

ピラー直結型海底地盤変動観測装置に関する測位実験

Experimental Assessments of Precise Positioning with Using GNSS on a Pillar-coupled Seabed Electric Benchmark System

筒井智樹・味喜大介・井口正人

Tomoki TSUTSUI, Daisuke MIKI, and Masato IGUCHI

Synopsis

Experimental assessments for a pillar-coupled electric benchmark platform at anchor are reported, which made on a test platform. Development of a geodetic platform at the center of flooded calderas have been highly demanded to improve the monitoring of the Aira Caldera. If geodetic observation in the center of the caldera is available, accuracy of the monitoring can be improved significantly. GNSS on the universal-coupled pillar at anchor is applied as a fundamental architecture of the platform. The design of the actual platform includes following four problems to be examined ; 1) year-long stability of Kinematic method, 2) optimum tilt detection method, 3) velocity responses, and 4) construction of tilt correction algorithm. Test of these all problems were successful and GNSS antenna array system is decided to apply the actual platform.

キーワード : 火山活動監視, 火山性地殻変動, 海底地盤変動観測, GNSS, カルデラ火山

Keywords: Volcano monitoring, Volcanic Ground Deformation, Seabed geodetic observations, Global Navigation Satellite System, Caldera Volcano

1. はじめに

地盤変動は地下の火山活動にともなう地下の圧力変化を反映するために火山活動の監視観測における火山活動の指標の一つとして取り扱われている。質の良い地盤変動観測データを得るためには最も垂直変動量の大きな地盤変動圧力源の直上とその周辺付近にベンチマークを設けて観測することが望ましいが、カルデラ火山はそれが陸上に位置していても中央部は湛水していることが多く、地盤変動圧力源が推定される中央部へのベンチマークの設置は水の壁に阻まれて特に難しい。

カルデラ火山は短い期間に数百立方キロメートルに及ぶ噴出物を放出する巨大噴火活動の結果として形成されたと考えられている（たとえば Aramaki, 1984）。現在は

後カルデラ火山から1立方キロメートル程度の噴出規模を繰り返す火山活動しか認められないカルデラ火山でも過去数万～数十万年年間隔に繰り返し大規模噴出が発生した証拠が指摘されているものが多く、カルデラ火山のいくつかは近い将来に再びかつてのような巨大噴火が発生する可能性が懸念されている。7千年前に発生した鬼界カルデラの大噴火によって、鬼界カルデラに隣接する九州地区の縄文文化が壊滅的な被害を被ったことが指摘されているが（栗畑, 2002）、数百立方キロメートル規模の噴火が今日起れば日本の国家に壊滅的な損失を与えるであろうことはたやすく想像される。そのためにカルデラ火山における火山活動の理解と監視は重要な問題である。したがって、沈水したカルデラにおいて水底の地盤変動観測を直接観測する手段があれば、カルデラ火山

の研究の進歩や火山活動監視の高度化に大きく貢献できるものと考ええる。

本稿では水没した巨大カルデラ火山の一つである南部九州、鹿児島湾奥に位置する始良カルデラを対象とした海底地盤変動観測の実現を目標として、海底地盤変動観測に必要な要素の検討と検証について報告する。

2. 海底地盤変動観測装置について

始良カルデラにおける近年の観測研究（たとえば Yamamoto et al., 2013 等）によれば、海底地盤変動観測装置設置予定地点付近では 1 cm/Year 程度の地盤変動の検知が期待される。火山活動にともなう地盤変動の監視では連続した測位を行う必要がある。

水底あるいは海底の地盤変動の連続観測をする場合、いくつかの方法が考えられる。一つは GNSS を用いた観測法で、もう一つは水圧計による観測法である。GNSS による観測では水平方向と垂直方向の変動を捉えることができるが、水圧計による観測では垂直変動を捉えることしかできない。さらに GNSS 衛星を用いた観測方法では、海底のアンカーに機械的に係留したブイを GNSS 受信機によって測位して海底のアンカーの位置を間接的に推定する方法と、海底に設置した複数のトランスポンダを海面の GNSS 観測装置と音響的に結合して海底のトランスポンダを測位する方法とが考えられる。前者はイタリアの INGV による CUMAS (De Martino et al. 2014) を含む MEDUSA システム (Iannaccone et al., 2018) があり、ブイとアンカーの間を係留鎖で連結する方法を採用して Campi Flegrei カルデラにおける 50 mm に達する垂直変動の検出に成功している。後者は GNSS 衛星観測による kinematic 測位と音響測位を結合した測位方法である音響結合 GNSS 測位法 (GNSS-A; Spiess, 1985) として実用化されており、Fujita et al. (2006) は日本近海の大陸棚において年間数センチオーダーの水平変動を捉えることに成功している。

我々の海底地盤変動観測装置には GNSS を測位に用いたピラー直結方式の構成を採用することにした。ピラー直結方式の概念を Fig. 1 に示す。

ピラー直結方式はピラー頂上の GNSS 受信点と海底の 1 点 (測位点: Benchmark) とがユニバーサルジョイントを介して機械的に結合される事が特徴であり、1 観測点につき 1 ヶ所の機材の設置で実現できることと、搭載機器は GNSS 受信機システムとその電源機材、標識灯 (施設灯) だけであること、陸上基地局との通信が確保できるのであれば連続観測が可能であることが長所としてあげられる。

ピラー直結方式の海底地盤変動観測装置では、GNSS

アンテナを頂部に搭載したピラーと海底のアンカーとがユニバーサルジョイントで結合されており、ピラーは潮流などの外力によって自由に傾斜し運動する。そのため 4 つの大きな問題を検討する必要があった。1 つ目は GNSS データ解析法の長期安定性の検討、2 つ目は最適な傾斜角検出法の検討、3 つ目は運動体上のアンテナによる GNSS 測位の速度追従性の検討、そして 4 つ目は傾斜補正アルゴリズムの構築である。

3. 検証とその結果

GNSS アンテナが運動することを考慮して、測位結果の解析には GNSS 搬送波の位相を用いる Kinematic 解析法を用いることにした。Kinematic 解析法はリアルタイムキネマティック (RTK) 法とポストプロセッシングキネマティック (PPK) 法とがあるが、本研究では即時処理は要求されないので PPK 法を用いることにする。係留ブイ方

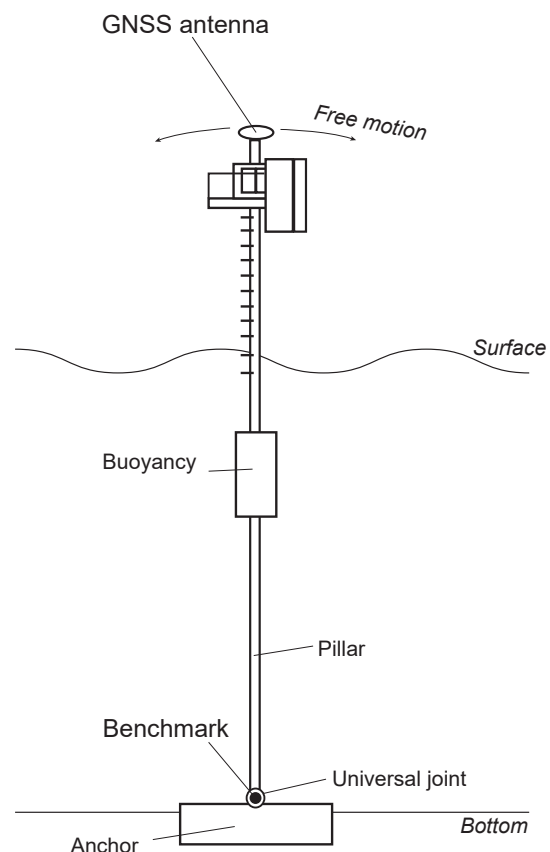


Fig. 1 A cartoon of the a pillar-coupled seabed electric benchmark system. Benchmark is right above the anchor. GNSS antennas are installed at the top of the universal coupled pillar at anchor. Pillar can move along current and wind.

式を採用した Iannaccone et al. (2018) も同様に Kinematic 解析法を採用している。一方、京都大学防災研究所附属火山活動研究センター（以下、火山活動研究センター）で従来から火山活動の観測に用いている解析法は Static 解析法であるため、Kinematic 解析法の安定性、運動追従性を検証する必要がある。さらにピラー頂部における GNSS 測位結果を補正するために、ピラーの傾斜量を求めて傾斜量に基づく補正量を決定する必要がある。そのために傾斜角測定方法の決定と傾斜補正アルゴリズムの構築が要請された。

Kinematic 解析法の安定性の検討は火山活動研究センターが維持管理する既存の連続観測点の 1 年分のデータを用いた PPK 解析を行い評価した。

傾斜検出方式の検証および傾斜補正アルゴリズムの検証、さらにアンテナ運動追従性の検証は火山活動研究センターが管理する黒神実験室構内に設置した実験台上で行われた。

いずれの実験も個々のアンテナの GNSS 測位結果の解

析にはフリーソフトウェア RTKLIB (Takasu, 2013)、連続観測点の解析には Leica GeoOffice (LGO) を用いた。さらに運動追従性の検証実験と傾斜補正アルゴリズムの検証の実験では、ピラーの傾斜補正に必要なアルゴリズムを独自に考案して補正に用いた。

3.1. Kinematic 解析結果の長期安定性の検証

最初に Kinematic 解析結果の長期安定性を検証する。既存の連続観測点 SNYM の約 1 年分 (2020/6/17 ~ 2021/6/23 372 日分) のデータを対象とし、SNYM から 1.5 km の距離を隔てた連続観測点の KMNG を参照点として用いて PPK 解析を行った結果と、同じ観測点組み合わせで行った Static 解析結果と比較する。なお使用アンテナはそれぞれ SNYM:AT502 (Leica 社製)、KURG:AX1202 (Leica 社製) であった。安定性の評価は渡邊ら (2020) の例にならない、測位値の分布を用いた。

両者の統計量を Table 1 に示し、Kinematic 法と Static 法との 2 種類の解析法による結果の時系列を Fig. 2 に

Table 1 Statistics of one-year long analysis

Method	Kinematic	Static
Latitude (Deg.)	31.614159048	31.614159049
Longitude (Deg)	130.701771133	130.70177134
Altitude (m)	49.13997	49.14003
Latitudal standard deviation (m)	0.0013	0.0015
Longitudal standard deviation (m)	0.0015	0.0016
Vertical standard deviation (m)	0.0051	0.0042

