

新しい分野に対するサイドスキャンソナーの 適用についての考察

松村謙一・松前泰博

Consideration of New Applications of Side Scan Sonar

Ken-ichi MATSUMURA and Yasuhiro MATSUMAE

Abstract

Underwater acoustic instruments are often used for topographical surveys of the seabed and to detect obstacles or the other targets on the seabed.

Side scan sonar is one of these instruments, which is characterized by its narrow horizontal beam width and gives plane figures of the seabed. Since developed in 1960's, the side scan sonar has been used in various fields, as geology study, cable and pipeline location, wreck location, fishery applications, military applications, and so on.

So far, the data obtained with the side scan sonar is an image of the seabed or some targets, that is qualitative information. Because of improvements in the performance of the sonar in recent years, however, it has become possible to get photographically vivid sonar records and to extract some quantitative information as the size of the targets or the water depth from the records.

Since we can get such quantitative data, new applications of the side scan sonar, for example engineering surveys or underwater archaeology, can be expected.

1 まえがき

海底地形や海中あるいは海底の障害物などの調査の手段として、音波を用いる方法が広く利用されている。

たとえば、魚群探知機あるいは音響測深機と一般に呼ばれているものは、いずれも水中に音波を発信し、音波が魚群あるいは海底面に当たってもどってくるまでの時間と音波の強さを計測することによって、魚群の位置や分布範囲あるいは水深を把握する機器である。

サイドスキャンソナーは、いわゆる水中音響機器の一種であるが、発信に用いる音波のビームに横方向の鋭い指向性を持たせることによって、海底面の状況を平面的にとらえることができるという点に大きな特徴を有している。

海底面を平面的に把握するという手法は、1950年代後半に、英国において海底面における音波の散乱を利用し

て海底地形を調査したことに始まる(Chesterman, ほか 1958)。

実際のサイドスキャンソナーは、1960年代前半に英国で開発され(Tucker ほか, 1961), 1960年代後半には実用的なシステムが市販されるようになった。

その後、技術の発展に伴ってサイドスキャンソナーは急速に普及し、海底地形調査、沈没船・墜落機などの搜索、海底ケーブル・パイプラインの敷設に伴う海底地形および敷設状況調査、漁場の地形・地質調査、魚礁設置状況調査、機雷探知などの分野に主として利用されてきた(Flemming ほか, 1982)。

さらに近年、海底の小さな対象物までも検出できる高分解能のサイドスキャンソナーが開発され、今後は、その適用分野がさらに大きく広がることが期待されている(Key, 1984)。

以上のような状況を踏まえ、土木分野や水中考古学の

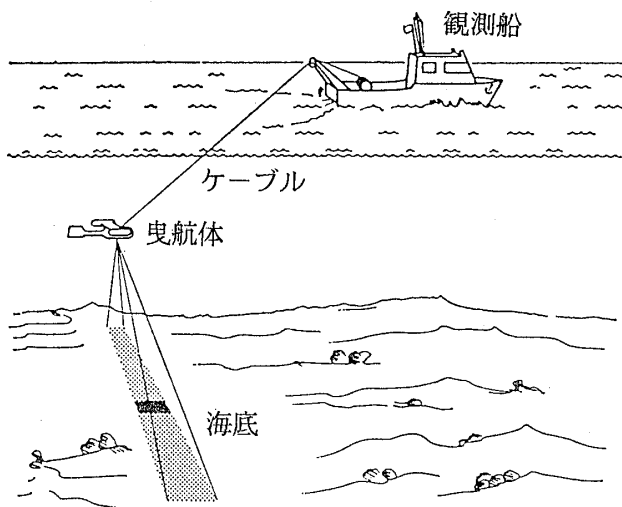


図-1 サイドスキャンソナーの測定概念図

Fig.1 Basic concept of the side scan sonar technique

分野などへのサイドスキャンソナーの適用の可能性についての考察を行った。

2 サイドスキャンソナーの概要

2・1 サイドスキャンソナーの原理

サイドスキャンソナーは、図-1に示すように、水中に吊り下げた曳航体の左右両側からそれぞれ斜め下方

向に扇状に広がった超音波パルスを発信する。この音波が海底に当たると、海底の凹凸部などから反射して、音源に近い海底部分から順次曳航体にもどってくる。曳航体にもどってくるまでの時間から算出される距離とその信号の強さから、海底の地形や凹凸などのプロフィールを平面的な濃淡イメージ記録として描くことができる。

2・2 サイドスキャンソナーの記録

サイドスキャンソナーにおいては、曳航体の左右の側面に音波の発信および受信を行うトランスジューサが取付けられている。曳航体の進行にしたがって所定の時間間隔で音波を発信し、そして反射波を受信することによって、図-2に示すように、曳航体の航跡位置を中心にして左右両側の海底の濃淡イメージ記録が記録紙に描き出される。

図-2に示した記録は、測定範囲（探査レンジと呼ばれる）を片側あたり100mに設定し、海水中の音速を1500m/secとして、音波の発信から受信までの時間を距離に換算してプロットしたものである。また、この場合の探査レンジ100mとは、海水中の曳航体の位置から斜め下方向に海底までの直線距離が100mまでの範囲のことである。

