

GNSS-A 測位における測位解と音速変化の関係[†]

石川直史*

Relationship of the uncertainty between the positioning and the sound speed in GNSS-A seafloor positioning[†]

Tadashi ISHIKAWA*

Abstract

We investigated the influence of the variation in the undersea sound speed on the solution of GNSS-Acoustic seafloor positioning. Our results indicated that the horizontal components of the seafloor position are almost independent of the sound speed. On the other hand, the vertical component has a region that depends on the sound speed. The width of this region can be interpreted as the resolution of the vertical positioning and depends on the analysis method and the quality of the data. Therefore, the dependency of the positioning on the sound speed can be a quality indicator for the analysis and data.

1 はじめに

GNSS-音響測距結合方式（以下、GNSS-A と呼ぶ。）による海底地殻変動観測は、海底の 3 次元絶対座標を測定できる唯一の技術であり、海洋情報部では、2000 年から本格的な観測を開始している。

本観測は、GNSS 測位によって決定された船の位置と船と海底の音響トランスポンダー（海底局）の間の音波の往復時間から、海中の音速構造を介して、海底局の位置を求めるものである。これは、軌道暦によって決定された衛星の位置と衛星から陸上のアンテナへの電波の伝播時間から、光速度を介して、地上のアンテナ位置を求める GNSS 測位と類似する。

精度の高い推定のためには、海中の音速構造を正確に与える必要があるが、時間・空間で複雑に変動する海中の音速を正確に把握することは実際

上不可能であるため、解析では、音速の補正項を推定パラメータとして、海底局位置と同時に推定することで、精度の向上を図っている（例えば、藤田 他, 2004 ; Fujita et al., 2006 ; Yokota et al., 2018）。

この測位技術における最大の誤差要因は、海中の音速構造の不定性である。佐藤・藤田（2004）は、音速構造に誤差を与える数値実験により測位解の誤差応答について調べた。水平方向については観測データを空間的にバランス良く取得することで音速誤差の影響を小さくすることができる一方で、上下方向には観測データの分布によらず音速誤差の影響が直接的に現れることを示した。これは、水平方向のようにデータをバランス良く取得できる方向に対しては、音速と位置座標が分離するのに対し（背景の音速場を含め完全に対称な場合は、位置座標は音速に依存せずに決定でき

[†] Received September 21, 2018; Accepted November 6, 2018

* 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

る), 上下方向に関してはバランス良く取得することは不可能であることから, 上下方向の位置座標と音速が分離せず, 解析の中で両者を独立のパラメータとして適切に評価することが難しいことを示唆している.

このように, 測位精度にはデータの空間バランスが大きく影響するが, 佐藤・藤田 (2004) の検討は, 航走しながらの観測が不可能で, 流れ・風まかせで理想的な空間バランスでデータを取得することが困難であった漂流観測時代のものであった. 本稿では, 音響観測装置を船底に設置し航走しながらの観測が可能となって以降のデータを用い, GNSS-A 解析における音速の初期値依存性及びデータの空間配置が与える影響について改めて検討を行った.

2 測位解の音速初期値依存性に対する調査

本研究では, サンプルデータとして, 主に TOS1 観測点の 2018 年 4 月の観測データを使用する. 高知県の沖合い水深約 1,000 m の地点に設置してある TOS1 観測点は, 黒潮の流軸から離れており, 音速構造が比較的安定しているため, これまでの観測データから比較的安定した解が得られており, 本研究の検証に適している.

海底の観測点は, 対角線が水深と同じ長さとなるように東西南北に四角形に設置してある 4 台の海底局を一つのアレイとして構成されている. 測量船は, 図 1 のようにアレイの中心 (平均位置) に対して対称となるようにバランスの良い測線上を航走しながら音響測距を行う.

解析では, 観測精度を向上させるため, 海底局位置の推定とともに海中の音速も同時に推定している (Fujita et al. 2006). 図 2 に解析アルゴリズムの模式図を示す. まず, 観測で得られた音速を固定パラメータとして, 観測データである音波走時の残差が最小となるように海底局の位置が最小二乗的に推定される. 次に推定された局位置を固定パラメータとして, 音速の変動を関数で表現した時の基底関数の係数を最小二乗推定する. この推定ループを海底局位置が収束するまで繰り返す.

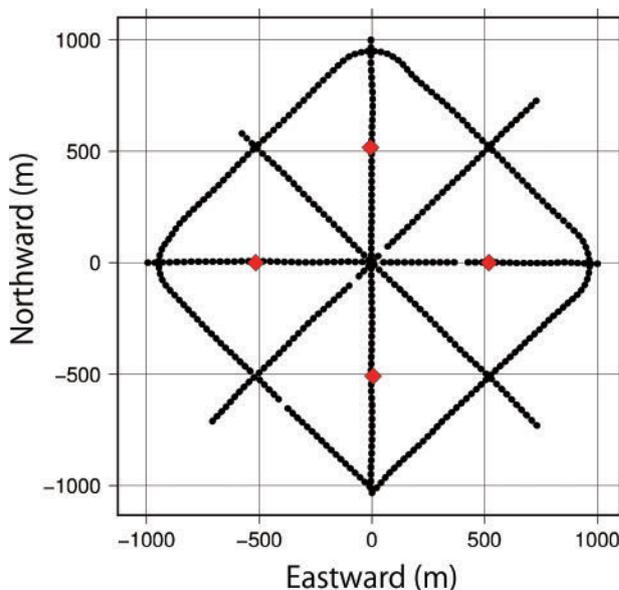


Fig. 1. Track lines of survey vessel used in this study. Black circles indicate acoustic ranging points, and red diamond-shapes positions of seafloor acoustic transponders.

