



Title	超音波速度並びに吸収の測定とその応用
Author(s)	池田, 郁雄; Ikeda, Ikuo
Citation	北海道大學工學部研究報告, 31, 1-93
Issue Date	1962-10-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40708
Type	departmental bulletin paper
File Information	31_1-94.pdf



超音波速度並びに吸収の測定とその応用

池 田 郁 雄

Measurement of Ultrasonic Velocity and Absorption

Ikuo IKEDA

Abstract

The three methods for the measurement of ultrasonic velocity and absorption which are principally different in their basis of the element to be measured are the interferometer method, the pulse method and the optical refraction method. In the present study, a comparison of these methods with the exception of the optical method was attempted for the purpose of developing a new technique with an improved accuracy of measurement in liquid.

The higher accuracy of measuring ultrasonic velocity by the use of an interferometer was realized and the range of the applicable frequency was extended up to several ten Mc. Further, two methods of measuring ultrasonic absorption in a very short time were proposed. The first is an application of the reflected pulse, and the other is a technique in which the attenuation of sound on the synchroscope was observed.

Lastly, various applications of these new methods are introduced, including the calibration of a micrometer with an accuracy of approximately 0.2μ .

目 次

第1章 序 論	2
1. 緒 言	2
2. 超音波の速度及び吸収の測定法とその精度	3
3. 工業計測用超音波速度及び吸収の測定装置に対する要求	5
4. 超音波速度及び吸収の測定精度向上に関する考察	8
第2章 試験用測定装置	9
1. 概 要	9
2. 送 信 装 置	9
3. 送 受 音 装 置	11
4. 受信装置及び記録解析装置	16
5. 付 属 装 置	17
第3章 送受音水晶板の振動波形とその読取位置	17
1. 概 要	17
2. 直流パルス入力と送音水晶板の振動	18
3. 直流パルスによる受音波形とその読取位置	19

4. 高周波パルスによる受音波形とその読取位置	23
第4章 測定音場の実験的検討	24
1. 音速, 音吸収の測定と測定音場の影響	24
2. 直流パルスによる音場の検討	24
3. 高周波パルスによる音場の検討	25
4. 連続高周波の干渉による音場の検討	26
5. 音場の調節法の総括	27
第5章 音速度の測定とその精度	27
1. 概 要	27
2. 直流パルスによる方法	28
3. 高周波パルスによる方法	33
4. 干渉法とパルス法との共用による新しい精密測定法	36
5. 音速度測定法の総括的検討	38
第6章 音吸収の測定	39
1. 概 要	39
2. 高周波1次受音波による音波吸収の測定	40
3. 高周波高次受音波群の波高の減衰と音場の設定	44
4. 音吸収の瞬間的測定法	52
第7章 音速度, 音吸収の測定法の工学的応用	54
1. 概 要	54
2. 音速度, 音吸収測定の実用	54
3. 微小変位測定器としての応用	55
4. 水晶板平行設定の検討の実用	57
5. 結 語	58
参 考 文 献	58
波 形 写 真	59
別 表	89

第1章 序 論

1. 緒 言

物質中をエネルギーが伝播するときに, エネルギーの受ける形態上の, 又は強度における変化は, その物質の性質, 状態による。音波を物質中に照射して物質から受ける応答についての研究は古くから行なわれていたが, 超音波技術の発展は精密な計測法として基礎物性研究には勿論のこと, 広く各般の工業に応用され, その重要性は日々益々増大している。超音波の速度, 吸収の測定装置も多種多様に考案されているが, それらの装置に依る測定結果のバラツキは, 夫々の装置における測定の相対精度 (例えば確率誤差によって表わされる。) より, はるかに大きく, その精度は, 精密な測定値として採用するために充分の信頼を得ることはできない状態である。これは試料そのものの化学組成の微少な相異にも依るがより以上に測定器における偏差が重大な影響を与えているものと思われる。本論文は誤差に関与すると思われる多くの要

素を検討したもので、実際にそれらによる測定値のバラツキを分離して明示し、測定の精度を高める新しい方法を見出すために試作した装置についてその性能を述べ、且つ又その装置による工学上の種々の可能性を論じ、その若干の実例を示したものである。

本章においては、音速及び音吸収の測定器に要求される性能と、現在使用されている各種の方法について、その長所短所を考察し、如何なる装置が作られるべきか、如何なる方法が可能であるかを述べる。

第2章では、この考察に基づいて試作された装置についてその構成並びに各部の構造の概要を説明する。

第3章は使用した直流パルス波及び高周波パルス波の実験的説明であり、これらの波形が測定値の読取りに際してもたらす誤差を調べたもので精度向上の可能性を知るための実験結果である。

第4章では、これらの波形が、音場の設定即ち送音板と受音板を含む容器の種々の状態に対して示す変化を、実験した結果に依って述べる。そして音場の設定に際しての極めて敏感な受音波形の変化が端度器の検査に応用される可能性に言及する。

第5章では、斯くして検討された装置において音速がどのような精度で与えられるか各種の方法で比較実験した結果を示す。特に最良の音場設定と共に、新しい高精度の音速の測定法の考案を述べる。一方工業的な音速の簡便測定法についても述べる。

第6章は、音吸収の測定に関する研究の結果であって、音場の設定及び検定が如何に音吸収の測定に重要な関与を示すかを明らかにしたものである。更に音吸収の測定のために以上の検討によって確立された新しい簡便迅速な測定法が提案される。

第7章において、工業上に、これらの方法の示す有用性について既に述べられた以外の可能な分野と二、三の応用実験について述べる。

尚本論文では干渉計を中心に検討がなされているので対象試料は流体が最も適当であり、実験では殆んど水を用いている。

2. 超音波の速度及び吸収の測定法とその精度

超音波による液体中の音速及び音吸収の測定法として既に多くの試みがあるが、音速度と音吸収の測定が共になされる方法としては、干渉計、光の廻折による方法、並びに音のパルス法の三つに大別される。これらの測定法は、それぞれ使用周波数領域に相異があり、又目的によって長短がある。次にこの三つの測定法を比較吟味する。

超音波干渉計に依る方法： 平面波を輻射する音源水晶板と、その前方に平行に置かれた反射板との距離が半波長の整数倍になるとき音源水晶を含む発振回路の電流は極値を示す。このことを利用して音波長を測り、使用した周波数と $v=f\cdot\lambda$ の関係 (v : 音速, f : 周波数, λ : 波長) から音速を求める。この方法は比較的低い周波数 (100 Kc~数 Mc) では音速を測る最も

精密な方法である。この精度については、多くの測定値の確率誤差は0.1%以内であるが、これらの報告間のバラツキは0.1%よりもはるかに大きく10%に及ぶことさえある。干渉計による音速測定の理論は Hubbard¹⁾, Großmann, Borgnis²⁾ によって与えられている。又、吸収係数の測定は理論は複雑であるが、古く Pielmeier³⁾ による実験以来多くの報告があり、その測定の誤差は10~20%といわれている。

光の廻折による方法：これは音波伝播によって媒体中に生ずる密度の等間隔変動が光の廻折格子の役割をなすことを利用した方法である。 n 次の廻折光が入射光となす廻折角 θ_n は、音波長 λ 、光波長 λ_c を用いて、

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda_c}{\lambda} \quad (n=0, \pm 1, \pm 2 \dots)$$

で表わされるから、これを用いて音波長を求め、以下 $v=f\lambda$ により音速を求める。又、吸収の測定は、この廻折光の強度が音強度の変化と直接関係があるから、例えば一次の廻折スペクトルの強度が音強度に比例することを利用して行なわれる。光学法にはその他種々の変形がある。光の廻折に依る方法は周波数の高い程精度もよく、周波数範囲は1 Mc~数百 Mc である。光学系の精度と音波の平面波よりのズレ等が影響し、又更に相当の強度を必要とすることが難点である。音速度の測定精度は高い周波数では0.1%以内の誤差で得られる。又吸収の測定誤差は10%以内と云われている。

パルス法：一定の短い継続時間の衝撃波を試料に与えて、それが一定距離を伝達するに要する時間を測定するか、或は一定時間に到達する距離を測る方法である。この音パルス法は直接的であるから歴史は非常に古く、可聴域でなされていたが、radarの技術の進歩と共に急激な発展をみた。音源水晶板に継続時間(本論文中パルス幅と称す)の短い衝撃パルスを与えて、このパルスが一定の距離を伝播するに要した時間をシンクロスコープで読むと、音速は直ちに知ることができる。又受音波の強さの距離による減衰から音吸収を測定する。音速度測定の精度はシンクロスコープ時間軸の精度に制限されて0.5%~1%の誤差である。又中粘性の液体では吸収の測定も1%~5%の誤差で得られるが、低い粘性の液体では充分の精度は得られない。音速の測定には、パルスの繰り返しの時間々隔をパルスの伝達時間によって得る方法(即ち受音パルスを送音パルス発生器に feed back してそれによって次の音パルスを発生させ、その繰り返し周波数を測って、その伝達時間を知る方法で、送受音板距離は一定に保つ——sing around 法と云う)が極めて高精度を得て(0.001%の確率誤差)いるが、この方法で音速と同時に吸収の測定を高精度に行なうことはできない。パルス法における周波数範囲は各種測定法のうちで最も広く、可聴域から数百 Mc に達する。パルス法の利点は瞬間のエネルギー伝播によって測定されるから、連続波に較べて大きいエネルギー密度を使って、しかも発熱等の影響から比較的に免れることができ、又直接の伝達音と容器壁等による散乱した後の伝達音とを時間的に分離できるから、補正量についての考慮が他の方法に較べてはるかに容易である

こと等である。

以上の三方法の特徴を表記すると、第1表の如くである。

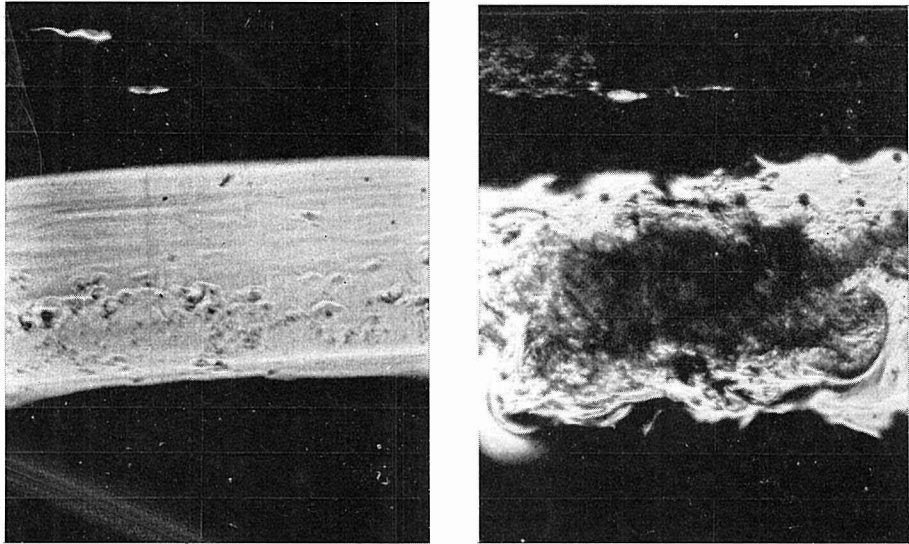
第1表 音速音吸収測定に於ける三方法の比較

		干 渉 計 法	光 廻 折 法	パ ル ス 法
音	変 量	反射板距離 $l=n\lambda$	廻折角 θ	パルス伝達時間 τ
	定 量	発振周波数 f	発振周波数 f	送受信間隔 l
	関 係 式	$v=f\lambda$	$v=f\lambda, \lambda=\lambda_0 \sin \theta$	$v=l/\tau$
速	変量インジケータ	マイクロメーター又はダイヤルゲージ	フィルム及びコンパレーター	シンクロスコープ
	測定に要するエネルギー/時間	微 弱	強 大	強
	測定に要する全エネルギー	大	大	小
の	測定中の温度変化	要 注 意	大; 要 注 意	極 小
	測定に要する時間	大	小	極 小
	測 周 波 数 範 囲	100 Kc~数 Mc	1 Mc~数百 Mc	低~数百 Mc
定	測 定 誤 差	0.1% 以内	0.1%~1%	0.5%~1%
	補正等の考慮すべき要素及び計算手間	少	多	少
	試 料	要 均 質	要 均 質	不均質でもよい平均値が求まる
	測定装置の設定	要 注 意	光学系の設定に極めて技術を要す	技術的困難 最小
音	変 量	回路電流 i_p	廻折光強度 I_n	受信パルス高さ h_x
	定 量	距 離	距 離	距離又は時間 x
	変量のインジケータ	高周波電流計又はガルバノメーター	光度計	シンクロスコープ
吸	関 係 式	複 雑	$I_n = J_n^2 \{ \phi(\lambda) \}$	$h_x = h_0 e^{-\alpha x}$
	測定に要する時間	大	小	稍 大
	測 定 誤 差	10%~20%	10%	1%~5%
測	最も正確に計れる粘度	小	中, 大	中
	計算手間と補正要素	多 大	少	僅 少
	試 料	要 均 質	要 均 質	不均質でもよい平均値が求まる
定	測定装置の設定	要 厳 密	音速測定に同じ	要 注 意

3. 工業計測用超音波速度及び吸収の測定装置に対する要求

超音波の計測への応用として既に実用されているものは極めて広範であるが、これを大別すると、音速を利用したもの、音波長を利用したもの、音の直進性を利用したものと及び音吸収を利用したもの等である。しかし、むしろこれらの音の性質のいくつかを同時に利用した場合の方が多く、例えば探傷器、測深器等は、音速、反射、直進性を利用したものであり、厚み計

等には波長，干渉を利用したものもある。又弾性率 E 又は圧縮率 β の測定は音速を利用して $E = \rho v^2$ 又は $\beta = 1/\rho v^2$ (ρ は密度) より求められるが，高分子の如き粘弾性体の弾性率の測定にとっては音速の外に音吸収の測定も必要である。同様に一般の分散系に対しても，音速音吸収は

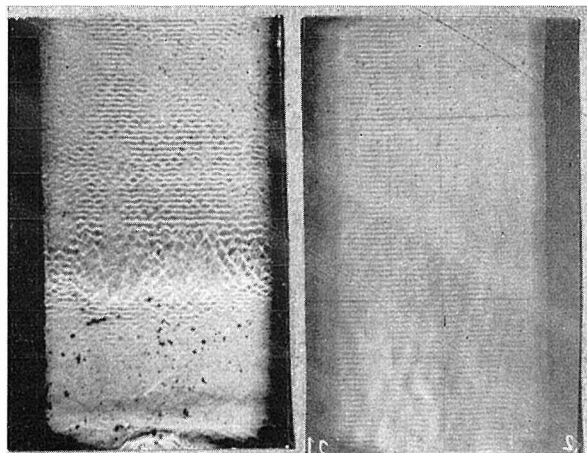


(A)

(B)

写真 1 アルコール-水両液境界面における超音波伝播 (1)
シュリーレン法による超音波衝撃写真

- (A) アルコール 50% 水溶液，中央白色部は混合して散光を示している状態
(B) 超音波衝撃直後，分散層に現われた攪乱状態



(A)

(B)

写真 2 アルコール水両液境界相における超音波伝播 (2)
火花放電による瞬間陰写真 (共に反射板なし 1 Mc)

- (A) 二液相界面の攪乱と見かけの波長増大 (アルコール 70%)
(B) 充分攪拌されたのちの状態 (A と同一試料)

その状態表示のために重要な量である。

又、実際の工業的な計器としては平衡均一系における音速音吸収の測定の他に、液体混合の過程、化学反応の過程、分散系の分散状態等の変化する過程や不均質過程における弾性率、圧縮率等を知るために、これ等の状態における音速音吸収を速かに測定する必要がある。しかし、この目的のためには前節のどの方法も単一には充分の成果を挙げ得ない。例えば写真1はアルコールと水の二液相状態における超音波の起発衝撃を示すシュリーレン写真であり、強い超音波が界面に大きな反応を与えるから光学的測定法が無意味なことを示すものである。写真2は超音波の波長変化を見る為に撮影されたもので写真1より界面が明確であるのは光源として火花放電による 10^{-6} 秒以下の瞬間光源を使用したためである。二液の界面に当る所に異常な変化が観測される。実際に音速は(従って音波長も)中間の濃度(約30%水溶液)で最大を示すが、それは純水の音波長の10%以内の増加であり、写真2に見られるように2倍近い増加はあり得ない。従って、この異常は光学上の問題であり、液体の密度の変化が光の経路方向にも一様でなく屈折による波長の見かけの伸びが現われることを示すものである。写真3は超音波場による光の廻折写真の一例である。これは自由表面をもった水の容器の底から超音波(1 Mc)を照射して水銀灯光源 4358 \AA によって撮影したものでありAは全くの均質系であり、B、Cはアルコールを拡散した状態である。不均質系に対してはB、Cの如く廻折像がぼけて得られる。従って不均質系に対して光学的方法是音速を測るには不適當であると結論される。

定常的な場にあつて完全な音波の干渉に依つて測定する干渉法もこのような場合に使用できないのは当然である。

パルス法は音パルスを液体中に照射して、これを受音し、一定距離に対する到達時間を測り途中の不均質の平均的音速を得ることができ、又、受信強度を測定して平均的吸収値を知る

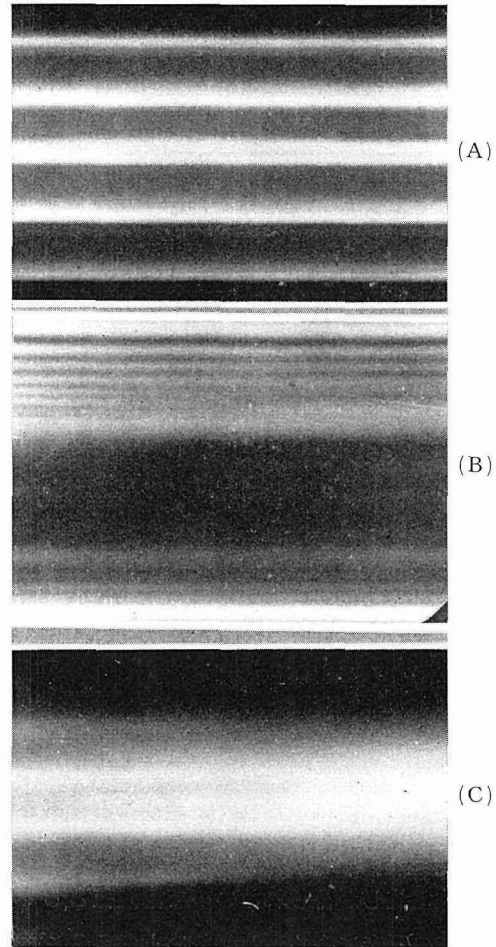


写真3 超音波による光の廻折

- (A) 水中、1 Mc の超音波による廻折例
- (B) アルコール拡散面における廻折例
- (C) アルコール拡散液中の廻折例

ことができる。しかし、吸収の測定は一般に距離移動による強度減衰を測るから、測定に時間を要し非平衡系に対しては測定の精度を著しく損う。更にパルス法は伝播する経路における音速の積分値が得られるのであるから、平均値が知れても不均質の度合等を示すことはできない。不均質の度合はむしろ光学的な散乱等によって知ることが可能であるから、特に分散系とか臨界溶解温度等光学的な検出を必要とする場合等、測定対象によっては、光学的装置と音パルス法との併用が効果的である。

4. 超音波速度及び吸収の測定精度向上に関する考案

工業的な要求が、これらの測定法に対して感じさせる困難のうち最も重要なものは非平衡系又は不均質系の弾性率を短時間に測定することであろう。非平衡系又は不均質系の音速及び音吸収を求めること自体難かしいことであるが、それを更に短時間に求めることは甚だ困難である。しかし吾々はここに、パルス法の利点を生かして、この測定を可能にし、更に精度を向上する道を見出すであろう。上記の各方法の評価により、パルス法以外に非平衡系の音速の測定に対して、有効な手段はないことが知られたし、又、光学装置がこの不均質の度合を捉える可能性を見せているから、これを併用することによって、その状態を判定しその平均音速を有意義に用うることが可能になる。

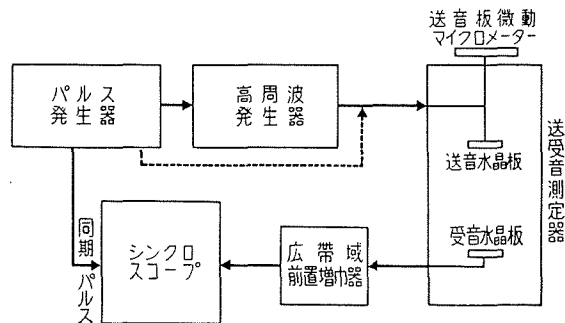
吾々の希望は、短時間の吸収、音速の測定のために、一つのパルスが現出するエコーの数々(反復反射)の受音高さの減衰とその遅れによって、その時の試料の状態を完全に掌握することができるのではなからうかと云うことにある。多くの実験でこの多重反射を認めていながら、固体における測定を除いて、液体、気体で使われていないのは、これらが誤差を相乗して非常に粗雑な値しか得られないので測定値として採用するに値しないからである。然らばその原因は最初の受音に全く現われないと考えることができるだろうか。これらの誤差原因を究明することは、直接の受音のみを採る測定の精度についても探究することを意味する筈である。本研究は、この点に着目してこれらの誤差原因を調べ、この多重反射の役立つ方法を見出し、又精密な測定に際してこの多重反射の与える精度を検討し、精度向上を計ろうとするものである。多重反射に特に留意した結果、送受音面の平行性が主要な検討対象となった。

一方平衡系における音速の測定は、干渉法において最大の精度を上げている。併し、干渉法は容器の壁の影響をうけ、又多重反射の集積であるから単純に考えることができない。干渉波に容器壁の影響が入ったとき、その精度は如何に変わるか。又通常の干渉法では干渉の鋭さを一波長の何分の一まで判別できるものであるか等の問題を考察することは、干渉法の精度向上のために重要な基本的な検討である。このような思考からこの研究のもう一つの重点が、この干渉計による音速の測定法として、パルス波と干渉波を重畳させる如き方法を開発し、その精度を調べることにおかれた。

第2章 試験用測定装置

1. 概要

試験用測定装置としては、以上の多様な方法を検討し、しかも不備の点を補う方法を発見したり、夫々の目的によって現われる要求に対処するために、可変要素の多いことが望ましい。そのような目的に完全に合致させるには極めて大掛りな測定装置の群を用意しなければならない。本研究では、各測定要素について広範な可変部分又は交換部品を用意したが、それでも、研究の対象として可能なる試料は通常の均一系液体又は若干の非平衡系又は散乱系の液体に限定された。光学系による音速の測定法は併用できるが、特に比較に加えなかったのは精度



第1図 測定装置ブロックダイアグラム

の問題としてはこの測定器自体よりも光学系の設定の仕方の方が大きく影響するからである。又、設備の不足のために、凡ての比較実験をすることはできなかったが、主要な結果を導いた実験は充分に行なわれた。この一群の測定装置のブロックダイアグラムを第1図に掲げ、主要な装置について以下の各節に説明する。尚これら以外の付属装置を一括して第5節に示す。写真4はこれら装置の鳥瞰である。

2. 送信装置

送音板は圧電振動のXカット水晶板である。送音板に印加する電圧は自作した装置から供給した。印加電圧の種類は、直流パルス、連続高周波、高周波パルス及び高周波連続発振にパルスを重畳させる如き方式のもの4種である。

各発生器の性能は次の通りである。

(a) パルス発生器 (写真4のA)

主に使用したものは、三和電気製ダブルパルスジェネレーターであり、主なる規格は、

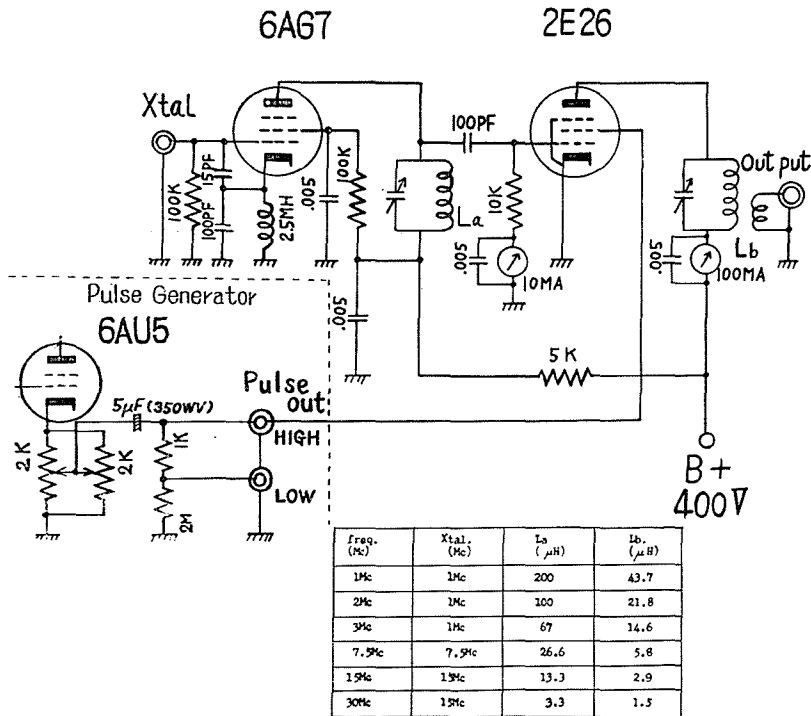
パルス立上り	0.07 μ s
パルス立下り	0.2 μ s
パルス幅	0.2 μ s ~ 20 μ s

出力 1 K Ω 負荷で -150 V (直流パルスに使用)
 + 30 V (高周波パルスに使用)
 繰返し周波数 1~10,000 pps

この装置による出力波形をシンクロスコープに画かせて撮影したものを波形, 写真 A-1 A-2 に示す。

(b) 高周波発振器 (写真 4 の B)

水晶発振による高周波発振器は自作したものである。その回路を第 2 図に示す。発振周波数は発振用水晶板及び同調線輪 L_a , L_b の差し換えにより 1 Mc~30 Mc の範囲で使用される。パルス発生器との結合は終段出力管のスクリーングリッドにおいてのみなされていて、高周波回路図においては、シンクロスコープ面上に高周波パルスが静止して (即ち同期して) 現われる筈はないが、実際には入力パルスを発振回路周辺に配線することによって高い周波数では、高周波とパルスの立上りの安定な同期が得られている。波形写真 K-6 においてその例が示されている。



第 2 図 高周波発振器配線図

本装置において、パルスの入力端子に一定の電圧を与えると、連続波発振となり、パルス発生器より+パルスを与えるとそのパルス幅でパルスの高さ(電圧)に応じた出力が得られる。パルス幅が 2 μs 以上であって、繰返し周波数が 400 cps より大きいときは、高周波パルスのみ

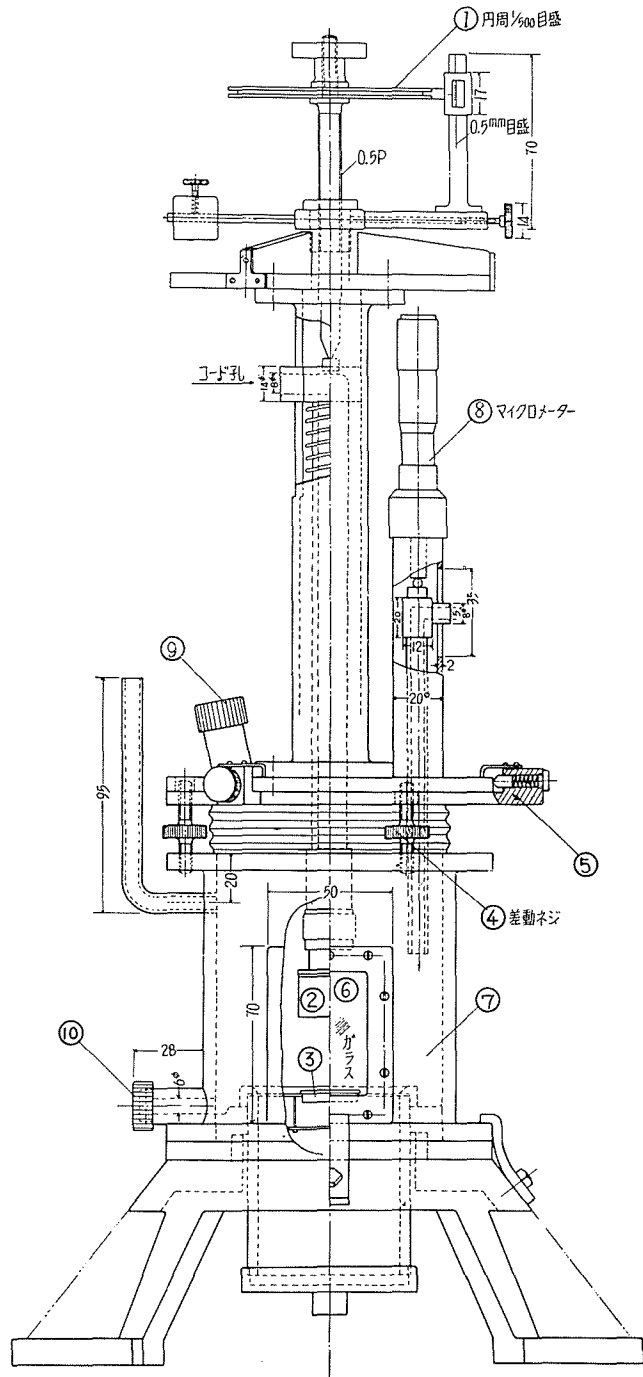
が現われる。しかし繰返しを少くしたり、パルス幅を更に小さくしたりすることによって出力真空管 2E26 の真空管回路の特定数に変化して連続波が陽極側に現われる。更にパルスがスクリーン、グリッドに印加されると、連続波の一部分が強化され、連続波とパルス波の重畳波の如きものが出力になる。実際に、パルス幅と、繰返し周波数を変えて、この二つの波の大きさの比率を適当に加減することができる。

かくして得られた電気出力は出力管陽極コイルに coupling させた 2 次コイルの両端を超音波発生用 X カット水晶板の両側メッキ面に接続することによって音響出力に変換される。

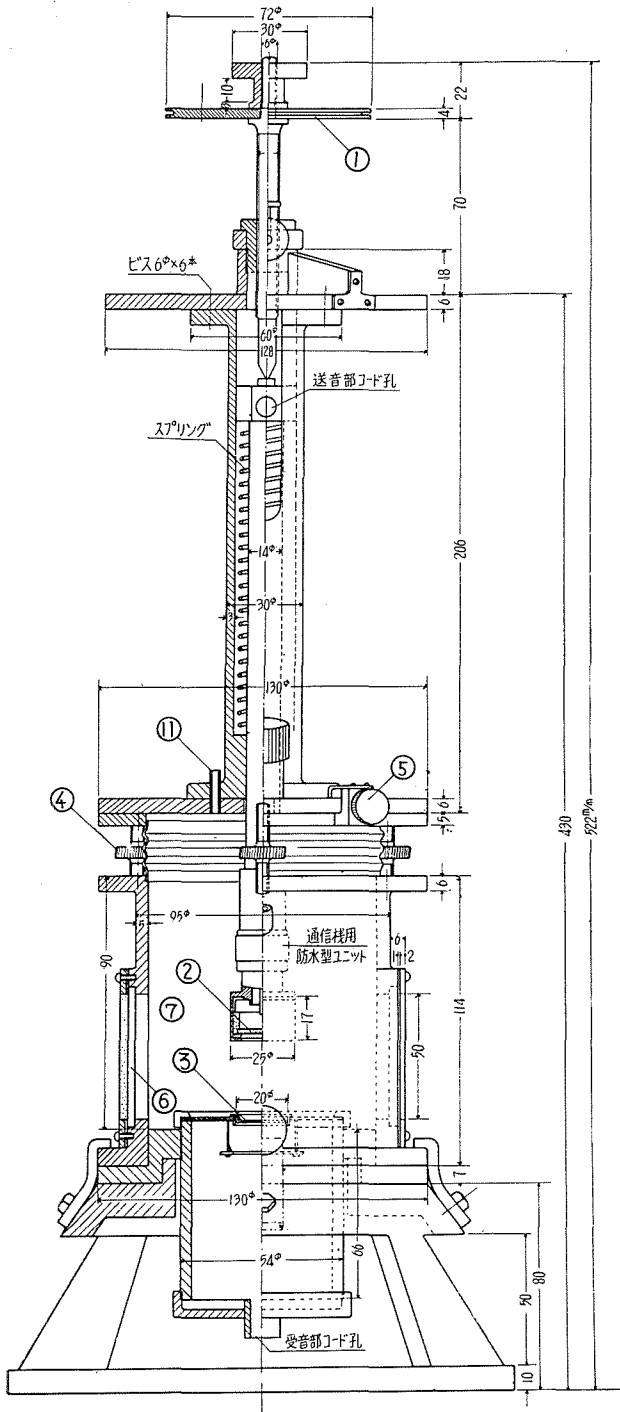
3. 送受信装置—測定容器 (写真 4 の C)

測定すべき資料を入れ超音波をその試料に照射し、それを受音する装置は、最も考案を要したものであり精度向上のための主要な検討のなされた部分であるので、その構造を以下に詳述する。写真 5 は本装置の組立てられた状態を示し、写真 6 はそれを分解した部品群である。第 3 図において、その断面設計が明らかにされているが、主要な部分を分り易い解説図によって示すと第 4 図の如くである。

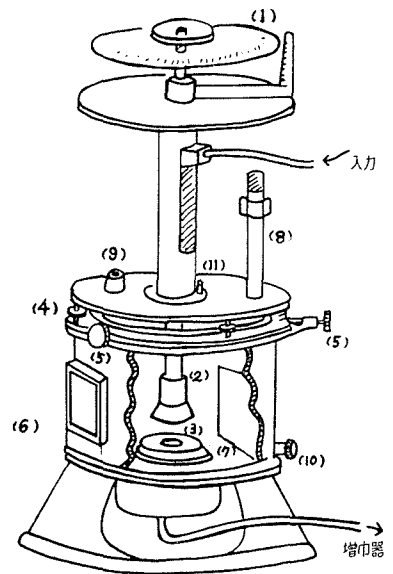
- 1) 送音水晶板上下微動用
マイクロメーター：



第 3 図 (a) 設計略図



第3図 (b) 設計略図



第4図 干渉計説明図

- (1) 送音水晶板上下微動用マイクロメーター
- (2) 差換式送音水晶板
- (3) 受音水晶板
- (4) 上部水晶傾斜装置
- (5) 水晶対向面積補正用水平動装置
- (6) 音場観察用平面硝子
- (7) 試料容器
- (8) 音場測定用副微動尺
- (9) 試料注入口, 標準温度計差込口
- (10) 試料取出口
- (11) 熱電対差込口

