

# 深海曳航式地震探査の現状とその開発

西村 清和 ・ 石原 丈実 ・ 玉木 賢策

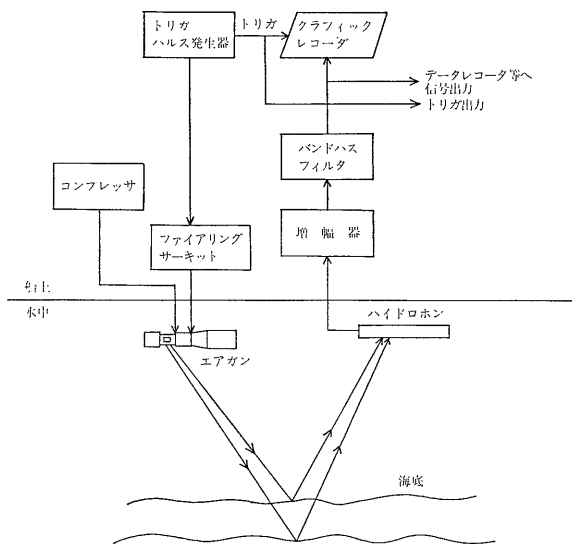
Kiyokazu NISHIMURA Takemi ISHIHARA Kensaku TAMAKI

## 1. 深海曳航式地震探査とは

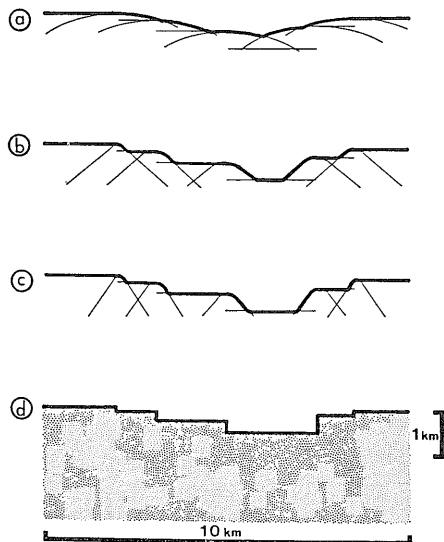
海底あるいは海底下の様子を知る手段として音の反射波が利用されている。海底面の情報を得る装置として超音波や高い周波数の音波を使用した測深機やサイド・スキャン・ソナー等があり一方海底下の情報を得る装置として低い周波数の音波を使った地震探査（音波探査）装置がある。地震探査装置の代表的なものの一つは音源にエアガンを使用したエアガン地震探査装置である。エアガンは水中にあるエアガン本体のチャンパーに100気圧程度圧縮空気を入れ外部からの電気的トリガ信号で瞬時に空気を水中に放出して発音するものである。発振周波数が低く大出力が得られることから大きい可探深度を必要とする海底地質調査や石油探査で広く用いられて来た。エアガン地震探査がここ20年来の海洋地質の進歩を支えて来たといっても過言ではない。

エアガン地震探査装置（アナログ式シングルチャンネル）の簡単なブロック図を第1図に示した。その動作原理はエアガンと hidroホンを船尾から曳航し船上装置のトリガパルス発生器を用いエアガンを一定時間間隔（例えば8秒毎）で発振させる。トリガパルスがオンになると同時にグラフィックレコーダの掃引を開始しある時間後に海底下で反射し戻って来たエアガンの信号の強弱を記録する。これをエアガンの発振毎に繰返し海底下の構造を断面として記録する。最近のデジタル技術の進歩により海底地質調査にもデジタル式のマルチチャンネル地震探査法が使用されるようになってきている。その探査装置は第1図のものに比べはるかに複雑である。しかしこれら通常地震探査では音源 hidroホンを海面近くで曳航して探査を行うため深海底の構造探査の場合のように音波の往復時間が長くなると音波の拡散や減衰で海底構造を正確に捉えることができなくなる欠点がある。また海溝斜面域や複雑な海底地形をもつ海底火山・海嶺域での探査では側方反射が生じ放物線状のパターンが記録され真の海底がマスクされてしまうことが多い。熱水鉱床探査 地震予知等では深海部の微細構造の把握が必要とされるが現状の地震探査ではそのニーズに答えることは不可能となっている。その改善法として2つの方法が考えられる。

