

12-6 点過程モデルによる熊本地震前後の地震活動の解析

Measuring seismicity diversity before and after the Kumamoto earthquake by point process models

統計数理研究所

東京大学地震研究所

The Institute of Statistical Mathematics

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2016 年熊本地震の余震域と周辺部での本震発生前後における地震活動の多様性の詳細を以下の (1) 定常 ETAS モデル^{1, 2)}, (2) 非定常 ETAS モデル³⁾, (3) 外部誘発項を含む ETAS モデル³⁾,

$$\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} K_0 e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p \quad (1)$$

$$\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu(t) + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} K_0(t_i) e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p \quad (2)$$

$$\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} \frac{K_0 e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p} + \frac{K_1 I_{\{t_1 < t\}}(t)}{(t - t_0 + c_0)^{p_0}} \quad (3)$$

およびマグニチュード頻度のモデル^{4, 5)}を用いて解析検討した⁶⁾。ただし t_0 は M7.3 の発生時刻である。これらを各データにあてはめて比べた最適モデルの解析から得られた結果は以下のように要約される。

第 1 に、2016 年熊本地震発生前の地震活動の大部分 (第 1 図, 領域 R1, 2, 6, 7, 8) は定常 ETAS モデル (1) によって説明できるが、布田川断層帯北側 (領域 R3, 4, 5) で、それぞれ群発地震が発生しており、それと同期するように非定常 ETAS モデル (2) による背景地震活動強度 $\mu(t)$ が上昇している (第 2 図二, 三段目パネル)。特に領域 R3 では東北沖地震の発生直後から $\mu(t)$ が約一年間にわたって上昇した (第 2 図, 一段目パネル)。

第 2 に、M6.5 から本震 M7.3 までの前震時系列では M1.5, M2.0, M2.5 の各下限マグニチュードで ETAS モデル (1) による静穏化が有意となった (第 3 図)。

第 3 に、M7.3 熊本地震発生後の地震活動に対しては主断層とオフフォールトの 3 地域の余震の活動 (第 4 図パネル A) ごとにモデル (2) と (3) を適用し比較した。その結果は (i) 本震 M7.3 を含む熊本地域では本震時に上昇した背景地震活動 $\mu(t)$ が時間経過とともに減衰しており主断層の強度が回復しつつあることが推測される (第 4 図パネル S1)。 (ii) 阿蘇地域では本震発生後の約ひと月間は非定常 ETAS モデル (2) による $\mu(t)$ の推定と外部誘発を含む ETAS モデルと (3) の本震 M7.3 による静的誘発強度 (第 3 項) がほぼ一致する。その後も、誤差を考慮すれば、このオフフォールト余震活動が概ね本震 M7.3 からの静的誘発として説明できる (第 4 図パネル S2)。 (iii) 大分地域では地震発生直後から M7.3 の静的誘発強度が $\mu(t)$ を有意に下回り (第 4 図パネル S3)、その発生は本震 M7.3 からの静的な誘発のみでは説明できない。本震直後の流体圧の急上昇による断層弱化が影響したと推察される。

