

### 6-3 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 (2021 年 5 月～2021 年 10 月)

#### Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan (from May 2021 to October 2021)

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 Resilience

歪・傾斜・地下水位の変化から短期的 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。

2021 年 05 月 10 日から 15 日にかけて、三重県において深部低周波地震活動が観測された（第 1 図）。第 2-4 図は三重県・滋賀県・奈良県・愛知県の産総研・気象庁・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。歪・傾斜の結果は 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、また地下水の結果は時系列解析プログラム MR-AR により気圧応答成分・潮汐成分・降雨応答成分を取り除き、2021 年 05 月 05 日から 05 月 09 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 5-7 図は第 2-4 図 [A], [B], [C] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（順に Mw 5.8, 5.6, 5.5）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、2020 年 11 月 01 日 (Mw 5.6 : 第 2-4 図の灰色矩形 1), 2020 年 11 月 02 日から 04 日午前 (Mw 5.7 : 同 2), 2021 年 02 月 18 日午後から 21 日午前 (Mw 5.7 : 同 3), 2021 年 02 月 23 日午後から 28 日午前 (Mw 5.6 : 同 4), 2021 年 04 月 29 日午後 -05 年 02 日 (Mw 5.7:同 5), 2021 年 04 月 30 日午後から 05 月 04 日 (Mw 5.8:同 6) である。

2021 年 05 月 21 日から 05 月 27 日にかけて、愛媛県・徳島県において深部低周波地震活動が観測された（第 8 図）。第 9 図は愛媛県・徳島県・香川県・高知県の産総研・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、2021 年 05 月 13 日から 20 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 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、2020 年 07 月 31 日午後から 08 月 03 日 (東) (Mw 5.6 : 第 10 図の灰色矩形 1), 2021 年 10 月 22 日午後から 23 日 (Mw 5.8 : 同 2), 2021 年 04 月 09 日から 11 日午前 (Mw 5.6 : 同 3) である。

2021 年 07 月 18 日から 08 月 01 日にかけて、愛媛県において深部低周波地震活動が観測された（第 11 図）。第 12, 13 図は愛媛県・滋賀県・高知県・徳島県の産総研・防災科研の観測点における歪・傾斜の観測結果である。歪・傾斜の結果は 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、2021 年 07 月 11 日から 17 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 14-18 図は第 12, 13 図 [A], [B], [C], [D], [E] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（順に Mw 5.6, 5.6, 6.1, 5.5, 5.9）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、2020 年 07 月 31 日午後から 08 年 03 日（東）(Mw 5.6：第 14-18 図の灰色矩形 1), 2021 年 01 月 19 日から 21 日午前 (Mw 5.7：同 2), 2021 年 01 月 21 日午後から 23 日 (Mw 5.8：同 3), 2021 年 01 月 24 日から 28 日午前 (Mw 5.6：同 4), 2021 年 03 月 23 日 -24 日 (Mw 5.7：同 5), 2021 年 04 月 09 日から 11 日午前 (Mw 5.6：同 6), 2021 年 05 月 20 日午後から 22 日 (Mw 5.6：同 7) である。

2021 年 07 月 20 日から 07 月 24 日にかけて、奈良県・和歌山県において深部低周波地震活動が観測された(第 19 図)。第 20 図は奈良県・和歌山県の産総研の観測点における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、2021 年 07 月 13 日から 20 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, 22 図は第 20 図 [A], [B] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果(順に Mw 5.6, 5.5)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、2021 年 02 月 23 日午後から 26 日午前 (Mw 5.8：第 21, 22 図の灰色矩形 1), 2021 年 03 月 16 日午後から 17 日午前 (Mw 5.4：同 2), 2021 年 04 月 29 日午後から 05 月 02 日 (Mw 5.7：同 3) である。

2021 年 09 月 16 日から 22 日にかけて、愛知県において深部低周波地震活動が観測された（第 23 図）。第 24, 25 図は愛知県・静岡県・長野県・三重県の産総研・気象庁・静岡県・防災科研の観測点における歪・傾斜の観測結果である。歪・傾斜の結果は 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、2021 年 09 月 01 日から 07 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 26 図は第 24, 25 図 [A] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果（Mw 5.4）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、2021 年 05 月 09 日午後から 17 日 (Mw 5.8, 5.6, 5.5：第 26 図の灰色矩形 1, 2, 3), 2021 年 04 月 30 日から 05 月 04 日 (Mw 5.8：同 4), 2021 年 02 月 18 日午後から 28 日午前 (Mw 5.7, 5.6：同 5, 6), 2020 年 09 月 04 日 (Mw 5.6：同 7) である。

## 解析方法

短期的 SSE の断層面推定には、各観測点の水平歪 4 成分、体積歪、地下水圧、もしくは傾斜 2 成分の記録を用いる。地下水圧は、O1 および M2 分潮の振幅を BAYTAP-G<sup>1)</sup> により計算し、GOTIC2<sup>2)</sup> により推定した地球固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・地下水・傾斜ともに、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、歪については理論潮汐歪を用いてキャリブレーション<sup>3)</sup>を行っている。

断層面の推定は次の 2 段階で行う<sup>4)</sup>。1 段階目では、断層面の位置（0.1° 間隔）とすべり量（1-50 mm）を可変とする。幅・長さともに 20 km に固定した断層面をフィリピン海プレート境界面<sup>5)</sup>上で動かす、各位置での最適なすべり量を探す。結果を示す図には、それぞれの位置で残差を最小にするすべり量を与えたときの、観測値とそのすべり量による計算値<sup>6)</sup>との残差の総和の分布を示している。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、次の 2 段

階目で推定された結果の任意性を確認することができる。2 段階目では、1 段階目で絞り込んだ領域付近で、断層面の位置 ( $0.1^\circ$  間隔)・すべり量 (1-50 mm)・長さ (10-80 km の間で 1 km 間隔) および幅 (10-50 km の間で 1 km 間隔) を可変として残差を最小にする解を求める。ただし、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解の任意性が高くなるので注意が必要である。

なお、残差はノイズレベルによって規格化している。これは異種の観測値を統合するための処置である。ノイズレベルの定義は、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  $2\sigma$  である。

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。

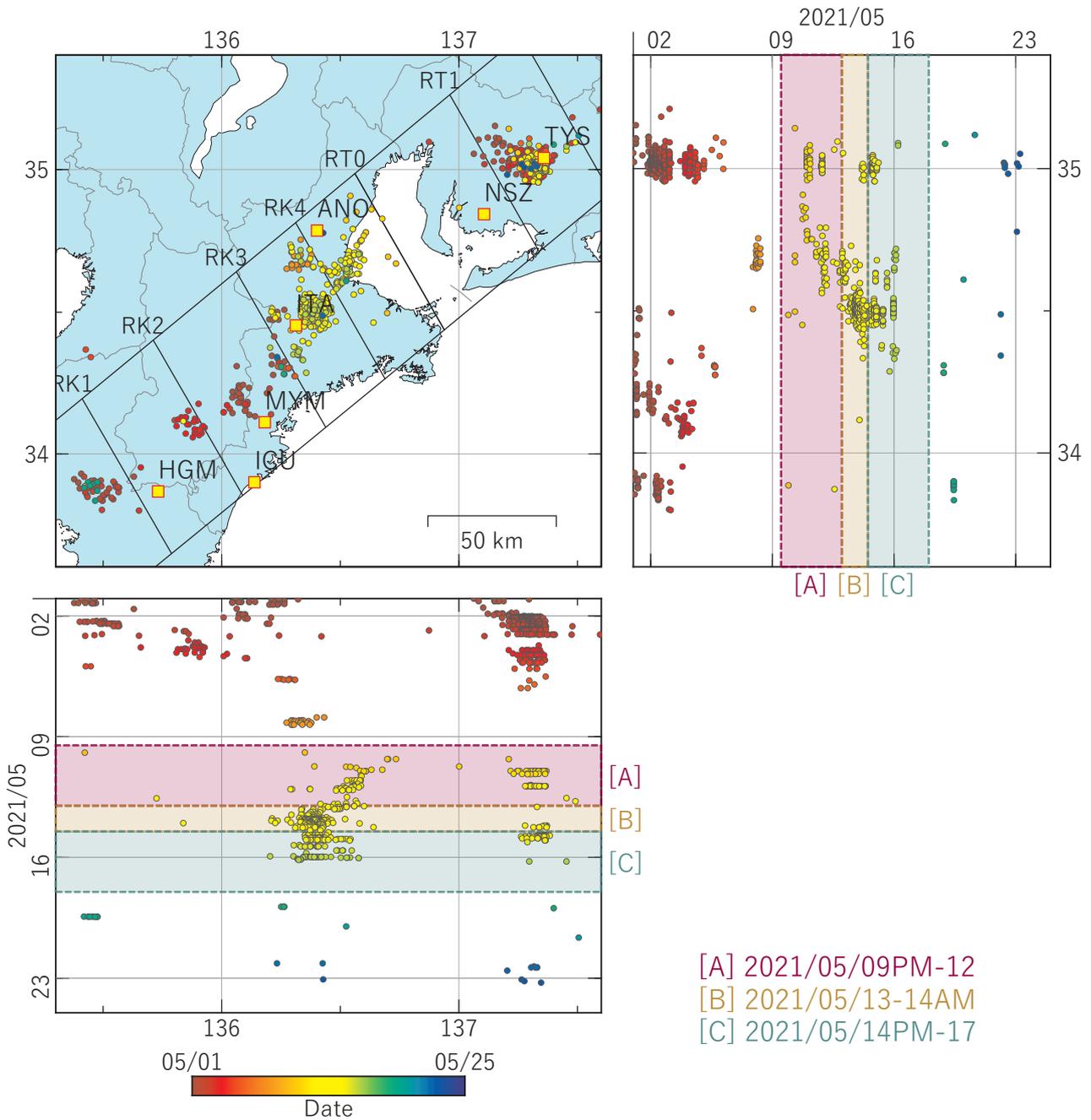
(矢部優・落唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・木口努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦)

## 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。

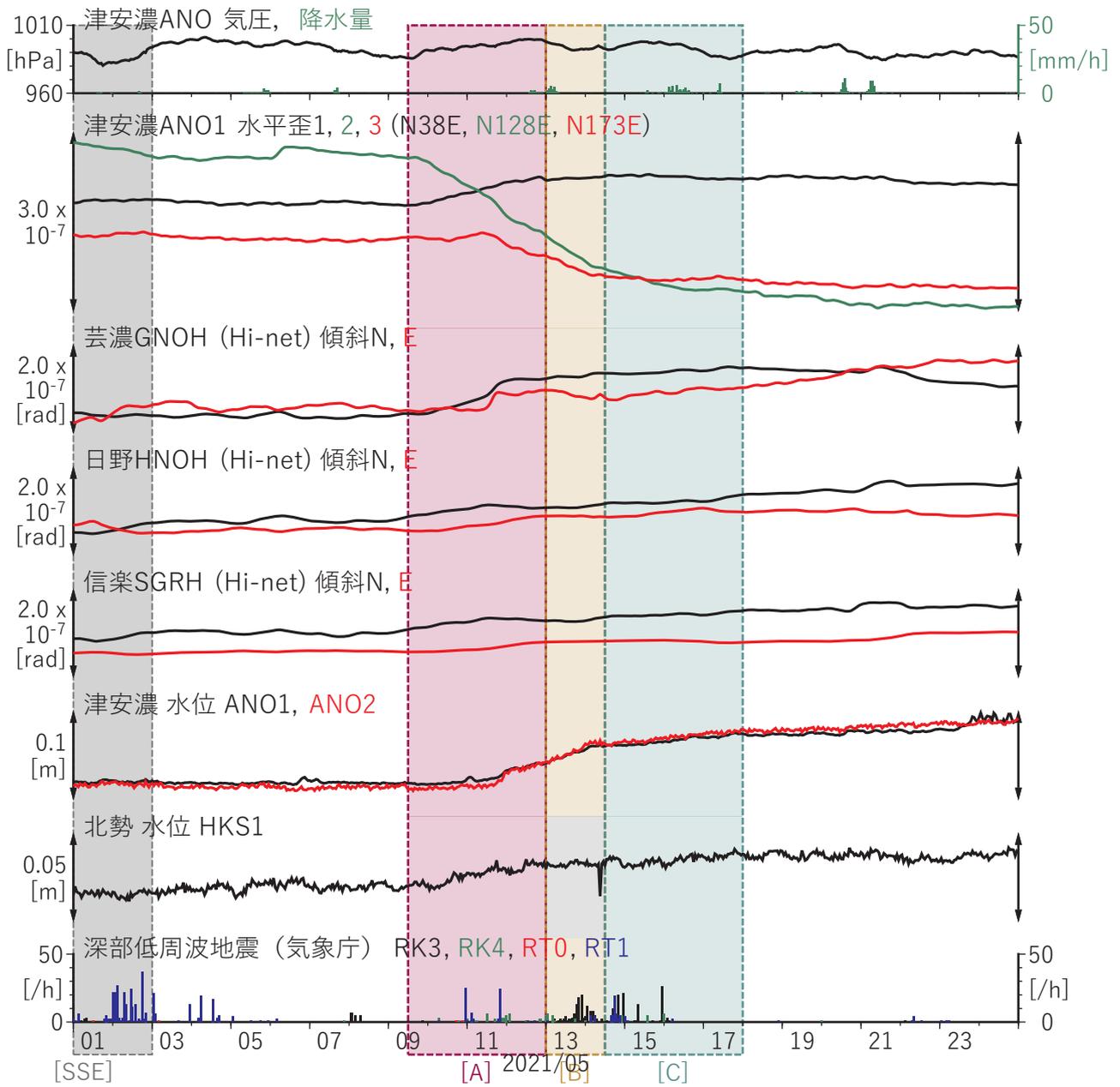
## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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*, **60**, 1-20.
- 6) Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.

