

### 3. 1. 4 首都圏の過去の地震活動に基づく地震活動予測手法の確立

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

過去に発生した地震の活動から将来の地震活動を予測する統計地震学的手法を発展させた新たな地震活動予測手法を提案する。そのために首都圏の過去の地震活動に最適化した時空間的に高分解能かつ高精度な地震活動予測アルゴリズムを開発する。またそれらのアルゴリズムを評価・検証するための基盤構築を行い、地震活動予測の実験を行って、地震活動予測手法の妥当性を検証する。

##### (b) 平成 27 年度業務目的

(1) c により構築された南関東において過去に発生した大地震の新たな時系列モデルを取り込み、地震活動予測アルゴリズムの高精度化をはかる。平成 26 年度に引き続いて、地震発生予測検証実験を行う。

##### (c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	准教授	鶴岡弘	tsuru@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	平田直	
東京大学地震研究所	特任研究員	横井佐代子	
東京大学地震研究所	特任研究員	尾形良彦	

#### (2) 平成 27 年度の成果

##### (a) 業務の要約

- (1) c により構築された南関東において過去に発生した大地震の新たな時系列モデルを取り込み、地震活動予測アルゴリズムの高精度化をはかった。
- 平成 26 年度に引き続いて、地震発生予測検証実験を行った。

##### (b) 業務の成果

- (1) c により構築された南関東において過去に発生した大地震の新たな時系列モデルを取り込んだ地震活動予測アルゴリズムの高精度化

##### a) M6.0 以上の地震活動予測のための RI モデルの開発

首都圏で M6.0 以上の地震を予測するための地震活動予測モデルの構築を開始し、モデルパラメータの最適化を事後予測検証実験によって実施した。地震活動予測モデルは、Relative Intensity モデルを採用した（以下、「RI モデル」と表記する（Nanjo, 2011）<sup>1)</sup>）。RI モデルでは、地震活動を予測するために過去の地震のデータから地震数と空間分布を学習する必要がある。予測の精度を向上させるためには、より長期間のデータから学習することが挙げられる。ここでは、気象庁震源カタログ以前のデータとして、宇津カタログを採用した（宇津, 1979）<sup>2)</sup>。ただし、地震の深さの決定精度を考慮して、空間予測領域は緯度・

経度の二次元予測領域のみとした。なお、宇津カタログは、課題 (1) c により震源の再決定が行われた (以下、「修正宇津カタログ」と表記する)。再決定は、1885 年 3 月 20 日から 1922 年 5 月 9 日に首都圏で起きた地震の震源 (緯度・経度・深さ) を近年の震源情報の S-P 時間の分布、初動ならびに発震機構解と比較・整理することにより推定された (石辺・他、2015)<sup>3)</sup>。これらの震央分布を図 1 (P.123) に示す。

2000 年 1 月 1 日から 2010 年 1 月 1 日に発生した M6.0 以上の地震に対する予測実験を行った。予測条件と学習条件を表 1 (P.122) のように定めた。この期間中に首都圏で観測された M6.0 以上の地震は 5 個であった (図 1、P.123)。学習開始年は、1895 年から 2000 年まで 1 年刻みで調査した。学習データ数を図 2 (P.124) の累積曲線に示す。予測値と観測値から各モデルの情報利得 (Information Gain : IG) (鶴岡・他、2015)<sup>4)</sup> を算出し、IG の値が大きいモデルほど良い予測であるとした。

結果を以下に述べる。表 1 (P.122) の各条件を学習した RI モデルの予測地震数を図 2 (P.124) に示す。予測地震数は、1923 年まではほぼ単調に増加し、それ以後は急激に減少した。

RI モデルの空間の期待値と観測値から得られた IG を図 3 (P.124) に示した。M4.0 以上 (3 ヶ月予測実験) あるいは、M5.0 以上 (1 年予測実験) をターゲットとした場合には、平滑化半径が小さいほど良い IG を示したが、M6.0 以上では平滑化半径が 10km よりも 15km、20km、25km の場合に IG が高くなることがわかった。また、学習期間開始年を 1895 年とする場合に IG が最大値をとることもわかった。図 4 (P.125) に平滑化半径 15km および学習期間開始年 1895 年の期待値の空間分布を示した。

修正宇津カタログを学習データに組み込むことにより、M6.0 以上の地震に対する予測の高精度化を図れることが示された。また、予測する、地震の規模に応じて最適な平滑化半径が異なる可能性があることも示された。

## b) RI モデルの改良による高度化の検討

RI モデルにおける空間分布は地震の規模によらずその重みが 1 であるが、地震の規模に応じて重みをつけた後に空間分布の推定を行い、IG の向上が見られるか調査を行った。3 ヶ月予測実験 (2015 年 11 月 1 日から 2016 年 2 月 1 日) の IG を図 5 (P.125) に示す。IG の最大値は、重みが 1 よりも大きい場合に得られることがわかった。a) との組み合わせにより、IG の向上が期待できる。

## c) 三次元階層時空間 ETAS モデルの開発

三次元空間の階層的時空間 ETAS モデルでは、任意の時刻  $t$  と位置  $(x, y, z)$  での地震活動度が、過去の地震発生履歴  $H_t$  の関数として、

$$\lambda_{ETAS}(t, x, y, z | H_t) = \mu(x, y, z) + \sum_{\{j: t_j < t\}} \frac{K(x_j, y_j, z_j)}{(t - t_j + c)^p} \left[ \frac{(x - x_j, y - y_j, z - z_j) S_j(x - x_j, y - y_j, z - z_j)^t}{e^{\alpha(M_j - M_c)}} + d \right]^{-q}$$

の様に記述される。 $\mu(x, y, z)$  は常時地震活動度 (background seismicity)、 $K(x, y, z)$  は余震生産性 (aftershock productivity) と呼ばれる。これらを位置の関数と考え、各領域で特に異なる地震活動度の特徴を定量化する。首都圏の現在の地震活動度および将来の地震活

動予測には、2011年東北地方太平洋沖地震によって誘発された活動度が追加され、

$$\lambda(t, x, y, z | H_t) = \lambda_{ETAS}(t, x, y, z | H_t) + \frac{K_{M9}(x, y, z)}{(t - t_{M9} + c_{M9})^{p_{M9}}}.$$

の様に東北地方太平洋沖地震の発生時刻  $t_{M9}$  を起点とする大森宇津型の減衰関数で記述される。ここで、首都圏の位置  $(x, y, z)$  における2011年東北地方太平洋沖地震からの影響度  $K_{M9}(x, y, z)$  の地域性を区別して定量化した。図6 (P.126) (a) にはこのモデルによる  $K(x, y, z)$  の空間分布を、図6 (P.126) (b) には  $\mu(x, y, z)$  の空間分布を示した。

## 2) 平成26年度に引き続き、地震発生予測検証実験の実施

### a) 実験の概要

昨年の事後予測実験により、3D-RIモデルのパラメータを過去（2011年東北地方太平洋沖地震の前）の地震活動に最適化した。このモデルが現在の地震活動の予測を正確に行うことができるかを試すため、2015年2月1日から事前予測実験を開始した。今年度は3ヶ月間の地震発生を予測する「3ヶ月予測実験」を4回実施し、それを基にモデルのアルゴリズムの高度化のための検討を行った。

