

GNSS と異種センサを統合した新しい測地観測技術の開発（第 2 年次）

実施期間	令和 6 年度～令和 10 年度		
地理地殻活動研究センター			
地殻変動研究室	宗包 浩志	川畑 亮二	
	姫松 裕志	林 京之介	
宇宙測地研究室	小林 知勝	中川 弘之	
	松尾 功二	石本 正芳	
	高松 直史	田中 優介	

1. はじめに

国土地理院では、GNSS や衛星 SAR 等により地震や火山活動に伴う地殻変動を計測し、地震・火山の評価を行う政府機関等に情報提供するとともに、位置情報管理のために用いている。迅速かつ稠密な地殻変動観測は、政府機関における評価や位置情報管理の的確さを支える重要な要素である。地殻変動の把握は電子基準点により主に行われるが、対象となる地殻変動の空間的な規模がメソスケール（数十 km）以下の場合、電子基準点では配点密度が不足するため、それを補う測地観測が必要である。可搬型 GNSS 連続観測装置（REGMOS）による観測は、配点密度の向上に資する一方、設置場所に制限が生じる、設置・撤去の労力を要するという短所がある。また、衛星 SAR 観測は、面的に地殻変動を把握できるものの、計測精度、時間分解能、計測可能な成分に短所がある。このような背景の下、近年、エレクトロニクス技術の発達により、小型で機動的な GNSS 観測が実現可能となるとともに、MEMS(Micro Electro Mechanical System)加速度計センサにより、小型で高精度の傾斜・加速度計測が可能となった。また、地上型レーザスキャナの技術開発が進展し、三次元点群のマッチング技術を工夫することで、場所を選ばず遠隔から高い計測精度で測地観測を行う技術的環境が整いつつある。本研究では、地震・火山活動において、メソスケール以下の地殻変動を把握可能とし、かつ GNSS 単独よりも付加価値が高く効率的な、小型・機動的な測地観測装置及び測地観測技術を開発することで、地震・火山活動のメカニズム把握や国家座標の適切な維持管理に資することを目指す。そのために、GNSS と MEMS による傾斜・加速度計を融合した、小型で機動性に優れた測地観測装置（以下「小型 GNSS-MEMS 観測装置」という。）を構築する。また、地上型レーザスキャナによる変動計測と合わせて遠隔地から安全・効率的に面的地殻変動を把握可能とする技術を確立する。2 年目の令和 7 年度は、小型 GNSS-MEMS 観測装置及び観測装置用架台等の開発を引き続き実施したほか、当該観測装置を用いた構内試験を実施した。また、地上型レーザスキャナの構内試験を実施した。

2. 研究内容

2.1 小型 GNSS-MEMS 観測装置の開発

本年度は、昨年度に開発した小型 GNSS-MEMS 観測装置を基盤として、温度計測機能の新規追加及び小型 GNSS 観測装置部と MEMS 観測装置部の一体化改造を実施した。

温度計測機能については、MEMS 加速度センサ周辺の温度変化を高精度に把握することを目的として追加したものである。本装置には、3 軸 DC 応答型 MEMS 加速度センサとして PCB Piezotronics 社製 3713F112G を採用している。本センサは、数百 μ rad レベルの傾斜変化や数百 mGal レベルの加速度変化を検出可能な高感度特性を有する一方、試験観測の結果、温度変化と相関を有するドリフト成分

が出力に含まれることが確認されており、これが長期観測時の検出精度に影響を及ぼす要因の一つであることが明らかとなった。そこで、温度と加速度出力との相関関係に基づくドリフト補正を可能とするため、MEMS 加速度センサ近傍の温度を直接計測可能な温度センサを新たに追加した。導入した温度センサは、0.3℃以内の測定精度を有し、かつ長期連続観測を想定した低消費電力特性を備えている。また、取得した温度データは、データ記録部である Raspberry Pi に自動的に転送・記録され、加速度データとの同時取得を可能とした。これにより、MEMS 加速度データと温度データを同時に高時間分解能で取得する体制が整備され、温度依存特性を考慮した解析及びドリフト補正手法の高度化が可能となった。これらの改良は、長期連続観測時における観測精度及び信頼性の向上に寄与するものと期待される、

小型 GNSS 観測装置部と MEMS 観測装置部の一体化については、昨年度に開発した装置では両者が独立した 2 構成となっていたが、内部構成及び電源系統の再検討を行った結果、電源ユニット類を共通化・一体化できる可能性があることが明らかとなった。また、小型 GNSS 観測装置部には瞬断対策として内部バッテリーを搭載していたが、これまでの運用実績から、瞬断に起因する不具合は確認されておらず、当該バッテリーは必ずしも必要ではないとの判断に至った。これらの検討結果を踏まえ、図-1 に示すような小型 GNSS 観測装置部と MEMS 観測装置部の一体化構造を新たに設計・開発した。実際に開発された観測装置は写真-1 のとおりである。本改良により、装置全体の小型化・軽量化が実現され、可搬性及び設置性の向上が達成された。

今後は、本装置を構内及び野外環境において長期間の試験観測に供し、耐環境性、安定性及び温度計測に基づく補正手法の有効性について定量的な評価を行うとともに、得られた知見を基に更なる装置性能の向上に向けた改良検討を進めていく予定である。