1つは音波の発振及び受信の指向特性を良くすることである。この方法は音響測深機ではすでに実用化されている。ナロービーム音響測深機がそれで音波ビームの指向角を1°~2°まで狭めて側方反射を防いでいる（通常の測深機の指向角は30°程度）。海底の地形図作成システムであるシービームはナロービーム音響測深機を発展させたものである。しかし海底構造探査に必要な数十~数百 Hz の音波のものは実現していない。2番目の改善法として音源と hidroホンを深海底近傍で曳航する方法がある。この方法によれば6000mの深海底でも大陸棚での探査と同様の記録が得られるはずである。エアガンを音源に使用する場合エアガンを深海底で発振させることが通常の方法では不可能なので hidroホンのみを深海底近傍で曳航する。第2図は従来の地震探査と深海曳航式地震探査の反射記録のあらわれ方を模式的に比較したものである（BOWEN, 1984）。図中①は海底のモデルを示し水深は5000mである。②は海面上に音源 hidroホンがある場合 ③は海面上に音源があり hidroホンが海底上100mのところ



第1図 エアガン地震探査装置（アナログ式シングルチャンネル）のブロック図



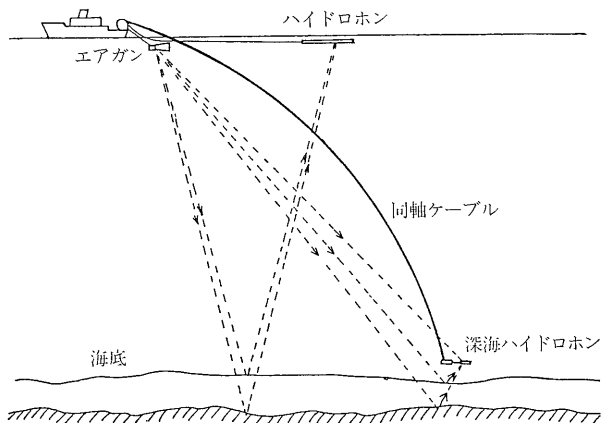
第2図 従来の地震探査と深海曳航式地震探査の反射記録のパターンを比較した模式図 (BOWEN, 1984)。①は水深5,000m海底のモデル ②は海面上に音源 ハイドロホンがある場合③は海面上に音源があり ハイドロホンが海底上100mのところにある場合 ④は音源 ハイドロホンとも海底上100mのところにある場合を示す。

にある場合④は音源 ハイドロホンとも海底上100mのところにある場合のそれぞれの記録のあらわれ方を示している。ハイドロホンのみを深海底近傍で曳航してもかなりの効果があることがわかる。

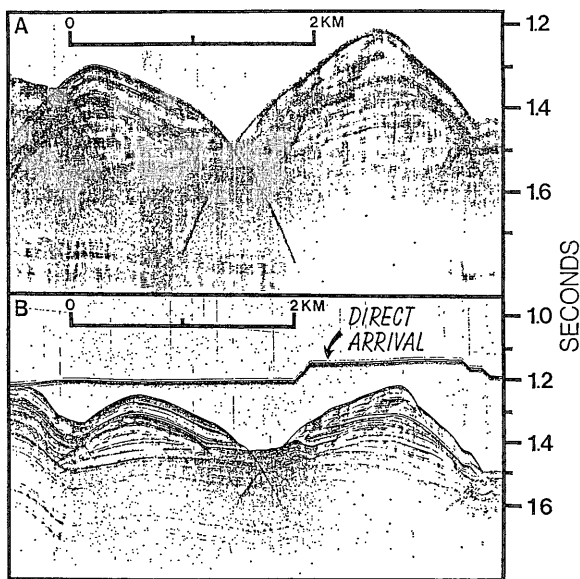
上述の方式による深海曳航式地震探査の概念図を第3図に示す。深海用ハイドロホンにプリアンプを付加した曳航器を同軸ケーブルの先端に取り付け 海底上100m程度のところを2~3ノットで曳航する。船上には深海ハイドロホンで受けた反射信号の収録・記録装置が設置してある。

