GPS 連続観測システムとその応用

GPS Earth Observation Network (GEONET) and its Application

日下 正明*・宮崎 真一*・後藤 勝広*・畑 中雄樹*
Masaaki KUSAKA, Shin-ichi MIYAZAKI, Katsuhiro GOTOU
and Yuki HATANAKA

1. はじめに

国土地理院では、高密度で高精度な測量網の構築と広域的な地殻変動の検出を連続的に行うことを目的とし、日本全国に GPS 固定観測局を展開し連続観測を行っている。本稿では、この観測網について簡単に紹介し、地殻変動やプレートテクトニクスにおけるこれまでの成果、その他の応用の一つとして RTK-GPS 測量を取り上げ紹介する。

2. GPS 連続観測システム

国土地理院が日本全国を覆う GPS 観測網の構築を開始したのは1994年だが、その1年前には、地殻変動の監視を目的として関東・東海地域に110点からなる GPS 観測網が構築されていた。これらの2つのネットワークは当初、目的別・地域別に運用が行われていたが、1996年にこれらを統合し、現在は新たに追加されたものを含め約950点の電子基準点 (GPS 観測局) を擁する、世界的にも他に類を見ない巨大な GPS 連続観測システムとなり、GEONET (GPS Earth Observation Network) と名付けられた。

GPS 連続観測システムは、日本全国の山間部を除いて約25km 間隔に配置された観測点と、観測点から公衆電話回線を用いてデータを取得し解析計算を行う GPS 中央局により構成されている。

電子基準点には、高さ 5 m のステンレス製ピラーが設置され (図1)、その頂部には GPS のアンテナが取り付けられている。ピラーの中央部には GPS 受信機、通信機器、電源及び無停電用バッテリーが格納されている。また基礎部分は約 2 m 立方のコンクリート基礎が設置されており、一般地域において風速60m/sec の強風に耐えられるよう設計されている。GPS による観測は、2 周波、上空視界15度以上、30秒サンプリングで24時間連続的に行っており、データは一旦受信機内のメモリに記録され後に中央局へ日々転送される。受信機のメモリには約10日間分のデータを保持することができ、通信障害等が起こった場合でも、10日以内に通信が復旧すればデータの欠測を防ぐことができる構造となっている。さらに、最大10時間までの停電に耐えられるよう、補助バッテリーが備えており、災害時においても極力データの欠測が起こらないような配慮がなされている。

中央局 (図2) は、茨城県つくば市の国土地理院内にあり、通信装置、データ格納装置、解析装置及び統合管理装置等を ATM 方式による光 LAN で接続している。さらに、24時間のスケジューリングによる自動運行システムが構築されており、大量のデータを限られた時間内に処理できるようになっている。電子基準点の観測データは、一日一回電話回線で GPS 中央局に転送され、RINEX II (Receiver Independent Exchange) フォーマットへの変換並びに品質検査を

*国土地理院 Geographical Survey Institute
〒305-0811つくば市北郷1番
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 37, NO. 2, 1998

図1 電子基準点

図2 中央局(茨城県つくば市国土地理院内)

図6 RTK 移動局での観測

図7 DMCA を取り付けた電子基準点の外観(千葉市)

図8 電子基準点の内部

図9 DMCA 無線装置

図10 無線制御局(筑波山)

経た後にデータベースへ格納される。解析計算は、機種別、地域別にクラスターと呼ばれるブロックに分割することにより、解析計算時の異機種による影響を避けると共に計算の高速化を図っている。解析計算のストラテジーとしては速報的な計算を行う組み合わせ暦（予報暦と速報暦を組み合わせた暦）と、より精密な軌道情報を約2週間遅れで国際GPS地球力学事業から入手して行う最終計算が定常ルーチンとして行われ、解析された結果はSINEX (Software Independent Exchange) フォーマットに変換されデータベースに格納される。現在、解析計算にはBERNESE, GAMIT, GIPSYといった学術用精密GPS解析ソフトが使用されている。また、解析結果は、表示プログラムにより、座標値・基線ベクトル成分（東西、南北、比高）の時系列表示、変動ベクトル図、歪み図等にして端末装置へ表示し、地殻変動（電子基準点の変動）の監視を行っている。これらの解析結果は地震調査委員会、地震予知連絡会議等へ随時提出され重要な基礎データとして利用される。

