

点過程モデルによる 熊本地震前後の地震活動の解析

熊澤貴雄¹、尾形良彦^{1, 2}、鶴岡弘²

¹統計数理研究所

²東京大学 地震研究所

ETASモデルとその拡張 他

1. 定常ETASモデル(Ogata 1988, 1989)

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

第1項 μ が背景地震強度を、第2項が時間的に先行する地震からの誘発強度を表し、全体として単位時間あたりの平均地震数 λ として定義される。

2. 外部誘発を含むETASモデル (ETAS model with remote triggering)

$$\lambda_\theta(t|H_t) = \mu + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} \frac{K_0 e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p} + \frac{\mathbf{K}_1 I_{\{t_1 < t\}}(\mathbf{t})}{(\mathbf{t} - \mathbf{t}_1 + \mathbf{c}_1)^{p_1}}$$

第3項が、対象領域(対象カタログ)に含まれない地震活動からの誘発強度を表す。

3. 非定常ETASモデル (Non-stationary ETAS model, Kumazawa and Ogata, 2013)

$$\lambda_\theta(t|H_t) = \boldsymbol{\mu}(\mathbf{t}) + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} \mathbf{K}_0(\mathbf{t}) e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p$$

定常ETASモデルのパラメータ μ (背景地震強度)と K_0 (余震誘発強度)を時間に依存する関数として表現する。

4. クーロン破壊応力の変化 (Δ CFS, King et al. 1994; Stein 1999)

$$\Delta \text{CFS} = \Delta \tau_s + \mu_F (\Delta \sigma_n - \Delta P_f)$$

τ_s : 剪断応力、 σ_n : 垂直応力、 μ_F : 断層の摩擦係数、 P_f : 間隙流体圧

Part1.熊本地震以前の地震活動

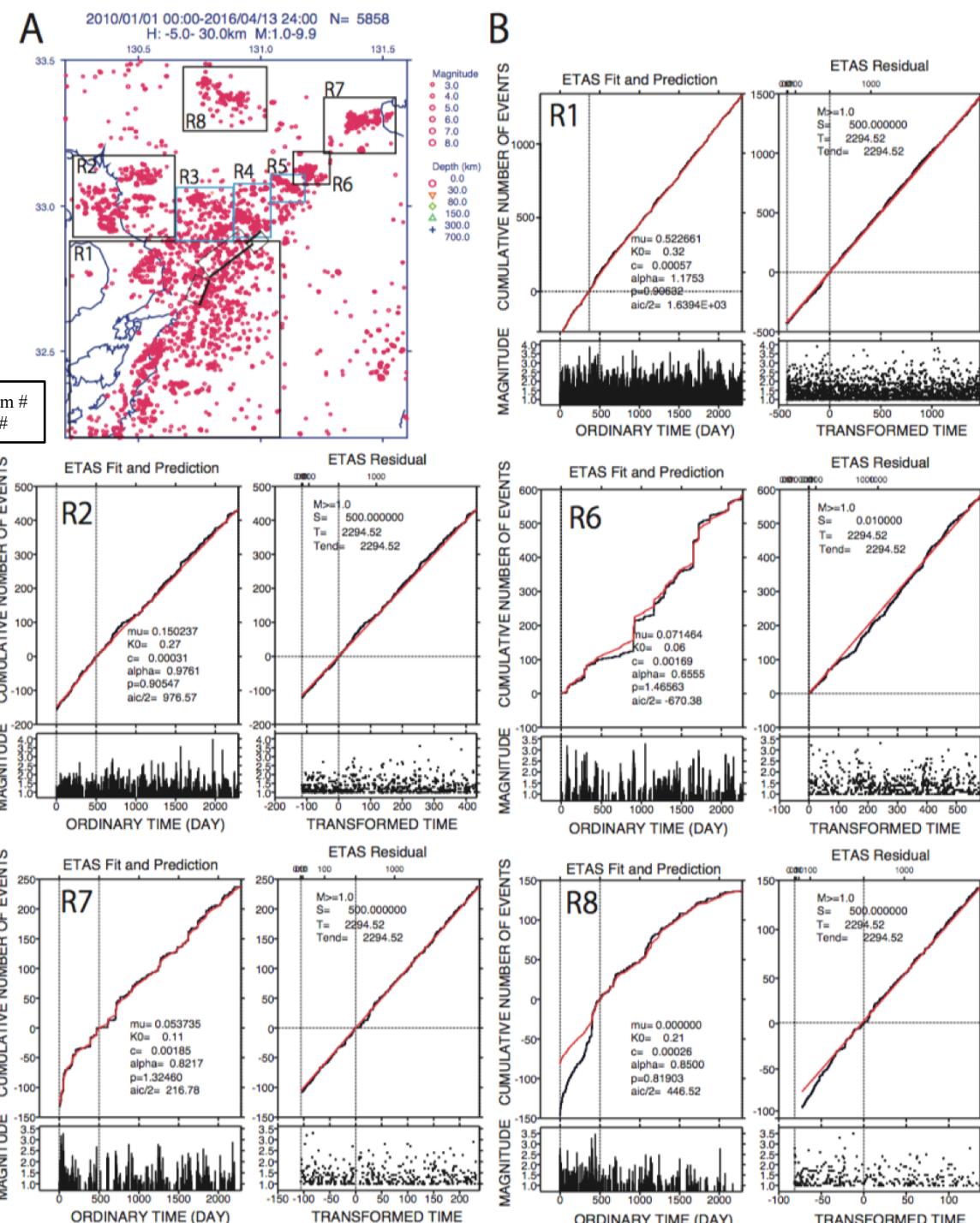
1-1.熊本地震の余震領域の大部分(R1,R2,R6,R7,R8)では、ETASモデルは良く当てはまる。