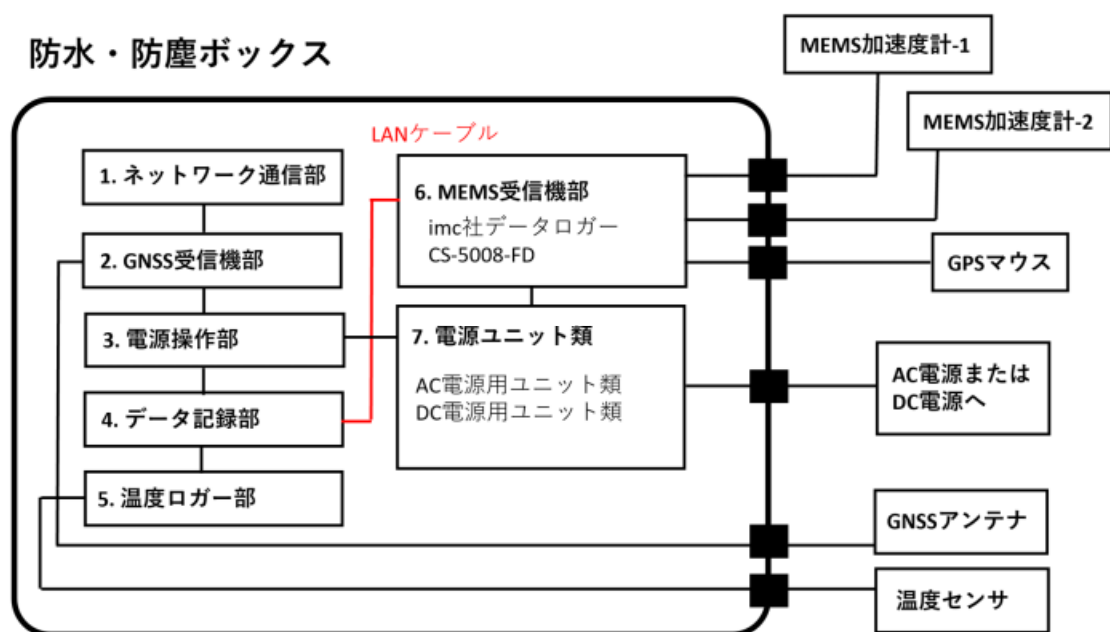


図-1 改良型小型 GNSS-MEMS 観測装置の構成イメージ。

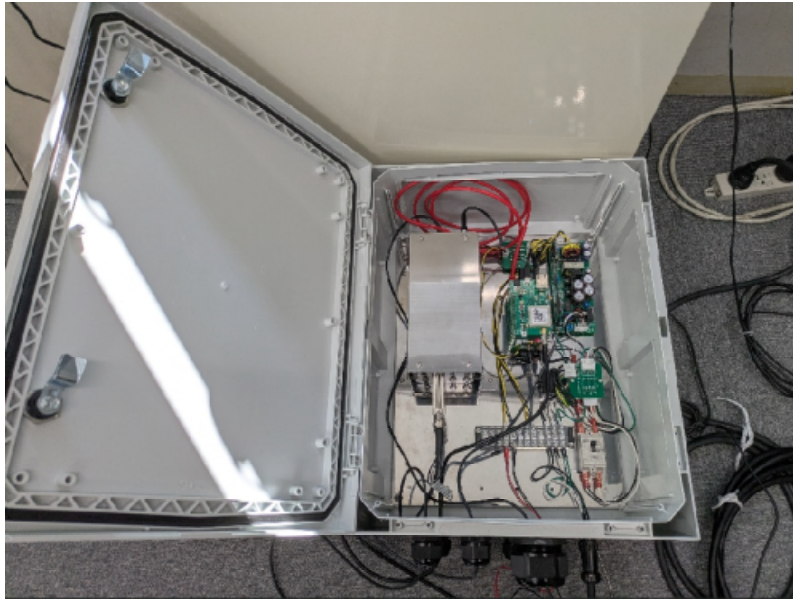


写真-1 改良型小型 GNSS-MEMS 観測装置の写真.

2.2 小型 GNSS-MEMS 観測装置用架台等の開発

令和 6 年度に小型 GNSS-MEMS 観測装置を現地に設置して観測を実施するため、以下の架台・装置の開発を行った：1) 小型 GNSS アンテナ・MEMS センサ設置架台，2) 観測装置・電源バッテリー設置架台，3) 地中 MEMS 設置装置（宗包ほか，2025）．今年度は，各架台・装置について，可搬性の向上や設置時の安定性の確保を主目的として改良を実施した．今年度開発した架台・装置の概要について第 2 章 2 節 1 項から第 2 章 2 節 4 項に示す．

2.2.1 小型 GNSS アンテナ-MEMS センサ設置架台

令和 7 年度に開発した小型 GNSS-MEMS センサ設置架台（以下「観測架台」という．）は，太い中心支柱とそれを支える 3 本の脚からなる土台部，及びその上部に取り付けられる GNSS アンテナ・MEMS 加速度計センサ用の固定台から構成される（写真-2）．火山周辺や沿岸部での長期観測を想定し，架台の金属部分は，耐食性に優れたステンレス SUS316 を採用した．中心支柱の先端には石突を設け，引き抜き強度 100 kg 以上の杭 3 本で地面に固定される．また，支柱を支える 3 本の脚についても，それぞれ同等の引き抜き強度を有する杭 1 本ずつで固定し，架台の安定性を確保している．

