

測量船「平洋」への海底地殻変動観測装置の設置†

吉田 茂*, 渡邊俊一*, 橋本友寿*, 中村優斗*

Installation of seafloor geodetic observation system on the S/V *Heiyo*†

Shigeru YOSHIDA*, Shun-ichi WATANABE*, Tomohisa HASHIMOTO*, and Yuto NAKAMURA*

Abstract

The Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard (JHOD) installed an acoustic transducer on the bottoms of the S/V *Meiyo* (550 tons) in March 2008, the S/V *Takuyo* (2,400 tons) in February 2010, the S/V *Kaiyo* (550 tons) in March 2012, and the S/V *Shoyo* (3,000 tons) in November 2012 and started sailing GNSS-Acoustic (GNSS-A) observations. The JHOD also installed a seafloor geodetic observation system on the New S/V *Heiyo* (4,000 tons) in January 2020 for more efficient and precise seafloor positioning. In this report, we discuss the outline of the seafloor crustal movement observation system installed in the S/V *Heiyo*, the position measurement method and the measurement results of the GNSS antenna and the transducer, and the results of the test observation.

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では、2000年以降、GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測の技術開発及び海底基準点の展開を行っている（例えば、藤田，2006；佐藤・藤田，2012；Yokota et al., 2018）。GNSS-音響測距結合方式では、GNSS観測によりマストに設置されたGNSSアンテナの位置を、船体動揺計測装置により船の姿勢をそれぞれ計測して、船底に設置された送受波器の時々刻々の位置を求める。同時に、音波を用いて、海底にあらかじめ設置した複数の海底局と送受波器との間の音響往復走時を計測する（音響測距観測）（Fig. 1）。測量船は、あらかじめ設定された測線上を航走しながら観測する。測線は海底局の周囲に直線4本と周回1本の計5本が設

定されており、第1測線、第2測線…という具合に先頭から順に番号をつけている。これら5本の測線で1セットの観測を構成する（Fig. 2）。1回の観測では測線上の進行方向を変えて複数セットの観測を実施して、合計数1,000個以上の走時データを取得し、最小二乗法で海底局の位置を決定する。

海底基準点は主に日本海溝沿い及び南海トラフ沿いの陸側の海底に展開されており、これまでに2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）に伴う地殻変動及びその余効変動、並びに南海トラフ沿いでのプレート沈み込みに伴う地殻変動を検出することに成功している（例えば、Sato et al., 2011；Watanabe et al., 2014；Yokota et al., 2016）。

これまでに、中型測量船「明洋」（550トン）、

† Received September 18, 2020; Accepted November 12, 2020

* 沿岸調査課海洋防災調査室 Geodesy and Geophysics Office, Coastal Surveys Division

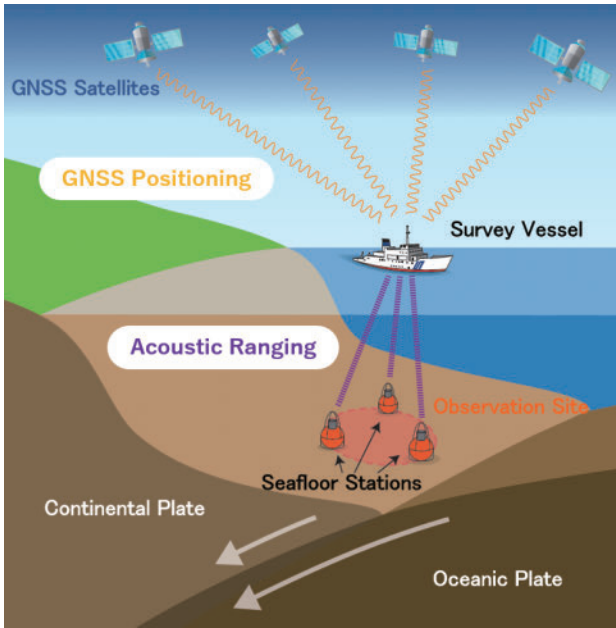


Fig. 1. Schematic picture of GNSS-acoustic seafloor geodetic observation.

図1. GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測の概念図.

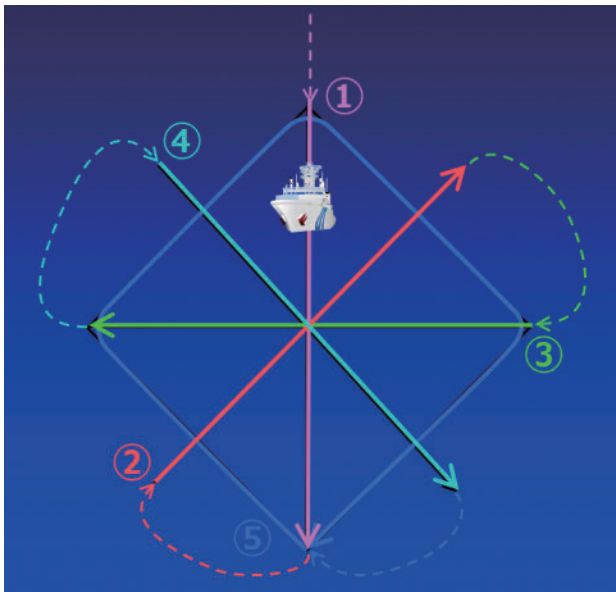


Fig. 2. Survey lines for GNSS-acoustic seafloor geodetic observation.

図2. 海底地殻変動観測における測線の配置例.

大型測量船「拓洋」(2,400トン), 中型測量船「海洋」(550トン), 大型測量船「昭洋」(3,000トン)に海底地殻変動観測装置が設置されている(川井・他, 2009; 氏原・成田, 2012; 秋山・他, 2013; 秋山・横田, 2014). さらに観測の機会を

増加させることを目的に, これら4隻の測量船に加え, 2020年1月に就役した大型測量船「平洋」(4,000トン)にも海底地殻変動観測装置が設置された.

