

11 - 9 地震予測の統計地震学の進歩と課題：阪神淡路大震災から 30 年 Progress and challenges in statistical seismology for earthquake prediction: 30 years after the Great Hanshin-Awaji Earthquake.

尾形良彦（統計数理研究所）

Ogata Yoshihiko(The Institute of Statistical Mathematics)

0. はじめに

兵庫県南部地震後、地震調査研究推進本部が発足し、部会の地震調査委員会では、長期地震発生確率と余震確率の評価手法検討小委員会^{1,2)}で筆者は委員として貢献した。これらの確率予測の取り組みは、統計地震学的にどのように進展したか、現在どのような課題があるか、これまでの地震予知連絡会の統数研報告を中心に振り返る。なかでも ETAS モデルは、時空間 ETAS モデルそして地域性を示す階層時空間 ETAS モデルへと発展して地震予測に貢献している。ただしここ数年に群発活動の同定に使用した非定常 ETAS モデルに関しては多くを割愛した。

1. 活断層に基づく長期予測

主要活断層のデータを基にした M7 クラス以上の地震予測に関して、更新過程で 2 重指数分布、ガンマ分布、ワイバル分布、対数正規分布の中から AIC で適合性を調査したが、当時の新モデル Brownian Passage Time (BPT) 過程がストレス蓄積・解放の物理的解釈に調和し、間隔分布が対数正規分布に近く、かつ危険率変化の単調増加性を担保するため長期予測モデルとして採用された²⁾。しかし、地震数の少なくない限られた活断層データから求めた BPT 分布の摂動度（ばらつき）の最尤推定値 $\alpha = 0.24$ で、これは全国的には小さすぎた。小標本で、かつ不確定な間隔の地震発生データ考慮し、地域差も考慮可能なベイズ事後分布で評価することを提案した（第 1 図）³⁻⁶⁾。他方、地震本部では個別の活断層毎だけでなく地域分けによっても確率予測している。

2. 背景地震活動度による永年予測

階層的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルの背景活動度^{7,8)}を基に M6 クラス以上の直下型地震の永年確率予測を提案した。HIST-ETAS モデルの内陸部における背景活動度^{7,8)}の推定率画像は、空間ポアソン推定率画像とは異なり、東北沖地震による影響を受けず、学習期間が異なっても不変である。背景活動率が高い地域は、新潟-神戸歪集中帯を含む歪応力蓄積率の変化が大きい地域⁹⁾など、GNSS 測地データからの最大剪断歪の空間分布から得られる確率⁹⁾と概ね似たパターンである。しかし背景地震活動度のものとは各地で量的に違いがあり特に北日本において明らかに異なる。

さらに、HIST-ETAS モデルの背景活動度は歴史的な被害地震の配置とも概ね一致している^{7,8)}。また内陸部の長期的予測（約 30 年間）で最も一般的な HIST-ETAS-5pa モデル（第 4 図 C 式）の背景率が、空間的ポアソン率や HIST-ETAS-7pa モデル（第 4 図 B 式）の背景活動度よりも、 $M \geq 6.0$ の大地震の位置をより良く予測する^{7,8)}。同様の結果がカルフォルニアにおける長期予測でも得られた^{10,11)}。

3. 余震の短期・中期予測

本震直後の大きな欠測データをマグニチュードごとの検出率変化でモデル化¹²⁾し、長期および

余震列の活動予測を考えた。地震の半数が検出できるマグニチュード（第 2 図左上の α 値）が変化するものとしたモデルで、本震直後の欠測を考慮した Reasenber-Jones モデルの準リアルタイム余震予測に最尤推定法¹³⁾（第 2 図）またはベイズ平滑法（MCMC 法）を採用する¹⁴⁾。

2017 年 4 月から防災科技研（NIED）では、後者の方法による、Hi-net 自動震源データに基づく、リアルタイム予測システムの運用をしている^{15,16)}。熊本地震やカリフォルニア州 Ridgecrest 地震¹⁷⁾の様に、本震より大きな後続地震（大余震）が発生する 1 日～数日の確率予測は、そうでない場合の予測より有意に大きい（第 3 図）。一般に ETAS モデルを大森宇津式に入れ替えることで 1 日以内の推定での偏りのない中期予測も可能になった¹⁸⁾。

4. HIST-ETAS モデルの時空間短期予測と評価

最大事後分布（MAP）解による HIST-ETAS モデルによる短期予測を、内陸部（第 4 図）、日本全域、熊本地震や鳥取地震の余震系列、及び Ridgecrest の余震活動などの動画²¹⁾で可視化した。

短期予測は対数尤度（情報利得スコア）を用いて評価される^{22,23)}。たとえば 2018 年までの気象庁データで学習した HIST-ETAS モデルの MAP 解について、2019 年から 5 年間の内陸部での発生率予測結果の性能を検証した^{22,23)}。また、特定の地震発生時期や場所の予測結果の優劣を、比較したスコア値の増減差により、可視化することができる^{22,23)}。

結果として、最近の期間 2019-2023 年を通して、HIST-ETAS-5pa モデル（第 4 図 C 式）が優れている^{22,23)}。しかし群発地震域では、背景活動 μ 値の時間変化に対応できないので、成績が良くない。また、能登半島地域や福島県茨城県東部など、学習期間中（1885-2010）に地震活動が低い地域では地域性を反映しない非ベイズ型の時空間 ETAS（ST-ETAS）モデル（第 4 図 A 式）より劣る。

最近、検出パラメータ（第 2 図左上）の α 値、 b 値と σ 値いずれも時間変化する検出率¹²⁾を考慮した大量の地震データを使った定常・非定常 ETAS モデルは地震活動の詳細な逆解析^{19,20)}に有用であることを示した。

