

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（続報）
Regional features revealed from the non-stationary ETAS model for earthquake swarm
activity in Noto Peninsula

統計数理研究所
The Institute of Statistical Mathematics

石川県能登半島で2020年11月末から活発化した群発地震は活動を継続している。これらの活動は4つの震央クラスターに分かれ（第1図（I）実線小四角領域A~D）、以前から活動の見られた珠洲GNSS観測点近傍の領域Bでは2020年11月末に14km以深へ移動した。この移動開始は後の第2図で示すように珠洲観測点が上昇に転じた時に対応している。以降、周辺の3領域でC, A, D順に発化し、それらの活動特性の時間変動を報告したり。本報告はその続報になる。今回は2021年11月6日までの地震カタログ及び同月15日までのGNSS観測時系列を用いており、本報告では地震カタログが2022年6月5日、GNSS観測時系列は5月21日（6月8日に取得）までの延長期間を解析した。

前回と同様に非定常ETASモデル²⁾をそれぞれの領域に当てはめた（第2図）。このモデルは背景強度 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 に依存して変化すると仮定し、これらの変化をベイズ法で推定したものである。その条件付き強度関数は

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

の様に表現できる。

これは、本地域での群発地震活動開始以前の、比較的広域の通常テクトニック活動の定常ETASモデルの標準パラメータ（リファレンスモデル）に対して、群発地震活動開始後の非定常度を補正するものである²⁾。時間変化するパラメータのうちで、背景強度関数 $\mu(t)$ は対象領域周辺でのゆっくりすべりによる応力変化、または断層内での流体貫入による断層弱化などに起因すると考えられる²⁾。 $K(t_i)$ は領域内の先行地震による近傍小断層群への地震連鎖効果（余震誘発率）を示す²⁾。

第一に、非定常ETASモデルを当て嵌める前に、特に重要なのがリファレンスの定常ETASモデルの選択である。これは、群発活動を含まない先行した期間で、対象領域を含む程度広い領域での地震活動の標準相場と見なせる安定した5つのパラメータ (μ_0, K_0, c, α, p) を推定する。今回は、各領域を合わせた全領域（第1図（I）の破線四角の領域）で、2018年からGNSS観測の異常変動が開始する時期（2020年11月末）までの下限マグニチュード 1.0 の地震251個から $\mu_0 = 0.096861$, $K_0 = 0.52258$, $c = 0.0005326$, $\alpha = 0.51218$, および $p = 1.1389$ を推定した。もしここで今回対象にしている群発地震を含むデータから

定常ETASモデルを推定すると α 値や p 値が低くなり、そのため第1項の背景強度 $\mu(t)$ が低く抑えられる結果となるので将来の予測のために偏ったものになるので勧められない。

領域 A は4地域の群発活動の中で最も活動度が高く、M1.0以上の地震数は全体の約半数を占め、M4以上の地震は前回報告の2021年11月6日までに6回、その後2022年5月2日までに5回発生しており、最大地震は2022年3月8日のM4.8である。背景強度関数は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 左上部）。領域 C の背景強度関数は2020年6月～8月のピーク時から現在はやや鈍化している（第2図 右上部）。領域 D では2022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。以降背景強度は緩やかに上昇していたが依然として高い状態を保っており、2022年の3月以降にM4以上の地震が3回発生した（第2図 左下部）。

領域 B は前回の報告と同様、地下14kmを境に Bs（深さ0～14km）と Bd（深さ14～25km）に分けて解析した。浅部 Bs の活動は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2図 中央上部、第2図 (II) 上段）。同時に深部 Bd では、浅部 Bs の中心部分の地震群を囲むように、ドーナツ状に活発化した（第2図 (II) 下段）。そして背景強度関数が大きく上昇下降を繰り返しているが、これで間欠性の強い活動 (burst-type)（第2図 中央下部）が生じた様相が表現されているか明らかでない。このことを表現するには非定常ETASモデル（1）の高度化を促されているかもしれない。