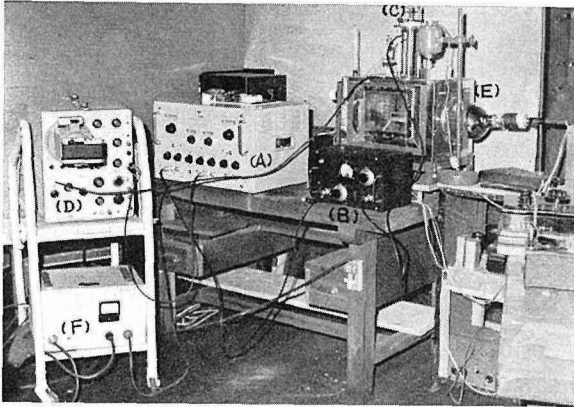


写真 4 実験装置

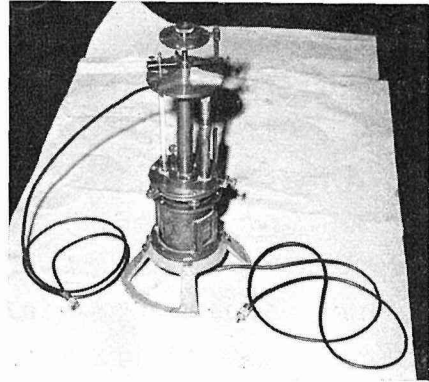


写真 5 試作干渉計 (送受信装置付試料容器)

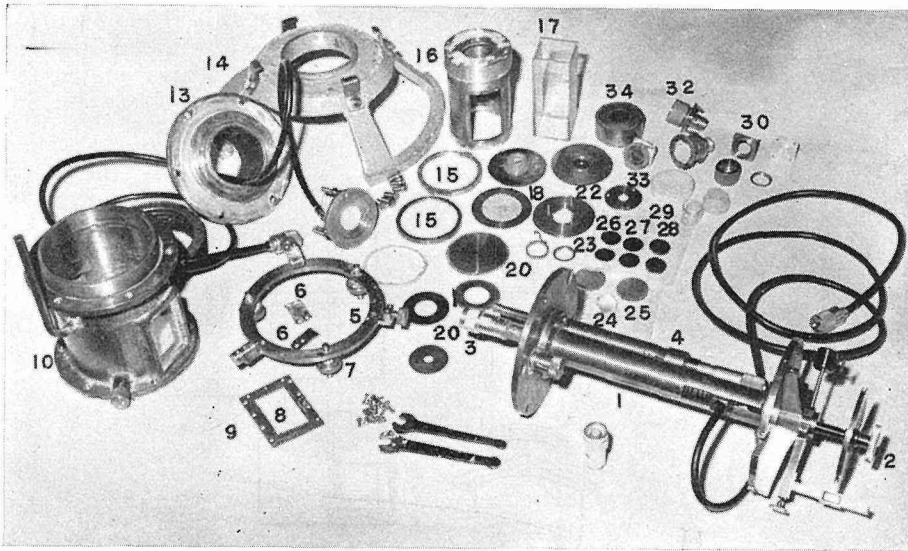


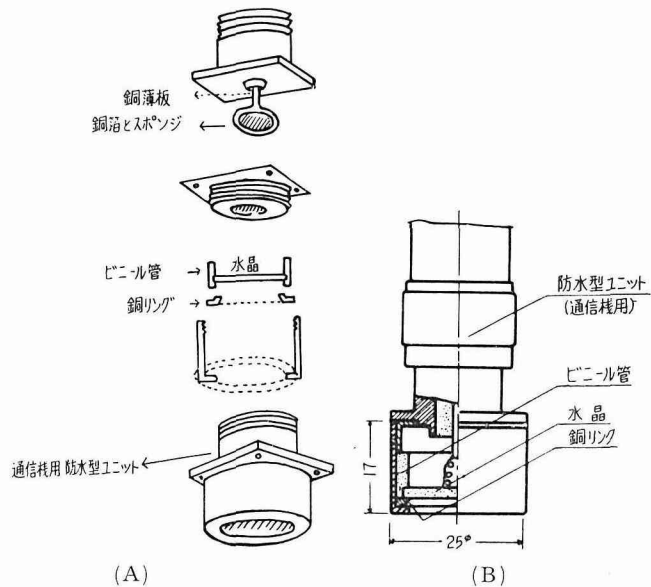
写真 6 干渉計分解部品群

- | | | |
|--|--------------------------------|--------------------|
| 1 上部水晶板微動上下動装置 | 10 容器円筒部 [第 4 図 (7)] | 換えるとき使用 |
| 2 微動マイクロメーター (1 μ 読取) [第 4 図 (1)] | (此の上に 5, 11 が乗って更に 1 が乗る) | 20 15 に使うビニールパッキング |
| 3 水晶振動子固定プラグ [第 4 図 (2)] (例えば 32 がこれにつく) | 11 シルフォンベローズ | 21 音場用スクリーン |
| 4 音場検査用微動装置 [第 4 図 (8)] (本論文では使用してない) | 12 下部水晶板設定台の一種 | 22 下部水晶固定例 (第 7 図) |
| 5 平行度調節用三点微動装置 [第 4 図 (4) 及び (5)] | 13 円筒部底部 (これに 12 が付く) | 23 同上分解図 (第 7 図) |
| 6 5 の固定用締具 (3 ケ) | 14 測定安定用載台 (アルミ製) | 24 平行平面硝子 |
| 7 5 の差動ネジ | 15 2 を 13 に押えるための締具 (13 にネジ込み) | 25 1 Mc 水晶板 |
| 8 観測用窓枠 [第 4 図 (6)] | 16 15 と同じ締具であるが 17 を押えるもの | 26 7.5 Mc 水晶板 |
| 9 同上窓硝子 (第 4 図 (6)) | 17 硝子角筒 | 27 3 Mc 水晶板 |
| | 18 下部水晶の固定例 | 28 1 Mc 水晶板 |
| | 19 下部水晶を反射板に置き | 29 水晶板設定用パッキング類 |
| | | 30 上部水晶分解 (第 5 図) |
| | | 31~34 上部水晶各種 |

スフェロメーターの脚をはずしたものを利用して、上下動距離最大 60 mm のマイクロメーターとしたものであるが、工作中的の取扱いの不注意から最大誤差 $\pm 5 \mu$ となった。目盛の最小値は 1μ である。精度が一定の有効範囲は 40 mm であった。

2) 上部水晶板 (保持用具付): 差換式であり、その構造は第 5 図に示されている。このような構造の必要性は、特に薄い水晶板に歪みを与えないため又防水の目的で多くの改良を重ねた結果得られたものである。特に極板として水晶の両面に銅板又は銅線を接触させねばならないがこの接触部分を接着剤によって固定すると、微小な温度差によって、水晶板は簡単に破壊されてしまう。15 Mc の水晶板で 0.19 mm の厚さとなるから極めて脆弱でありその保持の際に防水と、極板接続を考慮するのは技術上最大の難所であった。

上部水晶を上下微動軸に取付けるのは極めて容易であるが、上下微動軸の軸方向と、水晶



第 5 図 上部水晶振動子

A) 組立次第説明図 (B) 完成断面図

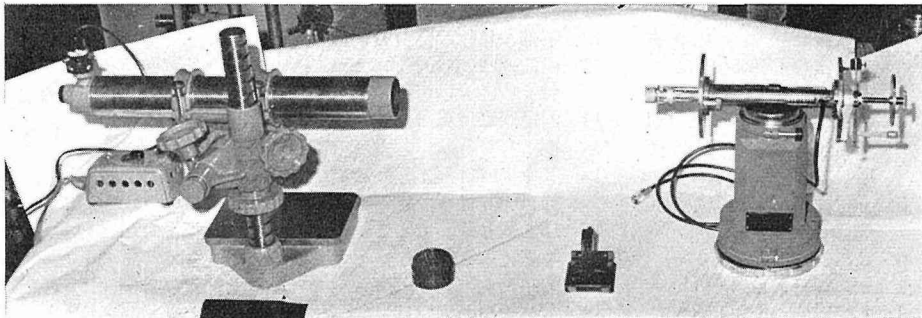
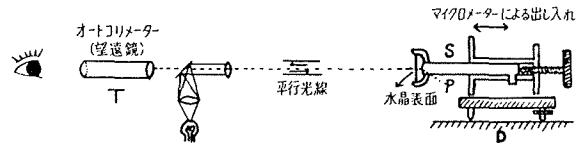


写真 7 オートコリメーションによる上部水晶板 (主に送音に使用) の設定

表面とを厳密に垂直に設定するため
に差換えのたびにオートコリメーシ
ョンの方法を適用した。第6図はそ
の方法の原理図である。

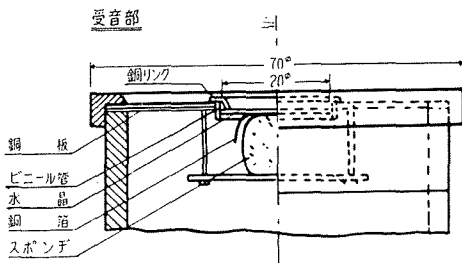


第6図 水晶板設定の方法

水晶片表面は光学平面仕上に金
蒸着を施した滑面であるので、その表面に投射した光の反射をオートコリメーション望遠鏡 T
の視野内に明瞭に捉えるようにすることができる。そこで先ず、水晶保持器を上下微動軸 S
から外して、望遠鏡 T の視野内における水晶保持器の差込口 (微動軸先端 P) の位置がマイク
ロメーターの出し入れによって移動しないようにする。そのためには、この微動軸をのせている
台 D の三脚を調節する。次ぎに上部水晶を設定する。このときはこの水晶保持器を差込んで
から、望遠鏡の鏡筒よりプリズムで投射された光が再び望遠鏡の同じ部分に反射されるように
水晶保持器を廻転し、止め金の締め具合を変えて最良の状態へもって行き合成接着剤で締め金
具の隙間を密閉する。実際にはかなりの熟練と忍耐を要する仕事である。後にオートコリメ
ーターを用意したため取扱いや精度は遙かに改良された。写真7はオートコリメーターを用いて
実験中の様子である。コリメーターには上下微動装置もついているからこの場合は水晶板微動
軸をのせる台を取除いた。

3) 下部水晶板： 下部水晶を保持する器具は同一の構造でもよいが、上部水晶板が可動
であるのに対して下部水晶は固定されるから扱いがかなり自由である。従って上部水晶より

保持ははるかに容易である。しかし、温度変化
や変形に対して全く同様の対策を要し、更に試
料の圧力を一応考慮しなければならない。第7
図にその構造を示す。



第7図 下部水晶振動子構造断面

上下水晶は何れを送音として何れを受音と
しても変りがないことは、後に実験によっても
明らかにされているが、音速音吸収の測定で上
部を送音としたのは、微少な外部回路のインピ
ーダンスの変化を考慮してどちらからかに一定すべきことと考えたからである。

4) 上部水晶傾斜装置： 上部水晶面と下部水晶面の平行な設定は、厚板水晶即ち 1 Mc,
2 Mc, 4 Mc 用水晶板においては、上下両水晶板間に平行平面硝子をはさんで、それらが密着
するように、この三点調節ネジによって行なった。三つのネジは、1 inch 当り 20 枚及び 28 枚
のネジを中心より両側に同じ右廻りに切ったものであり、上下動はその差動分だけ変化するよ
うになっている。従って三点を含む円の中心からの距離 50 mm に対して、このネジの一回転
は、上部水晶の傾斜角 0.005 radian に相当する。この平行性の調節が音場検討の主要点となる
ので後章において詳しく論ずる。

5) 横移動用三点調節装置： 上下両水晶板の平行性の他にその対向する面が互いに垂直線上に相対してないときは、測定の精度を損う。特に音吸収の測定では、この影響は理論からのずれを甚だしく大きくする。従って平行移動を行なう横動装置によって適正の位置に動かす必要がある。そのために設けられた調節用の三点のうち二点はネジで圧迫して動かし、他の一点は螺線バネで受けてあり、位置が定まった後この三点の上から金属片を締めつけて固定する様になっている。

6) 音場観察用平面硝子窓： 音の方向に平行に置かれた平面硝子の二つの窓は音場中心を透過して光を通過させることができるので廻折の実験も可能にしている。又化学変化や、分散系を扱う際、散乱光によって過程を監視すべき場合にも用いられる。

7) 試料容器： 試料の量を多く使用出来る場合はなるべく音場を大きくして側壁の影響を少なくすべきであるから、この容積を内径 90 mm の真鍮管によって与えた。そして内部を耐酸、耐アルカリの合成接着剤によって被覆した。少量の試料を用いた場合は、平行な平面硝子の四辺を有する内径 35 mm の矩形断面の硝子筒を用意し(写真6の17)、下部水晶板を含む台の上に固定した。この場合には側壁の影響を考慮しなければならないが、光学系の併用は前述の場合と大差なく適用される。写真6の16に示されている真鍮円筒は下部の台にネジ込みになっており、円筒の上蓋裏にスポンジを入れて、硝子角筒を下部水晶の台に圧着して漏水を防いでいる。

4. 受信装置及び記録解析装置

受音水晶板によって得られた信号は広帯域前置増幅器を通してシンクロスコープ上に画かれる。パルス発生器からの同期信号によりシンクロスコープの掃引は一定の時間遅れによってなされる。使用したシンクロスコープは本研究の長い期間に岩崎通信製 SS-1254, SS-5301 及び Tektronix 545 A(写真4のD)と変わったので、夫々の装置によって精度も異なるが、最後に使用したものが一番長く重要な結果と関連するのでこれについて必要なだけ説明する。このシンクロスコープの最速掃引は $0.1 \mu\text{s}/5 \text{ cm}$ であり、立上り時間を立上り 10% から 90% までに要する時間で示すと 12 millimicrosecond 即ち 12×10^{-9} 秒である。遅延時間は、2, 5, 10, 20, 50, ... μsec の各 range を有し、各 range の精度は 1% 以内である。又微細読取りは 1.00~10.00 までであり、これに range の大きさを掛けると実際の遅延時間が得られるが、この読取増加の精度は 0.2% 以内である。実験の初期に用いたシンクロスコープ SS-1254 はかなりの誤差をもっていたが較正して使用した。SS-5031 は較正を行っていないので、これらの実験値相互の比較は意味がない。

受信信号の増幅に用いた広帯域前置増幅器は岩崎通信製 WB-4 及び 5301 差込前置増幅器で、直流波形の受信の際には、この二つを直列にした場合もある(波形写真C例)。高周波のときは出力も大きいし受信には Tektronix 545-A 用の L-unit を使用し 0.005 V/cm の感度でシン

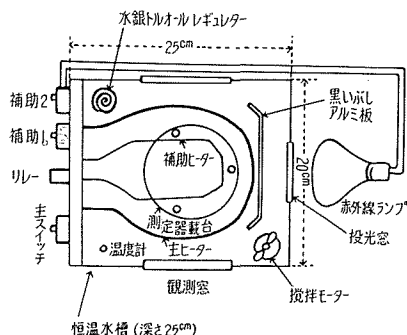
クロスコープ上に書き出す事が出来た。従ってこの他に前置増幅器をつけなくても充分であった。尚、Tektronix 545 A を使用したときは、ブラウン管は長残像時間のものであり、一回の掃引で写真撮影に充分であった。監視しながら撮影するためには、一回の掃引では観察し難いので、通常はパルスの繰返しを 200 及至 4000 c.p.s. にして、これに同期させて掃引したものを撮影した。写真撮影は初めはオリンパス 35 の複写装置で行なったが、後にキヤノンのシンクロ撮影装置によりキヤノン 1.9 で 60 分の 1 秒の露出を最も多く使用した。使用したフィルムは X-ray 用フィルムである。

5. 付 属 装 置

実験に付帯すべき各種の条件に必ずるために用意したものは、光学系と恒温装置及び電源安定器である。又、使用した蒸留水も研究室で直接製造したものであり、特に断わらない限り更にイオン交換器を通して試料とした。

光学系は、大型長焦点レンズを用いて、シユリーレン及び廻折写真を撮影したが、本論文の目的には、光学系は音場内の観察のみに用いられた。

自作した恒温水槽は、第 8 図に構造を、又写真 4 の E に外観を示すもので、温度は常温付近で $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ の精度である。温度範囲は室温 $\sim 60^{\circ}\text{C}$ であり、一定温度に達した後は主、及び副ヒーターは使用せず、輻射窓を通して赤外線電球のみで調節された。電源安定器は、本研究に供給された電源電圧が、85 V \sim 90 V であったため恒温槽を除くすべての電気装置に必要であった。シンクロスコープ及びパルス発生器には、岩崎通信製自動電圧調整器 SM-750 (写真 4 の F) を使用した。これは極めて安定であったが、高周波発振器に使用した調整器はやや不調であり、特に電源が 85 V 以下のときは極めて不安定となった。従って吸収の測定には、個々の実験にこのための誤差の入ることを防げないものと判断し、同一状態でも多数回繰返し測定することにより、このための誤差を無視した。



第 8 図 恒温水槽の構造

第 3 章 送受音水晶板の振動波形とその読取位置

1. 概 要

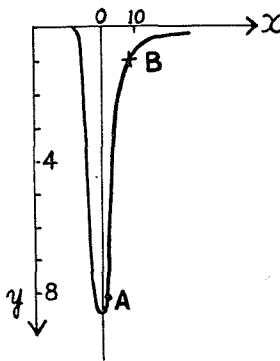
電気振動を水晶板に与えて機械振動を起し媒体中を音響として伝播させ再び水晶の弾性振動を通して電気振動として計測する過程はいわゆる電気音響の変換器の動作であるが、この動作解析により得られる諸量は音響を伝播する媒体の弾性率等の測定に直接には必要のない諸量である。しかしこの測定器によって単に波長や音速を測るのであってもそれらの測定の指標と

して、この電気振動の波形の立上りや波高値を利用する以上厳密にはこれらの定数諸量を誘導しておくべきであろう。実際にこの装置における反復反射波までも測定に使用しようとするのであるから、これらの波形について、その信頼性を少なくとも実験によって検証しなければならない。これらの理論については Hubbard, Borgnis の論文に詳述されているので、実験的に波形変化を調べ、音速、音吸収の測定に使用し得る波形の読取位置を決定し、その読取りの精度について述べる。

2. 直流パルス入力と送音水晶板の振動

直流パルスを送音水晶板に印加した場合の振動は理論的には Dirac の δ 関数を用いて振動の式 $m \frac{d^2\xi}{dt^2} + r \frac{d\xi}{dt} + a\xi = F(t)$, $F(t) = F_0\delta(t)$ によって解かれる。しかし実際には、波形写真 A に見られる如き波形を有し、むしろ立下りを $E = E_0 e^{-\alpha t}$ として表わされる。

水晶板に接続したパルス発生器の出力端子からシンクロスコープに結線して、パルス波形を撮影したものが波形写真 B に示されている。B-0 の形の減衰部分は厳密には簡単な自然対数には表わされないが、この形を光学的に拡大して読取り、立下りの高さ 95% から 12% まで



第9図 入力パルス波形

x 軸の単位は、ブラウン管上 1 mm に等しく、このスケールの 104 mm は $5 \mu\text{s}$ の時間に相当する。

この AB 間の実験式

$$y = y_0 e^{-\alpha x}$$

から α は最小 2 乗法により

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.3061 \text{ mm} \\ &= 6.36 \times 10^6 / \text{sec} \end{aligned}$$

と得られた。 [別表 1]

の読取値を用いて実験式を求めると第 9 図の如くなる。この結果からパルスの立下りは $V = V_0 e^{-\alpha t}$ として $\alpha = 6.36 \times 10^6 / \text{sec}$ と得られた。これは水晶の振動数が 1 Mc の程度ならこの立下りが振動波形に明らかに影響することを示すものである。

第 2 表 送音板の減衰

$$y_t = y_0 e^{-\alpha \frac{T}{2} t}$$

[別表 2]

例 $f = 4 \text{ Mc}$, B-4 よりの計算

$$v = 330 \text{ m/sec (空气中)}$$

$$\alpha \frac{T}{2} = 0.0104 \text{ (実験値)}$$

$$\alpha = 0.083 \times 10^6 \text{ sec}^{-1}$$

$$\alpha' \frac{\lambda}{2} = \alpha \frac{T}{2}$$

$$\alpha' = 2.51 \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha' / f^2 = 1.57 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-1}$$

$$\text{ref. 空气中の音吸収は } \alpha' / f^2 \doteq 1.44 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-1}$$

送音水晶板にパルスを与えたときの送音板自体の振動は、B-0 を拡大して B-1 又は B-2, B-4 に示されている。水晶の両面はこの場合空气中にあった。ここに現われた振動は送音水晶板の固有振動であり、第 2 表に例示される如き減衰率を持っている。これは空気音吸収を示すと共に水晶における電気機械変換の実験的知識を与えるものである。

一方このパルスによる水晶の振動が音波を媒体に伝えて、受音水晶板がこれを受波したときの波形は波形写真 C 以後に載せられている。これらの波形における包絡線の極大点は、パルス幅や使用水晶板の固有振動数によって異なる。このことは音響として伝播するものが自由減衰振動 [入力 $E = E_0 \delta(t)$ の場合] や強制減衰振動 $E = E_0 e^{-at}$ として単純に扱えないことを示すものである。しかし、受音波形の減衰包絡線の変曲点より波高の小さい側のみを使用するならば、その減衰率に意味を持たせることもできよう。ただこの減衰率を精度高く求めることはできないだろうし、これから液体物性を調べることは、果して有用であるか疑わしい。ここでは以上の観察から、直流パルスの受音振幅を計測に使用することの困難を指摘するに止める。

B に示された送音板の波高値等から、必要とあれば電気機械の変換能率を知ることができる。送音水晶板に入る電気入力 P_e はその一部が損失となるが残りが機械出力 P_m となる。音響として媒体中に照射される出力 P_a はこの P_m から更に粘性、摩擦損失等を引いたものである。電気音響変換は正確には、電気機械—機械音響の両変換を通し、更に受音過程でこの逆の二変換をなす。B に示される変換はこの内の電気機械、機械電気の変換能率 $\eta_{em} = P_m/P_e$ の 2 乗に関係する。

3. 直流パルスによる受音波形とその読取位置

直流パルスを送音水晶板に印加したとき、液中を伝播してのち、受音水晶板に生ずる受音電圧波形は、送受音水晶板設定の方法によっても変化すると思われるが、この検討は次章に譲って、ここでは最良の設定状態と仮定して、その場合の波形の位置及び振幅等の読取りの精度を論ずる。勿論、波形の解析を理論的行なえば、更に完全であるが、波形に影響すると思われる要素について実験的検討が本節において充分になされているので、波形の理論的解析は読取りを目的とする本論文では必要ない。

先ず振動数による受音波形変化を見ると、写真 C の如く直接受音波 (以後これを 1 次波と記す) 及び反復反射の波形 (順次に 2 次波, 3 次波等と記す) が得られる。送受音水晶板の固有振動数を並べて書き、前者を送音, 後者を受音とする。従って実際伝播する音の振動数を示すものではないが、送受音水晶板の厚さが同規格のときは、媒体中を伝播する波は、送受音板振動数と同振動数の減衰波である。1 Mc–1 Mc, 2 Mc–2 Mc 及び 15 Mc–15 Mc の波形が、写真 C-1, C-2, C-15 に示されている。この三者とも波形の最高値が最初にないのは前節で言及したように入力パルスの立上りがゆるいためである。第 2 章に述べた如く、このパルスの立上りは $0.1 \mu\text{s}$ であるが、パルス幅が最少 $0.15 \mu\text{s}$ あり、少なくとも $0.25 \mu\text{s}$ 以後に自由振動が起り、しかも減衰波がゆるやかなために波形にその影響の残ることは、前節で述べた通りである。従って 1 Mc より 2 Mc, 2 Mc より 15 Mc と次第に波形のくずれが大きくなる。一方立上りの鋭さを見ると、波形のくずれに関係なくその周波数の励振として振動が始まっている。即ち 15

Mc なら 15 Mc の波として立上るから 1 Mc, 2 Mc よりは立上り時間が短い。しかし音波長の測定で 1 波長の長さに対する立上りの比精度が問題である場合は、果していずれが精度高いかをこの写真から判定することはむずかしい。直流パルス波形の立上りからその固有振動の 4 分の 1 波長の山、谷の位置を判別することは容易である。例えば写真 C-15 の 1 次波において立上りの位置を $0.02 \mu\text{s}$ 以内に読取ることができる。これはシンクロスコープ遅延時間軸の最小読取值 $2 \times 0.01 \mu\text{s}$ と同じ大きさであるので読取限界を意味する。従って立上りの読取りをこれ以上に細かく読むことは意味がない。逆に見れば、1 次の直流パルスによる位置読取值は振動数によってはシンクロスコープの精度限界以上に精度高くすることが可能であると云えよう。

波形写真 D に示されるものは、送音板と受音板の固有周波数の異なる場合で、而も倍音の関係にあるときの受音波形である。水晶板の piezo 電気振動の原理からして水晶板はその固有振動数の偶数倍の倍音は受けない。事実高周波パルスでこれを確かめることができる。従って直流パルスのときも $2 \text{ Mc} - 1 \text{ Mc}$ 又は $4 \text{ Mc} - 2 \text{ Mc}$ では夫々 2 Mc, 4 Mc の伝播振動数の波形は現われない。それにも拘わらず、それらの固有振動数での振動が認められる。又 $1 \text{ Mc} - 2 \text{ Mc}$ 及び $2 \text{ Mc} - 4 \text{ Mc}$ のときは、発振振動数の音波をそのまま受けて受音板は subharmonic の現象を呈する。これらの事実、写真 D-1-2, D-2-1, D-2-4, D-4-2 に示されている。この送受音の交換による受音電気入力波のシンクロスコープにおける波高は送音板振動数の小さいときの方が大きいときよりも常に稍小さい。D-1-2 の波高と D-2-1 の波高は大凡 0.8 であり、D-2-4 の波高と D-4-2 の波高の比は約 0.9 であった。勿論保持設定の方法にも多少の相異はあるから、この比を比較することは意味がない。尚 $15 \text{ Mc} - 1 \text{ Mc}$ の際には一般に波の一周期中に副極大が現われるが、これはパルス幅によるもので特定のパルス幅 (約 $0.23 \mu\text{sec}$ 等) でこの副極大は消滅する。又この副極大は送受音水晶板の平行度の悪い場合には現われない。

C 及び D の写真に見られる如く beat 状波形は非周期的であり、その beat 状の包絡線の山の数は C と D とでは異なる。二つの型の山の現われ方から、この山は水晶板の共振によるものと考えることができる。C における山の数は反射板が常に発振音波の共振体であるから反射した数だけ山の数が増えている。即ち受音次数 n に対して $2n-1$ がその n 番目の受音 (n 次) における包絡線の山の数になる。D における場合は、共振体は受音板のみであるから、受音次数と山の数が一致する。即ち n 次の波形における包絡線は n ケの山を持っている。この波形の生成の原因は、単純な共振としてはとけない。しかし本章の目的は、この波形を解くことにあるのではなく、この波形が、この装置に本質的に付随するものであって、各種の条件によって変らない性質であることを実験的に立証し、それらの波 (各次波) を代表させる指標として、どの点を採用したらよいかを決定することにある。

これらの波形が振動及び反射の機構に附随するものであり、入力強度、周波数パルスの形、幅、媒質中の吸収や容器壁の影響等に無関係であることを実験したものが波形写真 E, F, G, H, I 等に示されている。

写真Eは入力パルスの幅と受音パルスの関係である。パルス幅の変化は立下りによる衝撃の影響を変えるから、パルス幅の大きいときは波形に多少の変化を与える。しかし、写真A2に示されたように、パルスの立上りには変化がないのでEにおける受音波形も最初の立上りには、形にも高さにも全く変化を見せない。(E(1)1, 2, E(2), E(3)及びE(4))又、包絡線の形即ち山頂部の減衰の模様も立下り時における若干の変形以外は認められない。しかし、このパルス幅によって、振幅の極大の位置の変る惧れがあり、又2次、3次波では包絡線の谷がはっきりしないこともあり、当然最初の立上り位置を指標とすべきことがこの実験の結果として示されたものと云えよう。

写真Fは入力パルス強度の大小による受音波形の変化である。特にF1は写真機を開放して入力を零から次第に上げたもので、各振幅の山の頂き即ち極大値の軌跡が画かれたものである。軌跡は明らかに掃引軸に垂直に立並んでいて、入力強度が波形に全く影響のないことを明示している。F2以下により入力の大小が受音強度の大小となるが、F1同様に波形には全く変化のないことを示している。

写真Gは送音板と受音板との距離をマイクロメーターで移動した場合の変化であって、距離が変わっても波形には全く影響のないことを示すと共に、器壁の影響もないことを示すものである。もし器壁の影響を受けるならば、送受音板距離によってその影響に変化を生じなければならないからである。従ってこの写真は送受音板の距離変化による音速の測定に、直流パルスの各次の立上りが適当な指標であることを確認するものである。

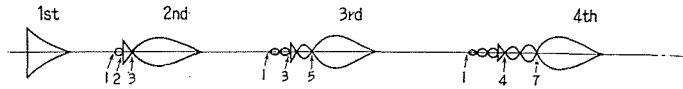
つぎに写真Hに、以上の実験に用いられた波高列の代表的なものを示し、Iに不良設定について示す。平行性の不良は高次の波高を著るしく小さくしたり、各次における極大極小の位置を著るしく変えたりするが、波形における上記の包絡線の性質を変えるものでは無いことを立証している。

写真Jに示されるものは音源水晶面上に可変紋りをおいて音源からの放射面を制限した場合の波形であるが(J1, 2, 3はC-2(a), (1), (2)を夫々制限したもの)、波形はC-2と全く変わらず単に強度に影響するのみであることが明らかにされている。

以上の実験結果から平行な送受音Xカット水晶板における直流パルスの受音波形としてC及びDに掲げたものを確認することができる。更に、以上の実験から、これらの波形の位置を表示する安定な代表点を選ぶことの有意なることが立証されたので、次に述べる。

直接の受音即ち一次の受音波形では立上り基点が常に波形位置を代表するものと見られる。しかし2次以降には、前駆波が入ることがあり、又どの立上りを取るべきか、疑問をもつこともある。そこで、すべての立上りを読取った例を第3表に掲げる。音速についての実験において、これらの読取値のうちの代表値が使用される。直接受音即ち1次波の読取りは送音受音の時間間隔を示すが2次波は反射反覆の伝播時間を含むから1次波読取値の3倍であるべきであり、3次波は5倍、4次波は7倍である。従って一定の距離によるこの各次波の代表点と

第3表 読取代表点のとり方



マイクロメーター位置		① ② ③	① ② ③ ④ ⑤	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦
各点読取値 ($\times 20 \mu s$)	(1) 30,000	1.03 4 7	5.03 5.06 5.10 5.15 5.33 3 4 5 18	7.02 7.06 7.09 7.12 7.16 7.03 7.55 4 3 3 4 14 25
	(2) 27,500	0.95 4 7	4.62 4.65 4.68 4.73 4.91 3 3 5 18	6.44 6.48 6.51 6.55 6.59 6.71 6.96 4 3 4 4 12 25
	(3) 25,000	0.86 4 8	4.19 4.23 4.26 4.31 4.50 4 3 5 19	5.85 5.89 5.93 5.96 6.00 6.12 6.38 4 4 3 4 12 26
	(4) 22,500	0.78 4 7	3.77 3.81 3.84 3.89 4.08 4 3 5 19	5.27 5.30 5.34 5.38 5.42 5.54 5.80 3 4 4 4 12 26
	(5) 20,000	0.70 4 8	3.36 3.40 3.43 3.48 3.66 4 3 5 18	4.68 4.72 4.75 4.79 4.84 4.95 5.12 4 3 4 5 11 26

a. 前駆波の先頭を代表点とする。
(1st, 2nd 1, 3rd 1, 4th 1)

b. 最初の大きな立上りを代表点とする。
(1st, 2nd 2, 3rd 3, 4th 4)

c. 最後の包絡線の立上りを代表点とする。
(1st, 2nd last, 3rd last, 4th last)

零点較正值 ($\times 20 \mu s$)		a.		b.		c.	
		P_0	$P = P_0 + P_1$	P_0	$P = P_0 + P_1$	P_0	$P = P_0 + P_1$
(1)		0.0335		0.0200		-0.0375	
(2)		0.0355		0.0180		-0.1035	
(3)		0.0320		0.0145		-0.0845	
(4)		0.0380		0.0160		-0.0875	
(5)		0.0385		0.0170		-0.0825	
各点較正值 ($\times 20 \mu s$)	(1)	P_1	$P = P_0 + P_1$	P_1	$P = P_0 + P_1$	P_1	$P = P_0 + P_1$
	(2)	0.9985	1.0320	1.0150	1.0350	1.0875	1.0500
	(3)	0.9155	0.9510	0.9330	0.9510	1.0065	0.9030
	(4)	0.8315	0.8635	0.8495	0.8640	0.9205	0.8360
	(5)	0.7480	0.7860	0.7660	0.7820	0.8375	0.7530
(5)		0.6635	0.7020	0.6820	0.6990	0.7525	0.6700

マイクロメーター 2.5 mm につき

	$0.8355 \times 20 \mu s$	$0.8330 \times 20 \mu s$	$0.8390 \times 20 \mu s$
音速 $v =$	$1496.1 \pm 1.2 \text{ m/sec}$	$1500.6 \pm 2.4 \text{ m/sec}$	$1489.6 \pm 7.5 \text{ m/sec}$
	(0.08%)	(0.16%)	(0.5%)

して、どの立上りを使用すべきかは、実際に夫々の立上りを用いて、送受信板の時間間隔或は距離を測ることによって明らかになる。例えば第3表において立上りの数の多い場合、最後の立上りを読取りに用いて計算すると(c)の如く原点としてあげられるべき位置が、送受信板距離によってかなり大きな開きを見せていて、それによる音速計算も確率誤差が極めて大きい。こ

の原点のバラッキが少なく、しかも 0 に近い (b) の場合が代表点として適している。(a) の場合は音速測定の精度はよいが、振幅が小さいので常にこの様な精度は期待できないし、前駆波が小さい波であるために読み落す危険もある。尚 (a) の前駆波は水晶を保持している器具が一部水晶の縁を押えるために、水晶面の極く近くで音路程内に入りこみ、そのためにこの前駆波は水晶面からの反射より早く生ずる反射の部分として反射波の波形に現われるものである。

