

## 12 - 13 階層的時空間 ETAS モデルによる短期・中期予測

**Short- and medium-term forecasts using hierarchical spatiotemporal ETAS model**

尾形良彦 統計数理研究所

Yoshihiko Ogata (The Institute of Statistical Mathematics)

広域の地震活動のための階層的時空間 ETAS モデル<sup>1)</sup>

$$\lambda(t, x, y | H_t) = \mu(x, y) + \sum_{\{j; t_j < t\}} \frac{K_0(x_j, y_j)}{(t - t_j + c)^{p(x_j, y_j)}} \left[ \frac{(x - x_j, y - y_j) S_j^{-1}(x - x_j, y - y_j)^t}{e^{\alpha(x_j, y_j)(M_j - M_c)}} + d \right]^{-q}$$

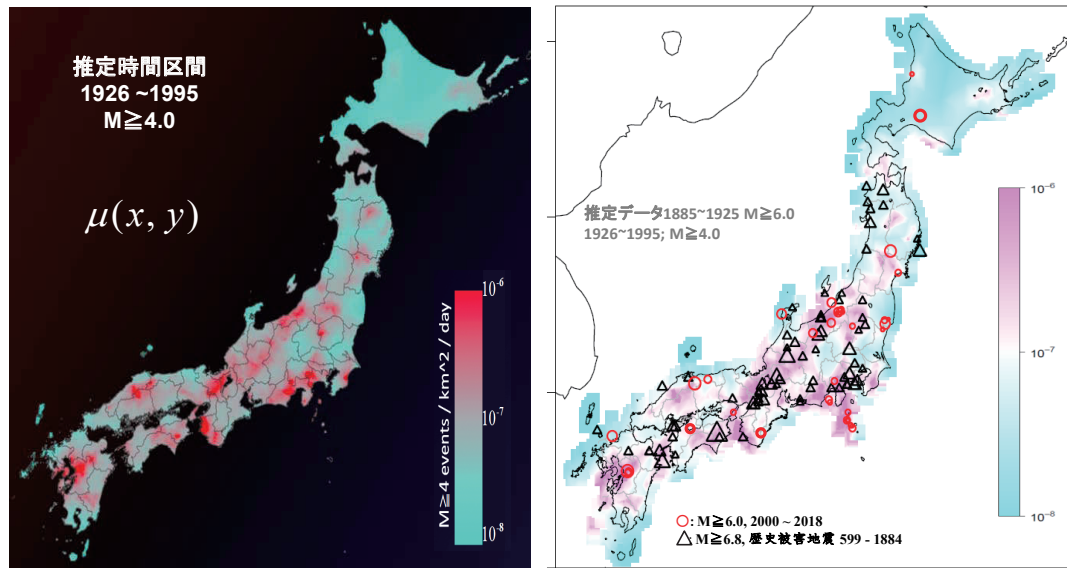
の予測と結果を示す。地域性的変化が著しく大きい係数  $m$  と  $K_0$  は位置座標に依存する。これらは局所線形デロネ関数で表し、平滑化の制約を課し、赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) の最小化によって調節し、逆問題で局所線形デロネ関数の最適解を得る<sup>2)</sup>。

その結果、常時活動度  $m(x, y)$  が高いところ<sup>3)</sup> に将来の M6.0 以上の大地震や過去の歴史被害地震 (M6.7 以上) の大地震の大多数が発生している (第 1 図)。同様に日本海溝沿いを含む全日本の詳細な常時活動度の高い部分に M7 クラスの地震が数多く発生している<sup>4)</sup>。パラメタ  $K_0(x, y)$  は短期予測に有用な余震生産性の位置情報になり、本震直後からの余震発生の時空間的予測に使用する。既に CSEP 日本で予測されたもの<sup>5, 6)</sup> の時空間精度を上げた予測動画のスナップショットを示した (第 2 図)。このように下限マグニチュードが十分高ければ、リアルタイムで不偏な余震数の時空間予測ができる状態である。

関東地方直下 100 km 深までの地震活動を解析・予測するために、上記モデル式を拡張して、さらに東北沖地震の影響を考慮した、経度緯度深さの 3 次元空間の HIST-ETAS モデルを作成した<sup>7, 8)</sup>。関東直下では三つのプレートが重なりあって局所線形デロネ関数の最適解の空間分布は詳細に非一様であり、これらの 3 次元像を示すのは容易でないので、等深の平面やプレート面と交差する 2 次元断面画像として示した (第 3 図)。1926 ~ 2016 年で気象庁データ ( $M \geq 4$ ) をあてはめた本モデルを使って、一例として、2018 年 6 月時点に予測し、その後 1 年に起きた  $M \geq 3$  の地震を示した。予測結果は良好である。

