GPS 連続観測システムについて*

GPS Earth Observation Network System

米溪武次**

Takeji KOMETANI

Key words GEONET, GPS

1. はじめに

国土地理院は、地殻変動の様相を把握するため、明治以来設置してきた三角点及び水準点などの標石基準点の定期的な繰り返し測量や地震および火山活動の災害発生時の緊急測量を行ってきた。これらの測量は、現地作業を経て解析結果を得るまでに数ヶ月から1年以上を要していた。このような状況の中、米国が1973年から軍事目的で開発していた精密宇宙測位技術のGPS (Global Positioning System : 汎地球測位システム) を民生用に解放すること、GPS が測量に利用でき連続監視が可能と思われることから、国土地理院は1987年にGPS受信機を導入し、精度の評価や作業手法の確立のため研究作業を開始した。1993年、米国はGPSの正式運用を開始。その後、国土地理院はGPS観測局を電子基準点と名付け、連続観測の自動化、通信回線を利用した観測データの自動送信及び中央局での解析処理を行う一連のシステムを確立し運用を開始した。2005年4月現在、1229点の電子基準点を全国に整備し(図1)、GPS連続観測システム(GEONET : GPS Earth Observation Network System)として管理・運用を行っている。電子基準点で得られた成果は各種測量の基準として利用されるほか、日々の解析結果は、地震調査研究や火山噴火予知研究のための広域地殻変動監視に利用している。当該年度の観測データや解析結果は、国土地理院ホームページからユーザに提供している。電子基準点で取得しているリアルタイムデータは、配信機関を通じて位置サービス事業者に向けて提供している。

本稿では、GPS連続観測システム(GEONET)の概要について報告する。

2. GPS 連続観測システム (GEONET) について

GEONETは、全国に約20 km 間隔で設置している1229点の電子基準点で構成されるGPS観測ネットワークと、観測データを集約・解析処理をして座標値を算出する国土地理院中央局の管理・解析システムから構成されている¹⁾。

ほとんどの電子基準点では、GPS信号を1秒ごとに受信し常時接続回線(IP-VPN)でリアルタイムに国土地理院中央局に転送している。離島及び高山地域の一部の電子基準点はISDN回線および衛星携帯通信を利用している。

中央局は、リアルタイムデータ通信管理装置、データ通信管理装置、電子基準点管理制御装置、データ格納装置、定常解析処理装置、リアルタイムデータ解析処理装置、解析結果表示装置などで構成されている。これらの装置で電子基準点からリアルタイムに送信してくるデータの制御・管理から解析などの一連のデータ処理を行っている。

図1 電子基準点配点図

*原稿受付 平成 17 年 8 月 30 日
 **国土地理院 (茨城県つくば市北郷 1 番)
 米溪武次
 昭和 46 年 建設省国土地理院
 昭和 47 年 建設大学校 終了
 昭和 60 年 第 27 次南極地域観測隊 (夏隊) 隊員
 平成 16 年 測地観測センター衛星測地課長補佐
 著書 改定新版 絵で見る地籍測量 (共著)

図 2 電子基準点

表 1 電子基準点設置一覧

設置年度	点数	設置範囲
1993 (H5)	110	南関東・東海
1994 (H6)	100	全国（上記除く）
1995 (H7)	400	全国
1996 (H8)	277	全国
1997 (H9)	60	全国
2002 (H14)	253	全国
2003 (H15)	24	東南海・南海
2004 (H16)	5	東南海・南海
計	1 229

図 3 電子基準点の形状

2.1 電子基準点

電子基準点は、頂上レドーム内に GPS 衛星からの信号を受信するアンテナを付け、中央部に受信機、通信機器、無停電装置、傾斜計、ヒーター、避雷器などを収納した高さ 5 m のステンレス製のビラー（図 2）からなり、基礎部はコンクリートで固定されている。

国土地理院は、広域の GPS 連続観測網として 1993 年度初めて、地震予知連絡会が観測強化地域に選定した南関東・東海地域に電子基準点 110 点を平均点間距離約 15 km で設置した。その後、高精度な測地網を構築するとともに広域地殻変動検出を目的に順次整備を図り、全国に 1 229 点の電子基準点を整備している。年度別の電子基準点設置は（表 1）のとおりである。

電子基準点ビラーの形状は、設置年度により異なる（図 3）。1997 年度以前に設置したビラーは、日射による熱膨張により 1 日の中で数 mm 程度変動することが確認されていた²⁾。この影響を取り除くため、2002 年以降に設置した電子基準点は、円柱型の内管に八角柱の外観を配した 2 重管構造とした。受信アンテナは、反射波を防ぎ位相特性をそろえるため Dorne Margolin T Chorkering Antenna (TRM29659.00) を統一して使用している。受信機は、長期の通信トラブルの際のリカバリーのため大容量メモリー

を装備しているほか、停電時にデータを遮断なく取得するため全点で 6 時間の無停電対応バッテリーを装備している。さらに南関東・東海地域及び東南海・南海地域、三宅島および中越地方の点については通信機器にも 6 時間から 72 時間対応の無停電対応バッテリーを装備し停電時にデータの送信が可能となっている。

