## 海洋情報部研究報告 第 63 号 令和 7 年 3 月 14 日 REPORT OF HYDROGRAPHIC AND OCEANOGRAPHIC RESEARCHES No.63 March 2025

# 海底地殻変動観測における現場音速プロファイルの影響

渡邉俊一\*

Effects of in-situ sound speed profile on the GNSS-A positioning<sup>†</sup>

Shun-ichi WATANABE\*

### Abstract

The unmanned GNSS-A observation systems with the small autonomous vehicles are under development in several groups in the world. In such cases, it is difficult to carry out in-situ measurement for the sound speed profile because it requires the casts of probes. To evaluate the necessity of in-situ profile measurement, we investigated those effects on the GNSS-A positioning results. For the actual data regularly collected by the Japan Coast Guard, there was little difference in the positions in the horizontal component. Although some degradation in the accuracy of the vertical component was observed, it was confirmed that this did not have a significant impact as far as the accuracy of the current routine observations is concerned.

## 1 はじめに

GNSS-音響測距結合方式による海底測位観測 (GNSS-A 観測)は、あらかじめ海底に設置した 音響トランスポンダ(海底局)とキネマティック GNSS により位置が決定される測量船に装備した 音響トランスデューサ(海上局)の間で音響によ り通信し、その往復走時をデータとして、海底局 の地球上における位置を推定する技術である(例 えば、渡邉、2021).2024年現在、当庁の運用方 法及び技術において、海域にも依存するが、概ね 水平2-3 cmの精度で位置を推定することがで きる、測位を繰り返し実施することで、海底の動 きをセンチメートル毎年以上の精度で検出するこ とが可能となり、政府による海溝型地震の評価・ 検討のための基礎資料として活用されている. 当庁の GNSS-A 観測は,水中音響測位としては ロング・ベースライン(LBL)測位に相当する. つまり,海中(海底)に固定されたターゲットの 位置を,位置が既知な海面付近の複数の音源(動 き回ることで物理的に1つの音源を複数の音源と みなすことができる)から推定する.これはター ゲットが観測中には動かないとするスタティック 測位である.さらに,海底局を各観測点に複数台 (通常4台)設置し,その海底局アレイの平均的 な位置を検出する.それらの効果により,位置と 音速擾乱の影響を同時に推定することができ,高 い測位精度を実現している(例えば,Fujita et al., 2006; Watanabe et al., 2020).特に,Watanabe et al. (2020)が開発したGARPOS(最新版は v1.0.2; Watanabe et al., 2024)では,音速擾乱から

† Received August 6, 2024; Accepted October 1, 2024

\* 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

の影響を,背景項並びに海上局の位置及び海底局 の位置の関数として表現して,擾乱場の構造自体 を推定している.

一方で, 音速擾乱が音響走時に与える影響は, 音線に沿って積分された量として表れる. つま り,海面から海底への測距のみで構成される GNSS-Aの観測値には,音線に沿った平均スロー ネス(音速の逆数)の擾乱の情報しか含まれてい ない. つまり,音線の経路情報を得られないた め,現実的に起きうる程度の音速プロファイル形 状の擾乱の情報はデータにほとんど含まれず,し たがって,音速プロファイル形状自体をデータか ら推定することは実質的に不可能である.

ただし, 音速プロファイルが異なると, レンズ の違いによって結像の位置が変わるように, 測位 解に影響を与える. プロファイルの影響について 定性的に考えるため, Fig. 1 に, 想定する音速プ ロファイル形状が違うことにより推定される局位 置がずれる様子を, 極端に強調して描いた概念図

under sound speed with vertical variation

(a) Travel time data acquisition

を示す. Fig. 1 の(a) では,実際に深さ方向に 音速が変化する場において得られる音線を赤破線 で示し,(b) では,実際とは異なる音速構造を 解析時に仮定した際に計算される音線を茶破線, それに基づき推定される海底局位置を茶三角でそ れぞれ示している.これらの図が示すように,音 速プロファイル形状の誤差は,音線の屈折による 音波の到達位置の差として表れる.したがって, 音速構造がほぼ水平成層で近似できるとすれば, 水平方向に対称的に取得されたデータに対して は,音速プロファイルの不可知性による局位置誤 差は,特に上下位置に影響を与えると考えられ る.そのため,適切な音速プロファイルを取得す ることは,海底地殻変動の上下成分を議論するう えで重要である.

