

海底精密音響測距とその問題点

藤本博巳*¹ 瀬川爾朗*¹

海底における測地学的・地球物理学的長期観測を行う最初のステップとして、相模トラフ軸の両側に汎用海底ステーション用の海底ベースを設置した。海底ベースはピンガー付き音響トランスポンダでその位置を約2mの精度でモニタしながら、予定した泥質の海底に設置された。昭和62年秋と63年秋の「しんかい2000」による潜航調査により、約1年の間における設置状況の変化はほとんど認められず、海底ベースを海底長期観測の基準点として使用できることが確認された。

普通用いられている振幅測定ではなく位相測定による超音波測距を行うことにより、測定分解能を2桁程度向上させてセンチメートルオーダの測距分解能が得られる見込みであり、精密音響測距による海底地殻変動観測が今後のひとつの課題である。測距の方法としては、M系列信号の相関処理による方式と、周波数変調によるパルス圧縮方式の2つが考えられる。傾斜角1.5度以上の谷側斜面に設置した海底ベースに振動子を固定し往復測定をし、海底において温度を測定して温度補正すれば、 10^{-5} の分解能で海底の距離変化を検出できる見込みである。

On Precise Acoustic Range Measurement at the Ocean Bottom

Hiromi FUJIMOTO*² and Jiro SEGAWA*²

The Ocean Bottom Bases (OBBs) were installed on both sides of the Sagami Trough axis as the first step toward long-term geodetic and geophysical monitoring at the ocean bottom. The position of the bases were monitored by using an acoustic pinger and a transponder system with an accuracy of about 2m to be installed on a desired position. It was confirmed during the diversions of "SHINKAI 2000" in autumn 1987 and 1988 that the OBB installed in the mud was stable enough to be used for long-term ocean bottom measurements.

The resolution of seafloor range measurement can be improved by two orders so that a centimeter accuracy can be attained for the measurement of ocean bottom crustal movement by using phase measurement techniques in place of amplitude measurement. Two methods are proposed for the precise phase measurement: M-sequence phase-coded pulse compression and linear frequency modulated pulse compression. A precise acoustic range measurement of the order of 10^{-5} is feasible under the following conditions: return measurement is made between two OBBs installed on the slope facing

*¹ 東京大学 海洋研究所

*² Ocean Research Institute, University of Tokyo

each other with the angle more than 1.5 degree, and long-term temperature effect is corrected by measuring temperature at the bottom.

1. はじめに

超長基線電波干渉計 (VLBI) や人工衛星レーザー測距 (SLR) により、この2~3年間のプレート運動の速度は、地学的に求められた過去数百万年の間の平均的な速度にほぼ一致し、大局的にはプレート運動の速度はほぼ一定であることが分かってきた。しかしながら一方で、プレートの沈み込みにもともなう地震は間欠的に発生している。プレートの沈み込み運動や海底下の地震活動ともなって、沈み込み境界である海溝やトラフにおいて実際にどのようなことが起こっているのか、ということはほとんど分かっていない状態である。

このような問題を解明するために計画されているのが、「しんかい2000」の潜航調査を基礎にした、相模トラフ軸周辺における測地学的・地球物理学的な海底長期観測である。その最初のステップとして、相模湾内のトラフ軸の東西に海底観測ステーション用の海底ベースを設置した (瀬川・藤本, 1988)。

その設置にあたって重要なことは、白ウリ貝コロニーの観測などを想定しても分かるように、指定した位置に設置することである。実際の設置作業に当たっては海底ベースを船からワイヤで吊り下ろし、その位置をピンガー付きの音響トランスポンダシステムによりモニターすることにより指定した地点に設置した。設置後、「しんかい2000」の潜航調査において、音響トランスポンダの交換と海底ベースの設置状況の観察を行った。今後、精密音響測距により海底ベース間の距離変化をセンチメートルオーダーで測定し、海底地殻変動を

