

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870193

研究課題名(和文) 繰り返し地震にかかる統計的予測手法のベイズ型時空間モデルへの発展

研究課題名(英文) Development of Bayesian space-time models in stochastic forecast methods for recurrent earthquakes

研究代表者

野村 俊一 (Nomura, Shunichi)

東京工業大学・情報理工学院・助教

研究者番号：70719640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：日本内陸には非常に多数の活断層が分布し、大地震を将来引き起こす危険を孕んでいる。大地震の予測においては、その活動周期の長さゆえにデータの不足および信頼性の問題がつきまとう。これらに起因するパラメータの推定誤差やデータの不確定性に対処し、安定した予測性能を確保する手段として、ベイズ予測手法を確立した。

また、小規模の繰り返し地震も、プレート境界の準静的滑りが再来間隔に反映されるため、プレート境界滑りのモニタリングに有効である。そこで、更新過程を拡張した時空間モデルを開発し、プレート境界の滑り速度の時空間分布を推定した。

研究成果の概要(英文)：There are many active faults in inland Japan that have risks of future catastrophic earthquakes. Since inland active faults in Japan have very long cycles of activity, forecasting is difficult because of the scarcity and unreliability of historical data. For stability of predictive performance, we established Bayesian prediction methods to deal with the uncertainty of data and parameters caused by these problems.

Small repeating earthquakes are also useful for monitoring interplate slip because their recurrence times reflect the quasi-static slip rate on plate interfaces. Here, we developed a space-time model extended from a renewal process to estimate the spatio-temporal distribution of slip rate on plate boundaries.

研究分野：統計地震学

キーワード：繰り返し地震 地震予測 更新過程 ベイズ予測 ガウス過程事前分布 時空間モデル プレートテクトニクス 東日本大震災

1. 研究開始当初の背景

確度の高い地震予知は困難との認識が広がる昨今、確率の言葉による中長期的地震予測は一つの現実的かつ実用的な足掛かりとなっている。特に、保険や建築土木の産業においては、短期的予測よりむしろ中長期的予測が必要とされる。

大地震の中長期的予測は大きく2つのアプローチに分かれる。1つは既知の活断層で繰り返される地震(固有地震)の再来を予測するもの、もう1つは、活断層を特定せずに大小全ての地震活動からマグニチュードの頻度分布の経験則を使った予測となる。日本では膨大な地質調査により多数の活断層が特定されているため、長期予測には主に前者の固有地震アプローチが採られている。

現在における日本の固有地震の予測手法は、各活断層の固有地震発生年代の点列を逆ガウス分布の更新過程でモデル化するものであり、その背景には地震再来の物理的過程として、地震を起こす力(クーロン破壊応力)線形ドリフトを持つがブラウン運動に従い蓄積され、閾値で地震を起こすブラウン到達過程が仮定されている。しかし、活断層等で繰り返し発生する大地震の長期発生確率評価にあたっては、過去の活動データの不足や不確実性といった問題が常に付きまとう。プラグイン予測分布による地震予測は、この不確実性によるバイアスを孕んでおり、バイアスのない予測にはモデルパラメータや不確定なデータに関する様々な可能性を考慮する必要がある。

また、甚大な被害をもたらした2011年東北地方太平洋沖地震では、いくつかの先行事象と考えられるプレート運動や地震活動の特異な変化が報告されている。先行事象はその後に続く本震の震源付近で発生するため、プレート運動の変動範囲や加減速の程度等の情報が重要となってくる。GPS観測網によるプレート運動分布の推定は、リアルタイムで異常を観察するための有効なツールである。しかし、陸上のGPS観測網から海域のプレート運動を推定すると、巨大地震の震源がある沖合に離れるほど分解能が落ちるといった問題点がある。

2. 研究の目的

本研究は甚大な被害をもたらす巨大地震の中長期的予測手法の新たな発展を目的とする。活断層ごとに地震の再来を1次元点過程で予測する従来法から脱却し、地震間の相互作用、同時運動、巨視的なプレート運動の変化などを空間統計の手法により取り入れた時空間点過程による予測を実現する。また、地震痕跡や地震発生年代の特定プロセスから生ずる不確実性の問題をベイズモデルの導入により解決し、地質学的知見による情報をできる限り活用した予測モデルの開発に