GNSS アンテナ・MEMS 加速時計センサを固定する固定台は，上部に GNSS アンテナ，下部に MEMS 加速度計センサを固定し，一つの整準台で GNSS アンテナと MEMS 加速度計センサを同時に整準できる仕様とした．また，MEMS 加速度計センサは温度変化に敏感であることから，熱反射塗装を施したステンレス製の円筒状の保護カバーで設置部を覆い，センサと保護カバーの間に厚さ約 1 cm の断熱材を挿入することで，温度変動の影響を低減した．



写真-2 左図は令和 6 年度に開発した観測架台。右図は令和 7 年度に開発した観測架台。

2.2.2 電源設置架台

令和 6 年度に製作した観測装置・電源バッテリー設置架台は、 $180\text{ cm} \times 140\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ と大型で可搬性に乏しいことから、令和 7 年度は、電源用の太陽電池パネルを搭載する電源設置架台と観測装置を収納する観測装置収納箱に分割した。電源設置架台は、太陽電池パネルを固定する枠とそれを支える 4 本脚の土台部から構成される（写真-3）。パネル固定枠は、ボルト止めが可能な形状とし、太陽電池パネルの角度を 40 度、50 度及び 60 度の 3 段階で調節できる仕様とした。土台部の 4 本脚は、3 段階（10 cm 間隔）で脚の長さを調節できる機構を備え、傾斜地でも太陽電池パネルを水平に設置できるようにした。土台部分とパネル固定枠は分解可能な構造とし、分解後は 2 台合わせても $100\text{ cm} \times 85\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ の空間に収納できる。この結果、令和 6 年度に製作した観測装置・電源バッテリー設置架台と比較して可搬性が大幅に向上した。



写真-3 左図は令和 6 年度に開発した観測装置・電源バッテリー設置架台。右図は令和 7 年度に開発した電源設置架台。

2.2.3 観測装置収納箱

観測装置収納箱は、2.1 章の小型 GNSS-MEMS 観測装置に加え、リチウムイオンバッテリー及びソーラーチャージコントローラを収納するための箱であり、その材質には架台と同様にステンレス SUS316 を採用した（写真-4）。観測装置収納箱は、下部から順に、引き抜き強度 100 kg 以上の杭が 4 本設置できる設置金具、下段収納箱、上段収納箱及び上蓋で構成される。盗難防止の観点から、設置金具及び上下段の収納箱は、いずれも箱内部からネジ止めする構造とした。また、上蓋は特殊形状のボルトで上段の収納箱に固定する仕様を用い、外部から不正に開けられないようにした。さらに、箱の内部の温度上昇を防ぐため、箱の外表面は熱反射塗料で塗装し、内部には厚さ約 1 cm の断熱材を全面に取り付けて温度変動の影響を低減した。



写真-4 左図は観測装置収納箱の全体写真。右図は観測装置収納箱のケーブル取出口。

2.2.4 地中 MEMS 装置

令和 6 年度に開発した地中 MEMS 装置は、浸水対策として MEMS 加速度計センサを取り付けた後の隙間を接着剤等で完全に封止する必要があるが、その結果 MEMS 加速度計センサが再利用できないという課題があった。この問題を解決するため、今年度開発した装置では、長さ 120 cm、直径 10 cm の塩ビパイプと MEMS 加速度計センサを取り付ける樹脂の台の接合部に防水用の O リングを挿入し、ネジで固定する構造を採用した（写真-5）。これにより、必要な防水性能を維持しつつセンサの再利用が可能となった。

また、令和 6 年度の装置では塩ビパイプ内が空洞であったため、ケーブル取出口から侵入した空気が内部で結露し、水滴となって塩ビパイプ内部に付着する問題が確認された。その対策として、今年度の装置では、塩ビパイプ内に厚さ 6 cm の断熱材を 2 個挿入した。地上にあるケーブル取出口から侵入した空気は断熱材により遮断されるため、装置内の温度勾配が緩和され、MEMS 加速度計センサ付近での結露が抑制される。さらに、温度変化の影響が低減されることで、MEMS 加速度計センサのノイズが抑えられると期待される。

加えて、雨や落石から地中 MEMS 装置を守るため、ステンレス製の地中 MEMS 装置保護箱を新たに製作した。



写真-5 左図は令和 6 年度に開発した地中 MEMS 装置。右図は令和 7 年度に開発した地中 MEMS 装置。

2.3 構内試験

2.3.1 観測架台が GNSS 観測に与える影響の調査

令和 6 年度に製作した小型 GNSS-MEMS 観測装置を国土地理院構内に設置し、令和 7 年 7 月 1 日から令和 8 年 1 月 29 日に掛けて GNSS 観測を実施した。解析には、RTKLIB2.4.3（高須ほか，2007）を用いた。国土地理院構内の電子基準点「つくば 1」を基準局としたキネマティック測位解析を行い、基準局と観測架台との基線ベクトルを得た。また、性能評価のため、同条件で基準局と国土地理院構内の IGS 点「TSK2」との基線ベクトルの時系列を算出して比較した。

