

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 28 年度業務目的

(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。

(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 28 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行った。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した。

(b) 業務の成果

1) (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

a) RI モデル

昨年度に引き続き、首都圏で M6.0 以上の地震を予測するための地震発生予測モデルの検討を行った。昨年度の検討により、地震発生予測モデルは、Relative Intensity モデルを基礎とすることとした（以下、「RI モデル」と表記する。（Nanjo, 2011¹⁾）。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発生頻度と空間分布を学習する必要があるため、より多くのデータを使って学習させるために気象庁震源カタログ以前のデ

ータである宇津カタログも使用することにした（宇津，1979²⁾ および 1982³⁾）。予測期間を 2000 年から 2010 年（10 年間）とした場合に空間予測の情報利得（Information Gain、以下「IG」と表記する）が 1 番高くなる RI モデルの条件を探索した。その結果、IG が高くなる学習期間は 1885 年から 2000 年、平滑化半径が 15km の時であった（図 1 と図 2 (d)、（P.143 と P.144））。これより、気象庁震源カタログだけを使うより、修正後の宇津カタログと気象庁震源カタログの両方を使用するほうが良い予測ができることが示された。

今年度は、RI モデルはより多くのデータを使って学習させれば良い予測ができるという仮説を検証するために、他の予測期間についても同様の調査を行った。

表 1 (P.140) に示すように、予測期間を 2000 年以前の 10 年間 4 回分（第 1 回：1960-1970 年、第 2 回：1970-1980 年、第 3 回：1980-1990 年、第 4 回：1990-2000 年）とし、学習データは修正後の宇津カタログと気象庁震源カタログを使用することとした。なお、宇津カタログは、昨年度、課題 1c により震源の再決定が行われた宇津カタログを引き続き使用した。3D-RI モデルの予測に対し IG を求めて、IG が 1 番高い条件を「予測が良くなる RI モデルの条件」とした。結果を表 2 (P.140) と図 1 (P.143) に示す（昨年度行った予測実験は、第 5 回：2000-2010 年に示した）。第 1 回と第 3 回は、学習期間の始まりが 1923 年より後から予測期間直前とした時に空間予測の IG が 1 番高くなった。また、第 2 回、第 4 回、第 5 回においては学習期間を 1923 年より前から予測期間直前とし、平滑化半径を 15-20km のときに空間予測の IG が 1 番高くなるという結果になった。これより、学習データを過去に遡ってより多くのデータを使えば RI モデルの予測が良くなるという仮説は必ずしも正しいとは限らないことが示された。その原因は、首都圏における M6 以上の地震活動の時空間分布が一定でないことが挙げられる。具体的には、1923 年大正関東地震とその余震によって地震の空間分布が変化したので、1923 年を学習データに含むか含まないかが予測に大きく影響すること、また、近年の M6 以上の地震の分布に空間的なばらつきがあるので、時間を遡って学習データを増やさなくても IG が高くなる場合があったということである。以下に結果の考察を行う。

宇津カタログを使用すると情報利得が大きくなるのはどんなときか。首都圏の M6 以上の地震活動は、1885 年から 1922 年は主に千葉と茨城内陸と福島沖が活発であり、1923 年 9 月 1 日の大正関東地震の直後に伊豆半島周辺が活発になった。その後、1924 年から 2000 年にかけては、主に千葉と茨城内陸と福島沖が活発になった（図 2 (a)、（P.144））。これより、気象庁震源カタログに宇津カタログが付け足されると、千葉と茨城内陸と福島沖の空間予測の期待値が増加する。例えば、これらの地域で全ての地震が起きた場合には宇津カタログを使用するほうが有利になる。しかし、一部でもほかの地域で地震が起きた場合には期待値の低さが情報利得の減少につながる。伊豆半島で地震が起きた場合、1923 年以前から学習したモデルの情報利得が上がると期待されるが、学習データが少ないため近くで地震が起きるとは限らず、必ずしも情報利得の増加に結び付かなかった。1923 年から 1924 年に現れる不連続な情報利得の変化の原因については、次の 2 点が考えられる。1 つ目は、1923 年 9 月 1 日大正関東地震による地震の空間分布の変化。関東地震の余震が伊豆地方で起きたが、それ以降は、ほとんど起きなかった。そのために、1923 年を学習期間に含む予測では伊豆地方の期待値が高くなるが、1924 年以降、期待値は減少する。第 2 回

予測実験では伊豆地方で地震が起きた（図 2 (b) と図 2 (c) 、P.144）。1923 年を含む予測と含まない予測において期待値の差が起き、これが対数尤度と情報利得の差も生じさせた。予測実験の第 1 回、第 2 回と第 4 回は、このケースに該当する。2 つ目は、1923 年 9 月 1 日大正関東地震による地震数の増加（図 2 (e) (P.144) の学習データの数）である。RI モデルの地震数の予測は、学習期間に 1923 年を含めなくなったとたんに不連続に減少する（図 2 (e) (P.144) の RI モデルの予測数）。空間テストの情報利得を求める際には、各 bin の期待値に係数（観測地震数を RI モデルの予測値で除した値）を掛けて規格化した値を空間テスト用の期待値として使用する。その係数は、1924 年を境に不連続に増加する（図 2 (e) (P.144) の規格化の係数）。係数の増加は、規格化した各 bin の期待値を増加させ、対数尤度と情報利得の増加も生じさせる。予測実験の第 3 回と第 5 回は、このケースに該当する。

首都圏での M6 以上の地震の予測において、学習データとしてマグニチュードの下限を M6 とした解析を実施したが、地震カタログの検知能力を考慮して、利用する学習データのマグニチュードの下限を変化させた解析も実施した。各期間における検知能力は、Ogata and Katsura (1993) のアルゴリズムを使用して 1 年毎のコンプリートネスマグニチュードを求めた。求められた検知能力の時間変化を図 3(P.145)に示した。なお、宇津カタログを採用している 1922 年より古い期間は、M 下限を 6 とした。第 1 回から第 5 回までの情報利得値の各平滑化半径での 5 ラウンドの情報利得値平均の時間変化を図 4 (P.145) に示す。すべてのラウンドの平均は、1960 年より以前であるので、情報利得値は、平滑化半径が 7.5km の際に大きくなることを示している。また、大正関東地震発生により、情報利得値のステップが見て取れるが、M6 以上の学習データの場合と比較すると、安定した情報利得値が得られていることがわかる。また、平滑化半径が小さくなるごとに情報利得値が高くなっていることが明瞭である。

2) 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

a) 3D-RI モデル

i) 3 ヶ月予測

昨年度に引き続き、今年度は事前予測実験を 2 回（2016 年 2 月 1 日から 2016 年 8 月 1 日まで）、事後予測実験を 15 回（2011 年 5 月 1 日から 2015 年 2 月 1 日まで）行った。事前予測実験は平成 26 年度から計 6 回実施したことになる。事前予測実験と事後予測実験の計 21 回分の事例を 3D-RI モデルの予測実験の結果として分析した。

3 ヶ月予測実験の実験条件を表 3 (P.140) に示す。地震活動の評価に基づく地震発生予測検証実験 (CSEP) (Schorlemmer and Gerstenberger, 2007⁴⁾) の評価方法を三次元地震発生予測モデル用に改良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。例として、事前予測実験第 6 回の期間中に発生した観測地震の震央図を図 5 (P.146) に、期待値の空間分布を図 6 (P.147) に、検証結果を図 7 (P.148) に示した。3D-RI モデルが実験に参加した回数の内、テストにパスした回数を各モデルのパス率 (= テストにパスした数 / 参加した実験数 [%]) と定義し、表 4 (P.141) に示した。また、予

