

10 – 6 最近の能登半島群発地震活動の時空間的特徴と 2023 年 5 月 5 日 M6.5 地震について

Space-time features of the Noto Peninsula swarm activity and the May 5, 2023 earthquake

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これまで 4 つの震央クラスタ A ~ D^{1,2,3)} (第 1 図) に分かれて発生しており, 群発期以前から活動の見られた B 地域の浅部 (0 ~ 14 km) では 2020 年 11 月末により深部へ移動した. 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^{1,2,3)}. 前回の統計数理研究所の報告³⁾ では, 非定常 ETAS モデル

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

の背景強度 $\mu(t)$ 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刻に始まって, B 地域の深部 (Bd) から他地域の脆性断層内への流体貫入によって破壊に至るシナリオと矛盾しないことを示した³⁾. また B 地域深部 (Bd) での間欠的な群発地震で, 背景強度 $\mu(t)$ 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背景強度 $\mu(t)$ の増加が地殻変動に大きく寄与している.

前回の報告 (2022 年 11 月 5 日) までは, B 地域深部 (Bd) 及び C 地域での背景強度 $\mu(t)$ は減少傾向である. しかし, A 地域の背景強度 $\mu(t)$ は高いまま推移し, D 地域の $\mu(t)$ は 2022 年 6 月 19 日の 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った. 最近, 領域の北辺で今年 5 月 5 日に M6.5 の地震が発生した. 本報告では, それに至るまでの群発地震の推移と本震以降の活動について解析した. データは 2023 年 5 月 8 日までの 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.

2. 2022 年 11 月後から最近までの群発地震活動と測地変化の解釈について

A ~ D 各地域を通る 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 (第 1 図). 特に珠洲 - 舳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. ETAS の背景強度 $\mu(t)$ は, 線形スケール (第 2 図上段, 下段は対数スケール) で見れば, A 地域では増大・減少を比較的短周期で繰り返しているが, 全体では緩やかに減少し, D 地域ではゆっくりと増大・減少を繰り返している. B 地域では, 第 1 図によると, 浅い領域 (Bs) に活動が移動してから余震誘発率 $K_0(t)$ と伴に漸増トレンドの継続が見られ, その東部延長部に向けての震央の移動が顕著である (第 4 図). また第 1 図によると, 珠洲を起点とする他観測点との斜距離や珠洲比高は, 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, そして M6.8 地震の直前に舳倉島 - 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, これらが関わる部分は除外して見た.

5月5日の石川県能登地方の震源断層モデル解⁴⁾の上端の深さを10kmと替えて、深部ゆっくりすべり断層モデルを仮定し、MICAP-Gで計算すると、前述の観測斜距離時系列や上昇の増加性トレンドが説明可能である。またB地域東部への群発地震活動の移動(第4図)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⁴⁾とほぼ同様とすれば、 $\Delta\text{CFS} > 0$ となることで説明可能である。

第2図で、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、5月4日の前震を除いて、静穏化がA地域にも及んで見られる。これに対応して、D地域の背景地震率 $\mu(t)$ が減少している。また、A地域の最近の $\mu(t)$ は減少トレンドであり、これに対応する第2図の発生パターンは明白である。同様に、 $\mu(t)$ 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第2図のD地域に、A地域へも及んで、静穏化が見られる。

後者の静穏化の原因は定かでないが、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。D地域の累積図のトレンド変化で1ヶ月ほどの静穏化とその回復は認められる。

3. 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ったこと

A～D地域を含む20km深までの全領域の空間b値分布を、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-PPM⁶⁾によって計算した。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。

第3図(b)におけるAとD地域の水平面投影のb値分布の特徴は、密度が疎な周辺部、特に北部のb値は広く1.5以上であり高いが、中・南部では地震分布が高密度(第5図参照)であり、それに見合っただけで細かいb値の変動が見られる。第3図(a)における垂直面投影の深さ対経度分布ではD地域の方がA地域より等高線が急峻な変化になっている。2022年以前のM4.3以上の震源(黄色丸)はb値分布が低い部分に起きていたが、今回の本震M6.3と最大余震M5.9はb値分布が高い部分に起きた。

