

ボトム・ソーナの超音波の散乱と記録について

中 条 純 輔*

About the Scattering of Ultrasonics of the Bottom Sonar and its Records

By

Junsuke CHUJO

Abstract

The bottom sonar is the underwater ultrasonic technique for sea bottom topography sounding using scattered ultrasonics of 200 kcps to 33 kcps by sea bottom reliefs and obstacles.

The bottom sonar sounds the sea bottom along the bottom plane, though the echo sounder sounds the sea bottom just under observation traverse.

In the second paragraph it is discussed that the ultrasonic propagates in water with diverging damping and absorption damping.

The intensity of scattering wave by the small and rigid sphere is inversely proportional to the fourth power of distance between the transducer to the small sphere. But concerning the sea bottom, the scattering intensity is inversely proportional to the third power. The absorption factor works as the exponential function of distance and the absorption coefficient increases with increase of frequency. This relation is illustrated in Fig. 2. Ultrasonic noises are classified to internal noise of transducer and amplifier, ambient noise depended on sea state, thermal noise, engine and screw noise, towing noise, cavitation noise, bubbles and so on.

In the next paragraph nine record examples of the bottom sonar are illustrated, and practical problems of analysis and interpretation are shown. Records are explained for the relation between slant distance and horizontal scale ratio (exaggeration), record of school of fish and wake, record at the bottom slope and so on. It is important and economic to cooperate the bottom sonar with the sparking sonic prospecting under synchronizing control. The last paragraph shows the comparison of records of two techniques and combined interpretation.

要 旨

ボトム・ソーナは海底に超音波を打出して、海底でおこる散乱波を観測し海底地形を面的にしらべる技術である。まず超音波の散乱の基本として微小な剛球による散乱を扱い、散乱波の強度が距離の4乗に逆比例することを示す。しかし海底面による散乱波は距離の3乗に逆比例する。さらに超音波の伝播には吸収による減衰が指数関数の形で伴う。次にボトム・ソーナの9枚の記録例によって直距離と水平距離の関係、稜線の記録上の変形、魚群と航跡などの実例と解釈を示す。また音波探査と共同観測するばあいの記録や測線のとり方につき述べている。

1. 緒 言

ボトム・ソーナ, Bottom Sonar (海底面超音波探査装置) は1964年度にわが国で開発された。本器の開発によつて海底地形を面的な広がりをもつて観測することができるようになった。その原理は超音波の送受波器を海中に観測船で曳航し、それから斜めの海底に向けて30~300kcps程度の単一周波数で矩形変調された超音波を打出し、海底で起る散乱波を受振して海底を調べることである。従来の超音波測探器 Echo Sounder が観測船の走る真下だけを線的に調べたことに対して面的な広がりをもつようになったことは大きな進歩であるといえよう。この技術はいまだその緒についたばかりで今後多くの解決すべき基本的な問題や器械的な問題やあるいは探査技術としての問題に取り囲まれている。しかし今後の海底地形の研究にもつとも有力な手段として役立つ

* 物理探査部

あろう。またすでに実用の段階にはいつている音波探査技術との共同観測 (同期のとれた併用) によつて海底地質の調査にも役立つであろう。

飛行機の出現が近代的な地形学の出発点であつたことは地形を面的な広がりそのまま把握できるという意味でもある。ボトム・ソーナで超音波の散乱によりとらえる面的な地形と空中から光でとらえる面的な地形とは実質的に異なる意味あいがある。それはだいたい超音波と光の物理的な違いと、ものの形を眼で認識する人間の機能に由来しているといえよう。(コウモリは超音波で物体を認識するといわれているが、人間にはこのような機能はないのである。)

本文においては 1. ボトム・ソーナの超音波の性質, 2. ボトム・ソーナ記録の変形と解釈, 3. ボトム・ソーナと音波探査との共同観測, を述べる。超音波の性質としては基本問題は略して実用上の伝播と散乱の問題を中心にし雑音との SN 比の問題にもふれる。記録の項では実例を中心としてその扱いをのべる。共同観測の項ではその意義や実際問題を述べる。

本文に引用される記録例は主として 1966 年度に瀬戸内海の備讃瀬戸において観測されたものを使用している。その代表的な観測条件は次のようなものである。

使用周波数	200 kc(水中の波長 0.75cm)
掃引: 水中相当距離	200 m
掃引時間	267 m-sec
発振間隔	1
発振時間間隔	約 1/4 sec
パルス幅	0.1 m-sec (波連 15 cm)
TVG	5
送受波器の水深	約 1 m
掃引電源	水晶で規制された安定な 50 cps

観測船の進航速度は約 4 ノットであるから 1/4sec ほどの発振は 0.5m に 1 回ずつ発振していることになる。左右のモード (左舷・右舷を交互に観測) のときは片側については 1 本おきになり約 1m に 1 回の発振となつて粗くなる。ボトム・ソーナと音波探査を共同観測したときの音波探査 (以下には音探と略称する) の観測条件は次のとおりである。

コンデンサー C	4 μ F
発振電圧 V	5.5 kV
発振エネルギー $1/2 \cdot CV^2$	60 ジュール
フィルター	350~3,500 cps
受振器	3 m ハイドロホン・アレー
曳航長	50 m

これらは代表的な観測条件であつて、これと違うものや、33kc の周波数を用いたボトム・ソーナ等については記録ごとに述べる。

本研究は科学技術庁研究調整局の特別研究促進費によるものである。

2. 超音波の散乱

2.1 微小な球による散乱

海底が平面の半無限弾性体で、海水の中を伝播し海底に入射する超音波が完全な平面波ならば海底では反射や屈折は起るが散乱 scatter という現象は起らないであろう。しかし実際の海底の面は泥・砂・岩の露出などがあつて平面ではない。このような面に超音波が入射したばあいの散乱現象を一般的に扱うことは非常に複雑である。この散乱をもつとも単純化したばあいとして水中に微小な動かない剛体の球が 1 コあるばあいの散乱を扱う。実際の海底はこのような球の大きさまざまのものが敷きつめられ、しかも散乱波が相互に干渉しあうようなケースで近似できるかもしれない。

散乱源になる球の半径を a とし、超音波の波数 k ($k = 2\pi / \text{波長}$) と直径 $2a$ との積が 1 より小さいということを微小の条件とする。すなわち $2ak < 1$ である。また剛体とは水の超音波による体積変化にくらべて球の体積変化を無視できる意味であり、音響インピーダンスが無限大に相当する。

このような球による散乱音場の速度ポテンシャル $\dot{\phi}_s$ を求めるには、

1) 入射平面波 $\dot{\phi}_0$ の音場内にその音場の粒子速度と同じ速度で振動し、体積変化が入射平面波によるそれとちようど逆になるような音場 $\dot{\phi}_{s_1}$

2) 入射平面波と同じ体積変化をするが音場の粒子速度と逆むきに振動する音場 $\dot{\phi}_{s_2}$ の 2 種の音場を作つて、 $\dot{\phi}_s = \dot{\phi}_{s_1} + \dot{\phi}_{s_2}$ のように重ね合わせると、不動の剛体球が水中に存在する境界条件を満し、球による散乱波の音場を求めることができる。

まず $\dot{\phi}_{s_1}$ を求める。球の体積を Q ($Q = 4\pi a^3 / 3$) とし、入射音圧を \dot{P}_0 、水の体積弾性率を K とすると Q の体積変化 $\dot{A}Q$ は

$$\dot{A}Q = -Q\dot{P}_0 / K$$

となる。ここで体積弾性率 K は、 $K = \rho V^2$ (ρ : 密度, V : 速度) で表わされ、 \dot{P}_0 は $\dot{P}_0 = j\omega\rho\dot{\phi}_0$ (ω : 円周波数 $\omega = 2\pi f$, $\dot{\phi}_0$: 入射平面波の速度ポテンシャル) となることを用うれば、 $\dot{A}Q$ の体積速度 \dot{A} は次のようになる。

$$\dot{A} = \partial \dot{A}Q / \partial t = j\omega \dot{A}Q$$

$$\therefore \dot{A} = k^2 Q \dot{\phi}_0$$

体積変化がちょうど打消すためには $-\dot{A}$ なる変化を考えればよい。これは球状音源であつてその音場 $\dot{\phi}_{s1}$ は

$$\dot{\phi}_{s1} = -k^2 Q \dot{\phi}_0 e^{-jkr} / 4\pi r$$

となる。

次に $\dot{\phi}_{s2}$ を求める。入射波の方向から測つた方位を θ とする。(散乱は入射方向に軸対象に起つている。) 微小球が入射方向に振動する粒子速度 \dot{V}_0 は速度ポテンシャルを方向微分するから

$$\dot{V}_0 = -j\omega \dot{\phi}_0$$

である。このような振動する球による放射音場は球より充分離れた距離 r において

$$\dot{\phi}_{s2} = -\frac{3}{2} k^2 Q \cos\theta \dot{\phi}_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}$$

となる。

散乱波の音場は上記2つの重ね合せであるから、

$$\dot{\phi}_s = \dot{\phi}_{s1} + \dot{\phi}_{s2}$$

$$= -k^2 Q \left(1 + \frac{3}{2} \cos\theta\right) \dot{\phi}_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}$$

である。

散乱波の強度は速度ポテンシャル $\dot{\phi}_s$ の自乗に比例するから、周波数 f の4乗に比例し ($k = 2\pi f / V$ を用うる), 球の半径 a の6乗に比例し ($Q = 4\pi a^3 / 3$ を用うる), 距離 r の2乗に反比例する。

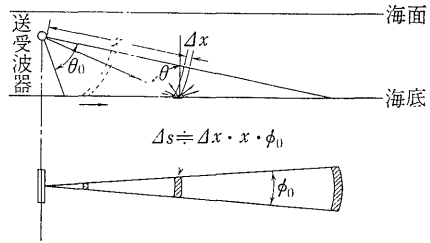
散乱波の方向性は $1 + 1.5 \cos\theta$ の因子で決まる。音源方向 ($\theta = 0$) では 2.5, $\theta = 115.5^\circ$ では 0, 入射波の進行方向 ($\theta = 180^\circ$) では -0.5 となる。

この式の成立には $2ka < 1$ という条件があつた。ボトム・ソナーで用いられている 200kc と 33kc の超音波の水中での波数はそれぞれ 8.4cm^{-1} および 1.4cm^{-1} であるから散乱球の直径 $2a$ としては 0.12cm および 0.73cm より小さい球ということになる。

