

国土を支える位置情報の基盤

- 電子基準点の現在と未来 -

キーワード：位置情報基盤
電子基準点
地殻変動監視
F3 解
次世代 GNSS

衛星測地課長

辻 宏 道

国土を支える位置情報の基盤

1. はじめに

「人に優しく活力ある国土」を支える縁の下の力持ち、電子基準点の現状と、未来への展望を述べる。

地上に固定した設備で GPS 衛星からの電波を常時観測する電子基準点は、本格的な設置から 15 年を迎え、GPS 測量や高精度リアルタイム測位を支える基準点として、また地震・火山活動の研究や予測に必要な地殻変動のセンサーとして、我が国の位置情報の基盤となった。平成 21 年(2009 年)4 月からは、精度をさらに高めた日々の座標 (F3 解) を提供し、地殻変動の監視を強化している。また次世代の全世界的衛星測位システム (GNSS) を見据えた電子基準点の更新を始めている。社会や技術が目まぐるしく変化する中で未来を見通すのは難しいが、今後の電子基準点のあり方について整理を試みる。

国内に設置された電子基準点のネットワークと、そのデータを収集・解析・配信する中央局等からなるシステム全体を、GPS 連続観測システム (GEONET: GPS Earth Observation System Network) と呼ぶ。電子基準点は GEONET の構成要素であるが、本稿では特に混乱を生じない場合、システム全体のことも電子基準点ということがある。

2. 電子基準点

2.1 3つの役割

電子基準点の整備は平成 5 年(1993 年)に始まり、平成 6 年(1994 年)には初期の観測網の運用が始まった(測地観測センター, 2004; 齊藤, 2007)。以来、電子基準点の増設、解析システムの統合・改良、アンテナ・受信機の交換等が行われ、15 年が経過した平成 21 年(2009 年)4 月現在、電子基準点は国内 1,240 ヶ所で運用され、3 つの役割を果たしている。

2.1.1 地殻変動の監視

電子基準点間の位置の変化は cm レベルの精度で毎日解析され、地震国・日本における国土の地殻変動を準リアルタイムで明らかにしている。地震前後の地表の地殻変動は、地下でどのような断層が形成されたかを知る数少ない手がかりであり、防災・減災に極めて重要な情報を提供する。また電子基準点での長年の観測から、地震波の放出を伴わないスロースリップ現象など学術的に重要な現象も発見されている。政府の地震調査研究推進本部は、地震調査研究のための基盤観測網と位置づけている。また地下のマグマが引き起こす火山活動の推移予測にも電子基準点のデータは活用されている。

- 電子基準点の現在と未来 -

2.1.2 測量の基準

平成 14 年(2002 年)の測量法改正により、我が国でも世界測地系が採用されたが、その際、電子基準点の測量成果が骨格的なデータとして利用された。また電子基準点で観測された GPS データは標準形式 (RINEX) でインターネットよりダウンロード可能であり、国内の GPS 測量に幅広く利用されている。このように電子基準点は我が国の測量の基準である国家基準点網の根幹となっている。

2.1.3 位置情報サービスの支援

平成 14 年(2002 年)より電子基準点の 1 秒毎のリアルタイムデータが開放され、位置情報サービス事業者がネットワーク型 RTK 測位のための補正情報配信に利用する等、民間における高精度リアルタイム測位の発展に貢献している(5. 参照)。

このように電子基準点は、測量や測位に位置の基準を与え、国民の安心・安全や経済活動の活性化に役立つ位置情報の基盤として、「人に優しく活力ある国土」を支えている。

2.2 課題

今や位置情報の基盤となった電子基準点であるが、次のような課題もあり、その対応に向けた努力が続けられている。

2.2.1 精度の向上

電子基準点の日々の座標は、cm レベルの精度を有しており、地震・火山活動時の地殻変動監視に十分な精度を有している。しかし長期的な時系列を見ると、定常的な地殻変動を示すトレンドの上に、振幅が 1 cm を超える年周変化が重なっていることがあり、その原因追究と軽減が長年の課題であった。最近、解析戦略の改良により、年周変化を大幅に軽減することに成功している(3. 参照)。

