７－３　2007 年中越沖地震の余震活動および周辺部の地震活動と地殻変動について
On the 2007 Chuetsu-Oki earthquake of M6.8: Preceding anomalous seismicity and crustal changes around the source, and the normal feature of the aftershock activity

統計数理研究所　尾形良彦
Yosihiko Ogata, Institute of Statistical Mathematics

１．2007 年中越沖地震（M 6.8）と 2004 年中越沖地震（M 6.8）との関係について．

2007 年中越沖地震の震源の深さは，気象研究所[1)]などの詳細に決められた余震の深さ分布によると，10km 強であり，余震分布[1)]の配置は Harvard や F-net などによる CMT メカニズムと調和的である．2007 年中越沖地震の本震の CMT メカニズムを受け手とした時の ΔCFS は，2004 年中越地震の断層のすべり[2)]に対して，あるいはその深部すべりに対しても，ストレスシャドウ（第１図 a）となり，中越沖地震の本震の震源でのすべりを抑制する様になっている．しかし，深さ 20km 弱で Δ CFS（第１図 a）の符号は正に変わり，中越沖地震断層の延長深部でのすべりを促進する様になっている．そして，これによって中越沖地震が誘発されるという，間接的な誘発が考えられる．さらに，第１図 b に示すように，中越地震の余震域全体はストレスシャドウとなって，余震活動が静穏化するはずである．

そこで，2004 年中越地震の余震活動に ETAS モデルを当てはめた．下限マグニチュード 3.0 の場合と気象庁カタログにおいて検出された全ての余震を考慮した．いずれにも顕著な静穏化が見られる（第２図）．後者の場合，本震後 20 日以降では，第２図のマグニチュード頻度分布が示すように，各マグニチュードの検出率は一貫して一定であることを前提とした．すこし距離があるが，2007 年能登半島地震の余震域も，仮定したすべり断層に関して，ストレスシャドウに覆われる．この場合にも，有意な余震の静穏化が見られる（第３図）．同様の間接的誘発のシナリオが当てはまるものとしては，1993 年鹿児島県西北部の 3 月の地震（M6.8）と同 5 月の地震（M6.5）の連発したケースが考えられる（第４図）．

中越沖地震の余震の 8 月中旬までの活動は順調に推移している（第５図）．

２．2007年中越沖地震周辺部の長期的地殻変動．

震源域周辺の GEONET の基線間距離の変化を調べてみた（第６図）．近隣で 3 年前に 2004 年中越地震があったため，多くの基線にはコサイスミックな跳びや余効変動が顕著実見られる．それだけでなく，西方近隣部での 2005 年 6 月と 8 月の M5 地震や 2007 年 3 月の能登半島地震による跳びや 2004 年中越地震の前駆的異常変化[3)]も見られ，地殻変動時系列の明解な解釈は難しい．そこで，これらの変化があまりみられない東北 - 南西方向に注目して，中越沖地震の深部延長部の領域を跨ぐような，観測点の基線間距離の時系列のトレンド変化を調べた．これらによると，2004 年 11 月の中越地震を境に，距離の伸び縮みの速度（傾き）が有意に異なって，相対的に距離が広がっている．この変化と前節の深部延長部のすべりから期待される変動が調和的である．

