

12 - 4 前震の確率予報の実施

Operational Probability Forecast of Foreshocks

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

1. はじめに

Molchan ダイアグラムを使った解析¹⁾によると、長期予測は更新過程によって定常ポアソン過程に比べて予測精度を改良するが、それでも確率利得は2倍弱である。同様にM8などの地震活動パターン認識予測は、時空間的定常ポアソン過程の予測に比べて有意であるが、その確率利得は高だか数倍程度である。ところが前震認識の確率利得はポアソン過程予測に比べて数千倍、「全カリフォルニア地震予測」第2次計画(UCERF2)の予測に比べて数百倍である。これは前震によって予測される大きな地震が起きるかもしれない標的領域が小さく時間的にも短期であるためである。この様に前震の識別に基づく大地震予測は十分実用的である。にもかかわらず、これまでそのような予測の実践とその評価の例は無いという。しかし、Ogata et al. (1996)²⁾(以後 OUK96 と引用する)は既に予測計算式を提案し遡及的な評価も行っており、それから15年経っている。この際、改めてその後の予測の検証を行ってみた。

2. 前震の事前識別予報法

ある地域で新規の地震活動が始まったとき、それらが前震である確率を求めたい。その場所その後、格段に大きな地震が起こる確率である。

前震を識別するには、先ず「地震の群れ分け」の定義が必要である。これは、いわゆる除群法の裏返しと考えられる。除群法を大雑把に分類すると、window法、link法、及びこれらの混成版がある。window法は本震のマグニチュードによる経験則に基づいているので地震学的には分かり易い。しかし本震が分かった上でのretrospectiveな除群法であり、リアルタイムでの前震の認識に使えない。リンク法は時空間の震源間距離に基づくので下限マグニチュードに依存するが、リアルタイム予測に使える。リンク法のパラメタ値はwindow法の結果と比べての調節する。

群れの最大地震を「本震」と呼ぶ。群れの先頭が本震のとき、地震群を「本震・余震型」と呼ぶ。本震の前の地震を「プレシヨック」と呼び、それらの最大Mと本震のM差が0.5未満の場合群れを「群発地震」、0.5以上のときのプレシヨックは「前震」と呼ぶ。

OUK96論文に先立つ論文²⁾で気象庁旧カタログ(1926~92年, $M \geq 4.0$)を用いてlink法およびwindow法で群分けを行い、前震系列とその他の地震群について、系列メンバー(最初の n 個を採用する)の時間間隔、震央間距離、マグニチュードの増減(M差)の統計的特徴を比較した。時間間隔や震央間距離は前震のほうが短いものが相対的に多く、前震のほうが集中性が強い(第1図a, b参照)。M差(後の地震のMから前の地震のMを引いたもの)は概して前震のほうが大きいものが多い(第1図c参照)。OUK96で群れの異なる数 $n = 2, 3, \dots, 10$ ごとについて調べたが同様な結果を得ている。

そこで、ある地震群が前震系列である確率 p_c を各地震間の時間間隔 t 、距離 r 、M差 g の関数で表し、 t, r, g のそれぞれにある変換をして $[0, 1]$ にほぼ一様に分布するようにしたものを τ, ρ, γ とし p_c のロジットを

$$\text{logit}(p_c) = \text{logit}\{\mu(x_1, y_1)\} + E_{\tau, \rho, \gamma} \left[\sum_{l=0}^3 b_l \tau^l + \sum_{m=0}^3 c_m \rho^m + \sum_{n=0}^3 d_n \gamma^n \right]$$

で表し、気象庁の旧データ（1926～93年、 $M \geq 4.0$ ）についてそのパラメタを求めている（係数 b, c, d については OUK96 参照）。AIC 最小の条件から上の多項式が選ばれた。ここで $E_{\tau, \rho, \gamma}[\dots]$ は、リアルタイム時点での群れの中の全ての地震のペア ($i < j$) の、時間差 $\tau_{i,j}$ 震央間距離及びマグニチュード差 について $[\dots]$ 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。また $\mu(x_1, y_1)$ は日本付近の $M \geq 4$ の群れの先頭の地震 ($i = 1$, 孤立地震も含む) が $M+0.5$ 以上の地震の前震である確率である。これが地域別に求められている（第2図参照）。確率は1%から10%強まで変動するが、三陸沖から浦河沖にかけての地域、福島・茨城県沖、東京区部・埼玉県東部地域直下、伊豆諸島付近などで大きくなっている。

3. 複数の前震の確率予報とその結果の評価

OUK96 モデルは旧 JMA カタログの 1993 年までの M4 以上のデータから推定されたものである。このモデルを使い、新 JMA 地震カタログの 1994 年から 2009 年までの確率予測した。予測確率は、第3図にあるように、0～40%の値をとり、結果的に前震の出現頻度と良く合っている。

