

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震発生予測のための地震活動評価手法の基盤構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進
 - (2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築
 - (2-1) 地震発生予測システム
 - ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進
 - (2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築
 - (2-1) 地震発生予測システム
 - ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化
 - イ. 地殻活動予測シミュレーションの高度化
 - (3) 地震・火山現象に関するデータベースの構築
 - ア. 地震・火山現象の基礎データベース
 - イ. 地震・火山現象に関する情報の統合化
2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進
 - (3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程
 - (3-1) 地震発生先行過程
 - ア. 観測データによる先行現象の評価

(5) 本課題の5か年の到達目標：

地震発生に至る地殻の物理的素過程が明らかになったとしても、来るべき地震の時期、場所や大きさが決定論的に予測できるようになることは考えづらい。これは、地震を含む破壊現象には非線形的な要素が少なからず含まれていると考えられるからである。地震発生予測の進展のためには、統計モデルや物理モデルに基づく地震活動予測アルゴリズムを時空間的に高分解能かつ高精度化する必要がある。また、それらのアルゴリズムの妥当性を評価・検証する仕組みの構築も必然である。これらを効率的に実施していくためには、基盤構築が急務であり、そのための地震データの品質管理や地震活動予測アルゴリズムを備えたソフトウェアの有機的な結合を継続的に行っていく必要がある。本課題では上記を実現するため、地震活動予測に関するインフラ整備を実施するとともに、地震活動予測の実験を行って予測手法の妥当性を検証する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成 21 年度は、先行して同種の研究が実施されているアメリカ・ヨーロッパ等のプロジェクト CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability) と国際連携を図り、CSEP と同様のソフトウェアをインストールし、日本の地震活動に適した地震活動予測モデルの募集や予測対象領域を決定し、地震活動予測モデルの検証を開始する。また、地震活動を正当かつ客観的に評価するために、気象庁一元化震源に対するコンプリートネスマグニチュードの時間変化を解析し地震活動の予測実験に活用する。

平成 22 年度は、地震活動予測モデルを広く募集し、テストクラス（1 日、3 ヶ月）に対するモデル比較を行う。

平成 23 年度は、テストクラス（1 年）に対するモデル比較を行う。

平成 24 年度は、日本の地震活動に適した地震活動予測モデルの高精度化に取り組む。

平成 25 年度は、テストクラス（3 年）に対するモデル比較を行うとともに、全体の成果を取りまとめる。

（7）計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

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を 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、グローバルな地震予測の検証環境を厳密に規定し、地震予測を客観的に評価する枠組みのことである。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。その予測は、prospective に実施されるので、モデラーによる予測の変更が原理的にできない仕組みであり、予測結果は共通の手法により評価がなされる。モデラーとは異なる第三者により地震研究所に設置されたテストセンターにおいて、その予測検証実験が遂行されている。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(=3×4) のテストが行われている（図 1）。

2. CSEP のテスト

地震の予測が観測結果を満たしているかどうかの評価に、CSEP においては、地震数の予測が観測をみたしているかどうかをチェックする N-テスト、地震活動の分布が観測を満たしているかどうかの S-テスト、予測のマグニチュードの規模別頻度分布が観測を満たしているかどうかの M-テスト、これら 3 つのテストの総合テストである L-テストが統計的に厳密に行われる。これらのテストは consistency テストとよばれるが、観測結果は一つであるため、その評価の手法に特徴がある。これらのテストの手順は以下のようなものとなる。(1) 期待値マップを元に数値シミュレーションにより地震を発生させる。(2)(1)の疑似地震により対数尤度を計算する。(3) (1), (2) を繰り返して（通常は 1000 回）対数尤度の分布を得る。(4) 実際に観測された地震による対数尤度が (3) の分布のどこにくるかを見る（図 2）。この分布は、図 3 をみてわかるように地震予測モデル毎に異なり、このテストから得られる評価値（スコア）はモデル間の絶対的な評価ではなく相対的なものであることが特徴である。

