

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

Behavior of Seabed Benchmark System during the First Year after Its Installation in Aira Caldera

筒井智樹・味喜大介・井口正人⁽¹⁾

Tomoki TSUTSUI, Daisuke MIKI, and Masato IGUCHI⁽¹⁾

(1) 鹿児島市危機管理局

(1) Crisis Management Division, Kagoshima City

Synopsis

This manuscript describes initial behavior of the SeaBed Benchmark system during the first year. The device installed for purpose of the feasibility study for monitoring activity beneath a flooded caldera volcano, and located in the center of the Aira Caldera, South Kyushu, Japan. Southward displacement appeared for the first three months and then its displacement changed into southwestward, and total displacement become ca. 4 cm southwestward for the first one year. Subsidence up to ca 4 cm appeared for the first nine months and vertical displacement seems to be steady after then. However, these displacements are quite local phenomena because no obvious displacement appeared in the surrounding stations. It is necessary to watch the all component of the displacement continuously.

キーワード: 海底地殻変動観測, GNSS, 始良カルデラ

Keywords: Marine geodesy, Global Navigation Satellite System, Aira Caldera

1. はじめに

大部分が水面下にあるカルデラ火山の地下活動に伴う垂直変動と水平変動の詳細な姿を知る試みとして、始良カルデラでは2023年3月に海底地盤変動観測装置SBBが設置された(Tsutsui et al. 2024). 本稿ではこの海底地盤変動観測装置の設置後1年間の挙動について報告する.

火山活動の観測および監視では地盤変動を時系列として取り扱うために、連続した観測値が得られる必要がある.

Tsutsui et al. (2024) の海底地盤変動観測装置は、独自に考案されたユニバーサルジョイントでアンカーと結合された鋼製柱上でGNSS測位を行う形式を観測装置の構成に採用した. この方式はTsutsui et al.

(2024) がオリジナルの例である. イタリアでは海底に係留されたアンカーとワイヤーで結合されたブイに搭載されたGNSSによる測位法が火山地帯の海底地殻変動の観測法として実用化されている. ワイヤー結合ブイ形式のGNSS(Iannaccone et al., 2017; Martino et al., 2014; Xie et al., 2019)では定点における垂直変動量の連続観測が容易である. しかしワイヤー結合方式のブイでは水平方向の拘束が完全でないために水平変動の計測ができないという欠点がある. 一方, Tsutsui et al. (2024)が採用した方式はGNSSが装着されたブイが自由に傾動して外力を受け流すようにしている点は同様であるが, ユニバーサルジョイントを用いて関節部の遊間を排除した構造としたことに加えて, 装置頂上の測位結果に姿勢補正をおこなうことで水平方向の測位を可能にしている.

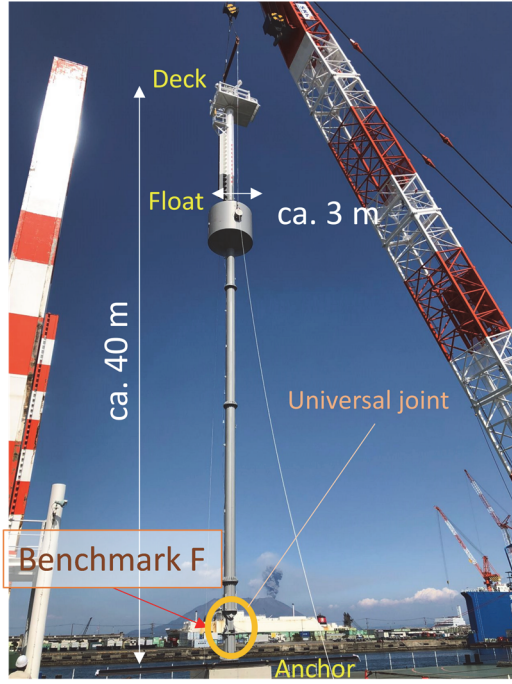


Fig. 1. SeaBed Benchmark (SBB) device on the carrier.

