

GPS 東海地域 3 時間解析値の面的監視

小林昭夫*

Spatial monitoring of GPS coordinates using 3-hour analysis in the Tokai area

Akio KOBAYASHI

(Received July 24, 2004 : Accepted October 18, 2004)

ABSTRACT

We propose a spatial monitoring procedure to detect precursory signals of the anticipated Tokai earthquake using a 3-hour analysis of the GPS data in the Tokai area. First, we calculate displacements for every component from a median coordinate for a long period and a median coordinate for the latest short period. Displacements are then smoothed using the GMT software, and grid point values after that are rated. By using this procedure, we can detect abnormal deformation on a map, and it is hoped that the stability for the outlying values can also be obtained. Moreover, the same procedure is effectively applicable to daily analysis values from the GPS.

1. はじめに

現在の東海地震予知は、地震直前に想定震源域およびその周辺のプレート境界のすべりに伴う前兆的地殻変動が観測されることが前提になっている。しかし、前兆的なすべりが発生するとしても、それがどのような時間経過をたどるかについては不明であり、現象が急速に進展する場合でも対応できるように、なるべく早急に地殻変動を把握する必要がある。気象庁は 1970 年代から東海地域で歪計による観測を開始し、リアルタイムに伝送および監視処理を行ってきた（末廣，1979；山岸・佐藤，1979）。1998 年度からは国土地理院で東海地域を対象とした GPS の 3 時間解析システムの運用を開始するとともに、気象庁では得られた 3 時間解析値の監視を開始した（小林・他，2002）。ここでは、GPS の特性を活かした 3 時間解析値の面的監視手法を提案する。

2. GPS 東海地域 3 時間解析と現在の監視方法

国土地理院では 1994 年に GPS を用いた連続観測システムの運用を開始し、2004 年現在、全国に 1200 点という高密度の観測網を展開している（国土地理院 GEONET グループ，2004）。2004 年 3 月に新たな解析手順に移行するまで、国土地理院の定常解析は 1 日分

のデータをもとに行われており、最も高精度な IGS (International GPS Service) 最終精密暦を用いた座標値を得るまでには観測後 2 週間程度を要し（飯村・他，1997）、観測の直後に利用できる組み合わせ暦を用いた座標値でも観測の翌日にならないと座標値が得られなかった。

GPS は、短期的な変化の観測精度については歪計に劣るものの、長期にわたるゆっくりとした変化の検出や地殻変動を面的に把握することには長けている。また、歪計の観測点配置が駿河湾や遠州灘沿岸に限られるのに対し、GPS 観測点はより高密度で内陸部も含めて広範囲に展開されている。このような GPS の長所を活かしつつ、できるだけ早く解析結果を得るため、1998 年度から東海地域を対象とした GPS の 3 時間解析システムの運用が開始された（小林・他，2002）。

気象庁の地震活動等総合監視システム（EPOS）における GPS 3 時間解析値の監視方法は主に、あらかじめ設定された観測点間の斜距離や比高を座標値から計算し、時系列表示上で異常の発生を監視するものである。これは、要素が 1 成分である体積歪の監視方法と同じであり、既存のツールを活用することができた。しかし、斜距離や比高は二つの観測点間の相対的な地殻変動を見ているだけであり、地殻変動の全体像を把

* Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute
気象研究所地震火山研究部

握するためには多くの観測点の組み合わせについて確認し、それらの情報を観測点の位置関係も含めて統合する必要がある。また、3 時間解析値は 1 日解析値と比較して観測時間が短いため座標のばらつきが大きく、極端に外れた値（外れ値）が多い（小林・他、2002）。斜距離や比高の監視において現れた異常値が、近隣の観測点においても共通に見られるものなのか、あるいは一時的な 1 点だけの変化なのかを把握することは、その変化をもたらした原因が東海地震に関連するものかどうかを推定するために重要である。以下では、これらの問題を解決するために、東海地域全体の地殻変動を面的に監視する方法を提案する。

