

音波のよもやま話 (その32) 音波の音速と減衰 (8) 減衰その5

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

一般に言われている音の減衰の原因の信憑性に関して述べる。

◆一般に言われている音の減衰

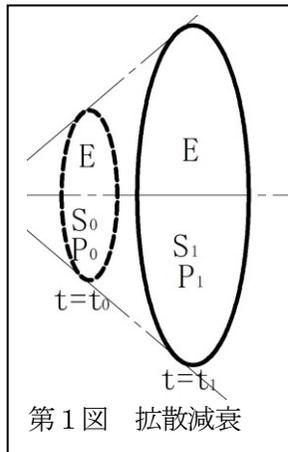
一般に音の減衰は以下の理由が書物に記載されている。

- (1) 拡散減衰
- (2) 熱への変換 (内部減衰、摩擦減衰などと呼ばれる)
- (3) 粒界による散乱 (散乱減衰と呼ばれる)
- (4) ヒステリシスによる。
- (5) 計測上は表面性状、面粗さ

業界によっては他にも理由を加えているが kHz~MHz 帯の超音波の場合それらは関係ないので、ここでは述べない。これまでの連載で減衰の主原因は音速分散であると、書いた。或いは遅延時間の分散と言っても良い。上記の一般に言われる原因の信憑性を議論する。

◆音の拡散による減衰

音が広がることに依る減衰である。第1図の様に例えば球面状に拡散する場合、時刻 t_0 で面積 S_0 、圧力が P_0 の場合、時刻 t_1 の時の面積と圧力を S_1P_1 とすると、エネルギー保存則から考えると、エネルギー密度は面積に反比例し、圧力はエネルギー密度の二乗根或いは単に比例するので、当然



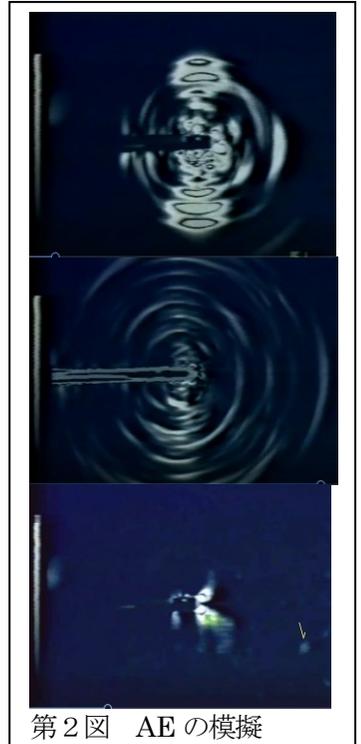
$$\frac{E}{S_0} > \frac{E}{S_1}$$

$$P_0 > P_1$$

となり、だれも異論がないであろう。筆者は BED の名称で今までに何度も説明した。ビームに端があるので、広がるのである。端の無い平面波であれば、広がらない (球面波は存在しない)。注意: 音圧と強度 (エネルギー) の関係は後の回で話す様に、比例関係にある。「強度=音圧の二乗」は大気圧など無視した間違いである。

◆音の熱への変換

前回も議論したが、気体中では、音は分子の並進運動であり、熱は気体分子のランダムな運動で、共に気体分子の運動である。エントロピー増大の原理からすると、音は最終的に熱に変わる事は間違いないであろう。同じ媒質内で例えば、エネルギーの一部が回転運動に変換しても、その回転運動が再び直進運動になる。回転運動になると、慣性は保存され、回転運動エネルギーの変化分直進速度エネルギーが



音波減衰都市伝説,信憑性,拡散減衰,音波の熱への変換,遅延減衰,散乱減衰

変化し、粒子の速度、結果的に音速の分散に変化する。エネルギーの変化が直ぐに熱になるのではなく、かなりの時間はかかりそうだ。ランダムと言うと、どういう状態が「ランダム」なのかを定義しないとイケない。音の場合、観測者が音と認識するかどうかと言う定義になろう。熱雑音という言葉があるが、計測者にとって意味の無い気体分子の運動は、仮に並進運動であっても、音と言う必要もない。ミクロの気体分子の振動を研究したい人にとっては、他の人が熱と思える現象も音として観測する必要があるかもしれない。どこまでが音で、どこからが熱と言うかはその状況次第である。