本報告では, 「平洋」に搭載した海底地殻変動観測装置の概要についてまとめる. また, GNSS-音響測距結合方式による観測に必要なGNSSアンテナと送受信器間の位置計測を, 2019年8月1日の最終ドック入渠の際に実施したので, その結果を報告する. 最後に, 「平洋」での海底局位置観測の再現性を評価するため, 他船による局位置解析結果と比較した.

2 観測機器の設置

「平洋」に設置した観測機器をTable 1及びPhoto 1に示す. 基本的構成は「明洋」, 「拓洋」, 「海洋」及び「昭洋」と同様である. 船底に送受信器(Photo 2), 中央重力計室に船体動揺計測装置(Photo 3)及びマッチングアンプ(Photo 4), マスト部分にGNSSアンテナ(Photo 5), 観測室に制御部の各機器(Photo 6左上)及びGNSS受

Table 1. Specifications of the equipment for the GNSS-Acoustic observation installed on the S/V Heiyo.

表1. 「平洋」に設置した海底地殻変動観測機器の規格.

装置名	規格
位置計測部	
GNSSアンテナ	septentrio PolaNt-x MF
GNSS受信機	septentrio PolaRx5
制御収録装置	septentrio
制御部	
制御装置	海洋電子 KD-MAC10-2
収録装置	海洋電子 KD-MAL10-2
時計装置	海洋電子 KD-ITS200-1
波形観測装置	Keysight Technologies DSOX4024A
通信装置	BUFFALO BS-GS2008P
電源部	
磁気増幅型安定化電源装置	電研精機研究所 PSN-3 k VA
無停電源装置	オムロン BU150R
海中音速度測定部	
海中音速度測定装置	Seabird SBE-19plusV2
船体動揺計測部	
船体動揺計測装置	iXBlue HYDRINS
音響送受信部	
送受信器・マッチングアンプ	海洋電子 TRBS812-15



Photo 1. Locations of installed equipment for the GNSS-Acoustic observation on the S/V Heiyo.
 写真1. 「平洋」に設置した海底地殻変動観測装置の配置.



Photo 4. Matching amplifier.
 写真4. 「平洋」中央重力計室に設置したマッチングアンプ.



Photo 2. Verification of acoustic transducer mounted on the hull of the S/V Heiyo.
 写真2. 「平洋」船底に設置された送受波器の動作確認.



Photo 5. GNSS antenna installed on the mast of the S/V Heiyo.
 写真5. 「平洋」マスト部分に設置されたGNSSアンテナ.

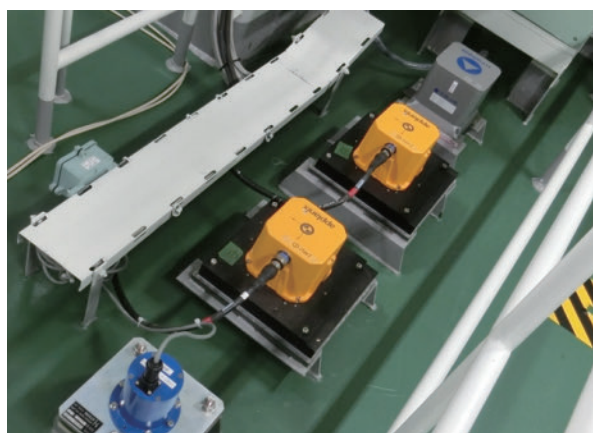


Photo 3. Dynamic motion sensor “HYDRINS” (the innermost one).
 写真3. 「平洋」中央重力計室に設置した船体動揺計測装置 (4つ並んだ装置の一番奥)

信機 (Photo 6 左下) を設置した. Photo 2 は, 船底に設置した送受波器 (黒い円形部分) に対し, 手に持った試験用送受波器から音響信号を発信して正常に動作するかどうかの試験の様子である. 試験後, 送受波器を格納する船底ドームの開口部を樹脂製の蓋で閉じた. 制御部の各機器は LAN 接続により観測室制御卓上のパソコンで一元的に操作できるようになっている (Photo 6 右側). なお, 本装置は, 1 回の送受信シーケンスに複数の測距信号を連ねて発振するマルチ測距 (横田・他, 2017; 松下・小池, 2018) が可能である.



Photo 6. Control and recording devices for the seafloor geodetic observation system installed in the laboratory of S/V Heiyo. (Left upper) Each device of the control unit. (Left lower) GNSS receiver. (Right) PCs on the control desk.

写真 6. 「平洋」観測室に設置された制御部のデバイス (左上：制御部の各機器, 左下：GNSS 受信機, 右：制御卓上のパソコン).

3 GNSS アンテナ送受波器間の位置計測手法

海底地殻変動観測において必要なのは、船体動揺計測装置の座標系に準拠した GNSS アンテナ送受波器の相対位置ベクトルである。そのため、以下の作業が必要となる。まず、測量の結果を測量地点のローカル ENU 座標に準拠して決定する。それと同時に船体動揺計測装置のデータを収録し、船体動揺計測装置の座標系をローカル ENU 座標系と結び付ける。ローカル ENU 座標で得られた測量結果を船体動揺計測装置の座標系に回転させることで、船体動揺計測装置の座標系に準拠した相対位置ベクトルを得る。

Fig. 3 に、測量に用いた測点の配置を示す。図中、送受波器底面の中心点である TD と GNSS アンテナ底面の点 ANT の相対位置が求めるべき量である。5096 は起点となる街区三角点で、同じく街区三角点の 5097 との位置関係から真北方位角を算出した。N-1, N-2, N-3, N-4, N-5 はドック近傍に至るトラバナー経路で、N-4, N-5 が船体に至るドック近傍の点である。S.1 は TD 直下のドック底面の点、GNSS.1 は GNSS アンテナ頂点である。GNSS.2 は、GNSS アンテナと航海用レーダーとの間での干渉が生じた場合に備えて準