### b) 3ヶ月予測実験の方法

3ヶ月予測実験において予測対象とする地震の条件と、予測モデル3D-RIモデルの学習条件を表2 (P.122) に示す。第1回予測実験では、2015年2月1日から2015年5月1日までに首都圏で起きる  $M 4.0$  から  $M 9.0$  までの地震を予測対象とした。3D-RIモデルに予測を行うための学習用データを入力し、予測対象となる地震の発生数（期待値）を計算した。学習用データは、 $M 2.5$  以上、平滑化半径は7.5、10、20、50 kmとし、学習期間は次の3種類とした。期間①1998年1月1日から2011年1月1日：2011年東北地方太平洋沖地震前の気象庁一元化地震カタログ、期間②1998年1月1日から2015年1月1日：2011年東北地方太平洋沖地震前と後の気象庁震源カタログ、期間③2012年1月1日から2015年1月1日：2011年東北地方太平洋沖地震後の気象庁震源カタログ。予測期間終了後（2015年5月1日以降）にCSEP (Schorlemmer and Gerstenberger, 2007)<sup>5)</sup> の評価方法を三次元地震発生予測モデル用に拡張したものをを用いて3D-RIモデルの予測がどの程度地震を予測できていたかを評価した。第1回予測実験の期間中に予測対象となる地震は9個発生した。空間分布を図7 (P.126) に示す。第2回から第4回の予測実験も、第1回予測実験と同様の方法で行った。

### c) 結果

3ヶ月予測実験の第1回から第4回の実験を概観すると、地震数、場所、規模のテストのパス率(各テストにパスしたモデルの数 / 全モデル数 x 100 [%])はそれぞれ41.7、89.5、100%となった。また、期間②を学習した3D-RIモデルは、空間および総合テストの対数尤度が他のモデルより良かった。

第1回予測実験の期待値の空間分布を図8(P.127)に、検証結果を図9(P.128)に示す。期間①を学習した3D-RIモデルの予測地震数は7.3個であった。この予測地震数から推定される地震数の95%信頼区間は3個から13個になり、観測数9個はこの範囲内に含まれる。よって、予測地震数と観測数に95%信頼区間内で有意な差異があるとは言えず、地震数のテストを棄却されなかった(図9(P.128)のN-test Learning Period 1)。これを「予測は観測を満たしていた」と考え、以下では「テストをパスした」と表記する。期間②を学習したモデルは、18.1個と予測しており95%信頼区間は10個から27個になるため観測数9個は観測数に対して予測地震数が多いとして地震数のテストで棄却された(図9(P.128)のN-test Learning Period 2)。同様に、期間③を学習したモデルは27.9個と予測しており観測数に対して予測地震数が多すぎるとして地震数のテストで棄却された(図9(P.128)のN-test Learning Period 3)。また、場所と規模と総合(地震数-規模-場所)の予測については全ての3D-RIモデルがテストをパスした(図9(P.128)のS-test、M-test、L-test)。期間②の3D-RI7.5kモデル(2011年東北地方太平洋沖地震前と後のデータを学習し、平滑化半径を7.5kmにした場合の3D-RIモデル)は、場所と総合の対数尤度が全てのモデルの中で最も良かった(図9(P.128)のS-test Learning Period 2とL-test Learning Period 2)。第2回予測実験から第4回予測実験の検証を行った結果、期間①を学習した3D-RIモデルは観測数に対して予測地震数が少なすぎるとして、また期間③を学習した3D-RIモデルは観測数に対して予測地震数が多すぎるとして、地震数のテストで棄却されることがあった(図10(P.129)、図11(P.130)、図12(P.131)のN-test Learning Period 1とLearning Period 3)。また、第2回予測実験では、期間①を学習した3D-RIモデルは総合のテストで棄却された(図10(P.129)のL-test Learning Period 1)。第3回予測実験では、期間①を学習した3D-RIモデルは場所と総合のテストで棄却された(図11(P.130)のS-testとL-test Learning Period 3)。第1回予測実験と同様に、規模は、全ての3D-RIモデルが全ての回でテストをパスした(図10(P.129)、図11(P.130)、図12(P.131)のM-test)。

#### d) 考察

規模については、同一の予測期間であれば全てのモデルが同じ対数尤度になった。これは、3D-RIモデルの規模の期待値を決める際にパラメータとして使用するグーテンベルグ・リヒター則の $b$ 値を全ての3D-RIモデルにおいて同じにしているためである。予測の際に使用した $b$ 値は0.9とし、観測した地震から得られる $b$ 値は1.3であった(第1回予測実験、

範囲は  $M4.0$  から  $M4.6$  )。規模のテストでモデルがパスしたのは、観測地震の規模が大きくなかったためと考えられる。

2011 年東北地方太平洋沖地震の前の首都圏の観測地震の数の平均  $\pm 2\sigma$  は、 $12.8 \pm 12.3$  個 / 3 ヶ月だった。2011 年東北地方太平洋沖地震の直後に余震の影響で急激に増え、その後は減少した。そして、2011 年 11 月には 3 ヶ月間の地震数は平均  $+2\sigma$  以下になった (図 13、P.132)。期間③ (2012 年 1 月 1 日以降) は地震数が平均  $+2\sigma$  より多い時期を含むのでそれを学習した 3D-RI モデルの予測地震数は平均  $+2\sigma$  より多くなった。これが、期間③を含む 3D-RI モデルが予測数を過大評価した原因と考える。

一方、2011 年東北地方太平洋沖地震の後は銚子沖の深さ 0–50km で地震が多く発生し、2011 年の前と同じ地震活動ではなくなった。実験中も、銚子沖の深さ 0–50km で地震が発生した (例えば、図 7、P.126)。よって、期間②や期間③を学習した 3D-RI モデルの対数尤度が期間①を学習した 3D-RI モデルより良くなったと考えられる。また、期間②を学習した 3D-RI モデルは 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震とその直後の余震を含んでいるために空間の期待値が期間③を含む 3D-RI モデルより高くなった。その結果、期間②を含む 3D-RI モデルの対数尤度が大きくなったと考えられる。なお、2011 年東北地方太平洋沖地震の前は伊豆地方の深さ 5–10km と銚子沖の深さ 40–50km で地震が起きていたので、その場所の期待値が高くなった (図 8 (上)、P.127)。

#### e) 検討

地震数の予測を改善するために 2011 年東北地方太平洋沖地震後の首都圏の地震数を大森宇津則 (宇津, 1999) <sup>6)</sup> で近似する方法を検討した。第 1 回予測実験から第 4 回予測実験の地震数を事後予測し、検証したところ地震数のテストをパスした (図 14、P.132)。この方法によって予測された地震数と、事前予測実験で 3D-RI モデルによって予測された地震数を表 3 (P.123) にまとめた。また、予測する際に使用した大森宇津則のパラメータを表 4 (P.123) に示した。3 ヶ月間の地震を予測するには、大森宇津則を使うのがよいと考えられる。

