

2016年4月1日三重県南東沖の地震（M6.1）に続く群発地震活動の統計解析

Statistical analysis of the swarm activity induced by the 2016 April earthquake of M6.1 at the southeast off the coast of the Mie Prefecture

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1日三重県南東沖でM6.1の地震が起きた。本震を囲むように余震が起きず、10 kmほど離れた場所に30分程度の遅れで群発地震が誘発され余震の様に減衰しすぐ静穏化した。それから18日後にはほぼ同じ場所で再び活動し、直ぐ静穏化して現在（5月16日）に至っている。

本報告では気象庁一元化震源カタログの全ての検出データを使用するとともに、気象庁地震波形データ（陸域）に海洋研究開発機構（JAMSTEC）のDONET地震波形データ（海域）を併せてMatched Filter法で再決定した震源データによる解析も並行して行った。いずれの震源データの群発活動には大なり小なり震源の拡散や移動が見られ、以下に述べる統計解析の結果によると、互いに同様な結果が得られ、今回の本震と誘発群発地震活動がプレート境界で起きたことを示唆している。

1. 地震の検出率とマグニチュード頻度分布 b 値の時間変化

検出された全地震のマグニチュード頻度分布の時間変化モデル¹⁾のベイズ的平滑化解析を行うと、 b 値の時間変動が認められるが、各マグニチュードの地震検出率は時間的に不変である。したがってM6.1本震直後に余震が殆ど無いのは、大量に欠測したのではなく、続発した活動は或る程度遅れて始まったことを示している。また、これは地震データが時間的に均質であるため、ETASモデルなどの地震活動が下限マグニチュードに拘ることなく推定できる。 b 値の時間変動はそれぞれの震源データと同じ傾向を示し、最初の群発活動中で増加し、第2の群発地震でもさらに増加している。

2. 非定常 ETAS モデルによる解析

ここで使用する「非定常」ETASモデル^{2, 3)}は従来のETASモデルの常時地震活動 μ と余震発生強度 K_0 のパラメータが次のように時間 t に依存するものである。

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

他のパラメータ α, c, p は時間不変（定数）であり、周囲のテクトニックな地震活動に合わせて決める。 $\mu(t)$ は地震発生場での静的応力変化や断層弱化などに起因する地震発生率の変化を示す。他方 $K_0(t_i)$ は各地震の連鎖性（トリガリング）効果の大小（余震生産性）を示