図 1. 本研究で使用したデータの測線配置. 黒丸が音響測距データを取得した地点で, 赤ひし形が海底局.

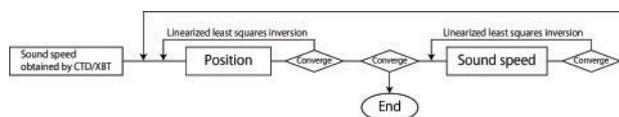


Fig. 2. Analytical algorithm flow of parameter estimations applied to obtain the positions of seafloor acoustic transponders.

図 2. 海底局位置推定の解析アルゴリズムの流れ

行う.

最小二乗推定では, 推定パラメータはその初期値に強く依存せずに推定されることが望ましい. 図 2 のアルゴリズムにおける位置と音速の個別の推定では, 推定パラメータの初期値依存性はほぼない. 一方で, 入力する固定パラメータに対しては依存性がある. 具体的には, 最初に推定される海底局位置は音速初期値に依存し, 次に推定される音速はその海底局位置に依存するために, 音速初期値が音速推定プロセスに間接的に影響を与えることになり, 最終的に収束した海底局位置までその影響が残るおそれがある. 従って, 音速 (水温・塩分) 観測の不確かさが最終的な測位結果に

与える影響を調査し、この観測システムの性質を明らかにすることが、今後の観測の高度化のために重要な鍵となる。

渡邊 (2016) は、過去の音速観測データの統計から得られた標準偏差を用いて、音速初期値を観測値から $\pm 1\sigma$ ずらしたときの測位解の挙動についての調査を行った。本稿ではさらに、音速初期値を連続的に変化させた時の挙動について調べる。渡邊・内田 (2016) における TOS1 観測点の過去の統計データによると、水深 800 m における音速の標準偏差は 0.8 m/s 程度であることから、ここでは、音速初期値を観測で得られた値から ± 1 m/s の範囲で 0.1 m/s 刻みで変化させる。測位解は音速の平均値に強く依存する (佐藤・藤田, 2004) ことから、音速の変化は海面から海底まで一律に与えた。

通常の解析では、音速推定は数時間程度の時間窓による変動の推定 (主に日周・半日周等の長周期の時間変動に相当) と 20 分程度の時間窓による変動の推定 (主に浅部の空間変動に相当) の 2 段階で実施している。本稿では、音速の平均値の変化による影響を調べるために、最初の長周期変動のみを推定した結果を用いる。

2.1 音速を推定しない場合

最初に、図 2 の解析アルゴリズムにおける最初の位置推定のループ、すなわち音速推定を行う前の測位解の振る舞いを調べる。結果を図 3 に示す。アレイの平均位置座標に注目すると、水平方向は大きな変動がないのに対し、上下方向については音速と完全に相関するように変動している。東西南北の個別の局の動きを見ると、音速が速いときはアレイ全体が沈降して四角形が拡大し、音速が遅い時にはその逆に上昇して四角形が縮小するような動きとなっていることが分かる。これは模式的に示すと図 4 のような状況になっている。データをアレイに対して対称にバランスよく取得することで、水平方向の平均位置の測位解については音速とは独立した形になり、音速依存性が小さくなるが、上下方向については、測位解と音速

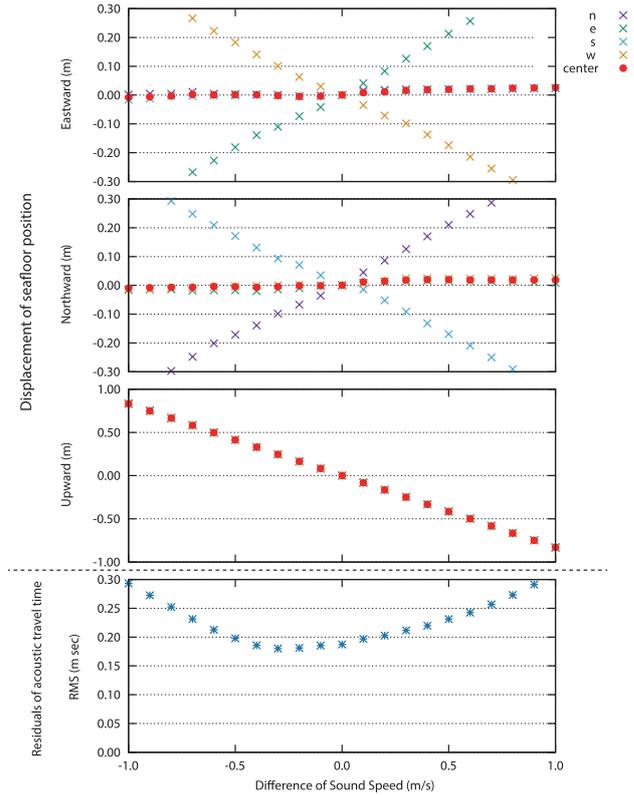


Fig. 3. Difference in seafloor transponder positions with various sound speeds, without sound speed estimation. Cross-shapes indicate positions of each transponders in four directions (N, E, W, and S), and red circles their mean position.

