

10 - 3 2016 年熊本地震の余震活動について

Aftershock analysis of the 2016 Kumamoto earthquakes

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 4 月 14 日からの一連の熊本地震から約一年間にわたる余震活動を ETAS モデルや非定常 ETAS モデル¹⁾などで解析し、活動推移の詳細を調べた。前震の M6.5 の発生後約 2 週間分の地震活動を解析した前回の報告の第 6 図²⁾では各地域で ETAS モデルがよく当てはまり、余震活動は順調に減衰していたと見えたが、一年間にわたる地震活動の解析では、各地域（第 1 図）で通常の ETAS モデルおよび変化点を含む ETAS モデルでは説明できない（第 1 表、第 2 表）。

熊本地域では M7.3 地震の余震系列の他に 14 日の M6.5 地震から続く前震活動を含む。これらの地震系列において M7.3 地震の発生時刻は自明な変化点（第 1 表）として不連続な非定常 ETAS モデルを適用した（第 2 図）。前震部分では M7.3 の前に背景地震活動と余震発生強度が共に減衰しているが、これは前震系列の静穏化²⁾と整合する。また M7.3 本震後では ETAS モデルを用いた解析では有意な変化点が無く、非定常 ETAS モデルでは背景地震活動と余震発生強度が共に緩やかに減衰している。また前震発生領域での余震発生の強度が周囲と比べて系統的に高い（第 2 図 B）。

阿蘇地域では M7.3 本震の約三週間後（ $t = 21$ 日）の変化点で ΔAIC が有意となり（第 1 表）余震活動の静穏化が示唆される。しかし非定常 ETAS モデルの適合度（第 1 表）の方がより優れており、静穏化に整合する緩やかな背景地震活動率や余震効率の減少変化が現れる（第 3 図 B）。当地域での背景地震活動強度の減衰は本震 M7.3 の誘発項（第 2 式右辺第 3 項）が示す減衰（第 3 図破線）以上に減衰しており、本震からの静的応力による誘発以外の原因が関与しているらしい。余震発生強度は阿蘇山の北部地域で系統的に高い（第 3 図 C）。

大分地域では M7.3 本震の 32 秒後に M5.7 の地震が誘発され、その後一連の余震が続いたと見られるが、このオフフォールト余震活動自体については M7.3 本震からの直接的な影響は見られない（第 2 表）。さらに本震後約二週間後（ $t = 15$ 日）以降 1 年以上、M3 以上の地震が発生しておらず静穏化が有意（第 1 表）となるが、このモデルより非定常 ETAS モデルの方が多少良い適合（第 1 表）を示しており、背景地震活動と余震強度は共に第 4 図 B のような減衰を示す。静穏化の ETAS モデルと非定常 ETAS モデルの適合度には大差がなく、今後の長期間にわたるモニタリングが必要である。ただし過去に遡って、この地域で M3 以上の地震が長期間発生しない場合は珍しくない。余震発生強度は深さに系統的に依存している（第 4 図 B）。

全領域で非定常 ETAS モデルの適合度が勝れ、 $\mu(t)$ パラメータ変移は大地震の破壊に伴い弱化した断層群の強度が経過時間とともに回復していく活動指標を示しているかもしれない。

拡張 ETAS モデルの説明

非定常 ETAS モデル¹⁾は通常の ETAS モデルの背景地震活動 μ と余震誘発強度 K_0 のパラメータが次のように時間 t に依存する。

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

他のパラメータ α, c, p は時間不変であり, 当該地域のテクトニックな地震活動に合わせて決定する. $\mu(t)$ は対象領域外からの剪断応力変化や断層強度の弱化や回復などに起因する時間変化を示すと考えられる¹⁾. 他方 $K_0(t_i)$ は対象領域内の各地震の誘発的連鎖効果 (余震発生強度) の大小を示すが, これは誘発地震の震源位置に依存して変化する. これらの推定法¹⁾は最小 ABIC 法にもとづく. 対抗する拡張モデルとして, 変化点 ETAS モデル以外に, 大地震による静的応力による誘発効果を表現した.

$$\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu + K_0 \sum_{\{i:t_i < t\}} \frac{e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p} + K_{M7.3} \frac{I_{\{t_{M7.3} < t\}}(t)}{(t - t_{M7.3} + c)^{p_{M7.3}}}. \quad (2)$$

も適用した. 右辺第 3 項が M7.3 地震による誘発効果の時間変化に対応する.

