

ボトム・ソナーで海底地形をながめよう

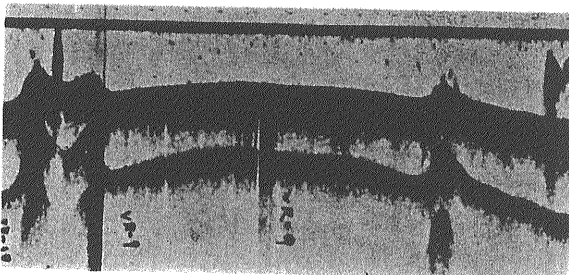
～海底面超音波探査装置の試作～

中 条 純 輔

飛行機で空を飛んで下界を眺めるのはまことに爽快なことである。パカと煙は高い所に昇りたがる。というコトワザがあるが、パカならずとも景色を一望の下に収める状態になれば、おおらかな気分とさわやかな緊張感を感じるのは当り前のことだ。普段はハウようにして歩いている道も細い線になり、見上げる木立も緑の平面になる。複雑な山の地形も手にとるようにわかる。

しかし観光の問題はさておいて、技術の冷酷な目は航空写真機を通して鋭く大地をにらみ、一物たりとも見のがさないだろう。航空写真技術の発展は測量技術はもとより、近代的な地形学の基礎になっているのだ。しかし海の底ともなるとまるで話が違ってくる。ごく浅い海は別として、大陸棚の水深 200m 程度においてさえほとんど見えない。いうまでもなく海水が光を吸収してしまうことと、海の表面で光が反射して見にくくするためである。海の表面での反射光は、平面偏光していることを利用して、偏光フィルターを使うと、だいぶ海中が見やすくなるが、海中の潜水艦など探すならいざしらず、海底地形を明りように写真にするにはほど遠い。海水が光を吸収することは何ともさける手段がない。海底の 10m 位近くなるとかく、海底を見ることはほとんどできない。こうして、海底地形を面的な広がりそのままに観測することは、かなり困難なことと思われていた。

海底地形を調べるには従来は、音響測深器 Echo Sounder が用いられている。第 1 図は N 社の測深器で観測した記録の例である。原理は船に取りつけた送波器から超音波（ふつうは 12 kc から 50 kc ぐらいの周波数）を海底にむけて打出し、海底からの反射波を受波器で受振する（一般には送波器と受波器は同じものを用いる）。その往復時間から距離を出すのである。この方法は魚からの反射波も捕えるので、魚群探知機とも呼ばれ、水産



第 1 図 音響測深器（エコー・サウンダー）の記録例。記録幅は 120m に相当する。海底は黒く出ていて 2 重反射もはっきりとれている。記録の左に 1 つと右に 2 つの魚群がみられる（器械は N 社のもので 24 kc を使用）

にも欠かせない器械である。この測深器こそ今までの海底地形を調べる中心的な技術であった。20 世紀初頭のころの海底にワイヤを下ろして測深した時代にくらべて、まことに画期的な技術の進歩だった。それから 40 年以上をへて、海中の超音波技術は非常に発達し、その間の海図の作製や、海底調査に測深技術面に、じゅうぶん威力を発揮してきた。

