

6-4 2024 年 M7.6 能登半島地震の余震活動解析

Analysis of Aftershock Activity of the 2024 Noto Peninsula M7.6 Earthquake

熊澤貴雄 尾形良彦 (統計数理研究所)

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

1. 余震減衰のデトレンド

2024 年 M7.6 地震の余震パターンと過去の周辺部の地震 (第 1 図), すなわち 2023 年 M6.5 と 2007 年 M6.9 の能登半島地震および 1993 年 M6.6 能登半島沖, の余震パターンの時空間的特徴を比べた. 余震発生 of デトレンドは, 通常の時系列解析と違って, 余震活動の点過程強度関数を積分して一様分布になるように時間変換をすることである¹⁾.

ただし以下の理由からデトレンドは大森宇津式で行い ETAS モデルを用いない. すなわち二次余震が高度に集中して発生した場合, ETAS モデルによる時間的デトレンドの時空間分布は, その集中期間の時間を拡大するので集中域以外では見かけの静穏化を生じさせるので避ける²⁾. 大森宇津モデルを用いると, 二次余震の誘発されたクラスターだけでなく, 客観的な希薄化の部分 (余震シャドウ) も可視化することができる. これは余震域中の相対的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⁾.

2. 2024 年 M7.6 能登半島地震の余震減衰の時空間的特徴

前回の予知連会議では, 2024 年 1 月 1 日の M7.6 能登半島地震本震から 1 月 30 日までの 1 ヶ月間のマグニチュード下限が M2 の余震について, ETAS モデルを当てはめた. これをもって, 2 月から 4 月末までの余震 $M \geq 3$, $M \geq 3.5$ および $M \geq 4$ の予測データが第 2 図に示されている. 結果として, 余震頻度は何れの下限マグニチュードでも予測通りに推移している.

デトレンドのために大森宇津式を本震直後から当てはめると, 当てはまりは良いが, 見かけの c 値が大きくなる (第 3 図左側パネルの最尤推定値参照). もし, 地震データの時間区間で完全性が保証された結果を確認したければ, 本震直後の欠測が疑われる区間を除いて考察することになる. 例えば $M \geq 2$ の場合, 本震後 1 日経過した時点から完全検出したものと考え.

2024 年 1 月 1 日の M7.6 能登半島地震の M2 以上の余震の大森宇津式のデトレンド時間による空間的密度分布 (第 3 図) は時間経過と共に顕著な変化はしない. 余震域では本震を含む中央部に比べて南西端と北東端地域で密度が高いが, 余震域境界の顕著な拡大は見られない. この様な不拡散の典型的な余震の時空間パターンの推移は, 余震域内部や周辺部の M7.6 断層運動による静的なストレス変化が, 他の要因に比べて, これまでのところ圧倒的に支配しているものと解釈する.

3. 以前の能登半島周辺地震の余震減衰の時空間的特徴

参考までに, 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^{3,4)} についての時空間的な統計的特徴を比較した. 第 4 図は, 第 3 図と同様の方法でデトレンドした時空間分布を示している. ただし本震から 5 か月後までの余震に大森宇津式を当て嵌めたものである. M6.5 地震直後の欠測期間が比較的に短いため c 値はそれほど大きくない. 5 か月の時点から M7.6 地震時まで相対的に活発化している (第 4 図右側). デトレンド時空間プロットから, 北部と西南方向に余震の拡散だけでなく M7.6 北西近傍で数密度の増加 (相対的に活発化) が見られる. 相対的活発化

の部位は M7.6 地震の震央に対して北西部の高密度群に対応する。そして、M7.6 地震の直前に全域で密度が急低下（相対的静穏化）している³⁾。

さらに、2007 年 2 月 7 日の M6.9 能登半島地震の余震活動については同様な余震の拡散が見られ、余震活動の本震周辺部の希薄化が認められる（第 4,5,6 図）。この現象の説明に（ Δ CFS）図で、4 月 6 日の M4.7 余震の前駆すべりの仮定によるクーロンストレス変化で説明している²⁾。