4. 高周波パルスによる受信波形とその読取位置

高周波パルスは直流パルスの継続時間だけ高周波を発生するものである。直流パルスが水晶の固有振動を誘起するのに対して、高周波パルスは固有振動と関係なく強制振動を起させることができる。固有振動の周波数及びその倍音の周波数にあつては電気音響の変換効率の極めて大きいのは当然である。従つてそれらの場合には、直流パルスの如き附随する減衰波形やその他のビート状の波形は極めて小さいと思われる。これらの波形の周波数による変化を見ると写真 K の如くである。この実験では 15 Mc の X カット水晶を用いて、高周波は 5 Mc 水晶発振子により発振させ、同調コイルで通倍して 15 Mc を得ている。写真 K 1 は同調のはずれた状態で、直流パルスの形がそのまま現われている。パルス幅及び同調の変化で K の各写真に見られる如き変化を生じている。K 5, K 6 はこれらの同調が略完全な状態である。尚設定水晶の固有振動の相異によりこの波形は若干異なつたものとなる。K 6 は殆んど完全な高周波パルス K 5 の拡大掃引である。第 2 章に述べた如く、直流パルスとの間にも完全な同期が得られている。K 4 は実際の音速音吸収に用いられた波形の一つであり、K 5, K 6 と同一の設定状態における高次波を示すものであるが、直流パルスと異なり高周波パルスは雑音を拾つたり、高周波分が完全に消えないで残つたりするので、これらの測定装置の結合には甚だ注意を要することを示すものである。

高周波パルスにおける読取值とすべき代表点位置は K の各写真より明らかな如く、パルス幅が適当であれば直流パルスにおける前駆波を除いた最初の立上りに相当し、しかも一般に直流パルスより入力が大きいのので読取りは容易である。パルス幅は波頂部の平坦さを保持している $5 \mu\text{s}$ 程度が最も多く用いられた。立上りの読取りは直流パルスに較べて高い周波数を使用するためと、連続発振分が完全に消えないために必ずしも良くない。これは直流パルスを真空管に供給したために、その立上りを悪くした結果である。K 6 から立上り位置の読取りは $0.1 \mu\text{s}$ 以上を期待できないことが分る。この立上りの悪さは、次数が多くなると急速にひどくなるので高周波パルスを使用しての高次波の使用はせいぜい 5 次波までである。

以上の実験から直流パルスと高周波パルスを較べて、高次波を使用して伝播時間の平均を得て音速を知ろうと云うときは、若し周波数に関係ないならば (即ち分散等を考慮しないで良いならば) 直流パルスは簡単であり有用であろうと結論される。しかし、高い周波数における音伝播を扱つたり、減衰の大きいものには、直流パルスは使えないから、高周波パルスによら

なければならない。又、吸収を測定するときには、写真 H において示される様に、直流パルスの振幅の極大は必ずしも受音エネルギーと簡単な関係にある様には思われぬ。それに対し、高周波パルスの各次の減衰は非常に整っておりこれを吸収に関係づける事が可能であると思われる。一方上記の実験から送受音水晶板の平行性の良否が、かなり波高列（なかならず高周波パルスにおける波高列）に影響を与えていることが知られるから、次章においてこれを主に検討する。

第 4 章 測定音場の実験的検討

1. 音速音吸収の測定と測定音場の影響

超音波の速度、吸収を精密に測定するためには、第 3 章に述べたパルスの読取位置についての検討の外に、パルス波高値について考察しなければならない。第 3 章の結果からパルスの読取りが $0.1 \mu \text{sec}$ の程度に得られることが示されたから、一次パルスでの音速の測定は直流でも高周波でも音場の設定にさして検討を必要としないことが分った。しかし高次波は設定の不良で波高が著るしく減り、波形の立上りも緩くなるから読取りの精度を損う。又吸収の測定については第 6 章に述べるが、音場の設定の相異は極めて大きい波高値の変化を伴う。音場の設定の相異による波高の相異の例を写真 I に示す。この結果から特に反覆反射せる高次波を使用することの極めて不安であることが知られる。従って送受音板の設定の検討を可能な限り厳密にすることが、これら高次波を測定に使用し、測定を容易にしたり精度を向上したりするための絶対不可欠の前提であることが分る。又干渉計法では、測定音場の周辺容壁等のために干渉波形が複雑な影響をうける場合もあり、これら音場の境界条件等も検討しなければならない。一方パルス法では送受音板距離が最短路程なので迂回して到達するような音路程になる側壁の影響等は分離することができる。従って送受音板設定の音場の検討にパルス法を使用することが簡単であり有効である。

2. 直流パルスによる音場の検討

直流パルスの受音波形は既に説明されたように、写真 C 及び D に掲げられている。送音された平面音波のエネルギーを受ける受音板面積が一定であれば、この受音エネルギーの最大値を与えるのは、送受音板が完全に平行で且つその中心を結ぶ軸がそれらの面に垂直であるときであろう。従って、シンクロスコープにおける受音波高の最大となることが当然平行性及び対向面積の校正の目安となる。しかし受音の 1 次波（直接の受音）の波高は平行度の変化に対して余り敏感でない。写真 L に示した波の高さから 1 次の波高の変化を眼視判別するには 0.004 radian の傾斜もまだ充分でないかも知れない。若し、 0.005 radian を眼視判別の最小感度とするならば使用した $2 \text{ Mc} \sim 2 \text{ Mc}$ の水晶板（直径 30 mm）において音路程の差が最大 0.15 mm

となり、これは水中の音波長の約4分の1に当る。これでは精度は余り期待できない。一方2次3次の波高は写真Lの高次波に見られる如く、傾斜に対して1次よりはるかに敏感である。従って2次以降の高次波については、その波高値を計測に使うことは意味がない(第6章参照)が、その大小を設定の良否判定に使うことは極めて有用である。

この波高の変化は両水晶板の対向する部分の面積とも重要な関係を有する。即ち対向する送受音面が相互に面の垂直上方に中心がなく平行に横にずれている場合は受音強度は損われる。第10図は水晶板設定の際の受音面積の相異を示す。

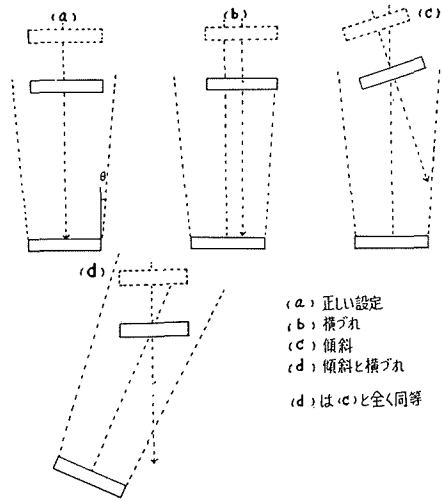
音の拡がり $\sin \theta = 0.61 \frac{\lambda}{a}$ (但し λ : 波長 a は音源半径) で与えられるから水中で、2 Mc 半径 15 mm の円形水晶音源で $\lambda = 0.75$ mm, $\theta = \sin^{-1} 0.03$ 即ち $1^{\circ}45'$ となる。従って送受音板が同一面積のときは、対向面のこのような対向有効面積の問題が重要な影響を受音強度に及ぼすことが分る。

写真Mは音場内に絞りを入れて、送音水晶板と受音水晶板のずれのある場合に水晶板距離の変化が受音波高や波形に如何に影響するかを調べたものである。送受音板の近接時に受音電圧(波高)が反って減少すると云う異常を示しているが、これは第10図bの場合に相当するものである。尚写真Nは絞りをおかず器壁の影響を見るために、切口が40 mm 平方の硝子角筒(写真6の17)を置いた場合である。又角筒を除き直径60 mm の円筒(写真6の16)を置いた場合も掲げているが、この二つの実験から音場に対する側壁の影響は認められないことが分かる。

以上の実験によって直流パルスによる音場の設定は、すべての次数の受音パルス波高が夫々極大になる如く調節し、且つ、水晶板距離の近接が波高増大となって現われる如く調節すべきことが明らかである。ただし、この場合の平行性の精度は0.005 radian 以内である。

3. 高周波パルスによる音場の検討

高周波パルスを音場の検討に用うる際に第一に考慮すべきことは、波形即ち波頂部の平坦さにある。この波形に乱れがあると高次の反射受音波は形が著るしくくずれて、量的な波高値を示すことができなくなるからである。波形の乱れについては既に第3章に述べたから、ここでは平坦な波頂部を有する波形による音場の検討について述べる。このような平坦な波形(写真O及びPに見られる如き)は反射に際しても波形を余りくずさないから、反射係数や吸収係



第10図 送受音板の設定の相異による受音面の変化

- (a) 正しい設定
- (b) 横ずれ
- (c) 傾斜
- (d) 傾斜と横ずれ
- (d) は(c)と全く同等

数を測定することを可能にする。写真 O 4 に見られる如く本装置ではパルス幅を $3 \mu\text{s}$ 以下にするときは平坦部を持たず直流パルスの如く鋭い波形となるが、送受音水晶板が高周波同調回路によって高周波発振周波数に同調しているので、直流パルスの如きビート波は生じない。

高周波パルスによる音場の試験に用いた周波数は主に 15 Mc であり、水晶板も 15 Mc – 15 Mc である。平行性の変化による波高列の相異は写真 O 2, O 4 にも, P 又は Q にも見られる。又 Q 2 では横移動による高次反射波の異常増大が観察される。以上の実験結果から高周波パルスの波高列の平行性の変化より受ける影響は極めて大きいことが明らかである。この感度の敏感な原因は周波数の高いことにあると考える。直流パルスにても同様に、周波数の高いほど感度はよいようであるが、直流パルスの場合は、高い固有周波数に対して立上りが緩すぎるためと、高次受音の波形がくずれるために、高次受音での調節は余り有効でなく、高周波パルスの如き感度を示し得ない。又直流パルスでは余り大きな入力を得られないことも感度の悪い原因の一つである。

高周波パルスによる音場の調節はかくして各次の受音波高が各次の最大波高を示す状態を最良の設定とする。しかし実験の結果は、O 2, O 3 における如く、又 P における如く 1 次の最大と 2 次の最大、その他各次の最大が必ずしも一致せず、その間に 0.001 radian 程度の差異が生ずるので平行性を決定するためには、更に考察が必要である。これは音場内の音圧分布が一様でないために生ずる問題であり、平行性の問題として簡単に扱うことのできないことであるので音吸収を論ずる後章に述べる。

4. 連続高周波の干渉による音場の検討

高周波パルスの持続時間が長く、又は、送受音板距離が短かいと、反射波との重なりを生ずる。写真 R に示される三枚の結果から、この重なりの部分に著しい増大又は減少の生ずることが認められる。しかもこの増大減少は受音板距離の増加につれて、交互に現われる。これは 1 次の受音波と 2 次の受音波とが受音板に重なってその和が受音波高となるためであって、位相の違いによりその和が周期的変化を示すのである。これは干渉計の作用の原理を示すと共に側壁等の影響を分離した最も単純な干渉図形として干渉の理論の実証と補正に重要な手段を提供するものである。ここでは連続高周波の干渉が平行度と如何なる関係にあるかを考察してこれを音場の調節に利用する。

平行性の完全な二つの平面での平面音波の干渉は、若しこの平面の間隔が丁度波長の半分の整数倍であれば極めて大きく、従って受音電圧波高も極値を示し、少しでも間隔がずれると受音電圧は急激に変化する。同じように面に傾斜がある場合を考えると、若し面の音波長との傾きが或る瞬間において同一面上の異なった場所で逆位相の波をうける状態になれば、積分される受音起電力は急激に減少する筈である。従って面の傾きを音波長の $1/2$ 以下に押えることは容易であって、実際はそれよりはるかに小さくできる。平行度の検査に連続波を用いること

は充分に有用である。例えば 15 Mc 発振で水晶板の直径が 20 mm あり、両端（直径の両はじ）の平行度のずれが半波長であるとする、その傾きは 0.0025 radian に当る。その 5 分の 1 を検知するなら 0.0005 radian となる。

一方連続波の干渉のみでは音場の周辺からの影響を知ることができないから、このために連続波とパルス波を重ねる方法は、有益な手段となる。尚、平行度以外の対向面積についての検出は、連続干渉波では困難であり余り敏感でないことが実験の結果明らかになった。

5. 音場の調節法の総括

音場における理論値よりのずれを最小にするために、音波の送受音に影響する各種の要素について検討したが、以上を総括して、本装置による設定を順序だてると、(1) 直流パルスにより最も大きい受音電圧を受ける状態に平行度を調節する。平行度の変化域の大きい装置では始めから高周波パルスにすると受音電圧はシンクロスコープ上に検出されない。大体の平行性をもたせるためには直流パルスが最も有用である。直流パルスは平行度不良な程受音強度は小さいが受音される。(2) 送音パルスを高周波パルスに切替えて、平行度の調節と共に対向面の調節を平行移動によって行ない、最大の受音波高群をシンクロスコープ上に作る。(3) 連続波を干渉させて、高周波パルスの極大と連続波の極大が一致し、連続波の極大が最も大きい状態に平行度の微細調節を行なう。写真 S は O に示した調節の後、連続高周波を重畳したもので S1 は O4 の発振器設定状態の 30 秒後の波形である。S2 はそれよりマイクロメーターを動かし干渉極大の位置におき更に平行度を調節し波高値最大の状態としたものである。S3 は S2 と全く同じ送音板の状態で 20 μ s パルス幅、繰返し 1000 cps にして連続高周波を殆んど消失した状態である。S4 は実際に音速、音吸収を測定するのに用いた S5 の状態の如きパルス幅 5 μ s の 1 次受音波形の掃引拡大写真である。これら設定のちがいによる音速、音吸収の測定について以下の章で、送受音板の設定による実験値の変化が明らかにされ、又完全な設定が反覆反射した高次受音波の波高値群を有効にすることが示される。

以上で受音板の平行度の良、不良が音場の設定に如何に重要な影響を持つかが明らかになったが逆に考えるならば、これらの測定法は使用の方法によって設定の状態を検定する有力な手段を提供することを意味する。この応用に関しては第 7 章に述べる。

第 5 章 音速度の測定とその精度

1. 概 要

第 1 章にあげられた測定法の主要なものは、第 2 章に述べた本研究装置においても可能であるが、本論文では廻折法に依るものを除いた他の方法、即ち干渉法、直流パルス法、高周波パルス法等を用いて、その測定の精度を比較検討する。

第1章に述べた如く音速の測定は、伝播距離と伝播時間を測定し、その比を音速として求める方法と、波長と周波数を測りその積を音速として求める方法とあり、一般には時間の測定より周波数の測定の方が厳密に、即ち高精度に求められる。しかし、時間の測定も校正された周波数によって、シンクロスコープの掃引速度及び遅延時間を校正することができ、又高周波パルスでも前記の如く、 $0.1 \mu\text{s}$ 程度の十分な読取感度を得ているから、測定の精度は時間軸精度より、むしろ微動測長器としてのマイクロメーターの精度に依って決ることが多い。

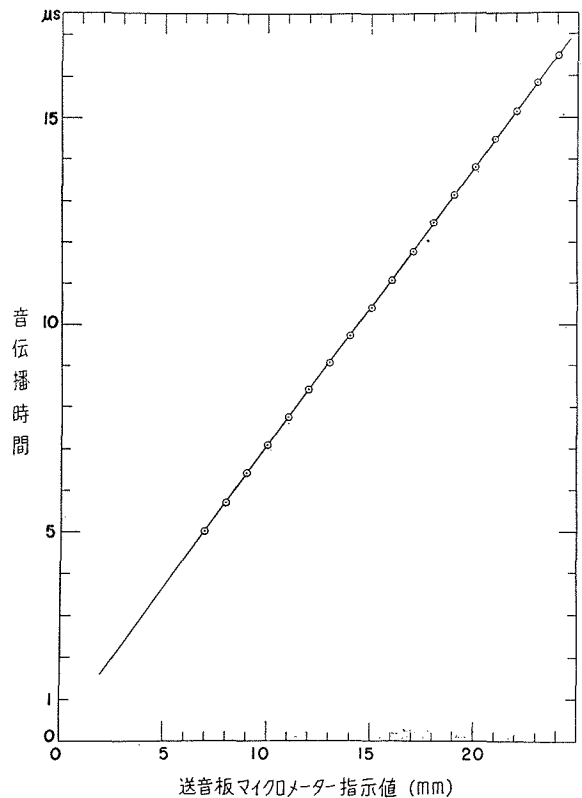
これらの方法のうち平衡状態に対しては、周波数と波長の積を用いる干渉法が良く、波長の算出にマイクロメーターの読取点を多くすると、即ち多数回の実験をすると、極めて精度高く求められる。しかし、不平衡状態や不均質系等の時間変化を持つものには、この方法は測定にかなりの時間を要するから余り有効でない。以下各方法に依る Data からそれぞれの特徴を描き出し、次いで、これ等の方法の検討から考察された新しい精密測定法をあげ、又特に迅速な測定を要求される場合に用うべき方法を論ずる。

2. 直流パルスによる方法

直流パルスによる音速度の測定は、送受音板の一定距離に対して直流パルスを送音水晶に印加した後、音パルスが受音板に到達する迄の時間をシンクロスコープで計り、その比から求めるものである。実際には送受音板の距離を移動して、その移動距離に依る到達時間の変化量から音速度を求める方法(例第11図)と、到達時間の変化量を一定にしてその一定時間差に対する移動距離を読み取り、その比を音速とする方法(第12図)がある。又、均質な平衡系試料に依って、これらの方法から

送受音板の距離の読取値を補正したり、又他の方法によって送受音板距離が校正されるならば、未知の試料についても、一回の測定によって音速を求めることができる。

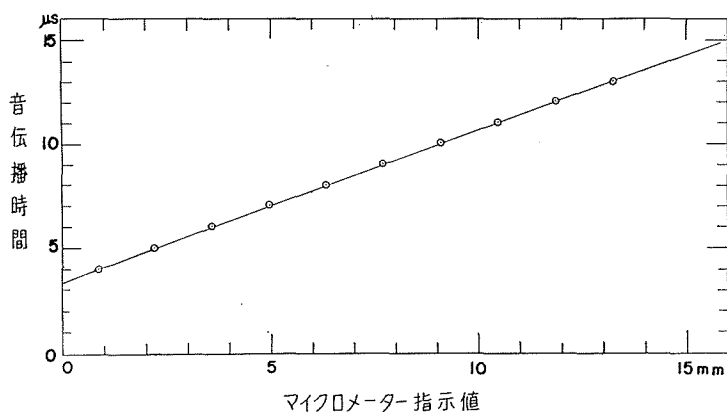
直流パルスに依る音速の測定は、結局時間の読取りを必要とするので、その精度は時間軸



水中音速度 $v=1483.24 \pm 0.71 \text{ m/sec}$ (0.05%) (20.2°C)

第11図 直流パルス1次波のみによる音速度測定例
試料 イオン交換処理蒸留水
送受音水晶板 2Mc-2Mc [別表3]

直流パルスに依る音速の測定は、結局時間の読取りを必要とするので、その精度は時間軸



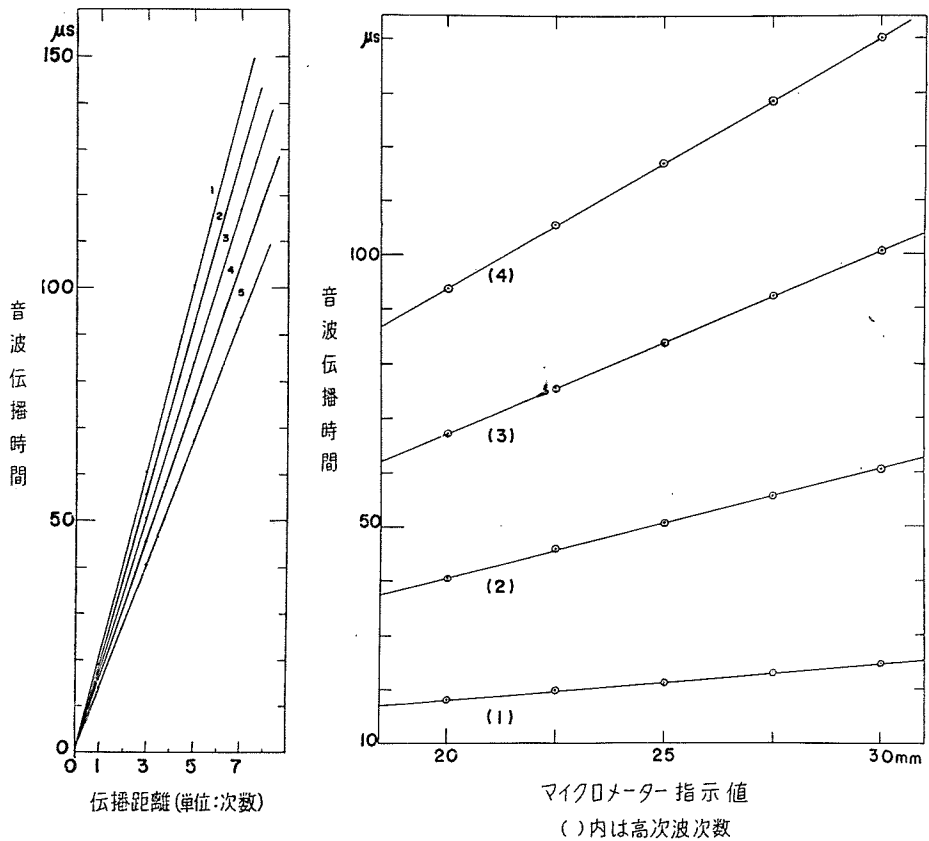
$$v = 1477.8 \pm 1.2 \text{ m/sec (0.08\%)} \quad (18.5^\circ\text{C})$$

第12図 直流パルス1次波による音速度測定例
 水晶板 2 Mc-2 Mc [別表4]
 (比較) 同一設定で干渉法で行なったもの [別表5]
 $v = 1477.4 \pm 3.2 \text{ m/sec (0.22\%)} \quad (18.5^\circ\text{C})$

の読取精度と距離移動の際のマイクロメータ移動軸の精度の両方に関係する。時間軸の精度即ちシンクロスコープ掃引時間及び遅延時間の精度は相対誤差 $\pm 0.2\%$ 以内であるが、絶対誤差は 1% 以内となっているから較正を必要とする。一方、数個内至十数個の測定値による確率誤差は、はるかに小さいから一般に音速の時間読取りによる誤差を 0.1% 以内にする事は容易である。尚、直流パルスの読取位置に就いては、第3章第3節で述べた如く、シンクロスコープの掃引より高精度に得られるので、その誤差は完全に無視することができる。一方マイクロメータの精度は最大 $\pm 2 \mu$ が普通(一級)である。これは音波長に対して例えば 15 Mc では $2 \mu / 0.09 \text{ mm} = 2\%$ となり、シンクロスコープに較べて精度が低い。従って此の方法によって音速を測る際に精度を 0.2% 以内にする為には、測定個数を増やして、相対誤差を小さくしなければならない。

直流パルスによる音速の測定は以上の様に測定器、即ちマイクロメータ及びシンクロスコープの精度限界までも精密に行なうことができる。しかし、此の方法は水晶板の固有振動と液体による振動の減衰とが関係する特定のただ一種類の振動においてのみ扱われるので周波数領域は狭く、水晶板の裁断研磨可能の範囲より出ない。従って大凡 30 Mc が上限である。本研究では 15 Mc まで用いた。

直流パルスの測定で高次の受音波列も利用できるならば、測定距離を短かくすることができる。しかし、波形が次第に変化するので果してそれ等の読取りが精度の向上に利益するかどうか、実験によって調べなければならない。高次パルスの読取位置を示す実験は、第3章においてなされるので(第3表)、こゝではその読取位置によって測定された音速の精度を調べる。高次波の採用が読取値の精度を上げることは、第3表の測定例を用いて比較した第13図でも明らかである。

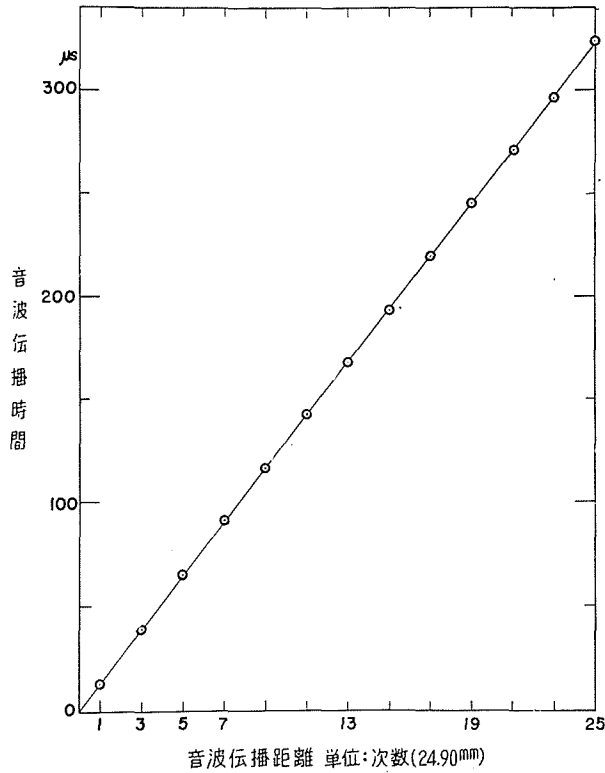


$$v_1 = 1506.0, \quad v_2 = 1500.0, \quad v_3 = 1498.8, \quad v_4 = 1512.6$$

$$v_{\text{mean}} = 1496.1 \pm 1.2 \text{ m/sec (0.08\%)} \quad (25.3^\circ\text{C})$$

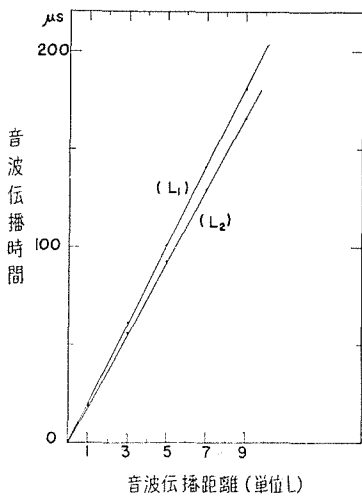
第13図 直流パルス各次波による音速度測定例【別表6】

直流パルス高次波の読取位置は、此の第13図の例を除き、最初の大きな立上り基点を用いた。(即ち前駆波を使用しない)。高次波列を使用して固定音路程においてなされた測定結果の一例を第14図に掲げる。送受信距離も可変である場合には、測定点を多くしなければならないが、送受信板距離の誤差を無視すると第15図の如く音速を求めることができる。これは高次波のシンクロスコープに依る読取りを示す一例である。第16図と第17図は各次波列による音速測定精度の比較例である。第18図は各次波列を同じ掃引遅延レンズを用いて(即ち遅延掃引の立上りを一定にして)、高次波による平均位置を用いた計算例で、第13図と同様であるが、マイクロメータの移動距離を倍にしたから、マイクロメータによる誤差を少なくすることができたものである。尚、以上の実験の大部分に送受信板が電気共鳴を起さない偶数倍音振動体が使われているが、送受信板の交換によっても全く同じ測定値の得られることから、(第4表)音速に関する限り偶数倍音送受信板の方法は、等振動数の送受信板の場合と全く同じことが分る。偶数倍音振動数を用いたのは、直流パルスの高次波の波形くずれを少しでも減らし、高次



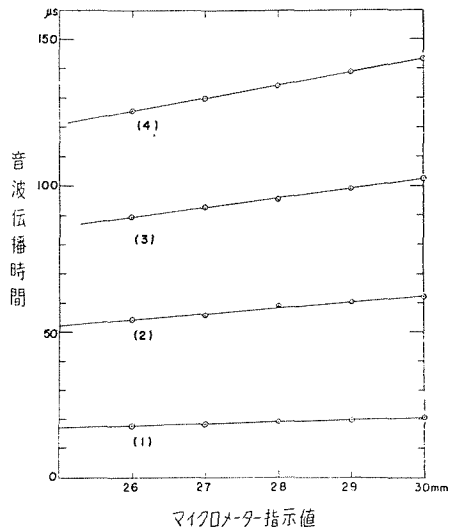
$v = 1933.1 \pm 1.8$ m/sec (0.09%) 1Mc-1 Mc 試料 グリセリン特級 18.4°C

第14図 直流パルス高次波列による音速度測定例 [別表7]



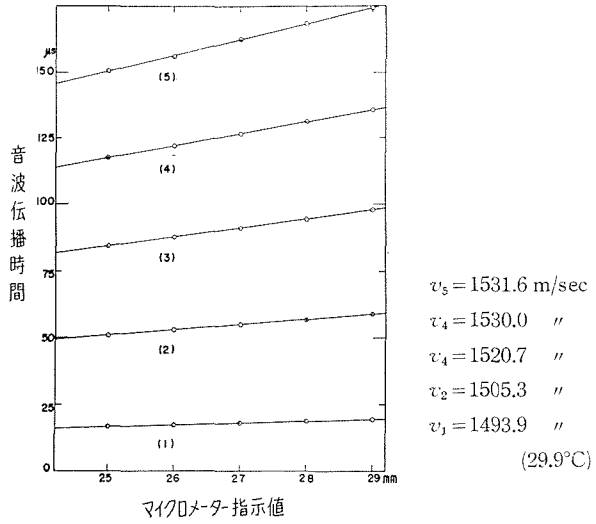
$L_1 = 30.000$ mm
 $L_2 = 25.000$ mm
 $v = 1537.5 \pm 7.5$ m/sec (0.49%)
 (24.80°C)

第15図 直流パルスによる精度 [別表8]

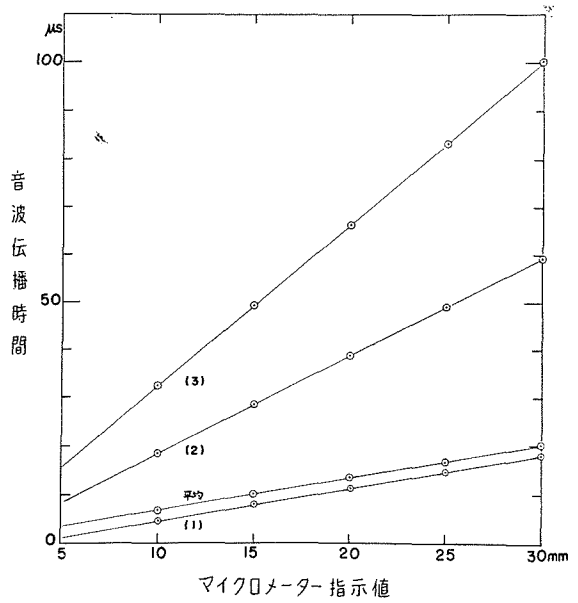
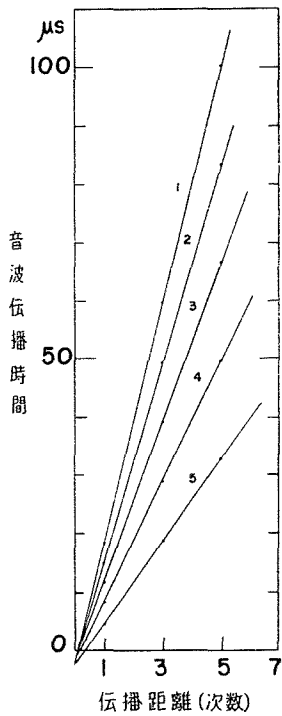


$v_4 = 1542.5$ m/sec, $v_3 = 1542.2$ m/sec,
 $v_2 = 1520.4$ m/sec, $v_1 = 1552.7$ m/sec, (25.7°C)

第16図 直流パルス各次波による音速測定例 (2 Mc-4 Mc) [別表9]



第 17 図 直流パルス各次波による音速度測定例 [別表10]
(4Mc-2 Mc)



$v_3 = 1479.30 \text{ m/sec}$
 $v_2 = 1477.5 \text{ ''}$
 $v_1 = 1476.7 \text{ ''}$
 $v_{\text{mean}} = 1479.90 \pm 0.14 \text{ m/sec}$

第 18 図 直流パルス各次波による音速度測定例 [別表11]
(2 Mc-4 Mc)

第4表 送受音板固有周波数の異なる場合の直流パルスによる読取精度
(送受音板交換による相異) 試料 蒸溜水

次数	伝播距離	4Mc-2Mc 伝播時間	2Mc-4Mc 伝播時間	差	
0	$\times l$	1.0 μ s (17.65°C)	0.5 μ s (17.95°C)	0.5 μ s	
1st	1	24.5	25.0	-0.5	24.8
2nd	3	73.0	73.5	-0.5	73.3
3rd	5	121.5	122.0	-0.5	121.8
4th	7	169.5	170.0	-0.5	169.8
5th	9	217.8	218.3	-0.5	218.1
6th	11	266.0	266.5	-0.5	266.3
7th	13	314.3	315.0	-0.7	314.7
8th	15	362.8	363.0	-0.2	362.8
9th	17	410.7	411.0	-0.3	410.9
10th	19	459.2 (17.80°C)	459.2 (17.80°C)	0.0	459.2

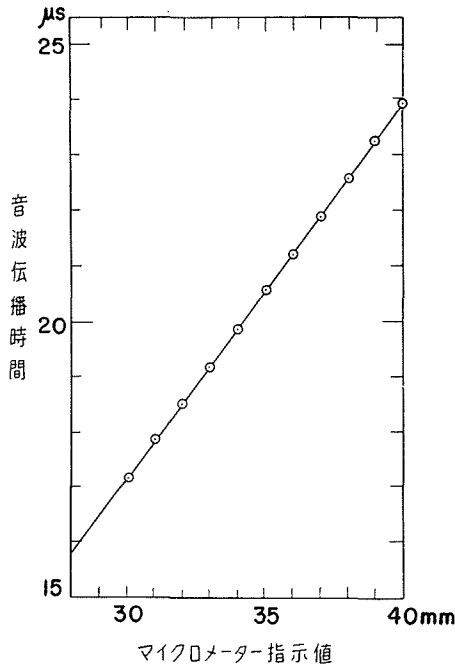
平均伝播時間 $\tau = 24.123 \pm 0.006 \mu\text{s}/l$ 平均温度 17.80°C

波をできるだけ採用するため、第3章に述べた如く、偶数倍音振動では派生する包絡線の山の数が1次反射を増す毎に一つ増えるだけだからである。

これ等の結果から知られることは、第16図、第17図における如く、各次波の使用も狭いマイクロメーターの移動範囲では、非常にバラツキが大きいことである。これらの誤差を除くために、そして高次波を有効に使うためには、固定音路程の方がより正確であり、若し移動音路程ならば、かなり多数回、それもなるべく移動範囲を広くした方が良いのは、誤差分布の法則からも明らかである⁵⁾。又見方を変えるとマイクロメーター移動間隔を広げた方が良い精度を示しているのは、やはりマイクロメーターが他の測定器要素よりも、低い精度にあるからに外ならない。尚、直流パルスに依る音速の測定では平行度の問題を特に取り上げていないが、第16図、第17図、第18図ともに大体共通して高次波の方が音速が延びていると云う事実は、平行度の不完全にも原因があると思われる。従って平行度の完全な設定によって、高次波の採用はより正確な実験結果を導くであろう。尚、直流パルスと干渉法との比較は別表(4)、(5)において行なっている。その他高周波パルス等との比較は後述される。

