

### 3-19 東北地方太平洋沖地震の余震と連鎖地震

#### Tohoku earthquake: aftershock activity and triggered activities in the eastern Honshu area.

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

#### 1. ETASによる余震数の予測に比べた余震生産率の異常

先ず、今回のM9太平洋沖地震の余震の生産性（productivity）を、東北沖地域の通常の地震の生産性と比較してみた（第1図）。1923年以降の東北地域のM5以上の地震活動をETASモデルで当てはめ、M9の地震が起きた予測数と比較すると、ほぼ予測どおりである。しかし1997年10月の一元化以降の当てはめだと予測の2倍ほどになる。後者の場合はこの期間に見られた広域静穏化のためでないかと考えられる（統数研、本巻別報告参照）。

#### 2. 余震活動

余震活動モニタリング時空間分布（M5+, 7月1日現在、第3図）。ETASモデルのalpha値が大きく2次余震の効果が小さい（大森・宇津の公式に近い）。地域的かつ変換時間的な均質な余震減衰が特徴的である。

余震活動時空間分布（M4.5+, 7月1日現在、第4図、第5図、第6図）。本震直後の余震の低発生率がアウターライズ寄り（東側）の領域で顕著である。M4.5+の余震活動の3月27日頃からの静穏化は有意である（第5図）。デトレンドした時空間分布は、余震活動に静穏化がない場合（第4図）に比べて、とくに陸寄りの深い部分で顕著である（第5図）が、静穏化の原因は今のところ不明である。第6図で変化点以後の時空間分布を求めたが、特段の非一様性は見えない。

余震活動時空間分布（M4.0+, 7月1日現在）。検出率の時間的な不均質性（特に本震直後）を見込んだ上で大森・宇津の式を当てはめた。このような場合にはc値が大きくなる。デトレンドした時空間図（第7図）で見るとプレート境界部分では特段の非一様性は見られないが、アウターライズ寄りでは静穏と活発が繰り返し最近数週間活発化しているように見える。

参考まで、最近の超巨大地震である2010年チリ地震（Mw8.8）と2004年スマトラ地震（Mw9.0）の余震活動を大森・宇津の公式でデトレンドした時空間分布を第8図に示す。スマトラ地震の場合は約3ヵ月後に南に破壊が拡大したが、余震活動の移動現象が見られる。ニュージーランドの2010 Darfield - 2011 Canterbury (Christchurch)地震にも似たような余震活動の特徴が見られる。

#### 3. 連鎖地震活動

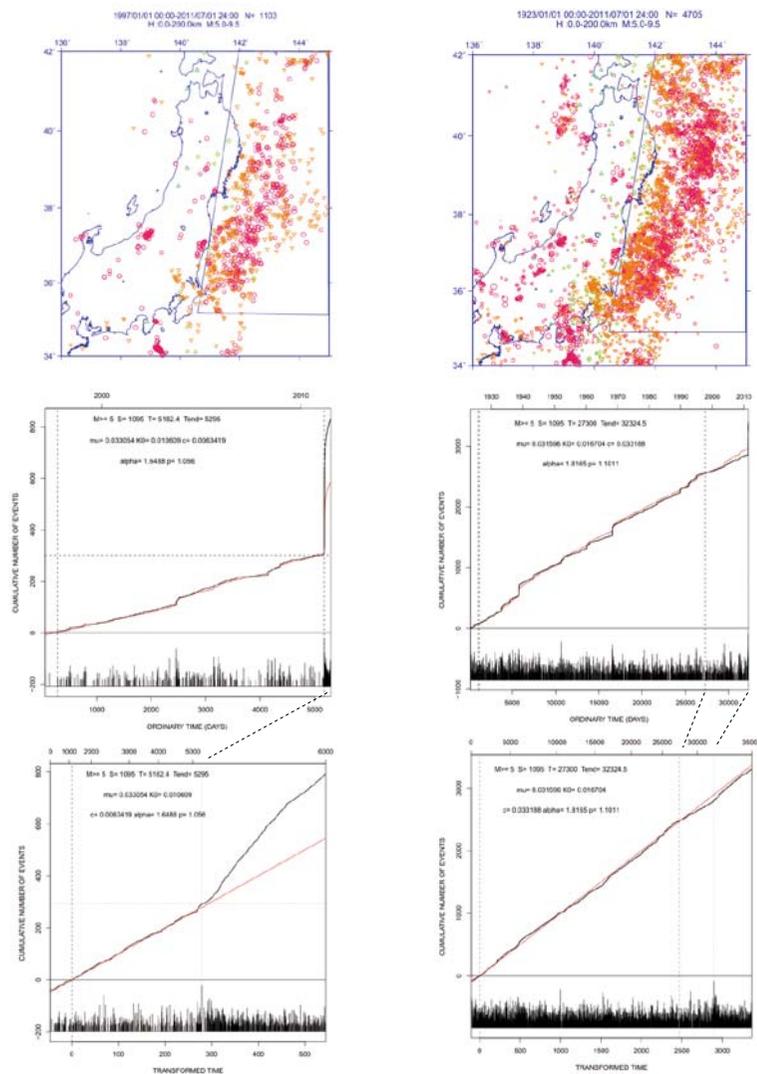
東北地方太平洋沖の超巨大地震はアウターライズ地帯のみならず日本海西縁部、東北地方や中部地方の内陸地震を誘発しており、それらは本震余震型または群発型で推移している。前者は富士地域M6.4、長野県北部M6.7および福島県西部M4.0の地震活動（第9図）。これらの地震を検出率の制約（M2+）のため通常の場合に比べて多くはないがETASでみると順調に推移しているようにみえる。後者の中には、しばらく経って飛びぬけて大きな地震が起きたものもある。

