

1 1 - 7 静的トリガリングと統計

Static triggering and statistical modeling

統計数理研究所

Institute of Statistical Mathematics

1 地震活動の変化の意味と余震活動の統計モデルの意義

まず地震活動の変化とは何かを明確に定義する必要がある。これまで多くの場合に、それは、除群アルゴリズムによって余震を取り除いてもたらされた、常時活動（ポアソン過程）の活動レベルの変化として認識されている。しかし、除群は科学的情報量の著しい低下をもたらすだけでなく、余震など群れを起こす局地的なストレス変化を考慮外とし、地震活動の地域的特性をつぶさに見ることができない。

ここで言う地震活動の変化というのは、地震活動が ETAS モデルで予測した理論的活動度から、ある時点で有意に逸脱することを意味する。地震活動の活発化・静穏化はこの意味で予測活動度を基準にした相対的なものである。なぜ余震の経験則をもとに構成した統計的モデルが必要なのか。それは余震を予測する物理的モデルが難しいためである。たとえば余震の連鎖性・集中性は断層内の破壊に伴う急激で局所的なストレス変化による誘発のためであるが、余震の断層群がフラクタル的で複雑なため膨大な個別的断層運動の記述は難しい。これに対して、統計力学の様にマクロなアプローチをとる事が有効である。かくして、データに適合した統計モデルによって余震効果を見込んで相対的に地震活動を解析する。このことによって外的な原因による広域的なストレス変化が見易くなるからである。

2 相対的静穏化現象と近辺の断層内のプレスリップとの関係

地震活動が順調に推移しているか否かはMT図や累積関数などの目視では良く分からないことが多いので、理論的累積地震関数（ETAS 発生強度関数の積分）を物差しにして余震の実際の累積数との偏差を測る。有意な変化が認められ、その後の地震発生がモデルによる発生率に比べて少ない場合、「相対的静穏化現象」と呼ぶ。これまでの統計的解析の経験から、一般に余震や群発地震のように活発な場合は、相対的静穏化は見易い。

いったん大地震が起きると、その近辺に同程度以上の地震が起きる確率（単位面積当たり）は遠方のどこかに起きる場合よりも大きい¹⁾。これらはストレスの急変による地震の誘発現象を示唆している。さらに、ある地震の余震活動が相対的に静穏化した場合には、予測どおりに活動が推移している場合より、この先新たな断層破壊を伴う大きな余震が起きる可能性が高い²⁾。相対的静穏化が長期間（たとえば数ヶ月以上）に及ぶと、日本においては、余震域近辺（たとえば200km以内）で、6年以内の期間に、本震と同規模以上の地震が起きる発生確率が、その他の場合より数倍以上も高い³⁾（第1図）。

このような前兆的静穏化現象の仕組みとして次の様な仮説が考えられる。すなわち、1つの破壊すべりが起こったときにその近傍の断層に破壊を促進させることが起こると思うが、そこで前端的に非地震性滑りも起こり易くなる。その滑りのために元の地震の余震域が Stress-shadow になる場合がある。それに伴い自然な余震減衰活動が急激に低下すると考える。実際、発震機構に基づいて計算したクーロンの破壊応力が低下した領域と余震活動が静穏化した領域の対応が付く場合が数多く見られるからである^{4,5)}。

3. なぜ静穏化か

しかし、そのような前駆的すべりは規模が小さく、クーロンの破壊応力も、これまでトリガー作用で議論されている閾値といわれる ΔCFF の絶対値より遥かに小さい。これに対してDieterichの摩擦構成則の理論⁶⁾に基づくと、条件によっては、活動度がそれまでより数割以上低下し、余震のように活動が活発な場合には相対的静穏化が顕著に見える。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な理由は2つ考えられる。第一に、Dieterichの発生率変化の理論式⁶⁾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図)。第2に、大きめの地震(余震)には多数の余震(二次余震)が付くが、ETASモデルはこの効果を考慮しているため相対的活発化が見え難い。別の見方をするなら、活発化を促した元々の大域的な ΔCFF が微弱な場合、これで誘発された地震数より、誘発された地震自体の断層運動による局地的な ΔCFF が誘発する余震数の方が大幅に上まると言うことである。stress-shadow 域の静穏化では、このような事が起き難いので、大域的なCFFの減少が反映され易いと思われる。

