

南関東・東海地域におけるGPS連続観測（1994年～1996年）

Continuous GPS Observation
in the Southern Kanto and the Tokai Districts (1994~1996)

地殻調査部 鷲谷 威

Crustal Dynamics Department Takeshi SAGIYA

要旨

関東・東海地方のGPS連続観測網（COSMOS-G 2）は、1994年に観測を開始して以来、現在の国土地理院のGPS連続観測網の先駆けとして貴重なデータを蓄積した。1995年～1996年にかけて観測されたデータを精密解析することにより、信頼性の高い地殻変動速度場が推定され、この地域のテクトニクスに関する新たな知見が得られた。相模トラフ、駿河トラフ沿いのプレートが沈み込んでいる場所では、プレート間相互作用に伴う歪の蓄積が見られ、伊豆諸島においてはマグマの貫入に伴う島の膨張変形が観測された。また、伊豆半島がフィリピン海プレートから独立した運動をしていることも明らかとなった。これら多くの貴重な成果をもたらしたCOSMOS-G 2であるが、解析や観測網そのものに関しては、対流圏遅延の補正が不十分なために見かけ上の季節変動が生じたり、観測局のアンテナピラーが傾いてしまうなど、解決すべき問題が残っている。国土地理院の全国GPS連続観測網は世界的な注目を集めつつあるが、長期にわたって高い精度を維持し、貴重なデータを蓄積していくために、これらの課題を抜本的に解決していくことが必要である。

1. はじめに

国土地理院のGPS連続観測網は、1994年度に観測を開始した南関東・東海地域の観測網（Continuous Strain Monitoring System with GPS by GSI, 略称COSMOS-G 2）（岩田, 1994, Sagiya et al., 1995）を皮切りに、それ以降全国観測網（GPS Regional Array for Precise Surveying, 略称GRAPES）の整備が急速な勢いで進んで（飯村他, 1995, 1997, Miyazaki et al., 1996, 1997）、1997年8月現在では日本全国に887点の連続観測点を有するに至った。観測網の名称もGEONET（GPS Earth Observation NETWORK）と改められ、測地・地殻変動の精密観測用のGPS連続観測網として世界最大の観測点数と最高の観測点密度を誇っている。

このGPS連続観測網は、その運用開始以来、短期間に日本列島の地殻活動に関連した興味深いデータ（例えば Tsuji et al., 1995, Heki et al., 1997, Sagiya,

1997）を次々と提供してきた。こうした成果は世界中の研究者から多大な関心を寄せられている。一方、従来の精密一次基準点測量に代わって、高度基準点測量がより効率的に高精度で実施できるようになるなど、多方面において恩恵がもたらされている。中でも、わずか1年間の観測によって得られた日本列島全体の地殻変動速度場は、従来の方法による三角点の測量100年分にも匹敵する成果であり、今後はその時間的変動を追跡できるようになることから、地震・テクトニクス等の研究に多大な貢献が期待されている。

こうしてGPS連続観測網のデータが利用されて世間の注目を浴びようになり、データの精度管理は一層その重要性を増している。GPSは従来の測量方法と比較して桁違いの高精度が達成可能なのに、観測局、観測スケジュール、解析方法などに対してそれぞれ細心の注意を払わないとさまざまなノイズを拾うだけの結果に終わりがねない。本報告においては、全国のGPS観測網の中で最初に整備され、すでに3年以上のデータを蓄積している南関東・東海地域の観測網について、1996年末までの精密解析結果を基にして過去の観測結果に関する総括を行い、この観測によって見出された地殻変動について議論を行うとともに、GPS連続観測において注意すべき問題点についても検討する。

2. COSMOS-G 2 の観測および解析

COSMOS-G 2 の観測および解析については、岩田（1994）、Sagiya et al.（1995）に詳しい説明がなされている。COSMOS-G 2 の観測点配置は図1に示す通りである。観測点の平均間隔は20km程度と活断層近傍などの特殊な地域を除けば、現在もなお全国で最も観測点密度が高い。観測開始当初は1日あたり6時間、サンプリング間隔30秒の観測が行われていたが、精度改善のために1995年1月より1日あたり12時間、サンプリング間隔60秒へと変更された。その後、1996年4月にGRAPESへ組み込まれてからは、1日24時間、サンプリング間隔30秒でデータ取得が行われるようになり、現在に至っている。

