

Fortran 言語による地震活動予測実験のための検証プログラム

鶴 岡 弘^{*†}

A Validation Program for Earthquake Predictability Experiments Using Fortran Language

Hiroshi TSURUOKA^{*†}

Abstract

The standard test program for validating earthquake forecast models in the CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability) was developed using Fortran language. Previously, it was necessary to setup an environment that considered version dependencies of multiple applications developed by the CSEP test center. With the developed program, earthquake forecast model developers can now easily perform validation using observed earthquake catalog.

Key words : Seismicity, Forecasts, CSEP, validation, Fortran

はじめに

地震活動予測実験の検証の国際的な動向としては、CSEP (Collaboratory for the Stud of Earthquake Predictability) プロジェクトが南カルフォルニア地震センターの主導により 2006 年より国際共同実験として始められ、ヨーロッパ各国、ニュージーランド、日本は 2008 年夏よりこの共同実験に参加し、グローバル規模で進められている。この実験は過去の地震活動を基に将来の地震活動を地震発生数として予測し、それを検証することを目的としている。特徴として、算出された地震発生予測数と実際に発生した地震数を比較検証することによりどのような地震発生予測モデルが適切かあるいは予測能力があるかを厳密に検定することが重視されている。CSEP においては、地震予測検証のための共通基盤を構築して、実際の予測と検証を実施するテストセンターが重要であり、この運用こそが検証実験の本質であった。CSEP では、地震予測モデルの性能を比較するために、異なるモデルの予測結果を同じデータセットで検証し、そのための標準的なテストを開発・導入してきた。また、この標準テストは地震活動予測モデルが実際の観測を満たしたかどうかにかぎらず、

予測モデルからシミュレーションにより擬似観測データを生成してその観測データ群と実際の観測データを検証するというものであった。テストのアルゴリズムについては、Zechar and Rhoades (2010) に詳しく説明されている。本論文では、この標準的なテストを実行できる検証プログラムを Fortran 言語のみで開発を行った。なお、CSEP の標準システムは、<https://docs.cseptest.org> に記載されているように複数のアプリケーションをインストールする必要がある。具体的には以下である。

- Python 3.9 or later
- NumPy 1.21.3 or later
- SciPy 1.7.1 or later
- Pandas 1.3.4 or later
- Cartopy 0.22.0 or later

このインストールの手間は非常に大変である。一方、開発したプログラムは Fortran 言語によるものであるため、インストール環境を整えやすく、容易にインストールが完了できる。また、アプリケーションのインストール時によくあることであるが、利用している OS のバージョンなども絡んで CSEP の標準コードをインストールすると時間的なコストが発生する。なお、この標準コードは頻繁にアップデートされるので、その状況（バグの状況など）も把握する必要などがある。もちろん、この標準コードは予測モデルの検証だけでなく予測結果を求めるコードも含まれており、単純に予測モデルの検証（テスト）をしたいモデラー

2024 年 12 月 3 日受付, 2025 年 1 月 14 日受理.

[†] tsuru@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所日本列島モニタリング研究センター

^{*} Research Center for Monitoring Japan Arc, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

(地震活動予測モデルを開発する研究者) からすると余分なコードが含まれていることにも注意が必要となる。

地震活動予測検証の流れ

日本の CSEP における地震活動予測検証についての流れと実験ルールを以下に示す。(1) 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。(2) 予測検証期間を、1 日、3 か月、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 年以上の場合には $M \geq 5$ の地震の発生を予測する。(3) 検証に用いる観測データは、気象庁一元化カタログを用いる。(4) 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) テストを実施する。それぞれのテストについての簡単な説明を以下に示す。日本の CSEP における結果については、Tsuruoka et al. (2012) も参照されたい。

- N-test

地震の観測総数と予測総数が整合するかを評価する。地震総数 (観測スコア: N) と、模擬スコアの分布を比較して、少なくとも N 個の地震が起きる確率 ($\delta 1$) と、多くても N 個の地震が起きる確率 ($\delta 2$) の 2 種類を求める。もし $\delta 1$ が非常に小さいならば、予測した地震数は観測した地震数より非常に少ない過少予測を表す。一方、 $\delta 2$ が非常に小さいならば、予測した地震は過大予測を表す。