3. 面的監視手順

GPS 観測点の座標値の変動を面的に把握する方法としては、各観測点における時期の異なる二つの座標値の差、すなわち変位をベクトル分布図に表す方法がしばしば用いられている。GPS の座標値には観測誤差によるばらつきがあるため、通常二つの座標値にはそれぞれ平均値など一定期間を代表する値を用いる。求める期間長を長くすると代表値が安定し、変位を精度よく把握できるようになるが、期間内に座標値が変化したときには代表値にその変化が反映されるまで時間を要する。すなわち、プレート間運動による経年的な変位のように代表値を求める期間長より長い現象は把握できるが、それより短い時定数を持つ現象は捉えにくくなるという問題がある。ここでは、東海地震の短期予知のための監視に必要な変化の速い変位を検知する

ため、過去のある程度長期の代表値と最新の短期の代表値とから変位量を観測点ごとに求めることによって代表値の安定と短い時定数を持つ現象の検出との両立を図ることとした。また、GPS3 時間解析値のように外れ値を多く含むデータの代表値としては、平均値よりも中央値の方が適しているため、ある期間内の座標の代表値として中央値を用いることとする。ここで捉えるべき現象は既に述べているように地震の前兆としてのプレート間すべりによる変位であるが、この現象の時間経過をあらかじめ知ることは難しい。このため、GPS データの特徴や 3 時間というデータ間隔を念頭に置き、長期と短期の組み合わせとして、ここでは六ヶ月間と一ヶ月間、一ヶ月間と一週間、一週間と一日間を採用する。

観測点ごとに求めた変位を南北、東西、上下の成分別に、GMT (Wessel and Smith, 1995) の機能を使用して、緯度経度 0.5 度ごとに中央値を求めるとともに 0.02 度ごとに格子点化し、スプライン関数を用いて平滑化する。また、水平二成分から発散（面積歪）と回転成分を計算し、同様に平滑化する。こうして得られた各成分の平滑化後の格子点値のうち最大、最小値を異常検知のための判定に用いる。

上記の処理をした平滑化前後の例を Figure 1 に示す。観測点ごとの変位を表した平滑化前の図には、伊豆半島などに大きな値を持った観測点がいくつか見られる。しかし、近隣の観測点は同様の傾向を見せていないため、複数点に影響を及ぼすような共通の変動源によるものではなく空間的な外れ値であると考えられる。こ

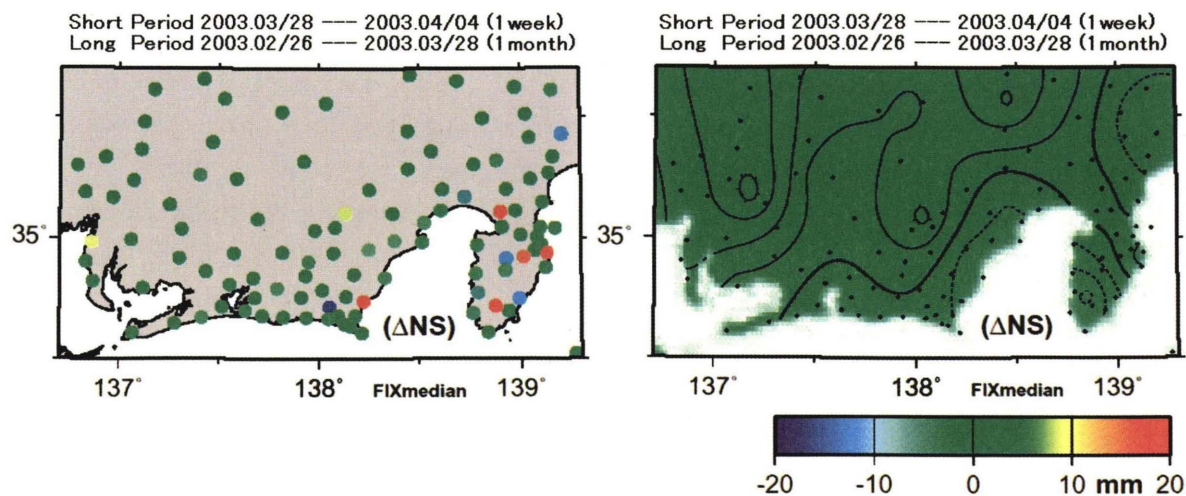


Figure 1 Examples before and after the smoothing process of this spatial monitoring