これらの過去の 3 つの地震の余震域拡大については、M7.6 と違って、本震による静的誘発応力に比べて流体間隙圧の増加が無視できない程度だったものと考察される。

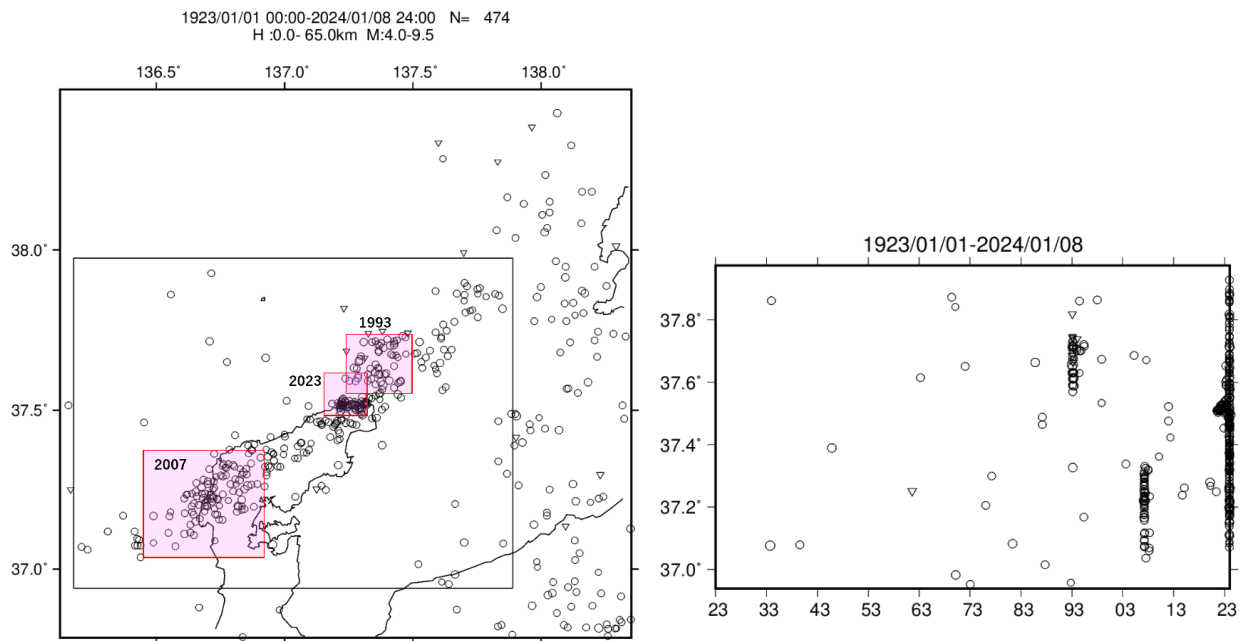
謝意

本解析に関して 2024 年 4 月 30 日までの気象庁 PDE 震源カタログを使用した。

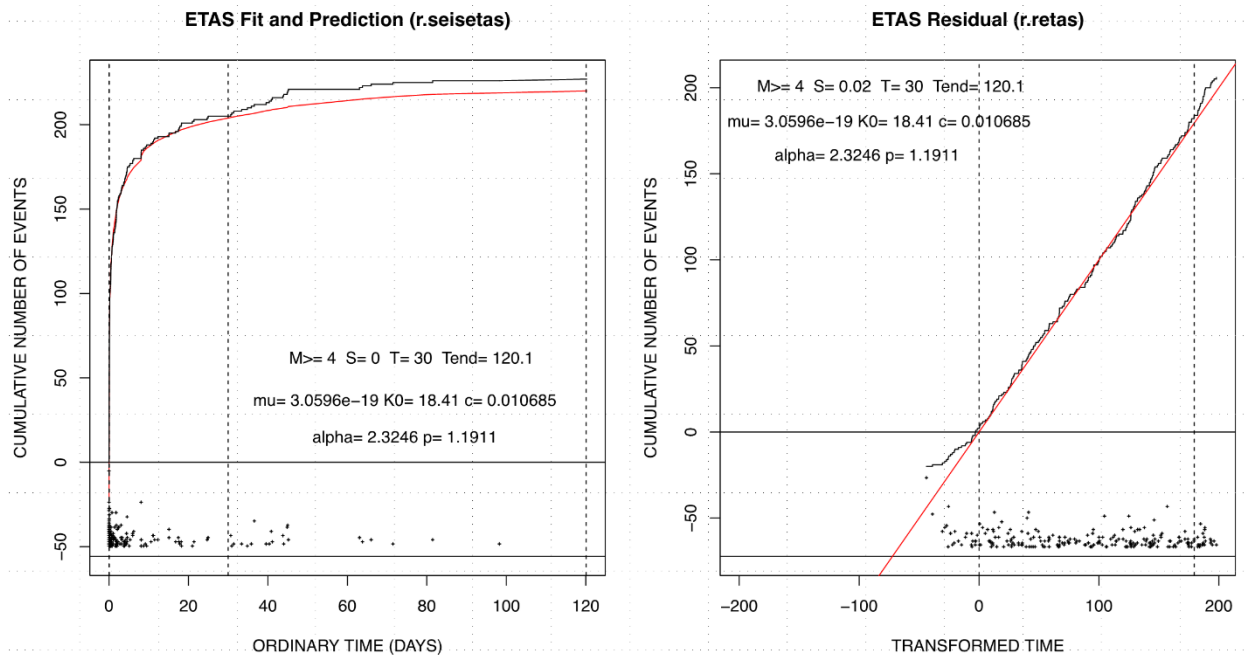
（熊澤貴雄, 尾形良彦; KUMAZAWA Takao, OGATA Yosihiko,）

