

## 12 - 2 CSEP 日本の取り組みについて

### Overview of the Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) in Japan

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

#### 1. はじめに

標準的な地震活動を捉えるモデルの開発を促し、それらの性能を予測の観点から比較検証する国際的なプロジェクト Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP)<sup>2)</sup>が、米国・ヨーロッパ・日本等の地震国が中心となり国際連携で進められている。これは同時に、従来提案されている、地震活動の活発化・静穏化による各種の地震活動予測手法の有意性と確率利得を評価出来る基盤を整備することにもなる。我が国でも「地震及び火山噴火予知のための観測研究（平成21年 - 25年）」の中で、予測システムの構築の一課題として位置づけられて進められると共に、CSEPの日本版「地震発生予測検証実験」が、2009年11月から実施されている。

#### 2. 予測とその検証のルール

検証実験の重要な点は、単に地震発生予測をするだけではなく、客観的かつ、厳密な手法で予測結果の評価をすることである。そのためには、以下の3点が特に考慮されている。

- i. 予測モデルを作る研究者(モデラー)と独立に、その結果を評価する組織(テストセンター)を作り、モデラーが実験の途中で予測モデル(予測値)を修正出来ないようにする。このために、モデラーは予測モデルのプログラムコードを、実験開始前にテストセンターへ提出することが推奨されている。テストセンターは、そのプログラムコードを実装して予測値を算出する。
- ii. テストセンターは、あらかじめ決められた手続きに基づいて、予測を検証(テスト)する。
- iii. 予測は本当の未来の地震を予測する(事後予測でない)。モデラーが、結果に合わせてモデルパラメータを原理的に調整出来ないようにするためである。

そこで、まず、実験開始前に、研究者コミュニティで「実験ルール」を定義した。以下に主な規則を示す。従来の地震予知研究に比べ、モデル間の優劣を厳密に評価出来る。

- (I) 予測検証領域として、(a) 日本全体、(b) 日本の離島を含まない領域(本土)、(c) 関東地域を設定する(第1図)。
- (II) 予測検証期間を、1日、3カ月、1年、そして3年と設定し、その期間に発生する地震数を予測し、検証する。対象とする予測期間が3か月以下の場合にはマグニチュード4以上( $M \geq 4$ )、1年以上の期間では $M \geq 5$ の地震の発生を予測する。
- (III) 検証に用いる観測データとしては、気象庁が決めた震源(気象庁一元化カタログ)を用いる。
- (IV) 予測の検証には、領域全体での地震総数(N)テスト、地震規模の頻度分布(M)テスト、時空間規模分布の尤度(L)テスト、空間(S)テスト、尤度比(R)テストを用いる。これらは、CSEP全体での統一手法である<sup>3,4)</sup>。
- (V) テスト結果は、論文で公表し、査読誌の論文が出版されるまでは、関連研究者の中でだけ流通される。

### 3. 最初の予測実験とその結果

予測モデルを国内外から公募した結果<sup>1)</sup>、3つの領域、4つの予測期間の計12のカテゴリに対して、合計91モデルが提出された(表1)。現在、3か月予測の結果がまとまりつつあり、そのハイライトとして、本土の3か月予測に登録された9モデルの評価結果を報告する。これらのモデルでは、過去の地震活動を詳細に解析して、空間的な地震発生確率を数値化している。過去に発生した地震カタログ(学習データ)を用いて、時間・空間的にどの程度平滑化するか、また、発生した地震が次の地震の発生にどのように(どのくらいの時間・空間の範囲に)影響を及ぼすか等が、それぞれのモデルで異なる。一例として挙げるRI(Relative Intensity of Seismicity)モデルでは、地震は時間的に一定の発生率で生じ、発生率が空間的に変化するという仮説に基づく。ある場所の予測発生率を計算するために、空間的な広がり(平滑化半径)を10, 30, 50, 100kmと仮定して、1998年以降の地震活動を用いる。それぞれを独立した予測モデルとして、計4つ登録されている。初めて実施された3か月予測の検証では、2009年11月1日—2010年1月31日に15個のM $\geq$ 4の地震が発生した。表2に結果を示すが、例えば以下のようなことが分かる。9モデルの中でModel Aは、3個の地震が起きると予測して過小評価になり、その一方で2つのモデル(Model D, I)が30個程度発生すると予測して過大評価となった。他の7モデルは12~18個の地震発生を予測して、発生数に基づく(N)テストをパスした。Sテストで評価される空間的な分布については、3つのモデルが棄却された。表1の4つのテストで棄却されないモデルはModels B, C, Eである。その中の一つ、平滑化半径が10kmのRIモデル(Model E)の予測マップを第2図に示す。発生確率の高いところで実際に地震が起きたことが分かる。これは一回目の検証結果に過ぎない。今後検証実験を繰り返し実行することにより蓄積される結果から、標準的な地震活動モデルに成り得る候補の絞込みやモデルの高度化を進める。