#### f) 結論

期間①を学習した 3D-RI モデルは地震数を過少評価することがあり、場所の予測 (対数尤度) は他の期間を学習したモデルより劣った。これより、期間①を学習した 3D-RI モデルは最近の首都圏の地震活動を予測するには力不足であることが示唆された。期間②を学習した 3D-RI モデルは、2011 年東北地方太平洋沖地震と直後の余震を学習期間に含むため、銚子沖の深さ 0–50km の期待値を高くした。実際に期待値の高い場所で地震が起こったので対数尤度も高くなり、予測の成績が良いという結果になった。また、実験後の検討によ

って、地震数については、大森宇津則を使用すると事前予測実験に参加したモデルより良い予測ができることが示された。

**(c) 結論ならびに今後の課題**

(1) cにより構築された南関東において過去に発生した大地震の新たな時系列モデルを取り込み、地震活動予測アルゴリズムの高精度化を図った。RIモデルのM6.0以上への適応と改良、および3次元階層化時空間ETASモデルの開発を実施した。平成26年度に引き続いて、地震発生予測検証実験を行い、予測モデルの評価を実施した。

**(d) 引用文献**

- 1) Nanjo, K. Z. : Earthquake forecasts for the CSEP Japan experiment based on the RI algorithm, Earth Planets Space, Vol.63, No.3, pp.261-274, 2011.
- 2) 宇津徳治: 12. 1885年～1925年の日本の地震活動－M6以上の地震および被害地震の再調査－, 地震研究所彙報, Vol.54, pp.253-308, 1979.
- 3) 石辺岳男, 佐竹健治, 村岸純, 鶴岡弘, 中川茂樹, 酒井慎一, 平田直: テンプレートマッチング法に基づく明治・大正期に発生した大地震の震源・発震機構解推定, 日本地震学会講演予稿集 2015年度秋季大会, p.111, 2015.
- 4) 鶴岡弘, 平田直, 横井佐代子: 都市の脆弱性が引き起こす激甚か災害の軽減化プロジェクト①首都直下地震の地震ハザード・リスク予測のための調査・研究(平成26年度)成果報告書, pp.112-113, 2015.
- 5) Schorlemmer, D. and Gerstenberger, M. C.: RELM testing center, Seismol. Res. Lett., Vol.78, No.1, pp.30-36, 2007. doi:10.1785/gssrl.78.1.30.
- 6) 宇津徳治: 地震活動総説, p.334, 1999.

**(e) 学会等発表実績**

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
Three-dimensional earthquake forecasting model for the Kanto district: Results of retrospective and prospective tests	Yokoi Sayoko, Hiroshi Tsuruoka, Naoshi Hirata	日本地球惑星科学連合2015年大会（千葉市）	2015年5月24日-5月28日	国内
首都圏の地震発生予測モデルの構築に向	横井佐代子・鶴岡弘・平田直	日本地震学会2015年度秋季大会（神戸）	2015年10月26日-10月28日	国内

けて ー3ヶ月テストクラス の事前予測実験ー	(東大地震 研)		日	
Five-year Japanese earthquake predictability experiment with multiple runs since 2009 including the 2011 Tohoku-oki earthquake	Naoshi Hirata, Hiroshi Tsuruoka, Danijel Schorlemmer	9 <sup>th</sup> International Workshop on Statistical Seismology	2015年6 月 15-19 日	国外
Development of Seismicity Analysis software: TSEIS - ETAS module implementation -	Hiroshi Tsuruoka and Yoshihiko Ogata	9 <sup>th</sup> International Workshop on Statistical Seismology	2015年6 月 15-19 日	国外

学会誌・雑誌等における論文掲載  
なし

マスコミ等における報道・掲載  
なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 28 年度業務計画案

(1) cにより構築された南関東における過去に発生した大地震の新たな時系列モデルを用いた長期間の地震活動変化の検討をする。さらに、これまでに実施した地震発生予測検証実験をまとめ、複数の独立な地震活動予測アルゴリズムを結合したハイブリッドモデル

との比較・評価を行い、首都圏の過去の地震活動に基づく地震活動予測手法を確立する。

表1 事後予測検証実験：RIモデルの予測条件と学習条件

予測	領域	東経 138.5°から 141.5°、北緯 34.5°から 37.0°、深さ 0 から 100km	
		緯度×経度	0.05° x0.05° (3000bins)
		深さ	100 km
	マグニチュード	6.0 以上 9.0 以下を 0.1 ごと	
	期間	10 年間：2000 年 1 月 1 日から 2010 年 1 月 1 日	
学習	領域	平滑化半径	10、15、20、25、30、40、50 km
		深さ	「予測領域」の深さ方向と同じ
	マグニチュードと期間	1895 年 1 月 1 日から 2000 年 1 月 1 日 M6.0 以上	

表2 事前予測検証実験：3D-RIモデルの予測条件と学習条件

予測	領域	東経 138.5°から 141.5°、北緯 34.5°から 37.0°、深さ 0 から 100km	
		緯度×経度	0.05° x0.05°
		深さ	5 km
	マグニチュード	3 ヶ月間：4.0 以上 9.0 以下を 0.1 ごと	
	期間	第1回：2015 年 2 月 1 日から 2015 年 5 月 1 日 第2回：2015 年 5 月 1 日から 2015 年 8 月 1 日 第3回：2015 年 8 月 1 日から 2015 年 11 月 1 日 第4回：2015 年 11 月 1 日から 2016 年 2 月 1 日	
学習	領域	平滑化半径	7.5、10、20、50 km
		深さ	「予測領域」の深さ方向と同じ
	マグニチュード	2.5 以上 9.0 以下、 <i>b</i> 値=0.9	
	期間	期間①：1998 年 1 月 1 日から 2011 年 1 月 1 日 (2011 年東北地方太平洋沖地震の前) 期間②：1998 年 1 月 1 日から予測期間の前日 (2011 年東北地方太平洋沖地震の前と後) 期間③：2012 年 1 月 1 日から予測期間の前日 (2011 年東北地方太平洋沖地震の後)	

表 3 各モデルによる地震数の予測と実測値の比較

		第 1 回	第 2 回	第 3 回	第 4 回
実測値		9	14	16	10
予 測 値	3D-RI 期間①	7.3	7.3	7.3	7.3
	3D-RI 期間②	18.1	18.3	18.4	18.4
	3D-RI 期間③	27.9	26.0	26.4	25.4
	大森宇津則	16.4	15.5	14.6	14.0

表 4 大森宇津則のパラメータ

	第 1 回	第 2 回	第 3 回	第 4 回
mu	0.0109	0	0	0
K	68.84	68.44	68.92	68.78
c	0.1128	0.1097	0.1127	0.1119
p	0.8209	0.8172	0.8195	0.8189