2.2.2 計画的な更新・維持管理

電子基準点を構成する受信機等のハードウェアの耐久年数は 10 年程度であり、また点数が 1,240 点と多数あることから、これらの更新を定常的かつ計画的に進める必要がある(4. 参照)。

2.2.3 次世代 GNSS への対応

電子基準点では、現在 GPS 衛星の信号 (L1: 1575.42MHz, L2: 1227.6MHz) を観測している。平成 12 年(2000 年)以降、米国は GPS の近代化政策を進めており、これまでの周波数に加えて L5 帯

(1176.45MHz)の信号も送信される予定である。また現在使用している信号の一部(L2のPコード)は、平成32年(2020年)には使用できなくなる見込みである。

一方、ロシアが運用中の衛星測位システムGLONASSの近代化が進められるとともに、欧州や中国ではGalileo、Compassと呼ばれる新しい衛星測位システムを開発中である。日本でも準天頂衛星と呼ばれるGPSの補完機能を有する衛星を開発している。これらは全世界的衛星測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite Systems)と総称され、そう遠くない将来、100機程度の測位衛星が地球を回る次世代GNSS時代の到来が予想されている。

利用可能な衛星数の増加は、衛星測位の効率化に大きなメリットがあると考えられ、測量や位置情報サービスの利用者の関心も高い。またGPS以外のGNSSの利用は、米国だけへの依存性を低めることになり、国家基準点としての安定性を高める効果もある。このため位置情報の基盤である電子基準点には、次世代GNSSへの対応が要請されている(7参照)。

3. 地殻変動監視の強化 - F3解の実用化 -

電子基準点による地殻変動の検出能力を向上させるため、研究者の長年の努力によって新しい解析戦略(第4版)が開発され、それに基づく日々の座標(F3解)が平成21年(2009年)4月より公開されている。ここでは新しい解析戦略の効用を述べる。詳細は中川他(2009)を参照されたい。

電子基準点で得られる衛星データの解析については、常に最新の技術と知見に基づき改良が行われてきたが(Hatanaka et al., 2003)、平成16年(2004年)から採用されていた解析戦略(第3版)には次のような問題があった。

3.1 大気の不均質性による系統誤差

観測網上空の大気に大きな不均質性がある場合、系統的な誤差が測位解に生じることがある(雨貝・石本, 2007)。このような誤差は、解析の際に「大気遅延勾配」を推定することで軽減できる。GPS衛星からの電波が中性大気を通過する際に信号が遅延するが、通常は、各観測点毎に天頂方向の一定時間毎の大気遅延量をパラメータの一つとして推定している。その際上空の大気は水平方向に均質であるというモデルを仮定する。しかし前線が通過する際などにはこの仮定は必ずしも妥当ではなく、得られる観測点の座標に系統誤差が生じてしまう。例えば、図-1上に見られる変動ベクトルの大半は、停滞前線の影響を受けたものと考えられる。