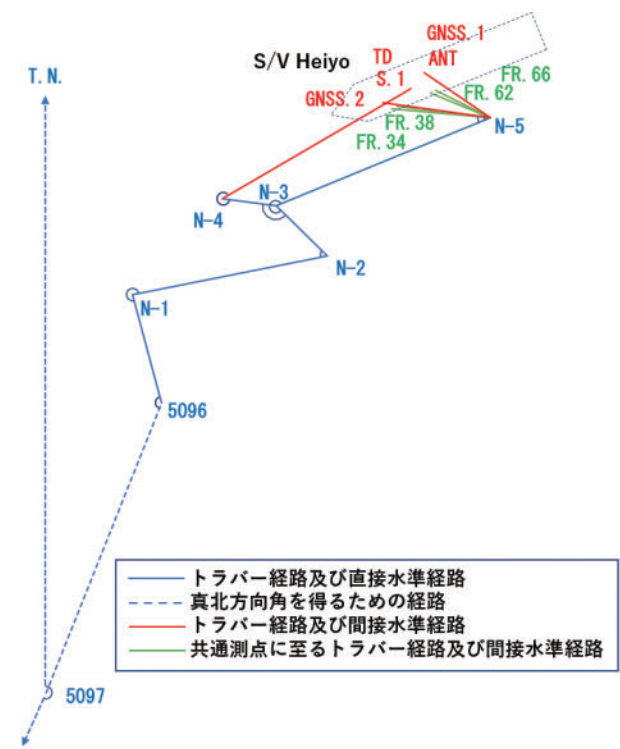


Fig. 3. Locations of survey points for the relative positioning.

図 3. 測量に用いた基準点・主要点網図。

備した予備の GNSS アンテナの位置である。FR.34, FR.38, FR.62, FR.66 は、別途行ったマルチビーム測深器の測量結果と結合するための共通測点で、「平洋」左舷側に設置された。今回の測量では、造船所近隣の街区三角点 2 点の位置から開放トラバースの手法で真北方向角と座標値を引っ張ってくる方法により、5096, N-1, N-2, N-3, N-4, N-5, S.1, FR.34, FR.38, FR.62, FR.66, GNSS.1, GNSS.2 の測量を実施した (Photo 7)。

測距・測角にはトータルステーション (ニコントリニブル製 M3 DR2) を用いた。5096 から N-4, N-5 までの高低差は水準儀 (ソキア製 SDL30) を用いた直接水準測量により実施した。測角は正反 2 回の計 4 回実施した。測距については 2 セット実施し、その平均値を採用した。気象補正は、距離が短いため実施しなかった。直接水準測量は往路と復路を実施し、3 級水準測量の許容範囲に収まっていることを確認した。トータルステーションを使用した光学測距・測角による間接水準を実施したのは S.1 と、FR.34, FR.38, FR.62, FR.66, GNSS.1, GNSS.2 の 2 組である。前者は N-4 を基点とし、後者は N-5 を基点とした。

S.1 から TD の距離は鋼尺を使用して直接測定



Photo 7. Survey for relative positioning of the GNSS antenna to the acoustic transducer using a total station.

写真 7. トータルステーションによる GNSS アンテナ・送受波器間の相対位置の測量。

し、ANT は GNSS.1 からアンテナの厚さを引くことで求め、最終的に必要な TD 及び ANT のローカル ENU 座標に準拠した位置を求めた。今回の測量では、測量結果を別の方法で評価するために、測量中に GNSS アンテナを稼働させてデータを取得した。

なお、今回の測量手法は従来の手法とは異なっていることに注意されたい。これまでは、まず、測量船がドックに入渠した際に、マストに設置された GNSS アンテナとドック近傍に設置した複数の点で GNSS 測量を行い各測点の位置を決めた。加えて、船底の送受波器の中心から鉛直下のドック底面に測点を設置し、この間の高さを測定した。その後、出渠後に水を抜いたドックにおいて、送受波器鉛直下の測点とドック近傍の測点との間で測量を行うことで、GNSS アンテナと音響トランスデューサとの位置関係を求めた。最後に、入渠時に測得しておいた船体動揺計測装置のデータを用いて、各測点の位置を船体動揺計測装置の各軸に準拠した座標系での値を求めていた (川井・他, 2009; 氏原・他, 2012; 秋山・他, 2013; 秋山・横田, 2014)。

4 GNSS アンテナ—送受波器間の位置計測結果

測距・測角・水準測量の成果、及びこれを元に算出したローカル ENU 座標 (平面直角座標系の III 系) の値を、Table 2, Table 3, Table 4 及び Table 5 にそれぞれ示す。S.1 は送受波器中心点である TD 直下の測点であり、鋼尺を使用した直接測量で 1.682 m の距離があったので、TD の高さはこの値を加えたものとした。ANT はアンテナ底面中央の位置であるので、今回測定したアンテナ頂点 GNSS.1 の値から、アンテナの厚み 0.073 m を補正して算出した。GNSS.1 はアンテナ中央トップにミラーを置き計測。他の測点と同様に測定・算出した 2 測点間の比高から器械高とミラー高の値を引いて算出した。

なお、今回測量を実施した三菱造船江浦工場の第 2 ドック (下関) は、観測機器を搭載した船底ドーム部分のドック底面が一段低い構造になって

Table 2. Angle survey results by total station.

表 2. トータルステーションによる測角測量結果.

