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

東京大学海洋研究所* 藤 本 博 巳・瀬 川 爾 朗・古 田 俊 夫

(昭和 63 年 10 月 27 日受付; 昭和 63 年 11 月 30 日受理)

Installation of Ocean Bottom Observation Station by Means of Underwater Acoustic Positioning

Hiromi FUJIMOTO, Jiro SEGAWA, and Toshio FURUTA

Ocean Research Institute, University of Tokyo, Minamidai 1-15-1, Nakano-ku, Tokyo, 164

(Received October 27, 1988; Accepted November 30, 1988)

Ocean bottom bases (OBB), newly developed for long-term geodetic and geophysical observations, were installed on the seafloor of Sagami Bay, Central Japan. The OBB, made of 1 m-square non-magnetic concrete block, was deployed using a wire at a desired position owing to a precise underwater positioning system using acoustic transponders and a 30 KHz bottom pinger. The OBB deployed was used to evaluate the accuracy of the underwater positioning system. The results of the experiment show that the acoustic positioning is accurate to 10^{-3} of the slant range. It was confirmed later on a submersible "Shinkai 2000" that the OBB was successfully installed and was very stable on the flat mud bottom.

§ 1. はじめに

海上からの地質・地球物理学的調査に基づいて選んだ海域において、潜水調査を含む詳しい調査研究を行い、海底観測の“つぼ”となる地点を選定し、そこにおいて測地学的・地球物理学的な長期観測を行うというのが、海域における固体地球科学の一つの方向である。これまでの海底観測は、海底の構造を探索するために船から測器を投入することにより行われてきたが、今日では、選定された場所において連続的な、あるいは再現性のある精密観測を行い、海洋底の変動をモニターし、海洋プレート生成や沈み込みの過程を明らかにするというような事が重要な課題となってきた。

このような観測の基礎となるのは、潜水船や曳航体の技術を含めた海中における計測制御技術であり、そのうちでも海中の測位は最も基本的な項目である。水中における電波の減衰のため、一般的には、海中における測位は音響トランスポンダを用いた音響測位システムにより行われる。この意味で、音響トランスポンダ測位は、海

中における詳しい調査研究の基礎となるものである。

日本における音響トランスポンダ測位の研究は、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(株)と共同で手軽で使いやすい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、手軽で使いやす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、次のステップとして、所定の場所に汎用海底観測ステーション用海底ベースを設置し、それを用いて再現性のある海底観測を遂行する研究を開始した。その最初の試みとして、1987 年 10 月に東京大学海洋研究所の淡青丸 KT-87-16 次航海において、汎用海底観測ステーション 1 号機を相模湾の海底に設置した。

海底観測ステーションの設置にあたって重要なことは、熱水鉱床の観測などを想定してもわかるように、指定した位置にそれを設置することである。またそれを利

昭和 63 年 4 月 7 日発表

* 〒164 東京都中野区南台 1-15-1

用して長期観測を行うためには、海底においてその位置と姿勢が安定していなければならない。今回の実験は、これらの問題を実海域の実験を通じて解決していくことを目指したものであり、海中測位システムと音響切り離しを利用することにより、かなりの重量物でもワイヤで吊り下ろし、指定した位置に水平に設置することが可能であることが示された。また海底ステーションを利用した最初の測定として、音響トランスポンダシステムの海中測位精度の評価を行うことができた。それらの問題を中心に、今回の実験について報告する。

§ 2. 音響トランスポンダシステムによる海中測位

水中音響を利用した海中の測位法にはいくつかあるが、最も測位精度に優れているのは、LBL (Long-baseline) 方式の音響トランスポンダ測位システムである。この方式では、通常3個の音響トランスポンダを海底に設置し、その3点からの距離測定を行うことにより、海中・海上の測位を行う。なお、音響測位における位置は、そのセンサである音響トランスジューサの位置である。海底ベースの設置作業においては、海底面からの高さを精密に測定する必要があるのでピンガーも合せて使用する。実際には以下のような手順により測位を行う。

