

## 小型 GNSS 測量機による測位精度の向上に関する研究（第 3 年次）

実施期間	平成 28 年度～平成 30 年度
地理地殻活動研究センター	
宇宙測地研究室	小門 研亮
測地観測センター	
電子基準点課	宮崎 隆幸

### 1. はじめに

国土地理院は日本全国に約 1,300 点の電子基準点を整備し、その観測データ及び解析結果を提供することで正確な位置の基準を与えている。これに加えて地震発生時には電子基準点の観測データから速やかに地殻変動量を算出して速報として発表し、変動量が著しい場合には観測データから地震断層モデルを算出するなどしている。

電子基準点の平均点間隔は約 20km であり、測量の位置の基準としては十分な空間密度で配置されている。また海溝型地震のような空間スケールの大きな地震イベントに対しても十分な検知能力を持つ。しかし空間スケールが比較的小さい内陸型地震においては電子基準点が必ずしも地震断層近傍に存在するとは限らず、ごく少数の観測点において小さな変動シグナルしか得られないことがある。

電子基準点間のより小さなスケールの地殻変動を検出するには、より高密度に GNSS 連続観測点を設置することが必要であるが、既存の電子基準点や観測条件が厳しい地域における地殻変動監視のための GNSS 連続観測を目的として国土地理院が開発した GNSS 火山変動リモート観測装置（Remote GNSS Monitoring System: REGMOS）（平岡ほか, 2011）の設置には、多大な製造コスト・運用コストや設置の労力がかかるため、REGMOS により GNSS 連続観測点数を劇的に増加させることは難しい。

一方で近年、GNSS 測位技術の進展により、測量用の GNSS アンテナや受信機以外にも、数千円～数万円で購入可能な低価格の小型 GNSS アンテナ（以下「低価格アンテナ」という。）及び GNSS 受信機モジュール（以下「低価格受信機」という。）が普及し始めており、これらの低価格な機器による高精度な測位が可能となりつつある。

本研究では市販の低価格アンテナ及び低価格受信機を用いて、測位性能を維持しつつ観測点数の大幅な拡大が可能な簡易型 GNSS 連続観測装置及び観測データの解析手法を開発することを目的として技術開発を実施する。第 3 年次にあたる平成 30 年度は、平成 29 年度までに試作した小型 GNSS 観測装置をつくば長距離 GNSS 比較基線場の基線測点 No.11 に設置し、測位性能の評価を実施した。

### 2. 研究内容

本研究で使用する小型 GNSS 観測装置では、低価格受信機としてスイス u-blox 社製 NEO-M8T モジュール（1 周波受信機モジュール（L1））、制御用コンピュータとして raspberryPi3 を使用した。平成 29 年度は、電源のインフラが整備されていない地域での設置を想定し、電源として鉛バッテリーやソーラーパネルを接続した装置で試験観測を実施したが、平成 30 年度は安定稼働下における測位性能を評価するため、ピラーや電源が整備されている「つくば長距離 GNSS 比較基線場」の基線測点 No.11 を使用して試験観測を実施した。試験観測は、「①低価格受信機のみを使用した場合」と「②低価格アンテナ及び低価格受信機を使用した場合」の 2 パターンとし、性能評価のための測位解析には RTKLIB2.4.2（高須ほか, 2007）を使用した。また、測位解析では、基線測点 No.11 を移動局とするス

タティック解析と後処理キネマティック解析を実施した。主な解析条件を表-1 に示す。

表-1 RTKLIB 解析条件

解析モード	スタティック	後処理キネマティック
使用衛星	GPS	GPS
使用周波数	L1	L1
使用暦（衛星軌道・時計）	IGS 最終（igs）暦	IGS 速報（igr）暦
電離層遅延	放送暦	放送暦
大気遅延	Zenith+Gradient	Zenith+Gradient
地球回転パラメータ	IGS 最終（igs）暦	IGS 速報（igr）暦
海洋潮汐荷重変形	あり	あり
エポック間隔	30 秒	1 秒

