GPSの原理と地震予知への応用*

畑 中 雄 樹**

Principle of GPS and its Application to Earthquake Prediction

Yuki HATANAKA

1. はじめに

「地震はなぜ起きるか」という疑問に対して、プレートテクトニクスは「沈み込む海洋プレートに引きずり込まれた陸側のプレートが耐えきれなくなって反発するのだ」と説明する。これは、正確には海溝沿いに起きる大地震についての説明である。プレートテクトニクスは、海洋底に記録された地磁気の縞模様、地震のメカニズム解、その他のさまざまな地球物理的証拠から、1960年代に確立されたパラダイムだが、プレート運動を測地学的に実測できるようになったのは、VLBIやGPSなどの宇宙測地技術が現れてからの話である。これらの技術によって、プレート運動が可視化されたと言えるかもしれない。特にGPSは、技術開発によってその精度が格段に向上し、更に扱いが簡便で機動性に富みコストも低いことなどから、近年、地殻変動観測の主流になり、地震予知への応用も有望視されるようになってきた。

本稿では、GPS測量の原理について簡単に解説し、国土地理院で構築した全国GPS連続観測システムについて紹介し、その地震予知における意義について論じる。

2. GPSの原理

GPSは、元来ナビゲーションを目的とした軍事技術を、民間にも部分的に解放して使用できるようにしたシステムである。まず、その原理を単純

化して説明する。

地球の周りを回る24個のGPS衛星から地上に向けて電波が送信されている。衛星には正確な原子時計が搭載されており、この時計の読みや衛星軌道の情報が、電波に乗せて放送されている。地上の観測点では、GPS受信機でGPS衛星からの電波を受信し、受信機内部の時計で測定される受信時刻と、衛星での発信時刻の差の情報から衛星-受信機間の距離を計算し、受信機の位置を決定する。同時に四つ以上の衛星が観測されれば、瞬時に位置がわかる仕組みである。この方法は単独測位法と言い、ナビゲーションに使用されている。その精度は数十m以内で、測地測量には不十分である。

測地測量で使用される方法は相対測位法といい、①コード化された信号の情報を使用するのではなく、より分解能の高い電波の位相を測定すること、②複数の観測点で同時に観測を行い、後でデータを持ち寄ってコンピュータで解析すること、③同時に観測された複数の観測点・衛星のデータを差し引き計算を行って、かなりの誤差要因を減らすこと、④観測点の絶対位置ではなく、2点間の相対位置が求められること、が単独測位法と大きく異なる点である。相対測位法の精度は、通常1ppm (10kmの基線を1cmの精度で測定) 程度であるが、最先端の技術を駆使すると数ppb (1000kmの基線を数mmで測定) の精度を達成することが可能である。このような高い精度は、GPS衛星の精密軌道情報の使用や、電波の伝播時間に影響を与える大気遅延量の推定などの多くの誤差要因を慎

*原稿受付 1996年1月16日

**国土地理院

重に考慮することによって初めて達成できるものである。

3. 全国GPS連続観測網 (GRAPES)

1994年10月、国土地理院は、地殻変動の監視と測量の基準点としての使用を目的として、全国GPS連続観測システム (GRAPES; GPS Regional Array for Precise Surveying / Physical Earth Science) を整備した¹⁾。また、これに先立ち、関東東海地域に地震予知を目的としたGPS連続観測網 (COSMOS-G2) が配備されているが²⁾、ここでは前者を中心に紹介する。

全国に配置された100点のGPS固定観測点には、高さ5mのステンレス製のタワーが設置され、その頂上にはアンテナが、胴体内には受信機と通信機器、及び停電用のバッテリーが格納されている。観測点では、GPS衛星からのデータを、30秒のサンプリング間隔で24時間連続的に記録している。観測されたデータは、公衆電話回線によって、茨城県つくば市の国土地理院内にあるGPS解析室に転送される。GPS解析室に集められたデータは、マサチューセッツ工科大学とスクリプス海洋研究所で開発されたGAMIT/GLOBKと呼ばれる精密GPS解析ソフトウェアを使って解析され、日々の観測点の位置が得られる。これらの作業は、システムが自動的に行うようになっている。