5. 兵庫県南部地震前後の周辺域での地震活動異常の回顧的解析

背景地震活動度が高い新潟 - 神戸歪集中帯に含まれる丹波地域を含む兵庫県南部地域では、1946 年南海地震後に 0.3bars 程度の歪増加を受けている²⁴⁾。しかし 1987 年頃からの静穏化が見られ^{25,26)}、1994 年頃から猪名川群発地震で活発化し M7.3 地震が発生するに至った（第 5 図）。しかし、和歌山市周辺の地震活動は相対的に活発化している（第 5 図）。この時期に広域地殻変動異常が報告されているが、スロースリップを M7.3 地震断層の深部を仮定して説明するのは困難である。

1995 年の M7.3 兵庫県南部地震の最大余震（M5.4）前に相対的静穏化の報告²⁷⁾があった。さらに、大森宇津式で時間を変換し線形化（de-trended）した残余時間 - 対 - 緯度の時空間プロットによれば、余震域の中央部が静穏化し、両端部が活発化している（第 6 図）。北部が最大余震（M5.4）、南部が 2013 年 M6.3 淡路島地震発生につながっている。後者に関して前駆的スロースリップを仮定した整合的シナリオを議論されている²⁸⁾。

相対的静穏化は、これを中期予測に使用する場合、将来どのくらいの期間、どの辺までの近傍で、大地震が発生する可能性があるかという確率利得を与えた。そのため筆者は過去に日本で発生した大地震の余震 76 系列を ETAS で調べた²⁹⁾。余震系列の約 45% で相対的静穏化が観察されたが、その場合 6 年以内に本震と同規模以上の地震が発生する確率は、日本の余震域近傍（例えば 100km 以内）では普段確率の 10 倍程度、時空間 ETAS モデルで誘発される空間的確率利得の数倍程度と

なる^{31,32,39)}。この確率利得（リスク増大度；第 7 図）をモデル化して多項目確率予測に組み込むことができる。

6. 多項目確率予測にむけて確率利得を求める取り組み

多項目確率予測式の実用化³⁰⁾⁻³²⁾は今後進展することが期待される。先行研究では、宇津が回顧的に 1978 年の M7.6 伊豆大島近海地震の直前での確率予測、Cao と安芸³⁸⁾は中国における 4 つの M7 クラス以上の大地震の直前での発生確率予測を計算している。もともと地震学コミュニティでは、1975 年 M7.3 海城地震は成功予知で 1976 年 M7.8 唐山地震は失敗予知と見做されている。しかし、これは政策的な見解である。多項目確率予測によれば両地震とも発生直前で M7 の地震の 1 日あたり約 10% の確率であった。いずれも普段の 1 日確率に比べて非常に高い確率である。

筆者^{11,32,39)}は 2016 年の M7.3 熊本地震に対する多項目確率予測の回顧的な計算を試みた。その際、まず HIST-ETAS モデルの背景地震活動率は Gutengerg-Richter 則と共に大地震の合理的な永年確率を与え、長期予測について当該活断層群の危険度、加えて前震の統計的識別（短期予測）³³⁻³⁷⁾や相対的静穏期間（中期予測）に関連する確率増幅の情報が利用可能になった。

しかしながら多項目予測の概念は、これまで半世紀、プロスペクティブ予測として実用化されていない。これは当初、広領域での永年予測や短期予測の評価が未整理であったこと、狭い地域でも、地震を引き起こす可能性（的中率）の高い異常現象の検索は注目されたが、的中率の低い異常現象の広範な統計的研究が希少なため、確率上昇の安定した推定・評価ができなかったことによる。これでは予測率が低いことになり不意打ちの大地震が殆どである。

したがってリアルタイムの多項目確率予測のためには、確率利得が低くても（的中率が低くても）で広領域で多くの異常現象を網羅的に収集して確率利得を編集する必要がある。短期的異常の研究は的中率が低くても時空間的に網羅的であることが求められる。例えば 3 節での余震のリアルタイム予測は $M \geq 7$ の大余震が 1 日で高々 10 倍程度の利得が見込まれる。またスロースリップに対する $M \geq 6.0$ の確率利得が 1 日で高々 300 倍増加していることも示されている⁴⁰⁾。その意味で、一過性の群発地震活動を特徴づける定常 ETAS モデルの異常解析^{41,42)}や非定常 ETAS モデルの背景 $\mu(t)$ 量のピーク（第 8 図）は、スロースリップの場合と同様なオーダーでの確率利得が期待できる。トレンドを除去した GNSS の基線距離時系列の最大変動幅⁴³⁾（第 9 図）などの比較的素朴な方法でも数倍程度の確率利得が期待できそうである。大森・宇津式で時間変換した余震活動の不均質時空間パターン⁴⁴⁾（第 10 図）は大余震などの予測の観点から、どの様に異常性を定量化し、確率利得に導くか、これは今後の課題である。

謝辞

震源データについて気象庁並びに一元化関連の諸機関、および筆者と一部課題の共同研究に關わって頂いた京大防災研阿武山観測所の片尾浩、飯尾能久両博士および防災科技研の汐見勝彦博士に感謝します。

