

# 海底地殻変動観測における新しい海底局アレイ引継ぎ戦略の検討<sup>†</sup>

渡邊俊一\*

Investigation of a new take-over strategy for transponder array  
in the GNSS-A seafloor geodetic observation<sup>†</sup>

Shun-ichi WATANABE\*

## Abstract

In the routine GNSS-A analysis processed by the Japan Coast Guard, the relative positions of seafloor transponders (array geometry) are constrained to improve the positioning accuracy. The constrained array geometry is calculated as the average of each transponder position obtained from each observation, so it generally stabilizes as data accumulates. However, the transponder members in the array change due to the replacements after the battery depletion or other factors. In the conventional method, the array geometry is re-estimated and analyzed recursively every epoch. This increases analysis time as data accumulates. In this study, we implemented an analysis method that calculates the amount of parallel shift of the existing transponders' array and the newly installed transponder positions. This enables us to locate the new transponder within the existing array with high accuracy, as a "short baseline" analysis of GNSS. We evaluated the appropriateness of the proposed method and found that it can stably calculate the array geometry without using the average of all data.

## 1 はじめに

海上保安庁では、特に海溝型の地震に対する防災に資するべく、南海トラフや日本海溝沿いの海域で地殻変動を検出することを目的に、GNSS-A 海底地殻変動観測を 2000 年から実施している。GNSS-A 観測においては、観測点の海底にあらかじめ設置した音響ミラートランスポンダ（以下「海底局」という。）と海上のトランスデューサとの間で音響通信を実施し、両音響機器間の距離（正確には音響往復走時）を計測する。得られた複数の音響往復走時と、GNSS とジャイロで決定

された海上トランスデューサの位置のデータを組み合わせることで、海底局の三次元位置を決定できる（例えば、渡邊, 2021）。

通常、各観測点には、4 台の海底局が、対角線が水深程度の距離になるような正方形になるよう配置され、アレイが構成されている。これにより、同一の海上位置から異なる斜距離・方位角のデータを取得ことができ、海底局の三次元位置と音速擾乱の影響を効果的に分離し、後者を補正することが可能になっている。海底地殻変動観測においては、これら海底局アレイの代表点位置（通

<sup>†</sup> Received August 15, 2025; Accepted September 18, 2025

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

常は重心位置)を「海底基準点」と定義し、その位置の変化(変位)を地殻変動として求めている。この海底基準点の位置を決めるためのGNSS-A観測は1回あたり数時間程度以上の時間がかかるが、1つの観測点において海底基準点位置を決めるために必要なデータセットまたは観測行動の単位を「エポック」と呼称する。

1エポックの観測データには、各海底局に対する音響走時とそれを取得した際の時刻、海上トランスデューサ位置等の情報が含まれている。現在のGNSS-Aルーチン解析では、Watanabe et al. (2020)において開発された解析ソフトウェアGARPOSを用いている。解析時には、まず、1エポックの観測データから、各海底局の位置及び音速変化に相当する擾乱場の時空間変化を推定する(この解析を「シングルエポック解析」という.)。その後、全エポックにわたって海底局間の相対位置(以下「アレイ形状」という.)に変化はない、つまり地殻変動または局所的な地表変形による海底局アレイの内部変形が無視できる、と仮定して、海底局の相対位置を拘束してアレイ全体の並進量を求めている(この解析を「アレイ形状固定解析」という.)。これにより、音速擾乱の影響の補正性能が向上し、測位解が安定することが知られている(例えば、松本・他、2008;石川・佐藤、2012)。アレイ形状不変の仮定が成立する場合(地殻変動の空間勾配が十分に小さい場合)については、アレイ形状固定解析で得られたアレイ並進量を各海底基準点で測定された地殻変動データとして報告・公開している(例えば、Yokota et al., 2018)。

なお、各観測点に設置される海底局はバッテリー駆動であり、概ね10年程度で更新する必要がある。このとき、新しい海底局と既存の海底局を同一エポックで観測することで、同一の観測環境で両者の位置を精度よく結びつけることができる。こうした目的で、海底局更新時には複数エポックにわたり「新旧比較観測」を実施している(例えば、氏原・他、2013)。

アレイ形状固定解析を実施するにあたっては、

特にこうした海底局更新によりアレイを構成する海底局が時間的に変化する場合に、どのように全エポックにわたる妥当なアレイ形状を決定するかという点が主要な論点となる。さらに、観測エポック数や更新海底局数が増加してきた現在においては、アレイ形状決定やアレイ形状固定解析を含めたGNSS-A解析全体の効率化・ロバスト化を考慮することも重要である。本研究では、これまでのアレイ決定手法について概観したうえで、より適切なアレイ形状決定手法を提案する。

