

GNSSによる長期的スロースリップ客観検出手法の応用 —短期的スロースリップの検出と長期的スロースリップの規模推定—

小林昭夫（気象研究所地震津波研究部）

Application of an Objective Detection Method of Long-Term Slow Slip Events using GNSS Data: Detection of Short-Term Slow Slip Events and Estimation of Moment Magnitude of Long-Term Slow Slip Events

by

Akio Kobayashi¹

1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan

(Received June 2, 2020; Accepted October 16, 2020; Published January 21, 2021)

Abstract

Long-term and short-term slow slip events (SSEs) have occurred repeatedly in the Nankai Trough subduction zone, Japan. The SSEs may incrementally stress the adjacent parts of the locked megathrust zone. When SSEs occur, it is important to determine whether they are similar to previous repeated events, in order to judge whether the probability of occurrence of a large Nankai Trough earthquake is relatively high. In this study, we objectively detected short-term SSEs in the Nankai Trough subduction zone by correlating the GNSS daily and 6-hour coordinates with a ramp function with a one-week slope, excluding common noise and long-term trends. The spatiotemporal distribution of short-term SSEs detected was in good agreement with the occurrence of deep low-frequency earthquakes. In addition, assuming slip on a rectangular fault on a plate boundary, we estimated the moment magnitude of long-term SSEs from displacement data for two years and obtained results that were close to those of previous studies.

1. はじめに

中央防災会議が令和元年（2019年）5月に定めた「南海トラフ地震防災対策推進基本計画」に基づき、気象庁では「南海トラフ地震臨時情報」（以下、「臨時情報」という）と「南海トラフ地震関連解説情報」を発表することとなった。このうち、臨時情報の発表を検討する「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」が開催される条件として、南海トラフ沿いにおけるM6.8以上の地震発生の他に、通常とは異なるスロースリッ

プ（SSE）が発生している可能性がある場合などがある（気象庁2020）。通常とは異なるSSEが発生していることを判断するためには、通常時のSSEを客観的に把握しておくことや、新たなSSEを即時に検出することが必要となる。

Kobayashi（2017）はGNSS日座標値（日値）を用いて、南海トラフ沿いの長期的SSEをランプ関数との相関値により客観的に検出する手法を開発し、それまで試行錯誤的に検出していたSSE現象を一定条件で検出することに成功した。しかし、臨時情報の発表に結びつくSSEには継続時間に関する条件はなく、より継続時間が短い短期的SSEに相当する現象も含まれている。短期的SSEについては、主にボアホール型のひずみ計や傾斜計などで検出されていた（Obara *et al.* 2004; 小林・他 2006）が、データ処理を工夫することでGNSSでも

Corresponding author: Akio Kobayashi
Department of Seismology and Tsunami Research,
Meteorological Research Institute
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.
E-mail: akobayas@mri-jma.go.jp

規模によっては検出できることが示された (Nishimura *et al.* 2013)。同じ現象を複数の観測項目で監視することで観測結果の信頼度は向上すること、ひずみ計の観測点は GNSS と比較して数が少なく観測点分布が一樣ではないことから、ひずみ計や傾斜計に加えて、GNSS による検出も併用することが重要である。また、Kobayashi (2017) による手法は長期的 SSE に伴う変位の確からしさを示すもので、SSE の規模を推定するものではない。長期的 SSE および短期的 SSE について、GNSS データを用いて即時的に位置や規模を推定することを目標に、ここでは以下の手法を開発・検証した。

2 章では、Kobayashi (2017) の手法を応用し、注目する現象の継続時間を短くすることにより、GNSS 日値による短期的 SSE の客観的な検出を試みる。また、東海地域のみより時間発展の短い現象の検出のために、GNSS の 6 時間座標値 (6 時間値) が 3 時間ごとに求められている (小林 2007)。3 章では、この GNSS6 時間値を用いた場合の短期的 SSE の検出について検討する。4 章では、客観検出手法を応用した長期的 SSE の規模推定について試みる。

2. GNSS 日値による短期的スロースリップの客観検出

まずは Nishimura *et al.* (2013) でも扱われた GNSS 日値を用いた短期的 SSE の検出を行う。GNSS 日値は国土地理院 GEONET の最終解 (F3) (中川・他 2009) を用いた。用いたデータの期間は 1996 年 3 月から 2016 年 12 月である。観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセット (岩下・他 2009) は、国土地理院 Web ページで公開されている。GNSS 日値による南海トラフ沿いの長期的 SSE 客観検出のための Kobayashi (2017) の手法を簡単にまとめると以下のようになる。この手法から主に SSE の継続時間の違いに伴う変更や長期的 SSE によるトレンドの除去を行った。

- (1) 観測点の成分ごとに直線トレンド、人為的オフセット、地震時オフセット、年周・半年周成分を除去する。
- (2) 中国地方の観測点について日々の座標変化量の中央値を求め、全観測点から差し引くことで、広範囲に現れる共通ノイズ成分を除去する。
- (3) 観測点ごとの変位からフィリピン海プレートの沈み込み方向 N55°W (Miyazaki and Heki 2001) と逆方向に投影した成分を求める。
- (4) フィリピン海プレートの等深線 25 km に沿った一定間隔の地表の計算地点を中心とする矩形範囲内の観測点について、(3) で求めた変位成分を平均する。
- (5) 主な地震の余効変動を対数関数で近似して除去する。
- (6) 上記の処理をした平均変位時系列と 1 年間の傾斜期間を持つランプ関数との相関係数を求める。また、傾斜期間前後各 1 年間の平均変位の差である 2 年間変化量を求める。

- (7) 相関係数が 0.6 以上かつ変化量が 2 mm 以上のとき長期的 SSE 検出とみなす。

ここでは、短期的 SSE の発生場所に合わせて、上記の手法で処理 (4) の計算地点はフィリピン海プレートの等深線 30 km に沿うよう設定した。また、現象の継続期間が異なることを考慮し、処理 (6) においてランプ関数の傾斜期間を短期的 SSE の代表的な継続期間である 7 日間に変更した。ただし、その場合、長期的 SSE に伴う数か月から数年のトレンド変化が、その期間中の相関係数に影響を与えてしまう (Kobayashi (2017) の Fig. 5 参照) ため、長期的なトレンド変化をあらかじめ除去しておく必要がある。このため、処理 (1) と (2) の間に、観測点の成分ごとに一定期間 (前 365 日および前 90 日について試した) の座標の中央値を差し引く処理を追加した。評価する時点を中心に前後一定期間の中央値を差し引いた方が長期的 SSE によるトレンド変化の影響をより軽減できるだろうが、日々の監視に用いることを考慮して前の期間のデータのみを用いた。この処理に伴い処理 (5) の余効変動除去は省略した。また、処理 (4) において矩形範囲内の観測点の変位平均値の他に、外れ値に強く矩形範囲内の上位の値を抽出できる第 3 四分位数 (上から 1/4 の値) も求めた。パラメータとして前 365 日または前 90 日、平均値または第 3 四分位数があり、4 通りの組み合わせができる。

深部低周波地震の活発化と短期的 SSE には関係があることが指摘されている (Obara *et al.* 2004)。東海地方など南海トラフ沿いのひずみ計で検出された変化 (気象庁地震予知情報課 2008; 板場・他 2013 など) も深部低周波地震を伴っている (Fig. 1)。このため、深部低周波地震の活動時に検出され、それ以外の時期にはなるべく検出されないよう試行錯誤の結果、処理 (7) の検出基準は 7 日間のランプ関数との相関 0.6 以上、14 日間の変化量 1 mm 以上とした。

