

測量船「昭洋」への海底地殻変動観測装置の設置[†]

秋山裕平*, 横田裕輔*

Installation of seafloor geodetic observation system on the S/V *Shoyo*[†]

Yuhei AKIYAMA* and Yusuke YOKOTA*

Abstract

The Japan Hydrographic and Oceanographic Department (JHOD) installed an acoustic transducer on the bottom of the S/V *Meiyo* (550 tons) in March 2008, the S/V *Takuyo* (2,400 tons) in February 2010, and the S/V *Kaiyo* (550 tons) in March 2012 and started sailing measurements. JHOD also installed a new seafloor geodetic observation system on the S/V *Shoyo* (3,000 tons) in November 2012 for more efficient and precise seafloor positioning. In this report, we present the new system mounted on the S/V *Shoyo* and the test results through the comparison with the results obtained by other S/Vs.

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では、東京大学生産技術研究所の技術協力のもと、GPS/音響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（藤田，2006；佐藤・藤田，2012）。

本手法では、まず、マストに設置された GPS アンテナにより船位を、ジャイロ室に設置された動揺計測装置により船の姿勢を計測し、これとともに、船底に設置された音響トランスデューサで音波を用いて、海底に設置された複数の海底局との距離計測（音響測距）をあらかじめ設定された測線上で行う。これを複数セット実施して 5,000 個以上の音響測距データ取得し、最小二乗法で海底基準点の位置を決定する（Fig. 1）。

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

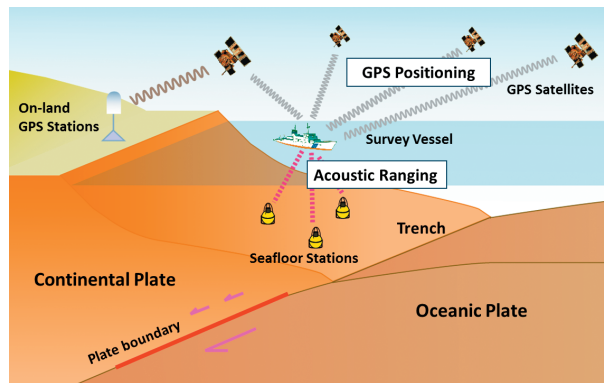


Fig. 1. Schematic picture of GPS/acoustic seafloor geodetic observation.

図 1. GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測の模式図。

宮城県沖、福島県沖等における地震間の地殻変動や 2005 年の宮城県沖の地震（M 7.2）及び 2011 年（平成 23 年）東北地方太平洋沖地震（M 9.0）に伴う地殻変動を検出することに成功している

[†] Received October 9, 2013 ; Accepted December 26, 2013

* 海洋調査課海洋防災調査室 Geodesy and Geophysics Office, Hydrographic Surveys Division

(例えば、藤田，2006；Sato et al., 2011)。

従来は測量船の船尾に GPS アンテナ及び音響トランスデューサ（送受波器）を設置し、観測を実施してきた（漂流観測）。この方法では、測線のコントロールが不可能である上、測線間の移動の度に音響トランスデューサを引き揚げなければならず、タイムロスが大きかった。より効率的な観測が可能な航走しながらの観測を実現するため、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）、2012年3月に中型測量船「海洋」（550トン）の船底に音響トランスデューサを常設し、航走観測を開始した（川井・他，2009；氏原・成田，2012；秋山・他，2013）。これにより、測線間の移動に伴うタイムロスが減少した。さらに、測線のコントロールが可能となったことにより、従来と比較して音響測距データの空間的なバランスが改善され、より短時間で安定した観測を行うことが可能となった（佐藤・他，2009）。

これら3隻の測量船に続き、2012年11月には、大型測量船「昭洋」（3,000トン）に音響トランスデューサ等からなる海底地殻変動観測システムを常設した。これにより、4隻体制での観測が可能になり、海底地殻変動観測の実施に際し観測機会の増加が期待される。