図 3. 音速を変化させたときの海底局の位置の変動。音速の推定は行っていない。ばつ印は東西南北の各海底局の位置を表し、赤丸は 4 局の平均位置を表す。

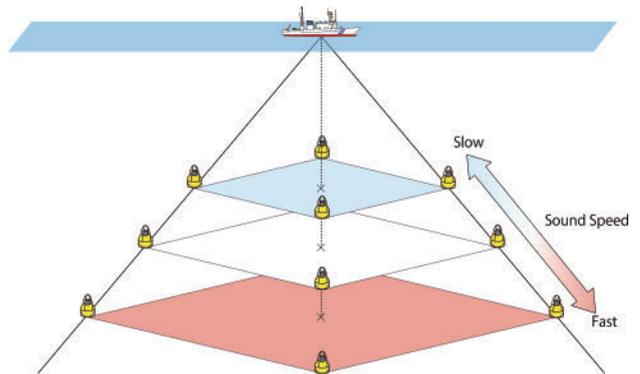


Fig. 4. Schematic figure indicating the vertical movements of seafloor transponder array by sound speed variation.

図 4. 音速の変化による海底局アレイの上下動を示した模式図。

が相関関係にあり、両者を独立に扱うことが難しいことを示している。このことから、上下方向の測位解の精度は音速の精度に直接依存することになる。要求精度内で正しい音速を与えることができれば、この段階で得られた測位解を最終結果とすることができるが、図3の例の場合、0.1 m/sの音速変化で約8 cm 上下方向の位置が動く。これは水温にして0.1度にも達しない程の僅かな変化であり、時間・空間で複雑に変動する音速をこの精度で正確に把握することは現実には不可能である。また、水平方向についても、アレイに対して完全に対称にデータを取得することが不可能であることから、平均位置の変動が生じ、図3の場合、最大で2 cm 程度というセンチメートルレベルの測位に影響する変動が見られる。

ここで、図3の最下段に示した各音速で解いた時の測位結果の残差に注目すると、-0.5 m/s から0.0 m/sの間に残差が小さくなる領域があることが分かる。図4の概念図のように船が完全に中心のみに位置している場合は、音速変化による残差の変動をアレイの拡大・縮小によって完全に吸収できるためこのような残差の変動は表れない。しかしながら、実際行っている図1のようなアレイ周囲の広い領域をカバーする観測測線では、アレイの平均位置に対しては対称となっているものの、各海底局に対しては対称性が崩れているために、音速変化による残差変動を吸収しきれずに、最適解からずれるほど残差が大きくなる傾向となる。このことは、音速と上下の測位解が分離可能であり、最適な音速値を解析的に推定することが可能であることを示唆している。

2.2 音速を推定した場合

次に、図2の解析アルゴリズムにおける音速推定を行い、全体の解析ループを収束させた場合の測位解の変動を図5に示す。音速推定の効果により、上下方向の測位解における完全な相関関係はなくなり、変動の幅が大幅に軽減される。水平方向の変動についても、最大で5 mm 程度と、センチメートルレベルの測位に十分なレベルまで小さ

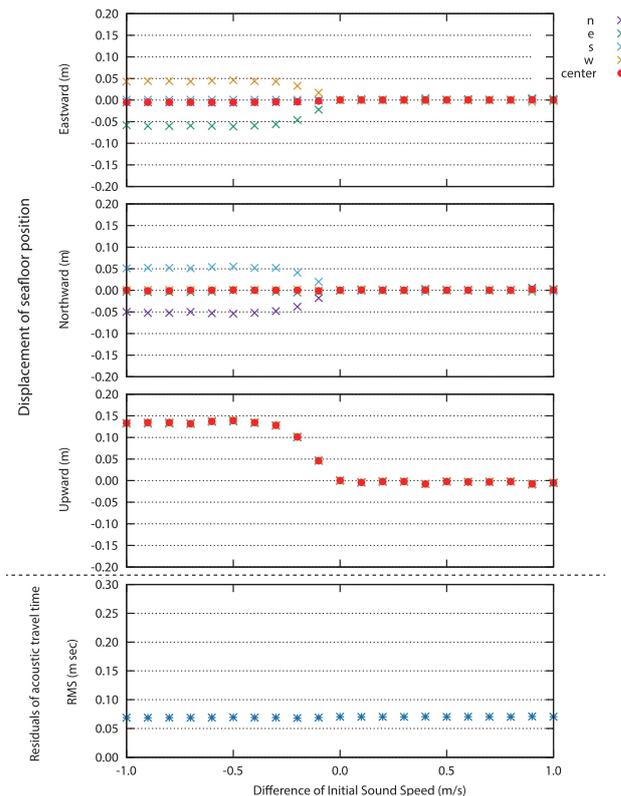


Fig. 5. Same as Fig. 3, but with sound speed estimation. 図5. 音速を推定した場合の海底局の位置の変動。図の表記は図3と同様。