岩手県中部の地震(7月24日, M6.8)に伴う地殻変動

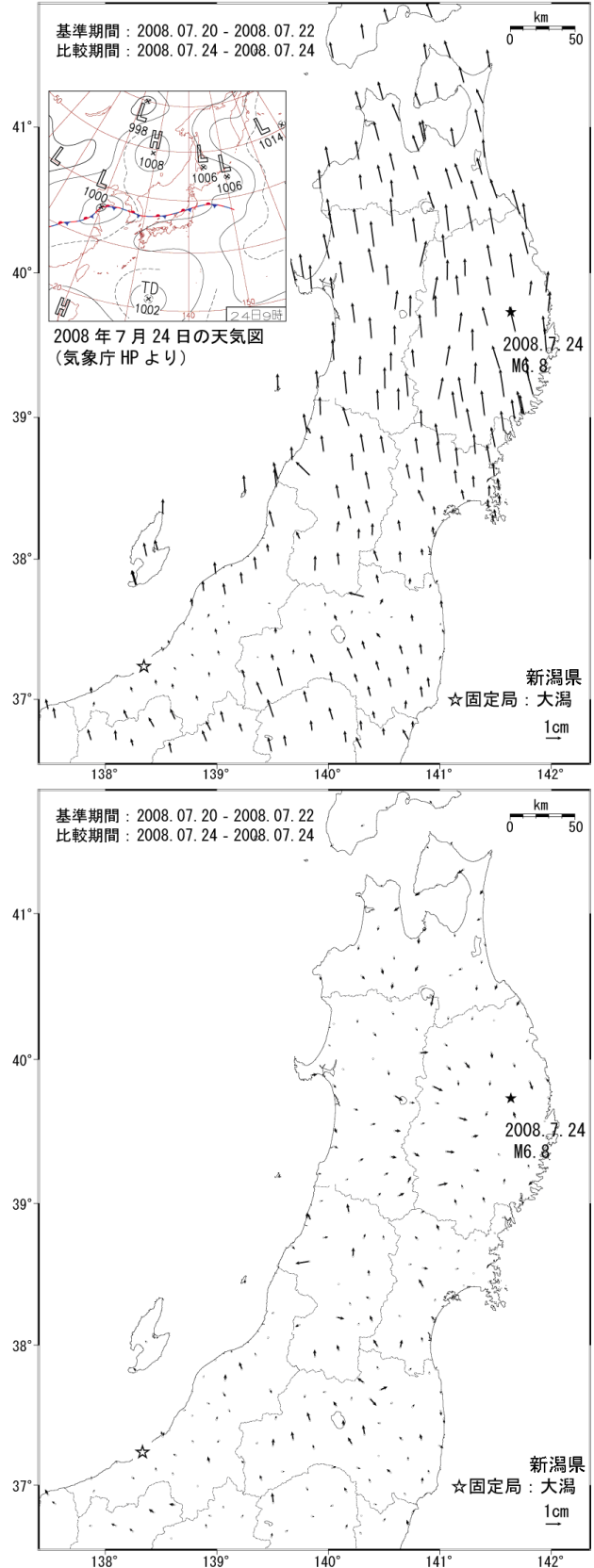


図-1 岩手県中部の地震(2008年7月24日)を挟む期間の変動ベクトル図の比較。上: 解析戦略第3版(F2解)。下: 同第4版(F3解)。中川他(2009)より引用。

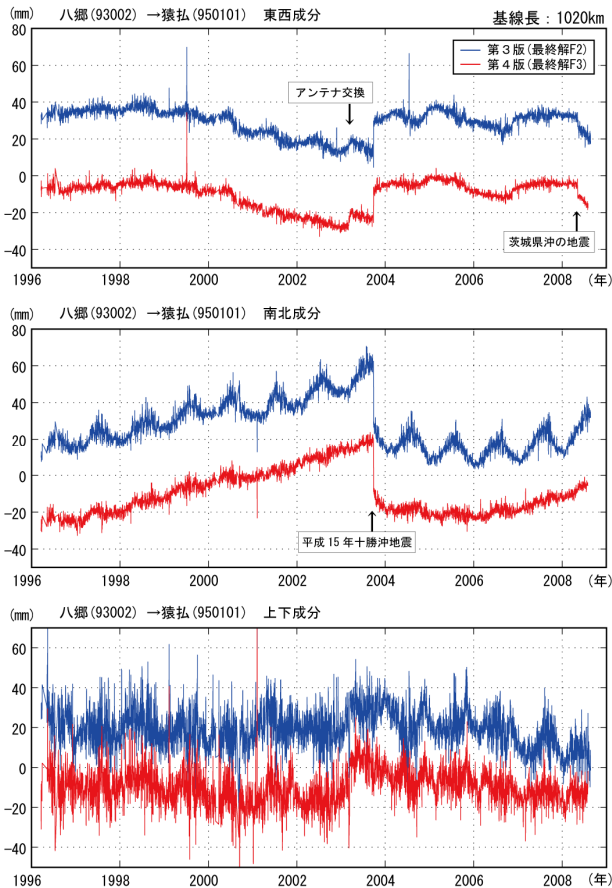


図 - 2 長距離基線における基線ベクトルの時系列を比較。青：第3版，赤：第4版。中川他（2009）より引用。

3. 2 準拠座標系やアンテナ位相特性モデルの不整合

国際 GNSS 事業 (IGS) は、国際地球基準座標系 ITRF2005 の公開に合わせて、2006 年 11 月より GPS 衛星の軌道暦を ITRF2005 (IGS05) に準拠したものに切り替えた。IGS05 は、衛星と観測局のアンテナ位相特性モデルとして「絶対モデル」を用いていたため、IGS 暦でも「相対モデル」から「絶対モデル」への切り替えが行われた。しかし電子基準点の解析戦略第3版では、ITRF2000 と「相対モデル」を採用しているため、不整合が生じていた。

