

海底地殻変動観測における GNSS アンテナ・トランスデューサ間 ローカルタイ (ATD オフセット) 計測手法[†]

富岡拓央*, 渡邊俊一*, 吉田 茂*

Measurement methods for the local tie between the GNSS antenna and transducer (ATD offset)
in the GNSS-A seafloor geodetic observation[†]

Takuhiro TOMIOKA*, Shun-ichi WATANABE*, and Shigeru YOSHIDA*

Abstract

For the GNSS-A seafloor geodetic observation, information on the relative position from the GNSS antenna to the transducer referenced to the axes of the gyro sensor (antenna-transducer offset; ATD offset) is required to convert GNSS antenna position to transducer position. Typically, the ATD offset is measured by the ground surveys at the dock when the GNSS-A system was equipped to the vessel. However, the measurement methods were determined based on the environmental conditions and constraints at the time, so they vary from one survey vessel to another. Therefore, in this study, we compile, compare, and evaluate the measurement methods used by each vessel to consider future measuring strategies.

1 はじめに

地球における位置を正確に把握するグローバル測地の手法により固体地球表面上の点の位置の変化を捉えることで、グローバルなプレートの相対運動やそれに伴う諸現象としての地殻変動を定量的に検出することができる。1990年代以降に開発・実用化されたGNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による海底測位観測(e.g., Spiess et al., 1998)は、それまで陸域に限られていたグローバル測地技術による地殻変動観測を海底にまで広げられるようにした。海上保安庁では、2000年から実海域における観測を開始し、宮城県沖や福島県沖での地殻変動の検出等、地震学的に重要な成果を提出してきた(詳しくは、藤田, 2006;

佐藤・藤田, 2012; 渡邊, 2021等のレビューを参照されたい)。現在海上保安庁で実施しているGNSS-A海底地殻変動観測の概念図をFig. 1に示す。

GNSS-A観測では、GNSS及び動揺計測装置(ジャイロ)により位置の決まった船底のトランスデューサから海底にあらかじめ設置したトランスポンダまでの音響走時を測定し、位置を決定する。GNSS-Aデータを解析するうえで特に精度への影響が大きいと思われる要素としては、海水中の音速変動の影響があげられる。Watanabe et al. (2020a)は、音速変動の影響を分離し線形化する観測方程式を構築し、適切な統計的特性、特にデータ相関項を導入することで、勾配音速構造

[†] Received September 12, 2025; Accepted November 7, 2025

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

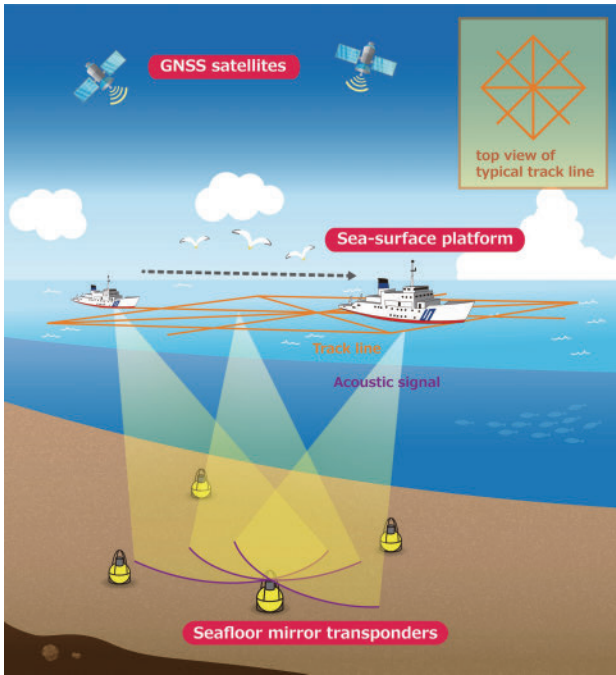


Fig. 1. Schematics of GNSS-A observation. Adopted from Watanabe et al. (2020a)

図1. GNSS-A 観測のコンセプト. Watanabe et al. (2020a) より.

を直接抽出する方法を開発した. この手法では, 経験的ベイズアプローチに基づいたパラメータ推定を導入することで, 音速変数の過剰適合を抑制し, GNSS-A データセットから安定的に音速場と海底局位置を同時に推定できる. 現在は, これら手法を実装したオープンソースソフトウェア GARPOS をルーチン解析に使用している.