この記録に現れている濃淡は海底の各部分から反射し

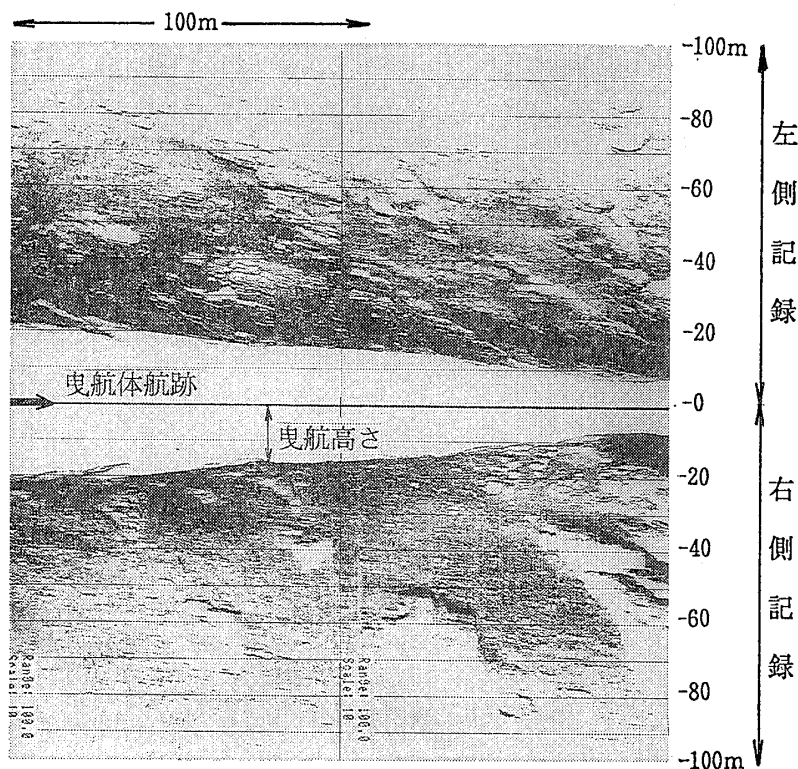


図-2 サイドスキャンソナーの記録の例

Fig.2 Example of side Scan sonar record

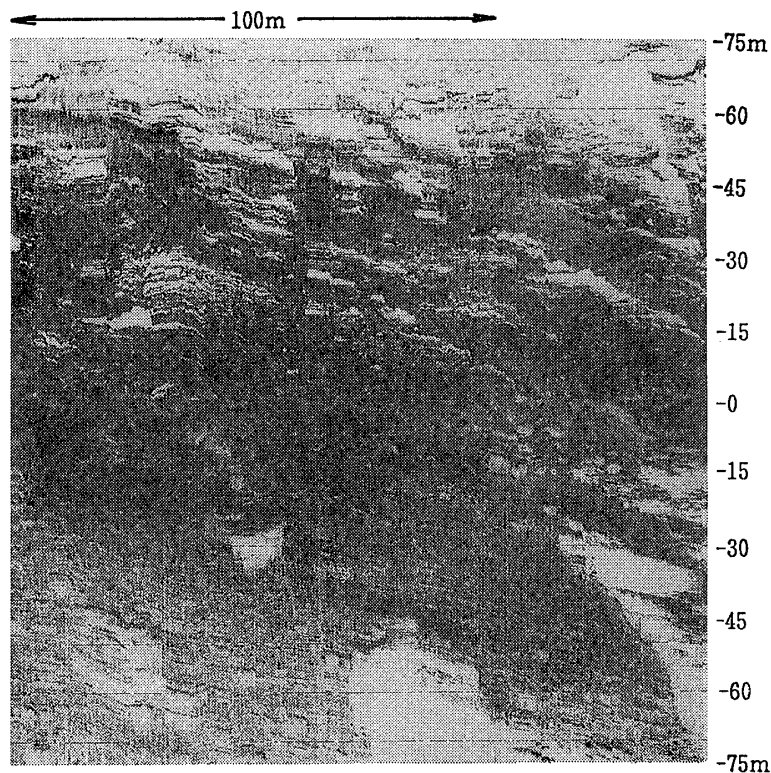


図-3 斜距離補正を施したソナー記録の例
Fig.3 Sonograph with slant range correction

てきた音波の強さに対応したものである。すなわち、濃い部分は反射してきた音波の強いところであり、薄い部分は反射してきた音波の弱いところである。また、白い部分は、その手前にある凸部に遮断されて発信音波が到達していない部分、いわゆる陰の部分である。この白い部分の形から凸部の形状を推定することができる。

また、曳航体の航跡位置に平行する形で白い帯状の部分が見られる。これは曳航体のトランスジューサから発信された音波が最も近い反射面で反射し、曳航体にもどってくるのに要した時間に相当する部分である。したがって、連続した濃い記録の現れる最初の部分は、一般的には、曳航体直下の海底面から反射してきた音波によるものと考えられている。すなわち、この白い帯状の部分の幅は、曳航体から曳航体直下の海底面までの深さを表すことになる。

しかしながら、ある範囲の海底地形の平面的な広がりのみを調査対象とする時は、上記の曳航体から海底面までの深さを表す白い帯状の部分は不要である。このような場合には、曳航体から各点までの直線距離(斜距離)で表わされている生データを、曳航体直下の海底を基準とした水平距離に補正する操作(斜距離補正と呼ばれている)を行う。この補正によって、図-1)2)に示した記録上から水深を示す部分が除去され、図-3)に示すような

水平距離によるソナーイメージ記録が得られる。

反射してきた音波の強さは、海底の地形や底質などに大きく依存しているため、記録に現れた濃淡の分布状況から海底面の状況を推定することが可能になる。たとえば、図-3)に示されているような濃淡分布の場合には、岩盤が露出している海底と推定されている。

2・3 サイドスキャンソナーの装置

装置の一例として、クライン社の HYDROSCAN 590 を写真-1)に示す。また、そのシステム構成を図-4)に示す。

このシステムは、つぎのような特徴を有している。

① 2つの周波数の音波による同時測定。

このシステムでは、100KHz と 500KHzの2つの周波数の音波による測定が同時にできる。

一般に、物質に対する音波の反射の強さは、その周波数によって異なる。したがって、2つの周波数の音波を用いて測定することは、目標物に対する検出能力を高くすることができ、また、測定記録を解釈する上で有効である。

② 探査分解能。

探査分解能を大きく左右する要素は発信音波の水平ビーム角の鋭さである。この角度が小さいほど、

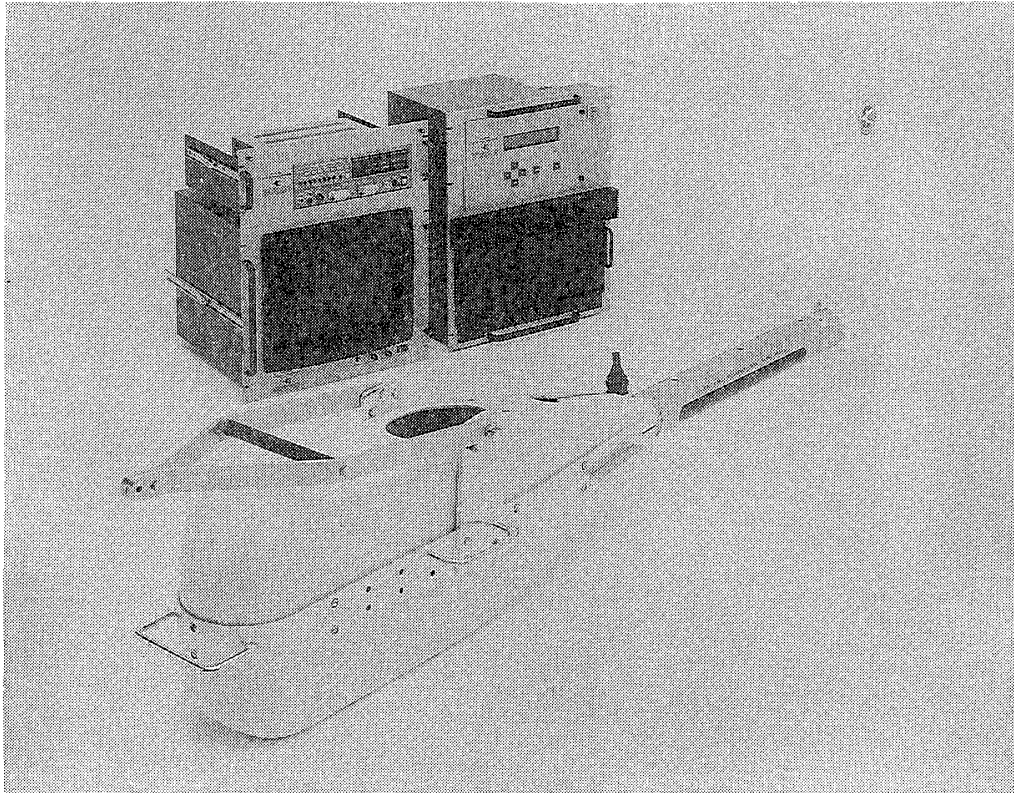


写真-1 クライン社製 HYDROSCAN 590システム
 Photo-1 Klein HYDROSCAN 590 side scan sonar system

