

11 – 12 2024 年 M7.6 能登半島地震前後の地震活動の逆解析

Inversion Analysis of Seismic Activity Before and After the 2024 Noto Peninsula M7.6 Earthquake

尾形良彦, 熊澤貴雄 (統計数理研究所)

Ogata Yoshihiko and Kumazawa Takao (The Institute of Statistical Mathematics)

1. はじめに

能登半島とその付近には 1923 年以來, 1993 年 M6.6 能登半島沖や 2007 年 M 6.9 能登半島地震の余震を除いて, M4 クラス以上の地震活動が殆んど見られない. 著者は 2007 年 M 6.9 能登半島地震の大森宇津式によるデトレンド変換時間の時空間分布から, 顕著な余震活動の拡散や静穏化部分を捉えた¹⁾. 本稿でもデトレンドは, ETAS モデルでなく, 大森宇津式で行う. これは余震域中の相対的な静穏化や活発化の両方の所在を可視化し, 局所的なストレス変化を掴むためである²⁾. 実例として日本周辺の多数の余震活動に適用され, 余震活動の時空間的異常パタンの可視化に有効であった²⁾.

本報告では能登半島北部で 2020 年以來続いた群発地震活動の延長で起きた 2024 年 1 月 1 日の M7.6 能登半島地震と, 2023 年 5 月 5 日の能登半島北部 (奥能登) の M6.5 地震の余震活動についての時空間的な統計的特徴を比較した. さらに本震直後の著しく欠測データを含む震源カタログデータに基づいた地震活動の解析法⁸⁾の応用について議論する.

2. 2024 年 M7.6 能登半島地震と 2023 年 M6.5 奥能登の地震の余震減衰の時空間的特徴.

M7.6 地震の直後からの下限 M2 と M3 の余震について, 第 1 図の上段にあるような当てはめに基づいてデトレンドを行った. ここで本震直後の欠測による不均質性をみかけで補うように当てはめると大森宇津式の c 値が大きくなる. 第 1 図の中下段は, デトレンド時空間分布に対して, M2 および M3 以上の余震配置と時空間分布を 2 次元ポアソン過程で平滑化³⁾した強度 (数密度) 関数を示している. 全体として時間的な射影では一様であるが, 空間的には非一様性が見える. 特に本震直後の初期では, 本震位置に対して南西部の余震の数密度が北東部の密度より高いこと, そして時間的に経過すると本震を含む中央部の密度が低下する一方, 余震域両端の密度は高いままで, 拡散は見られない. M3 以上の余震密度も同様な特徴を示している.

第 2 図は, M6.5 奥能登の地震の余震減衰に関して, 第 1 図と同様に平滑化したデトレンド時空間分布を示している. ただし本震から 5 ヶ月までの時間区間に大森宇津式を当て嵌め, M7.6 地震時まで延長したトレンドを使った. まず M5.9 の最大余震の直前に地域的な静穏化が見える⁴⁾. このデトレンド時空間分布から, 余震活動の周辺部で全方位へのゆっくりとした拡散が見られる. さらに余震域内の中西部で M7.6 地震時まで相対的に活発化している. この活発化部位は M7.6 地震の震央に対して北西部の高密度群に帰する. そして, M7.6 地震の直前に全域で密度が低下 (静穏化) している (第 2 図の右端と下端の拡大パネル参照).

3. M7.6 地震と M6.5 地震それぞれの余震の時空間的 b 値分布について.

M7.6 地震の直後からの $M \geq 2$ と $M \geq 3$ の余震のマグニチュードについて, デトレンドを行った空間および時空間上で, G-R 分布を仮定した 2 次元 b 値変化モデルの最適平滑化³⁾を ABIC 最小

化から求めた。ただし、地震データの完全性のため本震直後の欠測区間を除いた。第 3 図右側及び中央パネルから分かるように、 b 値変化幅は極めて小さく、ほぼ定数 ($b \doteq 1.1$) である。

