

2-13 宮城県沖プレート境界型大地震までの東北地方における地震活動 Statistical analysis of seismic activities in and around Tohoku District, northern Japan, prior to the large interplate earthquakes off the coast of Miyagi Prefecture

統計数理研究所

Institute of Statistical Mathematics

宮城県沖プレート境界型大地震の再来の長期確率は年々高まっている。本報告では、気象庁震源データにもとづいて、それぞれ1936年11月(M7.5)および1978年6月(M7.4)の地震以前の宮城県沖周辺、東北地方内陸部や日本海東縁における地震(余震)活動についてETASモデルで解析し、トリガー作用の作業仮説をたてて宮城県沖地震の中期的な予測に参考になりそうな特徴を模索し、最近の地震活動と対比してみた。

解析例としては、1937年までの東北地方内陸部の地震活動(第1図)、1933年三陸沖地震の余震活動(第3図)、1964年新潟地震の余震を含む1980年までの日本海東縁・東北地方内陸部の地震活動(第4図)、1968年十勝沖地震の余震活動(第5図)、1978年2月の牡鹿半島沖地震の余震活動(第6図)などである。

これらの解析結果を要約すると以下ようになる。宮城県沖のプレート境界型大地震の断層モデルにもとづき(一桁小さい規模の)前駆すべり(プレスリップ)を想定したとき、 ΔCFF がマイナス数ミリバール程度のstress-shadow地域の地震活動や余震活動には相対的静穏化がみられること、stress-shadow地域でもそれより弱かったり、正值 ΔCFF の地域においては、地震活動や余震活動は順調に推移している。

地震活動活発化に関する限り、数ミリバールという ΔCFF 絶対値量は、これまでトリガー作用で報告されている ΔCFF の閾値といわれる絶対値(0.1バール前後)より遥かに小さい。しかし摩擦法則によるDieterichの地震発生率理論式¹⁾に基づく、マイナス数ミリバール程度でも条件によっては第2図に示すように数割以上の活動度の縮小が起こり、余震活動のように活発な活動状態では相対的静穏化が顕著にみえる。また地震活動の静穏化の方が活発化より顕著に見える理由は2つ考えられる。第一に、 ΔCFF の同じ絶対値のもと、Dieterichの式から、トリガーによる地震活動度抑制化の縮小倍数の逆数は活発化の拡大倍数より大きく、静穏化トリガー後の回復は、活発化トリガー後の時間的減衰(改良大森余震減衰式)よりも緩やか(第2図参照)なことである。第二に、活発化によって大きな地震(余震)には多数の余震が付くが、ETASはこの様な余震発生の効果をモデルの考慮にいれているのでb値が変わらない限り、相対的活発化が見え難い。別の解釈をするなら、活発化によって余震が起き易くなるので、その結果、局地的に余震を引き起こした ΔCFF の大きさの方が、もとの大域的なトリガーを引き起こした ΔCFF の規模より大きく、これが活動度に卓越して貢献する。他方、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 の変化が素直に反映し易いと思われる。

次に、来るべき宮城県沖プレート境界地震のプレスリップを想定してこれまで調べたケースと同様の特徴が見られるか否か、近年のデータを解析してみた。解析例としては、1983年日本海中部地震の余震を含む日本海沿岸・東北地方内陸部の地震活動(第7図)、1994年三陸はるか沖地震の余震活動(第8図)、1962年宮城県北部地震余震の最近の活動(第9A図)、1996年宮城県鳴子町の余震活動(第9B図)などである。

震活動（第 9B 図）、1998 年宮城県南部の地震の余震活動（第 9C 図）、1998 年岩手県雫石の余震活動（第 9D 図）、2002 年 11 月宮城県沖の地震の余震活動（第 9E 図）、そして一元化データによる宮城県直下深部のプレート境界の地震活動（第 10 図）である。

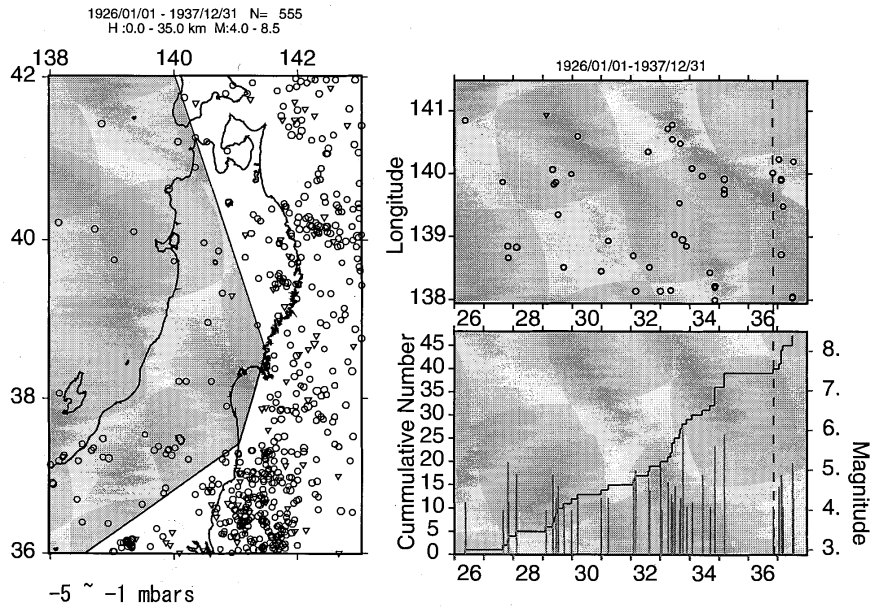
これらの活動の静穏化などの特徴は宮城県沖の断層内の事前すべりによるものと考えerより、2003 年 5 月の宮城県沖地震断層内の事前すべりによるものと考えたほうが、すべて調和的に説明できる。

以上、想定断層モデルや受け手の地震メカニズムには参考文献 2) -5) などを、解析方法については 6) -8) を使用した。

(尾形良彦)