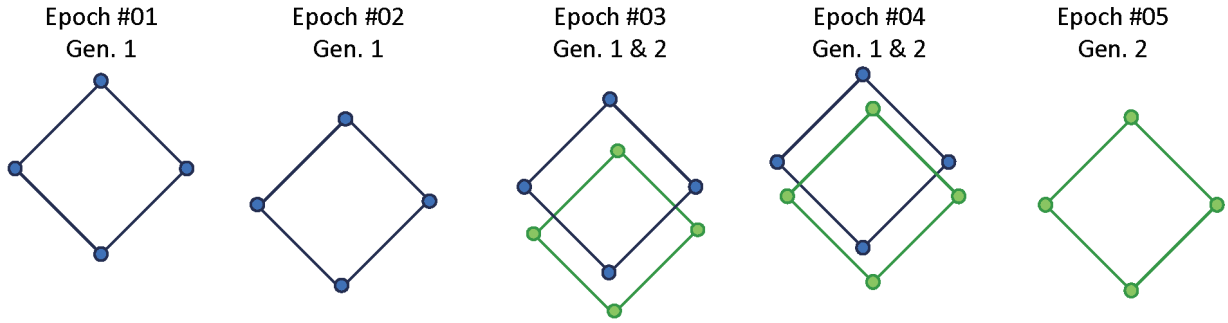
## 2 従来手法のレビュー

当庁の海底地殻変動観測においては、アレイ形状固定解析は松本・他(2008)により導入された。松本・他(2008)は、該当する全エポック(エポック数を $N$ とする)の全測距データから、アレイ形状(該当する $J$ 個の海底局の相対3次元位置; $3 \times (J-1)$ 自由度)と、全エポックの並進量( $3 \times N$ 自由度)の位置パラメータを一括して解く手法を考案し、当時ルーチン解析に使用していたソフトウェアSGOBS(Fujita et al., 2006)に実装した。この手法は、全測距データを用いてアレイ形状を推定することから、各観測エポックにおける測距データ誤差(GNSS誤差や音速擾乱の影響等も含まれる)で本質的に重みづけされたアレイ形状が求められること、また、エポックごとに測距する海底局が異なっても同一のアルゴリズムでアレイ形状と並進量が推定できること等の利点がある。他方で、エポック数が増加するにつれ、プログラム内で保持すべき測距データの量が増え、データの読み込みや行列演算コスト等の増大による計算時間の増加やメモリのオーバーフローといった技術的課題が生じるようになった。

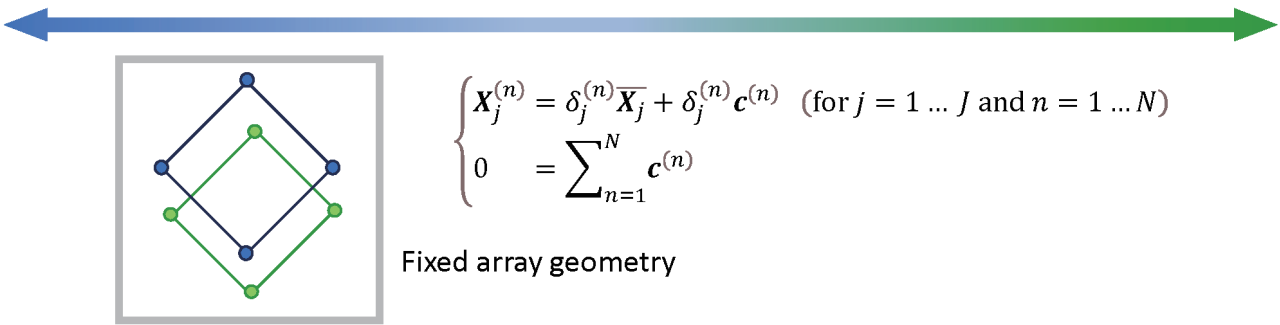
そこで、現在のルーチン解析では、複数のシングルエポック解析結果から平均アレイ形状を求めるという、より素朴なアレイ形状の決め方を採用している(Fig. 1)。具体的には、Watanabe et al. (2020)で記述されているように、アレイ形状固定解析における平均アレイ形状( $\bar{X}_j$ )として、

conventional method

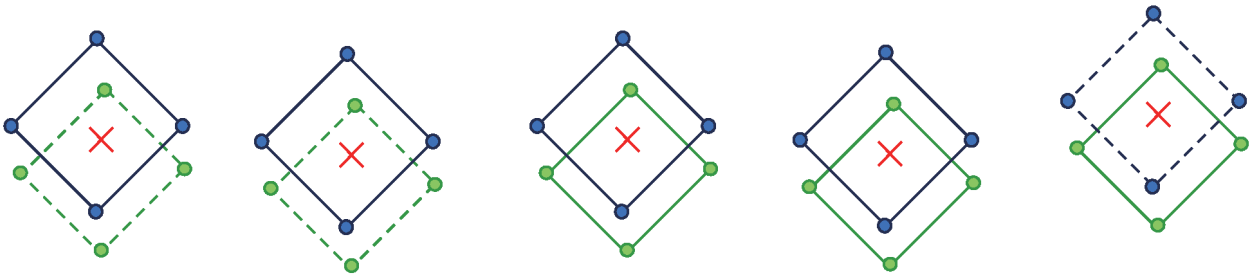
1) single-epoch analysis to obtain each transponder's position (blue/green circles)



2) take averages for transponders' positions and centroids for all epochs



3) re-calculate the position of centroid of all transponders (red crosses) for all epochs



Time series of red crosses' position → Sea floor displacement

Fig. 1. Flowchart of the sea floor displacement detection using the array geometry determined with the conventional method.

図 1. 従来手法により決定されたアレイ形状を用いた海底変位検出のフローチャート.

全エポックのシングルエポック解析結果 ( $X_j^{(n)}$ , ただし  $n$  はエポック番号) を全期間にわたり平均したものを使用する. この際, 新旧比較観測に

よって, 更新前後の海底局の相対位置が結びつく. 具体的には, エポックごとに異なるアレイ中心オフセット  $c^{(n)}$  を用いて,

$$\begin{cases} X_j^{(n)} = \delta_j^{(n)} \bar{X}_j + \delta_j^{(n)} c^{(n)} & (\text{for } j = 1 \dots J \text{ and } n = 1 \dots N) \\ 0 = \sum_{n=1}^N c^{(n)} \end{cases} \quad (1)$$

ただし,

$$\delta_j^{(n)} = \begin{cases} 1 & \text{if the transponder } j \text{ is used in } n \text{ th observation} \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

として計算できる。ここで、 $J$ と $N$ はそれぞれ当該観測点に存在するトランスポンダ数とエポック数である。ここでは、 $\bar{X}_j$ と $c^{(n)}$ が変数であり、パラメータ数は独立な方程式の数と同じなので、解は一意に定まる。なお、実際の運用にあたっては、シングルエポック解析で得られた各エポックのアレイ形状と平均アレイ形状との差を比較し、その偏差がある閾値を超えて悪いエポックについては除外するという工程を含めており、外れ値を含むエポックの影響を軽減している。こうして得られた平均アレイ形状を用いたアレイ形状固定解析により、各エポックのGNSS-Aデータからアレイ並進量を改めて推定することで、海底基準点の地殻変動量が得られる (Fig. 1)。

