

## 12-9 マグニチュードと時空間情報に基づく前震確率評価モデルの識別性能

### Foreshock Discrimination Model Based on Magnitudes and Spatio-temporal Information and its Predictive Performance

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

任意の地震群は、群内の地震のマグニチュード差や時空間的距離の分布形に見られる特徴及び地域性に基づき、前震群である確率を本震が起こる前に評価することができる。第 1a 図に示す Single-link 法<sup>1)</sup>に従い地震群を構成し、構成した地震群ごとに群内の最大地震を本震、本震の前と後の群内地震をそれぞれ前震、余震と定義する。そして、第 1b 図に示すように、活動中の地震群が 30 日以内に本震を起こす前震群である確率を評価するための統計モデルを構築し、その識別性能を検証する。

地震群のマグニチュード差や時空間的距離に関する特徴は、地震群内の地震数  $N$  と最大マグニチュード  $M_1$  に依存して変化するものの、その 2 つが同条件の下では前震群と他の地震群の間に相対的な傾向の違いがある。第 2 図では群内の最大マグニチュード  $M_1$  と二番目に大きいマグニチュード  $M_2$  の差  $\Delta M$ 、第 3 図では地震群の継続期間  $T$  (日)、第 4 図では群内の平均震央間距離  $D$  (km) の各特徴について、地震数  $N$  と最大マグニチュード  $M_1$  の範囲ごとに、前震群と他の地震群の分布の仕方に違いを見ることができる。

以上の特徴に、地震群の中心経度  $X$ 、緯度  $Y$  の位置に依存する前震確率情報（地域性）を加えて、ある地震群について、群内の最新地震から 30 日以内の本震発生確率を本稿での前震確率と定義し、次式に基づいて評価する。

$$\text{logit } p = g(X, Y) + f_1(N, M_1, \Delta M) + f_2(N, M_1, T) + f_3(N, M_1, D) + \alpha_s + \varepsilon, \quad \text{前震確率} = E_e[p]$$

ここで、 $\text{logit } p = \log \{p/(1-p)\}$  は  $p$  の取る値を  $0 < p < 1$  の範囲へ限定するロジット関数であり、このとき右辺の各項はオッズ (odds) の自然対数を表すものと解釈される。右辺第 1 項  $g(X, Y)$  は地域性だけに依存したベースラインであり薄板スプライン関数により推定される。また、 $f_1(N, M_1, \Delta M)$ ,  $f_2(N, M_1, T)$ ,  $f_3(N, M_1, D)$  は第 2 図から第 4 図に示した各特徴の組合せに基づくオッズの自然対数を、それぞれ 3 次スプライン関数により表現した項である。さらに、特異な地震群の影響による推定の不安定化を抑えるために、以上の項に含まれない地震群固有のオッズ（地震群  $s$  ごとの変量効果）を  $\alpha_s$  と表し、最後に各項の推定誤差をまとめた正規ノイズ  $\varepsilon$  を加えた。前震確率は、推定誤差  $\varepsilon$  が正規分布に従いランダムに変化する中での  $p$  の期待値  $E_e[p]$  (ベイズ予測) として評価することで、予測の安定化を図った。

1926 年 1 月 1 日から 1999 年 12 月 31 日までの気象庁震源カタログによる上の評価式の推定結果を第 5 図および第 6 図に示す。第 5 図の地域差の推定結果からは、主に伊豆半島沖と東北沖において前震確率が高くなっている。また、第 6a 図からはマグニチュード差  $\Delta M$  が小さいほど前震確率が高く、第 6b 図からは継続期間  $T$  が短いほど前震確率が高く、第 6c 図からは平均震央間距離が長いほど若干前震確率が高くなっており、この傾向は地震数  $N$  によって変化していることがわかる。な

お、第 6 図に共通する特徴として、最大マグニチュード  $M_1$  が小さいほど前震確率が高くなっているが、これは、 $M_1$  が小さいほど対象とする本震マグニチュードの下限が下がるためである。

以上で推定された前震確率の評価式を、2000 年 1 月 1 日から 2017 年 10 月 31 日までの同カタログに適用し、群内地震数が  $N = 2, 4, 8$  に達した各地震群について前震確率を評価した。地震群ごとの前震確率の評価値を 10% 区切りの階級に分けて集計し、各階級中の実際の前震割合すなわち適中率と比較した結果を第 1 表に示す。適中率は、該当の地震群数が少ない階級を除いて、各階級の前震確率評価値と概ね整合的である。また、60% 超の高い前震確率を得たのは伊豆半島沖の地震群であり、実際に M6 前後の本震を起こしている。ただし、たとえば 2016 年熊本地震の前震系列<sup>2)</sup>のように群内地震数が 10 を超えてくると、事例数の低下により前震確率の評価は不安定なものとなる。今後は下限マグニチュードの引き下げや海外のカタログの活用を検討して事例数の充足を図りたい。