たとえば福島県南東部（いわき地方）の誘発地震活動（第10図）は3月11日のM6を先頭にM6クラスの群発型活動を続けるが4月11日の地震（M7.0）につながる。3月11日からの活動（M3+, M2.5+）が3月28日ぐらいからETASモデルで予測される発生率よりもかなり少ない状況（相対的静穏化）が見られ、M7の地震が起きた。M7.0の地震の断層内（地理院本巻参照）で前駆的すべりを仮定し、受け手として東西伸張の正断層型地震を考えると、余震域がストレスシャドウとなり、余震活動の低下を説明できる。

もう一つは、長野県北部の南側の方の地震クラスタの群発である。北側のクラスタは第9図にある通り、順調に経過しているが、南側のクラスタの活動（第11図）は明瞭で有意な相対的静穏化が長い間続いて、最大地震（M5.6）が起きた。

（尾形良彦，熊澤貴雄）

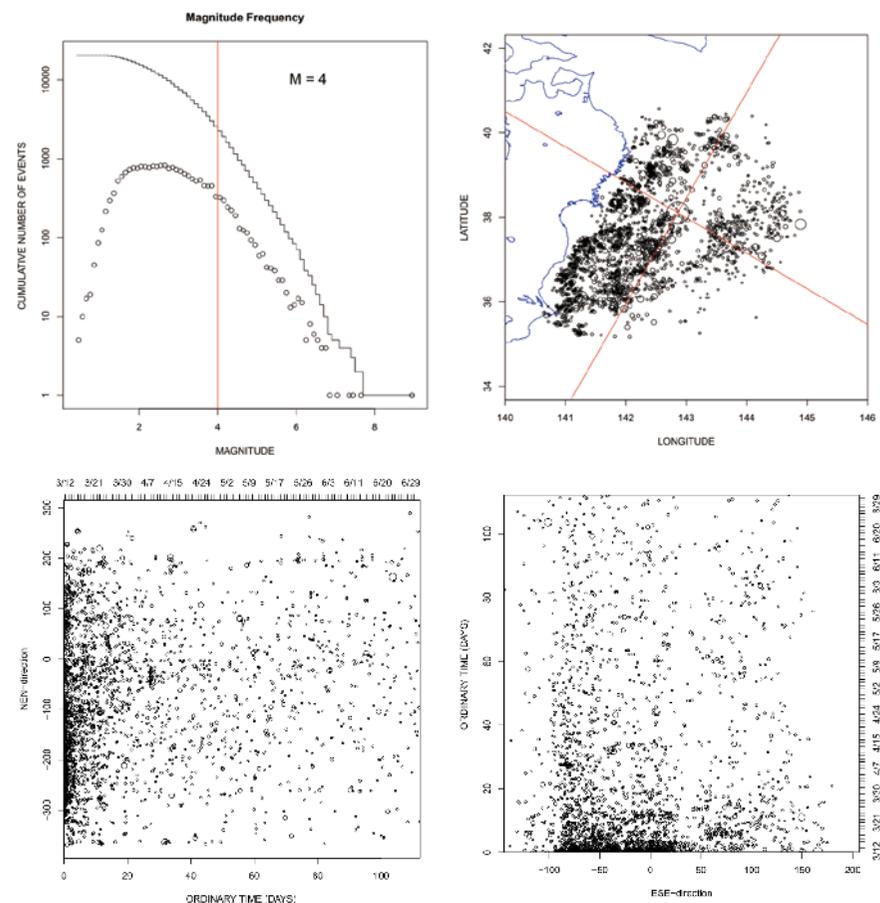
## 東北地方太平洋沖地震の余震の productivity



第1図. ETASモデルによるM9地震の余震数(M5+)の予測. 一元化以降の活動を基準にすると余震生産率はそれまでの約2倍である(左側図). しかし1926年からの活動を基準にすると同等の生産性となる(右側図). 一元化以降の活動の静穏化のためと考えられる(統数研, 本巻別報告参照).

Fig. 1. The aftershock productivity of M9 event relative to the ETAS forecast. Middle and bottom row cumulative functions and M-T diagrams are against ordinary and transformed time, respectively. We had twice as many aftershocks as expected by the activity during the period 1998-2010 (left), but the similar relative to the one during 1926-2010 (right). This is probably due to the seismic quiescence during the last decade (cf., other report by the ISM in this volume).

