

音波探査とは

中条 純輔

海の深さを測るということはむかしは容易なことではなかった。あらかじめ長さの測ってあるロープの先におもりをつけ 船からおもりが海底に着くまで繰り出してその長さを測ったものである。だからたった1点の深さを測るにも 探検船の人々は天候を待ち なぎを待つて非常な努力をはらわねばならなかった。半世紀ほど前の1912年に大西洋上で一大惨事が起こった。タイタニック号の氷山との衝突である。この5万6千トンの巨船は暗夜に巨大な氷山に出合ったのだが 気づいた時はもはや避けるすべもなく 処女航海という短い船の生涯は1,500 人の乗客と運命を共にして沈んでしまった。この大事件は 超音波で障害物をさがしたり 水深を測ったりする器械の発展を促した。初めはオルガンの管を水中で曳航したり いろいろ試みたが 何度かの失敗の後に成功したのは 電気振動を音波の振動に変えることが実用化してからである。こうして1923年に音響測深が成功するに及んで 測深技術能率は画期的によくなったのである。

最近ではこのような水中の音響器械はたいそう発達して 数kWの出力で精確に深海の深さを測る PDR(Precision Depth Recorder) というもの 捕鯨船から鯨を探す探鯨機 ぶっそうなものなら潜水艦や機雷を探すものなどから 小はアマチュア釣師がひとりで魚をさがす超

W
レシフェ ブラジル

小型のトランジスター化された数万円の魚群探知機に至るまで いろいろと出まわっている。

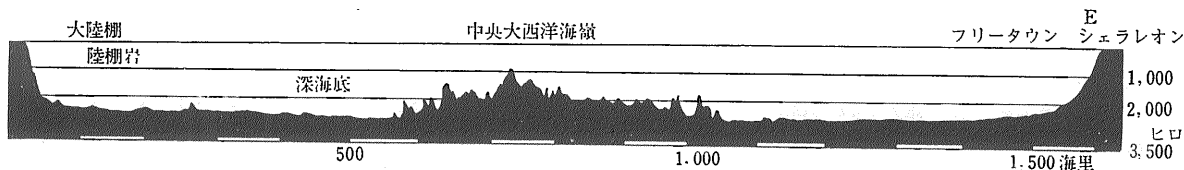
その原理は至って簡単で 音波が打ち出されてから海底その他目標物まで行き 反射してきたところを受信し その時間 t を測る。すると距離 x は

$$x = Vt/2$$

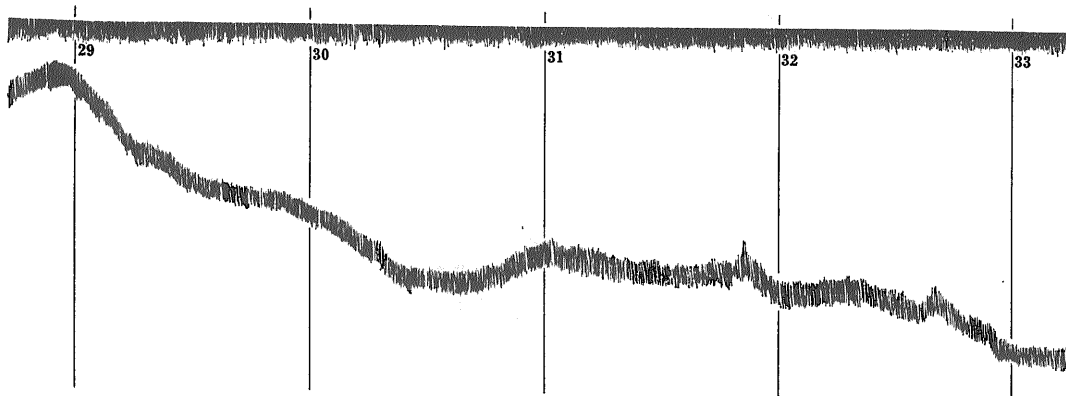
ここで V は水中の音の伝播速度で だいたい 1,500m/秒であり 2 で割るのはもちろん片道の距離を出すためだ。

このような測深技術によっても海底の地質はかなりわかってきた。もちろん測深でわかることは海底地形であり それは 海底地質の研究のほんの入口にすぎない。しかし陸上では目に見える地形というもの（正しくは航空写真がなくてはならないが）が海では目に見えず音波を用いなければわからないのである。だから大西洋の中央に堂々とそびえる大山脈 Mid-Atlantic Ridge の研究を長い苦勞のうちになしとげた B. Heezen や M. Ewing も その最大の武器は海底地形を測ることだった（第1図は大西洋海嶺の地形の断面図）。浅い海でも事情は同じで 海底地形を測ることは海底地質への第1歩である（第2図は浅海での測深機の記録例）。