第4図の2つの地震探査記録断面 (ROBB et al., 1981) は 同一測線における海上でハイドロホンを曳航する従来のタイプの地震探査の記録(A)と深海ハイドロホンによる記録(B)を示している。水深は約1000mで 音源として800ジュールのスパークを使用している。深海ハイドロホンによる記録は若干の回折波が出るものの 従来型のものに比べて記録の質が大幅に改善されている。

深海曳航式地震探査は 深海底の微細構造の探査に極めて有効であるが 反面従来型の地震探査に比べ取り扱いが容易でない欠点がある。具体的には (1)曳航体の曳航速度を上げることができない(1~3ノット程度)。したがって 調査能率が悪い。(2)同軸アーマードケーブルが必要 (3)ハイドロホンの浮き沈みに対する補正が



第3図 深海曳航式地震探査の概念図

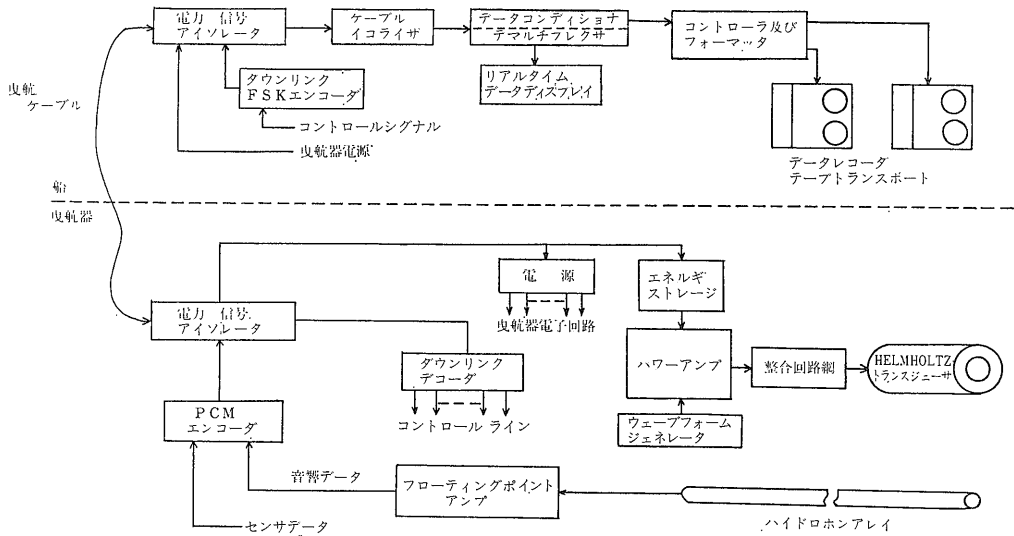


第4図 同一測線での地震探査記録断面の比較(ROBB et al., 1981)。Aは海面でハイドロホンを曳航する従来型の地震探査記録 Bは深海ハイドロホンによる地震探査記録。水深は約1,000m 音源は800ジュールのスパーク。

必要 等が挙げられる。

## 2. 深海曳航式地震探査の開発の現状

深海曳航式地震探査の成果が公表されるようになったのは 1980年代に入ってからで極めて新しい技術である。報告は米国および英国のものが殆んどであり 日本では未開拓の分野である。米国においてはウッズホール海



第5図 NORDA で開発した深海曳航式地震探査装置 DTAGS のブロック図 (FAGOT and SPYCHALSKI, 1984).

洋研究所および NORDA (Naval Ocean Research and Development Activity, 米国海軍海洋研究開発機構) が深海曳航式地震探査法の研究開発の先導的役割を担っている。今迄に開発された深海曳航式地震探査装置の内 いくつかを紹介する。

(1)単一の深海ハイドロホンを使用した地震探査装置

(PURDY and GOVE, 1982).