その他, 音響機器特性の影響 (永江・他, 2024; Yokota et al., 2024) や, トランスデューサの測位精度 (Watanabe et al., 2017; 渡邊・他, 2020b) も GNSS-A の解に影響を与える. 特に後者については GNSS の測位誤差だけでなく, 動揺計測装置のデータを用いて GNSS アンテナ位置を船底のトランスデューサ位置に変換する際にも誤差が生じる. この変換においては, 動揺計測装置の座標系に準拠した GNSS アンテナトランスデューサ間の相対位置 (ATD オフセット; Antenna-TransDucer オフセット) が必要となる (Fig. 2). この ATD オフセットを測定するため, 船底へのトランスデューサ装備に合わせて, 地上測量の手法による計測を実施している (川井・

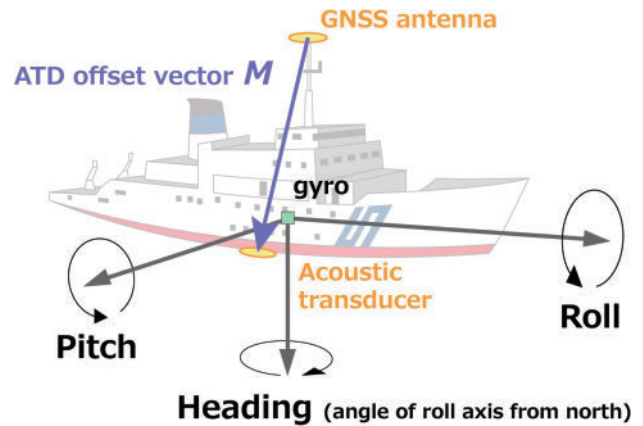


Fig. 2. Definition of the ATD offset vector. Adopted from Watanabe et al. (2020a)

図2. ATD オフセットベクトルの定義. Watanabe et al. (2020a) より.

他, 2009; 氏原・成田, 2012; 秋山・他, 2013; 秋山・横田, 2014; 吉田・他, 2021; 吉田, 2022).

上記の各船で実施した ATD オフセット計測は, 特に初期は複数の手法を試行したり, ドック環境や予算の制約等も考慮してそれぞれ異なった手法が採用されており, 個々の測定手法だけでなく設計 (デザイン) も統一されていない. そこで, 本稿では各船の計測方法を, 特に計測のデザインについてまとめて比較することで, 今後の計測方針を検討できるようにすることを目的とする.

2 ATD オフセットの定義

本節では, ATD オフセットベクトルとして測定されるべき量を具体的に定義する. Fig. 2 に示すように, ATD オフセットは, GNSS アンテナのアンテナ基準点 (Antenna Reference Point; ARP) を基準とした船底トランスデューサ底面中央 (以下「トランスデューサ底面中心」という.) の点までの位置ベクトルであり, 動揺計測装置のロール軸 (概ね船舶の船首方向. 以下「Forward 軸」という.), ピッチ軸 (同右舷方向. 以下「Rightward 軸」という.), 及びヘディング軸 (同船底方向. 以下「Downward 軸」という.) の三次元直交座標 (以下「FRD 座標」という.) で表現されたものとする. 計測においては, 計測地点

における地球楕円体の接平面の東方向（自転軸を接平面に投影した方向に直交する方向）、北方向（自転軸を接平面に投影した方向）及び接平面に垂直な上方向（地球中心から遠ざかる方向）の軸で構成されるローカル直交座標（以下「ENU座標」という。）に準拠した位置ベクトルを取得する。計測時に動揺計測装置のデータを収録し、ENU座標から回転させることで、船舶（正確にはジャイロ）に固定されたFRD座標でのATDオフセットが得られる。

GNSS-A観測においては、多数の音響測距データを取得してスタティックな海底のベンチマーク位置をセンチメートルの精度で決定するため、ランダム誤差の影響は十分に小さくなる。しかし、ATDオフセットにバイアスが生じていた場合には、系統的な誤差として測位解に影響しうる。そのため、ATDオフセットはセンチメートルレベルで決定されていることが求められる。

3 各測量船におけるATDオフセット測定

本節では、各測量船のATDオフセット計測事例についてまとめる。なお、計測において複数の手法を試行したケースもあるが、ここでは実際に採用したATDオフセットを算出するために用いた手法と結果についてのみ記載する。また、各計測の概要については、Table 1にまとめる。いずれの測量船についても、ATDオフセット計測は

ドライドックにて実施されたが、GNSSアンテナと船底のトランスデューサは同時に見通せない位置に装備されているため、それぞれ工夫がなされている。なお、ここでは計測のデザインに焦点を当て、個々の計測（測距・測角等）自体の精度・誤差（正反観測、対回観測や読み取り誤差等）の詳細については触れない。これらの測定については、必要な精度が担保される形で測定が実施されている。

