

小型 GNSS 測量機による測位精度の向上に関する研究（第 5 年次）

実施期間 平成 28 年度～令和 2 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

1. はじめに

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～十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.）や 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 GNSS 機器を用いた民間等による GNSS 連続観測局の整備も進んでいる。

低価格 GNSS 機器を用いた観測局は，設置や運用に係るコストを抑えることができるため，今後，さらに民間等により整備される可能性があるが，低価格 GNSS 機器による測位の精度や正確さが確保できない場合，使用する機器や設置場所によって測位結果に差異が生じる可能性がある。現在，民間等で整備が進められている GNSS 連続観測局の中には，高精度測位や地殻変動把握等を目的としたものも存在するため，本研究では，低価格 GNSS 機器による測位性能を評価するとともに，高精度測位や地殻変動把握等で使用する際の課題を整理した。

2. 研究内容

昨年度は，多周波対応の低価格アンテナと u-blox 社製の低価格受信機「ZED-F9P」を用いて測位性能を評価した。その結果，低価格アンテナを使用した場合，マルチパスの影響による位相特性の変化が原因と思われる測位結果のバイアスを確認したほか，u-blox 社の低価格受信機「ZED-F9P」においては，L2P 信号を受信できないことに起因する長距離基線での測位精度の低下を確認した。この結果を受けて，令和 2 年度は，以下の 3 つの評価を実施し，低価格 GNSS 機器を使用する場合の課題を整理した。



写真-1 位相特性計測の様子

- ① 国土地理院構内のアンテナ位相特性検定用架台（以下「位相検定架台」という.）において，15 万円以下の低価格アンテナ 4 機種及び測量用アンテナを設置し，各アンテナの位相特性を計測した。アンテナを整準台の上に設置した場合（写真-1 左）と整準台に約 1m のポールを取り付けて設置した場合（写真-1 右）の 2 パターンで位相特性を計測し，設置条件の違いがアンテナの位相特性に与える影響を評価した。
- ② ①の計測結果を基に位相特性モデルを作成し，土浦市高岡の GNSS 観測用ピラーで実施した 3 日間

表-1 キネマティック解析の設定条件

設定項目	設定内容
使用衛星	GPS+GLONASS
使用周波数帯	L1+L2（解析モード:combined）
解析レート	30秒
暦情報	Broadcast
PCV補正	有り
大気遅延補正	有り
電離層遅延補正	位相特性モデル評価時（②）：有り 低価格受信機評価時（③）： 有り/無しのパターンを実施

の GNSS 観測 (2020/12/14 00:00~12/17 00:00 (UTC)) に適用した。解析は、RTK-GNSS 用のプログラムライブラリ「RTKLIB」(高須ほか, 2007) を用いたキネマティック解析とし、土浦市高岡から約 11km 離れたつくば市国松の GNSS 観測用ピラーに設置したチョーキングアンテナ (TRM59800.00) を固定局として、表-1 に示す条件で実施した。得られたキネマティック座標解から、FIX 率と標準偏差及び座標解の平均値を算出し、位相特性モデルの違いが測位に与える影響を評価した。

- ③ ZED-F9P, L2P 信号にも対応した Septentrio 社の低価格受信機「mosaic-X5」及び測量用受信機を用いて 3 日間の GNSS 観測 (2020/9/25 00:00~9/28 09:00 (UTC)) を実施し、測位性能を評価した。観測は、位相検定用架台で行い、測量用アンテナで受信した信号を ZED-F9P と mosaic-X5 及び測量用受信機に分配してデータを記録した。解析は、国土地理院から 20~30km 離れた場所にある電子基準点のうち、データ品質が比較的良好な電子基準点「出島」を固定局とするキネマティック解析とし、表-1 に示す条件で実施した。また、L2P 信号の有無による測位性能の差異を確認するため、電離層遅延補正有り無しとの 2 パターンで解析を行い、それぞれ FIX 率や座標解の標準偏差を比較・評価した。

3. 得られた成果

3.1 アンテナ位相特性の計測結果

位相検定架台において計測した 2 パターンの位相特性を比較するため、位相特性のオフセット値 (PCO) の差及び電波の入射角 (仰角) 毎に得られる位相特性変動量 (PCV) の差の RMS を算出した (表-2)。また、米国国家測地測量局 (NGS) から位相特性モデルが公表されているアンテナについては、本研究で計測した 2 パターンの位相特性と NGS モデル値の違いを確認した (図-1)。測量用アンテナの位相特性は、ポールの有無によらず、ほぼ同じであり、NGS モデル値と比較しても、大きな差がないことを確認した。一方、低価格アンテナについては、PCO, PCV とともに差が生じ、大きいものでは測量用アンテナの数倍から数十倍の差が生じることを確認した。また、NGS 公表の位相特性モデルとも大きく異なっており、計測環境の違いで位相特性に大きな差異が生じる結果となった。低価格アンテナは、移動体測位を対象としたものが多く、アンテナ直径が約 8cm~15cm と測量用アンテナよりも小さいため、アンテナを設置する架台上面からのマルチパス等がアンテナの位相特性に影響を与えている可能性が高い。

