

海底地殻変動観測における機器の現状とその運用について

成田 誉孝, 畝見 潤一郎: 航法測地室

望月 将志: 東京大学生産技術研究所

The improvement of the seafloor geodetic observation system

Yoshitaka NARITA and Junichiro UNEMI : Geodesy and Geodetic Office

Masashi MOCHIZUKI : Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo

1 はじめに

海底地殻変動観測は平成12年の開始以来、幾度かの観測機材の追加, 更新を行ってきている。

観測の手法は、大きく分けてGPS衛星を用いて正確な船位を決定するためのキネマティック測位（以下、「K-GPS」という）観測と、海底に設置した海底基準局と船の距離を正確に求めるための音響測距観測の2つの観測手法を組み合わせることによって成り立っている（図1）。

更に2つの観測は揺れる船上で行っているため、刻々と変化する船体の向きや動揺量を補正する必要があり、それらを動揺観測装置により計測している。

また、音響測距観測において正確な計測を行うためには水中音速度の把握をする必要があり、そのためにCTD, XCTD, XBTを用いて海水温度・塩分濃

度の観測を行っている。

この様に多種多様な観測機材を用いてさまざまな種類のデータを取得し、それぞれを解析した結果を取りまとめることによって初めて海底基準局の位置を決定することが出来る。これら1つ1つの機器の精度向上や効率向上により、より高精度のデータをより多く効率的に取得することを目的に機器の更新, 追加を行ってきた。

観測機器の変遷と現状および観測の概要については畝見（2003）により紹介されているが、本稿では海底地殻変動観測システム（以下、「本システム」という）の内、測量船の船尾および観測準備室に設置されている各種観測機材で平成14, 15年度に追加, 一部更新された機器の更新理由及びその運用について更に掘り下げつつ紹介する。

また、海底基準局の器差計測の手法についてもこの機会に併せて紹介したい。

2 観測機器の紹介

前節1に記したとおり、本システムの運用にはさまざまな機器を用いているが、本節では2.1K-GPS観測, 2.2音響測距観測, 2.3動揺観測, 2.4時計装置, 2.5水中音速度観測に分けて各機器の更新理由と問題点を紹介していく。

2.1 K-GPS観測

K-GPS観測は主に移動体の位置決定を目的とした測量技術の一つで、通常は基準点となるGPS局から近距離（～十数km）にある移動体の位置を数mmか

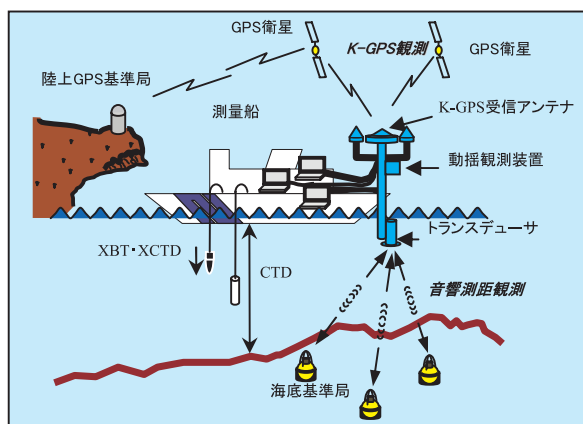


図1 海底地殻変動観測概念図

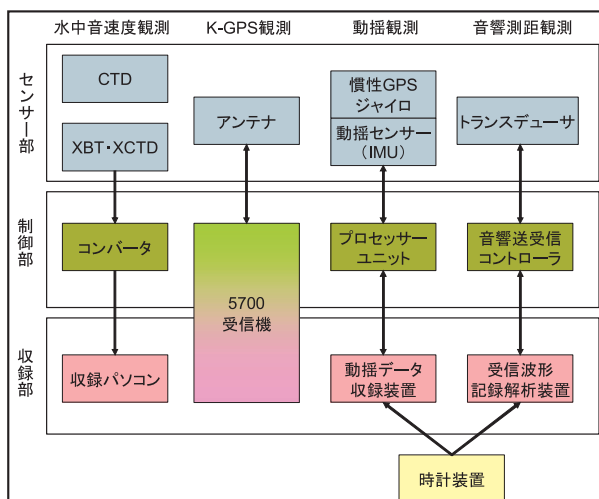


図2 海底地殻変動観測機器構成図

ら数cmの精度で求めるために用いられるが、われわれは長距離基線解析のためにNASA/GSFCで研究開発されたK-GPS解析用ソフトウェア「IT」(Colombo, 1998)を用いることにより陸上GPS基準局から遠く離れた位置(数十kmからおよそ100km)にある移動体(ここでは測量船)の位置を数cmの精度で求めている。

