

2-12 2003年宮城県北部の前震活動と余震活動および周辺部の地震活動の統計解析 Quiescence of the 2003 foreshock/aftershock activities in and off the coast of Miyagi Prefecture, northern Japan, and their correlation to the triggered stress-changes

統計数理研究所
Institute of Statistical Mathematics

2003年7月28日零時に宮城県北部地域にM5.5の直下型地震が起き、その余震が続発した。本震余震型であると仮定して気象庁は余震確率を公表したが、同日朝7時過ぎM6.2の地震が同地域に発生し、それまでの本震余震は前震と呼ばれる事になった。同様なケースとして双子地震¹⁾と呼べるものが少なからずある。最近のケースでは、後発の地震は若干小さくなるが、1997年鹿児島県西北部の地震(3月のM6.5と5月のM6.2)や1992年三陸沖はるか沖の本震(M7.5)と最大余震(M7.2)などがある。最初の余震系列の経過情報から、その後に近隣で本震に近い規模またはそれ以上の大きな余震や地震の発生の確率²⁾が高まるか否かを判断するのは地震予知の観点から重要である。

統計モデルによる余震系列の解析

実際、前者の地震の余震系列に改良大森型のポアソン過程またはETAS点過程を当てはめ、AICによる適合度を比較してみると、余震活動が静穏化している場合が多い²⁾。同様の解析によると今回の宮城県北部地域の前震も余震減衰の中で静穏化している可能性が大きい(第2図参照)。本震の断層にプレスリップがあつてマイナス数100ミリバール程度のstress-shadowが前震域を覆った可能性がある。実際、時空間(緯度)プロット(第3図)を見ると、最初の余震(前震)活動は来るべき本震の震央付近で活発なのに、本震直前はその付近で余震が極端に少なくなった。

このほか2003年5月宮城県沖の余震活動は、例えばM3以上の余震の系列については順調に改良大森法則に従って推移している(第5図左図)。しかし、M1.5以上(但し本震後20日以降のあてはめ)では、宮城県北部の地震(M6.2)によると思われるコサイスマミックな静穏化が見られ(第5図右図)、M0以上ではプレサイスマミックな静穏化も見られる(第6図)。

これに対して2003年7月28日の宮城県北部地震(本震M6.2)の余震は順調に経過している(第1図)。ただし、改良大森公式よりETASモデルが当てはまりが良く、余震の余震の発生が無視できない事を示す。前震(M5.5)の余震列もETASモデルが当てはまりが良い(第2図)が、2003年5月28日の宮城県沖地震の余震は改良大森に従う(第5図、左図)。これは震源がプレート内で60-75kmとやや深いためであろうか。

宮城県北部・岩手県南部地域の内陸部の地震活動(第4図)は2003年5月28日の宮城県沖地震によってトリガーされ活発化した模様で、2003年7月28日の宮城県北部の前震活動も、この地域の標準的な活動より相対的活動度(比ETASモデル)は高い。これに対して2003年7月28日の宮城県北部地震(本震M6.2)の余震はこの地域の標準的な活動に相当して推移している模様である。

相対的静穏化現象のメカニズム

余震活動が活発な余震域の近傍において、将来の大地震(大余震)の断層内でプレスリップが起きたと仮定するとき、これが現在の余震活動にとってstress-shadowになり余震活動が相対的に静穏化する場合が考えられるが、通常そのクーロン破壊関数値は-0.1バールにも達しない場合が多い。しかし、そのように小さな応力変化でも余震活動の低下がトリガーされうる^{3,4)}。

