

12-4 前震活動に基づく地震発生の経験的予測

Empirical forecast of occurrence of mainshocks based on foreshock activities

前田憲二・弘瀬冬樹 (気象研究所)

Kenji Maeda and Fuyuki Hirose (Meteorological Research Institute)

【はじめに】

前震活動は本震の発生を予測するための手掛かりとして古くから期待されている。しかし、今のところ前震活動と本震との物理的因果関係は十分には解明されておらず、本震が発生したのちに初めて前震だったと指摘される場合がほとんどであり、現実的には本震発生前に前震を識別し、本震発生を高い精度で予測することは一般に困難である。そこで、確率論的アプローチとして、例えば Ogata らは前震の統計解析を通じクラスターの地震活動が前震である確率を求め、クラスターの程度による本震発生確率の時間変化の評価手法を提示した¹⁾。また我々は、続発的に地震が発生しやすい特定の地域では本震前に活発な前震活動がみられる場合があることに着目し、その統計的性質から本震の発生を経験的に比較的効率よく予測する手法を開発してきた。そのような地域として、日本海溝沿いの特定の地域^{2),3)}、伊豆半島沖の地域⁴⁾、長野県北中部の地域⁵⁾がある。ここではこれらの地域について、前震活動の統計的解析を基に、それぞれの領域でどのようなまとまった地震活動を前震活動とみなせば経験的に本震の予測に効率的であるかについて述べ、その場合の本震発生の予測効率について報告する。

【予測手法】

前震識別の手順および予測効率の指標について以下に示す。

- 1) 震源カタログのデクラスター処理を行い、余震を除去する²⁾。余震定義の震央距離と時間は本震の規模に依存して変化させた。ただし、本震との規模の差が 1.0 以下の地震は除去しないで残すこととする。これは、本震との規模の差が小さい余震は引き続き発生する可能性のあるより大きな地震との関連性が高い、という考えによる。
- 2) 特定の大きさのセグメント (緯度 $D^\circ \times$ 経度 D°) 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) の候補とする。
- 3) その後特定の期間 (Ta 日) を警報期間とし、前震候補と同じセグメント内で警報期間中に本震が発生した場合に真の前震 (群) であったと判定する。
- 4) この前震 (群) の定義において、 D , Mf_0 , Tf , Nf , Ta をパラメータとして、本震 (規模 Mm_0 以上) を予測するために効率のよい前震 (群) のパラメータをグリッドサーチにより求める。

予測効率の指標としては、本震は時空間的に一定の発生率を持ってランダムに発生すると仮定したモデルを基準とし、前震候補による予測時空間における本震発生率が他の時空間より高いとする予測モデルとの 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。

【データおよび解析結果】

1) 日本海溝沿いの特定の地域

日本海溝から陸よりの海域においては、特に岩手沖、宮城沖、茨城沖の 3 領域で前震活動を伴う本震の発生する割合が比較的高い。そこで、この 3 領域内の地震活動について 1961 年から 2010 年

までの気象庁震源カタログを使用し、M6.0以上、深さ100km以浅の本震の発生を予測するのに効率的な前震候補選択のパラメータをD (0.25, 0.5, 1.0°), Mf_0 (4.0, 5.0, 6.0), Tf (10日に固定), Nf (1, 2, ..., 10個), Ta (1, 2, ..., 10日)の範囲内でグリッドサーチにより求めた。その結果、最適解としてD=0.5°, Mf_0 =5.0, Tf=10日, Nf=3, Ta=4日のパラメータが得られ、この時、予知率=38%(=11/29), 適中率=30%(=13/44), PG=380, dAIC=115であった。この前震パラメータを用い、1961年から2015年7月28日までの期間の予測を行った場合の予測成績を第1図に示す。この場合の予知率は27%(=13/48)であり、適中率は22%(=17/77)であった。

2) 伊豆半島沖の地域

同様に、伊豆半島沖の地域について、1977年から2013年6月までの気象庁震源カタログを用い、M5.0以上、深さ50km以浅の本震の発生予測に効率的な前震パラメータをD (0.1, 0.2, 0.3°), Mf_0 (3.0, 4.0, 5.0), Tf (1, 3, 5, 10日), Nf (1, 2, ..., 30個), Ta (1, 2, ..., 20日)の範囲内でグリッドサーチにより求めた。その結果、最適解としてD=0.2°, Mf_0 =3.0, Tf=3日, Nf=3, Ta=5日のパラメータが得られ、この時、予知率=68%(=44/65), 適中率=22%(=42/192), PG=225, dAIC=473であった。この前震パラメータを用い、1977年から2015年7月28日までの期間の予測を行った場合の予測成績を第2図に示す。この場合の予知率は68%(=44/65)であり、適中率は22%(=42/194)であった。

