

板を伝わる超音波

尾上守夫・高木幹雄

伝播媒質の寸法が波長に比して十分大きくない場合に長手方向へ伝播する波は無限大媒質中を伝播する波とは性質が異なって来る。ここでは板の中を伝播する波をとり上げ、その伝播状態、発生方法について述べ、超音波探傷法、超音波遅延回路への応用について解説を行なった。

1. はしがき

超音波が等方等質の固体内を伝播する場合には、たて波 (P波) とよこ波 (S波) のみが伝播でき、実体波 (body wave) と呼ばれる。実体波の特徴の一つは速度分散がない、すなわち、速度、したがって遅延が周波数に依存しないという点である。固体中を伝播する超音波を近似的に実体波として取り扱うことができるのは、超音波の波長に比べて媒質が十分に大きい場合で、境界面の影響が無視できる場合に限られる。媒質の寸法が超音波の波長に比べて十分大きくなると、境界面の影響を大きく受けるようになり、普通のたて波、よこ波はもはやそのままでは伝播できず、Lamb 波 (板の波)、Pochhammer-Chree 波 (棒の波)、Love 波 (表面層の波) などと呼ばれるそれぞれの断面に応じた特別の波のみが伝播できる。このような波は境界面の存在によって長手方向に導かれる被導波 (guided wave) の一種である。

被導波には普通のたて波、よこ波と違って速度が周波数によって変わる速度分散のあるものが多く、遮断周波数をもつ高次状態が存在するという特徴がある。ここでは板を伝播する被導波を板波と総称することにする。

板波のおもな種類が知られたのは上記の名称を見てもわかるように今世紀の初めであるが、その工学的応用が見出されたのは比較的最近のことである。板波は板波による探傷法および超音波遅延回路に用いられている。

超音波探傷の分野では、薄い板、細い棒、線、薄肉のパイプ、表面層など一部の寸法が長手方向の寸法に比して非常に小さい場合に用いられる。このような場合には、超音波をその短い寸法の方向に通すことには二つの大きな難点がある。その第1は反射式垂直探傷法の場合を考えてみれば明らかなように分解能の点から境界面と傷とが分離できなくなることである。第2には透過式の場合を考えてみるとわかるように、その物体をくまなく検査するためには、1次元もしくは2次元の走査が必要であって、時間と労力がかさむことである。このような難点を解決するために長手方向に伝播する板波が用いられ、原子力燃料棒や自動車用鋼板のごとく連続かつ自動的検査を必要とする時代の要求に板波探傷法はよく適合している。

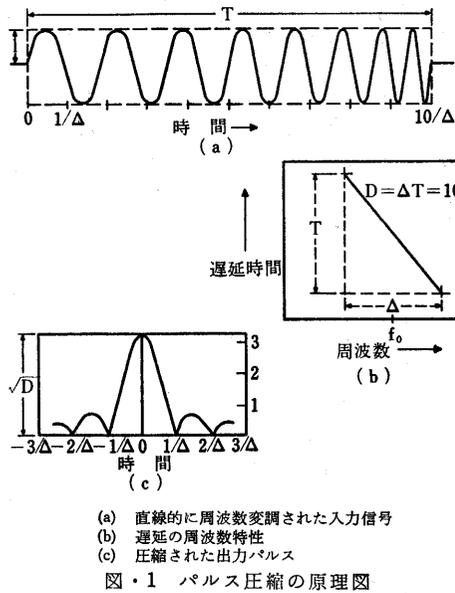
一方、超音波遅延回路は数 μsec ~ 数 m sec の電氣的

信号の遅延に用いられているが、遅延が周波数によって変わらない非分散型遅延回路と遅延が周波数によって変わる分散型遅延回路とに分けられる。非分散型超音波遅延回路はアナログ信号の遅延およびデジタル信号の遅延に用いられ、前者はレーダにおいて移動物体の検出 (moving target indicator) あるいは遅延帰還による S/N 比の改善に用いられる。また、テレビジョンでは帯域の圧縮あるいは SECAM, PAL 等のヨーロッパ系統のカラーテレビの受信機に用いられる。デジタル信号の遅延用としては循環型記憶回路として用いられることが多く、時分割電子交換機の制御装置、PCM 等を用いた時分割通信方式、電子計算機などの情報処理に用いられる。

また、分散型遅延回路は遅延が周波数によって変化する性質によって遅延等化器、可変遅延回路としても用いられるが、最も重要な用途は Chirp radar のように周波数変調されたパルスを用いる通信方式においてパルスの圧縮、伸長に用いられることである。この方式は短いパルスを正の傾斜をもつ直線的な遅延回路に加えるとそのパルスの周波数スペクトラムの各成分は直線的に分散をうけ高い周波数は低い周波数より遅れ、 $\sin x/x$ の型の直線的に周波数変調を受けた幅の広いパルスとなる。この幅の広いパルスと同じ傾斜で負の特性をもつ遅延回路に加えると高い周波数成分は低い周波数よりも遅延が少ないために、第1の遅延回路に加えたのと同じパルスに圧縮される。このパルスの圧縮の様子を図・1に示す。ここで送信波形の幅を T とし、スペクトラムの幅を Δ とすれば、遅延特性の傾斜は T/Δ になる。 $D=\Delta T$ を圧縮比と呼ぶ。この例では出力パルス幅は $1/\Delta=0.1$ に圧縮され、振幅は $\sqrt{D}=3.16$ 倍となる。

以上述べたように超音波遅延回路には種々の応用があるが、遅延回路を構成するのに実体波、被導波のいずれも用いられている。実体波を用いるものは 10MHz 以上の周波数で用いられ、高価であるのに対し、被導波を用いるものは、あまり高い周波数では用いられず広い帯域は得られないが、安価、軽量、低波挿入損失であって、遅延時間可変にやすく、長い遅延時間が得られるなどの利点がある。

被導波を非分散型遅延回路に用いる場合には、速度分散しない被導波である i) 丸棒のねじれ波の基本状態、ii) 板の SH 波の基本状態、iii) Rayleigh の表面波を



用いなければならない。これらはいずれも遅延回路に実用もしくは試用されている。また、丸棒のたて波も（周波数×直径）積が十分小さければ分散を無視でき、i) の丸棒のねじれ波の基本状態とともに磁歪遅延回路では用いられている。