ETAS model

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

observed cum #
ETAS cum #

右図は2010年から熊本地震直前までの地震活動をETASモデルで当てはめた。予行期間は東北沖地震発生後となる500日と設定した。

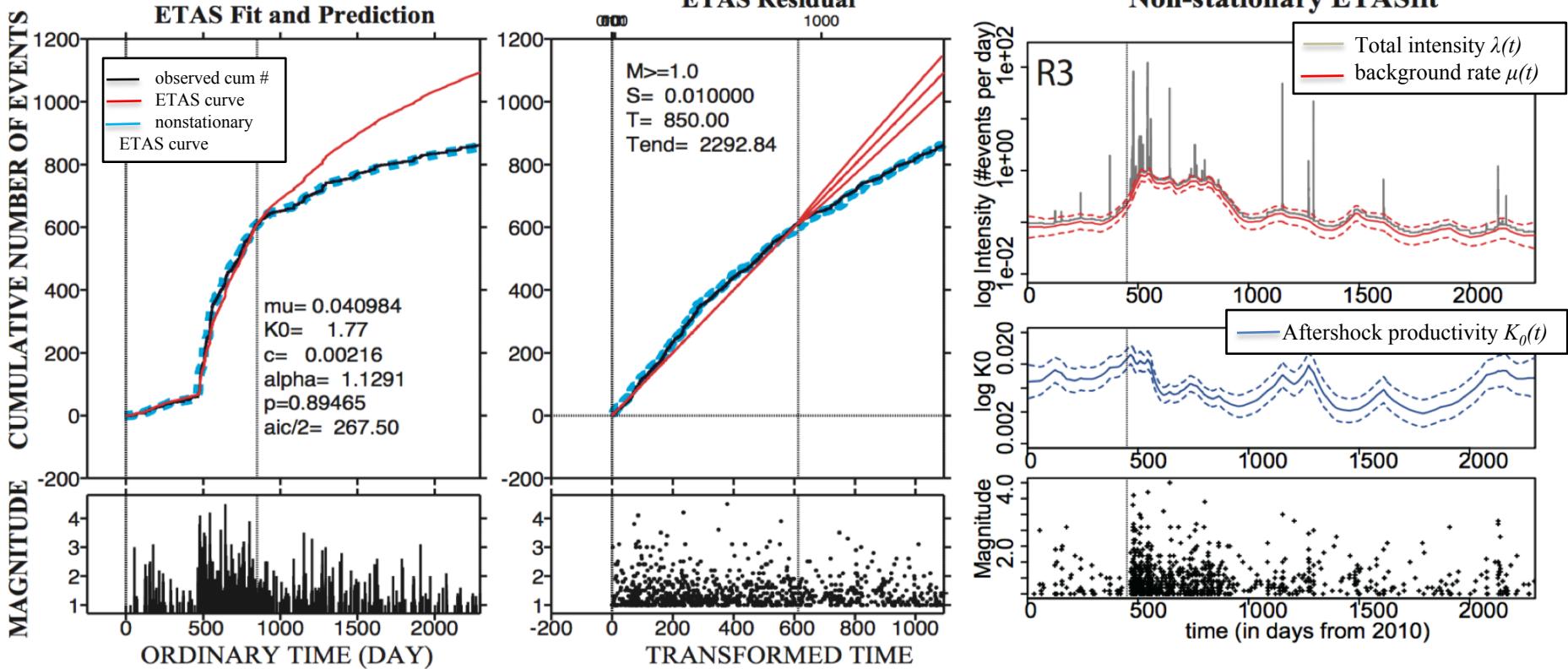
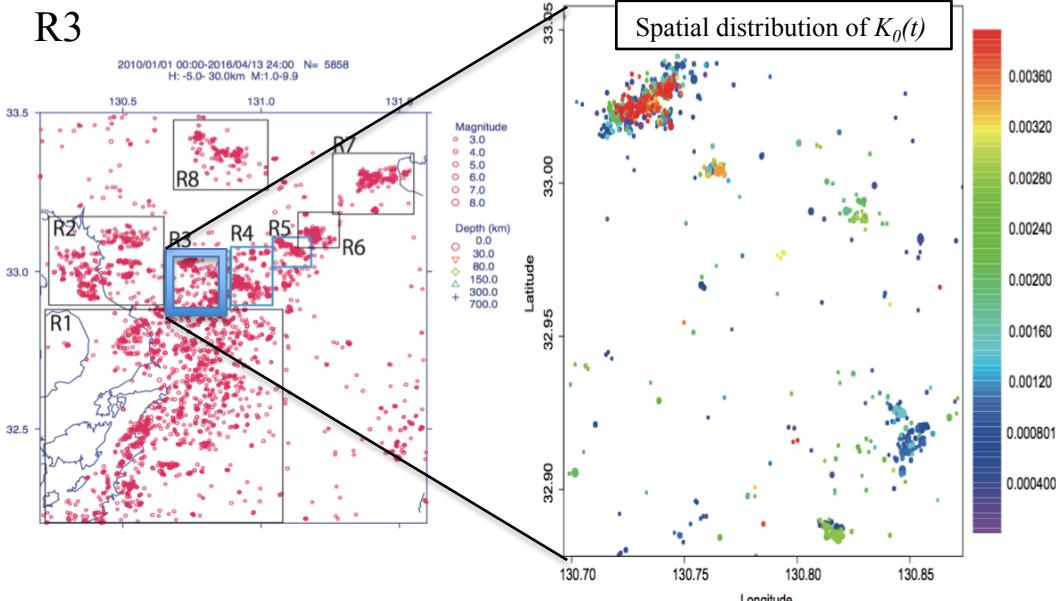


1-2. 熊本地震断層の北側領域(R3,R4,R5)で東北沖地震以降に異常な地震活動が見られた。これらの地震活動に関しては非定常ETASモデルを適用した。

Nonstationary ETAS:

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

R3では地震活動が東北沖地震の直後から約一年に渡って活発化しており、その期間の背景地震活動が上昇しているのが非定常ETASモデルの解析から見て取れる。

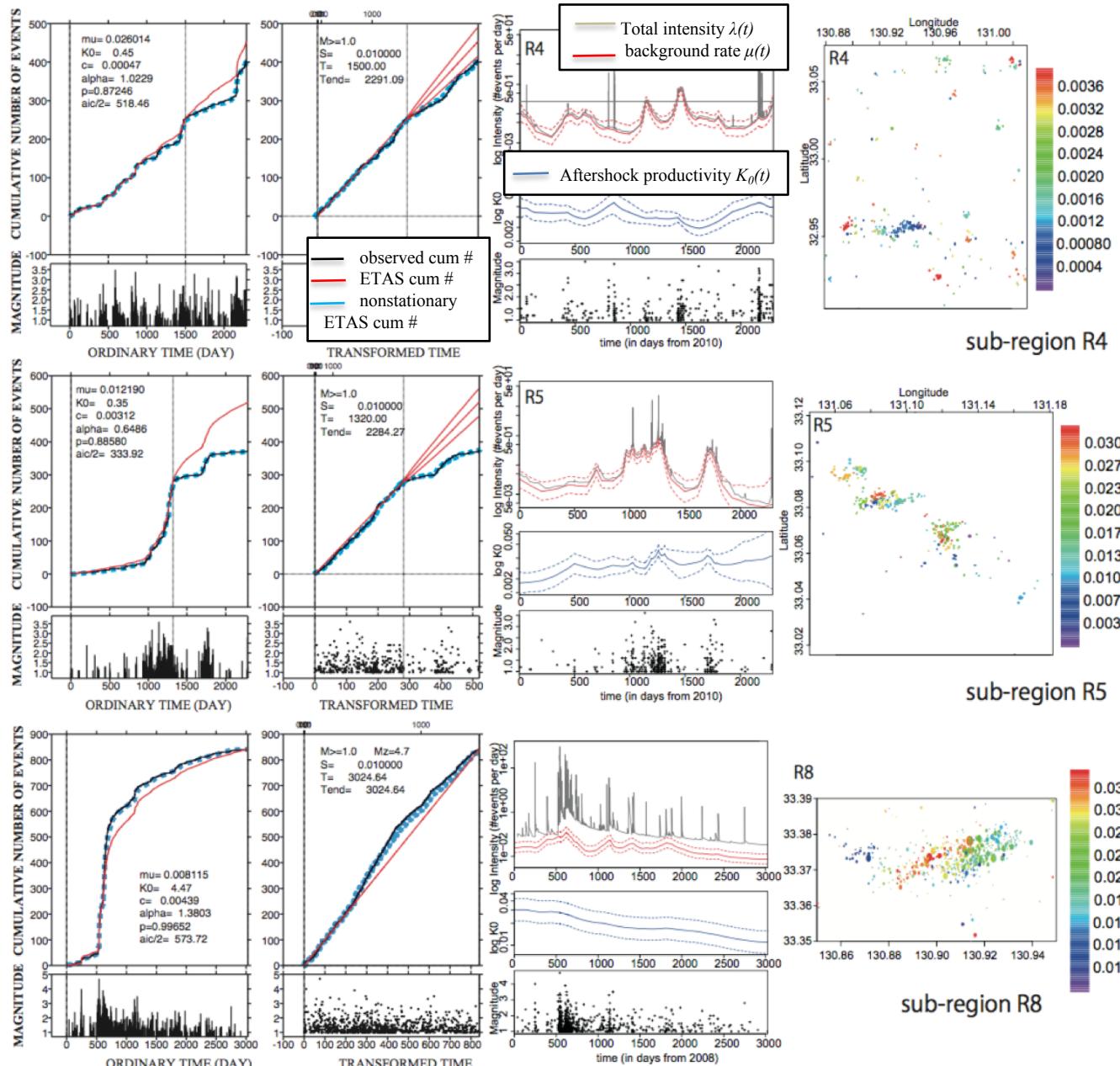
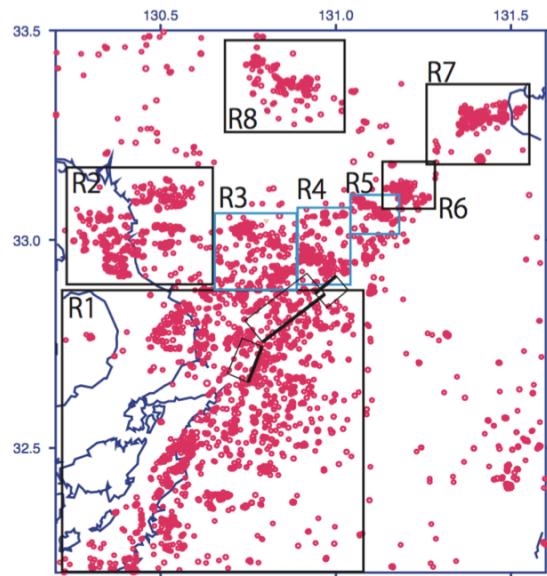


$$\text{Nonstationary ETAS: } \lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu(t) + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} K_0(t) e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p$$

