

8-3 豊後水道付近のスロースリップイベントと深部低周波微動

Slow slip event and the deep low-frequency tremor around the Bungo Channel

小原一成・廣瀬仁（防災科学技術研究所）

Kazushige Obara and Hitoshi Hirose

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. 周期的移動性微動とそれに同期したスロースリップイベント

西南日本の沈み込み帯で発生する深部低周波微動は、フィリピン海プレートの走向と平行に帯状に分布する(1)が、帯状領域内で必ずしも一様に発生するのではなく、いくつかの集中発生域が存在する。四国内では主に徳島・香川・愛媛県境付近、愛媛県東部、及び豊後水道・愛媛県西部の3つの微動集中域に分けられるが、それぞれのクラスターでは微動は周期的に活発化し(2)、一部地域ではそれと同期してスロースリップイベントが発生していることが明らかになった。愛媛県西部・豊後水道での活動は他地域に比べると活動度は高く、小規模な微動は頻繁に発生しているが、より規模の大きな活動は2001年からの2年間で4回(2001年1月、8月、2002年2月、8月)、約6ヶ月周期で発生している(第1図)。この地域については毎回微動源の移動が確認されているが、第2図に示すように2001年1月と2002年2月の冬季には活動域の北東端から南西方向、また2001年8月と2002年8月の夏季には豊後水道側から北東方向へ移動しており、それぞれ移動方向が異なることが特徴的である。この周期的な微動活動に同期して、近傍の防災科研Hi-net観測点(愛媛県日吉)に併設された高感度加速度計水平動成分(傾斜計)にステップ的変化が検出された(第1, 2図)。傾斜変化は微動の活動とほぼ同様に一週間程度継続するが、傾斜変化の仕方は微動の移動と密接に関係し、冬季には最初NS成分のみが変化しその後2成分に変化が現れるのに対して、夏季の場合には2成分が同時に変化し始めるが、微動が北東方向に移動するところにはEW成分の変化は終了し、NS成分のみに傾斜変化が残る。このようなエピソード的な傾斜変化は周囲の複数の観測点でも同様に観測されており(第3図)、地下深部で発生するスロースリップイベントによるものと判断される。そこで、2002年8月のイベントについてスロースリップの断層モデルの推定を行った。傾斜変化のパターンは微動の移動と共に変化することから、前半と後半に分けてそれぞれの傾斜ベクトル量を用いて断層モデルを推定した結果、いずれもプレート境界付近での逆断層すべりで説明でき、微動の移動と同様に、南西部から北東部へすべり源が移動すると考えられる(第4図)。なお、このモデルから推定される地表変位は非常に小さく、GPSでは検知困難である。

2. 2003年8月以降の深部低周波微動活動と時定数の異なる2種類のスロースリップイベント

2003年8月27日から豊後水道付近で深部低周波微動が発生し始め、時間と共に北東方向に移動した(第5図)。この微動の開始位置と移動の仕方については、これまで同地域で観測されてきた微動の特徴と大変調和的であり、半年周期で繰り返されるサイクルに一致すると共に、夏季の場合には豊後水道側から移動を開始するなど、これまでの事例とまったく同様である。微動は約1週間程度で北東方向に移動した後は、その活動域全域で長期間継続した。同地域では活動規模が大きい場合2~3週間程度継続することがあるが、今回は断続的ではあるが3ヶ月以上も継続しており、微動のモニタリングを開始した2000年9月以降で最大規模の活動

となっている。第5図に示した微動の発生源はエンベロープ相関法(1)により決定されているが、参考のために、同地域で気象庁が低周波地震とラベル付けしたイベントの震央分布も併せて示す。また、第6図には、2003年8月末から2ヶ月間に同地域で発生した深部低周波微動について、エンベロープ相関法によって震源決定された微動の積算数および気象庁一元化震源カタログ中に掲載されている低周波地震の積算数を、第7図にはそれぞれの手法に基づく微動の検出状況を、2003年8月30日1日間の四国西部の防災科研Hi-net観測点におけるエンベロープ波形記録と比較して示す。

国土地理院(3)は、GPS観測に基づき、2003年8月上旬から豊後水道周辺において、顕著な地殻変動が始まったと発表した。その地表変位の空間パターンは、1996年終わり頃から1997年いっぱいにかけて同地域で観測されたスロースリップイベント(4,5)時のものとほぼ同じであり、同様の現象が同じ領域で再度発生したものと考えられる。この地表変位に対応すると思われる傾斜変動が防災科研の傾斜計でもとらえられている。

第8図は、第9図に示した観測点での2003年1月から11月までの傾斜変化である。8月下旬から9月上旬にかけての約1週間(破線で示した期間)、第14図で示したのと同様な、微動とスロースリップの同期イベントによると考えられる傾斜変化が見られる。この期間を境にして、それ以前とは異なるトレンドを持つ変化が現れている。また第5,6図に見られるように、微動の活動もこの時期より活発化している。この変化は11月13日現在継続中である。すなわち少なくとも約2か月半にわたって異常な傾斜変動が続いていることになる。

第9図には国土地理院(3)による地表水平変位の分布と、傾斜計による9月4日から10月26日までの傾斜変化を示した。この期間の始まりである9月4日は先述の約1週間の変化が終わったとみられる時刻であり、ここでは便宜上、この時刻以降に約2か月半以上にわたる変化が始まったとして取り扱った。一方この期間の終わりである11月26日は、この翌日に大正(TSYH)観測点のセンサー再設置作業が行われており、データの連続性が保たれている最大限の期間を選択した。

これらの地表水平変位と傾斜変化から、矩形断層のすべりを仮定しOkada(6)の定式化を利用したインバージョンにより断層パラメタの推定を行った結果を第9図に重ねて示している。求められた断層モデルは沈み込んだフィリピン海プレートの上面付近の深さの低角逆断層を示しており、1996-97年に発生したスロースリップと同様な場所で再度すべりが始まったことが示唆される。また、推定されたすべりの位置については、前回のすべり領域(4,5)とほぼ重なるが、その領域の中で北側部分が現在までにすべっていると考えられる。すなわち第9図に示した推定すべり領域の南側ですべり残しが存在する可能性があり、前回(5)と同様に今後南の領域へすべりが移動していくことが考えられる。また、この推定すべり領域は、8月下旬-9月上旬の約1週間に発生したと考えられる、微動とスロースリップ同期イベント時にすべったと推定された領域(第9図の破線で囲んだ矩形領域)よりもやや浅い部分に位置すると考えられる。

第10図には2003年10月15日から11月13日までの1か月間の傾斜時系列を拡大して示した。11月8日頃から約5日間にわたって、第2,3図や第8図の破線で示した期間の変化と類似した変動が再度とらえられた。この期間には微動の活動も活発化している。この期間での傾斜変化ベクトルとそれから推定されたすべりのモデルを、同期間に発生した微動の震央分布と重ねて第11図に示した。観測された傾斜ベクトルの空間パターンは第4図とほぼ同様であることが分かる。すべりモデルも結果的にはほぼ同様に推定された。

