

緊急時に想定される時短海底地殻変動観測の事前能力評価[†]

伊牟田 圭^{*1}, 渡邊俊一^{*2}

Prior capability assessment of time-saving GNSS-A observation for urgent situations[†]

Kei IMUTA^{*1} and Shun-ichi WATANABE^{*2}

Abstract

The Japan Coast Guard conducts GNSS-A seafloor geodetic observation along the Nankai Trough and the Japan Trench. When a major earthquake occurs near the observation sites, emergent seafloor geodetic observations will be required to detect the crustal deformation. In such cases, depending on the magnitude of the earthquake, it is expected that observations at multiple sites might be required with a limited availability of survey vessels. To prepare for this, we assess the possibility of time-saving GNSS-A observations where several survey lines are omitted. In this study, with an eye toward time-saving observation in urgent cases, we evaluated the degradation of precision using different survey line patterns, with the existing actual data. As a result, we confirmed that the survey line patterns affect the degree of deterioration in positioning precision. In particular, it was found that the survey line patterns including outer circumference clearly resulted in smaller differences compared to normal observations. Although the conditions for the verification in this study do not necessarily match those of anticipated urgent situations, the results provided important insights regarding the impact of data distribution.

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では、2000年代からGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）を用いた海底地殻変動観測を実施している。GNSS-Aは、測量船等の海上プラットフォームの位置をGNSSにより精密測位しながら、プラットフォームに搭載した音響トランスデューサと海底に設置した音響ミラートランスポンダ（海底局）の間で精密音響測距を行うことで、海底局の地球における位置（緯度・経度・楕円体高等）をセンチメートルレ

ベルの精度で計測する技術である。各観測点には複数の海底局が設置されており、通常はその重心位置を基準点として、その位置の変化を地殻変動として検出する（例えば、渡邊, 2021, 2026）。

GNSS-Aによる海底地殻変動観測は、平常時のプレート間固着等による地殻変動の他、大地震発生時には、地震時地殻変動の量を観測することが可能である（例えば、Sato et al., 2011）。こうした地震時地殻変動の把握は、当該地震のメカニズムの理解だけでなく、引き続き余効変動の監視や

[†] Received August 22, 2025; Accepted October 2, 2025

* 1 第五管区海上保安本部 下里水路観測所 Shimosato Hydrographic Observatory, 5th Regional Coast Guard Headquarters

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

近傍の断層への影響を評価する上で極めて重要である（例えば、Watanabe et al., 2021）。そのため、観測点近傍で大地震が発生した場合、測量船による緊急海底地殻変動観測を実施し、海底局の移動量を測定することとしている。当該地震の影響を迅速に評価する必要があることから、こうした場合の観測においては、速報性が求められる。加えて、地震の場所や規模によっては、限られた測量船数及び時間で多くの点を観測する必要が生じる可能性が考えられる。

一方で、観測時間の短縮は、測位精度とのトレードオフとなる。ルーチン観測では複数回の観測を通じて年間数センチメートルレベルの変位速度を検出することが主な目的であるのに対し、大地震発生時の緊急観測ではイベント後の1, 2回程度の観測で10センチメートルを優に超えるようなイベントに伴う急激な変位の有無を検出することが目的となる。そのため、この目的での緊急観測においては、特にイベントの規模が大きいほど、多少の精度の劣化があっても、速報性と観測効率を優先しなければならない場合がある。具体的には、現在の当庁のルーチン観測は、水深により、通常1観測点あたり4～12時間程度の時間をかけて、幾何学的に対称な複数の測線を航走しながら実施し、センチメートルレベルの精度を確保している（例えば、松下・小池, 2018; Watanabe et al., 2020; Ishikawa et al., 2020）。なお、測線は海底局に対する仰角・方位角分布が一定となるよう設定されるため、水深に比例して長くなる。一方で、観測中の船速はドップラー効果の影響を考慮し一定としているため、観測時間も水深に比例して長くなる。緊急観測では、これらの観測時間を短縮する必要に迫られることがあると想定しておくべきである。そこで本研究では、観測の際の測線をルーチン観測に比して減らすことで、観測時間の短縮を図ることを考え、そうした場合に精度にどのような影響が出るのかを検証した。

2 手法及びデータ

本研究では、最近のルーチン海底地殻変動観測のセットアップに対して、より短時間での緊急観測が必要となった場合を想定して検討するため、2023年から2024年にかけての実際の海底地殻変動観測データを用いて、後述の音響素子特性に関する補正を適用したデータを使用した。使用した観測データをTable 1に示す。なお、緊急観測時の解の導出には、実際にはGNSS衛星軌道等の情報として概ね1日後に入手可能な速報暦を使用するが、本研究では測線の減らし方による位置推定精度への影響の評価を目的とするため、ルーチン解と同じ最終暦によるGNSS解を用いた。速報暦と最終暦によるGNSS-A測位解への影響については、渡邊・他（2020）を参照されたい。

他方で、近年、音響素子の物理的な特性を考慮した補正手法（Acoustic Ambiguity Reduction法；AAR法）が検討・開発されており（例えば、Yokota et al., 2024）、これが実用化されていることを前提とした解析を想定する。したがって、本研究では、AAR補正を適用したGNSS-Aデータを用いることとした。

現在の海上保安庁における海底地殻変動観測

Table 1. GNSS-A data used in this study.

表1. 本研究で用いたGNSS-Aデータ。

観測年月	観測地点	水深	使用船艇
2023年7月	釜石沖1	2200m	拓洋
2023年7月	釜石沖2	2300m	拓洋
2023年7月	福島沖	1200m	拓洋
2023年7月	銚子沖	1500m	拓洋
2023年11月	東海沖1	2400m	明洋
2023年11月	銭洲西	3800m	明洋
2023年11月	UT01	1350m	明洋
2023年11月	UT02	1950m	明洋
2024年1月	日向灘1	1640m	明洋
2024年1月	日向灘2	1960m	明洋