ボトム・ソナーで散乱波を観測するばあいには上式の入射波の音場 $\dot{\phi}_0$ が平面波ではなく球面波で送受波器からの距離 r に反比例して拡散減衰している。したがつて送受波器の位置で観測される散乱波の音場は距離の2乗に反比例し、強度は4乗に反比例している。

2.2 散乱波の強度

送受波器から海底に向けて斜めに発射された超音波がかなり 90° に近い角 θ で入射したばあい、すなわち海深にくらべてかなり離れた距離における入射を考える。超音波パルスの時間幅を Δt とするとその間の有効な海底の掃引距離 Δx は $\Delta x = V\Delta t / 2 \sin\theta = V\Delta t / 2$ となる。2で割るのは往復の径路を考えるので半分になるからである。ここで V は水中の音波速度約 $1,500\text{m/sec}$ である。この Δt の間に超音波を受ける海底の面積は $x\phi\Delta x$ である。



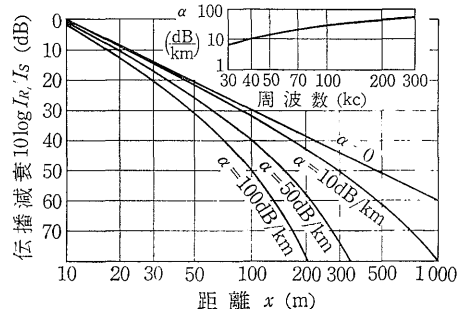
第1図 ボトム・ソナーの超音波の入射
海底に斜めに入射した超音波は大部分反射や屈折を起すが、一部は乱れて入射方向にもどつてくる。入射する面積は $x\phi\Delta x$ であり、パルス幅 Δt の時間の間に $\Delta s = V\Delta t / 2$ の距離を覆う

(第1図) ここで x は送受波器から海底までの距離であり、 ϕ は送受波器の水平方向の指向角である。超音波の散乱による反響強度 IP は前項ですでに述べたとおり距離 x の4乗に逆比例し、吸収のために距離の指数関数で減衰するので次のように表わされる。

$$IP = I_s e^{-2\alpha x} \cdot T_s \cdot x\phi\Delta x/x^4$$

ここで、 I_s : 指標強度, T_s : 単位面積あたりのターゲット・ストレングス, α : 単位距離あたりの吸収係数である散乱による反響強度 IP は前式のように距離 x の3乗に逆比例する。これは反響強度が往路で距離の2乗に逆比例して拡散減衰し、散乱源をもとにして復路でまた2乗に逆比例する拡散減衰をするが、超音波の放射を受ける面積もまた距離に比例して増すので結局前式のように3乗に逆比例するのである。もし水中に孤立した散乱源を問題にするなら前項でのべたように4乗に逆比例するであろう。これは測深器や音波探査で問題になるような平面の反射の強度が距離の2乗に反比例するのにくらべてはるかに急速な減衰であり、測定技術としての難かしさもこのような点からきている。

吸収による指数関数型の減衰は周波数とともに増大してゆく。海中の減衰と吸収係数は第2図のとおりであ



第2図 ボトム・ソナーの超音波の伝播減衰
ターゲット IP/I_s は α を軸距離 x に対して $e^{-2\alpha x} \cdot x^{-3}$ に比例する。 α は吸収係数で周波数とともに増加するので、高い超音波では遠くまでとどかない。

る。吸収がなければ ($\alpha = 0$) 距離が 10 倍で 30db (3 乗に逆比例) であるが α の値により図のとおり減衰する。ボトム・ソナーの 33-200kc では数 10db/km の程度である。33kc のボトム・ソナーの探査範囲より高分解能を目的とした 200kc のボトム・ソナーの方が実際の探査範囲が狭くなるのはこの吸収減衰のためである。

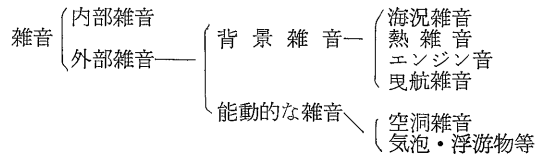
海底のターゲット・ストレングスは平面で入射角が 90° に近いばあいには入射角の余弦の自乗 $\cos^2\theta$ に比例すると考えられている。しかし地形や地質によって複雑に変化するであろう。表面が波長にくらべて粗くなつてくると入射角の変化に対してあまり変らなくなつてくる。したがって地形の変化によって散乱強度があまり変わらず、ただ地形の変化で影になる部分、すなわち入射角が 90° をこすところしかでなくなり、散乱波があるかないかが黒と白で記録にでるだけになつてしまうおそれがある。使用周波数が適切であればこの点は問題のないところである。

2.3 雑音

多くの測定技術において信号雑音比 S/N ratio が問題になるように、ボトム・ソナーでもその S/N 比が測定限界を決めている。ボトム・ソナーではすでに述べたように時間に対する信号の減少の割合が測深器よりも早く (時間の 3 乗に逆比例) 信号が小さいので S/N 比を充分よくするように注意せねばならない。

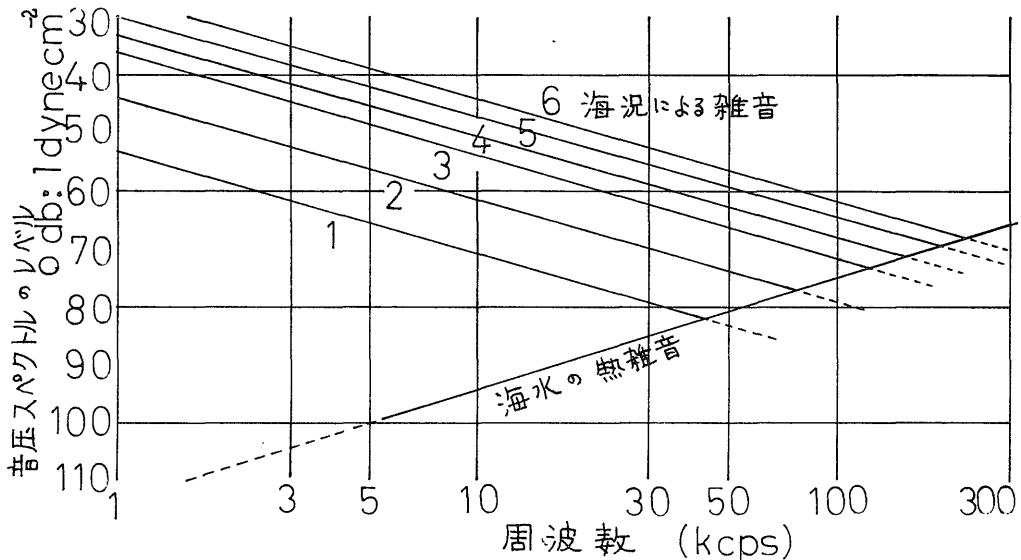
雑音には観測系の内部雑音と外部からくる外部雑音がある。外部雑音には海況による雑音、熱雑音、観測船の

エンジンの雑音、曳航による雑音など受動的なもの、浮游物や気泡のように能動的な超音波の放射の結果でてる雑音とがある。



内部雑音は受振増幅器の内部で発生する雑音で、とくに受振系と増幅器の初段で決まる。この雑音のレベルは外部雑音にくらべて少なくすることができる。機器の設計上の問題は多いが現場作業としての問題はあまりない。内部雑音による増幅の限界はだいたい 120 db 程度が普通である。

海況雑音は海の状態による雑音である。海況 1 は「おだやか、さざなみがある」で波の高さは 0-0.05m の程度、海況 6 なら「かなり高い波がある」で波高は 4-6 m である。海況 6 は 1 より雑音レベルが 20db ぐらい増大している。海況雑音は周波数が上ると減少してゆき周波数が 2 倍になると (octave 上ると) -5 db/octave 下り、周波数が 10 倍になれば -17db ぐらい減少する。熱雑音は名のように分子の熱騒乱により発生する雑音で、温度とともに増大するが普通の海水の温度 $0^\circ-25^\circ$ ぐらいの間での変化は無視できる程度である。熱雑音は海況雑音とは逆に周波数が上ると増大してゆき、大体周波数に比例して 6 db/octave あるいは周波数 10 倍で 20 db 上る。これはあらゆる周波数範囲で成立つ関係ではないが、ここで問題になる音波と超音波の範囲では成



第 3 図 海況雑音と熱雑音
海況が悪いほど海中の雑音の音圧レベルは上つてゆく。この雑音は周波数が増すと -5db/octave 位減少する。海水の熱雑音は周波数に比例して上つてゆく。ボトム・ソナーの周波数範囲ではこの 2 つは同程度である。

立つ。第3図は海況雑音と熱雑音の音圧スペクトル・レベルを周波数に対してとつてある。音圧レベルの 0db は 1 dyne cm^{-2} である。ボトム・ソナーの周波数 30~300 kcpsのあたりでは海況による雑音は音探などにくらべかなり減少してしまい熱雑音に近づいている。

船のエンジンや船体からでる雑音はエンジンの大きさや回転速度や船の形態によりさまざまであるが超音波の周波数領域では非常に小さいのが普通であり背景雑音として大きいものではない。ボトム・ソナーでは送受波器を船のごく近くに曳航するが音探では受振器を船から数10m離すのはその使用周波数領域でのエンジンや船による雑音レベルの違いのためである。

空洞雑音は大出力のばあいには生ずる空洞現象 cavitation によるもので送受波器の設計上の問題であり、正常な使用では生じない。

気泡はボトム・ソナーのばあい重要な意味をもつ。気泡は水中で安定した状態では 50kc 付近に共振周波数をもっていて超音波の吸収や散乱を起す。船の航跡にはスクルーなどのために気泡が生ずるので送受波器を曳航する際にそれが自船の航跡の内に入るような曳航方法は避けねばならない。また海況が悪く海中に白波などのために気泡が多いばあいは S/N 比が下るのであろう。他船が作る航跡が気泡による超音波の散乱のために記録に表われることは 3.5 項で述べる。

能動的な雑音のうち気泡・浮游物などによるような超音波の放射によつて生ずる雑音は別の意味では信号の一種とも考えられる。地震探査の反射法で爆発により生ずる表面波を雑音の一種と考えることと似ている。ボトム・ソナーの目的が別ならわれわれが目的とする地形による散乱が雑音と考えられることもありうる。