この地域では2001年からの2年間では、1週間程度の時定数を持つ微動と同期したスロースリップイベントが、約半年周期で繰り返し発生してきた(第1,2図)。その繰り返すすべりにより、隣接するより浅部での長い時定数をもつスロースリップ発生域に応力が蓄積されていき、ついにはすべりが再び始まったと考えられる。またそのすべりの影響で、短い時定数をもつスロースリップと微動の同期イベントもその規則性が崩された

考えられる。

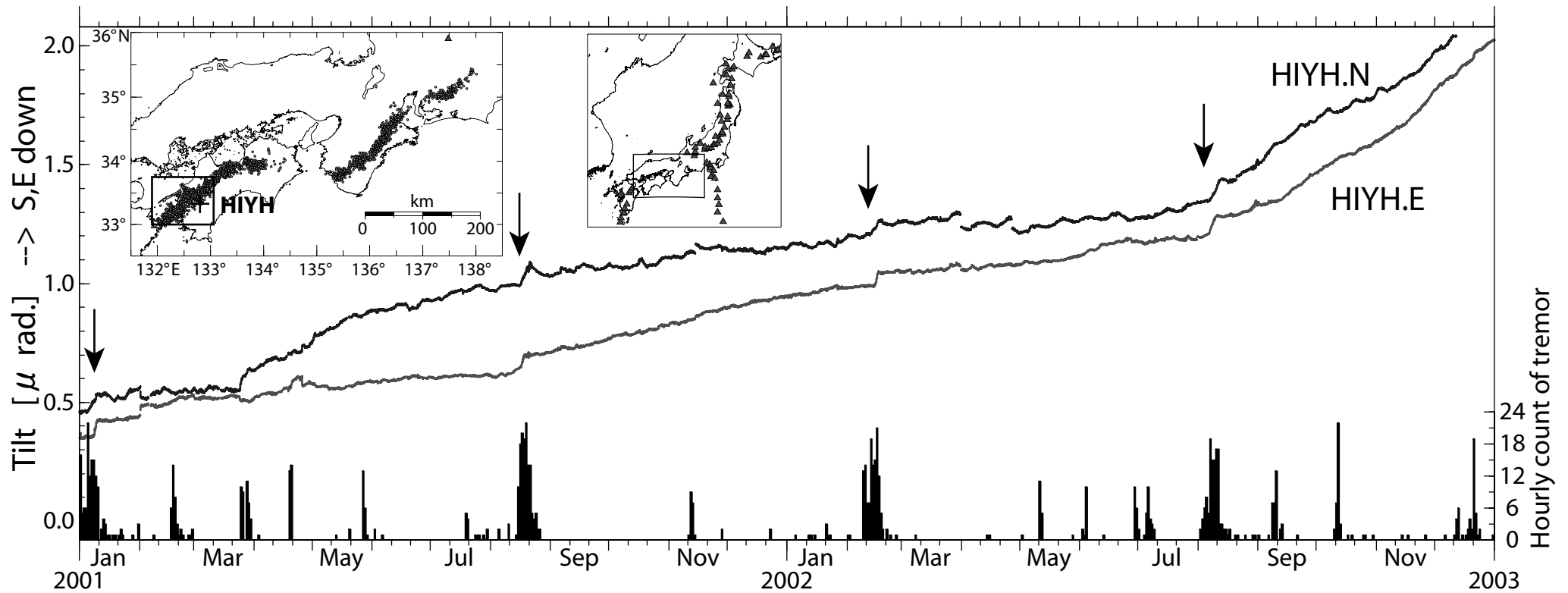
これらのことから、第一義的にはプレート境界面の深度によって、起こり得るスロースリップイベントには固有の時定数があることが示唆される。これはプレート境界面の摩擦的性質が、その温度圧力条件とそれに伴う相転移により変化していることを示していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Obara, K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681, 2002.
- 2) 小原一成, 西南日本の沈み込み帯で発生する深部低周波微動の特徴, *地震予知連絡会報*, 70, 524-532.
- 3) 国土地理院, 豊後水道周辺の地殻変動について,
<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2003/1029.htm>
- 4) Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, and S. Miyazaki, A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3237-3240, 1999.
- 5) Ozawa, S., M. Murakami, and T. Tada, Time-dependent inversion study of the slow thrust event in the Nankai trough subduction zone, southwestern Japan, *J. Geophys. Res.*, 106, 787-802, 2001.
- 6) Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040, 1992.
- 7) Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, M. Ishiguro, A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, 104, 507-516, 1991.