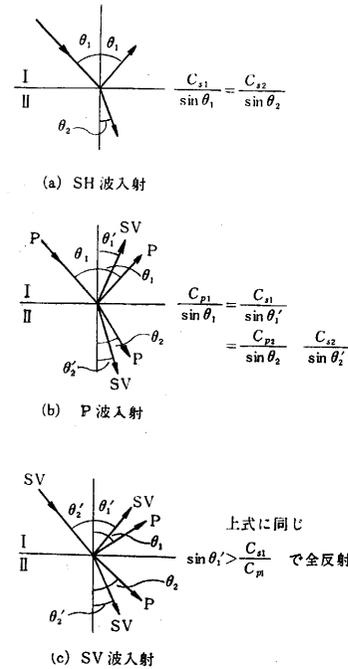
一方、分散型遅延回路に対しては被導波の速度分散は積極的に利用され、棒、管、板の基本状態は遅延-周波数特性に変曲点があり直線的な遅延特性を近似するのに便利である。特に板波は寄生出力が少ないのでよく用いられている。

ここでは、以上のような性質と応用面をもつ板波について、その伝播の模様、発生および検知方法に関して簡単な解説を試みることにする。

2. 固体中のいろいろな波

物体の各部の寸法が超音波の波長に比して十分大きい時は、その中を通る波は無限媒質の中の波と同じと見てよい。等方性の固体の場合にはたて波（P波）とよこ波（S波）の2種類の平面波が伝わりうることはよく知られている。異方性の場合にならっていえばS波については偏波面を考慮に入れて、互いに直交する二つのS波といった方がよいであろう。事実、無限媒質に境界面を導入して半無限平面にすると、振動方向が境界面に平行なS波（SH波）はなんらの影響を受けないが、それと直交する振動方向が面に垂直なS波（SV波）はもはや面に沿って伝わるができない。同様にP波も面に沿って伝わり得ない。その代わりにS波よりもやや速度の遅い Rayleigh 波と呼ばれる表面波が面に沿って伝わって行く。これはP波と同じ容積変化（dilatation）の成分とSV波と同じ回転（rotation）の成分をもっているからP

波とSV波とが組み合わさったものとも考えることもできる。Rayleigh波の特徴は、エネルギーが表面に集中していることであって、その特質を生かして大きな物体の表面傷の探傷を行なうものが従来の表面波探傷法である。この場合、下が半無限媒質と見られるくらい大きな物体であるということが大切な点である。そうでなくて薄い板のような場合には Rayleigh 波は板波の周波数が無限になつた極限としてのみ存在する。これは周波数が無限大に近づくと波長は零に近づき、それに比べればどんな薄い板でも片側から見れば半無限媒質と見なせるようになるからである。



沿っても伝播する。これらはいずれも速度が周波数に関係なく一定である。

波の伝播方向が境界面に平行でない場合には図・2に示したように境界面で反射および屈折（反対側にも媒質がある場合）が起こる。同図（a）のSH波の場合には光と同じで特別なことはないが、（b）のP波が入射する場合は新たにSV波が、（c）のSV波が入射する場合は新たにP波が発生する。すなわち、P波とSV波とは単独では境界条件を満足し得ないで組になって存在するわけである。このことは先の Rayleigh 波でも見られたところである。

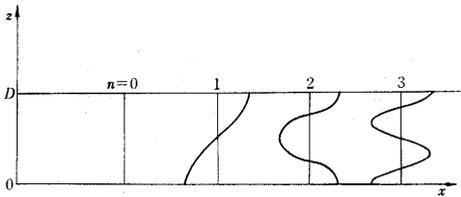
表・1 固体中の代表的な被導波

無限媒質	たて波		よこ波	
	P波	SV波	SH波	
半無限媒質 (1境界面)	Rayleigh 波		SH波	
板 (2境界面)	Lamb 波		SH波	
棒(パイプ) (長手方向)	Pochhammer-Chree 波		ねじれ波	
棒(パイプ) (円周方向)	(P+SV) 波		SH波	
表面層	(P+SV) 波		Love 波	

境界面をもう一つ増すと板になる。あるいは円筒面を境界面とすれば棒になる。このような有界の媒質内ではすでに述べたごとく単純な P 波、S 波は伝播できず、被導波のみが伝播する。表・1 は代表的なこの種の波をまとめたものである。この場合も SH 波の系統は別に群をなし、P 波、SV 波の系統は常に組をなして別の群を作っている。これらの波はさきに述べた二、三の例外を除き速度分散がある。

3. SH 波による板波¹⁾

板波の例として、まず SH 波による板波を考えよう。この波は超音波遅延回路では使用されているが、超音波探傷法においては探触子と物体との間に S 波を通すような接触面を必要とするので実用となった例は聞かない。



図・3 SH 波による板波

図・3 のように厚さ D なる板の x 方向に伝播する波を考える。SH 波であるから変位 v は紙面に垂直 (y 方向) であって次の形に書ける。

$$v = A \cos \gamma z \cdot \exp j(\omega t - kx) \quad (1)$$

ここで A は任意定数、 $\omega (= 2\pi f)$ は角周波数、 f は周波数、 k は伝播定数 (波数) である。(1) 式が解であるためには、弾性波動の微分方程式と境界条件とを満足しなければならない。まず微分方程式を満足するためには、

$$\gamma^2 + k^2 = k_s^2 = \left(\frac{\omega}{C_s}\right)^2 \quad (2)$$

なる条件が必要である。ここで C_s は S 波の速度、したがって k_s は無限媒質中の S 波の伝播定数となる。

次に板の両面に力が働かず自由であるという境界条件を満足するためには次の条件が必要である。

$$\gamma D = n\pi \quad (3)$$

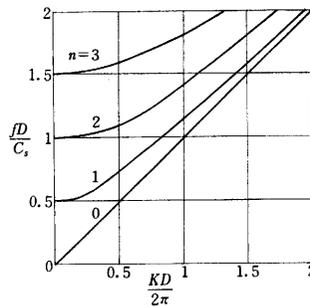
n はゼロを含む任意の整数でこれを板波の次数と呼ぶ。

(2)、(3) 式を組み合せると次の形となる。

$$k^2 = k_s^2 - \left(\frac{n\pi}{D}\right)^2 = \left(\frac{\omega}{C_s}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{D}\right)^2 \quad (4)$$

この式は周波数と伝播定数もしくはは速度との関係を与える式であって、速度分散方程式と呼ばれる。その関係を図示したものが図・4 であって、これらの曲線を分散曲線と呼ぶ。