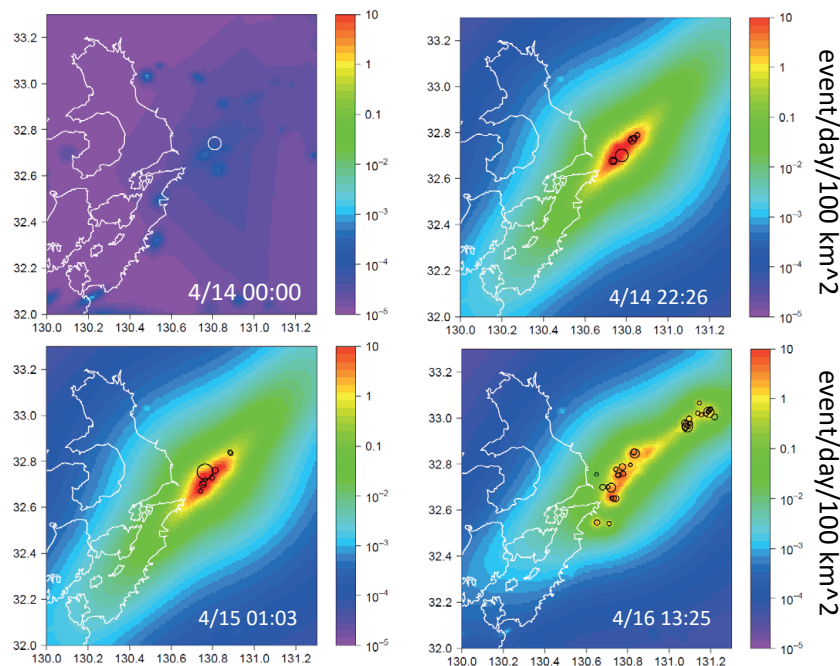
## 参考文献

- 1) 尾形良彦, 予知連会報 83 (1-2), 5-8, 2010.
- 2) Ogata, Y. *Earth, Planets and Space*, 63(3), 217-229, doi:10.5047/eps.2010.09.001, 2011.
- 3) 尾形良彦 予知連会報 97 (1-3), 9-12, 2017.
- 4) 尾形良彦 地震予知連絡会 50 周年記念企画公開シンポジウム, ポスター, 2019.
- 5) 尾形良彦 予知連会報 96 (12-24), 662-667, 2016.
- 6) 尾形良彦 予知連会報 97 (9-7), 368-374, 2017.
- 7) 尾形良彦 予知連会報 102 (4-5), 123-129, 2019.
- 8) Ogata, Y., Katsura, K., Tsuruoka, H. and Hirata, N. *Earth Planets Space*, 71 (113), <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1086-7>, 2019.



