

南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会（報告 別冊）
の加筆に関する引用文献一覧
（平成 28 年 9 月 26 日時点）

2. 東海地震対策と観測体制の現状等

- ・地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013, 南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について, http://jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm

4. 地震の前駆すべりと考えられた事例等

〔2014 年イキケ地震前に見られた地震活動〕

- ・Kato, A. and Nakagawa, S., 2014, Multiple slow - slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.1 earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, *41*(15), 5420-5427, doi:10.1002/2014GL061138.

5. 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震から得られた科学的知見

（1）地震活動の変化

〔静穏化〕

- ・Kawamura, M., Y. H. Wu, T. Kudo and C. C. Chen, 2013, Precursory migration of anomalous seismic activity revealed by the pattern informatics method: A case study of the 2011 Tohoku earthquake, Japan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, *103*(2B), 1171-1180, doi: 10.1785/0120120094.

〔地球潮汐と地震活動の相関〕

- ・Wang, W. and P. M. Shearer, 2015, No clear evidence for localized tidal periodicities in earthquakes in the central Japan region, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, *120*, 6317–6328, doi:10.1002/2015JB011937.

〔b 値〕

- ・Tormann, T., B. Enescu, J. Woessner and S. Wiemer, 2015, Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake. *Nature Geoscience*, *8*(2), 152-158, doi:10.1038/ngeo2343.
- ・Tormann, T., S. Wiemer, B. Enescu and J. Woessner, 2016, Normalized rupture potential for small and large earthquakes along the Pacific Plate off Japan, *Geophys. Res. Lett.*, *43*, 7468–7477, doi:10.1002/2016GL069309.
- ・Bürgmann, R., N. Uchida, Y. Hu and T. Matsuzawa, 2016, Tohoku rupture reloaded?. *Nature Geoscience*, *9*(3), 183-184, doi:10.1038/ngeo2649.

〔前震〕

- Marsan, D., T. Reverso, A. Helmstetter and B. Enescu, 2013, Slow slip and aseismic deformation episodes associated with the subducting Pacific plate offshore Japan, revealed by changes in seismicity, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, *118*, 4900-4909, doi:10.1002/jgrb.50323.
- Bouchon, M., V. Durand, D. Marsan, H. Karabulut, and J. Schmittbuhl, 2013, The long precursory phase of most large interplate earthquakes. *Nature geoscience*, *6*(4), 299-302, doi:10.1038/ngeo1770.
- Lippiello, E., W. Marzocchi, L. de Arcangelis, and C. Godano, 2012, Spatial organization of foreshocks as a tool to forecast large earthquakes, *Scientific Rep.*, *2*, 846, doi: 10.1038/srep00846.
- Kato, A. and S. Nakagawa, 2014, Multiple slow - slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.1 earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, *41*(15), 5420-5427, doi: 10.1002/2014GL061138.
- Brodsky, E. E. and T. Lay, 2014, Recognizing foreshocks from the 1 April 2014 Chile earthquake. *Science*, *344*(6185), 700-702, doi: 10.1126/science.1255202

〔小繰り返し地震〕

- Uchida, N. and T. Matsuzawa, 2013, Pre-and postseismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, *374*, 81-91, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.021.
- 野村俊一・内田直希・尾形良彦, 2013, 時空間非定常 BPT モデルによる北日本太平洋沖沈み込み帯の小繰り返し地震 (1993.7.15-2011.3.10) の解析例 (2) -特に主要地震の前と後の変化について-, 地震予知連会報, *90*, 54-57.
- Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Bürgmann and R. Hino, 2016, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan. *Science*, *351*(6272), 488-492, doi:10.1126/science.aad3108.

〔低周波微動〕

- Ito, Y., R. Hino, S. Suzuki and Y. Kaneda, 2015, Episodic tremor and slip near the Japan Trench prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, *42*, 1725-1731, doi:10.1002/2014GL062986.

(2) 地殻変動

〔長期的変動〕

- Mavrommatis, A. P., P. Segall and K. M. Johnson, 2014, A decadal-scale deformation transient prior to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, *41*, 4486-4494, doi:10.1002/2014GL060139.

- Yokota, Y., and K. Koketsu, 2015, A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, *Nature Communications*, 6, 5934, doi:10.1038/ncomms6934.
- Sato, M., M. Fujita, Y. Matsumoto, T. Ishikawa, H. Saito, M. Mochizuki and A. Asada, 2013, Interplate coupling off northeastern Japan before the 2011 Tohoku-oki earthquake, inferred from seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 3860-3869, doi:10.1002/jgrb.50275.
- Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto and Y. Hu, 2014, Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature*, 514(7520), 84-87, doi:10.1038/nature13778.
- Sun, T. and K. Wang, 2015, Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 120(2), 1329-1344, doi:10.1002/2014JB011707.

〔短期的変動〕

- Hino, R., D. Inazu, Y. Ohta, Y. Ito, S. Suzuki, T. Iinuma, Y. Osada, M. Kido, H. Fujimoto and Y. Kaneda, 2014, Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter, *Mar. Geophys Res.*, 35(3), 181-190, doi:10.1007/s11001-013-9208-2.

(3) 電離層及び大気圏関係の現象

- Heki, K. and Y. Enomoto, 2015, Mw dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120(8), 7006-7020, doi:10.1002/2015JA021353.

(4) 地下水の変化

- Orihara, Y., M. Kamogawa and T. Nagao, 2014, Preseismic Changes of the level and temperature of confined groundwater related to the 2011 Tohoku earthquake, *Scientific Reports*, 4, 6907, doi:10.1038/srep06907.
- 織原義明, 鴨川仁, 2016, 三陸地方における東北地方太平洋沖地震前の井戸水異常の調査—岩手県山田町から宮城県石巻市にかけて—, 地震第2輯, 69, 31-34.

7. 南海トラフ沿いの大規模地震の規模と発生時期の予測可能性に関する科学的知見

(2) 発生時期の予測可能性 (海底地殻変動観測に関する部分)

- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro and A. Asada, 2016, Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature*, 534, 374-377, doi:10.1038/nature17632.

2011年東北地方太平洋沖地震前に見られた前兆的現象 ～平成25年以降に得られた新たな知見：個別事例～

本資料では、特に断らない限り、「本震」とは2011年東北地方太平洋沖地震の本震を指す。

1. 活発化・静穏化	2
1.1. 約10年前から活発化・静穏化エリアが本震へ移動 (Kawamura et al., 2013)	2
2. 地球潮汐	3
2.1. 東北沖地震前に現れたp値は偶然 (Wang & Shearer, 2015)	3
3. b値変化	4
3.1. 東北沖地震前にb値が低下 (Tormann et al., 2015)	4
3.2. 東北沖地震前に発生ポテンシャル上昇 (Tormann et al., 2016)	5
4. 前震	6
4.1. プレート境界型地震前にみられる地震数の加速的増加 (Bouchon et al, 2013)	6
4.2. 前震の時空間的特徴 (Lippiello et al, 2012)	7
4.3. (参考) 震源の移動 (Kato and Nakagawa, 2014; Brodsky and Lay, 2014)	8
5. 小繰り返し地震・背景地震	10
5.1. 約3年前からゆっくりすべり発現 (Uchida & Matsuzawa, 2013)	10
5.2. ゆっくりすべりの時空間発展 (野村・他, 2013)	11
5.3. 2011年1-2月の遷移現象 (Marsan et al., 2013)	12
5.4. 周期的なゆっくりすべり (Uchida et al., 2016)	13
6. 長期的スロースリップ	14
6.1. 宮城県沖のプレート間カップリングの減少 (Sato et al., 2013)	14
6.2. 東北中南部沖の地殻変動の加速 (Mavrommatis et al., 2014)	15
6.3. 2003年頃からの遷移イベント (Yokota and Koketsu, 2015)	15
6.4. (参考) 余効変動におけるマンツルの粘弾性変形の影響 (Sun et al., 2014; Sun and Wang, 2015)	16
7. 短期的スロースリップ	18
7.1. 本震前1日間に海底水圧計に有意な地殻変動なし (Hino et al., 2013)	18
7.2. 2008年と2011年のスロースリップの時期に低周波微動発生 (Ito et al., 2015)	19
8. 電離層関係の現象	20
8.1. 地震の前兆的電離層擾乱のMw依存性 (Heki and Enomoto, 2015)	20
9. 地下水	21
9.1. 本震の3か月前から地下水変化 (Orihara et al., 2014)	21
10. 引用文献	22

1. 活発化・静穏化

約 10 年前から活発化・静穏化エリアが本震へ移動

1.1. 約 10 年前から活発化・静穏化エリアが本震へ移動 (Kawamura et al., 2013)

改良 PI (Pattern Informatics)の解析を通じて、異常な地震活動(活発化・静穏化)のエリアが 2000 年から 2011 年東北沖地震が発生するまで、本震に近づいていたと指摘。データは、気象庁カタログ (2000/01/01-2011/03/10, $M \geq 4.0$, 深さ 0-60 km)。

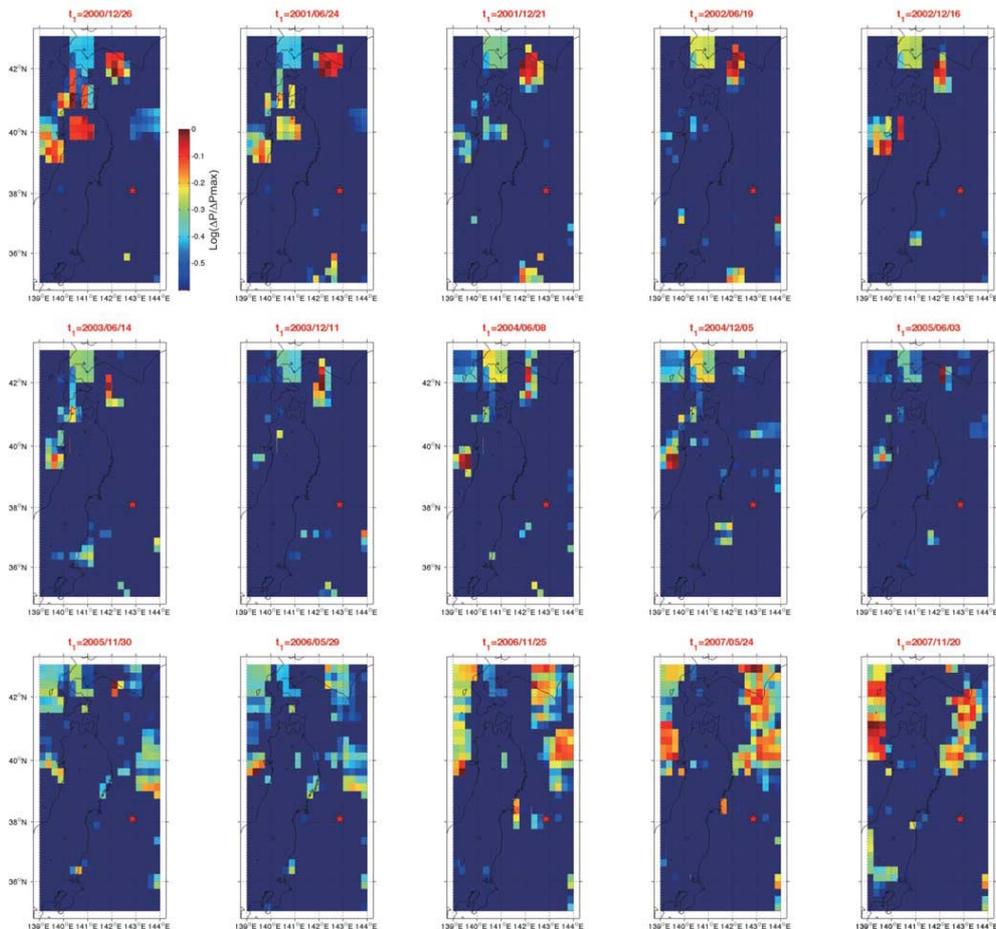


Figure 4. Snapshots of the spatial distribution of the grid cells with large seismicity changes (PI hotspots) for different change intervals between t_1 and t_2 ($t_2 = 1$ January 2011). Change interval for each panel is shown at top (only t_1 is denoted). Warm-color grid cells show the locations with large seismicity changes, including seismic quiescence and activation, during the change interval; this indicates high probability of earthquake occurrence after the change interval. Red-color regions correspond to the highest probability of earthquake occurrence. Cold colors represent locations with small seismicity changes, indicating low probability of earthquake occurrence after the change interval. It should be noted that the blue regions include all occurrence probabilities lower than -0.6 . It can be seen that the locations of the PI hotspots, which are regarded as anomalous seismicity areas, approach the epicenter of the 2011 Tohoku earthquake, which is indicated by the red star.

t_1 を変えた場合のPIのスナップショット。暖色系は地震活動(活発化、静穏化)の異常度が高い領域。★は本震。高PI域が徐々に本震に近づいていると指摘。

2. 地球潮汐

2011 年東北沖地震の前に現れたとされる地球潮汐との強い相関は有意ではないとの指摘

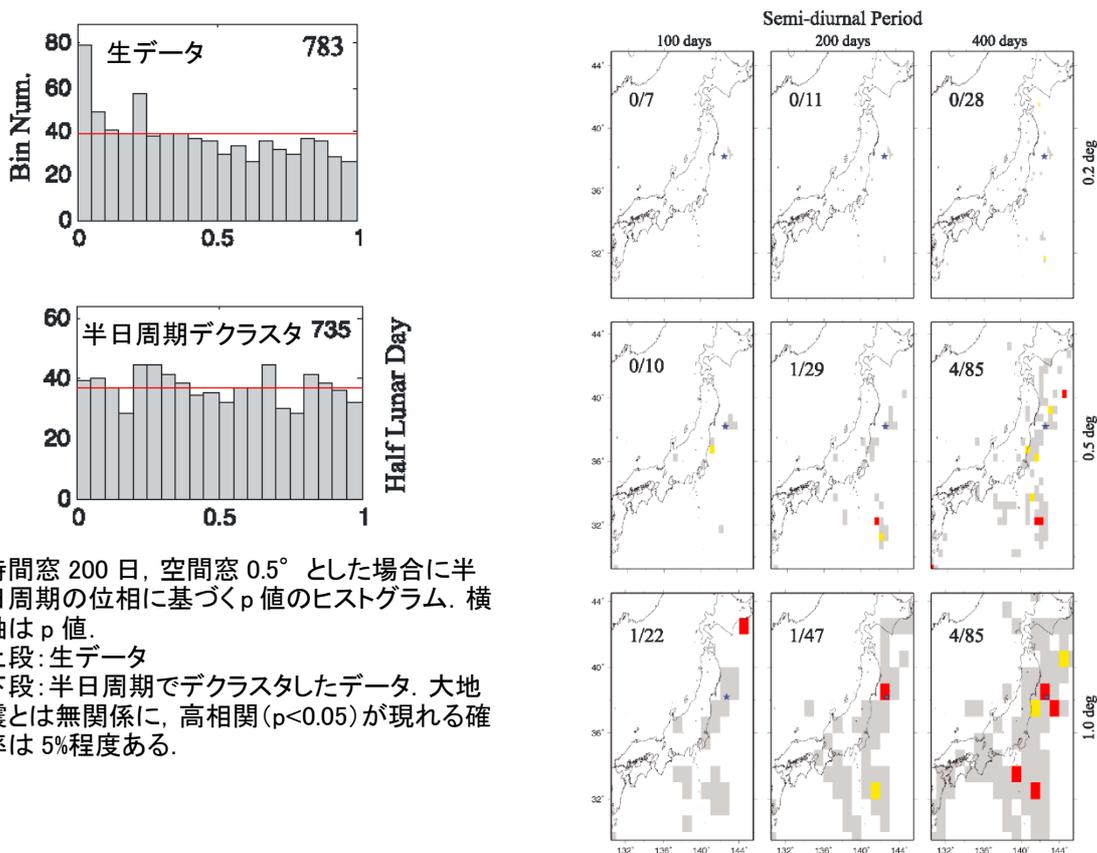
2.1. 東北沖地震前に現れた p 値は偶然 (Wang & Shearer, 2015)

Tanaka [2012, GRL]が発見した「本震の数年前から、前震・本震付近での中規模地震の発生に地球潮汐との強い相関がみられた」に対する反論. 半日周期 (12.42 時間) や半月周期 (14.77 日) など特定の周期に注目してデクラスタを適用した小規模地震を含むカタログを使用. 時間窓やセルの大きさを色々を変えた場合でも、大地震と関係なく $p < 0.05$ (地震活動と潮汐との相関が高い) となる確率は約 5%存在している. 東北沖地震前に注目すると、 $p < 0.05$ 域が本震の震央と一致する場合もあるが、時間窓や空間窓に左右され、偶然起こり得る範囲内であることから潮汐との相関はないと結論付けた.

注) ただし、W&S と Tanaka には基本的な項目にいくつか相違点がある.

W&S : 気象庁カタログ (2000 年 1 月~2013 年 4 月, M3.0 以上, 深さ全て, メカニズム解考慮せず), 時間窓 100-400 日, ある特定の 1 周期のみ.

Tanaka : GCMT 解カタログ (1976-2011 年, Mw5.0 以上, 深さ 70 km 以浅), 時間窓 3000 日, 固体潮汐+海洋潮汐 (主要 21 分潮) によるせん断応力成分



時間窓 200 日, 空間窓 0.5° とした場合に半日周期の位相に基づく p 値のヒストグラム. 横軸は p 値.
 上段: 生データ
 下段: 半日周期でデクラスタしたデータ. 大地震とは無関係に, 高相関 ($p < 0.05$) が現れる確率は 5%程度ある.

時間窓 (東北沖地震前の 100, 200, 400 日間) および空間窓 ($0.2, 0.5, 1.0^\circ$) を変えた場合の p 値分布. 赤は $p < 0.05$, 黄は $0.05 \leq p < 0.1$, 灰はそれ以外. 各図の数字は, $p < 0.05$ のグリッド数/イベント 10 個以上のグリッド

Figure 6. The spatial distribution of anomalous p values for possible semidiurnal tidal periodicity for $M \geq 3$ seismicity bins over a range of spatial (0.2° , 0.5° , and 1.0°) and temporal dimensions (100, 200, and 400 days), with each time bin ending immediately before the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake. The star indicates the main shock epicenter from Chu *et al.* (2011). Red indicates p values less than 0.05, yellow for p values between 0.05 and 0.1, and gray for the other p values. Only cells with more than 10 events are plotted. The number in each panel shows "(number of cells with $p < 0.05$)/(number of plotted cells)."