ウッズホール海洋研究所 (米国) の PURDY らによって開発された装置である。同軸ケーブルにプリアンプ付の単一のハイドロホンを付けたもので 受波信号は船上でデジタル化して 磁気テープに録音する。制御用のコンピュータは HP2100MX, RTEV-B. 32dB の可変利得アンプと12ビットの A/D コンバータを使用して 100dB のダイナミックレンジを得ている。サンプリング時間は 1 msec で 4 秒間データを録音する。海面上の音源には Bolt 社 600 B エアガン (40-in<sup>3</sup>) を使用し 発振間隔は10秒である。水深5400mの海底での実験に成功している。ケーブルの曳航ノイズが反射信号と重なり問題となっている。最近 ハイドロホンの指向特性を良好にするため パーチカルハイドロホンアレイが開発された (COLLINS et al., 1984)。

(2)深海曳航水平ハイドロホンを使用した地震探査装置

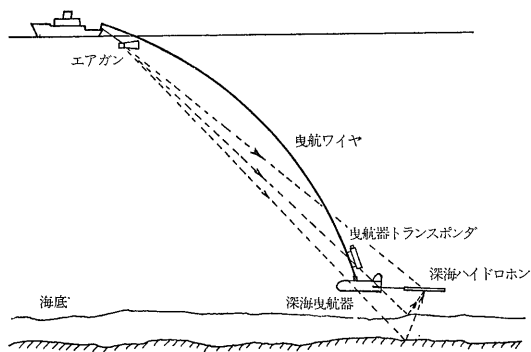
(BOWEN, 1984).

ケンブリッジ大学の BOWEN が開発した装置である。ハイドロホンに30m長のストリーマを使用していてこれが 3.5kHz のエコーサウンダを取り付けた深海曳航パ

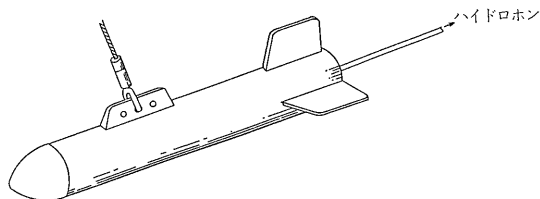
ッケージに接続されている。パッケージは同軸アーマードケーブルで曳航される。ハイドロホンストリーマからの信号 エコーサウンダの送受波信号をアナログ信号のまま 1本のケーブルで伝送するため曳航パッケージの中の電子回路で各信号を変調している。船上ではアナログテープデッキに変調されたデータを録音するとともに ストリーマ信号および 3.5kHz エコーサウンダの信号に復調する。音源はエアガンを使用し 海面上を曳航する。

(3)深海曳航式音源およびハイドロホンアレイを使用した地震探査装置 (DTAGS, Deep-Towed Array Geophysical System) (FAGOT and SPYCHALSKI, 1984; JONES et al., 1984).

NORDA の FAGOT らによって開発されたマルチチャンネルの深海曳航式地震探査システムである。ハイドロホンと音源を海底近傍 (海底上100m) で曳航するもので 6000m迄の深海底で使用できるように設計されている。ハイドロホンで受波した信号は深海曳航器内でデジタル化され 1.5Mbit/sec の転送速度で 全長7000m の曳航ケーブル上を通して船上のデータ収録装置に入力される。第5図にこのシステムの全体のブロック図を示してある。ハイドロホンストリーマは全長1000mで 48チャンネル分あるハイドロホンの内 24チャンネル分を使用している。また音源は圧電型トランスジューサ (周波数範囲260~650Hz) を使用している。深海曳航器内には 120dB<sub>v</sub> のダイナミックレンジを有するフローティングポイントアンプや12ビットの A/D コンバータが



第6図 地質調査所で開発中の深海曳航式地震探査システム



第7図 開発中のオフライン方式の深海曳航器の外観

ある。A/D コンバータのサンプリング周波数は約3 kHz である。深海曳航器にはトランスジューサを駆動するためのパワーアンプがあり その電源は船上より供給される。船上装置はデータの収録装置 レコーダ等から構成されており また曳航器およびアレイの深度アレイの方向およびテンション等のリアルタイム情報を表示するディスプレイなども備えている。このシステムのテストは水深4,500mの海域で1983年の夏に行われた。また1984年12月には このシステムで得たデータの重合処理を行い プロファイルを出力し 深海曳航式地震探査の有効性を確認した。