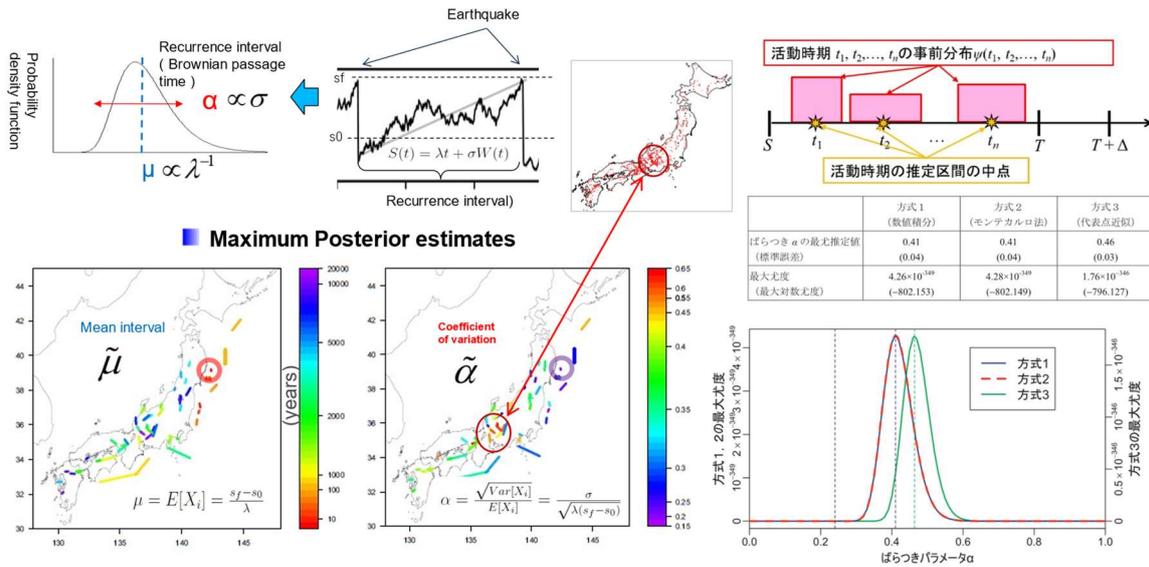
参考文献

- 1) 地震本部 (1998), <https://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/01b/chouki020326.pdf>
- 2) 地震本部 (1998), https://www.jishin.go.jp/reports/research_report/aftershock/yoshin2_yoshin2/
- 3) 野村俊一・尾形良彦 (2010), 予知連会報 **84** (11-11)
https://cais.gsi.go.jp/VOCHIREN/report/kaihou84/11_11.pdf

- 4) 野村俊一他 (2013) 予知連会報 **90** (2-3) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou90/02_02.pdf
- 5) 野村俊一・尾形良彦 (2017), 予知連会報 **90** (11-5)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou90/11_05.pdf
- 6) 野村俊一・尾形良彦 (2017), 予知連会報 **100** (11-2)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou100/11_02.pdf
- 7) Ogata, Y. (2022), *Earth Planets and Space*, **74**, 110, <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01669-4>
- 8) 尾形良彦 (2023), 予知連会報 **109** (12-9) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou109/12_09.pdf
- 9) 西村卓也 (2023), 地震本部 <https://www.jishin.go.jp/main/seisaku/hokoku23o/nk2-4.pdf>
- 10) 尾形良彦 (2015), 予知連会報 **93** (12-7) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou93/12_07.pdf
- 11) Ogata, Y. (2017) *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **45**, 497-527, doi:10.1146/annurev-earth-063016-01591
- 12) Ogata, Y. and Katsura, K. (1993), *Geophys. J. Int.*, **113**, 727-738 <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb04663.x>
- 13) Ogata, Y. and Katsura, K. (2006), *Geophys. Res. Lett.*, **33** (10), L10305, doi:10.1029/2006GL025888.
- 14) Omi, T. et al. (2013), *Nature Scientific Reports* **3**, Article No.2218, doi:10.1038/srep02218.
- 15) Omi, T. et al. (2018), *Seism. Res. Lett.*, **90** (1), <https://doi.org/10.1785/0220180213>
- 16) 汐見勝彦ほか (2022), 日本地球惑星科学連合 2022 年大会 [SSS11-P01],
<https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2022/subject/SSS11-P01/advanced>
- 17) Ogata, Y. and Omi, T. (2020) *Geophys. Res. Lett.*, **110** (4) <https://doi.org/10.1785/0120200023>
- 18) Omi, T. et al. (2014), *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 850-857, doi:10.1002/2013GL058958
- 19) Ogata, Y. (2024), *Seismol. Res. Lett.*, **95**, <https://doi.org/10.1785/0220240153>
- 20) Ogata, Y. and Kumazawa T (2024), *Seismol. Res. Lett.*, **95**, <https://doi.org/10.1785/0220240153>
- 21) Ogata, Y. (2022) YouTube, <https://www.youtube.com/@yosihikoogata784>
- 22) 尾形良彦 (2024a), 予知連会報 **110** (10-6), <https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou111/10-06.pdf>
- 23) 尾形良彦 (2024b), 予知連会報 **112** (10-4), https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou112/10_04.pdf
- 24) Ogata, Y. (2004), *J. Geophys. Res.*, **109** (B4, B04305), doi:10.1029/2003JB002634.
- 25) 茂木清夫 (1995), 予知連会報 **54** (7-9), <https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou54/07-09.pdf>
- 26) 渡辺晃 (1998) 京都大学防災研究所年報 41(A) 25-42
- 27) 松浦律子他 (1995), 予知連会報 **54** (7-15), <https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou54/07-15.pdf>
- 28) 尾形良彦 (2013), 予知連会報 **90** (8-3), https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou90/08_03.pdf
- 29) Ogata, Y. (2001), *J. Geophys. Res.* **106** (B5), <https://doi.org/10.1029/2000JB900400>
- 30) 尾形良彦 (2013), 予知連会報 **91** (12-6), https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou91/12_06.pdf
- 31) 尾形良彦 (2021), 予知連会報 **105** (12-10) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou105/12_10.pdf
- 32) Ogata, Y. (2018), *Seismol. Res. Lett.* **88** (4), 1117-1126, doi:10.1785/0220170006.
- 33) Ogata, Y. and Katsura, K. (2012). *Geophys. J. Int.*, **191** (3), doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05645.x.
- 34) 尾形良彦 (2011), 予知連会報 **86** (3-18) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou86/03_18.pdf
- 35) Nomura, S. and Ogata, Y. (2023). *Prog. Earth Planet Sci.* **10** (20), <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00548-0>.
- 36) 野村俊一・尾形良彦 (2018), 予知連会報 **99** (12-9)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou99/12_09.pdf

