

白嶺丸船上から生まれた音響探査機器

西村清和¹⁾

1. プロローグ

2000年3月18日、我々、地質調査所海洋地質部の実験グループメンバーを乗せた白嶺丸は千葉県船橋の専用基地を出港し、一路、下関の三菱重工造船所へ向かった。白嶺丸最後の回航である。東京湾を出てもさほど揺れを感じない。久しぶりに伊豆大島を間近に見た。快適な航海となりそうだ。3日間の短い航海の中で、途中、現在開発中の深海曳航地層探査装置の海域実験を行うため、関係機関のご好意により乗船させてもらったのである。翌日、潮岬西方約60km、水深約1,500mの実験海域に到着すると、探査器を水中へ投入し、実験を開始した。初めての海域実験であるが、乗組員は以前から扱っていた装置の如く淡々と投入作業を進める。先端的テクノロジーのかたまりと言って良い地層探査器である。これを深海底の海底高度100m程度のところを曳航し、高分解能の地層探査記録を得ようとするものである。

思えば、白嶺丸をベースに種々の調査機器を開発してきたことが思い出される。白嶺丸の調査航海あるいは回航を利用し、海域実験を行い、問題点が発見されれば改良し、再び海域実験に臨んだ。さながら動く実験室と言ってもよい。ここでは、白嶺丸で海域実験を行いながら完成させた2つの音響探査機器を紹介する。

2. 音響探査機器の開発

音波は電磁波と違って、水中での減衰が小さく、比較的伝播しやすいので、水中音波が海洋調査あるいはその他の目的に使用されてきた。音波を利用した測定器として音響測深機(echo sounder)が

代表的である。海面付近から音波を発射し、海底で反射し戻って来るまでの時間を計り、それを1/2とし、音速(約1,500m/秒)を乗ずることにより海底までの水深を算出することができる。この測定原理は、英国豪華客船「タイタニック号」遭難の悲劇をきっかけに始まった冰山を探知する装置の研究開発の過程で発明されたという。

音響測深機は深海用で12kHz、通常は数百kHzの超音波が使用されていて、海底を明瞭に検出するが、海底下では音波は吸収効果で減衰し反射波を得ることができない。海底下の構造を探査するには吸収減衰の少ない低周波の音源が使用される。このような探査方式は、海洋では音波探査と呼ばれている。音波探査法は、海底下の構造を明らかにするうえで必須の役割を果たしている。例えば、(1)海底地質層序の把握、(2)海底堆積形態(乱泥流堆積物、地入り構造)の把握、(3)活断層分布など海底地質構造の把握等、海洋地質学、堆積学、地震予知の研究に不可欠の物理探査技術である。地質調査所では日本周辺の海底地質調査を白嶺丸を使用して行ってきたが、音波探査の記録の質の向上が常に望まれていた。そういった中で音波探査装置の改良や新規の開発が行われた。

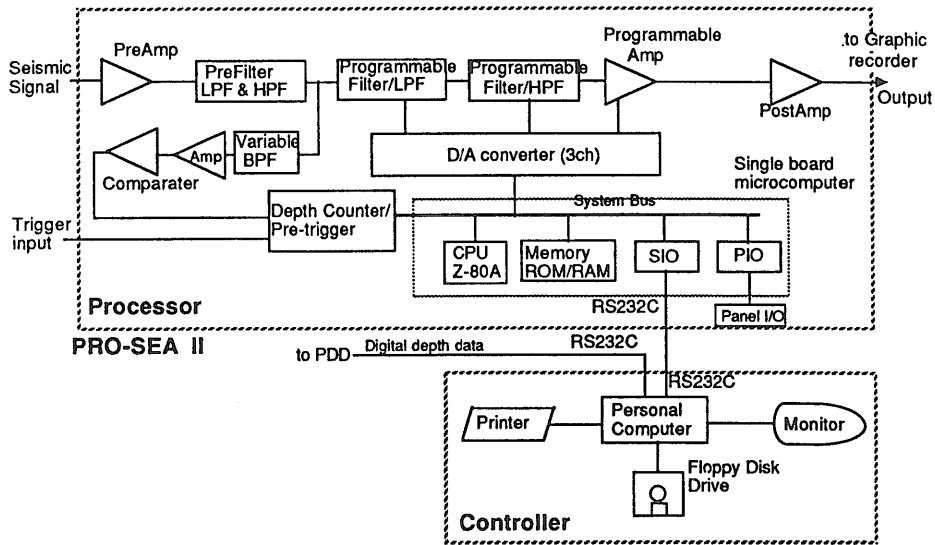
音波探査における記録の高品質化は、具体的に以下の点が挙げられる。

- (1) 分解能の向上
- (2) 探査深度の向上
- (3) SN比の向上
- (4) 散乱等による歪みの解消

これらを満足させるためには、音波探査装置の発振系と受振系の検討、改良が必要である。1980年～1986年にシングルチャンネルアナログ音波探査装置の受振系の改善を図った「プログラマブル

