

ボアホール歪計で観測された非定期的変化のGPSによる検証： 産業技術総合研究所地質調査総合センター安富観測点での事例

大谷 竜¹・北川有一¹・小泉尚嗣¹・松本則夫¹

Ryu Ohtani, Yuichi Kitagawa, Naoji Koizumi, and Norio Matsumoto (2003) Verification of a non-secular change in a borehole strainmeter data using GPS: A case study of the Yasutomi station of the Geological Survey of Japan, AIST. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 54(5/6), p.213 - 220, 7 figs.

Abstract: GPS-derived station coordinate variations around the Geological Survey of Japan (GSJ)'s Yasutomi station nearby the Yamazaki fault, southwestern Japan, were investigated to see if changes, corresponding to a non-secular strain anomaly from April in 2002 observed through a nearby borehole strainmeter, could be detected. An irregular coordinate change was found for that period at the Yasutomi GPS station, but not at the surrounding GPS stations of the Geographical Survey Institute's permanent GPS network (GEONET), which could imply a local aseismic slip along the Yasutomi fault. But due to unknown seasonal and semi-seasonal variations of the Yasutomi station, it is difficult to decide if the change was attributable to true crustal deformation.

Keywords: permanent GPS station, non-secular strain change, crustal deformation, site coordinate, seasonal variation

要 旨

産業技術総合研究所地質調査総合センター(旧地質調査所)の安富観測点(兵庫県東粟郡安富町)におけるボアホール歪計に2002年4月より非定期的な歪変化が観測された。安富観測点に併設されているGPS局には、同時期に東西方向への定常的な変位が鈍化している傾向が見られる。一方周囲にある国土地理院のGPS連続観測システム(GEONET)の観測局にはそうした傾向は見られない。これらの結果から、安富GPS局でみられた変動は、山崎断層沿いにおける局地的なゆっくり地震、あるいはクリープ等の非地震性断層すべりが発生したためだと解釈できる。しかしながらこれが真の地殻変動を反映したものであるかどうかは、GPS座標値に重量している季節変動等のため、分らない。

1 はじめに

近年、GPSや歪計等により、大きな地震を伴うことなく、数日ないし数ヶ月以上かけてゆっくりと生じる「非地震性断層すべり」に伴う地殻変動が多数検出できるようになってきた(例えば Heki, *et al.*, 1997; Ozawa *et al.*, 2002)。非地震性断層すべりは、大地震の発生に密接に関連していると考えられている(Lio *et al.*, 2002)。そのため、その詳細の解明は、地震発生過程の研究において極めて重要である。日本における非地震性断層すべりはこれまで海溝沿いで発生しているものが多く検出されているのに対して、内陸に発達する断層においてはその報告例は少ない。多田(1998)は、跡津川断層系において、辺長測量のデータにゆっくりと

した変位が見られることを報告している。近年、平原他(2003)は、跡津川断層系周辺にGPSを稠密に展開し、断層周辺のローカルな変位の空間分布を検出することで、断層のクリープ運動の検出の試みを行っている。また、糸魚川・静岡構造線や長町・利府断層沿い、四国の中央構造線沿いといった内陸の断層沿いに稠密にGPSを展開し、地殻下部で発生していると考えられるゆっくりとしたすべりを検出する試みも多数行われている(例えば、Nishimura *et al.* (2001), Sagiya *et al.* (2002), Tabei *et al.* (2002))。このように、GPSは連続的に安定して観測点の変位を測定することが可能なため、非地震性断層すべりのプロセスの解明において、大きな期待が寄せられている。

産業技術総合研究所(以降、単に産総研と呼ぶ)では、兵庫県東粟郡安富町の山崎断層系安富断層の北方近傍(200m以内)に安富観測点を設置し(第1図)地下水、石井式ボアホール歪計による地殻歪、及び併設されたGPS等による観測を1998年より継続している(小泉他, 1999; 佃他, 2000; 北川他, 2003)。これらの観測の主な目的は、非地震性断層すべりも含めた、山崎断層系において発生する地震前後の地殻変動を検出し、地下水と地殻活動との関係を解明することである。

2002年4月頃から、安富観測点のボアホール歪計において、これまでの定常的なトレンドとは異なる変化が生じ、6月5日頃から急激な縮み成分が観測された。その後、8月中旬には歪測定の内の一成分が2002年6月以前と同じ伸びの傾向に戻る等、この変化は徐々に治まりつつある。その間の累積の歪量は 10^{-6} にも及ぶ(北川他, 2003)。もしこれが山崎断層の非地震性断層すべりによるものであれば、我が国の

¹地球科学情報研究部門(Institute of Geoscience, GSJ)