4. 発震メカニズムの統計解析

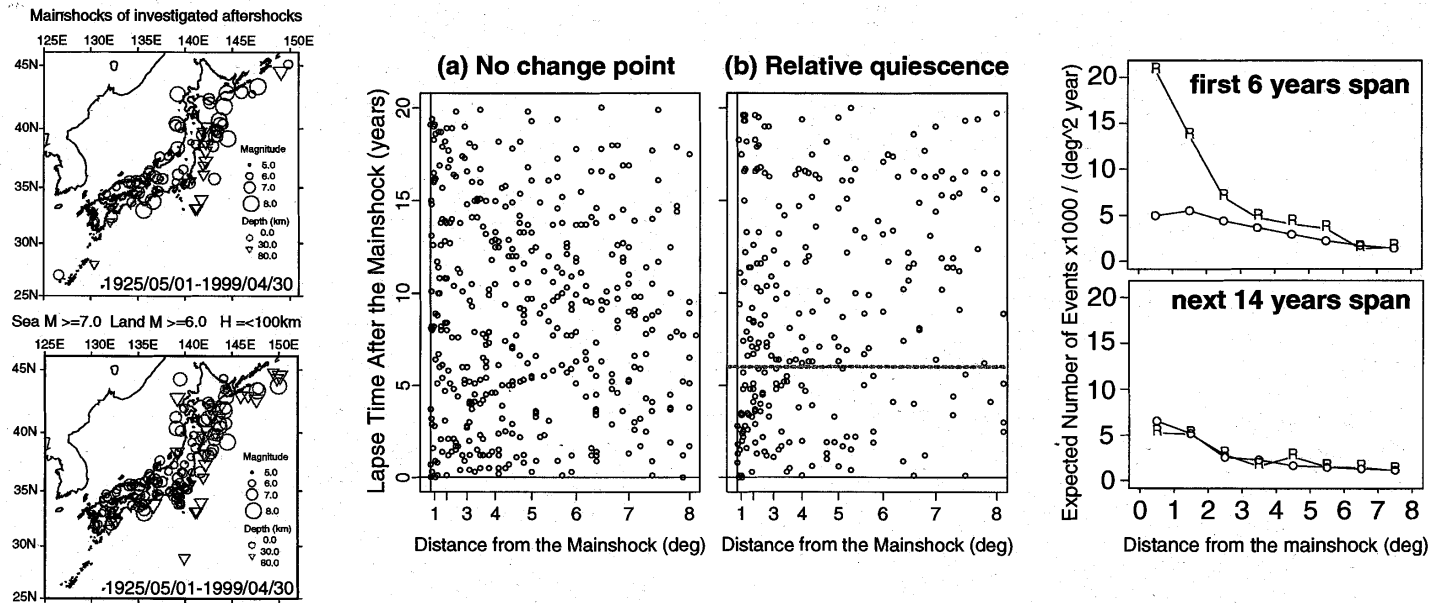
地震(余震)活動に(相対的)静穏化が見られたとしても、それが常習的なサイレント地震などの為かも知れない。アスペリティの近傍での滑りであっても、それから大地震の時期を予測するには依然として難しい問題が山積している。当面の実用的な目標は、各種の条件や情報を盛り込んで、上記の様な確率的予測の実効性を上げる事になろうかと思う。

他方、相対的な地震発生率の変化を検出し解析することによって、地殻内の微弱な応力の変化との量的な関係の解明に資する道も切り拓かれると考えている。いずれにしても、発震メカニズムの震源カタログの重要性は増している。その統計的解析の一例も示した(第3~5図参照)。

(尾形良彦)