測実験の各回における総合テスト、空間テスト及び数のテストについて1番成績が良かったモデルを抽出した(表2(P.140))。

期間①を学習した3D-RIモデルは、予測数が観測数より少なすぎたため数のテストで棄却された(図7(P.148)のN-test Learning Period 1)。期間②と期間③を学習したモデルは、期間①を学習したモデルよりは予測数が多く、予測数から推定される範囲内に観測数があるため数のテストをパスした。また、期間①を学習した3D-RIモデルは総合のテストも棄却された一方で、期間②と期間③を学習したモデルはテストをパスした(図7(P.148)のL-test)。これは、「総合の成績は予測数に影響を受けやすい」というCSEPのテストの特性が反映された結果である。規模と空間は全てのモデルがテストをパスした(図7(P.148)のM-testとS-test)。予測実験計21回分の3D-RIモデルの数のテストのパス率は、数、空間、規模のテストの中で1番低かった(表4(P.141)のN-test)。一方で、大森宇津則による地震数の予測は、パス率が90%となった(表4(P.141)のN-test)。3D-RIモデルでは、学習期間に発生した地震数の平均値を予測の地震数とするが、大森宇津則は、学習期間に発生した地震の減衰具合から将来起きる地震数を推定するので余震を含む期間の予測に強いという性質がある。今回の実験期間は、2011年東北地震の余震の減衰が顕著に表れた期間であったため大森宇津則による予測のほうが良くなったと考えられる(図8(a)、P.149)。空間予測および総合の対数尤度は、期間②を学習した3D-RI7.5kモデルの成績が良かった(図9(a)(P.150)と図10(a)(P.151)の3D-RI7.5k case2)。これは、3D-RIモデルの平滑化半径が7.5km、学習期間が東北地方太平洋沖地震の前後の震源データを学習した時に空間と総合の予測の成績が他の条件より良くなったことを意味している。

ii) 1年予測

事前予測実験を1回(2015年2月1日から2016年2月1日まで)と、事後予測実験を4回(2011年2月1日から2015年2月1日まで)行った。これら計5回分の事例を3D-RIモデルの予測実験の結果として分析した。

1年予測実験の実験条件を表5(P.141)に示す。3ヶ月予測実験と同様に予測モデルの検証を行った後、計5回分のパス率を表6(P.142)にまとめた。予測実験計5回分の3D-RIモデルの数のテストのパス率は、数、空間、規模のテストの中で1番低かった(表6(P.142)のN-test)。予測の改善を期待して大森宇津則による予測も行ったがパス率は20%となり、3D-RIより低くなった(表6(P.142)のN-test)。よって、数の予測は3D-RI case1あるいは3D-RI case2が他のモデルより良いという結果になった。空間予測および総合の対数尤度は、期間③を学習した3D-RI7.5kモデルの成績が良かった(図9(b)(P.150)と図10(b)(P.151)の3D-RI7.5k case3)。これは、3D-RIモデルの平滑化半径が7.5km、学習期間が東北地方太平洋沖地震の後の震源データを学習した時に空間と総合の予測の成績が他の条件より良かったことを意味している。その理由は、東北地震を境に首都圏のM5以上の地震

活動が変化したことがあげられる。具体的には、東北地震後（2012年から2016年）に福島県沿岸深さ30-35kmでM5以上の地震活動が活発になったが、この場所は過去（1998年から2011年）にM2.5以上の地震が起きていない場所だった。このため、期間①を学習した3D-RIモデルは、この場所での将来の地震発生確率は低いと予測した。また、期間②を学習した3D-RIモデルは、東北地震後の地震活動も考慮するが、学習するデータには12年間分の東北地震前の震源データと1年から4年分の東北地震後の震源データが含まれるため、予測には東北地震前の地震活動が大きく反映され、福島県沿岸深さ30-35kmでの地震発生確率は低いと予測された。つまり、期間①と期間②を学習した3D-RIモデルにおいて「地震発生確率の低い場所で地震が起きた」ことが成績がよくなかった原因である。一方、期間③を学習した3D-RIモデルは東北地震直後の余震分布と同様の地震活動が将来も起きると予測し、実際にその通りになったので予測の成績が良くなったと考えられる。

iii) まとめ

3D-RIモデルは、東北地震の前のデータを用いて三次元予測領域（緯度・経度・深さ）の空間分解能、平滑化半径、学習期間を決定した（表7（P.142）、鶴岡ら,2013⁵⁾と鶴岡ら,2015⁶⁾）。この条件を基に東北地震以後を予測期間として予測実験を行ってきた。その結果、現在の首都圏の地震活動を三次元予測領域で予測するには、表8（P.142）の条件で行うのが有用であることが示された。1)の結果と地震発生予測検証実験の結果から、RIモデルを用いた地震予測においては、平滑化半径として7.5kmを採用するのがよいと考えられる。

3) ハイブリッドモデルとの比較・評価

独立のモデルとして、RIモデルの平滑化半径の異なるモデルのハイブリッド化を検討した。1)における第5ラウンドの実験において、平滑化半径として15kmと30kmの二つのモデルの場合には、単独では、30kmよりも15kmのほうがより大きな情報利得値を取る。なお、平滑化半径の小さい15kmのモデルは、情報利得値は大きいですが、地震発生数の期待値の最小値は、30kmのモデルよりも大きい。そこで、30kmモデルの期待値が最小となっている領域かつ期待値マップ作成時において学習データが平滑化半径以内になかったセルの期待値をそのまま15kmのモデルに置き換えることにより、単独の15kmのモデルよりもさらに情報利得値を高めることができた。情報利得値の実際の上昇は、1.559から1.615であった。また、RI15K単独およびRI15KとRI30Kのハイブリッドモデルの期待値マップを図11（P.152）に示した。この応用として、速度構造やQ構造において、期待値を下げるができる領域がわかれば、同様にモデルのパフォーマンスを向上させることが原理的に可能である。

(c) 結論

(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行った。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) 宇津徳治: 5. 1885年～1925年の日本の地震活動(訂正と補遺), 地震研究所彙報, Vol.57, pp.111-117, 1982.
- 4) Ogata, Y. and Katsura, K. Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency disribuion inferred from earthquake catalogues, Geophysical Journal International, Vol. 113, pp.727-738.
- 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) 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 25 年度) 成果報告書, pp.118-137, 2013.
- 7) 鶴岡弘, 平田直, 横井佐代子, 尾形良彦: 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 27 年度) 成果報告書, pp.118-137, 2015.

(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: Progress reports of prospective tests for 3-month forecasting	Yokoi Sayoko, Hiroshi Tsuruoka, Naoshi Hirata	日本地球惑星科学連合2016年大会(千葉市)	2016年5月22日-5月26日	国内
マグニチュード6.0以上を対象とした首都圏の地震発生予測モデルの条件探索	横井佐代子、鶴岡弘、平田直	日本地震学会2016年度秋季大会	2016年10月5日-10月7日	国内

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

表 1. 事後予測実験：RI モデルの予測条件と学習条件

	学習条件	予測条件
空間	関東地域 (Lon.138.5-141.5, Lat.34.5-37.0, Dep.0-100km) 空間分解能 0.05° x0.05° x100km RI モデル (平滑化半径 10、15、20、25、30、50km)	
期間	1885 年-予測開始日前日	第 1 回：1960 年 1 月 1 日-1970 年 1 月 1 日 第 2 回：1970 年 1 月 1 日-1980 年 1 月 1 日 第 3 回：1980 年 1 月 1 日-1990 年 1 月 1 日 第 4 回：1990 年 1 月 1 日-2000 年 1 月 1 日 第 5 回：2000 年 1 月 1 日-2010 年 1 月 1 日
規模	6.0-9.0 (<i>b</i> 値=0.9)	6.0-9.0

表 2. 事後予測実験の結果

	学習期間	平滑化半径
第 1 回	1926 年-1960 年	30km
第 2 回	1913 年-1970 年	20km
第 3 回	1929 年-1980 年	15km
第 4 回	1923 年 1990 年	15km
第 5 回	1885 年-2000 年	15km