3. 予測結果

表 1 から 3 に、AllJapan テスト領域の 3 ヶ月テストクラスの結果を示す。東北沖地震直前のラウンドにおいては、すべての予測モデルは観測数を課題評価しており、N-テストをパスしていない。東北沖地震を含むラウンドにおいては、すべての予測モデルがテストをパスしていないことがわかる。東北沖地震後は予測モデルがテストをパスしないラウンドが続くが、2012/8/1 からの 12 ラウンドから、予測モデルがテストをパスする状況に回復した。

4. CSEP テストの問題点

CSEP のテストは、(1) L-テストは、地震予測数を少し多めであるとパスしやすい。(2) N-テスト結果と L-テスト結果は相関する。(3) N-テスト結果と S-テスト結果は、相関がない。(4) M-テストはほぼパスする。(予測モデルはほぼ GR 則を満たす。(5) N-テストは地震観測数が増えるとパスしにくくなる。などの特徴があるが、スコアがモデル毎の相対的な指標であるということと、日本においては S-テストをパスしないモデルが多いことがある。また、このテストの評価は、「予測が観測を満たして

いる」ということではなく、テストをパスの意味するところは「予測モデルは観測を満たしていないとはいえない」が正しい解釈である。また、M-テストは下限マグニチュードを変えるとスコアが変わる。テスト領域の解像度を変えて S-テストを行うとスコアが変わる (図 4) など、評価テストの改善・改良が必要である。

5. 検証実験の継続

2009 年 11 月 1 日から、日本における地震発生予測検証実験がスタートし、これまでに数多くの検証結果が得られた。予測の評価手法である CSEP の consistency テストの特性も徐々に明らかとなり、テスト自体の改善・改良が必要であるが、この検証実験を継続して実施することが予測モデルのさらなる向上につながる。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

鶴岡 弘, マッチスコアの評価性能について, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 横浜 (日本), 2013 年 10 月 7 日 ~ 9 日, 2013.

Tsuruoka, H., Nanjo, K., Yokoi, S. and Hirata, H. Predictability Study on the Aftershock Sequence of the 2011 Tohoku Earthquake using Preliminary JMA Catalogue, SSA 2013, 2013

平田直, 鶴岡 弘, 横井佐代子, テスト領域の空間解像度が評価に与える影響, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 横浜 (日本), 2013 年 10 月 7 日 ~ 9 日, 2013.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所 鶴岡 弘・平田 直・佐竹健治・楠城一嘉・横井佐代子・石辺岳男

他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5691

e-mail：tsuru@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：鶴岡 弘

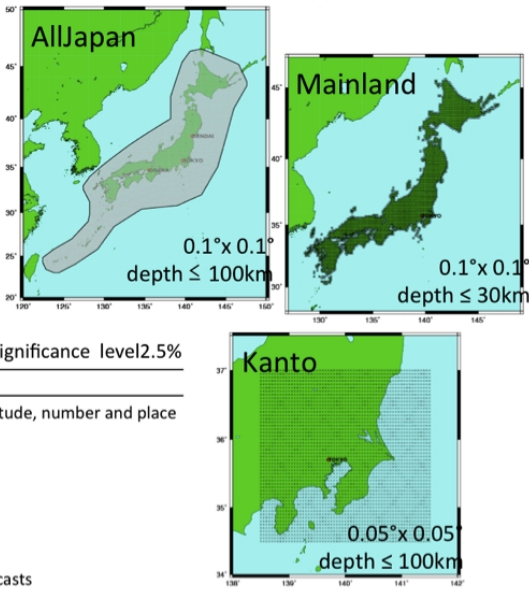
所属：東京大学地震研究所

Rules of CSEP-Japan

Test class

1-day	$4 \leq M \leq 9$
3-month	$4 \leq M \leq 9$
1-year	$5 \leq M \leq 9$
3-year	$5 \leq M \leq 9$

Testing region



Evaluation

test	
L	Likelihood of distributions of magnitude, number and place
CL	Conditional L-test
N	Event number
M	Magnitude distribution
S	Spatial distribution
W/T	Pair-wise comparison between forecasts

図 1.
日本の地震予測検証実験のルール.