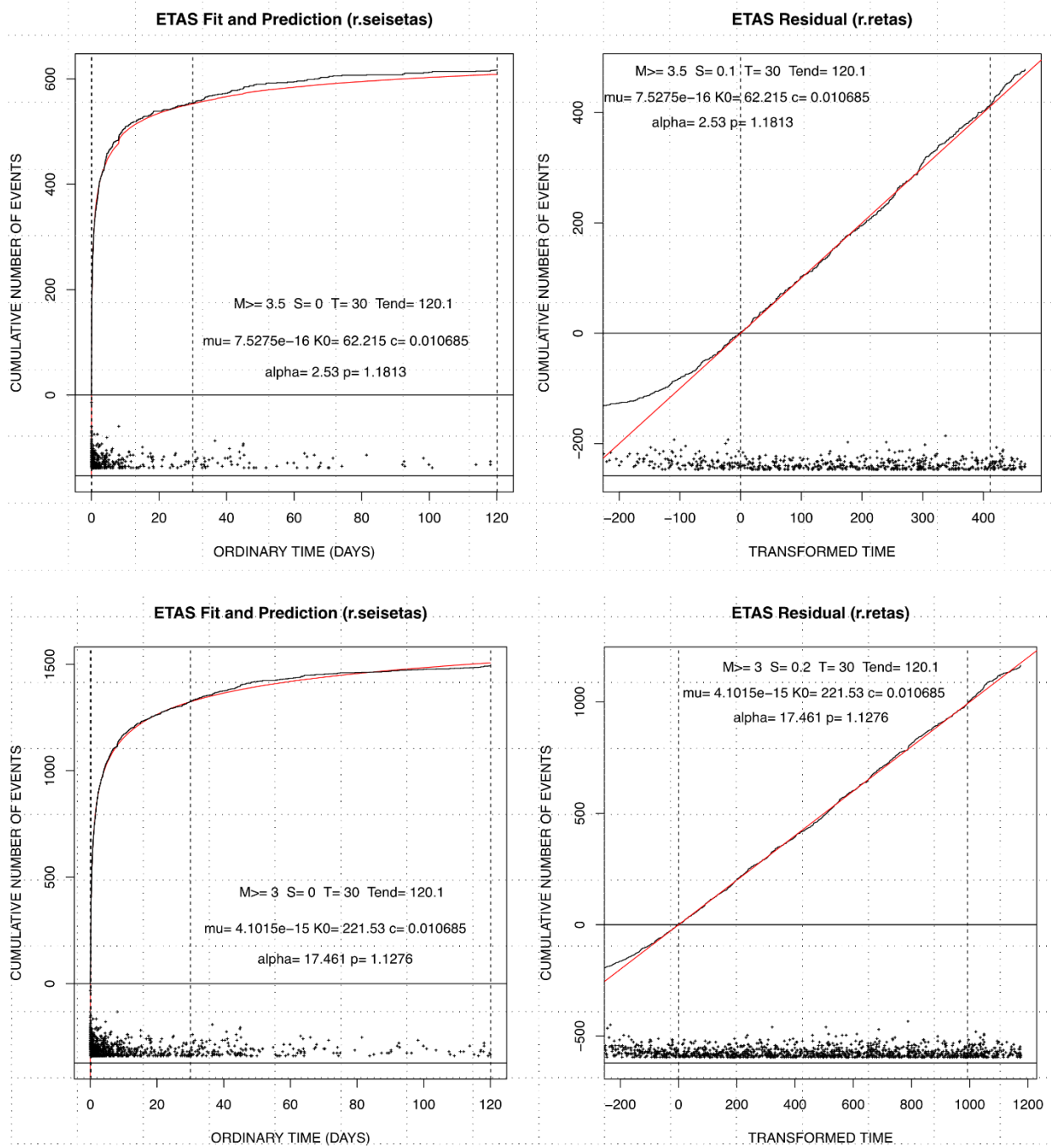
参考文献

- 1) Ogata, Y. (1988) *J. Amer. Statist. Soc. Assoc.* **83** (401) 9-27
- 2) Ogata, Y. (2010). *Geophys. J. Int.*, **181** (3), doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04542.x
- 3) 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
- 4) 尾形良彦, 熊澤貴雄 (2024) 地震予知連絡会会報, **112** 重点検討課題「令和 6 年能登半島地震」の検討, 掲載予定 <https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/242/image242/048-049.pdf>
- 5) 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