このように雑音はその発生の原因も観測にかかる現象もさまざまである。これらの性質をよく知り克服して始めてよい記録をとることができるのである。

3. ボトム・ソナーの記録の性質

3.1 直距離と水平距離

地形の表現の仕方にはいろいろの方法があるがよく用いられる方法は等高線による表示と伏カン図の表現である。等高線による表示は高さが量的に判る点で便利であり精確である。伏カンの表現では地形を実際に上から眺めたような感じに近い表現がされている。

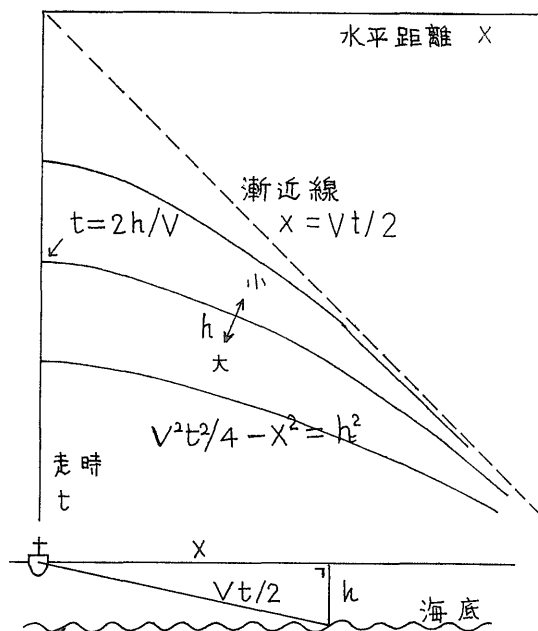
ボトム・ソナーの記録は一見伏カン図を思わせるような表示の記録である。それは起伏のある地形に斜めから光線をあてて上からみているような感じである。しかし普通の記録方式では超音波の散乱のあるところが黒く、

ないところが白くするので光をあてたばあいと逆である。(負変調をかけて白黒を反転することはできる。)しかし見かけは似ているが質的にはかなり異なつたものである。定量的な考察をするばあいには多くの注意が要る。ステレオ・ボトム・ソナーは散乱源の深さの定量化に意義のある技術であるが、ここでは普通のボトム・ソナー記録の範囲内で記録と実際の地形の関係を扱うことにする。

ボトム・ソナー記録において散乱源までの距離として読取る量は直距離 slant distance であつて水平距離 horizontal distance ではない。散乱源の走時を往復で t 、散乱源の深さを h 、水平距離を x とすると、

$$V^2 t^2 / 4 - x^2 = h^2$$

という関係がある。ここで V は水中の超音波の速度である。したがつて h が一定なら t と x は双曲線の関係になる (第4図)。水深 h にくらべて直距離がある程度大



第4図 直距離と水平距離
散乱源の直距離 $Vt/2$ と水平距離 x の間には双曲線の関係がある。したがつて測線の真下の海底の近傍では記録と地形の間には双曲線型のヒズミがある。

きければ走時から決まる直距離 $Vt/2$ と x はかなり近づき、図では漸近線に接近することになる。例えば $Vt/2$ が水深 h の3倍なら5%、5倍なら2%大きい程度である。実際の記録では送受波器の直下の海底から水深の2倍ぐらまで(伏角にして 30°)の間は記録がよくないことがあるので、それから先を問題にするばあいには

水平距離と直距離はかなり一致するといえよう。送受波器を海底から大体一定の深さで曳航することができるような条件のあるばあいには記録器のヘリカル電極のピッチを線型のものせず双曲線型のものにすることによって水平距離を直接に記録紙上に表わすことができる。clayはこれを中深海の Lateral Echo Sounder において送受波器を海底から 60m の深さで曳航することで実現した。これは実際には曳航技術や海底地形の変化のためにかかなり近似的なものである。これは直感的な判り易さの反面、定量的な精度が悪くなるので少なくともステレオ・ボトム・ソナーで視差 parallax を問題にするようなばあいは読取誤差がふえるから避けるべきであろう。

3.2 稜線の記録

海底に直線状で深さ一定の稜線 (例えば砂丘の頂上など) があり、ボトム・ソナーの測線がこれと斜交するばあいの記録を考えてみる。このばあい送受波器の指向性は水平面内では充分鋭くて側面からの散乱波は観測されず、垂直面内ではすべて稜線の散乱波が観測されるとする。稜線の深さを h 、水平距離を x 、直距離を s とすると

$$s^2 - x^2 = h^2$$

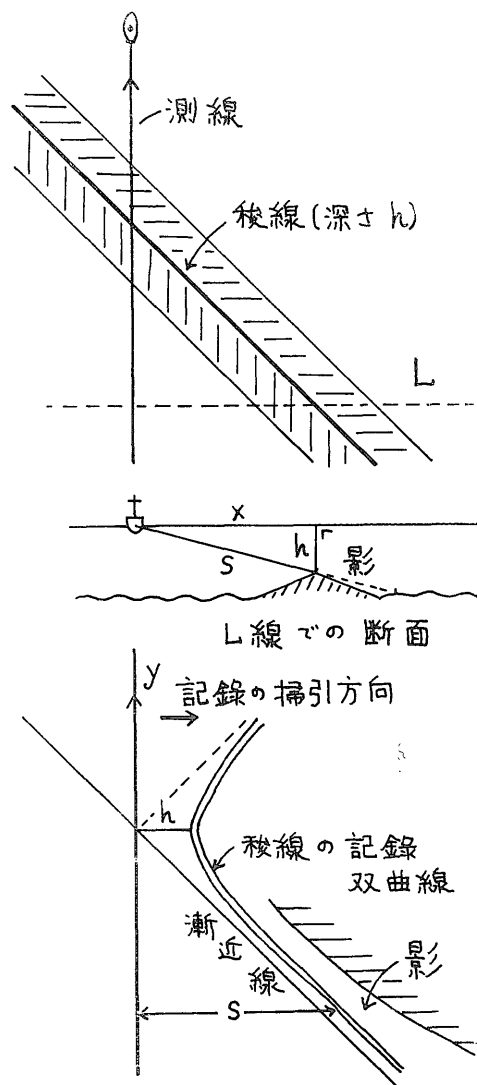
の関係がある。記録の掃引は直距離 s によって行なわれる。稜線が深さ一定の直線だと測線方向 y と x の間には一次関係があるので s と y の関係も

$$s^2 - \alpha^2 y^2 = h^2$$

という双曲線の関係になる。測線と稜線の交わる所では記録は双曲線の頂点になり距離は h である。また双曲線の漸近線は稜線である。第5図には稜線の記録を模式的に示した。稜線はこのように記録上双曲線になるが、双曲線の反対側の分枝は送受波器の反対側に相当するので実際上観測されることはない。

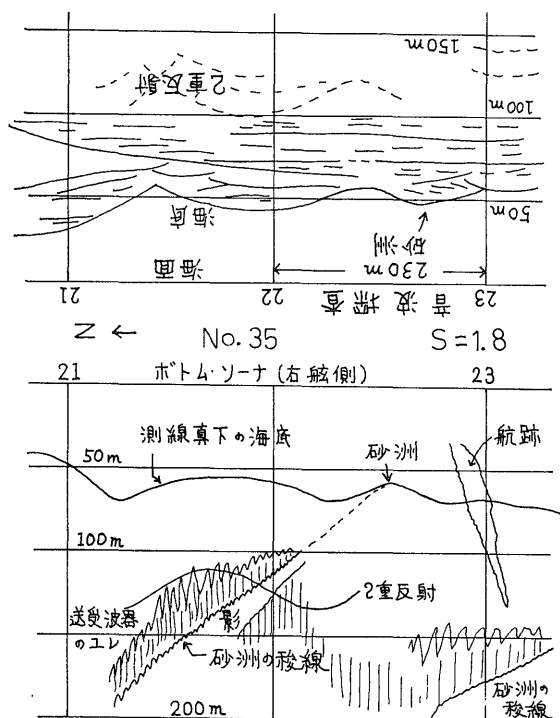
このような稜線の記録の例を図版1に示す。このボトム・ソナー記録は瀬戸内海の直島の沖で観測された砂洲 sand dune の例である。ボトム・ソナーの周波数は 33kc で掃引は 200m である。本記録の右舷側に砂洲が双曲線状にのびている様子がよくわかる。この砂洲は併用している測深器の記録にもよく出ていてその対応は明らかである。左舷側には砂連 sand wave が汎山表われている。33kc の記録はあとで示す 200kc の記録にくらべるとみた感じが粗く分解能が悪いことがわかる。

図版2は 200kc のボトム・ソナーと音波探査を共同観測した記録であり、第6図はその模式的な説明図である。200kc のボトム・ソナーでは送受波器の垂直面内の指向性を 45° に広げたので送受波器の真下の海底だけでなくその2重反射まで観測されている。この部分は従



第5図 稜線の記録
海底の稜線と測線が斜交すると稜線は記録上は双曲線として観測される。

来の測深器の記録と同じことである。測点 (以下#の符号で表わす) # 21 - 22 のあたりで 200 ~ 100m 位の距離に砂洲の稜線が観測されている。これは # 22.6 の真下の海底において高くなっている部分と連なるものである。このばあいもすでに述べたように (砂洲の稜線はほぼ直線であつて測線と斜交し、記録上は双曲線になることや稜線が真下の海底において水平になるという点は同じである。砂洲の測線側の斜面は散乱が強いので記録上黒く表われているが送受波器の曳航中のユレのためにシフトになっている。ボトム・ソナーと共同観測された音探



第 6 図 図版 2, No. 35, 井 21-23 の模式的説明図

の記録には砂洲の内部の構造がみられる。これによると砂洲内には北落ちの傾斜をした堆積物であつてその下の面(多分沖積層内の反射面)は現在の海底地形とは逆に北の方で深く落ちている。

音波探査において点状の散乱源(礫層, 魚群, 粗雑な面の岩石など)が記録上は双曲線になることはすでに知るところである。これは音波探査の方式が指向性にとぼしいことから起ることで, 上述のボトム・ソーナにおける稜線の双曲線とはかなり性質の違つたものであることを付言する。

3.3 水平・垂直尺度比

地形図はどの方向も同じ尺度で表わすのが普通であるが, ボトム・ソーナでは測線方向(これをかりに水平方向とする)と掃引方向(これを音探との対比からかりに垂直方向とする)の尺度が違ふことが多い。これは測線のとり方によつて成果が違ふことでもあり望ましいことではないが次の 2 つの理由による。

