

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：62603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17722

研究課題名（和文）過去の地震活動に基づく複合型短中期地震予測モデルの開発

研究課題名（英文）Development of composite short-middle term earthquake forecast models based on past seismic activity

研究代表者

野村 俊一（Nomura, Shunichi）

統計数理研究所・モデリング研究系・助教

研究者番号：70719640

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：内陸主要活断層の地震発生確率の評価における推定誤差および予測誤差の問題を数値実験を通して明らかにし、それらを解消するための統計手法を提案した。  
太平洋プレート沈み込み帯に分布する小繰り返し地震活動から、プレート沈み込み速度の時空間変化を推定し、大地震前後の特徴的な滑りを可視化した。  
地震群の特徴から、それが大地震の前震群である確率を評価する統計モデルを開発し、安定した予測精度を実現できていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震調査研究推進本部が現在公表している内陸主要活断層の長期評価に関して、将来の地震発生確率の評価における問題点を明らかにし、さらにその改善策を提案した点に社会的意義がある。  
また、地震活動の時空間的集中度とマグニチュード差の情報から、それが大地震の前震活動である確率をリアルタイムに評価することができるため、大地震の起こる可能性がある程度高いときに事前の注意喚起が実現できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We proposed a stochastic method to improve errors in inference and prediction for long-term evaluation of inland main active faults in Japan.

We estimated spatiotemporal variation of interplate slip rate from small repeating earthquakes in the subduction zone of Pacific plate and visualized characteristic slips before and after major earthquakes.

We developed a statistical model to evaluate the probability that a seismic cluster is a foreshock cluster of a large earthquake from its features and proved its stable predictive performance.

研究分野：統計地震学

キーワード：地震予測 繰り返し地震 プレートテクトニクス 前震活動 更新過程 非定常点過程 ベイズ型予測 ロジスティック回帰

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、国内の公的な地震予測として、地震調査研究推進本部(推本)が主要活断層で繰り返される地震の長期発生確率を公表している。推本の予測手法は、地震の繰り返し間隔に対して Brownian Passage Time (BPT) 分布を仮定し、分布の平均とばらつき(変動係数)の推定値をプラグインした将来の予測分布を用いている。しかし、過去の活動データの不足や不確実性から分布パラメータの推定精度は悪く、特に変動係数の推定誤差が地震予測にバイアスを与えている懸念があった。

(2) 本震に先行して起こる前震現象は、大地震を短期的に予測する上で非常に有効な手掛かりとなるものの、本震発生前に前震活動をそれと見分ける確実な方法は未だ存在しない。先行研究では前震活動に見られる様々な特徴が報告されているものの、それらを統計的に議論した研究はこれまでにほとんど無く、その多くが経験論に終始していた。

### 2. 研究の目的

(1) 過去の活動時期や活動数に不確実性をもつ活断層地震カタログに対して、パラメータを偏りなく推定して適切に予測するためのベイズ型予測手法を開発する。さらに、活断層地震の再来間隔の空間分布を推定してその地域差を明らかにする。

(2) プレート境界で起こる繰り返し小地震カタログに基づいて、その活動間隔の変化からプレート沈み込み速度の時空間変動を逆推定する手法を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震前後における東日本太平洋プレート境界における準静的滑りに見られる特徴を明らかにする。

(3) 前震活動に見られる様々な特徴を統計的に有効な特徴量へと変換し、特徴量に基づいて地震群が前震である確率を評価する前震識別モデルを開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 過去の活動時期や活動数に不確実性を考慮した尤度を定義し、パラメータ推定におけるバイアスを解消するために適切なパラメータ事前分布を設けたベイズモデルおよびベイズ予測手法を開発する。既存の予測手法と推定のバイアスや予測誤差を比べるための数値実験を行い、提案手法の予測性能を検証する。

(2) 過去の研究業績[1]にて提案した非定常更新過程モデルをプレート境界で起こる繰り返し小地震カタログに適用して、節点配置を工夫したスプライン関数を用いて、大地震による不連続な速度変化や余効滑りによる急激な変化を含めたプレート沈み込み速度の時空間変動を逆推定する。

(3) 気象庁震源カタログから M4 以上の地震を抽出し、地震の各ペアを時空間距離に基づいて連結することで地震群を構成する。構成した地震群から時空間的集中度やマグニチュードに関して前震とそれ以外とを識別するための特徴量を抽出する。その特徴量を説明変数として、まだ継続中の地震群が、より大きい本震前の前震である確率を評価するロジスティック回帰モデルを開発する。

[1] Nomura, S., Ogata, Y., Uchida, N. and Matsu'ura, M. (2017). Spatiotemporal variations of interplate slip rates in northeast Japan inverted from recurrence intervals of repeating earthquakes, *Geophysical Journal International*. 208, pp.468-481, doi: 10.1093/gji/ggw395.