他方、M6.5 の余震については、かなり荒い変化 ($b = 0.8 \sim 1.8$) が示され (第 3 図右側パネル)、余震域内各地のクラスタの地域特性を反映していると思われる。

以上は本震直後の欠測時間区間を除外して平滑化した。以下 5 節で扱っている欠測を考慮した場合の b 値の平滑化の結果と比較参照されたい。

4. M6.5 と M7.6 地震前後の背景地震活動度の変化について

能登半島で、第 4 図挿入地図領域に、非定常 ETAS モデル^{5,6)} を当てはめた結果が示されている。 μ 値 (背景強度) と K 値 (余震強度) の平滑化制約に対して、M6.5 地震時と M7.6 地震時での不連続性 (飛躍) を仮定すると ABIC は 340 ほど改善され、これらの時点での平滑化が棄却される。とくに第 4 図右側の拡大パネルには、M6.5 地震時の μ 値の飛躍後に緩やかな増加が見られるが、ここでは M6.5 地震直後の $M \geq 1.5$ 余震の欠測効果を考慮したい。

5. M7.6, M6.5 地震直後の余震検知率の推移と定常・非定常 ETAS モデルを用いた逆解析

地震活動解析の精度向上のため、気象庁が検出・編集したカタログの殆ど全ての地震を使用する。先ずカタログにリストされた地震のマグニチュード列の検出率分布を G-R 分布に掛け合わせたモデル (第 5 図左側パネル)⁷⁾ から b 値、 ν 値、 σ 値の時間変化を ABIC 法で求める。そして欠測データがモデル推定および予測に与える影響を考慮し真の地震発生率を計算する方法を開発した⁸⁾。

先ず 2024 年 M7.6 能登半島地震の本震直後の余震活動を解析した。この第 5 図の中央下部パネルで 50% 検出率には昼夜の変化が捉えられており、第 5 図中央上部パネルの b 値は一定である。 σ 値には有意な変化が見られるが、これには M7.6 地震の余震域の広さが反映していると思われる。他方 M6.5 奥能登の地震の余震活動の σ 値は 0.274 で一定であるが、 b 値は 0.9 ~ 1.3 を摂動している。ここで注目したいのは、上記 3 節で得られた結果では M7.6 の余震 b 値の変化幅が極めて小さくほぼ定数であるのに対して、M6.5 の余震 b 値の変化はかなり荒い有意な変化 (第 3 図右側パネル) が示されており、理屈が良く合っている。

次に第 5 図中央下部パネル (および第 6 図左下のパネル) に示した $M \geq 2$ の余震の検出率関数を定常 ETAS モデルの強度関数に掛け合わせ (第 6 図上段の図式参照)、検出された余震の強度関数を定義し、その対数尤度を ETAS モデルのパラメタに関して最大化し、最尤推定値 (MLE) を求める⁷⁾。この MLE パラメタ値の ETAS モデルが、欠測を補正した ETAS モデルの真の強度関数を与え、第 6 図の強度関数の赤い曲線で示されている。この補正 ETAS モデルによる $M \geq 2$ の余震の発生率は最初の数日の欠測を大幅に補完し、その後もきめ細かく欠測データを補っている。当該区間の μ 値は定数 (94.12 / 日) である。

仮説を広げて、M7.6 地震の余震活動として非定常 ETAS モデルを考える場合、 μ 値と K 値の時間変化の粗さに罰則の重みを調節して ABIC 法による最適な平滑化を図る。それぞれの重み (超パラメタ) に対して ABIC 値を参照すると、 μ 値の重みと K 値の重みは何れも大きい程 ABIC が小さくなって μ 曲線も K 曲線も殆ど定数となるので、結局定常 ETAS モデルと同等となり、その最大事後分布 (MAP) 解は第 6 図の MLE 解と同じである。

同様に M6.5 地震の余震に対して、非定常 ETAS モデルの強度関数 (第 6 図右下パネル) に $M \geq 1.0$ の余震の検出率変化 (第 5 図右下パネル) を掛け合わせ、検出された余震の強度関数を定義