3. 高周波パルスによる方法

高周波パルスによる音速の測定の特徴は、一般に高周波は強力なものが得られ、又音源水晶の数十倍の倍音によって水晶片を励振させることもできるから、周波数範囲を極めて広くさせ得ることにある。更に高周波パルスは、直流電気入力パルスの幅に応じた幅で波頂部の平坦な振動を持続させることができるから、強度測定を容易にする重要な手段を提供する。ただ、直流パルスによって振動を励起させるので、一般に高周波パルスでは直流パルスより立上りを



$v=1481.5 \pm 2.7$ m/sec (0.18%) (19.7°C)

第19図 高周波パルスによる測定例 (15 Mc-15 Mc) [別表12]

急にすることが困難である。これ等の位置読取りの精度については第3章で検討したから、本節では、それによって得られた実験値の精度を調べる。しかし高周波パルスによる音速度測定法は、最近非常に多く使われているので、本節では干渉法と高周波パルス法(第19, 20図)の比較例を挙げるにとどめ、(別表(12), (13))次節の新しい方法の説明のちに再び比較のために、此の方法を取上げることにする。

高周波パルスの高次波も測定に使用できれば、精度をより向上するものと期待できようが、第5表a及びbの例に示される如く(1桁の精

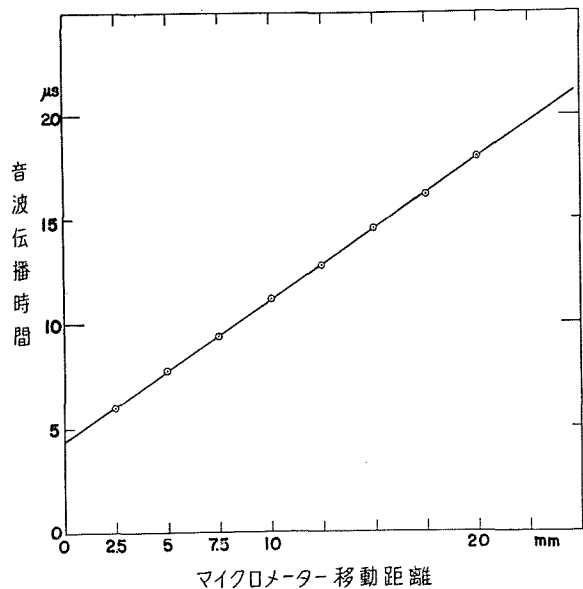
第5表 高周波パルス高次波による読取値のバラツキ ()内は1次の距離に対する換算値

(a) 例

マイクロメーター	1次	2次	3次	4次
0.600 mm	0.86	2.16 (0.72)	3.53 (0.71)	4.84 (0.69) $\times 20 \mu s$
1.000	0.89	2.29 (0.76)	3.62 (0.72)	5.08 (0.72)
2.000	0.92	2.39 (0.80)	3.84 (0.77)	
3.000	0.96			
1 mm につき	0.6 μs	0.8 μs		

(v) 例

マイクロメーター	2次	3次	4次	5次
0.000 mm	1.65 (0.53)	2.66 (0.53)	3.64 (0.52)	4.65 (0.52) $\times 5 \mu s$
2.500	1.91 (0.64)	3.09 (0.62)	4.29 (0.61)	5.47 (0.61)
5.000	2.17 (0.72)	3.52 (0.70)	4.89 (0.70)	6.20 (0.69)
7.500	2.43 (0.81)	3.95 (0.79)	5.49 (0.78)	6.94 (0.77)
2.5 mm につき	0.09	0.09	0.09	0.08

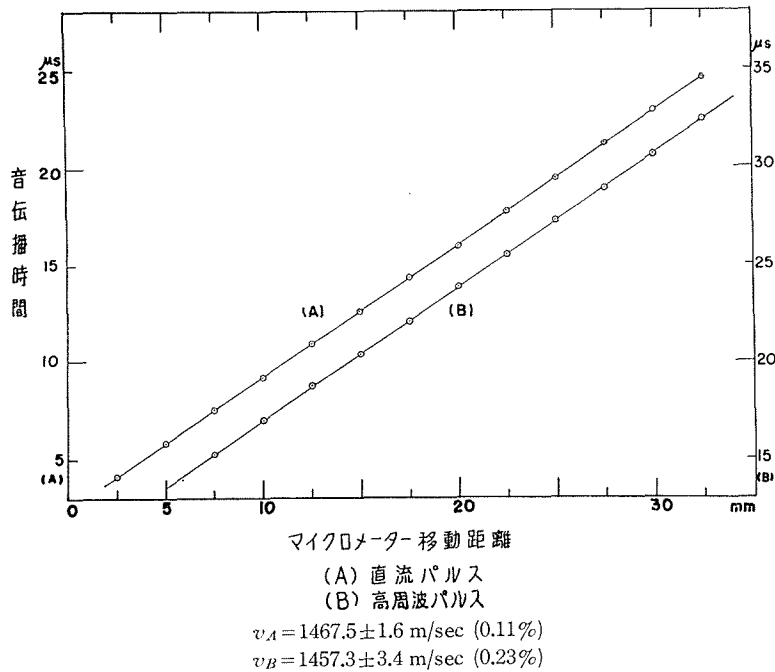


$v=1470.6 \pm 5.8$ m/sec (0.4%) (16°C)

第20図 高周波パルス(1次波)による音速度測定 [別表13]

第 6 表 直流パルス、高周波パルス及び干渉法による音速度測定との比較
 使用水晶 2Mc-2Mc 試料 イオン交換蒸溜水

A) 直流パルス (Min 幅, 150 V) マイクロメーター (2.5 mm ごとに)		B) 高周波パルス (10 Mc) 15 Mc-2 Mc		C) 干 渉 法		
指示値	伝播時間			10 Mc (2 Mc-2 Mc)		(15Mc-2Mc)
				干渉 Min 10 ケ ごとに (16.5°C)	干渉 Max 10 ケ ごとに (16.6°C)	干渉 Max 10 ケ ごとに (15.9°C)
30.000	1	4.24	$\times 5 \mu s$	1	$6.49 \times 5 \mu s$	
	2	3.89		2	6.13	
	3	3.56		3	5.78	17.332
	4	3.20		4	5.45	17.363
	5	2.87		5	5.11	17.603
	6	2.53		6	4.78	16.638
	7	2.19		7	4.43	15.899
	8	1.84		8	4.08	15.128
	9	1.51		9	3.76	15.168
	10	1.17		10	3.40	14.419
	11	0.83		11	3.05	14.445
(16.5°C)		(16.8°C)				
$n=11$ 平均伝播時間		$n=11$ 平均伝播時間		$n=5$ $5 \lambda = 0.7379 \text{ mm}$	$n=5$ $5 \lambda = 0.7360 \text{ mm}$	$n=5$ $5 \lambda = 0.7348 \text{ mm}$
$0.34072 \times 5 \mu s / 2.5 \text{ mm}$		$0.34309 \times 5 \mu s / 2.5 \text{ mm}$		$\pm 0.0015 \text{ mm}$	$\pm 0.0015 \text{ mm}$	$\pm 0.0011 \text{ mm}$
$\hat{r}_0 = 0.00039$		$\hat{r}_0 = 0.00078$		(0.20%)	(0.20%)	(0.16%)
$v = 1467.5 \pm 1.6 \text{ m/sec}$		$v = 1457.3 \pm 3.4 \text{ m/sec}$		$v = 1475.8 \pm 2.9 \text{ m/sec}$	$v = 1472.0 \pm 3.0 \text{ m/sec}$	$v = 1469.6 \pm 2.3 \text{ m/sec}$



第 21 図 直流パルス、高周波パルスによる音速測定例 (第 6 表 A, B に相当)

度しかなく) 直流パルスに較べて平行度の良い割に、バラツキが大きい(直流パルスの実験の大部分は研究の初期に行なわれたため、平行度は研究の後期、即ち高周波パルス使用以後に較べて概して不良であった)。従って高周波パルスの高次波群の使用による測定精度の向上は余り期待できない。

本研究では、高周波パルスの時間読取りには全て一次受音波の立上りが使用されている。(第4章第4節参照) 一定の距離移動に対する受音時間の変化の例は、第20図に示されている。又、直流パルス、高周波パルス及び干渉計による同一試料測定と比較は第6表(第21図)に示されている。此の例においては、測定数の割に干渉法が非常に精度良く示されている。直流パルスは一次波のみの使用であるが、高周波パルスよりも確率誤差が小さく、且つ数値も標準的数値と大体同じである。

4. 干渉法とパルス法との共用による新しい精密波長測定法

上記の最後の例は、10 Mc の干渉法に就て行なっているが、10 Mc の音波長は 0.15 mm 程であり、マイクロメーター円盤上の一目盛も誤差に大きく影響する。精度向上のためには、マイクロメーターの精度をあげることが極めて重要である。そのためにはマイクロメーターの一目盛、即ち 1μ の変位を確実に検知する必要がある。干渉法における極大、極小の際の受音板電圧の振幅(干渉波帯幅)の比はせいぜい 3:1 である。一波長の 4 分の 1、即ち谷から山への半分の距離は、 $0.15 \times 1/4 = 0.04$ mm であるから、 1μ 、即ちこれの 40 分の 1 を判別することは至難である。最も多く使用した 15 Mc では、水中での波長約 0.1 mm であるから、やはり一波長の 100 分の 1 を弁別しなければ、マイクロメーターの精度を向上しても、それを有効に使うことはできない。そこで新しく考案されたのが次の方法である。

第2章において説明された高周波発生器に、パルスジェネレーターよりの信号を与える際その繰返し周波数を小さくして、スクリーングリットに電圧のかかっていない時間を長くすると、浮遊電子が充満してスクリーングリットの抑制作用の効力を落とす。そして連続波高周波の幾分かが通過してしまう。此の連続波の強さは、スクリーングリットに電圧のかかっていない時間によって異なる。従って、パルスの幅と繰返し周波数を適当に加減することによって写真 T の様に連続干渉法とパルス法を重用して受音することが可能である。此の連続波の強さの加減によって T・1-1 の如くに高次波のパルスも使う様にすることもできるし、又、干渉極小の位置において T・1-3 の様に、又は T・2-4 や T・2-5 の様な波形にすることもできる。T・1-3 及び T・1-6 に示される如き形の極小ならば、マイクロメーターの 0.5μ の移動も捉えることができる。写真 U に示されて居るのは、 1μ のマイクロメーターの変位に対応するシンクロスコープ上の受音波形 2 次波の拡大写真である。 1μ のマイクロメーターの変位がシンクロスコープの縦軸上の 1 cm に対応して現われているから、 0.5μ の検出も容易なことが分る。此の方法によって、マイクロメーターを読み取った例が第7表、第8表及び第9表に示されてい

第7表 高周波パルスと干渉波による音速度測定例

イオン交換水 (20.0°C) 15 Mc-15 Mc

半波長ごとに	
Max.	Min.
0.386 (1)	0.361 (3)
0.336	0.312
0.288 (5)	0.264
0.240	0.216
0.192	0.161
0.135	0.109
0.089	0.063
0.042	0.014
$\lambda/2=0.04940$	$\lambda/2=0.04992$
$r_0=0.00029$ (0.59%)	$r_0=0.00025$ (0.50%)
$v=1482.0$ m/sec	$v=1487.8$ m/sec

() を付したものは写真 T-1 の同番号に該当する。

第8表 高周波パルスと干渉波の重畳による音速の測定例

イオン交換蒸留水 15 Mc-15 Mc

半波長ごとに現われる干渉極大極小におけるマイクロメーター読取値	
a. Max.	b. Min.
0.102 (2)	0.0300 (4)
0.151	0.0785
0.203	0.1270
0.254	0.1760
0.302	0.2280
0.350	0.2790
0.399	0.3270
0.447	0.3740
0.497	0.4220
0.548	0.4705
0.598	0.5215
0.647	0.5720
0.698	0.6205
0.749	0.6680
0.795	0.7205
0.845	0.7720
0.893	0.8220
0.940	0.8675
0.988 (3)	0.9140
	0.9625 (5)
$n=19$	$n=20$
$\lambda/2=0.049335 \pm 0.000062$	$\lambda/2=0.049228 \pm 0.000048$
$r_0=(0.13\%)$	$r_0=(0.11\%)$
$v=1480.0 \pm 1.8$ m/sec (18.8°C)	$v=1476.8 \pm 1.6$ m/sec (18.4°C)

() を付したものは写真 T-2 の同番号と同一状態である。

第9表 高周波パルスと干渉波の重畳による音速度の測定例

イオン交換水 (19.0°C) 15 Mc-15 Mc

半波長ごとに	Max.	写真 T-3	Min.	写真 U
0	20.3595 (1)		20.3830 (1) (2)	
1	20.4080		20.4310	
2	20.4555		20.4775	
3	20.5025		20.5260	
4	20.5530		20.5770	
5	20.6050 (2)		20.6290	
6	20.6565		20.6800	
7	20.7075		20.7315	
8	20.7575		20.7800	
9	20.8045		20.8280	
10	20.8535		20.8760	
11	20.9020		20.9245	
12	20.9510		20.9715	
13	20.9965		21.0195	
14	21.0465		21.0705	
15	21.0980		21.1225	
16	21.1500		21.1740	
17	21.2005		21.2255	
18	21.2530		21.2755	
19	21.3010 (3) (4)		21.3225	
$n=20$				
$\lambda/2$	0.049545 mm		0.049536 mm	
r	0.000070 mm (0.14%)		0.000069 mm (0.14%)	
v	1486.35 m/sec		1486.08 m/sec	

第10表 高周波パルスと干渉波の重畳による音速度測定例

(マイクロメーターの中範囲使用による)

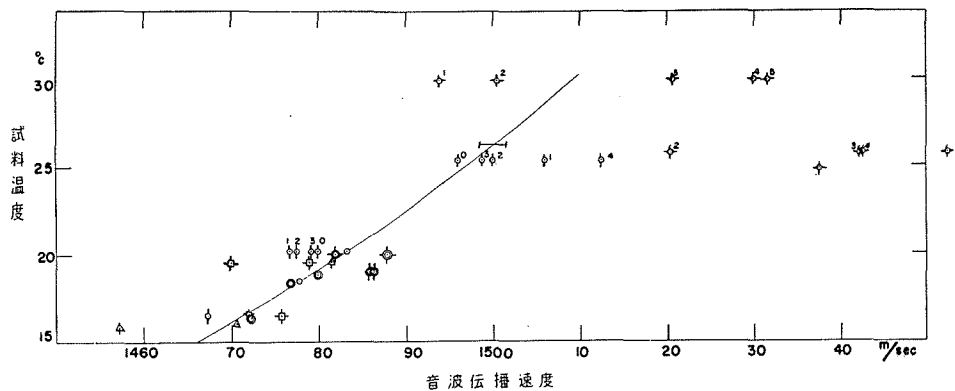
第20図と同一設定同一試料

5 λ ごとに	マイクロメーター指示値 (mm)
1	20.457 (16.36°C)
2	19.965
3	19.475
4	18.985
5	18.494
6	18.003
7	17.512
8	17.021 (16.45°C)
$n=8$	
$5\lambda=0.49076 \pm 0.00005$ mm	
$r_0=0.01\%$	
$v=1472.28 \pm 0.15$ m/sec (16.4°C)	

る。これ等の測定結果から、マイクロメーター狭範囲におけるバラツキの大きいことが明らかであり、此の読取方法も此の様に悪いマイクロメーターでは有効でないことを示している。そこでマイクロメーターの誤差を最小にするため、マイクロメーターの移動を Max 10 個毎に取ることにし、第 20 図と全く同じ設定において実験したものが、第 10 表である。茲に至って音速は始めて $\pm 0.01\%$ の精度を得ている。従って本方法が音速度精密測定法としての高精度を維持するためには、使用する送受音板距離微動装置 (マイクロメーター) の精度を向上することが必要である。マイクロメーターの誤差については、第 7 章に詳しく述べる。

5. 音速度測定法の総括的検討

音速度測定のうち本研究で扱われたのは、直流パルス法、干渉法及びパルス波干渉波重畳法であるが、試料としてイオン交換処理を施した蒸溜水を用いた諸例について、温度—音速分布図を第 22 図に示す。いずれの方法にも可成り高い精度が期待されていて、模範的な例は標準と認められている曲線 (M. Greenspan C. E. Tschiegg⁶⁾) に極く近い結果を示している。それにもかかわらず多くの散らばりの見られる原因の一つは、マイクロメーターの精度によるものであり、他は送受音板設定によるものと思われる。マイクロメーターの影響は極めて明瞭に現われている。図中に示されるマイクロメーターの測定変域が、2.5 mm 以下の場合には甚だ標準



第 22 図 イオン交換処理せる蒸溜水中の音速度

- 直流パルスによる測定 (数字は反射波次数)
- △ 高周波パルスによる測定
- 干渉波による測定
- ◎ パルスと干渉波との重畳による測定

付 標

- ⊕ 送受音板距離微動マイクロメーターの狭範囲使用による測定 (最も多くマイクロメーターの誤差が影響している)
- ↓ 同上マイクロメーターの中範囲 (2.5 mm 程度) 使用による測定

付標なきは広範囲 (10 mm 以上) 使用による方法

図中、中部の細線は M. Greenspan & C. E. Tschiegg による標準曲線

— の印は 0.1% の誤差範囲を示すものである。

線より外れている場合が多いが、12.5 mm 以上の測定域によった場合は、その方法の如何に関せず標準線に極めて近く、その測定誤差をそのまま絶対的な精度と見ることが可能である。

平行度の影響は本章第2節に考察せる通りである。

第22図から直流パルスの使用は音速を容易に得る手段として極めて有効なことが分った。しかし設定に充分の注意を払わないと、高次パルスの使用は不正確なものとなることが知られる。確率誤差等に依って精度を見ることは、此の場合有益なものと思われぬ。設定が正しくできるならば、直流パルスは反復反射波を可成り高次まで採用できるから、一回の測定に多くの測定点を得て、測定精度をシンクロスコープの読取精度より確率的に高くすることが可能である。以上の実験は、普通使用されない直流パルスが、高周波パルス等に較べて、使用に限界はあるが、通常の工学的測定範囲では、はるかに簡便、且つ正確であることを示すものである。

高周波による音速の測定は、直流パルスよりも精度を向上できるとは云えない。しかし得られた測定値は比較的バラツキが少なく、同一状態を干渉法によって求めたものよりはやや精度が良い。更に次章に述べる音吸収の測定は、高周波パルスに殆んど限られるので、この方法は一般に最も広く用いられている。

干渉法はマイクロメーターの精度に依存するのに、本装置に用いたマイクロメーターが不良なためと周波数が高かったために非常に悪い精度になったものである。しかし、第4節に述べられたパルス法との重畳法は、マイクロメーター読取精度を高めることに成功し、高い周波数にも干渉計の使用を可能にしたもので、これ等の方法の内最高の精度を期待されるものである。尚、本方法の使用は、音吸収の測定には全く無用であり、音吸収の測定に際して連続高周波は消失しなければならないが、此の目的に対して第2章第2図に配線図を示した本装置は、有効に動作するものであった。即ち連続波の重畳、消失は完全に制御された。

第6章 音吸収の測定

1. 概 要

音の吸収は、音の伝播距離に対する強度の減衰を測ることで求められるから、パルス法では受音板(又は送音板)をマイクロメーターで移動した距離 x とパルス受音電圧の大きさ V から $V = V_0 e^{-\alpha x}$ 又は $V_1/V_2 = e^{-\alpha(x_1 - x_2)}$ を用いて、直ちに α を得ることができる。この距離 x は、シンクロスコープ面上で掃引開始よりの遅延時間として現われるから、遅延時間 t により $V = V_0 e^{-\alpha' t}$ 又は $V_1/V_2 = e^{-\alpha'(t_1 - t_2)}$ となる。距離 x とこの時間 t との関係は、 $x = v \cdot t$ (v は音速) で表わされるから $\alpha' = \alpha v$ である。

直流パルスによる吸収の測定は、直流パルスの立上りが極めて微妙に影響する。立上って極大値に達する迄に時間がかかるから、最初の固有振動による立下りは、この直流パルスの極大値に達する前に始まる。従って、最大振幅の位置は固有振動の波の2, 3番目の山にある。

そして最初の振幅は、入力信号の強さの外に入力信号の立上りによって変化する。送受信においてこのことが云われるのであるから、直流パルスにより吸収を測定するのは不確実であると結論できる。特に高次反射パルスを用いることは殆んど無意味である。しかも音の吸収係数は周波数によって異なるから、特定振動数の減衰振動しか扱えない様な直流パルスによる受信波形の解析は、多分にその利用価値を限定される。本研究では、高周波パルスの特に波頂部の平坦な波形を用い、その一次受信パルスの波高の送受信板距離による減衰と高次受信パルス群による減衰測定の可能性を論ずる。又干渉法による音吸収測定は、各次の反射波の重積したものとなるが、その他に壁からの影響も受けて一意的に扱うことができない。干渉法による測定については Pielmeier 等の研究がある。本章で明らかにされる研究の結果は、当然干渉法の研究にも役立つものである。何故なら、写真 R で明らか様な様に、干渉法はこのパルスの重なりの状態 (R 2, R 3) の極限と考えることができるからである。

2. 高周波一次受信波による音吸収の測定

水晶円板面より平面音波を発生し、水晶面の中心軸垂直上方で音波を受ける時、受信水晶板に生ずる起電力は、必ずしもその受信水晶面を含む平面における全エネルギーにならないことは、既に第 4 章の音場の検討に際して述べた所である。半径 R の円板音源のピストン状振動における振動の中心軸上の音場の圧力分布は、Reyleigh⁵⁾, Backhaus, Born 等によって計算されている。音源面上の微小面積分 dS と dS から距離 r にある中心軸上の点の速度ポテンシャル ϕ は、 $\dot{\phi}_{dS} = \frac{\dot{V}_1}{2\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} dS$, $\phi = \sqrt{2} \dot{\phi} e^{j\omega t}$ で与えられる。但し、 $v_1 = \sqrt{2} \dot{V}_1 e^{j\omega t}$ で v_1 は音源面の粒子速度である。音源全面積による速度ポテンシャルの積分は

$$\dot{\phi} = \frac{\dot{V}_1}{2\pi} \iint \frac{e^{-jkr}}{r} dS \quad (7.1)$$

となる。距離 r が音源半径よりもはるかに大きい時は、音源面上のどの点からの距離 r も、中心軸上の距離 r_0 に等しくおくことができる。従って (7.1) 式は

$$\dot{\phi} = \frac{\dot{V}_1}{2\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} S \quad (7.2)$$

となる。音圧 p は

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \therefore \dot{P} = j\omega \rho \dot{\phi} \quad (7.3)$$

として表わされるから、(7.2)式により

$$|\dot{P}| = \frac{f\rho S}{r} |\dot{V}_1| \quad (7.4)$$

と簡単になる。一方距離が近い場合は、音源面上 dS の位置による r の変化が大きくなって、上の様な近似計算を許さない。この場合は半径方向の座標を y , 軸方向の座標を z とおき

$$r = \sqrt{z^2 + y^2}, \quad dS = 2\pi y dy$$

を用いて、 $y=0$ から $y=a$ まで積分すると、 $k=2\pi/\lambda$ として

$$\dot{\phi} = j \frac{\dot{V}_1}{k} \left(e^{-jk\sqrt{z^2 - a^2}} - e^{-jkz} \right) \tag{7.5}$$

を得る。ここで $\sqrt{z^2 - a^2} - z$ が波長 λ の整数倍になるところでは、音圧も 0 となる。何故なら、この ϕ を用いて P を求めると

$$\dot{P} = \frac{\omega\rho\dot{V}_1}{k} \left[\left\{ \cos(k\sqrt{z^2 - a^2}) - \cos kz \right\} - j \left\{ \sin(k\sqrt{z^2 - a^2}) - \sin kz \right\} \right]$$

となり、絶対値は

$$|\dot{P}| = \rho c |\dot{V}_1| \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{z^2 + a^2} - z) \right| \tag{7.6}$$

となるからである。 $\sin \theta \doteq \theta$ とおけるときは、(7.6) は (7.4) 式と同じになる。音源中心軸上の強度は第 23 図の如くなり、次式によって与えられる。

$$J = \sin^2 \frac{k}{2} (\sqrt{a^2 + z^2} - z)$$

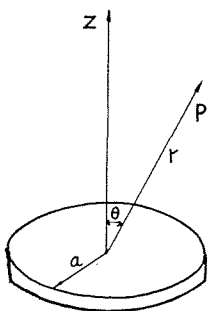
以上の計算は中心軸上の点におけるものであり、中心軸より離れると r の相異による変化を生ずる。しかし軸に垂直な平面上の全ての点の音強度を積分すると、第 23 図における点線の如き平均強度を得る。直線的な領域を Fresnel 域と云い

$1/z^2$ に比例する領域を Fraunhofer 域と云う。後者は $z > a^2/\lambda$ の領域である。通常の実験条件は Fresnel 域におかれてあり、補正項として考えられるのは音の放射角による受音面積の拡がり

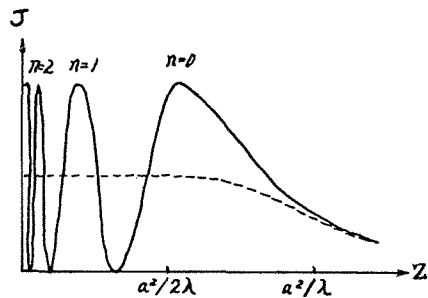
と、受音有効面積との差による損失のみである。しかも、後に述べる如く、この差は少ないので一般には省略して補正項なしに扱われる。しかし受音強度と受音面積との間には、必ずしも一義的に示されるものではない。音源(送音板)に対向する受音板が受ける音圧は、(7.1) 式を受音板全面について積分したものから得られる。(7.1) 式は、 r が a に比し十分に大きい点では第 24 図の様に記号を取ると、

$$\dot{\phi}(r, \theta) \cong \frac{\dot{V}_1 e^{-jkr}}{2\pi r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \tag{7.7}$$

で与えられる。この式のベッセル函数の項、 $J_1(z)/z$ の 2 倍はいわゆる指向性函数である。この函数の受音面積 S についての積分は、



第 24 図
音場計算記号説明図



第 23 図 音源中心軸上の音強度

$$\iint_S \frac{V_i e^{-jkr}}{2\pi r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} dt dr \quad (7.8)$$

であるが、送受信板が充分離れているとして $r=r_1$ とおくと、 θ 、 r に関して別々に積分が実施できる。

面積 S を充分大きくとると $\int J_1(z)/z dz$ は略々 0.5 である。実際に用いた水晶送音板では、 $a=10$ mm、 $k=2\pi/\lambda=70$ mm⁻¹ ($f=15$ Mc) であるから、 $ka=700$ とし、この指向性函数を数値積分によって求めると、 $z=3.83$ で殆んど半球面積分の値に近く得られる。故に $\sin \theta_0=3.83/700$ 、即ち $\theta_0=0.0055$ を放射角の目安とすることができる。 $z=3.83$ は $J_1(z)$ が最初に 0 になる角である。これを α とおくと、

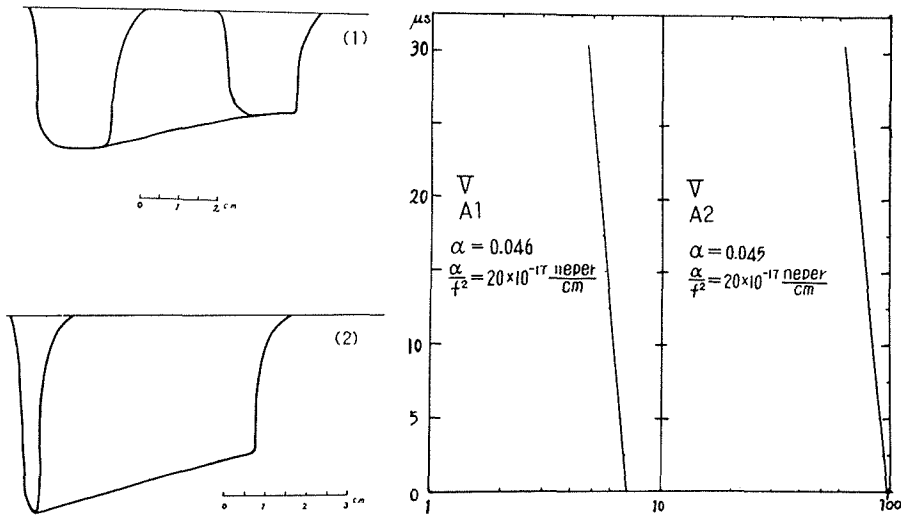
$$\alpha = \theta_0 = \sin^{-1}(1.22 \cdot \lambda/2a) \quad (7.9)$$

であり、既に述べた様に角 α は小さいから、一般に超音波領域での計測では角の拡がりを見捨てる。しかし角 α が小さいことは、受信板の設定に際して第 4 章において述べた如き (第 10 図) 横ずれの影響の極めて大きいことを示唆するものである。又、設定の際の平行性の不良は、若し送受信板が同一面積ならば有効受信面積の違いとなって受信強度に影響する。1 次受信パルスを使用に際しては、設定に充分気をつけるならば、この誤差を少なくし吸収の測定値を充分に有効ならしめることができよう。

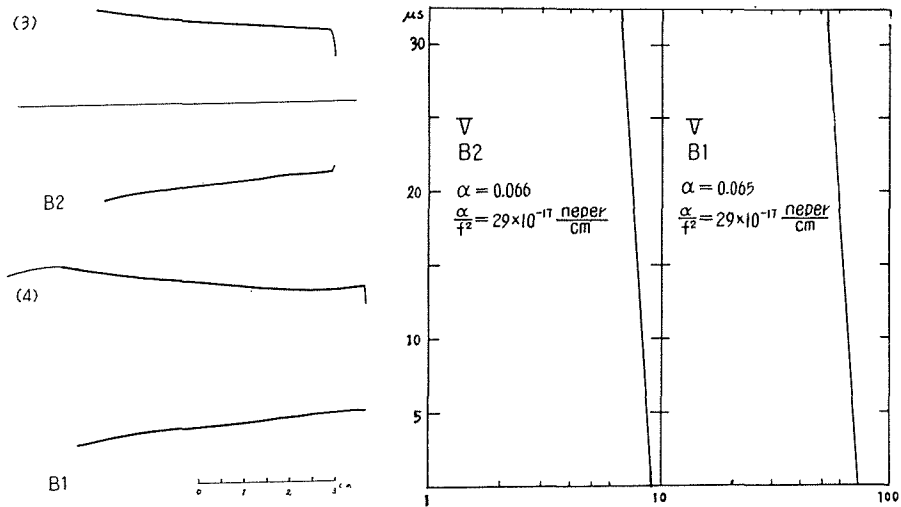
吸収の測定に 1 次受信パルスを使用した場合の実験結果を次に論ずる。1 次受信パルスの減衰を測る方法は、送受信板距離に対する受信波高を知ることである。送受信板の一定の距離毎に受信波高を測る方法は、最も標準的な方法であるが、測定に時間を要し、装置の安定性と共に、試料が安定な平衡系であることが重要な条件となる。従って実験室の精密な測定に用いられるが、実験の周囲状況に充分の注意を払わないと精度を損ね易く、更に短時間で結果を得ることはできない。

新らしく考案された方法の一つは、微動軸マイクロメーターにより送音板又は受信板水晶を連続移動し、シンクロスコープ面上の像の移動を開放した写真機で撮影するものである。送受信板距離に応じてパルス受信波のシンクロスコープ横軸上の位置は連続的に移動するので、撮影された写真には縦軸に波高、横軸に距離を示すことになり、減衰の自然対数曲線が直接に画かれる筈である。写真 V は、この様にして撮影した例で、移動の方法の相異により現われる図形の相異を見ることができる。V-A 1 は殆んど段階的に急激な移動の繰返しと、その間の充分な停止時間によつての撮影であり、V-B 1 は殆んど連続的に移動した例である。適当な停止と連続移動の速度によつて V-A 2 或いは V-B 2 の如き写真が得られる。後で述べる様に、高次パルスの受信波高を同時に写しとるためには、この像の移動速度即ちマイクロメーターの移動速度と像の明るさを調節し、画像濃度を適当にしなければならない。この測定法においてはこの実験技術が測定の精度に甚だしく影響する。

写真 V から近似曲線を得て、それより吸収係数の値 α を求めたものが、第 25 図に示さ



(A) 写真 V-A 1, V-A 2 による減衰
 試料 イオン交換蒸溜水 設定 A (17°C)
 パルス幅 (1): 10 μ s (2): 2 μ s



(B) 写真 V-B 1, V-B 2 による減衰
 試料 イオン交換蒸溜水 設定 B (20°C)
 パルス幅 (3): 2 μ s (4): 10 μ s

第 25 図 高周波 1 次パルスの減衰

れている。A, B, C 等は設定の相異を示すものである。水晶板は送受音板とも殆んど同一物の同一ユニットを使用しているので、設定の相異は傾斜角と平行移動の二つである。設定は何れも音場の検討に際して述べた様に、直流パルスによる調節、高周波パルスによる調節、連続波による調節を行なった後の状態である。図表に示された結果から、各設定における測定値は数 % 以内の精度で等しい減衰係数を示している。しかし、設定の相異による吸収値の相異は意外

に大きく、温度変化等を考慮しても甚だ大きい誤差である。更にこの比較において、どの設定が正しいかを以上の実験から断定することはできない。ただ次の様に仮定して考える。正しい設定とは、伝播して来た音波を同一面積で受けるとき、その面積の中心と音源平面との距離を一定にして、最大の音圧を受ける様な設定を云う。この様な設定のときは、受音平面は送音板と完全に平行であり、又受音板中心は送音板中心軸上にあるものと云えよう。直接受音波（1次波）の受音における誤差は、正しい設定からのずれによるものの外に、受音面積の制限によるもののあることは、既に述べた通りである。

3. 高周波高次受音波群の波高の減衰と音場の設定

1次受音波高値の減衰と同様に、2次以後の高次波の波高値の減衰からも減衰係数を求めることができる。シンクロスコープの横座標は1次波と同様に、送音してから反射をくり返して受音板に達した伝播全路程の時間を示すから、伝播路程はこの時間値に音速をかけたものとなる。2次波、又はその他の高次波も1次波と同じ減衰を示すなら問題は簡単である。しかし実際には高次波は路程が長いから Fresnel 域から外れ易いし、又設定状態の誤差は反射の度に累乗されて行くので設定が完全でないと、高次波高列の使用は無意味となる。