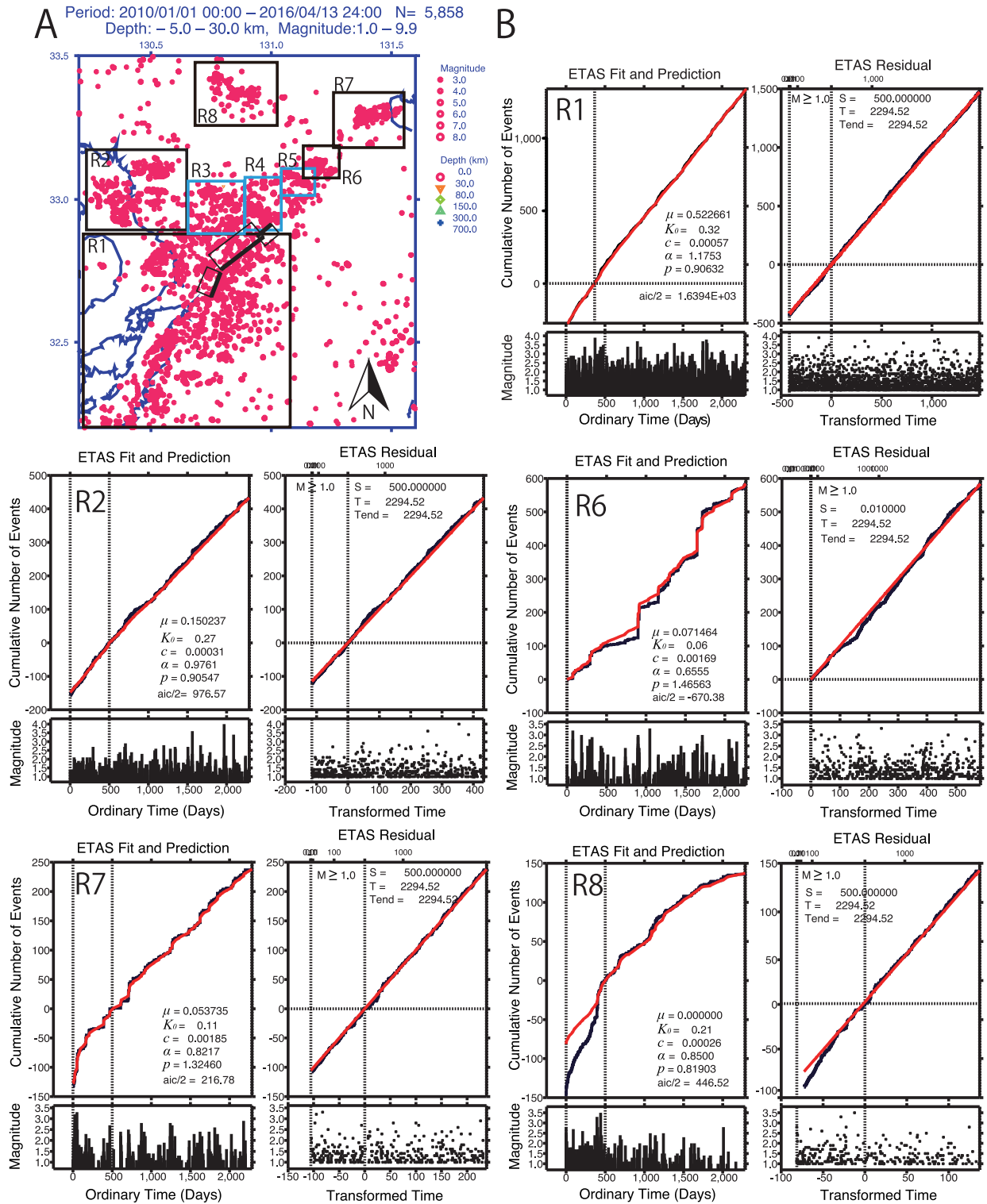
最後に、熊本地域の前震・余震に関して全ての検出されたマグニチュードデータを使用し、地震検出率を考慮した b 値の時間変化⁴⁾を求めた。この時間的变化は、2 番目に大きな前震 M6.4 と本震 M7.3 のそれぞれの発生時に階段状 (第 5 図パネル A) の変化であった。しかし、これらの一見した b 値の時間変化は、それぞれの階段での地震活動の移動による b 値の地域性のためである。すな

わち, M6.4 前後の変動は前震の震源が深い方向に移動したこと (第 5 図パネル B, 第 6 図パネル B) によって, 及び M7.3 前後の変動は前震から余震に震央分布が広がったことによって, その背後にある b 値空間分布⁵⁾ (第 6 図パネル A) が, それぞれの平均として見かけ上の時間変動として現れたと解釈できる.

本解析にかんして気象庁一元化震源カタログを用いた.

(熊澤貴雄, 尾形良彦, 鶴岡弘)

1. Ogata Y. (1988) *J Amer Statist Assoc* 83:9–27
2. Ogata Y. (1989) *Tectonophysics* 169:159–174
3. Kumazawa T, Ogata Y. (2013) *J Geophys Res* 118:6165–6182
4. Ogata Y, Katsura K. (1993) *Geophys J Int* 113:727–738
5. Ogata Y, Katsura K, Tanemura M. (2003) *Applied Statistics (JRSSC)* 52(4):499–509
6. Kumazawa, K., Ogata, Y. and Tsuruoka, H. (2017) *Earth Planet and Space* 69: 169