検出することを計画している。本報告では、海底ベースの測位や海底観測結果を示すとともに、海底精密音響測距とその問題点についてまとめた。

2. 海底ベースの測位

音響トランスポンダ測位の研究は、海中における詳しい調査研究の基礎となるものであり、海洋科学技術センターや東京大学海洋研究所等で行われてきた。はじめは外国製品の使用を試みていたが、信頼性や使い勝手に問題があり、東京大学海洋研究所では海洋電子機器と共同で手軽で使い易いLBL (long-baseline) 方式の音響トランスポンダシステムの開発を進めてきた (古田・他, 1984)。その後パーソナル・コンピュータを用いたデータ処理等にも改良を加え、手軽で使い易い実用的なシステムの開発をほぼ完了し、この2~3年の間に海中・海底におけるいろいろな観測に用いてきた (Fujimoto et al., 1988)。

海中の測位システムが確立したので、海底ベースを船上からワイヤで吊り下ろし、この音響測位システムによりその位置をモニターし、所定の場所に設置する作業を行った (瀬川・藤本, 1988; 藤本・他, 1988)。このような方法により、1987年10月に、東京大学海洋研究所の研究船淡青丸により相模湾の初島の東方約10km、水深1,370mの海底に、コンクリート製の海底観測ステーション用海底ベース (OBB, Ocean Bottom Base) 1号機を設置した。今回は試験的な設置であったので、相模湾内の平坦な場所を選び、3台の音響トランスポンダを船上から投入して、海底ベースの

測位を行った、白ウリ貝のコロニーなど特定の場所に設置する場合には、海底トランスポンダの1台を、潜水船等を用いて海底観測ステーションの設置予定地点の近く（そこからの方向と距離が正確に測定されている地点）に設置しておけば、そ

