

海底地殻変動観測で用いる海底基準局の
ディレイタイムの計測について[†]

中村優斗^{*1}, 石川直史^{*2}, 秋山裕平^{*3}, 渡邊俊一^{*4}, 黒田泰成^{*1}, 望月将志^{*5}, 横田裕輔^{*6}

Measurement of the internal delay time of the seafloor transponders deployed in Japan Coast
Guard's seafloor geodetic observation[†]

Yuto NAKAMURA^{*1}, Tadashi ISHIKAWA^{*2}, Yuhei AKIYAMA^{*3}, Shun-ichi WATANABE^{*4},
Taisei KURODA^{*1}, Masashi MOCHIZUKI^{*5}, and Yusuke YOKOTA^{*6}

Abstract

Seafloor geodetic observation using the GNSS-Acoustic ranging combination technique (GNSS-A) is conducted by performing acoustic ranging between the onboard transducer on a sea surface platform (e.g., survey vessel) and the mirror transponders installed on the seafloor. During the GNSS-A observation, a mirror transponder receives the signal transmitted from the transducer and returns the recorded signal back to the transducer after a fixed interval, which we call the internal delay time of the transponders. In our GNSS-A observation, the round-trip travel time between the transducer and the transponder is calculated by subtracting the internal delay time from the raw data. Thus, the accuracy of the internal delay time directly affects the positioning accuracy of the transponders. Therefore, a water tank experiment to precisely measure the internal delay time of our seafloor transponders was conducted in a test tank at the University of Tokyo. The mean value of the measured delay time was found to be approximately 0.18 ms longer than the existing value, corresponding to a ranging error of approximately 27 cm when assuming an underwater sound velocity of 1500 m/s. Reanalysis of the GNSS-A data with the averaged delay time showed that the unnatural uplift trend and step-like variations in the time-series of some seafloor reference points have improved.

[†] Received August 26, 2022; Accepted October 24, 2022

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

* 2 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

* 3 情報利用推進課 Chart and Marine Information Service Division

* 4 大洋調査課 Offshore Surveys Division

* 5 防災科学技術研究所 The National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

* 6 東京大学生産技術研究所 Institute of Industrial Science, University of Tokyo

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では、2000年代からGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）を用いた海底地殻変動観測を実施している。GNSS-Aは、測量船等の海上プラットフォームの位置をGNSS観測で測位しながら、プラットフォームに搭載した音響トランスデューサーと海底に設置したミラートランスポンダ（海底基準局）の間で音響測距を行うことで、海底の絶対位置をセンチメートル単位で計測する技術である（Fig. 1； Spiess, 1985； Asada and Yabuki, 2001； Fujita et al., 2006）。

当庁は海底地殻変動観測網「SGO-A」（Seafloor Geodetic Observation Array）を日本海溝と南海トラフ沿いの27か所に展開している。これまでにSGO-Aの観測結果から2011年東北地方太平洋沖地震に伴う巨大な海底の動き（Sato et al., 2011）や、南海トラフ沿いのプレート境界面の固着分布を推定する（Yokota et al., 2016）等、地震学・測地学的に重要な成果が多く得られてきた。

近年、ハードウェア・ソフトウェア両面の技術開発によるGNSS-Aの高度化が進んだことでより

詳細な地殻変動の検出が可能となり、新たな地球科学的成果が得られている。1回の音響測距シーケンスで複数の海底基準局を測距するマルチ音響測距法により年間の観測頻度が向上し（Ishikawa et al., 2020）、南海トラフ沿いの観測点で長期的スロースリップを検出することに成功した（Yokota and Ishikawa, 2020）ほか、経験ベイズ法を適用した新たな解析ソフトウェア「GARPOS」（Watanabe et al., 2020）を用いることで東北地方太平洋沖地震後10年間の複雑な余効変動を抽出した（Watanabe et al., 2021）。

短期的スロースリップ等の期間が1年に満たないような時間的により細かいスケールの地殻変動を捉えるためには、年間の観測頻度を増やすための技術開発だけでなく、GNSS-Aの測位精度に影響を及ぼす様々な誤差要因について検討する必要がある。GNSS-Aの誤差要因はGNSS観測の大気遅延、海中音速場の擾乱による音響測距誤差、測線や海底基準局アレイの幾何学的形状や広さによるバイアス（Nakamura et al., 2021）、そして観測機器のバイアスと多岐に渡る。本研究ではGNSS-A観測の音響測距における誤差要因の一つになりうる海底基準局の内部遅延量（ディレイタイム）の誤差に注目し、水槽試験による精密なディレイタイムの計測を試みた。

