

1994年 10月

APA No. 59-2

財団法人日本測量調査技術協会

# 精密測地網高度基準点測量の概要

佐々木 正 博

## 1. はじめに

国土地理院では、第5次基本測量長期計画に基づいた精密測地網高度基準点測量（以下「高度基準点測量」という。）作業を、平成6年度から新たに開始することになった。

高度基準点測量は、昭和49年度から光波測距儀を用いて実施してきた精密測地網一次基準点測量（以下「一次基準点測量」という。）に代わって、全国に100点設置したGPS観測局（電子基準点）と連結して、一等三角点と二等三角点の一部から構成される測地網の三次元位置を高精度に求めるものである。

この高度基準点測量では、GPS観測局の観測データ、GPS衛星の精密軌道情報（IGS暦）及び精密基線解析ソフトウェア（GAMIT）を使用することにより、一次基準点測量の精度（1～2 ppm）より1桁以上高精度な成果を迅速かつ効率的に求めることができる。

ここでは、GPS観測局と高度基準点測量の概要を紹介する。

## 2. GPS観測局

国土地理院が行う基本測量は、測量法第12条の規定に基づき10年毎に建設大臣が定める基本測量長期計画に基づいて実施されている。平成6年6月1日に第5次基本測量長期計画が制定され、この長期計画の骨子として、4課題が掲げられている。この4課題の一つに「測地基準点体系の整備と地震予知観測の推進」があり、この中では、「新たに宇宙測地技術を導入し、我が国の位置の基準となる測地基準点体系を整備するとともに、連続観測等により地震予知観測を推進する。」となっている。GPS観測局は、この構想に基づくものである。

GPS観測局には、全国に展開される平均点間距離120 kmで100点の「全国GPS連続観測システム」

（全国網）（図-1）と観測強化地域である南関東・東海地方に展開される平均点間距離15 kmで110点の「GPS地殻歪連続観測施設」（強化地域網）（図-2）とがある。両システムとも地殻変動の監視を目的としているが、強化地域網は1日6時間の観測を行って、そのデータを放送暦を用いて観測終了後直ちに基線解析を行うことにより、地震の短期予知を目指すのに対

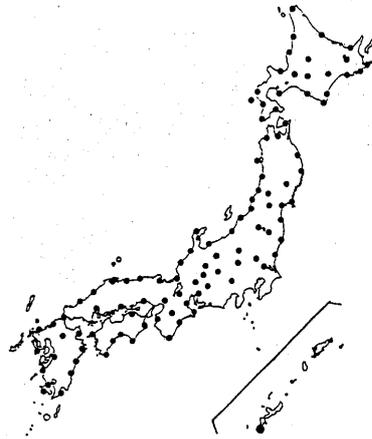


図-1 GPS観測局配置図（全国網）

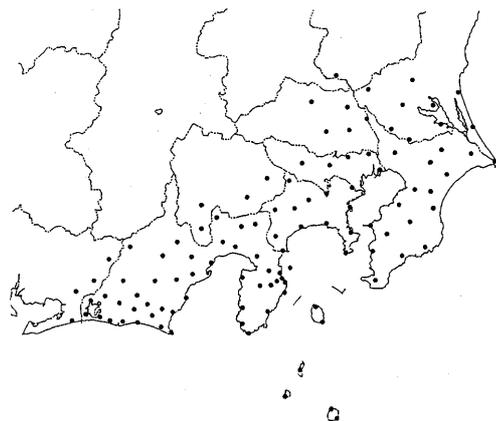


図-2 GPS観測局配置図（強化地域網）

し、全国網は1日24時間の観測を行って、そのデータを精密暦を用いて基線解析し、地震の長期予知に対応するとともに、高度基準点測量などの基準点とするものである。また、将来、高精度な三角点としての役割を担うための準備も行っている。

高度基準点測量の既知点となる全国網のGPS観測局（全国GPS観測局）（図-3）は、全国に平均点間距離120km間隔で100点のGPS観測局を本年9月30日までに設置し、運用を開始した。

