

曳航式デジタル表層音波探査装置 (CHIRP II) について

穀田昇一：沿岸調査課

岩淵 洋・渡辺一樹：海洋研究室

Towing Type Digital Sub-Bottom Profiling System (Chirp II)

Shoichi Kokuta : Coastal Surveys & Cartography Division

Yo Iwabuchi, Kazuki Watanabe : Ocean Research Laboratory

1. はじめに

平成7年1月の兵庫県南部地震の発生に際し、水路部は測量船「海洋」, 「明洋」を直ちに派遣して、同地震の震源域付近の海域において断層等の調査を行った。経験科学的側面を持つ地球科学にとって、地震のような現象はしばしば観測される訳ではないことから、ある現象の発生に際し、可能な限り詳細な調査を行わなければならない。特に、断層運動等の痕跡は直ちに消えていく運命にあるため、これら現象の調査は可能な限り速やかに行う必要がある。

今回の調査の結果、海域部においても、兵庫県南部地震に関連して動いた「地震断層」が存在することが示された。しかし、神戸の沖合にはこれ以外にも、今回の地震では動かなかったものの、今まで知られていなかった活断層が多数存在すること、これらの中には大きな活動度を持つものが存在することも判った。

今回の調査から類推すると、他の都市の沿岸域にも、未知の活断層が存在することが十分考えられた。我が国の大都市のほとんどは海岸に立地する。しかし、これまで沿岸域で活断層に着目した調査はほとんど行われていない。このことから、我が国のほとんどの大都市周辺には、活断層のデータの空白域が残されていると言うことになる。兵庫県南部地震は、活断層と内陸直下型地震とが密接な関係があることを、多くの者に改めて認識させた。このため、水路部は大都市周辺域の活断層調査に着手することとした。

なお、活断層とは「活着している断層」という意味である。活着している火山である「活火山」は活動が現在も継続しているのに対し、活断層の活動は、少なくとも日本の場合、間欠的であることが多く、通常は活動が停止している。しかし、地質学的スケールで見ると、現在は活動していなくても「今後も活動する可能性のある断層」である。ここで「今後活動するかどうか」という将来の活動を推理するための論理は、「これまで繰り返し活動してきたものは、今後も活動を繰り返すであろう」というものである。具体的には「第四紀、特にその後期に活動したことのある断層は、活動しつつあるものと推定される」(吉川ほか, 1973) という考えが一般的であるように思われる。

実際に活断層であるかどうかを判定する基準としては、(1)後期更新世ないし完新世に断層が動いているか、(2)断層が繰り返し活動しているか、というものであろう。海域部では、活断層の抽出は主に音波探査によってなされる。従って、活断層として判別される基準としては、音波探査記録上、(1)最上位の堆積層の変形、(2)変位の累積、として認識されることになる。

これまで、海域の音波探査では、「より深く探査する」ことが重要な課題であった。しかし、活断層調査では、(1)最上位の堆積層、すなわち表層をいかに詳しく調べるかが重要な問題の一つとなる。従来、海洋測量や沿岸測量等において一般的に用いられてきたスパーカーやエアガンは、発振波形が単一のパルスではないため表層の構造が海底面にマスクされ

てしまうこと、卓越周波数が低いため分解能が低いこと等から、表層部の構造を明らかにするには適していない。一方、変位の累積性の判定については、ある程度地下深部の記録が得られるスパーカーやエアガン等の反射法音波探査が有効である。特に、海底が粗粒堆積物で覆われているような場合、周波数の高い音波探査システムでは、ほとんど有効な記録が得られないことすらある。従って、活断層調査では、高周波の表層探査システムと、比較的低周波の音波探査システムを併用しなければならない。

