

2016年熊本地震 (M7.3) の前震確率予測について

Foreshock forecast probabilities of the M7.3 Kumamoto earthquake of 2016

東京工業大学
統計数理研究所

Tokyo Institute of Technology
The Institute of Statistical Mathematics

地震群の時間間隔の集中度・空間的配置の集中度・マグニチュード増減パターンなどの統計的特徴に注目して学習し、将来の大きな地震の「前震」である確率を計算するアルゴリズムは国内外で少なからず提案されている¹⁾。本報告では以下の3つの異なるアルゴリズムでM6.5熊本地震の「余震活動」からM7.0以上の本震が起こる予測確率を推定した。九州地域を含む日本の内陸直下型は前震確率が低く2%前後で全国平均(3.8%)以下である²⁾。以下の方法による予測施行の系列は第1図に与えている、M6.5熊本地震の余震のM7.3地震前の前震確率は概ね5%以上である。M7.3地震以後の確率予測は更なる大地震が起こる前震確率を与えている。これに関して方法1は比較的高い確率を維持しているが、方法2や3は更なる大地震が起こる確率は低くなっている。これらは、マグニチュード列から寄与される予測成分に関して、前者の方法はマグニチュード差の増減のみに基づいて予測式を構成しているが、後者の2方法は標的の本震のマグニチュードも考慮して構成しているからである。

これに比べて2005年M7.0福岡県西方沖地震や2015M7.1年鹿児島県西方沖地震のような本震・余震型系列は概して低い前震確率を与えている。

1. 前震群, 群発地震群, 本震余震群の統計的判別による方法²⁾

Single-link法(第2a図)で群分けを行い、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 , マグニチュード差 g の関数で表している。データから見てこれらの独立性は一応認められる。 t, r, g のそれぞれにある変換をして区間 $[0, 1]$ 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 のロジット関数 $\text{logit}(p)=\log\{(1-p)/p\}$ で

$$\text{logit}(p_c)=\mu_0+E[f(\tau, \rho, \gamma)] \quad \text{ただし} \quad f(\tau, \rho, \gamma)=\sum_{l=0}^3 b_l \tau^l + \sum_{m=0}^3 c_m \rho^m + \sum_{n=0}^3 d_n \gamma^n$$

で表し、気象庁のデータ(1926~93年, $M \geq 4.0$)についてそのパラメータを求めている。3変数多項式で展開した形式も試みているがAIC最小の条件から上の式が選ばれた。この研究においては、日本付近の $M \geq 4$ の地震が $M+0.45$ 以上の地震の前震である確率が地域別に求められ、最初の $M \geq 4.0$ の地震(結果的に孤立した地震や群れの先頭の地震)が前震である予測確率を求めるのに使っている。これに対して1994~2011年3月10日までのデータで予測実験を評価している^{3, 4)}。

2. 一般化加法モデルによる方法⁵⁾

1926年～2004年までのJMAカタログ ($M \geq 4$) から上記と同じSingle-link法により前震群の候補となる地震群を構成し、本震確率を評価するのに用いる特徴量として、 N : 発生地震数、 D : 最大震央距離 (km)、 T : 発生期間長 (日)、 M_1, M_2 : それぞれ最大、二番目のマグニチュードを採用した (第2図)。本震確率は標的となる本震マグニチュード M_{main} ごとに算出するものとし、次の一般化加法モデルによる本震確率 $P(N, D, T, M_1, M_2, M_{\text{main}})$ の算出を行った。

$$\text{logit}\{P(N, D, T, M_1, M_2, M_{\text{main}})\} = a_1(N) M_1 + a_2(N) (M_1 - M_2) + b(N) M_{\text{main}} + f(N, D, T)$$

