

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	田中 宏樹
論文題目	Analysis of Hierarchical Structure of Seismic Activity: Bayesian Approach to Forecasting Earthquakes (地震活動の階層構造の解析: 地震予測に向けたベイズ的アプローチ)		
(論文内容の要旨)			
<p>地震活動の予測を精度良く行うことは、特に大地震の防災及び減災にとって重要である。そのために、地震観測網から得られるデータを最大限活用して地震活動の性質の理解を深め、地震の確率的な予測を精度良く行うための方法を開発することが必要となる。そのような動機から、本論文では地震活動のうち特にその階層構造に注目し、地震の時間間隔の統計の研究と、地震の確率予測手法の改善に向けたベイズ的な方法の提案と考察を行う。</p> <p>本論文は全6章で構成されている。</p> <p>第1章では、地震活動の様子を地震カタログにより概観し、地震活動がマグニチュードを重みとする時空間の重み付き点過程で表現されることを述べる。一見して複雑な地震活動の中に普遍的に確認される統計法則であるGutenberg-Richter則と大森-宇津則について説明する。それらの統計法則の組み合わせで表される確率過程モデルであるETASモデル(Epidemic-Type Aftershock Sequence モデル)について説明する。ETASモデルは、実際の地震活動をよく再現することができる重み付き点過程モデルとして知られ、地震の確率予測と地震活動の統計性質の議論に用いられる。従来、地震発生を確率的に予測するには2通りのアプローチが知られている。</p> <p>(1)地震活動をETASモデルなどの点過程モデルで表し、条件付き強度関数でリスク評価する。</p> <p>(2)重み付き点過程に閾値マグニチュードを設けて得られる点過程を更新過程とみなす。</p> <p>しかし、方法(1)には地震活動とそれに引き続く大地震の発生確率の間に相関が仮定されないという問題がある。また(2)には閾値マグニチュードよりも小さい地震のデータを活用できないという問題があり、そうしたデータを組み込む方法が必要であることを指摘する。(2)の更新過程による予測のアプローチの基礎となる時間間隔分布は、地震活動の統計的性質の理解においても重要な役割を担う。そのような時間間隔分布の性質のうち、特に地震活動の時間的性質の階層構造の性質に関連する性質である、マルチフラクタル関係とスケーリング普遍性について述べる。これらの性質の理解には地震活動の階層性を取り扱い、時間間隔分布について議論できるような理論的枠組みが必要となることを指摘する。</p> <p>以上の点を踏まえ、第1章では本論文の目的を述べる。すなわち、地震活動を表す重み付き点過程の階層構造の性質を検討するための新しい方法を提案し、時間間隔分布のマルチフラクタル性とスケーリング普遍性の性質について理解を深めること、また、新たに導入した方法を確率予測における問題点を克服すべく、(2)の更新過程のアプローチにベイズ的な方法を適用することを提案し、その有効性についての議論と実際の地震活動への応用を見据えた検討を行うことである。</p>			

第2章では、本論文を通して地震活動の階層構造を扱うための基礎となる条件付き確率とそれを核として持つ積分方程式を導入する。この条件付き確率は、重み付き点過程に設定された異なる二つの閾値マグニチュードにおける時間間隔の間の統計的関係を与えることで時系列の階層構造を特徴づけ、積分方程式はその解として時間間隔分布を持つことから、時間間隔分布の性質を議論することができる。

第3章では、第2章で導入した条件付き確率および積分方程式から、地震予測の更新過程アプローチを改善するベイズ的な手法を提案する。条件付き確率についてのベイズの定理を解析的に導き、その拡張であるベイズ更新を定常ポアソン過程において理論的に考察する。本章で議論するベイズ的アプローチは更新過程アプローチを改善する形をしているが、事前確率をETASモデルの条件付き強度関数に置き換えることで点過程アプローチの問題点を改善する可能性についても指摘する。

第4章では、第3章でマグニチュードの時系列について考察したベイズ的なアプローチを時空間での重み付き点過程に理論的に拡張する。特に時間-空間の相互作用の確率予測への影響を検討し、地震活動の静穏化や空白域を定量的に地震予測へ取り込む可能性について議論する。

第5章では、第3章で提案したベイズ的なアプローチを実際の地震活動の時系列を用いて解析する。最も簡単なベイズの定理に現れる条件付き確率・時間間隔分布および逆確率の性質を、地震活動を発生レートで変換した時系列を用いて解析する。時間間隔分布のスケーリング普遍性の階層構造への拡張可能性から、第3章での地震予測のベイズ的アプローチを、非定常な時系列においても有効に行う方法について議論する。

第6章では本論文のまとめを行い、本研究で提案した確率予測におけるベイズ的アプローチを実際の地震活動へ応用する上での課題について述べる。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、主に地震の時間間隔分布を調べ、時系列の階層構造(マグニチュード閾値依存性)を基礎付けるとともに、閾値マグニチュード未満の小イベントの情報を予測に活用する方法を提案し、地震確率予測の改善を行った。本研究で得られた主な研究成果は以下の通りである。

1. 地震活動の階層構造を取り扱う道具として、条件付き確率と積分方程式の提案を行った。この条件付き確率の性質をカタログ解析で調べ、積分方程式から時間間隔分布の階層性についての経験則であるWeibullパラメータのマグニチュード依存性を定性的に説明した。
2. 1.の結果に基づく大イベント発生時刻を予測するベイズ的方法を提案し、理論・数値解析を行った。
3. 2.のベイズ的予測方法の時空間での重み付き点過程への理論的拡張を行った。特に時間-空間の相互作用の確率予測への影響を検討し、地震活動の静穏化や空白域を定量的に地震予測へ取り込む可能性を示した。
4. 2.のベイズ的予測方法を用いて地震カタログに対して解析を行った。従来、量子カオスの分野で用いられていたアンフォールディング変換を地震時系列に対して適用することにより、非定常な時系列へのベイズ更新を可能とし、条件付き確率に関する新しいスケール則を見出し、条件付き確率・時間間隔分布・逆確率のそれぞれの特徴を導出した。

以上、本論文は、地震活動の階層構造を取り扱うベイズ的予測方法を提案し、カタログ解析により、提案手法の妥当性を示すとともに、従来の点過程アプローチが取り扱うことができない時系列の階層性と非定常性を取り扱うことに成功した。

これらの結果は、従来のETASモデル等の点過程モデルが抱えていた、マグニチュードなどの地震活動と引き続く地震活動の独立性を持つという問題を解決しうるものであり、評価できる。

以上により、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月19日に実施した論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。