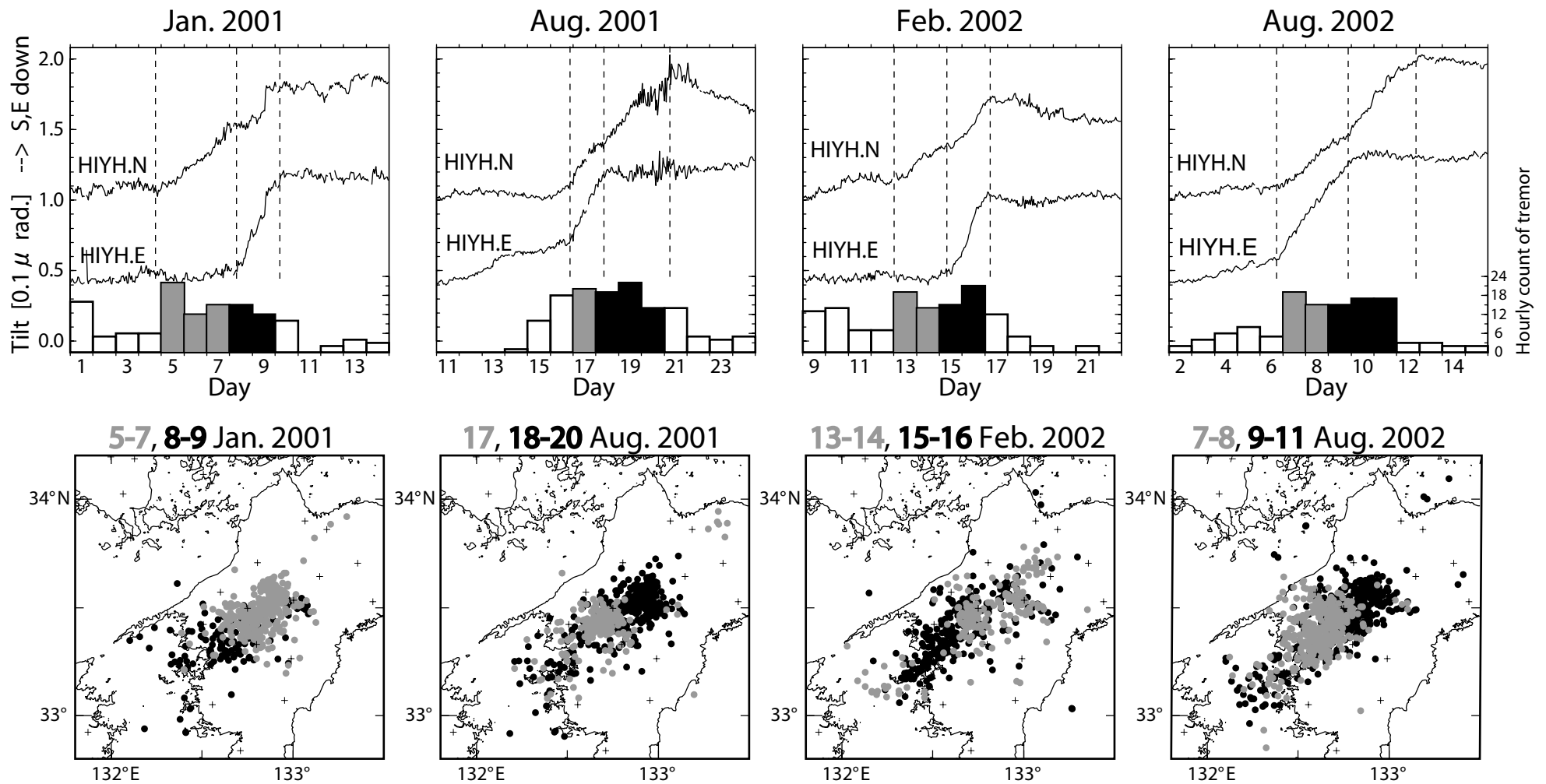
謝辞

気象庁のホームページで公開されている各測候所の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。



第1図 愛媛県西部・豊後水道地域における深部低周波微動の活動度と愛媛県日吉 (HIYH) での傾斜変動. 傾斜記録にはBaytap-G(7)による潮汐補正が施されている. 左上図の四角の領域内で発生した微動について1時間単位で計測した日別回数を下に示す. この地域は帯状に分布する微動活動域の中でも最も活発な場所であるが, 数日間以上継続するような規模の大きい微動は約半年周期で発生し, それに同期してステップ的な傾斜変化が観測されている.

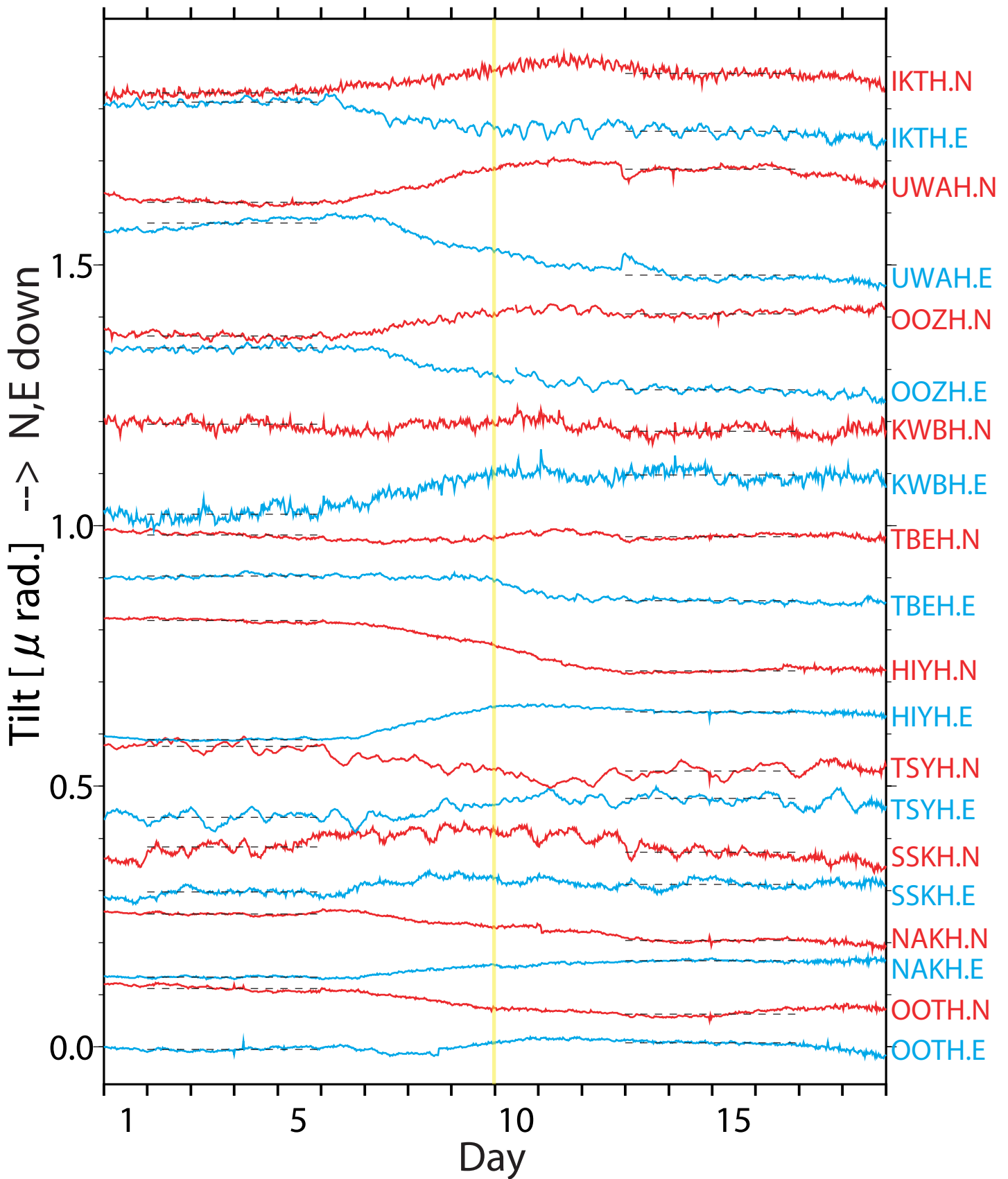
Fig.1• Time sequence of the tremor activity around the Bungo Channel and west of Shikoku and the tilt change observed at HIYH, Ehime prefecture. The tilt data are corrected with removing the tidal component using Baytap-G(7). The number of the tremor counted with a unit of 1 hour estimated in the square shown in the upper left corner is plotted at the bottom. This area is the most active part in the belt-like tremor zone and the large scale tremor with duration longer than a few days is appeared periodically every 6 months. The step-like tilt change is coincident with the major tremor activity.