3.1 測量船「明洋」（2008年3月）

測量船「明洋」の船底へのトランスデューサ設置は2008年に実施されたが、これは測量船船底へのトランスデューサ設置の最初の事例である（川井・他、2009）。この船底装備により、エンジンを止めての漂流観測から、任意の測線上を移動しながら観測する航走観測へと観測デザインが切り替えられ、観測が効率化するとともに海底局位置と音速のバイアス誤差を軽減しやすくなった（Sato et al., 2013; Ishikawa et al., 2020）。なお、ドックでのATDオフセット計測についても「明洋」が最初の事例であり、複数の手法が試されるなど、試行錯誤がなされている。ここでは、川井・他（2009）を参考に、実際に解析に用いるATDオフセットを算出するのに必要な測定のみをまとめる。「明洋」の作業は、三菱重工の横浜製作所本牧工場（神奈川県横浜市）にて実施され

Table 1. Specifications of the ATD offset measurements.

表 1. 各測量船におけるATDオフセット計測手法。

測量船	計測年月	計測地	トランスデューサ 底面中心～ ドック底面点間 高さ計測	ARPの位置計測				ドック底面点の位置計測					方位角測定	文献
				水平	鉛直	光学計測の 基点	GNSS 測量基準点	水平	鉛直	光学計測の 基点	GNSS測量 基準点	備考		
明洋	2008.3	神奈川県 横浜市	電子レベル	GNSS	GNSS	なし	ドック外縁 1点	GNSS	GNSS	なし	ドック外縁 1点	出渠後に測定	GNSS	川井・他 (2009)
拓洋 (大改修前)	2010.11	神奈川県 横浜市	コンベックス	GNSS	GNSS	なし	電子基準点 「横浜」	GNSS	GNSS	なし	電子基準点 「横浜」	出渠後に測定	GNSS	氏原・他 (2012)
拓洋 (大改修後)	2012.2	広島県 尾道市	コンベックス	測距・測角	測距・測角	不明	不明	測距・測角	測距・測角	不明	不明		なし	なし
海洋	2012.11	大阪府 大阪市	下げ振り錘・ コンベックス	GNSS	測距・測角	ドック外縁 2点	ドック外縁 2点	GNSS	測距・測角	ドック外縁 2点	ドック外縁 2点	出渠後に測定	GNSS	秋山・他 (2013)
昭洋	2014.11	和歌山県 由良町	下げ振り錘・ コンベックス	GNSS	測距・測角	ドック外縁 2点	ドック外縁 2点	測距・測角	測距・測角	ドック外縁 2点	ドック外縁 2点	上架中に測定 ・ドック底面に補 助点を設置	GNSS	秋山・横田 (2014)
平洋	2019.8	山口県 下関市	コンベックス	測距・測角	測距・測角	ドック外縁 1点	なし	測距・測角	測距・測角	ドック外縁 1点	なし	上架中に測定 ・計測の基点が ARPと異なる	トラバース (街区三角点)	吉田・他 (2021)
光洋	2020.1	山口県 下関市	コンベックス	測距・測角	測距・測角	ドック外縁 1点	なし	測距・測角	測距・測角	ドック外縁 1点	なし	上架中に測定	トラバース (街区三角点)	吉田 (2022)

た。

トランスデューサは船底に装備されているため、トランスデューサ底面中心から鉛直下方向(ENU座標でのU軸の方向と概ね一致)に伸ばした線とドック底面との交点をマークし、補助点とした(Photo 1. 以下「ドック底面点」という.)。ドック底面点とトランスデューサ底面中心間の鉛直高さは、電子レベルにより測定された(Photo 2)。GNSSアンテナのARP位置は、「明洋」上架中に、ドック外縁上の補助点に対するGNSS相対測位により決定された。この際に、GNSS-Aで動揺計測装置として使用する慣性航法装置「PHINS」により船体姿勢も収録した。ドック底面点の位置は、「明洋」の出渠後にドック外縁上の補助点に対するGNSS相対測位により決定された。これらデータを組み合わせることにより、ATDオフセット値が(1.889 m, -0.765 m, 21.281 m)として求められた。

3.2 測量船「拓洋」(2010年2月, 大改修前)

測量船「拓洋」への2010年の船底装備は、三菱重工の横浜製作所本牧工場(神奈川県横浜市)にて実施された。ATDオフセット計測は、概ね「明洋」と同様の手法で行われており(氏原・成田, 2012), ここでは「明洋」と異なる部分について記載する。まず、補助点としてはドック外縁上の補助点ではなく、電子基準点93032(横浜)のデータが使用された。また、トランスデューサ底面中心からドック底面点間の高さについては、Photo 3に示すように、コンベックスで計測された。また、ドック底面点のGNSS観測時に、アンテナ高としてトランスデューサのゴムカバーの厚さ(コンベックスによる測定値8 mm)が差し引かれている。「拓洋」以外の測量船におけるATDオフセット計測においても同様にゴムカバーの厚さを考慮しているかどうかは不明であるため、測量船間のATDオフセット値にバイアス的な差を生じさせる可能性がある。結果としては、ATDオフセット値が(-1.458 m, -0.749 m, 31.245 m)として求められた。



Photo 1. Marking on the dock floor below the transducer reference point for S/V *Meiyo*.