本システムではK-GPS観測のためにTrimble社製GPS受信機を用いている。平成14年までは船上観測用として4000シリーズ受信機とMicro Centeredアンテナを用いていたが、新機種として発売された5700受信機及びZephyr Geodeticアンテナを平成14年度に購入、比較観測試験を行った後、同受信機・アンテナの組み合わせを用いている。これは受信感度向上やマルチパス低減を目的とした最新のハードウェアを導入したものである。

K-GPS観測は0.5秒間隔(2 Hz)でデータを取得しているためにデータ量が多く、1時間の観測で約1MBのデータ量となる。4000シリーズ受信機は内部メモリーが少ないために長時間観測を行う場合は全てのデータをメモリーへ蓄えることが出来ず、リアルタイムでパソコンへデータを転送して収録していたが、時折データ転送エラー等によるデータ不具合があった。5700受信機へ更新後は内部メモリー量が増えた(96MB・128MB)ためリアルタイム転送の必要が無くなり、データ収録をメモリーで行った後にパソコンへ転送することによってこうした不具合

は改善された。

GPS観測のメリットとして測位と同時に正確な時刻を得られることが1つ挙げられる。3次元測位(GPS衛星を4衛星以上用いて緯度・経度・高さが求まっている)時の測位精度が約30mの場合、時刻精度0.1μsの精度を持つ。GPS受信機の収録間隔は内部発振器により管理されており、長時間観測を行うと目標とする収録間隔に対して「ずれ」が生じる。このような現象をタイムシフトと呼んでいる。この「ずれ」は収録タイミングのずれであり、収録されている時刻は正確なものである。

例えば5700受信機で29時間連続観測を行ったデータを見ると観測開始直後はちょうど0秒に収録しているが、24時間後を見ると0.156秒収録時間のずれ(この場合は進み)を生じている(資料1)。

観測時に船は漂流状態でデータ収録を行っているが、その移動速度は流れの速い黒潮流域の場合で3ノット程である。仮に、1ノットで漂流したとすると1秒間の移動速度は約50cm/sである。

現在使用している「IT」ソフトウェアは観測時に想定された収録間隔(0.5秒収録の場合、0秒と0.5秒)からずれたデータは想定された収録間隔に直すよう補完を行って解析する。このことと船の動揺が最大数mとなること及び海底地殻変動観測に必要な測位精度(数cm以下)を合わせて考えるとタイムシフト量は1/100s以下に抑えたい。

現在の一日の観測時間である約8時間で考えても、タイムシフト量をもう1桁良くする必要がある。収録時間の基準信号を内蔵の水晶発振器に頼らず、より正確な発振器(例えば時計装置として運用

収録データより時間表示部のみ抜粋	
↓秒の桁	
03 7 16 23 0 0.0000000	
2003年7月16日23時0分0秒	
03 7 17 22 59 59.8440000	
2003年7月17日22時59分59.844秒	

資料1 GPS収録時刻の比較

しているルビジウム周波数標準器) から基準信号を入力して運用できるGPS受信機の導入が必要である。

2.2 音響測距観測

陸上測量では光波や電波を用いて距離を測定することが多いが、水中ではほとんど光波や電波が透過しない。このことから水中での距離測定には音波が用いられている。海底地殻変動観測においても船と海底に設置した基準局との距離測定に音波を用いて行っており音響測距観測と呼んでいる。

海底地殻変動観測では1観測点につき海底に基準局を3～4局設置している。この基準局は10KHzの音波に反応するように作成されているが、それぞれに誤動作やノイズによる測定不良をなくすこと及び各基準局を識別することを目的とした特殊な符号(M系列信号(富山, 2003))を割り当てている。