3. b 値変化

2005 年頃から b 値の低下がみられる。

3.1. 東北沖地震前に b 値が低下 (Tormann et al., 2015)

プレート境界に沿って 2 km 間隔のグリッドを配置し、b 値の計算にはグリッドからの距離に応じた重みをかけて推定した。データは気象庁カタログ (1998 年～, M2.0 以上)。その結果、本震前の b 値低下がみられた。また、空間的には最大前震発生域で b 値が低下している。これらの結果は、Nanjo et al. [2012]と同様の傾向を示す。ただし、b 値の空間分布から地震発生領域分けはできないと指摘した。

*さらに彼らは、最近の b 値が 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の前の状態に戻っているため、応力は既に回復し、いつまた巨大地震が起きても不思議ではなく、地震発生はランダムに近いと主張。それに対する反論として、Bürgmann et al.[2016]は本震による応力降下量は十分大きく、本震前の応力状態に戻るには数百年程度が必要であること、b 値の変化は地震発生場所やメカニズム解の時間変化を反映しているのではないかと指摘した。

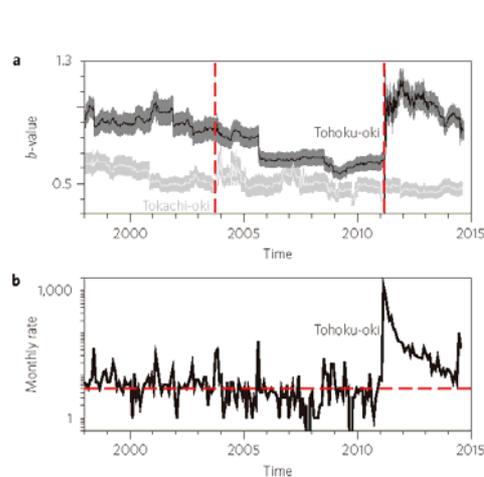


Figure 3 | b-value time series and monthly activity rates. **a**, b-value and uncertainty⁴⁸ for the Tokachi-oki and Tohoku-oki earthquakes (red dashed vertical lines) (for sampling parameters see Methods). **b**, $M \geq 3$ events per month inside the Tohoku-oki 10-m-slip contour²², red dashed line indicates the average rate for 1998-2011.

a: b 値の時間変化。黒線は東北沖、灰線は十勝沖。東北沖については、本震前に b 値が小さいこと、本震後に上昇し、その後下降していることがみてとれる。
b: 月あたりの発生レート。

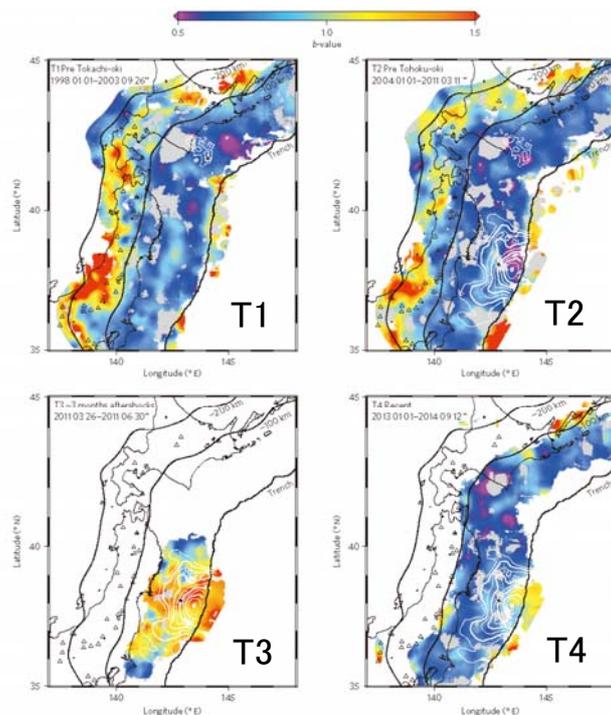


Figure 2 | Temporal evolution of b-values along the subducting plate. Mapview along the three-dimensional slab structure for time periods T1-T4. Grey nodes: nonlinear FMDs (ref. 7), stars: 2003 M8 Tokachi-oki and 2011 M9 Tohoku-oki epicentres, white contours: mainshock slip models, 2m and 4m for Tokachi-oki⁴⁹, 5-50 m for Tohoku-oki²². The maps show the first-order, time-independent tectonic imprint on b-values and the second-order temporal variation imposed by the M9 mainshock. We note that the apparent shift in the depth of the high-b-value band between T1 and T2 might possibly be an artefact caused by network and depth-determination changes at that time.

b 値の空間分布のスナップショット。

T1: 1998/01/01-2003/09/26

T2: 2004/01/01-2011/03/11

T3: 2011/03/26-2011/06/30

T4: 2013/01/01-2014/09/12

3.2. 東北沖地震前に発生ポテンシャル上昇 (Tormann et al., 2016)

Tormann et al. [2015]では G-R 則の b 値だけに注目していたが, a 値にも注目して地震発生ポテンシャルを推定した. $M8$ 以上の地震については, 本震前(P2)に本震付近でポテンシャルが上昇⇒本震直後(P3)にポテンシャル低下⇒その後(P4)は急激に回復し, 本震前の定常時(P1)よりも高い状態にある.

使用データは気象庁カタログ (1998/01/01-2015/12/31) で, それを 4 つの期間に分ける.

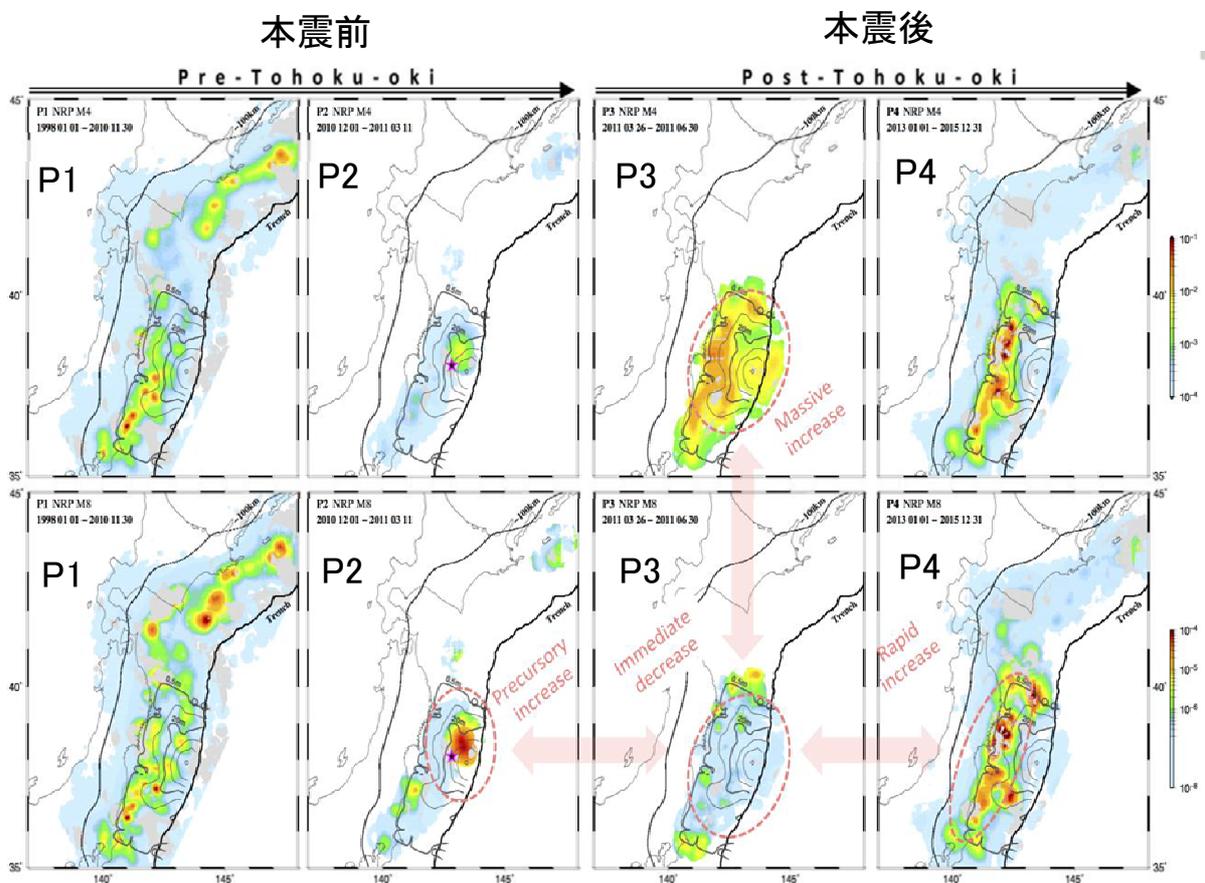
P1: 1998/01/01-2010/11/30 (12 年)

P2: 2010/12/01-2011/03/11 (~3 か月)

P3: 2011/03/26-2011/06/30 (~3 か月)

P4: 2013/01/01-2015/12/31 (3 年)

規模 : P1, P2, P4 は $M \geq 2.0$, P3 は $M \geq 3.7$. M_c はその都度推定.



上段: $M4$ の発生ポテンシャル. 下段: $M8$ の発生ポテンシャル. 本震前(P2)に本震付近でポテンシャルが上昇⇒本震直後(P3)にポテンシャル低下⇒その後(P4)は急激に回復し, 本震前の定常時(P1)よりも高い状態にある.

4. 前震

東北沖地震前にみられたものではないが、プレート間地震前に地震数の加速的増加傾向／空間的に本震に近いほど前震活動は活発傾向／時間的に本震に近いほど前震は本震の近くで発生する傾向が指摘されている。

4.1. プレート境界型地震前にみられる地震数の加速的増加 (Bouchon et al, 2013)

東北沖地震前にみられたものではないが、各地震の時系列・震央分布を本震を中心として重ね合わせて特徴抽出した結果、プレート間地震前に地震数の加速的増加（最大前震は本震の1日前、特に数時間前）がみられた。これは本震前にゆっくりすべりが生じていることを示唆。一方、プレート内地震ではみられず、破壊に至るメカニズムがプレート間地震とは異なることを示唆。

解析対象領域は日本及びアメリカ西海岸周辺。データ期間は 1999/01/01-2011/01/01（東北沖地震は含まれていない）。M6.5 以上の本震 62 個（プレート間地震 31 個、プレート内地震 31 個）を対象。

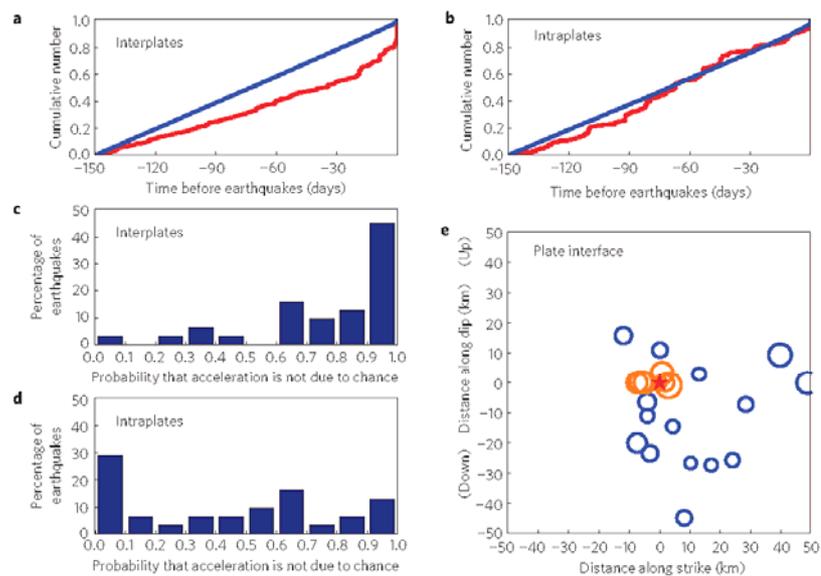


Figure 4 | Comparison of the characteristics of the different types of pre-earthquake sequence. a, b, Normalized stacked evolution of seismicity (in red) before the interplate and intraplate earthquakes. Every sequence carries the same weight. The blue curve shows the corresponding epidemic-type aftershock sequence simulation. **c, d,** Probability that the acceleration of seismicity observed before large earthquakes is not due to chance. **e,** Location of the last event before the 22 interplate earthquakes with last-day event (Fig. 2) relative to the mainshock hypocentre. The map shows the projection of the catalogue location on the plate interface and is centred on the earthquake hypocentre (red star). Subduction is in blue; transform in orange. Symbol size varies linearly with magnitude, which ranges from 1.5 to 5.5.

a, b: 規格化した地震活動の重ね合わせ (赤線)。プレート間地震前に地震数の加速的増加がみられる。 **c, d:** 本震前の地震数の加速的増加が偶然ではない確率。 **e:** プレート間地震の直前地震の相対位置。横ずれ断層型(橙)は逆断層型(青)に比べて本震付近で発生。

4.2. 前震の時空間的特徴 (Lippiello et al, 2012)

前震活動の時空間的変化の特徴から本震を予測しようと試みた研究. 過去 19 年間に南カリフォルニアで発生した地震 (M2.0 以上) を用いた. 前震活動の時空間的特徴を 2 つの指標 (本震からの距離に対する地震数, 本震からの平均距離の逆数) を用いて抽出したところ, 空間的に本震に近いほど前震活動は活発であり, 時間的に本震に近いほど前震は本震の近くで発生することを見出した. この特徴を考慮した予測モデル (ETAS モデルを補正したもの) を作成し, 回顧的にデータセットに適用した結果, M6 以上の本震 6 個のうち 5 個を予測し得る結果が得られた. ただし, これら本震以外の期間にも発生予測確率が高い時期はあるため, 適中率を含めた包括的な予測の有効性についてはさらなる検証が必要である.

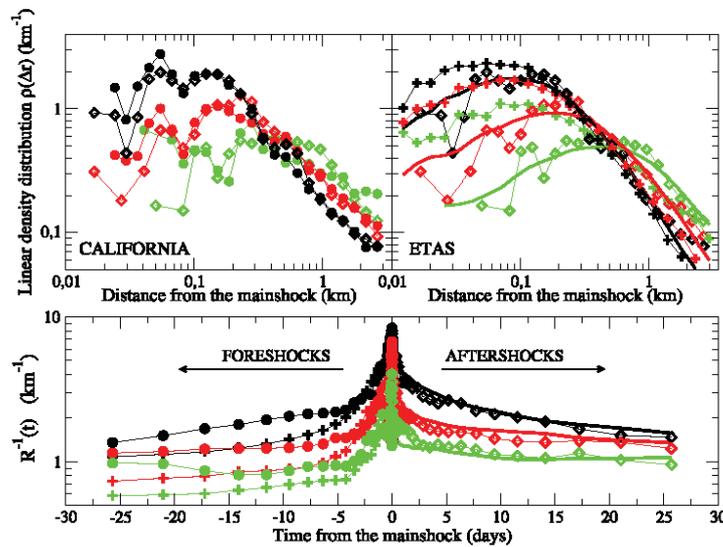


Figure 1: Aftershocks and foreshocks spatio-temporal organization in Southern California.

Left upper panel. The linear density probability $\rho(\Delta r)$ for foreshocks (filled circles) and aftershocks (empty diamonds) are obtained considering all events occurring within 12 hours from the mainshock. Different colors correspond to mainshocks in different magnitude classes, $m \in [M, M + 1)$, and $M = 2, 3, 4$ for black, red and green symbols respectively. We restrict the distribution to $\Delta r \leq 3$ km in order to reduce the contribution from background seismicity. Right upper panel The linear density probability $\rho(\Delta r)$ averaged over 50 independent realizations of synthetic catalogs generated by the ETAS model. Details on the numerical procedure are given in the Methods. Data for aftershocks and foreshocks in numerical catalogs are indicated as continuous lines and pluses, respectively. Open diamonds refer to the aftershock $\rho(\Delta r)$ in the experimental catalog. Black, red and green colors correspond to $M = 2, 3, 4$ respectively. Lower Panel. The inverse average distance R^{-1} is plotted as function of time from the mainshock. Here $\rho(\Delta r, t)$ is the linear density probability in the interval $[-1.2t, -t]$ ($[t, 1.2t]$) before (after) mainshocks for foreshocks (filled circles) and aftershocks (empty diamonds), respectively. We average $1/\Delta r$, instead of Δr , in order to reduce the influence of background seismicity and, for the same reason, we fix $R_{\max} = 3$ km. The same symbols as in upper panels are used.

左上の図(本震からの距離に対する地震数)から, 空間的に本震に近いほど前震(および余震)活動が活発であることがわかる.

その下の図(本震からの平均距離の逆数)から, 時間的に本震に近いほど前震(および余震)は本震の近くで発生することがわかる.