### 4. 研究成果

(1) 活断層地震の再来間隔における変動係数のベイズ型予測の数値実験検証：活断層で繰り返される地震の将来予測において大きな不確実性をもつ再来間隔の変動係数の推定精度と将来予測精度を向上させるため、過去の活動時期や活動数に不確実性が存在する活断層における尤度(図1)および新たなベイズモデルによる推定手法および予測手法を提案した。提案手法と従来型の最尤法で、変動係数の推定精度および将来予測精度を数値実験により比較検証し、活動時期に不確実性がある下では変動係数の最尤推定量とそれに基づく予測が大きなバイアスと誤差をもち、ベイズ事後分布に基づく推定と予測はそれらを大幅に改善することを示した。

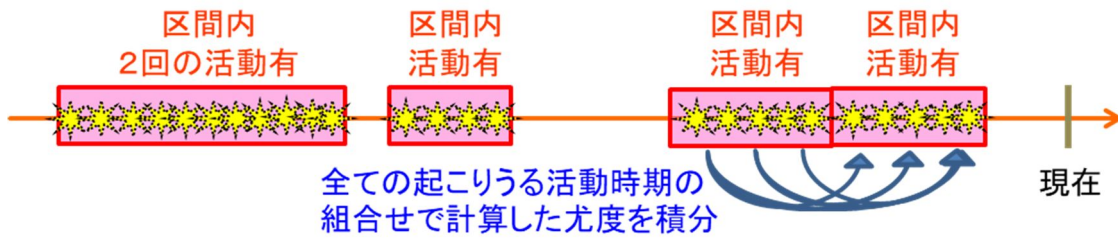


図1 活動時期に不確定性をもつ状況下での尤度

(2) 活断層地震の再来間隔における変動係数の空間分布推定：活断層で繰り返される地震の将来予測において大きな不確定性をもつ再来間隔の変動係数の推定精度を向上させるため、変動係数に2次元ガウス過程で表現される空間的相関を取り入れた階層ベイズモデルを開発した。日本内陸の主要活断層の古地震カタログに提案モデルを適用し、地域的な変動係数の大きさとその地域の活断層密集度に相関が見られることを示した。

(3) 小繰り返し地震活動に基づく東北地方太平洋沖地震前後のプレート間滑りの逆推定：2011年東北地方太平洋沖地震を挟んだ1993～2016年の東日本太平洋プレート境界における繰り返し地震カタログに基づいて、節点配置をアダプティブに調整したスプライン関数を用いてプレート間準静的の滑り速度の時空間変動の逆推定を行った。2011年東北地方太平洋沖地震後の余効滑り速度の詳細な時空間変化から、余効滑りの減衰の地域差を議論することができた。また、三陸沖で確認されている約3年周期で発生する周期的スロースリップについて、2011年東北地方太平洋沖地震後にも引き続き周期的に発生していることが確認できた。

(4) マグニチュードと時空間情報に基づく前震確率評価モデルの開発：Single-link clustering法によって構成した地震群から、前震活動が他の地震活動に比べて短期間に集中していること、震源の空間的ばらつきが大きいこと、最大と2番目のマグニチュード差が低く群発的活動である等の特徴があることを示し、スプライン関数を用いたロジスティック回帰モデルにより前震活動を識別して将来1ヵ月程度の本震発生確率を予測する手法を開発した。提案手法を2000年1月1日から2017年10月31日までの気象庁震源カタログに適用し、表1に示すように群内地震数が $N=2, 5, 10$ および $N \leq 10$ を満たす地震群について前震確率の評価値の度数分布から、各階級中の実際の前震割合すなわち適中率を求めて前震確率の評価値と比較した。該当例数の少ない階級を除いて、前震確率の高い階級ほど概ね適中率は高くなっており、さらに、表から階級ごとに前震確率を評価するモデルと、一律の前震確率とするモデルの予測性能を赤池情報量規準(AIC)により比較すると、いずれも前者の方が良い成績を示した。

(5) 前震識別に基づく新たなマグニチュード予測モデルの開発：(4)で開発した地震群内のマグニチュード差や時空間距離を用いた前震識別モデルに基づいて、その地震群内の次に起こる地震のマグニチュードを、Gutenberg-Richter則から外れる形で予測する手法を提案した。日本および世界の地震カタログを用いて、提案手法がGutenberg-Richter則よりも優れた予測性能が得られることを検証した。

