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 26 年度業務目的

平成 25 年度に構築した地震活動予測モデルと 3 次元テスト領域に対してレトロスペク ティブな1日、3ヶ月、1年、3年テストクラスの検証実験を行うととともに、プロスペク ティブな検証実験を開始する。

(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	
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 26 年度の成果

- (a) 業務の要約
 - 1) 平成25年度に構築した地震活動予測モデルと3次元テスト領域に対してレトロスペ クティブ(事後予測的)な1日、3ヶ月、1年、3年テストクラスの検証実験を行った。
 2) また、プロスペクティブ(事前予測的)な検証実験を開始した。
- (b) 業務の成果

1) 平成25年度に構築した地震活動予測モデルと3次元テスト領域に対するレトロスペクティブ(事後予測的)な1日、3ヶ月、1年、3年テストクラスの検証実験の実施

a) 情報利得

昨年度に決定された3次元テスト領域に対して「情報利得」を評価指標として地震活動 予測モデルの最適パラメータを探索した。地震の発生はポアソン過程であると仮定し、地 震発生予測モデルから期待される地震の予測数と実測数から得られる確率の①式を基本と し、①式の対数をとった「対数尤度」(②式)により地震予測モデルの評価を行う

(Schorlemmer and Gerstenberger, 2007¹⁾)。対数尤度は予測空間のグリッド総数に依存する 値であるため、異なるグリッド総数からなる予測空間で得られた対数尤度と比較するため 対数尤度から「情報利得」(③式)を算出し、比較の指標とした。

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

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

情報利得:
$$IG = \frac{L_A}{N_{obs}} - \frac{L_B}{N_{obs}}$$
 ・・・③

(*L_A*:モデル A の対数尤度、*L_B*:モデル B の対数尤度、*N_{obs}*:地震数)

本課題では、モデル A を RI モデルとし、モデル B を一様空間期待値分布モデルとした。 一様空間期待値分布モデルは、三次元テスト領域のどのグリッドにおいても地震の発生確 率(予測値)が同じ(一様)モデルである。一様空間期待値分布モデルにおいて、ある 1 つのグリッドの予測値(*2*)は、観測地震数を三次元テスト領域のグリッド総数で除した 値となる。情報利得が正の時、モデル A はモデル B より予測性能が高いことを意味する。

b) レトロスペクティブな1日、3ヶ月、1年、3年テストクラスの検証実験(事後予測実験)

昨年度に構築した地震活動予測モデルは、Relative Intensity (RI) モデルを基礎として おり、このモデルのパラメータは、平滑化半径、学習期間(開始年)、学習地震の下限マ グニチュード、規模別頻度を表すグーテンベルグ・リヒター (GR) 則の b 値である。1 日、 3ヶ月テストクラスは、マグニチュード4以上から9までの地震を予測し、1年、3年テス トクラスは、マグニチュード5以上から9までの地震を予測するので、表1(P.118)、表2 (P.119)に記載されたラウンド(予測・検証期間)において、RIモデルの最適パラメータ 値の探索を行った。この探索では、すでに地震が発生した過去の期間で、その時期より前 のデータを用いて地震発生を予測するので、レトロスペクティブ(事後的)な予測と呼ば れる。なお、この検証実験においては、学習開始年と学習地震の下限マグニチュードを探 索することとし、すべて平滑化半径は 10km、b 値は 0.9 とした。図1(P.122)に3ヶ月テ ストクラスの、図2(P.123)に1年テストクラスの第1ラウンドの探索結果を示す。それ ぞれのテストクラスの最適パラメータは、学習開始年、下限マグニチュードとその際の情 報利得の組み合わせで示すと(1988, 3.6, 4.5499)、(1988, 2.6, 3.543)であった。第1ラウン ドにおいては、伊豆で群発地震活動が起こっており、このラウンドの予測においては、こ の群発活動をどのようにモデルに取り込んでいるかによって予測性能が異なる。表 3(P.120) に3ヶ月テストクラスの全21ラウンドの最適パラメータを、表4(P.121)に1年テスト クラスの全18ラウンドの最適パラメータ値を示す。また、図3(P.124)に3ヶ月テスト クラスの第21 ラウンドの探索図を、図4(P.125)に1年テストクラスの第18 ラウンドの 探索図を示す。また、探索のパラメータ群から得られた情報利得の最大値と最小値の範囲 とその差の推移を図5(P.126)(3ヶ月テストクラス)および図6(P.126)(1年テストクラ ス)に示す。3ヶ月テストクラスよりも1年テストクラスのほうが情報利得の最大値が大 きく、その差についても1年テストクラスは3ヶ月テストクラスと比較して小さいことが