実験の結果より1次波と同じく2次波、3次波等の減衰係数を求めることができる。写真Wに示される状態は同一の設定の状態でパルス幅や掃引速度を変えて撮影したものである。それより写しとった曲線により α を求めたものを第26図及び第27図に示す。この結果から1次、2次、3次の α が甚だ大きく相異なることが知られる。同一の設定における次数のちがひによる α の不揃いな変化は特に2次波において甚だしく現われている（写真X）。

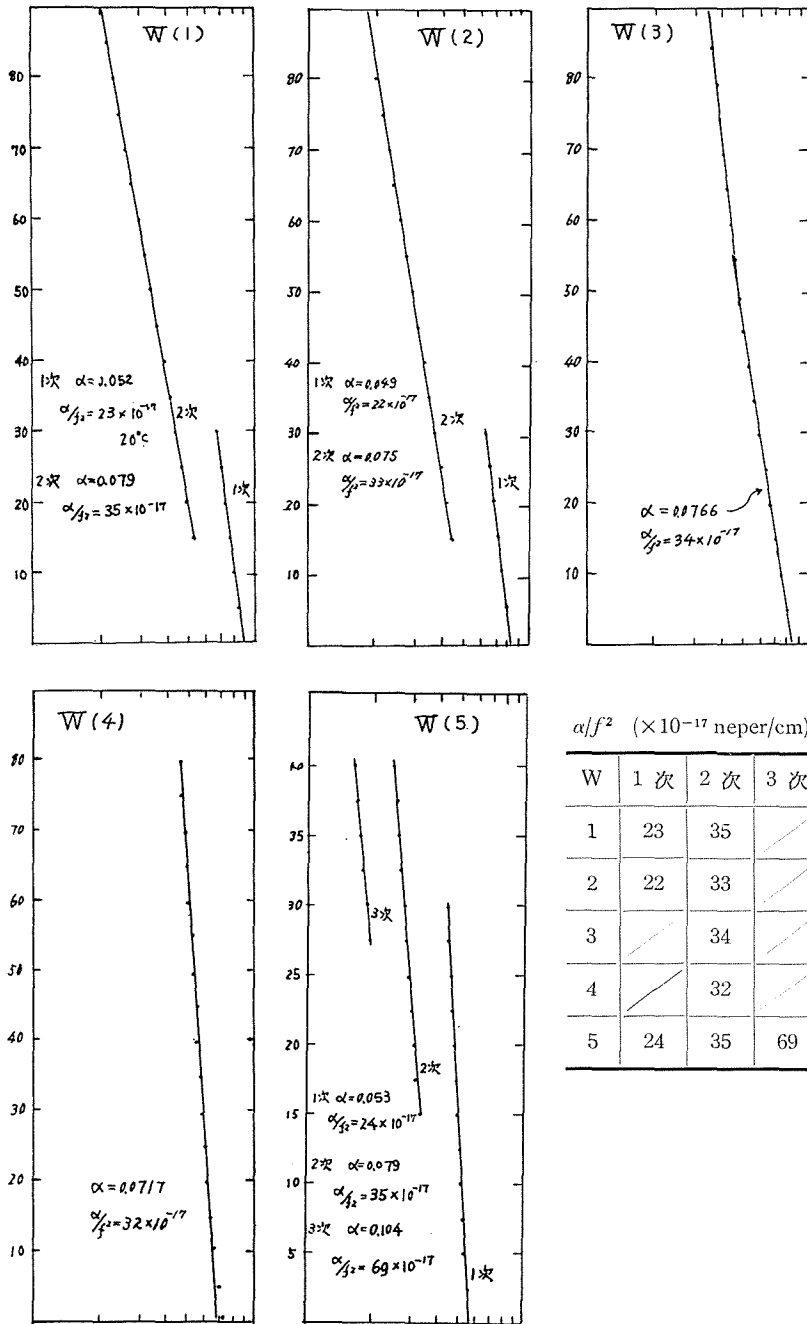
設定Aにおける2次波の凹凸及びその他の設定に同じく現われる2次波の凹凸の原因を次に考察する。関連あると思われる原因は次の6項目である。

(1) 送音板微動軸の移動に際して水晶面平行度に変化を生ずるようなガタのある場合

測定器械として可動部分を持つ限りそこに機械的ガタの生ずる可能性を持っている。しかし本装置では、この上下動部分の接触面の移動方向の長さを充分とることによって（第3図参照）このガタを極めて僅少に押えている。この原因によって現われる凹凸は不特定の小さい誤差か、さもなければ設定の相異に余り関係なく現われる特定のキズ等による大きな偏りかの何れかである。小さな凹凸による誤差は当然起り得ることで、測定の精度に関係する。一方写真Xに示される2次波の隆起の如きは特定の設定において必らず現われるから、これを偶然誤差とすることはできない。2次波のこの隆起に相当する点の1次波の曲線にはこのような大きな隆起の形跡が見られない。しかし、2次波の隆起の大きさが設定の仕方によって異なって現われることから、このガタが平行度を不良にするものと見做すことができよう。

(2) シンクロスコープ面上の輝度による像点の拡りの誤差

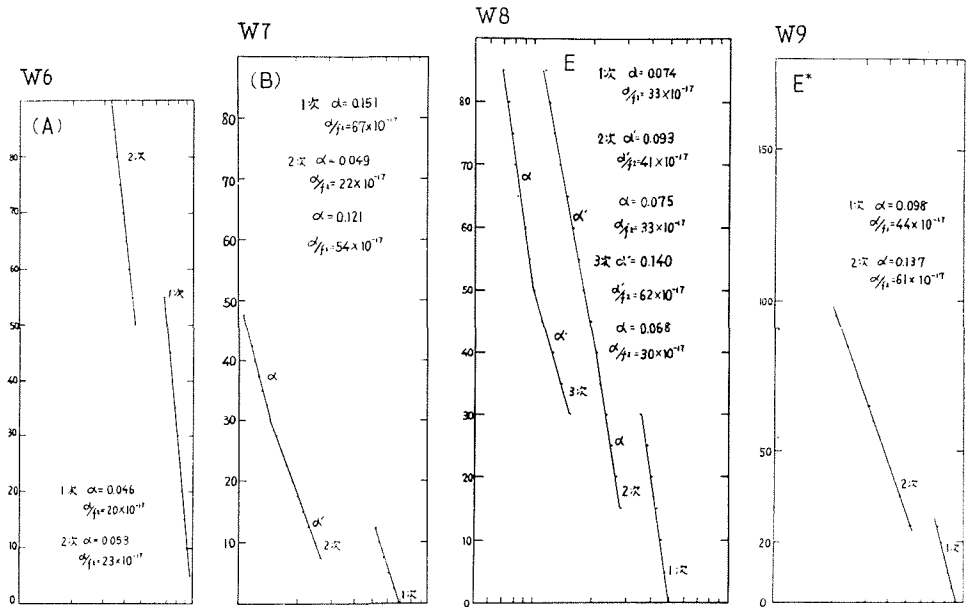
ブラウン管上に画かれる波形の尖端（山、谷に相当する所）の像は移動しないで画面に静止



第26図 高周波高次波の減衰例

設定 C 試料 イオン交換蒸溜水 (20°C)

周波数 15 Mc 水晶 15 Mc-15 Mc



吸収係数 α/f^2 ($\times 10^{-17}$ neper/cm)

No.	設定	1 次	2 次	3 次
W 6	A	20	23	
W 7	B	35	40	54
W 8	E	33	41 (33)	62
W 9	E*	44	61	

E* は E と殆んど同一の状態であるが、横移動している。
(送受音板の横づれ)

第 27 図 各設定における高次波音吸収値の相異
15 Mc-15 Mc 試料：水

させると多少広がるが、微動軸マイクロメーターを移動しながら途中で停止すると、パルス波形の静止形が掃過面積内に明瞭に現われる(写真 V-A 2, B 2)。これは減衰曲線を見ると同時に使用したパルスの伝播波形を見ることになり、極めて有用である。停止した点の輝度が増して輝度面積を広げるが、減衰曲線上にこのために生ずる凹凸の補正は容易である。

(3) 連続波による干渉の影響

パルス高周波の発振は、連続波の制御によって得ているのであるから、パルス波の入力していないときは、連続波が抑制されている。しかし完全に消失していないと、送受音板距離によってその連続波高に極大極小を生ずる。この場合、極大極小の間隔は音波長の半分の周期を持って現われる。A, B, C 等に用いられた波長は 15 Mc であるから、水中の波長は 0.1 mm であり、伝達時間で見ると 0.07 μ s 以下の周期である。パルス幅のとり方によって、このような

周期の現われることもあるが、写真 X に見られる如き大きな凹凸はこの周期よりはるかに大きく、この周期とは無関係である。

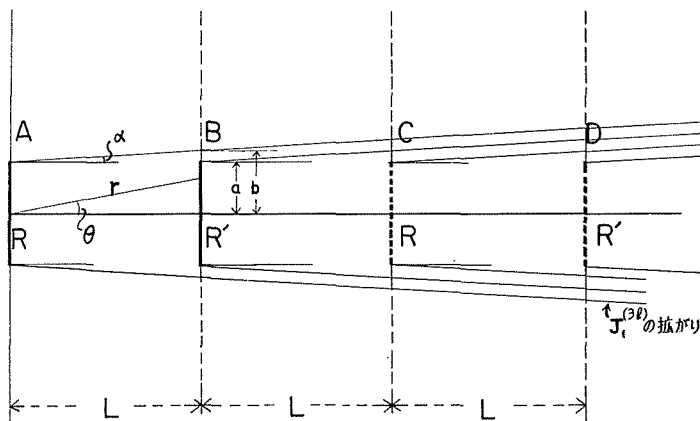
(4) 発振器その他の計器による誤差

既に述べた如く、同一設定で 1 次波に凹凸の現われないうちにも現われる 2 次波の凹凸が考えられているのであるから、この誤差原因に計器の不安定を考慮する必要はない。しかし実際に高周波連続波の発振は不安定であったから不特定の偶然誤差の原因としては一応考慮しておくべきであると思う。この誤差を小さくするためには後に述べる瞬間測定法によるか、数多くの実験値の平均をとるか、高周波出力を受音圧測定と同時に測定する方法をとるべきである。

(5) 受音板を含む面の音圧の面積分をその面全体について行なわずに限定された受音面積について行なうために生ずる誤差。

高次受音波の波高値に大きく影響すると思われるのがこの原因である。写真 X の 2 次受音波に現われる異状さは設定により著しく大きさが異なるが位置は大体同じ伝播距離のところにある。若し受音エネルギーが極小を示すときは、それから反射したエネルギーも小さくなり従って高次波の受音エネルギーにも当然影響する筈である。実際は写真 X 3, 4 に見られるように 1 次波と 2 次波とは余り関連ないようであるが、2 次波の隆起のある時の 3 次波はやはり若干の隆起を示している。このような面積分の位置による相異は更に水晶面の平行横ずれ等も原因として考慮しなければならないから、隆起や凹凸の原因を知っても理論的な補正は完全には行なえない。むしろこの平行移動による誤差も加えて実験的な反射係数を求める方が有効である。

実験的な反射係数を求めるためには、先ず 1 次波の凹凸の平均的な減衰曲線を近似曲線として減衰係数を求め、次に高次波について同様に減衰係数を求める。各反射係数が一定であるならば、各次の減衰係数は全く等しくなる筈である。第 28 図の如く送音板よりの音波の拡がりを描くならば、高次の受音波を扱う際の損失を単純化して考えることができる。



第 28 図 音波反射係数説明図

受音面を含む平面上の強度は(7.8)式で与えられているから吸収を伴わない受音強度は、受音側無限広さの平面全部についての積分量を J_0 として

$$J_1 = J_0 \iint_{R'(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \quad (7.10)$$

で与えられる。 $R'(l)$ は送受音板距離が l であるときの受音面 R' についての積分であることを意味する。

この面より反射した音波が送音板に達する際の音強度は、この受音強度に反射係数をかけたものが受音板を音源として逆方向に照射されたものとみてよい。反射係数を γ として再び同様の計算を繰り返すと得られる。即ち

$$J_{1r} = \gamma J_1 \iint_{R(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \quad (7.11)$$

そして更に再び反射して再び受音板に達するときは

$$J_2 = \gamma^2 J_{1r} \iint_{R(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \quad (7.12)$$

受音板と送音板とが全く同一規格であると仮定すると、 $R=R'$ とおけるから、設定が第27図の如く完全なら

$$J_2 = \gamma^2 J_0 \left[\iint_{R(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \right]^3 \quad (7.13)$$

となる。同様にして n 次波については

$$J_n = \gamma^{2(n-1)} J_0 \left[\iint_{R(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \right]^{2n-1} \quad (7.14)$$

を得る。

同一の伝播距離に対する1次波と2次波の受音強度の比は、上式より

$$\frac{J_2^{(l)}}{J_1^{(3l)}} = \gamma^2 \frac{\left[\iint_{R(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \right]^3}{\iint_{R(3l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr} \quad (7.15)$$

ここに (l) , $(3l)$ は送受音板距離が l , $3l$ のときの状態を意味する。

これに媒体中の音吸収を考慮すると $J_0 = J_0 e^{-\alpha l}$ として(7.10)式は

$$J_1^{(l)} = J_0 e^{-\alpha l} \iint_{R'(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \quad (7.16)$$

となる。以下同様に

$$J_{1r} = J_1 \cdot \gamma \cdot e^{-\alpha l} \iint_{R(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr$$

$$J_2 = J_0 \cdot \gamma^2 \cdot e^{-3\alpha l} \left[\iint_{R(l)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \right]^3 \quad (7.17)$$

従って等しい伝播距離に対する音強度の比は

$$\frac{J_2^{(L)}}{J_1^{(3L)}} = \gamma^2 \frac{e^{-3\alpha L}}{e^{-\alpha 3L}} \frac{\left[\iint_{R(L)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \right]^3}{\iint_{R(3L)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr}$$

故に

$$\frac{J_2^{(L)}}{J_1^{(3L)}} = \gamma^2 \frac{\left[\iint_{R(L)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr \right]^3}{\iint_{R(3L)} \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr} \quad (7.18)$$

この積分は $d\theta$, dr について分離して行なえるので

$$\iint \frac{e^{-jrk}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta dr = \int \frac{e^{-jrk}}{r} dr \cdot \int \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} d\theta$$

となる。 r が充分大きいときは $r = \text{const}$ とおけるから (7.18) 式内の自然対数項は吸収係数のときと全く同様になり、分母分子が等しく、これを省略することができる。従って残る項は角 θ による積分であり、これは距離に関係しない。従って若し平行度、横づれ等の設定が正しく行なわれているならば、この係数を常数によって近似させることができよう。(7.18) 式は、かくして最も簡単化された形において

$$\frac{J_2^{(L)}}{J_1^{(3L)}} = \gamma'^2 \quad (7.19)$$

全く同様にして

$$\frac{J_3^{(3L)}}{J_2^{(6L)}} = \frac{J_4}{J_3} = \dots = \gamma'^2$$

得る。実際には設定上の微少な変化が常に γ' に影響するからこの γ' は実験によって誘導すべきものと思う。

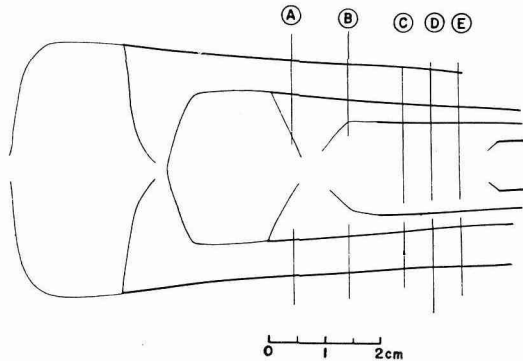
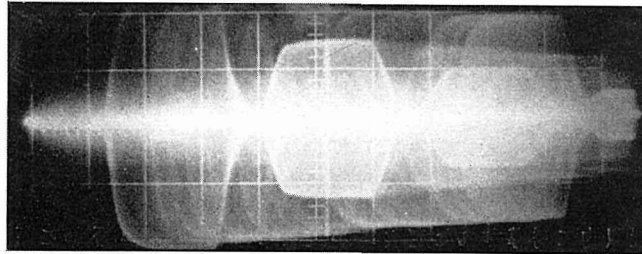
以上のように近似的に誘導された定数 γ' が実際に存在するか否かに高次波利用の可否はかかっている。設定 C* の写真が 1 次, 2 次, 3 次の同じ伝播距離における点を重複して撮影しているのでこの例によって反射係数を求めたものが第 11 表及び第 29 図である。これより得られる γ'^2 は約 0.66 となり概ね一致している。従ってこの場合は上記の仮定が大体当てはまることを示している。しかし設定の相異によっては、非常に大きなずれがあり、必ずしもこのように良い結果でない場合もある。これについては次の原因を考えることができよう。

(6) 水晶受音面と送音面との平行性の不良による場合

若し両水晶面が完全な平行より僅かにずれている場合は、1 次受音の大きさも最大にならないばかりか、距離増大と共に受音面中心が送音板中心軸よりもずれるから受音エネルギーの中心位置を含む平行平面の全エネルギーに対する比は平行度のずれと共に急激に小さくなる。従って媒質液体の吸収による受音強度の減衰よりはるかに大きな受音強度の減衰が得られる。

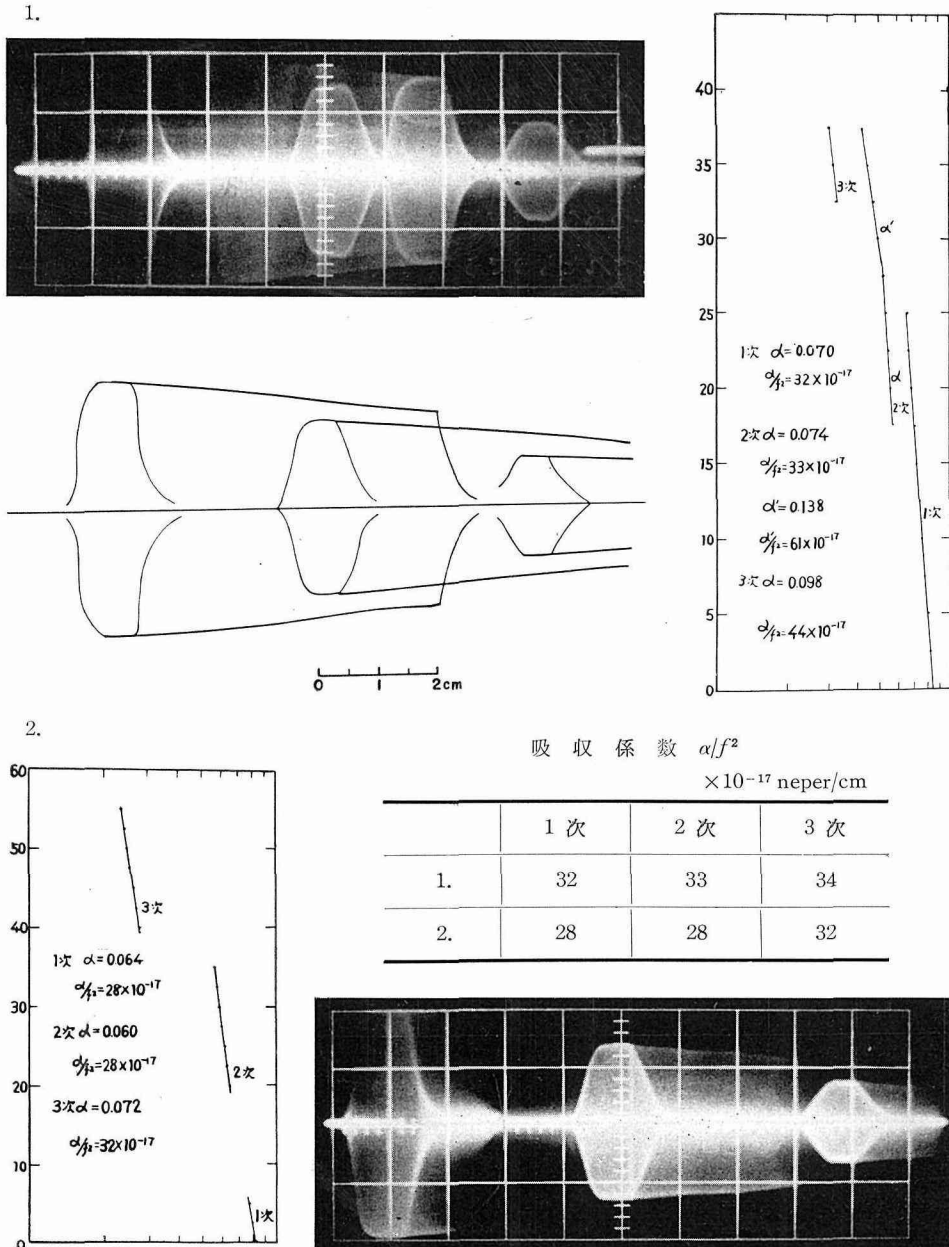
第11表 高次波高反射係数算出例
 設定 C* 試料イオン交換蒸溜水 (原図は第29図)
 15 Mc-15 Mc パルス幅 10 μ s

測定箇所	次 数	中心軸よりの距離			高 さ の 比		r^2
		上	下	和	次 数	比	
A	1	3.9	4.05	7.95	2/1	0.66	0.66
	2	2.6	2.65	5.26			
B	1	3.75	3.9	7.55	2/1	0.66	0.66
	2	2.45	2.55	5.00			
C	1	3.55	3.75	7.30	2/1	0.65	0.65
	2	2.3	2.45	4.75	3/2	0.70	0.70
	3	1.60	1.70	3.30	3/1	0.45	0.66
D	1	3.35	3.75	7.25	2/1	0.66	0.66
	2	2.15	2.30	4.45	3/2	0.65	0.65
	3	1.55	1.65	3.20	3/1	0.44	0.66
E	1	3.4	3.7	7.10	2/1	0.60	0.60
	2	2.05	2.20	4.25	3/2	0.74	0.74
	3	1.55	1.60	3.15	3/1	0.44	0.67
					r の 平 均		0.66



第29図 高次波高反射係数算出原板及び軌跡図

平行度のずれによる反射損失の増大は平行に横ずれした場合に較べてはるかに大きい。横ずれによる損失は反射の度に倍加するが、平行度のずれは反射のたびに反射角が倍加するから損失は甚だしく大きくなるわけである。この平行度のずれによる減衰係数の変化は各次波の実験結果から見る事ができる。(写真 W 及び Y, 及び第 30 図) 即ち第 26 図における設定 C 及



第 30 図 高周波高次波の減衰設定のよい状態例 (F)

び E では、吸数係数は高次になるに従って等比級数のように急激に増大する。しかし第 27 図及び第 30 図における設定 A 又は F では等差級数的に扱われる。従ってこれらの設定のうち C 及び E は特に平行性が悪いと云えよう。このようにして平行度の不良による場合と (5) に説明した平行な横ずれとは明確に区別できる。従って装置自身の設定状態の検討はこの原理によって考慮され、較正は精度を高く求めることができる。

4. 音吸収の瞬間的測定法

以上の実験の並びに理論的検討によって、完全な設定を試みてそれを吸収曲線から実証して、実験的に r を求めておくことができる。 r が距離に無関係に求められるならば、写真 Y に示される一連の写真のいずれの一つからも吸収係数を知ることができる。(第 30 図参照) F の設定はこの目的のために充分検討されたものである。1 次、2 次、3 次の吸収係数は概ね一致しているが、反射係数は単純化された理論のようには一致せず、 J_2/J_1 , J_3/J_2 , J_4/J_3 , で夫々異なる値を持つ。従ってこれらの比を夫々 K_{21} , K_{32} , K_{43} , 等とおいて夫々の実験値を用いる。写真 2 を拡大して吸収係数を各次について求めたのが第 12 表である。各次の音伝播距離 0 の位置における受音強度の比から

$$K_{21} = 0.74, K_{32} = 0.59, K_{43} = 0.57$$

とおいて、各次の α 印の実験値より、この係数値によって 1 次波に換算したものを α 印で示

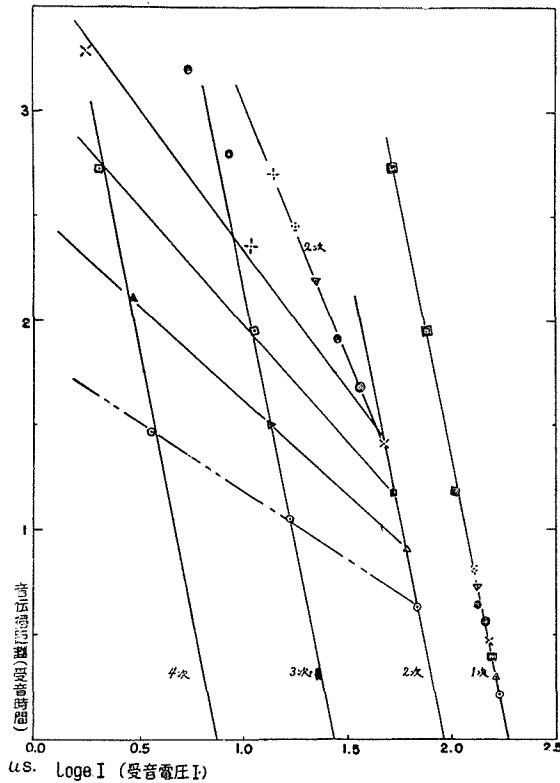
第 12 表 高次波列を用いた音吸収の測定
イオン交換蒸溜水 (15 Mc-15 Mc)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
音伝播時間 $\times 20\mu s$	0.21	0.30	0.39	0.47	0.56	0.64	0.73	0.81	0.90	0.99	
波 高 値	1st	9.31 (2.23)	9.20 (2.22)	9.01 (2.20)	8.87 (2.18)	8.74 (2.17)	8.40 (2.13)	8.43 (2.13)	8.30 (2.12)	8.07 (2.09)	8.44 (2.13)
	2nd	6.28 (1.84)	5.97 (1.79)	5.59 (1.72)	5.34 (1.67)	4.74 (1.56)	4.27 (1.45)	3.88 (1.36)	3.52 (1.26)	3.16 (1.15)	3.31 (1.20)
	3rd	3.40 (1.22)	3.10 (1.13)	2.87 (1.05)	2.84 (1.04)	2.58 (0.94)	2.58 (0.74)	1.91 (0.64)	1.64 (0.49)	1.46 (0.37)	1.40 (0.33)
	4th	1.78 (0.57)	1.61 (0.47)	1.38 (0.32)	1.29 (0.25)	1.13 (0.12)	1.13 (-0.04)	0.82 (-0.20)	0.63 (-0.46)	0.67 (-0.40)	0.60 (-0.50)

1st: $\alpha = 0.0680$
 $\therefore \alpha/f^2 = 30.2 \times 10^{-17}/\text{cm}$

2nd: (4ヶ) $\alpha = 0.0773$
 $\alpha/f^2 = 34.4 \times 10^{-17}/\text{cm}$

3rd: $\alpha = 0.0680$
 $\alpha/f^2 = 30.2 \times 10^{-17}/\text{cm}$



第31図 高次波列を用いた音吸収の測定
(第12表及び波形写真Yに相当)

してある。この結果は1次波の減衰曲線と殆んど一致していることを示している。

この方法は精密な数値を求めるには適さないかも知れない。しかし以上のように計器に関する常数として K のようなものを求めることができるならば、1つのパルス波の伝達によって音強度の吸収係数を知ることができる。音場による凹凸も先に述べた掃引法で知っていれば、それによつての補正も考えられるから、特に高い精度を求めるのでなければ、吸収の測定法として充分に利用できるものである。特に他の方法で行なえないような変動する試料に対して、この方法は極めて有用なものである。

音吸収の測定に関する以上の実験結果から従来の実験において得られた吸収値のバラツキの原因として設定の問題が最も主要なものと考えられるべきであることが分つた。そして更に吸収の迅速な測定法として掃引法と高次波列を用いる瞬間法が提案され、共に充分に利用し得ることが実証された。音吸収の測定から、逆に設定の良否を知ることのできるのも本研究による貴重な成果である。正しい設定のためには高次の吸収も着目すべきであり、そのようにして検討された設定において最も精度高く求められる吸収測定は高周波1次パルスによるものである。従つて何れの場合にも高次波高列の吸収の測定は精度向上に不可欠の手段となるものであ

る。

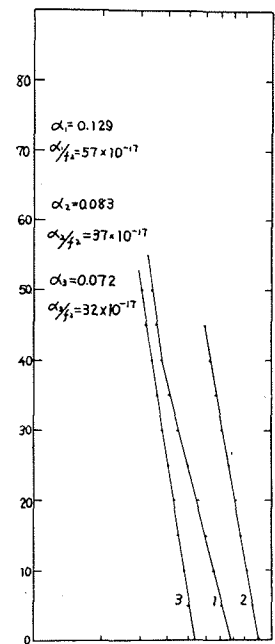
第7章 音速度、音吸収の測定法の工学的応用

1. 概 要

超音波による音速、音吸収の測定はそれぞれ有用な適用範囲を持っているし、体積弾性率の測定等常に工学上の応用につながっている。しかし、これらの方法自体は工学上の要求によったものではなく、測定の結果が工学に寄与するのである。従って工学上の要求からは、甚だ不十分な場合が多い。ここに述べられた研究の結果は、第1章の第3節に述べた如き要求によって開始された研究であって、従来の測定法と異なる方法が得られた訳である。しかも、従来の方法に対する検討のためになされた諸方法は、単に超音波の音速音吸収の測定に止まらず、微小変位測定器として或いはその検定器として、又端度器の検査器として重要な方法を示唆するものである。本章においては、以上の研究がもたらした有用な応用について述べる。音速音吸収の測定は以上の研究が直接応用されるので、ここには他の方法で不可能な場合や、本研究による方法の特に優れている場合についてのみ論ずる。

2. 音速度、音吸収測定の応用

音速音吸収の測定の方法としてここに提起された方法の、他の方法に較べて特に優れている点は、短時間の測定によって結果が得られる点であって、これが利用される工業上の対象は極めて広い範囲に及ぶが、ここに数例を述べる。(1)粘弾性体を扱う工業において、その工程中にそれら粘弾性材料の性質に変化の生ずることがある。例えば、合成繊維の製造等では、工程途中の粘弾性率を知ることは、極めて重要であるが適当な方法がない。この様な製造工程中の測定は、殆んど試料そのものの状態が流動しているから、平衡な静止状態に適用される干渉法では全く成果を期待できない。この様な場合は、固定音路程に於ける直流パルスによる音速の測定法、又は高周波高次パルス群による音速音吸収の測定法を用いることができる。(2)例えばコンクリートの如き液体状から次第に硬化する様な場合の弾性率の変化等は、これらの工学では必要な知識であるが、殆んど研究されていない。この様に吸収の大きい懸濁液の如き分散系に対しては、路程を短かくして高周波パルスの高次波を用いるか、1次波のみにより音速音吸収を測らなければならない。



第32図 水セメント混合液の吸収係数

[写真Z及び第13表]

第13表 セメント微粒子を混入せる水中の音速の変化
セメント含有重量率 1% 15 Mc-15 Mc

n	(A)	(B)	(C)
1	2.56	4.26	20.462
2	2.92	4.61	19.967
3	3.25	4.95	19.480
4	3.60	5.29	18.980
5	3.93 17.4°C	5.64 17.6°C	18.493
6			18.005
7			17.509
8			17.107
9			16.525
10			16.033 17.8°C
平均	0.3440±0.0011	0.3420±0.0027	0.49207±0.00029
\hat{r}_0	0.32%	0.79%	0.06%
音速 v	1453.5±4.7 m/sec	1462.0±11.2 m/sec	1476.21±0.89 m/sec
混入後経過時間	10 分	30 分	50 分
測定方法*	高周波パルス	高周波パルス	干渉法
$n_{i+1}-n_i$ の意味	送音板マイクロメーター 2,500 mm 毎に	送音板マイクロメーター 2,500 mm 毎に	5 波長毎に

* この場合直流パルスが使われなかったのは吸収が大きいのに直流パルスの出力が小さかったからである。

一般に分散系の測定は、安定した分散系（ベンガラ、懸濁水、インキ等）では、従来の方法（光学的方法を除く）でも測定することができる。又勿論、本研究による諸方法でも精度良く測定することができる。一方沈降の早い分散系、或いは変化する分散系では瞬間的な測定法が良い結果を与えるが、試料の状態に強制的な変化を与えないために音路程を固定することが望ましい。従って、音速の測定には固定音路程による直流パルスの利用が極めて有用である。又音吸収の測定には、高周波パルスの反復反射を用いるべきである。第13表に示されている例は、セメント：水比1%における混合過程の音速を測定したものである（写真Z及び第32図）。時間と共に音速は増大していて、体積弾性率の増大を示している。この実験は実際のコンクリートの硬化とは甚だかけはなれた混合比率ではあるが、この場合の弾性率の増大する傾向が似ているから、この測定の方法はコンクリート等における水和現象についても有益な知識を与えるものである。尚この分散系における音波の吸収は、分散粒子の沈降の問題と重なっているのでこれから吸収係数の減衰を遮断することはできないが、時間の経過と共に明らかに減少している。

3. 微小変位測定器への応用

超音波干渉計の理論を最初にたてた Hubbard は、干渉計の精度は1~2 Mcにおいて最も

よく、誤差 0.05% 以内にもすることができるから、マイクロメーターの検定に用いられようと述べたが、その後 Hiedemann は干渉計の誤差は最小でも 0.1% は避けられないと述べて居り、実際にマイクロメーターの検定に用いられた例がない様である。2 Mc における音波長は、水中で約 0.75 mm で、干渉計は半波長毎に読取値を有するから読取間隔 375μ である。これの 0.05% なら約 0.2μ である。しかし普通の干渉計では 1 回の読取値に 1% の精度 (3.8μ) を持つことは難かしく、多数回の測定による音波長の精度として上述のパーセンテージが得られているのであるから、マイクロメーターの較正等に使用するには不十分である。ここに述べられた方法では、15 Mc を使用してマイクロメーターの 1μ の変化を、電気的変換を通してシンクロスコープ上の高さ 1 cm に変換して観察することができる。機械音響及び電気的雑音を考慮してもその約 1/5 を読取精度とすることができるから、 0.2μ の精度でマイクロメーターを較正

第 14 表 マイクロメーターの精度試験例 (二例)