- 1) 記録の掃引線の幅(線の太さ)や線と線のスペース, 発振間隔が適当でないとき記録が見にくくなる。
- 2) 掃引方向の尺度は掃引の機構によつて一定であるが, 測線方向の尺度は観測船の速さや潮流などのために尺度を完全に一定にすることが機構上難かしい。

この中で 1) は散乱波の検出上大切である。地形による散乱波を散乱波と認定するのは 1 回だけ強い散乱波を出すだけでなく, 何本かの掃引線にわたつて散乱波が検出されることである。いわば眼で相関をとることである。この点は音波探査や反射法の記録と同じことである。水平・垂直という言葉はボトム・ソーナのばあい適切を欠くが音探との類似と共同観測をすることからそのまま用うる。

図版 3 の記録例は右舷のボトム・ソーナおよびそれと同一入力で電気的処理の違ふものと測深器の記録である。ボトム・ソーナの原記録で垂直方向は 1/1000 (図版の複写記録は縮尺されている), 水平方向は 1/3125 である。したがつて水平垂直尺度比 S は $S = 3.1$ である。

(図版でもこの値は変わらない)。地形図のばあい $S = 1$ が望ましいがこれは船をよほど遅く走らすか紙を早く送らねばならないので調査能率や記録の質からこの値にした。測深器の原記録は垂直方向 1/670, 水平方向 1/8900 であり, $S = 13$ になる。このように測線真下の海底については水平垂直尺度比が 4 倍にもなつていたので地形の相対的な変化がよく表われている。測線真下の海底を両記録でくらべると明らかに測深器の記録の方が地形の変化がよくわかる。このことからボトム・ソーナの調査でもやはり適当な尺度比をもつ測深器を併用した方が便利であろう。

音波探査のばあいには地層の傾斜があまり急でないときには S を 3~5 ぐらいにすることが多い。これは点状の散乱源の作る散乱波が $18^{\circ} \sim 11^{\circ}$ 位の漸近線をもつ傾斜をなし反射波と区別しやすいためであつた。しかしボトム・ソーナのばあいにこのような考慮は不要であり船の早さと観測の繰り返しなどから紙送り速度と S を決めてよいであろう。

図版 3 につき付言すると, ボトム・ソーナの 2 つのチャンネルはまつたく同じ入力を書いている。しかし記録器の電力増幅のレベルだけが違つていて右舷側の記録の方がコントラストが強く黒くなつてしまい濃淡の詳細がつぶれている。視覚的な dynamic range はあまり広くないので (20db ぐらいといわれている), 適切な記録レベルが必要だという事例でもある。

3.4 両舷の記録

送受波器を左舷・右舷両側とも用いて交互に発振するばあいには片側の発振回数が半分になつてしまふので記録が粗くなる。しかし観測範囲は 2 倍になるわけである。図版 4 は両舷を観測した記録例である。この例のように記録が見掛け上粗くなる。散乱波がよく続き記録がよければあいは少し粗くも実用上の問題はあまり

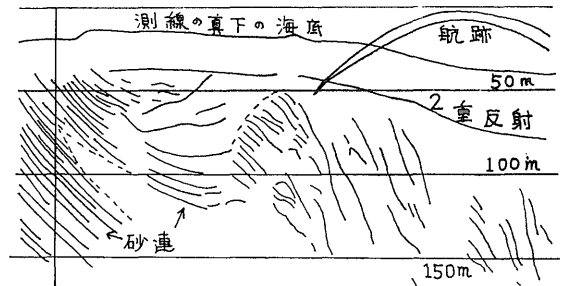
ない。しかし記録が悪くなってくると掃引間隔が粗くなつたためにまったく散乱波を検出できなくなることがあるので注意が要る。また2つの送受波器の特性や曳航状態をまったく同じにすることは実際上難かしいので送振器や受振器を共通に使う以上記録に多少の優劣ができるのはやむをえない。

2チャンネルの記録器を使うかぎり、左舷右舷のボトム・ソーナと音探の3つを併用することはできない。しかし2つの記録器の同期運転の機構はすでに完成しているので実現しうることである。

3.5 魚群と航跡

ボトム・ソーナの記録は超音波を散乱するものなら地形でなくても表わしてしまう。この点は音波探査と同じであるが周波数が非常に違うためにその表われ方も異なっている。記録上にしばしば表われるのは魚群と他の船の航跡である。魚群の記録例を図版5に示す。ボトム・ソーナの記録では魚群が広い範囲にわたって観測されている。魚群は測線の真下の海底よりもつと先までいるように見える。これはもちろん地下に魚群がいるのではなくて水平方向にるのが記録では下に表現されるためである。測深器の記録をみると海面の浅い所だけに魚群が観測されている。これは測深器の指向性が下方に鋭い形になつていて水平方向の反射波は受信されないためである。ボトム・ソーナと共同観測の音探の記録には魚群はまったく観測されていない。それは魚群がボトム・ソーナの周波数200kc (波長0.75cm) に対してはかなり強い散乱波をだすが、音探の周波数350~3,500cps (波長4.3m~43cm) に対しては散乱波が弱いためであろう。なお音探の記録の#1.3あたりに雑音があるので他の船のエンジン音のためであり、ボトム・ソーナ記録にはでていない。

ボトム・ソーナの記録には他の船の航跡ができることがある。これは航跡に発生する気泡が超音波を散乱するためである。水中に発生する気泡は発生条件により大きささまざまであるが安定して存在する気泡の直径は0.1mm程度である。この気泡は共振周波数を50kcあたりにもつているので体積としてはごく僅かでも超音波の吸収や散乱を起す。したがって他船の航跡が記録に表われることがある。また同じ理由で送受波器が自船や他船の航跡の中に入ると記録が悪くなりときには何も記録がでないこともある。図版6は航跡の記録である。航跡の中の気泡は時間とともに拡散するので航跡は後の方が広がっている。第7図は説明図である。記録の左側の50~100mのあたりにたくさんの砂連がみられる。砂連の波長は約4m程度であり、観測されただけでも30本ぐら



第7図 図版6のボトム・ソーナ記録の模式的説明図

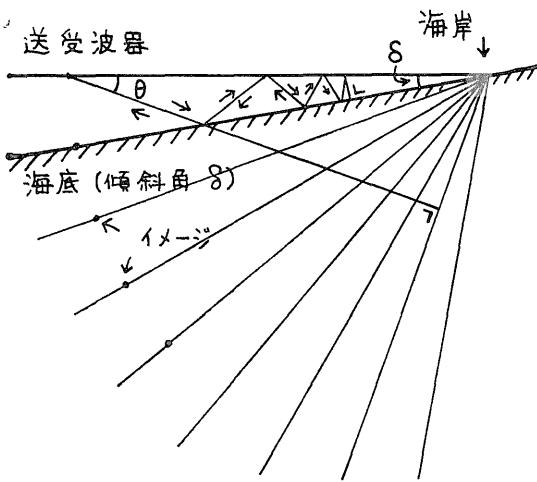
いの砂連がほぼ平行している。

3.6 浅い斜面

海岸から沖合に向う海岸のように緩い傾斜角で海底が深くなり、海底の起伏があまりはげしくないようなばあい、沖合から岸に向かってボトム・ソーナの超音波を打出すと記録にシマ模様ができることがある。図版7は海岸ぞいにシマ模様のでている記録の例である。シマ模様の見かけの波長は20~30m程度であり、送受波器の近くではシマ模様は消えている。この記録は33kcの周波数のもので掃引距離は800mで両舷観測である。観測は駿河湾の三津の西方である。右舷側は海岸から続く緩い斜面で海底にシマ模様のでている。底質は砂質のものが主である。左舷側の海底には安山岩の堆がある。記録の始めの方は負変調で表示し後の方は他の記録と同じように正変調で表示しているので黒白の関係が逆になつている。

シマ模様ができる原因としては1) シマ模様に相当する海底地形の起伏の存在、2) 音の斜面における多重反射、3) 音響的な干渉、の3つが考えられ、このうち2と3は本質的に違うものではない。

斜面における多重反射の径路は第8図に示すようになる。海底を傾斜角 θ の平面とし、送受波器は海面にあつて海岸線に垂直に音を打出すとし、海岸線までの距離を r とする。海底から反射する音波の距離は片道で $r \sin \theta$ となり (水深を d とすると $d \cos \theta$ とも表わせる)、2重反射は $r \sin 2\theta$ 、 n 重反射は $r \sin n\theta$ となる。このとき打出す波線の伏角は $\pi/2 - n\theta$ である。したがって傾斜角の緩い海底でも n が大きい多重反射では小さい伏角になり、指向特性のメイン・ローブの軸に近づくと観測される可能性がある。しかし $n\theta$ が $\pi/2$ より大きくなるような多重反射はありえないし、また海岸線より遠くなるような多重反射もありえない。次数の違う多重反射が記録上シマ模様になるには音の干渉が生じているからであろう。この記録例では周波数33kc(波



第8図 傾斜面の多重反射

斜面の多重反射では鏡像(イメージ)は円弧上に並ぶ。
 n 重反射の片道距離は $r \sin n\theta$ であり、超音波の伏角は $\pi/2 - n\theta$ である。次数の違う多重反射が記録上ソマ模様になる可能性がある。

長4.5 cm), パルス幅1 m-sec (波連1.5m) である。これらについては不明の点が多く今後の研究にまよところが多い。

4. ボトム・ソナーと音波探査の共同観測

4.1 記録の比較

ボトム・ソナーは音波探査と共同観測することによって海底の地形・地質を調べる有力な手段としての意味が強くてくる。海底の地形は海水による堆積物の運搬や堆積あるいは潮流による侵食のような外部からの営力と、海底よりも下の地質構造の表面への反映との両面によって形成される。したがってボトム・ソナーによる地形表面の調査と音探による地下構造の調査とはときに相助けて地形・地質の調査に役立つのである。

しかも実際の調査においては調査の費用の大部分を占める観測船の費用と船の位置を決める測量の費用が共通

であるので廉上りである。

第9図にボトム・ソナーと音探の共同観測の範囲を模式的に示す。ボトム・ソナーは海底にそうほぼ水平な面を調べ、音探では測線下の垂直な断面(無指向性の点から精確な垂直面ではない)を調べて、記録上はこれを同一平面に展開して表わしている。こうして地下構造を立体的に調べることができる。

