

# 非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化

## Changing features revealed from the non-stationary ETAS model in regional earthquake swarm activity of the Noto Peninsula

東京大学地震研究所  
統計数理研究所

Earthquake Research Institute, University of Tokyo  
The Institute of Statistical Mathematics

石川県能登半島では2018年ごろから地震回数が増加傾向にあり(第1-III図), 2020年11月末から地震活動が活発化して現在に至っている. これらの活動は大きく4つの震央クラスターに分かれ(第1図(I)), 従来から活動していた領域B(第1図(II))では2020年11月末に14km以深へ移動した. 以降, 他3領域でC, A, D順に発化している(第1図(III)). 2021年11月6日時点での最大地震は2021年9月16日に領域Dで発生したM<sub>j</sub>5.1である. GNSS観測では2020年11月末頃から非定常な変化(第1図(VI))が見られ, 輪島2-珠洲観測点および珠洲-舳倉島観測点の基線距離で約1cm程度の増加, 及び珠洲観測点の舳倉島との比高ではバラツキ誤差が大きいが3cm程度の隆起が観測されている(第1図(VI)).

領域A~Dの群発地震活動に非定常ETASモデル<sup>1)</sup>を当てはめた(第1図(IV)). このモデルは従来のETASモデルの背景強度 $\mu$ と余震的誘発率 $K_0$ のパラメータが, 次のように時間 $t$ に依存すると仮定し, これらをベイズ法で推定した.

$$\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu(t) + \sum_{\{i:t_i < t\}} \frac{K_0(t_i)e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p}. \quad (1)$$

背景強度 $\mu(t)$ は対象領域全般のゆっくりした応力変化や流体貫入による断層弱化などに起因すると考えられる. 余震的誘発率 $K_0(t_i)$ は主に領域内の先行地震による連鎖効果の変化(余震的誘発率)を示す.

領域Bは深さ14kmを境にBs(0~14km)とBd(14~30km)に分けて解析した(第1図(II)). 浅部Bsの活動は初め領域の中央付近に分布していたが, 2020年に入って活動が北東の方向へと移動し, 2020年11月30日に活動が深部Bdへ移動した際に静穏化した(第1図(IV)). 同時に深部Bdでは, 浅部Bs中央部分の地震群を囲むように, ドーナツ状に活発化し(第2-II図), 背景強度は現在に至るまで増加傾向にある(第1図(IV)). これらの詳細な活動の時空間的特徴は第2図および第3図を参照.

領域Bの深部(Bd)の活発化以降一ヵ月以上経って, 他の領域にも少しずつ地震活動が現れるようになり(M1以上に限定した場合, 以降で最初の地震はA:1月2日, C:1月20日, D:1月12

日)、さらに領域 Bd の活発化から2ヵ月から3ヵ月遅れて領域 C の活動度が上がり、次いで領域 A および D の地震活動度が順次上昇した(第1図(III))。

領域 C の背景強度は2020年6月~8月のピーク時から現在は鈍化し横ばい状態である。領域 A では4領域の群発活動の中で最も活動度が高く、M1以上の地震数は全体の約半数を占め、M4以上の地震は全て今年の6月以降11月6日までに計6回発生して、その内3回は10月以降に起こっており、背景強度も2021年9月のピーク時から依然として高い値を維持している(第2図A域)。領域 D は今年の8月から急速に活発度が上がり、9月16日に最大地震のM5.1が発生した。この時に背景強度がピークに達している。累計地震数は他領域と比べて高くないが、背景強度は依然として高い状態を保っている(第2図D域)。各領域の背景強度の変化(第1図(V))、および各領域の背景強度と余震強度の相対的な時空間変化パターンを見たのがそれぞれ第2図と第3図である。ここで特筆すべき特徴は B 領域内における浅部と深部の震央分布間(第1図(II))の特徴と誘発係数  $K_0$  値の相違の明瞭な対応関係(第3図B域)であろう。

