

12 - 2 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 (2) 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 ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 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 2016 年 2 月 1 日からの 4 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 λ 、観測数が ω 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 \times 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。評価手順は以下のようになる。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)** モデルを使用した。空間の平滑化半径は、10 km, 1998年から予測期間前までに発生した地震を学習データとした。ただし、地震の予測数については、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求めた。具体的な予測地震数は、時刻 t の地震積算数を

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

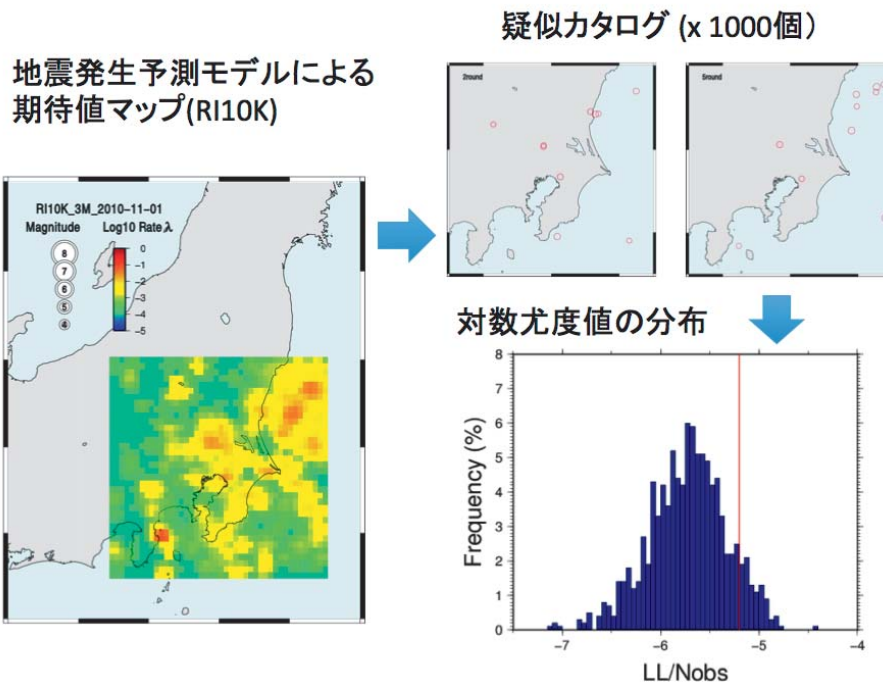
から算出した。

2016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第1, 2, 3, 4表に示し、予測マップを第2, 3, 4, 5図に示した。大森宇津則による地震数の予測はすべてテストをパスしていたが、複数のテストにおいてオリジナルのモデルと比べて必ず良くなるとは言えないラウンドも存在した。なお、一様空間期待値モデルを基準とした情報利得値は、各ラウンドでそれぞれ1.5559, 1.1846, 0.5658, 1.7080となり、情報利得は平均すると1.25であった。また、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は情報利得値が下がっていることがわかる。また、情報利得値の平均は1.26であり、今回の4ラウンドの平均に近かった。

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。20ラウンドを超える空間予測の情報利得値の平均は1.2から1.3程度であった。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することは重要である。また、モデルの改良を進めることにより、地震活動予測モデルの予測能力の向上は今後の課題であると考えられる。

(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.

第1表 2016/02/01-2016/05/01 のテスト結果
Table 1 Test results of 2016/02/01-2016/05/01

model	L- LL	L- gamma	N- Delta1, delta2	M- kappa	Z- zeta	Z- LL	IG	予測数
RI 10K original	-79.730	0.996	0.995 0.012	0.652	0.889	-51.842	1.5559	19.541
RI 10K + OU	-77.280	0.844	0.847 0.243	0.652	0.887	- 51.842	1.559	13.1