このアレイ形状計算手法の場合、式 (1) にシングルエポック解析の結果を与えることで簡単に平均アレイ形状を計算することができ、単純なスクリプトを1つ用意すれば誰でも機械的に平均アレイ形状を計算できるという利点がある。このことは、人事異動等で解析者が熟練していないケースが多いルーチン解析の場面で特に有用である。以下では、この手法を従来手法という。

一方で、計算時間及びエポック間で音速推定から生じうるバイアスに関する懸念がある。前者について、具体的には、エポックが追加されるたびに平均アレイ形状が更新されるため、過去すべてのエポックについてアレイ形状固定解析を実行する必要が生じる。GARPOSの導入により解析時間が大幅に短縮されたものの、エポック数は時間の経過に比例して増えてくるので、さらなる効率化が求められる。さらに、緊急観測等の際に船上で局位置解析をすることを想定した場合、高度な計算機環境や過去のエポックの測位結果等のデータセットがそろっていないとは限らない。そうした場合に、現在の手法を適用することが難しくなると考えられる。また、マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 等を適用したGARPOS-MCMC等の発展的な解析手法 (Watanabe et al., 2023, 2025) を用いる場合にも各エポックの計算時間が長くなるので、より重要である。後者については、平均ア

レイ形状の計算に新旧比較観測エポック以外の結果も用いることで、長期的な海洋変動等でアレイが歪む影響が新旧比較観測エポックの時点にまで遡って影響を与え、更新局と既存局に関する相対位置の誤差につながるという懸念である。特にこうしたオフセットを間違えた場合、誤差が経時的な位置変化として表れるため、地殻変動トレンドやステップの計算時の人為的なバイアス誤差となり、注意を要する。

以下では、これらの懸念を解決することを目指し、より効率的かつ適切に平均アレイ形状を求めするための新たな海底局アレイ引継ぎ戦略とその結果について紹介する。

### 3 提案手法

手法を考えるにあたって、まずはアレイ形状決定における誤差要因について考察する。GNSS-Aによる海底基準点の測位における主要な誤差要因としては、音線上の音速擾乱による走時の推定誤差 (例えば, Watanabe et al., 2020; 渡邊, 2025; Tomita et al., 2025)、音響機器の特性による音波読み取り誤差 (例えば, Honsho et al., 2021; Yokota et al., 2024; 永江・他, 2024)、GNSSによる測量船位置決定誤差 (例えば, Watanabe et al., 2017; 渡邊・他, 2020) 等があげられる。一方で、アレイ形状の決定という観点で考えると、特に海底局が比較的近い場所に設置されている場合、GNSSの短基線解析のように、測量船位置誤差 (GNSS測位におけるGNSS衛星軌道の誤差に相当) や音速擾乱 (GNSS測位における電離圏・対流圏遅延に相当) による誤差のある程度の部分は打ち消され、基線、すなわち相対的な位置関係は比較的精度よく決定されると期待される。したがって、新設した海底局のリファレンスとなる既設の海底局アレイが精度よく求められていれば、数回程度の同時観測によって、十分な精度で、リファレンスに対する新設海底局の相対位置を決定できるはずである。こうした想定に基づき、以下手法を提案する。なお、音響機器特性については、既存手法と提案手法のいずれでもうまく補正

される保証はない。

まず、各観測点においてリファレンスとなる海底局アレイのメンバーを決定する。リファレンスアレイには、原則として東西南北の4台が同時に観測されるエポック数が十分に確保されるような海底局の組を指定する。これらの海底局を「第1世代」と呼ぶ。以後、更新がされるたびに「第2世代」、「第3世代」というように更新を進める。基本的に、同じ世代の海底局は同時に相対位置が定まるもの、すなわち同じタイミングでその前の世代の海底局との比較観測が実施された海底局の組となるようにする。なお、何らかの不具合で応答しなくなった局の代替や、明らかに人為的に移動が確認された局等がある場合については、1台で世代が構成されることもある。

通常、海底局の世代交代時には、通例3～6回の比較観測が実施される。旧世代の不具合等による更新の場合、旧世代の海底局数が4台よりも少なくなる場合もあるが、本稿ではその場合も比較観測と位置づける。つまり、単一エポック内で異なる世代の海底局に対し観測を実施したものを、比較観測エポックと呼ぶ。

まず、「第1世代」のアレイ形状の決め方について述べる。これは、「第1世代」の海底局のみを観測しているエポックを抽出し、そのシングルエポック解析結果に対して式(1)の手法を適用して平均的なアレイ形状を計算したものとする。その際、外れ値は逐次的に除去している。

次に、「第 $M$ 世代」( $M \geq 1$ )の海底局アレイに対する「第 $M+1$ 世代」の海底局位置の決め方を述べる。これは、「第 $M$ 世代以前」と「第 $M+1$ 世代」の比較観測エポックについて、この後説明する「一部アレイ固定局位置解析」を実施して求める。「一部アレイ固定局位置解析」はGARPOS v1.0.2 (Watanabe et al., 2024)において実装された局位置解析手法で、一部の海底局位置を拘束したうえで、固定した海底局に対するその他の海底局位置と海底局アレイ全体の平行移動量を推定する (Fig. 2) ように解析条件を設定したものである。こうすることにより、固定された海底局アレイ

によって音速擾乱のパラメータ推定が安定化し、その他の海底局位置がより精度よく求められると期待される。複数回の比較観測について一部アレイ固定局位置解析を実施し、その結果を平均することで、「第 $M$ 世代以前」の海底局アレイに対する「第 $M+1$ 世代」の海底局位置を決定する。

なお、一部の観測点では、「第1世代」として設定する海底局よりも古くから観測している局が存在するケースもある。こうした海底局は「第0世代」とし、「第1世代」をリファレンスとし、「第2世代」と同じスキームでリファレンスアレイとの相対位置関係を決定する。また、「第0世代」より古い海底局は実質的に存在しない。以下では、この手法を提案手法という (Fig. 2)。