し、その対数尤度を基に平滑化に関するベイズ計算で得られた最小の ABIC は有意に非定常であった。第 6 図右下のパネルではそのようなインバージョンの最大事後分布 (MAP) 解を赤曲線で示す。最初の数日の欠測が大幅に補完されており、以降は見かけの発生率とほとんど重なる。特に μ 値は、第 4 図では控えめであったが、欠測効果を勘案すると、本震後数日間で 10 倍のオーダーで急増し減衰している。これは M6.5 本震の震動により余震域全体で流体間隙圧が強く変動したものと推察される²⁾。

謝意

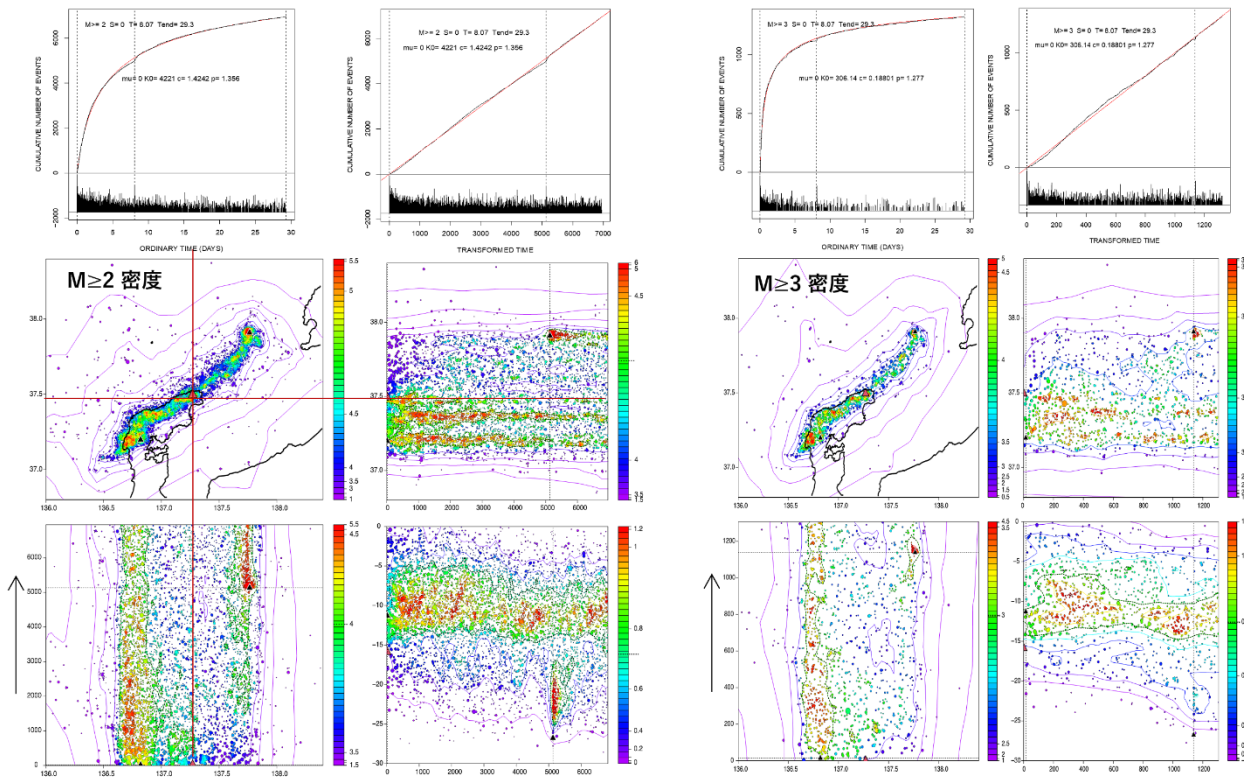
本解析に関して 2024 年 1 月 30 日時点での気象庁 PDE 震源カタログを使用した。

