

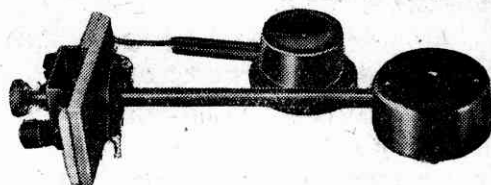
# 固 體 中 の 超 音 波 の 測 定

鳥 飼 安 生

最近超音波探傷器や魚群探知機或はその他の應用で超音波が世人の眼をひいているが、物質の諸物性や内部構造測定の一手段として物理化學的應用もまためざましいものがある。本稿では、固體中の超音波についてどのような測定法が行われているかについて、いろいろの場合につき、從來の方法から最新の方法にわたって述べたい。

## 1. は し が き

通常耳に聞える音の範圍は周波數で毎秒 20~20,000 サイクルであり、これ以上高い音は聴覺には感じなくなつて、いわゆる超音波といわれる。Bergmann<sup>1)</sup>によればその周波數範圍は  $20 \sim 5 \times 10^5 \text{kc}$  (キロサイクル) であるが、この上限はさらに擴げられようとしている。この超音波の研究が盛に行われだしたのは、第一次大戦末期フランスの物理學者 Langevin が潜水艦探知の目的で強力な超音波を得ることに成功して以來である。Langevin は水晶のピエゾ電氣効果を利用して、從來の方法とは比較にならない強度の超音波を得たのである。その後、Wood-Loomis の實驗とか Pierce の超音波干渉計の發明等を経て超音波の研究ははなばなしく展開されてきた。現在超音波は單なる音響學の範圍から、一般の物理・化學・通信工學・生物學さらに醫學へと、その領域をのばしてきているのであるが、この超音波の應用について大きく分けると二つの面がある。一つは化學反應、生物現象等への影響に關するもので、超音波の持つ大きなエネルギー、壓力變化が利用されており、第二の面は、媒質中での超音波の音速及び減衰性の精密測定に關するもので、媒質の弾性的性質と分子構造の研究のための音響技術の應用といえる面である。媒質を傳わる音波の速度は、その媒質の密度及び弾性率と簡単な關係のあることはよく知られたところで、音速を測定することにより、その媒質の弾性的性質を知ることができる。ところで、氣體、液體中の音速測定は可聴音の領域では困難であるが、超音波の領域では超音波干渉計により比較的容易に、しかも相當の精度で可能となり、Pierce 以後急速にこの方面が發達したのである。



超音波送信子及び受信子

すなわち、氣體中における音の分散と吸収とから、Kneser のいわゆる分子音響學が生れてきたのであり、又液體においても、その中の音の吸収、分散と液體構造との關聯につき幾多の研究がなされている。理論的研究と相俟つて、超音波技術は物質の内部構造探知への有力な武器といえるわけである。さて固體においても、事情は全く同じである。固體では、低い周波數の可聴音における弾性率測定も比較的容易であるが、もつとも精度の高いのはやはり數 10 kc の超音波における測定である。相當古くから金屬や結晶について、超音波による弾性率測定が數多行われ、それぞれすぐれた結果をだしているが、超音波を使うもつとも大きな利點は、試料が比較的小さくてすみ、装置も小型に組めるため、溫度や電磁場等の條件を相當希望通りにできることである。さらに最近、ゴムや合成樹脂のような高分子化合物の弾性、塑性的性質に關する理論的、實驗的研究が盛んとなつてきたが、超音波技術はこゝでもまた大きな役割を果そうとしているのである。本稿では、固體中の超音波の音速測定法について、最近迄に知られている方法及び筆者の行つてゐる實驗について概略的に述べてみたい。

## 2. 固體中の音速

氣體及び液體中では、音は唯一種の壓縮波すなわち縦波だけが存在するが、固體中ではこの外に横振動が行われる。すなわち横波が存在する。これは、固體內での剛性によるたりの歪力によるものである。