くなる。また、解析結果の残差の変動がごく僅かになっており、どの解も最小二乗法的に同等の解となっていることが分かる。しかしながら、上下方向には、約13 cmの段差が残っており、音速と上下位置の相関関係が解消できない領域が一部残る。

これは、以下のように解釈できる。最小二乗推定ではある初期値から出発して、残差が最小になる解を最適値として求める。このときの推定パラメータと残差の関係を概念的に図示したものが図6である。残差が最小となる位置がシャープな形状をしている理想的なケースでは、どのような音速初期値から出発しても残差最小の位置までスムーズに移動し、音速の最適解がユニークに推定される。一方で、残差が最小値から大きく変動しない平坦な領域が広がっていると、その領域の外側では初期値によらず領域両端付近までは音速が修正されるものの、領域内ではほぼ同等の残差を持つ解の集合となっているため、平坦領域の幅の

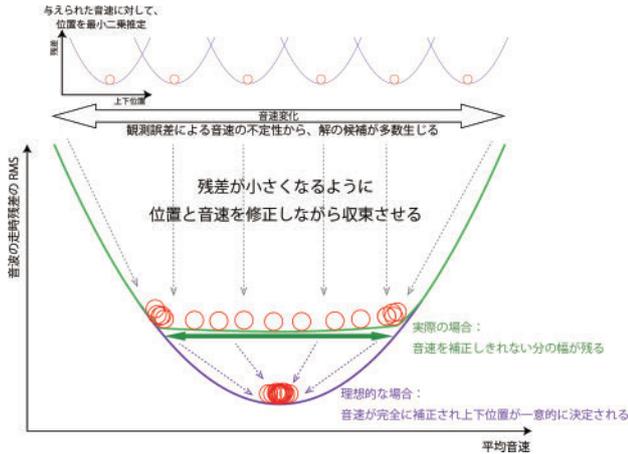


Fig. 6. Schematic figure of residual distribution in least-square estimation.

図 6. 最小二乗推定における残差分布の概念図

分だけ解の不定性が残る。図 3 の残差が小さくなっている領域がこの平坦領域に相当し、この領域内の音速値に対して図 4 の段差が生じていることが分かる。渡邊 (2016) では、音速初期値を $\pm 1\sigma$ 変化させたときの測位解を調べ、上下位置が $+1\sigma$ の場合と -1σ の場合で 2 つのクラスタ状に分離した結果を得たが、この 2 つのクラスタは図 4 における上下の段に対応していると考えられる。

図 4 の例の場合、音速初期値が観測値に対して、 $+0.0$ m/s から -0.3 m/s となる値がこの領域に該当する。0.3 m/s の音速変化は、水温にして概ね 0.1 度程度で、観測精度以下である。従って、ここでの音速推定は、最適な音速の候補を観測精度以下の幅まで絞り込むことができていると言える。これ以上絞り込むことができないこの領域は、本観測・解析システムにおける上下方向の測位解の最小分解能と解釈することができる。ただし、必ずしも上下方向の真の位置がこの範囲にあるとは限らないことには注意する必要がある。なぜならば、残差を最小にする解が尤も確からしいという統計的な評価は、偶発的な誤差がある場合のみに適用され、系統的な誤差によって解の分布がバイアス的にずれている場合には適用できないからである。本観測の場合、大気場や海洋場の擾乱などの未知の自然要因による系統的誤差が生

じている可能性があり得るので結果の解釈に注意を要する。本稿では議論しないが、音速の短時間周期の変動や空間変動の推定はこのような系統的な誤差に効果があると考えられている。

次に、水深の影響について調べる。ここまで見てきた水深 1,000 m の TOS1 観測点と水深約 3,000 m の ASZ2 観測点の結果の比較を行う。ASZ2 観測点において 2018 年 4 月に取得した観測データに対して図 5 と同様の調査を行った結果が図 7 である。なお図 5 で見たように音速推定を行った場合、各解の残差に大きな違いが表れなくなるため、以降は残差のプロットは省略する。上下方向の平均位置の段差は約 17 cm になっており、水深が深くなるほど上下方向の分解能が悪化することが示唆される。また、図 8 の測線配置を見てわかるように、ASZ2 は海底地形の関係で南局が正方形からずれた位置に設置されている。こ