第2図は AE の発生の模擬を光弾性可視化装置で観測した画像で、100 mm角の試験片の中央で AE を発生させた。20 回程度端面で往復反射した頃には、波らしきものは観測されないが、その後も時々最下段の矢印の所の様に、方向の異なる波が干渉して点として現れる。どちらに進む波かは良く分らない。感度を可なり上げてあり、中央の強い部分は残留応力である。この超音波可視化写真の場合、この点を音と呼ぶべきかどうか疑問である。

一般にこのランダムな熱になる事を一般には内部摩擦、分子間摩擦、粘性摩擦とか呼ばれる。この音-熱変換ではカットオフ周波数は無く、エコーの振幅減衰 $A(\text{dB})$ は距離 $L(\text{mm})$ と周波数 $F(\text{MHz})$ に単純に反比例する。

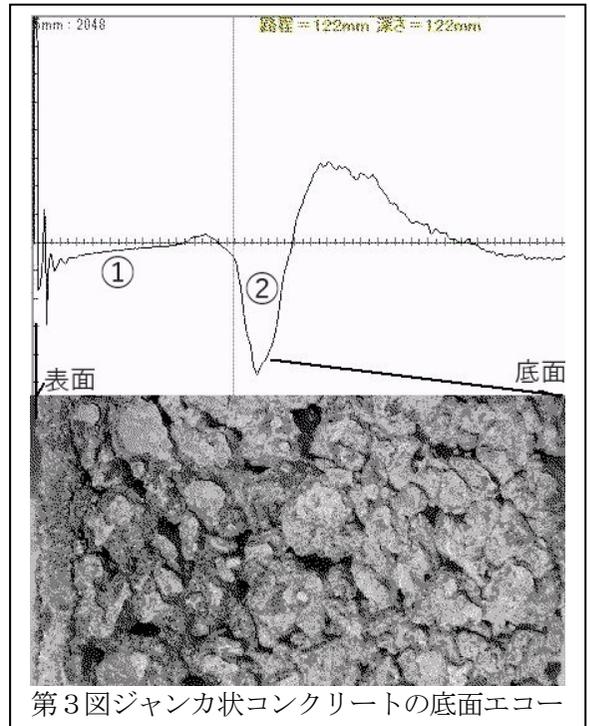
$$A = \frac{K}{LF} \propto \frac{1}{Lv} \quad \text{式}$$

K は減衰率と呼ばれている。水の場合 K は 0.0002dB/cm/MHz で人体の骨以外は $0.2 \sim 1\text{dB/cm/MHz}$ 。非破壊で対象になる材料とは異なり減衰自体が小さなものが多い。式の最後に周波数に反比例するという事は振動速度 $v(\text{m/s})$ に反比例する事を意味する。流体摩擦等は速度に比例するので、その逆数の減衰率は速度に反比例すと、妥当と言える。

◆音の粒界散乱による減衰

書物には散乱エコーという言葉が出てくる。原子力用ウラン燃料を詰めるジルコニウム合金の管は超音波探傷が行われているが、1970 代頃までは日本製の管は使えなかった。超探傷検査対象の欠陥からの反射エコーより、当時「散乱エコー」と呼んでいたノイズ・エコーの方が大きい。原因を探ると粒界が大きくまた、不均一

であることが判った。粒界が大きくても、均質



にすると探傷出来るレベルにノイズ・エコーが下がる。そうして検査できる様になり。日本製のシース管が実用化した。

コンクリートの内部にジャンカ（セメントの少ない部分）があると、超音波反射し検出できる。が、ジャンカばかりの構造体を作ると、減衰は大きい、ジャンカからの反射エコーが得られず、綺麗な底面反射のみ得られる。第3図は 125 mm厚さの全体がジャンカ構造の底面（バック）エコーを $76\Phi 0.5\text{MHz}$ 広帯域探触子の一探触子反射法で計測した例で、写真の様に石のサイズも違うし穴だらけだが、底面エコー②以外に反射波は見当たらない。なお、底面エコーのパルス幅は良質なコンクリートの倍ほどになる。その分エコー高さは低く、半分程度となる。①の様にジャンカからの反射波観測されない事はランダムな多数の反射体からの一般に言われる散乱エコーは観測されない事を示す例である。広帯域探触子のバック・ダンパーはタングステン粒子と接着剤の混ぜ物で、音響インピーダンスが振動子と同じ程度で、減衰が大きいのでダンピング用バックングとして使われる。20MHz 程度の探触子を使って計測しても、この減衰の大きなバックング粒子からは一切の散乱