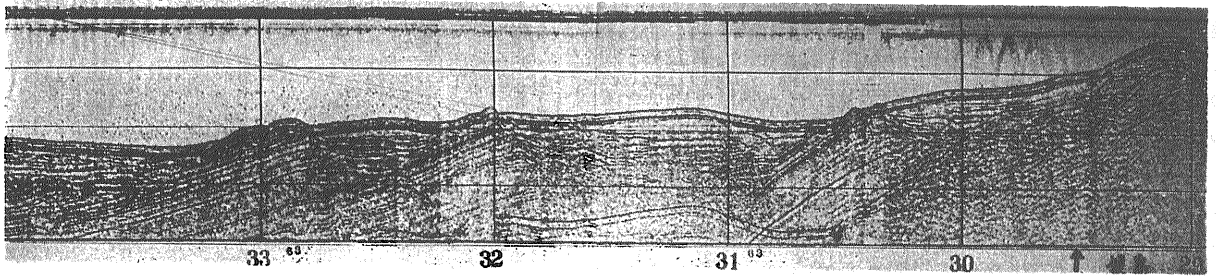
そこで測深機と同じ方法で海底より下の地下地層面からの反射もわからないだろうかという考えが起こる。これは実際可能になってきて 第3図に示すように測深



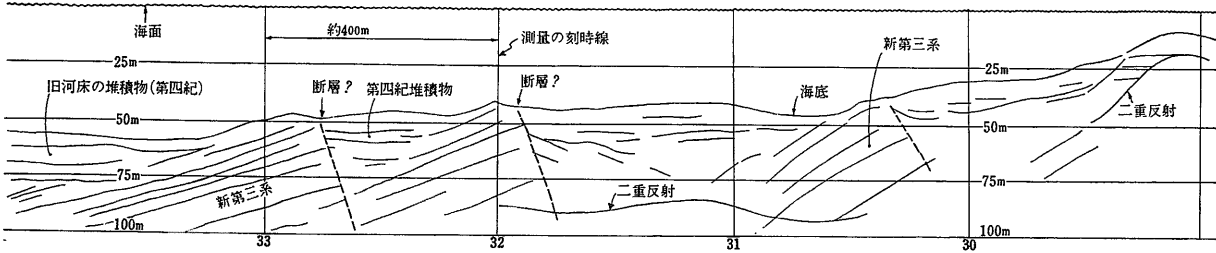
第1図 大西洋を東西に切った測深による地形図 水平方向はカイリ 垂直方向はヒロ 垂直水平比は40 中央にそびえる中央大西洋海嶺が特徴的である



第2図 測 探 器 の 記 録 例



第3図 音波探査の記録例



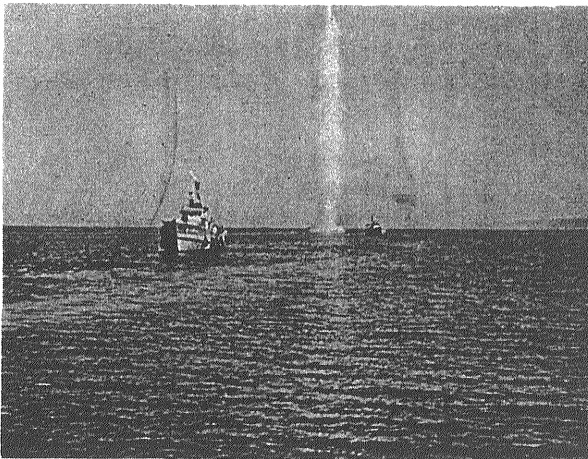
第4図 上掲第3図の模式図 (本記録は第2図の測深機の記録と同じであるが 垂直水平尺度が違うので見た感じが少し違ふし ハイドロホンのケーブルの長さ70mだけ位置も平行にズレている)

機では海底だけしか出ないのに 新しい方法では海底のさらに下がわかるようになった。この技術は音波探査とよばれる。その説明に先立って どうして測深機では海底しか記録に出ないのかを考えよう。

