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24年度業務目的

地震活動予測手法を評価・検証するための基盤を国際プロジェクトである CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability) により開発されている最新のソフ トウェアを導入し構築する。関東地域における過去の地震活動を踏まえた三次元テスト領 域の検討を進める。

(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	
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	

(2) 平成24年度の成果

(a) 業務の要約

- 地震活動予測手法を評価・検証するための基盤を国際プロジェクトである CSEP により 開発されている最新のソフトウェアを導入し構築した。
- 2) 関東地域における過去の地震活動を踏まえた三次元テスト領域の検討を進めた。

(b) 業務の成果

1) 地震活動予測手法を評価・検証するための最新のソフトウェアの導入

地震活動予測手法(以下、地震発生予測モデル)を評価・検証するために CSEP で開発 された最新のソフトウェア(バージョン 13.1.0) (Schorlemmer and Gerstenberger, 2007¹⁾, Schorlemmer *et al.*, 2007²⁾)を導入し、本課題で構築する首都圏の地震発生予測モデルを評 価・検証する環境を整備した。なお、地震発生予測モデルの評価・検証とは、予測(ある 期間内に地震が起こる場所と規模を期待値で示したもの)が実測に対してどれだけの整合 性を持つかを定量的に評価し、予測が妥当かどうかを統計的に判断することである。CSEP のソフトウェアとは、この地震発生予測モデルの評価・検証手法のためのプラットフォー ムのことを指す。最新版は、種々のバグ修正がなされており、地震発生予測モデルを旧版 より適切に評価・検証することができる。

本業務では CSEP の概念が深く関わっているので、以下に簡単に説明する。CSEP は、2006

年にアメリカで始まった地震予測可能性を探る学術的国際プロジェクトであり、地震発生 予測基準モデルの作成とその性能の向上を目的としている(http://www.cseptesting.org/ 図 1 (a)、P.137) (Schorlemmer and Gerstenberger, 2007¹⁾, Schorlemmer *et al.*, 2007²⁾)。一般に、 予測モデルは「予測モデルの作成と予測」→「予測と実測の検証」→「予測モデルの修正 と予測」を繰り返しながら構築されていく(図1(b)、P.137)。CSEPはこの「予測と実測 の検証」の作業を客観的に行うために、地震発生予測モデルのモデル作成者(モデラー) とは独立した「テストセンター」の設置を義務づけている。CSEP のソフトウェアは、こ の「予測と実測の検証」に使用される。日本も 2008 年より CSEP に参画しており、この検 証システムを使って日本の地震発生予測モデルの評価・検証を行っている (Nanjo et al., 2011³⁾)。CSEP と本業務の違う点は、CSEP は予測モデルの評価をテストセンターが実施す るが、本業務において担当者はモデラーとテスターを兼ねるということである。これは、 「予測モデルの作成と予測」→「予測と実測の検証」→「予測モデルの修正と予測」を行 い予測モデルの構築を行うことを意味する。なお、現在 CSEP で策定された評価・検証手 法は必ずしもベストの方法というわけではなく、検証結果の蓄積に伴って、評価手法は改 善されるべきものである。もちろん、評価手法が変われば評価結果が変わるので、地震発 生予測モデルの性能を正しく知る上で評価手法を適切に理解しておくことも重要となる。

CSEP では地震の発生はポアソン過程であると考え(①式)、地震発生予測モデルの予測 と実測の整合性を①式に基づく対数尤度で表現する(②式)。対数尤度は、値が大きいほど 予測と実測の整合性が良いことを意味する。本報告書における予測と実測の整合性は、地 震の空間分布・規模・発生数を総合的に評価した対数尤度(②式)で評価する。

Probability
$$p(\omega|\lambda) = \frac{\lambda^{\omega}}{\omega!} e^{-\lambda}$$
 (*λ*:予測、*ω*:実測) · · · ①

対数尤度 $L(\omega|\lambda) = \log p(\omega|\lambda) = -\lambda + \omega \log \lambda - \log \omega!$ ・・・②