表 3. 3 ヶ月間予測実験：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	4.0 から 9.0 を 0.1 ごと	
	期間	【事後予測実験】 第 1 回：2011 年 5 月 1 日から 2011 年 8 月 1 日 第 2 回：2011 年 8 月 1 日から 2011 年 11 月 1 日 第 3 回：2011 年 11 月 1 日から 2012 年 2 月 1 日 第 4 回：2012 年 2 月 1 日から 2012 年 5 月 1 日 第 5 回：2012 年 5 月 1 日から 2012 年 8 月 1 日 第 6 回：2012 年 8 月 1 日から 2012 年 11 月 1 日 第 7 回：2012 年 11 月 1 日から 2013 年 2 月 1 日 第 8 回：2013 年 2 月 1 日から 2013 年 5 月 1 日 第 9 回：2013 年 5 月 1 日から 2013 年 8 月 1 日 第 10 回：2013 年 8 月 1 日から 2013 年 11 月 1 日 第 11 回：2013 年 11 月 1 日から 2014 年 2 月 1 日		

		第12回：2014年2月1日から2014年5月1日 第13回：2014年5月1日から2014年8月1日 第14回：2014年8月1日から2014年11月1日 第15回：2014年11月1日から2015年2月1日 【事前予測実験】 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 第5回：2016年2月1日から2016年5月1日 第6回：2016年5月1日から2016年8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、 b 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 4.3 ヶ月間予測実験における各モデルの各テストのパス率

3ヶ月予測	N-test	L-test	S-test	M-test
3D-RIcase1	19.0	15.5	53.6	100
3D-RIcase2	57.1	57.1	98.8	100
3D-RIcase3	23.5	100	95.6	100
OmoriUtsu	90.0	-	-	-

表 5.1 年予測実験：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° x 0.05°	
		深さ	5 km	
		マグニチュード	5.0 から 9.0 を 0.1 ごと	
		期間	【事後予測実験】 第1回：2011年2月1日から2012年2月1日 第2回：2012年2月1日から2013年2月1日 第3回：2013年2月1日から2014年2月1日 第4回：2014年2月1日から2015年2月1日	

			【事前予測実験】 第1回：2015年2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、 <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 6. 1年予測実験における各モデルの各テストのパス率

1年予測	N-test	L-test	S-test	M-test
3D-RIcase1	40.0	40.0	60.0	100
3D-RIcase2	40.0	55.0	75.0	100
3D-RIcase3	33.3	100	83.3	100
OmoriUtsu	20.0	-	-	-

表 7. 2011年東北地方太平洋沖地震より前の首都圏の地震活動を三次元予測領域で予測するための3D-RIモデルの最適条件

	1日(M≥4)	3ヶ月(M≥4)	1年(M≥5)	3年(M≥5)
試行回数	31	5	5	1
期間	1998年～予測期間前日			
空間分解能	0.05° x 0.05° x 5km			
平滑化半径	7.5km			
規模	2.5			

表 8. 現在の首都圏の地震活動を三次元予測領域で予測するための最適条件

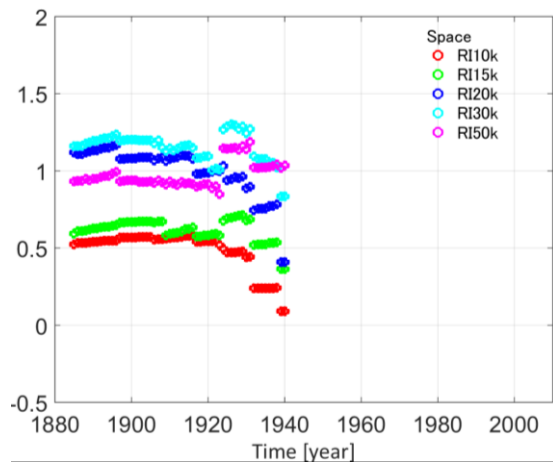
	3ヶ月予測 (M≥4.0)	1年予測 (M≥5.0)
試行回数 (事前+事後)	21 (6+15) 回	5 (1+4) 回
総合	3D-RI7.5k case2*	3D-RI7.5k case3*
数	大森宇津則	3D-RI case1*
空間	3D-RI7.5k case2*	3D-RI7.5k case3*
規模	<i>b</i> = 0.9	<i>b</i> = 0.9

*case1: 1998年1月1日 - 2011年1月1日

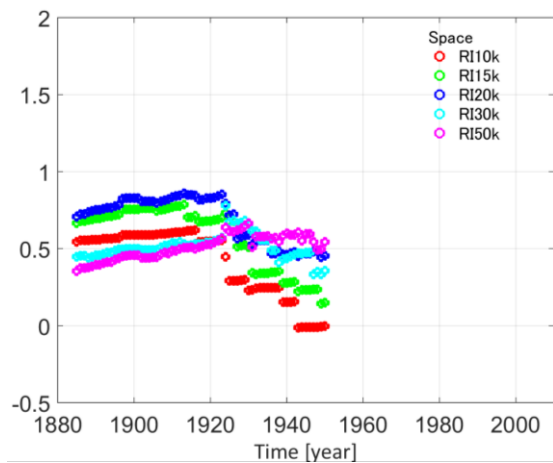
case2: 1998年1月1日 - 予測期間の前日

case3: 2012年1月1日 - 予測期間の前日

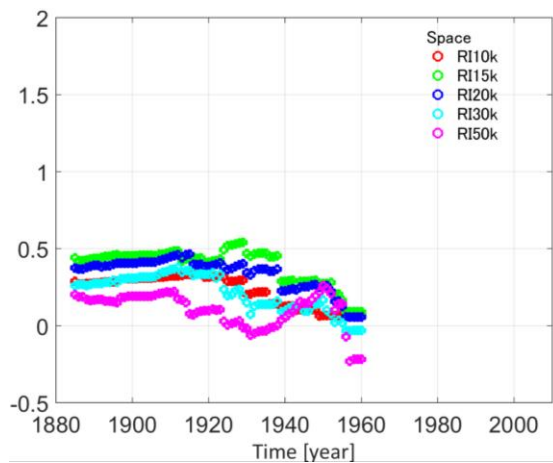
(a) 1960-1970



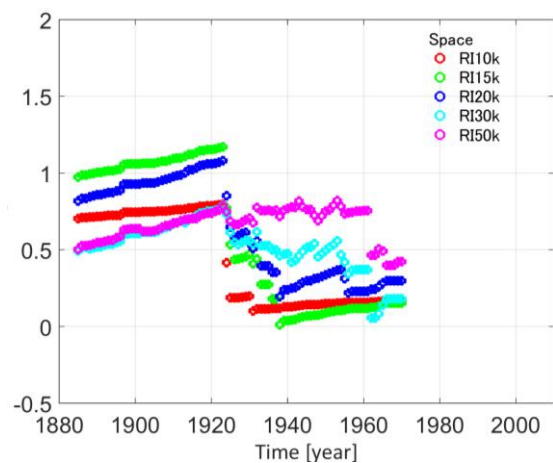
(b) 1970-1980



(c) 1980-1990



(d) 1990-2000



(e) 2000-2010

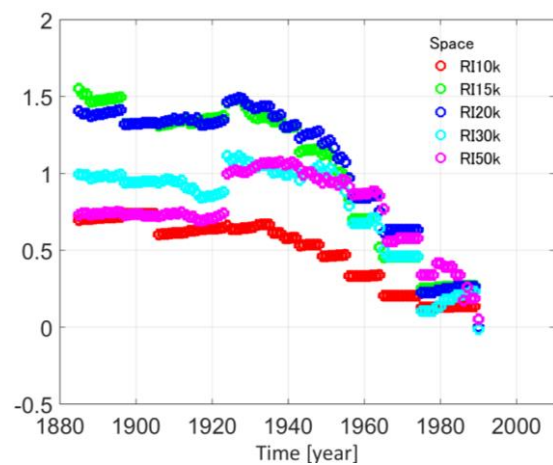


図 1 RI モデルの空間予測に対する情報利得 (IG)。横軸は学習データの始まりの年、縦軸は IG を示す。10 年間に発生した M6.0 以上の地震に対する事後予測検証実験、(a) 第 1 回、(b) 第 2 回、(c) 第 3 回、(d) 第 4 回、(e) 第 5 回。