すが、実際は時刻 t_i で起きた地震 i の位置に依存することが分かる。この点過程モデルを今回の群発地震活動に当て嵌めた結果を示す。

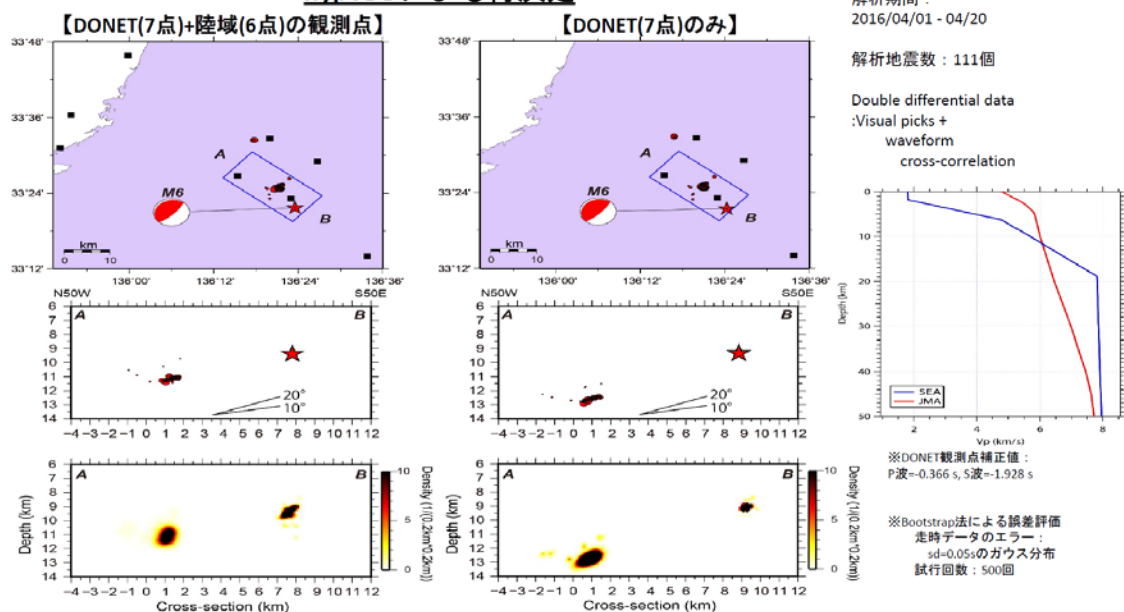
本解析にかんしてソフトウェア TSEIS と XETAS を使用した。

(熊澤貴雄, 尾形良彦, 加藤愛太郎, 鶴岡弘)

参 考 文 献

- 1) 統計数理研究所, 連絡会報 73 巻 (2005) 666.
- 2) Kumazawa, T. and Ogata, Y. *J.Geophys.Res.*118 (2013) 6165.
- 3) 統計数理研究所・気象研究所, 連絡会報 [94](#) 巻 (2015) (5-1) 136.

hypoDDによる再決定



第1図。気象庁地震波形データ（陸域）に DONET 地震波形データ（海域）を併せて Matched Filter 法で再決定した震源図

Fig. 1. Hypocenters relocated by Matched Filter method from the JMA seismic waveform data (inland) and DONET seismic waveform data (sea area).

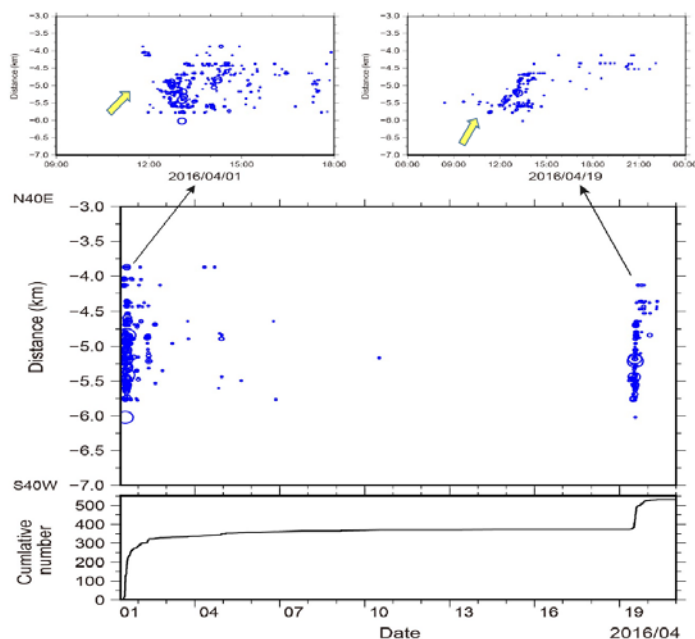
Matched Filter法の適用 (DONET+陸域の観測点)