R4. 複数回の群発地震活動が発生しており、対応する期間の背景地震活動が上昇している。

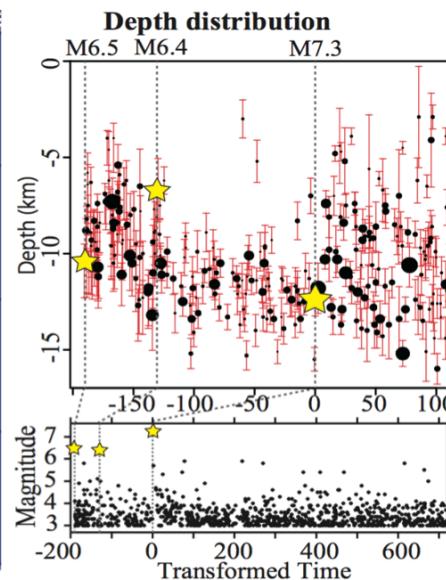
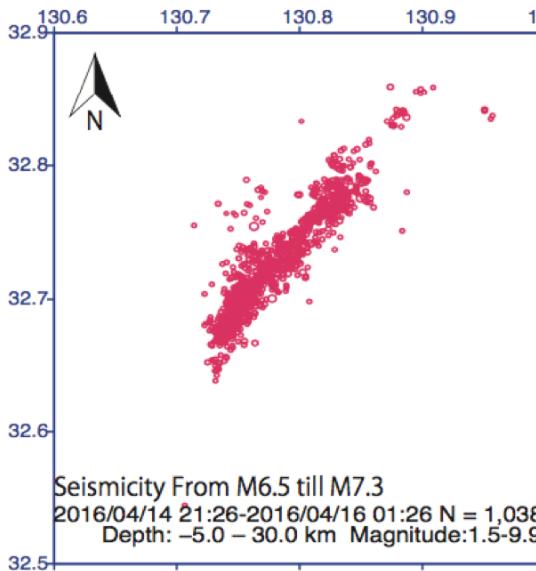
R5. 領域R3の群発的地震活動が治まる時期から地震活動が次第に活発化している。

R8. 東北沖前の時期にETASモデルでは合わない異常活動(群発地震)が見られる。

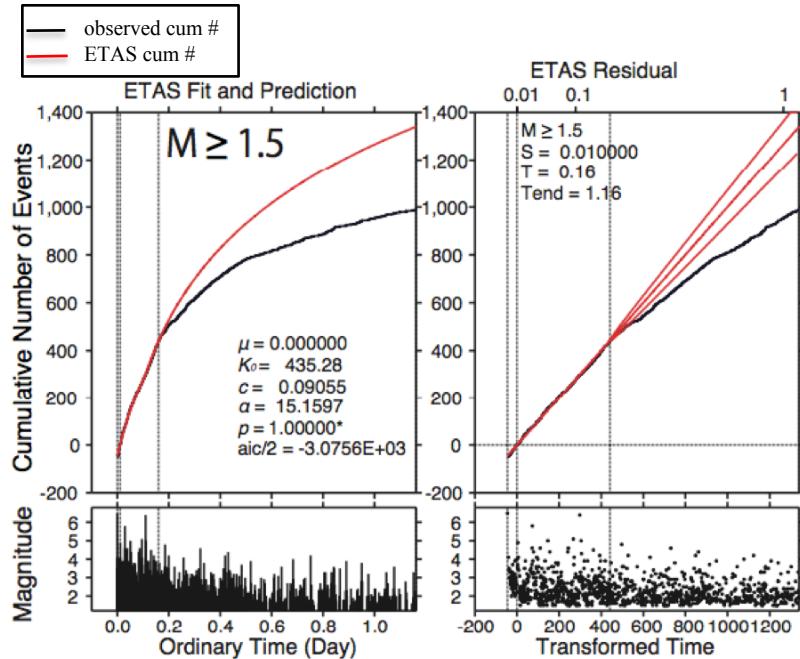


Part 2. 熊本地震発生以降の地震活動

2-1. 前震期間の活動(M6.5からM7.3直前まで)に対してETASモデルを適用し、変化点を探した。M6.4直後から静穏化が有意となる。



$$\text{ETAS model : } \lambda_{\theta}(t) = \mu + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} \frac{K_0 e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p}$$

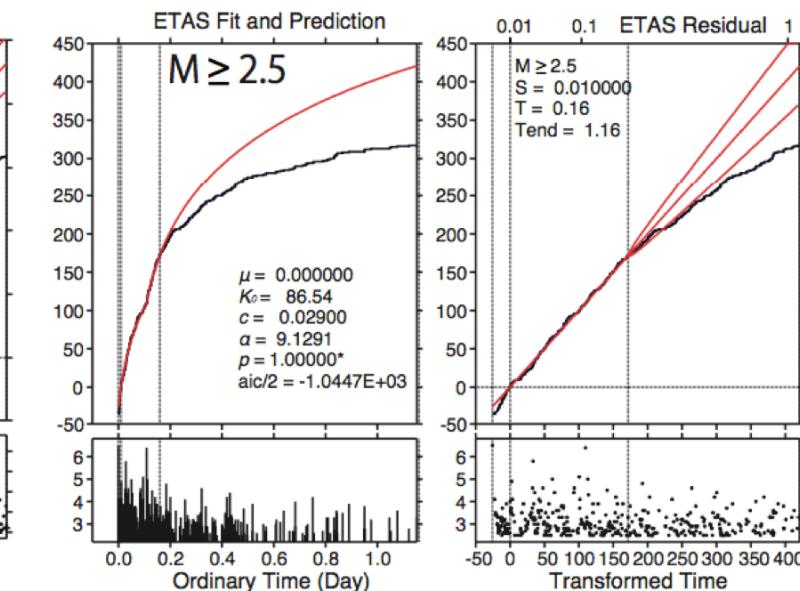
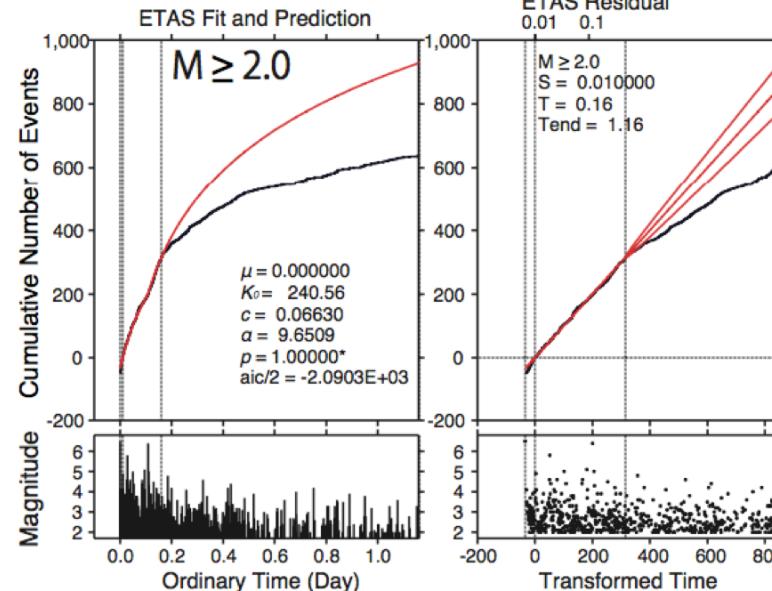


