

## 11 – 12 能登半島群発地震の経過と大地震前後の異常活動の解釈 Interpretation of the course of the Noto Peninsula earthquake swarm and some anomalous activities before and after major earthquakes

熊澤貴雄, 尾形良彦 (統計数理研究所)

KUMAZAWA Takao, OGATA Yosihiko (The Institute of Statistical Mathematics)

### 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 つの地域に別れて発生している (第 1 図)<sup>1-5)</sup>. 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 では, 2020 年 11 月末に活動が突如として 14km 以深へ移行し, 数ヶ月の遅れで周辺領域に時計回りの順で活動が波及した. 先行研究<sup>6-9)</sup> 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, 地震発生地域が分かれた理由は, 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, 北部地域 A と D の地震活動性は高いまま推移し, 両地域を東西に隔てる空白地帯付近で 2022 年 6 月 19 日に M5.4 地震が発生し, その約 19 時間後に D 地域の東端で M5.0 が伴った. 2023 年 5 月 5 日には D 地域東部の北辺で M6.5 の地震が発生し, その余震は北部地域全体からその北方にかけて広く分布した.

群発地震開始から本震 M6.5 とその余震活動を含む非一様な地震発生パターンに対応するために, 本稿の解析には以下の非定常 ETAS モデル<sup>10)</sup> を用いた.

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

このモデルは定常 ETAS モデルの第 1 項の”背景強度  $\mu$  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, これらの変化を赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) 法<sup>10)</sup> で推定するものである. 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.

本稿では, 非定常 ETAS モデルの背景強度関数  $\mu(t)$  及び地震密度分布推定から分かる地震活動異常が, 幾つかのスロースリップまたは間隙流体圧変化のシナリオと矛盾しないことを示す. また, 2023 年 5 月 5 日の M6.5 地震前後の地震発生パターンに流体圧変化が関与したことを示す. データは 2023 年 11 月 12 日のまでの JMA カタログを使用した.

### 2. 群発地震活動の拡散について

本節では 2023 年 5 月の M6.5 発生以前の群発地震活動に対して地域別に非定常 ETAS モデル (1) を当てはめ, 背景強度  $\mu(t)$  と GNSS 観測及び地震発生の時間密度分布との対応を考察した.

B 地域では 2020 年末に突如として深部 (14km 以深) で間欠的な群発地震活動が始まり, それ以前から安定した地震活動の見られた浅い部分は静穏化した. 2021 年中頃より震源は徐々に浅い部分に移動し, 2022 年 1 月頃に背景強度主導の地震バーストが発生している. このバースト期間の地震分布はこの地域の主応力方向に沿っており, その延長方向にある舳倉島観測点と珠洲観測点間の斜距離に急上昇が伴った. このことは流体の大規模移動が伴ったことを示唆する (文献 4: 第 1 図, 第 2 図参照).

B 地域での浅部へのマイグレーション開始から数ヶ月遅れで群発活動が波及した周辺地域 (A, C, D) の背景強度  $\mu(t)$  (第 2 図 a) は、各地域での群発開始から約半年程度の加速的活動を経て定常的活動に推移した。2022 年以降、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 B 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 (赤曲線) は M6.5 直前になって減少していることが明瞭である。一方で D 地域 (黄曲線) は 2023 年 3 月頃以降に一旦減少し、M6.5 直前に再び増加している。

### 3. 2022 年から 2023 年 M6.5 地震発生までの地震活動と測地変動の時空間的特徴について

A と D を合わせた地域の時空間活動 ( $M \geq 1$ ) を、2022 年から M6.5 本震前までの経度対時間の数密度分布で表示した (第 2 図 c)。この結果は経度対経過日数の震源座標 (着色点) を結んだ 2 次元デロネ型関数を用いた空間非一様ポアソンモデルで当てはめ、ベイズ的平滑化プログラム HIST-PPM<sup>11)</sup> によって最適な数密度分布を計算した。この数密度分布でみると、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 (静穏化 Q1)。この静穏化に対応するように、両地域の背景強度 (第 2 図 a) は低下している。また、2023 年以降の A 地域の背景強度 (第 2 図 a) は減少トレンドであり、これに対応する第 2 図 c の発生分布の密度低下は明白である (静穏化 Q2)。同様に、両地域の背景強度 (第 2 図 a) 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 c では D 地域に加えて A 地域の東部にも静穏化が見られる (静穏化 Q3)。

静穏化 Q1 及び Q2 は M6.5 震源断層<sup>12)</sup> (第 1 表) の深部延長域で、ゆっくりすべりを仮定した場合の A と D 地域でのクーロン応力シャドウ (CFS < 0 の領域) と対応する。同仮定による CFS > 0 の領域は、(文献 4: 第 4 図参照) で示した 2023 年初頭前後からの南東部地域震源の東方へのマイグレーションパターンも支持する。さらに、GNSS 珠洲観測点を起点とする周辺地域 (舩倉島, 輪島 2, 小木) との基線斜距離の 2023 年初頭からの増加トレンド (第 3 図) も、同一仮説に基づく MICAP-G<sup>13)</sup> で計算された地表変動ベクトルに基づく距離変化と矛盾しない。静穏化 Q3 は 2022 年 6 月の M5.4 断層の事後滑りを仮定した場合のクーロン応力シャドウと一致している。