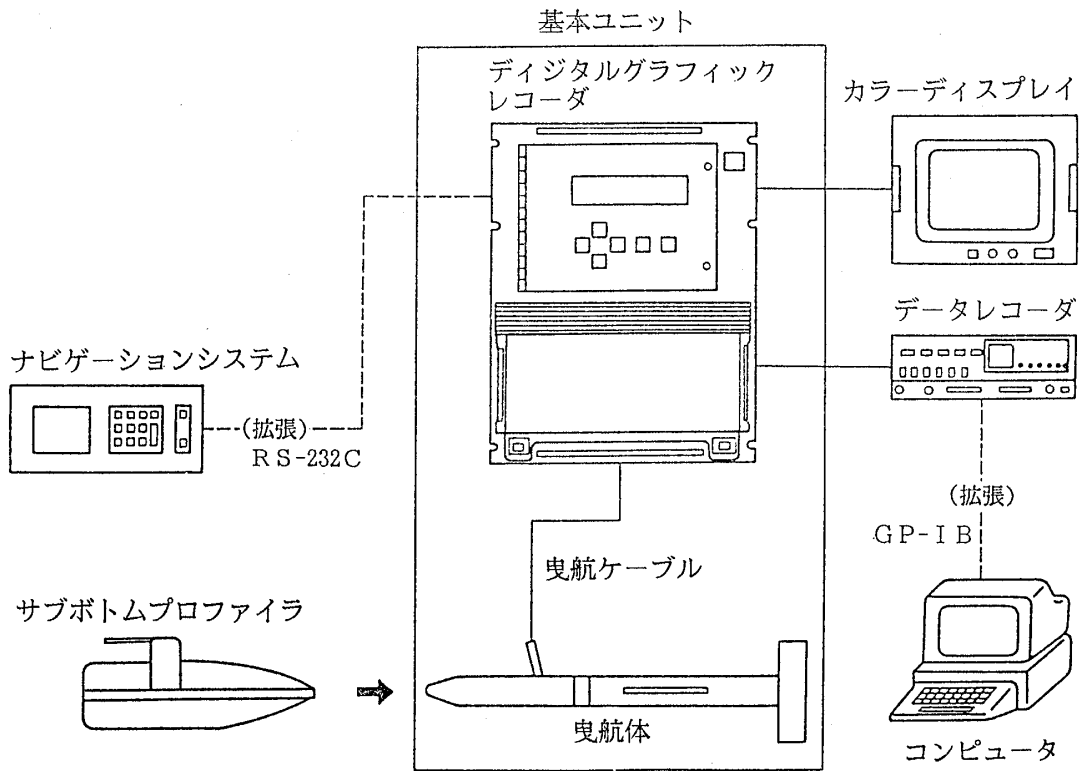


図-4 HYDROSCAN 590システムの構成
 Fig.4 Typical system configuration of HYDROSCAN 590

対象物の形が明確になり、また、その位置を正確に測定することができ、詳細な情報が得られることになる。

このシステムでは、音波の周波数が100KHzの場合は1°、500KHzの場合には0.2°という極めて鋭い水平ビーム角となっている。

③ 測定可能範囲。

サイドスキャンソナーは、曳航体に付けられているトランスジューサから発信された音波が、海底において反射してトランスジューサにもどってくる信号を測定するものであるが、遠くからの受信信号ほどそのエネルギーは小さい。このために、測定可能範囲はシステム全体のS/N比の大きさによって制約される。

このシステムにおいては、曳航体内部に高性能のプリアンプを使用し、さらに曳航ケーブルにシールド線を使用してノイズを抑えるなど、システム全体においてS/N比を改善する工夫がなされており、測定範囲は100KHzの場合には片側最大500m、500KHzの場合には150mとなっている。

④ サブボトムプロファイラとの同時測定。

曳航体の先端部にサブボトムプロファイラ（発信周波数3.5KHz）を取り付けることによって（写真-1参照）、サイドスキャンソナーによる測定と同時に、曳航体直下の地下構造断面をも併せて測定することができる。

3 サイドスキャンソナーの利用の現状

海底地形の調査や海底面上の物体の位置の確認などの手段として、サイドスキャンソナーが広く利用されている。サイドスキャンソナーの主な利用状況は表-1に示す通りである。

3・1 海底地形調査

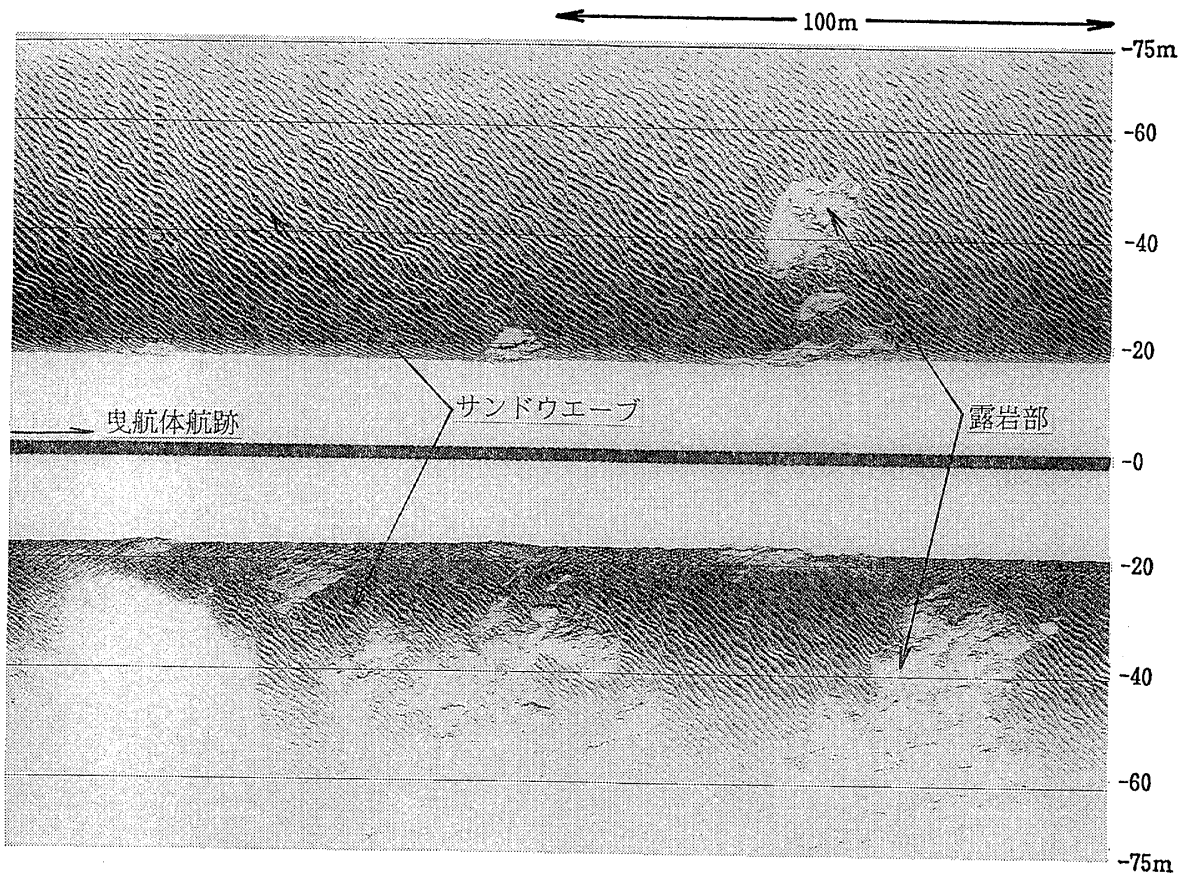
海底から反射してもどってくる信号の強さは、その地形や底質などによって異なる。一般に、反射してきた音波の強さは柔らかい砂・粘土よりも堅い岩の方が強く、また、粒子の細かい粘土よりも粒子の粗い砂の方が強い。

一方、海底面に凹凸があるとき、凸部からの反射波はその形や物質の性質に応じた強度で受信されるが、この凸部の陰になっている凹部には、発信音波が到達しないために記録上は白い部分として現われる。

