

海底地盤変動観測装置による始良カルデラ海域の地盤変動観測

Observation of Ground Deformation in Aira Caldera Using a Seabed Benchmark System

味喜大介・筒井智樹・井口正人⁽¹⁾

Daisuke MIKI, Tomoki TSUTSUI and Masato IGUCHI⁽¹⁾

(1) 鹿児島市

(1) Kagoshima City

Synopsis

We installed the Seabed Benchmark System (SBB) to establish a method for direct observation of ground deformation at sea area in the Aira Caldera. The position of the SBB shifted 5 cm southwest and 5 cm downward from March 2023 until July 2024. This may be considered to be due to natural settlement of the anchor block of SBB. There are similarities between the positional changes of SBB and neighbor stations in spring and summer, which are thought to be seasonal variations. Further observations are needed to determine if the anchor movement has become sufficiently small and to quantitatively evaluate the seasonal variation. The daily averaged benchmark positions are within a range of approximately 2 cm for the horizontal component and 1 cm for the vertical component for a period of about one month, suggesting that SBB is capable of detecting ground deformation larger than approximately 1 cm in the future.

キーワード: 海底地盤変動観測装置, 始良カルデラ, 地盤変動

Keywords: seabed benchmark system, Aira caldera, ground deformation

1. はじめに

始良カルデラ周辺においては、水準測量やGNSS観測などの地盤変動観測によって始良カルデラ中央部の地下に圧力源の存在が示唆されている（例えば Yamamoto et al., 2013; Kriswati and Iguchi, 2003 など）。しかし、始良カルデラの大部分は海域であるため圧力源近傍の地盤変動を直接観測することは困難であった。我々は海域における地盤変動を直接観測する手法の確立を目指して始良カルデラ内の海域に海底地盤変動観測装置（以下、SBB）を設置した。SBBは2025年3月6日に始良カルデラ中央部に近い桜島北東の水深約30 mの海域に設置された（fig. 1）。筒井ら（2024）は設置後約1年間のSBBの測位結果を報告した。以下では、SBBのデータ処理の手順、また、設置

後約2年間の間に得られたデータの特徴について報告する。

2. SBBの概要と観測データの取り扱い

2.1 SBBの構造と搭載機器

SBBは海底に沈めたコンクリート製のアンカー基台に浮体の浮力によって自立する鋼管製の観測塔を接続したもので、接続部は直交する2つの回転軸をもつユニバーサルジョイントになっている（Fig. 2）。このため観測塔は潮流や風を受けて常に揺動している。観測機器は観測塔の海上部に設置され、GNSSアンテナおよび受信機と電源機器および通信機器で構成されている。常に変化する観測塔の姿勢（傾き）を検出するためにGNSS受信機は2アンテナ受信機

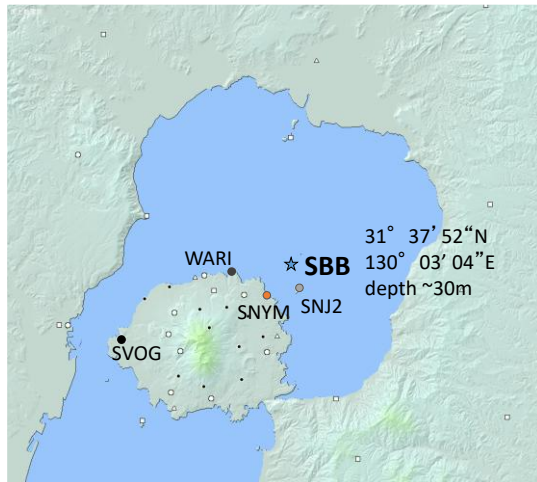


Fig. 1 Location of SBB

(NovAtel製PwrPak-7D受信器およびGNSS-802アンテナ)を2台,合計4つのアンテナを備えている。これらのアンテナは観測塔に直交する同一平面上で1辺がほぼ東西かつユニバーサルジョイントの上部回転軸と平行でその対角が北に向く正三角形の頂点(以下, 傾斜測定用アンテナ)および重心(以下, 測位用アンテナ)の位置に配置されている。測位用アンテナは観測塔の軸線上に位置する。

各々のアンテナで得られたGNSS受信データは15秒間隔で受信機の内蔵メモリに記録され,モバイル通信網を介して回収される。

2.2 SBBで得られたGNSS受信データの処理

SBBでは, ユニバーサルジョイントの下部回転軸の中央 (Fig. 2のBM) を測位点として, 4つのGNSSアンテナの受信データを基にその位置を算出する。

まず, 各アンテナの受信データに対してGNSS連続観測点SNYM (Fig. 1参照) を基準局としてPPK解析を行い,各アンテナの観測エポック毎の位置を決定する。PPK解析にはrtklibソフトウェア(Takasu,2013)を用いた。次に, 観測エポックごとに, 筒井ら (2022)・Tsutsui et al. (2024) に示した方法で傾斜測定用アンテナの位置から観測塔の傾斜を求め, それを用いて測位用アンテナの位置から測位点の位置を算出する。