本稿では、「昭洋」に設置した海底地殻変動観測システムの概要についてまとめる。また、GPS/音響結合方式による観測を行うため、音響トランスデューサ-GPSアンテナ間の位置計測を行った。さらに、「昭洋」での海底局位置観測の再現性を評価するため、他船での観測データを用いた局位置解析結果と比較したので、それらの結果を報告する。

2 観測機器の設置

「昭洋」に設置した観測機器を Table 1 及び Fig. 2 に示す。基本的構成は「明洋」，「拓洋」及び「海洋」と同様である。船底に送受波用音響トランスデューサ（Photo 1）、ジャイロ室に動揺計測装置（Photo 2）、マスト部分に GPS アンテナ

Table 1. List of the equipment installed on the S/V Shoyo.

表 1. 「昭洋」に設置した観測機器の規格。

装置名	規格
GPSアンテナ	Trimble Zephyr Geodetic2 RoHS
GPS受信機	Trimble NetR9
制御収録装置	SEA M-DNR
時計装置	SEA M-PTG-2
精密電源	SEA M-SMP
動揺計測装置	iXBlue PHINSIII
音響トランスデューサ	SEA M-SATR-2

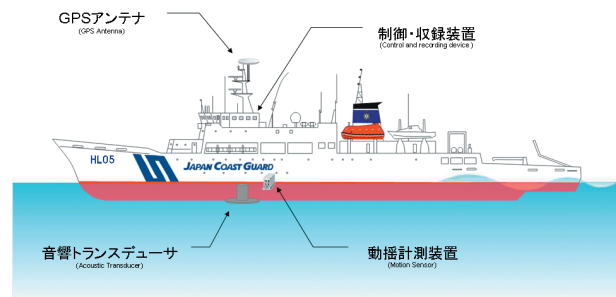


Fig. 2. GPS/Acoustic seafloor geodetic observation equipment on the S/V Shoyo.

図 2. 「昭洋」に設置した海底地殻変動観測のための観測機器。



Photo 1. Installation of an acoustic transducer on the hull of the S/V Shoyo.

写真 1. 「昭洋」の船底に送受波用音響トランスデューサを設置する様子。

(Photo 3)、観測室に各種収録装置（Photo 4）を設置した。これらの収録装置は LAN 接続により 1 台のパソコンで操作できるようになっている。

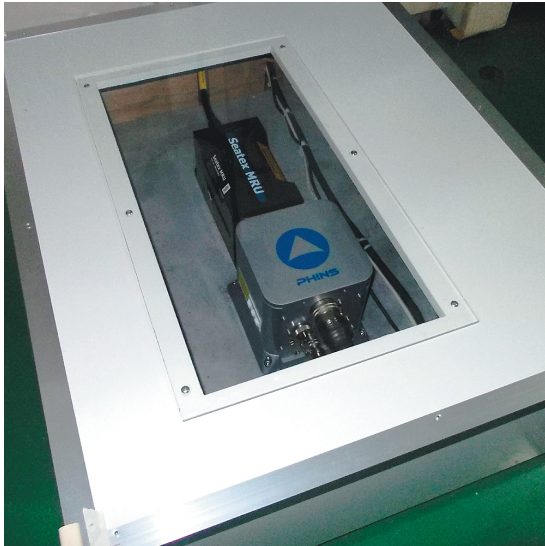


Photo 2. Dynamic motion sensor, PHotonic Inertial Navigation System (PHINS), installed in the S/V *Shoyo*.

写真2. 「昭洋」のジャイロ室に設置された動揺計測装置 (PHINS).