第2図 (上) 各活動期における第1図の時間軸拡大図 (2週間)。(下) 微動源震央分布の時間変化。2001年1月及び2002年2月には、微動は最初北東側で活発化し、その後南西方向の豊後水道側に移動したが、2001, 2002年8月には、それとは逆に豊後水道側から北東方向に微動が移動した。HIYHにおける傾斜変化は微動の移動と非常に調和的で、微動が北東側で活発なときにはNS成分のみ、微動が南西側で活発化するときにはNS, EW両成分で傾斜変化が現れ、スロースリップ源も微動と共に移動することが予想される。

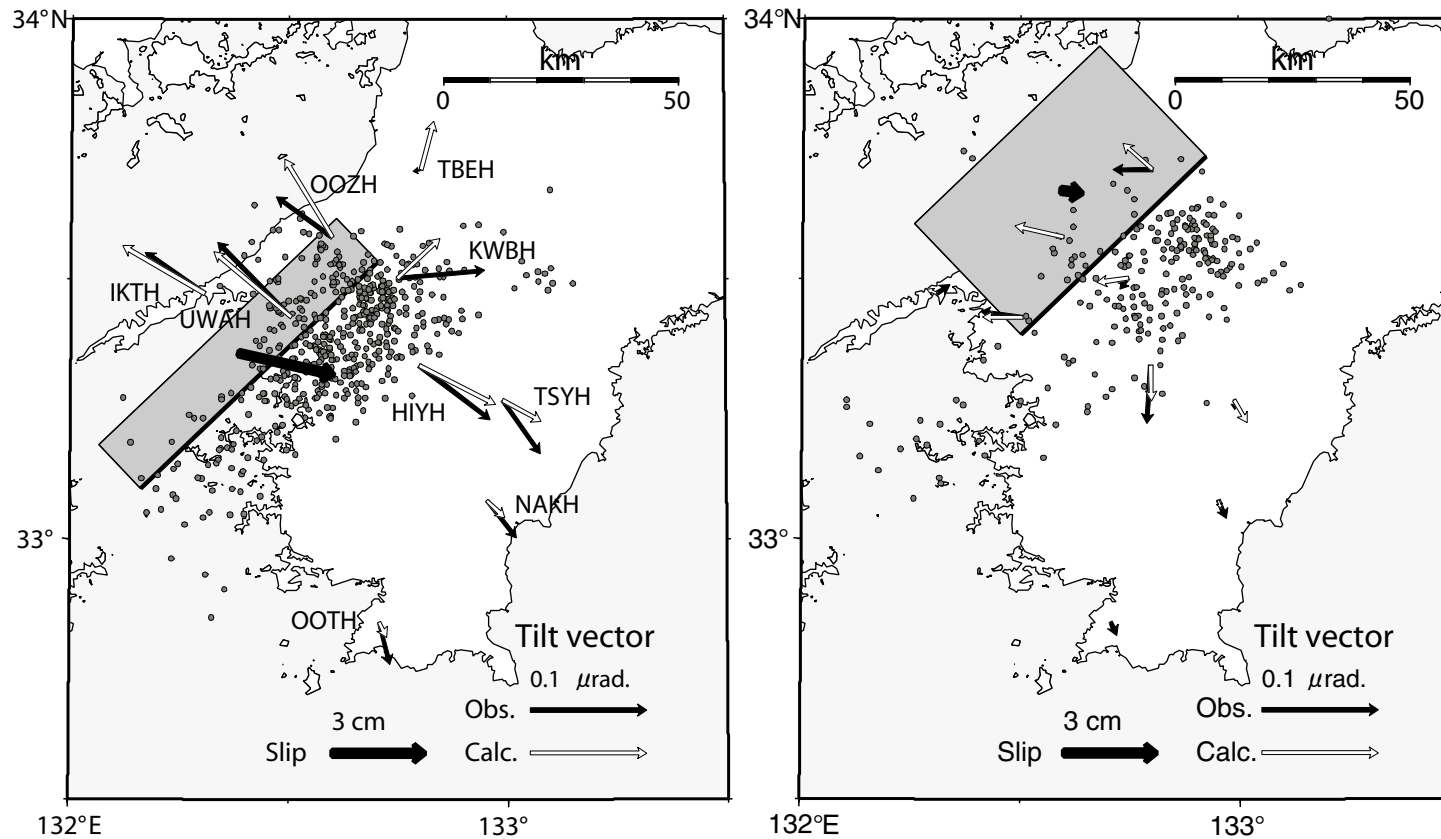
Fig.2 (Top panels): Expanded view of the tremor activity and the tilt change for each episode shown in Fig.1. (Bottom panels): Migration of epicentral distribution of the tremor. The tremor started from the northeast part of the tremor zone in 2001 January and 2002 February, then the tremor activity migrated to the southwest direction. On the other hand, the tremor migrated from around the Bungo channel to the northeast part in 2001 August, and 2002 August. The observed tilt change is very consistent with the migration of the tremor.

