

1 2 - 8 繰り返し地震の周期性と揺らぎに基づく発生予測

Statistical forecast for recurrent earthquakes based on periodicity and fluctuation in time

岡田正実 (気象研究所, 客員研究員)

Masami Okada

(Guest researcher, Meteorological Research Institute)

はじめに

繰り返し地震の予測はいろいろな地震について行われてきたし、地震調査委員会¹⁾では“長期的な地震発生確率の評価”として全国的規模で実施した。Nishenko²⁾は環太平洋の100個近いセグメントに対し、大地震が5年、10年および20年間に発生する確率を更新過程対数正規分布モデルで求めた。この大規模な試みに対し、後に観測データと比較した統計的検定が行われ、5年と10年の予測は失敗であったと結論づけられた^{3), 4)}。失敗要因として、各系列の地震数が少ないこと、セグメント分割と予測地震が不明確であったこと、統計処理が不適切であったこと等が挙げられる。そこで、条件のよい繰り返し地震系列(相似地震)に対し、パラメータ推定誤差を考慮した方法で事前に予測し、観測と比較・検証し、有意性を調べることにした。予測と検証の公明性を確保するために、予測した発生確率をWebページで公開している。なお、CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability)の地震発生予測検証実験では、特定地震ではなく、一定基準の地震の発生率(発生数)を多数の方法で事前予測し、観測と比較・検証するものである⁵⁾。

データと確率予測法

繰り返し地震データとしては、予測地震が明確に同定できること、将来も繰り返しが十分期待できること、事例が多く、統計的検定が可能であることなどが要請される。これらの点を考慮すると、プレート境界の小アスペリティで繰り返し発生する相似地震が最適であり、東北大学で作成した相似地震カタログを用いることにした。予測系列の選定条件は、1993年以降の地震が5個以上、平均Mが2.75以上、大地震の余震が1/3未満、およびバースト型でないことである。2008年の予測では、127系列うち、93系列は地震が7個以下と少ない。

予測方式(予測モデル)は、地震発生間隔の分布とデータ処理方法で決まる。少ないデータから最尤法で分布パラメータを推定すると誤差が大きい。推定誤差を考慮する方法として、小標本論(精密標本論)とベイズ統計がある。今回は、ベイズ統計対数正規分布モデルを使用した。対数正規分布モデルでは、発生間隔の対数 $X=\ln(T)$ が正規分布に従うので、小標本論とベイズ統計による取り扱いが、BPT分布などに比べ、格段に容易である⁶⁾。事前分布は、 X の平均について一様で、分散は逆ガンマ分布である。発生確率の計算には条件付き確率の式を用いるが、数値はパラメータ推定誤差を考慮した“発生確率の期待値”である。

予測結果

2007年末までの相似地震カタログを用いて、2008年2月に同年中の発生確率を計算し、7月にWeb公開した。第1図は各系列の位置と、2008年の発生確率を色で示したものである。第2図は、該当地震の発生状況を示したもので、赤が発生、青が非発生を表す。一目して、予測確率の大小と該当地震の発生・非発生がかなり良く対応していることが分かる。十勝沖で空白になっているが、2003年十勝沖地震M8.0の余震が1/3以上を占める相似地震系列を予測対象から除いたためである。

予測確率を10%ごとで区分けし、集計したものが第3図である。黄色が系列数、緑が発生確率の合計、赤は該当地震が発生した事例数を表す。緑と赤が同じような分布であることから、全体的に予測が妥当なものであったことが分かる。予測結果を統計検定^{3), 7)}したところ、個数検定(N-test)と尤度検定(L-test)では棄却されず、合格した。一例として、L-testの結果を第4図に示すが、理論分布は、各系列の地震活動が互いに独立である

と仮定して、計算されている。尤度比検定 (R-test) では、予測モデルが指数分布モデルより有意に優れており、Nishenko²⁾の予測の場合と異なっている。しかし、小標本論対数正規分布と比較した尤度比検定では、予測モデルは有意に劣っており、使用した事前分布が実際とあまり合っていなかったことが判明した。なお、平均対数尤度や Brier スコア⁸⁾は、東京の天気予報で3~6日先の降水確率予報と同じ程度の成績である。

