

12 - 3 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)

Earthquake forecasting method by supposing swarm-like activity to be possible foreshocks: its performance for recent seismicity data

前田憲二*・弘瀬冬樹 (気象研究所)

Kenji Maeda* and Fuyuki Hirose (Meteorological Research Institute)

(*現気象庁, presently Japan Meteorological Agency)

【はじめに】

本震発生前に前震を識別することは一般に困難であるが、続発的に地震が発生しやすい特定の地域では本震前に群発的な地震活動がみられる場合があり、我々はその統計的性質から本震の発生を経験的に予測する手法を開発してきた¹⁾⁻⁵⁾。第208回地震予知連絡会(2015年8月21日)では、この手法により比較的効率よく予測できる地域として、日本海溝沿いの3領域、伊豆半島沖の領域、長野県北中部の領域を指摘した⁴⁾。第210回(2016年02月22日)ではこれらの領域のその後の予測状況を報告するとともに、長野県北中部領域に対して得られている最適パラメータを日本の内陸地震に対しても援用して適用した場合の事後予測結果についても参考として報告した⁵⁾。本報告では、第210回で報告して以降の各領域の地震発生状況を述べるとともに、2016年に発生した熊本地震(4/16, M7.3)および鳥取県中部の地震(10/21, M6.6)に関連し、九州中部および山陰の領域についても同様の手法を用いて事後予測した場合の予測効率についても新たに調査したので、それらの結果も述べる。また、日本内陸全域については、伊豆半島沖の領域に対して求めたものと同じパラメータを援用して予測手法を適用した場合の結果などについても参考までに報告する。

【予測手法および評価指標】

前震候補選択の手順は、1) 震源カタログから本震とのマグニチュードの差が1.0以上の余震活動を除去し、2) 特定の大きさ(緯度 $D^\circ \times$ 経度 D°)の小領域の中で、特定の規模(Mf_0)以上の地震が特定の期間(Tf 日)の間に特定の数(Nf)だけ発生した時、前震(群)の候補とみなし、より大きな地震の発生を予測する。予測適中の判定は、前震候補発生後、2)で設定した小領域の中で特定の期間(Ta 日)内に本震(Mm_0 以上)が発生した場合に真の前震(群)であったと判定し、予測が適中したとする。 Mm_0 以上の本震に対し予測対象地域ごとに予測成績が最良となるように D , Mf_0 , Tf , Nf , Ta の最適パラメータを求めたが、そのための評価指標としては、ポアソンモデルによる予測と前震候補による予測モデルとのAICの差($dAIC$)を主に用いた。また、予知率(AR : 予測対象とする本震のうち予測された本震の割合)や適中率(TR : 前震候補のうち真の前震の割合)、確率利得(PG : 全時空間における本震の平均発生率に対する警報時空間における本震の発生率の比)も補助的に用いた。

【予測結果】

本手法を用いて本震発生の予測効率の調査を行った対象領域を第1図に示す。緑色で囲んだ領域はこれまですでに対象としていた領域であり、桃色で囲われた領域が今回新たに対象とした領域である。これらの予測対象領域における各解析期間に対し、本手法を適用した場合の事後予測成績の

一覧を第1表に示す。以下に各領域のこれまでの予測成績の状況を述べる。

1) 日本海溝沿い3領域, 伊豆半島沖の領域, 長野県北中部の領域 (第2図)

日本海溝沿い3領域については, 今期間 (第210回報告以降 2017/1/31 まで) 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。伊豆半島沖では 2016年7月24日に M3.5の地震が, 長野県北中部では 2016年9月4日に M2.2の地震が発生し, それぞれ前震候補条件を満たす地震であったが, いずれもその後の警報期間中に本震は発生しなかったため, 適中率は前回報告に比べ若干下がった。なお, 両領域ともに予測対象地震は発生しなかったため, 予知率には変化はない。第2図に長野県北中部の領域の解析対象期間における予測結果を表す震央分布を示す。

2) 九州中部の領域 (第3図)

