

# 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

統計数理研究所

野村 俊一, 尾形 良彦

2017年11月22日 第217回地震予知連絡会

# 背景

- Ogata et al. (1996)は、地震群のマグニチュード差・時間差・震央距離の情報に基づいて、前震確率の評価式を推定した
- 地震群におけるマグニチュードおよび時空間的特徴の分布は、群内の地震数および最大マグニチュードによって変化するため、それらも考慮して前震確率を評価するべきと考えられる
- 本報告では、上記の考えに基づいた新たな前震確率の評価式を提案し、評価式の推定に利用した期間(1926/1～1999/12)とは別の期間(2000/1～2017/10)の気象庁震源カタログによって、その前震識別性能(適中率)を評価する

# 前震確率評価モデルの構築の流れ

Step 1. 地震群の構成(クラスタリング)

Step 2. 前震群の定義付け

Step 3. 前震確率評価の情報抽出

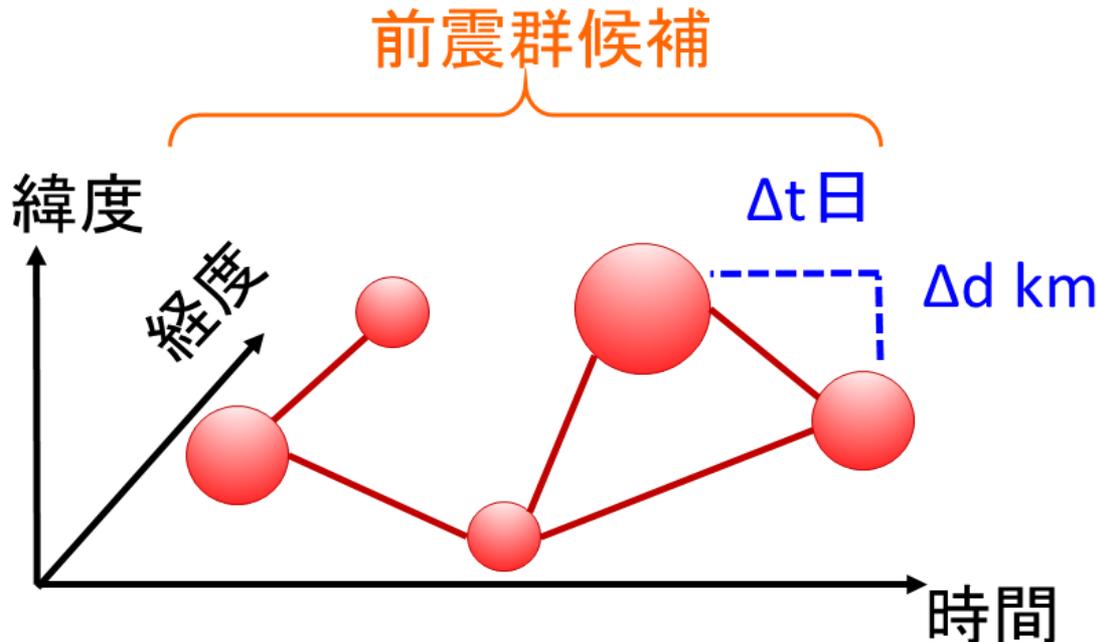
Step 4. 前震確率評価モデルの推定

Step 5. モデルの前震識別性能検証

# Step 1. 地震群の構成(クラスタリング)

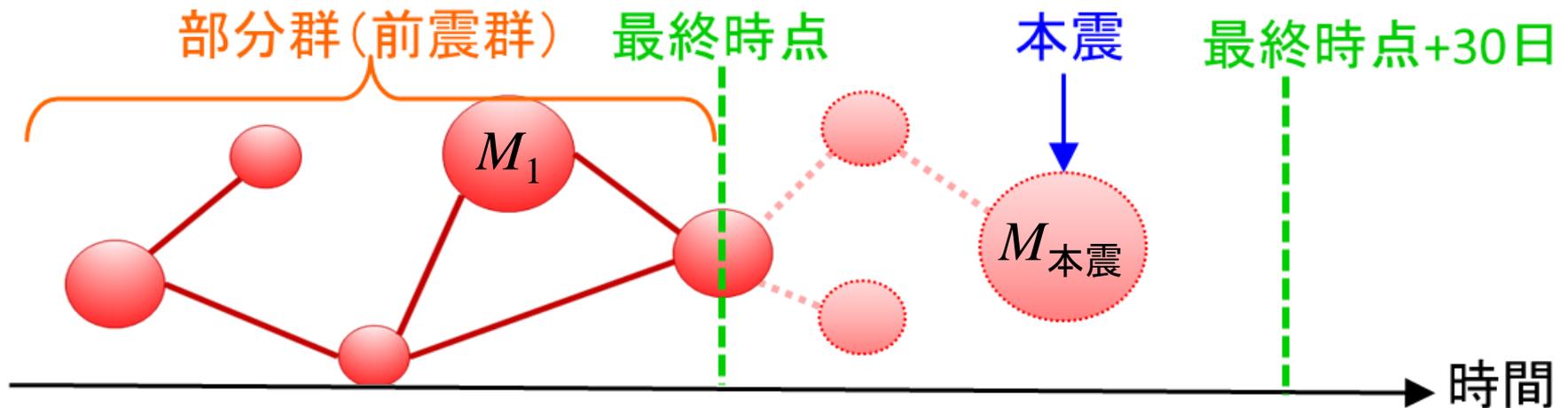
- マグニチュードM4以上、深さ100km以内の地震を対象として、震央間距離  $\Delta d$  と発生時刻差  $\Delta t$  が次式を満たす地震のペアを連結していくことで地震群(前震候補)を構成(Single-link法)