わかる。また、2011 年東北地方太平洋沖地震を含むラウンドにおいては、情報利得の最大 値が下がるが、その地震を含まない最初のラウンドである第7ラウンドにおいては、パラ メータの違いによる情報利得の差が非常に小さいということがわかる。さらに、情報利得 値の差の推移について第1ラウンドは値が大きく、徐々にその値が小さくなり第10 ラウ ンド以降はその差が徐々に大きくなることが見て取れる。これは、発生する地震数が減少 していることと逆相関になっている。

c) 地震活動予測モデルパラメータの決定

b)のレトロスペクティブな検証実験から、RI モデルの最適パラメータは、3 ヶ月および 1 年テストクラスともにラウンド毎にその値が変化しており、どの値を採用するかは非常 に難しいことが示された。同時に、最適なパラメータによる予測では、情報利得が 2~3 程 度で安定していることもわかった。プロスペクティブ検証実験においては、2015年2月1 日を実験開始とするので、b)における検討結果を考慮すると、後のラウンドのパラメータ 値が参考となるはずである。3ヶ月テストクラスにおいては、学習開始年は、2012年以降、 1年テストクラスは、1999年以降がよいことになる。ただし、これは事後予測における最 適パラメータの探索であり、ラウンド間でその最適パラメータが大きく異なっているため、 それを安定して求めるパラメータの探索手法が必要である。そこで今年度は、3ヶ月テス トクラスは、2014年1月1日から12月31日までの1年間を予測ターゲット期間とし、1 年予測クラスは、2012年1月1日から2014年12月31までの3年間を予測ターゲット期 間として、b)と同様に学習開始年と下限マグニチュードの探索を行った。探索結果をそれ ぞれ図 7(P.127)と図 8(P.127)に示す。最適パラメータの組み合わせはそれぞれ(1999, 2.4)、 (2005, 2.8)となった。このパラメータ値の予測性能を評価するため、図 5(P.126)と図 6(P.126) の情報利得の最大値との比較を図9(P.128)(3ヶ月テストクラス)と図10(P.128)(1年 テストクラス)に示す。これらのモデルパラメータは概ね最大値に近く、プロスペクティ ブ検証実験時において平均的に予測能力が高いモデルパラメータが決定できたと思われる。 ただし、今回のパラメータ探索においては、平滑化半径とb値を仮定(平滑化半径は10km、 b値は0.9)したので、予測性能の向上のためには、今後これらの仮定についても検討する 必要がある。

2) プロスペクティブ(事前予測的)な検証実験の開始

1)b)のレトロスペクティブな検証実験によって、学習開始年と学習地震の下限マグニチュードの最適パラメータを検討し、2011年東北地方太平洋沖地震後におけるその暫定的な値を1)c)において決定した。地震発生を予測する対象期間が、予測を行う時点より後の予測を行うことをプロスペクティブ(事前)予測という。1)の検討から、1 日テストクラス と3ヶ月テストクラスの RIモデルにおける学習開始年は1999年、学習の下限マグニチュードは2.4とした。この時における深さ10-15 kmにおける予測期待値マップを図11(P.129)に示す。2015年2月1日から5月1日までのマグニチュード4以上の地震の予測数は、18.7/89=0.2 個となる。実際には、マグニチュード4以上の地震は発生しなかった。

1年テストクラスと3年テストクラスでは、学習開始年を2004年、学習地震の下限マグ ニチュードを3.0とした。この時における深さ10-15kmにおける予測期待値マップを図12 (P.129)に示す。2015年2月1日から2016年2月1日までのマグニチュード5以上の地 震の予測数は15.2個となり、2015年2月1日から2018年2月1日までは、この約3倍の 数が予測数となる。ただし、この値はやや過大気味であるので、表4(P.121)における第 15から第17ラウンドまでの最適値である学習開始年を1999年、学習下限マグニチュード を2.9とした事前予測も行った。この場合の予測期待値マップを図13(P.130)に示すが、 この場合には地震の予測数は、11.3個(1年)、33.9個(3年)である。図14(P.131)には、 2011年東北地方太平洋沖地震前後での地震の深さ分布を示した。この地震の前後で有意に 深さ分布が変化していることがわかる。したがって、地震発生の深さ分布の変化を考慮す ることで地震予測モデルの性能を向上させることが可能である。