観測データの回収、基線解析、観測データ・解析結果の保存、解析結果の表示等は総合解析システム（GARD）

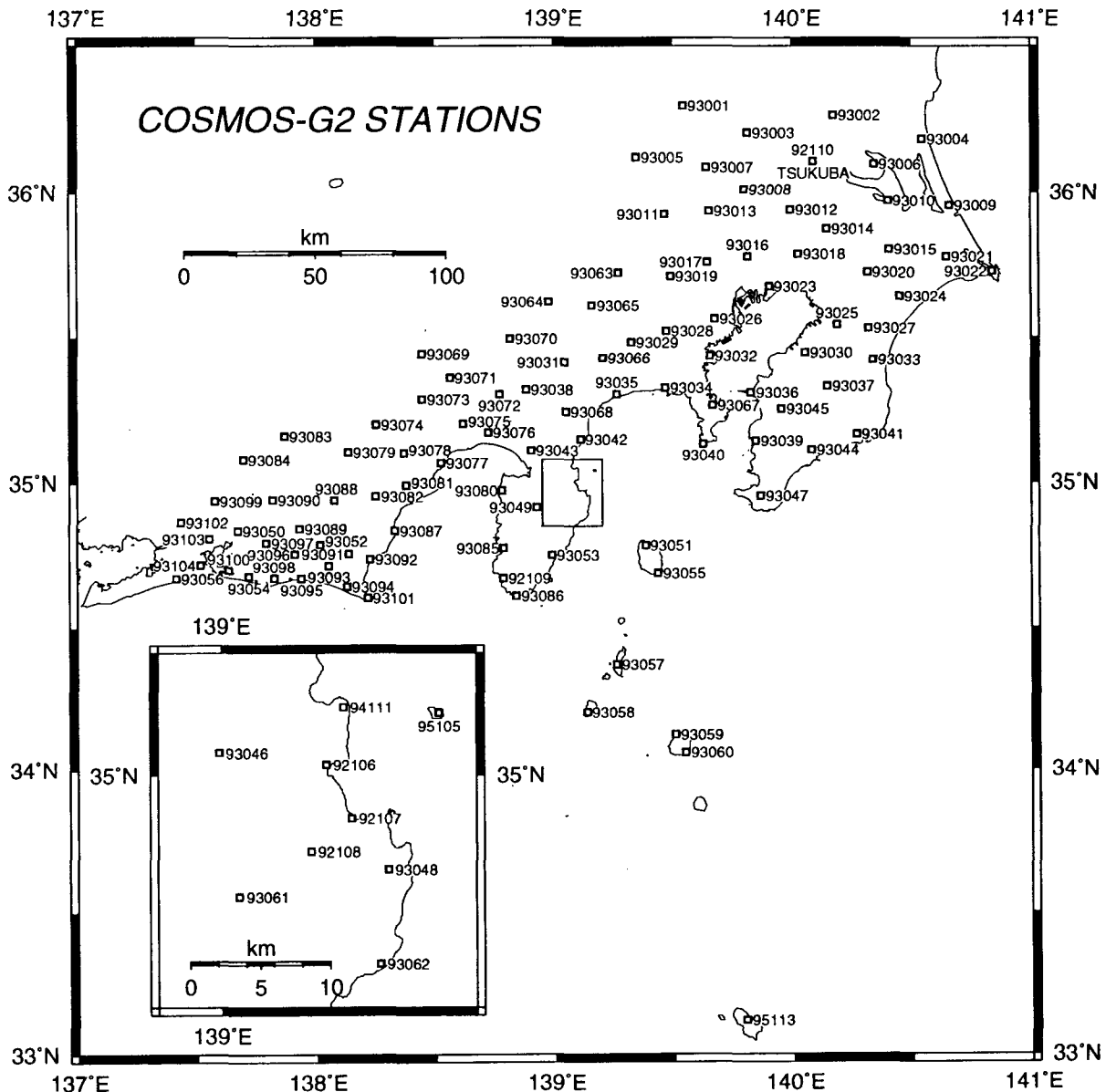


図1 COSMOS-G2観測網の観測点配置。数字は観測点番号を示す。

によって行われてきたが、精密暦を用いたより高精度な解析、地球中心座標系における座標値の推定などを行う目的で、1995年2月にGPSの精密解析ソフトウェアであるベルニーズ (Bernese GPS Software) が導入され、GARDによる解析と並行して精密解析を開始した。1994年8月から1996年12月までのデータが解析されており、本報告ではこの結果を用いて議論する。なお、COSMOS-G2が全国観測網GRAPESに組み入れられたため、1997年1月以降のデータは解析されていない。

3. ベルニーズによる精密解析

ベルニーズはスイスのベルン大学の研究グループによって開発されたGPSの精密解析ソフトウェアである (Rothacher and Mervart, 1996)。研究目的には世界中で最も多く使われているソフトウェアの一つであり、IGS (International GPS Service for Geody-

namics, 国際GPS地球力学事業) のグローバルな解析においても用いられている。従来のベルニーズの使用法は、テキスト画面に表示されるメニューを用いてオプション設定を対話形式で行いながら解析を進めていくものであった。COSMOS-G2の解析に用いたベルニーズのバージョンは3.6で、BPE (Bernese Processing Engine) と呼ばれる自動処理の機能や、正規方程式の蓄積とその一括解析という新たな機能が付け加えられ、大規模な観測網の定常的な解析が半自動で容易に行えるようになっている。

COSMOS-G2の解析に際して、GPS衛星の軌道情報に関しては、ベルン大学のグループがベルニーズを使って推定して求めているCODE精密暦を使用した。ベルニーズの解析では、受信した位相データの二重差 (観測点およびGPS衛星の対に関して位相の差し引きを行ったもの) を作り、サイクルスリップを修正する。異

なる周波数 (L_1 および L_2) の位相データの線形結合 (L_3) に関して位相波数不確定性を解くことにより、観測点の三次元座標値および対流圏遅延量をパラメータとする正規方程式が各観測点対について得られる。すべての観測点対に関する正規方程式を連立して解くことにより、全パラメータを一度に推定することができる。