内陸断層において 大きな地震を伴わないで数ヶ月といった期間で生じた変動としてははじめての検出例となり、内陸断層における非地震性断層すべりの研究の上で重要な情報を与えるものである。安富観測点近傍では京都大学防災研究所等により独立な地殻変動観測が行われており (Watanabe, 1991; 藤森他, 1996), 更に近傍には、国土地理院のGPS連続観測システム(GEONET)によるGPS観測局が数点設置されている。これらの観測で、この歪変化に対応している変動が捉えられたのであれば、その地球物理学的プロセスを解明する上で重要な情報を得られることが期待できる。本報告では、ポアホール歪計に見られた変化に対応する変動が産総研や周囲のGEONETのGPSでも見られるかどうか、主に測地学的観点から調査を行ったので報告する。なお、ポアホール歪計で観測された変化については、北川他(2003)に報告されているので参照されたい。

2. 安富観測点におけるGPS連続観測と解析

産総研の安富観測点でのGPS観測は、地下水観測井や歪観測点から数mの距離に併設された、高さ5mのピラー上に設置されたAllen Osborne Associates社製のチョークリング付きDorne-Margolinアンテナと観測小屋内に収納されたTurboRogue受信機SNR-8000によって行われている。安富GPS局はすぐ南に山岳をのぞみ、そのために視界が遮られていて、GPSの観測条件としては必ずしも良いとは言えない。実際、一日当りにGPS衛星から受信する観測データ量も、他の産総研のGPS観測局に比べて平均して少ない。

こうして得られたGPSデータは、他の産総研GPS局とともにいわゆるネットワーク解析がなされ、各局について一日一点の座標値が自動解析で推定されている。自動解析においては、アメリカ航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration)ジェット推進研究所(Jet Propulsion Laboratory(JPL))で開発されたGIPSY-OASIS II 解析ソフトウェアパッケージが使用されている(Webb and Zumberge, 1993)。なお本解析では、整数値バイアスを解いていない座標推定解を用いている。詳細は大谷他(2003)を参照されたい。使用したデータは、1998年3月1日から2002年9月28日までである。

3. 安富GPS局の座標値に見られる変動

自動解析で得られた安富GPS局の座標値変動を第2図に示す。それぞれ、北、東、上向きが正である(以下、全てのGPS座標値変動の図について同じ)。GPSで使用される座標系はITRF(International Terrestrial Reference Frame)もしくはそれに準ずる座標系に準拠している。縦線は、衛星の軌道等の層に使われている基準座標系が変更された時を示している。これに伴い、いくつかのとび(ギャッ



第1図 (上) 安富GPS局(図中で)及び基線を取るのに使用されたつくばGPS局(図中で)の位置 (詳しくは本文参照)

(下) 安富GPS局(YSTM 図中で)と比較に用いた周囲のGEONET局(図中で)陸の実線は県境を、薄線は主要断層を示す。主要断層の位置はHyperDPRImap(<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~katao/macsoft/DPRImap-man/DPRImapManual.html>)による。

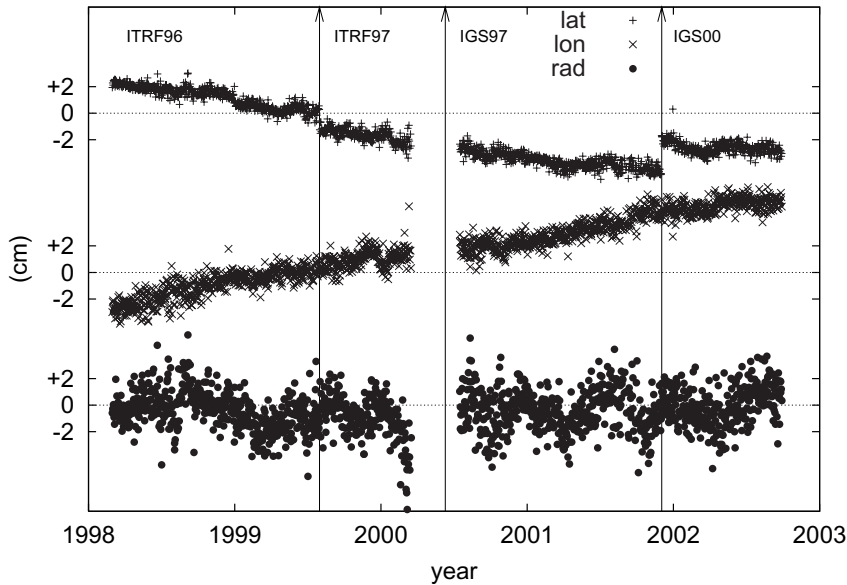
Fig.1 (up) Location of the Yasutomi GPS station (indicated as) and the Tsukuba GPS station (indicated as) used to form a baseline.

(bottom) Location of the Yasutomi GPS station (YSTM, indicated as) and the surrounding GEONET GPS stations (indicated as). Solid and thin lines over land show the boundary of prefectures and major faults after HyperDPRImap (<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~katao/macsoft/DPRImap-man/DPRImapManual.html>), respectively.

