

## 産総研ボアホール歪計で計測された歪変動と GPS 観測との比較

大谷 竜<sup>1,\*</sup>・松本則夫<sup>2</sup>・名和一成<sup>1</sup>・板場智史<sup>2</sup>

Ryu Ohtani, Norio Matsumoto, Kazunari Nawa, Satoshi Itaba (2012) Comparison of borehole strainmeter measurements with GPS: A case study at the stations of the Geological Survey of Japan, AIST. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 63(3/4), p. 93-105, 11 figs.

**Abstract:** We carry out comparison of strain variations measured by borehole strainmeters with GPS-derived strain to investigate the characteristics of the long-term (over the time scale of several months) measurement of strainmeter. We compare the line strain data observed at 7 stations of the AIST with the equivalent strain calculated using the observations of displacement data at the GPS sites surrounding the strainmeter stations. The result shows that there are seasonal variations both in strainmeter and GPS where the amplitudes are consistent each other at some stations, but they are not always in phase. In addition, many stations do not show good agreement between GPS and strainmeter. It is suggested that the strainmeter measurements do not reflect regional crustal deformation but are rather affected by unknown site-specific sources.

**Keywords:** borehole strainmeter, GPS, line strain, long-term stability

### 要 旨

数ヶ月程度のタイムスケールでの歪計の測定の特性を調べるために、産総研のボアホール歪計観測点 7 点における、水平面内の 3 方向の線歪の観測値と、歪計観測点を取り囲む周囲の国土地理院の GPS 連続観測点から計算された値との比較を行った。多くの観測点で、数ヶ月程度の変動として季節変動的な成分が、歪計と GPS 共に認められた。しかしながら、両者の間には必ずしも整合的な対応が見られなかった。その原因として、歪計に含まれる、単純なモデリングでは除去できないドリフト等、観測点固有の起源が考えられる。

### 1. はじめに

過去 10 年以上にわたり、通常の地震時の破壊 (数十秒) に比べ、地震断層面がゆっくり (数日~数年) とすべる「ゆっくり地震」と呼ばれる地殻変動が多数見つかった (Schwartz and Rokosky, 2007)。一般にこうしたゆっくり地震の検出には、ボアホール歪計 (以下、歪計) や GPS 連続観測網が使われている。歪計による観測では、筐体に収納した歪センサーを地下深くに埋設して地中の歪を観測する。その計測分解能は非常に高く、東海地方から四国で見つかったような、ゆっくり地震に伴う

微小な地殻変動の検出に威力を発揮している (小林ほか, 2006; Itaba *et al.*, 2010)。しかしながら、歪計設置後のドリフトの影響等もあり、地球潮汐など数日程度の比較的短期的な地殻変動現象については検出能力が高いものと考えられているが、それより長い、数週間から数ヶ月以上といったタイムスケールを持つ信号に対する歪計の計測特性がよく分かっていないため、その分解能の高さにも関わらず、現在のところは、数日~1 週間程度のタイムスケールの信号の検出に限定された使われ方に留まっている (小林ほか, 2006)。また、ボアホール歪計による観測は、観測機器の設置した近傍の歪を計測していると考えられているが、これがどの程度の拡がりの歪場を代表しているのか不明な点が多い。

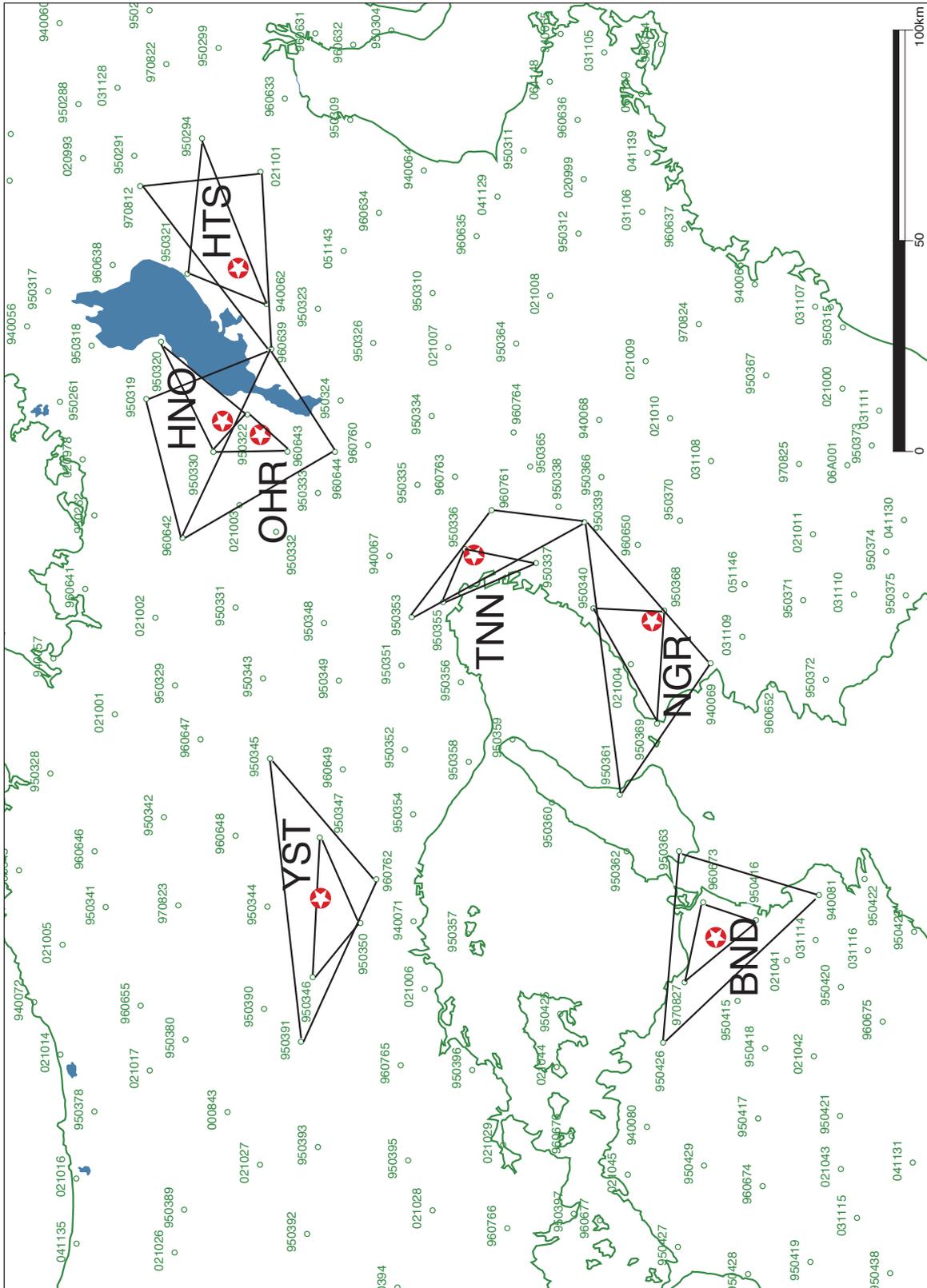
一方 GPS 観測では、衛星から発射された電波を地上に設置した GPS で受信してその変位を測定している。そのため、複数の GPS 観測点から算出される変位場は、その分布に応じた、比較的広域的な地殻変動を反映するものと考えられる (吉川, 2003)。この 15 年の GPS 測地技術の発展、とりわけ、国土地理院によって全国に展開された 1200 点にも及ぶ GPS 連続観測網 (GEONET) によって、地殻変動を連続して高い時空間分解能で捉えられるようになってきた (Sagiya, 2004)。

