

### 3-18 前震の確率予報の実施と評価：東北地方太平洋沖地震までの15年間 Operational probability foreshock forecasts up until Tohoku-Oki earthquake

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

1. はじめにある地域で新規の地震活動 ( $M \geq 4.0$ ) が始まったとき、それらが前震である確率を求めたい。その場所でその後、マグニチュード0.5以上飛びぬけた格段に大きな地震が起こる確率である。筆者ら<sup>1)</sup>が予測計算式を提案してから15年以上経っている。この度の東北地方太平洋沖地震には顕著な前震活動があった。そこで、これらの前震が提案方式の観点からどのように予測されていたか、それらを含む15年間の確率予測とその検証を行ってみた。

#### 2. 群れの先頭の地震の事前識別予報と評価

Single-link法で群分け(第1図上の距離式参照)を行い予測の実施とその結果の評価を行った。まず、東北地方太平洋沖地震の前震活動( $M \geq 4.0$ )は2月13日より始まり2月に9個、少し間を置いて3月9日のM7.3の最大前震を経て、3月11日のM9地震へ至る。この領域での前震である確率は全国平均(3.8%)以下であった(第1図左上の地図パネル)ので、このケースについて地域性のみを使った予測としては成功といえない。しかし、全体的な15年間の地域性による確率予測は実際の結果が統計的には齟齬がないことが示されている(第1図右上のグラフと下段の分割表参照)。

#### 3. 複数前震の事前識別予報と評価

群内の時間間隔、震央間距離、マグニチュードの増減( $M$ 差)を使って、地震群が前震系列である確率を計算するアルゴリズムを第2図の上段の式と中段の表で与えた。今回予測に使った気象庁マグニチュードは、提案した計算方式の表(第2図の中段)を推定したときに使った旧気象庁マグニチュードと異なる(第2図下段)が、敢えて旧マグニチュードを使って計算し既に公表されているこの表を使った。それにも拘らず結果は安定的であり、マグニチュードの些少の大小や下限についてはロバストであることが分かった。マグニチュードの値そのものでなく、マグニチュード列の増減関係が本質的であることが伺える。

この15年間の確率予測は実際の結果が統計的には齟齬がないことが示される(第3図のグラフと分割表参照)。最大地震(本震)が特に大きいもの( $M \geq 6.5$ )を選び出すと、群れの初期の段階における識別確率は明瞭である(第3図左下グラフ参照)。この図から、2月13日より始まった前震活動( $M \geq 4.0$ )は、当初、平均(7.2%)以下の予測確率であったが3月9日のM7.3の最大前震に向って増加し、最大前震時に20%近くになり、その後減少傾向であるが、3月11日のM9地震まで平均以上の予測確率を維持している。前震・本震・余震系列の多くの場合、本震が起きると急速に確率が減少する(第4図)ので、格段に大きいM7.3が起きても予測確率が下がらないので更に格段に大きな地震が起きる可能性が低くないことを示唆している。

因みに2008年の茨城県沖の群発地震は20%以上の予測確率を保持してM7の本震に至っている(第3図左下グラフ)。

(尾形良彦)

#### 参 考 文 献

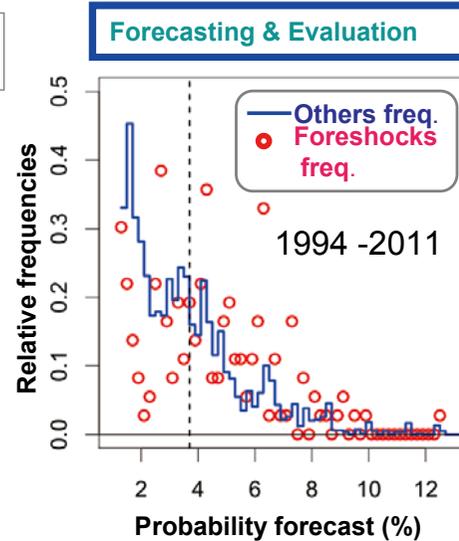
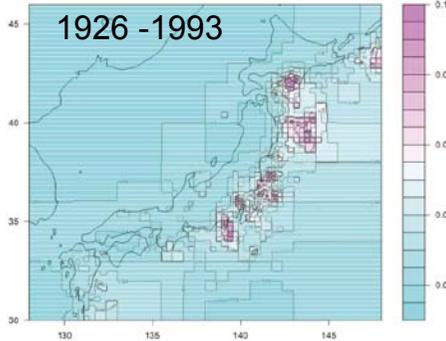
- 1) Ogata, Y., Utsu, T. and K. Katsura, 1996, *Geophys. J. Int.*, 127, 17-30.