### 4. M6.5 地震の前震と最大余震

第 4 図は M6.5 発生直前までの北部地域 A と D の全ての地震の震央 (参考の為、赤△は M6.5 地震と最大余震 M5.9 を付加した) から空間ポアソン過程のベイズ平滑化法<sup>11)</sup> によって得られた地震密度分布である。これによると、M6.5 は D 地域北縁の、群発地震の疎密度な領域に発生した。同様に、M6.5 地震発生前の 1 日間に起きた  $M \geq 1$  の地震の位置を×印で示したが、M6.5 周辺の低密度領域 (四角内) では集中的に 8 個発生している (赤×)。密度分布が示す相場的発生率から逸脱する発生パターンを示すこれらの活動は前震と捉えることができる。第 2 図 a で示した、D 地域の背景強度の M6.5 直前での上昇はこれらの前震活動を反映している。これらの平均  $b$  値は 0.85 で標準より低く、その殆どは元々極めて低い  $b$  値の領域に起きていることが、2 次元デロネ型関数に基づく空間的  $b$  値のベイズ平滑化法<sup>11)</sup> によって得られたパターンから示される (文献 5: 第 3 図参照)。本震と同様に、最大余震 M5.9 も密度分布の等高線が谷状に入り込んだ低い部位で発生していることが分かる。

## 5. 2022 年 6 月の M5.4 地震の最大余震 (M5.0) から M6.5 への局所的マイグレーション活動

2023 年 M6.5 地震発生前の調査期間における最大地震であった 2022 年 6 月の M5.4 地震は A 地域と D 地域を隔てる地震空白地帯付近に発生し、その約 19 時間後に D 地域活動の東端部において最大余震である M5.0 が続発した。後に起こる M6.5 地震とこの地震とは当地域のストレス場に沿って分布しており、主応力方向に採った矩形領域 (第 5 図 a) の地震活動を X-Y 軸対深さへ投影すると第 5 図 b になる。M5.0 から M6.5 にかけて、この領域では地震活動が増加しており、深部の M5.0 からより浅い M6.5 に向かって地震活動が分布する (第 5 図 b)。これらの観測は M5.0 発生後に深部から M6.5 の震源に向けて流体の移動やスロースリップが伴ったことを示唆する。

## 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

M6.5 本震から最大余震直前迄の間で大森宇津モデルが良く当てはまる期間を探すと (第 6 図 a の本震後 0.13 日の縦線参照)、その後に相対的静穏化が顕著に表れる。この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地帯が明瞭となる (第 6 図 b)。これは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。

第 7 図 a は 2019 年から 2023 年 11 月 12 日まで、M6.5 とその余震を含めた活動を地域別に非定常 ETAS で計算した結果を線形スケールで示した。ただし本震 - 余震領域を含む北部両地域 (A と D) は本震直後の甚だしいデータ欠損を考慮して下限マグニチュードを 1.5 とし、B 地域については 2023 年初頭前後からの東方への拡散を考慮した (文献 5: 第 4 図参照)。すなわち第 1 図の B 地域とその東方への延長部分を含む B' 地域を対照領域とした。黄色塗り部分は M6.5 地震以降の期間を表す。第 7 図 b には M6.5 地震以降の背景強度を (1) 式の余震活動度と合わせて対数スケールで示した。背景強度は各地域に於いて本震以降に同様に減少し再び回復する。この結果は M6.5 の余震活動を構成する地震成分の中で、本震の静的トリガー ( $CFS > 0$ ) が誘発するものだけでなく、流体貫入が誘発する成分が本震直後に一旦増加した後大きく減衰し、時間を置いて再び増加したことが原因と考えられる。これは一旦捌けた断層内の流体分布が時間を於いて回復する過程を反映したものと捉えられるかもしれない。背景強度が本震直後に上昇するのは、データ欠損の影響に加えて、断層活動によって地殻内の流体貫入が増加した経過を示したものと考えられる。この所見については下記 8 節を参照されたい。

## 7. まとめ

定常 ETAS モデルは対象とする地震時系列のみから地震活動同士の静的誘発 (static triggering) に基づく地震発生強度を説明しようとする。これに対して非定常 ETAS モデルは外部からの動的誘発 (dynamic triggering) も含み、非地震的誘発効果を考慮した点が特徴である。この外部からの誘発効果は ETAS モデルではパラメータ  $\mu$  (背景強度) に含まれることから、この詳細な時間変動を調べるのがスロースリップや間隙流体圧の変動を間接的に推定することに繋がる。M6.5 本震発生前の背景強度の変化と GNSS 観測との対比考察は先行報告<sup>1-5)</sup>に於いて詳述してきた。

本報告の内容は以下の 4 点に纏めることができる。先ず、群発地震開始地域 B の深部で、2022 年初めに一連の加速的な群発地震活発化を検出し、それに伴う GNSS 基線斜距離の同時的急増加と対比した。この時に流体の大規模な移動とゆっくりすべりが開始、それらが継続したと考えられる。