3.2 異なる位相特性モデルによる測位結果

NGS から位相特性モデルが公表されている低価格アンテナ A を用いて、土浦市高岡で GNSS 観測を行い、位相検定架台での計測結果を基に作成した 2 パターンの位相特性モデル及び NGS 公表の位相特性モデルを適用してキネマティック解析を行った。得られたキネマティック座標解から、FIX 率と標準偏差を算出するとともに、座標解の平均値と事前に測量用 GNSS 機器で計測した座標解との較差を計算し、適用する位相特性モデルの違いによって生じる座標解のバイアスを評価した (表-3)。

解析の結果、FIX 率や標準偏差は位相特性モデルの違いによらず、ほぼ同じであったが、測量用 GNSS 機器で計測した座標解との差については、大きく異なることを確認した。特に NGS 公表の位相特性モデルを適用した場合、東西方向に 39.0mm、高さ方向に 125.5mm の大きな差が生じた。一方、位相検定架台においてポール無しの状態で計測した位相特性モデルを適用した場合は、水平方向で 10mm 以内、上下方向でも 15mm 以内に収まっており、測量用 GNSS 機器による座標解との差が小さくなった。

表-2 各アンテナの位相特性計測結果の差（ポール無しーポール有り）

アンテナ	PCOの差 [mm] (ポール無しーポール有り)						PCVの差のRMS [mm]	
	L1			L2			L1	L2
	南北	東西	上下	南北	東西	上下		
測量用アンテナ	0.3	-0.9	0.8	0.6	-0.4	-1.4	0.41	0.63
低価格アンテナA	2.8	-0.6	-8.8	-2.3	1.3	4.4	0.94	3.45
低価格アンテナB	-1.2	0.2	0.1	-0.4	-0.4	33.3	0.74	15.54
低価格アンテナC	3.2	-0.8	-6.6	-0.1	-0.7	3.2	1.26	5.85
低価格アンテナD	-2.0	3.0	-8.1	0.4	3.8	-1.1	1.39	4.60

