

音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速, 固体に於ける音速の式,共振法による音速測定, パルス法による音速測定,BED

音波のよもやま話 (その26)

音波の音速と減衰 (2) 音速 1

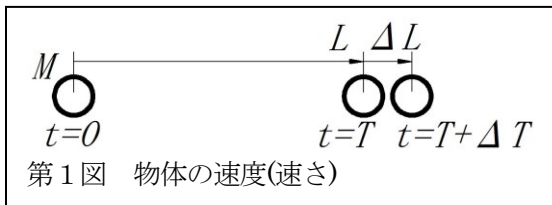
楠アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

前回の続きで音速と弾性率の関係を述べる。まずは物体の速さの話から。

◆速さ、速度

第1図の様に物体が一定の距離 L を移動するのに時間 T かかったとすると、平均速さ V_a は以下の式で定義される。



$$V_a = \frac{L}{T} \quad \text{式(1)}$$

物理や力学では「速度」は方向を持ったベクトル量であり、その意味を明示して速度ベクトルとも呼ぶ。速度ベクトルの大きさを「速さ」と呼ぶ。「速さ」の様な方向の無い量はスカラー量と言う。一般には速度と速さは区別しないで使っているの、読み手が適切に判断する必要がある。物体の重さ M とその運動エネルギー Em を使うと、

$$\sqrt{2 \frac{Em}{M}} = \sqrt{\frac{M V_a^2}{M}} = V_a = \sqrt{\frac{\text{動かすもの}}{\text{動かされるもの}}} \quad \text{式(1)}$$

と書ける。動かすものは運動エネルギーであり、動かされるのは重さである。2 を除けば、音など速度の一般的形式と同じである。音のエネルギーはミクロ的には運動エネルギーと圧力エネ

ルギーに等分配されるので、それを考えると同じともいえる。

距離が十分小さい ΔL の方向を持った区間とした場合、移動するのにかかる時間 ΔT とすると、位置 L に於ける速度 V は以下で示される。

$$V = \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad \text{式(2)}$$

速度を計測する場合、 ΔL や ΔT を小さくするのに限界があって、それぞれの速度の使用目的に対して十分短い値にしている。自転車に付ける速度計はタイヤの1回転ごとの計測で、 ΔL は 24 インチタイヤで 2m弱毎での計測である。なお、表示間隔は必ずしも計測間隔と一致しない。物体の速度は光速に近づかない限り、また、物体が小さくない限り、同じ形の物体の移動なので、速度 V は一義的に定義される。

◆同軸中の信号速度、光の速度=光速

ここで電磁波の速さの話をしておく。電子回路や振動子とそのケーブルなどは電気信号が伝わって動作するので、その影響があるののかないのか判断するにも知る必要がある。真空中の光、速さ c_0 は 1729 年にブラッドリーが星の光行差から、1849 年にフィゾーが高速回転歯車で、1950 年にフーコーが高速回転ミラーで測定され何れも約 30 万 km/s で、回転ミラーを改良して 1926 年に米国のマケルソンが 299796 ± 4 km/s と測定された。スコットランドのマクスウェルは彼の電磁波論から以下の式で導き、フ

音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速,固体に於ける音速の式,共振法による音速測定,パルス法による音速測定,BED

イゾーの測定値に近い事から光と電磁波は同じではと提唱した。

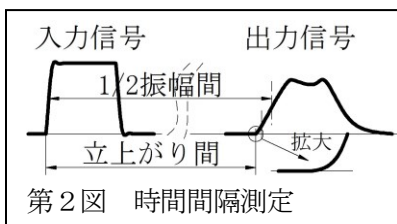
$$c_0 = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \text{式(3)}$$

ϵ_0 は真空の比誘電率 $8.85 \times 10^{-23} \text{F/m(N/V}^2\text{)}$ 、 μ_0 は真空の透磁率 $1.26 \times 10^6 \text{H/n(N/A}^2\text{)}$ で計算すると 29万9千 km/s となる。プラスチック、ガラスや振動子の様な誘電体の中での速度 c は、その誘電率 ϵ と透磁率 μ 或いは、真空を基準にした比誘電率 ϵ_0 、比透磁率 μ_0 を使うと以下となる。

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon \mu}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \approx \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{式(4)}$$

