

# 音波のよもやま話 (その28)

## 音波の音速と減衰 (4) 減衰その1

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

### ◆はじめに

前回までの連載で主に音速の話をした。今回から減衰の話をする。

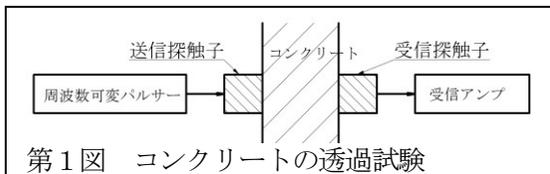
### ◆周波数可変型パルサー

1980年代に探触子励振電圧の周波数を自由に変えられるパルサーがドイツの超音波機器メーカーから発売された。計測帯域は通常の広帯域探触子の100%より遥かに広い。これを使って、コンクリートの試験がされた。骨材が20mm程度と大きく、小さな振動子では、探触子を当てる

結果は建築学会で一部発表されている。大きな面積の探触子に因る第1図の透過試験現象の概要は以下となる。

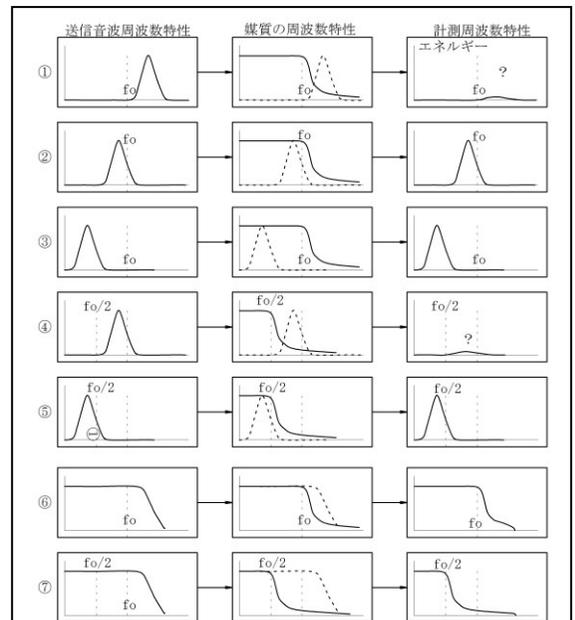
- 1) コンクリートは特定の周波数 (以降カットオフ周波数  $f_0$  と呼ぶ) 以上では超音波は減衰するが、その  $f_0$  周波数以下では減衰せず透過する。
- 2) 同じコンクリート材質で厚さを変えると、カットオフ周波数  $f_0$  は概略厚さに反比例する。

模式図で書くと第2図の様になる。送・受信探触子径は骨材径より十分大きな場合である。図左は送信される音の周波数特性、図中央は媒



カットオフ周波数とは遮断周波数とも呼ばれ、応答の限界周波数を言う。物理や電子工学では通過帯域に対して半分のエネルギー (-6dB、電圧信号で-3dB) が通過する周波数を言う。探触子の中心周波数は、高域側カットオフ周波数と低域側カットオフ周波数の平均と規定されている。

位置により、石に当たったり当たらなかったりと波形変動 (減衰) が起きる。これを無視する為、複数の小さな探触子の同時励振同時受信する一種の開口合成手法や径が  $76\phi$  と大きな振動子 (振動子面で開口合成) が使われた。その



周波数可変型パルサー,コンクリートの音の減衰,コンクリート切片の音の透過,粒界サイズと周波数特性,電気回路による減衰の模擬,LTSpice で伝播時間差計算

質の周波数特性、図右はコンクリートを通過した音の周波数特性である。

図の①の様にコンクリートのカットオフ周波数  $f_0$  より高い周波数の音を与えてもコンクリートの反対側では弱い透過音しか観測されない。カットオフ周波数より僅かに低いと殆ど減衰せずに観測される②。③の様にもっと低い周波数で送信すると、矢張り減衰せずに観測される。但し、受信の周波数特性の低域側が十分伸びている場合である。低周波探触子は電氣的等価インピーダンスが高い為、受信アンプの入力抵抗を可なり大きくしないと低域が伸びない。

