

6-4 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（2015年5月～2015年10月）

Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan (from May 2015 to October 2015)

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。

2015年5月7日頃から10日頃にかけて、三重県中部～伊勢湾にかけて深部低周波微動活動が観測された（第1図）。第2図は同時期の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・水位・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、さらに2015年5月1日から5月6日までのデータを用いて1次トレンドを除去したものである。

第2図の網掛部分に示した変化を用いて短期的 SSE の断層面を推定した結果を第3図に示す。モーメントマグニチュードは Mw 5.7 と推定された。

今回の活動域付近における最近の短期的 SSE には、和歌山県・奈良県県境付近～愛知県東部の領域で2015年1月1日頃から21日頃にかけて発生したイベント（発生順に Mw 5.6, 5.7, 5.8, 5.6, 5.2, 5.8; 第3図の灰色矩形 1A-1F）、愛知県東部～愛知県・長野県県境付近で2015年4月4日頃から28日頃にかけて発生したイベント（発生順に Mw 5.8, 5.7, 5.7, 5.3; 第3図の灰色矩形 2 および 3A-3C）がある。

2015年5月14日頃から16日頃、および5月26日頃から6月4日頃にかけて、豊後水道から四国西部の領域で深部低周波微動活動が観測された（第4図）。第5図は同時期の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・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、さらに2015年5月1日から5月12日までのデータを用いて1次トレンドを除去したものである。

第5図に示した変化の状況と微動活動の推移から、期間を[A] 2015年5月14日～5月16日、[B1] 5月26日～5月29日午前、[B2] 5月29日午後～5月31日午前および[B3] 5月31日午後～6月2日に分け、網掛部分に示した変化を用いて短期的 SSE の断層面を推定した結果を第6-9図に示す。モーメントマグニチュードは順に Mw 5.5, 5.6, 5.9, 5.7 と推定された。なお前述の通り微動活動は6月4日頃まで見られたが、観測値に対応する明瞭な変化が見られなかったことから、解析は6月2日までとしている。

今回の活動域付近における最近の短期的 SSE には、2014年12月26日頃から2015年1月12日頃にかけて発生したイベント（順に Mw 6.1, 5.8, 5.9; 第6-9図の灰色矩形 1A-1C）、2015年3月24

日頃から 27 日頃にかけて発生したイベント（順に Mw 5.8, 5.3; 第 6-9 図の灰色矩形 2A, 2B）がある。

2015 年 6 月 4 日頃から 7 日頃にかけて、奈良県南部で深部低周波微動活動が観測された（第 10 図）。第 11 図は同時期の微動活動周辺の産総研の観測点における多成分歪の観測結果である。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、さらに 2015 年 5 月 20 日から 6 月 3 日までのデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。

第 11 図の網掛部分に示した変化を用いて短期的 SSE の断層面を推定した結果を第 12 図に示す。モーメントマグニチュードは Mw 5.7 と推定された。

今回の活動域付近における最近の短期的 SSE には、同じ領域で 2015 年 1 月 7 日頃から 10 日頃にかけて発生したイベント（Mw 5.8; 第 12 図の灰色矩形 1）、西側の領域で 2015 年 3 月 14 日頃から 16 日頃にかけて発生したイベント（Mw 5.3; 第 12 図の灰色矩形 2）がある。

2015 年 7 月 18 日頃から 25 日頃にかけて、三重県中部で深部低周波微動活動が観測された（第 13 図）。第 14 図は同時期の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、さらに 2015 年 7 月 1 日から 7 月 15 日までのデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。

第 14 図の網掛部分に示した変化を用いて短期的 SSE の断層面を推定した結果を第 15, 16 図に示す。このイベントは微動活動の推移に対応して 2 つに分けられ、推定されたモーメントマグニチュードは順に Mw 5.5, 5.6 であった。

今回の活動域付近における最近の短期的 SSE には、2014 年 7 月 3 日頃から 14 日頃にかけて発生したイベント（順に Mw 5.4, 5.6, 5.5, 5.8, 5.7, 5.7; 第 15, 16 図の灰色矩形 1A-1F）、2015 年 1 月 1 日頃から 5 日頃にかけて発生したイベント（順に Mw 5.6, 5.7; 第 15, 16 図の灰色矩形 2A, 2B）がある。

2015 年 9 月 1 日頃から 5 日頃にかけて、豊後水道から四国西部の領域で深部低周波微動活動が観測された（第 17 図）。第 18 図は同時期の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、さらに 2015 年 8 月 16 日から 31 日までのデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。

第 18 図に示した変化の状況と微動活動の推移から、期間を[A] 2015 年 9 月 1 日～3 日、[B] 9 月 4 日～5 日に分け、網掛部分に示した変化を用いて短期的 SSE の断層面を推定した結果を第 19, 20 図に示す。モーメントマグニチュードは順に Mw 6.0, 5.5 と推定された。

今回の活動域付近における最近の短期的 SSE には、2015 年 3 月 24 日頃から 27 日頃にかけて発生したイベント（順に Mw 5.8, 5.3; 第 19, 20 図の灰色矩形 1A, 1B）、2015 年 5 月 14 日頃から 6 月 2 日頃にかけて発生したイベント（順に Mw 5.5, 5.6, 5.9, 5.7; 第 19, 20 図の灰色矩形 2A-2D）がある。

2015 年 10 月 25 日頃から 27 日頃にかけて、三重県中部～奈良県東部で深部低周波微動活動が観

測された（第 21 図）。第 22 図は同時期の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・体積歪の観測結果である。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、さらに 2015 年 10 月 10 日から 24 日までのデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである。

第 22 図の網掛部分に示した変化を用いて短期的 SSE の断層面を推定した結果を第 23 図に示す。モーメントマグニチュードは Mw 5.8 と推定された。

今回の活動域付近における最近の短期的 SSE には、2015 年 5 月 7 日頃から 10 日頃にかけて発生したイベント（Mw 5.7; 第 23 図の灰色矩形 1）、2015 年 7 月 18 日頃から 25 日頃にかけて発生したイベント（順に Mw 5.5, 5.6; 第 23 図の灰色矩形 2A, 2B）がある。

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な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 2σ 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。