### 4. おわりに

地震活動を捉えるモデルの性能を予測の観点から比較検証する目的で、地震発生予測検証実験が開始された。このために該当分野の研究環境を整備することから始めた。地震活動のモニタリングの高度化を図ることを目的とした地震予知連絡会では、将来的にはこうした予測とその評価を定期的に行う必要があるかもしれない。しかしながら、予測の手法とその検証法自体が確立していない現状では、予測モデルが本当に有効であるかを厳密に検討出来る研究基盤環境の整備が必須である。モデルの改訂と同時に、「検証手法」や「実験のルール」の改定も順次行っていく。

(平田 直・鶴岡 弘・楠城一嘉)

### 参 考 文 献

- 1) 地震活動の評価に基づく地震発生予測研究グループ, 2009, 日本地震学会ニューズレター, 20(6), 7-10.
- 2) Jordan T. H., 2006, *Seismol. Res. Lett.*, 77(1), 3-6, 2006.
- 3) Schorlemmer D., et al., 2007, *Seismol. Res. Lett.*, 78(1), 17-29.
- 4) Zechar, J. D., et al., 2010, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(3), 1184-1195.

Testing region	Testing class				
	1 day	3 months	1 year	3 years	Total
All Japan	5	9	12	9	35
Mainland	2	9	11	7	29
Kanto	4	7	8	8	27
Total	11	25	31	24	91

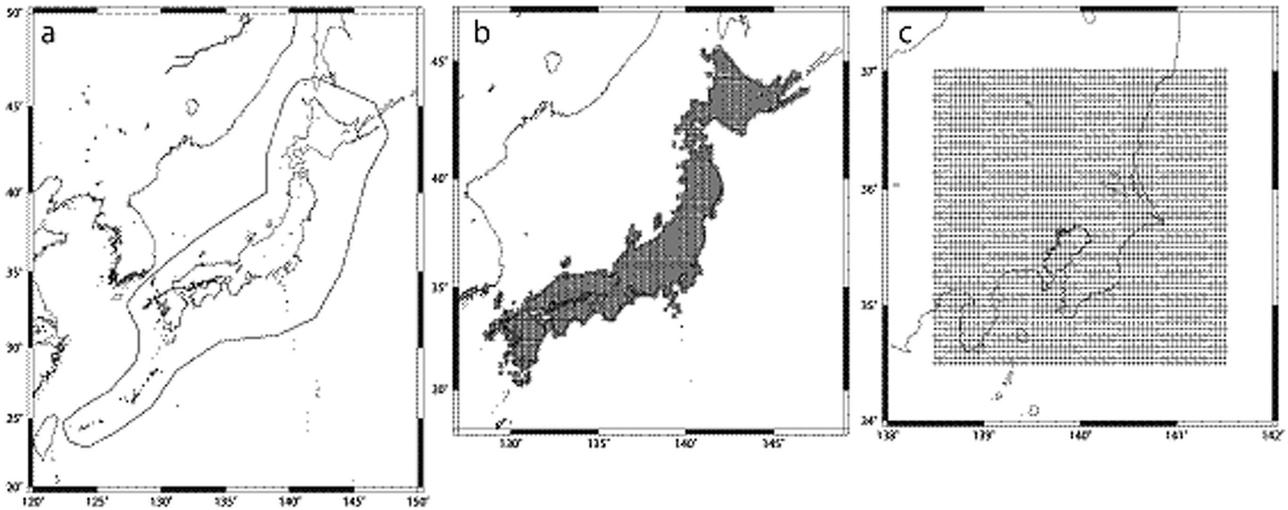
表 1. 予測検証期間，予測検証領域ごとに登録されたモデルの数.

Table 1. Statistics of the participating models. In this report, we consider the 9 3-month models applied to the “Mainland” region.