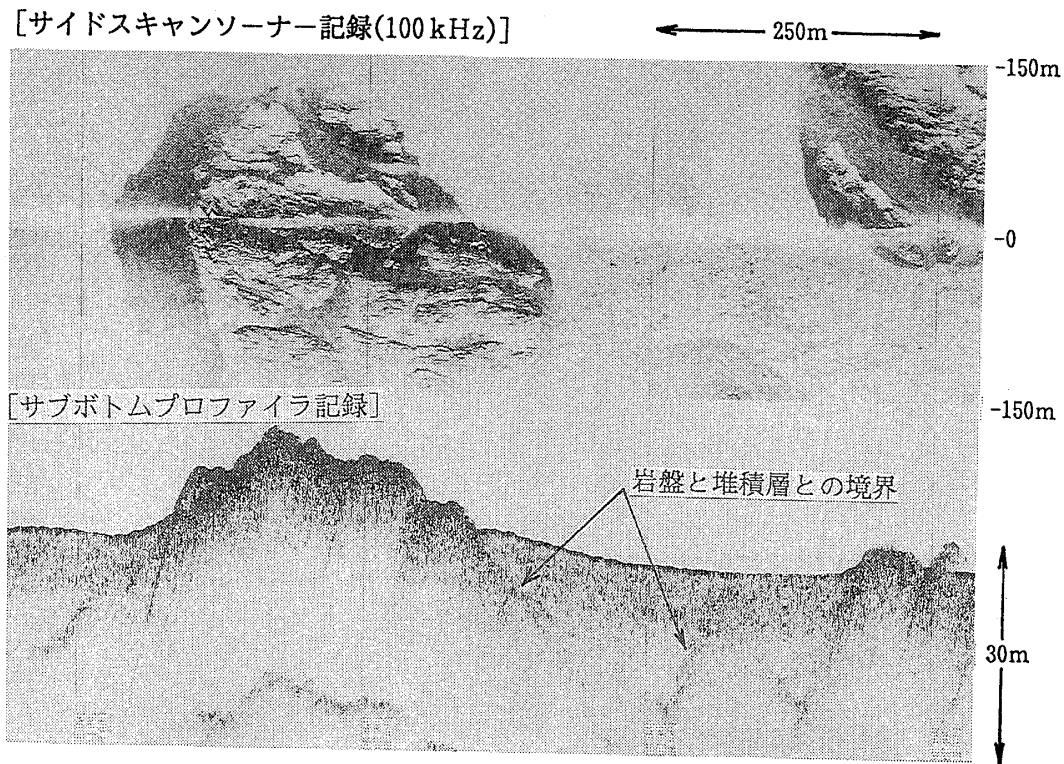
図-5は、海底面の記録の一例である。記録全体に現れている縞状の模様は、サンドウェーブ（砂漣）と呼ばれる砂地盤独特の模様である。つぎに、中央部付近の塊状に見える部分は、そのイメージパターンから岩盤が露出している部分であることが推定される。さらに、同図の左側下部の白く抜けたように見える部分は、トランスジューサからの発信音波が斜め下方向に入射したが、反射した音波がもどっていないことを示しており、この部分は、地形的に下り勾配の部分か、あるいは海底面に凹

表-1 サイドスキャンソナーの利用状況
Table 1 The present applications of side scan sonar

利用分野	利用目的		主な調査対象
海底地形調査	・海底地形図の作成のための海底微地形の抽出		・海底地形
漁場・魚礁調査	事前調査	・漁場計画作成のための海底地形の把握 ・人工魚礁設置位置の選定	・海底地形、 ・底質分布状況
	事後調査	・人工魚礁の設置状況の確認、集魚効果の検討	・人工魚礁の設置位置・分布
海底ケーブル・パイプライン調査	事前調査	・海底ケーブル、パイプライン敷設のためのルート選定	・海底地形
	事後調査	・海底ケーブル、パイプライン敷設状況の確認	・海底ケーブル、パイプライン
沈没物搜索	・沈没船や墜落機などの搜索		・沈没船、墜落機など
機雷探知	・敷設されている機雷の探知		・機雷



図—5 サンドウエーブの発達した海底面のソーナー記録 (500kHz)
 Fig.5 500kHz Sonograph of sand wave on the seabed



図—6 サイドスキャンソーナーとサブボトムプロファイラによる同時測定記録
 Fig.6 100kHz sonograph and 3.5kHz sub-bottom profiling record

凸が少なく粘性土などの分布する部分と推定される。

図-6は、サイドスキャンソナーとサブボトムプロファイラを併用して得られた海底の記録である。この図の上部に示すソナー記録には斜距離補正が施されている。ソナー記録から海底に露出した岩盤の平面的な分布が得られ、サブボトムプロファイラ記録から曳航体直下の地下構造（岩盤と堆積層の境界）が得られる。

したがって、サイドスキャンソナーとサブボトムプロファイラを組み合わせるにより、海底地形や底質分布の3次元的な状況の把握が可能となる。

3・2 人工魚礁の設置状況の確認調査

近年、地球的規模における水産生物資源の保護や関係国間での漁獲量規制などが実施されるようになり、このために、自国の沿岸域での漁獲量の安定確保を計る目的で人工魚礁の設置が広く実施されている。特に、わが国においては、昭和51年からは、沿岸漁場整備開発事業の一環として、その事業量は年ごとに拡大している。これらの人工魚礁の形状は角型および円筒型などさまざまであり、大きさも2~3 m²程度のものから100 m²を越える大型のものまである。また、一度に設置する魚礁の数は、数十基から数百基であり、設置範囲は数100 m²に及ぶこともある。

上記のような広い海域において魚礁設置の計画を立案するための底質分布調査をはじめとして、魚礁設置後の

配置検査、設置後の維持管理のための状況確認などについて効果的に調べる方法としてサイドスキャンソナーが有効である。また、このような人工魚礁を効果的に設置するためには、既設魚礁の配置状況を調べ、その配置と魚群の集集効果との関係を調べることも必要となる。

図-7および図-8は、既設の人工魚礁を対象として測定したソナー記録である。前者は大型の魚礁（一辺6 mの立方体）が設置されている場合であり、後者は小型の魚礁（高さ1.8 m、直径1.8 mの円筒形）が設置されている場合である。いずれの記録においてもコンクリート製の魚礁であり、強い反射信号によってその配置状況が良くわかる。図-7の海底の底質はおおむね砂質であり、一部岩盤が露出しており、この露出岩盤の周辺に魚礁が設置されていることがうかがえる。一方、図-8においては、曳航体の右側には露岩の存在が考えられるが、魚礁は左側の砂地盤上に設置されていることがわかる。このような魚礁設置箇所周辺の地盤状況をも明確にすることは、魚礁設置効果を検討する場合の貴重な資料となるであろう。

これらの測定記録からもわかるように、人工魚礁の材料には音波を強くはね返すコンクリートなどが通常用いられており、しかも一度に数多く設置されるので、魚礁そのものの寸法は小さくても、ソナー記録には数多くの同じ形状の斑点となって現れ、その配置状況は明瞭に描き出される。

