

海 底 測 量

丸 安 隆 和*・村 井 俊 治**

ま え が き

人は長い間海の中の神秘を求めて海に近づき、海に親しもうと試みた。海面下、ほんの 2~3m のところでさえ、この世のものと思えぬほど美しく、珍しい世界が開けるのを知って、科学者、技術者、詩人らが、海の中に野心的な夢をいだいてきた。しかし、海のもつ条件は人間を相容れるには、あまりにもきびしかった。

人類は、いまや海の上から宇宙までを征服したにもかかわらず、海面下は 100m の深ささえも意のままにならないのである。

海の中の神秘を解きあかすために、あるいは海の中の様相を写真に記録する試みが続けられた。そのために、潜水夫が自分自身で、または潜航艇で海底に近づこうと試みた。しかし、海の中はあまりにも陸の上と環境が異なっていた。1枚の写真をとることでさえ呼吸の苦しさ、寒さ、圧力、重力の違和感、海流、そしてときには海の危害者と闘わなければならなかった。

しかし時代は移った。われわれは海底に埋もれる資源を追い、海の空間を利用するために、海に関連する、いろいろな現象を早急に探究しなければならなくなってきた。この論文は、これらの中で特に海底地形を知る方法についての問題を取扱ったものである。

1. 測 深 の 歴 史

広い海の水深を測ることは、目に見える陸地を測量することと異なり、常識的に考えても非常に困難な作業である。しかし、海洋開発がこれからますます重要な問題となり、土木施設や構造物が海中につくられる気運が高まってくると、海底の地形も、陸上と同じように十分な精度で測定することが必要となる。どんな点がむずかしいか、どんな点を今後解決しなければならないか、を特に土木用大縮尺地形図をつくる場合について考えてみよう。

海の測量は沿岸測量と海洋測量の二つに大別すること

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 東京大学講師 生産技術研究所

ができる。沿岸測量とは海岸からの距離が5カイリまでの海域を測量する作業であり、海洋測量はそれよりも外海の測量である。沿岸測量と海洋測量とは、測量目的が異なると同時に、使用する測量器械、船なども異なってくる。

二十数年前までは、水深の測定は、目盛綱におもりをつけて海中におろして測る投鉛法であった。すなわち、点の測深である。したがって、点と点の間は未測であり、その間の地形は、くわしくはわからないわけである。

昭和 25 年ごろから音響測深儀が急速に発達して、船が航走した海面下の水深が連続して記録されるようになった。すなわち、線の測深ができるようになったのである。しかし、音響測深儀の送受波器の指向角の性質上、測定される線の幅は水深 10m ぐらいのところを航走したとして、だいたい海底 1m 幅ぐらいの連続記録である。したがって、10m 間隔で航走させたとしても、線と線の幅約 9m は未測で残る。

昭和 38 年に、音響測深儀の送受波器を 4 本にして、各送受波器の幅を合成した幅のある測深記録が得られるようになった。すなわち、面の測深ができるようになったのである。これによれば、水深によって送受波器の角度を調整して一航線を測深すれば、その幅の中にある浅所とか異常点を記録することができる。そして、この場合の測深精度は $\pm 0.1\text{m}$ といわれる。

海洋測量では、精度の低い深海用測深機が昭和 10 年ごろから使用されていた。F 式音響測深機などはレシーバーを耳につけ、発信音を耳で聞くと同時に、海底からの反響音を耳でキャッチし、そのときの水深標示板の示す水深を目で読んだものである。1秒間に 1500m の速度の音波を目視で捕えるのであるから、数百mの誤差は当たり前で、水深 50m ぐらいになると、とうてい使用できるものではなかった。

3. 測深とその位置の関係

水深がいくら精度よく測定できたとしても、その位置が正確につかめなければ何の意味もない。測深位置を決定するという事は、すなわち、船の位置を決定することである。船の位置の決定には、光学的方法と電波によ

の方法とがある。光学的方法とはトランシットや六分儀による方法であり、電波法とは電波測位機によって位置を求める方法である。十数年前までは、すべてトランシットや六分儀によったのであるが、電波測位機の急激な発達によって、最近ではほとんど電波法が用いられている。電波法によると陸上の2基点からの距離が瞬間的にテープに記録されるので、即座に船位が決定できる。

