

## 12-17 短期的スローイベントと微動の準リアルタイムでの検知能力

### Quasi-realtime detection capability of short-term slow slip event and tremor

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

小原一成<sup>1</sup>・廣瀬仁・木村武志・松澤孝紀

(<sup>1</sup> 現東京大学地震研究所)

Kazushige Obara, Hitoshi Hirose, Takeshi Kimura and Takanori Matsuzawa

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan

#### 1. はじめに

西南日本に沈み込むフィリピン海プレートと上盤プレートとの境界に沿って、巨大地震発生領域深部では間歇的にゆっくりすべり現象が発生し、それに伴って通常の地震に比べると低周波数成分に卓越する振動現象が観測される。振動現象としては、1.5-5Hz 程度に卓越する深部低周波微動<sup>1)</sup> やその構成要素としての深部低周波地震<sup>2)</sup>、周期 20 ~ 200 秒に卓越する深部超低周波地震<sup>3), 4)</sup> がこれまでに確認されている。これらの現象は、いくつかの領域（セグメント）に分かれ、それぞれの領域では周期的に発生するが、必ずしもすべてがそろって検知されるとは限らない。例えば、深部低周波微動が検出された場合でも、地殻変動としてのスロースリップイベント（SSE）が測地学的観測記録では認識できないことも多い。本資料では、防災科学技術研究所（以下、防災科研）が実施している深部低周波微動、超低周波地震、および SSE のモニタリングの現状と検知能力について示す。

#### 2. 傾斜観測による短期的スロースリップイベント（SSE）検知能力

##### 2-1. 概要

防災科研では、高感度地震観測網 Hi-net の地中地震観測装置に併設されている高感度加速度計水平動成分の DC 出力に基づいて、地殻傾斜観測を行っている。西南日本の深部低周波微動発生領域では、活発な微動活動に伴って地殻傾斜変動が観測される場合があり、この変動はプレート境界における逆断層型のスロースリップイベント（SSE）によるものである<sup>5)</sup>。この SSE の継続時間はおおよそ 1 週間以内で、2000 年後半から 2005 年まで東海地域で発生した SSE や、1996-1997 年、および 2003 年に豊後水道で発生した SSE に比べると継続時間が 2 桁程度短く、これらの年のオーダーで継続する「長期的 SSE」に対して、微動活動に同期した SSE 現象は「短期的 SSE」と定義される<sup>6)</sup>。西南日本に見られる微動活動に同期した短期的 SSE 現象は、北米大陸太平洋沿岸の Cascadia 地方でも観測されている<sup>7)</sup>。Cascadia ではイベントの規模も大きく（M6.5 前後）、GPS 観測網によって現象の検出、断層パラメタの推定がなされているが、西南日本で検出される短期的 SSE の規模は M6.0 前後と小さく、国土地理院の GPS 観測網 GEONET での検出は困難であり、ほとんどの場合、防災科研のボアホール傾斜計や気象庁・産総研等のボアホールひずみ計によって検出される。

## 2-2. SSE の規模と検出状況

2001 年から 2008 年までに防災科研傾斜計によって検出され、かつ断層パラメタが推定された SSE は全部で 55 であり (図 2a)<sup>8)</sup>, 検出される SSE の規模の下限はほぼ Mw5.5 である (図 2b). 観測される傾斜変化量は, 四国では分布のピークが  $0.05 \mu \text{radian}$  であるのに対し, 東海 (愛知) ではピークが  $0.03 \mu \text{radian}$  と小さい (図 2c). このことは, 短期的 SSE の規模に影響されると考えられる. 図 2d に短期的 SSE の検出状況を, 微動の時空間分布に重ねて示す.

## 3. SSE 時間発展解析

前節では, ひとつの矩形領域で均質なすべり分布を仮定した場合におけるインバージョンの結果を示したが, 活発な微動活動の場合には微動発生領域が 1 日約 10km の速度で移動するのに伴って, すべり源も移動する. そのようなすべり過程を求めるために, すべりの時間発展を考慮したインバージョン手法を開発した<sup>10)</sup>. ここでは, すべりの発生源としてプレート境界上に 10km 四方の小断層を固定的に配置し (図 3a), 観測された傾斜データを最も説明するようにすべり過程を推定した. 2005 年 5 月のエピソードにおける傾斜データフィッティング例を図 3b に示す. 1 日毎のすべり速度分布のスナップショットを見ると (図 3c), すべりの中心と微動分布がともに南西から北東に移動していることがわかる. 過去に発生した 7 回のエピソードについて同様の解析を行った結果, すべり量の大きな領域は毎回ほぼ同じ場所に重なる (図 3d).

## 4. SSE 自動検出

### 4-1. 概要

防災科研傾斜計データを用いて, 短期的 SSE を自動検出する手法を開発した. この手法を四国地域の傾斜計データに適用した結果, 手動で検出されていた 24 イベント中 19 イベントを自動検出することが出来た. また, 手動検出では捉えられていなかった四国中部での短期的 SSE を新たに検出することが出来た.

### 4-2. 自動検出手法 (図 4a)

#### ① 最適 SSE モデルの推定

まず, 解析期間内で短期的 SSE が発生していると仮定して, SSE の最適モデルを傾斜計データから推定する. ここでは, 各観測点の傾斜時系列データを背景トレンド成分 (直線) と SSE 応答成分でモデル化する. SSE の震源モデルは, 単純な矩形断層面上の一様すべりとし, すべり速度は各イベント中一定とする. この様な SSE の断層モデルを予め複数個仮定し, 最適なものをグリッドサーチする. モデルパラメータは SSE の断層モデル  $i$ , 開始時刻  $\tau$ , 継続時間  $T_0$ , すべり量  $A_i$ , 各観測点の背景トレンドを表す  $b_j$ ,  $c_j$  である. このうち  $A_i$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  は線形最小二乗法で推定し,  $i$ ,  $\tau$ ,  $T_0$  についてはグリッドサーチで推定する.

#### ② SSE を含むモデルと含まないモデルの比較

①と同じデータを背景トレンド成分のみでモデル化する (SSE を含まないモデル). 得られた

モデルと①の SSE を含むモデルを比較する。SSE を含まないモデルに対する SSE を含むモデルの Variance Reduction (以下, V. R.) が閾値を超えた場合, SSE が発生している可能性があるとし, 後でチェックを行う (③)。また別の SSE を探索するために, 推定された SSE 応答成分を観測データから除去し, ①に戻る。

### ③ 広域で捉えられたイベントの抽出

②で検出された SSE モデルには, ごく少数の観測点でしか傾斜変動が確認できないイベントがある。このような検出結果は, ローカルな地殻変動を SSE として誤検出している可能性があり, 信頼度も低い。そこで, ②で得られた各モデルについて観測点ごとに V. R. を個別に計算し, 少なくとも 4 観測点で閾値を超えたイベントのみを抽出する。これにより, 観測網の中で広域に捉えられた信頼度の高いイベントのみを抽出する。

## 4-3. 四国地域における短期的 SSE 自動検出

図 4b に示す四国地域の Hi-net 観測点における傾斜計データを用い, 2001 年 1 月～2009 年 7 月の短期的 SSE の自動検出を行った。20Hz サンプリングで観測された傾斜データを 1 時間間隔でリサンプリングし, BAYTAP-G<sup>11)</sup> により潮汐・気圧変化による応答成分を除去した。1 回の解析期間は 50 日とし, 40 日ずつずらしながら解析した。