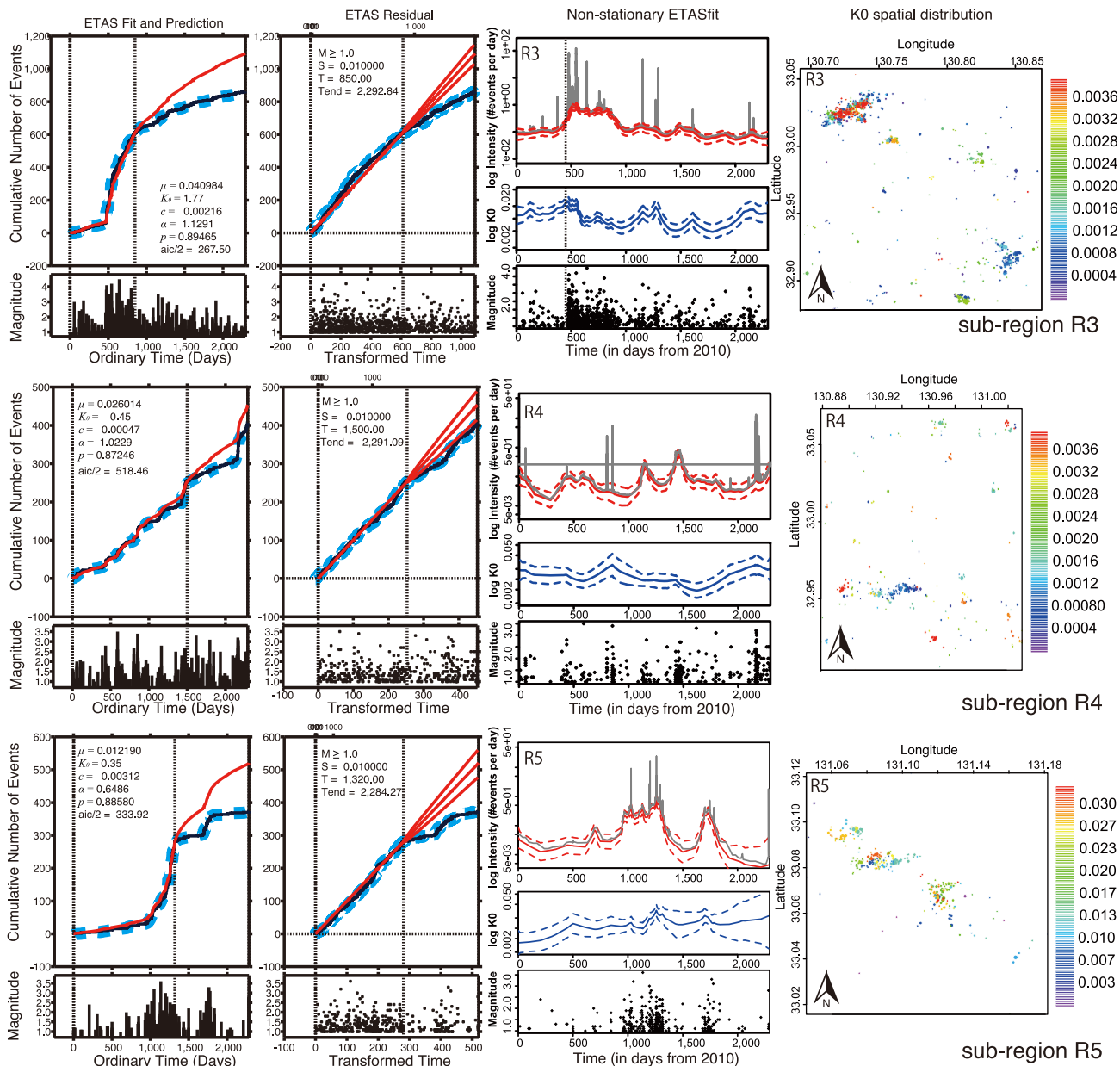


第 1 図 熊本地震前の地震活動。

パネル A： 熊本地震周辺域の空間分布に基づく分割領域。熊本地震断層モデルは国土地理院 (2016) の予知連資料に基づく。 パネル B： 適用した ETAS モデルの累積曲線 (赤) と地震観測数 (黒) を、それぞれ通常時間 (各対の左側) および変換時間 (各対の右側) で重ね合わせた。下段は対応する地震 ($M \geq 1.0$) の M-T プロット。

Fig. 1 The seismicity prior to the Kumamoto earthquakes

Panel A: The central Kumamoto region is separated to the R1–R8 sub-regions. The fault models are due to Geospatial Information Authority of Japan (2016, CCEP). Panels B: The ETAS estimate of the cumulative curve (red) is superimposed on the observed cumulative curve (black) of earthquakes of $M \geq 1.0$ in ordinary time (the left side of each pair) and transformed time (the right side of each pair). The corresponding M–T plots are associated.