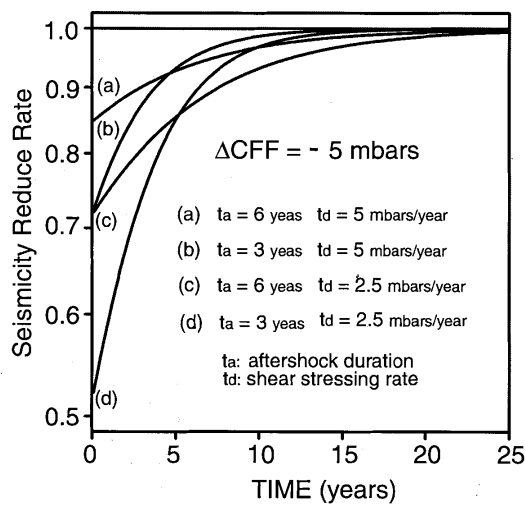
参 考 文 献

- 1) Dieterich, J.: J. Geophys. Res., 99, 2601-2618 (1994).
- 2) 瀬野徹三, 須藤 研, 江口孝雄: 予知連会報, 21, 10-12 (1979).
- 3) 山中佳子・菊地正幸: 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集, Sy-005 (2001).
- 4) 菊地正幸・山中佳子: EIC 地震学ノート, No. 0, 50, 128, 135, 137 (1996, 1998, 2002, 2003)
- 5) 気象庁, 発震機構データファイル, 地震年報 (The Annual Seismological Bulletin of Japan)
- 6) Okada, Y.: Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040 (1992).
- 7) 内藤宏人・吉川澄夫: 日本地震学会講演予稿集, C30 (1998).
- 8) 鶴岡 弘: 東京大学地震研究所技術研究報告 No. 2, 34-42 (1997).



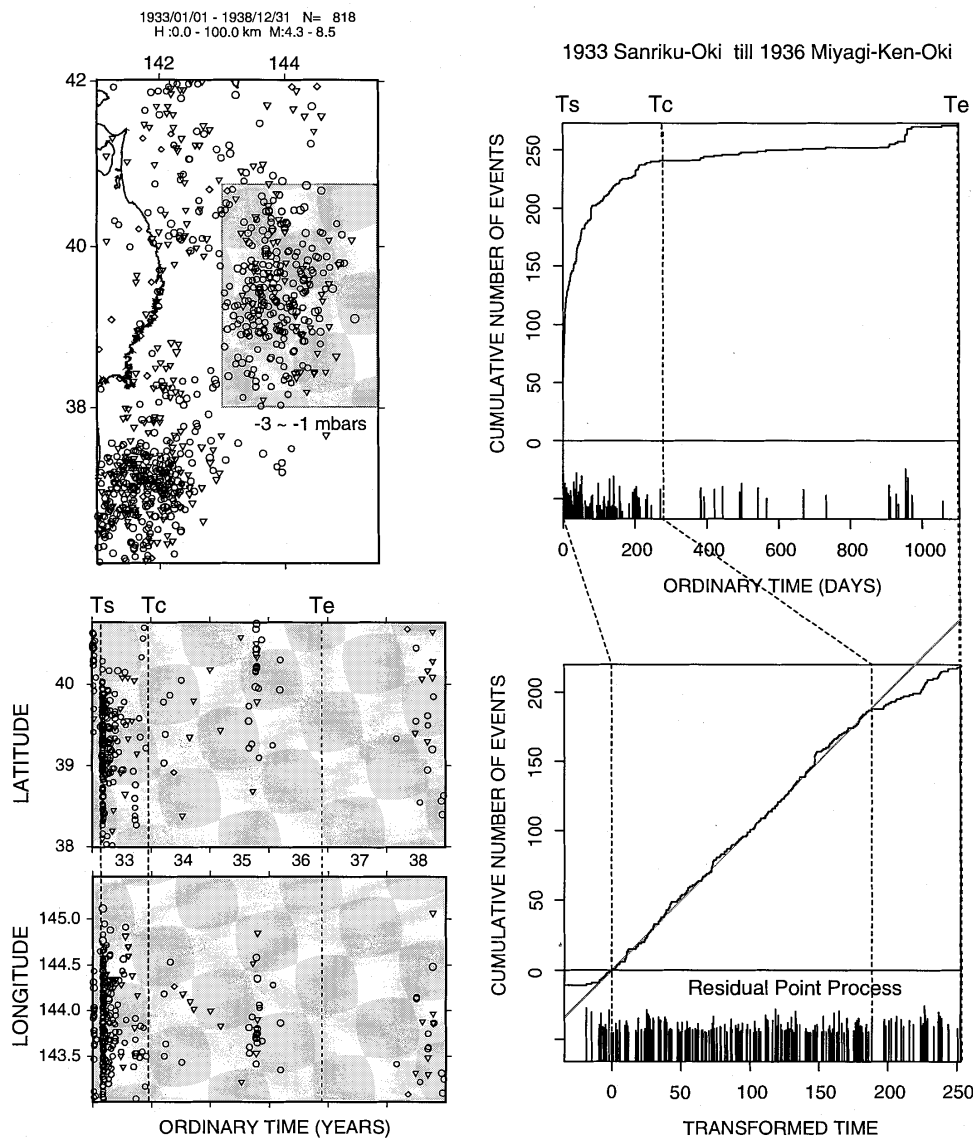
第 1 図 1936 年 11 月宮城県沖地震 (M7.5) の断層モデルについて受けての断層系について深さ 10 km で東西圧縮逆断層を想定して ΔCFF (摩擦係数 0.4) を計算したときの stress-shadow (灰色) 地域の震央図 (1926-1937; $M \geq 4$; 深さ 35 km 以浅) と時空間プロットと累積地震数および M-T 図。1935 - 36 年で静穏化が見られる。一桁小さい規模のプレスリップを想定 (以後プレスリップには常に本震のすべり量の 1/10 のすべり量を仮定) すると地域内は $\Delta CFF = -1 \sim -20$ ミリバールの値をとる。

Fig.1 Shallow earthquakes in the stress-shadow region during 1926-1937, before and after the 1936 Miyagi-Ken-Oki earthquake (M7.5): epicenters ($M \geq 4$), longitude versus time, and cumulative numbers and magnitude against time. Gray color region shows stress-shadow region of thrust-type slip under EW-compression at 10km depth, assuming the pre-slip within or around the 1936 rupture fault. The apparent friction coefficient is 0.4 that is always assumed hereafter. The quiescence during 1935-36 before the main event (dotted vertical line) is seen in the stress-shadow region where the ΔCFF would range $-1 \sim -20$ millibars by assuming 10% slip-size of the 1936 rupture. Hereafter, for pre-slips, we always assume the 10% size of the main rupture.



