

12-10 CSEP 参加グループによる予測手法：予測と実際の活動の比較検証 (3)  
Earthquake Predictability Experiment based on CSEP Project  
- Trial of forecast experiments in Japan -

東京大学地震研究所  
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

現在日本においては、地震活動に基づいた地震活動評価による地震発生予測検証実験が Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) プロトコルに基づき実施されている。CSEP とは、地震予活動予測を客観的に評価する枠組みおよびその研究基盤のことである。すべての地震活動予測モデルは、同一の地震カタログを学習データとして予測パラメータが最適化され、実際の予測がなされる。予測は、事前に実施され、予測結果は共通の手法により評価がなされる。実際の予測は、テスト領域を矩形(0.1°x 0.1°)に分割し、マグニチュード (M)は、0.1 刻みで分割され、小領域とその分割された M 規模ごとに、地震の予測数を算出したテーブルを生成し、そのテーブルを実際の観測と照らして評価する。今回の比較検証は、関東領域の将来の 3 ヶ月を予測する 2017 年 2 月 1 日からの 6 ラウンド分を実施した。

CSEP による予測の評価の基本式は、地震発生の予測数が  $\lambda$ 、観測数が  $\omega$  であった場合の、その実現確率は、

$$p(\omega|\lambda) = \lambda^\omega / \omega! e^{-\lambda} \quad (1)$$

であり、この対数尤度をとった

$$L(\omega|\lambda) = \log p(\omega|\lambda) = -\lambda + \omega \log \lambda - \log \omega! \quad (2)$$

が評価のインデックスとなる。これを小領域×地震規模の分割毎の予測数と実際の観測数から評価されることになる。この数値が大きいほど良いモデルである。この評価指数の特徴は、地震が起きることだけではなく起こらなかったということも考慮している。なお、CSEP による評価指数ではないが、一般的に使用されているものに情報利得 (Information Gain)がある。この指標は、モデル A の対数尤度値を  $L_a$ 、モデル B の対数尤度値を  $L_b$ 、観測地震数が  $N$  の場合には、

$$IG = \frac{(L_a - L_b)}{N} \quad (3)$$

で定義される指標となる。IG が 0 より大きい場合には、モデル B よりモデル A がよいことを示し、IG が 0.693 の場合には、モデル A はモデル B に比べて予測数が  $\exp(0.693)=2$  倍となっていることを意味している。通常比較の元となるモデル B は一様期待値分布モデルなど簡単なモデルを採用してこの値を算出する。この数値が大きいほど良いモデルとなる。

CSEP の標準テストは、観測結果が一つであるため、シミュレーションによって観測分布を導出してその分布と実際の観測結果を比較して観測結果がその分布を満たしているかどうかのテストを行うことにより実施される。評価手順は以下になる。①期待値マップを元に数値シミュレーションにより地震を発生させる。②①の疑似地震により(2)の対数尤度を計算する。③①、②を繰り返して(通常は 1000 回)対数尤度の分布を得る。④実際に観測された地震による対数尤度が③の分布のどこにくるかを見る(第 1 図)。このテストにおいては、モデル毎に分布が異なり、正規分布になるということでもない。また、出されるスコアは相対値でありモデル間で絶対的な比較ができるわけではないことに注意する必要がある。スコアは「観測をみたくしているとはいえない」を棄却す

る有意水準になる。

## 2. 予測実験の試行結果について

本予測試行実験に採用した地震活動予測モデルは、過去の地震活動を基本とした **Relative Intensity (RI)**モデル（空間の平滑半径は 10km を採用，学習期間は，1998 年から予測期間直前まで）のほか時空間 **ETAS** モデル（**HISTETAS5PA/HISTETAS5PA1205**）の計 3 モデルである。ただし，地震の予測数については，これまで **RI** モデルにおいては，大森宇津則のパラメータを東北地方太平洋沖地震後から予測期間前までの **M4** 以上の地震発生数から(4)式を用いて算出してきたが，地震活動が落ち着いてきたこともあり，今回は使用しなかった。予測地震数は，時刻  $t$  の地震積算数を