#### 4 提案手法の妥当性評価

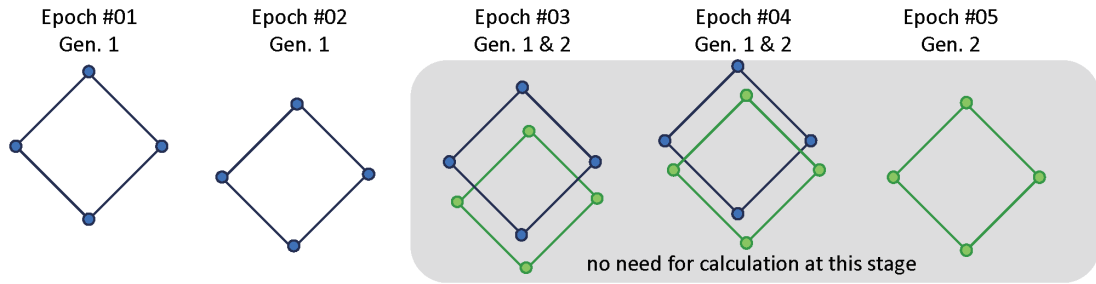
提案手法の妥当性について評価するため、同一データに対して従来手法による測位解と提案手法による測位解を比較した。なお、海底局個体差によるアレイ引継ぎへの影響を抑えるため、音響機器の角度特性を経験的に補正するAAR (Acoustic Ambiguity Reduction) 法 (Yokota et al., 2024) を適用した2023年末までの航走観測によるデータを用いた。また、2011年東北地方太平洋沖地震の影響を強く受けた観測点 (銚子沖以北の観測点) については、本震・最大余震発生以降のデータを用いた。比較には、当該期間中に2世代以上の海底局が存在する16の観測点 (不具合等による海底局再設置のみの観測点を除く。Table 1) を使用し、GNSS-A解析には、GARPOS v1.0.2 (Watanabe et al., 2024) を用いた。

測位結果については、新旧比較観測のない2年間のエポック (Table 1中 ref. epochsに表示) における偏差の平均がゼロとなるように、各成分にオフセットを加えた時系列を比較した (Fig. 3)。Table 1に、観測点ごとに得られた各成分での最大の偏差を示す。

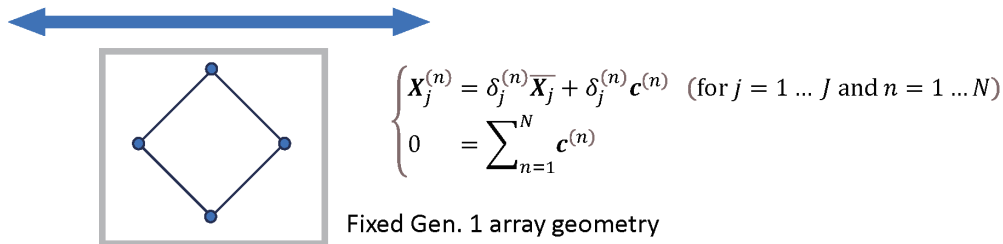
特に水平成分については、MYGIの特定のエポックを除き、偏差の最大値は3 cm程度以下に

proposed method

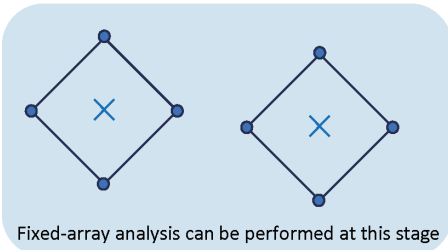
1) single-epoch analysis to obtain each transponder's position **only for Gen. 1 array (blue circles)**



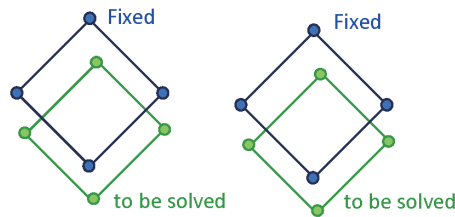
2) take averages for transponders' positions and centroids **only for Gen. 1 array**



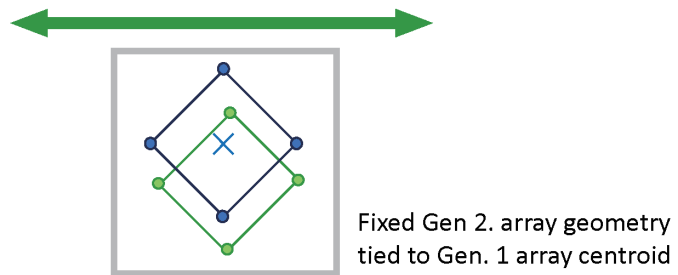
3) Fixed-array anal. for Gen. 1 epochs



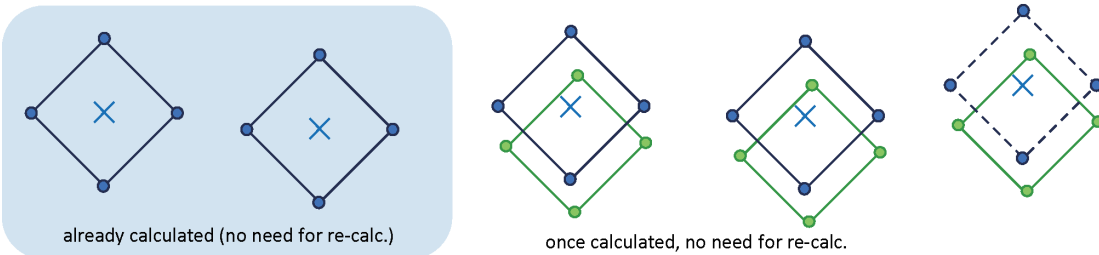
4) calculate the position of Gen. 2 transponders relative to Gen. 1 array



5) calculate the average positions of Gen. 2 transponders relative to Gen. 1 array



6) calculate the position of **Gen. 1 array centroid (blue crosses)** for the other epochs



Time series of blue crosses' position → Seafloor displacement

Fig. 2. Flowchart of the seafloor displacement detection using the array geometry determined with the proposed method.