- M-test

予測される地震の規模別頻度分布が観測と合っているかを評価する。

- S-test

地震の空間分布について予測と観測の整合性を評価する。あるマグニチュード以上の地震発生数を足し合わせ、その空間分布に関して予測と観測の整合性を検定する。

- L-test

予測される地震数とマグニチュード、そして空間分布が、観測と整合するかを評価するテストとなる。N-, M-, S-test の総合テストとなるが、結果については N-test と相関関係があることが示されている。

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、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。予測する地震発生数は、XML ファイル (表 1 に具体的な例を提示) で出力することとなっている。例えば、`<cell lat='24.15' lon='122.45'> <bin m='5.0'> 9.994608e-004</bin>` は、領域中心 (122.45E, 24.15N) の

マグニチュード 5.0-5.1 に発生する地震数が $9.994608e-004$ となることを記述している。実際の検証までのフローは以下となる。(A) 地震活動予測モデルを実行して地震発生数を予測した XML ファイルの生成。(B) 該当の予測期間、地震規模以上の地震カタログの生成。(C) (A)、(B) を用いて検証プログラムを実行させてテスト結果を得る。なお、(B) の地震カタログについては、CSEP では、ZMAP フォーマット (Wiemer (2001)) となっているため、TSEIS の A0 フォーマット (鶴岡 (1998) の表 1 参照) からの変換ツールなども準備した。

検証プログラムと関連ツールの利用方法

予測結果を記述した XML ファイルを Fortran で読み書きするためには XML に関するライブラリ等のインストールが必要となる。今回のテストにおいては、XML タグを除くツールを作成してタグなしの予測結果データを用いた。以下に、検証プログラムとそのためのツール群の利用方法について説明を行う。XML タグを取り除くツールは、XMLtoASCII.pl で forecast.xml ファイルが存在したとすれば、

```
$ XMLtoAscii.pl < forecast.xml > forecast.dat
```

により XML タグを取り除く。ZMAP フォーマットへの変換は、conv2zmap という Fortran プログラムを用いて、
\$ conv2zmap < jmacatalogA0.dat > jmacatalog.zmap.dat
として実行する。

検証プログラムは、cseptest という実行ファイルで、単純に cseptest と実行すると利用方法が表 2 のように出力される。プログラムに必要な引数は、検証領域データ、地震予測データ、観測地震カタログ、予測 M の下限、領域のメッシュサイズ、シミュレーション数、テストの種類のパラメータとなっており、複数の検証領域、複数のテストクラスに標準で対応している。表 3 の場合は、N-test のみの検証結果出力、表 4 の場合には、N-, M-, S-, L-test の検証結果が同時に実施される。このように Fortran 言語のみで地震予測活動予測結果の検証結果を容易に取得することが可能である。

最 後 に

本論では、CSEP の標準テストを行うことができる Fortran 言語のみを使用したプログラムを開発した。プログラムを開発した背景としては、地震研究所においてテストセンターを運用する必要性から CSEP のテスト環境を CSEP 本家と協力して維持してきたが、モデラーから簡単にテスト結果を得ることができないかとの意見をいただいたことによる。さらに、個々の地震活動予測モデルを開発するモデラーからすると、CSEP では情報システムの最新成果を取り込むことも重要であったが、XML タグの利用

表 1. CSEP 準拠の地震予測結果のための XML ファイル

```

<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<CSEPFforecast xmlns='http://www.scec.org/xml-ns/csep/forecast/0.1'>
<forecastData publicID='smi.org.scec/csep/forecast/1'>
<modelName>Kmodel</modelName>
<version>1.2</version>
<author>Kevin</author>
<issueDate>2005-03-31T23:10:00Z</issueDate>
<forecastStartDate>2005-04-01T00:00:00Z</forecastStartDate>
<forecastEndDate>2008-03-31T00:00:00Z</forecastEndDate>
<defaultCellDimension latRange='0.1' lonRange='0.1' />
<defaultMagBinDimension>0.1</defaultMagBinDimension>
<lastMagBinOpen>1</lastMagBinOpen>
<depthLayer max='30.0' min='0.0'>
<cell lat='24.15' lon='122.45'>
<bin m='5.0'>9.994608e-004</bin>
<bin m='5.1'>7.938999e-004</bin>
<bin m='5.2'>6.306171e-004</bin>
<bin m='5.3'>5.009170e-004</bin>
<bin m='5.4'>3.978925e-004</bin>
<bin m='5.5'>3.160573e-004</bin>
</cell>
.....
.....
<cell lat='24.25' lon='122.55'>
<bin m='5.0'>9.994608e-004</bin>
<bin m='5.1'>7.938999e-004</bin>
<bin m='5.2'>6.306171e-004</bin>
<bin m='5.3'>5.009170e-004</bin>
<bin m='5.4'>3.978925e-004</bin>
<bin m='5.5'>3.160573e-004</bin>
</cell>
</depthLayer>
</forecastData>
</CSEPFforecast>