本手法で先ほどの 4 通りのパラメータの組み合わせについてそれらの検出結果を比較したところ、活発な深部低周波地震に対応する変化は共通して検出したが、小規模な活動に対してはパラメータの組み合わせごとに検出結果が異なる (Fig. 1)。これは、小規模な短期的 SSE に伴う地表変化は相対的に小さくノイズレベルぎりぎり、GNSS のデータ処理手法のわずかな違いにより検出されたりされなかったりするためと考えられる。より多くのパラメータの組み合わせで共通して検出されたイベントは SSE の可能性が相対的に高く、一つのパラメータの組み合わせでのみ検出されたイベントは可能性が低いだろう。また、検出されたほとんどが相関値 0.6~0.8 であるため、相関値の違いによる確からしさの情報も少ない。このため、4 通りのパラメータの組み合わせによる検出を行い、それらの検出結果の重ね合わせにより短期的 SSE 検出の確からしさの情報を含む時空間分布図 (Fig. 2) を作成した。

例として示した 2004~2005 年 2 年間の結果 (Fig. 2) を見ると本手法で検出された高相関の時期、つまり短期的 SSE の可能性の高い時期は深部低周波地震の活発な時期と一致していることが多く、深部低周波地震の

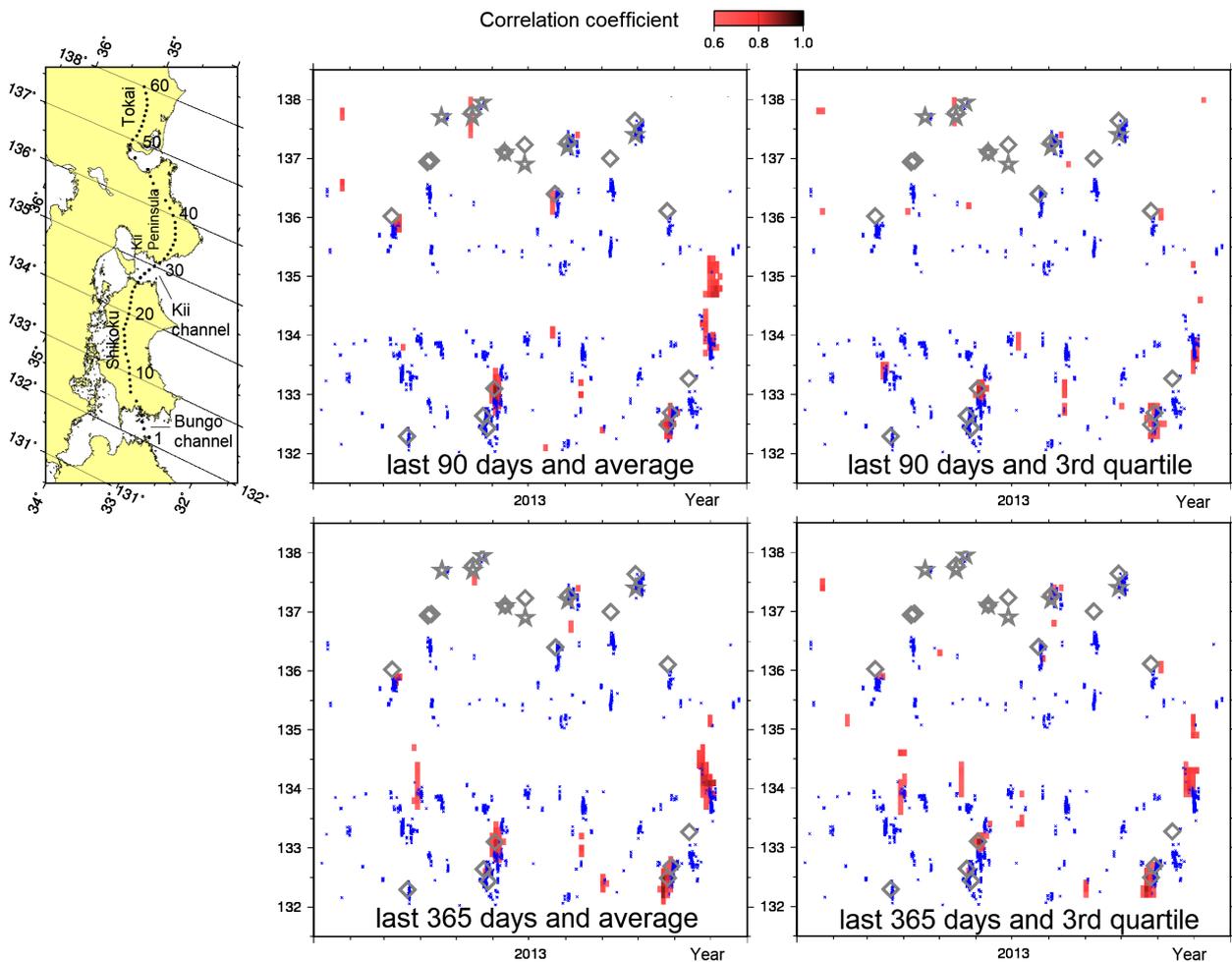


Fig. 1 Spatiotemporal distribution of detected short-term slow slip events under four parameter combinations along the Nankai Trough in 2013.

The location map shows our 60 calculation points at ~30 km depth on the Nankai Trough subduction interface. Colored regions indicate correlation coefficients greater than 0.6 and 14-day displacements greater than 1 mm under four parameter combinations (during the last 90 or 365 days, average or third quartile). Small blue crosses are the epicenters of deep low-frequency earthquakes. Gray stars represent short-term SSEs detected by strainmeters in the Tokai region operated by the Earthquake Prediction Information Division, JMA (2008). Gray diamonds indicate short-term SSEs detected by strainmeters and reported by Itaba *et al.* (2013, 2014a, 2014b).

発生していない時期にはあまり検出されていない。このことは、パラメータ調整の結果、本手法により短期的 SSE の時空間分布がある程度うまく把握できていることを示している。

Nishimura *et al.* (2013) により検出された短期的 SSE の時期と、本手法で検出された高相関の時期とを、深部低周波地震が南海トラフ沿いで比較的多く検出されるようになった時期と、2011 年東北地震の影響を考慮して 2002~2010 年まで比較した (Appendix Table S1)。本手法の検出結果は、Fig. 2 に示したように時空間の一つの位置に 4 つのパラメータの組み合わせによる検出数 (0~4) が入るが、時空間的に連続する検出を一つのイベントとして認識したい。このため、検出数 1 以上について、時空間的にその位置を取り囲む位置に検出数がある場合は同じイベントとする処理を繰り返し、最終的に各イベントについて検出数の合計を求めた。イベントの日付と経度は最大の相関を持つ位置とした。

調査期間中の Nishimura *et al.* (2013) によるイベント数 116 に近いイベント数になるように、本手法では検出数の合計が 5 以上について扱った (イベント数は 113)。Nishimura *et al.* (2013) と本手法とで共通して検出されたイベントは 56 例 (深部低周波地震が 5 個以上) と 6 例 (同 4 個以下)、Nishimura *et al.* (2013) のみ検出 (深部低周波地震が 5 個以上) は 31 例 (うち、本手法の検出数の合計が 1~4 は 13 例)、本手法のみ検出 (深部低周波地震が 5 個以上) は 21 例あった。同じ GNSS データを解析し、両手法で共通して検出されたイベントは半分程度あるが、それぞれ単独の検出結果も少なからず存在する。これは、短期的 SSE に伴う信号の大きさがノイズレベルに近いため、3 章でも他の事例について示すが、わずかな閾値の違いなどが検出結果に影響してくるためと考えられる。

