

電子基準点の GNSS 対応について

国土交通省 国土地理院 測地観測センター

つじ ひろみち
衛星測地課長 辻 宏道

1. はじめに

国土地理院では、全国約1,300カ所に設置した「電子基準点」と呼ばれる施設で測位衛星の連続観測を行ない、基本測量や地殻変動観測に活用するとともに、観測データや解析結果を公開し、衛星を利用して行なわれる公共測量や高精度測位サービスを支援している。平成25年からは従来のGPS衛星に加え、準天頂衛星およびGLONASS衛星のデータ提供を開始し、わが国でもいよいよ本格的なGNSS時代が始まった。

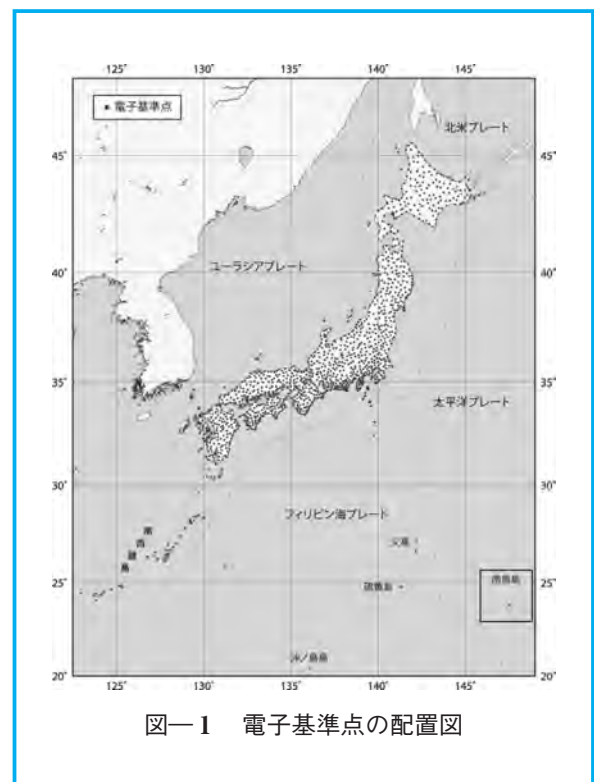
GNSSとはGlobal Navigation Satellite Systemの略で、GPSやGLONASSなどの各国の衛星測位システムを総称する用語である。本稿では、電子基準点のGNSS対応の背景や経緯、効果について述べる。

2. インフラとしての電子基準点

電子基準点の整備は平成5年に始まり、平成6年には約200点から構成される初期の観測網の運用が開始された。電子基準点の位置の変化から得られる地殻変動情報は、平成7年の兵庫県南部地震をはじめとする地震のメカニズム解明に貢献し

た。その後、電子基準点の増設、解析システムの統合・改良が行なわれ、平成25年現在、約1,300点で観測が行なわれている（図—1）。この間、地震や火山噴火に伴う地殻変動を検出し、防災情報として活用されるとともに、「揺れない地震」であるスロースリップ現象の発見等、学術的にも貢献している。