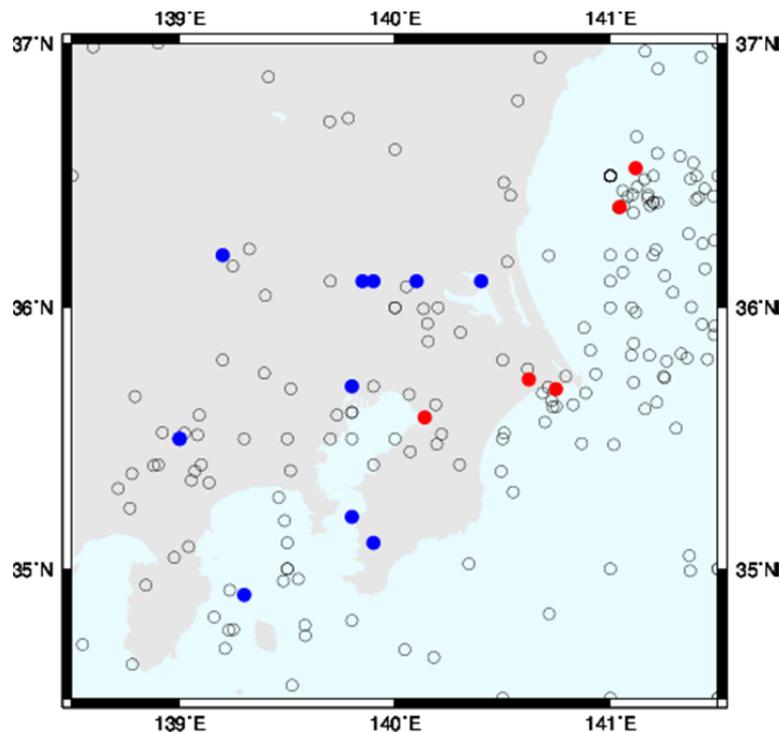


図 1 1885 年 3 月 20 日から 2010 年 1 月 1 日までに首都圏で発生した  $M6.0$  以上の地震の震央分布。青い丸は、修正宇津カタログに掲載されている地震を示す（1885 年 3 月 20 日から 1922 年 5 月 9 日）。中抜きの丸は、気象庁震源カタログに掲載されている地震の内 10 年予測実験で RI モデルの学習に使用した地震（1923 年 1 月 14 日から 2000 年 1 月 1 日）、赤の丸は 10 年予測実験で RI モデルの予測の対象となった地震（2000 年 1 月 1 日から 2010 年 1 月 1 日）を示す。