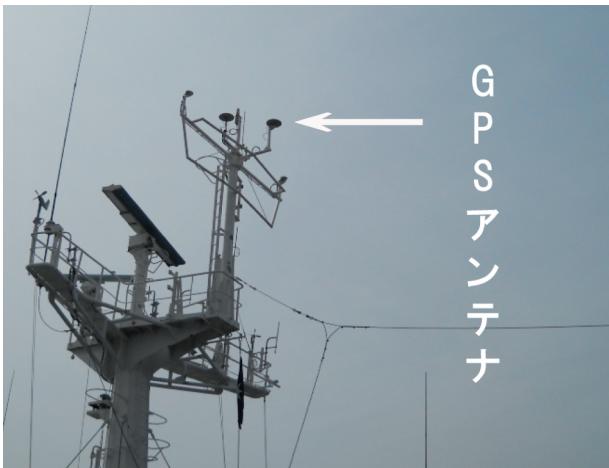


Photo 3. GPS antenna installed on the mast of the S/V *Shoyo*.

写真3. 「昭洋」のマスト部分に設置されたGPSアンテナ.

3 音響トランスデューサーマストGPSアンテナ間の位置計測

2012年11月の「昭洋」のドック入渠中及び出渠後に音響トランスデューサーマストGPSアンテナ間の位置計測を行った。

ドック入渠中には、ドック近傍に設置した点(2箇所)及びマストに設置されたGPSアンテナにおいてGPS測量を行った。それとともに、船



Photo 4. Control and recording devices of seafloor geodetic observation system installed in the S/V *Shoyo*.

写真4. 「昭洋」の観測室に設置した各種収録装置.

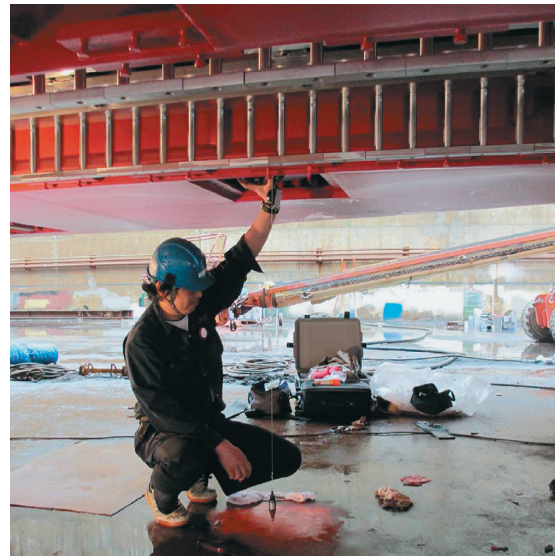


Photo 5. Measurement of the height of the acoustic transducer from the ground. The measuring point was placed just below the center of the transducer while the S/V *Shoyo* was dry-docked.

写真5. 「昭洋」のドック入渠中における船底の音響トランスデューサー底面と鉛直下のドック底面との距離を測定する様子.

底の音響トランスデューサー底面の中心点から鉛直下のドック底面に測点を設置し、この間の距離を測定した (Photo 5)。また、出渠後には、音響トランスデューサー鉛直下の点及びドック近傍の点(2箇所)の測角を行った。

GPS 測量の解析には Trimble Business Center (ver. 2.81) を用いた。さらに、この解析結果と「昭洋」入渠時に計測した動揺計測装置 (PHINS) のデータを組み合わせて、マスト GPS アンテナ底面を原点とした音響トランスデューサ底面の中心点の位置を決定した。得られた位置は、マスト GPS アンテナ底面に対して、船尾方向に 0.767 m, 右舷方向に 0.801 m, 船底方向に 28.894 m, 斜距離が 28.915 m であった。

4 海底局位置観測の再現性評価

(a) 音響測距結果

「昭洋」で得られた受信波形の一例を Fig. 3 に、この受信波形に対する相関処理結果を Fig. 4 に示す。相関処理には、音響解析ソフト「sas ver. 1.2.5」(富山, 2003) を使用した。