当庁ではPhoto 1のようなミラートランスポンダ型の海底基準局を各海底基準点に複数設置しており、船上トランスデューサーとの間で1基あたり1回の観測で数百回程度の音響測距を行う。音響測距における信号の送受信の概念図をFig. 2に示す。

船上トランスデューサーから発信された音響信号は海底基準局の最上部に取り付けられている半球型のゴム製振動子に入射する。音響信号は8次のM系列でコーディングされた長さ102 msの識別信号と、9次のM系列でコーディングされた長さ204 msの測距信号で構成されており、10 kHzの正弦波を4ビットごとに位相変調させることでこれらの信号を搬送している。船上トランスデューサーから発信した音波の識別信号が各海底

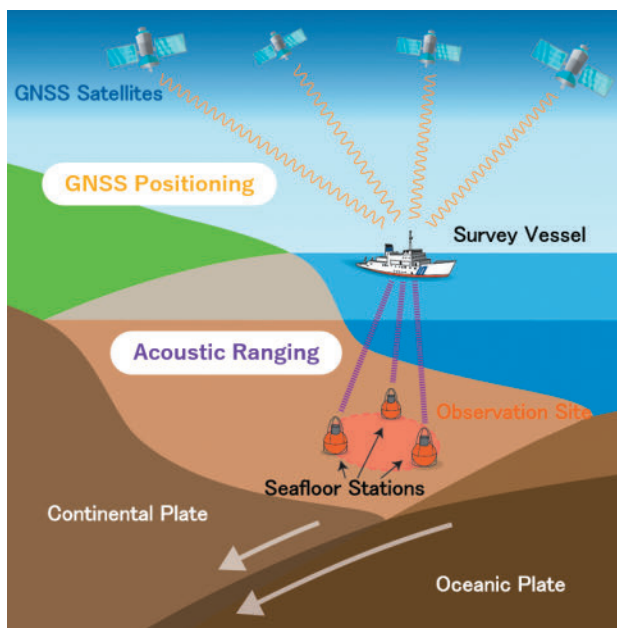


Fig. 1. Schematic diagram of the GNSS-Acoustic ranging combination technique.

図1. GNSS-音響測距結合方式の概念図。

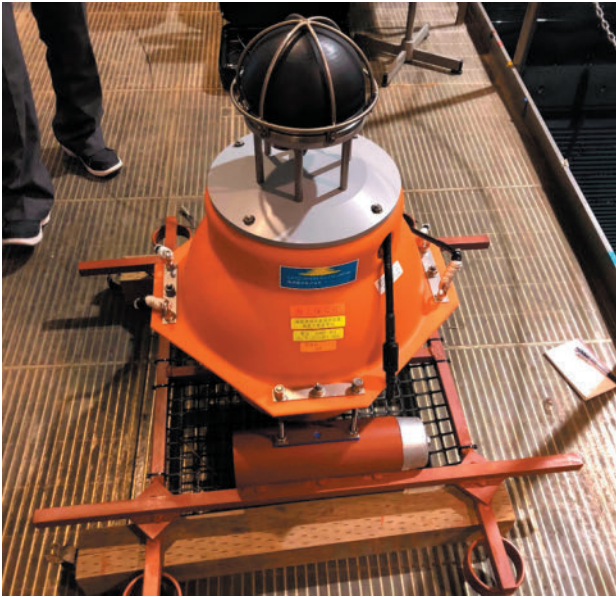


Photo 1. Seafloor transponder deployed at the SGO-A sites.

写真 1. SGO-A 観測点で用いられている海底基準局の全体像。

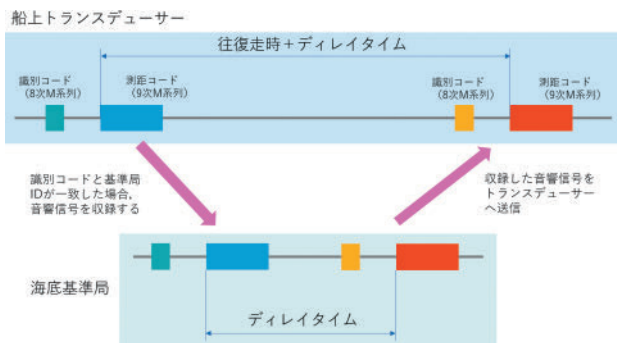


Fig. 2. Acoustic ranging between the onboard transducer and the seafloor transponder.