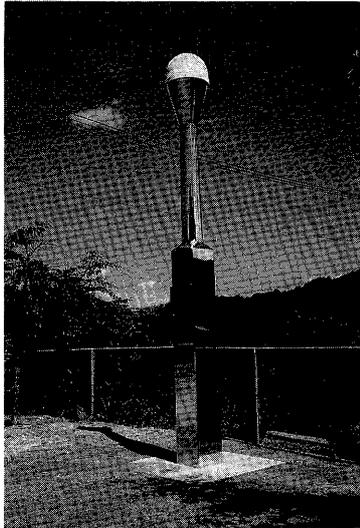


図-3 全国GPS観測局（No. 940058高山）

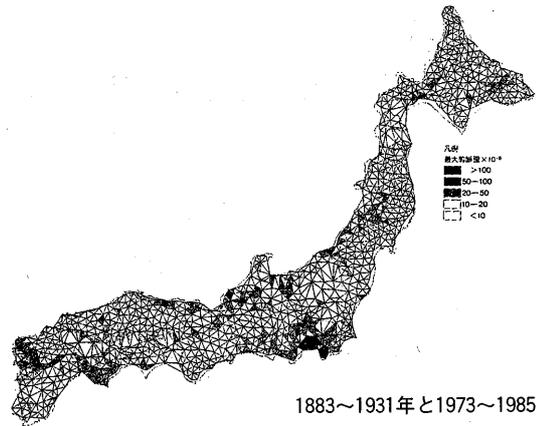
### 3. 一次基準点測量

光波測距儀を用いた一次基準点測量は、昭和49年度から開始され平成4年度まで実施された。平成5年度からGPSを用いた一次基準点測量が開始され現在に至っている。

一次基準点測量は、一等三角点と二等三角点の一部で構成された三角網を5年周期で繰り返し測量するもので、その成果は、地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会へ報告されるなど、広く利用されてきた（図-4）。しかし、一次基準点測量の繰り返し周期が計画どおりに進まないことから、より作業効率が良く、高精度な測量方式が望まれていた。

### 4. 試験観測

全国網の導入に当たって、VLBI観測で既に三次元座標値が既知の国土地理院の本院（茨城県つくば市）、水沢測地観測所（岩手県水沢市）、鹿野山測地観測所（千



1883~1931年と1973~1985年

図-4 一次基準点測量の成果（水平ひずみ図）

葉県君津市）の3箇所の構内で平成6年2月7日から10日までGPSの試験観測を行った。データの取得間隔は30秒で2月7日6時（UTC）から24時間の連続観測を3回行った。

観測に使用したGPS測量機は、アシュテックZ-12、トリンブル4000SSE、ターボログSNR8000及びトプコンGP-R1DY（アシュテックZ-12のOEM）の4社3機種である。観測は同一の気象条件（気象観測は行っていない。）で行うため、各社とも各VLBI観測点から若干偏心した場所にGPS測量機を設置して同時観測を行った。各VLBI点と偏心点の偏心量の測定は、GPS測量機を用いて各社毎に致心に注意して行った。

基線解析は、精密暦（IGS暦）と精密基線解析ソフトウェアを用いて1日1セッションとして3セッション行った。使用した精密基線解析ソフトウェアは、Z-12とGP-R1DYがGAMIT、4000SSEがBERNESE、SNR8000がGIPSYである。表-1には、試験観測で得られた成果の一例としてアシュテックZ-12によるつくばと水沢間、約348kmの1日毎の再現性と各社の3セッションの平均値とVLBI観測値の比較を示した。基線長については、1日毎の再現性、VLBI観測値との比較とも数mmの差で一致していることがわかる。また、図-5に示す地域で高度基準点測量を想定した試験観測を行った。各測点にトリンブル4000SSEを設置して同時観測を行った。データ取得間隔は30秒で1日24時間の連続観測を平成6年2月15、16日の2日間行った。基線解析は、精密暦（JPL暦）とGIPSY、精密暦（IGS暦）とGAMITでそれ

それぞれ行った。IGS 暦と GAMIT を用いて基線解析した結果を表-2に示した。2日間の24時間観測値の較差は、基線長及び各成分とも数 mm 以内である。また、2日間の24時間観測の平均値と各12時間観測値を比較すると、その差は基線長については数 mm 以内と高精度な成果が得られている。

以上の試験観測で得られた成果とこれまでに行ってきた GPS による一次基準点測量の経験などを基に、高度基準点測量の作業規程(案)が作成された。

表-1 試験観測結果 (GPS 観測局)

イ) 1日毎の再現性 (アシテック Z-12)

IGS 暦と GAMIT による計算結果 (偏心点での観測) (単位: m)