(c) 結論ならびに今後の課題

平成 25 年度に構築した地震活動予測モデルと 3 次元テスト領域に対して、レトロスペ クティブ(事後予測的)な1日、3ヶ月、1年、3年テストクラスの検証実験を行った。実験 にあたり、Relative Intensity (RI) モデルを3次元テスト領域に適用させた地震活動予測モ デルを使用した。RI モデルのパラメータは、平滑化半径、学習期間(開始年)、学習地震 の下限マグニチュード、規模別頻度を表すグーテンベルグ・リヒター(GR) 則のb 値があ るが、今回は平滑化半径とb値を、それぞれ、10kmと0.9に固定し、学習期間と下限マグ ニチュードに対してグリッドサーチを行い、情報利得が最大となるパラメータの探索を行 った。これにより、3ヶ月テストクラスと1年テストクラスの第1ラウンドの最適パラメ ータは、学習開始年、下限マグニチュードとその際の情報利得の組み合わせで示すと(1988, 3.6, 4.5499)、(1988, 2.6, 3.543)となった。ただし、このラウンドにおいては、伊豆で群発 地震が発生しており、この群発活動をどのようにモデルに取り込んでいるかによって予測 性能が異なることに注意が必要である。また、2011年東北地方太平洋沖地震を含むラウン ドである6ラウンドにおいては、情報利得が負となるが、その地震を含まない最初のラウ ンドである第7ラウンドにおいては、パラメータの違いによる情報利得の差が小さいとい うことが分かった。一方、3ヶ月予測クラスに対して、2014年1月1日から12月31日ま での4ラウンド分を予測ターゲット期間とし、1年予測クラスに対しては、2012年1月1 日から 2014 年 12 月 31 までの 3 ラウンド分を予測ターゲット期間とした場合の最適パラメ ータの組み合わせ(学習開始年、下限マグニチュード)は、それぞれ(1999,2.4)、(2005, 2.8) となった。3ヶ月予測クラスに対しては 21 ラウンド、1 年予測クラスに対して 18 ラ ウンドの事後予測検証実験から、最適パラメータは、ラウンド毎に変化しており、どの値 を採用するかは非常に難しいことが示された。同時に、最適なパラメータによる予測では、 情報利得が 2~3 程度で安定していることも明らかになった。

また、プロスペクティブ(事前予測的)な検証実験を開始した。この実験におけるモデ ルの予測は、平滑化半径とb値はそれぞれ 10kmと 0.9 で固定し、学習開始年、下限マグ ニチュードについては、プロスペクティブ検証実験のパラメータを基礎として 2011 年東北 地方太平洋沖地震後の地震数の減少傾向なども考慮したモデルパラメータを使用し、各テ ストクラスの地震予測数は、0.2 個(1日)、18.7 個(3ヶ月)、11.3 個(1年)、33.9 個(3年)となった。

今後の課題は、平滑化半径とb値を仮定(平滑化半径とb値は、それぞれ 10km と 0.9) したので、予測性能の向上のためには、今後これらの仮定についても検討する必要がある。 また、情報利得は地震数、空間分布、規模別頻度分布を含めた総合性能から算出したため、 学習期間と下限マグニチュードは、地震予測数が観測値に近くなる場合の最適値となって いる可能性が高いと考えられる。そのため、パラメータの探索は、空間分布を最適とする パラメータを求め、地震数に対しては別の地震活動モデル、例えば、ETAS を用いて決定 するなど複数モデルの組み合わせを検討する必要があると考えられる。さらに、東北沖地 震前後での地震発生の深さ分布の変化や地震規模別頻度分布の変化(b値の変化に対応) をモデルに組み込むことによって地震予測モデルの性能を向上させることができると考え られる。

(d) 引用文献

 Schorlemmer, D. and Gerstenberger, M. C.: RELM testing center, Seismol. Res. Lett., Vol.78, No.1, pp.30-36, 2007.