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



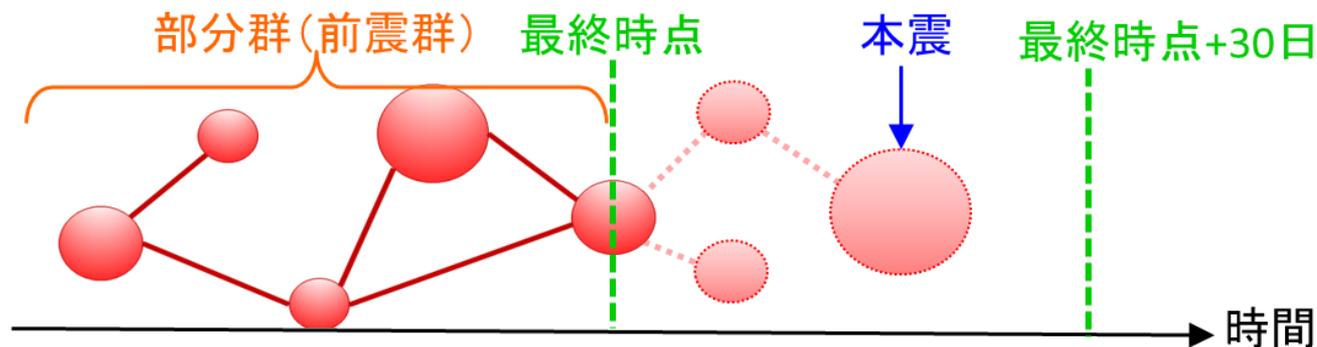
## Step 2. 前震群の定義

- Step 1.で構成された地震群の各地震発生時点までの部分群について、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(群内最大地震)が起きたとき、その部分群を前震群と定義
- 上の定義に従い、部分群が前震群である確率を前震確率と呼ぶ



## Step 3. 前震確率評価のための情報抽出

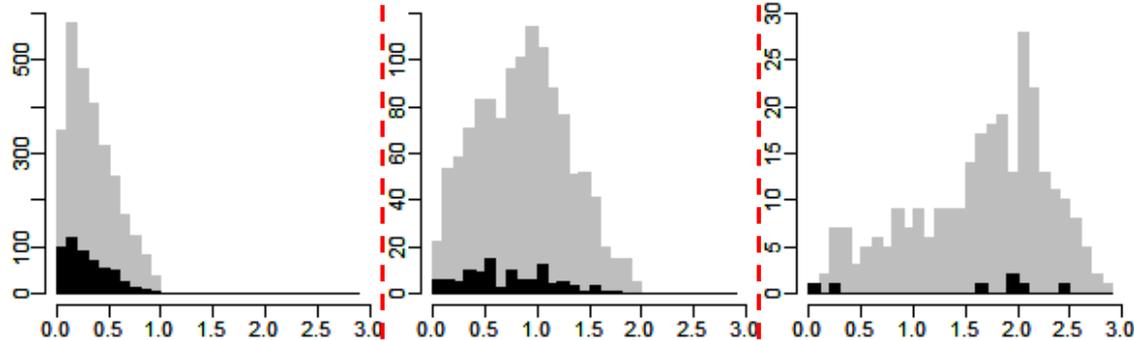
- Step 1.で構成された地震群の各地震発生時点までの部分群について、次の項目を前震確率評価のための情報として抽出する
  - 地震群構成数： $N(\geq 2)$
  - 群内の最大マグニチュード： $M_1$
  - 群内の最大・二番目マグニチュード差： $\Delta M = M_1 - M_2$
  - 地震群の発生期間： $T$  (日)
  - 群内の平均震央間距離： $D$  (km)
  - 地震群の中心経度・緯度： $X, Y$  (度)



