

非定常ETASモデルによる間隙流体圧駆動型群発地震の特徴

— 能登半島群発地震活動の時空間変動について —

Characteristics of fluid-driven earthquake swarms seen by the Nonstationary ETAS model

- Space-time changes of the Noto Peninsula Earthquake -

熊澤貴雄, 尾形良彦 (統計数理研究所)

1. はじめに.

石川県能登半島の北東部では、2020年11月末から、それぞれに特徴のある活動性の高い群発地震が4つの地域(図1)に別れて発生している(熊澤・尾形, 2022a, b, 2023a, b). 群発地震の開始以前から微小地震活動の見られた南東部領域(B地域, 図2a)では、2020年11月末に活動が突如として14km以深へ移行し(図2b), 数ヶ月の遅れで周辺の3領域(C, A, D)に時計回りの順で活動が波及した. 幾つかの報告(Nakajima, 2022; Yoshimura et al, 2022; Yoshida et al., 2022; Nishimura et al., 2023)では当地域の深部から流体が供給されたことが指摘されており, 図1にあるように地震発生地域A, B, C, Dが分かれた理由は, この流体が地殻の強固な部分(地震空白地帯)を浸透して, 周辺の脆弱な領域へと拡散していったことが示唆される. 以降, A地域とD地域の地震活動性は高いまま推移し, 両地域の境界付近で2022年6月19日にM5.4地震の発生を経て, 2023年5月5日にD地域の北辺でM6.5の地震が発生し, その余震がA, D地域とその北方に広く分布した.

群発地震発生パタンのフェイズ推移が示すように, 発生様式は時間的に一様ではない. この非一様性に対応するための有効で簡潔な手段は, 以下の非定常ETASモデル(Kumazawa and Ogata, 2013)である.

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

このモデルは定常ETASモデルの第1項の背景強度 μ と第2項の余震的誘発率のそれぞれに独立に時間変動要素を加味し, これらの変化をベイズ(ABIC)法で推定するものである. 背景地震強度のみならず誘発項を同時に動かすことでミスフィット要素を一方に押し付けることを防ぎ, 地震発生の機序に即した推定を可能とする. 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を反映すると考えられる. 他方 $K(t_i)$ 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)を表わす.

本稿の解析では, 非定常ETASモデルの背景強度関数 $\mu(t)$ とGNSS観測点間の斜距離の加速的増大が, 珠洲観測点周辺の上昇時に始まって, B地域の深部(Bd, 14~25 km)から他地域での脆性断層内への流体貫入によって微小断層の破壊に至るシナリオと矛盾しないことを示す. 特に非定常ETASモデルを当てはめる前に重要なのが, リファレンスの定常ETASモデルの選択である(たとえばKumazawa et al., 2016). これは, 今回の群発活動を含まない2020年11月末までの先行した期間で, 対象領域を含むある程度広い領域での地震活動の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.

また、2023年5月のM6.5地震の断層解を梃に、回顧的に断層深部延長での前駆的スロースリップのシナリオを仮定して、事前の測地変化や群発地震活動の変化様式が首尾一貫しているかを地殻変動解析プログラムMICAP-G（内藤，吉川，1999）で確かめてみた。データは2023年5月5日のM6.5地震時までのJMAカタログと、4月29日（5月16日に取得）までのGNSS観測時系列を使用した。

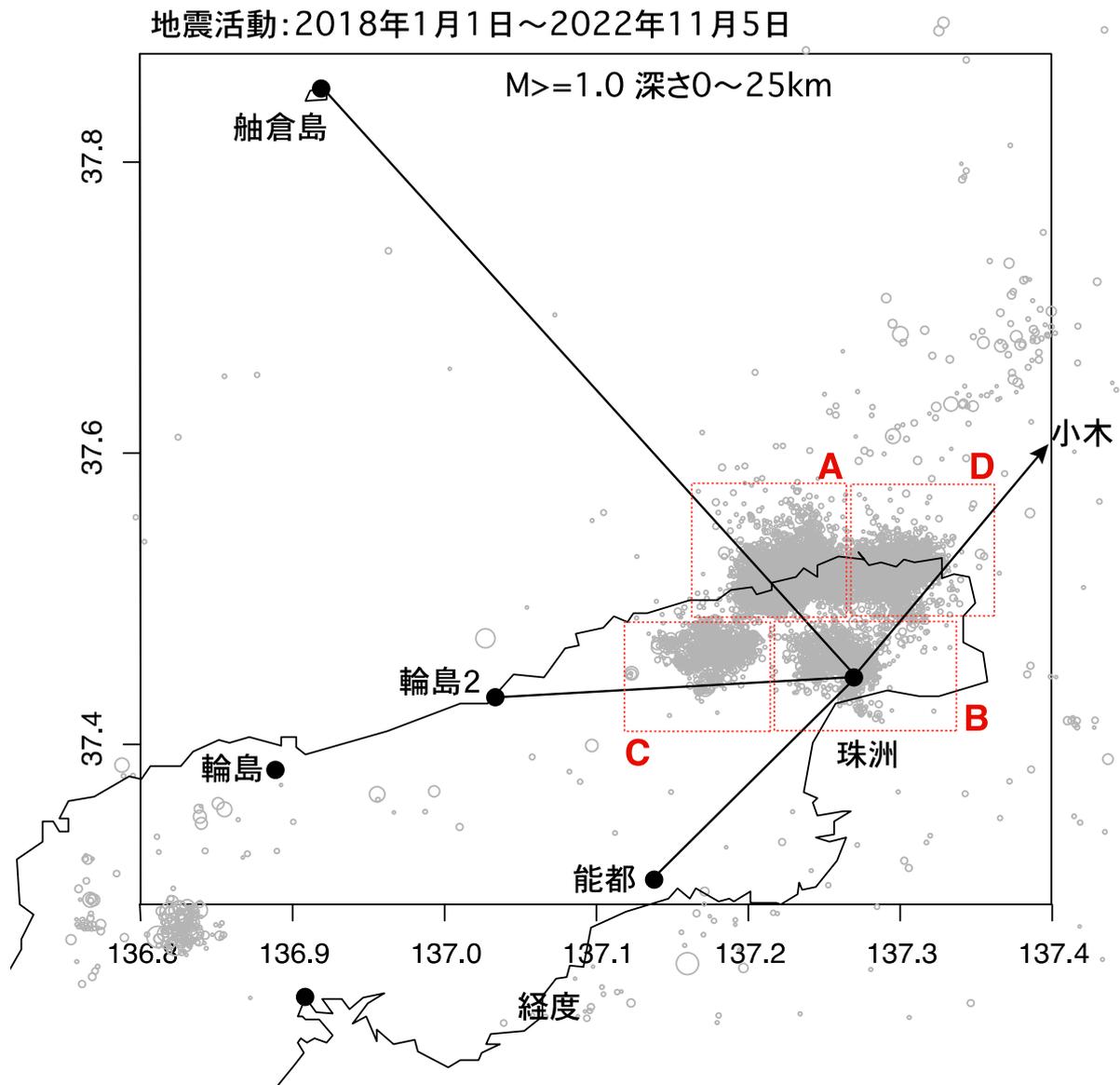


図1 各地域の地震活動とGNSS定常観測網。地図中の赤矩形は領域分け(A~D)。黒丸はGNSS定常観測点。
Fig. 1 Observation network of seismic activity and crustal deformation in each region. Red rectangles in the map indicate the area classification (A-D). Black circles indicate GNSS stationary observation points.