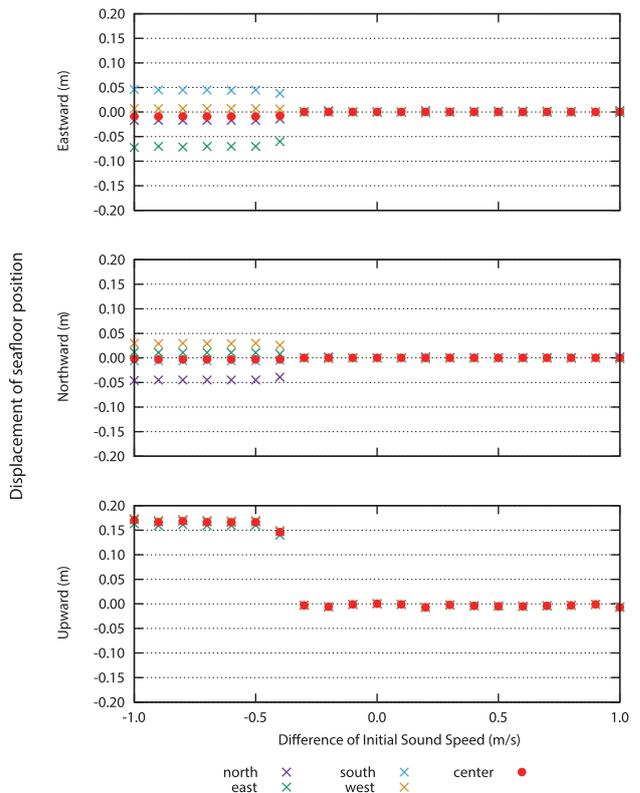


Fig. 7. The same analysis as Fig. 5, conducted at seafloor site ASZ2 observation point located at the approximate depth of 3,000 m.

図 7. 図 5 と同様の解析を水深約 3,000 m の ASZ2 観測点において実施した結果。

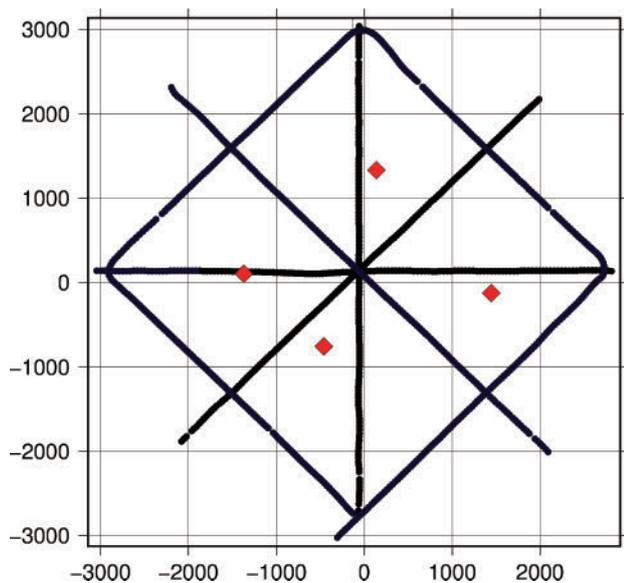


Fig. 8. Track lines of survey vessel for the seafloor site ASZ2. Abbreviations are the same as Fig. 1.

図 8. ASZ2 観測点の測線配置. 図の表記は図 1 と同様.

の影響で、水平方向の平均位置にも 1 cm 程度の段差が出現し、上下方向についても、個々の海底局の位置が上下にわずかに分離し、アレイが傾く傾向が見られる。

2.3 海底局アレイを固定して音速を推定した場合

最後に、松本・他 (2008) の方法によるアレイ固定の手法を使用したときの音速の初期値依存性について調べる。石川・佐藤 (2012) で考察されているように、アレイを固定することによって、図 4 のようなアレイの拡大・縮小をとともう下降・上昇の変動が抑制されることが期待される。

図 9 の結果を見ると上下方向の段差は約 7 cm まで低減しており、アレイ固定手法によって上下方向の解の安定性が改善されたことが分かる。

3 測線配置と音速推定の関係について

ここでは、最小二乗法による音速推定の仕組みがどのように働いているかについての詳細を調べる。ここでは、上記サブセクション 2.2 の解析で使用したデータについて、音速初期値として観測値を使用したものと初期値に ± 1 m/s を足した

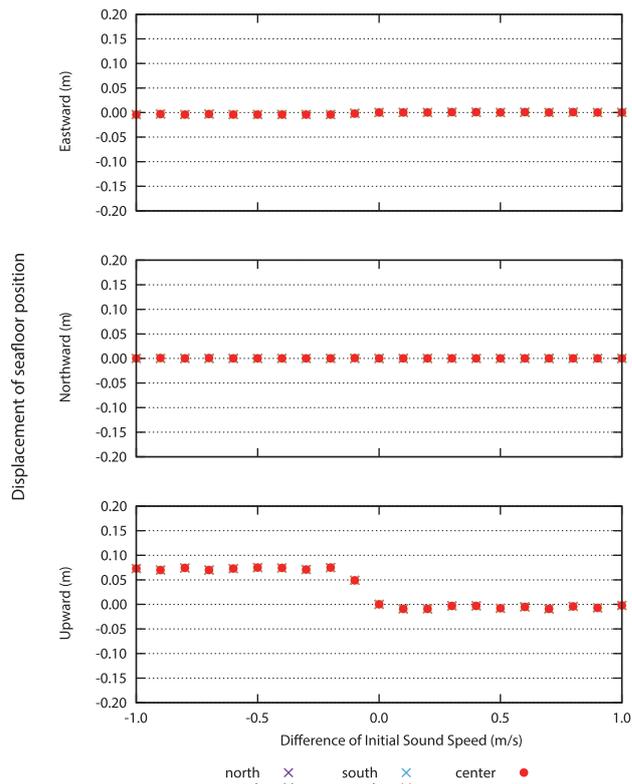


Fig. 9. The same analysis as Fig. 5, but conducted using array fixed method. Abbreviations follow that of Fig. 3.

