

前震の識別問題と確率予報と実際：最近17年間の検証

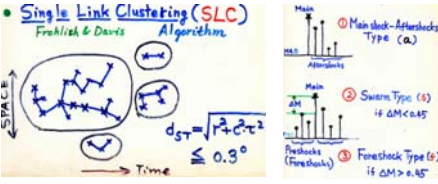
尾形良彦 モデリング研究系 教授

マグニチュード4以上の地震について、それらが前震である確率を、下記の論文に基づき、予報し、結果を1994年から現在までの地震データベースで検証する。

References

- Ogata, Y., Utsu, T. and K. Katsura, 1996, *Geophys. J. Int.*, 127, 17-30.
- Ogata, Y., Utsu, T. and K. Katsura, 1995, *Geophys. J. Int.*, 121, 233-254.

最初の地震はどのようにして認識されるか？前震の定義は？

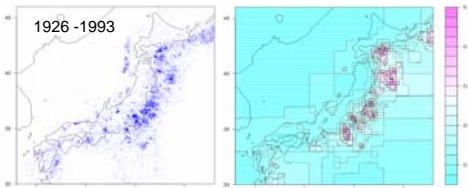


First of all we need to identify clusters of earthquakes, for which we use the Single-Link method that can be applied for the prediction. Then, given a cluster, we define the **mainshock** as the largest earthquake in a cluster. **Foreshocks** are the events that precede the mainshock in the cluster. **Foreshocks** are the preshocks when they are substantially smaller than the mainshock, for example, by the difference of 0.45 or more, otherwise the cluster is called as **Swarm**.

Cluster member#	Foreshocks #	Swarms #	M.A. #	All clusters #
≥1	487	3.7 ± 0.2	584	11676
≥2	125	6.5 ± 0.6	584	30.5 ± 1.1
≥3	57	8.0 ± 1.1	271	37.9 ± 1.8
≥4	33	8.7 ± 1.5	153	40.5 ± 2.5
≥5	18	7.4 ± 1.7	93	38.4 ± 3.1
≥6	12	6.8 ± 1.9	63	35.6 ± 3.6
≥7	10	7.9 ± 2.4	44	34.6 ± 4.2
≥8	8	7.8 ± 2.6	31	30.1 ± 4.5
≥9	8	9.2 ± 3.1	29	33.3 ± 5.1
≥10	8	10.3 ± 3.4	25	32.1 ± 5.3

This table shows statistics of such foreshocks, swarms and the mainshock-aftershocks including isolated earthquakes. The rate is about 4% for the first earthquake being foreshocks. If we have at least two earthquakes in a cluster, then these become 6-7% for foreshocks, and 30-40% becomes swarm.

最初の地震が前震である確率の地域性



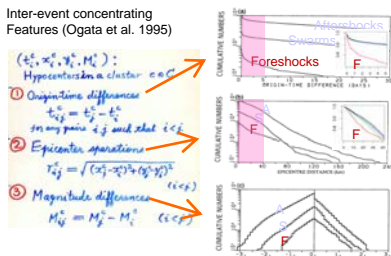
最初の地震が前震である確率予報と実際

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)

右上地図は1926年から1993年までのデータから推定した最初の地震 (M₀≥4) が前震である確率地図。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、縦の点線は予報に地域性を入れない場合の前震の全日本での平均値 (3.8%)。分割表は予報と実現頻度を取りまとめたもの。

複数の地震が前震である識別問題



These summarize the space and time concentrating features of each type of clusters, by stacked and ordered. Looking at the slopes of the log cumulative, foreshock concentrations are significantly stronger than any other types of clusters. Also, increasing magnitudes enhance the foreshock probability. The insets in (a) and (b) are normalized cumulative curves.

