

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2）

Regional features revealed from the non-stationary ETAS model for earthquake swarm activity in Noto Peninsula - Continuation Report 2

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

1. はじめに.

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依然として4つの震央クラスタA~D^{1, 2)} (第1図)に分かれている. 群発期以前から活動の見られた領域B浅部では2020年11月末に14km以深へ移動した. 以降, 暫くして周辺の3領域でC, A, D順に次第に活発化した. それらの時間変化を報告した^{1, 2)}. 前報告から半年ほど経過して, 本報告では地震活動が2022年11月5日まで, GNSS観測時系列は10月22日(11月10日に取得)までの期間を含めて再解析した.

領域Aは各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以上の地震は計14回発生しており, 最大地震は2022年3月8日のM4.8である. ETASの背景強度は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1図A地域の $\mu(t)$ 及び下記第2式で定義される積分を参照).

領域Dでは2021年の8月から急速に活発度が上がり, 9月16日に主要クラスタ南端でM5.1が発生した. 2022年6月19日には今回の活動の最大地震であるM5.4が領域Aとの境界付近で, 続く20日にはM5.0が当領域の東端で発生しており, これに続く活動は定常ETASモデルが比較的よく当てはまるが, 9月以降に再び活動が高まった(第1図D地域の $\mu(t)$ 及びその積分を参照).

領域Cの背景強度は2020年6~8月のピーク時から鈍化して回復して現在に至っている(第1図C地域の $\mu(t)$ 及びその積分を参照).

領域Bは前回・前々回の報告と同様, 地下14kmを境に浅部Bsと深部Bd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1図Bs地域の $\mu(t)$ 及びその積分を参照, また第2図参照). 深部Bdは間欠性の強い活動(バースト活動)でETASの背景強度が短時間的に大きく上昇下降を繰り返しているが, ここしばらく低下している(第1図 $\mu(t)$ 及びその積分Bd地域を参照).

各領域の地殻変化を良く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各パネルの下部の2つの小パネルに図示した(第1図). すなわち, 領域Aを跨ぐ珠洲-舳倉島間の斜距離(領域A, D, Bdの地震活動と対比), 領域Cを横断する珠洲-輪島2の斜距離, 領域Dを跨ぐ珠洲-小木(佐渡島)そして珠洲の上下座標変動(Bs, Bdと対比)である.

2. 非定常ETASモデルと統計量

前回と同様^{1, 2)}に非定常ETASモデル³⁾をそれぞれの領域(第1図)に当てはめ推定した. このモデルは定常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たものである.

$$\lambda(t | H_t) = \mu(t) + \sum_{\{i; t_i < s\}} \frac{K_0(t_i) e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p} ds \quad (1)$$

本報告の各図には、対数スケールで、背景強度 $\mu(t)$ と余震的誘発率 $K_0(t)$ を表示しているが、それらだけでなく、各地域の時刻 t までの活動の理論累積数（積分関数）

$$\int_S^t \mu(s) ds \quad \text{及び} \quad \int_S^t \sum_{\{i; t_i < s\}} \frac{K_0(t_i) e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p} ds \quad (2)$$

も計算し線形スケールで表示した。ただし時刻 S （第1図の黒縦点線）は、どの領域に対して、Bd 地域の群発活動開始時である。

斜距離や比高変動の異常値効果を除外した時間変化の平滑化のため前後3か月の移動中位値を使用し、各基線変動と比高変動は群発開始までのトレンドを除去して表示した。しかし幾つかの時刻での不連続変化や将来のデータが無いため平滑化を仮定できない部分があるので注意して診る必要がある。

3. 群発地震活動と地殻変動の対応関係

各領域 A~D を通るGNSS斜距離や珠洲観測点の上昇の変化との対応を考察した。特に珠洲-舩倉島基線はこの能登半島地域のストレス場の変化と深く関係しているが、斜距離の変動スケールより珠洲の上昇スケールが数倍程度であることに注意する。領域 B 深部 (Bd) で珠洲観測点の上昇変化が背景強度 $\mu(t)$ の急増加と同時に始まり、珠洲-舩倉島や珠洲-輪島2の基線の斜距離が同時に加速度的に増大して、続く10ヵ月間ほど等速（線形）増加に転じた。これらに対応して、領域 A 群、C群、D群の $\mu(t)$ が何れも加速増大し、そして等速的に増大した。