この予測結果の統計的検証は次のように確認できる。第一に前震の予測確率列の評価を前震の平均確率 (6.8%) に比した。ここで相対エントロピーの累積和 $Q = \sum_i Q_i$ が予測列全体の評価となる。ただし、それぞれの地震群 i についての和に対して $Q_i = x_i \ln\{p_i/p_0\} + (1-x_i) \ln\{(1-p_i)/(1-p_0)\}$ であり、 x_i は地震群 i が結果的に前震型であれば 1、さもなければ 0 という値をとり、 $p_0 (= 0.068)$ は全日本の平均 (複数) 前震確率、 p_i は予測確率である (第4図参照)。累積相対エントロピーの値は -15.2 で負値 (AIC の半分に相当) となり予測は平均確率 (6.8%) の予測モデルより大きく有意に ($10^{15.2}$ 倍) 優れている。

さらに確率予測列と前震群の出現のクロス表が非独立であることでも示される (表1 参照)。クロス表の独立性モデルに対する非独立性モデルの A I C 差は -13.3 であった。これらも極めて有意な出現である。

(尾形良彦)

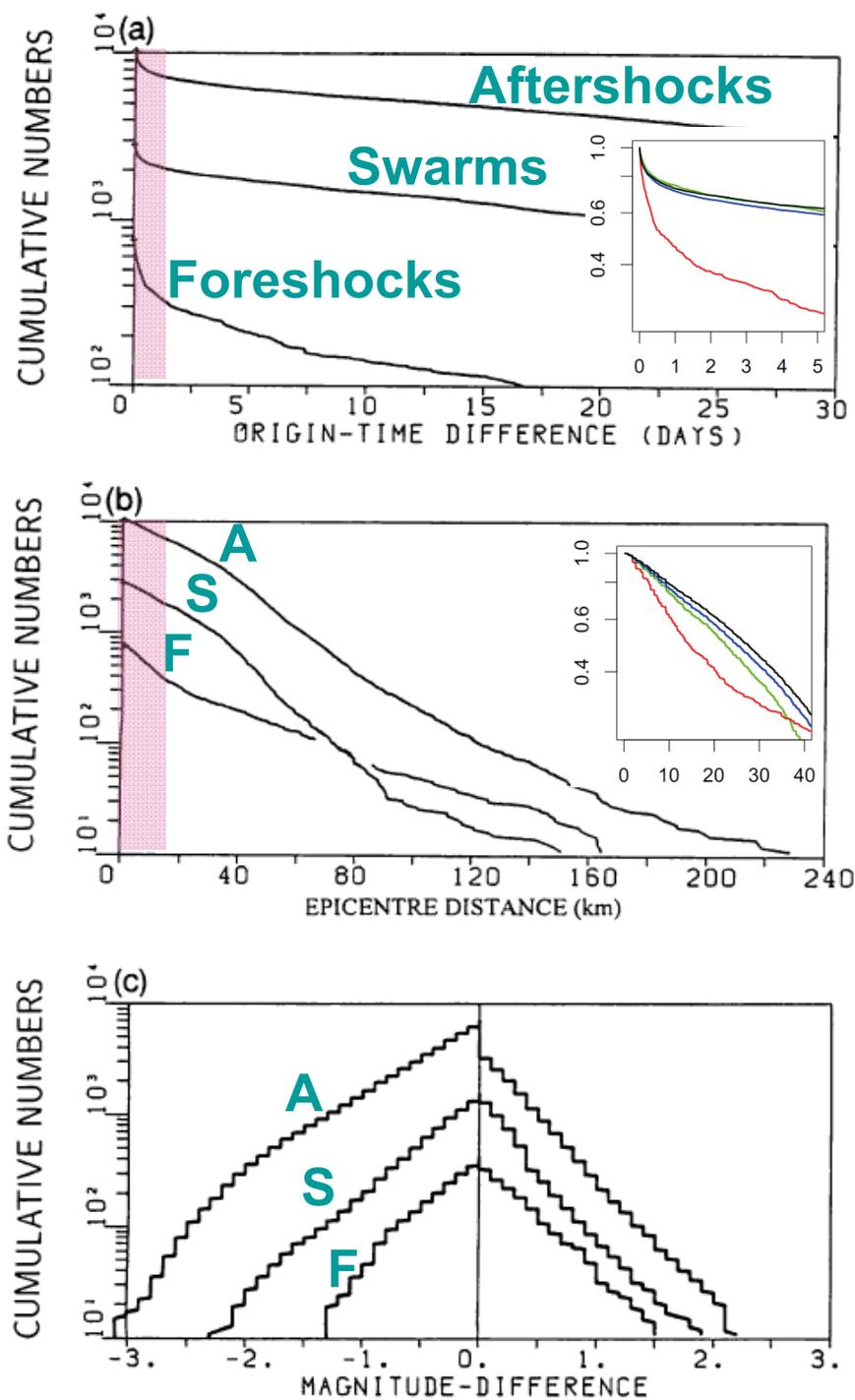
参 考 文 献

- 1) Jordan, T.H., 2010, Prospects for operational earthquake forecasting, 3rd SCEC-ERI Workshop @ERI, March 16-17, 2010.
- 2) Ogata, Y., Utsu, T. and K. Katsura, 1996, *Geophys. J. Int.*, 127, 17-30.
- 3) Ogata, Y., Utsu, T. and K. Katsura, 1995, *Geophys. J. Int.*, 121, 233-254.