平成14年の改正測量法の施行により、わが国でも世界測地系が採用され、電子基準点が公共測量に利用できるようになった。ホームページで公開



図—1 電子基準点の配置図

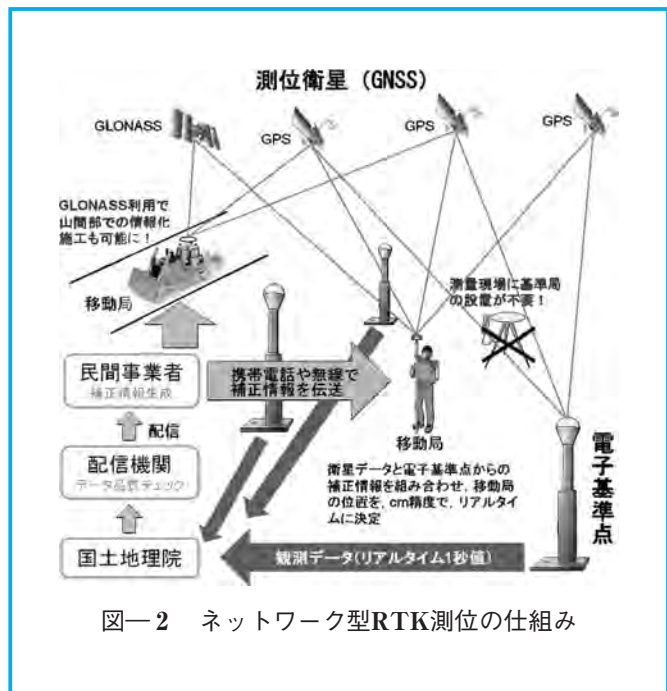
される30秒ごとの観測データは、GPS測量に不可欠なデータとして利用されている。また1秒ごとのリアルタイムデータも民間に開放され、位置情報サービス事業者がネットワーク型RTK測位等のサービスを行っている。この方式は、後述のとおり、利用者（移動局）のcm級の位置を、移動局で取得したGPSデータと周辺の電子基準点データから計算した補正情報とを用いてリアルタイムで決定するもので、公共測量や工事測量、土地登記等に活用されている。

GPSデータは、衛星と受信機の間には存在する大気の影響を受けるため、逆に大気中の水蒸気量の分析にも役立つ。このような「GPS気象学」の研究成果を生かし、気象庁は平成21年10月から電子基準点データから求めた水蒸気量の天気予報業務への利用を開始した。また、GPSのL1 (1,575.42MHz) およびL2 (1,227.60MHz) 信号を組み合わせると電離層の状態を調べることもできるので、電離層研究のツールとしても活用されている。

このように電子基準点は、わが国の測量、地殻変動観測、位置情報サービス、天気予報、学術研究等を支えるインフラとして不可欠なものとなっている。

3. GNSSへの期待

GPSは米国の開発した衛星測位システムだが、旧ソ連は1980年代から米国に追随してGLONASSを開発してきた。またGPSの成功で衛星測位が社会的に重要なインフラであることが認識されると、2000年ごろから欧州がGalileoという独自の衛星測位システムの開発を始め、これに次いでわが国もGPS補完機能を持つ「準天頂衛星システム」(QZSS)の開発を開始した。こうした各国の努力により、多数の衛星測位システムが利用できるGNSS時代の到来が期待されていた。



従来のGPSに加え、これらのGNSSを利用すると、同時に観測できる衛星数が増えるため、ビルや樹木等の障害物によって衛星信号が受信しにくい都市部や山間部でも測量できる場所が広がる。また新たな周波数帯L5 (1,176.45MHz) の信号が増えるので、より短い時間での測量が可能となることも期待される。このため利用者からは電子基準点でも早くGPS以外のGNSSにも対応してほしい、との要望が寄せられていた。

特に要望が高かったのは、cm級の測位をリアルタイムで行なうRTK (Real-Time Kinematic) 測位の分野である。RTKには、①利用者が現場に自分で基準局を置き、そこから移動局にデータを無線伝送する方式と、②周辺の電子基準点データから生成された補正情報を移動局において携帯電話等で受信して測位するネットワーク型RTKがある (図一 2)。

リアルタイムでcm級の精度を得るためには、同時に観測できる衛星数が5機以上必要となる。このため、工事現場でブルドーザー等の建設機械のコントロールやガイダンスを行なう情報化施工 (建設ICT) では、山間部など観測条件が悪い場所でも困らないよう、GPSとGLONASSを併用するRTKが先行的に普及していた。もし電子基準点でGLONASSが利用できれば、利用者は自分で