九州中部の領域について, 2016年5月までのデータを用い, 前震候補抽出の最適化を行った場合の事後予測の結果を第1表と第3図に示す。熊本地震前の3月までのデータを用いても最適な前震条件は変わらず, 熊本地震の本震直前の活動は今回得られた前震条件を満たすことがわかった。

3) 山陰地方の領域 (第4図)

山陰地方については 2016年末までのデータを用いた結果を第1表と第4図に示す。最適な前震条件を一つに絞れなかったため, 表には dAIC 重視と適中率重視の2つの場合のパラメータを用いた結果を示すが, いずれの場合も 2016年鳥取県中部の地震 (M6.6) の直前の活動は前震条件を満たした。しかし, 2015年末までのデータを用いて前震条件を求めた場合は満たさなくなる。

4) 日本の内陸地域 (第5図)

日本の内陸地域 (伊豆地域を除く) について, 伊豆半島沖の領域に対して求めたパラメータを援用した場合の予測成績の調査結果を第1表と第5図に示す。表には長野県北中部の領域に対して求めたパラメータを援用した場合の結果も示した。予知率および適中率共に伊豆半島沖のパラメータを用いた方が成績がよい。この場合, 今期間では熊本地震 (2016/4/16, M7.3) と薩摩半島西方沖の地震 (2016/5/7, M5.5) が予測された本震となるが, 全期間の適中率は5%以下と高くない。

【まとめ】

前震を伴いやすい領域および日本の内陸地域について, 前回の報告以降の期間を含めて前震活動に基づく地震発生予測の成績を調査した。その結果, 各領域および期間における予測成績について, 第1表のような結果が得られた。本手法を予報等に活用するためには, 特に適中率が低い場合についての更なる検討が必要である。

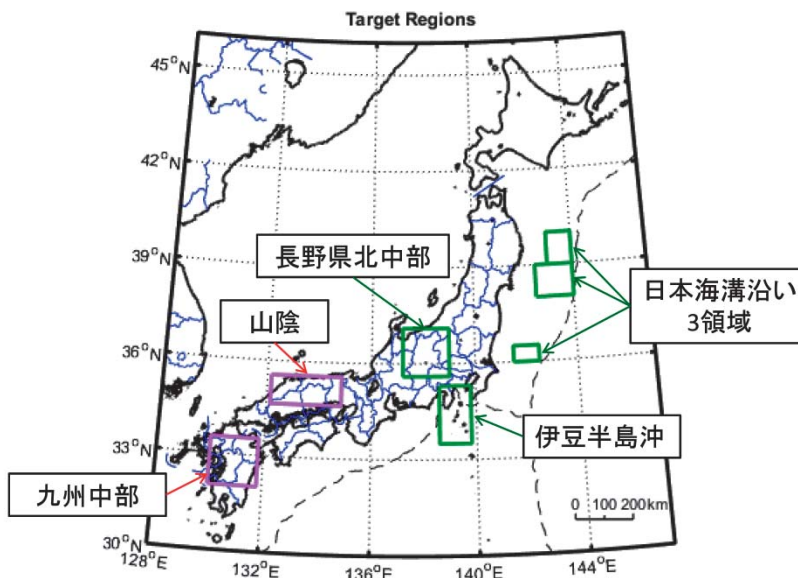
参考文献

- 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) 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.
- 3) 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.

第1表 各地域の予測結果. 事後予測期間, 前震パラメータ, 予知率, 適中率および確率利得を示す. 最適化されていない地域に対する結果は参考値.