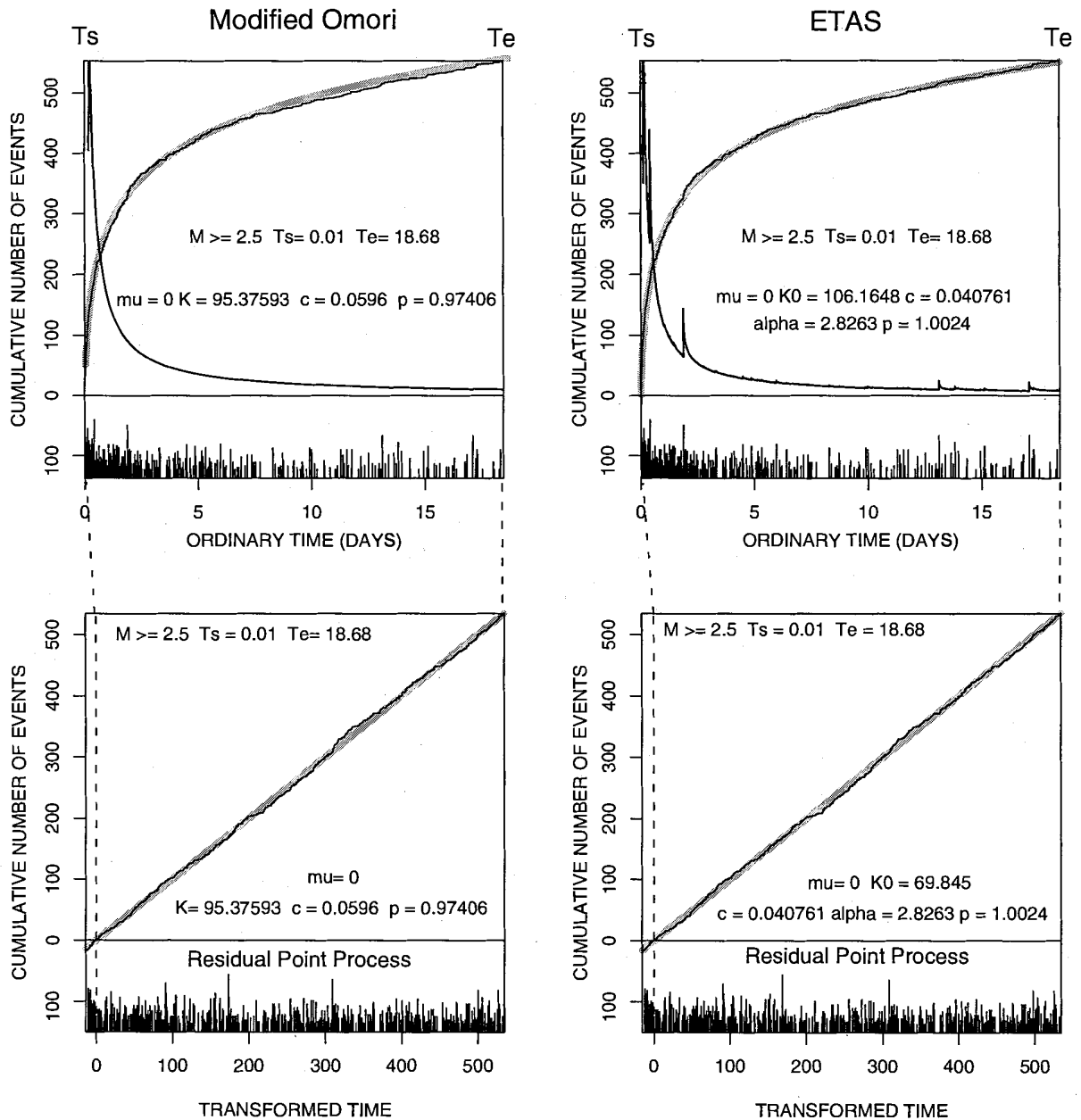
地震活動の相対的变化として、静穏化の方が活発化より顕著に出やすい理由は2つ考えられる。第一に、Dieterichの理論式³⁾によると同じ絶対値の ΔCFF のもと、一般に地震活動度の活発化の拡大倍数は抑制化の縮小倍数の逆数より小さく、その時間減衰も速やかなことである。第2に、活発化によって大き目の地震には多数の余震が付くが、ETASモデルはこれの効果を考慮にいれているので相対的活発化になり難い。別の見方をするなら、活発化によって余震が起きるということは局地的に発生した ΔCFF の大きさが、もとの大域的な ΔCFF の大きさを卓越するということである。stress-shadow による静穏化では、このような事が起こりにくいので大域的な ΔCFF の変化が反映され易いと思われる。

(尾形良彦)

参 考 文 献

- 1) 尾池和夫, 自然災害資料解析, 7, 61-66 (1980).
- 2) Ogata, Y., J. Geophys. Res. 106, 8729-8744 (2001).
- 3) Dieterich, J., J. Geophys. Res., 99, 2601-2618 (1994).
- 4) 尾形良彦, (第153回, 別報告) 予知連会報 (2003).
- 5) 菊地正幸・山中佳子, EIC 地震学ノート, No. 135, 137 (2002, 2003).