図版8は共同観測の記録例である。下はボトム・ソナー、上は放電式音探の記録でありこの例では音探の増幅器の出力を弱い結合でボトム・ソナー記録に重ねて描かせているので比較してみやすい。測線真下の海底地形をくらべると次の3点がわかる。

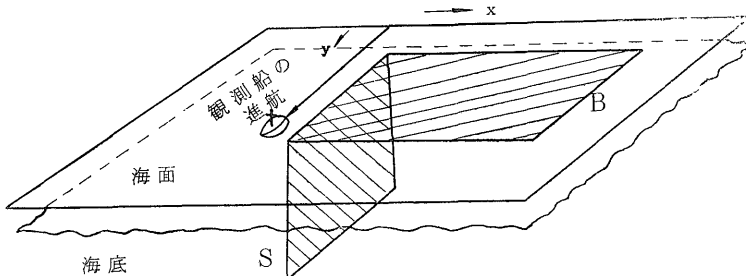
- 1) 真下の海底地形の形態が一致しない。
- 2) 水平方向に約50mズレている。
- 3) 垂直方向に約7mズレている。

この中で1)は音波の指向性に起因している。ボトム・ソナーのように垂直面内で1.5という鋭い指向性の方法と音波探査のように無指向性の方法では複雑な海底地形のばあいには反射の起る点が違ってくる。海底に突起した地形があるようなばあい音探では無指向性のために突起を頂点とする双曲線状のパターンが生ずる。このために海底地形の形態が違ってくる。

2)の水平方向のズレは音探の発振器と受振器を船尾から約50m曳航するが、ボトム・ソナーの送受信器は舷側に曳航するために生ずることである。

3)の垂直方向のズレはボトム・ソナーの発振が音探にくらべて約10 m-sec (水中相当距離は往復で7.5m)遅延をかけているためである。したがってボトム・ソナーの記録は0 mから発振線ごとズレている。この遅延の目的はボトム・ソナーを“左右”のモードで使うばあいに切換の水銀リレーの動作時間5m-secを避けるためであった。したがって本記録のようにボトム・ソナーを片側しか使わないときは切換リレーを使わないから遅延をなくしても差支えない。

図版8の記録例は瀬戸内海の備讃瀬戸のものである。



第9図 ボトム・ソナーと音探の共同観測
 ボトム・ソナーは海底に沿う面Bを観測し音探は測線の垂直下方の面Sを観測する。こうして海底の地形・地質構造を立体的に調べる。

＃1.5あたりでは直距離100mぐらいいまでに砂連 sand wave が斜めに観測されている。ここで音探の記録では地形の変化にかかわらず地層の反射は水平になっている。よつて＃1.5から＃2.5にかけての地形は巨視的にみれば侵食性の地形であり、侵食の過程のなかで砂連が堆積あるいは形成されたのであろう。＃3-4および6の近傍では音探記録上に散乱波がかなり強くでていて粗雑な海底表面を示している。これらは礫などの存在か岩盤の露頭が侵食を受けたものかのいずれかと思われる。

この記録によつても明らかのようにこれら2つの方法の間に音響的な干渉はまつたくない。周波数が1~2ケタ違うために互いの周波数成分がほとんどなくしかもフィルターで分離できるからである。

海面の波はボトム・ソーナにも音探にも影響を与える。波をふくめた海況雑音はボトム・ソーナへの影響はごく少ないが音探への影響は海の荒れたときなど無視できない。波によるユレの影響は音探では海底のみかけの深さの変化として出てくるが、ボトム・ソーナではそのほかに送受波器のヨーイングとして指向軸のユレになる。図版8の掃引方向にでているシマ模様はユレのためである。海況が悪く白波が一面に立つときなどは海面近くの気泡の存在のためにボトム・ソーナ記録は悪くなる。海況の悪いことはボトム・ソーナにも音探にもよくないがとくに前者に悪い。

音波探査では多重反射が観測されるのがふつうである。ボトム・ソーナでは測線の真下の海底からの2重反射が観測されることがある。超音波の指向性のローブの形から垂直下方にも感度の成分があるからである。しかし垂直下方以外からの2重反射に相当するような散乱波は実際にはレベルが低くて観測されず雑音レベルに埋れてしまうであろう。海底が傾斜しているばあいには昇り傾斜に向つて打出した超音波は伏角がかなり小さくても多重反射を起した後に送受波器にもどつてくるような波線の径路がありうる。しかしこれが観測されるかどうかには多くの疑問がある。(“浅い斜面”の項参照)

4.2 測線のとり方

ボトム・ソーナを音探と共同観測するばあいにその測線のとり方によつて記録の表われが変る点は注意を要する。音探である方向に傾斜をもつ地層やあるいはある方向にのびる海底の河床跡を調べるようなばあいには、地層の傾斜角がかなり急でないかぎり測線を構造に直交する方向にとるのがふつうである。それが構造の変化をもつとも適確にとらえるからである。

しかしボトム・ソーナのばあいには地形の構造方向に直交した測線は記録がみにくいことが多い。超音波を打

出した方向と地形の構造方向が直交するばあいに構造の変化に対する入射角の変化がもつとも大きくなるので記録がみやすい。測線は超音波を打出す方向と直交するから、構造方向と平行した測線がみやすい。

図版9は測線が砂連 sand wave にほぼ直交するいわばみにくいボトム・ソーナの記録である。これを砂連にそつた測線の記録にくらべると明らかにみにくい。

このように測線方向によつて記録の質に優劣がでることとはボトム・ソーナの調査区域で測線を定めるばあいに大切なことである。測線は地形構造に平行な方向の測線群を主としてとり、それに直交または交差する測線群を補足的にとるのがよい。地形構造と地質構造の方向が一致してボトム・ソーナと音探を共同観測するばあいには、主となる測線群の方向が違うのでその調査の目的や測線間隔から測線を定めることになる。

ボトム・ソーナで測線群を組むばあいには掃引幅、すなわち観測範囲が多少オーバーラップするように測線をとらねばならない。しかし音探のばあいには測線間隔にこのような制約はない。測線の間で地質の連続性あるいは相関性が考えられるかどうかという地質の規模の予想と調査目的が要求する精度と、調査の経済性から測線間隔を決めることが多い。

ボトム・ソーナと音波探査の共同観測が調査成果の解釈に対して決定的な意義をもつことはあるいは少ないかもしれない。しかし海底の調査の多角的な観点と経済性からみればばあいに、共同観測はなるべくした方がよいであろう。例えば地震探査・重力探査・磁気探査を同一調査地で併用したときに、成果の解釈に一致した傾向が生じようと相矛盾する結果が生じようとそれぞれの観点において意義のあることと似ている。

5. 結 言

ボトム・ソーナによつて海底地形を調査する技術は開発後の日も浅く経験もとぼしい。しかし今後の海洋調査の有力な手段の一つになることは間違いないところである。

本文では海中の超音波の伝播と散乱の問題、記録例をまじえた地形の記録上の変形や解釈の問題、ボトム・ソーナと音探の共同観測の問題などについてのべた。記録例に関しては調査例が日本の代表的な海底地形のすべてにわたっているわけではないので今後の調査に期待することが多い。とくに地形変化の少ない所での記録の向上は今後の重大な課題になるであろう。

日本周辺の内陸や大陸棚浅部の海底地形は5,000年前と考えられている沖積世高海面の時期以降に堆積的に形

成されたものが多い。同じ沖積統でも陸上の平野の地形と異り侵食的な要素が少なく地形変化が一般にはとぼしい。このような点が散乱という地形変化によつて起る現象を用いているボトム・ソーナの適用方法として難かしいところである。しかしとにかく海は日本列島をとりまわっている。海底地形の調査は今後も海洋地質のもつとも基礎的な課題の一つとして進めてゆかねばならない。