# Step 3. 前震群と他の地震群の分布の違い

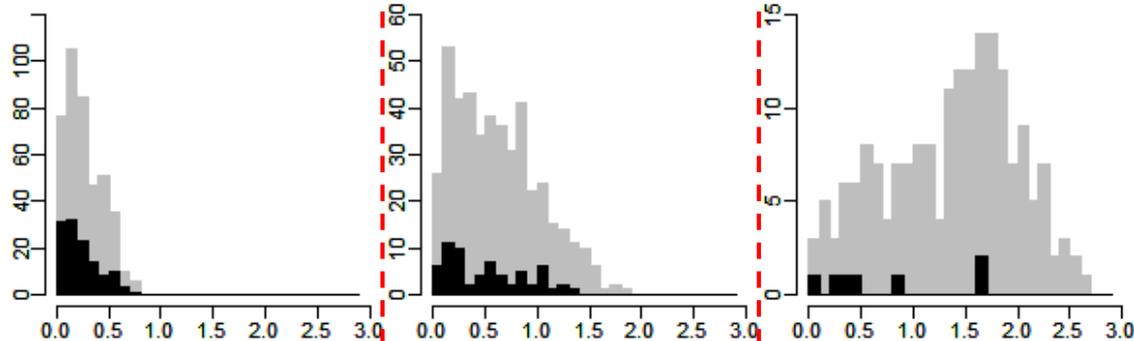
$4 \leq M1 < 5$      $5 \leq M1 < 6$      $6 \leq M1 < 7$