図 2. 海上音響トランスデューサーと海底基準局の間で行われる音響測距。

基準局に割り振られている ID と一致した場合のみ、海底基準局は音響信号を収録する。収録した信号は一定のディレイタイムを経ってから海上に向けて送信され、トランスデューサーに収録される。

音響解析では、トランスデューサーに収録された測距信号と理論波形の相互相関処理を行うことで、戻ってきた測距信号の先頭位置を決定する(富山, 2003)。トランスデューサーから発信した測距信号と、海底基準局から戻ってきた測距信号

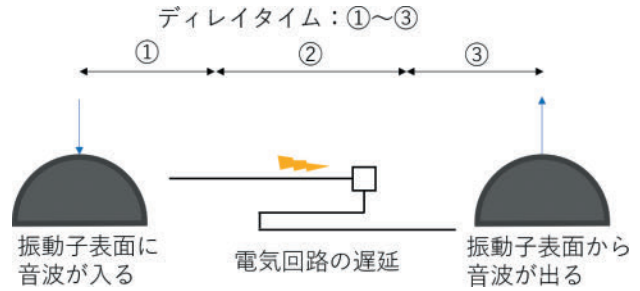


Fig. 3. Schematic diagram of the internal delay time of the seafloor transponder.

図 3. 海底基準局のディレイタイムの概念図。

の先頭位置の差からディレイタイムを差し引くことにより、トランスデューサーと海底基準局の間の精密な往復走時が求められる。

ディレイタイムは船上トランスデューサーから発信された音響信号が海底基準局の振動子に入射してから、電気回路上の遅延や音波への変換等を経て、返信用の音響信号が振動子表面から射出されるまでにかかる時間である (Fig. 3)。ディレイタイムは全ての海底基準局で一定となるように設計されており、現在当庁で納入している海底基準局のディレイタイムは 1.061506 s とされている。Fig 2 に示すとおり、船上トランスデューサーから発信した測距信号と海底基準局が返した測距信号の先頭位置から求めた音響走時は必ずディレイタイムが含まれているため、トランスデューサーと海底基準局の間の精密な往復走時を計算するためにはディレイタイムの正確な値が事前に求められている必要がある。

南海トラフ沿いの海底基準点の時系列を精査したところ、Fig. 4 に示す「熊野灘 1」, 「土佐沖 1」のように複数の観測点において近年隆起傾向のトレンドや、ある時期 (Fig. 4 の例では「熊野灘 1」が 2018 年頃, 「土佐沖 1」が 2019 年頃) を境に上下方向の時系列に 10 cm 程度の段差が生じているケースが見られた。同時期における水平方向の変位は、いずれもフィリピン海プレートが沈み込む方向と概ね一致しており、上下方向の変位は非定常的なイベント (スロースリップ等) のシグナルであるとは考えにくく、いわば地球科学的に不自然な変位である。天候・海況不良により稀に

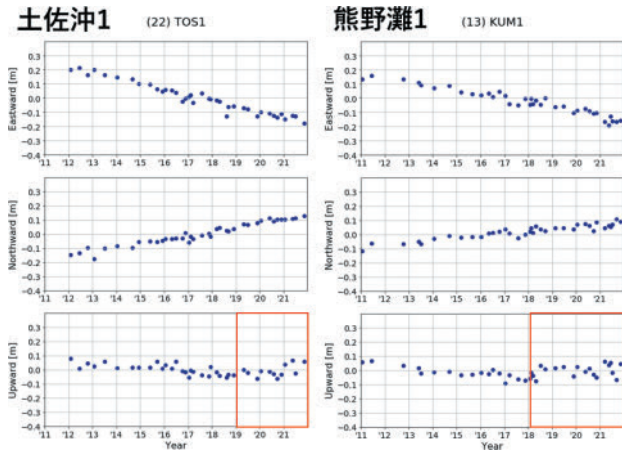


Fig. 4. Examples of GNSS-A time series at sites along the Nankai Trough with unnatural vertical displacements. (a) Time series of TOS1 and (b) KUM1. The time series after the installation of new seafloor transponders is surrounded by the red box.

