

12 - 2 CSEP に基づく地震活動予測の検証「予測実験の試行について」 Earthquake Predictability Experiment based on CSEP Project - Trial of experimental earthquake forecast 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。すべての地震予測モデルは、同一の地震カタログを用いて予測パラメータが最適化され、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ことになる。モデラーとは異なる第三者により評価がなされる。日本においては、AllJapan, Mainland, Kanto の予測領域、1 日、3 ヶ月、1 年、3 年の予測期間が設定され、合計 12(=3x4) のテストが行われている (第 1 図)。例えば、Kanto の 3 ヶ月予測は、小領域数は、3111 で、M4 以上 9 までを 0.1 刻みとするので、3111x51=158661 のテーブルを作成することになる。

2. 評価が難しい地震活動予測

「関東地域で近いうちにマグニチュード 6 クラスの地震が発生する」という予測がなされた場合の評価を考える。この予測は、関東地域が緯度・経度で規定されていないこと。近いうちの定義が曖昧であること。地震の規模の範囲もマグニチュード 6 クラスということだけでは、特定できないという問題がある。つまり、この予測は領域・期間・規模のすべてにおいて曖昧性が含まれているために客観的な評価も難しいという予測である。つまり、客観的な予測の評価を実施するためには、現状では CSEP に基づいた予測を実施し、その評価をもって地震活動モデルの性能を評価することが重要であると考えられる。

3. CSEP による予測評価指数

2. において、曖昧な予測は評価が難しいと述べたが、CSEP による評価の基本式は、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。1 で述べたように、これを小領域×地震規模の分割毎の予測数と観測数により(2)による計算値の総和の大小により地震活動予測結果が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となる。(λ, ω)の組み合わせにおいて、(2,2), (2,0), (0.1, 1), (0.1,0)の場合の対数尤度値は、それぞれ、-1.3069, -2, -2.4026, -0.1 となる。つまり、この評価指数の特徴は、地震が起きるときは、なるべく予測数を起きた地震数と同じにした場合、地震が起きないときにはなる

べく予測数を小さくすればよいという指数であり、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同時に考慮している指標であることがわかる。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非常に簡単なモデルを採用してこの値を算出することが多い。

4. 曖昧予測の評価

ここでは、CSEP 流に領域を細かく分割していた場合とそうでない場合の情報利得がどうなるかを比較する。領域(A, B, C, D)とこの領域全体 E を定義し、この領域に地震が 1 つ起こる場合の予測とその評価を実施する。モデル 1 から 4 は、1 個地震を予測し、地震が起こる領域が異なるモデルであり、モデル 1: (1, 0, 0, 0), モデル 2: (0, 1, 0, 0), モデル 3: (0, 0, 1, 0), モデル 4: (0, 0, 0, 1)である。モデル 5 は、領域全体 E に対して地震が 1 個起こるモデルを考え、実際の観測は、(1, 0, 0, 0)であった場合の評価を考えてみる。対数尤度値は、モデル 1 :-1, モデル 2-4 は、 $-\infty$, モデル 5 は、-1 である。対数尤度値で比べると、モデル 1 とモデル 5 は同じであるが、一様期待値モデルを基準とした情報利得値で比較すると、モデル 1 は、1.386 である一方モデル 5 は、0 となり、モデル 1 のほうが良いということがわかる。この結果より、曖昧予測は予測のパフォーマンスは高くないことを示し、情報利得値は、予測のパフォーマンスを領域分割数にかかわらず、定量的に評価できる指数であることがわかる。なお、モデル 5 の情報利得が 0 の意味するところは、地震の予測数と実際の観測数が一致しているものの、そのパフォーマンスは一様期待値モデルと同じであるにすぎないということである。

5. 東北地方太平洋沖地震後の地震活動の予測

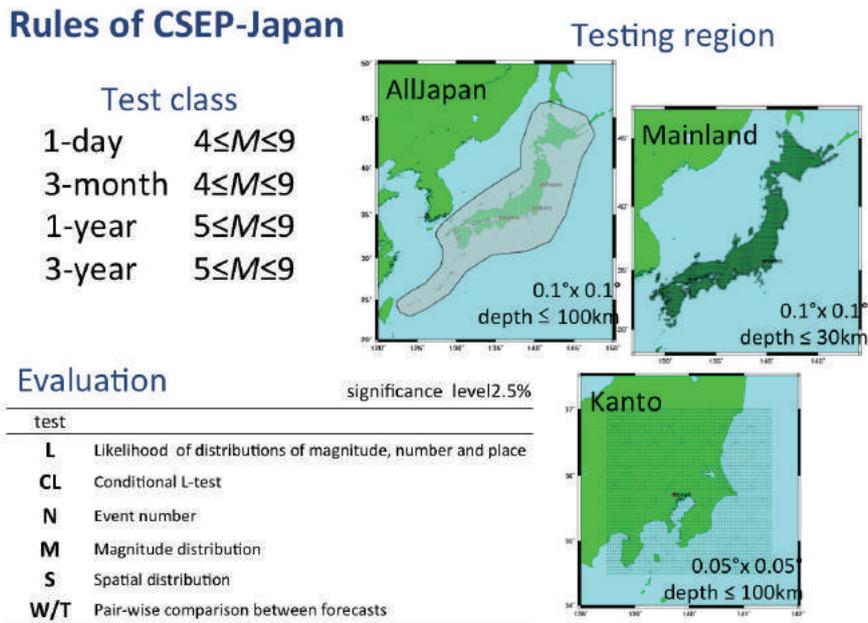
日本における CSEP の地震発生予測検証実験の結果から、3.11 の東北地方太平洋沖地震後においては、地震活動予測モデルの地震発生数の予測性能が非常によくないことが明らかになっている(第 2 図)。この図において、HISTETASA5PA1205 と HISTETAS7PA1205 は、3.11 後の予測モデルであり、この結果は事後予測になっていることに注意が必要である。このことから、3.11 後地震数の予測が地震活動予測モデルの性能を大きく左右している要素であることから、予測数については、大森宇津則により、そのパラメータである μ , K , c , p をこれまでの地震活動から推定し予測に使用したらどうなるかを示したのが第 3 図である。この図から、地震数は Relative Intensity (RI)モデルのオリジナルモデルから予測された予測数よりも、大森宇津則による予測数を使用したほうがよいことを示している。

