

GNSS アンテナの絶対位相特性に関する調査・検討

実施期間	令和 2 年度～令和 3 年度		
測地部	吉川 忠男		
測地部測地基準課	社 泰裕	山下 達也	
	加川 亮		

1. はじめに

準天頂衛星システム「みちびき」によるセンチメートル級測位補強サービス（CLAS）や精密単独測位（PPP）など、測位技術の進展によって誰もが高精度な測位情報を容易に取得できる環境が整備されつつある。

こうした高精度測位情報を建設現場の生産性向上を図る i-Construction 等において、安定的に活用するためには、取得した位置情報に対して GNSS アンテナ毎の位相特性（アンテナ種類、測位衛星の配置等に依存する受信位置の変化）を的確に補正する技術が必要となる。

このため、測地基準課では、令和 2 年度「測量の生産性を向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の枠組みにおいて、株式会社パスコと請負契約を締結し、GNSS アンテナ位相特性の個体差に起因する測量や測位への影響調査、GNSS アンテナ絶対位相特性の各国の状況調査及び GNSS アンテナ絶対位相特性データを取得できない場合における精度低下を回避する方法について調査・検討を行った。令和 3 年度はその検討結果を踏まえ関係者にてとりまとめを行った。

2. 調査・検証

2.1 GNSS アンテナ相対位相特性の個体差に起因する測量や測位への影響調査

測量機メーカーアンテナ 3 機種と廉価アンテナ 2 機種をそれぞれ 8 基使用して個体差を観測し評価した。

2.1.1 観測

国土地理院構内のアンテナ定数検定架台（以下「検定架台」という。）において、国土地理院の標準アンテナを架台 H001 に設置し、その周囲に同心円状に同機種アンテナ 8 基を設置し個体差を観測した（図-1）。観測は、「GPS アンテナ位相特性決定作業要領」（以下「作業要領」という。）に準拠し、同種アンテナ別に 1 セット 24 時間を 2 セットとし、アンテナ高は全て同一とした。また、12 時間毎にアンテナの向きを反転した。なお、準天頂衛星を取得できないアンテナがあるため全機種を GPS 衛星の受信波のみの解析とし、2 セット分を平均してアンテナの位相特性を求めた。なお、各アンテナの相対位相特性の解析には ANTTOOL を使用した。

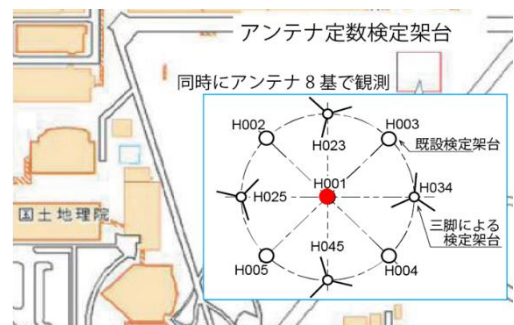


図-1 GNSS アンテナ個体差の観測

2.1.2 評価

アンテナ相対位相特性 PCV, PCO について、作業要領第 17 条に規定されている同機種アンテナの平均的な位相中心位置成分（南北，東西，上下）の差 5 mm 以内を指標に、次のとおり PCV, PCO の検証及び点検を行った。

【PCV 検証】

同機種 8 基の各仰角（15 度～85 度）における PCV の最大値と最小値を比較し、その中で最も較差が大きい値を抽出する。また、同機種 8 基の仰角 15 度～85 度間の標準偏差を求め、その中で最も大きい標準偏差を抽出する。

【PCO 検証】

同機種 8 基の PCO の南北成分、東西成分及び高さ成分の較差の最大値を抽出する。また、同機種 8 基の南北成分、東西成分及び高さ成分の標準偏差を算出する。

【PCV, PCO の点検】

観測で得られた各アンテナの個体別 PCV, PCO（以下「観測の PCV」という。）を基線解析に適用して検定架台の座標値を算出し、検定架台の成果値と比較した。同様に National Geodetic Survey (NGS) が公開している PCV, PCO（以下「NGS の PCV, PCO」という。）を基線解析に適用して検定架台の座標値を算出し、検定架台の成果値と比較した。なお、基線解析には GSILIB1.03 を使用した。