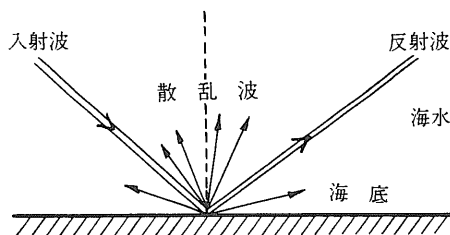
超音波を海中で応用した技術には、水産、土木、軍事などいろいろある。たとえば今では、捕鯨船が探鯨機という超音波でクジラを探す機械をもっているのは常識になった。昔のようにクジラの浮き上がる位置をカンであるなどのような経験的な名人芸より、探鯨機の方がはるかに精確で安いのである。これは 18 kc の超音波を船から水平に打ち出し、クジラからの反射波を捕えてブラウン管上に表わすのである。クジラはその位置だけでなく、相対的な動きもドップラー効果によってわかる。水中の障害物や潜水艦を超音波で探すソナーという技術もある。これは船底から水平方向には無指向性に超音波を打ち出し、受振は指向性を持たせてそれをぐるぐる廻しながら受け、それをブラウン管上にスポットを同期して廻しながら表示する。掃引はブラウン管の中心からウズ巻状に行なう（電波によるレーダーの場合は放射状に掃引するが、超音波のソナーの場合は伝播速度の関係でウズ巻の方がよい）。このような水中の技術は急速に発展しつつある。一般的なこととして言えることは、空中や陸上で“見る”という認識の仕方が水中では“聞く”ということで行なわれていることである。

前述した音響測深器は観測船の航行にしたがって、その真下の地形が“線的”に観測された。このような“線的”な観測に対して、観測船からある幅をもって“面的”な広がりのある海底の観測ができないかということが考えられた。これにはいろいろな試みがなされたが、完全な成功を収めたのは英国の Tucker たちが 1961 年に有名な観測船 Discovery II に取り付けた器械である。これを Narrow-beam Echo range と呼んだ。第 2 図はこの器械で観測した記録である。送受波器は船腹に取り付けられていて、船が動揺してもその軸が一定の方向を向くようになっている。日本でもこの技術の重要

性は早くから認識されて 1964年度に実現の運びになったが それは後述するように英国や米国とは違った多くの特色をもち わが国の実情によく合ったものであった。

米国でもこの技術は 早くから海洋地質学の大切な手段であるとの見通しが立てられていた。 1963年北大西洋の8,000フィートの海でスレッシャー号という原子力潜水艦が沈没した この沈没船の海底での状況を調べることもあって この海底地形(沈船を含めて)を面的に調べる技術は急速に開発されていった。 3,000 m 近い海で普通の echo sounder で沈船を探したり その形を調べることはほとんど不可能に近いので どうしても面的に調べねばならない。 Clay たちが1964年に発表した Lateral Echo Sounder 等もこのような2,000 m という中深海で調査するものである。 第3図はこの器械で中深海の海底を調べたものである。 このような国際的な情勢の中で 地質調査所の “海底面超音波探査装置”(Bottom Sonar) は完成された。

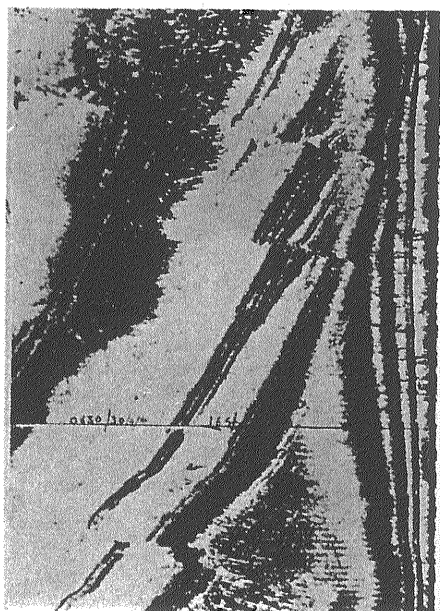
海底に斜めに超音波を入射させるとどうなるか。 超音波は物理の教科書に書いてあるように反射したり 屈折したりするだろう(第4図)。 海底から下の媒質中の音の伝播速度は 普通は水の伝播速度 1500 m/sec より大きいので 屈折角は入射角より大きい。 入射波が海底に斜めにはいり入射角が臨界角より大きくなれば 屈折波はなくなってしまって全反射が起こる。 いずれにしても 超音波は入射した方向にはもどっては行かないのである。 これは海底が完全な平面であり 入射波も完全な平面波のばあいである。 しかし実際の海底は決



