

海底局位置決定における海中音速構造の影響と初期値依存性についての考察[†]

渡邊俊一*

Dependency on the sound velocity model for the GPS-acoustic seafloor positioning[†]

Shun-ichi WATANABE*

Abstract

In order to detect the dependency on the sound velocity model for the GPS-acoustic seafloor positioning with the transponder-array constraint method, I reanalyze the data with following sound velocity models : (1) using more realistic vertical profile in which the sound velocity is time-independent for the depth of more than 1200 m instead of the usual model in which the depth-independent temporal variation is estimated, and (2) using statistical values for initial sound velocity for the depth of more than 1200 m instead of the observed values. The results quantitatively revealed that both models cause no significant difference in the relative position within the observation accuracy. The vertical component of the absolute position, however, systematically depends on the sound velocity structure model. Furthermore, I found the non-linear dependence of the absolute position on the initial sound velocity as well.

1 はじめに

海上保安庁では、2000 年ごろから GPS—音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術を開発し、日本海溝や南海トラフ沿い陸側の海底で地殻変動をモニタリングしている。本観測は、測量船の地球上での位置を決める GPS 測位と、測量船から海底の音響ミラートランスポンダ（海底局）までの距離を測定する音響測距とを結合することで、海底の精密測位を実現している。

この観測において特に重要となるのは、海中の音速構造及びその時間変化による測位解への影響を適切に補正することである。しかしながら、リアルタイムでの音速プロファイル測定は不可能で

ある。そのため、離散的な実測プロファイルを基にした音速推定のプロセスが必要となる。現在、海上保安庁の観測グループで用いている海底局位置推定のための解析（局位置解析）ソフトウェア SGOBS Ver. 3.6 では、1 エポック中に数回実施される水温・塩分測定から求めた音速プロファイルを先験情報とし、最適な音速の時間変化を、局位置と交互に推定している（藤田・他、2004）。ここで、エポックとは、1 回の測位観測（20 時間程度を要する）の単位と定義する。この音速のモデル化に当たって、2 つの大きな仮定が与えられている。一つは水平成層構造の仮定であり、もう一つは、音速がすべての深さで一律に時間変化する

[†] Received September 11, 2015; Accepted November 5, 2015

* 技術・国際課 海洋研究室

Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

という仮定である。後者の仮定は、音速構造の局位置に与える影響がほぼ音速プロファイルの平均値のみに依存するという佐藤・藤田 (2004) の議論を踏まえたものである。しかし、2012 年以降は、水深が 3000 m 程度以上となる点においても観測を実施しており、それらの海域において、上記の議論の妥当性は確認されていない。また、アレイ固定一括解析 (松本・他, 2008) の適用は、局位置解の鉛直成分の安定にも貢献することが秋山・渡邊 (2015) によって確認されているが、鉛直成分に対して初期音速の誤差が与える影響についての定量的な解析は、まだなされていない。

一方で、渡邊・内田 (2016) は深海域における音速構造の安定性を各観測海域で定量的に議論しており、それをを用いたより現実的な音速モデルを導入することが可能となった。そこで、本研究では渡邊・内田 (2016) で得られた深部音速構造の安定性を踏まえ、深部で音速が変化しない場合に、局位置がどのような影響を受けるかについて調べた。加えて、過去のデータから統計的に抽出された深部音速構造を、全エポックで共通して用いた場合の局位置解析も実施し、音速統計データの適用可能性についても考察した。

2 局位置解析における音速モデルの設定

局位置解析において入力する音速プロファイル

は、XBT (eXpendable BathyThermograph profiler), XCTD (eXpendable Conductivity Temperature Depth profiler), 及び CTD (Conductivity Temperature Depth profiler) によって数時間に 1 回程度の頻度で取得された水温・塩分プロファイルから求めたものである。現在の解析では、 $t = t_0$ の時刻に実測された初期音速プロファイル $V_0(t_0, z)$ から、深さ方向にそれぞれ線形に変化する最大 6 層の音速プロファイルを作成し、海面のトランスデューサと海底のトランスポンダ間の距離を計算している。各層を分かちノードは、 $z_n = 0, 200, 400, 800, 1200, 2400$ m 及び各海域の最深部 (z_{max}) と定めており、各層内の平均音速および最深部の音速が初期プロファイルと等しくなるように、各ノードにおける音速 $V_0(t_0, z_n)$ を深い側から順に計算している (Fig. 1)。その上で、全ノードに対して一律な補正値を時間の関数として与えて、その補正量を最適化する。つまり、ノードとして指定されるすべての深さ z_n における音速を、

$$V(t, z_n) = V_0(t_0, z_n) + a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2$$