図 2. 提案手法により決定されたアレイ形状を用いた海底変位検出のフローチャート.

Table 1. Maximum values of differences of the estimated displacement between the proposed and conventional methods.

表 1. 提案手法と従来手法で得られた変位時系列の差の最大値.

site	# of generation	ref. epochs	max dE [cm]	max dN [cm]	max dU [cm]
KAMN	3	2013-2014	2.7	1.8	4.6
KAMS	2	2014-2016	2.2	1.2	1.4
MYGI	3	2013-2014	2.5	4.0	4.0
MYGW	5	2015-2016	2.4	3.0	3.7
FUKU	3	2013-2014	0.7	1.1	4.0
CHOS	2	2013-2014	0.6	2.9	2.0
BOSN	2	2014-2016	1.4	0.9	1.7
SAGA	2	2014-2016	0.6	0.6	0.9
TOK1	4	2016-2017	2.7	1.9	4.6
TOK2	3	2016-2017	0.9	1.4	1.2
KUM1	4	2013-2014	1.1	2.7	5.8
KUM3	4	2016-2017	2.5	2.7	5.8
SLOW	4	2016-2017	0.7	1.8	1.3
MRT2	2	2016-2017	1.4	0.7	1.5
TOS1	2	2013-2014	0.9	0.4	1.1
TOS2	2	2013-2014	1.9	0.8	5.3

抑えられている。上下成分については、6 cm 以下となっており、測位精度と同程度以下の偏差となっている。一方で、例えば MYGW の南北成分のように、時期により系統的に偏差が生じている場合には地殻変動速度の算出に影響がある。そこで、各エポックについて、偏差ベクトル (3 成分) の L2 ノルムを計算し、それが 3 cm を上回るエポック数を確認した。閾値を上回るエポック数が 3 以上であった観測点は、MYGI, MYGW, FUKU, TOK1, KUM1, KUM3, TOS2 と、ほぼ半数となった。

上下位置の系統的な偏差が水平成分と同程度以上となっている FUKU, TOK1, KUM1, KUM3, TOS2 については、世代間の海底局の音響特性の差が補正しきれないことが影響していると考えられる。音響波形の読み取り位置が系統的にずれることは指摘されており、AAR 法でも補正しきれなかった誤差が残っているものと考えられる。逆に、こうしたギャップがなくなるよう AAR 法をさらに高度化することが望ましいといえる。なお、こうした機器の影響はアレイ形状や異なる海底局が同一世代に交じっている場合、あるいは測線の設定や音速の空間勾配によって水平成分の偏差にも影響する。

MYGI 及び MYGW は、偏差の水平成分が上下に比べ顕著である点に特徴がある。MYGW については、2017 年 4 月から 8 月の観測の間に、南局のみが南南東に 1.6 m 移動したことがわかっており、この移動の前後で異なる世代の海底局として扱っている。当然、新旧比較観測は実施できていない。変位時系列にずれが生じているタイミングがこの南局の移動と一致しているため、このことが測位解に影響を与えている可能性が示唆される。なお、MYGW での海底局の移動は 2023 年 2 月から 9 月の間にも西局で見られており、その際は南に 2.9 m 移動している。MYGW は宮城県沖の比較的陸に近い 1100 m 程度の水深の地点に設置されているため、水産業による影響の可能性が考えられる。MYGI については、原因の検証はできていないが、東北地方沖は南海トラフ沿いよりも複雑な音速場である場合が多く (例えば、渡邊・内田, 2016)、機器特性の影響が音速勾配の推定に影響した可能性が考えられる。一方で、第 3 節に記載したように、提案手法は短基線解析に相当するものであるところ、こうした音速場の変化による影響がバイアスを生じさせたのであれば、定性的には提案手法の方がよい性能を発揮すると考えられる。こうしたことを踏まえ、今後のさらなる検証が必要であると考えられる。

## 5 結論

本研究では、海底局更新に伴うアレイ引継ぎについて新しい手法を提案し、既存の手法と比較をした。観測点内の海底局の一貫性が保たれなかった一部の観測点で明瞭なバイアスが見られたものの、両手法による変位の偏差は水平で高々 3 cm、上下で 6 cm であり、GNSS-A の 1 エポックごとの測位精度と同等以下となることが確認され、精度としては従来手法と同等の性能を得られることが確認された。

一方、上下成分で偏差が系統的に大きくなった観測点では、機器バイアスに依存した系統的な誤差が生じている可能性が高く、AAR 法のさらなる高度化に取り組む必要があるといえる。宮城県