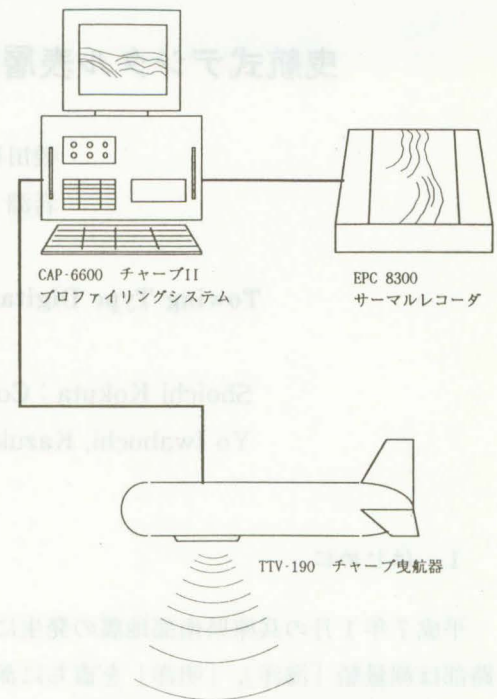
このため、沿岸調査課では、大都市付近海域の活断層調査において、海底下100m程度までの地質構造を詳細に明らかにするため、分解能の高いチャープ波を利用した曳航式のデジタル表層音波探査を導入した。本装置を使用して、3隻の中型測量船により、それぞれ東京湾、大阪湾、伊勢湾の活断層調査を実施したので、現地調査の状況・報告から、その機能及び現状と曳航方式の問題点について、スパーカー等の音波探査の運用の経験をもまえ、操作・保守上の知識・技術について紹介する。

2. 装置の構成

今回導入した表層音波探査装置は、DATASONIC社製 CHIRP II (Model-661) である。メインラックは、TIGA graphics 機構付きでソナー操作機能を持つメインプロセッサと、2ch, 16bit A/D, FFT トランスミッション方式の Digital Signal Processor (DSP) にデータ集録装置 (Exabyte, 8mmテープ) を内蔵したオールインワン設計になっている。外付けカラーモニタと5インチ光ディスクが付いている。これらを制御するソフトはチャープスキャンと呼び、WINDOWS 環境で動作する。記録器はインクジェット型カラープリンタとサーマル記録器 (記録幅20cm) とがあり、インターフェースはセントロニクス準拠となっている。

送信出力は4kWである。

曳航体は、空中重量150kgの大型のものと空中重量45kgの小型のものがある。前者は1~10kHzのチャープ帯域幅を持った送波器4個と、8~23kHzのチャープ帯域を持つ送波器1個及び受波器を内部



第1図 表層音波探査装置の構成

に装備している。後者は、送波器、受波器各1個を装備している (写真1参照)。それぞれの耐圧深度は600mである。曳航ケーブルはケブラー製で、用途に応じた100mと150mの2種類のものがある。

3. 装置の性能・機能・特徴

チャープ波とは、発振周波数が一定の帯域幅の間でリニアに変化するため、鳥がチュウチュウなく声によく似ていることから付けられたものである。本装置には3.5kHzと12kHzを中心として帯域幅が変化するよう、2種類のFM波形をスワップして発振させる技術が採用されている。また、チャープ受信音波をDSPにより帯域内でのフィルター処理・波形処理をすることによって、S/Nの高い信号が得られ、6~8cmの高分解能で表層の記録を得ることが出来る。

フィルター処理・波形処理により、サイドロープをも効果的に相関処理して円形ナロービームを形成する。大型曳航器の4個の3.5kHz送波器で構成された送波モジュールは、送波面積が広いことから、低周波でも指向幅の狭い発振ビームが形成できる。このため、双曲線効果や多重反射が軽減されるので、100m以深でもピンポイントでの地層を探査できる。