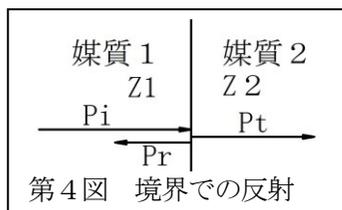
音波減衰都市伝説, 信憑性, 拡散減衰, 音波の熱への変換, 遅延減衰, 散乱減衰

エコーは観測されない。また、バックキンの側面で、他の探触子で音を観測しても、ビームが広がる事に依る音以外観測されない。バックキングで散乱エコーが観測される場合に切断すると必ず不連続部分（欠陥）がある。

散乱エコーと従来から呼ばれているエコーは不均質部からのエコーで、それが大きければ、我々は欠陥と認識する。従来の散乱エコーは小さな欠陥、小さな欠陥エコーと言ってもよい。

探触子と媒質を接触しないで感度を上げると一般に散乱エコーと呼ばれる距離に従い振幅は減るエコーが観測される。これはバックキングの裏面やケースなどの反射エコーである。バックキング裏面や探触子ケースを接触媒質で濡れた手で握ると散乱エコーと呼ばれるエコー振幅が低くなる。音は慣性力で、探触子外部に出ないと、エコーとして長い時間観測される。

一般に非破壊の対象の材料は多結晶でその結晶の間で散乱が起き、これが減衰の原因と考えられている。しかし、前記の様に散乱波は観測できないし、以下説明する様に散乱すると言う根拠がない。



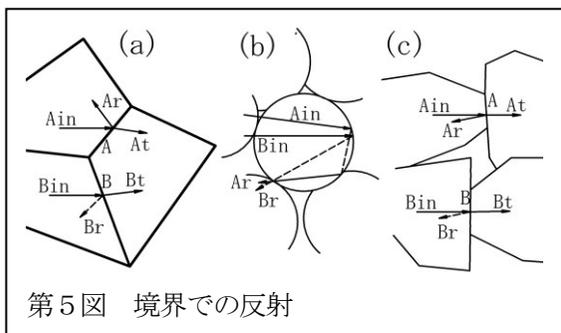
第4図 境界での反射

第4図の様な境界に音が垂直に入った場合、反射は境界の前後の音響インピーダンスの差により発生し、以下

の式でしめされる。

$$R_r = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

媒質2が媒質1より大きいとそのままの相で反射し、逆の場合、反転する。正の音が入ると



第5図 境界での反射

前者では正の音が反射し、後者では負の音が反射する。

鋼の様な多結晶の場合、境界は音速と音響インピーダンス共に異方で、境界の前後で両方の値が異なる。その為、第5図の(a)様に例えば界面Aでは入射波Ainの一部が反射波Arとなる。B面では反射の際に反転したBrとなる。図の(b)はバックキングの様に細かな丸い粒子を固めた場合で、この場合粒子に入った音が、そのまま出ていく事もあるが、図のBinの様に1回反射し反転して出ていく場合や、Ainの様に二回反射し、反転+反転=正転して出ていく場合など色々な場合が考えられる。また(c)の様に元の接触点付近の面積の違いが等価音響インピーダンスの差となり、Arの様に振幅を反転しないで、反射する場合もあるし、Brの様に反転する場合もある。均質材の中では反転するか反転しないか、又その方向と強度はランダムと考えられる。

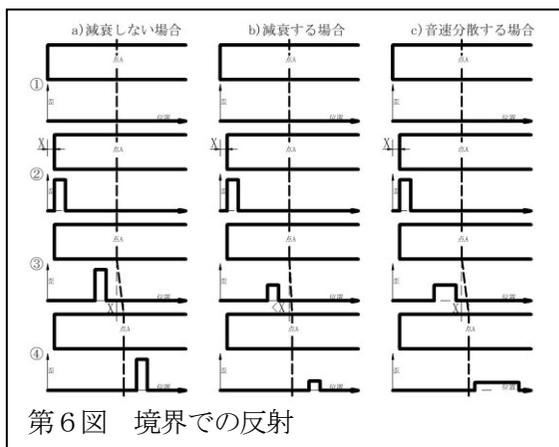
マクロに考えると、材料が実質的に均質な場合、第5図(a)の任意の点Aに来る音は、多くの散乱面からの反転しない波と反転した波で、色々な方向と強度の波が混じっている。従って点Aでの、各散乱面（又は散乱点）からの音の合計は

$$P = \sum P_n \cong 0$$

同様の考えで、点Aにおける粒子速度vも

$$v \cong 0$$

となる。重ね合わせの原理で音圧ゼロでも音が伝わる特別な時がある。粒子速度がゼロでない場合である。次回以降の連載で詳しく述べるが、粒子速度もゼロである事は重要である。