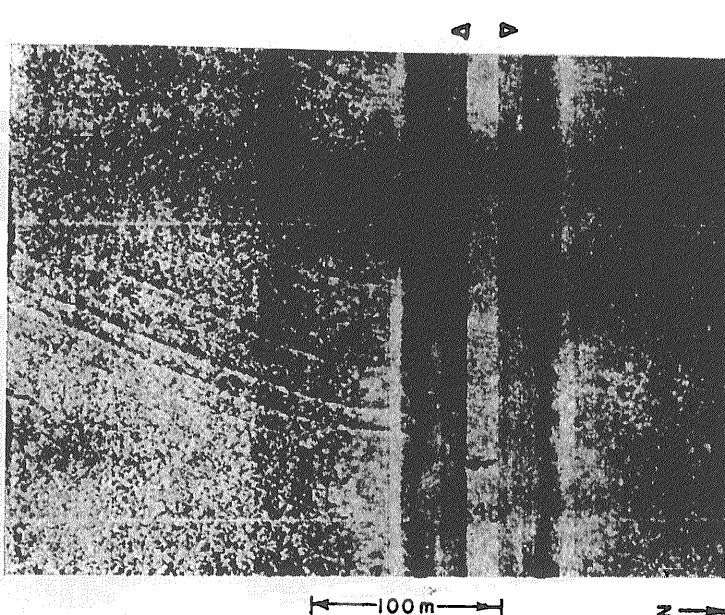
第4図 海底に入射した超音波は反射したり屈折したりする(全反射の場合は屈折波はない) そのほか海底の状況によって散乱波を発生する 超音波探査には散乱波の発生が重要である

して完全な平面ではないので 海底で“散乱”scatter という現象が起こる。 これは散乱源をもとにしていろいろな方向に音を出す現象だ。 この散乱波のうち ほんのわずかは 入射波の方向にもどっていく。 これを受振し増幅し記録する。 散乱の起こり方は海底の地形や 海底面の粗雑さや 反射係数の変化によって かなり異なるので散乱波を記録すると 海底の状態がわかるのである。

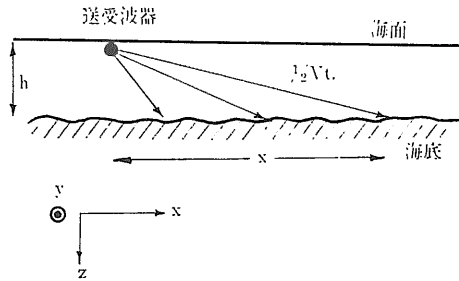
音波探査という技術をご存知の方は多いだろう。 これは水中で 100 cps—3,000 cps 程度の音波を発生し 海底や海底よりも下の地層の反射波を観測して 海底下の地質構造を調べる技術である。 同じように音を出しながら一方は海底の側方を 一方は海底よりも下を調べることができるのは何に由来しているのか? これは周波数の違いによって地層中で吸収係数がケタ違いに違うためである。 超音波探査では 30,000—300,000 cps 位の超音波を使うので 周波数として1~2ケタ大きくなる。 吸収係数は岩石の種類にもよるが だいたい周波



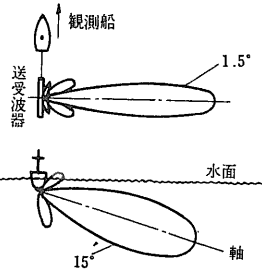
第2図 大陸棚の海底に露出した地層で幾つかの水平断層によって切られている(Tucker たち 1961による 器械は Asdic)



第3図 北大西洋の約 2,500 m の海底における超音波探査の記録 海脚 spur の南西斜面の記録で稜 ridge のようなものが数条みられる 送受波器は 2,500 m の海底の近くまでおろし 両側の打出しは異なった周波数で行なっている(Clay たち 1964による 器械は Lateral Echo Sounder)



第5図
散乱波の出る点までの直
距離 $\frac{1}{2}Vt$ と水平距離 x
と水深 h の間には $h^2 +$
 $x^2 = V^2 t^2 / 4$ の関係がある
実際には h より x は
十分大きいところが問題
になる