気象庁カタログ1994 - 2011年4月まで、 $M \geq 4.0$  の地震を時空間距離

$$d_{ST} = \sqrt{\Delta_{space}^2 + (c\Delta_{time})^2} \leq 0.3^\circ \text{ (or 33.33km)}$$

で連結する。ただし  $c$  は 1日=1km となるように決める。

群れの先頭地震(含孤立地震)について  
下記の下記の地図で確率予測する。



1994 - 2011

Forecast	0-2.5%	2.5-5%	5%-	All
Foreshocks	33	84	65	182
Others	1572	1849	770	4191
All types	1605	1933	835	4373
Ratio(%)	2.1	4.3	7.8	4.2

Diff-entropy = -22.7 DiffAIC = -40.0 (cross-table)

第1図. 左上図は1926年から1993年までのデータから推定した最初の地震( $M \geq 4$ )が前震である確率の地図。右上図は1994年から2011年3月まで左図の確率地図で予測した確率に対する発生結果の相対度数(正規化したもの)で赤丸が前震で青がその他で、縦の点線は前震の全国平均値(3.8%)。分割表は予報と実現頻度を取りまとめたもの。

Fig. 1. The left-hand-side color map shows the foreshock probability of the first event of each cluster or isolated event (Ogata et al., 1995). The forecast results during 1994-2011 are summarized in the right-side panel and in the contingency table in the bottom showing that this forecasting has been certainly better than the unconditional foreshock probability (3.8%). The contingency table of the probability forecasts and the outcomes are significantly correlated and consistent.

## 複数地震の前震確率予測の計算アルゴリズム

複数地震がおきた場合、群れ内の地震間同士の時間間隔  $t_{ij}$  (days), 震央間距離  $r_{ij}$  (km), マグニチュード差  $g_{ij}$  を以下のように単位立方体に納まる正規化変数変換する。

$$\text{i.e., } (t, r, g) \rightarrow (\tau, \rho, \gamma) \text{ in } [0, 1]^3 \text{ such that}$$

$$\tau = \begin{cases} 0 & \text{for } t \leq 0.01 \\ \log(100t) / \log(3000) & \text{for } 0.01 < t \leq 30 \\ 1 & \text{for } 30 < t \end{cases}$$

$$\rho = 1 - \exp\{-\min(r, 50) / 20\}$$

$$\gamma = \begin{cases} (2/3) \exp\{g / \sigma_1\} & \text{for } g \leq 0 \\ (2/3) + (1/3)[1 - \exp\{-g / \sigma_2\}] & \text{for } g > 0 \end{cases}$$