図 9. 図 5 と同様の解析を松本 (2006) のアレイ固定手法を用いて実施した結果. 図の表記は図 3 と同様.

ときの結果を例として示す。図 10 の上段に音速初期値で解析を行ったときの音波の往復走時残差、中段に推定された音速補正を行った後の残差、下段に音速の初期値と推定された音速を示す。ここでは、アレイ固定手法は使用していない。音速の推定については、音速を時間の 2 次関数で表現し、残差が最小となるように 2 次関数のパラメータを推定する。ここでは、音速の平均値に対するバイアス的な誤差を検討するため、約 1 時間 40 分の観測時間内を 2 次関数で推定した結果 (図 10 下段の青線) を考察に用いる。

音速初期値を ± 1 m/s ずらしたときは初期の残差が大きくなるものの、音速を 2 次関数で推定することによって、ほぼ同等の残差にまで収束していることがわかる。ここで、音速推定に大きく関与しているのは、最初に 4 本ある約 20 分程度の周期で 2 次関数的に変動している残差である。

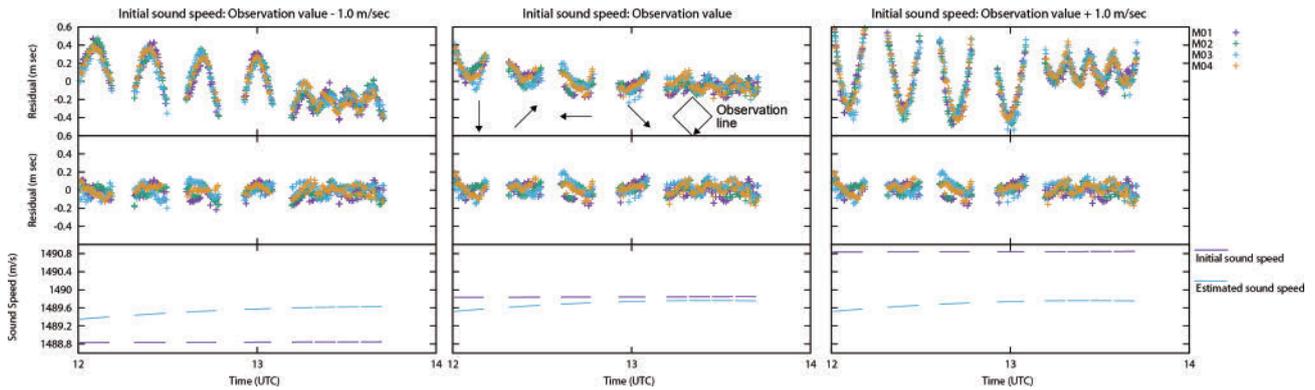


Fig. 10. Changes in residuals of acoustic travel time by sound speed correction. The upper and middle panels show residuals using initial and estimated value of sound speed, respectively. The lower panel shows sound initial and estimated value of sound speed.

図 10. 音速推定による残差の変化。上段は音速初期値を用いて解析したときの音波の往復走時残差，中段は推定された音速の時間変化関数を用いて解析を行ったときの残差，下段が音速の初期値と推定された音速を示す。与えた音速初期は、左列が観測値 - 1.0 m/sec，中央列が観測値，右列が観測値 + 1.0 m/sec である。プロットの色の違いは 4 台の各海底局の残差を表す。

これは、図 1 における 4 本の直線の測線（ケーキカット測線と呼称している。）に対応している。音速に誤差があった場合、海底局との距離が長いほど残差が大きくなる。アレイを縦断するケーキカット測線は海底局との距離が大きく変わるため、残差も大きく変動する。ここで、1 本のケーキカット測線を航走する時間が約 20 分であり、約 20 分周期の残差はこの航走時間を反映している。この残差変動は、音速の時間変動によるものではなく、平均値のずれによるバイアス的な誤差によるものなので、残差変動を小さくするように音速のパラメータ（主に 2 次関数で表現したときの定数項）を推定することで、初期音速の誤差は大きく軽減される。

測線の形状による音速推定への影響を調べるために、ケーキカット測線及びアレイの外側を周回する測線（四角形測線）について、それぞれ単独で、音速の初期値依存性を調べた結果が図 11 である。ケーキカット測線のみの場合、上下方向の段差が約 13 cm と全データを使用した図 4 の結果と大きく変わらないのに対して、四角形測線のみの場合には上下方向の段差が 30 cm 以上ある。これは、四角形測線の場合アレイ外側からのデータしかないため、音速誤差による残差の変動が小さく、音速が十分に推定されていないためと考え

られる。したがって、音速のバイアス的な誤差を補正するためには、観測エリアを縦断するケーキカット測線が必要となることがわかる。

さらに、測線の空間バランスの影響をみるためにケーキカット測線の中から南北及び東西測線のみを使用した場合の音速初期値依存性を図 12 に示す。この結果から、水平方向であっても測線に直行する方向では解が大きくばらつくことが分かる。また、上下方向については、測線に直交する方向にアレイが傾く様子が見られる。

