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
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，地震活動予測を客観的に評価する枠組みおよびその基盤のことである．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 2 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，

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

であり，この対数尤度をとった

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

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 La，モデル B の対数尤度値を Lb，観測地震数が N の場合には，

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

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非常に簡単なモデルを採用してこの値を算出する．

ただし，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（図 1)．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は少ない．また，出されるスコアは相対値でありモデルの絶対的な比較ができ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，10km, 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

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

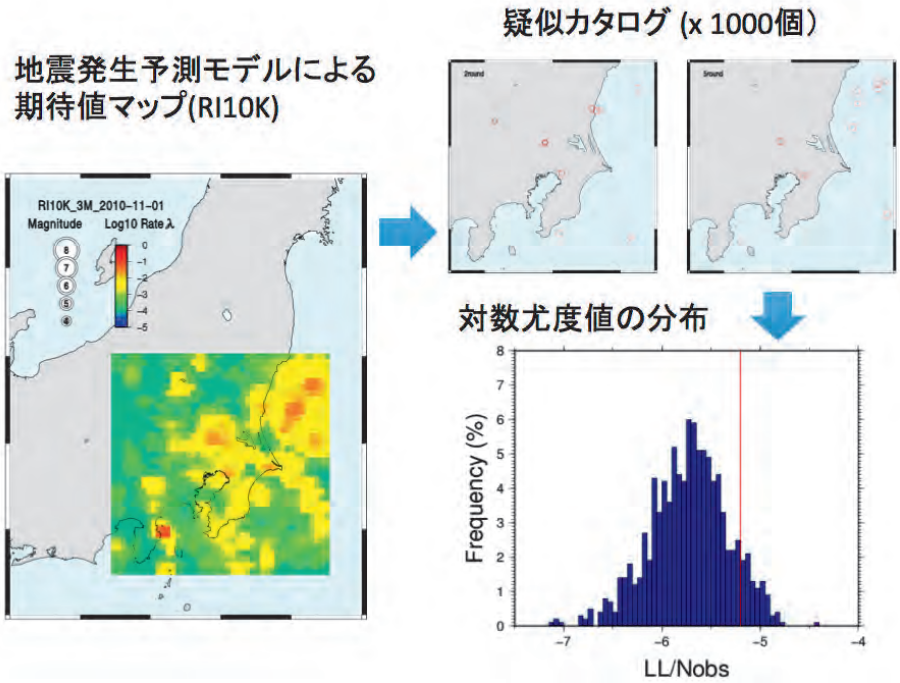
から算出した．

2015 年 8 月からの 2 ラウンド分の予測を CSEP によるテストの結果を表 1，2 に示した．また，予測マップを図 2，3 に示した．両ラウンドども RI モデルによる予測が観測を満たしているとの結果を得た．また，大森宇津則による地震数の予測はモデルの改善に貢献していることも改めてわかった．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 1.245, 1.131 となり，2015 年 11 月からのラウンドの予測が 2015 年 8 月からのラウンドの予測よりも難しかったようである．また，2015 年 5 月 1 から 8 月 1 日までの予測については，気象庁一元化カタログが確定したので，以前の暫定値での結果と確定値での結果の比較を行ったところ，予測数としては，0.07 の違い，L-Test の対数尤度値としては，0.03 程度の違いとなり確定値と暫定値で結果にはあまり影響しないことも確認できた．

3. 最後に

今回を含めて，3 回分の予測の結果が得られたが，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活動については，有効であることが改めてわかった．また，気象庁一元化カタログの暫定値と確定値を利用したことによる予測結果はあまりかわらないので，暫定値で十分な結果が得られることもわかった．CSEP に基づく地震活動予測実験を継続することにより，よりよい地震活動予測モデルの開発には今後も有効であると考えられる．