東海地域のひずみ計により検出された短期的 SSE の発生時期 (気象庁地震予知情報課 2008) に、GNSS を

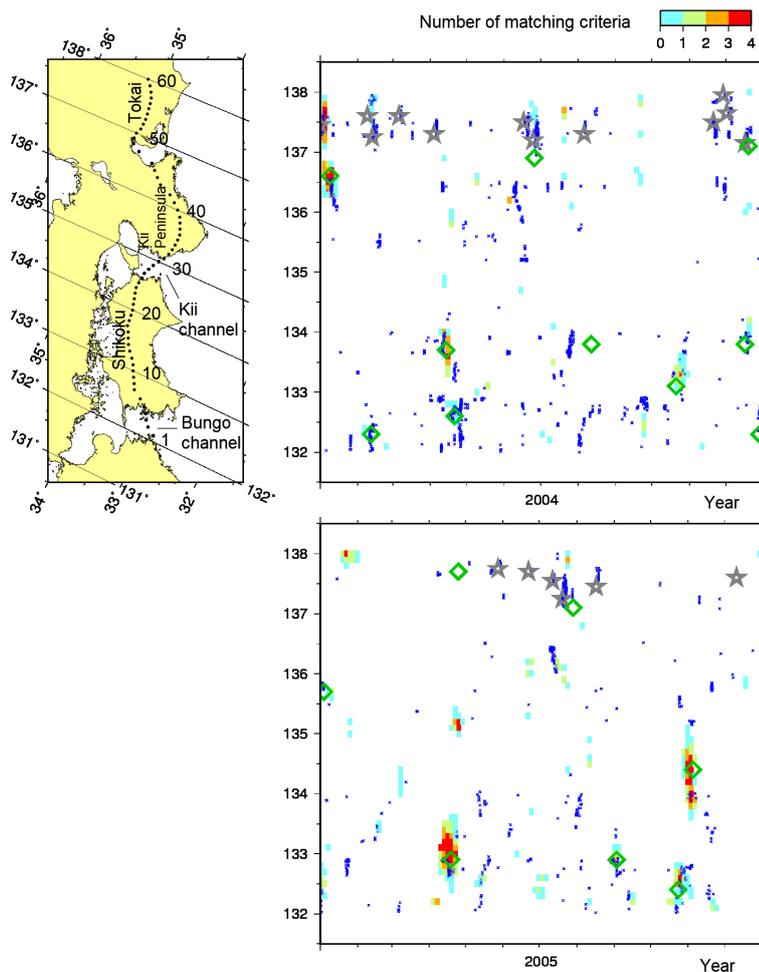


Fig. 2 Spatiotemporal distribution of short-term SSEs in the Nankai Trough subduction zone, 2004–2005.

Colored rectangular fields represent SSEs and the number of detection criteria that were met under the four parameter combinations for each calculation point shown in the location map. Green diamonds indicate short-term SSEs reported by Nishimura *et al.* (2013) using GNSS data. Small blue crosses are the epicenters of deep low-frequency earthquakes. Gray stars represent short-term SSEs detected by strainmeters in the Tokai region operated by the Earthquake Prediction Information Division, JMA (2008).

用いた本手法では検出されていない事例が多く見られる (Fig. 2)。これは短期的 SSE による地殻変動に関しては、ひずみ計の方が GNSS より感度が高いこと (Obara 2010) を反映している。そこで、GNSS を用いた本手法により、どの程度の規模の短期的 SSE について検出が可能かを確認した。1999～2016 年にひずみ計により検出された東海地域の短期的 SSE について、ひずみ計の解析から推定された SSE の規模 (手法は中村・竹中 (2004) による) と本手法による検出の有無との関係を Fig. 3 に示す。短期的 SSE の期間およびその前後 5 日以内に本手法で検出された場合にその SSE に対応付けた。本手法により検出された短期的 SSE の規模は、短期的 SSE が連続しているために対応付けられた一つを除き M5.3 以上で、ひずみ計により検出された最小規模より 0.2 程度大きい。ただし、本手法により規模 M5.3 以上のイベントがすべて検出されているわけではない。また、4 通りのパラメータの組み合わせのうち条件を満たした数 (図上の数字) とイベントの規模との間に明瞭な関係は見られない。これは GNSS に含まれる短期的 SSE の変位がノイズレベルに近く、気象や電離層などの条件により変位が検出できない場合もあるためと考えられる。

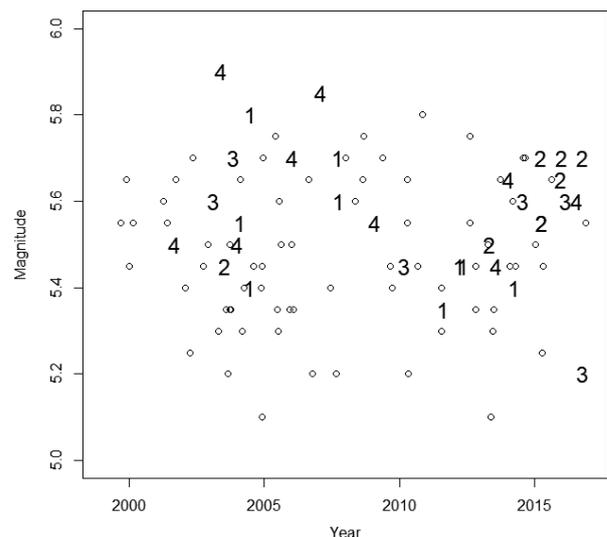


Fig. 3 Magnitude of short-term SSEs in the Tokai region detected by strainmeters.

The short-term SSE catalog (1999–2016) is based on information from the Earthquake Prediction Information Division, JMA (2008). Open circles denote events that were not detected in this study. Numerals indicate the date and magnitude of events detected in this study; their values represent the number of detection criteria that were met under the four parameter combinations.

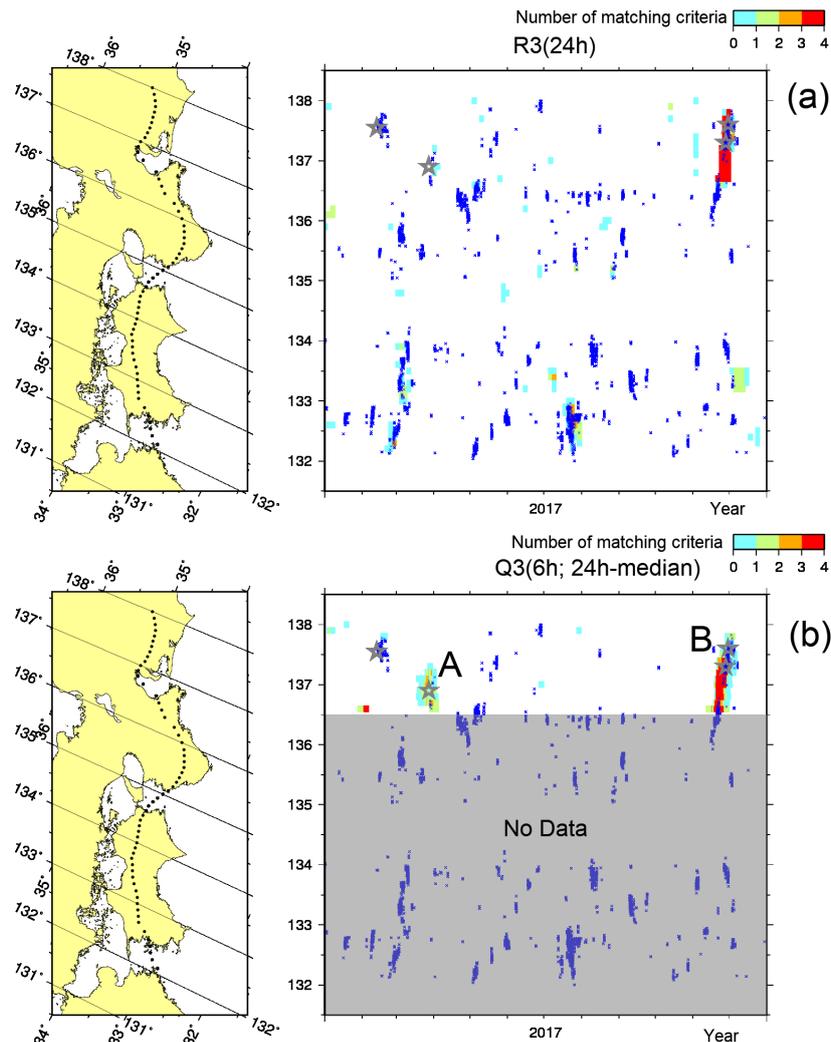


Fig. 4 Spatiotemporal distribution of detected short-term SSEs in the Nankai Trough subduction zone in 2017.