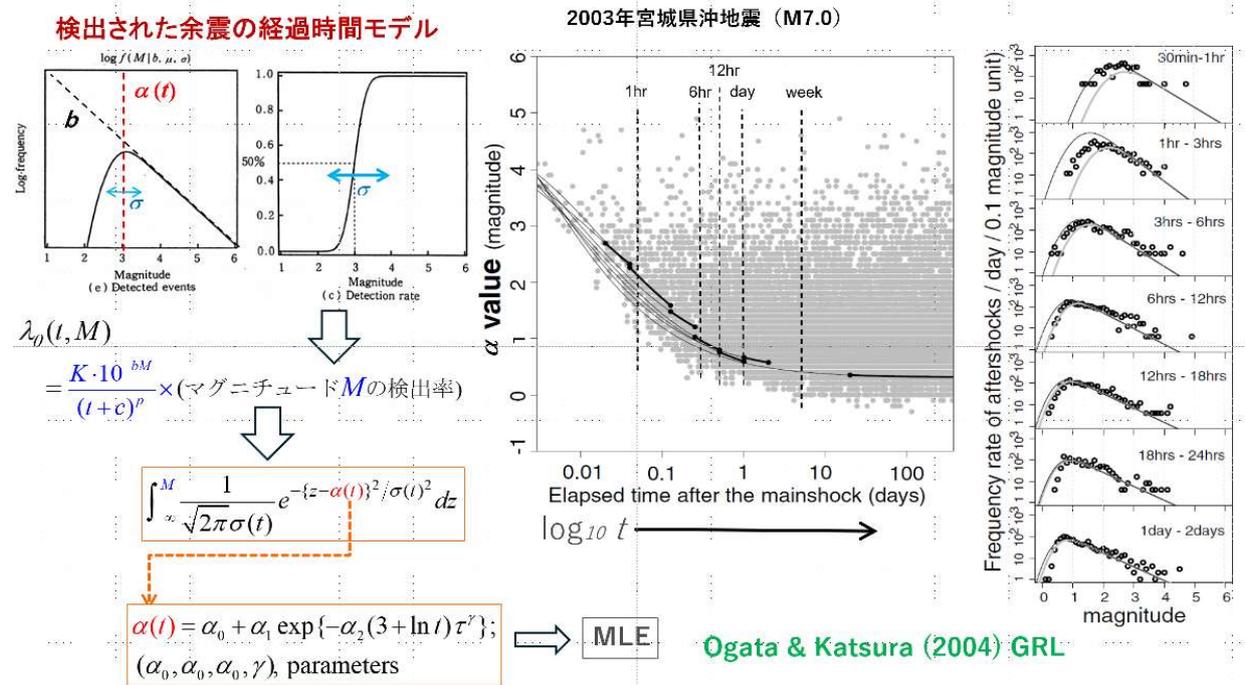
- 37) 野村俊一・尾形良彦 (2020), 予知連会報 **103** (12-8)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou103/12_08.pdf
- 38) Cao, T. and Aki, K. (1983), *J. Geophys. Res.*, **88** (B3), <https://doi.org/10.1029/JB088iB03p02185>
- 39) 尾形良彦 (2016), 予知連会報 **96** (12-23), https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou96/12_23.pdf
- 40) Dascher-Cousineau, K. and Burgmann, R. (2024), *Science Advances* **10** (35) DOI: 10.1126/sciadv.ado2
- 41) Nishikawa, T. and Ide S. (2017), *J. Geophys. Res.* **122** (7), 5325-5343, doi:10.1002/2017JB014188.
- 42) Nishikawa, T. and Nishimura T. (2023), *J. Geophys. Res.* **128** (5), <https://doi.org/10.1029/2023JB026457>.
- 43) Wang, T. et al. (2013), *Geophys. Res. Lett.* **40** (11) <https://doi.org/10.1002/grl.50554>
- 44) 尾形良彦 (2014) 予知連会報 **94** (12-8), https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou94/12_08.pdf
- 45) Mearns E. and Sornette D. (2021). The Great 1976 Tangshan Earthquake: Learning from the 1966-1976 Chinese Prediction Program. Cambridge Scholar Publishing, ISBN: 1-5275-7164-5 ISBN13: 978-1-5275-7164-8, <https://www.cambridgescholars.com/product/978-1-5275-7164-8/>

野村・尾形 予知連会報など



第 1 図 BPT モデルは応力蓄積・摂動・解放の物理的解釈と一致し発展性が望まれた。その地域性と地震発生の誤差時間間隔から、ベイズ事後分布で評価することを提案した^{3,4)}。