本報告では、これまで余り系統的な報告がなされていなかった、特に数ヶ月程度のタイムスケールにおける歪

<sup>1</sup> 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

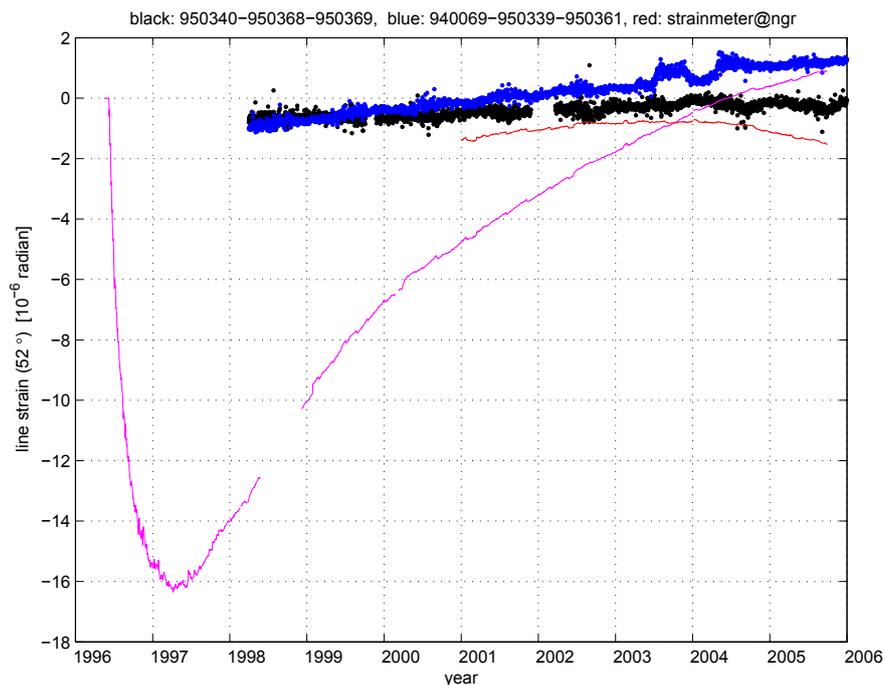
<sup>2</sup> 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center)

\* Corresponding author: R. OHTANI, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: ohtani-ryu@aist.go.jp



第1図 産総研の歪観測点及びGEONETのGPS観測点の分布。歪比較に使用した産総研観測点を星印で、比較に用いたGPS観測点を3点を三角形で囲ってある。

Fig. 1 Distribution of AIST strainmeter (stars) and GEONET GPS stations (open circles with triangles) used in the comparison.



第2図 根来での線歪の時系列処理の例. 線歪の方向はN52°E. 黒点がGPS1の, 青点がGPS2の線歪, 紫線がポアホール歪計によるドリフト成分を取り除く前の相対的な計測値, 赤線がドリフト成分(指数関数と直線)をフィットして取り除いた後の相対的な残差線歪.

Fig. 2 An example of pre-processing of line strain time series at the Negoro station. The observation direction of line strain of the strainmeter is N52°E. Black and blue dots are GPS1 and GPS2 line strain, respectively. Purple line shows the strainmeter-measured relative line strain before removing exponential and linear drift components. Red line indicates the relative residual line strain after removing the drift components.

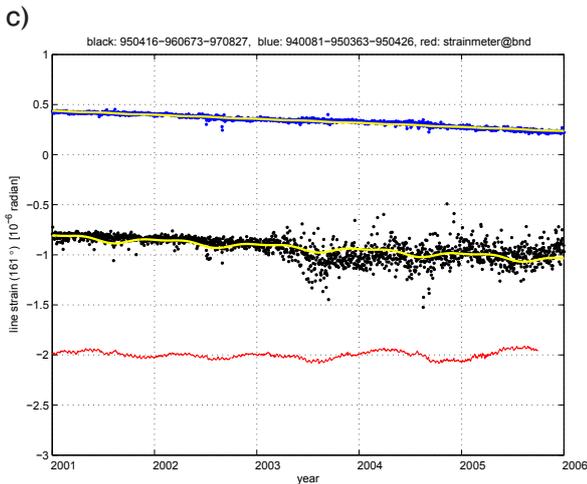
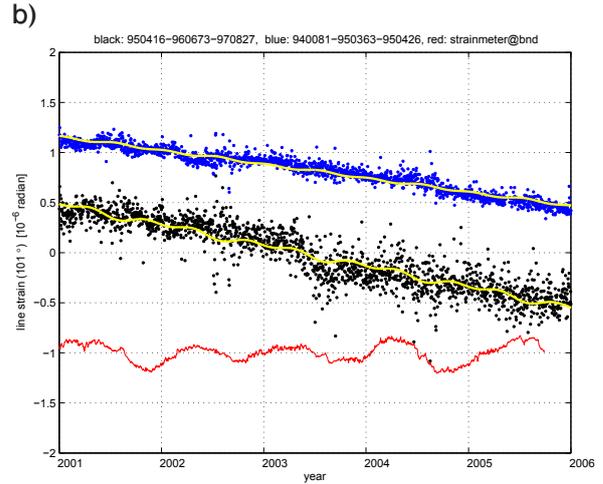
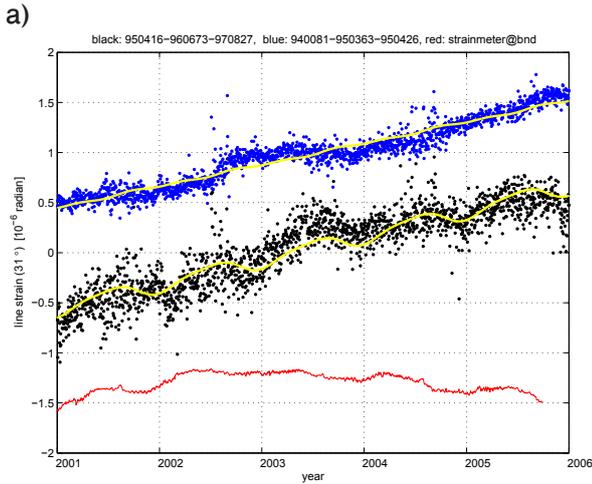
計の特性がどういったものなのかについて記載し, 評価するための調査を行った. 従来, 歪計による計測と, GPS から求められる歪とを比較した例は多くなかった. こうした調査がこれまで余り行われていなかった一因として, 歪計の設置は高価で手間がかかるために展開できる数が少なく, 系統的な調査が難しかったことによる. 例えば, 吉川 (2003) は, 東海地方の GEONET のデータから面積歪を求め, 同地域に設置した気象庁の歪計との比較を行った結果, 相関は見られなかったことを報告している. しかしこれは一つの観測点でしか比較を行って

いなく, 系統的な調査としては十分であるとは言えない. そうした中, 産業技術総合研究所 (以下, 産総研) では, 阪神大震災以来, 複数の歪計観測点を展開し, 連続観測を継続しており (佃, 1998), 歪計の連続観測網の先駆けとして貴重なデータを蓄積してきた. このデータを使うことで, ある程度の数の観測点で, 比較的長い期間に渡った記録を使って, 歪計と GPS との比較ができるようになってきた. そこで本報告では, 近畿地方を中心とする産総研の複数の歪計の記録を, 歪計観測点の周囲の GEONET 観測点から求められた GPS 歪と比較するこ

とで, 特に数ヶ月程度のタイムスケールでの歪計の特性についての情報を得ることを試みた. 同地方では, 1996 年以来複数の歪計による観測を継続していることに加え, ゆっくり地震による大きな影響を受けていないため, 間欠的な地殻変動の影響を受けていない平穏時での記録を調べることができるという利点があり, 中長期での歪計の特性を調べるのに適していると考えられる. 本報告ではこうした調査により, 歪計測における基礎的・基盤的な情報を得ることを目的とする.

