

GNSS 日値による面的監視の通常変動値調査 Noise Level of the Spatial Monitoring of GNSS Daily Coordinates

小林昭夫¹
Akio KOBAYASHI¹

(Received September 7,2012: Accepted March 27,2013)

ABSTRACT: Monitoring GNSS daily coordinates is suitable for detecting crustal deformations, such as slow slip events. Spatial monitoring of GNSS daily coordinates along the Nankai trough has begun because slow slip events are considered to be candidate earthquake precursors. It is necessary to investigate the noise level of the spatial monitoring of daily coordinates, and set a threshold. Here we tried investigating noise levels using quartiles that can extract outliers objectively. By setting an appropriate threshold, we can effectively monitor the phenomena to be detected.

1 はじめに

国土地理院では GPS 等を用いた GNSS 連続観測システム（国土地理院測地観測センター，2004）を運用しており，精密暦を用いて解析された日座標値（以降，日値）が 2~3 週間後に公表されている．GNSS 解析については，観測後なるべく早く座標値を利用したいとの需要があり，発生が危惧される東海地震の前兆現象把握のため，1998 年度から東海地域を対象とした GNSS3 時間解析システムの運用が開始された．このシステムでは観測の数時間後に座標値（3 時間値）が得られるが，日値と比較してばらつきが大きく，外れ値も多かった（小林・他，2002）．一般に座標値解析に使用される観測時間が短いと解析精度は落ちる．これら解析精度と速報性との兼ね合いから，現在は 6 時間の観測時間を用い 3 時間ごとに計算時間をずらした解析がされている（国土地理院測地観測センター，2004）．国土地理院で解析されたこの 6 時間解析の座標値（以降，6 時間値）のうち東海地域については現在気象庁に送られ，面的監視手法（小林，2007）などを用いて監視されている．

数時間や数日で進行する地殻変動現象の把握には GNSS では 6 時間値が適しているが，地震の前兆としての地殻変動の時間発展はそれだけとは限らない．

2011 年東北地方太平洋沖地震の数時間，数日前には陸上の GNSS や傾斜計で把握できる地殻変動は観測されなかった（国土地理院，2011；防災科学技術研究所，2011）．一方，西村（2012）は同地震の数年前から震源域でプレート間固着が弱まっていたことを指摘している．また，弘瀬・他（2009）は地震サイクルの数値シミュレーションで，長期的なスロースリップが加速して大地震の発生に結びつく可能性を示している．このため，数週間から数カ月で進行する地殻変動も見逃すことなく早期に把握する必要がある．対象とする現象が急速に進行するものでなければ，GNSS の 6 時間値より精度の高い精密暦を用いた日値の方が検知力の高さから監視に適している．このような観点から，2010 年より GNSS の日値を用いた南海トラフ沿いの面的監視資料が地震防災対策強化地域判定会に提出されている．

面的監視処理により，多くの観測点の情報を一目で確認できるようになったが，データの監視をする上では，通常の変動の幅や頻度を把握し，元データを確認・精査するきっかけとなる閾値が必要となる．面的監視の場合，小林（2007）のように平滑化後の格子点値の最大・最小値を監視に用いるのが適切と考えられる．ここでは箱ひげ図（四分位数）により

¹ 気象研究所地震火山研究部，Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

通常の変動幅を調査し、箱ひげ図のひげの最大値を通常の変動値として定義し、監視のための閾値として用いることを提案する。

2 通常変動値の調査手法とデータ

2.1 通常変動値（ノイズレベル）の性質

小林・松森（1999）はひずみ計のノイズレベル調査を行い、階差時間に応じてノイズレベルの 1.2~1.8 倍を現業者のデータ確認につながるアラーム報知の閾値に設定した。小林・松森（1999）のノイズレベルは、把握すべき現象を除き調査対象期間中（1 年半）に 1 回だけ発生する変化レベルを検出する最小の値として定義されている。

小林（2007）は GNSS 6 時間値の面的監視について調査し、調査対象期間 1 年間のノイズレベルとして小林・松森（1999）と同様の定義を用いた。GNSS 日値は、現在の解析手法と同じ再解析値が 1996 年 3 月以降のデータについて公開されており（国土地理院測地観測センター，2004），長期間のデータを対象に通常の変動値を調査することができる。GNSS 日値について同様の調査を行う場合、調査期間が 10 年ならその間に 1 回だけ発生する変化レベルを検出する最小の値としてノイズレベルを定義すべきか、あるいは 1 年に 1 回と同頻度として 10 年に 10 回と定義すべきか、という問題がある。また同様の問題は 6 時間値の追加調査を行った場合にも発生する。