こからの距離は正確に求められるから、他の2台の音響トランスポンダを船上から投下しても、設置予定付近において正確な位置出しを行うことができる。

図1は海底ベース1号機を設置するために用い

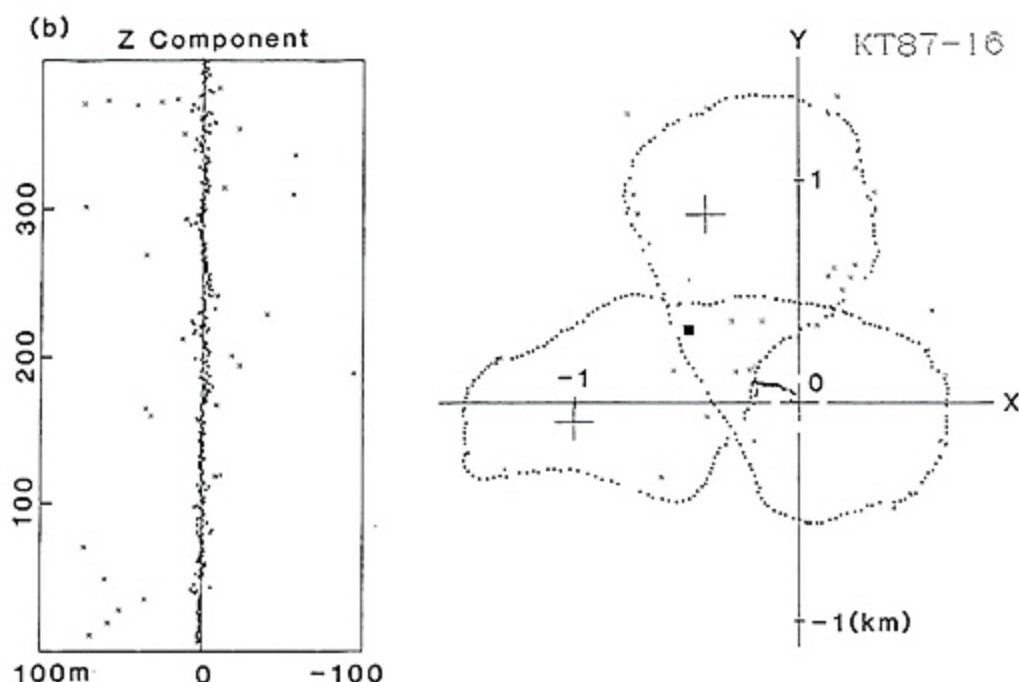


図1 海底ベース1号機を海底に設置するために敷設された音響トランスポンダネットの位置とそれを決定するための音響測位による淡青丸の航跡。音響測位による船の鉛直位置の誤差を左に、航跡図を上を示す。点は正常な値、×は誤差データ、+は海底のトランスポンダ、黒い四角はOBB 1号機の位置を示す。

Fig.1 Result of transponder navigation for relocation of the transponder net deployed for installation of an ocean bottom base(OBB No.1). Errors in vertical ship's positions determined by the transponder system are plotted for each interrogation sequence on the left, and the ship's track on the right. Dot, correct ship's position; ×, Wrong ship's position; Plus, transponder's position; Square, OBB installed afterwards.

られた音響トランスポンダネットの位置と、その位置を詳しく再決定するために行った音響測位システムによる船位決定の結果を示したものである（藤本・他、1988）。図中でA、B、Cの“+”印は海底の音響トランスポンダの位置であり、黒い四角は海底ベースの設置点である。図の左側には、音響トランスポンダネットの位置を再決定した後得られる船位の鉛直成分の誤差を、測定順に示してある。この誤差が最小になるように、ト

ランスポンダネットの位置を決めた。“×”印は音響ノイズにより乱されたデータであり、これらを除くと誤差の標準偏差は約3mである。

海中の不動点の位置決めを行うことにより、音響測位システムの測位精度を評価することができる。海底観測ステーションを利用した最初の測定として、船を約0.6ノットの微速で変位させながら、約40分間にわたって2分毎に海底ベースの3次元的な測位を行い、得られた結果を図2に示し

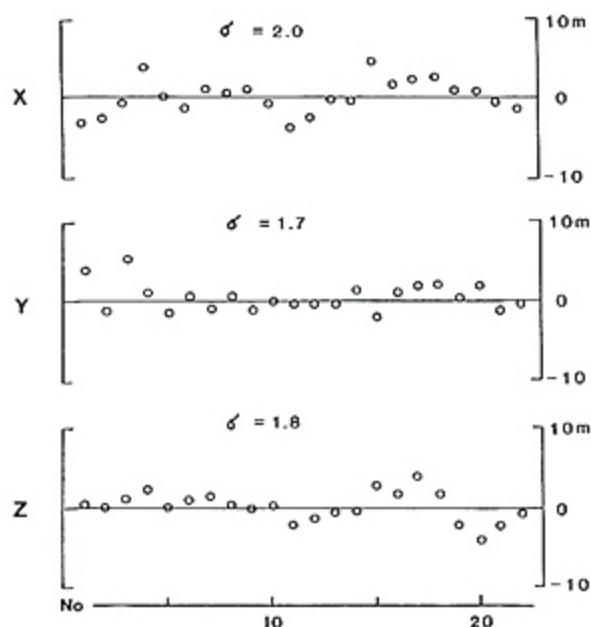


図2 船位を微速で変えながら海底に設置した海底ベース1号機の位置を音響測位システムにより2分毎に求めたときの誤差。横軸はショット番号であり、Xは東、Yは北、Zは鉛直向きを示す。標準偏差 σ は2mより小さい。

Fig. 2 Fluctuation of 3-D positioning data of the OBB No. 1 on the sea floor determined every 2 minutes by the transponder system. 'No' shows interrogation sequence, X, East; Y, North; Z, Upward; σ , Standard deviation in meter.