次に、M6.5 地震の断層モデルの深部延長部で前駆的滑りを仮定した場合の応力変化と、地震活動変化や測地学的変動との対応関係に関して論じた。すなわち深部すべりを仮定した  $\Delta$  CFS パターンは、A 地域全域での静穏化、珠洲観測点を起点とする斜距離の増加トレンド、そして南部地域 (B 地域) の地震群の東方へのマイグレーションと矛盾しない。これらはいずれも 2022 年終わりから見られた変動であった。同様に、M5.4 断層の事後的な滑りを仮定した  $\Delta$  CFS パターンは、M5.4 発生 (2022 年 6 月 19 日) の後暫くして北部地域 (A, D 地域) で見られた活動静穏化と矛盾しない。

そして、M6.5 とその最大余震 M5.9 は群発地震の数密度分布が低い領域で発生し、かつ本震周辺で纏まった数の前震が起こった点を指摘した。また、2022 年の M5.4 地震直後の最大余震である M5.0 から本震 M6.5 への主応力方向に沿う短冊域での地震発生分布は深部から浅部への流体の移動またはスロースリップを示唆する。

最後に本震以降の活動に関しては、本震後 0.4 日間の解析では最大余震 M5.9 直前にその周辺地域で静穏化が見られた。より長期間の非定常 ETAS モデル解析によると M6.5 以降に各地域の背景強度は大きく減少し、暫くして増大した。

## 8. 予測に向けた議論

能登半島の最近のバックグラウンドレートが下がり切って上昇しているという点に関しては、今回の能登半島の M6.5 地震の余震活動には動的誘発に因るものと静的誘発に因るものの両方が混在している。M6.5 地震の直後に流体の大量貫入で背景強度が急増し、余震減衰とともに大きく減少した<sup>22)</sup>。そのまましばらく経つと流体効果そのものが止まってしまうという可能性もあったが、深部からの流体の供給が振り返ってきているという推定は今後の予測において無視できない点である。

本震の断層解が分かっているならば、回顧的に周辺でのスロースリップを仮定して、本報告の様に測地データや地震活動変化を解釈することはできる<sup>14-20)</sup> ので、スロースリップの情報を事前に把握することは予測的観点から重要である。しかし多くの場合、特に内陸部でのスロースリップは規模が微小なのでインバージョンが難しく、精度の問題が付き纏う。その解決案として、可能なスロースリップの断層モデルを敷き詰めて地殻変動解析のプログラム MICAP-G などを用いれば、どの断層モデルが地震発生パターンや GNSS 測地時系列の変化に適合しているか評価でき、それらの適合度を重みとして予測することが考えられる。このようなフォワード推論は組み合わせの問題だから大掛かりでモデル作成の労力や計算負荷が大きいであろうが、今の計算機だったら可能であろうかと思う。

一時的なゆっくり滑りは、中期および短期の予測において大規模地震の前兆の可能性として有望であるが、習慣的なゆっくり滑りや地震後のゆっくり滑りとは何らかの形で区別されねばならない。大地震の確率増加を経験的に評価できるようにするには、地震活動の時空間パターンに基づいてこれらの種類の滑りを統計的に特定する必要がある。加えて測地観測など多様な種類のデータに基づいて物理的設定を制約することにより、前兆滑りをより明確に特定することができれば、確率利得はさらに高くなる可能性がある。

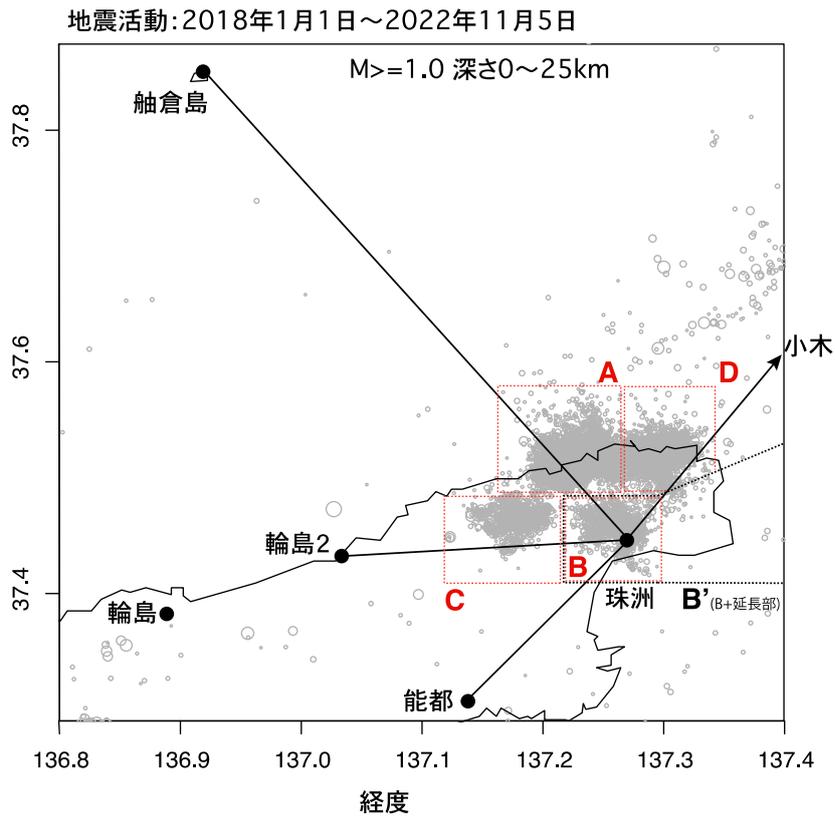
## 謝意.