観測点	観測日 (UTC)	基線長	DX	DY	DZ
つくば~水沢	2/7 6:00~24hour	347.722.9366	-94.805.0813	205.181.9004	-264.241.8033
	2/8 6:00~24hour	.9427	.0598	.8957	.6228
	2/9 6:00~24hour	.9361	.0681	.8919	.6141
平均値		347.722.9385	-94.805.0697	205.181.8960	-264.241.6134
最大値-最小値		0.0066	0.0215	0.0085	0.0195
S. D		0.0008	0.0087	0.0038	0.0072

ロ) VLBI 観測値との比較

偏心補正済みの3日間の平均値 (単位: m)

つくば~水沢	VLBI	VLBI-GAMIT(A)	VLBI-BERNESE	VLBI-GIPSY	VLBI-GAMIT(T)
基線長	347.730.600	-0.006	-0.001	0.005	-0.004
DX	-94.760.376	-0.010	-0.011	0.005	-0.004
DY	205.222.754	-0.046	-0.034	-0.051	-0.067
DZ	-264.235.783	-0.026	-0.022	-0.048	-0.046

5. 高度基準点測量

1) 要旨

第5次基本測量長期計画における4課題の一つに入っている測地基準点体系の整備の中で、日本列島精密測地網測量において全国に電子基準点を設置し、GPS 連続観測を実施する。また、全国を対象に、GPS による高度基準点測量を繰り返して実施するこ

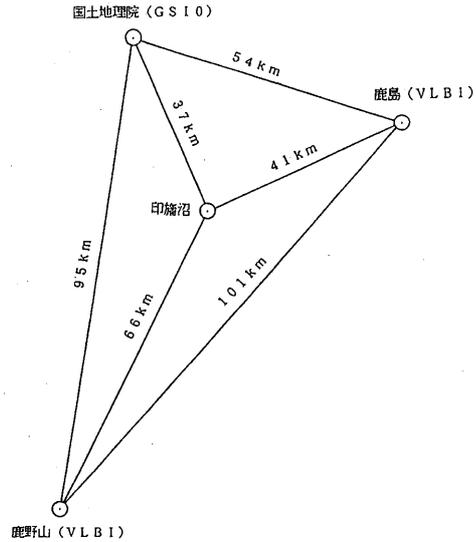


図-5 試験観測実施地域 (高度基準点測量)

表-2 IGS 暦と GAMIT を用いた基線解析結果

イ) 24時間観測結果

測点	成分	2月15日		2月16日		2日間の較差		平均	
		m		m		mm		m	
国土地理院 印旛沼	DX	-24.714.7671	.7660	1.1	-24.714.7666				
	DY	1.941.8810	.8790	3.9	1.941.8810				
	DZ	-27.927.4505	.4510	0.5	-27.927.4508				
	L	37.343.4481	.4475	0.6	37.343.4478				
鹿島	DX	15.944.2039	.2071	3.2	15.944.2055				
	DY	35.531.5767	.5696	7.2	35.531.5731				
	DZ	-14.325.1630	.1657	2.7	-14.325.1644				
	L	41.496.0345	.0305	4.0	41.496.0325				
鹿野山	DX	9.824.7479	.7495	1.6	9.824.7487				
	DY	-42.926.9348	.9358	1.0	-42.926.9353				
	DZ	48.556.7016	.7017	0.1	48.556.7017				
	L	65.551.5116	.5125	0.9	65.551.5121				

ロ) 24時間観測結果と12時間観測値との比較

測点	成分	24時間観測 2日間の平均 ①	12時間観測値							
			16日A②	②-①	16日B③	③-①	17日A④	④-①	17日B⑤	⑤-①
国土地理院 印旛沼	DX	-24.714.7666	.7663	0.3	.7661	0.5	.7618	4.8	.7693	-2.7
	DY	1.941.8810	.8867	5.7	.8812	0.2	.8767	-4.3	.8838	2.3
	DZ	-27.927.4508	.4465	4.3	.4521	-1.3	.4560	-5.2	.4472	3.5
	L	37.343.4478	.4447	-3.1	.4485	0.7	.4484	0.6	.4471	-0.7
鹿島	DX	15.944.2055	.2001	-5.4	.2064	0.9	.2015	-4.0	.2130	7.5
	DY	35.531.5731	.5828	9.7	.5743	1.2	.5777	4.6	.5618	-11.3
	DZ	-14.325.1644	.1582	-6.2	.1647	-0.3	.1612	3.2	.1760	-11.6
	L	41.496.0325	.0366	4.1	.0340	1.5	.0338	1.3	.0297	-2.8
鹿野山	DX	9.824.7487	.7419	-6.8	.7481	-0.6	.7491	0.4	.7528	4.1
	DY	-42.926.9353	.9238	11.5	.9364	-1.1	.9310	4.3	.9365	-1.2
	DZ	48.556.7017	.7102	8.5	.7029	1.2	.7053	3.6	.6970	-4.7
	L	65.551.5121	.5099	-2.2	.5137	1.6	.5120	-0.1	.5101	-2.0