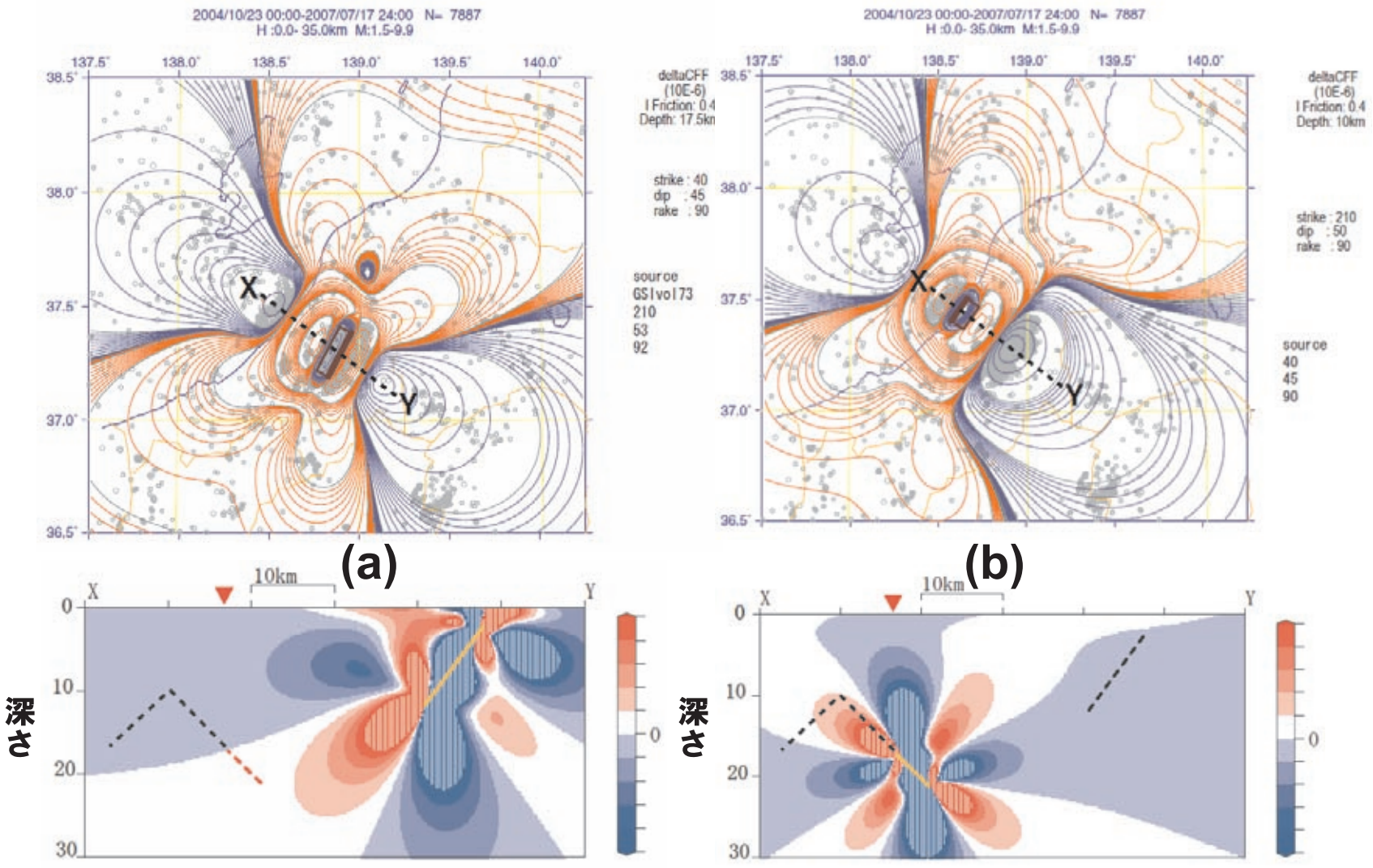
付記．国土地理院[4)]は第 6 図左図による本報告の結論に関して，この期間に起きた 2004 年紀伊半島沖，中越地震，2005 年宮城県沖，2007 年能登半島地震のコサイスミック及びポストサイスミックな変動の影響について注意している．特に宮城県沖地震の影響が粟島浦，村上，新発田など下越地域まで及んでいると指摘している．そこで，とりあえずコサイスミックな跳びを補正したものが

第 6 図右図に示してある．これらの観測点を含む基線距離の伸びの加速が宮城県沖地震の影響であるとすれば，第 6 図左右図を見比べて，この地域での宮城県沖地震のポストサイスミックな変動はコサイスミックな変動より相当大きいということになる．さらに，第 7 図上図に示すように下越地域の観測点を含まない新たな基線距離の時系列とそれらのコサイスミックな跳びを補正したものを追加した．これらと第 6 図の中越・上越地域内の基線の距離の時系列は，第 7 図下図の深部すべりから計算された地表の変動と調和的であるが，2004 年中越地震のポストサイスミックなすべり[4)]から計算されるものと調和しない．

本解析にかんして，気象庁一元化震源データ，地理院 GEONET データ，ソフトウェア TSEIS（東大地震研），MICAP-G（気象研）および CFFVS（京大防災研）を使用した．