各観測点の座標値は茨城県八郷町 (観測点番号93002) を固定点としてITRF93座標系で推定した。精密暦が準拠している座標系は1996年6月末をもってITRF93からITRF94へと更新されているが、本解析ではITRF93系で算出した八郷の座標をそのまま固定して計算を行った。このため、厳密には座標の連続性に関して疑問が残るが、各観測点における座標値の時系列変化を見る限りでは、座標系の移行期をはさんでステップや傾向の変化などは見られないので、地殻変動の議論を行うことは問題ないと考えられる。

こうしたITRF座標系の更新は今後も定期的に行われていくことが予想される。正しい解析を行うためには、座標系が移行する際に解析の基準となる固定点の座標値を正しく更新していくことが必要となるが、その場合移行前後の座標値を直接比較することには意味がなく、座標変換を施すことが必要となる。地殻変動観測という観点から言えば、COSMOS-G 2 を含む国土地理院のGPS観測網のデータ処理において、可能な限りの精度を追求すると同時に、長期間にわたって互いに比較可能な座標値を算出し保持しておくことが必要不可欠である。

本解析においては、各観測点は周囲で最短距離にある観測点と対になり、この2点の位相データに対して2重差のデータが生成される。こうして最短距離で結ばれた観測点の対をつないで全観測点を1つの観測網に組み上

げると、固定点から離れて多くの観測点を經由するほど計算誤差が累積して座標の推定誤差が大きくなってしまふ。こうした影響を避けるため、全観測点から11観測点を選んで、観測網の骨格となる長い基線を作り、これらの長基線に関する正規方程式を他の短基線に関する正規方程式と連立させて解を求めた。計算に用いたすべての短基線および長基線を図2に示す。

ベルニーズの解析においては、解析途中で生成される正規方程式を、各観測点の対について、また、ある観測日の観測網全体について、そのまま保存することができる。このことにより、同じ解析手順を何度も繰り返すことなく、パラメータに関する拘束条件のみを変えて繰り返し推定を行うことが効率的にできる。本解析においても、まず対流圏遅延のパラメータに関する拘束が強過ぎたことが原因で座標の時系列に異常な季節変動を生じたため、また最初に固定点としていた93001 (栃木県佐野市) の上下成分に原因不明の異常な変動が生じたため、拘束条件を弱めたり固定点を変えるなど合計2度にわたって正規方程式を解き直す再計算を行った。

4. 解析結果

ベルニーズによる解析で得られた1994年8月～1996年12月の間の座標変化の時系列を代表的な観測点4ヶ所について図3に示す。観測点93006 (茨城県霞ヶ浦町) は固定点の八郷に近く殆ど変動が見られない場所で、観測および解析の精度を確認するのに適した観測点である。座標の水平成分については、夏の間に若干ばらつきが大きくなるものの、全体的に2～3 mm程度の精度で座標が推定されている。上下成分は精度が劣るが、ばらつきは±2 cm程度の範囲に大部分が収まる。観測点93039 (千葉県鋸南町) は房総半島の南部に位置する。後述するように、この地域は相模トラフから沈み込むフィリピン海プレートの影響で陸側が北北西へ変形されている。この観測点においても、1年間あたり北へ2 cm、西へ1 cm程度の定常的な変動が見られる。観測点93048は近年間欠的な群発地震活動に見舞われている静岡県伊東市の小室山にある。ここに示したデータの範囲内でも1995年9～10月、1996年10月に比較的大きな群発地震活動が発生しており、それに関連した座標変化が水平、鉛直の全成分に見られる。伊豆半島東方沖では1997年3月に、さらに規模の大きな群発地震が発生して、この小室山観測点と熱海市初島の観測点間の距離が10日間に13 cm伸びたこともGPSの連続監視によって明らかとなっている。観測点93104 (静岡県湖西市) はCOSMOS-G 2 の西端に近い場所であり、網としての解析の精度を確認するのに適している。座標変化を見ると、成分によって大きさは異なるがいずれの成分にも季節変動的な要素があることがわかる。南北成分については、一年の前半にはあまり変化がなく、後半に北向きの変動が進んだという結果になっており、短期間の観測では変動の傾向を見誤