GNSS 3 時間値と比較して 6 時間値や日値は外れ値が少ないが、それでも座標値の時系列を見ると外れ値が時々発生している。面的監視処理では個々の観測点における外れ値を除く効果がある（小林，2005）が、複数の観測点で外れ値が発生した場合や、海岸の観測点など外れ値が正常値に囲まれていない場合は効果が薄れる。外れ値の発生頻度が低く、調査期間が短い場合、調査期間にその外れ値が入るかどうかでノイズレベルが大きく異なることも考えられる。

2.2 四分位数を用いた外れ値検出

外れ値を検出する汎用性のある手法として箱ひげ図（四分位数）を用いた方法がある（和田，2010；熊原・渡辺，2012）。四分位数とはデータを小さい値から順に並べてその範囲をデータ数で 4 等分した場合、小さい値から第 1 等分と第 2 等分の境である 25% 点を第 1 四分位数などとしたもので、図 1 のように箱ひげ図で表される。第 2 四分位数が中央値である。箱ひげ図の箱の長さは、第 3 四分位数（75% 点）から第 1 四分位数（25% 点）を引いた値である。上下のひげの長さは箱の長さの 1.5 倍以内にある最大（小）値で、その外側の値は外れ値となる。この 1.5 倍という数字は慣用的に用いられている値であり、数学的な意味はない。3 倍の外側の値は特異値とも呼ばれる。

ここでは、この四分位数を用いて外れ値または特異値を客観的に除き、箱ひげ図のひげの最大値を通常の変動値として定義し、監視のための閾値として用いることにする。このときひげの長さを箱の長さの何倍にとるか（以下、ひげの長さの倍数）は、最大値の分布の様子、外れ値（または異常値）の発生頻度、実際に検出すべき現象の検出時期を総合的に見て決める必要がある。特にスロースリップなどの現象を早く検出するため監視の閾値を低く設定すると、その閾値を超える頻度が高くなり、有意な現象が発生しているかどうかの確認の頻度が増え、“オオカミ少年”のように確認時の慎重さが低下し、結果として現象の見逃しにつながる恐れがある。日値の更新が一週間間隔であり、閾値を超えるのは少なくとも数週間に一度より低い頻度とすべきだろう。次節で述べる 6 つの監視要素の閾値超えが独立ではないことも考慮し、ここでは監視要素ごとに閾値を超

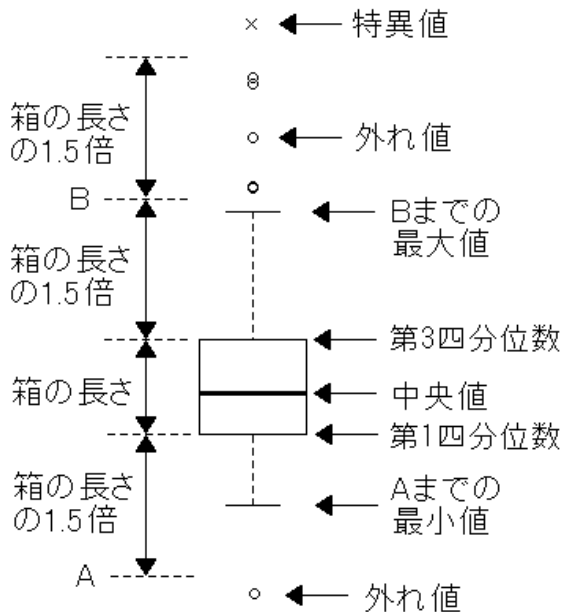


Fig. 1 Box plot and quartiles. Circles and crosses denote outliers and extreme outliers, respectively.