2009年の予測は、パラメータ事前分布を修正し、145系列で発生確率(第5図)を求め、同年4月にネットで公開した。結果が判明している1~6月の様子を見ると、発生確率が非常に小さい系列で実況と合わず、尤度検定で予測が棄却された。特に悪かった系列(第6図)を調べると、予測時点までほぼ規則的に発生していたが、今回だけ短期間で発生している。最もひどい2例は、2008年5月の茨城沖地震 M7.0の余効滑りのために、短期間で再発生したと推測されている。原因がほぼ特定される失敗例は、将来のモデル改良に役立つものであり、これらの事例も価値ある失敗と考えている。

新たな試みとして、鹿児島大学の相似地震カタログを用いて、2009年の予測を行った。バースト型のイベントが含まれていたため、除群を行ってから、平均Mが2.3以上の48系列を選んだ。予測系列の地域分布と発生確率は第7図の通りである。

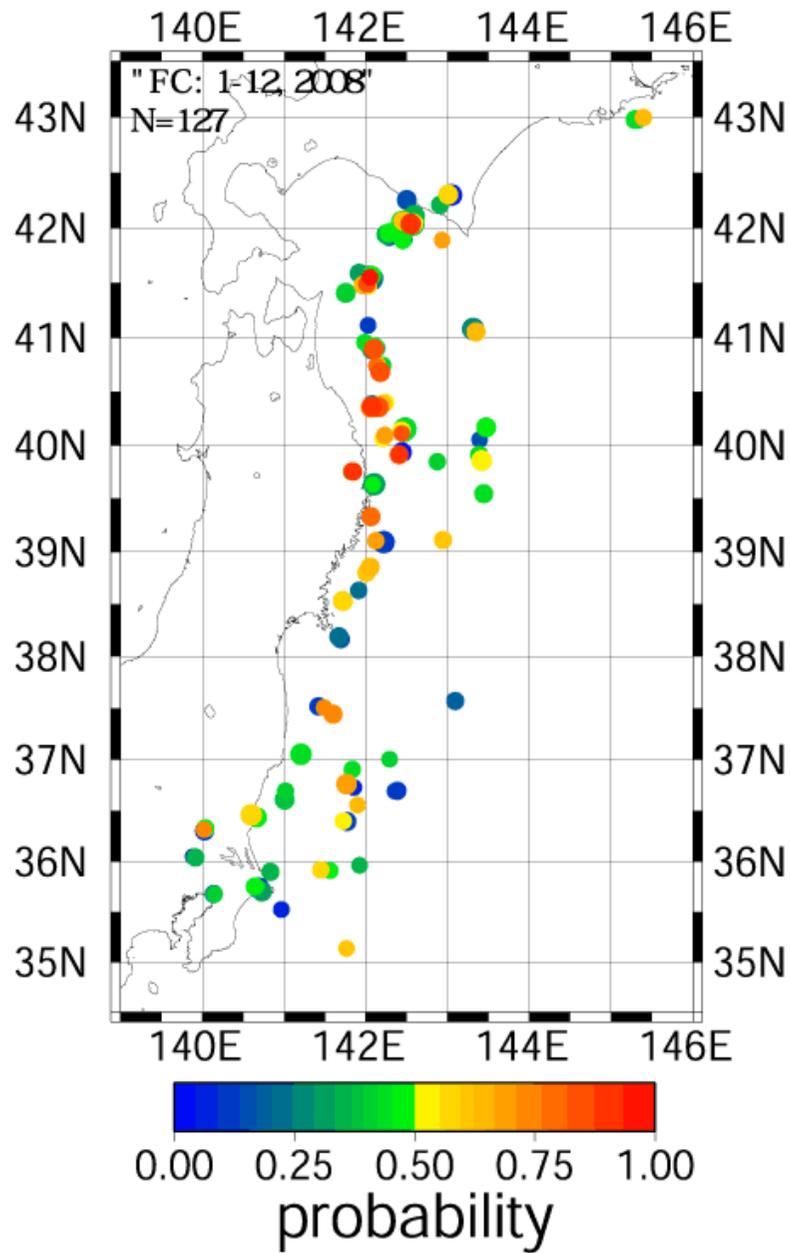
おわりに

これまでに行ってきた2006~07年の予測なども含めた結果と成績を見ると、プレート境界の相似地震については、更新過程を適用するのであれば、時間依存型のモデルがポアソン過程のモデルより有意に優れていると推測される。しかし、大地震発生やそれに伴う余効すべり等による影響も大きいので、予測成績が大幅に悪くなることも避けられない。予測実験の結果は、相似地震が小アスペリティの繰り返し破壊であるとする説⁹⁾に整合していると考えている。今後、プレート運動の揺らぎを予測に反映させる工夫が求められるし、予測結果が運動の揺らぎの解明に役立つことが期待される。