基準局を設置する必要がなくなるというメリットがある。

4. 電子基準点のGNSS対応

当初の電子基準点の更新計画では、米国のGPS近代化計画により現行のGPS受信機ではL2信号が受信できなくなる平成32年までに、全点で次世代GPSに対応した受信機を導入することを目標とした。平成20年度補正予算と平成21年度予算により、老朽化した受信機（450点）の更新が可能となり、その後は毎年80点の更新を10年間継続し、平成31年までに全点でGNSS対応を完了させる長期計画であった。GPS近代化で追加されるL5信号の受信にはアンテナ更新も必要だったが、その更新時期は未定であった。

平成22年9月にはわが国の準天頂衛星初号機「みちびき」が無事打ち上げられ、またロシアのGLONASSも衛星配備が完了し、利用者ニーズが確認された。このため電子基準点では、近代化GPS、Galileoに加え、準天頂衛星、GLONASSについても対応することとしたが、全点でGNSS対応できるのは、やはり平成31年の予定であった。

しかし、平成23年東北地方太平洋沖地震の発生は、この状況を一変させた。M9.0という未曾有の巨大地震がもたらした地殻変動を電子基準点は詳細に記録し、防災や地震調査、測量成果の改定等に貢献した。携帯電話網による通信の二重化や無停電装置の強化により、東北地方の電子基準点網の運用停止は発災直後に限られたが、それでも停電や通信遮断により地震前後の貴重なデータの一部が失われる事態となった。

このため、東日本大震災で被害を受けた電子基準点を復旧するとともに、防災上重要な地殻変動観測を継続的に実施するため、平成23年度補正予算により電子基準点の受信機・アンテナの更新等が認められた。この結果、ほぼ全ての電子基準点の機器更新が平成24年度末までに実施できることになった。ただし、GNSSデータの収集・配信を

行なうシステムの開発には一定期間を要するため、平成24～25年度に行なうこととした。

震災復興を支援するため、機器更新が完了した地域から準天頂衛星およびGLONASSデータの提供を順次行なうこととした。この結果、平成24年7月から東北地方を中心とする電子基準点187点、平成25年4月から東日本全域を含む541点、そして同年5月から全国の電子基準点について、準天頂衛星およびGLONASSデータの提供を開始し、予定どおり電子基準点の高度化が進んだ。

平成25年4月の時点で、電子基準点で利用している受信機種はTrimble NetR9とTopcon NET-G3である。いずれの受信機も、近代化GPS(L2C含む)、準天頂衛星(L2C、L5含む)、GLONASS、Galileoの信号に対応している。

5. 電子基準点のデータ

平成25年4月1日から施行された公共測量の「作業規程の準則」では、GLONASSや準天頂衛星をGPSと併用する方式が可能である。これらの公共測量に使用できる電子基準点の観測データは、国土地理院ホームページからダウンロードできる(<http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>)。さまざまな利用者を想定し、①GPSのみ、②GPSおよびGLONASS、③GPS、GLONASSおよび準天頂衛星という3種類のデータファイルを提供している。いずれも30秒ごとの観測データと放送暦(衛星から送信されている衛星の位置情報)を標準フォーマット(RINEX)に収納したものである。

以上のRINEXデータは一般の測量用であるが、情報化施工等に利用される1秒ごとのリアルタイムデータは、配信機関を通して各民間事業者に配信している。各電子基準点との通信は、64kbpsのIP-VPN(広域IP網を経由する仮想私設通信網)を利用しているが、GPSの観測データ量は3kbps以下であり、これに準天頂衛星やGLONASSを加えても7kbps程度なので問題ない

と当初考えていた。しかしGNSSの試験配信を進めるにつれ、リアルタイムデータの遅延時間の増加が問題となった。GPSだけだと遅延時間は0.3秒程度であったが、GNSS対応によりデータ量が増えると、1秒を超える遅延が生じる観測点も発生するに至った。このためデータ伝送の経路を点検し、通信サーバーの転送プログラムを修正する等の対策を施した結果、平均的な遅延時間は0.2~0.3秒程度となり、平成25年5月までに全点での配信が可能となった。