(熊澤貴雄, 尾形良彦, 鶴岡弘)

参考文献

- 1) Kumazawa, T. and Ogata, Y. *J. Geophys. Res.* 118 (2013) 6165
- 2) 統計数理研究所・地震研究所, 連絡会報, 96 巻 (2016) 12-21

第1表 基準 ETAS モデルからの各モデルの AIC (または ABIC) の減少量. 各地域の基準モデルは全期間での最尤 ETAS モデル. T_c は前震 M6.5 の発生時刻を 0 とした時の最良変化点時刻を表す. 変化点モデルの AIC はそれぞれの地域で減少している.

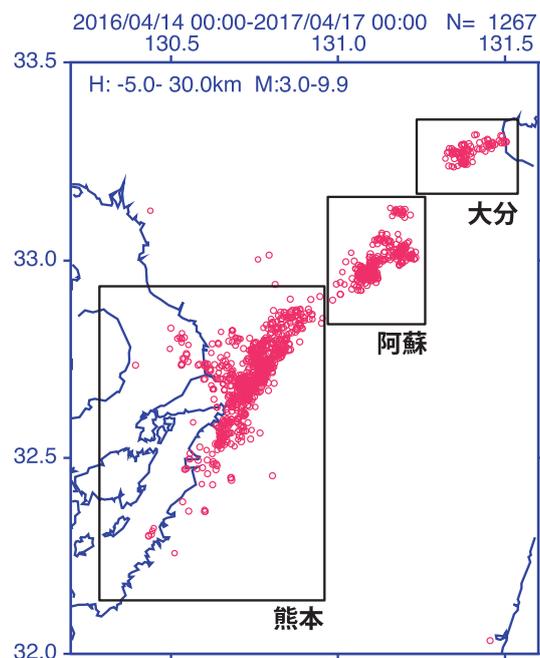
Table 1 AIC and ABIC differences from the reference ETAS model. The base AIC (or ABIC) is given by the ETAS estimate for the whole period of the target region. T_c correspond to the most likely change-point, counted from the occurrence time of M6.5 foreshock event.

	熊本地域	阿蘇地域	大分地域
ETASモデル 変化点の ΔAIC	-7.22 ($T_c=1.1656$ 日 M7.3本震時刻)	-10.44 ($T_c=21$ 日)	-6.26 ($T_c=14.9$ 日)
非定常ETAS モデルの $\Delta ABIC$	-18.58	-20.02	-7.03

第2表 基準 ETAS モデルとオフフォールト誘発効果を含む ETAS モデル (第2式) の最尤推定値と AIC 値の差.