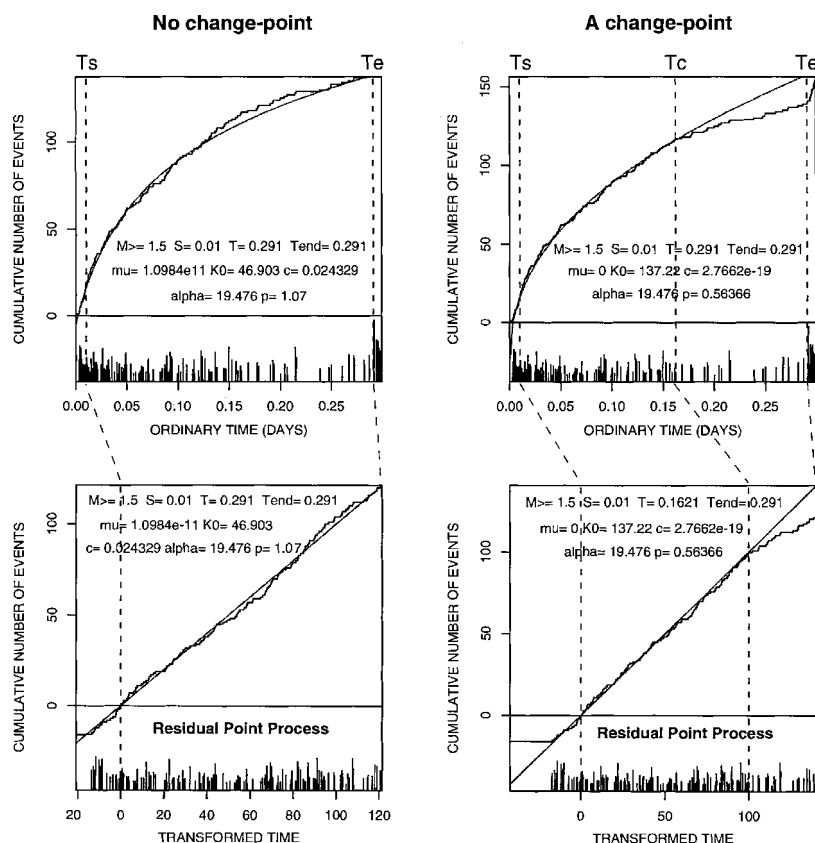
2003 Miyagi-Ken-North Aftershocks till Aug 13 ($M \geq 2.5$)



第1図 2003年7月26日に発生した宮城県北部の地震（本震 $M6.2$ ）の8月13日までの余震活動の累積図および $M-T$ 図 ($M \geq 2.5$)。左図は改良大森公式を当てはめ、右図は ETAS モデルを当てはめた結果である。推定された活動度変化と累積数の理論曲線を重ね合わせた。グラフの横軸は上図が通常の時刻で下図が当てはめたモデルによって変換された時間である。ETAS モデルのほうが当てはまりが良く、余震活動は順調に経過している。