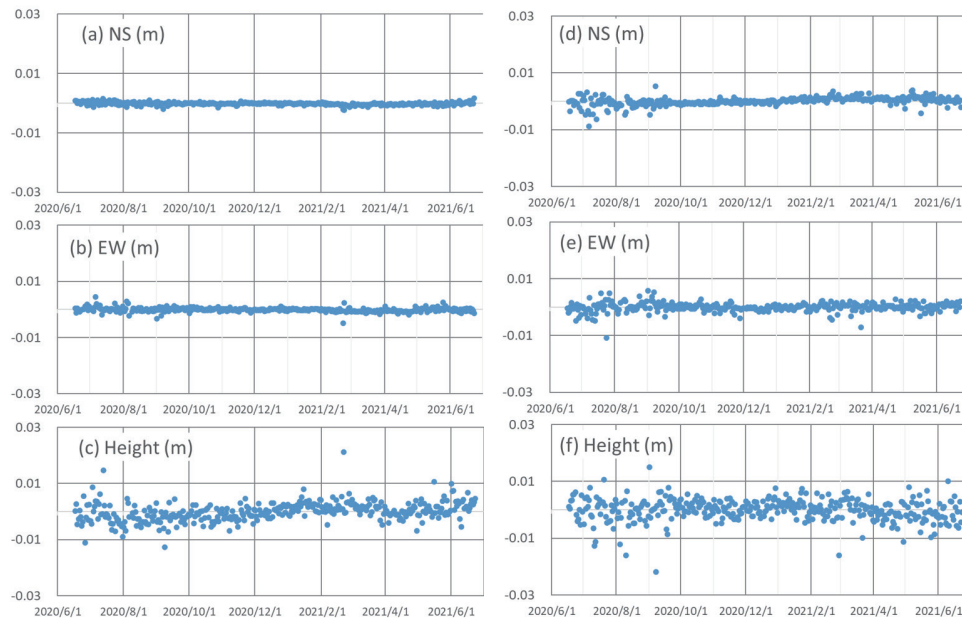


Fig. 2 Comparison of the result time series from Kinematic method and Static method at the continuous GNSS stations pair. The left panels triplet a through c is result of Kinematic method, and the right triplet d through f is that of Static method.

示す。対流圏補正モデルはそれぞれ次の方法を用いた。PPK 解析では RTKLIB 組み込みの RTKPOST を用いて ZTD (Zenith Tropospheric Delay) で対流圏補正を行い、Static 解析では解析アプリケーション LGO に組み込まれている時空間依存の対流圏補正オプション (以下 Computed) による補正を行った。

Fig. 2 の時系列からは両者とも目だったトレンドは認められない。水蒸気量の多くなる季節 (6 月～8 月) では Static 法による結果のバラツキが若干大きくなる傾向が見受けられる。また、Fig. 3 に解析結果の測位値分布を示すが、Kinematic 法解析結果及び Static 法解析結果のいずれも単峰分布を示す。

以上のことから Kinematic 解析法による測位結果は長期にわたる測位結果にあっても、Static 解析法と同程度の安定した結果が得られており、長期間の測位の継続を前提とする火山性地盤変動の観測が可能であることが確かめられた。

なお、Okuda et al. (2001) によれば Kinematic 法解析結果の標準偏差は用いる基線長に比例して増大する傾向が報告されている。

3.2. 傾斜角検出手法の検討

運動するピラー頂上のアンテナ測位結果から海底の測位点の座標を推定するためには、アンテナを載せているピラーの傾斜角を計測する必要がある。目標とされる測位点座標の推定精度は横方向 1 cm, 垂直方向 1 cm 程度である。運動体の傾斜角の推定では傾斜角計に他の種類のセンサを組み合わせているケースが多く見受けられる。平社・石坂 (2011) は傾斜角計とジャイロを併用して傾斜角の推定を行い、杉崎ら (2012) は傾斜角計に加速度計を併用して傾斜角の推定を行っている。

ここではピラー揺動にともなう傾斜角の検出方法の検討を目的として、1 軸を中心に卓越周期 2 ～ 3.6 秒で揺動する実験台上で GNSS 測位と同時に傾斜角計による測定を行い、それぞれの結果を比較した。

傾斜検出方式の検討では実験台は 2 本の 1 辺 0.3 m × 高さ 1.6 m のコンクリート柱を 1.6 m 間隔で配置し、それぞれのコンクリート柱頂部に設置したボールベアリングを介して自由に回転できる直径 48.6 mm の単管を軸として渡したものとした。以降の実験ではこの単管を「軸単管」と称し、位置を求めるべき「測位点」をこの軸単管の中心軸上に配した。この軸単管を中心とする 1 軸運動をするピラーを組み付け、ピラーの頂部に備えたビーム上に傾斜角計と GNSS アンテナを設置した 1 軸実験台

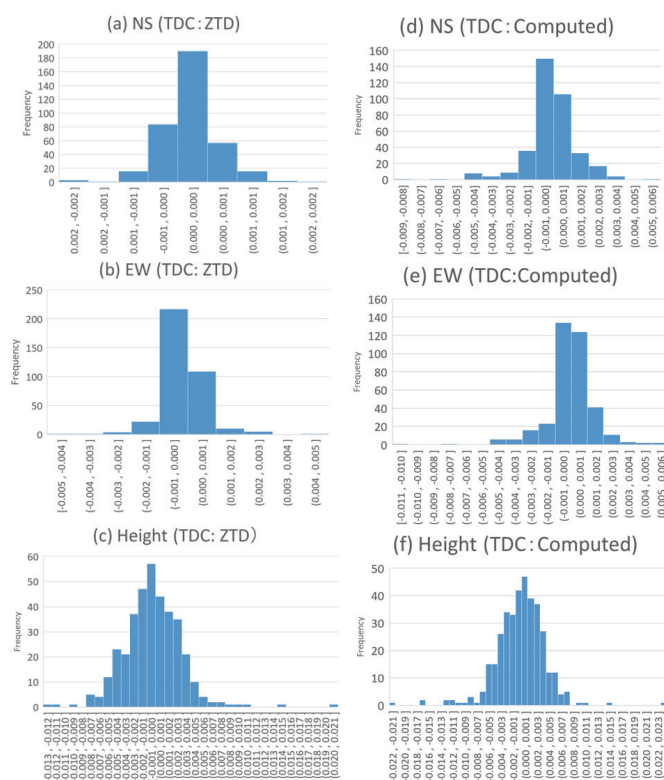


Fig. 3 Comparison of the result distribution from Kinematic method and Static method at the continuous GNSS stations pair. The left panels a to c are result of the kinematic method, and the right panels d to f are that of the static method.

Iを構成して実験を行った。

1軸実験台Iの実際とその組立図をFig. 4に示す。1軸実験台Iでは、ビームABとピラーCEは直交するように組み立てられ、回転軸JKの周りに回転運動ができるようになっている。ビームAB及びピラーCEはカウンターウェイト m_1 の質量を調節することによって振動周期を変化させることができる。また、測位点に相当するのが点 D_0 である。この点 D_0 より上部を海底地盤変動観測装置のピラーにみたて、動的傾斜を与えた。なお、軸単管の走向はN81.9度Eである。

つぎに実験台に搭載した機器の結線をFig. 5に示す。2アンテナを接続して処理ができるGNSS受信機NovAtel社製PwrPak7Dに2台のアンテナGNSS802を組み合わせ使用し、傾斜角計Jewell社製LCF-2330-L-14.5/14.5-FB: Ser:3045123をテレメータ装置LT-7700に接続して使用した。

デュアルアンテナGNSS受信機PwrPak-7DはNovAtel社のOEM-7シリーズModel OEM7720をケースに組み込んだものである。Model OEM7720の内部構成をFig. 6に示す。Model OEM7720は2つのアンテナから送

られたGNSS信号を共通のクロックで処理する構成をもつ。

2つのアンテナG1及びG2の位置のそれぞれを20Hzサンプリングで得られた記録を用いてPPK法で解析を行った。NovAtel製受信機PwrPak7Dから出力された生データは以下の手順でRINEX型式に変換した。NovAtel社の提供する変換ソフトウェアNovAtel convertを用いて受信機出力データをアンテナごとのNovAtel OEM6型式に変換し、さらにこれらの型式のデータをRTKLIBパッケージに含まれるアプリケーションRTKConvを使用してRINEX型式のデータを得て解析に使用した。

傾斜角計はそのY軸がビームABに平行になるように装着し100Hzサンプリングで得られた記録を用いた。

GNSSアンテナ変位量の記録として4Kビデオカメラ30fpsの画像記録を取得し、画像解析ソフトウェアDipp Motion Vによる変位量推定を行った。

スタティック解析に用いる仮設基準点は黒神観測室敷地海側構内の基台(KURB)にアンテナAR-10を設置し、受信機Leica GR-30で記録を行った。なお、Leica製受信機GR-30からは直接RINEX出力を得ることができた。

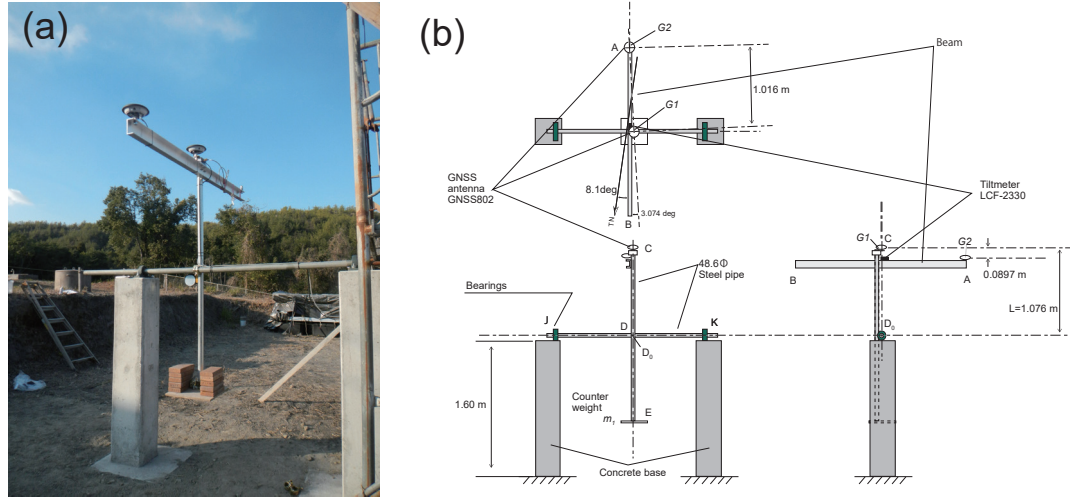


Fig. 4 The uni-axis platform. (a) The platform. (b) Configuration of the platform.