2.2 GNSS アンテナ絶対位相特性の各国の状況調査

絶対位相特性を取得する上で必要な要件を明確にする目的で、GNSS アンテナ絶対位相特性を計測する屋内型の電波暗室と屋外型のロボティック法について、各国の状況を調査するとともに装置、設計、観測手法を考察した。

i) 電波暗室

ドイツのボン大学、オーストラリアの地球科学研究所（Geoscience Australia）の文献を調査するとともに、必要な装置、設計等について考察した。

ii) ロボティック法

Geoscience Australia, ドイツの Geo++ GmbH, アメリカの NGS, 中国の武漢大学, スイスのチューリッヒ工科大学の文献を調査するとともに、必要な装置、観測手法等について考察した。

2.3 GNSS アンテナ絶対位相特性データを取得できない場合における精度低下を回避する方法の提示

アンテナ位相特性（PCV, PCO）を補正していない GNSS 観測の座標と、基準となる TS（トータルステーション）観測の座標の差から求める簡易な絶対位相特性（PCO のみ）の推定方法について検証した。

検証では、観測架台 9 点（測量網 1）、5 点（測量網 2）、4 点（測量網 3）の 3 パターン（図-2）について、以下のように妥当性や有効性を確認した。

i) 簡易な絶対位相特性（PCO）と NGS の PCO の比較により、本推定方法の妥当性を評価

ii) 幾何学的図形による TS の計算精度の違いから効率的かつ有効的な測量網を評価

なお、観測では、GNSS アンテナは Zephyr-Model2, TS は SOKKIA 製の NET05AX, ミラーは SOKKIA 製の APS12, CPS12, 基線解析ソフトウェアは GSILIB1.03 を使用した。基線解析は、ANTEX（PCV 及び PCO 補正）をゼロとし、L1 の 24 時間データで解析した。TS 計算ソフトウェアは経緯度網平均が可能な PAG-U を使用し、フリーネットワーク解法と 1 点固定解法で計算した。投影図法はメルカトル等角図法を採用し、平面の原点を H001 の座標、原点の縮尺係数は 1.000 に設定した。