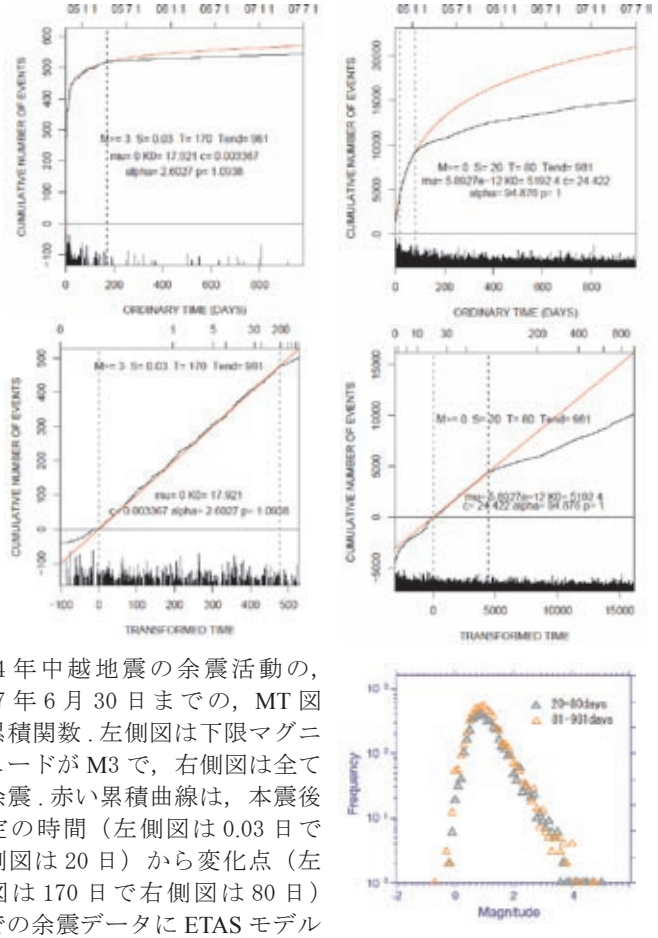
参　考　文　献

１）地震調査委員会，第 171 回地震調査委員会（臨時会）個別資料，(2007)．
２）国土地理院，予知連会報，73 巻，(2005)，269．
３）統計数理研究所（尾形良彦），予知連会報，77 巻，(2007)，452
４）国土地理院，予知連会報，79 巻，(2008)，403-477



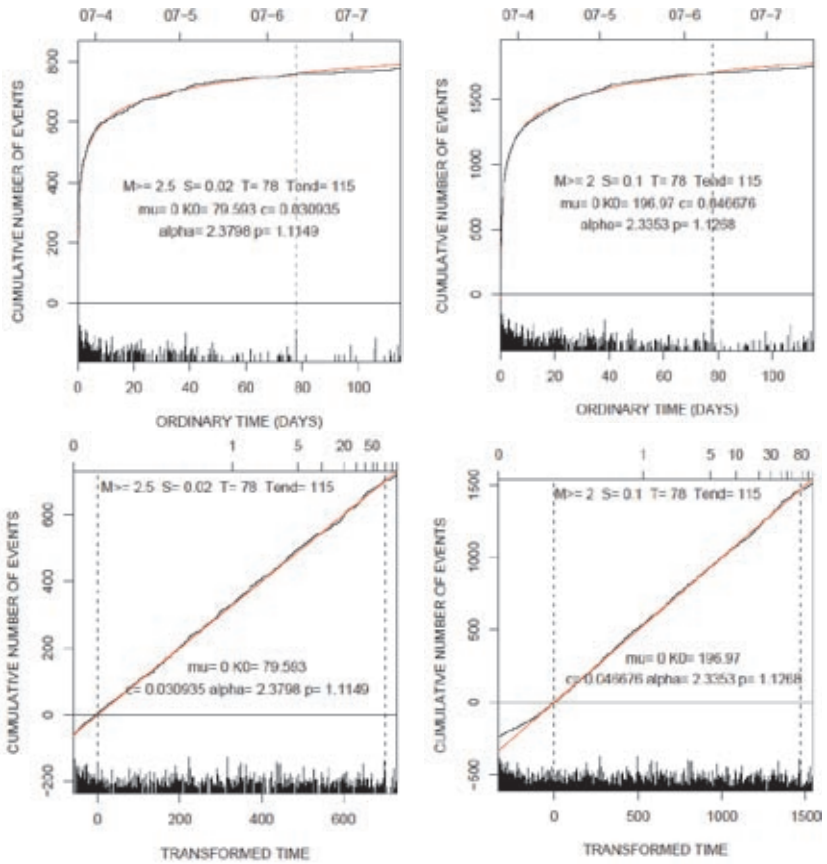
第 1 図　(a) 2004 年中越地震の断層すべり[2] による，2007 年中越沖地震の発振機構を受け手と考えたときの，ΔCFS の水平面図と X － Y 垂直面図 . 水平面図は深さ 10km で，赤の領域は正値，青の領域は負の値 .(b) 2007 年中越沖地震の共役断層の延長部の深部すべり (橙) による，中越沖地震と中越地震の断層を受け手と考えたときの，ΔCFS の水平面図（深さ 10km）と X － Y 垂直面図 .