写真1. 「明洋」での計測時におけるドック底面点のマーキング作業。



Photo 2. Leveling between the dock floor marker and the center of transducer plane for S/V *Meiyo*. Adopted from Kawai et al. (2009).

写真2. 「明洋」での計測時におけるドック底面点とトランスデューサ底面中心間の鉛直高さ計測作業。川井・他(2009)の写真5と同一。



Photo 3. Height measurement between the dock floor marker and the center of transducer plane for S/V *Takuyo* in 2010.

写真3. 「拓洋」(大改修前)での計測時におけるドック底面点とトランスデューサ底面中心間の鉛直高さ計測作業。

3.3 測量船「拓洋」(2014年11月, 大改修後)

測量船「拓洋」については、自律型潜水調査機器「ごんどう」を運用する母船として使用するため、2012年から2013年にかけて改修され(例えば、栗田・他, 2014. 以下「大改修」という。), トランスデューサ装備位置も変更された。その後事故による復旧工事において、再度ATDオフセット計測が実施された。なお、大改修から復旧工事までの間は試験的なものを除く海底地殻変動観測は実施されなかったため、本稿では大改修直後の測定については記載せず、復旧工事後の測定のみまとめる。

計測は、ジャパンマリンユナイテッド株式会社の因島事業所(広島県尾道市)において行われた。「明洋」及び「拓洋(大改修前)」の際と異なり、複数箇所からのトータルステーションを用い



Photo 4. Angle and distance measurement for S/V *Takuyo* in 2014.

写真4. 「拓洋」(大改修後)における測距・測角。

た測距・測角が用いられた(Photo 4)。トランスデューサ底面中心とドック底面点までの距離は、「拓洋(大改修前)」と同様、コンベックスにより測定された。計測データは、重力計室内に設置されたSeapath200用のMRU筐体の長軸を基準とした座標軸において処理された。つまり、GNSSや基準点は参照せず、ENU座標ではないドック内のローカルな座標系で測定されている。FRD座標への変換は、MRUとGNSS-Aで使用する動揺計測装置「PHINS」で同時に計測された姿勢データの差の分だけ座標系を回転させて求めている。結果としては、ATDオフセット値が(2.652 m, -0.695 m, 30.955 m)として求められた。

なお、本計測はマルチビーム測深器と合わせての計測となっており、事故後の復旧工事だったこともあるためか、測点図や生データ等、計測時の資料の一部が散逸している。技術報告としてもまとめられていないため、今後、各資料の所在確認を進め、計測の設定を再現できるよう取りまとめる必要がある。

3.4 測量船「海洋」(2012年3月)

測量船「海洋」への船底装備は、2012年3月にサノヤス造船株式会社(現・株式会社新来島サノヤス造船)(大阪府大阪市)にて実施された(秋山・他, 2013)。ドック外縁に2つの補助点を

設け、上架中と出渠後に、それぞれ補助点を基準としたGNSSアンテナとドック底面点の位置計測を実施した。いずれもENU座標の水平成分についてはGNSSにより求め、鉛直成分については、トータルステーションを用いた測距・測角により求めた。トランスデューサ底面中心からドック底面点の高さは、トランスデューサ底面中心から下げ振り錘でドック底面点をマーキングしたうえで、両点間に糸を張り、その長さをもって計測値とした。得られた測量結果について、同時に取得した動揺計測装置「PHINS」の軸に合わせるよう回転しFRD座標の値を得た。結果として、ATDオフセット値(1.535 m, -1.279 m, 23.677 m)を得た。

3.5 測量船「昭洋」(2012年11月)

測量船「昭洋」への船底装備は、2012年11月から三井造船株式会社由良工場(現・由良ドック株式会社)(和歌山県由良町)にて実施された(秋山・横田, 2014)。ATDオフセット測定は、2つの補助点をドック外縁に設置して実施された。GNSSアンテナARP位置については「海洋」と同様の計測であるが、事情により「昭洋」出渠後の測量が実施できない計画であったため、ドック底面点でのGNSS観測ができなかった。そこで、「昭洋」上架中に、ドック底面点からドック外縁上補助点側のドック底面上にもうひとつ補助点(以下「偏心点」という。)を設け、測距・測角によりドック外縁上の補助点からのドック底面点位置を求めた。そのほかの手順については、「海洋」と同じである。結果として、ATDオフセット値(-0.767 m, 0.801 m, 28.894 m)を得た。