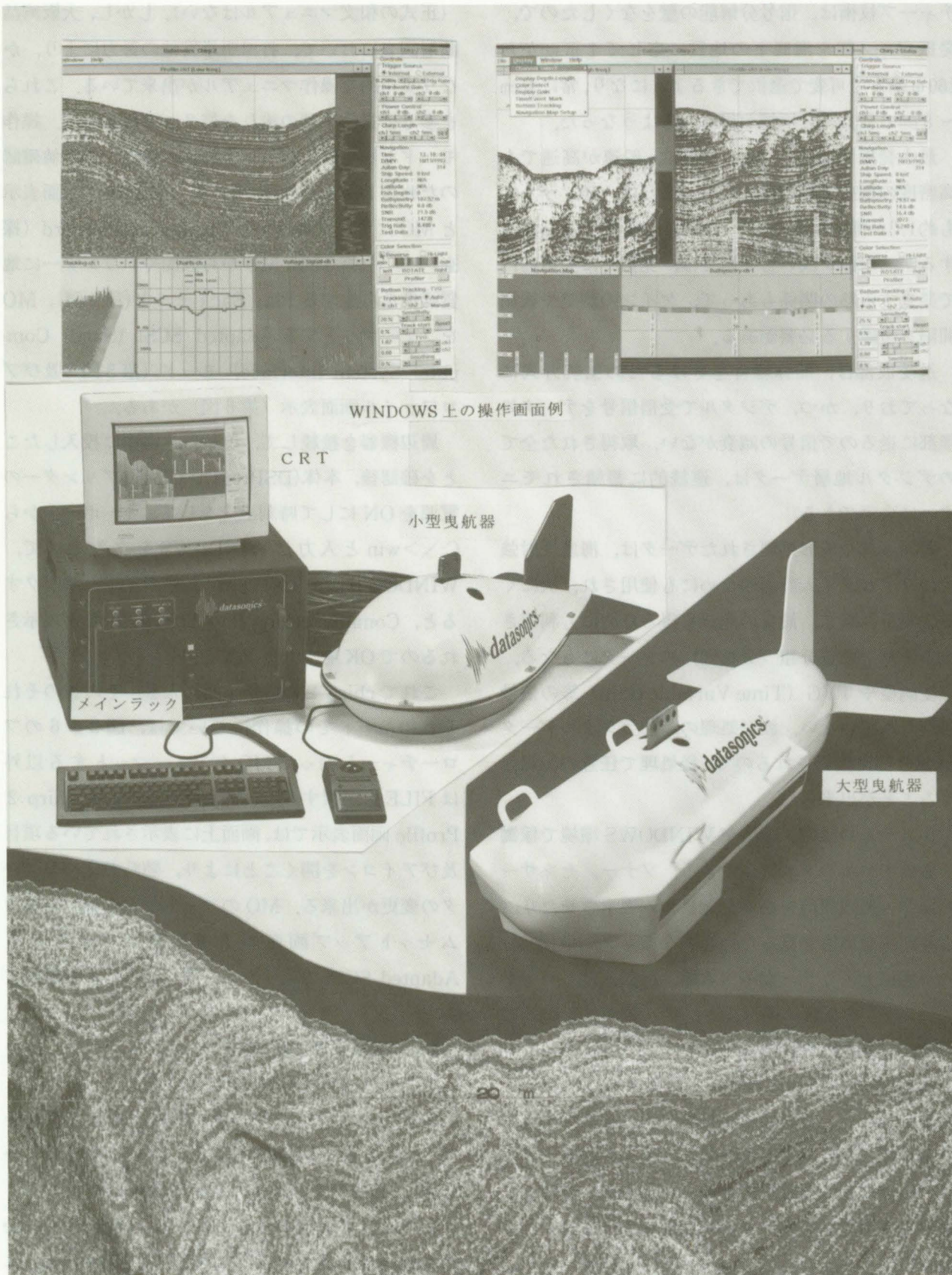


写真1 チャープII構成機器及び、記録イメージ

チャープ技術は、信号分解能の壁をなくしたので、発振パルス幅を海底下の地質に応じて1 m secから160 m secまで可変で選択できるようになり、常に6 cm～8 cmの最良の分解能が得られるようになった。

最小発振間隔は0.25secなので、船速が高速でも高密度の探査記録が得られる。これは、10ノットでも約1.3m間隔で探査データが得られることを意味するが、水深が浅いところでは、発信時に発信器内で発生する熱の関係もあって、ゲインの調整や観測間隔を考慮する必要がある。

送受波部は、船体雑音をさけるため曳航方式になっており、かつ、デジタルで受信信号をデータ処理部に送るので信号の減衰がない。取得された全てのデジタル地層データは、連続的に蓄積されモニターに表示できる。

蓄積された波形処理されたデータは、海底反射強度のリアルタイム計測のためにも使用され、次にくる底質を判断し、最良の記録を得るためにも利用される。また、底質分類(分布図)のデータにもなる。感度調整やTVG(Time Variable Gain)等の信号処理されていない、波形処理のみのデジタルデータがMO等に集録されるので、後処理で任意の記録を得ることが出来る。

システムの操作、診断がWINDOWS環境で稼働するのでマルチタスクができる。ソナー/センサーの操作・処理機能を必要と時のみ表示させたり、より詳細な地層を見るため必要なモニタ記録(地層)の一部拡大・カラー表示(水深、反射強度、バックグラウンド)を任意に選択でき、デュアル(2 ch)での操作・表示も可能である。

曳航体は水深600mの水圧に耐えるようになっていことから、海底面に曳航器を近づけて深海曳航をすれば、深海域でも双曲線にマスクされることなく、高分解能の記録を得ることが出来る。ただし、現状では深海曳航用ケーブルは用意されていない。