計測に用いる船上音響送受信部(以下「船上局トランスデューサ」という)より海底基準局に割り振られている識別用M系列信号と測距用M系列信号を送信すると海底基準局は自身に割り振られた符号と一致するM系列信号を受信後一定の反応時間(1.061506秒)後に識別用M系列信号及び受信した測距用M系列信号をコピーして発信する。このような仕組みから海底基準局をミラートランスポンダー(M/T)とも呼んでいる。この後、船上局トランスデューサが海底基準局から発信された2つのM系列信号を受信・記録することによりトランスデューサと海底基準局との往復時間を測定することができる(図3)。この音波の送信・受信をコントロールし、一連の音響波形を時刻信号と共に正確にデジタル収録するための装置を波形収録装置と言う。

波形収録装置はトランスデューサ、音響送受信コントローラー、A/D変換部、受信波形記録解析装置からなっており、平成15年度に音響送受信コントローラーを除くほとんどの装置を更新した。

2.2.1 トランスデューサ

2.2項の測定原理にあるとおり、トランスデューサは計測用信号を発信し、海底基準局から帰ってきた信号を受信するためのものである。音響送受信部であるトランスデューサはLinkQuest社製のものを使

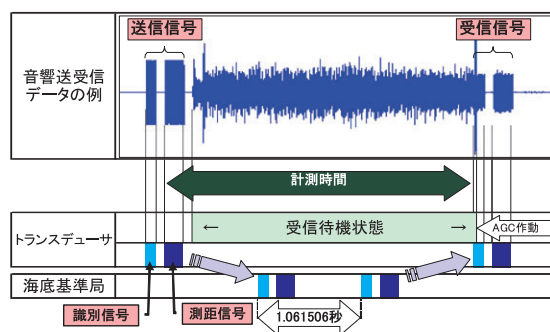


図3 測距原理と実際の収録波形



写真1 新旧トランスデューサ
(左: 3号機, 右1号機)

用している。(写真1)

トランスデューサは識別用、測距用波形を発信した後に受信待機状態時に入り、海底基準局の設置されている水深約300m～2,400mから戻って来るかすかな音波を受信するために受信部のゲインを上げる。背景雑音の中から海底基準局からの識別用M系列信号を検出すると受信記録幅を超えてスケールオーバーとならないようにゲインを自動的に調整し、引き続き到達した測距用M系列信号を適切な状態で受信する能力を備えている。この機能をAuto Gain Control (AGC) という(図3)。

平成15年度に導入した新型(トランスデューサ3号機)は旧型(トランスデューサ1,2号機)より位相中心特性、S/N比、角度変化による受信波形変化特性の向上を目的として開発されたものである。東京大学生産技術研究所と共同で新旧の器差及び各種特性を測定し(望月 他(2004)), 実際の観測地点(相模湾)での比較観測を2005年1月に実施するこ

とで新旧トランスデューサの器差を把握し、本年度（平成16年度）より運用を開始している。

2.2.2 音響送受信コントローラー

トランスデューサが発信する音響信号の送信強度や送信間隔の調整、初期化などを行うのが音響送受信コントローラーである（写真3）。

音響送受信コントローラーは受信波形記録解析装置から受け取った制御タイミングを基にトランスデューサに制御コマンドを送っている。制御コマンドが送られた後に識別用M系列信号が発信されると音響送受信コントローラーがトランスデューサより信号が発信されたことを表す信号（送信トリガーパルス）を発生する。この信号を送受信波形データと共に記録しておくことにより、データ解析時に測距開始位置を検出する手がかりとしている。

2.2.3 A/D変換部

トランスデューサが送受信した音響波形は電圧変化で表されるアナログデータであるが、音響送受信コントローラーから中継ボックスを経てA/D（アナログ/デジタル）変換ボードによりデジタルデータへと変換している。