Fig. 1　(a) The ΔCFS pattern of faults with the angles of the 2007 Off the Coast of Chuetsu (Chuetsu-Oki) Earthquake due to the slip on the fault model of 2004 Chuetsu Earthquake. The regions of red and blue show positive and negative ΔCFS values, respectively, at 10km depth on the horizontal plane and vertical plane of X-Y versus depth. (b) The ΔCFS pattern of faults with the angles of the Chuetsu Earthquake due to the slip on the assumed fault model of the deep extension of the fault of the Chuetsu-Oki Earthquake.



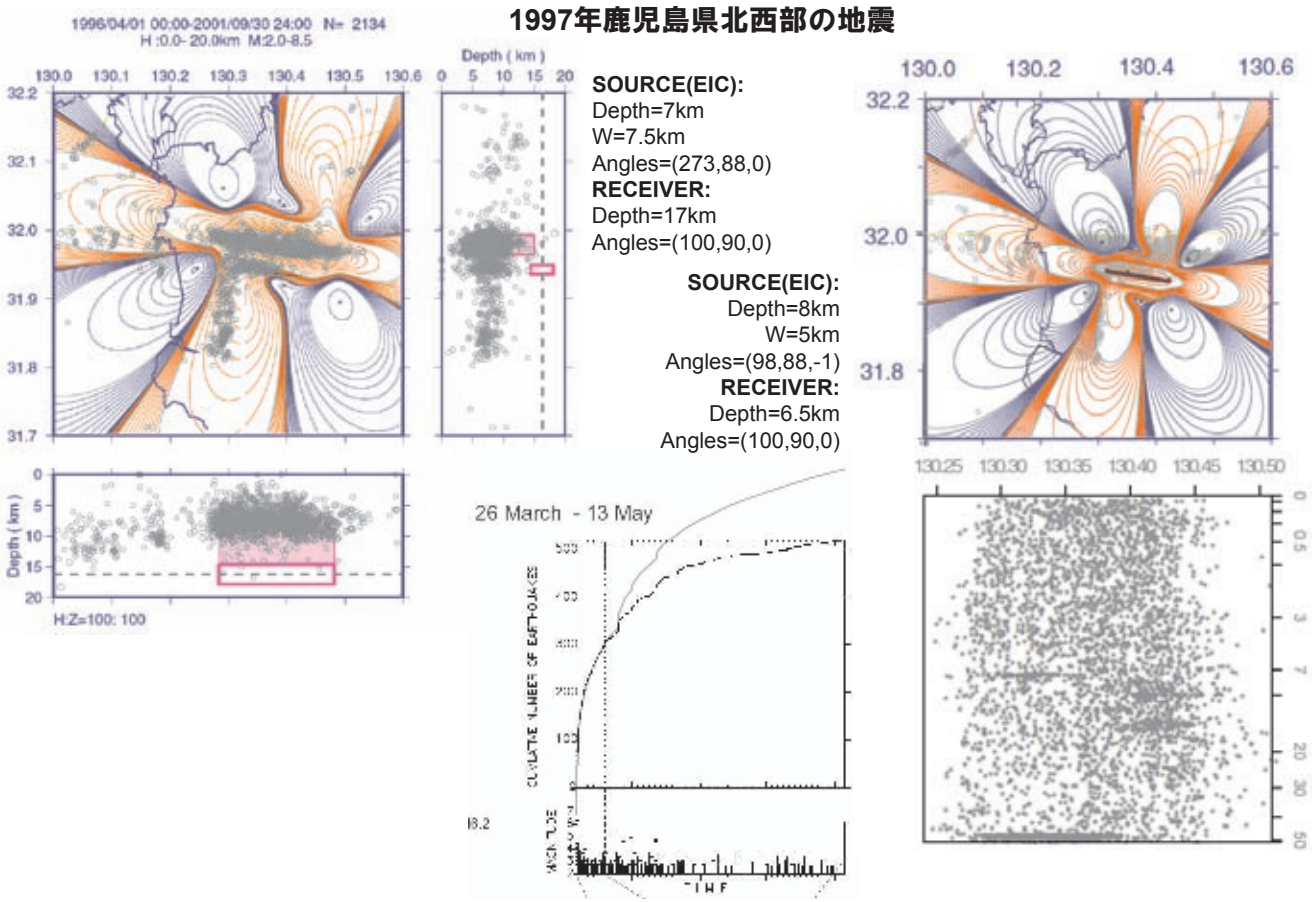
第 2 図　2004 年中越地震の余震活動の，2007 年 6 月 30 日までの，MT 図と累積関数 . 左側図は下限マグニチュードが M3 で，右側図は全ての余震 . 赤い累積曲線は，本震後一定の時間（左側図は 0.03 日で右側図は 20 日）から変化点（左側図は 170 日で右側図は 80 日）までの余震データに ETAS モデルをあてはめて，残りの期間を予測した理論的累積曲線 . グラフ横軸は，上図が通常の時間推移で, 下図が ETAS モデルによる変換時間 . 最下図は, 20-80 日（灰色）と 80 − 981 日（橙色）の，それぞれの期間のマグニチュード頻度分布 .