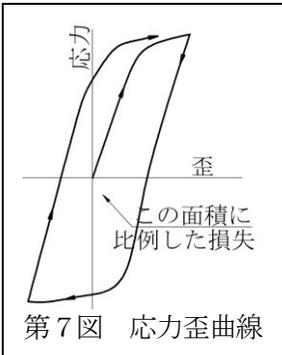


第6図 境界での反射

音波減衰都市伝説,信憑性,拡散減衰,音波の熱への変換,遅延減衰,散乱減衰

従って、点Aに対して各散乱面からの音は何の仕事もしない。Aは任意の点なので、任意の複数の点即ち曲線や面、振動子に対しても、何かの仕事をするような運動力（圧力）は発生していない。損失は起きていないのである。従って、同じ物質内の散乱で減衰が起きると考える事はできない。

荷物を押すとき、左右の手を握って、右手で押して、左手で同じ力引く状態で、荷物を触っても荷物は動かないし、荷物に対して何もエネルギーを与えていない。単に左右の腕の間で作用反作用が釣り合っているだけである。同じ物質内の散乱はこれと同様である。ただし、人が右手を左手に力を加えるとエネルギーを消費する。左右の手をバネなどに置き換えればエネルギー消費の無い事は理解できるであろう。



第7図 応力歪曲線

一方、例えば鋼材中にインクルージョン（異物）、或いは気泡が局所に入っている様な場合は

$$P = \sum P_n \neq 0$$

となるので、散乱エコーと呼ばれるエコーが観測され、実際に小さな介在物の検査などに使われている。碍子内のマイクロサイズの小さな欠陥は、ノイズ・エコーのレベルの盛り上がり、散乱ノイズの盛り上がりで判断している。

連載の初めの頃に述べた鶴巻バネを思い出そう。音は歪波、弾性波とも呼ばれ、歪を運ぶ。バネではなく、一次元の棒を考えて変位の移送の状況を復習しよう。無限大面積の棒？に端面から無限大有効幅の平面波を入れた状態を想像しよう。側面があるとモード変換、BEDなど厄介な現象が起き、現象の本質の理解が困難になる。側面の無い無限大物体の一部を考える。

音圧（内部応力） P と歪 δ の関係は、弾性係数を K として

$$P = K\sigma$$

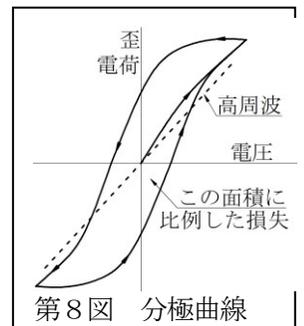
で示され音圧が小さくなると歪も小さくなる。第6図で歪は音圧と読み替えても良い。

図の様に減衰の無い材料と有る材料で出来た棒の側面を瞬時 t 押し、歪量 X を発生させる。 t が棒の音の伝播時間より十分小さい場合、②の様に歪が発生する。歪は棒の左端面付近にある。縦波音速でこの歪は伝搬する。途中で音が減衰しなければ、点Aを同じ歪量 X が通過し、 X だけ移動する。減衰する場合は、歪量は小さくなり、A点を通過する時 X より少ない量になり、移動量が減る。コルクだろうがスポンジだろうと、片面を押せば対面も含め移動すると言う一般事実と反する事になる。これは音が減衰する事から発生した矛盾である。前回述べたように、音速が分散するので、同図のc)に様子を描く。歪の総量は同じで、歪の幅が広がって伝わる。一般の探傷器等の場合、c)の④の状態はエコーとして表示されない。送信した時の周波数成分が減ったため、測定系の性質により「減衰して観測された」だけで一見(b)の様に観測される。受信帯域が広ければ減衰は観測されない。