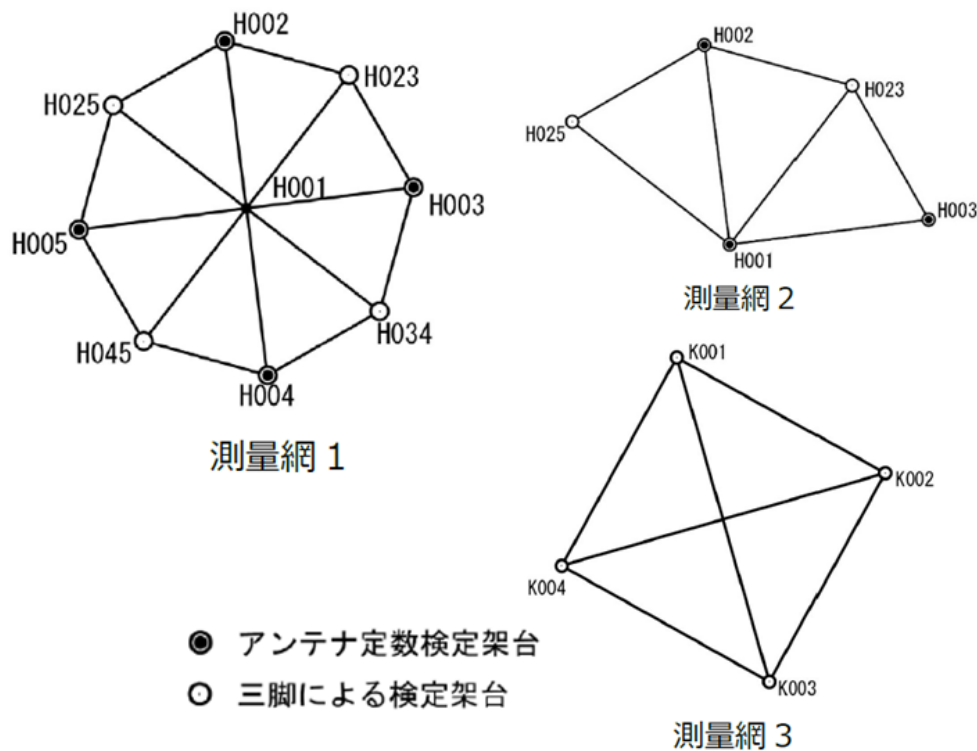


図-2 3つのパターンの測量網

3. 得られた成果

3.1 GNSS アンテナ相対位相特性の個体差に起因する測量や測位への影響調査の結果

【PCV 検証結果】

測量機メーカーアンテナ 3 機種 of L1, L2 及び廉価アンテナ 2 機種 of L1 では、個体間の最大較差 5mm 以下（最大標準偏差 2mm 以下）で概ね安定した結果が得られた（表-1）。一方、廉価アンテナ 2 機種 of L2 では、個体間の最大較差 8mm 以上（最大標準偏差 3mm 以上）で不安定な結果（表-1）となった。

【PCO 検証結果】

測量機メーカーアンテナの PCO では、同機種アンテナ間の南北成分、東西成分及び高さ成分で L1, L2 とともに個体間最大較差が概ね 5.0mm 以下（標準偏差 2mm 以下）で安定した結果となった（表-2）。一方、廉価アンテナの PCO の水平成分では、個体間最大較差 5.0mm 以下（標準偏差 2mm 以下）で安定しているが、高さ成分が 2 機種とも個体間最大較差 5.0mm 以上（標準偏差 2mm 以下）とやや不安定な結果（表-2）となった。

【PCV, PCO の点検結果】

観測の PCV を適用した解析の座標値と検定架台の成果値との較差は、測量機メーカーアンテナ、廉価アンテナともに、水平成分と高さ成分で概ね 1mm 以下であった。

NGS の PCV を適用した解析の座標値と検定架台の成果値との較差は、測量機メーカーアンテナでは、水平成分は概ね 2～3mm の較差、高さ成分は最大 5mm 程度の較差で整合した。一方、廉価アンテナでは、PCV が公開されていないため、PCO 補正のみで解析した結果（表-3）、水平成分は測量機メーカーアンテナと同様に概ね 3mm 程度の較差で整合したが、高さ成分は 20mm 程度の不整合がみられた。これらの結果から、個体毎に算出した PCV, PCO を測位及び測量に適用することは精度向上に有効と

考えられる。

表-1 PCV 検証結果

分類	メーカー	アンテナ	周波数	PCV 検証結果		
				個体間最大較差	最大標準偏差	備考
測量機メーカーのアンテナ	A	1	L1	2.1mm	0.7mm	L1, L2 ともに標準偏差が 1mm 前後であり, 個体間でのバラつきが少なく, 再現性が高く安定している
			L2	3.7mm	1.1mm	
	B	2	L1	1.5mm	0.5mm	L1, L2 ともに標準偏差が 1mm 以下であり, 個体間でのバラつきが少なく, 再現性が高く安定している
			L2	1.7mm	0.6mm	
	C	3	L1	4.6mm	1.6mm	L1, L2 ともに標準偏差が 1.6mm 前後であり, 個体間でのバラつきが多少見られた. 多少不安定である
			L2	5.0mm	1.6mm	
廉価なアンテナ	D	4	L1	4.6mm	1.5mm	L1 の標準偏差が 1.5mm 前後、L2 の標準偏差が 3mm 前後であり, 個体間でのバラつきが見られた. 再現性が低く, 不安定であった
			L2	8.6mm	3.3mm	
	E	5	L1	3.7mm	1.1mm	L1 の標準偏差が 1mm 前後であるが, L2 の標準偏差が 3mm 前後であり, 個体間でのバラつきが見られた. 再現性は低く, 不安定であった
			L2	8.3mm	3.1mm	