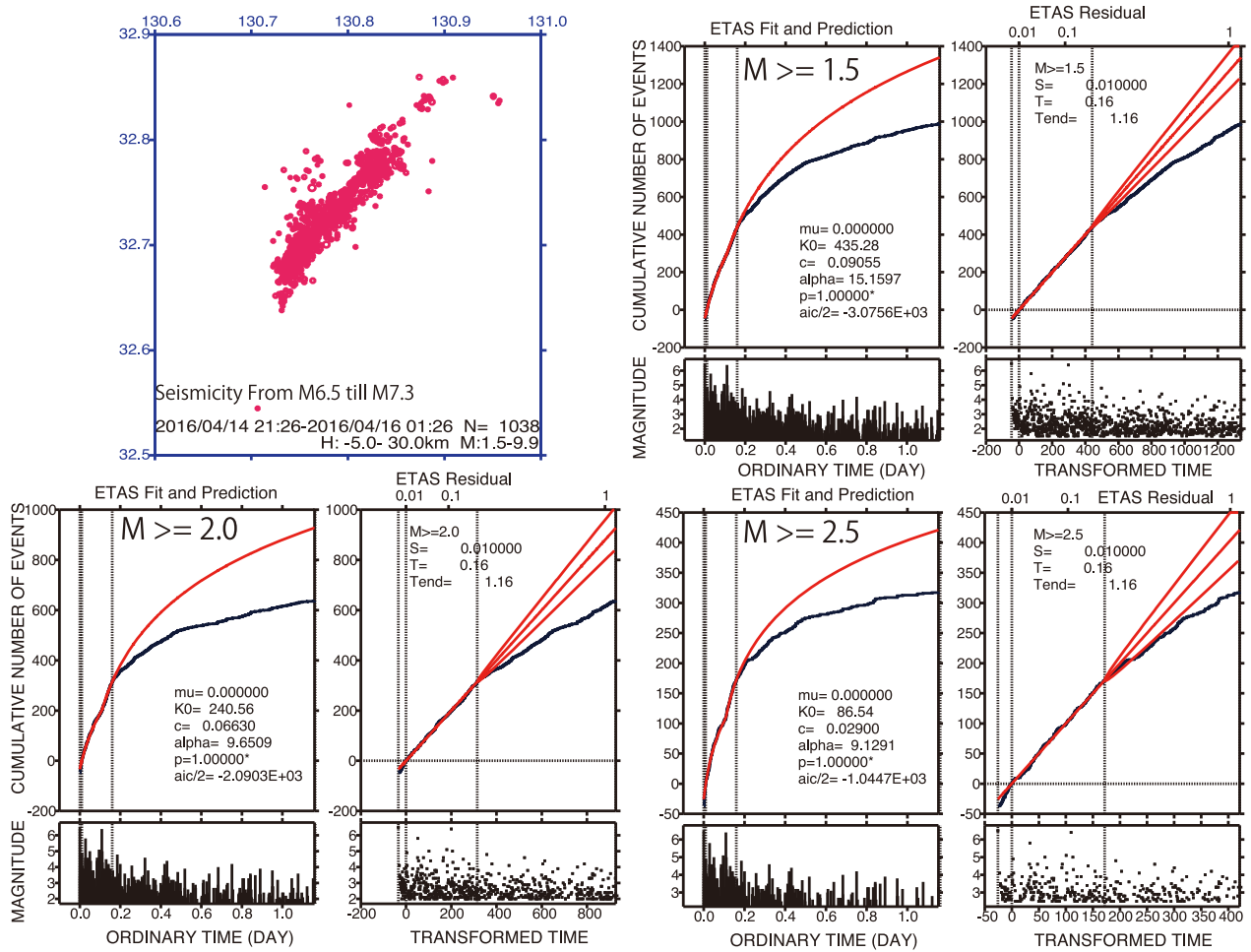


第2図 ETASモデル(1)と非定常ETASモデル(3)による推定。

上段から順に領域R3, R4, R5の地震活動に対するETASモデル(1)及び非定常ETASモデル(3)の推定。各段パネル第1列と第2列は、ETASモデルの最尤変化点の前期間での推定ETASモデルの延長区間までの累積曲線(赤)と実際の累積観測数(細い黒実線)を、それぞれ通常時間(第1列)と変換時間(第2列)で重ね合わせた。さらに細い黒実線に重なっている太い波線(青)は非定常ETASモデルの累積曲線を表す。第3列のパネルは非定常ETASモデルによる $\mu(t)$ (赤)および $K_0(t)$ (青)変化。右端のパネルは地震の位置に対する $K_0(t)$ の空間分布を示す。

Fig. 2 Estimates by the ETAS model (1) and the non-stationary ETAS model (3).