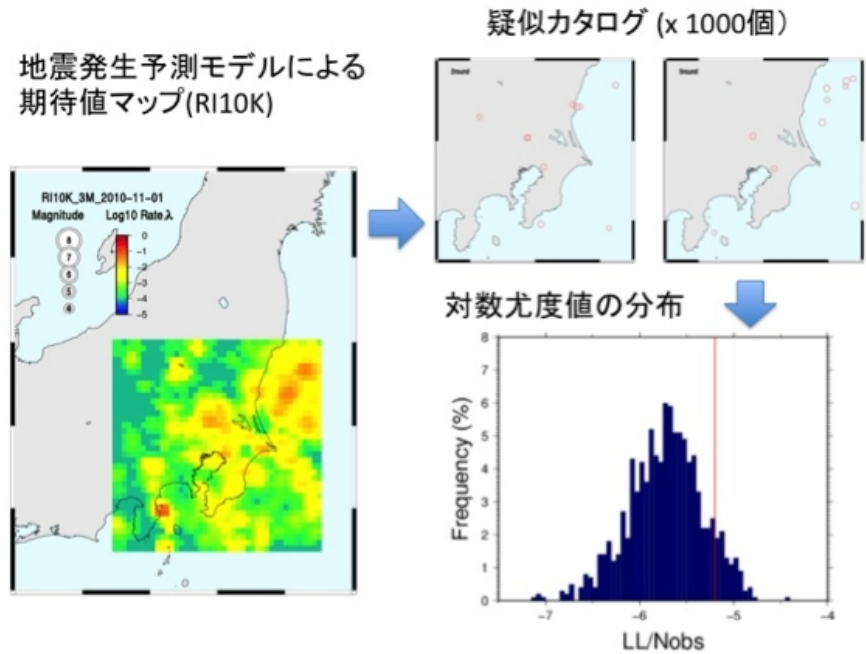


図 2.
観測分布の導出.

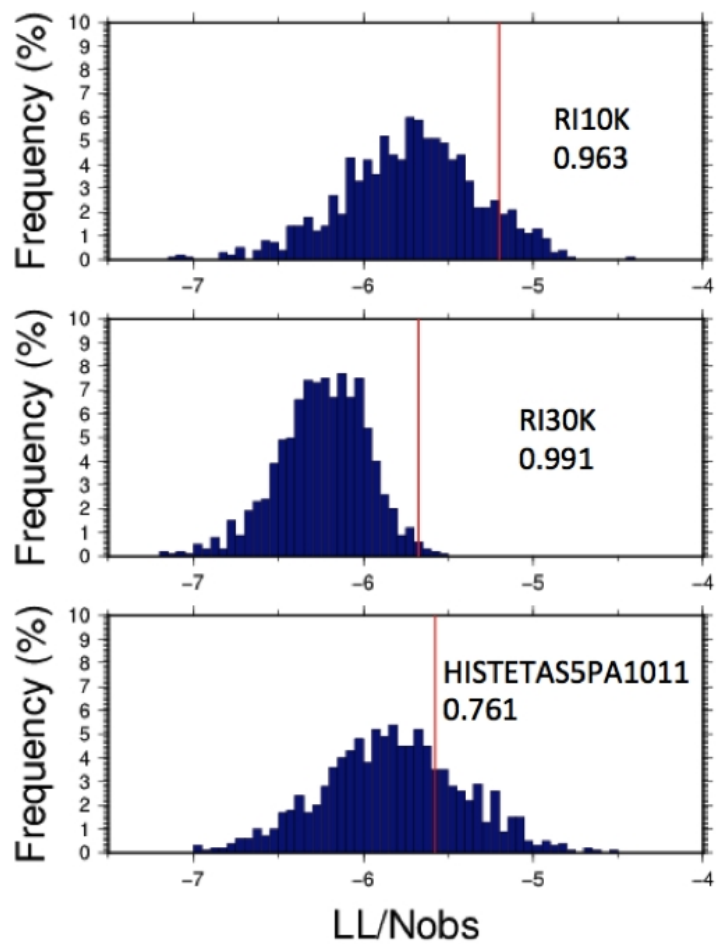


図 3.
モデル毎の対数尤度分布 (モデル：RI10K, RI30K, HISTETAS5PA1011)