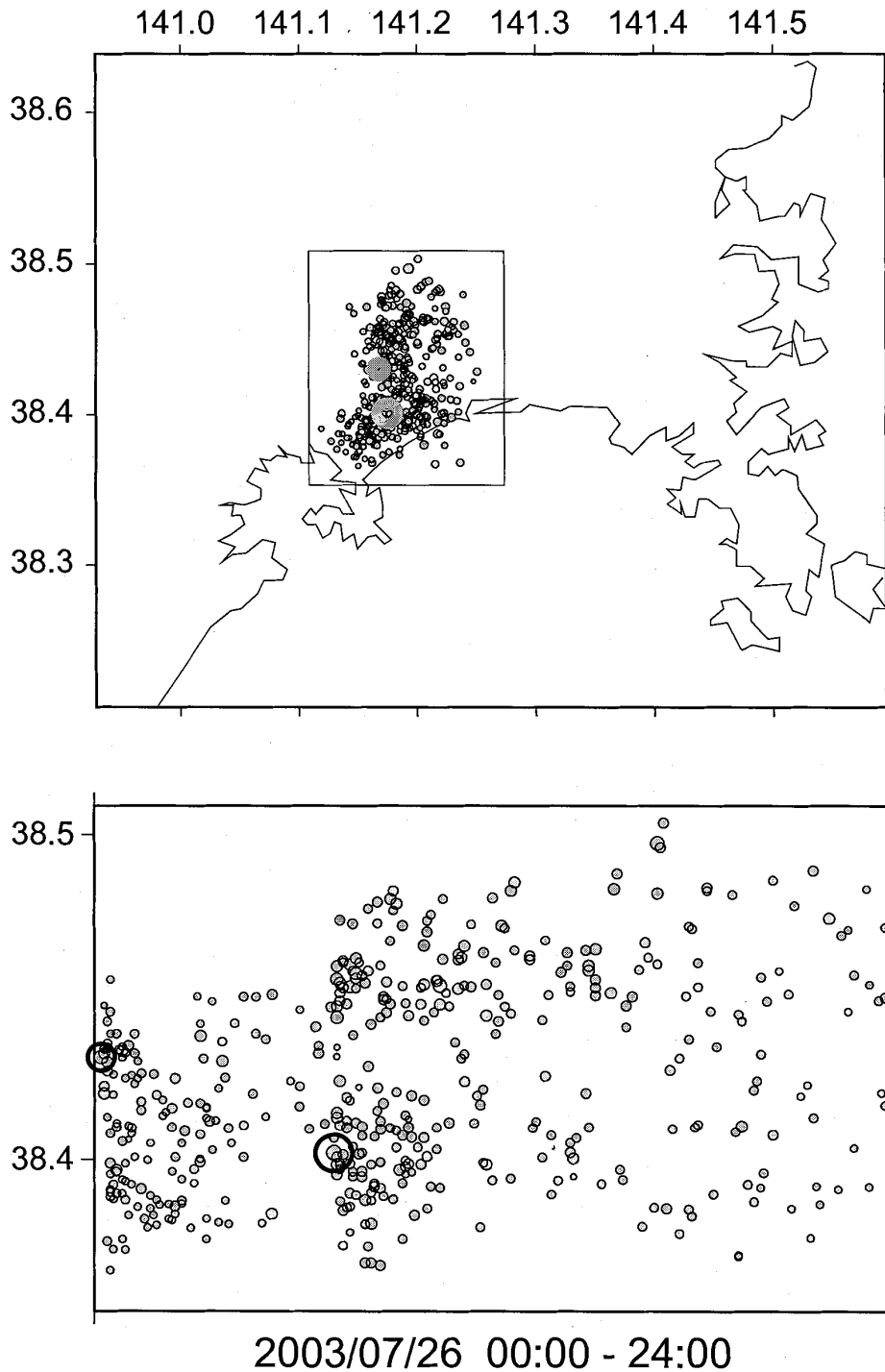
Fig.1 The aftershocks ($M \geq 2.5$) of the 2003 July 26 mainshock of $M6.2$ at Miyagi-Ken-Hokubu region. The panels show the cumulative number and magnitude against the ordinary time (top diagrams) and transformed time by the applied model (bottom diagrams). The modified Omori model (left panels) and the ETAS model (right panels) are applied, and the superimposed thin gray smooth curves are theoretical intensity function of aftershocks and expected cumulative number. The AIC comparison shows a better fit of the ETAS indicating further cluster within aftershock sequence.