2) 関東地域における過去の地震活動を踏まえた三次元テスト領域の検討

a) 過去の地震活動の調査

首都圏を含む関東地域は、南からフィリピン海プレート、東から太平洋プレートが沈み 込み、南西では伊豆半島が衝突しているというテクトニクス的に複雑な構造を持つが、日 本の CSEP は、関東地域(東経 138.5°から 141.5°、北緯 34.5°から 37.0°、深さ0から 100km)を予測領域の1つと設定している。本業務においてもこの領域を0次モデルとし て三次元テスト領域の検討を実施した。

この領域における過去の地震活動について気象庁一元化震源カタログを用いて調査を おこなった。1998年1月1日から2009年11月1日までに深さ0から100kmで起きたマグ ニチュード2.5以上の地震についての震源分布を図2(a)(P.138)に示す。正方形のパネル は、水平方向の震源分布であり、その右、下のパネルはそれぞれ緯度-深さ、経度-深さ に対して震源をプロットしたものである。また、深さ0~100kmにおいて1km毎の地震数 のヒストグラムを図2(b)(P.138)に示す。図2(c)(P.138)、図2(d)(P.138)は、それぞれ 深さ 0~10km、40~50km における震央分布を示す。

これらの図から明らかに、関東地域における地震活動は、水平方向および深さ方向に顕 著な不均質性がみられることが分かる。特に、深さ 0~10km においては伊豆地方(図 2(c)、 P.138)、深さ 40~50km においては銚子沖の地震が多く発生しており(図 2(d)、P.138)、 プレートの沈み込み等が地震活動に影響を与えている(Kimura *et al.*, 2006⁴⁾)。このことは、 地下構造と地震の発生が密接に関係しており、深さ方向を考慮した地震発生予測モデルが 必要であることを示唆している。

b) 三次元テスト領域のグリッドサイズの検討

地震発生予測モデルの高精度化のためには震源の緯度と経度に加え、深さに対してもグ リッドを設定する必要がある。なお、CSEPの関東地域の予測空間の最小単位(以下、グ リッドサイズ)は、水平方向0.05° x 0.05°、深さ0から100kmである(図3(a)、P.138)。 つまり、深さ方向の分解能はない二次元テスト領域であり本業務にそのまま適用できない。 そこで、グリッドサイズを水平方向0.1° x 0.1°、深さ方向10km毎に設定し、深さ方向の 分解能をCSEPの10倍にした三次元テスト領域から検討を始めた(図3(b)、P.138)。水 平方向のグリッドサイズをCSEPのそれより大きくしたのは、日本のCSEPのモデラーから水平方向のグリッドサイズを0.05° x 0.05°が細かいという指摘が出ていたためである。一 方で、Imoto and Rhodes (2010)⁵⁾はグリッドサイズを0.02° x 0.02°に設定し、モデルを開 発しており、本年度においては、水平方向のグリッドサイズとして 0.02°、0.05°、0.2° も併せて検討した。

c)地震発生予測モデル

三次元テスト領域の検討を行うにあたり、Relative Intensity model(以下、RIモデル、Nanjo, 2011⁶)を地震発生予測モデルとして使用した。理由は、既に CSEP に参加しており、比較的安定した予測結果が得られていること、パラメータである平滑化半径と b 値等が固定値であり、予測計算の結果が解釈しやすいという利点があるためである。

RIモデルは、地震は過去によく起きたところで将来も良く起こるという考えに基づいて 構築された地震発生予測モデルである。予測計算の過程で地震カタログから過去の地震の 起こり方を学習する工程を含む。このモデルを規定するパラメータは学習する期間と平滑 化半径、b 値、学習のマグニチュード下限がある。通常、与えた平滑化半径に応じてモデ ルの名前を区別しており、本業務でもそのように名前付けを行った。例えば、RI5kモデル は、RIモデルの平滑化半径 5km の場合の予測であることを意味する。図 4(P.139)に RI5k モデルの学習期間と対数尤度の関係を示す。対数尤度は、深さ0から100km で起きたマグ ニチュード 2.5以上の地震を 2009 年から1年毎に遡って学習し、2009 年 11月1日から 2010 年 2月1日までのマグニチュード 4.0以上 9.0以下、深さ0~100km で発生する地震を予測・ 検証した結果である。精度の高い予測をするには 2009 年から 1998 年ごろまで遡って学習 しなければいけないことが分かる。よって本報告で示すいくつかの検討においてとくに断 りがない限り、RIモデルの学習期間は、1998 年 1月1日からのデータを使用した。なお、 1998 年から 1999 年、2006 年から 2007 年の 2 箇所で対数尤度の大きな変化があるが、これ は 1998 年と 2006 年に伊豆地方で起きたマグニチュード 6 クラスの地震が大きく影響して いる (図 5、P.139)。