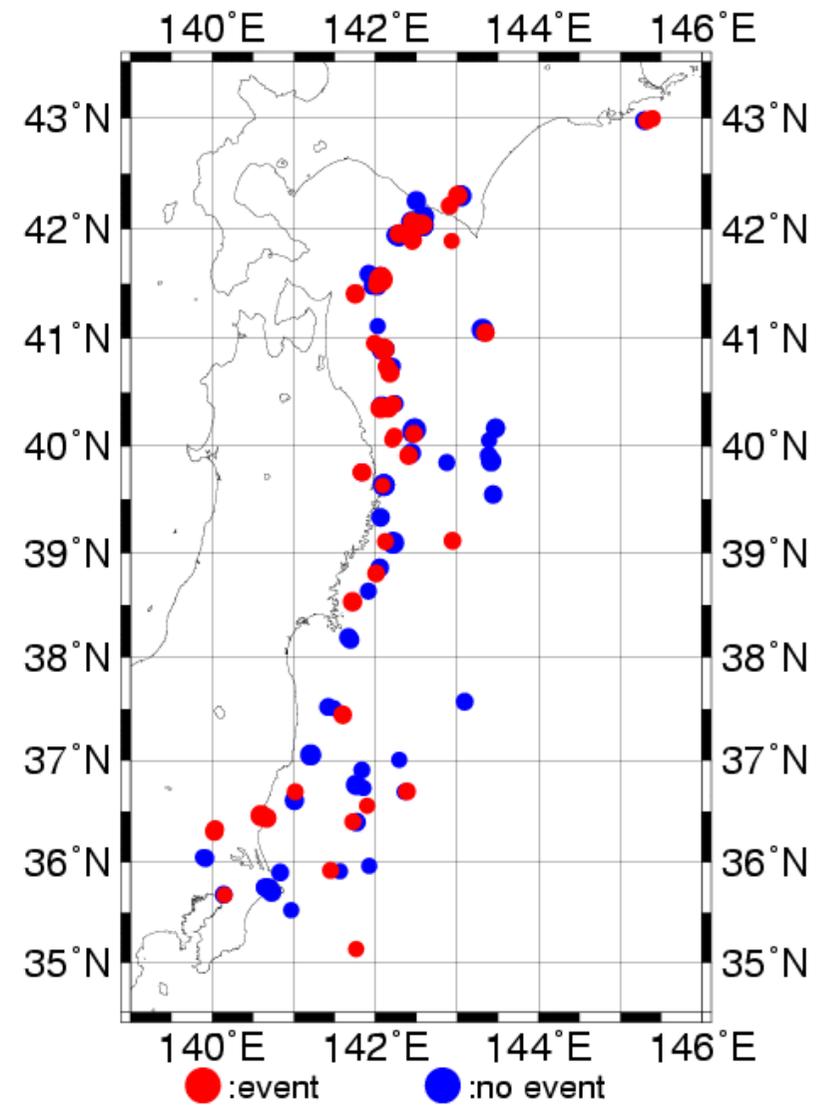
本研究に使用した相似地震カタログは、東北大学大学院理学研究科地震・火山噴火予知研究観測センター内田直希助教および鹿児島大学理学部附属南西島弧地震火山研究所後藤和彦准教授から提供されたものです。資料作成では気象研究所地震火山研究部青木重樹主任研究官の協力を受けました。