「昭洋」及び「明洋」の、同程度の海況下での観測で得られた受信波形の相関係数の分布をそれぞれ Fig. 5(a), 5(b) に示す。「明洋」と「昭

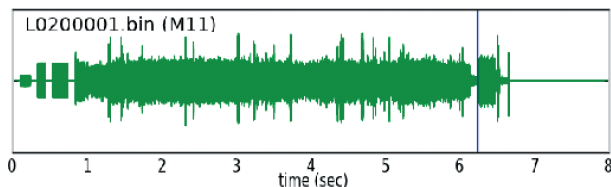


Fig. 3. Example of an acoustic signal.
図 3. 「昭洋」で観測された受信波形の一例。

洋」で得られた受信波形の相関係数の平均値の差は 0.1 以下であり十分に小さい。この結果から、「昭洋」での音響測距結果は他船と同様の信頼性があると言える。

(b) 局位置解析結果の比較

「昭洋」の第 1 回目の観測 (2013 年 7 月) では「熊野灘 1」海底基準点において 5 セットの観測を実施し、5,589 個の音響測距データを取得した。ここでは、その結果を用いた局位置解析結果と、2013 年 5 月に「海洋」で実施した同海底基準点での 5 セットの観測で得た 5,696 個の音響測距データを用いた解析結果を比較して、「昭洋」のデータの評価を行う。

使用したソフトウェアは、KGPS 解析は IT ver. 4.2 (Colombo, 1998), 局位置解析は SGOBS ver. 3.6 (藤田・他, 2004) である。局位置解析

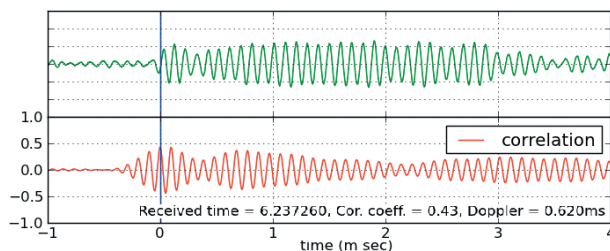


Fig. 4. Received signal (upper) and result of cross correlation (lower).
図 4. 受信波形の一部 (上) と相関処理の結果 (下)。

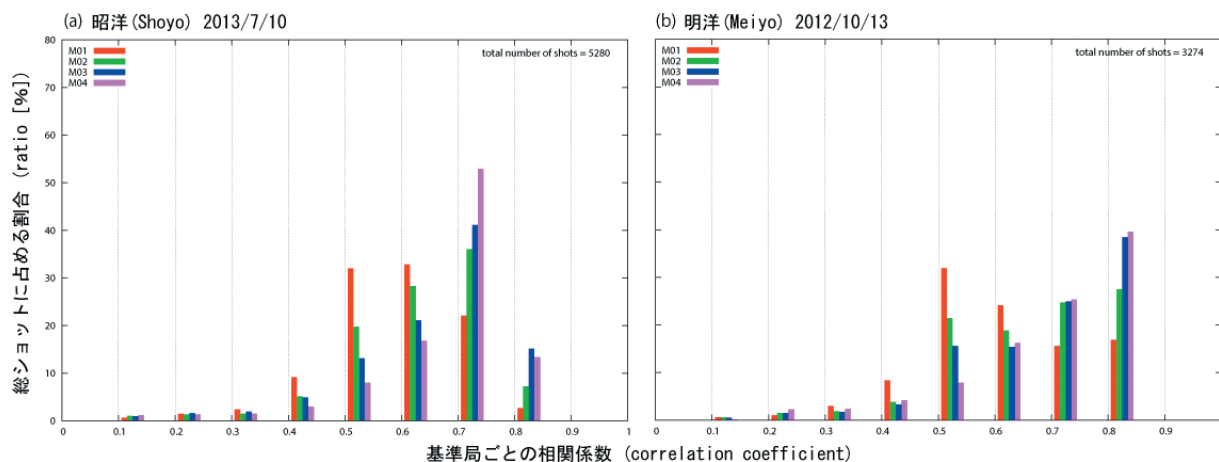


Fig. 5. Comparison of correlation coefficients calculated from acoustic ranging data obtained by (a) the S/V Shoyo and (b) the S/V Meiyo.
図 5. 同程度の海況下での観測で得られた受信波形の相関係数の分布の比較。(a) 「昭洋」, (b) 「明洋」。