- 1) 海水の温度や塩分濃度の測定に基づく音速分布の計算
- 2) 音響トランスポンダの敷設（地形や音波の折れ曲がりを考慮し、トランスポンダ間の距離や海底面からの高さを決定）
- 3) トランスポンダの位置を精密に再決定するための音響測距と測位計算
- 4) 海中測位用トランスポンダを用いた海中における3次元測位
- 5) 作業終了後、音響切り離しによるトランスポンダの回収

これらのうち、海底の位置決定において重要な、音響トランスポンダの位置の再決定について少し詳しく述べる。トランスポンダの海底への敷設においては、その係留システムを船から投下したときの緯度・経度と水深を以てトランスポンダの推定位置とするが、通常は、海流の影響などのために、それらの位置を精密に再決定することが必要になる。ロランCやNNSSなどの通常用いられている船の測位システムの測位分解能は、音響トランスポンダシステムに比べて劣るので、トランスポンダの位置の再決定は2つのステップに分けて行う。

まず最初にトランスポンダ相互間の距離とそれぞれの設置水深の修正を行う。このためには音速分布をあらかじめ求めておき、いろいろな場所で音響測距により船の

位置を3次元的に決定し、その海面からのずれ（実際には船から下ろした音響トランスジューサの水深の補正をしたもの）の2乗和が最小になるようにトランスポンダの位置をずらすという方法が有効である。このような処理の例として、相模湾に海底観測ステーション用プラットフォームを敷設するときに用いた音響トランスポンダネットと、その位置を再計算するために行われた音響測位の結果をFig. 1に示す。トランスポンダの位置を修正する前の結果を(a)に、修正後の結果を(b)に示す。座標軸に関しては、海底に設置した音響トランスポンダの一つを通る鉛直上向きの直線をZ軸とし、船から下ろした音響トランスジューサの設定水深に対応するZ軸上の点を原点とし、X軸を東、Y軸を北にとる。それぞれの図においてX-Y平面に落とした船位を右側に示し、左側には船位のZ成分を測定順に示してある。船位のZ成分は本来ならばゼロとなるはずであるが、海底のトランスポンダ間の相対位置に誤差があると、図(a)に示すように場所により変化する系統的な誤差を示す。そこで、座標軸の基準とした音響トランスポンダのX・Y座標を固定して、船位のZ成分の2乗和が最小になるようにトランスポンダの位置を逐次近似で修正する。通常15~20回の修正でほぼ収斂する。

実際の海では流れや風は避けられないから、船からワイヤで吊り下ろしたものを海底の定点の上に保つためには、かなりの操船作業が必要であり、エンジン等の振動やスクリューのキャビテーション等による水中音響ノイズが問題となる。これらのノイズによると考えられる不良データは20~30%程度あり、図では×印で示してある。これらの不良データを除いて、音響トランスポンダの位置を再決定すると、3次元的に求めた船の位置の鉛直成分の誤差は標準偏差にして2~3m程度になる。これは音響トランスポンダシステムによる測位の分解能の目安となる。

トランスポンダの位置再決定の第2段階は、基準とする測地系における位置を求めることである。このためには、トランスポンダシステムにより得られた船位が、ロランCなどの測位システムによる船位と最もよく合うように、トランスポンダネットの平行移動と回転を行う。ロランC等の測位データのばらつきは大きい、測位データの数も多いので最小2乗法によりトランスポンダの位置を決定することができる。ロランCによる船位は、一般的には測位の再現性が50m程度であるとされている。北西太平洋チェーンのロランCによる船位のばらつきは比較的小さい[FURUTA *et al.* (1987)]ことや、現状ではGPS (Global Positioning System, 汎地球測位システム) による船位決定可能な時間帯が限られてい

Fig. 1. Result of transponder navigation before installation of an ocean bottom base (OBB No. 1). 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. Effect of relocation of transponders can be seen from comparison of two figures; (a) before relocation and (b) after relocation. Dot: correct ship's position, $\times$: wrong ship's position, Plus: transponder's position, Square; OBB installed afterwards.