2003 Miyagi-Ken-North foreshocks ($M \geq 1.5$) till the mainshock



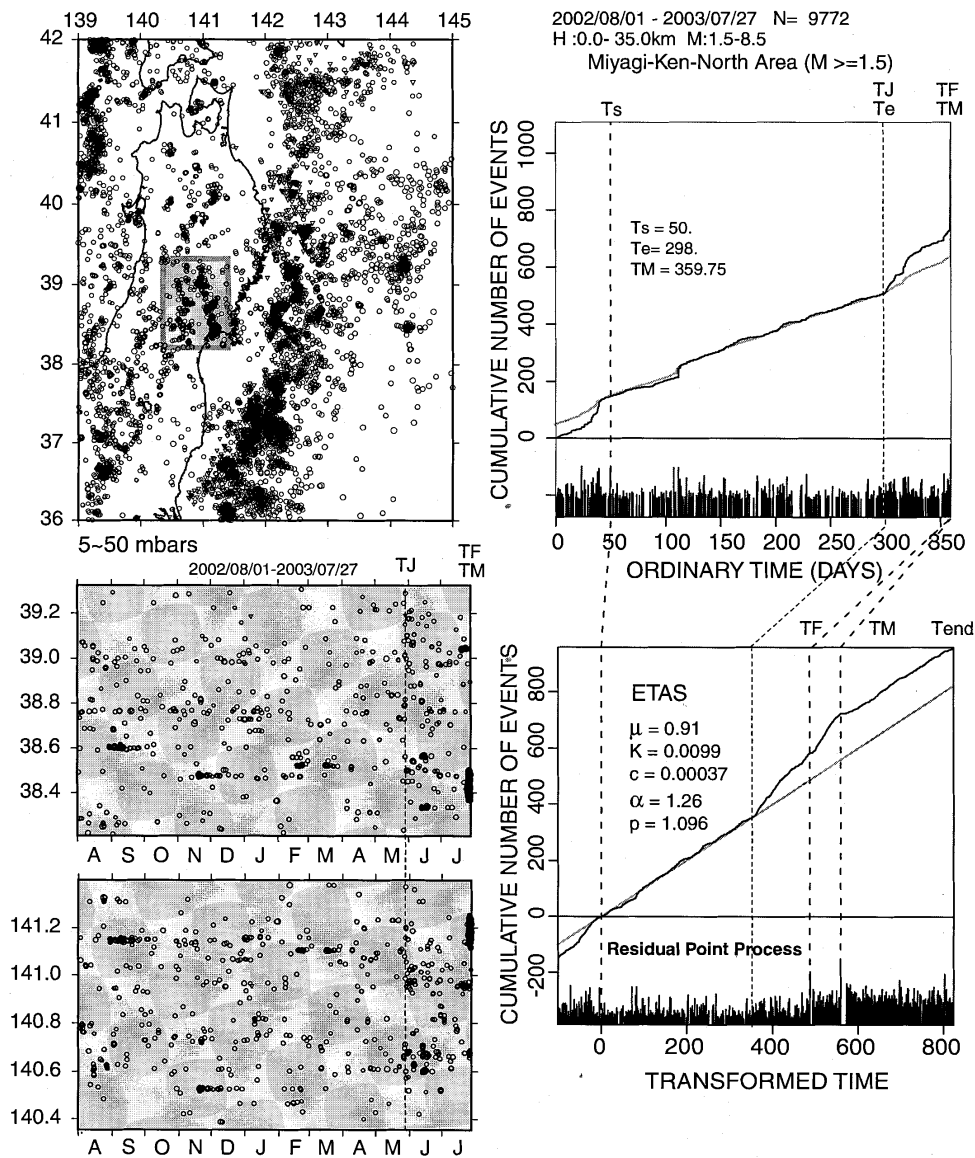
第 2 図 2003 年 7 月宮城県北部地域の地震 ($M5.5$) を始めとする前震活動 ($M \geq 1.5$) で本震 ($M6.2$) までの累積関数と M-T 図。左側 2 図は前震全体に一つの ETAS モデルを当てはめたもので、右側 2 図は変化点候補 T_c を境に前半と後半で異なったモデルを当てはめたものである。横軸は上図が通常の時刻で下図が ETAS (右側は前半の ETAS とその外延) によって変換された時間。それぞれの縦の点線は、(T_s , T_e) が ETAS モデルの当てはめのターゲット時間区間、そして T_c は変化点時刻。変化点の自由度を含むモデルの複雑性を考慮すると、全体を通しての当てはまりはほぼ同じだが、右側のケースは統計的に無視できなく、最初の前震発生後 4 時間経ったあたり (早朝 4 時過ぎ) から相対的な静穏化であった可能性が強い。本震の断層にプレスリップがあったとすると $\Delta CFF =$ マイナス数 100 ミリバール程度の stress-shadow が前震域を覆う。

Fig.2 The foreshock sequence ($M \geq 1.5$) led by the 2003 earthquake of $M5.5$ occurred at Miyagi-Ken-Hokubu till the mainshock of $M6.2$: their cumulative numbers and magnitudes against ordinary time (top diagrams) and transformed time by the fitted ETAS model (bottom diagrams). The left two panels show the fit of one ETAS model throughout the whole period of foreshocks, while the right two panels show the best fit of the two models (ETAS for the former and stationary Poisson for the latter) for the two periods divided at the possible change-point. Hereafter, vertical dotted lines at the times T_s , T_e , and T_c show that models are fitted to the events in the target period (T_s , T_e) and that the time T_c is the change-point. In this case, the time T_s is 0.01 day after the first event of $M5.5$, and T_e is the occurrence time (about seven hours after the first event) of the mainshock of $M6.2$. The right hand side case is not negligible even taking account of the model complexity including the searched change-point. We see the relative quiescence after about $T_c = 4$ hours. If we assume the preslip in the mainshock's fault, the stress-shadow ranging $\Delta CFF = -0.1 \sim -1$ bars covers the foreshock area. Indeed, it is notable from the space (latitude)-time plot that aftershocks after the mainshock around foreshock rupture zone is sparse compare to the whole aftershock region.