では、各海底局の位置を独立に求め、重心位置を海底基準点の位置として決定した。各観測における局位置解析結果を Fig.6 に示す。

ここでは、「海洋」による5セット分のデータを用いた局位置解析結果を基準として、「昭洋」の5セット解を比較することで、「昭洋」の海底地殻変動観測システムの有用性を評価する。また、各セットのばらつきをみるため、それぞれの1セット毎の局位置解析結果を相対値としてプロットした。「昭洋」と「海洋」の5セット解の差は水平 2.3 cm, 上下 2.1 cm であった。

これらの局位置解は 2~3 cm とされている繰り返し観測の精度の範囲内に収まっている。それぞれの船での観測時期の違いは 2 か月であり、この間の地殻変動は 1 cm 未満であると考えられることから、「昭洋」と「海洋」による局位置解は、互いに整合的であるといえる。また、「昭洋」による1セット毎の結果のばらつきも「海洋」と同程度である。したがって、「昭洋」のシステムは「海洋」と同程度の観測精度であると言える。

次に、「熊野灘 1」海底基準点における過去の局位置解析結果の時系列との整合性を確認する。「熊野灘 1」海底基準点における局位置解析結果 (2010 年 1 月から 2013 年 7 月) について、「昭洋」, 「明洋」, 「拓洋」及び「海洋」において実施した海底地殻変動観測結果を Fig.7(a) に示す。また、参考として「相模湾」海底基準点における局位置解析結果 (2010 年 8 月から 2013 年 7 月) についても Fig.7(b) に示す。基準は、「熊野灘 1」は「明洋」にて 2010 年 1 月に実施した観測での解, 「相模湾」は「明洋」にて 2010 年 8 月に実施した観測での解である。

Fig.7 から、「昭洋」で得られたデータの局位置解析結果は、他船での観測の解析結果の時系列と比べても、水平・上下方向ともばらつきの範囲内に収まっている。このことから、「昭洋」と他船での観測の間にバイアスエラーはなく、他船と同じ基準で結果を示すことができると言える。

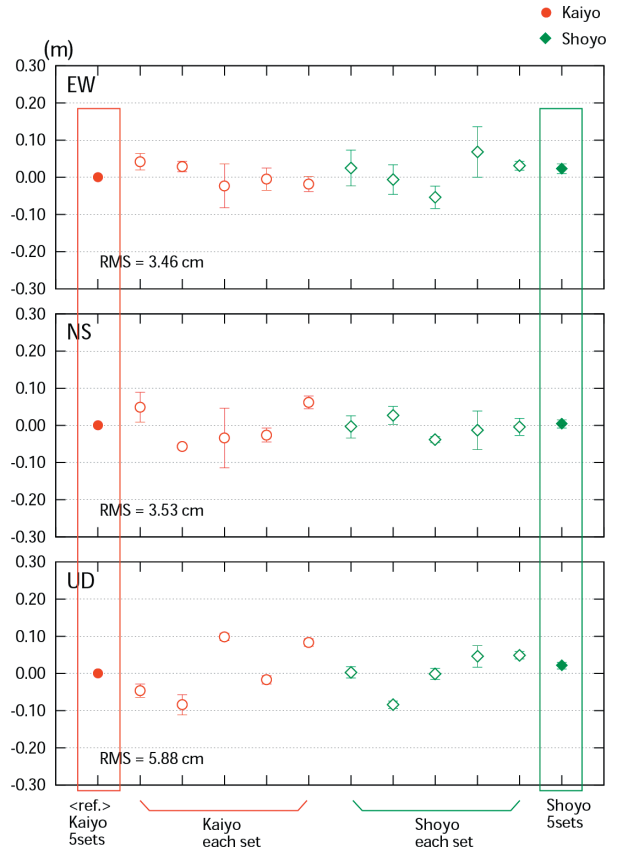


Fig. 6. Comparison of the positioning results at “KUM 1” by the S/V *Kaiyo* in May 2013 (red) and the S/V *Shoyo* in July 2013 (green). Solid and open circles and diamonds show 5-set and 1-set results, respectively. The reference is the 5-set results of the S/V *Kaiyo*.