4. 操作要領と注意事項

4-1. 操作要領

本装置の操作要領としては、英文のInstruction/Operationマニュアルを精読するのが一番である

(正式の和文マニュアルはない)。しかし、大阪湾活断層調査において、打田明雄官他の努力により、かなり実用的な操作マニュアルが出来ている。これらを参考に操作手順の流れを第2～6図に示す。操作モードとしては、データ集録前の動作・設定値確認のためのDisplay Onlyモード(第2図)、画面表示とMOにデータ集録するDisplay and Record(探査)モード(第3図)、MOから画面やプリンターに地質画像を再生するPlay Backモード(第4図)、MOをフォーマットするAdapted SCSI(Small Computer System Interface)モード(第5図)及びプロファイル画面表示(第6図)がある。

周辺機器を接続して、曳航器を海中に投入したことを確認後、本体(DSP-661)、CRT、プリンターの電源をONにして時刻設定をして、キーボードからC:\>winと入力しWINDOWSを立ち上げて、WINDOWS画面上のchirp 2をダブルクリックすると、Communication Port Informationが表示されるのでOKをクリックする。

これでchirp 2の操作画面に入る。その後のそれぞれのモードでの操作については、図2～6のフローチャート沿ってMOをフォーマットする以外はFILEを選択することにより行う。なお、Chirp 2 Profile画面表示では、画面上に表示されている項目及びアイコンを開くことにより、随時設定パラメータの変更が出来る。MOのフォーマットは、システムセットアップ画面の下方に表示されているAdapted SCSIのアイコンを開くことにより開始する。

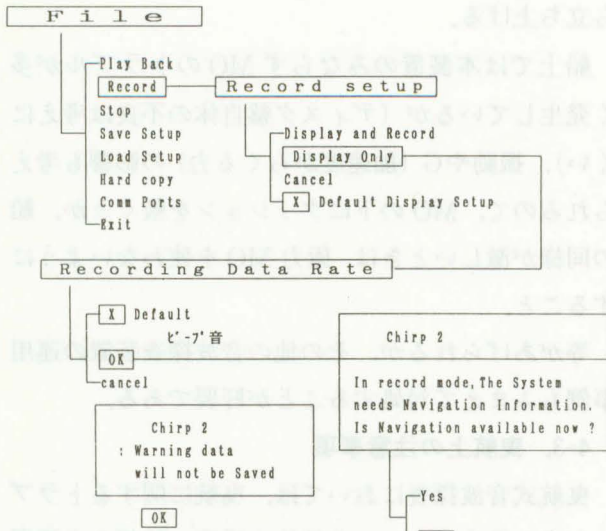
4-2. 操作上の注意事項

操作上の注意事項を以下に記する。

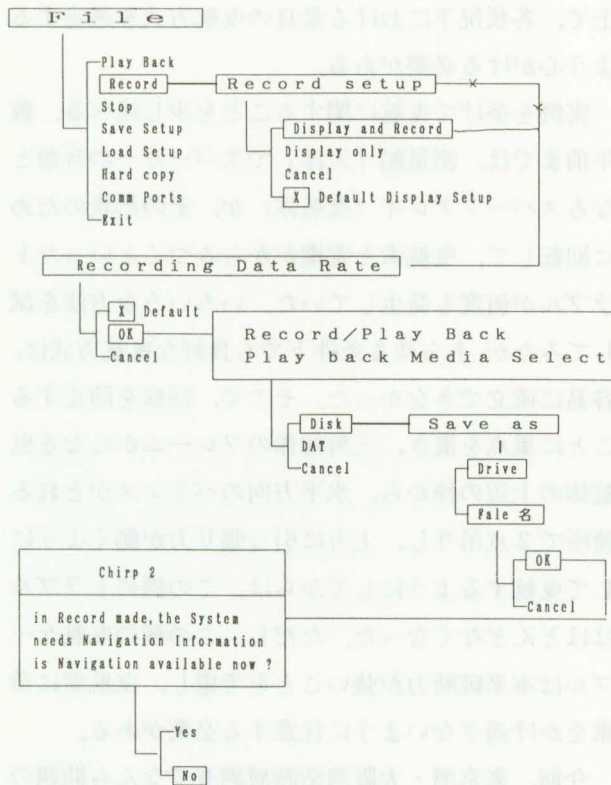
船体雑音をさけるため、本体から海中に直接シーアースをとる。入力電源は115Vなので、可能な場合は極力115Vのコンセントから電源をとる。