地域BとC、及びそれらの垂直面投影図は独特の変化となっている(第3図(c)参照)。第4図からB地域の浅部(Bs)では顕著な東方へのマイグレーションが見られ、この傾向は2023年1月頃から加速化した。M6.5破壊断層の深部ゆっくりすべり断層を仮定すれば、この移動は流体浸透と正の ΔCFS が相俟って説明可能である。

第5図のAとD地域の水平地震密度分布によるとM6.5は北部の疎な部分に発生している。前日(5月4日)から直前の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(第5図参照)で起きたものは8個あり、その平均b値は0.85で標準より低い、それらの殆どは元々極めて低いb値の領域(第3図b参照)に起きている。

4. 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当て嵌めると、下限マグニチュードに関わらず大変良く当てはまる(第6図)。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贖うためにc値は大きくなる。この様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(第6図の下段図)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。これは、第6図右側で深さ対時間図に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でM6.5の余震活動の一部にストレスシャドウが生じたためと解釈できる。

5. 考察

今回の解析は主に M6.5 の断層解を梃に、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パターンが首尾一貫しているかを確かめてみた。同様な試みの参考文献⁷⁻¹⁵⁾があるが、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く、そのため大地震予測に繋がらない。なので、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。

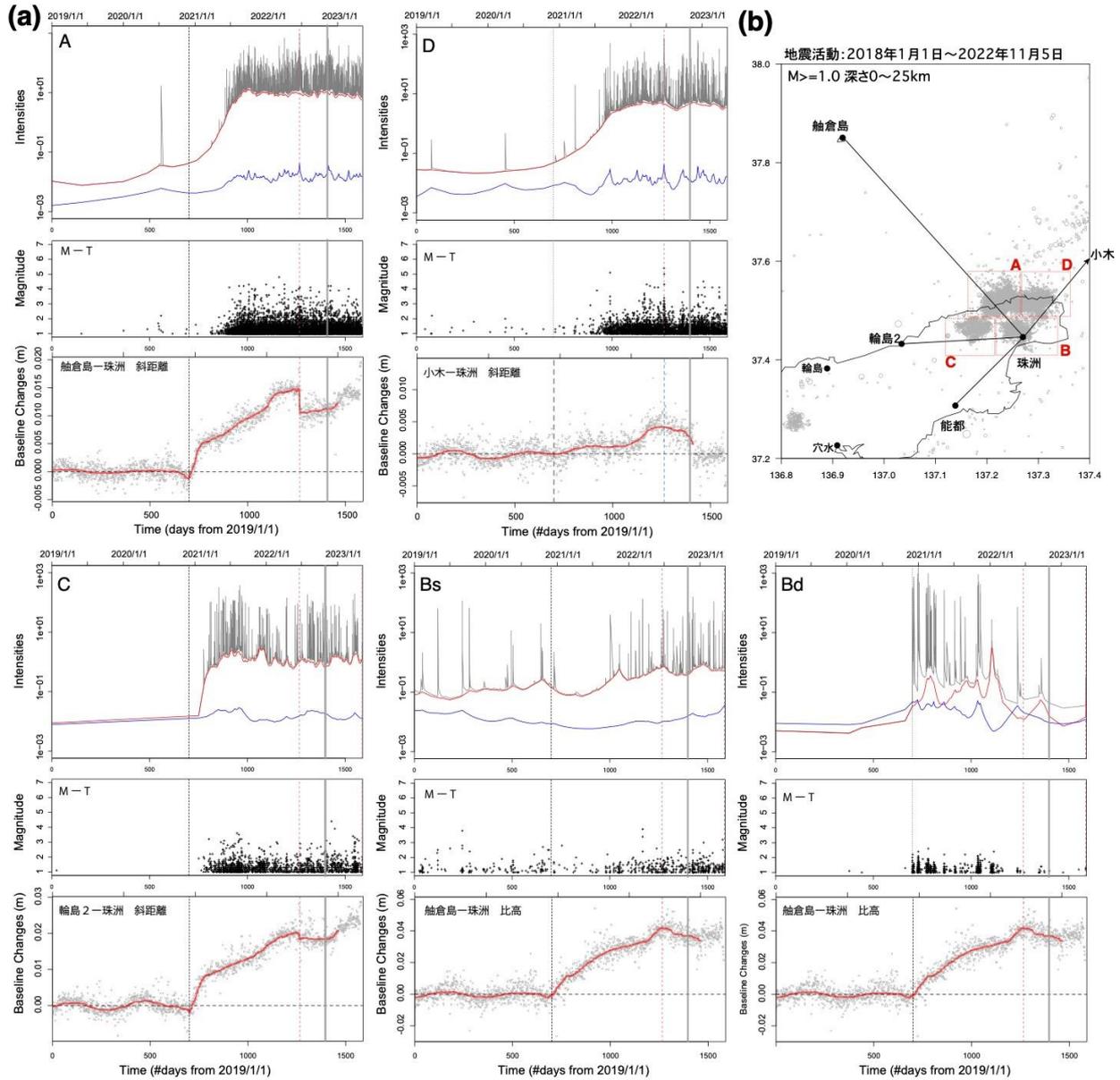
今回の中期予測として、相対的な意味で地震密度分布や地震空白について追及することは意味があったが、前震と思われる狭い本震近傍領域での時間的な b 値の低下はみられなかった。広域な領域での b 値の低下などは、もともと地震活動が、b 値が低い場所へのマイグレーションした可能性もある。