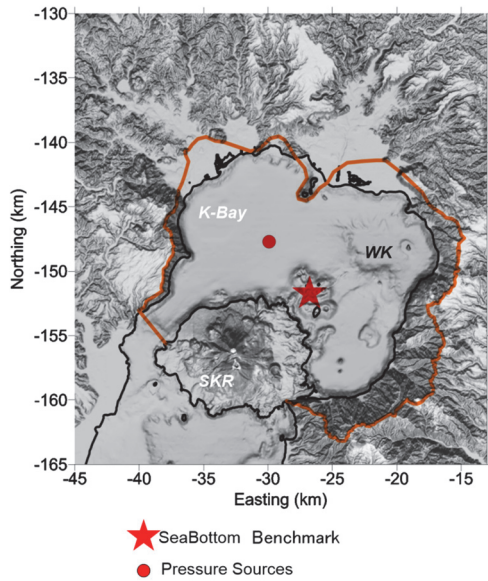


Fig. 2. Detailed map around SBB. An asterisk marks SBB location. A solid circle represents a pressure source (Eto et al., 1997; Yamamoto et al., 2013). Asterisk: SeaBottom Benchmark (SBB), Red boundary: Aira Caldera, K-Bay: Kagoshima Bay, SKR: Sakurajima Volcano, and WK: Wakamiko sub-caldera.

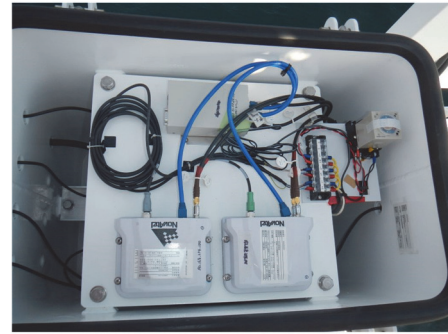
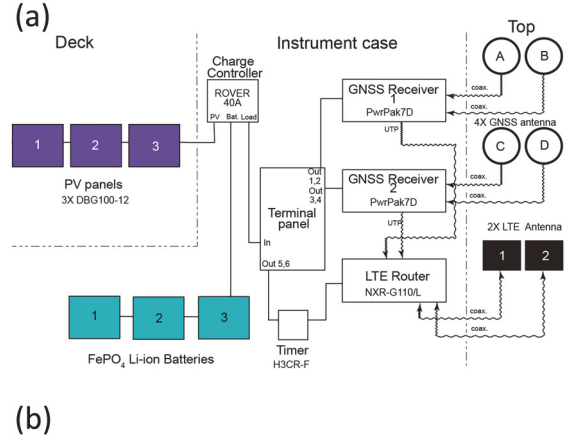


Fig. 3. a) Onboard system. b) The top layer in the instrument case. Two GNSS receivers, a LTE modem, a terminal panel, and a timer module are installed.

海底における火山性地盤変動観測は日本国内では他に例が報告されていない。設置環境および設置後1年間の測位結果の推移を本稿にまとめて記述することで、今後の発展に寄与したいと考える。

2. 海底地盤変動観測システム

SBBの概略はTsutsui et al. (2024) に記載されている。Fig. 1に海中投入前日に直立姿勢にされたSBBを示す。SBBは陸上では自立しないために、ヤードで組み立て後、クレーンで吊って直立姿勢に保持した。Fig. 1の撮影の翌日、SBBはこのまま投入場所まで輸送のうえ海中に投入された。投入場所をFig. 2に示す。

2.1 観測装置本体の構成

SBBの機器構成はTsutsui et al. (2024)の通りである。SBBの機器接続をFig. 3aに示す。ソーラーパネル以外の計測機器は内寸奥行き40 cm×幅70 cm×高さ65 cmの観測計器容器内に収納されている。SBBの観測計器容器内部の様子をFig. 3bに示す。観測計器容

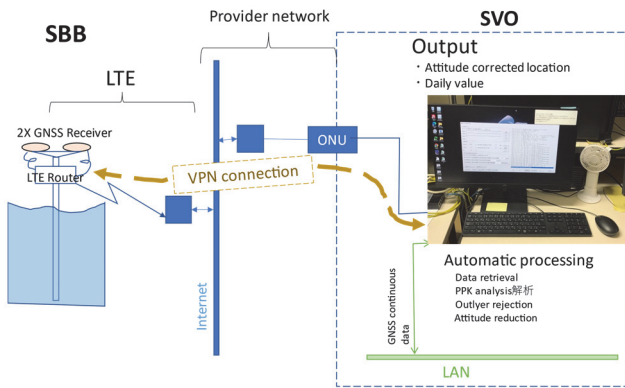


Fig. 4. Communication system of SBB.