た。各成分とも22回の測定の前値との差を示している。この測定の間に船は800m変位したが、測定された海底ベースの位置は3成分とも系統的な変化は示しておらず、測定された位置は正しい値である事を示している。各成分について、測位誤差は標準偏差で2m以下である。したがって、相模湾において約2mの測位精度で海底ベースを設置できることになる。

その後1988年春に、淡青丸により相模湾の海底にOBB No. 2を設置した。日本測地系における2つのOBBの位置は、No. 1については35°00.74' N, 139°16.44' Eであり、No. 2については35°00. N, 139°16.44' Eである。これらの位置は、音響

トランスポンダネットの位置をロランCにより決定し、さらにロランC電波の伝播速度の補正（小野・長森，1985）をし、日本測地系に変換することにより求められた。ロランCの測位精度は一般的に50m程度であるとされているから、測地座標上のOBBの位置の精度も同程度であると考えられる。図3に示すように相模トラフ軸の東西に設

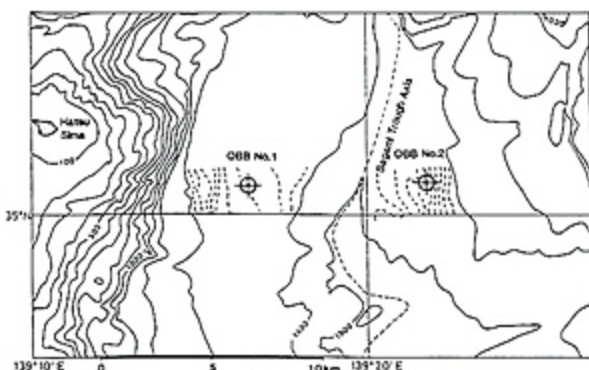


図3 1987年相模トラフ軸の西に設置されたOBB 1号機と翌年その東に設置されたOBB 2号機の位置。海底地形図は水路部による。

Fig. 3 OBB No. 1 was installed in 1987 on the seafloor on the west side of the Sagami Trough axis, Central Japan. OBB No. 2 was installed in 1988 on the other side. Bathymetric contours were drawn after a Topographic Map of the Sagami Bay published by the Hydrographic Department, Japan. Depths are shown in meter.

置された2つのOBBは、プレート運動に伴う測地的・地球物理学的海底変動を検出するための、海底観測ステーションとして利用される予定である。

3. 「しんかい2000」による潜航調査

OBBの1号機については、設置してから約1ヶ月後の1987年11月に、海洋科学技術センターの潜水船「しんかい2000」による潜航調査が行われ、写真1に示すように、8割ほど泥に埋まった状態で海底に水平に設置されていることが確認された（瀬川・藤本，1988）。それから約1年後に

再び潜航調査を行うことができた。1988年10月29日より11月1日まで支援母船「なつしま」に乗船し（瀬川・藤本・藤），10月30日に藤本がOBB1号機の設置点に潜航し，音響トランスポンダの交換と設置状況の変化を調査した。

OBBに固定してある音響トランスポンダには，「しんかい2000」が接近したときに，支援母船において音響コマンドによりフラッシュをON/OFFできる機能を付加してある。1988年の潜航時には，このフラッシュが約50mの距離から確認することができて，海底ベースの発見や，そのまわりの海中作業に役立った。しかし1年後の1988年秋の潜航においては，音響トランスポンダの応答もなくフラッシュも使用できなかった。音響的にOBBの位置を決定することができなかったため，ロランC測位に基づいて「しんかい2000」でOBB1号機の設置点付近を探ることになった。ロランCの測位精度は50m程度であるのに，相模湾の海底の視程は5m程度であることから困難が予想されたが，CTFMソナーが有効に働き，比較的短時間の搜索でOBB1号機を発見することができた。発見した位置は予想位置の東方約50mであり，この差はロランC測位の誤差によるものである。

OBB1号機の敷設状況は，写真2に示すように1年前の潜航時とほぼ同じ状態であった。但し，OBBの側面が泥の表面からどれだけ出ているかを見ると，ひとつの側面については泥の面が数cm上昇しているように見える。これが底層流の影響かそれともOBBの沈下によるものかということは，今後調べる必要がある。