4. 写真測量の可能性

いま、陸上の測量には写真測量は非常に大きいシェアをもっている。しかし、残念ながらこの方法は、いまのところ、そのまま海底測量に転用することは無理である。第一に、日本近海の海水はあまりにも汚れていて、2m先になると、もう光が届かないぐらいだからである。もし非常にきれいな海域があったとして、そこで写真測量を利用しようとする場合、解決しなければならない問題点が沢山ある。

(1) 水中写真の撮影方法

水中で写真撮影する場合には、所望の位置に正しい方向を向けてカメラをセットしなければならない。これには、Trigger方式とかPinger方式、Captive Vehicle方式など種々提案されているが、実用化するにはなお多くの厄介な問題をかかえている。

(2) 照 明

太陽光線は、水深を増すに従って急速に吸収されるので、海面下30mになると、ほとんど太陽光線はとどかない。したがって、海中撮影をしようとするれば照明は欠かせない道具である。

船の上から電気ケーブルを吊り下げることができる場合には、高電圧を要するタンゲステン電球の使用が可能である。ストロボおよびフラッシュランプはスチール写真をとるときには有効である。海中で吊下げ方式の水中カメラでは、めくら写しをすることになるので、多数の写真をとらなければならないが、この場合には、電気フラッシュが用いられる。

照明に必要な光量 BCPS は次の式で与えられる。

$$BCPS = D^2 A^2 \frac{C}{S} e^{2\alpha D}$$

ここに D : 照明と被写体の距離

A : カメラレンズの径

S : ASA フィルム感光度

C : 定数

α : 水の吸収係数

αD : 減衰率

いま $\alpha D=1$ とすれば、 $e^2 \approx 7.5$ となるから、大気中にくらべ光量が7.5倍必要になる。減衰率2の距離では、この値が55となり、距離が遠くなるに従い光量損失は急激に大きくなる。広い範囲の写真撮影のための照明は、きわめて困難といわねばならない。

(3) 水中カメラ レンズ

水中でカメラを使用しようとする、まず水密性を保つこと、カメラ内部の空気と水との接触面での屈折を考慮しなければならないこと、などの問題が起こる。光が水中から空中に出るときの屈折によって視界が縮小され一枚の写真にうつる範囲が著しく狭められること、被写体と像との対応が正しい中心投影の関係を示さなくなること、色によって屈折率がちがうので色収差が起こり、これを打消すためのレンズ組合せを考えなければならないこと、などの点が問題である。

(4) カラー写真の利用性

海中でカラー写真を撮影する場合には、白黒写真をとる以上にきびしい条件が課せられる。澄んだ海で撮影されたカラー写真は、一般に青色が優勢で実際より青味がかっている。プランクトンやシルトの多い海では、緑や茶が色調の主体となる。

水の中を通ると赤色が最も早く吸収され、6mで消える。次に、オレンジ、黄の順で緑色はかなりの距離まで残る。22mも離れると血は緑色になる。

照明も色彩に関与する重要な道具である。被写体に近づけて青いフラッシュ電球による電子フラッシュを用いると太陽光線の色温度に近づく。

(5) 航空写真を用いて海底をさぐる

飛行機から写真をとった場合、どのぐらいの水深まで海底の状況がうつせるかは、水がどのぐらい澄んでいるかによって左右される。非常に静かな海面であれば、従来15mぐらいまでは可能である、という報告があるが、日本の近海では、まずここまでは行かないだろう。カラー写真の場合、黒白写真よりも深いところまでうつせるというが、これも20mが限度とされている。

海底をうつした航空写真から地図をつくることはむずかしい。光が水から空中に出るときの屈折のために、先にも述べたように、被写体と像の対応が乱れて、普通の図化機に、そのままかけることができないからである。

このような多くの問題のほか、標定点の設置など困難な問題が多く、広い範囲にわたる海底地形を写真を用いて測量することは、現時点では、実用的には不可能に近いといつてよいと思われる。

5. 超音波の利用

海の中と地上の環境を比較して最も著しく異なるもののひとつに、海の中では電波および光がほとんど通らないことがあげられる。人間文明の発達にきわめて大きな貢献をしてきた電波は、海の水を媒体とする限り、何の役にも立たない。海の中に入った人間は、暗黒で重圧におさえこまれて、エレクトロニクス以前の文明さえつくり出せないのが現状である。