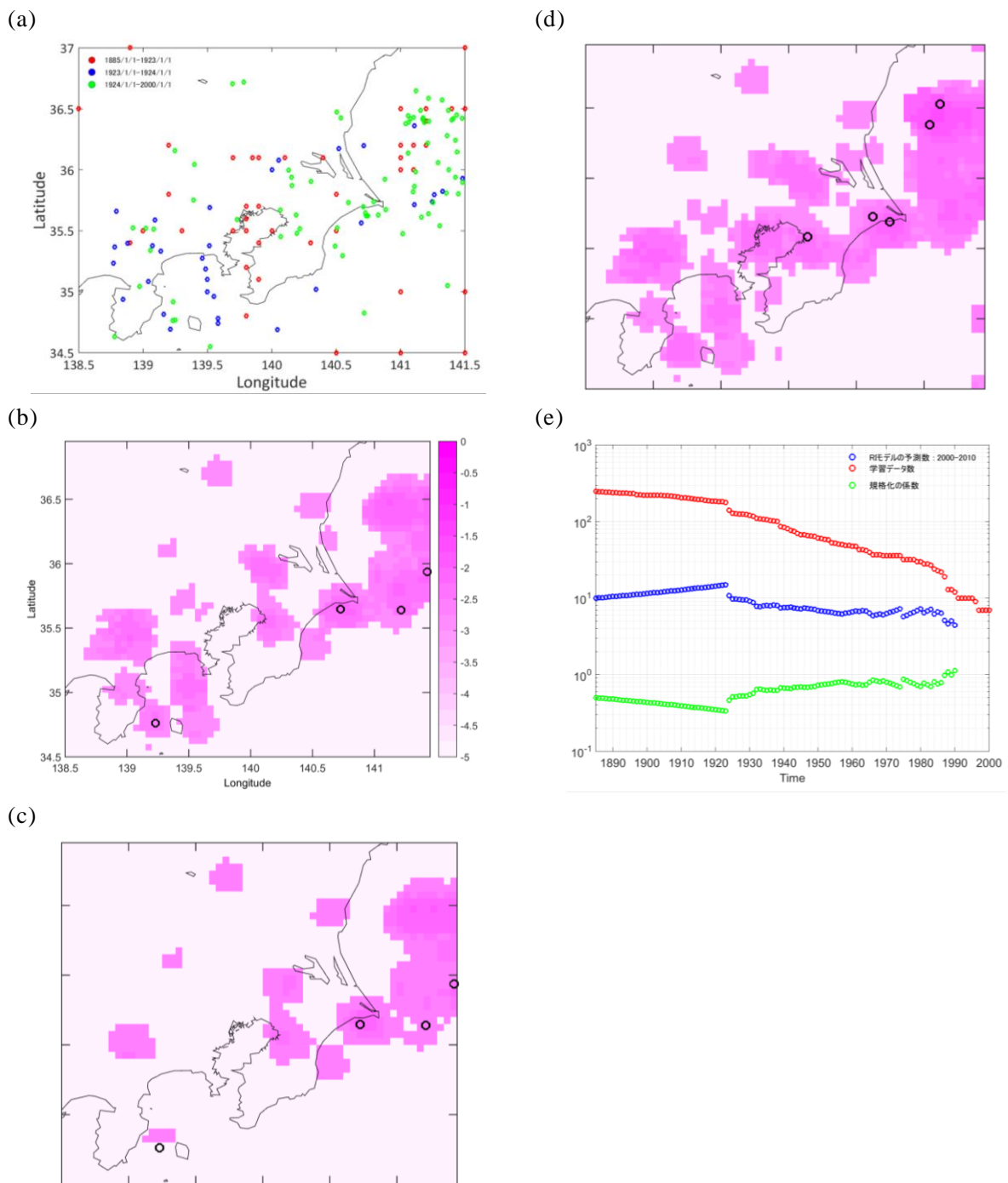


図2 (a) 1885年から2010年までのM6以上の地震の空間分布。1885年から1923年(赤)、1923年から1924年(青)、1924年から2010年(黄緑)、(b) 第4回予測実験のRI15kの予測図(学習期間1923年から1990年)、黒丸は、予測期間中に発生した地震の震央を示す。色はその場所における地震発生確率を示す。(c) (b)の予測図(学習期間1924年から1990年) (d) 第1回予測実験のRI15kの予測図(学習期間1885年から2000年)、(e) 第5回予測実験のRIモデルの予測数(青)、学習データの数(赤)、規格化の係数(黄緑)。