## 2. 方法

ポアホール歪計による歪データは, 産業技術総合研究所 (2006) による日値の解析結果を使用した (観測点は第1図の★印). このデータは, 毎日午前6時における観測が日値として使われている. 一般に, ポアホール歪計は設置後, 埋設後の緩和による大きなドリフトが顕著である (第2図参照). そこで, 時系列全体に卓越するこうしたドリフトを取り除くために, 産業技術総合研究所 (2006) は以下のデータ処理を行っている. まず, 観測開



第3図 a) 板東での線歪の時系列。線歪の方向はN31°E。黒点がGPS1の、青点がGPS2の線歪、黄色線がGPS歪をフィットした結果推定された直線トレンド、年周・半年周成分、及び補正されたステップ成分の和、赤線がドリフト成分を取り除いた後のボアホール歪計による相対的な残差線歪。

第3図 b) 上と同じ、但し方向はN101°E。

第3図 c) 上と同じ、但し方向はN161°E。

Fig. 3a) Line strain time series at the Bando station with the direction of N31°E. Black and blue dots are GPS1 and GPS2 line strain, respectively. Yellow line shows the sum of estimated linear trend, annual and semiannual components, and corrected steps. Red line shows the strainmeter-measured line strain after removing the drift components.

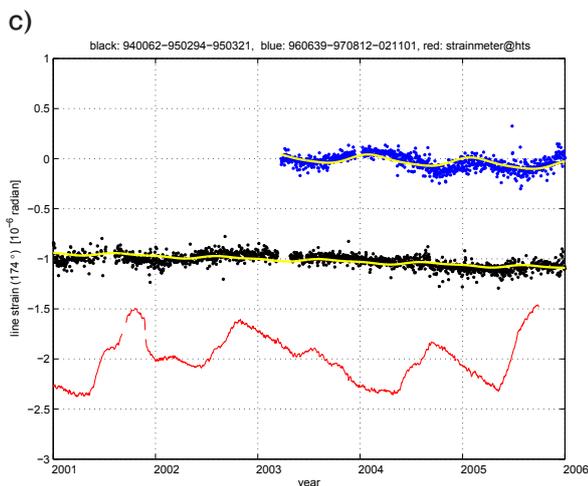
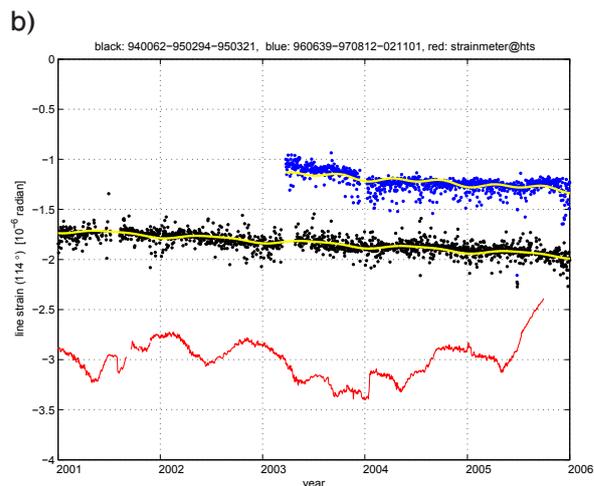
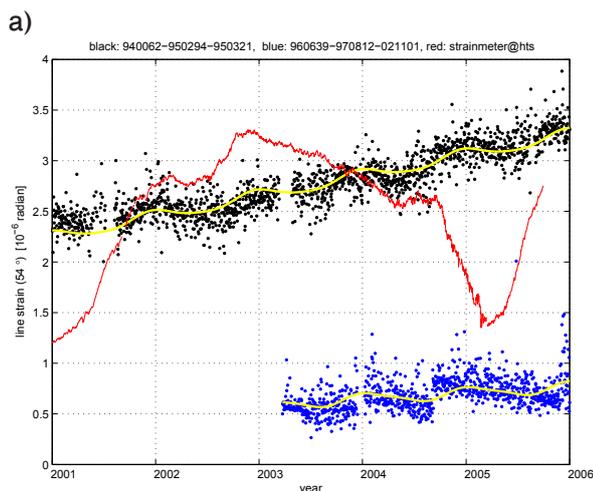
Fig. 3b) Same as above but the direction of N101°E.

Fig. 3c) Same as above but the direction of N161°E.

始直後の急激な変化が落ち着いた後の時系列に対して指数関数をフィッティングし、大きな変動成分を取り除く。しかし指数関数だけでは表しきれないドリフト成分が残るため、これらを取り除くため、更に直線をフィットし、残差時系列が求められる。その際、観測開始直後の初期データには、原因不明の不安定な挙動を示すことがあることが多いため、直線フィットする期間としては、観測開始数年後の、ある程度初期緩和が落ち着いてからのものに限定している。このような処理により、数年といったタイムスケールの信号も同時に取り除かれてしまう恐れがあるが、数ヶ月程度の現象は大きな影響を受けずに保存されると考えられる。第2図は根来観測点での例を示したものである。桃色の線が元々の歪計の日値データ

であり、これに指数関数のフィットと直線フィットをして、残差を計算したものが赤色の線である。GPSから計算された歪は黒丸と青丸の点で示している(後述)。こうして得られた残差時系列の内、数ヶ月程度の変動成分に着目して評価を行った。

GPSによる歪は、GEONETの最新の解析結果であるF3解(中川ほか, 2009)と呼ばれる、24時間の平均的な座標値である日値8年分(1998/4/1 - 2006/3/31)を使用して計算した。まず、F3解の3次元座標から水平面投影成分を計算し、歪計を囲む近傍の3点のGPS点間の地表での基線長を求めた。次に、ある時点での基線長の水平成分を基準として歪値を計算し、主歪計算を行った後、歪計の設置方向に対応する線歪を求めた。今回使用



第4図 a) 秦荘での線歪の時系列. 線歪の方向は N54°E. 黒点が GPS1 の, 青点が GPS2 の線歪, 赤線がドリフト成分を取り除いた後のポアホール歪計による相対的な残差線歪.

第4図 b) 上と同じ, 但し方向は N114°E.

第4図 c) 上と同じ, 但し方向は N174°E.

Fig. 4a) Same as Fig. 3a) but at the Hatasho station with the direction of N54°E.

Fig. 4b) Same as above but the direction of N114°E.

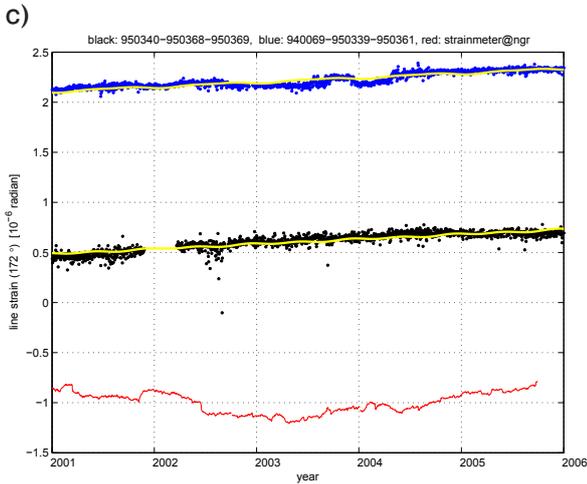
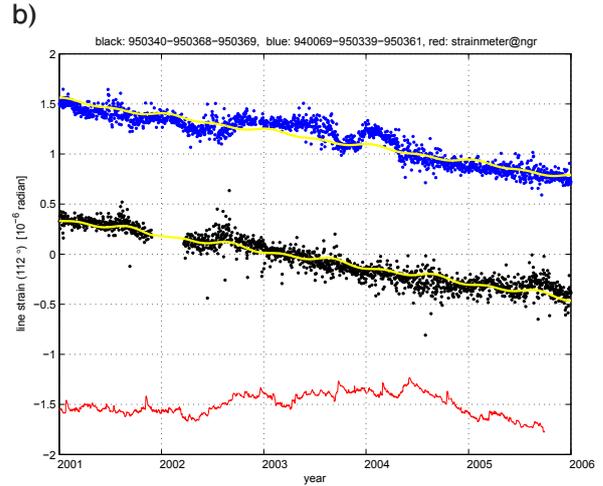
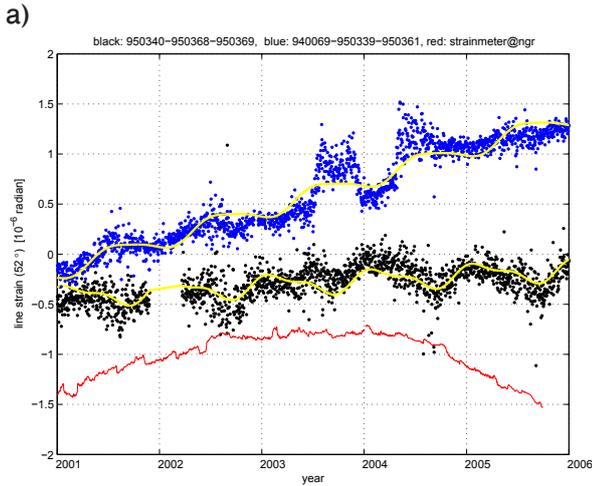
Fig. 4c) Same as above but the direction of N174°E.