各次数に対する変位分布を図・3 に併記した。この場合次数は節点 (面) の数と一致している。図・4 に示されているごとく高次の振動では f_n 以下の周波数では分散



図・4 SH 波による板波の分散曲線

曲線が存在しないので、減衰しないで伝播することはできない。この f_n をその次数の遮断周波数と呼んでいる。

$$f_{cn} = n \frac{C_s}{2D} = n f_{c1} \quad (5)$$

被導波には高次の姿態があり、各次数の遮断周波数がある

ことは、電磁波の導波管の場合とよく似ているが、電磁波の導波管では直流分を伝えることができる姿態がないのに対し、SH 波では図・4 から明らかなように 0 次の姿態は遮断周波数がゼロであり直流分を伝送できるという点で異なっている。

ところで (1) 式において x 方向に進む波を表わしているのは $\exp j(\omega t - kx)$ の項である。なぜならばこれを $\exp j\omega \{t - (x/c)\}$ の形に書いて見ると、 $t \rightarrow (t+T)$ 、 $x \rightarrow (x+cT)$ と置換えて見ても値が変わらないことがわかる。ということは T 秒後に cT だけ離れた点で同じ現象が見られるということであって速度が $c (= \omega/k)$ なる波にはかならない。しかしこの速度は位相速度 (phase velocity) と呼ばれるものであって、速度分散がある場合にはパルスのように多くの周波数成分を含む波形の伝播速度とは一致しない。簡単のために、角周波数が $(\omega + \Delta\omega)$ および $(\omega - \Delta\omega)$ 、伝播定数がそれぞれ $(k + \Delta k)$ および $(k - \Delta k)$ なる二つの波が伝播する場合を考えてみよう。すなわち、両者の振幅をそれぞれ

$$A \cos[(\omega + \Delta\omega)t - (k + \Delta k)x]$$

および

$$A \cos[(\omega - \Delta\omega)t - (k - \Delta k)x]$$

としてその和を求めてみると

$$2A \cos(\omega t - kx) \cos(\Delta\omega t - \Delta kx)$$

となる。これは ω なる搬送波が $\Delta\omega$ なるビートで変調されたかっこうになっている。(ここでは波動の形を \cos にしているが、これは \exp の実数部をとったと考えればよい。) 搬送波の速度は $c = \omega/k$ で上述の位相速度に一致するが、ビートすなわち注目している波形の速度は $\Delta\omega/\Delta k$ である。この極限をとって一般に

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (9)$$

を群速度 (group velocity) と呼んでいる。

分散曲線を図・4 のような形式で表わすと曲線上の一点と原点とを結ぶ直線の傾斜が位相速度、また、その点における切線の傾斜が群速度に比例するわけである。

搬送波をパルスで変調して用いる場合には、その周波

数成分は搬送波を中心とした側帯波として広く分布しており、その分布はパルス幅が広いほど、また、パルスの形が丸味を帯びて来るほど狭くなる。波形伝送理論によれば、ある波形が歪まないで伝播して行くためには、その波形の周波数スペクトラムの範囲内で群速度が一定であることが必要で、その際の伝播速度は群速度に等しい。それゆえ分散のない0次のSH波を用いる非分散型遅延回路では問題ないが、図・4のような分散曲線をもつ板波を板波探傷法に用いる場合には、分散のない状態を用いることができないので群速度が一定と見なしうるような分散曲線上の直線部分に周波数を選ぶか、あるいは幅の広い丸味を帯びたパルスを使用することが肝要である。この点において幅の狭いパルスが賞用されて来た従来のパルス探傷法とは大分趣きを異にしている。また、遮断周波数に近い周波数は波形が著しく歪むから避けなければならない。

以上のことからSH波による板波の速度を(4)式から求めて見ると次のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{位相速度 } C=C_s/\sin\theta \\ \text{群速度 } C_g=C_s \sin\theta \end{array} \right. \quad (8)$$

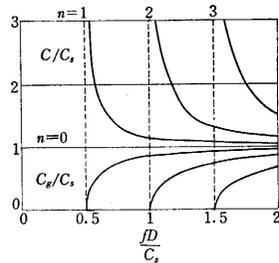
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{位相速度 } C=C_s/\sin\theta \\ \text{群速度 } C_g=C_s \sin\theta \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\text{ただし } \cos\theta=f_{cn}/f=nf_{c1}/f \quad (10)$$

この場合位相速度は常にS波の速度 C_s より大きく、群速度は常に C_s より小さくなっており、また0次の波はSH波そのものであるから速度分散がなくなっているが、これはSH波による板波に特有の性質であって、他の板波には当てはまらない。

図・5は(8),(9)式により速度と周波数の関係を表わしたものであるが、

後述のように発生条件を求めるためにはこの形式の方が便利である。この図は C_s を単位として両軸を規準化してあるが、これからわかるように材質が与えられれば、速度は周波数と厚みの積 fD に



図・5 SH波による板波の位相速度および群速度

よって定まる。これは他の板波にも共通の性質である。(棒の場合には厚みの代わりに直径をとる。) また、探傷を行なう場合に従来の探傷器を用いるならば周波数は固定であるから横軸はむしろ厚みで目盛の方が実際的である。

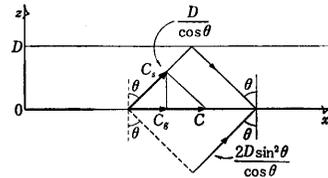
図・5 から $fD/C_s=1.5$ 位の時に群速度が10%以内で一定と見なしうるためには比帯域幅にして±12%位におさまるかなり幅の広いパルスを用いなければならないことがわかる。

以上はごくオーソドックスな板波の解析であったが、板波はまた平面波の多重反射によって形成されたものと

見なすことも可能である。すなわち、(1)式は(2),(10)式の関係を用いて次の形に書直すことができる。

$$\begin{aligned} v &= \frac{A}{2} \{ \exp j(\omega t - kx + \gamma Z) + \exp j(\omega t - kx - \gamma Z) \} \\ &= \frac{A}{2} \{ \exp j\{\omega t - k_s(x \sin\theta - \cos\theta)\} \\ &\quad + \exp j\{\omega t - k_s(x \sin\theta + Z \cos\theta)\} \} \quad (11) \end{aligned}$$

この式の第1項はZ軸とθの角度をなして斜上方に進行する平面波を表わす。その伝播定数は k_s であるから、この平面波は無限媒質内のSH波そのものである。同様に第2項はθの角度で斜下方に伝播するSH波を表わしている。板波とはこのような二つの平面波を合成したものにほかならない。ただしθは任意に選ぶことはできない。図・6に進む波が上面で反射して斜下方に進



