

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11722

研究課題名（和文）非定常な地震活動に対する点過程モデルと予測手法の開発

研究課題名（英文）Development of point process models and prediction methods for non-stationary seismic activity

研究代表者

野村 俊一（Nomura, Shunichi）

早稲田大学・商学大学院（会計研究科）・准教授（任期付）

研究者番号：70719640

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：プレート境界で準周期的に繰り返される中規模の繰り返し地震に対して、将来の発生確率を評価する予測手法を開発した。プレート境界の中規模の繰り返し地震活動は、周辺域で発生した大地震やプレート運動の変化に伴ってその周期を変化させている。本研究ではそのような周期変化に大森・宇津の余震減衰則やスプライン関数を適合させ、そこから将来の周期変化を予測し地震発生確率を評価する手法を提案した。提案手法を東北地方太平洋沖のプレート境界付近に点在する中規模の繰り返し地震群へと適用し、繰り返し系列毎に将来の地震発生確率を評価し、評価期間中の発生実績と検証した結果、本手法が妥当な予測を与えていることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大規模な繰り返し地震活動の予測手法は、周期が数十年から数万年にわたるため、予測の正しさを実績と照らし合わせて検証することが難しい。そこで、本研究では数年周期の中規模な繰り返し地震活動の予測へと焦点を当て、大地震やプレート運動による影響を考慮した予測手法を提案した。提案手法を実際の繰り返し地震のデータへ適用して将来にわたる地震発生確率を定期的に評価し、評価期間終了後に実績と照らし合わせた結果、妥当な予測が行えていることを実証することができた。

研究成果の概要（英文）：A forecasting method has been developed to estimate the future probability of occurrence of moderate recurrent earthquakes that occur quasi-periodically at plate boundaries. The recurrence intervals of moderate-sized recurrent earthquakes at plate boundaries are influenced by the occurrence of large earthquakes in the vicinity and by changes in plate motion. In this study, the Omori-Utsu aftershock decay law and spline functions are fitted to such changes in recurrence intervals to predict future changes and evaluate the probability of earthquake occurrence. The proposed method is applied to a group of medium-sized recurrent earthquakes on the subduction zone of the Pacific plate in the Tohoku region, and the future earthquake occurrence probability is evaluated for each recurrent earthquake series, which is verified with the actual occurrence during the evaluation period.

研究分野：統計地震学

キーワード：地震予測 繰り返し地震 更新過程 余震減衰 スプライン関数 BPT分布 点過程 時空間モデル

1. 研究開始当初の背景

国内の主要な活断層や海溝沿いのプレート境界で繰り返される大地震に対しては、政府機関の地震調査研究推進本部（地震本部）が活断層ごとに更新過程を適用して将来 10～300 年の地震発生確率を評価し一般公開している。これらの大地震は繰り返される周期がそれぞれ数十年から数万年と非常に長いため、予測が適切であったかを将来の地震活動から検証するには少なくとも数十年の期間を要する。そこで、気象庁ではプレート境界上の同一震源で数年周期に繰り返されているより小規模な繰り返し地震に対して、更新過程を用いた 1 年単位の予測実験を試行し、その評価結果を報告している。この予測実験は、一部の繰り返し地震で良い予測成績を示しているものの、東北沖の一部の繰り返し地震では 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の影響により繰り返し周期が非常に短くなっており悪い予測成績を示している。繰り返し地震の発生間隔は、周辺の大地震やスロースリップによる影響を受けて変化するため、それらの影響を考慮した予測が必要であるが、未だ実現はされていなかった。

地震活動の予測に用いられる点過程モデルは、最も単純なポアソン過程を除けば、活断層などの同一震源上で繰り返される地震に対する更新過程と、各地震の余震誘発効果を取り入れた ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) モデルとに大別される。前者の更新過程は、繰り返し地震の発生間隔が独立同一分布に従うとするモデルである。後者の ETAS モデルは、一定のバックグラウンド強度をもつポアソン過程に従う地震発生と、各地震の発生後からある減衰関数の強度に従う余震発生を同時に表したモデルである。いずれも時間軸上で定常なモデルであるが、近年の地震活動の解析および予測においては、より複雑な地震活動の非定常な挙動が課題となっている。