上記の課題を解決し、安定した地殻変動監視を行うために、国土地理院では、新しい解析戦略 (第4版) の開発を行ってきた。解析戦略第4版では、これまでの基本的な方針は継承しつつ、解析ソフトウェア Bernese をバージョン 5.0 に更新するとともに、

大気遅延勾配の推定、アンテナの絶対位相特性モデルの採用、座標系の ITRF2005 への変更、解析固定点 (電子基準点「つくば1」) の座標の取り扱いの変更、電離層遅延高次項の補正等の導入を行った (中川他、2009)。

1996 年 4 月以降の GPS 観測データを再解析した結果、新しい解析戦略では、大気遅延勾配の推定により、停滞前線・台風等の大規模な大気の不均質に起因する座標の系統誤差が大きく軽減されること、解析ソフトウェアの更新やアンテナ位相モデルの変更により、年周変動やばらつきが軽減されることなどが確認された。図 - 1 (下) は新しい解析戦略によるもので、上の図で見られた見かけ上の変動は軽減され、地震そのものによる変動がより明確に捉えられている。また図 - 2 は、約 1,000km の長基線について 1996 年以降の時系列を示したもので、従来の解析では南北成分に顕著であった年周変化が、新しい解析では軽減されていることがわかる。新しい解析戦略により地殻変動の監視能力が向上したことは他の事例でも確認されている (宮原他、2009)。

以上の結果を踏まえ、平成 21 年 (2009 年) 4 月 1 日から電子基準点の定常解析は解析戦略第 4 版によって行われ、F3 解と呼ばれる日々の座標が公開されている

(<http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>)。

4. 電子基準点の更新

ハードウェアの経年変化に対応するとともに、来るべき GNSS 時代にも目を配り、電子基準点の更新を着々と進めつつある。平成 20 年度補正予算、平成 21 年度予算により、平成 21 年 (2009 年) 度末までに、合計約 450 点で受信機の更新等を行う予定である。

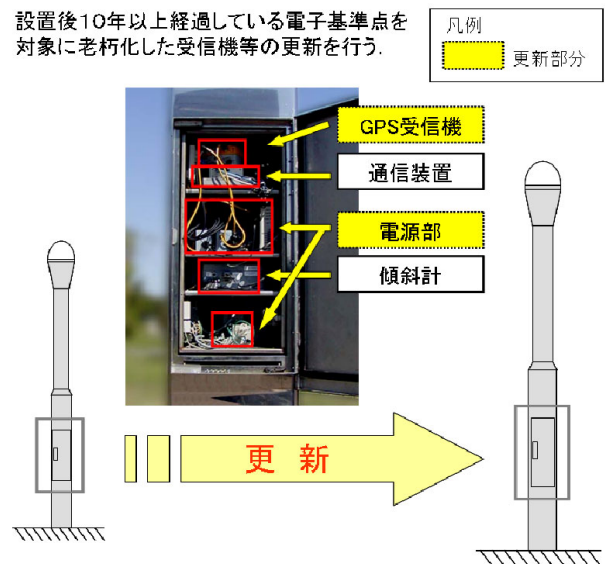


図 - 3 電子基準点の更新のイメージ

4.1 平成 20 年度補正予算

GPS 受信機の設置年次が古い電子基準点 360 点について受信機の更新を行う。また無停電装置が 24 時間対応していない観測点（約 280 点）について電源部の改造を行う。

近代化 GPS への対応として、従来の L1, L2 帯に加え、L2C, L5 の受信が可能な受信機を導入する。ただし L5 信号の受信には別途アンテナ交換が必要であり、後年度に対応の予定である。また近代化 GPS 信号のうち L1C については詳細な仕様が未定のため今回の対応は難しい。平成 21 年（2009 年）度末までに以上の更新が行われる予定である。

