

# 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）

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	水藤 尚	
	姫松 裕志	桑原 將旗	
宇宙測地研究室	小林 知勝	中川 弘之	
	松尾 功二	服部 晃久	

## 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、計測可能な変動の方向に短所がある。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旨とする。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併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認する。初年度である本年度は、小型 GNSS-MEMS 観測装置用架台等の設計・開発及び小型 GNSS-MEMS 観測装置の開発を実施した。

## 2. 研究内容

### 2.1 小型 GNSS-MEMS 観測装置用架台等の設計・開発

小型 GNSS-MEMS 観測装置を現地に設置し、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。以下、1)～3) の概要について述べる。

#### 2.1.1 小型 GNSS アンテナ・MEMS センサ設置架台

架台は三脚及びその上部に設置される GNSS アンテナ及び MEMS センサを固定するためのセンサ固定台から構成される（図-1）。長期に観測を継続することを考え、三脚の材質は腐食に強いステンレスとした。センサ固定台は、上部、下部にそれぞれ GNSS アンテナ、MEMS センサを固定する仕様と

した。その際、GNSS アンテナが地面反射マルチパスを拾うのを避けるため、アンテナは、底面が地面からおおむね 150 cm の高さに固定できるよう、三脚は脚長を約 140 cm とし、台と三脚の接続部の可動域を鉛直から外側に最大 30 度に制限した。また、架台が風や地震動等によって動かないよう、三脚と地面を引き抜き強度 100 kg 以上の杭で接続することとし、杭は地面に約 50 cm 以上打ち付けることが可能なように設計した。センサ固定台は、GNSS アンテナ、MEMS センサの水平を保持できるようそれぞれの段に独立に整準台・雲台で調整可能とした。MEMS センサの場合、水平以外に設置方位も合わせる必要があるため、雲台は水平だけでなく回転方向の調整も可能なように設計した。

