

海底地殻変動観測シミュレータの開発[†]

横田裕輔^{*1}, 田代俊治^{*1}, 石川直史^{*2}, 渡邊俊一^{*3}

Development of numerical simulator for seafloor geodetic observation system[†]

Yusuke YOKOTA^{*1}, Toshiharu TASHIRO^{*1}, Tadashi ISHIKAWA^{*2}, and Shun-ichi WATANABE^{*3}

Abstract

Seafloor geodetic observation with the GPS-Acoustic combination technique has been deployed by the Hydrographic and Oceanographic Department (JHOD). Although the observation precision has been improved since 2000, environment factors have complicated influence for the precision and were not examined enough quantitatively. For precision examination and error mitigation, we developed a seafloor geodetic observation simulator. We report a brief summary of this simulator and some case examples. Research of error factors and analytical approach for error mitigation using this simulator is our future works towards sophistication of the seafloor geodetic observation.

1 GPS-A による海底地殻変動観測

海上保安庁では、GPS-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（以下、基準点）の展開を行い、測量船による繰り返し観測を実施している（浅田・矢吹，2001；藤田，2006）。

海底地殻変動観測では、測量船の位置を「GPS観測」によって決定し、測量船に装備された音響トランスデューサと海底に設置された海底基準局（以下、海底局）との間の距離を「音響測距観測」で測り、それらを組み合わせて海底局の位置を決定している（Fig.1）。安定した観測結果を得るため、各基準点には複数の海底局が設置されており、各局の位置を平均することで、安定して基

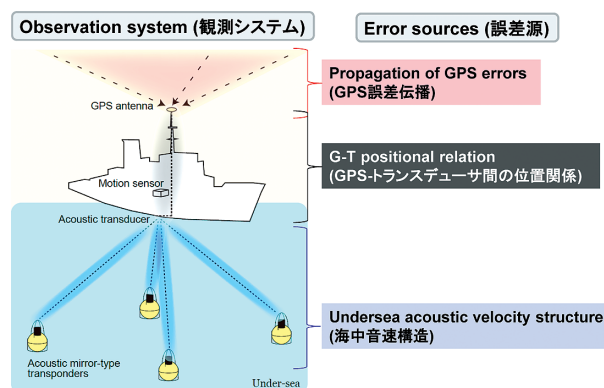


Fig.1. Schematic pictures of seafloor geodetic observation system and error sources.

図1. 海底地殻変動観測システムとその誤差要因の概念図。

[†] Received September 18, 2015; Accepted November 13, 2015

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

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

*3 技術・国際課 海洋研究室

Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

準点の移動を求めることができる。本観測はプレート境界での様々な地殻変動現象による海底の変動を捉えることに成功してきた。特に、東北沖地震の地震前、地震時、地震後の変動は非常に重要な成果である (Sato et al., 2011, 2013; Watanabe et al., 2014)。これらは、これまでの測地学・地震学的観測の枠組みでは捉えることのできない重要なデータである。

巨大地震発生時の変動を除けば、ほとんどの現象は 10 cm/year を下回る変動レートであるため、cm レベルの観測精度が求められている。2000 年以降の技術開発によって、観測機材と解析手法が高度化され、現在の 1 回の観測における精度は水平方向に $\pm 2-3$ cm 程度である (石川, 2016)。この場合、4 年間継続観測を行って水平方向に ± 1 cm/year 程度の精度で移動速度を導出できる。ただし、誤差要因は複雑であり、観測の機会ごとの精度や基準点ごとの精度は定量的な指標がなく、観測精度を客観的な情報で決めることはできていない。