Aug. 2002



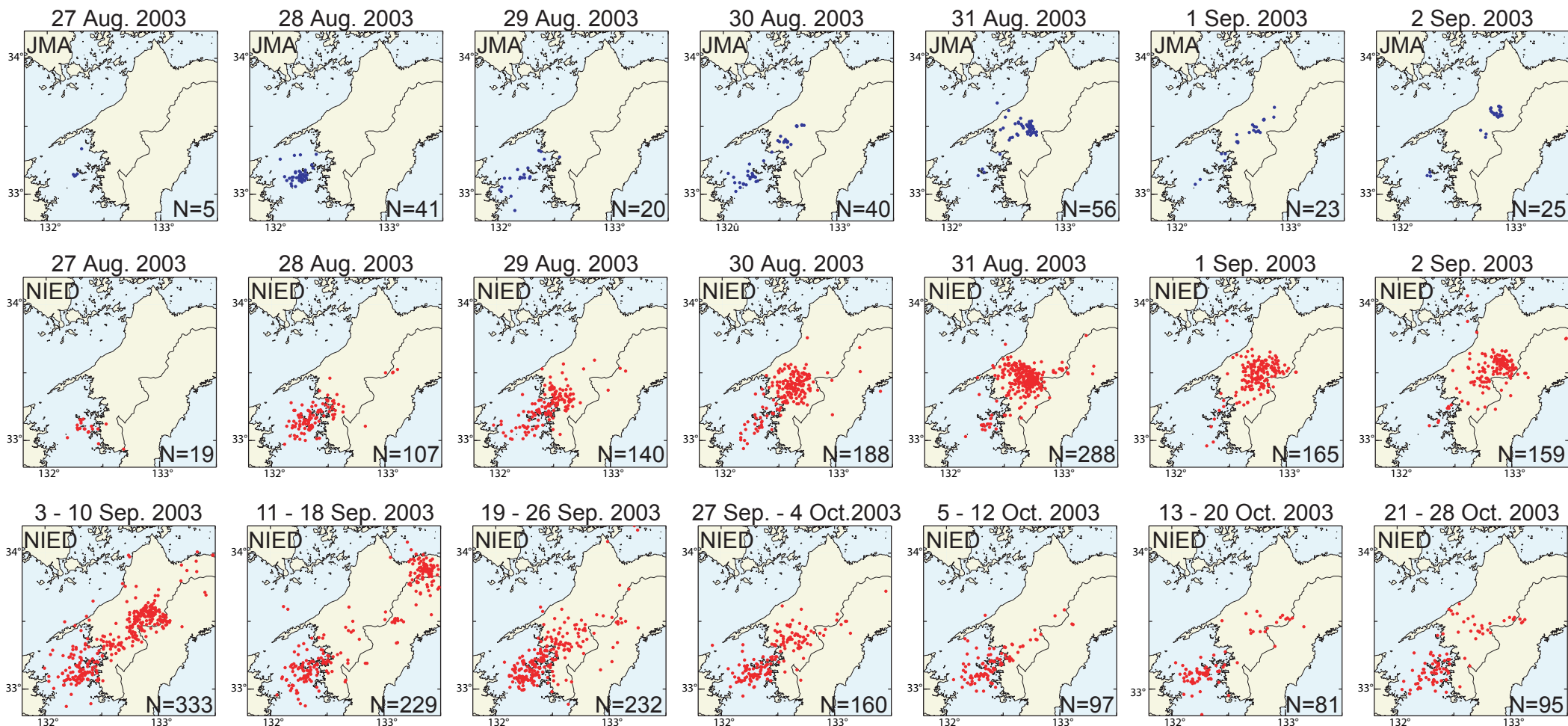
第3図 四国西部の観測点における2002年8月の傾斜変化. 観測点の位置は第4図に示す. 第2図より, 傾斜変化は8月6日から12日まで継続したので, その前後のデータでリニアトレンド(黒破線)を推定し, 全体から除去した.

Fig.3 Tilt changes observed in stations around the west of Shikoku in 2002 August. The tilt changes began from August 6 and continued to August 12. The linear trend calculated from the time period before and after the tilt change was removed from the whole data.



第4図 2002年8月の傾斜変化から推定されたスロースリップイベントの断層モデル。8月10日0時の前後についてそれぞれモデルを推定した。傾斜ベクトル（観測値、及び計算値）、それぞれの期間で震源決定された微動の震央分布を併せて示す。推定された断層パラメタはいずれも上端の深さが約40km, dipが約30度で、すべり量は前半が3cm, 後半が7mmであり、相当するモーメントマグニチュードはそれぞれ5.9及び5.7である。

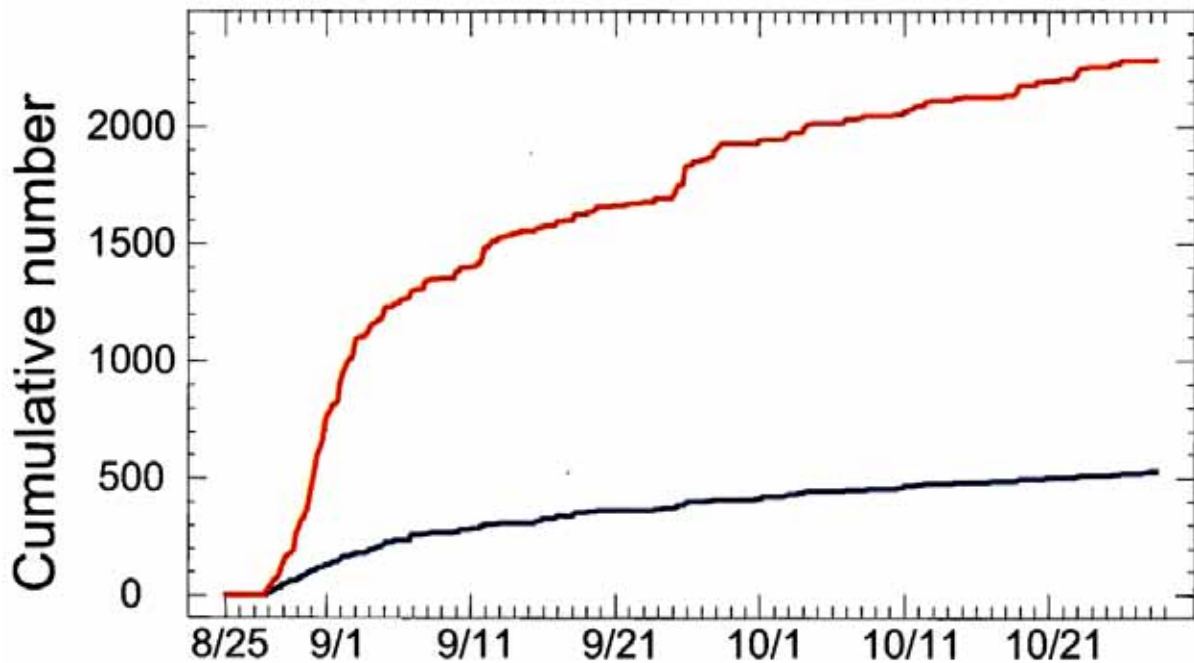
Fig.4• The slow slip models derived from the observed tilt vector before and after at 0:00 am in August 10th. The observed and expected tilt vector are indicated by solid and open arrows, respectively. The epicentral distribution of tremors determined for each time period are plotted by small circle.



第5図 2003年8～10月に豊後水道・四国西部地域で活発化した深部低周波微動の震央分布の時間的推移。最上段は8月27日から9月2日までの1日毎の気象庁一元化処理による同地域で発生した低周波地震の震央分布(青)。中段は、最上段と同じ期間(8月27日から9月2日)についてエンベロップ相関法自動処理によって決定された1日毎の微動源震央分布(赤)。

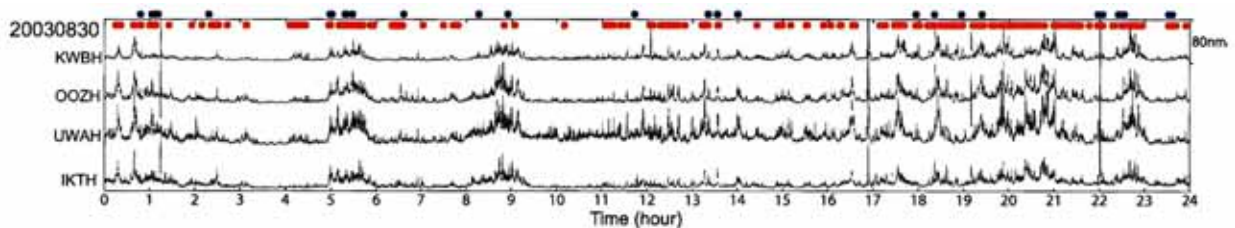
最下段は、同じくエンベロップ相関法によって自動的に決定された微動源震央分布で、9月3日から10月28日まで8日毎にプロットされている。

Fig.5 Migration of the tremor activity occurred from 2003 August. Top panel is the epicentral distribution of the low frequency earthquake determined by JMA for each 1 day from August 27 to September 2. Middle panel shows the epicentral distribution of the tremor determined by the automatic process based on the envelope correlation method for each 1 day from August 27 to September 2. Bottom panel indicates the epicentral distribution of the tremor estimated by the envelope correlation method for each 8 days from September 3, to October 28.



