

### 6 - 3 統計的時空間モデルで検出された中部・近畿地方の地震活動の変化 (1995-2001)

#### Seismicity changes in western Japan (1995-2001) detected by a statistical space-time model

統計数理研究所

Institute of Statistical Mathematics

地震活動の微妙な変化を見るには、時空間ETASモデルが役に立つ。1995-2001年のM2.5以上のデータに階層的時空間ETASモデル(以下の付録参照)をあてはめ、これによる理論的な活動度に対する実際の活動度の相対的な活発化や静穏化を相対比率として時空間(経度、緯度、時間)上の画像を得た。最初の5年間(1995-1999)の相対比は大体の地域で1前後の値になっているが、特徴的なのは1995年兵庫県南部地震震源域に隣接する丹波地域と常時活動の活発な和歌山地方の更なる相対的な活発化である(第1図上図および第2図)。これらは、兵庫県南部地震の断層モデル<sup>1)</sup>に対する、それぞれの地域の最頻発震メカニズム<sup>2)</sup>による $\Delta$ CFF分布<sup>3, 4)</sup>と調和的である(第1図下図)。ところで両地域での活発化は兵庫県南部地震に先行しており(第2図<sup>5)</sup>)、兵庫県南部地震の断層のどこかで前駆すべりがあった可能性を考えたいところである。また有馬高槻構造線以北のS波反射面の前駆的正断層的すべり仮説<sup>6)</sup>による $\Delta$ CFF分布についても両地域の先駆的な活発化と調和的である<sup>7)</sup>。

第3図の上図は2001年の相対比率を示している。青や紫はこの年の活動の低下、黄色は活発化を示しているはずである。これらの地域の地震の累積図とM-T図によると、新潟西部、若狭湾北部、琵琶湖東岸、大阪府北部兵庫県猪名川町周辺、紀伊水道南部、兵庫県北部余震は余震の不活発性を含む相対的静穏化、そして岐阜県中部、丹波北摂津、山崎断層周辺、和歌山県北部海岸部周辺は活発化がみられる。とくに琵琶湖東岸の活動の低下と岐阜県中部の活発化は浜名湖付近直下のすべり<sup>8)</sup>による $\Delta$ CFF分布(第3図下図)に調和的である。

#### 付録. 階層的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルによる地震活動変化の検出

大きな地震の破壊に伴う急激で局所的なストレス変化によって近傍の中小の断層群の破壊やすべりが誘発され、余震活動の連鎖性・集中性を生じていると考えられている。余震のメカニズムは本質的にミクロで複雑であるため予測には経験法則に基づいた統計的なアプローチをとらざるを得ない。時空間 ETAS モデルは改良大森公式  $\nu(t) = K(t+c)^{-p}$  と余震域のマグニチュードに関する宇津・関のスケールリング則に依拠して以下のように作成したものである。時刻  $t$  に於いて或る場所  $(x, y)$  での地震活動が

$$\lambda_{\theta}(t, x, y) = \mu + \sum_{\{j: t_j < t\}} \nu(t-t_j) \left[ \frac{(x-x_j, y-y_j) S_j(x-x_j, y-y_j)^t}{e^{\alpha(M_j-M_c)}} + d \right]^{-q}$$

で表現されるものである。ここで、 $\mu$  は常時地震活動度(background seismicity)、 $M_c, M_j$  は下限マグニチュードと  $j$  番目の地震のマグニチュードであり、 $S_j$  は余震分布の等高線を楕円で近似するような行列、座標  $(x_j, y_j)$  は必ずしも震央でなく余震分布の重心である。これらは小さな地震など多くの場合、夫々単位行列と震央であるが、AICによって有意なら、重心や相関係

数などを推定して置き換えたカタログを作成する。これに最尤法を適用してパラメタ  $\hat{\mu}, \hat{K}, \hat{c}, \hat{\alpha}, \hat{p}, \hat{d}, \hat{q}$  は推定される<sup>9)</sup>。