図2 ベルニーズの解析における短基線および長基線

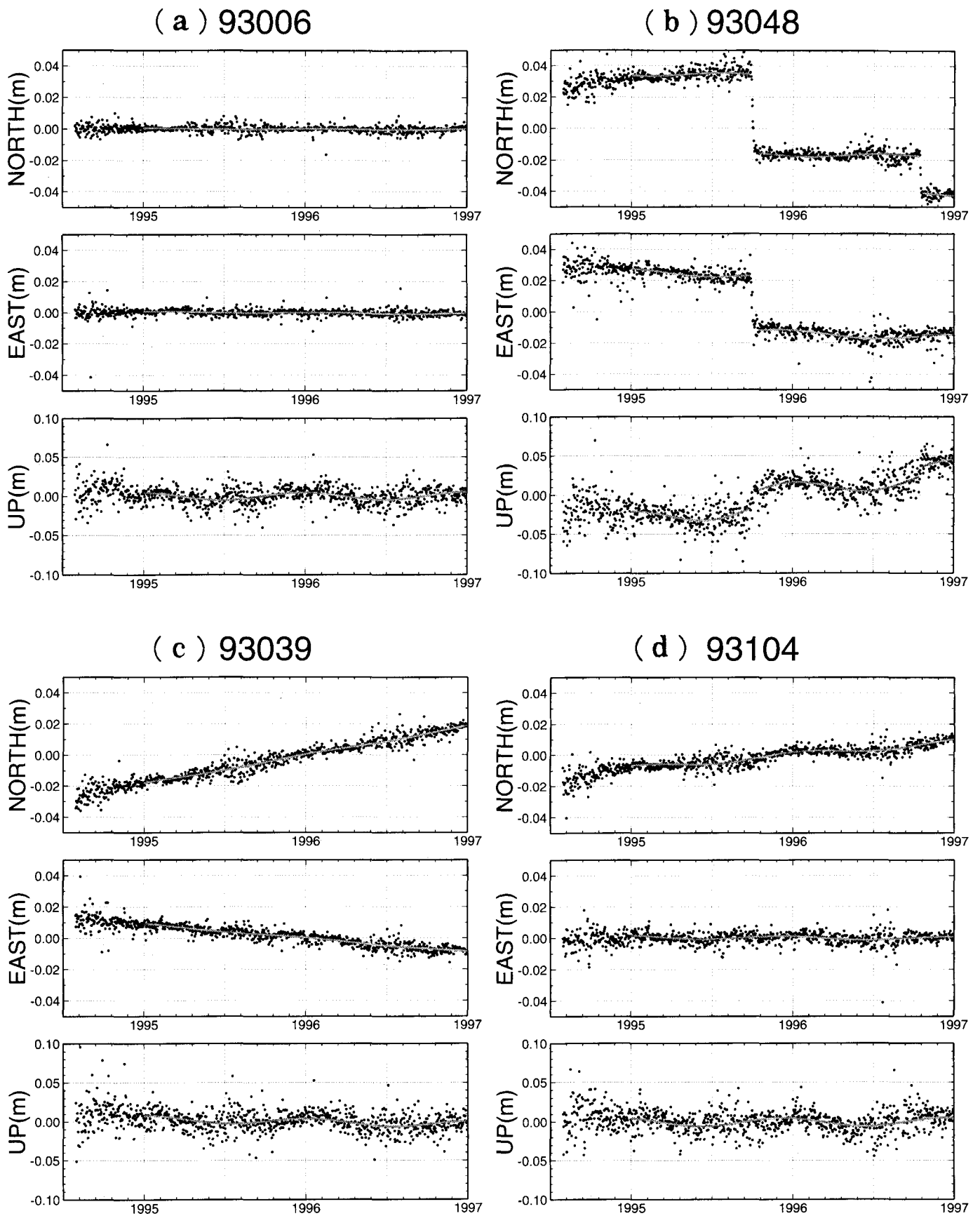


図3 GPS観測点の座標値の時系列データ (a) 観測点93006, (b) 観測点93039, (c) 観測点93048, (d) 観測点93104

COSMOS-G2 VELOCITY 1995 & 1996

Seasonal Components & Coseismic Steps are removed

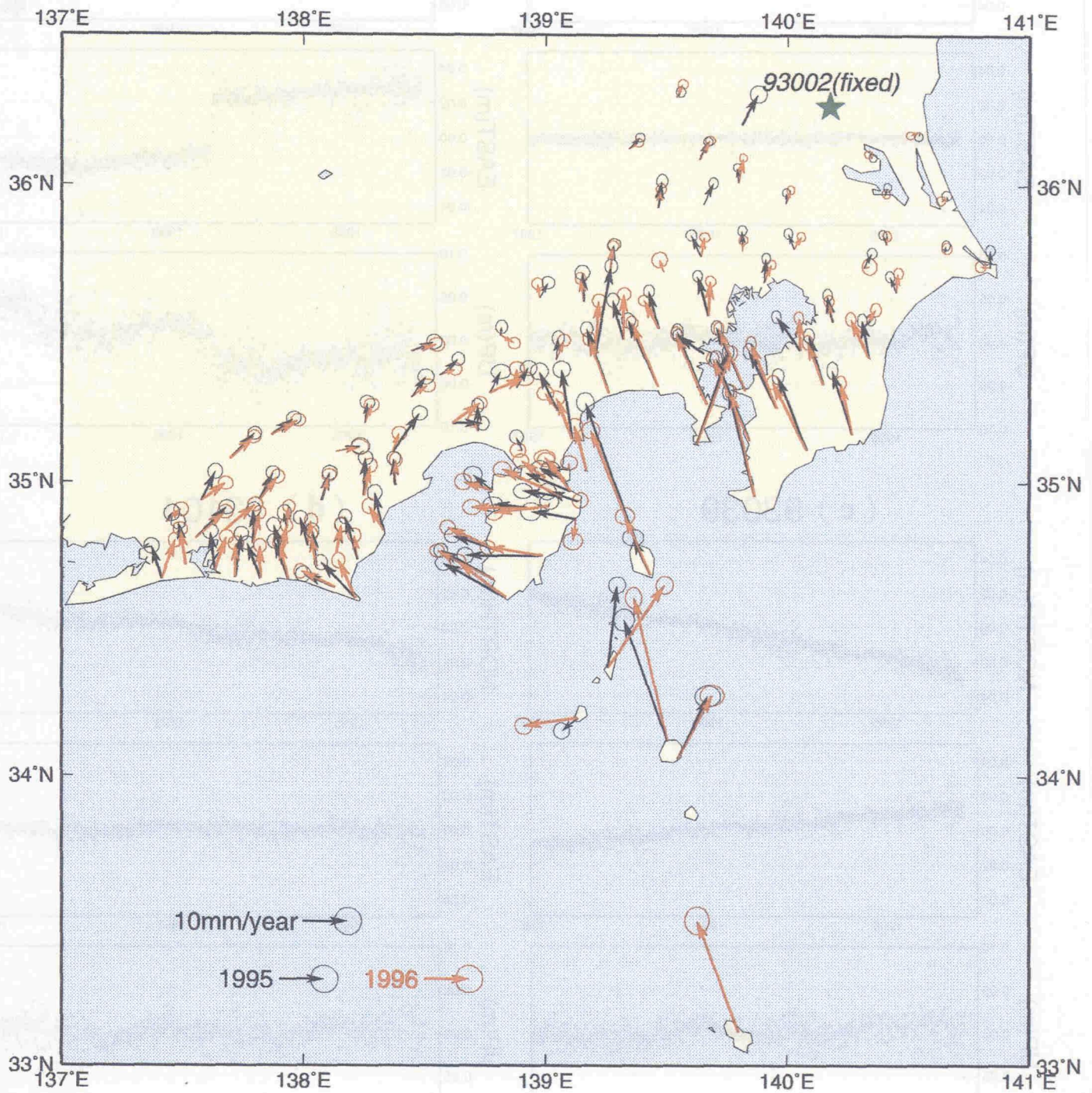


図4 南関東・東海地域の地殻変動速度ベクトル
楕円は推定された速度の誤差(99%信頼区間)を示す。

まるおそれがある。こうした季節変動は、対流圏遅延パラメータに対する拘束条件の違いによって生じる場合もあるが、土壌が季節的な含水量の変化で膨張・収縮を繰り返すことでもアンテナピラーに季節的な傾斜変化をもたらす可能性があり、簡単に結論を出すことはできない。この点については6節で再び議論する。

5. 南関東・東海地域の地殻変動速度場

前節で議論した各観測点における座標変化の時系列データから地殻変動速度を推定した。観測点によっては季節的な変動や大きな地震によるステップ状の変化が見られるため、最小二乗法によって各時系列に以下の式を当てはめた。

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + c_n^i \sin(2\pi t) + d_n^i \cos(2\pi t) + \sum_{k=1}^m e_{n,k}^i H(t - t_n^k) \quad (1)$$

ここで $x_n^i(t)$ は第 n 番目の観測点の第 i 成分($i = 1, 2, 3$)の時系列データ、 $a_n^i + b_n^i t$ が直線近似によるトレンドを示し、右辺第3項および第4項は年周変化を、右辺第5項は地震等の影響による m 個のステップを表す。 $H(t)$ はHeaviside関数であり、 t_n^k は観測点 n に影響を及ぼしたイベント k の発生時刻である。 $a_n^i, b_n^i, c_n^i, d_n^i, e_{n,k}^i$ をパラメータとして推定する。