水の中では、音による通信が有効であることは、かなり前から知られていた。海の中では、人間の目となり、耳となり、口となるものは、現在のところ音を利用する以外なさそうである。

水の中での音は、実にさまざまな特性をもっている。音の特性をうまく利用することによって、数多くの海の中の様子をさぐることができる。魚の群や潜水艦を発見したり、海の深さを測定し、海底地質をさぐるのに用いられている。しかし、陸上での電波や光ほど水中での音波は万能ではない。音波のもつ不完全さに対して、われわれは、これから多くの試みと、くふうをしなければならないのである。

(1) 超音波の特性

人間の耳は 16 Hz より低い超低音と 20 000 Hz 以上の超音波 (Hz は 1 秒あたりの周波数) は聞くことができない。

超音波は、単に聞こえない音波ということのほかにも多くの特徴をもっている。そのうち、大きい特徴は次の三つである。

- ① 媒質は、気体よりも液体、固体であることが多い：超音波のもつエネルギーは気体中で最も多く吸収され、液体、固体の順に少なくなるからである。
- ② 周波数が高く波長が短い：超音波は障害物があると、光と同じように音の影をつくる。すなわち、光束と同じように超音波は音のビームをつくり、エネルギーを集中させることができる。
- ③ 強度が著しく大きい場合が多い：人間が大声で話

表-1 音の伝播速度

媒質		温度 (°C)	弾性波速度 (m/sec)
気体	空気	0	331
	空気	20	343
	炭酸ガス	0	259
液体	淡水	17	1430
	海水	17	1500
固体	鋼	20	5800
	アルミニウム	20	6400

すときの音の強さは 1 W/cm^2 の 10 億分の 1 程度といわれる。人間の耳の面積は二つあわせて約 1 cm^2 なので 1 W/cm^2 の 10 億分の 1 でも、かなり大きい音となっている。人工的に起こす超音波では 1 cm^2 あたり数十から数百 W の強さにすることが可能である。

(2) 海水中の超音波の伝播と反射

音波の伝播は、球面波の伝播と考えられる。したがって、吸収されたり減衰しなければ音の強度は距離の 2 乗に反比例する。実際には、音波は媒質に吸収され減衰するので、さらに弱くなる。海中での減衰の状況を図-1 に示した。

海中での音波の伝播は、水温や水圧などの変化によって影響を受ける。

図-1 海中での音波減衰

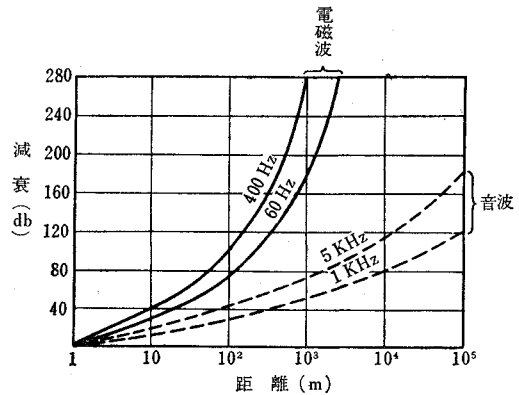
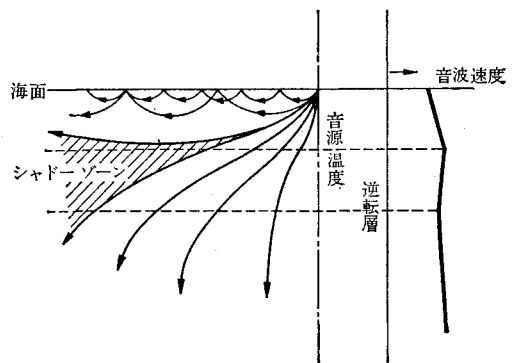


図-2 海中での音波の伝播



実際の海では、表面と海底では水温が異なるので音速は様でない。図-2 に示すように 600~1 200 m のところに温度の逆転層があり、そのため音波の伝わらないシャドージーンが生じる。海中に放射された超音波は海底または海中の固体または海面の気体など、媒質が異なるものに出会うと、そのほとんどが反射される。反射する物体の形質によって反射率が異なったり、乱反射されたりする。したがって、反射のパターンを見ることに