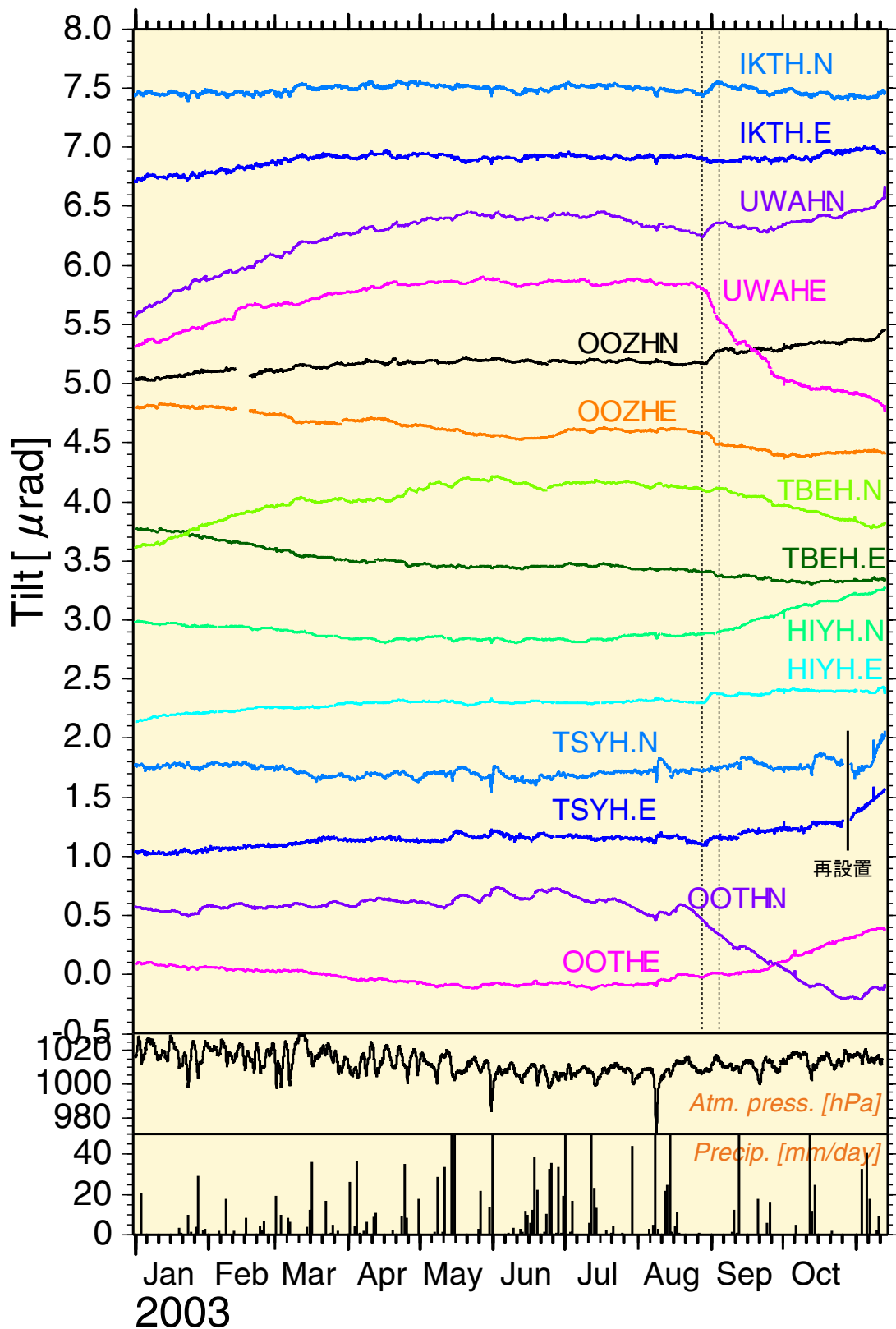
第6図 2003年8月25日～10月28日において第5図に示す範囲内に震源決定された微動数の累積分布．赤はエンベロープ相関法自動処理によって決定された微動の累積数で、青は気象庁一元化処理によって震源決定された同地域における低周波地震の累積数である．

Fig.6 Cumulative number of detected tremors occurred in the area shown in Fig.5 from August 25 to October 28, 2003. Red line indicates the number of tremors estimated by the envelope correlation method. Blue line is the number of low-frequency earthquake located in this area by JMA.