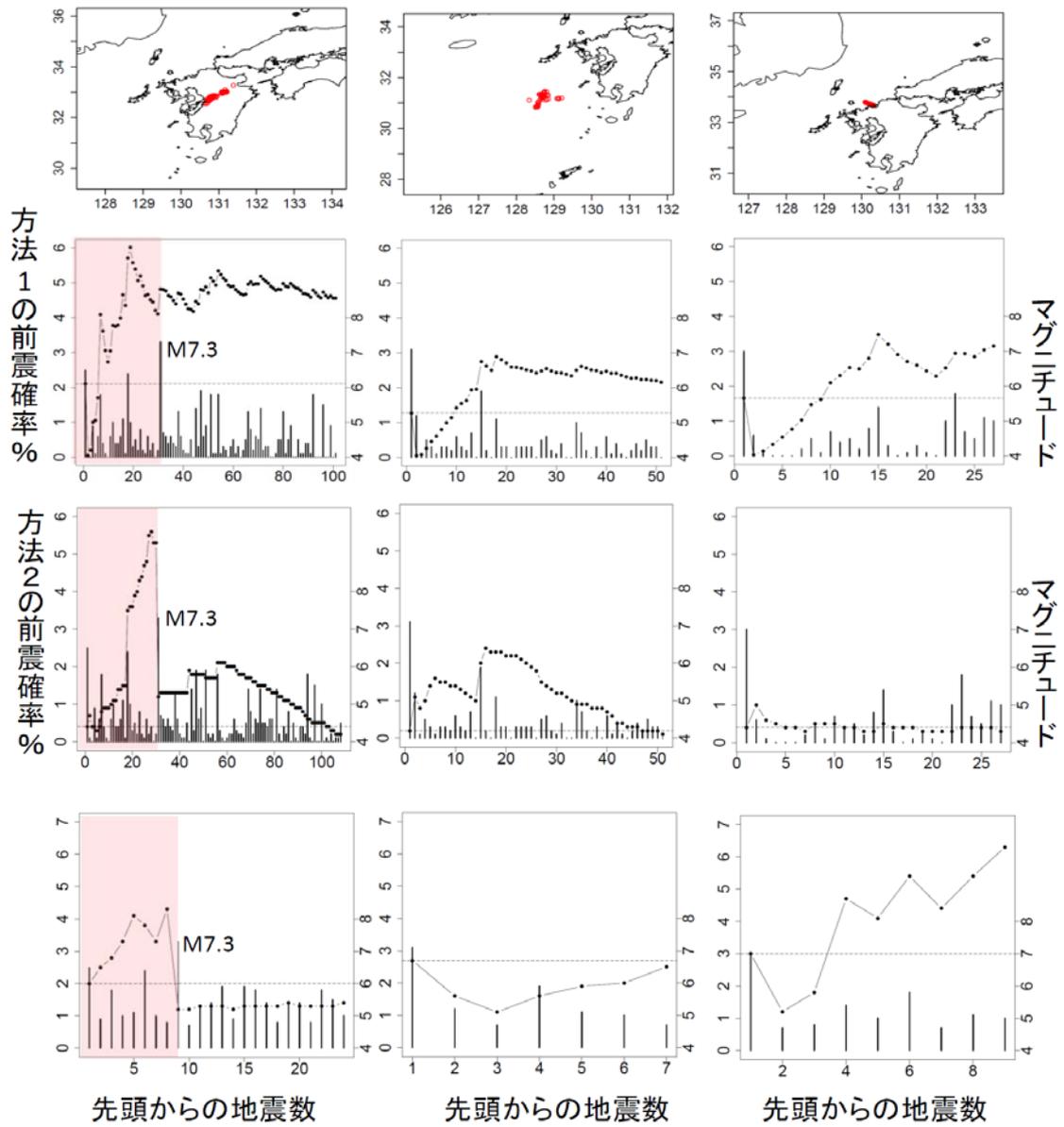
ここで、左辺の関数は $\text{logit}(P) = \log\{(1-P)/P\}$ であり、右辺の関数 a_1, a_2, b, f は各特徴量が本震確率に与える影響をそれぞれ3次B-スプライン関数で推定したものである。特に、右辺第三項の本震マグニチュード M_{main} の係数 $b(N)$ は b 値に相当するものとして導入した。推定された関数 a_1, a_2, b, f を第3図に示した。前震群の特徴として、最大マグニチュード M_1 が大きく、さらに最大と二番目のマグニチュード差 $M_1 - M_2$ が小さいほど本震確率が高い傾向がある。また時空間的には、短期間かつ広い領域で起こるほど本震確率が高い傾向が見られる。