第 2 図 Dieterich (1992)の式に基づく、小さな C F F 減少変化 ($\Delta CFF = -5$ ミリバール) による相対的地震発生低下率。

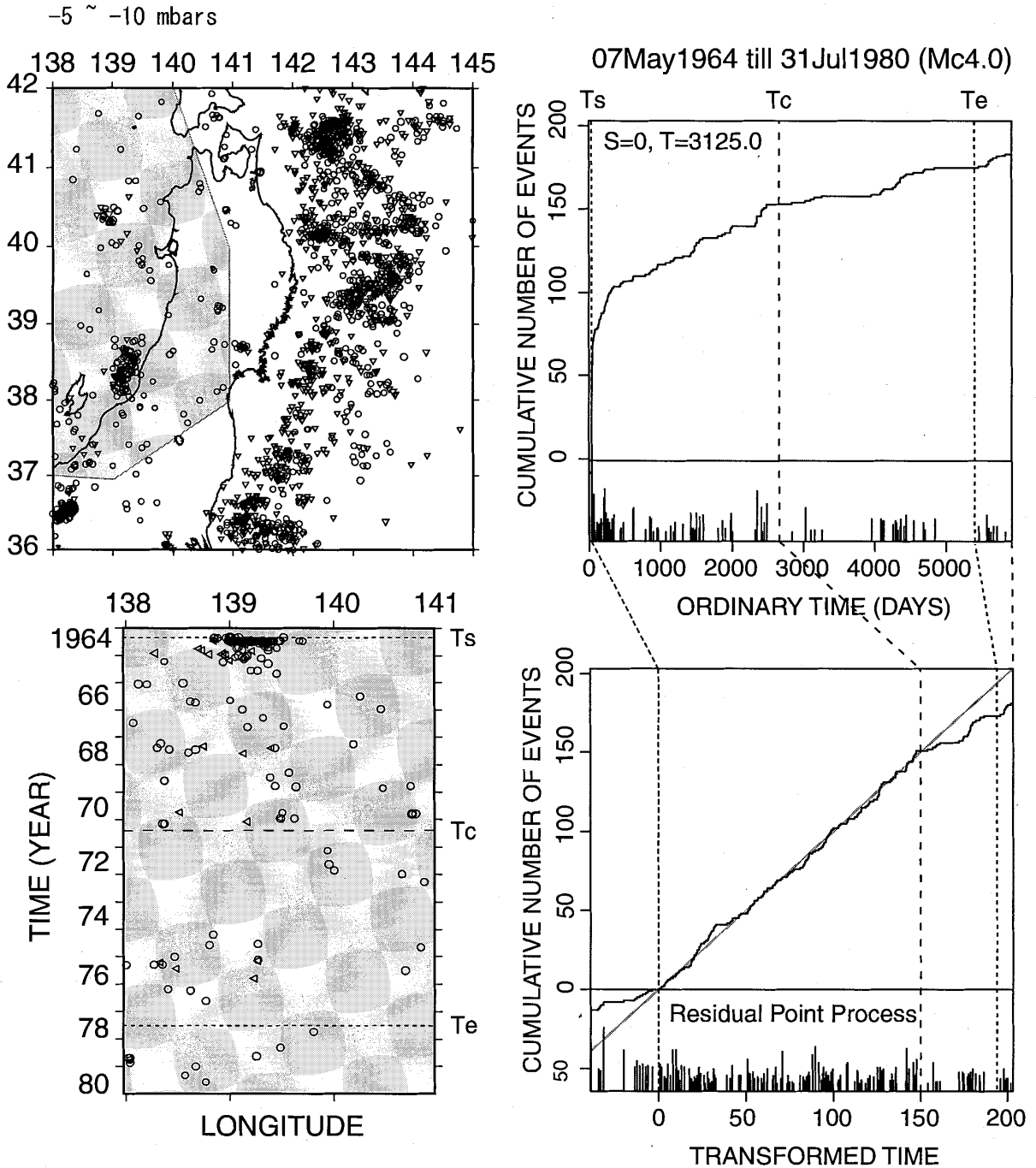
Fig.2 Seismicity reduction rate due to the small negative ΔCFF change based on the Dieterich's equation (Dieterich, 1992).



第3図 1933年3月三陸沖地震 (M8.1) の余震活動。左側：震央図 (1933-1938; $M \geq 4.3$; 深さ 100 km 以浅) と時空間プロット (縦の点線は 1936年11月宮城県沖地震, M7.5, の発生時刻)。右側：本震から 1936年宮城県沖地震までの累積曲線と M-T 図。横軸は上図が通常の時刻で下図が ETAS 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。1933年末あたりから相対的な静穏化が見られる。三陸沖地震の余震については本震と同様の正断層型メカニズムが卓越していると仮定する。1936年宮城県沖地震の想定プレスリップ (1/10のスリップ量) で三陸沖地震の余震域では $\Delta CFF = -5 \sim -1$ ミリバールの値をとる。