測深機ではだいたい12kcから200 kcくらいの周波数の音波を使っている〔1kc (kilocycle) とは1000サイクルのこと〕。

$$〔速度〕=〔周波数〕\times〔波長〕$$

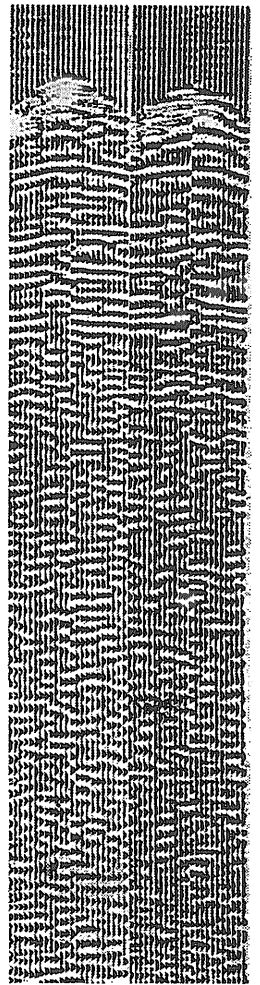
の式を使うと波長は13cmから0.8cm くらいになる。人間の耳では聞えない16 kc より高い周波数の音波は超音波とよばれているから 測深機は超音波の周波数帯域を使っていることになる。このような超音波は地面の中で(それが岩石であれ堆積物であれ)ひどく吸収される。海底の堆積物の場合にはその種類によって異なる



第5図 海上の地震探査

が だいたい周波数 f の1乗から2乗の間で吸収が増してしまうので 超音波はほとんど吸収されてしまう。これが超音波で地質を調べることのむずかしい理由である。

しかし測深に超音波を用いた理由は 海底よりも下からの反射が出るのがじゃまだからではない。超音波は小さな送波器で大きな出力が出せること 超音波領域では船のエンジン音による雑音小さくなり また受波器(多くの場合送波器と同じものを使う)に入る海水の雑音もぐっと小さくなること 指向性がある方向にエネルギーを集中できること 浅い海を測るためには波長が短いことが原理的に必要なこと などのためである。これらのことは後で音波探査を考える際にひとつずつ検討せねばならないだろう。超音波では吸収が多くて地質調査に使えないのであるが はるかに低い周波数の波ならだろう。ここで地震探査の反射法が出てくる。



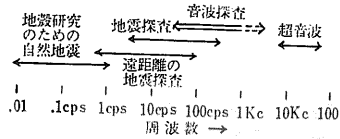
第6図 地震探査の反射記録の例2枚 面積表示を用いている

地震探査の反射法は主として陸上で石油を探査するために発展した技術である。現在では海洋でも調査や研究の重要な手段のひとつになっている。これは人工地震の別名もあるとおり海中でダイナマイトを爆発させて発生する音波（地中ではP波—音波に相当する—のほかS波や表面波も発生する）を用いて地下を調べる。この方法では使用する周波数が10~300 cps (cycle per second) くらいの低いものであるから地層中での減衰は少ないし非常に大きいエネルギーが使えるので深い所の探査に適している。石油の探査には数100m くらいの深さからときには4 kmまでも調べ得るし5km くらいの深さの深海で海底下3km くらいの反射を観測している例もある。

音波探査は超音波による測深等の技術と地震探査の反射法のちょうど中間に位置づけられる技術である(第1表)。この表によってもわかるように周波数やエネルギーも1けたか2けたくらい違うが費用の方も1けたくらい違うのである。

使用する周波数は探査する目的と関係がある(第7図)。すなわち0.01サイクル(周期にして1~数分)ののんびりした自然地震の波から数10kcの超音波にわたって広く地質の調査に用いられている。

先に掲げた第3図は音波探査の記録の一例であり第



第7図 使用する周波数のだいたいの範囲

4図はその説明の模式図である。これでわかるように記録は一見地下の断面のように見え直観的に理解しやすい。だいたいいろいろの物理探査の記録のうちで音波探査ほど直観的な地質構造のイメージを与えるものは少ないだろう。この理解しやすさは音波探査の最もすぐれた特色の一つといえよう。この理解しやすさの原因の一つは分解能のよさでありそれは使用周波数が地震探査よりも高いこと(波長が短いこと)に由来している。もし第3図と同じ所で反射法を行ない分解能を上げるため最大の努力をしたとしてもとてもこんなにシャープに地層はわからないだろう。音波探査が歴史が浅いのには急激に発展し需要が多いことは地震探査に比べて次のような特色のあることが理由であろう。

1. 記録が理解しやすい
2. 分解能がよい
3. 探査費用がやすい
4. ある地域の調査に測線の間隔もかなり細かくとれる
5. 漁業への被害がない

3の点では音波探査が地震探査の代用にならない以上簡単には言いきれないことであるがしかし使った費用に対する情報量という意味ではばく然といえるかもしれない。4の点は2・3に関係している。分解能がよいので地層を対比するのに測線をなるべく細かい間隔にとらないとむずかしくなる。またそれは費用がやすく作業能率がよいので可能である(地震探査でも費用と日時を問題にしなければできることである)。5の点は日本ではたいそう重要なことである。海洋での地震探査はこの漁業への影響のためにしばしば実行できないことがある。漁業への損害は陸上で農作物にあたる損害と異なって数を数えることがむずかしいことも理由の1つである。これらの特色があるので音波探査は主として次のような海域 ときに湖底の調査研究に使用されている。