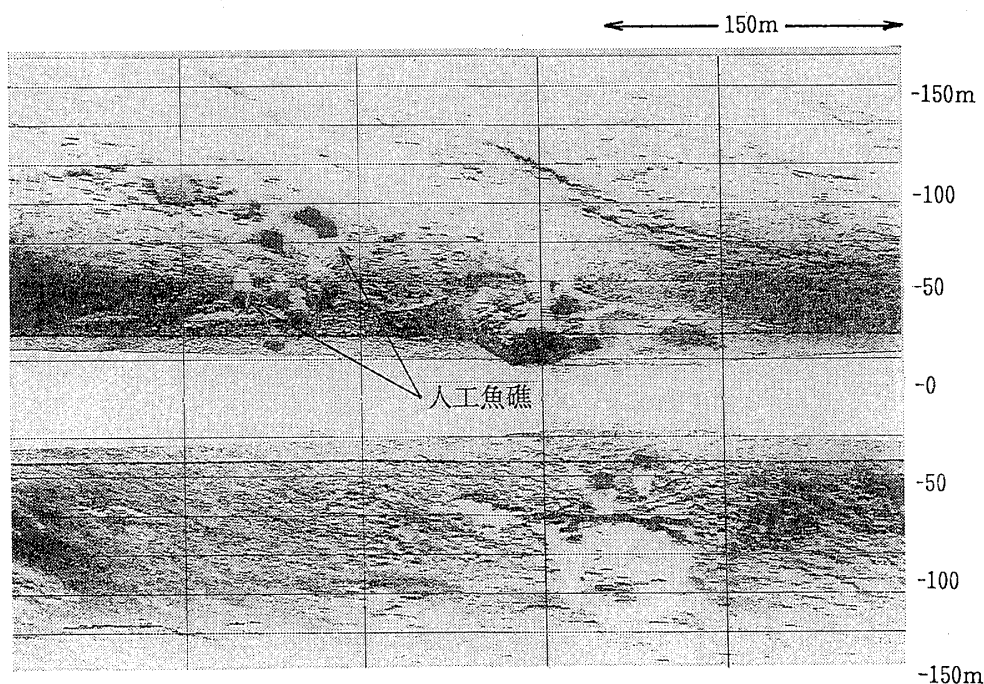


図-7 大型人工魚礁のソナー記録 (100kHz)

Fig.7 100kHz sonograph of large size artificial reefs

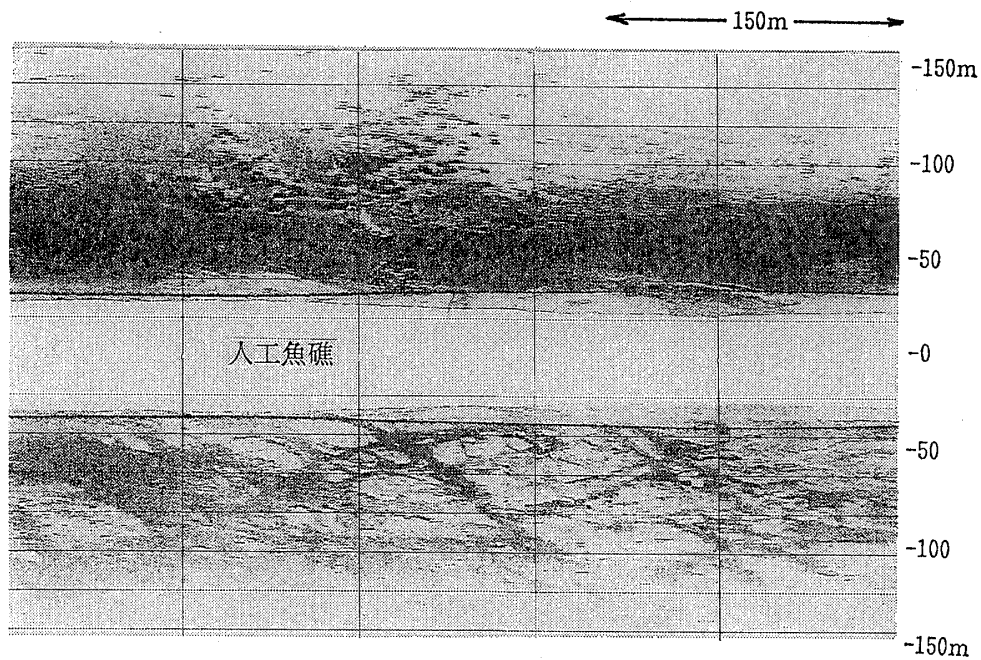


図-8 小型人工魚礁のソナー記録 (100kHz)
Fig.8 100kHz sonograph of small size artificial reefs

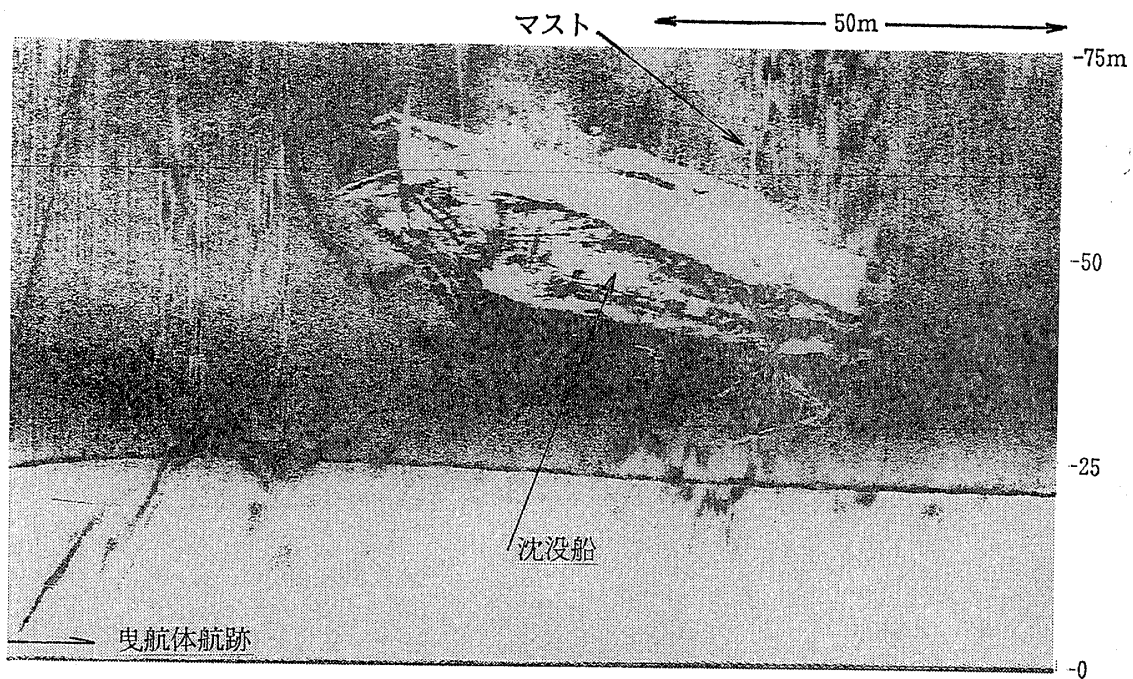


図-9 沈没船のソナー記録 (500kHz)
Fig.9 500kHz sonograph of a shipwreck

3・3 沈没船などの搜索

沈没船や墜落航空機などの搜索のためにも、サイドスキャンソナーが良く用いられている。たとえば、世界的な大事件となったタイタニック号(1912年沈没)、南ア航空機(1987年墜落)およびスペースシャトル・チャレ

ンジャー号(1986年墜落)の搜索に、サイドスキャンソナーが使用され、成果を挙げている。

図-9は沈没船に対する測定記録である。この船は、水深約30mの海底に沈んでいたものであり、船体やマストの形状までも明瞭にとらえられている。

海中での搜索の場合には、通常、第一段階として、対

象海域をできるだけ広くカバーするように広い探査レンジで測定し、異常が発見された場合には、第二段階として、その区域に接近して狭い探査レンジで詳細に調べるとい手順で実施する。図一9は、第二段階の調査として、周波数500KHzの音波によって探査レンジ75mで測定して得られたものである。