3) 長野県北中部の地域

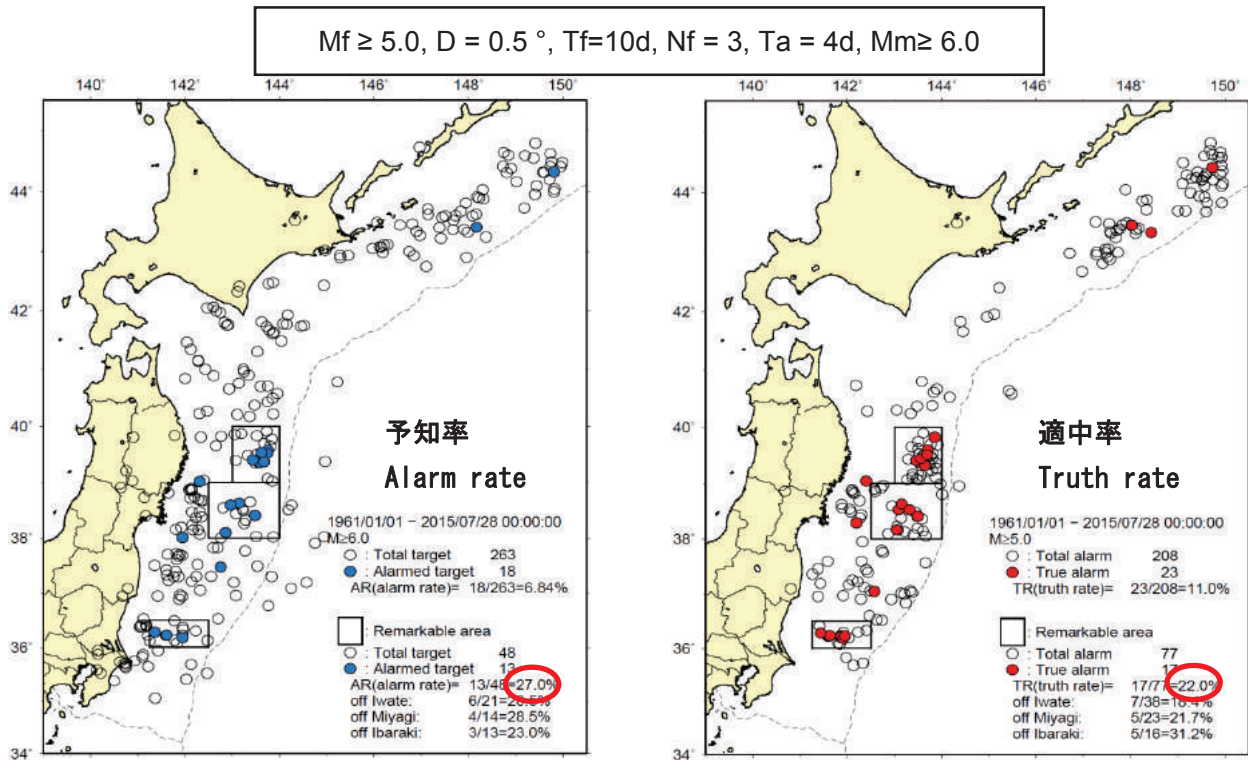
長野県北中部の地域について、1998年から2014年までの気象庁震源カタログを用い、M5.0以上、深さ30km以浅の本震の発生予測に効率的な前震パラメータをD (0.1, 0.2, 0.3°), Mf_0 (1, 1.5, 2, 2.5, 3), Tf (1, 2, 3, 5, 10日), Nf (1, 2, ..., 30個), Ta (1, 2, ..., 30日)の範囲内でグリッドサーチにより求めた。その結果、最適解としてD=0.1°, Mf_0 =2.0, Tf=1日, Nf=5, Ta=5日のパラメータが得られ、この時、予知率=45%(=5/11), 適中率=11%(=8/70), PG=333, dAIC=66であった。この前震パラメータを用い、1998年から2015年7月28日までの期間の予測を行った場合の予測成績を第3図に示す。この場合の予知率は45%(=5/11)であり、適中率は11%(=8/70)であった。