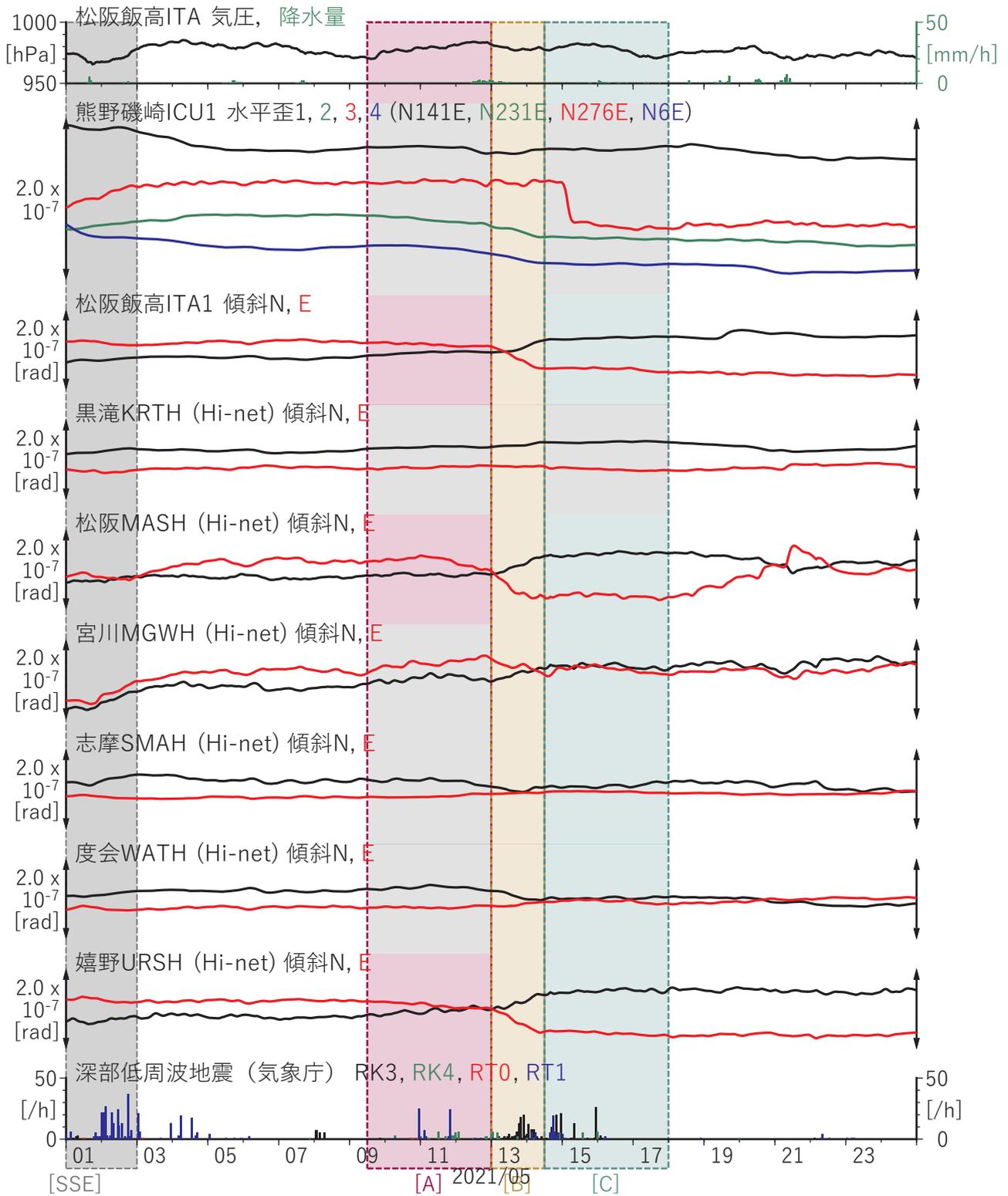


第 1 図 紀伊半島から東海地方における深部低周波地震（気象庁一元化カタログによる）の時空間分布（2021/05/01～2021/05/25）。

Fig. 1 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Kii Peninsula and the Tokai region from May 01 to 25, 2021.

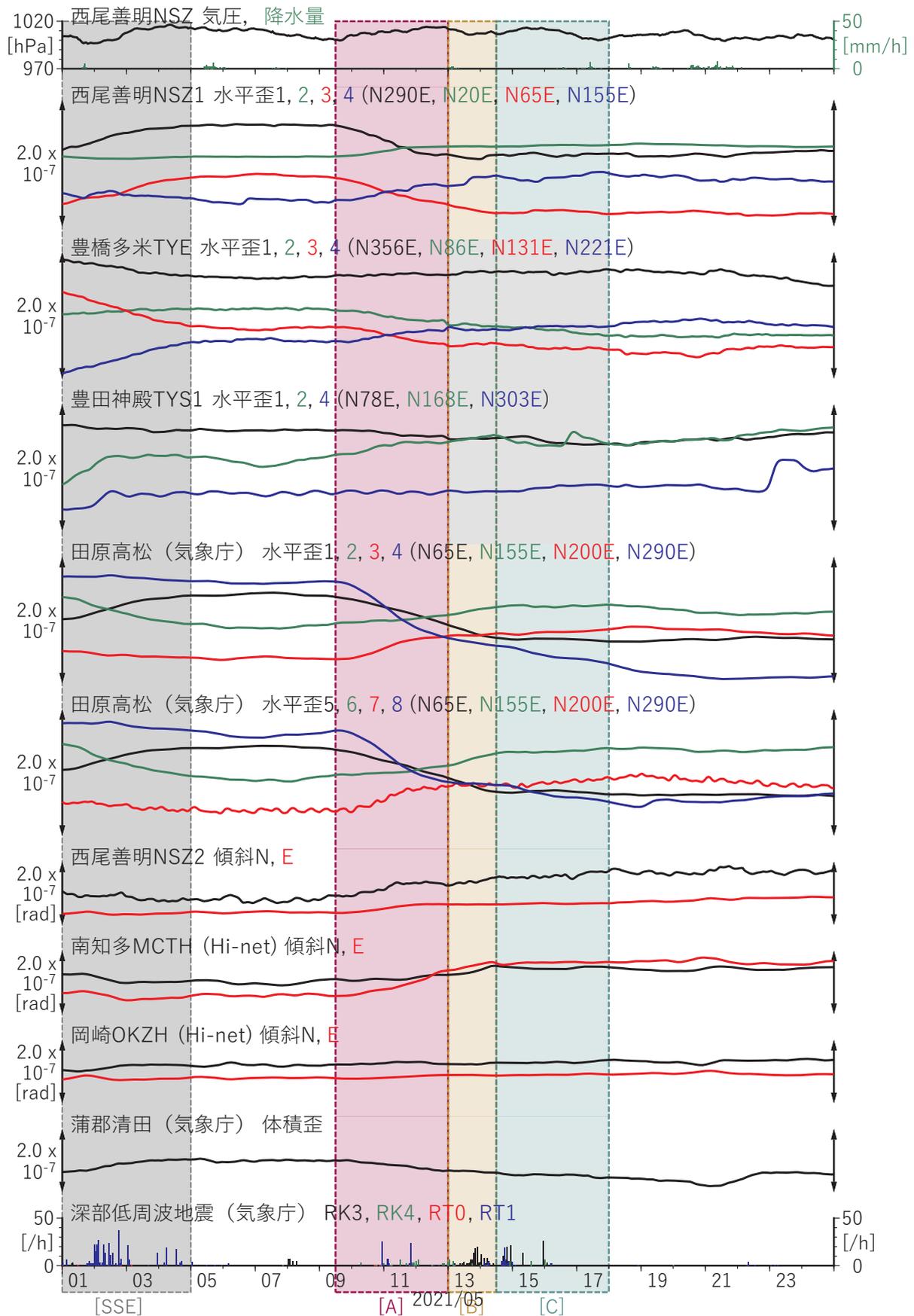


第 2 図 紀伊半島における歪・傾斜・地下水の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/05/01 ~ 2021/05/25).  
 Fig. 2 Observed strain, tilt, and groundwater level data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from May 01 to 25, 2021.



第 3 図 紀伊半島における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/05/01 ~ 2021/05/25).

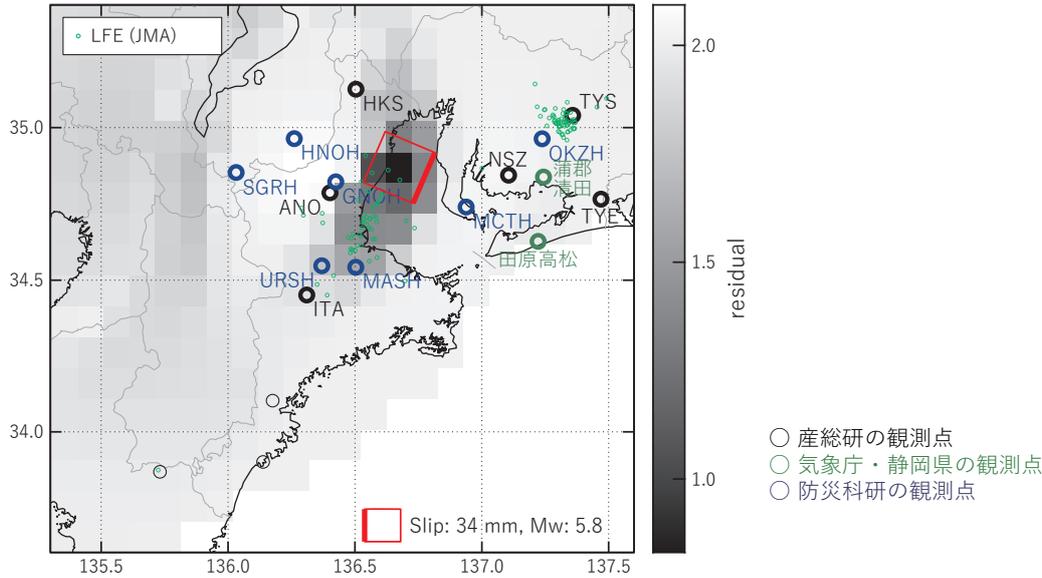
Fig. 3 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from May 01 to 25, 2021.



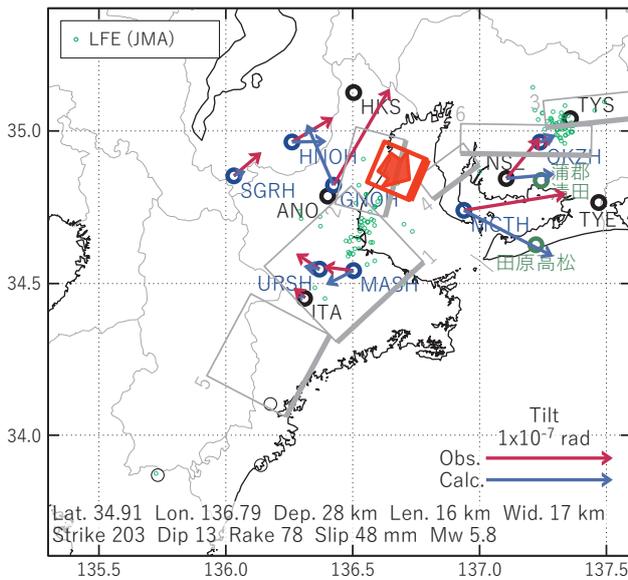
第 4 図 東海地方における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/05/01 ~ 2021/05/25).  
 Fig. 4 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Tokai region from May 01 to 25, 2021.

[A] 2021/05/09PM-12

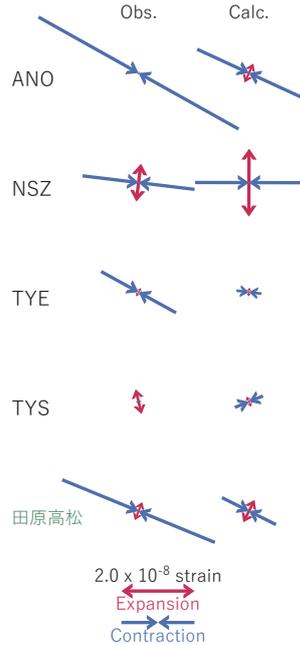
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



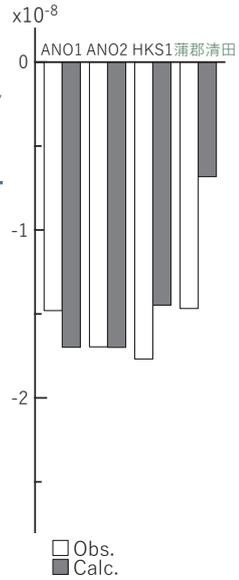
(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪



(b3) 体積歪

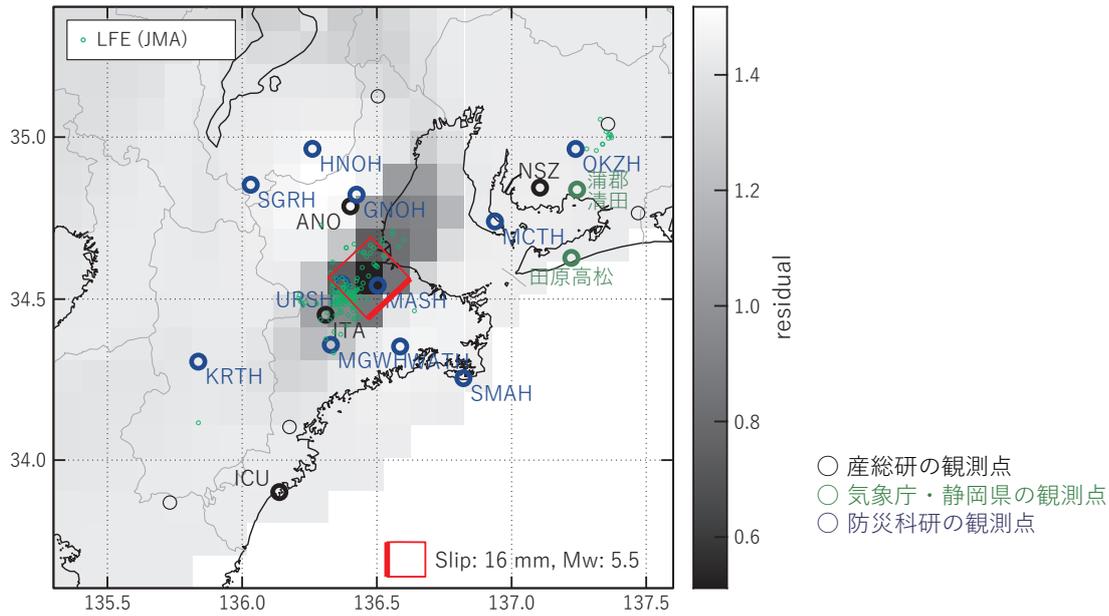


第 5 図 第 2-4 図 [A] を説明する断層モデル。以下の凡例の説明は以降の同様の図に共通。黒・緑・青の丸印はそれぞれ産総研・気象庁および静岡県・防災科研 Hi-net の観測点、緑の小さな丸印は気象庁の推定した低周波地震。(a) 1 段階目の結果。灰色の濃淡は残差の総和で、赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面の位置（大きさは 20x20 km で固定）。(b1) 2 段階目の結果。赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面。矢印は傾斜の観測値と計算値の比較。灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面（番号との対応は本文参照）。(b2) 主歪の観測値と (b1) に示した断層モデルから求めた計算値との比較。(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。

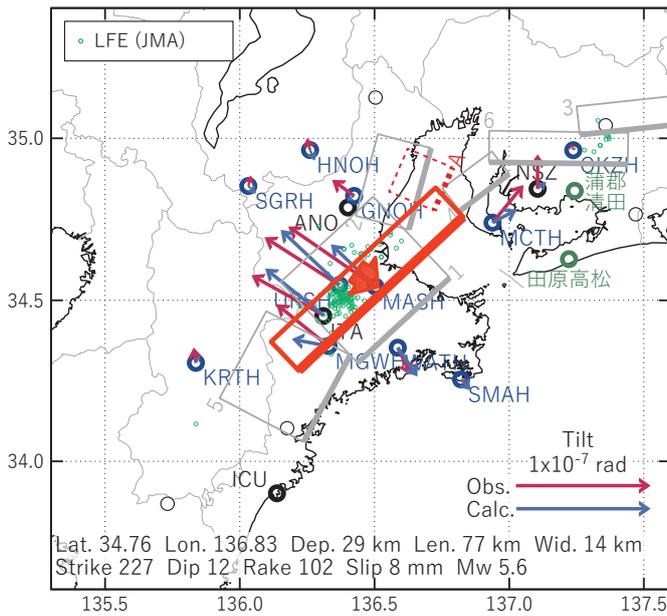
Fig. 5 Inferred fault models for Fig. 2-4 [A]. The legends below are applicable for all corresponding figures. The black, green and blue circles show the observation sites of AIST, JMA (or Shizuoka Prefecture) and NIED Hi-net. The green small circles show hypocenters of the low-frequency earthquake (LFE) estimated by JMA. (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 the blue arrows. The gray rectangles show the fault models of the recent events (see main text). (b2) The observed and calculated principal strain changes. (b3) The observed and calculated volumetric strain changes.