3. ISCカタログの経験確率による評価⁶⁾

1970年～2014年のISCカタログ ($M \geq 4.7$) に基づいて経験確率による本震確率の評価を行った。この手法では、下限マグニチュードの引き上げ ($M \geq 4.7$) に伴いSingle-link法の基準を調整して得られた前震群の候補に対して、本震確率を評価するための特徴量として N : 発生地震数、 D : 最大震央距離 (km)、 T : 発生期間長 (日)、 M : 最大マグニチュードを用い、各地震発生時点の特徴量 (N_0, D_0, T_0, M_0) に対応する条件 $\{N = N_0, D \leq D_0, T \leq T_0, M \geq M_0\}$ を満たした過去の地震群におけるマグニチュード M_{main} 以上の本震発生割合を本震確率の推定値として採用した。国内のカタログだけでは該当事例が少ないので、より信頼度の高い経験確率を算出するためにグローバルのISCカタログを評価に用いることとした。それでも表1で見られるように、地震数は多くなるがマグニチュードが大きくなるほど該当事例は少なくなり経験確率の信頼度は落ちる。

参考文献

- 1) 気象研究所 (2015) 連絡会報 94 巻, 108
- 2) Ogata, Y., Utsu, T. and K. Katsura, 1996, Geophys. J. Int., 127, 17
- 3) 統計数理研究所 (2011) 連絡会報, 86 (3-18), 123.
- 4) Ogata, Y. and K. Katsura, 2012, Geophys. J. Int., 191, 1237
- 5) 野村俊一, 尾形良彦 (2015). 日本地震学会 2015 年度秋季大会.
- 6) 野村 俊一 (2015). 東京大学地震研究所第6回研究集会「日本における地震発生予測検証実験 (CSEP-Japan)」.



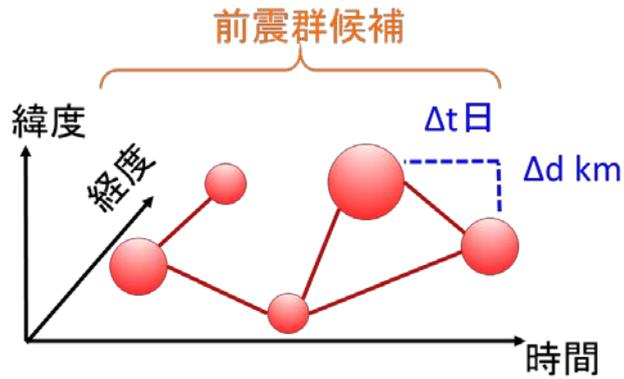
第1図. 前震確率の推移（発生地震の順番）。左からパネルの列は順に熊本地震，鹿児島西方沖地震，福岡県西方沖地震。上2列目から順に方法1²⁾，方法2⁵⁾，方法3⁶⁾による確率予測。

Fig. 1. Foreshock probability at each earthquake occurrence. Left, center and right panel shows the case of Kumamoto, West-off-Kagoshima and West-off-Fukuoka earthquake, respectively.

(a) 前震群候補の連結基準 (Single-link法)

$$\sqrt{(\Delta d)^2 + (c\Delta t)^2} \leq 33.33\text{km} \text{ (方法3では55.55km)}$$

