12 - 7 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法(5): 最近の活動事例による検証と ETAS モデルとの比較

Earthquake forecasting method by supposing swarm-like activity to be possible foreshocks (5): its performance for recent seismicity data and comparison with the ETAS model

前田憲二^{*}・弘瀬冬樹・溜渕功史(気象研究所) (^{*}気象庁地震予知情報課から併任)

Kenji Maeda^{*}, Fuyuki Hirose, and Koji Tamaribuchi (Meteorological Research Institute) (^{*}Additional post of Earthquake Prediction Information Division, Japan Meteorological Agency)

1. 前震活動に基づく予測モデルの成績(過去1年間および通算)

前震活動に基づく予測モデル(以下,本予測モデル)¹⁾⁻⁶⁾を用い,前回までの報告⁴⁾⁻⁷⁾に引き続き 本震発生の予測効率の調査を行った.解析期間の終了時点を2019年10月31日に更新したときの 通算の事後予測成績変化の一覧を第1表に示す.また,以下に各領域における前回報告以降の予測 成績の状況を述べる(第1図参照).

日本海溝沿い3領域,伊豆地域及び山陰地方については,今期間(2018/11/1~2019/10/31)は前 震候補も対象地震も発生しなかったため,予測成績には変化はなかった.長野県北中部では,2018 年11月24日および26日に前震候補の条件を満たす地震活動が計4回あったが,その後,警報期 間中を含め本震は発生しなかった.九州中部でも,2019年6月27日に前震候補の条件を満たした が,警報期間中を含め本震は発生しなかった.そのため,これらの地域では,適中率が前回報告に 比べ若干下がった.一方,九州中部では,2019年1月3日に発生した予測対象地震(M5.1)を見 逃した.活動の詳細を見ると,地震発生前の10日間ではM2.2が1個発生したが活動は低調であり, 前震候補の条件(第1表参照)を満たす地震活動には至らなかった.そのため,予知率は前回報告 に比べ若干下がった.

第2回には,領域ごとに本予測モデルを作成した期間における予測成績と,その後の最新の期間 までの通算の予測成績の変化を示した.

2. ETAS モデルによる予測結果との比較

本予測モデルで適中したアラーム(即ち,その後の予測期間において予測対象地震が発生したケース)について, ETAS モデルから期待される予測対象地震の発生確率を以下の手順で求めた.

- Mf₀以上の地震データから, G-R 則の b 値と ETAS モデルのパラメータを推定する.ここでの ETAS モデルとは定常時間 ETAS モデル⁸⁾を指す.
- ② 得られたパラメータを用いて,各地震後 Ta 日以内に期待される Mm₀ 以上の地震数を推定する. このとき,Ta 日間における時間減衰も考慮する.
- ③ ポアソン過程を仮定し、各地震後 Ta 日以内に Mm₀ 以上が発生する確率を算出する、即ち、平 均で Ta 日間にλ個の発生が期待される現象に対し、Ta 日間に1個以上発生する確率を、1-e^λ で与える.ただし、時間 ETAS を用いていることから、予測対象空間は領域全域である、一方、 本予測モデルにおける予測空間は第1表のD×Dである、このことから、ETAS モデルから 期待される予測対象地震の発生確率は過大評価であることに留意する必要がある。

伊豆地域,長野県北中部,九州中部について両モデルによる予測結果を比較した. ETAS モデル

から期待されるターゲット地震の発生率は5%以下が大半であり、本予測モデルによる適中率の方が平均的に高い値(7.0-22.7%)を示した(第3図).

3. ETAS モデルによる合成カタログと自然地震カタログとの比較

ETAS モデルによる自然地震カタログの再現性を検証するために,伊豆地域の実カタログからパ ラメータ推定された定常時空間 ETAS モデル⁹(8パラメータバージョン)と実カタログの最大規模 M7.0を上限とした切断 G-R 則に基づく模擬的な地震カタログ(合成カタログと呼ぶ)1000 個に対し, 本予測モデルを適用した場合の予測効率を調べた.その結果,合成カタログに適用した場合(パラ メータは合成カタログに最適化)よりも自然地震カタログに適用した場合の方が成績は良かった(第 4 図).また,本震発生時刻を基準としたスタッキングによる本震1 個あたりの前震回数積算図を 比較すると,自然地震カタログの方が前震活動の加速は大きかった(第5 図).このことは,ETAS モデルでは前震活動の特徴を十分には再現することは困難であり,前震活動の特徴をうまく抽出で きれば ETAS モデルよりも効率的な予測が可能であることを示唆する.