比誘電率 ϵ_0 は1より大きい。比透磁率は一部の物質を除いて、ほとんど1に近いので、上式のように多くの場合、比誘電率だけで近似する。鉄の比透磁率は 200000 と大きい、炭素鋼では 100、ネオジウム磁石で 1.05、アルミ、銅、水、プラスチック、コンクリートなど大半の物質はほぼ 1.000 である。一方比誘電率は空気など気体や多孔質体以外は大半 2 より大きく、水は 80、同軸の絶縁体に使うポリエチレン 2.3 程度、遅延材に使うポリスチレンは 1.5 である。水分により異なるがコンクリート 6~10 程度。振動子は PZT など 5000 を超えるものがある。PZT 製 1-3 コンポジット振動子の比誘電率は PZT の 1/10 程度と小さいが、実際には電極間を PZT の柱が繋がっているの、電磁波の速度を PZT と同じと考える必要な場合がある。

市販 50Ω の同軸を信号が伝わる場合、電子が流れるのではなく、同軸の銅線内に多数の電子があり、同軸の片側に電子が入ると、反対側から電子が押し出される様なイメージで、この速度は電磁波(光子)の同軸誘電体中の速度と一致する。しかし、誘電体の周波数特性の為に、



一致せず、どこからどこまでを伝搬時間とするかにより電気信号の速度の計測結

果は変わる。オシロスコープなどでは時間間隔を自動で測る機能があるが、殆どの場合振幅の 1/2 点間を測定している。共振体として利用する場合の共振周波数や、単なる電気信号の伝播時間を測定するには振幅の 1/2 点間は良いが、パルス信号の立ち上がりの間隔から求められる速度、前面速度(Front Velocity)を求めるのは大変だ。急な立ち上がりが発生するには膨大なエネルギーが必要で入力信号でさえ訛る。非破壊検査では画面は元の RF 波形を全波整流して表示しているし、精々画面幅の 0.5% の精度で読めば十分なので、比較的観測しやすい立ち上がり、即ち前面速度を用いている。通常同軸は数 GHz までしか使えない。最近話題の THz を超え、405~890THz の高い周波数の電磁波=光のガラス中の速度は、周波数により変化する。一般的に分散と言っている。プリズムで色が 7 色になる現象である。音は周波数による音速分散が無いと考えられている。

◆音速の一般形式

大気の音速は湿度により変わるが、乾燥空気の場合

$$c \approx \sqrt{\frac{kP}{\rho}} = \sqrt{\frac{kRT}{M}} \quad \text{式(5)}$$

ここに k は比熱比で大気は 1.4、 P は大気圧、 ρ は比重、 R は気体常数 287J/kgK 、 T は絶対温度、 M は大気平均分子量で 2.89g/mol

固体中の平均音速 c は体積弾性率 K と密度 ρ して以下である。

$$c \approx \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

気体は体積を半分になると、圧力は 2 倍になるので P は体積弾性率そのものである。音はそのエネルギーが熱に変換されず断熱的に伝わる。即ち音のエネルギーが各分子の三次元 XYZ 方向の単純移動運動には分配されるが、回転運動には分配されない。その為、実質的弾性率が増える。 kP が気体の(断熱)弾性率となり、気体も液体と同じ形式の式になっている。

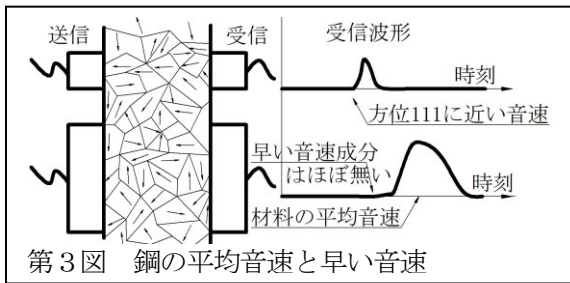
$$c \approx \sqrt{\frac{\text{弾性率}}{\text{比重}}} \quad \text{式(6)}$$

音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速, 固体に於ける音速の式,共振法による音速測定, パルス法による音速測定,BED