2. 流体の供給源

B地域の震源分布パターンで特徴的なのは、14 kmより深部 (Bd) の震央がドーナツ形状に分布し (図2aの灰色円)，時間的に間欠的に集中型発生 (図2bの青点群) している点である。そして珠洲観測点のGNSS観測による垂直変動 (図2c) から、B地域の地震活動が深部 (Bd) に移行し

たのほぼ同時に珠洲観測地点が隆起を開始し 2022 年の前半にかけて上昇傾向が継続し、珠洲-舩倉島基線の斜距離 (図 2 e) が増大した。この期間は深部 Bd で地震が発生した時期に相当し、両現象が同根であることは想像に難くない。

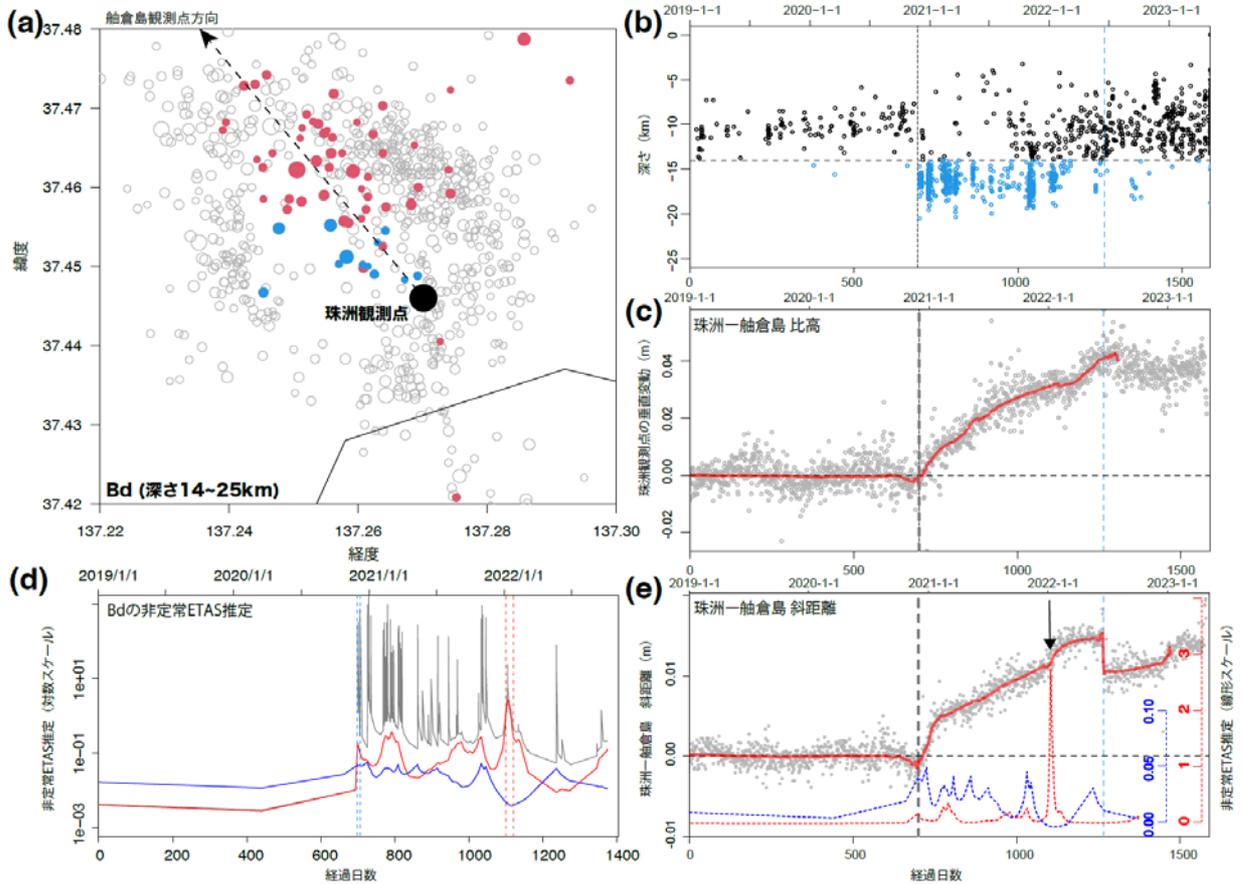


図 2 B 領域深部(Bd)の地震活動度 (2023/5 M6.5 発生以前). (a) 全期間を通しての Bd 領域の震央位置を示す。黒円盤は珠洲 GNSS 局の位置を示す。(b) B 領域の深さ対時間分布。青丸のバースト的地震群は Bd 地域の地震。(c) 舩倉島を基準とした珠洲の比高の時系列 (灰丸) で赤曲線は前後の 365 日の移動中央値 (縦の点線時までで除トレンド) を表す。(d) 灰色のスパイク状曲線、赤および青曲線は非定常 ETAS モデル (第 1 式) のそれぞれ成分 $\lambda(t)$, $\mu(t)$, $K_0(t)$ を表わす。青と赤のそれぞれの色の縦点線に挟まれた期間の地震位置は (a) の青円盤と赤円盤に対応している。(e) 灰色点は珠洲-舩倉島基線の斜距離の時系列で赤曲線は前後の 365 日の移動中央値。赤点線と青点線は左下パネルの赤線と青線を線形スケールで示した (縦の点線時までで除トレンド)。

Fig. 2. Seismic activity in deeper part of B region (Bd) (before the 2023/5 M6.5 event). (a) The epicentral location of the Bd region throughout the entire period. The black disk shows the location of the Suzu GNSS station. (b) Depth vs. time distribution in Region B. The bursty seismic swarms in the blue circles are earthquakes in the Bd region. (c) Time series of specific height of the Suzu station relative to Hekurajima station (gray circles). The red curve represents the median movement of 365 days before and after the time (detrended at the time of vertical dotted line). (d) The gray spiky, red and blue curves indicate the components $\lambda(t)$, $\mu(t)$, and $K_0(t)$ of the nonstationary ETAS model in Equation (1), respectively. The epicentral positions during the period between the blue and red colored vertical dotted lines correspond to the blue and red disks in the upper left, respectively. (e) The gray dots are time series of the oblique distance of the Hekurajima-Suzu baseline, and the red curve is the median movement of the distances over the 365 days before and after the time (detrended at the time of vertical dotted line). The red and blue dotted lines represent the red and blue lines in the lower left panel on a linear scale.

領域 B 深部 (Bd) の地震活動についての非定常 ETAS モデルの推定結果 (図 2 d) から分かるように、珠洲観測点の上昇変化 (2020 年 11 月末) は背景強度 $\mu(t)$ の急な増加とほぼ同時に始まっ

た。Bd での間欠的な群発地震には $\mu(t)$ 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、余震活動をあまり伴わない $\mu(t)$ の増加が地殻変動に大きく寄与している。とくに図 2e パネルによると、2022 年 1 月 1 日付近の $\mu(t)$ の急劇な増加による最大ピーク時には、背景強度 $\mu(t)$ の増大に比して余震トリガー効果 $K_0(t)$ が可なり小さかった。この結果から間隙流体圧の一次的な増加が先ず起こり、次いで珠洲観測点の上昇と珠洲-舢倉島基線の斜距離増大が伴った (図 2e) と考えられる。

この時の震央は図 2a の赤円盤で示されており、珠洲観測点北西の 20km 近辺に多く位置している。なお Bd ではその数か月以前にも大きなバースト群があった (図 2d) が、これらは余震効果 $K_0(t)$ の十分ある連鎖的地震活動であり、このため珠洲観測点付近での地殻変動の急増には至らなかったものと考えられる。その後の赤曲線で示された珠洲-舢倉島の斜距離の急下降は、非平滑データをみると下に跳んでおり、これについては次節で述べる。

図 2a の青円盤は初期の活動開始に対応して検出された地震群の震央である。青円盤・赤円盤ともに指向性が珠洲-舢倉島基線に沿っている。珠洲と舢倉島間の基線方向はこの能登半島地域のストレス場と深く関係している。次節でも、この 2 種のバースト地震群と珠洲-舢倉島の時系列への対応関係を議論する。

3. 群発地震活動の開始から M6.5 地震発生までと地殻変動の対応関係

本節では各地域 A, C, D の群発地震活動 (図 1) に対して非定常 E T A S モデル (1) を当てはめ、背景地震強度 $\mu(t)$ (図 3 b) と GNSS 斜距離の増加や珠洲観測点の上昇の変化トレンド (図 3 c) との対応を考察した。前節で示したように、B 地域の地震活動が 2020 年 11 月末に浅部 Bs (0 ~ 14 km) から深部 Bd (14 ~ 25 km) に移行したのと同時期 (図 2 c の縦灰色点線) に珠洲観測点の上昇変化が急増加し、珠洲-舢倉島基線の斜距離が同時に加速度的に増大して、続く 10 ヶ月間ほど等速 (線形) 増加に転じた。これら GNSS の変動に対応するように周辺地域 C, A, D でも群発地震が開始し、背景強度 $\mu(t)$ が何れも急増大し、しばらく経ってから定常的摂動に推移した (図 3 b)。