$$c = 1 \text{ (km/日)}$$



(b) 前震群候補からの特徴量抽出

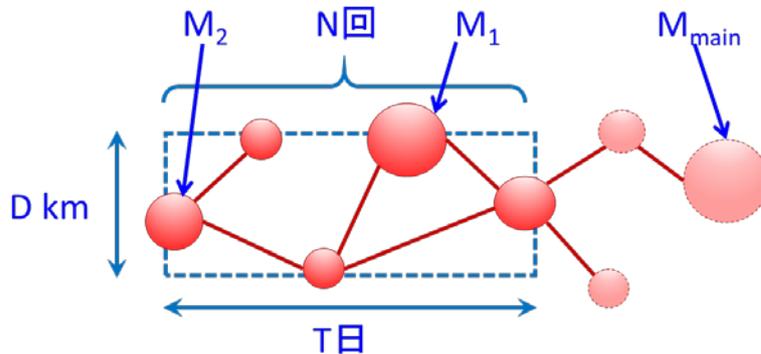
N : 発生地震数,

D : 最大震央距離,

T : 最初の地震からの経過期間,

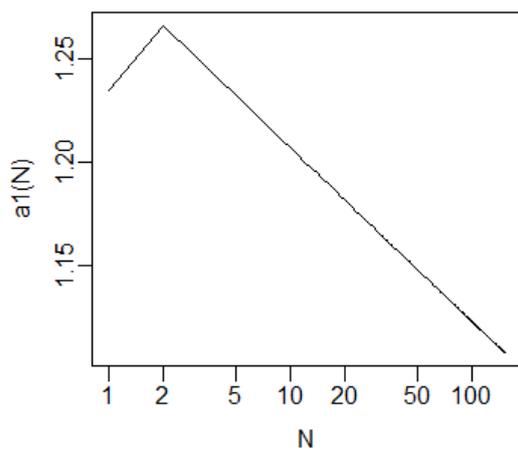
M_1, M_2 : 最大, 二番目のマグニチュード

M_{main} : 本震マグニチュード

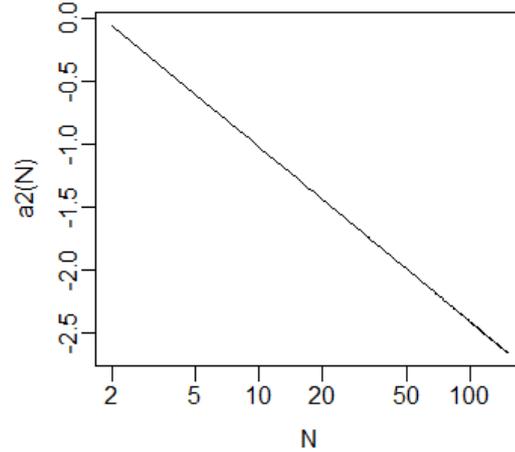


第2図. Single-link法による前震群候補の構成方法と, 前震確率評価のための特徴量抽出。

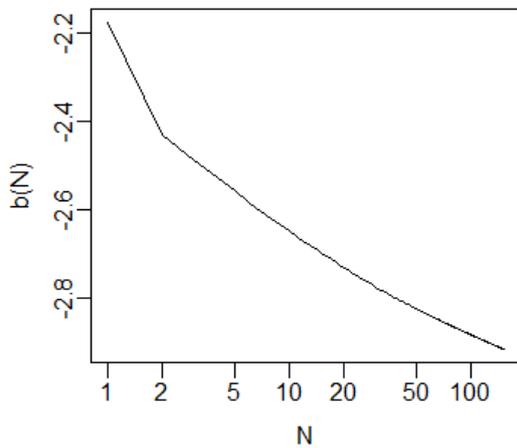
Fig. 2. Construction of foreshock candidates in Single-link method and extraction of features for foreshock probability evaluation.



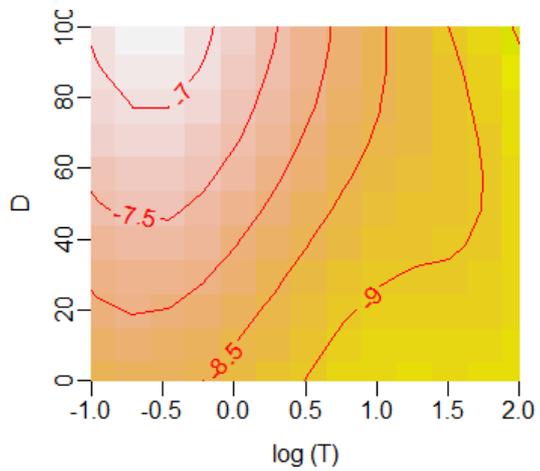
(a) M_1 の係数 $a_1(N)$



(b) $M_1 - M_2$ の係数 $a_2(N)$



(c) M_{main} の係数 $b(N)$



(d) $f(N, D, T)$ ($N=8$ のとき)