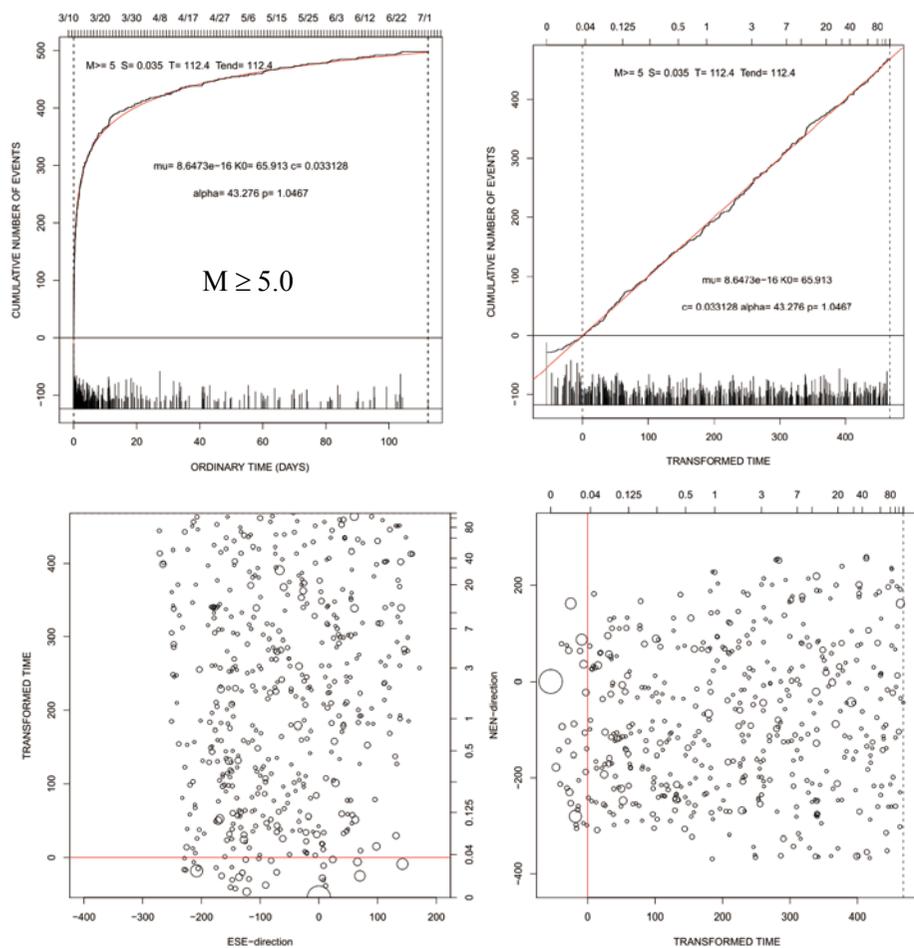
## 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴



第2図. 東北地方太平洋沖地震の余震のマグニチュード頻度分布, 震央分布, および時空間分布(M4+, 7月1日現在)ただし時空間分布(下段)は本震震央を原点で30度回転した北北東(NEN)と東南東(ESE)の座標軸に射影したもの.

Fig. 2. Aftershocks of the M9 earthquake; magnitude-frequency of detected aftershocks, M4+ epicenters and space-time plots where the space axes are rotated 30 degrees such that the y- and x-axis direction is NNE and ESE, respectively, so that depth of plate boundary in the same value in ESE axis stands for similar depth.

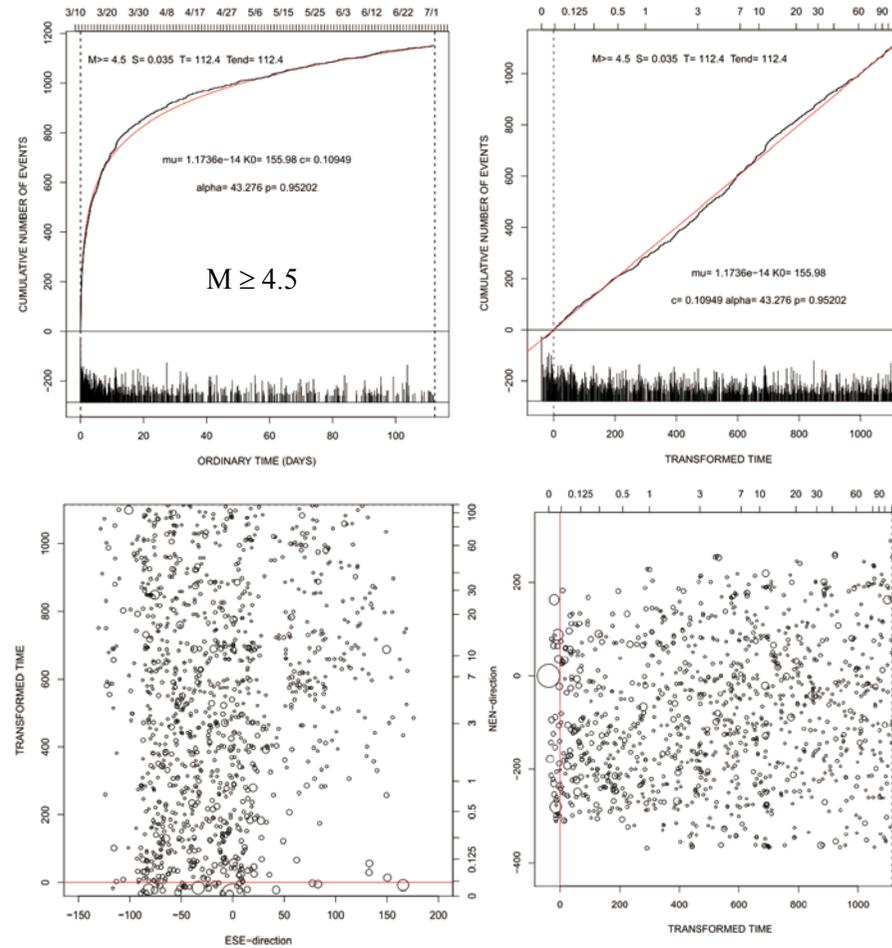
東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



第3図. 除トレンド余震活動時空間分布 (M5+, 7月1日現在). 時空間の座標軸は第1図に同じ. 上図で当てはめたE T A Sモデルのalpha値が大きく, 2次余震の効果が小さい(大森・宇津の公式に近い)ことを意味する. 変換時間的に均質な余震減衰が特徴的である.