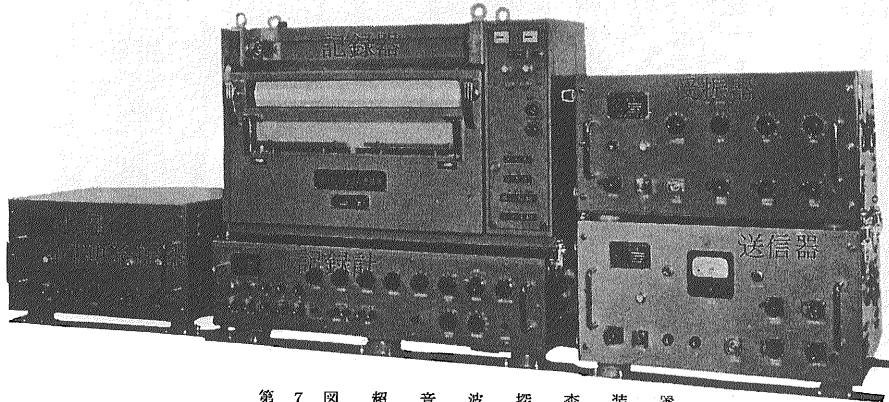
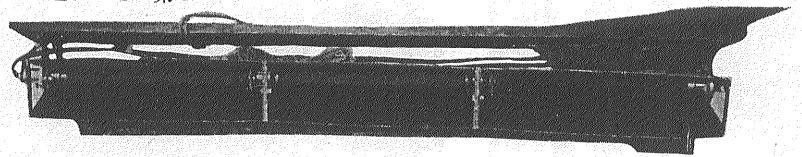
第6図
送受波器は観測船から
曳航する 水平方向の
指向角は鋭く 1.5° であり
垂直方向の指向角
は 15° である 軸に水
平から下に向けてある

数に比例する程度に大きくなる。したがって超音波ではかなり送振パワーを上げて海底から下は判らない。超音波で海底下が判ると分解能の点でも 船のエンジン音とのSN比の点でも 指向性の点でも たいそう優れた技術になるのだが それが実現しないのは地層による超音波の吸収が大きいためである。超音波探査のばあいはむしろ地層の吸収が大きいという点が大切なのでそうでない海底面の散乱波か 地下の反射面か区別がつかなくなってくる。後述するように音波探査と超音波探査を同一の記録器・制御器で併用するのであるが周波数が非常に違うのでフィルターで簡単に分離できて干渉しあうことはない。

送受波器から超音波を送振すると まず最初にもどってくるのは 真下の海底の反射波であって その時間 t は深さを h とすると $t=2h/Vw$ である。それから横方向に行くほど遅れて散乱波がもどってくる。したがって記録を時間で掃引しながら散乱波の入力にしたがって濃淡表示してゆき これを観測船の航行にしたがってくり返してゆけば 図のような記録がえられる。この点も音波探査の記録表示と似ている。違うことは第5図に示すように 水平距離 x と掃引時間 t による直距離 $\frac{1}{2}Vwt$ の間には一次関係はなく

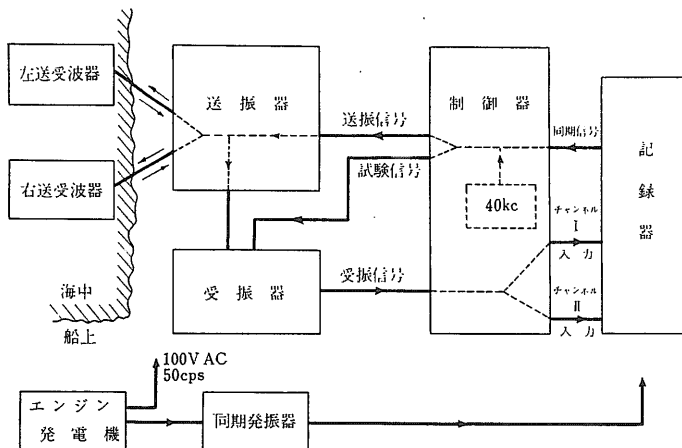
$x^2 + h^2 = (\frac{1}{2}Vwt)^2$ という双曲線の関係になる。したがって記録は海底を空から眺めたものとは違っている。しかし実際には水深にくらべて 3 倍の水平距離なら直距離との違いは 5% であり 5 倍なら 2% にすぎない。したがって感じとしては 海底を空から眺めた場合に似ている。