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<sup>23)</sup>、GEONET データ、地殻変動解析支援プログラム MICAP-G<sup>13)</sup> およびデロネ型三角網上の平滑化プログラム HIST-PPM<sup>11)</sup> を用いた。

東北大理学研究科吉田圭佑氏の地震カタログ<sup>24)</sup> は深さ分布を理解するのに有益であった。

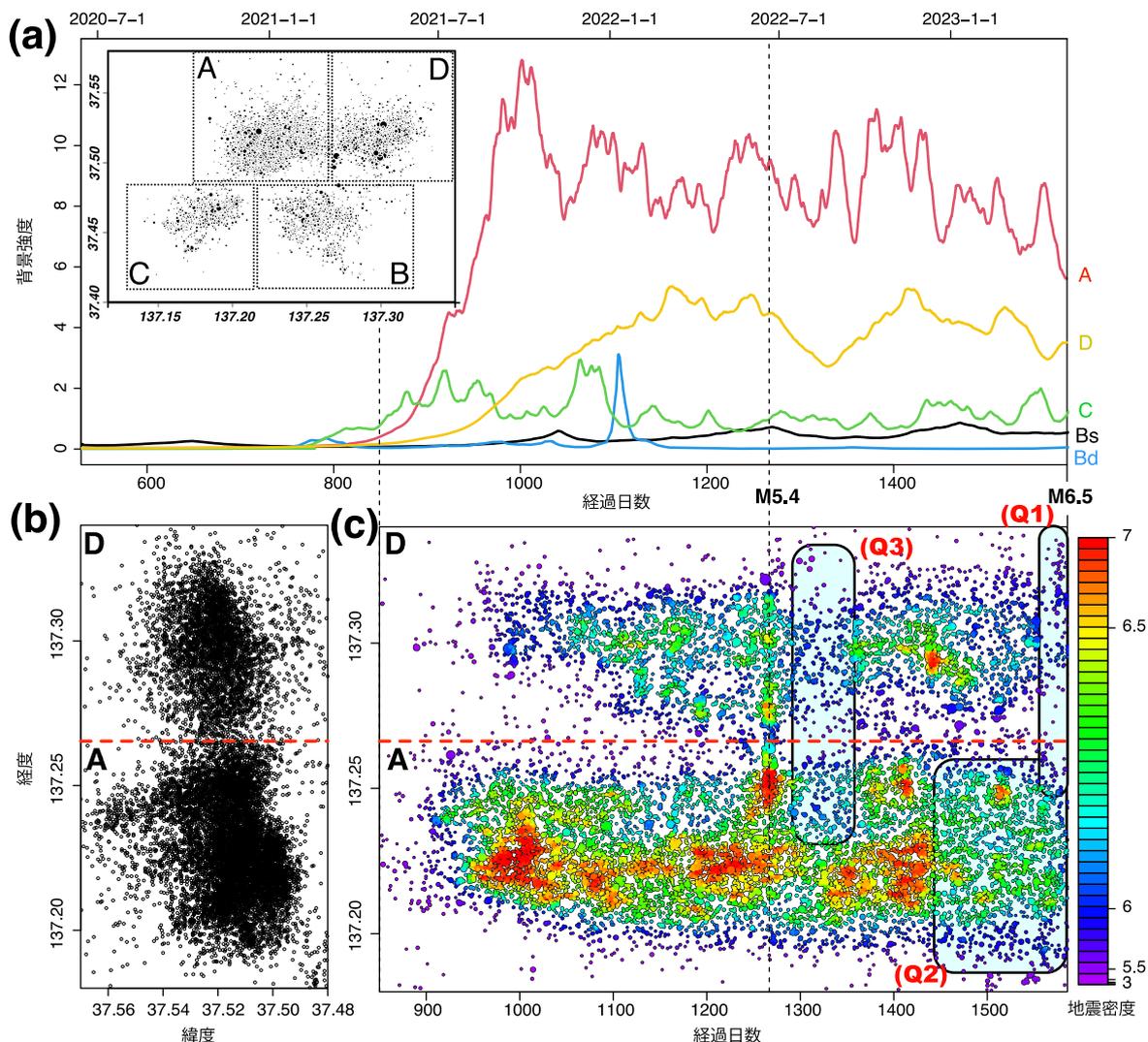
#### 参考文献

- 1) 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](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou84/03_05.pdf)
- 2) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2022a). 予知連会報 **107** (7-4), [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou107/07\\_04.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou107/07_04.pdf)
- 3) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2022b). 予知連会報 **108** (7-3), [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou108/07\\_03.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou108/07_03.pdf)
- 4) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2023a). 予知連会報 **109** (7-2), [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou109/07\\_02.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou109/07_02.pdf)
- 5) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2023b). 予知連会報 **110** (10-6), [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou110/10\\_06.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou110/10_06.pdf)
- 6) Nakajima J (2022) *Earth, Planets and Space* **74**, <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01719-x>
- 7) Nishimura T Hiramatsu Y, Ohta Y (2023) *Scientific Reports* **13**, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35459-z>
- 8) Yoshida K et al (2022) *J. Geophys. Res.* **128** (6), <https://doi.org/10.1029/2022jb026047>
- 9) Yoshimura, R et al. (2022) *Planetary and Space Sciences*, 3–7 November, Sagamihara, Japan 152th.
- 10) Kumazawa T, Ogata Y (2013) *J Geophys. Res. Solid Earth* **118** (12): 6165–6182. <http://doi.wiley.com/10.1002/2013JB010259>
- 11) 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](https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html)