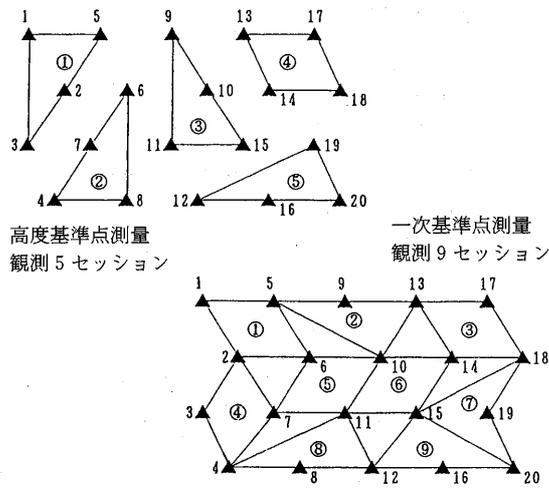


図-6 観測方法の違い

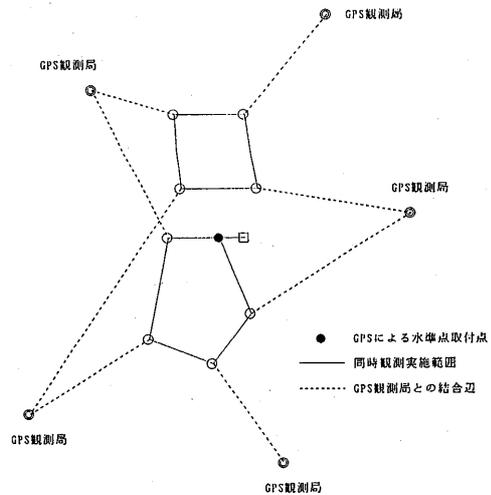


図-7 観測実施図

とが計画されている。高度基準点測量は、この計画に沿った高精度な三次元位置を効率よく求めるための測量である。一次基準点測量との作業方法の違いを図-6に示す。作業量が20点の地域で4台のGPS測量機を用いたときの観測セッション数では、高度基準点測量の方が4セッション少なく作業効率が良いことがわかる。また、高度基準点測量の精度は、水平距離で5 mm + 0.05 ppm × 基線長 (水平距離100 kmで1 cm以下)、垂直距離で10 mm + 0.10 ppm × 基線長、以上で一次基準点測量の精度 (1 ~ 2 ppm) より1桁以上高精度な成果が期待されている。

## 2) 選点・造標

選点は、次の要件を満たすこととなっている。

- 網は、原則としていくつかの単位多角形により形成する。
- 1個の単位多角形は、三角点3点以上で構成する。
- 単位多角形は、それを包含する3箇所以上のGPS観測局と結合する。
- 2 km以内の水準点との取り付けをGPS観測により行う。
- GPSアンテナは、高度角15度以上に上空を遮る障害物がないところに設置する。

高度基準点測量が目指す0.1 ppm以上の精度を確保するには、致心とアンテナ高の測定に細心の注意を払う必要があるため、努めて三脚を用いた観測ができるように選点することが望ましいが、場所によってはGPSアンテナタワーも使用できるようになっている。

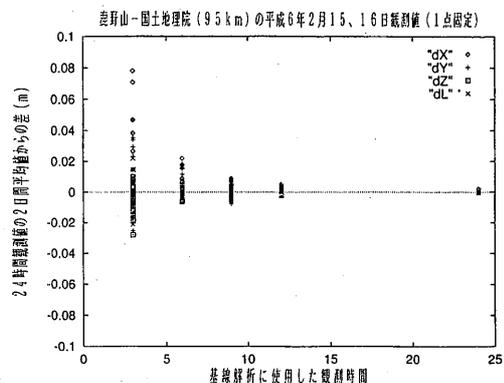


図-8 観測時間による精度分布 (JPL暦とGIPSYによる計算結果)