(尾形良彦, 熊澤貴雄)

OGATA Yosihiko, KUMAZAWA Takao

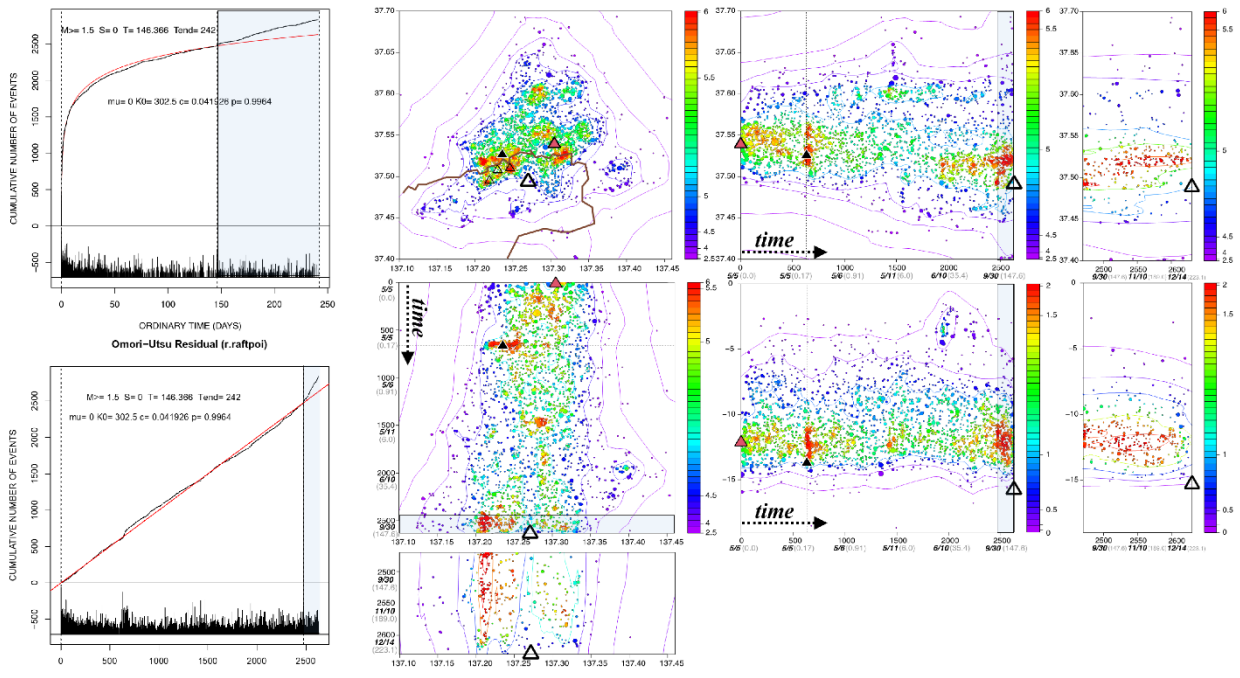
参考文献

- 1) 尾形良彦 (2007) 地震予知連絡会会報 **78** (7-11),
http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou78/07_11.pdf
- 2) Ogata, Y. (2010). *Geophys. J. Int.*, **181**(3), doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04542.x.
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) Kumazawa, T. and Ogata, Y., (2013) *J. Geophys. Res.*, **118**, 6165–6182.
- 6) 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.
- 7) Ogata, Y. and Katsura, K. (1993) *Geophys. J. Int.*, **113**, 727–738.
- 8) 尾形良彦, 熊澤貴雄 (2023) 予知連会報 **111**(6-2)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou111/06_02.pdf.