2 誤差要因

海底地殻変動観測における誤差要因は、大きく分けて Fig. 1 のように 3 つに分解することができる。

1 つ目は、測量船の位置を決定する GPS に生じている誤差 (以下、「GPS 誤差」という) の伝播による海底地殻変動観測への影響 (以下、「GPS 誤差伝播」という) である。本観測で行うハイレート (ここでは、1 Hz 以上と定義する) GPS 観測には、経験的に水平 ± 0.5 cm (1σ)、上下 ± 1.5 cm (1σ) のホワイトノイズやガウシアンノイズ、ランダムウォークのような振る舞いをする誤差が乗っていることがわかっており、悪条件下ではさらに増幅する場合がある (Colombo et al., 2000; Bilich et al., 2008 など)。この GPS 誤差が海底局位置の決定に誤差伝播して悪影響を及ぼす。

2 つ目は、GPS アンテナと船底トランスデューサの間の位置関係に関わる誤差 (以下、「G-T 関係誤差」という) である。これはさらに詳細に見

ると、ドック時におけるアンテナトランスデューサ間の測量結果に生じる誤差と、ジャイロセンサによる測量船の傾斜観測の誤差に分けることができる。

3 つ目は、海中の音速構造に起因する誤差 (以下、「音速構造誤差」という) である。この誤差源は、いくつかの先行研究において複雑性がよく知られている (例えば、石川・他, 2006; Kido et al., 2006; Kido, 2007)。また、10 年以上の継続的な観測の結果から、最終測位解のばらつきが小さい基準点と大きい基準点があることもわかっている (秋山・渡邊, 2015)。これらの基準点は、観測点周辺に音速構造の傾斜や移流が生じて誤差となってしまうことが多い地域であると推定される。

このほかに、影響は小さいものの水中雑音や音響発信機器自体に依存する誤差が考えられる。これらは音波の往復走時の観測値に影響を与える。このシミュレータでは観測データに対するノイズとして取り扱うことが可能だが、本稿では省略する。

これらの誤差のうち、GPS 誤差は定量的に取り扱うことができるため、海底地殻変動観測への GPS 誤差伝播も数値実験によって推定可能である。G-T 関係誤差は、一方向への偏りとして生じることがあっても、ばらつきとしては他の誤差に比べて極めて小さい。また、偏りが生じた場合にも様々な方向からの音響測距によって相殺することが可能であり、顕在化する誤差量が小さいため、本稿では扱わない。音速構造誤差は、定性的にしか理解できておらず、また、観測の機会や地域によって極端に異なるため、数値実験による定量的な議論が必要である。

GPS 誤差伝播と音速構造誤差による影響、また、手法変更による影響などを定量的に理解するために、我々は、任意に誤差を与えた擬似データセットを作成・解析できるシミュレータを開発した。以下では、その概要といくつかの数値実験の事例を紹介する。

3 数値シミュレーション手法の概要

3.1 解析アルゴリズム

まず、現在用いている解析プログラム「SGOBS」(藤田, 2006) のアルゴリズムを, Fig. 2 に示した。データセットとして, 3つの位置情報 (ハイレート GPS データ, 船の傾斜観測データ, GPS-トランスデューサ間の位置関係) を用いて作成した船底トランスデューサの絶対位置データ, 海底局に対する音波の往復走時データ, CTD など観測された音速構造データを用意する。

これらの値をデータ (d) として, インバージョン解析が行われる。まず, 海底局位置を未知パラメータ ($m_p^{(1)}$), 音速構造を既知パラメータ ($G_s^{(1)}$) として解く。これによって, $m_p^{(1)}$ が求まる (Fig. 2 中の [X])。一周目の解析では収束条件との比較は行わず, 次に, 海底局位置を既知パラメータ ($G_p^{(1)}$), 音速構造を未知パラメータ ($m_s^{(1)}$) として解き, $m_s^{(1)}$ を求める (Fig. 2 中の [Y])。次はまた, 未知パラメータと既知パラメータの関係を入れ替えて ($m_p^{(2)}, G_s^{(2)}$) を解き, 残差 ($e^{(2)}$) を収束条件 (e_{cr}) と比較する (Fig. 2 中の [Z])。以降, これらを繰り返し, 収束条件を下回ると測位解が決定される。結果は, 海底局の位置と音速構造 (関数) として得られる。