3.6 測量船「平洋」(2019年8月)

測量船「平洋」への船底装備は、2019年8月から三菱重工下関造船所(山口県下関市)にて実施された(吉田・他, 2021)。ATDオフセット計測は、ドック外縁に複数の補助点を設定し、GNSSアンテナARPとドック底面点の位置を、上架時にトータルステーションを用いた測距・測

角により測定した。ただし、それぞれの位置計測の基点は異なっている(吉田・他, 2021のFig. 3中N-5及びN-4)。また、機材の都合によりGNSS測量は実施せず、方位角を決定するため、造船所近隣の2つの街区三角点から開放トラバース測量の手法で補助点と結びつけた。トランスデューサ底面中心とドック底面点までの距離は、「拓洋」と同様、コンベックスにより測定された。また、ドック入渠時に測得しておいた船体動揺計測装置「HYDRINS」のデータを用いて、ENU座標からFRD座標に変換した。結果として、ATDオフセット値(7.932 m, -3.888 m, 31.813 m)を得た。計測時の写真や経路については吉田・他(2021)を参照されたい。

なお、「平洋」のATDオフセット値は吉田・他(2021)によりすでに報告されたが、手法は同一ながら異なった値が記載されている。これは、業者から受領した成果の座標系を取り違えたためである。つまり、業者からは平面直角座標3系における測量成果が提出されたものの、それを直交座標(ENU座標)としてその先の座標変換を進めたために生じた人為的なエラーであり、ここではそれを修正したものを記載している。

3.7 測量船「光洋」(2020年10月)

測量船「光洋」への船底装備は、2020年10月から三菱重工下関造船所(山口県下関市)にて実施された(吉田, 2022)。ATDオフセット計測手順については、「平洋」と実質的に同じであるが、ARPとドック底面点の位置測定の基点が同一点となっている点と、方位角を決めるための街区三角点から補助点までの開放トラバース測量の経路が一部異なっている。結果として、ATDオフセット値(7.997 m, -4.141 m, 31.773 m)を得た。測量時の写真や計測の経路については吉田(2022)を参照されたい。なお、「光洋」についても「平洋」と同様の座標系に関するエラーがあったため、こちらも修正している。

4 議論・考察

4.1 GNSS-A データからの推定値との比較

得られた ATD オフセット値を Table 2 にまとめる。ATD オフセットの値は、GARPOS での GNSS-A 解析において、通常事前に測量した値を既知として用いるが、推定値として割り当てることも可能である。つまり、船の姿勢の変化が十分に大きい場合、異なる姿勢から得られる複数の観測データを通じて、ATD オフセットを統計的に求めることができる (Watanabe et al., 2020a, 2025)。ただし、Downward 方向の成分については、ピッチ角とロール角の変化の範囲が小さいため、安定した推定はできない。

Watanabe et al. (in press) は、2024 年末までに取得されたすべての GNSS-A データにわたって ATD オフセットの Forward 成分と Rightward 成分を推定した。推定は GARPOS v1.0.2 (Watanabe et al., 2024) により、トランスポンダのそれぞれの位置と ATD オフセットの Forward 及び Downward 成分を同時に求める手法を用いている。なお、GNSS-A データには音響特性を経験的に

に補正する Acoustic Ambiguity Reduction (AAR) 補正 (Yokota et al., 2024) を適用したものをを用いている。ここでは、彼らの示した結果のうち、ATD オフセット推定値を地上計測の成果と比較した結果の統計量を Table 3 に示す。トランスデューサの個体差の影響もありうるため、統計量は船体に取り付けたトランスデューサごとに求めた。

Watanabe et al. (in press) で推定された ATD オフセット値のばらつきは標準偏差で概ね 2 cm 程度に収まっているため、これが GNSS-A から推定される場合の精度の目安といえる。そのうえで測量の値を比較すると、測量船ごとに異なる傾向が見られることがわかる。

まず、「昭洋」及び「平洋」については精度の範囲で計測値と推定値が一致していた。「光洋」については若干 Rightward 方向にずれが見られるが、データ数が少ないため、今後の精査が必要と考える。「明洋」及び「海洋」については十分なデータがあり推定値の信頼性は高いが、Forward 方向にそれぞれ +5 cm 及び +2 cm 程度の系統的なずれが見られた。一方で、Rightward 方向には有意なずれは生じていない。「拓洋」については、大改修前・後いずれについても Forward 方向に -20 ~ -30 cm という極めて大きなバイアスが確認された。Rightward 方向にはそれよりは小さいながら、+3 cm 程度のバイアスも見られた。なお、「明洋」、「拓洋」及び「海洋」のバイアスについてはすでに認知され解析時に補正されてお

Table 2. Measured ATD offset values.