1. 土木調査
2. 海底砂鉄の調査
3. 炭田の調査
4. 油田の調査
5. 一般的な地質調査やその予備調査

これらを1959年から1963年までの5年間のおもな調査地につき第2表に示し第8図に図示する。このような多くの探査例をとおして探査技術は確立された。し

第1表 標準的な使用法での3方法の比較

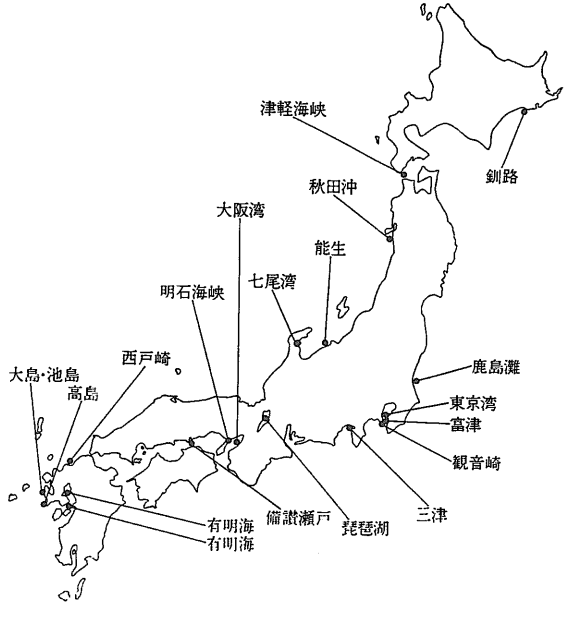
項目	方法別	地震反射法	音波探査	測深器
発振周波数		5-300cps	100-10,000cps	12-200kc中の単一周波数
発振波形		単1パルス	パルス2コ又は1コ	数コ—数10コの波連
発振回数			4-0.2回/sec	10-1回/sec
発振指向性		なし	大体なし	あり
海底下の探査深度		2,000m	100m	海底(0m)
エネルギー源		火薬	水中放電 振動板 ガス燃発等	磁歪振動
1回のエネルギー		10 ⁶ -10 ⁸ ジュール	10 ² -10 ⁴ ジュール	10-1ジュール
受振器		圧電・磁歪・振動等	圧電・磁歪・振動等	磁歪・圧電等 (大体発振器と同じものを用う)
受振間隔		5m-30m	1-3m	0.5-3m
記録法		不連続	連続(同期)	連続(同期)
地層の分解能		悪い	良い	何もわからない
観測員**		5人	2人	0
船		2双	1双	1双
漁業補償		あり	なし	なし
使用目的		地殻構造・石油・石炭	地質調査の予備調査 土木・石炭・石油	海底地形
探査費用		30万-70万円/km	2万-4万円/km	-

* 音源のエネルギーであって音波のエネルギーでない これに変換率をかけると音波のエネルギーになる

** 測量を除く観測の要員

第2表 1959年から1963年まで5カ年間の主要な音波探査

分類	調査地	調査機関	器 械	調査依頼	年月	備 考
土	明石海峡	土木研	スーパーカー	建設省	1959 7	架橋
	有明海	地質調	スーパーカー	地質調	1959 7	締切下拓
	津軽海峡	国鉄	スーパーカー	国鉄	1959 8	トンネル
	有明海	国際興業	ソノアローブ	熊本農地局	1959	埋立
	富津沖	地質調	調査所型	国土総合開発	1962 1他	埋立橋
木	備讃瀬戸	地質調	調査所型	建設省	1962 11	架橋
	坂出	地質調	調査所型	福岡通産局	1962 12	架橋
	備讃瀬戸	海洋研	調査所型	国鉄	1963 11	架橋
	観音崎	土質調	ジオ・ソーナ	地質調	1963 12	架橋
	砂鉄	有明海	土質調	調査所型	有明製鉄	1961 他
炭	大島池島	松島炭鉱	スーカーラス	松島炭鉱	1960 7	
	高島	三菱炭業	スーカーラス	三菱炭業	1960 9	
	釧路	太平洋炭	スーカーラス	太平洋炭	1961	
	有明海	福岡通産	スーカーラス	福岡通産局	1961	
	西戸崎	地質調	調査所型	西戸崎炭鉱	1961	
油田(ガス田)	宇部	宇部興産	調査所型	宇部興産	1963 8	
	秋田沖	石油資源	スーパーカー	石油資源	1959 6	
	秋田沖	石油資源	スーパーカー	石油資源	1961 4	
	湯町沖	石油資源	スーパーカー	石油資源	1961 7	
	八郎潟	石油資源	スーパーカー	石油資源	1961 4	
一般的な地質調査	能生	地質調	調査所型	電気化工	1962 8	
	七尾湾	地質調	調査所型	市役所	1962 8	(ガス地下貯蔵)
	東京湾中部	地質調	スーパーカー	地質調	1961 5	
	東京湾南部	地質調	スーパーカー	地質調	1961 10	
	大阪湾	地質調	スーパーカー	地質調	1962 7	
研 究	大鹿島	海洋研	スーパーカー	海洋研	1963 8	
	三津	地質調	調査所型		1960 9	
	琵琶湖	地質調	調査所型		1961 他 1961 11他	