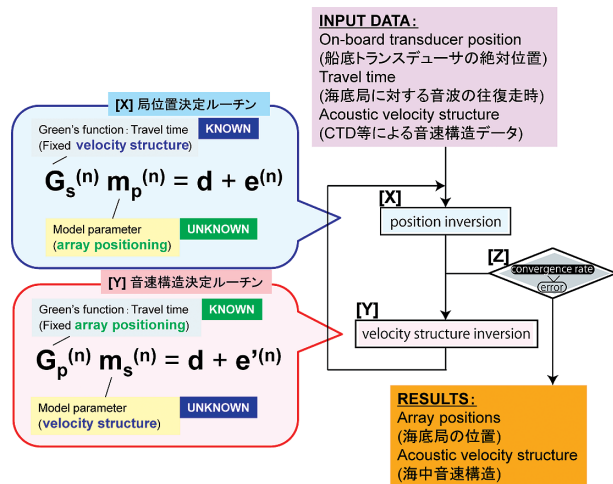


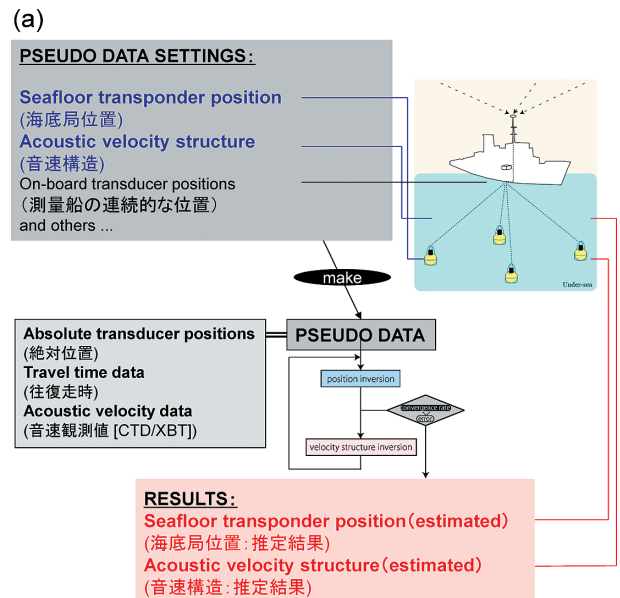
Fig. 2. Analysis algorithm of seafloor geodetic observation (after Fujita, 2006).

図 2. 海底地殻変動観測の解析アルゴリズム (藤田, 2006 を変更)。

3.2 シミュレーションアルゴリズム

シミュレータでは, この解析のための擬似データセットを作成する (Fig. 3(a)). データセットの作成にあたり, 海底局と測量船の位置や誤差などを設定する。

設定できるパラメータを Fig. 3(b) に示す。海底局位置は, 海中のどこにでも自由に設定できる。音速構造は, 3次元グリッドに対して指定することで自由に設定でき, 時間変化も同様に設定できる。グリッド間隔は次節で述べる往復走時の計算時間を省略するため, 1 m 間隔に制限している。グリッド間は内挿して連続的な構造となっている。測量船位置も自由に設定でき, 必要であれば海上多点展開を想定した数値実験も可能である。測線や現実的な測線からの揺らぎ, 波浪環境も再現できる。データ間隔, ショット間隔, GPS 誤差についても自由に設定が可能である。これら



(b)

設定パラメータ	オプション
海底局位置	Array positions
音速構造	空間勾配 (水平 + 垂直) / 時間変化
測量船位置	測線
測線からのズレ	Line wobbles
波浪影響	Ocean waves
データ量	Data volume
ショット間隔	Shot interval
GPS誤差	GPS error

Fig. 3. (a) Schematic picture and (b) configuration parameters of the numerical simulator for seafloor geodetic observation.