よって反射した物体の性質を知ることができる。

6. ソナー (SONAR) の種類とその利用

ソナーとは Sound Navigation And Ranging の略語で、最初は航海の目的に発信した音波が反射してくるのを観測する水中装置をさして用いたが、最近では一般に水中観測のための音響エネルギーを使用するシステムを総称するようになった。すなわちソナーは、測量、測探、連絡、探知などの目的のためにつくられた水中音響機器の総称と考えてよい。ヨーロッパでは、ソナーといわずアスディック (ASDIC) と呼んでいる。

(1) ソナーの種類と利用方法

使用する目的、観測する対象、測量距離や範囲、音波を送受信する方向などにより、使用する音波の特性や周波数および利用方式が異なる。

現在までに使用されたソナーを分類すると表-2 のようになる。いわゆる測深のために利用するのは Active Sonar で、垂直方向に音波を発射し、海底からの反射音をとらえ、距離を求める方式のものである。

表-2 ソナーの分類

分類方法	ソナーの種類	
送受信の形態	1. Active Sonar 2. Passive Sonar	送受信 水中から発信される音波を受信して、その音源の位置や方向を知る
送受信の方向	1. 垂直ソナー 2. 水平ソナー	海面付近の温度変化による変化は少なく、伝播特性がよい 海面近くの影響を受けやすく、機器も大型化
超音波ビームの使用方式	1. 単ビーム方式 2. 複ビーム方式 3. 走査方式	(ボトムソナー、サイドスキャンソナー、サイドルッキングソナー、PPI ソナー)
探査目的	1. 魚群探知機 2. 深海用ソナー 3. ヘドロ層探知ソナー 4. 海底構造探査ソナー 5. 障害物探知ソナー 6. 航海用ソナー 7. 観測用機器	ドップラーソナー 音響ブイ、ピンガートランスポンダー、水中ビーコン

単ビーム方式は、指向性のある音波を用いて目標物を線状に探知する方式で、測深機として使われる垂直ソナーはこの方式がほとんどである。船を航行しながらこの方式を用いれば、線状に断面図が得られる(図-3)。

複ビーム方式は、図-4 に示すように一列に多数個配置した送受信器により多数の断面を一時に測量しようとする方式である。この方法を音響掃海測量と呼ぶ。図-5 はその記録である。

走査式にはボトムソナーとサイドルッキングソ-

図-3 単ビーム方式の模式図

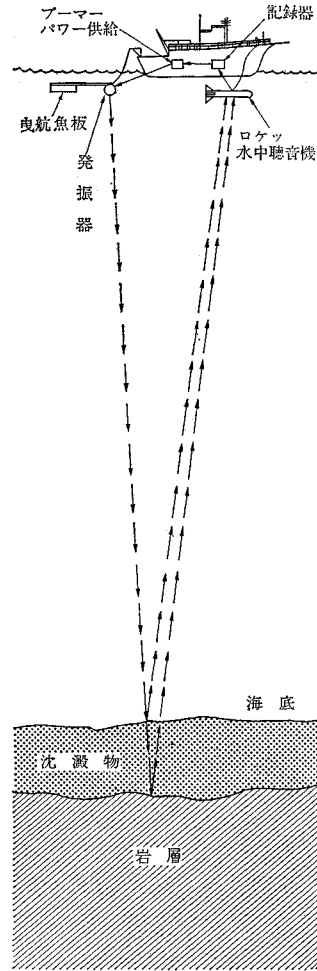
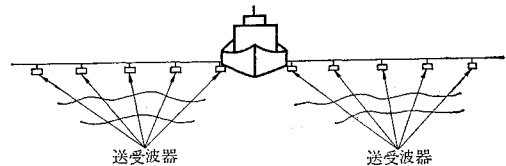


図-4 複ビーム方式の模式図



ナーとある。これは 図-6 (1) のように船の進行方向に対して左右の海底の形状を二次元的に連続して探知する方法と 図-6 (2) のように垂直軸のまわりに回転させて円形状に探知する方法とある。他の方法とくらべて格段に広い範囲を探知できる長所がある。得られる情報はブラウン管上か記録紙上に明暗の像として記録されるが、これを正確に読み取ることがむずかしい。