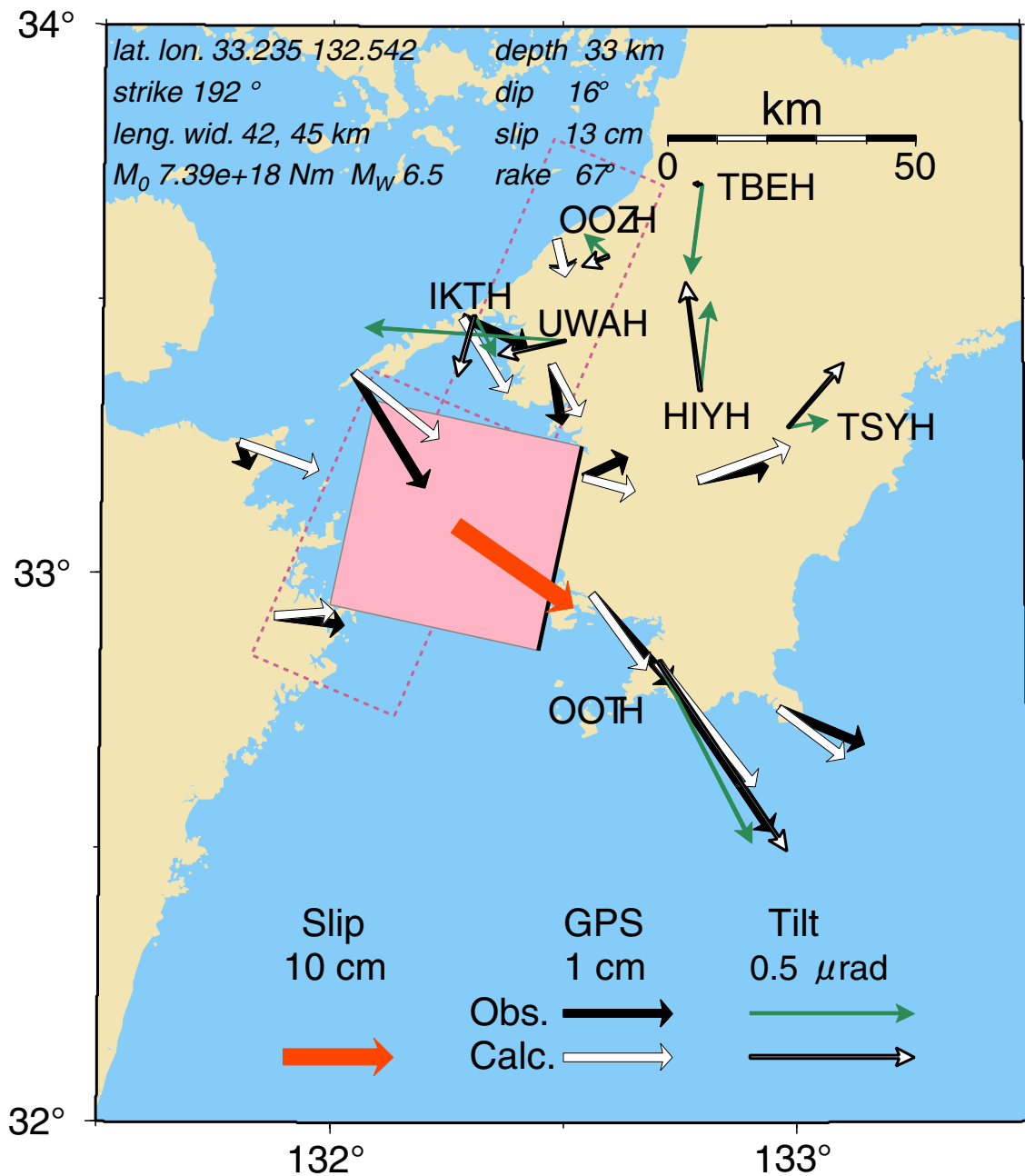
第7図 2003年8月30日の1日間における四国西部の4観測点でのエンベロープ (BPF2-16Hz) 波形記録．微動は同相のエンベロープで表現される．青丸は気象庁一元化震源リストにおける低周波地震、赤丸はエンベロープ相関法で震源決定された微動の発生時刻である．

Fig.7 Envelope traces of the bandpass (2-16Hz) filtered seismogram observed at 4 stations in the west of Shikoku with a time period of 1 day (August 30, 2003). The tremor is recognized by the coherent envelope pattern. Red and blue solid circles indicates the tremor detected by envelope correlation method and the low-frequency earthquake located by JMA, respectively.



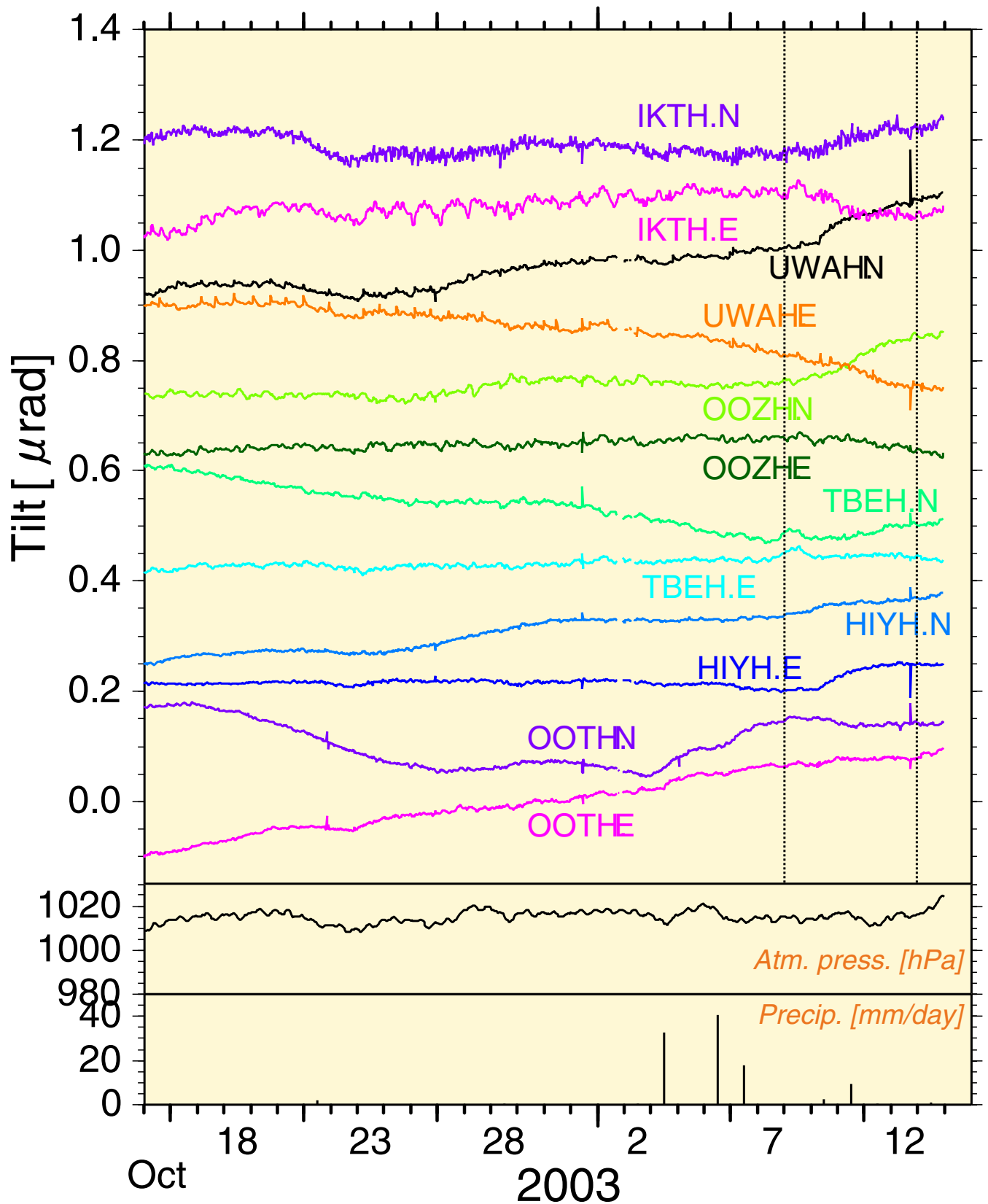
第8図 2003年1月1日から11月12日までの傾斜時系列. 観測点の位置は第9図の中に示した. 図の上方向が北・東下がりを示す. BAYTAP-G (7) による潮汐除去済み. 5月1日-8月1日のデータで線型トレンドを推定し, それを全期間から除去した. 縦破線で示した期間は, 第1-4図で示したのと同種の, 8月下旬から9月上旬にかけて約1週間継続した, 深部低周波微動の活発化とそれに同期したスロースリップイベントの発生期間を示している. 宇和島測候所の気圧・雨量を参考に示した.

