

12-8 統計モデルによる地震活動異常のモニタリング Monitoring seismicity anomalies by statistical models

統計数理研究所 尾形良彦

The Institute of Statistical Mathematics

地震確率予測に関する重点課題で筆者^{1, 2)}は次のことを強調した。一つの異常現象だけでは高い確率利得で大地震の予測を出すことは困難であろうが、いくつかの異常現象が同時に観測されれば、予測確率が高まることもある。長期・中期・短期の予測を生み出す異常現象から各々の確率予測を見積もり、それらを組み合わせて適中率³⁾を高めるのが有望な策である。

しかし現状では何等の異常事象の観測無しに大地震が起きる場合が多い。回顧的にみても大地震に先行する前兆現象が検出された率(予知率)³⁾は小さく、それは地震確率予測の実用化にとって不都合である。予知率を高めるには、今後さまざまな分野での各種異常現象検出の研究・開発の成果を待たねばならないが、目視による観測データの自明な異常事象もあれば観測データの基礎モデルに対する残渣(残差)解析に基づいてやっと認められる微妙な異常事象もある。たとえば他地域の大地震によって誘発されて活発化する地震活動や一過性の群発地震は自明な異常現象であるが、モデル依存の異常もある。たとえば、ゆっくりすべりによる相対的静穏化や相対的活発化などの ETAS モデルによる予測からのデータの逸脱^{4, 5)}は異常事象として取り扱うことができる。時空間 BPT モデル⁶⁾によって繰り返し小地震のデータから、ゆっくりすべりや地震前後の Loading rate の変化量を捉え、異常を考える。今後、統計モデルの高度化によって、それらを詳細にモニターしたい。

各種のビッグデータの解析・研究によって、前兆かもしれない異常事象を精力的に探し出すことが求められ、このことが予知率の向上につながる。例え適中率³⁾が低くても、そのような異常事象を発掘すべきである。閾値を定め白黒がつけられる異常に限る必要もなく、統計的な識別が有意なら確率予測に役立つ。前震予測^{7, 8, 9)}がこの例にあたる。

震源カタログは収録が最も長い期間にわたり、時空間的に検知能力の差はあるが発生した大小の地震について例外なく刻々と記録されている膨大なデータである。地震系列や余震系列に ETAS モデルを当てはめてモデルから期待される活動度を基準にして診断される相対的静穏化¹⁰⁾は地震活動異常の事例を著しく増やした。

GNSS (GPS) によって捉えられる測地データも同様なビッグデータである。これから予測能力を持つ異常発生パターンを見出す研究はもっと追究されても良い。現状では中小の地震発生が頻繁ななかで地殻変動の解析で小規模のゆっくりすべりの細かな像(特に内陸部のすべり)を得るのは困難である。しかし、地震活動異常を炙り出すために地域性に合った地震活動の標準モデルを開発したように、GPS 観測の時空間データに対しても地殻特性や歪の蓄積やポストサイスミック変動などの地域性に合った標準予測モデル¹¹⁾を目指す必要がある。また GPS 観測点間の基線距離変動時系列のトレンドを残渣から得られる或る素朴な極値統計量の異常値と中規模地震の因果関係を論じているもの¹²⁾もあるが、そのようなアプローチでも、確率利得が高まる様に予測の観点から研究する価値がある。

それらの異常事象が大地震の前兆なのか、どの程度切迫性があるのかなどの識別には不確定さが伴う。他方、たとえ適中率が高そうでも、単に「危険度が高い」「いつ起きても不思議でない」などの定性的な表現ではなく、地震発生の危険度やその変化の予測を量的に示す必要がある。予知に

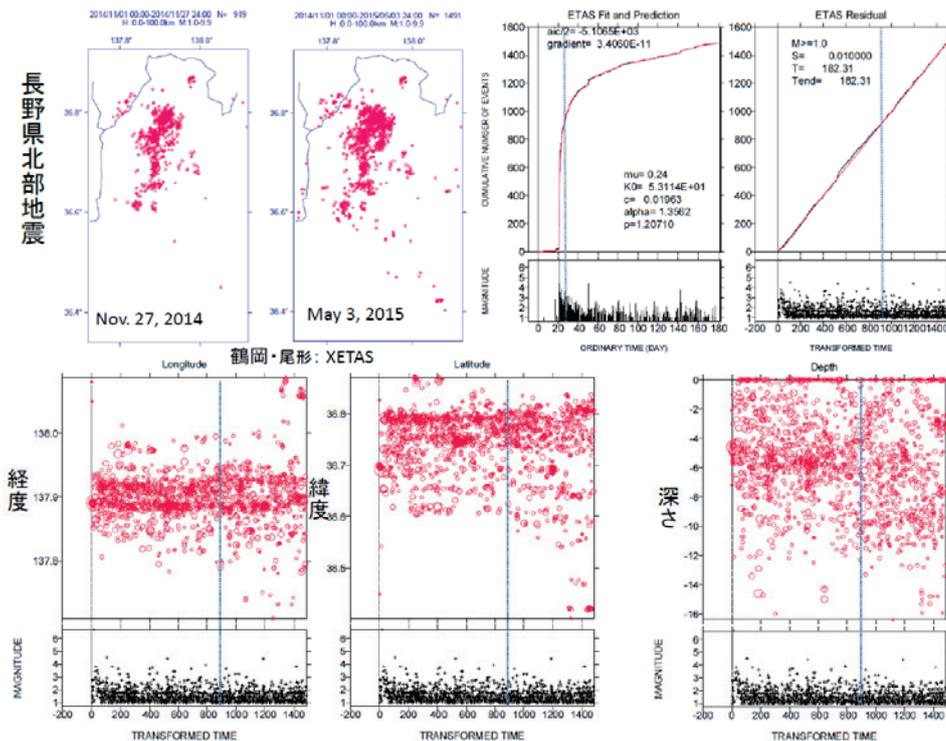
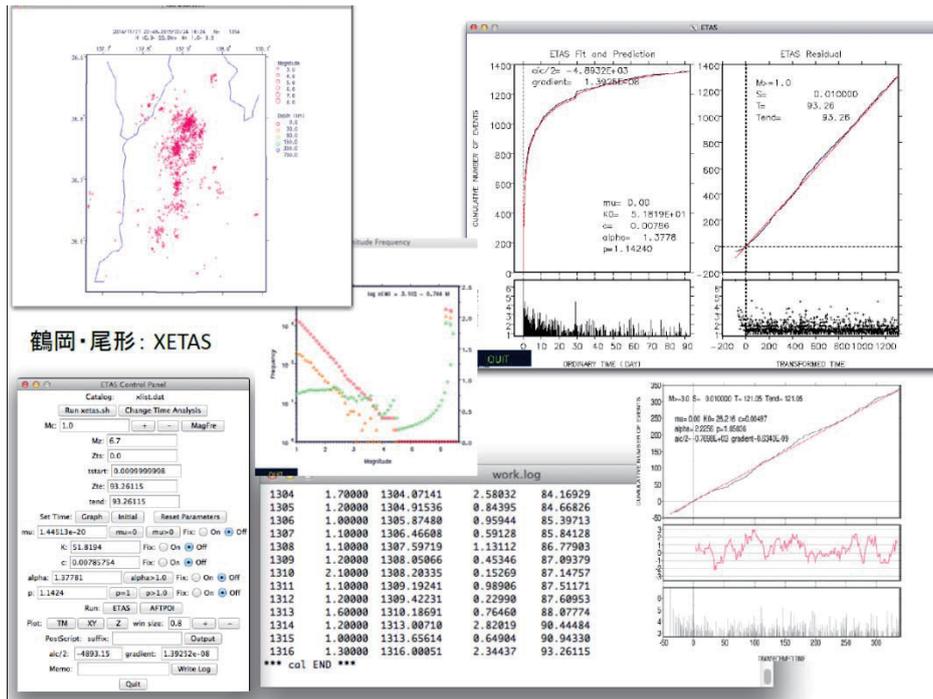
繋がりそうな定性的な知見や異常事象を確率的な予測に結び付ける必要がある。そもそも何かしらの異常が認められたとき、その出現は、この範囲、この期間の大地震の発生確率を、標準モデル（例えば文献1，2参照）のものとは比べて、この程度まで増加させると言えるようになればよい。