さらに, 得られたエポック毎の測位点の位置を日毎に平均した。平均処理にあたっては外れ値を除外するため, 1) 東西・南北・上下のいずれかの方向成分において中央値から2m以上離れる, 2) いずれかのアンテナのPPK解がfix解でない, 3) 傾斜測定用アンテナ位置の重心と測位用アンテナの位置が1cm以上異なる, 観測エポックを除外し, 4) その平均値から標準偏差の2倍以上異なる観測エポックをさらに除外して平均処理を行った。

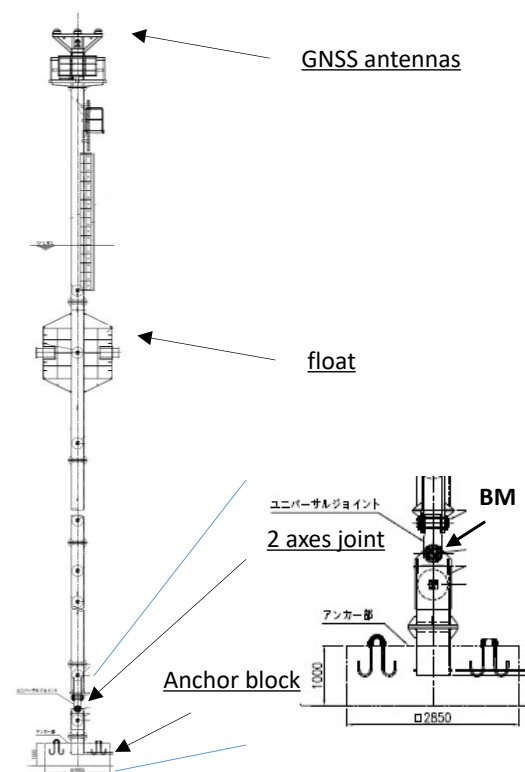


Fig. 2 Configuration of SBB

観測データの回収から日平均測位点位置の算出までの処理は自動処理アプリケーションを開発して運用している。

3. 日平均測位点位置の時間変化

3.1 位置ギャップの発生とその補正

SBBの日平均測位点位置の時間変化をFig. 3に示す。図の白丸は前後それぞれ2週の範囲の平均値から標準偏差の2倍以上外れる値を示す。SBBの設置後約2年間に位置が不連続に変化するギャップが4か所認められる。なかでも最大のは2024年8月8日に発生し, 南西に35cm, 下方に4cmにおよぶ。この日には日向灘を震源とするM7.1の地震が発生しており, SBBに近い桜島北岸のGNSS連続観測点では東方に最大2cmの変位が観測された。SBBの位置の変化量は地震に伴う地殻変動として期待されるより明らかに大きく, また, 地震後の2024年8月21日に実施した水中ドローンによる撮影によって, アンカー基台接地部の北側と東側にアンカー基台の移動の痕跡と考えられる溝状の窪みが確認されたことから, この位置ギャップは地震動によってアンカー基台が移動したことによるものと考えられる。

このほか, 2023年8月8日付近, 2024年8月28日付近および2024年11月25日付近にも位置ギャップが見られる。このうち2023年8月8日付近と2024年8月28日付