Fig. 3. Plots of space against transformed time (de-trended) regarding the projection axes shown in Figure 1. No significant change in time is found in M5.0+ data. The red cumulative curves in top panels are due to the fitted ETAS model where the alpha-value is large, indicating little secondary aftershocks, or close to the simple Omori-Utsu formula.

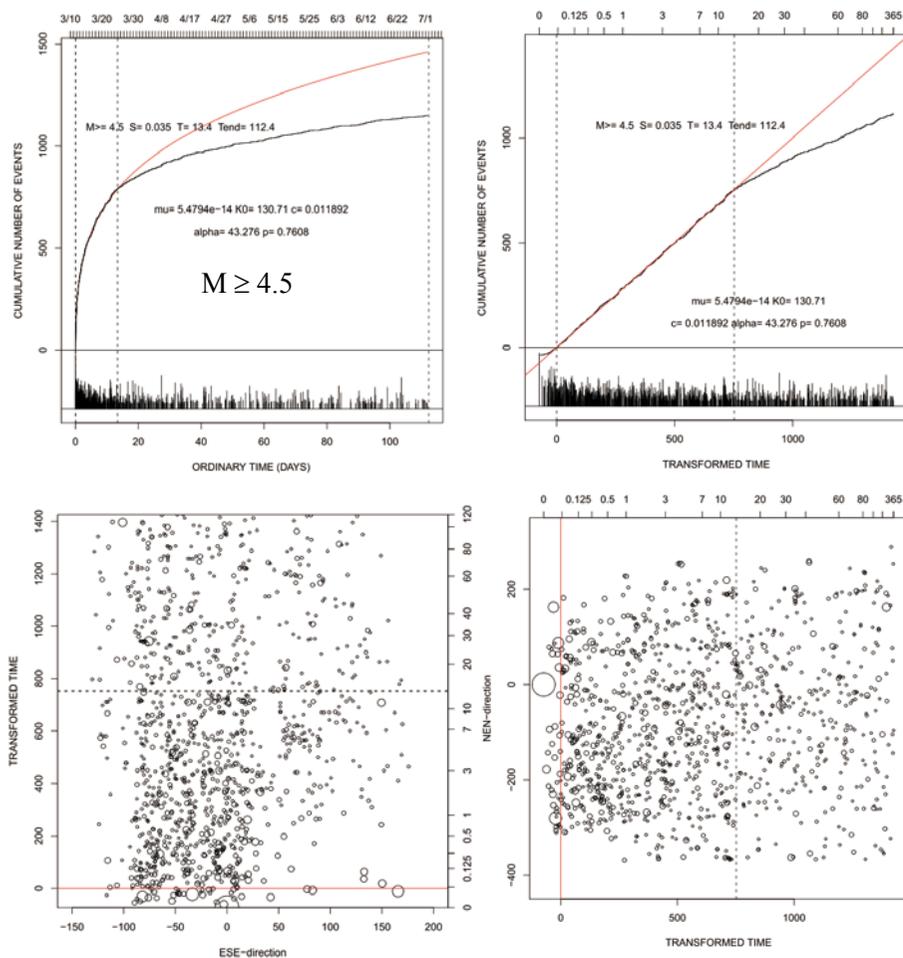
東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



第4図. 静穏化を仮定しない余震活動の除トレンド時空間分布 (M4.5+, 7月1日現在). 本震直後の余震の低発生率がアウトターライズ寄り(東側)の領域で顕著である.

Fig. 4. Plots of space against transformed time (de-trended) in M4.5+ data. No change point in time is assumed. We can see sparser events particularly in the beginning in the side of outer rise.

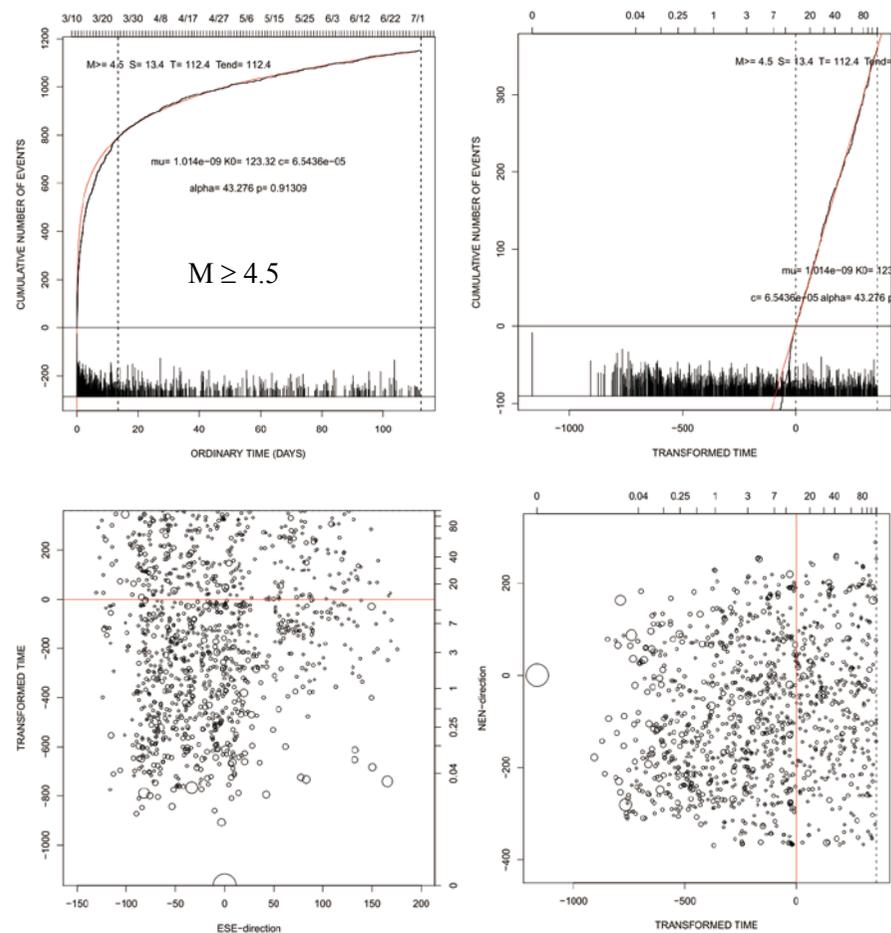
### 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