N=2

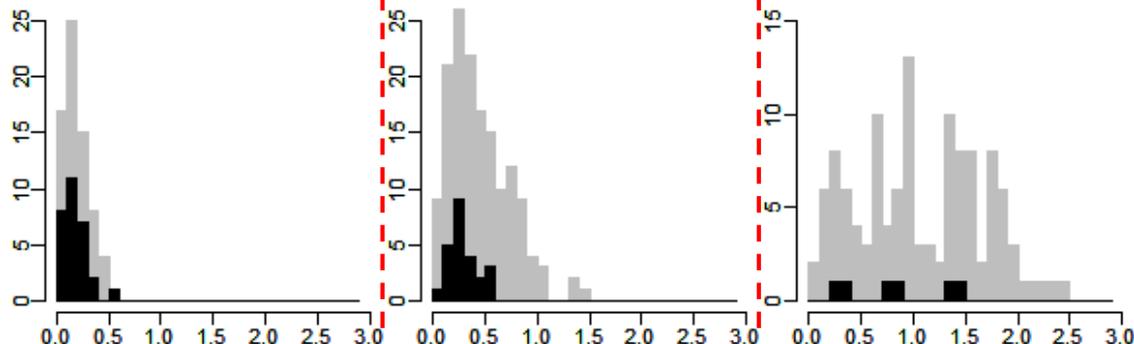


前震群  
前震群でない地震群

N=4



N=8

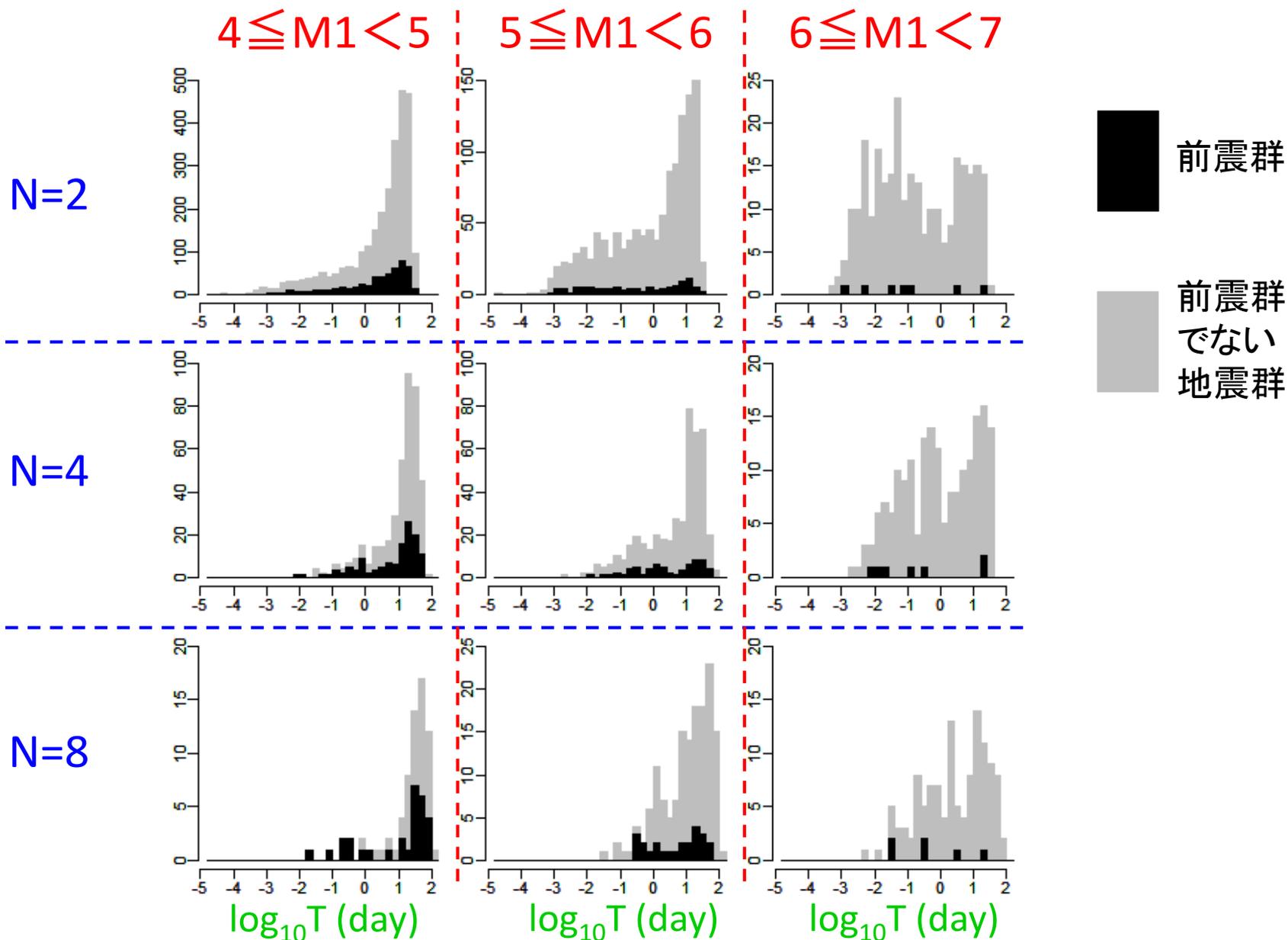


$\Delta M = M1 - M2$

$\Delta M = M1 - M2$

$\Delta M = M1 - M2$

# Step 3. 前震群と他の地震群の分布の違い



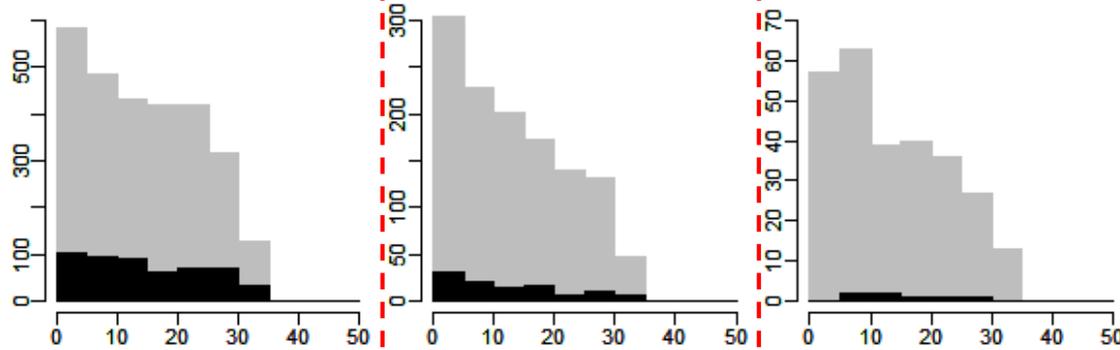
# Step 3. 前震群と他の地震群の分布の違い

$4 \leq M1 < 5$

$5 \leq M1 < 6$