d) 三次元テスト領域の検討

b)で用意した 4 つの三次元予測空間用のグリッドのデータセットに対し、地震発生予測 モデル(RIモデル)を用いて予測・検証を行い、予測空間に深さ方向を考慮したことが地 震予測の精度向上に効果があるかを調べた。

i) 深さ方向を考慮しない場合

深さ方向を考慮しない二次元テスト領域における予測例を図 6(P.140)に示す。図 6 (a) (P.140)は、RI10k モデルの学習期間である 1998 年 1 月 1 日から 2009 年 11 月 1 日までに深 さ 0 から 100km で起きたマグニチュード 2.5 以上の地震の震源分布である。図中の赤い丸 は地震の震央を、丸が大きいほど地震の規模が大きいことを意味する。このデータを用い てグリッドサイズ水平方向 0.1°四方、深さ方向 0~100km の下で 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日までのマグニチュード 4.0 以上 9.0 以下、深さ 0~100km で発生する地震を予測 させた結果を図 6 (b) (P.140)に示す。色が赤いほど、地震発生数の期待値が高いことを意 味する。図 6 (a) (P.140)と比較すると学習期間に地震の発生が多かった場所において、地 震発生数の予測の期待値も高くなっていることが分かる。図 6 (c) (P.140)は、図 6 (b) (P.140) で得られた予測を深さ 10km 毎に分割した図である (二次元テスト領域で得られた予測を 三次元テスト領域の予測結果と比較するために、仮想的に三次元表示させた。)。図 6 (b) (P.140)の予測値の 10 分の 1 が各深さの予測値になっており、全ての深さにおいて同じ空間 予測パターンを示す。実測と検証した結果、二次元テスト領域の対数尤度は-113.2 であっ た。

ii) 深さ方向を考慮した場合

図 6 (a) (P.140)と同じ期間、規模の地震についてグリッドサイズ水平方向 0.1°四方、 深さ 10km 毎 (三次元テスト領域)の下でプロットしたものを図 7 (a) (P.141)に示す。ま た、図 6 (b) (P.140)と同様に RI10k モデルに図 7 (a) (P.141)を学習データとして 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日までのマグニチュード 4.0 以上 9.0 以下、深さ 0~90km で 発生する地震を 10km 毎に予測させた結果を図 7 (b) (P.142)に示す。実測と検証した結果、 対数尤度値は-87.7 であった。

図7(b)(P.142)の予測は、図7(a)(P.141)で示した過去の地震の空間分布をよく反映し ていると考えられ、図6(b)(P.140)と異なるパターンを示している。これは、RI10kモデ ルにおいて震源の深さ分布を考慮する必要性があることを意味する。また、RIモデルの平 滑化半径を変えた三次元テスト領域を図8(P.143~146)に示す。平滑化半径が大きくなるほ ど予測値を出すのに使用する学習空間が広がるので空間予測の期待値のコントラストがな くなることがわかる。

iii) 対数尤度の比較

i)とii)により得られた RI10k モデルの対数尤度値の比較図を図 9(P.147)に示す。すべての平滑化半径のモデルにおいて二次元テスト領域より三次元テスト領域で予測した方が対

数尤度が大きくなっている。これは、三次元テスト領域の下で予測するモデルが予測の整 合性が高くなることを意味する。

iv)予測期間と地震発生予測モデルの平滑化半径

iii)では、予測期間 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日についてのみ対数尤度を比較したが、さらに 4 つの予測期間について三次元予測空間で予測・検証を行った(図 10、P.147)。図 10(P.147)の各ラウンドの期間は以下の通りである(3m1st は、3months 1st round の意)。
各ラウンドの震央分布を図 11(P.148)に示す。