GPS観測点の座標に影響を及ぼした地震等として、1995年9月~10月の伊豆半島東方沖群発地震、1995年10月6日の神津島近海の地震、1996年5月の房総半島周辺におけるスローアースクエイク、1996年10月の伊豆半島東方沖群発地震を考慮した。図3には、(1)式による曲線が原データとともに示されている。

こうして推定された各観測点の水平変動速度((1)式中の b_n^i)を図4に示す。1995年と1996年のそれぞれ1年分について求めた速度が分けて示されている。この両者は非常に良く一致しており、地殻変動速度場は、少なくともこの2年間ほぼ定常的であったといえる。より長い時間スケールで見た場合にこうした定常性が保たれるのか、それともプレート運動のゆらぎが見えてくるのかは興味深い問題であるが、そのためにはより長い期間のデータを用いて議論することが必要であり、今後のデータの蓄積に期待したい。

図4に示された水平速度分布について、テクトニックな観点から若干のコメントを記す。まず関東地方については、房総半島南部から神奈川県にかけて北北西向き、最大で2 cm/年を超す変位が観測されている一方で、東京湾以北では地殻変動が大変小さい。南側の大きな変動は、相模湾から関東地方の下へと沈み込んでいるフィリピン海プレートによって陸側プレートが引きずり込まれている、と解釈することができる。この変動が大きな地域は、1923年の関東地震(M7.9)の際に大きな地殻変動が観測された地域ともほぼ一致する。次の関東地震

へ向けて地殻内部に歪みを蓄積しつつある様子を、こうして窺い知ることができる。

東京湾以北については、沈み込んだプレートがある程度深くなると陸側との相互作用が弱くなるため、または関東地方を厚く覆う堆積層の弾性定数が小さいために地表で観測される変位が小さくなってしまい、という二つの解釈が可能である。おそらくは両者の影響が混在しているものと推測されるが、後者のように地表付近の影響だとすると、地下深部における歪みの蓄積を地表の観測によって精密監視することが原理的に困難となってしまう。関東平野は直下型地震の危険性が指摘されている場所であり、各種の観測網も良く整備されているが、今後は地下深部における観測を中心に高度な観測手法の開発に努めなければならない。