地震動や火山噴火によるビラーの傾斜をチェックするため傾斜計を設置している。南北・東西方向の傾斜量データが GPS 観測データとともに中央局に転送されている。落雷、誘導雷、接地雷から各機器を保護するために、アンテナに同軸避雷器さらに電源部及び通信部に避雷器を設置している。

2.2 GEONET の中央局解析処理システム

国土地理院は、2002 年度にデータ処理システムを改造した。短時間でのスタティック解析やリアルタイム解析を GEONET の解析機能に取り入れることで、より高速な地殻変動情報の把握が可能となった。GEONET 中央局でのデータ処理システムは、大きく次の部分に分けられる。GEONET システムの概念図は（図 4）のとおりである。

(1) リアルタイムデータ通信管理装置

常時接続化済み電子基準点からのリアルタイムデータを受け取り生データの状態で一時保存するとともに、1 時間

図4 GEONET システム概念図

ごとに RINEX 形式*1 のファイルを作成し、データ格納装置に送る。このとき、サンプリング間隔は 1 秒から 30 秒に間引きされる。また、必要に応じ RTCM 形式*2 のリアルタイムデータをリアルタイムデータ解析処理装置に送信する。

(2) データ通信管理装置

常時接続化されない電子基準点からのデータを受け取る部分である。基本的にリアルタイムデータ通信管理装置と同一の機能を備えているが、リアルタイム処理に係る作業のみ行わない。なお、ダウンロードを 3 時間ごとに行う制約から RINEX 変換を行う時間間隔は 1 時間ではなく 3 時間になっている。

(3) 電子基準点管理制御装置

データ処理システムの自動運用管理、電子基準点制御、電子基準点データベースの管理を行う。

- ・自動運用管理機能：RINEX ファイルの結合および品質検査、定常解析の設定・スタート、ファイルの送信や格納などを予め定められたスケジュールに従い自動的に行う。
- ・電子基準点制御機能：受信機のデータダウンロードや観測開始・終了などの制御を遠隔操作により行う。
- ・データベース管理機能：電子基準点データを管理する上で必要となる情報を一元管理する。具体的には、電子基準点名や所在などおよびその履歴、各種ファイルの格納先、解析設定と解析結果、電子基準点保守情報などが含まれる。

(4) データ格納装置

電子基準点からの RINEX データや解析に使われる必要なファイル、解析結果ファイルなどを保存する。ここでは、リアルタイムデータ通信管理装置から送られた 1 時間ごとの RINEX ファイルを 3 時間ごとに結合し 1 ファイルとして保存しているが、最終的には 1 日 1 ファイルで管理し、

CD-R などのメディアにバックアップを行う。

(5) 定常解析処理装置

Bernese/BPE をコアソフト*3 とする定常解析を行う。この装置は 20 台の PC (OS は Linux) で構成され、基線解析*4 部分の処理をクラスタごとに分割処理して高速化を図っている。多様化する解析の需要に合わせて 1 式当たり 6 プロセスの解析を独立して起動できる。

(6) リアルタイムデータ解析処理装置

緊急時に、最大 50 点の電子基準点を対象としたリアルタイム解析を行う。後処理での実行も可能となっている。

(7) 解析結果表示装置

定常解析及びリアルタイム解析結果をグラフ化し、編集する部分である。この装置は、用途に応じてさらに 4 つの装置に細分化される。

- ・定常解析結果表示装置：データ格納装置から解析結果の転送を受け、定常解析結果の情報を集約管理するほか、外部情報提供装置と地殻情報管理装置にも転送する。得られた解析結果は、専用の表示プログラムを利用してグラフ化することができる。
- ・リアルタイム解析結果表示装置：リアルタイムデータ解析処理装置が行うリアルタイム解析の結果をリアルタイムに転送を受けて表示する。
- ・外部情報提供装置：ユーザがインターネットを通じて閲覧できるように定常解析結果に基づく観測局の変動情報を生成する。

*1 RINEX (Receiver Independent Exchange) は、異なる GPS 受信機、ソフトウェア会社間の GPS データの交換のために使用される標準フォーマット

*2 RTCM (The Radio Technical Commission for Maritime Services : 米国海上電波技術委員会) は、特別委員会 104 において定めた GPS データの誤差補正量、座標値などの各データの標準フォーマット

*3 Bernese/BPE は、一連の GPS 解析を定期的に自動で行うソフトウェア

*4 観測点間の幾何学的な位置関係を求める計算を基線解析という。

表 2 GEONET で実施している解析の種類

解析の種類	ID	暦	セッション長	頻度
最終解析	F2	IGS 最終暦	24 時間	1 週間分を 1 週間ごと
速報解析	R2	IGS 超高速暦	24 時間	1 日ごと
迅速解析	Q2	IGS 超高速暦	6 時間	3 時間ごと
緊急解析	S2	IGS 超高速暦	1 時間単位で 任意	1 時間単位 で任意
リアルタイム 解析	—	IGS 超高速暦	1 秒	任意