4 まとめと今後に向けて

本研究では、GNSS-A 観測の測位解の音速初期値依存性を調べた。その結果、水平方向については初期値依存性が小さいのに対し、上下方向の解には音速初期値に依存する一定の幅の領域があることが分かった。この領域の幅は測位の最小分解能と解釈できる。このことは、観測点の地殻変動を議論する際、これまで行われてきたような最小二乗法で得られた 1 つの解のみを用いて評価することが必ずしも妥当であるとは言えず、音速（場合によっては他の誤差要因も含めた）パラメータの変化に依存した幅を持つ解として評価する必要があることを示している。今後は、パラメータの不定性を考慮した推定法（例えば、マルコフ連鎖モ

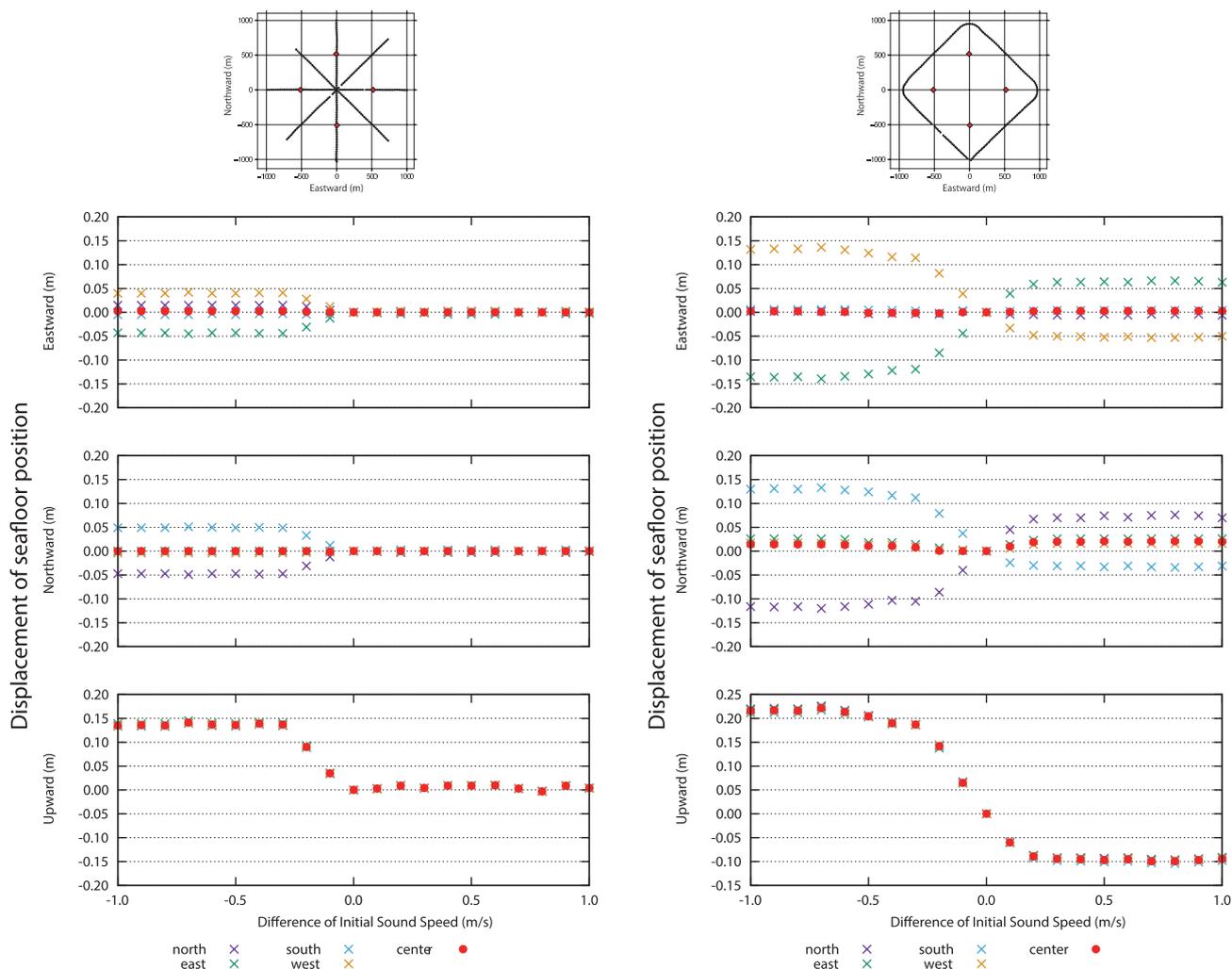


Fig. 11. The same analysis as Fig. 5, but conducted using only the straight-divided track lines, and only the square-shaped track lines.

図 11. 図 5 と同様の解析を、ケーキカット測線のみ使用した場合と、四角形測線のみを使用した場合の結果。

ンテカルロ法や粒子フィルタなど) の導入も考慮する必要がある。

アレイ固定という解析手法の改善によってこの幅が軽減したことは、本研究で行った調査が解析手法の妥当性の評価指標になりうることを示している。また、測線配置のバランスによっては上下方向のみならず水平方向にも影響が出ることから、観測データの妥当性の評価指標にもなりうる。そのため、誤差要因となるパラメータに対する測位解の応答を評価することは、今後の解析・観測の高度化に向けた開発のために有効な検証手法となる。

謝 辞

本研究のベースとなっているのは、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。また、渡邊俊一氏と横田裕輔氏には本研究をまとめるにあたり、有用な助言をいただきました。解析には国土地理院の電子基準点の 1 秒データを使用しております。記して感謝いたします。

文 献

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.