解析期間：
2016/04/01 - 04/23

解析帯域：4 - 8 Hz
解析窓長：5秒
テンプレート地震数：111個

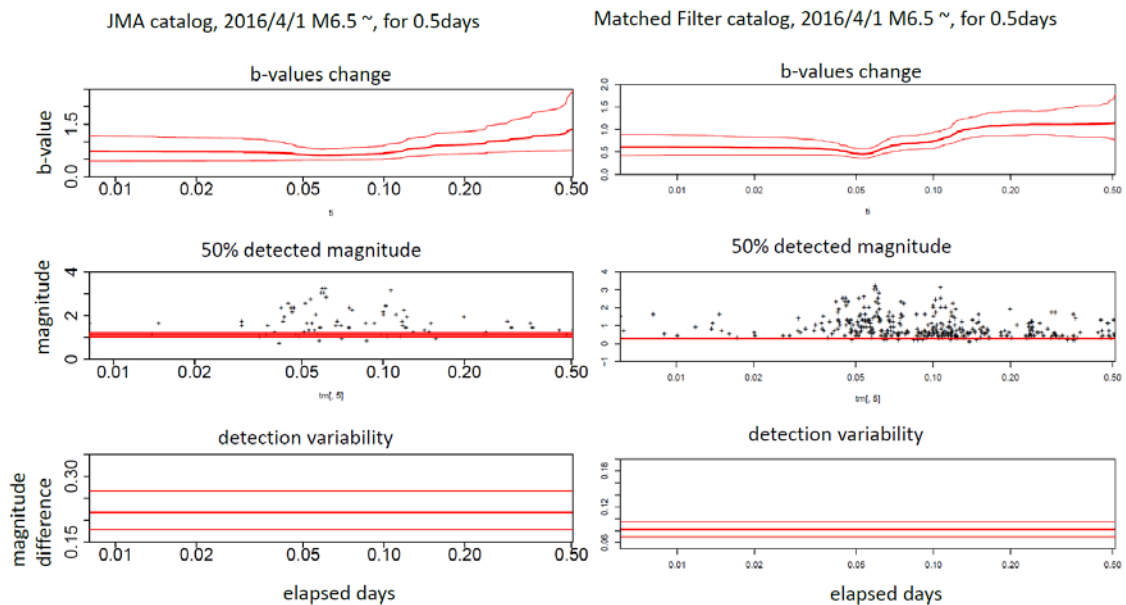
検出された総地震数：548個

右図：余震域の時空間変化。
4月1日と4月19日の群発的な地震活動の際、震源の移動が見られる。移動速度は、約10 km/dayである。



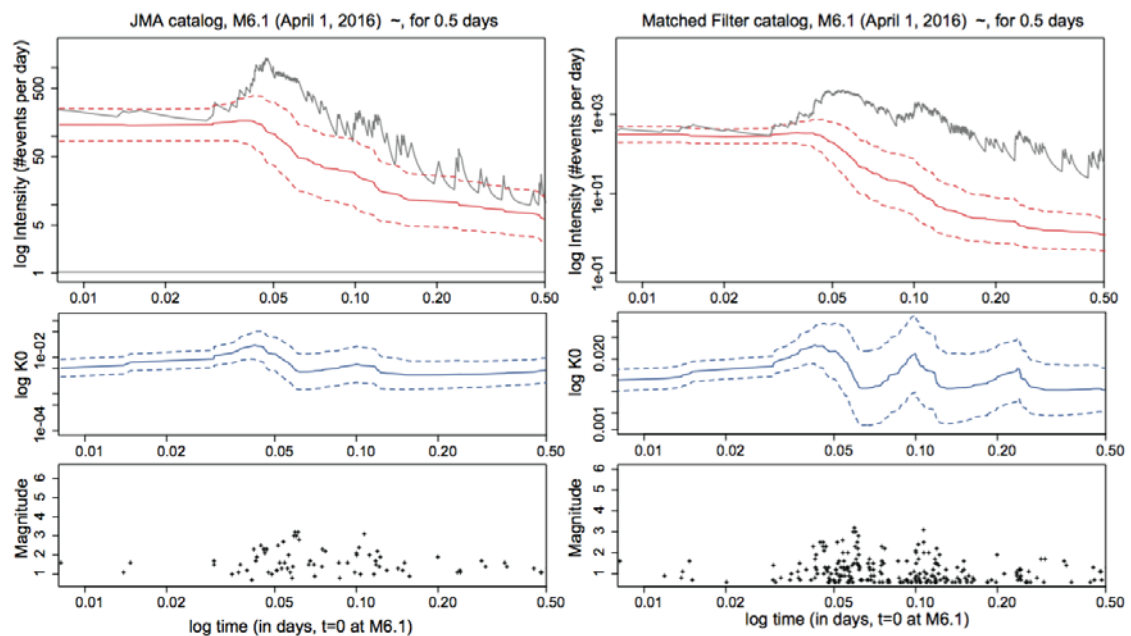
第2図。気象庁地震波形データ（陸域）に DONET 地震波形データ（海域）を併せて Matched Filter 法で再決定した震源データによる時空間図と検出地震数の累積曲線

Fig. 2. The space-time distribution and the cumulative curve of the relocated earthquakes by Matched Filter method.