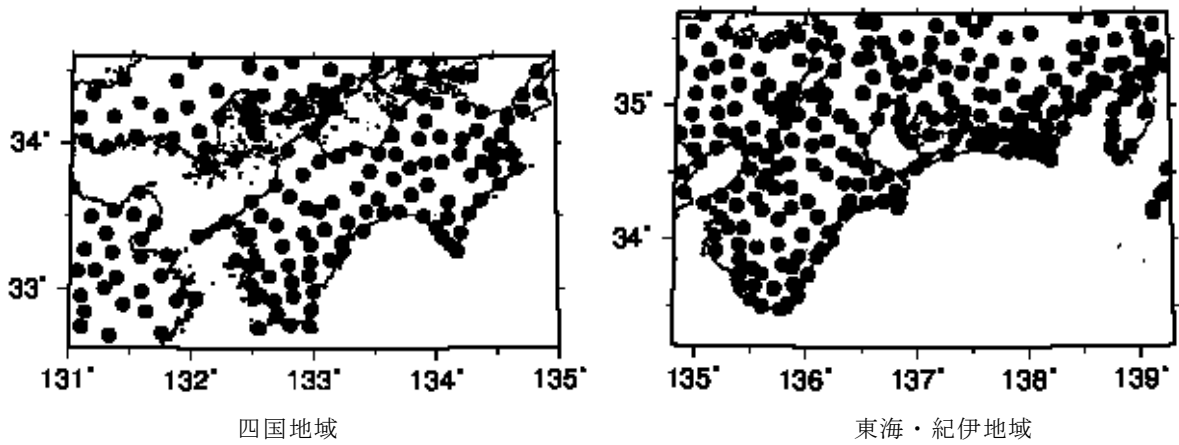


Fig. 2 Monitoring area of spatial monitoring. The left is Shikoku and the right is Tokai and Kii regions.