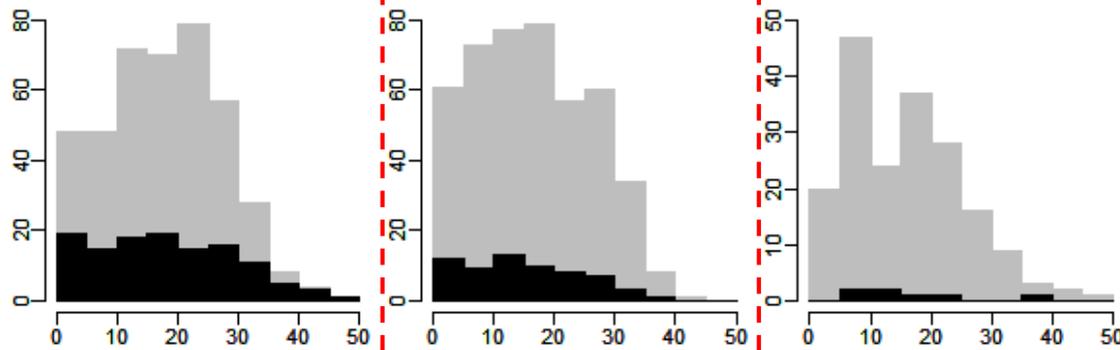
$6 \leq M1 < 7$

N=2

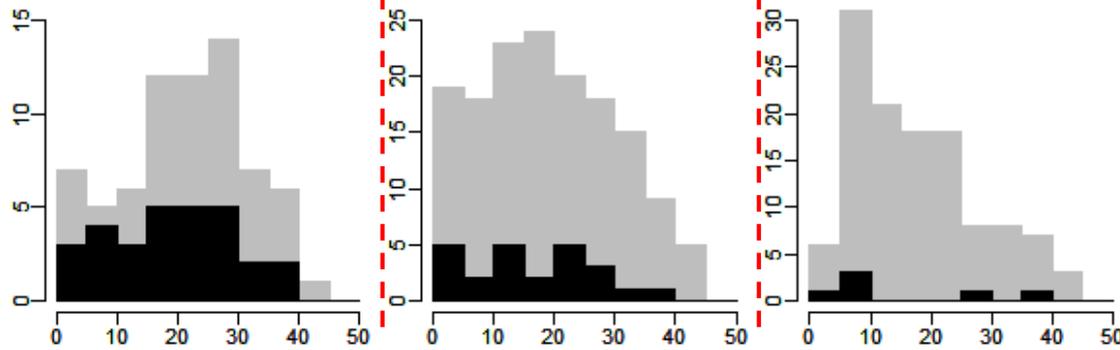


前震群  
前震群でない地震群

N=4



N=8



D (km)

D (km)

D (km)

## Step 4. 前震確率評価モデルの推定

- Step 1.で構成された地震群の各地震発生時点までの部分群について、次式によって前震確率(30日以内本震確率)を評価する

$$\text{logit } p = f_1(N, M_1, \Delta M) + f_2(N, M_1, T) + f_3(N, M_1, D) + g(X, Y) + \alpha_s + \varepsilon$$