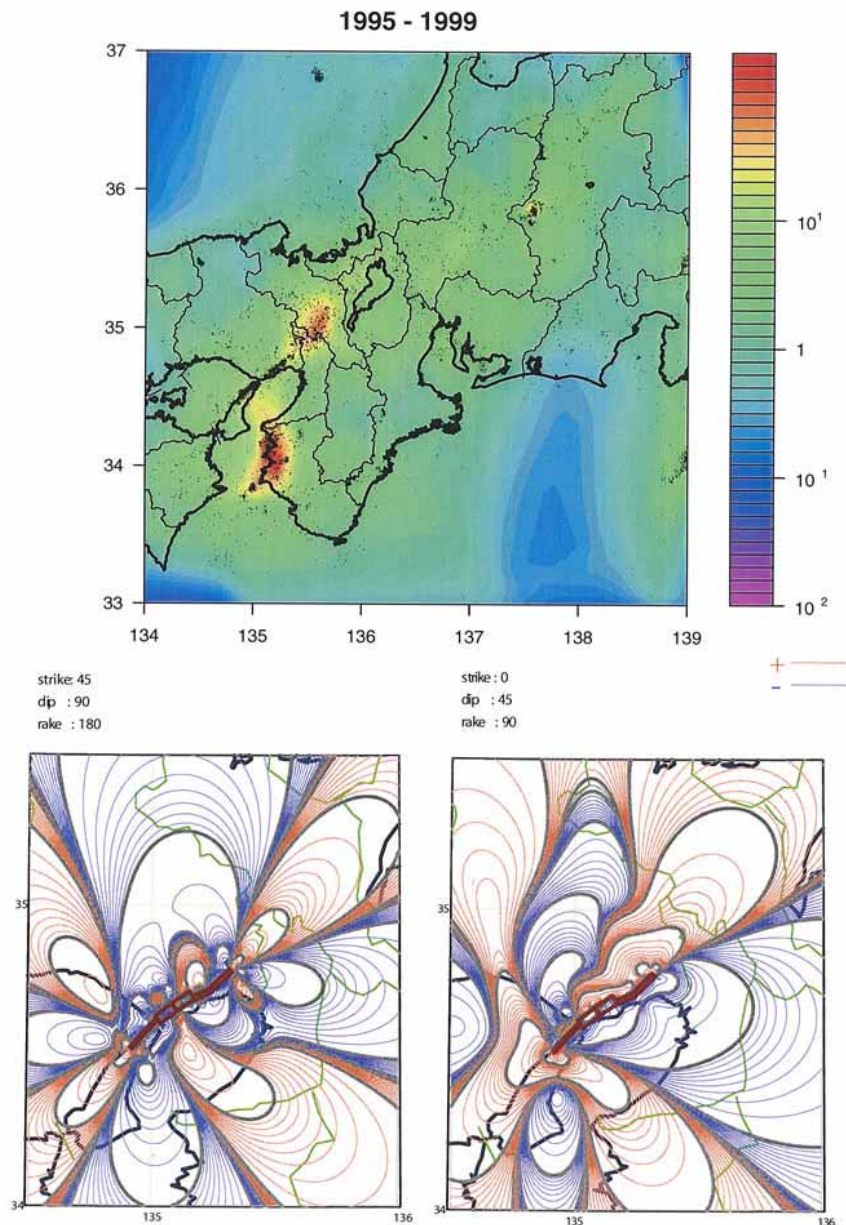
階層的時空間ETAS( HIST-ETAS )モデルは、これを一般化して、常時地震活動度  $\mu$  が位置  $(x, y)$ , 4つのパラメタ  $\hat{K}, \hat{\alpha}, \hat{p}, \hat{q}$  が位置  $(x_j, y_j)$  の関数と考え、各地で異なる地震活動様式を定量化する。推定はパラメタ変化の滑らかさを制約条件として入れてベイズ法で最適な解として得られる<sup>7, 10)</sup>。

また各地の実際の地震活動度と時空間モデルで計算された理論的活動度  $\lambda_\theta(t, x, y)$  の相対比率の推定はその滑らかさを制約条件としてベイズ法で最適な解として得られる。相対比率が有意に1より小さいか大きいかによって、相対的静穏化や相対的活発化した地域や期間を見出すのである。この様にミクロで複雑な現象を統計的に同定したモデルを基準にした相対的な地震活動変化を解析することによって広域のストレス変化が見易くなることを狙った。

