

10 - 4 地殻活動の予測実験 (2) — 内陸地震の短期確率予測と評価 (2019 – 2024.01.08)

Experiments in Prediction of Crustal Activity (2) — Short-term Probability Prediction and Evaluation of Inland Earthquakes (2019 – 2024.01.08)

尾形良彦 統計数理研究所

Yosihiko Ogata (The Institute of Statistical Mathematics)

1. 内陸部の地震活動度予測のための短期予測モデル

各地の時空間地震活動の短期予測を実行する最も柔軟なモデルは階層ベイズ型的時空間 Epidemic-Type Aftershock Sequence (HIST-ETAS-5pa) モデル^{1,2)}

$$\lambda_{\theta}(t, x, y | H_t) = \mu(x, y) + \sum_{\{i; t < t_i\}} \frac{K_0(x_i, y_i)}{(t - t_i + c)^{p(x_i, y_i)}} \left[\frac{(x - x_i, y - y_i) S_j^{-1} (x - x_i, y - y_i)^t}{e^{\alpha(x_i, y_i)(M_i - M_0)}} + d \right]^{-q(x_i, y_i)} \quad (1)$$

である。本報告では $H_t = \{(t_j, x_j, y_j, M_j); 0 < t_j < t, M_j \geq M_c\}$ は 1886 年から時刻 t までの $M_c = 4.0$ 以上の地震の発生情報履歴である。ただし $M \geq 6$ の大きな地震の位置座標は、推定では 1 日以内、予測の場合には 1 時間以内の余震の重心座標を取った。

モデル (1) を制限したものを含めて 3 つの時空間 ETAS 予測モデル

A) Space-Time ETAS モデル

B) HIST-ETAS- μ K モデル

C) HIST-ETAS5pa モデル

の違いを数式で示したものを第 1 図に記す。2024 年 M7.6 余震の余震を含む最近 5 年強のデータ出現に対して、これらの予測評価を比べる。さらに基準モデルとして、

D) 内陸部一様ポアソン過程

は時間的に一様で、かつ内陸部 (第 1 図参照) のみで同一値の発生率であり、その外域 (海域) では発生率 0 のモデルである。

上記のモデル A ~ C を以下の規準で内陸部に限って時間・空間的に比較した。因みに D モデルは「直下地震は何処に地震が起こってもおかしくない」ということの極端なモデルである。

2. 予測・検証・評価

先行情報として宇津カタログを含み、気象庁震源データに基づき $S = 2018$ 年までのデータから求めた上記モデルの最大事後分布 (MAP 解) モデルによって、2019 年から最近 5 年間の時間区間 $S \leq t \leq T$ での発生率を予測した。地震発生ごとに計算された対数尤度累積スコア

$$\log L(t_i, x_i, y_i; M_c) = \sum_{\{j; S < t_j < t_i\}} \log \hat{\lambda}(t_j, x_j, y_j | H_{t_j}) - \int_S \iint_{\text{Inland}} \lambda(t, x, y | H_t) dx dy dt \quad (2)$$

およびその増減差分

$$\Delta(t_i, x_i, y_i) \triangleq \log L(t_i, x_i, y_i) - \log L(t_{i-1}, x_{i-1}, y_{i-1}), \quad i = 1, 2, \dots, \text{予測地震数} \quad (3)$$

の大小で時間・空間的な予測結果の優劣の詳細を評価する (第 2, 3 図参照)。確率予測の評価規準としての対数尤度の意味については、例えば文献 3 を参照されたい。