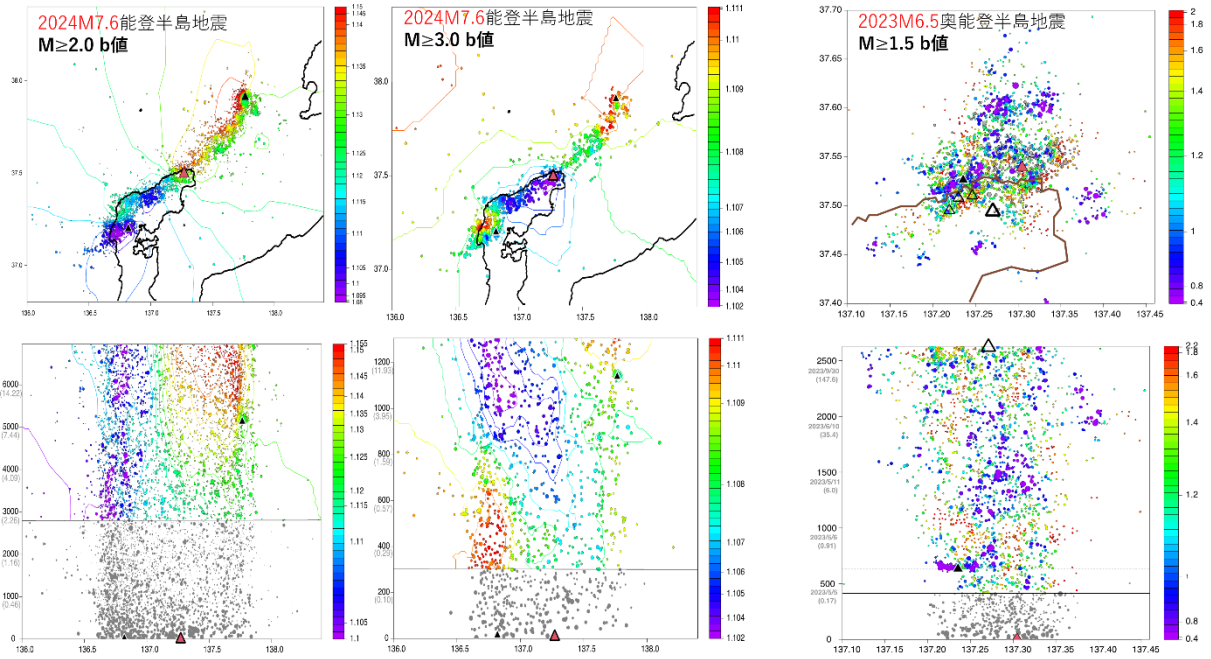
第 1 図 M7.6 能登半島地震の余震のデトレンド時空間配置。
 $M \geq 2$ (左) および $M \geq 3$ (右)。大森宇津式の残差時間(上段: 本震から 1/30 までを当て嵌め)対緯度, 経度, 深度の数密度分布をそれぞれ ABIC に基づくベイズ平滑化で推定。色票と等高線は単位面積あたりの数密度を表す。

Fig. 1 Detrended spatio-temporal configuration of the aftershocks of the M7.6 Noto Peninsula earthquake.
 $M \geq 2$ (left) and $M \geq 3$ (right). The Poisson density estimate of the Omori-Utsu type residual time (top panels: applied to 1/30 from the main shock) versus latitude, longitude, and depth using Bayesian smoothing with ABIC. The color plot and contour lines represent the point density per unit area.



第 2 図 2023 年 M6.5 奥能登地震の余震のデトレンド時空間分布。
大森宇津式の残差時間（左側パネル:本震 (▲) から M5.9 までを当て嵌め, M7.6 (Δ) まで延長) 対緯度, 経度, 深度の数密度分布をそれぞれベイズ平滑化で推定. 延長期間 (薄青シャドー部分) を拡大したものを最右側と下側パネルに載せる. 色票と等高線は単位面積当たりの点の数密度を表す. 時間軸括弧内は本震からの経過日数を表す.

Fig. 2 Spatio-temporal plot of the detrended aftershocks of the 2023 M6.5 Okunoto earthquake. By estimating the Omori-Utsu formula fit from the main shock (▲) to M5.9 and the extension period to M7.6 (Δ), 2D patterns of residual time versus latitude, longitude, and depth are obtained using Bayesian smoothing with ABIC. Enlarged versions of the extension period on light blue shading are placed on the right and bottom panels. The color chart and contour lines represent point density per unit area. On the time axes, the numbers in brackets represent the number of days since the main shock.