3. GPS 連続観測網で得られた地殻変動

GPS で得られた観測点座標を時系列として見ると地殻変動に関する情報が得られる。地表の観測点の地殻変動速度は、最も簡単には日々の観測点座標に対して直線回帰を行うことによって得られる。国土地理院の定常解析においては、茨城県つくば市にある国土地理院の構内にある観測点の座標を基準にしてその他の観測点座標を推定している。したがって、得られた速度は全てつくば観測点が不同であると仮定して得られたものになる。地殻変動の速度場は、基準となる固定点としてどこを選ぶかによって様相が変化してしまう。速度場に意味を持たせるためには、例えば、あるプレートに対する変動という形で速度場を推定すればよい。Miyazaki and Hatanaka (1997) は一年間の観測データを用い、Heki (1996) による VLBI データの解析によって得られた「つくば」のユーラシアプレートに対する運動を速度場に加え、ユーラシアプレート安定部に対する変動として速度場を推定した。その結果を、これまで提唱されてきたプレート境界と共に図3に示す。まず気がつくのは、これまで指摘されてきた糸魚川—静岡構造線を境界に速度場の構造が異なっている。しかし、GPS による速度ベクトルを見ると、

図3 日本列島の地殻変動速度場

ベクトルの大きさが大きく変化するのは静岡から糸魚川へかけてではなく、新潟にかけてである。この結果は、後者がプレート境界であるとする説（多田，1983）を支持している。

このプレート境界で分かれる領域の西側（西南日本）は、もともとユーラシアプレートに属すると考えられている。もしこの地域がユーラシアプレートに属するのであれば、速度ベクトルはゼロになるはずである。しかし図3を見ると、中国地方かや四国北部にかけては東向きに、四国南部は北西方向に、九州地方南部は南南東へ変動している。中国地方の東進については諸説ある。例えば、この地域が一つのアムールプレートと呼ばれる小さなプレートとしてユーラシアプレートとは独立に運動しているとも考えることもできる。四国南部は、ユーラシアプレートの下に沈み込むフィリピン海プレートによるプレート同士の固着によって、フィリピン海プレートの運動に引きずられていることを反映している。運動の方向は Seno *et al.* (1993) で推定されているフィリピン海プレートのユーラシアプレートに対する相対運動の方向と良く一致している。

九州南部では、2回の日向灘地震と鹿児島での地震による影響のため、通常時とは異なる速度になっていることに注意を要する。

一方の東北日本では、東北日本の下に沈み込む太平洋プレートの西進の影響と考えられる西向きの変動が顕著である。東南北部ではこの傾向が顕著で、プレート境界を形成すると考えられている東南北部太平洋沖の日本海溝では、四国沖と同様にプレート間の固着が存在することが原因と考えられる。一方の東北北部では、1994年に発生した三陸はるか沖地震の影響が1年以上経過した現在でも残っており、プレート間の固着が未だ回復していないと考えられている。さらにデータの取得を続ければ、巨大地震のサイクルである、破壊(地震)、未固着、回復、固着の一連のプロセスを世界で初めてとらえることになるだろう。北海道はより複雑な様相を示している。東南部では太平洋プレートによる影響が観測されているが、東北とは対照的にプレート境界から遠ざかってもその大きさが減少しない。特に興味深いのは、札幌付近に比較して奥尻島などの南西沖では西向きの速度が大きくなっていることである。北海道南西沖地震の影響が深部においてまだ残っている可能性もあるだろう。

ここまで見たように、速度場で見ている限りは固定点の選択による任意性がある。そこで、次にこれをひ

ずみ速度場に変換した結果を示そう。ひずみ速度場は速度場の速度による空間微分なので、速度の定数バイアスが微分によってなくなり、固定点の選択による任意性はなくなる。しかし、ひずみの計算では、どこか異常な観測点があれば、その観測点を含む領域全てでひずみ速度の値が異常になる。そこで、Kato *et al.* (1998)は、最小二乗コローケーションと呼ばれる手法で観測データをシグナルとノイズに分解し、シグナルの部分に対してひずみ速度を計算した。図4に主ひずみを示す。この結果はさまざまな情報を我々に教えてくれる。例えば、九州の雲仙一島原構造帯において南北伸張がみられること、四国から紀伊半島へ抜ける中央構造線におけるせん断ひずみが大きいこと、などが見られる。このような結果はこれまでの手法では10年、あるいは100年かかって得られてきたものであり、それがわずか一年間で明らかにされてしまったわけである。

4. 電子基準点を利用した RTK-GPS 測量

RTK-GPS とは、リアルタイムキネマティック GPS の略で、干渉測位方式の一種である。RTK は、その名のとおりにリアルタイムに基準局のデータを移動局に伝送し、移動局の位置を正確に割り出すシステムである。従来測量の主流であったスタティック（静止）測量では、1～数時間の観測の後、データを持ち寄り解析を行って、位置を算出していた。いわゆる後（あと）処理で新点の位置を求めていたのである。RTK を導入することによって、現場での結果の確認ができ、作業効率が格段に向上する。

図4 日本列島の地殻変動歪み速度場(Kato, 1998による)