超音波は送受波器から無指向的に打ち出されるのではない。水平方向には鋭い指向性を持たせねばならない。そうしないと同じ走時でも いろいろの方向のものが混り合ってしまう それを記録の上では区別できないからである。水平方向の指向幅は 1.5° 程度のものである。垂直方向に対してはそれほど鋭い指向幅を必要とはしない。実用上は 15° 位とし 第6図のようにその軸は水平より伏せておく。それは海底での超音波の散乱が距離の増加とともに急激に減少していくためである。反射波の場合には 大雑把にいうと 距離 r に対してエネルギーは 距離の自乗に反比例 r^{-2} して減少するが散乱はおおよそ 4 乗に反比例 r^{-4} するので その減少が激しい。それで指向性の方で逆に近くは弱く 遠くは強



第7図 超音波探査装置

第7'図
超音波探査の送受波器
全長約 2m 導波板の奥に
3 つに分割された細長い
部分がある これがゴム
でモールドされた超音波
40kc の素子群である
この送受波器を水中に曳
航する



第8図 超音波探査装置(ボトム・ソナー)のブロックダイアグラム

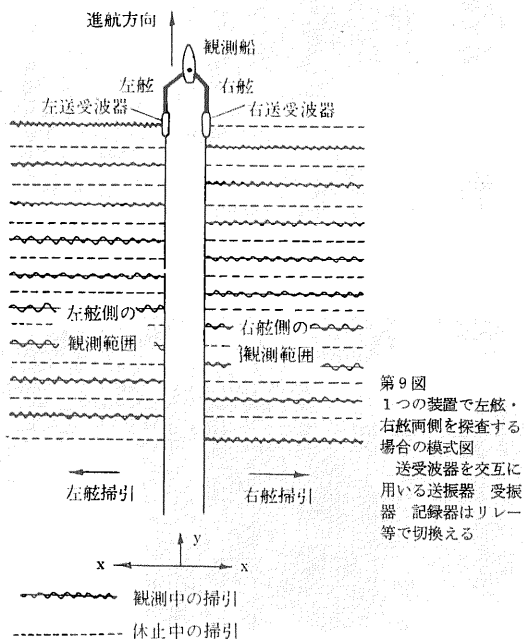
い音圧で打ち出すのである。こうして図のように指向角をもたし、軸を下げる必要があったのだ。ここで指向幅 15° とは、音圧が最大の軸方向に比べて音圧が $\frac{1}{\sqrt{2}}$ (すなわちエネルギーは $1/2$) になるまでの両側の角度をもって指向幅とする。したがって指向幅の角 15° を超えたからといって、急に音が0になってしまうわけではない。指向性はこのようにエネルギーを集中すること、信号雑音比をよくすること、記録を見やすく、判りやすくすることの意味がある。

装置の概略を述べよう。第7図は装置の写真であり、送振器、受振器、記録器、制御器、水晶同期発振器からなり立っている。第7図は水中を曳航する送受波器である。第8図はブロック・ダイアグラムである。記録器はその記録ドラムの回転に始まって、掃引の始めごとにパルスを出す。これが同期パルスである。