特に、既に実施されている各種の警告型予知^{1,3)}についても、あらためて回顧的な調査によって、確率利得や切迫性を定量的に研究し、確率予測につなげることが大事である。地震活動の異常現象は地震発生率の変化に関わり予測を改善できる。異常現象と地震の相関の統計的因果関係を議論し、どの位の時間遅れでどのような強さの変化で前兆事象だったのか否かを調べ、前兆確率を計算できる様にすべきである。このためには異常事象を外力（external）データとして入力する点過程モデル（例えば参考文献1の第5図参照）を開発することが重要である。

最近ETASモデルに基づいた地震活動予測と異常のモニタリングを容易に促進するためにGUIパッケージソフトXETASを開発した^{1,4)}。たとえば余震活動異常の検出がやり易くなったので講演ではそのような例を中心に示した。

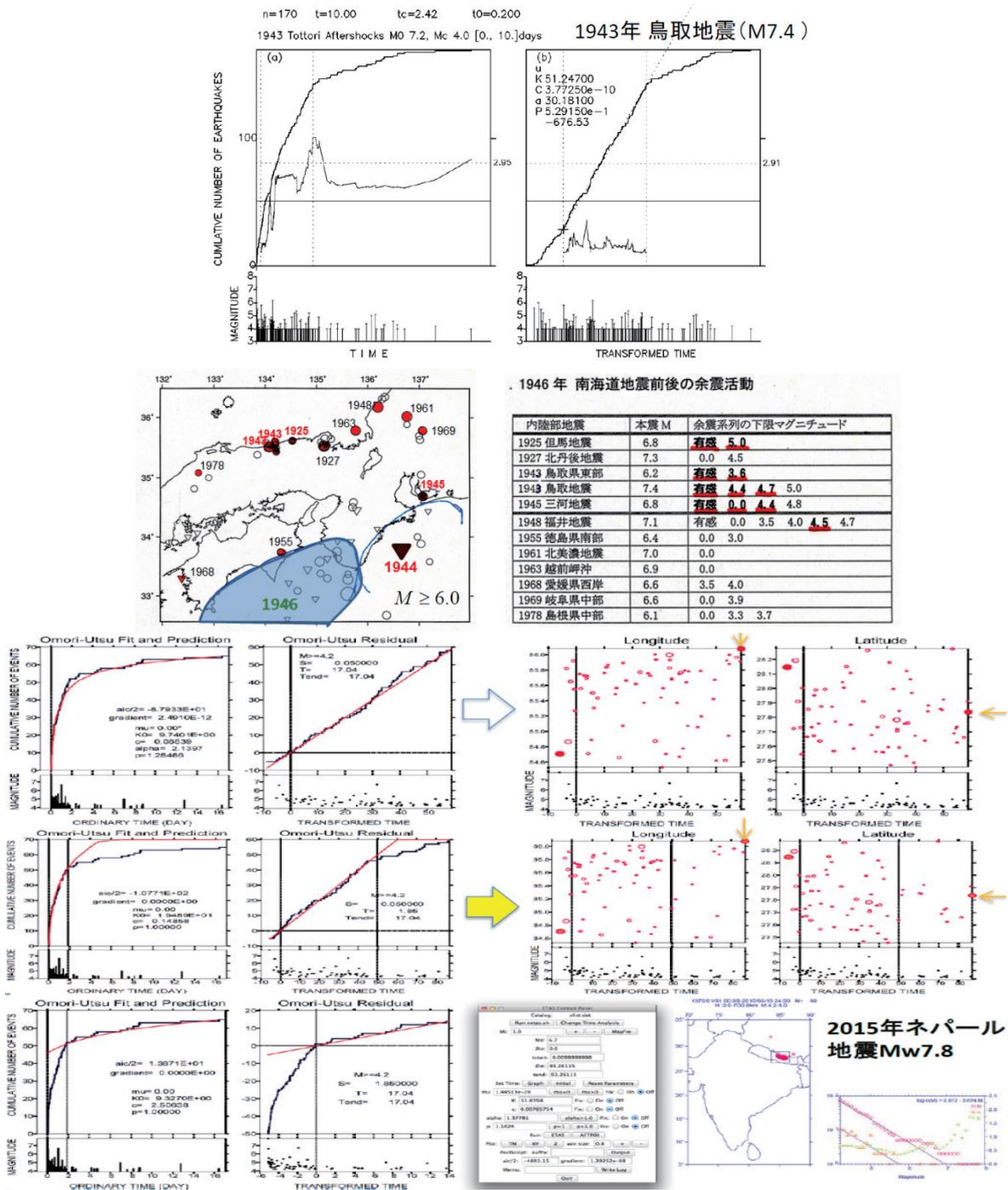
文献

1. 統計数理研究所 (2014). 連絡会報, **91**(12-6), 267-268.
2. 統計数理研究所 (2015). 連絡会報, **93** (12-7), 415-426.
3. 宇津徳治 (1977). 地震 II, **30**, 179-185; (1979). 連絡会報 **21** (7-4), 164-166.
4. Ogata, Y. (1988). *J. Amer. Statist. Soc.*, **83**, 9-27.
5. Ogata, Y. (1989). *Tectonophysics*, **169**, 159-174.
6. 統計数理研究所・東北大学 (2014). 連絡会報, **90**(2-3), 54-57.
7. Ogata, Y., Utsu, T., and Katsura, K. (1995), *Geophys. J. Int.*, **121**, 233-254..
8. 統計数理研究所 (2011). 連絡会報, **85**(12-1), 440-444.
9. 統計数理研究所 (2011). 連絡会報, **86**(3-18), 123-125.
10. Ogata, Y. (1992). *J. Geophys. Res.*, **97**, 19845-19871.
11. Noda, A., Hashimoto, C., Fukahata, Y., and Matsu'ura, M. (2013). *Geophys. J. Int.*, **193**, 61-7.
12. Wang, T., Zhuang, J, Kato, T. and Bebbington, M. (2013). *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2631–2635
13. Jordan, T. H. et al. (2011). *Annals of Geophysics*, **54**, 315-391.
14. 鶴岡弘・尾形良彦 (2014) 地震学会秋季大会 S02-P11