図 3. (a) 海底地殻変動観測シミュレータの概念図と (b) 設定パラメータ表。

の設定パラメータによって、往復走時、測量船位置、音速観測値からなる擬似観測データセットが作成される。

このようにして作成された擬似データセットを、第3.1節の解析アルゴリズムで解くと、海底局位置・音速構造が結果として得られる。これらの結果と設定された海底局位置・音速構造を比較することで、観測時間、測線計画、与えた誤差などがどのような影響を与えたかについて定量的に議論することが可能となる。

3.3 往復走時の計算手法

擬似データセット作成において、最も複雑な処理を要する部分が海底局との間の往復走時の計算である。この節では、このシミュレータにおいて用いられている往復走時の計算手法を記す。

「SGOBS」の解析アルゴリズム内では2次元音速構造（水平1成分、鉛直成分）に対する音線理論に依拠して、水平音速構造を仮定した反復アルゴリズムによって音線と往復走時を計算している。音響発信ごとに計算し直すことで、時空間変化の推定を可能としている。

一方、シミュレータでは傾斜構造などを考慮するために、3次元音速構造（水平2成分、鉛直成分）を入力値としている。海底地殻変動観測における海水中の音波は、ほぼ直線的に伝播するので、3次元音速構造中の発信地点と受信地点（測量船と海底局）の間を直線的に抽出した音速構造から2次元の水平構造を作り直したのち、「SGOBS」と同じアルゴリズムを用いて計算している。すなわち、音響発信ごとに、3次元構造から2次元構造を抽出し直すことで音速場の3次元的效果を再現している。そのため、3次元音速構造による音線の曲がりや揺らぎの効果は再現できず、音速構造の3次元的效果を完全には取り込めない。しかし、アルゴリズムを3次元的な計算手法に拡張することは、計算時間と設定の煩雑さが過剰に増えてしまう一方、ごく小さな複雑性しか取りこめなためメリットが少なく、本プログラムでは採用しない。

4 数値実験の事例

4.1 GPS 誤差伝播

以下では、数値実験の事例を紹介する。まず、GPS 誤差伝播を考える。Fig. 4(a)に示す GPS 誤差を設定して、250回の試行を繰り返す。4つの仮想海底局は1000 mの深度で、中心座標から半径500 mの円上の東西南北方向にそれぞれ配置した。船の移動は、日本海溝沿いでの観測に使用している測線を用いた (Fig. 4(b))。その上で、測線からのずれを ± 30 mを上下限としたランダムウォーク成分として水平方向に、波浪の影響として ± 2 mを上下限として上下方向に、それぞれ船の位置を揺らす形で考慮に入れて設定した。

推定された水平位置座標は、Fig. 4(c)のように分布する。推定位置座標と設定位置座標の間の距

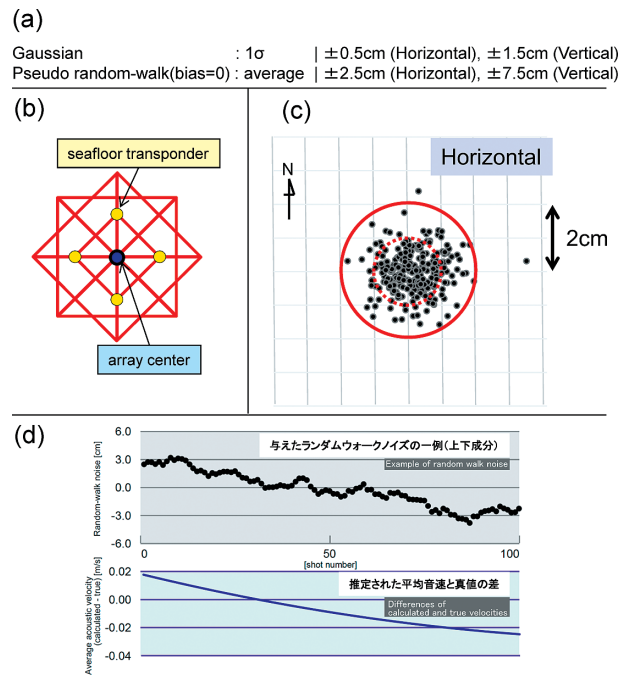


Fig. 4. (a) GPS error, (b) line plan, and (c) variation of estimated array centers in the numerical experimentation of GPS error propagation. (d) Example of random-walk noise in UD component (top) and differences of calculated and true average acoustic velocities (bottom).