この全国GPS連続観測システムの完成以来、北海道東方沖地震(1994年10月4日, M8.2)、三陸はるか沖地震(1994年12月28日, M7.5)、兵庫県南部地震(1995年1月17日, M7.2)と、日本列島は立て続けに大きな地震に見舞われた。奇しくも、これらの地震によって、完成したばかりのシステムの実力が試されることとなった。

Fig. 1は、この観測網で捉えられた兵庫県南部地震に伴う地殻変動である。地震によって、大阪府箕面市の観測点が西に3cm、兵庫県御津町の観測点が東に3cm移動しているのがはっきりと捉えられている。その精度は、水平成分で数mm、鉛直

Fig. 1 Time series of displacement of Kuji station relative to Rifu station around the time of the 1994 Sanriku Haruka-oki earthquake.

成分で1-2cmである。これは、相対精度にすると従来の測量方法を2桁以上も上回るものである。この図から震源付近が東西方向に圧縮されているのが読みとれる他、よく見ると南北方向への伸長も見られる。求められた地殻変動は、地震の震源モデルを推定する上で基本的なデータとなる。北海道東方沖地震や三陸はるか沖地震の場合も、同様の地震時の変動を地震発生後数日で求めることができた。これは地殻変動の観測にとって画期的な進歩である。従来ならば、地震が発生した後に観測計画を立てて、現地に赴き、光波測距儀やトランシット等で何日もかけて測量を行い、観測結果を点検し、計算して、最終的な地殻変動がでるまで、何週間もかかっていたのである。GRAPESの登場によって、地震による地殻変動の大まかな様子を数日のうちに把握できる体制が整った。このような迅速な対応は、地震を物理的に解釈するための資料を提供する上でも、また震災後の復旧測量のための測量計画をたてるうえでも重要である。

GPS連続観測の重要性は、地震発生後に即対応できるというだけでなく、地震による地殻変動の把握をより正確にするという面にもある。測地測量でわかる地殻変動というものは、地震後の観測点の位置と地震前の観測点の位置の差である。従来の測量では、大地震の発生後にはその直後に

観測をすることができるが、地震前のデータは何年も前に観測したものであるのが普通であった。したがって、そのデータから求められる地殻変動は、地震時の瞬間的な変動以外の変動が含まれる可能性が高い。それに対して、GRAPESによって得られた地殻変動は、地震の直前直後のデータが連続的に記録されているので、まさに地震の瞬間の変動を捉えているといえるのである。

地殻変動を連続的に監視できるということは、地震時の瞬間的な地面の動きをとらえるだけではなく、長期的で緩慢な動きを捉えることも可能にする。Fig. 2は、三陸はるか沖地震の前後の青森県久慈市の観測点の動き（宮城県利府町に対する相対的な変位）である³⁾。本震および最大余震の際の明瞭なジャンプの他に、明らかに余効変動と思われるなだらかな変動が見られる。このようなゆっくりとした変動は、時間的に密で、かつ精度の高い観測を行うことによって、初めて捉えられるものである。国土地理院では、定常的なプレート運動あるいはプレートの変形をモニターし、日本の地殻変動の速度場を求める研究も行われている⁴⁾。

以上、いくつかの例で見えてきたように、GRAPESは即応性、時間分解能、継続性の点で、

今までの地殻変動観測では考えられないほど高い能力を持っている。平成7年度中には、GRAPESとCOSMOS-G2が拡張統合され、全部で約610点のGPS連続観測網という、世界でも例を見ない高密度な観測網になる(Fig.3)。これによって日本全国が、平均点間距離25-30kmのGPS観測網に覆われることになる。時間空間的に密度の高い観測によって、地震の前兆的地殻変動の検出率を高めることができる。また、日本列島のより詳細な地殻変動を把握することによって、日本の活構造や地震活動との関連を論じることも可能になるだろう。

4. 地殻変動の表示方法

計算によって求められた地殻変動から情報を読みとり洞察を得るためには、地殻変動を図示する必要がある。

地殻変動を図示するには、Fig.1のような観測点の変位を矢印で表したベクトル図がわかりやすい。この図では鳥取県東伯町の観測点を固定して、この点との相対変位を表示している。これは、グローバルな座標系で変位を見た場合には、誤差が比較的大きく、あまり離れていない観測点間の相

Fig. 2 Horizontal crustal deformation associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. The arrows show the displacement vectors relative to Touhaku station.

