

階層ベイズ時空間点過程モデルによる日本の地震の長期予測

東京大学地震研究所・統計数理研究所 尾形良彦

地震予測実験国際共同プロジェクト CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability) の日本検証センター (東京大学地震研究所内) に提出した階層的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデル

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

による確率の一日毎の予測について、日本列島や関東地域のマグニチュード $M \geq 4$ の地震発生の 2009 年 11 月 1 日分の予測と、東北沖地震後の 2012 年 5 月 1 日分の予測から、地震活動形態の違いを見る。さらに $M5.0$ 以上の地震の 1 年分予測および $M7.0$ 以上の地震の 30 年分予測を求めた。2011 年東北沖地震 ($M9$) 以前では期間 $[S, T]$ で領域 A におけるマグニチュード M 以上の地震の長期予測には HIST-ETAS モデル (1) の常時地震活動度 $\mu(x, y)$ を使う。時点 S までの $M \geq 4.0$ の平均地震数 $N_A(0, S)/S$ で補正して

$$\Lambda(x, y, M | S, T) = \left\{ \mu(x, y) / \iint_A \mu(x, y) dx dy \right\} 10^{-b(x, y)(M - 4.0)} \times \{N_A(0, S)/S\} \times (T - S) \quad (2)$$

で与えた。ここで $b(x, y)$ は Gutenberg-Richter マグニチュード分布の係数であり位置に依存する。

しかし東北沖地震後の長期間の日本全般にわたる誘発性は格別に大きいので、上記の近似予測方式は機能しない。そこで、先ず予測地震数 $\hat{N}_A(S, T | H_S)$ を以下の手順でシミュレーションする。将来の地震のマグニチュードを地域 A における過去期間 $[0, S]$ のマグニチュードデータからブートストラップ法で re-sampling し、その上で東北沖地震時点 t_{M9} に関する大森・宇津予測式を加えた ETAS 点過程モデル

$$\lambda_A^{ETAS+OU}(t | H_t) = \mu + \sum_{t_i < t, t_i \neq t_{M9}} \frac{K e^{\alpha(M_i - 4.0)}}{(t - t_i + c)^p} + \frac{K_{M9} \cdot I(t > t_{M9})}{(t - t_{M9} + c_{M9})^{p_{M9}}} \quad (3)$$

を期間 $[0, S]$ の地震データで推定し、時刻 S から T までの期間中の地震発生のシミュレーションを何度も繰り返すと予測地震数とその誤差分布が得られる。次に、同期間中の地震発生率の空間分布は HIST-ETAS モデルの時間積分を正規化した条件付き確率分布

$$\phi_A(x, y | H_S) = \int_S^T \hat{\lambda}(t, x, y | H_S) dt / \iint_A dx dy \int_S^T \hat{\lambda}(t, x, y | H_S) dt \quad (4)$$

を計算し、(2) 式の代わりに以下の関数をもって長期予測とした。

$$\Lambda_A(x, y, M | S, T) \approx \hat{N}_A(S, T | H_S) \phi(x, y | H_S) \times 10^{-b(x, y)(M - 4.0)} \quad (5)$$