第 1 図 地震活動や余震活動をモニターする大森宇津式や ETAS モデルによる解析の可視化パッケージ XETAS の出力の例。デ・トレンド時空間図によると 2014 年 11 月 22 日長野県神城断層の本震後 5 日後から、余震の南半分が移動しているように見えるが、神城断層添いでなく、南東へ展開している。また、深い方に、余震の重心が、移っている。

Fig1 Example of the outputs of the visualization package 'XETAS' which applies Omori-Utsu formula or ETAS model to monitor seismic activity and aftershock activity.



第2図 (上半分) 南海トラフの昭和巨大地震の前と後の4半世紀に起きた西南日本の内陸地震の余震解析結果。太字赤線の下限マグニチュードは相対的静穏化が見られ、その他は順調な推移を示す。「有感」と「0.0」は、それぞれ有感余震と震源座標が決まっているデータ。(下半分) ネパール地震本震後17日経ってM7.3の最大余震が起きた、XETASによると本震後1日と20時間頃から余震活動が静穏化した。最大余震に向かって収束する余震の時空間パターンが見える。

Fig2 (Upper half) Aftershock analysis of the inland strong earthquakes in southwest Japan during the quarter of a century before and after the Showa great earthquakes in the Nankai Trough. (Lower half) The M7.3 largest aftershock occurred in the 17 days after the Nepal earthquake. According to the XETAS analysis, the aftershock activity lowered from 1,83 days after the main shock. The space-time pattern of aftershocks that converge toward the largest aftershock is visible.

1984年 長野県西部地震 (M6.8)

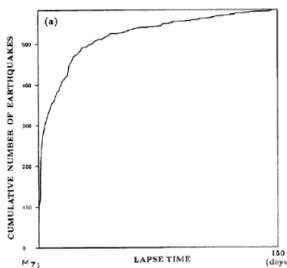
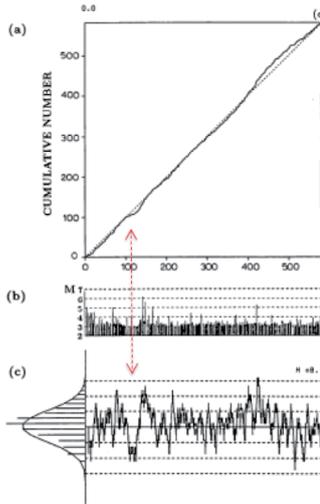


Fig. 12. Series of events and their cumulative numbers for the aftershocks of the Western Nagano Prefecture earthquake ($M = 5.5$) of 1984.

Fig. 13. Residual point process of the aftershock occurrences of the Western Nagano Prefecture earthquake: (a) cumulative numbers versus the transformed time; (b) magnitudes versus the transformed occurrence times; and (c) time series of the number of points on a moving interval with $h = 8$ (see the caption to Fig. 10 for a more detailed explanation of the graph).

Ogata (1989, Tectonophysics)



1978 ~ 1984年 長野県西部の群発型地震

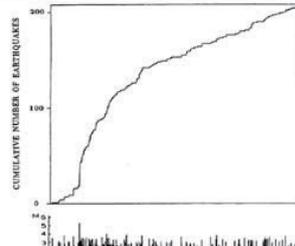
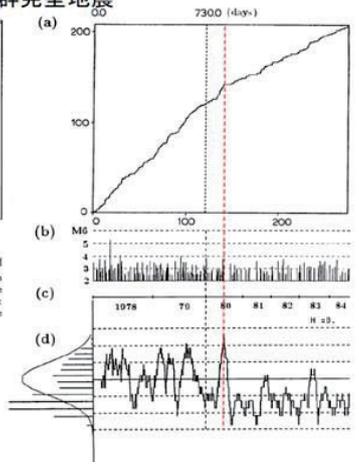


Fig. 14. Cumulative numbers and magnitudes of the swarm activity before the Nagano Prefecture earthquake versus lapse time from 1978 to the occurrence time of the main shock: events are selected with a cut-off magnitude of 2.5 from the JMA catalog.

Fig. 16. (a, b) Cumulative number and magnitudes, respectively, versus occurrence time of the residual process of the swarms obtained by the epidemic-type model with the estimated parameters in the text for the data of the first time span, 1978-1979. The vertical dotted line shows the end of 1979. (c, d) Similar to (c) and (d) in Fig. 14, respectively, but extrapolated for the last time span from the beginning of 1980 to the occurrence time of the main shock.



Ogata (1988, J. Amer. Stats. Assoc.)

Journal of the American Statistical Assoc.

宇津 地震活動総説

図 10.9 ETAS モデルによる解析 (表 10.11) に使った日本付近の地域分け

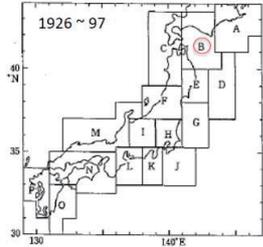


表 10.12 日本の各地域 (図 10.9) に対する ETAS パラメータ (1978-97 年, JSA 使用)

地域	N	M ₀	M _c	h	σ	μ	K	α	ρ	c	r
A	180	8.2	5.45	1.006	1.986	0.003576	0.069885	2.4583	1.1990	0.15693	0.522
B	677	7.9	4.95	0.980	1.859	0.011914	0.066522	2.2983	1.0699	0.13163	0.463
C	126	7.7	4.95	1.055	2.791	0.001147	0.017205	1.7462	1.2449	0.04257	0.239
D	282	8.1	5.45	0.954	1.748	0.002336	0.035752	1.5709	1.2496	0.06241	0.234
E	163	7.5	4.95	0.758	1.883	0.003937	0.010727	1.1496	0.9543	0.00647	0.435
F	160	7.5	4.45	0.883	1.886	0.002749	0.063581	2.2424	1.2169	0.03010	0.452
G	624	7.5	4.95	0.771	1.695	0.011968	0.065172	2.3550	1.0785	0.03001	0.504
H	599	6.9	4.45	0.877	1.742	0.011383	0.007783	1.5908	0.8801	0.01795	0.500
I	185	6.8	4.45	1.014	1.912	0.001226	0.032294	0.6281	0.9581	0.01155	0.202
J	181	7.4	4.95	0.986	1.765	0.004330	0.01408	2.5049	1.2194	0.35193	0.498
K	136	7.3	4.95	0.902	1.953	0.002170	0.047888	0.4545	1.0627	0.01397	0.420
L	77	7.9	4.95	0.905	2.019	0.006427	0.014656	1.6115	1.0079	0.02113	0.146
M	311	7.3	4.45	0.797	1.882	0.003791	0.067026	1.9752	1.0830	0.00885	0.321
N	429	8.0	4.45	0.829	1.975	0.008766	0.002354	2.1181	0.9617	0.09936	0.537
O	219	7.5	4.95	0.959	2.174	0.003843	0.019777	0.9560	0.9823	0.00793	0.481
P	95	6.1	4.45	0.805	1.650	0.001819	0.066655	1.9279	0.9391	0.00188	0.504