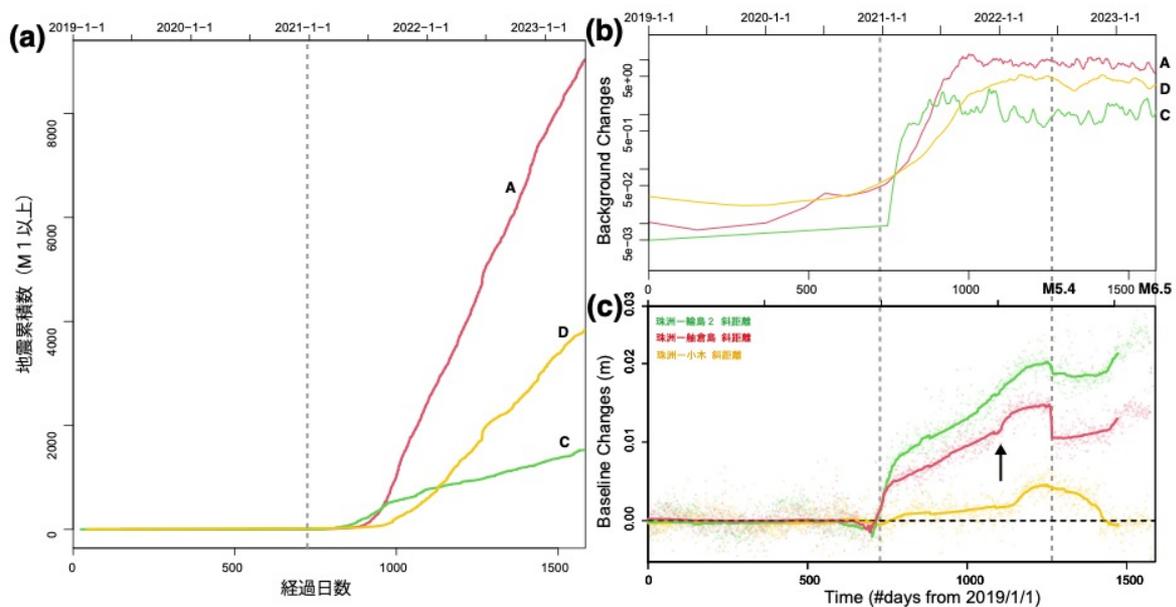


図 3. 地域 A, C, D における地震活動および GNSS 斜距離時系列. (a) マグニチュード 1 以上の地震の累積数. 縦点線は地震活動の深部移行時を示す. (b) 赤, 緑および黄色曲線は非定常 ETAS モデル(第 1 式)のバックグラウンド成分 $\mu(t)$ を示す. (c) 赤, 緑および黄色曲線はそれぞれの基線, 舳倉島-珠洲, 輪島 2-珠洲および珠洲-小木 (佐渡) の斜距離時系列 (縦の点線時までで除トレンド). 各曲線は前後の 180 日の移動中央値 (縦の点線時までで除トレンド) 最初と 2 番目の縦点線は地震活動の深部移行時及び北部の M5.4 地震時を示している.

Fig. 3. Seismic activity and GNSS obliquity distance time series for regions A, C, and D. (a) cumulative number of earthquakes greater than magnitude 1. Vertical dotted lines indicate the time of deep seismic activity transition. (b) Red, green, and yellow curves indicate the background component $\mu(t)$ of the nonstationary ETAS model (Equation 1). (c) Red, green, and yellow curves show the obliquity distance time series (shifted by detrending by the time of the vertical dotted line) for the respective baselines, Hekurajima-Suzu, Wajima2-Suzu, and Suzu-Ogi (Sado Island). The first and second vertical dotted line indicates the time of the deep seismicity transition and occurrence time of the M5.4 earthquake in the north, respectively.

GNSS に変動が現れてから周辺地域 C, A, D において群発地震が発生するまでの数ヶ月程度の時間差は, 流体が地殻の非地震帯を透過し, 各地域の地震帯に浸透するのに要した時間と見ることが出来る. Nishimura et al. (2023) では各地域を隔てる非地震帯ではスロースリップが発生していた為に地震の発生が抑制されたと議論している. このシナリオによれば, 地域 B から A を横断する珠洲-舳倉島基線と, 地域 B から C を横断する珠洲-輪島 2 基線において, 群発開始初期の 1~2 ヶ月間に斜距離が急激に増加したことの説明が付く. 図 2 b パネルで示されているように, B 地域での地震活動は 2022 年中に深部 Bd (14~25 km) から浅部 (0~14 km) と移行しており, 深部での活動は静穏化している. 同時期以降の図 3 の地震活動の定常化及び GNSS の変動からも, 当地域での流体の非定常的な供給は 2022 年中頃には停止ないし縮小・定常化したと考えられる.

これら周辺地域の群発地震活動では, それぞれ開始初期の半年程度とそれ以降とで発生様式が異なる. 初期期間では地震発生数が徐々に増え出して加速的に増加している (図 3 a). この期間の発生様式に標準 ETAS モデル (引用) を敢えて当てはめると ETAS モデルの臨界指数は 1.0 より大きくなり (Zhuang and Ogata, 2006), 定常性の要件を満たさず発生率は指数的に増加することになる. この推定はこの期間の加速的発生率を, 先行する地震からの誘発効果が減衰せずに蓄積していく効果で表現した結果と考えられる. 同様の初期推移は 1965 年から始まった松代群発地震でも,

多項式 $\mu(t)$ と ETAS モデルの和であてはめられている (Matsu'ura and Karakama, 2005) . 加速期に続く期間では各地域の地震累積数は直線的に伸びていき (図 3 a) , 背景地震活動度は一定の値前後の摂動が続く (図 3 b) . この傾向は群発領域北側に位置する A, D 地域では M6.5 地震時の直前まで続いているように見える.

地震活動と地殻変動を比較する上で, 特に珠洲と舭倉島間の基線方向はこの能登半島地域のストレス場方位とほぼ一致しているため, その変動は興味深い. 同斜距離は 2020 年 11 月末に急増大した. この急増大は領域 B 深部 (Bd)での間欠的な活動 (図 2 b 青点, および 2 c 参照) で $\mu(t)$ に急劇な増加が起こったためである (図 2 e) . この時期に対応する震央は図 2 a の青円盤で示されている. 同斜距離は急増後 10 ヶ月間ほど等速 (線形) 増加に転じた (図 3 c) . これらの地殻変動に対応するように, A, C, D 地域の $\mu(t)$ (図 3 b) はそれぞれ増大し, そして横ばい状態で推移する.

そして前節にも述べたように, 2022 年 1 月に Bd 地域において最大のバースト活動 (図 2 e の矢印) が起き, Bd からの大規模の流体移動があったと考えられる. このイベントは同斜距離でも図 3 c の赤線下の矢印部分の急増大として表れている. その後約半年間は速度が減衰・停滞し, M5.4 地震時 (赤縦点線) で急降下している. この急下降は領域 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. 同様の変動は珠洲-輪島 2 間の斜距離 (図 3 c) にも見られる.