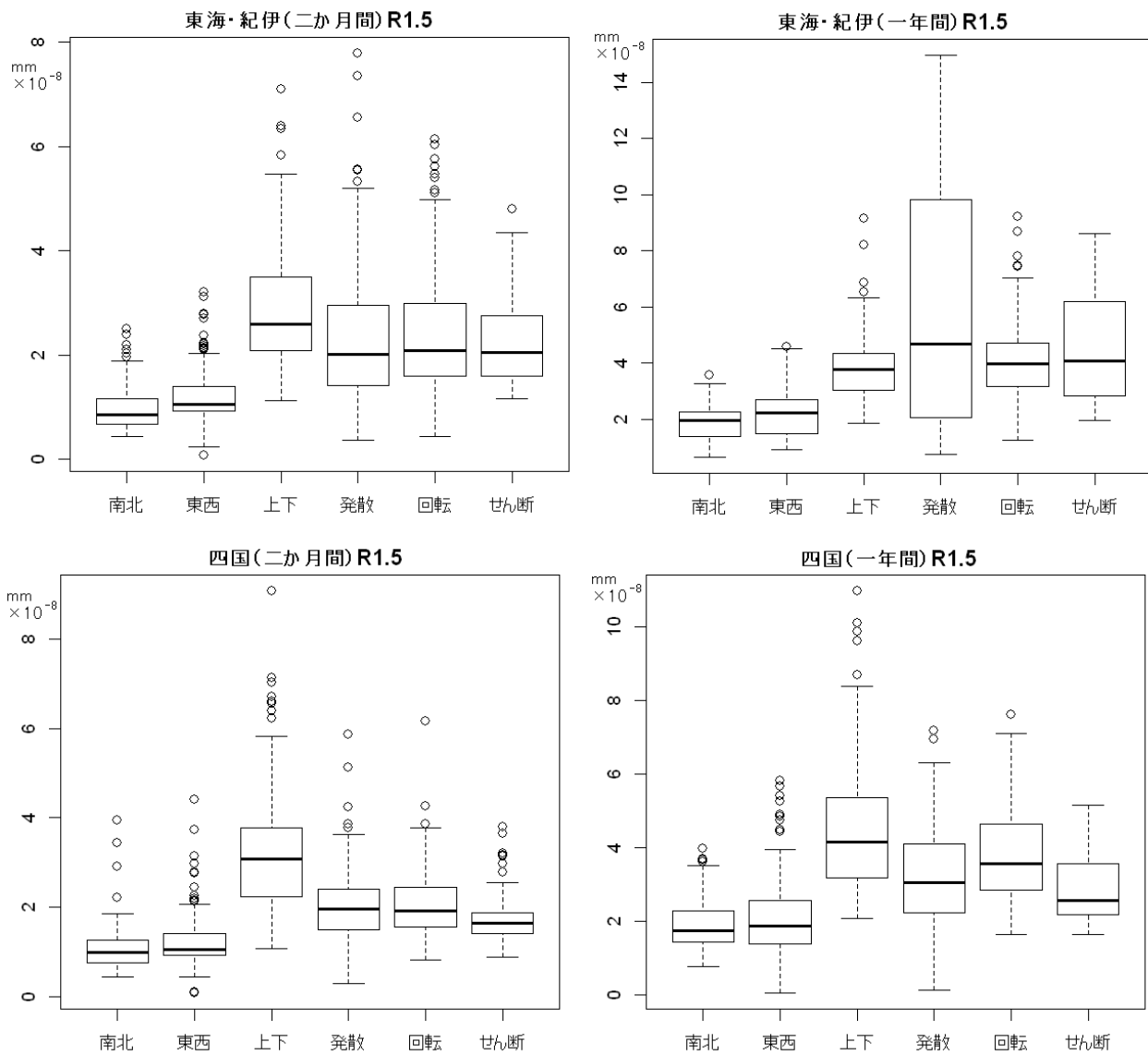


Fig. 3 Box plots of maximum values for six elements. Whisker length is 1.5 times that of the box length.

える頻度は三か月から半年に一度を目安とする。

2.3 調査対象データ

2002 年から 2003 年にかけてはほぼ全電子基準点のアンテナの交換が行われている（国土地理院測地観測センター，2004）。それ以前は座標値データのばらつきがやや大きいため，調査期間は 2004 年から 2011 年の 8 年間とし，毎月 1 日の値について面的監視処理結果の格子点の最大値を求めた（処理の詳細は小林（2007）参照）。監視要素は南北，東西，上下，

回転，発散，最大せん断ひずみの 6 つである。各成分の負の値（南北成分なら南成分）は絶対値をとり正の値と一緒に処理した。

調査対象領域は図 2 に示した東海・紀伊地域および四国地域である。図中に示した丸印は調査に用いた GNSS 観測点で，調査対象期間中に不安定な動きのある 21 点は調査に用いなかった。

