

7-4 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 MJ 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- 珠州観測点および珠洲- 舳倉島観測点の基線距離で約 1cm 程度の増加、及び珠州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¹⁾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 μ 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 ヶ月から 3 ヶ月遅れて領域 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。

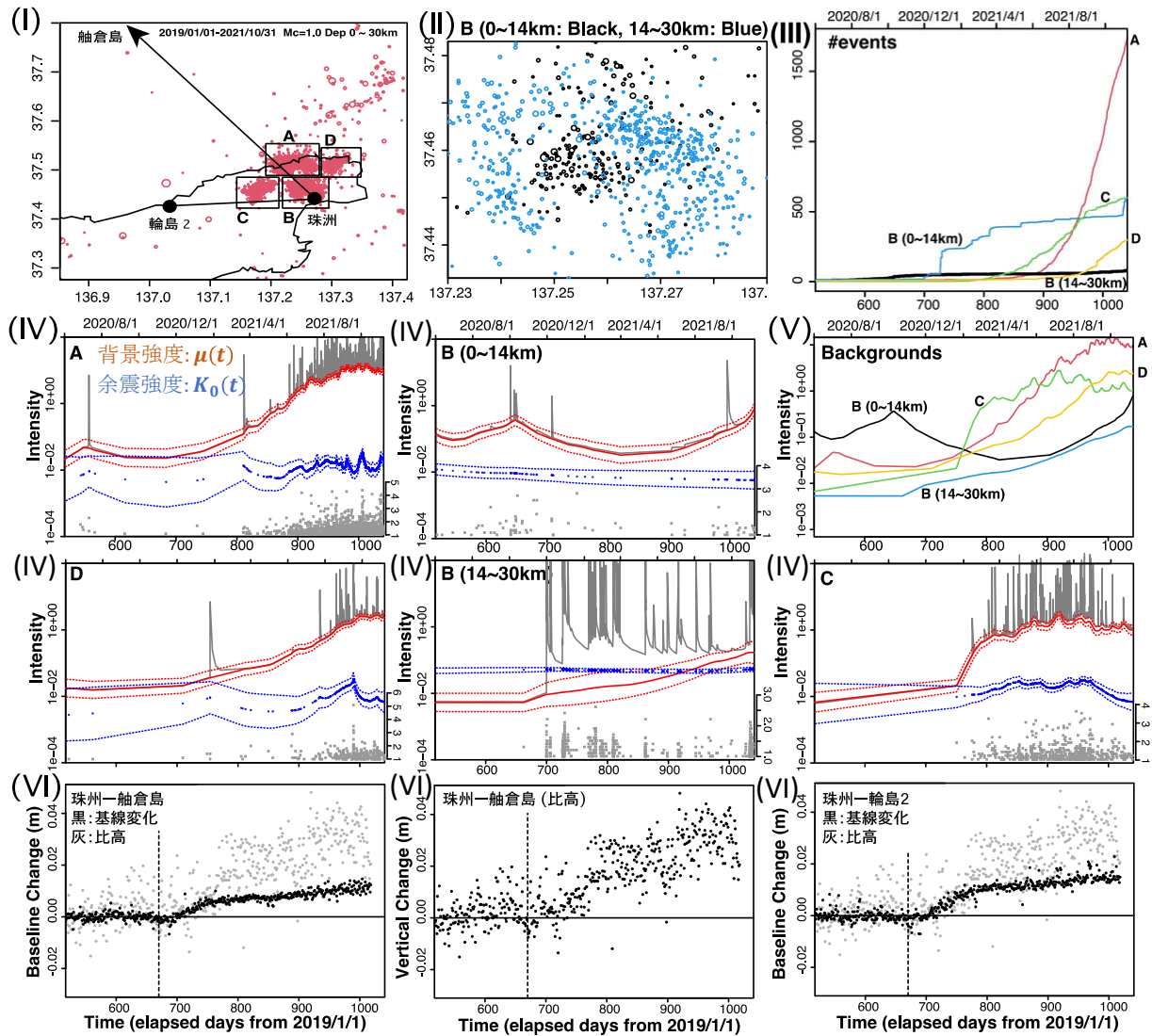
各領域の地殻変化を良く反映していると思われる以下の GNSS 観測時系列を図示した（第 1 図 (VI)）。すなわち、領域 A を跨ぐ珠洲－舢倉島基線、領域 B の珠洲－舢倉島比高、領域 B と C を跨ぐ珠洲－輪島基線である。領域 A、D、B の背景強度変化の仕方は珠洲観測所の比高時系列に相似し、領域 C の背景強度変化は珠洲－輪島基線距離の時系列に相似し、いずれも GNSS 時系列が背景強度変化に先行している。すなわち領域 C の領域直上を跨ぐ珠洲－輪島 2 のトレンドを除去した基線距離変化は最初急速に増えた後ゆっくり増加し、これに対して遅れて C 地域の背景強度が同様な形で変化している。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