SSE の断層モデルは, 手動検出で得られている SSE 発生域<sup>8)</sup>をカバーするように 16 の断層モデル(大きさ: 30 km × 30 km)を仮定した(図 4b)。深さ・走向・傾斜はフィリピン海プレートモホ面<sup>12)</sup>を参考に, プレート上面に沿うように仮定した。すべり角はプレート相対運動方向逆向きとした。

自動検出の結果, これまで手動で検出されていた四国地域の 24 イベント<sup>8)</sup>のうち, 19 イベントを検出することが出来た。また, 手動では検出されていなかった四国中部域においても, 短期的 SSE を新たに検出することが出来た(図 4c)。

## 5. 深部低周波微動・超低周波地震準リアルタイムモニタリング

### 5-1. 深部低周波微動のハイブリッド・クラスタリング処理

防災科研では深部低周波微動の処理手法として, 従来より観測点間の微動エンベロープ形状の相似性に着目したエンベロープ相関法 (ECM)<sup>1)</sup>を用いてきたが, 現在では, 微動エンベロープの相対時間差に加えて振幅の空間分布を考慮したハイブリッド法 (HB)<sup>14)</sup>, さらにその平均化処理に基づくハイブリッド・クラスタリング処理 (HBC)<sup>15)</sup>によるモニタリングを実施している。HB 法では, 1 分ごとに東海, 紀半島, 四国の 3 地域に分割して連続データを自動処理し, バリアンスリダクションの大きな結果を採用する。このとき, 通常地震が発生しても同様に処理されてしまうため, 深部低周波微動の時空間的継続性, つまり同じ場所で数時間～数日間継続的に活動するという特徴を利用し, 近接して震源決定された微動が複数個存在する場合に, その分布の重心位置を 1 時間ごとに推定する。これが, HBC 処理である。なお, HB, HBC とともに, 微動源の深さはプレート境界の位置<sup>12)</sup>に固定し, 震央位置のみを推定している。図 5a に, HB 法に基づく四国で発生した深部低周波微動の処理結果例を示す。

## 5-2. 微動処理結果の比較

また図 5b には、1 ヶ月間の四国における微動の時空間分布を HB (sel), HBC (luster) 処理結果について示す。ここでは参考のため、従来からの ECM, および気象庁の一元化カタログに記載されている低周波イベントのフラグが付与された中で深部低周波微動と同じ領域で発生しているものを抜き出して示す。これより、1 分毎の HB (sel) 処理結果では集中して分布している微動源の他に、全体的に分散した微動も存在するが、クラスタリング処理した HBC (luster) の結果では集中した微動源のみが残る。さらに気象庁一元化カタログに比べて多くの微動活動を捉えており、移動する微動の連続性を適切に把握していると考えられる。

## 5-3. 微動エンベロープとの比較

上で示された 4 種類の微動処理結果とエンベロープ波形を比較すると (図 5c), ハイブリッド法 (HBsel) によって 1 分毎に抽出された結果には、エンベロープでは目視で認識できないものも含まれているが、クラスタリング処理 (HBCluster) によってそのようなものは除外される。また、振幅の大きな微動が出現しているときにはエンベロープ相関法 (ECM) では若干の取り逃がしがあるが、気象庁一元化カタログではその傾向はさらに顕著で、微動の振幅とはあまり関係がないようにも見える。

## 5-4. 深部超低周波地震

深部超低周波地震のモニタリングについては、南海トラフ近傍で発生する浅部超低周波地震の検出も対象とし、防災科研 F-net の広帯域連続データを用いて GridMT<sup>16)</sup> に基づき自動的に行われる。さらに、センブルンス解析による波動伝播モニタリングの結果<sup>17)</sup> 等に基づいて、解析周波数帯域におけるノイズレベルを考慮し、精度よく解析されているイベントについて Hi-net 併設の高感度加速度計のデータも加えて CMT 解を再決定する (図 5d)<sup>3), 18)</sup>。深部超低周波地震のほとんどは、微動エンベロープのピークに対応して検出されるが、必ずしも一致しない場合もある (図 5e)。深部超低周波地震の検出は、遠地地震や気象条件等による長周期波動の存在に左右されるが、これまで検出された深部超低周波地震の規模はほとんど Mw3.3 ~ 3.7 の範囲内に限られる (図 5f)。

## 6. 深部低周波微動と SSE との関係

それぞれの活動領域 (セグメント) で周期的に発生する活発な微動活動に同期して、短期的 SSE が検出される場合がある。測地的に検出された短期的 SSE の規模と、そのときの微動活動を比較すると、エピソード中に含まれる微動検出数と SSE のモーメントは、おおむね線形関係にある (図 6a)<sup>13)</sup>。このことは、活動規模の小さな微動エピソードの場合でも、測地的には検知されない程度の SSE が発生している可能性を示すものであり、プレート境界におけるすべりをモニタリングする上で、微動活動のモニタリングが重要であることを示している。測地的に検出される SSE の規模が Mw6.0 前後であるのに対して、この線形関係を利用し、それぞれの微動エピソードに含まれる微動検出数から SSE の規模を推定すると、Mw5.5 以下の SSE も数多く発生していることが推定される (図 6b)。さらに、この Mw と微動発生面積からエピソード毎のすべり量を換算し、各地域で積算すべり量の時間変化を求めると、主な地域ではすべりレートが 4-5cm/年 とほぼ一定となる (図 6c)。

謝辞

解析には気象庁の WEB ページで公開されている気象データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Obara, K. (2002), Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, *296*, 1679—1681.
- 2) Katsumata, A. and N. Kamaya (2003), Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, *30*, 1020, doi:10.1029/2002GL015981.
- 3) Ito, Y., K. Obara, K. Shiomi, S. Sekine and H. Hirose (2007), Slow earthquakes coincident with episodic tremors and slow slip events, *Science*, *315*, 503—506.
- 4) Ide, S., K. Imanishi, Y. Yoshida, G. C. Beroza, and D. R. Shelly (2008), Bridging the gap between seismically and geodetically detected slow earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, *35*, L10305, doi:10.1029/2008GL034014.
- 5) 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.
- 6) Hirose, H., and K. Obara (2005), Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan, *Earth Planets Space*, *57*, 961—972.
- 7) Dragert, H., K. Wang, and T. S. James (2001), A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface, *Science*, *292*, 1525—1528.
- 8) Sekine, S., H. Hirose, and K. Obara, (2010), Short-term slow slip events correlated with non-volcanic tremor episodes in southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JB006059, *in press*.
- 9) 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*, 19-28.
- 10) Hirose, H., and K. Obara (2010), Recurrence behavior of short-term slow slip and correlated non-volcanic tremor episodes in western Shikoku, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2008JB006050, *in press*.
- 11) Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro (1991), A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, *104*, 507-516.
- 12) Shiomi, K., M. Matsubara, Y. Ito, and K. Obara (2008), Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan, *Geophys. J. Int.*, *173*, 1018—1029.
- 13) Obara, K. (2010), Phenomenology of deep slow earthquake family in southwest Japan: Spatio-temporal characteristics and segmentation, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JB006048, *in press*.
- 14) Maeda, T., and K. Obara (2009), Spatio-temporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, *J. Geophys. Res.*, *114*, doi:10.1029/2008JB006043.
- 15) Obara, K., S. Tanaka, T. Maeda., and T. Matsuzawa (2010), Depth-dependent activity of nonvolcanic tremor in southwest Japan revealed from a new location method, *submitted*.