$$N(t) = \mu \cdot t + K \{c^{1-p} - (t+c)^{1-p}\} / (p-1) \quad (4)$$

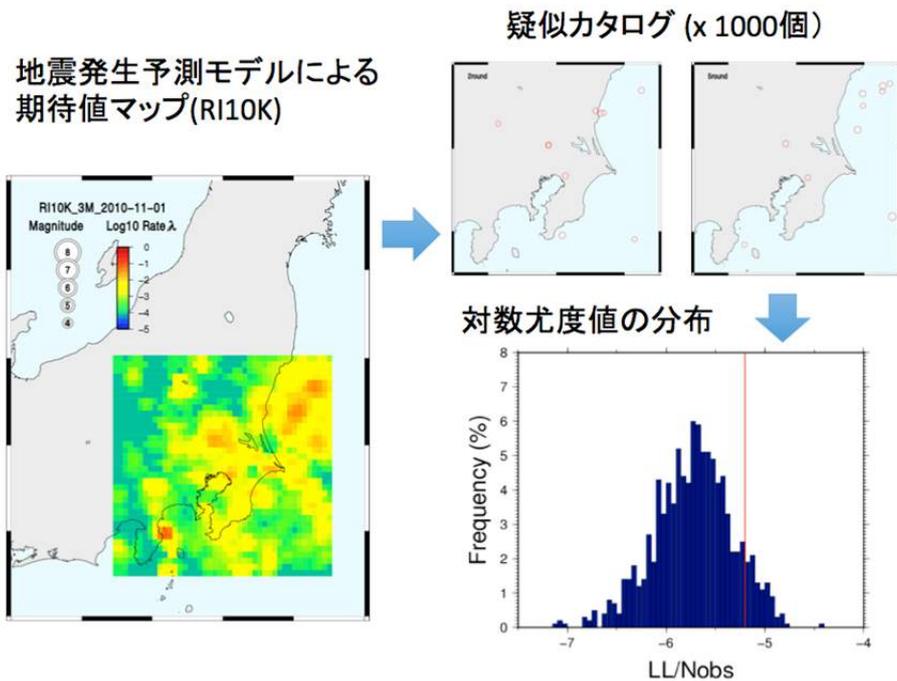
で算出する。

2017 年 2 月からの 4 ラウンド分の予測を **CSEP** によるテストの結果を表 1，2，3，4 に示し，予測マップを第 2 図，第 3 図，第 4 図，第 5 図に示した。地震数の予測はすべてのラウンドにおいて 3 モデルとも過大評価となった。一様空間期待値モデルを基準とした情報利得値の 3 モデルの全 35 ラウンドの平均は，**RI10K:1.162**，**HISTETAS5PA:1.168**，**HISTETAS5PA1205:1.419** となり，**HISTETAS5PA1205** がよいモデルであった。なお，2009 年 11 月からの各ラウンドの情報利得値を第 6 図に示した。東北地方太平洋沖地震を含むラウンドにおいては，3 モデルにおいて情報利得値が下がっていることがわかる。さらに，第 7 図においてそれぞれのモデルにおける地震の予測数を図示した。**HISTETAS5PA1205** は，東北地震後の予測モデルであるため，他のモデルよりも地震数をよく予測しているが，最近においては多少過大になっていることがわかる。

## 3. 最後に

大森宇津則による地震数の予測は，東北地方太平洋沖地震後の数年においては有効であることがわかったが，関東の地震活動が東北地方太平洋沖地震前の状態に近づいている状況では，オリジナルのモデルの予測がよくなりつつある状況であることを確認した。35 ラウンドを超える空間予測の情報利得値の平均は 1.1 から 1.2 程度であった。ただし，モデルを最適化すれば 1.4 程度に改善できることもわかった。**CSEP** に基づく地震活動予測実験を継続し，モデルの評価を引き続き実施し，モデルのパフォーマンスをモニターすることは今後も重要であると考えられる。なお，複数ラウンドにおける地震活動予測モデルの評価は空間予測および地震数予測を評価することでその特徴を把握できると思われる。

(鶴岡 弘)



第 1 図 CSEP テストの評価手順説明図.  
Fig. 1 Illustration of CSEP evaluation procedure.

表 1 2017/02/01-2017/05/01 のテスト結果  
Table1 Test results of 2017/02/01-2017/05/01

model	L-LL	L-gamma	N-delta1, delta2	M-kappa	Z-zeta	IG	予測数
RI10K	-80.98	0.993	0.992 0.014	0.674	0.720	1.4255	19.00
HISTETAS5PA	-79.41	1.00	1.00 0.002	0.635	0.820	1.7146	22.69
HISTETAS5PA1205	-79.58	1.00	1.00 0.00	0.631	0.916	2.010	27.69