第3図。2016年4月1日のM6.1地震後半日間のGRマグニチュード頻度分布b値（上段図）と地震検出率パラメータ（中下段図）の時間変化と2倍誤差。左側図は気象庁一元化データで右側図は気象庁とDONETから決めたデータ。

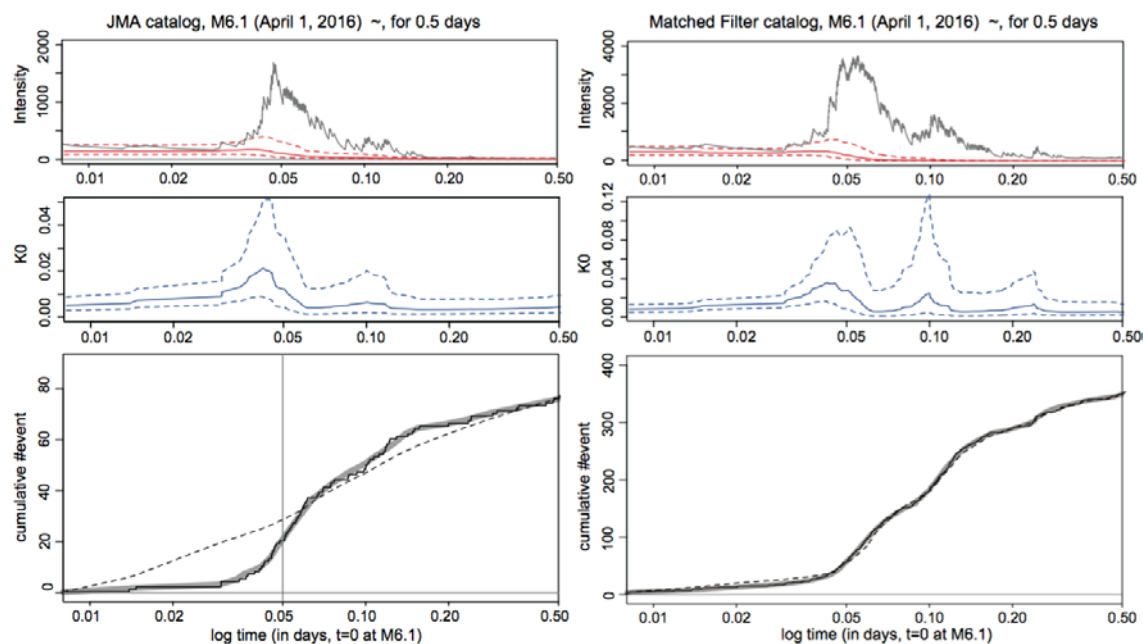
Fig. 3. The time changes of the b -values (top panels) and the detection rate parameters (middle and bottom panels, respectively) with double error bands, during the period of half a day after the M6.1 earthquake on April 1, 2016. The left hand side panels use JMA data, and the right hand side panels use the relocated data determined by using both the JMA network and the DONET network.



第4図。(上段図)非定常ETASモデルの強度関数 $\lambda(t)$ (灰色線)と常時地震活動(background seismicity rate) $\mu(t)$ (赤線)。(中段図)余震生産率(aftershock productivity) $K_0(t)$ (青) x軸, y軸共に対数スケール。(下段図)対応する地震活動のM-T図。期間は2016年4月