この機会に音響トランスポンダの交換を行った。応答しなくなっていた古いトランスポンダは，トランスジューサ部分が電蝕をうけて穴があいていた。トランスジューサの帯電あるいは水中コネクタ部分の絶縁不良が原因である可能性がある。

4. 海底精密音響測距とその問題点

今回の実験で用いた音響トランスポンダ測位システムは，手軽に，海中でメートルオーダーの測位を行うために開発されたものであり，単周波の音波のワンショット・パルス到達時間による距離測定を行っている。10kHz帯の超音波の振幅測

定による時間間隔測定の分解能は，音響トランスジューサの特性等から1msec程度であるといわれており，距離換算で約1.5mである。今回設置したOBBの測位の分解能は約2mであり，ほぼ標準的な測距分解能が得られていることを示している。

一方でプレート運動とそれに伴う地殻変動の年間の変動量は，火山活動や地震に伴う断層運動などを除けば大きくみてもセンチメートルのオーダーである。したがって海底の歪観測には少なくともセンチメートルオーダーの分解能と長期安定性が必要であり，通常の音響トランスポンダに比べて2桁高い分解能が必要となる。また実際の観測においては測距範囲は少なくとも1kmは必要であるから，少なくとも 10^{-5} の測距分解能が必要になる。これを実現するためには周波数帯を広げ位相測定を行うことにより，時間間隔測定の分解能を格段に向上させることが必要である。以下にそれらの方法と，実際の海底観測における問題点をまとめた。

4.1 M系列信号の相関処理による精密音響測距

この方法はGPS（Global positioning System，汎地球観測システム）やVLBI（Very Long Baseline Interferometer，超長基線干渉計）において高精度で距離測定を行うために用いられている方法と原理的には同じであり，基準信号（今の場合，送信信号）と受信信号の相関が最大になる時間を求めることにより，高いS/N比で時間間隔測定を行う。M系列信号は， 0° と 180° の位相を用いてコード化されており， n 段のシフトレジスターを用いて作られた， $2^n - 1$ 個のPseudo Random Noise Code（疑似雑音符号）よりなる。実際には振動子の特性を考慮してM系列信号を決める必要がある。はじめにコード信号を用いて相関処理を行い，その上で搬送波の位相測定を行うことにより高い分解能が得られる。このとき音波の揺らぎが問題になるが，海底間の伝送ならば解決できる見込みである。アメリカのスクリップス海洋研究所では，この方法により，3kmの距離を3cmの精度で測定したという報告がある（McIntyre, 1988）。

4.2 周波数変調方式のパルス圧縮による精密音響測距

これは衛星高度計による海面測高等に用いられている方法である。電波でも音波でも同じであるが、伝送距離が2倍になったとき同じS/N比で受信するためには、送信出力を16倍にする必要がある。しかし最大の送信出力には限度があるから、周波数帯域を広げることにより受信パルスの振幅を大きくし、高い測距分解能を得るためにこの方法が用いられる。その原理を簡単に述べると、一定振幅のパルスの搬送波の周波数を、そのパルス幅の中で時間に対して線型に変調して送信し、受信時には逆に周波数に対して線型な遅延をかけて、そのパルス幅の中の信号を同時に受信することにより、デルタ関数的なパルスを受信することができる、ということである。実際には受信されるパルス幅は、送信信号の周波数変調幅の逆数にはほぼ等しくなる。

超音波測距にこの方法を用いるときに問題となるのは、振動子の周波数帯域が比較的狭いということである。その結果、周波数帯域を広げるためには高周波を使わなければならない、長距離の測距が難しいということになる。また振動子の立ち上がりが悪いと、周波数変調をかけると振幅も大きく変化してしまうという問題もある。