1) 地質調査所 海洋地質部

キーワード：音波探査、プログラマブルTVG・TVF、深海曳航式音波探査、マルチセンサ型深海曳航探査



第1図 プログラマブルTVG・TVFサイスミックプロファイラPRO-SEA IIのブロック図。反射波の入力信号はプリアンプおよびプリフィルタを通り、プログラマブルフィルタおよびプログラマブルアンプへ入力される。プログラマブルアンプ・フィルタは予めプログラムしたアンプ利得、フィルタの中心周波数および通過帯域特性データで制御されるようになっており、海底面からの反射信号を検知すると、アンプ・フィルタの特性を時間の関数として変化させ、TVG・TVFを行う。プログラマブルアンプ・フィルタを通った信号は、ポストアンプで増幅され、グラフィックレコーダに出力される。

TVG・TVFサイスミックプロファイラ」を開発した。また1984年からは、音波探査受振器の受振位置を海底近傍とし、水平分解能を向上させた「深海曳航式音波探査システム」の開発を始めた。折しも、マイクロコンピュータ、パーソナルコンピュータなどマイクロエレクトロニクス技術発展の黎明期であり、各種の先端的電子デバイスをいち早く取り入れ探査機器の開発を行った。

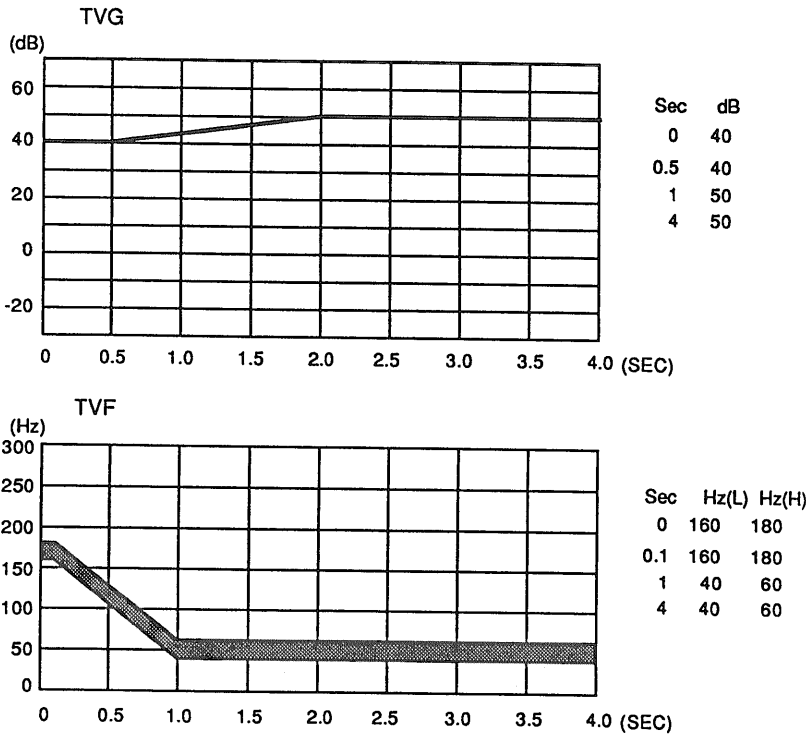
2.1 プログラマブルTVG・TVFサイスミックプロファイラ

エアガンなどの音源から発せられ、海底下の各地層で反射する音波のエネルギーは、深部に伝播するに従い、球面発散効果、吸収効果、透過損失により減衰する。従って反射波の振幅は海底下浅部に比べ海底下深部のは微弱となる。また反射波の周波数特性は、海底下浅部では広帯域の周波数成分を有するが、伝播距離の増加とともに高周波成分は減衰し、海底下深部では低周波成分だけとなる。このため増幅器の利得、フィルタの帯域周波数を固定した音波探査装置による探査記録は、海底下浅部においては反射信号が強すぎ、か