- 12) 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>
- 13) 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](https://doi.org/10.4294/zisin1948.52.1_101)
- 14) Ogata Y (2007) *J. Geophys. Res.* **112**, B10301, <https://doi.org/10.1029/2006JB004697>
- 15) 尾形良彦 (2008) 予知連会報 **79** (7-3), [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/07\\_03.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/07_03.pdf)
- 16) Ogata Y (2010). *PAGEOPH* **167** (8-9) 1115-1127, <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0096-y>
- 17) Ogata Y (2011). *Geophys. J. Int.* **186(1)**, 331-348, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05033.x>
- 18) 尾形良彦 (2007) 予知連会報 **78** (7-11), [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou78/07\\_11.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou78/07_11.pdf)
- 19) 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](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou80/12_05.pdf)
- 20) Kumazawa T, Ogata Y, Toda S (2020). *Geophys. J. Int.*, **223(2)**, 1304-1312, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa356>
- 21) Ogata Y, Tsuruoka H (2016). *Earth Planets Space* **68** (44), <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0410-8>
- 22) 尾形良彦, 熊澤貴雄 (2023) 第 240 回地震予知連絡会議, 第 110 巻予知連会報に掲載予定.
- 23) 鶴岡 弘 (1995) 地震研究所技術研究報告 No. 2. 34-42
- 24) Yoshida, K et al (2023) Zendo, <https://zenodo.org/records/10019860>



第 1 図 震央マップと GNSS 観測網. 地図中の赤い四角は地域分 (A-D) を示す. 黒い多角形 B' は地域 B とその東の延長を含む地域を表す. 黒丸は GNSS 観測点を示す.

Fig. 1 Epicenter map and GNSS observation network. Red squares in the map indicate the regional divisions (A-D). Black polygon 'B' indicates region B and its eastern extension. Black circles indicate GNSS observation points.



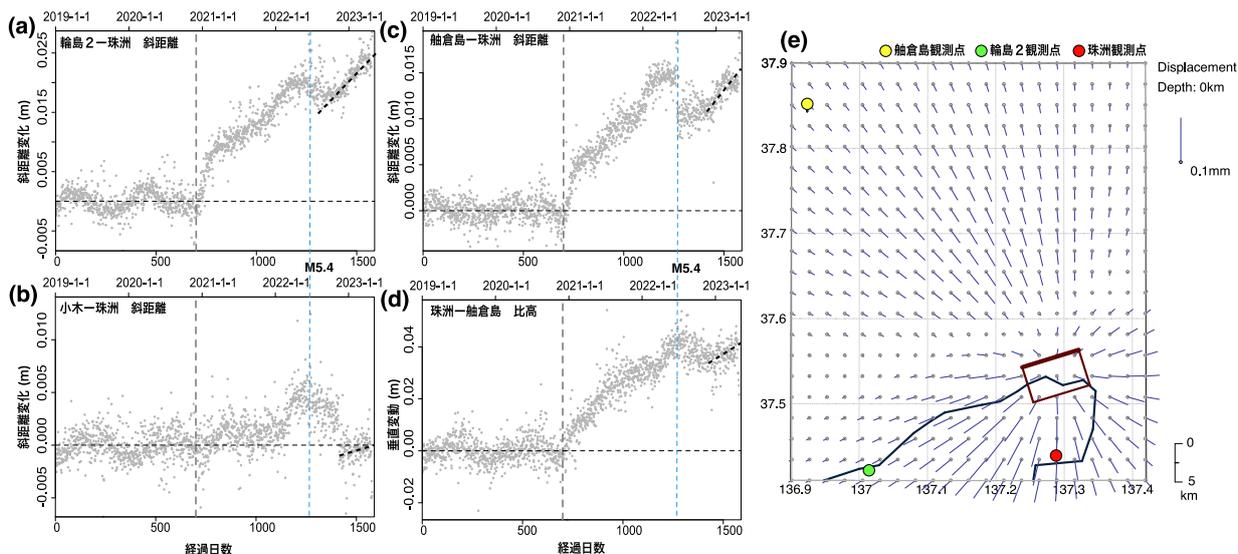
第 2 図 背景ポアソン強度の時間変化と時空間変化 (2023/5 M6.5 発生以前). (a) 各地域 of 背景地震強度を色別で線形スケールで表す. (b) A 地域と D 地域の震央分布. (c) 時間対経度分布. 色はポアソン密度を表す. それぞれ  $M \geq 1$  の地震活動. 特徴的な静穏化領域を Q1~Q3 で示す.