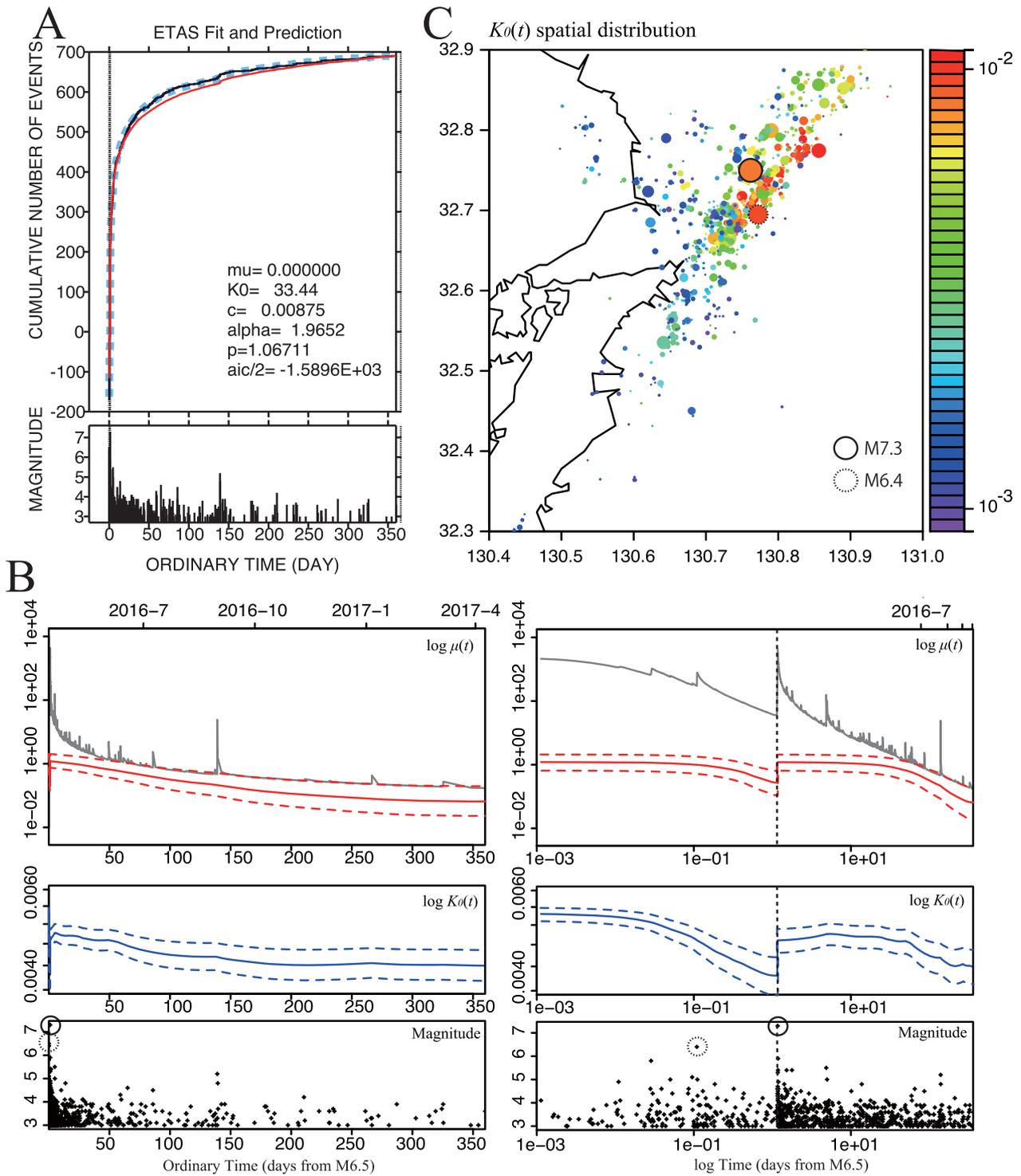
Table 2 MLEs of the reference ETAS model and the ETAS model with the induced effect (equation 2), and AIC differences between the two.

	μ	K_0	c	A	P	$K_{M7.3}$	$c_{M7.3}$	$P_{M7.3}$	ΔAIC
阿蘇 ETAS	0.0210	11.53	0.0166	1.532	1.331	--	--	--	-7.23
阿蘇 第2式	0.0162	8.894	0.0196	1.566	1.370	0.132	0.151	1.6891	
大分 ETAS	0.00561	5.381	0.0257	4.187	1.573	--	--	--	+2.51
大分 第2式	0.00540	5.372	0.0296	3.711	1.647	1.04×10^{-4}	0.383	1.826	