図-2（左図）は、電子基準点「つくば 1」と観測架台との基線ベクトル時系列を示す。「つくば 1」—観測架台の基線ベクトルの標準偏差は、水平成分が 2.9 mm，上下成分が 4.7 mm で、同期間における「つくば 1」—「TSK2」の基線ベクトルの標準偏差（水平成分 2.0 mm，上下成分 3.9 mm）に比べて 1.5 倍程度大きい。また、観測架台の基線では、夏期の日中に基線ベクトルの分散が増加する傾向が見られ、約 23 時間 56 分周期のマルチパスとランダムノイズが重畳した特徴を示した。このばらつきの原因が架台構造に起因するものかを検証するため、観測架台の隣に同一の GNSS アンテナと受信機を搭載した三脚を設置し、令和 7 年 9 月 17 日から 27 日にかけて並行観測を実施した。並行観測の結果を表-1 の標準偏差及び図-2（右図）の時系列に示す。両者の基線ベクトル時系列はおおむね一致しており、観測架台における基線のばらつきは主として設置環境等によるもので、観測架台が GNSS 観測精度に与える影響は小さいと判断できる。

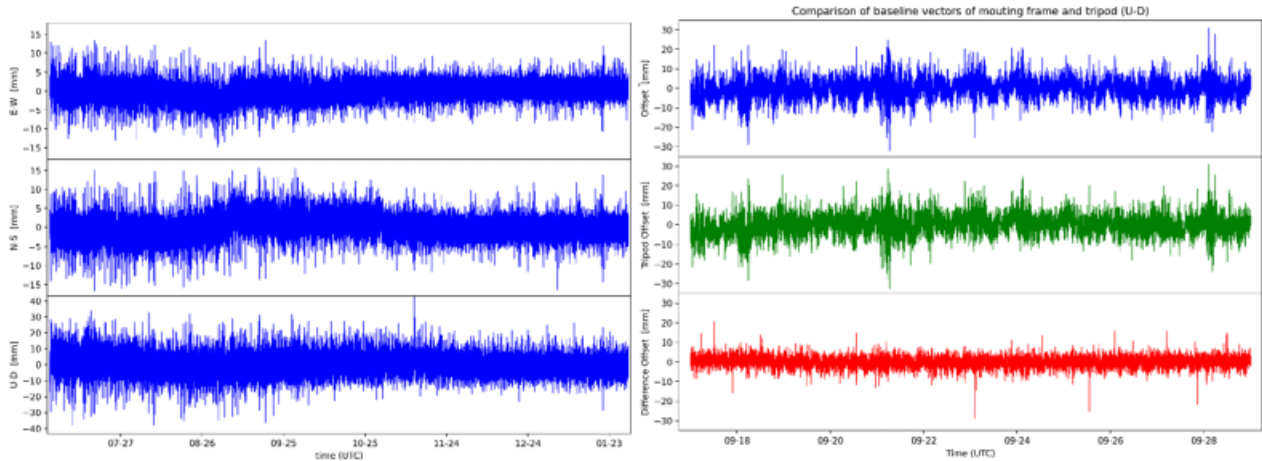


図-2 左図は電子基準点「つくば1」と観測架台の基線ベクトルの時系列。右図の青色の実線は電子基準点「つくば1」と観測架台の上下成分の時系列、緑色の実線は電子基準点「つくば1」と三脚の上下成分の時系列、赤色の実線は観測架台の上下成分（青色の実線）と三脚の上下成分（緑色の実線）の差分を示している。

表-1 電子基準点「つくば1」と観測架台及び電子基準点「つくば1」と三脚の基線ベクトルの標準偏差。

	東西成分 [mm]	南北成分 [mm]	上下成分 [mm]
観測架台	1.6	2.0	4.7
三脚	1.6	2.2	4.7

2.3.2 MEMS 加速度計センサによる計測結果

前述の国土地理院構内に設置した小型 GNSS-MEMS 観測装置のうち、MEMS 加速度計センサを用いた計測結果を示す。今回の解析では、小型 GNSS アンテナ・MEMS センサ設置架台に設置した MEMS 加速度計センサ（以下「架台 MEMS」という。）及び地中 MEMS 設置装置に設置した MEMS 加速度計センサ（以下「地中 MEMS」という。）の両方のデータが得られている令和7年6月16日から12月22日までの期間について、100 sps のサンプリング速度で記録した3軸方向の加速度データを用いた。

図-3 は比較的振動ノイズの少ない3日間の加速度変化を例示している。加速度には、短い周期で振動する変動とともに、気温と相関するような日周変動が見られる。また、図-4 は令和7年12月8日青森県東方沖の地震（M7.5）に伴う地震動を捉えたものである。本観測における MEMS 加速度センサのノイズレベルは数 mg 程度であることから、有感地震のような比較的振幅の大きい地震波であれば、MEMS 加速度センサで計測することが可能であることが確かめられた。