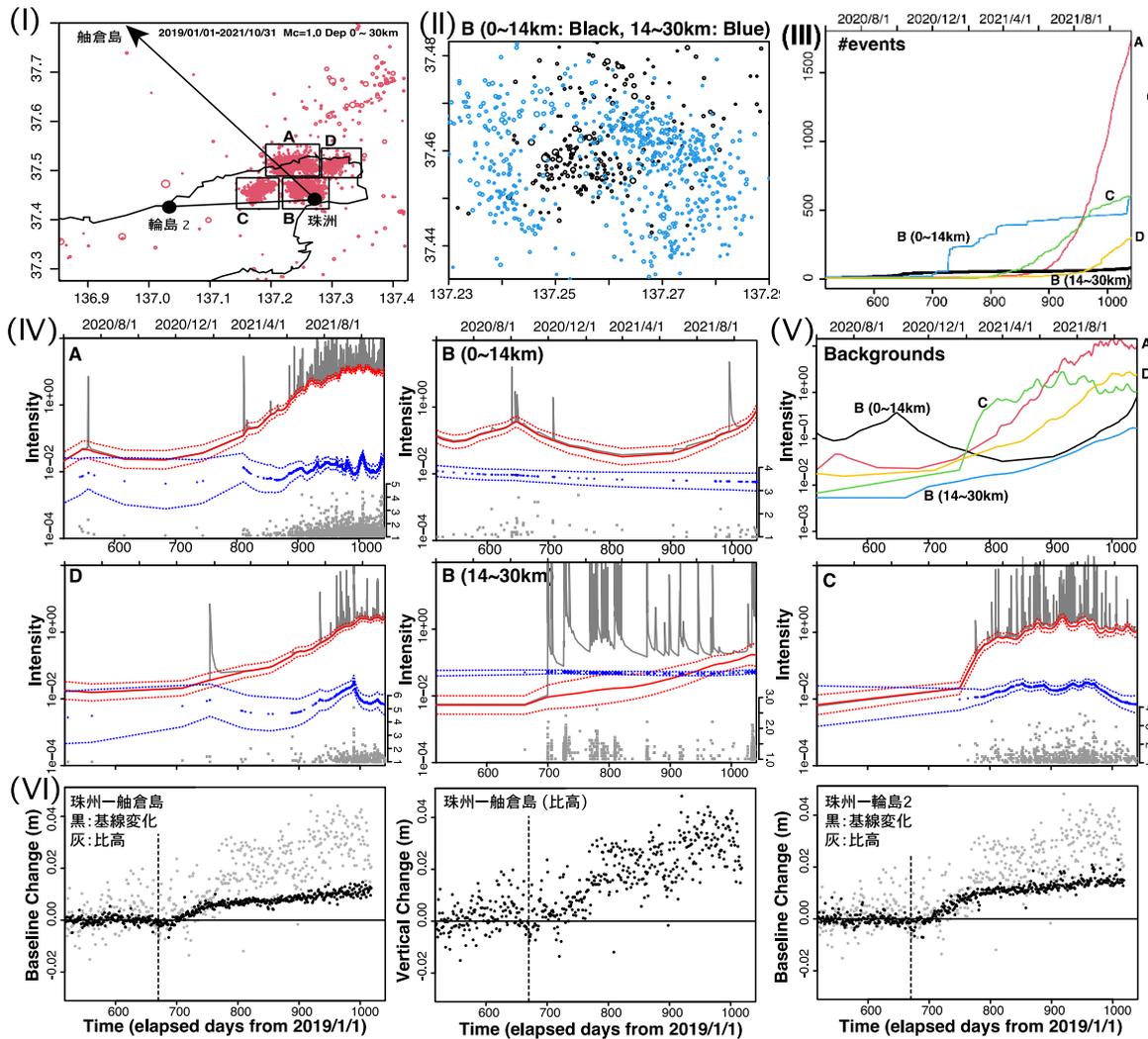
各領域の地殻変化を良く反映していると思われる以下の GNSS 観測時系列を図示した(第1図(VI))。すなわち、領域 A を跨ぐ珠洲-舢倉島基線、領域 B の珠洲-舢倉島比高、領域 B と C を跨ぐ珠洲-輪島基線である。領域 A、D、B の背景強度変化の仕方は珠洲観測所の比高時系列に相似し、領域 C の背景強度変化は珠洲-輪島基線距離の時系列に相似し、いずれも GNSS 時系列が背景強度変化に先行している。すなわち領域 C の領域直上を跨ぐ珠洲-輪島2のトレンドを除去した基線距離変化は最初急速に増えた後ゆっくり増加し、これに対して遅れて C 地域の背景強度が同様な形で変化している。また珠洲観測所の舢倉島比高変化のトレンドを除去時系列は、ゆっくり増加して頭打ちしているが、A 地域、D 地域および B 地域深部の  $\mu$  値変化が時間遅れで同様に変化している。