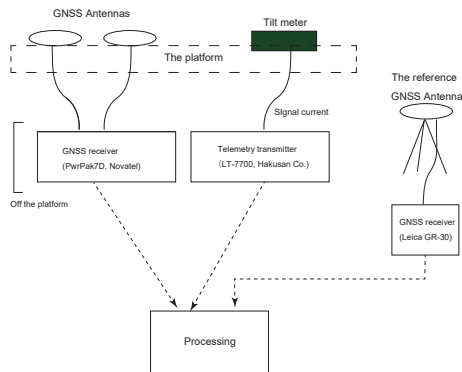


Fig. 5 Connections at the experiment

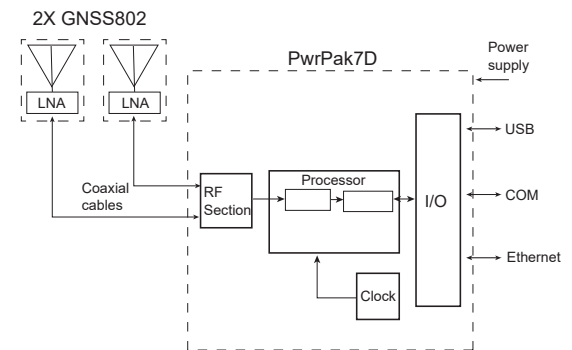


Fig. 6 Architecture of a GNSS receiver OEM-7 Model OEM7720 (NovAtel, 2021).

動的傾斜実験を行うに先立ち、測位点 D_0 の Static 測量を実施し、下記の値を得た。

測位点 D_0 : 北緯 31.5835802 度 東経 130.7018495 度 楕円体高 93.4454 m (2 系直角座標系表示 ; $x = -157015.25153, y = -28296.94320$).

動的な傾斜の実験は次のように行った。ピラー CE に初期振幅約 15 度を与えたのちに開放して時々刻々の傾斜角、GNSS 測位結果を観測する。観測の際にはビデオ撮影も併用した。カウンターウェイトの量を調節することでプラットフォーム運動の固有周期を設定する。

ビデオは軸 JK を延長した方向で C から距離 11.25 m の地点で撮影を行った。ビデオには実験台の全景とともに電波時計の表示を写しこみ、写しこまれた電波時計の

表示をもとに解析対象フレームを選択した。画像解析は Dipp-Motion V を用いてアンテナ基台 G1, G2 の動きを追跡した。自動追跡ではカウンターウェイト 16 kg (8W) のとき、ターゲットサイズ 45×45 ピクセル、探索範囲 70×70 ピクセルとし、時間順追跡を行った。

実際の測位実験の様子を下の Fig. 7 に、本稿で扱う実験条件を Table 2 に示す。以下では実験条件を Table 2 最右欄のコードを用いて表すことにする。

GNSS による測位は 1/20 秒ごとに行い、測位結果は PPK 法で処理を行った。

傾斜角計記録を再生して振動開始時刻を確認し、傾斜角計から得られた WIN フォーマットデータをテキストデータに変換した。また、テキストデータ化したファイ

Table 2 Conditions of the experiments

Code	Weight m_1 (kg)	N a t u r a l period (s)	M a x i m u m velocity (m/s)	Duration of motion (s)	Overestimation of tilt
8W	16	3.5	0.31	120	1.31
10W	20	3.1	0.35	140	1.34
10W+	31	2.5	0.43	180	1.54



Fig. 7 The platform at work. The platform is on the left. The current reference station KURB on the right

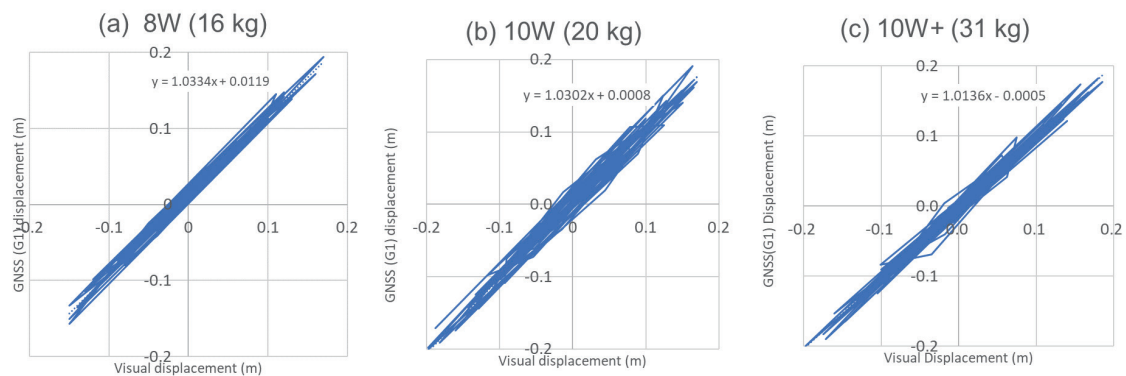


Fig. 8 Correlation of displacement measurements with GNSS antenna pair and with the visual analysis. (a) 8W ($m_1 = 16$ kg), (b) 10W ($m_1 = 20$ kg), (c) 10W+ ($m_1 = 31$ kg).

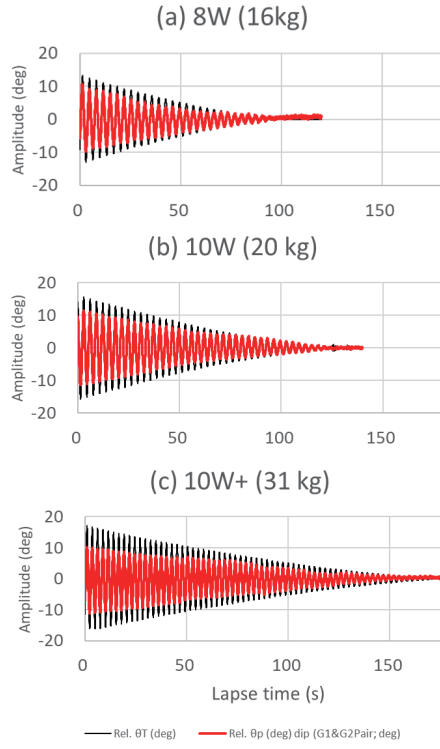


Fig. 9 Comparisons of the estimated displacements from the tiltmeter and from the GNSS antenna pair. $\text{Rel}\theta_T$ is the tiltmeter output and $\text{Rel}\theta_p$ is the estimation from the antenna pair. (a) 8W, (b) 10W, (c) 10W+.

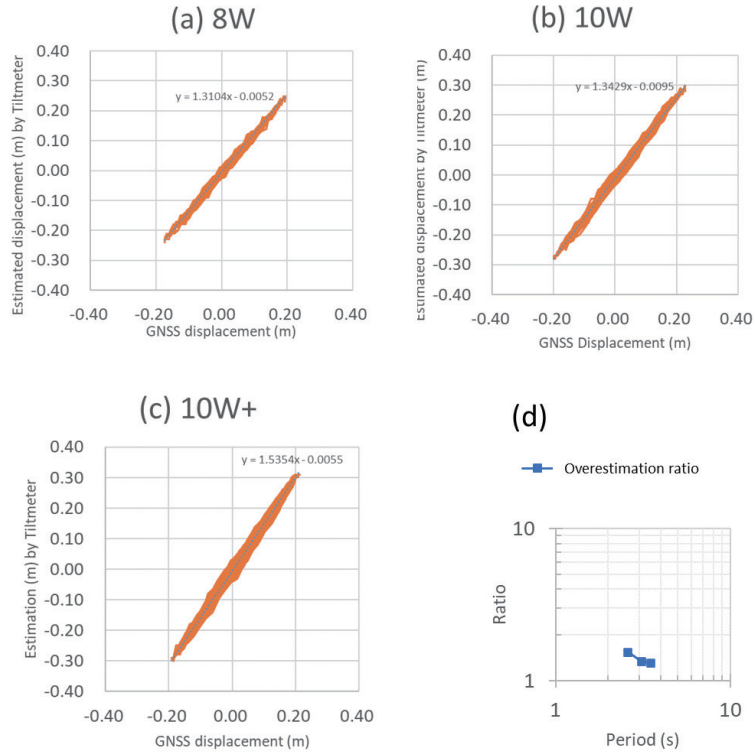


Fig. 10 Correlations of the estimated displacements from the tiltmeter and from the GNSS antenna pair. (a)8W, (b) 10W, (c) 10W+, (d) Over estimation ratio of the tilt. Ratio of the tiltmeter output for the GNSS antenna pair estimation.

ルに間引き（リサンプリング）をほどこし、20 Hz サンプリングと同等にしたデータセットも作成した。

カウンターウェイト m_1 の異なる3つの場合のそれぞれについて、GNSS アンテナ G1 の画像解析結果による変位量と GNSS 測位結果による変位量の対比を次の Fig. 8 に示す。

Fig. 8 からはいずれの結果も画像解析による変位量と GNSS アンテナペアによる変位量は目立った位相遅れ量が観察されず、振幅は3%程度の差で対応することを示している。したがって、GNSS 測位結果による変位量は真の値として扱ってさしつかえないことを示している。

傾斜角計出力と GNSS アンテナペアから推定された傾斜角の時系列を Fig. 9 に示す。Fig. 9 ではピラー CE を運動させるといずれの場合も傾斜角計による傾斜角測定結果が過大であることが示された。

x 軸に GNSS 振幅、y 軸に傾斜計からの推定振幅をプロットしたリサージュ波形 (Fig. 10a - c) を作成し、GNSS アンテナペア傾斜角値に対する傾斜角計出力値の p-p 比率を推定した。

固有周期と傾斜角振幅比の関係を Fig. 10d に示す。この比較でも両者に大きな位相遅れは認められない。Fig. 10d では運動する傾斜角計による推定傾斜角は30～50%過大になる傾向を示した。アンテナペアによる傾斜推定値に対する傾斜角計出力の比を Over estimation ratio として Table 2 右端に整理する。Over estimation ratio は周期が短くなるほど大きくなる傾向がうかがわれ、おおむね周期の比率の平方根に比例しているように見える。したがって、傾斜運動するアンテナの GNSS 測位結果に対する補正量の算出を傾斜角計による傾斜角計測結果だけに頼ると補正量が過大になるおそれがある。正副の GNSS アンテナからなるアンテナペアを用いた傾斜角測定では傾斜角計を用いた傾斜角測定より正確な結果が得られている。このことを考慮すると1つの GNSS アンテナと1つの2成分傾斜角計からなるシステムよりは、1つの主 GNSS アンテナと2つ以上の副 GNSS アンテナからなるアンテナアレイシステムのほうが傾斜角検出方法として適切であると考えられる。以降ではアンテナアレイシステムを用いた観測システムを構築して検証を進めることにした。

Table 3 Estimated antenna velocity

Hs (m)	Ts (s)	Xdamp (m)	Vmax (m/s)
0.53	2.0	0.016	0.05
1.19	3.0	0.226	0.474
2.11	4.0	0.928	1.458
2.50	4.9	1.650	2.116
2.50	6.0	2.20	2.304
2.50	7.0	2.575	2.311
2.50	8.0	2.925	2.297
2.50	9.0	3.250	2.269
2.50	10.0	3.600	2.262
2.50	12.0	4.300	2.251
2.50	15.0	5.625	2.356