4. M6.5 地震前の地震活動と地殻活動の特徴について

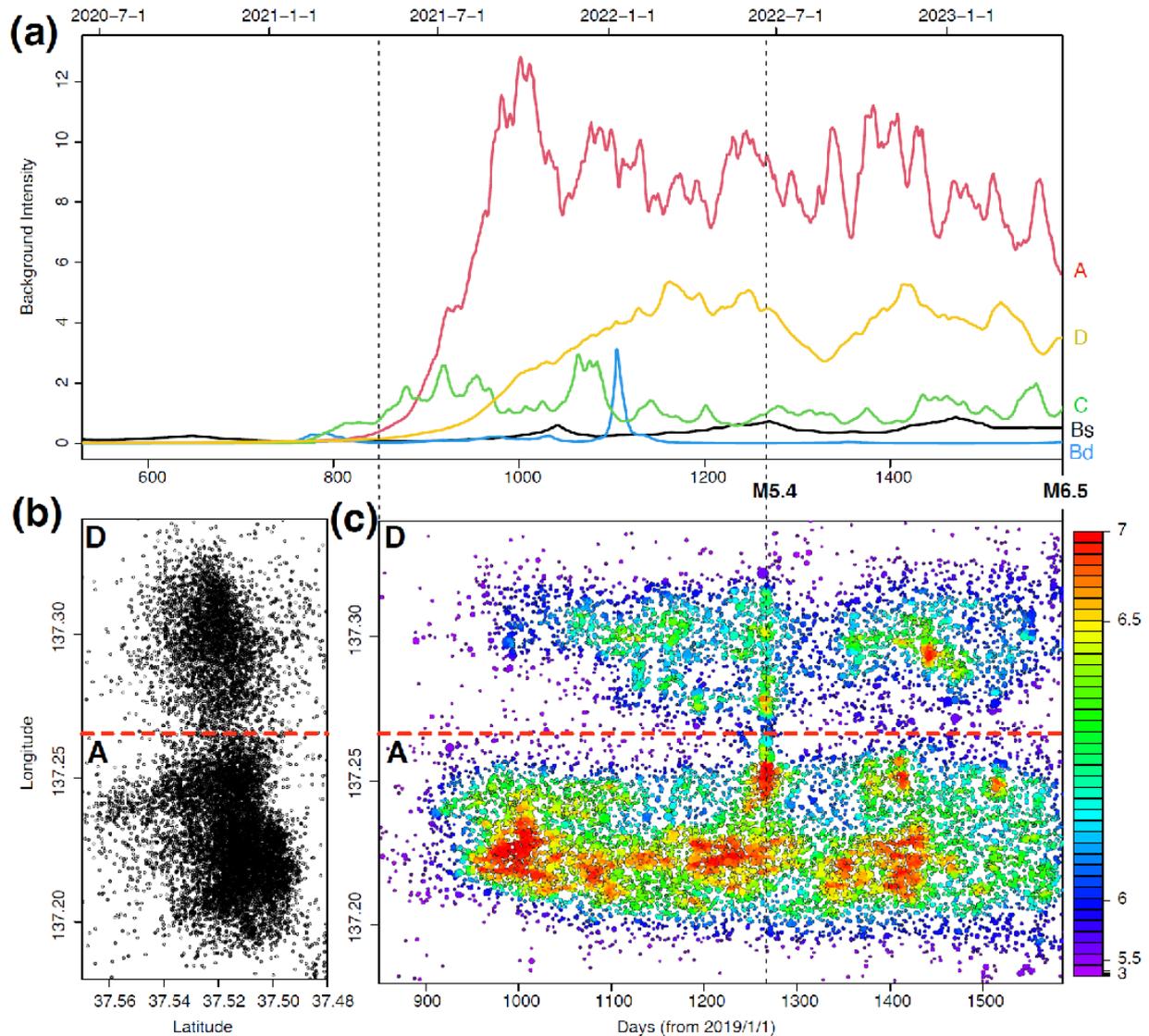


図4. 各地域の背景地震強度とA・D地域の時空間地震分布(2023/5 M6.5発生以前). (a)各地域の背景地震強度を色別で線形スケールで表す. (b)A地域とD地域の震央分布. (c)時間対経度分布. 色はポアソン密度分布を表す. それぞれ $M \geq 1$ の地震活動.

Fig. 4. Background seismicity and spatio-temporal seismic configuration of regions A and D (before the 2023/5 M6.5 event). (a) the background seismicity of each region in linear scale, in different color. (b) the epicenter distribution in region A and D. (c) time-to-longitude distribution with Poisson intensity. Cut-off magnitude is $M \geq 1$.

定常的に推移している図3bの背景強度 $\mu(t)$ は、図4aでの線形スケールで見れば、A地域とC地域では増大・減少を繰り返して、トレンドは緩やかに減少している。DおよびBs地域では比較的ゆっくりと増大・減少を繰り返している。A地域の背景強度 $\mu(t)$ (赤曲線)はM6.5直前になって減少していることが線形スケールでは明瞭となる。一方でD地域(黄曲線)は2023年3月頃以降に谷状に減増しており、これらの理由は図4cに基づく。すなわち、図4cでの入り付けは、20km深までのAとD地域を合わせた北部地域の経度対時間の数密度分布を、2次元デロネ型

関数を用いたポアソンモデルで ABIC による最適なベイズ的平滑化 HIST-PPM (Ogata Y. et al. 2020) によって計算した結果を示した。

A と D 地域の 2022 年から M6.5 本震前までの時空間活動 ($M \geq 1$) をみると、M6.5 の直前では、5 月 4 日の前震を除いて、静穏化が D 地域を中心に A 地域の東部にも及んで見られる。下限マグニチュードを上げて $M \geq 2$ で見ると、D 全域及び A 地域の大半を通して静穏化は可なり広域になる。この静穏化に対応するように、D 地域の背景強度 $\mu(t)$ が減少している。また、A 地域の最近の背景強度 $\mu(t)$ は減少トレンドであり、これに対応する図 4c の発生分布パターンは明白である。この静穏化は主に 12km より浅い部分の比較的小さい地震が減少した為である。同様に、両地域の背景強度 $\mu(t)$ が 2022 年 6 月 19 日の M5.4 発生後しばらく経って減少したことに対応して、図 4c では D 地域に加えて A 地域の一部にも静穏化が見られる。

これは M6.5 震源断層 (表 1) の深部延長域でのゆっくりすべり仮説の下での D と A 地域でのクローン応力シャドウと対応する。シャドウ領域は浅い深度で地域 D から地域 A の南東部に掛かるように広がる。さらに、各基線の斜距離変化や地震活動の特徴が、仮説に首尾一貫して変化しているかを MICAP-G で計算し確かめた。

経度 [°]	緯度 [°]	上端深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	すべり角 [°]	すべり量 [m]
137.238 (0.003)	37.578 (0.002)	0.2 (0.2)	5.6 (0.4)	10.6 (0.2)	74.2 (2.5)	63.9 (1.4)	110.3 (1.1)	1.7 (0.2)

表 1 M6.5 震源断層モデル解 (表 1 参照：国土地理院 2023, <https://www.gsi.go.jp/cais/topic20220505.html>)

Table 1. M6.5 epicenter fault model solution by GSI, <https://www.gsi.go.jp/cais/topic20220505.html>)