また、偏心は光波測距儀と経緯儀を用いて観測を行うので、精度の低下が予想されるため、偏心は極力避けなければならない。

測標 (GPSアンテナタワーを含む。) の建設に際しては、観測前後で致心、アンテナ高の点検を行い差異が生じている場合は再測が必要となるため、堅固に建設しなければならない。

## 3) 観測

観測は、図-7に示すように単位多角形毎の同時観測をGPSを用いた静的干渉測位方式で行う。観測時間は、データ取得間隔30秒以内で12時間の連続観測を行うことになっている。12時間の長時間観測が必要な理由は、表-1,2で示したように24時間観測の再現性が良いことから、24時間観測が最良であるが、作業効率を

考慮した場合、表-2と図-8に示すように、12時間観測で24時間の観測結果に近い値が得られ、高度基準測量の必要精度を確保するために必要な最低の観測時間は12時間と判断された。GPS 測量機は、1 級 GPS 測量機で L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>帯の P コードが受信可能でかつ AS (P コードの暗号化) 対応のものを使用することとなっている。器械高は、すべて mm 位まで測定する。また、観測時間帯は、世界時 (UTC) の 0 時 (日本時 9 時) から24時間の間に行う。これは、国際測地学協会 (IAG) の主導で設置され、平成 6 年 1 月 1 日から定常運用を開始した IGS (国際 GPS 地球力学事業又は国際 GPS サービス機構ともいう。) の精密暦がこの時間毎になっていること、GPS 観測局の観測とデータファイルの整理も同様に行うことによる。

偏心要素の測定は、2 級中距離型光波測距儀及び 1 級経緯儀等を用いて行う。零方向は、GPS 観測で設けた方位標か同じセッション内の三角点 2 点を使用する。精度を確保するためには、GPS アンテナ設置に伴う致心誤差とアンテナ高の測定誤差を極力小さくすることである。また、気象補正は、精密基線解析時に解析ソフトウェア上で対流圏遅延量のパラメータ推定によって行うため、気温、気圧等の気象観測は行わない。このため、使用する GPS 観測局も含めた同時観測点の気象状況は同様な環境が望ましいので、台風や寒冷前線等が観測地域に入っている時には観測を行わないよう規定している。

#### 4) 現地計算

観測データ取得後の計算処理作業の流れを図-9に示す。観測データは、異機種間の観測と基線解析に対応するため、RINEX フォーマットに変換する。現地における基線解析は放送暦を用いて行う。三角点成果を WGS84 座標系へ変換するには、「基準点座標 92」(国土地理院技術資料 B・1-No. 22) を使用する。これに記載されていない三角点においては、「座標変換プログラム TKY 2 WGS」(国土地理院技術資料 B・1-No. 23) を使用する。

現地計算は、観測データが正常に取得できているか、三角点が故意に移動されていないかの確認程度の計算で、次の点検計算がある。

##### ① 基線ベクトルの点検計算

- 観測時間の 2 分の 1 の時間のデータをそれぞれ基線解析し、その出合差を点検する。

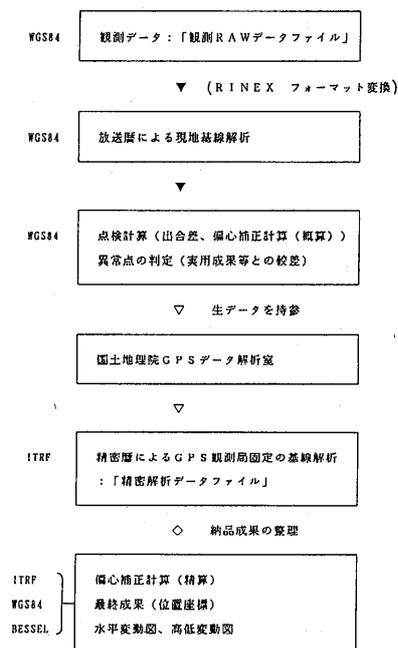


図-9 計算処理作業の流れ

- サイクルスリップの編集を手動で行った場合には、単位多角形の基線ベクトル成分の環閉合差を点検する。

(出合差、閉合差の許容範囲は、 $1 \text{ ppm} \times \Sigma D$ 、D は斜距離、許容範囲を超えた場合は、再測を行う。)