も取り組む。さらに、繰り返し地震に対する更新過程モデルを時空間に拡張したモデルを用いて、プレート境界上の繰り返し地震群からのプレートすべり分布の推定手法を構築し、過去に発生した大地震とプレート運動の推移との関係を明らかにする。現在も観測が続けられている相似地震からリアルタイムで大地震の先行的な活動をモニタリングすることを旨とする。

3. 研究の方法

本研究では、繰り返し地震の将来確率予測を行うベイズ予測モデルを提案し、パラメータや不確実なデータに対する事前分布を導入した予測を行う。モデルパラメータの不確実性に対しては、赤池ベイズ情報量規準(ABIC)で選択された事前分布を導入し、活動データの活動時期や活動回数の不確実性に対しては、条件付尤度関数を用いたベイズ予測を採用する。

また、繰り返し地震の確率予測に広く用いられているBPT分布更新過程モデルに、プレートすべり速度の時空間関数を導入することにより、プレート境界面上に分布する繰り返し地震群に対する時空間点過程モデルを提案する。このモデルを東北太平洋沖の小繰り返し地震群データに適用し、東北地方太平洋地震前までのプレートすべり分布の推移を推定する。推定結果よりプレートすべりの加速・減速等の変化を特定し、前後に起こったM6~8クラスの主要地震との関連性を議論する。また、GPS解析によるプレートすべり分布の推定結果と比較を行い、すべりの空間的範囲の精度とプレート固着域との関係を考察する。

4. 研究成果

今後の地震予測に直接的あるいは間接的に貢献する成果として、大別して次の3つの成果を得ている。

(1) 活断層で繰り返される地震に対する、活動履歴および地理的情報を用いたベイズ予測手法の提案

活断層地震の繰り返し間隔のばらつきの高さに地域性があることを利用して、繰り返し間隔の変動係数のパラメータに対して活断層の地理的位置によるガウス過程事前分布を導入し、変動係数の空間的分布を推定する研究を行った。地震調査委員会の手法では変動係数を全国一律として推定しているのに対して、本研究では活断層の密集地帯(近畿~飛騨)で変動係数が大きくなることを示した。

(2) 繰り返し小地震群の非定常時空間点過程モデルによる、プレート運動のモニタリング手法の提案

東日本大震災や南海トラフ地震を起こすプレート境界域には、小規模地震を数年スパン

で繰り返す震源が点在しており、その活動変化からプレート運動の変調を読み取ることができる。しかし、従来の研究では繰り返し地震の観測域近辺の局所的なプレート運動変化の議論に終始してきた。そこで本研究では、繰り返し小地震活動の発生過程をモデル化し、プレート境界全域における沈み込み速度の時空間的変動の推定手法を提案している。繰り返し地震系列の点過程モデルとしては繰り返し間隔に独立同一分布を仮定する更新過程がよく利用されているが、更新過程ではプレート沈み込み速度の変化に伴う繰り返し間隔の変化を表現することができない。そのため、時間変換を利用した非定常な更新過程を導入し、プレート沈み込み速度の時空間的変動を3次元 B スプライン関数により推定した。平滑化罰則付き尤度関数を用いてスプライン基底の係数を推定し、経験ベイズ法により平滑化罰則のハイパーパラメータを定めている。本モデルを用いてカリフォルニア州サンアンドレアス断層における大地震前、大地震後の繰り返し地震系列の解析を行い、大地震に先行した地震活動および余震活動が空間的に伝搬する様子を可視化することに成功している。さらに、大地震前後の沈み込み速度の変調を正確に捉えるため、節点配置を工夫し不連続または急激な変化を表現したスプライン関数で推定する手法を提案し、東北沖～北海道沖のプレート境界におけるプレート運動の時空間的変動を推定し、2004年釧路沖地震(M7.1)や東日本大震災の前に周辺域でプレート沈み込みが加速する様子などを捉えることに成功している。

(3) ロジスティック判別による前震群識別を利用した短期的本震予測モデルの提案

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。しかしながら、前震活動には他の地震活動に比べ、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が示される。そこで、これらの特徴量を用いて、非線形ロジスティック回帰モデルによる前震活動の識別モデルを提案し、将来1ヵ月程度の本震発生確率を予測する手法を提案し、2016年熊本地震の前震活動から M7 以上本震発生確率を見積もっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

[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. 査読付き論文.

[2]野村俊一, 尾形良彦 (2016). 2016年熊本地震(M7.3)の前震確率予測について Foreshock forecast probabilities of the M7.3 Kumamoto earthquake of 2016, 地震予知連絡会会報 第96巻, pp.652-657. 査読なし論文.