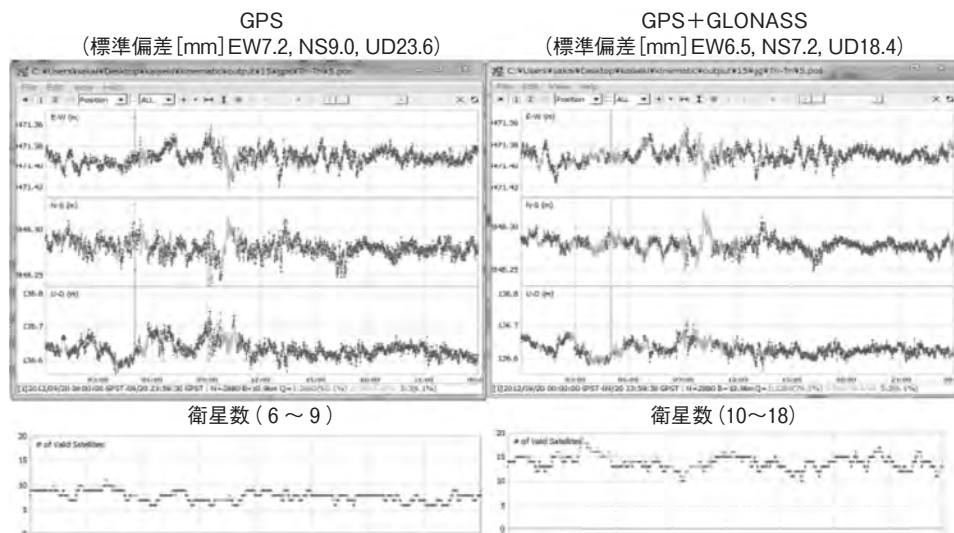
電子基準点のリアルタイムデータは、今後ネットワーク型RTK-GNSSだけでなく、実用準天頂衛星システムから配信される測位用補強信号の生成にも利用される予定であり、データの遅延時間

は重要な品質項目となる。平成25年度に、全国の電子基準点データが集まるデータセンター内の通信サーバーや回線を増強しており、より信頼性の高いリアルタイムデータの提供が可能となっている。