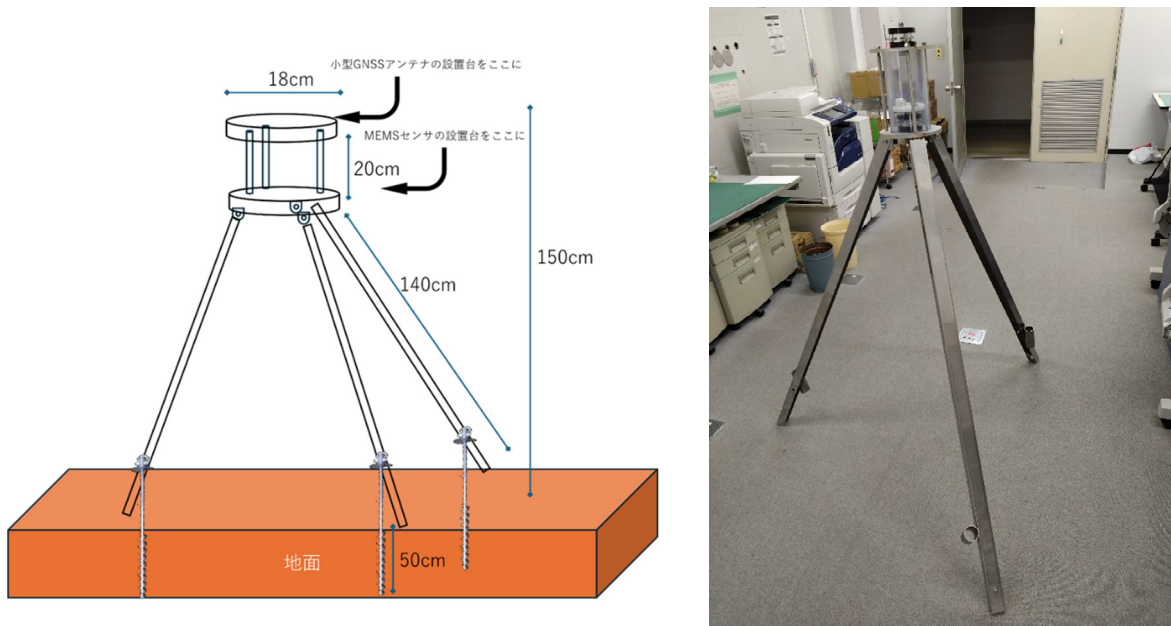


図-1 小型 GNSS アンテナ・MEMS センサ設置架台

### 2.1.2 観測装置・電源バッテリー設置架台

今回開発する装置は、商用電源がない場所でも観測を行うことが想定されるため、太陽電池パネル及びバッテリーを同時に設置する必要がある。そのため、観測装置に加え太陽電池パネル及びバッテリーを収容できる観測装置・電源バッテリー設置架台を設計した。架台は持ち運び及び現地での組立てを容易にするため、ステンレスで作成された 2 枚の枠を上部で溶接した蝶番様の形状とし、その一面に太陽電池パネル、もう一面に観測装置を収容するボックスを設置する仕様とした。また、枠と枠の間に板を渡して強度を保つとともに、そこに電源バッテリーを設置できるようにした(図-2)。なお、太陽電池パネルの保護のため、太陽電池パネルを設置する枠の背面に保護用のステンレス板を取り付けることとした。

### 2.1.3 地中 MEMS 設置装置

地面傾斜計測用の MEMS センサを地中に設置するための装置を開発した。装置は長さ 120 cm の塩ビパイプ、蓋及び MEMS センサ設置台から構成される。MEMS センサ設置台は塩ビパイプの蓋に固定される。その後、塩ビパイプに蓋を取り付け、地面に掘った穴に埋設することで MEMS センサを地中に設置する。その際、穴の底面にコンクリートを流し込み、パイプの上面で水平を取りつつコンクリートを固化させて MEMS センサを水平に固定するようにした。また、塩ビパイプ内部に水が侵入

し、センサが水没するのを防ぐため、パイプの上部をカバーで覆う構造とした（図-3）. センサ設置台はジュラコン樹脂で作成し、水没を避けるため高さを 5 cm 程度とした. また、万一センサが水没した場合に備え、センサのコネクタ部分に対して防水加工を施した.