伊豆半島および伊豆諸島は、COSMOS-G2において最も変動の大きな地域である。1980年代に噴火した大島と三宅島には、それぞれ島の北部と南部に2ヶ所の観測点が設置された(現在はそれぞれ島内4ヶ所ずつに拡充されている)が、いずれの場合にも、北側と南側の観測点の速度が有意に異なっている。これらの速度ベクトルは、大島および三宅島がフィリピン海プレートの一部として北北西向きに運動する上に、それぞれの島の火山における地下からのマグマの貫入に起因する膨張運動が足し合わされている、と解釈される。新島、神津島は近年地震活動が活発な地域で、1995年10月には神津島近海でM5.6の地震が発生し、神津島で約3 cmの変位を生じた。図4を見る限りでは、新島、神津島の2観測点はフィリピン海プレートの運動方向と異なる向きに運動している。この2島もまた火山島であるため、大島や三宅島のような島の内部変形を見ている可能性はあるが、活発な地震活動に現れているように、この周辺ではフィリピン海プレートがもはや剛体的な振る舞いをせず、プレート内部に亀裂が走って複雑な地殻活動が進行していると考ええることも可能であろう。

伊豆半島は従来フィリピン海プレートの一部と考えられてきたが、図4を見る限りでは、伊豆半島内部の観測点が殆ど西ないし西北西向きの速度ベクトルを持っており、フィリピン海プレートの一部として期待される速度から大きくかけ離れている。したがって、このGPSによる結果を見る限り、伊豆半島はフィリピン海プレートから切り離し、独立のブロックとして扱うべきである。

東海地方の速度ベクトルは、遠州灘に沿った海岸付近で北北西ないし北向き、内陸へ入るにしたがって次第に時計回りに回転して北東向きとなる。この速度ベクトルは主として二つの異なる要因で説明できる。一つは、固定点である八郷が属するオホーツクプレートと東海地方が属するプレートとの間の相対運動である。西南日本はユーラシアプレートの一部であると考えられてきたが、最近ではアムールプレートとして極東地域を区別する考えも提唱されている(Zonenshain and Savostin,

1981)。いずれにしても、糸魚川・静岡構造線あたりを境にして本州は2つのプレートに分かれるという考えは今日では主流となっており、COSMOS-G 2のベクトルからも、特に内陸部分のベクトルから、そうした傾向が読み取れる。東海地方の沿岸部のベクトルがプレート運動から反時計回りに回転した北ないし北北西の向きを持つのは、プレート運動に加えて、駿河トラフから沈み込む伊豆半島ブロックおよびフィリピン海プレートとの間の相互作用によって北西方向へ引きずられる動きがあるためであり、これがこの地域の速度ベクトルを決定している2つ目の要因である。プレート間相互作用の大きさは主として沈み込んだプレートの深さに依存して変化し、それがプレート運動と足し合わされることにより、東海地方で見られるような速度ベクトルの空間的な変化が生じていると理解される。

6. 年周変化とその成因

前節において(1)式を用いて地殻水平変動速度を推定する際に、各観測点における各座標成分の年周変化を表すパラメータも推定した。東西および南北方向の年周変化は、それぞれ異なる振幅と位相を持つ周期1年の単振動として表されているので、両者を2次元的に合成すると、年周変化分による変位の軌道が楕円で表現される。すなわち、各観測点は定常的な地殻変動に加えて、1年の周期を持つ楕円軌道に沿って動いていることになる。図5はそうした楕円軌道のみを全観測点について表示したものである。図5を見ると、関東地方においては年周変化の振幅が小さく、方向も観測点毎にばらばらであるのに対し、東海地方においては、殆どの観測点において北東-南西方向の振動が卓越し、振幅も最大で5mm程度になる。季節変化が地盤やピラーの膨張・伸縮によ

て生じているのならば、関東地方と東海地方でこのような系統的な差が生じることは考えにくく、また年周変化の振幅や方向もばらばらになるはずである。むしろ、これらの年周変化は対流圏遅延パラメータに対する拘束条件が強すぎる場合に見られた変化と同じ傾向にあり、この最終結果においてもそうした影響を取りきれていないことが示唆される。

このように年周変化分が無視できないため、3ヶ月や6ヶ月といった1年に満たない短い期間のデータを基に地殻変動を論じることは適当でない。現在運用されている全国観測網についても、年周変化の大きさを見積もることは重要な課題であり、その大きさ次第では短期間のデータを用いた議論を慎むべきである。