第8図 1959~63年の5年間の音波探査地

多いというほどの意味であり 他の方々に使えないわけではないのだが 反射法に適した現場作業の適合性や誤差の性質がある。しかし第9図に示すような屈折に適用した例もあり 記録がそのまま走時曲線のように表示されている。このような従来の屈折法のほかに音波探査独特の方法であるが 発振・受振の間隔を一定に保ったまま屈折波を初動として観測しながら曳航し移動する方法もある。この場合初動の変化は 屈折層の平均的な速度と水深の関係で決まってくる。現在は主として音源の問題で反射法が最も適した方法となっているが音源さえ解決されれば屈折法も急激に増すかもしれない。

第3点は記録器の動作により音波の発生が制御されることをいったものであり 測探器はすべてこの方式である。逆に音波の発生により記録器が制御される例もある。地震探査はだいたいその方式である。音波探査はほとんどが記録器の動作で音源が制御されるが 例外もあって J.Ewing により始められた Seismic Profiler は 従来の地震探査と音波探査の中間的なものであり 観測時間も5~10秒という長さである(第10図)。音波探査には種々の方法があるがその全体の方式はほとんど共通なものなので そのブロックダイアグラムを示すと第11図ようになる。受振器で受振した音波は増幅器と濾波器で増幅濾波され記録器で記録される。記録器は1回の掃引(回転)ごとにパルスを出す。このパルスによって発振の信号が制御される。発振器はエネルギー源により何らかの方法で音を発生する直前の状態にされていて 発振の信号により起動(トリガー)される。個々の例については 次の回に述べる。

かし現在の段階で探査技術としてすべてが満足すべきものというわけではなく 今後おおいに研究し開発すべき面も広いのである。

ここまで音波探査ということばで 第3図のような記録のできる方法をばくぜんと指してきたが もう少し詳しく音波探査の概念を述べてみよう。音波探査は音波を使う地下探査の技術であって

1. 水中に用いる
2. 反射法に用いる
3. 音波の発生が記録器の動作に同期して起こる

この3点が音波探査の特長である。第1の水中で用いるという点に関しては 現在の段階では共通のことである。陸上で用いることは単にアイデアがあるにすぎない。水中には海水と淡水があるが海水域の調査が圧倒的に多く 淡水域ではエリー湖(北米) マラカイボ湖(ベネズエラ) 琵琶湖などの例がある程度である。

第2の反射法という点については その調査例が一番

音波探査では音波の反射という物理現象が最も基本的なものなのでこの点についてふれてみよう。音が2種の媒質の境界で反射や屈折という現象を起こすことはよく知られたことである。これを一般的に扱うのは非常にめんどろなので境界は平面として2種の媒質は共に液体と考える。固体では音波に相当するP波(粗密波)のほかにS波というねじれ波が存在するのでかなりやっかいになるからである。

第12図のように境界や座標をとり平面波の音波がθの入射角で媒質に入射したとすると反射係数(入射波と反射波の振幅比)Rと屈折係数Tは次の式である。

$$R = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_2 - \rho_1 c_1 \cos \theta_1}{\rho_2 c_2 \cos \theta_2 + \rho_1 c_1 \cos \theta_1}$$