(a) Daily coordinate data (R3). (b) Median of 6-hour coordinate data from the previous 24 hours (Q3). Light-blue, light-green, orange, and red colors represent the numbers of detection criteria that were met under the four parameter combinations for the calculation points shown in the location map. Gray stars represent short-term SSEs detected by strainmeters in the Tokai region (Earthquake Prediction Information Division, JMA, 2008). In (b) there are no data from west of 136.5°E (shaded area).

3. GNSS6 時間値による東海地域の短期的スロースリップの客観検出

前章で述べたように、短期的 SSE の客観的な検出に、GNSS 日値が活用できると考えられる。しかし、「南海トラフ地震臨時情報」に結び付く「通常とは異なる SSE」には様々な時間発展を持つ現象が考えられる。GNSS 日値のデータは 1 日 1 個であり、解が得られるのは最終解 (F3) で 1 週間分まとめて 1 週間ごと、速報解 (R3) で 2 日後となる (中川・他 2009)。このため、より時間発展の短い現象の検出のために、東海地域のみ GNSS の 6 時間座標値 (Q3) が 3 時間ごとに国土地理院から気象庁に送られている (小林 2007)。この GNSS6 時間値についても、前節のような短期的 SSE 客観検出手法を適用できれば、早期の現象把握が期待できる。そのため、本手法について GNSS 日値と 6 時間値とではどの程度の検出能力の違いがあるのかを確

認しておく必要がある。確認に用いた 6 時間値のデータ期間は 2015 年 12 月 30 日から 2017 年 12 月 5 日の 2 年弱である。

2017 年 11 月 15 日から 12 月 5 日にかけて、奈良県から愛知・長野県境付近にかけて深部低周波地震とひずみ変化が観測された (気象庁 2018)。これに伴い、GNSS 日値による短期的 SSE 客観検出手法でも高相関が見られた (Fig. 4a)。

Fig. 5 にランプ関数との相関を取る直前の計算地点 51 (愛知県中部) における、日値および 6 時間値、6 時間値の過去 24 時間中央値の (領域内平均値の) 時系列を示す。11 月 25 日での 7 日間の傾斜を持つランプ関数との相関値は、日値 (R3 解) が 0.74、6 時間値が 0.44、6 時間値の過去 24 時間中央値が 0.72 であった。6 時間値はばらつきが大きいいためか相関値が低い、過去 24 時間中央値の変化は日値と似ており、相関値も日値と同程度であった。過去 24 時間中央値は、数時間で進行す

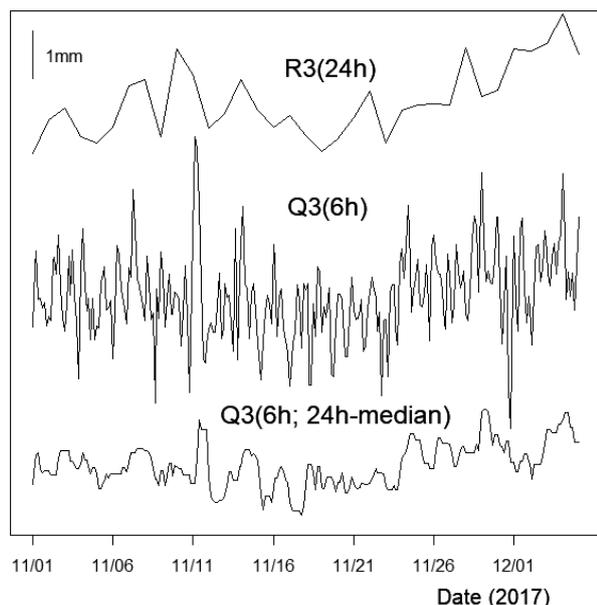


Fig. 5 Time series of displacements of calculation point 51 before correlation with the ramp function, November 1 to December 5, 2017.

From top to bottom: daily coordinates (R3), 6-hour coordinates (Q3), and median of 6-hour coordinates from the last 24 hours (last 90 days, average). See Fig. 1 for the location of calculation point 51.

るような急激な変化があった場合には元の6時間値より変化を検出しにくい、外れ値の影響を受けにくい。短期的SSEと同程度の時間変化の現象の場合は、日値は速報解R3でも解析に2日要するため、日値より6時間値による監視の方がより早く現象を検出できる可能性がある。

日値、および6時間値の過去24時間中央値を用いた短期的スロースリップ客観検出結果をFig. 4に示す。ランプ関数との相関係数と14日間の変化量については、日値同様に深部低周波地震の活動時に検出され、それ以外の時期はなるべく検出されないよう試行錯誤し、相関係数0.55以上、変化量0.5 mm以上の場合に検出基準を満たしたとした。ひずみ計で短期的SSEによる変化が検出されている2017年11月末から12月にかけての短期的SSE(図中B)については、4つのパラメータの組み合わせいずれも検出基準を満たした時空間分布(図中赤色)が志摩半島から愛知県への移動も含め日値と同程度となっている。一方、2017年3月下旬(図中A)については日値より6時間値の方が検出基準を満たした数が多い。この原因を確認するため、Fig. 6にこの期間のランプ関数との相関を取る直前の計算地点51(愛知県中部)における、日値および6時間値の過去24時間中央値の(領域内平均値の)時系列とランプ関数との相関をそれぞれ示す。日値と6時間値とでは監視間隔が異なること、ランプ関数との相関係数は日値が0.6、6時間値は0.55としたため、相関係数0.55から0.6の値が数日間あったことがFig. 4における検出結果の違いの原因と考えられる。ここでは6時間

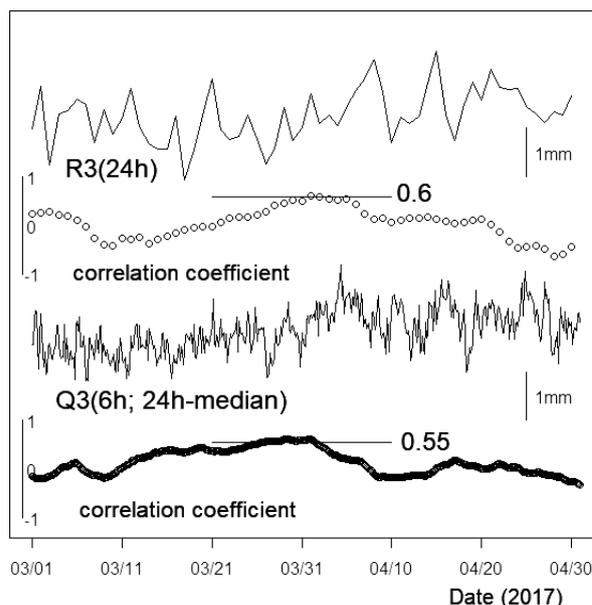


Fig. 6 Time series of displacements of calculation point 51 before correlation with the ramp function, March 1 to April 30, 2017.

From top to bottom: daily coordinate (R3), correlation coefficient between daily coordinates and the ramp function, median of 6-hour coordinates from the last 24 hours (last 90 days, average), and correlation coefficient between 6-hour coordinates and the ramp function.