[3]野村俊一 (2015). 活断層で繰り返される地震の点過程モデルとその長期確率予測, 統計数理 第63巻 第1号, pp.83-104. 査読付き論文.

[4]Nomura, S., Ogata, Y. and Nadeau, R.M. (2014). Space-time model for repeating earthquakes and analysis of recurrence intervals on the San Andreas Fault near Parkfield, California, *Journal of Geophysical Research*, **119**, pp.7092-7122, doi:10.1002/2013JB010558. 査読付き論文.

[学会発表](計25件)

[1]野村俊一 (2017). ベイズ統計モデルを用いた活断層の長期予測, 「伊方サイトの確率的地震ハザード評価専門家会合」ワークショップ2, 電力中央研究所会議室, 千代田区, 2017年3月22日, 招待講演.

[2]Nomura, S. and Ogata, Y. (2017). Statistical Discrimination of Foreshocks and Real-time Mainshock Forecasting, 10th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei10)(第10回統計地震学国際ワークショップ), Museum of New Zealand Te Papa Tongarewa, ウェリントン, ニュージーランド, 2017年2月21日, ポスター発表.

[3]野村俊一 (2017). 相似地震に基づく東北沖の滑り速度の時空間分布 地域別の特徴およびGPSインバージョンとの比較, 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」, 防災科学技術研究所セミナー室, つくば市, 2017年1月30日, 一般講演.

[4]野村俊一, 尾形良彦 (2017). 地震群の規模と時空間配置情報を利用した前震判別モデルによる短期地震予測, 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」, 同志社大学今出川キャンパス 寧静館会議室, 京都市, 2017年1月29日, 一般講演.

[5]Nomura, S. and Ogata, Y. (2016). Real-time Mainshock Forecast by Statistical Discrimination of Foreshock Clusters, 2016 Fall Meeting of the