測角	水平角(度)	真北方向角(度)	鉛直角(度)
∠ 真北 - 5097 - 5096	21.45426147	201.4542615	
∠ 5097 - 5096 - N-1	143.5969444	165.0512059	92.91055556
∠ 5096 - N-1 - N-2	273.4177778	258.4689837	91.75972222
∠ N-1 - N-2 - N-3	55.72444444	134.1934281	90.28277778
∠ N-2 - N-3 - N-4	143.5877778	97.78120591	92.7675
∠ N-2 - N-3 - N-5	293.2597222	247.4531504	90.75833333
∠ N-3 - N-4 - S.1	321.5827778	239.3639837	97.04388889
∠ N-3 - N-5 - FR.34	28.00777778	95.46092814	88.47583333
∠ N-3 - N-5 - FR.38	29.71694444	97.1700948	89.27583333
∠ N-3 - N-5 - FR.62	45.59388889	113.0470392	88.30916667
∠ N-3 - N-5 - FR.66	49.61083333	117.0639837	87.68277778
∠ N-3 - N-5 - GNSS.1	57.18194444	124.6350948	59.15972222
∠ N-3 - N-5 - GNSS.2	30.93861111	98.39176147	77.45138889

Table 3. Distance survey results by total station.

表 3. トータルステーションによる測距測量結果.

測距	斜距離(m)	水平距離(球面・m)	水平距離(平面・m)
5096 - N-1	49.215	49.152	49.155
N-1 - N-2	86.301	86.26	86.265
N-2 - N-3	31.197	31.197	31.199
N-3 - N-4	23.624	23.596	23.597
N-3 - N-5	100.71	100.701	100.707
N-4 - S.1	95.646	94.924	94.93
N-5 - FR.34	43.131	43.116	43.119
N-5 - FR.38	40.854	40.851	40.854
N-5 - FR.62	28.445	28.433	28.435
N-5 - FR.66	26.703	26.681	26.683
N-5 - GNSS.1	40.908	35.124	35.126
N-5 - GNSS.2	48.456	47.298	47.301

Table 4. Leveling results.

表 4. 直接水準測量結果.

水準	高低差(m)	水平距離(球面・m)	水平距離(平面・m)
5096 - N-4	-1.771	49.152	49.155
5096 - N-5	-1.965	86.26	86.265

Table 5. Calculated positions of survey points (w.r.t. zone III).

表 5. 算出された各測点の位置 (Ⅲ系基準).

測点	X(N・m)	Y(E・m)	H(U・m)	備考
5097	-228741.379	-115135.627		
5096	-228614.243	-115085.664	4.808	
N-1	-228566.752	-115098.344		
N-2	-228549.508	-115013.820		
N-3	-228527.760	-115036.189		
N-4	-228524.565	-115059.569	3.037	5096からの直接水準
N-5	-228489.145	-114943.179	2.843	5096からの直接水準
S.1	-228476.191	-114977.889	-8.212	
TD	-228476.191	-114977.889	-6.584	TDはS.1点の直上、HiはS.1+1.628m
FR.34	-228485.041	-114986.102	4.395	
FR.38	-228484.046	-114983.714	4.383	
FR.62	-228478.013	-114969.344	4.335	
FR.66	-228477.005	-114966.940	4.327	
GNSS.1	-228469.181	-114972.080	25.227	アンテナトップを測った
ANT	-228469.181	-114972.080	25.154	HiはGNSS.1-0.073m
GNSS.2	-228482.242	-114989.974	14.122	

おり、ドック近傍から船体の陰になることなく S.1 点が見通せた。船底ドーム部分下の作業でも人が立ったまま作業ができたので、測量作業が効率的であった (Photo 8)。

船体に関連する測点である、FR.34, FR.38, FR.62, FR.66, GNSS.1, GNSS.2, TD を、ANT を原点とした座標に直し (Table 6), 入渠時に測得した HYDRINS の約 2 時間の計測平均値 (Table 7) を元に、得られた各測点の値を、ANT を原点として回転させることで、HYDRINS のヨー軸の



Photo 8. Survey of the height of the acoustic transducer from the bottom of the dock.

写真 8. ドック底面からの送受波器の高さの計測.

Table 6. Coordinates with ANT as origin.

表 6. ANT を原点とした座標.

測点	X(N・m)	Y(E・m)	H(U・m)	備考
S.1	-7.010	-5.809	-33.366	
TD	-7.010	-5.809	-31.738	HiはS.1+1.628m
FR.34	-15.860	-14.022	-20.759	
FR.38	-14.865	-11.634	-20.771	
FR.62	-8.832	2.736	-20.819	
FR.66	-7.824	5.140	-20.827	
GNSS.1	0.000	0.000	0.073	
ANT	0.000	0.000	0.000	HiはGNSS.1-0.073m
GNSS.2	-13.061	-17.894	-11.032	

Table 7. Observed values of heading, rolling and pitching by HYDRINS while surveying.

表 7. 測量時の動揺計測装置の計測値.