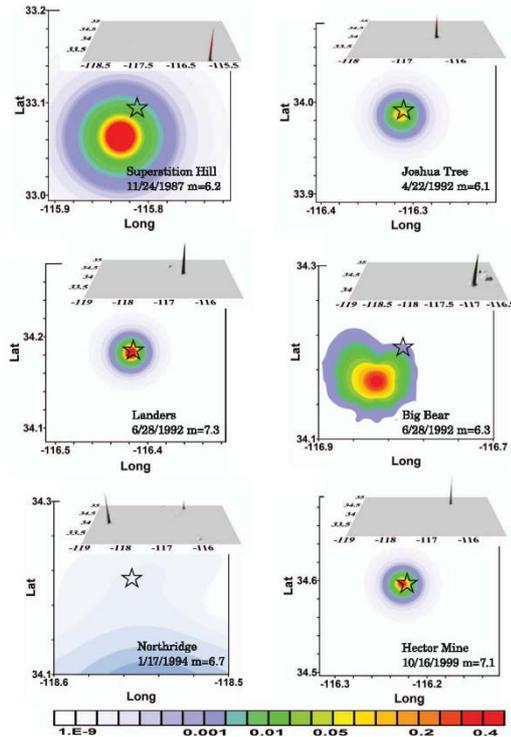
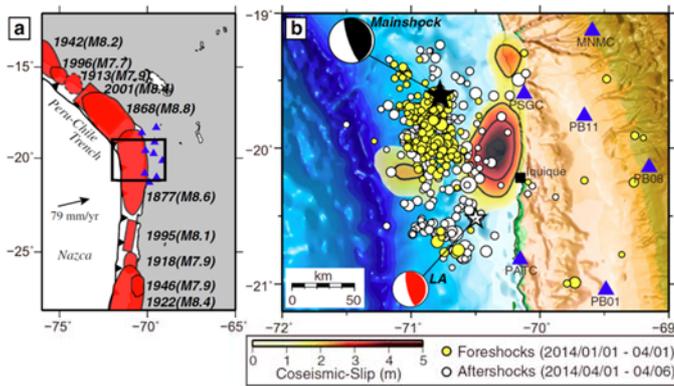


Figure 2 | Daily occurrence probability just before $m > 6$ earthquakes. The probability P_m^0 to have a $m > 6$ earthquake within 1 day in a cell of size 0.04° , is evaluated for the 6 largest events in Southern California just after the occurrence of the last event before mainshock. For each mainshock, we plot P_m^0 over the entire Southern California region (upper panels), and a zoom over a box centered in the future mainshock epicenter (front panels). Black stars indicate the mainshock epicenter location and the values of P_m^0 can be obtained from the color code bar.

M6 以上の地震直前における地震発生確率. 星印は各本震の震央. 左下の Northridge 地震以外は, 予測確率の高いエリアと本震の対応関係がよい.

4.3. (参考) 震源の移動 (Kato and Nakagawa, 2014; Brodsky and Lay, 2014)

2014年4月2日にチリ北部沿岸で発生したM8.2の地震(イケケ地震)に先立って、同年1月上旬以降、本震の震源断層域周辺で小繰り返し地震を含むいくつかのまとまった地震活動が発生しており、3月中旬以降に発生した活動域がゆっくりと移動し、最終的には3月22日から25日にかけて本震の震源に向かって移動していたことが確認された。これらの地震活動域のゆっくりとした移動や小繰り返し地震の発生は、本震の震源断層域周辺でゆっくりすべりが進行していたことを示唆している[Kato and Nakagawa, 2014]。



a: ペルー・チリ沖で発生した $M_w \geq 7.7$ の地震の震源断層域(赤く塗った領域)と解析に用いた地震計の分布(青色の三角)。

b: 本震前後の震央分布(黄色の丸が本震前、白色の丸が本震後)、本震の震央(黒色の星)とメカニズム、最大前震の震央(白色の星)とメカニズム、本震のすべり分布。

Figure 1. Seismotectonic setting of northernmost Chile. (a) Distribution of large subduction zone earthquakes ($M_w \geq 7.7$) along the Peru-Chile Trench. The red shaded zones denote the approximate extent of rupture zones [Chlieh *et al.*, 2004]. The blue triangles represent seismic stations operated by the GEOFON Program of GFZ Potsdam, whose continuous waveforms were analyzed in the present study using the matched filter technique and the extraction of repeating earthquakes. The arrow indicates the convergence direction of the Nazca plate relative to the South American plate [DeMets *et al.*, 1994]. (b) Distribution of the epicenters of template events before and after the 2014 Iquique, Chile M_w 8.1 earthquake, showing events listed in the USGS catalog (yellow and white circles). The black and white stars denote the epicenter of the main shock and the largest aftershock (LA) with the moment tensor solution by the USGS. The color scale and black contour lines show the coseismic-slip distribution estimated by a teleseismic waveform inversion (Tectonics Observatory, California Institute of Technology; http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/index.html). The contours are ≥ 1.5 m with an interval of 1 m. The locations of seismic stations are indicated by blue triangles. The black rectangle in Figure 1a indicates the area shown in Figure 1b.

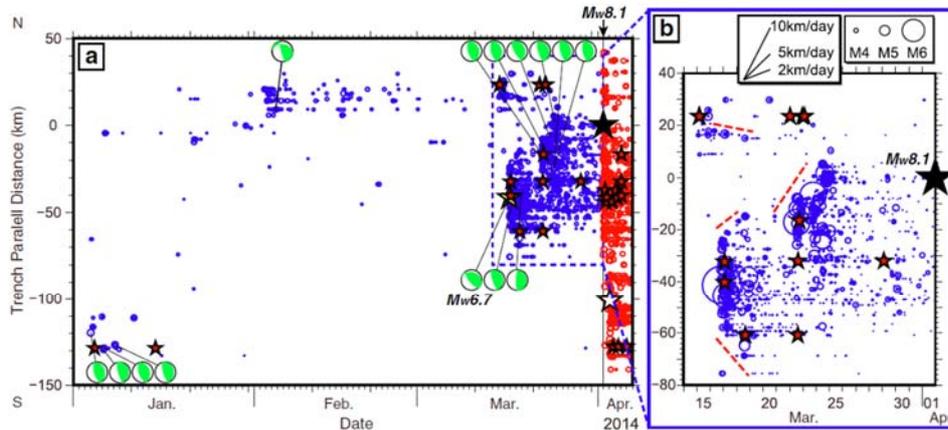
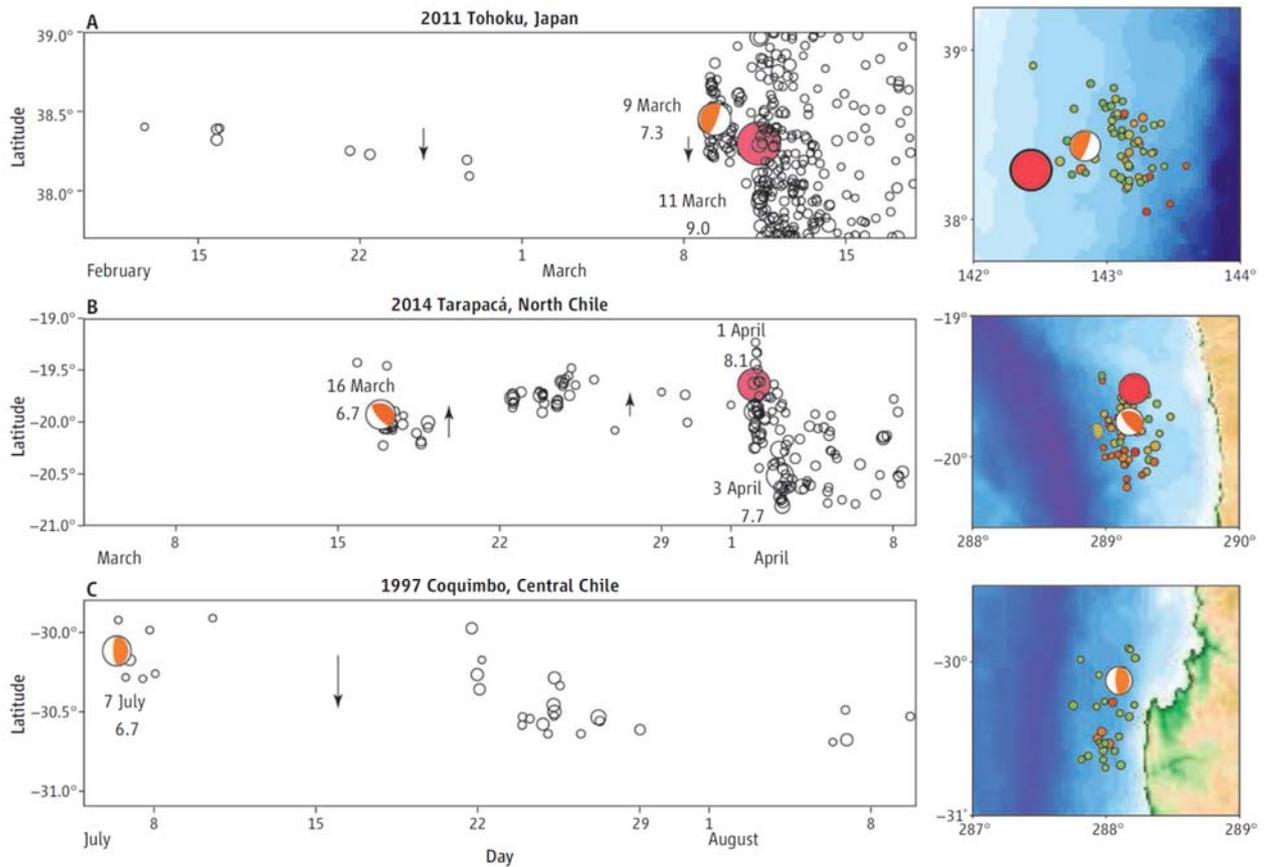


Figure 4. (a) Space-time diagram of all the detected events before and after the 2014 Iquique, Chile M_w 8.1 earthquake. The blue and red circles denote the foreshocks and aftershocks, respectively. The red stars indicate the repeating earthquakes. The diagram shows the earthquake origin times and locations projected onto the strike of the fault plane. The black, yellow, and white stars denote the hypocenters of the M_w 8.1 main shock, the largest M_w 6.7 foreshock, and the largest aftershock M_w 7.7, respectively. Focal mechanisms (from the USGS) are plotted as green beach balls. While all available focal mechanisms are used from January to February, only focal mechanisms with $M_w > 5.0$ are selected from 1 March until the main shock origin. (b) Enlargement of Figure 4a showing the intensive foreshocks between 14 March and 1 April 2014 (blue circles scaled to magnitude). The red dashed lines represent the approximate locations of the fronts of earthquake migrations.

a, b: 本震前後の震央の時空間分布(青色の丸が本震前、赤色の丸が本震後、赤色の星が小繰り返し地震、黒色の星が本震)。赤色の破線が地震活動域の移動速度を示す。3月22日から25日にかけて地震活動域が本震の震源に向かって移動している。

プレート境界に沿う地震活動の震源の移動(期間は数週間、移動速度は一日あたり数 km)は、大規模な地震の発生前以外の期間にも観測されている。Brodsky and Lay (2014)は、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2014 年イキケ地震の本震前に観測された地震活動の他、1997 年チリ中部沿岸の地震 (Mw6.7) 後に観測された地震活動における震源の移動を例として、震源の移動に引き続く大規模地震発生の有無がプレート間の固着状態や応力の蓄積状況と関係している可能性を指摘するとともに、このような地震活動の観測に基づく大規模地震の予測可能性をさらに検討するためには、陸域及び海域の双方における地震活動及び地殻変動観測データの蓄積が必要であると指摘している [Brodsky and Lay, 2014]。



2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の前 (A)、2014 年イキケ地震 (Mw8.1) の前 (B) 及び 1997 年チリ中部沿岸の地震の後 (C) に観測された地震活動。(C) の地震活動は、規模や発生数、震源の位置関係が (B) の本震前の地震活動に似ているが、その後さらに大規模な地震は発生しなかった。

Precursors or not? Plate boundary thrust sequences for the 2011 M_w 9.0 earthquake in Tohoku, Japan (A), the 1 April 2014 M_w 8.1 earthquake in north Chile (B), and the 1997 central Chile sequence (C). Red dots indicate great earthquake epicenters. The fault geometries of large foreshocks are indicated by orange focal mechanisms (the 1997 sequence was not followed by a great event). Arrows indicate migration direction. In the maps on the right of each panel, color denotes depth of foreshocks (red, 5 to 15 km; brown, 15 to 25 km; green, 25 to 35 km).

5. 小繰り返し地震・背景地震

プレート境界面のゆっくりすべりに対応する変化を小繰り返し地震や背景地震から把握する手法が提案されている。

5.1. 約3年前からゆっくりすべり発現 (Uchida & Matsuzawa, 2013)

小繰り返し地震の解析から、東北沖地震前後のプレート間のすべり状況を推定。データは1984年1月-2011年12月、本震前 M2.5 以上、本震後 M4.0 以上の大学観測点を使用。本震の約3年前から、一部の地域（図中 8, 11, 13, 15）ですべり速度が増加し、地震サイクルの最後の段階における固着域の地震直前のゆるみを示唆。これは GNSS [Ozawa et al., 2012] や海底圧力計 [Ito et al., 2012] で捉えられたスロースリップと同じものをみている。

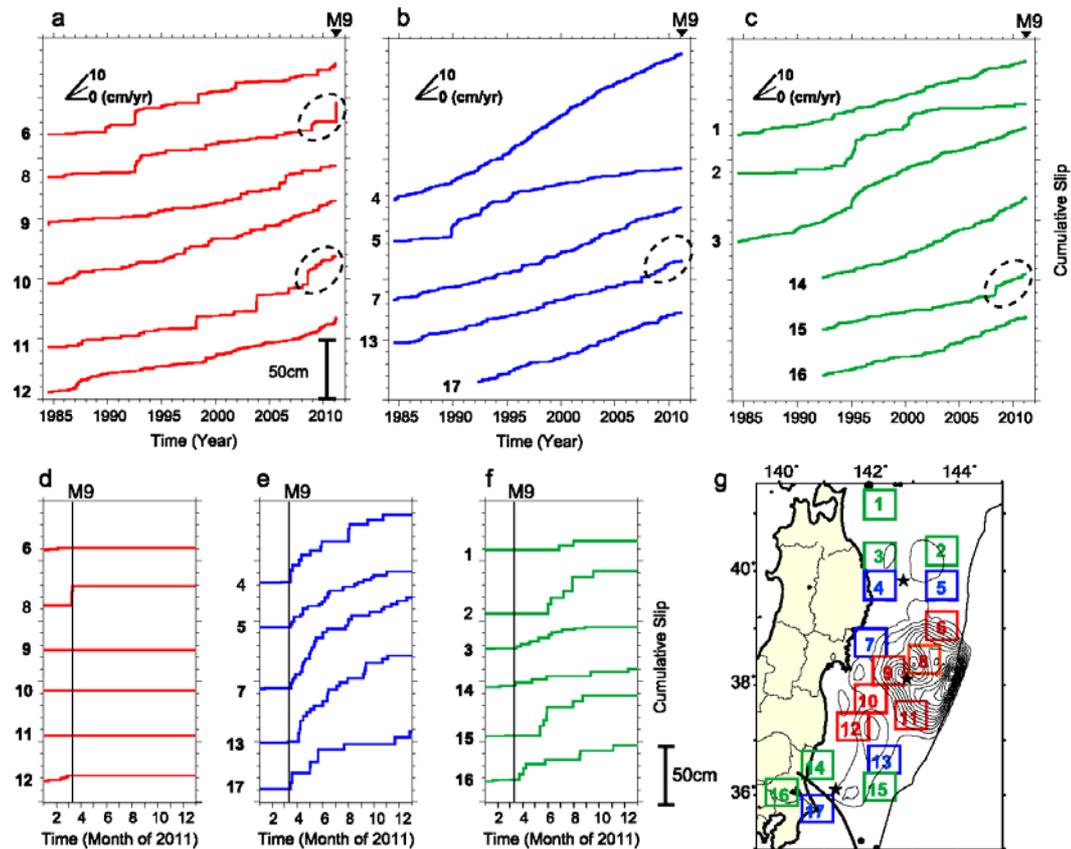
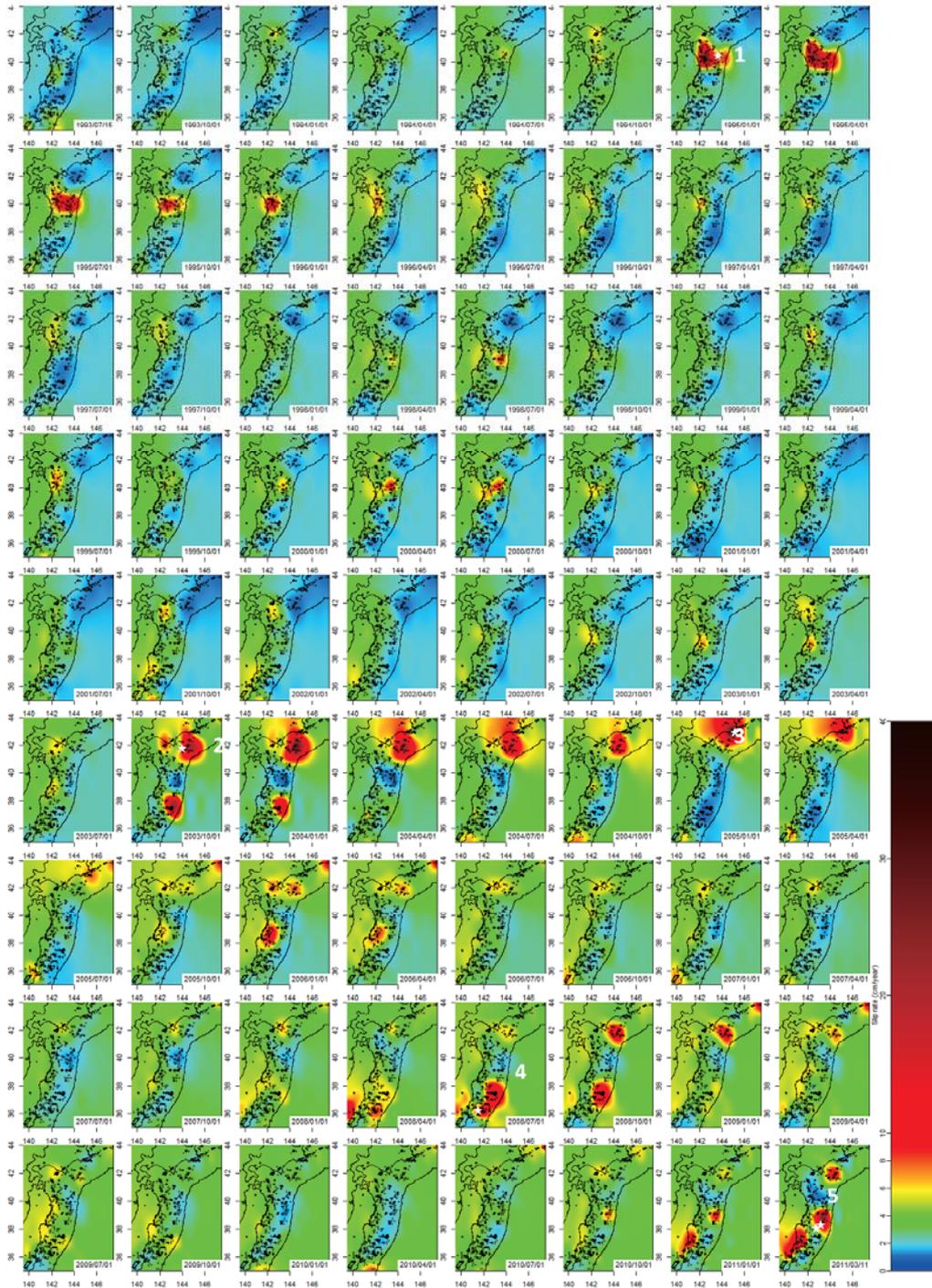


Fig. 7. Time history of aseismic slip at each portion of the plate boundary. (a-c) Averaged cumulative slip time series estimated from repeating earthquake groups in regions 1-17 shown in (g) before the Tohoku-oki earthquake. The cumulative slip curves are grouped into three (a-c) panels based on their postseismic slip pattern (d-f). The curves are categorised into the regions showing (d) no postseismic slip, (e) almost immediate and large slip after the Tohoku-oki earthquake and (f) small or delayed slip after the earthquake. (g) Map showing the locations of regions for calculating the averaged cumulative slip. The circles and contours are the same as in Fig. 1.