※仰角 15° ～86° を評価対象とする。
 5mm 以上の較差を着色

表-2 PCO 検証結果

分類	メーカー	アンテナ	周波数	PCO 検証結果						備考
				南北成分		東西成分		高さ成分		
				個体間 最大較差	標準 偏差	個体間 最大較差	標準 偏差	個体間 最大較差	標準 偏差	
測量機 メーカーの アンテナ	A	1	L1	2.3mm	0.7mm	3.6mm	1.3mm	4.1mm	1.3mm	L1,L2 とともに N,E,U の標準偏差が 1mm 前後であり、個体間でのバラつきが少なく、再現性が高く安定している
			L2	2.1mm	0.7mm	3.6mm	1.1mm	1.0mm	0.3mm	
	B	2	L1	5.4mm	1.6mm	3.3mm	1.1mm	5.4mm	1.7mm	L1,L2 とともに N,U の標準偏差が 1.5mm 前後であり、個体間でのバラつきが多少見られた。多少不安定である
			L2	5.8mm	1.5mm	3.0mm	1.0mm	5.0mm	1.5mm	
	C	3	L1	3.1mm	1.1mm	3.9mm	1.6mm	2.9mm	1.0mm	L1 の E の標準偏差が 1.6mm と多少バラつきがあった。一方、L2 の N,E,U の標準偏差が 1mm 前後であり、再現性が高く安定している
			L2	2.9mm	1.0mm	3.1mm	1.0mm	1.9mm	0.6mm	
廉価な アンテナ	D	4	L1	2.5mm	0.8mm	6.1mm	1.4mm	6.1mm	1.8mm	L1,L2 ととも水平成分のバラつきは少ないが、U の標準偏差が 1.8mm 前後であり、個体間でのバラつきが見られた
			L2	3.9mm	1.3mm	4.0mm	1.3mm	5.7mm	1.9mm	
	E	5	L1	2.6mm	0.9mm	4.6mm	1.5mm	4.0mm	1.5mm	L1,L2 ととも水平成分のバラつきは少ないが、U の標準偏差が 1.8mm 前後であり、個体間でのバラつきが見られた
			L2	2.9mm	0.9mm	4.2mm	1.5mm	6.0mm	1.8mm	

 5mm 以上の較差を着色

表-3 NGS の PCO を適用した解析の座標値と検定架台の成果値との較差（廉価アンテナ）

メーカーD ※PCO補正のみ						
測点名	X	Y	Z	dN(mm)	dE(mm)	dU(mm)
H002	-3957197.591	3310212.248	3737701.779	-2.0	2.0	-12.8
H003	-3957200.274	3310210.973	3737700.080	-1.9	-0.8	-15.3
H004	-3957200.145	3310213.599	3737697.901	0.6	0.5	-12.3
H005	-3957197.467	3310214.876	3737699.598	-0.6	0.5	-16.1

メーカーE ※PCO補正のみ						
測点名	X	Y	Z	dN(mm)	dE(mm)	dU(mm)
H002	-3957197.597	3310212.252	3737701.784	-1.6	1.2	-21.3
H003	-3957200.278	3310210.976	3737700.083	-2.4	-0.6	-21.2
H004	-3957200.151	3310213.603	3737697.907	-0.3	-0.8	-21.3
H005	-3957197.473	3310214.878	3737699.603	-1.2	-1.0	-23.2

3.2 GNSS アンテナ絶対位相特性の各国の状況調査の結果

3.2.1 電波暗室

電波暗室は、側壁、天井、床を電磁波吸収体で覆った閉空間である（図-3）。この中に放射用アンテナと検定されるべき受信アンテナ（以下「供試アンテナ」という。）を設置し、受信波を解析することで供試アンテナの特性を導出する。