【まとめ】

前震を伴いやすい3つの地域について、本震を予測するために効率的な前震(群)を選択するため、D, Mf_0 , Tf, Nf, Taをパラメータとして、前震候補の選択基準を地域ごとに求めた。その結果、最適な前震候補の選択パラメータは地域によって異なり、本震発生の予測効率も予知率は30~70%程度、適中率は10~20%程度と地域によって差がみられることが分かった。

参考文献

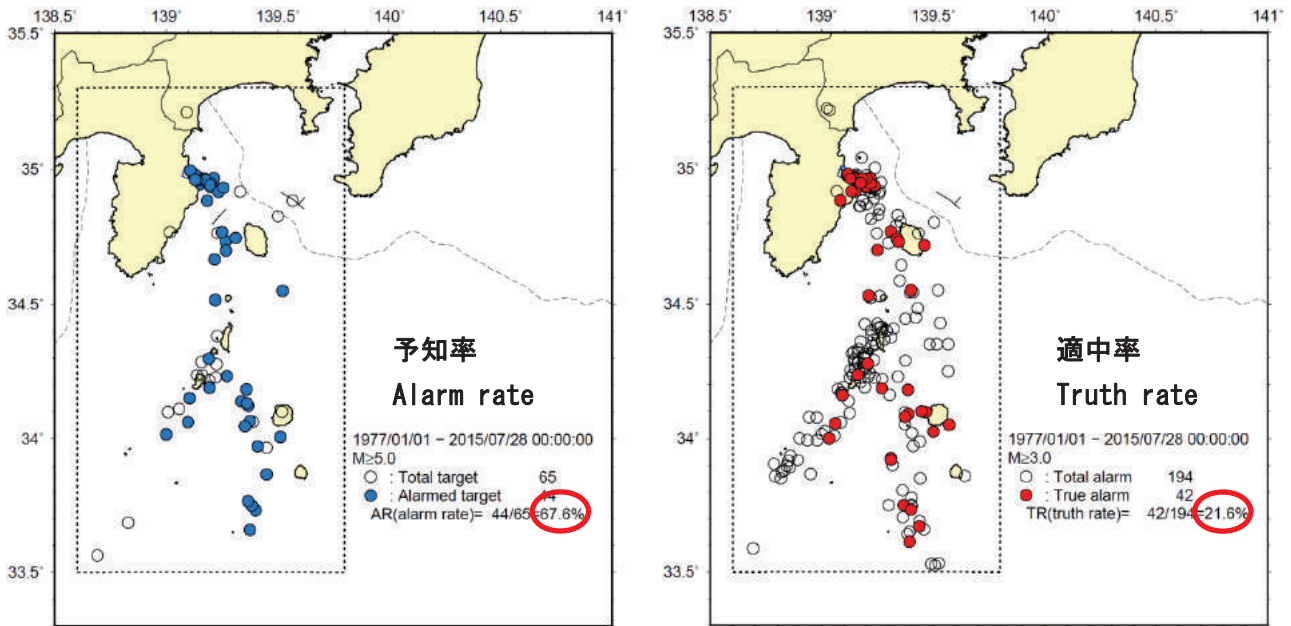
- 1) Ogata and Katsura (2012), Prospective foreshock forecast experiment during the last 17 years, *Geophys. J. Int.*, 191, 1237-1244.
- 2) Maeda, K. (1996), The use of foreshocks in probabilistic prediction along the Japan and Kuril trenches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 242-254.
- 3) 前田憲二・弘瀬冬樹 (2012), 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.
- 4) Maeda, K. and F. Hirose (2014), Prediction performance of empirically defined foreshocks in the Izu region, Japan Geoscience Union Meeting 2014, SSS01-06.
- 5) 前田憲二・弘瀬冬樹 (2015), 前震活動に基づく地震発生の経験的予測—長野県北中部地域への適用—, 日本地球惑星科学連合2015年大会, SSS27-07.



第1図 日本海溝沿いの地域に対する1961年1月1日から2015年7月28日までの期間における $M \geq 6.0$ の本震に対する予測結果. 図の上には前震候補を定義する最適パラメータ値を示す. (左) 予測対象の本震○と予測された本震●の震央分布図. 四角形で囲まれた3領域について, 予測対象本震のうち予測された割合を表す予知率は約27% (=13/48). (右) 前震候補○と予測が適中した真の前震●の震央分布図. 四角形で囲まれた3領域について, 前震候補のうち真の前震の割合を表す適中率は約22% (=17/77).