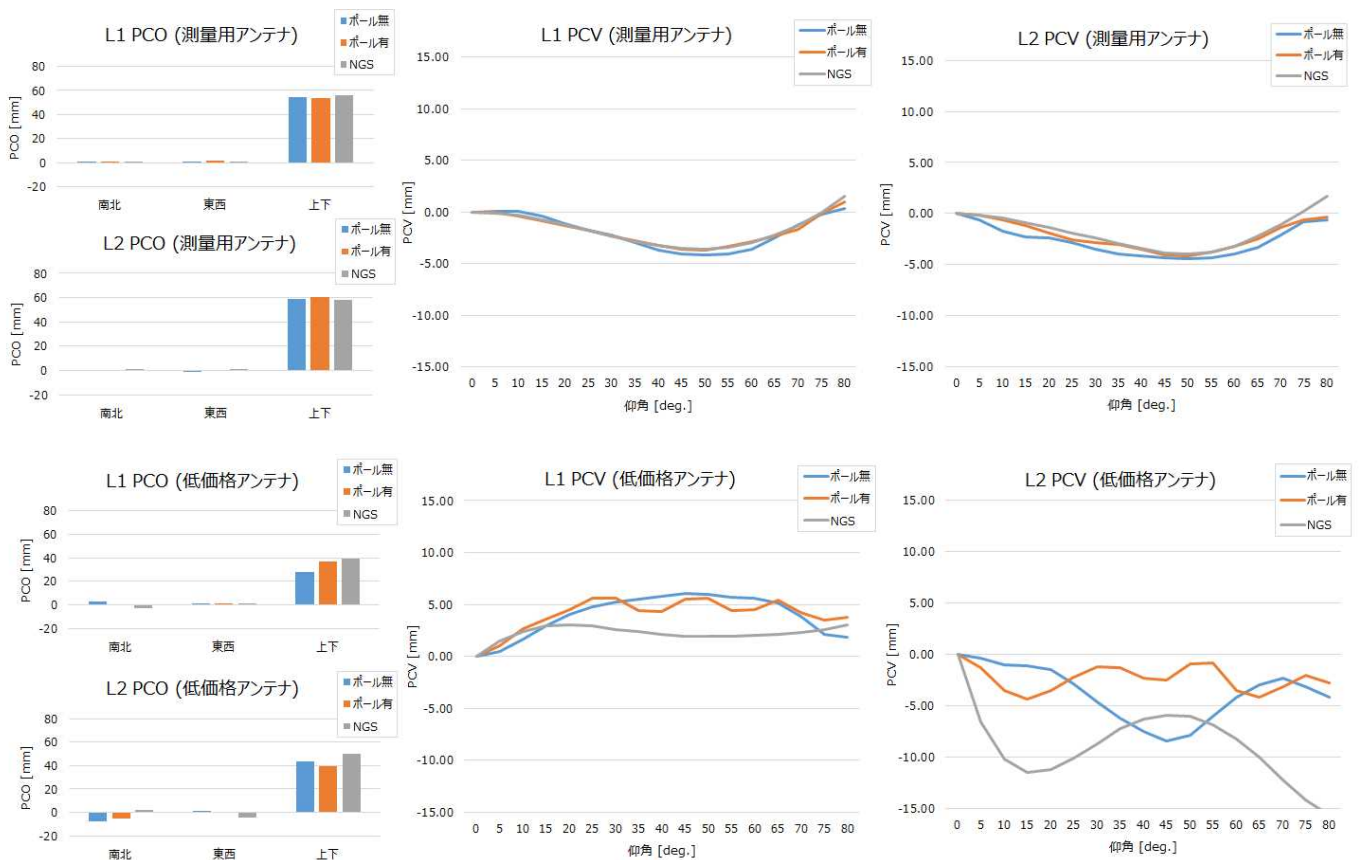


図-1 測量用アンテナ（上）と低価格アンテナ A（下）の位相特性計測結果

表-3 異なる位相特性モデルによる測位結果の比較（低価格アンテナ A）

適用した位相特性モデル	FIX率 [%]	標準偏差 [mm]			測量機による計測値との差 [mm]		
		南北	東西	上下	南北	東西	上下
位相検定架台 測量用ポール無し	90.5	7.1	7.8	25.4	1.7	6.6	-13.7
位相検定架台 測量用ポール有り	93.4	7.2	7.3	25.5	-3.0	17.3	41.8
NGS	91.6	7.6	7.6	26.5	5.2	39.0	125.5

これは、この位相特性モデルが NGS 公表のものよりも優れているというのではなく、位相検定架台におけるポール無しでの計測環境が、他の2つのモデルの計測環境に比べて、土浦市高岡における観測環境と類似しており、当該観測環境により適した位相特性モデルが作成された結果だと思われる。

NGS 公表の位相特性モデルと位相検定架台でのポール無しの状態で計測した位相特性モデルの差は、最大で十数 mm 程度である (図-1) が、GNSS 観測で得られる座標解の差は 100mm を超える結果 (表-3) となり、モデル値の差よりも大幅に大きい。これは、解析時に入力値とする PCO 及び PCV の誤差が、対流圏遅延や電離層遅延の推定に影響し、特に高さ方向に大きなバイアスとして現れたものと推測される。すなわち、低価格アンテナの中には、NGS から位相特性モデルが公表されているものも存在するが、マルチパスの影響を受けやすいアンテナを使用する場合にはこのモデルを用いたとしても、アンテナの設置方法や周囲の環境によってアンテナの位相特性が大きく変化するため、対流圏遅延や電離層遅延を推定する際に、測位結果 (特に高さ方向) に大きなバイアスが生じ、座標解の正確性が低下する可能性がある。

3.3 低価格受信機による測位性能の比較

測量用受信機及び2つの低価格受信機による GNSS 観測のキネマティック解析結果のうち、座標解の標準偏差及び FIX 率を図-2 に示す。電離層遅延補正無しの場合は、標準偏差・FIX 率ともに受信機の違いによる差は見られず、FIX 率は約 97%、標準偏差は水平方向で 12mm、上下方向で 34mm 程度となった。一方、電離層遅延補正有りの場合、測量用受信機及び mosaic-X5 では FIX 率がほぼ 100% となり、標準偏差も水平方向で約 7mm、上下方向で 20mm 以内に改善したが、ZED-F9P では FIX 率が低下し、標準偏差も他の2つの受信機ほどは改善しなかった。座標時系列 (図-3) においても、mosaic-X5 に比べ座標解のばらつきが大きいほか、座標解が FIX しない時間帯 (黄色プロット) があり、mosaic-