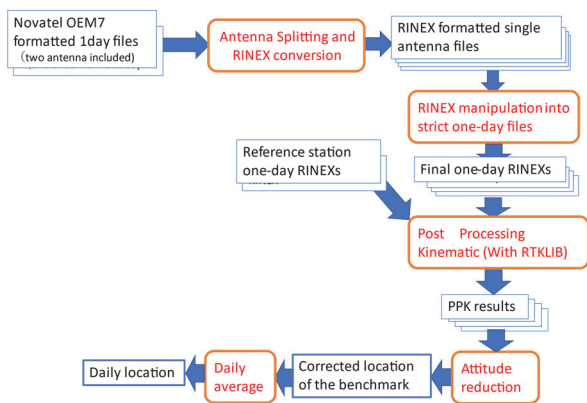


Fig. 5. SBB automated data processing system

器内部は3層に分かれて機器類が配置されている。計測装置（GNSS受信機、モバイルルータ、タイマースイッチ）は最上層に配置されている。電源系統は中間層と最下層に配置され、中間層にチャージコントローラーが、最下層にリン酸鉄リチウムイオン電池が配置されている。

2.2 自動姿勢補正付きデータ収録装置

Fig. 4にSBBで得られたデータの流れを示す。海上のSBB上では処理を行わずGNSS受信機内部にデータを蓄積する。基地局（火山観測所）からの呼びだしに応じて、GNSS受信機に蓄積された測位データは、基地局からの呼びだしに応じてモバイルルータを介して商用モバイル通信網を経由して基地局に回収される。

SBBでは揺動するブイの姿勢に由来する位置のオフセットを補正して、海底のアンカーの位置（厳密にはユニバーサルジョイントの最下軸Fの中央）を算出する必要がある。SBBでは最上部に4基のGNSS

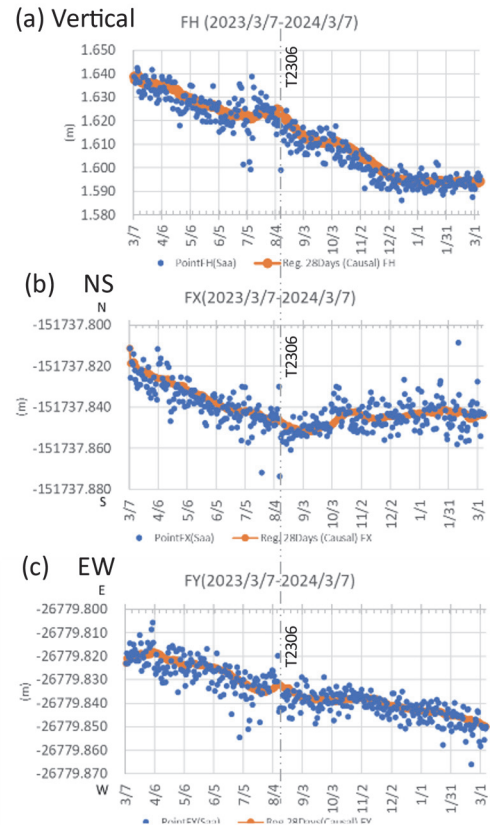


Fig. 6. Corrected position at the benchmark on SBB from 7th Mar 2023 to 7th Mar 2024. Blue dots are raw values and orange curves are their 28-day running average.

Table 1. Rejected Epochs

- Unfixed epochs,
- Epochs with offset distance more than 1.0 cm between the antenna A and the centroid of the triangle BCD,
- Epochs that either of FX, FY, or FH are lying more than 2 meters out from its median.
- Epochs that either of FX, FY, or FH are lying more than two-sigma out from its average.