### 3. 地質調査所における深海曳航式地震探査装置の開発

今迄に開発され 公表されたすべての深海曳航式地震探査装置は 深海ハイドロホンの曳航および信号伝達手段に導線を備えた曳航用ケーブル(例えば同軸アーマードケーブル)を用いている。したがって反射信号は船上においてリアルタイムで得ることができる。これをオンライン方式の深海曳航式地震探査装置と呼ぶことにしよう。これに対し 深海曳航器の中にハイドロホンで受けた信号を記憶するメモリ装置を設けて曳航し 船上へ揚収した後 反射信号を外へ取り出すものをオフライン方式と呼ぶことにする。オフライン方式であると 同軸アーマードケーブルは不要となり 単なる鋼製ワイヤが使用できるようになる。同軸アーマードケーブルは 例えば特性インピーダンス50Ωの同軸ケーブルに鋼線を2重外装したもので 地質調査船「白嶺丸」搭載のものは 全長約6000mで 外径は17.2mmである。ウインチの巻き上げ速度は 60m/分で遅い。同様にオフライン式の深海曳航に使用できそうなワイヤは 普段 岩石のドレッジに使用されるもので 全長が10,000

m 外径は12mmで ウインチの巻き上げ速度は 45~150m/分で高速の巻き上げが可能である。曳航ケーブルの場合に比べ取り扱いが容易で より深い水深の海域で使用できることが 前記の数値の比較から明らかである。また同軸ケーブルの場合 導線の断線が起ると全く使用できなくなる致命的な欠点がある。

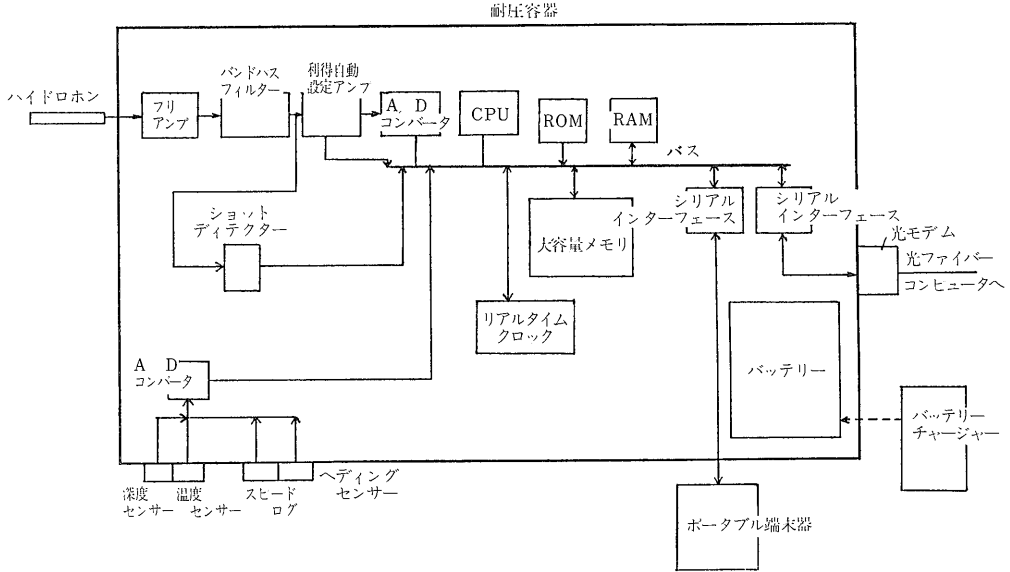
以上の事から我々は オフライン方式が有利であると判断し この方式の深海曳航式地震探査装置を中心に開発をすすめることにした。

オフライン方式を採用するもう一つの理由として オンライン方式の地震探査装置の開発が米国においてすでに行われていて 開発要素があまり無く 逆にオフライン方式の地震探査装置の研究開発が全く行われていないことが挙げられる。

オンライン方式の深海曳航式地震探査に関しては 1983年に導入した深海曳航型サイドスキャンソナー SMS-990 (EG&G社・米国) に付属する単一・無指向性の深海ハイドロホンで 1983年7月と1984年3月に簡単な実験を行っている。ハイドロホンの周波数範囲は100Hz~3kHzで 海面上の音源にエアガンを使用した。結果は芳しいものでなく ケーブルの曳航雑音等が卓越し S/Nの悪い記録であった。

