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(6): これまでの取りまとめと今後の課題

Earthquake forecasting method by supposing swarm-like activity to be possible foreshocks (6): summary so far and future issues

前田憲二 *・弘瀬冬樹・溜渕功史(気象研究所) (* 気象庁地震火山技術・調査課から併任) MAEDA Kenji*, HIROSE Fuyuki, and TAMARIBUCHI Koji (Meteorological Research Institute)

(*Additional post of Japan Meteorological Agency)

1. はじめに

本報告では前震活動に基づく予測モデル(以下,本予測モデル)¹⁾を用い,前回までの報告²⁾⁻⁶⁾ 以降の約2年間における予測結果を報告するとともに,本予測モデルを構築した当初の期間にお ける予測成績と当初の期間を含め最新の期間(~2021年9月)までの通算の予測成績などを取り まとめた.また,本予測モデルの予測効率を評価するため,定常時空間 ETAS モデル⁷⁾(以下単に ETAS モデルと呼ぶ)に基づく予測成績との比較を行うとともに,ETAS モデルによる合成地震カ タログを作成し,そのカタログと実カタログに本予測モデルを適用したときの成績の比較を行った. 最後に今後の課題についても触れる.

2. 前震活動に基づく予測モデルの成績(過去約2年間,当初最適化期間,および通算)

前回の報告⁶に引き続き 2019 年 11 月 1 日~2021 年 9 月 30 日の約 2 年間の本震発生の予測結果の調査を行った.今期間,ターゲット地震の発生の予測に成功した事例はなかった.各領域における予測結果の状況は以下のとおりである(第 1 図参照).

(a)日本海溝沿い3領域では、ターゲット地震が1回(2021/8/4 M6.0)発生し、その地震前に 地震活動はあったもののM5.0以上の地震は1回のみであり、前震候補とは判定されなかった.逆に、 今期間前震候補は2回発生したが、その後ターゲット地震は発生しなかった.(b)伊豆地域でもター ゲット地震が1回(2020/12/18 M5.0)発生したが、その地震前の活動は低調で、M3.0以上の地震 は15秒前の1回のみであり、前震候補とは判定されなかった。前震候補は今期間4回発生したが、 いずれもその後ターゲット地震は発生しなかった。(c)長野県北中部ではターゲット地震が3回 (2020/4/23 M5.5, 2020/5/19 M5.4, 2021/9/19 M5.3)発生した。このうち、前者2地震の前1日間に 地震活動がみられたが、いずれも前震候補の条件を満たさなかった。また、今期間は群発的活動が 活発で、前震候補となる地震が25回発生したが、いずれもその後ターゲット地震は発生せず、空 振りとなった。(d)九州中部ではターゲット地震は発生せず、また、前震候補は1回発生したが、 その後ターゲット地震は発生しなかった。(e)山陰地方ではターゲット地震も前震候補も発生し なかった。

予測対象領域におけるこれまでの予測成績を第2図にまとめた. 矢印の左側の数値はそれぞれの 領域の最適化期間(図中に表示)における成績を示し,右側の数値は最適化期間を含む2021年9 月30日までの通算の成績を示す. 最適化期間以降に適中した地震は2地震(図中の*参照)のみ であり,いずれの領域においても最適化期間以降の成績は低下したことが分かる.

第1表に最適化期間,通算期間,通算期間に対し再最適化を行った場合の成績の一覧表を記載す

る. 再最適化にあたってはパラメータのうち D, Mf₀, Mm₀ は当初の値に固定し, Tf, Nf, Ta のみ の最適化を行った. ここで, D, Mf₀, Mm₀, Tf, Nf, Ta はそれぞれセグメントサイズ(°), 前震 のマグニチュード下限,本震のマグニチュード下限,前震候補抽出の時間窓(日),前震候補抽出 の地震個数,アラーム期間(日)を表す. 再最適化の前後の成績を比較すると,九州中部と山陰地 域を除き予知率は向上しているものの,適中率は低下したことが分かる. これは,これらの地域で は前震候補の条件を緩めてより多くのアラームを出して予知率を上げた方が,たとえ空振りのア ラームが増えたとしても結果的に尤度が高くなり, Δ AIC 値が大きくなるためである.

なお,成績の評価には次の定義による指標を用い,いずれも大きいほど性能が高いことを示す.