図 4. 不自然な上下動が見られた南海トラフ沿いの観測点の時系列の例。(a)「土佐沖1」観測点の時系列、(b)「熊野灘1」観測点の時系列。赤枠で囲まれた箇所は、新しい海底基準局を投入した後の時系列である。

海底基準点の位置が数 cm 以上ずれることはあるが、Fig. 4 のケースのように数年に渡り時系列に影響することは考えにくい。したがってこのような不自然な上下変位は、地殻変動や天候・海況不良に由来するものではなく、観測機器の何らかのバイアスによる影響を受けていることを示唆する。

各海底基準点の上下方向時系列に隆起トレンドや段差が現れる時期の観測機器の変遷を調べたところ、どの観測点も開設した際に設置した古い海底基準局を更新するために、新しい海底基準局を設置していた。各観測点における新しい海底基準局を投入した時期は、いずれの観測点も上下方向に不自然な変位が現れる直前であった。このことから、新旧の海底基準局に何らかの器差があり、新しい海底基準局の投入が海底基準点の測位に何らかの悪影響を及ぼしている可能性が示唆された。

そこで本研究では、新旧の海底基準局のディレイタイムに器差が存在する可能性について検討し

た。前述のとおり、トランスデューサー～海底基準局間の真の往復走時を求めるためには解析で得られた音響走時からディレイタイムを差し引く必要がある。海底基準局のディレイタイムは仕様値が決まっているが、仮にディレイタイムが仕様値と異なる場合は往復走時が真値からずれてしまうため、海底基準局の測位に誤差が生じる要因となる。そのため、東京大学生産技術研究所の協力のもと、当庁の海底基準局の精密なディレイタイムを計測するための水槽試験を実施した。

2 水槽試験

海底基準局の精密なディレイタイムを計測するため、東京大学生産技術研究所海中観測実装工学研究センターの試験水槽でディレイタイム計測試験を 2021 年 11 月 12 日～16 日にかけて実施した。水槽は水中ロボットの研究・開発のために東京大学駒場キャンパス内に設けられており、寸法は 7 m (L) × 7 m (W) × 9 m (H) である（能勢, 2001）。水槽の側面及び底面には反射波を低減させるためのゴム板が取り付けられている。

ディレイタイム計測試験の概念図を Fig. 5 に示す。Photo 2 のように海底基準局の振動子を取り囲む金属製の保護ケージの直上と側面にハイドロフォンを取り付け、海底基準局を水槽の底まで下した。保護ケージと振動子表面は約 1 cm 程度の隙間があるため、往復で約 2 cm 程度の計測誤差が測定値に含まれることに留意する必要がある。Fig. 5 に示すように実験用のトランスデューサーを海底基準局付近まで降下させて固定、音響信号を発信し測定を行った。海底基準局に取り付けた 2 個のハイドロフォンは、トランスデューサーから発信した音響信号と、海底基準局から発信される返信用の音響信号を収録する。

ハイドロフォンはアンプ (Teledyne Reson VP2000 Voltage Preamplifier EC6081 mk2) を介した後に 2 つのチャンネルに入力を分岐させて収録用のオシロスコープ (RIGOL DS1104) に接続している (Fig. 6)。S/N 比の改善のためハイドロフォンの入力には 1 kHz–25 kHz のバンドパス

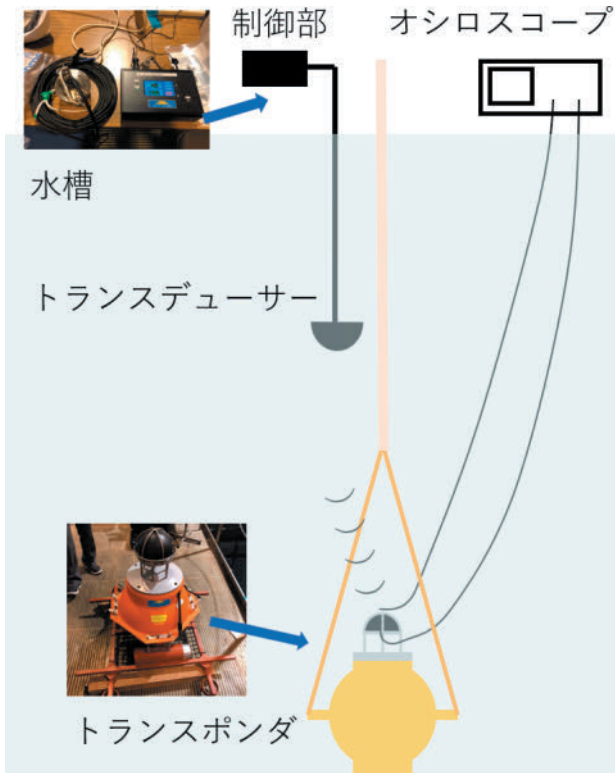


Fig.5. Schematic diagram of the internal delay time measurement experiment.