参考文献

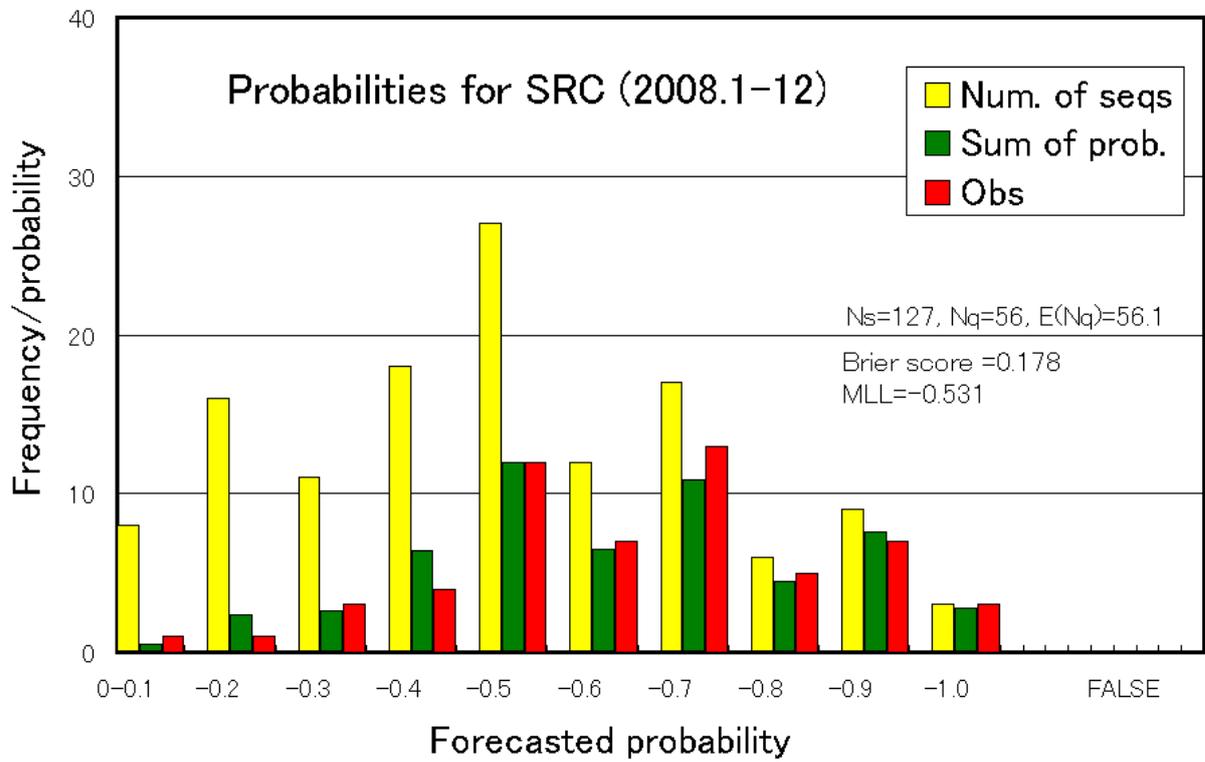
- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2001): 長期的な地震発生確率の評価手法について, 99 pp.
- 2) Nishenko, S. P. (1991): Circum-Pacific seismic potential: 1989-1999, PAGEOPH, 135, 169-259.
- 3) Kagan, Y. Y. and D. D. Jackson (1995): New seismic gap hypothesis: five years after, JGR, 100, 3943-3959.
- 4) Rong, Y., D. D. Jackson, and Y. Y. Kagan (2003): Seismic gap and earthquakes, JGR, 108, B10, 2471, doi: 10.1029/2002JB002334.
- 5) 楠城一嘉・鶴岡 弘・遠田晋次・平田 直 (2008): 地震活動の評価に基づく地震発生予測: 世界と日本の動向, 地震学会ニュースレター, 20, (4), <http://www.soc.nii.ac.jp/ssj/for_member/NL/v20n4/05.html>.
- 6) 岡田正実 (2009): 繰り返し地震および余震の確率予測, 地震 2, 61(特集号), S143-S153.
- 7) Schorlemmer, D., M. C. Gerstenberger, S. Wiemer, D. D. Jackson, and D. A. Rhodes, 2007, Earthquake likelihood model testing, SRL, 78, 17-29.
- 8) Brier, G. W., 1950, Verification of forecasts expressed in terms of probability, Mon. Weather Rev., 78, 1-3.
- 9) Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2003, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, JGR, 108, B5, 2249, doi: 10.1029/2002JB001920.



第1図 ベイズ統計対数正規分布モデルで予測した2008年相似地震発生確率。
 Figure 1. Prospective forecast for small repeating earthquakes in 2008 by a Bayesian approach with log-normal distribution.