図5 電子基準点を利用した RTK-GPS 測量

国土地理院は、郵政省と共同で電子基準点を利用した RTK-GPS に関する公開実験を行っている(図5)。この実験は平成9年10月から平成10年3月までの半年間を予定し、関東と関西のそれぞれ6点ずつの電子基準点に DMCA 無線と呼ばれるデジタル移動通信装置を設置している。電子基準点(基準局)で受信した GPS データをユーザー(移動局)に常時伝送(放送)し、移動局の位置をリアルタイムで求める。今後、測位精度の検証や受信範囲の状況など、実験の結果を踏まえ、実用化へ向けての検討を行う。

電子基準点の観測データを移動局に伝送する方法には、携帯電話、PHS、専用線、衛星通信などいろいろと考えられる。データをいかに相手に正確に伝えるかが重要である。RTK が普及し始めた頃には、免許の要らない特定小電力無線を利用したものが主流であったが、「送受信範囲が狭い(100m 程度)」、「市街地での混信が多い」など満足な観測条件が得られなかった。そこで、その解決策を模索していた時に現れたのが、前出の DMCA である。

DMCA 無線とは、デジタル・マルチ・チャンネル・アクセスの略で、財団法人移動無線センターが運営する移動体通信システムの一つである。タクシーや運送業などで利用されている無線システムで、モデムを接続することによって、GPS のデータを送受信することができる。一つの制御局での受信範囲は半径30km である。(ただし、環境や場所によって異なる)

DGPS (Differential GPS: RTK が搬送波位相を利用するのに対して、DGPS は疑似距離を利用する)で採用されている RTCM フォーマットは米国海上電波技術委員会が勧告するフォーマットで、データ量が非常に多く、伝送するにはかなり高速なデータリンク装置(モデム)が必要である。そこで、各社はもっとスリムなフォーマットをつくることにしのぎを削った。本実験で採用したフォーマットは CMR (Compact Measurement Record) と呼ばれる必要最小限のデータに絞った(RTCM の3分の1)ものである。

RTK では、OTF (On The Fly) と呼ばれる高速バياس決定技術を使って初期化を行う。そのため、移動途中の受信中断による計測不能ということがなくなった。

RTK による測位精度は、公称 $2\text{ cm} \pm 2\text{ ppm}$ といわれている。国土地理院の実験でスタティック測位と RTK の比較を行った結果では、約15km 以内の基線で

は誤差が距離に比例せず、最大で水平 3 cm、垂直 7 cm という結果であった。これは、比較的受信状態(GPS も DMCA も)のよい条件の下での結果である。したがって、GPS の衛星の数や無線の受信が弱い場所では、この限りではない。

電子基準点を利用した RTK は、基準点測量をはじめ以下のような用途に使用されることが予想される。

- ・公共測量(地籍調査、数値地形測量)
- ・工事測量(道路、河川、港湾、空港など)
- ・GIS(地理情報システム)
- ・車両(タクシー、バス、救急車など)の移動体管理
- ・自動走行支援(ITS)
- ・船舶の接岸誘導
- ・地下埋設物の調査
- ・古墳・遺跡の調査
- ・レジャー(ゴルフ、登山など)
- ・スキーのコース設定
- ・精密農業(トラクターの無人運転、農薬散布、収穫支援)
- ・重機の無人管理
- ・遭難者の救助
- ・地滑り、崩落の監視
- ・老人徘徊、迷子調査
- ・事件事故現場検証
- ・3次元CGの作成

5. おわりに

国土地理院の GPS 連続観測システムと、それによって得られた日本の地殻変動の様子、リアルタイムキネマティック測量への応用を紹介した。GPS 連続観測システムの応用分野は大変広く、ここで紹介したのはその内のごく一部であることを最後に記す。

謝 辞

東京大学地震研究所の加藤照之氏には、図4の使用を許可いただいたことを感謝します。

文 献

Heki, K., Horizontal and vertical crustal movements from three-dimensional very long baseline interferometry kinematic reference frame: Implication for the reversal time scale revision, J. Geophys. Res., 101, 3187-3198, 1996.

- Miyazaki, S., and Y. Hatanaka, Crustal deformation observed by GSI's new GPS array, EOS Trans. Am. Geophys. Union, 78, S104, 1997.
- 多田 堯, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, B33, 1983.
- Miyazaki, S., K. Heki., D. Dong, and G. An, Space geodetic determination of the movement of the Amurian plate, eastern Asia, in preparation.
- Seno. T, S. Stein, and A.E. Gripp, A model for the north of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data, J. Geophys. Res., 98, 17941-17948, 1993.
- Kato, T., G.S. El-Fiky, E.N. Oware, and S. Miyazaki, Crustal strains in the Japanese Islands as deduced from GPS dense array, submitted to Geophys. Res. Lett.