図5. 本研究で実施したディレイタイム計測試験の概念図.

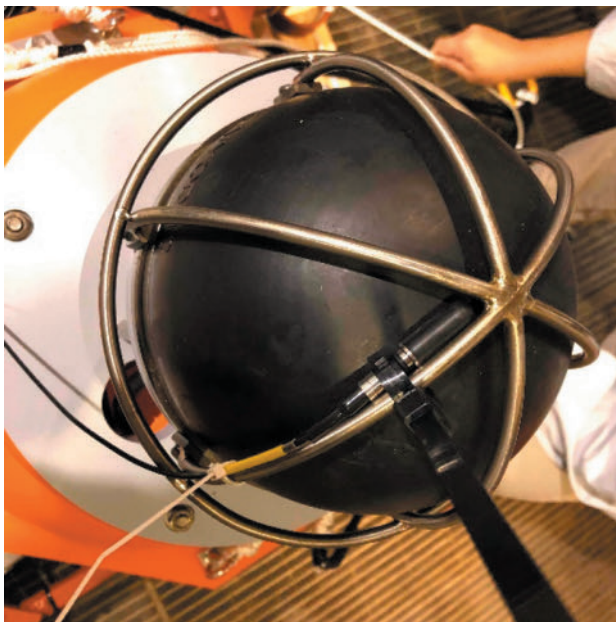


Photo 2. The head of the transponder with hydrophones attached.

写真2. ハイドロフォンを取り付けた海底基準局の振動子部分の様子.

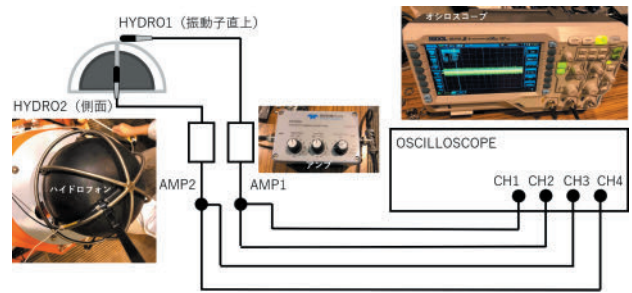


Fig. 6. Schematic diagram of the wiring between the hydrophones and the oscilloscope.

図6. ハイドロフォン-オシロスコープ間の配線図.

フィルタと 10 dB のゲインを適用している. 海底基準局から発信される応答は, トランスデューサーから送信される音響信号に比べ振幅ははるかに大きいので, ハイドロフォンの入力を2つのチャンネルに分岐させて送信・応答をそれぞれ別のチャンネルで収録している.

本試験では, 2021 年度に当庁が購入した海底基準局のうち当時未投入であった5基 (JCG401-029, JCG401-031, JCG401-034, JCG401-035, JCG401-039) のディレイタイムを計測した. 計測は1基あたり計8回以上行った.

3 結果

3.1 ディレイタイム計測結果

振動子の直上に取り付けたハイドロフォンの入力を解析し, 各海底基準局のディレイタイムを調べた結果を Table 1 に示す. 解析時にデータ不良が判明し, 試行回数が2回しかない JCG401-031 の結果を除くと, ディレイタイムの全平均値は 1.061690 s となった.

仕様上の海底基準局ディレイタイムの値 (1.061506 s) と比較すると, 計測したディレイタイムはおよそ 0.18 ms 長い. 簡単のため水中の音速を 1500 m/s と仮定すると, およそ 27 cm の測距誤差に相当する. これは, 半球型の振動子の表面から中心までの往復距離とほぼ同程度の距離である. したがって本試験の結果から, 仕様上のディレイタイムの値は電気回路の遅延 (Fig. 3 の②部分) のみ計測した値であり, 振動子表面-中心間の音波の往復時間 (Fig. 3 の①及び③) を考