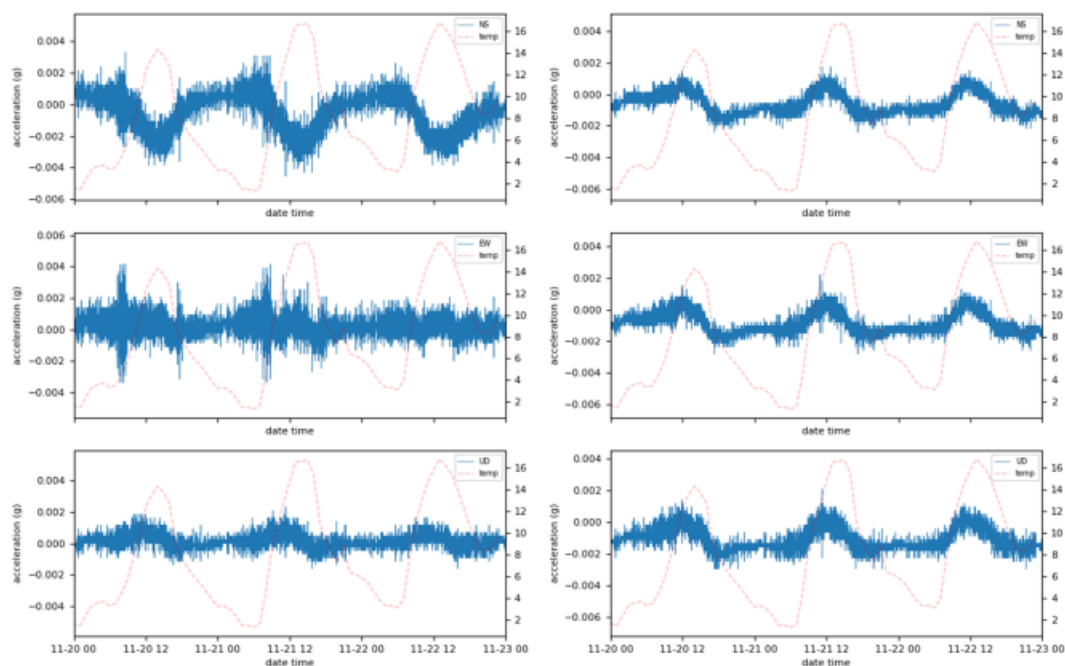


図-3 架台 MEMS（左）及び地中 MEMS（右）で計測した 3 日間の加速度変化。

加速度の単位は標準重力加速度 g 。軸の方向はほぼ南北（上）、東西（中）及び上下（下）で図-4,5 も同様。赤線はつくば（館野）の気温（気象庁）。

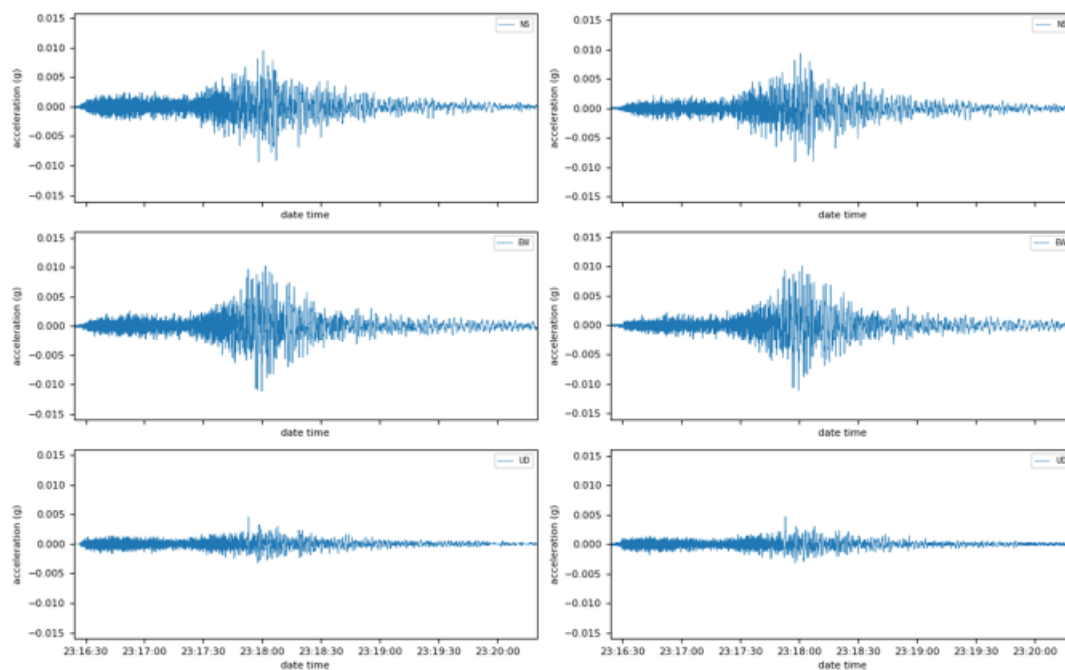


図-4 令和 7 年 12 月 8 日青森県東方沖の地震（M7.5）に伴う地震動波形。

また、図-5 は本観測で得られた約半年間の加速度の長期的な変化を示したものである。前述した気温による日周変動に加え、9 月 5 日付近に架台 MEMS 及び地中 MEMS の双方で、水平方向に急激な加速度の変化が見られた。この加速度変化は、架台 MEMS で 2 mg 程度、地中 MEMS で $2 \sim 3 \text{ mg}$ 程度である。いずれも数時間程度で変化しており、周辺で降水量が急激に増加した時間帯とほぼ同期することから、周辺地盤の局所的な変動に伴う傾斜を捉えた可能性がある。また、同時期を挟んだ GNSS