と、時間変化する水平成層構造として表し、 a_0, a_1, a_2 を全ての z_n に共通な変数として解いている。この手法では音速構造の深さ方向の時間変化

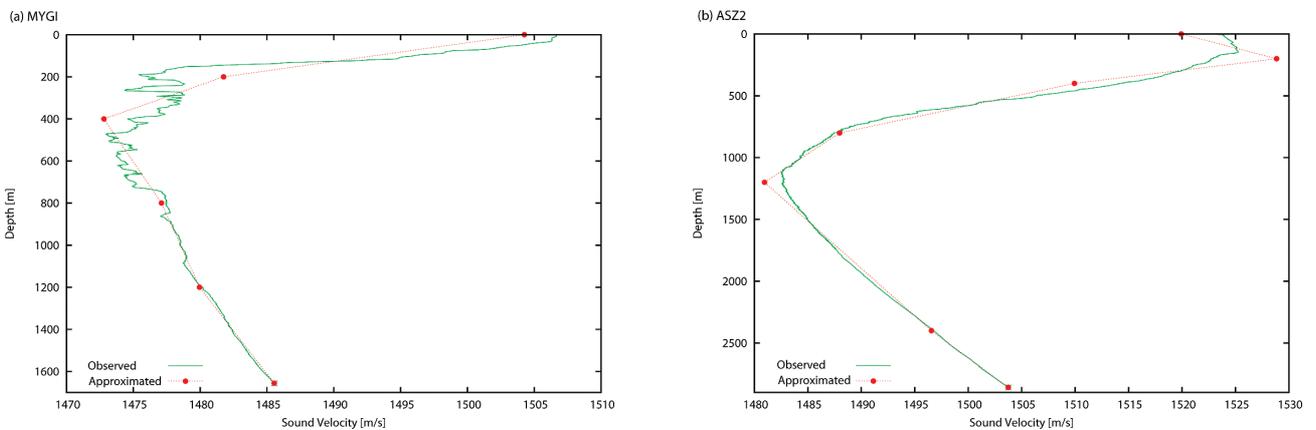


Fig. 1. Approximation of sound velocity profiles at (a) MYGI and (b) ASZ2 for positioning. Green lines and red circles indicate the observed profiles and the approximated velocities at each node, respectively.

図 1. 局位置解析に用いる近似音速プロファイルの例。(a) 宮城沖 1, (b) 足摺沖 2。緑線が実測値によるプロファイル、赤丸が各ノードにおける音速をそれぞれ示す。

情報が無視されることとなるが、佐藤・藤田 (2004) によると、解析結果に影響を与えるのは、音速プロファイルの形状よりもむしろ音速の平均値であることが示されており、問題がないとされてきた。以後、この音速推定手法を従来スキーム (SGOBS Ver. 3.6) と呼ぶ。

一方で、渡邊・内田 (2016) により、水深 1200 m 以深における音速の経時変動幅は 1 m/s 程度であることが確認された。そこで、本稿では、この知見を局位置解析に応用するため、より現実的な音速モデルとして、

$$V(t, z_n) = V_0(t_0, z_n) + a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2$$

($z_n = 0 \text{ m}, 200 \text{ m}, 400 \text{ m}, 800 \text{ m}$)

$$V(t, z_n) = V_0(t_0, z_n)$$

($z_n = 1200 \text{ m}, 2400 \text{ m}, z_{max}$)

を考える。つまり、1200 m 以深のノードにおける音速を固定し、それより浅部の音速が時間とともに変化すると仮定する。ノード間の音速は線形に補間されるため、観測海域が 1200 m より深い場合、800 m から 1200 m にかけて、音速の時間依存性が線形に減少し、1200 m 以深では時間変化が生じなくなることを意味する。以後、この手法を浅部音速変化スキーム (SGOBS Ver. 3.7) と呼ぶ。本研究では、まず、これらの手法の違いが局位置解析結果に与える影響について調べた。

次に、渡邊・内田 (2016) によって示唆された音速の統計平均プロファイルの実際の解析への適用可能性についても定量的に調べるため、浅部音速変化スキームを用いて、以下の 3 種類の初期音速モデルに対する局位置解析結果を比較した。まず、各エポックで実測された音速プロファイルのうち、1200 m 以深を統計平均プロファイルに置き換えたモデルである。以下ではこのモデルを SPB (Statistically averaged velocity Profile for Bathypelagic zone) モデルと呼ぶ。次の二つは、SPB モデルの統計平均プロファイル領域に対して、水温・塩分の経時変動の標準偏差 σ について、 $\pm 1\sigma$ を加えた場合に計算される音速プロ