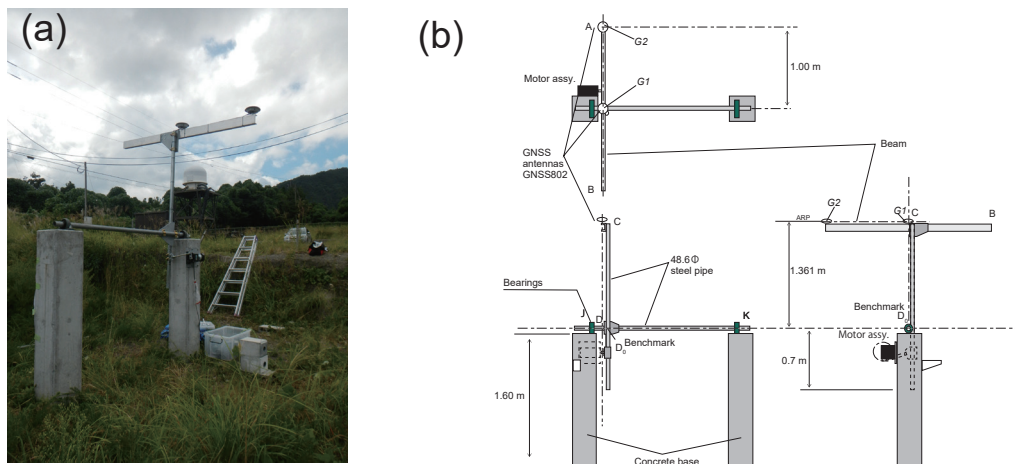


Fig. 11 The uni-axis platform II. (a) The platform at work. (b) Configuration of the platform.

3.3. Kinematic 法の運動追従性

海底地盤変動観測装置では風波と潮流によるアンテナの運動が想定されることから、運動体上の測位データの Kinematic 解析法結果が安定したものであることを確認する必要がある。

運動体上のアンテナを用いた測位実験としてはいくつかの報告例がある。Yigit (2016) は地震動による建造物の運動の検出を目的として 2 m 長の鋼帯材の上にアンテナを搭載し、打撃による加振を実施し DGPS を基準として高速サンプリング PPP の結果を評価した。さらに、Yigit et al. (2020) が地震動による建造物の運動の検出を目的として直線運動する振動台の上の測位実験を実施し、差動トランスによる変位量実測値に対して高速サンプリング PPP の結果を評価している。一方 Kinematic 解析では岡本 (2020) が RTK 対応 2 周波受信機 F9P の性能評価を目的に、2.5 m の直線軌道上の台車を時速 1 km (0.27 m/s) で

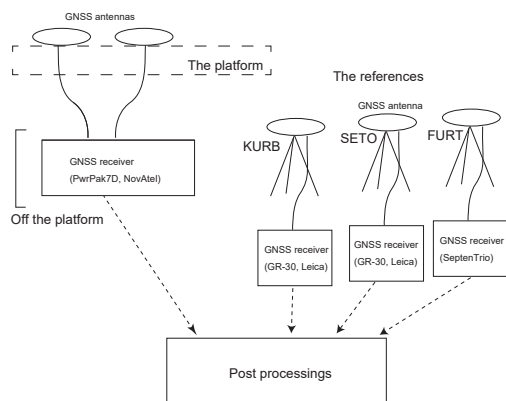


Fig. 12 The connection in the experiment.

移動させて測位し、RTK 解析によって移動中の精度の評価を実施した例がある。

海底地盤変動観測装置のアンテナ台の運動速度は国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網 (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS; NOWPHAS, 国土交通省, 2021) における鹿児島湾における波浪観測結果から推測した (Table 3)。

Hs は垂直波高値で、Xdamp は入射波に対するピラー頂部の応答振幅である。また、観測装置頭頂の最大運動速度 Vmax はピラー頂部の運動が単振動であると仮定して、

$$V_{\max} = X_{\text{damp}} * 2\pi / T_s$$

で与えた。

Table 3 より、ピラー長 60 m におけるピラー頂部の最大速度は 2.4 m/s 程度が予想された。またピラー長が約 40m であれば最大速度はさらに小さくなり 2 m/s 程度であると予想された。

以上のことから運動追従性の実験では定常的に 2 m/s

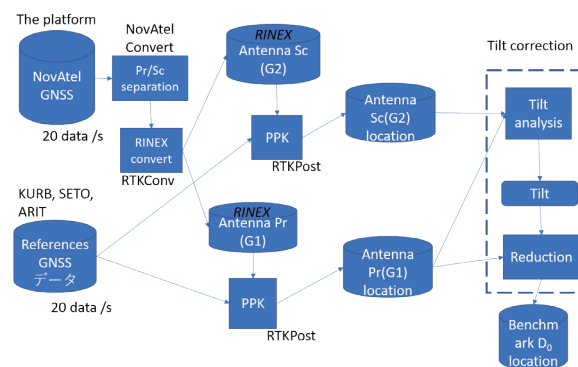


Fig. 13 Processing flow for the velocity response test.

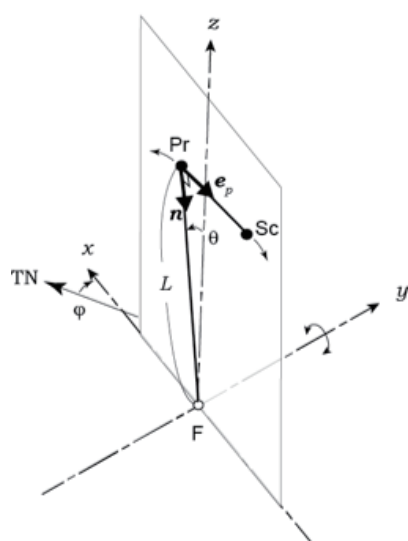


Fig. 14 Geometry of the uni-axis platform.

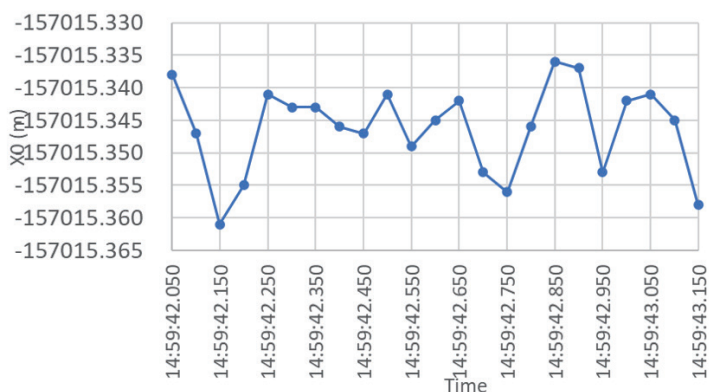


Fig. 15 Corrected location of the benchmark during a motion cycle, on 2021/10/12.

近辺の運動速度を含むアンテナの運動を実現する必要がある、先述の1軸実験台に200W電動機駆動のクランク機構を追加して実験に供した。これを1軸実験台IIと呼ぶことにする。1軸実験台IIの実際と組立とをFig. 11に示す。

実験台では回転軸中心からアンテナG1位相中心までの長さを1.4125 mとし、周期1.0秒で最大傾斜角15度として2.1 m/sの最大速度を実現した。このアンテナ台にGNSSアンテナGNSS-802 (NovAtel社製)を2つ使用し、ピラー直上のアンテナG1、ビーム先端のアンテナG2と名付けた。また、このアンテナペアをデュアルアンテナGNSS受信機PwrPak-7D (NovAtel社製)と組にして用いた。

1軸実験台IIの実験における測定機器はFig. 12に示すように接続した。PPK解析では既存の連続観測点KURB, ARITをそれぞれ基準点として用いた。これらの基準点は連続観測点SVOGを参照してそれぞれの座標値を決定した。基準点KURBはアンテナにAR10 (Leica社製)を用い、受信機にGR30 (Leica社製)と接続した。基準点ARITはPolaNt-x (Septentrio社製)をアンテナとして用いた。KURBはアンテナG1より25 m離れて2.2 m低く、ARITはG1より4.0 km離れて23.2 m高い楕円体高であった。それぞれの基準点で決定された座標値をエポック毎のデータとともに放送歴を使用してPPK解析に用いた。なお、海底地盤変動観測装置の設置予定点中心位置に対して、実際の運用時に想定される基準点SNYMまでの距離は2～3 kmである。

Fig. 13にデータ処理の内容を示す。各アンテナで得られた測位データはアンテナ毎に分離して取り出したものを、記録形式の変換の上でPPK解析にかけてエポック毎の測位値を得た。また、傾動するアンテナ台における測位結果の傾斜補正は以下に行った。

実験台の幾何学的配置をFig. 14に示す。測位点

(Benchmark) F, 主アンテナG1をPr, 副アンテナG2をScとし、磁北方向にx軸、それと直交する東方向にy軸をとるものとする。ピラーF-Prは長さLで、ピラーはFを中心としてy軸の周りに回転できるものとする。ここに、Heading角 φ , Pitch角 θ とする。

以下に測位点Fの座標推定の手順を述べる。プライマリアンテナPr, セカンダリアンテナScとする。

1. 実験台パラメータ (ビーム方向) の推定

- 1-1. 測位結果を平面直角座標系XYZに変換する。
- 1-2. 観測値からPr-Scベクトルの平均値を求める。
- 1-3. Pr-Scベクトルの平均値からPr-Scの方位角 β を求める。

2. 測位点座標Fの推定

- 2-1. 測位結果を平面直角座標系XYZに変換する。
- 2-2. Pr-Scベクトルを求める。
- 2-2. Pr-Scベクトルを水平面内で角度 β の座標回転を行い、Pr-Scベクトルを含む平面座標系xyzに変換する。
- 2-3. 座標変換されたPr-Scベクトルと直交するxz面内の単位法線ベクトルを求める。
- 2-4. xz面内の単位法線ベクトルをXYZ座標系に逆変換する。
- 2-5. アンテナ位相中心-F間の距離を変換後の単位法線ベクトルに乗じてPr座標に加え、F座標を得る。

運動するアンテナに対する測位点Fのx成分測位結果(傾斜補正済み)をFig. 15に示す。Fig. 15は概ね1秒間(アンテナ運動1周期分)の補正結果を取り出して示し、Fig. 16は傾斜補正された全ての測位点座標をxy平面上にプロットしたものである。Fig. 16では特に明瞭な周期性は認められない。もし傾斜補正の完成度が低ければ、アンテナの運動に伴った周期性が表れるはずである。

Fig. 17ではアンテナ運動1周期分を取り出したKURB基準の傾斜補正結果を示す。奥田ら(2010)も同様な実験

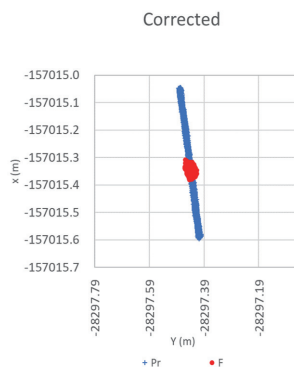


Fig. 16 Estimated location of the benchmark X_0 and Antenna Pr.