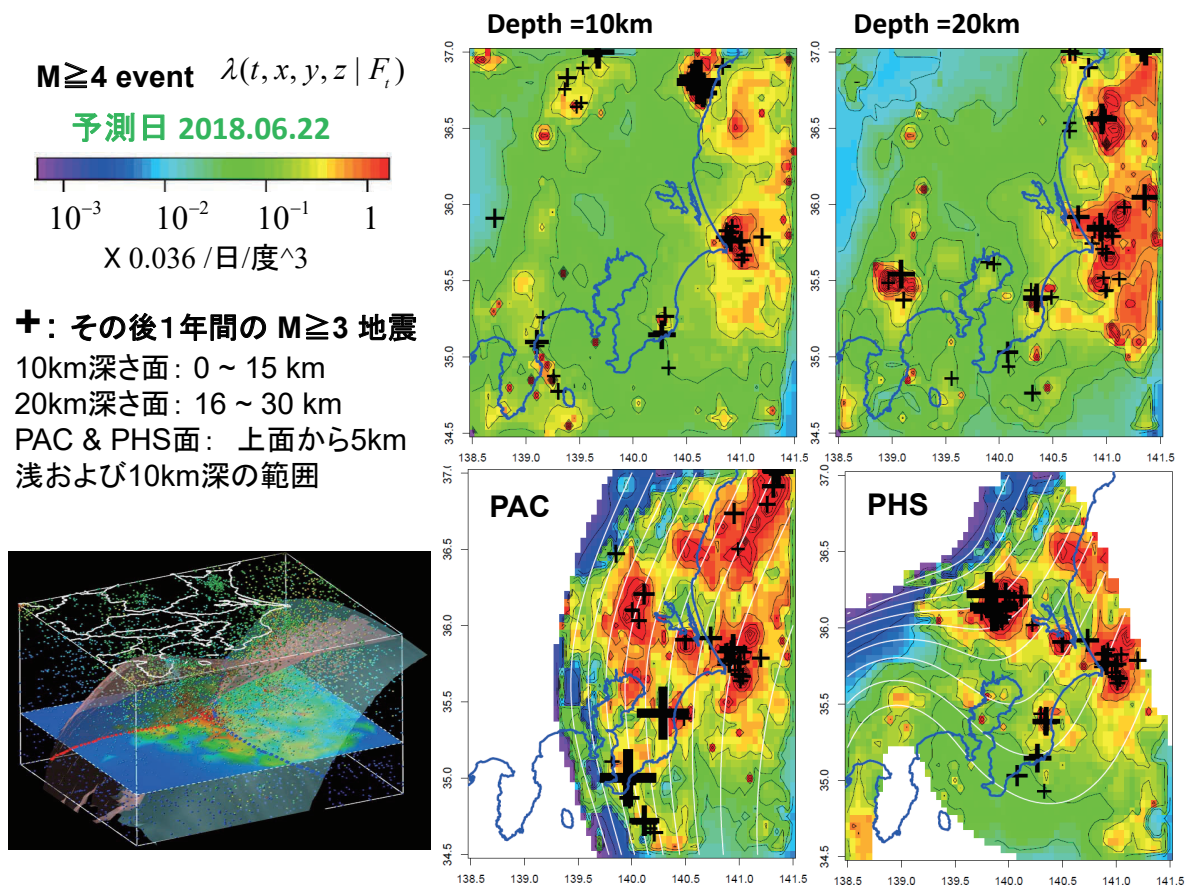
第1図 時空間 ETAS モデルの常時発生確率。色表はマグニチュード4以上の地震が起きる1日1平方キロメートル当たりの確率。1885年から1995年までの内陸部直下の地震データから求めた。(右図)北日本を除く未来の大地震(赤丸)や過去の歴史被害地震(黒三角; 宇津, 2004)の発生場所を良く説明している。

Fig. 1 Baseline occurrence rate of spatiotemporal ETAS model. The color chart shows the probability per square kilometer per day that an earthquake of magnitude 4 or greater will occur. This was obtained from the earthquake data from the inland area and the period from 1885 to 1995. It well explains the location of future large earthquakes (red circles) and historical damaging earthquakes (black triangles; Utsu, 2004), except for northland Japan.



第2図 時空間 ETAS モデルによる熊本地震系列の発生強度(確率の微分)の予測動画のスナップショット(時間が白字で附してある)。色標(対数スケール)はマグニチュード4以上の地震が起きる1日1平方度当たりの発生確率。丸印が予測時点以降の短時間間隔で発生した地震(1枚目にM6.4地震, 2枚目にM6.3余震, 3枚目にM7.3本震を含む)を示している。

Fig. 2 Snapshots (with time) of a prediction movie of the intensity (probability differentiation) of the Kumamoto earthquake sequence using the spatiotemporal ETAS model. The color chart (log scale) is the probability per square degree per day that an earthquake of magnitude 4 or greater will occur. Circles indicate earthquakes that occurred at a short interval after the forecast time, including the M6.4 earthquake on the first snapshot, the M6.3 aftershock on the second one and the M7.3 main shock on the third one.



第3図 深さ10 kmと20 kmの平面および太平洋プレート（PAC）とフィリピン海プレート（PHS）の上面付近における発生強度の2次元投影予測。対数色標の単位はM4基準値0.036個/日/(111 km)<sup>3</sup>に対応。黒い細線の輪郭間隔は対数目盛で等間隔（約3倍）。+印は予測後1年間で起きた各面からの近隣の地震を示している。すなわち10 km平面内で0 ~ 15 km以内、10 km平面内で16 ~ 30 km以内、またプレートの上面から5 km上方および10 km下方の深さ範囲内である。

Fig. 3 Two-dimensional predictions of the occurrence intensities in the horizontal planes of 10 and 20 km depth, and the top surface of the Pacific Plate (PAC) and the Philippine Sea Plate (PHS). The unit of logarithmic color target corresponds to M4 standard value 0.036 event/day/(111 km)<sup>3</sup>. The black fine lines are equal interval in logarithmic scale (about 3 times large). The + sign indicates nearby earthquakes from each side that occurred in a year after the forecast. In other words, it is within 0 to 15 km within the 10 km plane, within 16 to 30 km within the 10 km plane, and within a depth range of 5 km above and 10 km below the top surface of the plate.