## 12 – 11 日本周辺の海溝における準リアルタイム群発地震モニタリング Semi-realtime monitoring of earthquake swarm activities in subduction zones around Japan

西川友章(京都大学防災研究所) Tomoaki Nishikawa (DPRI, Kyoto University)

異常な地震活動を検出し、モニタリングすることは地震活動を支配する物理を理解する上で重要である。2011 年東北地方太平洋沖地震や 2014 年チリ・イキケ地震の数週間前には、通常の本震-余震系列とは異なる群発的な地震活動が観測された。また、スロースリップイベントや流体移動など、大規模な非地震性現象が群発的な地震活動を誘発することがあることも知られている。このことから、異常な地震活動をリアルタイムでモニタリングすることは、大地震の前駆的活動や非地震性現象を即時に検出することに役立つことが期待される。そこで、本研究は Epidemic-type aftershock-sequence (ETAS) モデル りを用い、異常な地震活動、特に群発地震活動を準リアルタイムでモニタリングするシステムを構築した。また、このシステムを 2019 年 4 月から現在 (2019 年 11 月)まで継続的に運用した。

ETAS モデルは、地震発生レートを定常背景レートと余震の大森・宇津公式の重ね合わせで表現するモデルである。本研究は、ETAS モデルから予測される地震発生数と実際に観測された地震発生数を比較することで地震活動の異常性を評価し、群発地震を検出する。本研究では、日本周辺の5つの海溝(日本海溝、千島海溝、南海トラフ、琉球海溝、伊豆海溝)における地震活動を解析の対象とし、これらの海溝を全11個の解析領域に分割した。例えば、日本海溝は茨城沖、宮城沖、三陸沖の3領域に、南海トラフは東海・東南海、南海の2領域に分割した。これに加え、2016年熊本地震震源域周辺、2019年山形県沖の地震震源域周辺、京都周辺の3領域も解析した。

まず、各解析領域内で過去(日本海溝では過去 1 年間、日本海溝以外の海溝では過去 3 年間、熊本、山形県沖、京都では過去 20 年間)に発生した  $M_j$  3 以上の地震を気象庁一元化地震カタログと最近の地震活動(速報値)から抽出し、ETAS モデルの 5 つのパラメタ  $(\mu, \alpha, c, K, p)$  を推定する、次に各領域内で ETAS モデルから予測される地震発生数(変換時間) $^{11}$ を計算する。最後に実際に観測された地震発生数と予測される地震発生数を比較し、ETAS モデルにより実際に観測された地震発生数以上の地震発生数を実現できる確率を計算する。具体的な確率の計算の手順は以下の通りである。

- 1. 解析の対象とする地震(ターゲット地震)をひとつ選ぶ.
- 2. ターゲット地震から 20 個前までの各地震に対して、その地震からターゲット地震発生時刻まで、地震発生レートを時間積分し、変換時間 (transformed time) を計算する.
- 3. 計算された変換時間を期待値とするポアソン分布を用いて、実際に観測された地震発生数以上の地震発生数が実現される確率を計算する.
- 4. 2と3の計算をターゲット地震から20個前までの地震全てに繰り返し、20個の確率のうち最も小さいものをターゲット地震に割りあてる.
- 5. 1-5 の手順を領域内の全ての地震に繰り返す.

上記の解析を過去のいくつかの大地震の前震活動や、大規模な非地震性現象に伴う地震活動に適用し、本システムがこれらの地震活動を異常な地震活動 (ETAS モデルにより実現できる確率が顕著に低い活動)として検出できるか確認した。その結果、1982年、2008年 $M_j$ 7.0 茨城県沖地震の直前数日間の地震活動は 0.01%以下、1996年10月 $M_j$ 6.9日向灘の地震の直前数日間の地震活動は 0.1%以下の確率を示した。2011年東北地方太平洋沖地震前の2月から3月6日までの地震活動は ETAS モデルで実現できる確率が 0.15% であり、比較的異常な活動であった。また、2018年6月の 房総沖スロースリップイベントに伴う地震活動も 0.01% 以下の顕著に低い確率を示した。