繰り返し地震から推定された累積すべり量。余効すべりのパターン(d-f)によって3グループに分けた。点線で囲んだ部分で本震の約3年前からすべり速度の増加がみられる。

5.2. ゆっくりすべりの時空間発展 (野村・他, 2013)

時空間非定常 BPT モデルを小繰り返し地震 (1993 年 7 月 15 日～2011 年 3 月 11) に適用し、プレート境界面のすべりの時空間発展をみたもの。東北沖地震の震源域周辺では、2010 年後半より震源のやや北を基点として加速しはじめ、活動が徐々に南下して最終的に 3 月 9 日の最大前震 (M7.3) および本震に繋がっている。同時に福島県沖の深部プレート境界や十勝沖震源域浅部で加速している。



第 1 図. 1993 年 7 月から 2011 年東北地方太平洋沖地震までの 3 ヶ月ごとの時空間ストレス蓄積率のスナップショット. カラーテーブルはすべり速度の cm/年の単位.

5.3. 2011 年 1-2 月の遷移現象 (Marsan et al., 2013)

SSE や流体の貫入によって地震活動が増加することがある。本研究は、本震－余震型では説明できないそのような地震活動の変化から、SSE のような遷移現象を抽出しようと試みたものである。使用データは気象庁カタログ (36-41°N, 140.5-146°E, 1990/01/01 - 2011/03/09(最大前震直前), M3.5 以上, 深さ全て)。小規模・短期間 (20 km, 40 日) の遷移現象は沈み込むプレートの上方で発生しやすい。Ito et al. [2012, Tectonophys.] が指摘した 2011 年 1-2 月の遷移現象も捉えられたが、解析期間 21 年間の中で最も顕著というほどではない。2008 年 11 月の海溝近くの SSE [Ito et al., 2012, Tectonophys.] は検知できなかった。一方、大規模・長期間 (80 km, 100 日) の遷移現象の多くは福島県沖～茨城県沖および深部側でみられ、そこでは 5.9 年周期で発生している。これは Uchida et al. [2016, Science] と整合的。

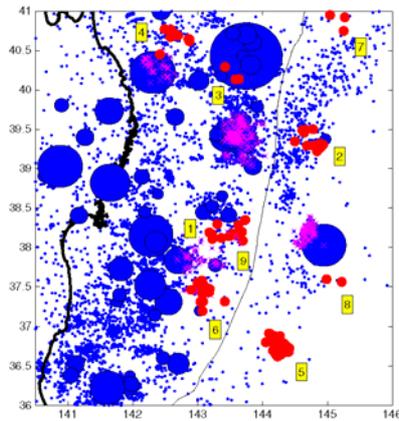


Figure 3. Map of all $m \geq 3.5$ earthquakes, 1 January 1990 to 9 March 2011. The transients are depicted using the same symbols and labels as with Figure 2: the red dots are all earthquakes that occur during the nine most intense transients; the magenta crosses are the earthquakes of the aftershock-related transients. The anomalous aftershock sequence of 2005 is located between transients 2 and 8. Magnitude $m \geq 6$ earthquakes which radii equal $L_0 \times 10^{0.5(m-3.5)}$ are shown with circles. The trench [Hayes et al., 2012] is shown with the thin black line.

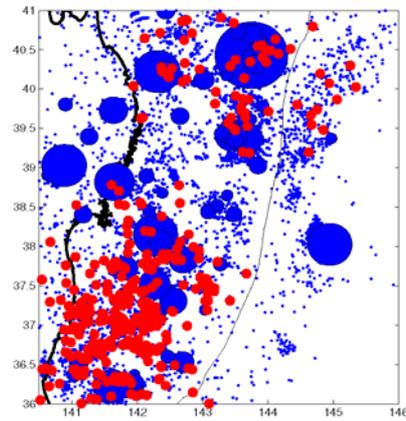


Figure 8. Map of the large-scale transients. The red dots show the earthquakes that are part of the eight most intense transients shown in Figure 7.

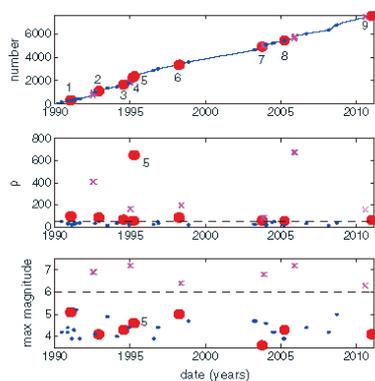


Figure 2. Temporal distribution of the 39 loading transients found with $\ell = 20$ km and $\tau = 40$ days (blue dots). The thick red dots and labels mark the nine most intense transients not related to aftershock sequence ($\rho > 50$), while magenta crosses are for transients related to aftershock sequences ($m_{\max} > 6$). The maximum magnitude m_{\max} is among all earthquakes in the transient.

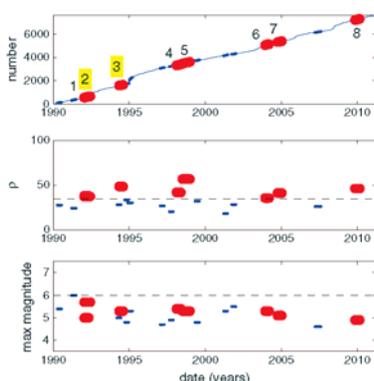


Figure 7. Temporal distribution of the 19 loading transients found with $\ell = 80$ km and $\tau = 100$ days. Legend is the same as in Figure 3. We here used a threshold $\rho > 35$ to display the most intense transients (in red). The eight most intense transients are labeled from 1 to 8 in the upper left graph, with the two occurring in the north having yellow labels.

左図: 小規模・短期間の遷移現象の抽出。右図: 大規模・長期間の遷移現象の抽出。

●は抽出された遷移現象期間に発生したイベント。

×は遷移現象として判定されたが、余震に関連したイベント。

●はそれ以外のイベントで、M6.0 以上は規模に応じて大きさを変えている。

5.4. 周期的なゆっくりすべり (Uchida et al., 2016)

小繰り返し地震の解析から、北海道～関東沖で周期的にスロースリップが発生していることを発見。このスロースリップに同期して大きめの地震($M \geq 5.0$)が発生している。東北沖地震時もスロースリッププレートが大きなタイミングであった。1984-2011 のデータから推定された周期関数を過去(1930-1983)に延長した場合も大きめの地震($M \geq 5.0$)との時間的な対応は良い。福島県沖～茨城県沖については、Marsan et al. [2013, JGR]の結果と整合的。

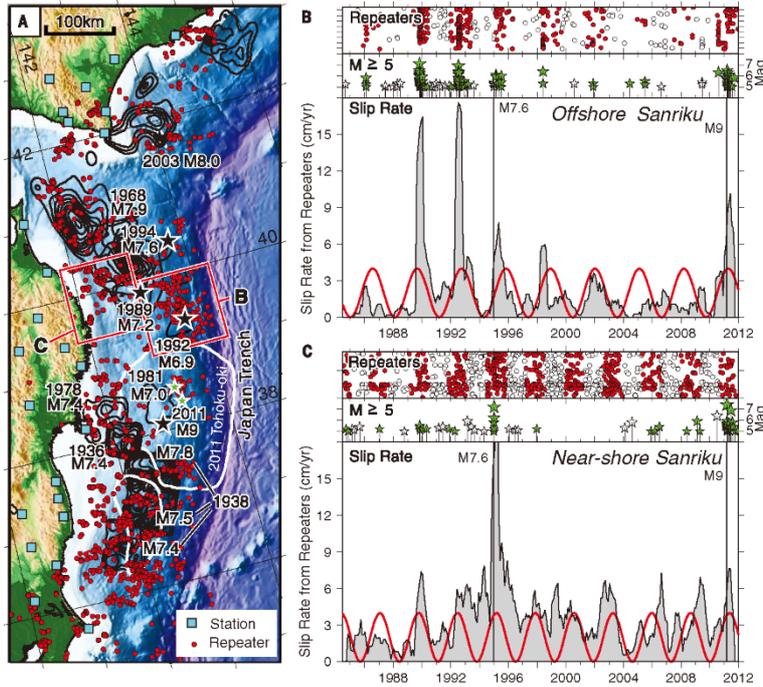


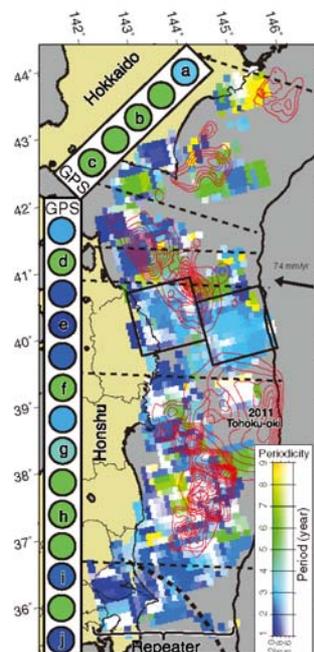
Fig. 2. Spatiotemporal distribution of repeaters and temporal variation of slow slip. (A) Distribution of repeater sequences (red circles) and slip areas of large earthquakes (black and white contours) (I–13, 29, 30). Cyan squares show seismic stations. Green stars show a $M 6.1$ earthquake in 2008 (north) and a $M 7.3$ earthquake in 2011 (south) that were preceded by slow slip (38). (B and C) Temporal distribution of repeaters near Sanriku aligned by latitude (top) (see fig. S1 for vertical enlargement), magnitude time plot of $M \geq 5$ earthquakes (middle), and temporal change of slip rate inferred from repeaters (bottom) for

offshore (B) and near-shore (C) areas off Sanriku shown in (A) (see fig. S3 for corresponding data for all other areas). Vertical lines show the times of the 1994 $M 7.6$ Sanriku-oki and the 2011 $M 9.0$ Tohoku-oki earthquakes. The number of $M \geq 5$ events in offshore and near-shore areas is 194 and 68, respectively. The red curves in (B) and (C) are best-fit sinusoidal functions fit to the slip-rate time series with 3.09- and 2.72-year periods, respectively. Repeaters and $M \geq 5$ events during the positive phase of the best-fitted sinusoid are shown by colored symbols, whereas those during the negative phase are shown by open symbols.

小繰り返し地震データから推定したプレート境界でのすべり速度(スロースリップの速度)。赤線はすべり速度に当てはめた周期関数。緑星は周期関数の位相が正(すべり速度が速い時期)に発生したもの。

小繰り返し地震から推定されたプレート境界でのスロースリップの周期および周期性の強さの分布。丸はGPSデータから推定された沈み込み方向の地面の短縮速度の周期。

Fig. 4. Spatial distribution of degree of periodicity and dominant period estimated from the repeater data. The color intensity shows the degree of periodicity, and the colors show the dominant period for the periods from 1984 to 2011 (between 36.5° and 41.5° N) and from 1993 to 2011 (north of 41.5° N and south of 36.5° N). The periods indicated for each area represent the dominant peak in the amplitude spectrum of the slip-velocity variations inferred from repeaters for 0.4° (latitude) by 0.6° (longitude) spatial windows. Contours show slip areas for the 2011 Tohoku-oki earthquake ($M 9.0$) and other $M 7$ or larger earthquakes since 1930 (I–13, 30). Colored circles show the dominant period of the on-land GPS gradient in plate motion parallel to the $N105^\circ$ E (Honshu) and $N120^\circ$ E (Hokkaido) directions (see fig. S13 for the spectrum of gradient time series in profile lines a to j that are used to compute the dominant periods).



6. 長期的スロースリップ

本震の10年ほど前から東北中南部沖のプレート間固着は弱まっていた。また、宮城県沖より福島県沖の固着は弱かった。

6.1. 宮城県沖のプレート間カップリングの減少 (Sato et al., 2013)

GPS 音響測地技術により、2011年東北沖地震の前9年間の宮城沖と福島沖の海底地殻変動を5地点で観測した。宮城県沖では、2005年宮城沖地震(M7.2)後の2006年12月以降のプレート間速度は、北米プレートに対し4-5 cm/yearで、2005年イベントの前6-7 cm/yearよりかなり小さい。このことは、2007年頃からの宮城県沖のプレート間カップリングは2005年のイベント以前より弱いことを示している。一方、福島県沖では、2002~2008年の地震間の期間では、約2 cm/yearの一定の西向き地殻変動が観測されている。福島県沖のプレート間カップリングは宮城県沖よりかなり弱い。このことは2011年の地震時に宮城県沖より福島県沖の方のすべりが小さかったことと整合する。

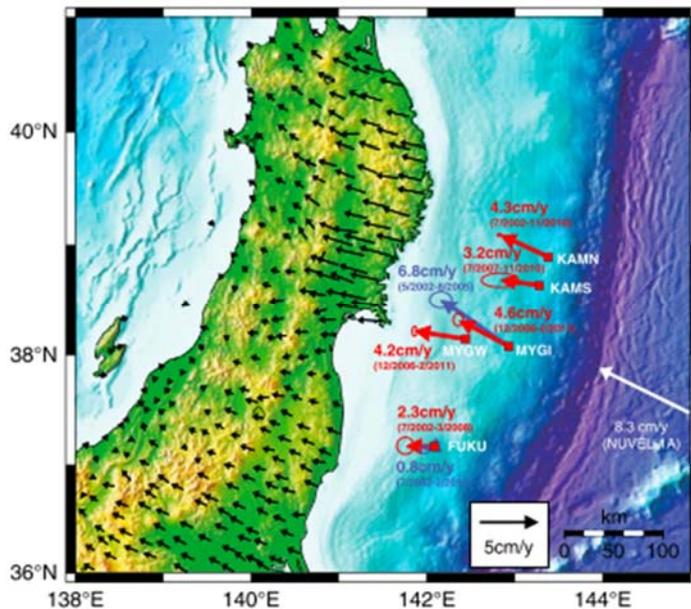


Figure 5. Site velocities at seafloor reference points relative to the North American plate estimated from the time series shown in Figure 4 after correcting for the intraplate velocity at Shimosato [Sengoku, 1998] and the relative velocity between the Eurasian plate and the North American plate calculated from the plate motion model, NUVEL-1A [DeMets et al., 1994]. The blue and red arrows at MYGI show the velocities for the periods from May 2002 to August 2005 and from December 2006 to February 2011, and those at FUKU show the velocities for the periods from July 2002 to February 2011 and from July 2002 to March 2008, respectively. The ellipse attached to the arrow represents the 1 sigma estimation error in the linear fit to the time series. The velocities of terrestrial GPS stations calculated from the daily positions provided by the GSI [Nakagawa et al., 2009] and that of the Pacific plate calculated from the NUVEL-1A model are also shown with black and white arrows, respectively.

宮城沖(MYGI)の変位は 2002.5-2005.8(青), 2006.12-2011.2(赤).
福島沖(FUKU)の変位は 2002.7-2011.2(青), 2002.7-2008.3(赤).

前回報告の海上保安庁(2011, 予知連会報)とほぼ同じ内容。

以下は前回報告した Ozawa *et al.* (2012)による 2003 年頃からの宮城・福島県沖のスロースリップと同じ現象について議論している。

6.2. 東北中南部沖の地殻変動の加速 (Mavrommatis *et al.*, 2014)

東北地震前の 1996～2011 年の GPS データ (GEONET F3 解) から共通ノイズ, Mw6.5 以上の地震による地震時および地震後の効果を除き, 時系列を直線トレンドと一定加速の組み合わせでモデル化した。東北沖に明らかな加速が見られ, 東北北部の逆向きの加速は 1996 年より前の地震の余効変動の減衰によるものかもしれないが, 東北中南部の加速はそれとは関係ないようにみられる。

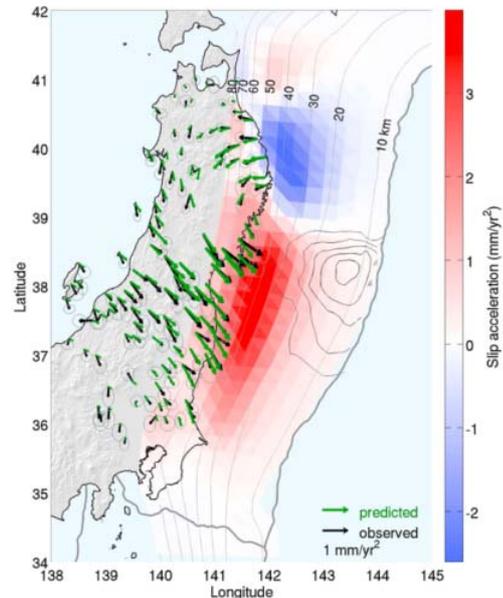


Figure 4. Inversion of interseismic accelerations for slip acceleration on the Japan Trench plate interface. Observed accelerations with 2σ error ellipses are shown in black; model fit in green. Colored patches show the estimated distribution of slip acceleration (dip-slip component) on the plate interface. Black contours indicate the slip distribution of the 2011 M_w 9.0 Tohoku-oki earthquake in 10 m intervals (Hooper *et al.*, 2013).