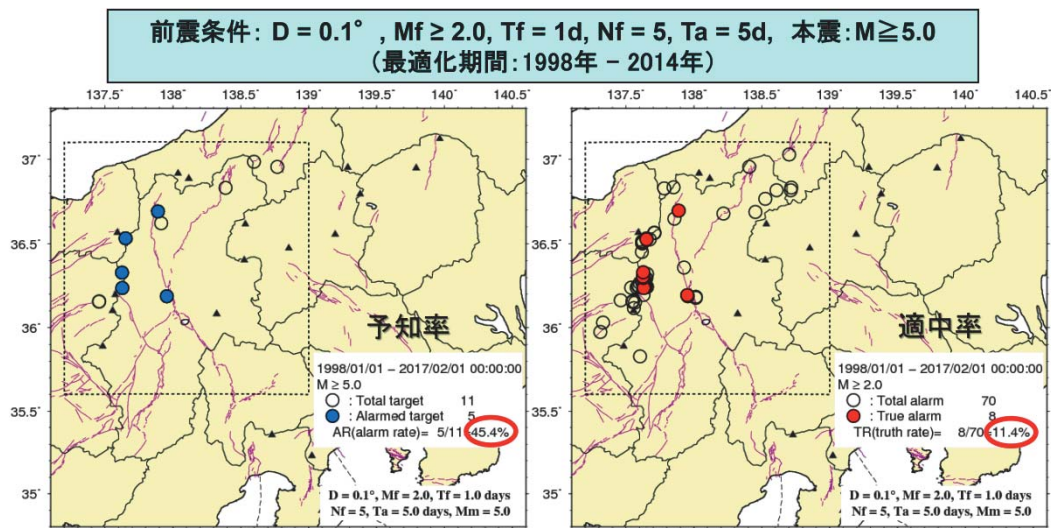
Table 1 Prediction results for each region.

領域	事後予測期間	前震パラメータと本震 M _D , M _{f0} , T _f , N _f , T _a , M _{m0} (最適化期間)	予知率	適中率	確率利得 (対象:最適化期間)
日本海溝3領域	1961~2017/1/31	0.5, 5.0, 10, 3, 4, 6.0 (1961-2010)	13/48 = 27(%)	17/77 = 22(%)	380
伊豆半島沖	1977~2017/1/31	0.2, 3.0, 3, 3, 5, 5.0 (1977-2013/6)	44/65 = 68(%)	44/197 = 22(%)	225
長野県北中部	1998~2017/1/31	0.1, 2.0, 1, 5, 5, 5.0 (1998-2014)	5/11 = 45(%)	8/70 = 11(%)	333
九州中部	1970~2017/1/31	0.1, 3.0, 10, 3, 12, 5.0 (1970-2016/5)	4/13 = 31(%)	3/46 = 6.5(%)	365
山陰	1977~2017/1/31	0.1, 2.0, 5, 2, 12, 5.0 (1977-2016)	9/21 = 43(%)	11/492 = 2.2(%)	89
		0.1, 3.0, 1, 2, 24, 5.0 (同上, 適中率≥5%を条件)	5/21 = 24(%)	4/37 = 11(%)	120
日本内陸 (参考値)	1998~2017/1/31	0.1, 2.0, 1, 5, 5, 5.0 (長野から援用)	8/84 = 9.5(%)	10/496 = 2.0(%)	—
	1977~2017/1/31	0.2, 3.0, 3, 3, 5, 5.0 (伊豆から援用)	23/190 = 12(%)	30/657 = 4.6(%)	—