アンテナを設置し、すべてのアンテナ毎に同時に測位データを取得する。

SBBは設置と同時に試験観測運用を始めるので大量のデータを連続的に処理する必要がある。この点は筒井ら(2022)の検証実験と異なる点である。ここでは筒井ら(2022)の姿勢補正アルゴリズムを採用した自動処理システムを構築して、SBBからのデータ

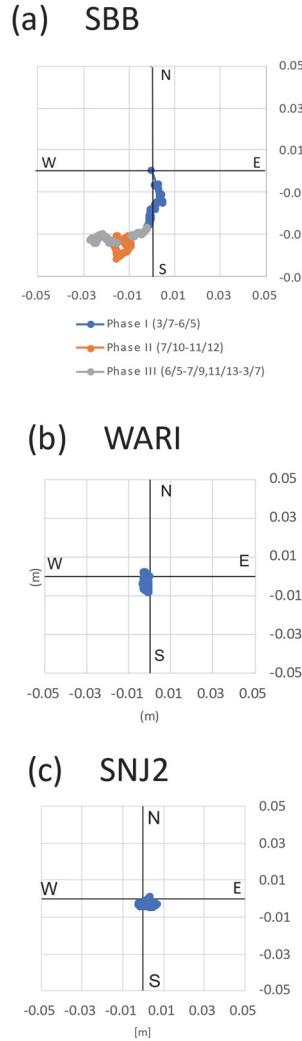


Fig. 7. Horizontal trajectories from 7th Mar 2023 to 7th Mar 2024, a) SBB with color coded with three phases. b) WARI and c) SNJ2 with whole period from 7th Mar. 2023 to 7th Mar. 2024.

取得に備えた。またPPK解析にはRTKLIBパッケージ (Takasu, 2013)のRTKPOSTを用いた。PPK解析の際の基準点にはSBBの南南西約2.2 kmに位置するSNYM観測点を用いた (Fig. 7a)。SNYM観測点は桜島北東岸に設置されている。以降の解析結果の記述で特に断りのない場合はSNYM観測点を基準としている。

Fig. 5にSBBデータの自動処理の流れを示す。火山観測では長期にわたる連続データが重要であるために、15秒間隔で得られた測位結果から1日平均データを算出して最終出力とすることにした。データの自動処理にあたり、試験観測運用であることを考慮し

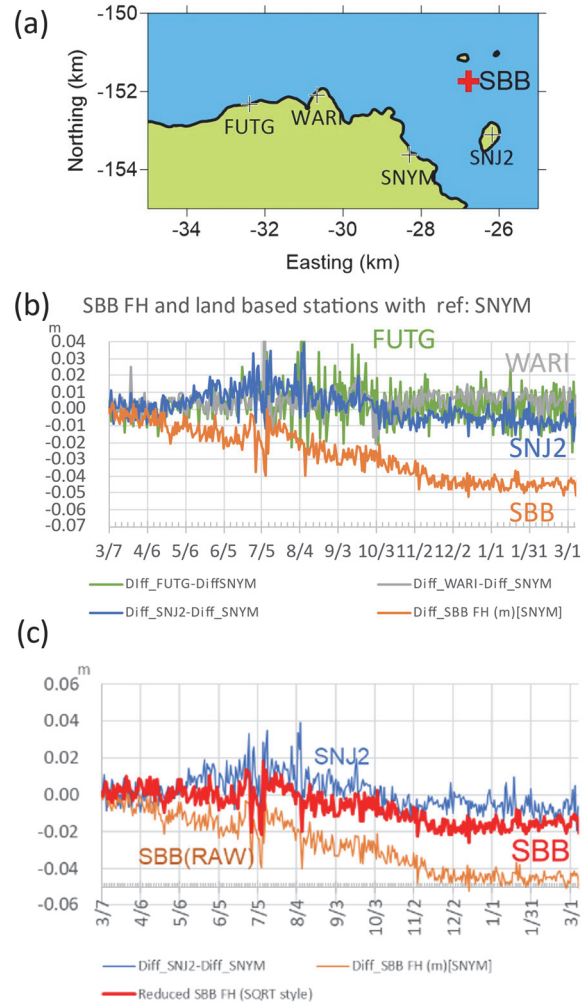


Fig. 8. a) GNSS stations around SBB. b) Vertical displacement of the proximal stations and that of SBB since 7 Mar 2023. c) Detrended vertical displacement with square-root approximation and raw vertical displacement of SBB and that of SNJ2