予測結果は、9 割方の地震予測で時空間 ETAS モデルの全てのバージョン A, B, C が D モデル

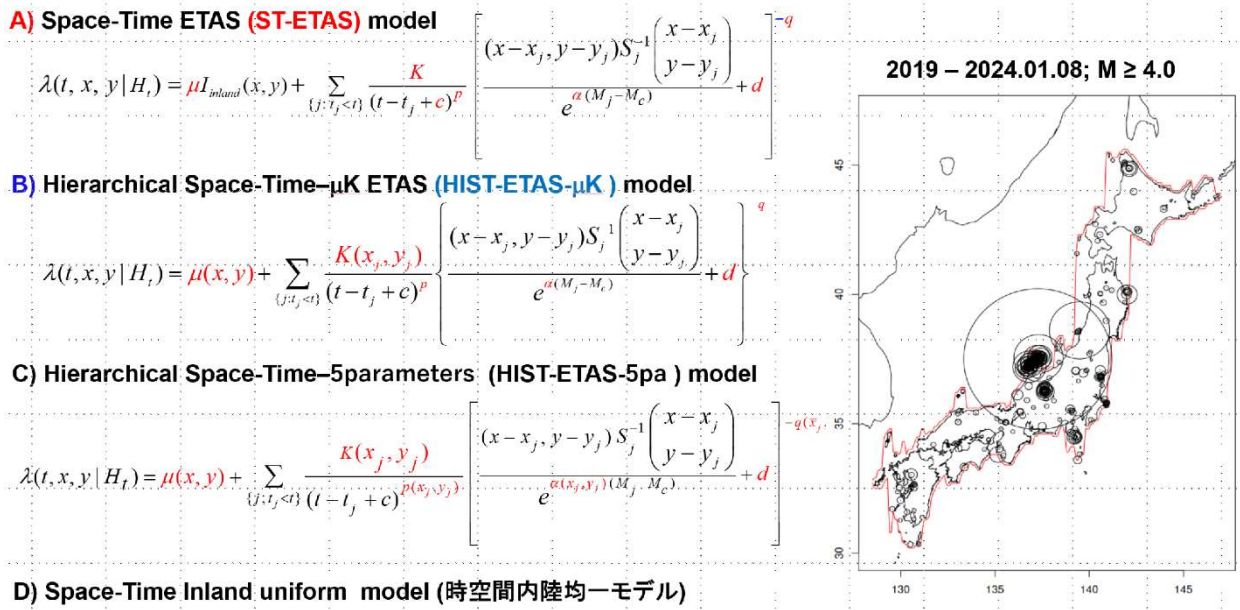
より優れているが、これは自明の余震効果の有無によるものである。

2019 年 – 2023 年を通して総じて、最も柔軟な C) HIST-ETAS-5pa モデルが優れており B) HIST-ETAS- μK モデルがそれに次ぐ (第 2 図)。しかし M7.6 能登半島地震とその余震では A モデルと B モデルが同等で、C モデルは成績が劣る。

そこで第 3 図の空間的な予測成績の優劣を見ると、能登半島地域、福島県浜通り茨城県北部や山形県沖の地震の様に、2011 東北沖地震までの学習期間に地震活動がほとんど無い地域では、A, B, C の順で、モデルが単純な時空間 ETAS モデルほど良い。これは、第 3 図左パネルの常時地震活動が低い地域と対応している。また伊豆半島沖や飛騨山地の群発型地震活動に対しては成績が良くない。

