

## 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)

尾形良彦 統計数理研究所

2024 年 M7.6 余震の余震を含む最近 5 年強の  $M \geq 4$  のデータ出現に対して、3 つの時空間モデル、A) **Space-time ETAS モデル** B) **HIST-ETAS- $\mu K$  モデル** C) **HIST-ETAS5pa モデル**、の予測精度を比べた。A モデルは B に含まれ、B モデルは C に含まれる。予測結果は D) **内陸部一様ポアソン過程**を基準として**対数尤度比スコア**で時間・空間的に示した。

1) 予測結果は、大多数の地震予測で時空間 ETAS 版モデル A) B) C) の全てが D) モデルより 9 割方優れているが、これは各地震の余震効果のモデリングによるものである。

2) 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- $\mu K$  モデルがそれに次ぐ (第 2 図)。しかし、2024 年 M7.6 能登半島地震余震では A) モデルと B) モデルが同等で、C) モデルは成績が劣る。

3) 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余震活動の様に、これらの地震の 2011 東北沖地震までの学習期間に地震活動がほとんど無かった地域では、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、常時地震活動が低い地域とも良く対応している。

### A) Space-Time ETAS (ST-ETAS) model

$$\lambda(t, x, y | H_t) = \mu I_{inland}(x, y) + \sum_{\{j: t_j < t\}} \frac{K}{(t - t_j + c)^p} \left[ \frac{(x - \bar{x}_j, y - \bar{y}_j) S_j^{-1} \begin{pmatrix} x - \bar{x}_j \\ y - \bar{y}_j \end{pmatrix}}{e^{\alpha(M_j - M_c)}} + d \right]^{-q}$$

### B) Hierarchical Space-Time- $\mu K$ ETAS (HIST-ETAS- $\mu K$ ) model

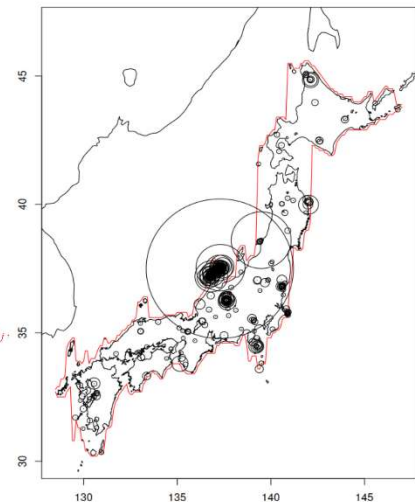
$$\lambda(t, x, y | H_t) = \mu(x, y) + \sum_{\{j: t_j < t\}} \frac{K(\bar{x}_j, \bar{y}_j)}{(t - t_j + c)^p} \left[ \frac{(x - \bar{x}_j, y - \bar{y}_j) S_j^{-1} \begin{pmatrix} x - \bar{x}_j \\ y - \bar{y}_j \end{pmatrix}}{e^{\alpha(M_j - M_c)}} + d \right]^{-q}$$