##### ② 異常三角点の判断

- 基線解析結果の緯度差、経度差と直前の観測値の緯度差、経度差との較差を点検する。(較差が 30 cm 以上の場合には、盤石を確認するなど異常の有無を調べる。)

#### 5) 精密基線解析

精密基線解析は、現地作業が終了後、国土地理院 GPS データ解析室にて GPS 観測局の観測データと GPS 衛星の精密軌道情報 (IGS 暦) 及び精密基線解析ソフトウェア (GAMIT) を用いて行う。IGS 暦による精密基線解析は、ITRF 座標系 (IERS 基準座標系) を用いて行う。

各セッションの周辺に設置している GPS 観測局の観測データと GAMIT を用いて各セッションごとの精密基線解析を実施したのち GLOBK ソフトウェアで平均計算を行って、各三角点の三次元位置を高精度に求める。このため従来の三次元網平均計算は行わな

い。

全国網のGPS観測局の成果は、100点のGPS観測局データと日本に比較的近い数点程度のIGS観測局データを使用し、適宜平均計算を行って求める。この計算を行うことにより、全地球規模でGPS観測局の位置が変動しているか否かがわかることになる。

ITRF座標系で求めた最終成果は、ベッセル楕円体とWGS 84楕円体の値に座標変換を行う。ベッセル楕円体に変換された値は必ずしも三角点の成果とは一致しないので注意が必要である。

#### 6) 成果の活用

高度基準点測量は、一等三角点と二等三角点の一部で構成する平均点間距離20 kmの測地網を5年周期で繰り返し観測を行うもので、一次基準点測量の精度(1~2 ppm)より1桁以上高精度な成果を迅速かつ効率的に求めることができるため、地殻変動のより詳細な把握ができ、地震予知、火山噴火予知研究の発展に大いに貢献できるものと思う。

また、GPS観測局のデータを用いてプレート運動等の地球規模の地殻変動の実態が解明できるなど地球科学研究への活用が期待される。

#### 7) その他

平成6年度の高度基準点測量作業は、直営で新潟と茨城地方の2地区(87点)、外注で北海道北部と関東甲信越地方の5地区(120点)を実施する予定である(図-10)。

高度基準点測量は、今年度から直営、外注同時に新規で実施されるため、作業実施後にいくつかの規程改正事項やよりよい観測方法等が提案されることが予想される。観測時間、偏心測定方法、GPSアンテナタワーの致心方法などの検討を加えて、よりよい高度基準点測量の手法が完成されることを期待したい。

#### 6. おわりに

旧来、位置決定するために盛んに使用された経緯儀

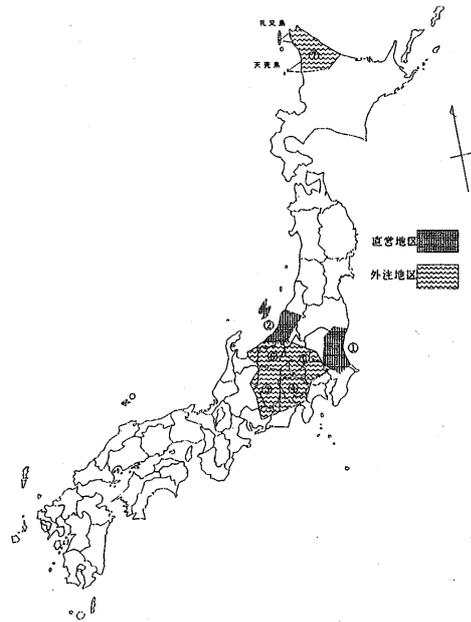


図-10 平成6年度の高度基準点測量作業地域

と鋼巻尺が光波測距儀に変わってから、精度や作業効率の面などで飛躍的な発展を遂げたが、GPS測量機の登場は、更なる精度と作業効率を向上させるとともに、位置決定手法に大変革をもたらした。

GPS観測局の観測精度は、0.01 ppm程度の高精度が期待されており、地震予知のための地殻変動の検出をはじめ、公共測量のための基準点としても活用されるようになるであろう。

高度基準点測量は、このGPS観測局を使用することにより、0.1 ppmという高精度な位置決定が可能となり、全国の一、二等三角点の改測を高度基準点測量で実施して、地震予知の基礎資料を提供するとともに公共測量の基準点として、高精度な三角点成果を提供できるようにしていきたい。

(国土地理院測地部)