Fig.1 Prediction results for $M \geq 6.0$ mainshocks along the Japan trench region from 01/01/1961 to 07/28/2015. The optimized foreshock parameter values are listed at the top. (Left) Epicentral distribution of mainshocks preceded by foreshocks (solid circles) and by no foreshocks (open circles). The alarm rate which denotes the fraction of alarmed mainshocks for three square regions enclosed by solid lines is about 27% (=13/48). (Right) Epicentral distribution of foreshock candidates followed by a mainshock (solid circles) and by no mainshock (open circles). The truth rate which denotes the fraction of foreshock candidates followed by a mainshock for three square regions is about 22% (=17/77).

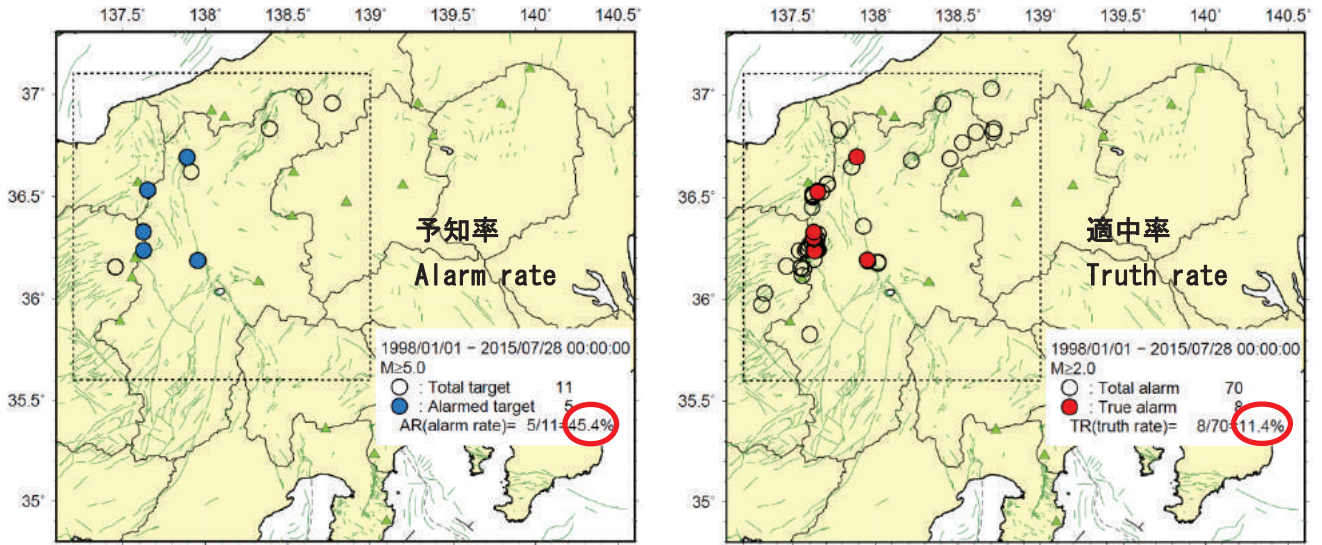
$M_f \geq 3.0, D = 0.2^\circ, T_f = 3d, N_f = 3, T_a = 5d, M_m \geq 5.0$



第2図 伊豆半島沖の地域に対する1977年1月1日から2015年7月28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. 図の上には前震候補を定義する最適パラメータ値を示す. 図の説明は第1図と同じ. (左) 点線で囲まれた領域における予知率は約68% (=44/65). (右) 点線で囲まれた領域における適中率は約22% (=42/194).

Fig.2 Prediction results for $M \geq 5.0$ mainshocks in the Off Izu Peninsula region from 01/01/1977 to 07/28/2015. The optimized foreshock parameter values are listed at the top. Refer to the explanation of Figure 1. (Left) The alarm rate in the dotted square region is about 68% (=44/65). (Right) The truth rate is about 22% (=42/194).

$M_f \geq 2.0, D = 0.1^\circ, T_f = 1d, N_f = 5, T_a = 5d, M_m \geq 5.0$



第3図 長野県北中部の地域に対する1998年1月1日から2015年7月28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. 図の上には前震候補を定義する最適パラメータ値を示す. 図の説明は第1図と同じ. (左)点線で囲まれた領域における予知率は約45% (=5/11). (右)点線で囲まれた領域における適中率は約11% (=8/70).

Fig.3 Prediction results for $M \geq 5.0$ mainshocks in the Northcentral Nagano Prefecture from 01/01/1998 to 07/28/2015. The optimized foreshock parameter values are listed at the top. Refer to the explanation of Figure 1. (Left) The alarm rate in the dotted square region is about 45% (=5/11). (Right) The truth rate is about 11% (=8/70).