- 3m1st 2009 年 11 月 1 日 2010 年 2 月 1 日
- ・3m2nd 2010年2月1日-2010年5月1日
- 3m3rd 2010 年 5 月 1 日-2010 年 8 月 1 日
- 3m4th 2010 年 8 月 1 日-2010 年 11 月 1 日
- 3m5th 2010 年 11 月 1 日-2011 年 2 月 1 日

対数尤度が一番良い平滑化半径はラウンド毎に変わるが、その範囲は概ね 5~10km 程度 であることが分かる。平滑化半径が 5km の時、学習空間の円と水平方向のグリッドの面積 がほぼ等しくなる。半径 2.5km の時には学習空間の範囲が水平グリッドのサイズより小さ くなるため学習する地震データに取りこぼしが生じており、それが予測の精度の悪さにつ ながると考えられる。また、学習空間を広くとればとるほど良い予測ができるというわけ ではないことが読み取れる。

v) グリッドサイズと地震発生予測モデルの最適化半径

上述で行ってきた検討は水平方向のグリッドサイズ 0.1°四方で行ったが、これに加え、 0.5°、0.05°、0.02°四方の 3 次元テスト領域のデータセットの下で地震発生予測モデル の予測精度に影響があるか検討した。その結果、水平方向のグリッドサイズが変わっても 地震発生予測モデル(RI モデル)の対数尤度が良くなるのは平滑化半径が 5~10km の時 であることが明らかになった。これにより、三次元予測空間の水平方向のグリッドサイズ は予測条件(ここでは、平滑化半径)に影響しないことが示された。

図 12(P.149)は、異なる水平グリッドサイズの下で RI モデルを用いて 2009 年 11 月 1 日 から 2010 年 2 月 1 日を予測した結果である。水平方向のグリッドサイズに関係なく、RI モデルの平滑化半径が 7.5~10km のとき対数尤度が良くなる。その理由は、グリッドサイ ズが変わっても、地震発生数の期待値分布の相対的な空間分布は変わらないからである(図 13(P.150)に 4 つのグリッドにおける RI10k モデルの深さ 40~50km における予測結果を示 した)。

(c) 結論ならびに今後の課題

地震活動予測手法を評価・検証するための基盤を構築するために国際プロジェクトである CSEP で開発された最新のソフトウェアを導入し、予測モデルを検証する環境を整備した。また、関東地域における過去の震源の深さ分布を予測に反映できるように二次元予測

空間に深さを加えた三次元テスト領域を設定した結果、二次元テスト領域より三次元テスト領域の方が予測精度が良くなることを確認できた。今後は、計算時間なども考慮してこれらの結果を基に関東地域における三次元テスト領域を決定する。

(d) 引用文献

- 1) 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.
- 2) Schorlemmer, D., Gerstenberger, M. C., Wiemer, S., Jackson, D. D. and Rhodes, D. A. : Earthquake Likelihood Model Testing, Seism. Res. Lett., Vol.78, No.1, pp.17-29, 2007.
- 3) Nanjo, K. Z., Tsuruoka, H., Hirata, N. and Jordan, T. H. : Overview of the first earthquake forecast testing experiment in Japan, Earth Planets Space, Vol.63, No.3, pp.159-169, 2011. doi: 10.5047/eps.2010.10.003.
- 4) Kimura, H., Kasahara, K., Igarashi, T. and Hirata, N. : Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: A new plate configuration revealed by interpolate aseismic slips, Techtonophysics, 417, pp.101-118, 2006.
- Imoto, M. and Rhodes, D. A. : Seismicity Models of Moderate Earthquakes in Kanto, Japan Utilizing Multiple Predictive Parameters, Pure Appl. Geophys, 167, pp.831-843, 2010. doi: 10.1007/s00024-010-0066-4.
- 6) 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.