ヘディング(真北方向を起点に東周りに+・度)	246.301
ロール(+なら左舷が上がる・度)	0.350
ピッチ(+なら船首が上がる・度)	0.370

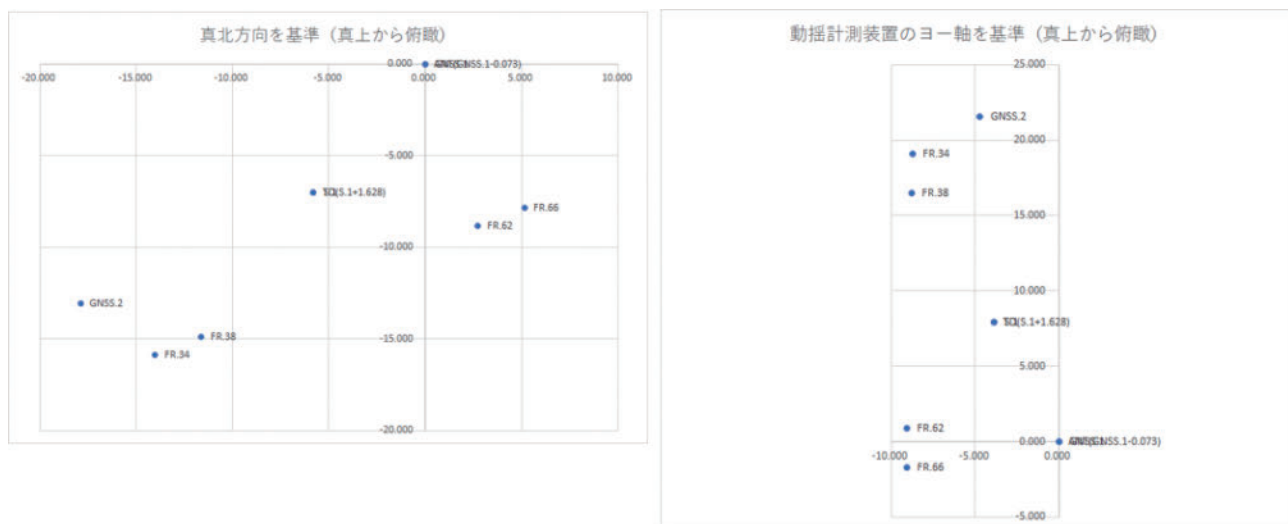


Fig. 4. Rotation of the coordinates of survey points on the vessel from the local ENU coordinates to the motion sensor's coordinates.

図 4. 船体各点の座標のローカル ENU 座標系から動揺計測装置の座標系への回転.

原点方向とそれに直交するロール軸・ピッチ軸を基準とした三次元座標軸に座標変換した (Fig. 4). HYDRINS は, 2019 年 8 月 1 日 06 時 15 分 07 秒 ~ 08 時 26 分 29 秒 (UTC) の間, 記録を行った.

船が海に浮かんでいる状態で HYDRINS を起動させると, 船の揺れで HYDRINS のエラー量が徐々に収束し, 初期化が完了する. しかし, ドックに入渠した状態では動揺が生じないため, まず, HYDRINS の正規の取り付け位置で電源を投入し 15 分静止, そのまま反時計回りに 90 度ずらした位置で 15 分静止, 同じく 180 度ずらした位置で 15 分静止させることで初期化を行った. 最後に正規の向きで固定させた (コールドスタート). 記録中のデータの揺らぎは, ヘディングが 0.01 度, ロール・ピッチは 0.00 度であり, ほぼ変化は見られなかった. また, 記録から算出した各値の標準偏差は, ヘディングが 0.00048 度, ロール・ピッチは 0 度であった.

その結果, ANT を原点とした TD の位置は, 船首尾方向を X (船首方向がプラス), 右左舷方向を Y (右舷方向がプラス), 上下方向を Z (下方向がプラス) としたとき, $X = +7.932 \text{ m}$, $Y = -3.888 \text{ m}$, $Z = +31.813 \text{ m}$ と求まり, 斜距離は 33.017 m であった. その他の測点の結果につい

Table 8. The coordinates of each survey point based on the three axes of HYDRINS.

表 8. 動揺計測装置の 3 軸を基準にした各測点の座標.

測点	X(船首が+・度)	Y(右舷が+・度)	Z(下が+・度)
S.1	7.922	-3.878	33.441
TD	7.932	-3.888	31.813
FR.34	19.080	-8.759	20.936
FR.38	16.493	-8.808	20.931
FR.62	0.910	-9.060	20.880
FR.66	-1.696	-9.103	20.871
GNSS.1	0.000	0.000	-0.073
ANT	0.000	0.000	0.000
GNSS.2	21.563	-4.699	11.199

ANT→TDの斜距離 33.017 m

ては, Table 8 に示す.

5 GNSS 測定の位置計測結果の評価

ANT の測定結果を GNSS 測定と比較するために, GNSS アンテナを 8 月 1 日 02 時 00 分 00 秒 ~ 07 時 59 分 59 秒 (UTC) の間稼働させた. GNSS 測定の解析には Trimble Business Center (以下 TBC) を用いた. 解析には近傍の電子基準点, 下関 (電子基準点番号: 940079), 北九州 1 (電子基準点番号: 021060), 北九州 2 (電子基準点番号: 021061) の GPS 衛星のみの 2 周波 30 秒データを使用, マストに設置した GNSS アンテナを含む全てのアンテナに対して PCV 補正を適

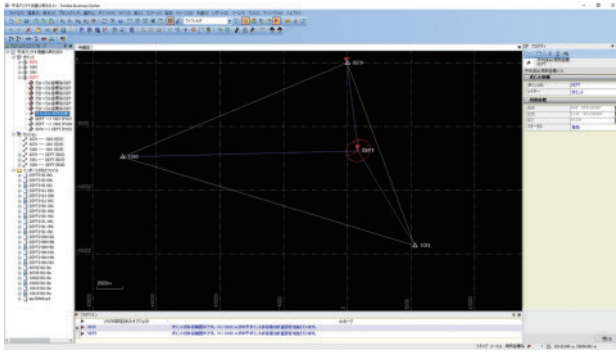
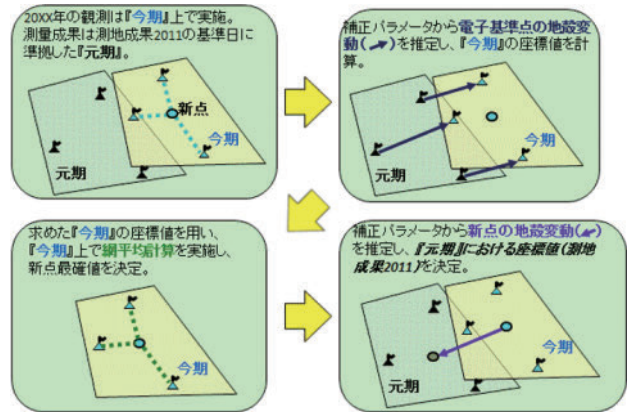


Fig. 5. GNSS analysis with TBC software.
図 5. TBC による GNSS 測量解析.