ることなどから、北西太平洋では測地座標系上の音響トランスポンダの位置は、ロランCにより求まる船位をもとにして決定されることが多い。尚、ロランC測位による船位については、後述のように、陸上ではロランC電

波の伝播速度が海上に比べて低くなることの補正が必要である。

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

Fig. 3. Ocean bottom base (OBB) made of non-magnetic concrete on the deck of the R/V Tansei-maru. Its size is 1100×1100×500 in mm. Its weight is 800 kg in air and 500 kg in water.

§ 3. 海底観測ステーション用海底ベースの設置

海底に適当な大きさのブロックを設置し、それを海底における観測点の標識として、あるいは観測用のプラットフォームとして用いることにより、海底観測ステーションにおける再現性のある海底観測が可能になる。海底観測ステーション用のコンクリート製ブロック（海底ベース）は、当面は海上の船から吊り下ろして所定の場所に設置することになるので、海底面に自由設置されただけということになり、傾斜については不動とはいえない。海底が平坦な場合には、海底ベースが海底に対し

て水平方向に動くことはほとんどないと考えられるが、鉛直方向の変位については実測してみなければわからない。海底ベースを海底における精密距離測定のプラットフォームとして使用する他に、海底における地震や電磁気、地殻熱流量などの測定や、潮汐観測のための海底圧力や重力等の測定に使用することには問題がないと考えられる。もし鉛直方向の海底との相対変位が十分小さければ、海底ベースを上下方向の海底地殻変動観測にも使用することができる。

指定した場所に海底観測ステーションを設置するためには、設置作業中、指定した位置を基準にして、海底ベースの位置を精密にモニターする必要があるが、このことは次のような方法を採用すれば可能である。LBL方式の音響トランスポンダ測位システムを用いる場合、通常3台の音響トランスポンダを海底に敷設する必要がある。そのうちの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（そこからの方位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まるから、他の2台の音響トランスポンダを船上から投下しても、設置予定点付近において正確な位置出しを行うことができる。

1987年10月に、淡青丸により相模湾の初島の東方約10 km、水深1370 m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を設置し、Ocean Bottom Base (OBB) NO. 1と名付けた〔瀬川・藤本(1988)〕。設

Fig. 4. OBB No. 1 on the seafloor observed from the submersible "Shinkai 2000".

置点を Fig. 2 に示す。海底ベースは、瀬川が深海底エンジニアリング研究会の協力を得てデザインしたものであり、Fig. 3 の写真に示すように一辺が 1,100 mm の正方形のコンクリート製ブロックで、高さは 500 mm、重量は空中で約 800 kg、水中で約 500 kg である。ブロックの下部は三脚となっている。上面の端部には純チタン製の吊り上げ用取手が 3 ケ所に取り付けられており、一辺 500 mm と 800 mm の正三角形の 3 つの頂点に位置する場所に測定器マウント用 V 字孔が開いている。海底ベースの中央には直径 100 mm の孔が底面まで貫通している。これは、海底の 2~3 m 上から海底ベースを水平に落下させるときの水の通路となり、その姿勢を安定させる。側辺の一つには、フラッシャー、ピンガー付きの音響トランスポンダを差し込む貫通孔と、このトランスポンダを支える側板（純チタン製）が取り付けられている。コンクリートブロックを非磁性とするため、強化材としては鉄筋は使わず、カーボン繊維を使用した。