### 3. 得られた成果

#### 3.1 低価格受信機のみを使用した場合の測位性能

平成 29 年度までの性能評価では、低価格アンテナと低価格受信機をセットにした装置で試験観測を実施していたため、測量用の GNSS アンテナ及び受信機による測位結果との差が、低価格アンテナによるものか低価格受信機によるものかの切り分けが困難であった。そのため、平成 30 年度は、GNSS アンテナは測量用アンテナである「Zephyr Geodetic model2」を共通で使用し、アンテナからの信号を低価格受信機と測量用受信機「Trimble NetR9」の 2 通りに分配入力した上で、両受信機による測位結果を比較した（表-2）。測位解析の基準観測局には、電子基準点「守谷」（基線長：20.3km）を使用した。

表-2 測量用アンテナを共通で使用した場合の測位結果の比較

解析モード	比較項目	(A)低価格受信機 u-blox NEO-M8T	(B)測量用受信機 Trimble NetR7	差(A-B) (mm 換算値)
スタティック	緯度[deg]	36.105679042	36.105679041	$+1.0 \times 10^{-9}$ (+0.1mm)
	経度[deg]	140.087654066	140.087654072	$-6.0 \times 10^{-9}$ (-0.5mm)
	楕円体高[m]	66.8069	66.8071	-0.0002 (-0.2mm)
後処理 キネマティック	緯度[deg]（平均）	36.105679034	36.105679031	$+3.0 \times 10^{-9}$ (+0.3mm)
	経度[deg]（平均）	140.087654071	140.087654087	$-1.6 \times 10^{-8}$ (-1.4mm)
	楕円体高[m]（平均）	66.8050	66.8107	-0.0057 (-5.7mm)
	FIX 率	97.5%	98.0%	-----
	標準偏差(N/E/U)[mm]	(17.5/11.8/36.1)	(16.9/11.7/36.5)	-----
	初期化時間※	479 秒	208 秒	-----

※初期化時間：観測開始から初めて 10 エポック以上連続で FIX 解が得られるまでの時間

座標値の差はスタティック解析で 1mm 以内、後処理キネマティック解析で 6mm 以内に収まっており、受信機の違いによる測位結果の差はごく僅かであった。また、後処理キネマティック解析では、初期化時間について、低価格受信機の方が 2 倍以上時間を要する結果となったが、FIX 率や解収束後

の標準偏差については、測量用受信機とほぼ同等の結果が得られた。これらの結果から、低価格受信機の測位性能は、測量用受信機と遜色ないものと判断できるが、機器の安定稼働という点では、試験観測を通じて以下の問題が判明した。

① 制御用コンピュータ「raspberryPi3」の脆弱性

raspberryPi3 はオペレーションシステム (OS) を SD カードにインストールするため、SD カードが壊れるとデータ取得が停止する。SD カードの耐久性は低く、今回の試験観測中にも SD カードの故障が発生したため、長期間の継続的な観測には不向きである。

② 時刻のズレ

低価格受信機で 1Hz サンプルングしたデータ (RINEX) を確認したところ、データ取得時刻が時間の経過とともに整数秒から少しずつずれることが判明した。0.005 秒以上ずれると、RTKLIB ではデータを読み込めず測位解析ができなくなるため、取得データのタイムスージングを実施する必要がある。

3.2 低価格アンテナ及び低価格受信機を使用した場合の測位性能

次に測量用アンテナを低価格アンテナに交換し、低価格アンテナと低価格受信機による装置での性能評価を行った。性能評価で使用する低価格アンテナは、u-blox 社製 NEO-M8T モジュール評価キット付属の小型アクティブアンテナとし、先の試験観測で使用した整準台の上に固定して試験観測を実施した。基準観測局を電子基準点「守谷」とし、表-1 の解析条件でスタティック解析及び後処理キネマティック解析を実施したが、後処理キネマティック解析では解が FIX しなかったため、エポック間隔を 10 秒に変更し解析を実施した。測位結果を表-3 に示す。

表-3 低価格アンテナ+低価格受信機による測位性能

解析モード	比較項目	(C)低価格アンテナ +低価格受信機 u-blox NEO-M8T	表-2(B)測量用受信機 との差 (C-B) (mm 換算値)
スタティック	緯度[deg]	36.105678932	$-1.09 \times 10^{-7}$ (+12.1mm)
	経度[deg]	140.087654032	$-4.0 \times 10^{-8}$ (-3.6mm)
	楕円体高[m]	66.8124	-0.0053 (-5.3mm)
後処理 キネマティック	緯度[deg] (平均)	36.105678894	$-1.37 \times 10^{-7}$ (-15.6mm)
	経度[deg] (平均)	140.087654021	$-6.6 \times 10^{-8}$ (-5.9mm)
	楕円体高[m] (平均)	66.8040	-0.0067 (-6.7mm)
	FIX 率	92.8%	-----
	標準偏差(N/E/U)[mm]	(22.8/19.6/53.1)	-----
	初期化時間	2,790 秒 (46 分 30 秒)	-----