観測の結果でも、北方向及び東方向に 2 mm 程度の変位が見られている（図-6）。本装置の GNSS アンテナは高さ約 1.4 m の架台上に設置されており、架台に 2 mrad（約 2 mg の水平方向の加速度変化に相当）の傾斜が生じた場合に期待される変位量は 2.8 mm であることから、GNSS 及び MEMS 加速度センサの計測誤差も考慮すると、架台の傾斜により GNSS アンテナ位置で変位が生じたと考えて矛盾しない。今回の観測により、MEMS 加速度計センサを用いることで、GNSS 観測点周辺の状況を相補的に監視することが可能であることが確かめられた。

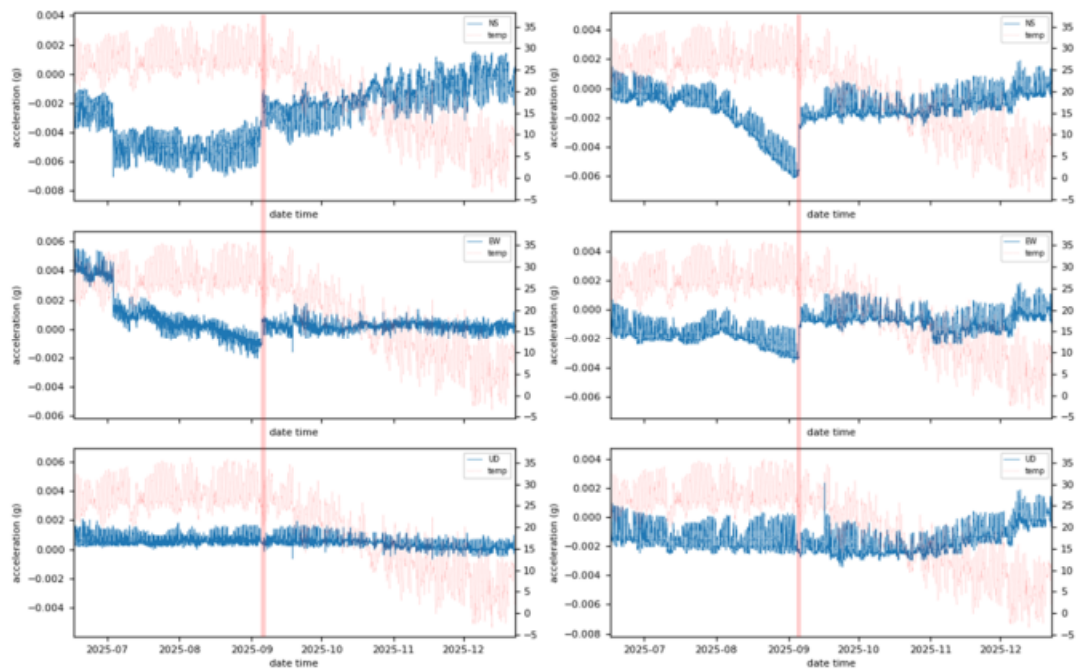


図-5 架台 MEMS（左）及び地中 MEMS（右）で計測した約半年間の加速度変化。

加速度は 30 秒ごとに平均した値を図示している。9 月 5 日付近を赤ハッチで示している。赤線はつくば（館野）の気温（気象庁）。

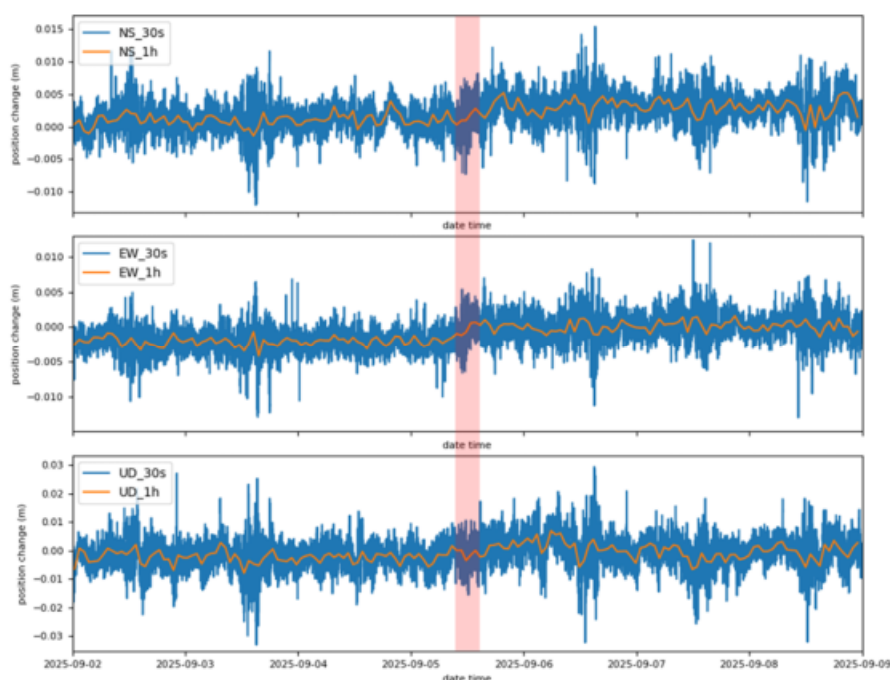


図-6 小型GNSSアンテナ・MEMSセンサ設置架台に設置されたGNSSアンテナによる基線ベクトルの時系列。南北（上）、東西（中）及び上下（下）方向の変位を示している。30秒データ（青）を1時間ごとに平均した値（橙）も図示している。MEMS加速度センサに急激な変化が見られる時間帯を赤ハッチで示している。