図・6 平面波の多重反射による板波の形成

む波となり(図・2参照)、それが下面で反射して再び斜上方に進む波となったときに元の波と位相が合う条件、すなわち元の波と反射した波の行路差が波長の整数倍になるという干渉条件が満たされなければならない。図から明らかなようにSH波(無限媒質内)の波長を $\Lambda_s (= 2\pi/k_s)$ とすれば、上記の干渉条件は

$$\left(\frac{D}{\cos\theta} - \frac{D \sin^2\theta}{\cos\theta} \right) = D \cos\theta = n\Lambda_s \quad (12)$$

となって、さきに境界条件から求めた(3)式と一致することがわかる。

この平面波の波面が板の表面の一点を過ぎて行く速度は図示のように $C_s/\sin\theta$ であって(8)式に示す位相速度にほかならない。しかし、パルスを加えた場合は波面は初めからその点まで伸びていない。そしてエネルギーは平面波の進むとおりに何回も反射しながら進んで行く。したがってその速度は平面波の速度 C_s のx方向への正射影 $C_s \sin\theta$ となって(9)式の群速度と一致する。

このような見方に従えば、パルスが板波として伝播するためには、パルスの継続時間中に何回かの多重反射が起こって相互に干渉することが必要なことがわかる。そのためには板厚が十分薄いか、パルス幅が十分広いことが必要である。そうでないときには各反射パルスは時間的に分離してしまって相互に干渉することはない。このような使い方が従来の斜角探傷法にほかならない。

ここで板波の減衰について考えて見る。板波は式(11)で示されているごとく、二つの平面波を合成したものと考えられるから、おのおのの波の減衰は平面波の減衰と

等しいと見なすことができる。図・6 から明らかなようにおのおのの波の伝播距離は x 方向に沿った実際の伝播距離よりも $(\sin\theta)^{-1}$ 倍だけ長くなっている。それゆえ無限大媒質中の平面波の減衰定数を η_0 とすれば、板波の減衰定数 η は次式で与えられる。

$$\eta = \frac{\eta_0}{\sin\theta} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{nf_{c1}}{f}\right)^2}} \quad (13)$$

ただし、 $\eta_0 = \frac{dk_s}{2}$

d は損失係数

以上は板の中を波が伝わるとしたらどのような波が伝わりうるかということ調べたわけである。次に問題となるのは、そのような波を探触子によって発生もしくは検知（以下まとめて発生と呼ぶ）するにはどうしたらよいかということである。この問題は厳密にはまだ完全に解けていないが、実用上は次のような考え方で支障をきたさないようである。

図・6 に示した考え方に従えば、干渉条件 (12) を満たすような角度で平面波

を板の中に送り込んでやれば多重反射によって自然に板波が形成される。具体的には斜角探傷法の場合と同様に図・7(a) に示すような楔を使用すればよい。楔と板の材質が等しい場合には入射角 θ_i はもちろん (12) 式による θ に等しくするわけである。材質が異なる場合は図・2 の屈折則を考慮して次式を満たす入射角を用いればよい。

$$\frac{C_i}{\sin\theta_i} = \frac{C_s}{\sin\theta} \quad (14)$$

ここに C_i は楔中の S 波の音速である。

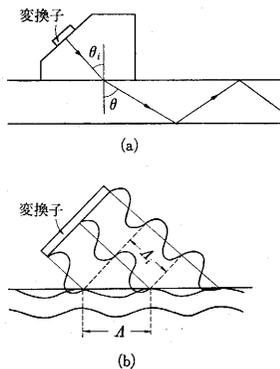
しかるに (8) 式によれば上式の右辺は位相速度にほかならない。すなわち、

$$\frac{C_i}{\sin\theta_i} = C \quad (15)$$

両辺を周波数で割って波長に直せば次式を得る。

$$A_i = A \sin\theta_i \quad (16)$$

これは図・7(b) で示すように板の表面で入射波が板波を同位相で励振する条件を表わしている。この考え方は SH 波による板波に限らず一般の板波に対しても成立するわけで (15), (16) 式は楔を使用した場合の一般の板波の発生条件と考えてよい。(もちろん P 波入射の場合は C_i として P 波の速度をとらなければならない。)



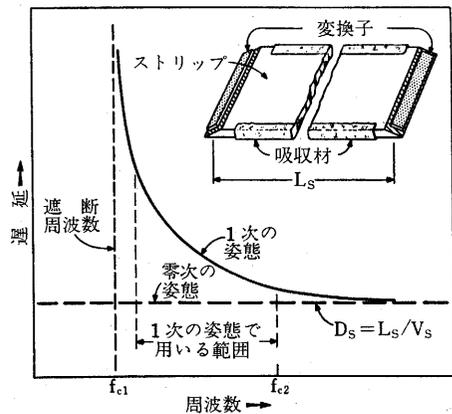
図・7

周波数と板厚が決まると図・5 により位相速度がわかり、楔と板の音速の比がわかっているれば同図の縦軸は直接入射角 θ_i で目盛ることができる。このように位相速度は速度という名が付いているが、実は入射角を求めるのに必要なものであって、実際のパルス伝播速度（既述のように主として群速度で決まる）とはかかわりないことを銘記して置かねばならない。

図・5 でわかるように周波数、板厚、板および楔の音速のいずれが変わっても入射角は変化するので、探傷器の場合には入射角が自由に換えられる可変角度のものが望ましい。もちろん探傷器の周波数を広い範囲に連続可変にできれば入射角固定の探触子でも差支えない。この場合に交換子にチタバリ、硫酸リチウムのような広帯域のものを使わなければ感度が落ちてしまう。

入射角が(15)式の条件からはずれた場合には不要の伝播状態が励振される。各状態の群速度が異なるから伝播距離が短い場合には波形が歪み、長い場合には複数個のパルスに分離してしまう。また連続波で使用する場合でも干渉によりわずかな周囲条件の変化で出力が大幅に変動するから、このような使い方は一般に好ましくない。不要状態はまた端面や傷における反射、透過の際にも発生する。これも一般には好ましい現象ではないが、場合によっては積極的に活用することも考えられる。

SH 波による板波は探触子と板との接触面も S 波を伝送する必要があり、探触子を固定することは実用上困難であるために油膜あるいは水等を介して超音波を送込む超音波探傷法には用い難いが、交換子を遅延媒質に固定して接着できる超音波遅延回路には用いられている。超音波遅延回路には 0 次の状態および 1 次の状態が用いられ、図・8 のような構造で用いられる。遅延媒質としてはア