プ)が生じているが、これは実際の地殻変動によるものではない。図において、水平成分に見られる定常的なトレンド成分は、アムールプレートの運動による観測局の変位を反映しているものと考えられる(Ohtani *et al.*, 2000)。

こうした定常的な変動に重畳するように、より周期の短い変動が見られている。特に、ポアホール歪計に非定常な歪変化が観測された2002年の春前後に注目すると、経度成分において、それ以前の一年と比べて東進速度が若干鈍化している(即ち相対的に定常成分に対して西向きに動いている)傾向がある。山崎断層は左横ずれ成分を有しており、GPSで観測された定常成分からのずれの向きと整合的

ポアホール歪計で観測された非定期的変化のGPSによる検証：
産業技術総合研究所地質調査総合センター安富観測点での事例(大谷ほか)



第2図 安富GPS局の座標値の変動。座標系の変遷があった時を縦線で、使用されている座標系とともに示している。“lat”、“lon”、“rad”はそれぞれ緯度、経度、鉛直(高さ)成分を表す。北、東、上向きが正。縦軸は各成分の相対的な位置を、横軸は年を示す。

Fig.2 Variation of the Yasutomi GPS station coordinate. Vertical lines indicate the time of changes of the reference frame used in the GPS analysis with its name. “lat”, “lon”, and “rad” indicate latitude, longitude, and radial (height) components. North, east, and up directions are positive. Vertical and horizontal axes indicate relative position of each component and year, respectively.

である。このことは、山崎断層沿いにおける局地的なゆっくり地震、あるいはクリープ等による非地震性断層すべりの発生を示唆しており興味深い。同時期の南北方向の変動についても振幅1cm程度の波打つような特徴的なパターンが見られている。

一方、近傍に位置するGEONETの観測局の変動は、安富局の変動と全体として傾向は似ているが、2002年の春前後に安富局で見られたような変動は明瞭ではない。第3図に、安富局とその周辺のGEONETのGPS局である、950346、950347、950350の3局(観測局の位置は第1図参照)の座標値の変動を示す。GEONETの座標値は、畑中他(2001)の解析による結果を用いた。なお、彼らの解析においては基準座標系は同一のものに統一されているため、その変更に伴うギャップは存在していない。安富局の座標値のばらつきがGEONETに比べて大きい。これは主に、安富局の上空の視界が悪く、衛星電波の受信状態がよくないことや、GEONETの解析では考慮されているマルチパス等に伴う位相特性変動の補正が、産総研の解析ではなされていないためであると考えられる。座標値の変動のトレンドについて見ると、座標系の変更に伴うとびを除けば、全体的には4局とも似たような傾向を示している。即ち、水平成分には先に指摘した、プレート運動に由来すると考えられる定常的トレンドが明瞭に見られる。また、安富局、GEONET局とも季節変動が認められる(これについては後述する)。先に見た、安富局の経度成分が鈍化している傾向にある時期においては、GEONETではむしろ3局ともに経度(東西)成分の変位速度が大きくなっている傾向がある。但し、時系列全体としてみると、これは季節変動の一部分と見なすこともでき、こうした定常的なトレンドや季節変動を除くと、GEONET局は数ヶ月程度の周期では大きくは変動していない。2002年春前後における変動ははっきりしないと言える。