ファイルを用いたモデルである。これらは、それぞれ $SPB \pm 1\sigma$ モデルと呼ぶこととする。

3 実データにおける局位置解のモデル依存性

本研究では、東北沖を代表する観測点として「宮城沖 1 (MYGI)」を、黒潮流域かつ 3000 m 級の深海域を代表する観測点として「足摺沖 2 (ASZ2)」を選択し、解析を実施した (観測点の詳細については Table 1 に記載)。ちなみに、宮城沖 1 は、他点に比べて深部まで音速の不定性が大きい観測点であるという特徴がある (渡邊・内田, 2016)。

Table 1. Positions of observation sites.

表 1. 観測点の位置および解析期間。

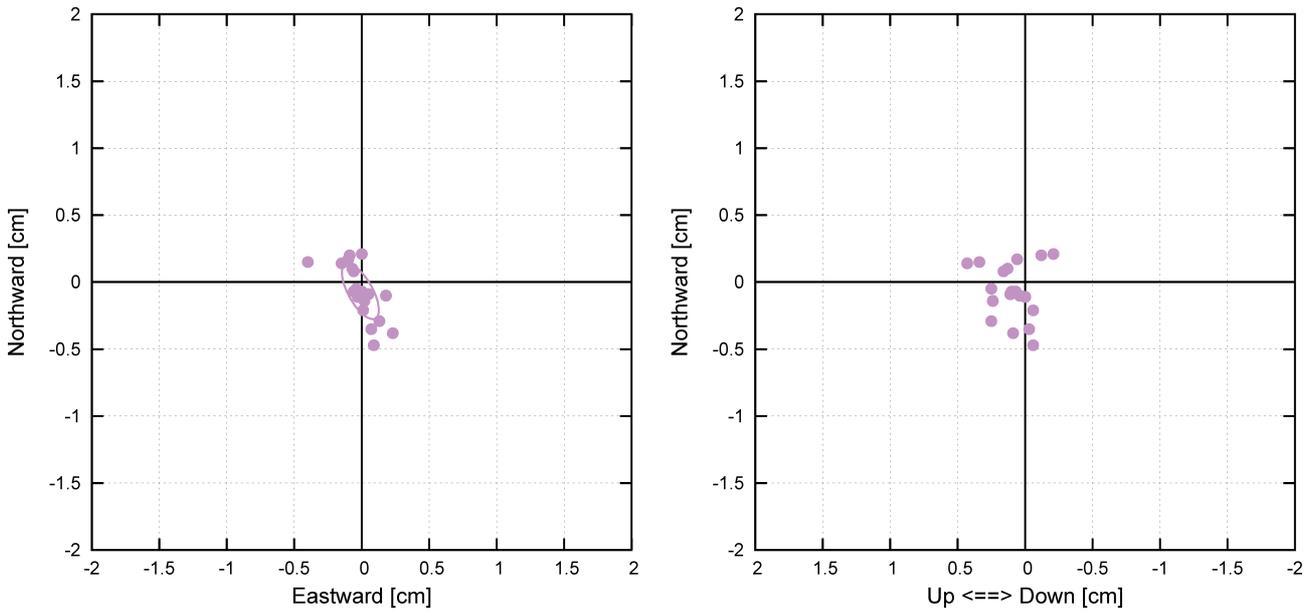
Site	Latitude	Longitude	Depth [m]	Observation period [month/year]	number of epoch
宮城沖 1 (MYGI)	38-05.0 N	142-55.0 E	1670	03/2011 - 04/2015	19
足摺沖 2 (ASZ2)	31-55.9 N	133-34.6 E	2940	01/2012 - 05/2015	9

3.1 推定スキームへの依存性

まず、従来スキームと浅部音速変化スキームとの比較を行うため、それぞれのスキームでアレイ固定一括解析による局位置解析を実施し、その結果を観測エポックごとに比較した。その結果を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 は、実測データを初期値とした浅部音速変化スキームによる局位置解 (測地座標系に対する絶対位置) を基準として、実測データを初期値とした従来スキームによる局位置解の偏差をエポックごとに示したものである。この結果を見ると、どちらの海域でも、異なる二つの手法による局位置の差は水平成分で 0.5 cm 以内に収まっている。このことから、佐藤・藤田 (2004) によって確認された音速プロファイル形状の局位置への非依存性が、3000 m 級の海域においても確認された。ただし、足摺沖 2 における局位置の鉛直成分については、偏差は現行精度以下の 1 cm 以内に収まっているものの、0.5 cm 程度の系統的なずれが見られる。局位置の鉛直成分は、局位置解析において推定される音速との分離が困難なため

