

## 6-5 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（2016年11月～2017年4月）

### Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan (from November 2016 to April 2017)

産業技術総合研究所

Geological Survey of Japan, AIST

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

歪・傾斜・地下水の変化から短期的 SSE の断層モデルを推定したイベントについて、その解析結果を報告する。

2016年11月5日から7日頃に四国中部で微動活動が観測された（第1図）。第2図は微動活動周辺の産総研・防災科研の観測点における歪・傾斜の観測結果である。これらの結果はBAYTAP-Gにより気圧応答成分、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き、2016年11月9日から21日のデータを用いて1次トレンドを除去したものである。

第3図は第2図[A]の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（Mw 5.6）である。今回の活動域付近における最近の短期的 SSE の活動は、2016年4月5日から8日（Mw 5.6；第3図の灰色矩形1）、2016年8月17日から27日と9月1日から6日（順に Mw 5.3, 5.8, 5.7；同2-4）、および2016年10月23日から28日（順に Mw 5.8, 5.5, 5.2；同5-7）である。

2016年12月9日から17日頃に紀伊半島で微動活動が観測された（第4図）。第5図は微動活動周辺の産総研・防災科研の観測点における歪・傾斜・地下水の観測結果である。これらの結果はBAYTAP-Gにより気圧応答成分、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き、2016年11月20日から12月8日のデータを用いて1次トレンドを除去したものである。

第6, 7図は順に第5図[A]（12月9日から11日）と[B]（12月15日から17日）の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（順に Mw 5.8, 5.6）である。今回の活動域付近における最近の短期的 SSE の活動は、2016年5月12日から15日（順に Mw 5.5, 5.4；第6, 7図の灰色矩形1, 2）、2016年7月27日から31日（Mw 6.0；同3）、2016年8月12日から22日（順に Mw 5.6, 5.6；同4, 5）および2016年10月2日から3日（Mw 5.5；同6）である。

2016年12月19日から22日頃に四国西部で微動活動が観測された（第8図）。第9図は微動活動周辺の産総研・防災科研の観測点における歪・傾斜の観測結果である。これらの結果はBAYTAP-Gにより気圧応答成分、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き、2016年12月9日から18日のデータを用いて1次トレンドを除去したものである。

第10図は第9図[A]の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（Mw 5.6）である。今回の活動域付近における最近の短期的 SSE の活動は、2016年8月17日から27日と9月1日から6日（順に Mw 5.3, 5.8, 5.7；第10図の灰色矩形1-3）、2016年10月23日から28日（順に Mw 5.8, 5.5, 5.2；同4-6）、および2016年11月5日から7日（Mw 5.6；同7）である。

なお 2016 年 12 月 27 日頃にも同領域で微動活動が観測されている（第 8 図）が、同時期の短期的 SSE の断層面については一意な推定結果が得られなかった。

2017 年 2 月 8 日～10 日頃, 22 日午後～24 日午前, 27～28 日頃, および 3 月 2 日午後～11 日頃に, 四国西部～中部にかけて微動活動が観測された（第 11 図）。第 12 図は微動活動周辺の産総研・防災科研の観測点における多成分歪・地下水・傾斜の観測結果である。これらの結果は BAYTAP-G により気圧応答成分, 潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き, 2017 年 1 月 25 日～2 月 7 日のデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。

第 13-18 図は, 第 12 図 [A], [B], [C], [D], [E], および [F] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（それぞれ Mw 5.5, 5.8, 5.5, 5.4, 5.5, および 5.7）である。[A] を含む領域では, 2016 年 10 月 25 日午後～26 日および 12 月 19 日～22 日に Mw 5.5 および 5.6（第 13 図(b1)の灰色矩形 3 および 6）の, [B] を含む領域では, 2016 年 10 月 23 日午後～25 日午前に Mw 5.8（第 14 図(b1)の灰色矩形 2）の, [C] を含む領域では, 2016 年 10 月 23 日午後～25 日午前, 10 月 25 日午後～26 日および 10 月 27 日～28 日に Mw 5.8, 5.5 および 5.2（第 15 図(b1)の灰色矩形 2, 3 および 4）の, [D] を含む領域では, 2016 年 10 月 25 日午後～26 日および 10 月 27 日～28 日に Mw 5.5 および 5.2（第 16 図(b1)の灰色矩形 3 および 4）の, [E] を含む領域では, 2016 年 8 月 17 日～21 日および 11 月 5 日～7 日に Mw 5.3 および 5.6（第 17 図(b1)の灰色矩形 1 および 5）の, [F] を含む領域では, 2016 年 8 月 17 日～21 日および 12 月 19 日～22 日に Mw 5.3 および 5.5（第 18 図(b1)の灰色矩形 1 および 6）の短期的 SSE が, それぞれ発生したと推定されている。

2017 年 2 月 13 日午後～17 日頃に愛知県中部～長野県境付近で活発な微動活動が観測された（第 19 図）。第 20 図は微動活動周辺の産総研・気象庁・防災科研の観測点における多成分歪・傾斜の観測結果である。これらの結果は BAYTAP-G により気圧応答成分, 潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き, 2017 年 1 月 30 日～2 月 13 日午前のデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。

第 21 図は第 20 図 [A] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（Mw 5.8）である。[A] を含む領域では, 2016 年 10 月 24 日～25 日午前に Mw 5.4（第 21 図(b1)の灰色矩形 5）の, 10 月 25 日午後～26 日に Mw 5.2（第 21 図(b1)の灰色矩形 6）の短期的 SSE が, それぞれ発生したと推定されている。

2017 年 3 月 2 日午後～7 日頃に奈良県南部で活発な微動活動が観測された（第 22 図）。第 23 図は微動活動周辺の産総研・防災科研の観測点における多成分歪・傾斜の観測結果である。これらの結果は BAYTAP-G により気圧応答成分, 潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き, 2017 年 2 月 16 日～3 月 2 日午前のデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。

第 24 図は第 23 図[A]の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（Mw 5.8）である。奈良県南部では, 2016 年 10 月 2 日～3 日に Mw 5.5（第 23 図(b1)の灰色矩形 2）の短期的 SSE が発生したと推定されている。

2017 年 3 月 28 日～4 月 3 日頃に伊勢湾周辺で小規模な微動活動が観測された（第 25 図）。第 26 図は微動活動周辺の産総研・気象庁・防災科研の観測点における多成分歪・体積歪・傾斜の観測結