Fig. 2 Background Poisson intensity rates of time and of space-time (before the 2023/5 M6.5 event). (a) Variation of the background intensity function of time in each region on linear scale. (b) Epicenters of the earthquakes of  $M \geq 1$  in regions A and D. (c) Coordinate of the longitude vs time events with colors indicated logarithmic intensity values at respective events' coordinates of the optimally smoothed Delaunay surface of Poisson intensity rates in logarithmic scale. Systematically low Poisson intensity (density) regions are indicated by Q1~Q3.

第 1 表 国土地理院の M6.5 震源断層モデル解<sup>11)</sup>

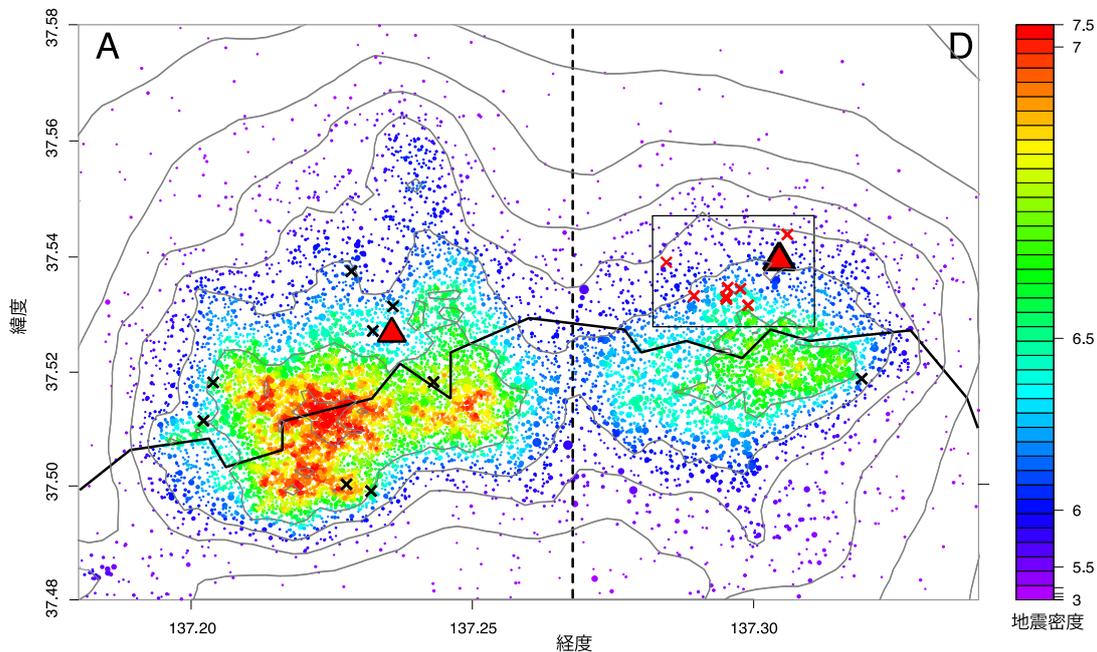
Table 1 The M6.5 epicenter fault model solution<sup>11)</sup> by GSI.

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



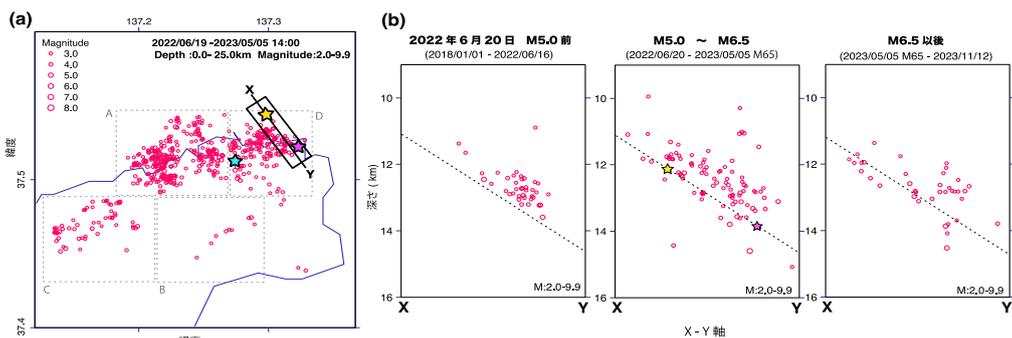
第 3 図 珠洲観測所を起点とした M6.5 地震前 1 年間の斜距離及び比高の時系列 (a ~d) は斜距離変動 (珠洲観測点とそれぞれ輪島 2, 小木, 舩倉島観測点間) 及び舩倉島を基準とした珠洲の垂直変動. 2023 初頭前後以降 2023 年 5 月 4 日までのトレンドを黒点線で示す. (e) M6.5 地震の断層<sup>12)</sup>の深部延長部モデル (茶色矩形) でのスロースリップを仮定した場合の地表の変動ベクトル.