2. 研究の目的

同一震源上で周期的に繰り返される比較的小規模な繰り返し地震は、普段は周期的に発生しながらも、大地震やスロースリップなどの影響を受けて発生周期が大きく変化するため、発生間隔が同一分布に従うことを仮定する定常な更新過程では将来の地震発生確率を適切に評価できないケースが多数存在する。特に、東北沖の繰り返し地震群は 2011 年東北地方太平洋沖地震の影響により発生間隔が急激に短くなっている。このような繰り返し地震に対して、非定常な更新過程を適用し、発生周期の変化を推定・予測した上で将来の地震発生確率を評価する新たな予測手法を提案する。繰り返し地震系列ごとに将来一定期間の地震発生確率を評価し、予測期間経過後に提案手法の予測精度を検証する予測実験を行う。

3. 研究の方法

Nomura et al. (2017)にて開発した小～中規模の繰り返し地震活動に基づいてプレート間準静的滑り速度を B-スプライン関数で推定する非定常更新過程モデルの改良を行った。改良モデルでは、滑り速度の代わりに相対的な応力蓄積率の時空間変化を時間域の自然 3 次スプライン関数と空間域の薄板スプライン関数とのテンソル積で表現した上でベイズ事後確率最大化により推定している。さらに、正規近似した事後分布からの各サンプルについてスプライン関数を将来に渡って補外して応力蓄積率の将来推移を短期的に予測することで、繰り返し地震の将来発生時期に対するベイズ予測分布を算出し、そこから将来の一定期間における地震発生確率を評価することができる。

周辺で大地震が発生すると繰り返し地震の発生間隔は急激に短くなるが、大森・宇津の余震頻度則に沿った時間変換を施すと、時間変換後の発生間隔は周期的なものとなることが多い(図 1)。そのような繰り返し間隔の変化に対して、Nomura et al. (2014)は定常な更新過程に対して時間変化する応力蓄積率に比例した時間変換を施すことで得られる非定常更新過程を提案し、プレート境界に分布する繰り返し地震活動に適用することで相対的な蓄積率の時空間変化を推定している。本研究では、地震の余震誘発効果を取り入れた点過程である ETAS モデル (Ogata, 1988) の考え方をこの非定常更新過程に取り入れたモデルを提案した。Hawkes 過程の一種である ETAS モデルでは、点過程の条件付き強度が定数のバックグラウンド強度と各地震の余震誘発強度の和で表現される。提案モデルでは、上に述べた非定常更新過程の相対的な応力蓄積率の推移を、定数と大地震後の余震誘発効果の和で表現する。それにより将来の蓄積率の推移の予測が可能となるため、大地震後の余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測手法も同時に提案した。

4. 研究成果

提案手法を東北地方太平洋沖のプレート境界付近に点在する小～中規模の繰り返し地震群の 2014～2020 年の発生データへと適用し、当該期間中の相対的な応力蓄積率の時空間変動を推定した。図 2 は、スプライン関数で推定された相対的な蓄積率を年ごとに積分して得られた各年の平均値である。図から、2011 年東北地方太平洋沖地震後の相対的な蓄積率は、沿岸部ではまだ高い水準にあるものの、沖合いでは早いペースで減衰していることが分かった。さらに、2020 年中

の四半期毎の繰り返し地震発生確率を評価した上で発生実績との比較検証を行った。その結果、ポアソン過程に比べて十分に高い予測性能が示された。一方、繰り返し地震発生確率の値が四半期毎に安定せず大きくばらついてしまう課題が露わになった。そこで、応力蓄積率を表現するスプライン関数の時間推移に平滑化罰則だけでなく平均回帰を促進するL2 罰則項を加えることで、過去の時間推移だけでなく将来予測をより安定化した手法を開発した。