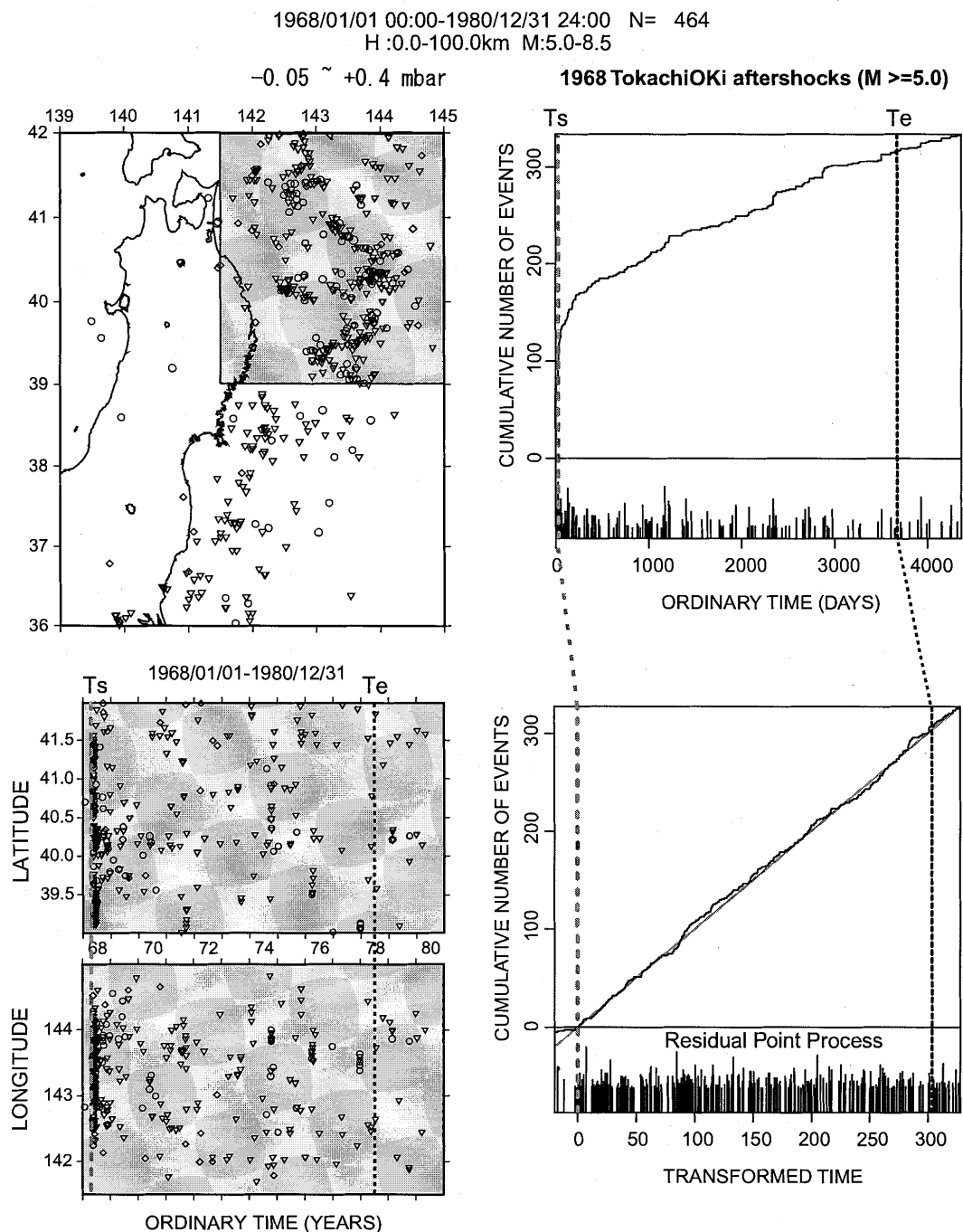
Fig.3 The aftershocks ($M \geq 4.3$) of the 1933 Sanriku-Oki earthquake of M8.1. The aftershock area (grey color rectangle) is almost in the ΔCFF stress-shadow, ranging $-5 \sim -1$ millibars, due to the assumed pre-slip of the 1936 Miyagi-Ken-Oki earthquake (M7.5) assuming also that majority of the aftershocks are normal fault mechanisms similar to the 1933 mainshock (Kanamori, 1971). The vertical dotted line in the space-time plot indicates the occurrence of the 1936 rupture. Hereafter, vertical dotted lines with T_s , T_e , and T_c show that ETAS is 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 0.15 day after the mainshock and the time T_e is the occurrence time of the 1936 Miyagi-Ken-Oki event. We see the relative quiescence after about the end of the year 1933.

1964/01/01 - 1980/12/31 N= 2029
 H :0.0 - 45.0 km M:4.0 - 8.5



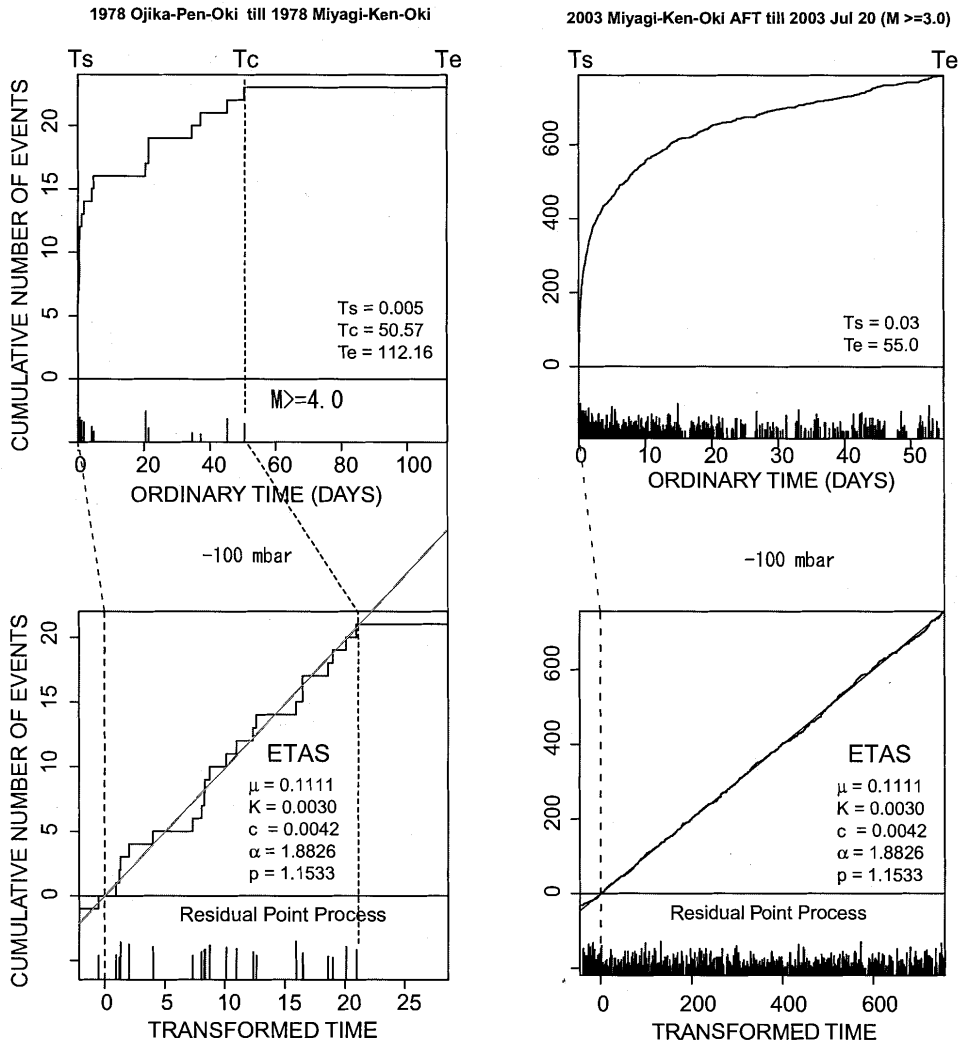
第4図 1973年6月宮城県沖地震 (M7.4) の断層モデル内の想定プレスリップ (1/10のスリップ量) に対して受け手の断層系について 10 km の深さで東西圧縮逆断層を想定したときの stress-shadow (灰色領域, $\Delta CFF = -5 \sim -10$ ミリバール) 地域の震央図 (1964 - 1980; $M \geq 4$; 深さ 45 km 以浅) と時空間プロットと累積地震数および M-T 図。1975 年以降で相対的静穏化が見られる。

Fig.4 Shallow earthquakes including the 1964 Niigata earthquake (M7.5) in the stress-shadow region during 1964-1980, before and after the 1978 Miyagi-Ken-Oki earthquake (M7.4): epicenters ($M \geq 4$), longitude versus time, and cumulative numbers and magnitude against time. Gray color in the epicenter plots shows stress-shadow region at 10km depth. The quiescence after 1975 (dotted vertical line) is seen in the stress-shadow region where the ΔCFF would range $-5 \sim -10$ millibars due to the assumed pre-slip of the 1978 rupture.