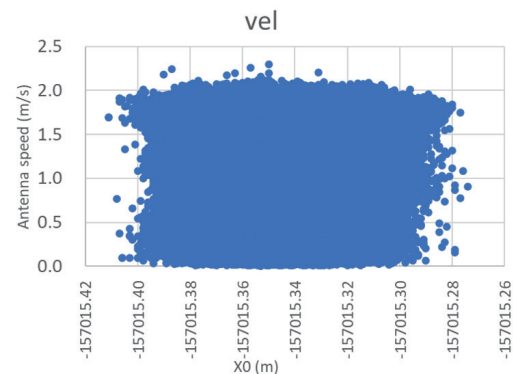


Fig. 17 Antenna velocity versus estimated benchmark locations. Mean benchmark = (-157015.348, -28297.438, 93.469), Var = (0.00002, 0.00001, 0.00002)

を行い 0.2 m/s 以上の速度において誤差の増大を指摘していたが、本実験では顕著な差は認められなかった。

また、アンテナ Pr の測位結果と、傾斜補正を施して導出した F の位置との空間分布を次の Fig. 18 に示す。

アンテナ Pr が約 50 cm X 方向に運動するのに対して、傾斜補正結果 X0 は 10cm 以内に収束している。以上のことから、傾斜量補正は成功していると判断される。

また 2021/10/12 15:00 - 21:00 の間の 6 時間分の測位結果とアンテナ速度との関係を Fig. 19 に示す。

アンテナ運動速度の増大に対して、測位結果が顕著に不安定になる傾向は見受けられない。したがって、2 m/s 程度の速度で運動するアンテナでの測位結果の Kinematic 解析は安定した結果を与えると判断された。

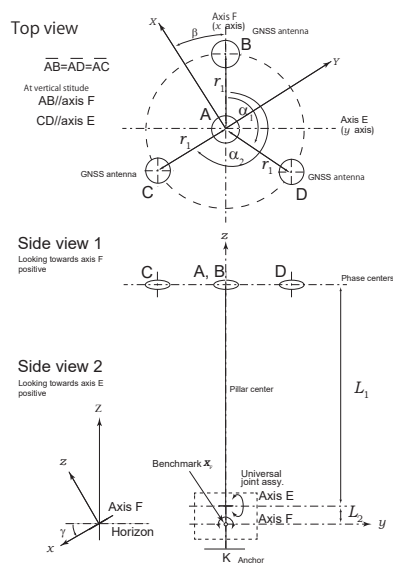


Fig. 18 Geometry of GNSS antennas A-D and axes E and F in the bi-axes platform.

3.4. 傾斜補正アルゴリズムの検証

Fig. 1 に示されるように海底地盤変動観測装置は海底に設置されたアンカーにユニバーサルジョイントで結合された上部構造（ピラーおよびアンテナ台）が乗る構造である。上部構造は風力や潮流力の作用がない時には浮体の浮力によって直立する。時々刻々変化する風力や潮流力、波浪力を受け流すために上部構造はすべての方向に傾動が可能でなければならないので直交する 2 軸で構成されたユニバーサルジョイントでアンカーと結合される。実際に運用する場合には上部構造頂部で GNSS 測位した結果から海底のアンカー上の基準点位置を決定する必要がある。

そのため、2 軸のユニバーサルジョイントでアンカーと結合されたピラー頂部の GNSS 測位結果から海底のアンカー上の基準点位置を求めるアルゴリズムを構築するとともに、実際の構成を模した実験台を用いて検証をおこなった。

ここまでの検証の結果を反映して海底地盤変動観測装置におけるアンテナ配置を Fig. 18 のように計画した。

ピラー頂部には 4 つのアンテナ A ~ D を配し、アンテナ A をピラー軸上に配した主アンテナとし、アンテナ B ~ D をピラー軸の傾斜を検出するための副アンテナとして配置した。またあらゆる方向の外力に応答してピラーを自由に傾斜させるためのユニバーサルジョイントの直交する 2 軸を E 軸と F 軸とし、F 軸とピラー軸との交点を測位点とした。CD は常に E 軸と並行で、AB は F 軸と同じ平面内にあるものとする。

傾斜補正アルゴリズム検証の実験では再び実験台を改修し Fig. 18 の構成を模した実験 2 軸実験台を構成した。

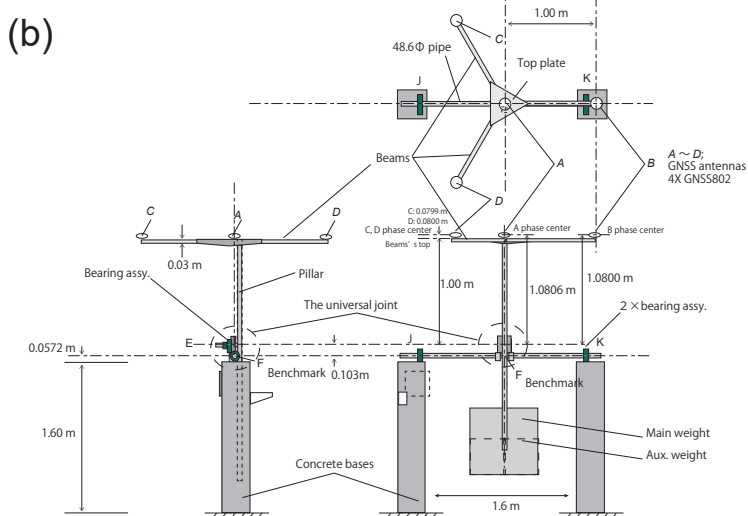
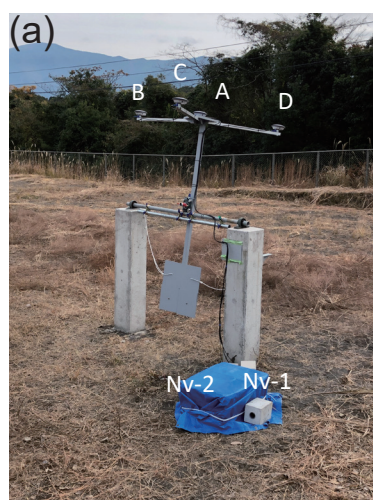


Fig. 19 The bi-axes platform (a) The platform at work. Natural tilt was D-down 8 degrees. (b) Configuration of the platform.

在来の実験台の単管軸を F 軸として、その上に F 軸に直交する E 軸を追加し、直交する 2 軸を有するユニバーサルジョイントの動きが実現できるようにした。さらにピラーの頂部には GNSS アンテナ A を設置し、アンテナ A から長さ 1.0 m の 3 本ビームを 120 度間隔に設け、ビーム端の一つずつ GNSS アンテナ B ～ D を設置した。また、ピラーの運動は電動機による駆動ではなく、ピラー下部の主もり板に対する風力を動力源として駆動するものとした。2 軸実験台の写真とその組み立てを Fig. 19 に示す。

Fig. 19 の 2 軸実験台における測位実験を 2022/1/7 ～ 2022/1/11 にかけて行った。4 つの GNSS アンテナ A ～ D には GNSS-802(NovAtel 社製) を用いた。デュアルアンテナ GPS 受信機 PwrPak7D(NovAtel 社製) を 2 セット用意し、それぞれアンテナ A 及び B の組と、アンテナ C および D の組とを接続した。測位点 F は 2 軸実験台の最下軸 JK の中央に設定した。

Kinematic 解析の基準点として既設の定常観測点 KURG と SNYM を用いた。KURG は実験台から約 24 m の距離にありアンテナ A より 3.7m 高く、SNYM は実験台から約 3.4km の距離にありアンテナ A より 45.6 m 低い。

本実験で得られた 4 つのアンテナの測位結果の処理の流れを Fig. 20 に示す。先述の 1 軸実験と同様に、各アンテナで得られた測位データはアンテナ毎に分離のうえ記録形式変換の後、PPK 解析を施してエポック毎の測位値を得る。

アンテナ A の測位結果の傾斜補正は次のように行う。まず、を平面直角座標系における測位点の表示とする。

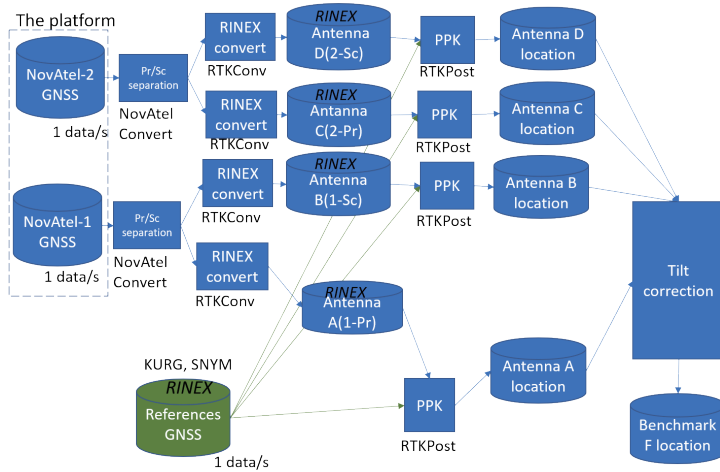


Fig. 20 Processing flow for the data of the antenna array experiment in the bi-axes platform.