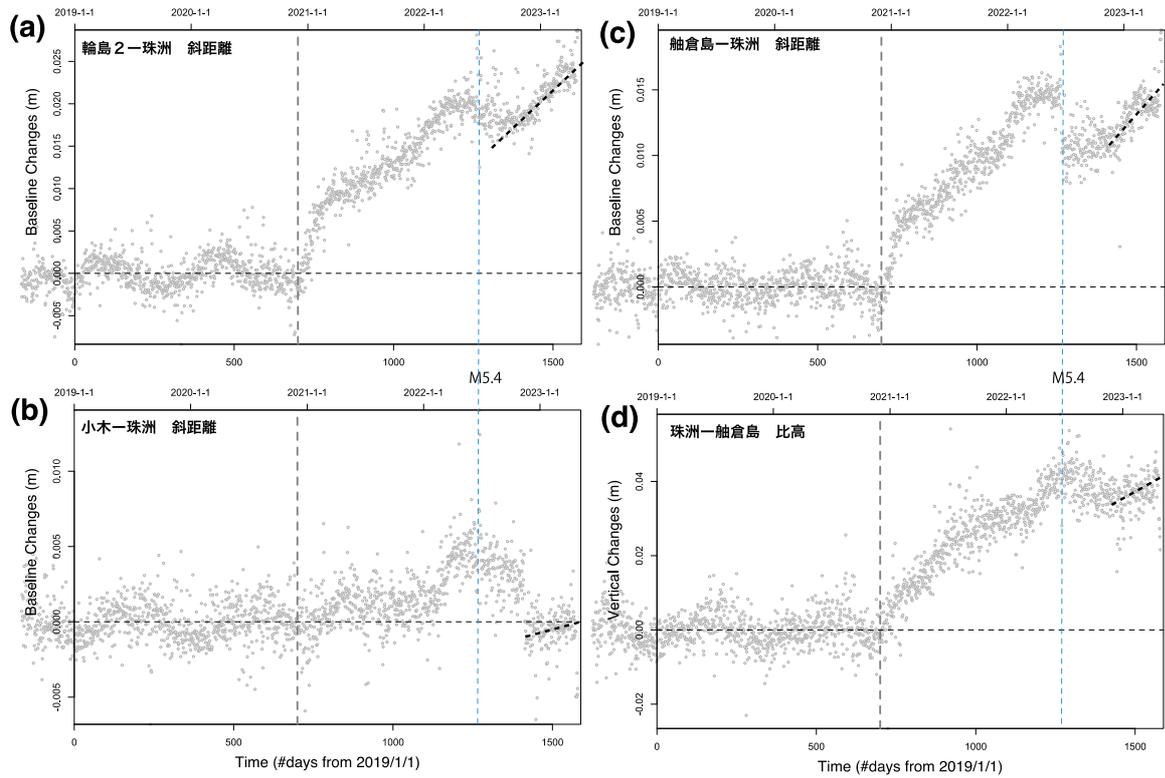


図5 珠洲観測所をめぐり M6.5 地震前 1 年間の斜距離及び比高時系列のトレンド

灰実線は2022年10月22日。佐渡島の小木観測点にアンテナ交換による飛びが見られる。

Fig. 5 Trends of obliquity and specific height time series for one year before the M6.5 earthquake for the Suzu observatory. The solid gray line is October 22, 2022. A jump due to antenna replacement is seen at the Ogi station on Sado Island.

まず図5から、珠洲を起点とする他観測点との斜距離や珠洲比高は、2022年末からM6.5地震時まで増加のトレンドが見られる。ただし、小木-珠洲の2023年当初の下方への、そしてM6.5地震の直前に舩倉島-珠洲の斜距離と比高に飛びが見られるが、これは去年11月の佐渡島の小木観測点と今年4月末の珠洲観測点にアンテナ交換による飛びが見られるので、その期間を外したトレンド変化に拘った。

また図6に見られるB地域での群発地震活動の東部への移動は、10 km深さ前後での受け手メカニズム解のストレス場をM6.5震源断層モデル解(国土地理院, 2023)とほぼ同様とすれば、 $\Delta CFS > 0$ となることで説明可能である。

図4でみられたAとD地域の一部の静穏化やD地域の背景強度 $\mu(t)$ の減少、またA地域の最近の背景強度 $\mu(t)$ の減少トレンドは、M6.5本震直前の周辺の静穏化は深部ゆっくりすべり断層モデルのストレスシャドウで説明可能である。

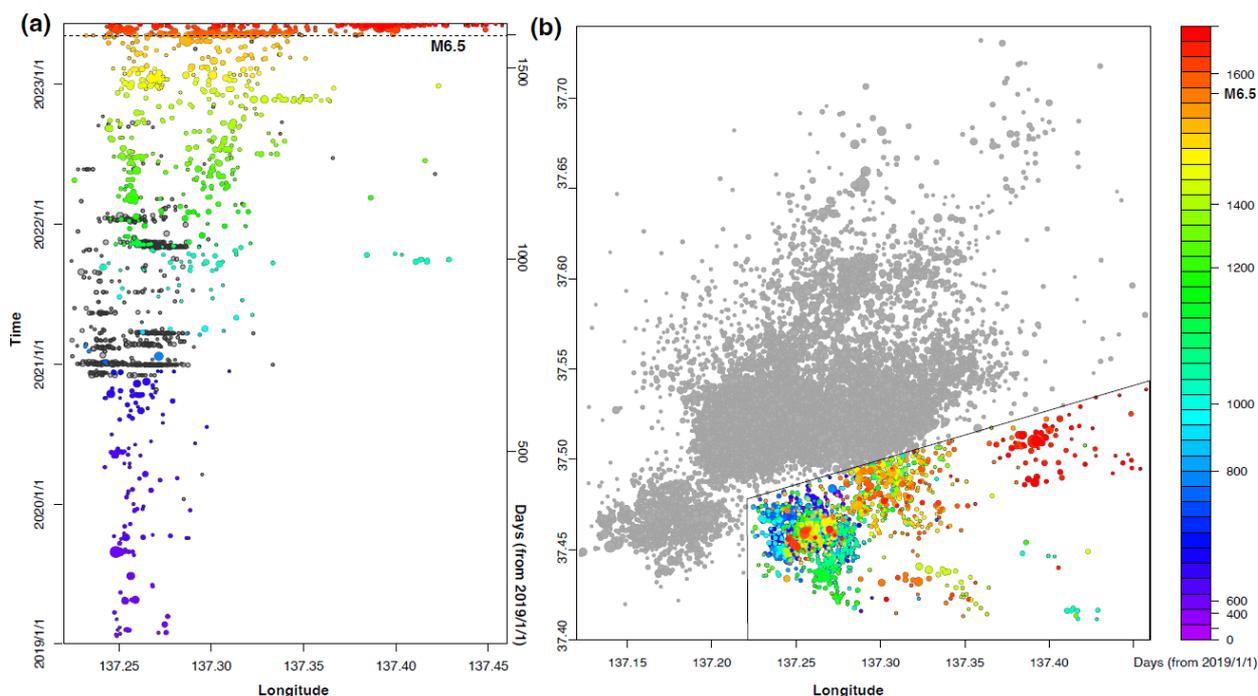


図6 B地域周辺の震央分布移動の時間推移。B地域とその東北延長地域（右図の色を付けた領域）を対象とした。(a) 経度対時間分布。色は時間（日）のカラーバーに対応する。Bd地域（14km以深）の活動は灰色点で表す。(b) 震央分布。

Fig. 6 Time evolution of epicentral distribution movement around region B. Region B and its northeastern extension (colored area in the right figure) are covered. (a) the distribution of longitude versus time. The color corresponds to the color bar for time in days, and the activity in the Bd region (depth > 14 km) is shown in gray dots. (b) the epicentral distribution.

B地域では、2022年前半に震源深度が再び浅い領域(Bs)に移動してからは安定した増加傾向にあり、東部延長部に向けての震央の移動が顕著である(図6)。この傾向は2023年になってから加速した。この移動の加速化は、先述の本震断層の深部ゆっくりすべりを仮定すれば、クーロンストレスの静的な増加が流体浸透と相まって実現したものとして説明可能である。また群発地震活動の東方への移動自体は、10km深さ前後での受け手メカニズム解のストレス場をM6.5震源断層モデル解(国土地理院2023)とほぼ同様とすれば、 $\Delta CFS > 0$ となることで説明可能である。

5. 能登半島の群発地震の空間**b**値分布および密度分布から分かること

7図のA~D地域を含む20km深までの全領域の空間**b**値分布や8図の数密度空間分布を、2次元デロネ型関数を用いたABICによる最適なベイズ的平滑化 HIST-PPM (Ogata Y. et al. 2020) によって計算した。7図では水平面投影だけでなく各領域の南方から見た経度対深さの垂直面への投影図を与えているが、何れも2次元座標の平滑化である。

用いた手法はZMAP法 (Wiemer 2001) とは異なり、地震位置によって三角網の関数を作って平滑化した、ベイズ的にABIC最適化のものであり、異方性を含め地震数密度が密になっているところ

では b 値の変化も精度良く細かく表れる。よって地震数密度が高い北部地域では、地震数に見合っ
て細かい変動が表れている。

北部地域の垂直切片を見た図7 a（深さ対経度射影分布）では、A地域の b 値変化がD地域より裾が
重い変化になっている。すなわち、浅部と深部に多数の小規模の地震が浸み込んでいる。

黄色の円盤はマグニチュード4.3以上の地震であるが、これは主に b 値の低い部分に起きていた
一方で、本震（M6.5）と最大余震は b 値の分布が高い部分に起きている（図7 a, b）。