比重は単位重さと考えてさしえない。固体の場合には前回の話で、弾性率がいくつもある。細長い棒状の場合はヤング率と言う。棒の長手方向に伝わる音の音速は波動方程式を解けば求まるが、結果のみ示すと

$$c \approx \sqrt{\frac{\text{ヤング率}}{\text{単位長さ当たりの重さ}}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{式(7)}$$

が平均音速である。平均音速と平均としたのは、長い棒を共振させたときの長手方向共振周波数から音速を求めた時の音速を意味している。パ



第3図 鋼の平均音速と早い音速

ルス音を長い棒の端面に入射して反対側で受信し、波形の立ち上がりを測った場合の前面音速ではない。長い細い棒状鋼、例えばアンカーボルトの長さ検査では、端面エコーの立ち上がりを測定しているが、これは前面速度で、後述の無限大媒質中の縦波速度程度である。

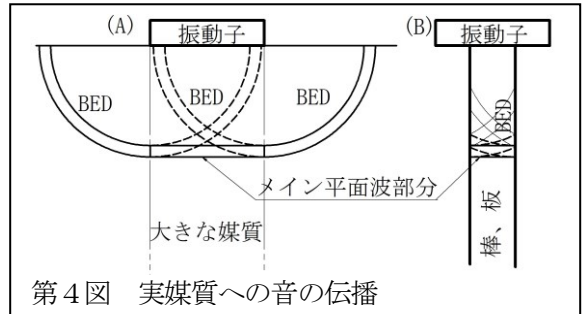
◆固体力学における音速の式

固体力学では線形で等方性の材料で微小変位の場合、近似式として平面波の縦波音速 Cl と横波音速 Ct は体積弾性率 K と剛性率 G を使って、比重を ρ として

$$Cl \approx \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad \text{式(8)}$$

$$Ct \approx \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{式(9)}$$

であることが知られている。これらは平均音速



第4図 実媒質への音の伝播

である。ヤング率とポアソン比で表せば

$$Cl \approx \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2\nu^2)}} \quad \text{式(10)}$$

$$Ct \approx \sqrt{\frac{E}{2\rho(1-\nu)}} \quad \text{式(11)}$$

ヤング率は比較的簡単に測定でき、ポアソン比もひずみゲージなどで測定できるが、大半の材料は約 1/3 である。上式でポアソン比が 0.3 と 0.33 で Cl は 4.5% Ct は 2% 程度の差になる。これらの音速はマクロの計測値、ヤング率などに基づく音速で、平均音速を意味する。前回述べたように鋼は多結晶で、結晶のヤング率は、方位 111 で 278GPa、方位 100 で 132GPa と差があり、当然音速も異なる。通用の鋼材は小さな結晶がほぼ均一に分布している為その平均ヤング率 208GPa 相当の「平均」音速を示す。一般には「平均」を付ける事は無い。第3図上の様に音速計測装置の送・受信間に偶々鋼の方位 111 結晶が連続している部分が繋がり、その繋がり部分のセンサーの受信面に占める割合が大きいと、平均音速より早い前面音速を測定する事になる。一般に鋼の音速を測る場合、同図下の様に、粒界より十分広い面積のセンサーで且つランダムに配置された沢山の粒界を通過する為、どういう装置で誰が測っても似たような受信エコー波形となり、平均的音速が測定される。

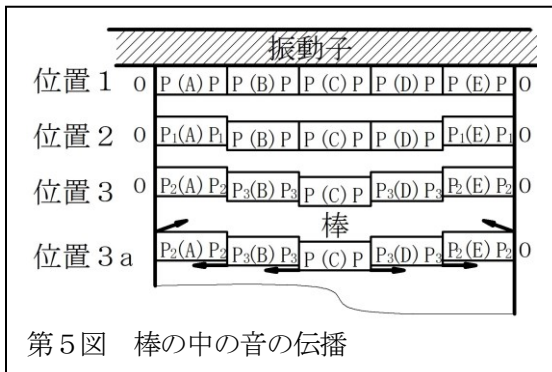
◆無限大と有限媒質での音速

無限大の大きさの均質な媒質中での無限大平面波の音速は前項で示されたが、非破壊では音は有限幅の探触子から送信される。第4図 (A) の様に媒質は送信ビーム (平面波と BED) より

音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速, 固体に於ける音速の式,共振法による音速測定, パルス法による音速測定,BED