ただし  $\sigma_1 = 6709, \sigma_2 = 0.4456$

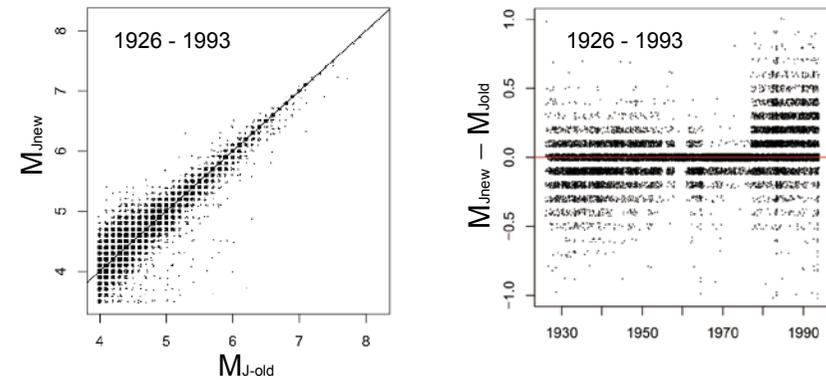
群れのメンバーが追加するごとに確率予測  $p_c$  を次のように計算する

$$\text{logit}(p_c) = \text{logit}\{\mu(x_i, y_i)\} + \frac{1}{\#\{i < j\}} \sum_{i < j} \left[ a_1 + \sum_{k=1}^3 b_k \gamma_{i,j}^k + \sum_{k=1}^3 c_k \rho_{i,j}^k + \sum_{k=1}^3 d_k \tau_{i,j}^k \right]$$

ここで  $\mu(x, y)$  は群れの先頭の予測確率(前頁参照)であり、後項は予測時点での群れの中の全ての地震のペア ( $i < j$ ) について内の関数値を計算し、それらの算術平均をとったものである。係数  $a, b, c, d$  については以下のとおり。

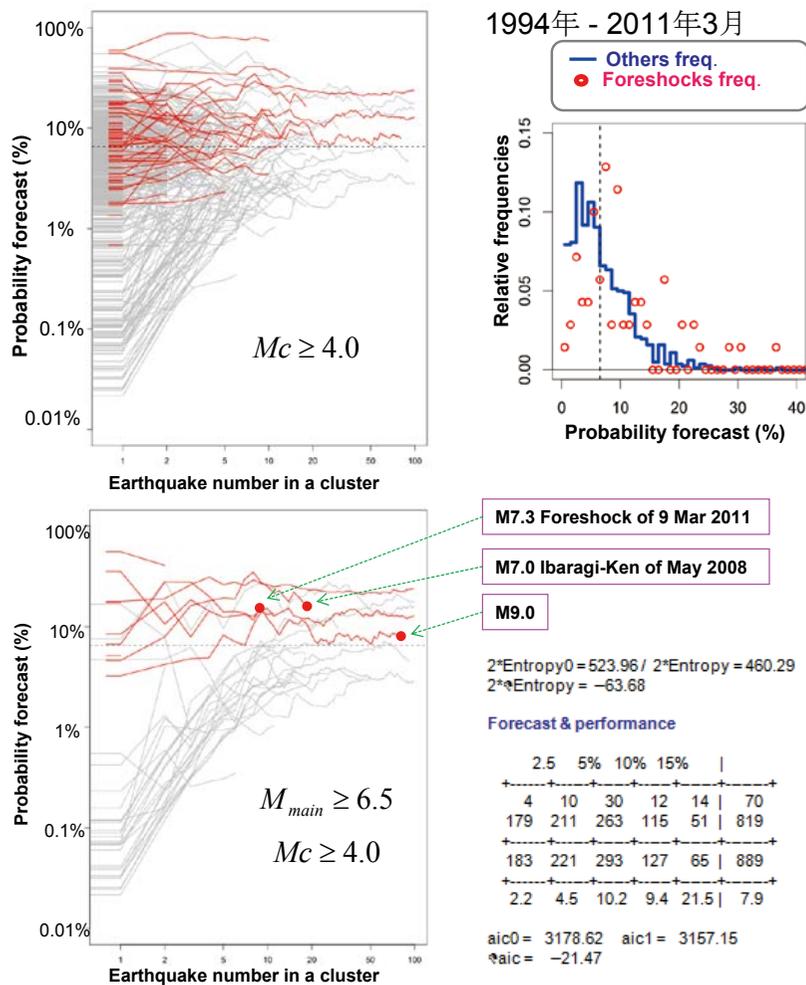
$k$	$a_k$	$b_k$	$c_k$	$d_k$
1	8.018	-33.25	-1.490	-10.92
2		62.77	2.805	295.09
3		-37.66	-2.190	-1161.5