この点について付け加えると、本震は b 値の高いところに発生したが、その直前の前震群は b 値
の低いところに起こった。これは前震の b 値が時間的に低下したわけではなくて、その場所は元来
 b 値が低いところだった。大きい地震の位置はローカルな観測網だけではなくより広域に決定され
ており、震源位置の偏りについて議論の余地は残るものの、 b 値自体の推定はG-R則で下限に近い
マグニチュードの小さな地震で殆ど決まるため、 b 値分布の推定精度には大きな問題は無いであろ
う。

図8の地域AとDの水平地震密度分布によると、M6.5は地域D内の、群発地震が集中する領域の
北縁で発生した。前日（5月4日）からM6.5地震発生前に起きた $M \geq 1$ の地震の位置を×印で示して
いるが、M6.5周辺の四角内で起きたもの（赤×）は8個あり、その平均 b 値は0.85で標準より低い
が、それらの殆どは元々極めて低い b 値の領域（図7 b参照）に起きている。

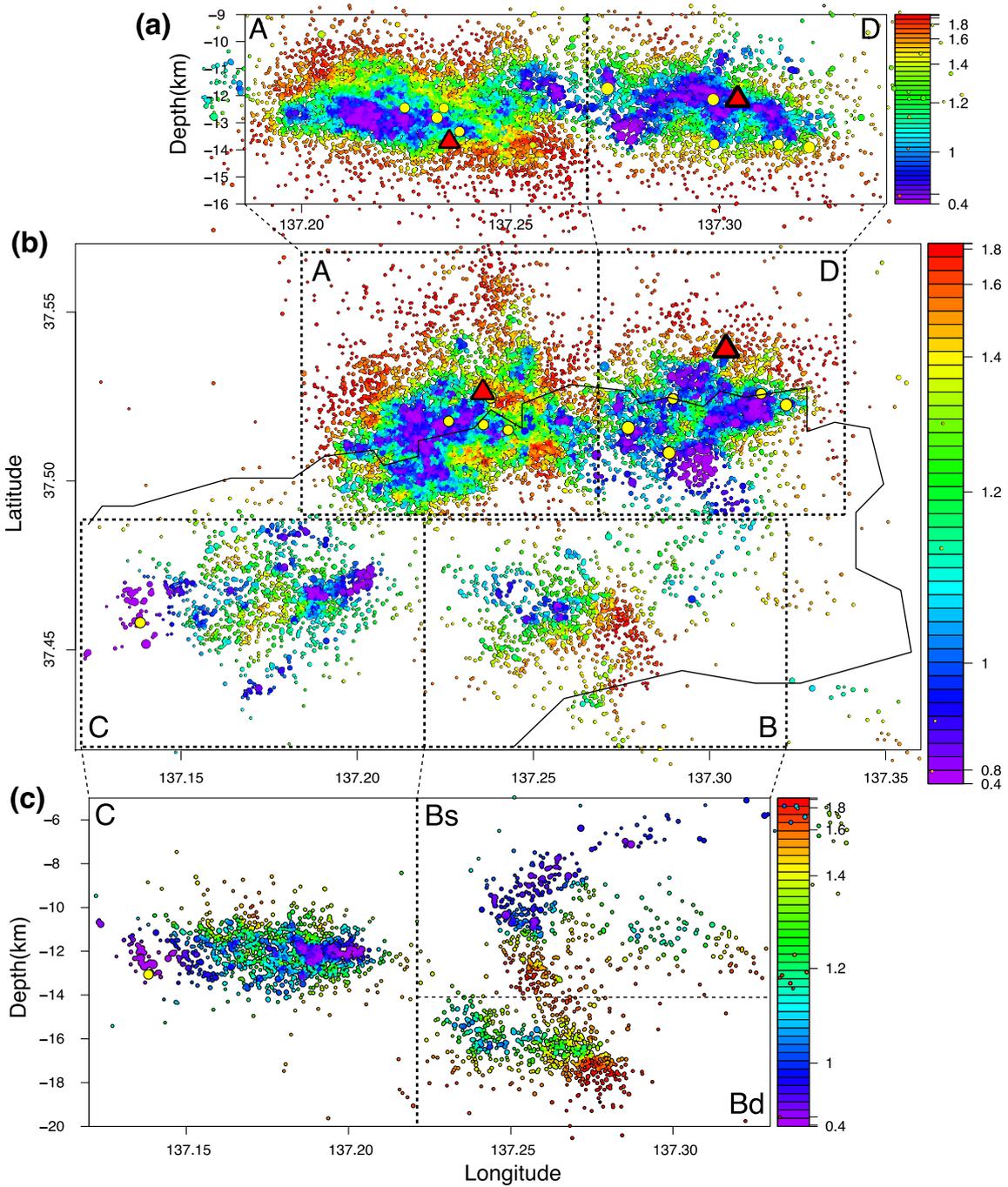


図7. 群発地震領域の平滑 b 値. 各震源位置での色標は平滑化した b 値を表す. 結果が, 地震が密な部分では, 色が重なって詳細が見えにくい, その重なりは底から表面まで時間順である. 各パネルの点線・点矩形は地震活動の領域分け. パネル (a) は A と D 地域の深さ対経度の平滑化 b 値分布. パネル(b)は全地域 (A~D) での緯度対経度分布で黄色丸は M6.5 地震発生以前の M4.3 以上の震源を示し, 赤三角は 2023 年 5 月 5 日の本震 M6.5 (右側) と最大余震 (左側) の震源. パネル(c)は B と C 地域の深さ対経度の平滑化 b 値分布.

Fig. 7. b-value pattern in the earthquake swarm region. The color at each epicenter shows the b-value of the color bar. The result is that in areas where the seismic activity is dense, the colors overlap and details are difficult to see, but the overlap is in time order from bottom to surface. The red triangle indicates the hypocenter of M6.5 on May 5, 2023 (right side) and its largest aftershock (left side). The yellow circles indicate the hypocenters of M4.3 or higher before the M6.5. Dotted lines and dotted rectangles indicate regions A-D.

今回の中期予測として、相対的な意味で地震密度分布や地震空白について追及することは意味があったが、図8の、前震と思われる本震近傍の狭い領域での時間的な b 値の低下はみられなかった。広域な領域での b 値の低下などは、もともと地震活動が、 b 値が低い場所へのマイグレーションした可能性もある。