第2表 2016/05/01-2016/08/01 のテスト結果
Table 2 Test results of 2016/05/01-2016/08/01

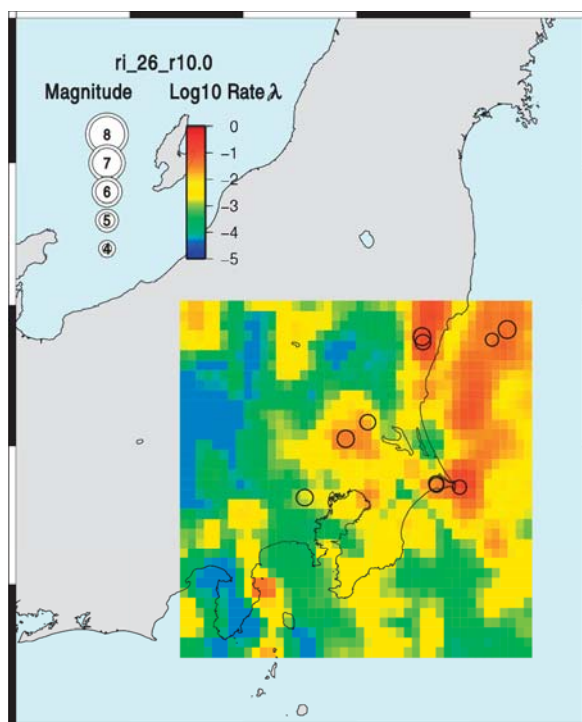
model	L- LL	L- gamma	N- Delta1, delta2	M- kappa	Z- zeta	Z- LL	IG	予測数
RI 10K original	-151.9	0.445	0.527 0.561	0.440	0.458	-98.633	1.1846	19.85
RI 10K + OU	-153.625	0.016	0.032 0.983	0.440	0.480	-98.633	1.1846	12.80

第3表 2016/08/01-2016/11/01 のテスト結果
 Table 3 Test results of 2016/08/01-2016/11/01

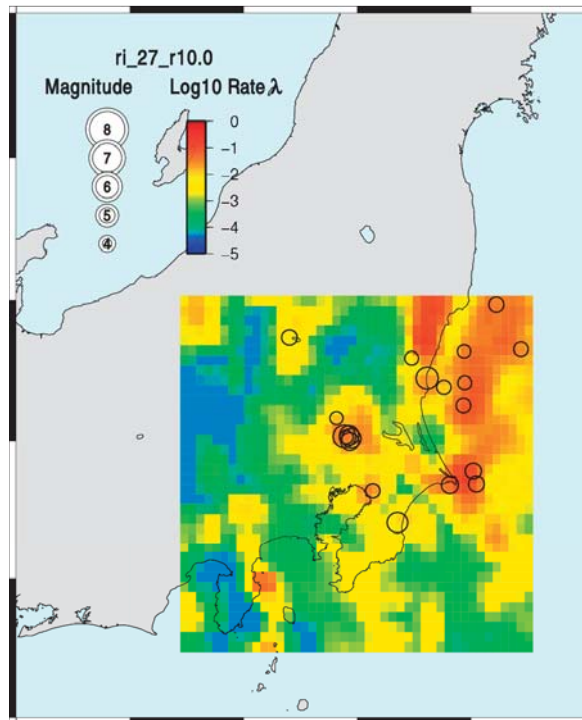
model	L-LL	L-gamma	N-Delta1, delta2	M-kappa	Z-zeta	Z-LL	IG	予測数
RI 10K original	-146.598	0.462	0.769 0.313	0.042	0.026	-95.943	0.5658	19.75
RI 10K + OU	-147.124	0.043	0.128 0.928	0.042	0.026	-95.943	0.5658	12.5

第4表 2016/11/01-2017/02/01 のテスト結果
 Table 4 Test results of 2016/11/01-2017/02/01

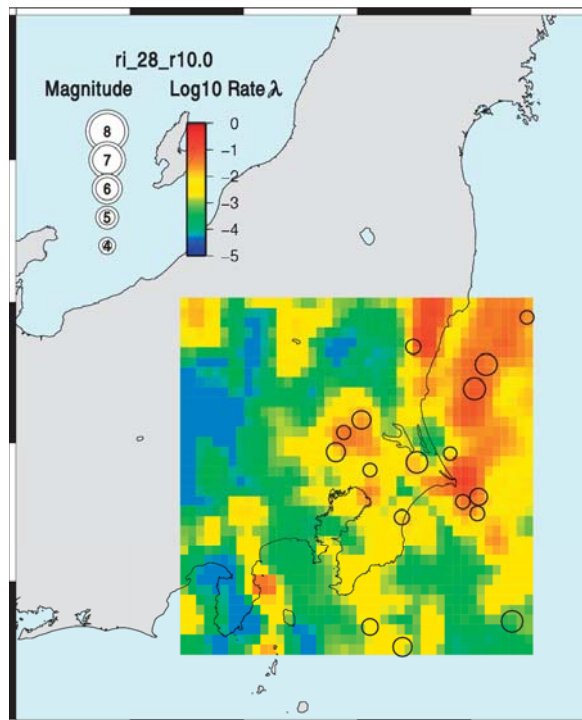
model	L-LL	L-gamma	N-Delta1, delta2	M-kappa	Z-zeta	Z-LL	IG	予測数
RI 10K original	-112.129	0.878	0.884 0.168	0.139	0.983	-69.399	1.7080	19.655
RI 10K + OU	-111.763	0.305	0.279 0.803	0.139	0.983	-69.399	1.7080	12.5