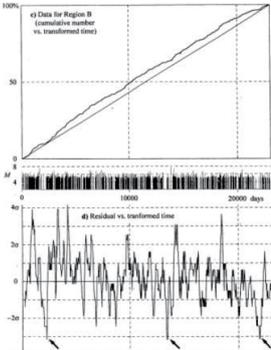
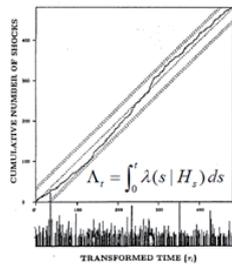
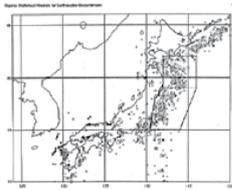
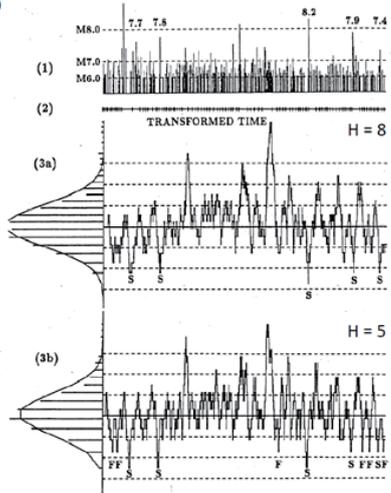


図 10.10 ETAS モデルによる震例解析の例 (表 10.11, 図 10.9 の D 地域). 上図はパラメータ (表 10.12) を用いて ETAS モデルによる解析の結果を示している。下図は残差を示している。縦軸は震例の発生時刻 (日) を示している。横軸は変換時刻 (日) を示している。縦軸は震例の発生時刻 (日) を示している。横軸は変換時刻 (日) を示している。