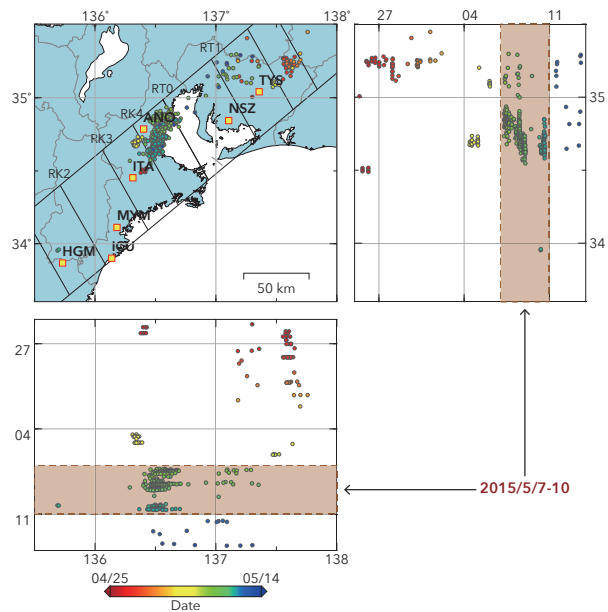
（落唯史・板場智史・小泉尚嗣・松本則夫・北川有一・武田直人・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦）

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。

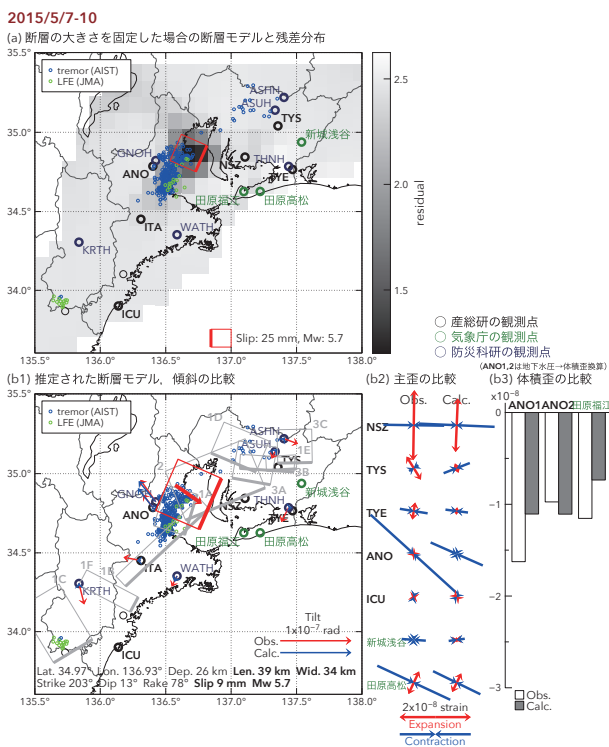
参考文献

- 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.



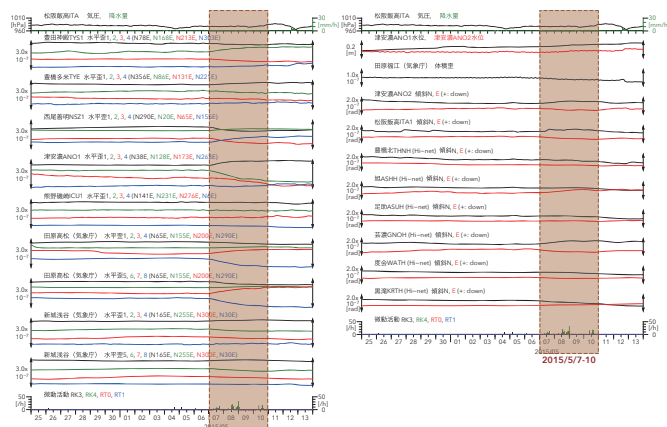
第 1 図 2015/4/25 00:00-5/14 00:00 の紀伊半島～東海地方における深部低周波微動の時空間分布図。エンベロープ相関法により決定。

Fig. 1 Epicentral and space-time distributions of deep low frequency tremors in Kii Peninsula and the Tokai district from 0:00 April 25 to 0:00 May 14, 2015.



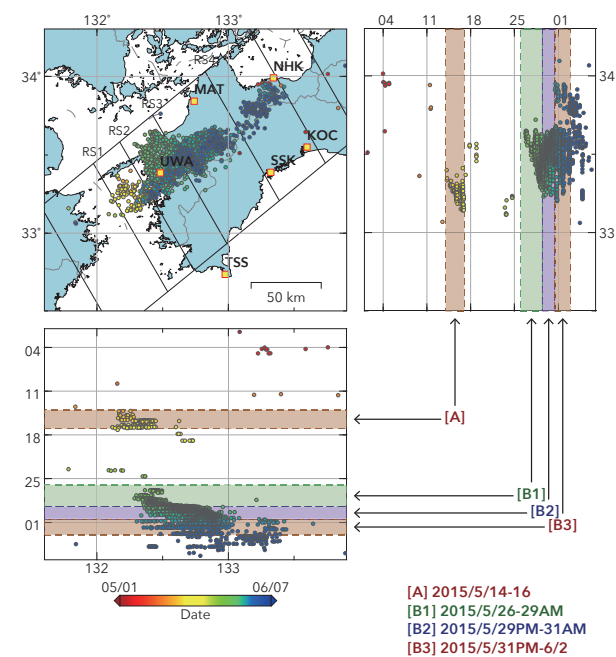
第 3 図 2015/5/7-10 の歪・傾斜・地下水変化 (第 2 図網掛) を説明する断層モデル。地図中の太丸印は解析に使用した観測点 (黒: 産総研, 緑: 気象庁, 青: 防災科研 Hi-net) を示す。小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動、小さい緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a) プレート境界面に沿って分布させた 20x20 km (大きさを固定) の矩形断層面に対して、おのおの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和をその断層面の位置に示した分布図。赤色矩形は残差の総和が最小となる断層面。(b1) (a) の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面 (赤色矩形) と断層パラメータ。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。(1A: 2015/1/1-3 (Mw 5.6), 1B: 2015/1/3-5 (Mw 5.7), 1C: 2015/1/7-10 (Mw 5.8), 1D: 2015/1/12-14 (Mw 5.6), 1E: 2015/1/15-18 (Mw 5.2), 1F: 2015/1/19-21 (Mw 5.8), 2: 2015/04/04-08 (Mw 5.8), 3A: 2015/04/14-15 (Mw 5.7), 3B: 2015/04/16-17 (Mw 5.7), 3C: 2015/04/18 (Mw 5.3)). (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。(b3) 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。

Fig. 3 The fault model for the strain, tilt and groundwater changes from May 7 to May 10, 2015. The black, green and blue circles show the observation sites of AIST, JMA and NIED Hi-net. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b1) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2015/1/1-3 (Mw 5.6), 1B: 2015/1/3-5 (Mw 5.7), 1C: 2015/1/7-10 (Mw 5.8), 1D: 2015/1/12-14 (Mw 5.6), 1E: 2015/1/15-18 (Mw 5.2), 1F: 2015/1/19-21 (Mw 5.8), 2: 2015/04/04-08 (Mw 5.8), 3A: 2015/04/14-15 (Mw 5.7), 3B: 2015/04/16-17 (Mw 5.7), 3C: 2015/04/18 (Mw 5.3)). The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and the blue arrows. (b2) The observed and calculated principal strain changes. (b3) The observed and calculated volumetric strain changes.