する歪計の観測点では三成分を測定しているので, 一つの観測点について, 3つの比較の図ができることになる.

GPSの線歪に含まれている後述するような季節変動成分の傾向を見るために, 直線トレンド成分, 年周・半年周成分を最小自乗法でフィッティングした. その際, GPSデータには, アンテナの交換等による人工的なステップが存在するため, 岩下ほか(2009)の方法にしたがって, ステップ前後の50日以内の10日分のデータのそれぞれの平均の差を求め, その大きさを計算してステップを補正した. こうした補正の上で, 直線トレンド成分, 年周・半年周成分を最小自乗法でフィットしたものを推定した.

これに加え, 歪計による観測値を, 異なる空間スケ-

ルでのGPS歪と比較するために, 歪計の直近のGPS観測点3点のデータを使ったものの他に, 別の観測点3点を使ってもGPS歪を計算した. この3点を選ぶ際, 最初の3点と違う観測点でかつ, 最初の3点をなるべく囲むような位置にあるGPS観測点をできるだけ選んだ(前者の3点の観測点から求めた歪をGPS1, 後者のものをGPS2と本報告では呼ぶ). これにより, 歪計による観測値がどの程度の空間スケールを代表するのか調査した. GPS1はおおよそ一辺が20 km程度の三角形の範囲を, GPS2はそれよりも一回り大きい30~50 km程度の三角形の範囲を覆っている. 使用したGPSの観測点を第1図に示す.



第5図 a) 根来での線歪の時系列。線歪の方向はN52°E。黒点がGPS1の、青点がGPS2の線歪、赤線がドリフト成分を取り除いた後のポアホール歪計による相対的な残差線歪。

第5図 b) 上と同じ、但し方向はN112°E。

第5図 c) 上と同じ、但し方向はN172°E。

Fig. 5a) Same as Fig. 3a) but at the Negoro station with the direction of N52°E.

Fig. 5b) Same as above but the direction of N112°E.

Fig. 5c) Same as above but the direction of N172°E.

### 3. 結果

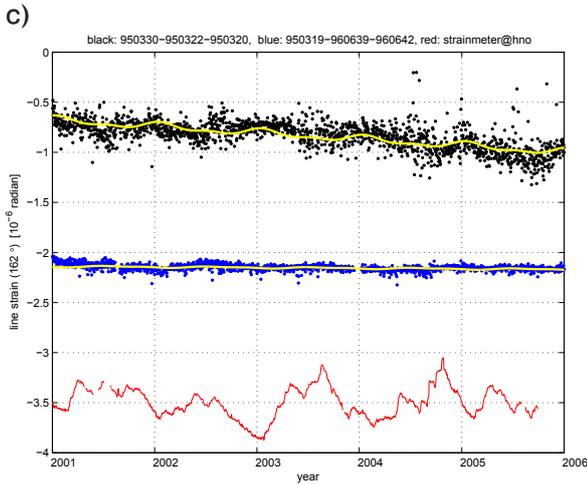
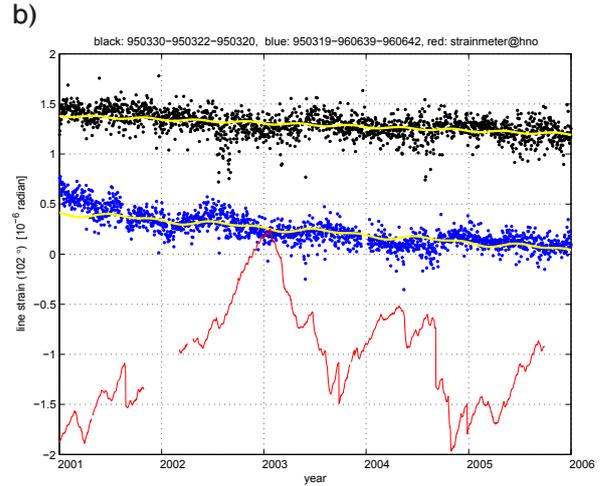
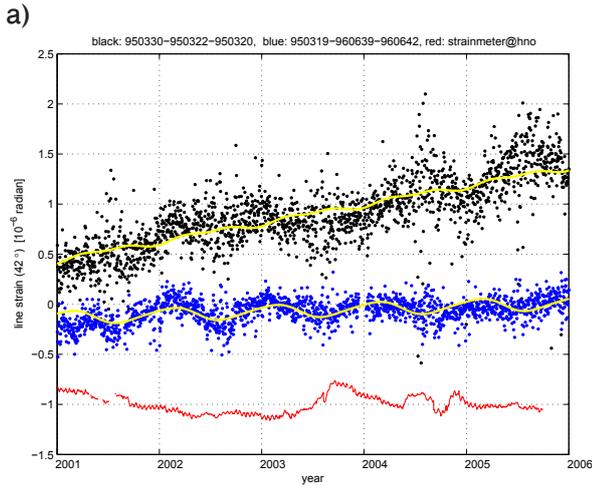
以上から得られた歪の時系列を第3図～第9図に示す。相互に比較ができるよう、スケールは全て同一のものにしてある。

黒点がGPS1、青点がGPS2の線歪、黄色線がそれぞれのGPS歪をフィットした結果推定された直線トレンド、年周・半年周成分、及び補正されたステップ成分の和である。一方赤線は、産業技術総合研究所(2006)による処理が行われた後のポアホール歪計の残差線歪である。それぞれの時系列は見やすいように、適時オフセットを加えた相対的な値である。前述のように、歪計での観測においては観測開始後の初期のデータは不安定であり、指数関数や直線フィットでは大きな変動が取れきれ

ないことから、ここでは比較的初期緩和が安定したと考えられる2001年以降の結果を示してある。

各観測点に見られる変動の特徴を簡単に説明すると、以下ようになる。

○板東(BND, 第3図): 歪計, GPSともに顕著に大きな変動がみられず安定しており、数ヶ月程度のタイムスケールとしては季節変動が認められる。季節変動については、a), c)においてGPS1との位相の対応が良いようにも見え、比較を行った観測点の中では両者の相関が良い観測点である(後述)。なおc)のGPS1では2003年を境に、日値の顕著なばらつきが増大や季節変動の振幅の増大が見られる。丁度この時期に、全国のGEONETの観測点で大規模なアンテナ交換が行われている(国土地理院, 2004)ことから、これはアンテナ交換に伴う観測



第 6 図 a) 花折での線歪の時系列。線歪の方向は N42°E。黒点が GPS1 の、青点が GPS2 の線歪、赤線がドリフト成分を取り除いた後のポアホール歪計による相対的な残差線歪。

第 6 図 b) 上と同じ、但し方向は N102°E。

第 6 図 c) 上と同じ、但し方向は N162°E。

Fig. 6a) Same as Fig. 3a) but at the Hanaore station with the direction of N42°E.