慮していない可能性があることが示唆された。

3.2 ディレイタイム補正後の海底基準点時系列

これまでの GNSS-A データのルーチン解析では、仕様上のディレイタイムである 1.061506 s を音響解析の結果から差し引くことで各海底基準局の往復走時を計算していたが、本試験でより正確なディレイタイムが判明したことから、往復走時の計算に本試験の計測値を用いて全データの再解析を行った。十分な試行回数が得られなかった JCG401-031 を除く海底基準局 4 基については Table 1 に示したそれぞれのディレイタイム平均値を、JCG401-031 と既に投入されている海底基準局については本研究で計測した結果の全平均値 (1.061690 s) を用いた。データの再解析には当庁のルーチン解析と同様に「GARPOS」(Watanabe et al., 2020) を用いており、ディレイタイムの値以外は全く同じ条件で解析を行った。

ディレイタイム修正前後の「土佐沖 1」と「熊野灘 1」観測点の時系列を Fig. 7 に示す。青い点はディレイタイム修正前の時系列、赤い点は修正後の時系列を示す。上下成分 (3 段目) のディレイタイム修正前後の時系列を比較すると、「土佐沖 1」は更新用の海底基準局を新たに投入した 2019 年以降の時系列がディレイタイム修正後に下方向にシフトしており、隆起傾向のトレンドが改善された。また「熊野灘 1」観測点でも、計測したディレイタイムを用いたことで 2018 年頃のステップ状の上下変動が解消されたように見える。

Table 1. Measured internal delay times of the seafloor transponders.

表 1. 試験水槽で計測された各海底基準局のディレイタイム。

シリアル番号	MT番号	試行回数	ディレイタイム (平均)
JCG401-029	M07	8	1.061686
JCG401-031	M09	2	1.061713
JCG401-034	M08	10	1.061691
JCG401-035	M09	8	1.061706
JCG401-039	M10	8	1.061678
全平均			1.061690

4 考察

新しい海底基準局の投入後に隆起傾向が見られた原因として、ディレイタイムの計測基準が異なる新旧の海底基準局が混在している観測エポックがあることが考えられる。前述の通り当庁では古い海底基準局を更新するために、新しい海底基準局を投入する。その際に、新旧海底基準局の同時比較観測を数回行い、新旧海底基準局の相対位置を求めることで、時系列の連続性を保っている。

新しい海底基準局のみ観測しているエポックでは、観測する全ての海底基準局の音響走時にディレイタイム誤差が含まれているため、「GARPOS」の海中音速場モデルによる補正である程度誤差を吸収することができると考えられる。一方で、同時比較観測を行っているエポックでは、ディレイタイム誤差が含まれる新しい海底基準局と、ディレイタイムが正確な古い海底基準局が混在しているため、ディレイタイム誤差を海中音速場モデルで補正しようとする古い海底基準局の位置にも影響が生じてしまう。結果的に、同時比較観測の場合はディレイタイムの誤差を新しい海底基準局の位置に含めた解が選択される。

新しい海底基準局はディレイタイムが過小であったため、波形解析により得られた音響走時からディレイタイムを差し引いて計算される往復走時は実際よりも長くなる。同時比較観測における新しい海底基準局の位置は、前述の通りディレイタイム誤差が含まれてしまうため、新しい海底基準局のみ観測しているエポックに比べ深く推定される。一方で新しい海底基準局のみ観測しているエポックは、海中音速場モデルによりディレイタイム誤差がある程度補正されるため、相対的に位置が浅くなる。そのため、Fig. 4 のように新しい海底基準局を投入し、同時比較観測から新しい海底基準局のみの観測に移行するタイミングで隆起しているような時系列となる。

一方で、Fig. 7 の 2021 年以降の上下方向の時系列に着目すると、「土佐沖 1」と「熊野灘 1」はいずれも以前に比べて時系列のばらつきが増大しているように見える。測量船「海洋」で観測した