(e) 学会等発表実績

発表成果(発表題目、口	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国
頭・ポスター発表の別)		(学会等名)		内の別
地震発生予測検証実験	横井佐代子 ·	日本地球惑星科学連	2012年5月	国内
の現状(口頭)	楠城一嘉·	合2012年大会	20日-25日	
	鶴岡 弘・	(千葉・幕張)		
	平田 直			
日本における地震発生	鶴岡 弘・	日本地球惑星科学連	2012年5月	国内
予測検証実験概要(口	横井佐代子・	合2012年大会	20日-25日	
頭)	楠城一嘉·	(千葉・幕張)		
	平田 直			
Prospective Evaluation of	Hiroshi	AOGS2012	2012年8月	国際
the CSEP-Japan	Tsuruoka,	(Resorts World	13日-17日	
Earthquake Forecasts (Kazuyoshi	Convention Centre,		
頭)	Nanjo, Sayoko	Singapore)		
	Yokoi, Naoshi			

学会等における口頭・ポスター発表

	Hirata			
Comparison of earthquake	Yokoi Sayoko,	2012 SCEC Annual	2012年9月	国際
forecasting tests in Kanto	Hiroshi	Meeting	9日-12日	
district and all over Japan	Tsuruoka,	(Palm Springs,		
(ポスター)	Kazuyoshi	U.S.A.)		
	Nanjo, Naoshi			
	Hirata			
評価手法マッチスコア	鶴岡 弘	日本地震学会2012年	2012 年 10	国内
の提案 (ポスター)		度秋季大会	月16日-19	
		(北海道・函館)	日	
首都圏の地震発生予測	横井佐代子 ·	日本地震学会2012年	2012 年 10	国内
モデルの構築に向けて	楠城一嘉·	秋季大会	月16日-19	
-2次元から3次元へ-	鶴岡 弘・	(北海道・函館)	日	
(ポスター)	平田 直			
Earthquake forecasting	Yokoi Sayoko,	International	2012 年 10	国際
model for Kanto district in	Hiroshi	Workshop of Special	月 29 日 -31	
Japan (ポスター)	Tsuruoka,	Project for Reducing	日	
	Kazuyoshi	Vulnerability for		
	Nanjo, Naoshi	Urban Mega		
	Hirata	Earthquake Disasters		
		(宮城・松島)		
Prospective Evaluation	Tsuruoka	International	2012 年 10	国際
of the CSEP-Japan	Hiroshi,	Workshop of Special	月 29 日 -31	
Earthquake Forecasts	Kazuyoshi	Project for Reducing	日	
(口頭)	Nanjo, Sayoko	Vulnerability for		
	Yokoi, Naoshi	Urban Mega		
	Hirata	Earthquake Disasters		
		(宮城・松島)		
Earthquake forecasting	Yokoi Sayoko,	The 2012 American	2012 年 12	国際
test for Kanto district to	Hiroshi	Geophysical Union	月3日-7日	
reduce vulnerability of	Tsuruoka,	Fall Meeting		
urban mega earthquake	Kazuyoshi	(San Francisco,		
disasters (ポスター)	Nanjo, Naoshi	U.S.A.)		
	Hirata			

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

- (f) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定
 - 1) 特許出願
 - なし
 - 2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成25年度業務計画案

首都圏の過去の地震活動を含む複数の地震カタログに対するコンプリートマグニチュ ード等の性能評価を実施するとともに、階層的時空間 ETAS モデルをもとにした三次元地 震活動予測モデルのプロトタイプを開発する。関東地域における地震活動評価の検討に用 いる三次元テスト領域を決定する。



テストセンター

図 1 Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP)の概要。(a) CSEPの Website (http://www.cseptesting.org/)。(b) CSEP における地震発生予測モデルの 検証スキーム。



図2 首都圏の震源分布。(a) 1998年1月1日から2009年11月1日までのマグニチュー ド2.5以上、深さ0~100kmの地震に対する空間分布図。(b) 深さ1km 毎の地震数 のヒストグラム、(c) 深さ0~10km と(d) 40~50kmにおける地震の空間分布図。



図 3 首都圏の予測領域。(a) CSEP における予測領域。水平方向 0.05° x0.05°、深さ 100km。 (b) 本業務における予測領域。水平方向 0.1° x0.1°、深さ 10km。



図4 予測モデル(RI5k モデル)の学習期間と対数尤度の関係。地震発生予測モデルによ る確率予測を行う際に参照する地震カタログの長さと予測に与える影響を示した。