(尾形良彦)

#### 参 考 文 献

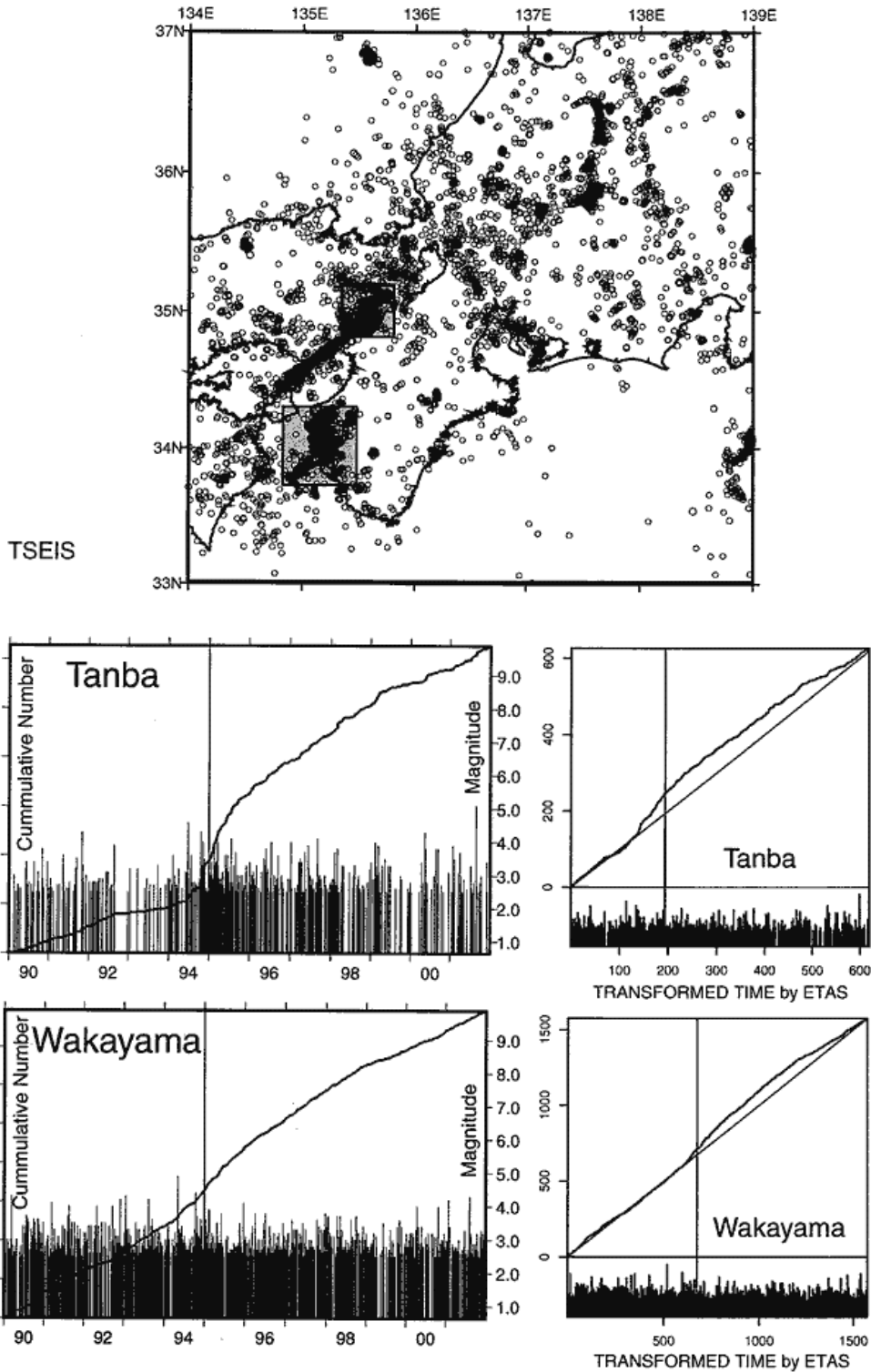
- 1) 橋本 学: 地震 2 48, 521-530 (1996).
- 2) 馬場俊孝, P. Cammins, 堀高峰, J. Townend, 宇平幸一: 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, S041-P013 (2002).
- 3) Okada, Y.: *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040 (1992).
- 4) 内藤宏人・吉川澄夫: 日本地震学会講演予稿集, C30 (1998).
- 5) 鶴岡 弘: 東京大学地震研究所技術研究報告 No. 2, 34-42 (1997).
- 6) 飯尾能久: 地震 2 49, 103-112 (1996).
- 7) Ogata, Y.: *Research Memorandum*, No. 879, *The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo* (2003).
- 8) Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura: *Science*, 298, 1009-1012 (2002).
- 9) Ogata, Y.: *Ann. Inst. Statist. Math.*, 50, 379-402 (1998).
- 10) Ogata, Y.: *Research Memorandum*, No. 808, *The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo* (2002).