(a) MYGI



(b) ASZ2

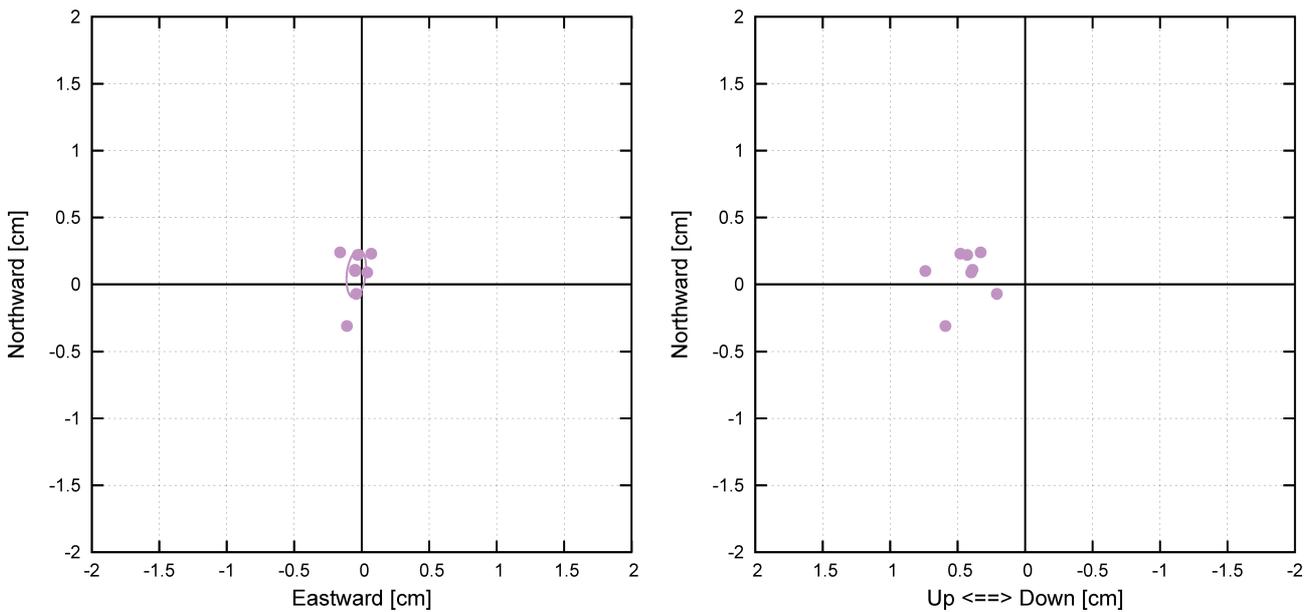


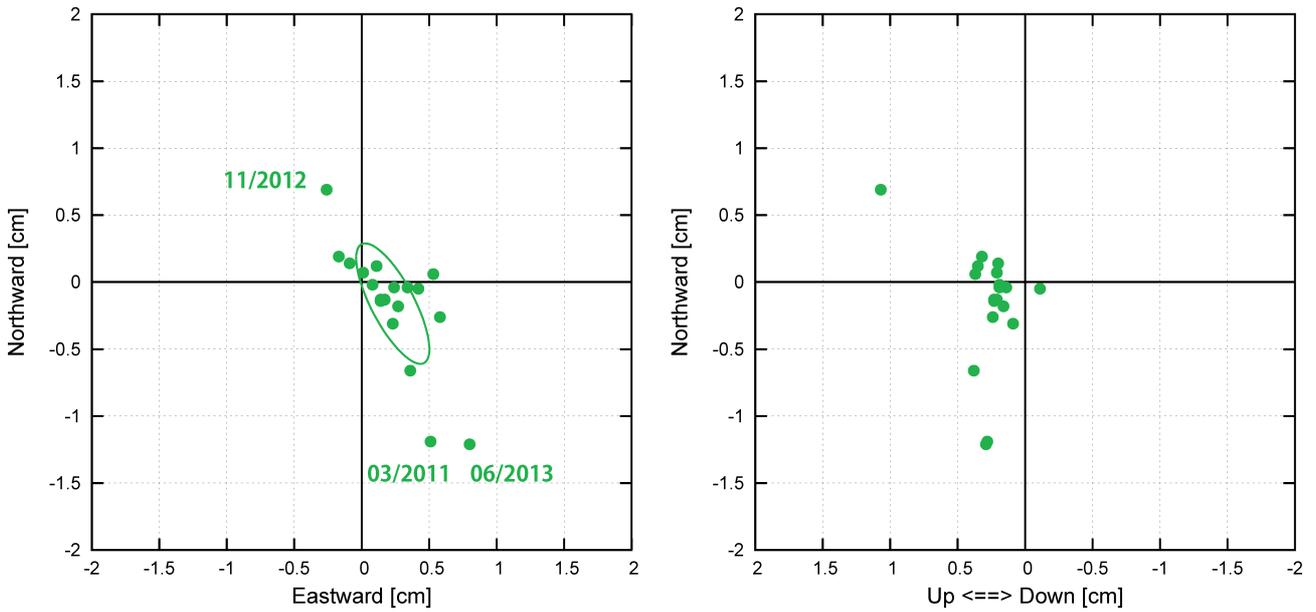
Fig. 2. Differences of each-epoch position by SGOBS Ver. 3.6 from position by SGOBS Ver. 3.7 at (a) MYGI and (b) ASZ2. Observed velocities are used in the analysis. Horizontal differences are shown on the left side with standard deviation ellipse. Vertical-northward differences are shown on the right side.