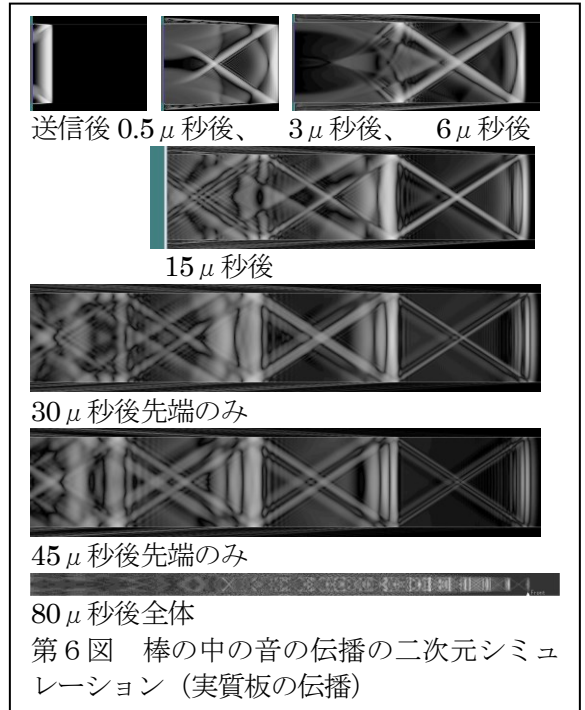
十分大きい場合もあるし、(B) の様に平板状や棒状でビームが直ぐに側面に当たる場合も多くある。(A)の場合先端の平面波は式(8)で示される音速となるが、(B)の場合も同じではないのか？

第5図の様に探触子から丸棒に音が下に向かって出た直後の状況を考える。本来はもっと細分化すべきだが、考えやすいようにビームを5個に分けて考える。また、側面反射波とBEDは除いた。音が出た瞬間の位置1では中央(B) (C) (D)の側面音圧はそれらの左右の部分の音圧と同じなので、音は広がらない。側面を拘束され



た状態の弾性率状態である。一方両端の(A) (E)はその外側の音圧がゼロなので、広がろうとする。側面が無い分実質的弾性率が下がり、結果音速が遅くなる。片側がヤング率と同様の弾性率で束縛されていない状態と言える。

位置2にきた時にはその分遅れ、また BED



の発生分音圧が更に下がって P_1 となる。(B)(D)の(A)(E)に近い部分は隣の P_1 音圧が自身より低いので外側に広がろうとする。中央(C)の両側は同じ音圧なので、次の位置3では中央のみ縦波音速で伝搬する事になる。先端中央が弱い音が縦波音速で伝搬し、側面近くの先端音は遅れることになる。なお実際には位置3a の様にと問えば(c)の先端部分は左右端の外側の音圧がゼロなのでBEDが発生するし、BEDによる尻食い現象や側面反射とそのモード変換もあり、前面は音圧の差はあるが、平面でただ端の先端音圧は中央に比べて低い事になる。

◆FDTD 二次元シミュレーション

長い丸棒の FDTD 三次元シミュレーションは時間を要する。二次元即ち紙面上下方向無限に続く一般鋼材板状のシミュレーションをする。更に時間短縮の為周波数は 1MHz とする。円柱体の場合周囲の影響がもっと激しいと考えられる。幅は 12 mm で次項の実験と同じとした。表示は変位表示にした。変位表示にすると大気への

音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速, 固体に於ける音速の式,共振法による音速測定, パルス法による音速測定,BED

音波の伝播も観測できるので、例えば空中音波センサーで音を観測するアイデアも画像から思いつく。変位の変化が音圧に比例し、大気中の音圧は金属中の音響インピーダンス差が弱い。鉄内部だけを考える場合は音圧表示とも思っても大きな問題は発生しない。超音波送信 0.5μ 秒後は、第6図の様に第5図同様、周囲の音が遅れる様に表示される。感度を上げれば遅れ部分が減少するので、音圧が下る現象が同時に起こっている様だ。少し進むと BED により、先端波面後部が尻食い現象で食われ、波面の厚さが薄く（波長が短く）なる事が判る。材料によっては元々の周波数より可なり高い周波数成分になっているが、一般には観測に使う受信探触子の公称周波数特性付近が強調して観測される。側面で大半のエネルギーは横波へのモード変換し、対面でまた縦波に変換しながら伝搬していく。 6μ 秒程度までは先端中央の音圧が高いが、 45μ 秒（約 270 mm 伝搬）では先端は弱くなっていき、つぎの BED により発生した半波の方が強くなる。