測量用アンテナ及び測量用受信機を使用した場合との測位結果の差は、スタティック解析、後処理キネマティック解析共に緯度方向で 1cm を超過し、経度及び上下方向については 1cm 以内に収まる結果となった。後処理キネマティック解析の FIX 率は 90%以上となったものの、標準偏差は測量用アンテナを使用した場合の約 1.5 倍大きくなっており、アンテナの違いによる測位性能の低下が見られる。また、初期化時間も 45 分以上と大きく悪化した。低価格アンテナは測量用アンテナに比べ SNR も低く、ノイズが大きいと思われ、それにより測位解が収束しにくくなり、測位性能の低下を招いている

ものと思われる。

上記の評価は、L1 信号のみを使用した 1 周波解析の比較結果であり、電離層遅延の影響を評価することができないが、平成 29 年度の性能評価において、10km を超える基線において上下方向の測位結果に差が生じることが報告されている。そのため、平成 30 年度は、低価格アンテナ及び低価格受信機の 1 周波スタティック解析 (L1) について、電離層遅延補正を適用しない場合と測地観測センター地殻監視課の GNSS 統合解析システム (畑中, 2012) で生成される電離層遅延補正モデルを用いた場合の 2 通りを実施し、測量用アンテナ及び測量用受信機の 2 周波スタティック解析 (L1+L2) の測位結果と比較した。測位解析の基準観測局には、「つくば 1」、「阿見」、「守谷」、「利根」を使用し、基線長と測位結果の差の関係を確認した (表-4)。

表-4 2 周波解析結果 (測量用機器) と 1 周波解析結果 (低価格観測装置) の差

基準 観測局	基線長 (km)	2 周波解析 - 1 周波解析 (補正なし)			2 周波解析 - 1 周波解析 (補正あり)		
		緯度差 (mm 換算)	経度差 (mm 換算)	楕円体高差 (mm)	緯度差 (mm 換算)	経度差 (mm 換算)	楕円体高差 (mm)
つくば 1	0.25	-15.6	-3.8	-7.4	-15.6	-3.9	-7.4
阿見	13.5	-11.1	-11.6	28.7	-10.1	-13.7	22.1
守谷	20.3	-10.5	-10.6	37.2	-2.1	-8.9	30.7
利根	26.5	-19.4	0	33.7	-6.5	-5.5	20.6

緯度及び経度方向の差は全てマイナスとなり、アンテナ位相中心がずれている可能性を示唆する結果となったが、差は 1.6cm 以内に収まった。一方、楕円体高差については、10km を超える基線で大きくなる傾向が見られる。モデルを用いた電離層補正を適用することで差は小さくなるものの、2~3cm 程度の差が残る結果となった。

#### 4. 結論

本研究により、低価格受信機及び低価格アンテナの測位性能を独立に評価することができた。低価格受信機は、制御コンピュータの脆弱性や時刻安定性に課題はあるものの、測位性能については測量用受信機と同等の性能 (mm 単位で整合した測位解) を得られることを確認した。低価格アンテナについては、後処理キネマティック解析において、標準偏差や初期化時間の面で性能が劣っていることを確認したが、測位結果の差は 2cm 以内で整合しており、アンテナ位相中心の影響を補正すれば、電子基準点を補完する GNSS 連続観測に使用できると思われる。しかしながら、現行の 1 周波対応の低価格受信機では、長距離基線における電離層遅延の影響を解消できないため、ublox 社を始め、複数のメーカーで新たに開発・販売している多周波対応の低価格受信機の採用を検討する必要がある。

#### 参考文献

- 畑中雄樹 (2012), GPS 統合解析技術の高度化 (第 3 年次), 平成 23 年度調査研究年報, 112-115.
- 平岡喜文, 横川正憲, 根本盛行, 村山盛行, 武山峰典 (2011): 次世代衛星携帯電話を利用した GPS 火山変動リモート観測装置 (REGMOS-Hybrid) の開発, 測地学会誌, 57(4), 173-180.
- 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, Paper presented at GPS/GNSS Symposium 2007, Tokyo, Japan.