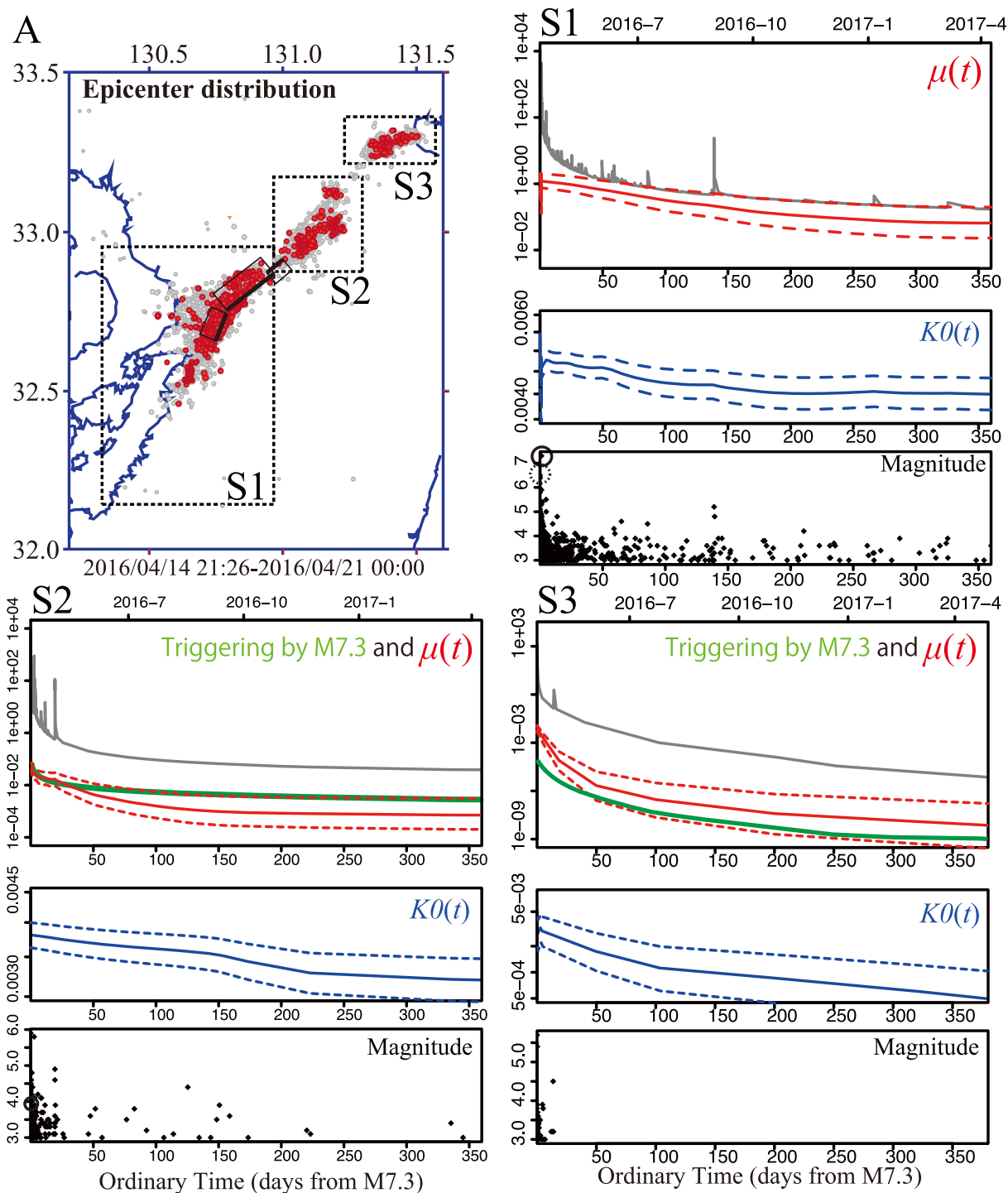
The models are fitted to a seismicity of $M \geq 1.0$ in the R3, R4, R5 sub-regions given from the top to bottom row panels. The first and second column panels show the empirical (black) and theoretical (red) cumulative curves of the ETAS fitted to the data against the ordinary and transformed times of the ETAS model in the target period prior to the most significant change-point of the two-stage ETAS model. The thick dashed light blue curve superimposed on the empirical cumulative curve indicates the theoretical cumulative curve of the estimated non-stationary ETAS model. The third column panels show estimated $\mu(t)$ curve (red) and $K_0(t)$ curve (blue) of model (2); 2-fold errors are also indicated. The right-most panels plot the K_0 values versus the locations of the earthquake epicenters.