図 6. 「熊野灘 1 (KUM 1)」における 2013 年 5 月の「海洋」での局位置解析結果 (赤) と 2013 年 7 月の「昭洋」での局位置解析結果 (緑) の比較。赤丸と緑ひし形は各観測における全データを使用した全セット (5 セット) 解, 白抜き丸とひし形は 1 セット分のデータのみから求めた解。1 セット解のばらつきの RMS をそれぞれ記載している。

5 結論

2012 年 11 月、「昭洋」に海底地殻変動観測装置を常設した。本稿で示した観測機器は、2013 年 7 月に実施した観測の時点では正常に動作をしている。その際の観測の結果、水平成分及び上下成分とも、数 cm とされている繰り返し観測の精度の範囲内に収まった。このことから、「昭洋」のシステムは、他船と同程度の信頼性があることが確認された。

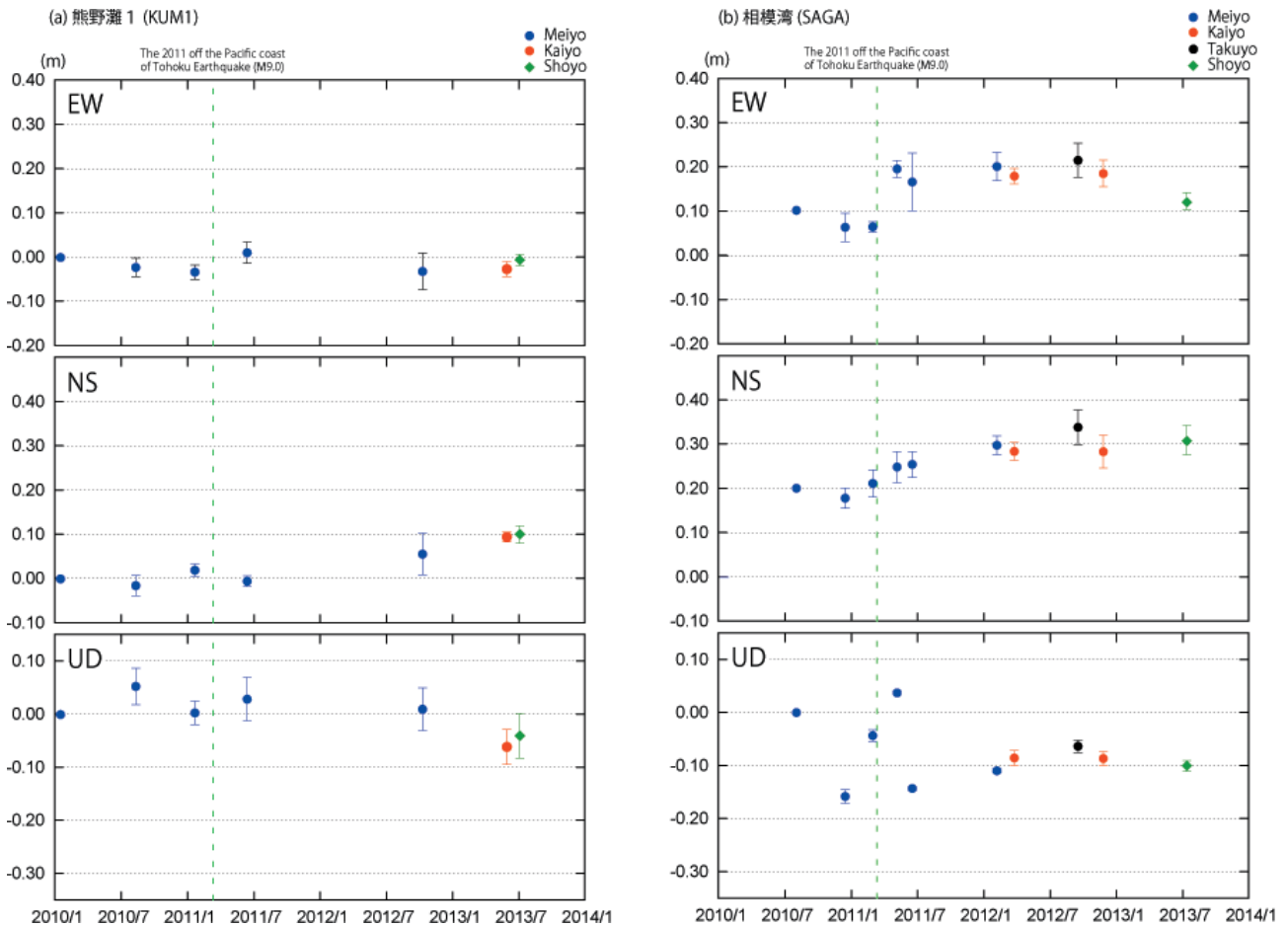


Fig. 7. Time series of the estimated positions at (a) “KUM 1” from January 2010 to July 2013 and (b) “SAGA” from August 2010 to July 2013. Blue, red, and black circles and green diamonds show observations by the S/Vs *Meiyo*, *Kaiyo*, *Takuyo*, and *Shoyo*, respectively. Green dashed lines show the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

図 7. (a) 「熊野灘 1 (KUM 1)」における 2010 年 1 月から 2013 年 7 月までの局位置解析結果の時系列と (b) 「相模湾 (SAGA)」における 2010 年 8 月から 2013 年 7 月までの局位置解析結果の時系列の比較. 青丸, 赤丸, 黒丸, 緑ひし形は, それぞれ「明洋」, 「海洋」, 「拓洋」, 「昭洋」での観測結果を表している. 緑点線は 2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震の発生時期を示す.

本稿により, 「昭洋」に常設したシステムの有用性が確認できたことから, 今後は 4 隻体制での海底地殻変動観測が可能となる. これにより, 海底地殻変動観測の実施に際し観測機会の増加が期待される.

謝 辞