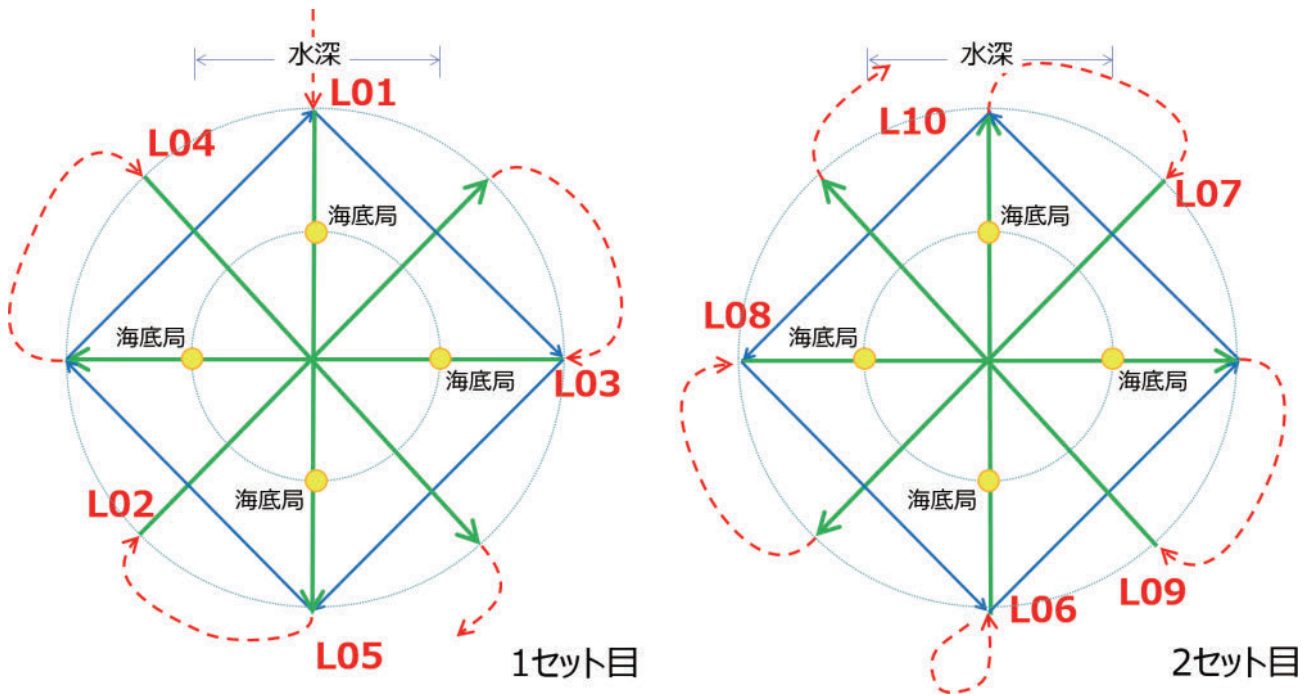


Fig. 1. Positions of seafloor stations (yellow circles) and typical survey line for the routine observation (solid arrows). One set consists of four straight lines (green arrows) and one square-shaped line (blue arrows).

図 1. 通常観測における海底局配置 (黄丸) とそれに対する典型的な計画測線 (実線矢印). 緑矢印で示す直線の測線 4 本と青矢印で示す四角形の測線 1 本を順に回することで 1 セットが構成される.

Table 2. Survey line patterns set for this study.

表 2. 測線配置パターン.

測線パターン	測線の概要	所要時間 (対通常観測)
パターンA	十字状の2本の測線配置	16%
パターンB	Aに外周の正方形の測線を加えた配置	33%
パターンC	X字状の2本の測線配置	16%
パターンD	Cに外周の正方形の測線を加えた配置	36%
パターンE	外周の正方形1周のみの測線配置	17%
パターンF	外周の正方形2周 (進行方向違い) の測線配置	34%

は、あらかじめ海底に設置した海底局 (通常、各観測点に水深程度の距離の対角線を持つ正方形の頂点に 4 台を配置) に対し、船底に装備したトランスデューサを用いて、航走中に音響信号を送受信する航走観測で実施している (例えば、渡邊, 2021). 現在の定常観測では、Fig. 1 に示すように海底局に対して幾何学的にバランスの取れた 5 本の測線を 1 セットとし、船の進行方向を変えたものを計 2 セット実施している (以下「通常観測」という.). 測線番号 L01 ~ L04, L06 ~ L09 は直線測線, L05 と L10 は周回測線となる.

本研究では、この幾何学的バランスを維持したまま測線を減らすにあたって、Table 2 に示す 6

パターンの測線配置を作成し、それぞれについて精度評価を行った. 各パターンの測線配置を Fig. 2 に示す.

解析には、通常観測のデータから各パターンに対応する測線のデータを取り出して用いた. 通常観測では、通常、測線番号 L01 ~ L05 を 1 セット目、測線番号 L06 ~ L10 を 2 セット目として 2 セットで実施しているが、測線番号 L05 と L10 (周回測線) を使用するパターン F を除いて、全て 1 セット目のデータを用いた. 一方、基準となる通常観測の解析については 2 セット目も含めた全測線のデータを使用している.

各観測データについて、まず通常観測と同様に測線 10 本を使用したケースについて、海底地殻変動解析ソフトウェア GARPOS v1.0.1 (Watanabe et al., 2020, 2022) による局位置解析を行い、その結果を基準位置とした. その上で、前述の 6 つの測線パターンのデータについても同様に局位置解析を行い、海底局アレイの重心位置について、基準位置との差を東西、南北、上下それぞれの方

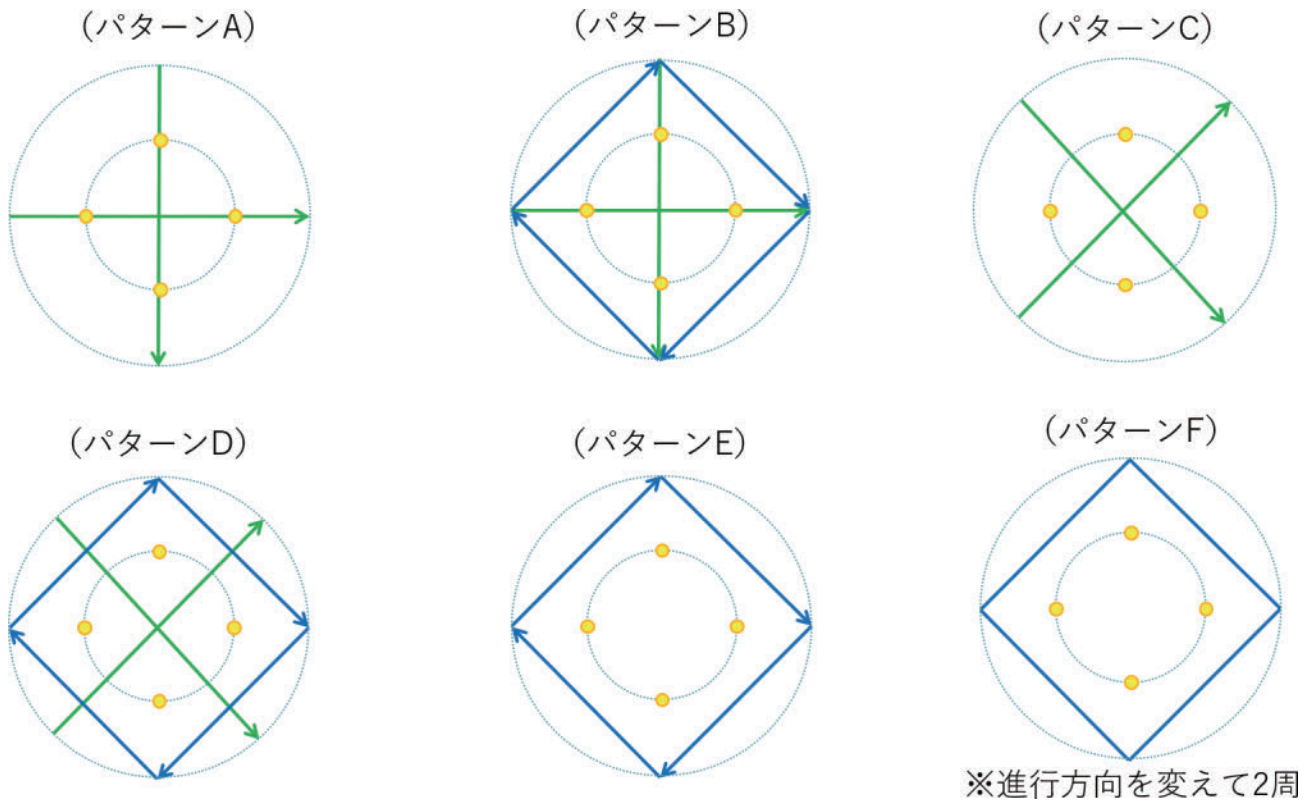


Fig. 2. Survey line patterns in this study.
 図 2. 本研究で用いた測線パターン.