6.3. 2003 年頃からの遷移イベント (Yokota and Koketsu, 2015)

1996 年 3 月から 2011 年 3 月 8 日までの GEONET 座標値を用い, 日本海溝のすべり欠損速度を推定した。年周, 地震時, 地震後の変化を除き, 2002 年以前のデータから推定したトレンドを除きした。東北中南部の太平洋岸では東向き, 東北北部では西向きの偏差が見られる。これらはプレート境界のすべりによらしてインバージョンすると, 非常に長期間の遷移イベント (M_w 7.7) と北側のバックスリップ (M_w 7.4) により説明できる。

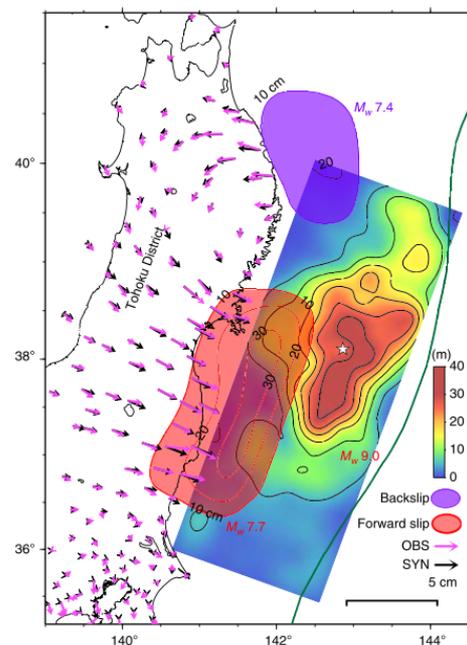


Figure 2 | Distribution of total deviations and the result of a two-source inversion. The red and purple contours represent the distributions of the forward slip by the very long-term transient event and the backslip by the northern source, which were obtained through the two-source inversion of the total deviations (pink arrows). The black arrows denote synthetic deviations computed for the inversion result. The co-seismic slip distribution of the 2011 Tohoku earthquake⁸ is also displayed with the epicentre (white star) and Japan Trench (dark green line). The black bar at the bottom right denotes 100 km.

6.4. (参考) 余効変動におけるマンツルの粘弾性変形の影響 (Sun et al., 2014; Sun and Wang, 2015)

東北地方太平洋沖地震の発生直後の数年間にその震源断層域上で観測された海底地殻変動は、プレート境界の余効すべりだけでは説明できず、マンツルの粘弾性変形を考慮する必要がある。粘弾性変形を考慮しない場合、プレート境界の余効すべり量を領域により過大・過小評価してしまう [Sun et al., 2014]。

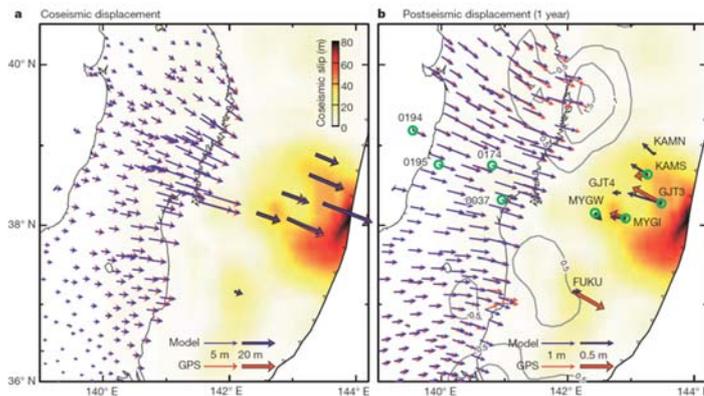


Figure 1 | Coseismic and postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake. **a.** Coseismic displacements of land (for example, ref. 10) and seafloor¹⁶ GPS sites and model predicted displacements based on the fault slip model shown (see Methods). **b.** One-year postseismic displacements of land¹⁵ and seafloor (refs 16 and 17 and Methods) GPS sites and model predicted values based on the viscoelastic model of this work. Seafloor GPS vectors were obtained through fitting campaign data with logarithmic functions as in Extended Data Fig. 6. Site GJT4 failed shortly after the earthquake. Black contours (m) are the afterslip distribution used in our modelling (see Methods). Observed and model time series at sites marked with a green circle in the main corridor of interest are shown in Fig. 3.

東北地方太平洋沖地震の本震に伴う地殻変動(a)及びその後1年間の余効変動(b)。赤い矢印が観測データ、青い矢印がモデルによる推定値。余効変動の空間分布は、海域及び陸域のいずれにおいてもマンツルの粘弾性を考慮したモデルによりよく説明される。

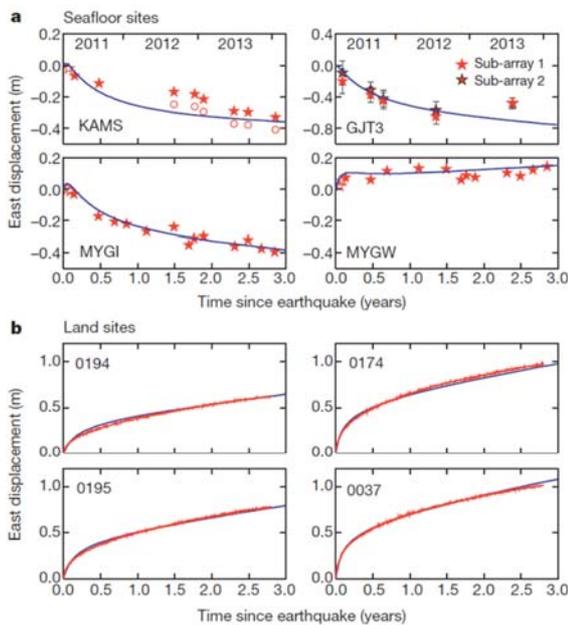


Figure 3 | Observed (red) and model-predicted (blue) time series of the east component of postseismic displacements. The locations of the GPS sites are shown in Fig. 1b. **a.** Seafloor sites. For TU site GJT3, error bars (standard error) are based on error analysis, and sub-arrays are formed by different combinations of seafloor transponders, both as explained in Methods. For the JCG sites^{16,17}, error estimates were not provided but are estimated to be smaller than those of GJT3 (see Methods) except for the first one or two less reliable measurements at each site (open stars). Circles for KAMS represent position data after a manual correction for an assumed delayed local afterslip during 2012. The one-year vector for this site shown in Fig. 1b is based on the corrected data. **b.** Randomly selected land sites in the main corridor of interest. Other sites in this corridor have similar results.

東北地方太平洋沖地震の本震に伴う海域(a)及び陸域(b)の地殻変動の時間変化。赤い線やプロットが観測データ、青線がモデルにより推定される地殻変動。余効変動の時間変化も、海域及び陸域のいずれにおいてもマンツルの粘弾性を考慮したモデルによりよく説明される。

Sun and Wang (2015)は、マンツルの粘弾性変形を考慮したモデルにいくつかの異なる地形や粘性係数を適用して有限要素法による計算を行い、粘弾性変形が地震発生後の余効変動に与える影響を検討した。その結果、Mw8.0 を超える大規模な地震の発生直後には粘弾性変形の影響により陸域と海溝軸付近で逆向きの地殻変動が生じるとともに震源断層域の陸側端周辺で沈降が生じることを指摘した。粘弾性変形の影響の大きさは沈み込むスラブの厚さや粘性係数等の条件に依存するが、Mw7.5 以上の地震の余効変動においては粘弾性変形の効果が無視できない可能性がある。

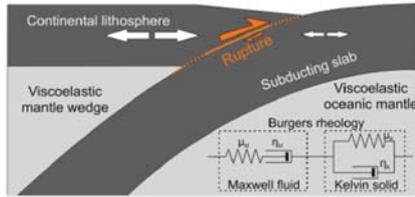


Figure 2. Model structure and rheology of the 2-D reference model REF (Table 1). Assigned coseismic fault slip is uniform (U_s) in the solid segment of the shown rupture zone and linearly tapers to zero over the dashed segments. Orange arrows illustrate the asymmetric coseismic motion of the two fault walls (see Figure 1 and section 2). Larger and smaller diverging white arrows represent different degrees of tension induced by the thrust rupture. The Burgers rheology applies to both the mantle wedge and the oceanic mantle. Symbols μ and η denote rigidity and viscosity, respectively, and subscripts M and K indicates Maxwell and Kelvin components, respectively.

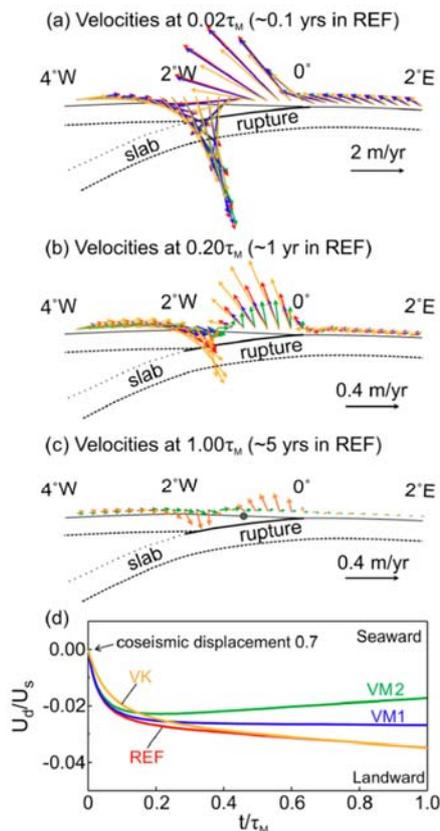


Figure 4. Results of four models with different viscosities but identical fault slip: REF, VK, VM1, and VM2 (Table 1). (a-c) Surface velocities at different times after the earthquake. Here τ_M is that of the REF model (~5 years). (d) Time-dependent postseismic east displacement U_d , normalized by fault slip U_s , of a surface site above the rupture zone (location shown as the solid circle in Figure 4c). Results for different models are color coded as their names in Figure 4d.

(左図)マンツルの粘弾性変形を考慮した 2 次元モデル。プレートの弾性変形と、マンツルの粘弾性変形により、地震発生後の余効変動を表現する。

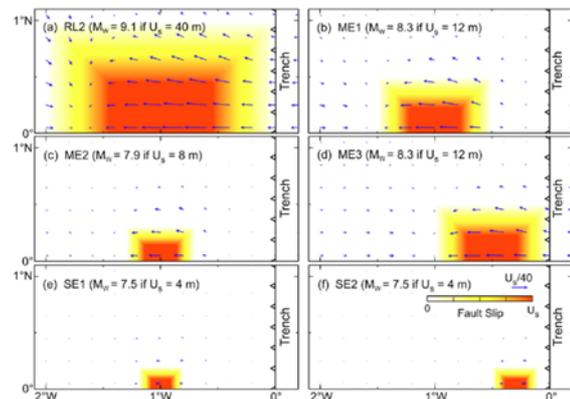


Figure 8. One year ($-0.2\tau_M$) postseismic displacements due to viscoelastic relaxation in six models with different rupture sizes and/or depths (Table 1). Slab depth at 1°W is about 22.5 km. The models are symmetric with respect to the equator, so only the northern half is shown. Magnitudes of earthquakes are based on a rigidity of 48 GPa. The depths of the center of the rupture are (a-c and e) ~22.5 km, (d) ~15.5 km, and (f) ~13 km.

(上図)地震の規模による粘弾性変形の地殻変動への影響の違い。規模が大きいほど影響は大きく、Mw7.5 の場合は変動量が地震時のプレート境界のすべり量の 1%未満と無視できる程度の影響となる。

(左図)

(a)~(c):異なる粘性係数に対応する地震発生から 0.1年、1年、5年後の地殻変動。いずれの場合も地震発生直後には、陸域と海溝軸付近では逆向き、震源断層域の陸側端周辺では沈降が生じる。

(d):震源断層域の中心直上の地表の東西方向の変動(東が正)。いずれの場合も地震発生直後には西向きに変動するが、その後の変動方向はマンツルの粘性係数によって変わらう。

7. 短期的スロースリップ

本震の3年前と1か月前のスロースリップ発生時に低周波微動が発生していた。本震の3か月前と1か月前に地下水の異常が見られた。しかし、海底水圧計では本震前1日間に前震の余効変動以外の変化は見られなかった。

7.1. 本震前1日間に海底水圧計に有意な地殻変動なし (Hino et al., 2013)

2011年東北沖地震の震央近くで得られた海底圧力記録を、十分な前兆的地殻変動が先行したかどうかについて検討した。東北地震の震央付近では2010年から8地点の海底圧力計の連続記録が得られている。データから非テクトニックな変動を低減した後、震央地域の海底上下変動の時系列をノイズレベル2~4cmで得られた。前震の地震時変化を除き、余効変動は対数関数をフィッティングして除去した。本震前およそ1日間に、前兆すべりに関連する有意な地殻変動は見られなかった。(最も東のTJT1では本震約4時間前から約3cmの変化が見られるが、ほぼノイズレベルと同じ。)東北沖地震の前には、震源付近でモーメントマグニチュード6.2以上、海溝付近の沈み込み境界で6.0以上の前兆すべりはなかった。

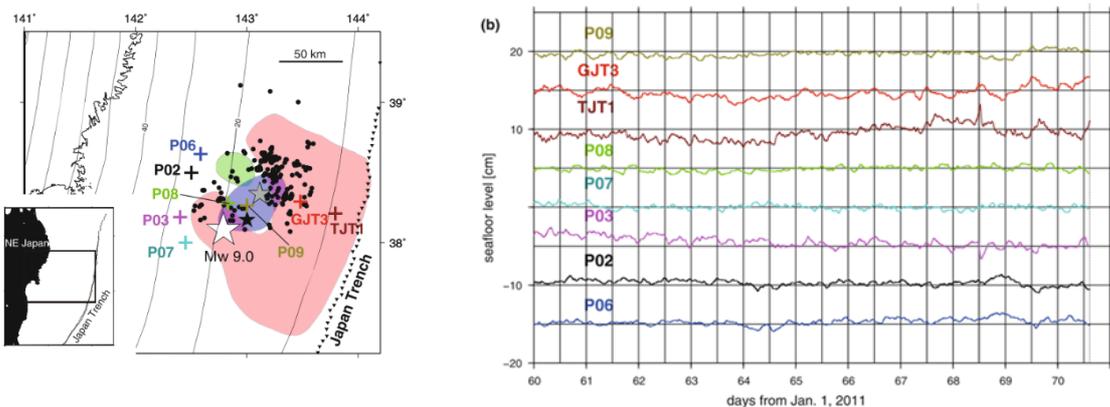


Fig. 4 Time series of SFL variation for the 11 days before the mainshock after applying CMNR. a SFL after CMNR. Dashed lines show temporal variation due to post-foreshock (Mw 7.3) deformation, obtained by log- t fitting to the observations. b SFL time series after subtracting the log- t postseismic deformation

2011年3月1日から11日の海底上下変位。M7.3の前震(横軸68.5の位置)による地震時変化と余効変動(対数近似)を除去したもの。

前回報告の Ito et al. (2013, Tectonophysics) は海底圧力計を解析し、2008年11月下旬と2011年1月下旬~3月上旬に変化が見られ、本震から海溝よりの部分でスロースリップが発生したと推定した。今回の Hino et al. (2013)では、東北地震前の1日間(図では11日間表示)には前兆すべりはなかったという内容。

7.2. 2008年と2011年のスロースリップの時期に低周波微動発生 (Ito et al., 2015)

日本海溝近くの海底地震計は、2008年と2011年のスロースリップイベントに伴う周囲のノイズレベルの振幅のいくらかの増加を記録した。観測された信号は5-8Hzの低周波に富み、その増加はスロースリップイベントに伴う小さな低周波微動によることを示唆している。スロースリップイベントの発生場所は、海溝近くにあるTJT2の下かより海側にある。

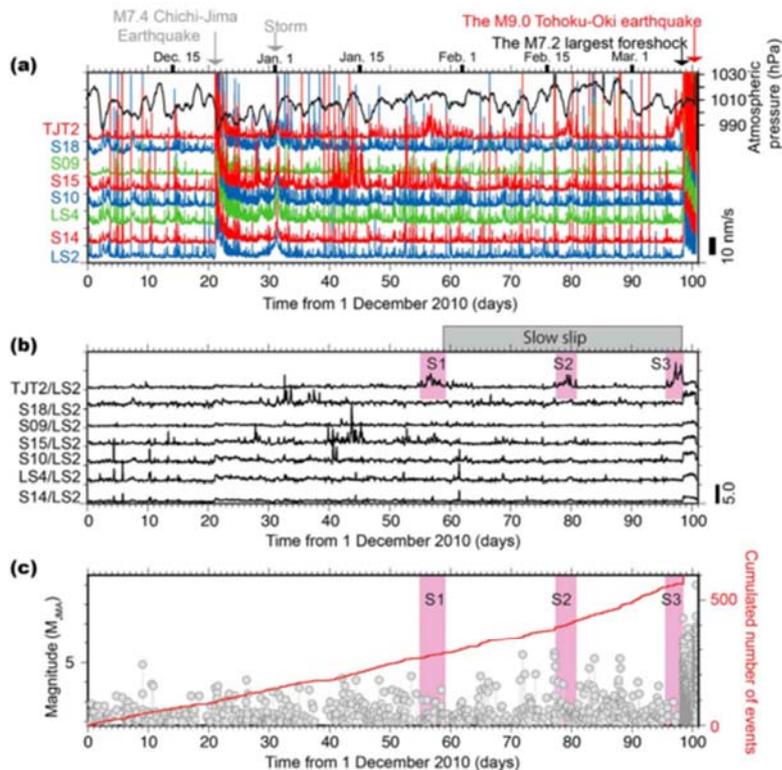
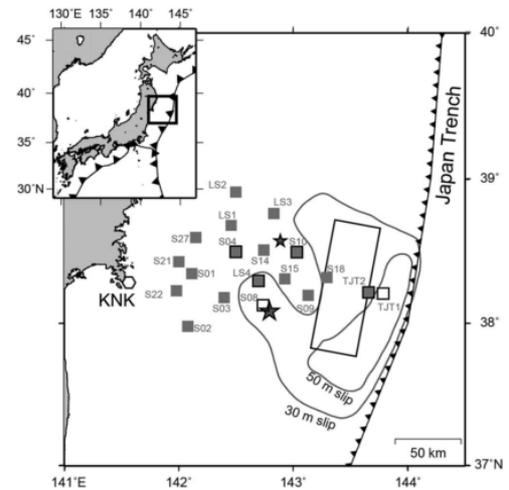


Figure 4. (a) Root median square (RMS) envelope (red, blue, and green) seismograms and atmospheric pressure observed at KNK from 1 December 2010 to 11 March 2011. RMS envelopes for the filtered outputs, determined using a band-pass filter with cutoff frequencies of 2 and 10 Hz, are plotted. (b) Envelope ratios referred to station LS2. Purple-shaded windows indicate triangular-shaped excitations observed at Station TJT2. S1, S2, and S3 correspond to Sequences 1, 2, and 3, respectively, in the text. (c) Magnitude-time plot and cumulated number of seismicity with magnitude >2 within the area shown in Figure 1 from 1 December 2010 to 11 March 2011.

