

12 - 5 繰り返し小地震に対する予測能力評価

Evaluation of statistical forecast for small repeating earthquakes on the plate boundary along the Japan Trench

岡田正実 (気象研究所, 客員研究員)

Masami Okada

(Guest researcher, Meteorological. Research. Institute)

繰り返し地震の予測可能性を調べるために、2006年から2011年にかけて、関東～北海道の沖合で発生する繰り返し小地震（相似地震）の事前予測と検証を東北大学と共同で実施した。

1. 予測実験

繰り返し小地震は、小さな固着域（アスペリティ）がプレート運動に伴って繰り返し破壊されることで発生すると考えられている^{1),2)}。波形が極めてよく似ていることから、「相似地震」とも呼ばれ、同一の系列に属するかどうかは、波形の類似性から識別される。予測実験で使用した系列は、地震が5個以上で、マグニチュードMの平均が2.75から4.0程度までである。多数の系列があり、過去の繰り返しから再現性が十分期待でき、発生・非発生の区別が明確なことなどから、特定地震予測の実験には最適である。しかし、地震数が5～7個と少ない系列が多いので、「条件付き確率」で発生確率を求める際には、発生間隔分布のパラメータ推定誤差の影響を考慮する必要がある。更新過程を想定し、発生間隔が対数正規分布に従うと仮定して、予測期間（1年）内における発生確率をベイズ統計や小標本論で計算した^{3),4)}。

予測実験は以下の予測期間について実施した。

2006年7月～07年6月（93系列）	2008年1～12月（127系列）
2009年1～12月（145系列）	2010年1～12月（163系列）
2011年1～12月（183系列）	

予測総数は711回で、ベイズ統計による予測確率はホームページで公開し、検証の透明性を確保した。

2. 確率予測の成績

2011年の予測実験は、東北沖巨大地震とその余震活動を含む期間なので除き、それ以外の4回を集計した。

予測の成績は実験ごとに多少変動した。2006年7月～07年6月と2008年の予測成績は、平均対数尤度やBrierスコアで見ると、かなり良好であった。第1図に2008年の予測確率と該当地震の発生状況を示すが、予測確率が高い系列で該当地震が多く発生し、低いものはあまり発生しなかったことが分かる。

一方、2009年（第2図）は成績が比較的悪かった。この年は福島県から茨城県の沖合で、前年からのプレート間滑りが継続したことで、北緯38度以南を中心に、予測確率の小さな系列でも該当地震が発生し、平均対数尤度やBrierスコアが悪かった。2010年は成績が多少回復した。

4回の実験（528予測）を集計したものが第3図である。予測確率を10%ごとに分け、該当する予測系列数（黄色）、それらの予測確率の合計（緑色）、予測期間に該当地震が発生した系列数（赤色）である。予測数（緑色）と観測結果（赤色）がよく似た分布をしており、予測確率が全体とし

てほぼ妥当な値であり、信頼度 (Reliability) がかなり良かったことが分かる。

なお、2011 年は 3 月に巨大地震が発生し、活発な余震活動が続いた年であるが、実施した「該当地震が発生するかどうか」の予測成績はさほど悪くなかった。しかし、該当地震が複数個発生した系列数が、それ以前の 10 倍以上に達しており、系列毎の発生個数を予測していたとすれば、極めて悪い成績であったことになる。2012 年以降は予測実験を行っていない。

3. 検証と評価

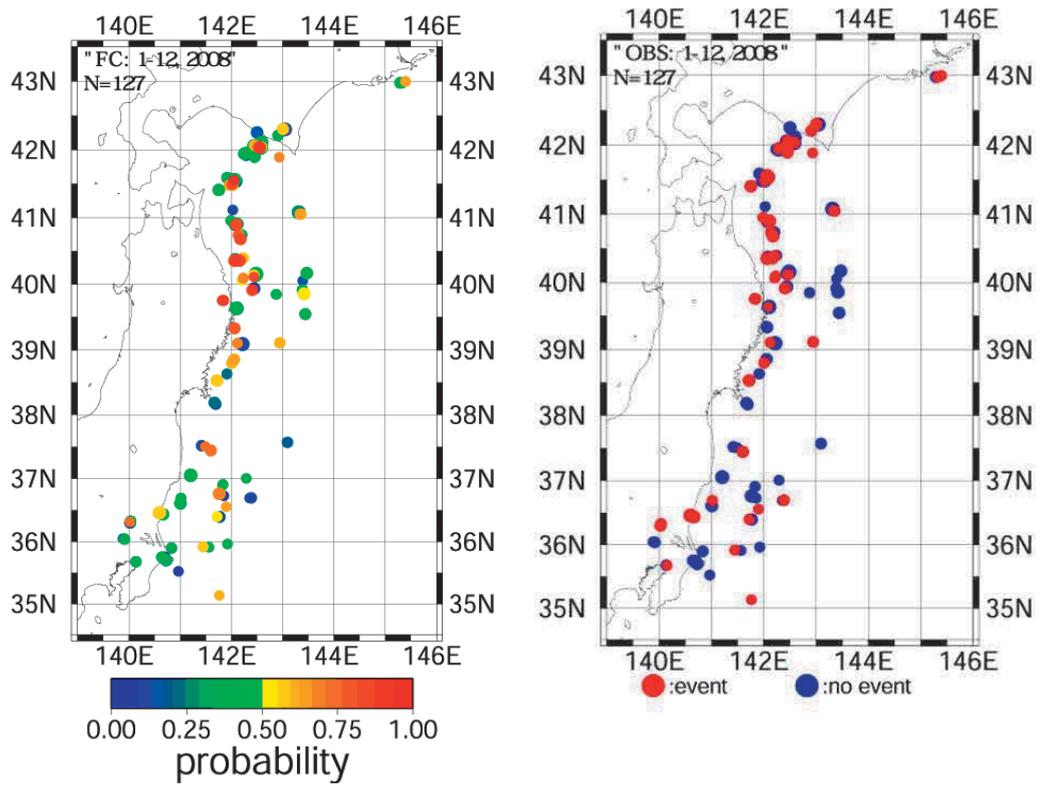
観測データを用いて、ベイズ統計による予測確率の統計検定を実施した。個数検定 (N-test) では 1% の危険率で棄却され、尤度検定 (L-test) では 5% の危険率で棄却されたが、ブライアスコアによる検定では棄却を免れている。ポアソン過程の指数分布モデルによる予測と比べた尤度比検定では、ベイズ統計対数正規モデルが極めて有意に優れていた。