向について求めた。また、統計量として、各成分並びに東西南北 (2D) 及び 3 成分 (3D) の差の二乗平均平方根 (RMS) をそれぞれの測線パターンについて求め、評価の指標とした。なお、本研究における精度 (あるいは精度劣化) の評価は、通常観測のデータから得られる基準位置に対する較差のばらつき具合により示されるものであり、測位解自体の精度とは異なることに注意されたい。

3 結果

測線パターンごとに得られた解について、基準位置からの差を Figs. 3-8 に示す。Fig. 3 と Fig. 4, Fig. 5 と Fig. 6 をそれぞれ比べると、周回測線を加えた方が基準位置との差が小さくなる傾向が認められる。また、Fig. 7 に示す周回測線 1 周分のみの結果と他のパターンを見比べると、Fig. 3, Fig. 5 に示す周回測線を加えないパターンと比較すると差が小さい。

これらの結果から測線パターンごとに推定位置

の差の RMS を算出した結果を Table 3 及び Fig. 9 に示す。RMS は 2 で述べた通り東西、南北、上下、平面、立体の 5 つについて算出した。3D-RMS に注目すると、直線測線のみパターン A, C が 20 cm 前後であるのに対し、それらと同程度の観測時間である周回測線のパターン E では 15 cm 未満となった。一方、その倍程度の観測時間を要するパターン B, D, F では、いずれも周回測線が入っており、3D-RMS は 10 cm を下回った。このことから、周回測線のデータが精度向上において重要であることが示唆される。また、パターン A・C とパターン B・D を比較すると、東西方向を除いて X 字測線を用いる B と D が十字測線を用いる A と C よりもやや小さい RMS となっている。これらの結果からは、X 字測線に周回測線を加えたパターン D、または向きを変えた周回測線を 2 周するパターン F が通常観測との較差が小さくなるといえる。

また、使用船艇ごとに RMS を計算した結果を Figs. 10, 11 に示す。サンプル数が少なくなるた

め信頼度は落ちるが、RMSはいずれも概ね同じ傾向を示している。このことから、使用する観測機器による差は、今回調査した範囲では影響しないと考えられる。

4 考察

以上の結果から、今回検証した測線パターンの中で観測時間を短縮しつつ精度を確保するには、パターンDまたはFが有効であると言える。ただし、実際の緊急観測においては、その時の投入できるリソースや要求される精度との兼ね合いで測線を決定することになる。

測線パターンの違いにより測位精度の劣化具合に差が生じることが確認されたが、その要因として船上の送受波器と各海底局との相対位置、つまり送受波器・海底局間の距離と方位角のデータ分布を考える。まず、周回測線を含むパターンB, D, E, Fの方が含まないパターンA, Cより明らかに基準位置との差が小さくなった要因としては、測距の方位角分布が考えられる。1つの海底局に注目すると、アレイを横切る直線2本のみで構成されるパターンA, Cでは、測距されない方位角が存在するのに対し、海底局アレイを周回する測線が含まれるパターンでは、海底局の周囲全方向からの測距データが含まれる。これにより、特に水平方向についてデータ配置がよくなることから、測位上の優位性につながったと考えられる。

次に、送受波器・海底局間の距離変化については、海底局の直上を通る測線パターンA, Bの場合に大きくなる。一方、直上を通らないパターンC, Dは、距離変化は小さいが、若干基準位置との差が小さくなるという結果が得られた。音速変化と海底局位置は走時に対し異なる応答をするため、直上を通る測線のように、距離の変化幅が大きいほど音速と位置のパラメータを分離しやすいはずである。しかし、2基の海底局直上を通る測線上では、他の2基に対する距離変化は大きくない。つまり、海底局4基のうち距離変化が大きいものと比較的小さいものの差が発生し、測線に直交する成分に対して音速と位置の分離が向上しな

いと考えられる。音速は時間変化するため、直上の測線を同時に取得できない限り、3次元位置と音速をバランスよく推定することが、パターンAでは却って難しくなった可能性がある。それよりはむしろ、前述した方位角のバランスがよりよいパターンC, Dの方が、測位解が安定すると考えられる。

今回使用したデータ数は、観測10エポック分に留まるため、より正確な検証にはさらなるデータの追加が必要である。また、今回の検証は過去の通常観測のデータを想定される測線パターンに組み替えて分析を行ったものであり、想定される時短観測と通常観測ではXCTD・XBTの投下タイミングや投下位置、測線間の時間差等（例えば、パターンAでは2本の測線を連続して観測すべきだが、用いたデータとしては斜めの測線が間に入っているため、測線入線時刻が緊急時の想定とは異なる）、観測条件が異なっている。さらに、今回の検証は、あくまで通常観測との比較であり、時短観測そのものの測位精度を示すものではないことに注意が必要である。しかし、観測データ配置の影響について得られた定性的な理解は有用であり、今後、シミュレーションも含めた精度検証を進める上で重要な示唆を与えるものといえる。

Table 3. 2D-RMS and 3D-RMS for each survey line pattern.

表3. 測線パターンごとの2D-RMS及び3D-RMS.