第 5 図 1968 年十勝沖地震 (M7.9) の余震活動。左側：震央図 (1968-1980; M ≥ 5; 深さ 100 km 以浅) と時空間プロット (縦の点線 Te は 1978 年 6 月宮城県沖地震, M7.4, の発生時刻)。右側：本震から 1978 年宮城県沖地震までの累積曲線と M-T 図。横軸は上図が通常の時刻で下図が ETAS によって変換された時間。1978 年宮城県沖地震後も余震活動に変化は見られない。1978 年宮城県沖地震の想定プレスリップによる十勝沖地震の余震域での ΔCFF は $-0.05 \sim +0.4$ ミリバールと絶対値がかなり小さい。

Fig.5 The aftershocks (M ≥ 5) of the 1968 Tokachi-Oki earthquake of M7.9. The ΔCFF value in the aftershock area (gray color rectangle) ranges $-0.05 \sim +0.4$ millibars, if we assume pre-slip of the 1978 Miyagi-Ken-Oki earthquake (M7.4) assuming further that majority of the aftershocks are thrust type mechanisms similar to the 1968 mainshock. In this case, T_s is 0.2 day after the mainshock and T_e is the occurrence time of the 1978 Miyagi-Ken-Oki event. We see no seismicity changes even after the 1978 rupture.

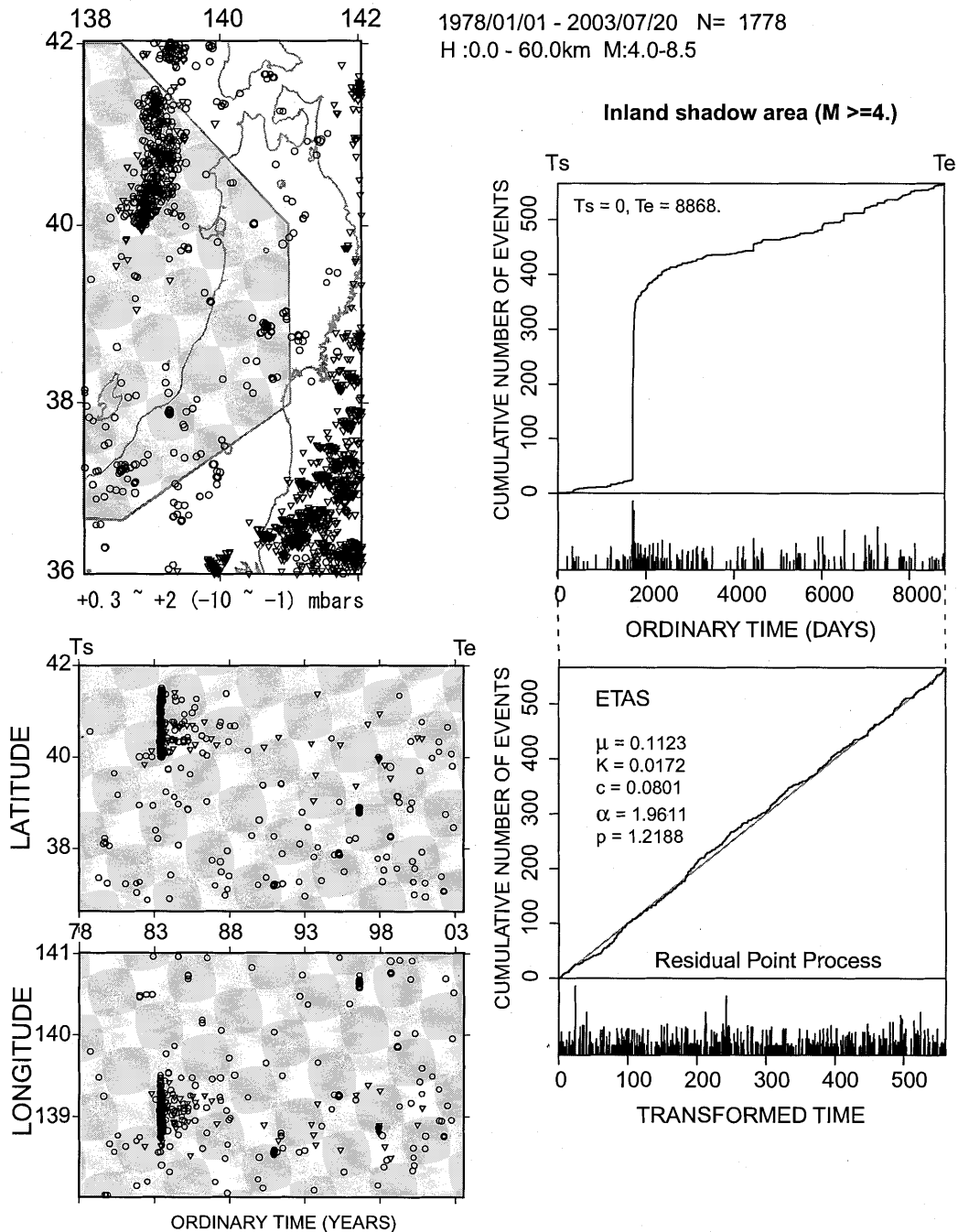


第6図 左図は1978年宮城県沖地震の震源域付近で起きた1978年2月の牡鹿半島沖地震(M6.7)の余震活動で6月12日日本震までの累積図およびM-T図(M≥4)。横軸は上図が通常の時刻で下図がETASによって変換された時間。本震より1ヵ月半後から静穏化している可能性が高い。メカニズム解からこの地震は太平洋プレート内の逆断層型であり、宮城県沖地震のプレスリップ(1/10のスリップ量)を想定するとその余震域では-100ミリバール前後の ΔCFF が得られる。そのプレスリップ自体も数バールの規模で牡鹿半島沖地震によってトリガーされた可能性も否定できない。