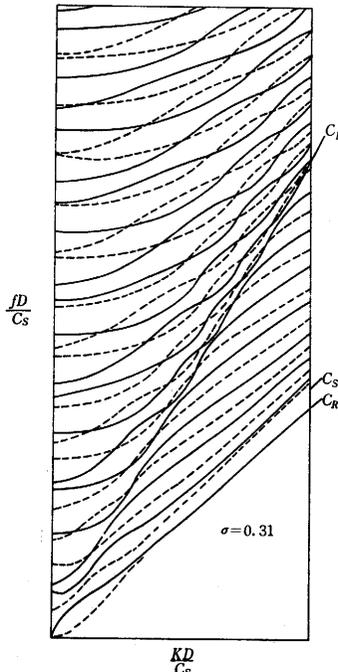
図・8 SH 波による板波の遅延の周波数特性

ルミニウム等の金属のストリップが用いられ、図のように両側面に吸収材を用いるならば、幅が波長の 10 ないし 20 倍の有限な板の中を SH 波が伝播しうることが示されている。交換子としては高い電気機械結合係数を有

する圧電セラミックが用いられ、長さ方向に沿って分極されたセラミックの棒をストリップにおける伝播方向と平行に厚さ方向に電氣的に駆動することによって SH 波を発生することができる。

非分散性遅延回路⁴⁾には 0 次の姿態を用い、他の不要な姿態の発生を避けるために第 1 の分散性姿態の遮断周波数以下になるように周波数と厚みの積 fD を選ぶ。したがって、ストリップの厚さは図・4 よりわかるように $C_s/2f$ (f は用いる帯域の上限の周波数) に選ぶ。0 次の姿態を発生させるには、式 (12) より $\theta = \pi/2$ となるので、変換子を図・8のごとく傾いた状態ではなくストリップに対し直角にはればよい。このような遅延回路は中心周波数が数 MHz、ビット繰り返し周波数が 2MHz、遅延時間が数 m sec のものが得られている。

分散型遅延回路の場合には 2 次の姿態の遮断周波数 f_{c2} 以下に帯域をとり、第 1 の姿態のみを励振するようにすれば分散型遅延回路を作ることができる。ここで問題となるのは、0 次の姿態を励振させずに 1 次の姿態のみを励振することであるが、変換子を図・8 の如く傾けて取り付ければよい。この角度は用いる帯



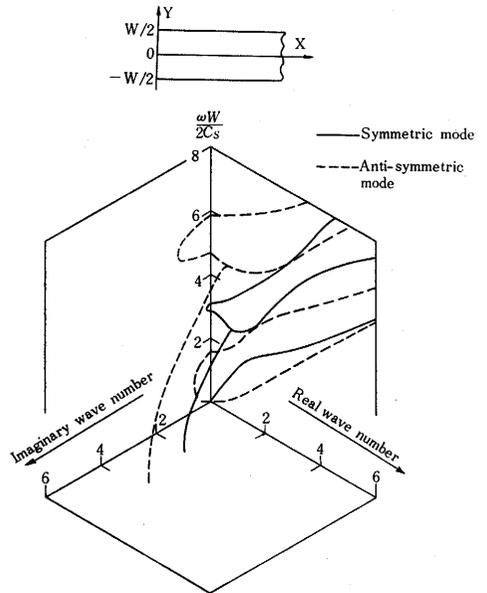
図・9 Lamb 波の分散曲線 (Mindlin: Onoe による)

域の中心周波数において式(12)を満足するように選ばよく、図・7 の楔による板波の発生と同様に 1 次の姿態のみを励振できる。

4. Lamb 波(P+SV 波による板波)¹⁾⁻³⁾

前節の SH 波による板波は変換子あるいは探触子と板との接触が SH 波を通すようにしなければならず、超音波遅延回路の場合には変換子を固定できるので問題はなかったが、超音波探傷を行なう場合には実用上の難

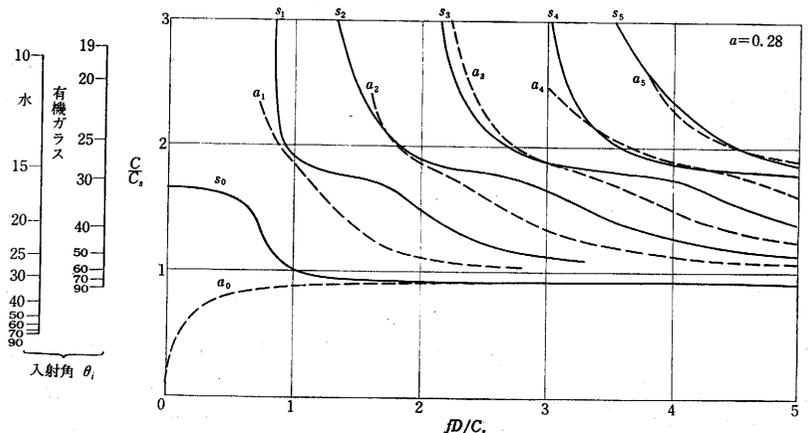
点があった。図・7 において入射波として S 波の代わりに P 波を用いれば、(P+SV) 波による板波、すなわち Lamb 波が発生し、しかも接触に関する難点が除かれるので、油膜あるいは水を介して行なう超音波探傷法に対して便利である。



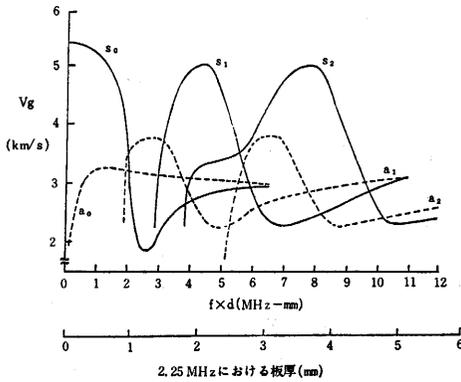
図・10 板波の周波数スペクトラム

Lamb 波の速度分散方程式は SH 波と同様の手段で求めることができる。分散曲線の例を図・9~図・12 に示した。この形状は板の音速を単位として両軸を基準化すれば、ポアソン比のみによって定まる。図・4, 5 に比べてはるかに複雑であるが、これは図・6 の考え方でいえば、反射の度に新たに P 波, SV 波が発生して行って、そのすべての位相が合う必要があるから当然とも言えよう。図中 s は板の中央面に関して対称な振動, a は斜対称な振動を表わし、それぞれの添字は次数を示す。