次に同材質のコンクリートで厚さを増やした場合、例えば2倍の場合、④の様に②で透過した  $f_0$  の音が透過しないが、元の厚さのカットオフ周波数  $f_0$  の半分より少し低い周波数の音を送信すると、⑤の様に透過する。

さらに⑥⑦のように送信音を狭帯域ではなく、広帯域にしたらどうなるかを後年試した。広帯域探触子をステップ関数・パルサー又はスパイク・パルサーで励振した。ほぼ材質そのものの減衰(周波数)特性が観測される。実はこの手法は大昔から鋼材の粒界サイズを非破壊測定する方法としても実用化されていた。また、これはインパルス音応答と呼ばれる材料の周波数特性の計測方法でもある。周波数の異なる探触子を何個も使用して、周波数による減衰を測る必要が無い。一個の探触子で材料の周波数特性を知ることが出来る。

十分低い周波数は必ず容易に透過するが、低い周波数ほど時間分解能が悪くなるし、ビームの指向角も広がるので、 $f_0$  より少し低い周波数が一般非破壊検査で平面状欠陥検出能の高い周波数と言える。散乱エコーの多い状況でもこの  $f_0$  より少し低い周波数では散乱エコーも減る為、SN 良い探傷ができる。小さな傷の検査をしたい場合、無暗に周波数を上げて散乱エコーが多くなるだけで、必ずしも小さな欠陥が検出できない。まずはカットオフ周波数  $f_0$  を知る事が重要である。

①から⑤の現象を元に、コンクリート検査用の周波数可変検査装置 ULCON3 との名称で国

内生産された。最初高い周波数に設定しておいて、透過波形又は反射波形を観測しながら、周波数調節つまみを回して周波数を下げていき、目的の波形が十分観測したら、そこで周波数調整を止め、検査していた。受信時の電氣的 SN を良くするため、アンプの周波数帯域も送信周波数と連動して変化するように設計されていた。例えば 100kHz で送信するときは、受信帯域は 50~150kHz に自動的に設定される。コンクリートでも昭和初期に作られた古いコンクリートはカットオフ周波数が非常に低く、場合によっては縦波成分が観測されない。殆どが横波に成分となり、波の種類を勘違いして間違った音速を求める事もあった。適切な周波数を知るのは、意外と面倒だった。そこで、第2図の⑥⑦の原理に基づく装置が販売された。受信アンプは広帯域なので、その帯域が広い分 SN が下がるかと思いきや、むしろ SN が良かった。それまでは受信された有用信号の全てを増幅して表示せずに捨てていることに気が付いた。(可変周波数アンプの入力インピーダンスが低く、その影響で低域感度が落ちている事も 10 年後に判った)

即ち、減衰現象を把握するには、出来るだけ広い帯域が必要なようである。特定の周波数に対し減衰量が知りたい場合は、その特定周波数の送信と受信をすればよいが、減衰現象全体を把握するには成るべく広帯域にする必要がある。特定の周波数でバースト励振すると、共振現象が強くなる事もあり、広帯域パルス波の現象と異なる結果になる事が多い。広帯域な超音波を出し、且つ広帯域受信すれば、簡単に音は通過するし、同時に材質の音波特性が分かる。また、受信波の周波数は透過する最大周波数=カットオフ周波数  $f_0$  程度が主となるので、時間軸分解能も対象材料に対して最良の結果となる。材料自体がフィルターの役目を果たし、何も人工的に周波数調整する必要性はなかったわけである。

一般に広帯域探触子の方が、狭帯域探触子より減衰材に向いていると言われる。その一因はこの減衰特性である。

周波数可変型パルサー,コンクリートの音の減衰,コンクリート切片の音の透過,粒界サイズと周波数特性,電気回路による減衰の模擬,LTSpice で伝播時間差計算

なお、非破壊検査では広帯域と言うと帯域幅 100%程度のことを言う。一般計測では例えば周波数下限が 10kHz で周波数上限が 10MHz と書いた帯域幅が 200%に近いことを指す。一般電子技術者にとって、帯域幅 100%は狭帯域である。コンクリートの場合非破壊検査で言う「広帯域 100%」では良い結果は得られず、帯域幅は 200%近くが必修である。カットオフ周波数が対象により激しく変化するからである。例えば新設した 30 cmのコンクリート厚さのカットオフ周波数は 100kHz 程度のであるが、昭和初期のコンクリートは 20kHz 程度と差は 5 倍であった。