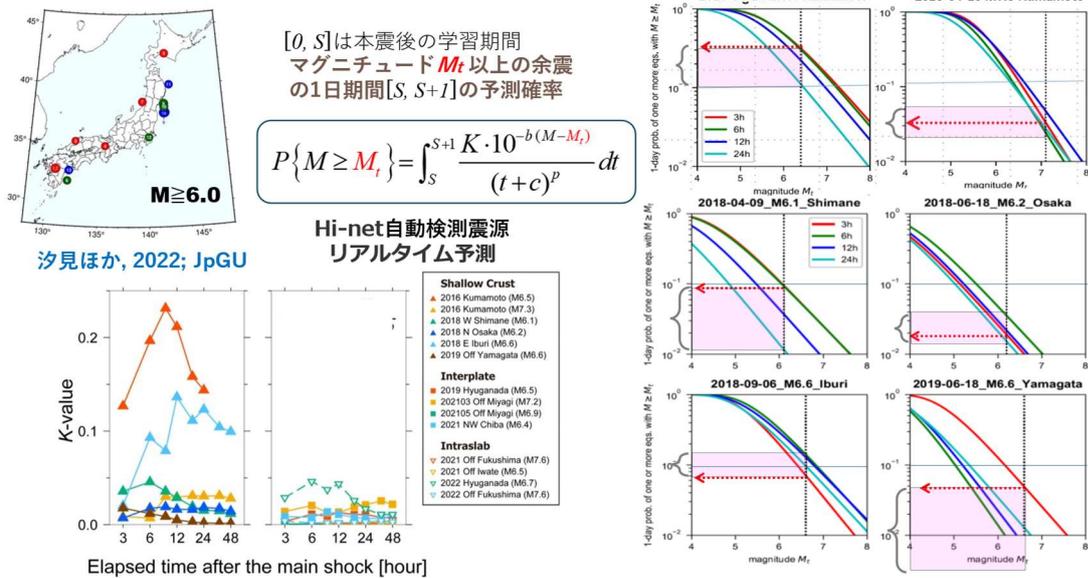
Fig. 1 The BPT model was consistent with the physical interpretation of stress accumulation, perturbations and releases, and development potential was desired. Due to its regional nature and the error time interval of the earthquake occurrence, we proposed to evaluate it with a Bayesian posterior distribution^{3,4)}.



第 2 図 α 値が時間変化する場合の 6 つのパラメータの最尤推定値はマグニチュード頻度の時間変化を良く予測する。

Fig. 2 The maximum likelihood estimates of the six parameters, when the α-values are time-varying, predict the time variation of the magnitude frequency well.

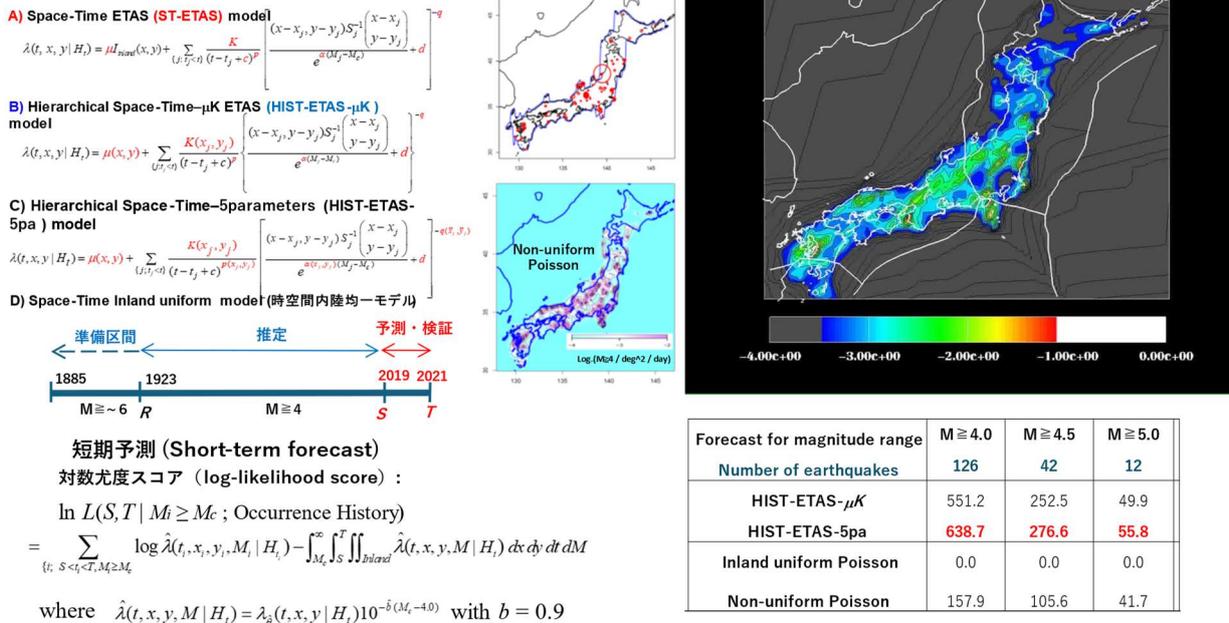
本震発生から3時間後、6時間後、12時間後、24時間後の1日予報確率（色付曲線）



第 3 図 Hi-net 自動検測によるリアルタイム予測。M6.5 熊本地震の場合、本震よりも大きな余震が 1 日以内に発生する確率は 30%~10%であったが、他 13 例は 10%未満で多くは数%であった。