Fig. 3 Location of the observation stations of GRAPES after the expansion and integration of current GPS networks (to be finished in March, 1996).

対変位の方が正確に求められるためである。実際に相対変位を求めるにはどこかを固定する必要があるが、固定点の選択には任意性がある。地震に伴う変動を見る場合には、震源から遠く離れている観測点を近似的に不動とみなすことにより、この問題を一応避けることができる。しかし、例えば長期にわたるデータからプレートの定常的な変動を求めて表示するような場合は、どの点も不動とはみなせないで、任意性が残る。言い換えれば、ベクトルによる図を見る際には、定ベクトルのバイアスがかかっている可能性を意識して見なければならぬ。

一方、相対的な変動の様子を表す物理量として、歪みを図示する方法もある。歪みは2階のテンソル量なので、それをわかりやすく表示するのは容易ではない。そのため、いくつかの仮定を置いて問題を単純にするのが普通である。まず、弾性論における自由表面の境界条件の性質から、地表付近では歪みテンソルの主軸の一つが鉛直方向を向き、残りの2軸が水平面内にあると仮定する。更に三つの観測点を頂点とする三角形を構成し、三角形内で歪みが一様であるという仮定をすると、各頂点で与えられた変位から歪みの水平成分を計算することができる。このようにして求めた水平歪みのテンソル主軸をその大きさと共に地図上に表示するというのが、よく行われる方法である。この方法は、観測点で与えられたデータを補間する必要がないので、観測点の密度が低い場合でも三角形内の歪みを一意的に決めることができるという利点を持っている。また、歪みについての多くの情報を一度に表現できるという強みもある。ただし、三角形を構成する観測点の選択には任意性がある。

観測点で与えられた変位を、補間によって格子点データに直し、グリッドやワイヤーフレームで表示する方法も提案されている⁵⁾。観測点の数が増えて、その密度が高くなってくると、グリッド化による誤差が小さくなることが期待される。グリッド状に並んだ点列の変動パターンを眺めることによって、地面の変位が場所によって変化している様子を直感的に捉えることができる。

今のところ、地殻変動をその時間変化まで含め

て可視化する究極の表示方法はないようである。よりよい表示方法の出現が望まれるが、むしろ、いろいろな表示方法を、それぞれの長所を生かして使い分けるべきなのかもしれない。

5. 地震予知に向けて

地殻変動観測を地震予知に役立てるには、地殻の実際の動きを逐次モニターすると同時に、得られた変動が何を意味するのかを解釈することが重要である。つまり、地殻の異常な変動を検知することも大切だが、それと地震との間の関係を適切に解釈するためのモデルがなくてはならない。地震の前兆的地殻変動には短期的なものや長期的なものがあるが、これは過去に地殻変動を捉えた数少ない貴重な観測データを実際に発生した地震と対応させることによって、前兆であることが判ったものである。実戦では、地震が発生するという未来の情報がないので、客観的な判断をするには、その拠り所となる物理的なモデルが必要である。モデルを構築するには、数多くのデータを蓄積してその中から普遍的な法則を引き出さなければならない。GPSによる地殻変動の連続観測は、このような面からも今までにない視野を提供するものである。地震予知を地殻変動観測の立場から見ると、主として日単位から年単位の現象がターゲットであると考えられるが、このタイムスケールの現象を時間空間的にこれほど密にモニターする手段はこれまでなかったのである。全国GPS連続観測網によって、我々はこのタイムスケールの現象を見るための新しい「目」を持つに至ったと言える。