複数の下限マグニチュード設定に対して、静穏化は有意であった。

$dAIC = -7.04$
for $M_c = 1.5$

$dAIC = -7.94$
for $M_c = 2.0$

$dAIC = -1.61$
for $M_c = 2.5$

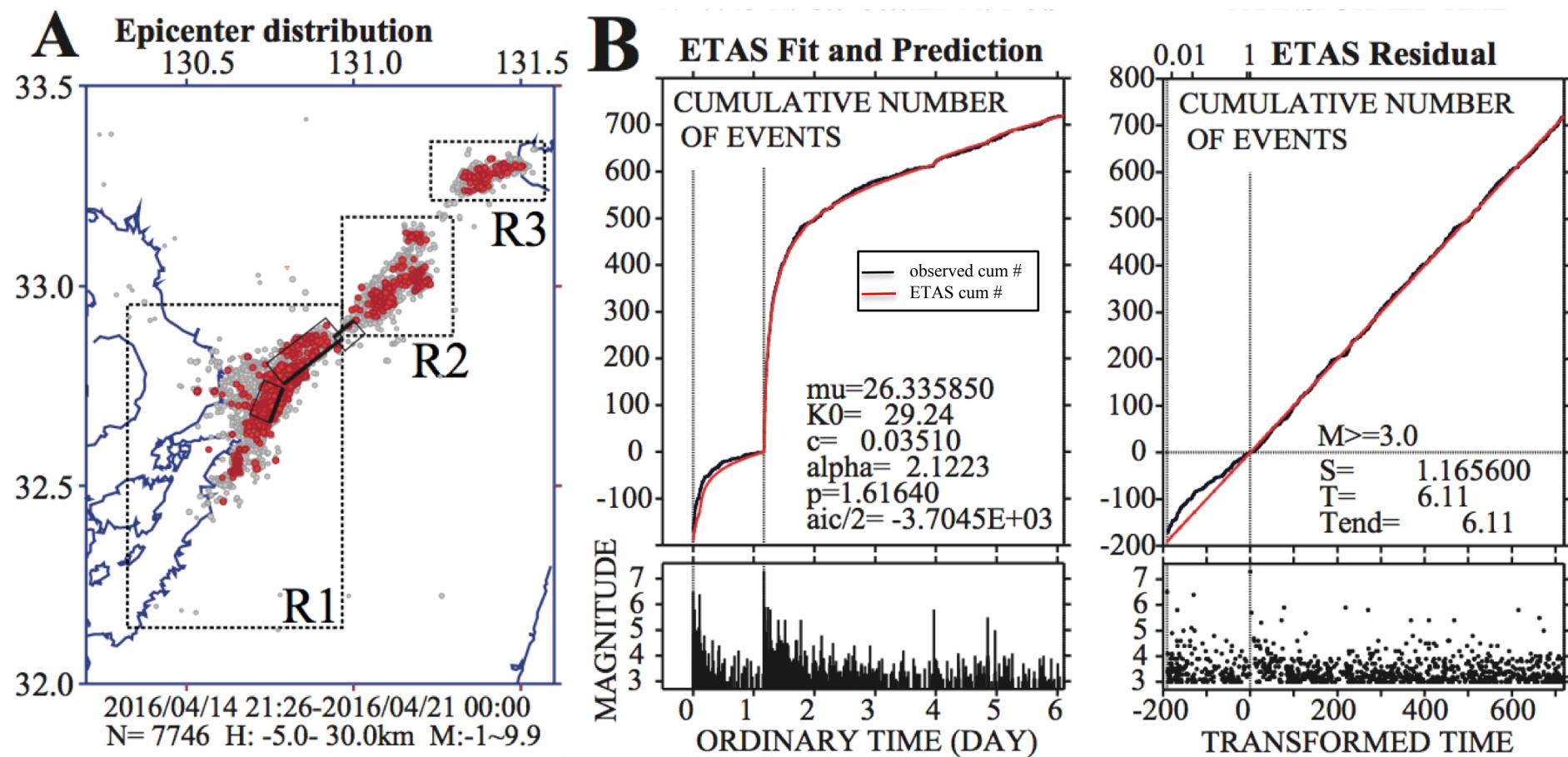


Part 2. 熊本地震発生以降の地震活動

2-2. 本震以降も含めた活動

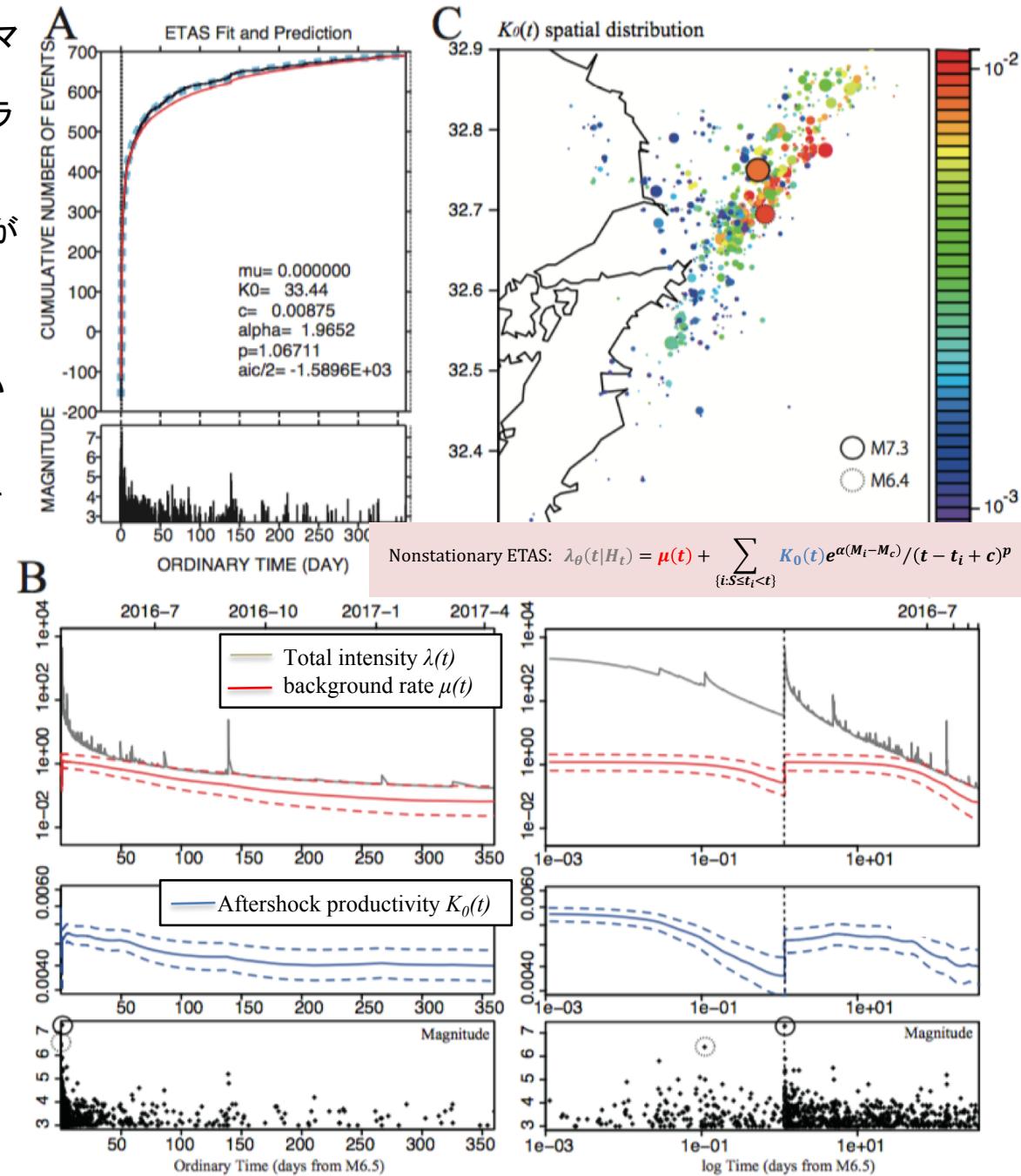
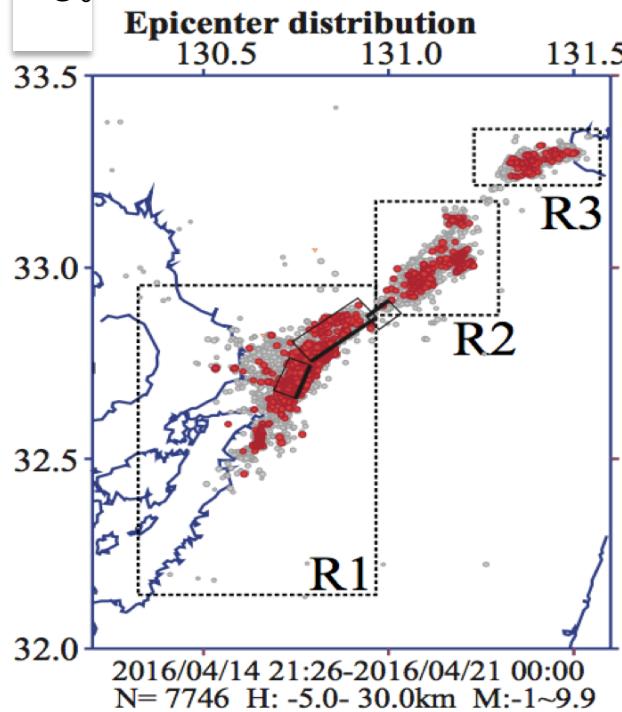
$$\text{ETAS model : } \lambda_{\theta}(t) = \mu + \sum_{\{i: S \leq t_i < t\}} \frac{K_0 e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p}$$