	RMS E (m)	RMS N (m)	RMS U (m)	RMS E-N (m)	RMS E-N-U (m)
パターンA	0.132	0.127	0.106	0.183	0.211
パターンB	0.026	0.050	0.047	0.057	0.074
パターンC	0.149	0.105	0.079	0.182	0.199
パターンD	0.028	0.038	0.039	0.047	0.061
パターンE	0.051	0.056	0.105	0.075	0.130
パターンF	0.040	0.021	0.053	0.045	0.070

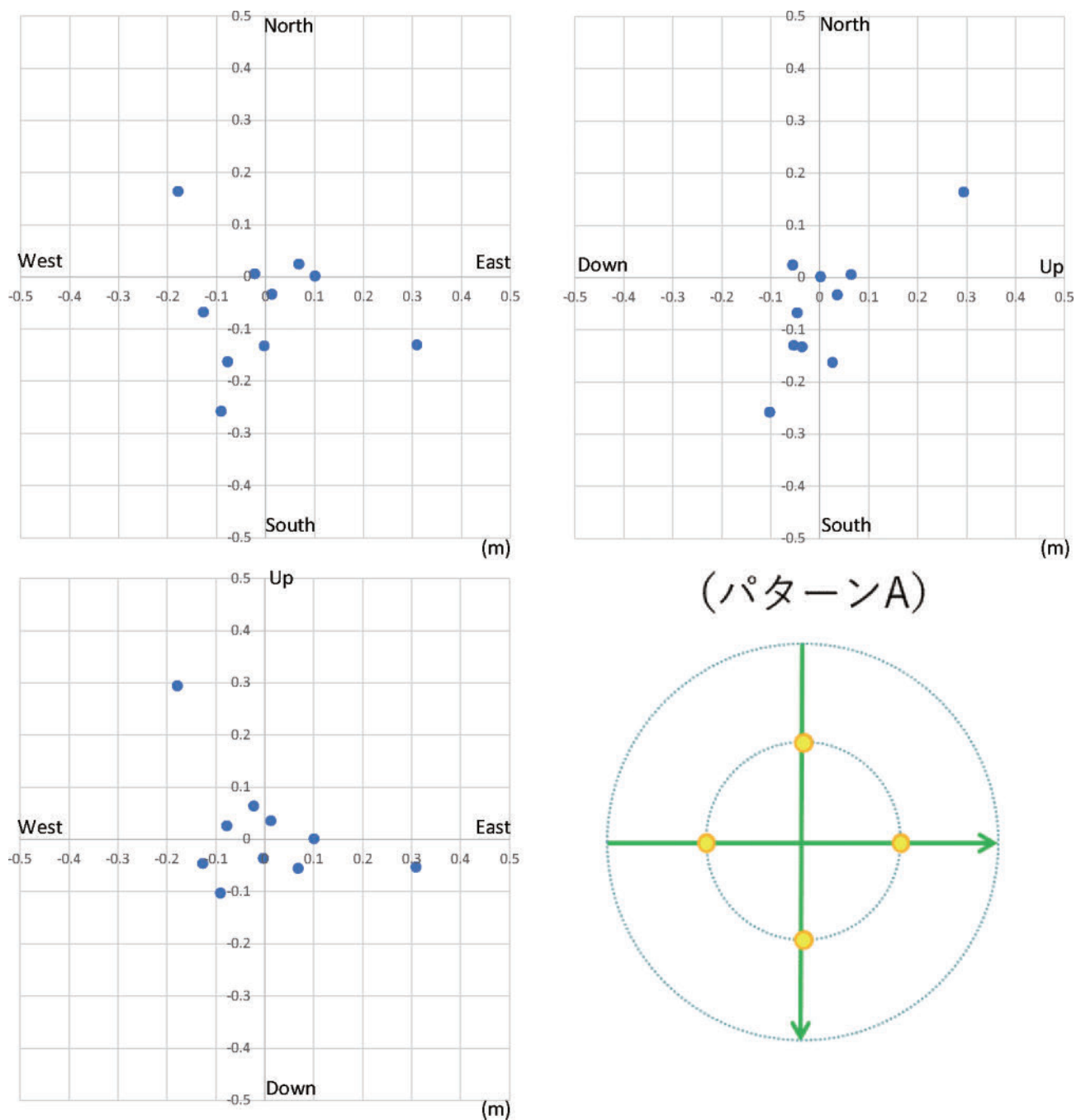


Fig. 3. Difference of the estimated position from the reference for the pattern A. The eastward-northward (upper-left), upward-northward (upper-right), eastward-upward (lower-left) and survey line pattern (lower-right) are displayed.

図3. パターンAでの測位解の基準位置からの差. 東西・南北成分 (左上), 上下・南北成分 (右上), 東西・上下成分 (左下) 及び測線パターン (右下) をそれぞれ示す.

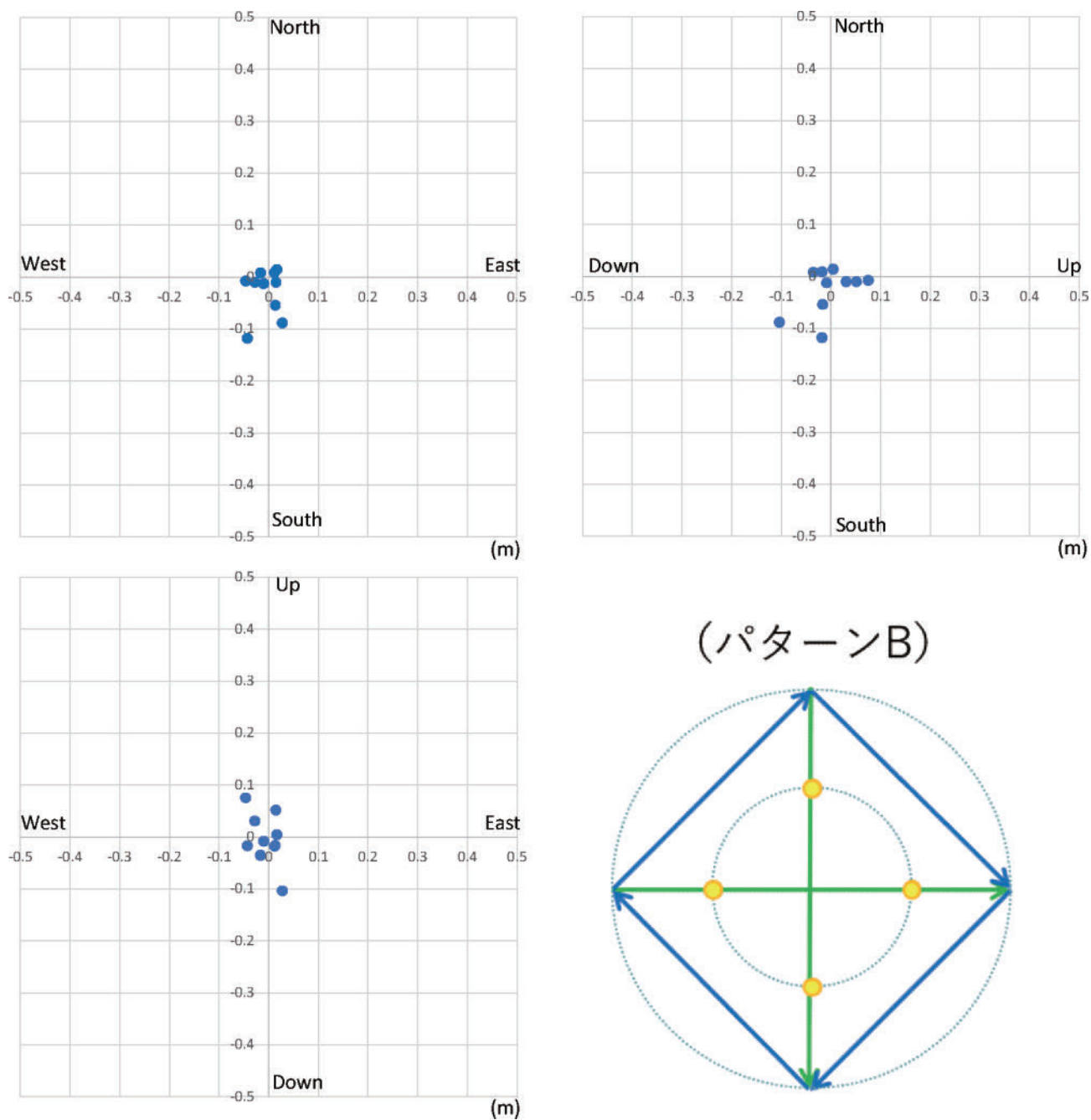


Fig. 4. Difference of the estimated position from the reference for pattern B. The layout and meaning are the same as Fig. 3.