地質調査所における深海曳航式地震探査装置の開発は 科学技術振興調整費「我が国周辺200海里水域における新調査システムの開発に関する研究」の中の一研究項目として行っている。昭和59, 60年度の2ケ年でシステムを完成させる予定である。

現在開発中の深海曳航式地震探査装置は オフライン方式で第6図に示すような形態で探査を行う。システムは深海曳航器 曳航器測位装置および船上の曳航器データ収録・編集装置の3つから構成されている。深海曳航器は大容量のメモリを持ったシングルチャンネルデジタル式地震探査装置で 曳航器の後部からハイドロホンを流す構造となっている(第7図)。曳航索として鋼製ワイヤを使用する。深海曳航器の耐圧水深を10,000mとして 海溝底でも探査可能なシステムとすることを最終目標としている。



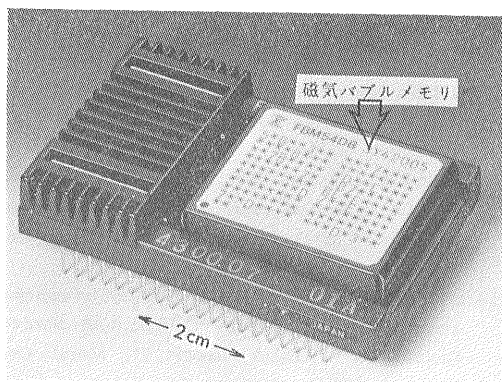
第8図 開発中のオフライン方式の深海曳航器のブロック図

(1) 深海曳航器

深海曳航器はそのブロック図(第8図)に示すように耐圧容器の中に大容量メモリを備えたマイクロコンピュータシステムを封入したものである。反射信号用のA/Dコンバータは12ビットのものを使用している。反射信号を蓄積する大容量メモリとして磁気バブルメモリを使用する。磁気バブルメモリは小型 大容量 不揮発性 悪環境下の使用に耐えられる等 深海曳航器のメモリとして好適な性能を備えている。まだ値段が高いことが欠点である。第9図に磁気バブルメモリの外観を示す。国産のものでは1Mビット(128Kバイト)のメモリがすでに商用化されていて近いうちに4Mビットのバブルメモリが 出回るようである。エアガンの発振間隔を12秒 1トレースの記録時間を4秒とし 1msecでサンプリングをした場合 8時間の連続探査で約20Mバイトのメモリ容量を必要とする。メモリの効率的な使用を図るため 1トレースの中の海中部分の記録を少なくすることや 笠原ほか(1984)の開発したデジタル海底地震計で使用されている音声合成法によるデータ圧縮等の技術利用を検討している。第7図中のポータブル端末器は曳航器内の利得 フィルタ サンプリング時間等のパラメータのセットを曳航器の外部から行うためのものである。曳航器はトラブル等以外に 開蓋することはない。大容量メモリに蓄積されたデータは光モデムから外部へ掃き出される。

(2) 曳航器測位装置

曳航器の精密な位置決定には 水中音波の伝達時間の測定をもとにした曳航器測位装置を用いる。これは海底設置のトランスポンダ(最低3台) 曳航器の近くに取付けた曳航器トランスポンダおよびトランスジューサを含む船上部より構成され(第10図参照) 海底設置のトランスポンダは 調査終了時に船上からのコマンドによりアンカーを切離し浮上させ回収する。測位の簡単な原理は次のようである。海底設置の各トランスポンダは特定の応答周波数  $F_1$  の音波を受けるとそれぞれ異なる周波数  $f_1, f_2, \dots$  の音波を返送してくる。曳航器トランスポンダは海底のものと異なる応答周波数  $F_2$  の音波を受けると  $F_1$  の音波を出すように設定しておく。まず船上のトランスジューサから  $F_1$  の音波を送ると海底の各トランスポンダが応答し 送ってから各周波数  $f_1, f_2, \dots$  の音波が返ってくるまでの時間測定から船→海底→船の各経路に対応する距離が求まる(第10図A)。次に船上から  $F_2$  の音波を送ると曳航器トランスポンダ 海底の各トランスポンダの順に応答し  $F_1$  の音波を受けるまでの時間から船→曳航器→船の経路に対応する距離  $f_1, f_2, \dots$  の音波を受けるまでの時間から船→曳航器→海底→船の各経路に対応する距離が求まる(第10図B)。これらを組み合わせることにより 海底の各トランスポンダから曳航器までの距離を決め 海底トランスポンダの位置をもとに曳航器の位置を求めるのである。