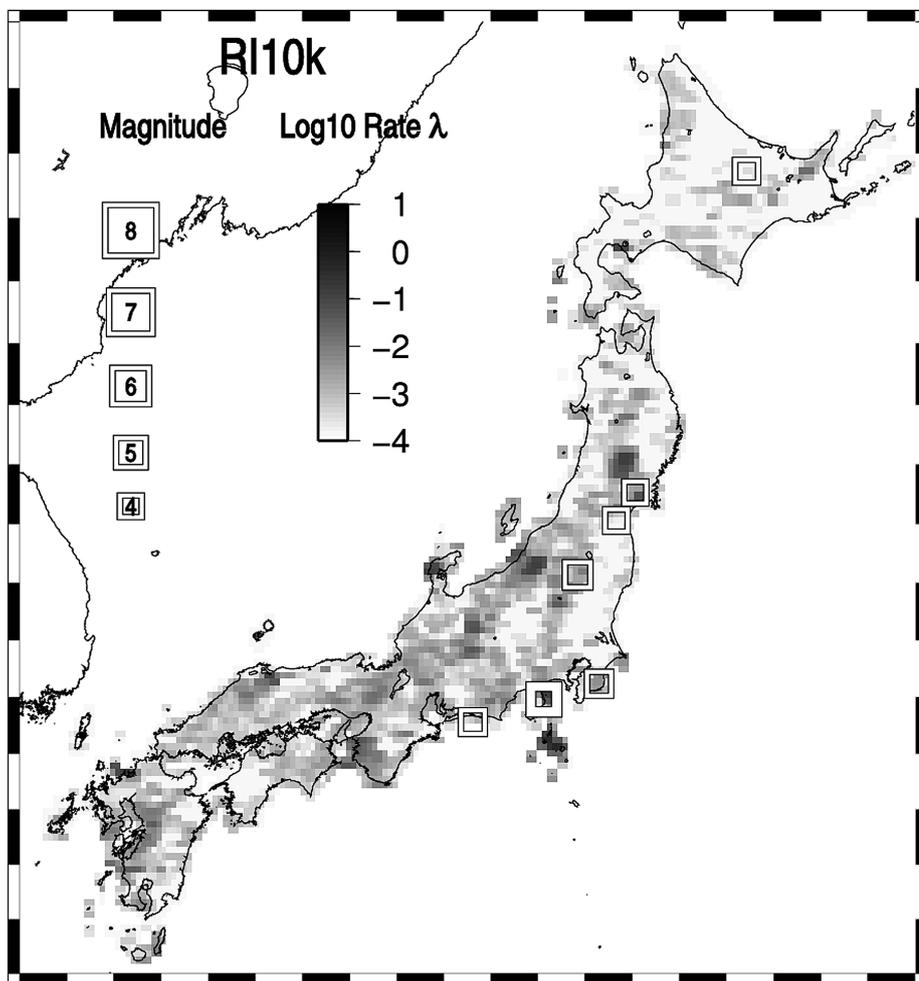
Model	L-test	N-test		M-test	S-test	Forecast number
	$\gamma$	$\delta 1$	$\delta 2$	$\kappa$	$\zeta$	
Model A	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	1.000	0.914	0.684	3.27
Model B	0.361	0.271	0.810	0.809	0.235	12.45
Model C	0.374	0.297	0.787	0.825	0.236	12.73
Model D	0.999	0.999	<b>0.001</b>	0.635	0.686	30.79
Model E	0.683	0.770	0.312	0.767	0.027	17.68
Model F	0.641	0.770	0.312	0.767	<b>0.000</b>	17.68
Model G	0.685	0.770	0.312	0.775	<b>0.001</b>	17.68
Model H	0.788	0.770	0.312	0.766	<b>0.012</b>	17.68
Model I	0.999	0.999	<b>0.003</b>	0.967	0.149	29.45

表 2. 検証結果のまとめ，対象領域は“本土”で，予測検証期間は 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 1 月 31 日の 3 か月間である．地震規模の頻度分布 (M) テスト，時空間分布の尤度 (L) テスト，空間 (S) テストの統計量はそれぞれ  $\gamma$ ， $\kappa$ ， $\zeta$  である．これらは 0 から 1 の値をとる [0;1]. 地震総数 (N) テストでは， $\delta 1$  と  $\delta 2$  がそれぞれ，過大予測と過少予測の統計量 [0;1] である．表中の太字体の数値は，有意水準を 2.5% とした時，「予測と観測が一致する」という仮説が棄却される値を示している．詳細は，Schorlemmer *et al.* (2007) と Zechar *et al.* (2010) を参照のこと．“Forecast number” は予測総数を示す．

Table 2. Summary of test results obtained for the “Mainland” region during the forecast period from 1 November 2009 to 31 January 2010. The L(ikelihood)-, M(agnitude)-, and S(pace)-test results are indicated by the scores [0;1]  $\gamma$ ,  $\kappa$ , and  $\zeta$ , respectively. The N(umber)-test:  $\delta 1$  and  $\delta 2$  are the scores [0;1] of overprediction and underprediction, respectively. We consider a significant level of 0.025 so that bold values indicate that the observed target catalog is inconsistent with the corresponding forecast. See Schorlemmer *et al.* (2007) and Zechar *et al.* (2010) for details. The column “Forecast number” shows the total number of forecast earthquakes.



第1図 予測検証領域: (a) 日本全体, (b) 日本の離島を含まない領域 (本土), (c) 関東地域.  
 Fig. 1 Testing regions: (a) All Japan, (b) Mainland, (c) Kanto.



第2図 3ヶ月予測をする地図の一例. 予測検証領域は“本土”, 予測検証期間は2009年11月1日から2010年1月31日まで.  $M \geq 4$ の地震の予測値を対数で示している. この図は, RI10kモデル (平滑化半径が10 kmのRIモデル) の結果. これは, 表1ではModel Eに相当する. 四角は, 予測期間に実際に起きた, マグニチュード4以上 ( $M \geq 4$ ) を持つ15個の地震を示す.

Fig. 2. Map of the expected numbers of  $M \geq 4$  earthquakes,  $\lambda$ , in the “Mainland” testing region during the 3-month forecast period from 1 November 2009 to 31 January 2010. Logarithm of  $\lambda$  is given in the gray code. This image shows the forecast map of the RI10k (RI model with a spatial smoothing of 10 km), called the Model E in Table 1. Squares show 15  $M \geq 4$  earthquakes in the testing region during the same period, nine events out of which occurred in the Izu Peninsula because of an earthquake swarm in December 2009.