Controlsの数値がロックしたらTrigger SourceのInternalをExternalに戻し、再度Internalにセットすると作動する。

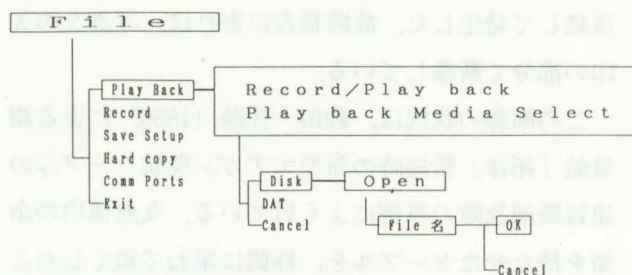
Bottom Tracking-TVGの数値がロックしたときは、Autoを一度Manualに戻し、再度Autoにセットする。



第2図 作動チェック Display Only



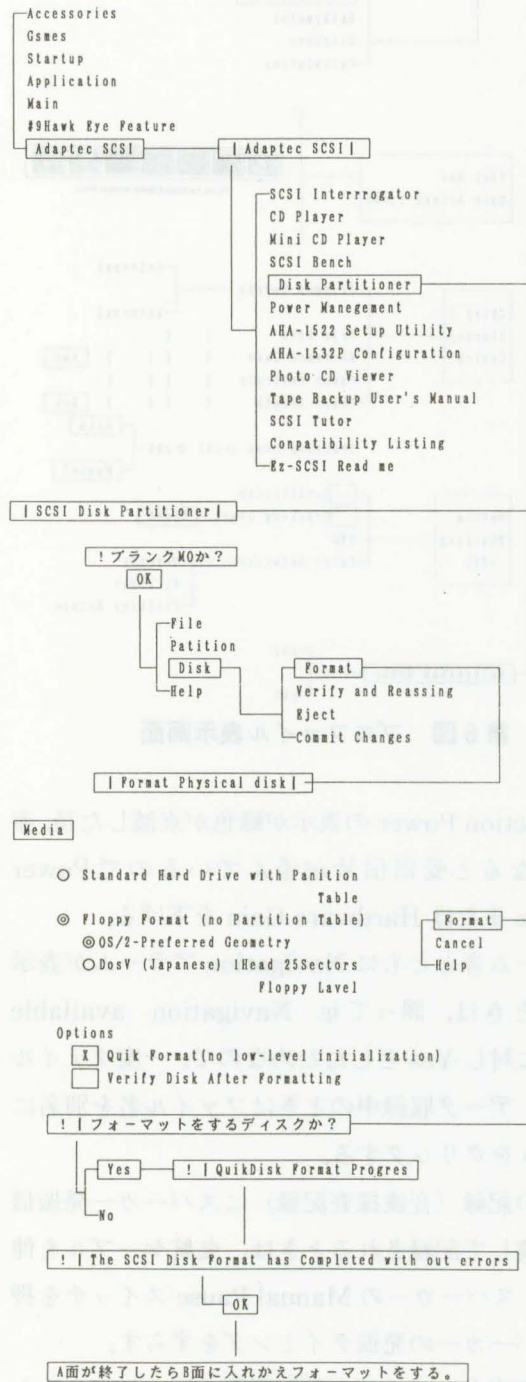
第3図 データ収録 Display and Record



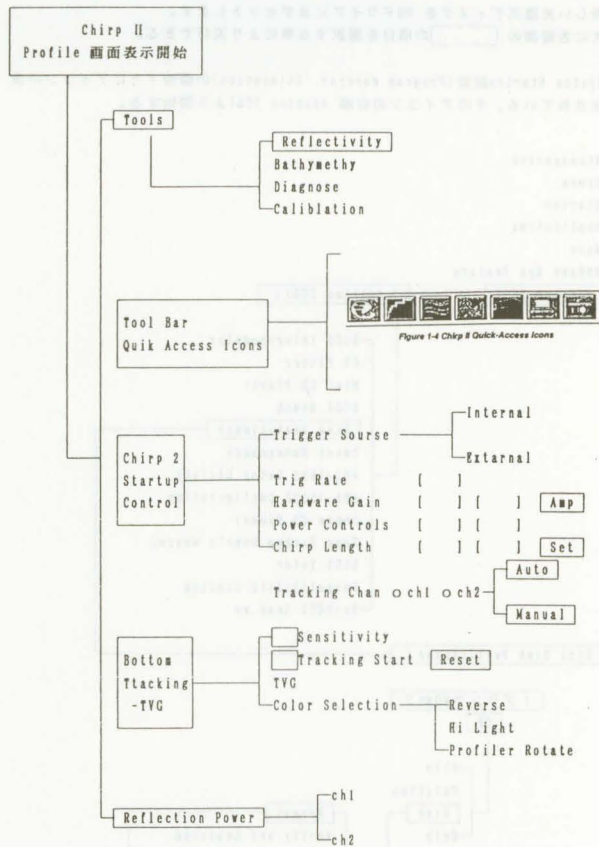
第4図 記録の再生 Play Back

新しい光磁気ディスクを M0ドライブにまずセットします。
次に各画面の [] の項目を選択する事により実行できる。

System Startup画面(Program manerer, Datasonics)の画面下方にアイコンが表示されている。そのアイコンの右端 Adaptec SCSIより開始する。



第5図 MOのフォーマット



第6図 プロファイル表示画面

Refraction Power の表示が緑色が点滅した後、赤点滅になると受信信号が歪んでいるので Power Controls または Hardware Gain を下げる。

アラーム音とともに Navigation アラームが表示されたときは、誤って is Navigation available now? に対し Yes としたためなので、一度ファイルを閉じ、データ収録中のときはファイル名を別名にして No をクリックする。

地層の記録（音波探査記録）にスパーカー発振信号が連続して記録されるときは、曳航ケーブルを伸ばすか、スパーカーの Manual Pause スイッチを押してスパーカーの発振タイミングをずらす。

記録密度を上げるため発振間隔を短くしているときは、発振パワーが高いと発振機構が高温になり、温度保証回路が働き発振がストップするトラブルが多く見られる。このような場合は、Power Controls か Source power の設定値を下げること。