宇津カタログ 1885 ~ 1980 M>=6.0

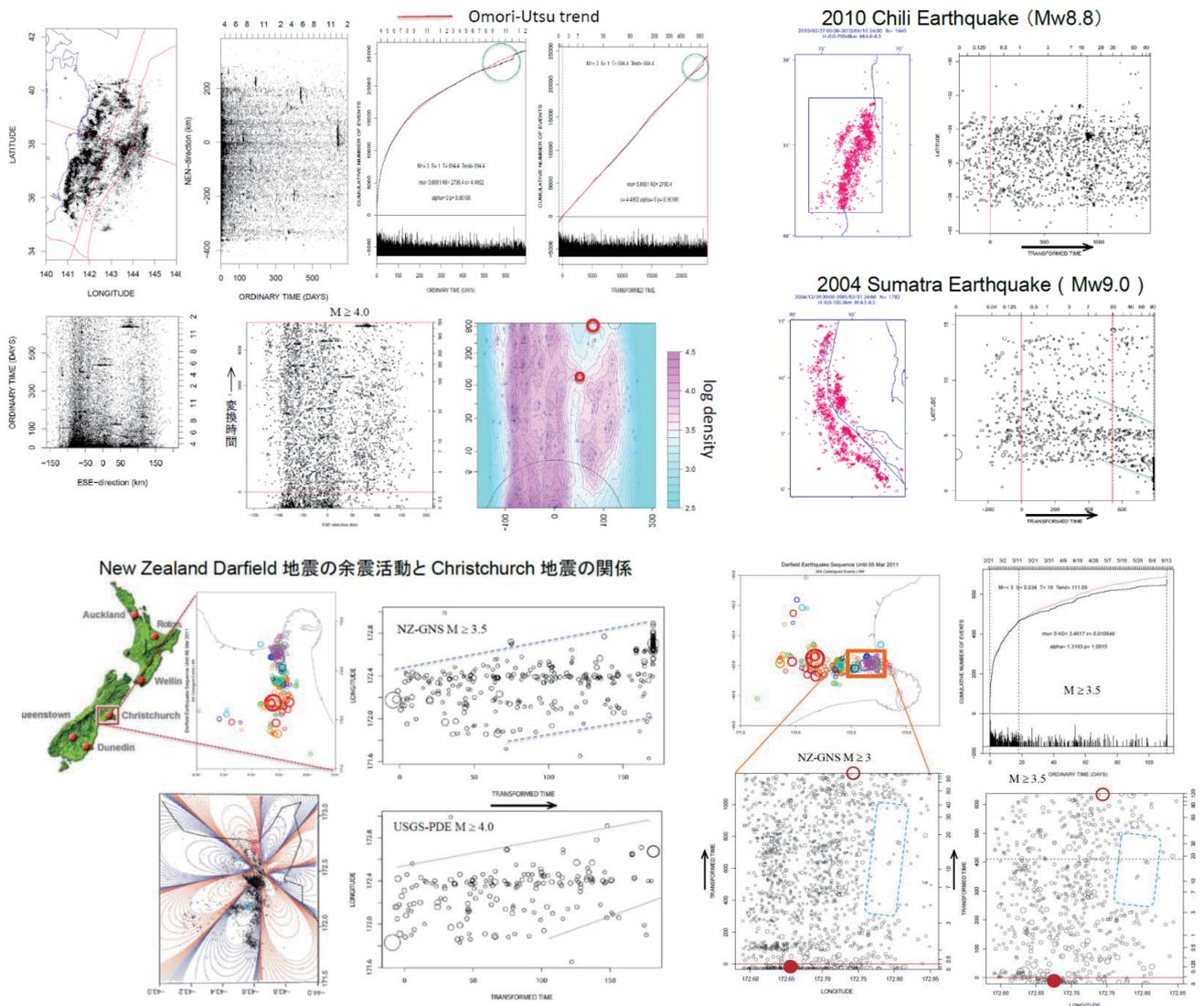


$$\Lambda_t = \int_0^t \lambda(s | H_s) ds$$



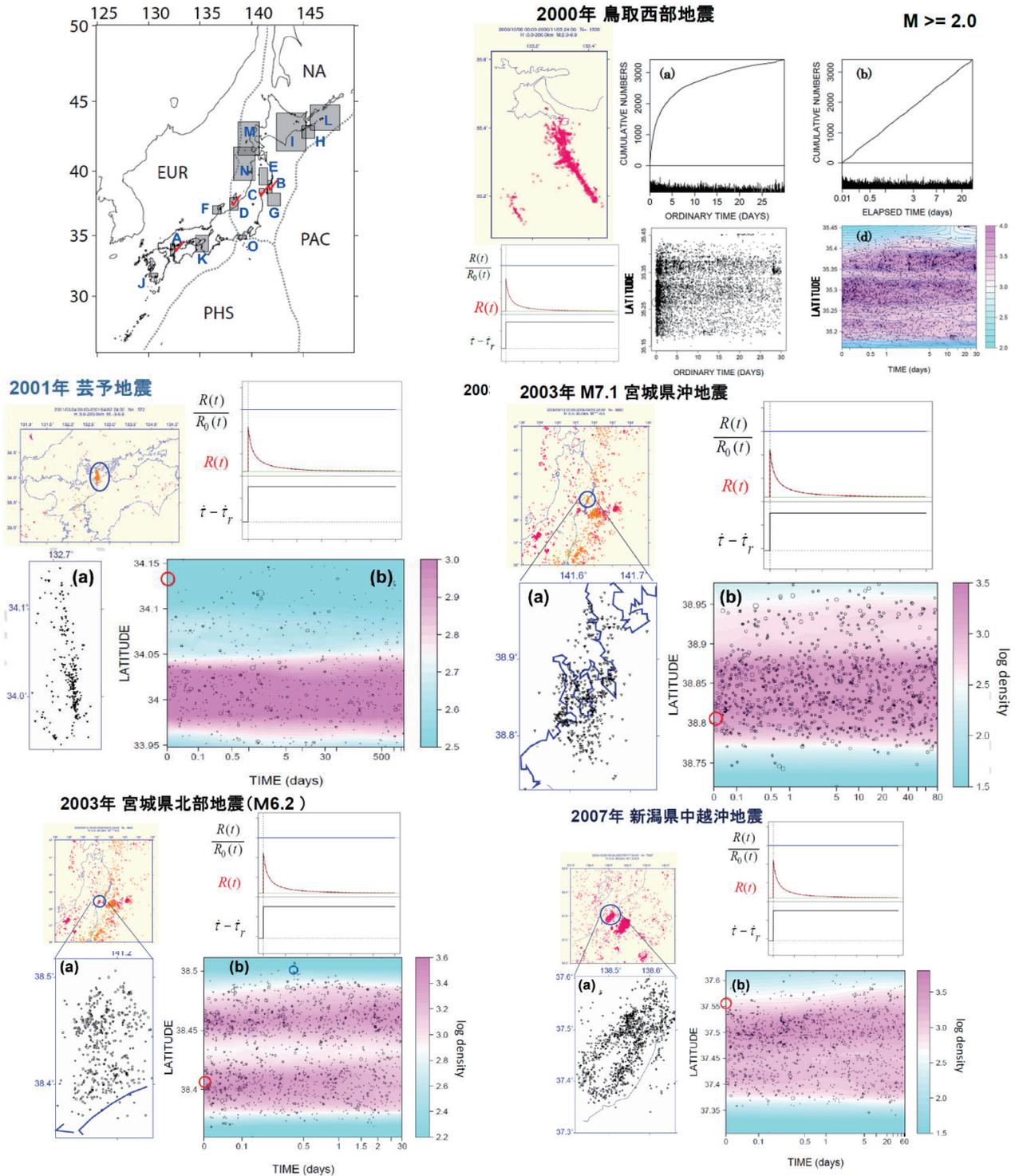
第 3 図 ETAS モデルの変換時間での移動窓の中に含まれる点の数の時系列を残渣時系列と呼ぶ。気象庁の地震活動指数と似ている。移動窓の長さを適切に決めるとき峰や谷から相対的活発化や静穏化が見える。

Fig3 Time series of the number of points contained in the moving window in the ETAS conversion time of 1978-1979 is referred to as the residual series. It is similar to the seismic activity index of the JMA. The relative activation and quiescence from the peaks and valleys, respectively, can be visible when appropriate length of the moving window is determined.



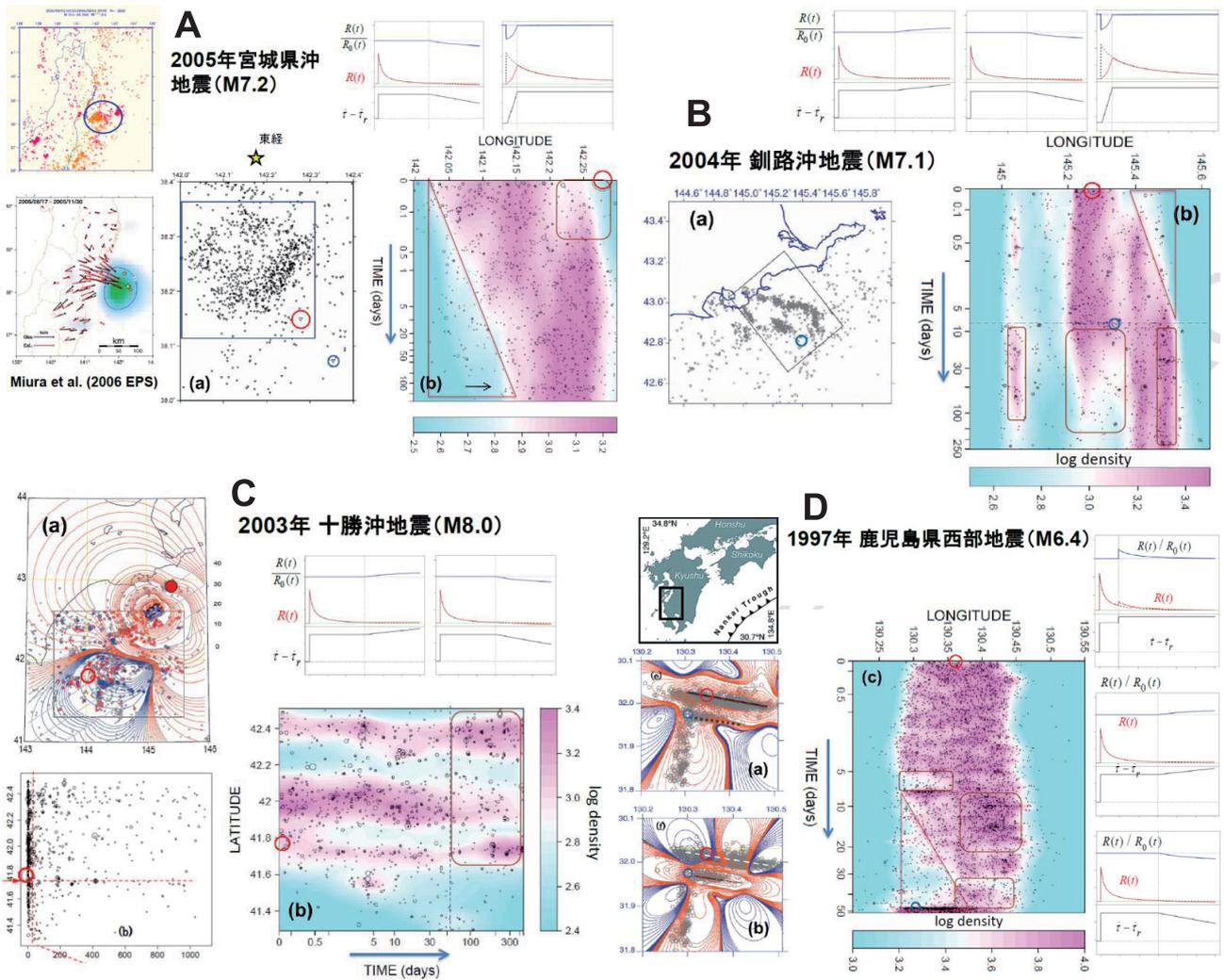
第 4 図 (1) 東北沖地震の余震活動で 2012 年暮れに三陸沖で M7.3 の大余震が発生した。同年の夏頃から付近での静穏化がみられる。(2) 余震活動の移動。チリ地震の余震活動には見られないが、スマトラ地震では約 3 ヶ月後から南半分の余震活動の移動が見られる。(3) クライストチャーチ地震の半年前、西方に Mw7.1 のダーフィールド地震があり、その余震が東へ移動した。(4) クライストチャーチ地震の余震も東側で静穏化し最大余震の前に活動度が回復した。