値による短期的SSE検出の相関係数を0.55としたが、調査期間が2年弱と短いため、実際の運用時には検出結果の様子を見て調整する必要があるかもしれない。

4. 長期的スロースリップの規模推定

Kobayashi (2017) による長期的SSE客観検出手法は、ランプ関数との相関係数を求めているため、SSE発生の確からしさの目安にはなるものの、それらの規模についての情報は得られない。SSEの規模を得るためには、SSE発生期間のGNSS観測点における変位量からインバージョン(例えば、Yabuki and Matsu'ura 1992)などによる推定が必要となる。このような個別の解析をせずに、簡単に長期的SSEの規模を把握できれば、日々の監視に有益である。このため、各種仮定の下で客観検出処理を応用し、以下の手順で長期的SSEの規模の時空間分布を作成した。

- (1) フィリピン海プレートの等深線25 kmに沿った経度0.1度間隔の計算地点を中心としてプレート境界上に置いた30 km×30 kmの矩形断層上に、100 mmのすべり量を与えたときのGNSS観測点における理論変位を、半無限弾性体中の矩形断層による式(Okada 1992)により計算する。与えたすべりの大きさは、剛性率を 4.0×10^{10} N/m²とすると、地震モーメント M_0 の定義 $M_0 = \mu DS$ (μ : 剛性率、 D : すべり量、 S : 断層面積、単位: Nm)、 $\log M_0 = 1.5M_w + 9.1$ (Kanamori 1977)よりモーメントマグニチュード M_w 6.3相当となる。

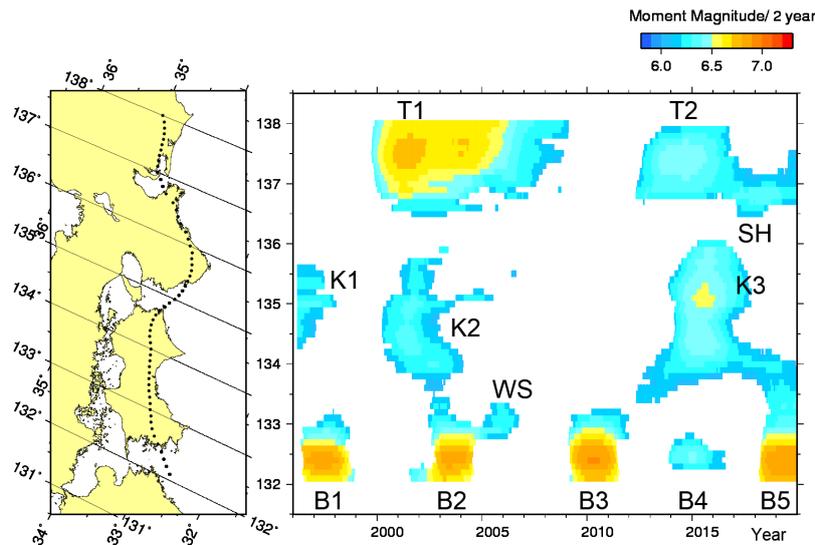


Fig. 7 Moment magnitude distribution of long-term SSEs in the Nankai Trough subduction zone, 1996–2019.

Values are equivalent to the moment magnitude per 2 years. T1 and T2: Tokai region, SH: Shima Peninsula, K1–K3: Kii Channel, WS: western Shikoku, B1–B5: Bungo Channel.

- (2) 計算地点を中心とする地表上の矩形範囲（フィリピン海プレートの沈み込み方向に 100 km、その直交方向に 50 km）内の観測点における、(1)の理論変位の沈み込み方向と逆方向に投影した成分の理論平均変位を求める。
- (3) 客観検出手法の 2 章(6)で算出された 2 年間の観測変位量と、上記(2)で求めた一定のすべり量を与えた場合の理論変位値とを比較する。このとき、2 年間の観測変位量が大きい／小さい場合でも、単純化のためすべりの範囲は(1)で設定した 30 km×30 km の矩形断層上にあると仮定する。矩形断層上のすべり量と地表変位量とは比例関係にあるため、2 年間の観測変位量から 2 年間あたりのすべり量を求めることができ、対応する M_w を算出する。すべりの範囲を固定した仮定の影響度については後で議論する。

上記の方法で推定した長期的 SSE の規模分布を Fig. 7 に示す。また、個々のイベントの規模について本研究と他研究で推定された結果との比較を Table 1 に示す。ここでは 2 年間の変化量を用いて推定したため、2 年より短い継続期間を持つ長期的 SSE の規模との比較が可能となる。紀伊水道 K1 は長期的 SSE 自体が今回データ処理した 1996 年 3 月以前から開始しており、データ期間の端にあたることもあり過小評価されている。紀伊水道 K2 は規模のわりに継続期間が長く、Kobayashi (2017) も 3 年間の変位量を用いて M_w を推定しているため過小評価された可能性がある。その他は本研究と他研究で推定された規模の差が概ね M_w 0.2 以内に収まっている。東海地域 T1 は長期的 SSE の継続期間が 2 年以上のため、本研究の規模との比較対象外だが、Ozawa *et al.* (2016) の図から 2 年あたりの規模を読み取ると M_w 6.8~7.0 で、本研究の値とほぼ一致している。

Table 1. Moment magnitude of long-term SSEs estimated in this and other studies. Event names correspond to Fig. 7.

Event	Period	This study	Other studies
T1	2000–2005	6.8	7.2 (Ozawa 2017)
T2	2013–2015	6.5	6.6 (Ozawa 2017)
SH	2017–2018	6.4	6.4 (Kobayashi and Tsuyuki 2019)
K1	1996–1997	6.3	6.7 (Kobayashi 2014) 6.7 (Ozawa 2017)
K2	2000–2002	6.3	6.6 (Kobayashi 2017)
K3	2014–2016	6.5	6.7 (Kobayashi 2017) 6.6 (Ozawa 2017)
WS	2005	6.3	6.5 (Kobayashi 2010) 6.0–6.3 (Ozawa 2017)
B1	1997	6.9	7.1 (Ozawa 2017) 6.9 (Takagi <i>et al.</i> 2019)
B2	2003	6.9	7.1 (Ozawa 2017) 6.9 (Takagi <i>et al.</i> 2019)
B3	2010	6.9	7.0 (Ozawa 2017) 6.9 (Takagi <i>et al.</i> 2019)
B4	2014–2015	6.4	6.2 (Ozawa 2017) 6.5 (Takagi <i>et al.</i> 2019)
B5	2018–2019	6.9	7.0 (Ozawa <i>et al.</i> 2020)

理論変位を計算したのは 30 km×30 km の矩形断層上の 100 mm のすべり (M_w 6.3 相当) であり、長期的 SSE の規模が大きくなった場合、プレート境界上のすべりの範囲も広がり、実際の変位のパターンとずれるおそれがある。このため、一番規模の大きな東海 2000–2005 年の長期的 SSE (高相関は 2008 年まで続いてい

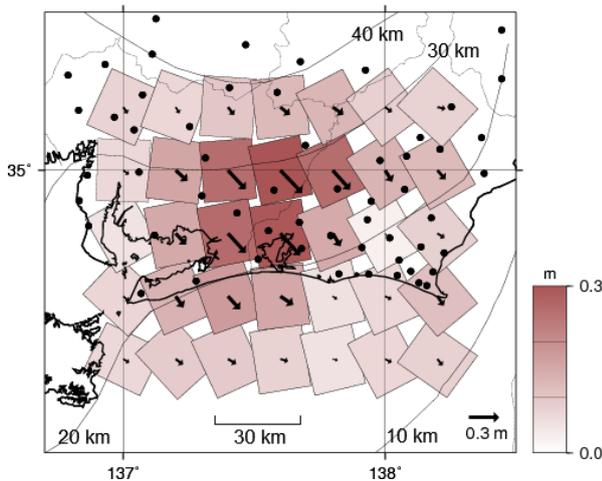


Fig. 8 Estimated slip distribution on the plate interface in the Tokai region.