これは制御器にはいり矩形波を作る。制御器の内では 40kc の基本周波数が発振されていて、矩形波で変調されて送信信号が作られる。実際の回路は整形や遅延や発振間隔選択がはいっていてもっと複雑である。送振器で 900W に電力増幅されて送受波器に加えられて 40kc の超音波に変換され水中に打ち出される。電気-音響変換素子には円筒振動を用いたチタバリ(チタン酸バリウム)が使われている。このチタバリは電気信号を超音波に変換するが、逆に超音波を電気信号にも変換するので、受波器としても用いられる。シリコンダイオードと共振回路を組み合わせた切替回路によって送波と受波を切り替えて受振信号を受振器に導き、増幅し、変調極性を決めてから制御器に入れる。変調極性には正変調と負変調がある。正変調は受振信号の音圧の大きいところで記録紙が黒くなり、無信号で白くなるよう

なすなわち普通の増幅である。負変調は信号によって記録紙が白くなり、無信号で黒くなるような変調である。暗い所で懐中電灯などでものを照らした場合にもの、の在る所が白く見えることとの対応から、このような負変調を行なっている。負変調は音波探査における半波整流の負極性とは全く別のもので、むしろ記録を写真にしたときの陰画と同じものである。変調極性を与えられた受振信号は、制御器で距離選択を決めてから、記録器で記録紙に描かれる。記録器は音波探査において用いられているものと特別の2、3の点を除いては、同じなので可換である。

観測は観測船かのら左舷側と右舷側の両方を一緒に行なうと能率がよい。観測範囲が当然2倍になる。これを行なうには左と右を交互に行なうか別の周波数の超音波によって同時に行なうかである。交互に行なう場合には、一つおきに発振するので、観測が粗くはなるが、送振器、受振器をリレーで切り替えることにより、一組で済ますことができるので、器材が安上がりであり、電力も少なく済む(第9図)。送振器は 900W の電力なので、リレーでの一回毎の切り替えはむずかしいかと思われたが、水銀リレーの採用で可能であった。このリレーは液体の接点なので、電流容量が大きいが、 30°



第9図 1つの装置で左舷・右舷両側を探査する場合の模式図。送受波器を交互に用いる送振器、受振器、記録器はリレー等で切替える。

以上傾けられないし 5 m-sec 位の作動時間がかかる。
 しかし実用上の欠点は全くない。 こうして動作のモードとしては左 右 左右の3種がなされる。

おもな仕様は 次のごとくである

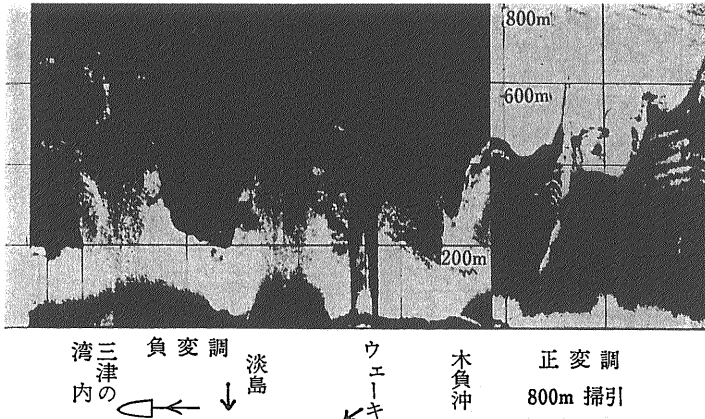
記録レンジ	100 m 200 m 400 m 800 m
発振周波数	40 kc
水中の波長	3.75 cm
入力モード	左 右 左右
送振パルス幅	0.1 0.3 1 3 10 msec
送振出力	900 W
発振間隔	1 2 3 4
距離選択	1 2 3
受振器利得	120 db
TVG	TVGの特定数可変
変調極性	正変調 負変調
送受振器のQ	5
指向角	水平1.5° 垂直15°
試験信号	送振器と送受波器を用いないセット試験 手動送振試験