つ低周波成分が分解能の良い高周波成分をマスクするため見づらいものとなる。また、海底下深部では振幅が小さくなるので反射信号は記録に現れなくなる。

これに対し「プログラマブルTVG・TVFサイスミックプロファイラ」では、アナログ方式音波探査装置のアンプ・フィルタ部分について、上述の欠点を除去した新方式のシステムである。すなわち、本装置では、海底下浅部から深部までの反射波を受振する際、探査装置の増幅器の利得特性及びフィルタの周波数帯域特性を時間の関数として変化させるTVG (Time Variant Gain) およびTVF (Time Variant Filtering) をマイクロコンピュータを用いて正確かつ自在に行うことを可能にした。具体的には、海底地層における音波の減衰特性に応じて、海底下浅部において増幅器利得を小さく、フィルタの中心周波数を高くして、海底から深くなるに従い増幅器利得を上げ、フィルタの中心周波数を低く設定する。これにより記録の分解能、探査深度およびSN比の大幅な改善が図れた。装置は外部入力利得制御可能なプログラマブルアンプ、外部入

TVG/TVF CONTROL DATA



第2図

TVG・TVF制御データの一例。TVGは4秒間に利得が40dBから50dBに変化する。TVFは4秒間に低域遮断周波数が160Hzから40Hzに、高域遮断周波数が180Hzから60Hzに変化する。TVG・TVF制御データは利得、低域および高域フィルタの各遮断周波数について、それぞれ1バイト単位の250個の配列で構成している。

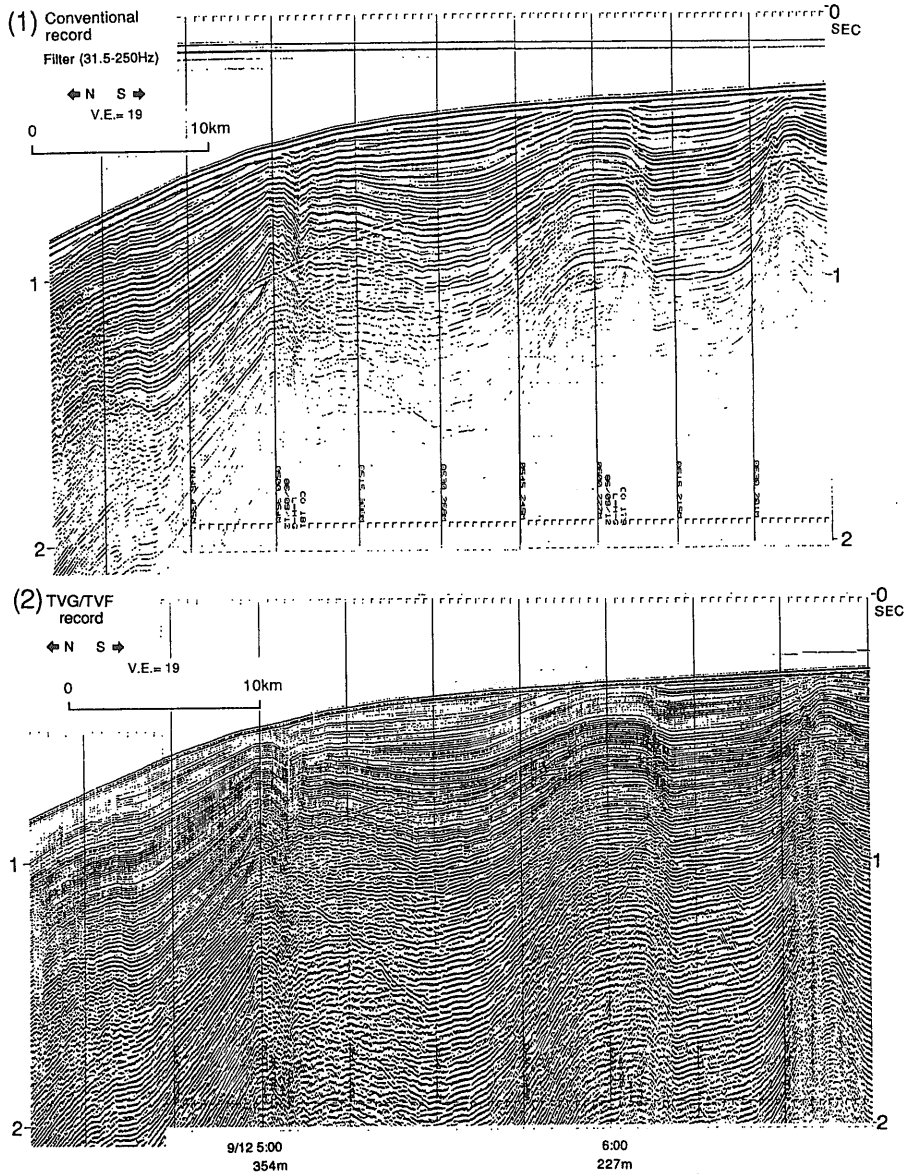
力で遮断周波数の制御ができるプログラマブルフィルタ、アンプ・フィルタを制御するためのD/Aコンバータ、マイクロコンピュータ等から構成されている。プログラマブルフィルタの中心周波数および通過帯域の特性に対応する時系列データ(TVG・TVFデータパターン)をあらかじめマイクロコンピュータにプログラムしておき、海底面からの反射信号の検知に基づき、アンプ・フィルタの特性を時間の関数として変化させる。開発装置の1号機(PRO-SEA Iと名付けた)はパーソナルコンピュータPC-8001(NEC)をベースに製作したが、その後、1号機の使用経験をもとに改良を行い、実用的な2号機(PRO-SEA II)を設計製作した。2号機ではアンプ・フィルタ、マイクロコンピュータ等を小型の電子デバイスに置き換え、装置のコンパクト化と使い勝手の向上を図った(第1図)。制御(時系列)データはTVG用、TVF用(ローパスおよびハイパスフィルタ)の3つがあり、各データは1掃引あたり250ポイントである。制御データの一例を第2図に示す。これらは、プログラマブルに随時設定することができ、海底地質構造に応じて最適なデータのパターンを選ぶことが