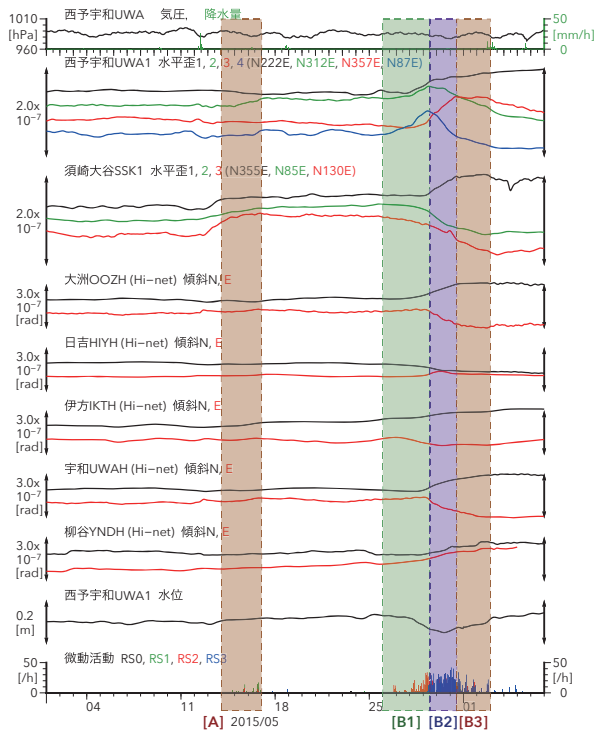
第 2 図 紀伊半島～東海地方における歪・傾斜・地下水観測結果 (2015/4/25 00:00 - 2015/5/14 00:00 (JST))

Fig. 2 Observed strain, tilt and groundwater changes at the observation sites and number of deep low frequency tremors in Kii Peninsula and the Tokai district from 0:00 April 25 to 0:00 May 14, 2015.

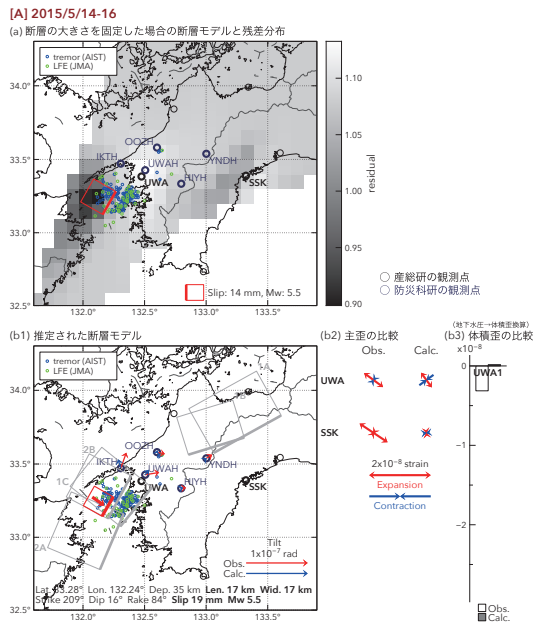


第 4 図 2015/5/1 00:00-6/7 00:00 の四国地方における深部低周波微動の時空間分布図。エンベロープ相関法により決定。

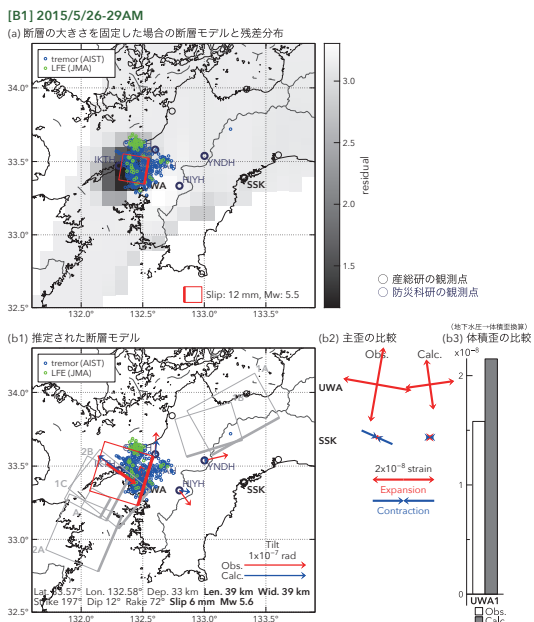
Fig. 4 Epicentral and space-time distributions of deep low frequency tremors in the Shikoku district from 0:00 May 1 to 0:00 June 7, 2015.



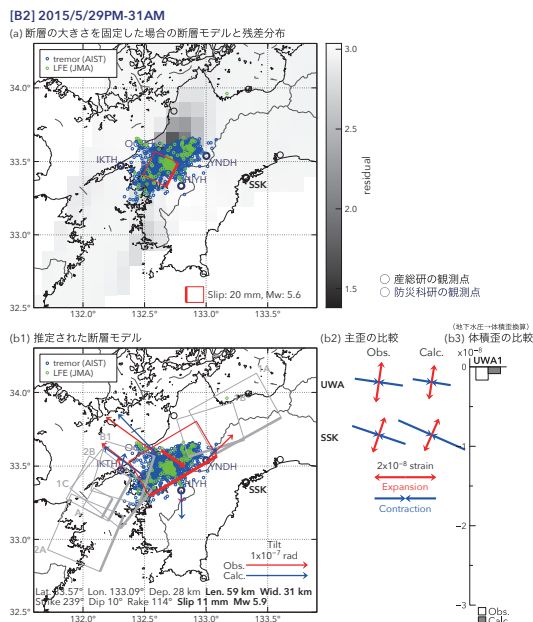
第5図 四国地方における歪・傾斜・地下水観測結果 (2015/5/1 00:00 - 2015/6/7 00:00 (JST))
 Fig. 5 Observed strain, tilt and groundwater changes at the observation sites and number of deep low frequency tremors in the Shikoku district from 0:00 May 1 to 0:00 June 7, 2015.



第6図 2015/5/14-16の歪・傾斜・地下水変化 (第5図網掛[A]) を説明する断層モデル。地図中の大丸印は解析に使用した観測点 (黒: 産総研, 青: 防災科研 Hi-net) を示す。小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動, 小さい緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a) プレート境界面に沿って分布させた 20x20 km (大きさ固定) の矩形断層面に対して、おのおの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。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b) (a)の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面 (赤色矩形) と断層パラメータ。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。(1A: 2014/12/26-31 (Mw 6.1), 1B: 2014/12/31-2015/1/3 (Mw 5.8), 1C: 2015/1/10-12 (Mw 5.9), 2A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 2B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3))。 (b) 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。 (c) 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。
 Fig. 6 The fault model for the strain, tilt and groundwater changes from May 7 to May 10, 2015. 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 tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2014/12/26-31 (Mw 6.1), 1B: 2014/12/31-2015/1/3 (Mw 5.8), 1C: 2015/1/10-12 (Mw 5.9), 2A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 2B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3)). The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and the blue arrows. (b) The observed and calculated principal strain changes. (c) The observed and calculated volumetric strain changes.