この超音波探査 Bottom Sonar で探査した記録例を述べよう。 第10図は駿河湾の三津周辺において観測された記録例である。 掃引は 800m レンジ パルス幅は 3 で時間にして 1m-sec であり 水中相当距離は 1.5m 超音波 40 kc は水中波長 3.75 cm であるから 40コ の波連である。 入力選択は左右 発振間隔は 1 であるから

約 $\frac{1}{2}$ sec ごとに (正しくは $2 \times 400 \text{ m} / 1,500 \text{ m/sec} = 53 \text{ 3m/sec}$) 発振している。 記録は右から左への船の進航によって作られ上半が右舷側で南側 下半が左舷側で北側である。 記録の右半分は正変調であり 左半分が負変調である。 正変調では黒い所が散乱波のある所であり とくに黒いところ(この写真は濃淡がよく出ていないが)突起物であり 白い所は谷や陸地などの超音波のもどってこない所である。

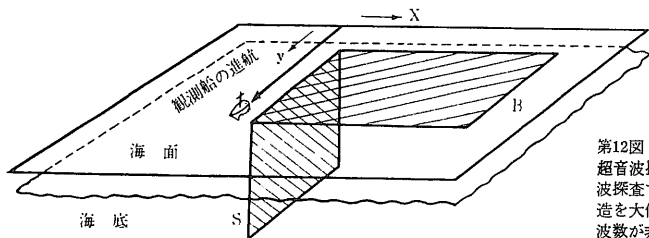
記録によると海底の突起や 谷のような地形が真に鮮明に観測されている。 また突起はその影の部分で超音波の入力がなくなるので 白く (正変調の場合) 抜けている様子がよく判る。 影の長さから適当な仮定をすれば 突起物の比高が求められるが 余り精度のよいものではない。 海底の突起は陸上の地質からの推定により 第四紀の安山岩類と考えられる。 沖合から海岸の方に向けて観測した場合は 記録のように海岸に沿った数条の縞が見られ それから先は白く抜けて超音波はもどってこない。 この縞模様が地質的なものか 音響的なものか また白く抜ける境界が海岸線かどうかには まだ不明の点がある。

正変調の記録と負変調のそれは どちらがよいかは一概に決めかねる。 それは先に述べた暗い所で光をあてた場合の連想ということもあるが 記録上でどちらがより細部の構造が判るかという点とも関係がある。



第11図 水中気泡による反射と吸収
 水中に気泡があると 体積比は 10^{-5} 程度でも共振のために反射や吸収が起こり そのピークは約 50kc である 左図は 気泡を含む水と 含まぬ水の境界平面における音圧反射率と超音波の周波数との関係 気泡の半径は約 0.075 mm 実線は計算値 破線は実測値 気泡の体積比 r がパラメータで a は $r=5.6 \times 10^{-5}$ b は $r=1.5 \times 10^{-5}$ c は $r=0.63 \times 10^{-5}$
 右図は吸収係数 db/cm と周波数 kc との関係 気泡半径は約 0.06 mm 実線は計算値 破線は実測値 気泡の体積比 r は $r=1.5 \times 10^{-5}$

第10図 ボトム・ソナーの記録例 (駿河湾の三津付近) 掃引 800m 相当 パルス幅 3 (1m-sec) 周波数 40 kc 発振間隔 1 右は正変調 左は負変調 記録の上側 (南側) は陸側 下側 (北側) には海底に突起がある 中央でウエーキ (航跡) を横切っている



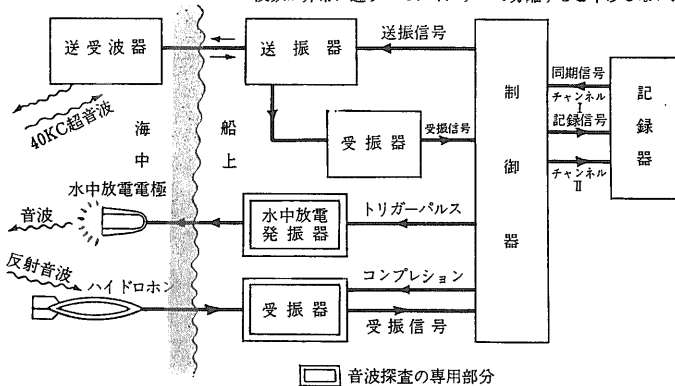
第12図 超音波探査と音波探査の共同観測の模式図
 超音波探査では 40 Kc の超音波で海底面Bを探査し 音波探査では300—1,000 cpsの音波で海底より下の地質構造を大体Sの面のように探査する。この2つの方法は周波数が非常に違うのでフィルターで分離すると干渉しない。