図 2. (a) 宮城沖 1, (b) 足摺沖 2 における, SGOBS Ver. 3.6 による局位置解の, SGOBS Ver. 3.7 による局位置解からの差. 差は, エポックごとに示している. 初期音速には, いずれも実測音速を用いた. 左は水平成分, 右は鉛直成分と南北成分をそれぞれ示す. 水平成分の図中の楕円は標準偏差を示す.

に音速解析スキームの影響を受けやすく, このような系統的な差が生じることは十分考えられる. 逆に, 解に系統的な差が生じることは, 局位置解がスキーム依存していることを意味し, 今後の測

位精度向上を目指す上で重要な情報であるともいえる.

(a) MYGI



(b) ASZ2

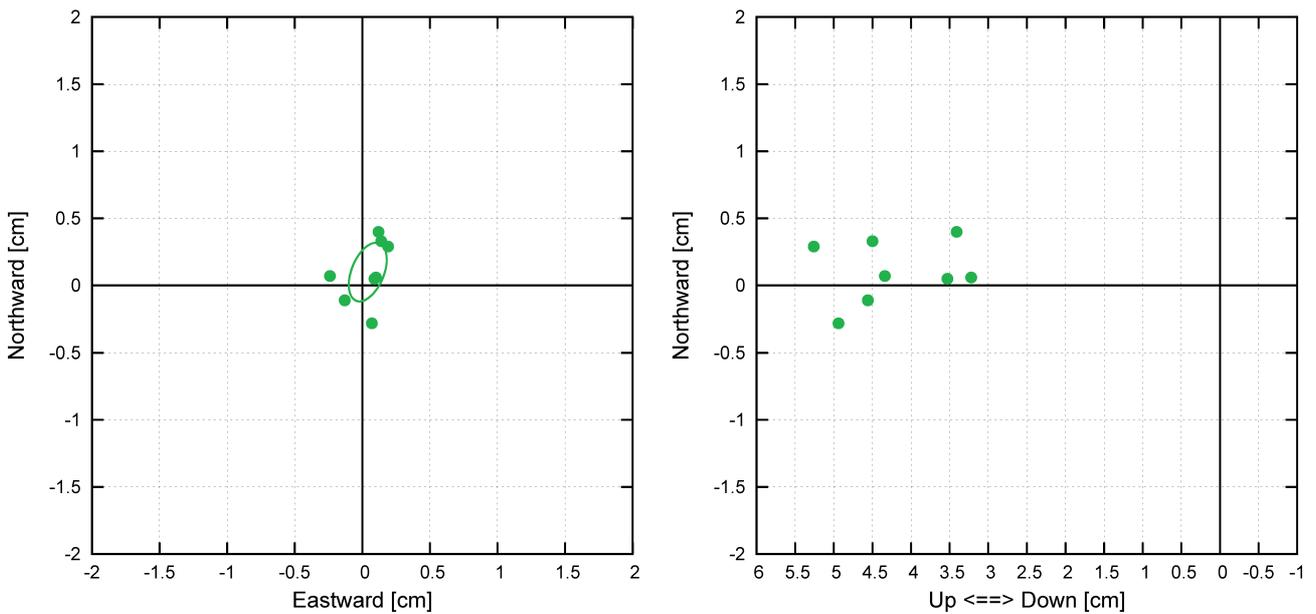


Fig. 3. Differences of each-epoch position with the SPB model from position estimated from observed velocities at (a) MYGI and (b) ASZ2. SGOBS Ver. 3.7 is used for the analysis. Horizontal differences are shown on the left side with standard deviation ellipse. Vertical-northward differences are shown on the right side. Epochs with large difference are indicated with month/year.