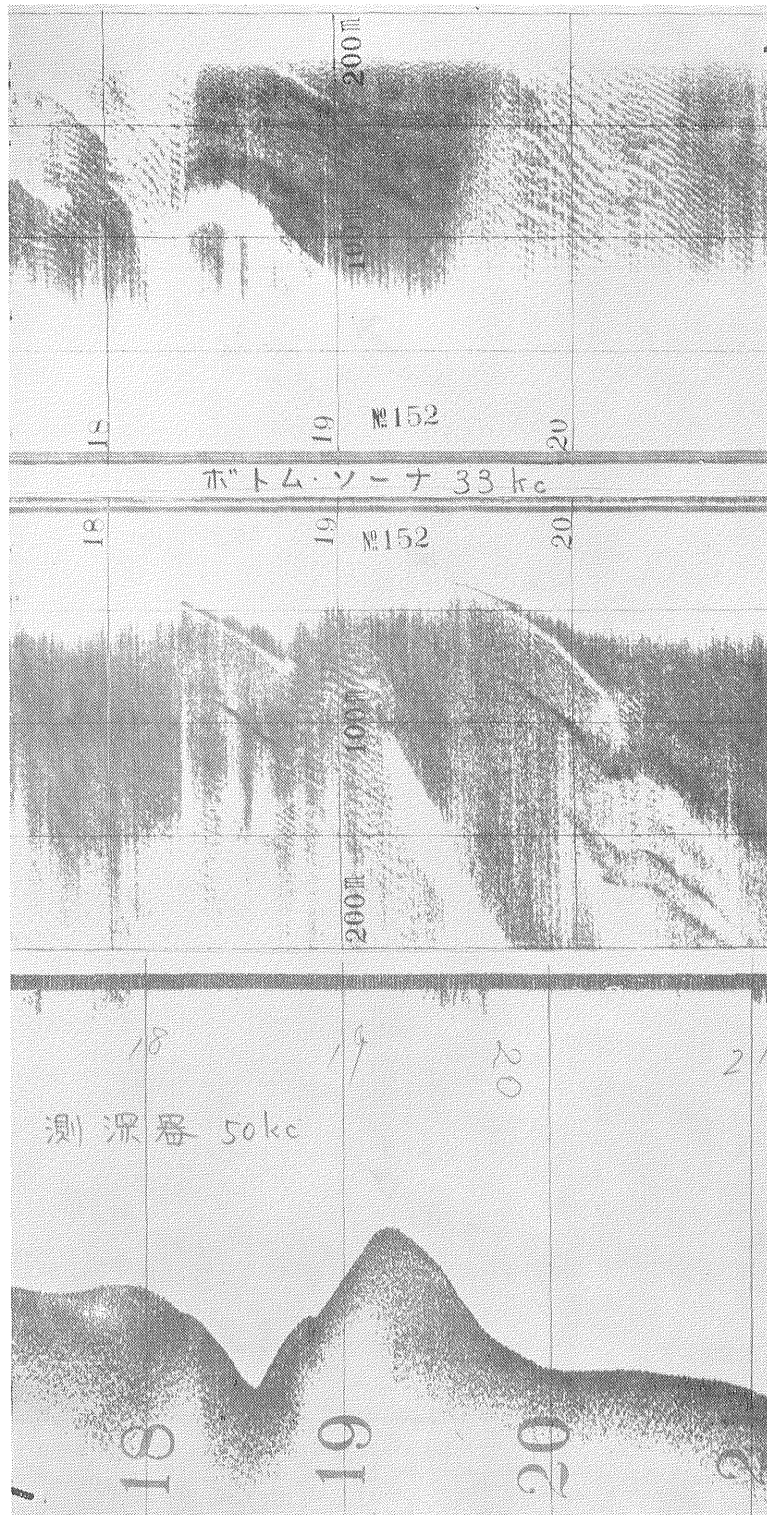
文 献

- 1) CLAY, C. S., J. ESS & I. WEISMAN (1964) : Lateral Echo Sounding of the Ocean Bottom on the Continental Rise. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 69, no. 18, p. 3823~3835
- 2) 中条純輔 (1965) : 海底面超音波探査装置の試作, 沿岸・大陸棚の特別研究報告書, 科学技

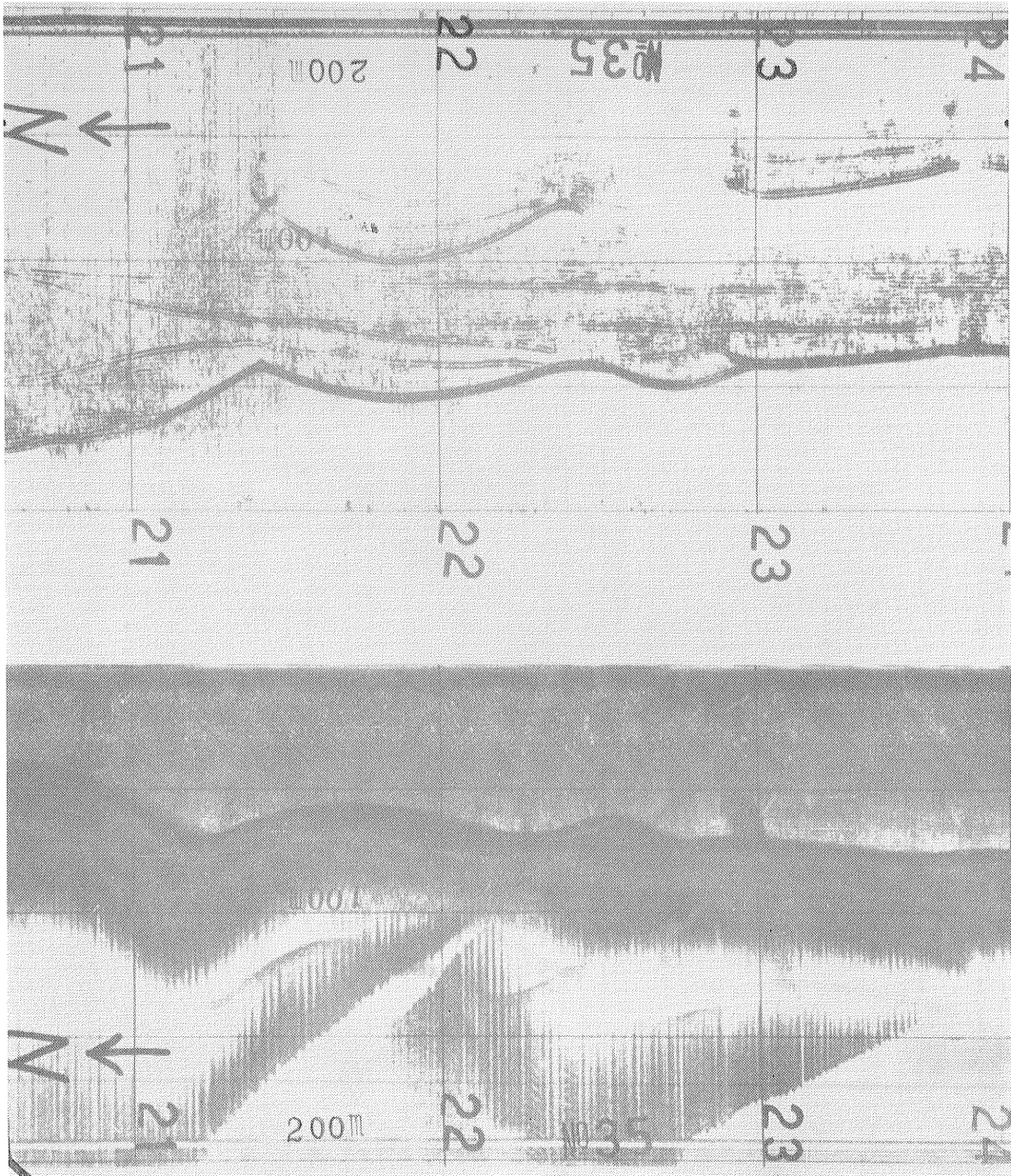
術庁研究調整局

- 3) 中条純輔 (1966) : ステレオ・ボトム・ソーナの研究, 沿岸大陸棚の特別研究報告書, 科学技術庁研究調整局
- 4) 中条純輔・高橋弘治 (1966) : ボトム・ソーナの開発, エレクトロニクス, vol. 11, no.3, p.286~292
- 5) 実吉純一他 (1966) : 超音波技術便覧
- 6) STUBBS, A. R. (1963) : Identification of Patterns on Asdic Records. *International Hydrographic Review*, p. 53~68
- 7) TUCKER, M. J. & A. R. STUBBS (1961) : Narrow-beam Echo-ranger for Fishery and Geological Investigation. *British Jour. Applied Physics*, vol. 12, no. 3

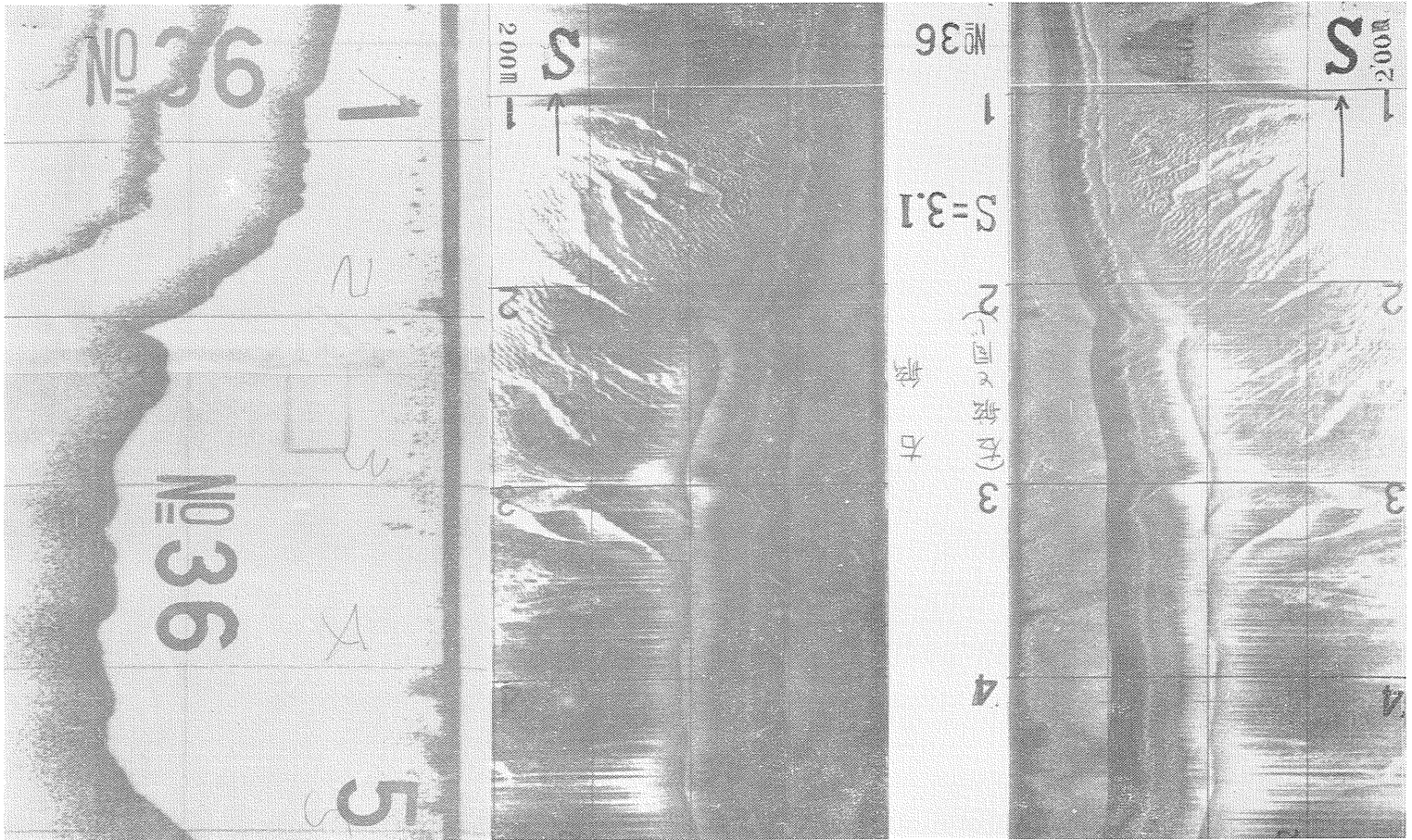
ボトム・ソナーの超音波の散乱と記録についで。(中条純輔)