できる。第3図に島根県日御碕沖(白嶺丸GH86-4航海、1986年9月)でのPRO-SEA II及び従来システム(アンプ利得、バンドパスフィルタの帯域周波数固定)による音波探査記録断面を示す。

2.2 深海曳航式音波探査システム

音源と hidroホンを海面近くで曳航する通常の音波探査では深海底での探査のように音波の往復時間が長くなると、音波の拡散による海底での反射面積の拡大により水平方向の分解能が低下し、また海底地形が複雑なところでは音波の散乱、側方反射の発生により、真の海底構造を記録することができなくなる。このような問題点を解決する一つの方法として、深海曳航探査法がある。音波探査装置の音源および受振器、または受振器のみを深海底近くで曳航することにより、浅海域での探査と同様の配置となり、その結果水平分解能を向上させることができる。

地質調査所では1984年から現在に至るまで深海曳航式音波探査システム(DTS, Deep Tow Seismic system)の開発を継続的に行っている。1984

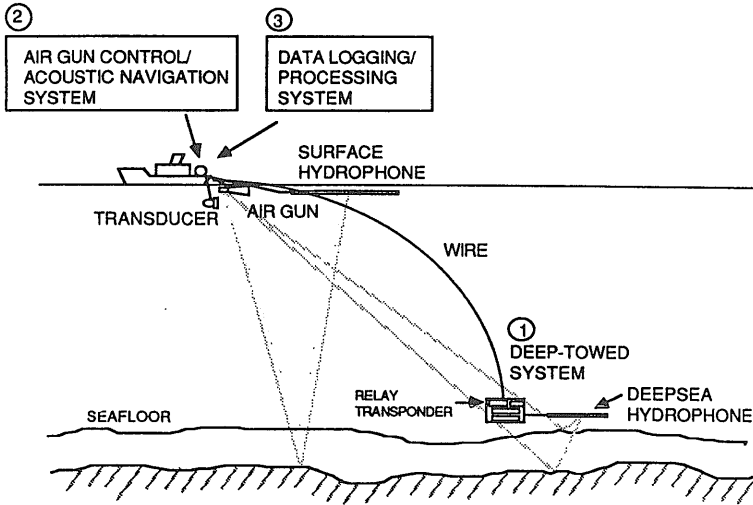


第3図 プログラマブルTVG・TVFサイスミックプロファイラPRO-SEA IIおよび従来システムによる音波探査記録断面。上図は従来システム、下図はPRO-SEA IIによる同一測線記録、海域は鳥根県日御碕沖、水深約200～600m。音源としてBOLT PAR 1900Cエアガン(容量120m³、WSK付き、圧力1500psi)2台使用、ショット間隔6秒、速力10kt、記録幅2秒。