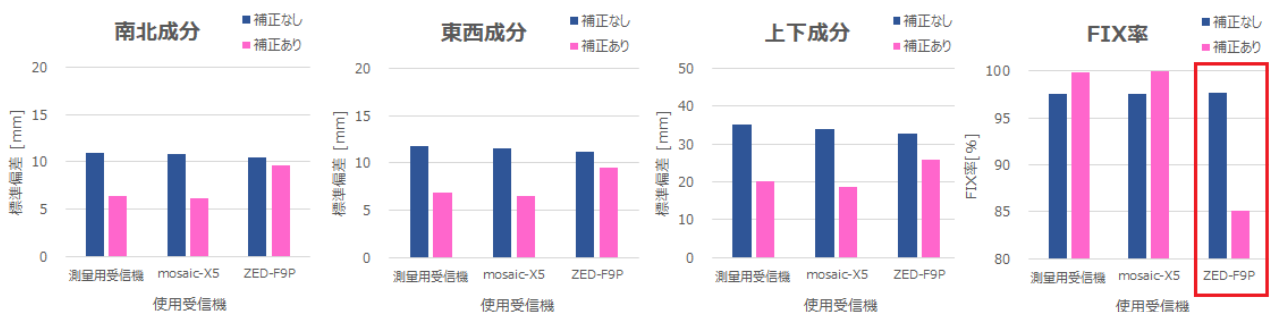


図-2 受信機毎のキネマティック解析結果の比較

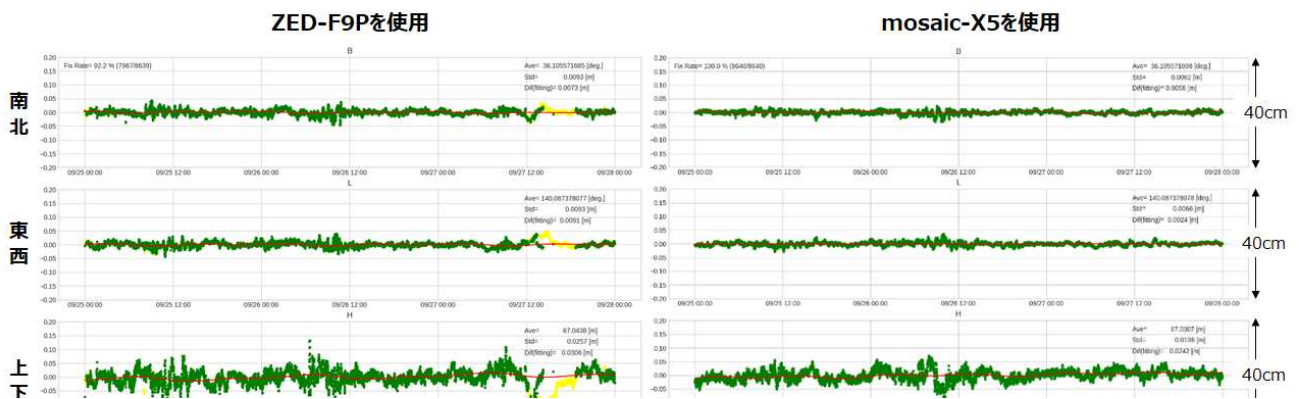


図-2 ZED-F9P (左図) 及び mosaic-X5 (右図) を使用した場合の座標時系列 (緑: FIX 解、黄: FLOAT 解)

X5の方が安定した座標解が得られることを確認した。電離層遅延補正には、L1/L2の2周波の信号が必要であるが、ZED-F9PはL2P信号に対応していないため、電離層遅延補正に使用できる衛星数が減少し、測位結果及びFIX率の低下につながった可能性がある。

4. 結論

本研究により、低価格アンテナの信頼性と2つの低価格受信機の測位性能を評価することができた。低価格アンテナの場合、移動体測位を対象とした小型のアンテナが多く、測量用アンテナに比べマルチパスの影響を受けやすいため、設置方法や周囲の環境によって位相特性が大きく変化する可能性が高い。マルチパス等による位相特性の変化は、キネマティック解析の標準偏差（再現性）にはあまり影響しないが、得られる座標解（特に高さ方向）にバイアスが生じることを確認した。民間等のGNSS連続観測局の座標値は、10km以上離れた電子基準点を用いて算出されることが想定されるため、低価格アンテナを採用する観測局の場合、高さ方向のバイアスに注意が必要である。低価格受信機については、対応周波数の多い低価格受信機 mosaic-X5 を使用することで、適切な電離層遅延補正が可能となることを確認した。電離層遅延等の補正が必要な10kmを超える長距離基線において正確かつ高精度な測位を行うには、このような多周波対応受信機の採用を検討すべきである。

参考文献

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.