第5図. 変化を仮定した除トレンド余震活動時空間分布 (M 4.5+, 7月1日現在). 3月27日頃からの静穏化は有意であり、とくに陸寄りの深い部分で顕著である。

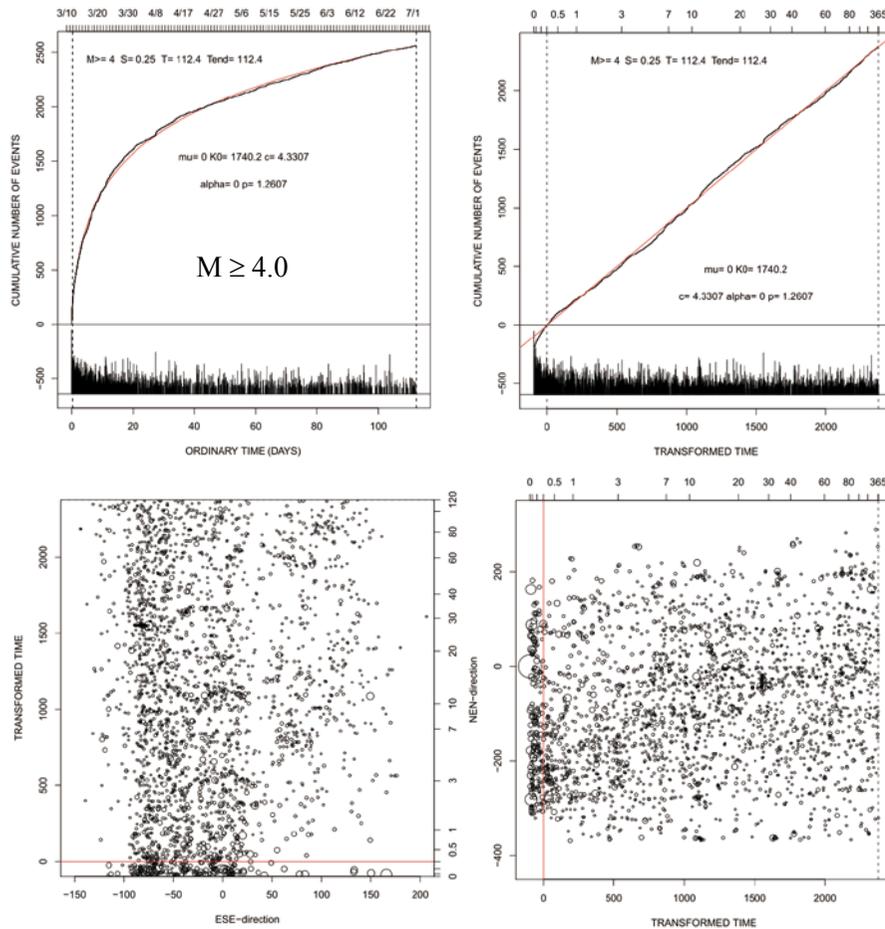
Fig. 5. De-trended space against time plots. Significant change in time is found in M4.5+ data. We can see sparser events particularly in the coast side after the change-point around 27 March.