第3図 前震の静穏化。

前震時系列（M6.5 から M7.3 まで，下限マグニチュードはそれぞれ 1.5, 2.0, 2.5）に ETAS モデル（1）を適用した。変化点（ $t = 0.16$ ）前の理論累積数を赤曲線で，観測数を黒曲線で表す。各パネル下段は M-T 図。左上パネルに震央分布を示す。

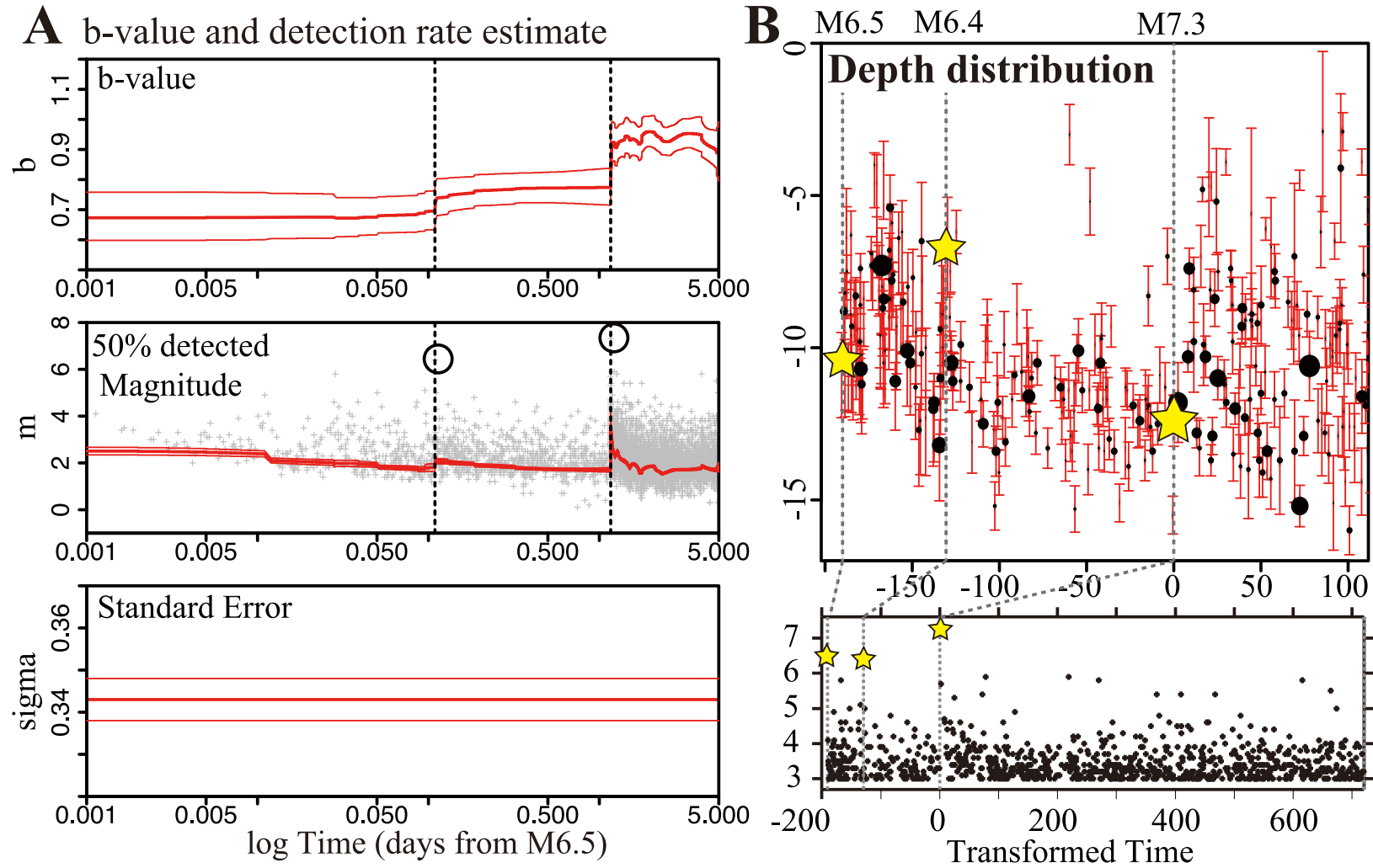
Fig. 3 The ETAS model (1) is applied to the foreshock sequence (from the occurrence time of the M6.5 earthquake to the mainshock M7.3) with different magnitude thresholds of $M \geq 1.5$, $M \geq 2.0$, and $M \geq 2.5$. The theoretical cumulative curves (red) before the change-point ($t = 0.16$) are plotted against the ordinary and transformed times, superimposed on the observed cumulative numbers of events (black), together with the corresponding M-T diagrams. The top left panel plots the epicenter distributions.