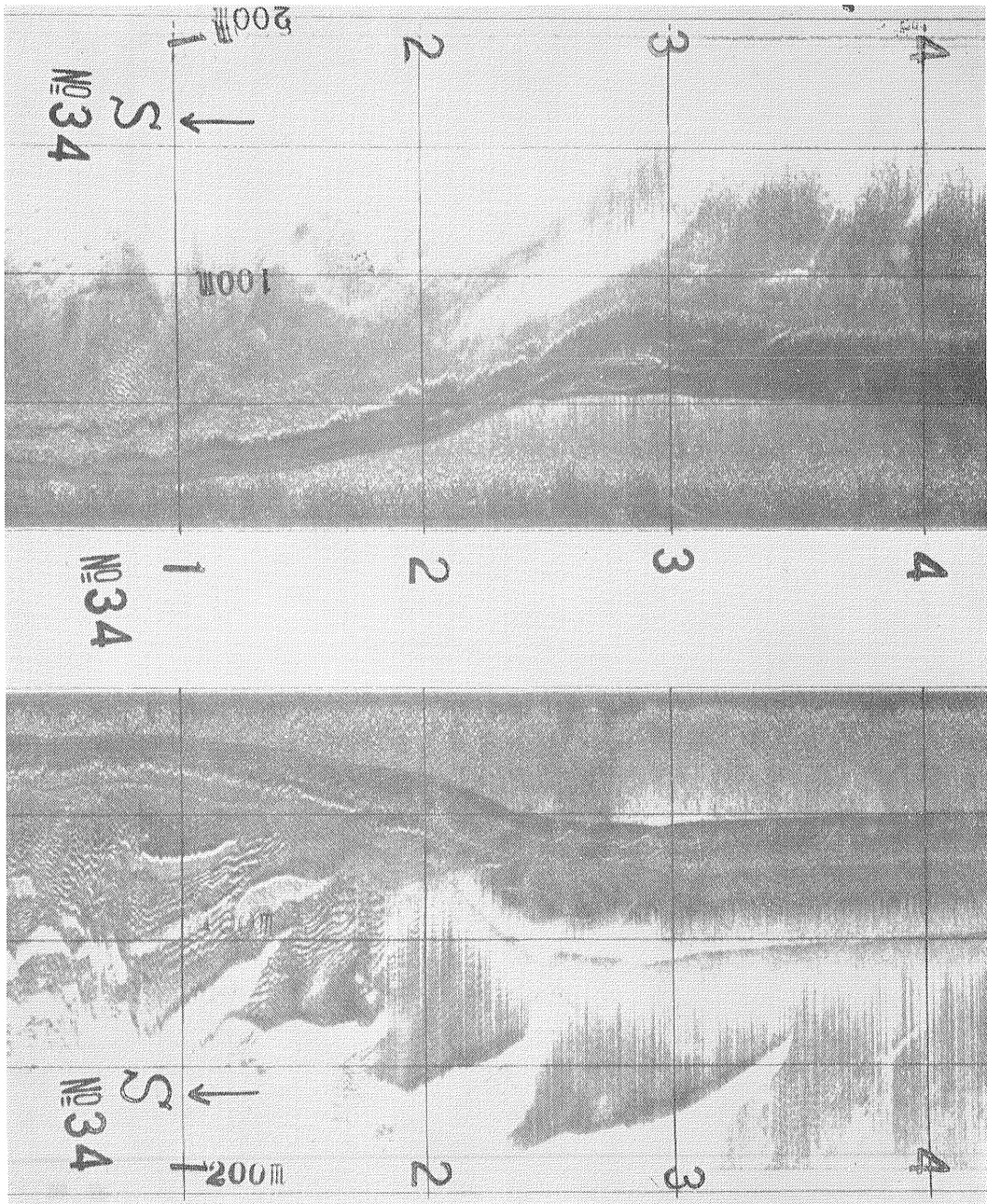
図版 1 ボトム・ソナー33kc左の記録と測深器記録 使用周波数33kc、掃引距離200m 瀬戸内海の直島沖の記録(No.152)
 海底には砂洲や砂連がある。左舷側に観測された砂洲の頂上(稜線)は双曲線状に延びている。砂洲の頂点は測深器の記録とも一致する。(ボトム・ソナーの送受波器は船から約20c 曳航しているのでズレがある。)この送受波器は鉛直下方への出力や感度がごく少ないので稜線真下の海底地形は記録にでない。



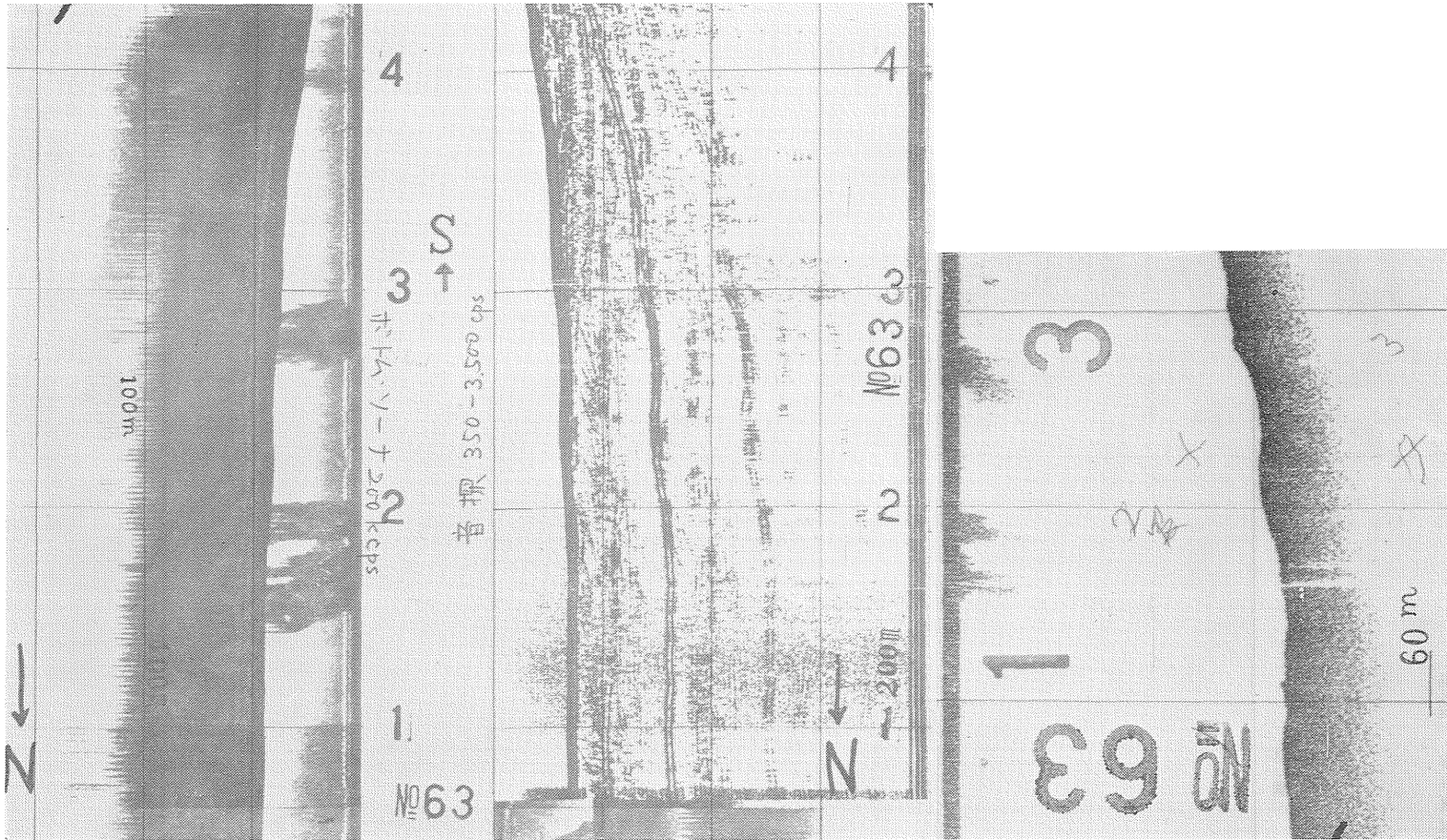
図版 2 ボトム・ソナー200kcと音探の記録 使用周波数200kc, 掃引距離200m
瀬戸内海の大槌島付近の記録 (No. 35)
ボトム・ソナー記録に砂洲が観測されていて、測線真下の砂洲に連なっている。砂洲の斜面からの散乱波は送受波器のユレのためにシマ模様になっている。記録上の黒い部分は超音波の散乱のあるところ、白い部分は散乱がごく弱いか砂洲の蔭など散乱波のないところである。本記録の垂直水平尺度比Sは1.8である。模式的説明図は第6図。



図版 3 ボトム・ソナーと測深器の記録 瀬戸内海の備讃瀬戸の大槌島付近 (No. 36)
 右舷側のボトム・ソナー記録, 両チャンネルとも同じ記録を書かせているが, 印画レベルが右の方が高い。左の方が適正なので記録がみやすい。ボトム・ソナー記録の水平垂直尺度比は 3.1 で測深器の記録の水平垂直尺度比は 13 である。測線直下の海底の形をみると測深記録の方が誇張されている。



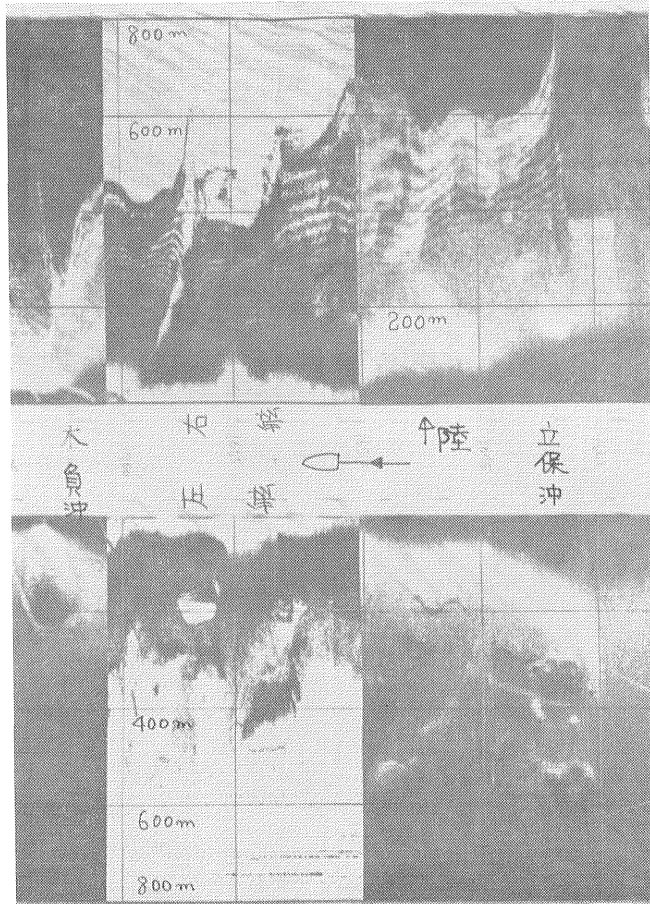
図版4 ボトム・ソーナの左舷と右舷の記録 備讃瀬戸の記録例 (No. 34)
左右両舷を観測すると発振を左右交互に行なうために掃引線が1本おきになって記録が粗くなる。記録が良いときは1本おきになっても見掛けがあまり変わらないが、悪くなるとかなり差がでてくる。