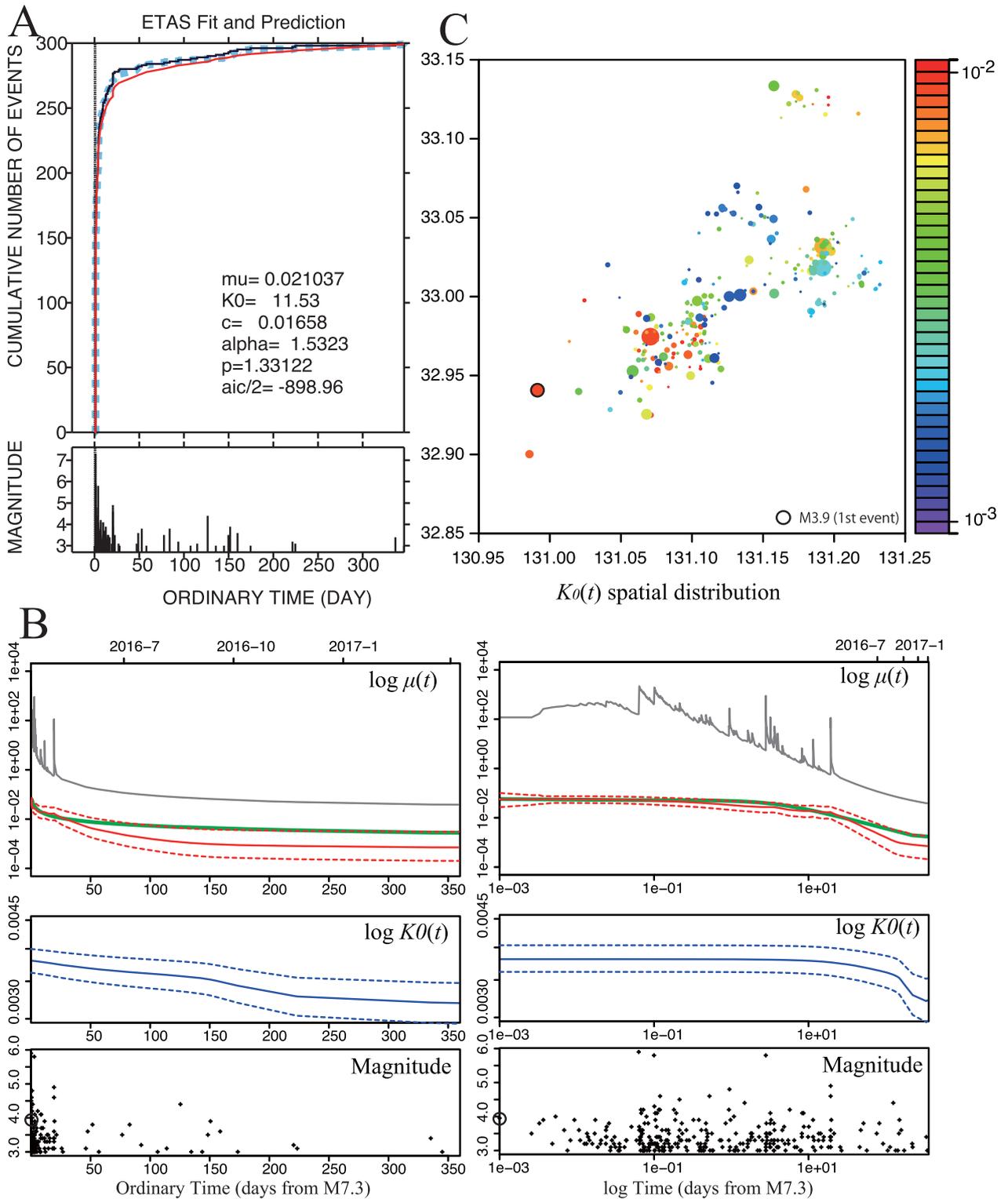
第1図 熊本地震余震域全域の震央. 2016年4月14日のM6.5前震から2017年4月17日までの $M \geq 3.0$ の熊本地域の地震と阿蘇地域および大分地域のオフフォールト余震を示した.

Fig. 1 The epicenter locations of $M \geq 3.0$ earthquakes in the whole aftershock region for the period from the M6.5 event at 14th Apr. 2016 till 14th April 2017, in Kumamoto main-region and Aso and Aso and Oita off fault regions.



