\mu$ でも1mmでも、切断されたビームの端の状態は変わらないのでBEDの量は変わらない。微細反射体でも反射面積による反射よ

り、反射体で切断された強いビームの端からのBEDの方が強い。「欠陥からの反射」は反射面積の大きな欠陥以外では存在しないのである。欠陥からの反射エコーは音波の反射による部分より、メイン・ビームの切断の結果発生したメイン・ビームから供給されるエネルギーによる拡散即ちBEDにより、戻ってくるエコーの強度は明らかに強い。単に小さな欠陥で発生する反射による球面波では、伝播距離に従って、拡散減衰で音圧は弱くなるが、BEDはメイン・ビームからエネルギーが供給される為、遠距離でもあまり弱くならない。第18図にFDTDによる鋼の中の傾いた割れに入射した平面波の挙動を示す。この場合、反射ビームは縦波と横波に分かれている事には注意。

微細な粒界からの反射を「後方散乱」と呼ぶが、一般的に各粒界からの反射とされているが、実際は各粒界による切断によるBEDである。

詳しくは連載

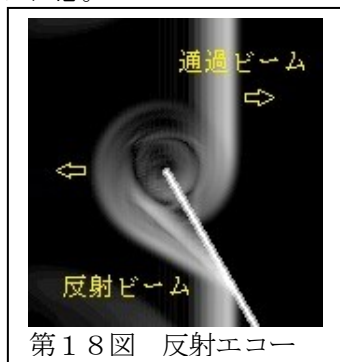
15「なぜ超音波探傷は割れ欠陥検出能が高いか？」を参照されたい。

また、試験片に加工した円形面反射体からのエコーは径の二乗即ち面積に比例する場合は、面からの反射である。小さくなると径に比例するようになる。これはBEDによる。

#### ◆加速度運動

ものを移動させるときに音が必要だとの認識があまりない。コンニャクの端を押しても、単に弾性で歪だけでは、反対の端は直ぐには移動しない。端まで歪を伝搬する事により、反対が歪=移動するのである。連載の35回の一次元FDTDで移動に関する模擬をしてみよう。

車を加速して一定速度Vにするイメージは誰でもわかる。ニュートンの有名な式の積分形式



第18図 反射エコー

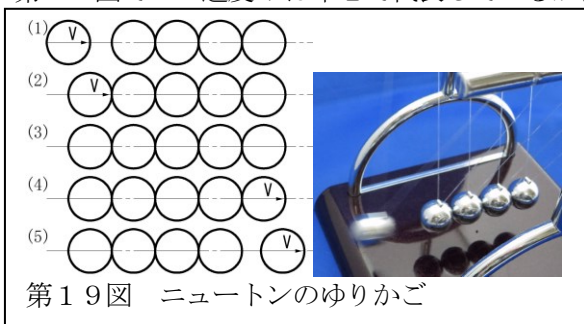
従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

$$V = \int a dt \quad (\text{式 } 8)$$

の様に加速度  $a$  を一定時間加える必要がある。

ニュートン時代から運動の実験に使われていた「ニュートンのゆりかご」(商品名バランスボール、ニュートンクレドル、カチカチ玉、衝撃弾性装置等) は第 19 図の様に左の玉が速度  $V$  で 4 個の玉列に当たる(2)。図(1)~(2)まで一定速度である。衝突後一瞬全体が止まったように見える(3)。が、右の端の玉が急に速度  $V$  で動き出す(4)。中央の玉は運動しているようには見えない。(4)で急に速度  $V$  を得ている。どうやって加速しているのだろうか？

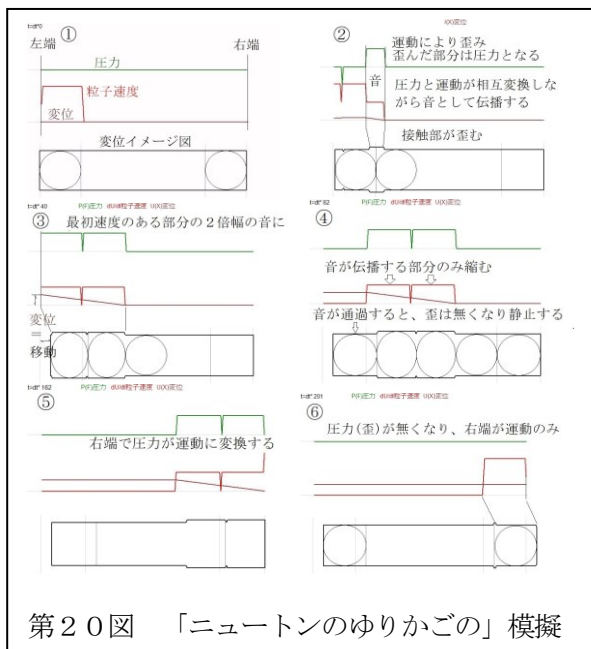
第 19 図で玉の速度  $V$  は中心で代表しているが、



第 19 図 ニュートンのゆりかご

玉の各点が同じ速度  $V$  である。音波関連ではこの速度を粒子速度  $v$  と呼ぶ。各点の粒子速度  $v$  の平均値が  $V$  と考えればよい。単独で定常運動している場合(1)や(5)では粒子速度  $v$  は速度  $V$  である。粒子速度は原子や分子の速度と言っても良い。