他方で,近年は東北大学及び海洋研究開発機構 のグループをはじめ,アメリカやカナダ等海外の 研究グループで,自律航行型海面プラットフォー ム (Autonomous Surface Vehicle; ASV) である

under "wrong" constant sound speed

(b) Transponder position estimated



Estimated transponder position

- Fig. 1. Schematic illustration of effect on the positioning caused by the difference in the assumed sound speed profile. Note that the figure extremely emphasizes the inflection. (a) Acoustic ray paths under a sound speed profile with vertical variation as an actual sound speed field (red broken lines). Acoustic travel times are calculated by integrating slowness along the ray path. (b) Synthetic acoustic ray paths (brown broken lines) and estimated transponder position (brown triangle) under "wrong" assumption of the constant sound speed for obtained data (a).
- 図1. 想定する音速プロファイルの違いによって生じる局位置決定への影響の概念図. 屈折の影響を極端に誇張し ている点に注意. (a) 実際の構造として深さ方向に変化する音速プロファイルがある場合に得られる音線 (赤破線). 音響走時は音線に沿ったスローネスの積分値として与えられる. (b) データ (a) に対して, 解 析において音速を「間違って」深さ方向に一定と仮定した場合に計算される音線(茶破線)と, その際に推 定される海底局の位置(茶三角).

ウェーブグライダーによる無人観測が実用化され つつある(例えば, Iinuma et al., 2021). また, 東京大学においても無人航空艇(Unmanned Aerial Vehicle; UAV)によるGNSS-A 観測技術の 開発が進められており(Yokota et al., 2023), 今 後は船舶を使用しないGNSS-A 観測が広く行われ るようになると予想される.こうした非船舶型の 観測に関しては様々な技術開発課題があるが,特 にペイロードの制限により,プローブの投下を必 要とする音速プロファイルの取得は実質的に不可 能であるといえる.

そのため、現場での音速プロファイルを取得で きない状況において、どの程度測位解が変化する かについて現時点のデータセットで検討すること は、今後こうした無人機を活用するにあたって必 要不可欠である.本稿では、既存のデータセット を用いて、現場音速プロファイルが入手できない ときの測位解への影響について比較する.

#### 2 手法

現在,当庁の GNSS-A のルーチン解析には, Watanabe et al. (2020) において開発された GARPOS (最新は v1.0.2; Watanabe et al., 2024) を使用しているところ,本研究でもこれを用い る.GARPOS では,観測された音響往復走時 $T^{o}$ を,局位置を含むモデルパラメータで構成される モデル走時 $T^{o}$ と比較し,最尤法によりモデルパ ラメータを推定する.モデル走時は,ある定常的 なリファレンス音速プロファイル $V_{0}(u)$ のもとで 海上局位置 $P_{0}(t)$ と海底局位置Xから得られるリ ファレンス走時 $\tau$ と,そこからの擾乱項の積とし て,

$$T_i^c = \exp\left(-\gamma_i\right) \cdot \tau_i,\tag{1}$$

と表される.ここで、 $|\gamma_i| \ll 1$ のとき、

$$T_i^c \sim (1 - \gamma_i) \tau_i, \tag{2}$$

が成り立ち, γ<sub>i</sub>は *i* 番目のショットについて基準 音速からの平均的な音速のずれ率を示すものと解 釈される. つまり, GARPOS のモデルにおいて は、局位置の違いによる走時への影響と音速擾乱 による走時への影響を、 $\tau \ge \gamma$ に分割して推定し ていることになる.なお、擾乱項 $\gamma$ は空間(海上 局位置 $P_0$ と海底局位置X)について一次の項ま で展開した擾乱場モデル $\Gamma$ から抽出される値と してパラメタライズしている.すなわち、