多くの経験の後に目的に応じて選ばれるべきであろう。

記録の中で北側(下半部)に他船の航跡(ウェーキ)が出ている。またウェーキを送受波器が横切る所では記録が黒く抜けてしまっている。これはウェーキの中に含まれる細かい気泡が超音波を散乱し透過しないためであろう。自然の海中に発生する気泡は だいたい 50kc 位の超音波に吸収のピークをもっている(第11図)。したがって 40 kc の周波数ではその近傍なので吸収や反射が激しい。送受波器が自船のウェーキの中に入ることは好ましくないことである。

探査範囲は一概に何メートルと言えない技術上の問題点と目的からくる制約があるが 大雑把な言い方をすれば 水深 200m 以内の大陸棚の範囲内で適用し 5~50mの水深の範囲では 400m~800mの探査ができるであろう。近いものほど鮮明であり 遠いものほどSN比が悪くなる。送振パワーを上げれば探査範囲は広がるが もちろん比例関係はない。周波数を高くすれば水中での吸収が増してくるので 到達距離は短くなるが 散乱は増し 雑音へり分解能が上がるという利点がある。しかし同じ機器で周波数を変えることは共振を使う以上 機構上の困難がある。水深 200m を越えると海の深さは急に深くなる(といっても平均傾斜は 4° にすぎないが大陸棚の 4 倍の傾斜である)。これより先で Bottom Sonar を適用することに急にむずかしくなってきた clay の実験のように送受波器を海底に沈める必要が出てくるであろう 探査範囲以前の問題である。

超音波探査は 従来のエコー・サウンダーが観測船の真下しか判らなかつたのを 面的な広がりをもって海底を調べるといふように 範囲を広げたという点で大きな意義がある。そして音波探査と共同観測しようといふことで一層の意義が出てくるであろう。それは第12図に示すように超音波探査で観測船の進航した線の側方の海底面を調べ 音波探査によって真下の(厳密には鉛直面という真下ではないが近似的にはそう考えて差支えない)海底下の構造を立体的に調べるのである。こう



第13図 超音波探査と音波探査の共同観測のブロック・ダイヤグラム

して海底下の構造を立体的に調べることができる。このような共同観測によって 探査が質的に非常に向上することはいうまでもない。一方 経費の方は非常に安くすむのである。それは探査の費用の大部分は測定の費用と備船の費用だからである。第13図にはこの二つの方法で共同観測した場合の装置のブロック・ダイヤグラムを示す。

この二つの方法では周波数がケタ違いに違うので 容易にフィルターで分離できて干渉を起こすようなことはない。海底の地形をこのようにして広く能率的に調べることができるようになった。しかし現在の段階では記録に表われる海底地形は 超音波を用いての定性的なものであって コンター(等高線)で表現されるような量的なものではない。しかしその技術も早晩に開発されてゆくであろう。

陸上では地形図なしに地質調査を行なうことは決してない。しかし海底の場合には逆に海底地形図のある方がまれである。海底地形はそれが堆積物であれ 露岩であれ地質の反映なのであるから 地形を調べることは重要な問題である。1950年代以降に地球物理学的な技術による研究が軌道に乗るまでの間は 海底地形の研究とドレッジが海洋地質学の中軸になっていた点を考えても 海底地形の調査の基本的な重要さがうかがわれるのである。

(筆者は物理探査部)