開発した予測手法を東北地方太平洋沖のプレート境界付近に分布するマグニチュード5 前後の6 つの中規模繰り返し地震系列へと適用し、2023 年1 月1 日からの1 年間および3 年間における系列ごとの地震発生確率を評価した。2024 年に入ってから2023 年中の繰り返し地震の予測をその発生実績と比較して提案手法の予測性能を評価した。その結果、昨年中の発生確率が約6 割であった1 系列で地震が発生し、昨年中の発生確率が5 割程度以内であった残り5 系列では地震が発生しなかった。さらに、従来の定常な更新過程に基づく予測手法と比べてもブライヤースコアや平均対数尤度において優れた予測性能を持つことが実証された。

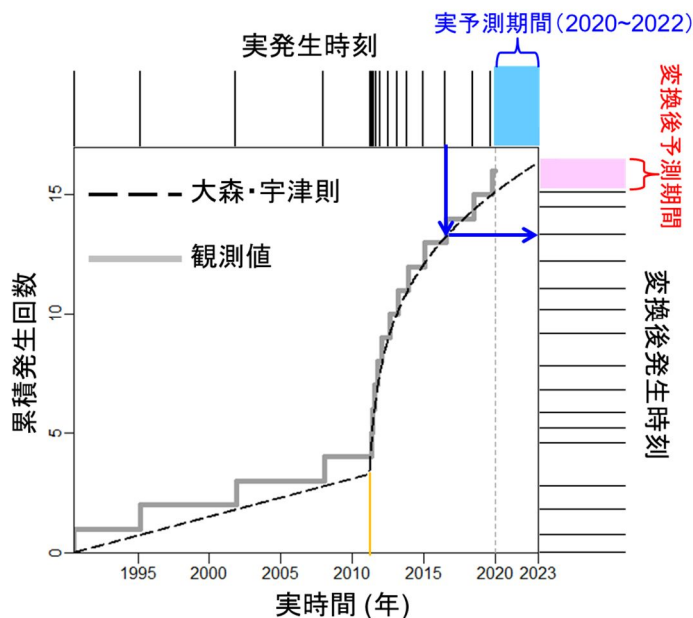


図1：2011年東北地方太平洋沖地震以降の大森・宇津則を考慮した繰り返し地震予測（釜石沖の例）

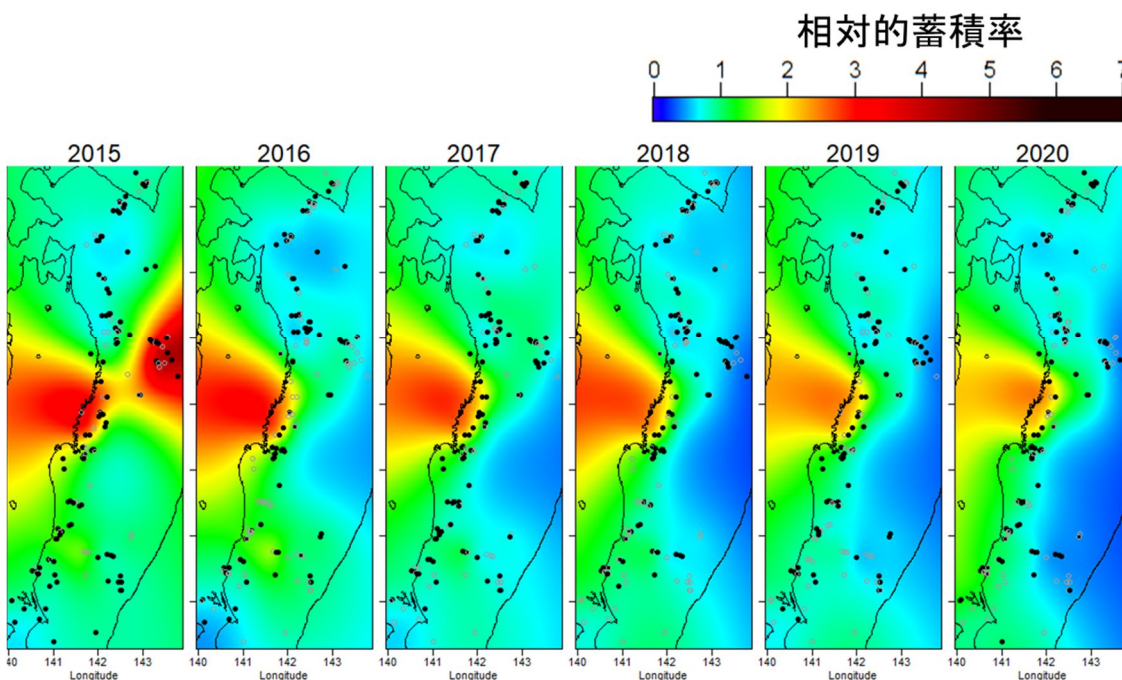


図2：東北地方太平洋沖に分布する繰り返し地震群から推定した相対的蓄積率の時空間推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 田中昌之	4. 巻 111
2. 論文標題 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率（2023）	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 地震予知連絡会会報	6. 最初と最後の頁 578-583
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 田中昌之	4. 巻 108
2. 論文標題 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率（2022）	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地震予知連絡会会報	6. 最初と最後の頁 608-612
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，田中昌之	4. 巻 69
2. 論文標題 余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 統計数理	6. 最初と最後の頁 239-254
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Nomura, S. and Tanaka, M.
2. 発表標題 Forecasting Repeating Earthquakes with a Nonstationary Renewal Process
3. 学会等名 27th APRIA 2023 Annual Conference（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中昌之
2. 発表標題 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率 (2024)
3. 学会等名 第242回地震予知連絡会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 プレート間非地震性すべり速度のトレンドを考慮した繰り返し地震の短期予測
3. 学会等名 2022年度研究集会「繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野村俊一, 田中昌之
2. 発表標題 非定常更新過程を用いた繰り返し地震予測
3. 学会等名 2022年度(第39回)待ち行列シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野村俊一, 内田直希, 尾形良彦
2. 発表標題 プレート間非地震性すべり速度の時空間変化を考慮した繰り返し地震の短期予測
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中昌之
2. 発表標題 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率 (2023)