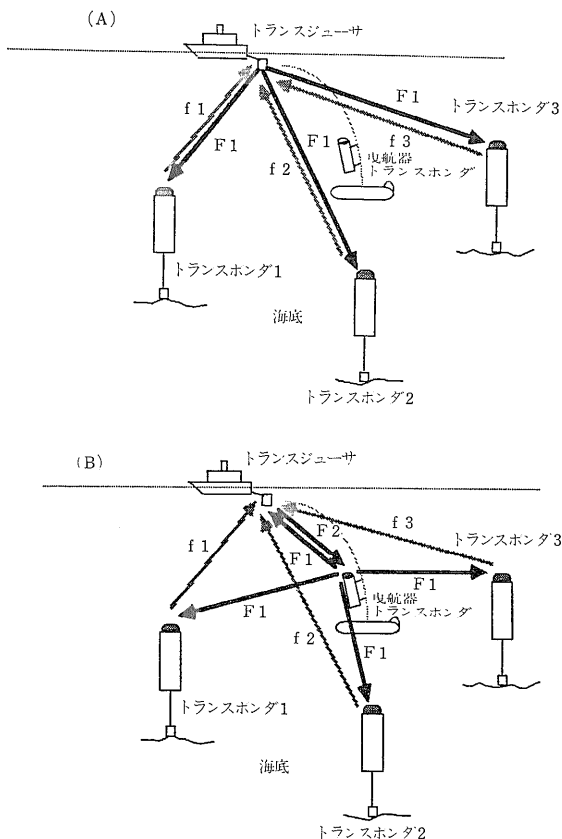
第9図 磁気バブルメモリの外観

(3) 曳航器データ収録・編集装置

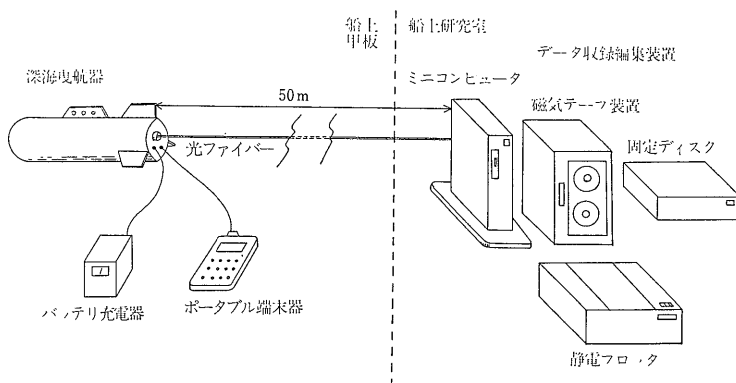
探査が終了し 船上へ引き揚げた曳航器内のデータを収録し 処理を行なう装置である。ミニコンピュータ 磁気テープ装置 図形出力装置 (静電プロッタ) 等から構成されている。後部甲板上に揚収した曳航器と研究室に置いたデータ収録・編集装置とは離れているため 何らかの信号伝達手段が必要である。普通のワイヤでは船のアンテナから発信される 無線電信・電話等の高周波雑音でデータ伝送が妨害されるので 光ファイバケーブルを用い 高速データ伝送を行う (第11図)。ミニコンピュータに入力したデータは 磁気テープに録音すると共に 深度補正 位置補正 波形処理等を行ない 図形出力装置に海底構造断面図として出力する。

4. おわりに

1984年12月3～7日にサンフランシスコで行われた American Geophysical Union (米国地球物理学会) 秋季大会で深海曳航式地震探査に関する興味ある発表があつた。



第10図 曳航器測位装置の測位原理。(A)  $F_1$  の音波を船から送ることにより海底のトランスホンダが応答し船→海底→船の各経路の距離が求まる。(B)  $F_2$  の音波を船から送ると曳航器トランスホンダ 海底の各トランスホンダの順に応答し船→曳航器→船及び船→曳航器→海底→船の経路の距離が求まる



第11図 オフライン方式の深海曳航器の船上でのデータ収録方法を示す図

た(要旨は EOS Vol. 65, No. 45 (1984)参照).