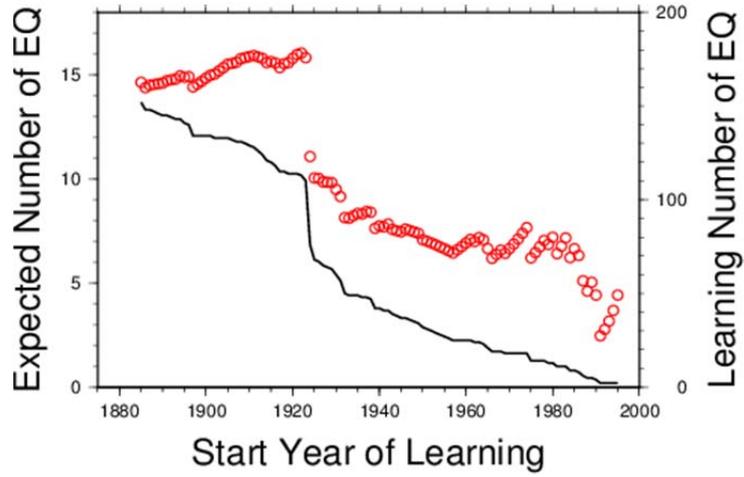


図2 RIモデルの学習データ数および地震予測数。

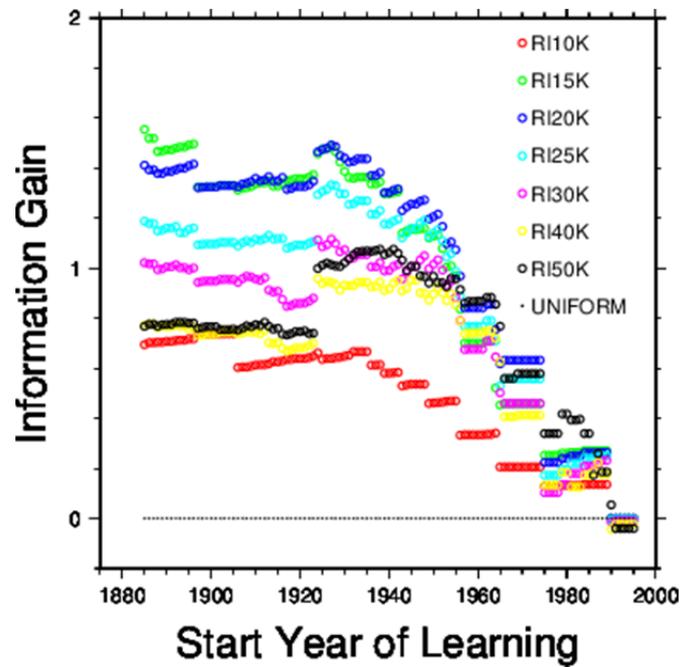


図3 RIモデルにおける10年予測実験の結果。縦軸は空間一様期待値モデルを基準とした場合の情報利得 (IG)、横軸は学習期間開始年を示す。

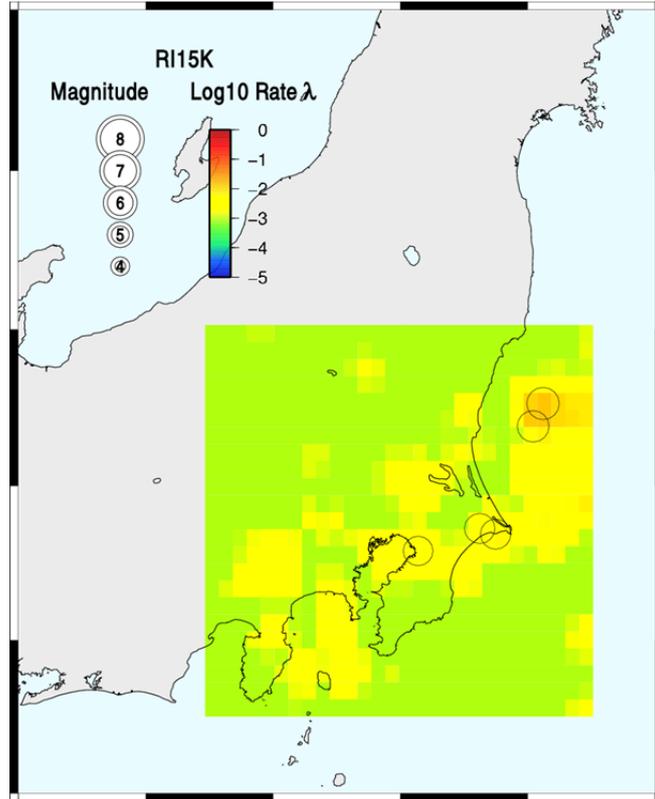


図 4 最適パラメータによる空間予測図。平滑化半径は 15km、学習開始年は 1895 年。

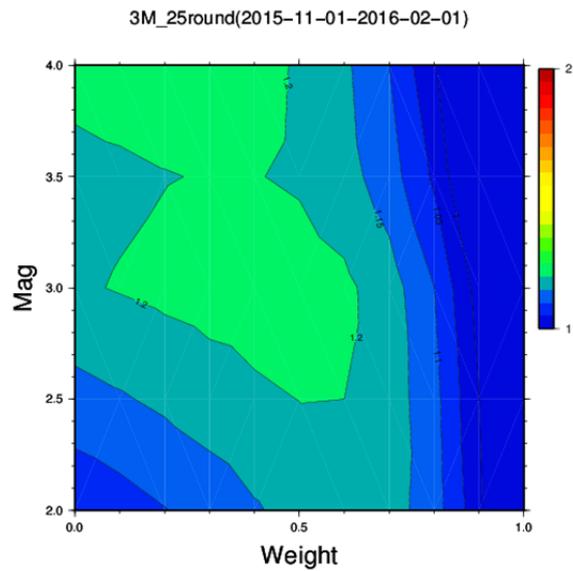
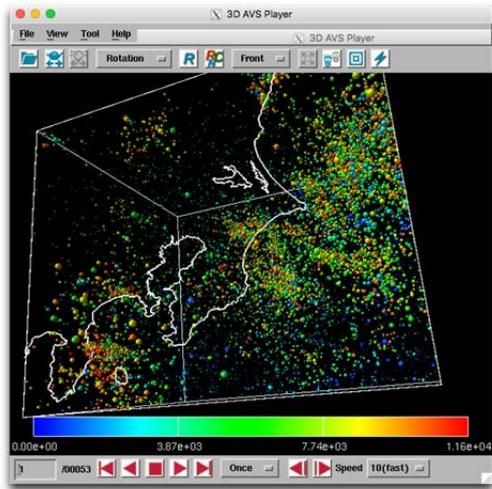


図 5 3ヶ月予測実験（2015年11月1日から2016年2月1日）の学習下限規模および重みのIGの分布。Weight=0の場合、IGは規模に依存せず、Weight=1の場合には規模が1大きくなる毎にIGが10倍になる。

(a)



(b)

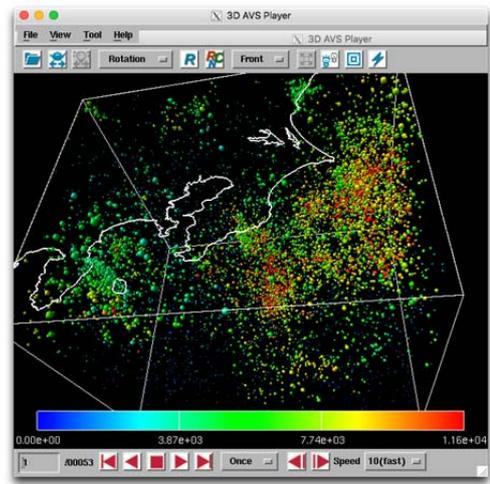


図6 三次元階層的時空間 ETAS モデルのモデルパラメータの空間分布。(a)  $K(x, y, z)$  の空間分布、(b)  $\mu(x, y, z)$  の空間分布。