ブイ座標系：で表現し、F 軸中央の位置をブイ座標系の原点 (0 0 0) とする。x 軸 = F 軸で北方向を正、y 軸 = 水平面東方向を正、z 軸 = xy 面に垂直上方を正とする。

点 A ～ F の幾何学配置を Fig. 21 に示す。測位点 (x 軸の中央 F) に原点をとり、F 軸に平行に x 軸、XY 平面上で時計回り 90° 方向に y 軸を取ることにする。

まず面 BCD の単位法線ベクトル $\mathbf{N}_{BCD}$ を求める。

各アンテナ測位値：

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_A &= (X_A \ Y_A \ Z_A) \\ \mathbf{X}_B &= (X_B \ Y_B \ Z_B) \\ \mathbf{X}_C &= (X_C \ Y_C \ Z_C) \\ \mathbf{X}_D &= (X_D \ Y_D \ Z_D)\end{aligned}\quad (1)$$

面 BCD を張る 2 つのベクトル $(\overrightarrow{BC} + \overrightarrow{BD})$ と $\overrightarrow{CD}$ とのベクトル積 $\widetilde{\mathbf{N}_{BCD}}$ は、二つのベクトルが張る平面の法線と平行であり、以下のように計算される。

$$\widetilde{\mathbf{N}_{BCD}} = (\overrightarrow{BC} + \overrightarrow{BD}) \times \overrightarrow{CD} \quad (2)$$

$\widetilde{\mathbf{N}_{BCD}}$ を正規化したものが単位法線ベクトル $\mathbf{N}_{BCD}$ である。

$$\mathbf{N}_{BCD} = \frac{\widetilde{\mathbf{N}_{BCD}}}{|\widetilde{\mathbf{N}_{BCD}}|} \quad (3)$$

次に E 点の位置ベクトル $\mathbf{X}_E = (X_E \ Y_E \ Z_E)$ を以下に従って求める。

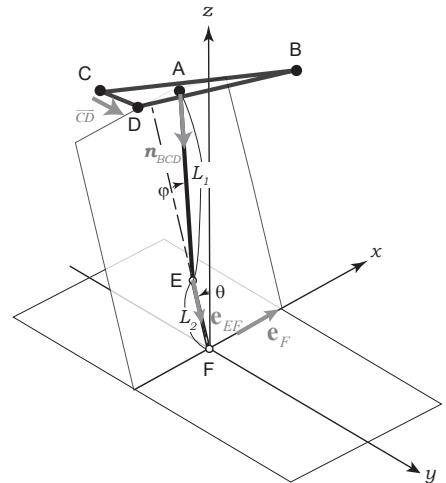


Fig. 21 Geometry of the points A to F

$$\mathbf{X}_E = \mathbf{X}_A + L_1 \mathbf{N}_{BCD} \quad (4)$$

次に F 点の座標を求めるためにはベクトル EF をもとめる必要がある。まず、EF に平行な単位ベクトルが必要である。F 軸 (x 軸) が水平で真北に向いているならば話は簡単であるが、実際に海底地盤変動観測装置の設置を実施すると F 軸は真北に対して角度を持ち、かつ水平に対する傾斜も生じてしまうはずである。このことを考慮して、あらためて以下のように F 軸の方位角 β と傾斜

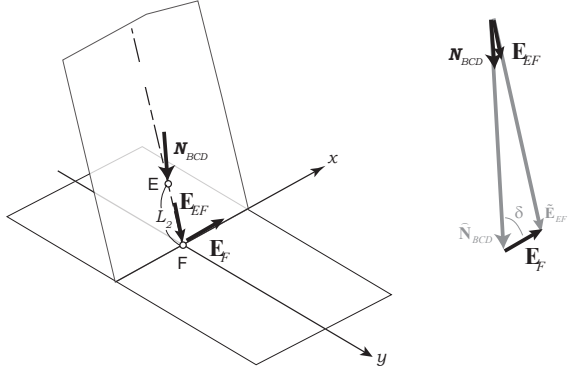


Fig. 22 Geometry of the vector EF.

角 γ を定義する。

β : F 軸の方位 (測位点を中心として北から時計回りを正)

γ : F 軸の傾斜 (測位点を中心として水平面から下方を正)

方位角 β と傾斜角 γ はいずれも設置作業の際に測定されて既知であるものとする。

以上のことから F 軸単位ベクトル (x 軸正方向向き) $\mathbf{E}_F$ は以下のように与えることができる。

$$\mathbf{E}_F = (\cos \gamma \cos \beta \quad \cos \gamma \sin \beta \quad -\sin \gamma) \quad (5)$$

$\mathbf{N}_{BCD}$ と $\mathbf{E}_F$ のなす角を δ とすると、

$$\cos \delta = \frac{\mathbf{E}_F \cdot \mathbf{N}_{BCD}}{|\mathbf{E}_F| |\mathbf{N}_{BCD}|} \quad (6)$$

$\mathbf{E}_F$ の $\mathbf{N}_{BCD}$ 方向成分は、

$$\hat{\mathbf{N}}_{BCD} = \frac{\mathbf{N}_{BCD}}{|\cos \delta|} \quad (7)$$

で与えられる。(Fig. 22)

したがって、EF 方向のベクトル $\tilde{\mathbf{E}}_{EF}$ は、

$$\tilde{\mathbf{E}}_{EF} = \hat{\mathbf{N}}_{BCD} - \mathbf{E}_F \quad (8)$$

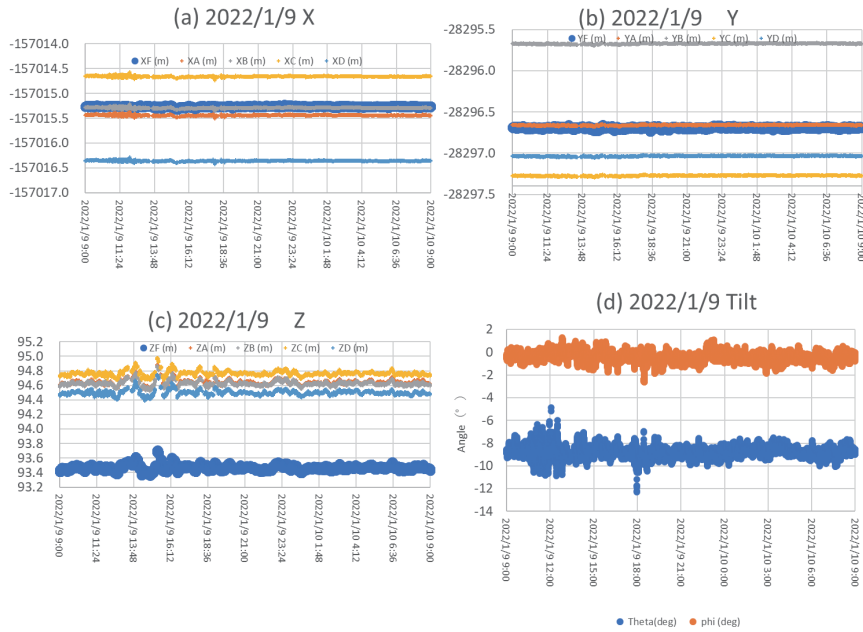


Fig. 23 Example time series of raw estimations, coordinates and tilt, at the antennas and corrected estimation of the benchmark on 10 Jan. 2022, with gentle motion. a) X component, b) Y component, c) Z component. In the panels A to c, blue symbols are the benchmark, Reddish orange symbols are Antenna A, gray symbols are Antenna B, orange symbols are antenna C, and light-blue symbols are antenna D. d) Blue symbols are rotation angle θ around F-axis and orange symbols are rotation angle φ around E axis. Reference was the station SNYM, 3.4 km away from the platform.

で与えられ, EF 方向の単位ベクトル $\mathbf{E}_{EF}$ は,

$$\mathbf{E}_{EF} = \frac{\tilde{\mathbf{E}}_{EF}}{|\tilde{\mathbf{E}}_{EF}|} \quad (9)$$

である. したがって,

$$\overline{EF} = L_2 \mathbf{E}_{EF} \quad (10)$$

である.

以上より $\mathbf{E}_{EF}$ を得たので, 下式によって $\mathbf{X}_F$ を求める.

$$\mathbf{X}_F = \mathbf{X}_E + \overline{EF} = \mathbf{X}_A + L_1 \mathbf{N}_{BCD} + L_2 \mathbf{E}_{EF} \quad (11)$$

アンテナにおける測位誤差の伝播を次のように評価する. 誤差を含んだ測位点座標の位置ベクトルを $\mathbf{X}'_F$ とする. 以下ではプライムをつけられたベクトルは誤差を

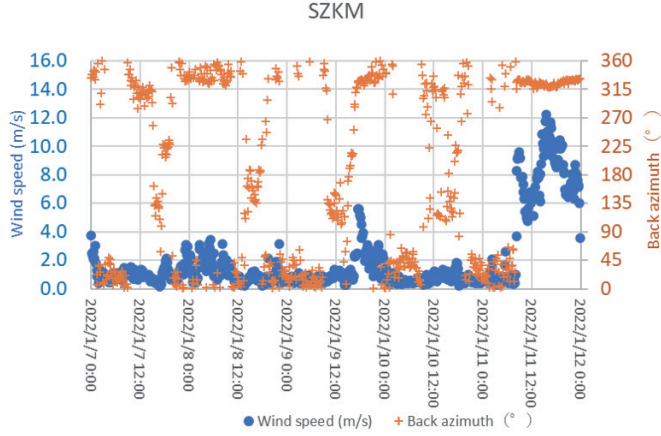


Fig. 24 Wind speed and back azimuth at SZKM, 3.5 km NNE apart from the platform, during the test.

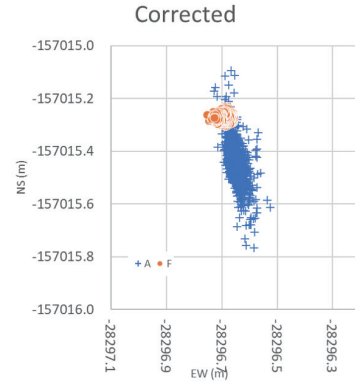


Fig. 26 Spatial distribution of estimations of antenna A and benchmark F location in the same period with that of Fig. 25.

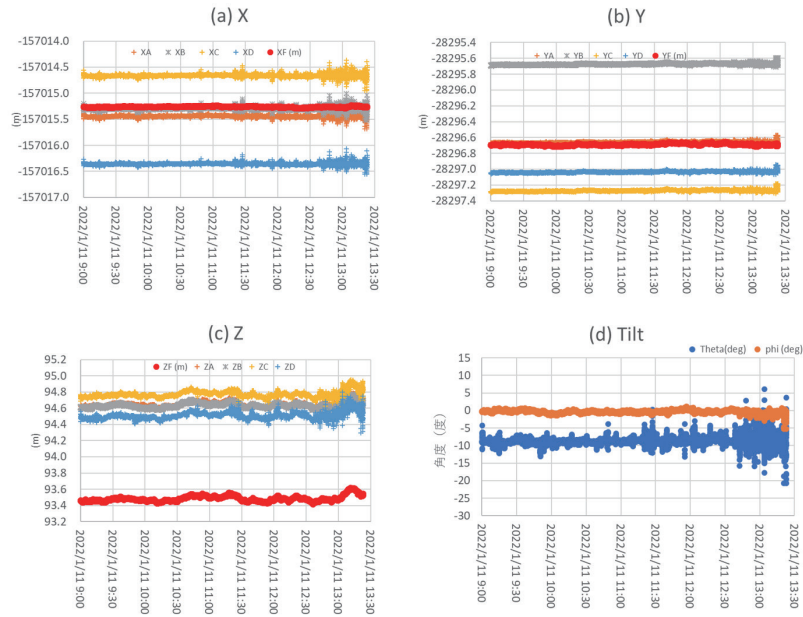


Fig. 25 Closed up of raw estimations, coordinates and tilt, at the antennas and corrected estimation of the benchmark on 11 Jan. 2022. a) X component, b) Y component, c) Z component. In the panels a to c, red symbols are the benchmark, Reddish orange symbols are Antenna A, gray symbols are Antenna B, orange symbols are antenna C, and light-blue symbols are antenna D. d) Blue symbols are rotation angle θ around F-axis and orange symbols are rotation angle φ around E axis. Reference was the station SNYM, 3.4 km away from the platform.