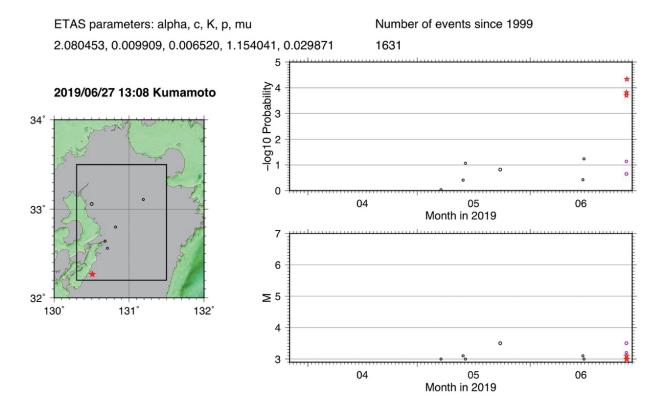
以上の解析を全 13 領域において 4 時間ごとに自動で繰り返すシステムを構築し、2019 年 4 月から現在 (2019 年 11 月) まで継続的に運用した。解析結果は Web ページ上で公開している (https://sites.google.com/site/tomoakinishikawahomepage/home/ 今日の地震活動)。2019 年 4 月から 9 月までの半年間では、顕著な異常が見られた回数(ETAS モデルで実現できる可能性が  $10^3$  以下)は 6 回であり、うち 6 月の熊本県芦北町 ( $10^4$  以下)(第 1 図)と 9 月の種子島東方沖 ( $10^3$  以下)(第 2 図)の地震活動では震央が 10 km 程度の範囲でクラスタリングした。これらの地震活動は ETAS モデルで実現できる確率が極めて低く、何らかの非地震性現象に誘発されていた可能性もあるが、詳細は明らかではない。また、2019 年 4 月から 9 月までの半年間には  $M_j$  7.0 以上の大地震は解析領域内で発生しておらず、顕著な異常が見られた全 6 回のうち  $M_j$  7.0 以上の大地震の前震活動であったものは 0 回であった。

2019年12月以降も本システムを継続的に運用し、大地震の前駆的活動や大規模な非地震性現象を準リアルタイムで捉えることを目指す。一方、大地震前に必ず異常な地震活動が発生するわけでも、異常な地震活動があれば必ず大地震が発生するわけでもないということには注意が必要である。今後、過去の大地震前の地震活動に基づき、大地震予測に対する本システムの有用性を定量的に評価する予定である。

謝辞:本資料では、気象庁一元化地震カタログと最近の地震活動(速報値)を使用しました. 記して感謝申し上げます.

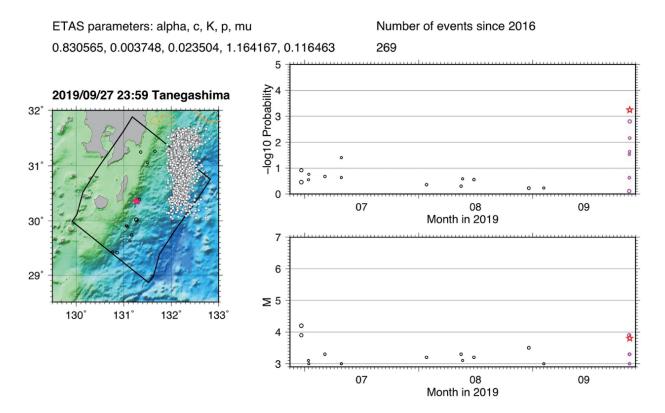
## 参考文献

1) Ogata, Y. (1988). J. Am. Stat. Assoc., 83(401), 9-27, doi:10.1080/01621459.1988.10478560.



第1図 2019年6月熊本県芦北町の群発地震活動. 左図は2019年6月27日から三ヶ月前までの震央分布(黒丸). 赤紫色の丸は2019年6月27日から3日前までの地震. 赤い星は、ETAS モデルにより実現できる確率が $10^3$ 以下であった地震. 黒い実線は解析領域を示す. 右上図はETAS により実現できる確率の時間変化. 右下図はマグニチュード - 時間ダイアグラム.

Fig. 1 An earthquake swarm activity in the Kumamoto study region in June 2019. The left panel shows epicentral distribution (black circles) on and before 27 June 2019. Magenta circles show epicentral distribution on 27 June 2019 and in the preceding three days. Red stars indicate earthquakes whose probability that the ETAS model can realize the seismic sequence is lower than 10<sup>-3</sup>. The black solid line indicates the Kumamoto study region. The right upper panel shows the temporal change of the probability. The right bottom panel shows the magnitude-time diagram.



第2図 2019年9月種子島東方沖の群発地震活動. 左図は2019年9月27日から三ヶ月前までの震央分布(黒丸). 赤紫色の丸は2019年9月27日から3日前までの地震. 赤い星は, ETAS モデルにより実現できる確率が10<sup>3</sup>以下であった地震. 黒い実線は解析領域を示す. 白い四角は Yamashita et al. (2015) によって検出された微動の震央. 黄色い実線は南海トラフの地震発生帯と, Yagi et al. (1999) によって推定された1996年10月と同年12月の日向灘の地震のすべり分布. 右上図はETAS により実現できる確率の時間変化. 右下図はマグニチュード - 時間ダイアグラム.

Fig 2 An earthquake swarm activity in the Tanegashima study region in September 2019. The left panel shows epicentral distribution (black circles) on and before 27 September 2019. Magenta circles show epicentral distribution on 27 September 2019 and in the preceding three days. Red stars indicate earthquakes whose probability that the ETAS model can realize the seismic sequence is lower than 10<sup>-3</sup>. The black solid line indicates the Tanegashima study region. White squares indicate tectonic tremors detected by Yamashita et al. (2015). Orange solid lines represent the seismogenic zone of the Nankai Trough and the slip distribution of the 1996 October and December Hyuganada earthquakes (Yagi et al., 1999). The right upper panel shows the temporal change of the probability. The right bottom panel shows the magnitude-time diagram.