Fig4 (1) Large aftershocks of M7.3 occurred in off Sanriku in late 2012 in the aftershock activity of the Tohoku-Oki earthquake. It had been quiet in the vicinity from the same year's summer. (2) Migration of the aftershock activity. It is not seen in the aftershock activity of the Chile earthquake, but it is seen in the southern half of the Sumatra aftershocks after about three months of the mainshock. (3) Six months before the Christchurch earthquake, the Darfield earthquake of Mw7.1 occurred to the west. (4) Its aftershocks had migrated to the east where the Christchurch earthquake occurred. Aftershocks of Christchurch earthquake lowered in the eastern side and restored preceding the largest aftershock.



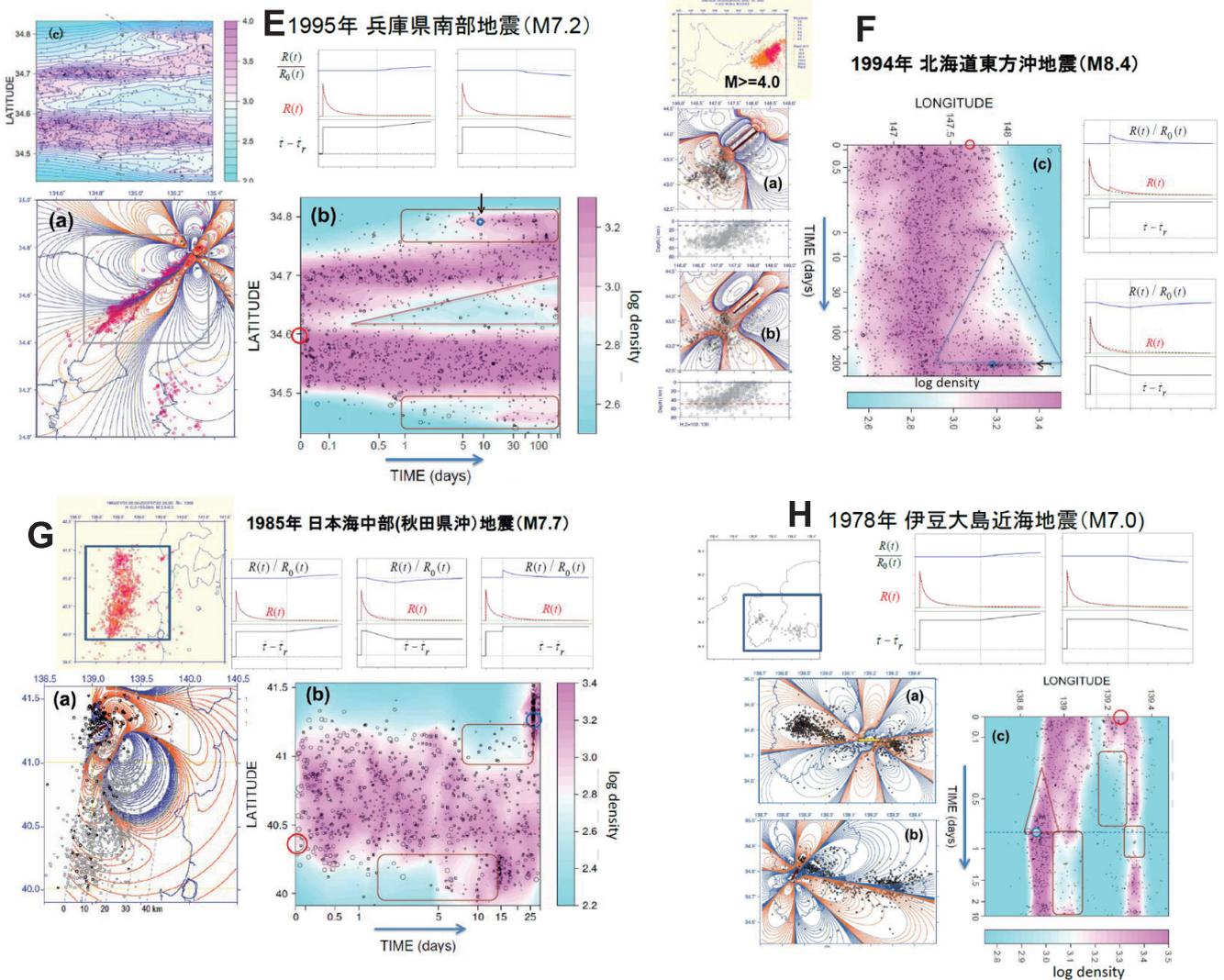
第5図 デトレンド時空間図の等高線と色調は点密度の対数スケールを表す。変換時間と空間（緯度または経度）それぞれの平滑化の重みは ABIC 法で客観的に決めている。これらの余震例では、場所によって点密度が違うが、変換時間については一様に推移している。

Fig5 Contours and colors of the detrend space-time diagram represents the logarithmic scale of the point density. The respective smoothing weights of the conversion time and space (latitude or longitude) are determined objectively by ABIC method. In these aftershocks example, the point density is different depending on the location, but is uniform regarding the conversion time.