海底ベースは船上からワイヤーで吊り下ろされ、海底の決められた場所にできるだけ水平に設置されなければならない。ワイヤーで吊ったまま海底に接触させると海底ベースをひきずる恐れがあるので、海底上 2~3 m のところで海底ベースをワイヤーから切り離す。このため海底ベースに取り付ける海中測位用のトランスポンダには海底から 200 m までの高さを 0.1 m の精度で測定するピンガーの機能が付加されている。30 KHz の超音波により測定された海底までの距離は、海中の音響測位に用いている 10 KHz 帯の音波により船上まで送られてくる。このようにして海底ベースの位置をモニターしながら船の位置とワイヤーの繰り出しを制御し、海底ベースが設置点の直上 2~3 m の位置にあるときに、音響的にワイヤーから切り離し、そこから海中を自由落下させ海底に設置させた。今回は試験的な設置であったので、3 台のトランスポンダは船上より投下して、海底ベースの

設置作業を行った。

海底ベースの設置点の位置は、音響トランスポンダ測位システムにより決められた。この測位のために海底に設置されたトランスポンダネットの位置は Fig. 1(b) に示すように再配置され、更にロラン C（世界測地系）による船位に合うように平行移動と回転がほどこされた。そのようにして得られた海底ベースの位置は $35^{\circ}00.610'N$, $139^{\circ}16.244'E$, 水深 1,370 m である。

日本測地系に基づく水路部の海底地形図等にプロットするためには、次の二種類の補正が必要である。一つはロラン C 電波の陸上伝播速度が海上に比べて小さいため、日本近海では場所により約 1 km にも及ぶ系統的な誤差が生じることに對する補正である。この補正はロラン C 電波が陸上を通ってくる距離に対して 6 ns/km の補正を行えばよいことがわかかっており、海岸線データとロラン C 局の配置から計算した補正表が用意されている [小野・長森 (1985)]。GPS 測位と比較した結果では、この補正表の精度は 100 m 程度である [FURUTA *et al.* (1987)]。今回の場合、ロラン C 局としては Master（硫黄島）と X（北海道）および Y（沖縄）を使用していたので、補正值は緯度方向に $+0.30'$ （北へ 560 m 移動）、経度方向に $0.00'$ である。第 2 の補正は世界測地系から日本測系地への変換である。この補正值は今回の設置点においては、緯度方向に $-0.168'$ 、経度方向に $+0.197'$ である。したがって日本測地系における OBB No. 1 の位置は、 $35^{\circ}00.74'N$, $139^{\circ}16.44'E$ となる。

海底観測ステーションの 1 号機については、設置してから約 1 ヶ月後に海洋科学技術センターの潜水船「しんかい 2000」による潜水調査が行われ、7 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 (Fig. 4)。このことにより、今回の実験で採用した設置方法が適切なものであったことがわかった。底質は泥であり、高さ 50 cm の約 7 割が海底に沈んだ海底ベースは、非常に安定していることが判明した。

海底ベースの設置作業に用いられた音響トランスポンダシステムは、海洋科学技術センターの潜水船「しんかい 2000」で用いているシステムとは互換性がない。そこで今回用いた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的にフラッシュを ON/OFF できる機能も付加した。水中の視程は約 5 m であったが、フラッシュは約 50 m 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非常に役立った。この潜水調査の機会に音響トランスポンダの交換が行われた。海底ベース上で種々の測定をすることを考えて、新しい音響トランスポンダを海底ベースから 11.2 m 離れた海底に設置し

Fig. 5. 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。その間の正確な距離測定は難しかったが、最終的には海底の写真を連続して撮り、あとで張り合わせて距離と方位を決めた。

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。その設置点の位置は、日本測地系で $35^{\circ}00.81'N$, $139^{\circ}21.80'E$ である。Fig. 2 に示すように、2 つの OBB はプレート境界と考えられる相模トラフ軸をはさんで設置されており、プレート運動に伴う測地学的・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。

§ 4. 音響測位システムの評価

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 分ごとに海底ベースの 3 次元的な測位を行い、得られた結果を Fig. 5 に示した。各成分とも 22 回の測定の平均値との差を示している。この測定の間には船は 800 m 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ことを示している。各成分について、測位誤差は標準偏差で 2 m 以下である。このときの船と海底トランスポンダ間の距離は 1.5~2 km であるから、測位精度は