```

表 2. cseptest の help 出力

```

Usage cseptest forecast_region obscatalog min_mag bin_size nsimu TESTS
forecast.dat JPall.dat catalog 4 0.1 1000 N

```

表 3. cseptest の実行出力 (N-test のみ)

```

$ cseptest JPmain.dat RI30K.dat jmaM6.zmap 6 0.1 1000 N
=== CSEP TESTS RESULTS ===
RI30K.dat
jmaM6.zmap2
JPmain.dat
N
nsimu= 1000
nbin= 5483
Nfore= 12.803
Nobs= 12
delta1= 0.617 6 20
delta2= 0.484 6 20

```

表 4. cseptest の実行出力 (N-, M-, S-, L-test)

```

$ cseptest JPmain.dat RI30K.dat jmaM6.zmap 6 0.1 1000 NMSL
=== CSEP TESTS RESULTS ===
RI30K.dat
jmaM6.zmap2
JPmain.dat
NMSL
nsimu= 1000
nbin= 5483
Nfore= 12.803
Nobs= 12
delta1= 0.617      6      20
delta2= 0.484      6      20
kappa= 0.473  LL=   -16.846   -22.865   -12.971   8688
PG= 1.7710 xLL0=   -79.329 uLL0=   -86.187
zeta= 0.036  LL=   -79.329   -80.380   -56.821   8819
theta= 0.0129166671
gamma= 0.419  LL=  -110.148   -158.496   -56.411

```

には積極的でなかったこともある。そのため CSEP 標準の予測結果ファイルから XML タグを除くツールや、地震カタログから ZMAP フォーマットに変換するプログラムも併せて開発を行った。本プログラム群を利用することによりモデラーは CSEP に予測モデルを提供しなくても CSEP 標準のテストが容易に可能となる。また、本プログラムは並列化が難しいコードとなっており、計算機システム導入におけるベンチマークとしても活用されている。なお、本論文でのプログラムは <https://www.weic.eri.u-tokyo.ac.jp/repository/cseptest/> から利用可能である。

謝 辞：技術研究報告編集委員会と 2 名の匿名査読者には、有益なご指摘を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- pyCSEP (CSEP 開発者用ウェブサイト), <https://docs.cseptest.org> (参照: 2025-1-23)
- 東京大学地震研究所日本列島モニタリングセンター (地震活動予測検証プログラム) ウェブサイト, <https://www.weic.eri.u-tokyo.ac.jp/repository/cseptest/> (参照: 2025-1-23)
- 鶴岡 弘, 1997, ワークステーションにおける地震活動解析ソフトの開発, 東京大学地震研究所技術研究報告, no. 2, p. 34-42, <https://doi.org/10.15083/00032279>.
- Tsuruoka, H., N. Hirata, D. Schorlemmer, F. Euchner, K.Z. Nanjo, and T. H. Jordan, 2012, CSEP testing center and the first results of the earthquake forecast testing experiment in Japan, *Earth, Planets and Space*, vol. 64, no. 8, p. 661-671, <https://doi.org/10.5047/eps.2012.06.007>.
- Wiemer, S., 2001, A Software package to analyze seismicity: ZMAP, *Seismological Research Letters*, vol 72, no. 3, p. 373-382, <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>.
- Zechar, J. D., M. C. Gerstenberger, and D. A. Rhoades, 2010, Likelihood-based tests for evaluating space-rate-magnitude earthquake forecasts, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 100, no. 3, p. 1184-1195, <https://doi.org/10.1785/0120090192>.