年から1988年にかけて第一世代のシステムを開発し探査実験を行った。その後1994年からは第二世代、1996年からは第三世代のシステムの開発を始めた。

深海曳航式音波探査システムは(1)深海曳航器、(2)音源発振制御・曳航器測位装置、(3)船上データ収録編集装置の3装置から構成され(第4図)、

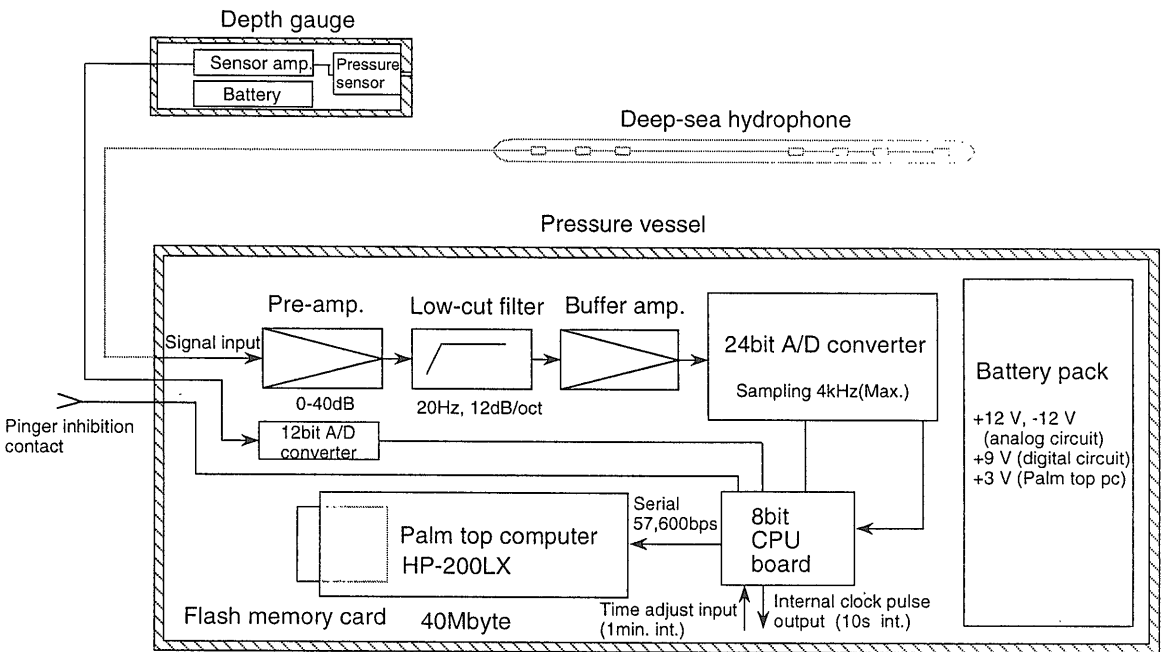
曳航器を取り付けた曳航フレームを海底上100～300m程度のところで曳航ワイヤを用いて曳航する(約2～3ノット)。一方海面付近にはエアガン、ウォーターガンなどの音源を曳航する。曳航器内部には、探査データ記録器を備えたシングルチャンネルデジタル探査器があり、深海ハイドロホンで受けた反射波データは曳航器の中でデジタル化され、曳



第4図
オフライン深海曳航式音波探査システムの概念図。
探査システムは、
(1) 深海曳航器
(2) 音源発振制御・曳航器測位装置
(3) 船上データ収録編集装置
から構成される。

航器内の大容量メモリに蓄積される。探査終了後、深海曳航器を船上へ回収して収録データを取り出す。本システムの特長は、(1) 曳航器内に探査データ記録器を備え、ワイヤで曳航するオフライン方式である、(2) 曳航器の耐圧水深は10,000mで、全世界の殆どの海域で適用できる、(3) 記録器として、

機械的なショックに強い固体メモリを使用している点にある。第一世代のシステムでは大容量メモリとして4Mビットの磁気バブルメモリ(素子の大きさは、縦横高さ 37mm×42mm×9mm)を32個組み合わせ、16Mバイトの容量を得た。当時16Mバイトメモリ装置の設計製作は磁気バブルメモリの開発



