

## 12 - 8 多様な予測方式に対する前震識別モデルとその予測性能評価

**Foreshock Discrimination Models for Various Prediction Schemes and Evaluation of their Predictive Performance**

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

前震活動の識別に基づいて本震を予測するモデルや評価法（例えば文献 1, 2, 3 など）はこれまでに種々提案されているが、それらは予測方式も多種多様に異なっており、それゆえ予測性能の比較評価も難しいことが多い。本報告では、予測期間および予測対象のマグニチュード下限などの予測方式の一部を変更する場合の本震発生確率の調整方法とその予測性能の評価例を示す。

Single-link 法<sup>4)</sup>により構成した未だ活動中の地震群において、最後の地震から 30 日以内に群内最大地震が起こるものを前震群と定義したときの前震確率の評価式<sup>4)</sup>を、2000 年 1 月 1 日から 2017 年 10 月 31 日までの気象庁カタログに適用し、群内地震数が  $N = 2, 5, 10$  および  $N \leq 10$  を満たす地震群について評価された前震確率の度数分布と、各階級中の実際の前震割合すなわち適中率と比較した結果を第 1 表 (a) に示している。該当例数の少ない階級を除いて、前震確率の高い階級ほど概ね適中率は高くなっている。さらに、表から階級ごとに前震確率を評価するモデルと、一律の前震確率とするモデルの予測性能を赤池情報量規準 (AIC) により比較すると、いずれも前者の方が良い成績を示している。

ここで、予測期間を 30 日より縮めた場合の前震確率を評価するために、前震確率評価時点から本震発生までの期間の累積分布を第 1 図に示す。評価時点から 30 日以内の本震のうち、およそ 6 割が 7 日以内、およそ 3 割が 1 日以内に発生しているため、元の 30 日以内本震発生の前震確率に 6 掛け、3 掛けすることでそれぞれ 7 日以内、1 日以内本震発生の前震確率へと修正することができる。

また、予測対象である本震のマグニチュード下限を変更した場合の前震確率を評価するために、最大前震と本震とのマグニチュード差  $M_{main} - M_1$  の累積分布を第 2 図に示した。マグニチュード差の分布は、ゲーテンベルグ-リヒター則と同様の式で  $b$  値 0.8 に相当する

$$P(M_{main} > M_1 + m) = 10^{-0.8m}, m = 0, 0.1, 0.2, \dots$$

に概ね従っている。したがって、たとえば本震を M6 以上に限定した場合の前震確率は（元の前震確率） $\times 10^{-0.8(M_1 - 5.9)}$  のように評価することができ、また、本震を最大前震マグニチュード  $M_1 + 0.5$  以上に限定した場合の前震確率は（元の前震確率） $\times 10^{-0.8 \times 0.4} \doteq 0.48$  のように評価することができる。これらの前震確率の予測性能を第 1 表 (b), (c) に基づいて評価すると、第 1 表 (a) と同様に前震確率の高い階級ほど概ね適中率は高くなり、一律の前震確率よりも階級別に評価する方が AIC も良くなるため、前震確率は依然有効と言える。

最後に、群内で次に起こる地震のマグニチュード分布を前震確率に基づいて修正する方式での予測<sup>4)</sup>を考える。ここでは、気象庁による日本のカタログに加えて、世界の震源カタログも用いた予測性能評価も行う。M4.7 以上、深さ 100 km 以内、観測期間 1960 ~ 1999 年の International Seismic Center (ISC) のグローバルカタログに基づいて前震識別モデル<sup>3)</sup>を推定し直した結果を第 3 図、第 4 図に示す。ここで、 $(X, Y)$  は地震群の中心経度・緯度、 $N$  は群内地震数、 $M_1, M_2$  は群内の最大と二番目のマグニチュード、 $T$  は地震群の継続期間 (日)、 $D$  は群内の平均震央間距離 (km)

である。

推定された本研究のモデルと先行研究のモデル<sup>5, 6)</sup>で評価した前震確率（最大前震マグニチュード  $M_1 + 0.5$  以上の本震発生確率）を用いて群内の次の地震のマグニチュード分布を予測したとき、通常のゲーテンベルグ-リヒター則（ $b$  値 0.9）のマグニチュード分布に対する情報利得の累計を第5図に示している。本研究のモデルはずっと正の累積情報利得で推移しているが、群内地震数  $N$  を5以内に限定した場合の方が情報利得は大きくなる。また、先行研究のモデルと比較すると、1994～2011年の気象庁カタログでは群内地震数  $N \leq 5$  に限ると先行研究の方が優れた予測性能を示すが、地震数  $N$  を限定しないと本研究のモデルの方が遥かに良くなる。一方、1994～2011年の United States Geological Survey (USGS) による世界の震源カタログを用いて予測性能を評価すると、群内地震数の条件によらず本研究で推定し直したモデルが先行研究のモデルよりも良い予測成績を示している。