- 16) Tsuruoka, H., H. Kawakatsu, and T. Urabe (2008), GRiD MT (Grid-based Realtime Determination of Moment Tensors) monitoring the long-period seismic wavefield, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 175, 8-16.
- 17) Asano, Y., K. Obara, and Y. Ito (2008), Spatiotemporal distribution of very-low frequency earthquakes in Tokachi-oki near the junction of the Kuril and Japan trenches revealed by using array signal processing. *Earth, Planets and Space*, 60, 871–875.
- 18) Ito, Y., K. Obara, T. Matsuzawa, and T. Maeda (2009), Very-low-frequency earthquakes as small asperity on plate boundary in transition zone from locked to aseismic slip, *J. Geophys. Res.*, 114, doi: 10.1029/2008JB006036.

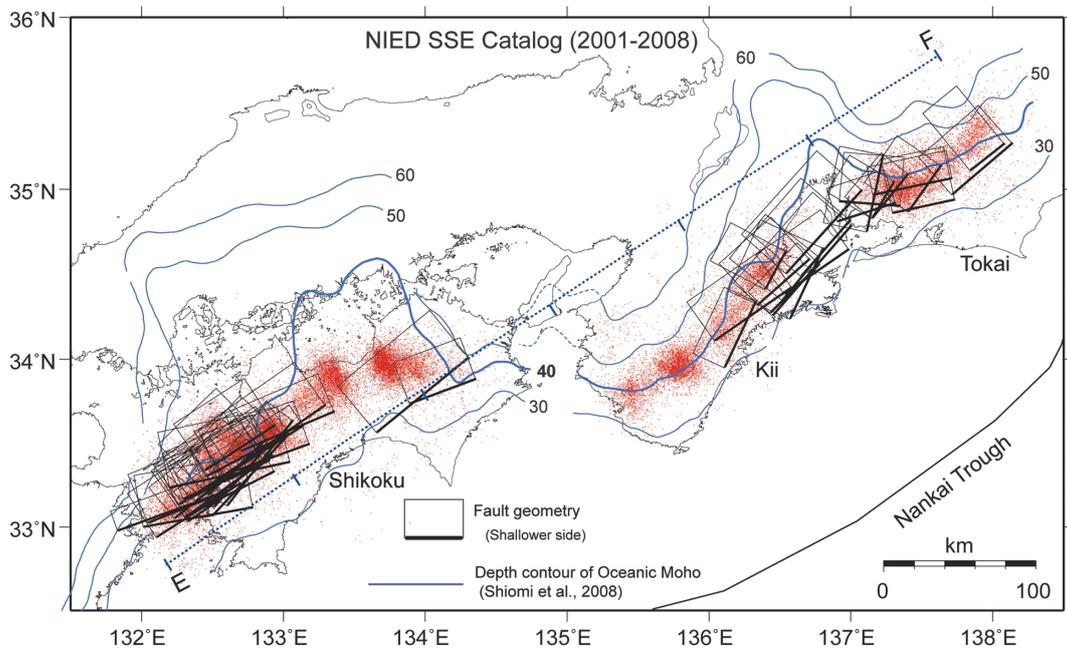


図 2a 傾斜計で検出された短期的 SSE の断層モデル推定結果<sup>13)</sup>。断層モデルは、矩形断層均質すべりインバージョンに基づく<sup>8)</sup>。すべり方向はプレート運動を考慮して固定している。それぞれの矩形のうち、太線で示された辺が浅い側を示す。全ての断層モデルは逆断層すべりで、ほぼプレート境界の深さと調和的である。

Fig. 2a Distribution of the reverse fault plane of short-term SSEs estimated by Hi-net tilt data<sup>8)</sup> plotted on the tremor distribution<sup>13)</sup>. The bold lines on the rectangles indicate the updip side of the fault plane.

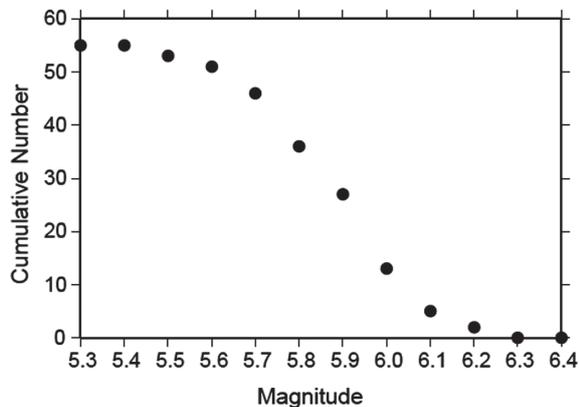


図 2b 短期的 SSE のマグニチュード頻度分布<sup>8)</sup>. 2001 年から 2008 年まで, 四国, 紀伊半島, 東海地域で断層パラメタが推定された短期的スロースリップイベントのモーメントマグニチュードの積算頻度分布.

Fig.2b Cumulative frequency distribution of SSEs estimated in Shikoku, Kii and Tokai area from 2001 to 2008 against the moment magnitude<sup>8)</sup>.

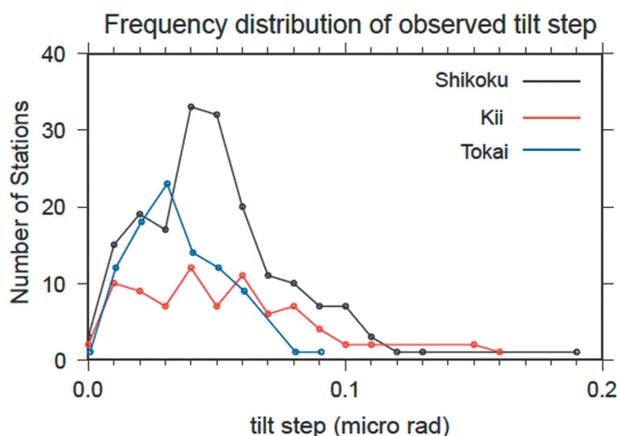


図 2c 観測された傾斜ステップ量頻度分布<sup>8)</sup>. 2001 年から 2008 年まで, 四国, 紀伊半島, 東海地域で検出されてきた短期的 SSE のモデル推定に利用された傾斜変化量の頻度分布. 観測された傾斜ステップのほとんどは  $0.1 \mu$  radian 以下である.

Fig.2c Frequency distribution of observed tilt steps for estimated SSE from 2001 to 2008<sup>8)</sup>. The black, blue, and red lines indicate the distribution of observed tilt vectors combined from the steps in north-south and east-west components in the Shikoku, Kii, and Tokai regions, respectively. Observed tilt steps are less than 0.1 micro radian.