個数検定などで予測が棄却されており、予測方法に改善すべき点があることが分かる。しかし、予測成績の良し悪しは異質の側面があるので、統計的に棄却されても予測の有効性が直ちに否定される訳ではない。例えば、東京における 2 日後の降水確率予報 (2006 ~ 2010 年) について個数検定を行うと、0.1% 以下の危険率でも棄却される。

ROC(Relative/Receiver Operating Characteristic) を用いて、今回の予測成績を降水確率予報の成績と比較したものが第 4 図である。この図では、左上に位置する 2 日前の降水確率予報が最もよい予測で、右下に位置する 7 日前のものが最も劣っている。繰り返し小地震に対する予測 (ベイズ統計及び小標本論による対数正規分布モデル) は、5 日前の降水確率予報とほぼ同じ成績であり、意外と良い成績であったと評価している。

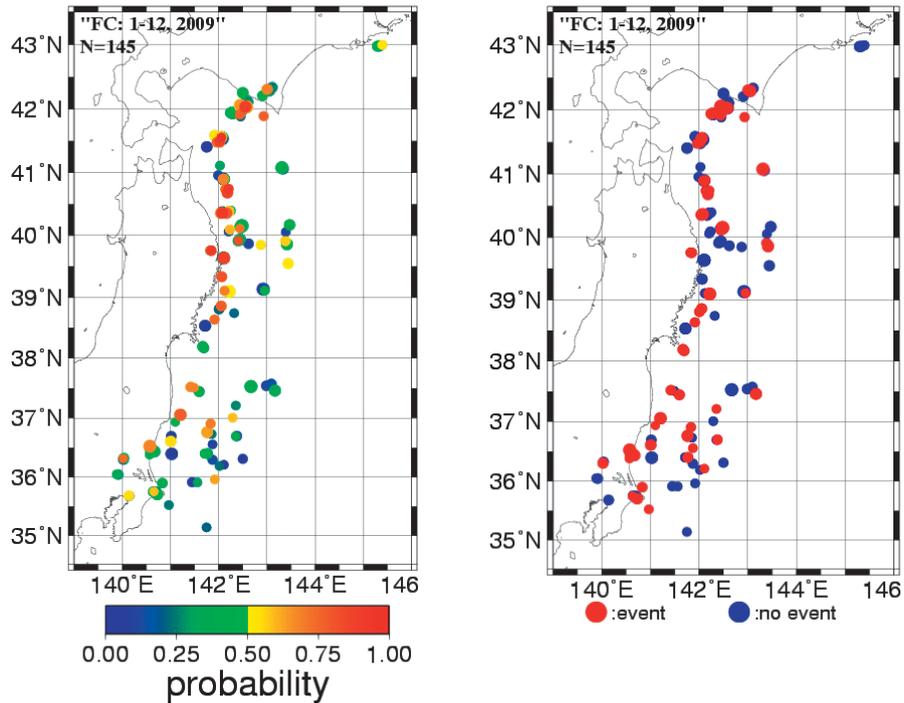
参 考 文 献

- 1) Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), 2249, doi:10.1029/2002JB001920, 2003.
- 2) Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1801, doi:10.1029/2003GL017452, 2003.
- 3) 岡田正実, 繰り返し地震の周期性と揺らぎに基づく発生予測, 予知連会報, 83, 12-8, pp. 633-638.
- 4) Okada M., N. Uchida, and S. Aoki, Statistical forecasts and tests for small interplate repeating earthquakes along the Japan Trench, *Earth Planets Space*, 64, 703, doi:10.5047/eps.2011.02.008. 2012.