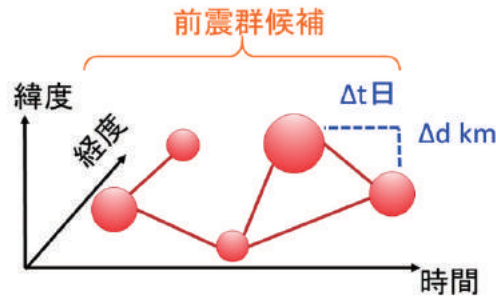
(野村俊一, 尾形良彦)

#### 参 考 文 献

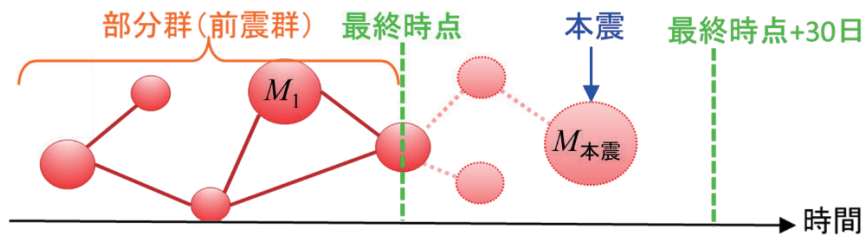
- 1) Ogata, Y., Utsu, T. and K. Katsura, 1996, Geophys. J. Int., 127, 17
- 2) 統計数理研究所 (2016) 連絡会会報, 96 (12-22), 652.

(a) 前震群候補の構成方法 (Single-link 法)

$$\sqrt{(\Delta d)^2 + (c\Delta t)^2} \leq 33.33\text{km} \quad (c=1.11 \text{ km/日})$$

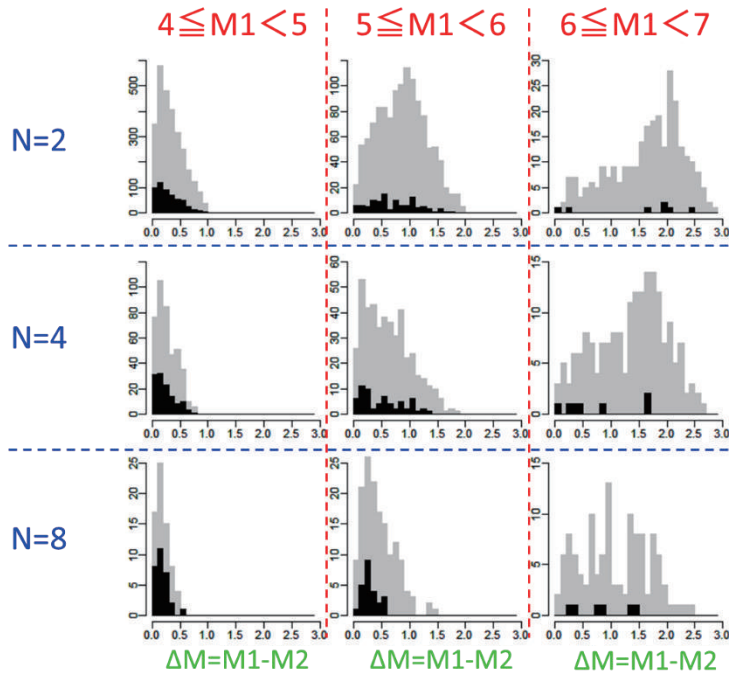


(b) 前震群の定義 (最終時点から 30 日以内にマグニチュード  $M_{\text{本震}} > M_1$  の本震発生)