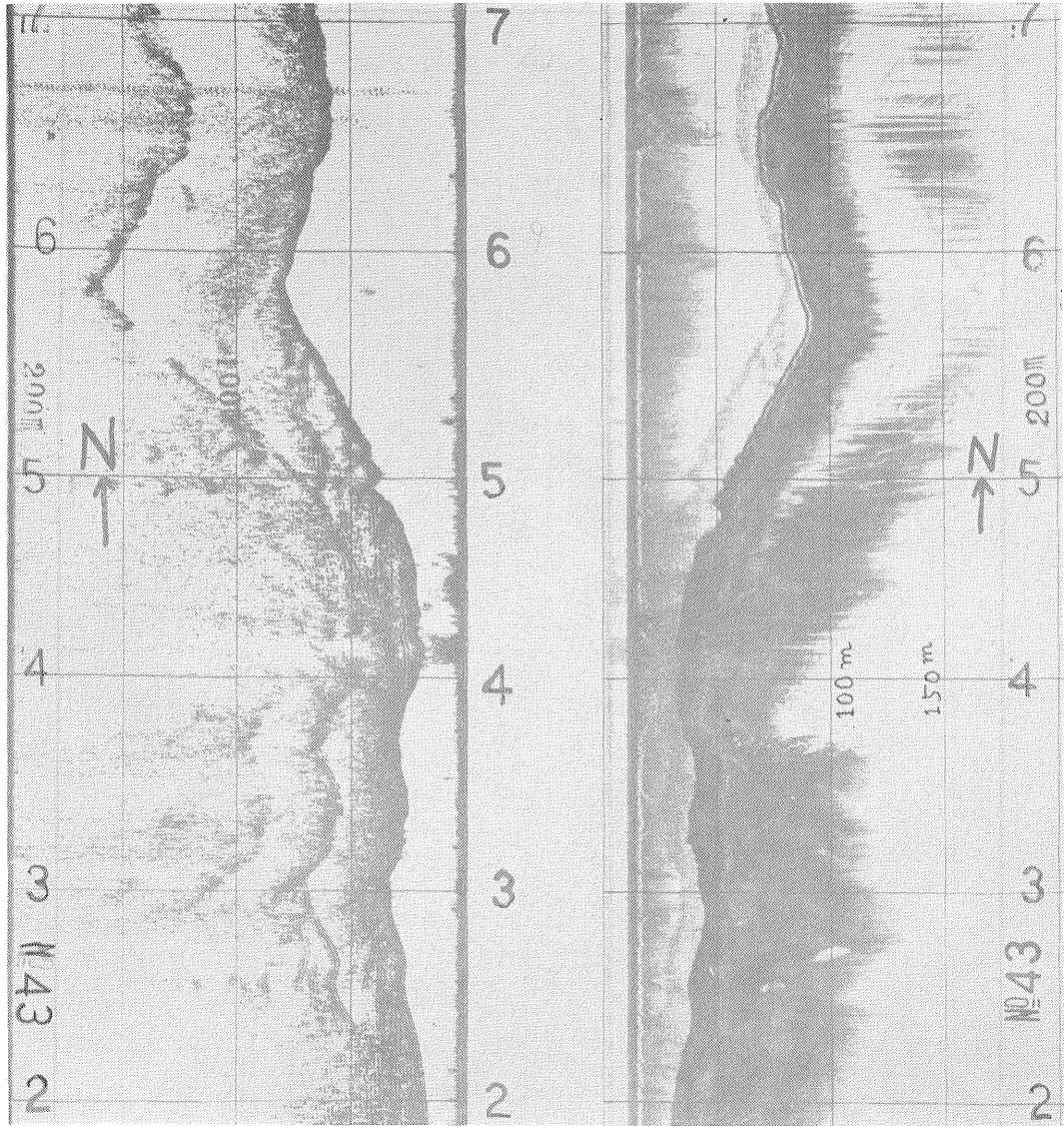
図版 5 ボトム・ソナーと音探と測深器による魚群の記録 備讃瀬戸の女木島西方 (No. 63)
 周波数はボトム・ソナー 200 kcps, 音探 350~3,500 cps, 測深器 50 kcps。
 ボトム・ソナー記録では魚群が測線の側方に広く分布していることがわかる。音探の記録には魚群はまったく観測されていない。
 測深器記録には海面の上方にだけ魚群が分布している。



図版 6 ボトム・ソナーによる航跡の記録 備讃瀬戸の日比の沖にて
 船の通つた航跡には気泡が残るためにボトム・ソナーで観測される。この航跡は時間とともに拡散して大きくなる。この記録には測線真下の2重反射や、測線側方の砂連も観測されている。模式的説明図は第7図。

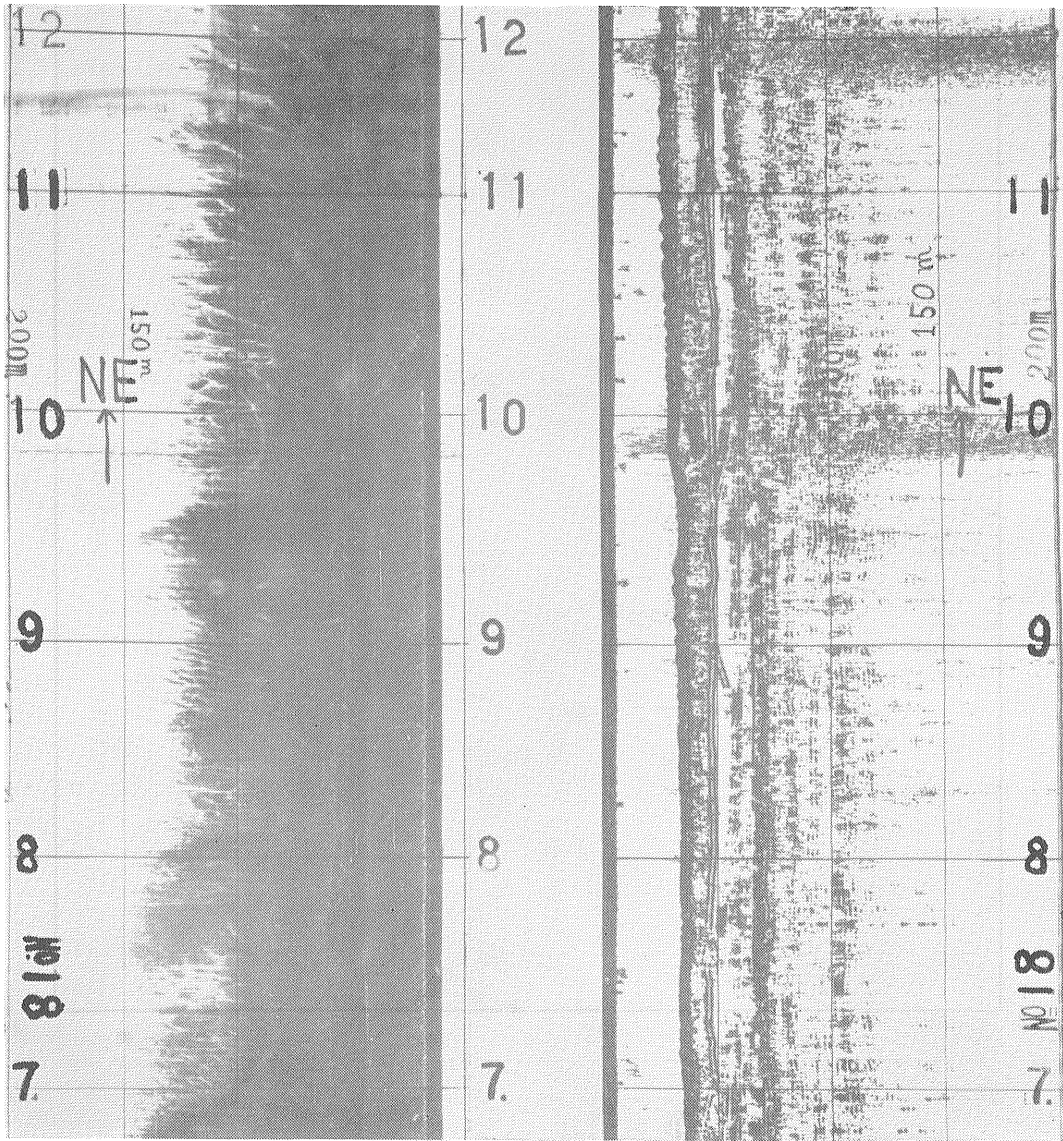


図版 7 ボトム・ソナーによる浅い斜面の記録 使用周波数 33 kc, 掃引 800 m, 観測範囲, 両側で 1,600 m
 駿河湾の三津の沖
 右舷側は海岸近くの緩い斜面で海底にシマ模様がでている。左舷側には海底に安山岩の堆がある。記録の始めの方は負変調で表示し、後の方は他の記録と同じく正変調で表示しているので濃淡の関係が逆になっている。



図版 8 ボトム・ソナーと音探の記録
備後瀬戸の大崎の鼻 (No.43)

音探記録を弱い結合でボトム・ソナー記録に重ねている。測線真下の記録が水平にも垂直にも合わないだけでなく、反射の形態も少し違っている。



図版 9 地形の傾向とほぼ直交した測線におけるボトム・ソナーと音探の記録。
備讃瀬戸の日比沖 (No.18)
海底表面には砂連がたくさんあり、音探記録は地形の細かい変化を表わしている。ボトム・ソナーの記録では砂連の形態があまりよくは表われていない。