(2) 音波探査機によるヘドロ層調査

100 kHz 以上の音波測深機はヘドロ層からも反射を得

図-5 記録例

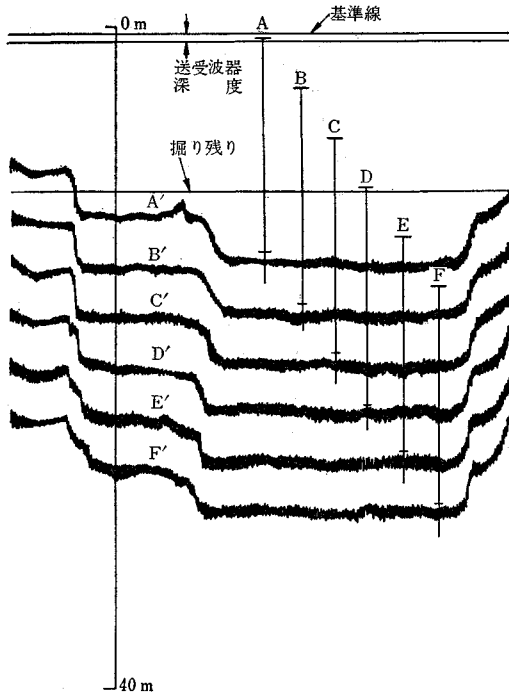
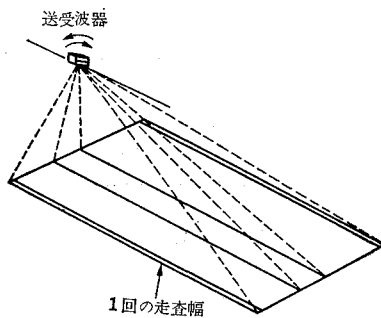
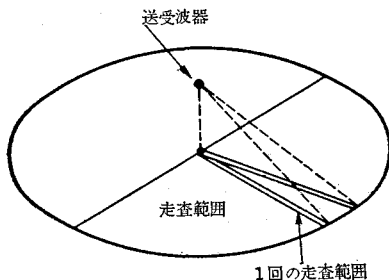


図-6

(1) 連続して探知する方法

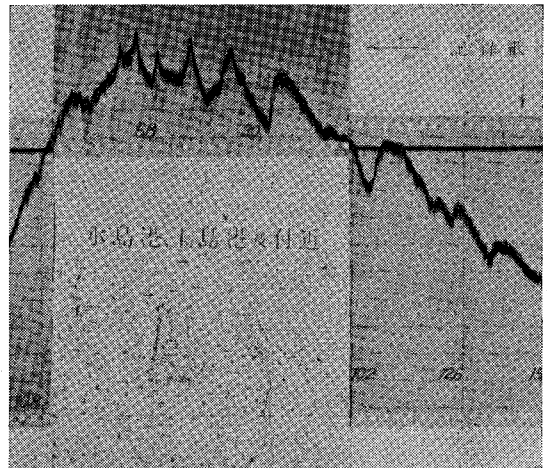


(2) 回転させて円形状に探知する方法



ることができる。20 kHz 以下の周波数による音波はへドロ層を通過し硬い岩底から反射するので、これからへドロ層の厚さを測定できる。写真-1 は測定記録の一例である。

写真-1 測定記録例



7. ソナーによる精密海底地形測量の問題点

主として港湾内航行の安全を確保するために行なわれてきた海底測量は、ほぼその目的を達するまでに発展した。しかし、最近計画されている海中土木構造物の設計を行なうためには、陸上で行なわれる程度の地形測量が要求されるようになった。すなわち、この目的のためには、少なくとも深さ ± 50 cm、で水平位置でも 1.5 m 程度の精度を必要とするであろう。

このような精密な海底地形図をつくるには、従来の方法に、さらにもう一つ工夫を加えなければならないだろう。このとき生ずる問題点には、つぎのようなものがある。

(1) 測深精度

音響測深機を用いて測深する場合の誤差には、次のものが考えられる。

① 反射波によるもの：超音波の周波数と海底地質、たとえばへドロか砂かによって反射する層が異なる。反射波は海底の小面積からの反射である場合が多いから、海底の形と記録像との非対応、さらに航行中のローリングやピッチングによって反射音波が垂直方向でない場合には、斜め方向の水深が測定される。