今回, 海底地殻変動観測装置の設置及び観測の実施には測量船「昭洋」乗組員の協力のもとに行われたものであり, 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設置について, 海洋情報部研究報告, 50, 91-96.
- Colombo, O. L. (1998) Long-Distance Kinematic GPS, in “GPS for Geodesy 2nd Edition”, Springer, 537-568.
- 藤田雅之・佐藤まりこ・矢吹哲一郎 (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.
- 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.

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.

佐藤まりこ・浅倉宜矢・齋藤宏彰 (2009) 船底ト
ランスデューサによる航走海底地殻変動観測
の評価 (速報), 海洋情報部技報, 27, 56-
65.

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

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.

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.

観測システムを新たに常設した。

本稿では, 「昭洋」に設置した海底地殻変動観
測システムの概要及び他船の観測データとの比較
による局位置の再現性評価結果について報告す
る。

要 旨

海上保安庁海洋情報部では, 東京大学生産技術
研究所と技術協力を行いつつ, GPS/音響結合方
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。我々の海底基準点は,
主に日本海溝及び南海トラフ沿い陸側に設置さ
れ, 測量船による繰り返し観測を行っている。

より短時間で安定した観測を行うため, 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), 2012年
3月に中型測量船「海洋」(550トン)の船底に音
響トランスデューサ(送受波器)を常設し, 船底
トランスデューサによる航走観測を開始した。引
き続き2012年11月に大型測量船「昭洋」(3,000
トン)に音響トランスデューサ等の海底地殻変動