Fig. 3 Time series of the distances and specific height between GNSS observation points during one year before the M6.5 earthquake. (a ~d) Distance variations (between Suzu station and Wajima2, Ogi, and Hekurajima stations, respectively) and vertical variations of Suzu with respect to Hekurajima; trends from around the beginning of 2023 to May 4, 2023 are shown by black dotted lines. (e) Vector of surface deformation assuming slow slip in the M6.5 deep extension (brown rectangle).



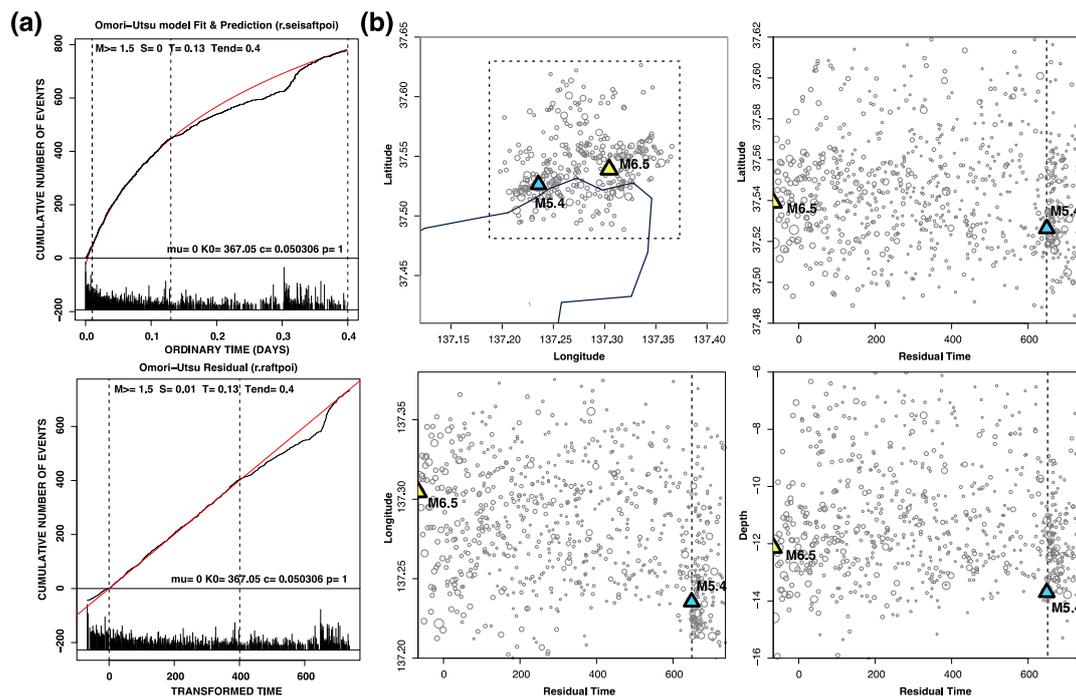
第 4 図 A と D 地域の空間地震密度分布. 配色の形式は第 2 図と同様. 色票は 1 平方度当たりの対数平均個数で密度等高線に対応し, 赤三角は東側が M6.5, 西側が M5.9 を表す. ×印は 5 月 4 日から 5 月 5 日の M6.5 までの震央分布を示す.

Fig. 4 Spatial density intensity in A and D regions. The Poisson intensity corresponds to the logarithmic color markers and the equidistant contour lines. Red triangles are epicenters of the M6.5 and M5.9 from east to west, and red and black × marks the epicenters that occurred from May 4 to 5 before the M6.5 occurred.