3. 学会等名 第238回地震予知連絡会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Nomura and M. Tanaka
2. 発表標題 Nonstationary Renewal Model for Forecasting Repeating Earthquakes under Aftershock-Triggering Effects
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中昌之
2. 発表標題 中規模繰り返し相似地震と周辺の規模の大きな地震との態様について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Nomura
2. 発表標題 Modeling and Prediction of Recurrent Earthquakes
3. 学会等名 International Actuarial Association(IAA) ASTIN 2021 Online Colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Nomura and M. Tanaka
2. 発表標題 Nonstationary Renewal Model for Repeating Earthquakes Under Aftershock-Triggering Effects
3. 学会等名 AOGS 18th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Tanaka
2. 発表標題 Relationship Between The Moderate Repeating Earthquakes And The Larger-scale Earthquakes On The Trench Side
3. 学会等名 AOGS 18th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村俊一, 田中昌之
2. 発表標題 余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の非正常更新過程
3. 学会等名 2021年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 Stochastic Models and Forecasts for Repeating Earthquakes
3. 学会等名 地球科学データへの統計・数理手法適用に関するワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中昌之
2. 発表標題 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率 (2022)
3. 学会等名 第234回地震予知連絡会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村俊一, 田中昌之
2. 発表標題 余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測
3. 学会等名 ROIS-DS第1回成果報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村俊一, 田中昌之
2. 発表標題 余震誘発効果を考慮した非定常更新過程による繰り返し地震の予測
3. 学会等名 THK19繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村俊一
2. 発表標題 繰り返し地震に基づくプレート間滑り速度の時空間変動の逆推定
3. 学会等名 統計数理研究所 共同研究集会「諸科学における大規模データと統計数理モデリング」
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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 分担 者	田中 昌之 (Tanaka Masayuki) (10742728)	気象庁気象研究所・地震津波研究部・主任研究官 (82109)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------