図 4. GPS 誤差伝播調査のための数値実験に使用した (a) GPS 誤差量, (b) 測線計画と, (c) 推定位置座標のばらつき, (d) 与えたランダムウォークノイズの一例と推定された平均音速の真値との差。

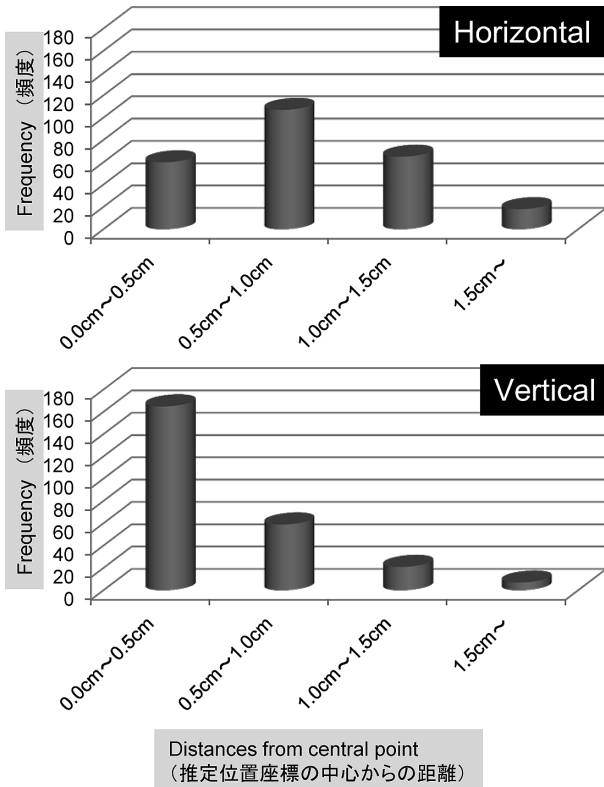


Fig. 5. Histograms of variation of estimated array centers in the numerical experimentation of GPS error.

図 5. GPS 誤差を導入した数値実験における推定位置座標のばらつきのヒストグラム：(上) 水平，(下) 垂直。

離は 1σ が約 8 mm のばらつきを持つ。また水平方向，垂直方向をそれぞれヒストグラムにすると Fig. 5 のようになる。この結果から，GPS 誤差を単純に導入すると，GPS 誤差伝播は垂直方向の方が小さいという結果になる。また，いずれも与えた GPS 誤差中のランダムウォークノイズの振幅に比べて，影響がかなり小さいことがわかる。

これらの振る舞いは，「GPS 誤差は上下方向の方が大きい」という現実に即した設定に対して，一見矛盾している。原因は，音速推定アルゴリズム (Fig. 2 中の [Y]) にあると考えられる。このアルゴリズム内で，ランダムウォークノイズの上下方向成分は音速構造誤差として解析され，海底局位置の推定には大きく影響しない。Fig. 4(d) では，その一例として 100 ショット分の音響測距データに対するランダムウォークノイズの上下成分と音速推定された平均音速の比較を示した。ラ