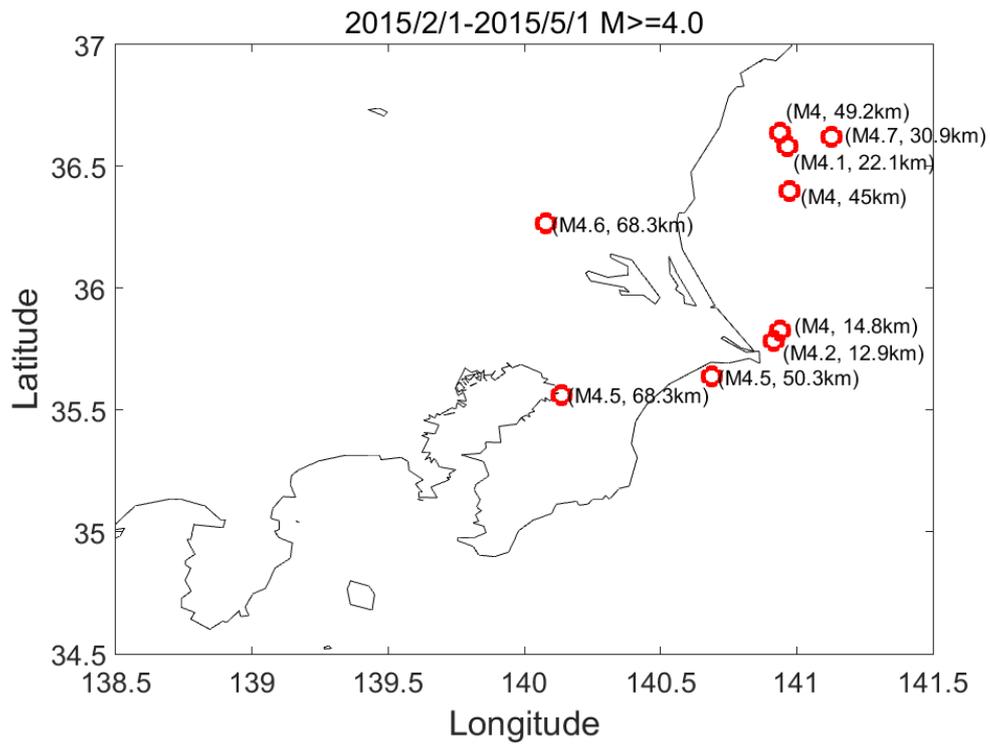


図7 3ヶ月第1回目実験の期間中に発生した観測地震の震央図。赤い丸は場所、場所の横にはその地震の規模と深さを示す。

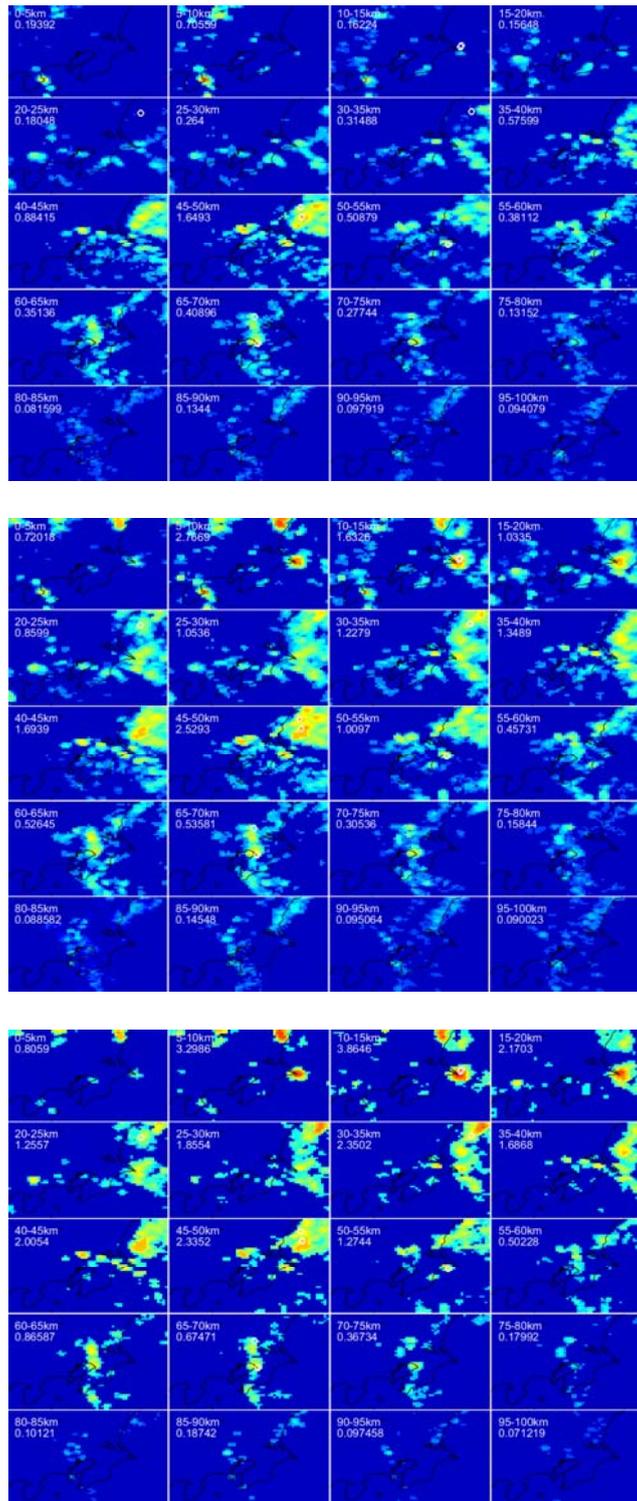


図 8 3D-RI7.5k モデルにおける 3 ヶ月第 1 回予測実験の期待値（空間分布：色）と観測地震（震央：白）。（上）表 2 中の期間① を学習期間とする場合、（中）期間② を学習期間とする場合、（下）期間③を学習期間とする場合。

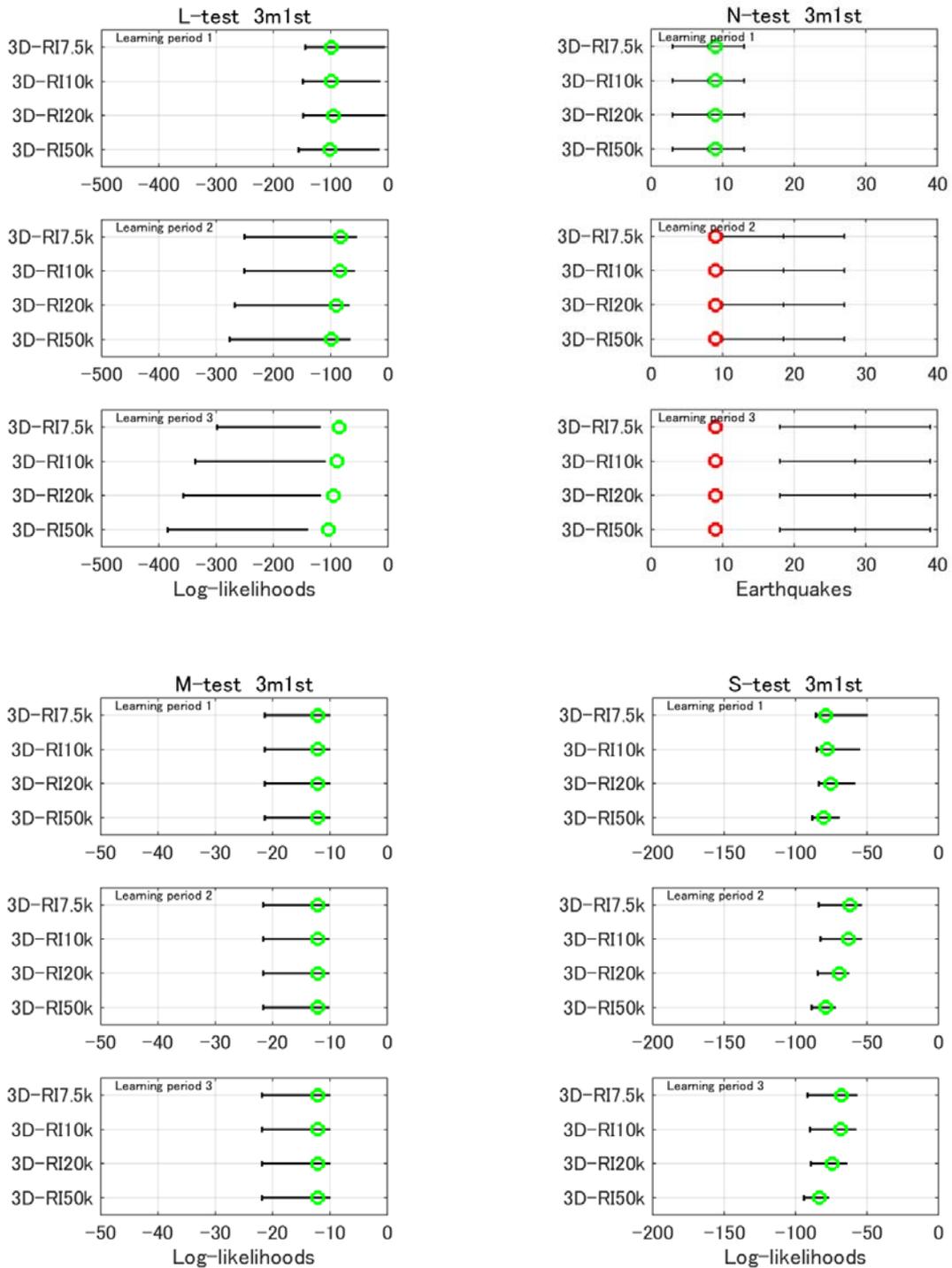


図9 3D-RIモデルにおける3ヶ月第1回予測実験の各テストの検証結果。L-testは予測の地震数-規模-空間分布に対するテスト、N-test、M-test、S-testはそれぞれ予測の地震数、規模分布、空間分布に対するテスト。Learning Period1は表2中の期間①、Learning Period2は期間②、Learning Period3は期間③を示す。黒い線は95%信頼区間を示し、この区間の中に丸があればテストにパスしたとする。緑色はテストにパスしたこと、赤色はパスできなかったことを示す。