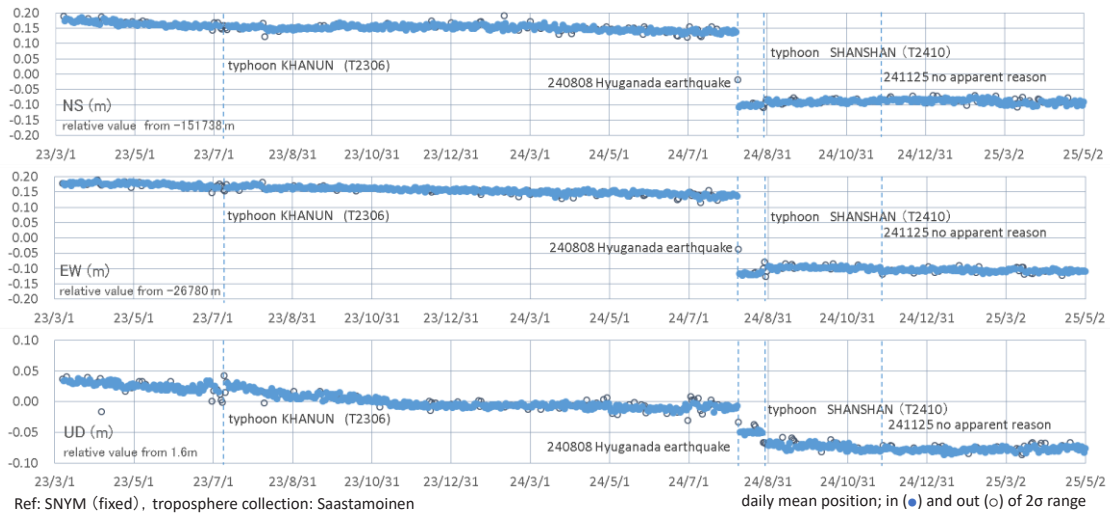


Fig. 3 Change in daily mean position of SBB

近は台風が接近していた。これら3か所の位置ギャップは2024年8月8日より小さく、水平および上下方向にそれぞれ1-2cmであるが、陸域のGNSS連続観測点ではこのようなギャップは見られないことから、これらも風浪によるアンカー基台の位置や姿勢の不連続な変化によって発生した可能性が高い。日平均測位点位置にみられる上記4か所のギャップについては、南北、東西、上下の成分ごとに前後の16-20日間の平均値の差を用いて補正した。

3.2 日平均測位点位置の時間変化の特徴

位置ギャップを補正したSBBの日平均測位点位置をFig.4に示す。位置のばらつきは時期により多少異なり春季から夏季にやや大きい傾向があるが、1か月程度の期間をとったときの日平均測位点位置の各成分の標準偏差は、南北成分および東西成分について3

– 8 mm (平均5 mm)、上下成分について2–6 mm (平均4 mm) であり水平成分で約2 cm、上下成分で約1 cmの範囲におさまる。

SBBの設置以降、日平均測位点位置は全体として水平成分は南西方向に上下成分は沈降方向にゆるやかに変化している。筒井ら (2024) が指摘したように2023年12月頃以降上下成分の沈降速度が小さくなっているが、水平成分については2023年12月以降も南西方向への位置変化がさほど変わらない速度で続いているように見える。このような傾向は2024年7月頃まで継続し、2024年8月以降は位置変化の速度は各成分ともそれまでより小さくなっている。また、2023年から2025年まで共通して3月から7月にかけて南方への移動速度が他の時期より大きくなる傾向が認められる。

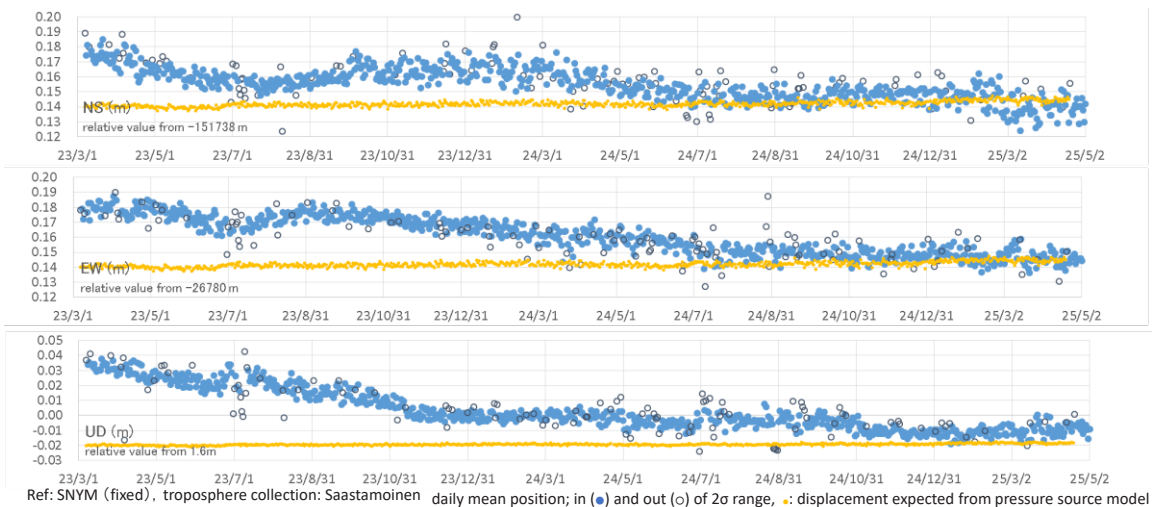


Fig. 4 Change in daily mean position of SBB (after correcting gaps)

3.3 近傍のGNSS観測点との比較

SBBに近い陸上の観測点3点(SNYM, SNJ2, WARI)とSBBの位置をSVOG(観測点の位置はFig. 1参照)に対する相対的な位置変化として示したものをFig. 5に示す。SBBの位置変化は、2024年7月頃までは周辺の観測点と異なり相対的に南西および下方に移動しているが、2024年8月以降はSBBの位置変化が小さく近隣の観測点と類似した傾向を示す。また、前節で述べた3月から7月にかけて南方への移動速度が他の時期より大きくなる傾向はSBBだけでなく近隣の観測点でも認められる。