Fig. 2　The cumulative number and magnitude of aftershocks of the sequence of the M≥3.0 events (left panel) and all detected events (right panel), respectively, against the ordinary time (top) and transformed time (middle) during the period from the mainshock of the 2004 Chuetsu earthquake to July 2007. Red curves show theoretical cumulative curve calculated by the ETAS model that is fitted to the period where the red and black cumulative curves are almost overlapped. The bottom panel shows the magnitude frequency distributions in the period 20-80days and 80-981days since the mainshock.



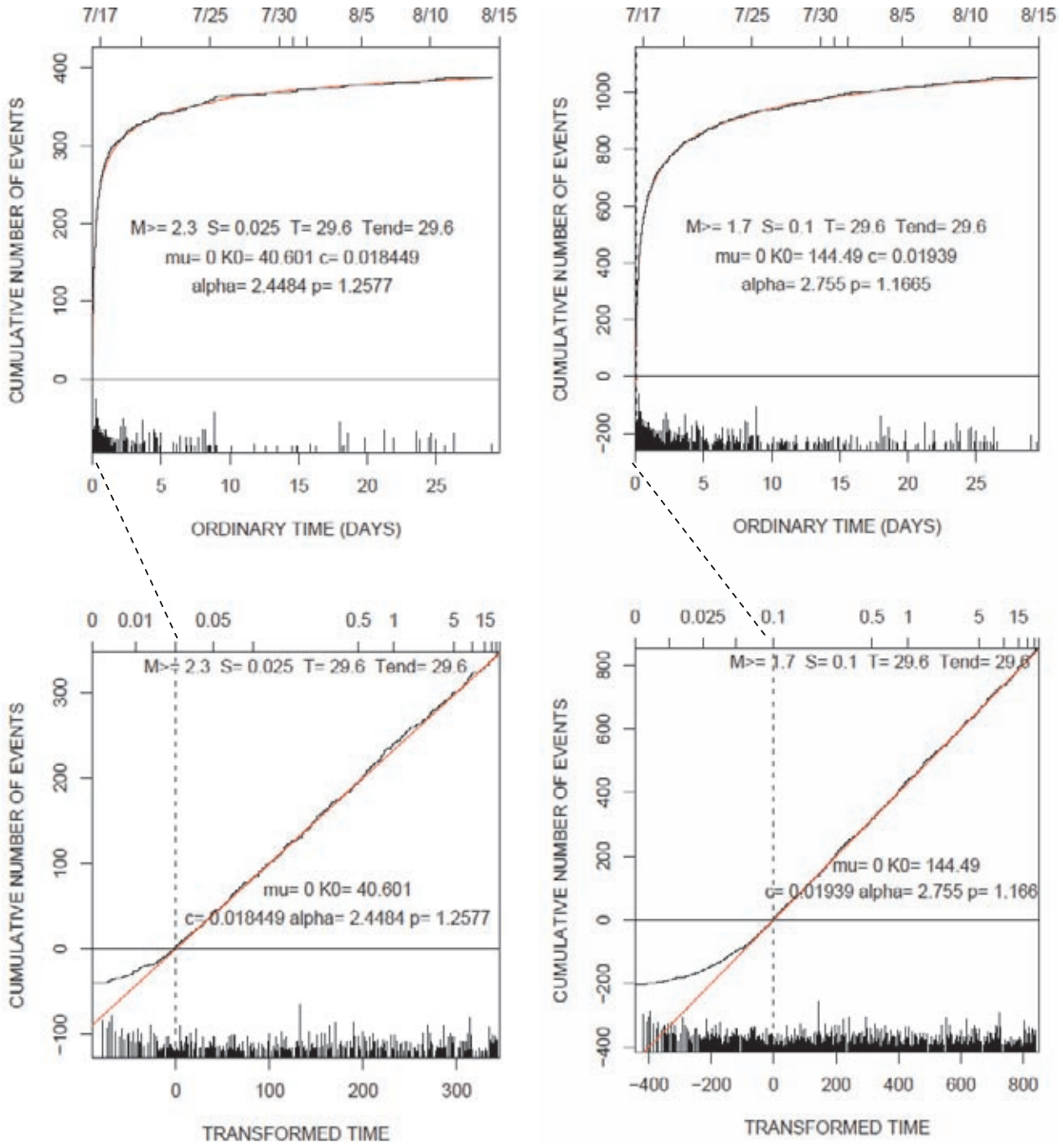
第 3 図　2007 年能登半島地震の余震活動の，2007 年 7 月 20 日までの，MT 図と累積関数 . 右側図は下限マグニチュードが M2.5 で, 左側は M2.0 の余震 . 赤い累積曲線は，本震後一定の時間（右側図は 0.02 日で左側図は 0.1 日）から変化点（78 日）までの余震データに ETAS モデルをあてはめて残りの期間を予測した，理論的累積曲線 . 横軸は，上図が通常の時間推移で，下図が ETAS モデルによる変換時間 .