第3図 2003年7月26日0時から同日24時までの前震・本震・余震の時空間（緯度）プロット。本震発生までの前震活動は余震減衰の途中で静穏化している（第2図）が、活発な減衰から静穏化への変化が極端な部分は来るべき本震の周辺であったことが分かる。地震動のインバージョンによると、本震後の余震活動が不活発な場所（中央部）は滑りが大きかったアスペリティであった。

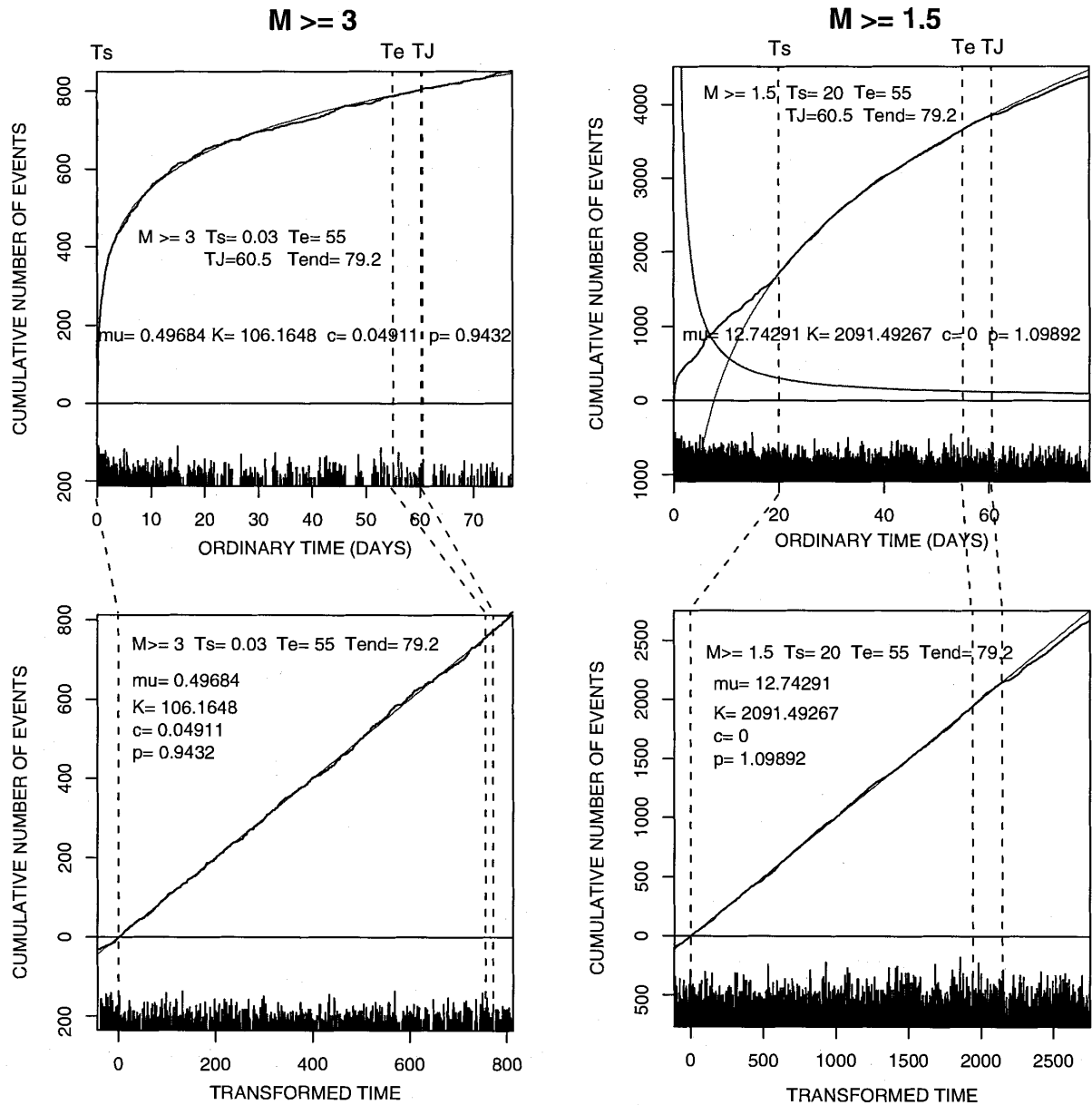
Fig.3 Plots of foreshock-mainshock-aftershock sequence in space (latitude) versus time during whole day of 26 July 2003. It is seen that the main contribution of the relative quiescence in foreshocks relative to the ETAS decaying rate is the gap around the forthcoming mainshock. Incidentally, the inactive part of aftershocks (after the mainshock) corresponds to the asperity of the fault owing to the seismogram inversion.