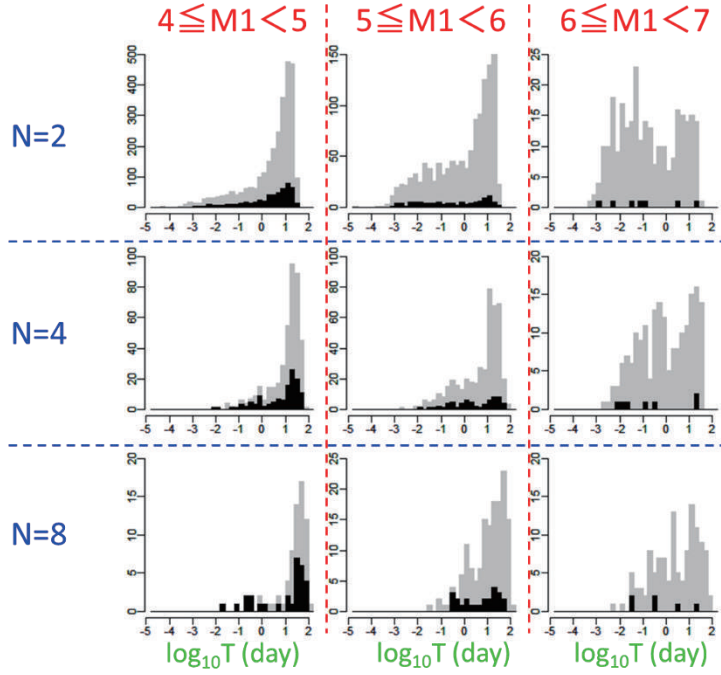
第 1 図 Single-link 法による前震群候補の構成方法と，前震群の定義．

Fig. 1 Construction of foreshock candidates in Single-link method and definition of foreshocks.

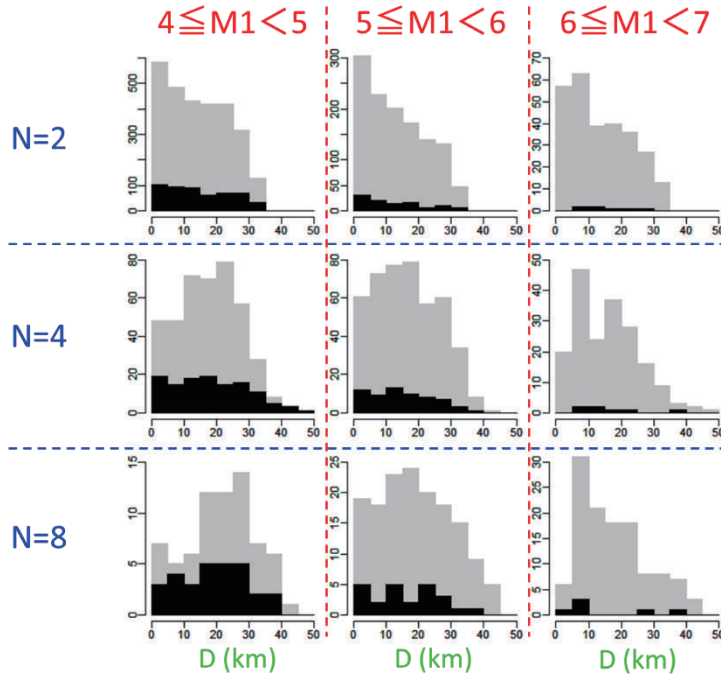


第 2 図 前震群 (黒) と他の地震群 (灰) の最大地震と二番目に大きい地震のマグニチュード差  $\Delta M$  のヒストグラム．

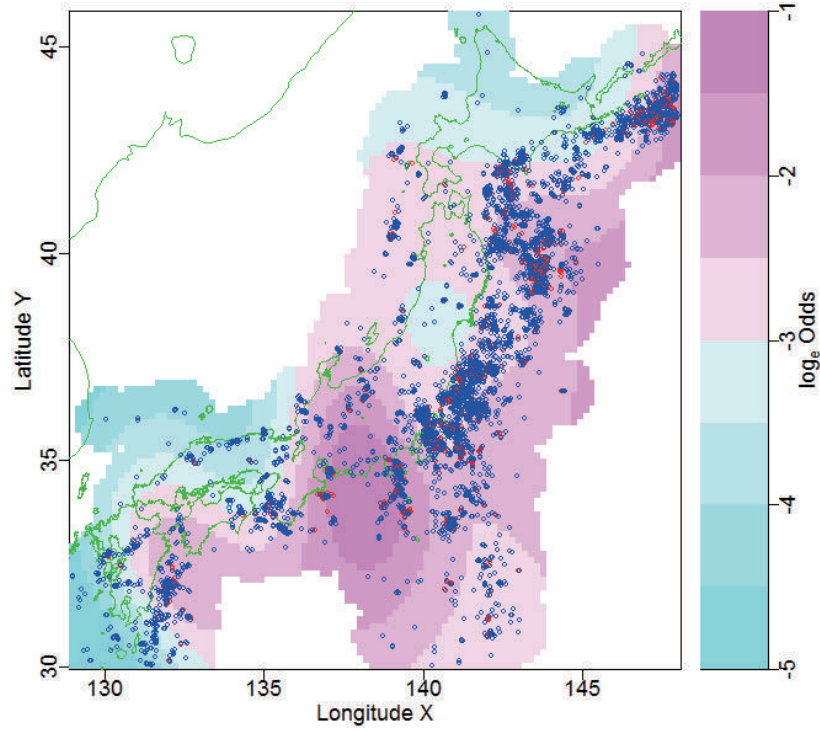
Fig. 2 Histograms of differences of two largest magnitudes in foreshock clusters (black) and the other clusters (gray).