これら固體内の弾性波動の傳播速度は、その固體の弾性常數によつて定まるが、特に等方性固體の場合、その弾性常數としていわゆる Lamé の常數  $\delta$  及び  $\mu$  が使われる。 $\mu$  は剛性率と同じである。そこで無限に擴がつた等方性固體を考え、その中での縦波の速度、及び横波の速度をそれぞれ  $V_l$  及び  $V_t$  とすると、これ等は Lamé の常數を用いて次のように表わされる。

$$V_l^2 = (\delta + 2\mu)/\rho, \quad V_t^2 = \mu/\rho \dots \dots \dots (1)$$

$\rho$  は媒質の密度である。

この外普通に使われている常數に Young 率 ( $E$ ) と、

Poisson 比 ( $\sigma$ ) とがあるが、これ等と Lamé の常数との関係は次の通りである。

$$E = \mu(3\delta + 2\mu)/(\delta + \mu), \quad \sigma = \delta/2(\delta + \mu) \dots (2)$$

$E, \sigma$  を用いて速度式を書直すと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} V_l^2 &= (E/\rho) \{ (1-\sigma)/(1+\sigma)(1-2\sigma) \} \\ V_t^2 &= (E/\rho) \{ 1/2(1+\sigma) \} = \mu/\rho \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

次に固体が棒状をしていて、長さ比べて直径が無視できるほど細く、また傳播する音の波長が直径に比べて充分大きいと考えられるとき、速度式は次のように簡単になる。

$$\left. \begin{aligned} V_l^2 &= E/\rho (\text{縦振動}) \\ V_t^2 &= \mu/\rho (\text{横振動}) \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

以上媒質である固体の形について、二つの極端な場合を考えたが、この中間の状態、例えば音の波長と棒の直径とが同程度の場合の音の傳播はもつと複雑となってくる。従つて音響學的に固体の弾性率を測定するには、上の二つの極端な場合の何れかを擇ぶべきで、中間の状態はなるべくとらないのが普通である。

### 3. 固体中の超音波測定法

前節に述べたところから従つて、固体中の超音波音速の測定或は超音波による弾性率測定の方法は2つに區別される。

その一つは、前節ではじめの場合に相當するもので調べようとする固体試料の大きさに對して充分小さい波長の超音波を用いて行ふ。したがつて小さな試料を用いる場合は、周波数を相當高くしなければならぬ。この方法の使われる周波数は少くとも 100kc 以上でなければならない。

第二は前節後者の場合で、細長い試料を用い、使う超音波の波長は試料の直径に比べて充分長いようにする。したがつて周波数は割合に低いものとなり、通常 100kc 以下に用いられる。この方法では普通長さの方向の音波に試料を共振させる方法をとるので、共振法と名づける。これに對して、前者の方法は普通進行波を用いて行われるから進行波法と名づけよう。

#### (i) 共振法

長さ  $L$  の一様で細長い棒の中を、長さの方向に音が傳播するときの基本共振周波数を  $f$  とすると、これと傳播速度  $V$  との関係は次の通りである。

$$V = 2fL \dots (5)$$

この式は、伸び縮みの振動すなわち縦振動にも、振り振動にも通用する。(5) 式と前節の (4) 式とを比較することにより、その固体の弾性率と共振周波数との関係が次のように求められる。