文献

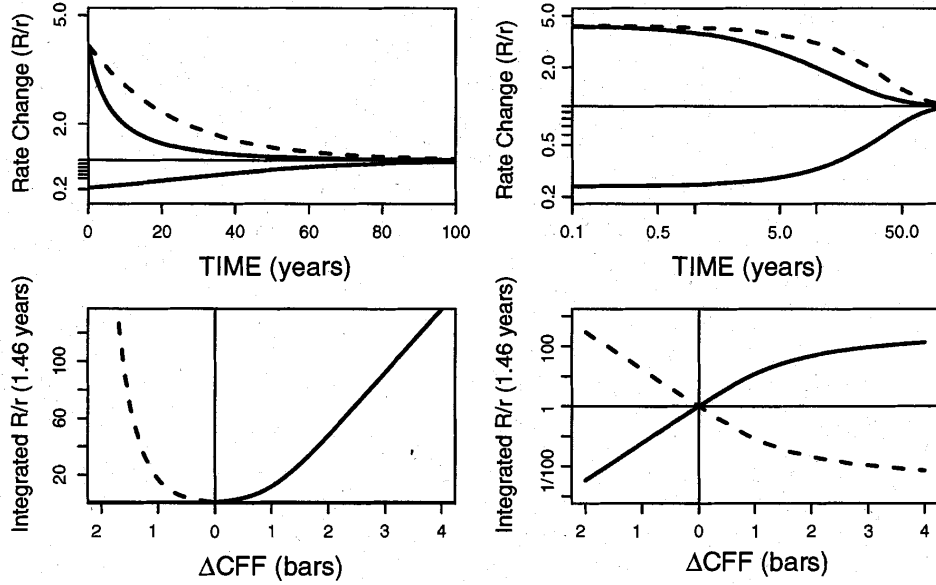
- 1) Kagan, Y.Y, and L. Knopoff, Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 67, (1980), 303-320.
- 2) Matsu'ura, R.S., Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 61 (1986), 1-65.
- 3) Ogata, Y., J. Geophys. Res., 106, (2001), 8729-8744.
- 4) Ogata, Y., L. M. Jones, and S. Toda, J. Geophys. Res., 108 (2003), 2318, 10.1029/2002JB002009,.
- 5) 統計数理研究所, (第156回, 別報告) 予知連会報, 72巻 (2004).
- 6) Dieterich, J., J. Geophys. Res., 99, (1994), 2601-2618.
- 7) Toda, S., R.S. Stein, P. Reasenberg, J.H. Dieterich, and A. Yoshida, J. Geophys. Res., 103, (1998), 24543-24545.
- 8) 橋本 学, 地震 (ii), 48巻, (1995), 521-530.
- 9) 馬場俊孝, P. Cammins, 堀高峰, J. Townend, 宇平幸一, 地球惑星科学関連学会 2002年合同大会予稿集, (2002), S041-P013.
- 10) Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura, Science, 298 (2002), 1009-1012.



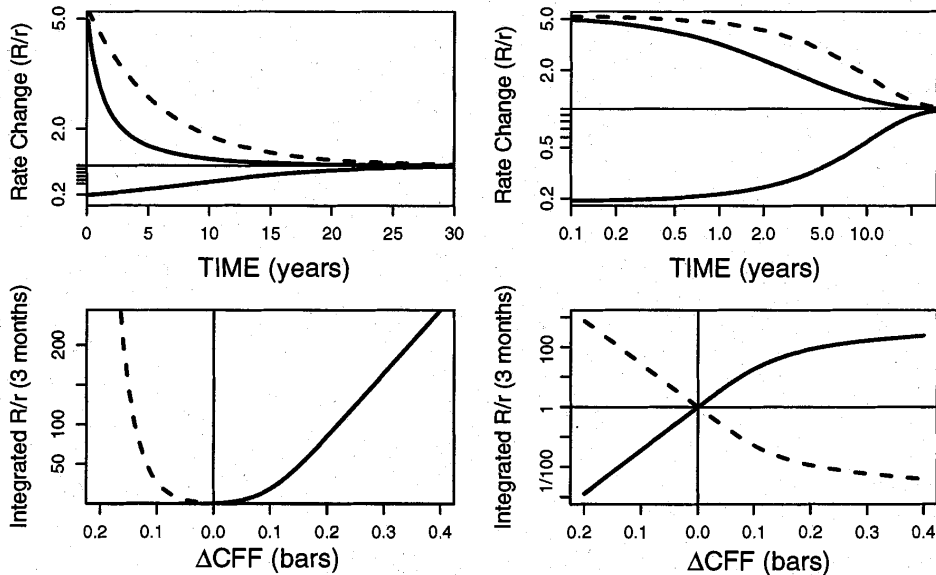
第 1 図³⁾ 左側 2 図の上図は調べた余震の本震 (77 個) の震央, 下図は陸域で M6, 海域では M7 以上の地震。中央 2 図は調べた余震の本震の発生時刻と震央をこれらの座標の原点に置いて, 継続する地震 (左側下図) までの経過時間 (y 軸) と距離 (x 軸, 目盛は平方) の座標にプロットし, それらを重ね合わせたもの。中央 2 図の左図は余震活動に有意な変化が無い場合 (43 余震例) で, 右図は有意な変化が見られ相対的静穏化に至った場合 (34 余震例)。右側 2 図は単位面積当りの地震 (陸域では M6, 海域では M7 以上) 発生予測率。R で結んだ折れ線は相対的静穏化が見られた場合で, 右側 2 図の上図は 6 年以内, 下図は 6 年から 20 年まで。右側 2 図の上下図の O で結んだ折れ線は余震活動に有意な変化は無い場合。