- M6.5から約一週間の地震活動を、前震活動を予行期間に取り、マグニチュードの下限をM3.0に設定して、ETASモデルで当てはめた。(パネルA, 赤ドット)
- 該当期間中の余震活動は正常に減衰している。



2-3. クラスター別の、本震以降も含めた地震活動:R1(熊本地域)

- M6.5から本震後一年間分の地震活動を、マグニチュードの下限をM3.0に設定して、ETASモデル及び非定常ETASモデルでクラスター毎(R1,R2,R3)に当てはめた。
 - R1は一週間分のデータではETASモデルがよく当てはまつたが、それ以降に逸脱が見られる。
 - 背景地震活動 $\mu(t)$ はM7.3前に減衰している(前述の本震前の静穏化に対応)。
 - M7.3の30日以降も両パラメータが減衰している。



2-3. クラスター別: R2(阿蘇地域)

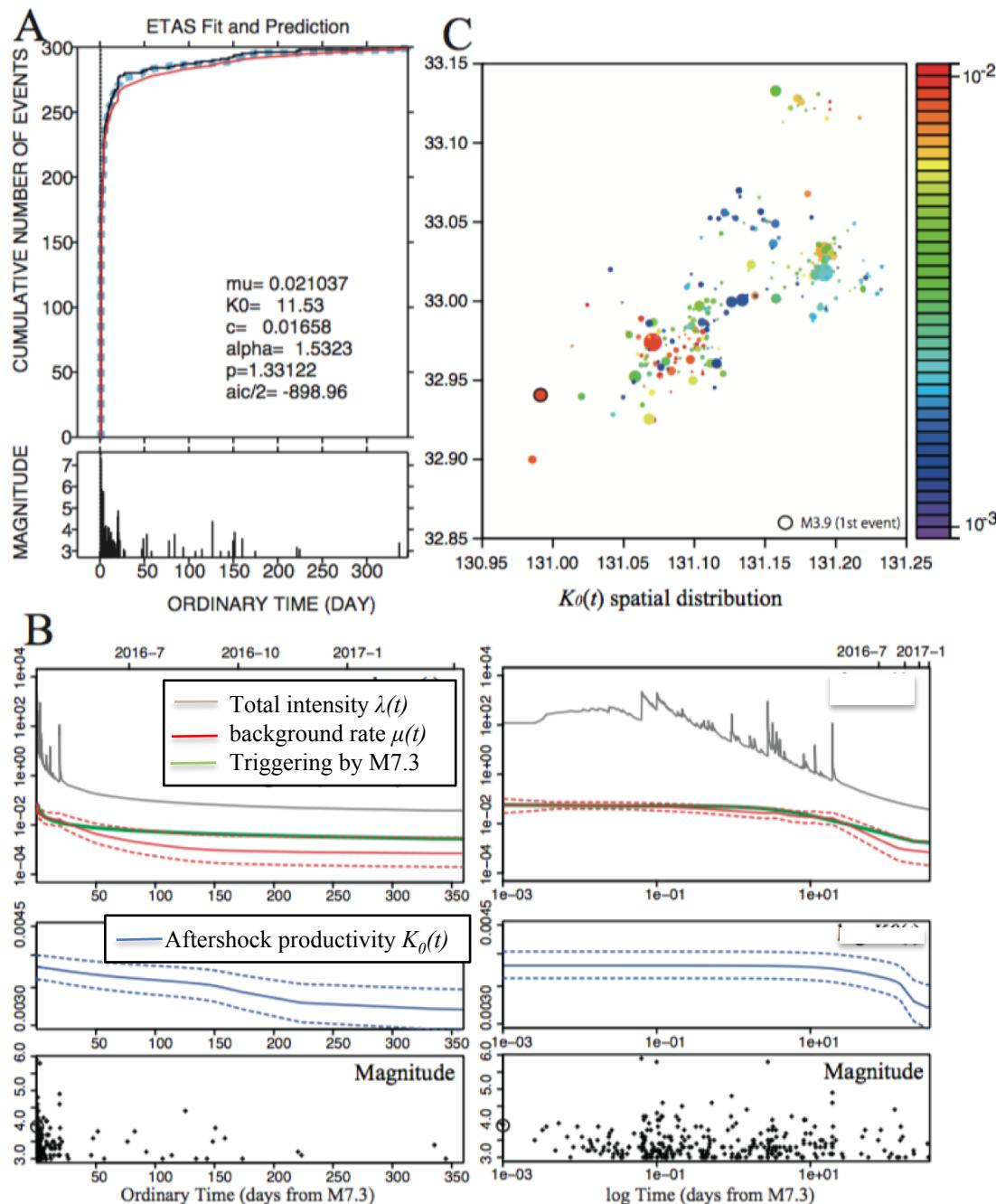
本震M7.3を外部誘発項として含むETASモデル

$$\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu + \sum_{\{i: S \leq t_i < t\}} \frac{K_0 e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p} + \frac{K_{M7.3} I_{\{t_{M7.3} < t\}}(t)}{(t - t_{M7.3} + c_{M7.3})^{p_{M7.3}}}$$

Nonstationary ETAS:

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

- R1と同期間の地震活動(本震後一年間分、前震活動を含まないため本震以降のみ)に外部誘発を含むETASモデル、非定常ETASモデルを適用した。
- 背景地震活動 $\mu(t)$ は徐々に減衰している。
- 本震からの静的誘発項は $\mu(t)$ にほぼ重なるように減衰しており、背景地震活動の大部分が本震の誘発項から成ることが分かる。
- 約一ヶ月目以降で $\mu(t)$ が本震からの静的誘発項を有意に下回る。



2-3. クラスター別: R3(大分地域)