	(A) 読取値	較正值	残 差	(B) 読取値	較正值	残 差
1	0.3830	0.38065	23×10^{-4}	0.963	0.9653	-23×10^{-4}
2	0.4310	0.43019	8	0.914	0.9160	-20
3	0.4775	0.47973	-22	0.867	0.8668	2
4	0.5260	0.52926	-33	0.820	0.8176	24
5	0.5770	0.57880	-18	0.772	0.7684	36
6	0.6290	0.62834	7	0.721	0.7191	21
7	0.6800	0.67787	21	0.668	0.6699	-19
8	0.7315	0.72741	41	0.620	0.6207	-7
9	0.7860	0.76694	31	0.572	0.5714	6
10	0.8280	0.82648	15	0.522	0.5222	-2
11	0.8760	0.87602	0	0.471	0.4730	-20
12	0.9245	0.92555	-11	0.422	0.4237	-17
13	0.9715	0.97509	-34	0.374	0.3745	-5
14	1.0195	1.02462	-51	0.327	0.3253	17
15	1.0705	1.07416	-37	0.279	0.2761	29
16	1.1225	1.12370	-12	0.228	0.2268	12
17	1.1740	1.17323	8	0.176	0.1776	-16
18	1.2255	1.22277	28	0.127	0.1284	-14
19	1.2755	1.27230	22	0.079	0.0791	-1
20	1.3225	1.32184	7	0.030	0.0299	1
1 測定値当りの確率誤差 r		126199×10^{-8} $17.86 \times 10^{-4} \text{ mm}$			6138×10^{-8} $13.51 \times 10^{-4} \text{ mm}$	

(註) 干渉波、高周波パルスの重畳による方法では 1 測定の誤差を最大 1μ としても 20 ケの最大誤差による確率誤差は $s^2 = 2000 \times 10^{-8}$ であるから、1 測定当りの確率誤差は $r_0 = 0.74 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 即ち約 0.07μ である。従ってこのマイクロメーターの試験では読取の誤差はマイクロメーターの誤差に較べて無視され得る。この方法によってマイクロメーターの精度を 0.1μ 以下に較正することができる。

することができる。半波長は 15 Mc では 50μ であるから、1 回の読取値はこの半波長の 0.4% を精度とする。そしてこの場合較正は半波長毎即ち 50μ 毎になされる。以上は音波の伝播する媒体として水を用いての計算であるが、水中音速の温度変化は、 1°C 当り 0.2% であるから、 0.1°C の精度に温度変化を押えるなら 0.02% となり、殆んど影響ない。若しメチルアルコールの 17% 水溶液を用いるなら、 $20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ で音速は 1 m 以下の変化しかもたないから、常温では温度変化は殆んど考慮する必要がない。従ってこれを標準液として密封した可動長容器をつくり、本研究によって得られた音場の調節法を厳密に実施して平行度を完全にすれば、微小変位測定器例えばマイクロメーター等の較正は、極めて容易にすることができる。しかも本装置はそのまま微小変位の測定器として用いることもできる。他の微小変位測定器は、その測定検知量が微小であるのに応じて測定範囲も狭くなり、その比精度は余り大きくすることができない。超音波干渉による微小変位の検知は、光波基準と原理的には同一の範疇に属するから絶対的な精度の維持と共に極めて広域な長さの範囲に対処できるものである。波長は光波に較べて著しく長い、それだけ測定可能域が広がる訳である。絶対測長 0.2μ で 1 m の長さの測定を行なうならば、1 回の読取りで得る測定値の比精度は 10^{-7} の程度になる。尚これらの数値は本研究において実際に用いられた 15 Mc についての結果を用いたものである。本論文における測定値の誤差が大きかったのは、マイクロメーターの誤差が極めて大きかったからであり、このマイクロメーターの誤差をイオン交換蒸留水を用いて数回の実験より較正を行なったものが第 14 表に示されている。この検定の方法は 0.2μ の精度で得られたものであり、この表からマイクロメーターの検定によって、今迄の諸表の確率誤差がかなり小さくなることが予想される。特に 0.1% 以下の測定精度は、マイクロメーターの性能がわるいために精度を頭打ちされて居るものであって、それらの測定精度はマイクロメーターの交換によって、はるかに良い精度を得るであろう。

4. 水晶板平行設定の検討の応用

本実験において、送受音水晶面設定の際の平行度の良不良が高周波パルス等に及ぼす影響の極めて大きいことが示された。従ってこれを利用して平行な二平面間に音場を設定してその平行性を検知することが可能である。平行度と横づれの二つの問題は吸収の研究で示されたように分離して考えることができるから、平行度の状態を検定する場合を取り出して考慮する。工学上のこの問題の応用は端度器の検定である。単面の平行性は端度器において特に重要であるが、この超音波音場の検討は重要な示唆を与えている。もし端度器の端面を挟むことができるならば、それに密着する送受音板によって高い周波数の多次反射を行ない、その減衰の様子から平面度の良不良を論ずることができる。これらの検定が従来省りみられなかったのは、超音波干渉法の上限が数 Mc の低い周波数領域であったから平行度の検定の精度が悪かったものと思われる。又高周波高次パルスは金属等の音吸収の測定に用いられているが、その音場の検

討は必らずしも充分になされていなかった。本章に行なわれた検討を通して送受音水晶板の平行性の感度を 0.005 radian 以下にすることの容易であることが知られた。これはマイクロメーターの端面平行度の JIS 規格に略々等しい傾きである。従って波形写真 P に示される如き高次波高列を利用するか、更に高い周波数を利用することにより、精度を向上することが可能である。

5. 結 語

本研究の当初の目的は、液体中の音速、音吸収を測定して体積弾性率等を求める方法を究明し、その精度の向上に資すると共に、工業的に有益なる簡便な測定法を開発することにあつた。本論文に述べられた各種の新らしい測定法は、上述の要求を満し、多くの分野に寄与している超音波技術に、更に有用な分野を提供するものである。

直流パルスによる音速の測定が比較的高精度で得られることは装置を極めて簡便にするので甚だ有用であり、高周波と干渉波との重畳による方法は精密な音速を測るばかりでなく、微小変位測定器として、又その検定器として重要な方法を提供するものである。又高次反射波も含めた多重反射による値が使用できることになったが、これもパルス波による測定可能の領域を広め、且つ非平衡系に対する短時間内の平均的音速を求めるような工学的要求に対処するものである。

終りに本研究の遂行に当って、有益な御指導御援助を頂いた北大工学部教授福島久雄、小沢保和、中村常郎、横道英雄の諸先生に衷心より感謝の意を表す。又、写真撮影に長岡徠三氏の御協力を、そして本論文作成に北大工学部理学第一研究室の全職員の御助力を頂いた事を付記する。

文 献

- 1) J. C. Hubbard: *Phys. Rev.* **38**, 1011 (1931); **41**, 523 (1932); **46**, 525 (1934).
- 2) F. E. Borgnis: *Acustica* **7**, 151 (1957).
- 3) W. H. Pielmeier: *Phys. Rev.* **34**, 1184 (1929).
- 4) D. Tabuchi: *Mem. Inst. Sci. and Ind. Reseach, Osaka Univ.* **11**, **39** (1954).
- 5) Reyleigh: *Scientific papers*, **5**.
- 6) B. Greenspan & C. E. Tschiegg: *J. of Res. Nat. Bureau of Standards* **59**, 955 (1957).
- 7) I. Ikeda: *J. Acoust. Soc. Am.* **34**, 351 (1962).

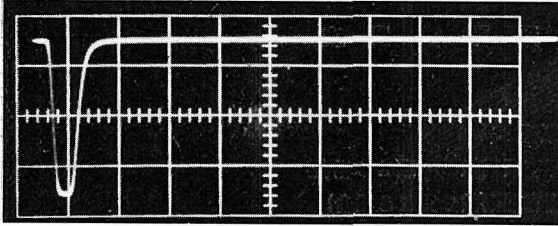
波形写真目次

- A: 直流パルス入力波形
 B: 直流パルスを印加せる水晶板の振動
 C: 直流パルス受音波形 (送受音板固有振動数の一致せる場合)
 D: 直流パルス受音波形 (送受音板固有振動数の異なる場合)
 E: パルス幅による受音波形の変化
 F: 電気入力強度による受音波形の変化
 G: 送受音板距離による受音波形の変化
 H: 直流高次波列極値の変化
 I: 送受音板の平行度の変化による波形の変化
 J: 音場内の絞りによる波形の変化
 K: 高周波パルスの受音波形
 L: 平行性のくずれによる直流パルス高次波高の変化
 M: 送受音板距離による直流パルス高次波高の変化
 N: 音場の狭い場合の直流パルス高次波高の変化
 O: 高周波パルスによる音場の検討
 P: 平行度変化による高周波パルス高次波高の変化
 Q: 高周波パルスによる音場の調節
 R: 高周波パルスの反射波との重なり
 S: 音場の調節
 T: 高周波パルスと干渉波の重畳による音速度の測定
 U: 高周波パルスと干渉波の重畳による音速度測定点の微調整
 V: 高周波パルス1次波による音吸収の測定
 W: 高周波パルス高次受音波高の減衰
 X: 高周波パルス減衰曲線における波形の凹凸
 Y: 高周波パルスによる音速音吸収の測定
 Z: セメント混合水の音吸収

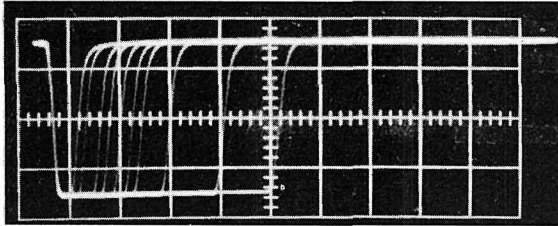
波形写真略記号説明

- H: 水平軸単位 $\mu\text{s}/\text{cm}$ } 但し, 1 cm は写真中の方眼正方形の1辺に相当
 V: 垂直軸単位 Volt/cm }
 W: パルス幅, R: パルス繰返し周期, D: 掃引遅延時間
 Q: 使用水晶板固有振動数, L: 送受音板距離, P: 受信信号波高
 f: 伝播音波振動数, α : 音吸収係数 (1波長あたり)
 S: 試料, 特記せざるものはすべてイオン交換処理を施せる蒸留水

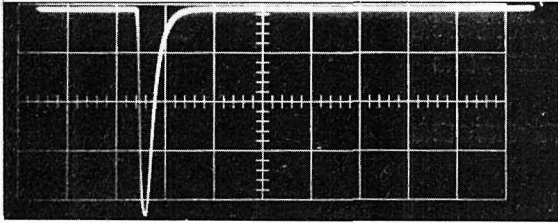
A 1



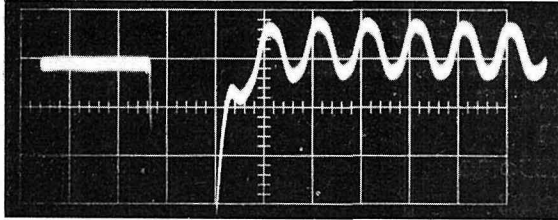
A 2



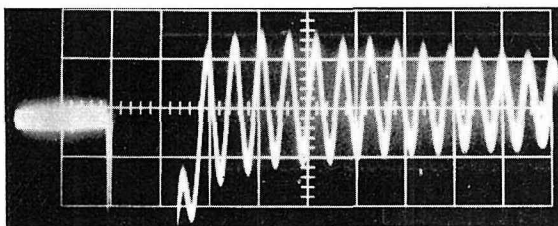
B-0



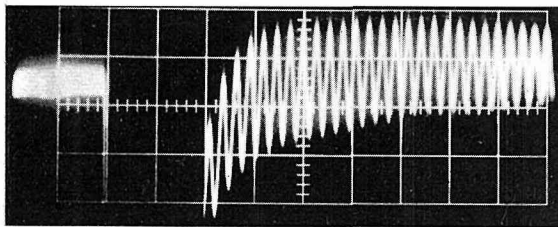
B-1



B-2



B-4



A. 直流パルス入力波

H. $0.5 \mu\text{s}/\text{cm}$ V. $5 \text{ V}/\text{cm}$

但し, 1:10 probe 使用

1. W. Min. (約 $0.15 \mu\text{s}$)
2. W. Min., 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 1.0, 1.5 及び $2.0 \mu\text{s}$

B. 直流パルスを印加せる水晶板の振動
(両端自由)H. $1 \mu\text{s}/\text{cm}$

W. Min.

-0. V. $5 \text{ V}/\text{cm}$
 $\times 10$ (1:10 probe 使用)

Q. 1 Mc (直径 30 mm)

-1. (-0 の V 軸を拡大せるもの)

V. $0.01 \text{ V}/\text{cm}$ $\times 10$

Q. 1 Mc

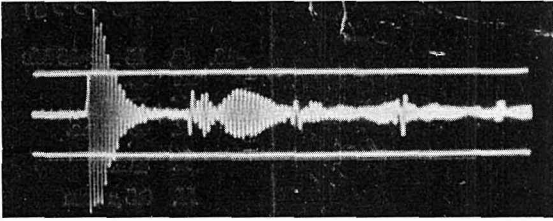
-2. V. $0.005 \text{ V}/\text{cm}$ $\times 10$

Q. 2 Mc (直径 30 mm)

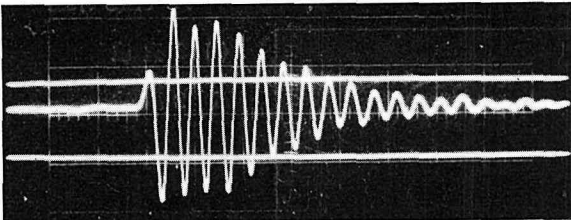
-4. V. $0.005 \text{ V}/\text{cm}$ $\times 10$

Q. 4 Mc (直径 30 mm)

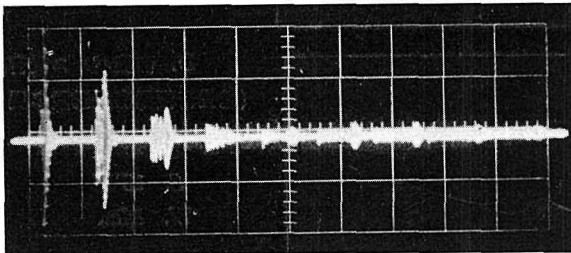
C-1 (a)



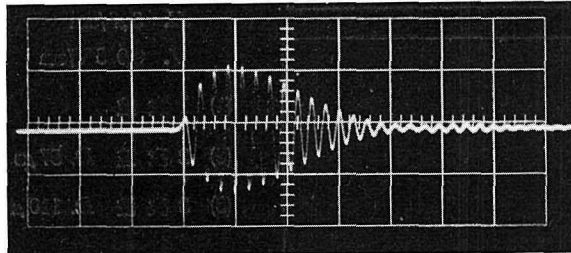
C-1 (1)



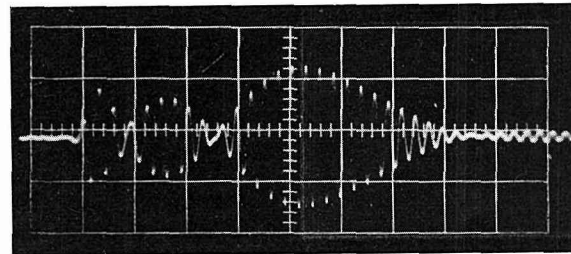
C-2 (a)



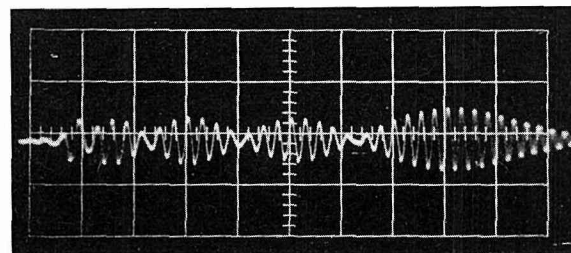
C-2 (1)



C-2 (2)



C-2 (3)



C. 直流パルス受信波形
(送受信板固有振動数の一致
せる場合)

-1. S. グリセリン (17.9°C)

L. 24.90 mm

W. 0.36 μ s

R. 300 c.p.s.

較正電圧幅 50 mV

Q. 1 Mc-1 Mc

(a) H. 10 μ s/cmD. 1 μ s

1次, 2次, 3次, 4次

(1) 上の掃引を拡大せるもの

H. 2 μ s/cmD. 10 μ s

1次波

-2. Q. 2 Mc-2 Mc

S. 15°C

V. 0.05 V/cm

W. Min.

(a) H. 10 μ s/cm

(1) 1次波拡大

H. 2 μ s/cm

(2) 2次波

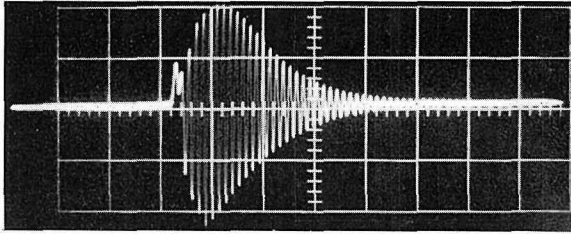
H. 2 μ s/cm

(3) 3次波 (V軸も拡大)

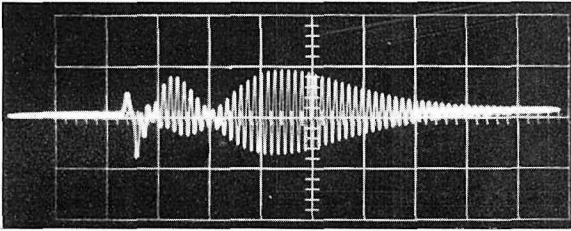
H. 2 μ s/cm

V. 0.02 V/cm

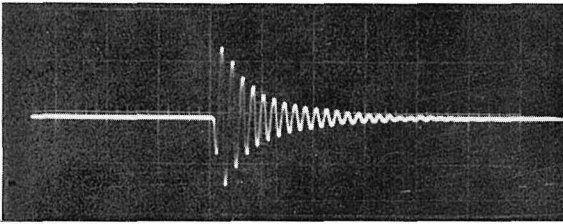
C-15 (1)



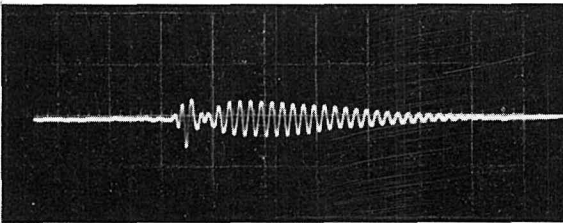
C-15 (2)



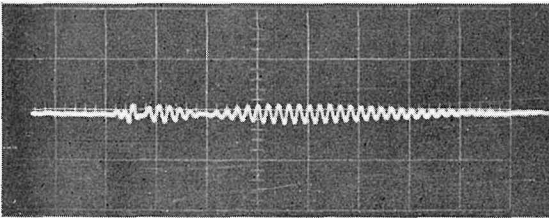
D-1-2 (1)



D-1-2 (2)



D-1-2 (3)



C (つづき)

-15. Q . 15 Mc-15 Mc W . Min. R . 400 c.p.s. L . 極近接 H . $0.5 \mu\text{s}/\text{cm}$ V . $0.005 \text{ V}/\text{cm}$

(1) 1次波

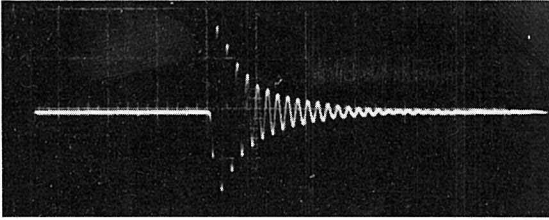
(2) 2次波

D. 直流パルス受音波形
(送受音板固有振動数の異なる場合)-1-2. Q . 1 Mc-2 Mc S . 15°C W . Min. H . $5 \mu\text{s}/\text{cm}$ V . $0.005 \text{ V}/\text{cm}$

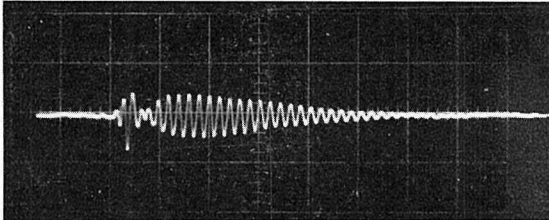
(1) 1次波

(2) 2次波 D . $57 \mu\text{s}$ (3) 3次波 D . $110 \mu\text{s}$

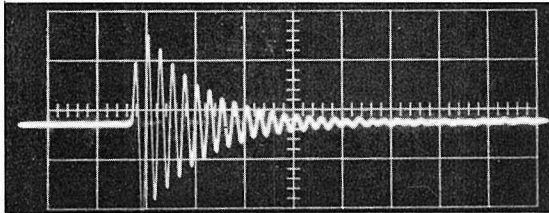
D-2-1 (1)



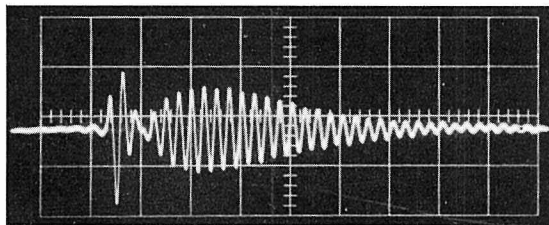
D-2-1 (2)



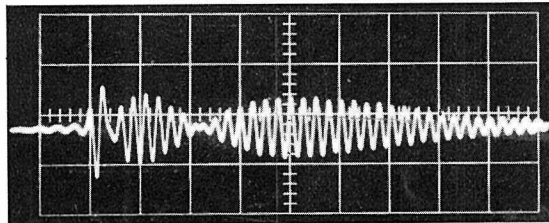
D-2-4 (1)



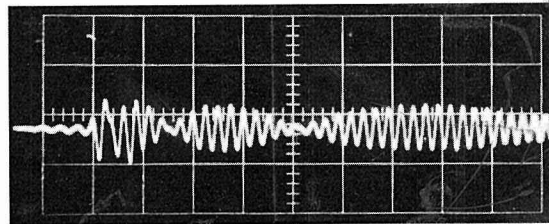
D-2-4 (2)



D-2-4 (3)



D-2-4 (4)



D (つづき)

-2-1. Q . 2 Mc-1 Mc

(D-1-2 と送受音を切替交換したのみで装置試料共不変)

(1) 1 次波

D-1-2 (1) との立上り高さの比は

$$P_{D-1-2} : P_{D-2-1} = 0.79$$

(2) 2 次波

D. 63 μ s-2-4. Q . 2 Mc-4 Mc S . 22.3°C W . Min. H . 2 μ s/cm V . 0.005 V/cm

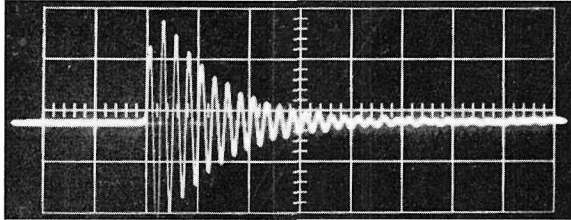
(1) 1 次波

(2) 2 次波

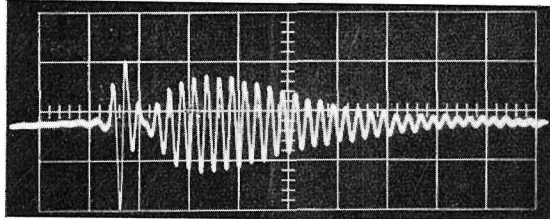
(3) 3 次波

(4) 4 次波

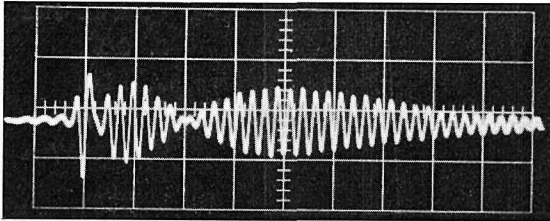
D-4-2 (1)



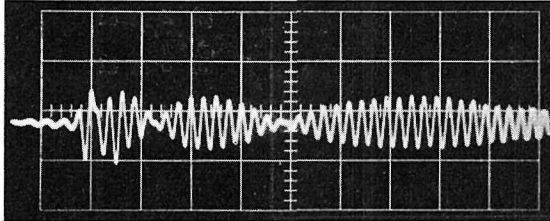
D-4-2 (2)



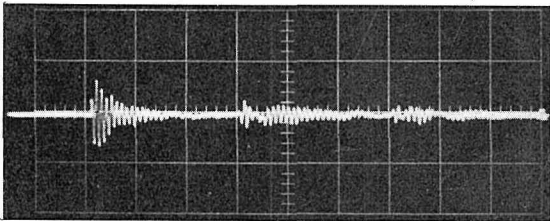
D-4-2 (3)



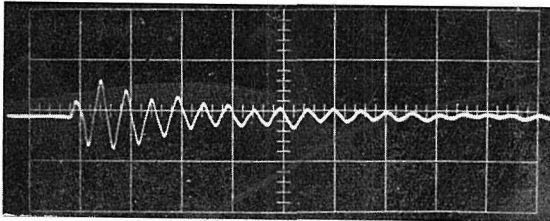
D-4-2 (4)



D-1-15 (a)



D-1-15 (1)



D (つづき)

-4-2. Q . 4Mc-4 Mc(D-2-4 と送受音を切替交換したの
みで他の実験条件は同じ)

(1) 1次波

$$P_{D-2-4} : P_{D-4-2} = 0.86 \text{ (立上り)} \\ = 0.91 \text{ (極大点)}$$

(2) 2次波

$$P_{D-2-4} : P_{D-4-2} = 0.88$$

(3) 3次波

$$P_{D-2-4} : P_{D-4-2} = 0.88$$

(4) 4次波

$$P_{D-2-4} : P_{D-4-2} = 0.87$$

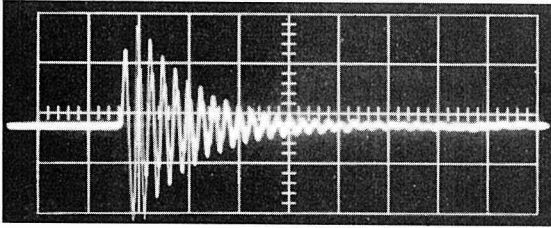
-1-15.

 Q . 1 Mc-15 Mc W . Min. V . 0.005 V/cm R . 400 c.p.s.(a) H . 10 μ s/cm

(1) (a) の掃引を拡大せるもの

 H . 2 μ s/cm

E (1)-1



E. パルス幅による受信波形の変化

V. 一定

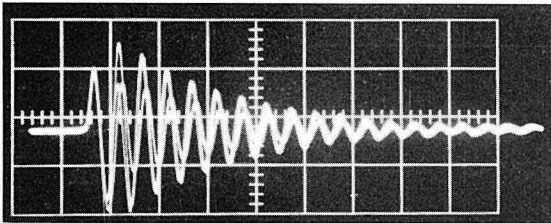
(1)-1. 1次波

W. Min., 0.24, 0.5 μ sH. 2 μ s/cm

Q. 4 Mc-2 Mc

(W Min., が出力最大)

E (1)-2



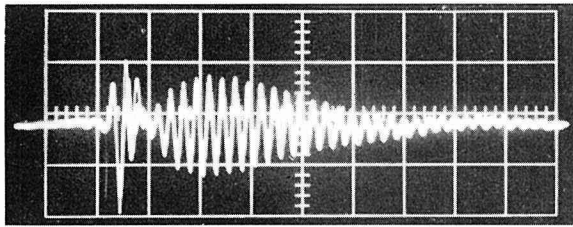
(1)-2. 1次波

W. Min., 0.23, 0.5 μ sH. 1 μ s/cm

Q. 2 Mc-4 Mc

(W min が出力最大)

E (2)



(2) 2次波

W. Min., 0.24, 0.5 μ sH. 2 μ s/cm

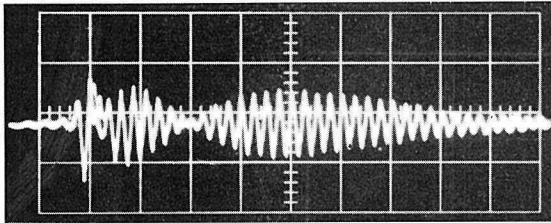
Q. 4 Mc-2 Mc

(3) 3次波

W. Min., 0.24, 0.5 μ sH. 2 μ s/cm

Q. 4 Mc-2 Mc

E (3)

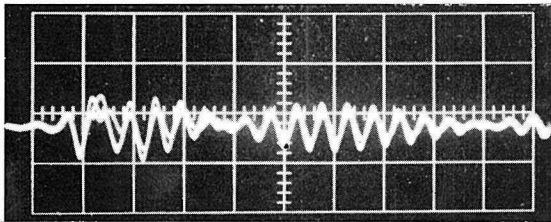


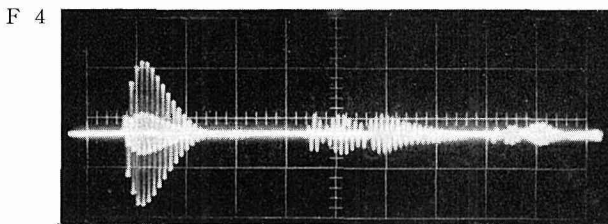
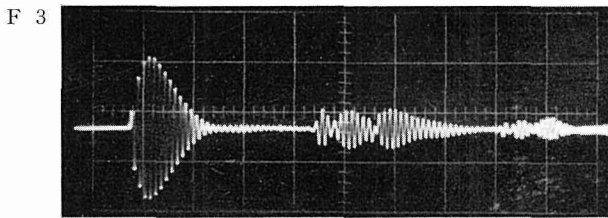
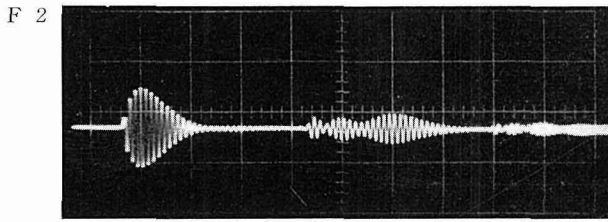
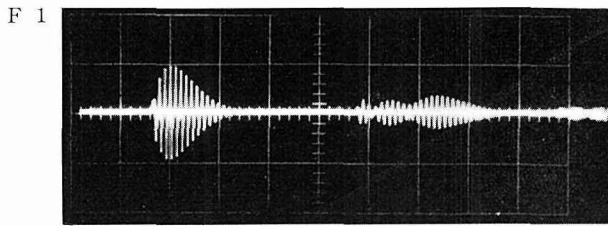
(4) 4次波

W. Min., 0.23, 0.5 μ sH. 1 μ s/cm

Q. 2 Mc-4 Mc

E (4)





F. 電気入力強度による受音波形の変化

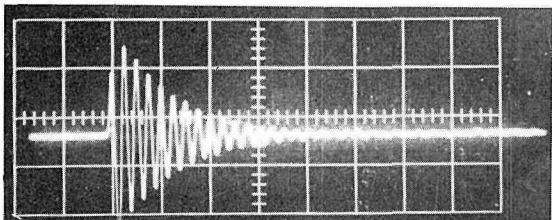
Q . 2 Mc-2 Mc

H . 5 μ s/cm

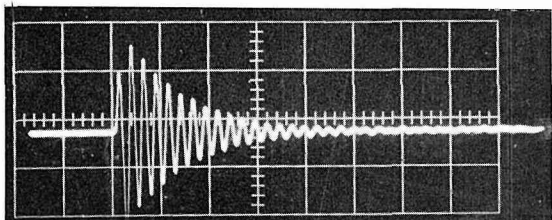
V . 一定

1. 電気入力強度を0より連続的に上げた場合
2. 強度一定
3. 強度一定 (2より強度をあげた場合)
4. 連続的 (途中停止)

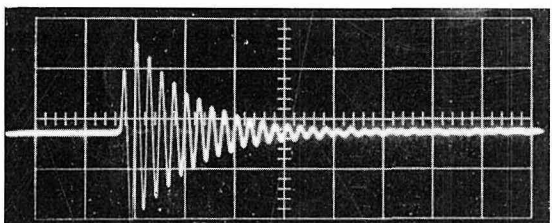
G (1)-1



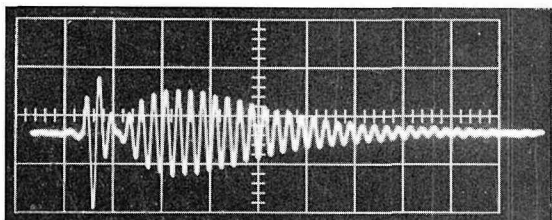
G (1)-2



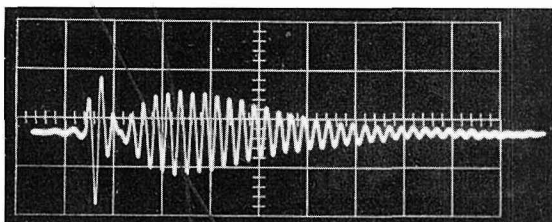
G (1)-3



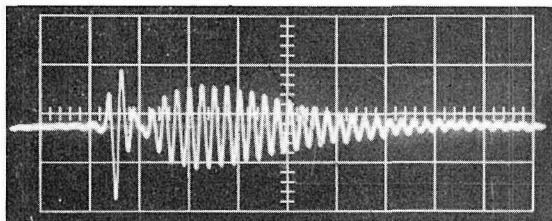
G (2)-1



G (2)-2



G (2)-3



G. 送受信板距離による受信波形の変化

Q. 2 Mc-4 Mc

H. 2 μ s/cm

V. 一定

(1) 1 次 波

1. L. 12.0 mm

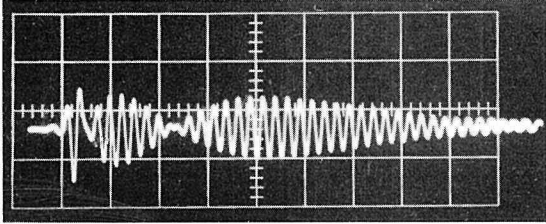
2. L. 22.0 mm

3. L. 27.0 mm

(2) 2 次 波

L は (1) の同番号と同じ

G (3)-1

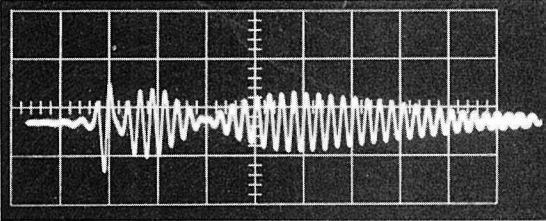


G (つづき)