(a)はRMSエンベロップ、(b)はLS2に対するエンベロップ比。S1~S3は海溝近くのTJT2で微動が活発化した時期。
S15とS18のスパイク状の信号の原因は不明。

8. 電離層関係の現象

本震の 40 分前に電離層擾乱発生。先行時間は規模や発生タイプに依存。

8.1. 地震の前兆的電離層擾乱の M_w 依存性 (Heki and Enomoto, 2015)

これまでに GNSS によって得られる視線方向に積分した全電子量(Slant Total Electron Content: STEC)を解析し、東北地方太平洋沖地震の発生前 40 分に電離層擾乱を見出していた。しかし衛星の視線方向では仰角の変化で STEC の値が U 字型に大きく変化し、その補正に任意性が出てしまう。これに対する批判に応えるため、今回、衛星高度の影響を受けにくい鉛直方向の全電子量(VTEC)を用いた。さらに AIC を用いて、その変化の検出を客観的に行うことが出来るようにした。その結果、 M_w 8.2-9.2 の地震について、 M_w に依存して 25-80 分の先行時間を得ることができた。さらに、同規模で比較した場合、プレート内地震はプレート境界地震よりも先行時間が長いことが分かった。

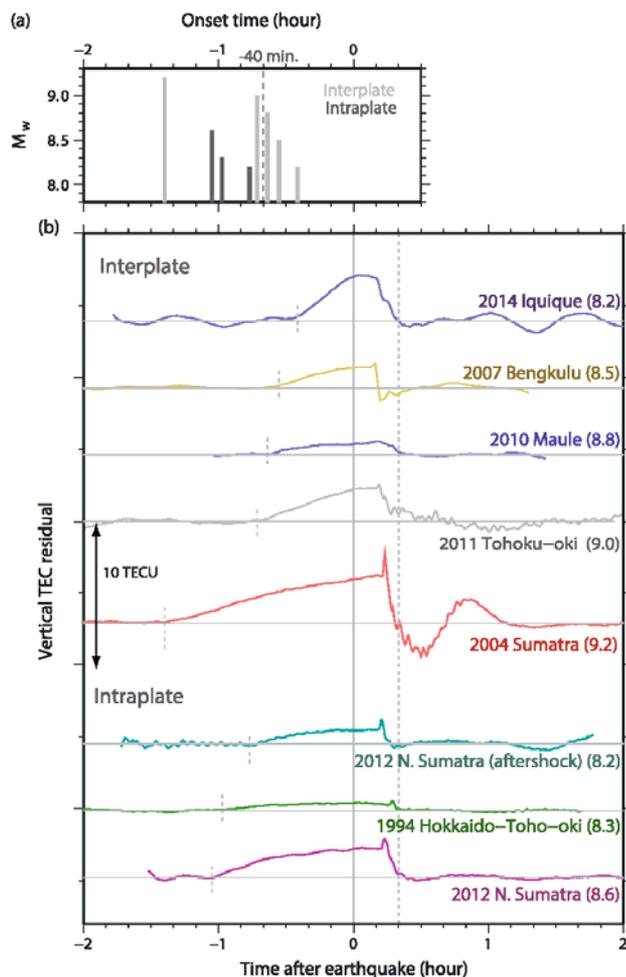


Figure 5. (a) Comparison of the onset times of the precursory TEC enhancement for earthquakes with various M_w . Precursors tend to start earlier before larger earthquakes and intraplate earthquakes (dark gray). (b) The residual plot of VTEC for the eight earthquakes are compared. M_w is indicated within the parentheses. Short vertical dashed lines indicate the times of positive breaks. For the site name and satellite numbers, see Figure 1.

- (a) 先行時間と規模の関係。同規模で比較した場合、プレート内地震の方がプレート境界型地震よりも早く異常が現れる。
- (b) VTEC の残差。図中央の縦線は地震発生時刻、短い破線は自動検出された時刻を示す。

9. 地下水

本震の3か月前から地下水変化がみられた。

9.1. 本震の3か月前から地下水変化 (Orihara et al., 2014)

2011年M9.0東北地方太平洋沖地震の3か月前に異常な地下水変化が始まった。震源の155 km北西の岩手県五葉温泉の2000 m井戸で地下水位と温度がほぼ同時に減少した。これはおそらく前兆地殻変動によるものだろうと主張。この他、沿岸の正源寺では東北地震の1か月前から井戸水が汲み上がらなくなった。

その後16地点を追加調査し [織原・鴨川, 2016], 気仙沼市の満福寺で井戸水の濁り (ただし、水位低下なし) が本震前 (ただし、時期不明) にあったとの証言を得た。他の15地点には変化なし。

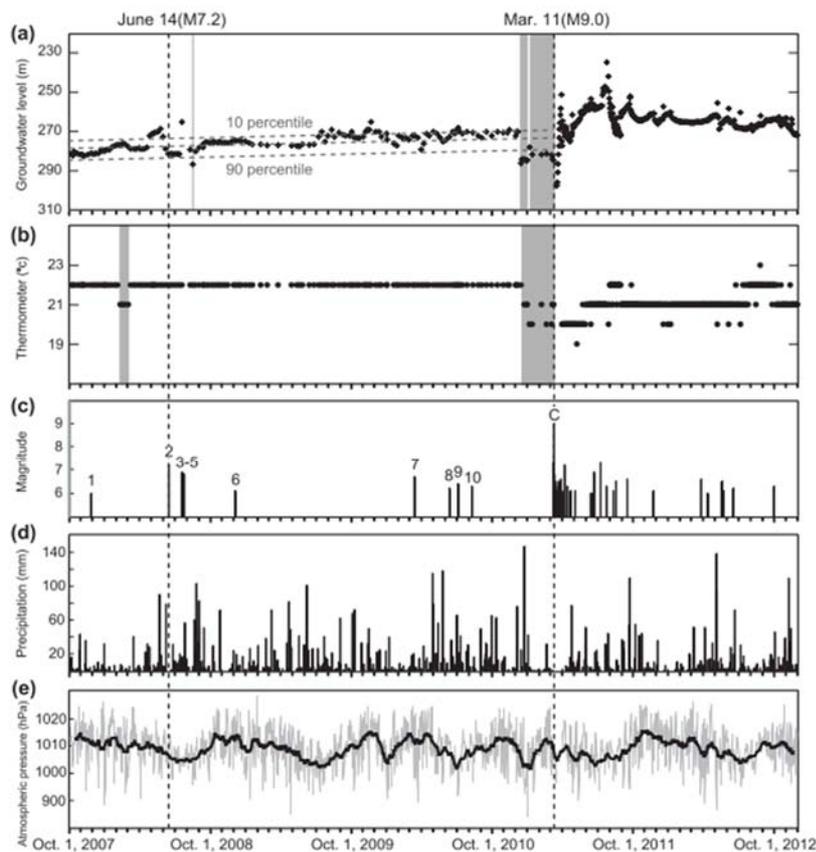
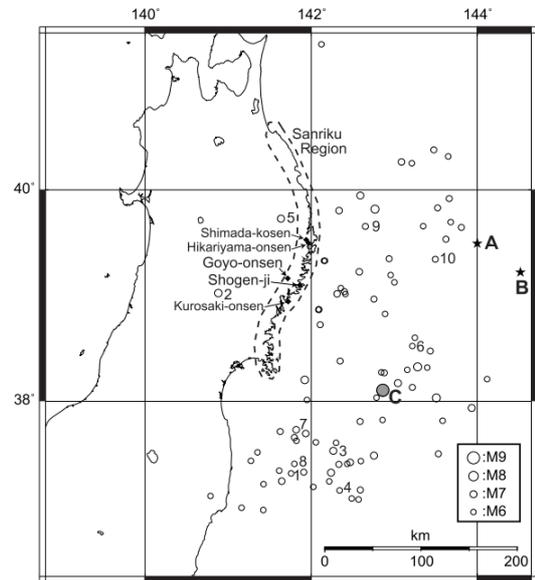


Figure 2 | Time series of (A) groundwater level, (B) groundwater temperature, (C) EQs ($M \geq 6$), (D) precipitation, and (E) atmospheric pressure (Solid line: ± 14 -day running mean and gray line: one day data). Horizontal dashed lines denote thresholds of the interquartile range of the groundwater variation before the main shock. Vertical dashed lines indicate the 2008 M7.2 Iwate-Miyagi Nairiku and Tohoku EQs.

東北地震の約3か月前(灰色部分)から五葉温泉の地下水位が90パーセント以上(10m以上)変化, 水温が1~2度低下. 五葉温泉と正源寺以外の観測点についての記載なし.

10. 引用文献

【地震活動】

- Brodsky, E. E. and T. Lay, 2014, Recognizing foreshocks from the 1 April 2014 Chile earthquake. *Science*, *344*(6185), 700-702, doi: 10.1126/science.1255202
- Bouchon, M., et al., 2013, The long precursory phase of most large interplate earthquakes, *Nature Geosci.*, **6**, 299-302, doi: 10.1038/NGEO1770.
- Bürgmann, R., et al., 2016, Tohoku rupture reloaded?, *Nature Geosci.*, **9**, 183-184, doi: 10.1038/NGEO2649.
- Kato, A. and S. Nakagawa, 2014, Multiple slow - slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.1 earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, *41*(15), 5420-5427, doi: 10.1002/2014GL061138.
- Kawamura, M., et al., 2013, Precursory migration of anomalous seismic activity revealed by the pattern informatics method: A case study of the 2011 Tohoku Earthquake, Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **103**, 1171-1180, doi: 10.1785/0120120094.
- Lippiello, E., W. Marzocchi, L. de Arcangelis, and C. Godano, 2012, Spatial organization of foreshocks as a tool to forecast large earthquakes, *Scientific Rep.*, **2**, 846, doi: 10.1038/srep00846.
- Marsan, D., et al., 2013, Slow slip and aseismic deformation episodes associated with the subducting Pacific plate offshore Japan, revealed by changes in seismicity, *J. Geophys. Res.*, **118**, 4900-4909, doi: 10.1002/jgrb.50323.
- 野村俊一・他, 2013, 時空間非定常 BPT モデルによる北日本太平洋沖沈み込み帯の小繰り返し地震 (1993.7.15-2011.3.10) の解析例 (2) -特に主要地震の前と後の変化について-, *予知連会報*, **90**, 54-57.
- Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto and Y. Hu, 2014, Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature*, *514*(7520), 84-87, doi:10.1038/nature13778.
- Sun, T. and K. Wang, 2015,. Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *120*(2), 1329-1344, doi:10.1002/2014JB011707.
- Tormann, T., et al., 2015, Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake, *Nature Geosci.*, **8**, 152-158, doi: 10.1038/NGEO2343.
- Tormann, T., et al., 2016, Normalized rupture potential for small and large earthquakes along the Pacific plate off Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 7468-7477, doi: 10.1002/2016GL069309.
- Uchida, N. and T. Matsuzawa, 2013, Pre- and postseismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **374**, 81-91, doi: 10.1016/j.epsl.2013.05.021.
- Uchida, N., et al., 2016, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in

northeastern Japan, *Science*, **351**, 488-492, doi: 10.1126/science.aad3108.

Wang, W. and P. M. Shearer, 2015, No clear evidence for localized tidal periodicities in earthquakes in the central Japan region, *J. Geophys. Res.*, **120**, 6317-6328, doi: 10.1002/2015JB011937.

【地殻変動】

Ito, Y., R. Hino, S. Suzuki, and Y. Kaneda, 2015, Episodic tremor and slip near the Japan Trench prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 1725-1731, doi:10.1002/2014GL062986.

Hino, R., D. Inazu, Y. Ohta, Y. Ito, S. Suzuki, T. Iinuma, Y. Osada, M. Kido, H. Fujimoto, and Y. Kaneda, 2013, Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter, *Mar. Geophys Res.*, doi:10.1007/s11001-013-9208-2.

Mavrommatis, A. P., P. Segall, and K. M. Johnson, 2014, A decadal-scale deformation transient prior to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 4486-4494, doi:10.1002/2014GL060139.

Sato, M., M. Fujita, Y. Matsumoto, T. Ishikawa, H. Saito, M. Mochizuki, and A. Asada, 2013, Interplate coupling off northeastern Japan before the 2011 Tohoku-oki earthquake, inferred from seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, **118**, 3860-3869, doi:10.1002/jgrb.50275.

Yokota, Y., and K. Koketsu, 2015, A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, *Nature Communications*, **6**, 5934, doi:10.1038/ncomms6934.

【その他】

Heki, K. and Y. Enomoto, 2015, Mw dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements, *J. Geophys. Res.*, **120**, 7006-7020, doi: 10.1002/2015JA021352.

織原義明・鴨川仁, 2016, 三陸地方における東北地方太平洋沖地震前の井戸水以上の調査ー岩手県山田町から宮城県石巻市にかけてー, *地震* **2**, **69**, 31-34, doi: 10.4294/zisin.69.31.

Orihara, Y., M. Kamogawa, and T. Nagao, 2014, Preseismic Changes of the level and temperature of confined groundwater related to the 2011 Tohoku earthquake, *Scientific Rep.*, doi: 10.1038/srep06907.

GPS-A海底地殻変動観測による 南海トラフ地震想定震源域のすべり欠損の推定

石川直史（海上保安庁海洋情報部）

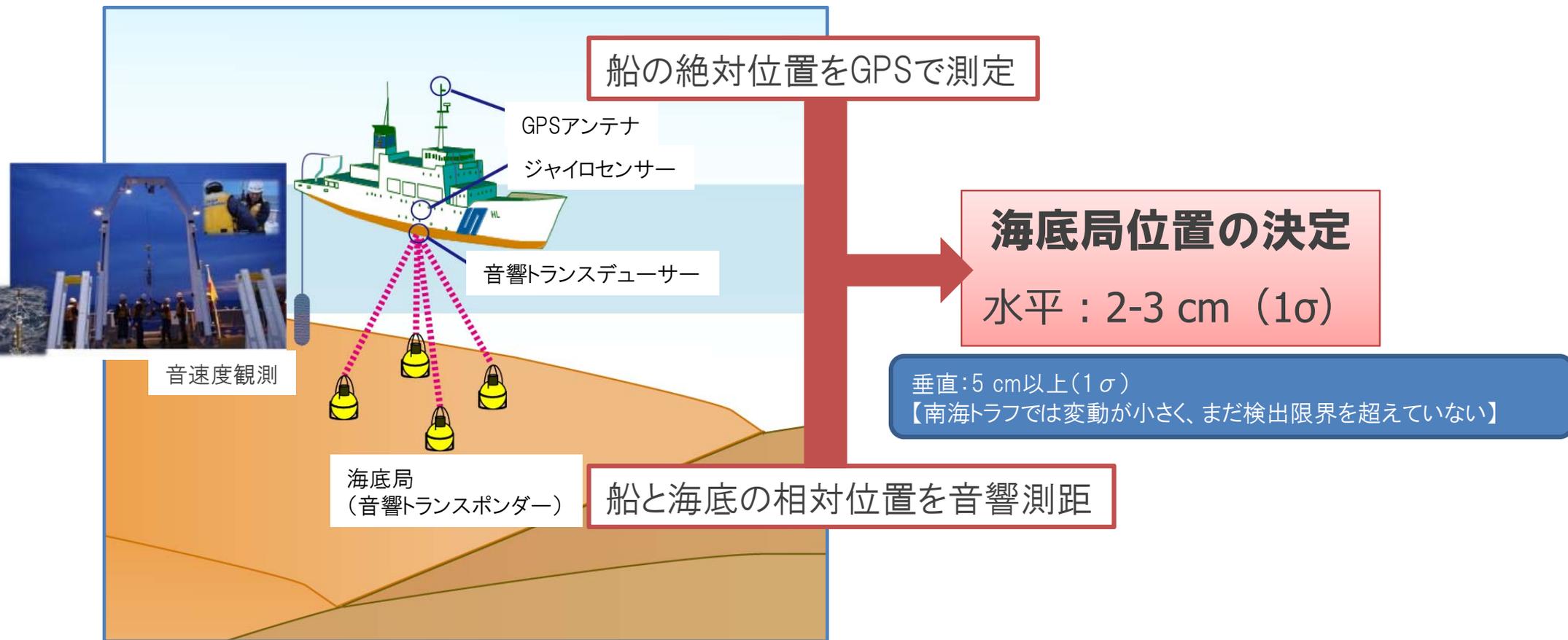
LETTER

doi:10.1038/nature17632

**Seafloor geodetic constraints on interplate coupling
of the Nankai Trough megathrust zone**

Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Toshiharu Tashiro¹ & Akira Asada²