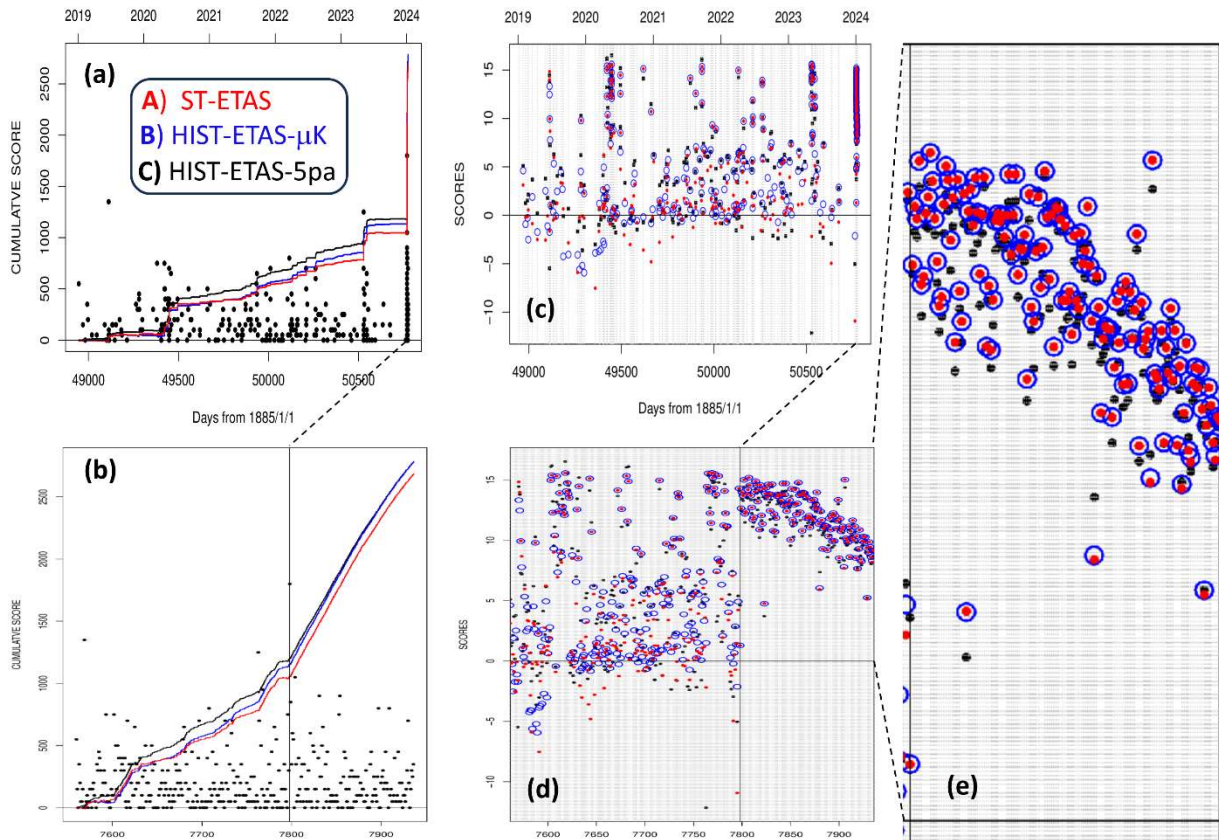
参考文献

- 1) 統計数理研究所 (尾形良彦) (2023) 予知連会報 **109** (12-9) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou109/12_09.pdf
- 2) 統計数理研究所 (尾形良彦) (2024) 予知連会報 **110** (10-06) <https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou111/10-06.pdf>
- 3) 庄建倉 尾形良彦 (2015) 統計数理 **63** (1) <https://www.ism.ac.jp/editsec/toukei/pdf/63-1-029.pdf>



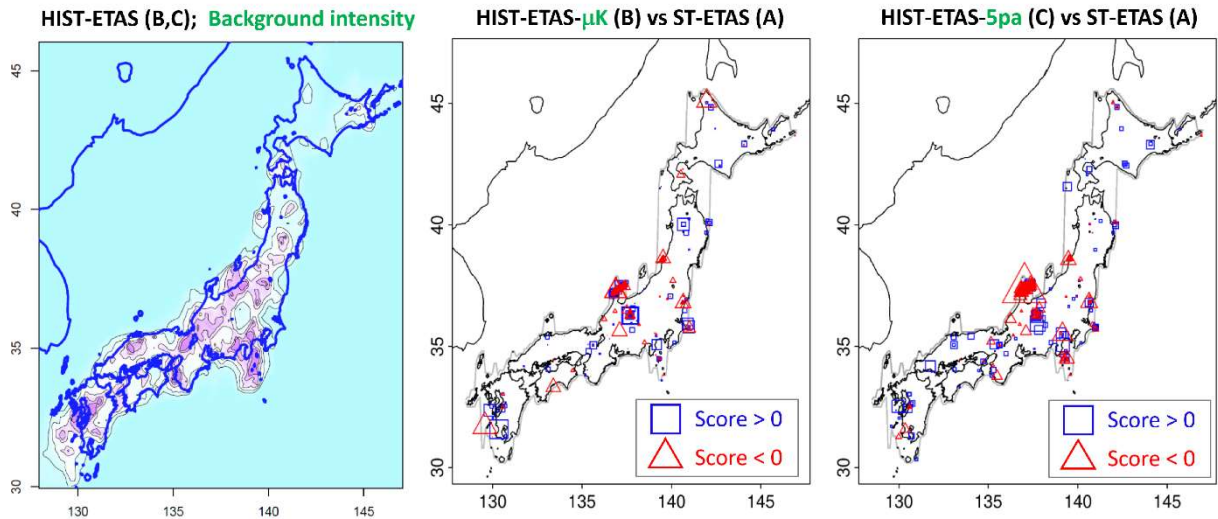
第 1 図 HIST-ETAS の 3 つのモデル A, B, C を D モデルとの性能比較. 大地震の震源位置は 1 時間以内の余震の重心座標を取る. D モデルは, 右の地図パネルの赤線で囲まれた範囲 (内陸) で一様な強度を持つ定常ポアソン過程である.

Fig. 1 Comparison of the performance of the three HIST-ETAS models, A, B, and C, where for an epicenter location of a large earthquake, the centroid coordinate of the aftershocks within one hour are taken. D model is the stationary Poisson process with uniform intensity within the area enclosed by the red line in the right map panel (inland).