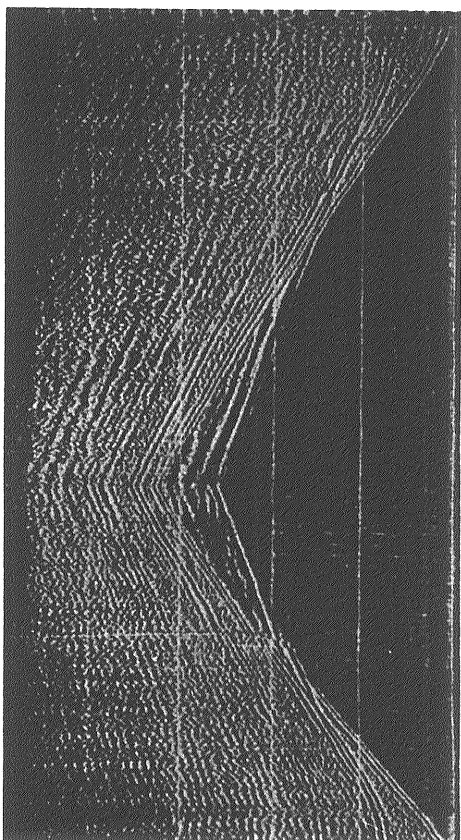
$$T = \frac{2\rho_2 c_2 \cos \theta_2}{\rho_2 c_2 \cos \theta_2 + \rho_1 c_1 \cos \theta_1}$$

ただし $\sin \theta_1/c_1 = \sin \theta_2/c_2$ という関係がある

ここで ρ_1 と c_1 は入射波側の媒質の密度と速度 ρ_2 と c_2 は屈折波側の密度と速度 θ_1 と θ_2 は入射角と屈折角である

反射係数Rは垂直に入射するとき最大になって

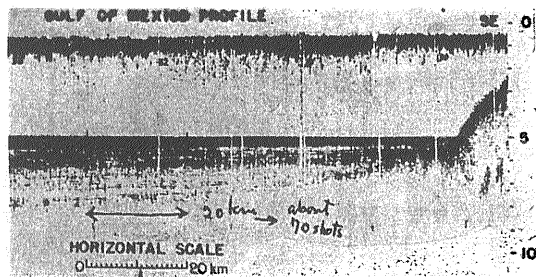
$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$$



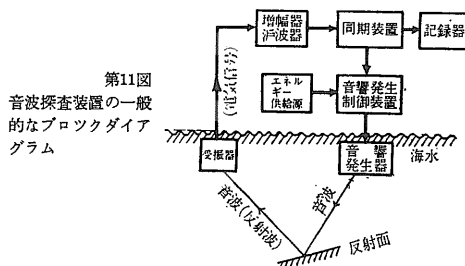
第9図 音波探査による屈折法の記録例で タテ軸は走時ヨコ軸は 距離を表わす (McGuinness による)

となる。密度ρと速度cの積ρcは物質に固有の量であって音響インピーダンスとよばれる。反対係数は上の式のように2つの媒質の音響インピーダンスの比が決まれば決まる。音響インピーダンスは音響系を電気系に類似させたとき音圧が電圧に 粒子速度が電流に 交流抵抗(impedance)がρcに対比するのでこの名がある。CGS単位では $gr \cdot cm^{-2} \cdot sec$ であって $\mu\text{-bar/cm/sec}$ とも同じことである。種々の物質の音響インピーダンスは第13図のようである。水と空気では3,000倍も違うので水から空中に出る屈折係数Tはわずかに1/1,500にすぎない。音波探査の際に水中で発生した音を空中で聞いていると さして大きくないのはこのためである。もっとも考えようでは これは真空管2段の増幅で取りかえせる程度のものである。水と鉄では20倍程度違う。

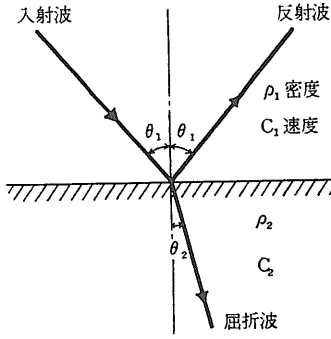
私たちの問題である岩石や堆積物の音響インピーダンスは だいたい水より大きく鉄より小さい範囲にある。大きい方ではマントルを作っているかんらん岩の音響インピーダンスは密度が $3.2gr/cm^3$ 速度が $8.2km/sec$ だから $2.6 \times 10^6 gr \cdot cm^{-2} \cdot sec$ 位になる(マントルが音波探査の対象になることは深海ではさほど先のことはないだろう)。小さい方は水とだいたい同じで 0.15×10^6 である。海底の軟泥などは水の中にあっても水より遅い速度をもつことがある。しかし水より密度が小さいことはない(小さければ浮かんでしまう)。したがって水より小さい音響インピーダンスの水中堆積物は実際上ないと考えられ 岩石の音響インピーダンスの最小と最大の間は17倍位になる。音響インピーダンスは巨視的には海底から下にゆくほど大きくなるのが普通である。それぞれの地層の間にどのくらい音響インピーダ