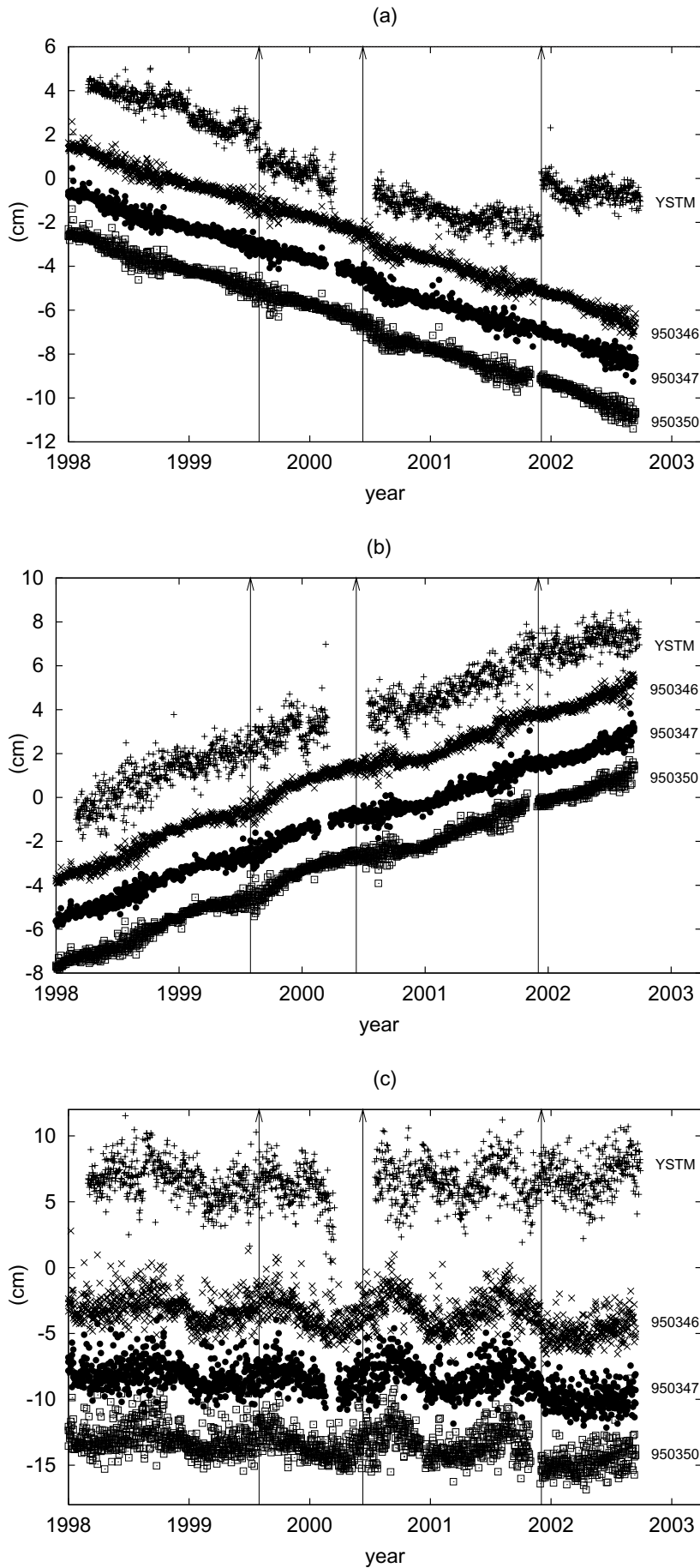
更に詳しく調べるため、GPSの座標値を使って主歪解析

を行った。安富局を囲むように3点のGEONETの座標値データがあるので、安富局を含むこの領域の歪を計算することができ、より直接的にポアホール歪計で観測された変動と比較できる。第3図のGEONETのGPSデータを用いて主歪解析を行った結果を第4図に示す。なお、主歪解析の起点は1998年1月1日である。図から、歪量についても、座標値で見られたような季節変動が見られる。これは、各局の季節変動が剛体的に生じているわけではなく、こうした狭い領域内においてもそのパターンが空間的に変わっていることを意味している。こうした季節変動を除けば、2002年4月以降、ポアホール歪計で見られたような、これまでの傾向に比べて著しく顕著な非定期的な変動は見られない。最大主歪が若干大きくなっているようにも見えるが、それまでの季節変動で変化した範囲を大きく越えるものではない。また、計算された面積歪の変動量も 10^{-6} には及ばず、ポアホール歪計で観測された大きさには到底達しない。

以上のことから、安富局の周囲のGEONET局には、顕著な非定期的な変動は見られないと言える。これは、仮にポアホール歪計で計測された変動が実際の地殻変動によるものとしても、GPS観測値における季節変動を大きく越えてGEONET局に影響を及ぼす程の広がりを持つものではない、ローカルな現象であることが示唆される。