### C) Hierarchical Space-Time-5parameters (HIST-ETAS-5pa) model

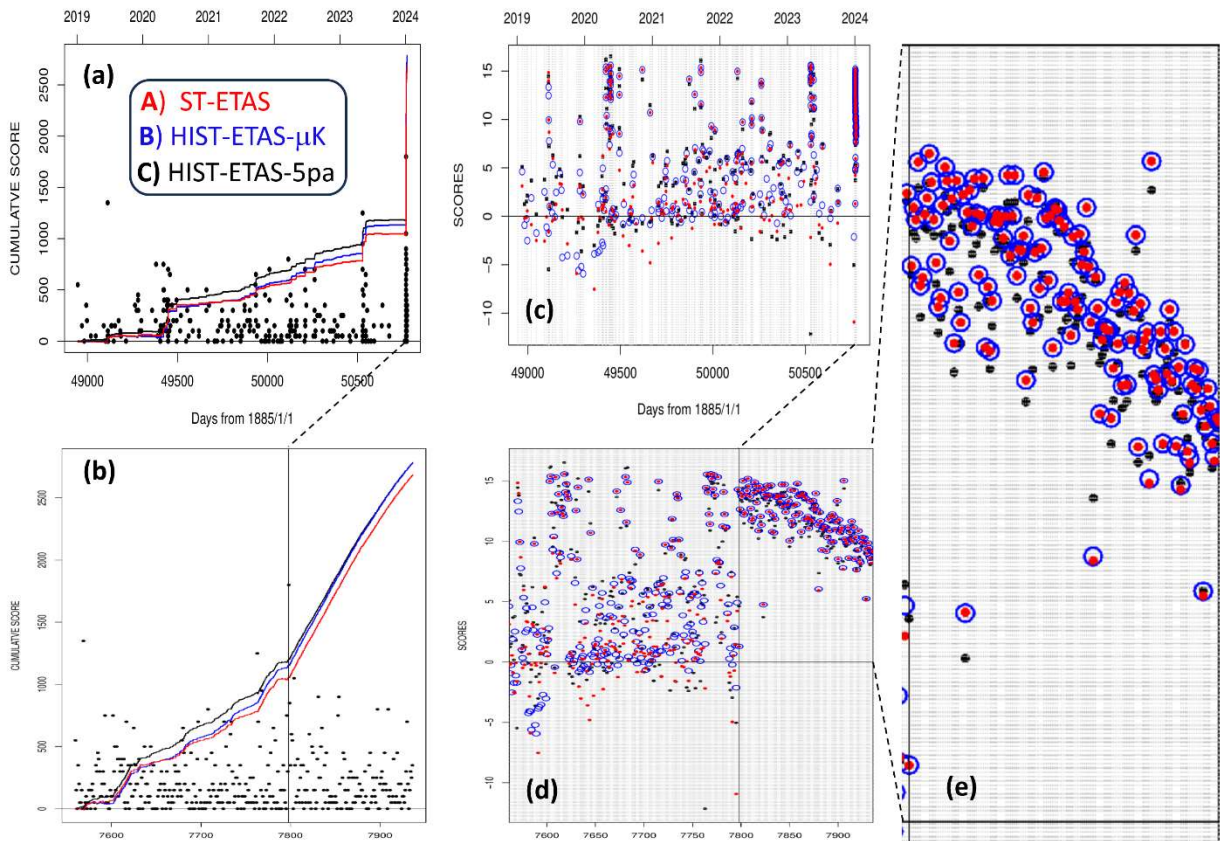
$$\lambda(t, x, y | H_t) = \mu(x, y) + \sum_{\{j: t_j < t\}} \frac{K(x_j, y_j)}{(t - t_j + c)^{p(x_j, y_j)}} \left[ \frac{(x - x_j, y - y_j) S_j^{-1} \begin{pmatrix} x - \bar{x}_j \\ y - \bar{y}_j \end{pmatrix}}{e^{\alpha(x_j, y_j)(M_j - M_c)}} + d \right]^{-q(x_j, y_j)}$$

### D) Space-Time Inland uniform model (時空間内陸均一モデル)

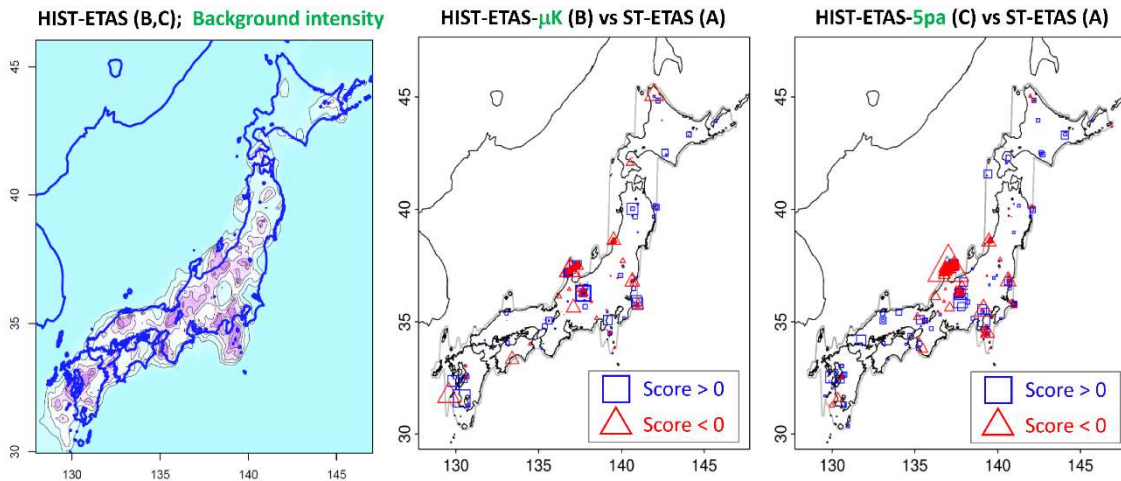
2019 – 2024.01.08;  $M \geq 4.0$



第 1 図 HIST-ETAS の 3 つのモデル A, B, C の D モデルとの性能比較。ただし D モデルは右の地図パネルの赤線で囲まれた範囲 (内陸) で一様な定常ポアソン過程である。



第2図 各種時空間 ETAS モデルの (左図) 対数尤度スコアの累積と (右図) それらの地震毎の時間的推移。  
 (a)と(b)パネルの黒点は M-T 図。横軸は (a)と(c)が通常時間経過, (b), (d)と(e)が地震の順番, 各パネルの累積の黒線, 青線および赤線, そして右図の黒点, 青○および赤点, は, それぞれ時空間 ETAS モデル A), B) および C) モデル に対応する。左図ではマグニチュード系列を下向きに描いた。



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 HIST-ETAS- $\mu$ K モデル対 HIST-ETAS モデル, 及び HIST-ETAS-5pa モデル対 HIST-ETAS モデル, の対数尤度差分スコアの位置依存図で, 青□は正值, 赤△は負値。