4.2 平成 21 年度予算

電子基準点測量を引き続き実施すると共に、今後も安定して観測データを取得・提供していくため、平成 21 年度予算でも、設置後 10 年以上経過している電子基準点 90 点を対象に、受信機等の更新を行う。今後も受信機の更新は毎年実施していく予定である。

また次世代 GNSS に対応するとともに、通信の冗長化・効率化等にも配慮したシステム改造に関する調査を実施する。運用のコストダウンには、より安価で高品質な通信方法への移行が必要であり、将来、最新技術を踏まえた新たなデータ収集・解析システムの構築を目指している。

4.3 平成 21 年度補正予算

電子基準点の強化のため、商用電源の供給が停止しても 72 時間稼働可能となるような電源部の改造（510 点）、災害時の通信確保のための通信二重化、通信二重化に伴う中央局の電源増強等について必要な予算要求を行っており、国会で審議中である。

電源部の改造により、大地震によって震源周辺の電子基準点への電源供給が途絶えても長時間にわたり自立した観測が可能となり、地震時の地殻変動のみならず、地震後の余効変動を詳細に捉えることが可能となる。2004 年新潟県中越地震後に電源が強化された一部の電子基準点では、2007 年新潟県中越沖地震の際、停電中も継続的にデータを取得した成功例がある。

現在全ての電子基準点のリアルタイムデータは、KDDI の新宿データセンターを経由して配信されているため、万一新宿データセンターに障害が発生した場合、配信が途絶する可能性がある。通信の二重化により、直接各観測点からつくば市の中央局にデータを直送できるようになり、大規模災害時の対応がより確実なものとなる（図 - 4）。

リアルタイムデータのフォーマットについては、受信機に依存しない Binex に対応させる（5 参照）。このため Binex に対応した通信管理装置も整備する。

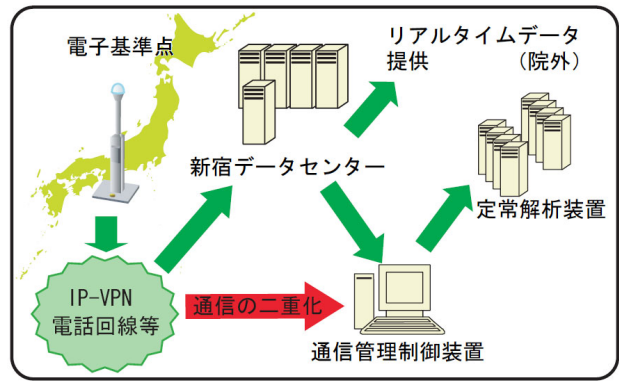


図 - 4 平成 21 年（2009 年）度に予定している通信の二重化

5. リアルタイムデータの配信フォーマット

平成 21 年（2009 年）の受信機更新を機にリアルタイムデータの配信フォーマットの変更を計画している。

現在、電子基準点のリアルタイムデータ（1秒データ）は、配信機関（日本測量協会）を経由して、位置情報サービス事業者（現在、2社）に配信され、ネットワーク型 RTK 測位などのサービスに利用されている（図 - 5）。事業者への配信フォーマットには、受信機メーカー固有のフォーマット（ニコン・トリンプル社：RT17, トプコン社：JPS）が用いられてきた。しかし定期的な受信機更新を考えると、メーカーに依存しない標準フォーマット（Binex）の採用が合理的である。

Binex は米国 UNAVCO（University NAVSTAR Consortium；米国の GPS 大学連合）が開発した GNSS のリアルタイムデータ用の交換フォーマットで、現行フォーマットに比べ圧縮率が高く、データ遅延の