珠洲-舩倉島の斜距離は、1年後（第1図の赤い縦線）で再び加速度的に急増大し、約半年間停滞し、その後（第1図の矢印付きの青い縦線）で急減少した。前者の急増大は領域 B の深部 (Bd) での間欠的な活動のうち $\mu(t)$ の急劇な増加のためである。このバーストでは $\mu(t)$ の増大に比して余震トリガー効果 $K_0(t)$ が可なり少なかった。このバーストの震央は第2図の赤丸で示されており、珠洲観測点北西の20km 近辺に位置している。なお Bd には遡ること数か月以前にも大きなバースト群があったが、これらは余震効果 $K_0(t)$ の十分ある活動であり、このため珠洲観測点付近での地殻上昇には繋がらなかったものと考えられる。

後者の急下降は、非平滑データを良く見ると下に跳んでおり、領域 AとD の境界でのM5.4地震（逆断層）でストレス変化が発生したことに対応する。

4. 考察

背景強度 $\mu(t)$ と斜距離の加速的増大は、珠洲観測点周辺の上昇時刻に始まって、B 地域深部から他地域の脆性断層内への流体貫入による破壊に至るシナリオと矛盾しない。 $\mu(t)$ や珠洲-舩倉島や珠洲-輪島2基線の斜距離の加速的増大の開始時刻および等速的増大に転じる遅延や時間間隔はB 地域と群発他地域が離れているに関係していると思われる。すなわちB地域と他地域の境界

には地震の空白がみられるが、そこで流体圧増加に起因する非地震性すべりや断層開口が生じたことを表すのかもしれない。また B地域深部 (Bd) での間欠的な群発地震で $\mu(t)$ の増加と後続地震への余震誘発率 $K_0(t)$ との比が大きく異なる場合があり、余震活動を伴わない $\mu(t)$ の増加が地殻変動に大きく寄与している。

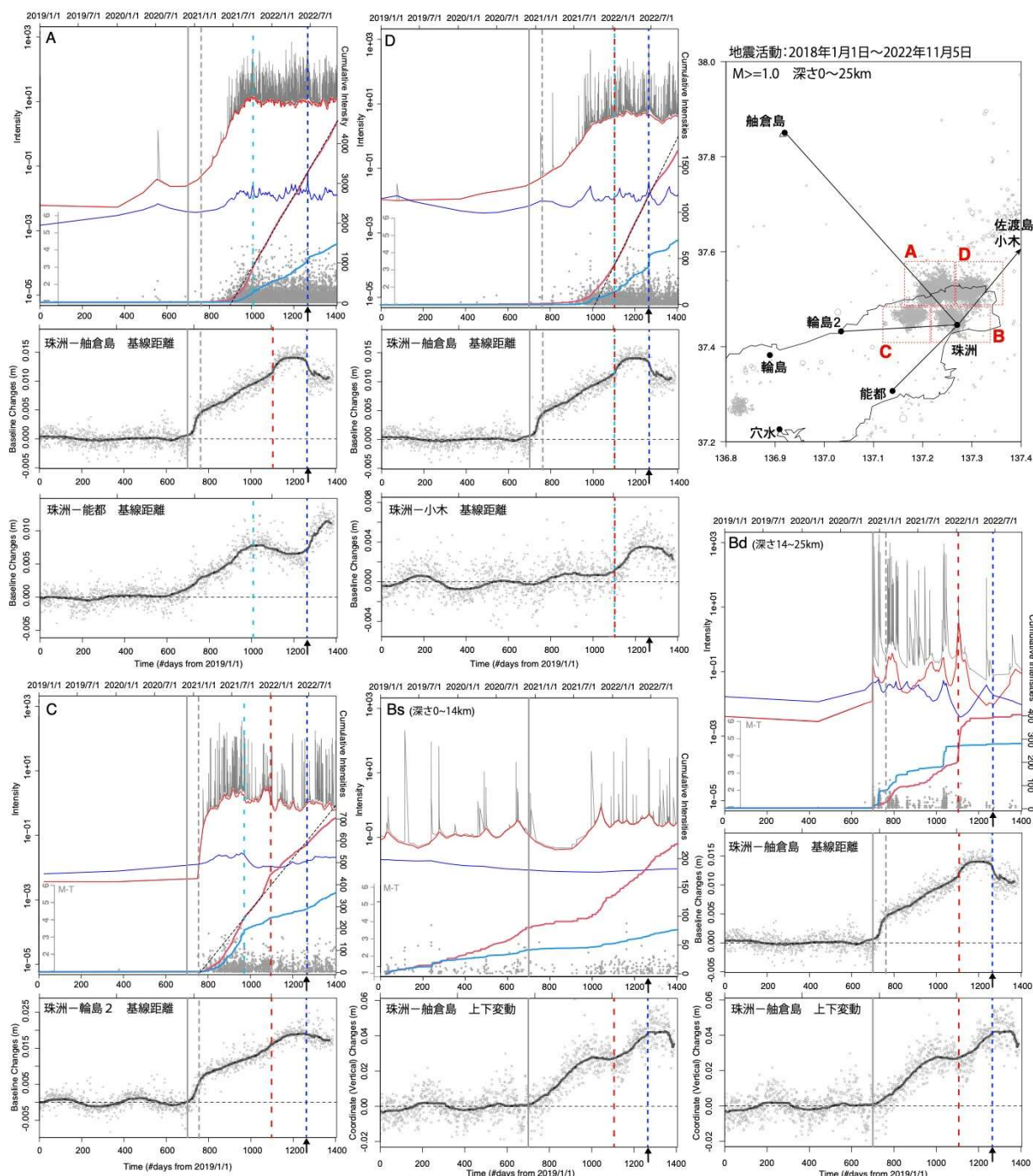
最近 (2022年11月5日現在) まででは、Bd 領域及び C での $\mu(t)$ は減少傾向である。しかし、A 領域の $\mu(t)$ は高いまま推移し、及び領域 D の $\mu(t)$ はM5.4 発生後、一時的に減少したが従来のレベルまで回復しつつある。