各領域の地殻歪変化を反映していると思われる GNSS 観測時系列を地震活動と合わせて図示した（第2図）。すなわち、領域 A を跨ぐ珠洲～舳倉島間の斜距離（第2図 左下部）、領域 B の舳倉島を基準にした珠洲の上下変動（第2図 中央部）、領域 B と C を跨ぐ珠洲～輪島2間の基線（第2図 右部）である。季節性変動を除けば、領域 A、C、D の背景強度関数の変化はそれぞれ領域を跨ぐ斜距離変動の傾きに相似し、B 領域のものを除いて、いずれも GNSS 時系列の変化が背景強度の変化に先行している。領域 B では GNSS のトレンド変化から殆ど間を置かずして、それまで領域 Bs に属する浅い活動が深さ14km以深の領域 Bd へと移行し（第2図 (II) 上段）、次第に浅い深度へと推移している。

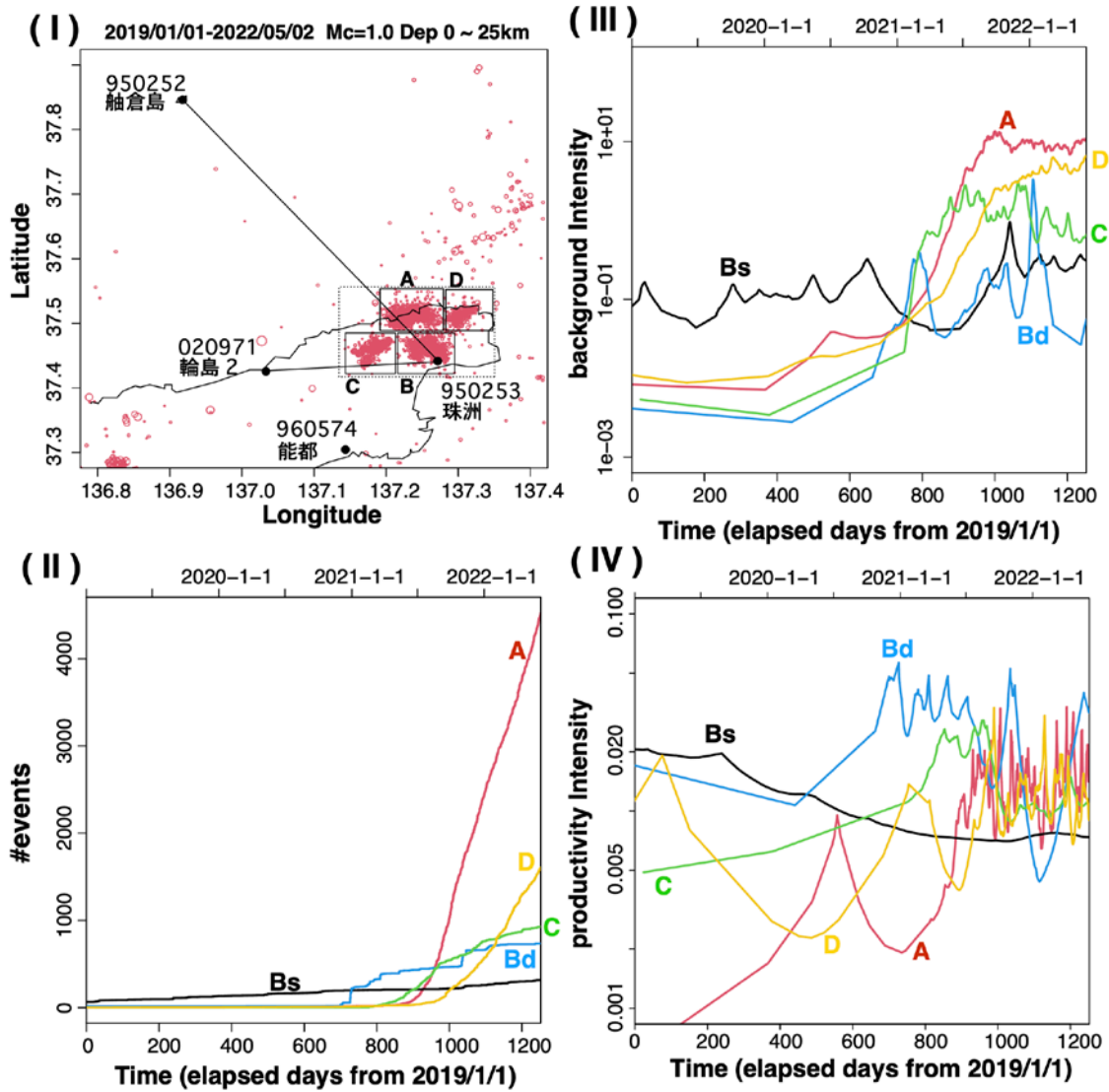
本解析に関して気象庁震源カタログ、地震活動可視化システムTSEIS、および国土地理院地殻変動情報表示のGEONETデータを使用した。