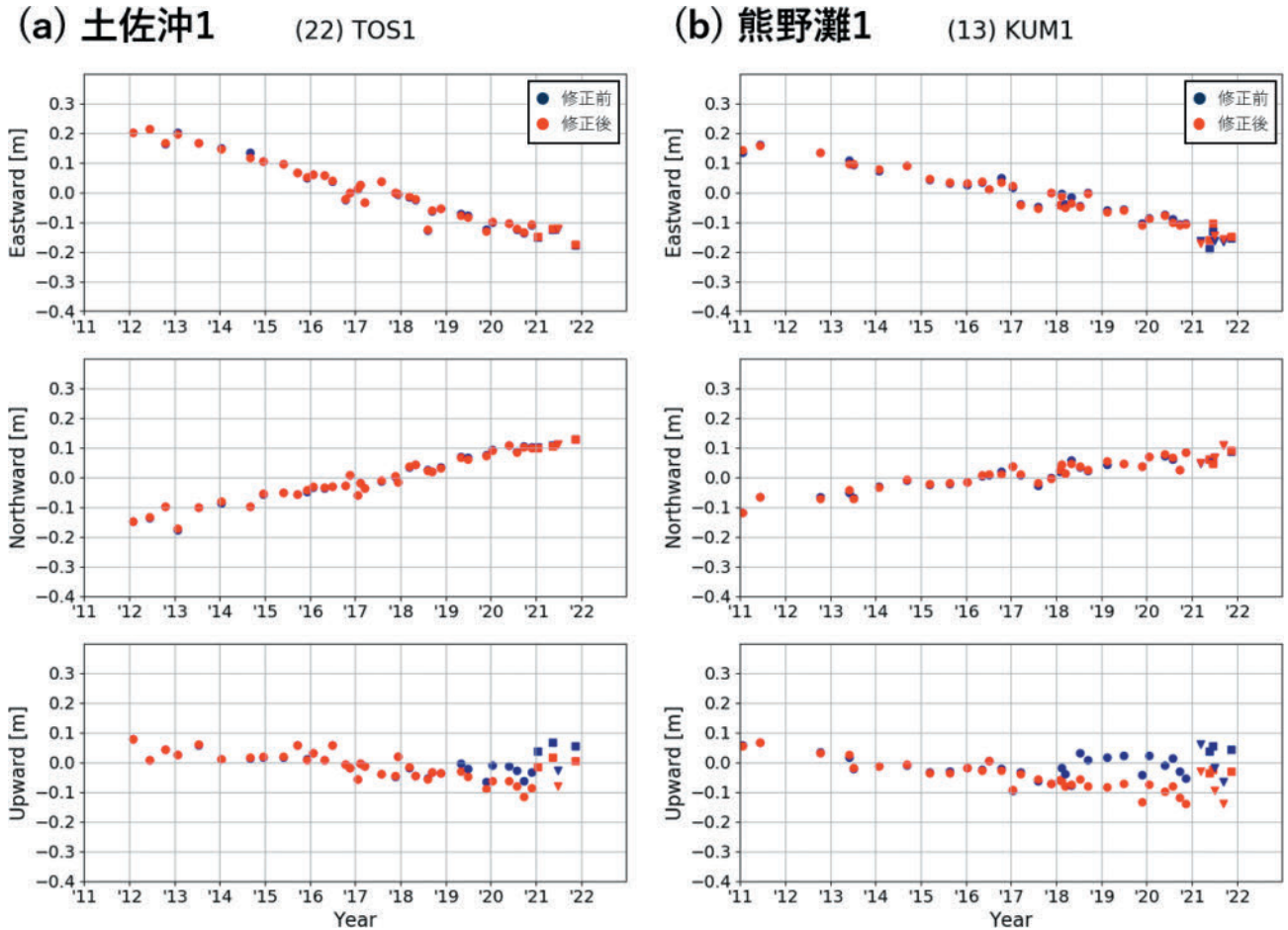


Fig. 7. GNSS-A time series at (a) TOS1 and (b) KUM1, before (blue) and after (red) the correction of the delay time. Epochs after 2021 marked with squares are measured by the survey vessel *Meiyō* and triangles by *Kaiyō*.
 図 7. デレイタイム修正前後の (a)「土佐沖1」と (b)「熊野灘1」の時系列. 青い点はデレイタイム修正前の時系列, 赤い点は修正後の時系列を示す. 2021年以降に測量船「明洋」で観測したエポックは四角形, 測量船「海洋」で観測したエポックは三角形で示している.

エポック (Fig. 7 時系列中の三角形) はこれまでの時系列トレンドと概ね整合する上下位置が得られたが, 測量船「明洋」で観測したエポック (Fig. 7 時系列中の四角形) は全ておよそ 10 cm 程度上方向にずれていた. 上下位置のバイアスは 2021 年以降に継続して現れていることから, 測量船「明洋」の観測機器 (トランスデューサー等) の影響により何らかのバイアス誤差が生じている可能性がある. 時系列の更なる精度向上のためには, 今回検討した海底基準局のバイアス誤差のみならず, 各測量船に搭載されている観測機器のバイアスについても評価・検討していく必要があるといえる.