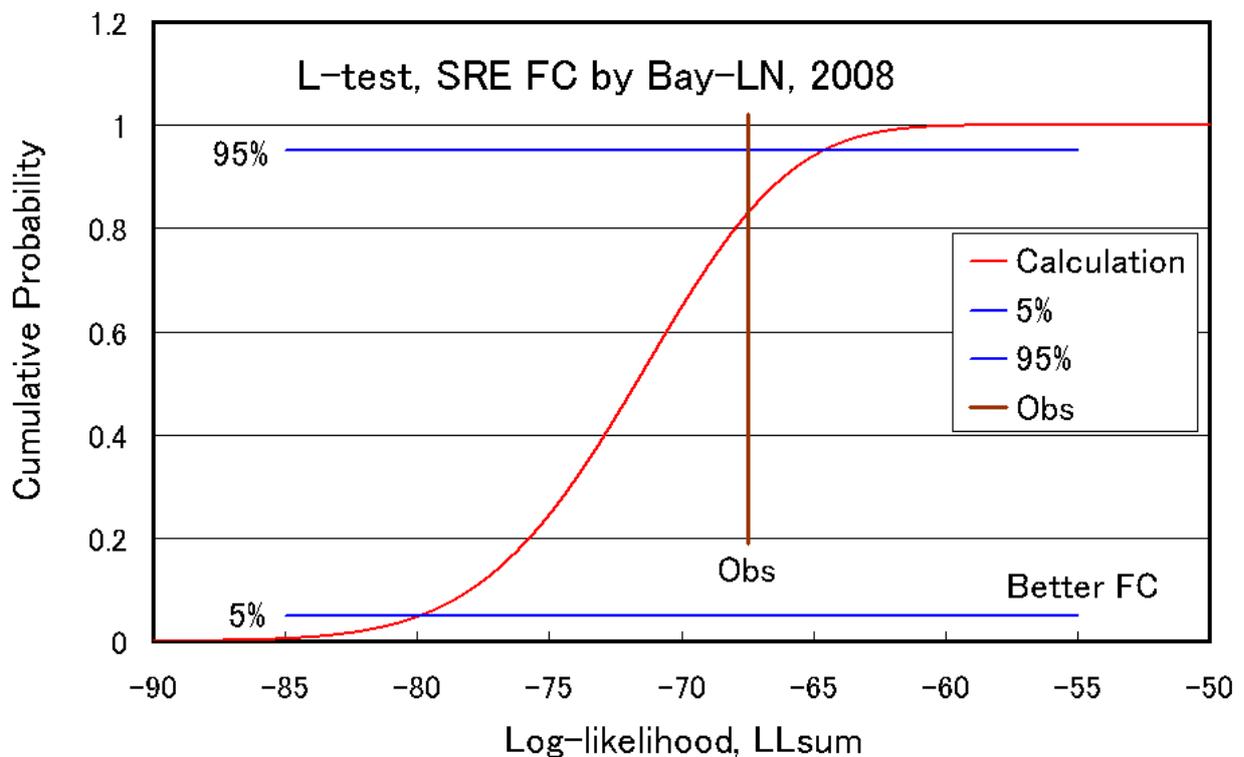


第2図 2008年中の相似地震の発生状況。
 Figure 2. Occurrence of qualifying small repeating events in 2008.