第 1 図 時空間 ETAS モデルの理論的活動度に比した実際の活動度 (M2.5 以上) の相対比率。上図は最初の 5 年(1995-1999)の平均的な比率。下図は兵庫県南部地震震源付近の  $\Delta$ CFF 変化分布。橋本(1996)の兵庫県南部地震モデルによる変化。受けての断層群として、左図は東西圧縮横ずれ、右図は東西圧縮逆断層型を想定している。等高線は対数スケールで等間隔、赤線は正值で青線が負値、灰色は  $\pm 0.003$ ,  $\pm 0.03$ ,  $\pm 0.3$ ,  $\pm 3.0$  bar (0.1MPa) の値に相当する。

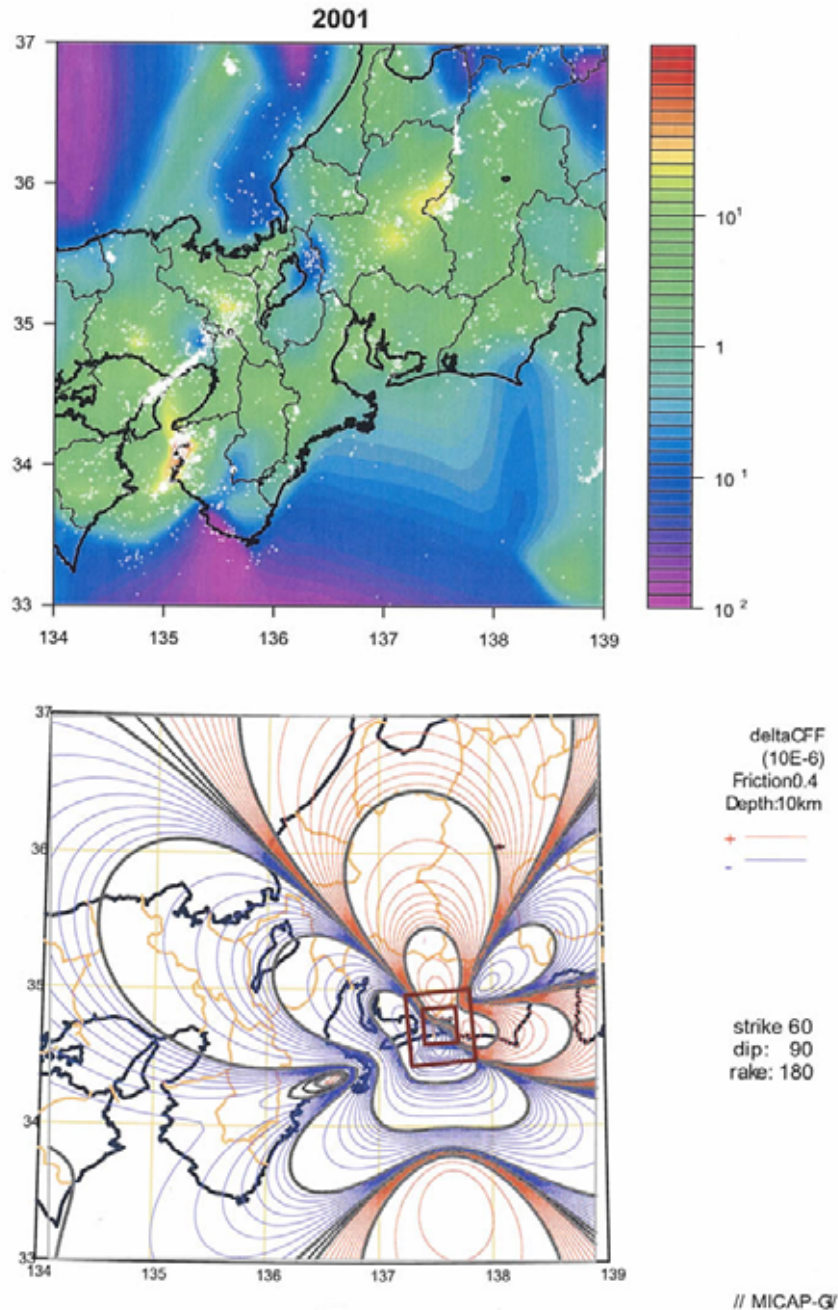
Fig.1 Image of the ratio of the real seismicity rate of events (M2.5 or larger) to the predicted rate by the space-time ETAS model. The image in the top panel shows the averages during the periods 1995-1999. The images in the bottom panels shows Coulomb's stress changes in the crust at 10km depth around area of the 1995 Kobe earthquake of M7.2 assuming the apparent friction coefficient 0.4. Resulting regions of positive and negative Coulomb stress changes are shown by red and blue contours, respectively. The contour interval is equidistant in logarithmic scale, and the thick grey lines represent the values of  $\pm 0.003, \pm 0.03, \pm 0.3, \pm 3.0$  in bar (0.1MPa). (Left panel) Receiver faults are assumed to have the orientation N45°E with right-lateral strike-slip, and N40°W with left-lateral strike-slip. (Right panel) Receiver faults are assumed to have the N-S strike with 45°-dipping thrust faults.