[B] 2021/05/13-14AM

(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



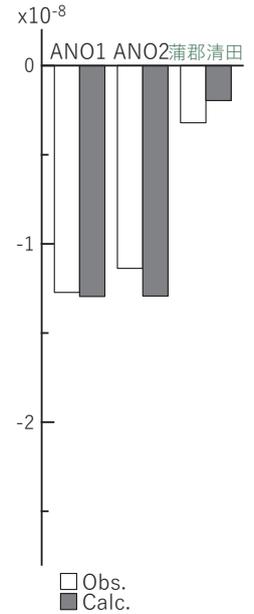
(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪



(b3) 体積歪

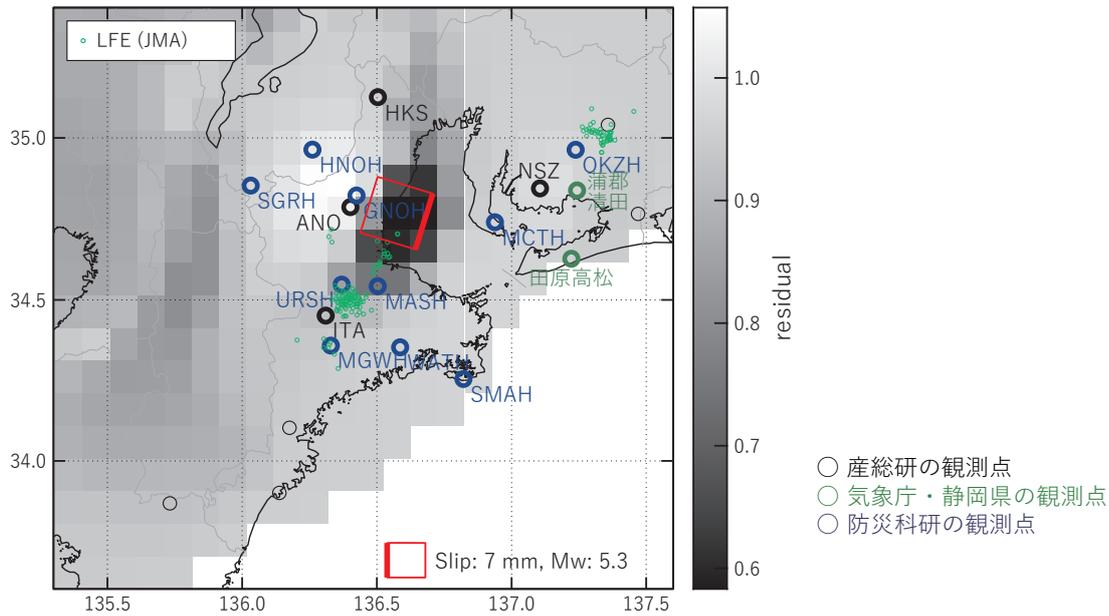


第 6 図 第 2-4 図 [B] を説明する断層モデル。各図の説明は第 5 図を参照。

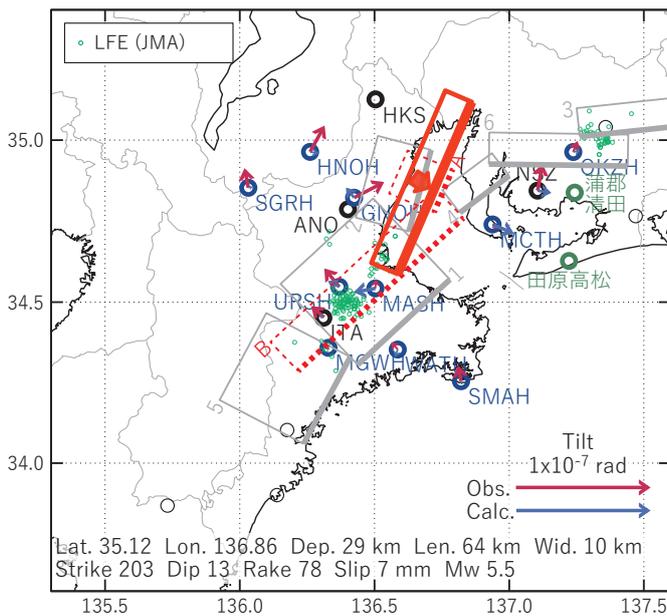
Fig. 6 Inferred fault models for Fig. 2-4 [B]. See also the caption of Fig. 5.

[C] 2021/05/14PM-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



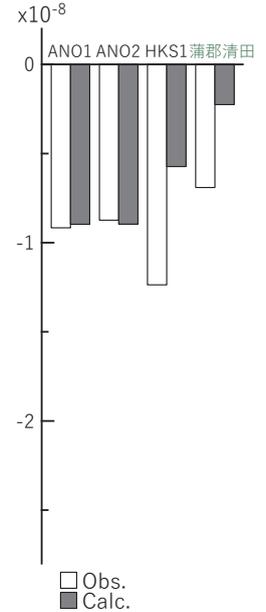
(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪

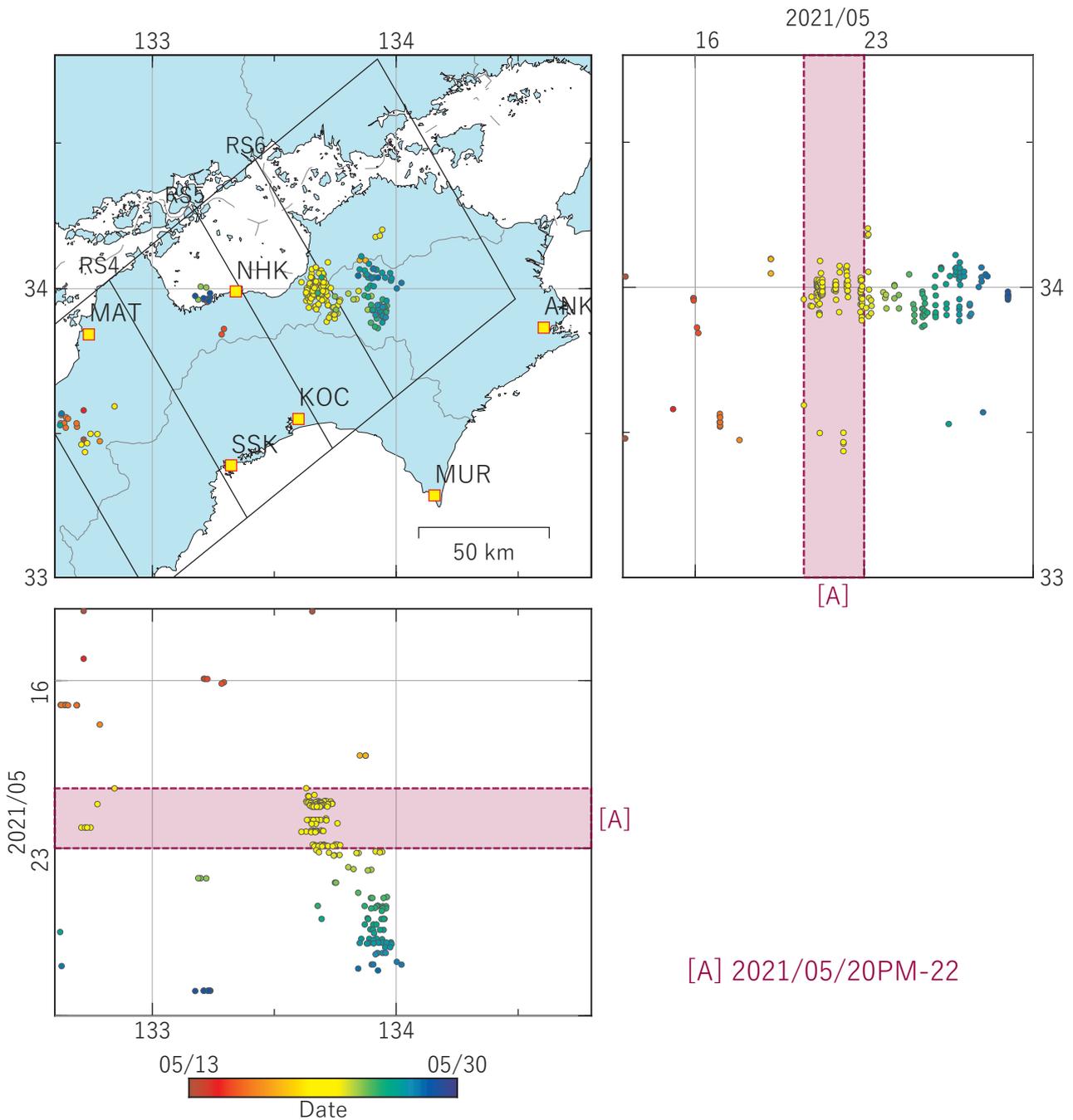


(b3) 体積歪



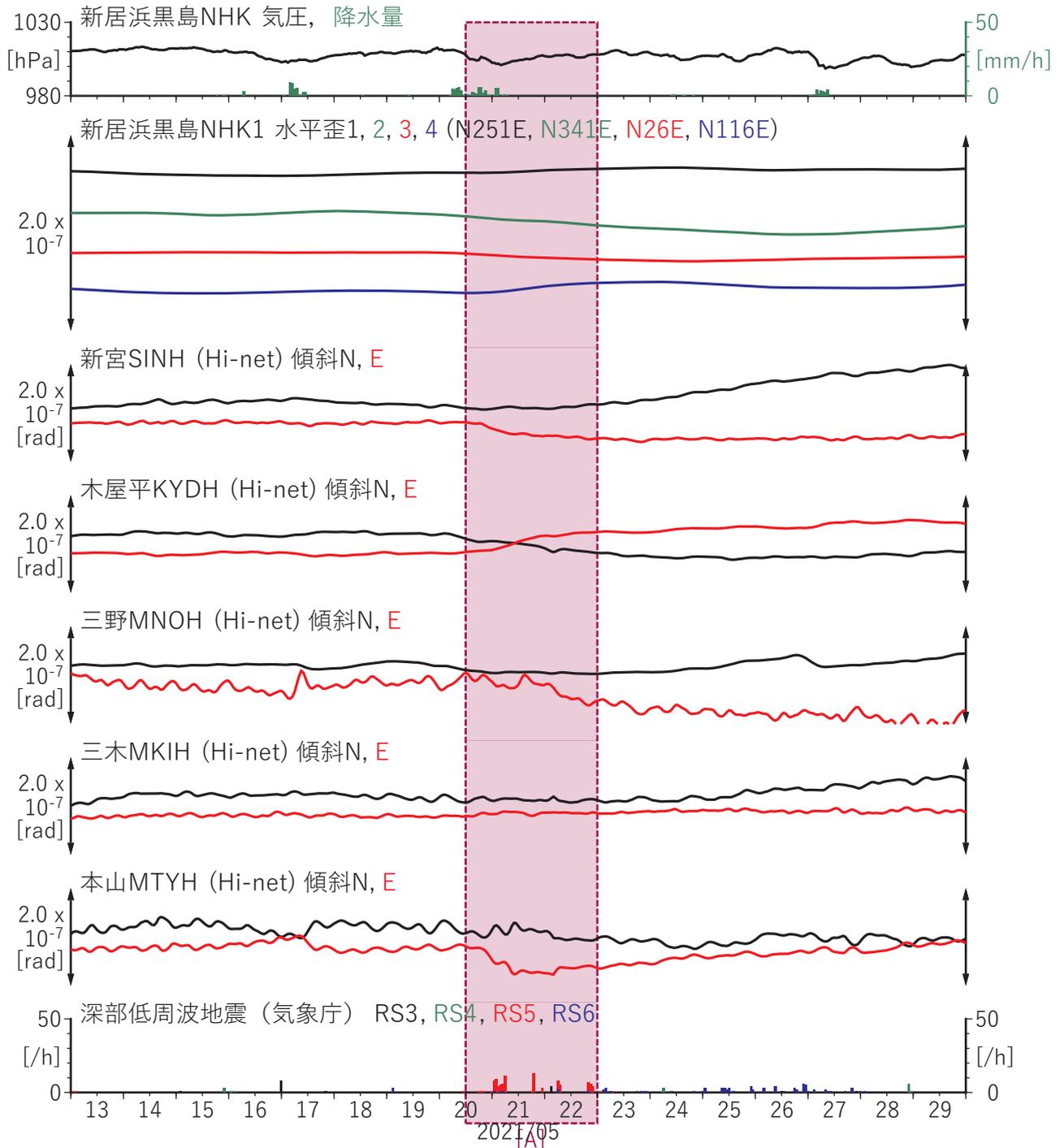
第 7 図 第 2-4 図 [C] を説明する断層モデル。各図の説明は第 5 図を参照。

Fig. 7 Inferred fault models for Fig. 2-4 [C]. See also the caption of Fig. 5.



第 8 図 四国地方における深部低周波地震（気象庁一元化カタログによる）の時空間分布（2021/05/13 ～ 2021/05/30）。

Fig. 8 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Shikoku region from May 13 to 30, 2021.

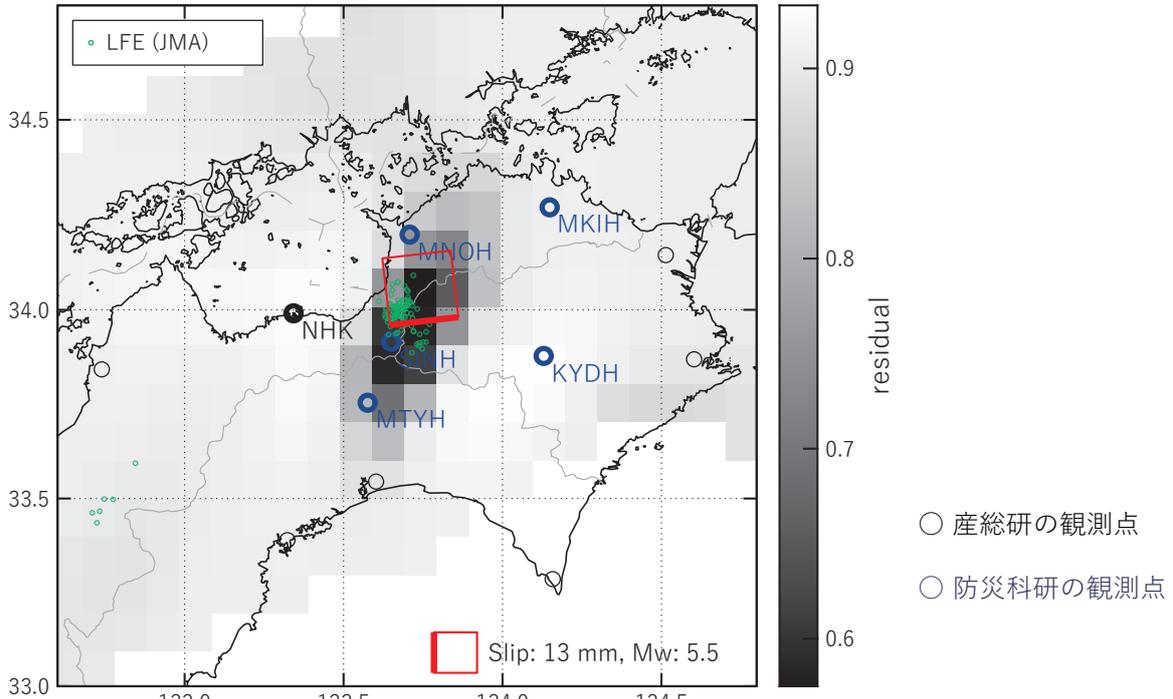


第 9 図 四国地方における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/05/13 ~ 2021/05/30).