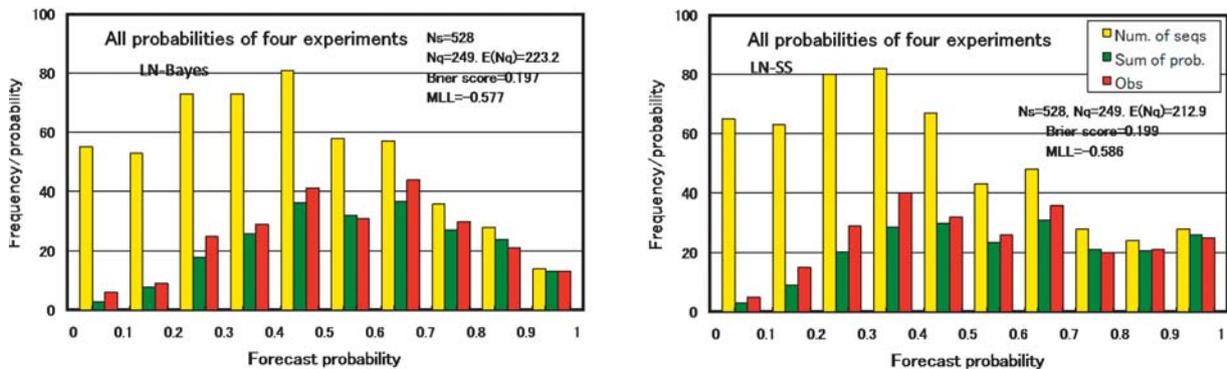


第1図 繰り返し小地震の予測発生確率（左，2008年）と観測結果（右，赤：該当地震発生，青：非発生）。

Fig.1 Prospective forecast probabilities for 127 sequences in 2008 (left) and the observation (right) for sequences qualified by the event (red circle) or not (blue circle).

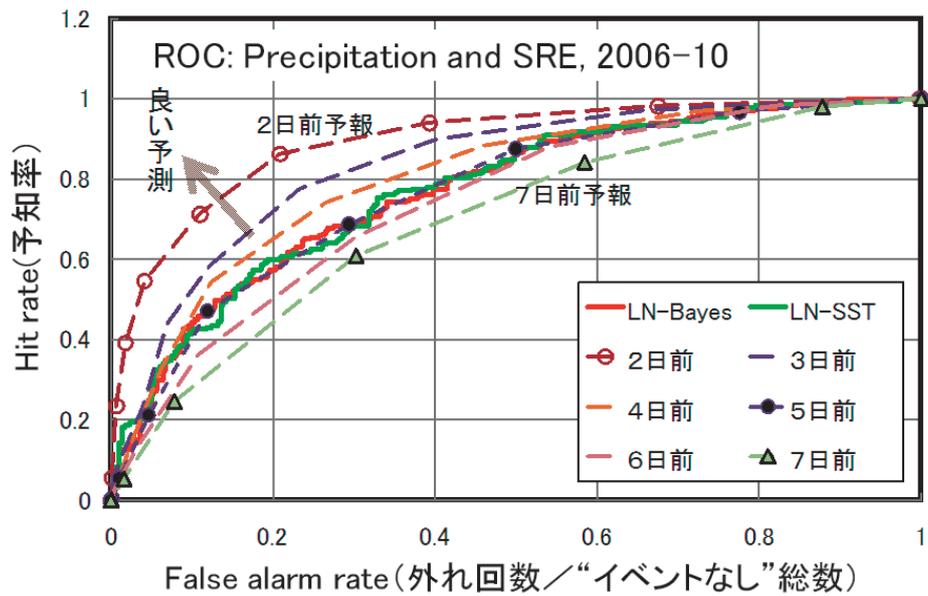


第2図 繰り返し小地震の予測発生確率（左，2009年）と観測結果（右）。
 Fig.2 Forecast probabilities for 145 sequences in 2009 (left) and the observation (right).



第3図 4実験（528回予測）の集計。ベイズ統計対数正規分布モデル（左）と小標本論対数正規分布モデルによる予測（右）。黄色：確率10%ごとに区分けした予測回数，緑：予測確率の合計（発生系列数の期待値），赤：該当地震の発生系列数。

Fig.3 Frequencies of forecasts (yellow bars), the sum of forecast probabilities (green bars), and the actual number of sequences with events (red bars) for every 10% range of probabilities of 528 forecasts in four experiments by using Bayesian theorem (left) and the small sample theory (right) on log-normal distribution model for time interval of the small repeating earthquakes.



第4図 繰り返し小地震及び降水の確率予測のROC. LN-BayesとLN-SSTはベイズ統計対数正規分布モデルと小標本論対数正規分布モデルによる小地震の予測. 他は東京の降水確率予測 (2日から7日前, 2006~2010年).

Fig.4 The ROCs (Relative/Receiver Operating Characteristic) of probability forecasts for the small repeating earthquakes and precipitations in weather forecast at Tokyo. LN-Bayes and LN-SST are forecasts by Bayesian theorem and the small sample theory on log-normal distribution models, respectively.