果である。これらの結果は BAYTAP-G により気圧応答成分、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き、2017 年 3 月 15 日～3 月 27 日のデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。第 27 図は第 26 図 [A] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果 (Mw 5.8) である。伊勢湾では、2016 年 8 月 1 日～6 日に Mw5.8 (第 27 図(b1)の灰色矩形 2) の短期的 SSE が発生したと推定されている。

2017 年 4 月 20 日から 30 日頃に三重県中部で微動活動が観測された (第 28 図)。第 29 図は微動活動周辺の産総研・防災科研の観測点における歪・傾斜・地下水の観測結果である。これらの結果は BAYTAP-G により気圧応答成分、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き、2017 年 4 月 6 日から 4 月 19 日のデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。

第 30, 31 図は順に第 29 図 [A] (4 月 20 日から 25 日午前) と [B] (4 月 25 日午後から 30 日) の変化を説明する短期的 SSE の推定結果 (順に Mw 5.8, 5.8) である。今回の活動域付近における最近の短期的 SSE の活動は、2015 年 11 月 3 日から 5 日 (Mw 5.4; 第 30, 31 図の灰色矩形 1)、2016 年 7 月 27 日から 31 日 (Mw 6.0; 同 2)、2016 年 8 月 12 日午後から 16 日 (Mw 5.6; 同 3)、2016 年 12 月 9 日から 17 日 (順に Mw 5.8, 5.8; 同 4, 5)、2017 年 3 月 2 日午後から 7 日 (Mw 5.8; 同 6)、および 2017 年 3 月 28 日から 4 月 3 日 (Mw 5.8; 同 7) である。

#### 解析方法

短期的 SSE の断層面推定には、それぞれの観測点の水平歪 4 成分・体積歪・傾斜 2 成分・地下水圧の記録を用いる。地下水圧は、O1 および M2 分潮の振幅を BAYTAP-G [Tamura et al., 1991] により計算し、GOTIC2 [Matsumoto et al., 2001] により推定した地球個体潮汐および海洋荷重潮汐 (O1 および M2 分潮) との振幅比を用いて、体積歪に変換する。歪・傾斜・地下水とともに、観測波形から BAYTAP-G により、気圧応答成分、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除く。また、イベント直前の期間を用いて 1 次トレンドも取り除く。微動活動も参考にして、数時間～半日単位で活動開始・終了時期を判断し、その期間の変化量を短期的 SSE による変化量とする。その際、歪については Matsumoto et al. [2010] の手法で理論潮汐歪を用いてキャリブレーションを行っている。

断層面の推定は、計算時間の短縮と、推定された結果の一意性を確認するために 2 段階で行う。断層面推定は板場ほか [2012] の手法を用いた。フィリピン海プレート境界面上 [弘瀬ほか, 2007] に多数の断層面を仮定してグリッドサーチにより推定する。仮定した断層面上のすべりによって各観測点で期待される歪変化の計算には Okada [1992] のプログラムを用いる。1 段階目には、断層面のサイズは固定 (幅・長さ共に 20 km)、断層面の位置 (0.1° 間隔) およびすべり量 (1 ～ 100 mm の間で 1 mm 間隔) のみ可変として広範囲で計算を行う。1 段階目の結果を示す図では、それぞれの断層面において最適すべり量を与えたときの、観測値と計算値 (期待値) との残差分布を示している。これにより、短期的 SSE が生じている可能性が高い領域を絞り込むとともに、推定された結果の任意性を確認することが出来る。2 段階目には、1 段階目で絞り込んだ領域 (= 残差が小さい領域) 付近で、位置及びすべり量に加えて、断層面の長さを 10 ～ 80 km、幅を 10 ～ 50 km、それぞれ 1 km 間隔で可変として計算を行なう。その結果、観測値との残差が最小となる断層面が 1 つ計算されるが、計算に使用している観測点数が少ない場合や、断層面と観測点配置の関係によっては任意性が高くなるので注意が必要である。なお、異種観測値を統合して解析するため、観測点ごとに残差をノイズレベルによって規格化している。ノイズレベルは、気圧応答、潮汐成分およ

びホワイトノイズ成分を取り除いた後（微動活動が活発な期間および周辺の日雨量 50 mm を超える時期を除く）の 24 時間階差の  $2\sigma$  とした。

深部低周波微動の検出・震源決定には、エンベロープ相関法を用いている。

（落唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・武田直人・木口努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦）

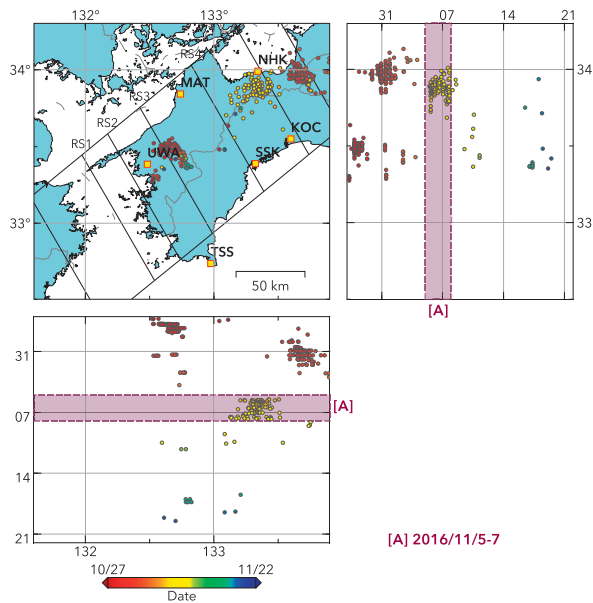
#### 謝辞

短期的 SSE の断層モデル推定には、気象庁、静岡県の多成分歪計および体積歪計の記録を使用しました。気象庁の歪計データを解析する際には、気象庁によるキャリブレーション係数を使用しました。微動の解析には、気象庁、東京大学、京都大学、名古屋大学、高知大学、九州大学の地震波形記録を使用しました。低周波地震の震央位置表示には、気象庁の一元化カタログを使用しました。ここに記して感謝します。

#### 参考文献

- 弘瀬冬樹，中島淳一，長谷川昭（2007），Double-Difference Tomography 法による西南日本の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定，地震 2，60，1-20.
- 板場智史，松本則夫，北川有一，小泉尚嗣，松澤孝紀，歪・傾斜・地下水統合解析による短期的スロースリップイベントのモニタリング，日本地球惑星連合 2012 年大会，千葉，5 月，2012.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe, GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, J. Geod. Soc. Japan, 47, 243-248, 2001.
- Matsumoto, N., O. Kamigaichi, Y. Kitagawa, S. Itaba, and N. Koizumi (2010), In-situ Calibration of Borehole Strainmeter Using Green's Functions for Surface Point Load at a Depth of Deployment, Eos, Trans. AGU, Abstract G11A-0626.
- Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., 82, 1018-1040.
- 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.