パラメータ設定時にマウスを煩雑にクリックすると、画面がロックするので焦らずに設定すること。ロックしたらウインドを全て閉じて、再度 WIN か

ら立ち上げる。

船上では本装置のみならず MO のトラブルが多く発生しているが（ディスク盤自体の不良は考えにくい）、振動や G（加速度からくる力）の影響も考えられるので、MO の下にクッションを敷くとか、船の同様が激しいときは、極力 MO を使わないようにすること。

等があげられるが、その他の音波探査装置の運用事例もふまえて対処することが肝要である。

4-3. 曳航上の注意事項

曳航式音波探査においては、曳航に関するトラブルが多々発生するが、曳航体の構造・仕組みを把握し、船体の後部配置クレーン、ギャロス、ダビット等の機能、船速、海況、海底地形等を全て勘案した上で、各状況下における最良の曳航方式を選定するよう心がける必要がある。

事例を挙げて曳航に関することを少し述べる。数年前までは、測量船「天洋」でスパーカーの音源となるスパークアレイ（曳航体）が、その形状のために回転して、曳航索と電線がからみつくといったトラブルが何度も発生していた。いろいろな方法を試してみたが、あらゆる条件下でも良好な曳航方式は、容易に確立できなかった。そこで、回転を防止することに重点を置き、三角柱体のフレームからなる曳航体の上辺の枠から、水平方向のバランスがとれる箇所を2点吊りし、上方に引っ張り力が働くようにして曳航するようにしてからは、この種のトラブルはほとんどなくなった。ただし、この種の曳航ケーブルは本来破断力が強いことを考慮し、曳航索に荷重をかけ過ぎないように注意する必要がある。

今回、東京湾・大阪湾活断層調査でなんら問題の生じなかった CHIRP II の大型・小型曳航器内ケーブルが、伊勢湾活断層調査の初期に断線トラブルが連続して発生した。故障報告に寄れば、写真2の矢印の部分で断線している。

この断線の状況は、穀田・佐藤（1986）による測量船「拓洋」新造時の新型エアガン曳航ケーブルの連続断線故障の事例によく似ている。曳航体内の余裕を持たせたケーブルを、外側に束ねて短くしたことが原因と推察される。写真2の矢印部のように、