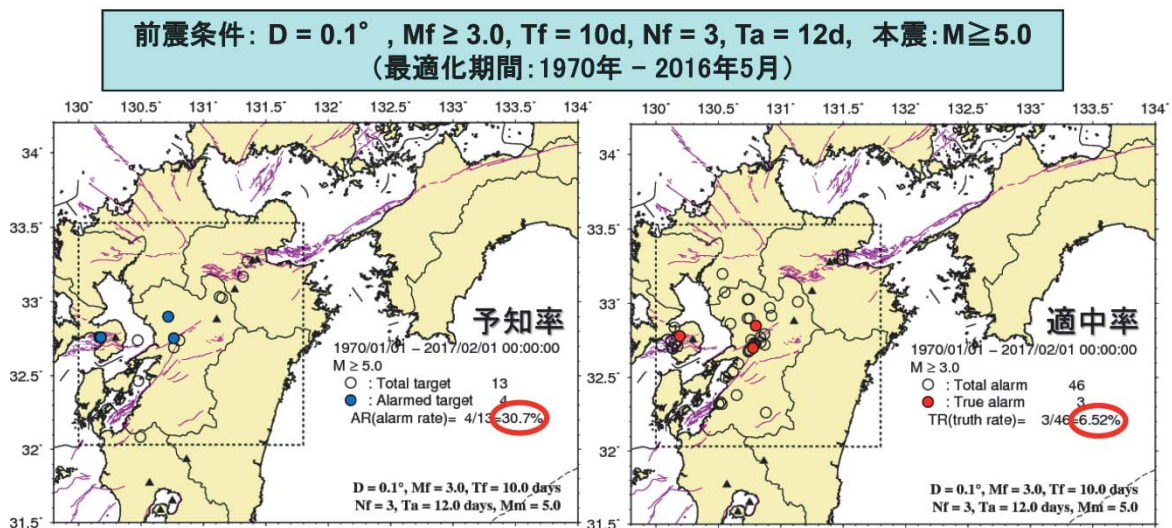
第1図 調査対象とした領域. 緑色の領域はこれまでにパラメータの最適化の調査を終えた領域で, 桃色の領域は今回新たに調査した領域.

Fig.1 Locations of the target regions. Green and pink rectangles represent regions already and newly investigated on optimized parameters, respectively.



第2図 長野県北中部領域（点線内）の1998年1月1日から2017年1月31日までの期間における $M \geq 5.0$ の本震に対する予測成績。前震候補を定義する最適化されたパラメータ値と最適化期間を図の上に示す。（左）予測対象の本震○と予測された本震●の震央分布図。（右）前震候補○と予測が適中した真の前震●の震央分布図。

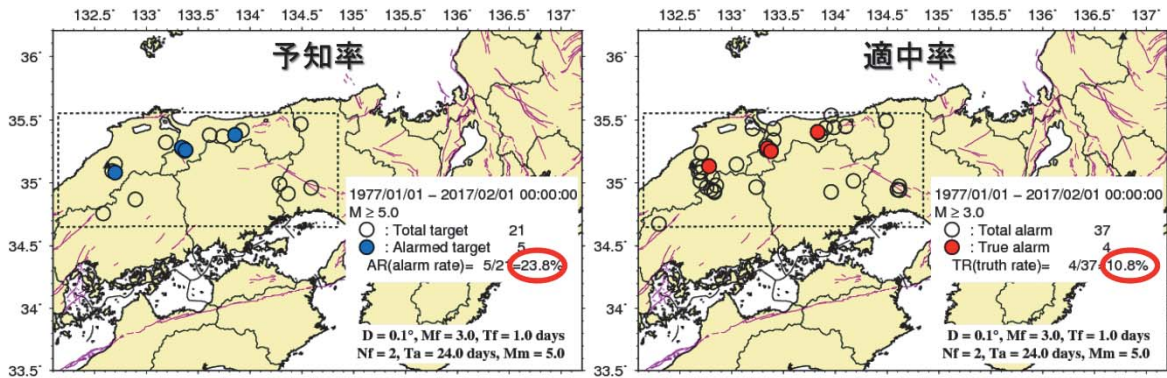
Fig.2 Prediction results for $M \geq 5.0$ mainshocks in the north-central Nagano prefecture region (dotted rectangle) from 1998/01/01/ to 2017/01/31. The optimized foreshock parameter values and the period for optimization are listed at the top. (Left) Epicentral distribution of mainshocks preceded by foreshocks (blue solid circles) and by no foreshocks (open circles). (Right) Epicentral distribution of foreshock candidates followed by a mainshock (red solid circles) and by no mainshock (open circles).



第3図 九州中部領域（点線内）の1970年1月1日から2017年1月31日までの期間における $M \geq 5.0$ の本震に対する予測成績。前震の最適パラメータは図の上部に示す。凡例の説明は第2図と同じ。

Fig.3 Prediction results for $M \geq 5.0$ mainshocks in the central Kyushu region (dotted rectangle) from 1970/01/01/ to 2017/01/31. Optimized parameters are shown at the top. Legends are the same as those in Fig. 2.