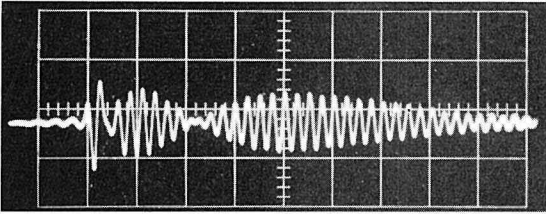
(3) 3次波

Lは(1)の同番号と同じ

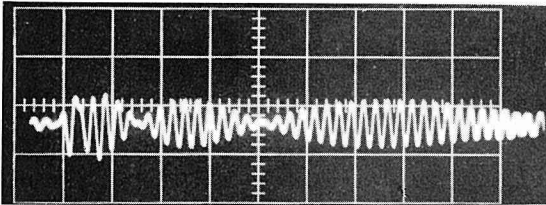
G (3)-2



G (3)-3



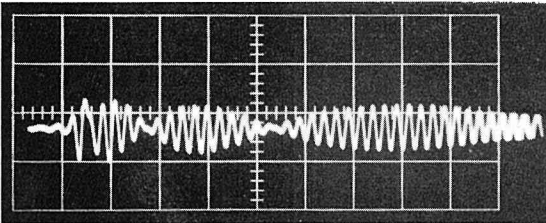
G (4)-1



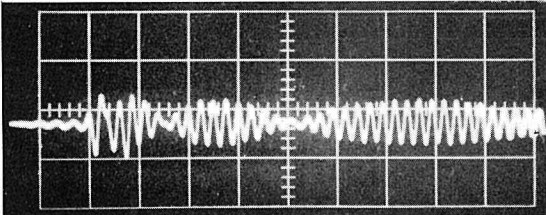
(4) 4次波

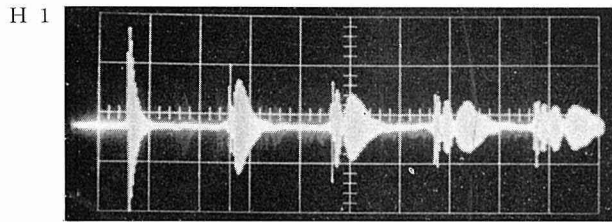
Lは(1)の同番号と同じ

G (4)-2



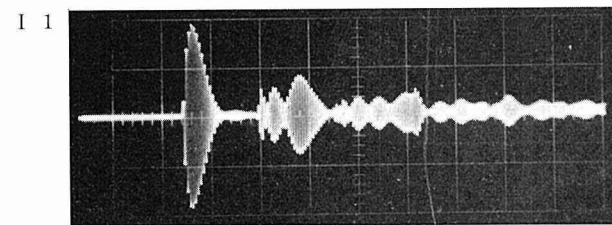
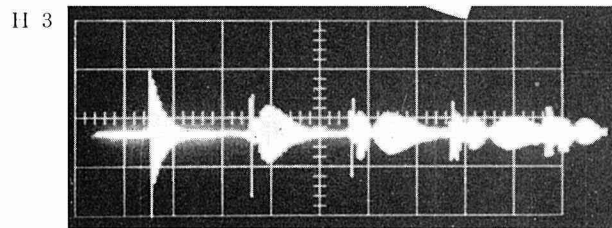
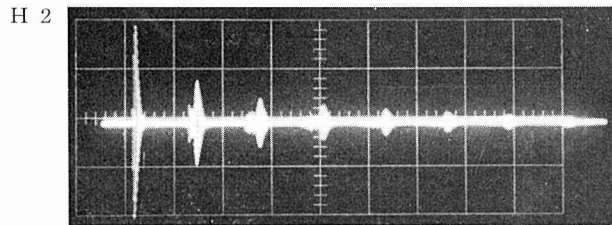
G (4)-3





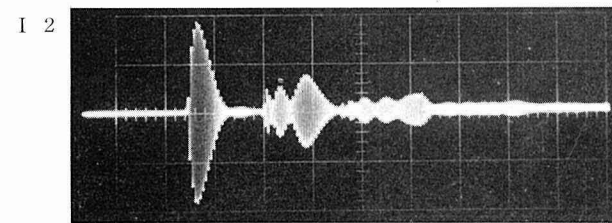
H. 直流高次波列
極値の変化

1. H . $20 \mu\text{s}/\text{cm}$
 V . $0.005 \text{ V}/\text{cm}$
 Q . $4 \text{ Mc}-2 \text{ Mc}$
2. H . $50 \mu\text{s}/\text{cm}$
 V . 約 $0.016 \text{ V}/\text{cm}$
 Q . $2 \text{ Mc}-2 \text{ Mc}$
3. H . $20 \mu\text{s}/\text{cm}$
 Q . $2 \text{ Mc}-4 \text{ Mc}$

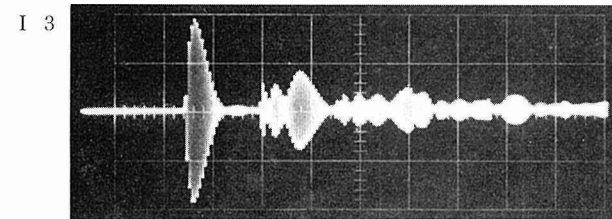


I. 送受音板の平行度の変化による
波形の変化

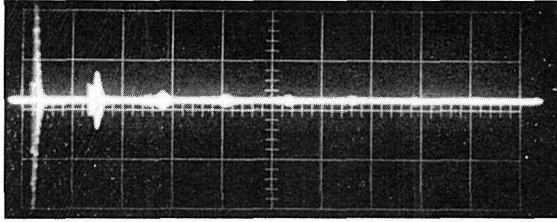
- Q . $2 \text{ Mc}-2 \text{ Mc}$
 L . 近接
 H . $10 \mu\text{s}/\text{cm}$
 V . 約 $0.016 \text{ V}/\text{cm}$



1. 平行性良
2. 上の状態より 0.001 radian 傾斜
3. 更に 0.001 radian 傾斜



J 1

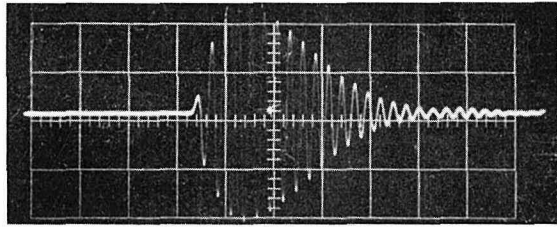


J. 音場内の絞りによる波形の変化

 $Q. 2 \text{ Mc} - 2 \text{ Mc}$ $V. 0.01 \text{ V/cm}$ 1. $H. 50 \mu\text{s/cm}$

(絞りのない H-2 と比較)

J 2



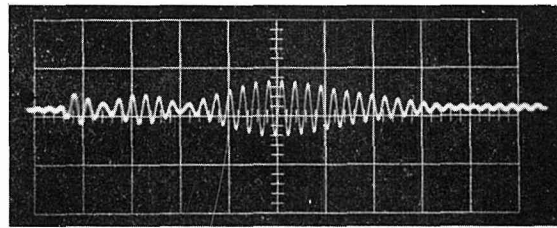
2. 1 次波

 $H. 2 \mu\text{s/cm}$ $D. 24.9 \mu\text{s}$

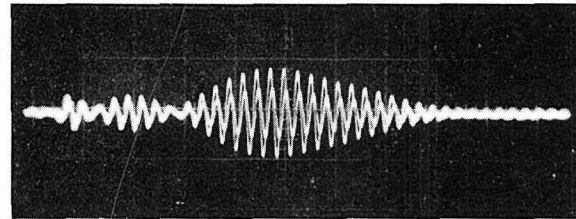
3. 2 次波

 $H. 2 \mu\text{s/cm}$ $D. 87.2 \mu\text{s}$ 4. 絞りの位置による 2 次波の波高
の変化 $H. 10 \mu\text{s/cm}$

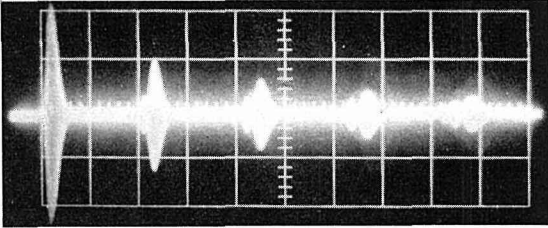
J 3



J 4



K 1



K. 高周波パルスの受信波形

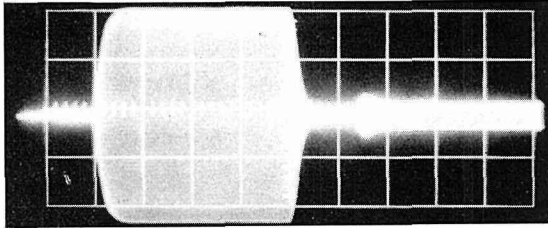
Q. 15 Mc-15 Mc

V. 0.5 V/cm

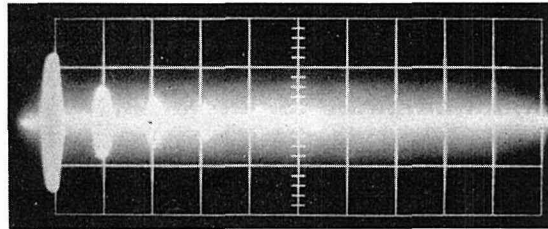
1. H. 10 μ s/cmW. 0.5 μ s2. H. 5 μ s/cmW. 20 μ s3. H. 20 μ s/cmW. 5 μ s4. H. 10 μ s/cmW. 6.2 μ s

(同調やや不完全)

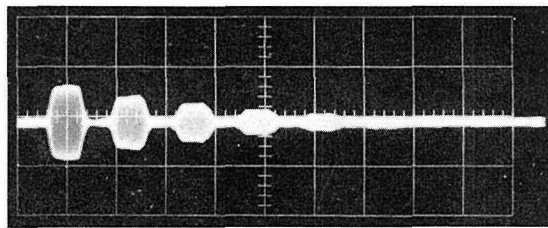
K 2



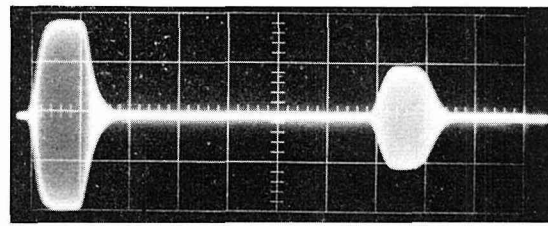
K 3

5. H. 5 μ s/cmW. 5 μ s6. H. 1 μ s/cmW. 5 μ s

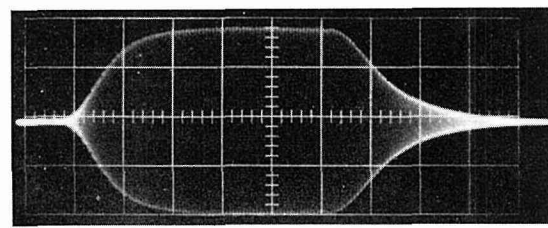
K 4

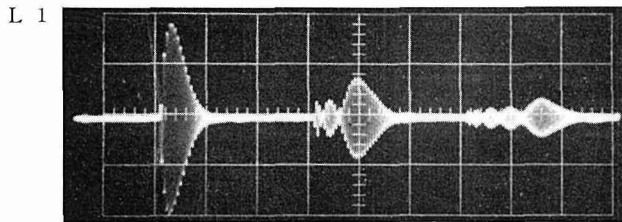


K 5



K 6





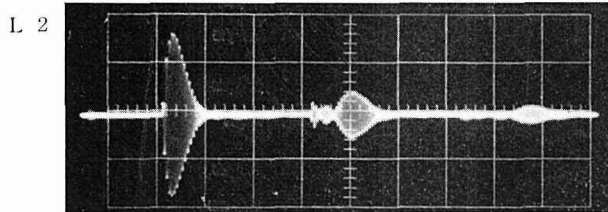
L. 平行性のくずれによる直流パルス高次波高の変化

Q. 2 Mc-2 Mc

V. 0.01 V/cm

1. H. 10 μ s/cm

平行性良

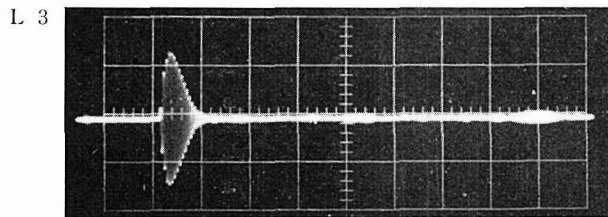


2. 1 より 0.001 radian 傾斜

3. 傾斜を大きくして2次以降最小の場合

4. 近接時平行性良好

H. 5 μ s/cm



5. 20 μ s/cm

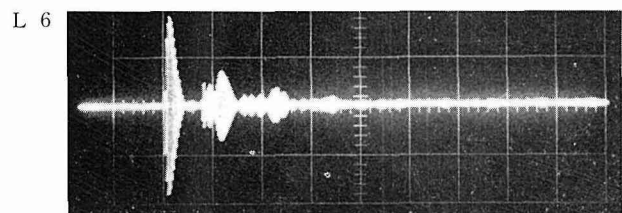
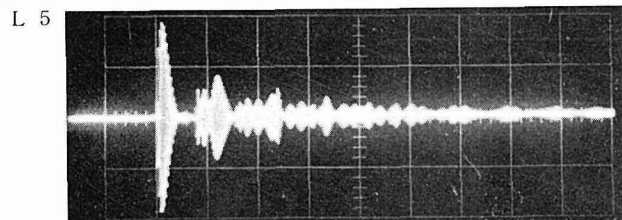
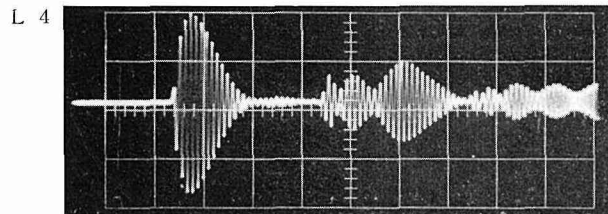
4 と同一状態

高さ比

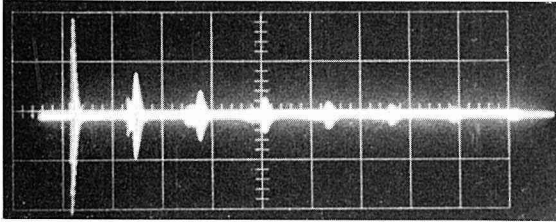
$P_1 : P_2 : P_3 = 3.8 : 1.6 : 0.8$

6. 5 より 0.002 radian の傾斜による高さの変化

$P_1 : P_2 : P_3 = 3.7 : 1.4 : 0.7$



M 1



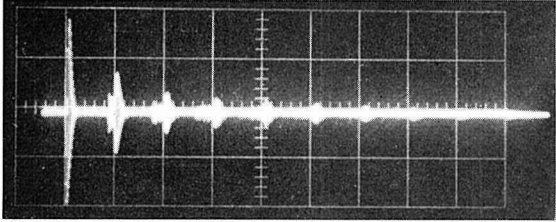
M. 送受音板距離による直流パルス
高次波高の変化
(送受音板中心がずれている場合)

Q. 2 Mc-2 Mc

H. 50 μ s/cm

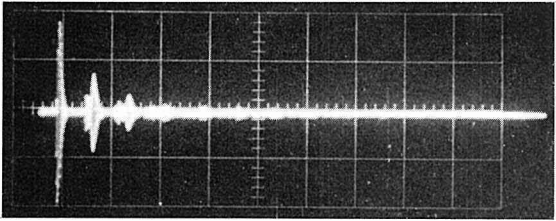
V. 0.016 V/cm

M 2

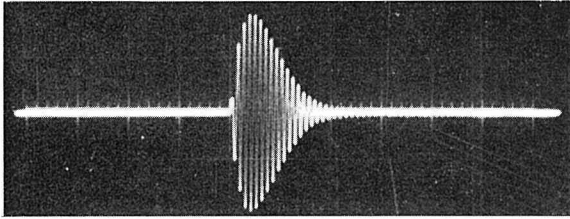


1, 2, 3 と送受音板よりの近接と共に
波高の減少が観察される。

M 3



N (1)



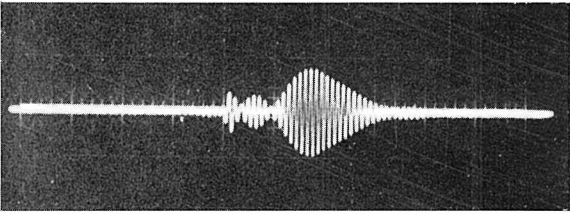
N. 音場の狭い場合の直流パルス高
次波高の変化

Q. 2 Mc-2 Mc (直径 28 mm)

1 辺 3.5 cm の角型硝子筒内での音伝
播

H. 5 μ s/cm

N (2)

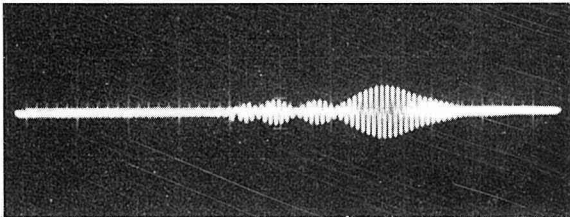


(1) 1 次 波

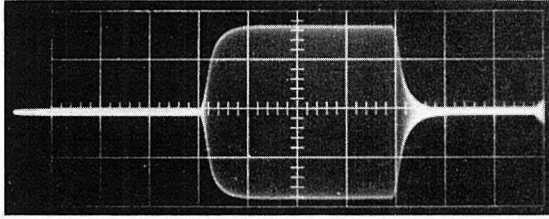
(2) 2 次 波

(3) 3 次 波

N (3)



O 1



O. 高周波パルスによる音場の検討

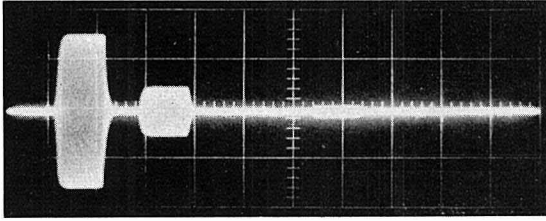
Q. 15 Mc-15 Mc

V. 0.05 V

R. 4000 c.p.s.

1. H. $5 \mu\text{s}/\text{cm}$ W. $20 \mu\text{s}$

O 2



2. 1と同じ状態

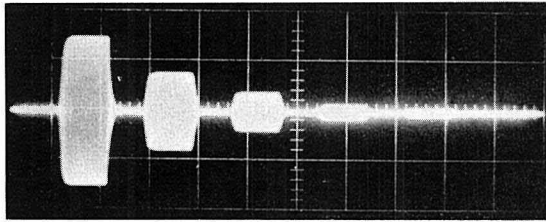
H. $20 \mu\text{s}/\text{cm}$

3. 平行度, 対向面積調節

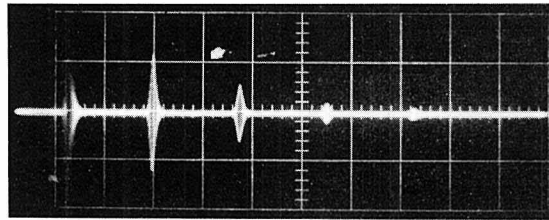
4. 3と同じ状態

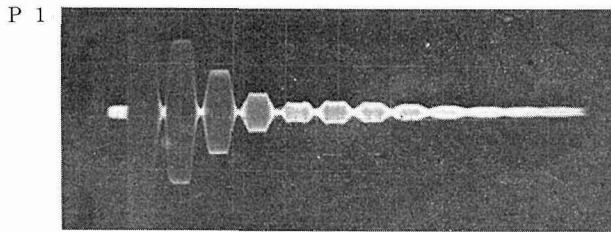
W. $2 \mu\text{s}$

O 3



O 4





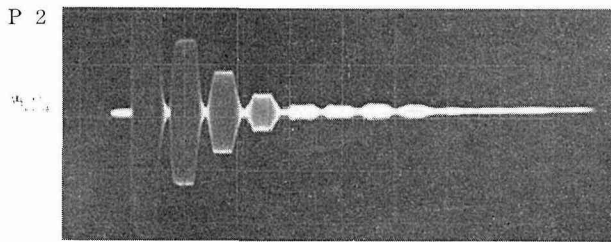
P. 平行度変化による高周波パルス
高次波高の変化

Q. 15 Mc-15 Mc

H. 10 μ s/cm

W. 10 μ s

V. 一 定

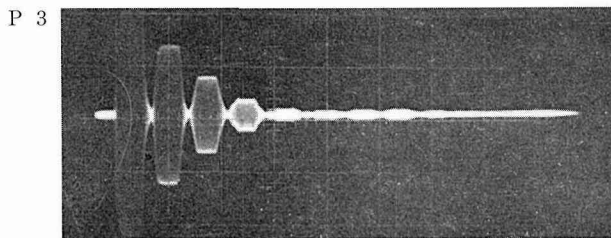


1. 平行性の概ねよい状態

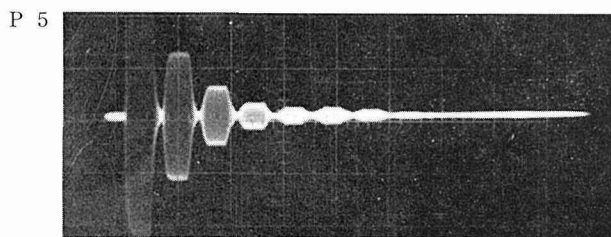
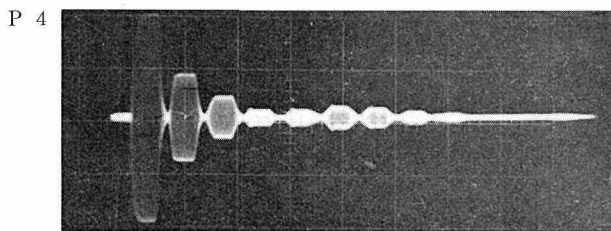
2. 三点調節ネジの一つで 0.0005
radian 以下の傾斜を与えた場合

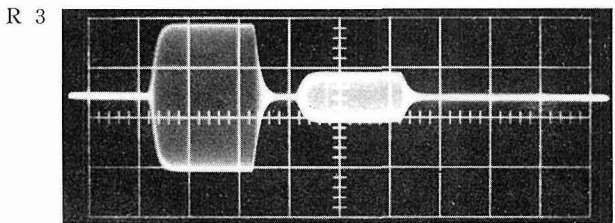
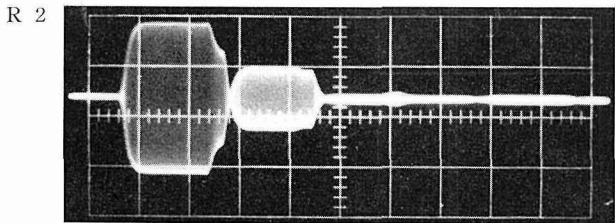
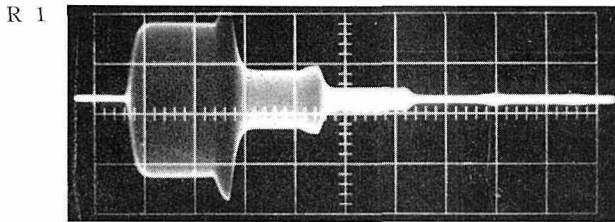
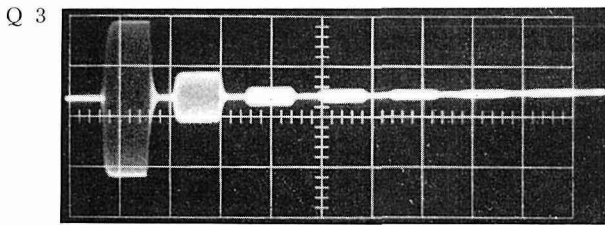
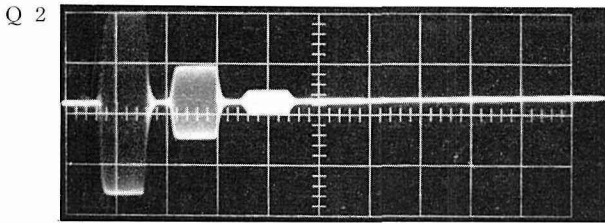
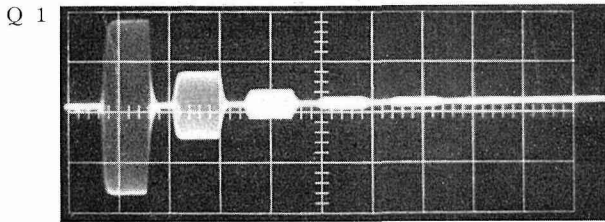
3. 更に同量傾斜

4. 他のネジによって 0.001 radian
傾斜



5. 1次が最大になるよう三点全部
調節





Q. 高周波パルスによる音場の調節

Q. 15 Mc-15 Mc

H. 20 $\mu\text{s}/\text{cm}$

V. 0.05 V/cm

W. 18.5 μs

1. 1次波高最大
2. 対向面積変化
(横移動)
3. 高次波高を大きくすると1次波
高減少

R. 高周波パルスの反射波との重なり

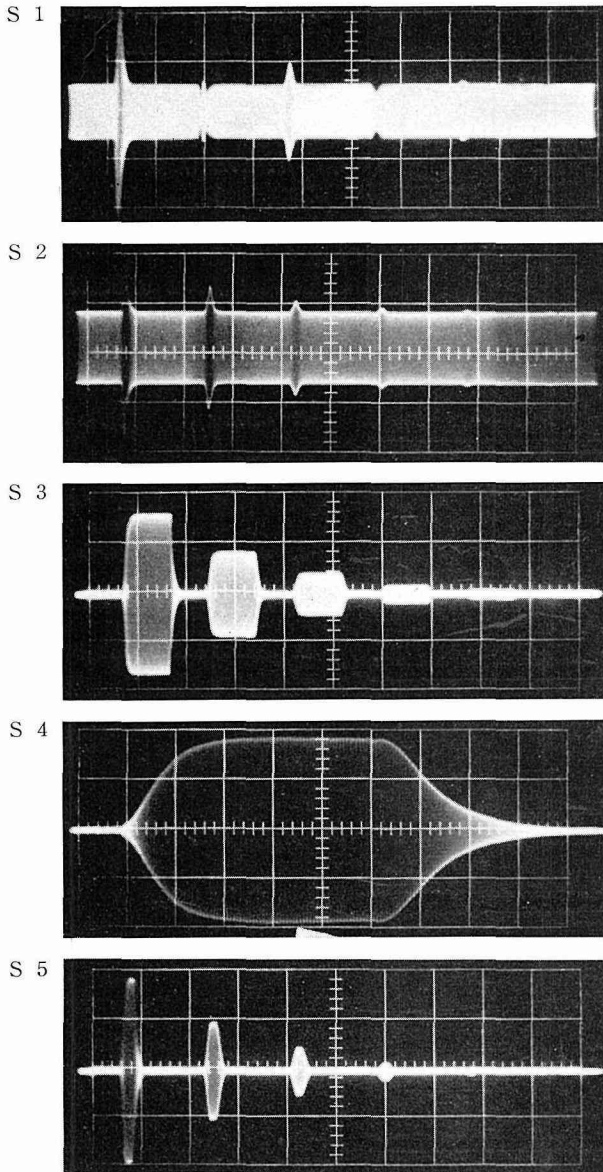
Q. 15 Mc-15 Mc

H. 10 $\mu\text{s}/\text{cm}$

V. 0.1 V/cm

W. 20 μs

1. 送音板移動マイクロメーター指
示値
0.508 mm
干渉 Max.
2. 0.481 mm
干渉 Min.
3. 4.062 mm
干渉せず



S. 音場の調節

Q. 15 Mc-15 Mc

H. 20 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (4を除く)

V. 0.05 V/cm (2を除く)

O-4の状態迄の調節を済ましたのち高周波継続発振の強まった状態を用い干渉法によって更に微調整を行なう。

1. O-4の状態で暫時発信をつづけると、パルスと連続波の重畳の如き形になる。(これは干渉極小の近くの状態である。)

W. 2 μs

R. 100 c.p.s.

2. 送受音板距離を僅少値変化して干渉極大とし、更に平行度を調節。

R. W. 同上

V. 0.1 V/cm

3. 以上の調節を完了したのち R をふやすと連続高周波は消失する。

W. 20 μs

R. 2,000 c.p.s.

4. パルス幅変更

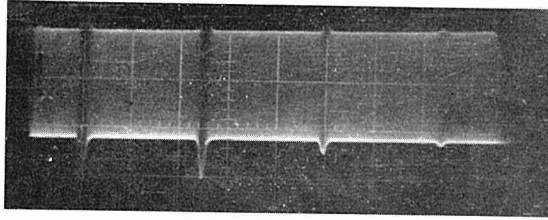
H. 1 $\mu\text{s}/\text{cm}$ W. 5 μs

5. 4と同じ状態

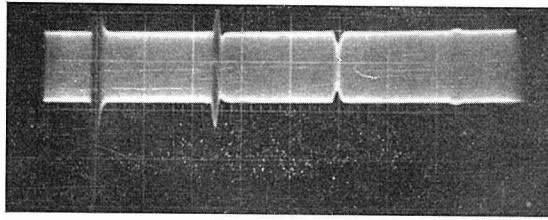
Hのみ変更 (20 $\mu\text{s}/\text{cm}$)

(これを Y に使用)

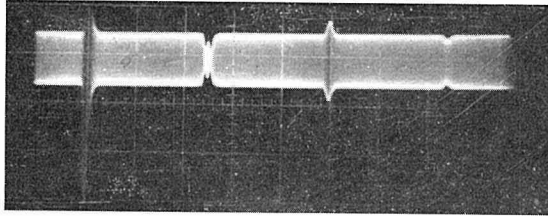
T・1-1



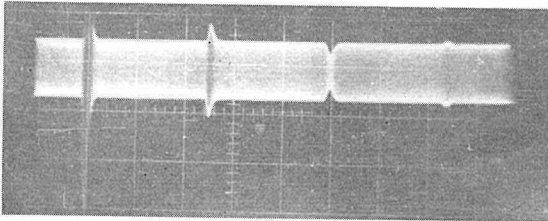
T・1-2



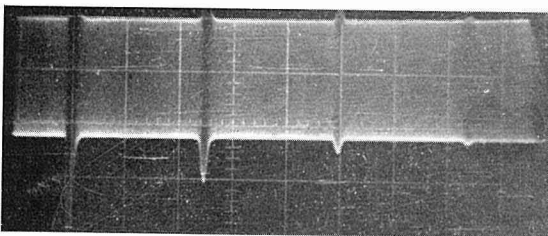
T・1-3



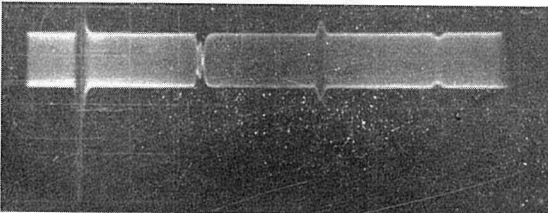
T・1-4



T・1-5



T・1-6

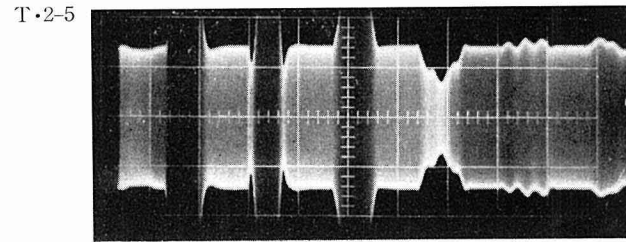
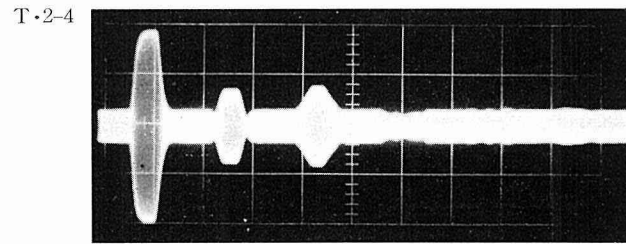
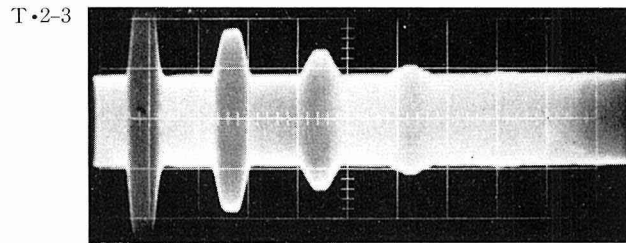
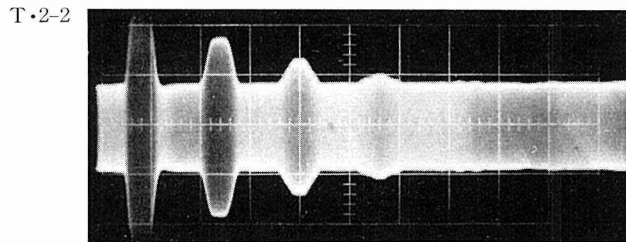
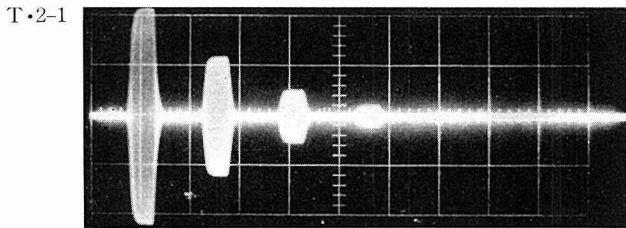


T. 高周波パルスと干渉波の重畳による音速度の測定

- 1. Q . 15 Mc-15 Mc
- H . 20 μ s/cm
- V . 0.05 V/cm
- R . 200 c.p.s.
- W . 2 μ s

受信板読取位置 (小数点以上は同じであるから省略)

- 1. 0.386 mm 干渉 Max.
- 2. 0.372 mm 3次のみ Min.
- 3. 0.361 mm 2次及び連続波 Min.
- 4. 0.351 mm 3次のみ Min.
- 5. 0.336 mm 全部 Max.
- 6. 0.0145 (0.0140 mm が Min.)