4 サイドスキャンソナーの利用分野の拡大

前章で、サイドスキャンソナーの利用状況を見てきたが、ほとんどの場合、得られた記録をイメージパターンと比較して、適切と考えられる解釈を行うという程度にとどまっている。

近年になって、データ処理技術の進歩と相まって、サイドスキャンソナーによって得られたデータに対して、海底平面図を描かせるモザイク図化処理や、測深データとの組み合わせによる三次元画像処理などが行われてはいるものの、今のところその数は少なく、試行段階と思われる。

しかしながら、これらの処理技術の発展に伴って、今後はサイドスキャンソナーによるデータに対して、従来とは異なった使い方あるいはこれまで利用されなかった新しい分野への適用が考えられることから、若干の考察を行った。

4・1 サイドスキャンソナーによって得られる定量的データ

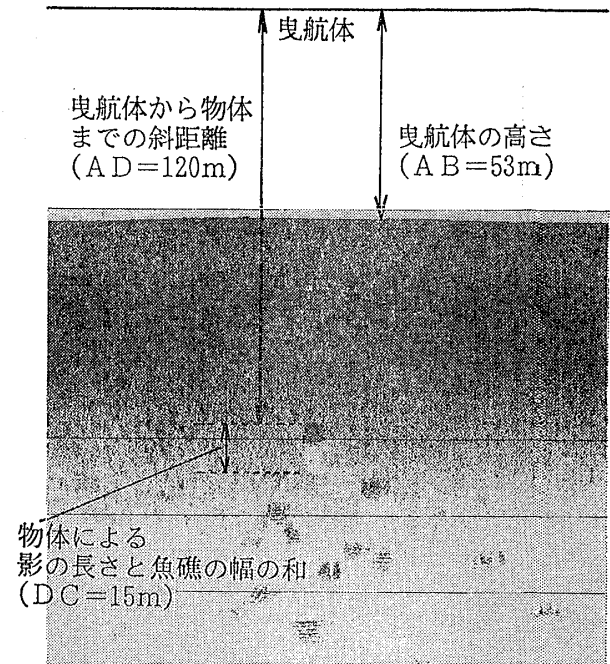
サイドスキャンソナーによって得られる記録に対しては、従来は主として定性的な解釈を行うにとどまっていたが、装置の分解能が向上し、より鮮明な記録が得られるようになってきた。このような記録を用いることによって、以下に示すように、比較的精度の良い定量化が可能である。

(1) 海底面上にある物体の大きさの推定

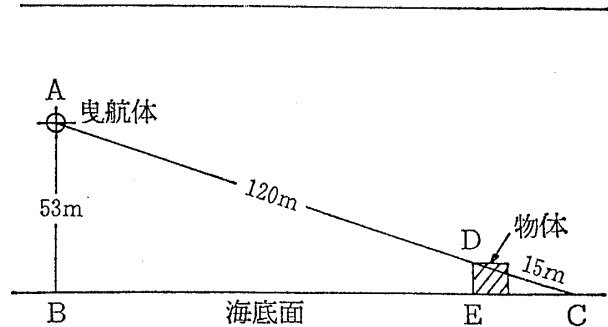
図一10(a)は、人工魚礁が設置されている海底のソナー記録(周波数:100KHz)である。この記録から、
 曳航体の海底面からの高さ AB=53m
 曳航体から魚礁までの斜距離 AD=120m
 魚礁の幅と魚礁による影の長さの和 DC=15m
 であることが読み取れる。図一10(b)に示すように、三角形△ABCと△DECとの相似関係によって、上記の値から魚礁の海底面からの高さを求めることができる。

$$DE = \frac{AB \times DC}{AD + DC} = \frac{53 \times 15}{120 + 15} = 5.9(m)$$

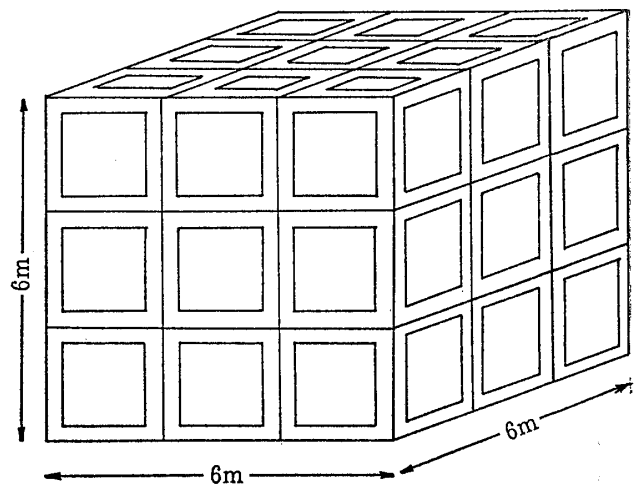
(a) ソナー記録



(b) 曳航体、物体、海底面の位置関係



図一10 ソナー記録による物体の大きさの読取り
 Fig.10 Calculation of a target size from 100kHz sonograph



図一11 海底に設置される人工魚礁
 Fig.11 Artificial reef placed on the seabed

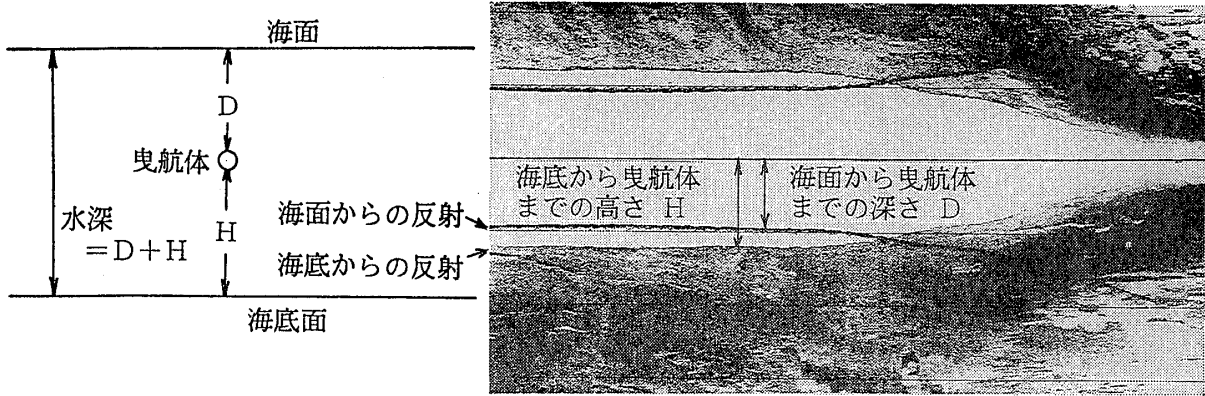
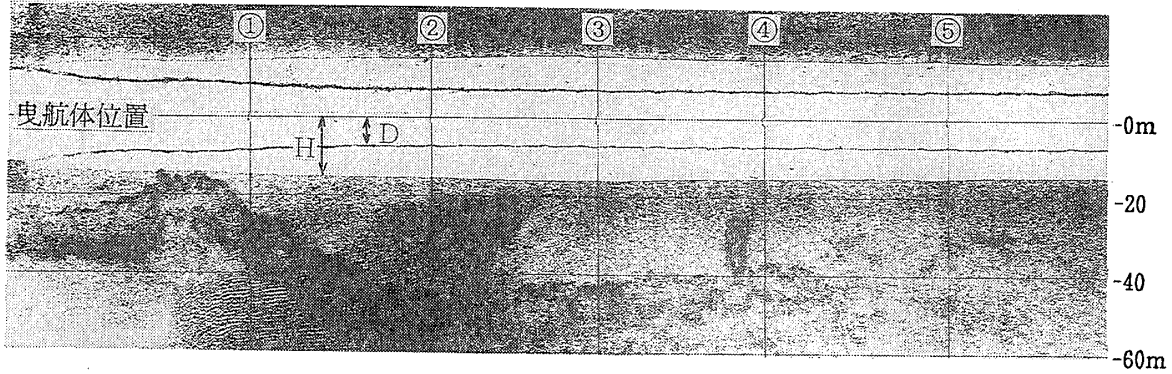
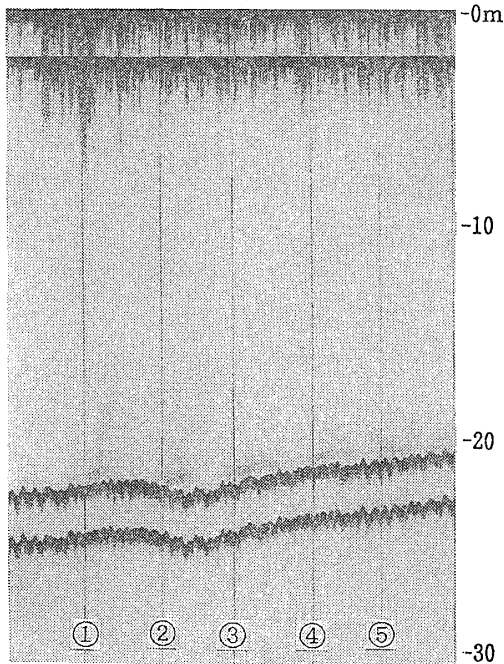