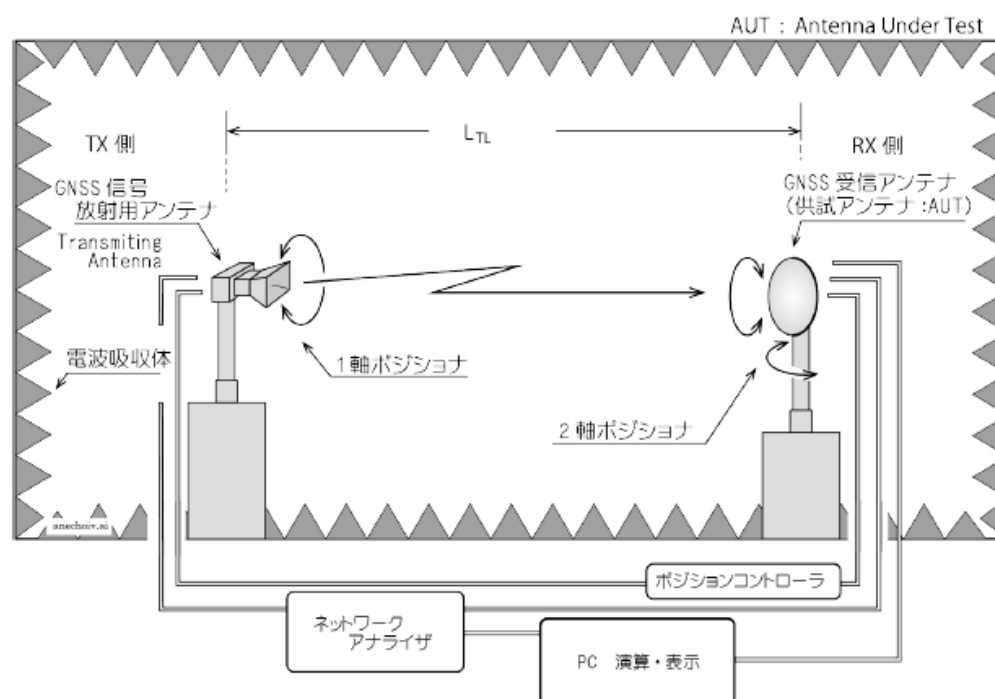


図-3 電波暗室の概要

ボン大学では、電波暗室における GPS アンテナの位相特性の検定が実施されており、その概要は以下のとおりである（Görres, et al., 2006）。

- ・送受信間距離（放射用アンテナと供試アンテナの間の距離）は約 18m である。
- ・電波吸収材は 0.5GHz 以上の周波数用に設計されており、ほとんどの GNSS の周波数に対応可能。

- ・送信用アンテナは右旋円偏波（RHCP：Right Hand Circular Polarization）放射を生成できるアンテナを使用。これはGNSSアンテナが主に右旋円偏波を受信するように設計されているためである。
- ・使用した電波暗室の寸法は幅 16 m×高さ 14 m×奥行き 41 m である。

一方、Geoscience Australia では電波暗室で検定を実施している事実が紹介されているものの、その詳細は記載されていない（Riddell et al., 2015）。

電波暗室の設計要素として、送受信間距離、無響特性（直接波と反射波の振幅比）、電波吸収体の選択、電波暗室の大きさが挙げられる。ここでは電波暗室のサイズが最もコンパクトとなる設計について考える。

- ・送受信間距離は、供試アンテナの位置において、受信波が平面波近似できる最小の長さとなる。一般的な GNSS アンテナ（周波数帯域 L1 帯 1.5GHz, 開口径 30cm）を想定すると、0.9m となる。
- ・無響特性の適切な値について Görres, et al., (2006), Riddell et al., (2015) のいずれにも記されていない。そこで GNSS に近い周波数帯を使用する無線 LAN に関する電波暗室の文献（Kobayashi et al., 2017）で推奨されている -30dB (1/1,000) を想定する。
- ・電波吸収体は、マイクロ波の電波吸収体として一般的に用いられているピラミッド型の誘電体電波吸収体を選択する。-30dB (1/1,000) の無響特性を満たすには、厚さ 0.3m 程度のものが望ましい。
- ・以上に基づき、幾何学的な考察を行うと、電波暗室の最小サイズは幅 1.1m×高さ 1.1m×奥行き 1.8m と算定される。