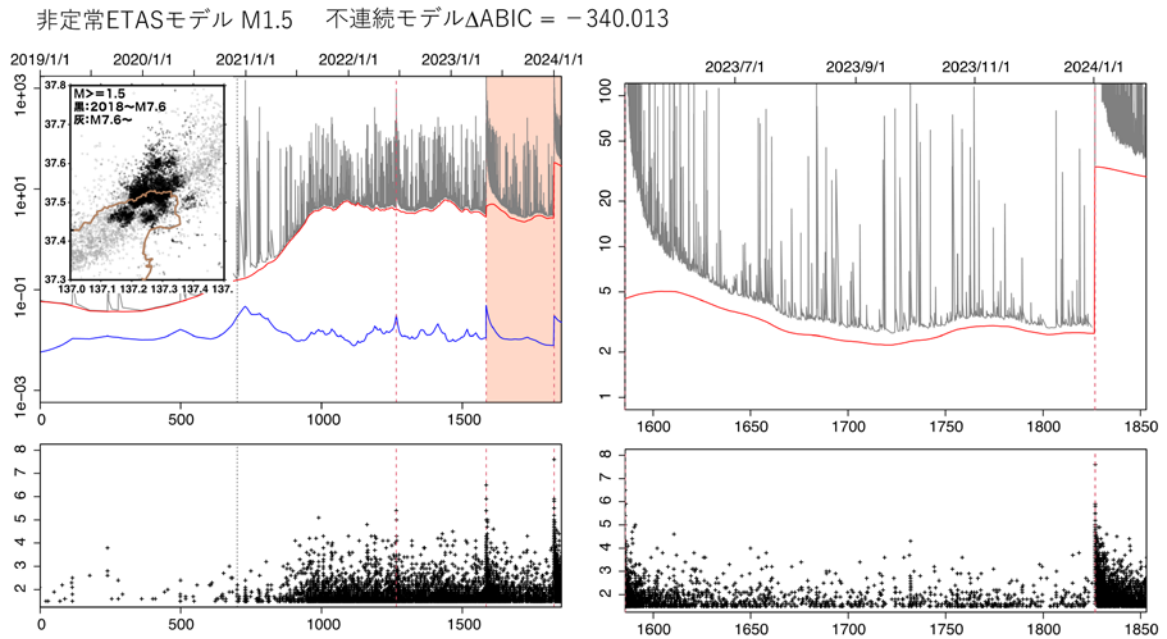


第 3 図 能登半島地震の余震の時空間 b 値分布.

マグニチュード下限が殆ど完全に検出されている時間区間 ($M7.6 M \geq 2$ は本震から 2 日経過時以降, $M7.6 M \geq 3$ は 0.2 日以降, $M6.5 M \geq 1.5$ は 0.1 日以降) における b 値 (色票と等高線) の時空間平滑化. 下段時間軸にそれぞれのデトレンドに用いた大森宇津推定の残差時間と, 括弧内に本震からの経過日数を示す.