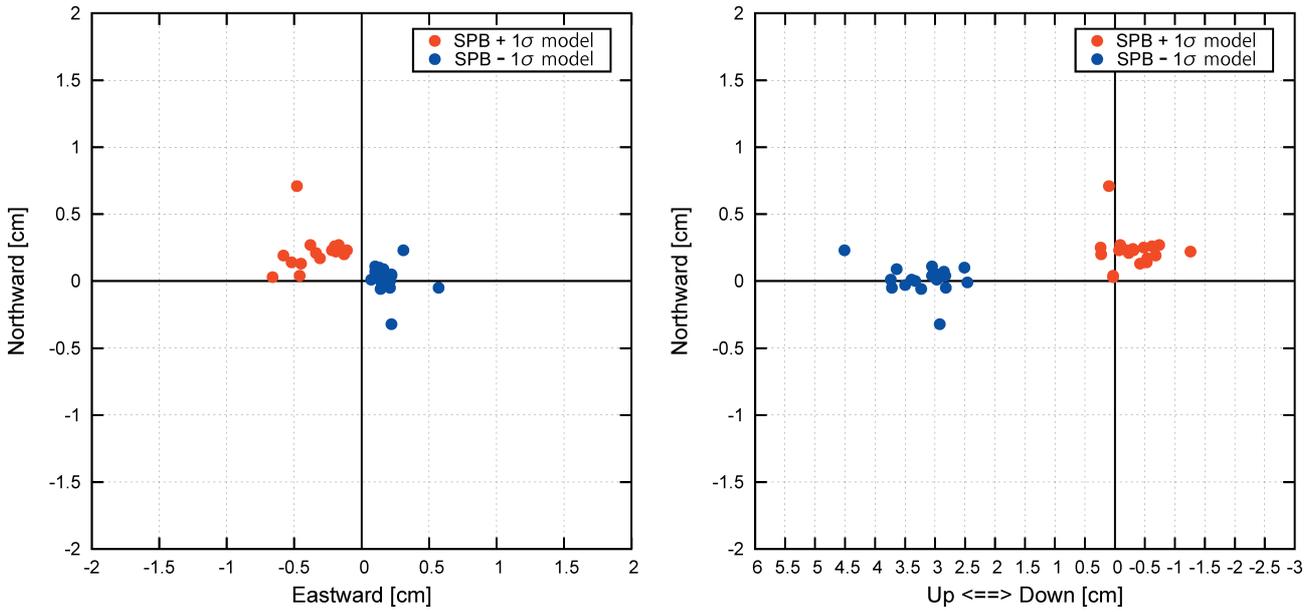
図 3. (a) 宮城沖 1, (b) 足摺沖 2 における, SPB モデルによる局位置解の, 実測音速による局位置解からの差. 差は, エポックごとに示している. 音速推定手法としては, SGOBS Ver. 3.7 を用いた. 左は水平成分, 右は鉛直成分と南北成分をそれぞれ示す. 水平成分の図中の楕円は標準偏差を示す. (a) における図中の数字は, 比較的大きな差が見られたエポックを月/年で示している.

3.2 音速初期値への依存性

本節では, 局位置解の音速初期プロファイル依存性について確認する. ここでは, 深海域の音速

が安定していることを前提とした解析となるので, いずれの計算についても, 浅部音速変化スキームを用いた解析結果を示す.