Fig.1³⁾ Superposed plots of the time lags versus distances from the main shock (left top panel) of the investigated aftershocks to the subsequent large events (left bottom panel). Middle left panel (a): superposition for the 43 main shocks whose aftershock sequences have no change point. Middle right panel (b): superposition for the 34 main shocks whose aftershock sequences show relative quiescence. Only events with sizes similar to or larger than the main shock (specifically, $M \geq M_0 - 0.2$) were considered as shown in the left bottom panel. The abscissa of the middle panels is scaled by the square of the distance so as to be proportional to the area of the disk with the given distance as radius. A notably strong concentration in distance occurs during the first 6 years in the panel (b) compared to the rest 14 years in the panel (b) and also to all 20 years in the panel (a). The right two panels show average numbers of the subsequent large earthquakes per unit area against distance from the main shock of the investigated aftershock sequence. The dashed lines connecting the symbols “R” and “O” stand for the cases of anomalous (relative quiescence), and normal aftershock activity, respectively, for earthquakes occurring within the first and second 10-year periods after the main event.

$\Delta CFF = \pm 0.5$ bars; $A\sigma=0.35$ bars/year; Stressing Rate 0.15 bars/year; $t_a = 23$ years

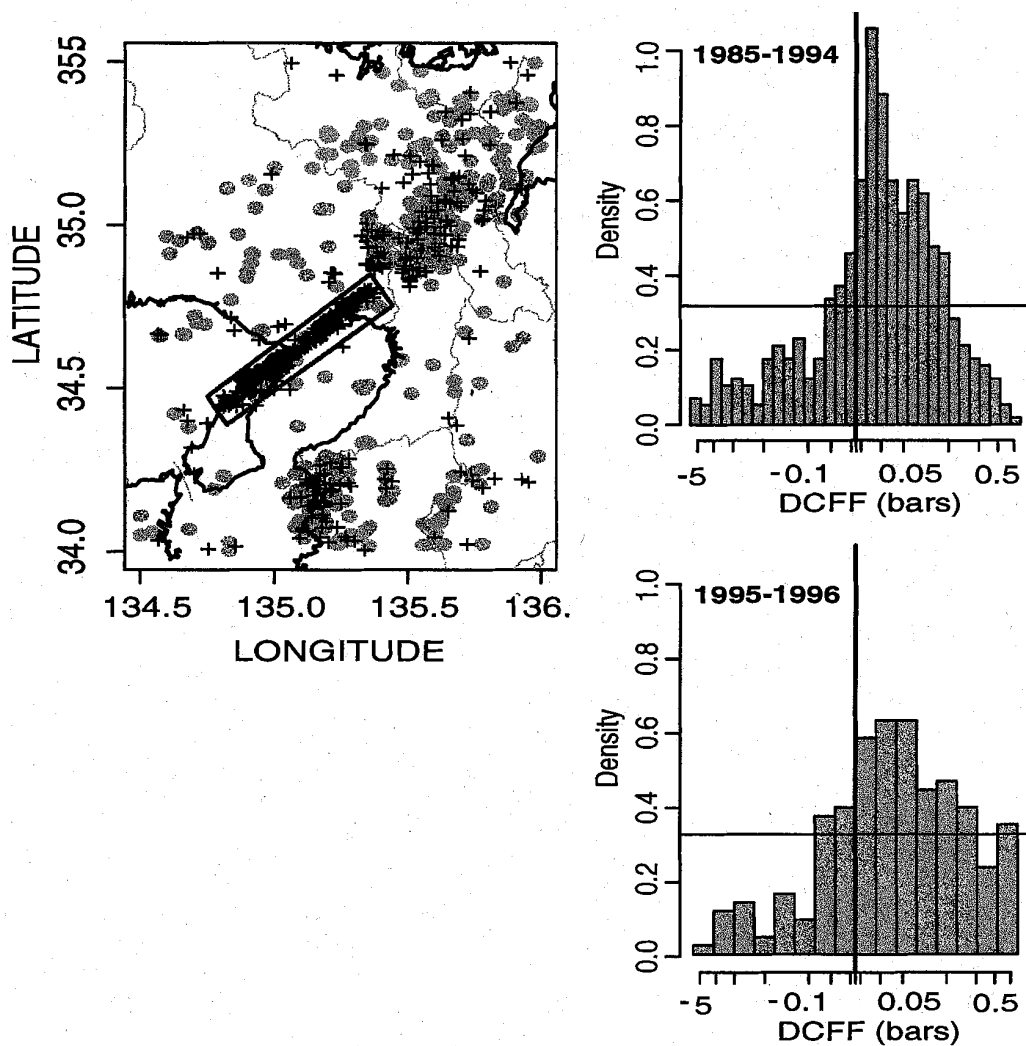


$\Delta CFF = \pm 0.05$ bars; $A\sigma=0.03$ bars; Stressing Rate 0.005 bars/year; $t_a = 6$ years



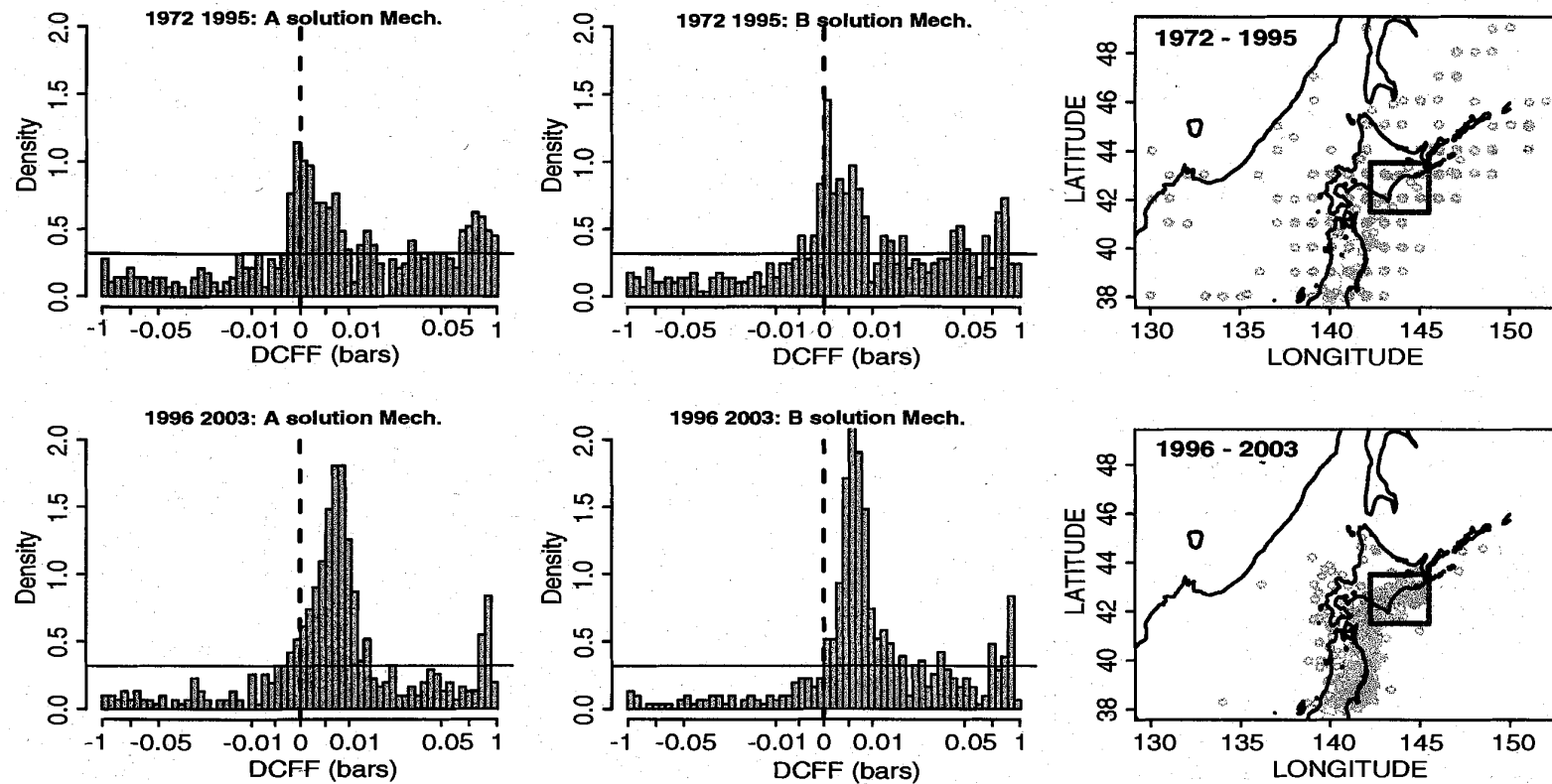
第2図 摩擦構成則の理論に基づく地震発生率変化式⁶⁾の図示。上4図は兵庫県南部地震による変化に際して推定されたパラメタ値⁷⁾を使用。左上図は同じ絶対値の ΔCFF の下で、変化後の発生率の時間的経過、上の実線は活発化した発生率の減衰曲線で、下の実線は抑制された発生率の回復曲線である。点線は、発生抑制率の逆数を示したもので発生率の時間的経過の積分効果を比較できる。右上図は、その両対数グラフで、以下ここでの全ての右側の図は、左側の図の両対数グラフ。下4図は ΔCFF が ± 50 ミリバールと言った小さなストレス変化の場合の一例。