Fujita M, T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S.

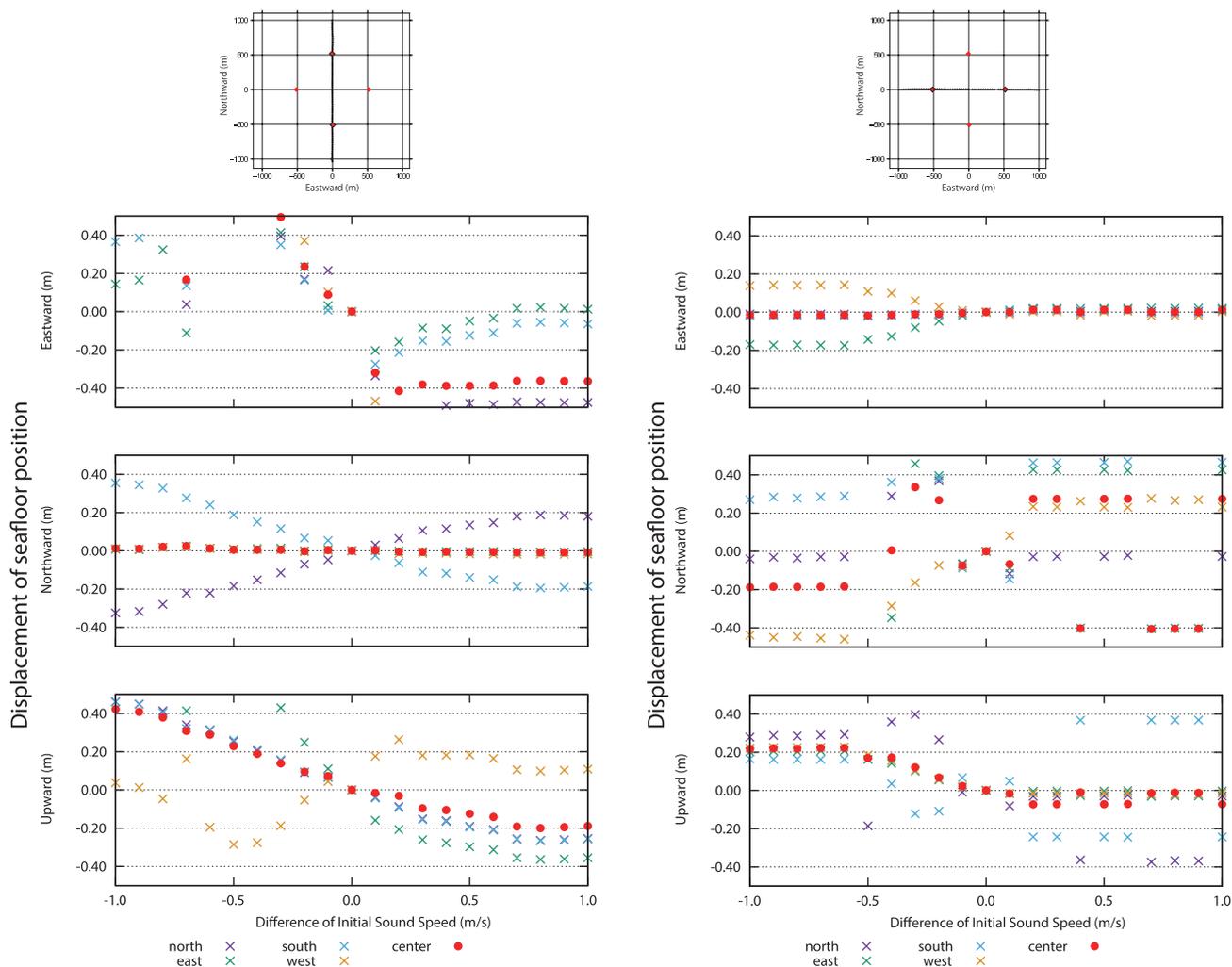


Fig. 12. The same analysis as Fig. 5, but conducted using only the north-south line, and only the east-west line.
 図 12. 図 5 と同様の解析を、南北測線のみ使用した場合と、東西測線のみを使用した場合の結果。

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.

石川直史・佐藤まりこ (2012) 海底地殻変動観測における重心推定法の評価, *海洋情報部研究報告*, 48, 74-84.

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 (2016) 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, *海洋情報部研究報告*, 53, 82-89.

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.

Yokota Y, T. Ishikawa, and S. Watanabe (2018) Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Scientific Data* 5: 180182.

要 旨

GNSS-A 海底地殻変動観測の測位解の海中の音

速の初期値に対する依存性を調査した。解析の初期値として与える音速を変化させた結果、水平方向の測位解については音速初期値に対する依存性がほぼ無いのに対し、上下方向には初期値に依存する一定の幅の領域があることが分かった。この領域の幅は測位の最小分解能と解釈できる。また、音速の初期値に対する測位解の応答は、解析手法や測線配置などの観測手法によって変化することから、本研究で用いた手法は解析・観測の評価指標として活用できる。