2.4 山口県北部及びトカラ列島近海の地震活動における小型GNSS観測の実施

小型GNSSの観測機能については、既に実用的な水準にあることから、今年度はその機動性を生かして実地の地殻変動観測への適用を進めた。その適用事例の一つが、令和7年2月から活発化した山口県北部の地震活動である。この地震活動に伴って発生している地殻変動の詳細な把握を目的として、令和7年6月24日、山口県萩市大字福井上に小型GNSS観測装置を設置し、観測を開始した。もう一つの事例が、トカラ列島近海の地震活動である。活動域近傍の陸地（島）に限られる中、国土地理院の既設観測点がない小宝島に小型GNSS観測装置を設置し、観測を開始した（令和7年7月12日）。いずれの観測においても、得られた地殻変動の結果は、地震調査委員会や地震予知連絡会に提出され、活動評価の基礎資料として活用された。なお、本観測における結果の詳細は、一般研究「小型GNSS機器を用いた詳細かつ迅速な地殻変動把握手法の開発」に係る調査研究年報において報告されている。

2.5 地上型レーザスキャナ

地上型3次元レーザスキャナ（以下「レーザスキャナ」という。）は、レーザを用いて非接触かつ非破壊で地物や地形情報を3次元的に計測することができる観測機器の一つである。観測対象は植生や雪氷など多岐にわたり、地物観測においては地形の計測に用いられている（例えば Voordendag et al. 2023）。2時期に計測した結果の差分をとることにより、地形の変化を捉えることができ、地すべりや鉱山における変動のモニタリングなどに活用されている（例えば Stumvoll et al. 2021）。観測対象まで視通を確保できれば任意の地点から計測することができ、スキャナ本体は測量用精密三脚に据え付けて計測ができるため、機動性の高い観測も期待できる。

本研究では、レーザスキャナを用いて地上から高密度な点群データを取得し、メソスケールの地殻変動を検出することを目指す。地殻変動検出のための差分解析や点群マッチングといった解析技術の

高度化を進めるとともに、主に火山を対象とした観測事実を蓄積し、新たな地殻変動の観測手法としての有用性を検証する。令和 7 年度の実施内容は以下のとおりである。

①機器の調達

本研究で使用するレーザスキャナとして、オーストリア RIEGL 社製 VZ-4000i25 を選定し、令和 7 年 12 月に調達した（写真-6）。本機種は、最大計測可能距離 4,600 m（反射率 90%）の性能を有し、計測距離 2,000 m の場合 7 cm 程度の空間分解能で点群データを取得可能である。本機種により、遠隔地から広域かつ高密度に観測対象を観測でき、遠隔地から計測可能な性能は、観測場所の選択肢を広げることにつながる。特に火山を対象とする場合、火山活動の活発化や噴火が切迫した際には火口周辺は規制区域として設定される事例が多いため、遠隔地から観測できることは重要な性能である。

②有珠山における観測のための現地調査

実際に生じている地殻変動を検出することを目的として、長期的に収縮が継続している有珠山を対象に令和 8 年度から観測を行う予定である。本年度は、観測場所の選定のため現地調査を行った。なお、観測場所の選定には北海道大学地震火山観測センターの協力を受けた。

観測場所は、レーザスキャナにより良質なデータを得るため、以下の 2 点を満たすことを条件として選定した。i) 植生や地物・地形による遮蔽がなく視通が確保できること、ii) 複数地点から観測できること。i) はレーザスキャナ観測における最低条件である。ii) は複数の独立した地殻変動の変位成分を得ることに必要であり、観測精度を幾何学的に向上させるとともに、地形によるレーザ影の影響の補完にも寄与する。

現地調査及び植生の状況や観測可能性についてのヒアリングの結果、有珠山外輪山の散策路及び周辺の林道からカルデラ内の山体及び昭和山を望む複数地点を候補地点として選定した。候補地点には国有林及び国立公園に該当する地点があるため、観測の許認可を受けるための申請を行い、令和 8 年度から観測が可能となる見込みである。

③過去データを用いた気象の影響の評価

レーザスキャナ観測時における気象の影響を検証するために、数値気象モデルを用いた斜距離変化の試算を行った。レーザスキャナは、近赤外帯のレーザを用いて観測地点と対象物の距離を測定するため、気象条件により屈折率が変化することで伝搬速度や伝搬経路が変化し、計測結果に影響を与え得る。本研究では、火山におけるサブデシメートル級の地殻変動を高精度に検出することを目指しているため、あらかじめ気象の影響を定量的に見積もった。今回は気象の影響として支配的な成分である伝搬速度変化に伴う効果のみを計算した。観測を予定している有珠山周辺における観測を想定し、レーザを水平方向に数百 m～数 km 照射した場合について、屈折率の変化から斜距離変化を求めた。屈折率の計算に必要な気象データは、気象庁メソ数値予報モデル(Meso-Scale Model: MSM)の地上面データ（各日 0 時(UTC)の初期値）を使用した。