4. まとめ

- ・過去1年では長野県北中部と九州中部で成績が若干下がった.
- ・通算では日本海溝3領域と長野県北中部の成績が特に下がった.
- ・特に集中的に地震が発生する場合を除き、定常時間 ETAS モデルより前震活動に基づく予測モデルの方が高い予測確率を示す。
- ・定常時空間 ETAS モデルでは本震前の前震活動の加速を十分に再現していない. →前震活動の特徴に基づく予測の方が定常時空間 ETAS モデルより予測に有効.

参考文献

- Maeda, K. (1996), The use of foreshocks in probabilistic prediction along the Japan and Kuril trenches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 242-254.
- 2) 前田憲二・弘瀬冬樹 (2012), 前震の経験則に基づく地震発生予測 東北地方太平洋沖地震とその後の地震活動への適用 ,日本地震学会講演予稿集, D12-06.
- Maeda, K. and F. Hirose (2014), Prediction performance of empirically defined foreshocks in the Izu region, Japan Geoscience Union Meeting 2014, SSS01-06.
- 4) 気象研 (2016), 前震活動に基づく地震発生の経験的予測, 予知連会報, 95, 415-419.
- 5) 気象研 (2016), 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法:最近の活動事 例による検証,予知連会報,96,476-480.
- 6) 気象研 (2017), 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法:最近の活動事例による検証 (3), 予知連会報, 98, 465-469.
- 7) 気象研 (2019), 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法:最近の活動事例による検証 (4), 予知連会報, 101, 492-494.
- Ogata, Y. (1988), Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, J. Am. Stat. Assoc., 83, 9-27.
- 9) Ogata, Y. and J. Zhuang (2006), Space-time ETAS models and an improved extension, *Tectonophys.*, 413, 13-23.

第1表 各地域の最新1年間のデータ更新に伴う通算の予測結果の変化.

Table 1 Prediction result variation for each region obtained by adding latest one year data.

領域	期間	前震条件と ターゲットM [#] (D, Mf₀, Tf, Nf, Ta), Mm₀	予知率		適中率		確率利得 _(最適化期間)
日本海溝3領域	1961年~*	0.5, 5.0, 10, 3, 4, 6.0	27%	(=13/48)	22%	(=17/79)	380
伊豆地域	1977年~*	0.2, 3.0, 3, 3, 5, 5.0	68%	(=44/65)	22%	(=44/199)	225
長野県北中部	1998年~*	0.1, 2.0, 1, 5, 5, 5.0	33%	(=5/15)	10% ↑ 11% [†]	(=8/77) ↑ 73 [†]	333
九州中部	1970年~*	0.1, 3.0, 10, 3, 12, 5.0	<mark>29%</mark> ↑ 31% [†]	(=4/14) ↑ 13 [†]	6%	(=3/ <mark>52</mark>) ↑ 51 [†]	365
山陰地方	1977年~*	0.1, 3.0, 1, 2, 24, 5.0 (適中率 ≥ 5%を条件)	22%	(=5/23)	11%	(=4/37)	120

* 2019年10月31日 + 2018年10月31日

D:グリッドサイズ[]] Mf₀:前震侯補の下限規模,Tf:前震抽出の時間窓[日] Nf:前震抽出の地震数,Ta:予測期間[日],Mm₀:ターゲット地震の下限規模 <u>赤数</u>字は,この1年間で 値が変わったもの



第1図 過去1年間で成績に変化がみられた地域の予測成績.

Fig. 1 Prediction results for target mainshocks in each region where foreshock candidates or target mainshocks occurred after last year's report⁷⁾.



第2図 通算の予測成績の変化.

Fig. 2 Prediction result variation for each region since the prediction test began.



第3図 本モデルと定常時間 ETAS モデルによる予測確率の比較.

Fig. 3 Comparison of the occurrence probability values of a mainshock proposed by the present model (red bars) with the distribution of equivalent values by the stationary time-ETAS model (blue bars).



- 第4図 1000 個の時空間 ETAS 合成カタログを用いた場合の成績の分布と実データの成績の比較.
- Fig. 4 Prediction result distribution derived from applying the present model to the synthetic 1000 catalogs made by the stationary space-time ETAS model, and comparison with the results (red values) for the real data.



第5図 スタッキングにより得られた本震前の前震回数積算の合成カタログと実データでの比較.

Fig. 5 Cumulative number of foreshocks per mainshock obtained by stacking method for synthetic 1000 catalogs (black or blue lines) and its comparison with that for the real data (red line).