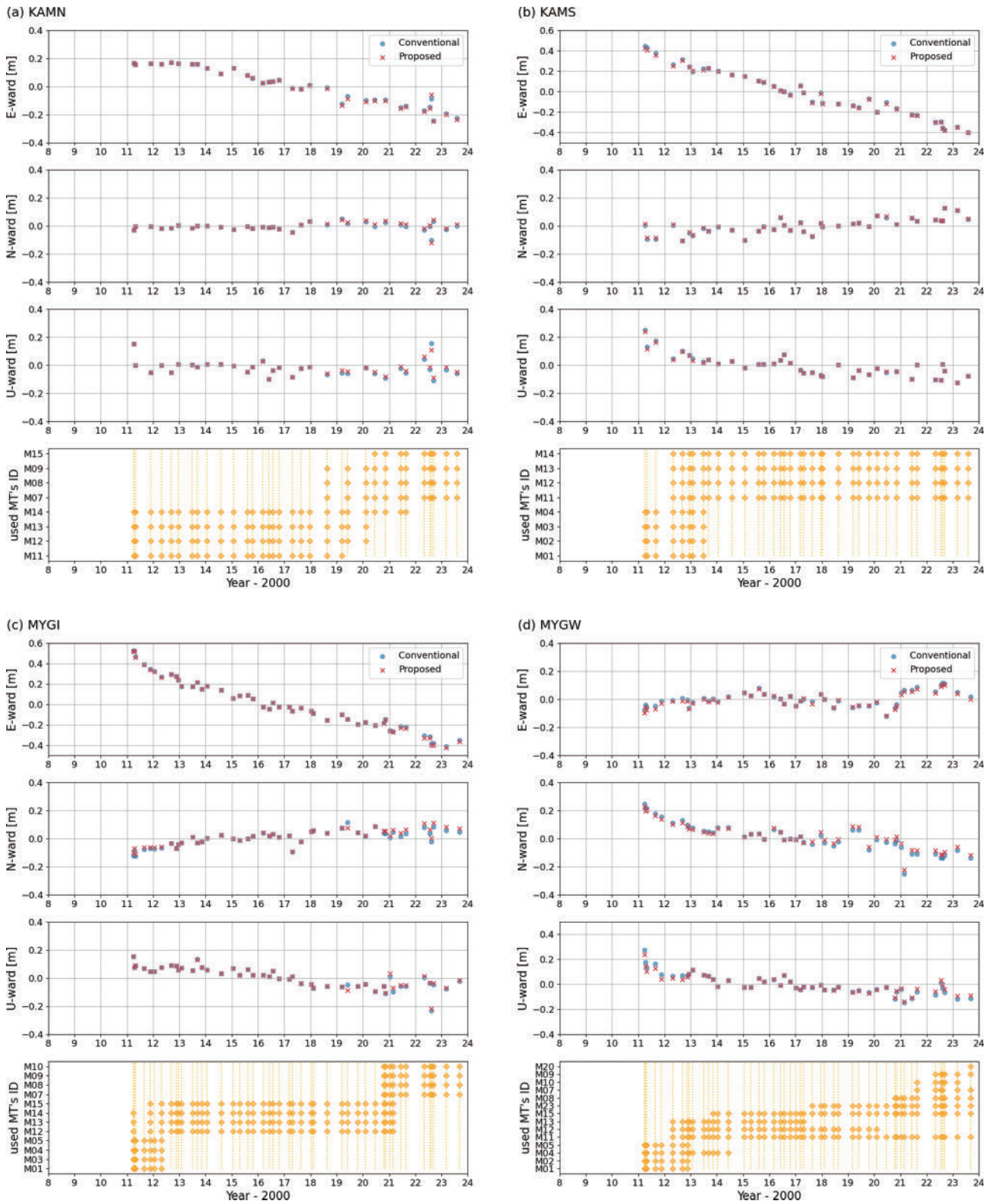


Fig. 3. Displacements of seafloor reference points acquired with the proposed (red crosses) and the conventional (blue circles) methods. The bottom panels indicate the transponders' ID (orange diamonds) used for each epoch.

図 3. 提案手法 (赤 X) 及び従来手法 (青丸) で得られた海底変位時系列. 4 段目の四角は, 当該エポックの解析に使用された海底局 ID を示す.

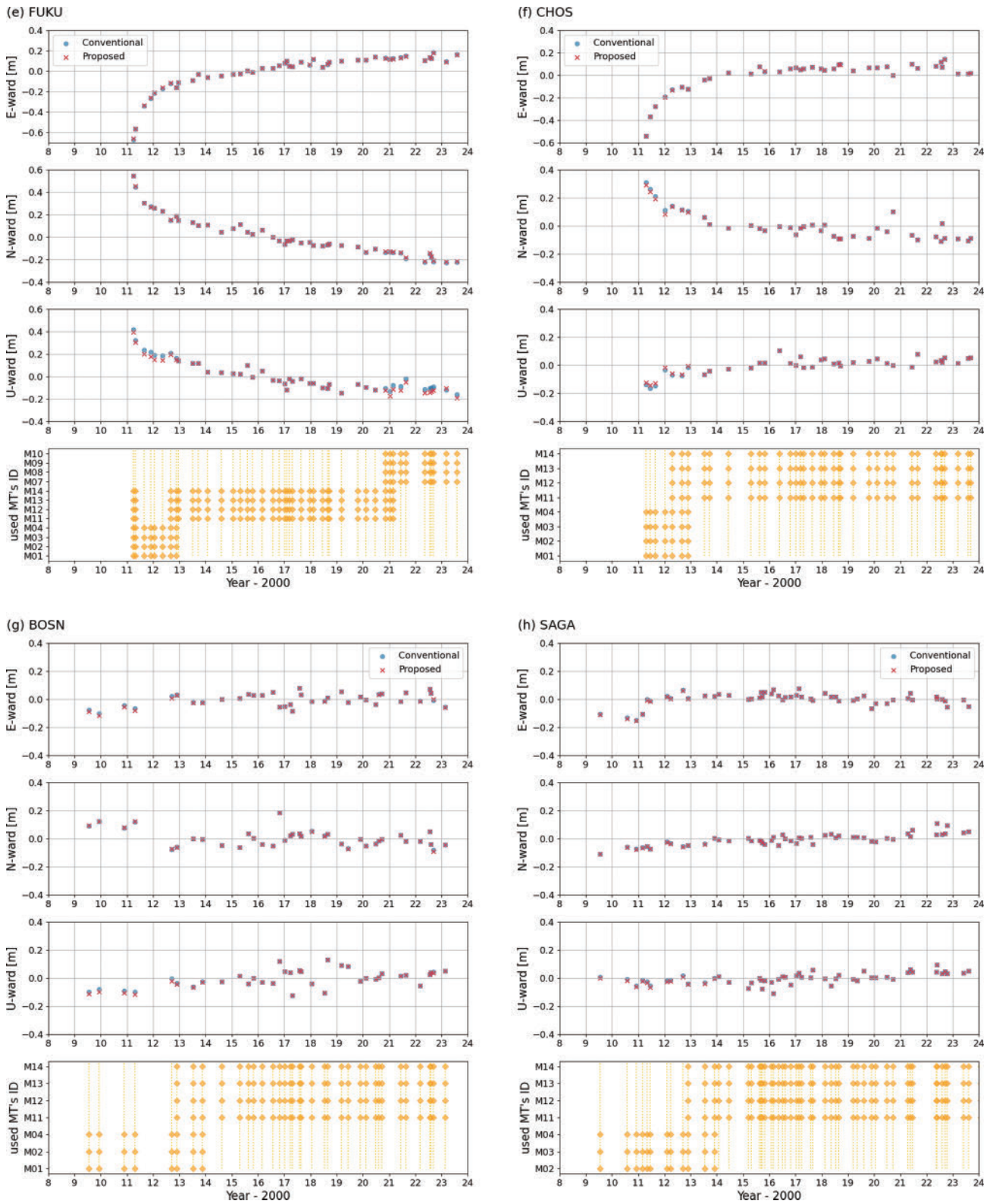


Fig. 3. (Continued)