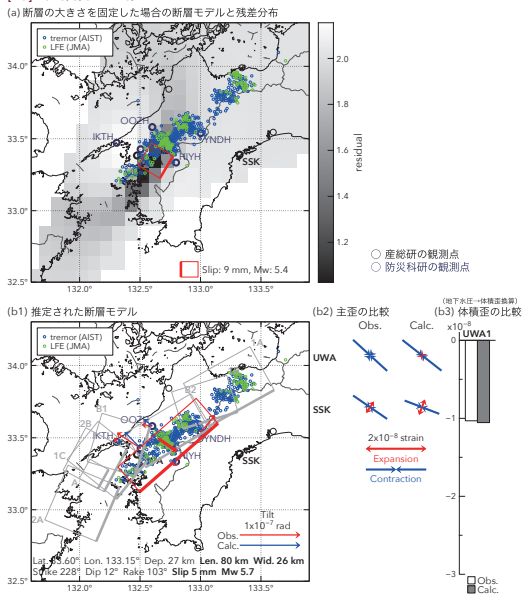


第7図 2015/5/26-29AMの歪・傾斜・地下水変化 (第5図網掛[B1]) を説明する断層モデル。地図中の大丸印は解析に使用した観測点 (黒: 産総研, 青: 防災科研 Hi-net) を示す。小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動, 小さい緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a) プレート境界面に沿って分布させた 20x20 km (大きさ固定) の矩形断層面に対して、おのおのの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和をその断層面の位置に示した分布図。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b) (a)の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面 (赤色矩形) と断層パラメータ。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。(1A: 2014/12/26-31 (Mw 6.1), 1B: 2014/12/31-2015/1/3 (Mw 5.8), 1C: 2015/1/10-12 (Mw 5.9), 2A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 2B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3), A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5))。 (b) 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。 (c) 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。
 Fig. 7 The fault model for the strain, tilt and groundwater changes from May 26 to May 29 AM, 2015. 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 tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2014/12/26-31 (Mw 6.1), 1B: 2014/12/31-2015/1/3 (Mw 5.8), 1C: 2015/1/10-12 (Mw 5.9), 2A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 2B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3), A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5)). The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and the blue arrows. (b) The observed and calculated principal strain changes. (c) The observed and calculated volumetric strain changes.



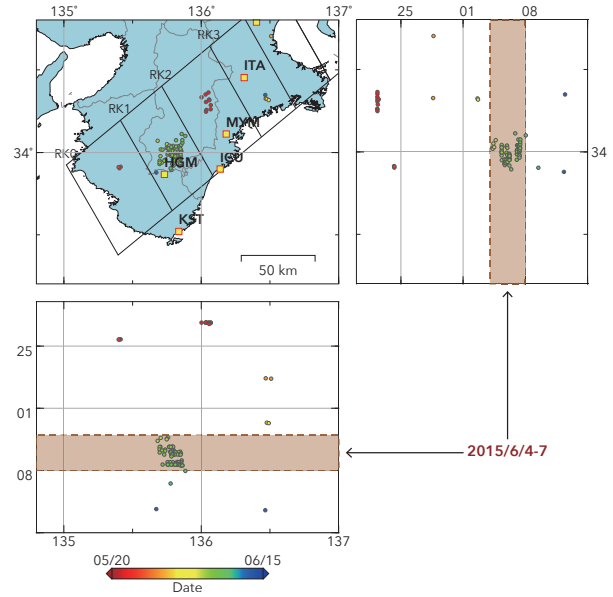
第8図 2015/5/29PM-31AMの歪・傾斜・地下水変化 (第5図網掛[B2]) を説明する断層モデル。地図中の大丸印は解析に使用した観測点 (黒: 産総研, 青: 防災科研 Hi-net) を示す。小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動, 小さい緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a) プレート境界面に沿って分布させた 20x20 km (大きさ固定) の矩形断層面に対して、おのおのの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和をその断層面の位置に示した分布図。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b) (a)の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面 (赤色矩形) と断層パラメータ。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。(1A: 2014/12/26-31 (Mw 6.1), 1B: 2014/12/31-2015/1/3 (Mw 5.8), 1C: 2015/1/10-12 (Mw 5.9), 2A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 2B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3), A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5), B1: 2015/5/26-29AM (Mw 5.6))。 (b) 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。 (c) 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。
 Fig. 8 The fault model for the strain and tilt changes from May 29 PM to May 31 AM, 2015. 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 tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2014/12/26-31 (Mw 6.1), 1B: 2014/12/31-2015/1/3 (Mw 5.8), 1C: 2015/1/10-12 (Mw 5.9), 2A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 2B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3), A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5), B1: 2015/5/26-29AM (Mw 5.6)). The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and the blue arrows. (b) The observed and calculated principal strain changes. (c) The observed and calculated volumetric strain changes.

[B3] 2015/5/31PM-6/2

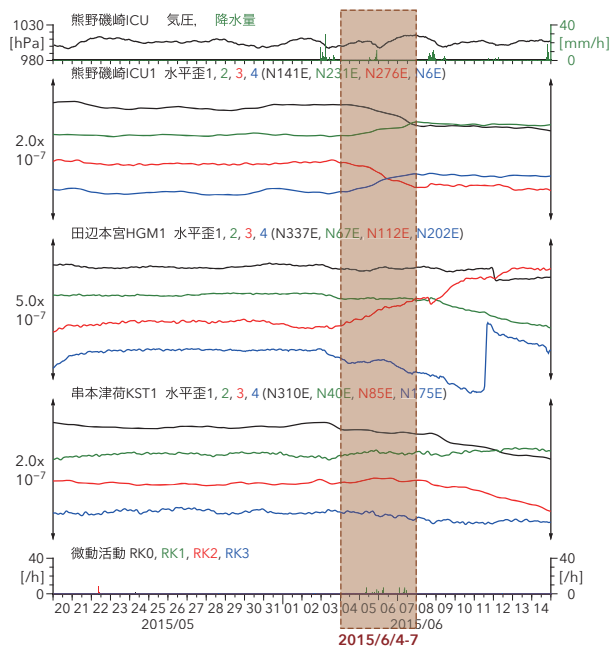


第9図 2015/5/31PM-6/2の歪・傾斜・地下水変化(第5図網掛[B3])を説明する断層モデル。地図中の太丸印は解析に使用した観測点(黒:産総研,青:防災科研 Hi-net)を示す。小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動, 小さい緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a)プレート境界面に沿って分布させた20x20 km(大きさ固定)の矩形断層面に対して, おのおのの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和とその断層面の位置に示した分布図。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b1)(a)の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面(赤色矩形)と断層パラメータ。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 (1A: 2014/12/26-31 (Mw 6.1), 1B: 2014/12/31-2015/1/3 (Mw 5.8), 1C: 2015/1/10-12 (Mw 5.9), 2A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 2B: 2015/5/26PM-27 (Mw 5.3), A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5), B1: 2015/5/26-29AM (Mw 5.6), B2: 2015/5/29PM-31AM (Mw 5.9))。 (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。(b3)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。