斜めの距離の 10^{-3} 程度であると言っても良い。

この音響トランスポンダ測位システムは、10KHz 帯の単周波音波のワンショット・パルスの伝播時間をパルスの立ち上がりを検出することにより測定するという、通常用いられている測距方法を用いている。この方法による時間間隔測定の分解能は 1 ms 程度であり、距離にすると約 1.5 m である。距離が変わらない状態で音波測距の分解能を実測したところ、約 6,000 m の斜め距離において 1~2 m であった。実際の作業においては、音響ノイズの影響や船の舷側からおろしたトランスジューサの水深や船との距離が船首方位により少し変化することなどのため、船位の鉛直成分のばらつきは斜め距離約 6,000 m の場合 3 m 程度である。トランスポンダ・ネットの大きさは普通水深と同程度であるから、幾何学的に水平の測位誤差を推定すると 4~5 m となる。このような結果も合わせて考えると、この音響測位システムの測位精度は、一般的に斜め距離の 10^{-3} 程度であると言える。

§ 5. 考察及び結論

今回の実験により、コンクリート製の海底ベースを船から吊り下ろして、音響測位システムにより位置をモニターしながら操船とウインチの操作を行い、音響的に切り離し、海底の指定した場所に水平に設置することができるとことが確認された。また、潜水船「しんかい 2000」による潜水調査により、海底ステーション用海底ベースは 7 割ほど泥に埋まった状態で海底に水平に設置されており、その位置也非常に安定していることが確認された。この海底ベースは水平方向だけでなく鉛直方向の海底地殻変動観測用のプラットフォームとしても使用できる可能性がある。また、この潜水調査の機会に音響トランスポンダの交換も行われ、潜水船等による潜水作業と組み合わせることにより海底観測ステーションを利用した再現性のある精密な海底観測を実行できるめどがついた。

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・ショットパルスの到着時間により距離測定を行っている。設置後の海底観測ステーションを利用してその測位精度を評価したところ、水深 1,400 m 程度の相模湾内においては、約 2 m の精度が得られることが確認された。したがって、相模湾においては約 2 m の精度で海底観測ステーションを設置することができる。他の測定データも合わせて判断すると、このシステムの音響測位精度は測定される斜め距離の 10^{-3} 程度である。

音波測距については音波の振幅ではなく位相を測定することにより、センチメートル・オーダーの測距も可能である [MCINTYRE (1988)]. そのようなシステムを用いた海中測位や、海底における測密音響測距による海底地殻変動の検出などが今後の課題である。OBB No. 1 と OBB No. 2 の水平距離は 8,120 m であり、この距離をセンチメートル・オーダーで測定することが最初の課題となろう。

謝 辞

海底観測ステーションの製作については、深海底エンジニアリング研究会（新日鉄，三井造船，西松建設，不動建設(株)の共同による研究会）の援助をうけた。海底観測ステーションの設置作業は，東京大学海洋研究所の研究船 淡青丸の乗組員の協力無くしてはできなかった。また，「しんかい 2000」による潜水調査では，母船 なつしまの乗組員やしんかい 2000 の田代船長，赤澤潜航士にはたいへんお世話になった。以上の方々に，心より感謝する。

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 (PACON 88)*, OST4/8-19.
- 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.
- FURUTA, T., H. FUJIMOTO, V. RENARD, J. ALLENOU and G. RIOU, 1987, Evaluation and correction of Loran-C positions from comparison with GPS data, *Mar. Geod.*, **11**, 221-230.
- MCINTYRE, M. C., 1988, A seafloor positioning system, *Proceedings of Pacific Congress on Marine Science & Technology (PACON 88)*, OST3/13-20.
- 小野房吉・長森亨二, 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, 相模湾に設置された海底ステーションの観察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 (第 4 回 「しんかい 2000」 研究シンポジウム報告書)*, 251-257.