Fig. 6b) Same as above but the direction of N102°E.

Fig. 6c) Same as above but the direction of N162°E.

環境の変化に起因する可能性が高い。

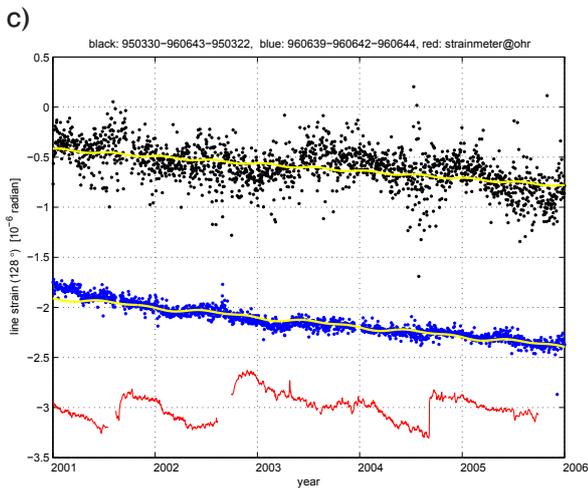
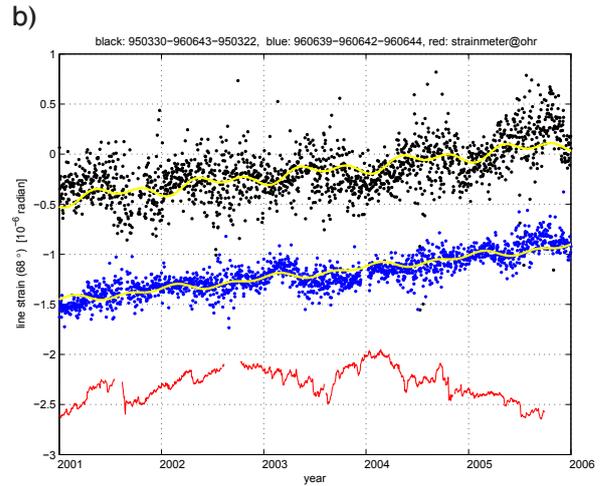
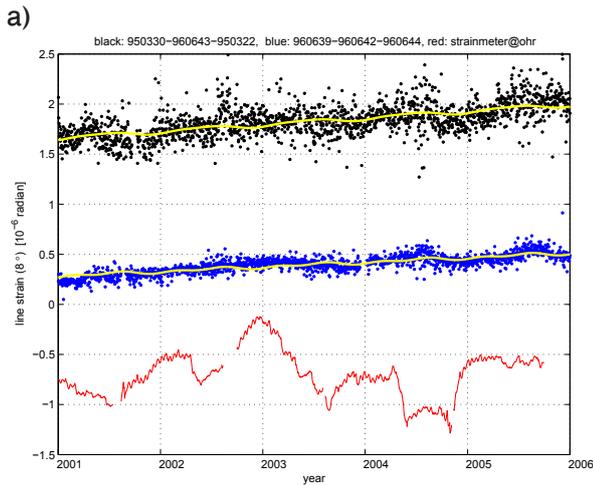
○ 秦荘 (HTS, 第 4 図) : 板東とは違って、歪計による計測の安定性が良くなく、a), b), c) 共に全体的に緩やかではあるが他の観測点と比べて大きな変動を示しており、その上に数ヶ月程度の変動として、季節変動的な成分が乗っているように見える。一方、GPS ではそうした大きな変動は見られなく、GPS 歪との対応は良くない。なお a) の GPS2 について、2004 年後半にステップがあるように見えるが、対応するアンテナ交換の記録がないため、ステップ補正は実施していない。他の成分ではこうしたステップは明瞭でなく、原因は不明である。

○ 根来 (NGR, 第 5 図) : a) にある上向きの凸の変動はドリフトの取れ残りだと考えられる。一見、歪計の測定は比較的安定しているように見えるが、他の観測点で見ら

れる季節変動状の変化がここでは明瞭ではない。これは、時折見られる歪の急激な変化が、季節変動を分かりにくくしていることが原因であると考えられる。しかしながら、このような急変は GPS 歪には見られず、両者の相関はよくない。

○ 花折 (HNO, 第 6 図) : b) では、歪計による計測が安定していない。また、比較的安定しているように見える a) においても、GPS1 に見られる季節変動は歪計の計測値には見られず、両者の対応は良くない。更に c) においては、両者に季節変動が見られるものの、歪計の季節変動の位相と GPS1 とは逆相関を持っているように見え、前者の振幅も後者に比べて有意に大きい等、歪計と GPS の季節変動は整合的な対応は見られない。

○ 大原 (OHR, 第 7 図) : 花折と同様、歪計に  $0.5 \times 10^{-6}$  程



第7図 a) 大原での線歪の時系列。線歪の方向はN8°E。黒点がGPS1の、青点がGPS2の線歪、赤線がドリフト成分を取り除いた後のボアホール歪計による相対的な残差線歪。

第7図 b) 上と同じ、但し方向はN68°E。

第7図 c) 上と同じ、但し方向はN128°E。

Fig. 7a) Same as Fig. 3a) but at the Ohhara station with the direction of N8°E.

Fig. 7b) Same as above but the direction of N68°E.

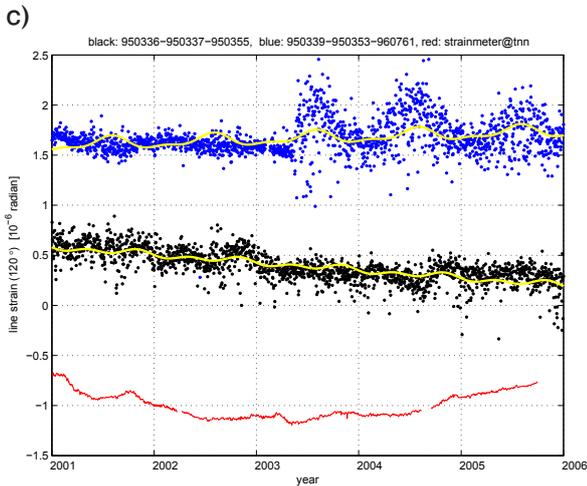
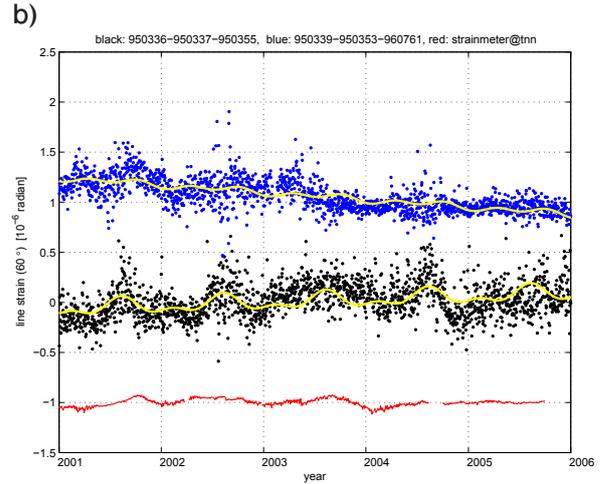
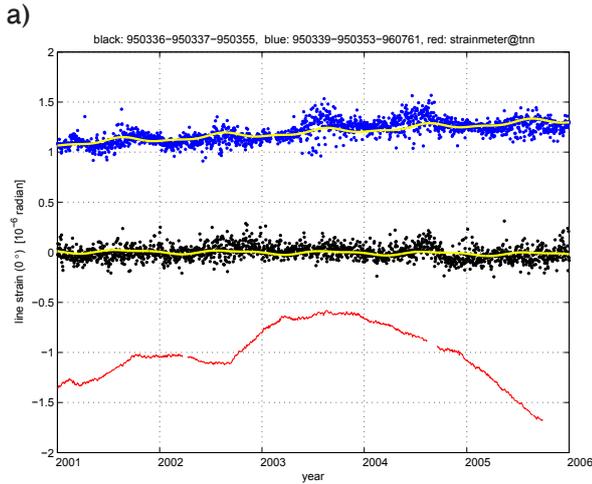
Fig. 7c) Same as above but the direction of N128°E.