2003年5月の宮城県沖の地震も類似のメカニズムの地震であると考えられているが、現在のところ余震活動(たとえばM≥3およびそれ以上)に相対的静穏化は見られない(右図参照)。

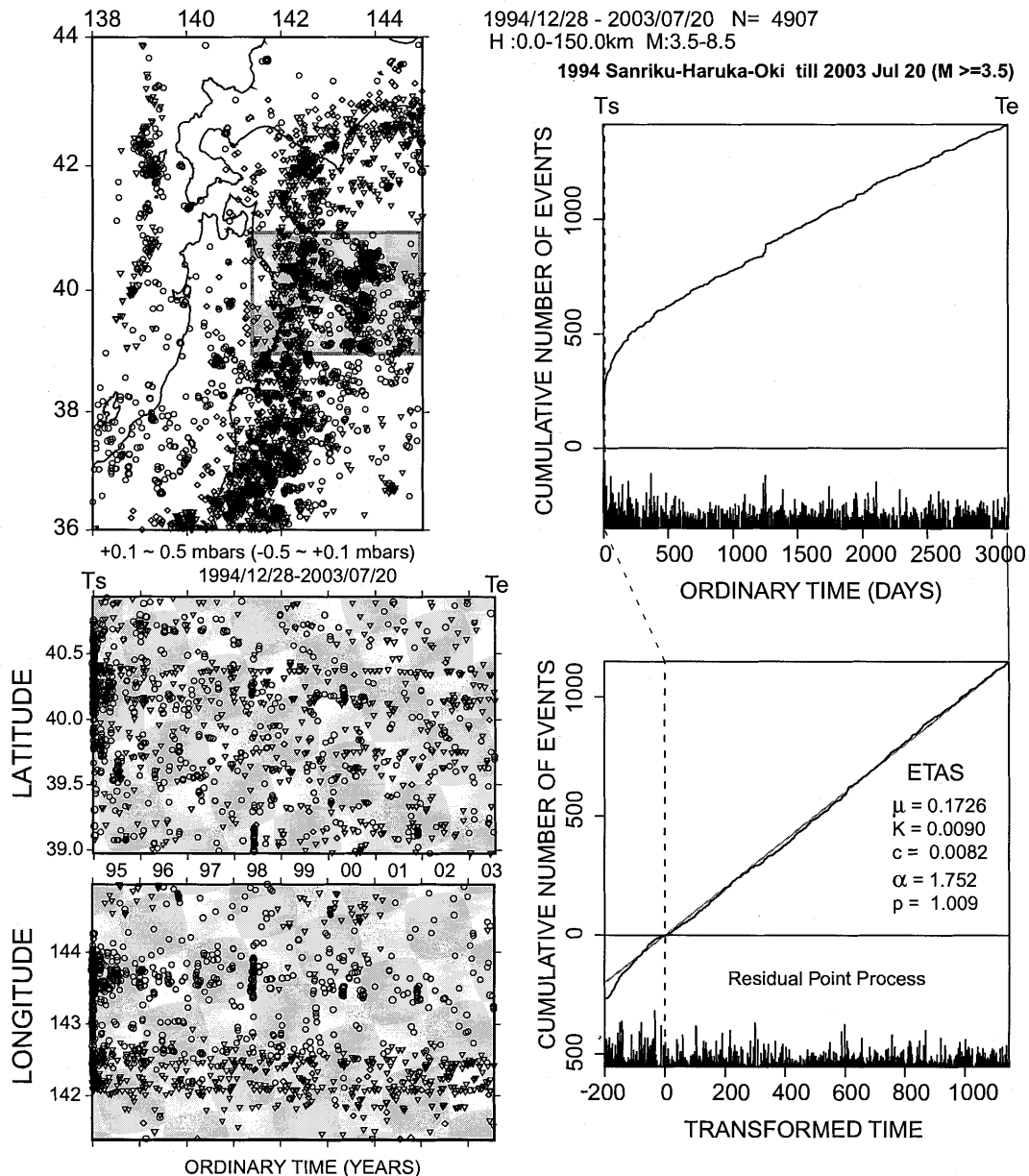
Fig.6 The left two panels show the aftershocks (M≥4) of the Ojika-Hanto-Oki earthquake (M6.7) occurred at 20 February 1978. We see the relative quiescence after one and a half months later from the mainshock till the main rupture of M7.4 at 12 June 1978. The former mainshock is likely to be interplate thrust rupture within the subducting Pacific Plate. The aftershock area is in the stress-shadow of ΔCFF being about -100 millibars due to the assumed pre-slip of the June 1978 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M7.4, which might be triggered by the former mainshock with a few bars' ΔCFF .

The 2003 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M7.0 has a similar mechanism to that of the Ojika-Hanto-Oki earthquake, but so far we see no relative quiescence in the aftershock sequence (M≥3) (the right panels).