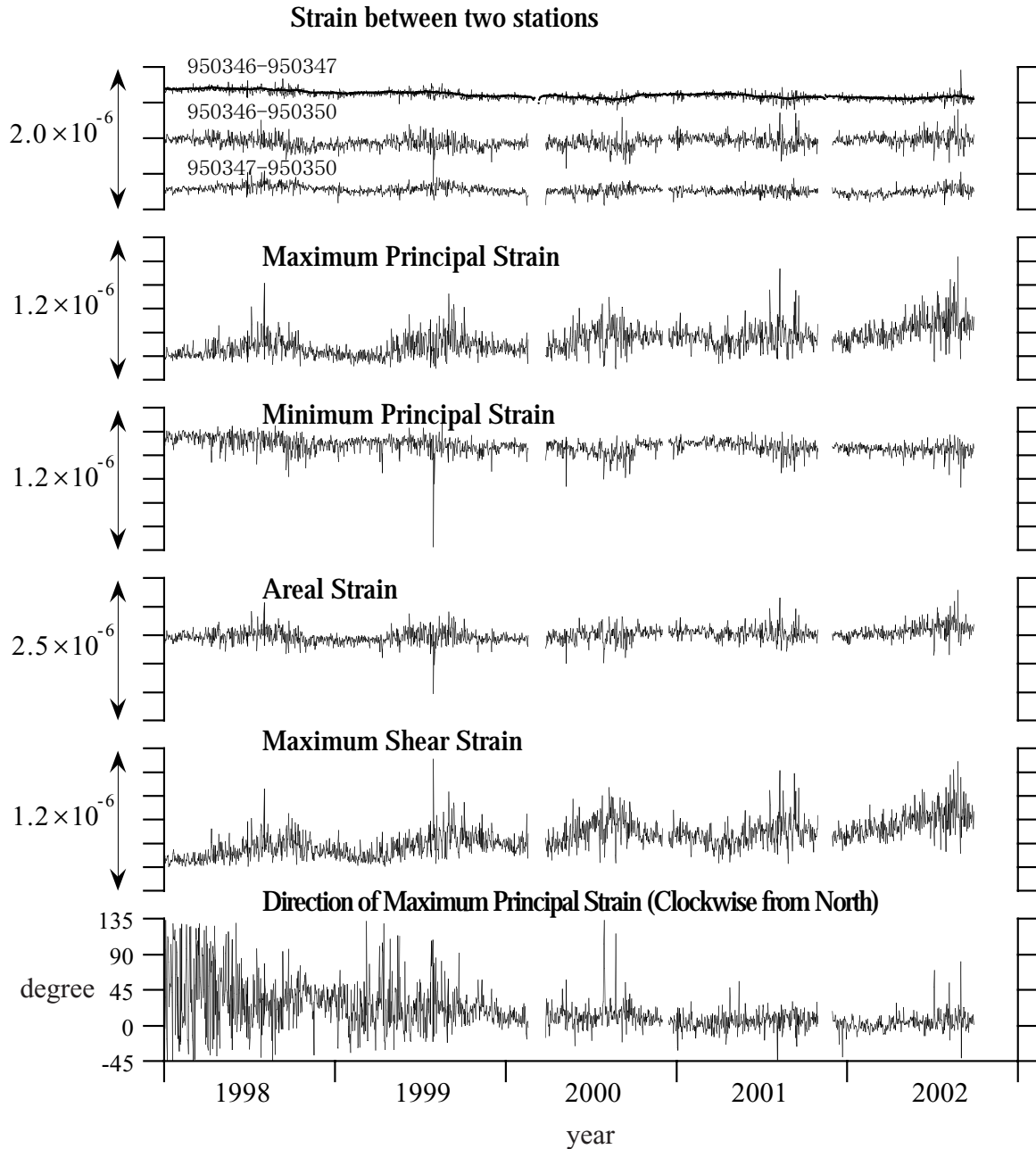
4. 座標値変動の評価

一般に、GPSによる解析においては、衛星軌道等の暦の種類や、どのような解析戦略を採用するかによって推定される座標値が若干異なってくる。本解析においては、全ての観測局を同時に解析する方法(ネットワーク解析)が採用されている。しかしこの手法は、ある観測局に不良データが含まれている場合、その影響が他の観測局の座標値推定にまで影響を与える可能性がある(大谷他、2003)。そこで、



第3図 安富局(YSTM)および周囲のGEONET局(950346, 950347, 950350)の座標値の変動。(a), (b), (c)はそれぞれ緯度, 経度, 鉛直成分を示す。北, 東, 上向きが正。図中の縦線は座標系の変遷があった時を示している。縦軸は各局の相対的な位置を, 横軸は年を示す。

Fig.3 Variations of the coordinate of the Yasutomi GPS station (YSTM) and the surrounding GEONET GPS stations of 950346, 950347, 950350. (a) latitude, (b) longitude, (c) radial (height) components. North, east, and up directions are positive. Vertical lines in the figures indicate the time of changes of the reference frame used in the GPS analysis. Vertical and horizontal axes indicate relative position of each station and year, respectively.



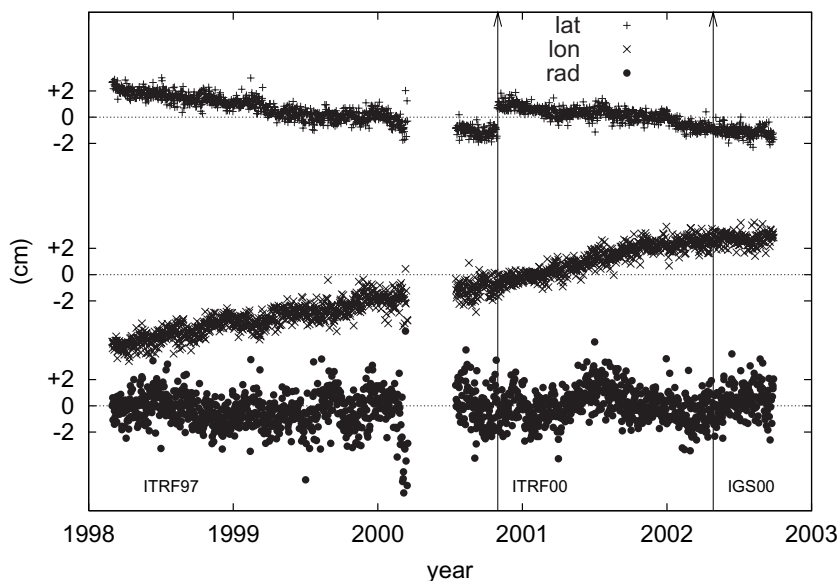
第4図 第3図のGEONETの3局の1日値の座標値データを用いて計算された主歪解析の結果 上から順に、各局間の歪値、最大主歪、最小主歪、面積歪、最大せん断歪、最大主歪の方向(北から時計回り)を示す。主歪解析の起点は1998年1月1日。

Fig.4 Principal strain calculated from the daily coordinate data of the three GEONET stations in Figure 3. The origin of the principal strain analysis is January 1, 1998.