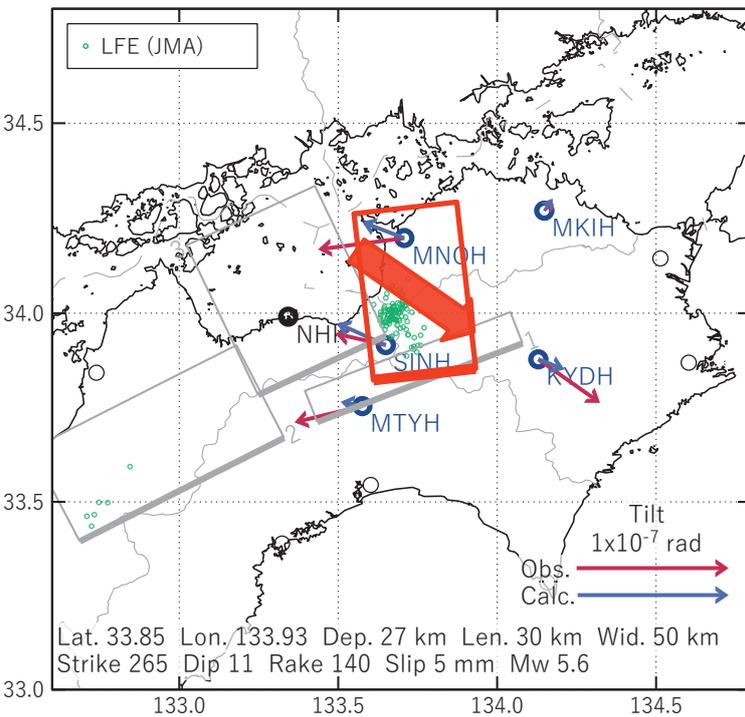
Fig. 9 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Shikoku region from May 13 to 30, 2021.

[A] 2021/05/20PM-22

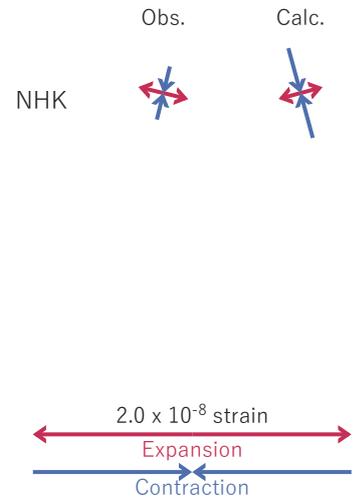
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定した断層モデル

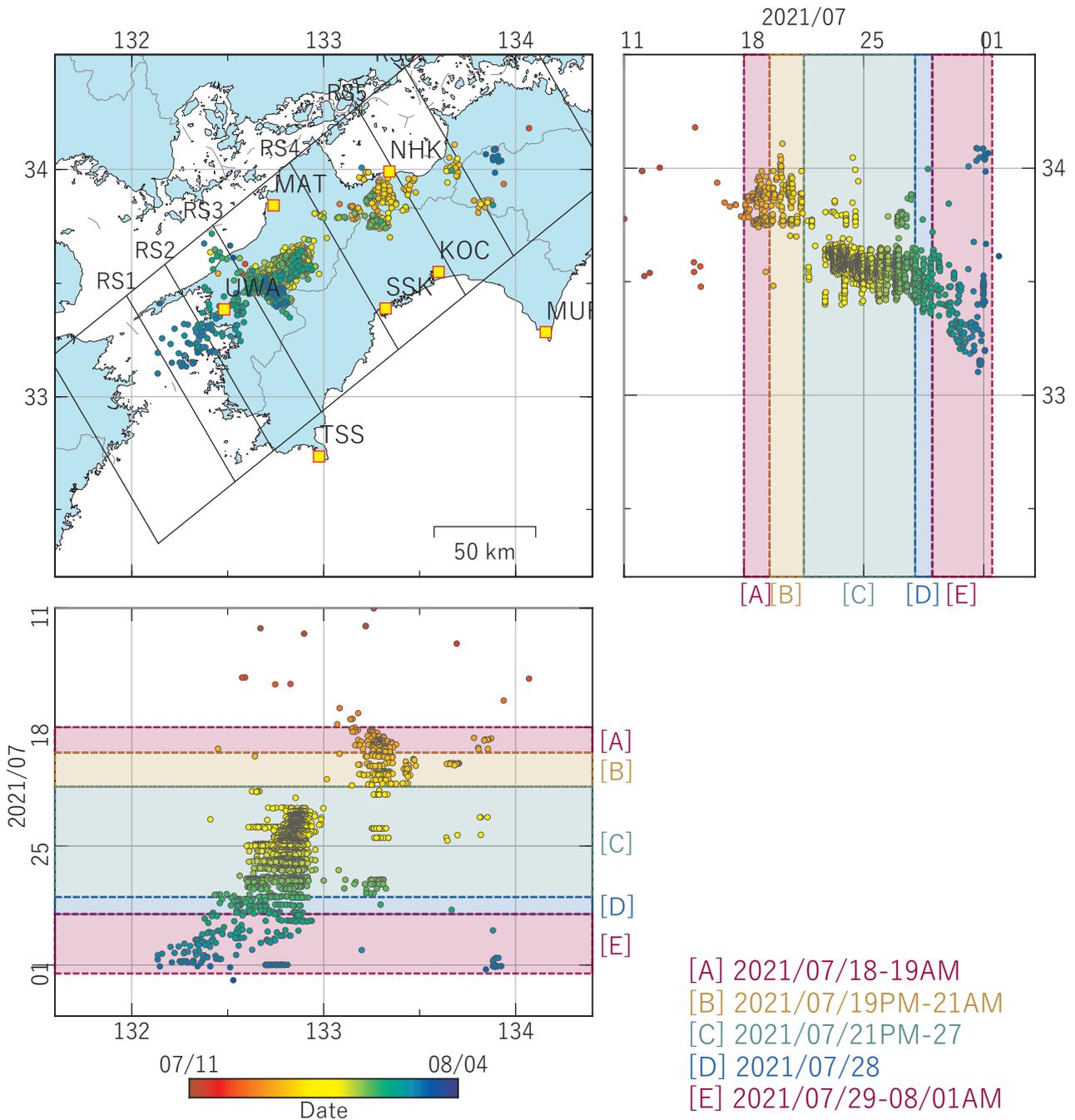


(b2) 主歪



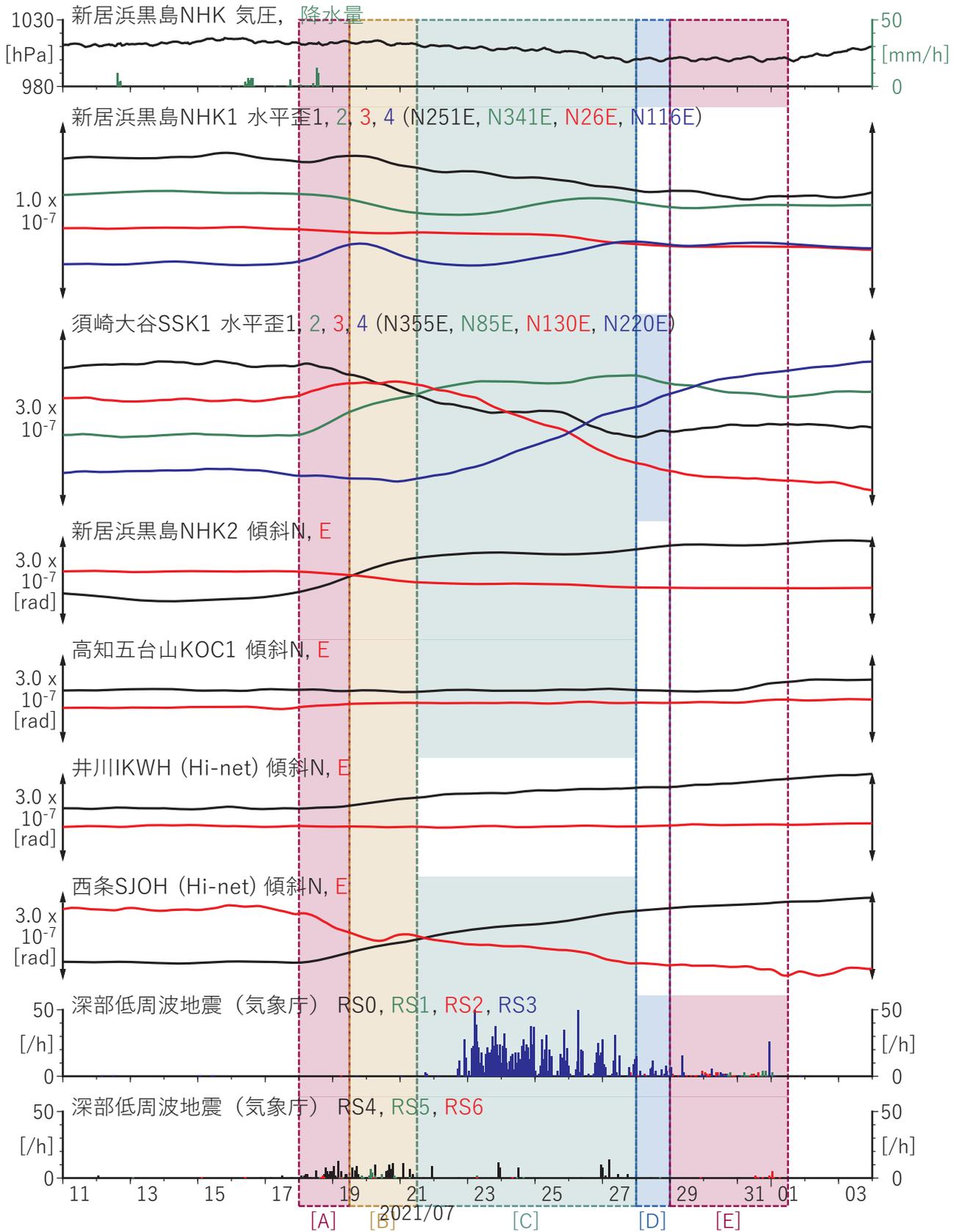
第 10 図 第 9 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照.

Fig. 10 Inferred fault models for Fig. 9 [A]. See also the caption of Fig. 5.

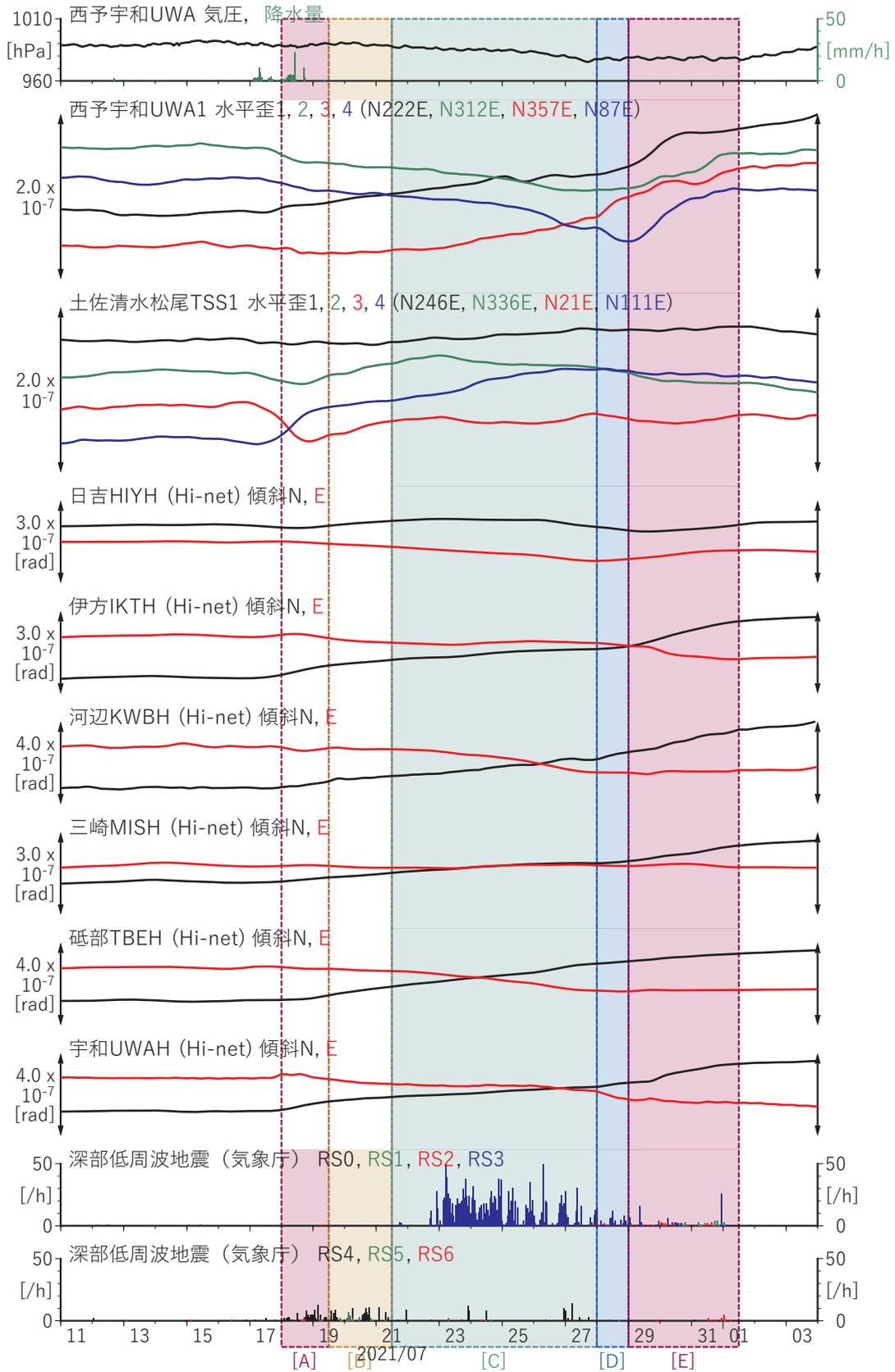


第 11 図 四国地方における深部低周波地震（気象庁一元化カタログによる）の時空間分布（2021/07/11 ~ 2021/08/04）。

Fig. 11 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Shikoku region from July 11 to August 04, 2021.