含んだ量を表すものとする． $\mathbf{X}'_F$ は下のように表現される．

$$\mathbf{X}'_F = \mathbf{X}'_A + L_1 \mathbf{N}'_{BCD} + L_2 \mathbf{E}'_{EF} \quad (12)$$

また，GNSS アンテナ A の測位結果の位置ベクトルを以下のように表す．

$$\mathbf{X}'_A = \mathbf{X}_A + \delta \mathbf{X}_A \quad (13)$$

ここに $\mathbf{X}_A$ は A の真の位置， $\delta \mathbf{X}_A$ は真の値からの偏差ベクトルである．(12) 式によれば，A に加わった偏差量はそのまま F の推定結果に加わることになる．

一方， $\mathbf{N}'_{BCD}$ は

$$\mathbf{N}'_{BCD} = \frac{\tilde{\mathbf{N}}_{BCD}}{|\tilde{\mathbf{N}}_{BCD}|} \quad (14)$$

$$\tilde{\mathbf{N}}_{BCD} \approx \mathbf{N}_{BCD} + (\overline{BC} + \overline{BD}) \times \delta \overline{X}_{CD} + \delta \overline{X}_{BCD} \times \overline{CD} \quad (15)$$

上式の最右辺では偏差同志のプロダクトは小さいものと

して省略した．したがって，式を整理して，

$$\mathbf{N}'_{BCD} \approx \frac{\mathbf{N}_{BCD}}{|\mathbf{N}_{BCD}|} + \delta \mathbf{N}_{BCD} \quad (16)$$

ここに $\delta \mathbf{N}_{BCD}$ は $\mathbf{N}_{BCD}$ の誤差項で，

$$\delta \mathbf{N}_{BCD} = \frac{(\overline{BC} + \overline{BD}) \times \delta \overline{X}_{CD} + \delta \overline{X}_{BCD} \times \overline{CD}}{|\mathbf{N}_{BCD}|} \quad (17)$$

として表される．(12) に (13) と (16) とを代入すると

$$\delta \mathbf{N}_{BCD} = \frac{(\overline{BC} + \overline{BD}) \times \delta \overline{X}_{CD} + \delta \overline{X}_{BCD} \times \overline{CD}}{|\mathbf{N}_{BCD}|} \quad (18)$$

となる． L_1 に比べて L_2 は一桁近く小さいため

$$\mathbf{E}_{EF} \cong \mathbf{E}'_{EF} \quad \text{とすると，}$$

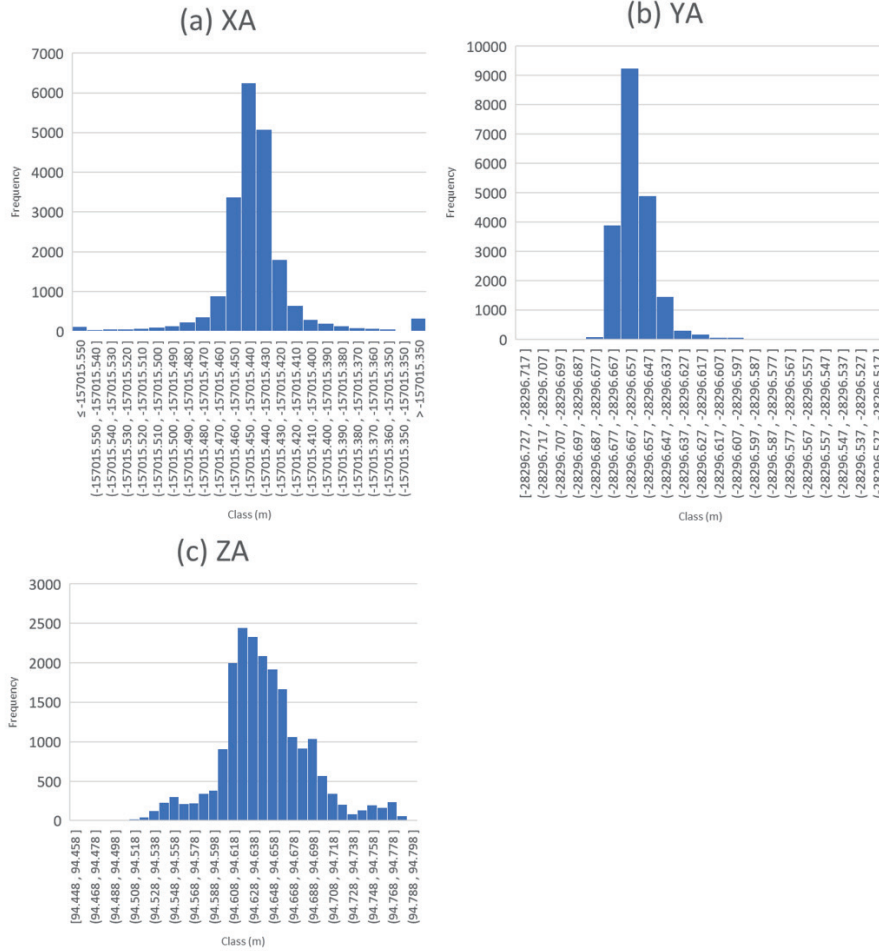


Fig. 27 Distribution of each component (XA, YA, ZA) of the antenna A.

Reference: SNYM.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}'_F \approx & \mathbf{X}_A + L_1 \left(\frac{\mathbf{N}_{BCD}}{|\mathbf{N}_{BCD}|} \right) + L_2 \mathbf{E}_{EF} \\ & + \delta \mathbf{X}_A + \frac{L_1}{|\mathbf{N}_{BCD}|} \left((\overline{BC} + \overline{BD}) \times \delta \overline{X}_{CD} + \delta \overline{X}_{BCD} \times \overline{CD} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

となり、最終的な偏差（誤差）項 Δ は下式で表されることになる。

$$\Delta = \delta \mathbf{X}_A + \frac{L_1}{|\mathbf{N}_{BCD}|} \left((\overline{BC} + \overline{BD}) \times \delta \overline{X}_{CD} + \delta \overline{X}_{BCD} \times \overline{CD} \right) \quad (20)$$

(20) 式は次のことを示している。

- ・ A の測定誤差はそのまま誤差（偏差）に加わる。
- ・ B, C, D のそれぞれの位置ベクトルに由来する誤差（偏差）は $(L_1 \div |\mathbf{N}_{BCD}|)$ 倍でそれぞれが最終誤差（偏差）に加わる。

したがって、 $L_1 = 30 \text{ m}$ 、 $\triangle BCD$ の面積 $(|\mathbf{N}_{BCD}|) = 0.74 \text{ m}^2$ とすると、B, C, D の相対位置ベクトルの偏差が約 40 倍になって推定結果に現れることになる。

したがってアンテナ A ～ D の設置誤差が同じ程度であるならば、アンテナ A の位置のずれより、アンテナ B, C, D の張る平面の向きの誤差のほうが測位結果に大きく響く。

観測結果

各アンテナの測位値とともに上述の傾斜補正を施した結果を Fig. 23 に示す。複数の GNSS アンテナ間の干渉は認められなかった。、実験中の無風時の平衡状態は、Fig. 21 のようにアンテナ CD の D 側が水平に対して 8° 下がりの状態であった。

また観測期間中 2021/1/7 ～ 1/11 の午前中までは風速が小さかったが、実験期間最終日（1/11）午前以降は気象観測点 SZKM の観測結果（Fig. 24）に示されるように、風が強くなった。これに伴い Fig. 25 のように実験台の顕著な運動が認められ、アンテナ A ～ D が数センチメートル以上の振幅で揺動していた。

上図の期間のアンテナ A の測位値分布と導出された測位点 F の測位値分布を Fig. 26 に示す。

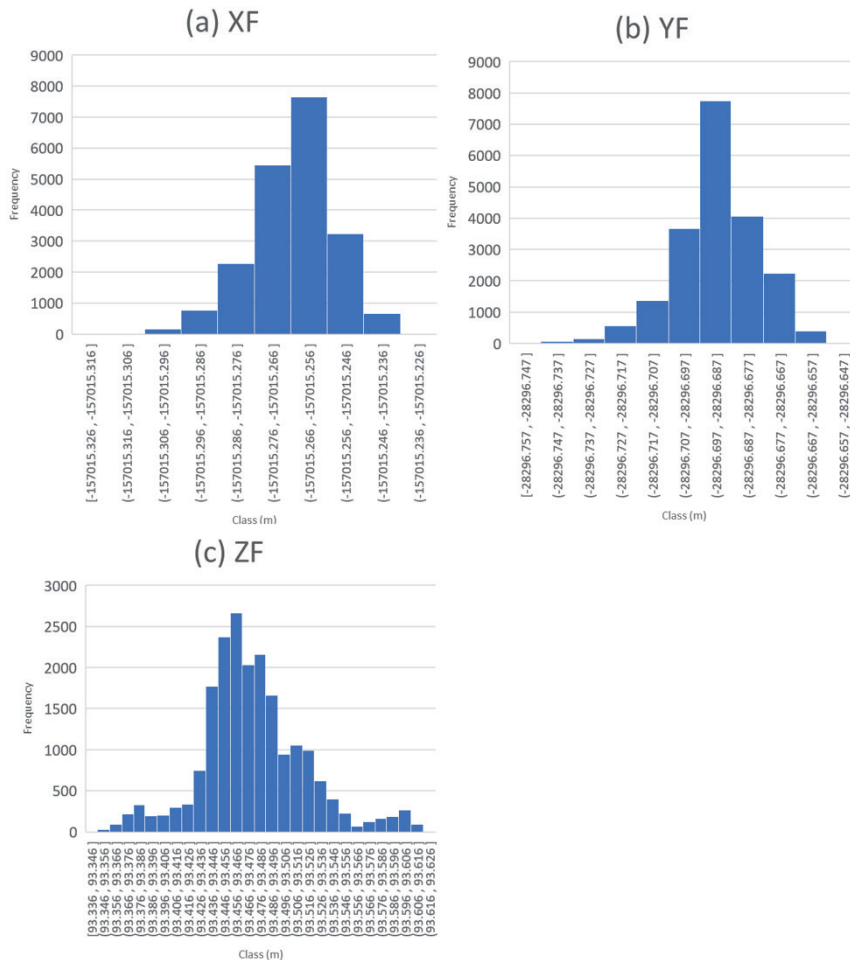


Fig. 28 Distribution of each component (XF, YF, ZF) of the point F.