② 記録機構によるもの：たとえば記録器のペンの瞬間変動によるブレが起こる。

③ 設計音速によるもの：ほとんどの音響測深機は音速を 1500 m/sec として設計しているが、水温、密度、圧力によって音速が異なる。

④ 航行中のピッチングおよび潮汐によるもの：海上保安庁水路部では、水深をその付近での最も潮の引いたときの海面を 0 m として表わしている。この基準面は

関門海峡地域でも数個あり、実測しているときの位置の潮位を正確に知ることは非常にむずかしい。ピッチングによる誤差も大きい。

⑤ 超音波の屈折によるもの：超音波は、発射する方向、水圧、密度により屈折する。このため測距離の誤差が生ずる。

(2) 位置ぎめと水深測量との連動

地形図は、深さと位置とが同時に決定されなければならない。ソナーで測深したとき、その平面位置をリアルタイムで決めるには次の2つの方法がある。

① 陸上の数箇所の測量基地と船との距離、あるいは角度を電子技術により自動的に読み取り、それらの値を船に積み込まれたコンピューターに入力することにより、測深された時刻における平面位置を計算する方法：この方法は、ロランやデッカと呼ばれる電波利用方式の位置決めの方法に取り入れられているが、精密海底地形測量を行なうためには少なくとも1m以内の誤差でおさまるように、開発を進めなければならない。

② 海底の既知点にトランスポンダーやピンガーなどの超音波発信器をいくつかすえ付け、測深の記録のときにそれらの超音波を同時に受信して、それらの位置からの距離を知り、受信器の位置を求める方法：この方法は既知点の位置や受信像の解析など、まだ多くの解決すべき問題が多い。しかし、いずれ海底にこのような基準点を設置することが必要となるにちがいない。

(3) 解像度

ソナーから得られる海底地形の像の解像度は、われわれが通常用いている写真にくらべ、一般にきわめて悪い。そのため、像のパターン認識をする技術が必要である。解像度をあげるためには高周波にすればよいが、前にも述べたように、高周波の超音波は吸収減衰が激しいので、距離が短くなければならない。また、反射音が海

中の騒音や雑音に打ち消されない程度に感度をあげる必要がある。いいかえれば、ソナーによる探知距離の限界は、海中の雑音と反射音が区別できる深さであるということができる。

また、海底の地形や地質によって反射のされ方が異なる。乱反射が大きいと像は鮮明にならない。

このように、像の読取りと像の不鮮明なことの問題は精密測定のためには解決すべき重要な問題といえる。

8. ソナーによる測量に関して将来行なうべき開発研究の目標

精密海底地形測量を行なうために、ソナーはきわめて有力な武器であることは確実である。しかし、たとえ精度のよい測深用ソナーがつくられたとしても、位置ぎめが不確実では役に立たない。将来、開発すべき第一の大きい問題は、ソナーの改良とともに、海底の三次元精密測定を可能にするような測量システムを確立することであろう。すなわち、いかにして広い範囲の多量の海底地形データを正確かつ迅速に取り出すかということ、それらの海底地形情報をいかに速く処理するか、を研究することである。

第二に、海底地形に関する判読技術の開発研究が必要である。海底の地形や植生は陸上のそれと全く異なる様相を呈している。堆積物や浮遊物や漂砂など、土木構造物の設計や施工に重要な影響を及ぼす海底の諸動態を知ること重要である。

宇宙を駆けめぐる人工衛星を追跡することは、すでに完成された技術となった。しかし、地球をとりまく海に関しては、いろいろな点で宇宙とはくらべものにならないぐらい困難な問題がきわめて多い。

【追記】この論文は“海底測量と技術の研究会”の機関誌 USEA から抜萃したものである。関連のある文献は USEA に数多く記載されているので、同誌を参照されたい。

海洋開発シンポジウム講演集

1970年4月18日開催のシンポジウム講演集の残部(80部弱)を頒布中です。本特集子の骨子となった資料ですから併読下さい。

記

体裁・頒価：B5オフセット印刷 42ページ 500円(〒50円)

申込方法：土木学会あて代金および送料をお送り下さい。