図5 伊豆地方における地震発生様式(1990年1月1日から2009年11月1日までに起き たマグニチュード2.5以上9.9以下、深さ0~100km)。(a) 震央分布。丸の大きさはマ グニチュード、色は震源の深さを意味する。(b) 地震が起きた時期とマグニチュード の関係。(c) 累積曲線。横軸は時間、縦軸は地震の累積数を示す。



1998/1/1-2009/11/1 M>=2.5 H<=100km



図 6 予測空間、図 3 (a) における首都圏の地震の震央分布と確率予測の例。(a) 1998年 1月1日から 2009年11月1日までに発生したマグニチュード 2.5以上、深さ 0~100km の 地震の震央分布。赤い丸は地震の震央を示す。丸の大きさがマグニチュードを表す。(b) RI10kモデルを用いて(a)を元に 2009年11月1日から 2010年2月1日までのマグニチ ュード 4.0以上 9.0以下、深さ 0~90km で発生する地震を予測した例。色は地震発生数の 期待値分布を示す。(c)図 6 (b)を元に首都圏の地震の確率予測を 10km 毎に示したもの。 色は図 6 (b)の凡例と同様、地震発生数の期待値分布を示す。(b)、(c)共に水平方向の grid は、0.1° x0.1°。



図 7 (a) 首都圏の地震の震源分布と確率予測の例。
図 6 (a) のデータを深さ 10km 毎にプロットしたもの。



図7(b) 首都圏の地震の震源分布と確率予測の例。
RI10 モデルを用いて(a)を元に2009年11月1日から2010年2月1日までのマグニチュード4.0以上9.0以下、深さ0~90kmで発生する地震を深さ10km毎に予測した例。色は図6(b)の凡例と同様、地震発生数の期待値分布を示す。
grid は、0.1°x0.1°。



 図8(a) 首都圏の地震の確率予測とRIモデルの平滑化半径。RIモデルの平滑化半径を 変えて図7(b)と同様の方法で深さ10km毎の予測を行った。
平滑化半径は、5km。
色は図6(b)の凡例と同様、地震発生数の期待値分布を示す。
水平方向のgridは、0.1°x0.1°。



 図8(b) 首都圏の地震の確率予測とRIモデルの平滑化半径。RIモデルの平滑化半径を 変えて図7(b)と同様の方法で深さ10km毎の予測を行った。
平滑化半径は、10km。
色は図6(b)の凡例と同様、地震発生数の期待値分布を示す。
水平方向のgridは、0.1°x0.1°。

(b)



図8(c) 首都圏の地震の確率予測とRIモデルの平滑化半径。RIモデルの平滑化半径を 変えて図7(b)と同様の方法で深さ10km毎の予測を行った。 平滑化半径は、30km。 色は図6(b)の凡例と同様、地震発生数の期待値分布を示す。 水平方向の grid は、0.1° x0.1°。

(c)



 図8(d) 首都圏の地震の確率予測とRIモデルの平滑化半径。RIモデルの平滑化半径を 変えて図7(b)と同様の方法で深さ10km毎の予測を行った。
平滑化半径は、50km。
色は図6(b)の凡例と同様、地震発生数の期待値分布を示す。
水平方向のgridは、0.1°x0.1°。

(d)



図9 二次元予測空間と三次元予測空間における RIモデルの平滑化半径と対数尤度の関係。 赤とグレーはそれぞれ三次元予測空間および二次元予測空間における RI モデルの対 数尤度を示す。対数尤度は、2009年11月1日から2010年2月1日の予測と実測に対 して算出した。



図 10 三次元予測空間における RI モデルの平滑化半径と対数尤度の関係を 5 つの予測期 間に対して調べた。



図 11 図 10 で用いた 5 つの予測期間の震央分布図。



図 12 水平方向のグリッドサイズと対数尤度の関係。対数尤度は、2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日の予測と実測に対して算出した。



図 13 水平方向のグリッドサイズと地震発生数の期待値分布の関係。RI10k モデルを用い て 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日を予測した。ここでは、深さ 40~50km の図を掲 載した。