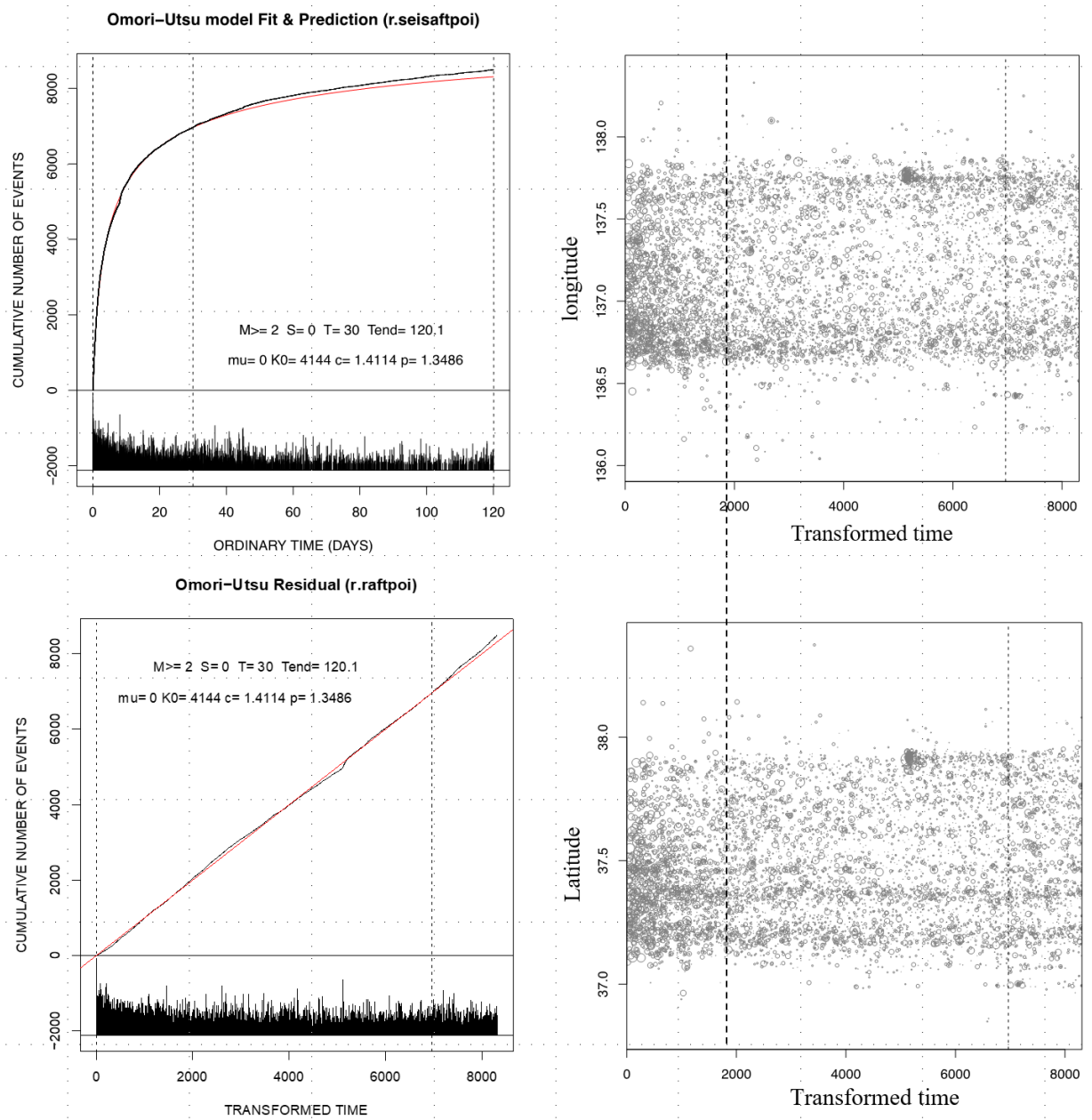
第 1 図 能登半島周辺の $M \geq 4$ 地震の震央分布図と緯度対時間 (1923 年から 2024 年 1 月 8 日)。2024 年 M7.6, 1993 年 M6.5, 2007 年 M6.9, および 2023 年 M6.5 の地震の群は夫々の赤枠矩形内。
 Fig. 1 Distribution of epicenters of $M \geq 4$ earthquakes around the Noto Peninsula, and plots of latitude versus time (1923 – January 8, 2024). The aftershock clusters of 2024 M7.6, 1993 M6.5, 2007 M6.9, and 2023 M6.5 earthquakes lie within their respective red rectangles.