次の地震のマグニチュード分布予測を変える方式は、ETAS モデルなどの既存モデルの予測を修正する形でも適用できるため、将来的には国際プロジェクト Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) の地震予測検証実験などを通じて他のモデルとの予測性能比較を行うことが望まれる。

(野村俊一, 尾形良彦)

#### 参考文献

- 1) 統計数理研究所 (2011) 前震の確率予報の実施, 連絡会会報, **85** (12-4), 440-444.
- 2) 前田憲二・弘瀬冬樹 (2011) 前震による確率予測 - 日本海溝沿い領域について -, 連絡会会報, **85** (12-10), 460-462.
- 3) 統計数理研究所 (2011) 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, 連絡会会報, **86** (3-18), 123-125.
- 4) 統計数理研究所 (2018) 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, 連絡会会報, **99** (12-9), 446-451.
- 5) 統計数理研究所 (2018) 次の地震のマグニチュード予測と評価, 連絡会会報, **99** (12-10), 452-455.
- 6) Ogata, Y., Katsura, K., Tsuruoka, H. and Hirata, N. (2018) Exploring magnitude forecasting of the next earthquake, *Seis. Res. Letters*, **89**, 1298.

第1表 2000年以降の(a)最大前震マグニチュード超, (b)最大前震マグニチュード+0.45超, (c)M6以上の本震を対象とした前震確率評価値の度数分布と適中率 (=前震群数/全地震群数). 最右列はAICの比較(階級別に前震確率を定めた場合のAIC1と一律の前震確率とした場合のAIC0).

Table 1 Cross-classified contingency table of evaluated foreshock probability and actual portion of foreshocks for mainshocks of magnitudes over (a) maximum foreshock magnitudes, (b) maximum foreshock magnitudes + 0.45 and (c) M6 for seismic clusters of certain size N. The right end column shows AIC comparison between the contingency table (AIC1) and the reference model with constant probability evaluation (AIC0).

(a)

前震確率評価値		0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%	合計	AIC
N=2	全地震群数	469	489	220	59	14	2	0	0	1,253	AIC0=967
	前震群数	27	67	45	17	4	2	0	0	162	AIC1=916
	適中率	6%	14%	20%	29%	29%	100%	N/A	N/A	13%	dAIC=51
N=5	全地震群数	129	57	27	13	9	3	2	2	242	AIC0=198
	前震群数	8	12	4	3	3	1	1	2	34	AIC1=185
	適中率	6%	21%	15%	23%	33%	33%	50%	100%	14%	dAIC=13
N=10	全地震群数	68	7	3	5	4	2	2	0	91	AIC0=83
	前震群数	5	3	1	2	3	1	0	0	15	AIC1=73
	適中率	7%	43%	33%	40%	75%	50%	0%	N/A	16%	dAIC=10
N≤10	全地震群数	1410	884	443	161	77	37	13	9	3034	AIC0=2435
	前震群数	92	134	86	50	24	17	6	9	418	AIC1=2244
	適中率	7%	15%	19%	31%	31%	46%	46%	100%	14%	dAIC=190

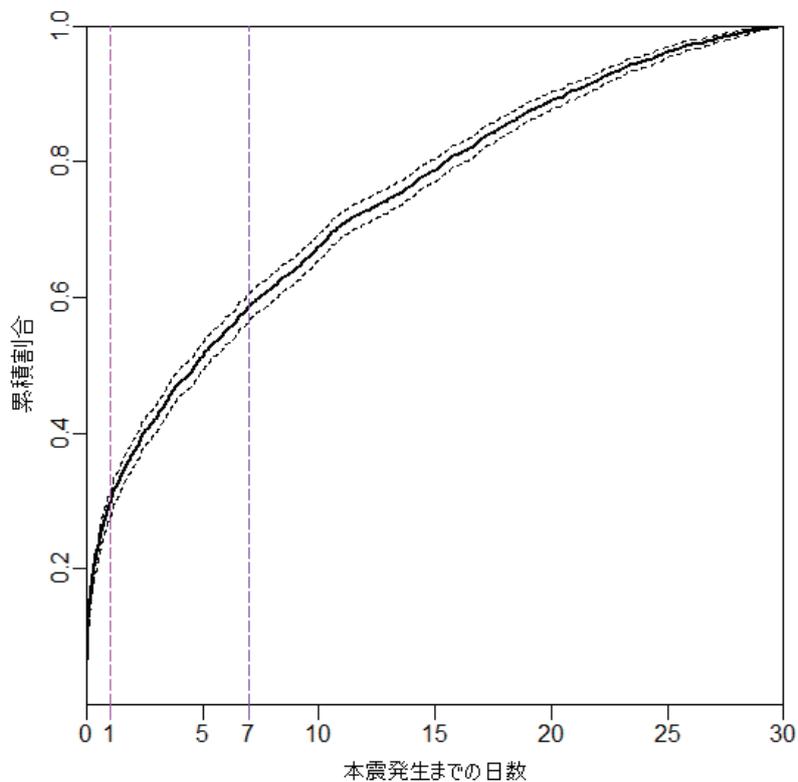
(b)