度の大きな緩やかな変動が卓越している。それに乗るように、数ヶ月程度のタイムスケールを持つ変動が見られるが、花折とは違い、必ずしも季節変動的な変化とはいえない。b)の2003年前半には、時折2ヶ月程度の繰り返しの明瞭な変動が見られるが、原因は不明である。こうした変化に対応する明確なGPS歪の変動は見られない。

○天王寺(TNN, 第8図): 歪計による計測値は比較的安定しているが、a)やc)のように数年スケールの緩やかな変動が見られる。これは、指数関数と直線近似では取れきれなかったドリフトである可能性がある。そうした緩やかな変動の上に小さいながらも季節変動が見られ、その振幅はGPS1のそれとオーダー的には整合的であり、かつ位相の対応も良いように見える。このことから、歪計とGPSの対応がある程度認められる観測点であると

言える。なお、GPS2が2003年を境に、ノイズや季節変動のパターンに変化が見られるのは、前述のアンテナ交換によるものと考えられる。

○安富(YST, 第9図): 歪計による計測は比較的安定している。2002年6月より、a)、c)に数ヶ月程度の顕著な変動が見られるが、これは山崎断層で生じたと考えられるゆっくり地震に伴う地殻変動を捉えているものと考えられる(北川ほか, 2003; 大谷ほか, 2003; Kitagawa *et al.*, 2006)。しかしながら、GPS歪にはこれに対応する変動は見られない。こうした地殻変動によって擾乱を受けた期間を除くと、歪計には季節変動的な成分が認められる。特にb)においては、歪計とGPS1の季節変動の振幅は同じくらい大きさである。しかし、位相が反転しているようにも見える(後述)。



第 8 図 a) 天王寺での線歪の時系列。線歪の方向は N0°E。黒点が GPS1 の、青点が GPS2 の線歪、赤線がドリフト成分を取り除いた後のポアホール歪計による相対的な残差線歪。

第 8 図 b) 上と同じ、但し方向は N60°E。

第 8 図 c) 上と同じ、但し方向は N120°E。

Fig. 8a) Same as Fig. 3a) but at the Tennoji station with the direction of N0°E.

Fig. 8b) Same as above but the direction of N60°E.

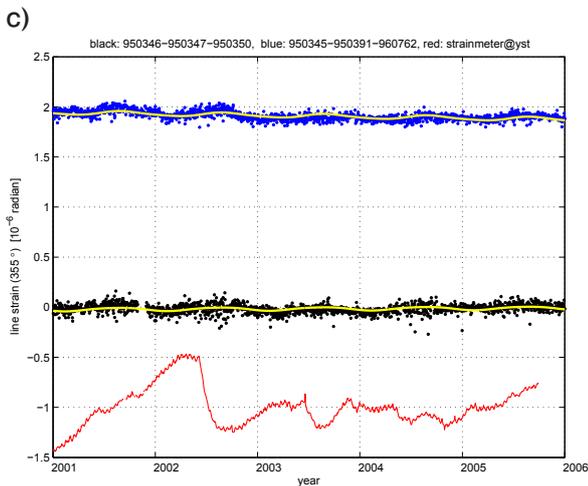
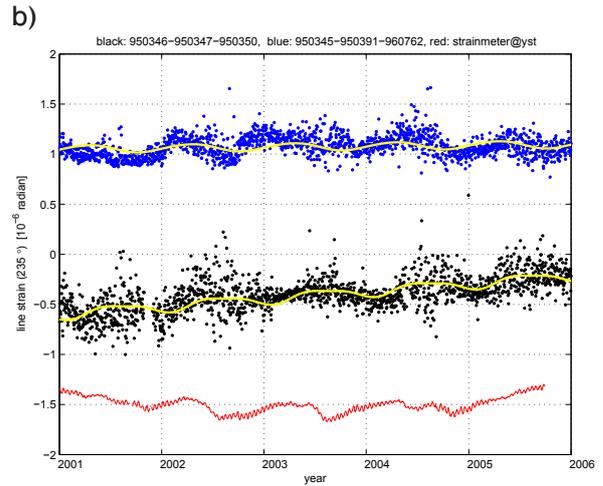
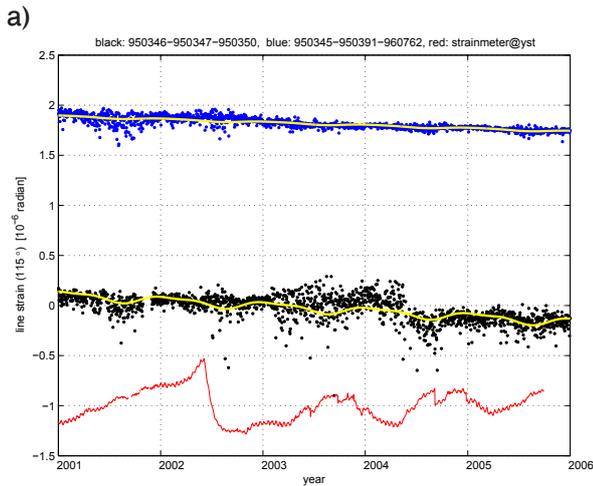
Fig. 8c) Same as above but the direction of N120°E.

#### 4. 考察

全体に共通する特徴として以下のことがあげられる。まず、歪計による計測値(日値)は、GPSの日値のばらつきに比べると格段に小さく、歪計による計測分解能の高さが分かる。一方、歪計では大きな変動が見られるケースがしばしば見られる。即ち、GPSでは経年的な直線トレンドを基準としてそこからのずれた分の変動は、 $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-6}$ 程度に収まっているのに対して、歪計の場合は、秦荘(第4図a)や花折(第6図b)のように最大で $2 \times 10^{-6}$ にも及ぶ大きな変動が見られる。これらは、指数関数や線形では近似しきれなかった、その観測点固有のドリフトの取れきれていない成分を反映していることが考えられる。なお多くの歪計観測点で見られる、約半

月周期の細かいぎざぎざは、13.66日周期のMf分潮や27.32日周期のMm分潮等の地球潮汐の影響であると考えられる。

多くの歪計の記録には、数ヶ月スケールの変動として、季節変動的な成分が認められる。これはGPS歪にも存在する。後者は、黄色線で表されたフィティングの結果から、振幅でおおよそ $0.05 \times 10^{-6} \sim 0.3 \times 10^{-6}$ 程度の範囲に収まっている季節変動であるのに対して、前者はGPSよりも大きな振幅を示すものがあり、かつ季節変動の繰り返しもGPSほど周期的ではない。こうした歪計の季節変動の多くは、GPS1、GPS2の季節変動いずれとの対応もよくなく、両者の相関は低い。その中で、板東(第10回)や安富(第11回)のように比較的歪計の変動が安定している観測点においては、その季節変動の振幅



第9図 a) 安富での線歪の時系列。線歪の方向はN115°E。黒点がGPS1の、青点がGPS2の線歪、赤線がドリフト成分を取り除いた後のボアホール歪計による相対的な残差線歪。

第9図 b) 上と同じ、但し方向はN235°E。

第9図 c) 上と同じ、但し方向はN355°E。

Fig. 9a) Same as Fig. 3a) but at the Yasutomi station with the direction of N115°E.