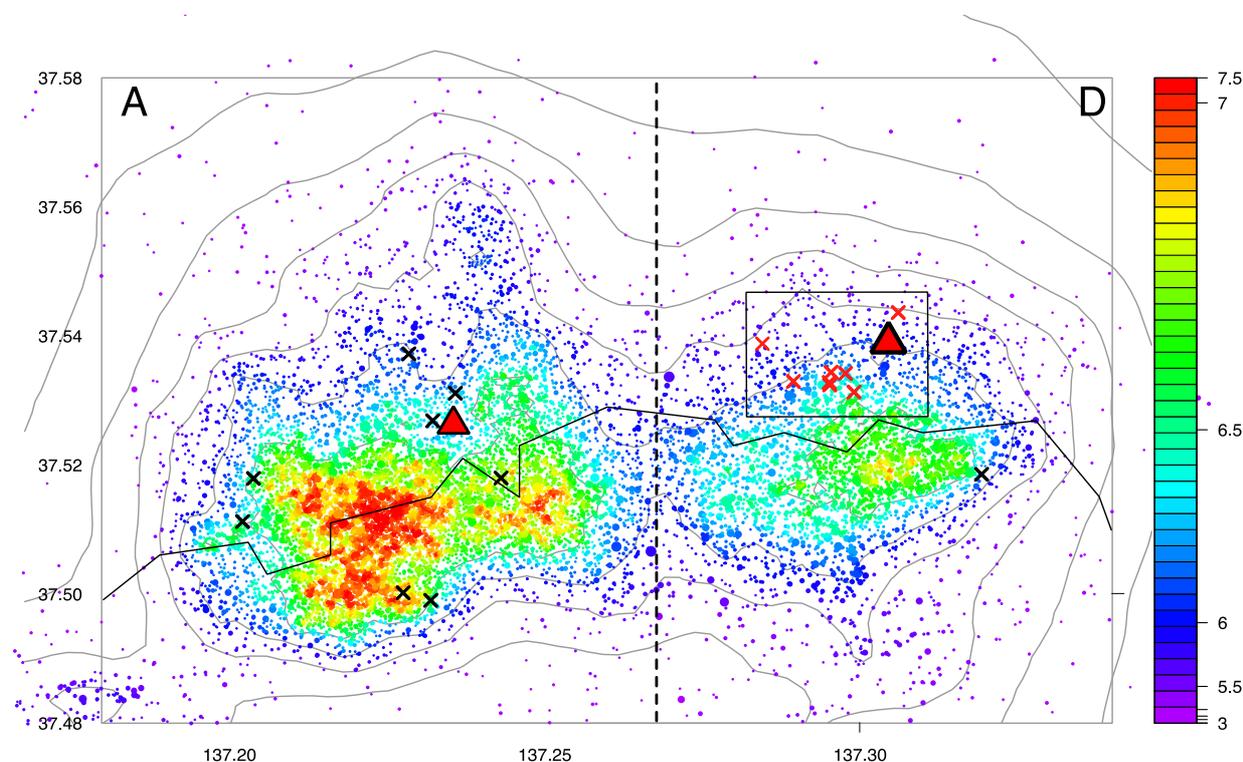


図8 AとD地域の地震密度分布。配色の形式は図2と同様。ポアソン強度は対数値の色標や等高線に対応し、赤三角は図2と同じで、×印は5月4日から5月5日のM6.5までの震央分布を示す。

Fig. 8 Seismic density distribution in A and D regions. Poisson intensity corresponds to the logarithmic color markers and equidistant contour lines, red triangles are the same as in Figure 2, and X marks the epicentral distribution from May 4 to 5 when the M6.5 occurred.

6. M6.5地震後の余震の異常時空間パターンとその解釈について

大森宇津モデルをM6.5本震から最大余震前までで、良く当てはまる期間をさがした（図9d, fの本震後0.26日の後半縦線参照）。ただし下限マグニチュードを下げると本震直後の地震欠測を賸うために c 値は大きくなる。このような適合曲線の線形変換時間について経度座標をプロットすると、事前に最大余震周辺での相対的な空白が明瞭に表れる（図9e）。これは、図9bで深さ対時間図にも端的に示されている様に、本震で誘発された最大余震周辺でのゆっくりすべりによって、M6.5の余震活動の当該部にストレスシャドウが生じたためと解釈できる。

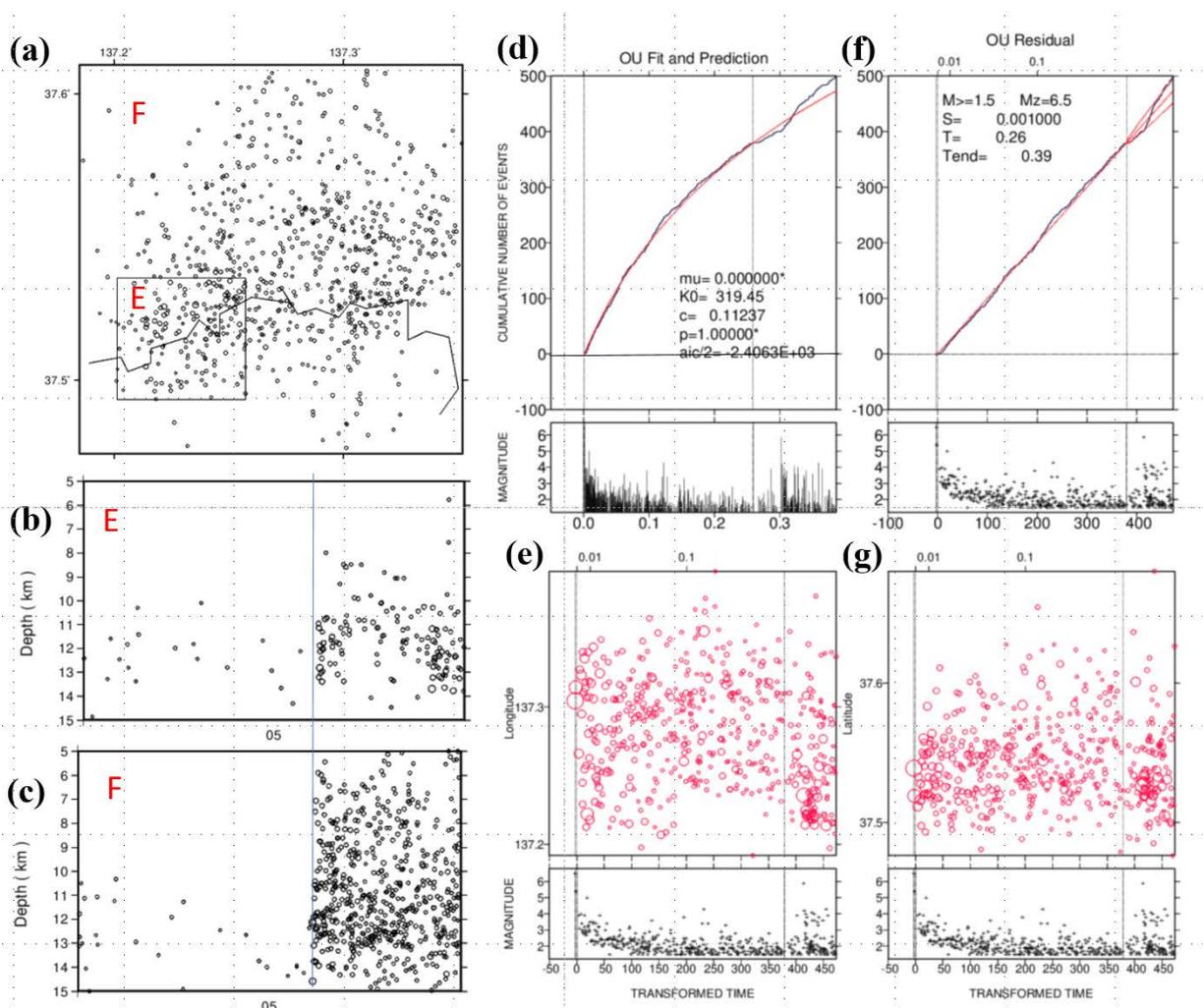


図9. 2023年M6.5地震の後続地震(余震). 5月5日中の全ての前震と余震の震央分布(a)とE領域と外側(F領域)の深さ対時間の分布(b,c). 本震後の $M \geq 1.5$ 活動で最大余震の1時間前までを大森宇津式で当て嵌めた. 2及び3列目上段は累積数及びM-T図(d,eは通常時間,f,gは変換時間). (e)は経度対変換時間図,及び(g)は緯度対変換時間.

Fig. 9 Subsequent earthquakes (aftershocks) of the 2023 M6.5 earthquake. Distribution of epicenters of all foreshocks and aftershocks during May 5 (a) and depth vs. time in region E and outside (region F) (b and c). $M \geq 1.5$ activity after the main shock up to 1 hour before the largest aftershock is fitted with the Omori-Utsu formula; (d) and (f) show cumulative number and M-T diagram (e and g). The left side of the bottom panel shows the longitude vs. conversion time diagram, and the right side shows the latitude vs. transformation time diagram.

7. まとめ

非定常ETASモデルは対象とする地震時系列のみから地震発生強度を説明しようとする. ここで本質的なのはカタログ外部からの誘発, 即ち間隙流体圧などの影響を間接的に考慮した点である. この外部からの誘発効果はETASモデルではパラメータ μ (背景強度)に含まれることから, これの詳細な時間変動を調べることが間隙流体圧の変動を間接的に推定することに繋がる.