Fig.2 Seismicity-rate-change function⁶⁾ and its integrations. Top 4 panels use the constitutive parameters⁷⁾ estimated for the case of the 1995 Kobe rupture of M7.2. The bottom 4 panels use a very small changes $\Delta CFF = \pm 50$ millibars in addition to the specified constitutive parameters. Dotted lines indicate the reciprocal of the functions in case of stress shadow.



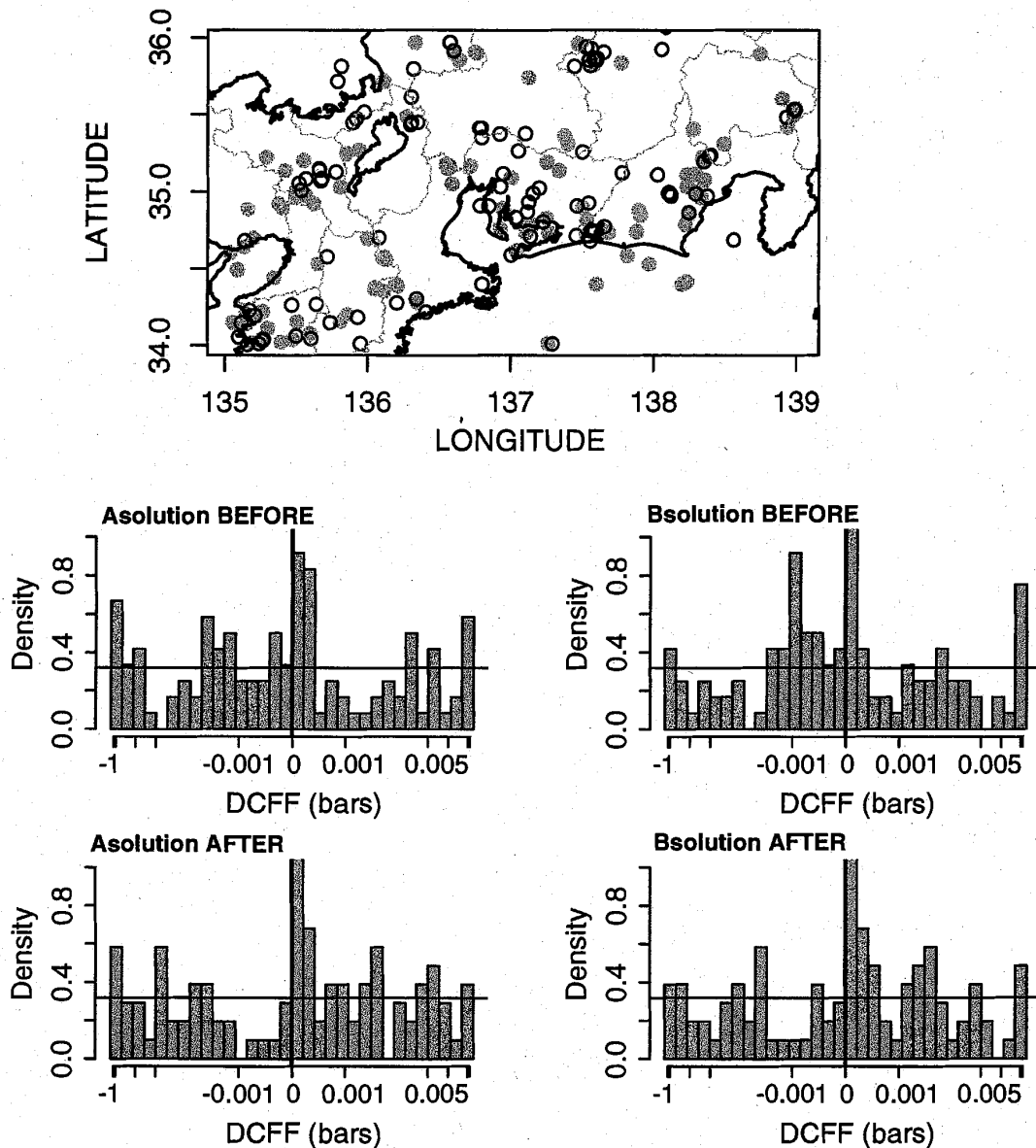
第3図 1995年の兵庫県南部地震前後の周辺部の地震活動度の変化と Δ CFFとの関係。断層モデルは橋本(1995)⁸⁾、微小地震のメカニズムデータ(左上の震央図)は馬場ほか(2002)⁹⁾に拠る。右上図は兵庫県南部地震以前の地震の相対度数のヒストグラムで全積分が1になるよう基準化、横軸は Δ CFFをarc-tangentで変換したもので実際の Δ CFFの値を目盛っている。右下図は兵庫県南部地震以後のもの。左上の震央図にあるように、兵庫県南部地震の余震域を除外している。負の Δ CFFの地震の割合が減って、正の Δ CFFの地震の割合が増え全体的には右に重心が移っている。