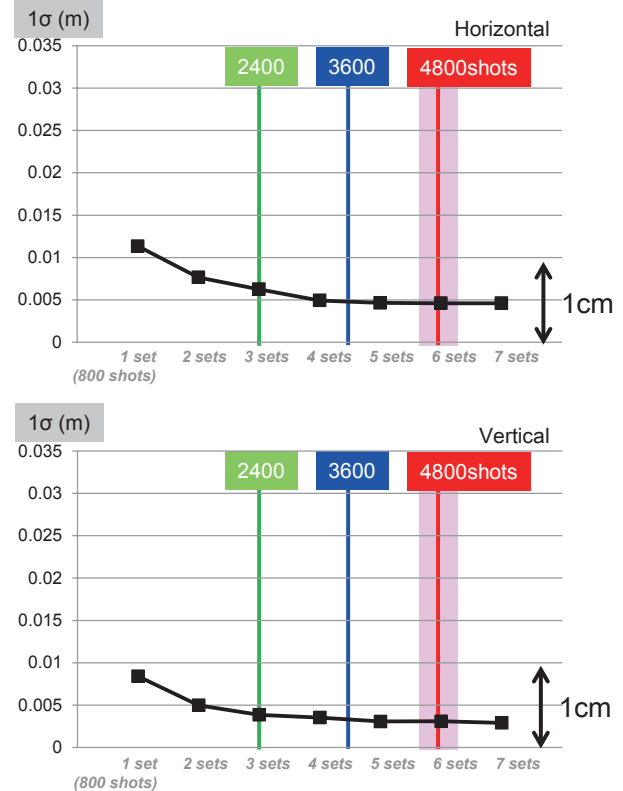


Fig. 6. Standard deviations of estimated array centers in the numerical experimentation of data volume.

図 6. データ量を変化させた場合の推定位置座標の標準偏差の比較：(上) 水平，(下) 垂直。

ンダムウォークノイズによる大局的で緩やかなばらつきは音速推定によって取り除かれていることがわかる。ただし，水平方向への GPS 誤差は音速推定アルゴリズムでは十分に除去できないので，結果として水平方向への誤差伝播が，より大きくなる。

4.2 データ量

次は，データ量の増減による影響を考える。GPS 誤差は第 4.1 節と同じ設定にして音響測距データ量を 4800 ショット (800 ショットを 1 セットとして，6 セット) の 1/6 (1 セット) から 7/6 (7 セット) まで変化させてそれぞれ 250 回試行した結果を Fig. 6 にまとめた。

この結果は，第 4.1 節の GPS 誤差の設定ではデータ量を 2/3 (3600 ショット) に減らしたとしても精度はほとんど変わらないということを示

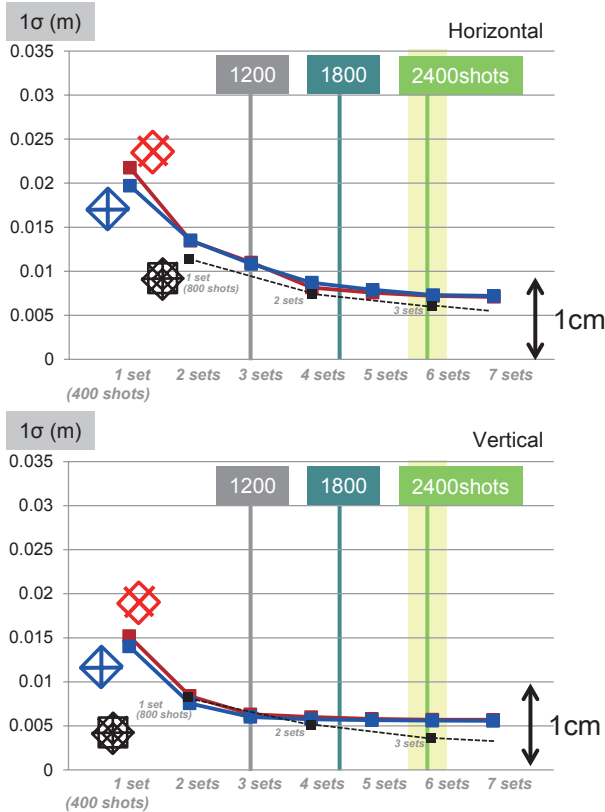


Fig. 7. Standard deviations of estimated array centers in the numerical experimentation of line plans.
 図 7. 測線計画を変化させた場合の推定位置座標の標準偏差の比較：(上) 水平，(下) 垂直。

している。一方で 1/2 (2400 ショット) を下回るとはっきりと精度が劣化する。つまり、これまでの音響測距のデータ数は GPS 誤差に対してはやや過多であるということになる。ただし、GPS 誤差は常に一定ではなく、電離圏や大気圏の擾乱、衛星配置の影響を受けて劣化する場合があり、誤差量に応じてこの結果も変化し得ることに注意が必要である。