$$\Gamma(t, \boldsymbol{P}_0, \boldsymbol{X}) = \alpha_0(t) + \alpha_1(t) \cdot \frac{\boldsymbol{P}_0(t)}{\boldsymbol{L}^*} + \alpha_2(t) \cdot \frac{\boldsymbol{X}}{\boldsymbol{L}^*} \quad (3)$$

とし、各係数*α*<sub>0</sub>(*t*), *α*<sub>1</sub>(*t*), *α*<sub>2</sub>(*t*)の各成分を時間 方向に B スプラインで基底関数展開し、その係 数をモデルパラメータとして推定している. な お、*L*\*は特徴的な長さスケールである. したがっ て、ここで導入された擾乱場モデルを用いると、 音速場の平均的な擾乱の時空間変化が、背景項並 びに海面及び海底での傾斜に投影されて表現され ることになる. さらに、GARPOS では、ベイズ 的なアプローチを導入し、擾乱場の時間変化がな めらかであるという条件を課したうえで擾乱パラ メータと局位置を同時推定している.

このように,現在の解析スキームにおいては, 音速プロファイルは所与のものとして,リファレ ンス走時を計算するために使用されている.本研 究では,音速プロファイルの違いによる測位解へ の影響を調査することを目的とするので,このリ ファレンスプロファイルを変化させることでどの 程度測位解が変化するかを調べることとする.

具体的には、これまで船舶で観測をしていた観 測点において無人機を使用するケースを想定し、 それぞれの観測点でこれまでの観測で得られてい た音速プロファイル全体の平均プロファイルを作 成し、各観測データに適用して局位置を推定した (以下「平均プロファイル解」という).その結果 について、現場音速プロファイルにより得られる ルーチン解(以下「現場プロファイル解」とい う)と比較した.水槽実験等で指摘されている海 底局の個体差による影響(例えば、永江・他、 2024)を極力除くため、同一の海底局セットを長 期間観測できている観測点を代表的に調査するこ ととし、TOS2(高知県沖)、KUM2(三重県沖)、 FUKU(福島県沖)、及び MYGI(宮城県沖)の 観測点のデータを使用した(Japan Coast Guard, 2022).

#### 3 結果·考察

平均プロファイル解と現場プロファイル解の時 系列を Fig. 2 に示す.両者の解の差が小さい場合 には、点が重なって表示されている.また、観測 データセットごとの平均プロファイル解と現場プ ロファイル解の差の分布と頻度分布を Fig. 3 に示 す.第1節及び Fig. 1 で示したように、水平成分 の差は極めて小さく,差の標準偏差は3mm 程度 で,一部の外れ値を含めても2cm以内に十分収 まっていた.ルーチンによる測位解の線形回帰か らのばらつきが,良好な観測点であっても2-3 cm 程度であることを考えると,平均プロファイ ル解の使用はほとんど影響を与えないといえる.

一方で、上下成分については、第1項及び Fig. 1で予想したように水平成分よりも顕著に影響が 大きく、差の標準偏差は約4 cm であった. Fig.4 は、平均プロファイル解と現場プロファイル解そ





図2. 現場プロファイル解(青)と平均プロファイル解(橙)による変位時系列(ITRF2014準拠).



Fig. 3. Position differences between the average profile solutions and the in-situ profile solutions. Panel on the rightbottom shows Frequency distributions of the position differences in the eastward, northward, and upward components.

図 3. 平均プロファイル解と現場プロファイル解の差の分布. 右下のパネルは東, 北, 上向き成分の差の頻度分 布.