第4図 宮城県北部地域と岩手県南部地域（灰色の矩形領域）の最近の活動、2002年8月–2003年7月； $M \geq 1.5$ ；深さ35 km以浅。震央図・時空間分布（左側）。ターゲット時間区間（ T_s , T_e ）にETASモデルを当てはめた累積関数とM-T図（右側）で横軸は上図が通常の時刻で下図が当てはめたETASによって計算された変換時間。TJで示された点線は2003年5月26日の宮城県沖地震（ $M7.0$ ）の発生をしめし、この地震によって10 kmの深さでこの地域の東西圧縮逆断層（以下常に摩擦係数0.4を仮定）に対して+5~+50ミリバールの ΔCFF でトリガーされた活発化と考えられる。

Fig.4 Shallow earthquakes ($H \leq 35\text{km}$) in the shaded rectangular region during the recent period (August 2002 – July 2003) before and after the 2003 May 26 Miyagi-Ken-Oki earthquake of $M7.0$ (vertical dotted line indicated by TJ). The panels show epicenters ($M \geq 1.5$), latitude and longitude versus time, and cumulative numbers and magnitude against the ordinary time (the right top panel) and against the transformed time (the right bottom panel) by the ETAS model fitted to the target interval (T_s , T_e). In this region ΔCFF value ranges +5~+50 millibars assuming the E-W compression thrust type mechanism triggered by the May 26 event of $M7.0$. The foreshock activity during the first event of $M5.5$ and the mainshock of $M6.2$ (the both occurred at 26 July 2003; i.e., TF-TM) was more active than the predicted rate by the ETAS fitted in the interval (T_s , T_e). But its aftershock activity (during TM – T_{end} in the right bottom panel, but overlapped in the right end boundary in the top right panel) seems similar to the predicted rate.

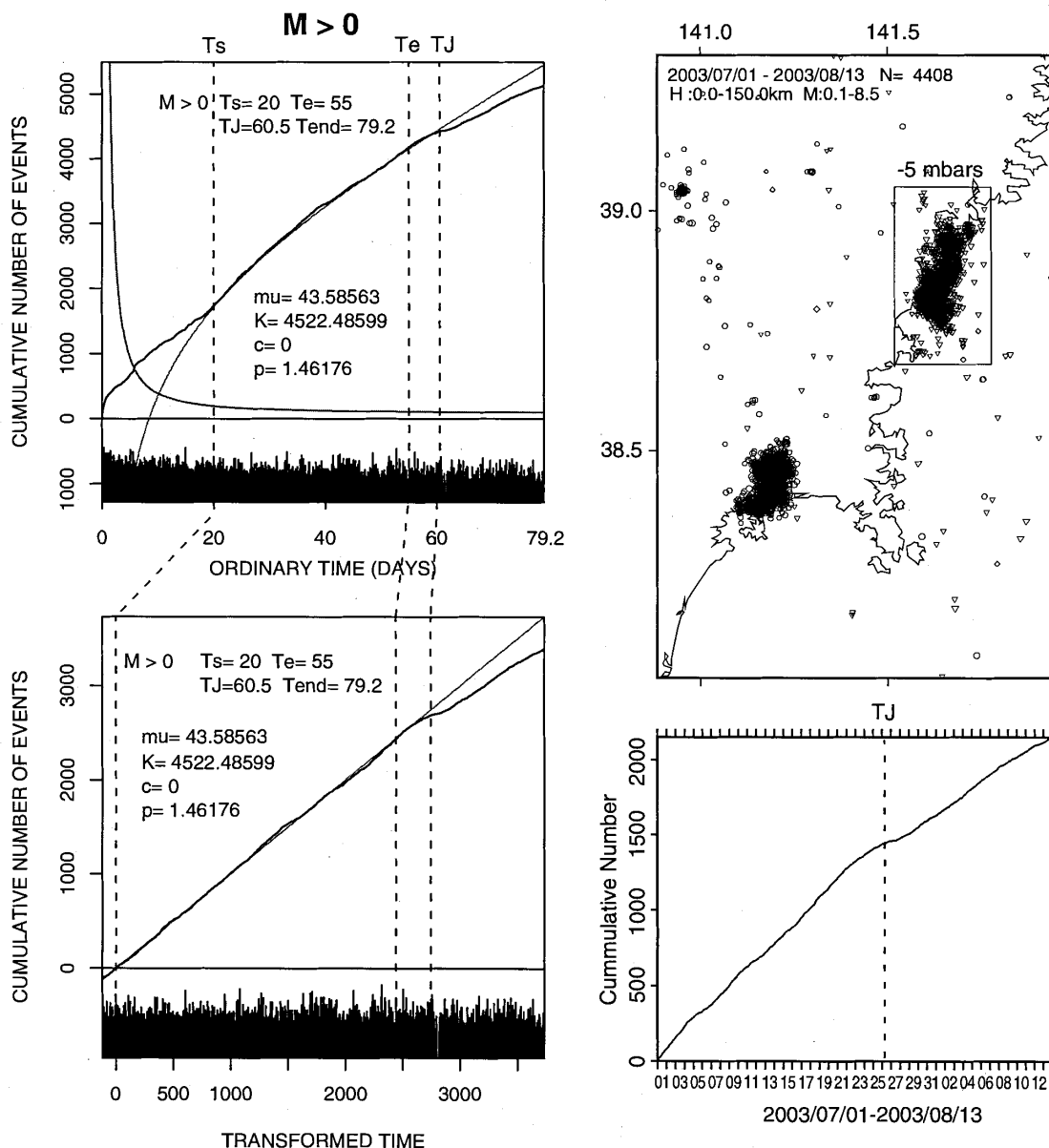
2003 May 28 Miyagi-Ken-Oki Aftershocks till Aug 13