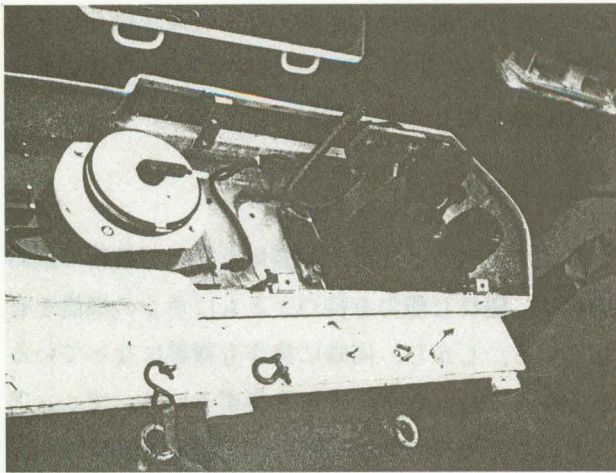


写真2 大型曳航器内送受波器の配備状況

ケーブルの接点部の片側が固定された部分に、もう一方の動き回るケーブルがモルト（固定）されている部分に回転力（ひねり）が加わった振動が伝わると、信号線が外側の保護材との摩擦やよじれ力により簡単に断線する。そこで、外側に束ねたケーブルをほどいて、曳航体内に余裕を持たせたところ、この種の断線トラブルはなくなった。

前述の3海域での活断層調査では、水深が浅く、スパーカとの同時探査の関係上、本装置の曳航器は、左舷のシークレーンを使い左舷から3mほど離して3~4mの深度で曳航されたが、常にこの方法が最良というわけではない。水深があるときや、ある程度の波が予想されるときは、後部舷側寄りの三方ローラーから、5m以上沈ませて曳航するのがより望ましい方法である。

曳航ケーブルはケブラー製なので、引っ張り力に対する強さは、大型曳航器を6ノットで曳航しても問題ないようになっている。しかし、投入・揚収の作業の容易さや不慮の事故などを考慮して、曳航索を使っている。この時、曳航索の方に極端に力をかけると、曳航バランスが崩れるので、曳航ケーブルと曳航索の双方に同等の張力、又は若干曳航ケーブル側に張力がかかるよう、投入前に双方に長さの目印を付けると良い。そして、曳航索と曳航ケーブルは、極力同一の曳航支点から曳航するのを原則とする。

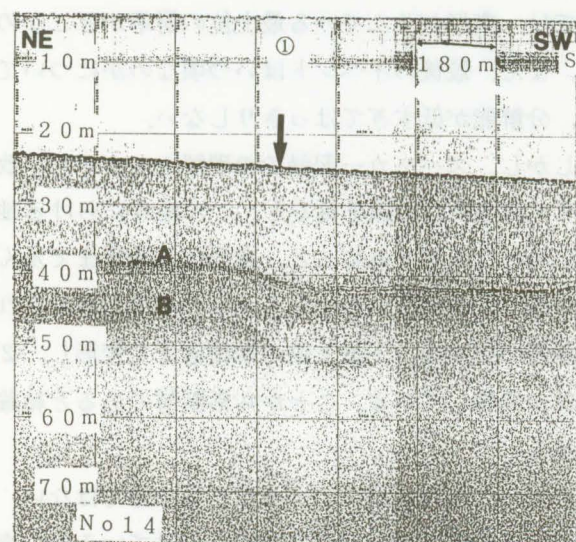
大型・小型の曳航器は、様々な表層音波探査作業を想定して用意している。曳航器の重量・浮力を考

慮し、小型のものは曳航ケーブルのみで20m測量艇により、水深100m以浅の地質・底質調査に、また、大型のものは、大型・中型船により、水深に応じて曳航深度を変えて、沿岸測量から海洋測量まで多目的で、表層の地層を探索できる。海況・水深・底質・地形及び調査船の能力等の観測条件をよく把握し、運用方法・条件を検討することにより、本装置が多くの調査場面で活躍する事を期待している。