実際の実験では、200 mの距離において1 cmの分解能が得られたという報告があるが、1 km以上の測距においては、4.1で述べたM系列信号の相関処理による方法の方が、技術的に容易であると考えられる。

4.3 音響トランスポンダの固定

「しんかい2000」による潜航調査の結果、海底観測ステーション用海底ベースに固定することにより、水平方向には長期間にわたって1 cmよりよい精度で音響トランスポンダを固定できることが確認された。

4.4 音波の揺らぎと伝播経路

1988年秋の「しんかい2000」潜航時における、XBTによる海中の温度と音速のプロファイルを図4に示す。この図から明らかなように、水深1,000 m以下の海中においては水温変化により音速

が複雑に変化しており、水深1,000 m以浅における精密音響測距は難しい。しかし1,000 m以深においては水温は安定しており、音速はほぼ圧力だけに依存しており非常に安定している。したがって、1,000 m以深の海底間における精密音響測距ならば可能であるといえよう。

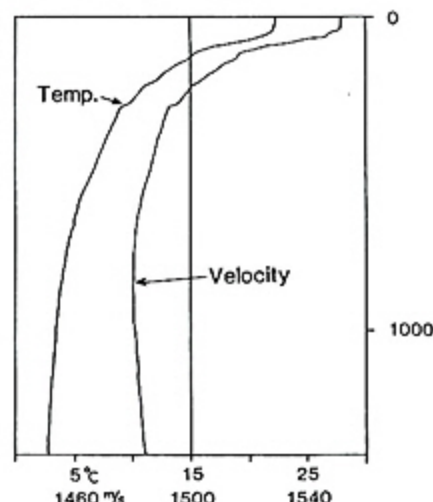


図4 「しんかい2000」潜航用に観測されたXBT観測による相模湾における海中の温度と音速分布。

Fig. 4 Profiles of water temperature and acoustic velocity in Sagami Bay obtained by the XBT measurement of "SHINKAI 2000"

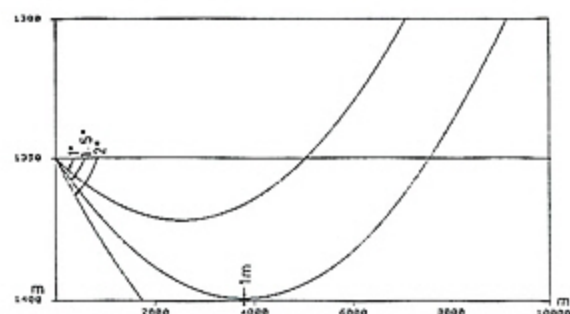


図5 相模湾海底における音波の伝播経路を調べる数値実験の結果。谷側に1.5度以上傾いておれば7 km以上の伝送が可能である。

Fig. 5 Ray tracing for the acoustic waves propagating near the bottom of the Sagami Bay. Direct acoustic range measurement is possible on the baseline longer than 7 km at the dip angle larger than 1.5 degree.

図4の結果に基づいて、水深1,400m付近における音波の伝播経路を数値計算で求めた結果を図5に示す。この結果によれば、トラフ軸の方向に1.5度以上傾斜した場所に海底ベースを設置すれば、7km以上の距離において直接音響測距ができる。ちなみに図3から分かるように、OBBの2号機の設置点付近の傾斜角は1.9度であり、1.5度以上の傾斜地を探すのは難しい問題ではない。但し、OBB1号機の場合は2号機と直接計測はできないので、適当な場所に3号機を設置する必要がある。

4.5 音波速度の変化

相模湾海底を想定して、音波速度に対する温度変化の影響を計算すると、0.001℃の温度変化に対する音速の変化率は 3×10^{-6} 程度である。単周期の温度変化を除けば、水晶温度計により0.001℃の温度変化は測定できるので、海底で3点（両端とあと1点）で温度を測定しておけば、長期的な海底歪観測に対する温度の影響は補正できる。