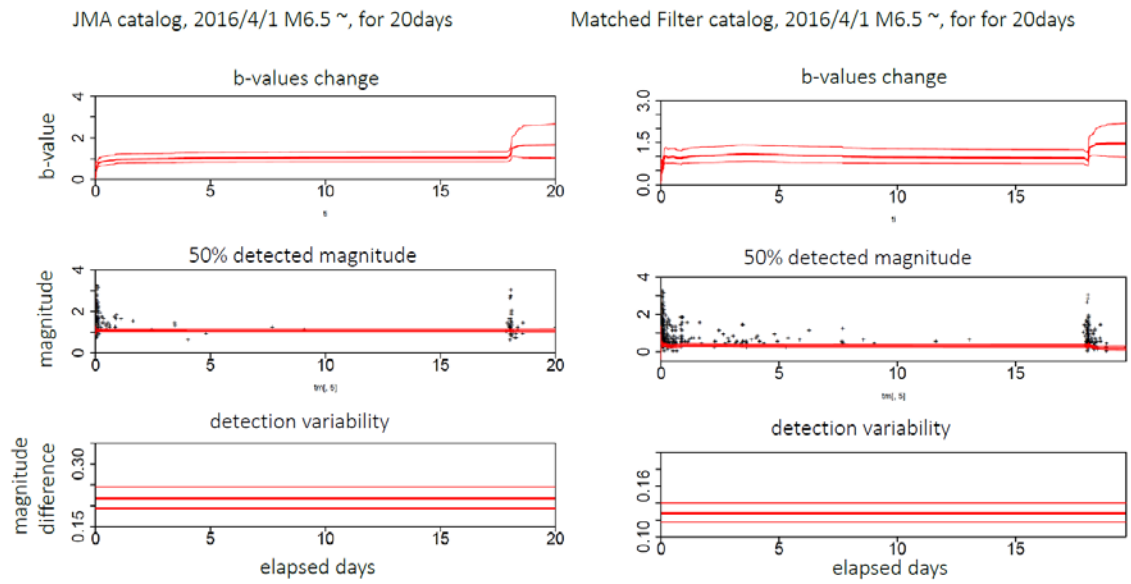
1 日の M6.1 地震後半日間。左側図は気象庁一元化データで右側図は気象庁と DONET から決めたデータによる結果。

Fig. 4. (Top panels) The intensity rate $\lambda(t)$ (gray spiky lines) and the background seismicity rate $\mu(t)$ (red curves) of the nonstationary ETAS model. (Middle panels) The aftershock productivity parameter $K_0(t)$. The x- and y-axis are both in logarithmic scale. (Bottom panels) the M-T plot of the corresponding seismicity, during the period of half a day after the M6.1 earthquake of April 1, 2016. The left hand side panels use the JMA data, and the right hand side panels use the waveform data from the JMA network and the DONET network.



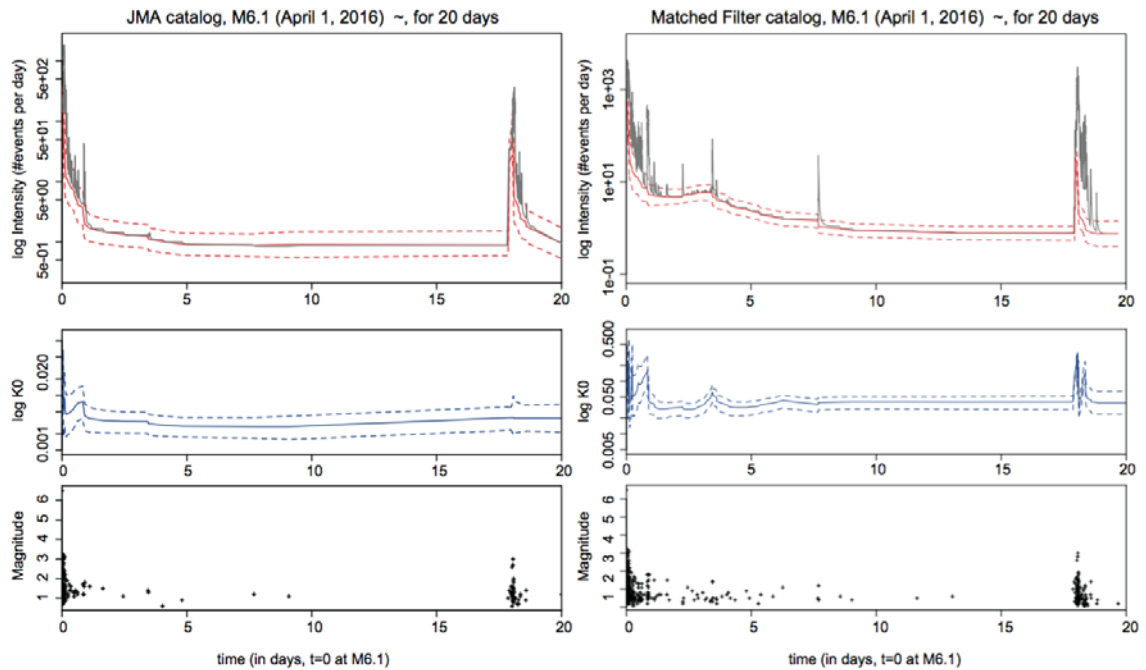
第 5 図。(上段図と中段図) 第 4 図の上段図と中段図の y 軸をリニアスケールで与えたもの。
 (下段図) それぞれの観測群発地震の累積関数 (黒実曲線) と非定常 ETAS モデルによる理論累積曲線 (灰色曲線)。黒点曲線は 0.05 日以降をターゲット区間として定常 ETAS モデルを当て嵌めた場合の推定累積曲線。