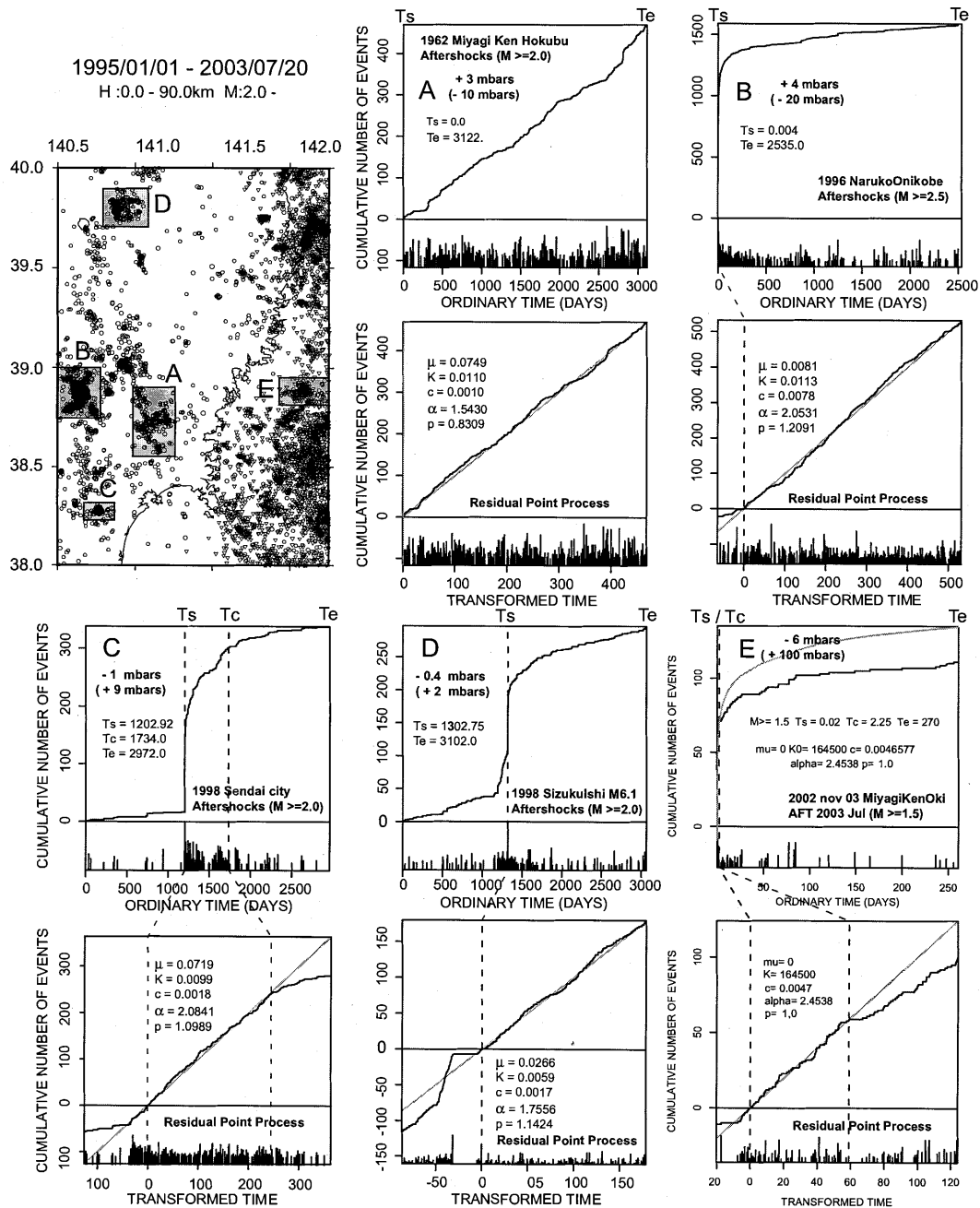
第7図 1978年宮城県沖地震型の想定プレスリップに対して、受け手の断層系として10 kmの深さで東西圧縮逆断層を想定したときの stress-shadow (灰色領域, $\Delta\text{CFF} = -1 \sim -10$ ミリバール) 地域の1983年日本海中部地震 ($M7.7$) の余震を含む震央図 (1978-2003年7月20日; $M \geq 4$; 深さ60 km以浅) と時空間プロットと累積地震数およびM-T図。他方、同領域に対して2003年5月の宮城県沖地震のプレスリップを想定すると $\Delta\text{CFF} = +0.3 \sim +2$ ミリバールになる。相対的静穏化は見られないので後者の方が尤もらしい。

Fig.7 Shallow earthquakes including the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake of $M7.7$ in the stress-shadow (gray color) region during 1978 - 20 July 2003 assuming the pre-slip of the 1978 Miyagi-Ken-Oki earthquake type, epicenters ($M \geq 4$), space-time plots, and cumulative numbers and magnitude against time. The pre-slip should decrease the stress with the ΔCFF ranging $-5 \sim -10$ millibars. On the other hand, if we assume the pre-slip of the 2003 May Miyagi-Ken-Oki earthquake, the region would have increase of the ΔCFF ranging $+0.3 \sim +2$ millibars, which may better explain the fact that we do not see any relative quiescence.



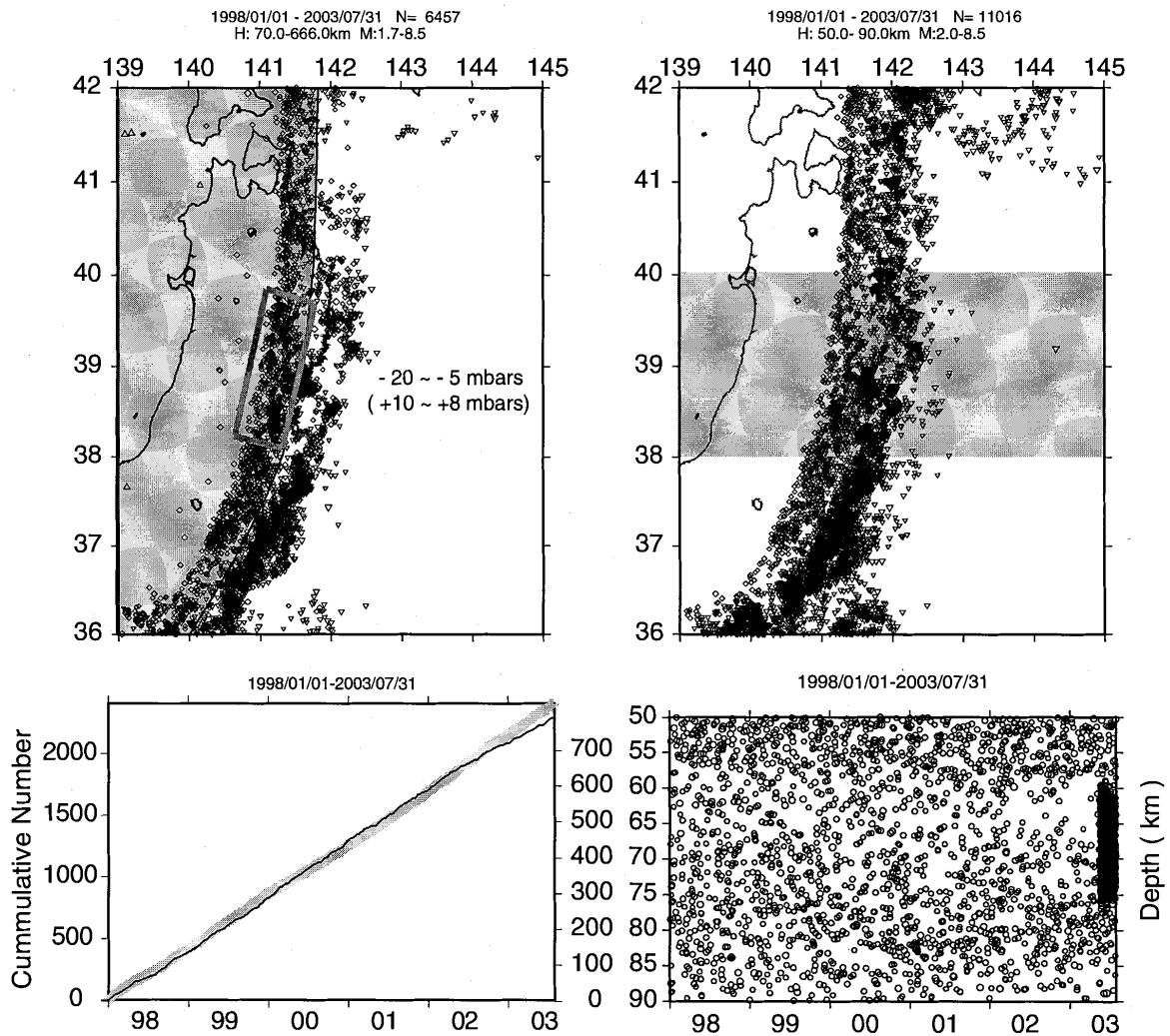
第 8 図 1994 年三陸はるか沖地震 (M7.5) の震源域付近における余震活動と常時活動。左側：震央図 (本震発生から現在 (2003 年 7 月 20 日) まで; $M \geq 3.5$; 深さ 150 km 以浅) と時空間プロット。右側：本震発生からの累積曲線と M-T 図。横軸は上図が通常の時刻で下図が ETAS によって変換された時間。現在まで活動に変化は見られない。三陸はるか沖地震の余震については本震と同様の逆断層型メカニズムが卓越していると仮定する。1978 年宮城県沖型地震型と 2003 年 5 月の宮城県沖地震のプレスリップでも三陸はるか沖地震の余震域では ΔCFF はそれぞれ $+0.1 \sim +0.5$ ミリバールと $-0.5 \sim +0.1$ ミリバールと絶対値はかなり小さい。