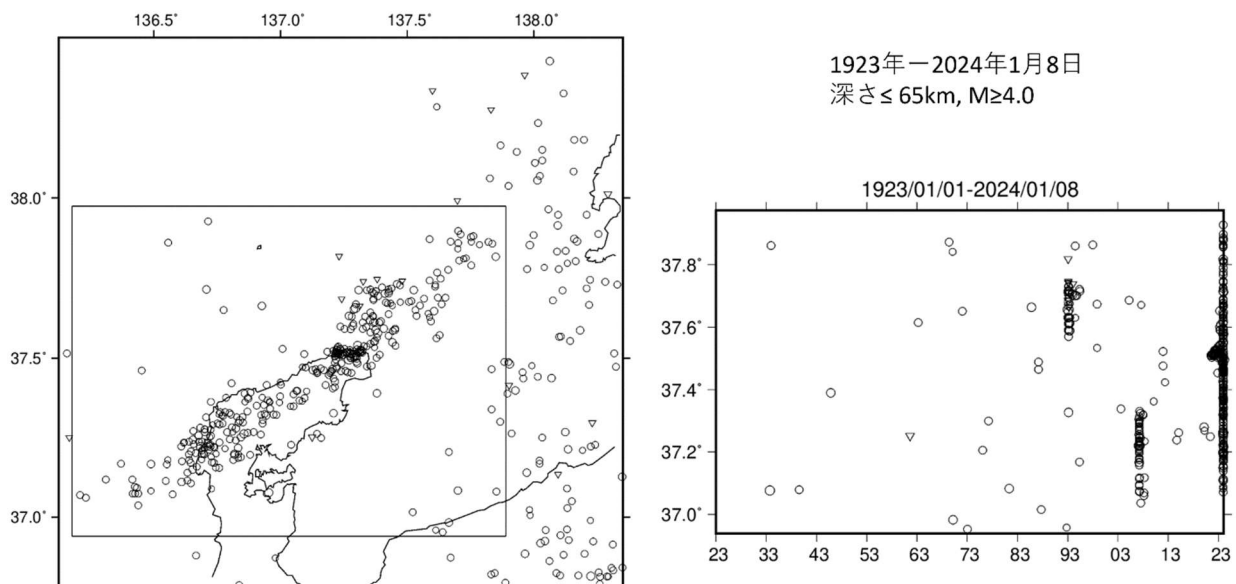
第 2 図 予測結果の成績の時間的推移. HIST-ETAS モデルの予測結果を内陸ポアソンモデル (D モデル) と比較した成績の時間的推移. (a) 累積対数尤度 (2 式) 対通常時間経過, (b) 累積対数尤度 (2 式) 対地震の順番, (c) 累積対数尤度差分 (3 式) 対通常時間経過, (d) 累積対数尤度差分 (3 式) 対地震の順番. (a) と (b) パネル: 黒点は M-T 図, 赤点は ST-ETAS 対 D モデル, 青線は HIST-ETAS- μ K 対 D モデル, 黒線は HIST-ETAS-5pa 対 D モデル. (c) と (d) パネル: 赤線は ST-ETAS 対 D モデル, 青点は HIST-ETAS- μ K 対 D モデル, 黒点は HIST-ETAS-5pa 対 D モデル. (e) はパネル (d) の能登半島 M7.6 余震部分の評価を拡大したもの.

Fig. 2 Temporal evolution of the prediction performance of the HIST-ETAS model compared to the Inland Poisson model (D model) over time. (a) cumulative log-likelihood (2) versus normal time history, (b) cumulative log-likelihood (2) versus earthquake order, (c) cumulative log-likelihood difference (3) versus normal time history, and (d) cumulative log-likelihood difference (3) versus earthquake order. Panels (a) and (b): black dots are M-T plots, red dots are ST-ETAS versus D model, blue lines are HIST-ETAS- μ K versus D model, black lines are HIST-ETAS-5pa versus D model; panels (c) and (d): red lines are ST-ETAS versus D model, blue dots are HIST-ETAS- μ K versus D model, black dots are HIST-ETAS-5pa versus D model. (e) magnified view of the evaluation score for the Noto Peninsula M7.6 aftershock portion of panel (d).



第 3 図 予測結果の成績の空間配置. 左図は HIST-ETAS モデルの背景強度. 中央図と右図は夫々 B)HIST-ETAS- μ K モデル対 A)HIST-ETAS モデル, 及び C)HIST-ETAS-5pa モデル対 A)HIST-ETAS モデル, の対数尤度差分スコアの位置依存図で, 青口は正值, 赤 Δ は負値.

Fig. 3 Spatial arrangement of predicted result scores. The left figure is the background intensity of HIST-ETAS model. The middle and right figures is location-dependent plots of log-likelihood difference scores for the HIST-ETAS- μ K model versus the HIST-ETAS model, and the HIST-ETAS-5pa model versus the HIST-ETAS model, respectively, with blue \square representing positive values and red Δ representing negative values.



第 4 図 能登半島周辺の $M \geq 4$ 地震の震央分布図と緯度対時間 (1923 年 -2024 年 1 月 8 日). 震央分布の長方形枠内の地震の群れは 2024M7.6, 1993 年 M 6.5, 2007 年 M6.9 2023 年 M6.5 の余震を含む.

Fig. 4 Distribution of epicenters around the Noto Peninsula, and latitude vs. time (1923 - January 8, 2024). Aftershocks of 2024M7.6, 1993M6.5, 2007M6.9 and 2023M6.5 are included in the earthquake swarms in the inside rectangular in the left panel.