Fig. 5. (Top and middle panels) Same as those in Fig. 4 except for given in linear scale on x-axis. (Bottom panels) The empirical cumulative function of the observed earthquakes (solid black thin curve) superimposed on the theoretical cumulative curve by nonstationary ETAS model (gray thick curve), with the estimations by the standard ETAS model for the target period after the first 0.05 days (vertical dashed black line).



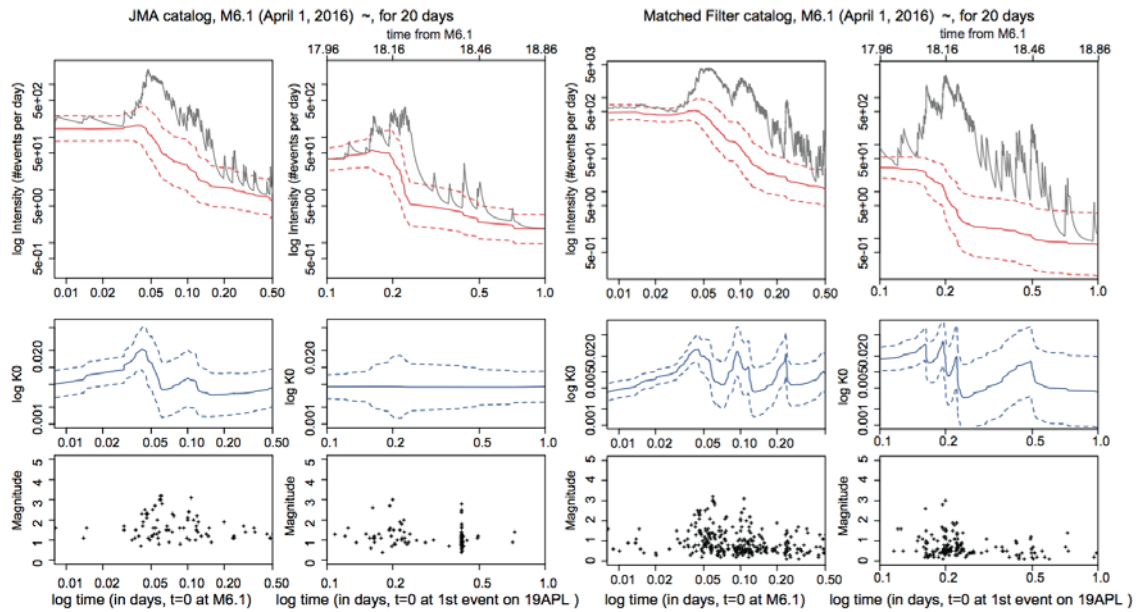
第 6 図。第 3 図と同様であるが解析期間は M6.1 地震時から 20 日まで。

Fig. 6. Same way as those in Fig. 3 except that the fitted period is 20days after the M6.1 earthquake.