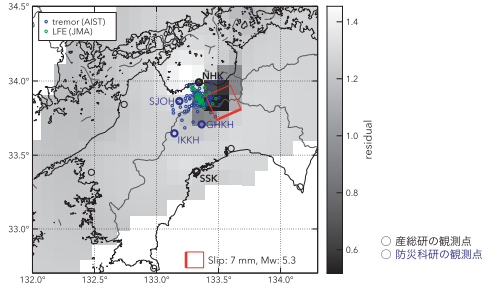


第1図 四国地方における深部低周波微動の時空間分布 (2016/10/27-2016/11/21)

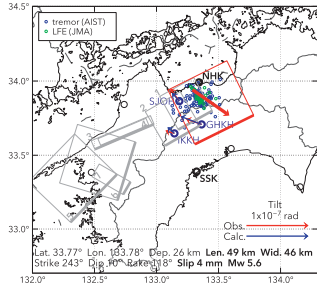
Fig.1 Space-time distribution of deep low frequency tremors in the Shikoku region from October 27 to November 21, 2016.

[A] 2016/11/5-7

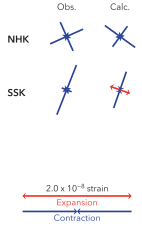
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定された断層モデル

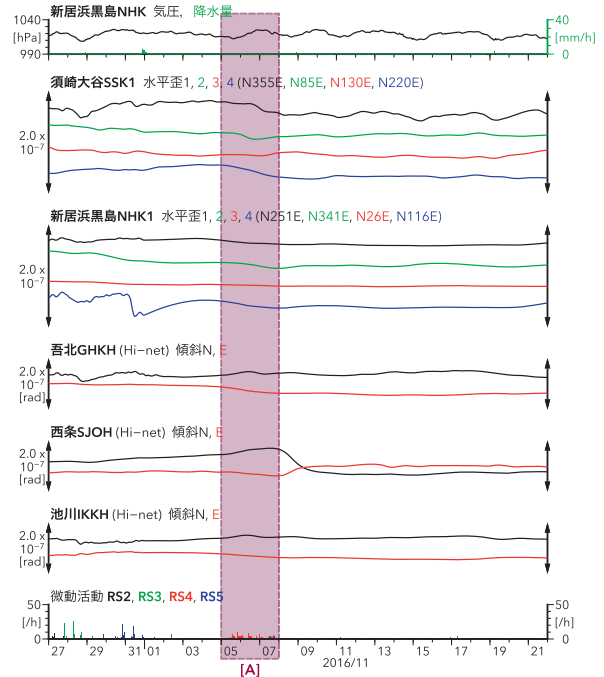


(b2) 主歪



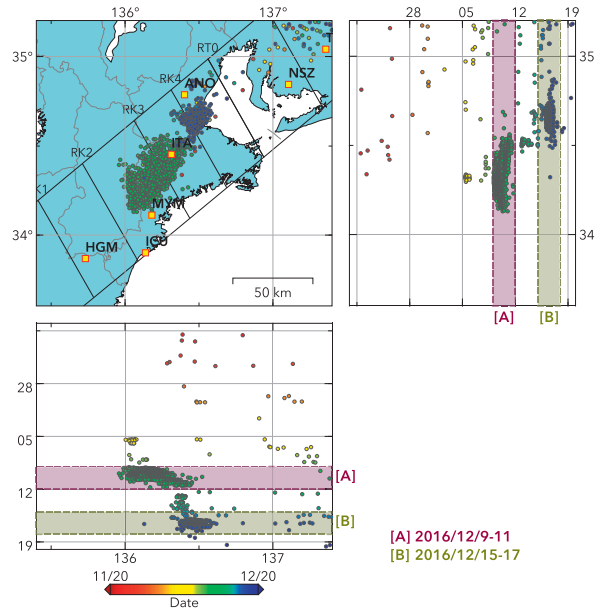
第3図 2016/11/05-07の歪・傾斜変化(第2図[A])を説明する断層モデル。黒・青の丸印はそれぞれ産総研・防災科研 Hi-net の観測点を、青・緑の小さな丸印はそれぞれ産総研の推定した深部低周波微動および気象庁の推定した深部低周波地震を示す。(a) 1段階目の結果。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面の位置(大きさは20×20 kmで固定)。背景の濃淡はおのこの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和をその断層面の位置に示した分布図。(b1) 2段階目の結果。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。矢印は傾斜の観測値と計算値の比較。灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面(番号との対応は本文参照)。(b2) 主歪の観測値と(b1)に示した断層モデルから求めた計算値との比較。

Fig.3 Inferred fault models for the strain and tilt changes from November 05 to 07, 2016 (Fig. 2[A]). The black and blue circles show the observation sites of AIST and NIED Hi-net. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremor (LFT) estimated by AIST and low frequency earthquake (LFE) estimated by JMA, respectively. (a) The result of the first step. The length and width of the rectangular fault patch are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated on each fault patch. The gray scale shows the distribution of sum of residuals and the red rectangle shows the place of the fault patch with the minimum residual. (b1) The result of the second step. The red rectangle shows the estimated fault model. The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and blue arrows. The gray rectangles show the fault models of the recent events (see main text). (b2) The observed and calculated principal strain changes.