6. 予測実験の試行について

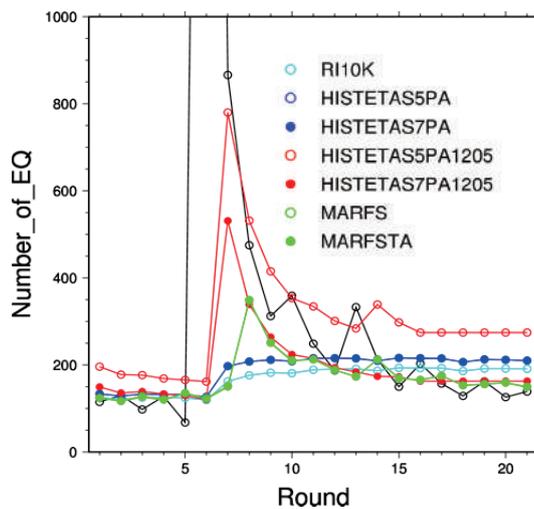
RI モデルによる、2015/05/01 から 3 ヶ月の予測については、関東テスト領域においては、大森宇津則により推定される予測数を採用したほうが、対数尤度値で約 1 ほど良くなることが明らかとな

った。また、本論においては、曖昧予測では予測の評価が困難であるのと、実際にはそのパフォーマンスが高くない可能性を示された。CSEP に基づく予測実験の試行を繰り返すことにより、実際の予測モデルの評価手法が確立されていくことが期待されると考えている。

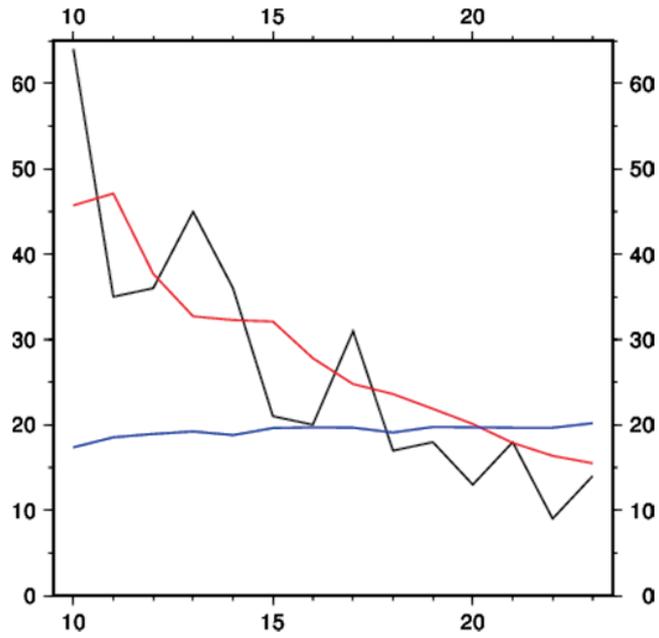
(鶴岡 弘)



第1図 日本の地震予測検証実験のルール。
Fig.1 Rules of CSEP-Japan.

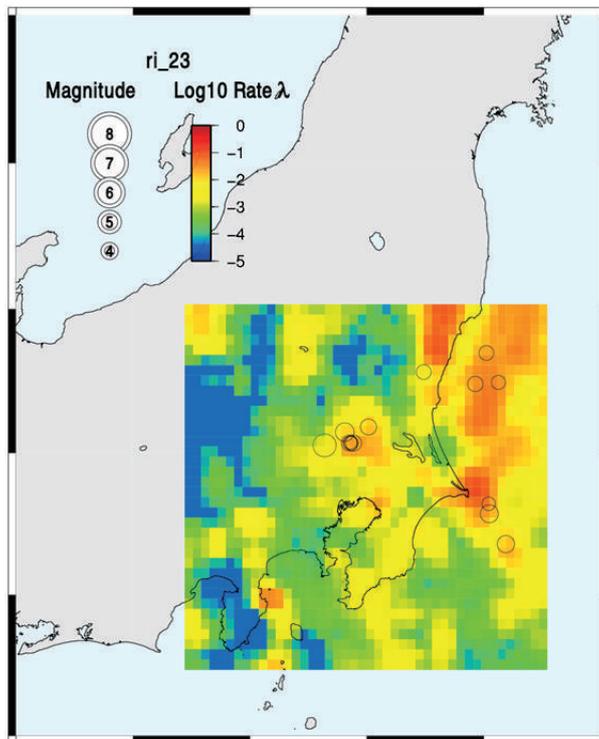


第2図 3.11 前後の CSEP に提出された地震活動予測モデルによる予測結果 (領域: AllJapan)
Fig. 2 Forecast results by earthquake models submitted to CSEP-Japan around Tohoku-oki EQ (Test region: AllJapan).



第3図 大森宇津則による地震予測数の推定結果. (黒：観測数, 赤：大森宇津則, 青：オリジナルモデルによる予測数)

Fig. 3 Predicted Earthquake Number by Omori-Utsu Law.



第4図 関東テスト領域の2015/5/1-8/1 ラウンドの評価結果.

Fig. 4 Evaluation results for Kanto test region (2015/05/01-08/01).