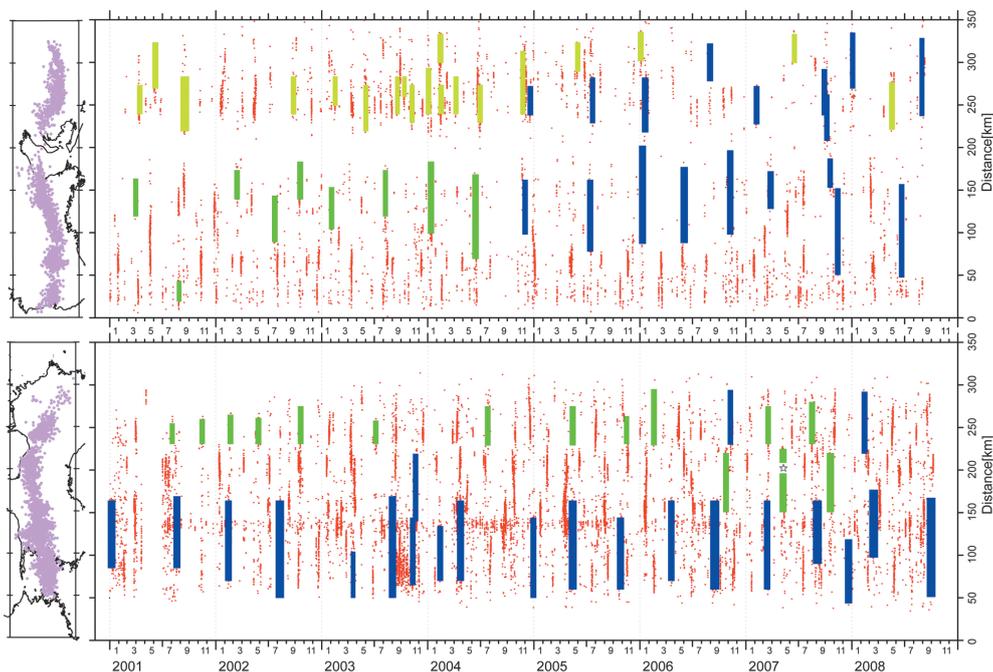


図 2d 短期的 SSE の発生 (検出) 状況. 深部低周波微動の時空間分布に, SSE の発生 (検出) 状況を重ねたもの. 青が, 複数観測点で傾斜変化を観測し SSE の断層モデルが推定可能であったもの, 緑が, 観測数が少なく SSE としての断層モデルは推定できなかったが, 微動活動に同期した傾斜変化を捉えることができた場合である. また, 黄緑は, 小林・他<sup>9)</sup> (2006) によって気象庁ひずみ計において観測された短期的 SSE を示す. ☆は 4.SSE 自動検出で新たに断層モデルが推定されたイベントである (図 4c).

Fig.2d Spacetime distribution of slow slip events plotted on the tremors. Blue rectangles are large-size slow slip events with fault parameters estimated from tilting data. Green rectangles are small-size slow slip events with fault parameters not estimated whereas associated with the tilt step detected by only a few stations. Yellow rectangles are slow slip events in Tokai area estimated by strainmeters by the JMA by Kobayashi et al.(2006)<sup>9)</sup>. The star symbol is the episode with fault parameters estimated by the automated detection proposed in the section 4 (Fig. 4c)

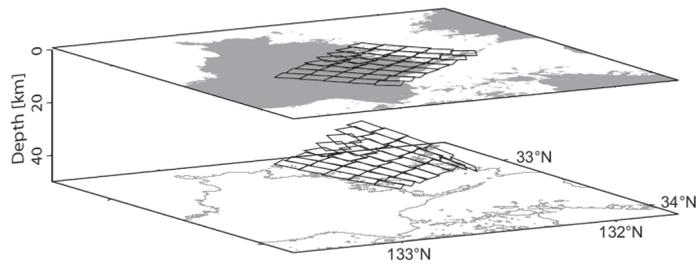


図 3a 小断層モデルの配置<sup>10)</sup>

Fig. 3a Configuration of the subfaults used in the inversion (perspective view looking from NNE)<sup>10)</sup>. Three-dimensional geometries and the surface projections of the modeled subfaults are displayed.

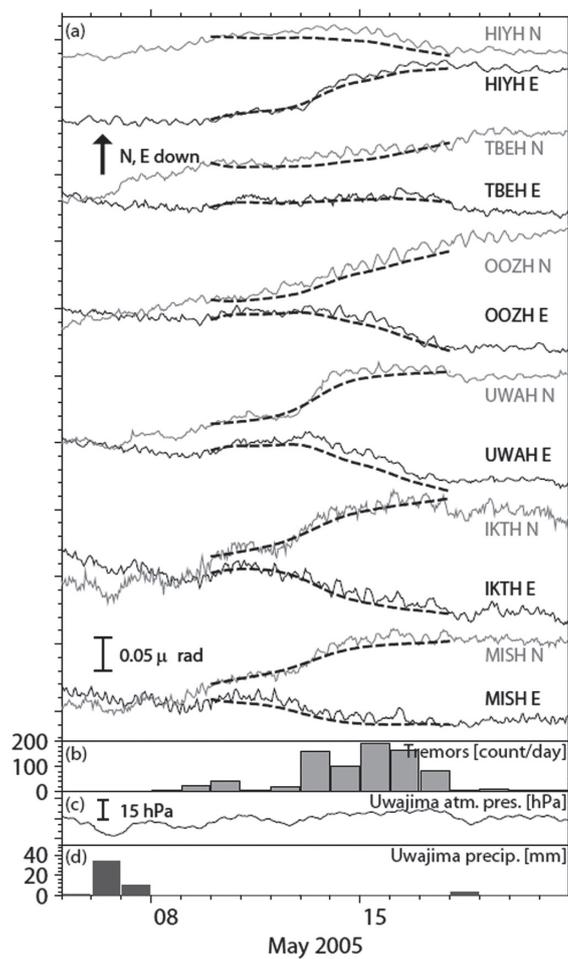


図 3b 観測された傾斜変化と得られたモデルから推定された傾斜変化との比較<sup>10)</sup>.

Fig. 3b Time series of detided and detrended tiltmeter records for the ETS episode in May 2005<sup>10)</sup>. (a) Traces with a four-character station code followed by “N” or “E” denote northward and eastward ground down tilt change components down to the north and east, respectively. (b) Tremor activity (daily number of tremors within the rectangle in Figure 1). (c) Atmospheric pressure change and (d) daily precipitation at the JMA Uwajima observatory. The Hi-net tiltmeter stations and the JMA observatory locations are shown in Figure 1. The dashed lines in (a) show the calculated tilt changes due to the estimated slip process of this SSE. Times are presented in Japan Standard Time (JST).

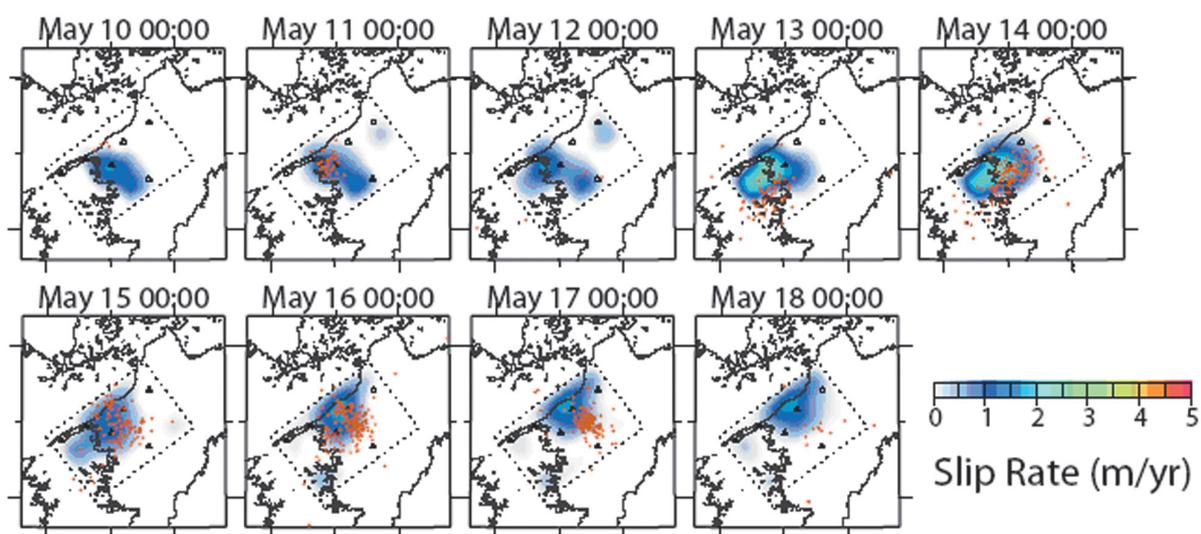


図 3c 2005 年 5 月の SSE における 1 日毎すべり速度分布<sup>10)</sup>

Fig.3c Estimated daily slip rate distributions of the May 2005 SSE<sup>10)</sup>. The time for each frame is 00:00 JST. Orange dots show the tremor epicenters that occurred within a one-day-long time window from 12:00 on the previous day to 12:00 on the day of each frame. The rectangle indicated by broken lines in each frame denotes the modeled region.