帯域幅 200%の送信を実現するには、以前の連載にも書いた音のインパルス応答を測定するのが一番正しい方法である。音のインパルスが発生するには、広帯域探触子を電圧でインデシアル応答をさせればよい。具体的にはデュレーションの長いスパイク型パルサー又はステップ関数電圧の印加によりインパルス音が発生できる。勿論インパルス音に含ませたい最大周波数成分の周波数で、駆動回路の出力インピーダンスは探触子のそれより十分低い事が必要となる。多くの高減衰材を対象にした場合 MHz 帯域は殆ど通過しないので、探触子は必然的に低い周波数で電氣的インピーダンスの高い探触子となり駆動力の悪いパルサーでも十分と考えがちだが、内側 BED の影響を避ける為、或いは骨材や粒界などの影響をさける為大きな送信振動子径が必要な場合が多く、駆動特性は十分検討する必要がある。受信側では振動子容量とアンプの入力抵抗により電氣的低域側カットオフ周波数が生じるが、出来るだけ直流近くまで観測する様にすることも重要である。

鍛冶屋や大工がハンマーで叩いて材質の種類や物の良し悪しを判断する。この場合叩いた時にインパルス音が発生して、相手の材質や亀裂などの状態次第で、異なる音色が聞こえる。昔からインパルス音による判定は行われてきたのである。今まで電子技術が追い付かなかったとも言える。

標準的市販探傷器やパルサーレーザと市販広帯域探傷器の組み合わせで帯域幅を 100%程度にする理由は、振動子の横振動成分、探触子内や材料表面などからの反射、モード変換波を排除する為である。振動子は必ず横振動しており、半径相当の周波数成分が強く発生する。また、その周波数の受信感度も高い。例えば 5MHz 6 φ では 5MHz の他その 1/10 の周波数付近の送・受信感度が高い。探触子ケースは数 k~100kHz に共振が発生する。

減衰の少ない材料の極微細欠陥検出用には帯域幅 30~70%と狭い高 SN を謳った専用探触子が作られている。

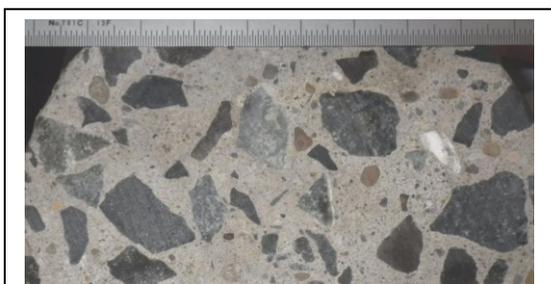
ここで一つの疑問である。元々広帯域の送信音波に含まれている高周波成分がカットされると、その成分のエネルギーが減って、透過した信号の振幅は下がるのでは？との疑問である。実際実験すると、大きくは減らない。どうも高周波成分エネルギーが低周波成分エネルギーに変換されていると考えるのが妥当である。

#### ◆コンクリート切片

コンクリートは 5~20mm程度の碎石と砂、セメントを 6 : 3 : 1 程度の重量比で混ぜ、水で練って固めたものである。日本では大半が碎石で、隙間を砂とセメントの混合物（モルタル）で埋めた構造とイメージするのが良い。セメントは水と反応し固化する。コンクリートの音速は 4000~5000m/s で、音響インピーダンスは 8~13MRayls である。混ぜる碎石の性質や水とセメントの重量比で変化するが、碎石単体の音速は 3000~6000m/s、その音響インピーダンスは 8~16MRayls 程度である。砂とセメントが固まった状態のモルタルは音速が 3500m/s、音響インピーダンスは 10 MRayls 程度である。