4.3 測線計画

次に、測線計画が与える影響について考察した。Fig. 7 に示すグラフは、GPS 誤差は第 4.1 節と同じ設定として、測線を図に示す 2 種類に設定し、データ数を 2400 ショット (400 ショットを 1 セットとして、6 セット) の 1/6 (1 セット) から 7/6 (7 セット) まで変化させた結果である。これについても試行回数は 250 回とした。比較の

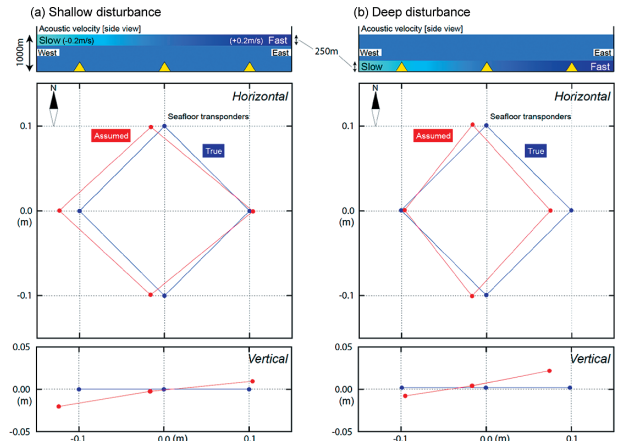


Fig. 8. Comparisons between estimated and true positions of seafloor transponders in the numerical experimentation of acoustic velocity structures: cases of (a) shallow and (b) deep disturbances.

図 8. 音速構造を変化させた場合の海底局の推定座標と設定座標の比較：(a) 浅部擾乱と (b) 深部擾乱を設定した場合。

ため、Fig. 6 の結果も併記した。

この結果から、局位置の推定に対しては、測線が海底局の直上を通過するかしないかはほとんど影響していないことがわかる。ただし、データ数が少ない場合は直上を通過した場合の方がより良い結果を得ている。

4.4 音速構造誤差

実際の海底地殻変動観測のばらつきは水平方向に $\pm 2-3$ cm 程度、垂直方向に $\pm 4-5$ cm 程度であり、第 4.1 節の GPS 誤差伝播に関する数値実験結果は誤差が過小である。つまり、実際のデータには、残る音速構造誤差の寄与が大きいということになる。音速構造誤差にも観測中の時間変化による影響と観測中は変化しない構造傾斜や移流による影響が考えられる。ここでは時間変化しない場合を考える。

GPS 誤差は無いものとして、Fig. 4 (b) の測線を用いる場合を考える。Fig. 8 (a) のように音速構造傾斜が浅部にある場合には、海底局位置が少し傾斜を持って、東西に引き伸ばされるような振る舞いをする。これは海水がレンズのように影響を

与えたと捉えることもできる。このようなレンズ効果は大きな誤差源であり、アレイ形状の固定(松本・他, 2008)などによって低減の努力が進められている。

一方, Fig. 8(b)のように傾斜が深部にある場合には, 海底局位置の東西への伸縮が真逆の振る舞いを見せる。これは浅部と深部に擾乱がある場合で, 音波が受ける影響が大きく異なるためである。深部ほど音速構造擾乱が起こりにくくはあるものの, ± 0.2 m/s 程度であれば, 2000 mまでの深度で発生していることが観測から明らかになっており, 留意すべきである。このような様々な擾乱を与えたテストケースを作成しリスト化することで, 音速構造誤差の定量的な評価を実施していきたいと考えている。

5 今後の課題

本稿では, 開発された海底地殻変動観測シミュレータの概要といくつかの実験事例を紹介した。このシミュレータは本観測の高度化に向けて多様な利用が考えられる。

まず, 本来の目的である誤差要因の定量的な評価を実施していく必要がある。10年以上の観測により考察に十分なデータ量が蓄積されているので, 実観測との比較による検証も可能である。