図 4. パターン B での測位解の基準位置からの差. 表示方法は図 3 と同じ.

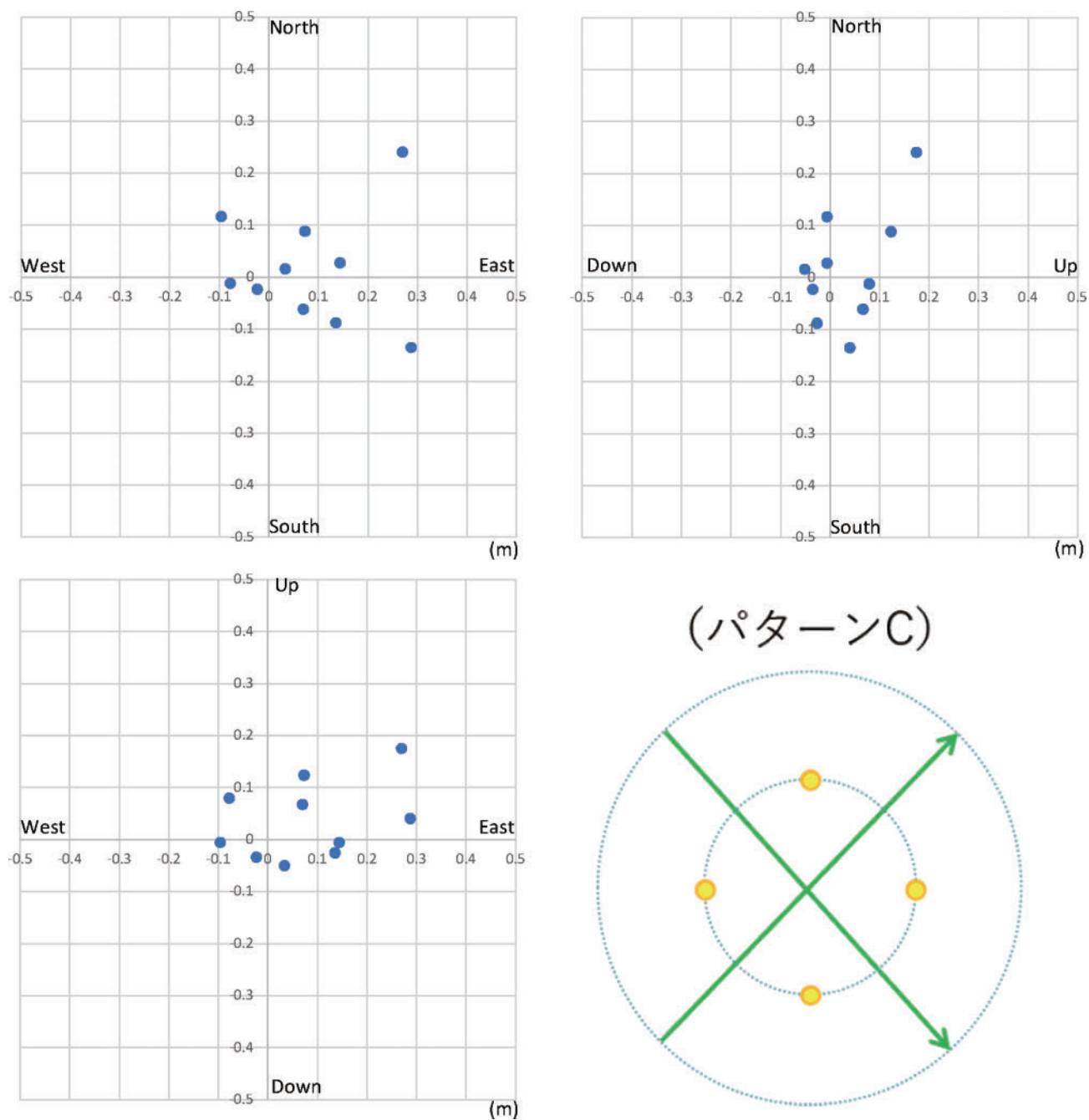


Fig. 5. Difference from the reference position of positioning solution in pattern C. The layout and meaning are the same as Fig. 3.

図5. パターンCでの測位解の基準位置からの差. 表示方法は図3と同じ.