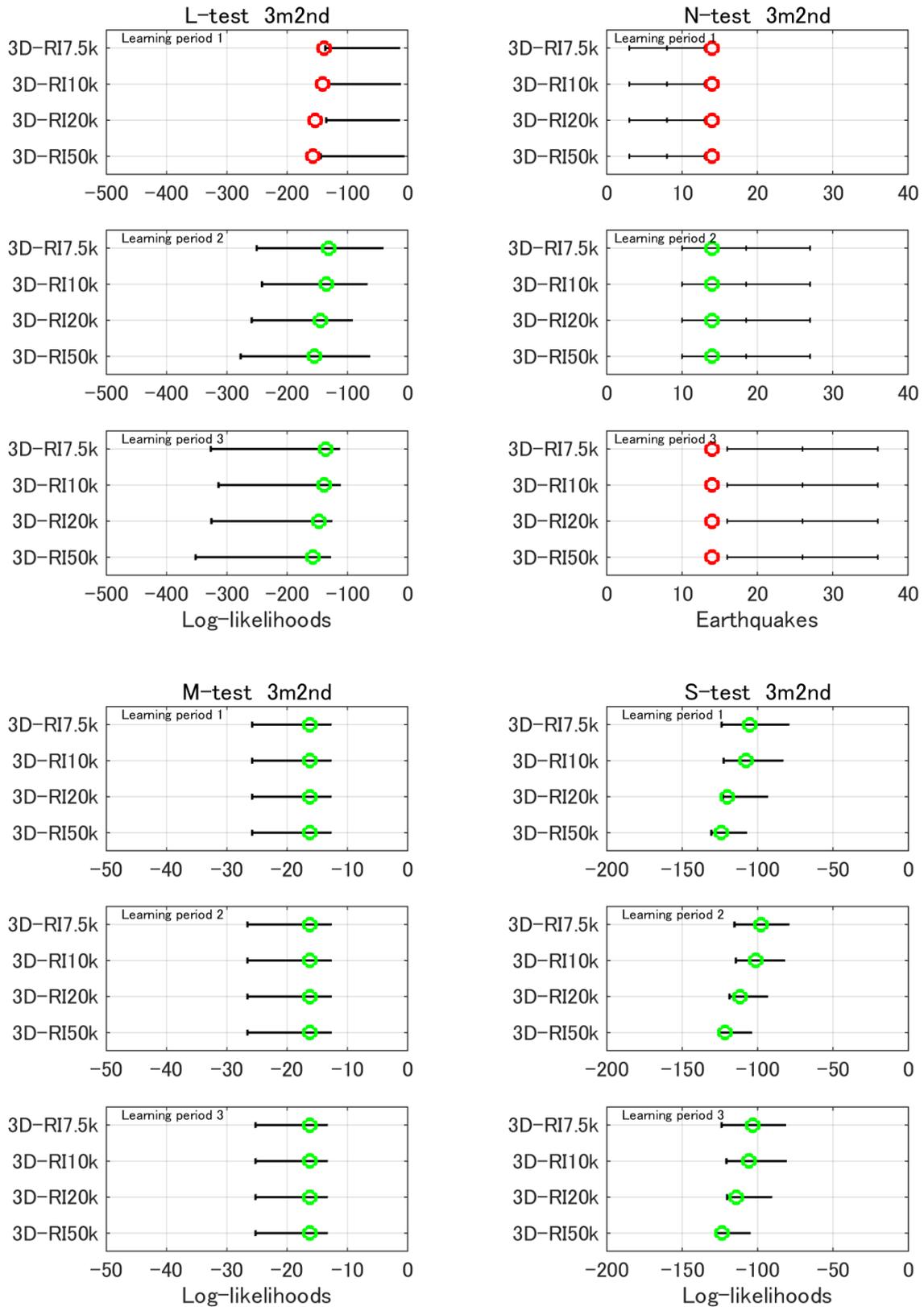


図 10 3D-RI モデルにおける 3 ヶ月第 2 回予測実験の各テストの検証結果。図の見方は、図 9 と同じ。

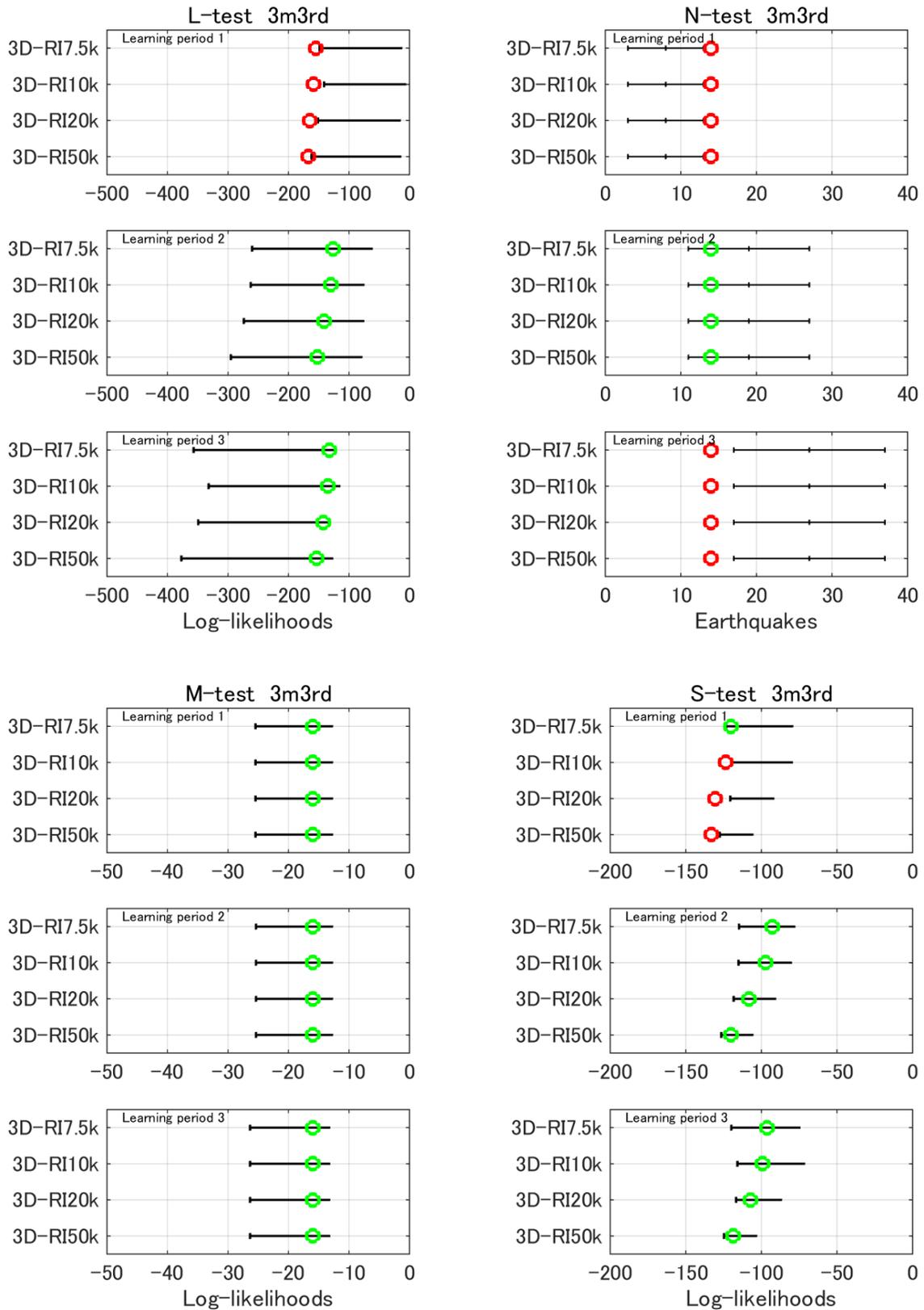


図 11 3D-RI モデルにおける 3 ヶ月第 3 回予測実験の各テストの検証結果。図の見方は、図 9 と同じ。

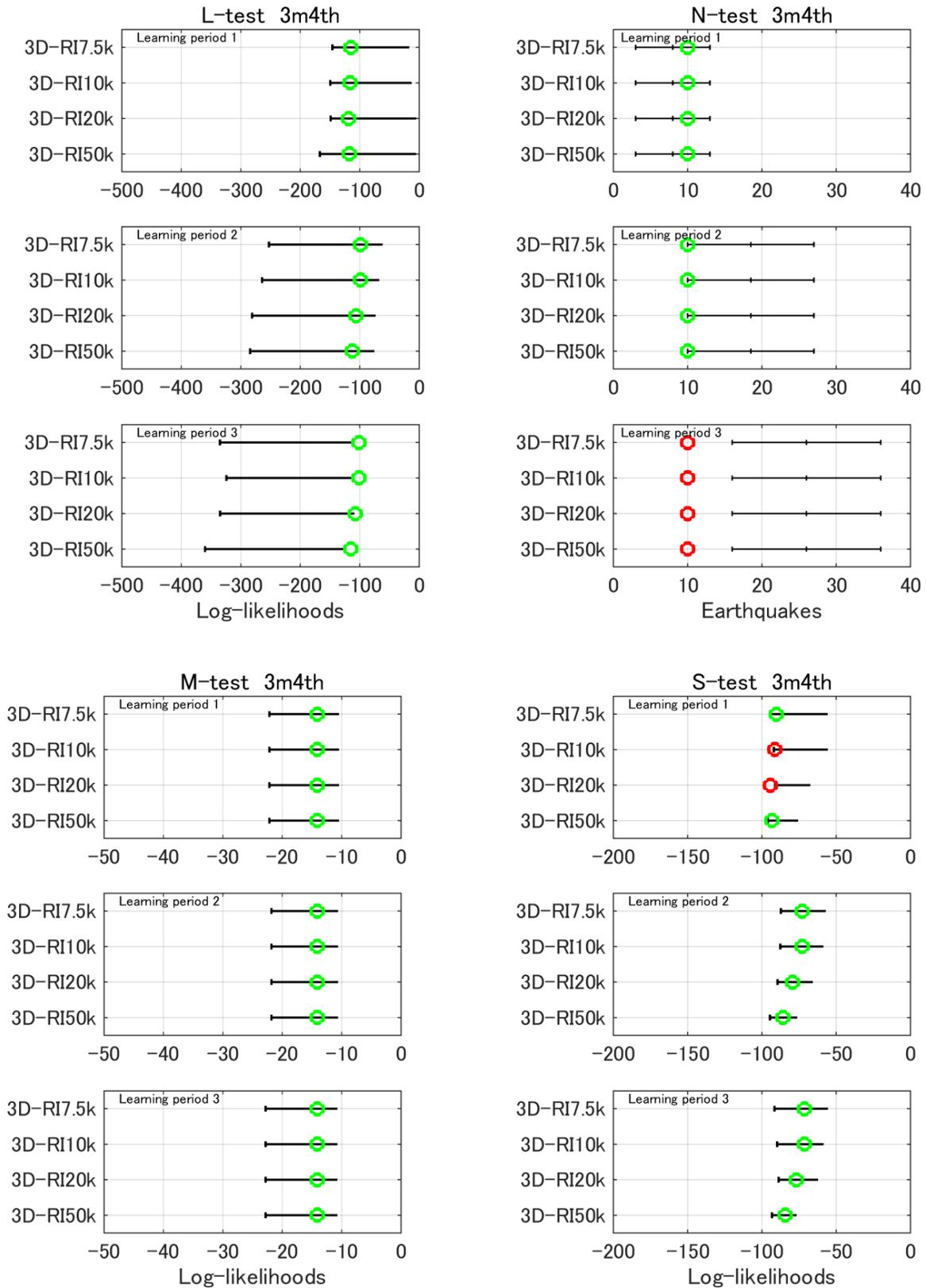


図 12 3D-RI モデルにおける 3 ヶ月第 4 回予測実験の各テストの検証結果。図の見方は、図 9 と同じ。