(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	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
Three-dimensional	Yokoi Sayoko,	日本地球惑星科学連	2014年4月	国内
earthquake forecasting	Hiroshi	合2014年大会	28日-5月2	
model for the Kanto	Tsuruoka,	(横浜市)	日	
district: Completeness	Naoshi Hirata			
magnitude of earthquake				
catalogs				
Collaboratory for the	Schorlemmer	日本地球惑星科学連	2014年4月	国際
Study of Earthquake	Danijel,	合2014年大会	28日-5月2	
Predictability –Global	Gerstenberger	(横浜市)	日	
Activities	Matt, Hirata			
	Naoshi ほか,			
History of network	Schorlemmer	日本地球惑星科学連	2014年4月	国際
detection completeness in	Danijel, Hirata	合2014年大会	28日-5月2	
Japan	Naoshi,	(横浜市)	日	
	Ishigaki Yuzo			
	ほか,			
Three dimensional	Yokoi Sayoko,	Asia Oceania	2014年7月	国際
earthquake forecasting	Hiroshi	Geosciences Society	28日-8月1	

model for Kanto district in	Tsuruoka,	2014	日	
Japan: Analysis of an	Naoshi Hirata	(札幌市)		
earthquake catalog				
considering focal depth				
Three dimensional	Tsuruoka	Asia Oceania	2014年7月	国際
earthquake forecasting	Hiroshi,	Geosciences Society	28日-8月1	
testing region for Kanto	Sayoko Yokoi,	2014	日	
district in Japan	Naoshi Hirata	(札幌市)		
Determination of 3D	Sayoko Yokoi,	2014 SCEC annual	2014年9月	国際
testing region for Kanto	Hiroshi	meeting	5日-9月9日	
district in Japan	Tsuruoka and	(カリフォルニア)		
	Naoshi Hirata			
Prospective evaluation of	Hiroshi	2014 SCEC annual	2014年9月	国際
1-day testing class of the	Tsuruoka and	meeting	5日-9月9	
CSEP-Japan earthquake	Naoshi Hirata	(カリフォルアニ	日	
forecasts		ア)		
首都圏の地震発生予測	横井佐代子・	日本地震学会2014年	2014 年 11	国内
モデルの構築に向けて	鶴岡弘・平田	秋季大会	月 24 日 -26	
-三次元予測領域の決	直	(新潟市)	日	
定一				
CSEP-Japan における1日	鶴岡弘・平田	日本地震学会2014年	2014 年 11	国内
テストクラスの地震発	直	秋季大会	月 24 日 -26	
生予測検証実験結果報		(新潟市)	日	
告				
地震活動解析ソフト	鶴岡弘・尾形	日本地震学会2014年	2014 年 11	国内
(TSEIS)の機能強化	良彦	秋季大会	月 24 日 -26	
		(新潟市)	日	

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 27 年度業務計画案

(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。

表1 3ヶ月テストクラスの予測期間。

ラウンド	予測期間
1	2009-11-01 - 2010-02-01
2	2010-02-01 - 2010-05-01
3	2010-05-01 - 2010-08-01
4	2010-08-01 - 2010-11-01
5	2010-11-01 - 2011-02-01
6	2011-02-01 - 2011-05-01
7	2011-05-01 - 2011-08-01
8	2011-08-01 - 2011-11-01
9	2011-11-01 - 2012-02-01
10	2012-02-01 - 2012-05-01
11	2012-05-01 - 2012-08-01
12	2012-08-01 - 2012-11-01
13	2012-11-01 - 2013-02-01
14	2013-02-01 - 2013-05-01
15	2013-05-01 - 2013-08-01
16	2013-08-01 - 2013-11-01
17	2013-11-01 - 2014-02-01
18	2014-02-01 - 2014-05-01
19	2014-05-01 - 2014-08-01
20	2014-08-01 - 2014-11-01
21	2014-11-01 - 2015-02-01

表2 1年テストクラスの予測期間。

ラウンド	予測期間
1	2009-11-01 - 2010-11-01
2	2010-02-01 - 2011-02-01
3	2010-05-01 - 2011-05-01
4	2010-08-01 - 2011-08-01
5	2010-11-01 - 2011-11-01
6	2011-02-01 - 2012-02-01
7	2011-05-01 - 2012-05-01
8	2011-08-01 - 2012-08-01
9	2011-11-01 - 2012-11-01
10	2012-02-01 - 2013-02-01
11	2012-05-01 - 2013-05-01
12	2012-08-01 - 2013-08-01
13	2012-11-01 - 2013-11-01
14	2013-02-01 - 2014-02-01
15	2013-05-01 - 2014-05-01
16	2013-08-01 - 2014-08-01
17	2013-11-01 - 2014-11-01
18	2014-02-01 - 2015-02-01