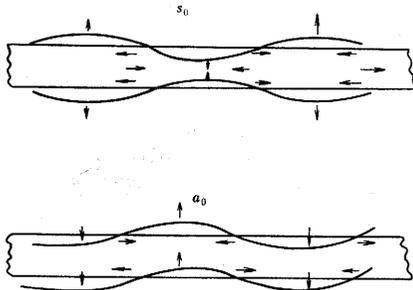
断面における変位分布はもはや SH 波の場合 (図・3



図・11 位相速度と (周波数×板厚) 積との関係

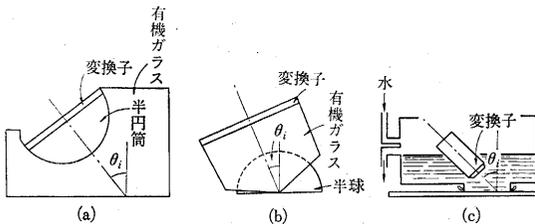


図・12 群速度と(周波数×板厚)積との関係



図・13 Lamb 波の振動姿態

参照)のように一定ではなく、 fD 積によって変わってくる。たとえば、図・13 は fD 積が比較的に小さい場合の s_0, a_0 の変位分布を示したもので、前者はいわゆる縦波、後者は撓みの波に相当する。しかし fD 積が非常に大きくなると既述のごとく両者共 Rayleigh 波のように変位が表面に集中し、位相速度も Rayleigh 波のそれに近づいて行く。したがって内部の傷を探するにはこのような姿態は適さないわけである。高次の姿態は fD 積が大きくなっても、内部に変位があり、位相速度も C_p に近づいて行く。群速度は図・12 に示すようにある fD 積に対して最大となり、この付近の周波数成分が最も早く伝播する。



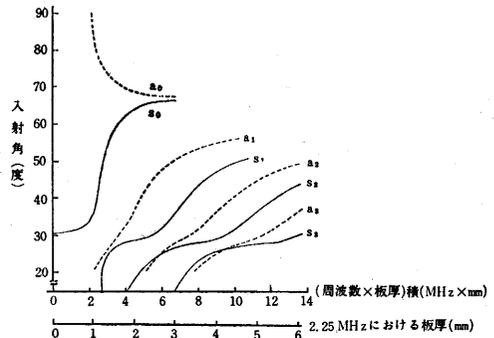
図・14

超音波探傷法に用いる可変角の探触子としては図・14 に示すように楔の途中に円筒面 (a) もしくは球面 (b) の摺動面を設けたものが市販されている。もちろん、摺動面にはグリースや油を塗ってP波の透過を助けている。

P波はS波と異なって水中でも伝わるから水浸法によ

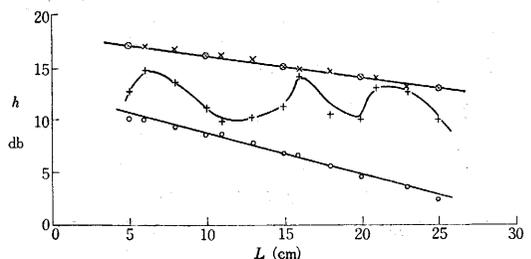
ってLamb波を発生することも可能である。この場合は普通の探触子をただ傾けるだけでよい利点はあるが、水の音速が小さいため図・11 の目盛からわかるように入射角の調節がクリティカルなこと、減衰が大きくて探傷距離が短いことが欠点である。また、水浸法では各姿態の減衰に大きな差があり、これは板の表面における変位の垂直成分の大きいほど水中にエネルギーが多く逃げることによる。どの姿態でも $C = \sqrt{2}C_p$ では表面の変位が垂直成分のみになり、逆に $C = C_p$ では垂直成分がゼロになって平行成分のみとなる。したがって前者に近い場合には減衰が大きく、後者に近い場合には減衰が小さいが、エネルギーを送り込むことも困難となる。水浸法の利点を生し、しかも探傷距離を長くするためには、図・14 (c)のごとく探触子の部分のみを水浸するのがよい。このような構造は被験物を連続的に動かして自動検査をするのにも適している。

有機ガラスの楔によって板波を鋼板中に発生させる際



図・15 有機ガラスのくさびを使用する可変角探触子の鋼板への入射角と(周波数×板厚)積との関係

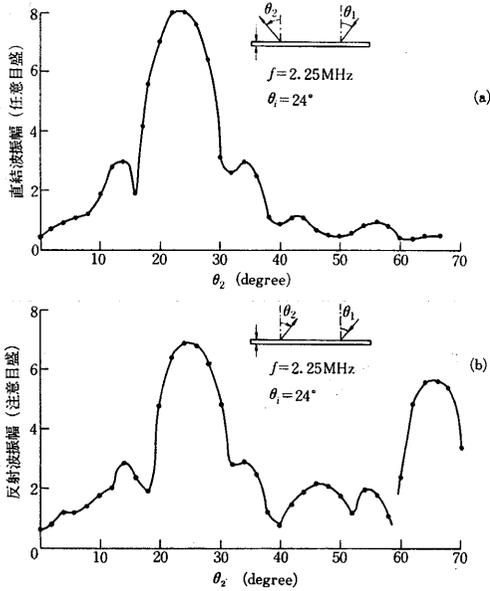
で与えられる。図からわかるように、板厚 2.5mm の場合には、姿態 s_1 および a_1 はそれぞれ単独に励振することが可能であるが、姿態 s_0 と a_0 の対、あるいは s_2 と a_2 の対は入射角が近いために同時に励振され、また、図・12 に示されている群速度も近いために両姿態が時間的に分離しないで相互に干渉する⁵⁾。たとえば板厚 2.3mm の鋼板で s_2, a_2 の両姿態が重り合う周波数 2.43MHz および時間的に分離する周波数 2.3MHz における減幅曲線をとると図・16のごとく、各姿態が分離する 2.3MHz