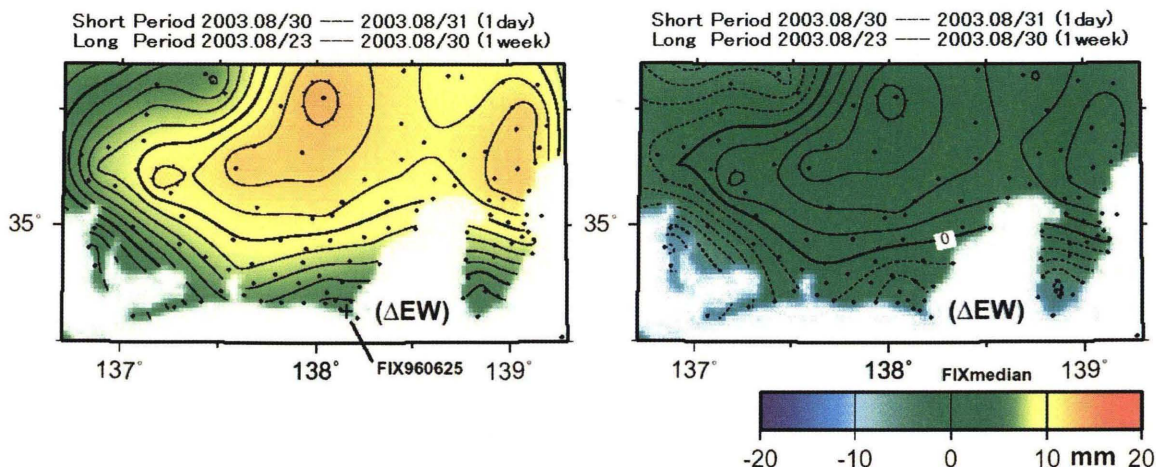


Figure 2 Difference in the distributions between the cases using a specific point (960625) and the median of all points for fixed point

のデータを平滑化した後の図にはこのような外れ値の影響が現れておらず、ここで用いた空間的平均・平滑化のパラメータが外れ値の影響を適切に除去していることがわかる。ただし観測点密度が低い場所や、海岸付近や内陸部など観測点分布に偏りがある場所では外れ値の影響が残ることもある。固定点の取り方による見え方の違いの例を Figure 2 に示す。従来の変位ベクトル図では、ある特定の点を固定点としてその点との相対的な変動を表現することがよく用いられてきた。GPS 1 日解析値のように座標値が安定している場合は良いが、3 時間解析値のように座標値のばらつきが大きな場合、固定点自体が空間的外れ値となったときには、見かけ上その他の多くの観測点に大きな変位が現れてしまう。また、固定点が欠測になった場合はその他の点の値が得られない。このような場合、変位ではなくひずみを用いるのも一つの解決法であるが、変位の方が直感的に変動量を把握しやすく、もともとなる観測点ごとの座標値に戻って値を確認するときなど監視上扱いやすい面がある。このため本手法では特定の固定点を設けずに、成分ごとに変位量の中央値を持った観測点を固定することによって平滑化後の格子点値の安定を図った。これにより Figure 2 に示したように、特定の固定点の変動により全体的に変位量がシフトすることを防ぐことができる。なお、いずれの固定点の場合でも、実際に監視範囲内の観測点の多くが一様に変位をした場合にはそれら変位が相殺される恐れがあるが、想定している現象のスケールよりも監視対象範囲を広げることでその恐れを小さくすることができる。