一般にモデルには、互に関連する二つの目的がある。現象の予測と、現象の本質の理解である。地震予知に即していえば、地震の発生を予測することが前者であり、地震発生メカニズムを明らかにすることは後者である。地震発生メカニズムには、まだ謎の点が多いが、地殻に加えられている広域的な応力がその原動力である。現状では地震発生域の地殻応力を直接連続的に測定することはできないが、モデルによってGPSで得られる地表変形の情報と結びつけることは可能である。問題は、モデルの構築にある。地球内部の地震波

の伝わり方や地震時の地殻変動などの短期的な性質は、地球が第一近似的に弾性体であると考えられるとよく説明できるが、長期的には非弾性的な振る舞いもするだろう。実際、三陸はるか沖地震ではGPS連続観測によって長期的な余効変動が観測されたが、その原因としてアセノスフェアの粘弾性的変形の可能性を示唆する研究もある⁶⁾。このような非弾性的変形の性質は、まだ十分に解明されておらず、むしろGPS連続観測データを基にして、これから研究が進められるべきものである。

プレート境界で発生する地震について、その繰り返し期間にわたる長期的な地殻変動を断層面上の滑りと関係つけて論じられるようになったのも最近のことである⁷⁾。地震の繰り返しサイクルを理解するためには、広域的な地殻変動を長期にわたって把握することが大切である。これは、GPS連続観測網のデータが蓄積するのを待てば自然に実現されるはずである。それだけではなく、地殻変動の時空間的に微細な構造を捉えることによって、活構造や微小地震の発生、その他の地球物理学的な現象間の相関が明らかになるかもしれない。

以上のような、さまざまな研究を進めていくことによって、日本列島の地殻変動のモデルが構築され、ひいてはより確かな地震予知へのステップとなるであろう。

6. 終わりに

本稿では、地殻変動観測に的を絞ったが、GPS連続観測網の可能性はそれだけに留まらない。大気中の水蒸気によってGPSの電波が遅延を受け

る性質を利用して天気予報に応用するGPS気象学、GPSによる電離層モニタリングやGPSを地震計として使用する可能性など、はば広い応用が可能である。これはGPS技術そのものの汎用性と高密度な連続観測の相乗効果によるものと言えよう。

謝 辞

本文推敲にあたって、国土地理院地殻調査部の橋本学氏および鷺谷威氏から貴重なコメントをいただいた。

参 考 文 献

- 1) Miyazaki S., H. Tsuji, Y. Hatanaka, Y. Abe, A. Yoshimura, K. Kamada, K. Kobayashi, H. Morishita and Y. Iimura: Establishment of the Nationwide GPS Array (GRAPES) and its Initial Results on the Crustal Deformation of Japan, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 1996, in press.
- 2) Sagiya T., A. Yoshimura, E. Iwata, K. Abe, I. Kimura, K. Uemura and T. Tada: Establishment of Permanent GPS Observation Network and Crustal Deformation Monitoring in the Southern Kanto and Tokai Areas., Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol.41, 1995, 105-118.
- 3) 辻 宏道, 畑中雄樹, 宮崎真一, F. ウェブ: GPS連続観測で見た三陸はるか沖地震の広域的な余効変動, 日本地震学会講演予稿集, 1995年度秋期大会, 1995, P102.
- 4) 宮崎真一, 辻 宏道, 畑中雄樹: GPSで観測された日本の地殻変動速度場, 日本地震学会講演予稿集, 1995年度秋期大会, 1995, C81.
- 5) 海津 優, 星野 実: 高密度変位データから求めた地殻歪みの表現方法, 日本測地学会第84回講演会要旨, 1995, 23-24.
- 6) 日置幸介, 中井新二: GPSで見る地震時/地震後地殻変動: 三陸はるか沖地震(1994/12/28 Mw=7.6)の特異性とその地学的意義, 日本測地学会第84回講演会要旨, 1995, 101-102.
- 7) Sagiya T.: Crustal Deformation Cycle and Interplate Coupling in Shikoku, Southwest Japan., 東京大学博士論文, 1995.