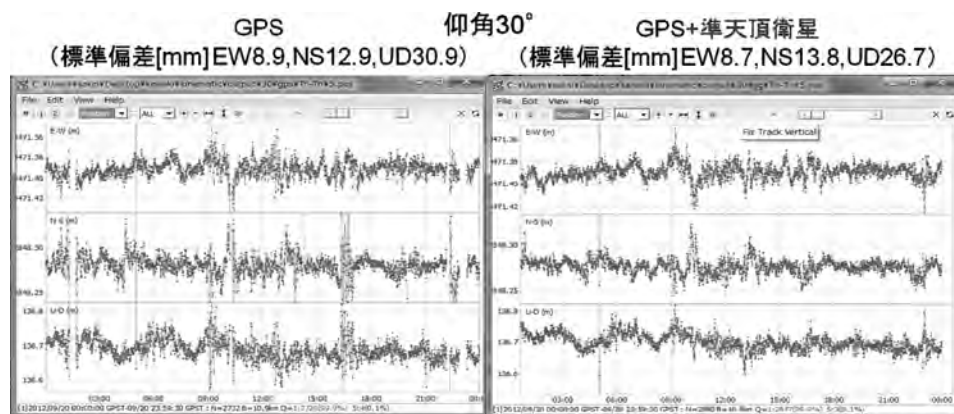
6. GNSS対応の効果

GPSに準天頂衛星やGLONASSを併用した場合の測量の精度について、電子基準点等のデータを用いて簡単な分析を行なってみた。

まず平成24年9月20日に取得した東北地方の電子基準点データと放送暦を用いて、10~30kmの



図一三 電子基準点間（小野田～色麻，距離11km）のキネマティック基線解析の時系列（1日分）左：GPSだけ。右：GLONASSを併用。最低仰角は15°



図一四 電子基準点間（小野田～色麻，距離11km）のキネマティック基線解析の時系列（1日分）左：GPSだけ。右：準天頂衛星を併用。最低仰角は30°

表一 1 電子基準点間のキネマティック基線解析の結果。平成24年9月20日に東北地方の16基線で求めた各成分の標準偏差の平均。最低仰角は15°

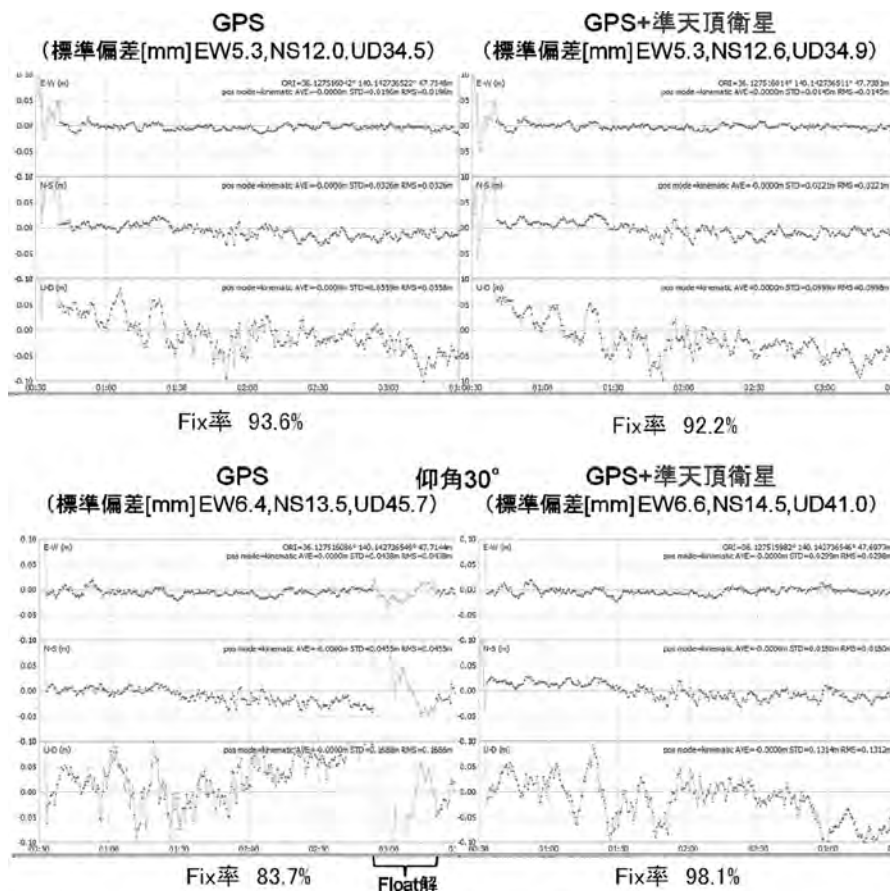
基線成分	GPSだけ	GPS+GLONASS	GPS+準天頂衛星
東西	8.6mm	7.7mm	8.6mm
南北	12.2mm	8.7mm	11.4mm
上下	30.3mm	25.7mm	31.2mm

同一機種間の基線16本について、東京海洋大学の高須氏が開発した解析ソフトウェアRTKLIB ver.2.4.1を用いて、30秒間隔のキネマティック解析を行なった。GLONASSを併用した場合、GPSだけに比べ座標値の1日分の標準偏差は1～3割減少した(表一1)。これは衛星数の少ない時間帯における測位のばらつきが改善されることの効果と考えられる(図一3)。準天頂衛星の併用効果は、衛星数が一つしかないため、それほど顕著

ではないが、解析に用いる衛星の最低仰角を上げる、つまり観測条件を悪くするにつれ、併用の効果は大きくなった(図一4)。

さらに準天頂衛星の併用効果について、平成24年11月26日に長距離GNSS比較基線場で取得した観測データおよび平成25年5月10日に取得した電子基準点データを用いて行なった。解析ソフトウェアには、RTKLIB ver.2.4.1をベースに国土地理院で改良を加えたGSILIBプロトタイプを利用した。