表 2. 各測量船における ATD オフセット計測結果.

測量船	計測結果		
	Forward [m]	Rightward [m]	Downward [m]
明洋	1.889	-0.765	21.281
拓洋 (大改修前)	-1.458	-0.749	31.245
拓洋 (大改修後)	2.652	-0.695	30.955
海洋	1.535	-1.279	23.677
昭洋	-0.767	0.801	28.895
平洋	7.881	-3.988	31.815
光洋	7.945	-4.239	31.773

Table 3. Statistics of difference between the estimated and measured ATD offset.

表 3. GNSS-A 観測から推定された ATD オフセットと計測結果との差の統計値.

測量船	トランスデューサ	Forward			Rightward			データ数
		中央値 [m]	平均 [m]	標準偏差 [m]	中央値 [m]	平均 [m]	標準偏差 [m]	
明洋	sn3482-001	0.058	0.058	0.012	-0.003	-0.004	0.014	278
	sn15181	0.048	0.048	0.018	0.001	0.002	0.013	368
	sn3482-002	0.055	0.054	0.011	-0.003	-0.003	0.011	26
拓洋 (大改修前)	3482A-001	-0.288	-0.289	0.009	0.025	0.034	0.023	27
	3482A-002	-0.270	-0.268	0.012	0.037	0.040	0.012	28
拓洋 (大改修後)	3482B-G0006	-0.246	-0.243	0.009	0.026	0.025	0.013	11
	sn3482-002	0.026	0.027	0.018	0.010	0.012	0.013	197
海洋	sn15109	0.023	0.028	0.017	0.001	0.001	0.015	190
	sn013639	0.012	0.012	0.005	0.003	0.003	0.007	12
昭洋	sn016207	0.009	0.008	0.019	0.003	-0.002	0.027	86
	G0002	-0.011	-0.008	0.014	0.004	0.003	0.014	32
平洋	G0003	-0.014	-0.014	0.014	0.028	0.025	0.020	8

り、これまでに提出してきた海底地殻変動観測成果に影響を与えるものではないことに留意された。

「拓洋」の Forward 方向のバイアスについてはトランスデューサのサイズよりも大きくなるため、GNSS 測量や測距・測角における誤差とは考えにくい。そこで、システムのバイアスとして、GNSS-A 観測における音響測距時刻のバイアスあるいはドックでの計測時の姿勢誤差が考えられる。前者については、例えば音響測距時刻として記録された値が実際より 0.1 秒遅れた値が記録されていた場合には、その 0.1 秒間における船の平均的な移動距離 (7 kt の場合、前方に約 36 cm) 分だけ ATD オフセットにバイアスが生じることになる。しかし、このずれは船速に比例するので、特に速力を観測地点ごとに 4 kt から 7 kt まで変化させていた 2010 年代前半までのデータを含む「拓洋」(大改修前)において標準偏差が 1 cm 程度にまで小さくなることを説明できない。後者については、仮にピッチ角が地上計測時と GNSS-A 観測時で 0.5 度のバイアスを持っていた場合には Forward 方向に約 30 cm ずれることになるので、要因としては有力かもしれない。しかし、大改修前と後で 2 回、計測方法も時期も異なる結果を比較したにもかかわらず同程度のずれが同様に生じる理由を説明することは難しい。動揺計測装置自体は同一であるから、測定時の動揺計測装置からの出力と GNSS-A 観測時の出力の設定が異なったまま保存されている可能性はあるが、執筆現在において「拓洋」の動揺計測装置は故障しておりメーカー修理も不能の状態となっているため、確認することは不可能である。もうひとつ、ドック上架時と洋上で浮力の関係で船体がたわむといった影響もあるかもしれないが、この場合は他の同クラスの測量船で 10 cm レベルの差が間違いなく生じていないことから、原因としてはあまり有力ではないと考えられる。

Forward 方向へのずれは、「拓洋」よりは小さいものの、「明洋」及び「海洋」でも見られた。これらについても「拓洋」と同様の議論から、動

揺計測装置のバイアス的な影響の可能性が高いと考えられる。しかし、こうした影響がどうして生じたのかについては、改めて精査が必要である。

また、各測定自体の精度についても改善・検証の余地がある。例えば、測距・測角や水準測量の測定補助点を増やすことができれば、精度や信頼性の向上につながると期待される。こうした評価をするためには、測定時の完全な配点や機器情報、生データが必要である。残念ながら一部の ATD オフセット測定ではそれらが保存されておらず、検証自体が困難な状況である。こうした点を踏まえ、今後の測定ではデータや資料のより適切な管理が求められる。また、Downward 方向の精度については現状において検証することができない。なお、「海洋」では 2 つのドック外縁点から間接水準により鉛直高さを求めていたが、両者には 67 mm の差があった。こうした誤差の原因を考察するためにも、より多点からの測定が必要であるといえる。