図 3. (続き)

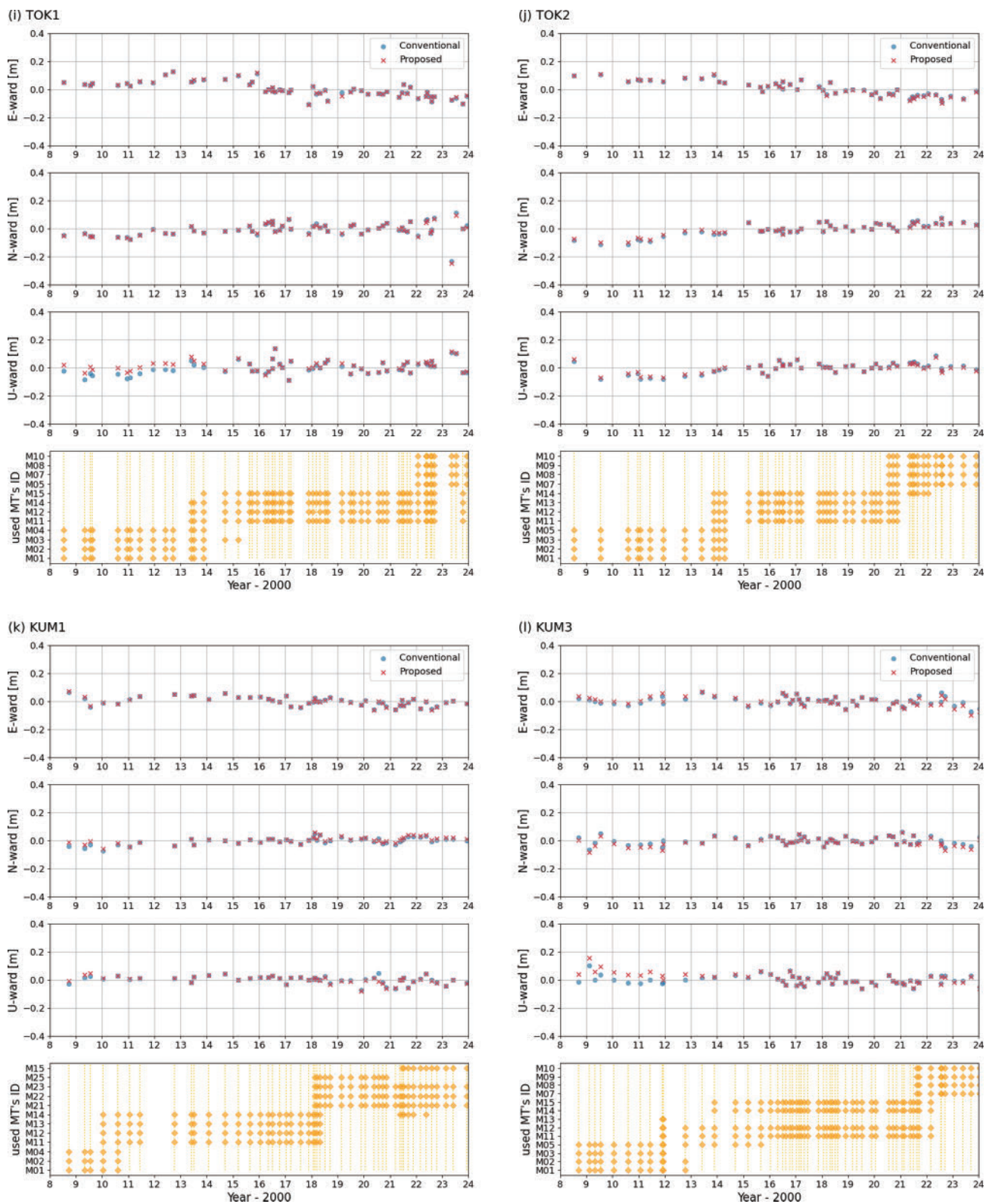


Fig. 3. (Continued)

図 3. (続き)