本解析に関して気象庁震源カタログ、地震活動可視化システムTSEIS、および国土地理院地殻変動情報表示のGEONETデータを使用した。

(熊澤貴雄, 尾形良彦)

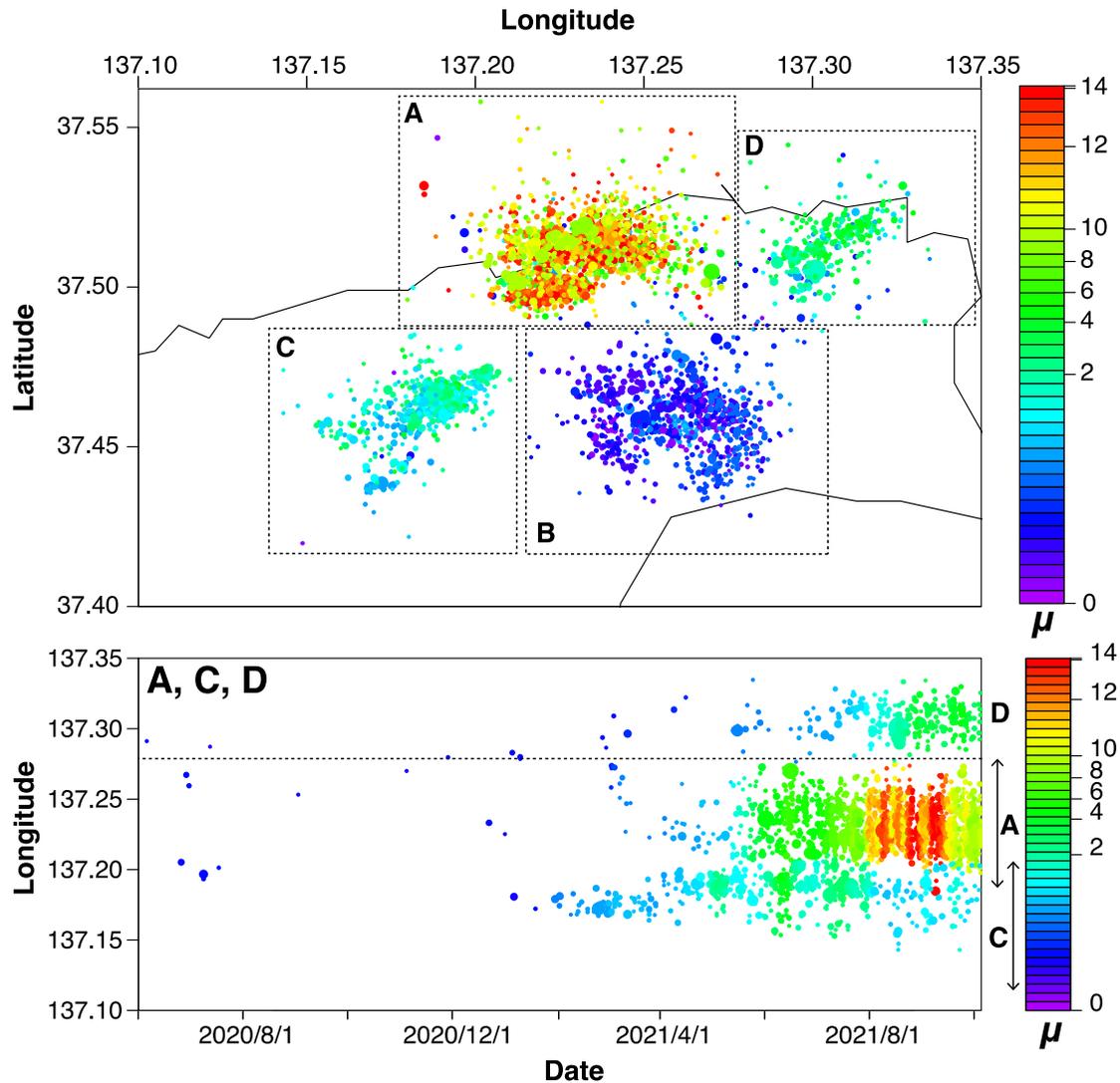
#### 参考文献

- 1) Kumazawa T, Ogata Y (2013), Quantitative description of induced seismic activity before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake by nonstationary ETAS models, *J Geophys. Res. Solid Earth* **118** (12): 6165–6182. <http://doi.wiley.com/10.1002/2013JB010259>



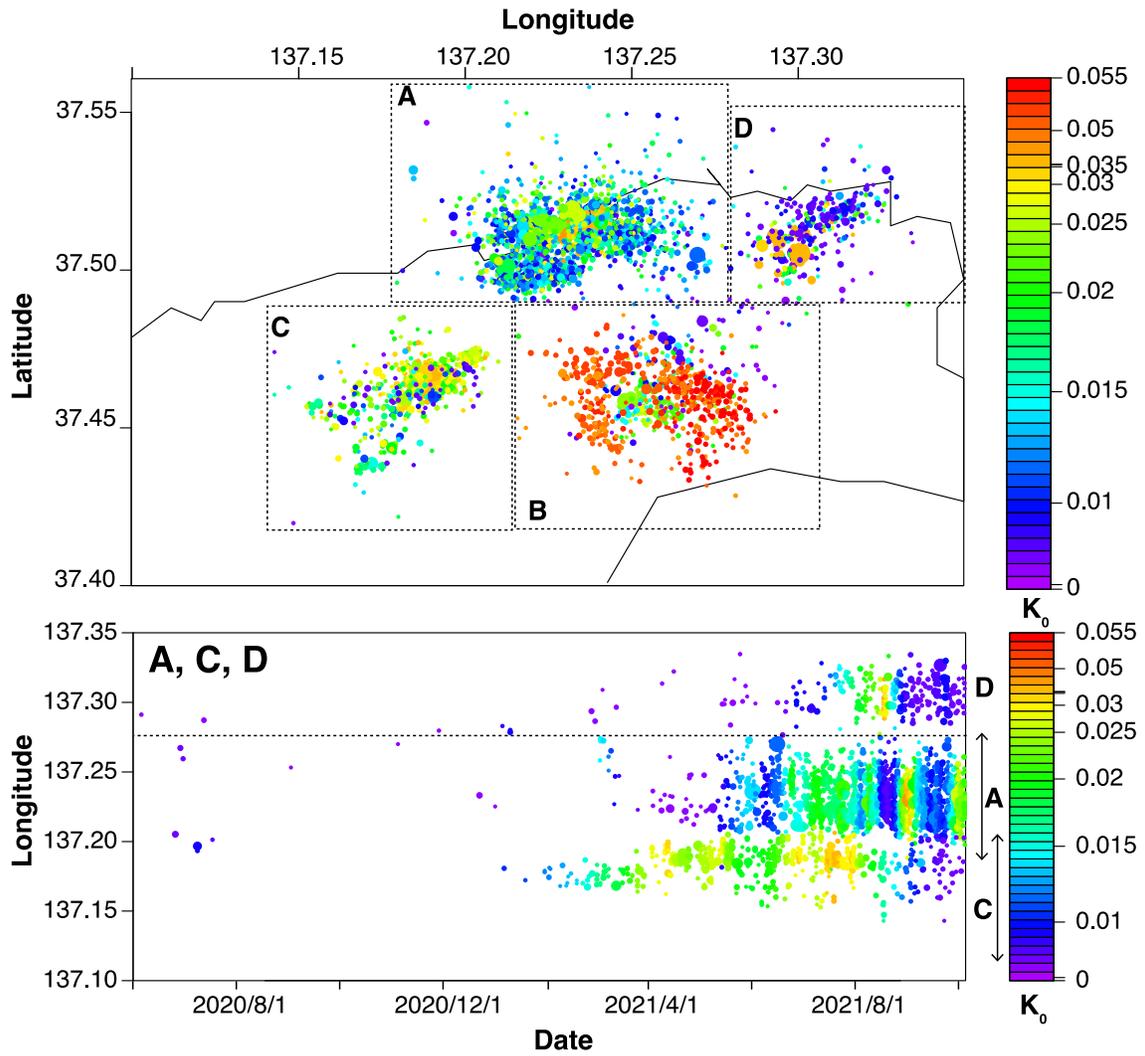
第1図 石川県能登半島の群発地震活動と GNSS 時系列。(I) 赤丸は2018年以降、深さ30kmまでの震央分布。矩形 A, B, C, D は解析の領域分け。黒丸はこれらの領域の最近接の電子基準点を示す。(II) 領域 B 内の深さ別震央分布。(III) 領域別の2020年6月1日からのM1.0以上の地震累積数。(IV) 非定常 ETAS モデルによる解析結果。解析には2018/1/1から2021/11/6まで、深さ30km以浅の地震を使った。赤線と青線はそれぞれ背景強度と余震誘発強度の時間変化、及び其々の95%信頼区間(点線)。灰色のスパイク状曲線は非定常 ETAS モデルの強度変化。各パネルの下部の灰色点は M-T プロット。(V) 各領域での背景強度変化の絶対スケール比較。(VI) 各領域直上を跨ぐ GNSS 基線の距離や珠洲観測所の比高変化(日単位)の時系列。それぞれ2018年から2020年10月末(縦破線)までの定常(一次)トレンドを除去した。GNSS データは国土地理院ホームページから11月10日に取得。