## 気象庁・新旧カタログのマグニチュード比較



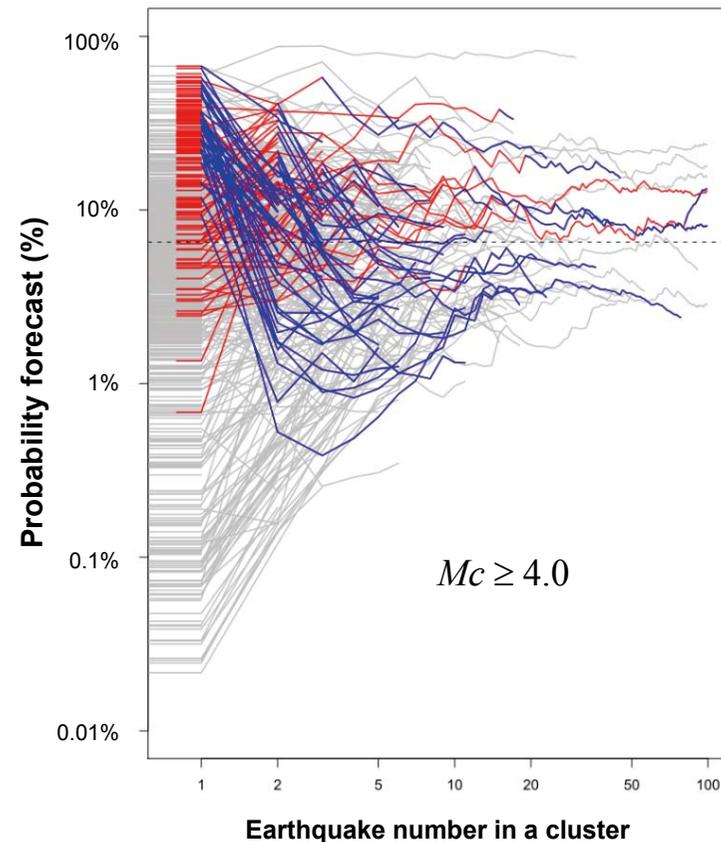
第2図. 地震群が前震系列である確率を計算するアルゴリズムと旧気象庁マグニチュードと現一元化マグニチュードの比較(下段パネル)

Fig. 2. Calculation algorithm under the first plural earthquakes of a cluster, and magnitude differences between the old and new JMA catalogs (bottom panels).



第3図. 左上図は地震群に新しい地震が加わった時、その順番(横軸)とその前震確率(縦軸)。結果的に前震の群れが赤線で、その他の群れが灰色線。右上図は予報確率とその結果の相対度数(正規化したもの)。赤丸が結果的に前震で、青がその他。横の点線は複数の場合の前震の全国平均(7.2%)。左下図は左上図のうち本震がM6.5以上のもの。右下の表は予報と実現頻度の集計表。

Fig. 3. Top left panel shows the foreshock probability forecasts of each cluster at each time when a member is updated, where red and gray color indicates that the clusters were actually foreshocks and other type, respectively. The forecast results during 1994-2011 Mar. are summarized in the top right panel and in contingency table in the left bottom, which show that the forecasts have been certainly better than the unconditional foreshock probability (7.2%) in case where we have plural events in a cluster. The left bottom panel is obtained when the clusters in the top left panel are restricted for the mainshock of  $M > 6.5$ .



第4図. 地震群に新しい地震が加わった時、その順番(横軸)とその前震確率(縦軸)。前震(単発を含む)が赤線で、本震以後の予測確率が青線。その他の群れ(本震余震型または群発地震型)が灰色線。横の点線は複数の場合の前震の全国平均(7.2%)。

Fig. 4. Foreshock probability forecasts of each cluster at each time when a member is updated, where red color segments indicates foreshocks, including single foreshocks. Then, blue segments shows the probability forecasts after the mainshock. Gray color segments indicate that the clusters were other type, namely mainshock-aftershock sequence or swarm-type. Horizontal dashed line indicates the unconditional foreshock probability (7.2%) in case where we have plural events in a cluster.