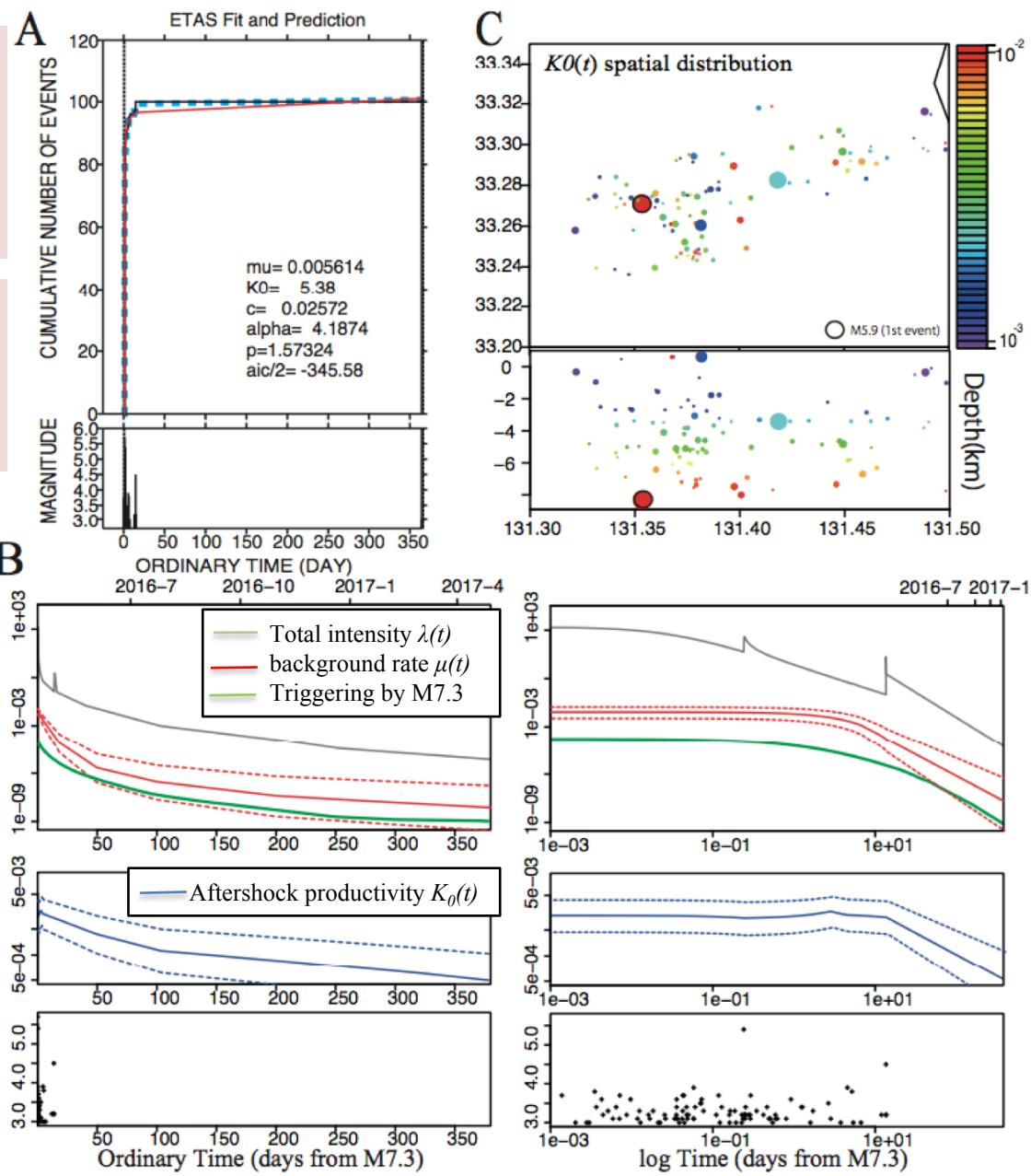
本震M7.3を外部誘発項として含むETASモデル

$$\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu + \sum_{\{i: S \leq t_i < t\}} \frac{K_0 e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p} + \frac{K_{M7.3} I_{\{t_{M7.3} < t\}}(t)}{(t - t_{M7.3} + c_{M7.3})^{p_{M7.3}}}$$

Nonstationary ETAS:

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

- R1と同期間の地震活動(本震後一年間分、前震活動を含まないため本震以降のみ)に外部誘発を含むETASモデル、非定常ETASモデルを適用した。
- 本震の誘発効果は推定される背景地震強度より数桁小さく、別の擾乱(流体圧による断層強度の低下)が当地域の地震活動を起こしたことが推察される。
- 背景地震活動が急速に減衰している。当地域では本震の二週間後以降、M3以上の地震が2018年1月31日に到るまで発生していない。

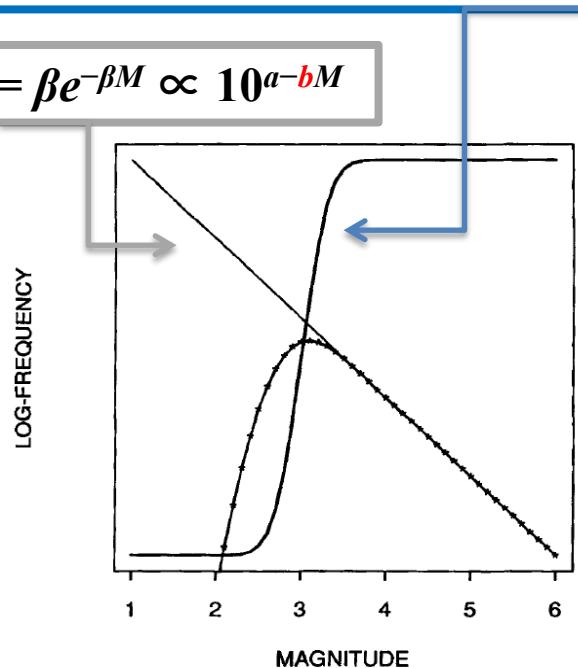


2-4. 地震検出率とb値の時間変動の同時推定 (Ogata and Katsura 1993)

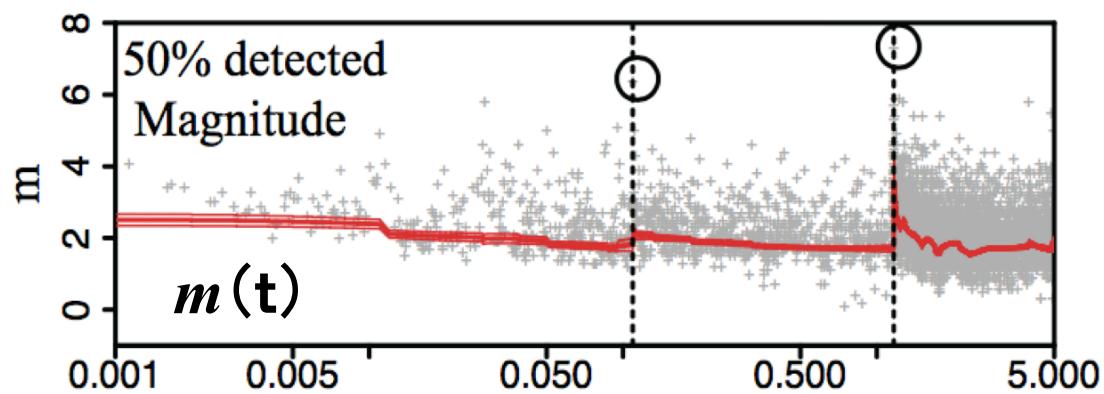
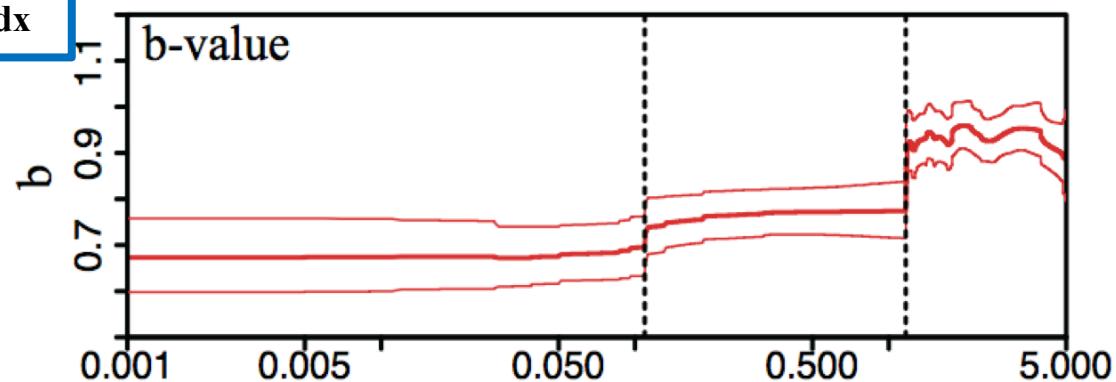
The detection-rate function

$$q(M|m, \sigma) = 1/(\sqrt{2\pi}) \int_{M_c}^{\infty} \exp\{(x - m)^2 / 2\sigma^2\} dx$$

$$f(M) = \beta e^{-\beta M} \propto 10^{a-bM}$$



b-value and detection rate estimate



The intensity function

$$\lambda(M|\beta(t), m(t), \sigma(t))$$

$$= f(M|\beta(t)) \cdot q(M|m(t), \sigma(t))$$

This characterize the time-dependent magnitude frequencies of all detected earthquakes (Ogata and Katsura 1993, 2006).