第10図 Seismic Profiler の記録例 海底5秒(約3,800m)という深い海がある



第11図 音波探査装置の一般的なブロックダイアグラム



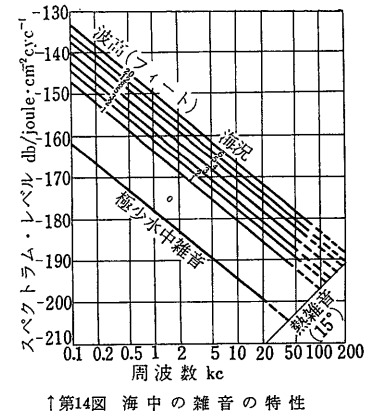
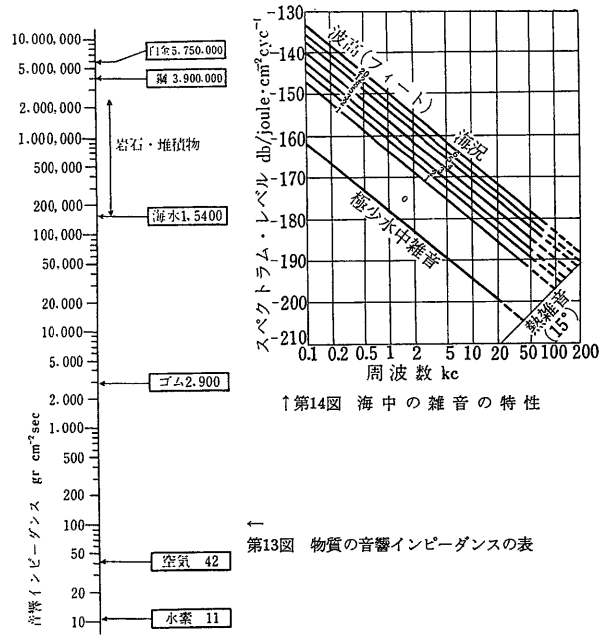
第12図 液体の境界での音波の反射と屈折
 $\sin\theta_1/C_1 = \sin\theta_2/C_2$

ンスの違いがあると観測にかかってくるかは観測の条件でかなり変わるが、大ざっぱにいうと約10%ほどの違いが最低限必要だと思われている。

水の中で発生した音がどこまで伝わるかを考えてみよう。音波探査のため発生した音が太平洋を越えてアメリカまで伝わるとする人はいないだろう。しかしペガトン級の水爆を爆発させれば水中音波は太平洋を越えて伝わるだろう。これは音を聞いている所にある雑音に比べて信号が大きいか小さいかということによって決まることだ。だから水の中に全く雑音がなければ、音は小さくはなるが、遠くまで伝わるだろう。しかし水中に雑音がなくても「聞く道具」そのものの中でも雑音は発生している。もっとも実際には水中の雑音は増幅器(聞く道具)の雑音よりはるかに大きいのであるが、雑音が小さく信号が大きいくほど、すなわち信号雑音比(S-N比)が大きいくほどよい記録がとれることはいうまでもない。したがっていかにして雑音を小さくするかが1つの問題である。音波探査で問題になる雑音は次の3つである。

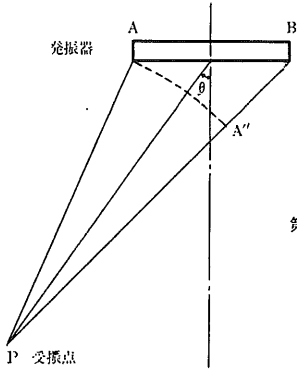
- 1) 海の雑音
- 2) 船のエンジンの雑音
- 3) 受振器が水中を曳航される時の渦や振動など

海の雑音は14図に示されるようなスペクトルをもっている。海が荒れているほど雑音が多くなり周波数が高いほど雑音が低い。しかし非常に高い周波数では海の雑音よりも熱擾乱の雑音が大きく出てしまう。次に船のエンジンの雑音は、船によりさまざまだが、一般に超音波領域までは出していない。音波探査に際しては受振器を船からケーブル等で離すことで雑音をさけている。音波探査では、測深器のように受振器を船底に取りつけないのはこのためである(例外もあるが)。第3の受振器の雑音は、その流体力学的な形状と曳航される早さによって異なる。とくに速度による雑音の発生はその



形状によってある速度から先で急激に増加することがある。音波探査では船の速さを4~6ノットぐらいで走らすが、そのように遅い理由の一つは、この雑音の点にある。遅く走れば当然調査の能率は落ちるが記録の質はよくなる(遅く走る他の理由はその方が地下構造が詳しくわかるからである)。