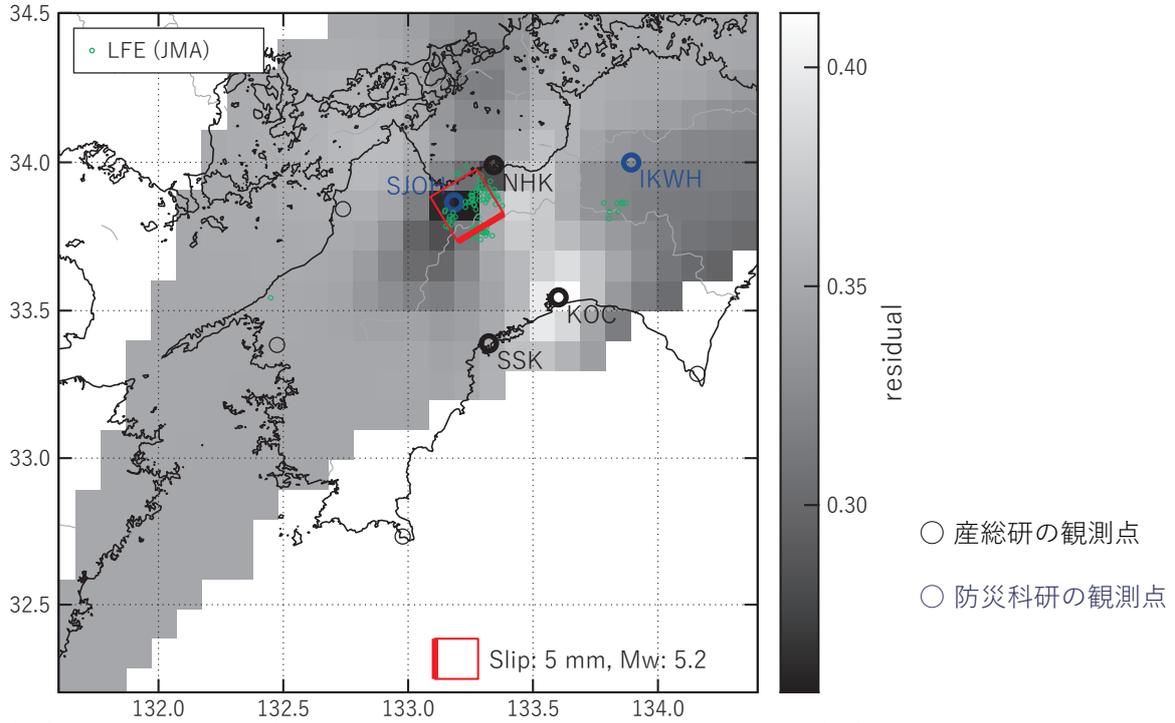
第 12 図 四国地方中部における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/07/11 ~ 2021/08/04).  
 Fig. 12 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the central Shikoku region from July 11 to August 04, 2021.



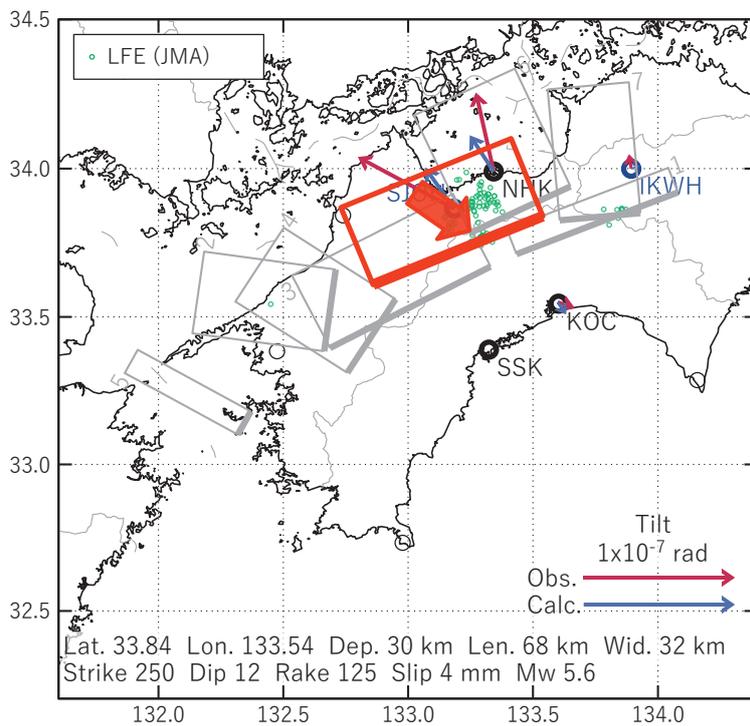
第 13 図 四国地方西部における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/07/11 ~ 2021/08/04).  
 Fig. 13 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the western Shikoku region from July 11 to August 04, 2021.

[A] 2021/07/18-19AM

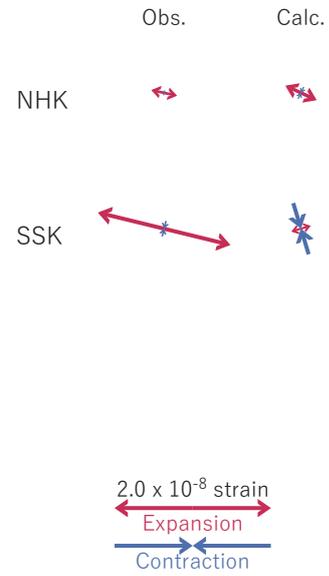
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪

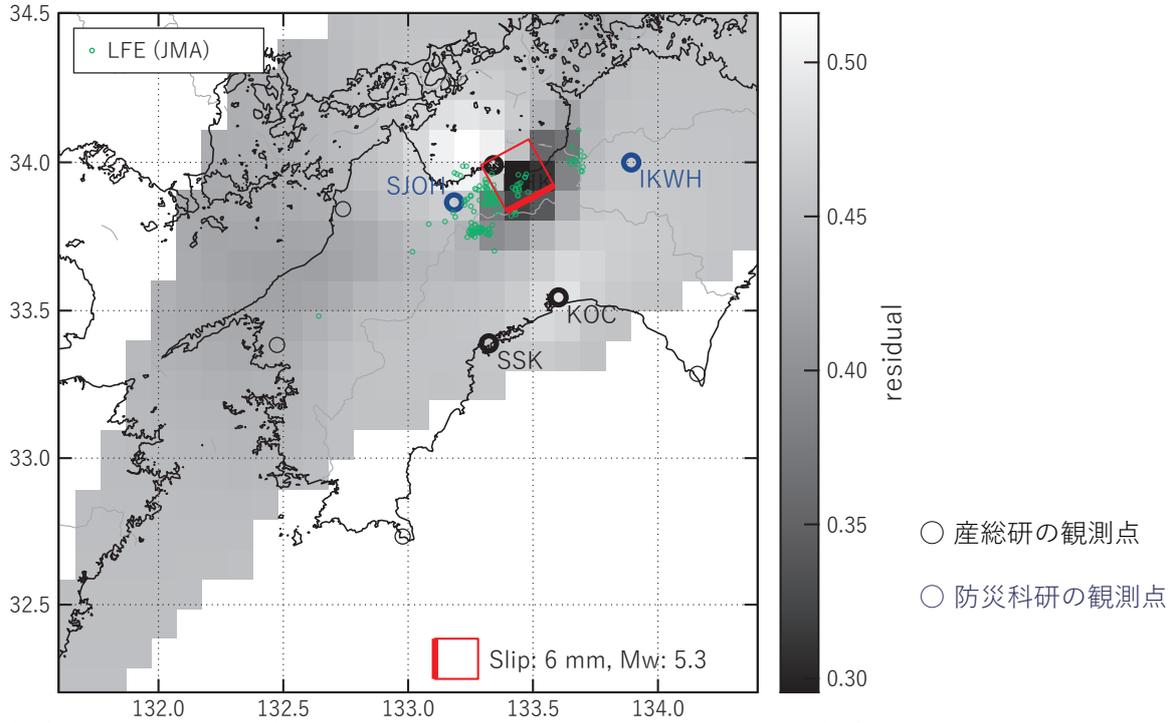


第 14 図 第 12, 13 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照.

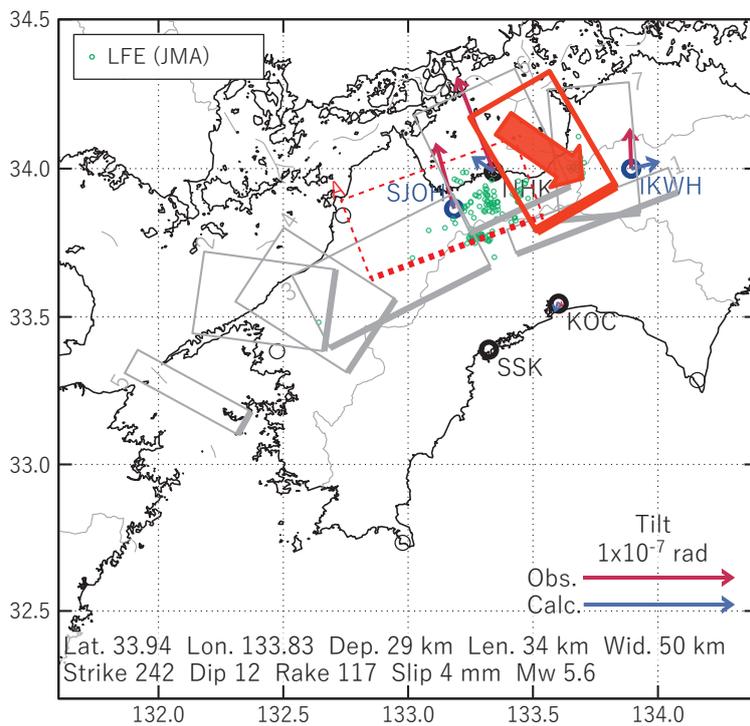
Fig. 14 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [A]. See also the caption of Fig. 5.

[B] 2021/07/19PM-21AM

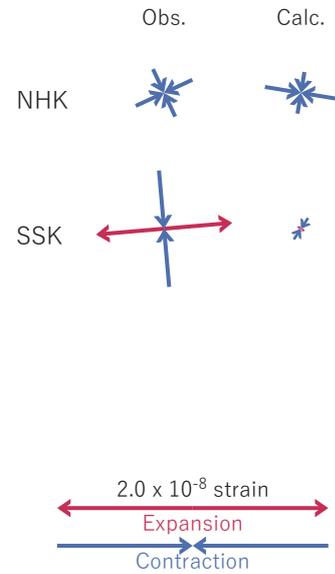
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪

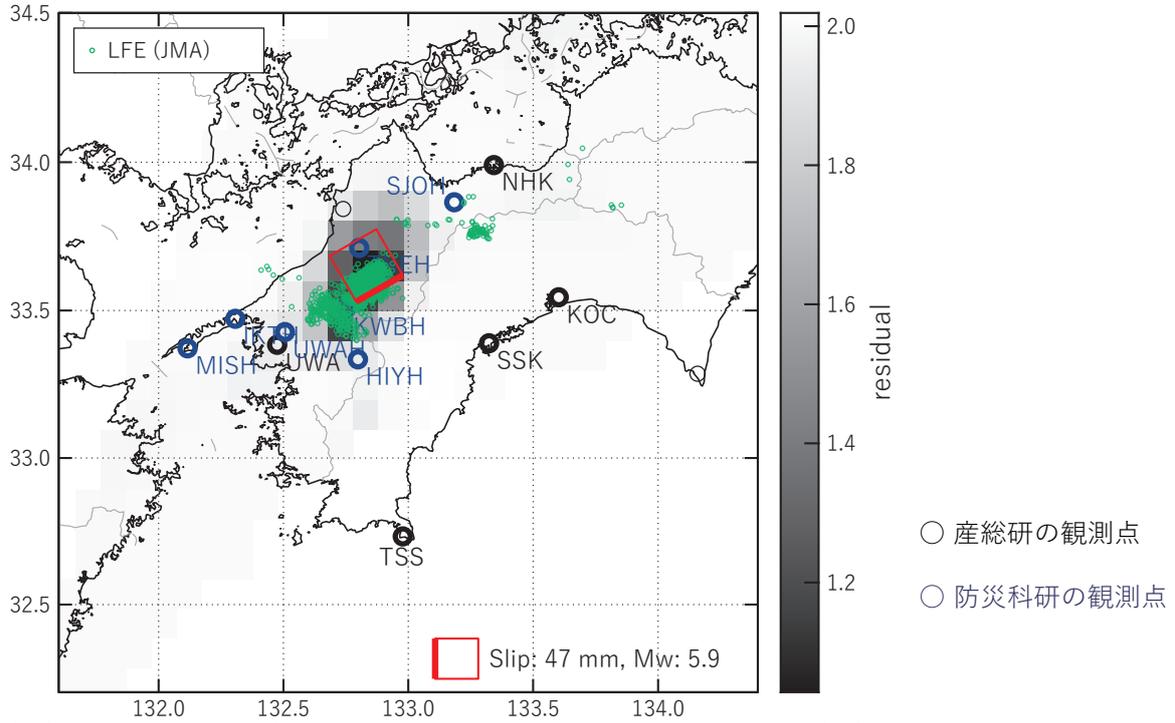


第 15 図 第 12, 13 図 [B] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照.

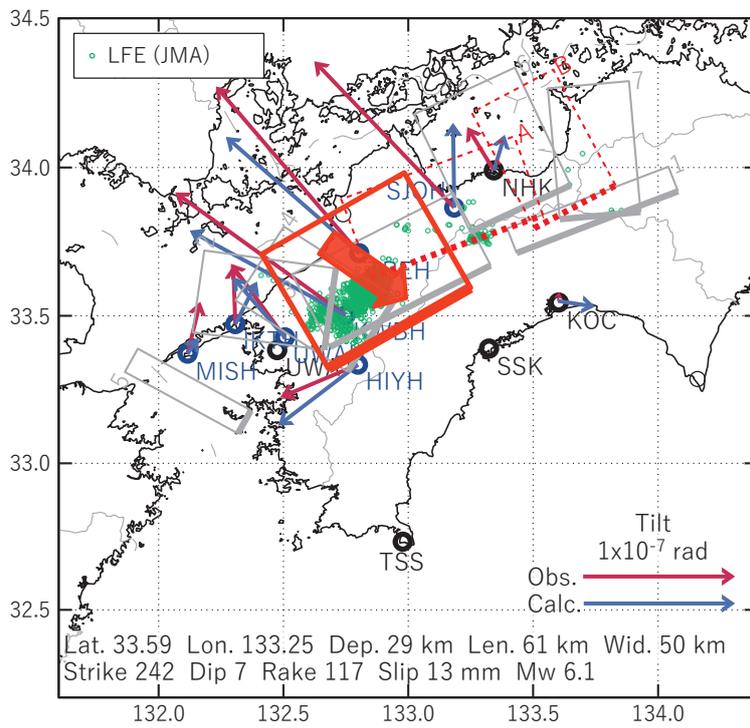
Fig. 15 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [B]. See also the caption of Fig. 5.