て処理過程の中間データを取り出せるようにするとともに、欠測や瞬断によって不規則に生成された生ファイルにも対応できるようにした。

PPK解析後に1日分のデータでTable 1に示す異常なエポックを除去したものを一日分平均して「一日値」として保存することにした。

GNSS測位結果には種々の理由から異常な値を含みエポックが多く含まれる。異常なエポックの除去は残された結果の質を確保するために必要なことであるが、極端すぎる基準を設けると逆に有効なデータの数減少してしまう。Table 1のデータ除去基準は設置後約半年間の測位結果の分布を検討して決定

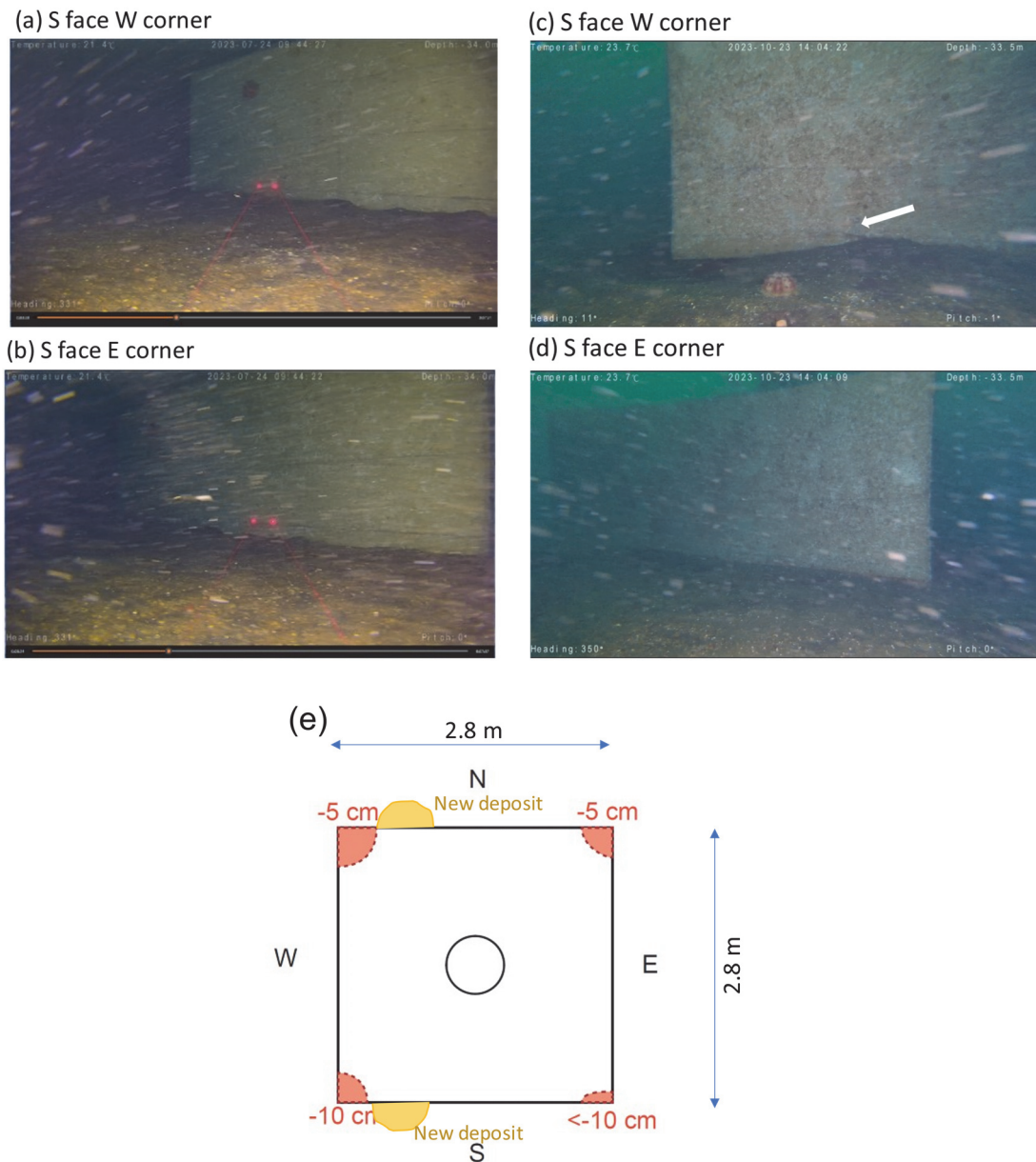


Fig. 9. Underwater photographs of the south face of the anchor block. a) The west corner, b) the east corner before T2306, c) the west corner, and d) the east corner after T2306. An arrow in the panel c points the previous surface mark. A set of twin red marker indicate 10 cm in the panels a and b. e) A sketch of bottom condition of the anchor. Orange areas are washouts and yellow areas are sediments.

された。データ除去基準とその検討の詳細については稿をあらためて報告することにする。

3. 観測データ

Fig. 6 に1年分の傾斜補正済み測位結果1日値を示す。いずれも2023年3月7日の設置直後から右下がりのグラフが現れており、設置直後から測位値が速い

速度で変動している。しかし、いずれの成分も1年間のうちにふるまいが変化しているように見える。

Fig. 6aに上下成分の推移を示す。上下成分では2023年12月まで単調な沈下が進むのに対して、12月以降に沈下がほぼ止まっている。また8月以降10月までの期間では値の揺らぎが大きくなっている。

Fig. 6b に示される南北成分では2023年8月まで単調に南方向への移動が見られるが、8月頃を境にそれ

以降10月までの期間では若干の北方向への移動が現れていた。10月以降は値が落ち着いている。

Fig. 6c に示される東西成分では全期間を通して西への移動が見られるが、2023年8月以降ではグラフの傾きが緩くなっている。