図一5は、比較基線場(距離11km)において異機種間で3時間分のキネマティック解析を行なった事例である。表一2は、稚内、秋田、つくば、大阪、高知周辺の電子基準点(同一機種)間の36基線(10~70km)において、キネマティック基線解析を行なった際の標準偏差を示したものである。



図一5 比較基線場(距離11km)におけるキネマティック基線解析の時系列(3時間分)左:GPSだけ。右:準天頂衛星を併用。上:最低仰角15°。下:最低仰角30°

表一 2 電子基準点間のキネマティック基線解析の結果。平成25年5月10日（14：00～20：00UT）に全国の36基線で求めた各成分の標準偏差の平均

最低仰角	基線成分	GPSだけ	GPS+準天頂衛星
15°	東西	6.8mm	6.7mm
	南北	8.8mm	9.2mm
	上下	24.5mm	25.4mm
30°	東西	7.8mm	7.0mm
	南北	11.9mm	11.5mm
	上下	45.6mm	42.5mm

準天頂衛星をGPSと併用しても系統的な誤差は生じないこと、最低仰角を30°に設定した場合は、準天頂衛星の利用により整数値バイアスのフィックス率が向上したり、上下方向のばらつきが改善されていることが分かる。観測条件の良い場所ではGPSだけでも十分な精度が得られるが、GNSSの併用により観測条件の悪い場所でも同等以上の精度が確保できることがポイントと考えられる。

平成24年10月、試験配信中の電子基準点GLONASSデータを利用したネットワーク型RTKが、東日本大震災復興のための三陸縦貫自動車道の工事現場で、情報化施工に活用され、「GNSS対応の電子基準点のおかげで衛星からの受信制約も大幅に改善された」と評価された。

国土交通省が平成25年3月にとりまとめた情報化施工推進戦略でも、「電子基準点を利用したネットワーク型RTK法による衛星測位技術は、今後GPS衛星以外の測位衛星の併用により、測位可能な時間と場所の増大と安定性の向上が期待されている。ネットワーク型RTK法では、施工現場ごとに設置している基準局が不要となるなどのメリットがあるため、情報化施工での活用の拡大が期待されている技術である」としている。

7. 今後の計画

電子基準点の受信機については、現在利用できるGNSSへの対応は完了したものの、今後登場する新たなGNSSへの対応が必要となる。Galileoの複数の信号や、近代化GLONASSのCDMA信号等については利用者ニーズをよく調べて検討する必要がある。アンテナについてはすでにL5帯の周波数に対応済みのため、当面更新の必要はない。

データ収集・配信については、平成24～25年度にかけてマルチGNSSに対応した新たなシステムを開発した。今後、実用準天頂衛星システムの補強データ生成の源泉としても利用できるような高い信頼性を確保していく。

データ解析については、まず東日本大震災を契機に津波予測支援のために開発中の電子基準点の常時リアルタイム解析において、準天頂衛星やGLONASSの利用を図る。また、最高精度を追求する地殻変動監視のための定常解析についても、別途進めている国土交通省総合技術開発プロジェクトによるマルチGNSS解析技術を活用しつつ、結果が出るまでの時間短縮を図る。

利用できる衛星がGPSだけに限られていた時代は、受信機・アンテナや解析ソフトウェア、そして中央局のシステムも今から思えば実にシンプルであった。GPS以外のGNSSが増えることで、取り扱うデータの量や種類、それらの組み合わせが複雑多岐にわたるようになり、利用者側の使いこなしは以前よりも難しくなると思われる。しかし100機以上の測位衛星データが利用できるGNSS時代ならではの新たな利用の展開が期待される。国土地理院は、今後も電子基準点の高度化をはじめ、GNSSを賢く測量や測位に使うことができる環境の整備に努めていく。