こうした見かけ上の年周変化が生じるのを防ぐためには、対流圏遅延パラメータの正確な見積もりが重要となるが、その際には大気中の水蒸気量の変化が互いに独立とみなせる程度十分離れた2点の基線解析を行うことが必要である。COSMOS-G 2の解析においては、基本的に最短の基線をつないで観測網を構成したため、地殻変動による座標変化と対流圏遅延量の変化をデータから区別することが難しくなっている。こうした困難を解決する一つの方法として、グローバルな解析で位置と速度が決定されているIGS観測点を複数個解析に組み込んで、IGS観測点の座標値をグローバル解析で決定された値に強く拘束しながら他のローカルな観測点の座標を推定する方法が考えられる。こうした方法を用いれば図5に見られるような年周的变化は生じにくい。1996年4月以降の全国観測網の解析は、基本的にCOSMOS-G 2と同様な1点を固定する方法で行われているが、観測網全体を取り囲む形で複数のIGS観測点を組み込んだ解析を検討すべきであろう。対流圏遅延パラメータの推定に関しては、最近のいわゆるGPS気象学によって本質的な改良が見込まれるほか、解析ソフトウェアも日進月歩であり、近い将来にはより良い解析手法が開発されるものと期待できる。

7. 観測局の問題点

COSMOS-G 2の観測点112個所のうち、今回解析した期間内にピラーの傾動その他の要因によって明らかに異常な変動が観測されたところは、93013(埼玉県大宮市)、93014(茨城県利根町)、93032(神奈川県横浜市)、93040(神奈川県三浦市)、93046(静岡県大仁町)、93050(静岡県引佐町)、92110(茨城県つくば市)の7ヶ所で、この他にも周囲の観測点と異なる挙動を示している点や振幅が2cm近い季節変動を持つ場所も見受けられる。また、93003(茨城県三和町)や、93019(東京都小金井市)、93077(静岡県清水市)などの観測点においては、データは一見正常に取得されているものの、サイクルスリップが多過ぎるなどの理由で精密解析が行えないことが多かった。これらの観測点では何らかの電波障害が生

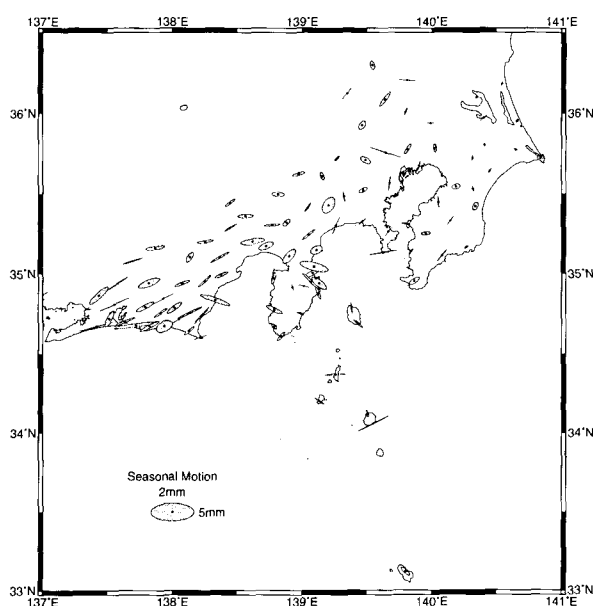


図5 各観測点における年周運動の軌道

じたものと推定される。以上のような異常点が生じる事故率は全体の10%を超えている。こうした異常点が生じる原因としては、アンテナピラーの構造的な不安定性、周辺の軟弱地盤や地下水位変動の影響、近隣の工事等による人為的影響、電波障害、受信機の故障など多くの要因が考えられるが、各観測点について周囲の状況等を調査すれば、その異常が何に由来するのかを推定することは比較的容易であろうと考えられる。以下、代表的と思われる要因について、その問題点と対策について考察する。

そもそもCOSMOS-G 2を始めとする国土地理院のGPS観測点は、アンテナを基盤岩に固定することをせず、表層の土壌に穴を掘ってコンクリートの土台とともにピラーを埋めるだけの構造になっている。そのため、軟弱地盤の影響によるピラーの傾動は、堆積層が2~3 kmと厚い関東平野だけでなく、全国の殆どすべての観測点に現れても不思議ではない。ましてや、日本は乾季と雨季のはっきりした地域であり、含まれる水分の量の違いによって、土壌が季節的に収縮・膨張すると予想される。こうした収縮・膨張は毎年の降水量などの気候条件によって変化すると考えられ、単純な季節調整モデルで補正を施すのにも限界がある。従って、ピラーを建設する際に、可能などころでは基盤岩に固定する、それが不可能などころでは軟弱地盤を想定してデザインを工夫する等の配慮が是非とも必要である。こうした観測点の不安定な動きに関しては、米国カリフォルニア州パークフィールドでサンアンドレアス断層沿いの変形を二色レーザーを用いて測距観測したデータの詳細な解析例があり (Langbein and Johnson, 1997), 観測点の変位に無視できないランダムウォーク成分があるために観測機器の精度がいくら高くても変動速度を正確に見積もれないことが報告されている。また、南カリフォルニアのロサンゼルスを中心とした地域では、SCIGN (Southern California Integrated GPS Network) と呼ばれるGPSの連続観測網を整備中で、250の観測点が1998年中に設置される予定であるが、アンテナピラーの安定を保つために、デザインや施工の面で多くの工夫がなされているほか、観測点の選定方法についても詳細なガイドラインが示されている (たとえばHudnut, 1996)。今後のGPS観測網整備においては、こうした研究成果等を参考にしていくことも重要であろう。