Fig. 5 Comparison between SBB and adjacent GNSS stations

4. 考察

始良カルデラを東西に横切るGNSS基線の水平距離の変化を基に為栗ら(2022)が示したS波低速度領域の形状を模した圧力源による始良カルデラ下の圧力源モデル(味喜ら, 2024)から期待されるSNYM-SBB間の相対的な位置変化を、Fig. 4に黄色のシンボルで示した。2024年7月頃までのSBBの南西および下方への移動は、圧力源モデルから期待される地盤変動や近傍のGNSS観測点の位置変化(Fig. 5)とは明らかに異なっていてSBB設置位置の地盤変動を直接反映しているとは考えにくく、SBBのアンカーの自然沈降や姿勢変化に起因すると思われる。また、2024年8月以降のSBBの位置変化の速度が小さいことは、地震によるアンカーの移動によってアンカーの着底状況がそれ以前より相対的に安定し自然沈降や姿勢変化の進行が緩やかになったと解釈することができる。他方、SBBと近隣の観測点の位置変化の時期による傾向が類似していることは季節変動の反映である

可能性がある。

このように、SBBで得られた位置変化は設置後約2年の時点では設置位置の地盤変動を直接示しているとは言えない。自然沈降などのアンカーの移動が充分小さくなったかの判断や、季節変動の量的評価を行うにはさらに観測を継続する必要があるが、SBBの日平均測位点位置が短期的には1-2cmの範囲におさまっていることから、将来的にあるいはアンカーの自然沈降や季節変動より進行のはやい変動であれば、SBBによってcmオーダーの地盤変動を検出可能であると考えられる。

5. まとめ

始良カルデラ中央により近い海域での地殻変動を観測する手法開発の目的で海底地盤変動観測装置を設置した。

設置後約2年間に日平均測位点位置に複数回のギャップが発生した。2024年8月8日の位置ギャップは特に大きく、同日に発生した日向灘を震源とする地震の際にアンカー基台が移動したと考えられる。

ギャップ補正後の日平均測位点位置は上記の地震までに、南西方向に約5cm、下方方向に約5cm移動した。これはアンカーの自重による沈降と姿勢変化の結果と解釈可能である。上記の地震以降、SBBの位置変化は小さくなったことは、アンカー基台が移動した後に着底状況がより安定したことを示唆する。また、SBBや周辺のGNSS連続観測点の測位結果には季節変動と考えられる変化も認められる。

自然沈降などのアンカーの移動が充分小さくなったかの判断や、季節変動の量的評価を行うにはさらに観測を継続する必要がある。

SBBの日平均測位点位置のばらつきからみて、SBBによってcmオーダーの地盤変動が検出可能であると考えられる。

謝 辞

本稿は、令和7年度原子力施設等防災対策等委託費(火山活動及び火山モニタリング評価に係る調査・研究)事業の成果の一部です。記して感謝いたします。

参考文献

味喜大介・筒井智樹・井口正人(2024): 始良カルデラ周辺の地盤変動に関する有限要素法モデルを用いた圧力源形状の検討(続報), 京都大学防災研究所年報, 67B, pp.87-90.

為栗健・八木原寛・筒井智樹・井口正人（2022）：
高分解能な3次元速度構造解析による始良カルデラ
下のイメージング，火山，第67巻，pp. 69-76
筒井智樹・味喜大介・井口正人（2022）：ピラー直
結型海底地盤変動観測装置に関する測位実験，京
都大学防災研究所年報，65B，pp.48-66.
筒井智樹・味喜大介・井口正人（2024）：始良カル
デラにおける海底地盤変動観測装置の設置後1年間
の挙動，京都大学防災研究所年報，67B，pp.79-
86.
Kriswati, E. and Iguchi, M. (2003): Inflation of the Aira
caldera prior to the 1999 eruptive activity at Sakurajima
volcano detected by GPS network in south Kyushu. Ann.
Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 46B, pp. 817-
826.

Takasu, T. (2013) RTKLIB: an open source program
package for GNSS positioning, <http://www.rtklib.com/>
Tsutsui, T., Miki, D., Iguchi, M. (2024): Seabed
benchmark system in Aira caldera; Earth, Planets and
Space, <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02044-1>
Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N.,
Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T.,
Uchida, K., Nakamoto, M. (2013): Vertical ground
deformation associated with the volcanic activity of
Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as
revealed by repeated precise leveling surveys, Bull.
Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, pp. 137-151.

（論文受理日：2025年8月29日）