Fig. 9 The fault model for the strain, tilt and groundwater changes from May 31 PM to June 2, 2015. 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 tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b1) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2014/12/26-31 (Mw 6.1), 1B: 2014/12/31-2015/1/3 (Mw 5.8), 1C: 2015/1/10-12 (Mw 5.9), 2A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 2B: 2015/5/26PM-27 (Mw 5.3), A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5), B1: 2015/5/26-29AM (Mw 5.6), B2: 2015/5/29PM-31AM (Mw 5.9)). The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and the blue arrows. (b2) The observed and calculated principal strain changes. (b3) The observed and calculated volumetric strain changes.



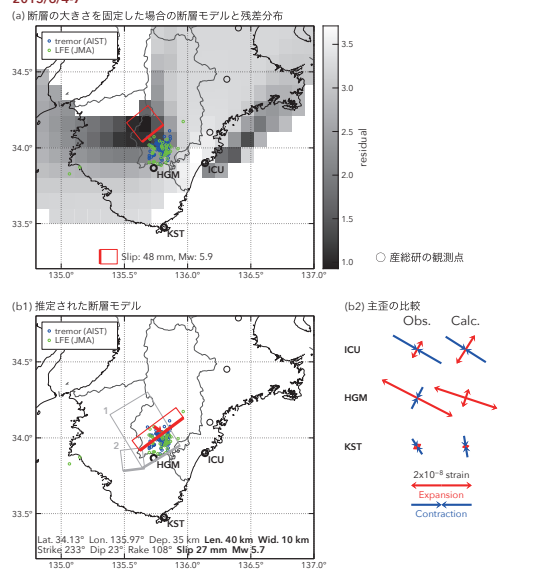
第10図 2015/5/20 00:00-6/15 00:00の紀伊半島における深部低周波微動の時空間分布図。エンベロープ相関法により決定。 Fig. 10 Epicentral and space-time distributions of deep low frequency tremors from 0:00 May 20 to 0:00 June 15, 2015.



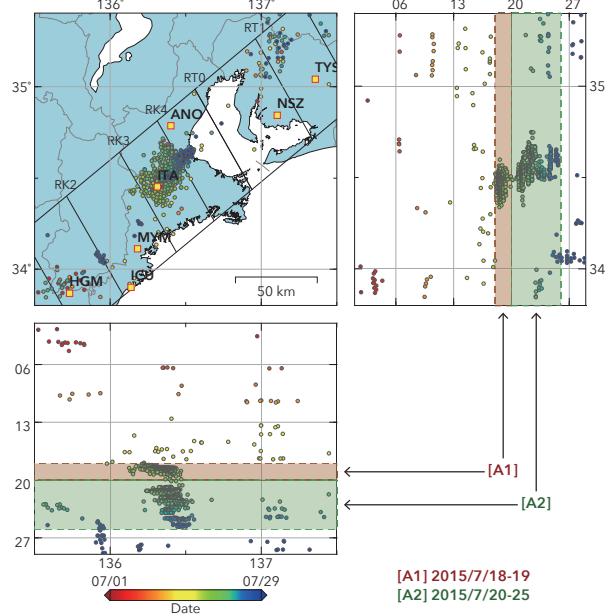
第11図 紀伊半島における歪観測結果 (2015/5/20 00:00 - 2015/6/15 00:00 (JST))

Fig. 11 Observed strain changes at the observation sites and number of deep low frequency tremors in Kii Peninsula from 0:00 May 20 to 0:00 June 15, 2015.

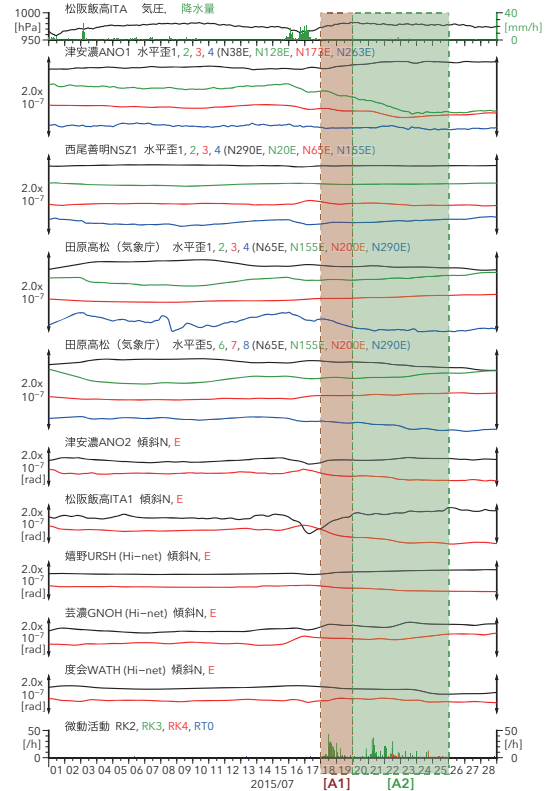
2015/6/4-7



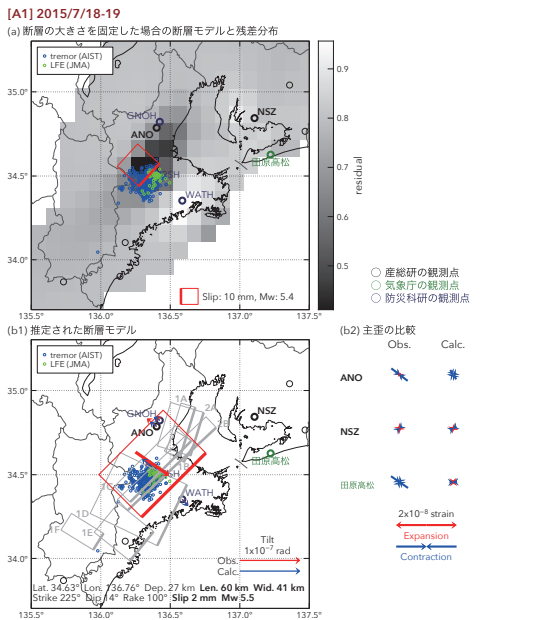
第12図 2015/6/4-7の歪変化(第11図網掛)を説明する断層モデル。地図中の太丸印は解析に使用した産総研の観測点を示す。小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動, 小さい緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a)プレート境界面に沿って分布させた20x20 km(大きさ固定)の矩形断層面に対して, おのおのの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和とその断層面の位置に示した分布図。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b1)(a)の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面(赤色矩形)と断層パラメータ。灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面 (1: 2015/1/7-10 (Mw 5.8), 2: 2015/3/14-16 (Mw 5.3))。 (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。 The fault model for the strain changes from June 4 to June 7, 2015. The black circles show the observation sites of AIST. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. The black circles show the observation sites of AIST. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (b1) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1: 2015/1/7-10 (Mw 5.8), 2: 2015/3/14-16 (Mw 5.3)). The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and the blue arrows. (b2) The observed and calculated principal strain changes.