監視期間は，直近一か月とその前三か月（それぞれの期間中央の差から二か月間と呼ぶ），および直近

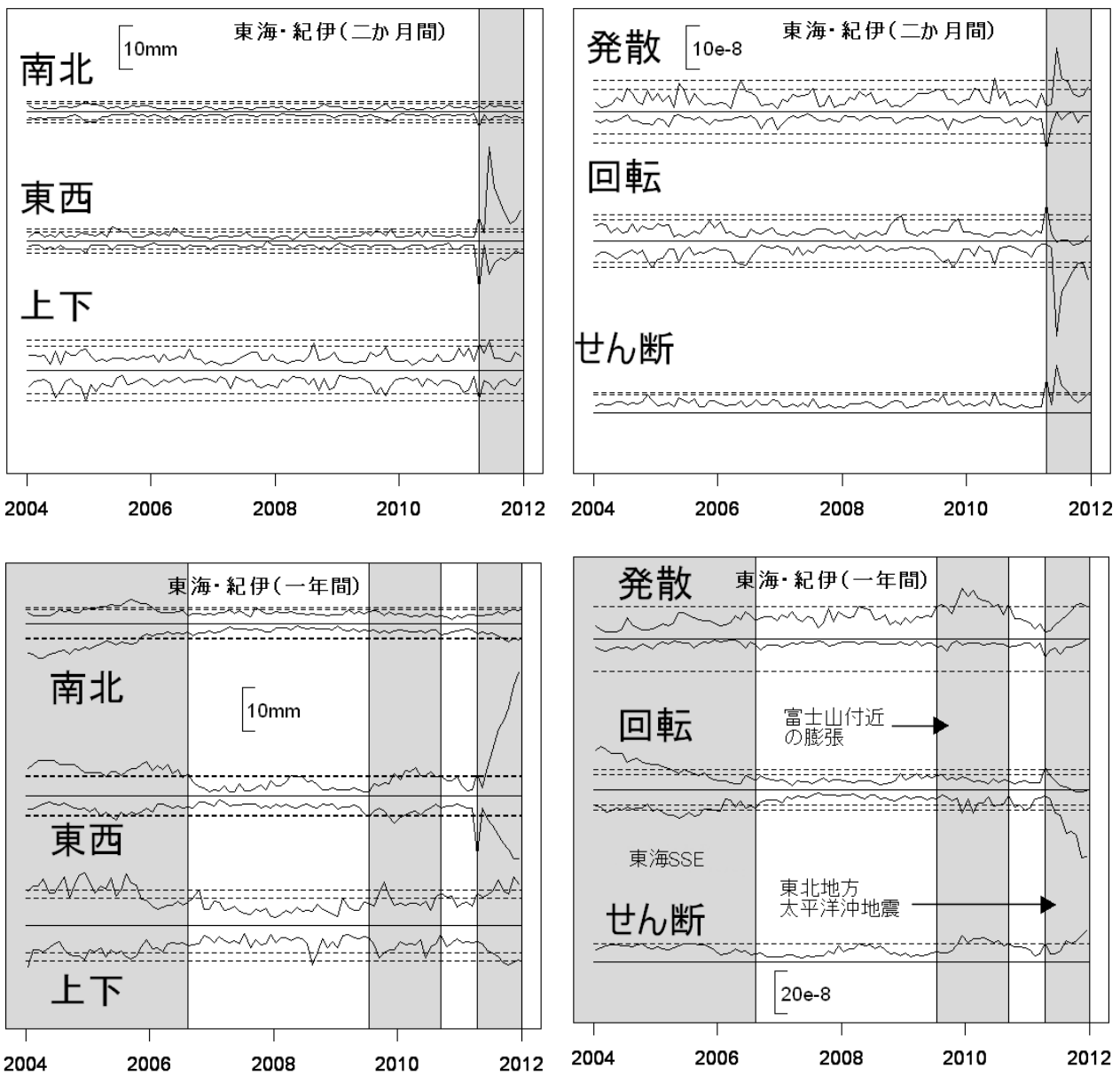


Fig. 4 Time series of maximum and minimum values of six elements for Tokai and Kii regions. The dotted lines represent maximum/minimum values except outliers in which the whisker lengths are 1.5 and 3.0 times that of the box. Gray periods are excluded as known phenomena to be detected.

一か月と前年同時期一か月（同一年間）の二つである。調査結果に影響する2004年9月の三重県南東沖の地震、2009年8月の駿河湾の地震、2011年3月の東北地方太平洋沖地震については、地震時のオフセットがゼロになるように補正した。いずれも地震後の余効変動は補正していない。2000年末から2005年頃までの東海スロースリップ（Ozawa et al., 2002）や2003年と2009～2010年の豊後水道長期的スロースリップ（Ozawa et al., 2004）、2006年頃からの富士

山の膨張（原田・他，2010）が見られる期間は把握すべき現象の期間として調査対象から除いた。また、東北地方太平洋沖地震の余効変動は非常に大きいため、その影響がある期間も調査対象から除いた。