(a) MYGI



(b) ASZ2

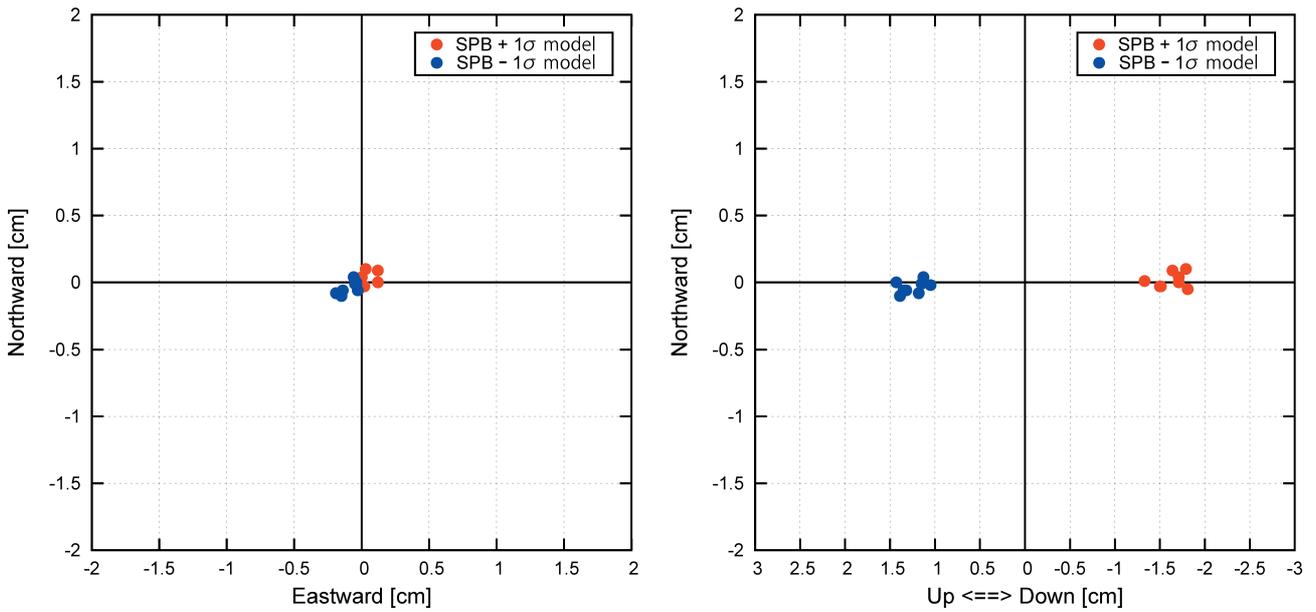


Fig. 4. Differences of each-epoch position with the SPB+1 σ model (red) and the SPB-1 σ model (blue) from position with the averaged velocity model at (a) MYGI and (b) ASZ2. SGOBS Ver. 3.7 is used for the analysis. Horizontal differences are shown on the left side. Vertical-northward differences are shown on the right side.

図4. (a) 宮城沖1, (b) 足摺沖2における, SPB+1 σ モデル(赤)及びSPB-1 σ モデル(青)による局位置解の, SPBモデルによる局位置解からの差. 差は, エポックごとに示している. 音速推定手法としては, SGOBS Ver. 3.7を用いた. 左は水平成分, 右は鉛直成分と南北成分をそれぞれ示す.

Fig. 3に, SPBモデルによる結果を, 実測データを用いた場合の局位置解からの偏差として示す. 結果の傾向はそれぞれの海域で異なってい

る. 足摺沖2では, 位置変化の水平成分は0.5 cm以内に収まっている一方で, 鉛直成分は3-6 cm程度浅く求められており, エポックごとのばらつ

きも大きい。宮城沖1では、2012年11月のエポックを除いて鉛直位置の差は0.5 cm以内に収まっているものの、水平成分については差が1 cmを超えるエポックも見られる(2011年3月と2013年6月のエポック)。このうち、2012年11月のエポックについては、統計データから求めた平均音速と観測時の実測音速との差が大きく、水深1200 mで2.5 m/s、1600 mでも1.6 m/sの差があったため、特に鉛直方向において局位置が適切に求まらなかったと推察される。2011年3月のエポックについては、東北地方太平洋沖地震直後の緊急観測のため、音響測距データ数が他のエポックに比べて少ない(通常の3分の1程度)ことが局位置解の収束に影響していると考えられる。一方で2013年6月のエポックは、他2つのエポックのような特別な事情は見られないため、例えば観測時に音速構造が傾斜していたなど、現在の水平成層モデルを用いたスキームでは十分にモデル化できていない要素の影響を受けている可能性がある。このエポックに限らず、初期音速の違いによる水平方向の差が、北西-南東方向に卓越して見られることも、この海域に特徴的な音速構造が存在している可能性を示唆している。実際に、渡邊・内田(2016)も、この海域で冷水塊の短期的な侵入を確認している。こうした初期値依存性については、その影響は現在の測位精度よりも小さいが、今後、高精度な解析スキームを開発するために、より多くの事例に対する調査が重要となるであろう。

次に、SPBモデルを基準とした $SPB \pm 1\sigma$ モデルの結果を、Fig.4の赤、青のプロットとして、それぞれ示す。鉛直成分については、いずれのモデルも ± 1 cm程度にばらついており、絶対値としては $SPB - 1\sigma$ モデルで正の方向、 $SPB + 1\sigma$ モデルで負の方向にそれぞれシフトしている。これは、測量船-海底局間の距離を音波の往復走時から求める際、仮定する音速が真値に比べて大きいほど距離を大きく見積もってしまう、つまり海底局がより遠くにあると計算してしまうことに起因する。シフト量に注目すると、宮城沖1では、