(熊澤貴雄, 尾形良彦)

参考文献

- 1) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2022). 地震予知連絡会会報第107巻 (7-4)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou107/07_04.pdf.

2) Kumazawa T, Ogata Y (2013) *J. Geophys. Res. Solid Earth* **118** (12): 6165–6182.
<http://doi.wiley.com/10.1002/2013JB010259>



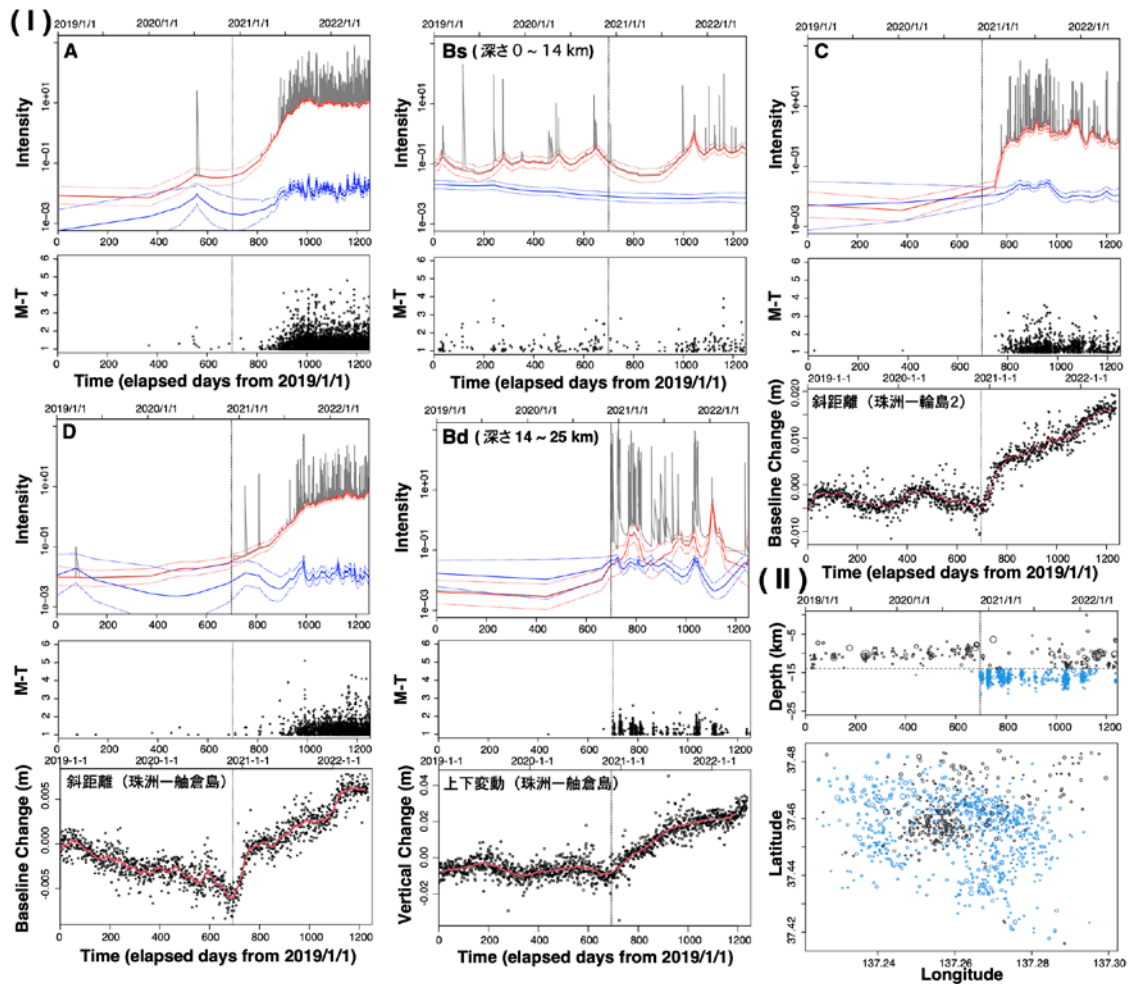
第1図 石川県能登半島の群発地震活動。

(I) 赤丸は2018年以降、深さ25kmまでの震央分布。波線矩形は今回の活動全体を含む領域で2018年から2020年11月末までの地震活動に定常ETASモデルを当てはめレファレンスとした。4つの実線四角A, B, C, Dは活動の領域分け。黒丸はこれらの領域から最近接のGNSS電子基準点を示す。(II) 領域ごとのM1.0以上の地震累積数で2018年より表示した。赤線は領域

A, 黒は Bs, 青は Bd, 緑は C, 黄は D に対応する. (III) 領域ごとの背景強度 (μ 値) 関数の比較. (IV) 領域ごとの余震強度 (K_0 値) 関数の比較.

Fig. 1 Swarm activity and GNSS distance time series in the Noto Peninsula, Japan.

(I) Red circles indicate the distribution of epicenters down to 25 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) Cumulative number of earthquakes of M1.0 or higher for each region, counted from 2019. Colors correspond to: red-A, black- Bs, blue-Bd, green-C, yellow-D. (III) Background intensity (μ value) function per region. (IV) Triggering productivity (K_0 values) function per region.