Arrows indicate the motion of the overriding plate with respect to the subducting Philippine Sea plate in each colored rectangle. Solid circles are locations of GNSS stations. Contours show the depth of the top of the subducting plate (Hirose *et al.* 2008).

るように見える) について、GNSS 観測値からすべり分布と規模を推定し、それらを用いて観測点での理論変位を計算し、2 章手順(3)-(4)と同様の沈み込み方向と逆方向の成分の平均を求めてみた。

2 章手法(2)で処理した GNSS 日値を用い、各観測点の 2000 年 1 月の平均値と 2006 年 1 月の平均値の差から 6 年間の変位量を求め、この変位量から東海地域のプレート境界上のすべり分布を求めたものを Fig. 8 に示す。すべり分布インバージョンの手法は Kobayashi and Tsuyuki (2019) と同様である。2004 年 9 月 5 日紀伊半島南東沖の地震 M 7.4 によるオフセットは除いてあり、余効変動(水藤・小沢 2009)は除いていないが、ここでの目的は長期的 SSE の規模の詳細な推定ではないので余効変動の影響は無視する。推定されたすべりの規模は Mw 7.13 相当で、浜名湖の北側にすべりの中心がある。すべりの中心の深さは 25 km 付近にあり、本手法で用いた計算地点の深さと同じである。このすべり分布を用いて各観測点での理論変位を計算した。すべりの中心に近い Fig. 7 に示された東経 137.5 度

の計算地点における、フィリピン海プレート沈み込みと逆方向の平均変位(2 章手法(4)参照)は 59.2 mm となる。本手法で平均変位 59.2 mm を観測したときに対応する(30 km×30 km の矩形断層上のすべりと比較したときの)すべりの規模は Mw 7.06 となり、本手法の方が過小評価となるが、その差は 0.1 未満であった。

5. まとめ

GNSS 日値を用いた長期的 SSE の客観検出手法(Kobayashi 2017)を用いて 3 つの応用を行った。一つ目は GNSS 日値から長期トレンドを除き、注目する変化期間を 7 日間にすることで短期的 SSE の検出を行い、検出された期間と短期的 SSE に伴う深部低周波地震の発生時期との一致が見られた。二つ目は GNSS6 時間値を用いて先ほどの短期的 SSE の検出を行い、6 時間値の過去 24 時間中央値を用いた場合に日値と同程度の検出結果が得られた。三つ目は計算地点に置いた矩形断層上に既知のすべり量を与えて観測点における理論変位をあらかじめ計算しておき、観測値と理論変位を比較して発生した長期的 SSE の規模を推定するもので、既に報告された長期的 SSE の規模と比較して一部を除き Mw の差が 0.2 以内に収まった。なお、2020 年度より国土地理院から気象庁にリアルタイムに提供される GNSS6 時間値が、これまでの東海地域から南海トラフ沿いに拡大された。これらの処理は気象庁における GNSS を用いた各種 SSE の監視に用いられることが期待される。

謝 辞

GNSS 座標値および人為的オフセット値は国土地理院より入手した。矩形断層による理論変位の計算には MICAP-G(内藤・吉川 1999)を用いた。すべり分布インバージョンの計算には、Kobayashi and Tsuyuki (2019)と同じく露木貴裕氏作成のツールを用いた。作図には GMT(Wessel *et al.* 2013)、R(R Core Team 2012)を用いた。匿名の 2 名の査読者と対馬弘晃編集委員には、原稿の改善に役立つ有益なコメントをいただいた。

以上、記して感謝します。

付 録

Table S1. Comparison of short-term SSEs detected by Nishimura *et al.* (2013) and this study (2002–2010)

Ranks A, B, and C of Nishimura *et al.* (2013) refer to probable SSEs, possible SSEs, and non-SSEs, respectively. Total number of detection criteria is the sum of adjacent spatiotemporal values. Only events meeting more than five detection criteria of this study are shown (except in category B). The meaning of the categories is as follows. A: Detected by both studies and the number of low frequency earthquakes (LFEs) is five or more; B: Detected only by Nishimura and the number of LFEs is five or more (if the total number of detection criteria is 4 or less, only that number is shown); C: Detected only by this study and the number of LFEs is five or more; D: Detected by both studies and the number of LFEs is four or less.

Category	Nishimura			Total number of Maximum detection correlation				LFE	Comment
	Lon.	Rank	This study	Lon.	criteria	coefficient			
D	2002-01-15	133 A	2002-01-05	133.7	11	0.76	2		
	2002-01-16	135.8 B	2002-01-11	133	35	0.89	1		
D	2002-02-02	135.2 B	2002-01-14	135.9	5	0.73	0		
			2002-01-29	132.1	5	0.77	0		
A	2002-02-03	137.3 A	2002-02-19	132.8	82	0.90	1		
							5≦		
C	2002-02-19	132.8 A	2002-02-19	133.8	17	0.82	5≦		
							4		
B	2002-03-14	136.6 A	2002-02-22	135.7	18	0.76	4		
							5≦		
B	2002-04-04	135.7 C	2002-04-29	137.3	13	0.79	0		
							5≦		
C	2002-05-16	137.2 A	2002-05-17	133.4	35	0.81	5≦		
							5≦		
D	2002-05-19	137.8 A	2002-05-20	137.8	5	0.72	0		
							0		
B	2002-06-05	136.9 A	2002-07-04	132.2	8	0.69	4		
							5≦		
C	2002-07-23	136 A	2002-08-06	135.6	25	0.80	5≦		
							5≦		
A	2002-08-15	132.4 A	2002-08-09	132.5	17	0.77	5≦		
							5≦		
D	2002-09-03	137.7 B	2002-09-05	137.9	32	0.74	0		
							0		
A	2002-10-17	133.3 A	2002-10-17	133.5	40	0.82	5≦		
							5≦		
B	2002-11-21	137.2 A	2002-12-22	132.5	22	0.79	5≦		
							5≦		
A	2002-12-25	132.3 A	2002-12-25	134.1	10	0.78	0		
							5≦		
B	2003-02-04	136.1 A	2003-02-14	132.5	19	0.74	0		
							0		
A	2003-02-06	133.8 A	2003-02-17	137.4	11	0.69	5≦		
							5≦		
A	2003-03-13	132.7 A	2003-03-19	132.8	21	0.81	5≦		
							5≦		
A	2003-04-12	133.1 A	2003-04-12	133.1	7	0.69	5≦		
							5≦		
C	2003-04-18	132.2	2003-04-18	132.2	8	0.80	5≦		
							0		
A	2003-04-30	136	2003-04-30	136	5	0.71	0		
							0		
A	2003-05-03	132.8	2003-05-03	132.8	7	0.76	0		
							5≦		
A	2003-06-02	136.8 A	2003-06-02	136.8	118	0.92	5≦		
							0		
A	2003-06-17	134 A	2003-07-17	137.9	29	0.73	5≦		
							5≦		
C	2003-07-14	137.7 A	2003-07-20	137	12	0.68		a series of event of 07-14	
							5≦		
B	2003-07-29	132.6	2003-07-29	132.6	6	0.66	5≦		
							5≦		
B	2003-07-30	135.5 A	2003-08-01	136	8	0.72	0		
							5≦		
B	2003-08-07	136.5 A	2003-08-01	136	8	0.72	0		
							5≦		
A	2003-09-13	133.7 A	2003-09-09	134	38	0.82	5≦		
							5≦		
C	2003-09-09	135.7	2003-09-09	135.7	6	0.78	5≦		
							2		
			2003-09-18	134.6	16	0.71	2		

Table S1. Continued.