一方で、日本全国にはすでに約900の観測点が配置されて毎日観測が行われているので、このデータも有効に活用して、得られるだけの情報をそこから得るように努めなければいけない。Segall (1997) は、テクトニックなシグナルは多数の観測点に同時に現れて互いに相関を持つのに対し、観測局の不安定性に由来する動きはランダムウォーク的で互いに相関を持たない、という性質を利用し、GPS観測網のデータをネットワークフィルターと呼ばれる方法で解析し、テクトニックなシグナル

のみを取り出す方法を提唱している。こうした解析法は国土地理院の解析においても今後検討していく必要があるだろう。

電波障害に関しては、選定の段階でGPS受信機を使った試験観測をしておけば概ねその地点における電波の受信状態は把握できるはずである。単にデータ受信を受信機の画面で確認するだけでなく、データを持ち帰って解析してみることも大切である。L 1, L 2 の2周波のうち片方が受信できなかったり、サイクルスリップが多数生じている場合には精密な解析には支障を来すので、そうした場所は避けた方が無難である。選点作業では、本来、簡単なボーリング等も行なって、地盤の安定度や地下水の湧出具合を調べるべきであるが、あまりに多数の選点を短期間に集中して行った特殊事情のために、そうした配慮が不十分であった可能性は高い。パイロット事業的な性格のあったCOSMOS-G 2の観測におけるこうした結果を踏まえて、今後はピラーの安定性に気を配り、より丁寧な選点に努めていくことが必要であろう。全国観測網の整備はいまだ途上にあり、今後の新観測点整備に際しては、慎重に慎重を重ねた手続きが望まれる。

8. 終わりに

国土地理院のGPS連続観測網は測距・測角による旧来の方法による測量に置き換わるものとして整備が進められている。確かに、GPSによって達成される精度はこれまでの測量をはるかに凌ぐものがあり、わずか2, 3年の観測で日本列島の変形に関する新たな知見が次々と得られている。今後も観測点の高密度化や解析手法の高度化によって新たな成果が数多く得られるものと期待される。一方で、GPS観測にはまだ開発途上の要素も多く、データ処理や解釈は慎重に行っていかなければならない。現在は世界中を探しても、国土地理院のものに匹敵するGPS観測網は見当たらないゆえ、新たな観測技術や解析方法を試す場として、また興味深いテクトニックな変形を観測できる道具として、世界中から大きな関心を寄せられている。この機会に、諸外国の経験・知識を積極的に取り入れて、今後100年間の測地測量を担い得るような堅固な観測網が構築されることを願って止まない。そうすることによって、世界と結合された日本の測地網の構築が現実のものとなり、地震・テクトニクス等の研究にも多大なる貢献ができるであろう。

謝辞

地殻調査部の今給黎哲郎観測解析課長には、原稿を読んで頂き、ご意見を頂いた。ベルニーズによる解析に関しては、UNAVCOのChristian Rocken博士、James Johnson氏、ベルン大学のMarkus Rothacher博士に色々と教えて頂いた。また、解析作業は真野宏邦氏に手伝って頂いた。COSMOS-G 2の観測網整備および運用には岩田悦郎、阿部馨、上村和彦、木村勲の各氏が中心

的に従事した。以上の方々に深く感謝いたします。ベル
ニーズの導入は科学技術振興調整費による「首都圏直下
の地震予知手法の高度化に関する研究」の一部として行
われた。

参 考 文 献

- Heki, K., S. Miyazaki and H. Tsuji, Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, *Nature*, **386**, 595-598, 1997.
- Hudnut, K. W., The fixed-mount rock pin: site selection, design and installation, Internet document (<http://www-socal.wr.usgs.gov/scign/hudnut/rock#pin.html>), 1996.
- 飯村友三郎・小林勝博・森下一, 全国GPS連続観測システムの運用, 国土地理院時報, **82**, 1-5, 1995.
- 飯村友三郎・宮崎真一・佐々木正博, 高密度電子基準点網の構築, 国土地理院時報, **87**, 37-49, 1997.
- 岩田悦郎, GPS連続観測網による南関東・東海地域の地殻変動監視, 国土地理院時報, **81**, 51-60, 1994.
- Langbein, J. and H. Johnson, Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation, *J. Geophys. Res.*, **102**, 591-603, 1997.
- 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, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **42**, 27-41, 1996.
- Miyazaki, S., T. Saito, M. Sasaki, Y. Hatanaka and Y. Iimura, Expansion of GSI's nationwide GPS array, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **43**, 23-34, 1997.
- Rothacher, M. and L. Mervart (Ed.), Bernese GPS software version 4.0, *Astronomical Institute, University of Berne*, 1996.
- 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, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, 105-118, 1995.
- Sagiya, T., Anomalous transients in crustal movements of the Boso Peninsula, Japan—Is it a slow earthquake?—, *Eos Trans. AGU*, **78** (17), Spring Meet. Suppl., S214, 1997.
- Segall, P., Detection of fault slip transients from geodetic data: The network inversion filter, *Eos Trans. AGU*, **78** (17), Spring Meet. Suppl., S214, 1997.
- Tsuji, H., Y. Hatanaka, T. Sagiya and M. Hashimoto, Coseismic crustal deformation from the 1994 Hokkaido-Toho-Oki earthquake monitored by a nationwide continuous GPS array in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1669-1672, 1995.
- Zonenshain, L. P. and L. A. Savostin, Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia, *Tectonophysics*, **76**, 1-45, 1981.