前震確率 =  $E_\varepsilon[p]$  (ベイズ予測: 推定誤差  $\varepsilon$  に関する  $p$  の平均値)

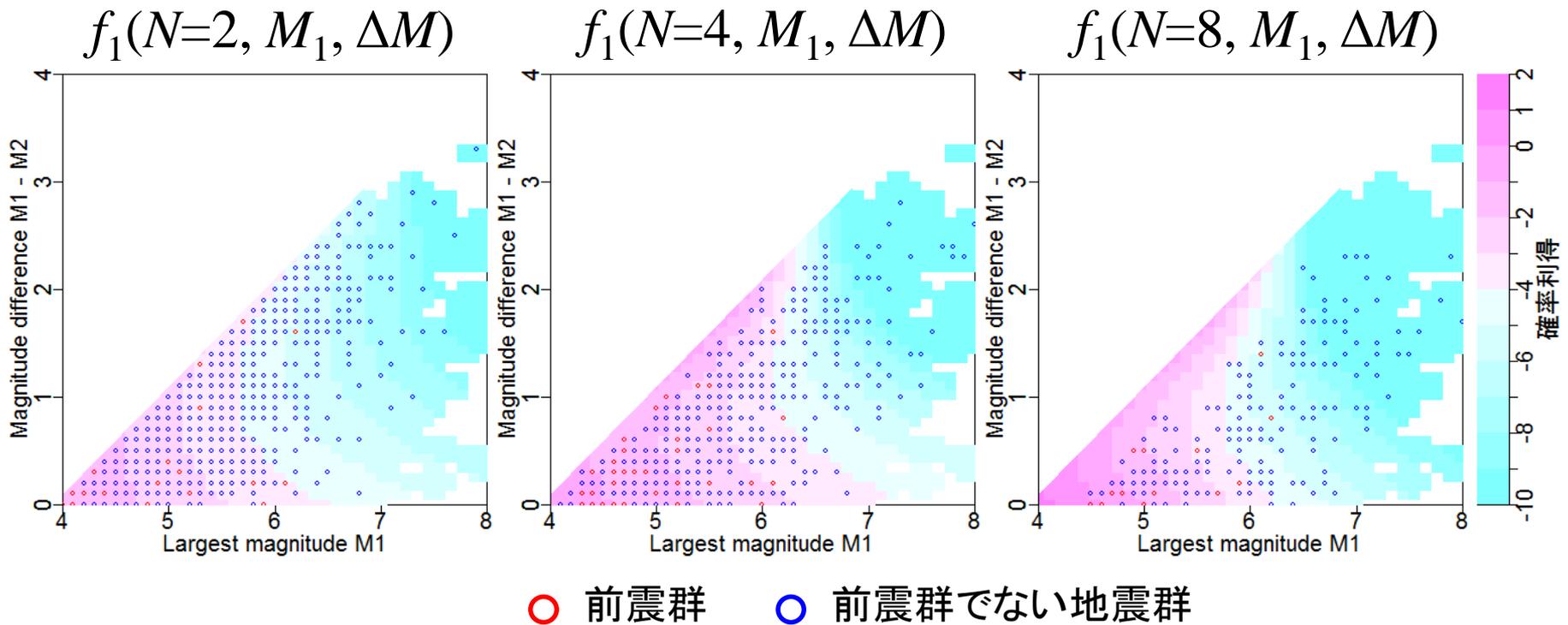
- $\text{logit } p = \log\{p/(1-p)\}$ : ロジット関数(ロジスティック回帰)
- $f_1, f_2, f_3$ : 確率利得関数(3次スプライン関数)
- $g$ : 確率利得関数(薄板スプライン関数)
- $\alpha_s$ : 上式で表現できない確率利得(地震群  $s$  ごとの変量効果)
- $\varepsilon$ : 上式の推定誤差(正規分布に従うノイズ)