ネットワーク解析の妥当性を評価するため、ネットワーク解析とは独立の解析手法で得られた結果との比較を行った。GIPSY-OASIS IIでは、一点のGPS局のデータだけで解析が可能な、精密単独測位(Precise Point Positioning)と呼ばれる解析が可能である(Zumberge *et al.*, 1997)。精密単独測位は、他の観測局のデータの品質の影響を受けないため、ネットワーク解析の妥当性を評価するために使用できると考えられる。そこで安富局について、解析時に採用するパラメータやモデリング等は定常解析と同じ条件で精

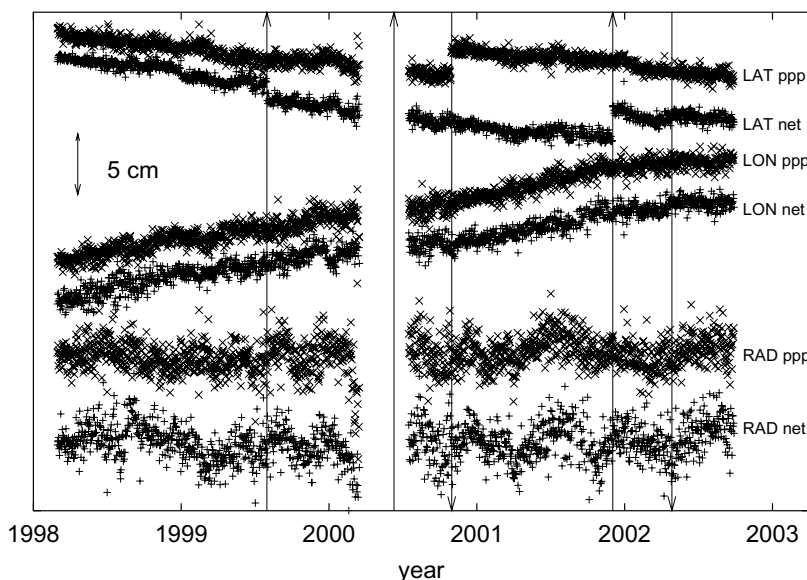
密単独測位手法により解析した結果との比較を行った。但し、衛星等の層としては、過去のデータの利用の制約から、若干異なるタイプのものであるfiducial freeと呼ばれる層を用いた。

精密単独測位による結果を第5図、両者を比較した結果を第6図に示す。精密単独測位解析における基準座標系の変遷は、ネットワーク解析とは時期が異なるために、ギャップの位置が異なっている。この点を除けば、両者の長期的な変動の傾向はよく一致しており、非定期的な変化があった



第5図 精密単独測位解析による安富局の座標値変動。座標系の変遷があった時を縦線で、使用されている座標系とともに示している。“lat”、“lon”、“rad”はそれぞれ緯度、経度、鉛直(高さ)成分を表す。北、東、上向きが正。縦軸は各成分の相対的な位置を示す。

Fig.5 Variation of the Yasutomi GPS station coordinate estimated through the analysis strategy of precise point positioning. Vertical lines indicate the time of changes of the reference frame used in the GPS analysis with its name. “lat”, “lon”, and “rad” indicate latitude, longitude, and radial (height) components. North, east, and up directions are positive. Vertical and horizontal axes indicate relative position of each component and year, respectively.



第6図 精密単独測位(図中で“ppp”)及びネットワーク解析(図中で“net”)から得られた安富局の座標値変動の比較。“LAT”、“LON”、“RAD”はそれぞれ緯度、経度、鉛直(高さ)成分を表す。北、東、上向きが正。ネットワーク解析、精密単独測位解析において座標系の変遷があった時をそれぞれ上矢印、下矢印で示す。縦軸は相対的な位置を、横軸は年を示す。

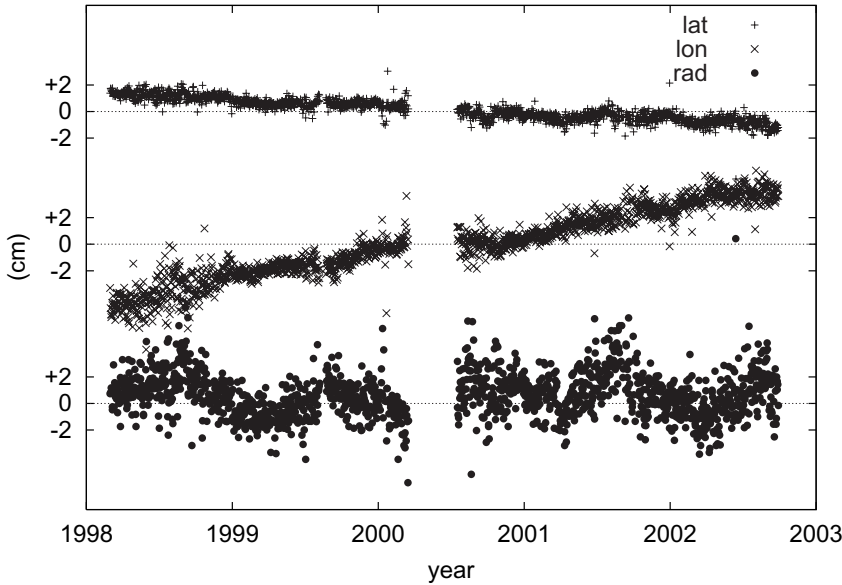
Fig.6 Comparison of the coordinate variations of the Yasutomi GPS station estimated through the strategies of precise point positioning (indicated as “ppp”) and network analysis (indicated as “net”). “LAT”, “LON”, and “RAD” indicate latitude, longitude, and radial (height) components. North, east, and up directions are positive. Vertical arrows indicate the time of changes of the reference frame used in the GPS analyses (upward for network and downward for point positioning). Vertical and horizontal axes indicate relative position of each component and year, respectively.