◆ヒステリシスによる減衰

非破壊の対象の材料はほとんどが多結晶で単結晶と異なり、力と歪の関係にヒステリシスがある。第7図に交番応力を加えた場合の鋼の応力と歪の関係の例を示す。交番の周期や力によって異なるが、ヒステリシスカーブを描く。原因はミクロの転移で、繰り返し同じループになる場合もあれば、クリープ現象の様に戻らない場合もある。ヒステリシスカーブの面積に比例したエネルギー損失があるので、超音波の振動でも損失する可能性がある。

ミクロの転移と言う事では探触子に使う圧電振動子の分極曲線も同じようにヒステリシスカーブを描く。計測しやすい印加電圧に対する充電電荷（電流）が測定されている。



第8図 分極曲線

充電電荷は、内部の分極の反転量に比例する。分極の反転は歪なので、電荷=歪ともしても良い。分極操作は、焼成してユックリ冷まして内部残留応力が少ない振動子を内部の各所にマイクロの歪みを作る操作と言える。薄い振動子を

音波減衰都市伝説,信憑性,拡散減衰,音波の熱への変換,遅延減衰,散乱減衰

分極操作すると内部応力の変化により振動子が破損する事が良くある。一度分極した振動子を逆に電圧を加えて脱分極する場合も良く壊れる。振動子の分極電圧を、探傷器等の印加電圧は同じ極性にした方が探触子の寿命が延びる。分極曲線を第8図に示す。分極電圧の変化が速いと点線の様にヒステリシスは殆ど観測できない。PZT系振動子では数Hzでヒステリシスを観測できるようになるが、ポリマー系振動子では分単位の周期でないと観測できない。内部の分極の反転に時間を要する為と思われる。また印加電圧も、PZT系では百V/mm以下の電界から徐々にヒステリシスを示す。分極電圧の1/10でもヒステリシスカーブを観測できる。が、ポリマー系では分極電圧に近づかないとヒステリシスを計測出来ないし、ヒステリシスカーブは矩形に近い。

探傷器で振動子を励振する場合比較的大きな電圧が印加され、その度に分極が進むが、その量は僅かで気づく大きさではない。探傷器に接続してパルサー電圧で分極が進んでも、電圧印加を止めるとジワリと元に戻るし、温度(ランダム振動)により進んだ分極が無くなる量が大い。

振動子や鋼の様な多結晶体に音が入ると、歪に変換する場合もあるが、他方既にある歪が開放される事がある。どちらが多いか疑問だ。

分極された圧電振動子に、その分極電圧に近いバースト波電圧を印加すると、波数が多くなると、厚さの共振で音の振幅が増え、数秒の内にはほぼ完全に脱分極する。無理やり分極で内部歪が溜まっていた状態から、ある点を起点に数秒間のドミノ倒しの様に脱分極が起きる。入力音波のエネルギーより遥かに大きな歪エネルギー(音)が解放される。一種の音の増幅器である。

鋼などの内部のミクロの歪みの圧力は100MPa程度と言われる。圧延鋼の引張強度は450MPa程度で、通常の非破壊用探触子から出る音圧は大気圧の1/10(0.01MPa)以下なので、比べものにならないくらい弱い。ヒステリシスによる減衰は有るであろうが、減衰として観測できるレベルではないと言える。

樹脂は機械的ヒステリシスが大きく、音の減衰の原因と考えられよう。

◆あとなぎ

境界面凸凹などによる減衰はあり、紙面の都合で書かない。後の回で薄膜や接着層の話と共にする。減衰と音速に関してはもっと述べたいこともあるが、取りあえず終わりにする。次は重ね合わせの原理に関して述べる。

◆今回知った事

- (1) 拡散減衰は有る。
- (2) コンクリートのジャンカや探触子のタングステンバックキングで、散乱波は観測されない。
- (3) 観測者に音としての意味があれば音、でなければ熱(雑音)
- (4) 一般に散乱エコーと呼ばれるエコーは、小さな欠陥=不連続だ
- (5) 通常の探傷器等で観測される減衰は、受信計測帯域幅によるフィルターの影響である
- (6) 物質の応力ヒステリシスによる減衰は有るであろうが、非破壊領域では計測できる量ではないであろう。
- (7) 通常の探触子から出る音の音圧は0.01MPaと100MPaを超える鋼材の強度に比べ極弱い。

<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)

IUS2012 Doersden 423 4I-4 Wave Propagation Simulation in Coarse Grain (attenuative) Materials