周波数可変型パルサー,コンクリートの音の減衰,コンクリート切片の音の透過,粒界サイズと周波数特性,電気回路による減衰の模擬,LTSpipe で伝播時間差計算

実際に第3図の現場施工されたコンクリートから石より薄い 7.5 mm厚さ切片を切り出し、第1図同様の配置接続で、透過法で音の伝搬を観測した。使用する送信探触子は 24Φ5MHz 広帯域、受信 6Φ20MHz と小さくした。第4図(a)は丁度大きな石の部分で、裏表とも石が見えて



第3図 コンクリート断面



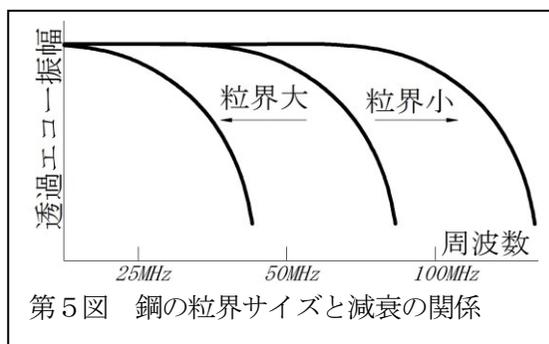
第4図 コンクリート切片の透過試験

いて、そこに接触させて透過エコーを観測した。多重エコーが観測される。(b)は両面モルタルの部分で、(a)に比べ伝搬時間がかかっている。周波数も少し落ちている。(c)は片面が石で、反対面がモルタルの部分で(a)(b)の中間的伝搬時間である。僅か 7.5 mm程度の厚さを伝搬すると、早いところでは 1.35us、遅いところで 1.65us と、測定箇所によって 20%程度の伝搬時間差が発生していることが判る。前述の碎石やモルタルの単独の音響特性から考えられる範囲の値である。使った受信探触子の振動子径はΦ6 で、これをもっと大きい例えば 40Φ振動子径の探触子では、どこでも似た伝搬時間としか計測できないし、受信音圧信号強度も落ちる。大きな面積にすると、その面積の色々な伝搬時間の音

が受信時に振動子面開口合成の結果、平均的な波形が観測されるが、伝搬時間の半波長違うエコーは互いに消しあい、少し違うエコーは低い周波数になり、減衰して観測される為と考えられる。

#### ◆鋼の場合

鉄の場合、同じ材料を圧延していくと、粒界が小さくなり、それに逆比例して減衰が少なくなることが知られている(第5図)。厚板は出荷段階で、粒界サイズを顕微鏡でマクロ観察して、出荷して問題ないサイズかどうか確認することがある。この場合試験片を研磨して顕微鏡で人



第5図 鋼の粒界サイズと減衰の関係

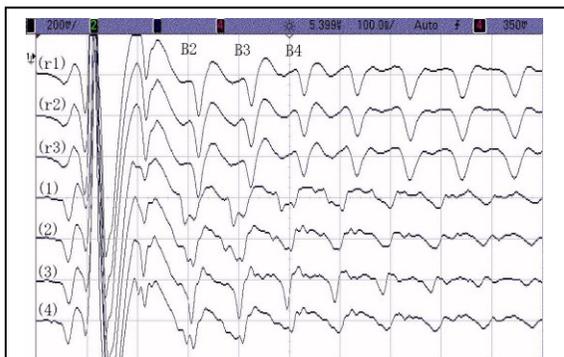
が観察するのは時間とコストがかかるので、超音波の減衰により粒界を推定する手法がとられた。筆者が設計した装置では帯域幅 100%の探触子を 5 個使い 2MHz~80MHz 程度をカバーし、数ミクロンから 0.5mm 程度までの粒界サイズを推定した。1980 年代後半当時は探触子の帯域幅 100%が限界だったが、現在では 200%帯域を実現できるので、1 個の探触子で計測できる事は判っている。