このような定量的評価にとどまらず, 観測手法を変更した場合の精度の事前調査にも利用できる。音響測距間隔や, 測線計画, 海底局配置などの変更についても事前に調べることができる。海上観測において, 事前調査の手法を持つことは重要である。

さらに解析手法の評価・改善にも利用できる。解析手法については, 2000年代前半に設定したパラメータや条件を使用している部分が多く, 妥当性の検証も不十分である。しかし, これまでは解析手法の変更による結果への影響が明らかでなかったため, 変更の方針を立てられなかった。事前にシミュレーションすることが, 解析手法変更の方針立てにも有用である。

今後は, このような数値実験を用いた誤差の理

解や手法の改善によって, 海底地殻変動観測の高度化を進めていく必要があると考えている。

謝 辞

シミュレータのベースとなっている海底局位置解析プログラム「SGOBS」は, 藤田雅之氏をはじめとする歴代の航法測地課, 航法測地室, 海洋防災調査室, 海洋研究室の職員の方々によって構築されたプログラムです。匿名の査読者には本稿を査読いただき, 原稿を改善する上で有益な助言をいただきました。深部の音速構造については, 東北大学の木戸元之教授らの観測と議論を参考とさせて頂きました。記して感謝いたします。

文 献

- 秋山裕平・渡邊俊一 (2015) 海底地殻変動観測における重心推定法の効果についての考察, 海洋情報部研究報告, 52, 88-96.
- 浅田 昭・矢吹哲一郎 (2001) 熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化, 地学雑誌, 110 (4), 529-543.
- Bilich, A., K. M. Larson, and P. Axelrad (2008) Modeling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Boliva, *Journal of Geophysical Research*, 113, B04401, doi: 10.1029/2007 JB 005194.
- Colombo, O. L., A. G. Evans, M. I. Vigo-Aguar, J. M. Ferrandiz, and J. J. Benjamin (2000) Long-baseline (>1000 km), sub-decimeter kinematic positioning of bouys at sea, with potential application to deep-sea studies, *Proceedings of the ION GPS 2000 Meeting in Salt Lake City*.
- 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.
- 石川直史 (2016) 海底地殻変動観測の統計的な精度評価手法, 海洋情報部研究報告, 53, 45-56.

- 石川直史, 藤田雅之, 松本良浩 (2006) 海底局位置決定における海中水温構造の影響, 海洋情報部研究報告, 42, 15–29.
- Kido, M. (2007) Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean, *Earth Planets Space*, 59: e 33–e 36, doi: 10.1186/BF 03352027.
- Kido, M., H. Fujimoto, S. Miura, Y. Osada, K. Tsuka, and T. Tabei (2006) Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys, *Earth Planets Space*, 58: 911–915, doi: 10.1186/BF 03351996.
- 松本良浩, 藤田雅之, 石川直史 (2008) 海底地殻変動観測における複数エポック一括局位置解析手法の導入, 海洋情報部技報, 26, 16–22.
- 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.
- Sato, M., M. Fujita, Y. Matsumoto, T. Ishikawa, H. Saito, M. Mochizuki, and A. Asada (2013) Interplate coupling off northeastern Japan before the 2011 Tohoku-oki earthquake, inferred from seafloor geodetic data, *Journal of Geophysical Research*, 118: 1–10, doi: 10.1002/jgrb.50275.
- 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: 10.1002/2014GL 061134.

要 旨

海上保安庁海洋情報部で実施している海底地殻変動観測は、2000年以降の技術開発によって観測精度を高めてきているものの、精度に影響を与える環境要因は複雑であり、誤差要因それぞれの定量的な検証が行われていない。我々は精度の検証と誤差の低減に向けて、この観測を再現する数値シミュレータを開発した。本稿では、シミュレータに関する概要と数値実験の事例を紹介する。今後は、数値実験によって、誤差要因の調査、解析的な誤差の低減手法の開発など、海底地殻変動観測の高度化に向けた取り組みを進めていきたい。