音波探査が超音波の測深技術などと異なる点の一つに指向性の問題がある。この指向性は発振や受振をする音波に方向性をもたせることと、信号雑音比をよくすることの2つの意味がある。水中に第15図のようにA、Bという発振器があると、これが発振する音をP点で聞いているとしよう。Aから出る音とBから出る音はA、P、B、Pとの長さが違うので、少し到達時間が違う。その長さの違いをA'B'とすると、波長がA'B'よりもじゅうぶん長い音(低い音)ではその違いは問題にならない。しかし短い波長になってくるとこの違いは大切な意味もってくる。A'B'(A'B'はおおよそAB sin thetaになる)が波長の半分になると、Aから出る波とBから出る波はPでいつも山と谷が重なるために打ち消し合ってしまう音はゼロになる。これは1/2波長にかぎらず、3/2波長でも5/2波長でも同じである。もしA'B'が1波長なら反対に強め合う。こうしてある方向には音波が強く伝播するという指向性が生ずるのである。これからすぐわかるように、発振器A、Bが一定なら波長が短いほど指向性が鋭くなっていくし、波長が一定なら発振器A、Bが大きいくほど指向性が鋭くなる。これは音波でも電波でも事情は同じである。放送局や電話局の屋上でみかけるシナ



第15図 指向性の説明図
Aに比べてBから出る波はA'B'だけ遅れてPに到達する
 $A'B = AB \sin \theta$

指向性がないために起こることは

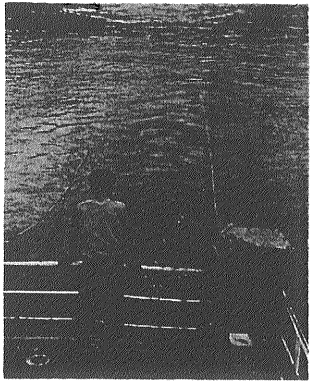
1. エネルギーを下方だけに集中できない
2. 斜めや横からの反射も描いてしまう

というようなことである。しかし2の点は必ずしも欠点ではない。もし指向性が極端に鋭いとすれば音の波線に垂直でないあらゆる反射面が観測されないことになり水平な反射面に限ることになる。このような意味でも2.はある程度必要なことである。指向性をもたすために電波の場合のパラボラ・アンテナみたいなものを水中で引くなどということは実際にはしないが受振器10数個を線状にならべて同時に受振しその出力を加え合すという事は行なわれている。これは群設置 grouping といわれ指向性をもたす重要な手段である。

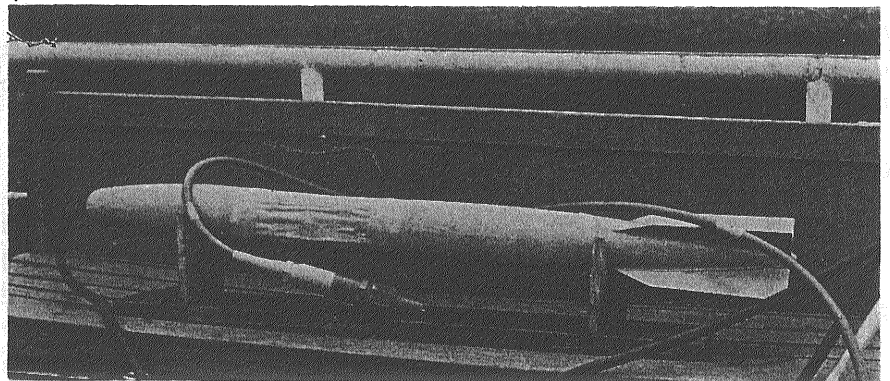
今回は音波探査がどんな技術かということ どんな分野に用いられているかということのほかにこの後を理解するために必要な基本的な反射・雑音・指向性等について説明した。

(筆者は物理探査部)

なべのようなパラボラ・アンテナもこの指向性を持たせるためにあのような形にするのだ。指向性は発振器の大きさ以外にも出力の分布や位相のズレや発振器の形状も関係してくる。しかし簡単に言えば波長が長くなれば発振器を大きくせねばならない。音波探査では指向性をもたせにくいのはこのような大きな発振器を水中で曳航するのがむずかしいからである。



音波探査
水中放電電極と受振器は観測中
船尾から70m位流して曳航しエンジンの雑音をさける



水中放電電極と受振器(魚雷型)

音波探査器械の一例(地質調査所型)左から水中放電電極発振器 増幅器 記録器と制御器 および受振器(下)