Category	Nishimura	Lon.	Rank	Total number of		Maximum correlation coefficient	LFE	Comment
				This study	Lon. criteria			
A	2003-09-25	132.2	A	2003-09-27	132.3	369	0.93	5≦
				2003-10-15	135.2	17	0.79	2
				2003-10-30	132.1	33	0.83	a series of event of 09-27
C				2003-11-08	137.2	12	0.76	5≦
	2003-11-22	132.9	A					a series of event of 09-27
C				2004-01-04	137.5	39	0.86	5≦
A	2004-01-09	136.6	A	2004-01-10	136.7	52	0.86	5≦
B	2004-02-12	132.3	A			2		5≦
B	2004-02-14	137.3	C			2+3		5≦
A	2004-04-14	133.7	A	2004-04-15	133.8	32	0.83	5≦
A	2004-04-21	132.6	A	2004-04-21	132.6	5	0.67	5≦
C				2004-06-05	136.3	5	0.74	5≦
A	2004-06-26	136.9	A	2004-06-26	137.7	9	0.74	5≦
				2004-07-20	137.7	9	0.65	0
	2004-08-12	133.8	A					0
	2004-09-14	137.9	C			2		0
				2004-09-24	132.4	5	0.73	0
	2004-09-24	137.2	C					0
A	2004-10-21	133.1	A	2004-10-27	133.3	26	0.77	5≦
A	2004-12-17	133.8	A	2004-12-20	134	7	0.71	5≦
B	2004-12-20	137.1	A					5≦
A	2004-12-29	132.3	A	2005-01-01	132.5	9	0.75	5≦
B	2005-01-04	135.7	A			3		5≦
D	2005-01-23	137.7	C	2005-01-22	137.9	20	0.78	なし
				2005-03-11	134.4	6	0.74	1
				2005-04-07	132.2	5	0.73	0
A	2005-04-19	132.9	A	2005-04-19	133.1	119	0.94	5≦
				2005-04-25	135.1	18	0.72	0
	2005-04-25	137.7	A					0
C				2005-05-13	132.5	7	0.77	5≦
				2005-07-03	132.3	6	0.70	0
A	2005-07-17	135.8	C	2005-07-15	136.1	7	0.79	5≦
				2005-07-24	137.9	5	0.66	0
	2005-07-27	134.7	C					0
B	2005-07-29	137.1	A					5≦
				2005-08-11	134.6	5	0.68	0
A	2005-09-03	132.9	B	2005-09-01	133	9	0.66	5≦
				2005-10-19	132.2	5	0.79	a series of event of 10-25
A	2005-10-24	132.4	A	2005-10-25	132.6	38	0.86	5≦
A	2005-11-05	134.4	A	2005-11-03	133.9	96	0.92	5≦
A	2006-01-10	136.6	A	2006-01-17	136.8	56	0.89	5≦
A	2006-01-21	132.9	A	2006-01-20	133.3	25	0.90	5≦
A	2006-02-21	134	A	2006-02-19	133.8	7	0.76	5≦
				2006-03-07	137.9			0
A	2006-03-17	135.6	A	2006-03-15	136	14	0.71	5≦
C				2006-04-20	132.7	23	0.70	5≦
				2006-05-23	136.4	13	0.69	0
C				2006-06-01	133.2	18	0.78	5≦
				2006-06-24	134.7			0
	2006-06-27	133.1	B					0

Table S1. Continued.

Category	Nishimura	Lon.	Rank	Total number of		Maximum correlation coefficient	LFE	Comment	
				This study	Lon. criteria				
B	2006-07-20	137.3	A				5 ≦		
	2006-07-25	135.5	A				0		
C				2006-07-28	133.9	6	0.67	5 ≦	
				2006-08-03	135.7	6	0.67	1	
				2006-08-09	137.4	13	0.73	0	
A	2006-09-17	132.5	A	2006-09-17	132.7	22	0.76	5 ≦	
				2006-09-26	137.5	10	0.73	0	
B	2006-10-05	132.5	B			3		5 ≦	
C				2006-10-26	133.2	19	0.80	5 ≦	
B	2006-11-11	136.3	A			1			
A	2006-11-11	134	A	2006-11-10	133.9	19	0.79	5 ≦	
C				2006-12-19	135.6	7	0.72	5 ≦	
A	2007-02-09	137.2	A	2007-02-11	137.2	56	0.80	5 ≦	
A	2007-03-13	132.6	A	2007-03-13	132.2	10	0.80	5 ≦	
				2007-03-13	132.7	16	0.75		event with the above
A	2007-03-19	134.1	B	2007-03-25	134.4	5	0.74	5 ≦	
B	2007-03-23	136.2	B			3		5 ≦	
A	2007-05-10	133.1	A	2007-05-09	133	49	0.78	5 ≦	
	2007-06-21	134.7	A					0	
A	2007-07-23	136.6	A	2007-07-20	136.3	6	0.76	5 ≦	
C				2007-07-23	135.8	6	0.73	5 ≦	
C				2007-07-26	135	5	0.69	5 ≦	
C				2007-08-16	133.6	37	0.80	5 ≦	
B	2007-08-28	137.8	B					5 ≦	
A	2007-09-09	132.5	A	2007-09-12	132.6	6	0.68	5 ≦	
B	2007-10-09	137.2	A			2		5 ≦	
B	2007-10-17	133.1	A			3		5 ≦	
B	2007-11-14	136.1	A					5 ≦	
				2007-11-26	135.2	32	0.86	4	
B	2007-12-24	132.2	A			3		5 ≦	
B	2008-02-14	133.8	A					5 ≦	
A	2008-03-07	136.6	A	2008-03-13	136.3	5	0.71	5 ≦	
A	2008-03-11	135.4	C	2008-03-16	135.8	7	0.80	5 ≦	
				2008-03-16	137.6	16	0.81	0	
B	2008-03-25	132.9	A			3		5 ≦	
	2008-04-06	137.7	A					0	
B	2008-06-21	136.1	A					5 ≦	
	2008-07-15	133.3	C			2		0	
B	2008-08-21	137.5	A					5 ≦	
A	2008-09-30	132.5	A	2008-09-30	132.6	28	0.84	5 ≦	
A	2008-10-14	133.7	A	2008-10-18	133.6	105	0.88	5 ≦	
B	2008-11-13	136.6	A					5 ≦	
B	2009-01-19	133.8	A					5 ≦	
A	2009-02-06	135.3	A	2009-02-06	135.2	6	0.71	5 ≦	
A	2009-02-08	137.2	A	2009-02-06	137.1	18	0.79	5 ≦	
	2009-04-02	137.7	A					0	
A	2009-04-12	132.6	A	2009-04-10	132.8	17	0.73	5 ≦	
A	2009-05-14	136.9	A	2009-05-19	136.8	7	0.72	5 ≦	
A	2009-06-01	133.1	A	2009-05-28	133.2	128	0.91	5 ≦	
B	2009-06-20	134.1	A					5 ≦	

Table S1. Continued.