表1 2000年以降の前震確率評価値の度数分布と適中率(=前震群数/全地震群数)。最右列は一律の前震確率とした場合とのAIC比較。

前震確率評価値	0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%	合計	AIC	
N=2	全地震群数	469	489	220	59	14	2	0	0	1,253	AIC0=967
	前震群数	27	67	45	17	4	2	0	0	162	AIC1=916
	適中率	6%	14%	20%	29%	29%	100%	N/A	N/A	13%	dAIC=51
N=5	全地震群数	129	57	27	13	9	3	2	2	242	AIC0=198
	前震群数	8	12	4	3	3	1	1	2	34	AIC1=185
	適中率	6%	21%	15%	23%	33%	33%	50%	100%	14%	dAIC=13
N=10	全地震群数	68	7	3	5	4	2	2	0	91	AIC0=83
	前震群数	5	3	1	2	3	1	0	0	15	AIC1=73
	適中率	7%	43%	33%	40%	75%	50%	0%	N/A	16%	dAIC=10
N≤10	全地震群数	1410	884	443	161	77	37	13	9	3034	AIC0=2435
	前震群数	92	134	86	50	24	17	6	9	418	AIC1=2244
	適中率	7%	15%	19%	31%	31%	46%	46%	100%	14%	dAIC=190