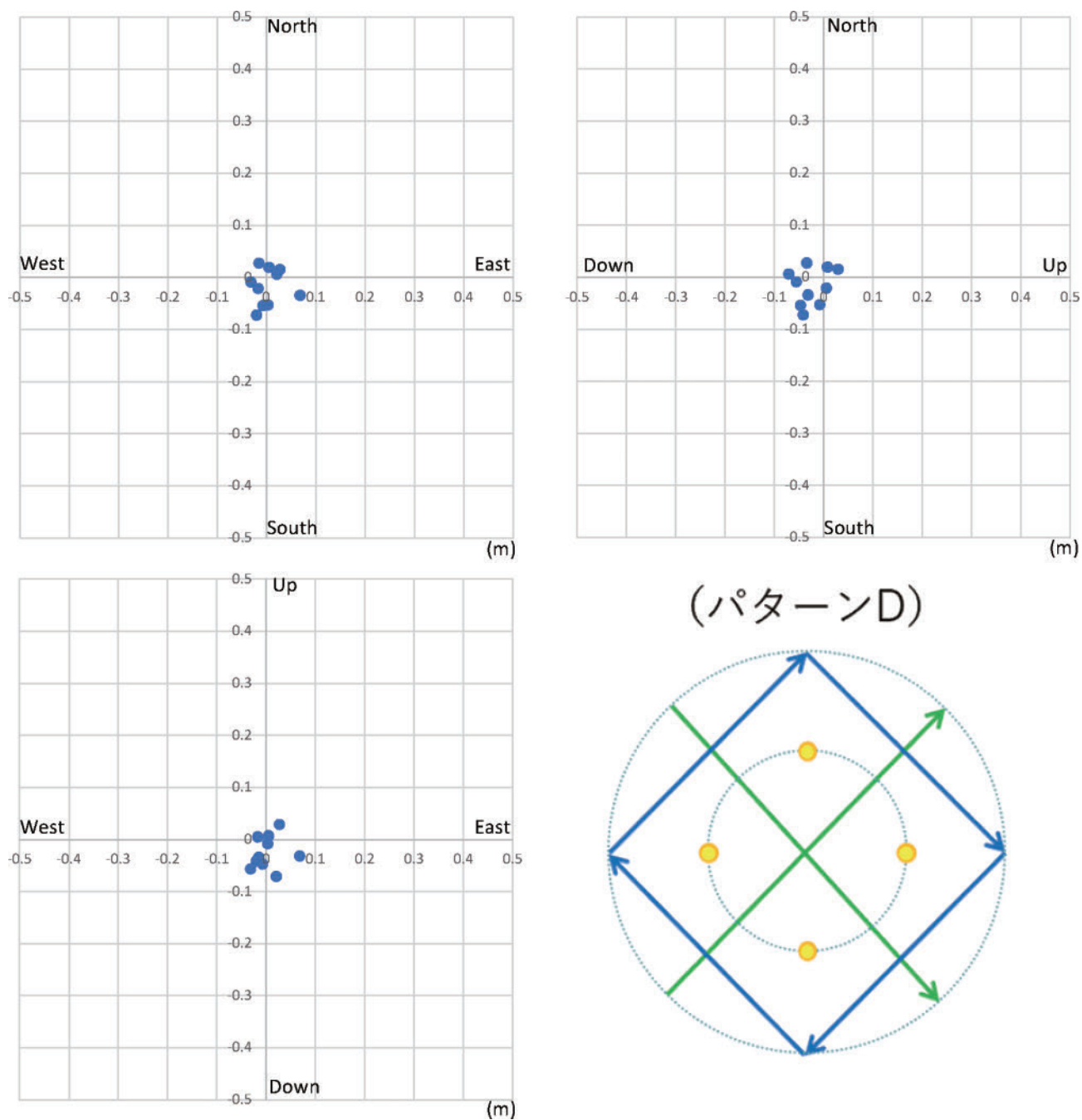


Fig. 6. Difference from the reference position of positioning solution in pattern D. The layout and meaning are the same as Fig. 3.

図 6. パターン D での測位解の基準位置からの差. 表示方法は図 3 と同じ.

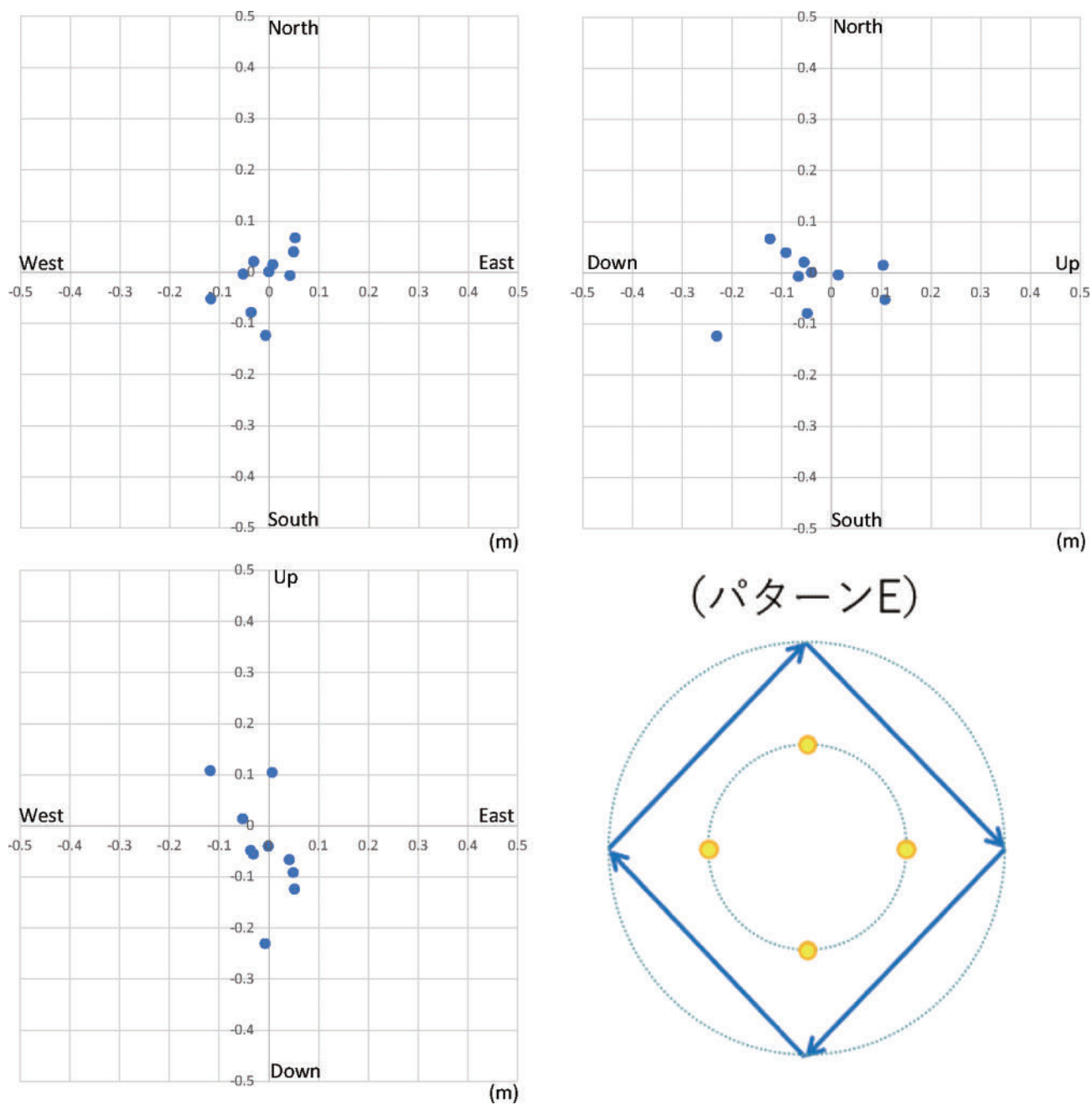


Fig. 7. Difference from the reference position of positioning solution in pattern E. The layout and meaning are the same as Fig. 3.

図7. パターン E での測位解の基準位置からの差. 表示方法は図3と同じ.