前震確率評価値		0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	合計	AIC
N=2	全地震群数	991	249	13	0	1,253	AIC0=690
	前震群数	65	29	4	0	98	AIC1=679
	適中率	7%	12%	31%	N/A	8%	dAIC=11
N=5	全地震群数	190	40	9	3	242	AIC0=158
	前震群数	16	4	1	3	24	AIC1=146
	適中率	8%	10%	11%	100%	10%	dAIC=12
N=10	全地震群数	75	9	5	2	91	AIC0=73
	前震群数	6	4	2	0	12	AIC1=65
	適中率	8%	44%	40%	0%	13%	dAIC=8
N≤10	全地震群数	2355	565	95	19	3,034	AIC0=1833
	前震群数	165	73	20	14	272	AIC1=1756
	適中率	7%	13%	21%	74%	9%	dAIC=77

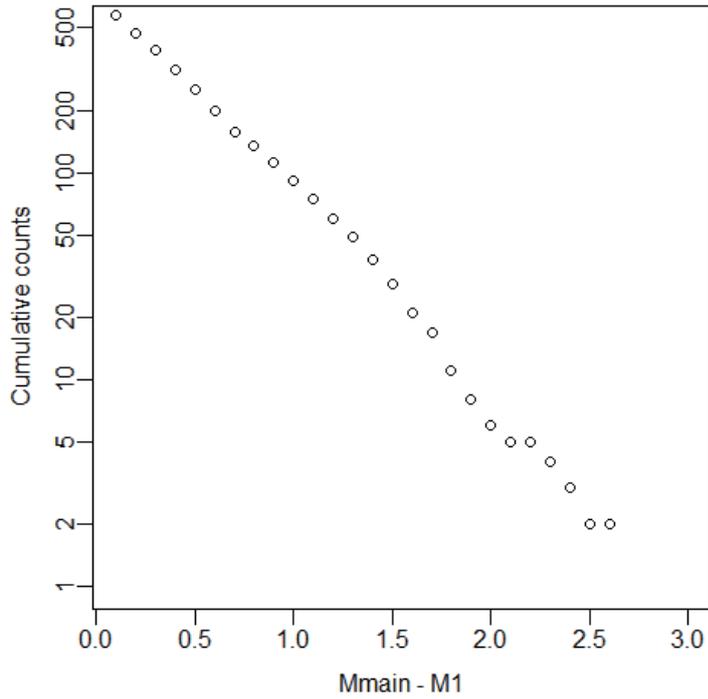
第1表 続き.  
Table 1 Continued.

(c)