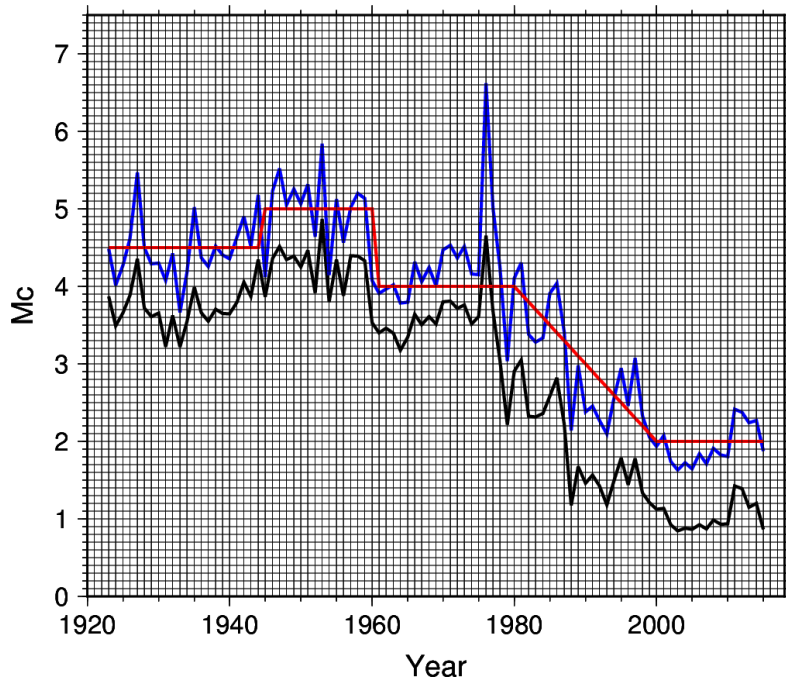


図 3. 関東地域のコンプリートネスマグニチュードの時間変化。青：計算されたコンプリートネスマグニチュード、赤：設定したコンプリートネスマグニチュード。

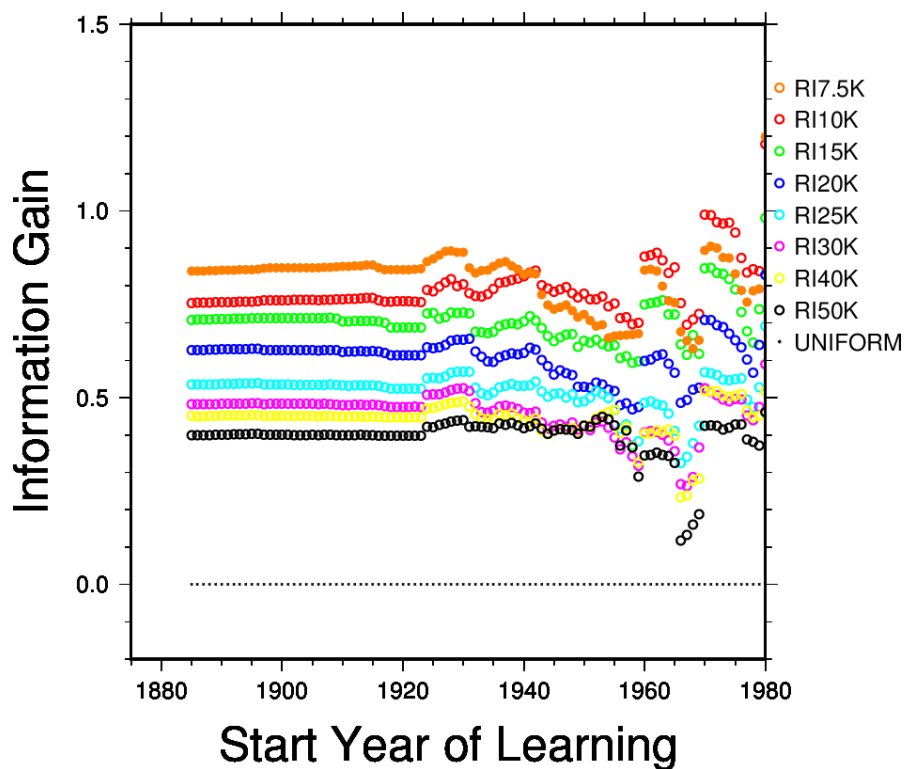


図 4. RI モデルの空間予測に対する情報利得 (IG)。横軸は学習データの始まりの年、縦軸は IG を示す。学習データは、図 3 におけるコンプリートネスマグニチュード以上の地震を使用している。

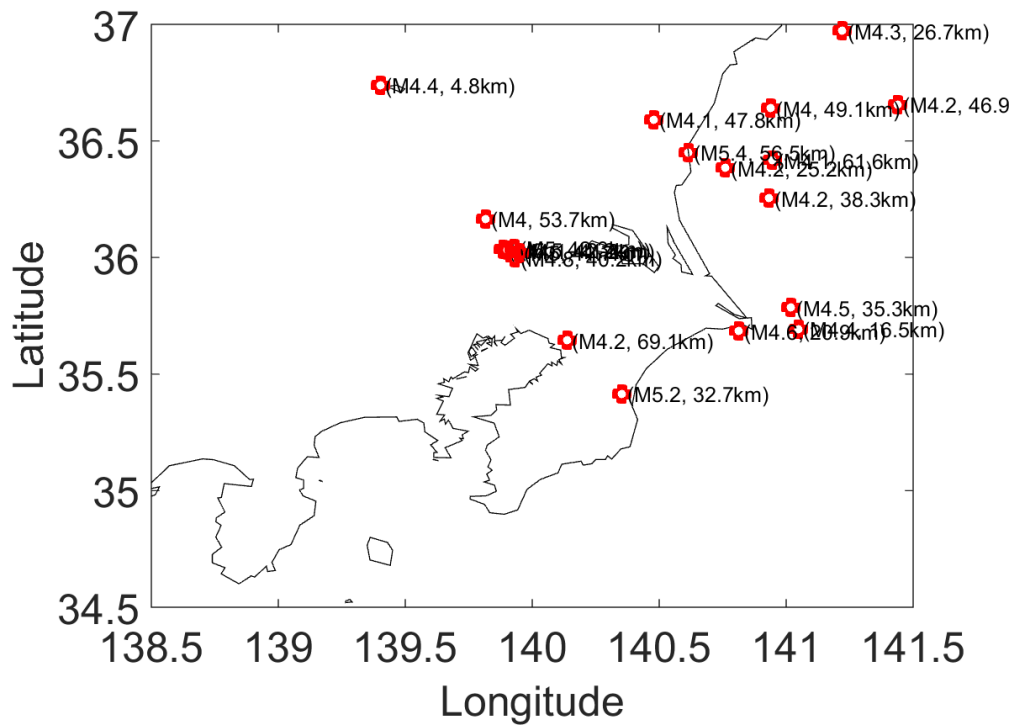
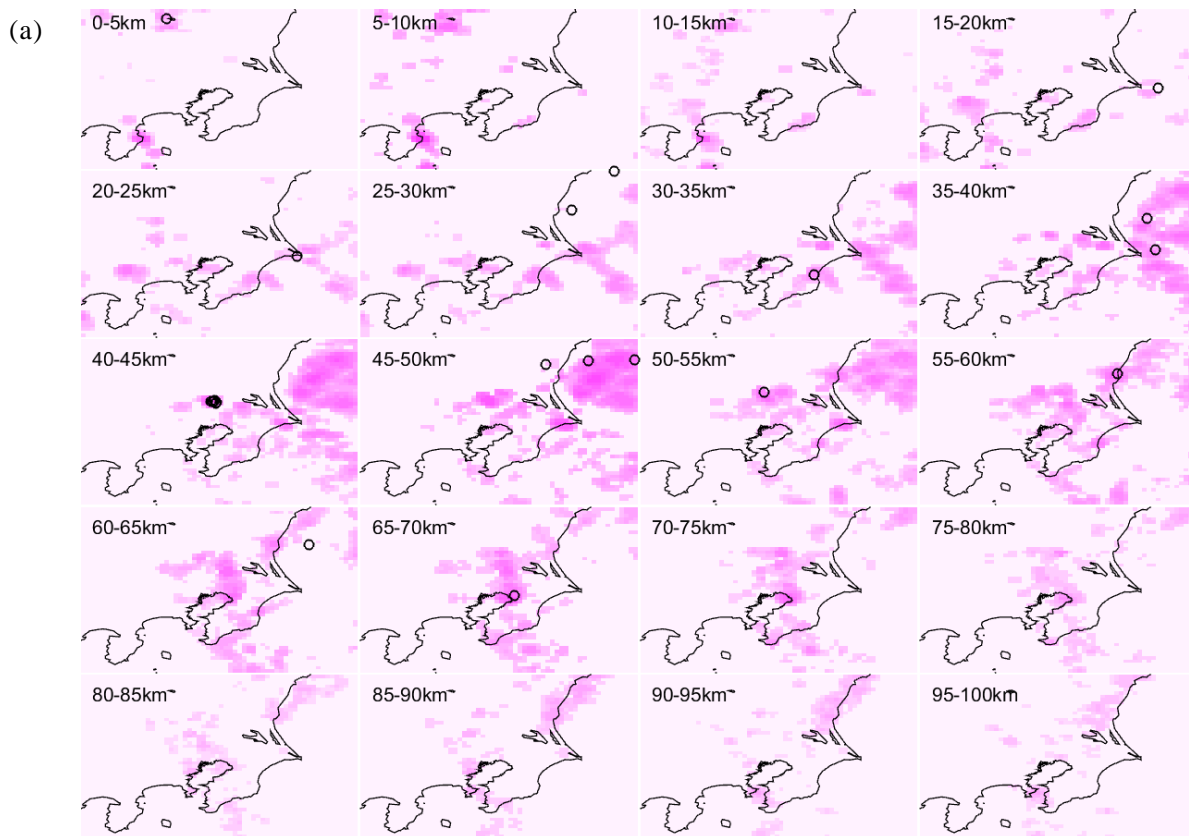