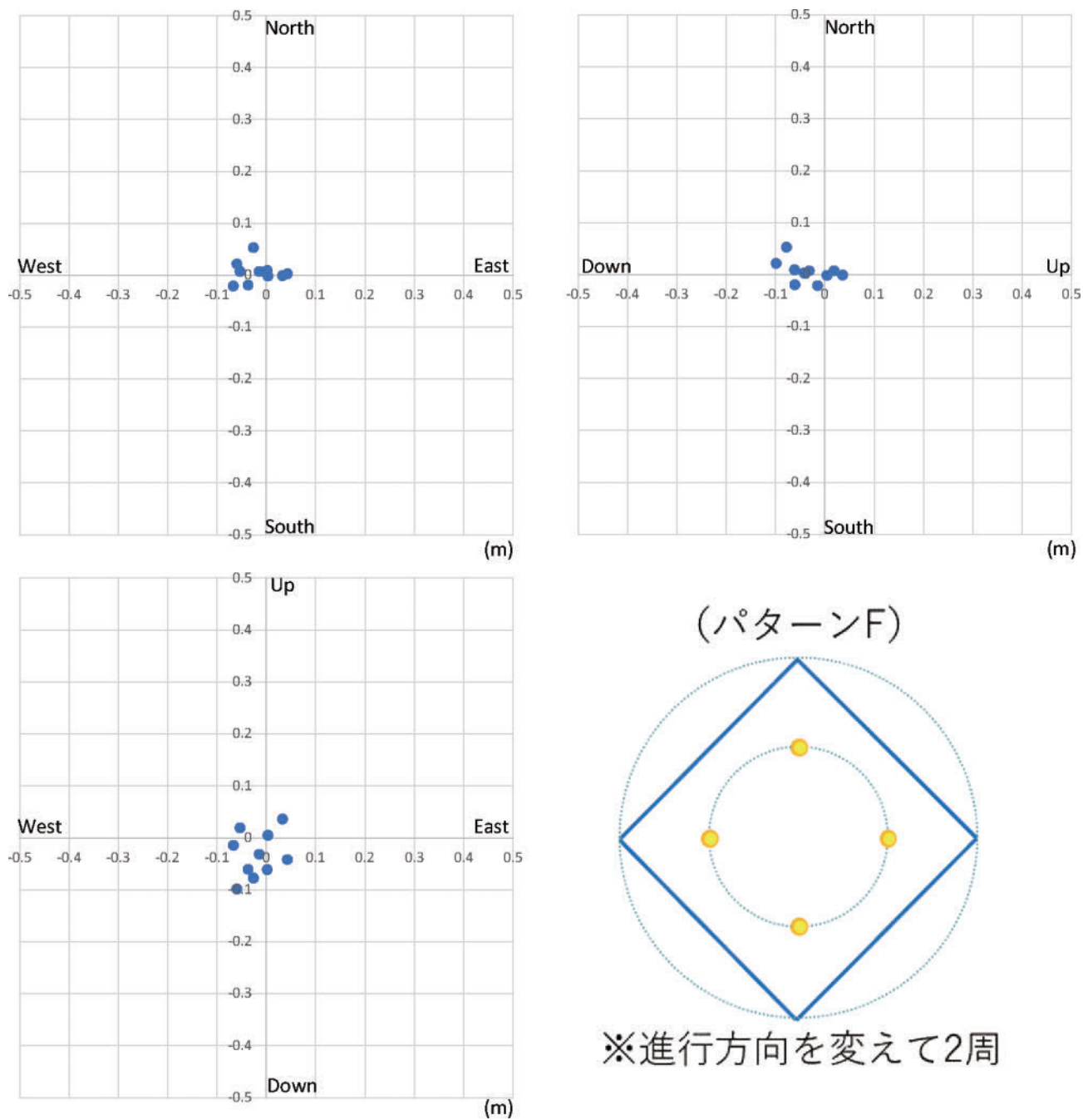


Fig. 8. Difference from the reference position of positioning solution in pattern F. The layout and meaning are the same as Fig. 3.

図 8. パターン F での測位解の基準位置からの差. 表示方法は図 3 と同じ.

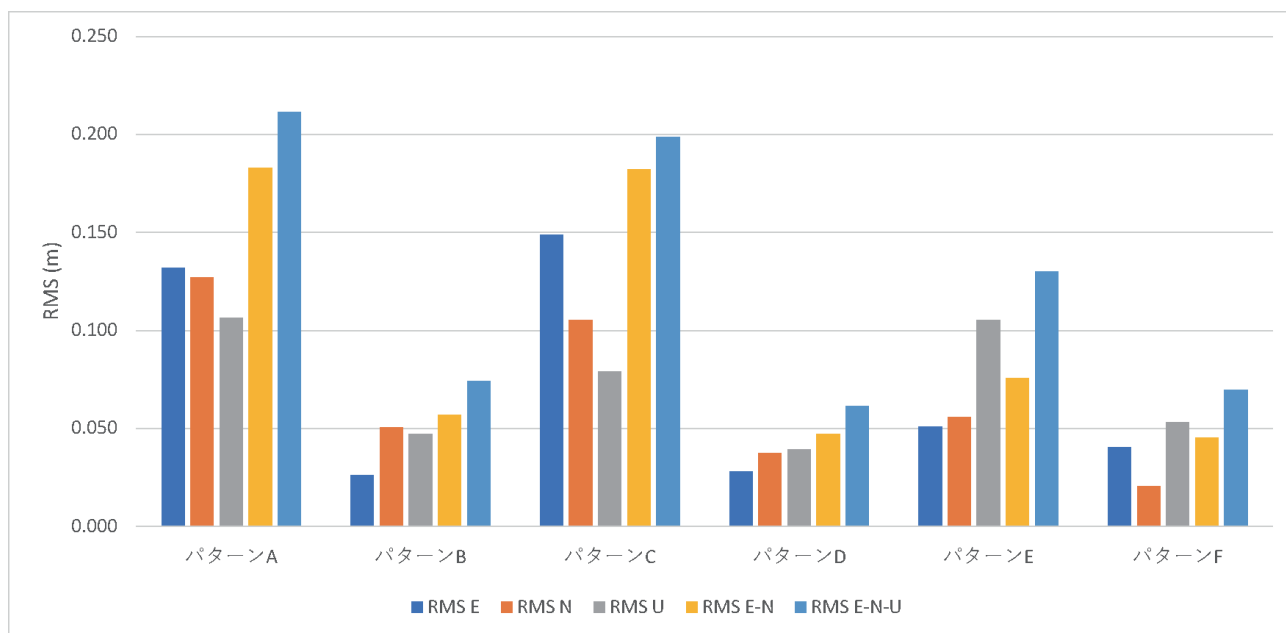


Fig. 9. RMS values of difference between the estimated and reference positions for each survey line pattern.

図9. 測線パターンごとの測位解の基準からの差のRMS.

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」及び「明洋」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

- 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
- 松下 優・小池未来時 (2018) 海底局マルチ測距手法による海底地殻変動観測の効率化, 海洋情報部研究報告, 56, 46-49.
- 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

- 渡邊俊一 (2026) 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, 海洋情報部研究報告, 64, 49-61.
- Watanabe, S., Ishikawa, T., Nakamura, and Y., Yokota, Y. (2021) Co- and postseismic slip behaviors extracted from decadal seafloor geodesy after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planets Space*, 73:162. doi:10.1186/s40623-021-01487-0
- 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
- 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
- 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,