2020年末より活発化した能登半島の群発地震活動を非定常ETASモデル(1)で地域別(A~D)に解析し, 背景強度の時間変化を調べるに当たって, 先ず基準となる標準定常ETASパラメータは

2018年から2020年11月末までの非群発の地震活動を当てはめた。それから、各地域 A~D の背景強度 $\mu(t)$ の時間発展を推定し、各群発領域を通るGNSS斜距離の変化との対応を考察した。

B地域の深部 (Bd) には、間欠性の強い地震活動 (burst) が反映された特徴が見られた。同地域でのバースト活動で余震誘発成分 K_0 の少ない地震活動の $\mu(t)$ の急増加が地殻変動に大きく寄与している。実際、背景強度 $\mu(t)$ の時間変化と国土地理院のGNSS観測データを比較すると、季節性変動を除けば、珠洲観測点から他観測点までの基線の斜距離の増加率と珠洲観測点の上昇率が背景強度の変化に先行している。このように背景強度 $\mu(t)$ と斜距離の加速増大は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を支持する。

具体的には、B地域深部 (Bd) での $\mu(t)$ の急増加と同時に珠洲観測点の上昇変化と珠洲-舩倉島の斜距離が加速的増大し、次いで10か月間程度等速 (線形) に増加した。これらに対応して、A, C, D 地域でも $\mu(t)$ が何れも大きく増大し、そして各地域でそれぞれ定常的な一定のレートからの摂動変動へと推移した。急増加開始から定常的な変動に至る時間的遅延や時間間隔はB地域と他の群発他地域が離れて発生していることに関係している。珠洲-舩倉島の斜距離はその1年後で再び加速度的に増大した後、約半年間停滞してその後急減少した。前者の急増大は地域B深部 (Bd) での間欠的な活動の $\mu(t)$ の急上昇に伴い、後者の急減少はA, D地域の境界で発生したM5.4地震のストレス変化が原因である。

2023年1月頃以後のGNSS観測点間の斜距離増大や珠洲観測点の上昇の変化はM6.5地震の深部でスロースリップを仮定したモデルによる地殻変動と矛盾しない。仮説的に、国土地理院によるM6.5の暫定断層解の深部延長部にスロースリップ断層モデルを置いて観測した測地変化や群発地震活動が、それに首尾一貫しているかというのを確かめた。具体的には珠洲GNSS観測点を基点とした C, A, D の地震群を跨ぐ基線の斜距離時系列や珠洲観測点の比高時系列の増加の Micap-G による理論的計算の結果や、B地域浅部 (Bs) での活動が東方へと拡散し2023年1月頃から加速化したことは、いずれもM6.5地震の深部でスロースリップを仮定したモデルで説明可能である。

M6.5地震発生前日の2023年5月4日から本震発生直前までに、本震付近で纏まった活動 ($M \geq 1.0$ の地震が8個；図8D地域の赤X) が見られた。これらの前震群は以前からの群発地震の発生密度が低い部分で発生し、b値に関しては地域的に高い所で発生している。本震M6.5とその最大余震M5.9もb値分布が高い所で起こった。

大森宇津モデルをM6.5本震から最大余震前までで当て嵌めると、事前に最大余震付近での相対的な空白が明瞭に表れる。これは最大余震M5.9周辺でのゆっくりすべりが起き、本震で誘発された余震活動にストレス・シャドウ (負の ΔCFS) が被さったためと解釈できる。

確率予測の見地からみて、スロースリップの情報を事前に把握することは重要であるが、内陸部でのスロースリップ自身は微小なのでインバージョンが難しい。本震の断層解が分かっているならば、その周辺でのスロースリップを仮定して、測地データや地震活動変化を解釈することはできる

(Ogata, 2010, 2011; 尾形, 2007, 2008) が、規模の微小さから精度の問題が付き纏う。なので、測地時系列の残差解析から様々な場所のスロースリップをシナリオ化し、測地変化や群発地震活動の変化の尤もらしさを評価し、確率予測に繋げることが望まれる。確率予測としては、色々な所に、それらしいスロースリップをシナリオ化して、今回やってみたようなフォワード推論で、多様な測地

変化や地震活動の変化を評価し、そして尤もらしさを確率予測につなげることができるように今後も努力していきたい。

謝意. 本解析に関して気象庁震源カタログ、地震活動解析ソフト (TSEIS; 鶴岡, 1955), 国土地理院地殻変動情報表示のGEONETデータ, 気象研究所の地殻変動解析支援プログラムMICAP-Gおよび統計数理研究所のデロネ型三角網配置上のBayes型平滑化のプログラムHIST-PPM (Ogata Y. et al. 2020)を使用した。

(熊澤貴雄, 尾形良彦; KUMAZAWA Takao, OGATA Yosihiko)

参考文献

- 国土地理院 (2023) 令和5年5月5日の石川県能登地方の地震活動の震源断層モデル (暫定), <https://www.gsi.go.jp/common/000249465.pdf> <https://www.gsi.go.jp/cais/topic20220505.html>
- 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2010) 予知連会報84 (3-5)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou84/03_05.pdf
- 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2022). 予知連会報 107 (7-4)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou107/07_04.pdf.
- 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2022). 予知連会報 108 (7-3)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou108/07_03.pdf
- 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2023). 予知連会報 109 (7-2)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou109/07_02.pdf
- 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2023). 予知連会報 110 (10-6)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou110/10_06.pdf
- 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>
- Kumazawa, T., Ogata, Y., Kimura, K., Maeda, K. and Kobayashi, A. (2016). Background rates of swarm earthquakes that are synchronized with volumetric strain changes, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.442, pp.51-60, doi:10.1016/j.epsl.2016.02.049.
- Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S. (2020). *Geophys. J. Int.*, 223(2), 1304-1312,
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa356>
- Matsu'ura R.S. and Karakama, I (2005) A point-process analysis of the Matsushiro Earthquake swarm sequence: The effect of water on earthquake occurrence, *pure and applied geophysics* **162**, 1319–1345,
- 内藤宏人, 吉川澄夫 (1999) 地震 第2輯 52(1) DOI https://doi.org/10.4294/zisin1948.52.1_101
- Nakajima, J. (2022) Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan, *Earth, Planets and Space* **74**, <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01719-x>.
- Nishimura T, Hiramatsu Y, Ohta Y (2023) Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan, *Scientific Reports* 13, doi 10.1038/s41598-023-35459-z
- Ogata Y. et al. (2020). *Computer Science Monograph*, No. 35, 統計数理研究所,
https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html
- Ogata, Y. (2007) *J. Geophys. Res.* 112, B10301, doi:10.1029/2006JB004697.
- 尾形良彦 (2007) 予知連会報 78(7-11) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou78/07_11.pdf
- 尾形良彦 (2008) 予知連会報79(7-3) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/07_03.pdf
- 尾形良彦, 遠田晋次 (2008) 予知連会報, 80 (12-05)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou80/12_05.pdf
- Ogata, Y. (2010). *PAGEOPH* 167 (8-9) 1115-1127, doi:10.1007/s00024-010-0096-y.

- Ogata, Y. (2011). *Geophys. J. Int.* 186(1), 331-348, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05033.x.
- Ogata, Y. and Tsuruoka, H. (2016). *Earth Planets Space* 68 (44), doi: [10.1186/s40623-016-0410-8](https://doi.org/10.1186/s40623-016-0410-8)
- 鶴岡 弘 (1995) 地震研究所技術研究報告 No. 2. 34-42
- Wiemer, S. (2001) [A software package to analyze seismicity: ZMAP](#) Seismological Research Letters 72 (3), 373-382
- Yoshida K., Uno M, Matsuzawa T, Yukutake Y, Mukuhira Y, Dato H, and Yosida T (2022) Upward Earthquake Swarm Migration in the Northeastern Noto Peninsula, Japan, Initiated From a Deep Ring-Shaped Cluster: Possibility of Fluid Leakage From a Hidden Magma System, *J. Geophys. Res.* 128 (6), <https://doi.org/10.1029/2022jb026047>
- Yoshimura, R. et al. (2022) Three-dimensional electrical resistivity structure around earthquake swarm region in the Northeastern Noto Peninsula. In Meeting, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences, 3-7 November, Sagami-hara, Japan 152th.
- Zhuang J. and Ogata Y. (2006) Properties of the probability distribution associated with the largest event in an earthquake cluster and their implications to foreshocks, *PHYSICAL REVIEW E* 73, 046134, DOI: 10.1103/PhysRevE.73.046134