- American Geophysical Union(AGU)(米国地球物理学連合 2016 年秋季大会), Moscone Center, サンフランシスコ, アメリカ合衆国, 2016 年 12 月 13 日, ポスター発表.
- [6]野村俊一, 尾形良彦 (2016). 前震識別モデルによる 2016 年熊本地震の本震確率予測, 日本地震学会 2016 年度秋季大会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2016 年 10 月 5 日, 一般講演.
- [7]野村俊一, 尾形良彦, 内田直希, 松浦充宏 (2016). 局所不連続スプラインを用いた太平洋プレート沈み込み速度の時空間分布の推定, 2016 年度統計関連学会連合大会, 金沢大学角間キャンパス, 石川県金沢市, 2016 年 9 月 7 日, 一般講演.
- [8]野村俊一, 尾形良彦 (2016). 再来間隔のばらつきの空間的類似性を利用した活断層地震のベイズ型予測, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉市, 2016 年 5 月 23 日, 一般講演.
- [9]Nomura, S. and Ogata, Y. (2016). Spatial Distribution of the Coefficient of Variation and Bayesian Forecast for the Paleo-Earthquakes in Japan, European Geosciences Union(EGU) General Assembly 2016, Austria Center Vienna(ACV), Vienna, Austria, 2016 年 4 月 19 日, 一般講演.
- [10]野村俊一 (2016). 体型を示す新たな体組成指標の提案とそのダイナミクス, 科研基盤(A)シンポジウム「統計学と機械学習における数理とモデリング」, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都目黒区, 2016 年 2 月 22 日, 一般講演.
- [11]野村俊一 (2016). 局所分断スプライン関数によるプレート沈み込み速度の推定, 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」, 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター別館第一会議室, 仙台市, 2016 年 1 月 25 日, 一般講演.
- [12]野村俊一, 尾形良彦, 内田直希 (2015). 繰り返し地震群の点過程モデルから推定されるプレート運動の時空間変動, 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」, 同志社大学今出川キャンパス寧静館会議室, 京都市, 2015 年 12 月 25 日, 一般講演.
- [13]Nomura, S. and Ogata, Y. (2015). Spatial Distribution of the Coefficient of Variation for the Paleo-Earthquakes in Japan, 2015 Fall Meeting of the American Geophysical Union(AGU)(米国地球物理学連合 2015 年秋季大会), Moscone Center, サンフランシスコ, アメリカ合衆国, 2015 年 12 月 15 日, 一般講演.
- [14]野村俊一, 尾形良彦 (2015). 確率密度比推定を用いた前震識別と短期地震予測への実装, 日本地震学会 2015 年度秋季大会, 神戸国際会議場, 神戸市, 2015 年 10 月 27 日, 一般講演.
- [15]野村俊一, 尾形良彦 (2015). 前震のロジスティック判別による短期地震予測モデル, 2015 年度統計関連学会連合大会, 岡山大学津島キャンパス, 岡山県岡山市, 2015 年 9 月 7 日, 一般講演.
- [16]野村俊一 (2015). 前震群の識別条件の探索とその予測可能性, 東京大学地震研究所 第 6 回研究集会「日本における地震発生予測検証実験(CSEP-Japan)」, 統計数理研究所, 東京都立川市, 2015 年 7 月 24 日.
- [17]野村俊一 (2015). 確率密度比推定を用いた前震のリアルタイム識別, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉市, 2015 年 5 月 24 日, 一般講演.
- [18]Nomura, S. and Ogata, Y. (2015). Spatial variation on earthquake interevent time distribution in Japan, Hokudan 2015 International Symposium on Active Faulting (北淡国際活断層シンポジウム 2015), 兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 兵庫県淡路市, 2015 年 1 月 15 日, 招待講演.
- [19]Nomura, S., Ogata, Y. and Uchida, N. (2014). Space-time renewal model for repeating earthquakes and slow slip before and after the major earthquakes in the northeastern Japan subduction zone, 2014 Fall Meeting of the American Geophysical Union(AGU)(米国地球物理学連合 2014 年秋季大会), Moscone Center, サンフランシスコ, アメリカ合衆国, 2014 年 12 月 19 日, ポスター発表.
- [20]野村俊一, 尾形良彦, 内田直希 (2014). 相似地震の時空間更新過程モデルと東北日本沈み込み帯のスロースリップ, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 朱鷺メッセ・新潟コンベンションセンター, 新潟市, 2014 年 11 月 26 日, 一般講演.
- [21]野村俊一, 尾形良彦 (2014). 日本の内陸活断層における地震発生間隔のばらつきの空間分布推定, 2014 年度統計関連学会連合大会, 東京大学本郷キャンパス, 東京都文京区, 2014 年 9 月 14 日, 一般講演.
- [22]Nomura, S. (2014). Space-time Renewal Model for Repeating Earthquakes and Slip-rate History in the Northeastern Japan Subduction Zone, 2014 SCEC(Southern California Earthquake Center) Annual Meeting, Hilton Palm Springs, パームスプリングス, カリフォルニア州, アメリカ合衆国, 2014 年 9 月 7-10 日, ポスター発表.
- [23]Nomura, S. (2014). Real-time classifier of foreshocks using kernel logistic regression, Asia Oceania Geosciences Society(AOGS) 11th Annual

Meeting, ロイトン札幌, 北海道札幌市,
2014年7月30日, 招待講演.

[24]野村俊一, 尾形良彦 (2014). 日本の内
陸活断層における地震発生間隔の変動係
数の空間分布推定, 東京大学地震研究所
第5回研究集会「日本における地震発生予
測検証実験(CSEP-Japan)」, 東北大学地
震・噴火予知研究観測センター, 仙台市,
2014年7月10日.

[25]野村俊一, 尾形良彦 (2014). 地震の再
来間隔分布にかかる空間的変動と長期確
率予測への影響, 日本地球惑星科学連合
2014年大会, パシフィコ横浜, 横浜市,
2014年4月29日, 一般講演.

〔図書〕(計1件)

[1]野村俊一 (2016). カルマンフィルタ
Rを使った時系列予測と状態空間モデル,
共立出版, 168ページ, 統計学 One Point 2,
2016年9月, ISBN: 978-4-320-11253-7.

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 俊一 (NOMURA, Shunichi)
東京工業大学・情報理工学院・助教
研究者番号: 70719640

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

内田 直希 (UCHIDA, Naoki)
東北大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 80374908

尾形 良彦 (OGATA, Yoshihiko)
情報・システム研究機構・統計数理研究所・
名誉教授
研究者番号: 70000213

松浦 充宏 (MATSU'URA, Mitsuhiro)
情報・システム研究機構・統計数理研究所・
外来研究員 / 東京大学・大学院理学研究科・
名誉教授
研究者番号: 00114645