15μ 秒後では主要エネルギーは画像右にあるが、 30μ 秒後には中央に移り、 45μ 秒後には左に遅れ平均音速が遅くなる。 80μ 秒後の全体では、小さな三角印の前面波より一番強い部分は距離で $1/4$ ほど遅れている事が判る。距離と共に主要エネルギーの伝播速度は下がる。この棒の長さ方向の共振では、伝搬する音の主要エネルギーが往復して共振する。

超音波非破壊では縦波の多重列は遅れエコーと呼ばれ、長い棒や板では顕著に観測される。

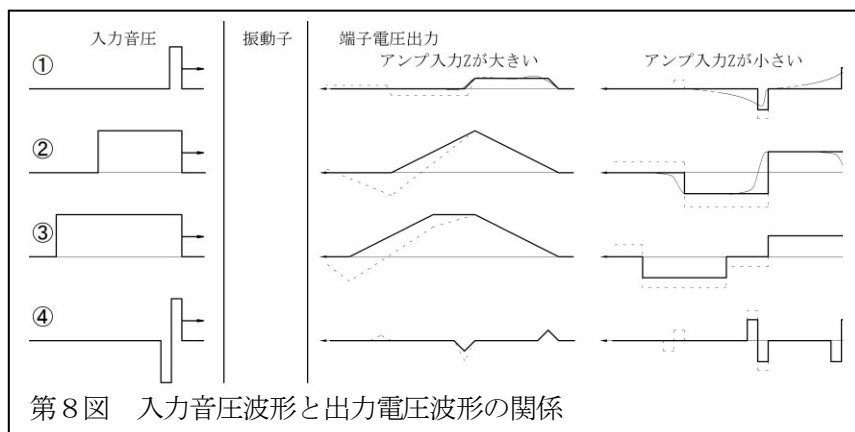
遅れエコーは鋼の場合棒の径を D とすると概略 $1.54D$ （一探触子法では $0.77D$ ）である。その間隔毎に横波から縦波に変換した進行縦波平面波があり、その間を横波が伝搬する。縦波→横波→縦波→横波と変換しながら遅れていく。

遅れる毎に縦波の波長は長くなって周波数は段々低くなっていく。

別の言い方をすると縦波と横波の進行速度が同じになる角度でモード変換しながら伝搬すると言える。

実際にこの伝播する音を正確にとらえるのは難しい。例えば端面に垂直探触子を配置すると、縦波も横波も変位の方向は主に軸方向なので、連続した低周波と一定の間隔の縦波が振動子で受信されるが、市販探触子とレシーバの組み合わせでは、レシーバの入力の電気的インピーダンスが低い為、低域がカットされ、受信探触子の感度の良い部分が強調される。

棒の場合周囲全体が開放で音圧ゼロであるが、シミュレーション第6図の様な薄い板の場合で且つ振動子幅が十分広い場合は、型側面のみ開



第8図 入力音圧波形と出力電圧波形の関係

放で音圧ゼロなので式(8)と式(7)の中間の平均音速となるであろう。

◆振動子入力と電圧波形

以前の回で述べたことだが、復習しよう。まず振動子の受信特性を簡単に述べる。

探触子にはポアソン比が $0.18\sim 0.25$ と小さい異方性の材料が好まれて使われている。送信時は横振動成分が小さく、受信時も横振動に対する感度が低い。縦波探触子と言うと、縦波しか受けない様な表現だが、仮にポアソン比がゼロでも条件により横波も振動子端子に電荷を発生する。音速が遅い媒質から振動子に音が入る

音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速, 固体に於ける音速の式,共振法による音速測定, パルス法による音速測定,BED

場合を第7図に示す。前面でモード変換しない場合もあるが、その場合でも多くの探触子の振動子裏面で反射する時にはモード変換する。入射横波の一部は縦波モード変換して縦波として振動子に入って主にその垂直成分が電荷を発生する。モード変換せずに横波のまま屈折した波の振動方向(歪)は波面と平行であるが、図の様にその振動子の厚さ方向の成分は有る。その歪みに相当する電荷を発生する。