Fig.8• Observed tilt time series from January 1, 2003 to November 12, 2003. The station locations are shown in Fig. 9. 'N' and 'E' followed by station code with four characters denote the northward and eastward ground down components, respectively. The records after removing each tidal component estimated by BAYTAP-G (7) and a linear trend estimated in a time period from May 1 to August 1 are plotted. Vertical dotted lines show a corresponding period of a slow slip event which coincides with a tremor activity, which is the same type of phenomena shown in Fig. 1-4. The bottom two panels show an atmospheric pressure and a precipitation observed at Uwajima meteorological observatory.



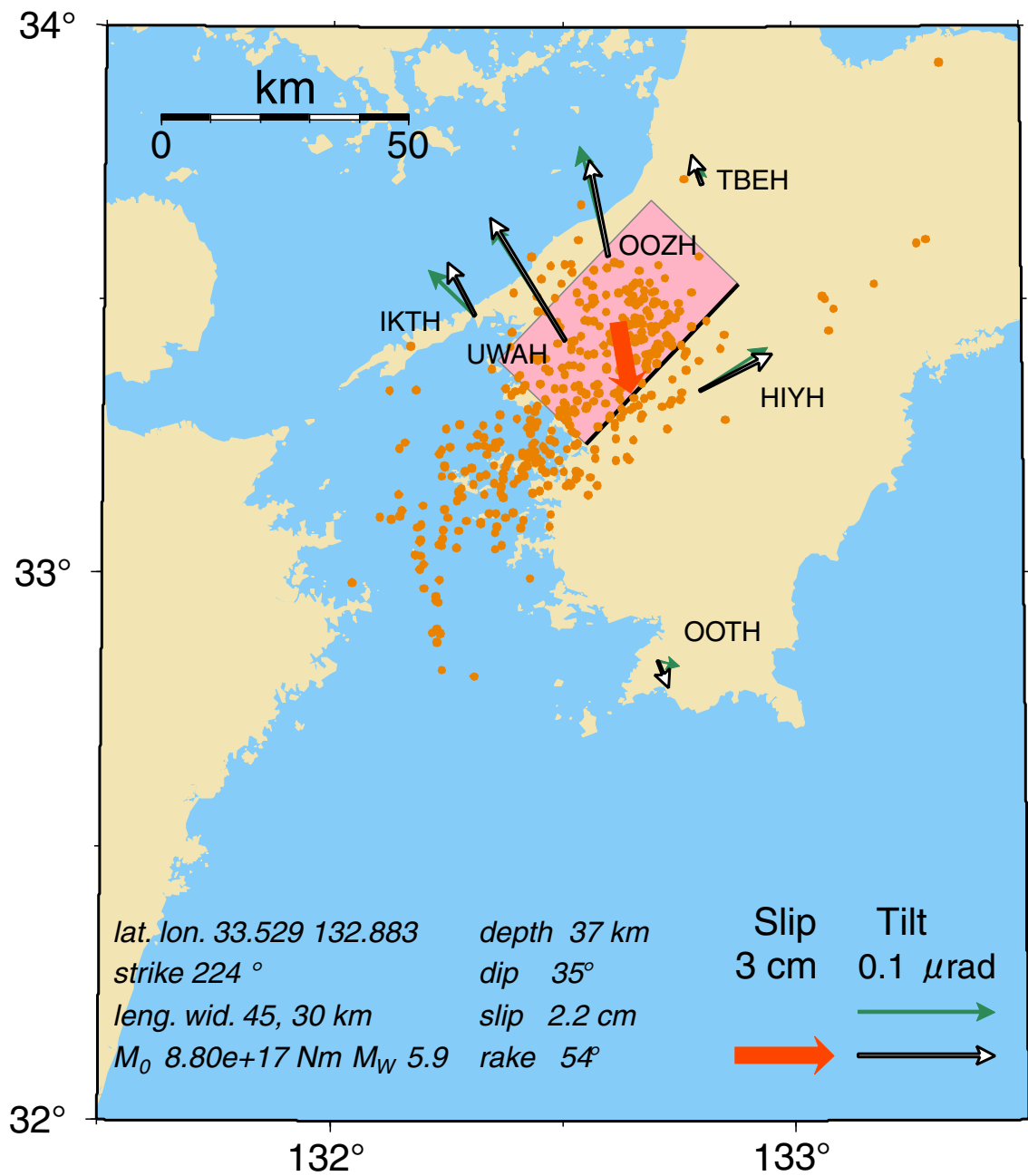
第9図 国土地理院GPS観測による地表水平変位ベクトル（2003年6月-2003年10月）と、2003年9月4日から10月26日の期間での傾斜変動ベクトル，それらのデータから推定されるスロースリップイベントの断層モデル，およびそれから計算される水平変位と傾斜変化ベクトル．GPS水平変動データは国土地理院発表（3）から読み取った．破線で囲った矩形領域は，第8図に示した約1週間の移動性微動・スロースリップ同期イベントの推定すべり領域（上端の深さ約40km）．

Fig.9 Surface horizontal displacements (solid black arrows; Jun,2003-October, 2003) observed at GPS stations operated by Geographical Survey Institute and the tilt changes (gray arrows) from September 4,2003 to October 26, 2003 observed at NIED tiltmeter stations. A rectangle fault was estimated from these data (a rectangle with an arrow). Solid white arrows and open white arrows denote calculated horizontal displacements and tilt changes, respectively. Dotted rectangles show the estimated slow slip area during the time period denoted in Fig. 8 as the vertical dotted lines.



第10図 10月15日から11月13日までの傾斜時系列. 表示方法は第8図と同様. 縦破線は短い継続時間のスロースリップイベントによって考えられる傾斜変化の期間を示す. この期間の傾斜変化ベクトルを第11図に示した.

Fig.10• Tilt time series from October 15, 2003 to November 13, 2003 (same as Fig. 8). A time period of another short-term slow slip event with tremor activity is depicted by vertical dotted lines.



第11図 11月8日 00:00 から11月12日 23:30 までの傾斜変化ベクトル（緑矢印）とそのデータから推定されたスロースリップの断層モデル（赤矩形・矢印），このモデルから計算される傾斜変化ベクトル（白抜き矢印）．この期間に発生した微動の震央を点で表示した．

Fig.11 Tilt change vectors for the period shown as dotted lines in Fig. 10 (solid thin arrows), the estimated fault model from these tilt change data (rectangle with a thick arrow), and the calculated tilt changes (open arrows). Epicenters of tremor activity during the same period are also plotted (dots).