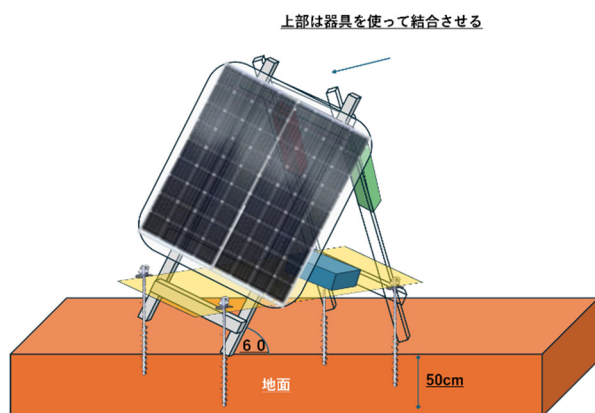


図-2 観測装置・電源バッテリー設置架台

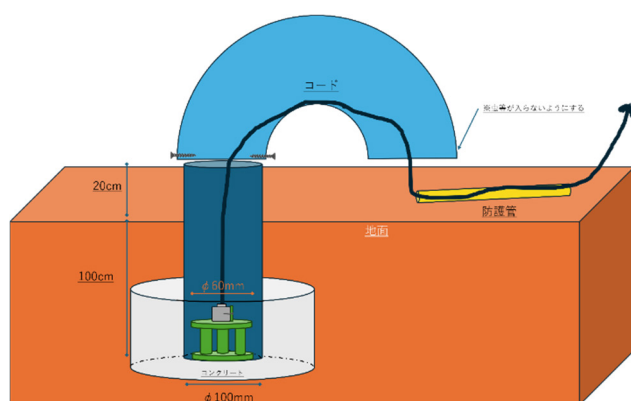


図-3 地中 MEMS 設置装置の設置後のイメージ図と製作物

## 2.2 小型 GNSS-MEMS 観測装置の開発

同一の観測架台に異なるセンシング機材（小型 GNSS 及び MEMS 加速度計センサ）を搭載する「小型 GNSS-MEMS 観測装置」の開発を行った. 本節では、初めに、MEMS 加速度計センサ（以下「MEMS センサ」という.）の要件の整理と整備について、次に、小型 GNSS と MEMS センサを統合した観測装置の開発について述べる.

### 2.2.1 MEMS センサの要件の整理と整備

MEMS センサ及びデータ収集に必要な機器類を整備した. 本研究の遂行のため、使用する機器には以下のような目標性能を設定した. MEMS センサについては、直交 3 成分の並進運動を計測する必要があることから、3 軸の加速度センサを導入することとした. まず初めに、加速度計で傾斜を監視するためには、地震による振動帯域から準静的な変動帯域までの広い周波数帯の加速度変化を安定的に捉える必要がある. そのため、3 軸方向の検出に必要な周波数範囲を 0~100 Hz とした. また、数百  $\mu\text{rad}$  レベルの傾斜を捉えるためには、3 軸方向の加速度を数百 mGal 精度で検出する必要があることから、

100 mGal 程度の計測精度を満たすことを要件とした。さらに、地震時のクリッピングを避けるため、ダイナミックレンジを 1000 Gal 以上とした。加えて、本研究で開発する装置は、野外での運用を想定していることから、耐環境性に優れたセンサを用いる必要がある。特別研究「災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究」や一般研究「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」の取組において、小型 GNSS 観測装置の受信機内部は、夏場にかけて 70°C 近くの高温になることが分かっていることから、その知見から 100°C 程度の温度耐性を要件とした。なお、冬場の観測も想定されることから零下においても稼働することも条件とした。以上の要件から、本研究では、MEMS センサとして PCB Piezotronics 社 3713F112G を導入した。本センサは、3 軸 DC 応答 MEMS 方式を採用しており、±2000 Gal のダイナミックレンジにて、周波数 0~250 Hz の範囲を 100 mGal の精度で 3 軸方向の加速度変化を計測可能である。また、耐温度性は -54~120°C であり、計測機能や環境耐性において本研究の要件を満たすものである。

一方、データ収集については、アンテナ架台設置用と地中設置用の 2 個の MEMS センサを搭載することから、最低でも二つの入力チャンネル数を持つ上記 MEMS センサ対応のデータロガーが必要になる。その上で、上記 MEMS センサの周波数範囲 0~100 Hz を記録するために、サンプリングレートは数百 Hz をロガーの必要な要件とした。また、正確なデータの時刻管理が必要なことから、GPS により時刻同期を行った上で、データをサンプリングし、外部記録装置にデータを記録する機能を備える条件も必要とした。また、リモートでの操作を可能とするため、FTP 通信によるデータ転送を可能とするものとした。以上の要件から、本研究では、データロガーとして imc 社 CS-5008-FD を導入した。本データロガーは入力チャンネル数が 8 ch であり、サンプリングレートは 100 kHz である。データの記録に当たっては、GPS 装置により時刻同期を行った上でのデータサンプリングが可能である。また、FTP 通信によるデータ転送が可能であり、Rasbery Pi に代表されるようなシングルボードコンピュータを介したデータ取得も可能である。なお、本機種の耐温度性は -10~55°C であり、MEMS センサほどの耐性範囲ではないものの、野外での運用も可能である。