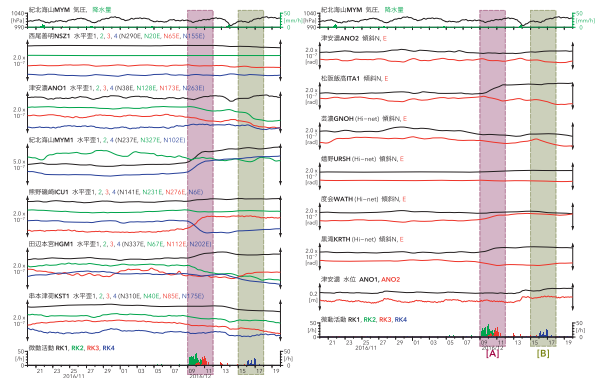
第2図 四国地方における歪・傾斜観測結果と微動の検出数 (2016/10/27-2016/11/21)

Fig.2 Observed strain and tilt data and detected numbers of the tremors in the Shikoku region from October 27 to November 21, 2016.



第4図 紀伊半島における深部低周波微動の時空間分布 (2016/11/20-2016/12/19)

Fig.4 Space-time distribution of deep low frequency tremors in the Kii Peninsula from November 20 to December 19, 2016.

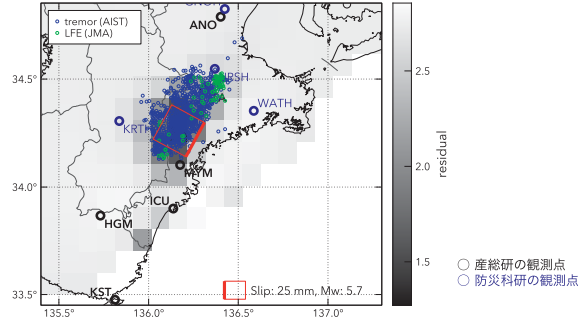


第5図 紀伊半島における歪・傾斜・地下水観測結果と微動の検出数 (2016/11/20-2016/12/19)

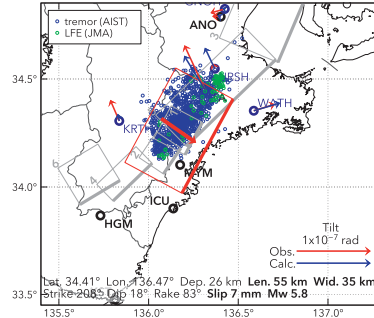
Fig.5 Observed strain, tilt and groundwater data and detected numbers of the tremors in the Kii Peninsula from November 20 to December 19, 2016.

#### [A] 2016/12/9-11

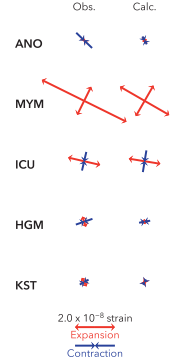
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定された断層モデル



(b2) 主歪

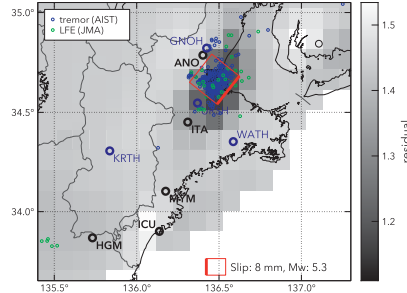


第6図 2016/12/09-11の歪・傾斜変化 (第5図 [A]) を説明する断層モデル。凡例は第3図を参照。

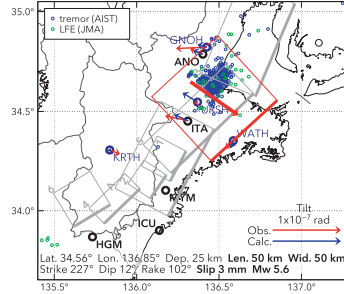
Fig.6 Inferred fault models for the strain and tilt changes from December 09 to 11, 2016 (Fig. 5[A]). See also the caption of Fig. 3.

#### [B] 2016/12/15-17

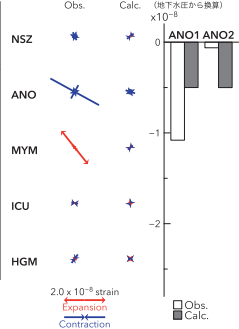
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



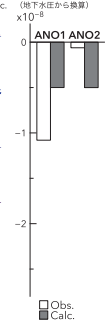
(b1) 推定された断層モデル



(b2) 主歪

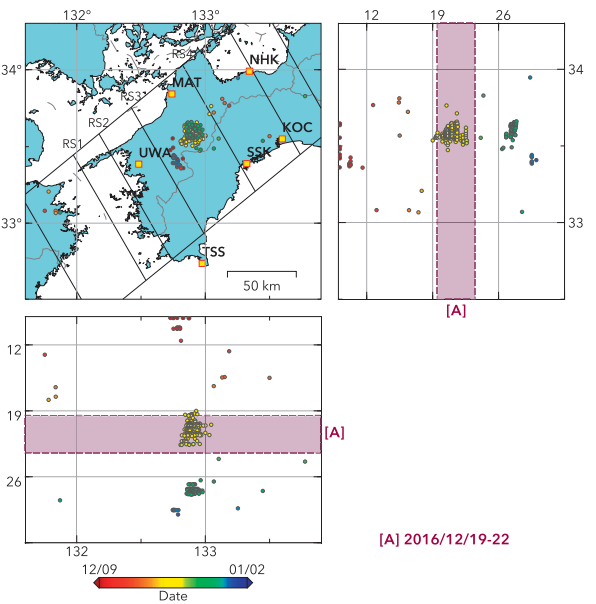


(b3) 体積歪



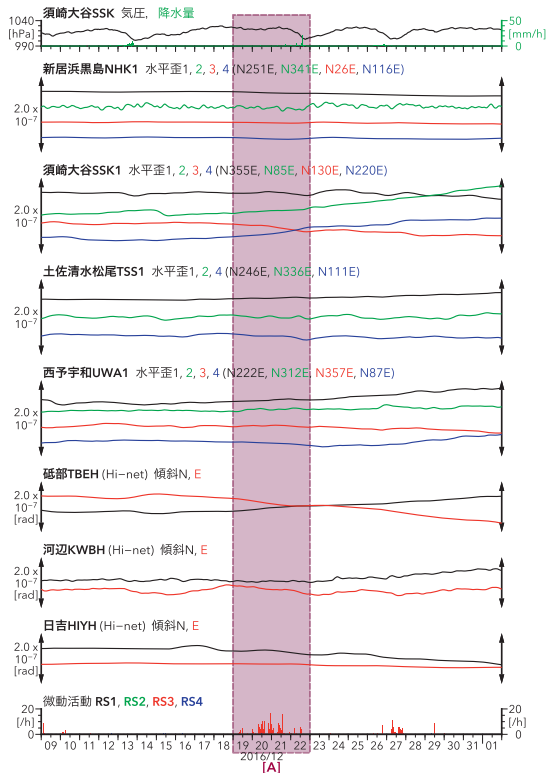
第7図 2016/12/15-17の歪・傾斜・地下水変化 (第5図 [B]) を説明する断層モデル。 (b3)は体積歪の観測値と(b1)に示した断層モデルから求めた計算値との比較。凡例は第3図を参照。

Fig.7 Inferred fault models for the strain, tilt and groundwater changes from December 15 to 17, 2016 (Fig. 5[B]). (b3) The observed and calculated volumetric strain changes. See also the caption of Fig. 3.