図-12 ソナー記録による水深の計算
 Fig.12 Calculation of water depth from 100kHz sonograph

(a) サイドスキャンソナー記録(500 k Hz)



(b) 音響測深機記録



(c) ソナー記録と測深機記録による水深の比較

位置		①	②	③	④	⑤
ソ 記	H(m)	14.3	15.6	15.9	15.2	15.2
	D(m)	8.8	7.1	7.1	7.1	7.1
ナ 録	水深(m)	23.1	22.7	3.0	22.3	22.3
測深機記録 水深(m)		22.8	22.2	22.9	22.0	21.7
差 (m)		0.3	0.5	0.1	0.3	0.6

図-13 ソナー記録による水深と測深機記録による水深の比較
 Fig.13 Comparison between water depth obtained from a sonograph and that from an echo sounder

また、魚礁の一边の長さは、約5.8mであることが記録から読み取れる。

なお、この海域に設置されていた人工魚礁は、図一11に示すような一辺が6mの立方体型のコンクリート製のものである。したがって、ソナーの記録から計算によって求められた魚礁の寸法は極めて、精度が良いことがわかるとともに、この魚礁は、海底下に埋もれることなく、極めて安定した状態に設置されていることが推定できる。

(2) 水深の把握

サイドスキャンソナーの曳航体から発信される音波は、垂直面内においては広いビーム幅を有しているために、ソナーの記録上に、海底面からの情報だけではなく、水面からの反射の情報が現われることが多い。

そこで、図一12に示すように、海底からの反射記録によって求められる海底から曳航体までの高さHと、水面からの反射記録によって求められる水面から曳航体までの深さDを加え合わせることによって、曳航体が位置する箇所における水深を計算することができる。

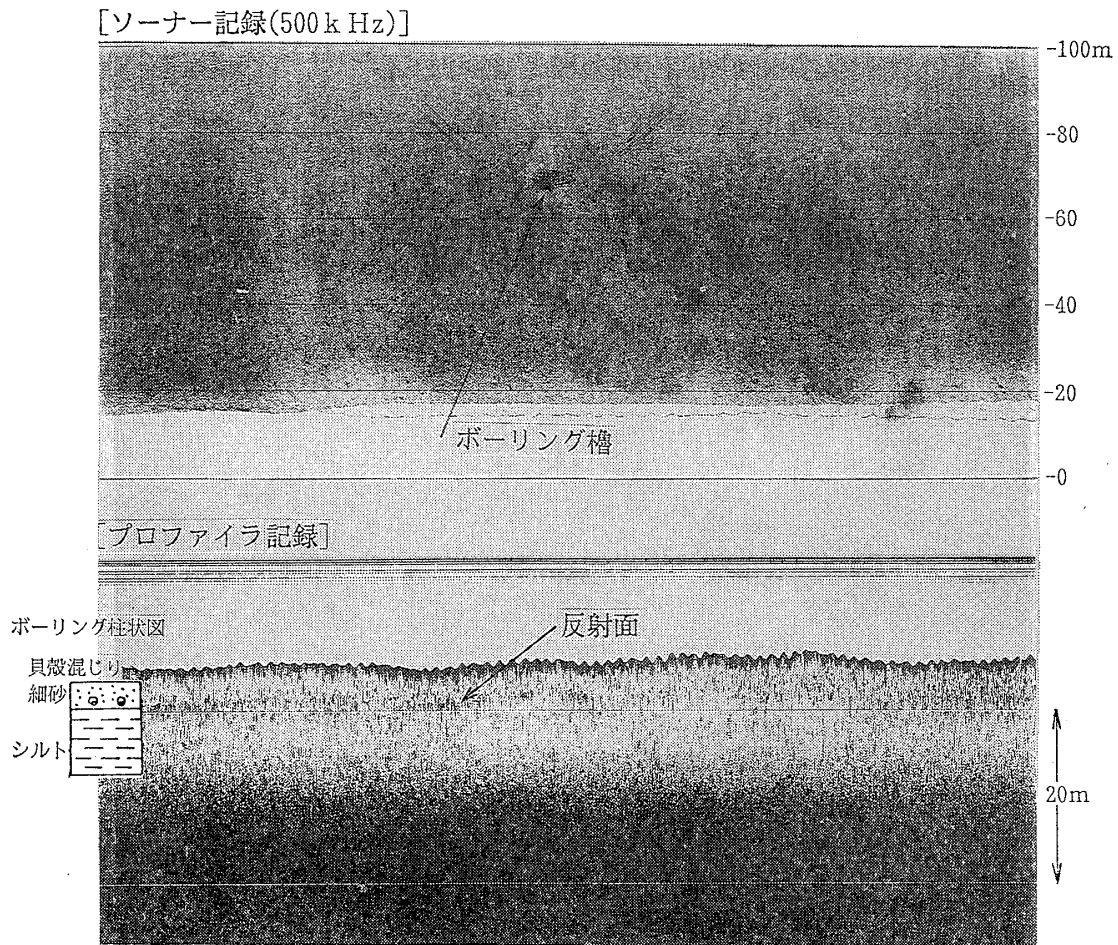
図一13は、東京湾において測定されたソナーの記録(a)と、同時に実施した音響測深の記録(b)を比較したものである。これらの記録から、同一位置における水深の読取り値を比較すると、(c)に示すようになり、両者の読取り値の差は0.1~0.6mであり、極めて良好な一致を示している。