### 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



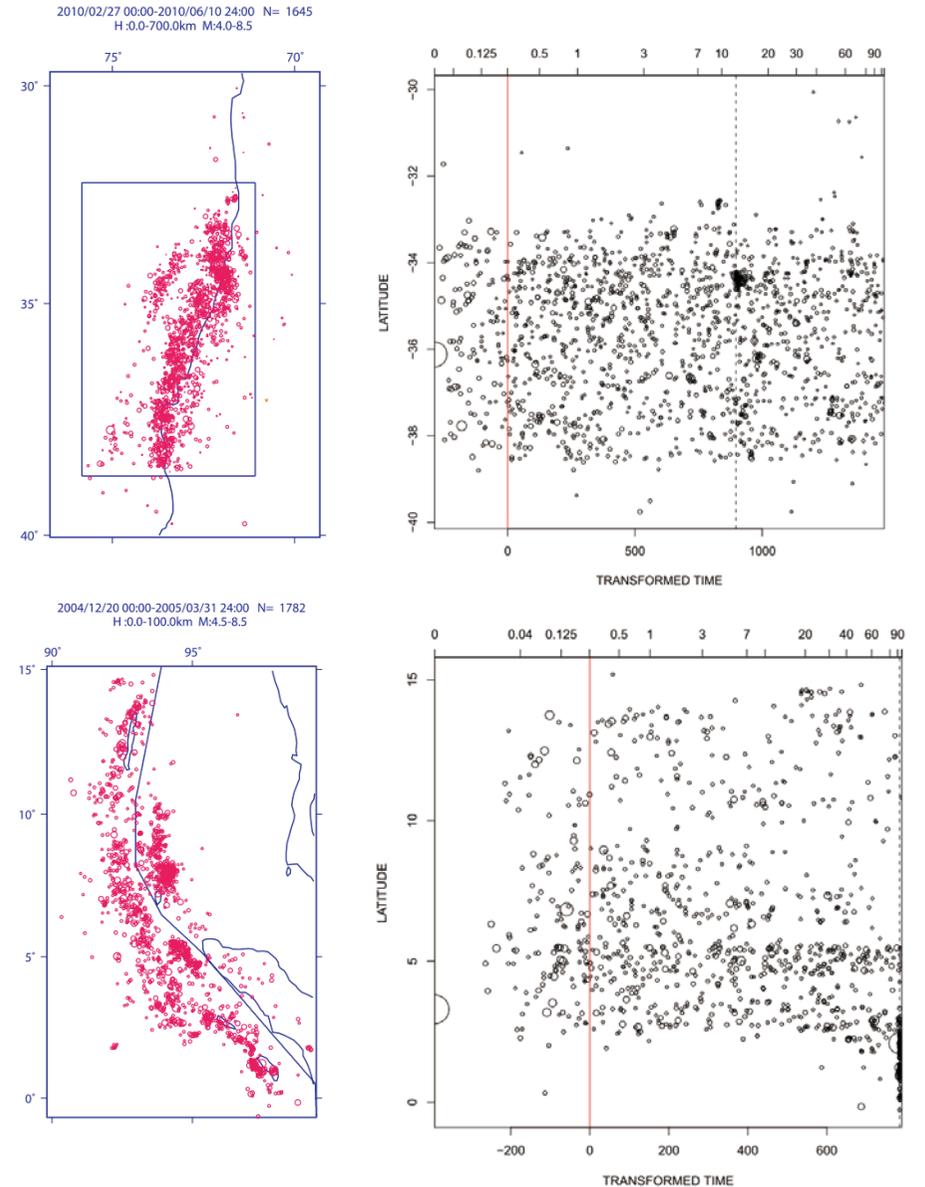
第6図. 有意な変化点後の除トレンド余震活動時空間分布 (M 4.5+, 7月1日現在).  
Fig. 6. De-trended space against time plots after change-point in M4.5+ data.

## 東北地方太平洋沖地震の余震活動の特徴(続き)



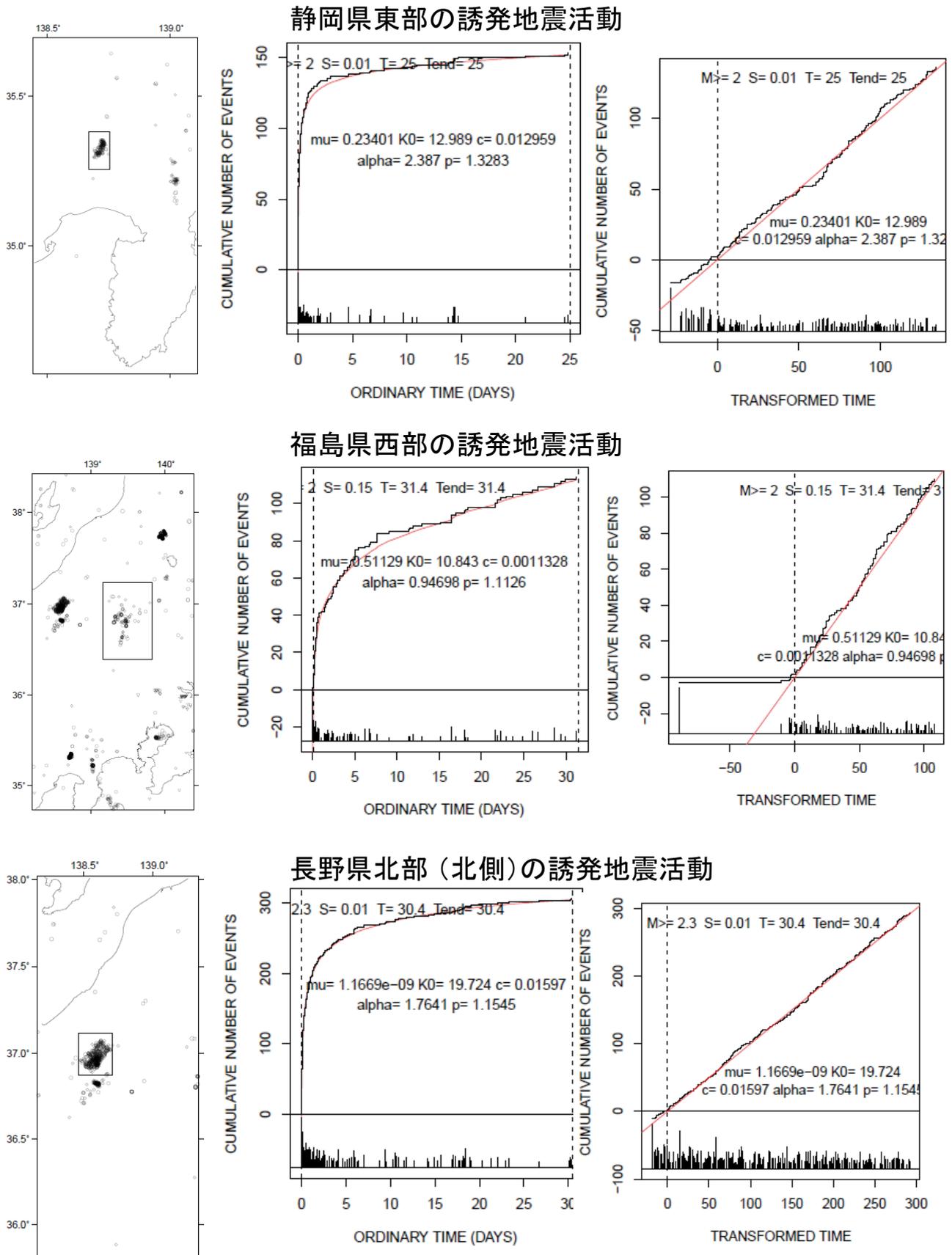
第7図. 余震活動時空間分布(M4.0+, 7月1日現在). 検出率の時間的な不均質性(特に本震直後)を大森・宇津の式でデトレンドした. アウターライズ側地域が最近1ヵ月間活発化しているように見える.