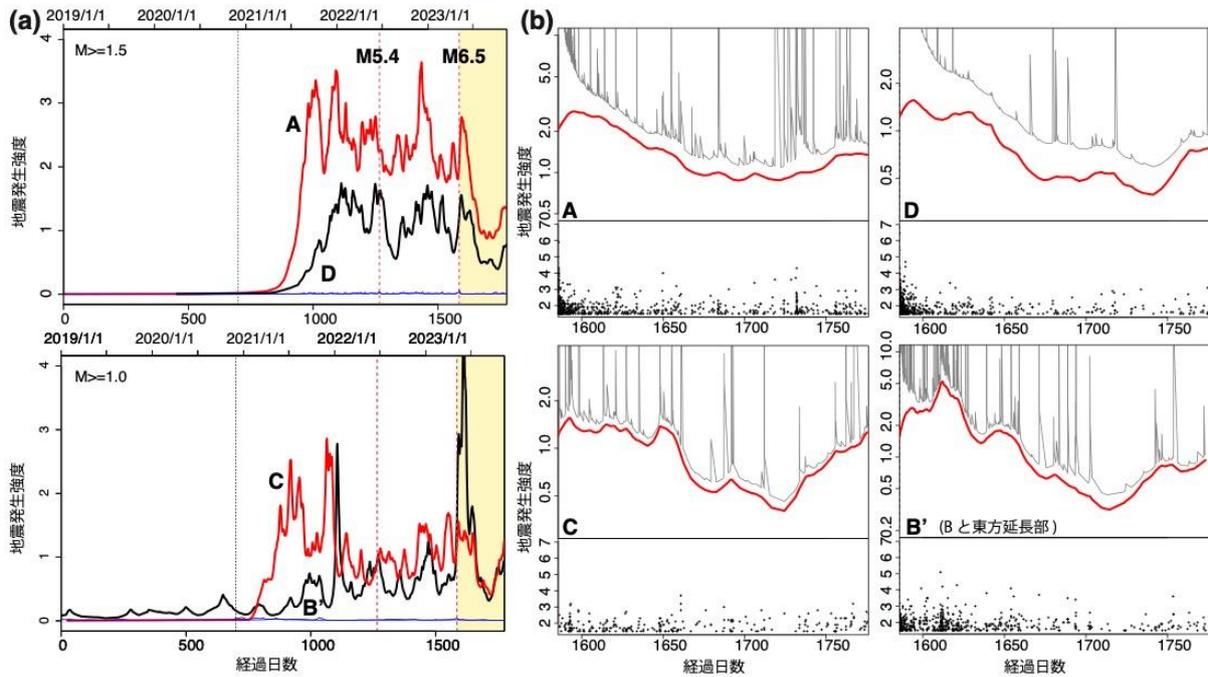
第 5 図 M5.4 地震から M6.5 地震にかけての小地域の深さ分布。(a) 2022 年 6 月 19 日の M5.4 (青色星) から 2023 年 5 月 5 日 M6.5 (黄色星) までの震央分布。ピンク色星は 2022 年 6 月 20 日の M5.0 (M5.4 の最大余震) を表す。M ≥ 2.0。(b) パネル (a) の矩形領域内の震源を X—Y 軸対深さ方向へ投影したもの。期間は左からそれぞれ 2018 年から M5.0 直前まで、M5.0 から M6.5、M6.5 以降 (2023 年 11 月 12 日まで)。

Fig. 5 Distribution of hypocenter depths in small areas between M5.4 and M6.5. (a) Epicenter distribution of M ≥ 2.0 events from M5.4 on June 19, 2022 (blue star) to M6.5 on May 5, 2023 (yellow star). The pink star represents the M5.0 on June 20, 2022 (the largest aftershock of M5.4 earthquake). (b) X-Y axis distance versus depth projection of the epicenter within the rectangular region in panel (a). Periods from left to right panels are 2018 to just before M5.0, M5.0 to M6.5, and after M6.5 (until November 12, 2023), respectively.



第 6 図 M6.5 地震の余震活動。2023 年 5 月 5 日の M6.5 から 0.4 日間の M ≥ 1.5 余震活動。(a) M6.5 から 0.13 日までを大森宇津式で当て嵌め、外挿した (赤曲線)。黒曲線は観測累積数。上段は通常時間、下段は変換時間 (残渣時間)。(b) 震央分布 (左上) 及び変換時間に基づく時空間分布。

Fig. 6 Aftershock of M6.5. Aftershock activity of M ≥ 1.5 events during 0.4 days after the May 5, 2023 M6.5 event. (a) Extrapolation by fitting the Omori-Utsu formula from M6.5 to 0.13day (red curve). The black curve is the cumulative number of observations, M ≥ 1.5. upper panel: normal time, lower panel: transformed time (residual time). (b) Epicentral distribution (upper left), and spatiotemporal distribution based on the transformed time.



第 7 図 M6.5 地震以降の余震活動度と背景強度の変化。(a) 2019 年から 2023 年 11 月 12 日までの背景強度推定値。上パネルは地域 A と D の背景強度 (それぞれ赤線と黒線) で下限マグニチュードは M1.5。下パネルは地域 C と B' (それぞれ赤線と黒線)。B' は旧 B 地域と東方延長部を含む (第 1 図参照) で下限マグニチュードは M1.0。縦軸はリニアスケール。M6.5 以降を薄黄色で強調した。(b) M6.5 以降の背景強度 (赤線) を地域別に表示。スパイク曲線は非定常 ETAS モデルの強度関数。縦軸は対数スケール。

Fig. 7 Changes in aftershock activity and background intensity since the M6.5 Earthquake. (a) Background intensity estimates from 2019 to November 12, 2023. The upper panel shows the background intensity for regions A and D (red and black lines, respectively). The lower magnitude is M1.5. The lower panel is for regions C and B' (red and black lines, respectively). B' includes former area B and its eastern extension (Fig. 1). The lower magnitude is M1.0. Vertical axis is linear scale. The area after M6.5 is highlighted in light yellow. (b) Background intensity (red line) after M6.5 is shown by region. Spiky curves are intensity functions of the non-stationary ETAS model. Vertical axis is on a log scale.