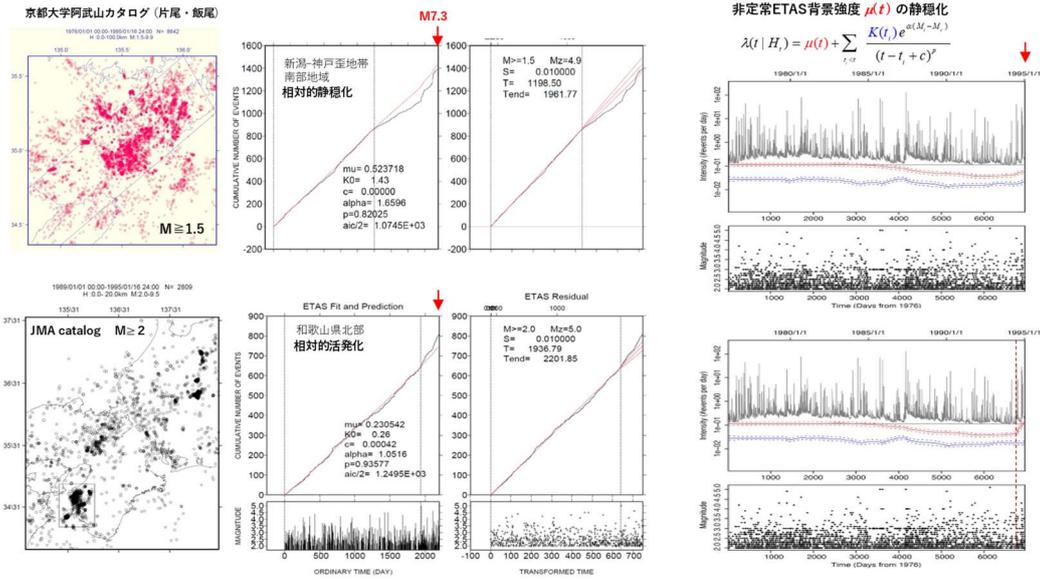
Fig. 3 Real-time prediction by Hi-net automatic logging. in the case of the M6.5 Kumamoto earthquake, the probability of an aftershock larger than the main shock occurring within one day was 30%~10%, while in 13 other cases it was less than 10% and in many cases it was several percent.

4. HIST-ETASETASモデルの時空間予測と評価



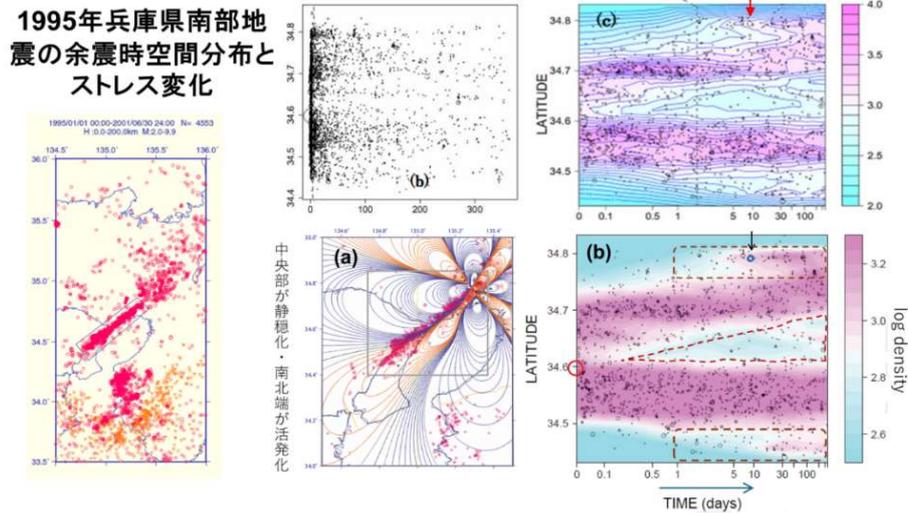
第 4 図 予測動画¹⁵⁾。対数尤度 (情報利得) では、地域性を反映する C モデルが優れている。

Fig. 4 Prediction video¹⁵⁾. The C model is superior in terms of log-likelihood (information gain), reflecting regional characteristics.



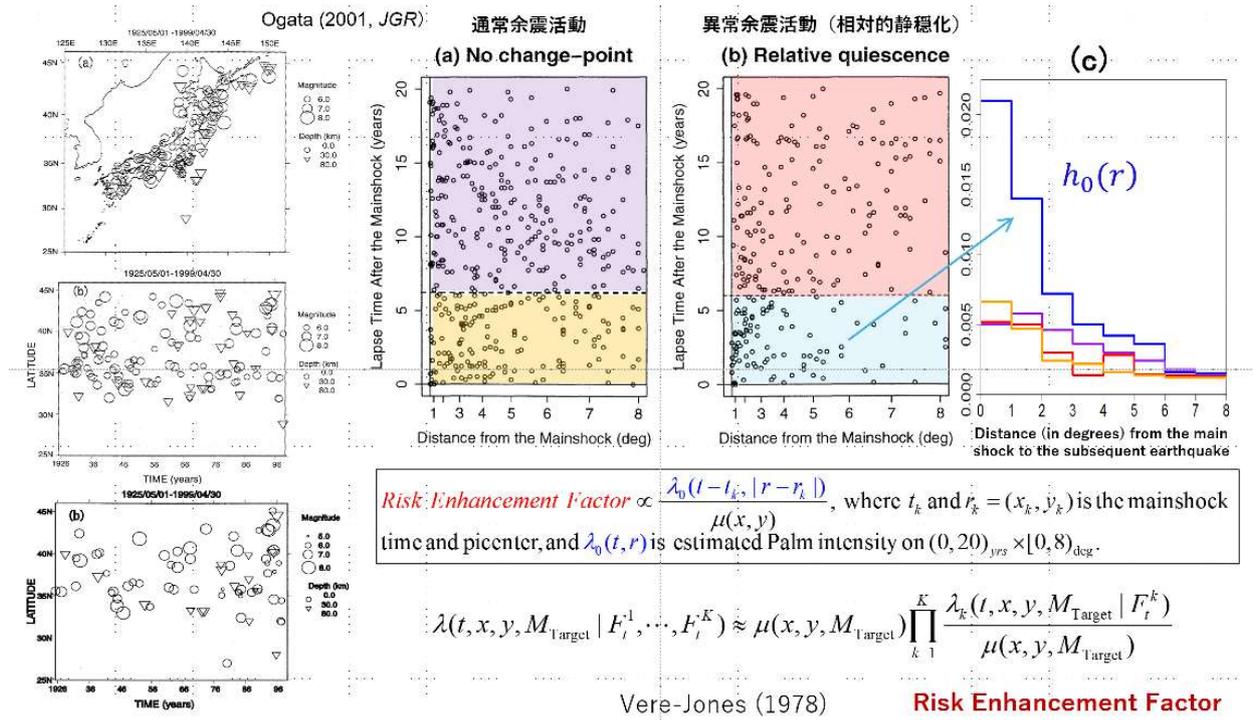
第 5 図 第 2,3 列目上段パネル；定常 ETAS モデルによると 1987 年頃から相対的な静穏化が始まり，1994 年頃の猪名川群発活動で増加に転じ，その後 M7.3 が発生した．第 4 列目のパネル；非常 ETAS モデルによると，余震生産性/パラメータ K の変化（青色曲線）に比べて，背景活動の μ 値の減少（赤色曲線）が顕著である．第 2,3 列目の下段パネル；一方では和歌山県北部の相対的な活動が見られる．