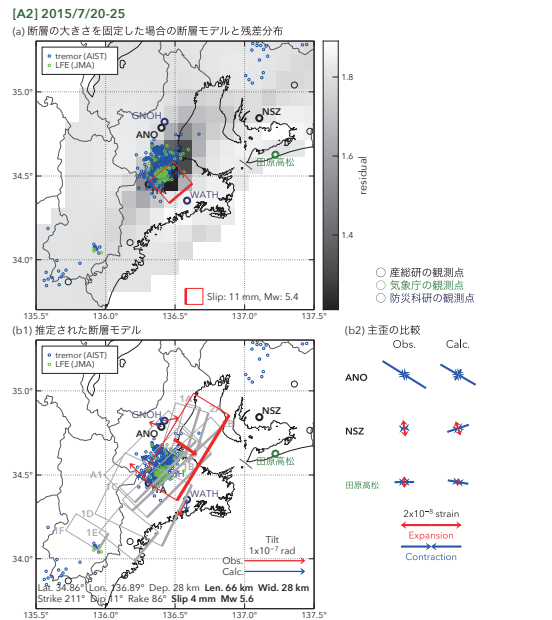
第 13 図 2015/7/1 00:00-7/29 00:00 の紀伊半島～東海地方における深部低周波微動の時空間分布図。エンベロップ相関法により決定。
 Fig. 13 Epicentral and space-time distributions of deep low frequency tremors in Kii Peninsula and the Tokai district from 0:00 July 1 to 0:00 July 29, 2015.



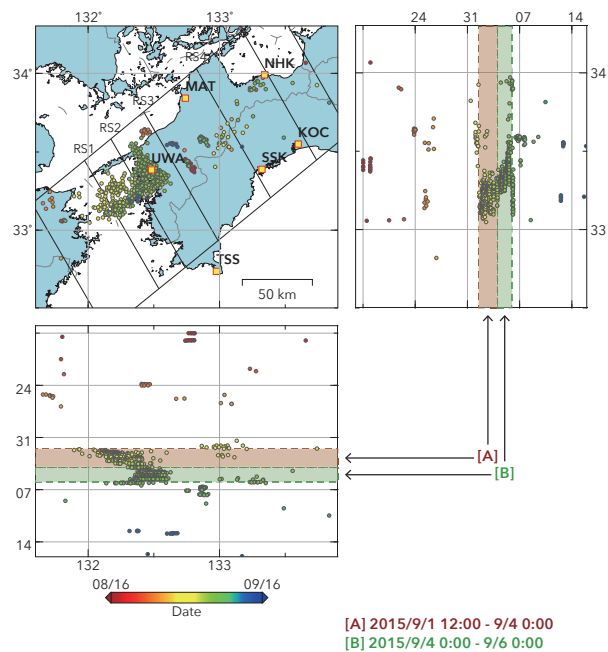
第 14 図 紀伊半島～東海地方における歪・傾斜観測結果 (2015/7/1 00:00 - 2015/7/29 00:00 (JST))
 Fig. 14 Observed strain and tilt changes at the observation sites and number of deep low frequency tremors in Kii Peninsula and the Tokai district from 0:00 July 1 to 0:00 July 29, 2015.



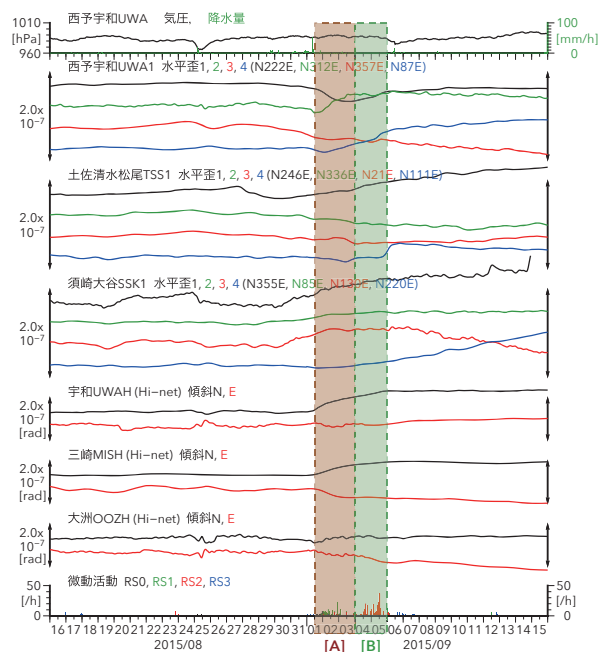
第 15 図 2015/7/18-19 の歪・傾斜変化 (第 14 図網掛[A1]) を説明する断層モデル。地図中の太丸印は解析に使用した観測点 (黒: 産総研, 緑: 気象庁, 青: 防災科研 Hi-net) を示す。小さい青丸印は産総研による深部低周波微動、小さい緑丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a) プレート境界面に沿って分布させた 20x20 km (大きさ固定) の矩形断層面に対して、おのおのの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和とその断層面の位置を示した分布図。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b) (a) の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面 (赤色矩形) と断層パラメータ。灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面 (1A: 2014/7/3-4 (Mw 5.4), 1B: 2015/7/5-6 (Mw 5.6), 1C: 2015/7/7-8 (Mw 5.5), 1D: 2015/7/9-10 (Mw 5.8), 1E: 2014/7/11-12 (Mw 5.7), 1F: 2015/7/13-14 (Mw 5.7), 2A: 2015/1/1-3 (Mw 5.6), 2B: 2015/1/3-5 (Mw 5.7))。 (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。The fault model for the strain and tilt changes from July 18 to July 19, 2015. The black, green and blue bold circles show the observation sites of AIST, JMA and NIED Hi-net, respectively. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2014/7/3-4 (Mw 5.4), 1B: 2015/7/5-6 (Mw 5.6), 1C: 2015/7/7-8 (Mw 5.5), 1D: 2015/7/9-10 (Mw 5.8), 1E: 2014/7/11-12 (Mw 5.7), 1F: 2015/7/13-14 (Mw 5.7), 2A: 2015/1/1-3 (Mw 5.6), 2B: 2015/1/3-5 (Mw 5.7)). (b2) The observed and calculated principal strain changes are also shown on the map by the red and blue arrows. (b2) The observed and calculated principal strain changes.