第 4 図 M7.3 熊本地震の発生以降一年間の余震活動への非定常 ETAS モデル(3)の適用。
 パネル A は M6.5 熊本地震以降の震源分布および M6.5 と M7.3 の断層モデルを示す。灰色丸は
 M3 未満の地震活動、赤色丸は M3 以上の地震活動を表す。パネル A 内のサブ領域 S1～S3 の
 M3 以上の余震に対する推定非定常 ETAS モデル (3) の発生率とパラメータの時間変化。パネ
 ル S2 および S3 では本震 M7.3 からの誘発項 (モデル 2 式 の第 3 項) を合わせて示す。

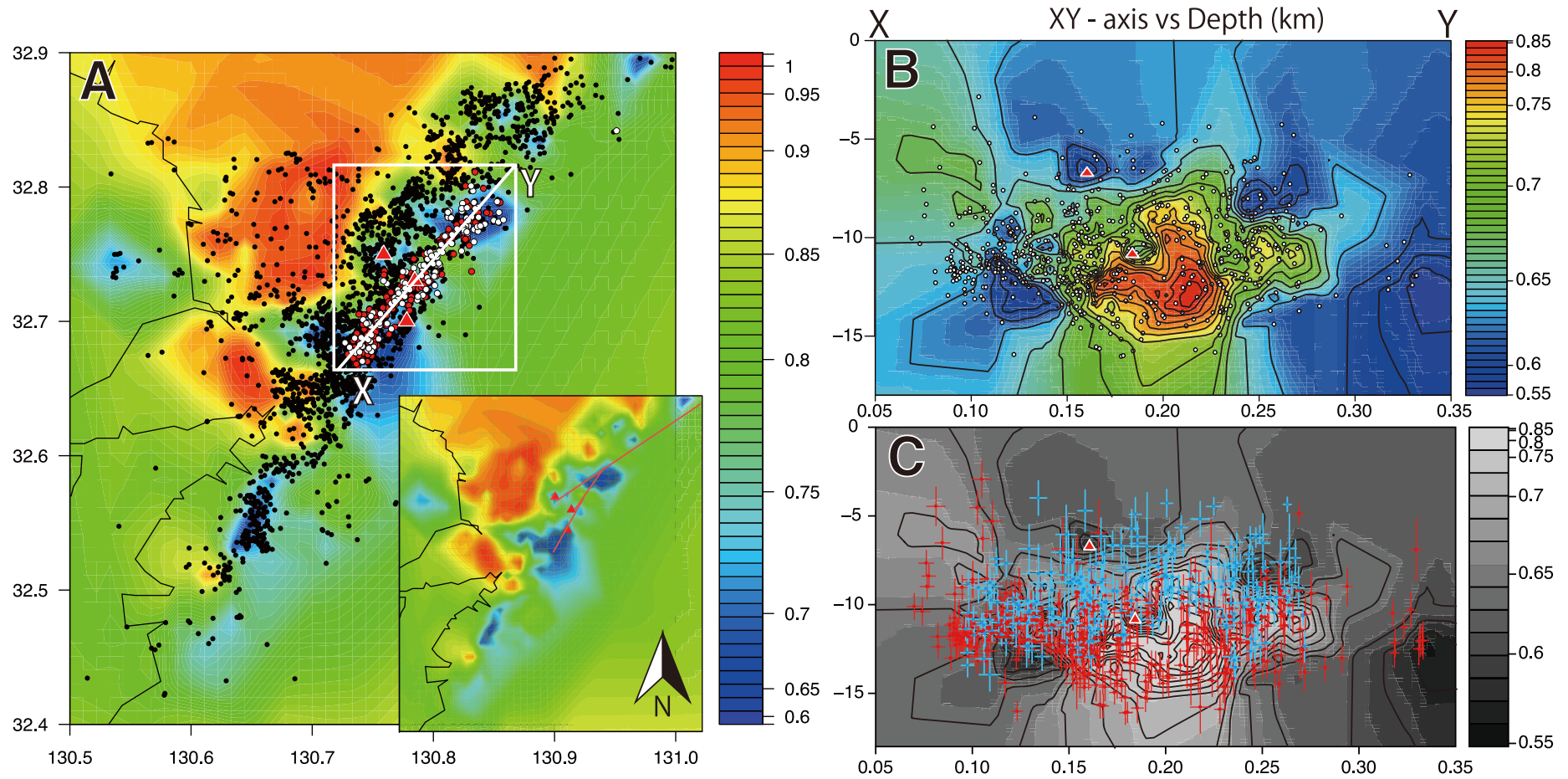
Fig.4 Non-stationary ETAS models (3) applied to the main-fault and off-fault aftershocks of the M7.3
 Kumamoto earthquake.