GPS-音響測距結合方式(GPS-A)による海底地殻変動観測



GPS-A観測の現在の状況

観測点数

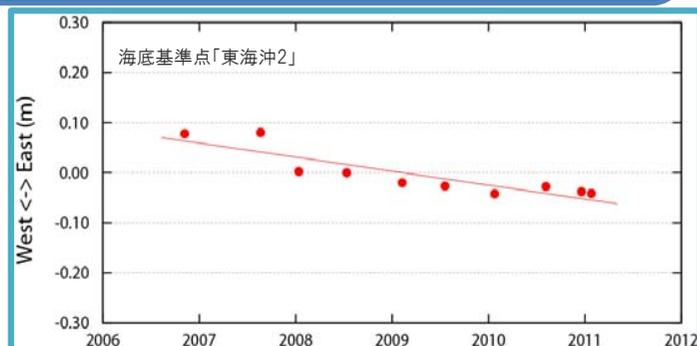
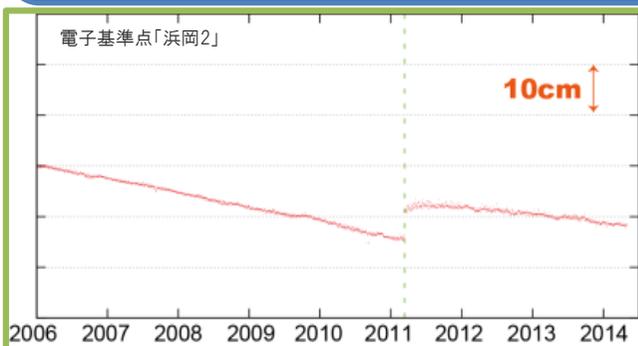
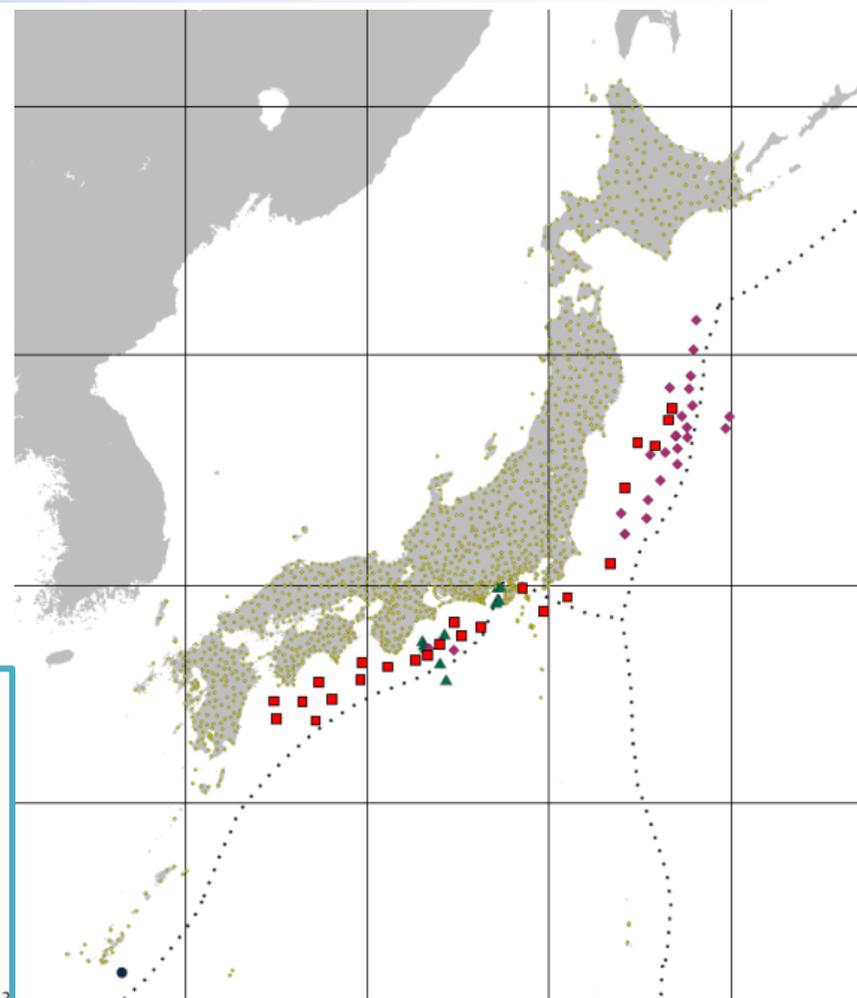
- **約60点** (海上保安庁: 24点) cf. GEONET: 1300点以上

観測精度

- 地殻変動速度 (回帰直線の傾き) : **約1cm/year** (目標値)
- 位置推定 (回帰直線のまわりのばらつき) : **2-3 cm** (1σ)
cf. GEONET: 1cm以下

観測頻度

- **年に2-3回** cf. GEONET: 連続観測

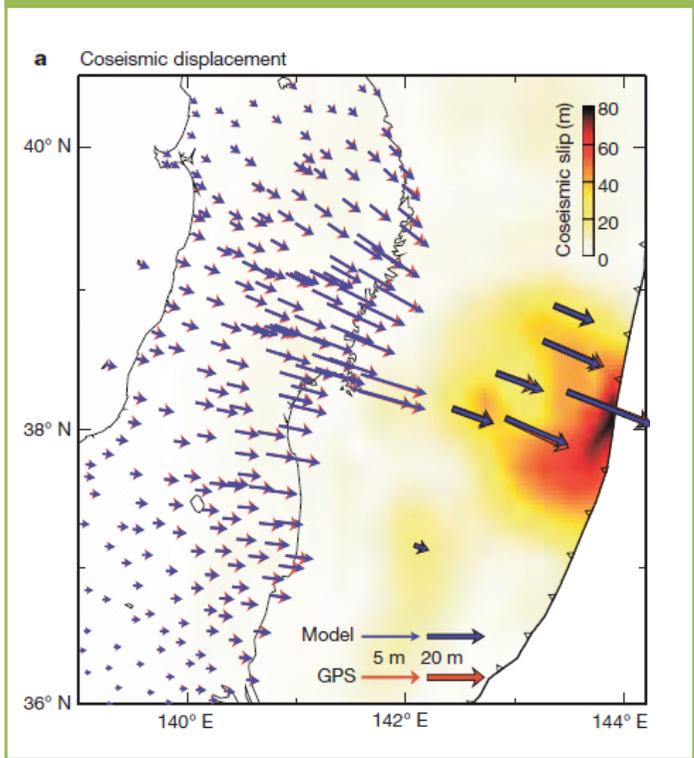


東北地方太平洋沖地震の影響について

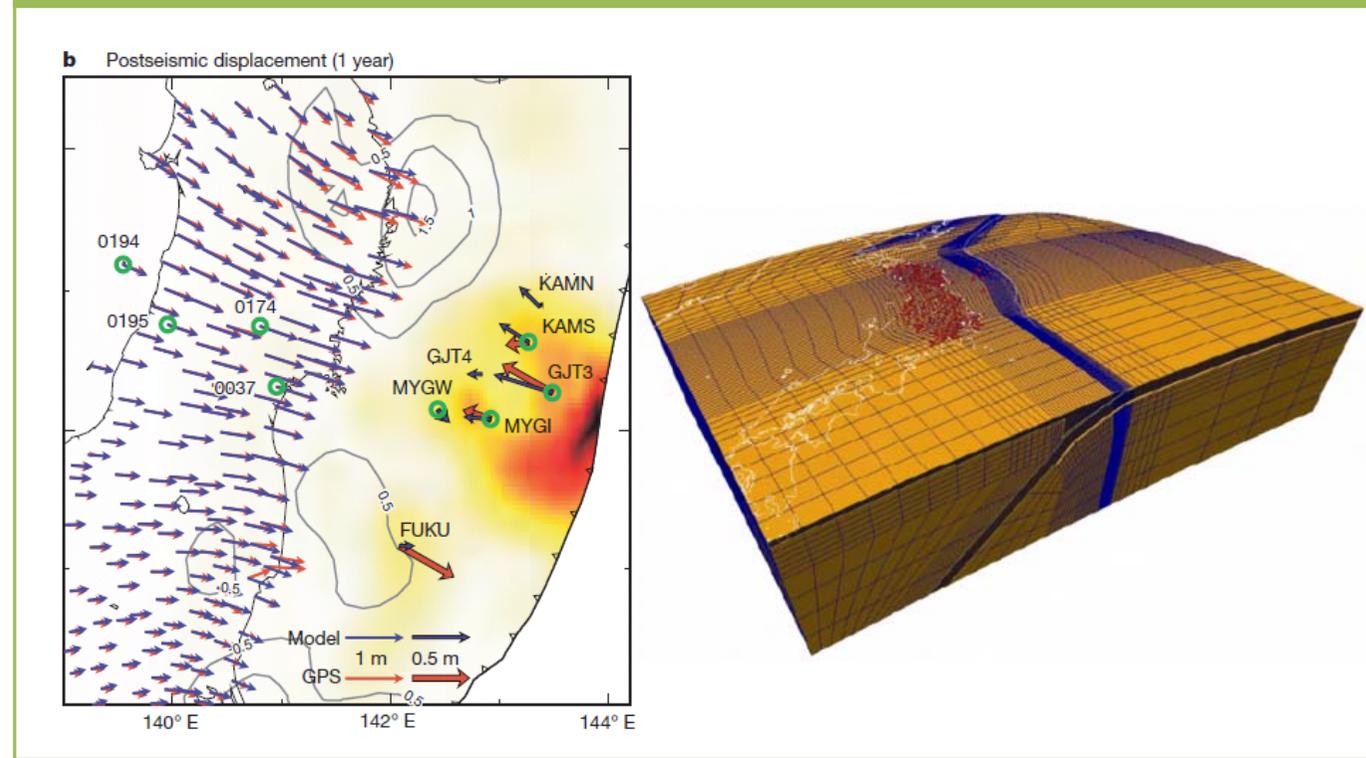
Sun et al. (2014, Nature) Sun and Wang (2015, JGR)
Iinuma et al. (2012, JGR)

南海トラフの海底地殻変動観測点における変動量をモデルから計算し、その分を補正

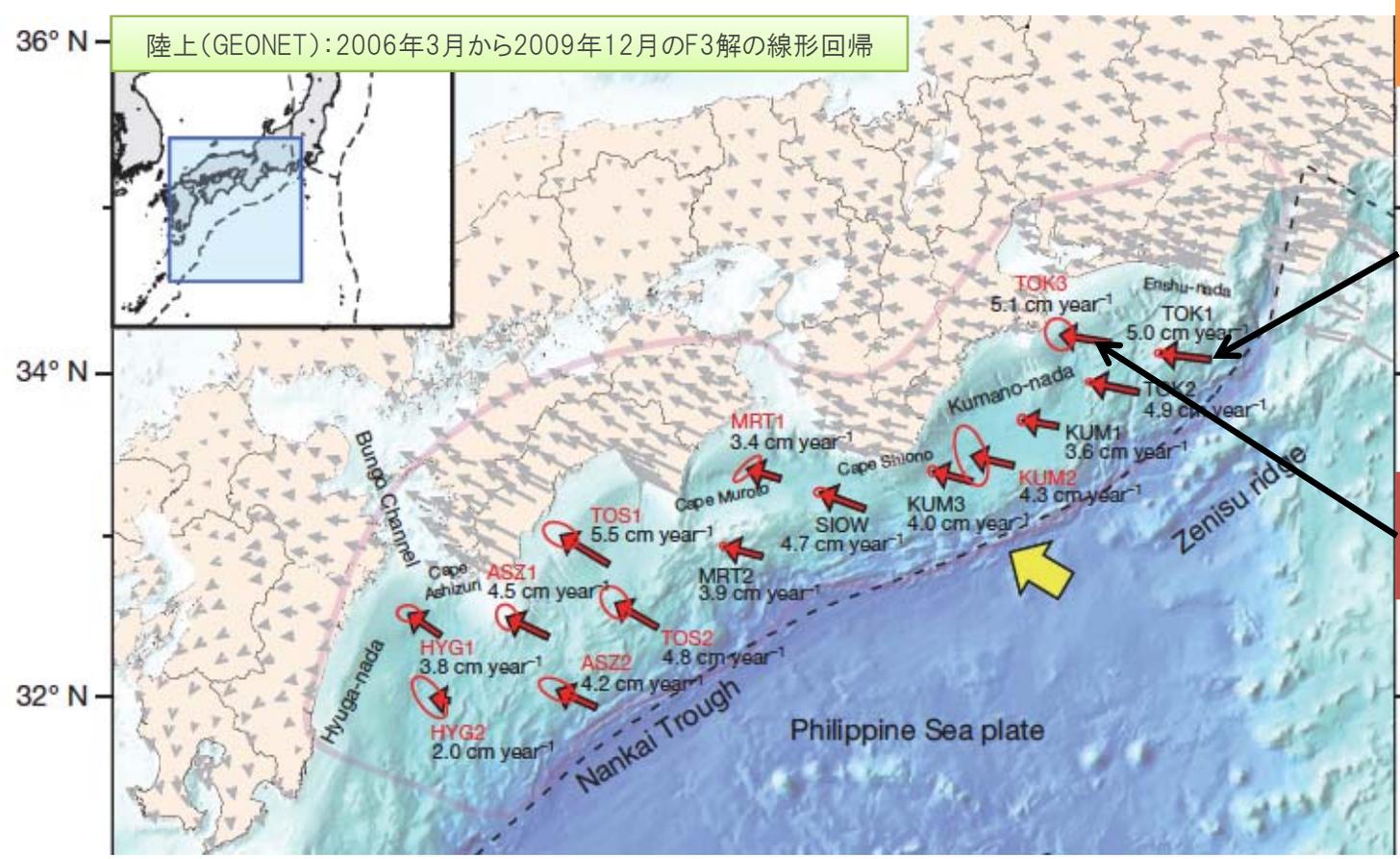
Co-seismic



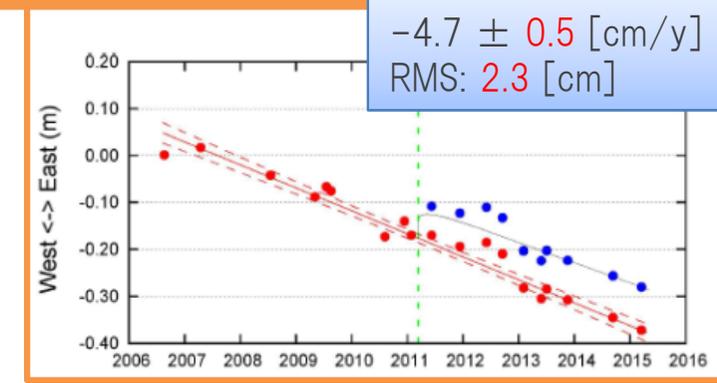
Post-seismic (アフタースリップ + 粘弾性緩和)