## Step 4. 前震確率評価モデルの推定

- 気象庁震源カタログから下記条件の地震を抽出し、前震確率の評価式(確率利得関数)の推定に用いる
  - 観測期間: 1926年1月1日～1999年12月31日
  - 震源: 東経128～148°、北緯30～46°、深さ100km以下
  - マグニチュード: M4 以上
- 推定した評価式を、観測期間: 2000年1月1日～2017年10月31日で他は上記条件の同カタログに適用して、前震確率の評価値の妥当性(前震識別性能)を検証する

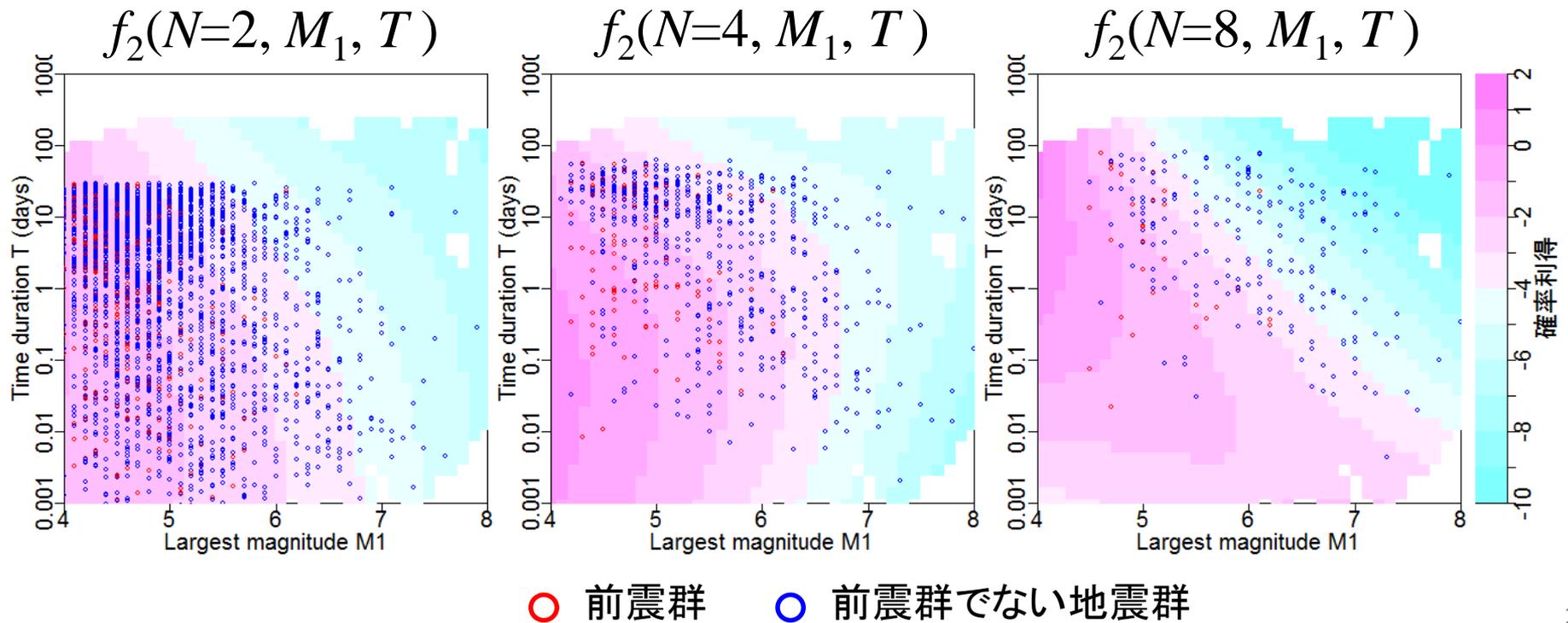
# Step 4. 推定された確率利得関数

- 1926～1999年の気象庁カタログにより推定した各確率利得関数（高いほど前震確率が上昇）を以下に示す
- 群内の最大・二番目マグニチュード差  $\Delta M$  が小さいほど前震確率は上がり、その度合いは群内地震数  $N$  と最大マグニチュード  $M_1$  に応じて変化する



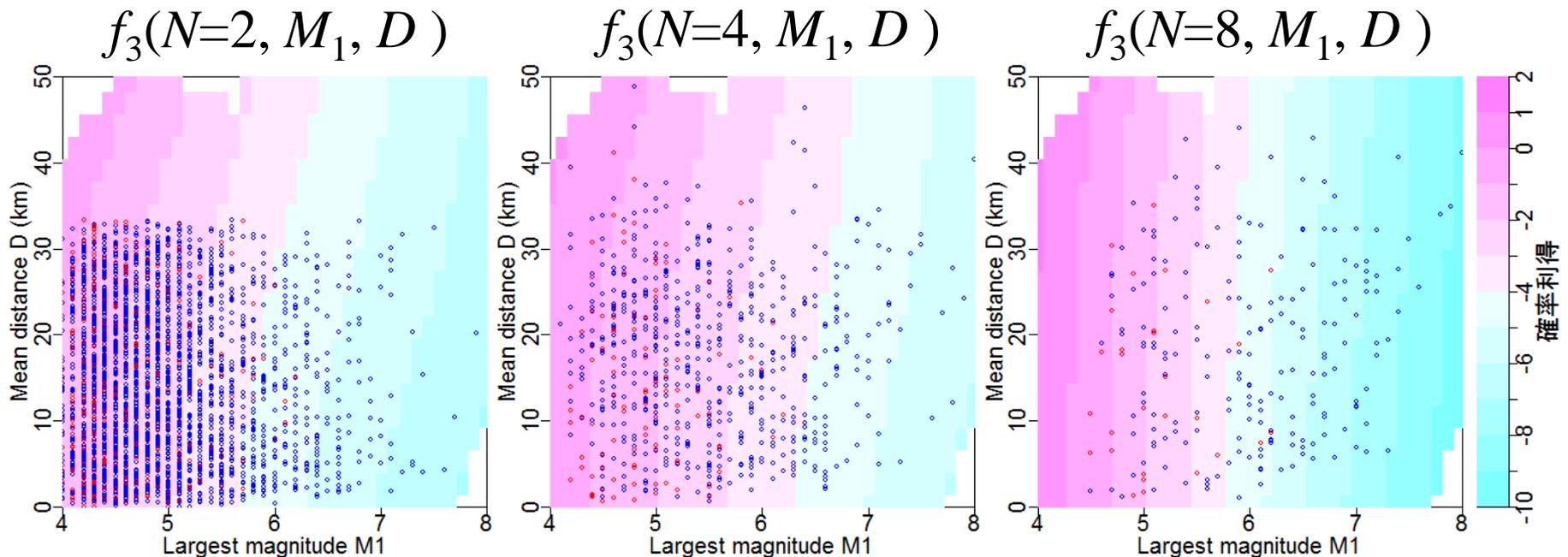
# Step 4. 推定された確率利得関数

- 1926～1999年の気象庁カタログにより推定した各確率利得関数（高いほど前震確率が上昇）を以下に示す
- 同じ群内地震数  $N$  と最大マグニチュード  $M_1$  では、発生期間  $T$  が短いほど前震確率は上がる傾向にある



# Step 4. 推定された確率利得関数

- 1926～1999年の気象庁カタログにより推定した各確率利得関数（高いほど前震確率が上昇）を以下に示す
- 同じ群内地震数  $N$  と最大マグニチュード  $M_1$  では、震央間距離  $D$  が長いほど前震確率は若干上がる傾向にある