第6図 変換時間についても非一様な異常例。(A) 余効すべりで余震域南西部の、静穏域が拡大。(B) 東側で遅れ余震で、最大余震の後、深部と浅部で活発化、そして中央部が静穏化した。(C) 2 - 3 ヶ月経過して余震活動パターンが反転した。(D) 余震域の西部で静穏化し東部では活発化した。

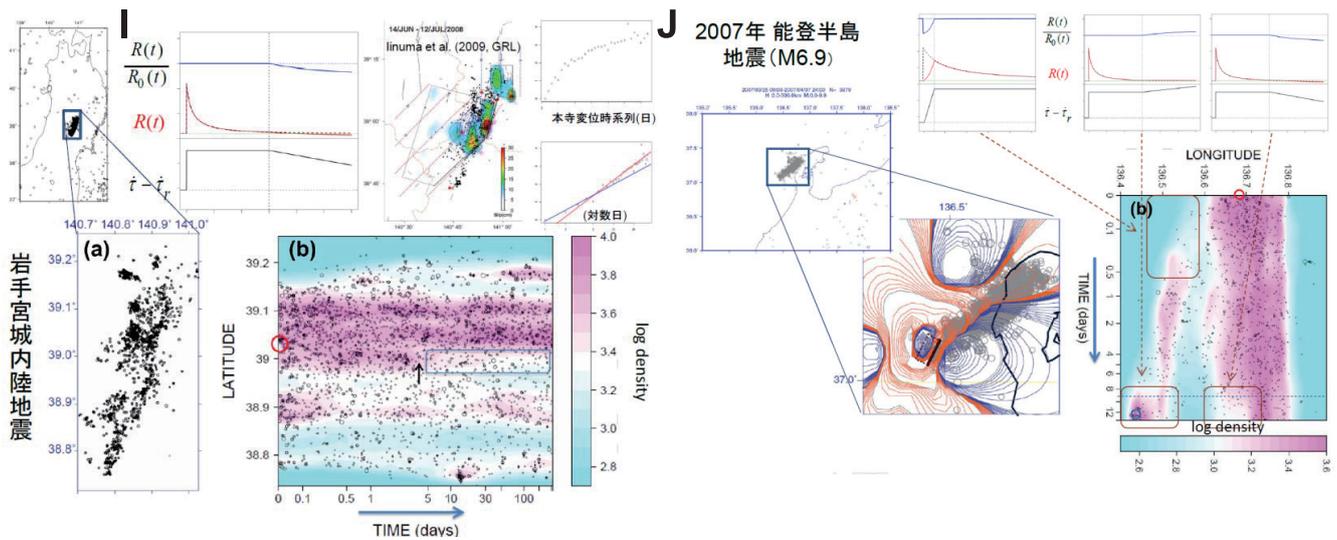
Fig6 Non-uniform and abnormal examples for the conversion time. (A) The quiet area was expanded in the southwest aftershock area by the slow slips. (B) Delayed aftershocks in the eastern part. After the largest aftershock, the deep and shallow parts were activated, and the central portion became quiet. (C) Aftershock activity pattern is reversed in 2-3 months elapsed. (D) The aftershock activity became quiet in the western part, while it activated in the eastern part.



第6図(続き1)。(E) 余震域の中央部が静穏化し両端部が活発化した。(F) 余震域北東部で静穏化し活動回復途中に最大余震が起きた。(G) 北部余震域内で、ゆっくり静穏化し回復した。

(H) 余震域の北端は静穏化、南端は活発化する中で、大きな余震が起きた。(I) これは顕著なオフフォルト余震活動を伴った。本震後数時間で中央部が静穏化、最大余震前で活動の移動と活発化、そして最大余震後に、大島沖で静穏化し、回復した。

Fig6 (continued, 1) . (E) the center of the aftershock area was activated but both ends became quiet. (F) The largest aftershock occurred in the northeast part in the recovery stage from the significant quiescence. (G) North end of the aftershock area lowered to occur the largest aftershock, while the southern tip activated to occur a large aftershock. (H) The mainshock was accompanied by a remarkable off-fault aftershocks. The middle part lowered in a few hours after the mainshock, and migration and activation of off-fault activity occurred before the largest aftershock. After the largest aftershock, activity near Oshima off the coast became quiet and then recovered.



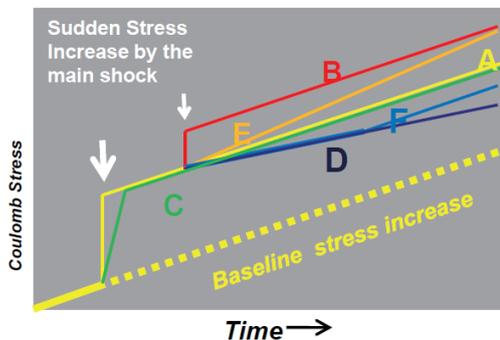
$$R_n = \frac{r}{\gamma_n \dot{\tau}_r}$$

$$\gamma_n = \gamma_{n-1} \exp \left[-\frac{\Delta CFS}{A\sigma} \right]$$

coseismic stress change

$$\gamma_{n+1} = \left[\gamma_n - \frac{1}{\dot{\tau}_n} \right] \exp \left[-\frac{\dot{\tau}_n \Delta t}{A\sigma} \right] + \frac{1}{\dot{\tau}_n}$$

Stressing rate change



$\dot{\tau}_r$ secular shear stressing rate

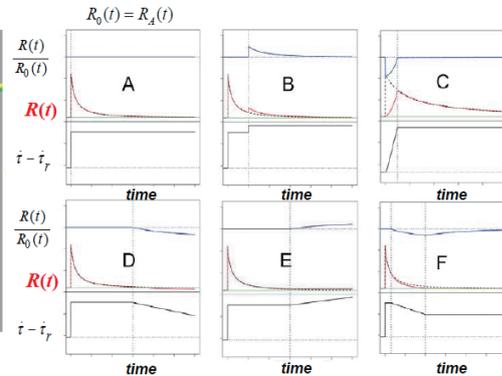
$\dot{\tau}$ shear stressing rate

r background seismicity rate

γ_n state variable (n time steps)