5 まとめ

海底地殻変動観測で用いる海底基準局の精密なデレイタイムを測定するため, 東京大学生産技術研究所の試験水槽で計測試験を実施した. 当時未投入であった 5 基の海底基準局のデレイタイムを測定したところデレイタイムの平均値は 1.061690 s となり, 計測されたデレイタイムは仕様上の値 (1.061506 s) よりもおよそ 0.18 m 長いことが分かった. これは, 水中の音速を 1500 m/s と仮定すると約 27 cm の測距誤差となり, 振動子の表面から中心までの往復距離とほぼ同じ距離である. このことから, 仕様のデレイタイムは電気回路の遅延のみ計測した値であり, 振動子の表面から中心まで音波が往復する時間を考慮

していない可能性があることがわかった。

今回計測したディレイタイムを用いて GNSS-A データを再解析したところ、いくつかの海底基準点で見られた近年の不自然な隆起傾向のトレンドやステップ状の変動が改善された。しかしながら、ディレイタイム修正後も 2021 年以降の上下成分のばらつきが依然として時系列に残っている。2021 年以降の時系列は測量船に搭載されている観測機器のバイアスの影響を受けている可能性があり、更なる精度向上のためには海底基準局のみならず各測量船の観測機器のバイアス誤差についても検討することが不可欠である。

謝 辞

水槽試験の実施にあたり、海洋防災調査室の職員の皆様と株式会社東陽テクニカの皆様にご協力いただきました。また、東京大学生産技術研究所の試験水槽を利用するにあたり、巻研究室の巻俊宏准教授、坂巻隆氏にご協力いただきました。感謝申し上げます。

文 献

- Asada, A. and T. Yabuki (2001) Centimeter-level positioning on the seafloor, *Proc. Jpn. Acad. Ser. B* 77, 7-12.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006) GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planet. Space*, 58, 265-275. doi:10.1007/s00190-013-0649-9.
- 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.
- Nakamura, Y., Y. Yokota, T. Ishikawa, and S. Watanabe (2021) Optimal Transponder Array and Survey Line Configurations for GNSS-A Observation Evaluated by Numerical Simulation, *Front. Earth Sci.* 9:600993. doi:10.3389/feart.2021.600993.
- 能勢義昭 (2001) 水中ロボット試験水槽, 生研リーフレット, 318, <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/publication/leaflet/010601/leaflet318.pdf>.
- 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.
- Spiess, F. N. (1985) Suboceanic geodetic measurements, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-23, [4], 502-510.
- 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.
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Yokota, and Y. Nakamura (2020) 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.
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Nakamura, and Y. Yokota (2021) Co- and postseismic slip behaviors extracted from decadal seafloor geodesy after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Space*, 73:162, doi:10.1186/s40623-021-01487-0.
- 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.
- Yokota, Y. and T. Ishikawa (2020) Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by GNSS-A, *Sci. Adv.*, 6, eaay5786, doi:10.1126/sciadv.aay5786.

要 旨

GNSS-音響測距結合方式を用いた海底地殻変動観測では、海上プラットフォームに搭載した音響トランスデューサーと海底に設置したミラートランスポンダ（海底基準局）の間で音響測距を実施する。海底基準局はトランスデューサーから発信された音波を受信後、音波の電気信号への変換や電気回路の遅延等により、ある一定の遅延時間（ディレイタイム）が経過してからトランスデューサーに向けて録音した音響信号を送信する。音響測距データを波形解析して取得した音響走時はディレイタイムが含まれており、トランスデューサーと海底基準局の精密な往復走時を求めるためには正確なディレイタイムの値が必要である。そこで、海底基準局のディレイタイムを精密に測定するための試験を、東京大学生産技術研究所の試験水槽で実施した。計測されたディレイタイムの平均値は既存値に比べて約 0.18 ms 長く、水中音速 1500 m/s を仮定すると約 27 cm の測距誤差に対応することが分かった。このディレイタイムの平均値で GNSS-A データを再解析したところ、いくつかの海底基準点の時系列データにおいて、不自然な隆起傾向のトレンドやステップ状の変動が改善されることが確かめられた。