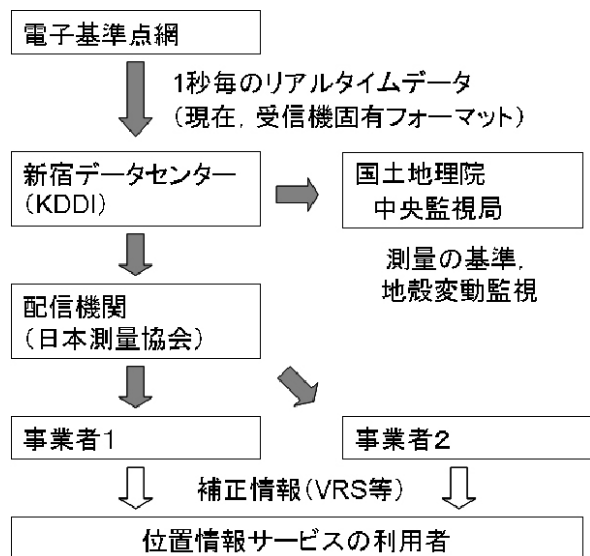


図 - 5 電子基準点のリアルタイムデータの流れ

問題が起こりにくい。最近の測量用 GPS 受信機では、Binex でのデータ出力も可能となっている。

航法分野では、RTCM(Radio Technical Commission for Maritime Services; 海事業務無線技術委員会) の定める RTCM SC-104 フォーマットが標準的だが、測量で重要な搬送波位相データの有効桁数に限りがあり、測量での利用には適していないと考えられる。

Binex は、データの圧縮率が高いため、衛星数が増加してもデータ配信の遅延を抑えることができる。また、標準フォーマットなので、電子基準点の受信機の機種が変わっても、今後システムの変更は不要となる。一方、当初のシステム変更には配信機関・事業者が費用負担が発生するため、利用者に影響が出る可能性もある。また電子基準点の受信機がすべて Binex 対応機に更新されるには一定の時間を要するので、しばらくは3種類のフォーマットが混在することになる。このため利用者への影響が出ないように配信機関・事業者と必要な調整を行い、十分な準備・試験期間を経て Binex によるデータ配信を始めることにしている。

6. セミ・ダイナミック補正

日本では地殻変動が著しいので、測量の基準として遠くの電子基準点を用いる場合、近くの三角点からの測量成果や、それに基づいて決定された各種測量成果と整合しなくなる可能性がある(国土地理院技術協議会, 2003)。

これを防ぐために開発されたのがセミ・ダイナミック補正であり、実装に向けた研究が精力的に進められた(宮崎, 2007)。セミ・ダイナミック補正では、電子基準点等の国家基準点で得られた地殻変動量を使って、地域ごとに異なる補正量を求める。平成 20 年(2008 年)度から一部の基本測量に導入されているが、今後周知を図り、基本測量・公共測量への適用を推進する予定である。

7. GNSS 時代への対応

将来の GNSS 時代を見通すことは至難の業だが、可能な範囲で電子基準点の未来について考える。

7.1 電子基準点への要請

まず電子基準点への要請について整理する。

7.1.1 社会基盤としての要請

電子基準点は、地殻変動の監視、測量基準の提供、位置情報サービスの支援等に不可欠な社会基盤であり、国費を投入した大規模システムであることから、緊急時にも運用を停止させないこと、計画的にシステムの更新・維持管理を行うこと、運用・更新コストを削減しながら費用対効果を高

めることが常に要請される。

7.1.2 防災・減災面からの要請

国民の安心・安全につながる情報提供を図るため、地殻変動の監視能力をさらに高める必要がある。すなわち、

地殻変動解析の精度をさらに向上させること

時間分解能を向上させること

現在の準リアルタイム解析には数時間を要しており、cm 精度で真のリアルタイム解析を行うことは電子基準点の究極の目標である。

必要な地域で空間分解能を向上させること

全国をカバーする国家基準点及び基盤観測網としては、1,200 点で概成したと考えられるが、地震・火山活動の予測で特に重要な地域については、大学などの他機関が有する観測ネットワークとの連携により監視を強化していくことが必要である。火山地域では気象庁との協定に基づき、両機関のデータを統合して解析する統合解析の準備が進んでいる。

7.1.3 時代の潮流からの要請

新技術への対応

地殻変動監視や基本・公共測量へのメリットを踏まえ、次世代 GNSS 技術の導入を進める。測量分野での精度は現行でもかなりのレベルに達しているが、衛星数の増加や L5 周波数の追加等によりアンビギュイティの早期決定が可能となり、効率的な測量の実施が期待される。