すなわち、縦振動の場合には

$$E = 4f^2 L^2 \rho \dots (6)$$

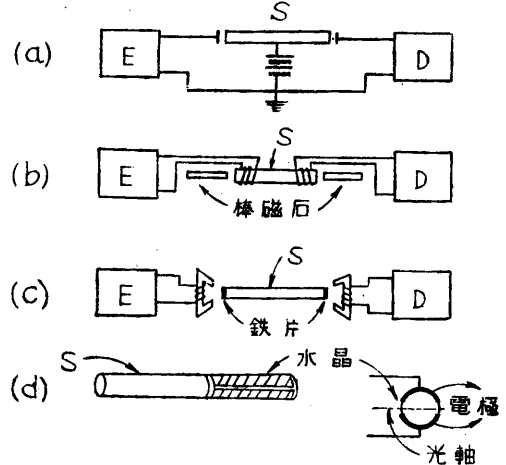
横振動の場合には

$$\mu = 4f^2 L^2 \rho \dots (7)$$

となる。但し (6) 式は棒の直径が長さ比べて充分小さいとした時の式で、そうでない場合には若干の補正を要する。

さて棒状の試料に振動を與え、またその振動をうけて試料の共振周波数を求める方法には色々あるが、その代表的なものを第1圖に示した。<sup>2)</sup>

第1圖 (a) に示したのは、靜電的方法である。<sup>3)</sup> 試料



第1圖 共振法による弾性率測定装置

E: 發振器 D: 受信器 S: 試料

が金属の場合、これに或る程度の偏倚電壓を與えて、發振器よりの電壓を靜電的に試料に働く機械的な力に變え受振の方も靜電的に行く。

(b) はアメリカの Zener<sup>4)</sup> による渦電流の方法である。試料の端近く巻いたコイルに流れる電流による試料内の渦電流と端近くおいた棒磁石の呈する磁場との相互作用がこの方法の原理となつてゐる。

(c) は試料の端に鐵片を貼りつけ、これを電磁的に振動させ、また振動を受けるのである。<sup>5)</sup> この方法は電磁型スピーカーまたはマイクロフォンと同じ原理によつてゐる。

最後に (d) に示した方法は、アメリカの Quimby 及びその弟子たち<sup>6)</sup> が創始して、すでに長年月にわたつて金属及び結晶について測定を行つてきた方法で、水晶のピエゾ電氣効果を利用したものである。この場合試料は圖のように Y-方向に延びた X-カットの水晶棒の一端にセメント附けされ、圖のように水晶につけられた極板に高周波電壓を加えて振動が驅動される。共振の状態を知るには、上の兩極板に流れる電流をはかるのである。

以上述べてきた方法による固体の弾性率測定の精度はきわめてよく、0.1パーセントの精度で測定が行われている。これらの方法を用いている面白い結果が發表されているのであるが、それらはすべて文献によることとして、こゝでは省略する。

## (ii) 進行波法

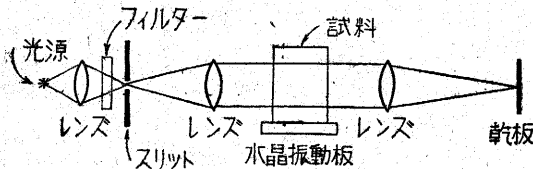
測定周波数がずっと高くなると、前の共振法では試料の大きさを非常に小さくせねばならず、これを用いることができなくなる。この場合には、波長に比べて断面直径の充分大きい試料を用い、超音波を連続弾性波として取扱つて（縦振動の場合）、その諸量を測定する。この場合の測定法にも次のようにいろいろある。

(a) 光廻折法 透明な媒質中に音波があるとき、波動式にしたがつてその中に一定の間隔で密度の大小が現われる。その媒質の光弾性によりこれが光に対する屈折率の周期的な変化となり、一種の廻折格子の作用をする。この場合の格子常数は音の波長  $\lambda$  であるから、光波長（空気中）を  $\lambda$  としたとき、廻折角  $\theta$  は音波に対して垂直入射のとき、次式で与えられる。