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)¹⁶⁾、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-G⁵⁾ 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)⁶⁾ 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). 予知連会報 **107** (7-4)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou107/07_04.pdf.
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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>
- 5) 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
- 6) 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
- 7) Ogata, Y. (2007) *J. Geophys. Res.* **112**, B10301, doi:10.1029/2006JB004697.
- 8) 尾形良彦 (2007) 予知連会報 **78**(7-11) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou78/07_11.pdf
- 9) 尾形良彦 (2008) 予知連会報 **79**(7-3) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/07_03.pdf
- 10) 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
- 11) Ogata, Y. (2010). *PAGEOPH* **167** (8-9) 1115-1127, doi:10.1007/s00024-010-0096-y.
- 12) 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
- 13) Ogata, Y. (2011). *Geophys. J. Int.* **186**(1), 331-348, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05033.x.
- 14) Ogata, Y. and Tsuruoka, H. (2016). *Earth Planets Space* **68** (44), doi: 10.1186/s40623-016-0410-8
- 15) Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S. (2020). *Geophys. J. Int.*, **223**(2), 1304-1312,
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa356>.
- 16) 鶴岡 弘 (1995) 地震研究所技術研究報告 No. **2**. 34-42

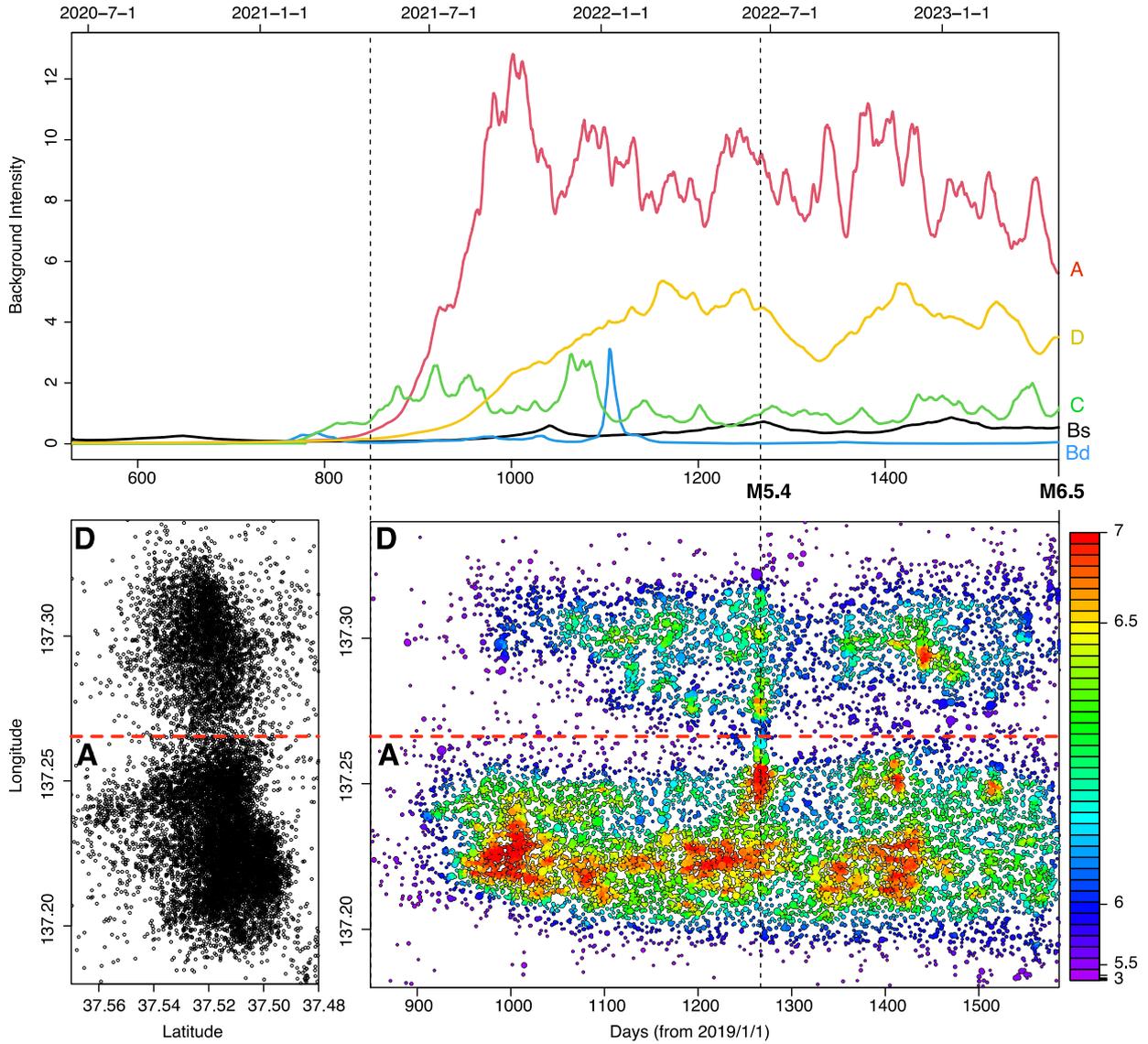


第 1 図 各地域の地震活動と地殻変動。

地図パネル (b) の赤矩形は領域分け (A ~ D)。黒丸は GNSS 観測点。パネル (a) の上段は各領域の地震活動の解析結果の時間変化。灰色のスパイク状曲線は非定常 ETAS モデルの強度変化、赤曲線は背景強度、青曲線は余震誘発強度で、いずれも対数スケール。中段は M-T プロット。下段の灰色丸は斜距離変動または比高変動で、赤曲線は前後の 90 日の移動中央値 (2022 年終わりまで) を表す。縦赤点線は 2022 年 6 月 19 日の M5.4 発生時刻を示す。灰色実線は前解報告 3) の終点 (2022 年 10 月 22 日)。

Fig. 1 Seismicity and crustal changes in each region.