Fig. 3　The cumulative number and magnitude of aftershocks of the sequence of the M≥2.5 events (left panel) and M≥2.0 events (right panel), respectively, against the ordinary time (top) and transformed time (middle) during the period from the mainshock of the 2004 Chuetsu earthquake till 20 July 2007. Red curves show theoretical cumulative curve calculated by the ETAS model that is fitted to the period where the red and black cumulative curves are almost overlapped.



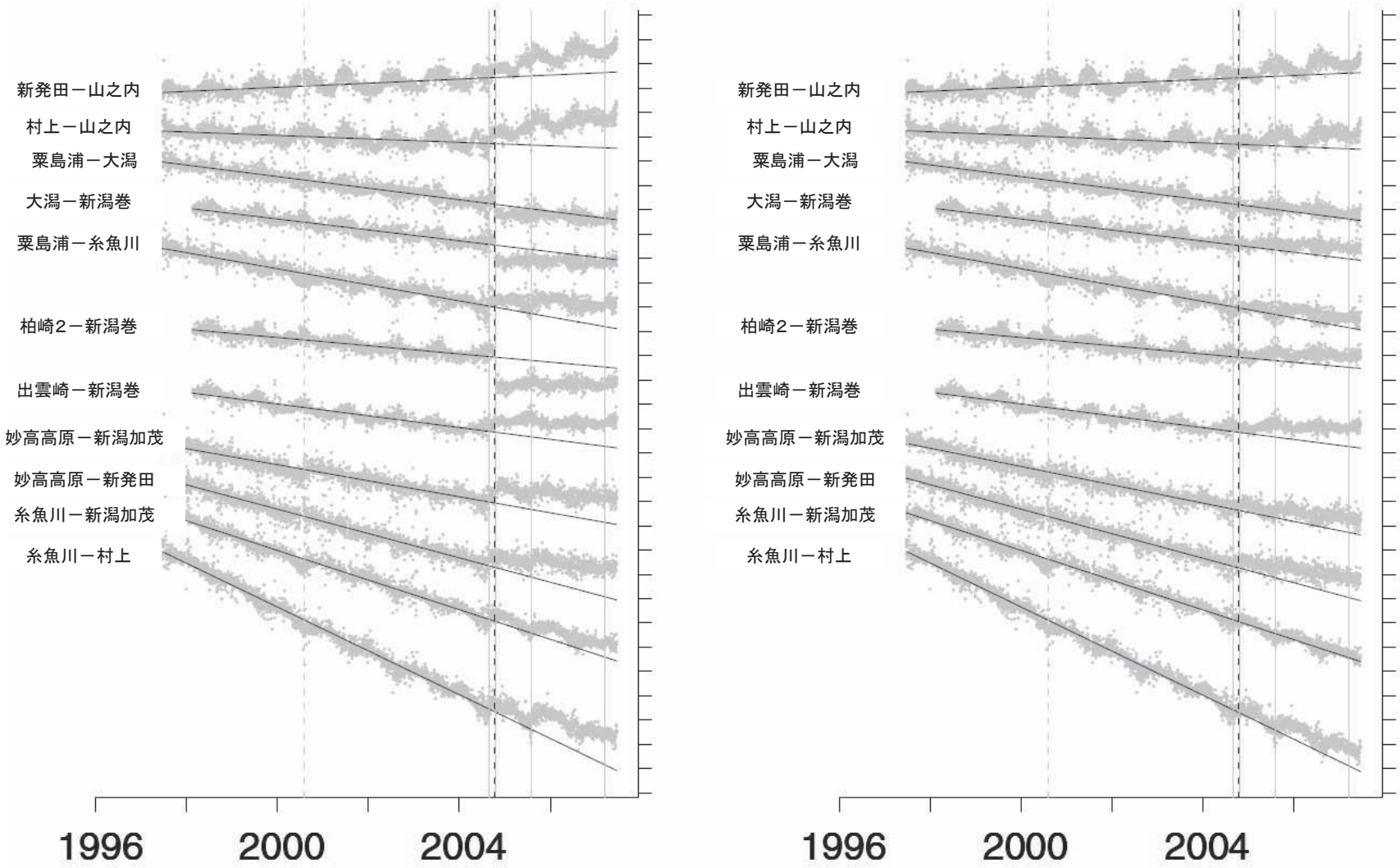
第４図　左側図：1997 年３月の鹿児島県西北部の地震（M6.6）の断層すべりによる，５月の地震（M6.4）の断層モデルの深部（17km）を受け手と考えたときの，ΔCFS の水平面図と震源と受けてモデルの垂直面図．等高線は対数スケールで，赤は正値，青は負値である . 右側図：５月の地震の断層の延長部の深部すべりによる，３月の余震を受け手と考えたときの，ΔCFS の深さ 6.5km での水平面図（上図）と余震の時空間図（下図 , M≥1.5）．この時の時間は大森・宇津の公式に基づいて変換したもの．中央下図：３月の地震から５月の地震までの余震（M≥2.7）の MT 図と累積関数．灰色の曲線は，変換点時間までの余震データに ETAS モデルで当てはめた，理論曲線．