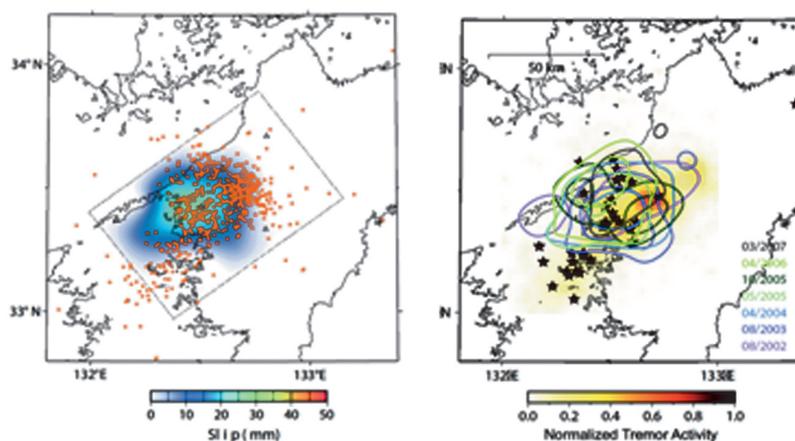


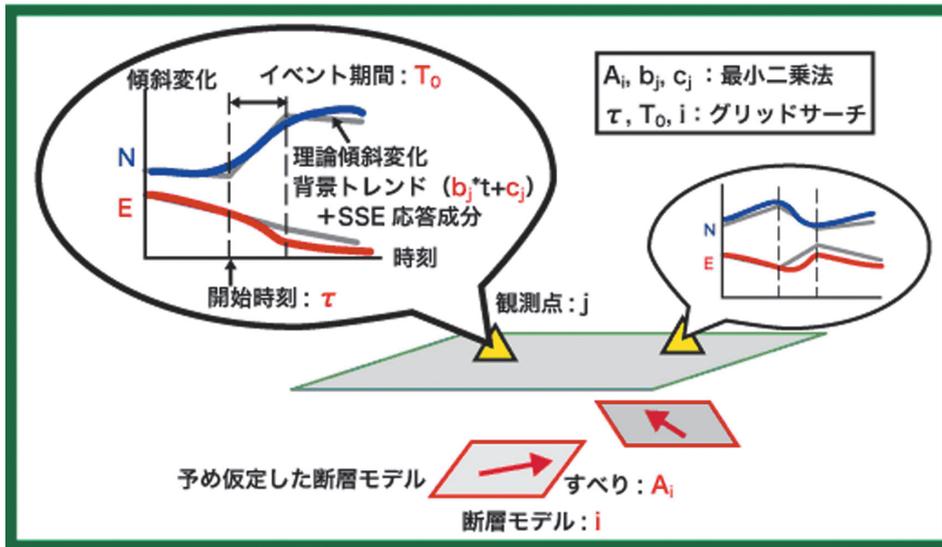
図 3d (左) 2005 年 5 月の SSE における積算すべり量分布<sup>10)</sup>,

(右) 各エピソードにおけるすべり分布<sup>10)</sup>. 外側のコンターは 1cm, 内側は 3cm である.

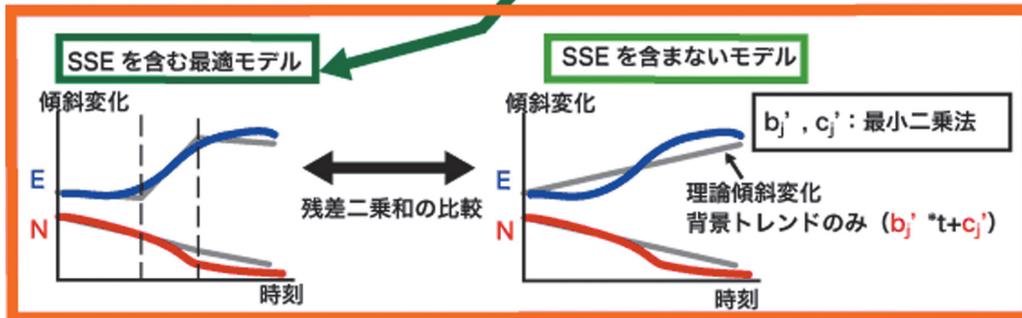
Fig.3d (Left) Cumulative slip distribution of the May 2005 SSE<sup>10)</sup>. The orange dots show the tremor epicenters that occurred during the episode.

(Right) Slip distributions of seven SSEs<sup>10)</sup>. The contours show the cumulative slip distributions of each episode. Each episode has one or two contour lines. The outer contours indicate 1-cm slip, whereas the inner contours indicate 3-cm slip. The color of the contour lines indicates the month and year of a particular episode, as indicated in the lower-right corner. The color scale indicates the normalized histogram of cumulative tremor activity during the seven episodes shown in this figure. The stars indicate the epicenters of VLFEvents that also occurs during the specified episodes.

① SSE 最適モデルの推定



② SSE を含むモデルと含まないモデルの比較



データ全体の Variance Reduction (V. R.) による判断

③ 広域で捉えられたイベントの抽出

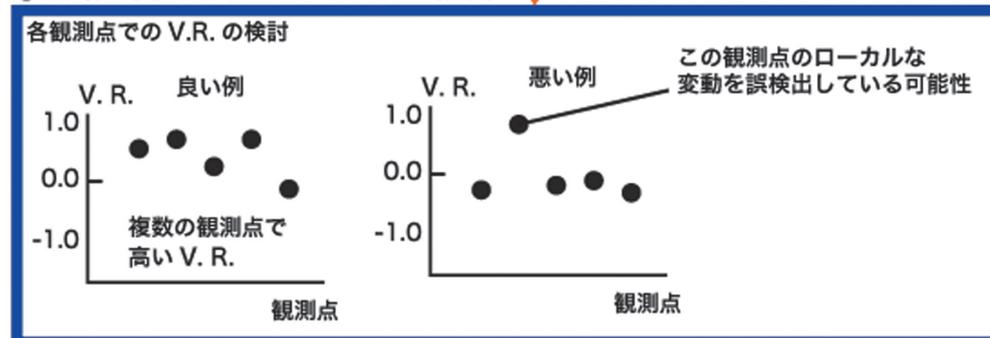


図 4a Hi-net 傾斜計データを用いた短期的 SSE 自動検出手法の概要.

Fig. 4a Overview of the automated detection method of short-term slow slip event by using the Hi-net tiltmeter data.