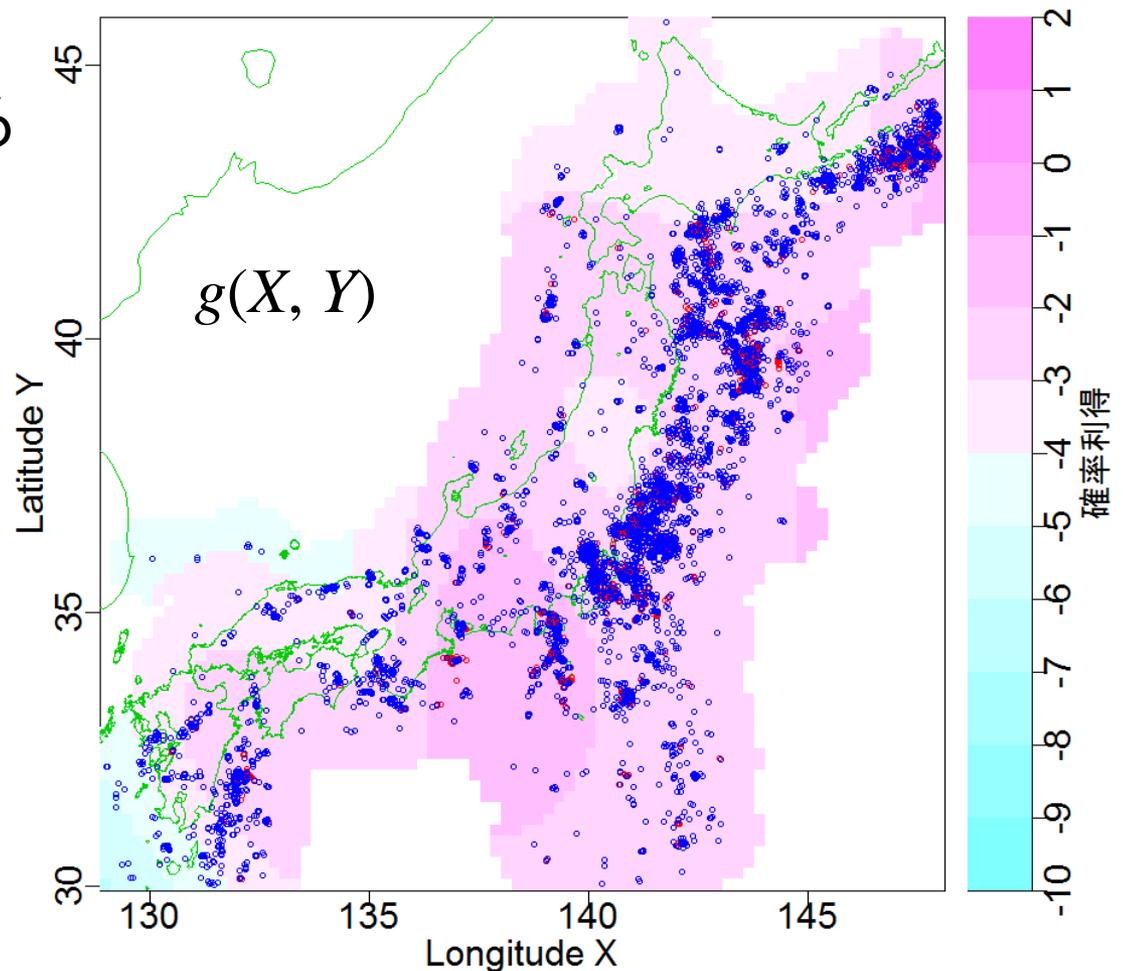


○ 前震群      ○ 前震群でない地震群

## Step 4. 推定された確率利得関数

- 1926～1999年の気象庁カタログにより推定した各確率利得関数（高いほど前震確率が上昇）を以下に示す
- 伊豆半島の周辺域で確率利得は最大となる
- 震央の位置によって前震確率が最大10倍程度は変化する

- 前震群
- 前震群でない地震群



## Step 5. モデルの前震識別性能検証

- 1926～1999年の気象庁カタログから学習した前震確率評価式を、2000～2017年10月の同カタログに適用して識別性能を検証する
- 群内地震数が  $N = 2, 4, 8$  に達した時点での前震確率の評価値を10%ごとに区切って集計し、適中率(=前震群数/全地震群数)と比較検証すると、評価値と実際の適中率は概ね整合している
- 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

| 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%  |

# 結論

- 地震群のマグニチュード差および時空間距離の情報から、地震群が前震である(30日以内に本震を起こす)確率を評価するモデルを提案した
- 1926～1999年の気象庁カタログから学習した前震確率評価式を、2000年以降の同カタログに適用し、評価値に近い適中率を得た
- 今後への課題と展望
  - 群内地震数が10を超えてくると、該当例数の低下により評価式(確率利得関数)の推定が不安定になるため、今後は海外のカタログも活用して該当例数の充足を図りたい
  - 予知率(M4以上の前震群をもつ本震の割合)は約1割と低く、予知率改善のため下限マグニチュードを下げることも検討する