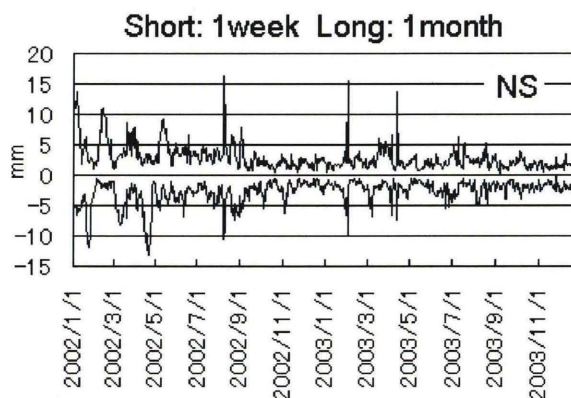


Figure 3 Change of the maximum and the minimum values in two years for the NS component of the Tokai region

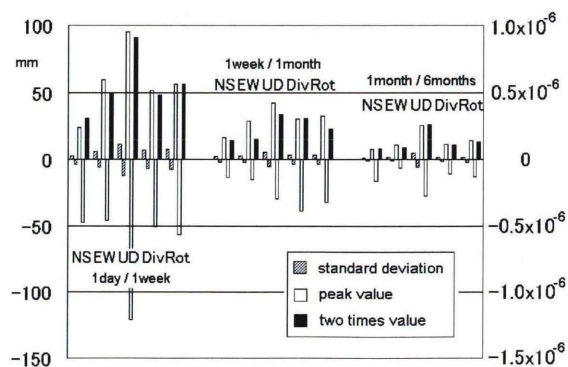


Figure 4 Standard deviation, peak values and the value which appears two times in two years for each component of the Tokai region using 3-hour data. The units of NS, EW and UD are shown in the left axis, and the units of divergence (Div) and rotation (Rot) are shown in the right axis.

4. 東海地域 3 時間解析値への適用結果

監視のための基準を適切に設定するためには、長期間のデータを一貫した条件で調査して格子点の最大、最小値の発生頻度を把握する必要がある。気象庁では既に地震活動等総合監視システム (EPOS) において東海地域の歪計の監視を行っているが、その監視基準は調査期間 (1 年半) に事象が 1 回だけ発生する変化レベルをもとに設定している (小林・松森, 1999)。GPS3 時間解析値についても、2002~2003 年の 2 年分のデータを用いて調査を行った。平滑化後の格子点値の最大、最小値の推移について南北成分を例にとって Figure 3 に、標準偏差, ピーク値, 調査期間内に 2 回発生する値 (年に 1 回発生する頻度に相当) を Figure 4 に示す。ここで連続して値を超えている場合は発生を 1 回とした。歪計の場合に準じて監視を考えた場合、年に 1 回発生する値をもとに異常検知の基準値を設定するのが適当だと思われ、この基準からすると、水平二成分の値は短期一日間のとき 30~50mm, 一週間のとき 14~15mm, 一ヶ月間のとき 8~9mm であった。

Ozawa *et al.* (2002) によると、東海スロースリップによる地表の水平変位は 2000 年秋から 2002 年 6 月までの時点で大きい所で 2cm ほどであり、モーメントマグニチュードは 6.7 と推定されている。東海スロースリップの発生場所は浜名湖周辺直下の深さ 20~30km のプレート境界上と推定されているが、そこで同程度の規模の前兆すべりが 1 日の間に進行したとしても、上記基準では異常は検知されないことになる。地震の前兆現象としての異常な変位を早期に発見するために導入された 3 時間解析システムであるが、得られた座標値のばらつきが大きいので、短期一日間での監視を想定した場合には、異常と判定する基準をかなり上げなければならないことがわかる。実際、今回の調査期間中の 2002 年 5 月には、伊豆半島東部群発地震活動に伴う数 mm 程度の水平変動が GPS1 日解析値で観測されている。しかし、3 時間解析値では座標値のばらつきが大きいので、座標値の時系列でもその変化を捉えることができなかった。また、火山活動に伴う地殻変動が GPS により観測されることがあるが、変動源の規模が小さく変位の方向がそろわない場合には、平滑化により変位が打ち消されてしまうことが予想される。このように、有意な変位でも同じ方向の変位がある程度存在しないと検出されない場合もある。