図5 3ヶ月第6回目実験の期間中に発生した観測地震の震央図。赤い丸は場所、場所の横にはその地震の規模と深さを示す。



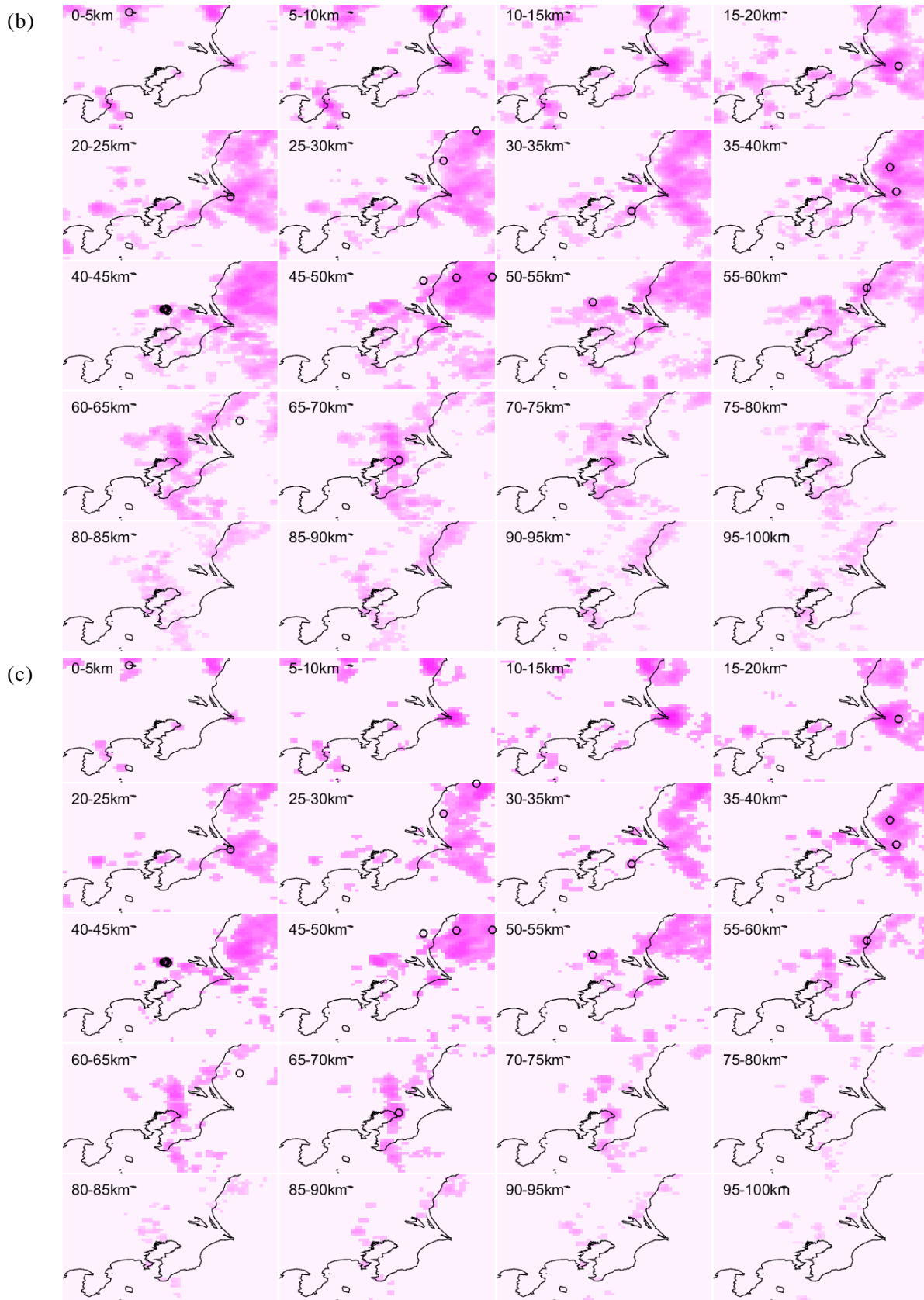


図6 3D-RI7.5kモデルにおける3ヶ月第6回予測実験の期待値（空間分布：色）と観測地震（震央：黒）。(a)表2中の期間①を学習期間とする場合、(b)期間②を学習期間とする場合、(c)期間③を学習期間とする場合。

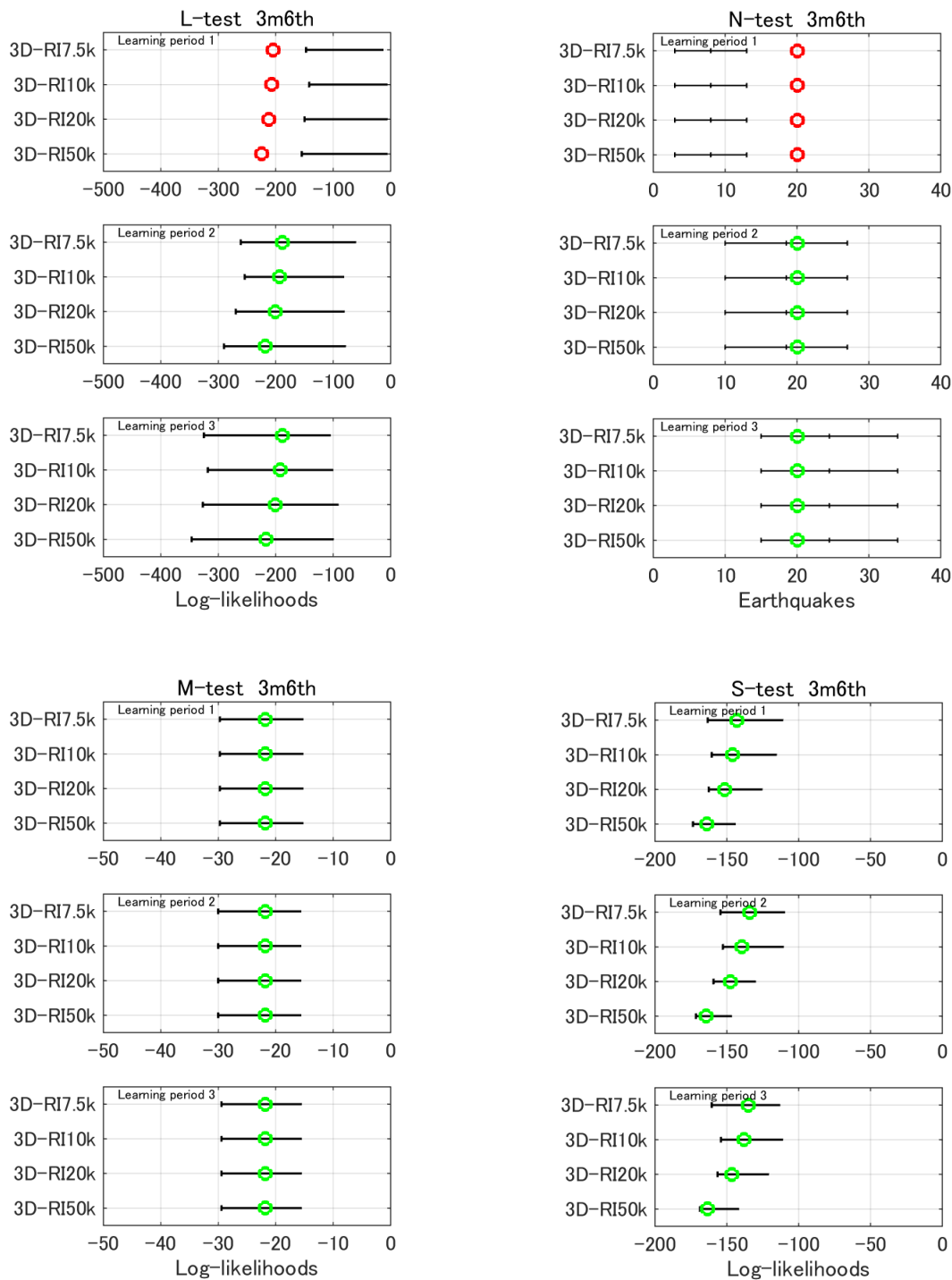
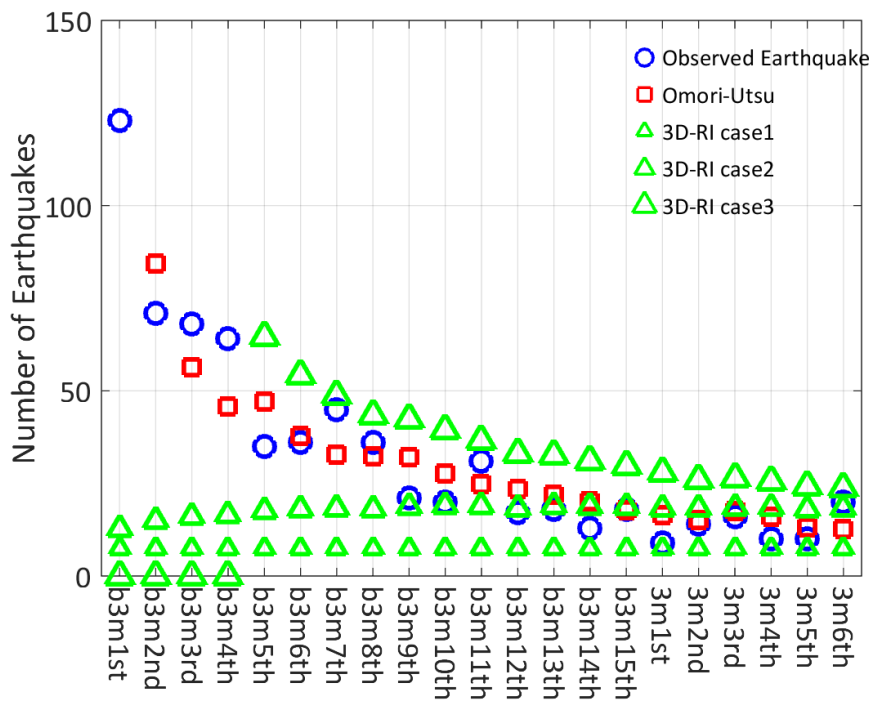