A/D変換部は中継BOXに0CH～3CHの4つの入力CHを持っているが、この内の3つを使用して収録を行っている。各CHの信号測定レンジは、送受信波形記録用の0CHが±5V固定、送信トリガーパルス用（1CH）及び時計信号記録用（2CH）が±10V固定となっている。送信トリガーパルスと時計信号はそれぞれ音響送受信コントローラーや時計装置から信号線（BNCケーブル）により中継ボックスへ接続され、送受信波形信号と同様にA/D変換ボードによりデジタルデータへ変換、収録されている。

水中での音速度は約1,500m/sであるため、これをサンプリング間隔200KHzでA/D変換すると1サンプルの間隔が約0.75cmとなる。更新以前のシステムではA/D変換部は内蔵の発振器によりサンプリング周波数を生成して収録を行っていたが、数cmの測距精度のためにはこのサンプリング間隔が一定であることも重要となる。そこで、現在では時計装置へ標準周波数を供給している発振器（ルビジャー

ム周波数標準機）から時計装置へ標準周波数となる10MHz信号を入力、時計装置内部で200KHzの信号を生成、この信号をA/D変換の基準周波数とすることにより、サンプリング周波数の安定化を図っている。これは時計装置更新と並ぶ平成15年度更新の目的の一つである。

2.2.4 受信波形記録解析装置

デジタル変換されたデータを収録すると共に音響送受信コントローラーを制御しているのが受信波形記録解析装置である。

装置本体（波形5号機）は一般的なタワー型デスクトップパソコンで、O/S（オペレーションシステム）も一般的製品のうち安定性に優れたWindows2000を使用している。更新によりA/D変換部等、内蔵する拡張ボードが増えたため、更新以前の装置（波形3,4号機）に比べて筐体のサイズが1回り大きくなっている。

A/D変換されたデータは1度の音響信号収録分のデータ量で約9MB（10秒間収録の場合）という膨大な量となるため、A/D変換後に直接ディスクに書き込まず、一度メモリーにバッファリングされ、装置にSCSI接続された240GBのディスクアレイ2号機（ディスクアレイ1号機は100GB）へ書き込まれる。ディスクアレイは冗長化と高速書き込みの両立を目的にRAIDレベル5で運用しており、船舶内での運用という過酷な環境によるデータの破損に対して安全性を高めている。

海底地殻変動観測で行うK-GPS観測装置や動揺観測装置、水中音速度観測等のデータも合わせて受信波形記録解析装置に接続されたディスクアレイに一括化して管理しているが、1日に8～12GB程度となり、普通のデータメディアでは船から事務所へ運搬することが出来ず、そのために外部接続のハードディスク装置（現在は容量80GB）にディスクアレイからコピーを行い運搬している。

2.3 動揺観測装置

本システムは船上で運用しているため、観測中は絶え間なく動揺している。K-GPS観測のアンテナと音響測距観測のトランスデューサはステンレスとアルミで出来た長さ8mの柱の上下に設置しており、



写真2 慣性GPSジャイロと動揺センサー

この動揺量を補正しなければ海底基準局の位置は正確に求まらない。

本システムでは船の動きを慣性GPSジャイロと動揺センサー (IMU) (写真2) で計測し、求めたデータは収録用パソコンによりデジタルデータとして収録している。

更新以前の装置 (動揺3, 4号機) は、動揺観測装置内部にGPS時計ボードを内蔵していたが (詳細は2.4時計装置の項参照)、平成15年度の更新時に時計機能を分離、時計装置から時刻データを入力する方式に変更した (動揺4号機改)。

現在の動揺観測装置は慣性GPSジャイロと動揺センサーを用いたものであるが、装置の特性上空中にしか設置できない。今後、光ファイバージャイロなど新技術を導入し柱の上のみではなく海中部分でも動揺量を計測することにより柱のしなりを補正するなど計測技術を変えていくことにより、より高精度に動揺量が観測できるものと考えている。

2.4 時計装置

本システムで観測を行っているのは音響測距を行った送信・受信時間及び、その時の姿勢として動揺観測装置のデータ、船の位置としてK-GPS観測のデータである。これらを組み合わせることにより海底基準局の位置を求めているが、組み合わせるための基準は時刻であるため、これを高精度に一致させる必要がある。