b値はM6.4, M7.3の発生時に階段状に上昇する。本震後は不規則な変動、減少傾向にある。

Standard Error

sigma

$\sigma(t)$

0.001 0.005 0.050 0.500 5.000

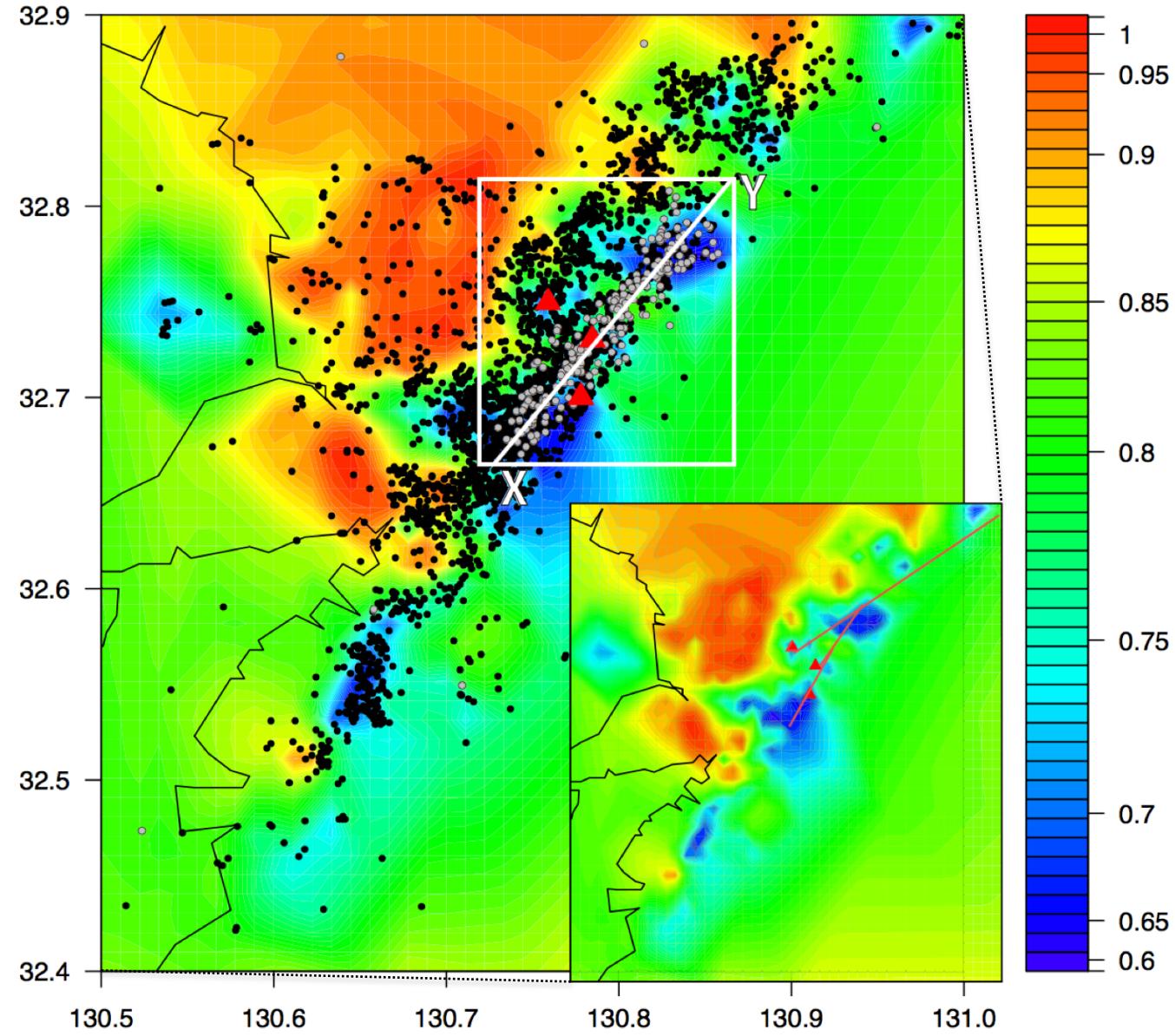
log Time (days from M6.5)

2-4 b値の空間分布(b値の階段状時間変化の解釈)

The probability density distribution:
 $f(M|b, X, Y) = \beta(X, Y) e^{-\beta(X, Y)(M - M_c)}$

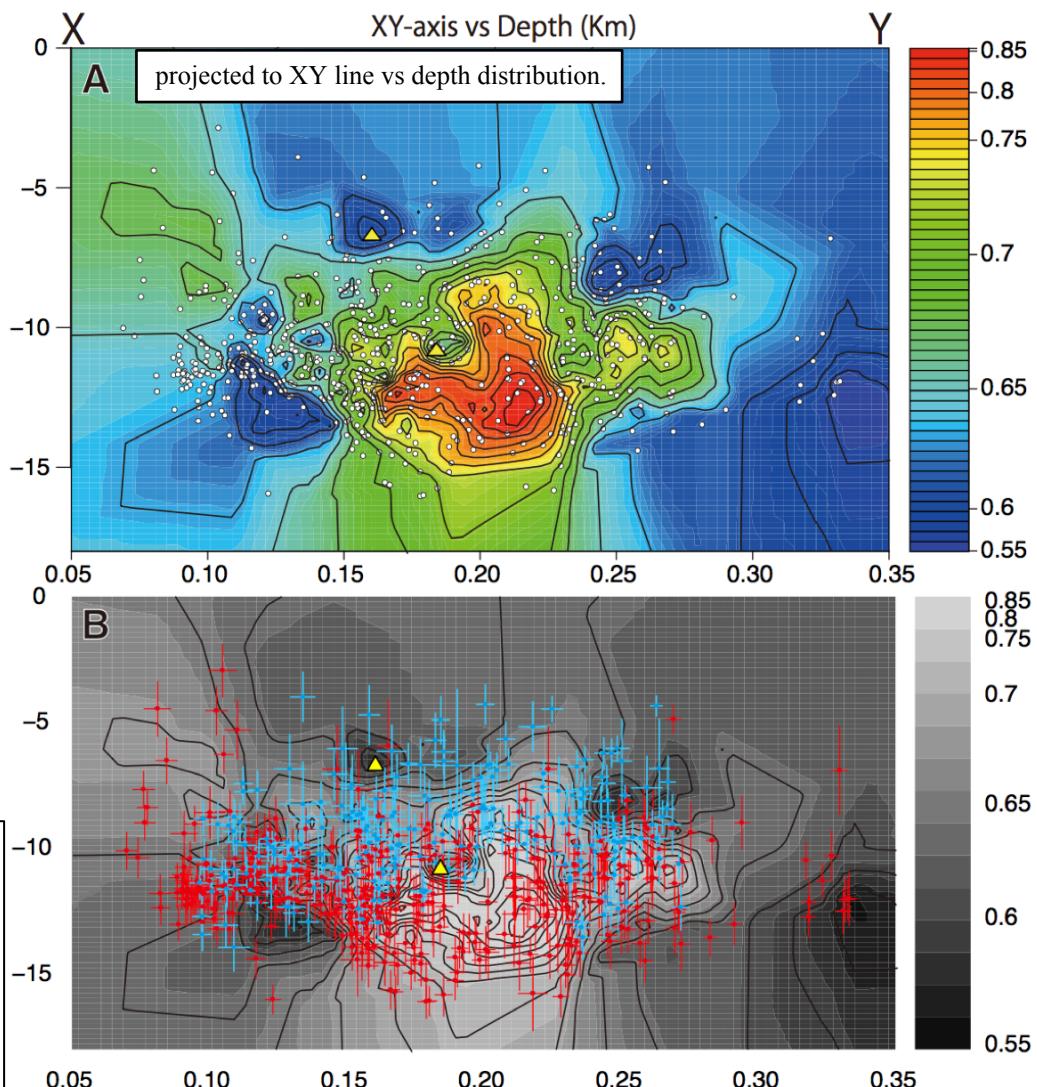
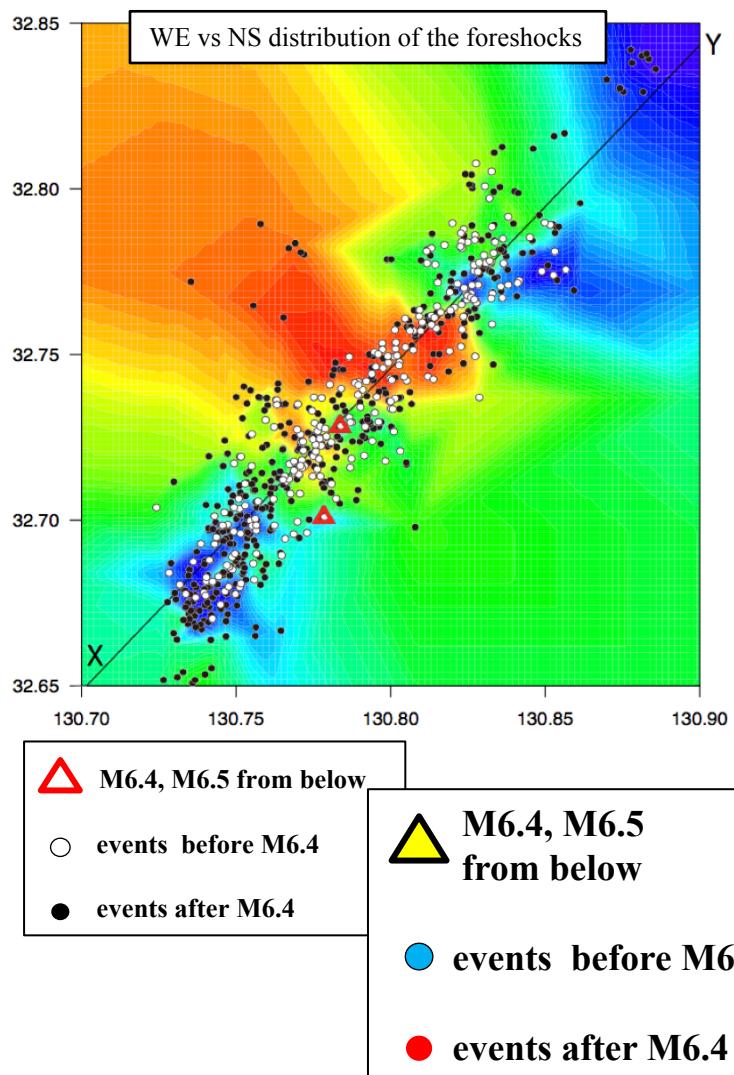
Here $\beta = \beta(x, y)$ is a function of location, represented by a piecewise-linear function defined on the Delaunay tessellated region. The penalized log-likelihood is used.