表3 3ヶ月テストクラスのレトロスペクティブ検証実験における最適パラメータ値とその際の情報利得。

ラウンド	学習開始年	下限マグニチュード	情報利得
1	1988	3.6	4.55
2	1986	3	1.803
3	2007	2.9	3.001
4	2009	2.3	3.385
5	1998	3.3	3.656
6	1987	2	-3.511
7	2010	2.5	2.2
8	2008	3.5	2.521
9	2009	2.7	2.534
10	2009	3	2.451
11	2008	2.1	2.297
12	2003	3.8	2.597
13	2008	2.4	2.429
14	2001	3.3	2.38
15	2013	3	3.18
16	1999	3.6	2.933
17	1991	4	2.976
18	2012	4	2.971
19	2014	2.2	2.67
20	2013	3.4	2.714
21	2014	2	2.259

表4 1年テストクラスのレトロスペクティブ検証実験における最適パラメータ値とその際の情報利得。

ラウンド	学習開始年	下限マグニチュード	情報利得
1	1988	2.6	3.543
2	2007	2.5	2.002
3	1983	4	-0.650
4	1983	4	-0.732
5	1983	4	-0.807
6	1983	4	-0.873
7	2010	2.7	1.788
8	2009	2.7	2.088
9	2007	2.8	1.933
10	2009	2.8	1.989
11	2004	3.2	1.945
12	2007	2.7	2.281
13	1999	3.4	2.772
14	2000	3.1	2.601
15	1999	2.9	2.532
16	1999	2.9	2.619
17	1999	2.9	2.642
18	1990	2.6	2.485



図1 3ヶ月テストクラス第1ラウンドにおける学習開始年と学習下限マグニチュードの探 索結果と観測された地震の震央図。情報利得の最大値となるパラメータを白の星で示す。 カラースケールは情報利得値を示し、赤ほどモデルの性能が高い。



図2 1年テストクラス第1ラウンドにおける学習開始年と学習下限マグニチュードの探索 結果と観測地震の震央図。情報利得の最大値となるパラメータを白の星で示す。カラース ケールは情報利得値を示し、赤ほどモデルの性能が高い。



図3 3ヶ月テストクラス第21ラウンドにおける学習開始年と学習下限マグニチュードの 探索結果と観測地震の震央図。情報利得の最大値となるパラメータを赤の星で示す。カラ ースケールは情報利得値を示し、赤ほどモデルの性能が高い。



図4 1年テストクラス第18ラウンドにおける学習開始年と学習下限マグニチュードの探索結果と観測地震の震央図。情報利得の最大値となるパラメータを白の星で示す。カラー スケールは情報利得値を示し、赤ほどモデルの性能が高い。



図 5 3ヶ月テストクラスにおける探索パラメータ群の情報利得の最大値および最小値の 範囲(赤線;左軸)と最大値と最小値の差(青線;右軸)の推移。



図 6 1年テストクラスにおける探索パラメータ群の情報利得の最大値および最小値の範 囲(赤線;左軸)と最大値と最小値の差(青線;右軸)の推移。



図7 3ヶ月テストクラスの最適パラメータの探索結果図。



図8 1年テストクラスの最適パラメータの探索結果図。



図9 プロスペクティブ検証実験時(3ヶ月テストクラス)における RI モデルのパラメータ 値による情報利得(緑線)と事後予測におけるパラメータの最適値による情報利得(赤線) との比較図。



図 10 プロスペクティブ検証実験時(1年テストクラス)における RIモデルのパラメー タ値による情報利得(緑線)と事後予測におけるパラメータの最適値による情報利得(赤 線)との比較図。



図 11 プロスペクティブ予測実験(3ヶ月テストクラス)における RI モデルの予測期待値 図(深さ10-15km、平滑化半径10km)。学習期間は、1999年1月1日から2015年2月1 日まで。下限マグニチュードは、M2.4。地震の予測数は、18.7。



図 12 プロスペクティブ予測実験(1年テストクラス)における RI モデルの予測期待値図 (深さ 10-15km、平滑化半径 10km)。学習期間は、2004年1月1日から 2015年2月1日 まで。下限マグニチュードは、M3.0。地震の予測数は、15.2。



図 13 プロスペクティブ予測実験(1年テストクラス)における RI モデルの予測期待値図 (深さ 10-15km、平滑化半径 10km)。学習期間は、1999年1月1日から 2015年2月1日 まで。下限マグニチュードは、M2.9。地震の予測数は、11.3。



図 14 2011 年東北地方太平洋沖地震前後での関東領域における地震の深さ分布、マグニチ ュード 3 以上を選択している。(上図) 期間 1998 年 1 月 1 日から 2011 年 1 月 1 日まで。(下 図) 期間 2012 年 1 月 1 日から 2015 年 1 月 1 日まで。