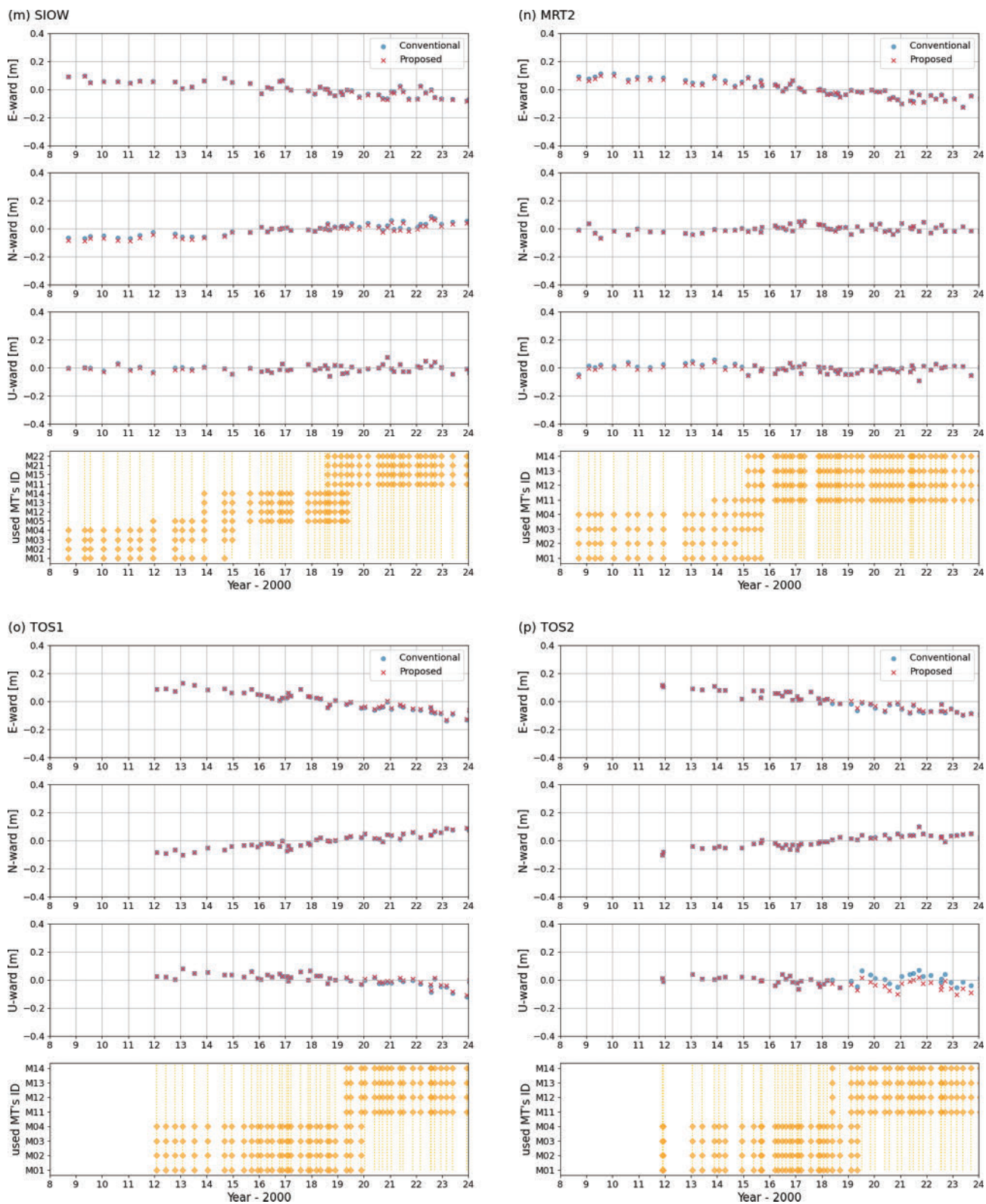


Fig. 3. (Continued)

図3. (続き)

沖の観測点では、水平成分の偏差の方が顕著になるケースもあった。定性的には、短基線解析となる提案手法が安定した測位結果を与えると期待されるが、今後もデータの蓄積に応じたさらなる検証が必要であるといえる。

## 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「平洋」, 「光洋」, 「昭洋」, 「拓洋」, 「明洋」, 及び「海洋」により取得されました。AAR 補正データは東京大学生産技術研究所の横田裕輔准教授及び海洋防災調査室の永江航也海洋防災調査官により作成されました。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
- Honsho, C., M. Kido, T. Ichikawa, T. Ohashi, T. Kawakami, H. Fujimoto (2021) Application of phase-only correlation to travel-time determination in GNSS-acoustic positioning. *Front. Earth Sci.* 9, 600732. doi:10.3389/feart.2021.600732
- 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.
- 永江航也・横田裕輔・石川直史・渡邊俊一・中村優斗・吉住優懂・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.
- Tomita, F., M. Kido, T. Iinuma, and Y. Ohta (2025) GNSS-Acoustic positioning error in the vertical component considering the uncertainty of a reference sound speed profile. *Mar Geophys Res* 46, 3. doi:10.1007/s11001-025-09563-w
- 氏原直人・佐藤まりこ・石川直史・渡邊俊一 (2013) 海底基準局の更新に係る時系列連続性確保のための新しい解析方法, 海洋情報部研究報告, 50, 84–90.
- 渡邊俊一 (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. 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 (2023) Full-Bayes GNSS-A solutions for precise seafloor positioning with single uniform sound speed gradient layer assumption. *J. Geod.* 97, 89. doi:10.1007/s00190-023-01774-6
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Nakamura, and Y. Yokota, (2025) Model selection for the sound speed perturbation of GNSS-A using the widely applicable Bayesian information criterion (WBIC). *Earth Planets Space* 77, 23. doi:10.1186/s40623-025-02144-6
- 渡邊俊一 (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, 海洋情報部研究報告, 63, 14–20.
- Watanabe, S., Y. Bock, C.D. Chadwell, P. Fang, and J. Geng (2017) Long-term stability of the kinematic precise point positioning for the sea surface observation unit compared with the baseline analysis, 海洋情報部研究報告, 54,

38-73.

渡邊俊一・横田裕輔・石川直史 (2020) キネマティック精密単独測位を用いた GNSS-A 海底測位の精度検証, 測地学会誌, 66, 1-7, doi:10.11366/sokuchi.66.1

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

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・塩分プロフィー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, Sci. Data, 5, 180182, doi:10.1038/sdata.2018.182

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

部アレイ固定局位置解析」を実装した。これにより, GNSS における短基線解析と同様に, 新しい海底局の既存アレイに対する相対位置が精度よく求まり, 全データの平均を用いずとも安定的にアレイ形状を求められるようになることが確認された。

## 要 旨

海底地殻変動観測では, 海底基準点の測位精度を向上させるため, 海底局の相対位置 (海底局アレイ形状) を拘束して解析している。拘束するアレイ形状には, 各観測から得られる各海底局位置の平均を採用している。基本的にはデータの蓄積に伴い安定化する。しかし, バッテリー消費に伴う海底局の置き換え等により, アレイを構成する海底局は変化する。それを踏まえ, 現在は都度アレイ形状を推定しなおし再帰的に解析しており, 解析時間の増大を招いている。そこで, 本研究では, アレイ形状がすでに精度良く決まっている中に新たに海底局が追加された場合に, 既存アレイ平行移動量と新しい海底局位置を求める「一