表2 2017/05/01-2017/08/01 のテスト結果

Table2 Test results of 2017/05/01-2017/08/01

model	L-LL	L-gamma	N-delta1, delta2	M-kappa	Z-zeta	IG	予測数
RI10K	-73.17	0.995	1.000 0.000	0.260	0.018	0.0647	19.58
HISTETAS5PA	-71.52	0.999	1.000 0.000	0.206	0.196	0.6070	22.69
HISTETAS5PA1205	-76.225	1.000	1.000 0.000	0.259	0.053	0.4324	27.69

表3 2017/08/01-2017/11/01 のテスト結果

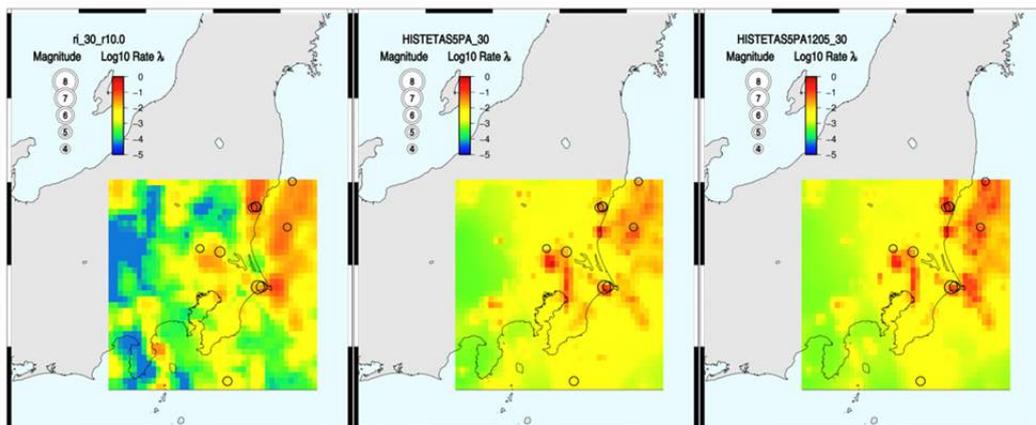
Table3 Test results of 2016/08/01-2016/11/01

model	L-LL	L-gamma	N-delta1, delta2	M-kappa	Z-zeta	IG	予測数
RI10K	-106.35	0.901	0.974 0.039	0.271	0.107	0.7365	19.482
HISTETAS5PA	-104.16	0.975	0.998 0.010	0.178	0.447	1.1020	22.69
HISTETAS5PA1205	-99.72	0.999	1.000 0.000	0.250	0.720	1.6361	27.69