時期においても両者ともよく似た変動をしていると言える。このことは、この非定期的変化がネットワーク解析による見掛けのものではないことを意味している。

第3図から分かるように、安富局と周囲のGEONET局には水平・鉛直両成分に季節変動が見られる。特に、鉛直成分については顕著に見られ、冬から春にかけて極小に、夏に極大となるような共通の変動をしている。水平成分については鉛直成分に比べて振幅は小さいが、GEONETには認められる。座標系の変遷にともなうギャップや欠測、また座標値のばらつきが大きいために分かりづらいが、安富局でもGEONETの変動と同様の季節変動の傾向はうかがえる。更に、安富局の変動にはGEONET局にはない成分として半年周期の変動がある。特に鉛直成分には著しく、1月頃と7月頃に最大、4月頃と10月頃に最小となるような顕著な変動が見られる。但し、2000年以前では余り明瞭ではない。2002年春前後の安富局の座標値のゆらぎも、こうした季

節変動、もしくは半年変動の一部を構成しているようにも見える。一般に、日本において推定されたGPS座標値に季節変動が見られることは、これまでの多くの研究から指摘されている(例えば、Murakami and Miyazaki, 2001)。これが数ヶ月程度の地殻変動を議論する際、精度の良い議論を妨げているが、その原因ははっきりとは分からない。また、産総研GPSに見られる座標値の半年変動は、使用している受信機が電離層の影響を受けやすいために、2000年以降の太陽活動の活発化に伴う、電離層活動の半年周期の擾乱がGPS解析に影響している可能性が指摘されている(大谷他、2003)。このような変動のために、安富局における、数ヶ月程度のタイムスケールの地殻変動の議論が困難になっている。

ポアホール歪計で観測された非定期的変化のGPSによる検証：
産業技術総合研究所地質調査総合センター安富観測点での事例(大谷ほか)



第7図 つくば局に対する安富局の相対的な変位: "lat", "lon", "rad" はそれぞれ緯度, 経度, 鉛直(高さ)成分の変化を表す。北, 東, 上向きが正。

Fig.7 Relative displacement of the Yasutomi GPS station with respect to the Tsukuba GPS station. "lat", "lon", and "rad" indicate latitude, longitude, and radial (height) components. North, east, and up directions are positive.

こうした変動を軽減させるために,安富局とは別のGPS局を基準として,安富局の相対的な変位を計算した。第2図における座標値の変動は,いわば地球の中心を基準とした変動を示すものだが,別のGPS局との相対的な変位を見る,即ち差を取ることで,両者に共通に含まれている誤差を相殺することができ,座標値推定の精度を上げることができると思われる。特に,上記の電離層の影響はある程度の広がりを持って共通に存在すると考えられるので,両局の差を取ることで,その影響を軽減できることが期待される。また,季節変動成分についても,もし両局間で同じような変動をしていれば,差を取ることで小さくできる可能性がある。第7図は,定常のネットワーク解析で安富局とともに解析されたつくば局に対する,安富局の相対的な位置を示す。定常解析で同時に解析している局としては他に草薙局と豊橋局があるが,これらは2001年頃より始まった東海スローイベント(Ozawa *et al.*, 2002)の影響を受けて非定期的に動いている可能性があり,基準点として適さない。よって基線長はやや長くなるが,地殻変動の影響がより少ないつくば局を選んだ。時系列のギャップが消えているが,これは安富局とつくば局両方に共通に含まれていた座標系の変遷によるギャップが,両者の差を取ることで相殺されたためである。この結果,時系列の連続性が確保されてみやすくなっている。また,共通の誤差源であった電離層の擾乱に伴う半年周期の変動もある程度低減している。この図からも,2002年春以降の,定常的な東進成分の鈍化が分かる。しかしながら同じような鈍化は,2001年の中頃前後や1999年の中頃にも見られ,これらは季節変動の一部を表しているとも言える。これは,広域的に共通な電離層の影響はある程度軽減されたが,季節変動成分については,両者でそのパターンが異なっているために残存しているためであると考えられる。また,経度(南北)成分の変位についてはやや複雑である。つまり,これには季節変動とともに,半年周期の

変動が見えており,電離層による誤差が完全に取り除かれていない可能性がある。2002年春季において変位速度が鈍化しているが,これは半年変動の一部とも見なせる。鉛直成分については,安富局がつくば局に対して,冬から春にかけて沈降し,夏頃に隆起するといった明瞭な季節変動が見られ,季節変動が明確に残っている。このように,つくば局との基線長においても,安富局には重畳している季節変動等による数ヶ月程度の変動が見られるため,ポアホール歪計で見られた非定期的な変化に対応した明瞭な変動があるとは言い難い。