-  M6.4, M6.5, M7.3 from below
-  events before M7.3
-  events after M7.3



前震活動はb値の比較的低い領域に分布する。本震以降は活動がb値の高い領域に広がり、M7.3発生時の階段状変化がその平均として現れたと解釈できる。

2-4 b値の空間分布(b値の階段状時間変化の解釈その2)



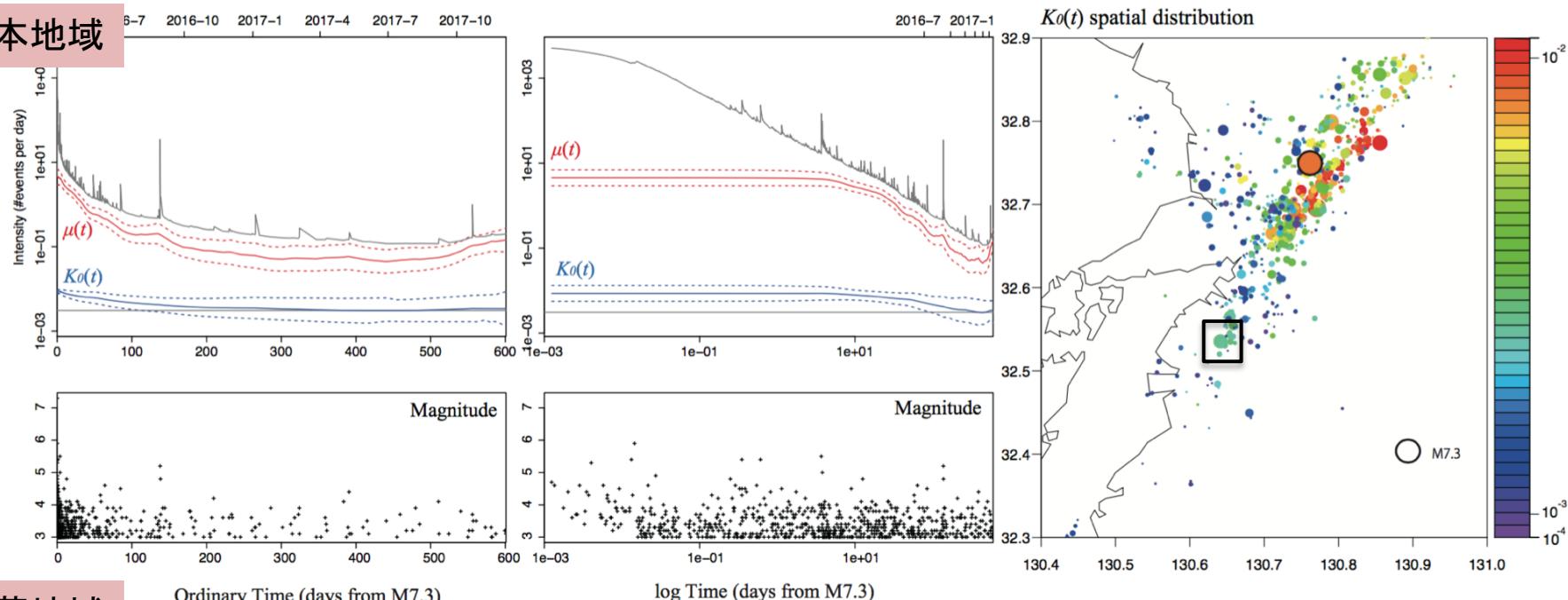
前震部分の地震活動はM6.4前と後で水平面上ではほぼ均等に分布する。水平分布の長軸方向の深さは(前述のとおり)浅い箇所から深い箇所へと遷移しており、これがb値の深さ方向の分布の高低に対応し、その平均としてM6.4前後の段差状変化として現れたと解釈できる。

結論

1. 熊本地震前は前震・余震領域の大部分で地震活動は(定常)ETASモデルが良く当てはまつたが、布田川断層の北側の領域で異常活動(中には東北沖地震に影響された群発地震)が見られた。
2. M6.5地震から本震までの前震期間で有意な相対的静穏化が見られた。
3. 本震後一週間分の広義余震活動は全体として定常ETASモデルが良く当てはまつた。
4. 現在までの余震活動は定常ETASモデルでは説明できず、各余震クラスター別に非定常ETASモデルを適用したところ：
 - 熊本地域では1週間後から背景地震活動が減衰しており、断層強度が回復していることが推測される。
 - 阿蘇地域では本震後二週間までは本震M7.3の静的誘発効果で概ね説明できる。以降は背景地震活動は静的誘発効果より速く減衰している。
 - 大分地域では本震M7.3の静的誘発効果だけでは説明できない。
5. 前震・余震を通したb値の時間変動は見かけで、実際はb値の空間変化に対して、それぞれの主活動部分の移動を反映している。

付録. クラスター別: 2018年1月までの解析結果 (熊本地域、阿蘇地域)

熊本地域



阿蘇地域