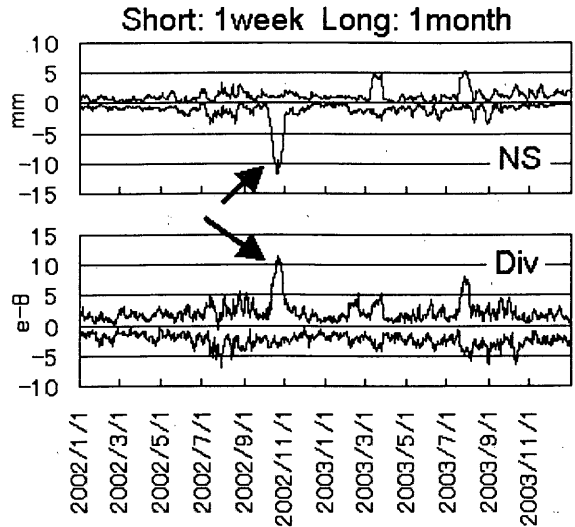


Figure 5 Changes of the maximum and the minimum values in two years for NS and divergence components of Southern Kanto. Arrows show the 2002 slow slip event of the Boso Peninsula.

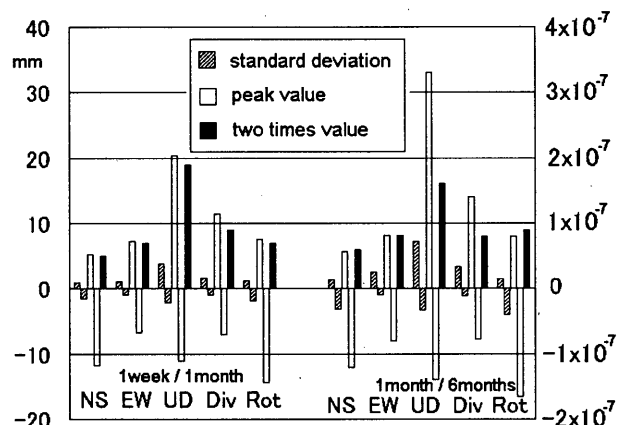


Figure 6 Standard deviation, peak value and the values which appear two times in two years for each component of Southern Kanto using daily data. The units of NS, EW and UD are shown in the left axis, and the units of divergence (Div) and rotation (Rot) are shown in the right axis..

5. 全国 1 日値への適用例

東海地域の GPS3 時間値のために提案した面的監視手法であるが、GEONET の定常解析である精密暦を用いた全国の 1 日値に対しても同じ手法が有効かどうか試すため適用してみた。ただし用いたデータが 1 日値であるため、短期一日間については調査しなかった。例として関東地方南部について 2002~2003 年の 2 年間の最大、最小値の推移例を Figure 5 に、標準偏差, ピーク値, 調査期間内に 2 回発生する値 (年に 1 回発生する頻度に相当) を Figure 6 に示す。ここで連続して