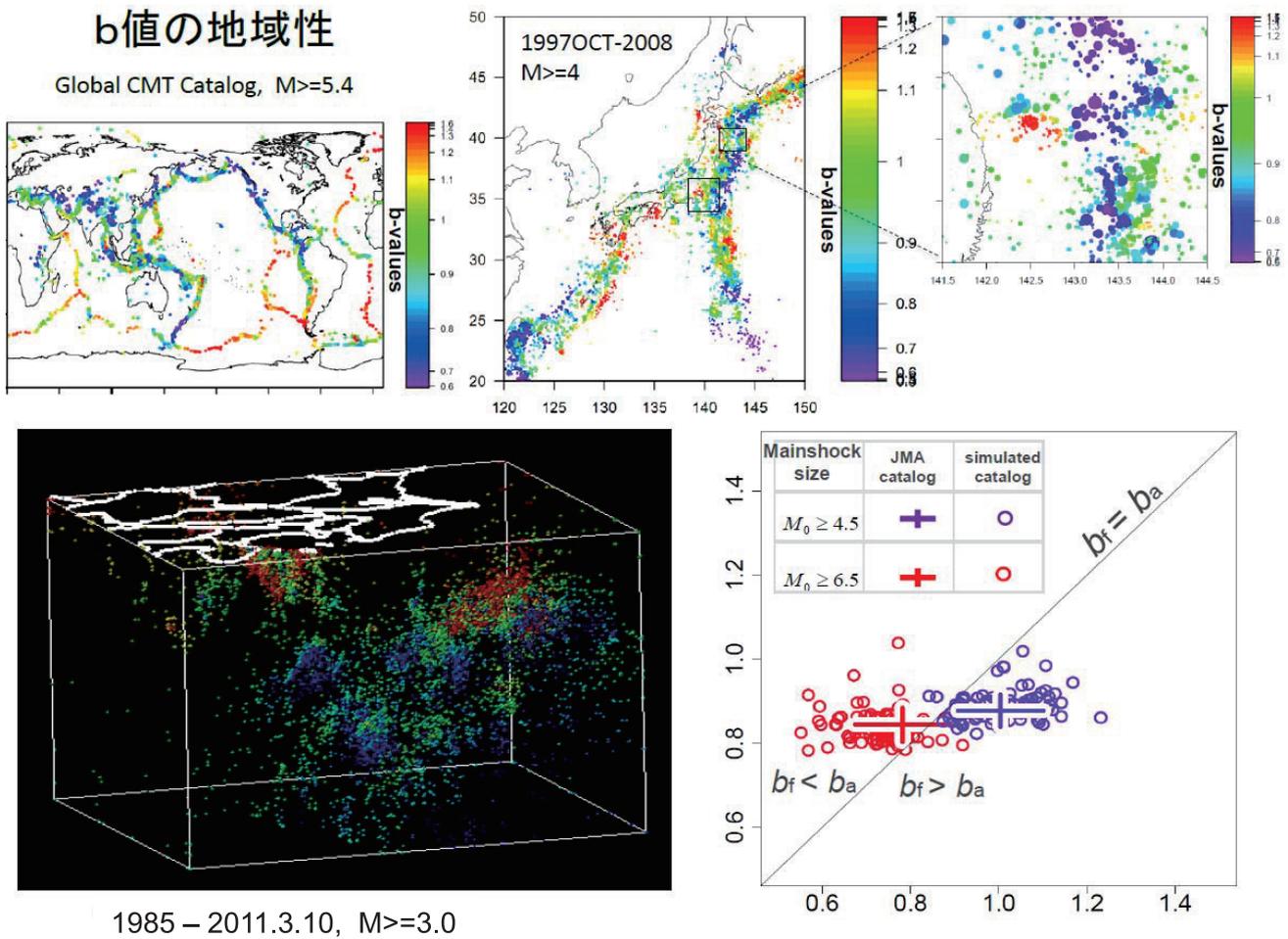
Δt time increment to relocate γ

$A\sigma$ constitute parameter x normal stress



第6図 (続き 2). (I) 矢印で示した余効すべりスポットで静穏化した. (J) 余震域の中央部で静穏化した. 他方, 西端では, 最大余震の2日前頃から活発化した. (K) これまで見たような, 静穏化や活発化のパターンは, ここに示す6つのシナリオ, すなわち余震域内のすべりなどによる CFS の加速や減速変化を仮定すれば Dieterich の速度および状態依存摩擦則の式で定性的に説明できる.

Fig6 (continued 2). (I) The activity lowered in the afterslip spot indicated by the arrow. (J) The activity lowered in the middle part of the aftershock area, whereas, in the western end, it was activated from about two days before the largest aftershock. (K) This diagram illustrates relations between transient stress changes and anomalous activities in an aftershock region by the six scenarios which are derived from the rate and state dependent friction law of Dieterich (1994).



第7図 b値は場所や深さに大きく依存する。大雑把にいつて海嶺ではb値が大きく沈み込み帯では小さい。しかし、日本領域の沈み込み帯を詳しく見ると、かなり細かい地域性がある。それゆえ広域でのb値の時間的変化は単に活動域の移動である可能性がある。(左下図)本震の前と後のb値の変化を地震群の重ね合わせで調べた。本震が大地震の場合には前震のb値が余震より小さい。しかし一般の場合は逆になるので要注意である。

Fig7 The b value depends on the location and depth. Roughly speaking, b value is small in ridge zones, and is small in the subduction zones. However, looking in detail the subduction zone of the Japan area, there are fairly different fine localities. We have to be careful not to confuse that temporal change in the b value in the wide region simply may be a change in the active zones. Bottom left panel shows the change in the b value before and after the main shock in the superposition of the earthquake clusters. The b value of foreshocks is smaller than that of aftershocks in the case of a major earthquake. Otherwise, the relationship becomes reverse in majority of the earthquake clusters.

異常地震活動の監視 (monitoring)

地震活動活発化:

M8-MSc algorithms: Keilis-Borok & Kossobokov (1986), IASPEI Software Library, 1997

RTP (Reverse Tracing of Precursors) algorithm; Shebalin et al., 2003, *EPS*)

先行群発地震 (precursory swarm) (関谷, 1976; Evison, 1977) → EEPAS モデル

(Every Earthquake a Precursor According to Scale; Rhoades & Evison, 2004)

前震の識別: Jones (1985, *BSSA*), Agnew&Jones(1991, *JGR*), Console他 (1993, *BSSA*),

前田 (1993, 地震), Maeda (1996, *BSSA*), Ogata et al. (1995, 1996 *GJI*)

地震活動静穏化:

空白域 (第1種, Gap)

静穏化 (井上, 1965 駿震時報)

相対的静穏化 (Ogata, 1992 *JGR*)

b値:

空間 Gutenberg・Richter (1949*BSSA*) etc., **時間** Suyehiro etc. (1964, *PAGEPH*) etc.

Coda Q:

Aki (1967), Jin&Aki (1986, *JGR*, etc.), Sato (1986, *JGR*), etc.

地球潮汐とのシンクロ:

Load/Unload Response Ratio (LURR): Y値, Yin et al. (1995, 2000, 2006, *PAGEOPH*)

Y値*ETAS; Thang & Zhuang (2011, *tectonophysics*)

Shuster test: Tsuruoka et al. (1995, *GJI*); Tanaka et al. (2002 *JGR*, *GRL*, etc.)

Fourier series +/-x ETAS: Iwata & Katao (2006a, *GRL*; 2006b, 地震学会)

Recommendations: 予知率の向上を目指すモニタリング

- 各種のビッグデータの解析・研究によって、前兆かもしれない異常事象を精力的に探し出すことが予知率の向上につながる。例えば適中率が低くてもそのような異常事象を発掘すべきである。
- 警告型予知についても、あらためて回顧的なサーベイで、確率利得や切迫性を定量的に研究し確率予測につなげることが大事である。
- 自明な異常現象もあれば観測データの基礎モデルに対する残差解析に基づいてやっと認められる微妙な異常現象もある。
- 地震活動異常を炙り出すために地域性に合った地震活動の標準予測モデルを開発したように、GPS観測の時空間データも先ず地殻特性や歪の蓄積などの地域性に合った標準予測モデルを目指す必要がある。