4.2 計測デザインの提案

ここで、理想的な計測のデザインについて検討する。GNSS-A の ATD オフセットのように、比較的短基線の相対位置ベクトルを精度よく計測する必要がある例としては、国際地球基準座標系 (ITRF) を構築する際に求められるローカルタイがあげられる。具体的には、ITRF 構築に使用される衛星レーザー測距 (SLR)、超長基線電波干渉法 (VLBI)、全球測位衛星システム (GNSS) 等の複数の宇宙測地技術について、その地上局の相対位置を、地上測量技術により精度よく計測することで、互いの基準系を結びつけている (例えば、Nakamura et al., 2022; 鈴木・他, 2025)。宇宙測地技術の地上ローカルタイの測定は、SLR 望遠鏡や VLBI アンテナのように、駆動部を持ちその不動点を何らかの手法で求める必要がある分、ATD オフセット計測よりも必要な工程が多くなるが、本質的には同様の考え方が可能である。なお、ローカルタイデータとして ITRF 構築に用いるためには、誤差 (分散共分散行列) の提示が求

められている点も注目に値する。

計測デザインとしては、まず、求めたい相対ベクトルの起点と終点を覆うネットワークがあることが重要である。それは、ドック外縁に、互いに視準可能な補助点を少なくとも3点設けることで実現できる。また、ある程度の基線長を確保できる少なくとも2つの補助点でGNSS測量を同時に実施することで、「平洋」及び「光洋」のように開放トラバース測量をせずとも方位角を決定できる。鉛直高さについては、GNSSアンテナのあるマストに対しレベルを用いた水準測量を実施することは現実的ではない。そこで、ドック外縁補助点からの測距・測角により決定することは妥当である。その際、補助点すべてから間接水準測量を実施することで、測定結果の精度評価が可能となる。これにより、現在別の手段で検証することのできない Downward 成分の信頼性について評価することができるようになる。こうして得られた測定の生データからは、Nakamura et al. (2022)と同様の手法で分散共分散を定量的に算出することができると期待される。

5 結論

本稿では、各船の機器装備時の ATD オフセット計測についてまとめた。計測方法はそれぞれ異なっており、その時々で適切な手法を試行錯誤で進めてきたことがうかがわれる。最近の計測結果については GNSS-A 観測から推定される値とのギャップが少ないが、それが偶然によるものか検証するには、測量のデータが不十分である。測定の誤差情報を定量的に検証可能な測定デザインを考案することは、極めて重要である。また、最近では、レーザースキャナー等による形状計測の手法も確立されているところ、今後はそうした新技術の活用・評価も含めて検討すべきである。さらに、他機関の同様な測定についても情報を収集し、より効果的な手法の検討を進める必要がある。

本稿で得られた結果は、個々の測定精度が詳細な検証に耐えうるものでない点に留意が必要であ

るものの、少なくとも「昭洋」及び「平洋」のケースについては観測データとの差がほぼ生じていないことが確認された。一方で、一部の測量船では GNSS-A 観測から推定された値に対して有意なバイアスが生じていた。原因としては動揺計測装置のバイアスやドック上架時の船体の変形等の可能性が考えられる。この場合、ENU 座標系での測定自体には問題がなかったとも言えるため、原因の検証は重要である。しかし、これらの要因を事後的に検討・考察することは極めて難しい。特に、詳細な設定や個々の計測の記録・生データ等が存在しないことが、事後的な検証を極めて難しいものになっている。今後の測量においては、後世からの検証可能性を担保することが技術的な事業における要請であることを念頭に置き、計測の追跡・再構成に必要な一切の情報を適切に保存・管理することが強く求められる。

謝 辞

本研究に使用したデータは、海洋防災調査室職員及び測量船「平洋」、「光洋」、「昭洋」、「拓洋」、「明洋」及び「海洋」により取得されました。AAR 補正データは東京大学生産技術研究所の横田裕輔准教授及び海洋防災調査室の永江航也海洋防災調査官により作成されました。原稿の作成に当たり、匿名の査読者から有用なコメントをいただきました。

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.
- Ishikawa, T., Y. Yokota, S. Watanabe, and Y.