1990/01/01 00:00-2001/12/31 24:00 N= 9826  
 H :0.0- 20.0km M:2.5-9.9



第2図 震央図（上段の図）の矩形領域の丹波地域と和歌山地方の累積曲線とM-T図（中段と下段）。横軸は左図が通常の時刻で右図がETASによって変換された時間。

Fig.2 Diagrams of cumulative number and magnitudes (the middle and bottom panels), in the activated regions (Tanba and Wakayama) indicated in the top panel, against the ordinary time in years (left panels) and transformed time by the ETAS model (right panel).



第 3 図 時空間 ETAS モデルの理論的活動度に比べた実際の活動度 (M2.5 以上) の相対比率。上図は 2001 年の平均的な比率。下図は Ozawa et al. (2002) に基づく浜名湖周辺下のサイレント地震による  $\Delta CFF$  変化の分布 (深さ 10km, 摩擦係数 0.4 を仮定)。受け手の断層として東西圧縮横ずれ型を想定している。等高線は対数スケールで等間隔, 赤線は正值で青線が負値, 灰色は  $\pm 0.0003$ ,  $\pm 0.003$ ,  $\pm 0.03$ ,  $\pm 0.3$  bar (0.1MPa) の値に相当する。

Fig.3 Image of the ratio of the real seismicity rate of events (M2.5 or larger) to the predicted rate by the space-time ETAS model. The images in the top show the averages during the periods 1995-1999 and 2001, respectively. The images in the bottom panels shows Coulomb's stress changes in the crust at 10km depth in the central Japan, assuming the apparent friction coefficient 0.4, caused by the silent slip modeled by Ozawa et al. (2002). The diagram postulates lateral strike-slip under EW-compression. Resulting regions of positive and negative Coulomb stress changes are shown by red and blue contours, respectively. The contour interval is equidistant in logarithmic scale, and the thick grey lines represent the values of  $\pm 0.0003$ ,  $\pm 0.003$ ,  $\pm 0.03$ ,  $\pm 0.3$  in bar (0.1MPa).