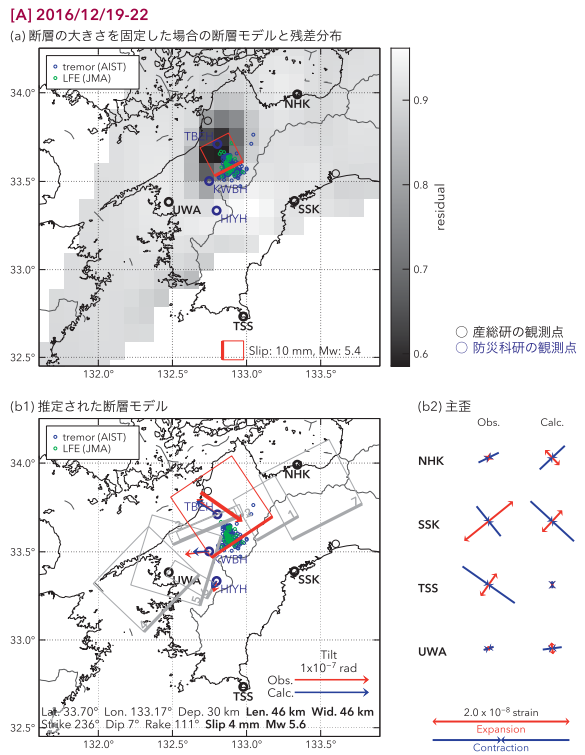


第8図 四国地方における深部低周波微動の時空間分布 (2016/12/09-2017/01/01)

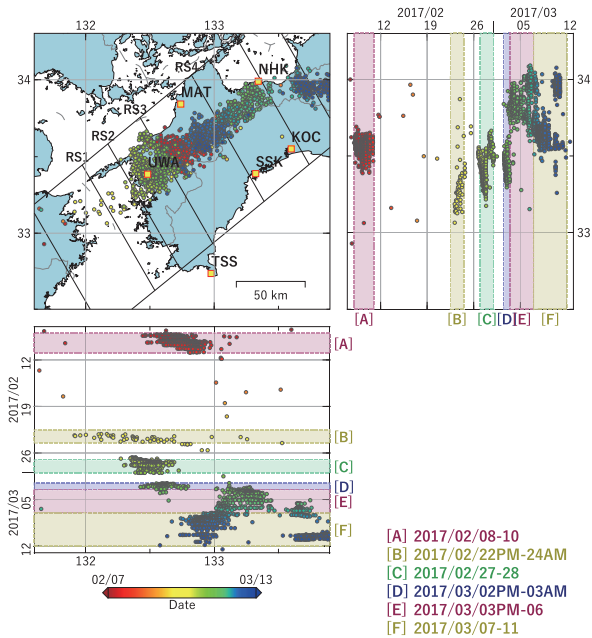
Fig.8 Space-time distribution of deep low frequency tremors in the Shikoku region from December 09, 2016 to January 01, 2017.



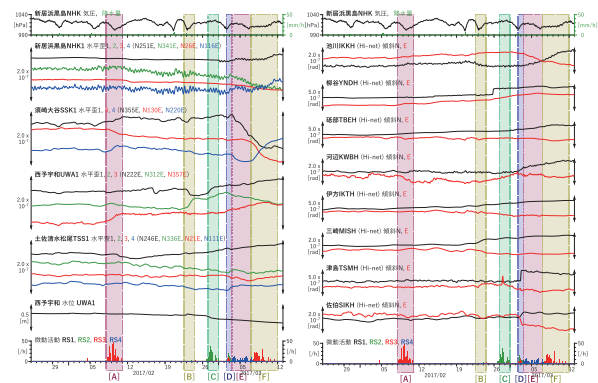
第9図 四国地方における歪・傾斜観測結果と微動の検出数 (2016/12/09-2017/01/01)  
Fig.9 Observed strain and tilt data and detected numbers of the tremors in the Shikoku region from December 09, 2016 to January 01, 2017.



第10図 2016/12/19-22の歪・傾斜変化(第9図[A])を説明する断層モデル。凡例は第3図を参照。  
Fig.10 Inferred fault models for the strain and tilt changes from December 19 to 22, 2016 (Fig. 9[A]). See also the caption of Fig. 3.

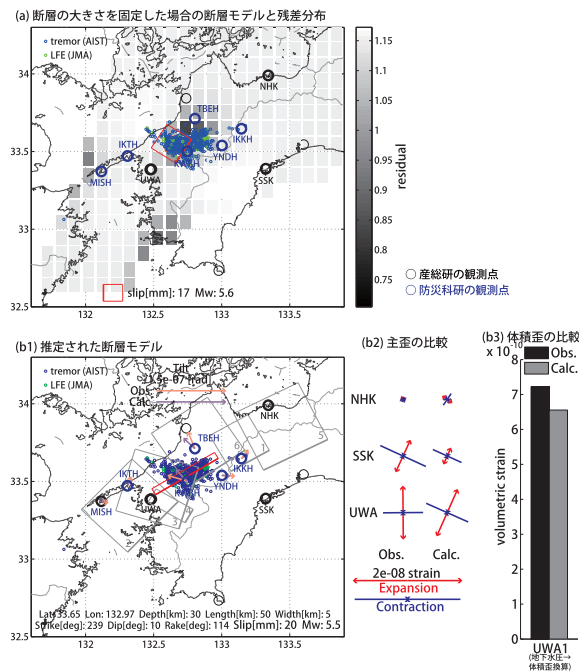


第11図 四国地方における深部低周波微動の時空間分布 (2017/02/07-2017/03/12)  
Fig.11 Space-time distribution of deep low frequency tremors in the Shikoku region from February 07 to March 12, 2017.