### 2.2.2 小型 GNSS-MEMS 観測装置

先行研究（特別研究「災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究」及び一般研究「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」）において開発を進めた小型 GNSS 観測装置の知見を基に、小型 GNSS 観測装置、MEMS センサ及びデータロガーを統合した小型 GNSS-MEMS 観測装置を作成した。装置の構成を図-4 に示す。小型 GNSS 観測装置は、GNSS 受信機部、データ収集・システム操作部（シングルボードコンピュータを搭載）、ネットワーク通信部、電源ユニット類から構成される。構成装置は全て一つのボックス内に収納し、振動や揺れによる接続不良が生じないように配線・固定している。収納ボックスは IP55 の規格を満たす防水・防塵性能を確保した。収納ボックス背面には、架台のフレーム等に固定するための治具を備え付けている。MEMS 観測装置は、MEMS 受信機部（データロガー）と電源ユニット類から構成される。構成装置は全て一つのボックス内に収納し、振動や揺れによる接続不良が生じないように配線・固定している。収納ボックスは IP55 の規格を満たす防水・防塵性能を確保した。収納ボックス背面には、架台のフレーム等に固定するための治具を備え付けている。両観測装置は、小型 GNSS 観測装置の (A-2) データ収集・システム操作部と MEMS 観測装置の (B-1) MEMS 受信機部で接続されている。これにより、(A-1) GNSS 受信機部及び (B-1) MEMS 受信機部で記録した GNSS 及び加速度データを (A-2) データ収集・システム操作部において収集し統合処理することができる。

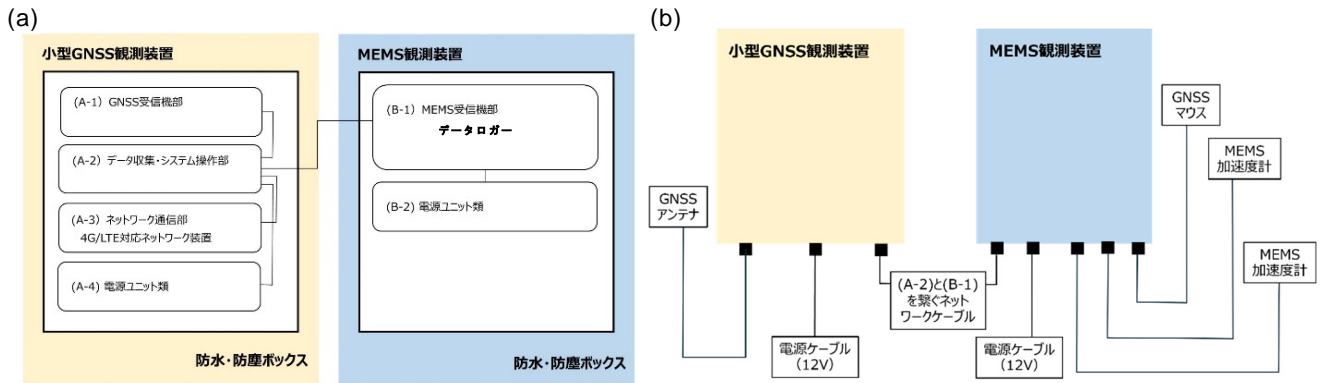


図-4 小型 GNSS-MEMS 観測装置の概要. (a)内部構成イメージ. (b)外部構成イメージ.

### 3. まとめと今後

令和 6 年度は、小型 GNSS-MEMS 装置用架台等の設計及び開発を実施した。開発では、野外での迅速かつ簡便な設置を目指し、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 設置装置の設計及び開発をそれぞれ実施した。また、本研究の遂行に必要な MEMS センサ及びデータ収録機能に関する要件をまとめ、これに対応した 3 軸 MEMS 加速度センサ及びデータロガーを整備した。さらに、小型 GNSS 観測装置、MEMS センサ及びデータロガーを統合して小型 GNSS-MEMS 観測装置を作成した。次年度は、開発した装置用架台への設置等を行い、屋内外での試験観測を実施する予定である。