更新以前のシステムでは、GPS時計を動揺収録装置に内蔵し、パソコンのシステムタイムを1分毎に

合わせるによりタイムサーバとし、LANで接続した受信波形記録解析装置のパソコンから1分毎にタイムサーバ側と時刻合わせを行うことにより一致させていた。この方式ではパソコンの内蔵時計の発振精度やLAN接続による通信の遅延等の要因により、ある程度以上の精度を望めなかった。

平成15年の更新時にGPS時計を組み込んだマスタークロック (MC 1号機) と標準周波数発振器 (ルビジウム時計, Rb 1号機) を組み合わせた時計装置を導入した (写真3)。この時計装置はGPS時計に残るわずかな不安定性をも取り去り、標準周波数発振器の精度で時刻を運用することができる。

試験観測ではルビジウム時計の歩度は1時間に約 $1.2\mu\text{s}$ となっており、海底地殻変動観測で必要とされる精度約1msに対し、1日24時間観測を行っても2桁程良い精度となっている。

こうして高い安定性を持つ時計信号を受信波形記録解析装置と動揺データ収録装置へデジタルデータとして送り、両収録データ間の時刻差を必要精度で一致させることができた。この改良も平成15年度の更新目的の一つである。

しかし、これによって一致したのは音響測距観測データと動揺観測データのみであり、これらとK-GPS観測装置の時刻は μ 秒程度とはいえ一致していないため、これら全てを一致させ各観測機器間の時刻同期を図ることが今後の課題である。

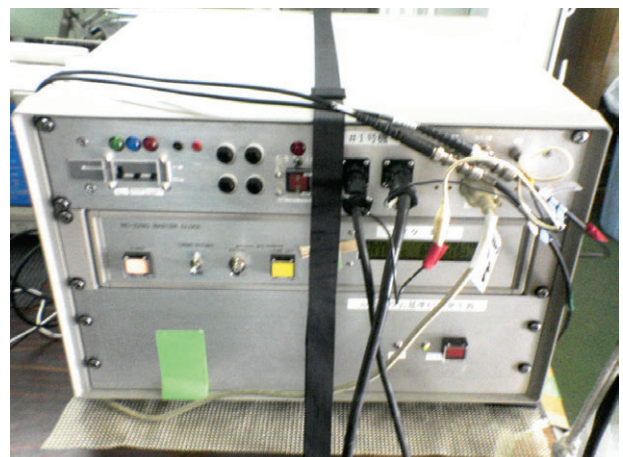


写真3 音響送受信コントローラー (上段)、時計装置 (中段)、周波数発生器 (下段)

2.5 水中音速度観測

音響測距観測データを正確に求めるためには、水中音速度を正確に知る必要がある。水中音速度は主に水温・水中塩分濃度の変化に影響される。われわれはこの観測にSEA-BIRD ELECTRONICS社製のSBE 19及びAPPLIED MICROSYSTEMS社製のCTD-12 Plus (写真4)のいずれかのCTDを用いて電気伝導度、水温、及びその深度を計測しており、それぞれ年に1度メーカーに拠るキャリブレーションを行い、精度を維持している。

CTD観測時はCTDを吊り下げたワイヤーを垂直に保つために船のスクリュー及びバウスタスター(船を横方向にさせるために船腹についているスクリュー)を用いなければならない。これらの作動音が音響測距観測時に音響ノイズとなるため測距観測中にCTD観測を行うことが出来ない。更にCTD観測時にギャロスを使用するが、ギャロスアームがKGPS観測用アンテナ上に覆いかぶさることによりKGPS観測データが途切れると船の位置決定を行うことが出来ない。このような制限があるため、CTD観測は測距観測の前後にのみ行い、測距観測中はCTD観測の代用としてXBTもしくはXCTDの観測を行っている。いずれも鶴見精機社製のプローブを使用して観測を行っている。

XBT・XCTDの観測精度はCTDに比べて公称精度で1～2桁劣っている。また、XBT、XCTDの深度はプローブを投入、海面着水後の落下速度を基にした時間経過より求められているため、CTDにより求