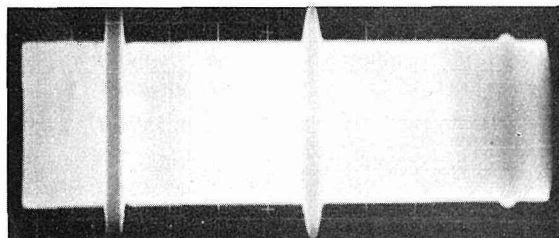


T (つづき)

- 2 Q. 15 Mc-15 Mc
- H. 10 μ s/cm
- V. 0.1 V/cm
(但し 5. は 0.02 V/cm)
- W. 5 μ s

- 1. 高周波パルスのみ
- 2. マイクロメーター読取値
干渉
0.102 mm Max.
- 3. 0.988 mm Min.
- 4. 0.029 mm Min. に近い
(0.030 mm が Min.)
- 5. 1.013 mm
- V. 0.02 V/cm

T・3-1

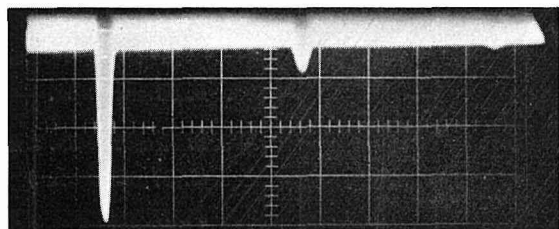


T (つづき)

・3 15 Mc-15 Mc
干渉 Max. において

-1. H . 10 $\mu\text{s}/\text{cm}$
 V . 0.05 V/cm
読取値 20.359 mm

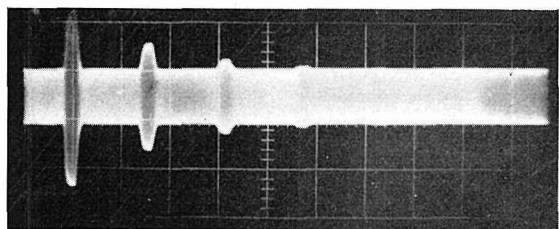
T・3-2



-2. H . 10 $\mu\text{s}/\text{cm}$
 V . 0.02 V/cm
読取値 20.605 mm

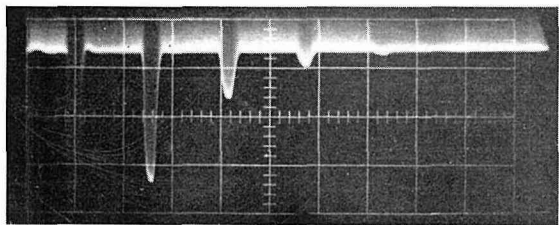
-3. H . 20 $\mu\text{s}/\text{cm}$
 V . 0.1 V/cm
読取値 21.301 mm

T・3-3

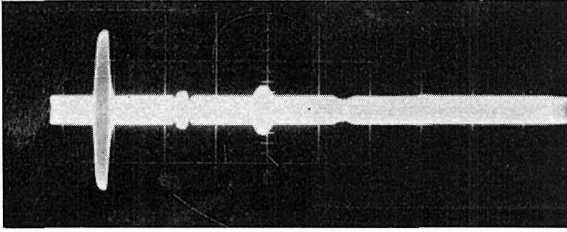


-4. H . 20 $\mu\text{s}/\text{cm}$
 V . 0.02 V/cm
T・3-3 の拡大 (V 軸)

T・3-4



U-1



U. 高周波パルスと干渉波の重畳による音速測定点の微調整

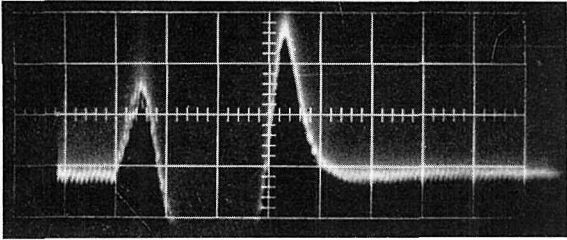
W. $5 \mu\text{s}$

H. $2 \mu\text{s}/\text{cm}$ (1を除く)

V. $0.005 \text{ V}/\text{cm}$ (1を除く)

干渉 Min. において

U-2



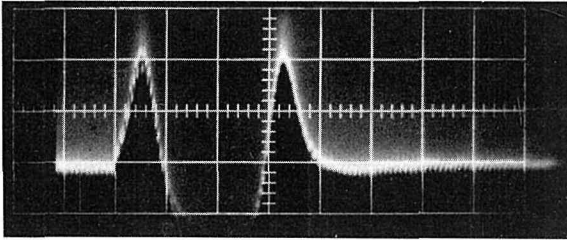
1. マイクロメーター
読取値 20.383 mm

H. $20 \mu\text{s}/\text{cm}$

V. $0.1 \text{ V}/\text{cm}$

2. U-1 の H, V. を拡大せるもの

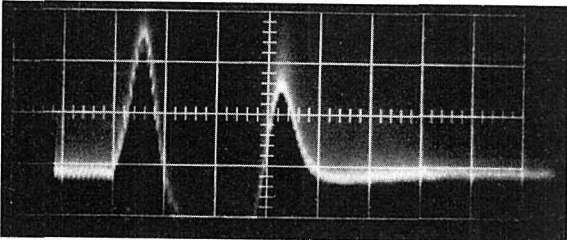
U-3



1μ 変位

読取値 20.382 mm

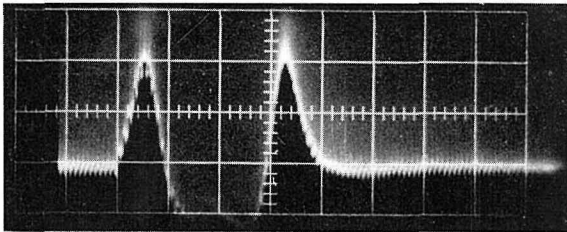
U-4



更に 1μ 変位

読取値 20.381 mm

U-5

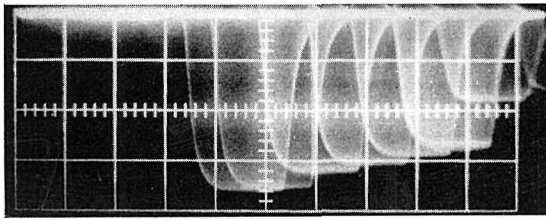


1μ 戻す

読取値 20.382 mm

殆んど U-3 と同一状態となる

V-A 1



V. 高周波パルス1次波による音吸
収の測定

設定 A (17°C)

H. 5 μ s/cm

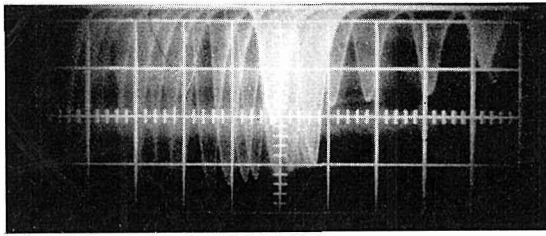
V. 0.02 V/cm

W. 10 μ s

R. 2,000 c.p.s.

$\alpha/f^2 = 20 \times 10^{-17}$ neper/cm

V-A 2



設定 A (18°C)

H. 同 上

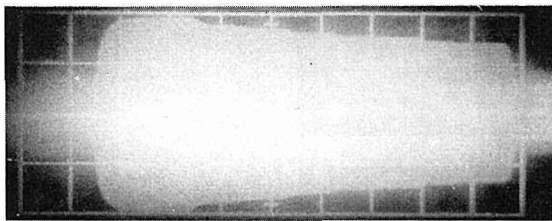
V. 同 上

R. 同 上

W. 2 μ s

$\alpha/f^2 = 20 \times 10^{-17}$ neper/cm

V-B 1



設定 B

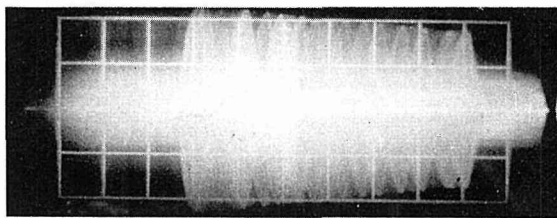
H. 同 上

V. 0.05 V/cm

W. 10 μ s

$\alpha/f^2 = 29 \times 10^{-17}$ neper/cm

V-B 2



設定 B

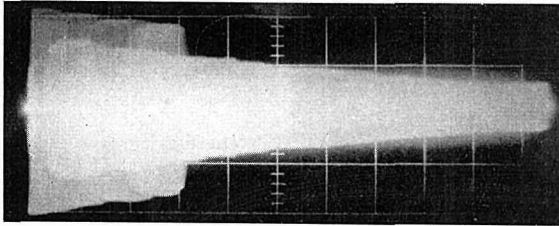
H. 同 上

V. 同 上

W. 2 μ s

$\alpha/f^2 = 29 \times 10^{-17}$ neper/cm

W 1-1



W. 高周波高次受音波高の減衰

1. S. 20°C [設定 C]

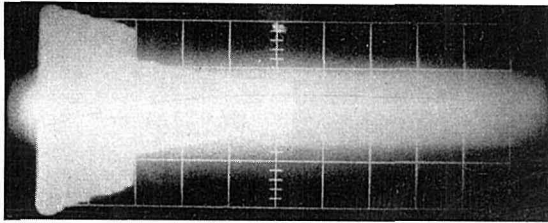
1次波及び2次波

H. 10 μ s/cm

V. 0.05 V/cm

W. 10 μ s $\alpha_1/f^2 = 23 \times 10^{-17}$ neper/cm $\alpha_2/f^2 = 35 \times 10^{-17}$ neper/cm

W 1-2



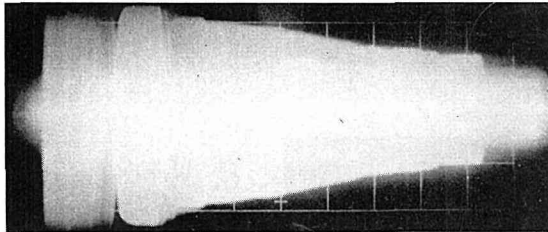
1次波及び2次波

H. 20 μ s/cm

V. 0.05 V/cm

 $\alpha_1/f^2 = 22 \times 10^{-17}$ neper/cm $\alpha_2/f^2 = 31 \times 10^{-17}$ neper/cm

W 1-3



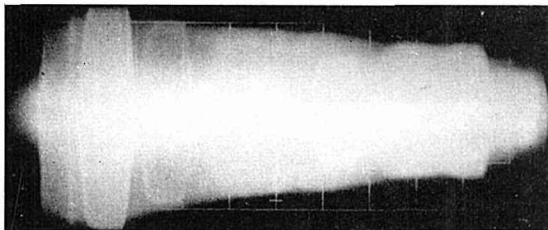
2次波

H. 10 μ s/cm

V. 0.005 V/cm

W. 10 μ s $\alpha/f^2 = 34 \times 10^{-17}$ neper/cm

W 1-4



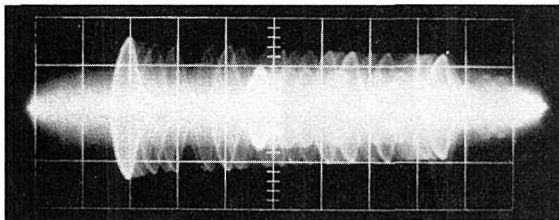
2次波

H. 10 μ s

V. 0.02 V/cm

 $\alpha/f^2 = 32 \times 10^{-17}$ neper/cm

W 1-5



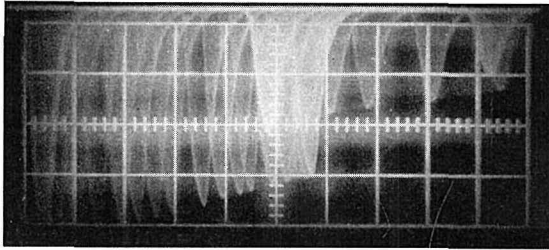
1, 2, 3次波

H. 5 μ s/cm

V. 0.01 V/cm

W. 2 μ s $\alpha_1/f^2 = 24 \times 10^{-17}$ neper/cm $\alpha_2/f^2 = 35 \times 10^{-17}$ neper/cm $\alpha_3/f^2 = 69 \times 10^{-17}$ neper/cm

W 2・1



W. (つづき)

2.

設定 A

$$H. 5 \mu\text{s}/\text{cm}$$

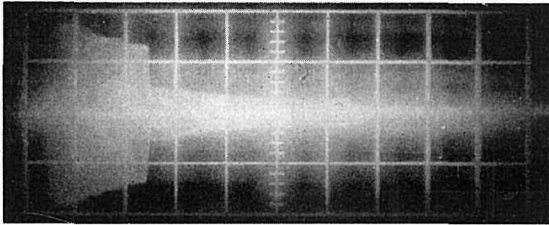
$$V. 0.02 \text{ V}/\text{cm}$$

$$W. 2 \mu\text{s}$$

$$\alpha_1/f^2 = 20 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

$$\alpha_2/f^2 = 23 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

W 2・2



設定 B

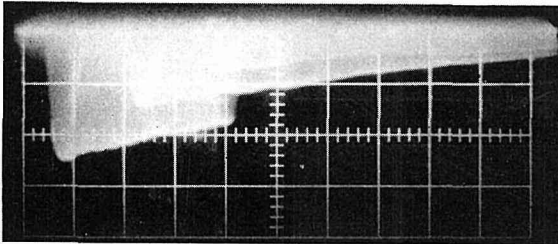
$$H. 20 \mu\text{s}/\text{cm}$$

$$W. 5 \mu\text{s}$$

$$\alpha_1/f^2 = 35 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

$$\alpha_2/f^2 = 54 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

W 2・3



設定 E

$$H. 10 \mu\text{s}/\text{cm}$$

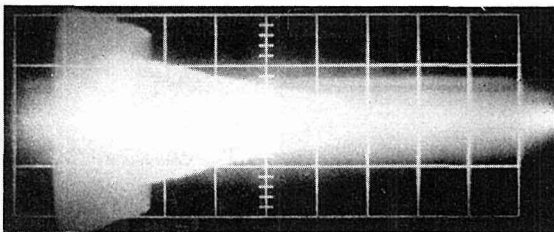
$$W. 5 \mu\text{s}$$

$$\alpha_1/f^2 = 33 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

$$\alpha_2/f^2 = 41 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

$$\alpha_3/f^2 = 62 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

W 2・4



設定 E*

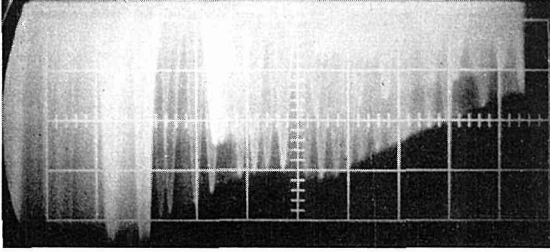
$$H. 20 \mu\text{s}/\text{cm}$$

$$W. 5 \mu\text{s}$$

$$\alpha_1/f^2 = 44 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

$$\alpha_2/f^2 = 61 \times 10^{-17} \text{ neper}/\text{cm}$$

X 1



X. 高周波パルス減衰曲線における
波形の凹凸

設定 A

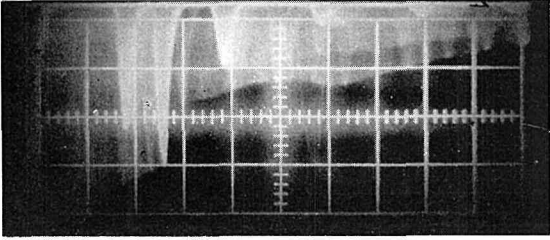
1次は左端のみ

2, 3, 4, 5次の波形

H. $5 \mu\text{s}/\text{cm}$

W. $2 \mu\text{s}$

X 2



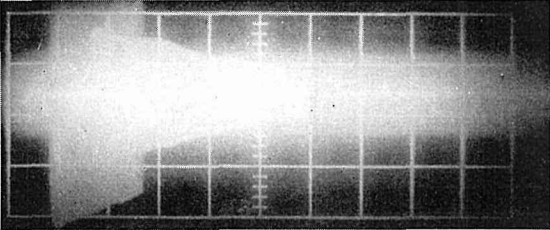
設定 A

(1), 2, 3, 4, 5次の波形

H. 同上

W. 同上

X 3



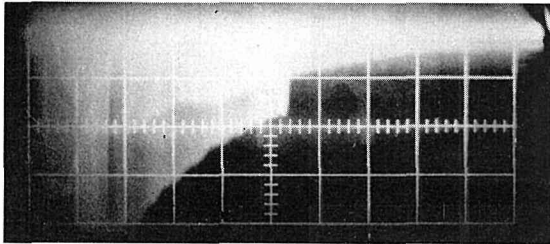
設定 D

1, 2次波形

H. $20 \mu\text{s}/\text{cm}$

W. $5 \mu\text{s}$

X 4

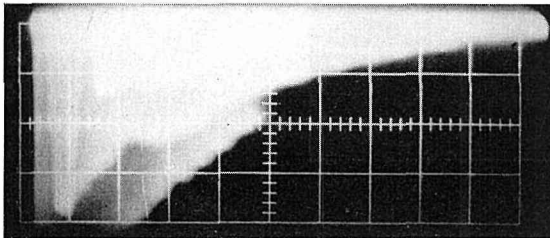


設定 D

H. $10 \mu\text{s}/\text{cm}$

W. $2 \mu\text{s}$

X 5

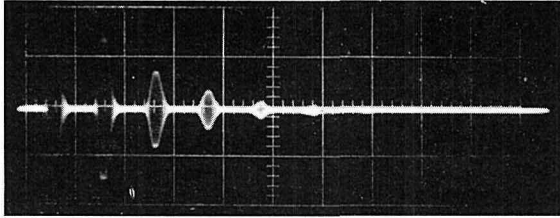


設定 E

H. $10 \mu\text{s}/\text{cm}$

W. $5 \mu\text{s}$

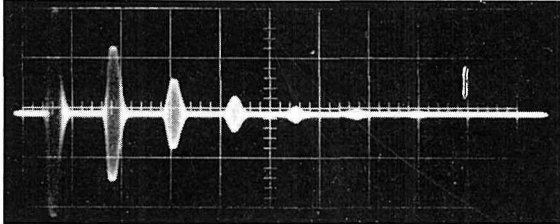
Y 1



Y. 高周波パルスによる音速音吸収
の測定

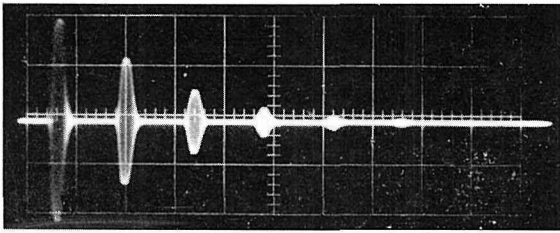
15 Mc -15 Mc
H. 20 μ s/cm
V. 0.05 V/cm
W. 5 μ s
D. $0.21 \times 20 \mu$ s

Y 2



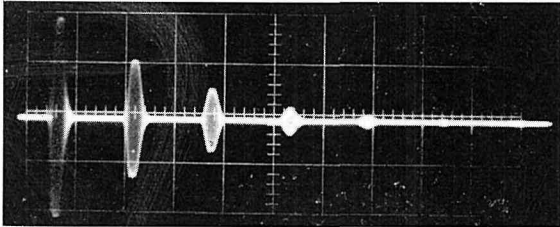
D. $0.30 \times 20 \mu$ s

Y 3



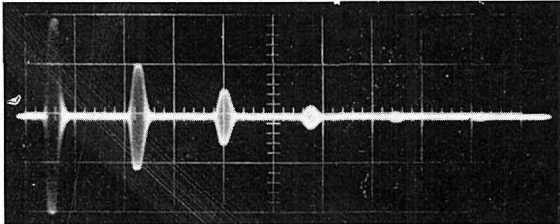
D. $0.39 \times 20 \mu$ s

Y 4



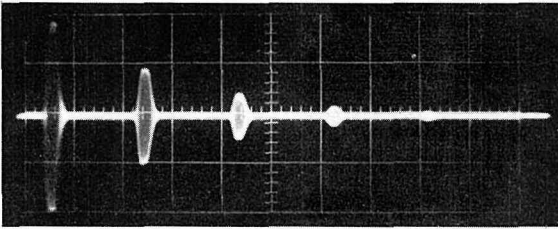
D. $0.47 \times 20 \mu$ s

Y 5



D. $0.56 \times 20 \mu$ s

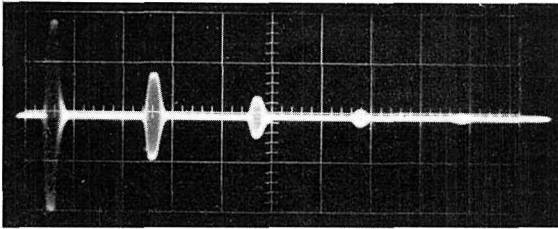
Y 6



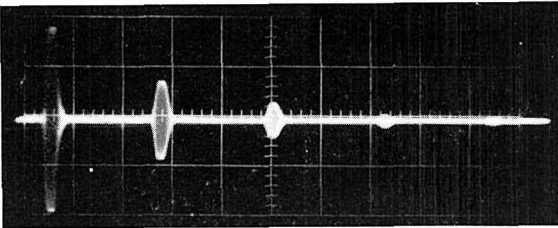
Y. (つづき)

D. $0.64 \times 20 \mu s$

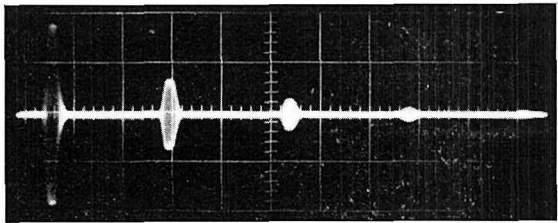
Y 7

D. $0.73 \times 20 \mu s$

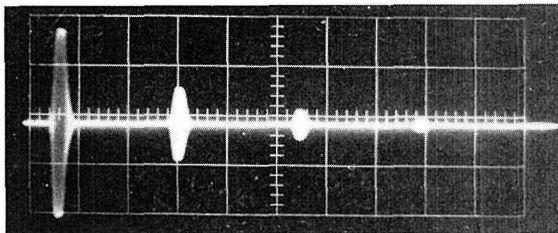
Y 8

D. $0.81 \times 20 \mu s$

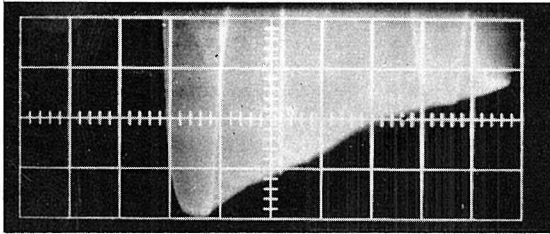
Y 9

D. $0.91 \times 20 \mu s$

Y10

D. $0.99 \times 20 \mu s$

Z 1



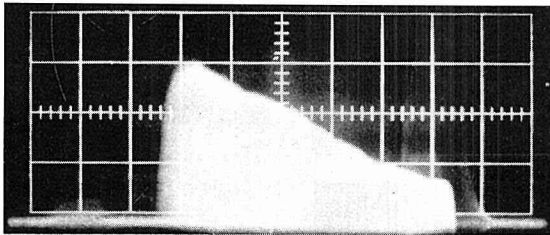
Z. セメント混合水の音吸収

混入後 10 分

17.4°C

 $H. 5 \mu\text{s/cm}$ $V. 0.01 \text{ V/cm}$ $W. 5 \mu\text{s}$ $\alpha/f^2 = 57 \times 10^{-17} \text{ neper/cm}$

Z 2

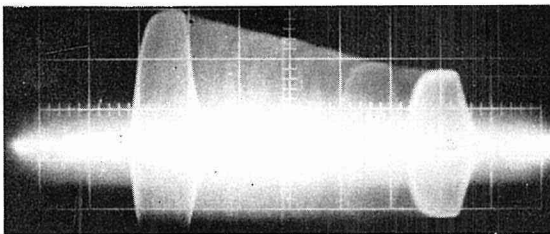


混入後 30 分

17.8°C

 $H. 5 \mu\text{s/cm}$ $V. 0.02 \text{ V/cm}$ $W. 5 \mu\text{s}$ $\alpha/f^2 = 37 \times 10^{-17} \text{ neper/cm}$

Z 3



混合後 50 分

17.8°C

 $H. 5 \mu\text{s/cm}$ $V. 0.02 \text{ V/cm}$ $W. 5 \mu\text{s}$ $\alpha/f^2 = 32 \times 10^{-17} \text{ neper/cm}$

別表 1 波形写真 B-0 よりの実験式並びに減衰係数の誘導

x	y	$\log_e y$	$\Delta \log_e y$	$\Delta^2 \log_e y$
1	8.4	2.13	0.29	
2	6.3	1.84	0.31	-0.02
3	4.6	1.53	0.34	-0.03
4	3.3	1.19	0.32	0.02
5	2.4	0.87	0.29	0.03
6	1.8	0.59	0.29	0.00
7	1.35	0.30	0.30	-0.01
8	1.00	0.00		

故に $y = y_0 e^{-\alpha x}$ を実験式として採用する。

$$\log_e y = \log y_0 - \alpha x$$

最小 2 乗法により α を計算すると

$$\alpha = 0.306/\text{mm} = 6.36 \times 10^6/\text{sec}$$

〔第 9 図〕〔B-0〕参照

別表 2 送音板振動の減衰率 ($y = y_0 e^{-\alpha \frac{r}{2} i}$)

i	y_i	$\log y_i$
1	5.25	1.66
2	5.00	1.61
3	4.80	1.57
4	4.60	1.53
5	4.45	1.49
6	4.40	1.48
7	4.25	1.45
8	4.25	1.45
9	4.20	1.42
10	4.00	1.32
11	3.90	1.36
12	3.75	1.32
13	3.60	1.28
14	3.55	1.26
15	3.45	1.24
16	3.30	1.19
17	3.30	1.19
18	3.30	1.15

$\alpha \frac{T}{2}$	0.0104
α	$0.083 \times 10^6/\text{sec}$
但し, f	4 Mc
v	1500 m/sec

〔B-4〕〔第 2 表〕参照

別表 3 直流パルス一次波のみによる音速度測定例

試料 イオン交換処理蒸溜水 (20.2°C) 2 Mc-2 Mc

送音板マイクロメーター指示値	音波伝播時間 $\times 5 \mu\text{s}$
7.000	1.005
8.000	1.140
9.000	1.280
10.000	1.415
11.000	1.550
12.000	1.685
13.000	1.815
14.000	1.950
15.000	2.085
16.000	2.220
17.000	2.355
18.000	2.495
19.000	2.630
20.000	2.760
21.000	2.895
22.000	3.030
23.000	3.170
24.000	3.295

測定数 $n = 18$
音速度 $v = 1483.24 \pm 0.71 \text{ m/sec (20.2°C)}$ (0.05%)

〔第 11 図〕参照

別表 4 直流パルス一次波による音速度測定例



試料 イオン交換蒸溜水
(18.5°C)
パルス幅 0.5 μs
水晶板 2 Mc-2 Mc

・点はタイムマーカー 1 μs 間隔
掃引時間 1.85/1.978 μs/cm (校正)

α cm	マイクロメーター指示値 mm
13	13.2730
12	11.8860
11	10.4925
10	9.1020
9	7.7095
8	6.3330
7	4.9825
6	3.5920
5	2.2055
4	0.8185

n = 10

平均値 $m = 1.3824 \pm 0.0011 / \alpha = 1 \text{ cm}$

$$v = \frac{1.978}{1.85} \times m$$

$$= 1477.8 \pm 1.2 \text{ m/sec (18.5°C)}$$

(0.08%)

[第 12 図] 参照

別表 5 干渉法による音速度測定例

試料及び設定は別表 4 [第 12 図] に同じ
波の位置の検知はシンクロスコープ中心線上
の受音の波頂波底の移動によって行なう。

移動した波数	マイクロメーター指示値
0	10.9930
1/2	10.6105
1	10.2195
1 1/2	9.8520
2	9.4895
2 1/2	9.1005
3	8.7225
3 1/2	8.3630
4	7.9985
4 1/2	7.6290

n = 10

波長平均値 $\lambda = 0.7469 \pm 0.0016$

音速 $v = 1.978 \times \lambda$

$$= 1477.4 \pm 3.2 \text{ m/sec (18.5°C)}$$

(0.22%)

別表 6 直流パルス各次波による音速度測定例

イオン交換水 (25.3°C)

マイクロメーター 指示値	音 波 伝 播 時 間				各次平均伝播時間 × 2 μs
	1st × 20 μs	2nd × 20 μs	3rd × 20 μs	4th × 20 μs	
30.000 mm	1.03	3.03	5.03	7.02	0.0335 + (2n - 1) 0.9985
27.500	0.95	2.78	4.62	6.44	0.0355 + (2n - 1) 0.9155
25.000	0.86	2.53	4.19	5.85	0.0320 + (2n - 1) 0.8315
22.000	0.78	2.28	3.77	5.27	0.0380 + (2n - 1) 0.7480
20.000	0.70	2.03	3.36	4.68	0.0385 + (2n - 1) 0.6635
マイクロメーター 2,5000 mm あたりの 平均伝播時間 (× 20 μs)	0.083	0.250	0.417	0.574	0.08355
f %	0.50	0.00	0.46	0.40	0.08
音速 (m/sec)	1506.0	1500.0	1498.8	1512.6	1496.1 ± 1.2

[第 13 図] 参照

別表 7 直流パルス高次波列による音速度測定例

試料 グリセリン (特級品) (18.4°C)
1 Mc-1 Mc送受音板距離固定 $l=24.90$ mm

次数	音伝播距離 $\times l$	音伝播時間 $\times 50 \mu s$
1st	1	0.266
2nd	3	0.785
3rd	5	1.310
4th	7	1.838
5th	9	2.339
6th	11	2.853
7th	13	3.361
8th	15	3.868
9th	17	4.398
10th	19	4.913
11th	21	5.423
12th	23	5.931
13th	25	6.472

$$n=13$$

$$m=12.881 \pm 0.012 \mu s/\ell$$

$$v=1933 \pm 1.8 \text{ m/sec (18.4°C)}$$

(0.09%)

〔第 14 図〕参照

別表 8 直流パルスによる精度

イオン交換蒸溜水 (24.80°C)
パルス幅 0.2 μs 4 Mc-2 Mc

マイクロメーターの指示値	音波伝播時間		
	30.000 mm μs	27.500 mm μs	差 μs
1st 1	19.97	18.37	1.60
2nd 3	61.10	56.05	5.05
3rd 5	100.64	92.44	8.20
4th 7	140.84	129.44	11.40
5th 9	180.64	165.96	14.68

$1.625 \mu s/2.500 \text{ mm}$
 $v=1537.5 \pm 7.5 \text{ m/sec (24.80°C)}$
(0.49%)

〔第 15 図〕参照

別表 9 直流パルス各次波による音速測定比較例

イオン交換蒸溜水 (25.73°C) 2 Mc-4 Mc

マイクロメーター指示値	音波伝播時間			
	1st (5 range) μs	2nd (10 range) μs	3rd (20 range) μs	4th (20 range) μs
30.631	20.675	62.235	102.50	143.50
29.631	20.000	60.32	99.30	139.00
28.631	19.400	58.33	96.04	134.00
27.631	18.710	56.32	92.80	129.86
26.631	18.100	54.37	89.54	125.38
マイクロメーター 1.000 mm あたりの 平均伝播時間 \bar{t}	0.664 0.005 (0.75%)	1.9730 0.0059 (0.30%)	3.242 0.032 (0.99%)	4.538 0.049 (1.1%)
音速 (m/sec)	1552.7	1520.4	1542.2	1542.5

〔第 16 図〕参照

別表 10 直流パルス各次波による音速度測定比較例
イオン交換蒸溜水 (29.90°C) 4 Mc-2 Mc

マイクロメータ指示値	音 波 伝 播 時 間				
	1st (×2 range)	2nd (×10 range)	3rd (×10 range)	4th (×20 range)	5th (×20 range)
	μs	μs	μs	μs	μs
29.000	19.256	58.82	97.73	135.68	174.10
28.000	18.556	56.90	94.43	131.12	168.40
27.000	17.926	54.80	91.16	126.36	162.24
26.000	17.190	52.87	87.85	121.92	156.60
25.000	16.592	50.87	84.58	117.40	150.62
マイクロメータ - 1.000 mm 当 り平均伝播時間 r	0.6694	1.9930	3.288	4.576	5.876
	0.0071	0.0396	0.023	0.022	0.027
	1.1%	0.48%	0.70%	0.48%	0.46
v (m/sec)	1493.9	1505.3	1520.7	1530.0	1531.6

〔第 17 図〕参照

別表 11 直流パルス各次波による音速度測定例
イオン交換蒸溜水 (20.2°C) 2 Mc-4 Mc

マイクロメータ指示値	音 波 伝 播 時 間			
	1st	2nd	3rd	平 均
30.000	$0.913 \times 20 \mu s$	$2.965 \times 20 \mu s$	$5.015 \times 20 \mu s$	$1.0255 \times 20 \mu s$
25.000	0.745	2.463	4.170	0.8563
20.000	0.580	1.950	3.327	0.6867
15.000	0.408	1.447	2.480	0.5180
10.000	0.235	0.935	1.635	0.3500
マイクロメータ - 1 mm あたり の伝播時間 r %	$0.6772 \mu s$	$2.0304 \mu s$	$4.2250 \mu s$	$0.67572 \mu s$
	0.40	0.26	0.03	0.012
μ (m/sec)	1476.7	1477.5	1479.3	1479.90 ± 0.14

〔第 18 図〕参照

別表 12 高周波パルスによる測定例
イオン交換蒸溜水 (19.68°C) 15 Mc-15 Mc

マイクロメーター指示	伝播時間
30.000	$3.43 \times 5 \mu s$
1.000	3.57
2.000	3.70
3.000	3.83
4.000	3.97
5.000	4.10
6.000	4.24
7.000	4.37
8.000	4.51
9.000	4.65
40.000	4.78

$n = 11$

平均 $0.135 \times 5 \mu s/mm$

$\hat{f}_0 = 0.0024 \times 5 \mu s/mm$

(0.18%)

$v = 1481.5 \pm 2.7 \text{ m/sec (19.68°C)}$

[第 19 図] 参照

別表 13 干渉法による音速度測定例
第 19 図と同一設定 (19.63°C)

半波長ごとに	マイクロメーター読取値	
	Max. mm	Min. mm
1	0.1870	0.2595
2	0.2390	0.3080
3	0.2860	0.3560
4	0.3360	0.4050
5	0.3850	0.4560
平均 $\lambda/2$ \hat{f}_0	0.04930	0.04900
	0.00036 (0.73%)	0.00032 (0.70%)
v	$1479.0 \pm 10.8 \text{ m/sec}$	$1470.0 \pm 8.7 \text{ m/sec}$

別表 14 高周波パルス (1 次波) による音速度測定例
イオン交換蒸溜水 15 Mc-15 Mc

マイクロメーター 2,500 mm ごとに	音波伝播時間 $\times 20 \mu s$
1	0.30 (16.1°C)
2	0.39
3	0.47
4	0.56
5	0.64
6	0.73
7	0.81 (16.2°C)
8	0.90
マイクロメーター 2,500 mm あたり の平均時間	$(0.0852 \pm 0.0003) \times 20 \mu s$ (0.4%)

$v = 1470.6 \pm 5.8 \text{ m/sec (16.2°C)}$

[第 20 図] 参照