第12図 四国地方における歪・傾斜・地下水観測結果と微動の検出数 (2017/01/25-2017/03/12)  
Fig.12 Observed strain, tilt and groundwater data and detected numbers of the tremors in the Shikoku region from January 25 to March 12, 2017.

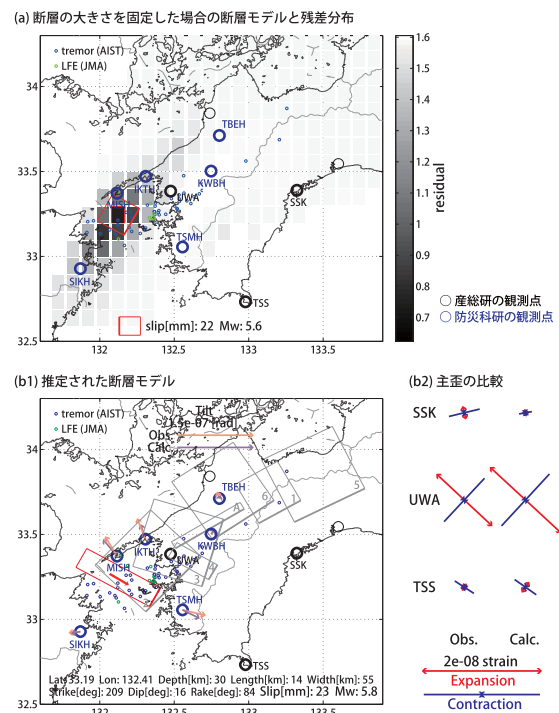
[A] 2017/02/08-10



第 13 図 2017/02/08-10 の歪・傾斜・地下水変化 (第 12 図[A]) を説明する断層モデル。凡例は第 3 図・第 7 図を参照。

Fig.13 Inferred fault models for the strain, tilt and groundwater changes from February 08 to 10, 2017 (Fig. 12[A]). See also the caption of Figs. 3 and 7.

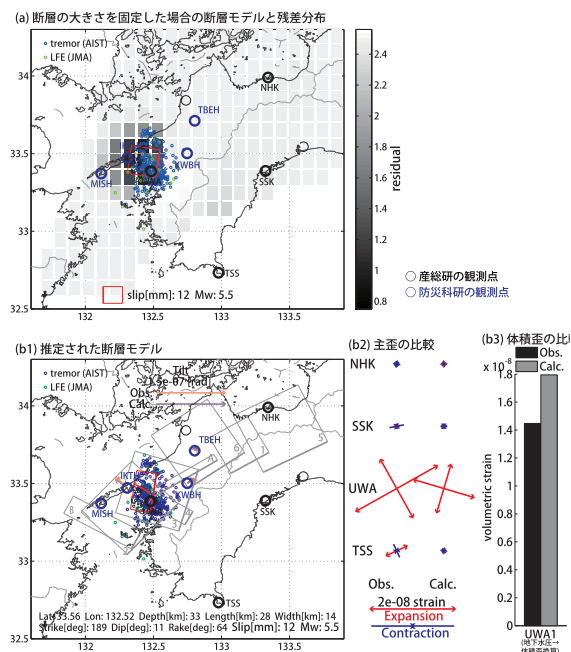
[B] 2017/02-22午後-24午前



第 14 図 2017/02/22 午後-24 午前の歪・傾斜変化 (第 12 図[B]) を説明する断層モデル。凡例は第 3 図を参照。

Fig.14 Inferred fault models for the strain and tilt changes from the second half of February 22 to the first half of February 24, 2017 (Fig. 12[B]). See also the caption of Fig. 3.

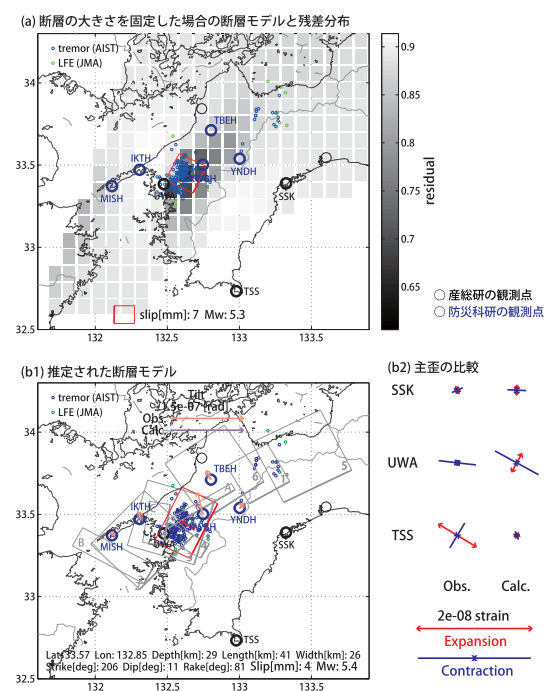
[C] 2017/2/27-28



第 15 図 2017/02/27-28 の歪・傾斜・地下水変化 (第 12 図[C]) を説明する断層モデル。凡例は第 3 図・第 7 図を参照。

Fig.15 Inferred fault models for the strain, tilt and groundwater changes from February 27 to 28, 2017 (Fig. 12[C]). See also the caption of Figs. 3 and 7.