第5図 2003年5月宮城県沖の地震 (M7.0) の8月13日までの余震活動 (累積曲線と M-T 図) に改良大森公式を当てはめた。左側 (右側) の図はそれぞれ $M \geq 3$ ($M \geq 1.5$) のデータに対してターゲット時間が本震からの経過時刻で $T_s = 0.03$ 日, $T_e = 55$ 日 ($T_s = 20$ 日, $T_e = 55$ 日) で、その後は外延したものである。横軸は上図が通常の時刻で下図が改良大森公式によって変換された時間。経過時刻 $TJ = 60.5$ 日には7月26日宮城県北部の地震 (M5.5, M6.2) が発生してそのコサイミクな相対的静穏化が見える。2003年宮城県北部地震のスリップで宮城県沖地震の余震域では-50ミリバール前後の ΔCFF 値をとる。

Fig.5 The aftershock sequences with $M \geq 3$ and $M \geq 1.5$ of the 2003 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M7.0 shown in the left and right panels, respectively. The aftershocks are applied by the modified Omori formula for the target time intervals (T_s, T_e) = (0.03, 55) days and (20, 55) since the mainshock occurrence time, respectively, to extrapolate the theoretical (predicted) curves. The time $TJ = 60.5$ days indicate the occurrence time of the 28 July 2003 mainshock, and the triggered coseismic quiescence is seen after that. In the aftershock volume of the Miyagi-Ken-Oki earthquake, ΔCFF takes -50 millibars.

2003 May 28 Miyagi-Ken-Oki Aftershocks till Aug 13



第 6 図 2003 年 5 月宮城県沖の地震 (M7.0) の 8 月 13 日までの余震活動 (右上図) に改良大森公式を当てはめたもの (続き)。左側の図はマグニチュードの決まったデータ ($M > 0$) に対してターゲット時間は本震からの経過時刻 $T_s = 20$ 日, $T_e = 55$ 日で, その後は外延したものである。横軸は上図が通常の時刻で下図が改良大森公式によって変換された時間。経過時刻 $T_J = 60.5$ 日には 7 月 26 日宮城県北部の地震 ($M_{5.5}, M_{6.2}$) が発生した。ここではプレサイスミックな相対的静穏化までが見える。2003 年宮城県北部地震のプレスリップで宮城県沖地震の余震域では -5 ミリバール前後の ΔCFF 値をとる。右下の図には 7 月以降の累積余震数の曲線 (通常の時) を与えてある。

Fig.6 The aftershock sequence of the 2003 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M7.0 is shown in the left panels. The modified Omori formula is applied to the aftershocks with $M > 0$ in the target interval $(T_s, T_e) = (20, 55)$ days to extrapolate the theoretical (predicted) curves. The time $T_J = 60.5$ days represents the occurrence of the 2003 July 28 mainshock, and the preseismic quiescence is seen before the M7.0 event. In the aftershock volume of the Miyagi-Ken-Oki earthquake, ΔCFF takes about -5 millibars. The epicenters of aftershocks are shown in the top right panel, and their cumulative curve after 1 July 2003 is shown in the bottom right panel.