Forecast	0-2.5%	2.5-5%	5-10%	10-15%	15%-	All
Foreshocks	0	2	5	6	7	20
Other Types	42	45	72	34	14	207
All Types	42	47	77	40	21	227
Ratio (%)	0.0	4.3	6.5	15.0	33.3	8.8

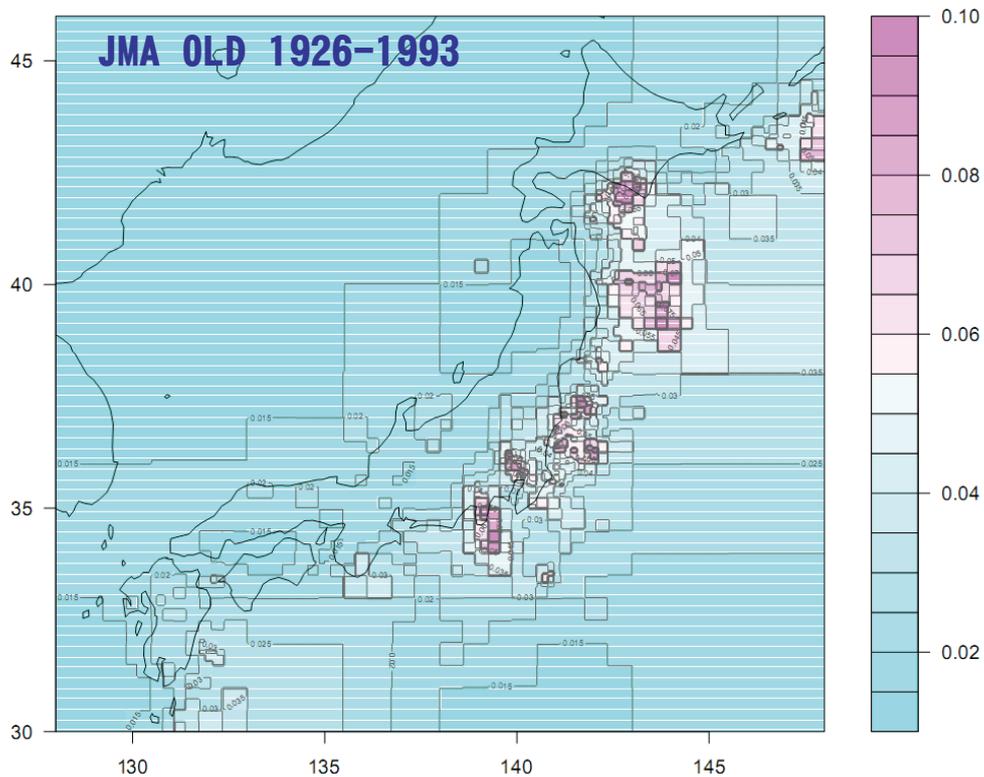
表1 前震の確率予測と実際の出現数の分割表

Table 1 the forecasting evaluations by contingency table

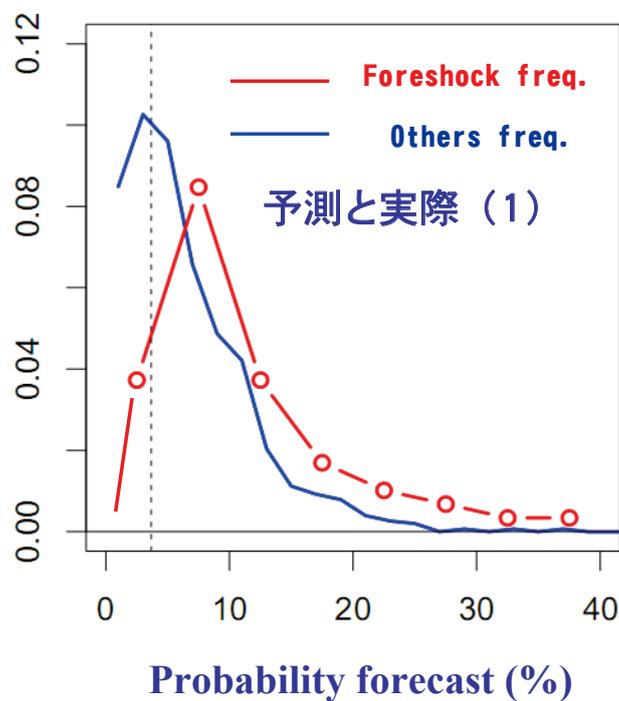


第1図 群れの中の地震同士の (a) 時間間隔, (b) 震央間距離, (c) マグニチュード差を小さいものからの順に並べ替えた累積分布で, 各図の上から順に全ての地震型の群れ, 群発型地震群そして前震型である. 挿入図はピンクで塗った部分を規格化した累積曲線である.