Panel A indicates the epicenters and the fault models of the M6.5 and M7.3 ruptures, where gray disks indicate events with magnitudes less than M3 whereas reds disks indicate those larger than M3. The estimated occurrence rates and time-dependent parameters of the model (3) that is applied to the aftershocks of $M \geq 3.0$ in the sub-regions S1 ~ S3 in panel A. In addition, for the regions S2 and S3, the model (2) is also applied.



第 5 図 M6.5 前震から始まる気象庁データの地震検知率と b 値の時間変化と震源の深さ。
 パネル A の上段から下段へ: b 値の時間変化, 50%検出率, 及び部分的検出範囲。時間変化は対数スケールで示す。いずれも 95%誤差がエンベロープで示される。
 縦の破線は, M6.4 および M7.3 の地震 (大きな円) の発生時刻。パネル B の上段と下段: 震源の深さ分布。星印 (黄色)は, 左から M6.5, M6.4, および M7.3 を表す。

Fig. 5 Earthquake detection-rates and b -value change, and the hypocenter depth variability.
 Panels A show, from top to bottom, plots of b -values and detection-rate parameters⁴⁾ in time from M6.5 foreshock with double error envelopes against time on a log scale. The vertical dashed lines show the occurrence times of the M6.4 and M7.3 earthquakes, which are marked by large circles. Panels B show depth variability against the transformed time. Yellow stars indicate M6.5, M6.4 and M7.3 from left.



第 6 図 b 値の空間分布。

パネル A の白点及び赤点は其々 M6.4 前震の前後の前震活動の震央、黒点は主断層余震の震央に対応する。赤三角は南から順に M6.4, M6.5, および M7.3 の地震の震央を表す。右下挿入図では震央を取り除いた b 値分布のみを示す。パネル B はパネル A の X-Y 軸に投影された前震の深さ分布を、b 値の分布 (色及び 0.02 刻みの等高線で表す) 上に白抜き点で示す。赤三角は浅い側から順に M6.5 と M6.4 地震の震源に対応する。パネル C の青色の標準誤差付きの十字は M6.4 前震の前の前震群の震源を表し、赤色の標準誤差付きの十字は M6.4 の後の前震群の震源を表す。

Fig. 6 The spatial b -value variability near the regions of foreshocks and on-fault aftershocks.

In Panel A, white and red dots represent epicenters of the foreshocks before and after M6.4, respectively. Black dots represent epicenters of the aftershocks. Red open triangles indicate the epicenters of M6.4, M6.5, and M7.3 earthquakes located from the south. Red segments indicate simplified traces of the Hinagu Fault and the Futagawa Fault located from the south. The inset panel shows only the b -value image. In Panel B, white dots represent the hypocenters of the foreshocks projected onto the X-Y lateral plane shown in panel A. Colors and contours show the b -value variability. The contours are shown in 0.02 increments. Red triangles indicate the hypocenters of the M6.5 and M6.4 foreshocks in the order from the shallow to deep. In panel C, blue crosses of standard errors represent the hypocenter estimates of the foreshocks prior to the M6.4 event, and red crosses of standard errors represent the hypocenter estimates of the foreshocks after the M6.4 event.