一般に材料の周波数特性から粒子径など物性を知る方法をスペクトロスコピーと呼んでいる。

前述のコンクリート同様、粒界に近い厚さの切片を作り音速を測った。市販で手に入る SUS304 の 0.3 mm厚さの板を比較として、同じ厚さの粒界が 0.5 mm程度の SUS430 ビレットの中央付近から作った切片を測定した。探触子は 2x2mmの平面 Fr100MHz を使った。Φ2 程度の範囲で数点測定した。第6図の(r1)~(r3)は

周波数可変型パルサー,コンクリートの音の減衰,コンクリート切片の音の透過,粒界サイズと周波数特性,電気回路による減衰の模擬,LTSpipe で伝播時間差計算

SUS304 の多重エコーで高周波成分が無く、どの位置でも同じ様な波形が観測される。一方(1)~(4)の SUS430 では高周波成分が観測されると同時に波形が激しく変化している。多重エコーは比較的早く減衰する。多重の時間間隔、例えば B2-B3 間を測定すると、(r1)~(r3)はほぼ一定であるが、(1)~(4)はばらつく。



第6図 0.3tの多重波形

位置番号	0.3mmt	0.6mmt	1mmt	3mmt
1	5.387	5.910	5.249	6.004
2	5.270	5.937	5.202	5.998
3	5.339	6.160	5.249	6.004
4	5.114	6.131	5.202	6.004
5	5.224	5.991	5.156	5.936
6	5.179	5.831	5.321	5.998
7	5.179	6.074	5.202	5.992
8	5.136	5.937	5.297	5.998
9	5.202	6.102	5.179	5.992
平均	5.226	6.008	5.228	5.992
平均偏差	0.071	0.097	0.045	0.012
標準偏差	0.091	0.113	0.055	0.021
偏差比	1.7%	1.9%	1.0%	0.4%

表1 小さなセンサーでの音速測定結果

同じ SUS430 で 3 mm の厚さの切片を作り、薄くしながら測定し、0.2 mm、0.3 mm、1 mm、約 3 mm の 4 種の厚さを測った。探触子は Fr65MHz3Φ 12.5R のフォーカス探触子でフォーカス径は 0.2 mm、フォーカス深度は金属中 0.5 mm 程度のものである。結果を表 1 に示す。0.2 と 0.3 mm の場合は B2-B4 間、1 mm と 3 mm では B1-B2 間とした。薄い場合、測定できない波形も多く、その位置付近で測定できる部分を探し測定した。

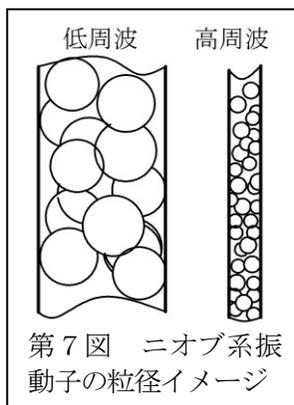
74.5 mm 厚さの大きな元の試験体を B1-B2 法で測定したら、5MHz20Φ で測定したら、音速は 5992±2m/s の範囲であった。

通常材料中は音速一定として考えるが、一般材料ではそうはいかない様である。鉄も粒界の集まりで、その方向で 10% 程度音速が異なる。圧延材では鉄の結晶が圧延方向に向くことが多く、圧延方向とそれに直角方向で異なる音速が観測され、音響異方性と呼ばれる。斜角探触子の屈折角が音速で変化する為、建築の溶接部検査では前もって音速異方性を確認してから斜角超音波検査が行われる。単結晶ではそれぞれの方向の音速測定が容易で、例えばシリコン結晶の場合方向により 7500m/s~9000m/s の音速と 10% 以上の開きがある。

ニオブ酸系広帯域用の振動子は、振動子自体で減衰特性がある。振動子を音が一往復する時の振幅変化率の逆数を Q 値 (Quality Factor) と言う。広帯域用振動子の Q 値は 10~30 程度である。音の一往復での減衰率は逆数なので 10~3% 程度と言う事である。例えば 10MHz 探触子を直ぐに作りたい時、2MHz の振動子の在庫があったら、それを研磨して薄くすれば 10MHz の探触子ができる。が、このニオブ酸系広帯域振動子の場合、研磨すると、Q 値が変化し、場合によっては振動子としての機能が無くなる。これは振動子の材料を仮焼成する時に、周波数により粒界サイズを変えている為である。第 7 図の様に低周波の振動子は粒界サイズが大きく、高周波の振動子は粒界サイズが小さい。出来た