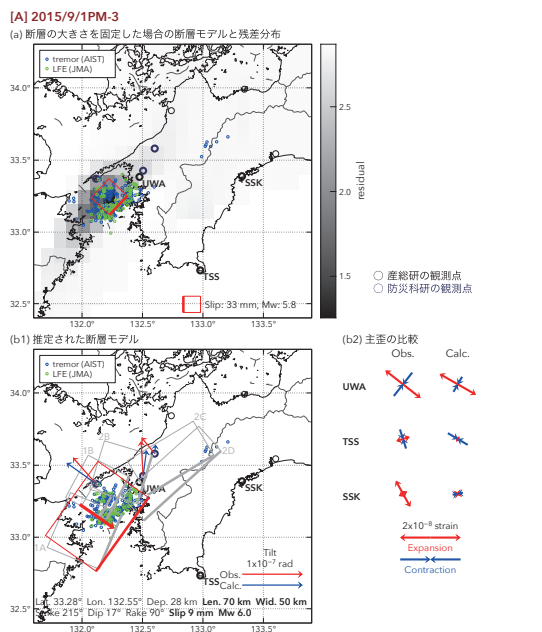
第 16 図 2015/7/20-25 の歪・傾斜変化 (第 14 図網掛[A2]) を説明する断層モデル。地図中の太丸印は解析に使用した観測点 (黒: 産総研, 緑: 気象庁, 青: 防災科研 Hi-net) を示す。小さい青丸印は産総研による深部低周波微動、小さい緑丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a) プレート境界面に沿って分布させた 20x20 km (大きさ固定) の矩形断層面に対して、おのおのの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和とその断層面の位置を示した分布図。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b) (a) の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面 (赤色矩形) と断層パラメータ。灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面 (1A: 2014/7/3-4 (Mw 5.4), 1B: 2015/7/5-6 (Mw 5.6), 1C: 2015/7/7-8 (Mw 5.5), 1D: 2015/7/9-10 (Mw 5.8), 1E: 2014/7/11-12 (Mw 5.7), 1F: 2015/7/13-14 (Mw 5.7), 2A: 2015/1/1-3 (Mw 5.6), 2B: 2015/1/3-5 (Mw 5.7), A1: 2015/7/18-19 (Mw 5.5))。 (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。The fault model for the strain and tilt changes from July 20 to July 25, 2015. The black, green and blue bold circles show the observation sites of AIST, JMA and NIED Hi-net, respectively. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2014/7/3-4 (Mw 5.4), 1B: 2015/7/5-6 (Mw 5.6), 1C: 2015/7/7-8 (Mw 5.5), 1D: 2015/7/9-10 (Mw 5.8), 1E: 2014/7/11-12 (Mw 5.7), 1F: 2015/7/13-14 (Mw 5.7), 2A: 2015/1/1-3 (Mw 5.6), 2B: 2015/1/3-5 (Mw 5.7), A1: 2015/7/18-19 (Mw 5.5)). (b2) The observed and calculated principal strain changes are also shown on the map by the red and blue arrows. (b2) The observed and calculated principal strain changes.



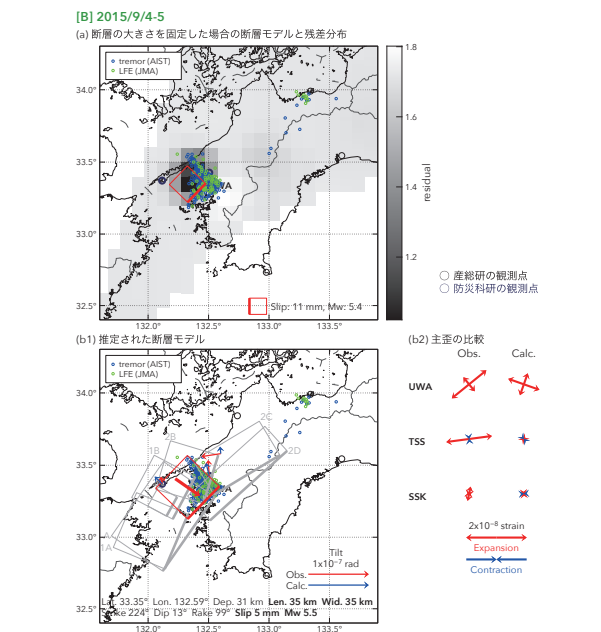
第 17 図 2015/8/16 00:00-9/16 00:00 の四国地方における深部低周波微動の時空間分布図。エンベロープ相関法により決定。
 Fig. 17 Epicentral and space-time distributions of deep low frequency tremors in the Shikoku district from 0:00 August 16 to 0:00 September 16, 2015.



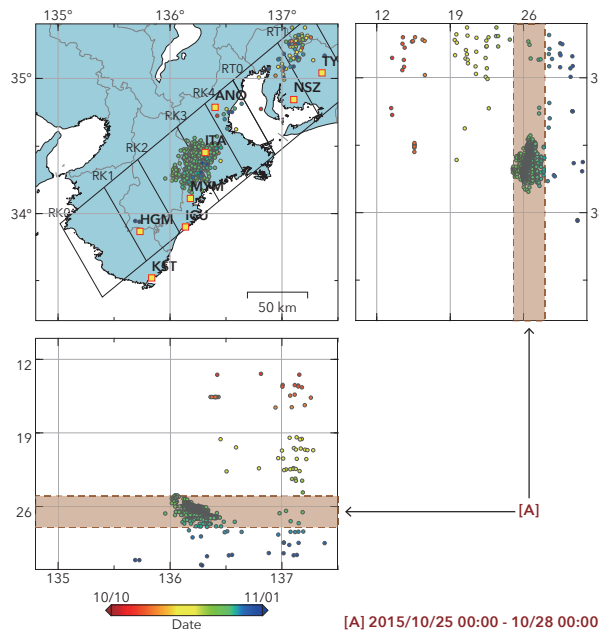
第 18 図 四国地方における歪・傾斜観測結果 (2015/8/16 00:00 - 2015/9/16 00:00 (JST))
 Fig. 18 Observed strain and tilt changes at the observation sites and number of deep low frequency tremors in the Shikoku district from 0:00 August 16 to 0:00 September 16, 2015.



