

氏 名 熊澤 貴雄

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 1503 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 複合科学研究科 統計科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Detecting misfits of the ETAS for seismicity anomalies

論文審査委員 主 査 教授 田村 義保
教授 尾形 良彦
准教授 庄 建倉
准教授 井出 哲 東京大学
准教授 遠田 晋次 京都大学

論文内容の要旨

The ETAS model is a point process model to describe the triggering effects on offspring events. It provides good prediction when the underlying mechanism, or the parameter set of the ETAS model, is uniform over the focal period. This suggests that, when an estimate deviates wildly from the observation, we can suspect that there are changes in mechanisms along time. My research focuses on this deviation, or misfit, of the ETAS model to identify the cause of the disturbance.

Changes in seismicity often caused by external stress changes (Δ CFS) transferred from nearby faults' activities. Movements in different faults affect differently, hence it is possible to speculate which fault is the major cause of an observed misfit. Any supporting observation other than ETAS model must be followed. Once we suspect a fault is slipping, we could prepare for upcoming earthquakes in that fault or in nearby faults potentially triggered by it. In chapter2, we applied this methodology to, although retrospectively, the 2008 Iwate Miyagi earthquake of magnitude 7.0. With careful partitioning of the regions around the source fault of the earthquake, by checking the misfit of the ETAS estimation in each region, we found that, among the two fragments of the fault, the southern fragment had slipped some years before the main shock. More careful examination suggested that the center of the slip moved deeper along the fault afterward, right before the main shock. These fault activities are also supported by the crustal deformation around the fault, observed by GPS network.

The method we adopted for examining the ETAS misfits in chapter2 is the change-point analysis. Here we assumed that the parameters change abruptly at certain time, and checked if fitting the ETAS model separately before and after that time improves the model in statistical sense, by AIC. The timing of optimal significant change-point and the direction of diversion are compared with the Δ CFS caused by the southern fragment of the fault in each region.

This simple method does not suit the case when we have good reasons to guess that the parameters change gradually over time, or that too many disturbances are involved for the change-point method to be carried out. For such cases we suggest to use a misfit function, which measures diversions of the ETAS estimation from data along time. Such a misfit function is estimated as the best modifier to the ETAS model in a given framework. In chapter3 we proposed two types of misfit functions; one modifies the ETAS intensity by multiplying some number at each occurrence time of event. The other modifies only the background seismicity, again by multiplying some number at each event time. Since the number of parameters for these modifiers, or misfit functions, is large, we used Bayesian smoothing method. The major difference in these functions is that the second function reflects changes only in background seismicity.

We then applied these methods to various complicated cases, include the data sets contain very short periods of earthquake swarms, over 100 years of large earthquake observations over all Japan, and some earthquake clusters triggered by the 2011 Tohoku-oki earthquake of the magnitude 9.0. Unlike the conclusive examination in chapter2, the applications here were experimental.

博士論文の審査結果の要旨

博士論文審査委員会は熊澤貴雄氏の学位申請論文の審査を1月17日午後1時30より約1.5時間にわたり行い審議の結果申請論文は学位の要件を満たしていると判断した。その概要は下記の通りである。

論文の概要

大地震は多くの地震（余震）を誘発し、小地震でもそれなりに誘発し、時には自分より大きい地震も誘発する。Epidemic-type aftershock sequence (ETAS) モデルは、一連の地震活動を予測発生率で表現した点過程モデルである。このモデルは余震・群発地震などの連鎖する地震活動の短期予測や地震活動の異常を検出する解析の物差しとして使われている。熊沢君の博士申請論文は ETAS モデル適用の実証的な研究および ETAS モデル予測からの不適合性と非定常性の推定のためのモデリングとデータ解析の実証的な研究を行っている。以下オリジナルな2つの結果（章）の概略を記す。

変化点解析のモデル選択による地震活動変化の検証とその実証的研究（2章）

点過程 ETAS モデルを適用して地震活動の変化を検出している。ある時間（変化点）でデータを区切り、その前後で地震活動の様式が有意に変わっているか（活発化や静穏化）を赤池情報量規準（AIC）の変化点用改訂版を使って解析し、推定変化点の不確実性の分布も求めている。この手法によって2008年岩手県宮城県内陸部地震（M7.2）発生に先駆け数年前後で東北地方および周辺部の各地域の地震活動の変化を見出した。この活発化または静穏化の変化は、本震の一部断層において前駆的に非地震性すべりがあったと仮定した場合の各周辺地域での応力変化や地震活動の変化パターンと一致するものであった。この「すべり」はGPSによる地表変動の観測からも支持された。

ETAS モデルからの逸脱度と非定常性のモデリングとその実証的研究（3章）

ETAS モデルの予測が観測から偏って外れる場合は、地震の発生様式に何らかの一時的な外因性変化が介在していることを示唆する。これらは2章のように変化点解析で取り扱えることもあるが、異常が短期間に終了する場合あるいは時間と共に変化する非定常な成分がある場合がある。これらが具体的にどのような変化であるかを調べたい。ETAS モデルからの逸脱度を測る二種類の関数を考え、これらを ABIC に基づいたベイズ的平滑化法などによって推定した。解析例として、非地震性「すべり」に伴う房総半島沖や東京湾の群発地震を含む地震活動、2011年3月11日の東北沖の超巨大地震によって誘発された東北地方・中部地方内陸部の地震活動の推移や、巨大地震前の85年間に渡る日本列島における長期的地震活動などへ適用し、静穏化や活発化、および非定常性を量的に明示している。

論文の評価

2章で求めた赤池情報量規準（AIC）における変化点パラメタの為のペナルティは先行論文の誤りを修正したものであり、変化点の推定誤差も独自のものである。断層の一部での

地震前の「非地震性すべり」の作業仮説をたて、応力場の増減変化で地域分けした地震活動を ETAS モデルで岩手宮城内陸部地震の前の東北地方周辺の地震発生パターンの変化を客観的に検証することに成功している。また、このケースでは GPS 観測定点や臨時観測点が当該断層直上に乗っていたため明瞭な地表移動が観測されており、内陸地震の地震前の非地震性「すべり」が直接的に捉えられた例として特筆される。このように、地震活動解析と測地学的解析を相補的に用いることで地殻内のストレス変化の把握の向上が期待できることを示したことは高く評価できる。

2章を取りまとめた論文が *Journal of Geophysical Research* の電子版に 2010 年 10 月 30 日に掲載されたが、一週間でダウンロード数が 600 回を超え、アメリカ地球物理学会 (AGU) 発行の全分野の学術誌のなかで「Most Popular Journal Article」としてトップ 4 に入るなど、関連研究者からの関心を集めていることも高く評価できる。

地震活動に火山地帯のマグマや地殻の断層間隙での水圧変化など、外力に起因する群発地震等が混じる場合、標準の ETAS モデルでは予測が正しく機能しないことが分かっている。3章で提案された 2 種類のモデリングとベイズ法による推定は熊澤氏が独自に提案したものであり、統計地震学や地震活動の研究分野での先駆的研究と認めることができる。これらの手法により、標準 ETAS モデルのみでは評価の難しい活動異常の詳細な推定を可能としている。熊澤氏が解析した、東北沖巨大地震で誘発された内陸部の地震活動の多くがこのタイプの活動であるのは興味深いことである。また、巨大地震前の長期的地震活動にあてはめ、3章の方法で追試し、静穏化・活発化を明示している結果も重要であり、地震の確率予測の改善と実用化へ繋がる可能性もあるものと思われる。

以上から、博士論文審査委員会は、申請者の学位請求論文が学位に十分値する水準にあると全員一致で判定した。