- 予知率 (AR) = 予測されたターゲット数 (A) / 全ターゲット数 (C)
- 適中率 (TR) =適中したアラーム数/全アラーム数
- F 値=予知率 (AR) と適中率 (TR) の調和平均= 2/(1/AR+1/TR)
- 確率利得(PG)=アラーム時空間(B)内のターゲット発生率/全時空間(D)内のターゲットの 発生率 = (A/B)/(C/D) = (A/C)/(B/D) = 予知率/警報分率
- Δ AIC =定常ポアソンモデルによる AIC -予測モデルによる AIC

= 2*C*AR*log(PG)+2*C*(1-AR)*log((1-AR)/(1-AR/PG))-2

3. ETAS モデルによる予測結果との比較

本予測モデルの予測効率を評価するため,本予測モデルと,ETAS モデル⁷に基づく予測モデル(以下 ETAS 予測モデル) との予測成績の比較を行った(詳細は Hirose et al.⁸⁾参照).比較は気象庁カ タログから低周波地震以外のすべて地震を用い,そのデータに対し両モデルを作成することで行った.解析領域および対象期間,本予測モデルの最適パラメータ及び予測成績を第2表に示す.また, ETAS 予測モデルによる予測成績は以下の手順で求めた.

- 各領域について定常時空間 ETAS パラメータ θ 及び u(x,y) を求め、それに基づき、緯度・ 経度 0.01 度間隔で、毎日午前 0 時における地震発生強度 λ (t,x,y) [/day/degree²] を計算する.
- ② 予測期間を1日間とし、1日間は λ は変化しないものとして、評価空間 D°× D°の セグメントにおける地震発生強度 λ (t) [/day] を算出する.
- ③ G-R 則を仮定し、各セグメント内で1日以内にターゲット地震が1個以上発生する確率 P(N≥1)を算出する.
- ④ $P(N \ge 1)$ が、ある閾値 P_{th} 以上となる時空間セルに1日予測のアラームを発出し、アラーム ON/OFF の二値問題にする.
- ⑤ 閾値 P_{th} を 0.0001 ~ 1.0 まで 0.0001 刻みで変更し、Δ AIC が最大となる P_{th} を最適値とし、 その時の予測結果から予測成績を求める.

各領域について、本予測モデルと ETAS 予測モデルの予測成績を比較した図を第3図に示す.図 から分かるように、どの領域についてみても総合的な成績の良否を示す F 値とΔ AIC の指標につ いては、本予測モデルの方が高く、予測効率が良いことを示している.

4. ETAS モデルによる合成地震カタログと自然地震カタログとの比較

本予測モデルが ETAS モデルに基づく予測よりも有利であることを示す別の方法として, ETAS モデルによる合成地震カタログを作成し,そのカタログと実カタログに本予測モデルを適用したと きの成績の比較を行った(詳細は Hirose et al.⁸⁾参照).対象領域は岩手・宮城沖の領域と茨城沖の 領域の2領域とした.それぞれの領域において,気象庁カタログから1961年~2010年の期間の低 周波地震以外のすべてのデータを抽出して実カタログとした.合成カタログを作成するにあたって は、実カタログから推定されたパラメータで表現される定常時空間 ETAS モデル⁷¹を用い,規模分 布は実カタログから復元抽出することで1,000 個の合成カタログを作成した.作成したすべての合 成カタログに対し個別に本予測モデルを適用し,最適パラメータと対応する予測結果を求めるとと もに予測結果の分布を調べた.その結果を第4 図に示す.この図から本予測モデルを実カタログに 適用した場合の成績は、合成カタログに適用した場合に期待される成績の分布より良い方に外れて いることが分かる.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前の規格化された前 震回数積算図を比較すると、実カタログの方が前震活動の加速は大きかった(第5図).これらこ 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 比較的効率よく抽出している本予測モデルの方が ETAS モデルよりも予測に有利であることを示し ている.

5. まとめと今後の課題

(まとめ)

- 本予測モデルによる予測成績は地域,期間によって変化するが,これまでの成績は 予知率は22~68%,適中率は5~28% 程度である.
- 定常時空間 ETAS モデルを基にした予測より,本予測モデルの方が平均的に予測成績は 良い.
- 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. (今後の課題)
- ⇒ 複数の最適化期間に基づく予測の期待値とばらつきの調査
- ⇒ 最適値だけでなく '群発度' に応じた確率の計算による発生確率の時間変化の推定
- ⇒ 全国(海域と内陸に分割)の平均モデル,あるいは地域ごとに分割したモデルを寄せ集めた全国版の作成
- ⇒ スロースリップなど他の独立した情報を取り込んだモデルの高度化.