用し、最終暦で基線解析を行った (Fig. 5).

測量成果には、座標値が確定している元期座標の値と GNSS 測量時の今期座標の値の差を無くすため、国土地理院が提供しているセミ・ダイナミック補正を反映させた。まず、電子基準点にセミ・ダイナミック補正を反映させ、地殻変動を考慮した観測時の電子基準点の推定位置 (今期座標) を基準に GNSS アンテナ (ANT) の今期座標を網平均で算出、そうして求めた位置を今期から元期座標への逆方向のセミ・ダイナミック補正をすることで、ANT の元期座標を求めた。こうすることでトータルステーションによる光学測距・測角で求めるために使った街区三角点と同じ世界測地系 (測地成果 2011) を元にした座標値が算出される (Fig. 6)。各電子基準点の測地成果 2011 の位置は、国土地理院 Web サイトの【基準点成果等閲覧サービス】に掲載されている測地成果 2011 の値を、セミ・ダイナミック補正と ANT の標高を算出するために必要なジオイド高の値及び測量結果の比較のために必要な平面直角座標への変換については、同じく国土地理院 HP の【SemiDynaEXE】【ジオイド高計算】及び【平面直角座標への換算】を使用した。そうして求められた位置を Table 9 に示す。

残差について、X, Y 方向の最大残差が -0.0094 m, H 方向については -0.012 m と、どちらも 1 cm 程度の値に納まった。今回の GNSS 測量で求めた ANT の位置は、予備的なもの以上の意味はないが、トータルステーション等で測った測量成



※国土地理院HPより

Fig. 6. Procedure of semi-dynamic correction (available at <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/semidyna05.html>).

図 6. セミ・ダイナミック補正の作業手順 (国土地理院 Web site より ; <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/semidyna05.html>).

Table 9. ANT position and residuals obtained by GNSS observation.

表 9. GNSS 観測で求められた ANT の位置と残差。

算出された測点ANTの座標(世界測地系(元期・測地成果2011)の値)

測点	緯度	経度	楕円体高(m)	標高(m)
ANT	33° 56' 02".83346	130° 55' 22".96983	57.6899	25.166

算出された測点ANTの座標(III系の値)

測点	X(N・m)	Y(E・m)	H(U・m)
ANT	-228469.1838	-114972.0706	25.166

光学測距・測角とGNSS観測の残差

測点	$\Delta X(N \cdot m)$	$\Delta Y(E \cdot m)$	$\Delta H(U \cdot m)$
ANT	0.0028	-0.0094	-0.012

果を補強する証拠になるとと思われる。

6 海底局位置の再現性評価

6.1 音響測距結果

海底局位置計測の再現性を評価するため、令和 2 年 4 月に「相模湾」海底基準点において試験観測を実施した。観測は 2 セット計 10 測線の観測を 3 連続送信のマルチ測距にて実施し、2901 個の音響測距データを取得した。得られた受信波形 (Fig. 7) 及び受信波形と参照波形の相関処理の結果 (Fig. 8) の一例をそれぞれ示す。相関処理には音響解析ソフト「sas」(富山, 2003) を使用した。

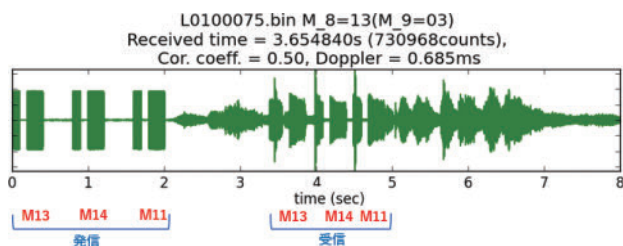


Fig. 7. An example of recorded acoustic signal.
 図 7. 「平洋」で観測された受信波形の一例。

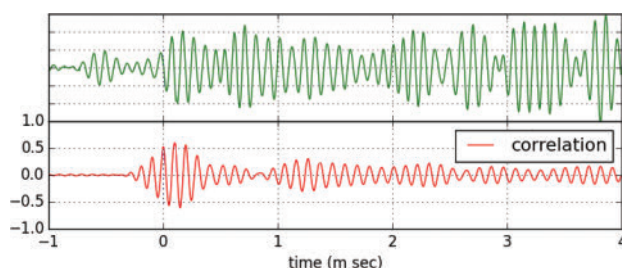


Fig. 8. Enlarged received acoustic signal (upper) and the correlation value of the signal (lower).
 図 8. 受信波形の一部 (上) と相関処理の結果 (下)。