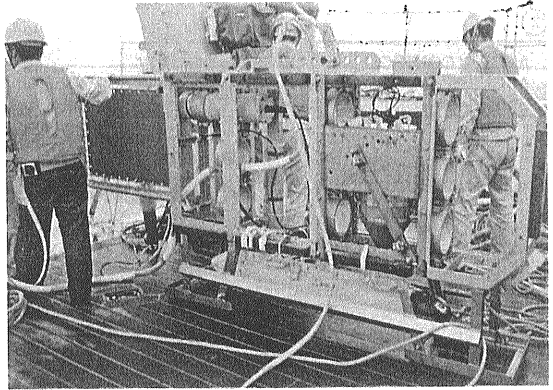
BLOCK_seismic

第5図 深海曳航音波探査器のブロックダイアグラム。深海ハイドロホンで受波した反射波信号はプリアンプ、フィルタを通りA/Dコンバータでデジタル化される。デジタルデータは超小型コンピュータに設けたフラッシュメモリカードに格納される。

メーカーも経験が無く、DTS開発に参加している技術者たちが幾晩も徹夜して完成にこぎつけた。磁気バブルメモリは将来を嘱望された記憶素子であったが、ICメモリの台頭とともに、表舞台から消えた。

第一世代の探査器は外径17.5cm、全長1.5m、空中重量85kgの耐圧容器2本から構成されていた。この中に、受振器、記録器、電池などが収納されているが、大変重く、扱いにくかった。そこで、探査器のコンパクト化を検討したが、幸いにして、エレクトロニクス技術の長足の進歩、特にICメモリの高密度化とパーソナルコンピュータの小型化で装置の小型化が実現可能となり、コンパクト化された第二世代の探査器の開発を行うことができた。この探査器は外径約16cm、全長約57cm、空中重量約20kgの耐圧容器に収納されている(第5図)。

深海曳航探査は精密探査が行える反面、長大なワイヤまたはケーブルを曳航することから船の航行速度が2-3ノットに抑えられ、その調査効率は通常の航走観測に比べ格段に悪い。そこで深海で同時曳航可能な他の探査機器を一つの曳航フレームに搭載し、一回の曳航探査で複数の探査データを得ることにより海底構造の解釈を総合的に行うことを目指した。これを「マルチセンサ型深海曳航探査」と名付け、前述の第二世代の深海曳航探査器と深海曳航式プロトン磁力計(東京大学海洋研究所所有)、深海サイドスキャンソナー(地質調査所所有)を組み合わせた探査システムを構築した(第6図)。マルチセンサ型探査システムによる深海曳航探査は、「白嶺丸」による北海道西方海域調査航海(GH96航海、1996年7月)および東海沖調査航海(GH97航海、1997年5月)の中で実施し、マルチセンサ化の効果を実証した。中でも、GH97航海の天竜海底谷(水深1,300m)で行った深海曳航探査では、その中で深海ハイドロホンの改良も進め、SN比の良好な探査記録を得ることができた。この探査により深海曳航式音波探査が海底断層の詳細な構造を調査できる可能性を示すことができた。



第6図 投入準備中のマルチセンサ型深海曳航探査システム(白嶺丸後部甲板、1996年7月)。

3. エピローグ

先日、あるコンサルタント会社の技術者からプログラマブルTVG・TVFサイズミックプロファイラに関する文献の請求があった。私は、今やデジタル全盛の時代で、この装置の役目はすでに終わったものと思っていた。ところが、沿岸域の小規模な音波探査ではまだまだアナログ音波探査が使われているので、この技術が活用できるという。最近の小型携帯機器などに多用されているDSP(Digital Signal Processor)によるデジタル信号処理技術等を利用する事により、この装置が先端的な調査機器として復活する日もあるかもしれない。

3月20日午後3時、2隻のタグボートに引かれた白嶺丸は下関造船所の1号岸壁に着岸した。ここに白嶺丸25年の航海が終了した。

白嶺丸、そしてわれわれの海域実験にご協力、ご支援くださった白嶺丸乗組員の皆様ならびに関係機関の皆様には厚くお礼申し上げます。長い間ありがとうございました。

NISHIMURA Kiyokazu (2000) : Marine seismic profiling instruments which were produced on board of R/V Hakurei-maru.

<受付: 2000年4月7日>