3.2.2 ロボティック法

ロボティック法は 6 自由度のアーム型ロボットに供試アンテナを取り付け、これを回転させることであらゆる方位角・高度角で GNSS 衛星からの電波を受信する手法である（図-4）。

各国におけるロボティック法の実施状況の概要は表-4 のとおりである。

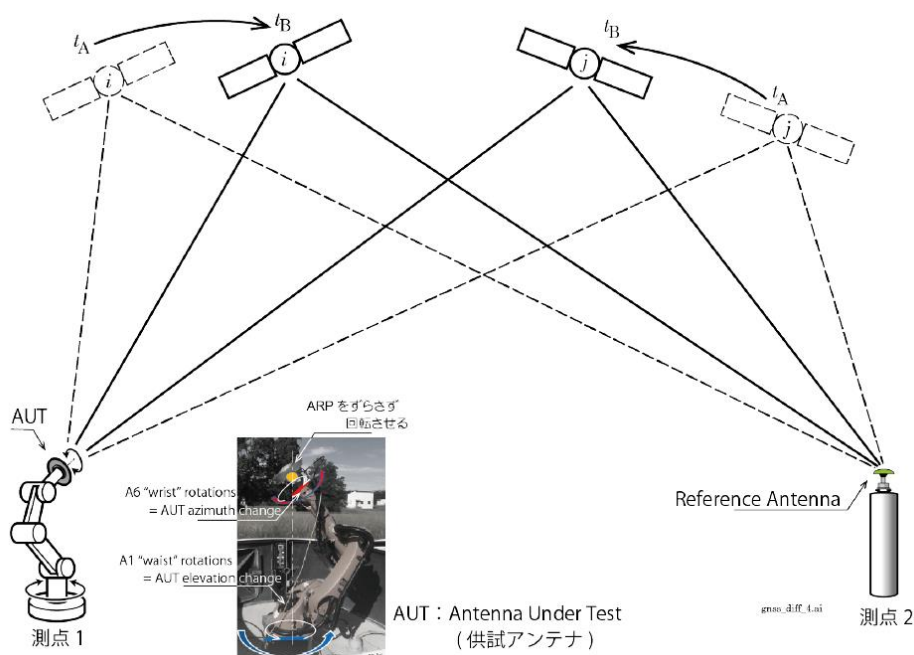


図-4 ロボティック法の概要。Bilich et al. (2018) に掲載されている図に一部加筆した。

表-4 各国におけるロボティック法の実施状況の概要

組織名	文献	概要
Geoscience Australia	Riddell et al. (2015)	・ Geo++社と KUKA 社の 6 自由度アームロボットを使用。 ・ 電波暗室による絶対位相特性の検定とロボティック法によるそれとの差は 1mm 以内であったことが報告されている。
Geo++ GmbH	Schmitz et al. (2008)	・ 独自の 6 自由度アームロボットを製作。
NGS	Bilich et al. (2018)	・ KUKA 社の 6 自由度アームロボット KR60 HA を使用。 ・ 6 自由度アームロボットの動作精度をレーザトラッカで検定。
武漢大学	Hu et al. (2015)	・ マルチパス対策のため、6 自由度アームロボットと標準アンテナを 1.6m のコンクリートピラー上に設置。また、基準アンテナと供試アンテナの距離を約 3m と短く取る。さらに二重位相差で処理した観測データを、時間差で差を取る三重位相差で処理することによって、マルチパスを軽減。 ・ 検定の前処理として、GNSS 座標系とロボットのローカル座標系の座標変換パラメータを確立するとともに、GNSS の時刻と位相特性観測の時刻を同期させる。 ・ PCO と PCV の分離は、GNSS データの二重位相差の計算、連続するエポック間の三重位相差で絶対 PCO の導出、三重位相差の残差から絶対 PCV を推定、という手順により行う。
チューリッヒ工科大学	Willi et al. (2018)	・ KUKA 社の 6 自由度アームロボットを使用。 ・ GPS 衛星以外に Galileo 衛星にも対応。 ・ 三重位相差による処理を実施。