（鶴岡　弘）



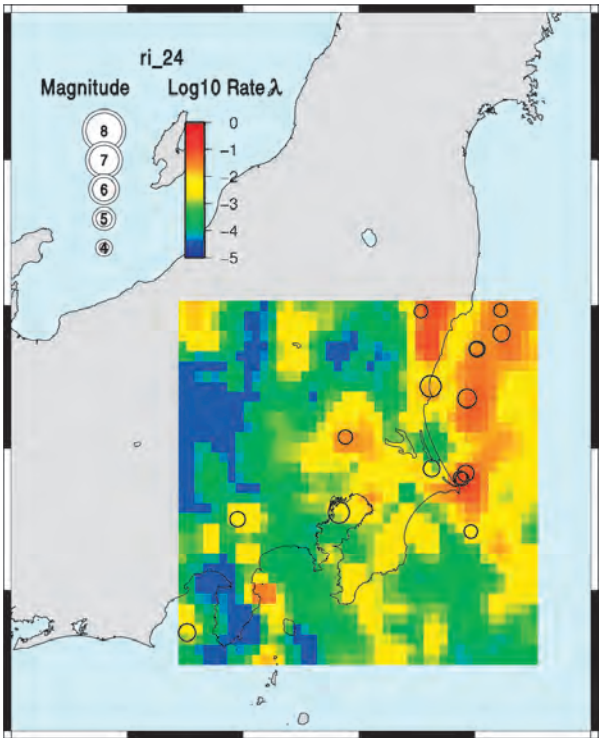
第 1 図　CSEP テストの評価手順説明図.
Fig.1　Illustration of CSEP evaluation procedure.

表 1　2015/08/01-2015/11/01 のテスト結果
Table1　Test results of 2015/08/01-2015/11/01

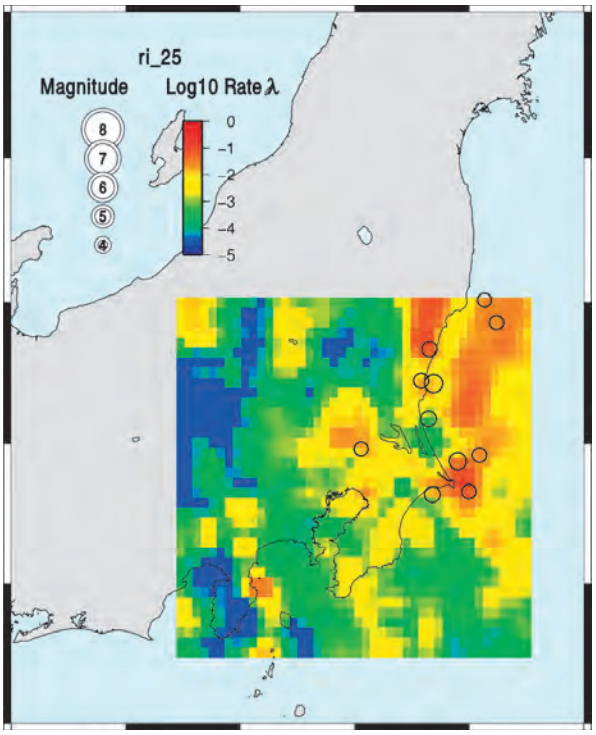
model	L- LL	L-gamma	N-Delta1, delta2	M-kappa	Z-zeta	Z- LL	PG	予測数
RI 10K original	-121.226	0.844	0.863 0.205	0.498	0.528	-81.796	3.4713	20.165
RI 10K + OU	-120.827	0.390	0.400 0.693	0l498	0.528	-81.796	3.4713	14.6

表 2　2015/11/01-2016/02/01 のテスト結果
Table2　Test results of 2015/11/01-2016/02/01

model	L- LL	L-gamma	N-Delta1, delta2	M-kappa	Z-zeta	Z- LL	PG	予測数
RI 10K original	-88.997	0.990	0.990 0.017	0.762	0.429	-60.648	3.0997	20.069
RI 10K + OU	-86.889	0.805	0.822 0.270	0.762	0.429	-60.648	3.0997	14.0



第 2 図　関東テスト領域の 2015/08/01-2015/11/01 ラウンド評価結果.
Fig. 2　Evaluation results for Kanto test region 2015/08/01-2015/11/01 round.



第 3 図　関東テスト領域の 2015/11/01-2016/02/01 ラウンドの評価結果.
Fig. 3　Evaluation results for Kanto test region 2015/11/01-2016/02/01 round.