写真4 CTD観測風景

めた観測値と比較した場合、深度にバイアスが存在することが分かってきた。これを補うべく、平成16年度にCTDとXCTDの同時観測を行い、時間・深度換算式の係数を見直した(社他(2005))。XBTについてはKizu et al. (2005)により同様の見直しが行われている。見直した深度換算式を適用することにより水中音速度の精度が向上した。

3 海底基準局のディレイ計測作業

海底基準局はトランスデューサからの信号を受信すると1.061506秒の遅延の後に同じ信号を発振する(図3参照)設計となっているが、実際の海底基準局には個体差が存在する。往復時間にはこの個体差も含まれるため、正確な距離を求めるためにはこの遅延時間が実際にはどの位なのかを正確に把握しておく必要がある。水中音速度を約1500m/sとして、遅延時間の最後の桁(10^{-6} 秒)が1違うとすると0.15cmの誤差が発生するため、海底地殻変動観測に必要な精度と測定限界(200KHz収録=1サンプル0.75cm)から考えて、各基準局のバラツキ(器差)が 10^{-5} 秒程度で安定しているかを把握したい。このために海底基準局を海底に設置する前に発振遅延の個体差計測を行っており、この作業をディレイ計測作業と呼んでいる。ディレイ計測作業を東京大学生産技術研究所浅田研究室と共同で行っている。

計測作業の概略は次の通りである(図4)。

計測はトランスデューサと海底基準局にハイドロフォンを取り付けて行う。本計測において海底基準局に取り付けたハイドロフォンがトランスデューサから受信した波形と海底基準局から受信した波形の時間差が海底基準局のディレイとなる。

投入前の海底基準局は、保管時の電池消費を防ぐために電源はoffとなっている。海底基準局は耐圧ガラス球により中の機器を保護しているが、この表面にデータ通信及びスイッチング用のプラグが付いている。このプラグにスイッチコネクタを取り付けてある場合が電源offであり、スイッチコネクタを外すと電源onすなわち待機状態となる。実験を行う場合や海底に設置する場合にはスイッチコネクタを外して電源をonとした後にプラグ部の海水による

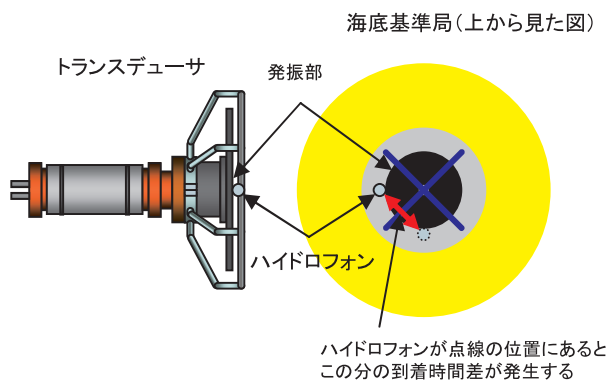


図4 ディレイ計測概略図

ショートを防ぐため、プラグにダミーコネクタを装着する。

海底基準局が待機状態となっている場合は2分間隔で送受信部に電源を供給している。この電源供給時にパイロットランプが点灯(約1秒)するのでこれで確認できる。この2分に1度の電源供給時に識別用M系列信号を受信した場合には起動状態へ移行、以後音響測距が可能な状態となる。この起動状態にするためにトランスデューサから海底基準局へ識別用M系列信号を2分間発信する作業をウェイクアップと呼んでいる。ちなみに一度起動した海底基準局は1時間識別用M系列信号の呼びかけが無い(測距が行われない)場合には待機状態に戻る。

なお、ディレイ計測は計測と準備を並行して行う場合がほとんどであるが、計測中のものと識別用M系列信号が同じ海底基準局の準備を同時に行うと、準備中の海底基準局が計測中の識別用M系列信号に反応して空中発振し、送受信部が破損する可能性がある。したがって同じ識別用M系列信号を持つ海底基準局を連続して計測してはいけない。

次に海底基準局とトランスデューサにハイドロフォンを取り付ける。このときに写真5の様に細索やネット、結束バンドを用いて固定しているが、以前、ストックングを輪切りにして固定したところ、ストックングが吸音材の役割を果たし、データの質が非常に悪くなった。ハイドロフォンは確実に、しかし発振を妨げず、さらに信号をロスしないよう取り付けよう注意する必要がある。