The red rectangles in the panel (b) show the regions A~D. The black circles show the GNSS observation stations. (a) Upper panels: Analysis results of seismic activity in region A~D. The gray spike-shaped curves show the intensity variations of the nonstationary ETAS model (Equation 1). The red curves show the background intensities $\mu(t)$, and the blue curves show the aftershock induced intensities $K_0(t)$, in logarithmic scale. (a) Middle panels: M-T plots. (a) Lower panels: Most relevant GPS changes for region A~D. Grey circles are the daily variations of diagonal distances and relative heights, with running median of 6 months span in red curves up to the end of 2022. The vertical dotted line shows the time of M5.4 occurrence on June 19, 2022. The gray line is the end point of the previous report3) (October 22, 2022).

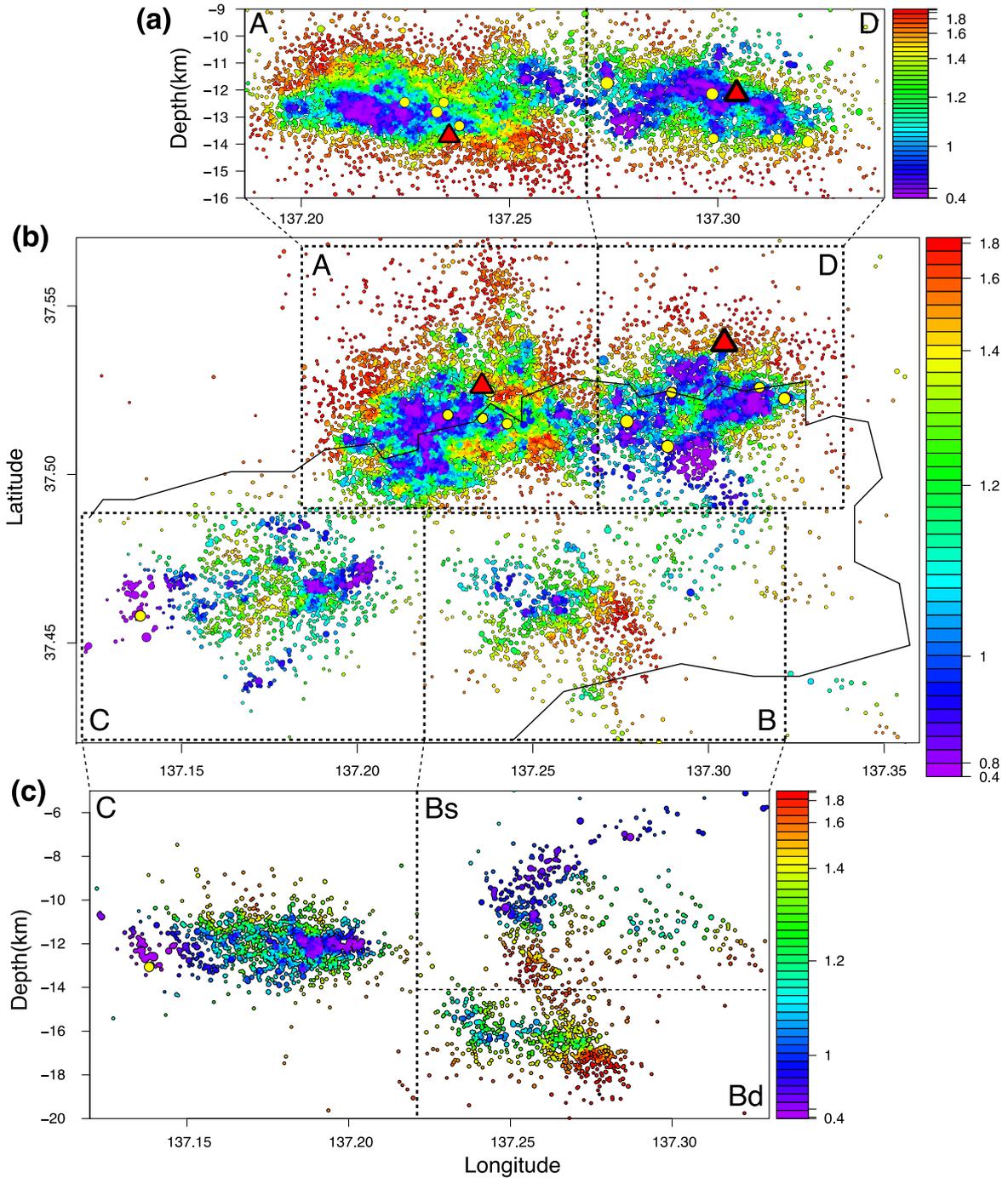


第 2 図 各地域の背景地震強度と A・D 地域の時空間地震分布.

上段の曲線は色別に各地域の背景地震強度を線形スケールで表す. 下段は A 地域と D 地域の震央分布 (左) と時間対経度分布. 色はポアソン密度の対数スケールを表す. それぞれ $M \geq 1$ の地震活動.

Fig. 2 Background seismicity and spatio-temporal seismic configuration of regions A and D.

Upper panel shows the background seismicity of each region in linear scale. Lower panel shows the epicenter distribution in region A and D (left), and time-to-longitude distribution with Poisson intensity in log scale. Cut-off magnitude is $M \geq 1$.

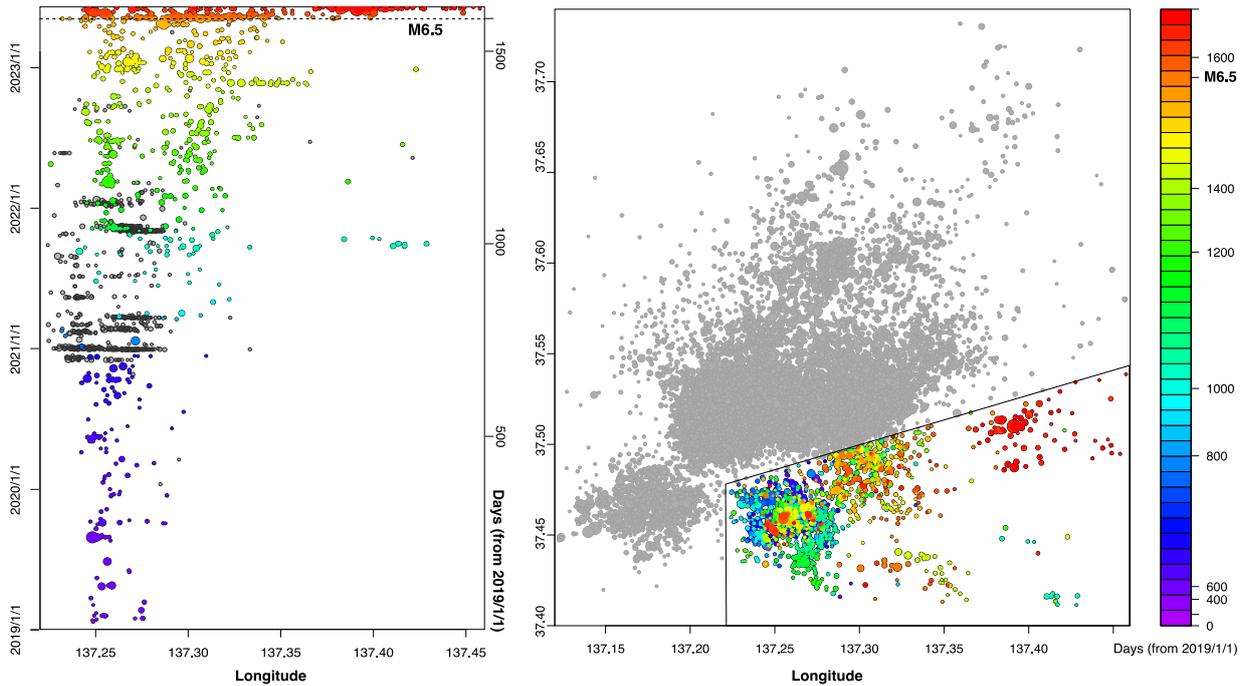


第 3 図 群発地震領域の平滑 b 値。

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. 3 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.