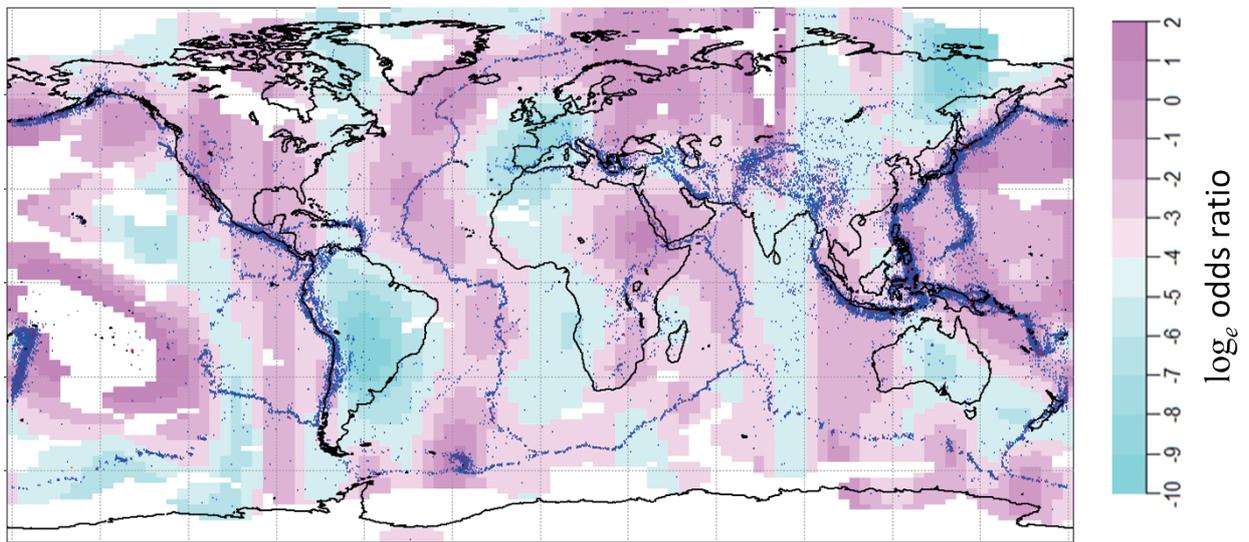
前震確率評価値		0-5%	5-10%	10-15%	15-20%	合計	AIC
N=2	全地震群数	1,229	22	2	0	1,253	AIC0=278
	前震群数	28	0	1	0	19	AIC1=272
	適中率	2%	0%	50%	N/A	2%	dAIC=6
N=5	全地震群数	205	30	6	1	242	AIC0=120
	前震群数	11	5	0	0	11	AIC1=115
	適中率	5%	17%	0%	0%	5%	dAIC=5
N=10	全地震群数	81	6	3	1	91	AIC0=69
	前震群数	7	2	1	1	9	AIC1=63
	適中率	9%	33%	33%	100%	10%	dAIC=6
N≤10	全地震群数	2779	203	41	11	3,034	AIC0=1167
	前震群数	110	25	7	3	145	AIC1=1133
	適中率	4%	12%	17%	27%	5%	dAIC=34



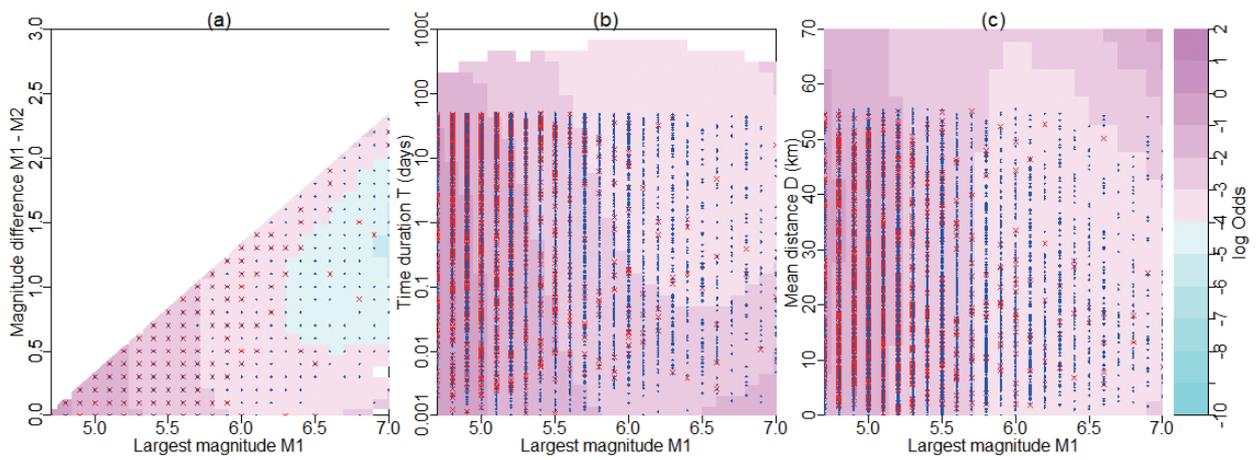
第1図 前震確率評価時点から本震発生までの期間の累積分布とその95%信頼区間.  
Fig. 1 Cumulative distribution of duration from foreshock probability evaluation to mainshock occurrence with its 95% confidence intervals (dashed curve).



第2図 本震と最大前震のマグニチュード差の累積分布.  
 Fig. 2 Cumulative counts of differences between mainshock magnitudes and maximum foreshock magnitudes.