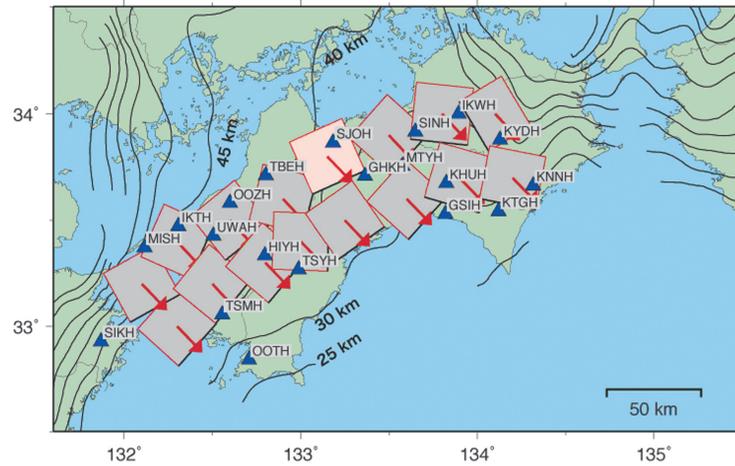


図 4b 解析に使用した Hi-net 観測点 (三角) と仮定した断層モデル (矩形). 赤矩形は図 4c の検出例において推定された断層モデル. コンターはフィリピン海プレートモホ面の深度分布<sup>12)</sup>.

Fig.4b Hi-net stations (triangle) used in this analysis and assumed rectangle fault model. The red rectangle fault plane is estimated for the short-term slow slip event of May 2007 and 2009 in the central Shikoku area as shown in Fig. 4c. The iso-depth contour represents the configuration of oceanic Moho discontinuity in the subducting Philippine Sea plate<sup>12)</sup>.

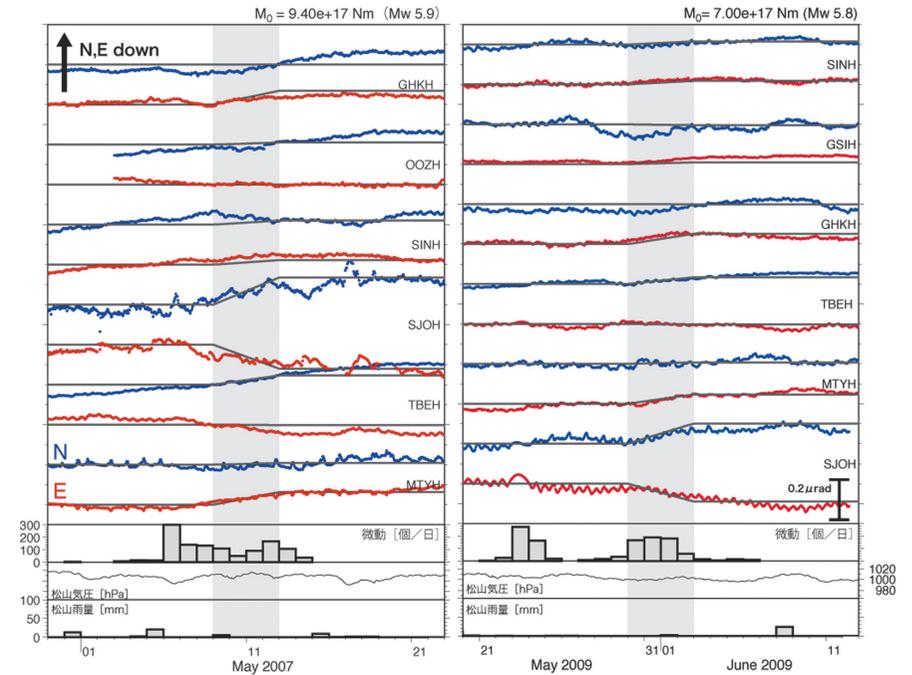


図 4c 四国中部における短期的 SSE の検出例. 青線・赤線はそれぞれ観測傾斜時系列の南北・東西成分. 上方向の変動が北・東下がりの変動を示す. 推定された各データの背景トレンド成分は除去して示している. 黒線は推定された短期的 SSE モデル (図 4b 赤矩形) による理論傾斜変動. 灰色の期間が SSE 発生期間. 断層面周辺の微動活動度<sup>13)</sup>, 気象庁松山観測点の気圧・雨量を合わせて示す. また左図の SSE 発生時を図 2d に☆で示す.

Fig.4c Example of detection of short-term slow slip event in the central part of Shikoku. Blue and red lines are NS and EW components of observed tiltmeter records, respectively. Linear trend estimated simultaneously by the detection procedure were subtracted from the observed records. Solid line is synthesized tilt change calculated for the estimated SSE fault model (red rectangle in Fig.4b). Gray period indicates the SSE occurrence. At the bottom fields, we plot the daily frequency of tremor activity<sup>13)</sup>, atmospheric pressure change and daily precipitation at the JMA Matsuyama observatory.

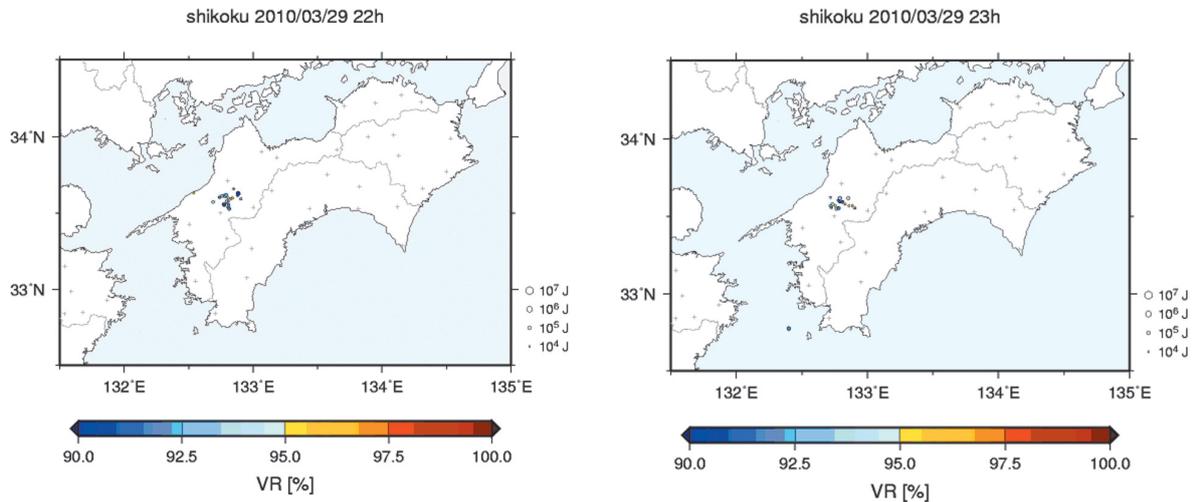


図 5a 2010 年 3 月 29 日 22 時および 23 時台に四国で発生した深部低周波微動のハイブリッド法(HB)処理結果. 1 分毎に決定された微動源のうちバリアンスリダクションが 90 以上のもののみをプロットしている.

Fig. 5a Epicentral distribution of tremor in western Shikoku calculated by the hybrid method. The tremor epicenters with the variance reduction greater than 90 are plotted.