$$\sin \theta = \lambda / \lambda \dots \dots \dots (8)$$

よつて、 $\lambda$  と  $\theta$  とから  $\lambda$  が求められ、これと音源の周波数とから音速が求められるのである。

Bergmann 及 Schaefer<sup>7)</sup> による実験装置は第2圖の通りである、前にも述べた通り、ガラスのような等方性

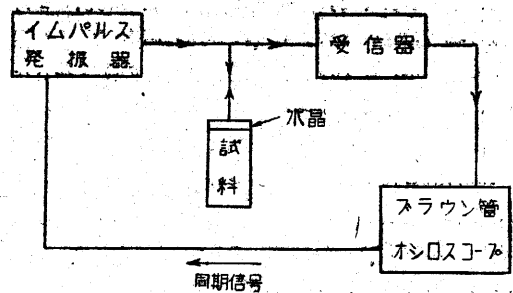


第2圖 光廻折法

固体中の音速は、縦振動と横振動のおのおのに対して異つた値をとるので、それぞれに應じて音波の波長  $\lambda$  も異つており、したがつて廻折角  $\theta$  も異つている。すなわち等方性固体の場合、廻折角は2つ表われるのである。（勿論第1次の廻折像だけを考へてのことである。）

光廻折の方法は透明な固体の場合に限られ、不透明のものについては簡単ではないが、(b) 以下で述べる方法は透明、不透明にかかわりないものと一般的な方法である。

(b) 衝撃波法 世界第二次大戦中、特にアメリカにおいて radar がきわめて發達したが、戦後早速 radar 技術が超音波に應用されて、衝撃波による音速測定法が發達してきた。測定の原理は極めて簡単である。すなわち試料の片端にくつつけた音源から發射された衝撃超音波が、試料内を傳播して試料の他端に達し、そこで反射して元に戻つてくるまでの時間を測定すればよい。装置の概略圖は第3圖の通りで、上の時間の測定はブラウン管を用いて電氣的に行うことができる。回路の原理は、本誌でもたびたび報告された超音波探傷器<sup>9)</sup>と全く同じであるが、ごく簡単に述べると、オシロスコープ内の時間軸回路と同期した信號がイムパルス（衝撃波）發振器に送られ、時間軸回路と同じ繰返周波数でイムパルスが發生して水晶振動子に加えられる。水晶のピエゾ電氣作

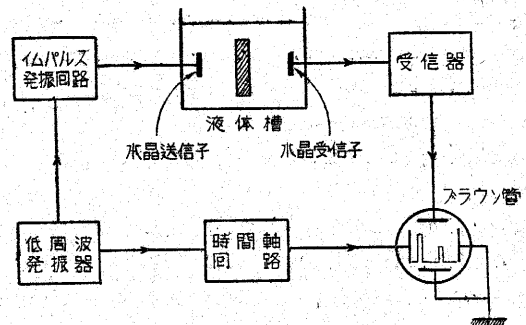


第3圖 衝撃波による音速測定装置

用により試料内にイムパルス超音波が發生して試料内を往復し、再びこゝで電氣的イムパルスに變つてはじめてのイムパルスとともに受信器に送られ、増幅檢波されブラウン管の縦軸に加えられる。ブラウン管輝面上に現われた2イムパルス間の時間間隔を適當な時間目盛で讀めばこれが求める超音波の往復時間となる。

用いる水晶振動子として、X-カットの水晶を用いると、縦振動に対する値が求められ、Y-カットの水晶を使えば、横振動に対する値が得られる。

上の方法は、金属、結晶體のように内部摩擦の小さいものについて用いられるが、ゴム状物質のように減衰のはなはだしいものについては適用されない。このような場合には、第4圖のような装置を使う。<sup>10)</sup> 第3圖と比較



第4圖 液体中に試料をおいた音速測定装置

してみると、2枚の水晶をそれぞれ送信子、受信子として使う以外は電氣回路に何の變化もない。この場合、水晶をふくめた音響系はすべて圖のように水或はその他の液体中におかれ、送受信子である二枚の水晶の間に、測定しようとする試料の薄い板状のものが音の進行方向に垂直に挿入される。測定方法は、まず試料のない場合、液体中で送信子から受信子に音の達する時間を前と同様に求め、次に試料を挿入して同様に求めた音波の傳播時間のずれと、試料の厚さ、液中の音速から試料中の音速が計算されるのである。装置が液体中に浸されるのは、空気中では、固体と空気との音響イムピーダンスの開きが大きいので、両者の境界面で音のエネルギーはほとんど反射されて使いものにならないからである。