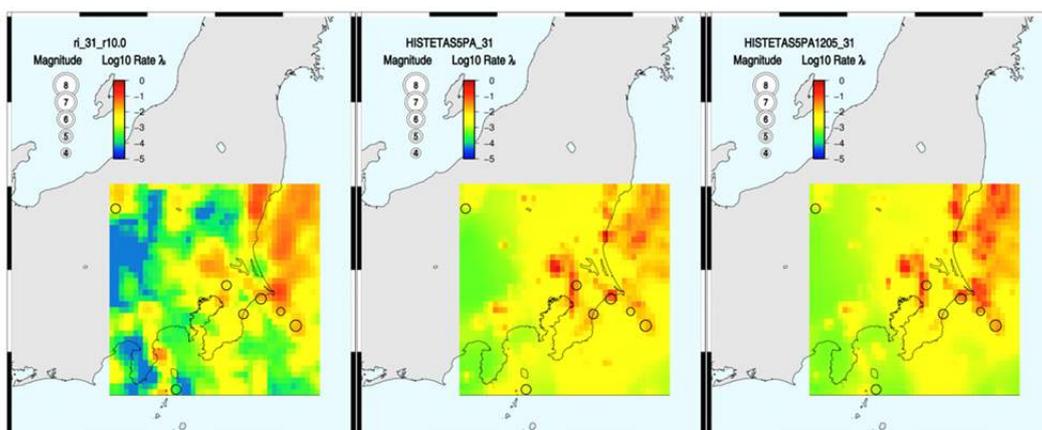
表4 2017/11/01-2018/02/01 のテスト結果

Table3 Test results of 2017/11/01-2018/02/01

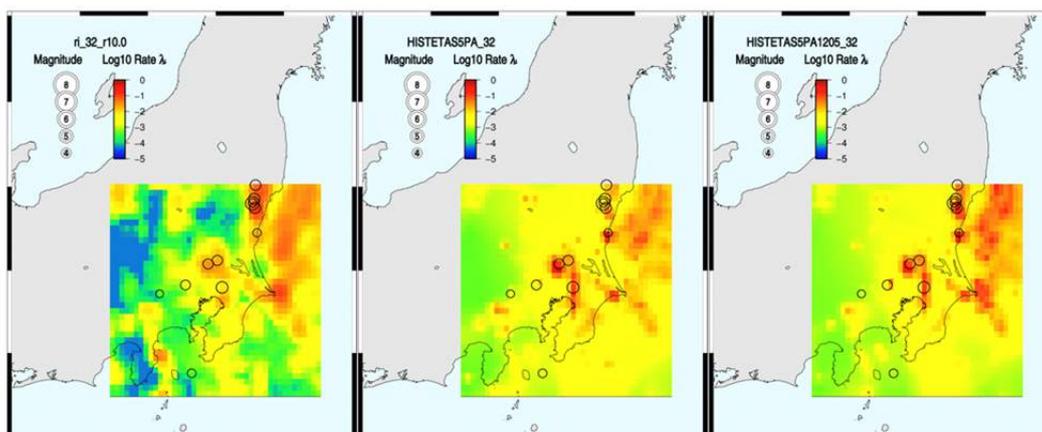
model	L-LL	L-gamma	N-delta1, delta2	M-kappa	Z-zeta	IG	予測数
RI10K	-148.42	0.447	0.478 0.606	0.158	0.471	1.2242	19.407
HISTETAS5PA	-150.40	0.660	0.747 0.328	0.114	0.396	1.1275	22.690
HISTETAS5PA1205	-146.35	0.914	0.956 0.073	0.147	0.443	1.3654	27.69



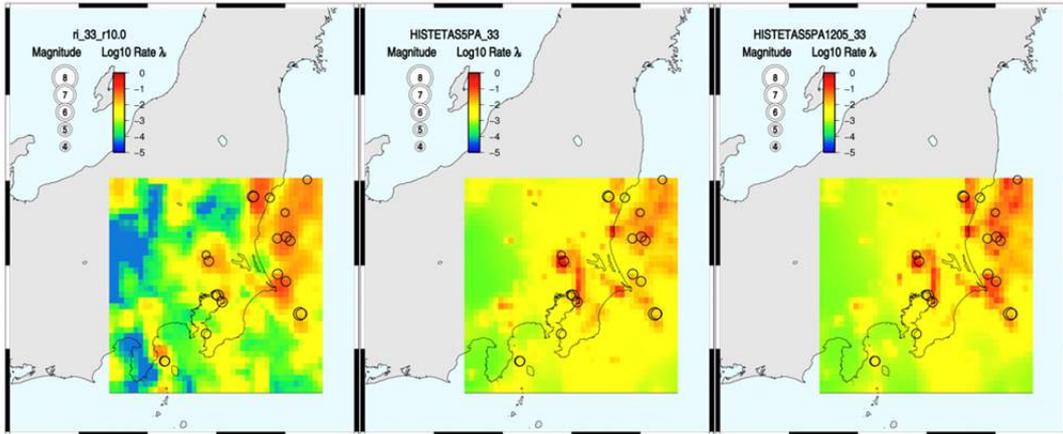
第2図 関東テスト領域の 2017/02/01-2017/05/01 ラウンド評価結果.  
 Fig. 2 Evaluation results for Kanto test region 2017/02/01-2017/05/01 round.



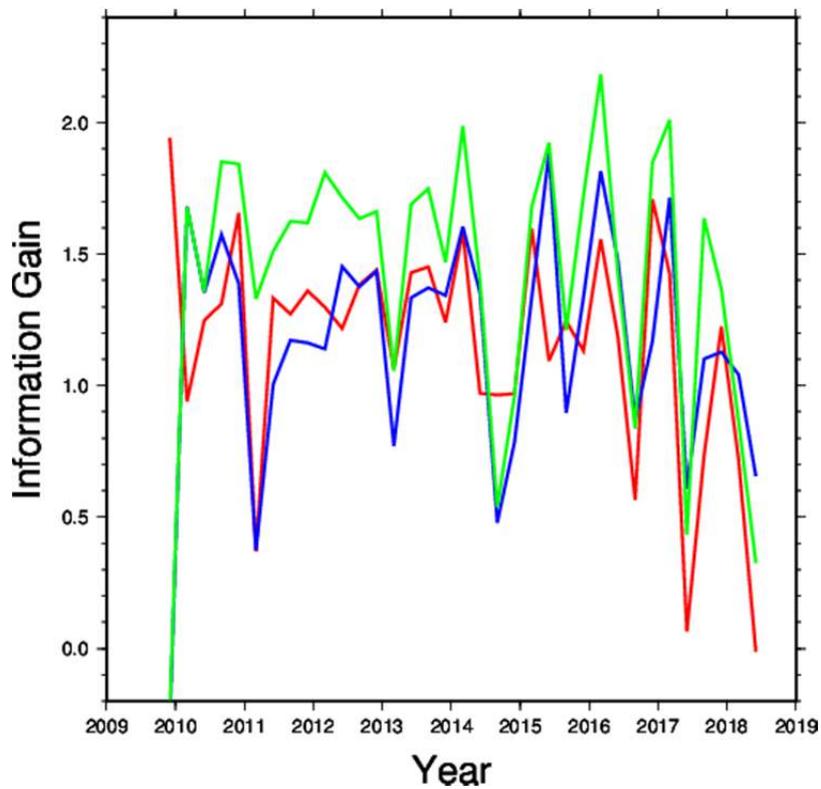
第3図 関東テスト領域の 2016/05/01-2017/08/01 ラウンドの評価結果.  
 Fig. 3 Evaluation results for Kanto test region 2016/05/01-2017/08/01 round.