測位点Fの測位結果の水平方向の軌跡をFig. 7aに示す。Fig. 7aは、Fig. 6bおよびcに示される28日移動平均をとった水平成分変位を軌跡として作図したものである。Fig. 7aではSBBは設置後の1年間で南西方向に約4 cm移動していることがみとめられる。年平均移動速度は0.07 mm/dayである。

設置後1年間のうちには水平成分の変化の傾向が途中で変化していることと、時期によっては大局的な変化とは別の変化をしていたことがみとめられる。水平成分の動きが大きく変化するのとは2023年6月初めである。それまで南向きに測位点が移動していたが、6月初め以降は西向きに測位点が移動するようになる。西向きに測位点が移動するようになってから1ヶ月後に測位点は不規則な動きに移行し、11月末までその動きが継続する。11月末以降はふたたび測位点は西向きに移動するようになる。

先述のSBBの測位点の動きが地下の圧力源の動きを表しているかどうかを検討する必要がある。Fig 8aにSBBの周囲に展開されているGNSS連続観測点の配置を、bに2023年3月7日を基準としたこれらの常設点の上下成分とSBBの上下成分の傾向とを比較して示す。周囲の常設点のトレンドがほとんど水平であるのに対し、SBBは11月下旬まで右下がりのトレンドを示した後、11月下旬以降では水平なトレンドに移行する。

動きの大きい2023年3月から11月下旬までの上下変動のトレンド h_0 は、設置後の経過日数 D に対して

$$h_0 = 0.0016\sqrt{D} \quad \text{でよく近似できる。この式を用いて}$$

トレンド除去を行ったSBBの上下成分をFig. 8cに示す。同期間における南北方向のトレンド dx は

$$dx = -0.020\sqrt{D} + 0.0015 \quad , \quad \text{東西方向のトレンド}$$

$$dy \text{ は } dy = 7.0 \times 10^{-7} D - 0.0015 \quad \text{がよい近似を与える。}$$

Fig. 7b, cにそれぞれ観測点WARI, SNJ2の水平軌跡を示す。Fig. 7aとこれらの軌跡を比べると、SBBの水平移動量は常設点のそれよりも大きい。観測データのみかけの傾向から判断するならば、11月末まではSBBの観測データは始良カルデラの火山活動にともなう変動を直に表しているとは考えにくく、設置直後のアンカー直下の海底土の圧密を反映したSBBだけの動きを反映している可能性のほうが高いと考え