複数の地震が前震である識別確率 (続き)

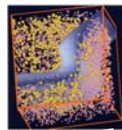
Normalizing Transformation
 $(t, r, g) \rightarrow (\tau, \rho, \gamma)$ in $[0,1]^3$

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

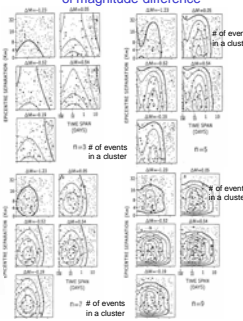
Epicenter Separation Transformation
 $\rho = 1 - \exp\{-r/\sigma\}$

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

Normalized time, distance & magnitude difference in the unit cube



Foreshock probability on sliced planes of magnitude-difference



Here the normalized cube is filled by such transformed differences. The yellow large balls and purple small balls represent the foreshocks and the other types of clusters, respectively. To see the ratios inside the cube, these are projected to the sliced pieces as shown in the bottom left panel. Plus signs and small dots represent the foreshocks and the other types. Thin contour curve indicates the first 5% ratio and thin contours indicate 10%, 15%, 20% and so on. Based on these normalized data, we estimate the forecasting model below.

複数の地震が前震である識別確率予測の計算式

Multiple Prediction Formula (Utsu, 1978)

This is the probability of foreshocks by a logit model of the 4 independent features of location, epicenter separations, time and magnitude differences. Namely,

複数の地震の前震確率予測の計算アルゴリズム

複数の地震がおきた場合、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。

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

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

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

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

$\sigma_1 = 6709, \sigma_2 = 0.4456$

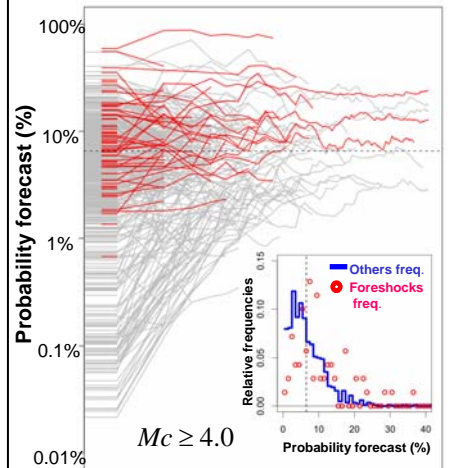
群れのメンバーが追加することに確率予測 p_k を次のように計算する

$$\logit(p_k) = \logit\{\mu(x_k, y_k)\} + \frac{1}{\#\{i < j\}} \sum_{i < j} \left[a_i + \sum_{l=1}^k b_l \gamma_{i,l} + \sum_{l=1}^k c_l \rho_{i,l} + \sum_{l=1}^k d_l \tau_{i,l} \right]$$

ここで $\mu(x, y)$ は群れの先陣の予測確率 (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

確率予報と実際 1994-2011 Mar.



続発する地震の順番

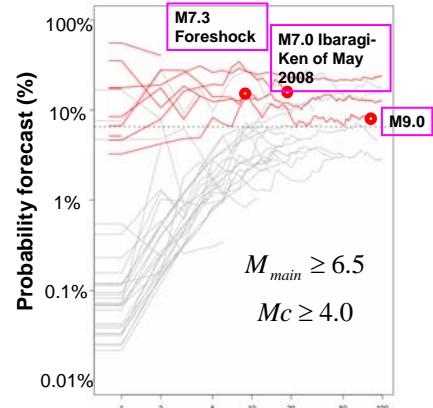
$2^*Entropy_0 = 523.96 / 2^*Entropy = 460.29$
 $2^*\Delta Entropy = -63.68$

予報確率と実際の結果の分割表

	2.5%	5%	10%	15%	
	4	10	30	12	14
	179	211	263	115	51
	183	221	293	127	65
	2.2	4.5	10.2	9.4	21.5
					7.9

aic0 = 3178.62 aic1 = 3157.15
 $\Delta aic = -21.47$

本震がM6.5以上の場合 (M9東北地方太平洋沖地震を含む)



続発する地震の順番

左上図は1994年から2011年3月まで地震群に対して新しい地震が追加 (横軸) されるごとに予報される前震の確率 (縦軸) で赤線が前震だった場合で灰色線がその他。右上図は左図の予報に関して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横の点線は予報に地域性を入れない場合の前震の全日本での平均値 (3.8%)。縦の点線は予報に地域性を入れない場合の前震の全日本での平均値 (6.8%)。左下図は左上図の予報で本震がM6.5以上のものだけを取り出した。クロス表は予報と実現頻度を取りまとめたもの。