Fig. 1 Swarm seismic activity and GNSS time series in the Noto Peninsula, Ishikawa Prefecture, Japan, and analyzed results by the non-stationary ETAS model. (I) Red circles indicate the distribution of epicenters down to 30 km depth since 2018. Rectangles A, B, C and D are regions considered in the analyses. Black disks indicate GNSS stations around the regions. (II) Classified epicenters at depth 14 km in region B. (III) Cumulative numbers of earthquakes of M1.0 or greater in respective regions, measured from June 1, 2020. (IV) Non-stationary ETAS analysis results: The red and blue lines show the time variation of the background intensity and aftershock-induced intensity, respectively, with their 95% confidence intervals (dotted lines). Gray dots at the bottom of each panel are M-T plots. (V) Comparison of the background intensity rate changes in respective regions. (VI) Daily time series of the distances of the GNSS baselines and depth changes at Suzu station relative to Hekura-jima station, where the both baseline-distance time series here are those removed the stationary trend in the time span from 2018 to the end of October 2020 that is indicated by vertical dashed line): the GNSS data were obtained from the GSI URL Website on 2021/11/10.



第2図 背景強度 ( $\mu$  値) の時空間変化. 第1図で得られた背景強度を重ねて表示し, 強度に従って彩色. 点線枠は領域区分を表す. (上段) 水平分布. (下段) 東西方向の時間分布. 領域 A, C, D のみ. (他領域と重複するので領域 B は省いた)

Fig. 2 Spatio-temporal distribution of background intensity ( $\mu$  value). The background intensities obtained in Fig. 1 are superimposed and colored according to the intensity values. The dotted frame indicates the considerer regions. (Upper panel) Horizontal intensity distribution. (Lower panel) Intensity distribution in the east-west direction against time for the regions A, C, D; region B is omitted.



第3図 誘発係数 ( $K_0$  値) の時空間分布. 第2図と同様. B 領域の浅部と深部 (第1-II 図参照) での系統的なスケールの違いが特徴的である.

Fig. 3 Spatio-temporal distribution of triggering coefficients ( $K_0$  values). Explanations are same as those in Fig. 2. The systematic difference in scale between the shallow and deep parts of region B (see Fig. 1-II) is characteristic.