TEST		L	N(under)		N(over)	M	S	forecast(obs)	fore/obs
MODEL	LL(L)	gamma	delta1	delta2	kappa	zeta	forecast(obs)	fore/obs	fore/obs
HISTETAS5PA	-553.96521	1.000	1.00000	0.00000	0.262	0.155	132.21126(68.0)	1.94	
HISTETAS7PA	-554.48529	1.000	1.00000	0.00000	0.257	0.479	132.20472(68.0)	1.94	
RI10K	-555.94433	1.000	1.00000	0.00000	0.284	0.065	124.21431(68.0)	1.83	
MARFS	-574.73038	1.000	1.00000	0.00000	0.349	0.001	130.57214(68.0)	1.92	
RI30K	-576.21008	1.000	1.00000	0.00000	0.334	0.037	124.21430(68.0)	1.83	
RI50K	-587.82008	1.000	1.00000	0.00000	0.297	0.082	124.21430(68.0)	1.83	
RI100K	-599.47050	1.000	1.00000	0.00000	0.332	0.291	124.21430(68.0)	1.83	
TRIPLES1011	-616.66693	1.000	1.00000	0.00000	0.561	0.647	122.89603(68.0)	1.81	

表 1.
AllJapan の第 5 ラウンド (2010/11/1-2011/2/1) の評価結果.

TEST		L	N(under)	N(over)	M	S	forecast(obs)	fore/obs
MODEL	LL(L)	gamma	delta1	delta2	kappa	zeta	forecast(obs)	fore/obs
HISTETAS7PA	-26311.15385	0.000	0.00000	1.00000	0.000	0.000	126.75051(3702.0)	0.03
HISTETAS5PA	-26439.18496	0.000	0.00000	1.00000	0.000	0.000	126.75947(3702.0)	0.03
RI100K	-26482.17245	0.000	0.00000	1.00000	0.000	0.000	119.41082(3702.0)	0.03
RI50K	-26766.78596	0.000	0.00000	1.00000	0.000	0.000	119.41082(3702.0)	0.03
RI30K	-26964.84176	0.000	0.00000	1.00000	0.000	0.000	119.41082(3702.0)	0.03
TRIPLES1011	-27729.81732	0.000	0.00000	1.00000	0.000	0.000	118.55716(3702.0)	0.03
RI10K	-27800.54045	0.000	0.00000	1.00000	0.000	0.000	119.41082(3702.0)	0.03
MARFS	-27890.97891	0.000	0.00000	1.00000	0.000	0.000	114.74027(3702.0)	0.03

表 2.

AllJapan の第 6 ラウンド (2011/2/1-2011/5/1) の評価結果.

TEST		L	N(under)	N(over)	M	S	forecast(obs)	fore/obs
MODEL	LL(L)	gamma	delta1	delta2	kappa	zeta	forecast(obs)	fore/obs
HISTETAS5PA	-1185.07647	0.969	0.94834	0.05970	0.768	0.878	209.81296(187.0)	1.12
RI10K	-1195.06581	0.577	0.34128	0.68527	0.831	0.863	181.13562(187.0)	0.97
MARFS	-1195.17379	0.658	0.42438	0.60411	0.875	0.839	184.07388(187.0)	0.98
RI30K	-1229.50003	0.689	0.34128	0.68527	0.830	0.988	181.13562(187.0)	0.97
HISTETAS7PA	-1231.85582	0.994	0.94713	0.06106	0.722	0.996	209.64589(187.0)	1.12
RI50K	-1257.38876	0.685	0.34128	0.68527	0.841	1.000	181.13562(187.0)	0.97
TRIPLES1011	-1274.27537	0.116	0.00183	0.99856	0.582	0.997	149.73916(187.0)	0.80
RI100K	-1302.52153	0.700	0.34128	0.68527	0.846	1.000	181.13562(187.0)	0.97

表 3.

AllJapan の第 12 ラウンド (2012/8/1-2012/11/1) の評価結果.

空間解像度	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
zeta値	0.001	0.000	0.002	0.103	0.678
確率利得	1.90	1.97	1.98	1.99	1.95

表 4.

解像度が異なる場合の、スコアおよび確率利得値.