5. まとめ

産業技術総合研究所地質調査総合センターの安富観測点におけるポアホール歪計に,2002年4月より非定期的な歪変化が観測された。併設されているGPSの座標値の水平成分には同時期に東進成分の鈍化等のゆらぎが見られる。しかしながら,原因不明の季節変動等が重畳しておりそうした変動は他の期間にも見られることから,このゆらぎが,ポアホール歪計で観測された歪変化に対応した座標変動であるとは現状では断定し難い。今後,更なるデータの蓄積が待たれるとともに,こうした季節変動等の原因を解明し軽減していく必要がある。

謝辞:安富局の保守管理において,高橋 誠,佐藤 努,大川智子の各氏に貢献頂きました。GEONETのデータは,国土院から提供を受けました。一部の図の作成に,GMT(Generic Mapping Tools)及び片尾浩氏のHyperDPRI mapを使用しました。また改稿の際には,査読者及び編集委員より有益なコメントを頂きました。ここに記して感謝します。

文 献

- 藤森邦夫・山本剛靖・大塚成昭(1996)山崎断層安富基線網における測量結果(1975~1995),京都大学防災研究所年報, **39(B-1)**, 303-309.
- 畑中雄樹・飯塚豊久・沢田正典・山際敦史・菊田有希枝(2001)新解析戦略によるGEONETデータの再解析, **27**, 日本測地学会第96回講演会予稿集.
- Iio Y., Y. Kobayashi and T. Tada (2002) Large earthquakes initiate by the acceleration of slips on the downward extensions of seismogenic faults, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **202**, 337-343.
- Heki, K., Miyazaki, S., and Tsuji, H. (1997) Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, *Nature*, **386**, 595-597.
- 平原和朗・大井陽一・安藤雅孝・細 善信・和田安男・大倉敬宏(2003)跡津川断層の地殻変動・クリープしているか?, *月刊地球* **25**, 59 - 64.
- 北川有一・小泉尚嗣・大谷 竜・渡辺邦彦・板場智史(2003)山崎断層沿いの産業技術総合研究所安富観測点の顕著な地殻歪変化, *地震*, 印刷中.
- 小泉尚嗣・高橋 誠・佃 栄吉・松本則夫(1999)1999年4月17日の山崎断層の地震(M3.9)前後における地下水位・地殻歪の変化, *日本地震学会講演予稿集*, 1999年度秋季大会, P149.
- Murakami, M., and Miyazaki, S. (2001) Periodicity of strain accumulation detected by permanent GPS array: Possible relationship to seasonality of major earthquakes occurrence, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2983-2986.
- Nishimura, T., Sagiya, T., Tada, T., and Miura, S. (2001), High strain rate west of the Nagamachi-Rifu fault, northern Japan, observed by a dense GPS array, in the Proceedings of the International Symposium on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region.
- Ohtani, R., Koizumi, N., Matsumoto, N., and Tsukuda, E. (2000) Preliminary results from permanent GPS array by the Geological Survey of Japan in conjunction with groundwater-level observations, *Earth, Planets and Space*, **52**, 663-668.
- 大谷 竜・松本則夫・小泉尚嗣・高橋 誠・佐藤 努・北川有一・佃 栄吉・佐藤隆司・伊藤久男・桑原保人(2003)産業技術総合研究所地質調査総合センターにおけるGPS連続観測, *地質調査研究報告* **54**, 5/6, 193-212.
- Ozawa S, Murakami, M., Kaidzu, M., Tada, T., Sagiya, T., Hatanaka, Y., Yurai, H., and Nishimura, T. (2002) Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, Central Japan, *Science*, **298** (5595), 1009-1012.
- Sagiya, T., Nishimura, T., Iio, Y. and Tada, T. (2002) Crustal deformation around the northern and central Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, *Earth Planets Space*, **54**, 1059-1063.
- Tabei, T., Hashimoto, M., Miyazaki, S., Hirahara, K., Kimata, F., Matsushima, T., Tanaka, T., Eguchi, Y., Takaya, T., Hosoi, Y., Ohya, F., and Kato, T. (2002) Subsurface structure and faulting of the Median Tectonic Line, southwest Japan inferred from GPS velocity field, *Earth Planets Space*, **54**, 1065-1070.
- 多田 堯(1998)跡津川断層における地殻変動, *月刊地球* **20**, 142-148.
- 佃 栄吉・小泉尚嗣・桑原保人(2000)地震防災対策強化地域及び活断層近傍における地下水等総合観測研究, *地質調査所月報* **51**, 9, 435-445.
- Watanabe, K. (1991) Strain variations of the Yamasaki Fault zone, Southwest Japan, derived from extensometer observations Part 1 - On the long-term strain variations-, *Bulletin of the Disast.Prev.Res.Inst., Kyoto Univ.*, **41**, 29-52.
- Webb, F. H., and Zumbege, J. F. (1993) An introduction to the GIPSY/OASIS-II, *JPL Publ. D-11088*, Jet Propul. Lab., Pasadena, Cal.
- Zumbege, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H. (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, **102**, 5005-5017.

(受付:2003年2月7日;受理:2003年8月5日)