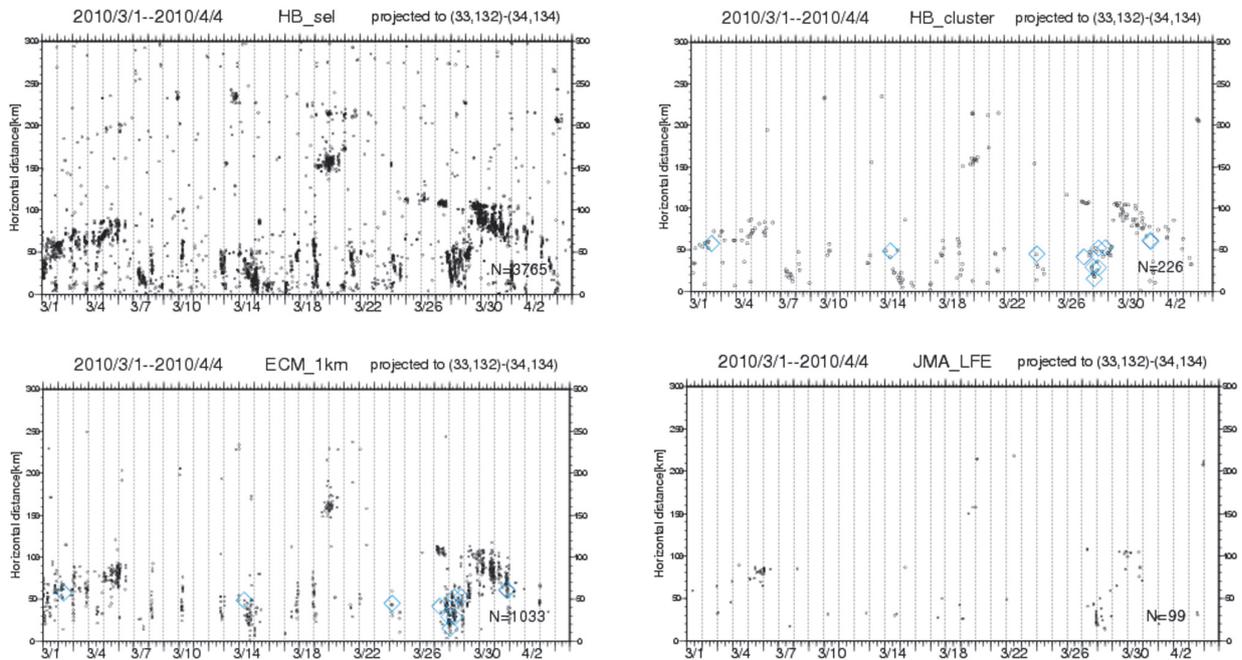
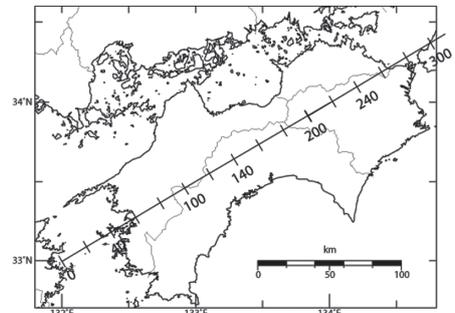


図 5b 2010 年 3 月 1 日から 65 日間の四国における深部低周波微動活動時空間分布. 投影した測線を下段右に示す. 上段左はハイブリッド法 (HBsel) によって 1 分毎に決定された微動, 上段右は 1 時間ごとにクラスタリング処理 (HBcluster) した結果, 中段左はエンベロップ相関法 (ECM), 中段右は気象庁一元化カタログによる分布である. 青菱形は, 周期約 20 秒に卓越する深部超低周波地震である.

Fig.5b Spacetime plot of tremor in Shikoku for 65 days from March 1st 2010. (upper-left) tremor estimated by the original hybrid method every one minute, (upper-right) centroid tremor estimated every one hour by the clustering process by using the output from the hybrid method, (middle-left) tremor estimated by the envelope correlation method, (middle-right) low frequency earthquake determined by JMA, (lower-right) profile for the spacetime plot.



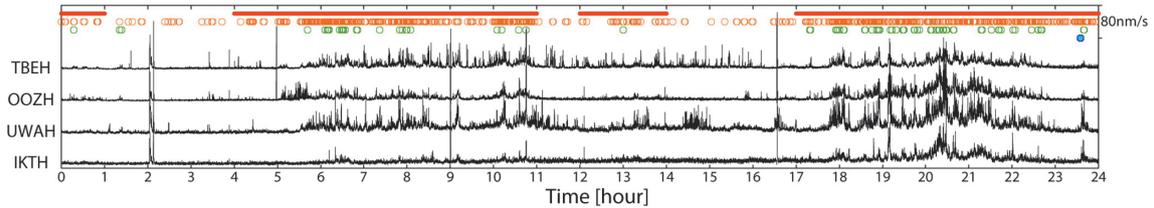


図 5c 2010年3月31日の1日間の四国西部4観測点における2-16Hz帯域のエンベロープ振幅と微動処理結果の比較。シンボルは上から順に、赤線が1時間毎にハイブリッド・クラスタリング処理(HBCluster)され微動活動の存在が確認された時間帯、橙丸がハイブリッド法(HBsel)によって1分毎に抽出された微動、緑丸がエンベロープ相関法(ECM)によって1分毎に抽出された微動、青丸が気象庁一元化カタログに掲載されている低周波地震の発生時刻である。

Fig. 5c One-day envelope traces with the pass-band between 2 and 16 Hz recorded at 4 stations in western Shikoku on March 31, 2010 and comparison of tremor detection methods. Red line, red circle, green circle and blue circle indicate the existence of tremor by hybrid clustering process, tremor detected by original hybrid method, tremor detected by the envelope correlation method, and low frequency earthquake detected by JMA, respectively.

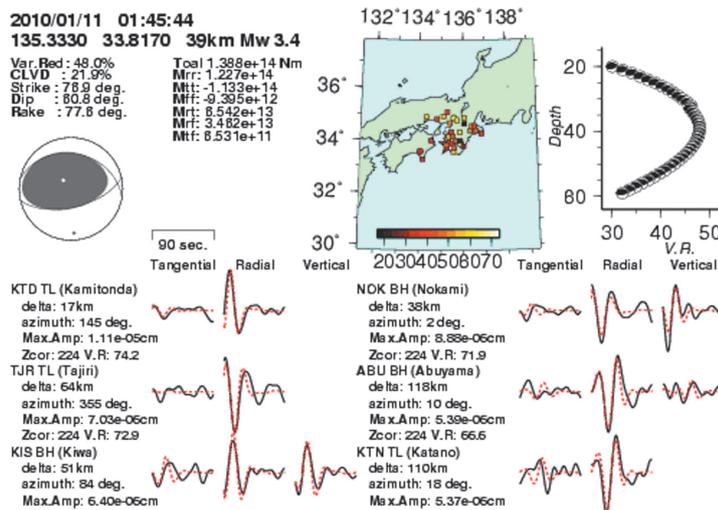


図 5d. 深部超低周波地震解析例

Fig. 5d. Detection of the deep very low frequency earthquake.