[D] 2017/03/02午後-03午前

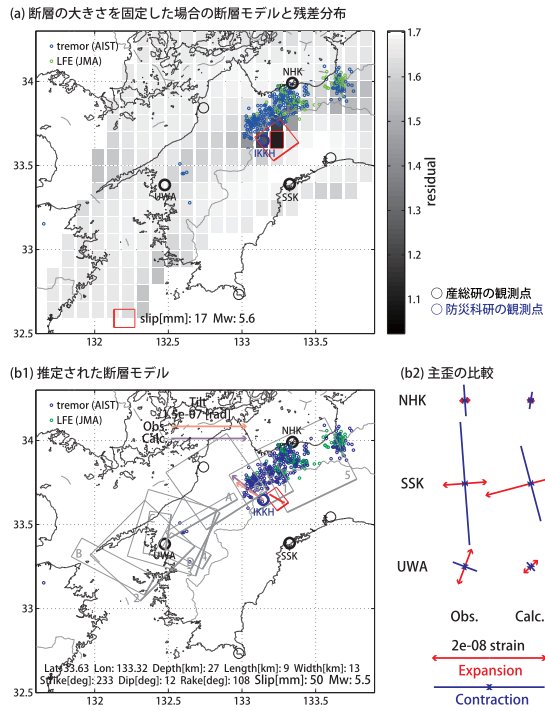


第 16 図 2017/03/02 午後-03 午前の歪・傾斜変化 (第 12 図[D]) を説明する断層モデル。凡例は第 3 図を参照。

Fig.16 Inferred fault models for the strain and tilt changes from the second half of March 02 to the first half of March 03, 2017 (Fig. 12[D]). See also the caption of Fig. 3.



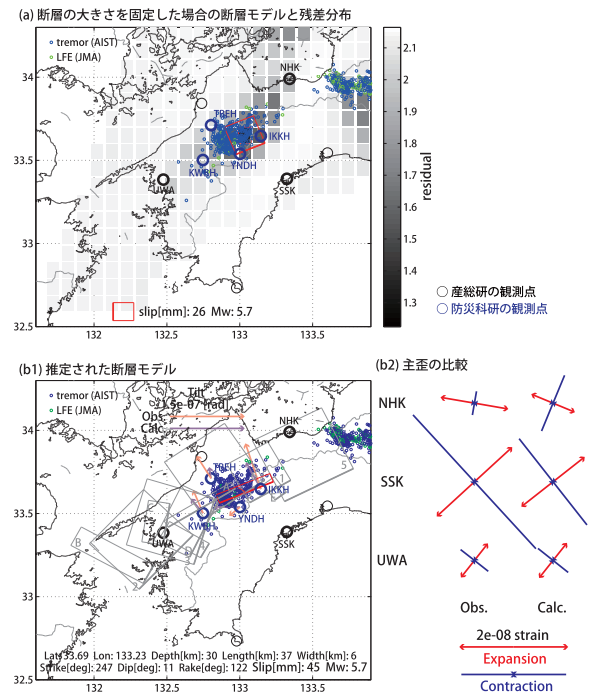
[E] 2017/03/03午後-6



第 17 図 2017/03/03 午後-06 の歪・傾斜変化 (第 12 図[E]) を説明する断層モデル。凡例は第 3 図を参照。

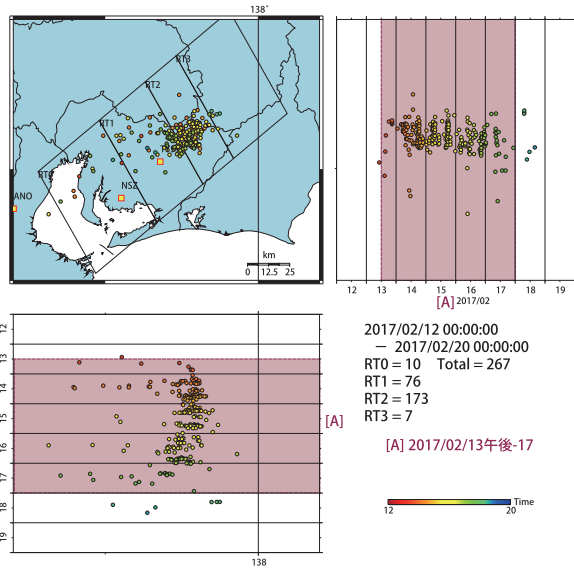
Fig.17 Inferred fault models for the strain and tilt changes from the second half of March 03 to March 06, 2017 (Fig. 12[E]). See also the caption of Fig. 3.

[F] 2017/03/07-11



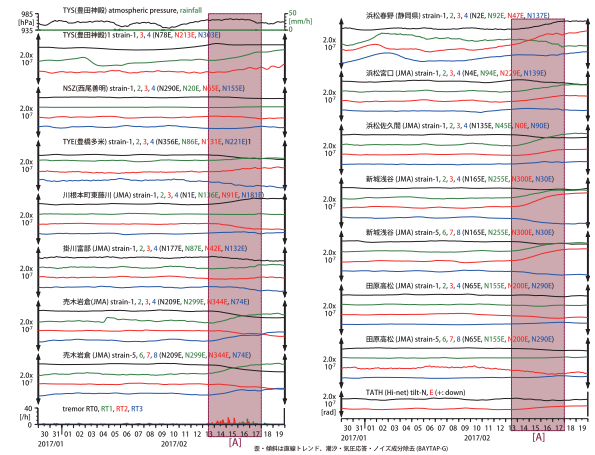
第 18 図 2017/03/07-11 の歪・傾斜変化 (第 12 図[F]) を説明する断層モデル。凡例は第 3 図を参照。

Fig.18 Inferred fault models for the strain and tilt changes from March 07 to 11, 2017 (Fig. 12[F]). See also the caption of Fig. 3.



第 19 図 東海地方における深部低周波微動の時空間分布 (2017/02/12-2017/02/19)

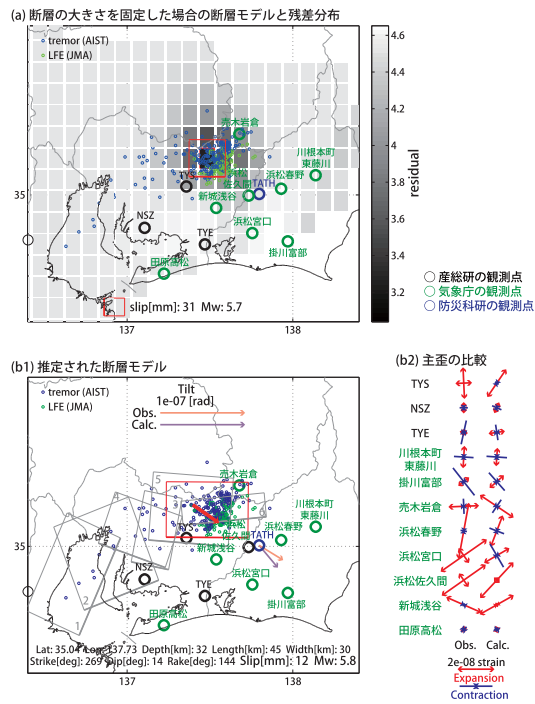
Fig.19 Space-time distribution of deep low frequency tremors in the Tokai region from February 12 to February 19, 2017.