2023 年 1 月から 2025 年 12 月までの 2 年間について、計測距離を 700 m, 2,000 m, 4,500 m として、2023 年 1 月 1 日を基準とした斜距離の変化を求めた結果を図-7 に示す。この結果から、冬季に斜距離が伸長し、夏季に斜距離が短縮する周期的な変化を示すことがわかる。また、計測距離が長くなるにつれて斜距離変化の振幅は増大し、計測距離が 700 m の場合は冬季と夏季における斜距離の変化量は最大 2 cm 程度となる一方、計測距離が 4,500 m の場合は最大で 13 cm 程度の斜距離変化となることがわかった。

上記の結果から、観測を実施する季節や気象条件によっては、気象の影響が無視できないことを再確認した。一方、2 時期に取得した点群データ間のマッチングを適用することで、気象の影響を吸収できる可能性もある。今後の試験観測や現地観測において、気象測器を用いた観測地点における気象条件の記録も行い、気象の影響について継続的に検討する。



写真-6 調達した地上型 3 次元レーザスキャナ。

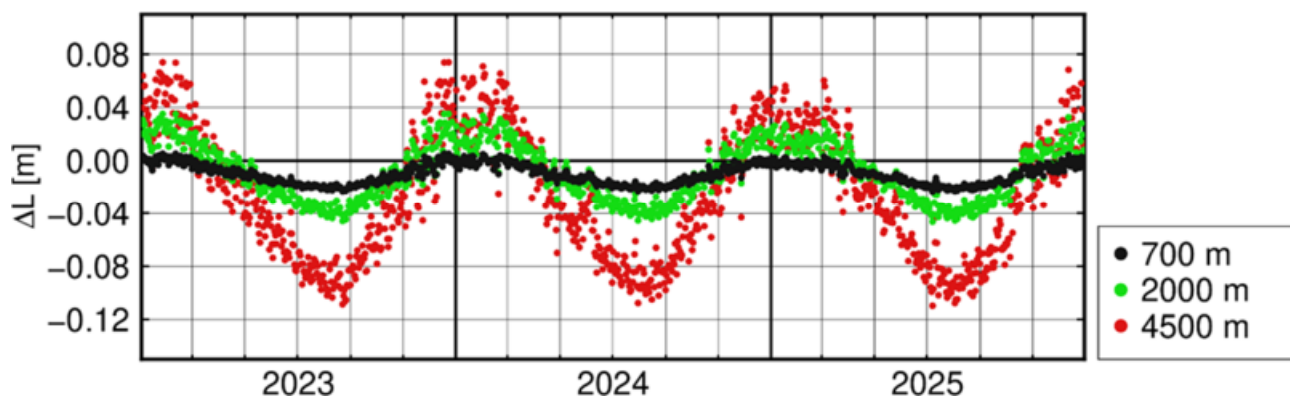


図-7 数値気象モデルを用いた気象の影響による斜距離変化 (ΔL) の時系列.

3. まとめと今後

令和7年度は、構内観測における結果から、MEMS 加速度計センサにより、GNSS 観測点周辺で発生する変動を相補的に監視することが可能であることが確かめられた。一方、計測された加速度は気温変化に大きく依存していることから、長期的な変化を捉えるためには、温度変化を踏まえた加速度変化の評価が必要になる。レーザスキャナに関する研究においては、観測機器の調達、観測場所の選定、気象の影響の検討を行った。

次年度は、MEMS 加速度計センサの温度依存性に関する調査を進めるとともに、地球科学的なシグナルを捉えるためより感度の高い加速度センサの導入及び試験計測を進める予定である。また、レーザスキャナに関しては、点群データを用いた差分解析の精度検証として、実験環境下における変位抽出の精度評価及び解析手法による変位成分への感度検証を行う。有珠山を対象とした観測は、今年度選定した観測地点において2回実施する予定である。

参考文献

宗包浩志, 水藤尚, 姫松裕志, 桑原將旗, 小林知勝, 中川弘之, 松尾功二, 服部晃久 (2025): GNSS と異種センサを統合した新しい測地観測技術の開発 (第1年次), 国土地理院令和6年度調査研究年報, 114–118.

Stumvoll, M.J., Schmaltz, E.M. and Glade, T. (2021): Dynamic characterization of a slow-moving landslide system – Assessing the challenges of small process scales utilizing multi-temporal TLS data. *Geomorphology*, 389, p.107803. doi: 10.1016/j.geomorph.2021.107803

高須知二, 久保信明, 安田明生 (2007): RTK-GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価及び応用, GPS/GNSS Symposium 2007, Tokyo, Japan, November 20-22 2007.

Voordendag, A., Goger, B., Klug, C., Prinz, R., Rutzinger, M., Sauter, T. and Kaser, G. (2023): Uncertainty assessment of a permanent long-range terrestrial laser scanning system for the quantification of snow dynamics on Hintereisferner (Austria). *Frontiers in Earth Science*, 11. doi: 10.3389/feart.2023.1085416