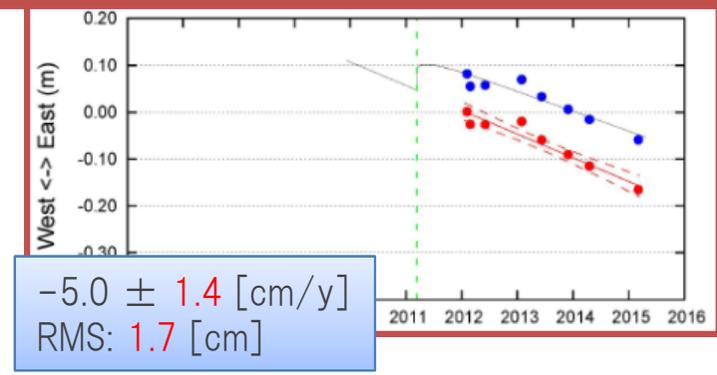
観測結果



東北地震前からの観測点:
2006年から約9年の線形回帰



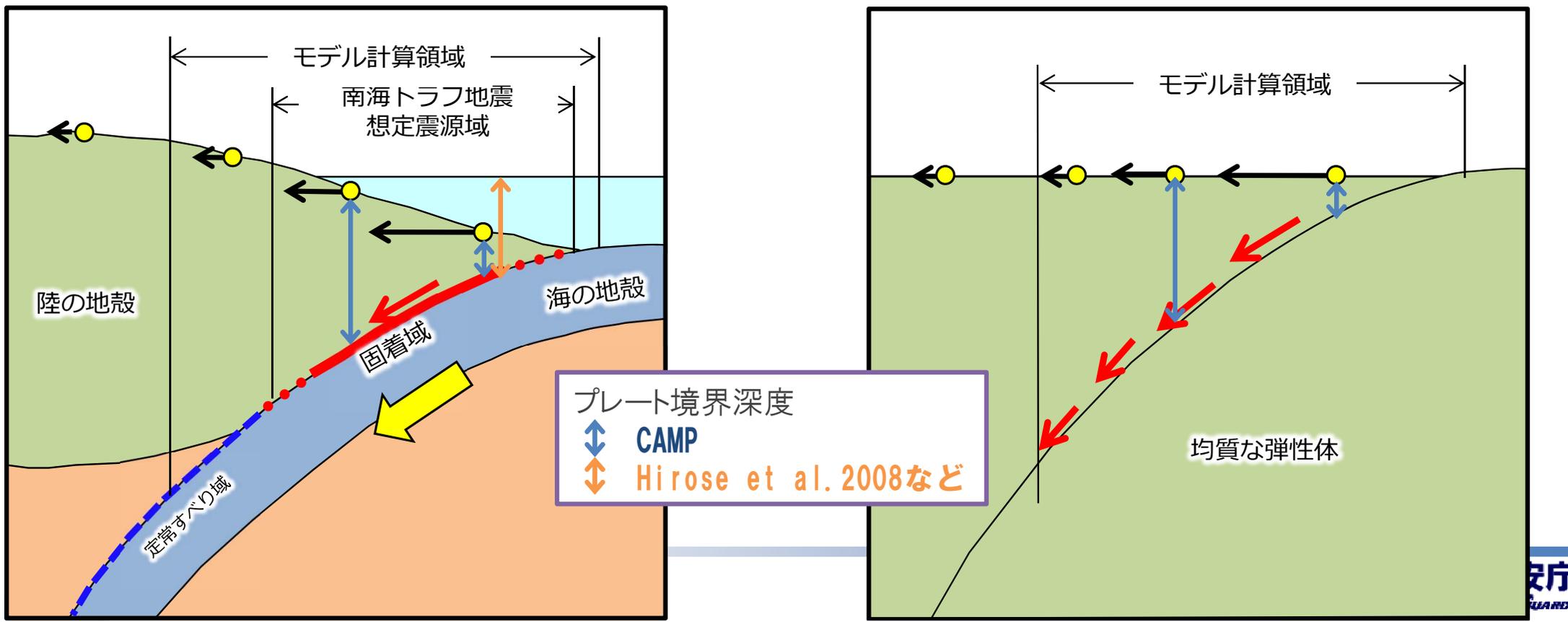
東北地震後の新設点:
2012年から約3年の線形回帰



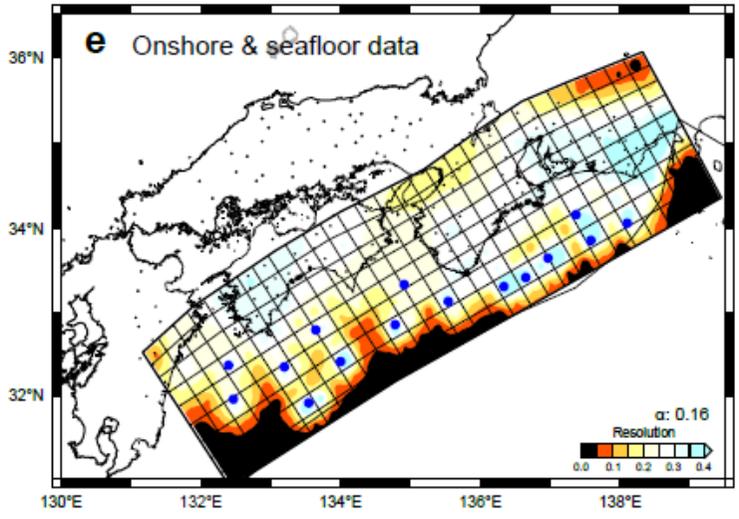
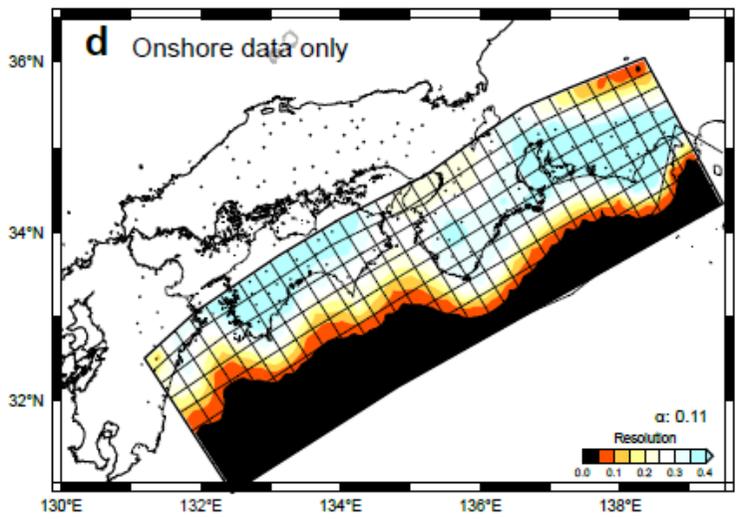
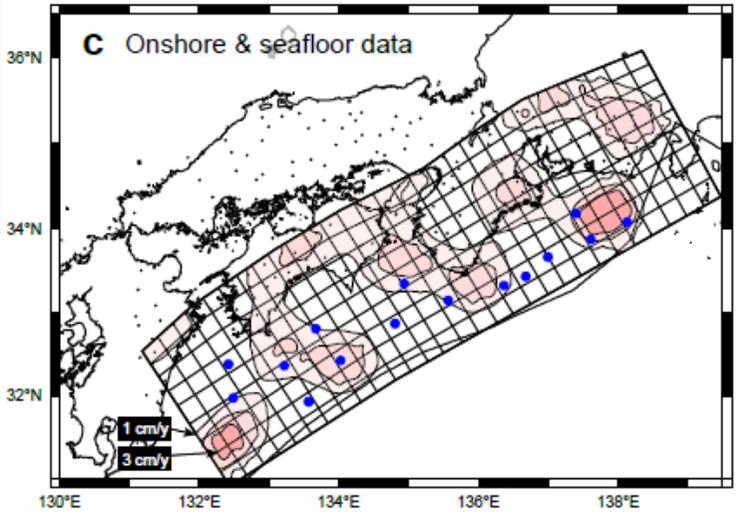
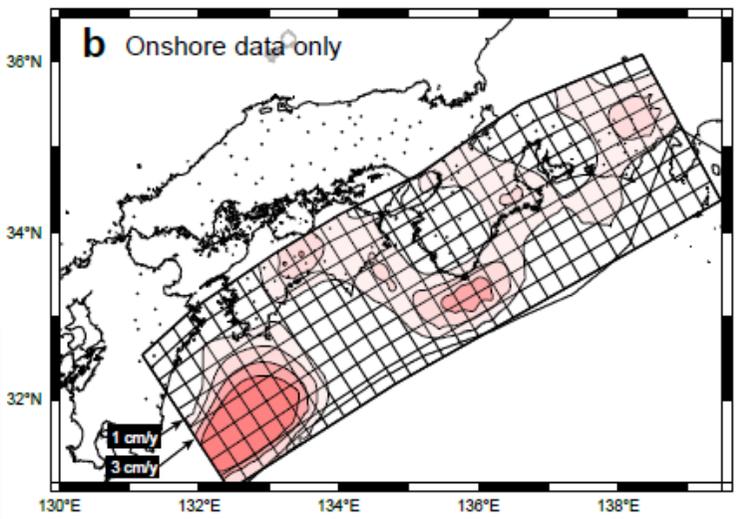
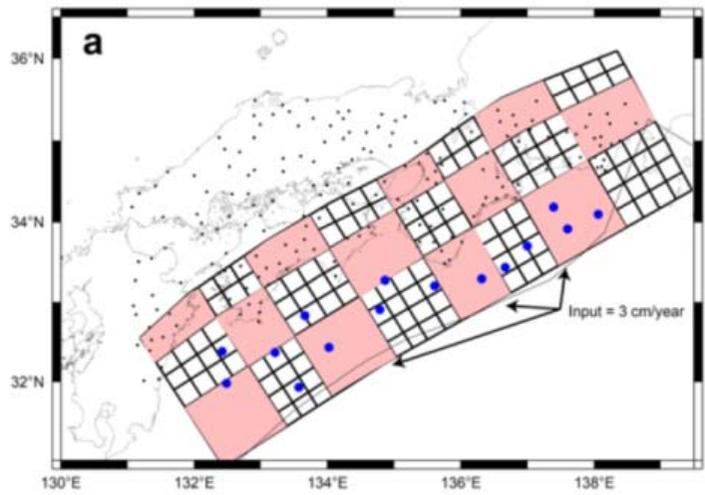
すべり欠損の推定:モデルの設定

- シンプルなモデルで、陸上データのみでの推定と海底データを加えたときの推定の違いを見る -

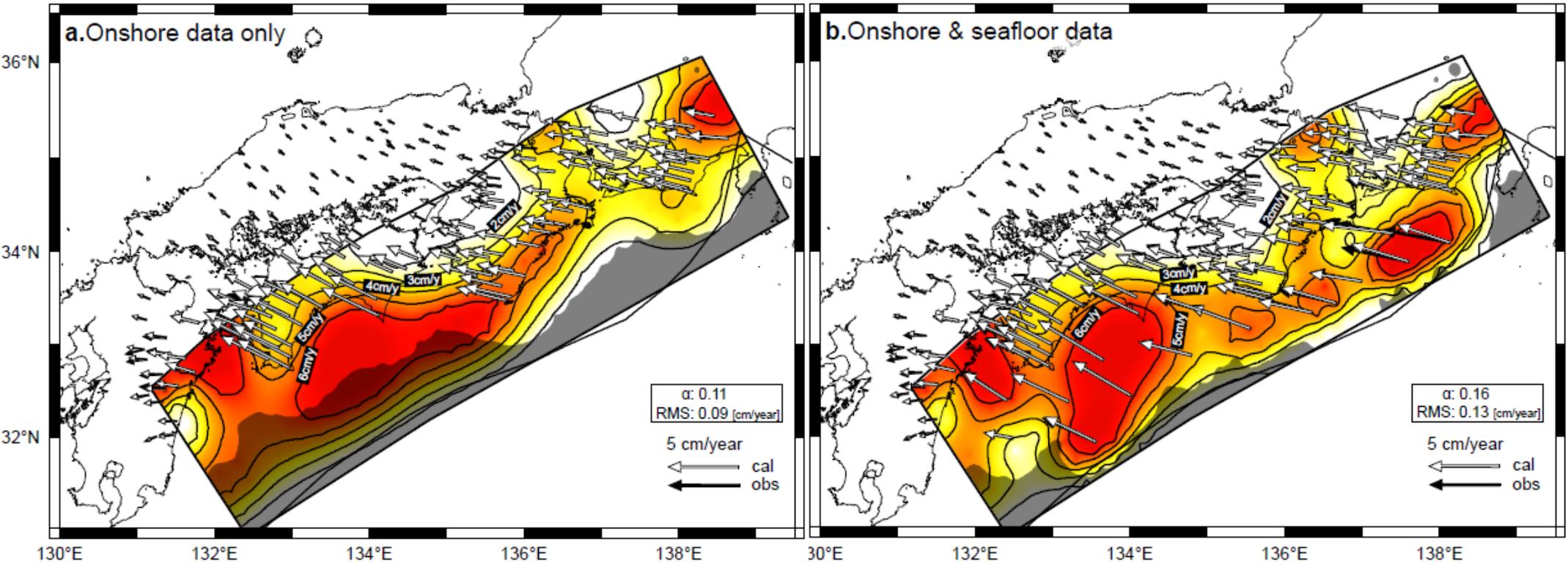
インバージョン手法	使用データ	東北地震の影響	プレート境界モデル	グリーン関数の計算	すべり速度・角度	ブロック運動	分岐断層
Yabuki & Matsu'ura [1992]	陸上GPS + 海底GPS-A (水平のみ)	Sun & Wang [2015], linuma et al. [2012]	CAMP Standard [Hashimoto et al., 2004]	半無限均質弾性体	制限せず	考慮せず	考慮せず



チェッカーボードテスト

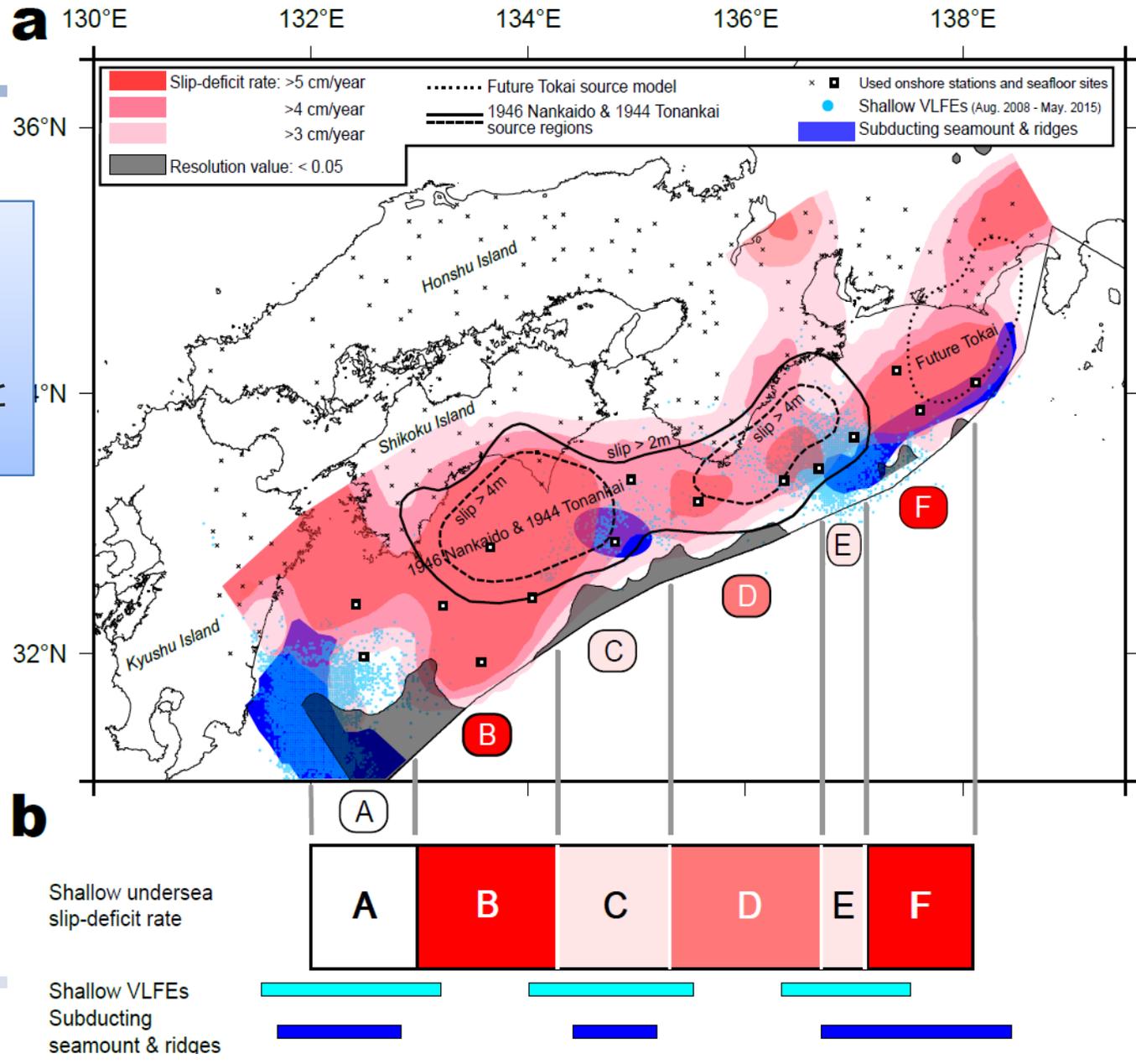


すべり欠損の推定結果



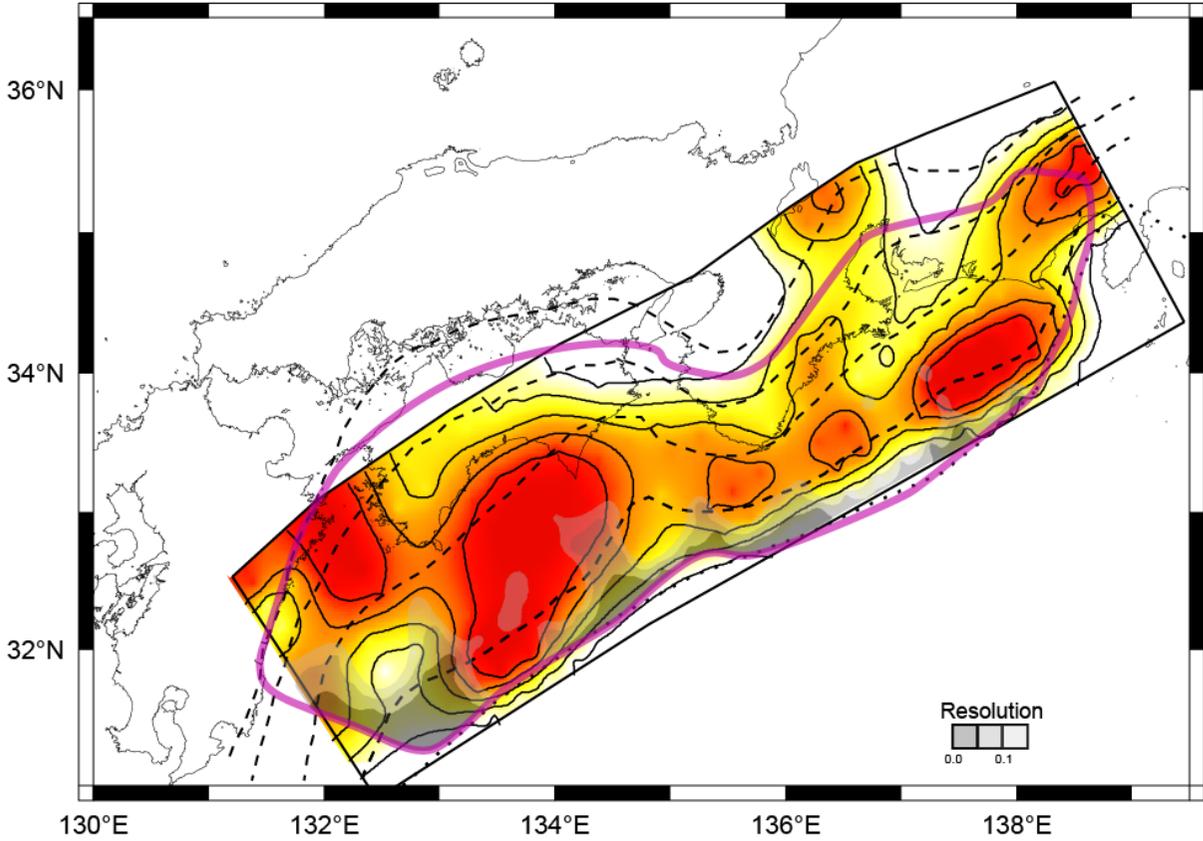
結果の解釈

- 過去の震源域(Sagiya & Thatcher 1999)や想定東海地震の震源域より沖合に固着の強い領域が伸びている
- VLFEの活動域や海山の沈み込み帯と固着の弱い領域が重なっている



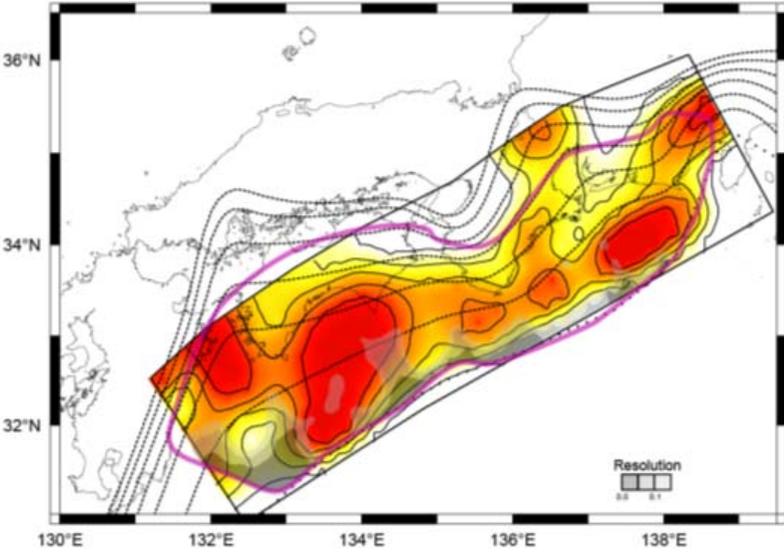
すべり欠損の推定結果

今回の結果は、
概ねプレート境界の深さ10~30kmのところを見ている



※プレート境界は内閣府モデル

※計算に使用したCAMPモデルの深度



すべり欠損の推定結果