以上の調査結果から、ロボティック法を導入する際に留意すべき点をまとめると以下のとおりである。

- ・ マルチパス対策が重要である。具体的な対策としてアンテナをピラー上に設置すること、三重位相差による処理を行うこと、アンテナ間の基線なるべく短くすることが挙げられる。
- ・ 6 自由度アームロボットの動作精度が重要であるため、これを確保するのに定期的にレーザトラッカで検定することが望ましい。

3.3 GNSS アンテナ絶対位相特性データを取得できない場合における精度低下を回避する方法の結果

3つの測量網（図-2）で算出した簡易な絶対位相特性（PCO）（表-5）は、NGSのPCOと数mmの較差で一致した。また、3つの測量網に共通して南北成分及び高さ成分の較差は小さく、東西成分の較差が大きい傾向（測量網1、測量網2は、東西成分の較差が最大4mm、平均較差が2.4mm。測量網3は、東西成分の平均較差が1.3mm）であった。高さ成分はすべての測量網において2mm以下であった。これにより簡易な絶対位相特性（PCO）の有効性が確認できた。

TS観測の測量網平均計算において、フリーネットワーク解法、1点固定解法による計算精度の違いはみられなかった。観測値の標準偏差や位置の誤差楕円は、測量網3が良好（測量網1、2の半分以下）であった。また、測量網の強さの指標（既知点の配置や点数から評価される観測精度の指標） $\sqrt{Q}$ は、フリーネットワーク解法の方が1点固定解法より1桁程度小さかった。以上の結果により、測量網3を採用した測量マニュアル案（図-5）を作成した。

表-5 簡易な絶対位相特性（PCO）

観測網1の結果とNGSのPCOの較差

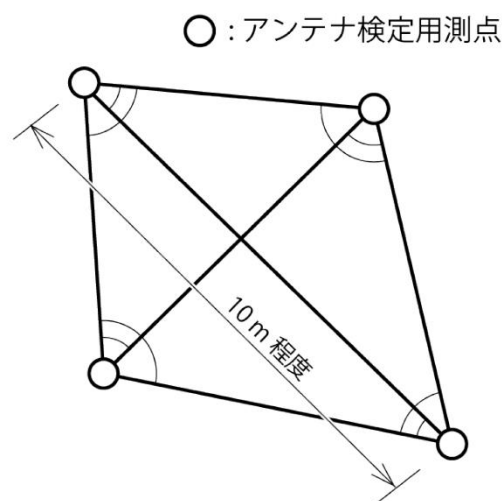
測点名	N(mm)	E(mm)	U(mm)
H002	-0.8	2.4	2.5
H023	2.8	0.4	1.3
H003	0.1	4.1	1.6
H034	0.3	2.0	1.8
H004	-0.3	2.7	-0.3
H045	1.1	3.0	2.8
H005	-0.3	1.5	1.6
H025	0.7	2.7	1.9
較差平均	0.5	2.4	1.6
標準偏差	1.1	1.1	0.9

観測網2の結果とNGSのPCOの較差

測点名	N(mm)	E(mm)	U(mm)
H002	-0.4	1.8	1.9
H023	2.8	0.4	1.3
H003	0.1	4.1	1.6
H025	0.2	3.4	2.5
較差平均	0.7	2.4	1.8
標準偏差	1.5	1.7	0.5

観測網3の結果とNGSのPCOの較差

測点名	N(mm)	E(mm)	U(mm)
K001	0.6	0.3	0.7
K002	0.0	2.3	1.2
K003	-0.6	1.1	0.8
K004	0.0	1.6	2.3
較差平均	0.0	1.3	1.2
標準偏差	0.5	0.8	0.7



TSの観測およびデータ処理		
最低限の測点数	4点程度	
測量網	10m程度の閉合多角形と対角線で測量網を形成	
使用するTSの性能基準	測角精度	±1.0"
	測距精度	±1mm+1ppm×Dist km (ミラー定数を点検すること)
TSによる観測の回数	2対回	
TSによる観測の許容範囲	倍角差	15"
	視測差	8"
測量網平均計算	方式	経緯度網測量平均計算
	既知点成果	GPSの基線解析結果
	解法	フリーネットワーク解法 あるいは 1点固定&1方向指定
	座標の精度の許容範囲	誤差楕円の長軸半径1mm以内
GPS観測は、国土地理院の『GPSアンテナ位相特性決定作業要領』に準拠		