[C] 2021/07/21PM-27

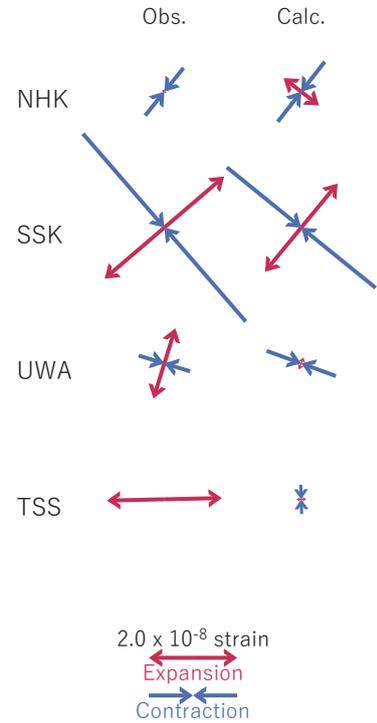
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪

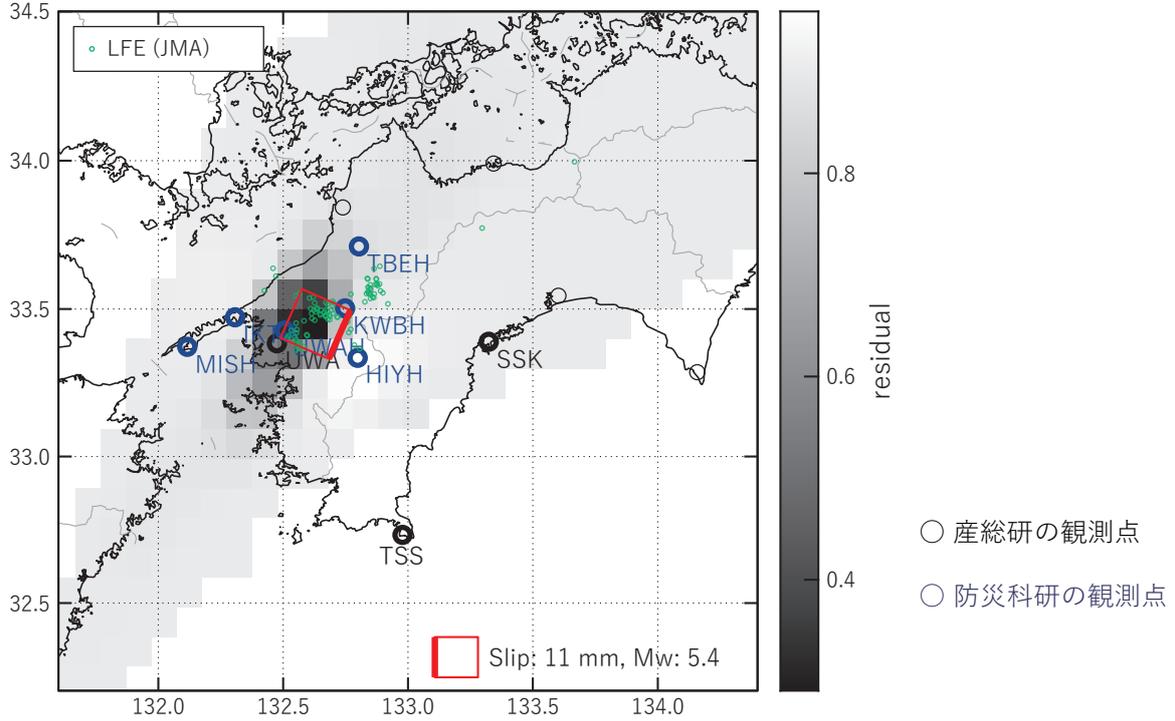


第 16 図 第 12, 13 図 [C] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照.

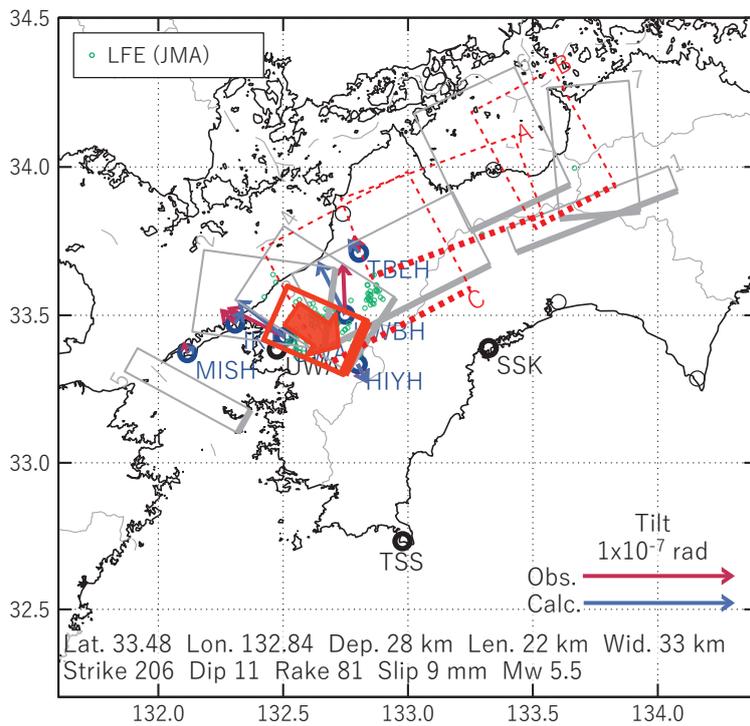
Fig. 16 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [C]. See also the caption of Fig. 5.

[D] 2021/07/28

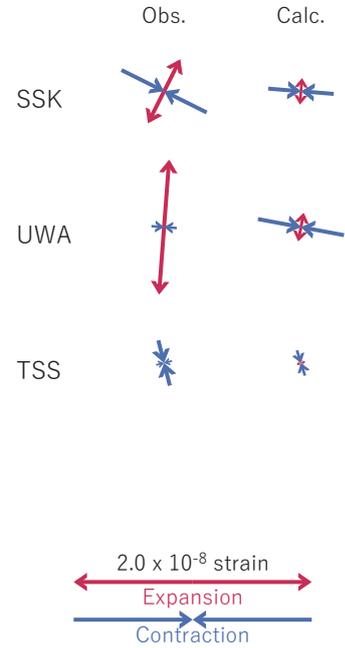
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪

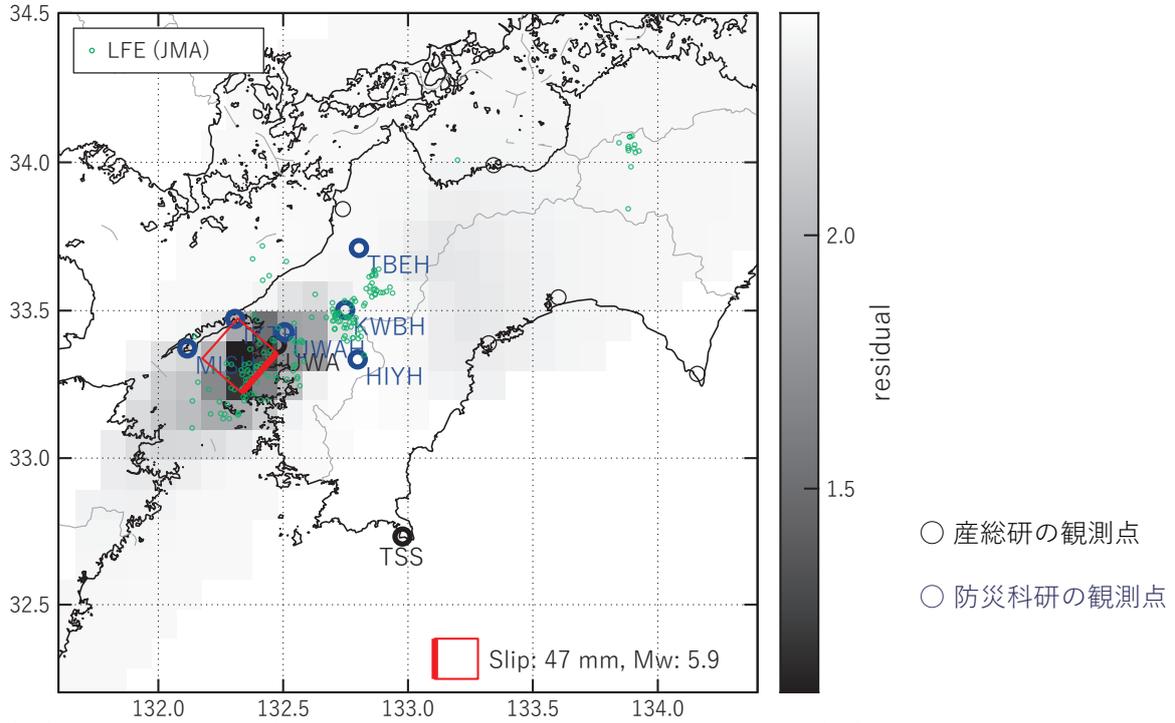


第 17 図 第 12, 13 図 [D] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照.

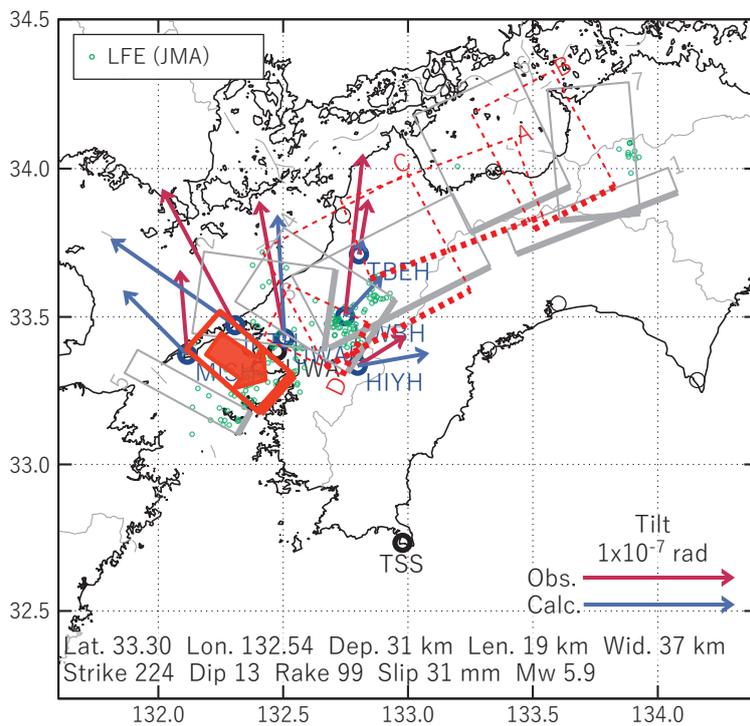
Fig. 17 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [D]. See also the caption of Fig. 5.

[E] 2021/07/29-08/01AM

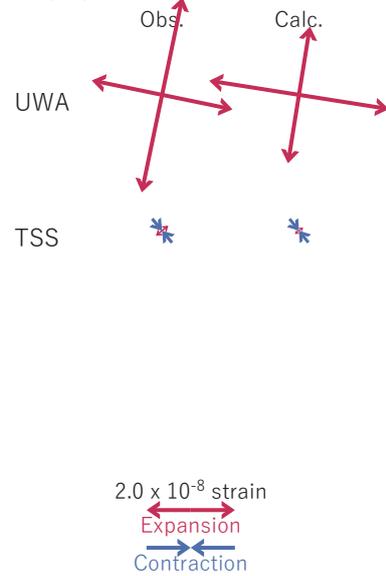
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定した断層モデル