音は伝搬するにしたがって波形の変化をする。尻食い現象などがその典型である。受信探触子に入って来る音波の波形が、送信探触子から出た音の波形と同じことは稀である。ただし、通常の探傷器等では受信探触子の基本波成分が強く表示される場合が多い。復習として振動子に垂直に入って来る音波の波形と振動子の端子電圧の関係を第8図に示す。出力波形は振動子に繋がるレシーバ・アンプの入力インピーダンスが振動子の等価インピーダンスより十分大きい場合と十分小さい場合を描いた。なお、出力電圧波形時間軸はオシロスコープとは左右逆向きに描いている。また振動子の音響インピーダンスと同じ音響インピーダンスの且つ良く減衰するバックキングの場合を実線で、音響インピーダンスが多少小さい場合を点線で描いた。入力は分かり易いように矩形パルスにしたが、実際は訛った波形である。

以前の回で説明した様に、振動子への垂直音波入力の場合、出力電荷は入力音波と振動子の厚さ方向感度関数との畳み込み積分相当である。その為、入力音圧と相似の電荷波形を得るには、振動子の厚さを十分薄くすることが必要である。例えば5MHz程度垂直に入ってきた音波を「そこそこ」正しい波形で観測するには50MHzとか500MHzとかと言った高い周波数の振動子で受信する必要がある。現実には高い周波数の振動子では、周波数に反比例して感度が低くなり、十分な信号強度が得られない。その為、波形自体はそれほど問題にしない、一般非破壊検査では送信振動子の周波数と受信振動子の周波数は近くしている。一般非破壊では細かな波形

の変化を論理的に議論しないで済む検査をしている。

アンプの入力インピーダンスが高い場合、図の①の様に入力パルス幅が振動子厚さ相当より狭い場合は振動子厚さ相当の台形波が得られる。振動子より短い波長の音が振動子と同じ波長と観測される。

入力インピーダンスの低いアンプを通った場合は、振動子と同じ波長の一波と観測される。アンプなどの帯域の為、二点鎖線の様に短い矩形パルス波は延ばされ、訛った一波として観測される。

②の様振動子相当厚さのパルスの場合は、振動子厚さの2倍相当の三角波になる。

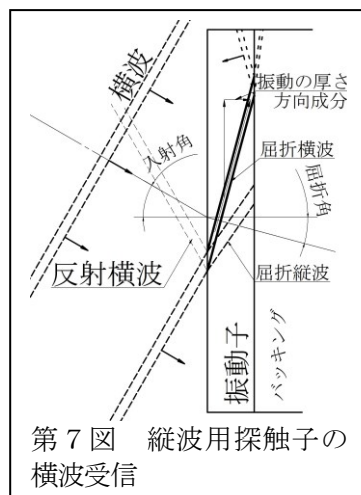
アンプの入力インピーダンスが低いと一波相当になる。

③の様、振動子厚さ相当より長いパルス音入力では三角波の中央が平坦になる。④の様短い正負の音の場合、小さな三角波が振動子厚さ相当で正負発生する。アンプの帯域が狭い場合はごく弱く一波で観測される。

アンプの入力インピーダンスが相対的に低い場合は、傾斜が強調される。即ち高い周波数成分が大きく、低い周波数成分が低くなると考えても良い。この様に变形した波形がアンプやオシロの帯域の為に更に歪んで画面に表示される観測される事になる。

◆棒音波伝搬の実例

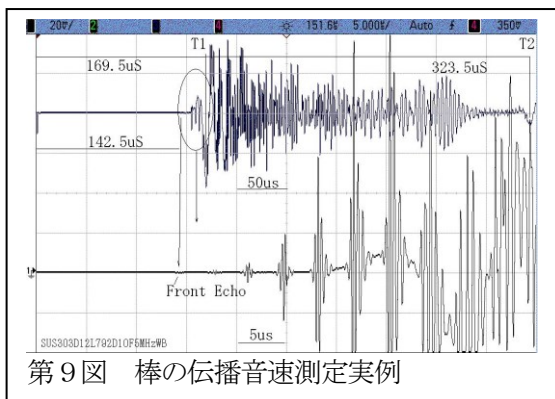
長い丸棒の FDTD 三次元シミュレーションは



第7図 縦波用探触子の横波受信

音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速,固体に於ける音速の式,共振法による音速測定,パルス法による音速測定,BED