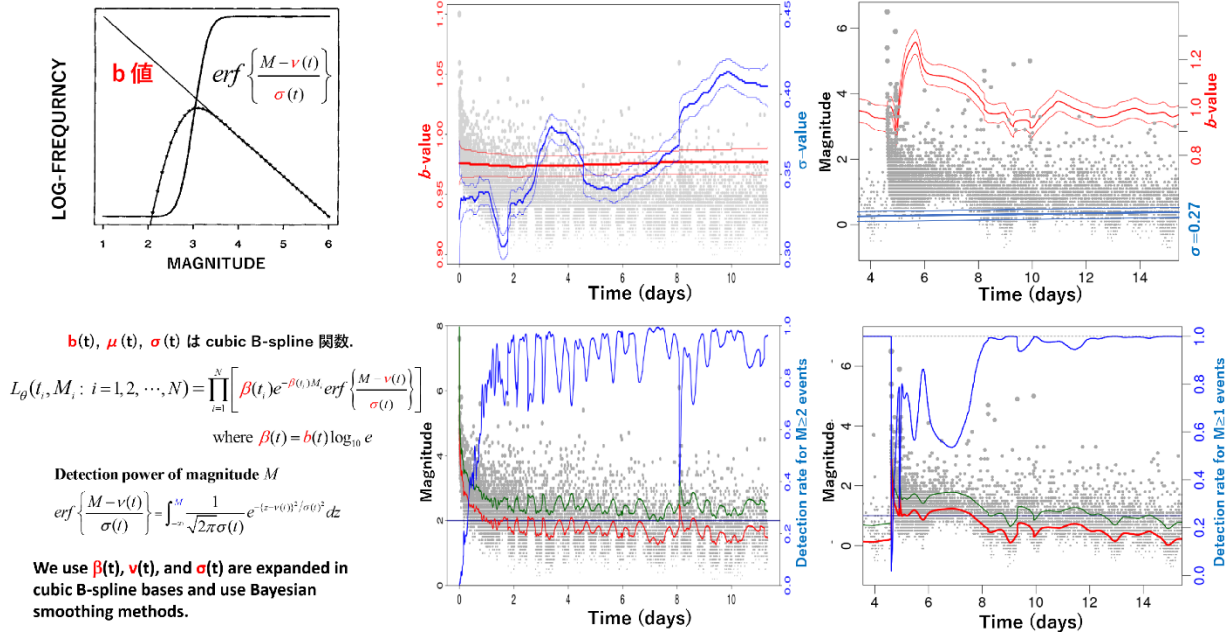
Fig. 3 Spatio-temporal distribution of b -values.

Spatio-temporal smoothing of the b -values in the time interval where the lower magnitude limit is almost completely detected (from the left, after 2, 0.2, and 0.1 days from the main shock, respectively). The color plots and contour lines are b -values.



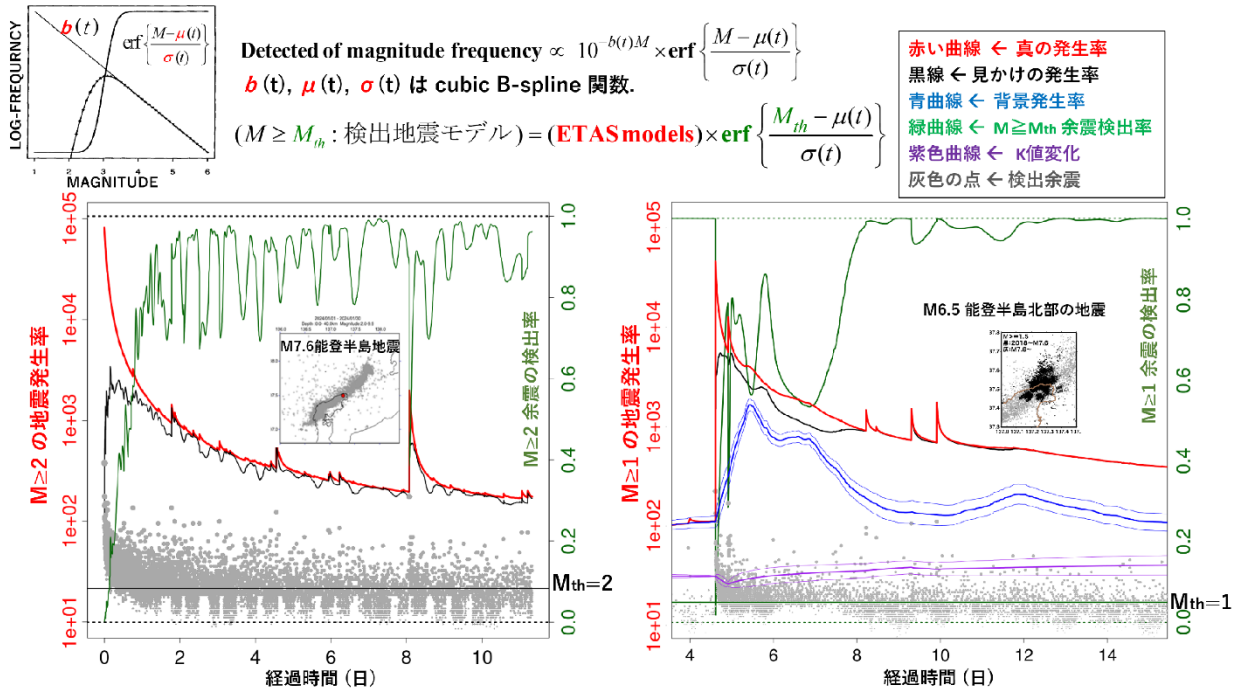
第 4 図 奥能登地域における比較的広領域での背景地震活動の解析. 赤曲線は μ 値, 青曲線は K 値, 楕状の灰色曲線は非常定 ETAS モデルの強度関数. (左) 2018 年から 2024/1/30 までの $M \geq 1.5$ の地震. 薄橙色のシャドローは 2023 年 5 月の $M6.5$ 地震時以降. (右) $M6.5$ 地震時以降の薄橙色シャドロー部を拡大した.