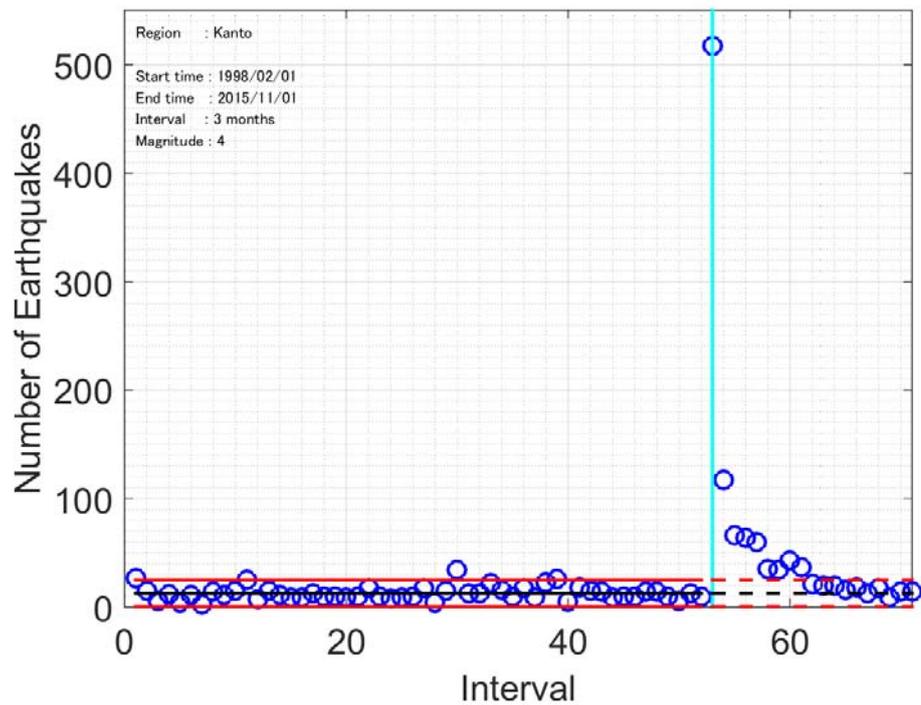


図 13 1998年2月1日から2015年11月1日に観測された3ヶ月毎の地震数(M4.0以上)。黒い線と赤い線は、1998年2月1日から2011年2月1日の3ヶ月毎の地震数の平均値と標準偏差( $\pm 2\sigma$ )を示す。水色の線は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震を含む3ヶ月間を示す。

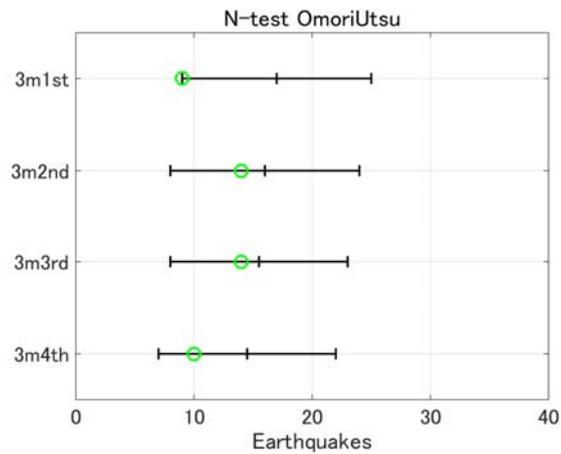


図 14 大森宇津則による3ヶ月第1回予測実験から第4回予測実験のN-testの検証結果。図の見方は、図9と同じ。