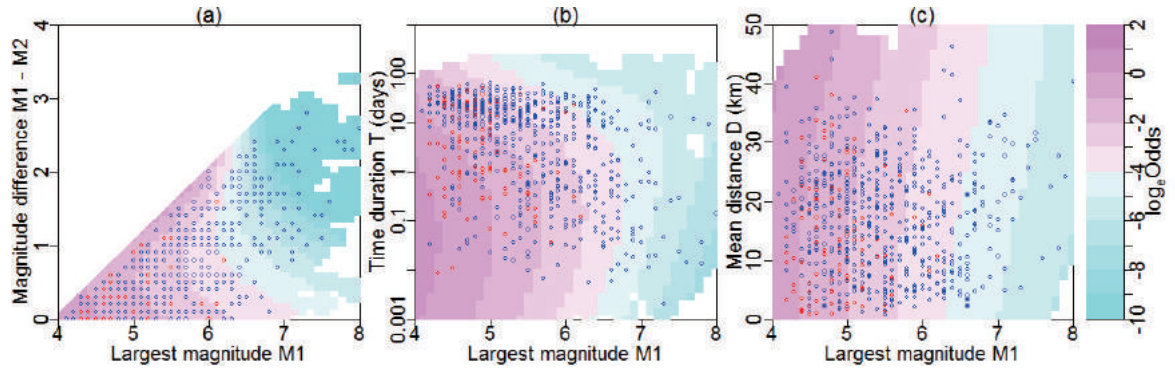
第3図 前震群（黒）と他の地震群（灰）の継続期間  $T$ （日）のヒストグラム.  
 Fig. 3 Histograms of time spans of foreshock clusters (black) and the other clusters (gray).



第4図 前震群（黒）と他の地震群（灰）の平均震央間距離  $D$ （km）のヒストグラム.  
 Fig. 4 Histograms of mean pairwise distances in foreshock clusters (black) and the other clusters (gray).



第 5 図 地域差によるオッズ関数  $g(X, Y)$  の推定値と、前震群（赤点）と他の地震群（青点）の分布。  
 Fig. 5 Estimates of odds function  $g(X, Y)$  and map of foreshock clusters (red) and the other clusters (blue).



第 6 図  $N=4$  のときの前震群（赤点）と他の地震群（青点）の各特徴の分布と、オッズ関数(a)  $f_1(N, M_1, \Delta M)$ , (b)  $f_2(N, M_1, T)$ , (c)  $f_3(N, M_1, D)$  の推定値。  
 Fig. 6 Distribution of features in foreshock clusters (red) and the other clusters (blue) and estimates of odds functions (a)  $f_1(N, M_1, \Delta M)$ , (b)  $f_2(N, M_1, T)$ , (c)  $f_3(N, M_1, D)$  when  $N=4$ .

第 1 表 2000 年以降の前震確率評価値の度数分布と適中率（＝前震群数／全地震群数）.  
Table.1 Cross-classified contingency table of evaluated foreshock probability and actual portion of foreshocks for seismic clusters of certain size  $N$ .

| 前震確率の評価値 |       | 0-10% | 10-20% | 20-30% | 30-40% | 40-50% | 50-60% | 60-70% | 70-80% | 合計   |
|----------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| $N=2$    | 全地震群数 | 463   | 483    | 227    | 64     | 14     | 2      | 0      | 0      | 1253 |
|          | 前震群数  | 32    | 74     | 47     | 20     | 4      | 2      | 0      | 0      | 179  |
|          | 適中率   | 7%    | 15%    | 21%    | 31%    | 29%    | 100%   | N/A    | N/A    | 14%  |
| $N=4$    | 全地震群数 | 151   | 98     | 54     | 22     | 14     | 5      | 1      | 2      | 347  |
|          | 前震群数  | 14    | 16     | 10     | 8      | 2      | 1      | 1      | 2      | 54   |
|          | 適中率   | 9%    | 16%    | 19%    | 36%    | 14%    | 20%    | 100%   | 100%   | 16%  |
| $N=8$    | 全地震群数 | 82    | 17     | 10     | 2      | 6      | 5      | 2      | 0      | 124  |
|          | 前震群数  | 7     | 3      | 4      | 1      | 3      | 2      | 2      | 0      | 22   |
|          | 適中率   | 9%    | 18%    | 40%    | 50%    | 50%    | 40%    | 100%   | N/A    | 18%  |