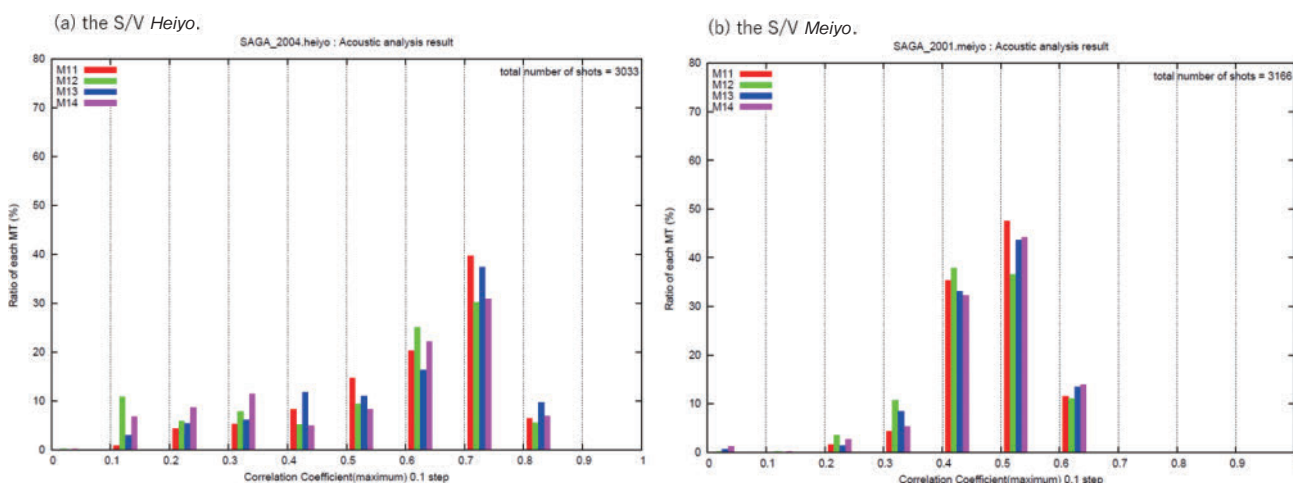


Fig. 9. Histograms of correlation values of return signal obtained at SAGA (a) in April 2020 by the S/V *Heiyo* and (b) in January 2020 by the S/V *Meiyo*.

図 9. 「相模湾」で取得された音響信号の相関係数の分布。(a) 2020 年 4 月に平洋で取得されたもの、(b) 2020 年 1 月に明洋で取得されたもの。

Fig. 7 を見ると、0～2 秒の間にマルチ測距の識別信号 (102 msec) と測距信号 (204 msec) の組が 3 組記録されており、それに対する海底局の応答が 3～5 秒の間に返ってきていることが見て取れる。この例では、S/N 比がとても高く、海底局から送信された信号の存在は容易に判別できる。

「平洋」及び「明洋」の、「相模湾」海底基準点における同程度の海況下での観測で得られた受信波形と参照波形の相関係数の分布をそれぞれ Fig. 9 (a), (b) に示す。この例では、「明洋」と比較し「平洋」は全体的に相関係数が高いことがわかる。

6.2 局位置解析

上記の試験観測のデータを用いて、通常の観測

と同様に局位置解析を実施した。GNSS 解析には RTKLIB ver. 2.4.2 (Takasu, 2013), 局位置解析には SGOBS (藤田・他, 2004) ver. 4.0.2_f を使用した。しかしながら、計算走時と観測走時の残差が大きく、適切な解が得られなかったため、試行錯誤的に原因究明を行った。

データを検証した結果、船体動揺計測部で記録した時刻が GNSS 受信機で記録した時刻に対し約 1 秒進んでいることと、音響解析の結果得られた送受波器の送信時刻が、GNSS 受信機で記録した時刻と比べて第 8 測線までは 2 秒、それ以降は 1 秒遅れていることが判明した。

海底地殻変動観測の局位置解析におけるエラーのうち、解析条件の設定や各種前処理における人為的なものを除けば、多くの場合は GNSS のエラーやデバイス間の時刻同期に起因することが経

験的にわかっている。そこで、まずは過去に他船でも同様のエラーが生じた例のある、船体動揺計測装置と GNSS 収録装置間の時刻差について調べた。調査には、船体動揺計測部で取得される Heave 値（高さの変分値）と GNSS 解析で得られた「平洋」の GNSS アンテナの高さの時系列を用いる。なお、GNSS アンテナの高さについては、実測値に測量船の傾きを考慮した補正値を加えたものを用いた。両者の高さ時系列は波浪によって振動するので、時刻をずらしながら両者の相関を取ることで、短周期の上下動が同期するために必要な時刻差がわかる。その結果、船体動揺計測部で記録した時刻が GNSS 受信機で記録した時刻に対し 0.95 秒進んでいることが明らかになった。時刻ずれの刻み幅は 0.05 秒としたため、分解能は 0.05 秒であることに注意されたい。先述のとおり、こうした時刻ずれ自体は他の船で発生した例があり、その際には推定した時間ずれ量を補正することで修正している。今回も同様に、GNSS の時刻が正しいとして、動揺計測の時刻からずれ量である 0.95 秒を引くことで修正を行った。

この補正によっても解が改善されなかったため、次に、送受波器の送信時刻がずれている可能性を調べた。観測装置の時刻制御には、時計装置から出力される 1 PPS 信号を用いているため、信号の極性等の器差に起因する読み取りミスにより正秒の整数倍の時刻ずれが発生する可能性があるからである。実際、他船においても 1 秒のずれが発生したこともあった。そのため、正秒でのずれが生じていると想定して時刻を 1 秒ずつずらしながら解析を実施し、試行錯誤的に測位解の品質が良くなる組み合わせを探索した。しかし、観測時間全体にわたって一定の時刻ずれが発生するという仮定の下では、まだうまく解けないことが分かった。そこで、より細かくタイムウィンドウを区切り、測線ごとに個別のずれ量を推定したところ、第 1 測線～第 8 測線まで記録された送信時刻に 2 秒を、第 9 測線以降は 1 秒を、それぞれ加えた場合に解が安定することが分かった。時刻同期

に関するエラーの発生原因と根本的な解決法については、現在調査中である。

観測データに時刻同期に関する修正を加えたのちに局位置解析を実施し、得られた解をこれまで他の船で実施した結果と比較した (Fig. 10)。個々の観測エポックごとの安定性を比較するため、各海底局位置に関する拘束をかけずに 1 エポックで解くシングルエポックの解析結果を用いた。Fig. 10 では、2018 年 2 月の値を基準値とした偏差分をプロットした。

Fig. 10 から、水平位置は十分に再現されており、ここ 2 年間の平均値と比較して大きなバイアスを持っていないことが確認された。上下成分についてはここ 2 年間の平均値に比べて 4 cm 下方向に推定されているが、特にシングルエポック解析の GNSS-音響測距結合方式結果においては上下成分の決定精度が良くないことを踏まえると、今回のテスト範囲においては機器バイアスは確認されなかったと結論付けられる。ただし、まだ「平洋」での観測回数が少ないため、「平洋」起因のバイアス誤差の有無を十分な確度で議論することは難しい。測量船ごとのバイアスについては観測を繰り返すことでしか確度が高まらないので、