3 調査結果

面的監視処理の各要素最大値の分布を箱ひげ図（ひげの長さ倍数は1.5倍）にして図3に示す。負の値は絶対値をとっているため、ここでは値の大き

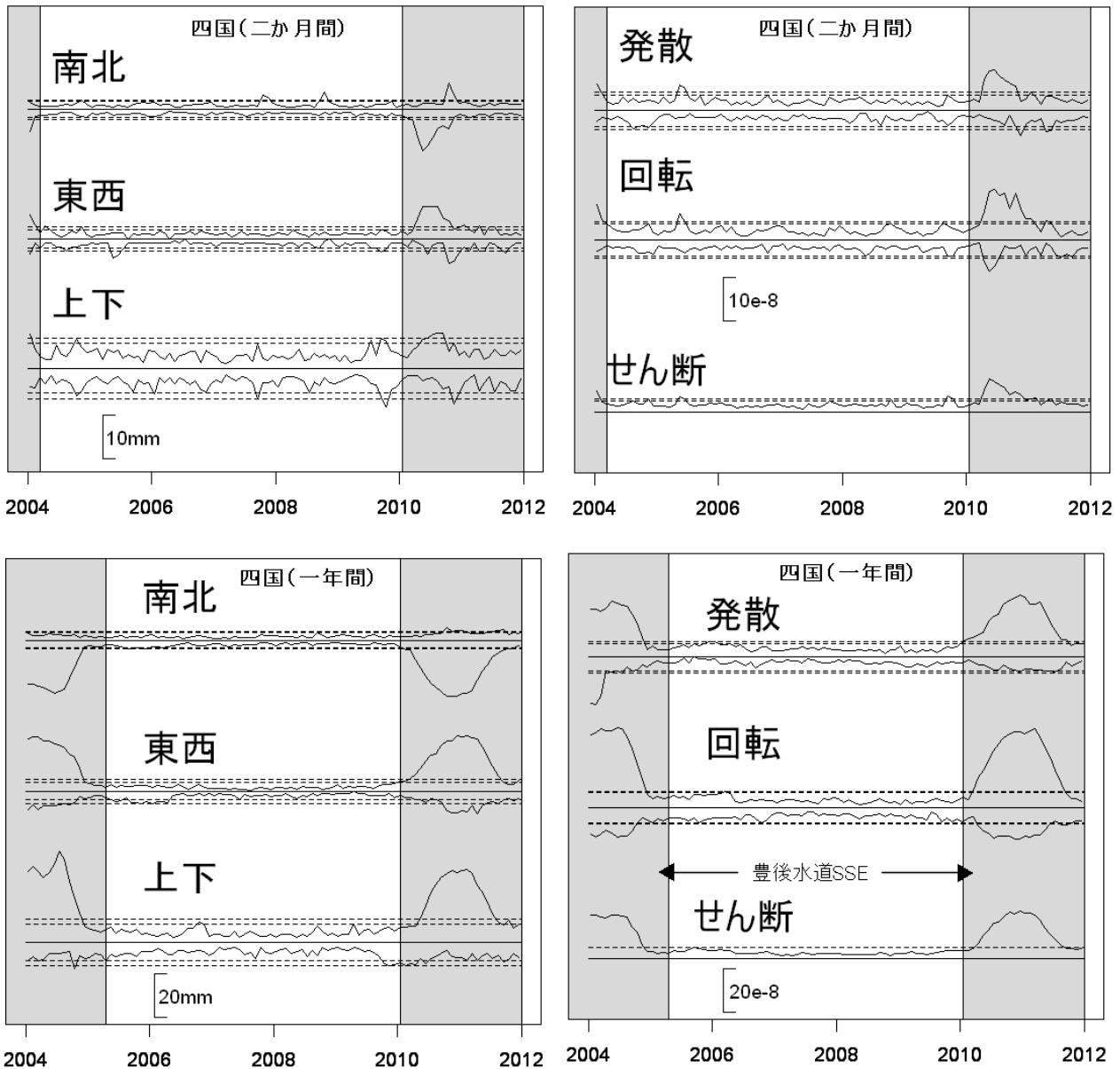


Fig. 5 Time series of maximum and minimum values of six elements for Shikoku. The dotted lines are maximum/minimum values except outliers in which the whisker lengths are 1.5 and 3.0 times that of the box. Gray periods are excluded as known phenomena to be detected.

い側の分布のみに注目する。ひげの外側にもある程度連続的な分布が見られる成分がある。これは、ひげの長さ倍数 1.5 倍では、ある程度の頻度で発生する通常より少し大きな値も外れ値とされてしまうことを意味している。また、従来の GNSS 座標値についての調査 (Mao et al., 1999, 国土地理院測地観測センター, 2004 など) と同様に、水平成分に比べ上下成分のばらつきが大きいことが見て取れる。面的監視結果の格子点の最大値・最小値の時系列を、東海・紀伊については図 4 に、四国については図 5 に示す。図 4 の東海・紀伊 (一年間) で 2010 年頃にピークを持つ発散成分は、2006 年頃からの富士山付

近を中心とする膨張に対応している。また、図 5 の四国 (一年間) には各成分に 2003 年と 2009~2010 年の豊後水道長期的スロースリップに対応する変化が見られる。

ひげの長さの倍数を 1.5 倍, 2.0 倍, 2.5 倍, 3.0 倍にしたときの外れ値を除く最大値 (監視の閾値) と, その閾値を超える値となった回数を図 6 に示す。調査対象回数 (月数) は, 調査対象領域, 監視期間により異なり 40~87 回であるが, 現象がランダムに発生する場合, 回数を日数に読み替えると一か月半から三か月分となる。三か月から半年に一度の閾値超えに相当するのは, 調査期間に 0~1 回超える閾値と