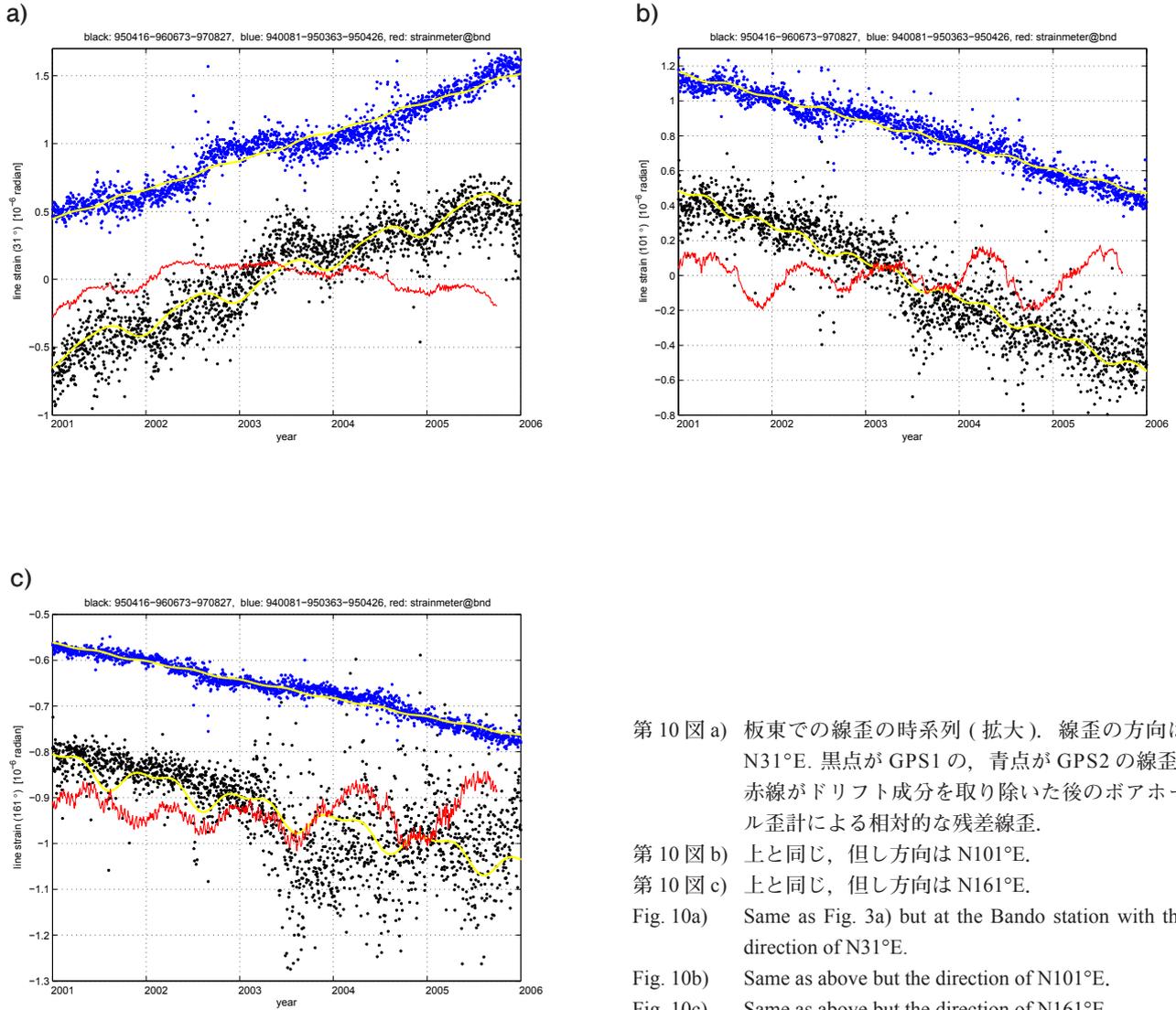
Fig. 9b) Same as above but the direction of N235°E.

Fig. 9c) Same as above but the direction of N355°E.

がGPSのそれと大きくは異なることは注目に値する。即ち、板東では第10図a)、第10図c)の成分で、歪計(赤線)とGPS1との季節成分の振幅(黒点と黄色線)が同じ程度の大きさになっており、位相の相関も前述のGPSアンテナの交換前に当たる期間では比較的良好(第10図)。また安富においても、ゆっくり地震の影響が余り見られない歪計の成分では、季節変動の振幅はGPS1のそれとほぼ同じような大きさになっている(第11図b))。即ち、こうした観測点の成分では一方が一方に対して極端に大きくなく、歪計、GPSともに最大でも全振幅で $0.2 \times 10^{-6}$ 程度の大きさに収まっている。しかしながら、板東のもう一つの成分(第10図b))では季節変動の大きさは異なり、位相も対応しているようには見えない。また安富においても、他の成分では季節変動の振幅は両者

で異なり、また位相は全ての成分でむしろ逆相関しているようにも見え、両者に良い対応があるとは言い難い。

これらのことから、少なくとも解析に使用した7点の歪計からは、数ヶ月スケールの地殻変動を捉えることは現状では困難であると結論づけられる。特に、相互に離れた7点もの異なる観測点での比較において、歪計による変動とGPS歪との相関が良いケースがほとんど無かったことは、歪計による計測が、観測点固有のローカルな影響(例えばセンサー周辺の間隙水圧変化や、歪計設置時のセメンティングによる岩盤とのカップリングの状態等)を強く受けていることを示唆する。こうした影響は、単純な指数関数や直線のフィッティングでは十分に取り除けないと考えられるため、歪計によって数ヶ月程度のタイムスケールを持つ地殻変動による信号を分離すること



第 10 図 a) 板東での線歪の時系列 (拡大). 線歪の方向は N31°E. 黒点が GPS1 の, 青点が GPS2 の線歪, 赤線がドリフト成分を取り除いた後のポアホール歪計による相対的な残差線歪.

第 10 図 b) 上と同じ, 但し方向は N101°E.

第 10 図 c) 上と同じ, 但し方向は N161°E.

Fig. 10a) Same as Fig. 3a) but at the Bando station with the direction of N31°E.

Fig. 10b) Same as above but the direction of N101°E.

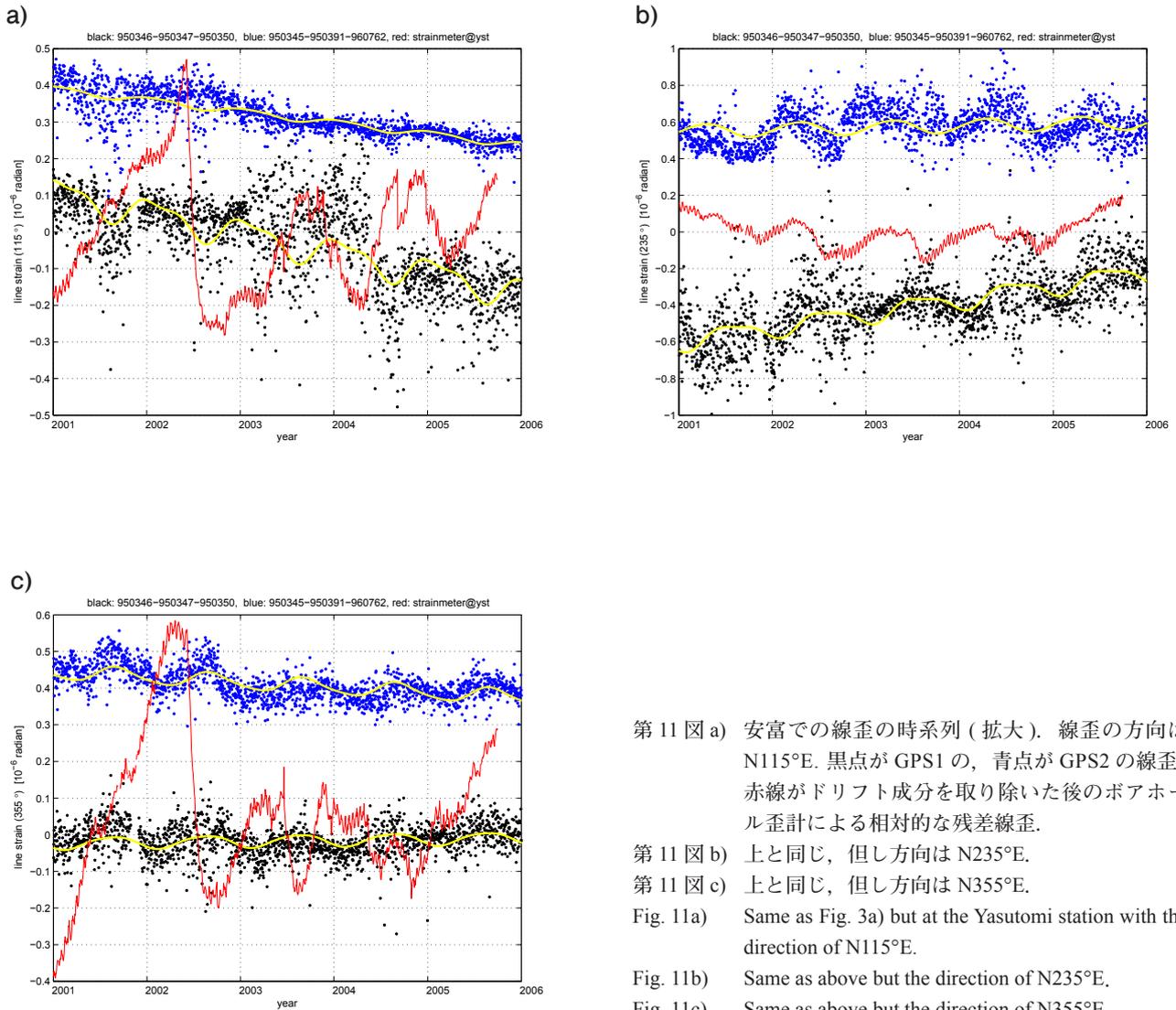
Fig. 10c) Same as above but the direction of N161°E.