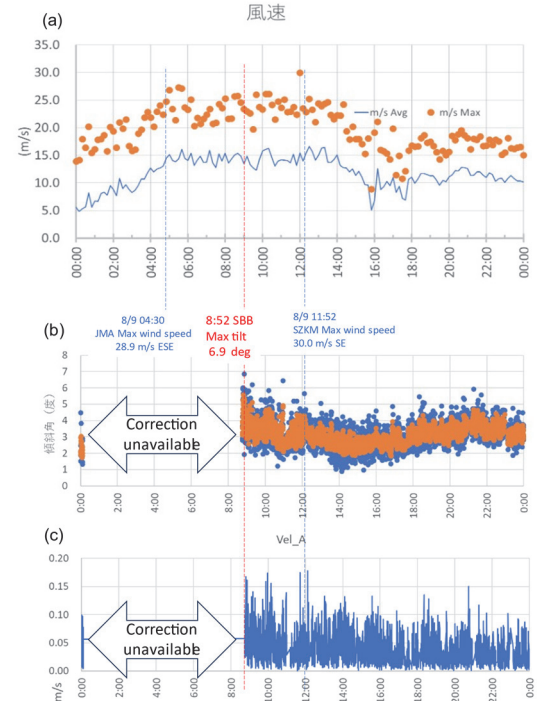


Fig. 10 Tilt of the shaft and movement of the Antenna A under the typhoon T2309 during whole day of 9 Aug 2023. a) Wind speed at the station SZKM, b) Tilt of the shaft, and motion velocity of the antenna A.

る。もしそうだとするとSBBアンカー直下の不均一な圧密の進行によるアンカーの南西方向傾斜の増大によって測位点位置のみかけの移動が起きているのかもしれない。

SBBによって得られた傾斜補正後の測位値はアンカー直上の測位点F(Benchmark F)の位置座標である。測位点FはFig. 1に示されるようにアンカー底面から約2.5 m上方のユニバーサルジョイントF軸の中央に設定されており、アンカーが平行移動しなくても傾斜によってその水平座標に変化を与えることができる。1辺2.8 mのアンカーにおいてアンカー角が4 cm沈下した場合、みかけの水平移動が4 cm、上下方向の変化は0.4 mm程度があらわれるはずである。実際の上下方向の沈下量約 4cmを考慮すると不均一な圧密沈下による傾斜の増加で測定値の変化が説明できそうである。水平移動量にひきつづき注目の上、アンカーの実際の傾斜量の計測を行う必要がある。

一方2023年12月末以降の期間であれば、SBBで観測された上下変位は正味の地盤変動を反映している可能性が高いと考えられる。

4. 2023年台風6号の通過による影響

Fig. 9 に2023年の台風シーズンを挟んで7月16日と10月23日に行った水中観察の結果を示す。それぞれの水中写真を比較すると、7月16日のFig. 9a, b ではアンカー周囲の洗掘らしきものは見受けられないが、台風6号を経験した後の10月23日のFig. 9c, d にはSBBのアンカーの角における洗掘が進行していた。Fig. 9e には両者の変化を整理して示す。洗掘量は多くても5 cm程度であろうと見受けられる。また西側のアンカー角で見受けられる洗掘では洗掘箇所の東側側壁に新たな堆積が見受けられることから、洗掘に寄与した潮流は東向きの流れであろうことが推察される。

SBBは2023年8月8日～9日にかけて台風6号の暴風圏に巻き込まれた。桜島対岸の鹿児島市東郡元の気象庁AMeDAS鹿児島観測点（距離約18 km南西方向）では瞬間最大風速28.9 m/s（風向ESE）を2023年8月9日 04時に、SBBに最も近い新島のSZKM観測点（距離約1.8 km南南東方向）では瞬間最大風速30.0 m/s（風向SE）を2023年8月9日11時52分に観測していた。台風6号通過時のSZKM観測点における風速変化とSBBの傾斜角変化をFig. 9に示す。