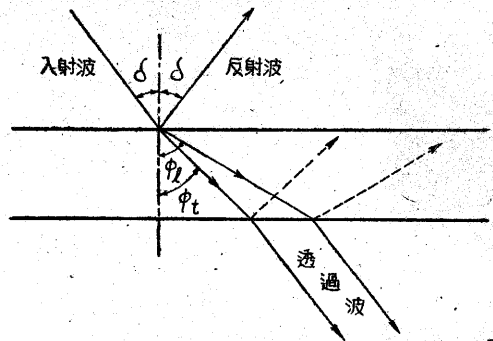
アメリカの文献<sup>8), 10)</sup>によると、衝撃波による測定法

は非常に精度がよくて、第3圖の装置では0.1%、ゴム状物質の場合の第4圖の装置では2%の精度があると報告されているが、これだけの精度を得るのは容易でない。特に發振回路でのイムパルス幅を充分狭くすること、受信回路の感度、周波数特性をよくすること及び正確な時間目盛を得ることが大切である。

用いられる周波数は、1Mc (メガサイクル) から數10Mc にわたっているが、時にずつと低い數10kcの周波数のものも報告されている。<sup>10)</sup>

(c) 全反射法 光が屈折率の大きい媒質から屈折率の小さい媒質へ進むとき、ある入射角以上では境界面で全反射して第2の媒質へ進んで行かないことはよく知られているところである。この全反射を起す臨界角を $\Delta$ とした時、 $\sin \Delta$ は兩媒質の屈折率の比に比例する。同様のことが音波の場合にも起るのであつて、音波の場合媒質中の音の傳播速度が屈折率に逆比例する量となる。したがつて液體と固體との境界面がある場合、一般に固體中の音速は液體中の音速より大きいから、屈折率は逆に液體の方が大きいこととなり、音波が液體側から固體側に進むとき、ある入射角以上で全反射を起す。この時の全反射の臨界角の正弦が光の時と同様に液體中、固體中の音速の比になるので、この臨界角を測定することにより、固體中の音速が求められる。この方法での装置の概略は第4圖の液槽の部分を考えればよい。この場合も試料は板状のものをを用いるが、その中心に立つた鉛直軸の因りに回轉できるようにしておく。今まで報告されている文献<sup>11), 12)</sup>では、送信子に加えられる電壓は、定常的な高周波電壓であつて、これによつて生じた定常的な超音波が試料を貫き、その出力を適當な方法で測るのである。その方法として報告されているのは、光學的方法<sup>11)</sup> (前に述べた廻折を利用する方法) と水晶を受信子として用いた電氣的方法<sup>12)</sup>とがあるが、筆者のところで最近衝撃波を使う方法を考案した。金屬やガラスのような内部摩擦の小さい固體試料についてははじめの2方法でも問題ないが、ゴム状物質のように吸収性のものではどちらの方法も感度が低くて測定がむずかしくなる。この感度の低下は衝撃波を使うことにより防ぐことができる。この場合の装置は第4圖と全く同じである。ゴムの測定の場合、感度を上げるため受信器の利得をできるだけ増すと、直接發振器から誘導的に或は輻射により受信器に達する餘計な信號が馬鹿にならなくなつてきて、いくら遮蔽につとめてもどうしても消えがたい。この困難を避けるにはイムパルスを使えばよいのである。第4圖のブラウン管輝面上に見るように、直接純電氣的に傳播した信號と、一度超音波を介して傳つたものとは後者の時間的遅れのため明かに區別されている。そこでわれわれは安心してこの第2のバースの増減だけを問題にしておればよいのである。

さて一般に固體中には縦波、横波があり、それ等の速度が互いに異つてゐることはすでにたびたび述べてきたのであるが、速度が違うということは前に述べた意味で屈折率が違うことになり、したがつて現在の方法で臨界角を求めた場合それが2つ出てくる。第5圖において、