棒の音速の実測例を第9図に示す。計測機器により波形はかなり異なる。棒はSUS303材Φ12長さ892mmである。探触子は市販公称10D5MHz直接接触用広帯域を棒の前後に接触媒質を介して取付け、片側をスパイク・パルサーで叩いた。インパルス状の送信音波とする為、デューレーションは通常スパイク・パルサーの5倍程度(結合コンデンサー5nF)と長めにした。受信探触子は直接オシロスコープに繋いだ。棒を透過したT1エコーと1.5往復したT2エコーが観測される。第9図の下は横軸の拡大図で、送



信から142.5μ秒に小さな5MHzの波形が観測され、音速6260m/sと計算される。なお5MHzの成分が多いが、これは前述の様に受信時に探触子の共振周波数成分が感度よく観測されるため、音圧波形ではこれほど強くない。所謂横波に一度モード変換した遅れエコーが多重的に現れ、それに重畳して低周波成分が観測される。約150μ秒伝搬しただけで、約150秒の範囲に音が散らばっている事が判る。T2以降は5MHzの周波数成分は減衰して低周波成分が主要となる。T1エコーの低周波の負のピークから、T2の同じ部分までの時間は323.5μ秒と計測され、音速5515m/sと計算される。

◆共振法での音速測定

棒の長手方向の共振周波数から音速を求める事ができる。多くの場合被試験材を細い糸で吊るして試験する。水晶振動子など精密測定が必

要な場合は真空中でする必要があるが、空気の影響は一般に少なく、吊るすだけで十分である。

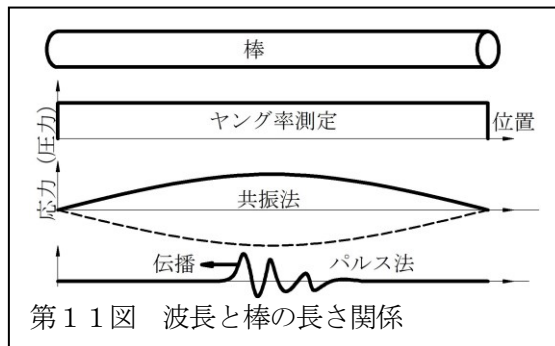
端面を小さなハンマーで叩けば、共振する。

お寺の鐘の様に叩いた瞬間は高い周波数成分があり

り、徐々に基本波が優勢となるが、単純な軸方向の共振の他、斜や径方向、屈曲など色々な共振が発生し、多少唸る。お寺の鐘の唸りは音色でよいが、共振周波数の測定では誤差になる。成るべく唸りの少ない叩き方を工夫するしかない。

叩くのに圧電振動子を使う方法もあるが、何かを接触させると、それが負荷になって、共振周波数が変位する。ごく薄いポリマー振動子で被試験材径と同径の単体を側面に接着付ける方法が今までの経験上一番良いが、手間と費用がかかる。

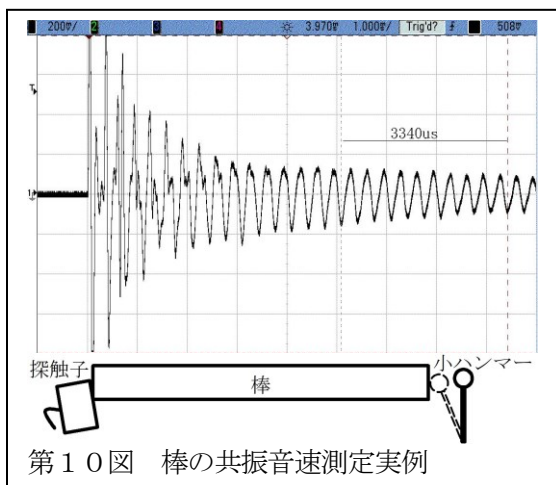
共振音の検出にはマイクでも良いが、騒音の有る場所では使えない。通常探触子を被検査体にほぼ点接触させる方法は空中雑音の影響が少なく簡便で良い。等価的音響インピーダンスは接触面積に比例するので、棒の端面積の1/1000(径で1/30)以下にすれば探触子接触による影響は無視できる。市販公称10D5MHzの前項と同じ探触子を僅かな接触媒質で点接触状態にして共振を観測した結果が第10図である。10波長の長さは3340μ秒と計測され、5341m/sと計算される。第9図のT1T2間からの計算値