Fig. 4 Analysis of background seismicity in the northern Noto Peninsula. Red curves are μ values, blue curves are K values, and spiky gray curves are intensity functions from the nonstationary ETAS model. (Left) $M \geq 1.5$ earthquakes from 2018 to 1/30/2024. The period shown in light orange shadow corresponds to the May 2023 $M6.5$ earthquake to 2024/1/30. (Right) The enlarged plot of the light orange period.



第 5 図 2024 年 M7.6（中央パネル）および 2023 年 M6.5（左側パネル）能登半島地震の余震の検出率変化。上段パネルの赤曲線は b 値変化（誤差付き）、上段の青曲線は σ 値（誤差付き）。下段パネルの赤曲線は 50% 検出率 μ 値、緑曲線は $\mu + 2\sigma$ 値ただし $\sigma = 0.27$ 。灰色点は検出地震のマグニチュード列。下パネルの青線はマグニチュード $M \geq 2.0$ の余震の検出率。

Fig. 5 Detection rate changes for the aftershocks of the 2024 M7.6 (middle panel) and 2023 M6.5 (left panel) Noto Peninsula earthquakes. Red curves in upper panels are b -value changes (with errors); blue curves in upper panels are σ -values (with errors). The red curve in the lower panel is the μ value with a 50% detection rate; the green curve is the $\mu + 2\sigma$ value, but $\sigma = 0.27$. The gray dots are the magnitude sequence of the detected earthquake. The blue line in the lower middle panel is the detection rate for aftershocks with magnitude $M \geq 2.0$.



第 6 図 能登半島 M7.6 と M6.5 地震の余震の ABIC 最適解。
 赤い曲線は真の活動率，黒曲線は観測された（見かけの）地震発生率，青色曲線は背景活動率 $\mu(t)$ 値（誤差付き），紫色曲線は $K(t)$ 値（誤差付き），緑の曲線は $M \geq 2$ の余震の検出率変化（左パネル）， $M \geq 1$ 余震の検出率（右パネル）。灰色円盤は全検出地震のマグニチュード対時間経過。

Fig. 6 ABIC optimal solutions for the M7.6 and M6.5 Noto Peninsula earthquake aftershocks.
 Red curves are true activity rates, black curves are observed (apparent) earthquake rates, blue curves are background activity rate $\mu(t)$ values with errors, purple curves are $K(t)$ values with errors, green curves are detection rate changes for $M \geq 2$ aftershocks (left panel) and $M \geq 1$ aftershocks (right panel). Gray disks are magnitude vs. time histories of all detected earthquakes.