第5圖 平行板における音波の進行

$\delta$  の入射角で境界面に達した音波は、固體內で縦波と横波とに分れ、それぞれの速度に應じて、屈折角  $\phi_l$  及び  $\phi_t$  の方向に進み、第2の境界面で再び液中に入射方向と平行な方向に出て受信子に向ふ。液體中の音速を  $V_0$ 、固體中の縦波、横波の速度をそれぞれ  $V_l$ 、 $V_t$  とした時屈折の法則は次の様になる。

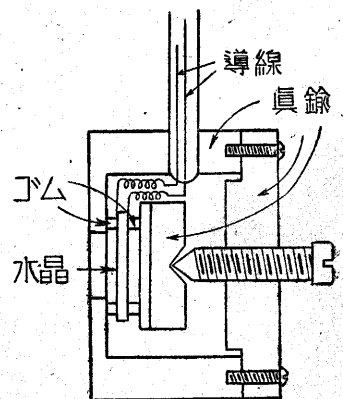
$$\sin \delta / \sin \phi_l = V_0 / V_l, \quad \sin \delta / \sin \phi_t = V_0 / V_t \dots (9)$$

試料を回轉して入射角を0度から次第に増て行くとまづ縦波に對する全反射が起り、さらに廻轉すると、横波に對する全反射が起る。各臨界角をそれぞれ  $\Delta_l$ 、 $\Delta_t$  とすると (9) 式から

$$V_l = V_0 / \sin \Delta_l, \quad V_t = V_0 / \sin \Delta_t \dots (10)$$

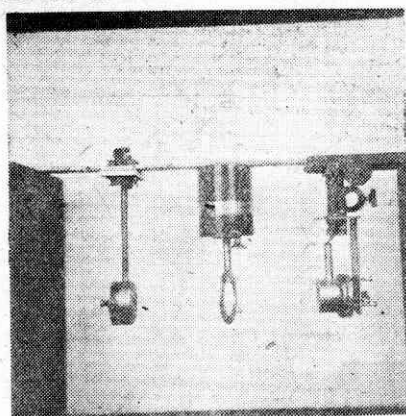
と  $V_l$ 、 $V_t$  が  $V_0$  に對して求められるのである。こゝで注意すべきは、 $\delta = \Delta_l$  のとき、境界面においてまりの歪力が0になる條件から、固體內には縦波ばかりでなく横波も傳播しないことである。すなわちこの時は受信子の出力は鋭く落ちて、 $\Delta_l$  の値を精度よく定めることができるのである。