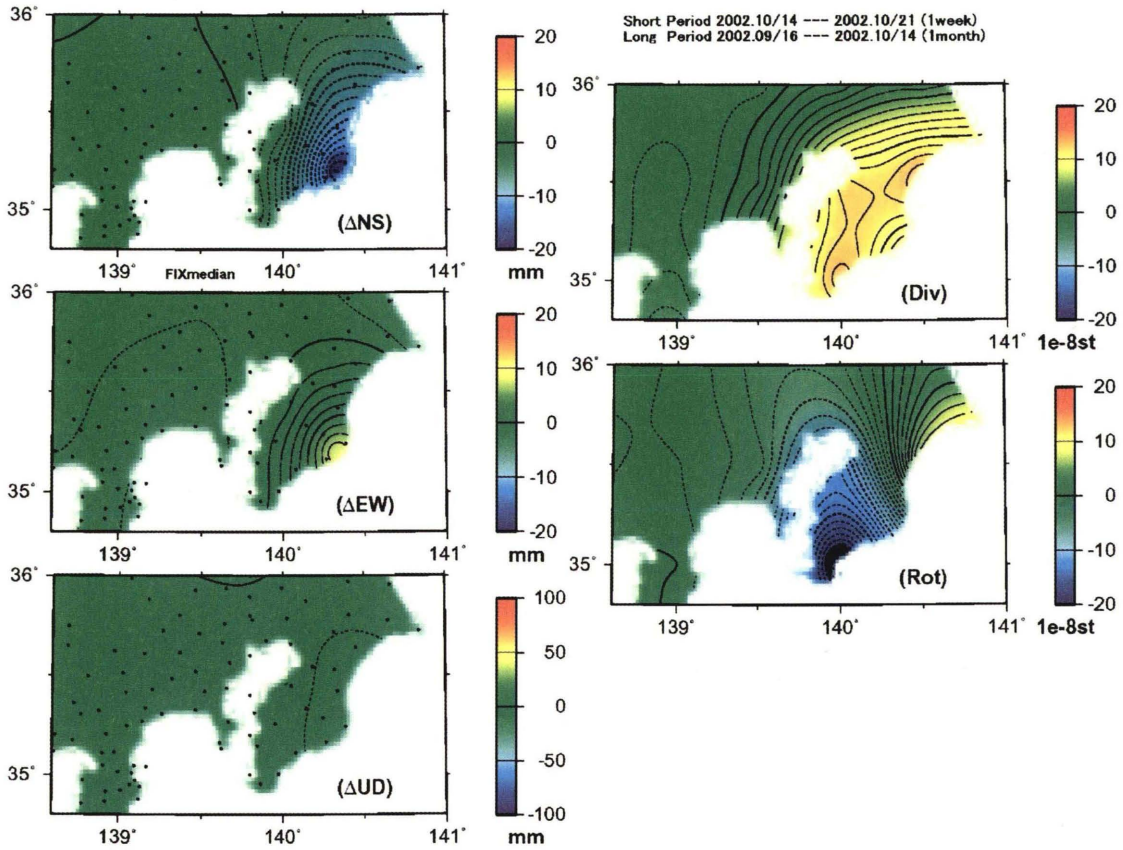


Figure 7 Crustal deformations after smoothing of Southern Kanto at the time of the 2002 slow slip event of the Boso Peninsula

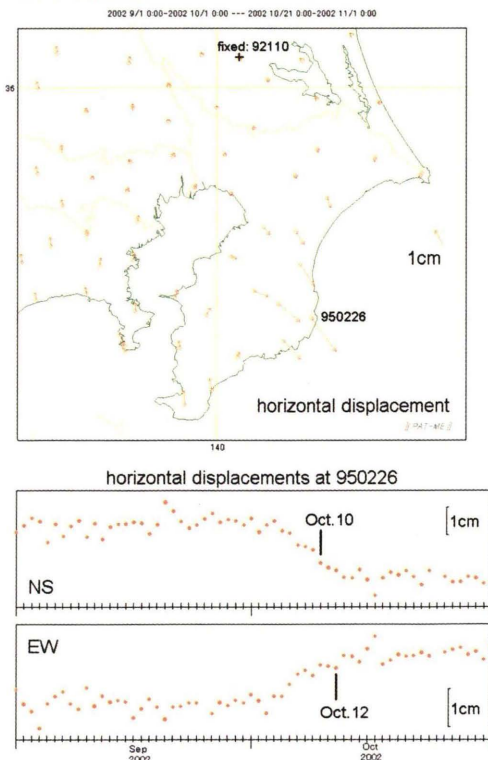


Figure 8 Horizontal displacement (upper) and time series of north-south (middle) and east-west (lower) displacements at the 950226 station for the period of the 2002 slow slip event of the Boso Peninsula