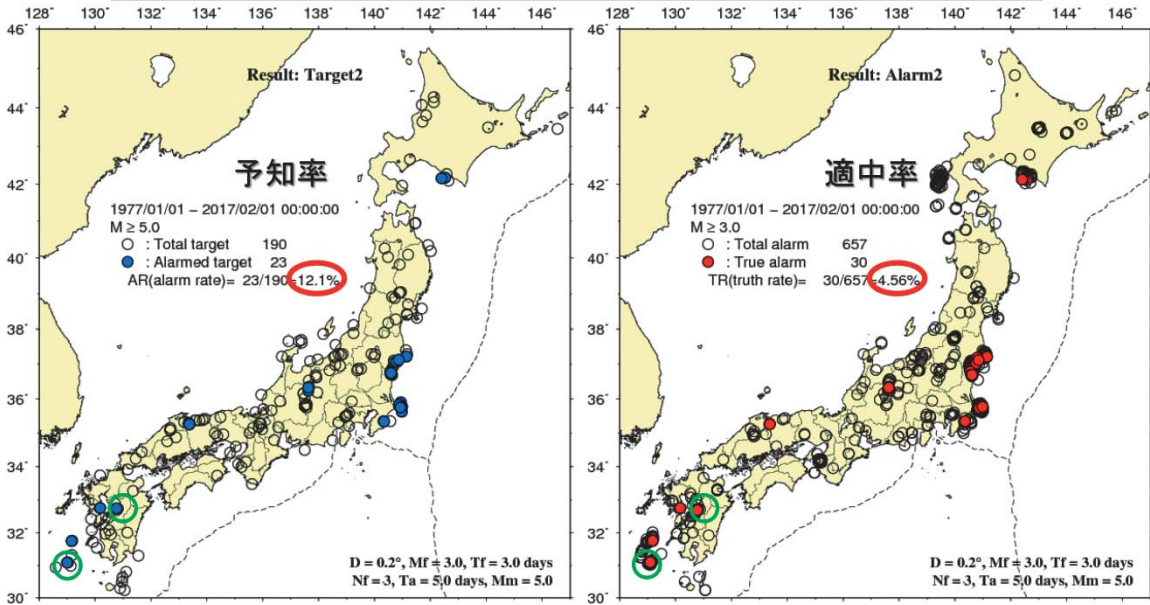
適中率重視のパラメタ: $D = 0.1^\circ$, $M_f \geq 3.0$, $T_f = 1d$, $N_f = 2$, $T_a = 24d$, 本震: $M \geq 5.0$
 (最適化期間: 1977年 - 2016年)



第4図 山陰領域(点線内)の1977年1月1日から2017年1月31日までの期間における $M \geq 5.0$ の本震に対する予測成績。前震の最適パラメータは図の上部に示す。凡例の説明は第2図と同じ。

Fig.4 Prediction results for $M \geq 5.0$ mainshocks in the San-in region (dotted rectangle) from 1977/01/01/ to 2017/01/31. Optimized parameters are shown at the top. Legends are the same as those in Fig. 2.

前震条件: $D = 0.2^\circ$, $M_f \geq 3.0$, $T_f = 3d$, $N_f = 3$, $T_a = 5d$, 本震: $M \geq 5.0$
 (伊豆半島沖における最適化パラメータを援用)



第5図 日本の内陸地域で1977年1月1日から2017年1月31日までの期間における $M \geq 5.0$ の本震に対する予測結果。前震の最適パラメータは伊豆半島沖領域のものを援用。凡例の説明は第2図と同じ。

Fig.5 Prediction results for $M \geq 5.0$ mainshocks inland Japan from 1977/01/01/ to 2017/01/31. Used parameters are those for off the Izu peninsula region. Legends are the same as those in Fig. 2.