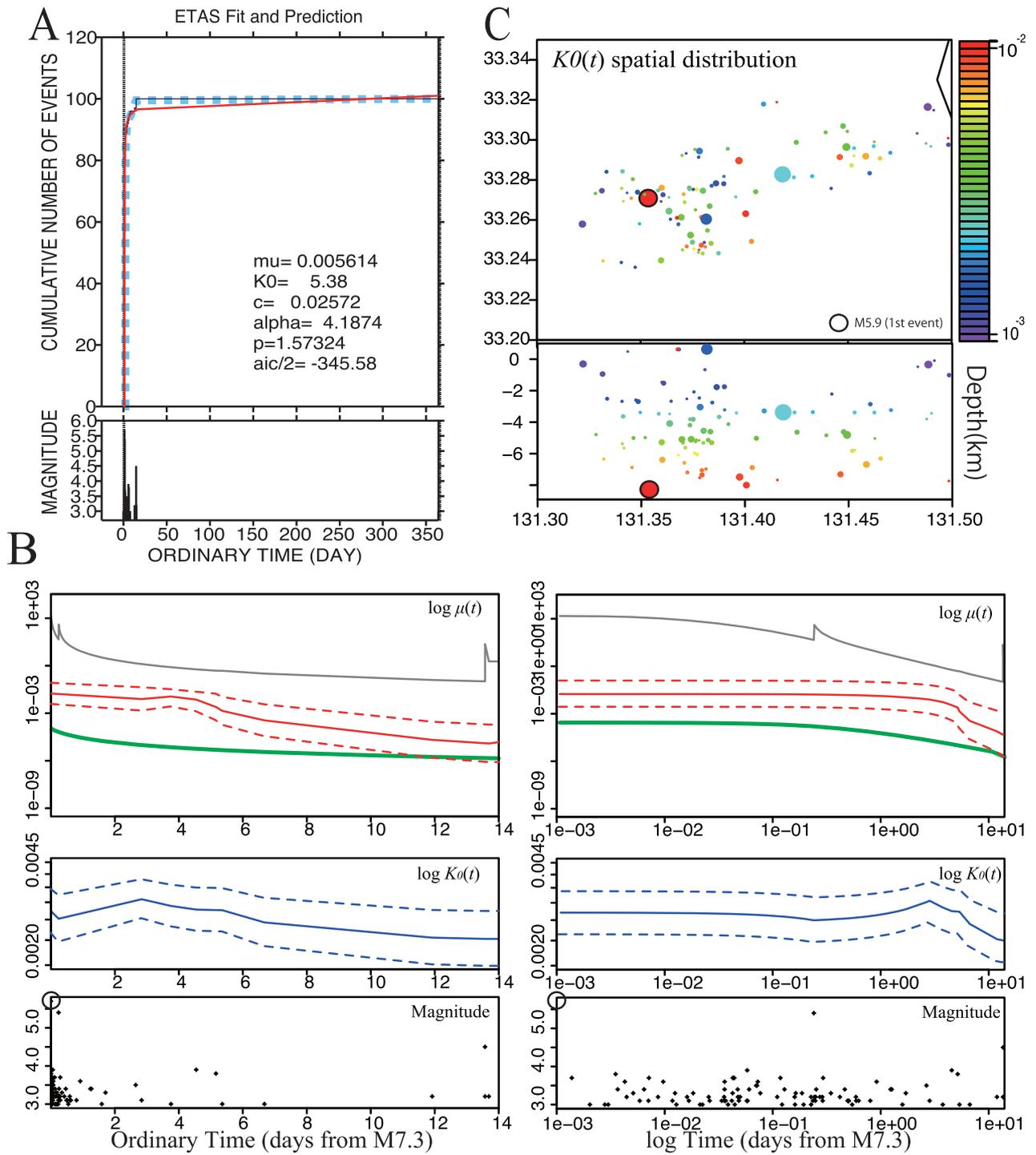
第2図 熊本地域の地震活動の解析。(A) ETAS モデルを $S = 0.01$ 日 (M6.5 直後) から全期間の期間で適用し基準モデルとした。赤曲線はその理論累積数を表す。灰色の点線はパネル B に示す非定常 ETAS モデルで得られる推定累積曲線。(B) 非定常 ETAS モデルの推定結果。基準パラメータとしてパネル A の基準 ETAS モデルの最尤推定値を用い、左側パネルは通常時間、右側パネルは対数時間でのプロットで標準誤差のエンヴェロープを破線で表示した。縦点線は M7.3 地震の発生時刻を示す。(C) 余震発生強度 K_0 の空間変化。

Fig. 2 Models applied to the Kumamoto region. (A) The ordinary ETAS model fitted for the whole period, and the red cumulative curve stands for the ETAS model. The thick dotted gray curve stands for the estimated non-stationary ETAS model in panel B. (B) The estimated non-stationary ETAS model where the reference parameters are the MLE in the panel A. The time is in normal scale (left side panel) and in logarithmic scale (right side panel) with dashed envelopes of the standard errors. (C) Spatial distribution of the MAP estimates of K_0 parameters.



第3図 阿蘇地域の地震活動の解析。(A) 通常 ETAS モデルを $S = 0.01$ 日 (M7.3 直後) から全期間で適用した。赤曲線および灰太点線は第2図のパネル A に同じ。(B) 第2図のパネル B に同じ。ただし緑太実線は本文の第2式に表されている熊本地域の M7.3 地震による静的誘発項の変化を示す。(C) は第2図のパネル C に同じ。

Fig. 3 Models applied to the Aso region. (A) is same as the panel A of Figure 2. (B) is the same as the panel A of Figure 2, except that the thick dark green curve represents the triggering effect by the M7.3 event, indicated by the 3rd term in equation 2 in the text. (C) is the same as the panel C of Figure 2.



第4図 大分地域の地震活動の解析。(A) 第3図のパネルAと同じ。(B) 第2図のパネルBと同じ。(C) の上図は第2図のパネルCと同じ。下図は深さ対東西分布を示す。

Fig. 4 Models applied to Oita region. (A) is same as the panel A of Figure 3. (C) is the same as the panel C of Figure 2.