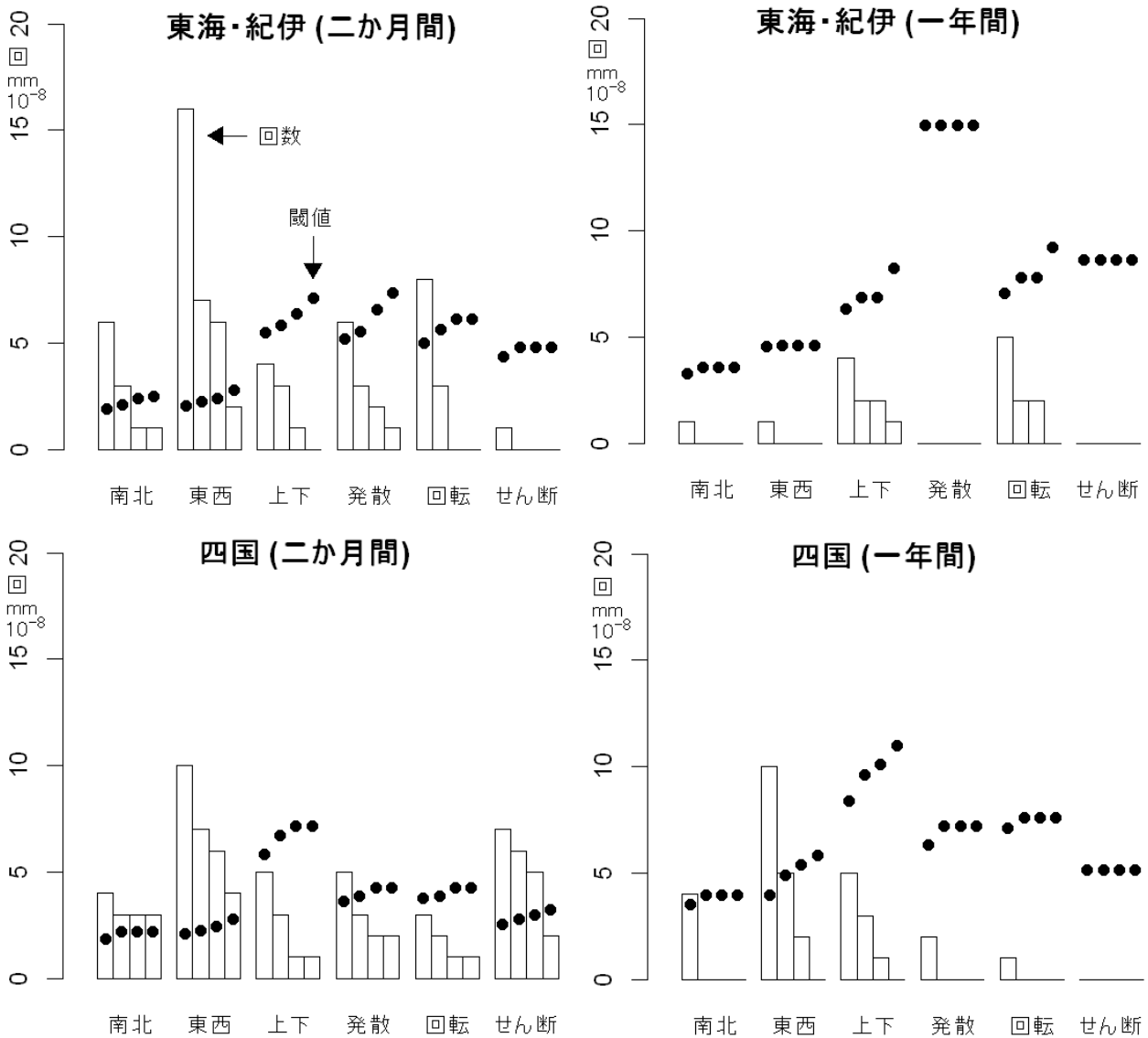


Fig. 6 Maximum values of six elements excluding outliers (dots) and times that exceed the maximum values (bar plots). Whisker lengths from left to right are 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 times that of the box.

Table 1 Detection time of long-term slow slip events of the Bungo Channel according the difference in whisker lengths. Whisker lengths are 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 times that of the box.