Fig.3 Change of frequency distribution of earthquake mechanisms before and after the 1995 Kobe rupture of M7.2. Δ CFF is calculated for each micro-earthquake with its specific mechanism (Baba et al. 2002)⁹⁾ assuming the Kobe fault rupture model by Hashimoto (1995)⁸⁾. Normalized histograms are made by the arc-tangent transformation of Δ CFF value. The events within the aftershock region are removed from the statistics.



第4図 2003年十勝沖地震の前駆的すべり仮説⁵⁾を検証するJMAのメカニズム頻度変化。上三図が1972~1995年、下三図が1996~2003年の期間のデータ。震央図にあるように余震域周辺を除外している。左側上下図は受け手の地震のA解メカニズムによる ΔCFF のヒストグラム。中央上下図がB解メカニズムのもの。いずれも負の ΔCFF の地震の割合が減って、小さい正の ΔCFF の地震の割合が顕著に増えている。 ΔCFF が $+0.02 \sim +0.1$ の地震が比較的に少ないのは余震域周辺の地震を除外した為と考えられる。

Fig.4 Change of frequency distribution of the JMA earthquake mechanisms before and after the suspected precursory slip⁵⁾ of the 2003 Tokachi-Oki earthquake of M8.0. Panels in top and bottom row represents the data for the period 1972-1995 and 1996-2003, respectively. Panels in left and middle columns represent for the two conjugate fault plane solutions (A and B). Normalized histograms are made by the arc-tangent transformation of ΔCFF . Some missing of events of 0.01-0.1 bars may be owing to the removal of events in the focal rectangular region.



第 5 図 浜名湖直下のスロー地震の断層モデル¹⁰⁾をもとに計算したF-netデータによる Δ CFF頻度変化。上震央図で灰色丸は1997~2000年, 白抜き丸は2001~2003年の地震。中下図は地震の共役メカニズムで, 左側がA解, 右側がB解の断層面を仮定したときのヒストグラム。-1ミリバール前後の小さな Δ CFFで起きた地震の割合が減って, +1ミリバール前後のものが増えているように見える。地震の殆どを占める Δ CFFが-10~+10ミリバール値域で, 2値回帰logitモデルでAIC比較をすると前後の分布パターンに変化が有るという場合が支持される。

Fig.5 Change of frequency distribution of the earthquake mechanisms (F-net) before and after the onset of slow slip¹⁰⁾ beneath the Lake Hamana. Open circles and grey disks in the top left panel represent the epicentres of the events from the periods 1997-2000 and 2001-2003, respectively. The second and third row panels show the normalized frequencies of CFF during the two periods for the two conjugate fault plane solutions. The change of distribution is supported by the AIC comparison by fitting binary logit model to the CFF data in the span of [-10, 10] millibars.