實際に測定の場合、送信子、受信子の構造外觀は第6圖及びカットに示す通りである。水晶は圓孔のあいた眞鍮容器内に水密に封じられ、その一面は外の液體



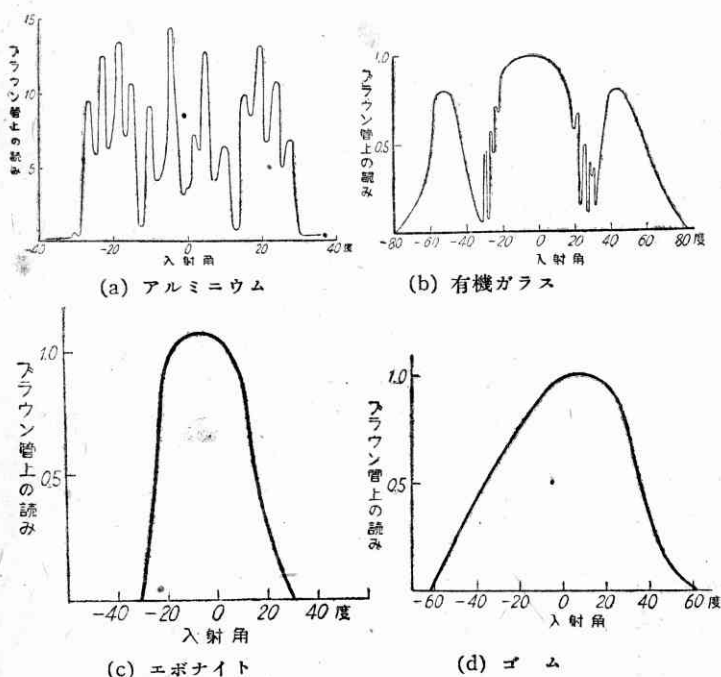
第6圖 壓電型送信子  
または受信子

に、他の面は内側の空気に接している。測定装置の外観は第7圖に示す通りである。



第7圖 第6圖の外観

この方法による測定の結果の2~3例を第8圖に示す。第8圖(a)はアルミニウムについての測定で、<sup>12)</sup> 内部摩擦の非常に少ない試料で、その兩境界面の間で縦波、横波が何回も反射を繰り返して、それ等の間に生じた鋭い干渉が顯著に現われている例である。しかも縦波の全反射に対しては一段と鋭い谷を見せている。兩側で急激に落ちているところが横波に対する全反射の角度である。同圖(b)は有機硝子についての結果で、内部摩擦がある程度存在する場合の一例である。第8圖(c)はエポナイト(d)はゴムについての測定の例で、いずれも山が一つし



第8圖 全反射法による測定

かないのは、これ等の物質中で横波はきわめて減衰しやすい性質のものであることがわかる。また加硫によりゴ

ムの中の音速は非常に増すことを示している。

全反射の方法で音速を求める場合注意すべきことは試料の厚さについてである。試料が餘り薄いと、見掛け上の音速は試料の大きさが無限大に擴がついていてと考えた時の音速よりずつと小さいものとなってくる。文献によると、用いる超音波の周波数を  $f\text{Mc}$  とし、試料の厚さを  $d\text{cm}$  としたとき  $f \times d$  は  $4\text{Mc}\cdot\text{cm}$  より大きくなければならない。この方法での測定の精度は、角度測定の精度によつて非常に左右されるが、それさえ充分正確にゆけば、金属、ガラス等の場合1%位の精度を得ることは容易であらう。

#### 4. あとがき

以上長々と、固体中の超音波音速の測定法につき、種々の場合を述べてきたが、測定の対象や、周囲の条件によつてそれぞれ適宜な方法を用いるべきであらう。

最近の超音波探傷器のように、測定技術の應用ははなやかであり、また合成樹脂、合成ゴムのように測定対象についても、きわめて興味深いものがあつて、固体中の超音波についての測定は今後ますます重要なものとなつて行くであらう。この一文が、その方面の方々に少しでもお役に立てば、筆者の大いに幸とするところである。

終りに、本稿に述べた實驗測定は精密工學科學生古谷勝美君によるものであつて、同君の熱心なる努力に厚く謝意を表する。(25・7・10)

#### 文 献

- 1) L. Bergmann: 'Der Ultraschall', VDI-VERLAG GMBH, BERLIN, 1939.
- 2) S. Siegel: J. Acous. Soc. Amer. 16, (1944) 26.
- 3) R.B. Jacobs and D. Bancroft: Rev. Sci. Inst. 9, (1938) 279.
- 4) C. Zener, F.C. Rose and R. H. Randall: Phys. Rev. 56, (1939), 343.
- 5) R. L. Wegel and H. Wilther: Physics 6, (1935) 141.
- 6) L. Balamuth: Phys. Rev. 45, (1934) 715; F. C. Rose: Phys. Rev. 49, (1936) 50.
- 7) L. Bergmann and C. Schaefer: Sitz. Ber. Berliner Akad. (1935) 222.
- 8) H.B. Huntington: Phys. Rev. 72, (1947) 321.
- 9) 高木, 丹羽: 生産研究 第1巻 第3號 13頁; 第2巻 第3號 14頁
- 10) D.G. Ivey, B.A. Mrowca and E. Guth: J. Appl. Phys. 20 (1949) 486.
- 11) Bez-Bardili: Zeits. f. Phys. 96, (1935) 761.
- 12) W.C. Schneider and C.J. Burton: J. Appl. Phys. 20, (1949) 48.