図-5 簡易な絶対位相特性の測量マニュアル（案）

4. 結論

GNSSアンテナ相対位相特性の個体差に起因する測量や測位への影響調査では、測量機メーカーアンテナと廉価アンテナの安定性を確認した。その結果測量機メーカーアンテナのPCV、PCOは、概ね安定

していたが、廉価アンテナの PCV, PCO は、L2 の高さ成分が不安定であった（表-1, 表-2）。また、各個体別の PCV, PCO を測位及び測量に適用することは精度向上に有効である結果が得られた。

GNSS アンテナ絶対位相特性の各国の状況調査では、GNSS アンテナの絶対位相特性計測に必要な電波暗室の最小限の寸法は、幅 1.1m×高さ 1.1m×奥行 1.8m であり、大きな施設は不要であることがわかった。ロボティック法では、二重位相差で処理した観測データを、時間差で差を取る三重位相差で処理することでマルチパスが軽減される。このとき供試アンテナの ARP（機械的アンテナ基準点）をズラさないように姿勢を変え三重位相差で処理することで、基準アンテナの PCV, PCO を分離でき絶対位相特性が得られることも確認できた。

GNSS アンテナ絶対位相特性データを取得できない場合における精度低下を回避できる方法の考察では、簡易な絶対位相特性 PCO を推定する方法を提示した。アンテナによって PCV が公開されていないものもあり、海外作業あるいは開発途上国の GNSS 測量に際して測量サイトで簡易に推定できる有効な方法と考えられる。

今後、電波暗室やロボティック法を用いた絶対位相特性の検証が実施できるよう検討していきたい。

参考文献

- Bilich, A., Erickson, B., Fancher, K. L. Geoghegan, C., and Breidenbach, S. (2018) : “6-axis robot for absolute antenna calibration at the US National Geodetic Survey”, AGU Fall Meeting 2018 (G43D-0730) .
- Görres, B., Campbell, J., Becker, M., and Siemes M. (2006) : Absolute calibration of GPS antennas: Laboratory results and comparison with field and robot techniques, GPS Solutions, 10, 136-145.
- Hu, Z., Zhao, Q., Chen, G., Wang, G., Dai, Z., and Li T., (2015) : “First Results of Field Absolute Calibration of the GPS Receiver Antenna at Wuhan University”, Sensors, 15, 28717-28731.
- Kobayashi, K., Murayama, K., Yasuda, M., and Saegusa, K. (2017) : Basic Study on the Anechoic Chamber for Receiver Evaluation of the Next Generation Wireless Communication Terminal, Electronics and Communications in Japan, 100, 39-52.
- 国土地理院 : 「GPS アンテナ位相特性 決定作業要領」,
<https://www.gsi.go.jp/common/000187150.pdf> (accessed 13 Jan. 2022) .
- 国土地理院 : 「作業規程の準則」,
https://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/pdf/r2/r2_junsoku.pdf (accessed 13 Jan. 2022) .
- KUKA: KUKA ウェブページ, <https://www.kuka.com/ja-jp> (accessed 13 Jan. 2022) .
- NGS: Antenna Calibrations, <https://geodesy.noaa.gov/ANTCAL> (accessed 13 Jan. 2022) .
- Riddell, A., Moore, M., and Hu, G. (2015) : Geoscience Australia’s GNSS Antenna Calibration Facility: Initial Results”, IGNS Symposium 2015.
- Schmitz, M., Wübbena, G., and Propp, M. (2008) : Absolute Robot-Based GNSS Antenna Calibration - Feature and Findings -, Geo++ GmbH Germany, International Symposium on GNSS 2008.
- Willi, D., and Rothacher, M. (2018) : Multi-GNSS Absolute Antenna Field Calibration with a Robot at ETH Zurich, IGS Workshop 2018.