れぞれの上下成分について線形トレンド回帰をし た際の残差分布を示したものである.この図を見 る限り平均プロファイルの使用が直ちに顕著な精 度劣化につながるものではないといえる.しか し、今後、Yokota et al. (2024)等で取り組まれ ている Acoustic Ambiguity Reduction (AAR) 法 による音響機器バイアスの補正により上下成分の 安定性が向上した際には、より慎重に平均プロファイル使用の是非を見極める必要があるだろう.

### 4 結論

本研究では, 音速プロファイルを現場観測によ り取得できない事態を想定し, 仮想的に統計的な



- Fig. 4. Frequency distributions of the differences from the linear trend in the upward component for the in-situ profile solutions (blue) and the average profile solution (orange).
- 図4. 上向き成分について,線形回帰した直線からの 差の頻度分布. 青と橙は,それぞれ現場プロ ファイル解と平均プロファイル解を示す.

プロファイルを用いた場合の精度について評価した.当庁の観測では,幾何学的に対称な測線を描けているため,水平成分には顕著な影響は見られなかったが,上下成分については精度がわずかながら悪化するという結果が得られた.とはいえ,定性的には,現在の測位精度の範囲内では平均プロファイルの使用が直ちに問題となるようなことはないと考えられる.他方で,並行して研究が進められている音響機器バイアスの補正による精度向上が実現した際には,現場プロファイルを使用できないことによる上下成分の精度劣化が地殻変動の検出に悪影響を与える可能性も十分にある.

さらに、今回は季節や海流の状況等を考慮する ことなく機械的に平均音速プロファイルを作成し たが、海洋モデル等を活用して観測日のプロファ イルをある程度の精度で再現することができれ ば、より安定した結果を得られる可能性が高い. 今後は測位精度の向上といった状況の変化に対応 することに加え、数値海洋モデル等から適切なプ ロファイルを作成する方法を確立するといった研 究に取り組むことで,無人観測の導入に備え,現 場音速プロファイル取得の必要性についてより実 践的な検討を進めていくことが求められる.

### 謝 辞

本研究に使用したデータは,海洋防災調査室職 員並びに測量船「拓洋」,「明洋」,及び「海洋」 により取得されました.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

- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006) GPS/acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, Earth Planets Space, 58, 265–275, doi:10.1186/BF03351923.
- Iinuma, T., M. Kido, Y. Ohta, T. Fukuda, F. Tomita, and I. Ueki (2021) GNSS-Acoustic observations of seafloor crustal deformation using a wave glider. Front. Earth Sci., 9:600946. doi:10.3389/feart.2021.600946.
- 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.
- Japan Coast Guard (2022) GNSS-A data obtained at the SGO-A sites "TOS2", "KUM2", "FUKU", and "MYGI" for the identical four transponder-array. Zenodo. doi:10.5281/ zenodo.6417480.
- 永江航也・横田裕輔・石川直史・渡邉俊一・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.

- 渡邉俊一(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. Nakamura, and Y. Yokota (2024) GARPOS: Analysis tool for GNSS-Acoustic seafloor positioning (Version 1.0.2). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.12620693.
- 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.
- Yokota, Y., M. Kaneda, T Hashimoto, S. Yamaura, K. Kouno, and Y. Hirakawa (2023) Experimental verification of seafloor crustal deformation observations by UAV-based GNSS-A. Sci. Rep. 13, 4105. doi:10.1038/ s41598-023-31214-6.
- 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.

# 要 旨

近年,無人機を活用した海底地殻変動観測の実 用化に向けた技術開発や実証的な取り組みが進め られている.こうした無人観測においては,その 仕組み上,プローブを使用した音速プロファイル の取得が困難である.そこで本研究では,現場音 速プロファイルを取得できない場合に測位解がど のように変化するかを調査した.その結果,当庁 が取得した実データにおいては,プロファイルの 変化は水平成分にはほとんど影響を与えなかっ た.上下成分については多少の精度劣化が認めら れたものの,現状のルーチン観測の精度と比較す る限りにおいては顕著な影響を与えるものではな いことが確認された.