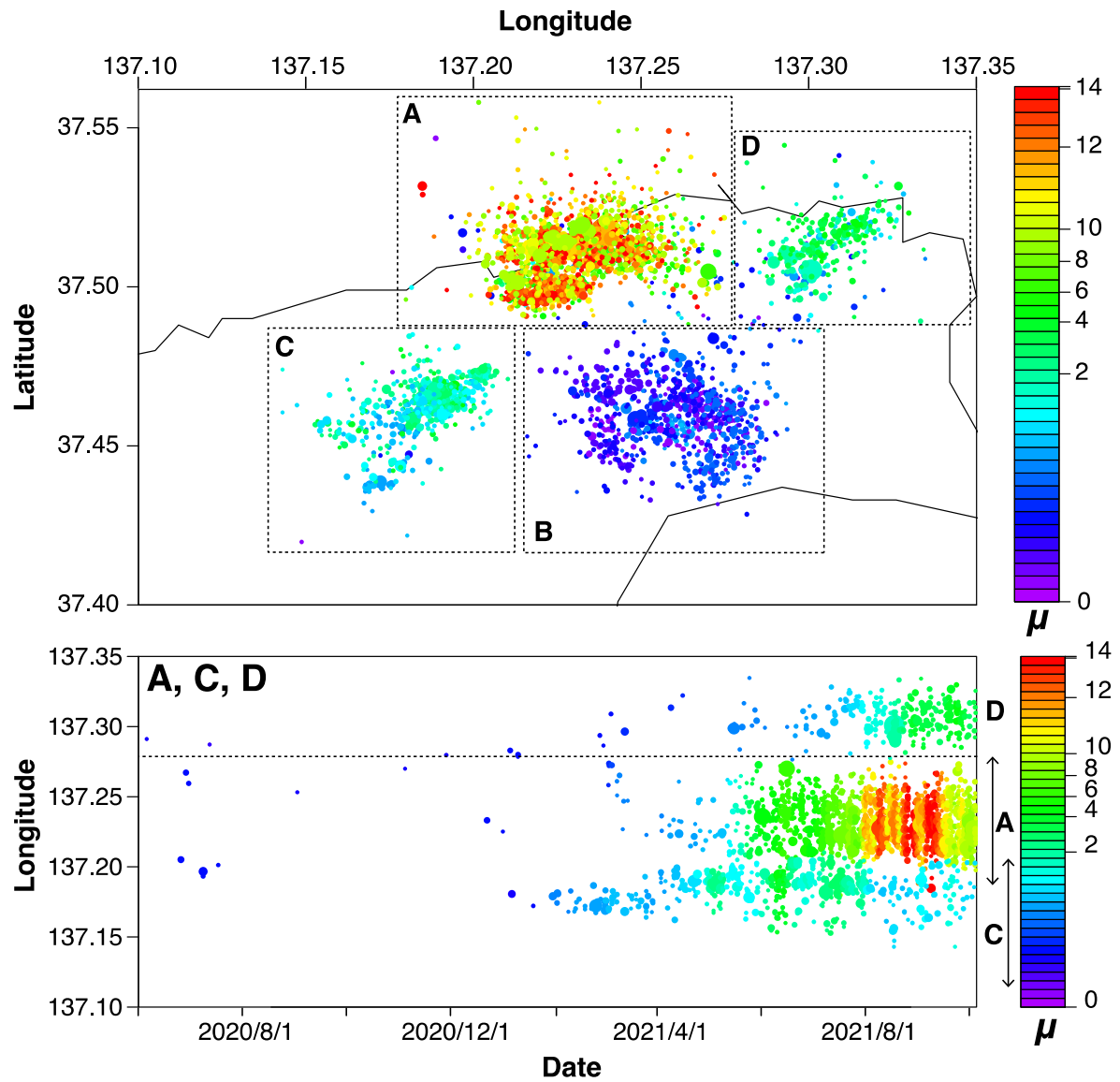
参考文献

- 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>



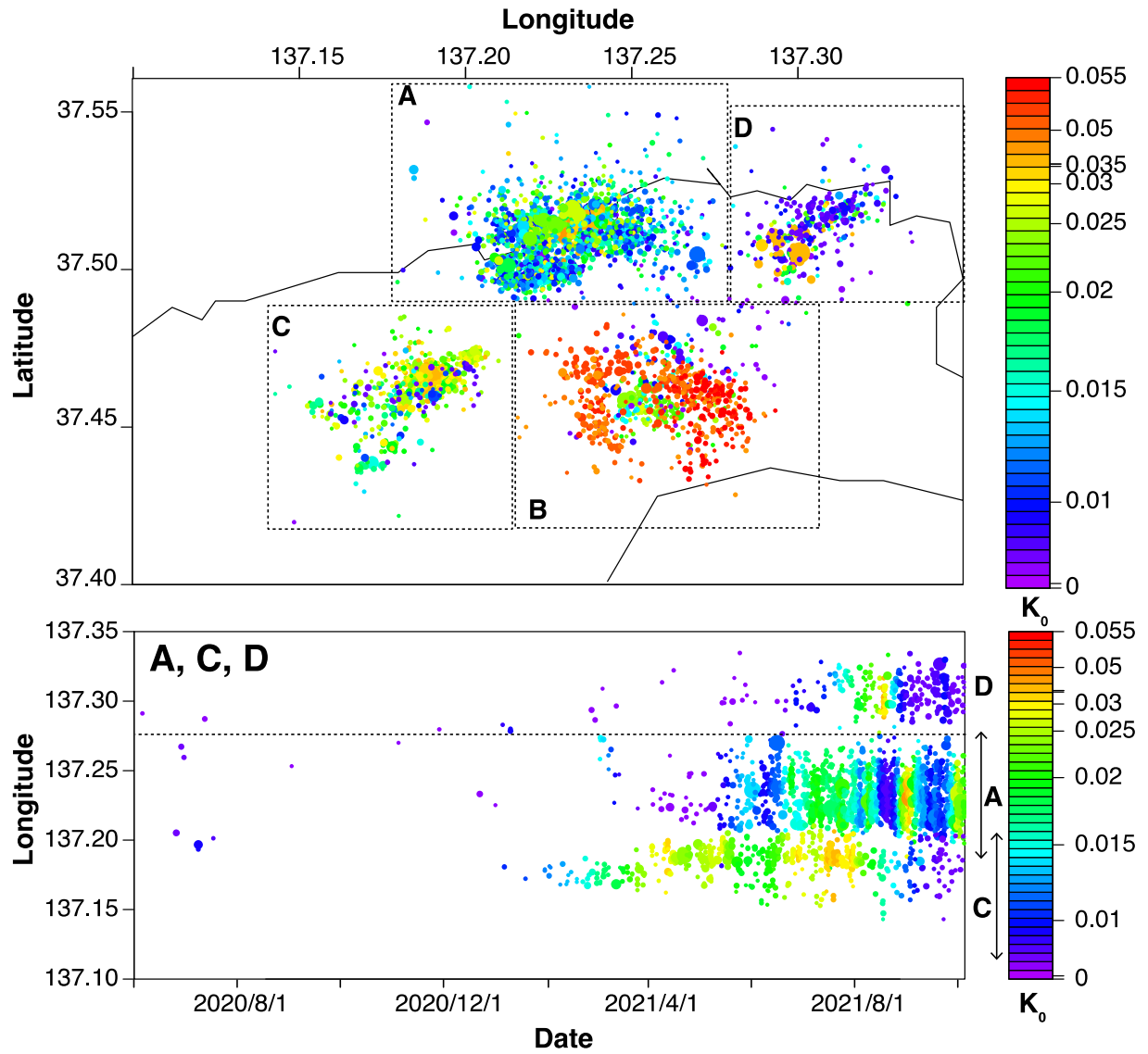
第 1 図 石川県能登半島の群発地震活動と GNSS 時系列. (I) 赤丸は 2018 年以降、深さ 30km までの震央分布. 矩形 A, B, C, D は解析の領域分け. 黒丸はこれらの領域の最近接の電子基準点を示す. (II) 領域 B 内の深さ別震央分布. (III) 領域別の 2020 年 6 月 1 日からの M1.0 以上の地震累積数. (IV) 非定常 ETAS モデルによる解析結果. 解析には 2018/1/1 から 2021/11/6 まで、深さ 30km 以浅の地震を使った. 赤線と青線はそれぞれ背景強度と余震誘発強度の時間変化、及び其々の 95%信頼区間 (点線). 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 (μ 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 (μ 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.