は現状の方法では困難である.

今後, 歪計データを用いた数ヶ月スケールの地殻変動検出のためには, こうしたノイズの低減が必要である. これまで見て来たように, 時間的に単調に変化する初期緩和のドリフトとは別に, 数年 (天王寺) から 2 ヶ月 (大原) までの様々なタイムスケールで変動するような成分が見つかった. また, 今回天王寺などでも見られたように, 時間的に単調に変化する初期緩和とは別なドリフトが存在している可能性も示唆される. 今後真の地殻変動を抽出するためには, こうした変動の要因の特定や誤差を補正する技術を開発していくとともに, そもそも歪計設置時に, ローカルな影響を受けないような工夫が不可欠である.

パイロット事業的な性格のあった, 近畿地方の歪計の

連続観測網におけるこうした結果を踏まえ, 産総研では 2007 年から, 南海~東南海地域の周辺に新たな歪観測点を設置しており, 現在までに 14 点で観測を開始している. これらの観測網では, より情報量の多い, 水平 4 成分や上下方向の線歪を測定できるポアホール歪計を始め, 異なる深度での地下水位観測や地震観測等も同時に行っている (小泉ほか, 2009). またローカルな影響を極力排除するために, 歪計の設置位置 (深度) についてクラックが少ない場所を注意深く選定した上で, センサー周辺の水みちを塞いで間隙水圧変化による影響を受けにくくしたり, 計器と岩盤とのカップリングをよくするためのセメント配合比の選定等, 多くの改良を施しており, 従来傾斜計ではその存在を確認出来なかった, 奈良県南部におけるゆっくり地震の複数観測点での検出に成功す



第 11 図 a) 安富での線歪の時系列 (拡大). 線歪の方向は N115°E. 黒点が GPS1 の, 青点が GPS2 の線歪, 赤線がドリフト成分を取り除いた後のボアホール歪計による相対的な残差線歪.

第 11 図 b) 上と同じ, 但し方向は N235°E.

第 11 図 c) 上と同じ, 但し方向は N355°E.

Fig. 11a) Same as Fig. 3a) but at the Yasutomi station with the direction of N115°E.

Fig. 11b) Same as above but the direction of N235°E.

Fig. 11c) Same as above but the direction of N355°E.

る (Itaba *et al.*, 2010) 等, 高い観測性能を示している. これらの地域では GEONET の GPS 観測点も充実しており, 地下水変動の影響や地殻変動との関係を調べる絶好のデータが得られることが期待される. 今後, 設置後の初期緩和が落ち着いた後, こうしたデータを使って, 地下水等による誤差の影響等も評価しつつ, ボアホール歪に見られる変動の総合的な要因調査を行うことが必要である.

謝辞: 歪計観測点の整備では産総研, 地方自治体を始め多くの関係者の協力を得ています. また, 活断層・地震研究センターの北川有一氏・高橋誠氏・小泉尚嗣氏, 地質情報研究部門の佐藤努氏の貢献なくしては, 本論は完成することはありませんでした. ここに記して深く感謝します.

## 文 献

Itaba, S., N. Koizumi, N. Matsumoto, and R. Ohtani (2010) Continuous Observation of Groundwater and Crustal Deformation for Forecasting Tonankai and Nankai Earthquakes in Japan, *Pure Appli. Geophys.*, **167**, 1105–1114.

岩下知真子・梅沢武・川元智司・野神憩・畑中雄樹・石倉信広 (2009) GPS 連続観測システム (GEONET) 解析結果に生じる人為的要因によるオフセットの補正手法について, 国土地理院時報, **118**, 23-30.

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で観測された顕著な地殻歪変化, 地震 2, **56**, 245–254.

- Kitagawa, Y., N. Koizumi, R. Ohtani, K. Watanabe, and S. Itaba (2006) Detection of aseismic slip on an inland fault by crustal movement and groundwater observations: A case study on the Yamasaki fault, Japan, *Pure Appl. Geophys.*, **163**, 657-673.
- 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋 (2006) 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ (1984～2005年), *地震*, **59**, 19-27.
- 小泉尚嗣・高橋誠・松本則夫・佐藤努・大谷竜・北川有一・板場智史・梅田康弘・武田直人・重松紀生・桑原保人・佐藤隆司・今西和俊・木口努・関陽児・塚本斉・山口和雄・加野直巳・住田達哉, 風早康平・高橋正明・高橋浩・森川徳敏・角井朝昭・下司信夫・中島隆・中江訓・大坪誠・及川輝樹・干野真 (2009) 東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備について, *地質ニュース*, **662**, 6-10.
- 国土地理院 (2004) 電子基準点 1,200 点の全国整備について, *国土地理院時報*, **103**, 2-51.
- 中川弘之・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下知真子・川元智司・畑中雄樹・宗包浩志・石本正芳・湯通堂亨・石倉信広・菅原安宏 (2009) GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について, *国土地理院時報*, **118**, 1-8.
- 大谷竜・北川有一・小泉尚嗣・高橋誠・松本則夫 (2003) ボアホール歪計で観測された非定常的变化の 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, *地質調査研究報告*, **54**, 213-220.
- Schwartz, S., and J. Rokosky (2007) Slow slip events and seismic tremor at circum-Pacific subduction zones, *Reviews of Geophysics*, **45**(3), doi:10.1029/2006RG000208.
- Sagiya, T. (2004) A decade of GEONET: 1994-2003—The continuous GPS observation in Japan and its impact on earthquake studies—, *Earth Planets Space*, **56**, pp. xxix-xli.
- 産業技術総合研究所 (2006) 産総研のボアホール歪計による近畿地方の地殻歪観測結果 (1997 年 1 月～2005 年 9 月), *地震予知研究連絡会報*, **75**, 487-494.
- 佃栄吉 (1998) 変動解析研究室の現在の研究内容と今後の展望, *地質ニュース*, **523**, 29-34.
- 吉川澄夫 (2003) 歪変化に見られる東海スロースリップの影響, *月刊地球号外*, **41**, 35-41.
- (受付: 2011 年 10 月 11 日; 受理: 2012 年 7 月 25 日)