Fig. 5 The second and third columns' upper panels; according to the stationary ETAS model, the relative quiescence started around 1987 and turned into an increase with the Inagawa swarm activity around 1994, then the M7.3 event occurred. The fourth column panels; according to the non-stationary ETAS model, the decrease in the μ -values (red curve) of the background activity is noticeable compared to the change in the aftershock productivity parameter K (blue curve). The second and third column' s lower panels; the relative activity in northern Wakayama Prefecture can be seen. activity is noticeable compared to the change of the aftershock productivity parameter K (blue curve).



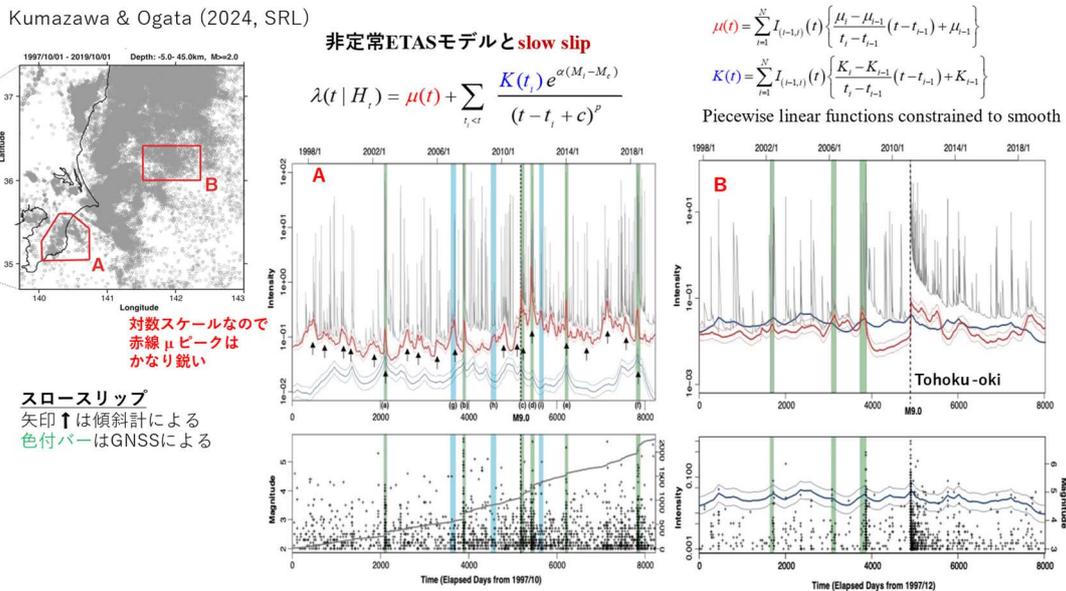
第 6 図 大森宇津式の変換時間 - 対 - 北緯の時空間プロットのベイズの平滑化によれば余震域の中央部が静穏化し，両端部が活発化した．北部の相対的活発化が最大余震 (M5.4) に，南部が 2013 年 M6.3 淡路島地震につながる．

Fig. 6 Bayesian smoothing of the spatio-temporal locations detrended by the Omori-Utsu formula conversion time vs. latitude shows that the central part of the aftershock area became relatively quiet and the two ends became more active. The relative activation in the northern part led to the maximum aftershock (M5.4) and in the southern part to the 2013 Awaji Island earthquake (M6.3).