Fig. 7. Space against time plot that is detrended by the Omori-Utsu formula for the aftershocks of M4.0 or larger which seem to be nearly homogeneously detected after several days since the mainshock. We can see relative activation during the last month in outer rise side.



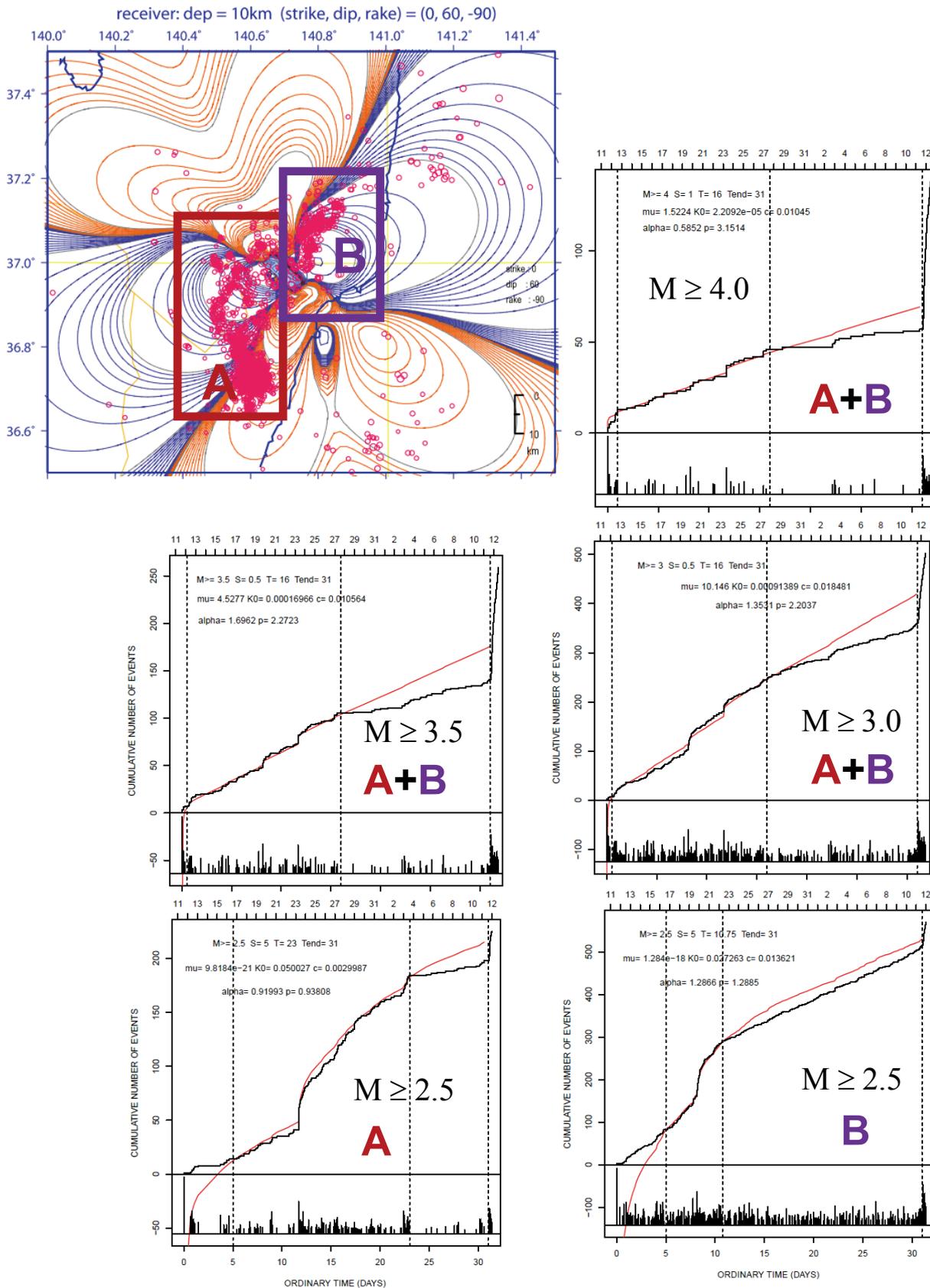
第8図. 2010年チリ地震(Mw8.8)の余震活動(上図)と2004年スマトラ地震(Mw9.0)のプレート境界部分の余震活動(下図)のデトレンド時空間分布.