- Nakamura (2020) History of on-board equipment improvement for GNSS-A observation with focus on observation frequency, *Front. Earth Sci.*, 8:150. doi:10.3389/feart.2020.00150
- 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.
- 栗田洋和・瀬田英憲・梅田安則・南 宏樹・井城 秀一・大泊理八・橋詰未来 (2014) 自律型潜水調査機器「ごんどう」の運用, *海洋情報部研究報告*, 51, 98-105.
- 永江航也・横田裕輔・石川直史・渡邊俊一・中村 優斗・吉住優憧・井上智裕・河野賢司・飯沼卓史 (2024) 水槽実験から見る SGO-A 観測の音響測距波形の特徴, *電子情報通信学会技術報告*, 124, 27-31.
- Nakamura, Y., S. Watanabe, Y. Yokota, A. Suzuki, H. Ueshiba, and N. Seo (2022) Shimosato collocation of the SLR and GNSS stations, In: Freymueller, J.T., Sánchez, L. (eds) *Geodesy for a Sustainable Earth. International Association of Geodesy Symposia*, 154. Springer, Cham. doi:10.1007/1345_2022_156
- 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., M. Fujita, Y. Matsumoto, H. Saito, T. Ishikawa, and T. Asakura (2013) Improvement of GPS/acoustic seafloor positioning precision through controlling the ship's track line, *J. Geod.*, 87, 825-842. doi:10.1007/s00190-013-0649-9
- Spiess, F.N., C.D. Chadwell, J.A. Hildebrand, L.E. Young, G.H. Percell Jr., and H. Dragert (1998) Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 108, 101-112. doi:10.1016/S0031-9201 (98) 00089-2
- 鈴木 啓・岡村盛司・瀧 修一・平岡喜文・吉藤 浩之・小門研亮・福崎順洋 (2025) 昭和基地におけるローカルタイ測量 (第 65 次南極地域観測隊), *国土地理院時報*, 139, 19-25. doi:10.57499/JOURNAL_139_04
- 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.
- 渡邊俊一 (2021) 海洋情報部における 2011 年から 2020 年にかけての GNSS-A 海底地殻変動観測の発展と成果, *海洋情報部研究報告*, 59, 95-114.
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Yokota, and Y. Nakamura (2020a) GARPOS: Analysis Software for the GNSS-A seafloor positioning with simultaneous estimation of sound speed structure. *Front. Earth Sci.*, 8: 597532. doi:10.3389/feart.2020.597532
- 渡邊俊一・横田裕輔・石川直史 (2020b) キネマティック精密単独測位を用いた GNSS-A 海底測位の精度検証, *測地学会誌*, 66, 1-7, doi:10.11366/sokuchi.66.1
- Watanabe, S., Y. Bock, C.D. Chadwell, P. Fang, and J. Geng (2017) Long-term stability of the kinematic precise point positioning for the sea surface observation unit compared with the baseline analysis, *海洋情報部研究報告*, 54, 38-73.
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Yokota, Y. Nakamura, and K. Nagae, Understanding biases due to the instrumental errors in GNSS-A seafloor positioning, *Geodesy for a Changing Environment—Proceedings of the 2025 IAG Scientific Assembly* (in press).
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Nakamura, and Y. Yokota (2024) GARPOS: Analysis tool for GNSS-Acoustic seafloor positioning (Version 1.0.2). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.12620693
- Yokota, Y., T. Ishikawa, K. Nagae, S. Watanabe, Y. Nakamura, K. Kouno, and Y. Yoshizumi

(2024) Acoustic ambiguity reduction (AAR) method: an acoustic signal identification method for GNSS-A observation considering instrumental signal distortion. *Earth Planets Space* 76, 97. doi:10.1186/s40623-024-02050-3

吉田 茂 (2022) 測量船「光洋」への海底地殻変動観測装置の設置, 海洋情報部研究報告, 60, 40-50.

吉田 茂・渡邊俊一・橋本友寿・中村優斗 (2021) 測量船「平洋」への海底地殻変動観測装置の設置, 海洋情報部研究報告, 59, 178-189

要 旨

海底地殻変動観測においては, GNSS アンテナ位置をトランスデューサ位置に変換するため, 動揺計測装置 (ジャイロ) の軸を基準とした, GNSS アンテナからトランスデューサまでの相対位置 (ATD オフセット; Antenna-TransDucer オフセット) の情報が必要である. 通常, ATD オフセットはドックで海底地殻変動観測装置を装備する際に計測される. ただし, 測定の方法はその時々環境・制約下で検討されたため, 測量船ごとに異なっている. そこで各船の測量方法をまとめて比較し評価することで, 今後の測定方針の検討に向けた基礎資料とする.