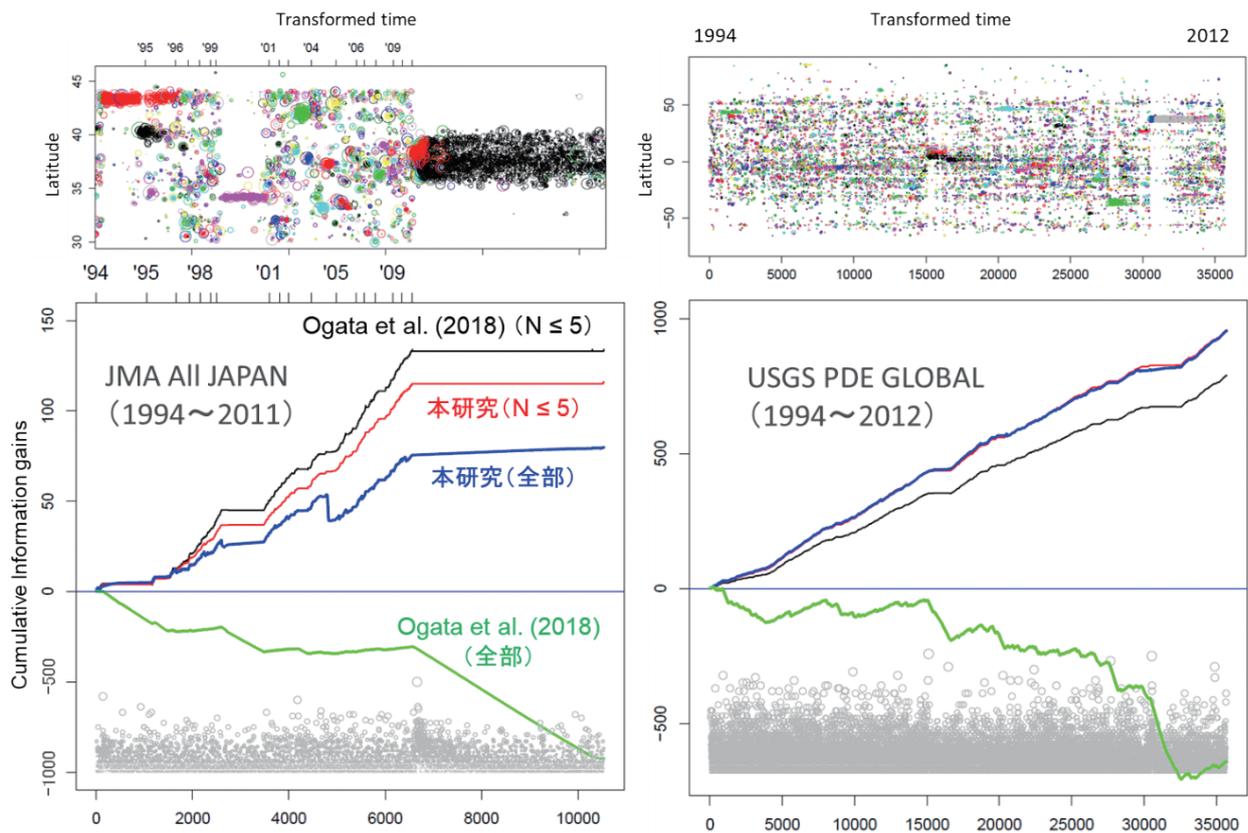


第3図 ISC グローバルカタログから推定された地域差によるオッズ関数  $g(X, Y)^{4)}$  の推定値と、前震群 (赤点) と他の地震群 (青点) の分布.  
 Fig. 3 Odds function  $g(X, Y)^{4)}$  and map of foreshock clusters (red) and the other clusters (blue) estimated from the ISC global catalog.



第 4 図 ISC グローバルカタログから推定された  $N = 2$  のときの前震群 (赤点) と他の地震群 (青点) の各特徴の分布と、オッズ関数<sup>4)</sup> (a)  $f_1(N, M_1, M_1 - M_2)$ , (b)  $f_2(N, M_1, T)$ , (c)  $f_3(N, M_1, D)$  の推定値。

Fig. 4 Distribution of features in foreshock clusters (red) and the other clusters (blue) and odds functions<sup>4)</sup> (a)  $f_1(N, M_1, M_1 - M_2)$ , (b)  $f_2(N, M_1, T)$ , (c)  $f_3(N, M_1, D)$  when  $N = 2$  estimated from the ISC global catalog.



第 5 図 気象庁カタログと ISC グローバルカタログに対する G-R 則と比めたマグニチュード予測分布の information gain<sup>5,6)</sup> の評価。

Fig. 5 Cumulative information gain scores<sup>5,6)</sup> of magnitude predictive distributions from G-R law for JMA catalog and ISC global catalog.