ニュートンのゆりかご、ビリヤード、アイスホッケー、カーリングなどで円柱、球状を使うのは、直線運動が回転運動に変化し、運動が複雑になるのを避けるためである。丸の場合、内部での応力の伝播は複雑なので、無限大平面の 5 枚の板が衝突した模擬とする。一次元 FTDT シミュレータは無限大太さの棒状のものの軸方向の模擬である。材料は歪んだ部分に圧力(応力)が発生する。第 20 図①は左に玉が衝突した瞬間に相当する。同図に細線で玉のイメージを加筆している。左の玉の範囲のみ粒子速度を持っている。(2)で運動している部分の先端の運動により歪(圧力)が発生し、音となり伝播する。音の部分は歪(圧力)があり、縮んでいる。



第 20 図 「ニュートンのゆりかごの」模擬

③で運動が全て音に変換する。音の幅は最初の運動の幅の 2 倍である。変位は移動であり、左端の玉は当たった後、少し位置が移動する。この図では変位を大げさに書いてある。通常玉の  $1/1000$  以下の変位なので、見た目では分らない。④で左端の玉を音が出ると、その玉は歪が無くなり、静止する。音の有る 2 個の玉は歪んでいる(楕円)。⑤で音が右端に伝わり、その先に玉が存在しない開放端(自由端)なので、音が運動に変換する。歪が解放され運動になると考えると判りやすい。⑥で全の音が運動になると、右端の玉以外は静止する。右端の玉のみ右に運動しているので、離れる事に成る。

- (1) 一定速度で運動する玉の衝突
- (2) 玉の 2 倍長さ相当のパルス音が発生
- (3) パルス音の伝播
- (4) 反対側の最後の玉内部でパルス音が運動に変換

と変換している。以上が「ニュートンのゆりかご」の原理説明である。

パルス音の長さは物の音響的長さの 2 倍である。自動探傷器ラインの直後に  $0.5 \sim 2 \text{ mm}$  径の硅砂(シリカ、音速約  $6000 \text{ m/S}$ ) などを用いてサンドブラストする場合がある。その場合硅砂の

従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

径の2倍相当の音が発せする。1~5MHzの音が発生し、超音波探傷のノイズになる事がある。

ニュートンのゆりかごでは、衝撃音が伝わりと書物に書かれていることが多い。音は業界や分野で呼び名が異なり、連続体力学、固体力学では弾性波と呼ばれる。超音波、可聴波、歪波、応力波、衝撃弾性波なども皆同じ音の別名である。音速がそれぞれの分野で異なる場合があるが、測定法の違いによる差で、同じ物質材料の物理的音速は一つである。ただし、正確な音速測定は困難である。

半世紀前 10Hz から再生できる 70 cm径の大型スピーカを松下の研究所に作ってもらった。低周波で駆動すると、人には風としか感じない。直流電圧を加え、玩具「空気砲」の様な動作をさせるとやはり風と言う感覚である。段々高い周波数にすると音として皮膚や耳で感じるようになる。更に高い周波数にすると耳のみで聞こえる。これらは周波数の違いで、風なども一部は単なる運動と計測されるが、人には聞こえない超低周波の音波に変換しており、全ての物質の位置変化は音によると言ってもよい。

#### ◆あとがき

音波理論に間違いが多く、前回までに指摘してきたが、それを再認識して貰うために、整理して記した。

#### ◆今回知った事

- (1) 物理論仮説が正しいかの確認にはエネルギー保存則が成り立つか調べるのが良い。
- (2) ホイヘンスの原理は当時ポアソンなど後退波の問題が指摘され、キルヒホフなどが補正を考えた。
- (3) ニュートン力学の認知以前にホイヘンスの原理が発案された。
- (4) 殆どの音波理論がニュートン力学を無視している
- (5) 回折は物が有るからではなく、物によりビームが切断し、ビームに端が出来るから (BED)。
- (6) ビームの端部の圧力により、圧力の無い外にビームが膨らむ (BED)。
- (7) 「二律背反定理」間違いと容易に証明できる。
- (8) 探触子の焦点は近距離音場限界以遠にも設ける事は出来る。
- (9) 殆どの理論が「大気圧」「結合エネルギー」を考慮していない。
- (10) 「音圧」と「音の強度」が近似的に比例関係だと、音の重ね合わせが成り立つ。
- (11) 探触子から出る音は最大0.1気圧程度
- (12) ピストンでシリンジを動かすと変位と圧力の関係が非線形であることが判る。
- (13) 空中パルス超音波法では必ず正圧を使う。負圧では音が伝わらない事がある。
- (14) ガウシアン・サイン波形での実験研究は、微分や積分の要素を考慮出来ない可能性がある。
- (15) サイドローブは送信では存在しないが、受信振動子面の開口合成で帯域が狭い場合に発生する。
- (16) 音は物理的意味で減衰しない。通常の探傷器では減衰して観測される。
- (17) 通常の探傷器等と探触子の組み合わせでは多くの情報が失われている。
- (18) 探傷器等は鋼の検査に特化した計測器である。
- (19) 音の減衰現象は計測結果であり、実際には存在しない。
- (20) 欠陥からの反射エコーは音波の反射による部分より、メイン・ビームの切断の結果発生したBEDによる。
- (21) 後方散乱波は粒界の反射による散乱ではなくBEDが主になっている。

従来の超音波理論の間違い,重ね合わせの理,エネルギー,点音源,呼吸モード,エントロピー,エネルギー保存則,音は元々非線形現象, ニュートンのゆりかご,チップ・エコー,端部エコー

- (2 2) 物の移動は音による。
- (2 3) 小さな物が大きな物に衝突すると、小さな物の径の倍相当の波長のパルス音が発生する。
- (2 4) 弾性波、衝撃波、超音波、可聴波、歪波、応力波など皆同じで音で、それぞれの分野で付けられた別名。
- (2 5) 全ての物質の位置変化は音による。

<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)

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 -