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; KUMAZAWA Takao, OGATA Yosihiko)

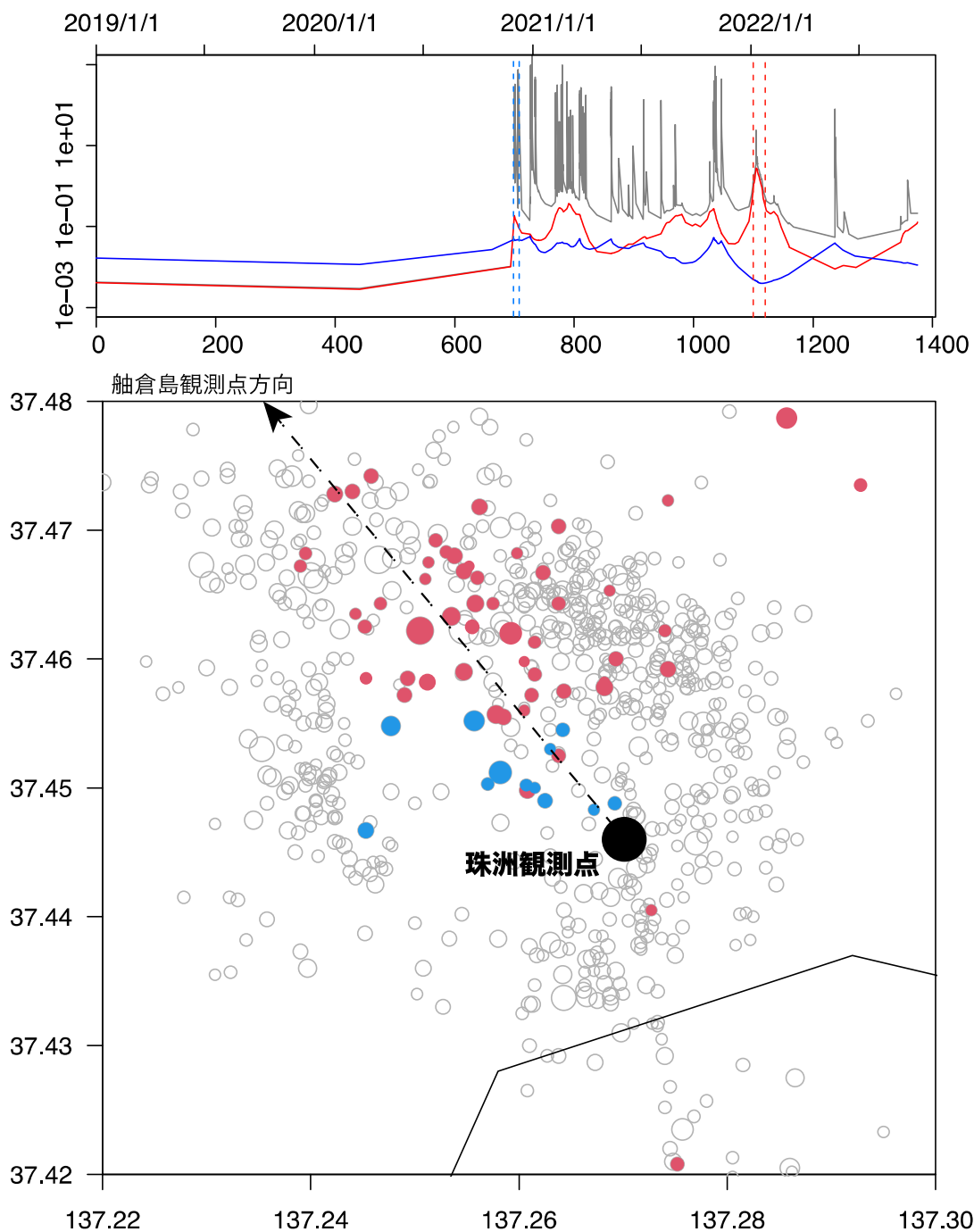
参考文献

- 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) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2022). 地震予知連絡会会報第 108 巻 (7-3)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou108/07_03.pdf
- 3) Kumazawa T, Ogata Y (2013) *J. Geophys. Res. Solid Earth* **118** (12): 6165–6182.



第1図 各地域の地震活動と地殻変動。 地図パネルの赤矩形は地震活動の領域分け (A~D) で黒丸はGNSS観測点。その他のパネル各領域の地震活動の解析結果と関連基線距離の時間変化。灰色のスパイク状曲線は非常常ETASモデル(第1式)の強度変化。赤曲線は背景強度 $\mu(t)$ (対数スケール)とその累積(線形スケール)の時間変化, 青曲線は余震誘発強度 $K_0(t)$ (対数スケール)とその累積(線形スケール)の時間変化。M-T図は同枠の下段(灰色点)。各パネルの中段・下段は当該の基線距離の変動及び上下変動(灰色丸)で, 前後の3ヶ月の移動中央値(黒曲線)を含む。各縦点線は最初から以下の時刻を示す。すなわち灰色実線から灰色点線までは珠洲-舩倉島基線の斜距離が活動開始直後の急増加から等速変化の移行期, 水色線は $\mu(t)$ 積分の加速期から等速(線形)の移行期, 赤点線はB地域における $\mu(t)$ の急上昇時と各基線距離の再加速時(D地域の水色と赤の点線は重なっている)。矢印と青点線は最大地震(M5.4)の発生時と珠洲-舩倉島基線距離の急減少を示す。

Fig. 1 Seismicity and crustal changes in each region. The red rectangles in the map panels show the seismic activity classification (A-D) and the black circles show the GNSS stations. The other panels show the result of seismic activity analysis for each region and time variation of associated baseline distance. In the upper panels, the gray spike-shaped curve shows the intensity change of the non-stationary ETAS model (Equation 1). The red curves are background intensity $\mu(t)$ (log scale) and its cumulative (linear scale); and the blue curves are the aftershock induced intensity $K_0(t)$ and its cumulative (linear scale) change with time; and the gray dots in the bottom side of each larger panel show the M-T diagrams. In