台風通過中（8月9日0時～8時52分）は参照点SNYMを含む地域で停電が発生したために自動補正が行えなかった時間帯が発生したが、記録ではSBBの最大傾斜は 6.9° （8月9日8時52分）が記録に残されていた（Fig. 10b）。記録された最大傾斜角はSZKMにおける平均風速約15 m/s（Fig. 10a）で干潮直後の低潮位時に相当していた。SBBの設計計算では最低潮位時の最大風速（21.6 m/s）、最大波浪、平均潮流（0.5 ノット）による最大傾斜角は 13.18° とされていたことを考慮すると、SBBは所期の性能を満足しているものと考えられる。また、塔頂部の15秒毎の位置から推定された塔頂部の最大運動速度は最大0.17m/sであった。さらに暴風圏通過後も定常的に観測および通信が維持されていたことから、SBBの傾斜角は台風6号暴風圏化にあっても塔頂部の水没角度（ 34.2° ）を超さなかったであろうと考えられる。

5. まとめ

2023年3月の設置から2023年12月下旬まで沈下が進行し、2023年12月下旬以降の上下変動は落ち着いている。設置当初からの沈下量は約4 cmであった。

設置直後から3ヶ月間の測位点の側方変位は南方向であったが、2023年6月5日以後の側方変位は西方向である。最終的には設置後約4 cm南西方向に移動したことが示された。沈下が落ち着いても西方への移

動（0.07 mm/day）は続いている

2023年12月23日までの沈下量はアンカー直下の海底土の圧密に由来する可能性がある。

測位点座標の南西方向への変位はアンカーの平行移動ではなく傾斜増大に由来する可能性がある

2023年台風6号暴風圏中にあってもSBBは風波潮流による漂流および水没を発生することはなく、所期の姿勢維持性能を維持していた

謝 辞

本研究の経費は 原子力規制庁 令和5年度原子力施設等防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）事業に依るものである。また本稿で参照したSBB周辺のGNSS観測点のデータは京都大学防災研究所附属火山活動研究センター（現 火山防災研究センター）スタッフの労力を費やして取得されているものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 筒井智樹・味喜大介・井口正人 (2022): ピラー直結形海底地盤変動観測装置に関する測位実験, 京都大学防災研年報, 第65号B, pp.48 - 66.
- Eto, T., Takayama, T., Yamamoto, K., Hendrasto, M., Miki, D., Sonoda, T., Matsushima, T., Uchida, K., Yakiwara, H., Wan, Y., Kimata, F., Miyazima, R., Kobayashi, K. (1997): Re-upheaval of the ground surface at the Aira caldera, - December 1991- October 1996, *Anns. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 40B-1, pp.49-60.
- Iannaccone, G., Guardato, S., Donnarumma, G. P., Martino, P. D., Dolce, M., Macedonio, G., Cherici, F., Beranzoli, L. (2017): Measurement of Seafloor Deformation in the Marine Sector of the Campi Flegrei Caldera (Italy), *Jour. of Geophy. Res. Solid Earth*, Vol. 123, pp. 66-83. <https://doi.org/10.1002/2017JB014852>.
- Martino, P.D., Guardato, S., Tammara, U., Vassallo, M., Iannaccone, G. (2014): A first GPS measurement of vertical seafloor displacement in the Campi Flegrei caldera (Italy), *Jour. of Volcanol. and Geothem. Res.*, Vol. 276, pp. 145-151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.003>.
- Takasu, T., (2013): RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, <http://www.rtklib.com/>
- Tsutsui, T., Miki D., and Iguchi, M. (2024): Seabed Benchmark System in Aira Caldera, *Earth Planets and Space*, Vol. 76, article No. 99.

- <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02044-1>.
- Xie, S., Law, J., Russel, R., Dixon, T. H., Lambre, C., Malservisi, R., Rodgers, M., Iannaccone, G., Guardato, S., Naar, D. F., Calore, D., Fratirelli, N., Brizzolara, J., Gray, J. W., Hommeyer, M., and Chen, J. (2019): Seafloor Geodesy in Shallow Water with GPS on an Anchored Spar Buoy, *Jour. of Geophys. Res., Solid Earth* Vol. 124, pp. 12116-12140.
- 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 (Kazan)*, Vol. 58, pp. 137-151. https://doi.org/10.18940/kazan.58.1_137.

(論文受理日 : 2024年8月31日)