図7 3D-RIモデルにおける3ヶ月第6回予測実験の各テストの検証結果。L-testは予測の地震数-規模-空間分布に対するテスト、N-test、M-test、S-testはそれぞれ予測の地震数、規模分布、空間分布に対するテスト。Learning Period1は表2中の期間①、Learning Period2は期間②、Learning Period3は期間③を示す。黒い線は95%信頼区間を示し、この区間の中に丸があればテストにパスしたとする。緑色はテストにパスしたこと、赤色はパスできなかったことを示す。

(a)



(b)

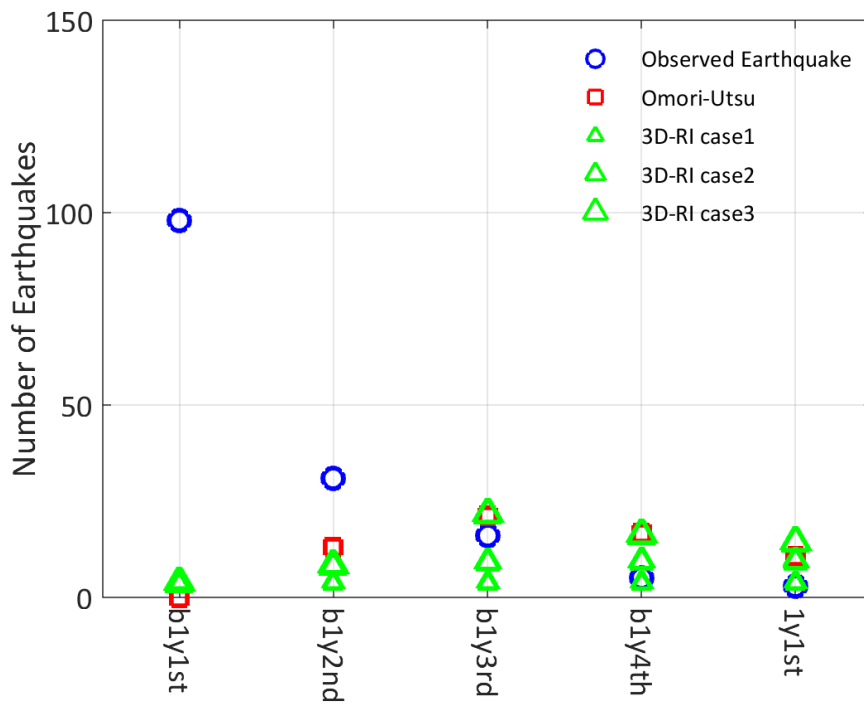
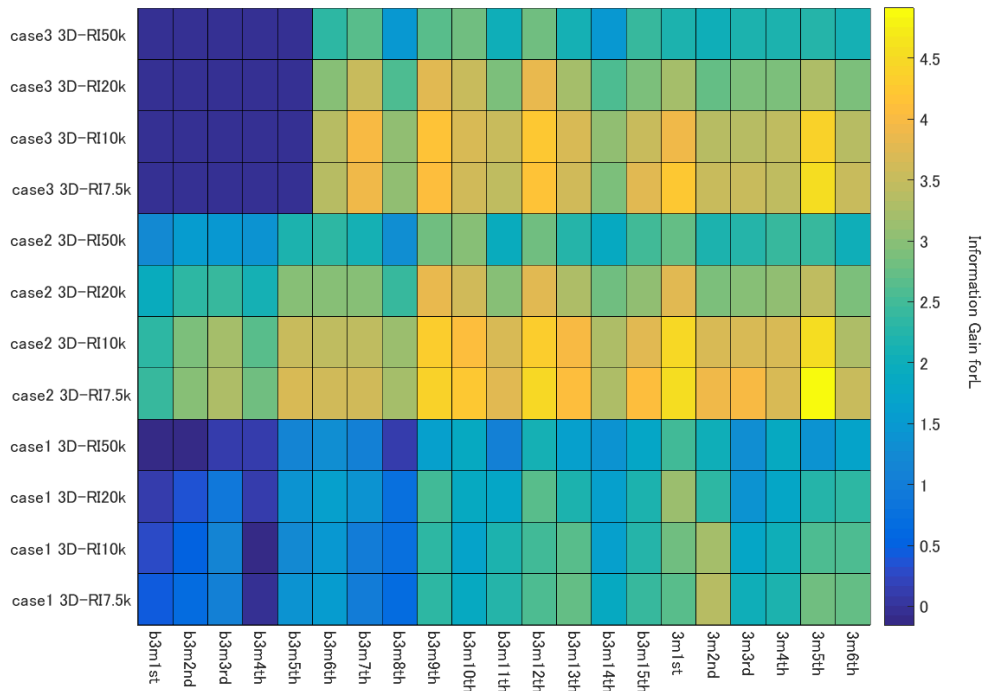


図 8 大森宇津モデルによる地震数の予測。(a) 3 ヶ月予測、(b) 1 年予測。横軸は予測実験の回、縦軸は地震数を示す。青丸は各回の観測地震数、赤丸は大森宇津則による予測（地震数）、緑の三角形は 3D-RI モデルによる予測（地震数）を示す。1 番小さい緑の三角形は期間①を学習した時の 3D-RI モデルの予測、1 番大きい緑の三角形は期間③を学習した時の予測、中間の大きさの緑の三角形は期間②を学習した時の予測である。

(a)



(b)