Reference: SZKM

Fig. 26 で示すアンテナ A の運動方向は北北西－南南東方向が卓越しているが、1/11 は SZKM で北北西の風が強く吹いていたことが観測されていることから、当日の卓越風向の影響であると考えられる。アンテナ A の測位値の分布が最大南北方向 0.6 m, 東西方向 0.3 m の範囲内にあるのに対して、傾斜補正後の F 点は (x, y) = (-157015.26, -28296.69) m を中心として ほぼ 0.1 m 以内に分布する。したがって傾斜補正アルゴリズムは機能していたことが示された。

傾斜補正前の A アンテナの測位結果分布を Fig. 27 に示し、傾斜補正を施して導出された測位点 F の座標値の分布を Fig. 28 に示す。Fig. 28 に示された傾斜補正後の測位結果の分布は単峰的である。

最後にアンテナアレイ A ～ D の測位結果を用いて算出した測位点 F の座標値と、直接測位による測位点 F の座標とを比較する。ここでは PPK 解析に用いる基準点として、距離の異なる 2 点 (SNYM; 3.4 km, KURG; 24 m) のそれぞれについて調べた。

直接測位データは GNSS-802 アンテナを F 軸からの垂直高さが既知のユニバーサルジョイント上の台座に取り付けて、2022/2/1 10:00-10:40 の間に測位データを取得

した。基準点は KURG(アンテナ:AX-I202)と SNYM(アンテナ:AT-502)を用いた。これらのデータに対して RTKPOST の Static モードを用いて解析を行った。Table 4 に KURG を基準とした PPK 解析を行った結果を示す。

Table 4 は推定された測位点 F の座標を XF, YF, ZF で表している。The reference は直接測位の結果を表している。Diff XF ～ Diff ZF はアンテナアレイによる推定座標値のそれぞれから直接測定値を引いた残差を表している。KURG を基準点として Kinematic 解析を行った場合は、diff XF ～ Diff ZF が全てで直接測定値との差が 1 cm 以内であることを示している。風が強くなった時間帯を含む測定 (1/11 09:00-14:59) においても顕著な残差の増大は認められない。

次に距離 3.4 km の地点にある SNYM を基準として Kinematic 解析を行った結果について Table 5 に示す。

Table 5 ではさきほどの KURG を基準にした解析より Diff XF ～ Diff ZF の差は大きい値を示す。X 方向では最大 1.6 cm の差、Y 方向では 0.27 cm、Z 方向では 2.6 cm の差があった。さらに、SNYM 基準の XF ～ ZF の推定結果の標準偏差は KURG 基準のそれよりも 5 割大きい。基準点として用いた観測点 SNYM は観測点 KURG に比べて実験台までの距離が相対的に大きいことを考慮すると、

Table 4 Estimated location of the benchmark F with the antenna-array (reference: KURG, 24 m apart)

Period	XF(m)	YF(m)	ZF(m)	SXF(m)	SYF(m)	SZF(m)	Diff XF (m)	Diff YF(m)	Diff ZF(m)	Note
2022/01/07 1210 - 1/08 0859	-157015.2640	-28296.6910	93.4680	0.0084	0.008	0.0144	-0.0087	0.0044	0.0078	
2022/01/08 0900 - 1/09 0859	-157015.2650	-28296.6910	93.4680	0.008	0.0077	0.0139	-0.0097	0.0044	0.0078	
2022/01/09 0900 - 1/10 0859	-157015.2650	-28296.6910	93.4680	0.0079	0.0078	0.014	-0.0097	0.0044	0.0078	
2022/01/10 0900 - 1/11 0859	-157015.2640	-28296.6910	93.4680	0.008	0.0079	0.0144	-0.0087	0.0044	0.0078	
2022/01/11 0900 - 1/11 1459	-157015.2650	-28296.6910	93.4660	0.0069	0.0089	0.0126	-0.0097	0.0044	0.0058	Windy
2022/2/2 10:08 - 10:40 Static KURG	-157015.2553	-28296.6954	93.4602							

Table 5 Estimated location of the benchmark F with the antenna-array (reference: SNYM, 3.4 km apart)

Period	XF (m)	YF (m)	ZF (m)	SXF (m)	SYF (m)	SZF (m)	Dif X (m)	Dif Y (m)	Dif Z (m)	Note
2022/01/07 1210 - 01/08 0859	-157015.2610	-28296.6890	93.4680	0.0111	0.0096	0.0389	-0.0119	0.0037	0.0191	
2022/01/08 0900 - 01/09 0859	-157015.2620	-28296.6890	93.4650	0.0083	0.0085	0.0272	-0.0129	0.0037	0.0161	
2022/01/09 0900 - 01/10 0859	-157015.2620	-28296.6900	93.4690	0.0118	0.0093	0.0412	-0.0129	0.0027	0.0201	
2022/01/10 0900 - 01/11 0859	-157015.2610	-28296.6900	93.4640	0.0101	0.0088	0.0375	-0.0119	0.0027	0.0151	
2022/01/11 0900 - 01/11 1459	-157015.2650	-28296.6910	93.4750	0.0121	0.0138	0.0452	-0.0159	0.0017	0.0261	Windy
2022/2/1 10:08-10:40 Static SNYM	-157015.2491	-28296.6927	93.4489							

基準点までの距離の増大に応じて測位推定値のバラツキが大きくなる傾向が示されていると考える。

しかしながら推定値の分布は単峰型を示しているので、1 日分の平均を行った結果の収束は期待して良いと考える。

以上のことから海底地盤変動観測装置における 4 アンテナ測位は実用に耐えると判断された。

4. まとめ

海底地盤変動装置の構成のために実験を通して傾斜検出方式の検討、GNSS 観測結果処理方式の検証、傾斜補正アルゴリズムの検証を行った。傾斜検出方法では傾斜角計による直接測定とアンテナペアによる GNSS 間接測定による測定法を比較したが、アンテナペアによる GNSS 間接測定が良い結果を示した。GNSS 観測結果処理方式の検証では、既存の京都大学防災研究所火山活動研究センター連続観測点 SNYM の約 1 年分 (2020/6/17 ~ 2021/6/23, 372 日分) のデータを対象とし、SNYM から 1.5 km の距離を隔てた連続観測点の KMNG を参照点として用いて PPK 解析を行った結果を評価した。解析結果の測位値は単峰分布を示し、1 年間を通したトレンドは見られなかったことから、Kinematic 解析は長期にわたる観測結果を用いても安定した解が得られることが示された。次に Kinematic 解析法の運動に対する追従を確認するために 1 軸を中心に定期的に振動する実験台を用い最大 2 m/s に達するアンテナの運動下での測位結果の分布を調べ、Kinematic 測位の安定性を調べた。運動するアンテナで求めた測位結果に副アンテナを用いたエポック毎の傾斜補正を施して測位点座標を求めた。傾斜補正後の測位点座標ではアンテナ運動速度が 2 m/s に達しても顕著な分散の拡大が見られないことが明らかになった。このことは運動するアンテナに対して、副アンテナを用いたエポック毎の傾斜補正が有効であることと、想定される運動速度に対して Kinematic 解析が安定した結果を与えることを示すものである。

最後にでは直交する 2 軸のそれぞれを中心に回転する実験台を用いて、アンテナアレイによる全方向の傾斜に対する補正アルゴリズムの確認を行った。実験の結果、アンテナアレイによる傾斜補正の結果得られた測位点座標値はいずれの成分も測位値は 1 cm 以下の標準偏差の単峰分布を示し、アンテナアレイによる傾斜補正アルゴリズムが有効であることが示された。

謝辞

本研究の経費は原子力規制庁平成 31 (令和元) 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) 事業および令和 2 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、令和 3 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) 事業に依った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 岡本 修 (2020): 新世代の低価格受信機が持つ抜群の精度 2 周波 RTK レシーバ F9P の測位性能, センチメートル GPS 測位 F9P RTK キット・マニュアル, CQ 出版株式会社, pp. 31 - 41.
- 奥田邦晴・川崎潤二・酒出昌寿 (2010): キネマティック GPS の動揺時における傾斜角度の測定誤差について, 水産大学校研究報告, Vol. 58, No. 1, pp.217-222.
- 栗畑光博 (2002): 考古資料からみた鬼界アカホヤ噴火の時期と影響, 第四紀研究 第 41 巻 (4) pp. 317-330.
- 国土交通省 (2021): 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網 (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS; NOWPHAS), <https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, 2022/4/20 確認.
- 杉崎紘一・阿部正人・奥水 聡 (2012): 構造ヘルスマニタリングのための管制センシングによる傾斜・振動計測法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 1, pp. 216-225.
- 平社信人・石坂卓彌 (2011): ジャイロ計と傾斜計を複合させたリアルタイム姿勢角検出器, 計測自動制御学会産業論文集, Vol. 10, No. 21, pp. 175-181.
- 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, 第 66 巻, pp. 1-7.
- Aramaki, S. (1984): Formation of the Aira Caldera, Southern Kyushu, ~22,000 Years ago, Journal of Geophysical Research, Vol. 89, B10, pp. 8485-8501.
- De Martino, P., Guardato, S., Tammara, U., Vassallo, M., Iannaccone, G. (2014): A first GPS Measurement of vertical seafloor displacement in the Campi Flegrei Caldera (Italy), Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 276, pp. 145-151.
- Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M., Kawai, K., Matsumoto, Y., Yabuki, T., Asada, A., Colombo, O. L. (2006):

- GPS/acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, Vol. 58, pp. 265-275. doi:10.1186/BF03351923.
- Iannaccone G., Guardato S., Donnarumma G.P., De Martino P., Dolce M., Macedonio G., Chierici F., Beranzoli L. (2018): Measurement of seafloor deformation in the marine sector of the Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 123, pp. 66-83. <https://doi.org/10.1002/2017JB014852>.
- Novatel (2021): OEM7 Receiver system, https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Core_Installation/OEM7_Receiver_System_Overview.htm, 2022/2/7 確認
- Okuda, K., Mise, M., Motomura, K., Tatsumi, S. (2001): The Base Line Length Characteristics of the Positioning Accuracy by Kinematic GPS/GLONASS, *Fisheries Engineering*, Vo. 38, No. 1 pp. 9 - 18.
- Spiess, F. N. (1985): Suboceanic geodetic measurements, *IEEE Transaction, Geoscience and Remote sensing*, Vol. 23, pp. 502-510.
- Takasu, T. (2013): RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, <http://www.rtklib.com/>
- 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.
- Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Bezcioglu, M., and Dindar, A. A. (2020): Investigating the effects of ultra-rapid, rapid vs. final precise orbit and clock products on high-rate GNSS-PPP for capturing dynamic displacements, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 73, No. 4, pp. 427-436, DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2020.73.4.427>.
- Yigit C. O. (2016): Experimental assesment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 7, No. 1, pp. 360-383, <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2014.917724>.

(論文受理日 2022 年 8 月 31 日)