(3) 地下構造の把握

図一14は、東京湾において実施したサイドスキャンソナーとサブボトムプロファイラの測定記録である。

なお、この測定をおこなった測線からおよそ70m離れたところにボーリング槽があり、このボーリングによって得られた柱状図をプロファイラ記録の左に示してある。プロファイラ記録において、柱状図の貝殻混じり細砂とシルトの境界に対応する深度(約3m)付近に、不明瞭ではあるが反射面と考えられる信号が見られる。

図一6に示した堆積層と岩盤の場合のように、反射係数の大きい場合には、比較的明瞭な反射信号によってその境界が認知されるが、図一14のような場合には、不明瞭になることは止むを得ないことである。しかしなが



図一14 プロファイラ記録とボーリング資料との対比
 Fig.14 Comparison between a profiling record and a boring section

ら、たとえば、上記のように、ボーリングの結果との対比などによって反射信号を確認することによって、地下構造の概略を予想することができる。

4・2 新たな分野に対するサイドスキャンソナーの適用

従来は、海底（水底）の地形や底質の平面的分布と地下断面を求めるための測定は、それぞれに対する専用機を用いて別々に行われているために、測線の同定が困難であったが、サイドスキャンソナーとサブボトムプロファイラを併用することによって、測線の不一致という問題は解消し、それらの測定結果を総合することによって定量的なデータを得ることができるようになってきた。測定装置、測定法、解析法などに関して、改良・開発を行わなければならない点が多々あるとはいえ、つぎに示すような分野への適用が考えられる。

① 人工島計画などにおける水深および底質の調査

たとえば、海域における飛行場の建設計画などの場合、候補地の水深、表層堆積物の分布状況、基盤の深さなどの概略を調べる。

② 海底の浚渫作業における堆積量や分布範囲の事前調査および残存量の調査

浚渫作業計画立案にあたって、底質およびそれらの堆積物の分布範囲、とくに、岩盤の深さの概略を調べる。また、浚渫土砂を用いて他海域の埋立てを行う場合には、作業の途中段階で残存量を調べる。

③ 貯水池における堆砂量の調査

貯水池の維持管理のための土砂堆積推移状況を定期的に調べる。

④ 水中構造物およびその基礎部の変状調査

外洋に面しており、波浪や海流の影響が大きい場所では、台風などによって岸壁やテトラポットなどの基礎部が洗掘を受けて変状をきたすことがある。したがって、構造物の安全対策として変状の有無、変状の規模などを調べる。

図-15は漁港の防波堤部におけるソナーの記録（周波数：500kHz）である。防波堤の輪郭とその下の捨石の配置状況が明確にとらえられている。したがって、平常時における記録と台風などの事後の記録を比較することによって、変状の有無あるいは変状の規模を推定することができる。

⑤ 水中考古学調査への適用

サイドスキャンソナーによる調査によって海底の堆積層の分布状況を三次元的に把握することができることから、水中考古学調査への利用が考えられる。

日本各地には、古代の沈没船などによって代表されるいわゆる「海底遺跡」がある。これらの調査に対しては、最終的には潜水による調査は不可欠ではあるが、事前に、サイドスキャンソナーによる調査を行うことによって、つぎのような成果が期待でき、極めて効率的である。

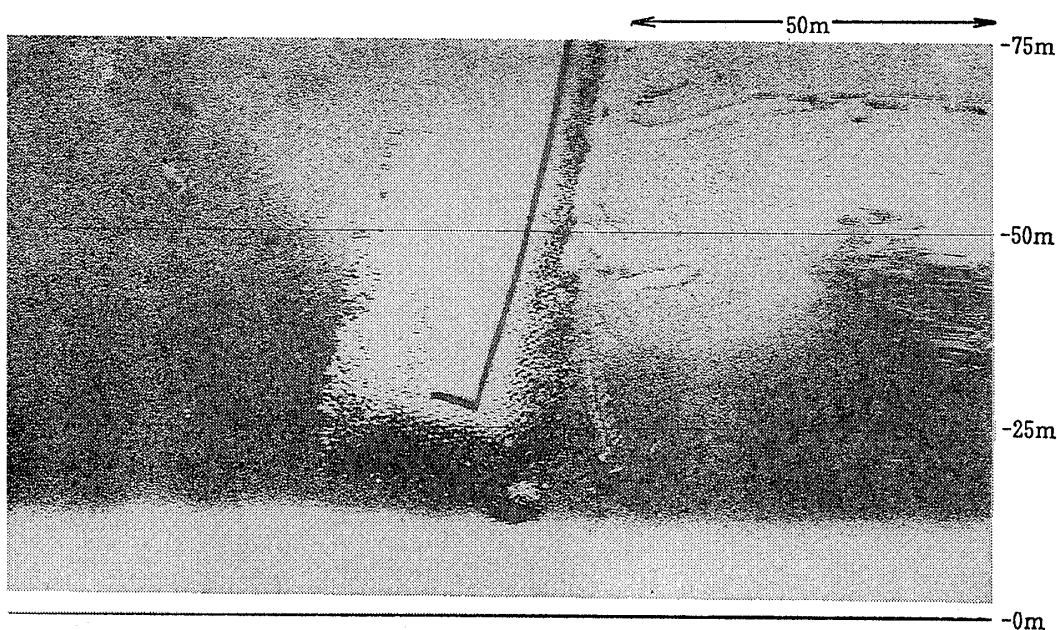


図-15 防波堤とその下の捨石マウンドとソナー記録（500kHz）

Fig.15 500kHz sonograph of a breakwater and its rubble mound

- a) 広範囲の海底面のイメージ記録によって、海底面に遺跡や沈没船などが存在しておれば、その位置を特定できる。
- b) 底質（砂、粘土、礫など）の平面的分布が把握できることから、遺物などが埋まっている可能性のある範囲を推定できる。
- c) サブボトムプロファイラを併用することによって、遺物が埋まっている可能性のある地層の厚さや範囲を推定できる。また、その地層中にある大きさの遺物がある場合には、それを示唆する反射波が得られる可能性がある。

5 あとがき

最近の日本においては、関西新空港建設、東京湾横断道路建設などのビックプロジェクトをはじめ、各種のウォーターフロント開発プロジェクトが活発化する一方、大洋底における鉱物資源などの開発、沿岸域での栽培漁業なども活発化し、それに応じた多種多様な用途に対する調査が求められる状況となっている。

このような状況の中で、サイドスキャンソナーもデジタル化や分解能の向上など技術改良が進み、今後大いにその利用分野が拡大される可能性が出てきた。

サイドスキャンソナーにより得られるのは、現在のところあくまでも海底面の平面的なソナーイメージ記

録である。

しかし、今後さらにサイドスキャンソナーの適用分野を拡大していくためには、定量的データの測定をはじめとし、モザイク図、コンター図などのコンピュータによる自動図化、信号強度による底質の自動判定、求積などのほかデータの2次元、3次元の処理なども含めハード、ソフト両面での一層の研究開発が必要である。

参 考 文 献

- Chesterman, W.D., Clynick, P.R. and Stride, A. H. (1958): An Acoustic Aid to Seabed Survey, *Acoustica*, No.8, pp.285-290.
- Flemming, B. W., Klein, and Denbigh, P. N. (1982): Recent Developments in Side Scan Sonar Techniques, W.G.A. Russell-Cargill, ISBN 0 7992 0465 X.
- Key, W.H. Jr (1984): Alternate Uses of Hydrographic Data Taken with Side Scan Sonar, National Ocean Service Hydrographic Conference Proceedings, pp.17-23.
- Tucker, M.J. and Stubbs, A.R. (1961): A Narrow-beam Echo-ranger for Fishery and Geological Investigations, *British J. Appl. Phys.* No.12, pp.103-110.