Fig. 4　Left panels: The ΔCFS pattern of faults on the horizontal plane at 17km depth with the angles of the deep extension of the May 1997 Northwestern Kagoshima Prefecture Earthquake due to the slip on the fault model of the March 1997 Northwestern Kagoshima Prefecture Earthquake. The regions of red and blue contours (logarithmic equidistant) show positive and negative ΔCFS values, respectively, and vertical projections of the source fault model and the receiver fault model of aseismic slip that produce the ΔCFS pattern in the right top panel. Right panels: The top panel shows the ΔCFS pattern of faults with the angles of the March earthquake for its aftershocks due to the slip on the assumed fault model in the deep extension of the May earthquake. The bottom one shows the space-time plots of aftershocks (M≥1.5) with longitudes versus transformed time by Omori-Utsu formula of decaying aftershock activity. Bottom middle panel: The cumulative number and magnitude of aftershocks of the sequence of the M≥2.7 events against the ordinary time during the period from the mainshock of the March event till the May event. The grey curve shows theoretical cumulative function calculated by the ETAS model that is fitted to the period till the change-point of the activity.



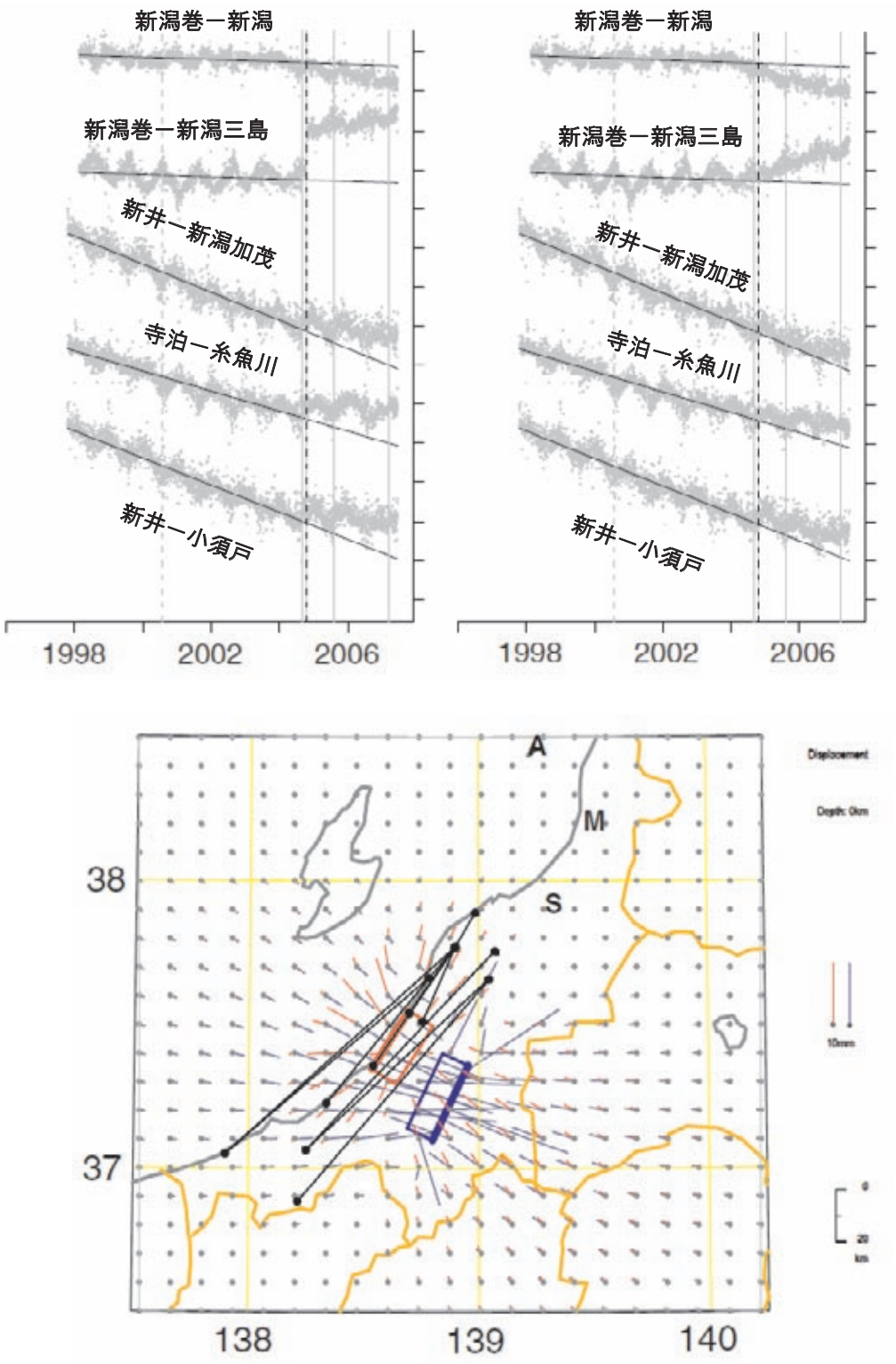
第５図　2007 年中越沖地震の余震活動の MT 図と累積関数．左側図は下限マグニチュードが M2.3 で，右側は M1.7 の余震．赤い累積曲線は，本震後一定の時間（左側図は 0.025 で日右側図は 0.1 日）から８月 15 日までの余震データに ETAS モデルをあてはめた，理論的累積曲線．

