

## 係留ブイを用いた GPS/A 海底地殻変動観測の誤差伝播の評価

## Evaluation of the error propagation in GPS/A measurement using a moored buoy

\*今野 美冴<sup>1</sup>、木戸 元之<sup>1,2</sup>、太田 雄策<sup>1</sup>、高橋 成実<sup>3,4</sup>、福田 達也<sup>4</sup>、越智 寛<sup>4</sup>、日野 亮太<sup>1</sup>\*Misae Imano<sup>1</sup>, Motoyuki Kido<sup>1,2</sup>, Yusaku Ohta<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>3,4</sup>, Tatsuya Fukuda<sup>4</sup>, Hiroshi Ochi<sup>4</sup>, Ryota Hino<sup>1</sup>

1.東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知観測研究センター、2.災害科学国際研究所、3.防災科学技術研究所、4.海洋研究開発機構

1.Reserch Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions Graduate School of Science, Tohoku University, 2.International Research Institute for Disaster Science, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 4.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

【研究背景・目的】東北大学、JAMSTEC、JAXA は、係留ブイを用いた津波・海底地殻変動モニタリングシステム (Takahashi et al., 2014) の共同開発を進めており、東北大学は GPS/A 観測を担当している。将来巨大地震が発生すると予想される紀伊半島沖熊野灘で現在 3 回目の試験観測を実施している。係留ブイ GPS/A 観測の目標測位精度は、巨大地震に伴う地殻変動を即時把握できるよう 1 m と設定している。本観測システムのブイは、強潮流域で連続観測できるよう水深の 1.5 倍程度の長さの索で係留されているため、(1) 定点保持が難しく、(2) 海底局アレイ中心に必ずしも位置しない。これらは、最終的に推定するアレイ重心位置に (1) アレイ形状 (各海底局間の相対的な位置関係) 誤差の影響が観測位置に依存した系統的な誤差として表れる、(2) データに含まれる誤差がアレイ中心で測位した場合の数倍以上拡大されて表れる、と考えられるが、このような状況の誤差伝播評価を行った例はない。そこで、本研究では係留ブイ GPS/A 観測を想定した条件で数値実験を行い、測位結果への誤差伝播量を見積もった。また、数値実験結果を第 2 回試験観測 (2014) の測位結果と比較検討し、測位精度向上策を提言した。

【数値実験】係留ブイ GPS/A 観測における誤差要因には、海上局位置推定誤差、姿勢推定誤差 (位置に変換すると海上局位置水平成分誤差)、走時検出誤差、アレイ形状誤差が考えられる。このうち、海上局位置水平成分の誤差はアレイ重心位置に等倍で反映される。そこで、誤差伝播が未解明な以下 1-3 の誤差を与え、係留ブイ振れ回り幅を想定した海上局位置でのアレイ重心位置を推定した。これを 10 回試行した平均値と、初期値として用いるアレイ形状の重心を原点とし、各誤差を与えて推定したアレイ重心位置の原点からのずれ量を誤差伝播量とした。アレイ形状には 2014 年船舶キャンペーン観測で取得したデータを用いて推定した個々の局位置を用いた。個々の局位置の推定精度は、走時残差から水平 15 cm、上下 25 cm 程度だと考えられる。原点を中心にした 10 km 四方に 100 m 間隔で海上局位置を配置し、疑似データを作成した。第 2 回試験観測の海上局位置は、精密暦を用いた後処理キネマティック精密単独測位 (PPP) 解析 (GIPSY-OASIS II, ver. 6.3) により推定したので、測位精度は水平 ~2 cm、上下 ~4 cm 程度 (太田・他, 2006) と考えられる。最終的に以下の 3 通りの誤差を与えた。

1. 海上局位置上下成分推定誤差: 各海上局位置で独立に、4 cm (1  $\sigma$ )。
2. 走時検出誤差: 各海上局位置および各海底局で独立に、相関ピーク読み違いを想定した  $\pm 0.1$  ms、および分解能限界の  $\pm 0.01$  ms。
3. アレイ形状誤差: 各海上局位置で独立に、個々の局位置に水平成分 15 cm、上下成分 25 cm (1  $\sigma$ )。

【数値実験結果】各誤差要因の誤差伝播量は最も大きくなる領域で 1. ~ 20 cm, 2. ~30 cm, 3. 0.5--2 m となった。誤差伝播量が最も大きくなる領域は、GPS 測位で用いられる幾何的精度劣化率が高い領域と概ね一致した。誤差要因として与える量を半分にすると、誤差伝播量も半分になった。

【議論】第 2 回試験観測では、約 4 カ月間に渡り週に 1 回連続 11 回の音響測距 (ショット間隔約 1 分) を実施した。測位精度 1  $\sigma$  (東西/南北) は、解析可能なデータが揃った 13 週全体で 0.7/1.0 m であった。観測期間全体の測位結果は、系統的な誤差が大きい 5, 7 週目を除き 誤差要因 1-3 の誤差伝播の和により説明可能であり、最も大きな誤差要因はアレイ形状誤差であることがわかった。数値実験では、各海上局位置での統計的な誤差伝播量を調べるためにアレイ形状に関しては 3 の条件としたが、実際の誤差は一意である。アレ

イ形状誤差を全ての海上局位置で共通にして数値実験を行うと、アレイからやや離れた場所に局所的に大きな誤差伝播が表れることから、5, 7 週目の海上局位置はそのような領域にあったと考えられる。係留ブイ GPS/A 観測の測位精度 1 m を達成するためには、誤差量と誤差伝播量の線形性から、アレイ形状誤差を数 cm オーダーで推定すればよいと考えられる。第 2 回試験観測の海上局位置は後解析で推定したので、今後長期間のリアルタイムキネマティック PPP の精度および確度を把握する必要がある。

【結論】本研究で実施した係留ブイ GPS/A 観測の誤差伝播に関する数値実験は、第 2 回試験観測結果のばらつきの特徴と概ね整合的であり、最も大きな誤差要因がアレイ形状誤差であることが明らかになった。また、係留ブイ GPS/A 観測の測位精度を向上させるためには、正確な局位置推定が最も重要であり、次にリアルタイムキネマティック PPP の測位精度評価とその向上が必要であることを示した。

謝辞：本研究で使用したデータは、文部科学省の受託研究「海底地殻変動観測技術の高度化」、および JST 戦略的イノベーション創造プログラム（レジリエントな防災・減災機能の強化）の研究の一環で得られたものです。記して感謝いたします。

キーワード：海底地殻変動、係留ブイ、GPS/A 観測

Keywords: Seafloor crustal deformation, A moored buoy, GPS/Acoustic measurement