$SPB + 1\sigma$ モデルでの負のシフト量が小さい。これは、解析における局位置推定と音速推定との非線形性を反映したものと思われる。水平成分についても、宮城沖1と足摺沖2の双方で、系統的な差が見られる。特に宮城沖1のずれは顕著であり、その差と鉛直位置の非対称性には何らかの関係があるものと推察される。ここで、渡邊・内田(2016)において、宮城沖1の1200 m以深における水温の標準偏差が他点と比べて大きくなっていったことを踏まえると、一つの可能性として、宮城沖1では初期音速モデル間の差が大きい(すなわちパラメータに与えた擾乱が大きい)ために、解が受ける非線形の影響が大きくなったと考えられよう。しかし、こうした議論は、より多くの観測点で同様な解析を、例えば $SPB \pm 2\sigma$ モデルなども含めて実施し、与える擾乱の絶対値との比較においてなされるべきであり、今後の研究を期待したい。その上で、もしこうした非対称性が特定の観測点を特徴づける要素であるとわかれば、その観測点特有の非成層音速構造の推定といった議論にもつながるだろう。

4 結論

本研究では、まず、解析時に推定する音速について、より現実的なモデルとして、時間変化項を深さに依存させた場合の局位置解と従来手法による局位置解とを比較した。その結果、アレイ固定一括解析を使用した安定性の高い解析手法では、音速時間変化の深さ方向の重みの違いによる局位置解への影響は、水平成分・鉛直成分ともに1 cm未満であることが確認された。一方で、鉛直成分においては、ミリメートル単位ではあるものの、系統的な差が表れることも確認された。本研究では直観的に現実的であると考えられる音速変動モデルを実装したが、音速推定スキームの違いでこのような偏差が生じることは、個々のスキームの有効性についての定量的な検証の必要性を示唆する。この視点は今後の精度向上においても重要で、解のふるまいのスキーム依存性について、シミュレーションなどを用いた調査も必要となるで

あろう。

次に、深部音速の初期値として渡邊・内田(2016)で示された統計平均値およびその標準偏差の幅で全エポックに亘って共通のプロファイルで置き換えた場合の局位置解のふるまいについて調べた。その結果、現在求められている水平方向のエポック間相対変位としてのセンチメートルという精度では、顕著な影響を与えないことが確認された。しかしながら、宮城沖1の事例において詳細を見ると、全エポックに亘る同一プロファイルの適用によって生じる局位置の偏差は、特定の水平方向に相関を持ち、さらに一部のエポックにおいてはより大きな値となることもわかった。このような個別の海域・エポックにおけるずれに着目することで、現在の推定法でモデル化しきれていない構造、例えば今回のいずれの手法でも仮定されていない水平傾斜構造や冷水塊の侵入といった空間構造に起因する誤差の抽出などについての考察が深まると期待される。

さらに、宮城沖1における $SPB \pm 1\sigma$ モデルとSPBモデルとの比較からは、音速初期値擾乱の非線形的な効果についても示唆された。これも相対的な変位という意味では現在の観測精度以下であるものの、今後、音速の統計データを適用する際には注意を要する効果であり、さらなる調査が求められる。

謝 辞

本研究の基盤となっている海底地殻変動観測は、歴代の航法測地課・航法測地室及び海洋防災調査室員により開発されたものである。データの取得には、測量船「昭洋」「拓洋」「明洋」「海洋」乗組員に協力いただいている。また、匿名の査読者には本論文の改善に資する有益なコメントをいただいた。記して感謝する。

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.
- 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.
- 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.
- 佐藤まりこ・藤田雅之(2004)海底地殻変動観測における海中音速誤差の局位置への影響について, 海洋情報部技報, 22, 42-49.
- 渡邊俊一・内田徹(2016)日本沿岸西太平洋海域における同一海域での海中水温・塩分プロファイルの時間的安定性の検証, 海洋情報部研究報告, 53, 57-81.

要 旨

本研究では、海底地殻変動観測のアレイ固定一括局位置解析における音速構造モデル及び初期値の解への影響について、以下の2つの場合について調べた。(1)音速の時間変化について、浅部は変化するが深部の音速は変化しないという、より現実的なモデルを使用した場合(現在の解析では音速の時間変化はすべての深さに一律に与えている)。(2)初期音速として、1200 m以深を観測時の実測値ではなく過去の統計データで置き換えた場合。その結果、いずれの場合についても、現在の観測精度を上回るような差が、相対変位において生じないことが定量的に確認された。一方で、絶対位置においては、音速構造モデルに依存する系統的な偏差や初期値の非線形効果が生じていることも明らかとなった。