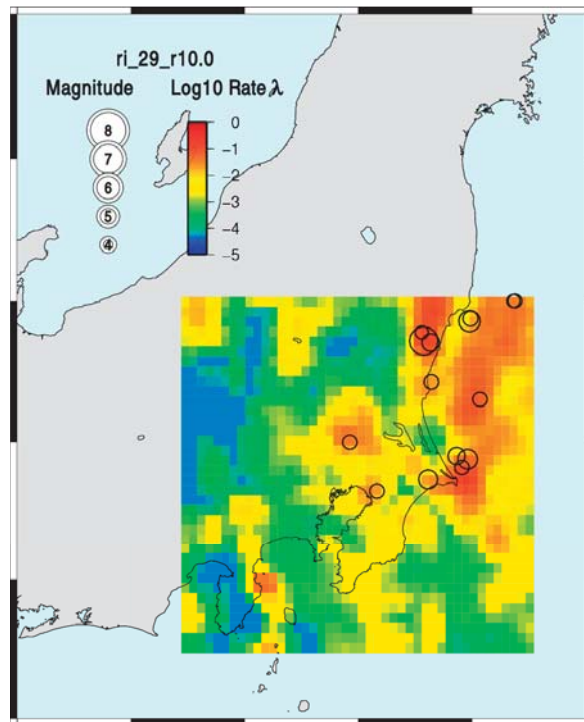
第2図 関東テスト領域の2016/02/01-2016/05/01 ラウンド評価結果.
 Fig.2 Evaluation results for Kanto test region 2016/02/01-2016/05/01 round.



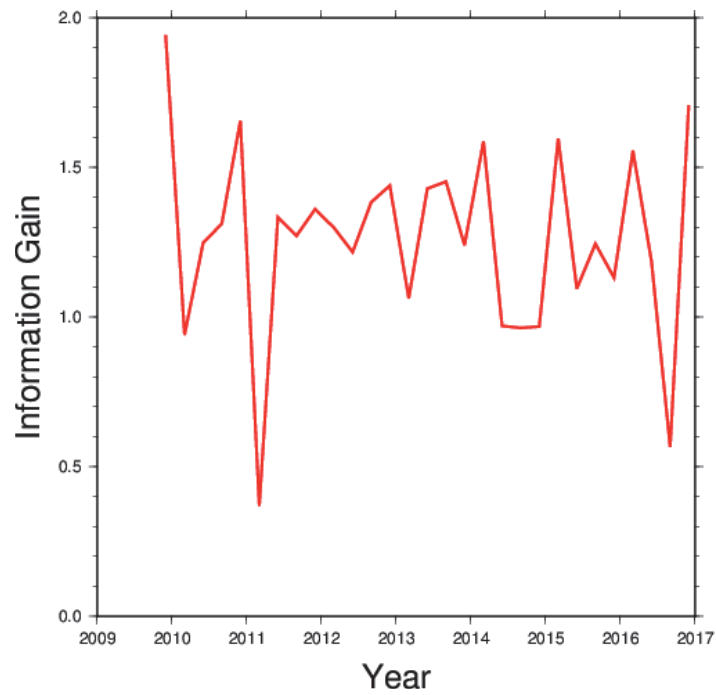
第3図 関東テスト領域の 2016/05/01-2016/08/01 ラウンドの評価結果.
Fig.3 Evaluation results for Kanto test region 2016/05/01-2016/08/01 round.



第4図 関東テスト領域の 2016/08/01-2016/11/01 ラウンドの評価結果.
Fig.4 Evaluation results for Kanto test region 2016/08/01-2016/11/01 round.



第 5 図 関東テスト領域の 2016/11/01-2017/02/01 ラウンドの評価結果.
 Fig.5 Evaluation results for Kanto test region 2016/11/01-2017/02/01 round.



第 6 図 各ラウンドの情報利得値.
 Fig.6 Information gain values for each round.