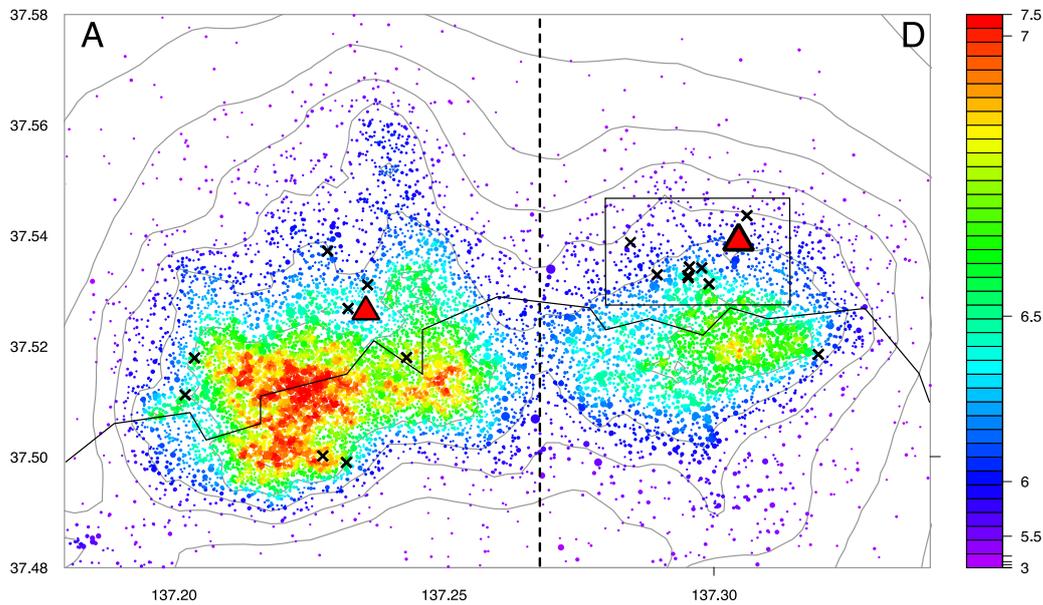


第 4 図 B 地域周辺の震央分布移動の時間推移。

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。左図は経度対時間分布。色はカラーバーに対応する。Bd 地域 (14km 以深) の活動は灰色で表す。右図は震央分布。

Fig. 4 Hypocenter migration around area B.

The target area is the region B and north-east extension. Color shows the occurrence time. Left panel is for the longitude-to-time distribution. Gray colored circles correspond to the hypocenters deeper than 14km (Bd). Right panel shows the epicenters.