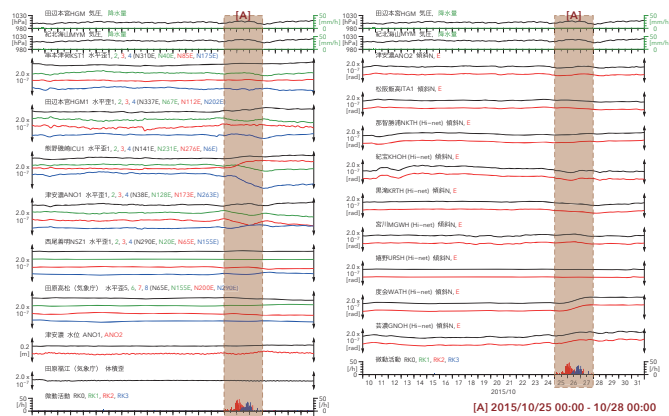
第 19 図 2015/9/1PM-3 の歪・傾斜変化 (第 18 図赤色[A]) を説明する断層モデル。地図中の太丸印は解析に使用した観測点 (黒:産総研, 青:防災科研 Hi-net) を示す。小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動, 小さい緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a)プレート境界面に沿って分布させた 20x20 km (大きさ固定) の矩形断層面に対して, おのおの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和とその断層面の位置を示した分布図。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b)(a)の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面 (赤色矩形) と断層パラメータ。灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面 (1A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 1B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3), 2A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5), 2B: 2015/5/26-29AM (Mw 5.6), 2C: 2015/5/29PM-31AM (Mw 5.9), 2D: 2015/5/31PM-6/2 (Mw 5.7))。 (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. 19 The fault model for the strain and tilt changes from September 1 PM to September 3, 2015. The black and blue bold circles show the observation sites of AIST and NIED Hi-net, respectively. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 1B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3), 2A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5), 2B: 2015/5/26-29AM (Mw 5.6), 2C: 2015/5/29PM-31AM (Mw 5.9), 2D: 2015/5/31PM-6/2 (Mw 5.7)). The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and blue arrows. (b2) The observed and calculated principal strain changes.



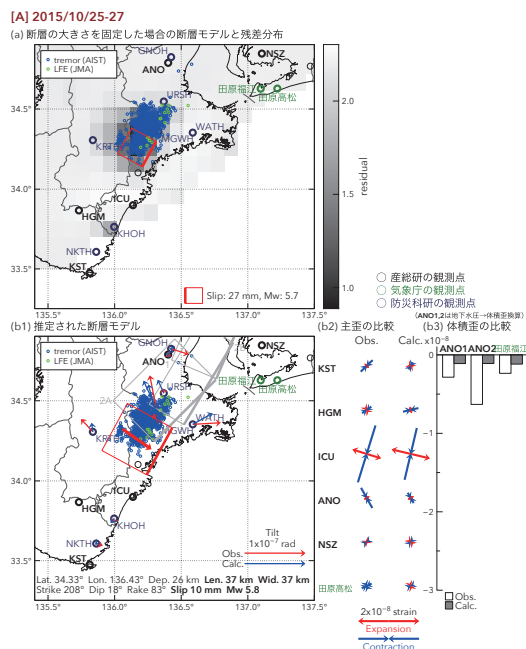
第 20 図 2015/9/4-5 の歪・傾斜変化 (第 18 図緑色[B]) を説明する断層モデル。地図中の太丸印は解析に使用した観測点 (黒:産総研, 青:防災科研 Hi-net) を示す。小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動, 小さい緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。(a)プレート境界面に沿って分布させた 20x20 km (大きさ固定) の矩形断層面に対して, おのおの断層面で最適なすべり量を選んだときの残差の総和とその断層面の位置を示した分布図。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。(b)(a)の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面 (赤色矩形) と断層パラメータ。灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面 (1A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 1B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3), 2A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5), 2B: 2015/5/26-29AM (Mw 5.6), 2C: 2015/5/29PM-31AM (Mw 5.9), 2D: 2015/5/31PM-6/2 (Mw 5.7), A: 2015/9/1PM-3 (Mw 6.0))。 (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. 20 The fault model for the strain and tilt changes from September 4 to September 5, 2015. The black and blue bold circles show the observation sites of AIST and NIED Hi-net, respectively. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1A: 2015/3/24PM-26AM (Mw 5.8), 1B: 2015/3/26PM-27 (Mw 5.3), 2A: 2015/5/14-16 (Mw 5.5), 2B: 2015/5/26-29AM (Mw 5.6), 2C: 2015/5/29PM-31AM (Mw 5.9), 2D: 2015/5/31PM-6/2 (Mw 5.7), A: 2015/9/1PM-3 (Mw 6.0)). The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and blue arrows. (b2) The observed and calculated principal strain changes.



第21図 2015/10/10 00:00-11/1 00:00の紀伊半島～東海地方における深部低周波微動の時空間分布図. エンベロープ相関法により決定.
 Fig. 21 Epicentral and space-time distributions of deep low frequency tremors in Kii Peninsula and the Tokai district from 0:00 October 10 to 0:00 November 1, 2015.



第22図 紀伊半島・東海地方における歪・傾斜・地下水観測結果 (2015/10/10 00:00 - 2015/11/1 00:00 (JST))
 Fig. 22 Observed strain, tilt and groundwater changes at the observation sites and number of deep low frequency tremors in Kii Peninsula and the Tokai district from 0:00 October 10 to 0:00 November 1, 2015.



第23図 2015/10/25-27の歪・傾斜・地下水変化(第22図赤色[A])を説明する断層モデル. 地図中の大丸印は解析に使用した観測点(黒:産総研, 緑:気象庁, 青:防災科研 Hi-net)を示す. 小さい青丸印は産総研による深部低周波微動, 小さい緑丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す. (a)プレート境界面に沿って分布させた20x20 km (大きき固定)の矩形断層面に対して, おのお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. 赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面. (b1)(a)の断層面付近でのグリッドサーチにより推定された断層面(赤色矩形)と断層パラメータ. 灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面 (1: 2015/7/9 (Mw 5.7), 2A: 2015/7/18-19 (Mw 5.5), 2B: 2015/7/20-25 (Mw 5.6)). (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. The fault model for the strain, tilt and groundwater changes from October 25 to October 27, 2015. The black, green and blue bold circles show the observation sites of AIST, JMA and NIED Hi-net, respectively. The blue and green small circles show hypocenters of deep low frequency tremors estimated by AIST and low frequency earthquakes estimated by JMA, respectively. (a) The distribution of the sum of residuals between observed and calculated values that are caused by the uniform slip on a rectangular fault on the plate interface. The length and width of the rectangular fault are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated. The red rectangle shows the fault patch with minimum residual. (b1) The red rectangle shows the estimated fault model. The gray rectangles show the fault models of the recent events (1: 2015/7/9 (Mw 5.7), 2A: 2015/7/18-19 (Mw 5.5), 2B: 2015/7/20-25 (Mw 5.6)). The observed and calculated values that are also shown on the map and the red and blue arrows. (b2) The observed and calculated principal strain changes.