第 20 図 東海地方における歪・傾斜観測結果と微動の検出数 (2017/01/30-2017/02/19)

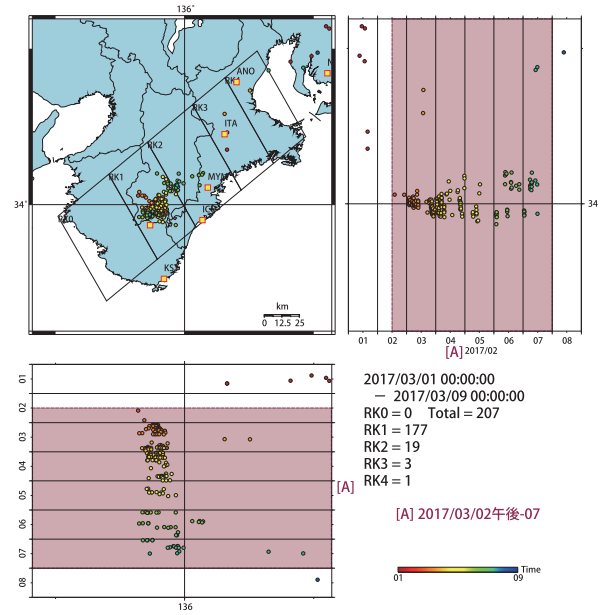
Fig.20 Observed strain and tilt data and detected numbers of the tremors in the Tokai region from January 30 to February 19, 2017.

[A] 2017/02/13午後-17



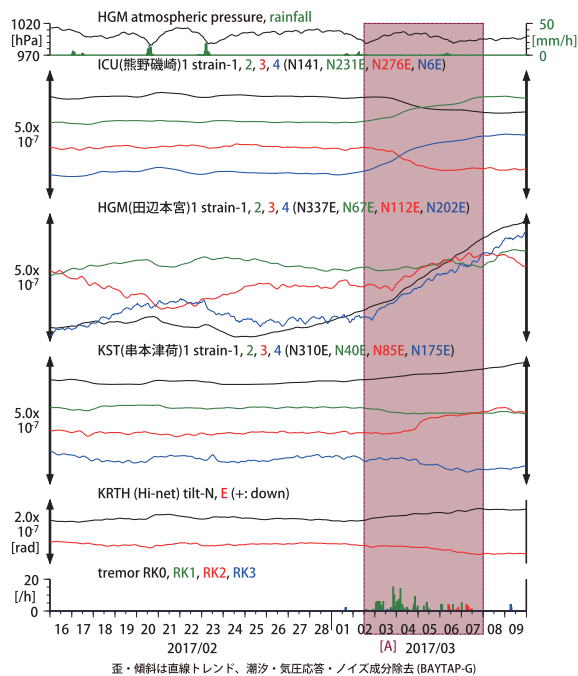
第 21 図 2017/02/13 午後 -17 の歪・傾斜変化 (第 20 図 [A]) を説明する断層モデル。緑の丸印は気象庁の観測点を示す。凡例は第 3 図を参照。

Fig.21 Inferred fault models for the strain and tilt changes from the second half of February 13 to 17, 2017 (Fig. 20[A]). The green circles show the observation sites of JMA. See also the caption of Fig. 3.



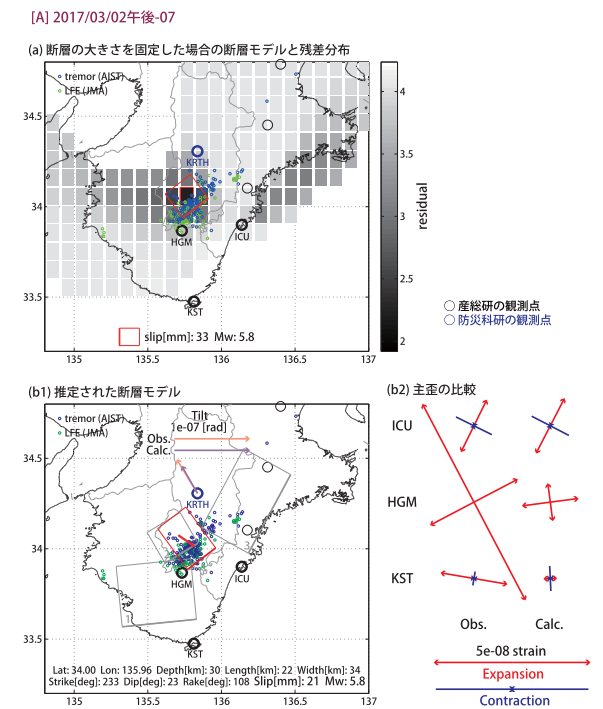
第 22 図 紀伊半島における深部低周波微動の時空間分布 (2017/03/01-2017/03/08)

Fig.22 Space-time distribution of deep low frequency tremors in the Kii Peninsula from March 01 to March 08, 2017.



第 23 図 紀伊半島における歪・傾斜観測結果と微動の検出数 (2017/02/16-2017/03/09)

Fig.23 Observed strain and tilt data and detected numbers of the tremors in the Kii Peninsula from February 16 to March 09, 2017.



第 24 図 2017/03/02 午後 -07 の歪・傾斜変化 (第 23 図 [A]) を説明する断層モデル。凡例は第 3 図を参照。

Fig.24 Inferred fault models for the strain and tilt changes from the second half of March 02 to 07, 2017 (Fig. 23[A]). See also the caption of Fig. 3.



Fig.25 Space-time distribution of deep low frequency tremors in the Kii Peninsula from March 15 to April 08, 2017.

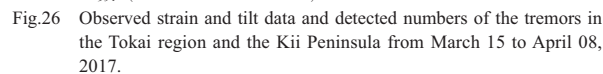


Fig.27 Inferred fault models for the strain and tilt changes from March 28 to April 03, 2017 (Fig. 26[C]). See also the caption of Figs. 3 and 7.

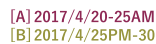


Fig.28 Space-time distribution of deep low frequency tremors in the Kii Peninsula from April 06 to May 04, 2017.