Category	Nishimura	Lon.	Rank	Total number of		Maximum correlation coefficient	LFE	Comment
				This study	Lon. criteria			
A	2009-07-07	135.6	B	2009-07-09	135.9	36	0.78	5 ≦
	2009-08-11	137.7	C					0
				2009-08-14	132.4	8	0.70	0
				2009-08-23	137.9	6	0.65	0
A	2009-09-27	134.5	A	2009-09-22	134.2	10	0.74	5 ≦
B	2009-10-19	136.4	A			2		5 ≦
A	2009-11-04	132.6	A	2009-11-06	132.5	82	0.91	5 ≦
				2009-12-12	132.3	25	0.79	2
				2009-12-15	133.2	14	0.80	a series of event of 12-12
A	2009-12-29	133.1	A	2009-12-30	133.6	99	0.90	5 ≦
	2010-01-19	135.2	B					0
	2010-02-06	136.6	B					0
A	2010-03-10	132.3	A	2010-02-22	132.5	362	0.94	5 ≦
A	2010-03-09	137.1	A	2010-03-12	136.7	21	0.82	5 ≦
A	2010-04-19	133.9	A	2010-04-20	134.1	120	0.93	5 ≦
				2010-05-05	132.1	12	0.86	a series of event of 02-22
C				2010-05-26	132.3	49	0.92	5 ≦
A	2010-05-24	136.6	A	2010-05-26	136.6	12	0.86	5 ≦
C				2010-06-22	132.2	5	0.65	5 ≦
A	2010-07-14	133	A	2010-07-19	133.5	31	0.70	5 ≦
C				2010-07-22	135.7	26	0.74	5 ≦
A	2010-07-31	134.4	A	2010-07-31	134.3	30	0.74	5 ≦
A	2010-08-15	132.5	A	2010-08-15	132.4	50	0.79	5 ≦
	2010-09-06	136.2	A					0
D	2010-09-09	137.7	A	2010-09-05	137.8	8	0.65	0
B	2010-10-01	136	B			1		5 ≦
B	2010-11-15	134.1	A					5 ≦
A	2010-12-10	132.2	A	2010-12-13	132.3	21	0.77	5 ≦

参考文献

- Hirose, F., J. Nakajima and A. Hasegawa, 2008: Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography. *J. Geophys. Res.*, **113**, B09315, doi:10.1029/2007JB005274.
- 板場智史, 北川有一, 小泉尚嗣, 高橋誠, 松本則夫, 武田直人, 木村尚紀, 木村武志, 松澤孝紀, 汐見勝彦, 2013: 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2012年11月~2013年4月). 地震予知連絡会会報, **90**, 254-269.
- 板場智史, 小泉尚嗣, 高橋誠, 松本則夫, 北川有一, 武田直人, 木村尚紀, 木村武志, 松澤孝紀, 汐見勝彦, 2014a: 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2013年5月~10月). 地震予知連絡会会報, **91**, 230-242.
- 板場智史, 小泉尚嗣, 高橋誠, 松本則夫, 北川有一, 落唯史, 武田直人, 木村尚紀, 木村武志, 松澤孝紀, 汐見勝彦, 2014b: 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2013年11月~2014年4月). 地震予知連絡会会報, **92**, 238-249.
- 岩下知真子, 梅沢武, 川元智司, 野神頤, 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.
- Kanamori, H., 1977: The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **82**(20), 2981-2987, doi:10.1029/JB082i020p02981.
- 気象庁, 2018: 南海トラフ周辺の地殻活動 (2017年11月~2018年4月). 地震予知連絡会会報, **100**, 219-239.
- 気象庁, 2020: 南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会/地震防災対策強化地域判定会. 地震予知連絡会 50年のあゆみ, 239-243.
- 気象庁地震予知情報課, 2008: 微小な歪変化が検出された短期的スロースリップの抽出. 地震予知連絡会会報, **80**, 278-282.
- 小林昭夫, 2007: GPS 東海地域 6 時間解析値の面的監視. 地震予知連絡会会報, **70**, 67-72.
- 小林昭夫, 2010: 四国西部において 2005 年に発生した小規模な長期的スロースリップ. 地震 2, **63**, 97-100. doi:10.4294/zisin.63.97.
- Kobayashi, A., 2014: A long-term slow slip event from 1996 to 1997 in the Kii Channel, Japan. *Earth, Planets and Space*, **66**:9, doi:10.1186/1880-5981-66-9.
- Kobayashi, A., 2017: Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough using GNSS data (1996-2016). *Earth, Planets and Space*, **69**:171, doi:10.1186/s40623-017-0755-7.
- Kobayashi, A. and T. Tsuyuki, 2019: Long-term slow slip event detected beneath the Shima Peninsula, central Japan, from GNSS data. *Earth, Planets and Space*, **71**:60, doi:10.1186/s40623-019-1037-3.
- 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 2, **59**, 19-27, doi:10.4294/zisin.59.19.
- Miyazaki, S. and K. Heki, 2001: Crustal velocity field of southwest Japan: Subduction and arc-arc collision. *J. Geophys. Res.*, **106**, 4305-4326, doi:10.1029/2000JB900312.
- 内藤宏人, 吉川澄夫, 1999: 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発. 地震 2, **52**, 101-103, doi:10.4294/zisin.1998.52.1_101.
- 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, 菅原安広, 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.
- 中村浩二, 竹中潤, 2004: 東海地方のプレート間すべり推定ツールの開発. 地震予知連絡会会報, **68**, 25-35.
- Nishimura, T., T. Matsuzawa and K. Obara, 2013: Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough, southwest Japan, using GNSS data. *J. Geophys. Res.*, **118**, doi:10.1002/jgrb.50222.
- Obara, K., 2010: Phenomenology of deep slow earthquake family in southwest Japan: Spatiotemporal characteristics and segmentation. *J. Geophys. Res.*, **115**, B00A25, doi:10.1029/2008JB006048.
- Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu and K. Kasahara, 2004: Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L23602, doi:10.1029/2004GL020848.
- Okada, Y., 1992: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- Ozawa, S., 2017: Long-term slow slip events along the Nankai trough subduction zone after the 2011 Tohoku earthquake in Japan. *Earth, Planets and Space*, **69**:56, doi:10.1186/s40623-017-0640-4.
- Ozawa, S., M. Tobita and H. Yari, 2016: A possible restart of an interplate slow slip adjacent to the Tokai seismic gap in Japan. *Earth, Planets and Space*, **68**:54, doi:10.1186/s40623-016-0430-4.
- Ozawa, S., R. Kawabata, K. Kokado and H. Yari, 2020: Long-term slow slip events along the Nankai trough delayed by the 2016 Kumamoto earthquake, Japan. *Earth, Planets and Space*, **72**:61, doi:10.1186/s40623-020-01189-z.
- 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/>.
- 水藤尚, 小沢慎三郎, 2009: 東海地方の非定常地殻変動ー東海スロースリップと 2004 年紀伊半島南東沖の地震の余効変動ー. 地震 2, **61**, 113-135.
- Takagi, R., N. Uchida and K. Obara, 2019: Along-strike variation and migration of long-term slow slip events in the western Nankai subduction zone, Japan. *J. Geophys. Res.*, **124**, doi:10.1029/2018JB016738.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. Luis and F. Wobbe, 2013: Generic mapping tools: Improved version released. *Eos Trans. AGU*, **94**(45), 409-410, doi:10.1002/2013EO450001.
- Yabuki, T. and M. Matsu'ura, 1992: Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip. *Geophys. J. Int.*, **109**, 363-375, doi:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00102.x.

GNSS による長期的スロースリップ客観検出手法の応用 —短期的スロースリップの検出と長期的スロースリップの規模推定—

小林昭夫（気象研究所地震津波研究部）

Kobayashi (2017) は、GNSS データの共通ノイズを低減し、1 年間の傾斜期間を持つランプ関数との相関を取ることで、南海トラフ沿い長期的スロースリップの客観検出を行った。ここではこの手法を応用し、南海トラフ沿い短期的スロースリップの客観的な検出を行った。GNSS 日値および 6 時間値について長期トレンドを除き、1 週間の傾斜期間を持つランプ関数との相関を取った。本手法により検出された時空間分布は、深部低周波地震の活発化とよく一致していた。また、Kobayashi (2017) は長期的スロースリップに伴う変位を検出したが、ここではその手法を応用して検出された長期的スロースリップの規模推定を行い、先行研究とほぼ一致した結果が得られた。