Fig. 5　The cumulative number and magnitude of aftershocks of the sequence of the M≥2.3 events (left panel) and M≥1.7 events (right panel), respectively, against the ordinary time (top) and transformed time (middle) during the period from the mainshock of the 2007 Chuetsu-Oki earthquake to 15 August 2007. Red curves show theoretical cumulative curve calculated by the ETAS model that is fitted to the observed period.



第６図　2007 年中越沖地震の断層深部を跨ぐ GEONET の基線の距離の原時系列（右側図）．左側図は 2004 年紀伊半島沖，中越地震，2005 年宮城県沖，2007 年能登半島地震のコサイスミックな跳びやその他の顕著な跳びを補正したもの．

Fig. 6　The left panels show the original daily time series records of each base-line distance between the stations that steps over the suspected slip source, and the right panels show the modified ones removing the coseismic jumps at the vertical lines.



第７図　上図は左側が追加した基線の距離の原時系列で，右側は第６図右側図と同様に跳びを補正したもの．下図の黒線分は，第６図で選んだ時系列の基線のうち，粟島浦（A），村上（M），新発田（S）を端点にしたものを除いたもの，及び上図で追加して考慮した基線を示す．赤の矩形は 2007 年中越沖地震の前駆的断層深部すべりモデルで，格子点上の赤ベクトルはそれによる地表の理論的変動分布．青矩形は 2004 年中越地震の余効すべりモデル[4] で，青ベクトルはそれによる地表の理論的変動分布．

Fig. 7　The top panels show the daily time series records of the additional base-line distances (left panel) and their modifications (right panels) by removing the coseismic jumps at the vertical lines. The bottom panel shows the geodetic base-lines (solid black segments) between the GEONET stations around the source of the suspected precursory slips (red rectangular) on the deep extension of the 2007 Chuetsu-Oki Earthquake fault. The red arrows on the regular lattice show directions and sizes of the cumulative surface movements due to the precursory slips, whereas the blue arrows show the calculated surface movements by the postseismic slip model[4] of the 2004 Chuetsu Earthquake.