(前田 憲二・弘瀬 冬樹・溜渕 功史) MAEDA Kenji・HIROSE Fuyuki・TAMARIBUCHI Koji

参考文献

- 1) Maeda, K. (1996), The use of foreshocks in probabilistic prediction along the Japan and Kuril trenches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 242-254.
- 2) 気象研 (2016), 予知連会報, 95, 415-419.
- 3) 気象研 (2016), 予知連会報, 96, 476-480.
- 4) 気象研 (2017), 予知連会報, 98, 465-469.
- 5) 気象研 (2019), 予知連会報, 101, 492-494.
- 6) 気象研 (2020), *予知連会報*, 103, 356-360.
- Ogata, Y., & Zhuang, J. (2006), Space-time ETAS models and an improved extension, *Tectonophys.*, 413, 13-23.
- 8) Hirose, F., Tamaribuchi, K., & Maeda, K. (2021), Characteristics of foreshocks revealed by an earthquake forecasting method based on precursory swarm activity, *JGR*, **126**, https://doi.org/10.1029/2021JB021673.



(a) 日本海溝3領域

第1図 各領域における最近約2年間(2019年11月~2021年9月)の予測結果.予測が適中した地震はなかった. 吹き出しに見逃し及び空振りの数を示す.(a)日本海溝3領域,(b)伊豆領域.(続く)

Fig. 1 Forecast results in each region from 11/1/2019 to 9/30/2021. No target event was forecasted. Number of missed targets and false alarms are shown in balloons.
(a) 3 regions in Japan trench, (b) Izu region. (To be continued)



(d) 九州中部



(e) 山陰地方



- 第1図 (続き)(c)長野県北中部,(d)九州中部,(e)山陰地方
- Fig. 1 (Continued) (c) North-central part of Nagano, (d) Central part of Kyushu, (e) San'in region.



第2図 各領域及び期間における本予測モデルの予測成績の変化.矢印の左は当初の最適化期間の成績を、右は 2021年9月末までの通算の成績を示す.

Fig. 2 Forecast result variation for each region since the forecast test began. The left side of arrows indicates results for initial optimizing period, and the right for throughout the test period until 9/30/2021.



- 第3図 各領域における本予測モデル(赤実線)と定常時空間 ETAS による予測モデル(黒破線)との予測成績の比較. [Hirose et al.⁸⁾より抜粋,一部改変]
- Fig. 3 Comparison of the forecast performance between the present model (red lines) and the stationary space-time ETAS model (black broken lines) for each region. [Cited and partially modified from Hirose et al.⁸]



- 第4図 本予測手法を1000 個の定常時空間 ETAS 合成カタログに適用した場合の成績の分布と実データに適用した場合の成績の比較.上段:岩手・宮城沖の領域,下段:茨城沖の領域.[Hirose et al.⁸⁾より抜粋]
- Fig. 4 Forecast 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 (white arrows) for the real data. Black arrows indicate the median of results for ETAS catalogs. (top) Off Iwate and Miyagi region, (bottom) Off Ibaraki region. [Cited from Hirose et al.⁸⁾]



第5図 スタッキングにより得られた本震前の規格化された前震回数積算の ETAS 合成カタログ(青線)と実デー
 タ(赤線)との比較.小さな余震は除去されている.(a) 岩手・宮城沖の領域,(b) 茨城沖の領域.[Hirose et al.⁸⁾より抜粋]

Fig. 5 Cumulative number of foreshocks per mainshock obtained by stacking method for synthetic 1000 ETAS catalogs (blue line) and its comparison with that for the real data (red line). Small aftershocks are removed. (a) Off Iwate and Miyagi region, (b) Off Ibaraki region. [Cited from Hirose et al.⁸]

- 第1表 各地域・期間ごとに用いた予測パラメータと予測成績.上段:当初の最適化期間に対するパラメータと成績.
 中段:上段の最適化期間を含み最新の期間(2021年9月30日)までの通算成績.パラメータは上段と同じ.下段:中段の期間と同じ期間に対して再最適化により求めたパラメータを適用したときの成績.ただし,再最適化において D, Mf₀, Mm₀ は当初の値に固定し, Tf, Nf, Ta のみの最適化を行った.ここで, D, Mf₀, Mm₀, Tf, Nf, Ta はそれぞれセグメントサイズ(°),前震のマグニチュード下限,本震のマグニチュード下限,前震候補抽出の時間窓(日),前震候補抽出の地震個数,アラーム期間(日)を表す.
- Table 1Optimum parameters and forecast performance for each region and periods. Top: results for the initially optimized
period. Middle: results for the total period up to 9/30/2021 using the same parameters as the top. Bottom: results
obtained by re-optimized parameters for the middle table. Note that only parameters of Tf, Nf, and Ta are
re-optimized.