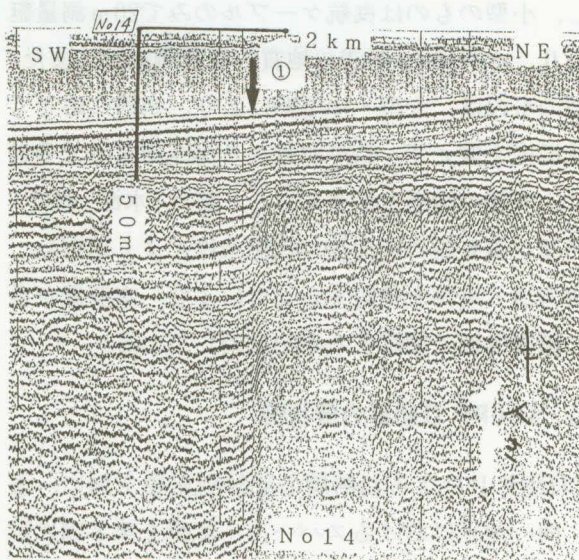
5. CHIRP II記録の解析例

CHIRP IIによる活断層の記録例を第7図に、また、同一地点におけるスパーカー記録を第8図に示す。本記録は、伊勢湾（常滑沖）において得られたものである。なお、本記録は、同一測線で得られたものではあるが、出力方法の違いにより東西方向が逆転していることに留意されたい。

CHIRP II記録では、海底下に反射面が2面ほど認められる(第7図A, B)。矢印を付した地点において、海底下の反射面がわずかに撓んでいることが認識される。ただし、このわずかな撓みが断層であるかどうかは、この記録からだけでは何とも言えない。単なる埋積海底谷や段丘の断面を見ているだけなのかもしれない。一方、スパーカー記録(第8図)をみると、第7図と同じ地点(矢印を付した地点)



第7図 CHIRP IIの記録例
(2~7 kHz, 発振間隔0.25秒, 出力700/1000)



第8図 同一測線におけるスパーカー記録
(1000J, 発振間隔1秒)

において、地層が大きく変形していることが容易に認識される。この地層の食い違いは、上位の層準では地層が完全に切れた「断層」ではなく、切れずに撓んだ状態を保っている「撓曲」となっているようではあるが、少なくとも下位の層準では「断層」となっていることが容易に理解される。地形の変位量は下位の層準ほど大きく、探査可能な限界深度以深まで、地層の変形が続いている。「古い」下位の地層ほど変形のイベント（地震）を多く経験し「変位が累積」していることになる。ただし、スパーカー記録では、変形が及んでいる最上位の層準がどこなのか、また、最後のイベントはいつ頃なのかについては、分解能が低すぎてははっきりしない。

しかし、スパーカー記録での理解をふまえて、改めてCHIRP II記録を見ると、この地点における地層の変形は断層であること、変形は沖積層まで及んでいることが判る。以上から、この地点で認められる地層の変形は、(1)最上位の堆積層まで変形し、(2)変位が累積している、ことから活断層であると結論される。

ただし、現状の記録では必ずしも十分ではない。第7図Aの層は断層による変形を受けているが、海底面は断層による変形が認められない。従って、最後のイベント（すなわち地震）の発生は、この間にあることは判るが、あまりにも両者の間隔が広すぎ

る。この間の層準からも詳細な反射面が得られるように、出力のパラメーターを調整するか、場合によっては記録を取り直す必要がある。

6. おわりに

今まで述べたように、本装置を含めて最新の観測機器は、優れた能力を持つとともに多くの機能を有している。しかし、同時に操作も複雑になっていることから、良好なデータを取得するには、マニュアルを通じた操作・保守・管理上の知識・技術に加え、その観測に関わる分野の理論・背景等の知識を理解・把握しておかねばならない。簡易マニュアルに頼って操作するだけでは、トラブル時のとっさの判断にも応用できないばかりか、その調査の目的を果たすために必要なレベルのデータを取得することは出来ない。調査の目的や解析法を十分理解し、機器の原理をふまえた上で適切な調整や操作を行うことが、良い調査成果を得る上で重要である。

本稿を書くにあたり、十分な時間機器を使ったわけではないので、表現・内容には間違い等もあると思われる。お気づきの点についてはどんどん指摘して頂きたい。

最後に、導入したばかりの本装置を使用し、活断層調査にご苦労なされた中型測量船乗組員の皆様、多くの生の声を聞かせていただいた観測科、上乘り職員及び関係者の方々に、この紙上を借りてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- DATA SONIC Inc. : CHIRP II (DSP 661) Operation/Instruction Manual.
- 穀田昇一・佐藤繁 : 拓洋搭載深海用音波探査装置の使用上の諸問題と解決対策について—観測ノート—, 水路部技報, 4, p93~109, (1986)
- 打田明雄 : CHIRP II 簡易マニュアル (手記), (1995)
- 吉川虎雄・杉村新・貝塚爽平・太田陽子・坂口豊 : 新編日本地形論, 東大出版会, p415, (1973)