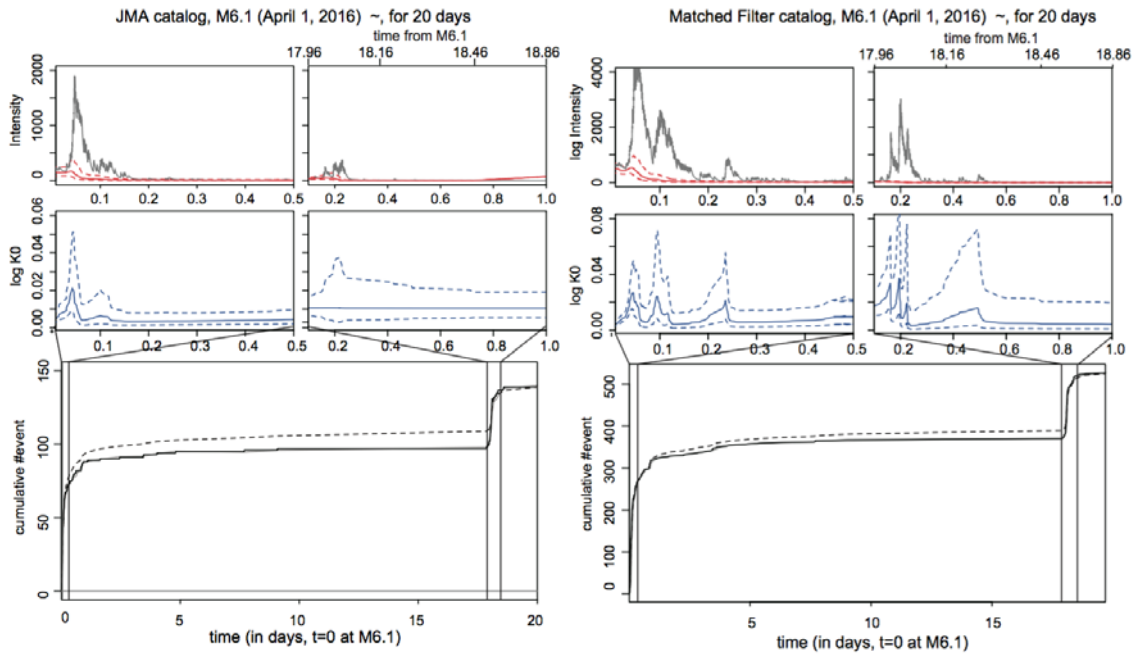
第 7 図。第 4 図と同様であるが解析期間は M6.1 地震時から 20 日まで。

Fig. 7. Same as those in Fig. 4 except that the fitted period is 20days after the M6.1 earthquake.



第 8 図。第 7 図の各群発期間の拡大図。第 1 列と 3 列目は M6.1 本震から 0.5 日間を対数時間スケールで、第 2 列と 4 列目は 2 回目の群発活動開始 (4 月 19 日) から 1 日間の開始時刻からの対数時間スケールで表示した。

Fig. 8. Enlarged view of Fig. 7 for the active periods of the first 0.5 days span after the M6.1 (1st and 3rd columns) and a day span from the start of the second swarm (2nd and 4th columns). The x-axis is in logarithmic scale started from the beginning of each active period.



第9図。第5図をM6.1地震から20日間延長した全区間について示した。(上段と中段図) 第8図の上段と中段図のx軸, y軸をリニアスケールで示た。(下段)地震活動の累積図で説明文は第5図の下段と同じ。

Fig. 9. Extended figures of the nonstationary ETAS model as those in Fig. 5 for the entire period of 20 days from the M6.1 earthquake. (Top and Middle panels) Same plot as those in Fig. 8 except that both x- and y-axes are in linear scale. (Bottom) The corresponding cumulative curves throughout the entire period.