		最適化期間	の成績	※各表中の確率利得は地震が1個以上発生したせ グメントを対象とした背景地震発生率から算出				
領域	期間	前震条件と本震M (D,Mf₀,Tf,Nf,Ta), Mm₀	予知率	適中率	確率利得	ΔΑΙC		
日本海溝3領域	1961~2010/12/31	0.5, 5.0, 10, 3, 4, 6.0	11/30 = 37(%)	14/50 = 28(%)	382	111		
伊豆地域	1977~2013/6/30	0.2, 3.0, 3, 3, 5, 5.0	44/65 = 68(%)	44/194 = 23(%)	357	468		
長野県北中部	1998~2014/12/31	0.1, 2.0, 1, 5, 5, 5.0	5/11 = 45(%)	8/69 = 12(%)	1503	64		
九州中部	1970~2016/5/31	0.1, 3.0, 10, 3, 12, 5.0	4/13 = 31(%)	3/43 = 7(%)	1032	47		
山陰	1977~2016/12/31	0.1,3.0,1,2,24,5.0 (適中率≧5%を条件)	5/21 = 24(%)	4/37 = 11 (%)	349	48		

通算期間の成績

領域	期間	前震条件と本震M (D,Mf₀,Tf,Nf,Ta), Mm₀	予知率	適中率	確率利得	ΔΑΙϹ
日本海溝3領域	1961~2021/9/30	0.5, 5.0, 10, 3, 4, 6.0	13/49 = 27(%)	16/71=23(%)	235	118
伊豆地域	1977~2021/9/30	0.2, 3.0, 3, 3, 5, 5.0	44/66 = 67(%)	44/203 = 22(%)	412	480
長野県北中部	1998~2021/9/30	0.1, 2.0, 1, 5, 5, 5.0	5/18 = 28(%)	8/107 = 7(%)	819	57
九州中部	1970~2021/9/30	0.1, 3.0, 10, 3, 12, 5.0	4/14 = 29(%)	3/55 = 5(%)	899	46
山陰	1977~2021/9/30	0.1,3.0,1,2,24,5.0 (適中率≧5%を条件)	5/23 = 22(%)	4/39 = 10 (%)	342	48

通算期間の再最適化による成績

(※D,Mf₀は固定しTf,Nf,Taを再最適化)

領域	期間	前震条件と本震M (D,Mf₀,Tf,Nf,Ta), Mm₀	予知率	適中率	確率利得	ΔΑΙC
日本海溝3領域	1961~2021/9/30	0.5, 5.0, <mark>3, 2</mark> , 4, 6.0	17/ 49 = 35(%)	16/ <mark>101</mark> = <mark>16</mark> (%)	190	149
伊豆地域	1977~2021/9/30	0.2, 3.0, <mark>1, 2, 4</mark> , 5.0	<mark>46</mark> /66 = <mark>70(</mark> %)	60/312 = 19(%)	329	484
長野県北中部	1998~2021/9/30	0.1, 2.0, <mark>4</mark> , 5, <mark>4</mark> , 5.0	7/18 = <mark>39</mark> (%)	<mark>9/166</mark> = 5(%)	968	83
九州中部	1970~2021/9/30	0.1, 3.0, <mark>7</mark> , 3, 12, 5.0	4/14 = 29(%)	<mark>4/47 = 9(%)</mark>	1041	47
山陰	1977~2021/9/30	0.1,3.0,1,2,24,5.0 (適中率≧5%を条件)	5/23 = 22(%)	4/39 = 10 (%)	342	48

※下段の赤字は中段から変わった数値

第2表 定常時空間 ETAS に基づく予測モデルとの比較のため,各領域および期間の新基準データに対し新たに求めた本予測モデルの最適パラメータ及び予測成績.[Hirose et al.⁸⁾より引用]

 Table 2
 Optimum parameters and results obtained by applying the present method to the revised regions and the catalog.

 [Cited from Hirose et al.⁸⁾]

		Parameter					Al	Alarm rate		Truth rate				
Area	Period	D (°)	M_{f0}	$T_{\rm f}({\rm days})$	N_{f}	T_{a} (days)	M_{m0}	(%)		(%)		F (%)	PG	ΔAIC
Off Iwate and Miyagi	1961-2010	0.5	5.0	9	3	4	6.0	33.3	(= 8/24)	24.4	(= 10/41)	28.2	340.5	78.3
Off Ibaraki	"	"	"	3	2	1	"	66.7	(= 4/6)	30.8	(= 4/13)	42.1	1567.5	52.5
Central Honshu	1998-2019	0.2	2.0	1	5	5	5.0	40.0	(= 6/15)	9.6	(= 7/73)	15.5	439.9	61.9
Izu Islands	1977-2019	0.2	3.0	1	2	4	5.0	72.3	(= 47/65)	20.1	(= 63/314)	31.4	338.0	499.2