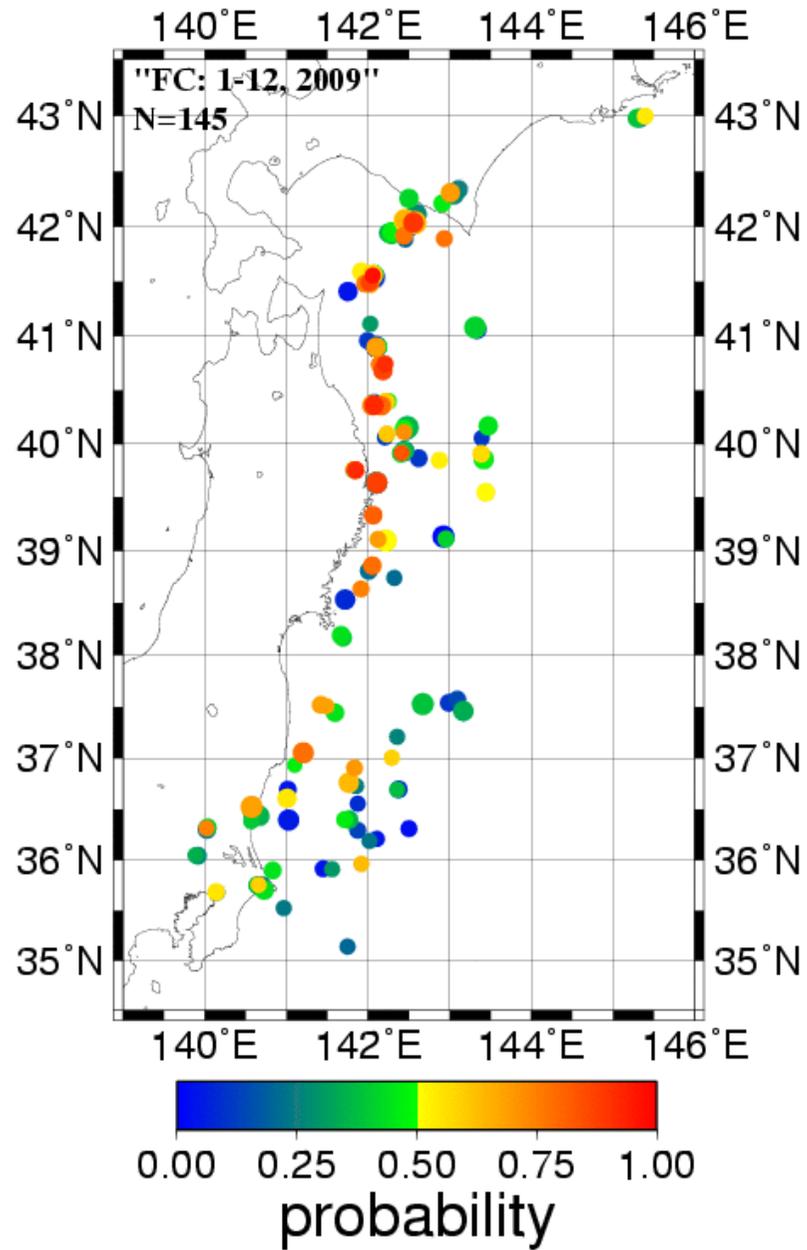
第3図 2008年の予測確率と相似地震発生数. 黄色: 地震系列数, 緑: 発生期待数 (発生確率の合計), 赤: 該当地震が発生した系列数.

Figure 3. Comparison of forecast probabilities and the number of qualifying events in 2008.

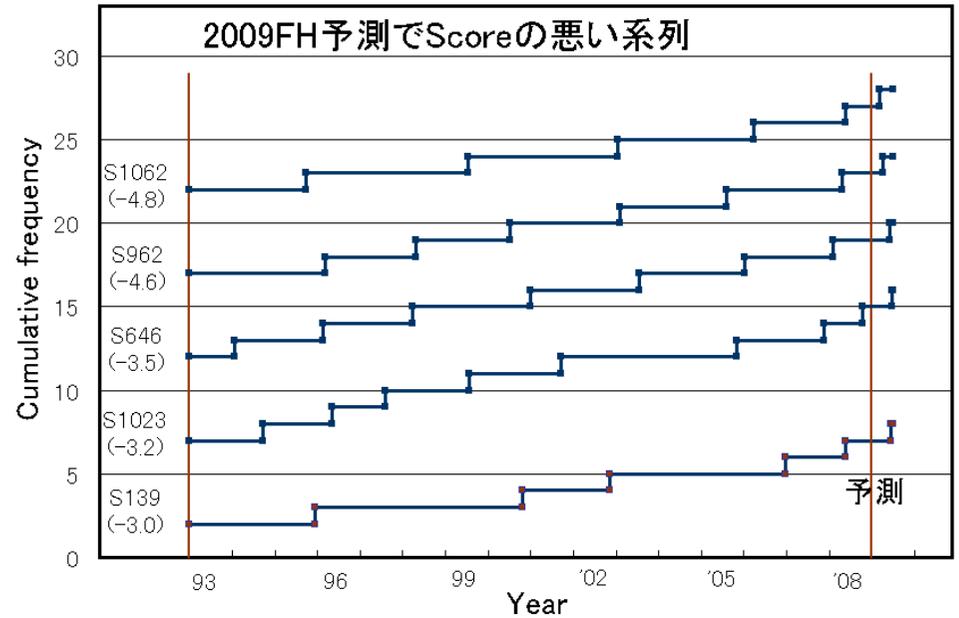


第4図 2008年相似地震発生確率予測の尤度検定図. 観測データから求まる対数尤度 LLsum が 5% 点と 95% 点の間にあるので, 予測モデルは棄却されない.