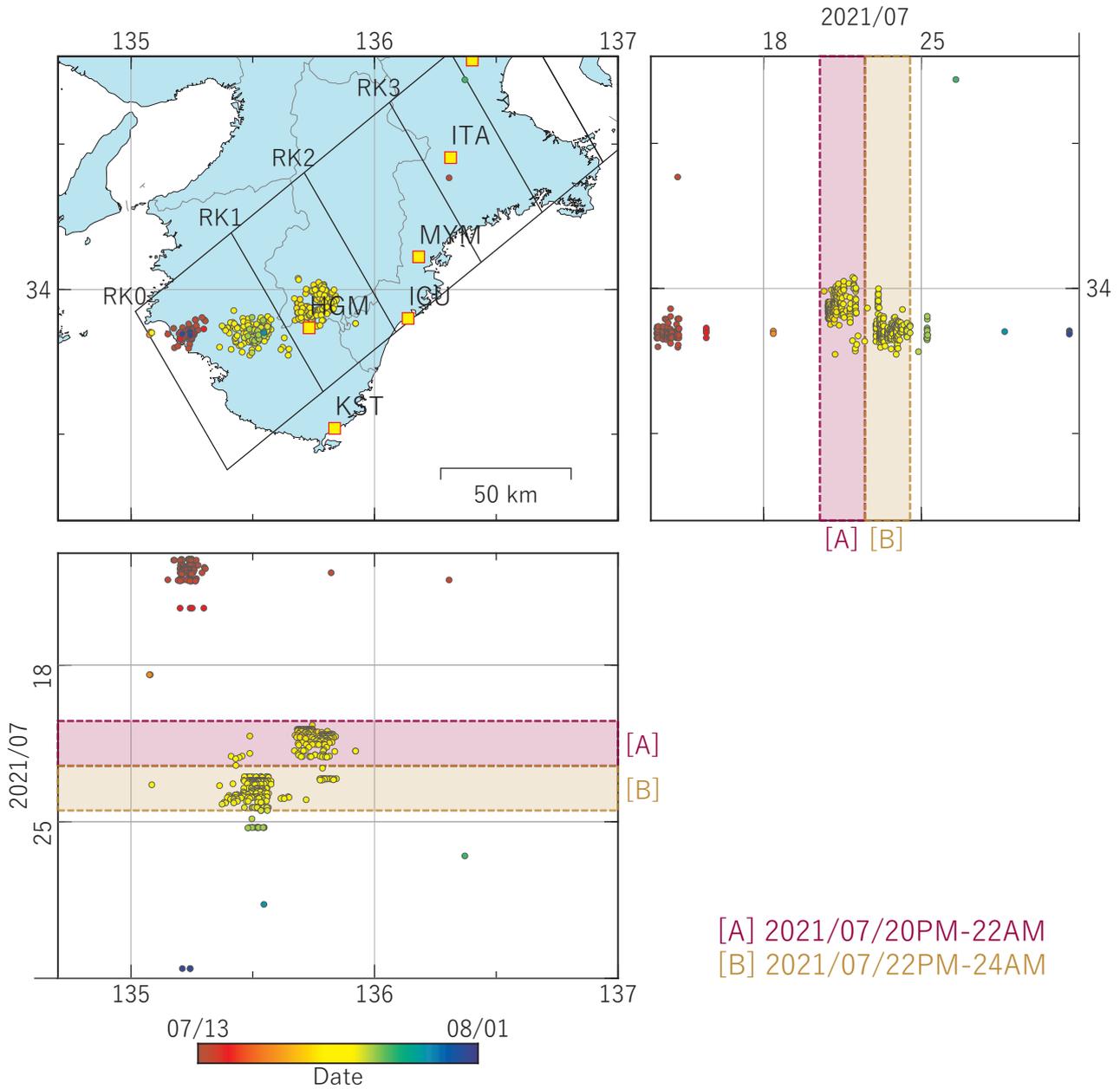


(b2) 主歪



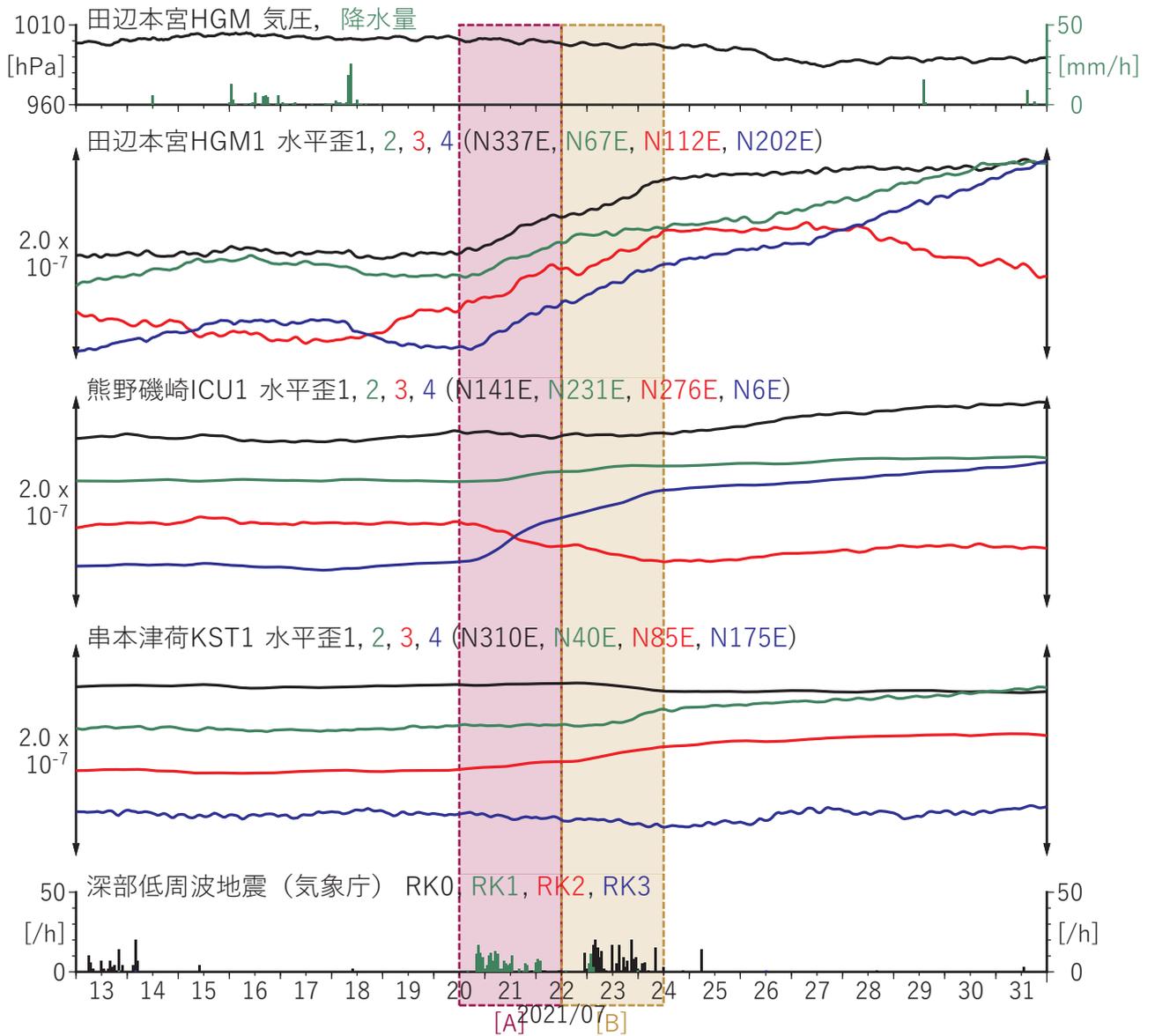
第 18 図 第 12, 13 図 [E] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照.

Fig. 18 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [E]. See also the caption of Fig. 5.



第 19 図 紀伊半島における深部低周波地震（気象庁一元化カタログによる）の時空間分布（2021/07/13 ~ 2021/08/01）。

Fig. 19 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Kii Peninsula from July 13 to August 01, 2021.

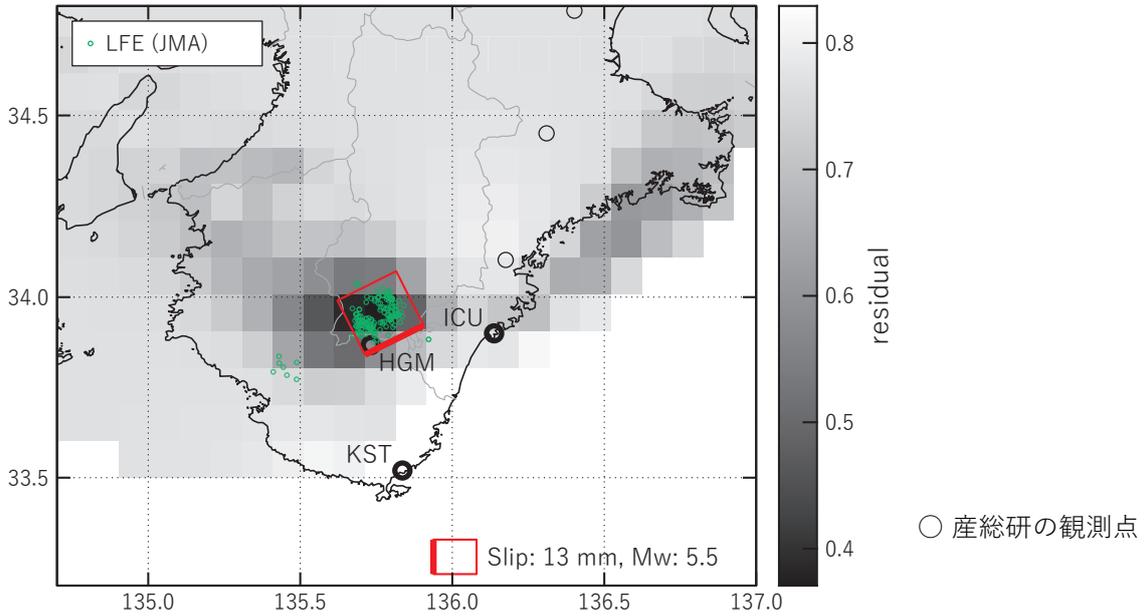


第 20 図 紀伊半島における歪の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/07/13 ~ 2021/08/01)。

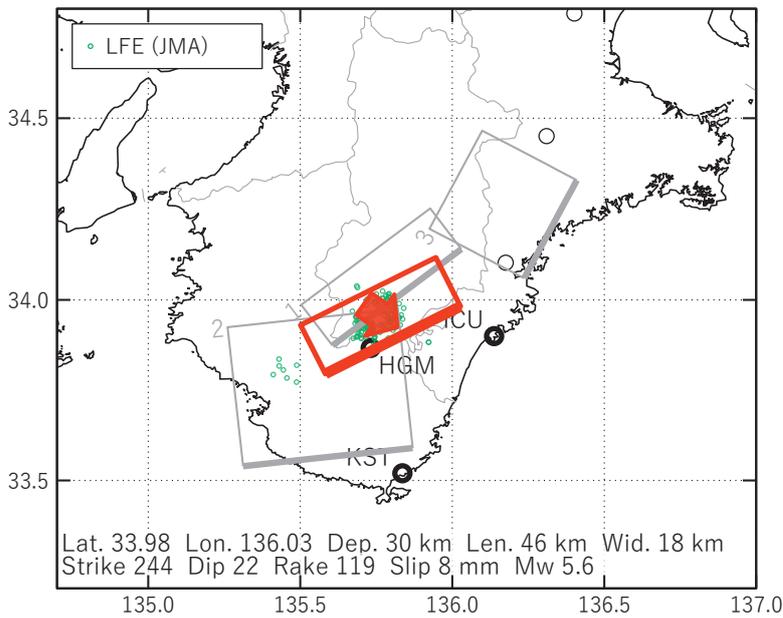
Fig. 20 Observed strain data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from July 13 to August 01, 2021.

[A] 2021/07/20PM-22AM

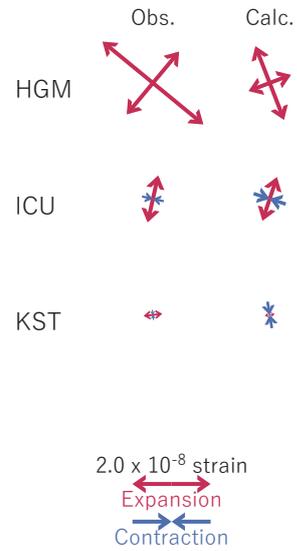
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪

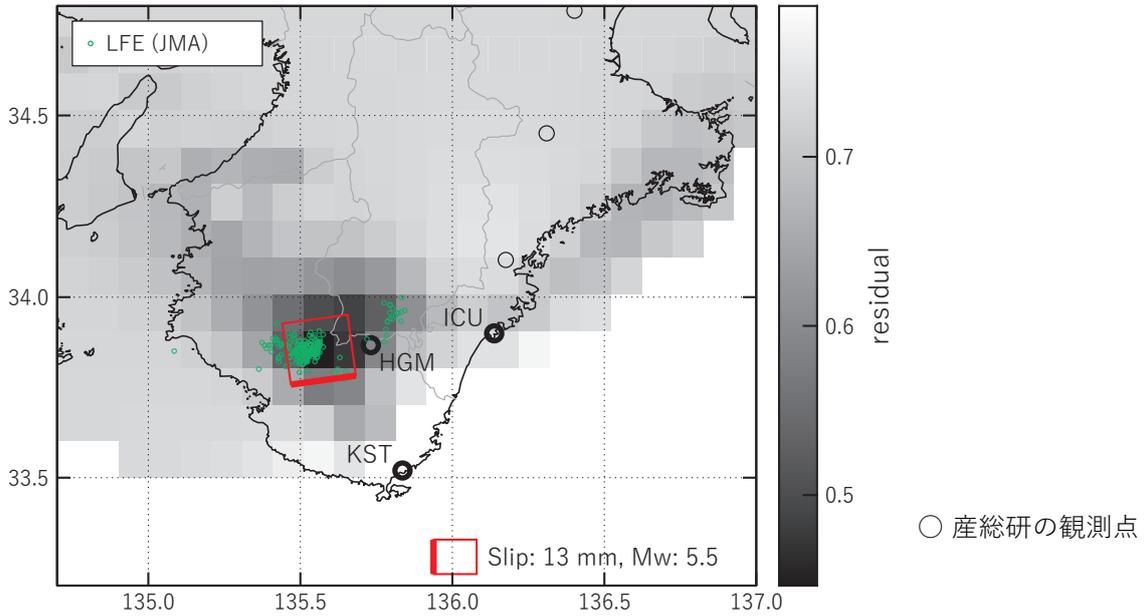


第 21 図 第 20 図 [A] を説明する断層モデル。各図の説明は第 5 図を参照。

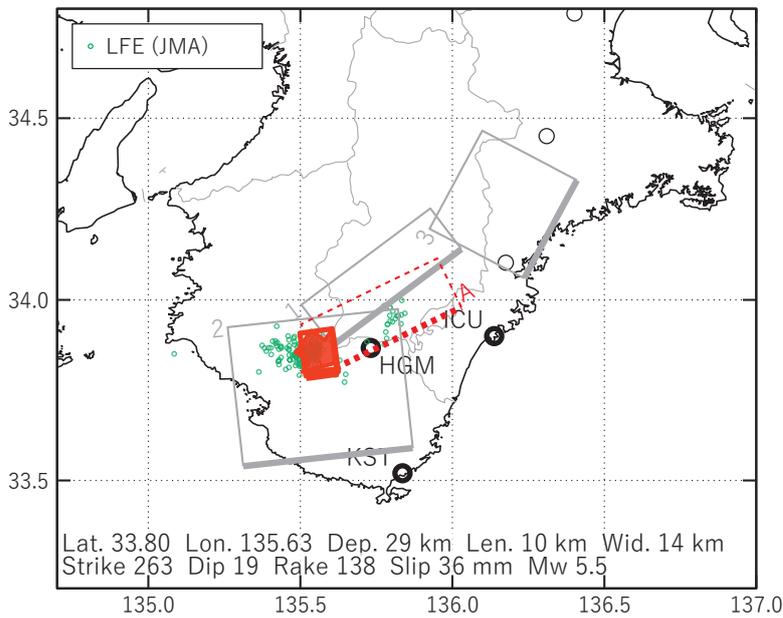
Fig. 21 Inferred fault models for Fig. 20 [A]. See also the caption of Fig. 5.