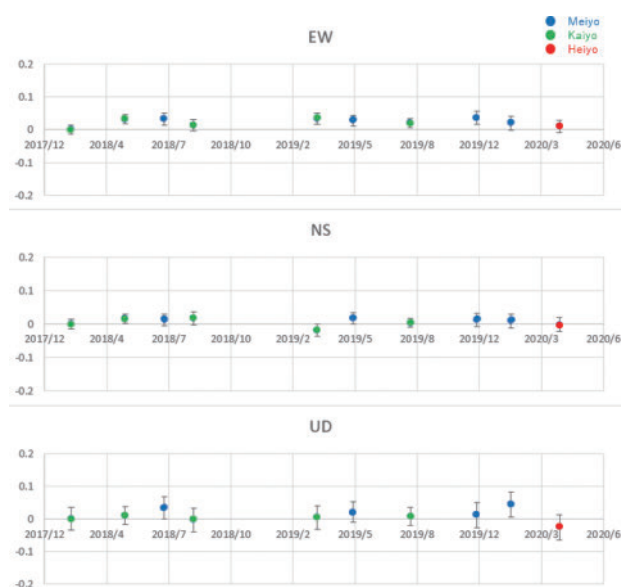


Fig. 10. Time series of the estimated positions at “SAGA” from Feb. 2018 to Apr. 2020.

図 10. 「相模湾」における 2018 年 2 月から 2020 年 4 月までの局位置解析結果の時系列の比較。

今後も「平洋」での海底地殻変動観測を行う必要がある。事前にバイアスについての情報を入手しておくことは、海溝型地震が発生したときなどの緊急時に、「平洋」が海底地殻変動観測を実施した際により精度の高いデータを得ることにつながる。機器バイアスはドック入渠時のメンテナンスや機器の取り外しの影響や機器のドリフトなどの影響で変化する可能性も高いため、海底地殻変動観測装置が設置された全測量船について、少なくとも年に1回以上の定期的な観測を実施することが望まれる。

7 結論

2020年1月に就航した最新鋭の大型測量船「平洋」に海底地殻変動観測装置を設置した。本稿で示した観測機器は、2020年4月に実施したテスト観測において、船体動揺計測部で記録した時刻と送受波器の送信時刻がGNSS受信機で記録した時刻とそれぞれ合致していないという問題点が発見された。しかし、応急的な解決方法が判明したことから最終的に性能を把握することができ、数cmとされている観測の精度の範囲内に水平成分が収まっていること、上下成分についてはバイアス誤差が疑われるため、さらなる観測を積み重ねて原因を突き止める必要があることが確認された。

謝 辞

測量船「平洋」への海底地殻変動観測装置の設置及び観測の実施は測量船「平洋」乗組員の協力のもとに行われたものです。また、匿名の査読者には原稿を改善するための指摘をいただきました。記して感謝いたします。

文 献

秋山裕平・氏原直人・大門 肇 (2013) 測量船「海洋」への海底地殻変動観測装置の設置, 海洋情報部研究報告, 50, 91-96.
秋山裕平・横田裕輔 (2014) 測量船「昭洋」への海底地殻変動観測装置の設置, 海洋情報部研

究報告, 51, 106-112.

藤田雅之 (2006) GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測～海上保安庁の取り組み(レビュー)～, 海洋情報部研究報告, 42, 1-14.

藤田雅之・佐藤まりこ・矢吹哲一朗 (2004) 海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアの開発, 海洋情報部技報, 22, 50-56.

川井仁一・浅倉宜矢・松本良浩 (2009) 測量船「明洋」への海底地殻変動観測用送受波器の船底装備について, 海洋情報部技報, 27, 50-55.

松下 優・小池未空時 (2018) 海底局マルチ測距手法による海底地殻変動観測の効率化, 海洋情報部研究報告, 56, 46-49.

佐藤まりこ・藤田雅之 (2012) GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術の進展, 海洋情報部研究報告, 48, 26-40.

Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada (2011) Displacement Above the Hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332, 1395, doi: 10.1126/science.1207401.

Takasu, T. (2013) RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, 29-49.

富山新一 (2003) 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.

氏原直人・成田誉孝 (2012) 測量船「拓洋」への海底地殻変動観測装置設置について(速報), 海洋情報部研究報告, 48, 85-90.

Watanabe, S., M. Sato, M. Fujita, T. Ishikawa, Y. Yokota, N. Ujihara, and A. Asada (2014) Evidence of viscoelastic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5789-5796, doi:10.1002/2014GL061134.

Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe (2018) Seafloor crustal deformation data along the

subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations. *Sci. Data*, 5:180182, doi:10.1038/sdata.2018.182.

Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada (2016) Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, 534, 374–377, doi:10.1038/nature17632.

横田裕輔・田代俊治・下村広樹 (2017) 海底局マルチ測距手法の実装, 海洋情報部研究報告, 54, 32–37.

要 旨

海上保安庁海洋情報部では、主に日本海溝及び南海トラフ沿い陸側に展開した海底基準点において、GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測を繰り返し行っている。海底地殻変動観測には測量船を使用するが、2008年3月に中型測量船「明洋」(550トン)、2010年2月に大型測量船「拓洋」(2,400トン)、2010年3月に中型測量船「海洋」(550トン)、2012年11月に大型測量船「昭洋」(3,000トン)の船底にそれぞれ音響トランスデューサ(送受波器)を設置したことにより、より短時間で安定した観測が可能となる航走観測が実現され、観測精度や観測効率が向上した。海洋情報部では、新たに2020年1月に最新鋭の大型測量船「平洋」(4,000トン)が就航したが、「平洋」にも同様に海底地殻変動観測システムを設置した。本稿では、「平洋」に設置した観測システムの概要、GNSSアンテナと送受波器の位置測定方法と測定結果、及びテスト観測の結果について報告する。