(1) MOORE et al. は水深6,000mの中米海溝において深海曳航式地震探査とシービーム調査の両方を実施しその結果を比較して海溝地域の複雑な地質構造を把握するにはシービームの解像度では不十分で深海曳航式地震探査が不可欠であると結論した。

(2) LEWIS & COCHRANE は米国北西海岸オレゴン沖のサブダクション帯で深海曳航式地震探査と海面上で行うマルチチャンネル地震探査を実施しその結果を比較してサブダクション帯のスラストを促えるにはマルチチャンネル地震探査より深海曳航式地震探査の方が優れていることを報告した。

(3) WATTS は招待講演を行いシービーム人工衛星による調査と並んで深海曳航調査の重要性を指摘した。

このように深海曳航式地震探査は米国等においても深海での地質構造を把握するための新しい調査手法として注目されつつあるものである。地質調査所ではオフライン方式という他で試みられていない深海曳航式地震探査装置を完成させ熱水鉱床域や海溝斜面域での精密構造調査に役立てていきたいと考えている。

## 文 献

- BOWEN, A. N. (1984) A high-resolution seismic profiling system using a deep-towed horizontal hydrophone streamer, *Marine Geophysical Researches*, Vol. 6, p. 275-293.
- COLLINS, J. A., KOELSCH, D. E., and PURDY, G. M. (1984) Seismic reflection profiling with a deep towed hydrophone array, *Marine Geophysical Researches* Vol. 6, (in press).
- FAGOT, M. G. and SPYCHALSKI, S. E. (1984) Deep-towed array geophysical system (DTAGS): A hardware description, *NORDA Report 71*, Naval Ocean Research and Development Activity.
- JONES, S. K., SPYCHALSKI, S. E. and FAGOT, M. G. (1984) Deep-towed array geophysical system, *Offshore Technology Conference*, OTC 4815, p. 335-340.
- 笠原順三, 高橋正義, 松原志泰, 小宮光昇(1984) ADPCM方式音声合成法を用いたマイコン制御海底地震計, センサ技術, Vol. 4, No. 1, p. 55-61
- PURDY, G. M. and GOVE, L. A. (1982) Reflection profiling in the deep ocean using a near bottom hydrophone, *Marine Geophysical Researches*, Vol. 5, p. 301-314.
- ROBB, J. M., SYLWESTER R. E. and PENTON, R. (1981) Simplified method of deep-tow seismic profiling, *Geo-Marine Letters*, Vol. 1, p. 65-67.

---

## 紹介—昭和59年度版通商産業省工業技術院特別研究報告集より

海洋地質部が主体となって実施した工業技術院特別研究「深海底鉱物資源に関する地質学的研究」「日本周辺大陸棚精密地質に関する研究」(共に昭和54~58年度に実施)の総括的研究成果概要が標記報告集の一部として昨年末に刊行されている。それぞれ各年度ごとの主として白嶺丸船上での研究結果概要については各年の地質ニュース3月号(海洋特集)に掲載されまた室内研究の結果も含めて一部についてはすでにクルーズレポート海洋地質図として印刷・刊行されているが簡潔ではあるが要領よく全体の成果がまとめられたのは標記報告集の記事がはじめてである。両記事とも経緯 研究方法 各調査海域ごとの成果概要 全体的成果概要 参考文献(これまでに刊行された文献リスト)が述べられており研究結果のエッセンスを知るといふ目的のために便利であろうと思われる。

昭和59年度版 通商産業省工業技術院特別研究報告書 471ページ。4,000円

編 集: 通商産業省工業技術院 発 行: (株)日本産業技術振興協会 (03)591-6271~3, 昭和59年12月25日

深海底鉱物資源に関する地質学的研究 (昭和54~58年度)

水野篤行・他22名。同上 p. 223-235.

日本周辺大陸棚精密地質に関する研究 (昭和54~58年度)

本座栄一・他20名。同上 p. 236-248.

---