Fig. 1 Cumulative curves of (a) origin-time differences, (b) distances between epicenters and (c) magnitude differences between earthquakes. For each diagram, the curves from the top to the bottom represent earthquakes of all the types, swarms and foreshocks, respectively. The insets in (a) and (b) are the normalized cumulative curves in the pink shaded zones.



第2図 孤立地震や群れの先頭の地震が前震である確率の地域性。 カラーテーブルの数字は確率。
 Fig. 2 Map of the probability that the first event of the cluster or isolated event will be a foreshock.
 The numbers associated with the color table indicate probabilities.



第3図 予測前震確率の相対頻度。 赤線が実際に前震だった場合、青線がその他（群発型と本震・余震型）。
 Fig. 3 Normalized frequencies of the predicted foreshock probabilities. Red and blues lines represent the frequencies in the case where the events were actually foreshocks and the other types of clusters (swarm or mainshock-aftershock type clusters), respectively.

Probability forecast (%)

1 st EQ	CLS	#C	P_C	ENTROPY	CUM~E	P1	P2	P3	P4	P5	P6	...		
1	-1	1	5.90%	-0.02072	-0.02072	5.90%								
2	-3	9	1.93%	0.02060	-0.00012	4.09%	0.48%	0.55%	1.01%	1.31%	1.63%	2.01%	2.93%	3.34%
3	-4	1	4.45%	-0.00550	-0.00562	4.45%								
4	-5	1	5.35%	-0.01496	-0.02058	5.35%								
5	-6	1	4.10%	-0.00180	-0.02238	4.10%								
6	-7	1	0.32%	0.03682	0.01443	0.32%								
7	-8	2	7.37%	-0.03649	-0.02206	7.63%	7.11%							
8	-9	1	1.40%	0.02601	0.00395	1.40%								
9	-10	1	8.85%	-0.05257	-0.04862	8.85%								
10	-11	3	11.20%	-0.07869	-0.12732	11.89%	10.97%	10.73%						
11	-12	1	10.45%	-0.07029	-0.19760	10.45%								
12	-13	3	0.40%	0.03604	-0.16156	0.16%	0.47%	0.57%						
13	-14	1	3.91%	0.00021	-0.16134	3.91%								
14	-16	1	16.20%	-0.13670	-0.29804	16.20%								
15	-18	2	13.36%	-0.10337	-0.40141	13.48%	13.24%							
16	-19	1	27.13%	-0.27649	-0.67790	27.13%								
17	-20	1	13.67%	-0.10694	-0.78483	13.67%								
18	21	1	21.35%	1.69299	0.90816	21.35%								
19	-22	1	16.75%	-0.14322	0.76494	16.75%								
20	23	6	17.09%	1.47052	2.23546	15.34%	22.53%	16.51%	15.74%	14.91%	17.51%			
214	236	1	11.62%	1.08509	14.64916	11.62%								
215	-237	6	5.62%	-0.01778	14.63138	5.00%	5.45%	5.68%	5.90%	6.16%	5.54%			
216	-239	3	5.82%	-0.01991	14.61147	5.92%	6.41%	5.13%						
217	-240	1	10.43%	-0.07012	14.54135	10.43%								
218	-241	4	2.29%	0.01691	14.55826	0.61%	1.56%	3.43%	3.55%					
219	-242	1	12.35%	-0.09173	14.46653	12.35%								
220	-243	1	3.74%	0.00199	14.46851	3.74%								
221	-244	1	2.24%	0.01738	14.48590	2.24%								
222	-245	1	5.77%	-0.01940	14.46650	5.77%								
223	-246	2	2.87%	0.01097	14.47747	0.33%	5.40%							
224	-247	9	4.20%	-0.00283	14.47464	0.16%	0.53%	3.10%	5.52%	7.64%	5.81%	4.68%	4.72%	5.63%
225	-248	4	14.93%	-0.12168	14.35296	18.87%	16.24%	13.22%	11.40%					
226	-249	1	1.54%	0.02449	14.37745	1.54%								
227	250	3	8.64%	0.78808	15.16553	8.56%	9.25%	8.10%						

第4図 予測前震確率と実際の一覧表の一部。

Fig. 4 Sequentially predicted foreshock probabilities and actual results