Fig.8 The aftershocks ($M \geq 3.5$) of the 1994 Sanriku-Haruka-Oki earthquake of M7.5 and background activity in and around the region. The aftershock area (grey color rectangle) is either in the stress activation or in the stress-shadow with very small ΔCFF values ranging $+0.1 \sim +0.4$ millibars or $-0.5 \sim +0.1$ millibars, due to the assumed pre-slips of the 1978 Miyagi-Ken-Oki fault or 2003 May Miyagi-Ken-Oki earthquake, respectively, assuming further that majority of the aftershocks are thrust type mechanisms similar to the 1994 mainshock. In this case, the time T_s is 10 day after the mainshock (i.e., after the largest aftershock of M7.2) and the time T_e is 20 July 2003. We see no relative seismicity changes.



第9図 1962年 M6.5 宮城県北部地震余震の最近の活動 (A), 1996年 M5.9 宮城県鳴子町の地震の余震活動 (B), 1998年 M5.0 宮城県南部の地震の余震活動 (C), 1998年 M6.1 岩手県栗石の地震の余震活動 (D), および 2002年 11月 M6.1 宮城県沖の地震の余震活動 (E)。パネル内A-Eの記号下の ΔCFF 値はそれぞれ 2003年5月の宮城県沖地震のプレスリップおよび 1978年宮城県沖型地震型のプレスリップ (括弧内の数字) を想定した場合。これらの ΔCFF 値と余震活動の特徴の関係については本文参照。

Fig.9 Recent aftershock activity of the 1962 Miyagi-Ken-Hokubu earthquake of M6.5 (A), aftershock activities of the 1996 Miyagi-Ken-Naruko-Machi earthquake of M5.9 (B), the 1998 Miyagi-Ken-Nanbu earthquake of M5.0 (C), the 1998 Iwate-Ken-Shizukuishi earthquake of M6.1 (D), and 2002 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M6.1 (E). Below each of the signs A-E in the five top panels we denote ΔCFF values assuming precursory slips of either the 2003 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M7.0 or the 1978 Miyagi-Ken-Oki type rupture of M7.5 (the ΔCFF values in a bracket). All the analyzed results are consistent with the assumed pre-slip of 2003 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M7.0, contrary to the assumed pre-slip of the future interplate rupture of the 1978 Miyagi-Ken-Oki type.



第10図 地震カタログの一元化 データによる1998年以降の2003年5月宮城県沖地震付近のプレート境界の地震活動。左図は70 km以深（上図の東北地方下部の全灰色領域）の地震活動が下図の太い灰色の累積曲線によって示され、そのうち上図の灰色枠四角領域内の地震が下図の細黒の累積曲線によって示されている。右図は上図の灰色領域内（ 38° - 40° N）の地震の深さ対時間分布。左右の図とも2002年11月3日の宮城県沖の地震（M6.1）によって2003年5月の宮城県沖地震のプレスリップを誘発（ $\Delta\text{CFF} = +$ 数10ミリバール）し、更にこれらの地震活動の静穏化（ $\Delta\text{CFF} = -20 \sim -5$ ミリバール；第9図のE参照）につながっている可能性を否定しない。1978年宮城県沖型地震型のプレスリップを仮定した場合、この領域では $\Delta\text{CFF} = +8 \sim +10$ ミリバール（括弧内の数字）であり静穏化を説明し難い。

Fig.10 Seismic activity during 1998 - 20 July 2003 around the plate boundary near the source of the 26 May 2003 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M7.0. The left two panels show interplate activities beneath Tohoku region deeper than 70 km. The thick gray and thin black cumulative curves in the left bottom panel respectively stand for the earthquakes ($M \geq 1.7$) from the whole gray region and the embosomed region by the thick gray lines in the top panel. The right bottom panel represents the depth against time of earthquakes ($M \geq 2$ in old JMA magnitude) from the shaded region shown in the top panel. From these diagrams we speculate that the 2002 event of M6.1 triggered the precursory slip of the 2003 event of M7.0 (with about +50 millibars) and that the pre-slip then inhibit the activity in the neighboring plate boundary region (with $-20 \sim -5$ millibars): also see Figure 9E. It is less likely that the quiescence is triggered by the future interplate rupture of the 1978 Miyagi-Ken-Oki type, owing to the ΔCFF values ranging $+8 \sim +10$ millibars in the same region.