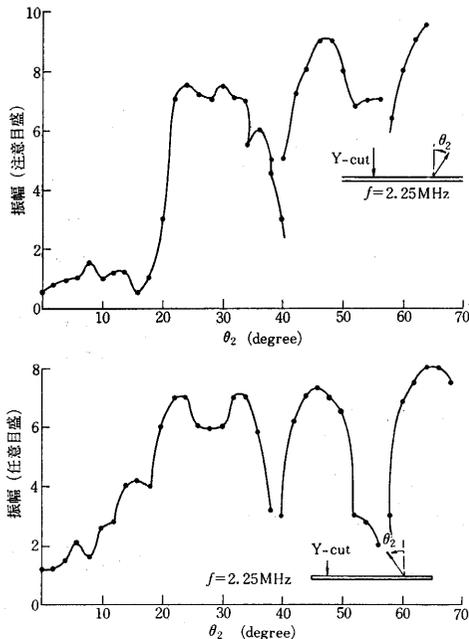
図・16 s_2-a_2 姿態の減幅曲線

に必要な入射角は fD 積によって定まり、図・15 の曲線では s_2 および a_2 の減幅曲線は単調であるが、両姿態が重り合う 2.43MHz では互いの干渉により著しく波打っている。また、この減衰の様子は表面の油膜などによって非常に影響を受けやすく、傷の定量化に当て一つの問題点となっている。

また、多重励振は変換子の長手方向指向性の副極によっても励振される⁶⁾。これは主極が励振条件式 (14) を満足する場合に、副極が他の姿態の励振条件を満足する



図・17 端面反射における不要姿態



図・18 Y-カットの発生姿態

場合に生ずる。このようなことはある特定の fD 積に限って起こるが、群速度がある程度以上異なると多重伝播の各姿態は時間的に分離して擬似傷となって現われるから注意を要する。

この他多重伝播姿態は傷、側面、端面などによる姿態変換によっても生ずる。Lamb 波での端面の反射による不要姿態の発生を調べたものが図・17 である。すなわち、2 個の探触子を用い、送信の入射角を固定し、受信の方を変えてみると受信波にいかなる姿態が含まれているかわかる。(a)は両者を向合わせた場合で、ほとんど単一の姿態しか発生していない。(b)は受信探触子を反対側に向けて端面からの反射波を分析した場合で反射により他の姿態が発生していることがわかる。

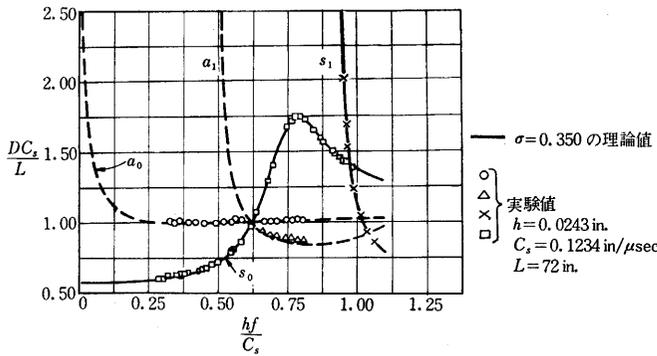
従来の表面波探傷法に用いられた Y-カット (x 軸方向の寸法が厚みの 7 倍のもの) を用いても Lamb 波を発生できる。しかし、図・14 の探触子と違って両側に波が出ることで、多くの姿態が同時に発生するなどの点で使い難く、実用にはもう一工夫必要であると思われる。図・18 は図・17 と同じ方法で姿態の分析を行なった例で、すべての姿態がほとんど同じ強度で発生していることがわかる。

以上は主としてパルス法の場合を考えて来たが、パルス法では受信波形が、姿態、入射角、送信パルス幅、周波数、探傷距離によって複雑に変化することを探傷図形の解釈に当たって常に留意する必要がある。

また、2 個の探触子を用いて連続波による透過探傷法を行なうことも可能で、傷の位置でなく有無を知るだけでよいならば連続波の方が一般に装置は簡単になる。この際注意を要するのは楔内の反射、多重伝播姿態の影響、被験物の輪廓からの反射などが連続波の場合にすべて加算されるために周波数や探触子の位置のわずかな変化で出力が大きく変動する。これに対しては周波数変調をかけ平均的な出力をとる方法が効果がある。

現在 Lamb 波は主として自動車用鋼板などの薄板の探傷に使われているようである。使用される周波数は 0.8 ~ 5MHz、板厚は 0.1 ~ 25mm 程度である。幅 3m の鋼板を幅方向に 2 探触子法で探傷する際、長手方向の速度を 4 ~ 5 m/min にとれるということである。また、溶接部の探傷にも利用されている。

一方、超音波遅延回路の方面では分散型ストリップ遅延回路に用いられている。姿態としては図・19 に示されているごとく遅延時間特性の直線部分が大い s_0 が用いられるが、この範囲では他の姿態に位相速度の等しいものがなく、棒の波を使うのに比べて有利である。また、SH 波の時と同じく厚さが半波長、幅が 10 ないし 20 波長にとるので変換子が棒の場合よりもずっと大きくなり、変換子のインピーダンスを下げるできるので電氣的整合を広い周波数範囲に涉ってとり挿入損失



図・19 アルミニウムのストリップにおける(周波数-厚み積/横波の速度)と(横波の速度/群速度)の関係

を下げ、多重反射信号を抑圧できるという利点がある。さらに変換子が指向性を有するとともに側面に吸収材をつけられる点等で分散型遅延回路には棒の波に比べて好んで用いられる。

変換子としては圧電セラミックの角棒を厚み方向に分極したものを用いる。s₀ 状態を図・19の遅延特性の変曲点付近で励振するためには、ストリップの板厚よりも変換子の幅をやや小さくするのがよい。このようにして作られた遅延回路は約20%の帯域を有し、遅延の直線性は帯域の下端で1.7%、上端で3.5%、とすぐれている。この種の遅延回路はSH波を用いるものよりも不要な状態の抑圧がより良く行なわれるゆえ、SH波の分散型遅延回路よりも好まれている。

さらに直線性のよい分散型遅延回路あるいは拋物線的に遅延時間の変化する遅延回路など、任意の遅延特性を合成したいという要求を満たすためには、均一断面の板波を用いるのでは不可能である。この問題を解決するのに次のような手段が考えられている⁷⁾。一樣なストリップの周波数と遅延時間の関係は長さや厚みによって一義的に定まり、長さや厚みを変えれば周波数と遅延時間の関係は変化する。したがって、多くの長さや厚みの異なった板を連続に接続すれば、総合遅延特性は各区間の板の遅延特性の和として得られる。多くの厚さがわずかに異なった短い区間の集まりの極限として厚さにテーパをついた板となる。