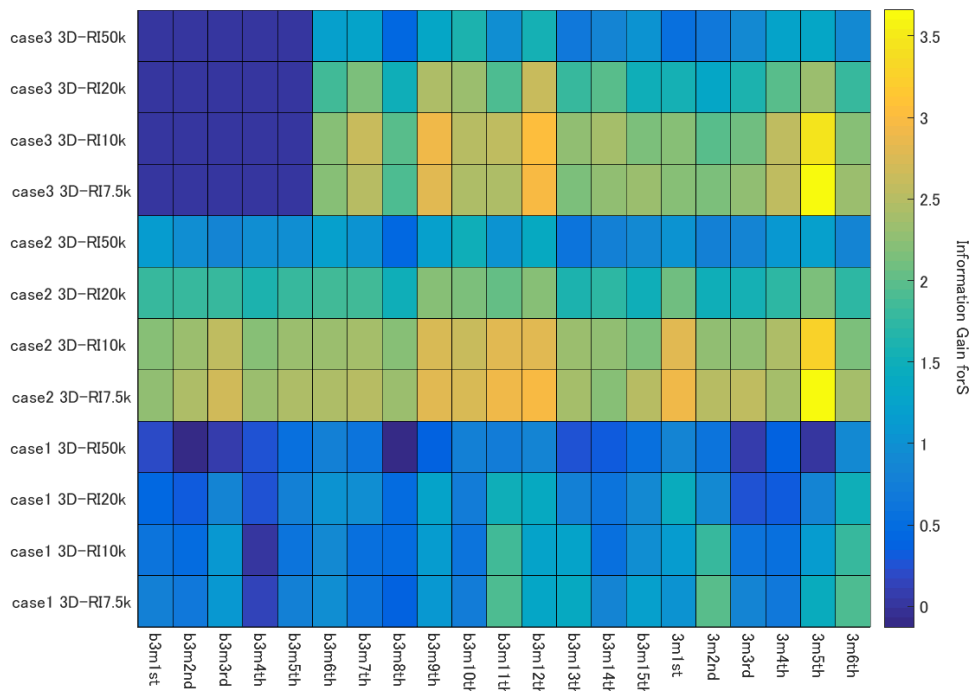
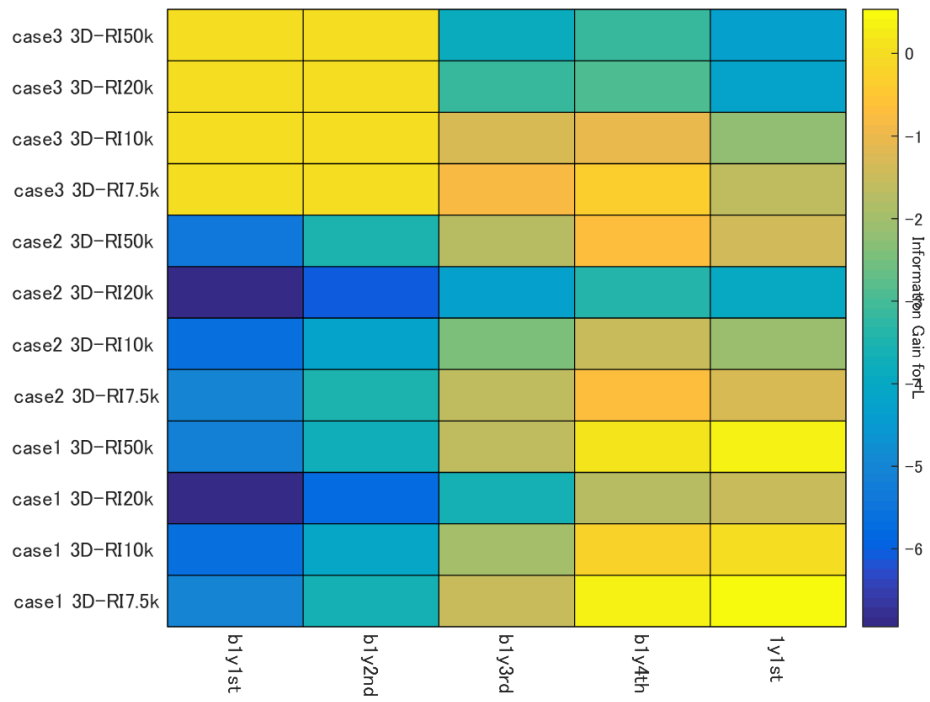


図9 3D-RIモデルの3ヶ月予測に対する情報利得。(a) L-test、(b) S-test。

(a)



(b)

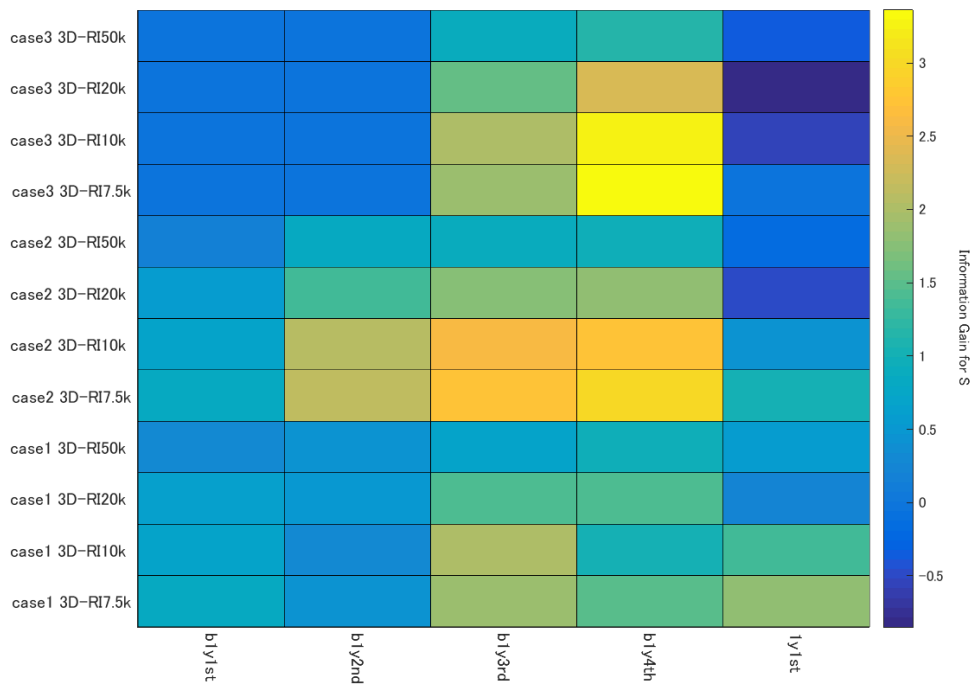


図 10 3D-RI モデルの 1 年予測に対する情報利得。(a) L-test、(b) S-test。

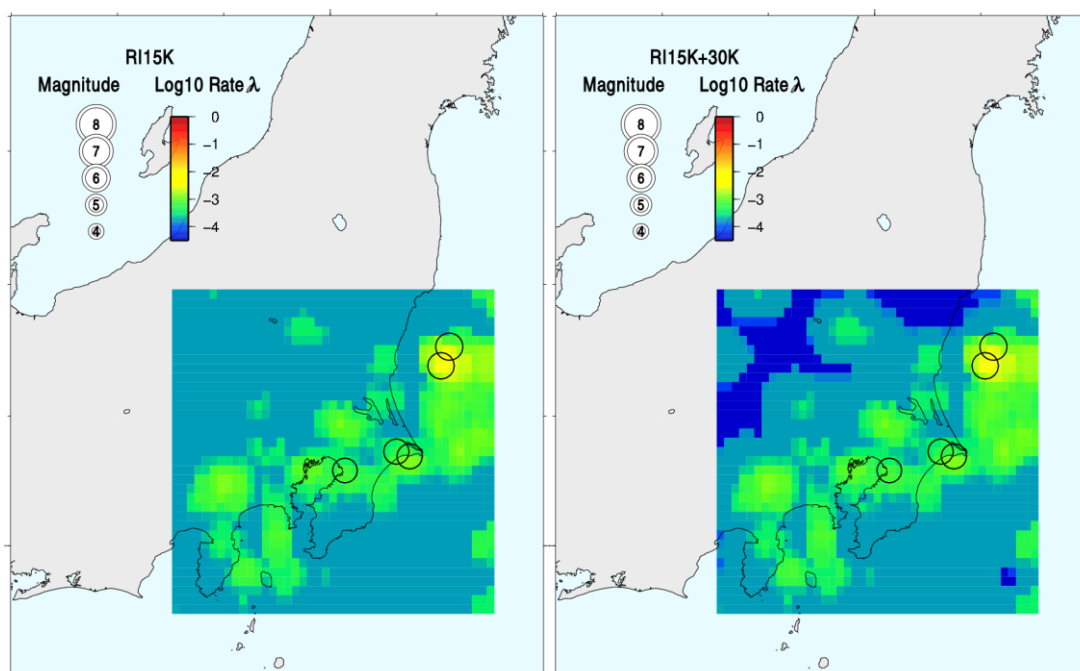


図 11 通常モデルおよびハイブリッドモデルの地震数期待値マップ。左が RI15K モデルで、右が RI15K と 30K のハイブリッドモデル。