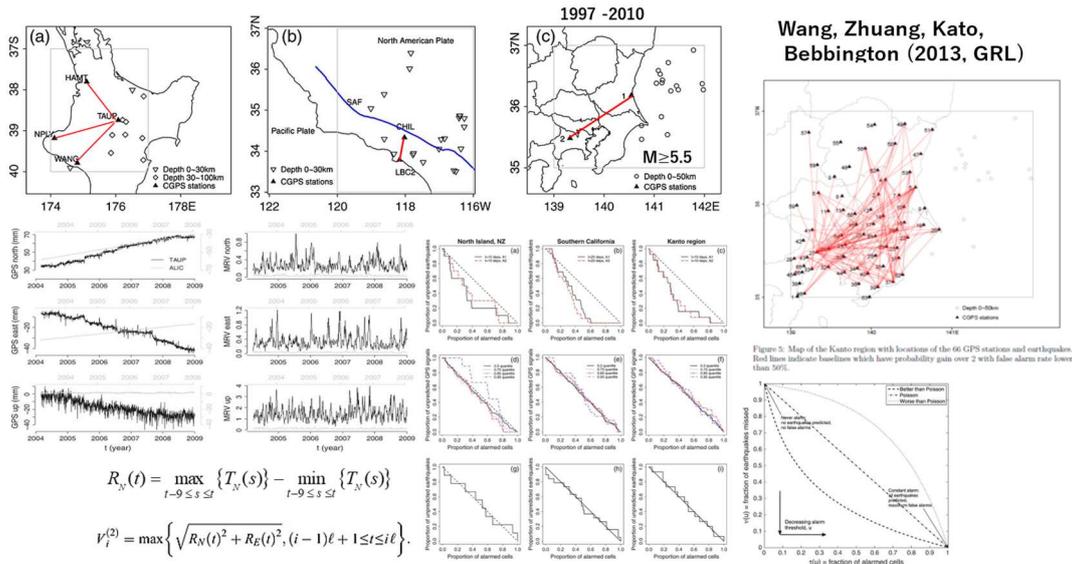
第 7 図 約 45% の余震列の相対静穏化に対して、6 年以内に大地震の確率利得は、時空間 ETAS 利得よりも数倍、背景地震活動より数十倍大きい。

Fig. 7 The probability gain of a major earthquake within six years for relative quiescence in about 45% of the aftershock sequence is several times larger than the space-time ETAS gain, and tens of times higher than the background rate.



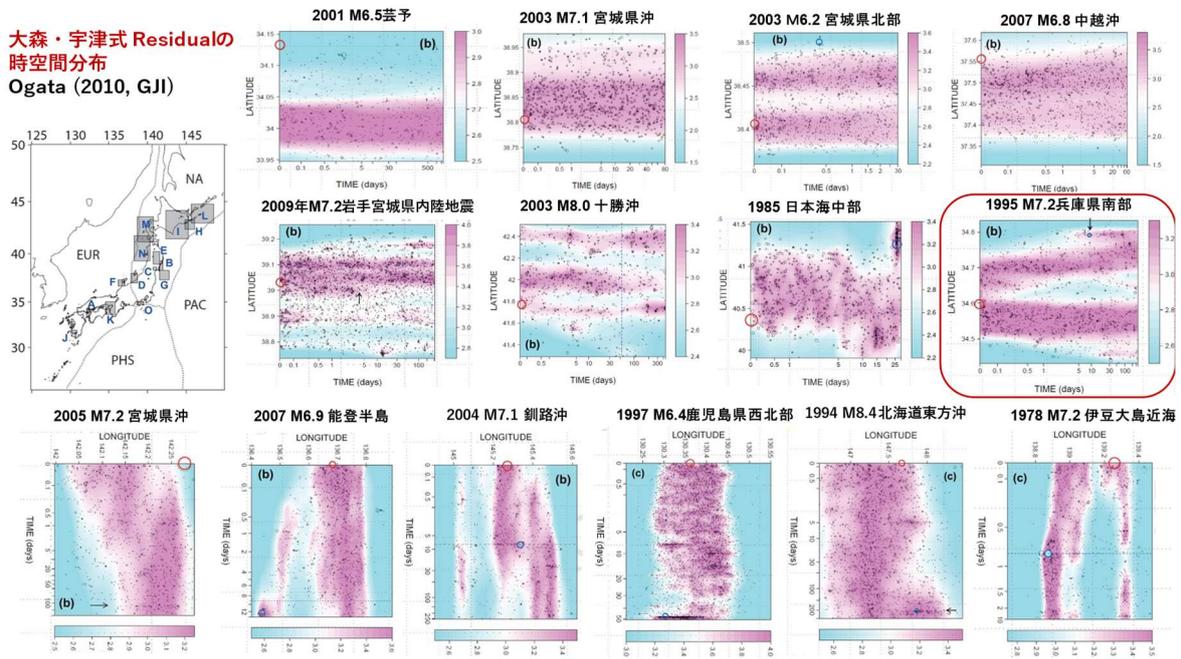
第 8 図 傾斜計異常、GNSS 測地異常、小繰り返し地震からの逆解析によるスロースリップは、非定常 ETAS モデルの μ 値のピークに対応する。B 地域では東北沖 M9 地震がスロースリップを誘発した。

Fig. 8 Slow slips inversion from recording anomalies of tiltmeters, GNSS and small repeating earthquakes correspond to the peaks of the m-value of the non-stationary ETAS model. In region B, a M9 earthquake off the Tohoku coast induced slow slip.



第 9 図 トレンドを除去した GNSS の基線距離時系列の極大変動幅に対して、関東沖の M5.5 以上の地震に対する、モルチャンプロットで因果性の検出を試みた研究。これは、ポアソンモデルに対して 2 倍程度の確率利得を示している。

Fig. 9 Study attempting to detect causality in the Morchan plot for the maximum variability of the GNSS baseline distance time series with the trend removed, for earthquakes greater than M5.5 off the Kanto region. This shows a probability gain of about two times over the Poisson model.



第 10 図 大森宇津式の変換時間対緯度/経度の時空間プロット。最上段パネルに示された様に時間的にほぼ一律な場合以外に、非一律な場合が多く見られ、場合によっては大きな余震発生との関係が見える。

Fig. 10 Spatio-temporal plot of Omori-Utsu formula conversion time versus latitude/longitude. There are many non-uniform patterns that might be suggested from the location of large aftershocks.