[B] 2021/07/22PM-24AM

(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) 推定した断層モデル

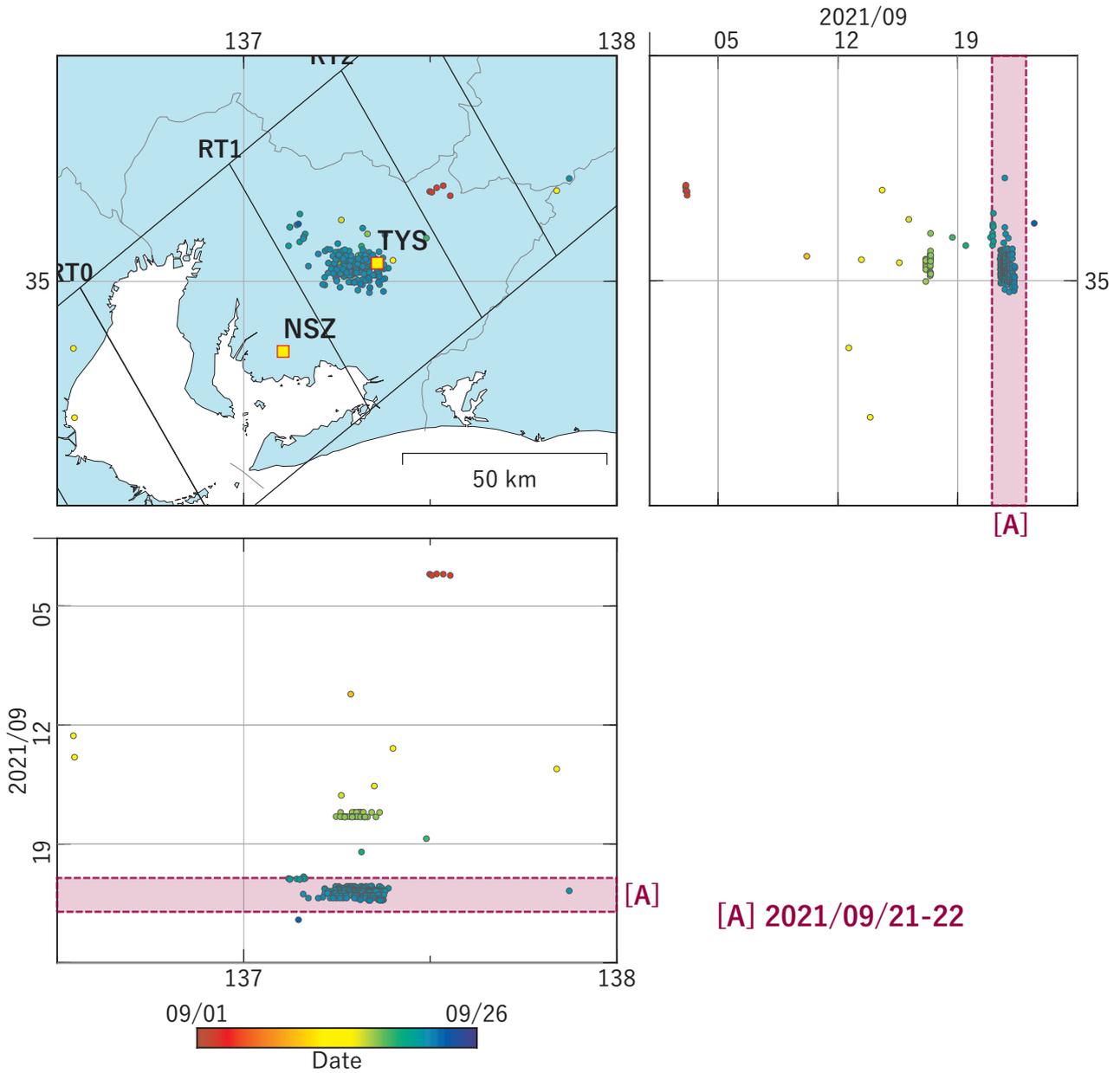


(b2) 主歪



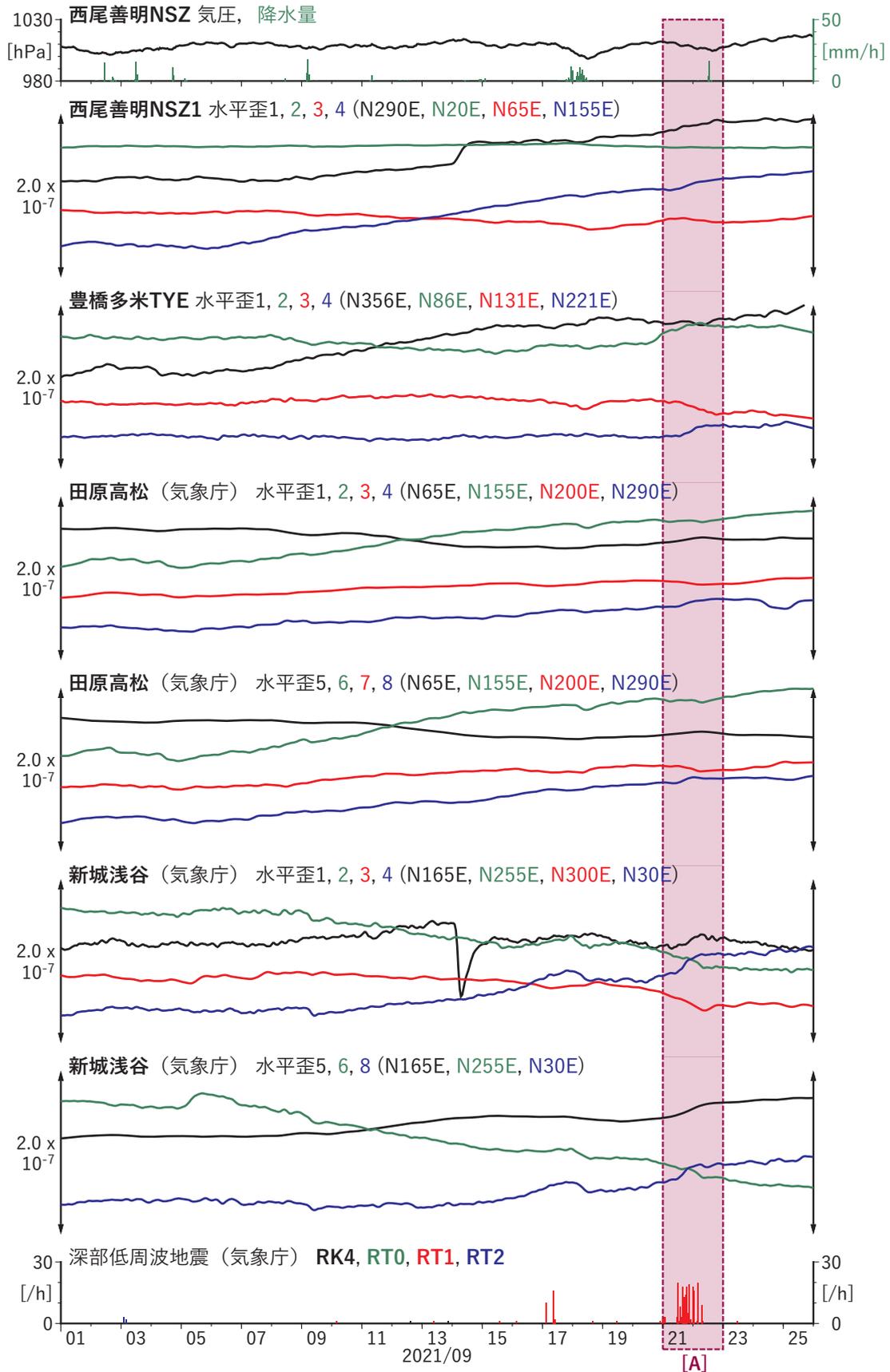
第 22 図 第 20 図 [B] を説明する断層モデル。各図の説明は第 5 図を参照。

Fig. 22 Inferred fault models for Fig. 20 [B]. See also the caption of Fig. 5.



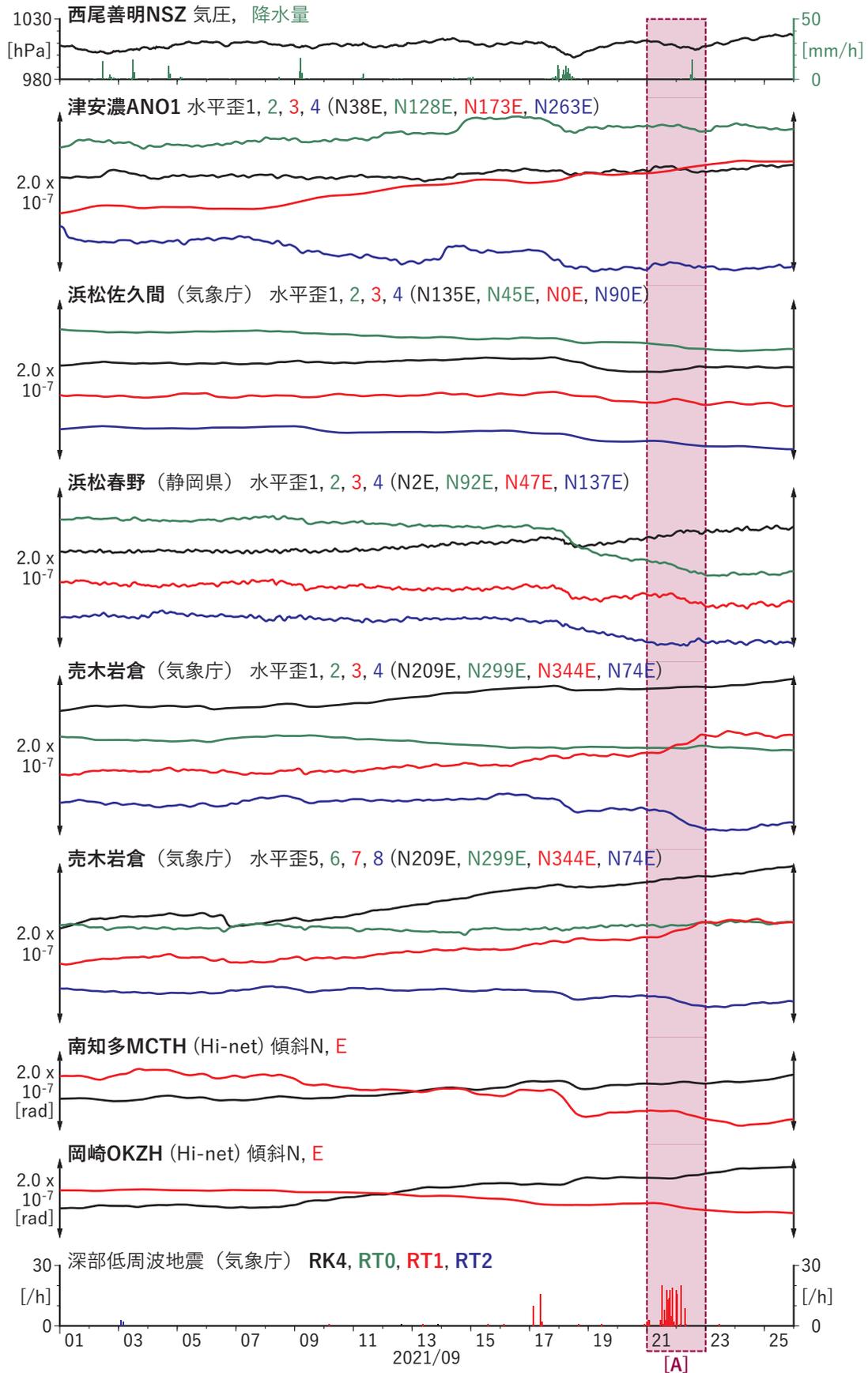
第 23 図 東海地方における深部低周波地震（気象庁一元化カタログによる）の時空間分布（2021/09/01 ～ 2021/09/26）。

Fig. 23 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Tokai region from September 01 to 26, 2021.



第 24 図 東海地方における歪の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/09/01 ~ 2021/09/26)。

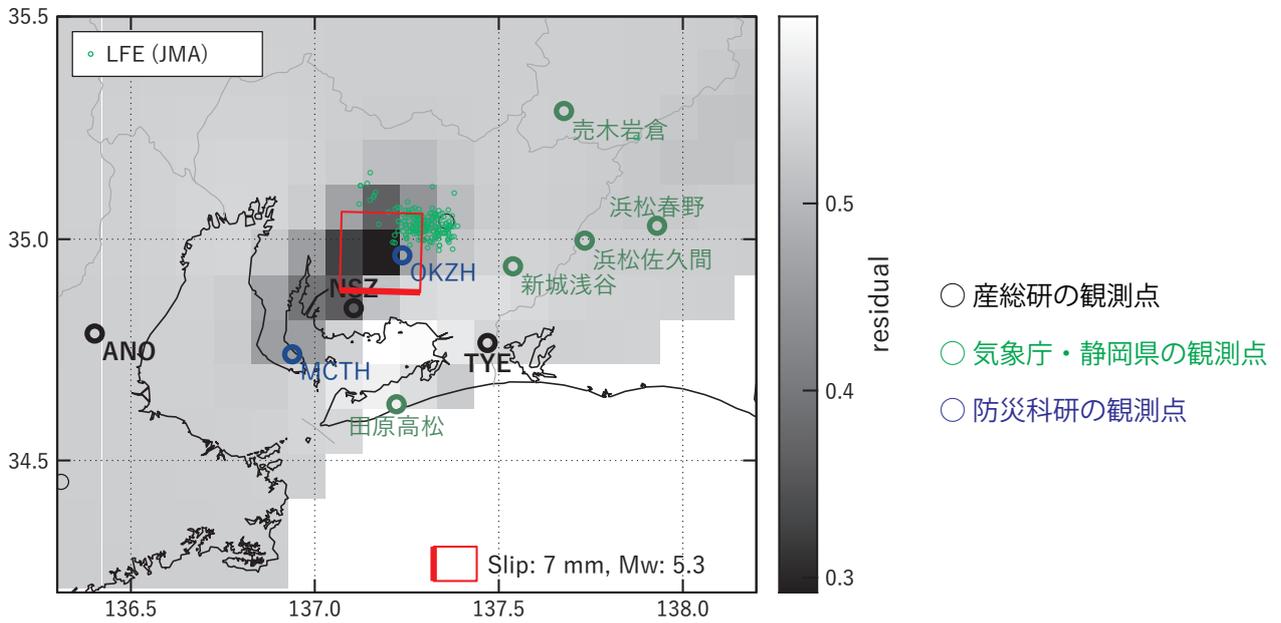
Fig. 24 Observed strain data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Tokai region from September 01 to 26, 2021.



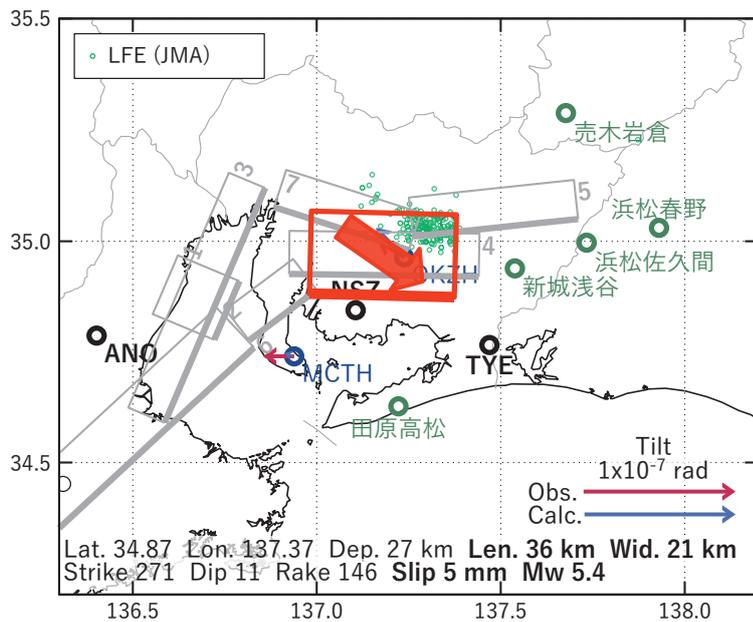
第 25 図 東海地方における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数 (2021/09/01 ~ 2021/09/26).  
 Fig. 25 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Tokai region from September 01 to 26, 2021.

[A] 2021/09/21-22

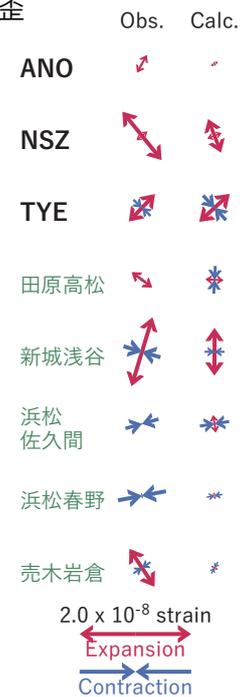
(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



(b1) 推定した断層モデル



(b2) 主歪



第 26 図 第 24, 25 図 [A] を説明する断層モデル。各図の説明は第 5 図を参照。

Fig. 26 Inferred fault models for Fig. 24, 25 [A]. See also the caption of Fig. 5.