the middle and lower panels for each region, gray dots show time variations of the indicated baseline distances and the vertical rise of Suzu station relative to Hekurajima station, with running median of 6 months span in black curve. The vertical lines indicate the following times. The solid gray line to the gray dotted line indicates the transition period of the Suzu-Hekurajima baseline distance from a rapid increase to a constant velocity change immediately after the start of the activity, the light blue line indicates the transition period from an acceleration period of $\mu(t)$ to the linear velocity change, the red dotted line indicates both the largest rise of $\mu(t)$ and the re-acceleration of each baseline distance in region B (the light blue and red dotted lines in region D overlap). Arrows and blue dotted lines indicate the time of the maximum earthquake (M5.4) and decrease of Suzu-Hekurajima baseline distance.



第2図 B領域深部(Bd)の地震活動. 上段図：灰，赤，青曲線がそれぞれ非定常ETASモデル（第1式）の成分 $\lambda(t)$, $\mu(t)$, $K_0(t)$ を示している. 下段図：灰色の円は上図の全期間を通しての Bd 領域の震央位置を示す. 青と赤の円盤は上段図のそれぞれの色の縦点線に挟まれた期間の地震位置を示す. 黒い円盤は珠洲GNSS局の位置を示す.

Fig 2 Seismicity in deeper part of region B, (Bd). Upper panel: The components $\lambda(t)$, $\mu(t)$, $K_0(t)$ of the nonstationary ETAS model in Equation (1) are shown in gray, red, blue curves, respectively. Lower panel: Gray circles show the epicenter locations in Bd region throughout the whole period indicated in the above panel. Blue and red disks indicate the epicenter locations in the period between the dotted lines of the respective colors in the upper panel. Black disc show location of Suzu GNSS station.