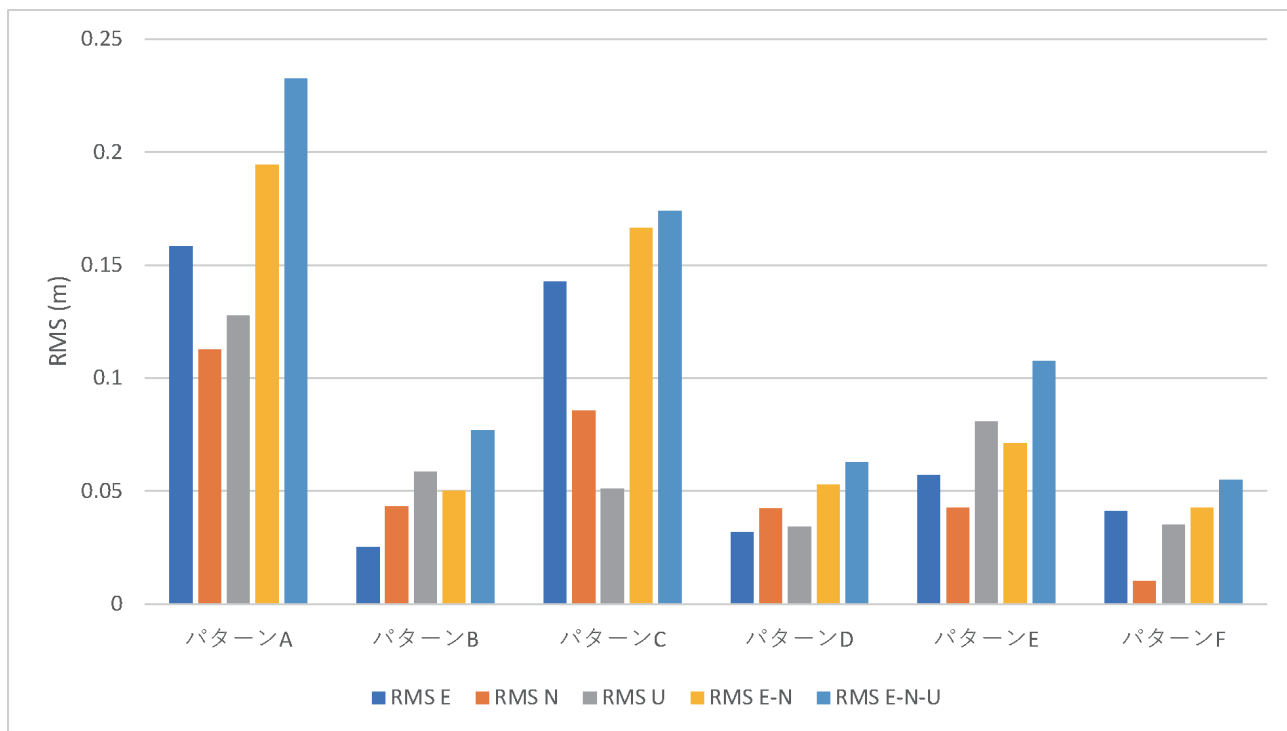


Fig. 10. RMS values of difference between the estimated and reference positions for each survey line pattern for S/V Meiyō.

図 10. 測量船「明洋」のデータについて得られた測線パターンごとの測位解の基準からの差の RMS.

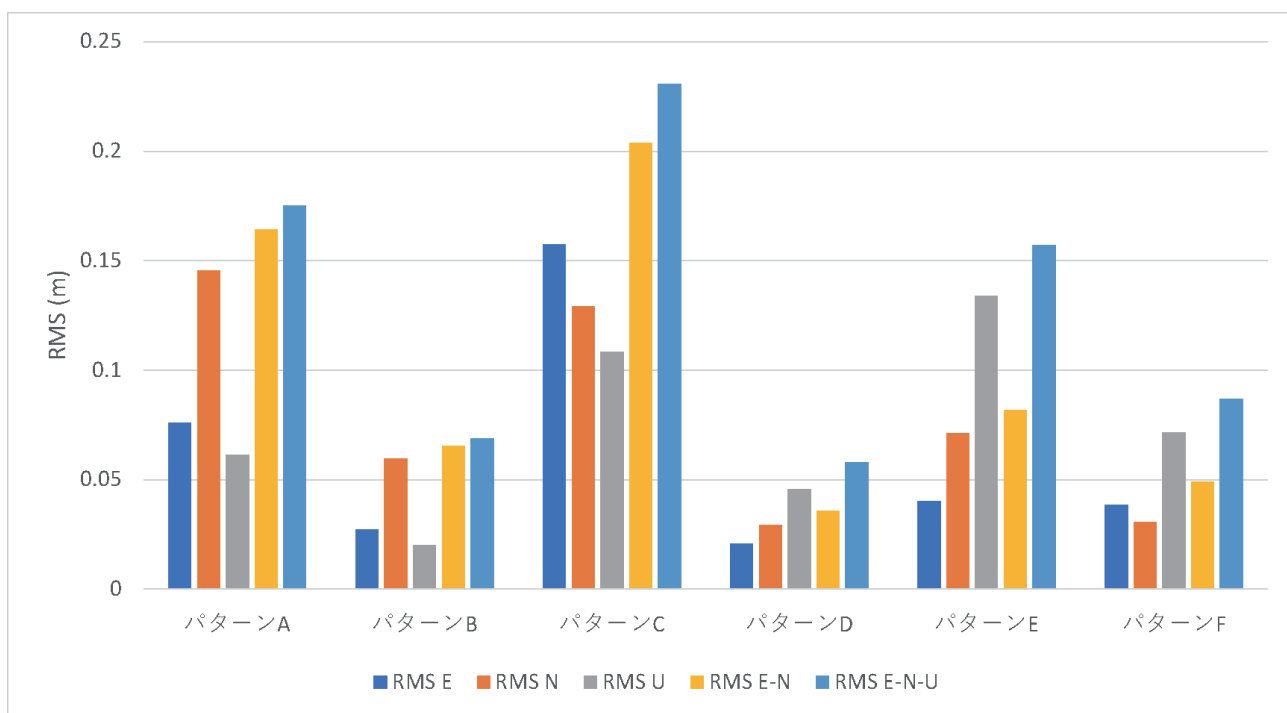


Fig. 11. RMS values of difference between the estimated and reference positions for each survey line pattern for S/V Takuyo.

図 11. 測量船「拓洋」のデータについて得られた測線パターンごとの測位解の基準からの差の RMS.

59, 95-114.

Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Nakamura, and Y. Yokota (2022) GARPOS: Analysis tool for GNSS-Acoustic seafloor positioning (Version 1.0.1). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.6414642

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

海上保安庁では太平洋沿岸を中心に海底地殻変動観測を実施している。将来、観測点近傍で大地震が発生した場合、地殻変動量推定のための緊急海底地殻変動観測の実施が求められる。その際、地震の規模によっては短時間での多点観測が必要になると想定される。こうした場合には、通常の観測よりも短時間で観測を実施するために測線を省略する必要が生じる。本研究では、緊急時の時短観測を見据え、測線省略の方法と測位精度への影響を、過去の観測データを用いて検証した。その結果、測線パターンの違いにより測位精度の劣化具合に差が生じることが確認され、特に周回測線を含む測線パターンでは明確に通常観測との較差が小さくなることがわかった。本研究の検証は想定される緊急海底地殻変動観測とは条件が必ずしも一致しないが、データ配置の影響について重要な示唆を得られた。