第2図 非定常 ETAS モデルによる解析結果.

解析には 2018/1/1 から 2022/6/5 まで、深さ 25km 以浅の地震を使った. 縦点線は 2021 年 11 月末を表し、それ以前の 4 領域を含む矩形地域 (第 1 図 (I)) のデータを定常 ETAS モデルで当て嵌め、リファレンス・パラメータを求めた. 赤線と青線はそれぞれ背景強度関数と余震誘

発強度関数の時間変化, 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 モデルの条件付き強度関数変化. 各列下段は各領域を跨ぐ GNSS 基線 (斜距離) または 舳倉島を基準とした珠洲観測点の垂直変動の時系列. 赤曲線は中央点の前後 15 日間の移動窓平均. GNSS データは国土地理院ホームページから 6 月 6 日に取得, 5 月 21 日までのデータを含む. パネル (II) に領域 B の深さ分布 (上) と震央分布 (下) を示す. 黒円は Bs に, 青円は Bd に属する.

Fig. 2 Non-stationary ETAS analysis results of region.

Red and blue lines show the time variation of the background intensity and aftershock-induced intensity, respectively, with their 95% confidence intervals (dotted lines). In each column, lower panel shows daily time series of the distances of the indicated GNSS baseline or vertical changes of Suzu station relative to Hekurazima station: the GNSS data were obtained from the GSI URL Website on 2021/11/10. Panel (II) shows the depth vs time distribution (upper panel) and epicenters (lower). Black circles belong to the region Bs, and blues to Bd.