期間	ひげの長さの倍数	2003年	2009~2010年
二 か 月 間	1.5倍	2003年7月	2010年2月
	2.0倍	2003年8月	2010年3月
	2.5倍	2003年9月	2010年3月
	3.0倍	2003年9月	2010年3月
一 年 間	1.5倍	2003年5月	2010年1月
	2.0倍	2003年6月	2010年2月
	2.5倍	2003年6月	2010年2月
	3.0倍	2003年6月	2010年2月

なる。全てのカテゴリで調査期間に0~1回とする条件は難しいが、ひげの長さの倍数が1.5倍では明らかに回数が多く、2.5か3.0倍が適切となる。

次に監視の閾値の違いによる、実際の現象の検出時期の違いについて確認した。2003年および2009~2010年の豊後水道長期的スロースリップについての検出時期を表1に示す。1.5倍の方が2.5倍、3.0倍より検出時期が早い、その差はほぼ一か月である。今回は毎月1日について調査しているため、一か月は最小単位であり、実際の検出時期の差はさらに小さい可能性がある。2.5倍と3.0倍では検出時期が同じため、ひげの長さの倍数として3.0倍を採用すると、実際の現象の検出時期はさほど遅くならず、より明らかな外れ値(異常値)を除くことができる。ひげの長さの倍数3.0倍のときの外れ値を除く最大

値(監視の閾値)を表2に示す。

4 まとめ

箱ひげ図(四分位数)を用いて外れ値を除去することにより、GNSS日値に関する面的監視の通常の変動について把握し、その監視に用いる閾値を調査した。閾値として用いる箱ひげ図のひげの長さの倍数は、外れ値の出現頻度と実際の現象の検出時期の検証により、このデータセットでは3.0倍の採用が適切と考えられる。

謝辞

本調査には国土地理院GEONETのGNSS座標値を使用した。面的監視には高山寛美氏のひずみ計算サブルーチンを使用している。解析および作図には統計ソフトR(R Core Team, 2012)を用いた。査読者の方には本稿の改善に対し有益な助言をいただいた。以上、記して感謝します。

文献

- 熊原啓作・渡辺美智子(2012): 身近な統計(改訂版), 放送大学テキスト, 296pp.
- 国土地理院(2011): 東北地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **86**, 184-272.
- 国土地理院測地観測センター(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**, 1-51.
- 小林昭夫(2005): GPS東海地域3時間解析値の面的監視, 験震時報, **68**, 99-104.
- 小林昭夫(2007): GPS東海地域6時間解析値の面的監視, 験震時報, **70**, 67-72.

Table 2 Maximum values (excluding outliers) in which the whiskers lengths are 3.0 times that of the box.

監視成分	東海・紀伊		四国	
	二か月間	一年間	二か月間	一年間
南北	2.5 mm	3.6 mm	2.2 mm	4.0 mm
東西	2.8 mm	4.6 mm	2.8 mm	5.8 mm
上下	7.1 mm	8.2 mm	7.1 mm	11.0 mm
発散	7.3×10^{-8} strain	15.0×10^{-8} strain	4.3×10^{-8} strain	7.2×10^{-8} strain
回転	6.1×10^{-8} strain	9.2×10^{-8} strain	4.3×10^{-8} strain	7.6×10^{-8} strain
せん断	4.8×10^{-8} strain	8.6×10^{-8} strain	3.2×10^{-8} strain	5.2×10^{-8} strain

- 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**, 17-42.
- 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**, 75-84.
- 西村卓也 (2012): 測地観測データに基づく東北日本の最近 120 年間の地殻変動, 地質学雑誌, **118**, 278-293.
- 原田昌武・細野耕司・小林昭夫・行竹洋平・吉田明夫 (2010): 富士山及び箱根火山の膨張歪と低周波地震活動, 火山, **55**, 193-199.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・高山博之 (2009): 東海地域の長期的スロースリップイベントおよび地震サイクルの再現の試み, 地震 2, **62**, 67-84.
- 防災科学技術研究所 (2011): 2011 年東北地方太平洋沖地震前の傾斜記録, 地震予知連絡会会報, **86**, 298-302.
- 和田かず美 (2010): 多変量外れ値の検出～MSD 法とその改良手法について～, 統計研究彙報, **67**, 89-157.
- Mao, A., C. G. A. Harrison, and T. H. Dixon (1999): Noise in GPS coordinate time series, *J. Geophys. Res.*, **104**, 2797-2816.
- Ozawa, S., Y. Hatanaka, M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire and Y. Ishigaki (2004): Aseismic slip and low-frequency earthquakes in the Bungo channel, southwestern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L07609, doi:10.1029/2003GL019381.
- Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, T. Nishimura (2002): Detection and Monitoring of Ongoing Aseismic Slip in the Tokai Region, Central Japan, *Science*, **298**, 1009-1012.
- R Core Team (2012): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

(編集担当 大竹和生・本間直樹)