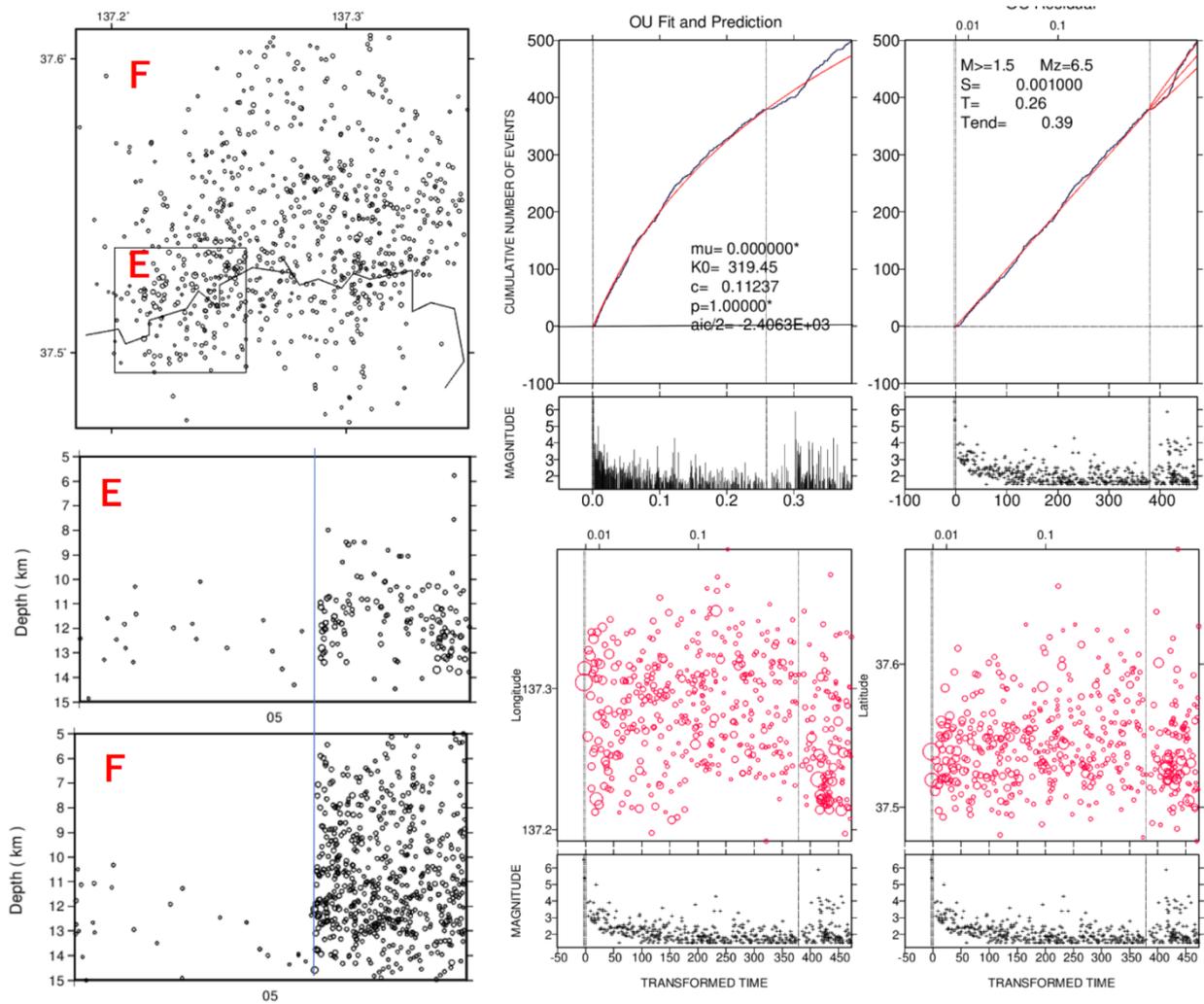


第 5 図 A と D 地域の地震密度分布。

配色の形式は第 2 図と同様。ポアソン強度は対数値の色標や等高線に対応し、赤三角は第 2 図に同じで、×印は 5 月 4 日から M6.5 までの震央分布を示す。

Fig. 5 Seismic density distribution in A and D regions.

Poisson intensity corresponds to the logarithmic color markers and equidistant contour lines of log scale, red triangles are the same as in Figure 2, and X marks the epicentral distribution from May 4 to M6.5.



第 6 図 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（一列目上図）と E 領域と外側（F 領域）の深さ対時間の分布（中、下図）。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（左側は通常時間、右側は変換時間）。下段左側は経度対変換時間図、及び右側は緯度対変換時間。

Fig. 6 Subsequent earthquakes (aftershocks) of the 2023 M6.5 earthquake.

Distribution of epicenters of all foreshocks and aftershocks during May 5 (top of first row) and depth vs. time in region E and outside (region F) (middle and bottom rows). $M \geq 1.5$ activity after the main shock up to 1 hour before the largest aftershock is fitted with the Omori-Utsu formula; upper rows of columns 2 and 3 show cumulative number and M-T diagram (left side: normal time, right side: conversion time). 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.