実現方法としては、希望する帯域に何点かの周波数を選び、何枚かのストリップで合成する。j番目の周波数f_jにおける遅延D(f)は長さx_jのj番目の板の遅延の和として

$$D(f_j) = \sum_j^n a_{ij} x_j \quad (17)$$

で表わされる。ただし、a_{ij}は図・19より得られる。このようにしてN個の板とM個の周波数によってマトリックスの形で表わされ、linear programmingによって所期の遅延特性との差を与えられた criterion で最小にする

解を求める。なお、各区間での反射を防ぐために各区間を接着することはせずに、1枚の板からエッチングにより板厚を変えるとともに表面を滑らかにして反射を防止する。

このようにして得られた遅延回路の直線性は非常に良好で50%の帯域で偏差±1.5%、25%の帯域で0.5%以下であり、一樣な板の場合の20%の帯域で3.5%の偏差に比べると、はるかにすぐれている。また、拋物線のような非直線の遅延特性に対してもよい結果が得られている。

5. 結 言

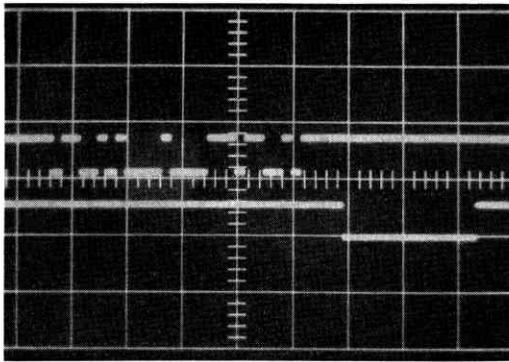
以上要約すれば、板波は板、線、棒、パイプ、表面層など断面がほぼ均一な物体の長手方向に伝わる被導波の一種であり、一般に速度分散があるので位相速度と群速度を区別して考える必要がある。パルスの伝播速度はほぼ群速度に等しく、位相速度はむしろ発生条件を求めるためのものと考えた方がよい。

板波を超音波探傷法に用いる場合には、

- (a) 発生には可変角の探触子が便利である。
- (b) 水浸法は減衰が大きく、探傷距離が短い。
- (c) 多重伝播状態や群速度が一定でないこと等のために探傷波形が歪みやすいから解読に注意を要する。

板波を利用した探傷法は性格的には従来の斜角探傷法と表面波探傷法との中間に位するものであって、従来の探傷法のギャップを埋めるものであり、かつ連続的に検査するには非常に適しているため、その応用は急速に発展するものと思われる。そのためには最適使用状態、傷の定量化など研究を要するものが少なくない。また、機器についても現在の探傷器は周波数可変範囲、パルス幅、送信波形などの点で必ずしも板波探傷法には最適と言えない。自動化の場合などはもっと単能化し、かつ、性能の良いものが作られてよいであろう。特にチタバリや硫酸リチウムなどの広帯域の変換子を使って広い周波数可変範囲をもつ探傷器ができると探触子の可変機構が省けて便利と思われる。

一方、板波の超音波遅延回路への応用面では、板波の発生に関して変換子を媒質に固定できるという点で探傷法に較べて容易である。非分散型遅延回路にはSH波の0次の状態が適しており、変換子に圧電セラミックを用い、遅延媒質としてアルミニウムを用いるという組合せで、2MHzのビット繰返し周波数、数msecの遅延時間の技術が確立している。また、分散型遅延回路にはLamb波のs₀状態を用いるのが、不要状態による寄生出力が少なくよい。直線からの偏差がかなり許され、帯域も大きくなくてもよい場合には均一断面の板を用いればよ

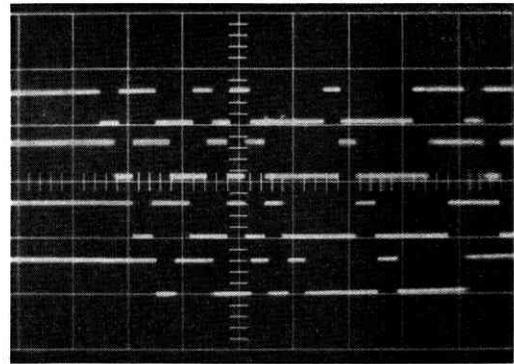


図・12 コマンド符号(上)とスイッチ出力(下)
縦軸 10 volt/div 横軸 sec/div

(1966年10月7日受理)

文 献

- 1) S. W. Golomb "Digital Communication" Prentice Hall.
- 2) A. V. Balakrishnan "Advances in Communication Systems"
- 3) J. C. Springett "Command Techniques for the



図・13 シフトレジスタ各部出力

Remote Control of Interplanetary Spacecraft" Proceedings of 1962 National Telemetry Conference 8-4.

- 4) W. R. Bennett ほか, "Data Transmission" McGraw-hill.
- 5) 安田ほか, "宇宙飛翔体用超遠距離コマンドの一方式" 昭和40年通信学会全国大会.

次 号 予 告

(1967年1月号)

研 究 解 説

河床形体の研究の過程について.....井 口 昌 平
——特に20世紀初頭までの研究について——吉 野 文 雄

光学集束系の等価回路表現.....藤 井 陽 一

海 外 事 情

ヨーロッパの道路と道路交通事情.....星 埜 和

研 究 速 報

ホログラムを用いた共役波面干渉法.....小 瀬 輝 次
山 本 和 也

アナログ、デジタル方式によるハイブリッドタイマ.....山 口 楠 雄
鈴 木 俊 光

触媒の物理的構造による反応選択性.....河 添 邦 太
吉 田 澄 朗 夫

軽量骨材コンクリートの高圧蒸気養生.....小 林 一 輔
伊 藤 利 治

——圧縮強度におよぼす養生条件の影響——

(p. 9よりつづく)

く、直線性が厳しく要求され、かつ、帯域を要する場合あるいは任意の遅延特性を得たいときには長手方向にテーパをつけて厚みを変化させた板を用いることによって実現できる。
(1966年10月17日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐藤: Bull. Earthquake Res. Inst. 29 (1951).

- 2) 井元: 電試彙報, 17, 1 (1953).
- 3) 尾上: 超音波専門委員会資料 (1955.7).
- 4) A. H. Meitzler: IRE Trans IRE UE-7, 35 (1960).
- 5) 屋上, 山田: 非破壊検査, 13, 6, 308 (1964).
- 6) 尾上, 山田: 非破壊検査, 13, 5, 255 (1964).
- 7) A. H. Fitch: JASA, 35, 5, 709 (1963).