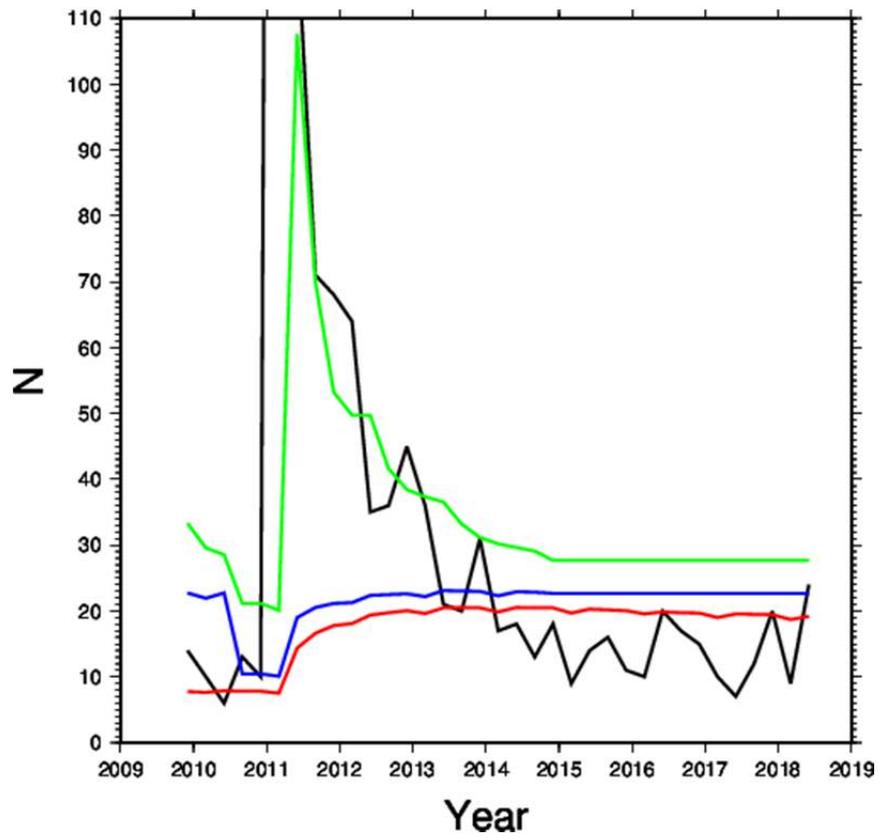
第4図 関東テスト領域の 2017/08/01-2017/11/01 ラウンドの評価結果.  
 Fig. 4 Evaluation results for Kanto test region 2017/08/01-2017/11/01 round.



第5図 関東テスト領域の2017/11/01-2018/02/01ラウンドの評価結果。  
 Fig. 5 Evaluation results for Kanto test region 2017/11/01-2018/02/01 round.



第6図 各ラウンドの情報利得値(赤:RI10K, 青:HISTETAS5PA, 緑:HISTETAS5PA1205).  
 Fig. 6 Information gain values for each round  
 red:RI10K, blue:HISTETAS5PA, green:HISTETAS5PA1205).



第7図 各ラウンドの地震予測数(黒:観測, 赤:RI10K, 青:HISTETAS5PA, 緑:HISTETAS5PA1205).  
 Fig. 7 Forecast earthquake number for each round  
 Black:Obsevation, red:RI10K, blue:HISTETAS5PA, green:HISTETAS5PA1205).