振動子が出荷基準の Q 値になる様に調整している為である。

余談だが、広帯域の探触子を作るには、Q 値が高い例えば PZT 系の振動子でも、それと音響インピーダンスが同じバックギング材を貼れば広帯域化で



周波数可変型パルサー,コンクリートの音の減衰,コンクリート切片の音の透過,粒界サイズと周波数特性,電気回路による減衰の模擬,LTSpice で伝播時間差計算

きる。がバッキング材の温度特性変化が激しく、 $0^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ の一般使用温度範囲で常に安定した広帯域とならない。その為  $Q$  値の低い振動子を使わざると得ない。

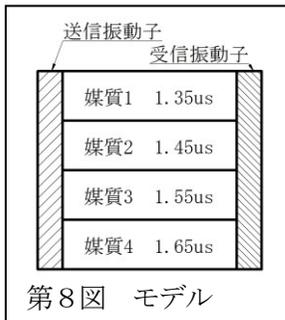
なお、鋼材の元になるインゴットの状態では粒界が数  $\text{cm}$  に達するものもあり、普通コンクリートより大きな減衰を示し、超音波非破壊検査が出来れば大きな市場があるが、 $\text{MHz}$  帯を使う非破壊超音波探傷器では不可能である。このインゴットの物性では反射法超音波検査は不可能であろう。S エコーを引き算する方法では可能性がある。透過法では  $100\text{kHz}$  以下の周波数で可能である。

### ◆時間差のモデル

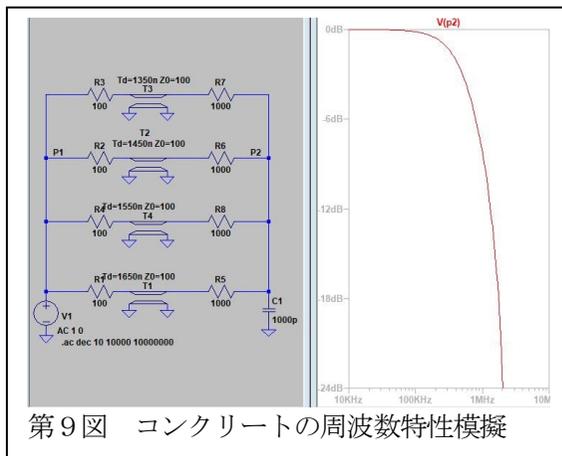
第3図のコンクリート切片での測定結果をもとに、大きな一個の受信振動子で観測したらどうなるか、その周波数特性を知るにはフリーのシミュレーションが手に入る電気回路によるアナロジーが簡便である。前々々回使ったフリーのソフトウェア LTSpice を使って、周波数特性

を求めてみる。第8図の様に単純化して、送・受信探触子の間に4本の柱があって、それぞれが前の計測結果の  $1.35\mu$  から  $1.65\mu$  秒の伝播時間とする。実際には屈折も起きるが、送・受信は平面振動子なので、屈折の結果遅れた分も計測結果には含まれていないはずである。また、経路は沢山あるだろうが、4つで代表してもらう。試してもらうと判るが、増やしても結果は大して変わらない。