Fig. 8. Aftershock activities of the 2010 Chili earthquake of Mw8.8 and the 2004 Smatra earthquake of Mw9.0. Space against time plot detrended by the Omori-Utsu formula for the aftershocks



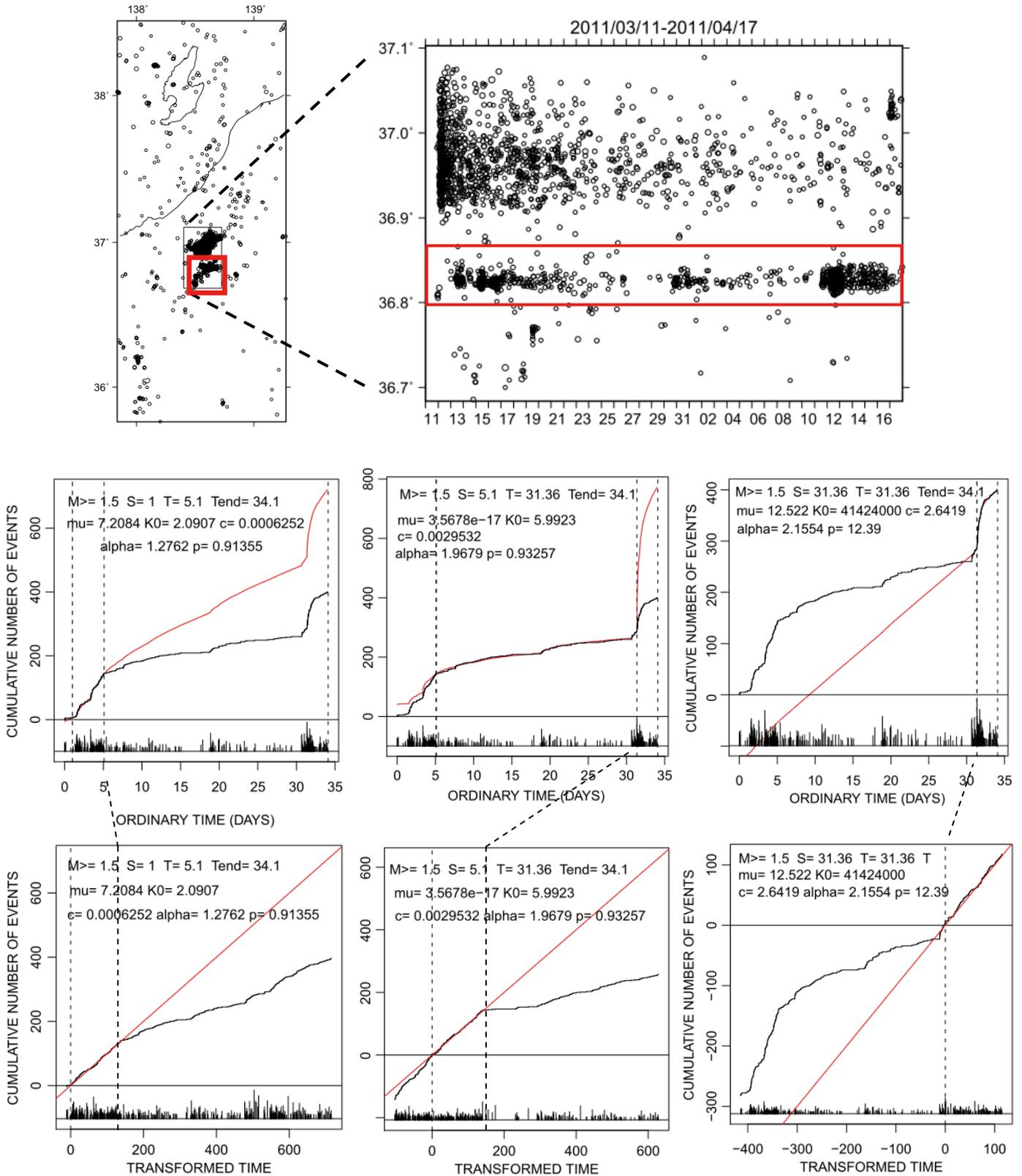
第9図. 富士地域, 福島県西部および長野県北部(北側)の誘発地震活動(M2+). ETASに乗って順調に推移しているように見える.  
 Fig. 9. The triggered activities in Fuji, Nagano and Niigata regions shown from top to bottom raw panels, respectively. Those seem to be normal relative the ETAS activity.

# 福島県浜通りの誘発地震活動



第 10 図. 福島県南東部 (いわき地区) の誘発地震活動. 群発型地震 ( $M3+$ ,  $M2.5+$ ) は 3 月 28 日辺りからの相対的静穏化は有意となる. 静穏化は 4 月 11 日の地震 ( $M7.0$ ) の前駆的すべりを仮定し, 東西伸張の正断層群についてのストレス・シャドウで説明可能

Fig. 10. The swarms in Fukushima-Ken Iwaki area, which are mostly E-W contraction normal faulting. The  $M7.1$  event occurred in the gap between the two swarm clusters. The significant relative quiescence for the data of  $M2.5+$  and  $M3.0+$  relative to the ETAS.



第 11 図. 長野県北部地域南側 (赤枠) の誘発地震活動 (M1.5+). 北側の活動 (第 8 図参照) とは対照的に有意に静穏化した活動になっており約 1 月後に大地震が起きた. M 1.8+ のデータでも同様である.

Fig. 11. Triggered activity (M1.5+) at southern part of Northern Nagano-Ken. In contrast to the northern part, we have quiescence relative to the ETAS prediction. Then, we have a significantly large earthquake in a month.