利用者ニーズへの対応

測量の基準を提供し、位置情報サービスを支援する立場から、一般利用者のニーズに対応する位置情報の基盤として必要な機能の拡充を図る。

地理空間情報社会の形成促進

地理空間情報活用推進基本法(平成 19 年)や宇宙基本法(平成 20 年)を踏まえ、位置情報の基盤として地理空間情報社会の形成を促進すべく、電子基準点についても必要な対応を図る。

7.2 GNSS への対応について

以上の要請を踏まえ、当面次のような観点で電子基準点の GNSS 対応を検討していく。

7.2.1 近代化 GPS の全信号への対応

L2 の P コードが廃止される予定の平成 32 年(2020 年)までに、現行受信機及びアンテナの更新を完了させ、受信機更新の際には、近代化 GPS に対応した最新機種を順次導入することを検討する。L5 受信のためにアンテナ更新が必要だが、更新に伴い電子基準点の測量成果も改定する必要があり、混乱を避け

るためになるべく一斉に更新する可能性についても検討することが必要である。

7.2.2 近代化 GPS と相互運用性のある GNSS 信号への対応

Galileo の E1 (=L1), E5a(=L5) 信号, 準天頂衛星の C/A, L1C, L2C, L5 信号について必要な対応を行うことを検討するとともに, 検討にあたっては, 衛星系の違いによる系統誤差について十分検証を行うことが必要である。

準天頂衛星の技術開発では, LEX 帯 (1278.75MHz) で高精度測位用の補正情報の送信を想定している。(補正情報の作成には電子基準点データが利用される。)

7.2.3 一般利用者のニーズがある GNSS への対応

その他の GNSS についても, 長期的に安定運用され, 市場に対応受信機が出回り, 一般利用者のニーズが見込める場合は, 電子基準点で対応することも考慮する。

7.2.4 リアルタイムデータの配信

電子基準点で対応する GNSS については, 現行の

GPS 同様, リアルタイムデータの配信を行う可能性についても検討する。

7.2.5 上記に対応できる新しい中央局の整備 GNSS の導入, 衛星数の増大, リアルタイム解析や統合解析等に対応した新しいデータ収集・解析・配信システムの整備について検討する。

いずれの施策においても, 国費の投入にあたって必要性和費用対効果を厳しく吟味することは当然である。また衛星測位を巡る動きは激しく, 状況の変化に柔軟に対応して施策を進めることが必要である。

8.まとめ

本稿では, 「人に優しく活力ある国土」を支える縁の下の力持ち, 電子基準点に関する最新の動向を紹介した。頭文字は変わらないが, GEONET は GNSS 連続観測システム (GNSS Earth Observation System Network) への進化を始めている。インフラとしての機能を維持しつつ, 新たな GNSS や技術革新に対応し, より高度な目的を達成するため, 国土地理院は国として必要な電子基準点に関する施策を進めていく。

参考文献

- 雨貝知美・石本正芳 (2007): GEONET に見られる大気擾乱の広域的な影響について, 国土地理院時報, 112, 41-49.
- Hatanaka, Y., T. Iizuka, M. Sawada, A. Yamagiwa, Y. Kikuta, J. M. Johnson, C. Rocken (2003): Improvement of the Analysis Strategy of GEONET, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 49, 11-37.
- 国土地理院技術協議会 (2003): ダイナミックな測地基準点体系の実現に向けて - 変動する国土と人々を結ぶ位置情報の基盤 -, 基準点体系分科会 () 報告書, 48.
- 宮原伐折羅・野神憩・梅沢武・岩下知真子・川元智司 (2009): GPS 連続観測システム (GEONET) の解析戦略 (第 4 版) から見た地殻変動について, 国土地理院時報, 118, 印刷中。
- 宮崎清博 (2007): セミ・ダイナミック補正について, 第 36 回国土地理院技術発表会資料, 27-34。
- 中川弘之・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下知真子・川元智司・畑中雄樹・宗包浩志・石本正芳・湯通堂亨・石倉信広・菅原安広 (2009): GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について, 国土地理院時報, 118, 印刷中。
- 齊藤隆 (2007): 地理空間情報社会への GEONET の貢献, 第 36 回国土地理院技術研究発表会資料, 35-45.
- 測地観測センター (2004): 電子基準点 1200 点の全国整備について, 国土地理院時報, 103, 1-51.