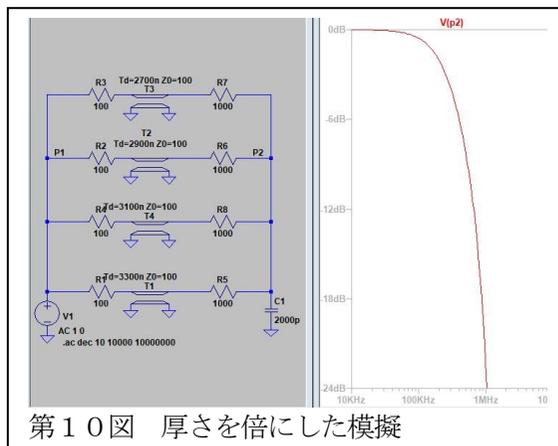
LTSpice で周波数特性を求めた結果が第9図である。図の左は等価回路、図の右は周波数特性計算結果である。高い周波数は通らず、低い周波数は良く通す。第4図のコンクリートの周波数可変パルサーによる結果と全く同じである。 $-3\text{dB}$  のカットオフ周波数は  $800\text{kHz}$  と読める。各柱の中で減衰は無いが、遅延時間の異なる柱



第8図 モデル



第9図 コンクリートの周波数特性模擬



第10図 厚さを倍にした模擬

の信号が加算されると、振動子面でカットオフ周波数が発生する。大きな面積の  $5\text{MHz}$  探触子では感度が極低いのも頷ける。

材料が厚くなると、カットオフ周波数が下がる事も確認できる。厚さが2倍になったとして、 $1.35\mu$  秒などの値を全て倍にする。その結果は第10図である。カットオフ周波数は半分の  $400\text{kHz}$  になっている。冒頭の1980年代のコンクリートの送信周波数と透過波検出の特性に関する経験と一致した。第8図の各柱を伝搬する音は減衰したわけではなく、観測点で伝搬時間の異なる音（大きな振動子で）同時受信すると、信号が一見減衰して観測されると判った。一般に観測される音の減衰は音速の分散が主原因の一つと言う事である。大きな振動子で受信する状況を一般的に「開口合成」と呼ばれる。

周波数可変型パルサー,コンクリートの音の減衰,コンクリート切片の音の透過,粒界サイズと周波数特性,電気回路による減衰の模擬,LTSpice で伝播時間差計算

アレイ探傷装置は複数の振動子で受信した音圧波形の電気信号を電氣的に開口合成している。中身的には各素子で受信されたエコー波形の足し算である。大きな振動子は振動子電極で電荷を足し算して、開口合成している。1-3 コンポジット振動子では、各 PZT 柱で発生した電荷を電極で開講合成している。なお、開口合成は合成開口とも呼ぶ。

#### ◆音速測定と精度

音速の分散が減衰の原因であろうことが判った。音速を測定するには伝搬時間を測定し、その伝搬距離を測れば、計算する事が出来る。が、音速が分散する様な状態では、平均値を求める事も難しい。

基本的には減衰が観測されない周波数、即ち音速分散が観測できない様な周波数で、伝搬時間を測定する事になる。アルミ、鋼など金属では比較的正しい値が求まるが、鋼でも粒界が粗らかったり、コンクリートの様に作るサイズで特性が変わるものでは、減衰が観測されない様な周波数の波長は試験体サイズに比べ十分短くなく、時間計測精度を得られない。また、固体では横波成分や側面などの反射波が縦波の中に含まれる場合もあり、伝搬時間を測る事自体が不可能な場合もある。

絶対値としての音速の測定は難しいと思った方がよい。

#### ◆あとがき

多くの物質の減衰が観測される主因は音速分散と振動子面での開口合成の結果と言う話をした。次回は減衰が大きいと言われる材料を中心に話す。

#### ◆今回知った事

- (1) コンクリートは特定の周波数（以降カットオフ周波数  $f_0$  と呼ぶ）以上では超音波は減衰するが、その周波数以下では減衰せず透過する
- (2) 同じコンクリート材質で厚さを変えると、カットオフ周波数は概略厚さに反比例する

- (3) 限界に近い小さな欠陥の検出にはカットオフ周波数を知ることが重要である。
- (4) 帯域幅は 200% 近くでないと言音のインパルス応答で減衰特性は測定できない
- (5) 一般探傷目的では 30~100% 程度の帯域が良い。
- (6) 粒界の大きな鋼材の減衰は大きく観測される。
- (7) 減衰の主因は音速の分散と振動子面の開口合成
- (8) 1-3 コンポジット振動子では、各 PZT 柱で発生した電荷を電極で開口合成している。

#### <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)

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