図 5 観測時間と解析精度

図 6 地震に伴う水平・上下運動

・地殻情報管理装置：各種資料作成用に解析結果やグラフなどを表示編集する。

3. GEONET での解析

GEONET では、需要に応じて多様な解析を実施している (表 2)。全点を対象とする定常解析は、最終解析 (F2)、速報解析 (R2)、迅速解析 (Q2) の 3 種類であり、この他、緊急時には緊急解析 (S2) を行うことができる。記号はそれぞれ Final, Rapid, Quick, Special の頭文字である。4 者の解析に使用するモデルは基本的に同一で、異なるのは使用する暦、セッション時間、および解析頻度である。F2 は IGS (International GNSS Service)*5 最終暦を R2, Q2 および S2 は IGS 超高速暦を用いている。IGS 超高速暦は前半が速報暦、後半が予測暦であるが、予測暦は軌道変更などには対応できず、予測が大きくなる場合があるので、軌道情報の品質をチェックして使用する。Q2 は 6 時間のデータウインドウを 3 時間ずつずらしながら準リアルタイムで解析を実施している。これは、GEONET のデータがリアルタイムで転送される体制が整ったことにより可能になったものである。

4. 観測時間と解析精度

地震および火山活動が活発化したとき地殻変動の様相を

より早く把握するためには、1 セッションあたりの観測時間を短縮するのが望ましいが、その場合解析精度の低下は避けられない。この観測時間と解析精度とのトレードオフの関係を示したのが (図 5) である¹⁾。この図から、観測時間と標準偏差との間に相関が見られ、観測時間が 24 時間であれば、 $1\sigma = 10 \text{ mm}$ 未満の標準偏差で解析結果が得られることや 6 時間未満の観測データによる解析を行った場合、統計的に妥当とみなされる以上の精度劣化が生じるということがわかる。準リアルタイムの迅速解析 (Q2) のセッション長を 6 時間としたのはこのためである。

5. GEONET が捉えた地殻変動検出

GEONET により得られたコサイスマミックな地殻変動は、地震予知連絡会や国土地理院 HP など一般に公表し GPS 連続観測システムの即応性を明らかにした。有珠山や三宅島の火山活動、鳥取県西部地震などの地殻変動を迅速かつ従来にない高い精度で捉えている。本項では、GEONET

*5 IGS では、測地学・地球物理学等の研究活動支援を目的とし各国関係機関の協力のもと、全世界に GPS 衛星の追跡ネットワークを構築し連続観測を行っている。観測データは、アメリカとフランスにあるデータセンターで集中管理し提供している。データセンターでは、観測データから GPS の軌道暦、地球回転パラメーターなどを生成し公開している。軌道暦とは人工衛星の運動を時系列で表したもので生成の迅速さと精度により最終暦、超高速暦等がある。IGS が提供しているこれらを IGS 暦という。

図7 余効変動

が捉えた最近の地殻変動の解析結果を紹介する。

5.1 2003年十勝沖地震

2003年9月26日4時50分頃に北海道十勝沖を震源とする震度6弱(M 8.0)の地震が発生し、北海道の広い範囲で地殻変動を検出した。震源に近い襟裳岬周辺で変動が大きく、青森県の「岩崎」を固定として見た場合、「広尾」が最大で南東方向に約96 cm移動し、「大樹2」で約30 cmの沈降がみられた(図6)。これは、GEONETの運用開始以来、水平・上下方向とも最大の変動量であった。

大地震が発生すると、その後に生じるゆっくりとした地殻変動がしばらく続くことがある。このような現象を余効変動と呼んでいる。今回の地震で襟裳岬付近を中心に北海道の広い範囲で余効変動が観測されており、地震後から2005年7月までに「えりも1」で南東方向に約21 cmの水平変動が確認されている(図7)。

5.2 2004年新潟県中越地震

2004年10月23日17時56分頃新潟県中越地方を震源とする最大震度7の地震(M 6.8)が発生し、新潟県を中心とする広い範囲で地殻変動を検出した。「守門」が約21 cm北西方向へ移動し、「小千谷」で約26 cmの隆起が見られた(図8)。

6. おわりに

衛星測位システムのGPSを利用したGEONETの整備により、日本列島の地殻変動の監視および把握が従来に比べきわめて迅速かつ詳細に把握されるようになった。

衛星測位システムは米国のGPS近代化政策、欧州共同

図8 地震に伴う水平・上下変動

体によるGALILEOの構築、ロシアによるGLONASSの改良、我が国における準天頂衛星計画など、次世代衛星システムの開発計画が進められており新たな発展期に入りつつある。GEONETもこれらの動向を踏まえ、更に高精度で安定したシステムへの高度化を図ることにより即時性の高い地殻変動の監視が実現し防災、減災に向けた情報提供のツールとして重要な役割を担うものと期待される。

参考文献

- 1) 測地観測センター: 電子基準点1,200点の全国整備について, 国土地理院時報, 103集, (2004).
- 2) 阿部 馨, 菊田有希枝, 堀田暁子, 堀 弘, 菅富美男, 田村 孝, 藤咲淳一, 大滝 修, 日下正明, 畑中雄樹, 石原 操: 電子基準点の日照変位, 日本測地学会誌, 92 (1999).