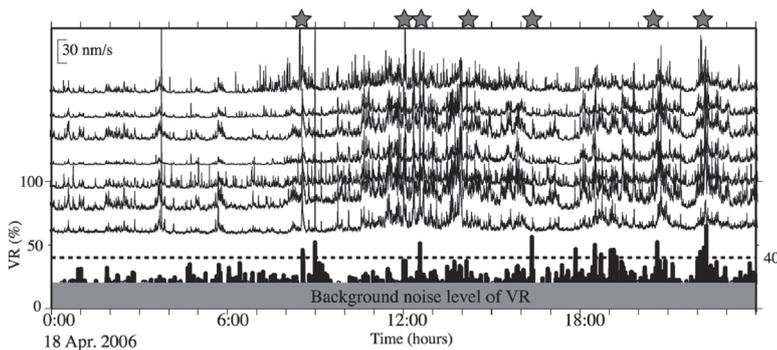


図 5e 深部超低周波地震の検出と微動エンベロープとの比較<sup>18)</sup>。最上段の星印が検出された超低周波地震の発震時、7本のトレースがそれぞれの観測点における微動エンベロープ、最下段がバリアンスリダクションを表す。

Fig. 5e Temporal variations of VR (bar chart) and envelopes of deep low-frequency tremors at seven Hi-net high-sensitivity seismometer stations on 18 April 2006<sup>18)</sup>. The dashed line marks the 40% level of VR. Stars indicate the times of origin of the VLF events detected in this study.

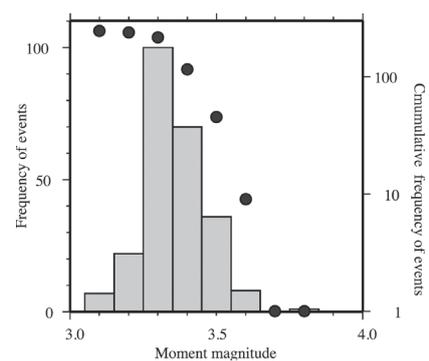


図 5f 2003～2008年に検出された深部超低周波地震の規模別頻度分布<sup>18)</sup>。

Fig. 5f Frequency distribution (histogram) and cumulative frequency distribution (circles) of moment magnitude for all VLF events detected by GMTI and CMTI during the five-year study period<sup>18)</sup>.

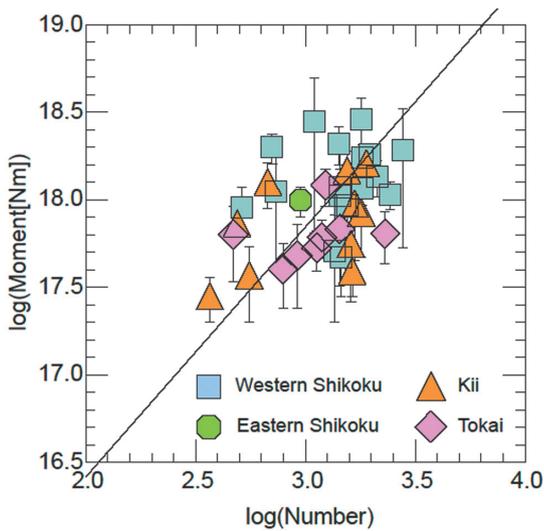


図 6a 断層パラメタが推定された SSE モーメントとそのエピソード中の微動検出数との比較<sup>13)</sup>。  
 Fig. 6a Relationship between the number of detected tremors in the major tremor episode and the moment of the detectable short-term SSEs corresponding to each tremor episode<sup>13)</sup>. The vertical bar attached to each symbol is the estimation error of the SSE moment<sup>8)</sup>.

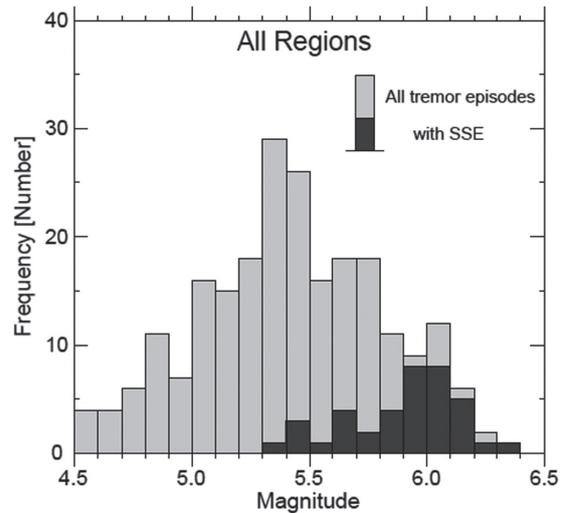


図 6b 微動検出数から推定した SSE 規模別頻度分布<sup>13)</sup>。黒四角は実際に断層パラメタが推定された SSE である。  
 Fig. 6b Frequency distribution of tremor episodes magnitudes defined in all regions<sup>13)</sup>. The equivalent magnitude of the supposed SSE is estimated from the number of detected tremors for each episode. The light gray bars indicate all tremor episodes. The solid bars indicate tremor episodes accompanying detectable short-term SSEs.

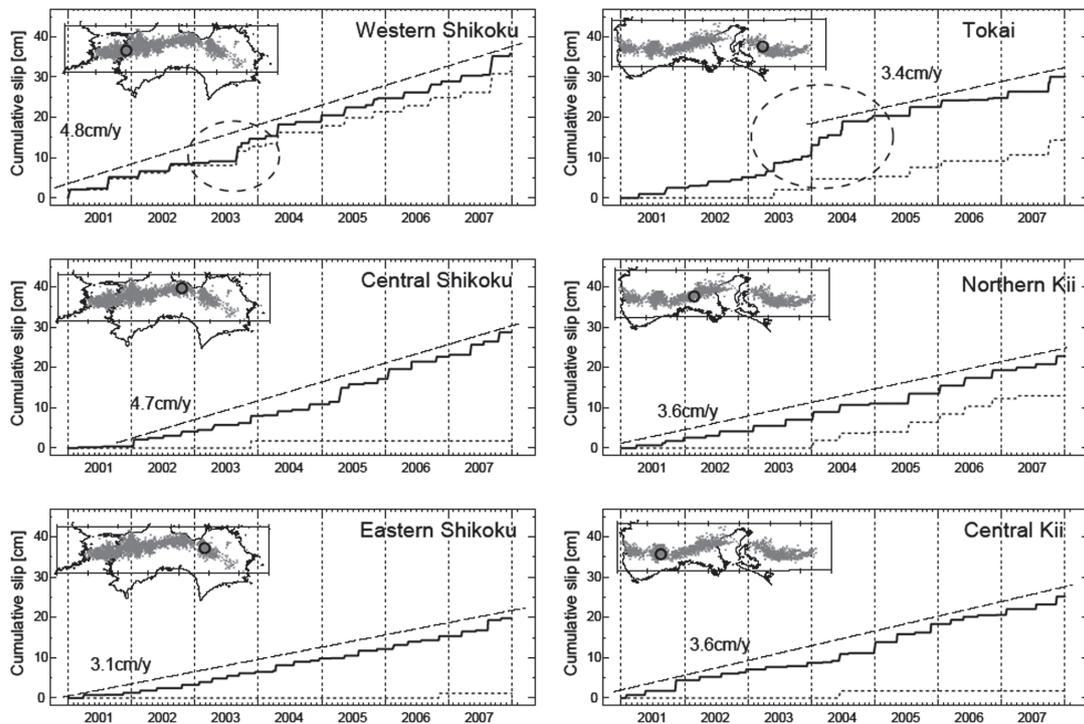


図 6c 挿入地図中の丸で示した地点におけるエピソード毎微動検出数から換算したすべり量の積算時間変化<sup>13)</sup>。  
 Fig. 6c Time history of accumulated equivalent slip length estimated from the number of detected tremors for all tremor episodes (solid lines)<sup>13)</sup>. The dotted lines indicate the equivalent slip history estimated for major tremor episodes accompanying the detectable SSEs. Dashed lines show linear regressions of the slip rate. The broken circles plotted on the top two panels of the western Shikoku and Tokai area indicate anomalous changes in the slip history.