値を超えている場合は発生を 1 回とした。Figure 5 の 2002 年 10 月の矢印部分に大きな値が見られるが、これは房総半島南東沖のスロースリップ(国土地理院, 2003)に対応するものである。Figure 7 にはこのときの各成分について平滑化後の変位分布を、Figure 8 には水平ベクトル図と最も大きな変位を示した観測点の座標時系列図を示す。年 1 回発生する値を基準値にした場合、2002 年 10 月のスロースリップに関し最も早く基準値を超えるのは、短期一週間の南北成分で 10 月 10 日、次いで短期一週間の東西成分と回転成分で 10 月 12 日と、現象のほぼ半ばの時点で検知できる。平滑化後の変位分布もこのときの変動をよく表しており、ここで提案した手法は、データのばらつきが小さい GPS1 日解析値に対して有効に活用できることがわかる。

6. おわりに

東海地震の短期予知のために導入された GPS3 時間解析値の異常検知のため、面的監視手法を考案した。この手法では、空間的に異常が検知できるという簡便

さだけでなく、外れ値に対する安定性も期待される。国土地理院では 2003 年度に全国 GPS の 6 時間データによる 3 時間ごとの解析を導入した（国土地理院 GEONET グループ, 2004）。6 時間データの解析値は、3 時間解析値と比較して精度の向上が期待できる（山際・他, 2002）。現在の 3 時間解析値はばらつきが大きいため、面的監視をする場合の基準値を上げなければならないが、解析値の精度が向上して基準値を低くできれば、房総半島南東沖スロースリップの例のように東海地震の前兆的地殻変動を検知できる可能性があるだろう。このため東海地震監視のためには、精度の良い 6 時間データの解析値の早期利用が望まれる。

謝辞

国土地理院による GPS 東海地域 3 時間解析値と GEONET の定常解析値を使わせていただいた。図の作成にあたっては中村(1999)の SEIS-GPS を使用した。また、匿名の査読者 2 名による指摘は、本稿を改善する上で有益であった。以上、記して感謝します。

参考文献

- 飯村友三郎, 宮崎真一, 佐々木正博(1997): 高密度電子基準点網の構築, 国土地理院時報, **87**, 37-49.
- 国土地理院(2003): 関東甲信地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **69**, 138-179.
- 国土地理院 GEONET グループ(2004): GPS 連続観測システム“GEONET”とその展望, 測地学会誌, **50**, 53-65.
- 小林昭夫, 松森敏幸(1999): 埋込式体積歪計のノイズレベル調査及び異常監視処理, 験震時報, **62**, 17-41.
- 小林昭夫, 山本剛靖, 畑中雄樹, 丸山一司, 竹中潤, 緒方誠(2002): GPS 東海地域 3 時間解析値のグループ化と補正, 気象研究所研究報告, **53(2)**, 75-84.
- 末廣重二(観測部地震課)(1979): 地殻変動連続観測と埋込式歪計 (I), 測候時報, **46**, 9-25.
- 中村浩二(1999): GPS データ簡易表示プログラム (SEIS-GPS) の開発, 情報地質, **10**, 257-266.
- 山岸要吉, 佐藤馨(観測部地震課)(1979): 地殻変動連続観測と埋込式歪計 (II) -データの伝送と集中処理-, 測候時報, **46**, 107-111.
- 山際敦史, 畑中雄樹, 丸山一司, 菅富美男, 石本正芳(2002): 新 GEONET の構築 -リアルタイム化・高精

度化に向けて-, 日本測地学会第 98 回講演会要旨, 33.

- Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai and T. Nishimura (2002): Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, *Science*, **298**, 1009-1012.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith (1995): New version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans., AGU*, **76**, 329.