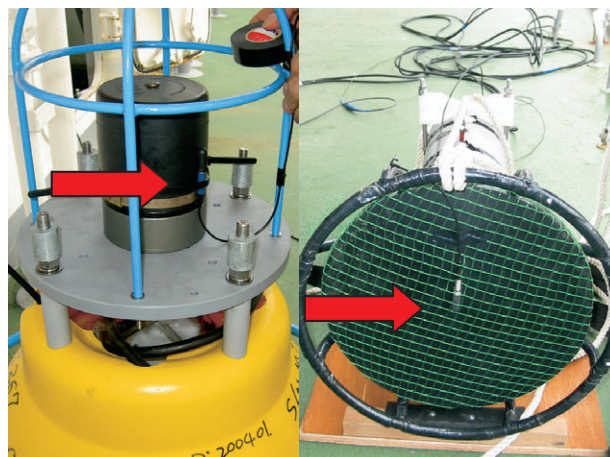


写真5 ハイドロフォンの取り付け状況

ディレイ計測作業は必ず水中で行わなければならない。なぜなら海底基準局及びトランスデューサは発信音圧が非常に高いために空中で発振を行うと発振器が自らの音圧により壊れてしまう恐れがあるからである。このため海底基準局及びトランスデューサは測量船の舷側から吊り下げて計測を行っている。

吊り索にはあらかじめ海水面下のトランスデューサと海底基準局に取り付けたハイドロフォンが一定の深さになる様目印を付け、取り付けられたハイドロフォン同士が正面を向き合い、一定の距離を保たせるために、振れ留め索を取り付ける。これは例えば海底基準局に設置したハイドロフォンがトランスデューサから遠い方向に向いた場合、トランスデューサからの信号到達が遅くなるために、正確なディレイ計測が行えなくなるためである(図3)。

この様にして計測の準備を整えたら各ハイドロフォンをA/D変換部の時計信号とトリガー信号の代わりに接続し、海底基準局、トランスデューサを水中に沈め、ウェイクアップを行い、測距観測と同様の手順により計測作業を行っている。

この様にして計測した結果、所期の目的である 10^{-5} 秒以下の個体差であることが確認できている。

4 おわりに

海底地殻変動観測では海底に設置した海底基準局の位置を数cmで求めるためにさまざまな機器を使用して観測を行っている。観測機器にはそれぞれに

個体差や誤差を持ち、誤差にもデータ1つのみを見た場合の誤差や全体を見た場合の安定性、時間変化等、さまざまな側面がある。機器一つ一つの精度向上や効率向上は観測システム全体からしてみればわずかな向上でしかないが、それを積み上げることによって全体の精度が向上し、全体のデータ量が増えていく事により海底基準局の位置決定精度が上がっていく事となる。

今後も海底地殻変動観測の観測精度、効率、取得数の向上に向けてシステム全体を見直しつつ機器の運用、更新が必要と考えている。

参 考 文 献

- 畝見潤一郎：海底地殻変動観測の現状と諸問題について，海洋情報部技法，**22**，33-41，(2004)
- Kizu S., H.Yoritaka and K.hanawa: A New Fall-Rate Equation for T5 Expendable Bathythermograph (XBT) by TSK, J. Oceanogr., 61, No.1, 155-121 (2005)
- 社泰裕，石井春雄，藤田雅之，加藤弘紀：XCTD-2 Fの深度換算式の更正の試み，海洋情報部技法，**23**，93-98，(2005)
- 富山新一：海底地殻変動観測における音響解析，海洋情報部技報，**21**，67-72，(2003)
- 藤田雅之，矢吹哲一郎：海底地殻変動観測におけるK-GPS解析結果の評価手法について，海洋情報部技報，**21**，62-66，(2003)
- 望月将志，成田誉孝，吉田善吾，石川直史，藤田雅之，浅田昭：海底地殻変動観測用新型音響船上局トランスデューサーの導入，日本測地学会第102回講演会要旨集，53-54，(2004)
- 矢吹哲一郎：海底地殻変動観測を目指した音響技術開発，水路部研究報告，**38**，47-58，(2002)