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 野村俊一, 尾形良彦	4. 巻 100
2. 論文標題 BPTモデルの共通のばらつきパラメータの推定とベイズ型予測	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地震予知連絡会会報	6. 最初と最後の頁 350-355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 野村俊一, 尾形良彦	4. 巻 99
2. 論文標題 マグニチュードと時空間情報に基づく前震確率評価モデルの識別性能	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地震予知連絡会会報	6. 最初と最後の頁 446-451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 野村俊一	4. 巻 9
2. 論文標題 Group fused lassoによる料率区分の自動セグメンテーション	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ジャリッパ・ジャーナル	6. 最初と最後の頁 10-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 野村俊一	4. 巻 70
2. 論文標題 状態空間モデルの損害保険への活用 Rパッケージ “KFAS” を用いた解析例	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本アクチュアリー会会報	6. 最初と最後の頁 224-245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 野村俊一, 尾形良彦	4. 巻 98
2. 論文標題 最新の活断層カタログに基づくBPT予測	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地震予知連絡会会報	6. 最初と最後の頁 443-448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計36件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 地震群からの特徴量抽出に基づく前震識別と本震予測モデル
3. 学会等名 固体地球データ同化に関する研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 非正常更新過程モデルによる相似地震に基づいたプレート間準静的滑りの逆推定手法の開発
3. 学会等名 平成30年度研究集会「相似地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング手法の構築」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村俊一, 尾形良彦
2. 発表標題 活断層の長期予測におけるばらつきパラメータの検討と影響
3. 学会等名 東京大学地震研究所 研究集会「日本における地震活動に基づく地震発生予測検証実験(CSEP-Japan)」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nomura, S.
2. 発表標題 Hierarchical Topic Models for Tensor Count Data
3. 学会等名 2019 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 テンソル計数データのための階層トピックモデル
3. 学会等名 情報・システム研究機構 データサイエンス共同利用基盤施設 共同研究集会「データ科学の応用と展望」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 多重線形モデルによる都道府県別生命表の解析
3. 学会等名 リスク解析戦略研究センター第6回金融シンポジウム「金融が直面する新環境への対応と方法論」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nomura, S. and Ogata, Y.
2. 発表標題 Bayesian estimation and forecast for recurrence intervals of uncertain occurrence times from paleoearthquakes
3. 学会等名 2018 Fall Meeting of the American Geophysical Union(AGU) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 テンソル分解を利用した都道府県別生命表解析
3. 学会等名 日本保険・年金リスク学会第16回研究発表大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 活動間隔のばらつき のベイズ推定 中央構造線断層帯の例
3. 学会等名 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 第240回長期評価部会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一, 尾形良彦
2. 発表標題 日本の活断層カタログに対するBPT モデルによるベイズ型予測と数値実験に基づく予測性能
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 一般化fused lassoを用いたクラス料率の自動セグメンテーション
3. 学会等名 2018年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nomura, S. and Ogata, Y.
2. 発表標題 Statistical features and cluster-based discrimination of foreshocks
3. 学会等名 International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process -Observation, Validation, Modeling, Forecasting-(ISEF-IWEP5) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一, 尾形良彦
2. 発表標題 Foreshock Discrimination and Short-Term Mainshock Forecast Based on Magnitude Differences and Spatio-Temporal Distances
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 空間的相関を考慮した地震再来間隔のばらつきパラメータの推定
3. 学会等名 統計数理研究所・東北大学流体科学研究所・材料科学高等研究所合同ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 相似地震活動に基づくプレート間すべりの時空間変動の逆推定
3. 学会等名 地震研特定共同研究(B)「固体地球科学のシミュレーションモデルと観測データに適用可能なデータ同化法の開発」ミーティング (招待講演)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Nomura, S.
2. 発表標題 Spatial distribution of coefficients of variation for earthquake recurrence intervals in Japan
3. 学会等名 ISM Symposium on Environmental Statistics 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nomura, S., Watanabe, M. and Oguma, Y.
2. 発表標題 Classification of Intra-Week and Intra-Day Walking Patterns and Their Effect on Body-Composition Changes Using A Hierarchical Model
3. 学会等名 第32回情報論的学習理論と機械学習研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 日本における長期地震予測の現状と課題
3. 学会等名 OLIS・慶應義塾大学 保険フォーラム2017 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nomura, S.
2. 発表標題 Modeling heterogeneity and non-stationarity of earthquake recurrence cycles
3. 学会等名 International Symposium on Risk Analysis and Random Fields (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 相似地震の再来間隔モデルと東北太平洋沖の準静的すべり履歴の推定
3. 学会等名 研究会「地震活動の物理2018」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 地震群からの特徴量抽出に基づく前震識別モデルの検討
3. 学会等名 研究会「地震活動の物理2018」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一, 尾形良彦
2. 発表標題 地震再来間隔の変動係数の空間分布と長期地震予測
3. 学会等名 科研基盤(A)シンポジウム「空間データと災害の統計モデル」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 状態空間モデルの損害保険への活用 Rパッケージ“KFAS”を用いた解析例
3. 学会等名 日本アクチュアリー会第1回産学共同研究集会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 相似地震に基づく準静的すべり分布の推定～デロネー分割を用いた平滑化推定～
3. 学会等名 平成29年度研究集会「相似地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング手法の構築」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 保険料率算定におけるスパース推定技法の活用
3. 学会等名 統計数理研究所 リスク解析戦略研究センター 第5回金融シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村俊一, 渡辺美智子, 小熊祐子
2. 発表標題 活動量計ログデータに基づく週内活動パターンの類型化と体組成変動への影響
3. 学会等名 第8回横幹連合コンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村俊一, 高橋宏典
2. 発表標題 一般化Fused Lassoによるクラス料率算定
3. 学会等名 日本保険・年金リスク学会第15回研究発表大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nomura, S. and Ogata, Y.
2. 発表標題 Spatial Pattern of Coefficients of Variation and Bayesian Forecasts for Recurrence Intervals of Earthquakes in Japan
3. 学会等名 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference Tokyo 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 BPT更新過程における変動係数 の推定方法について
3. 学会等名 第8回研究集会「日本における地震発生予測検証実験(CSEP-Japan)」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村俊一, 尾形良彦
2. 発表標題 日本の活断層カタログに対するBPTモデルの適切な推定と予測について
3. 学会等名 日本地震学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nomura, S.
2. 発表標題 Short-term forecasts by foreshock discrimination
3. 学会等名 CSEP Workshop: Informing Earthquake Debates with CSEP Results (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村俊一, 尾形良彦
2. 発表標題 前震判別と余震減衰を利用した短期的地震予測モデル
3. 学会等名 2017年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村俊一, 尾形良彦, 内田直希, 松浦充宏
2. 発表標題 繰り返し地震活動に基づくプレート境界における準静的滑りの逆推定
3. 学会等名 第64回理論応用力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nomura, S., Watanabe, M. and Oguma, Y.
2. 発表標題 Classification of in-week and -day patterns in ambulatory activity and body composition change
3. 学会等名 The 2017 Conference of the International Federation of Classification Societies (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nomura, S. and Ogata, Y.
2. 発表標題 Spatial distribution of coefficients of variation and Bayesian forecasts for recurrence intervals of earthquakes
3. 学会等名 1st International Conference on Econometrics and Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村俊一, 尾形良彦
2. 発表標題 地震群のマグニチュード頻度と時空間の特徴量を利用した前震判別モデルによる短期地震予測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Ariyoshi, K., Nomura, S., Uchida, N. and Igarashi, T.	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer International Publishing	5. 総ページ数 10
3. 書名 A trial modeling of perturbed repeating earthquakes combined by mathematical statics, numerical modeling and seismological observations (Moment Tensor Solutions)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	尾形 良彦 (Ogata Yosihiko) (70000213)	統計数理研究所・名誉教授  (62603)	