圧力に対しては、1mH₂Oの水圧変化に対して音速は 10^{-5} 程度変化する。したがって潮汐表によりほぼ補正ができるが、海底圧力計により圧力観測することも可能である。

4.6 流れの影響

単方向の音波測距においては、海水の流れは直接測定結果にひびくので、往復測定が必要である。往復測定を行えば1ノットの流れがあっても測距に対する影響は 10^{-7} 程度であり無視できる。

以上をまとめると、相模湾海底における精密音響測距は技術的には可能であると判断できる。

5. おわりに

「しんかい2000」による今回の潜航調査により、相模湾に設置した海底ステーションは安定しており、海底歪観測の土台として使用できることが確認された。音響精密測距による海底歪観測も技術的には可能であると考えられるので、今後研究を進めていく予定である。

謝 辞

海洋科学技術センターの調査船「なつしま」の船長及び乗組員、「しんかい2000」の指令、副指令、船長等の方々には大変お世話になりました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- Fujimoto, H., T. Furuta, K. Kobayashi, and H. Murakami, 1988, Long-baseline acoustic transponder subnavigation system and its improved software, Proceedings of Pacific Congress on Marine Science & Technology (PACON88), OST 4/8-19.
- 藤本博巳, 瀬川爾朗・古田俊夫, 1988, 音響トランスポンダ測位に基づく海底観測ステーションの設置, 地震, 41, 583-589.
- 古田俊夫・藤本博巳・友田好文・小林和男・村上英幸, 1984, 音響トランスポンダ航法システムの開発とその運用, 測地学会誌, 30, 313-322.
- McIntyre, M.C., 1988, A seafloor positioning system, Proceedings of Pacific Congress on Marine Science & Technology (PACON88), OST 3/13-20.
- 小野房吉・長森享二, 1985, ロランC電波の陸上伝播効果とその評価に基づく補正図の作成, 水路部研究報告, 20, 151-166.
- 瀬川爾朗・藤本博巳, 1988, 相模湾に設置された海底ステーションの観測および音響トランスポンダの交換, 海洋科学技術センター試験研究報告, 251-257.

(原稿受理 1989年3月30日)



写真1 1987年11月24日に「しんかい2000」で観察された海底ベース1号機の設置状況。

photo. 1 OBB No. 1 on the seafloor observed from the submersible "SHINKAI 2000" on November 24, 1987.

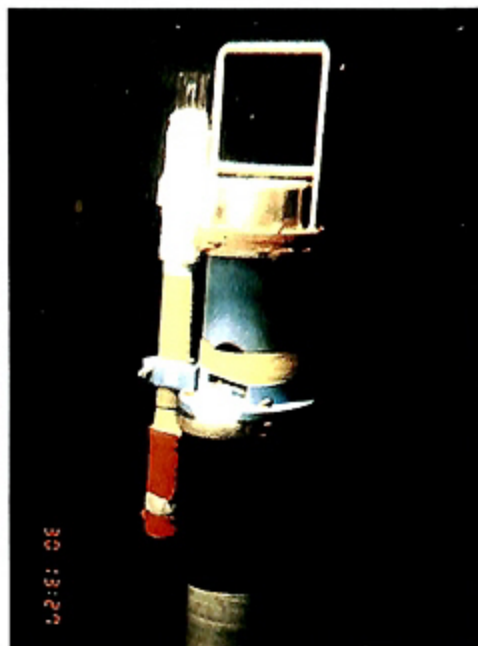


写真3 海底ベース1号機のそばに約1年間設置されていた音響トランスポンダの上部。音響トランジューサが電蝕を受けていた。

photo. 3 Upper part of the acoustic transponder deployed near the OBB No. 1 for one year. The acoustic transponder was electrically corroded.



写真2 1988年10月30日に「しんかい2000」で観察された海底ベース1号機の設置状況。

photo. 2 OBB No. 1 observed from the submersible "SHINKAI 2000" on October 30, 1988.