第3図. 方法2で推定された一般化加法モデル $\text{logit}\{P(N, D, T, M_1, M_2, M_{\text{main}})\} = a_1(N) M_1 + a_2(N) M_2 + b(N) M_{\text{main}} + f(N, D, T)$ の各成分。

Fig. 3. Components of generalized linear model $\text{logit}\{P(N, D, T, M_1, M_2, M_{\text{main}})\} = a_1(N) M_1 + a_2(N) M_2 + b(N) M_{\text{main}} + f(N, D, T)$ estimated in the method 2.

地震名	前震群識別条件				本震条件	ISCカタログによる評価(1970-2014)	
	地震数 N_0	最大震央距離 の上限 D_0	経過期間 の上限 T_0	最大マグニチュード の下限 M_0	本震マグニチュード の下限 M_{min}	本震発生数 /識別条件達成数	本震発生確率
2016年 熊本地震 M7.3	1	-	-	M6.5	M7.0	13/658	1.98%
	2	50km	1日	M6.5	M7.0	11/442	2.49%
	3	50km	1日	M6.5	M7.0	8/281	2.85%
	4	50km	1日	M6.5	M7.0	6/184	3.26%
	5	50km	1日	M6.5	M7.0	5/123	4.07%
	6	50km	1日	M6.5	M7.0	3/79	3.80%
	7	50km	1日	M6.5	M7.0	2/60	3.33%
	8	50km	1日	M6.5	M7.0	2/46	4.35%
	9	-	-	M7.3	M7.4	1/83	1.20%
	10	-	-	M7.3	M7.4	1/81	1.23%
	11	-	-	M7.3	M7.4	1/79	1.27%
	12	-	-	M7.3	M7.4	1/77	1.30%
	13	-	-	M7.3	M7.4	1/79	1.27%
	14	-	-	M7.3	M7.4	1/81	1.23%
	15	-	-	M7.3	M7.4	1/79	1.27%
	16	-	-	M7.3	M7.4	1/78	1.28%
	17	-	-	M7.3	M7.4	1/78	1.28%
	18	-	-	M7.3	M7.4	1/78	1.28%
	19	-	-	M7.3	M7.4	1/73	1.37%
	20	-	-	M7.3	M7.4	1/76	1.32%
	21	-	-	M7.3	M7.4	1/77	1.30%
	22	-	-	M7.3	M7.4	1/75	1.33%
	23	-	-	M7.3	M7.4	1/77	1.30%
	24	-	-	M7.3	M7.4	1/71	1.41%
2015年 鹿児島県 西方沖地震 M7.1	1	-	-	M7.1	M7.2	4/150	2.67%
	2	50km	1日	M7.1	M7.2	2/122	1.64%
	3	60km	1日	M7.1	M7.2	1/89	1.12%
	4	60km	1日	M7.1	M7.2	1/64	1.56%
	5	60km	1日	M7.1	M7.2	1/53	1.89%
	6	60km	5日	M7.1	M7.2	1/50	2.00%
	7	60km	5日	M7.1	M7.2	1/40	2.50%
2005年 福岡県 西方沖地震 M7.0	1	-	-	M7.0	M7.1	6/203	2.96%
	2	50km	1日	M7.0	M7.1	2/166	1.20%
	3	50km	2日	M7.0	M7.1	2/112	1.79%
	4	50km	3日	M7.0	M7.1	4/85	4.71%
	5	50km	30日	M7.0	M7.1	3/74	4.05%
	6	50km	30日	M7.0	M7.1	3/56	5.36%
	7	50km	30日	M7.0	M7.1	2/45	4.44%
	8	50km	40日	M7.0	M7.1	2/37	5.41%
	9	50km	50日	M7.0	M7.1	2/32	6.25%

表1. 方法3の経験確率評価のための前震識別条件とISC震源カタログから算出した前震確率。

Table 1. Conditions of foreshocks for evaluation of empirical probability in method 3 and foreshock probability calculated from the ISC hypocentre catalogue.