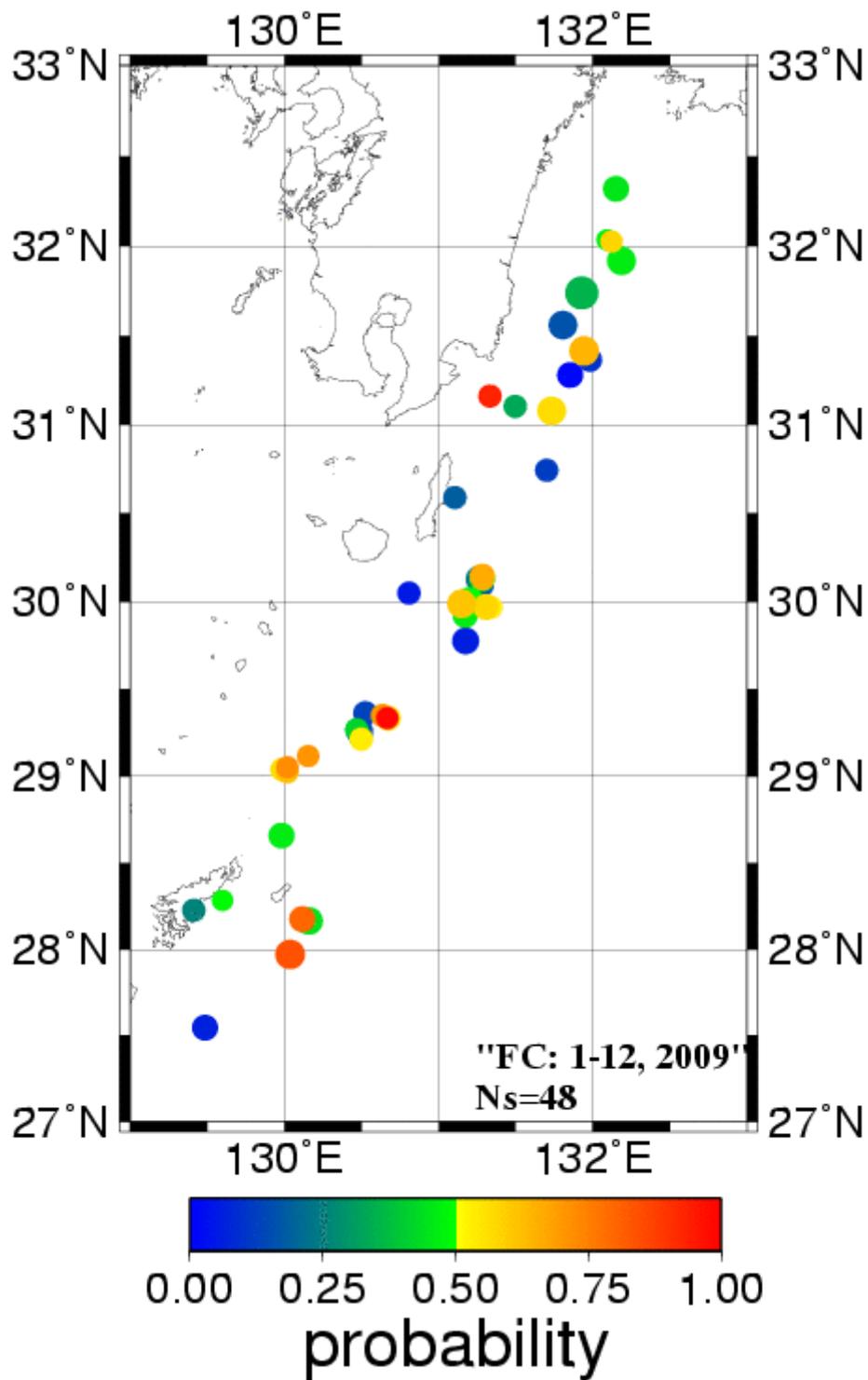
Figure 4. L-test for the probabilities of microrepeater in 2008.



第5図 相似地震の2009年発生確率予測.
Figure 5. Prospective forecast for microrepeater in 2009.



第6図 2009年前半の予測が大きく外れた系列の地震発生状況. 括弧内の数字は対数尤度.
Figure 6. Time histories of microrepeater sequence whose log-likelihood was very low for the forecast of the period from January through June, 2009.



第7図 日向灘から奄美近海で発生する相似地震の2009年発生確率予測。
 Figure 7. Prospective forecasts for microrepeater near Kyushu in 2009.