音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速,固体に於ける音速の式,共振法による音速測定,パルス法による音速測定,BED

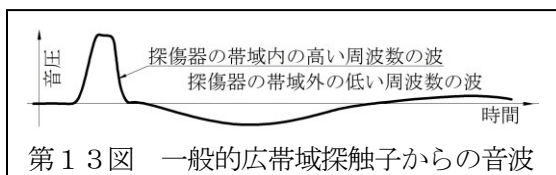
より遅い。半波長が棒全体相当で、ヤング率測定全体の全体に均一歪を与えている状態に近い。

第9図のT1T2間測定では、半波長は約6 μ 秒程度で棒長の約1/23と短い。この波長さ差が音速測定結果に表れたと考えられる。式(7)相当はもっと遅いと考えられる(第11図参照)。な



お、もっと減衰の少ない鋼などでT10など後の方が観測できる場合、波長は後ろになるほど伸びている。即ち共振法に近づく。その例を第12図に示す。第10図と似たような波形である。送・受信感度が不足なので、オシロスコープは周波数帯域の狭いが感度が前図の4倍の感度の500 μ V/Scaleのオシロスコープに変え、送信電圧は完全なステップ・パルサーとし打診法同様成るべく半波のインパルス音をだす様にした。更に片側の探触子は0.5MHz20 Φ とした。この探触子のダンパーの重さが重く150gである。

振動子からは前後に音が発生するので、極低周波で観測すると、ダンパーが付いているが打診法のハンマーの様に半波の音にはならない。ダンパーは後ろが斜めに切ってあって、これで軸方向の振動を直角に変え何とか低周波域を延



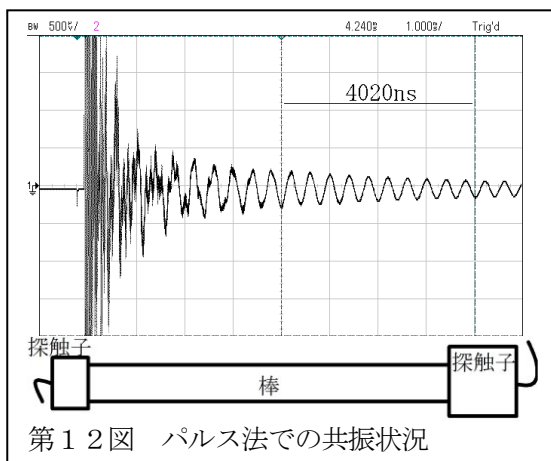
ばず細工をしているが、慣性の法則から前後に出る音の運動量は同じ、即ち正負合計ゼロで、最初の半波は振動子厚さ、その後低周波の波が続く(第13図)。また打診法では簡単に大気圧の何倍もの圧力相当の変位を発生できるが、圧電振動子を使った探触子では精々0.1気圧程度が限界である。第10図の様に探触子を点接触して探触子の影響を避ける方法とはとれない。10周期分の時間が4.02msで音速4438m/sと計算される。両側に配置した探触子は接触媒質で音響接続された状態が続き、探触子を含めた全体の共振周波数を測ってしまい、波長がその分伸びる。

◆あとがき

主に長い棒の音速に関して述べた。次回は板や平行面の音速に関して述べる。

◆今回知った事

- (1) 非破壊では時間観測に、比較的観測しやすい波形の立ち上がりを使っていて、これを使った音速測定結果は前面音速と呼ばれる。
- (2) 長い棒の音速測定をするには、打診法



が一番近い近似が得られる様だ。

- (3) 送・受信に使うセンサー等は、被試験材との接触状態で、計測結果が大きく変わる。

音速,音の減衰,光速,音速の一般形式,平均音速,前面音速, 固体に於ける音速の式,共振法による音速測定, パルス法による音速測定,BED

- (4) 共振周波数を測るには、成るべく音響結合が弱い方法を取るのが望ましい。

<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