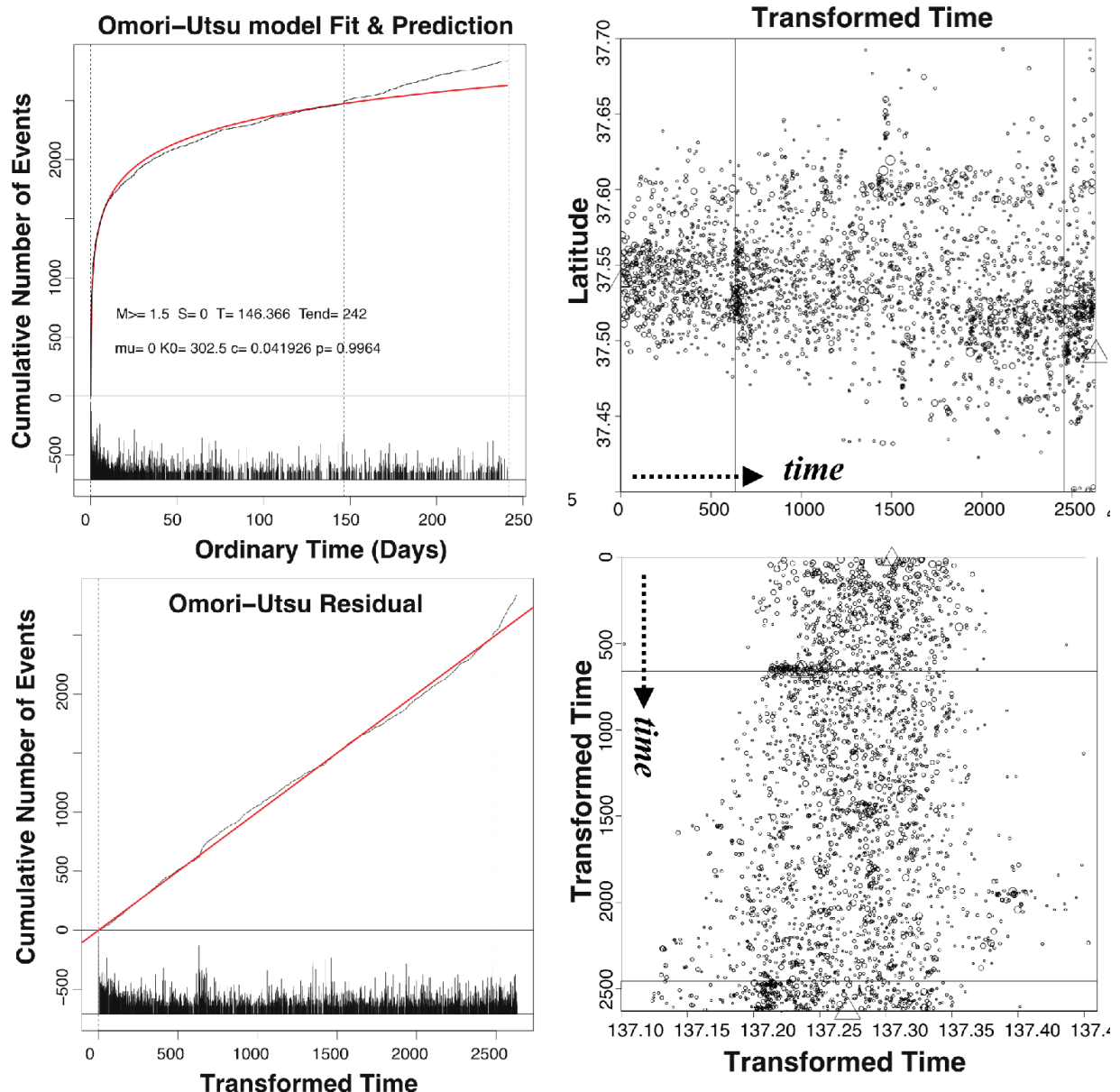
第 2 図 能登半島 M7.6 の余震の適合と予測。
 黒曲線は累積余震発生数，赤い曲線は予測累積数。

Fig. 2 Fitting and prediction of aftershocks from Noto Peninsula M7.6. The black curve shows the cumulative number of earthquakes, and the red curve shows the predicted cumulative number of earthquakes.



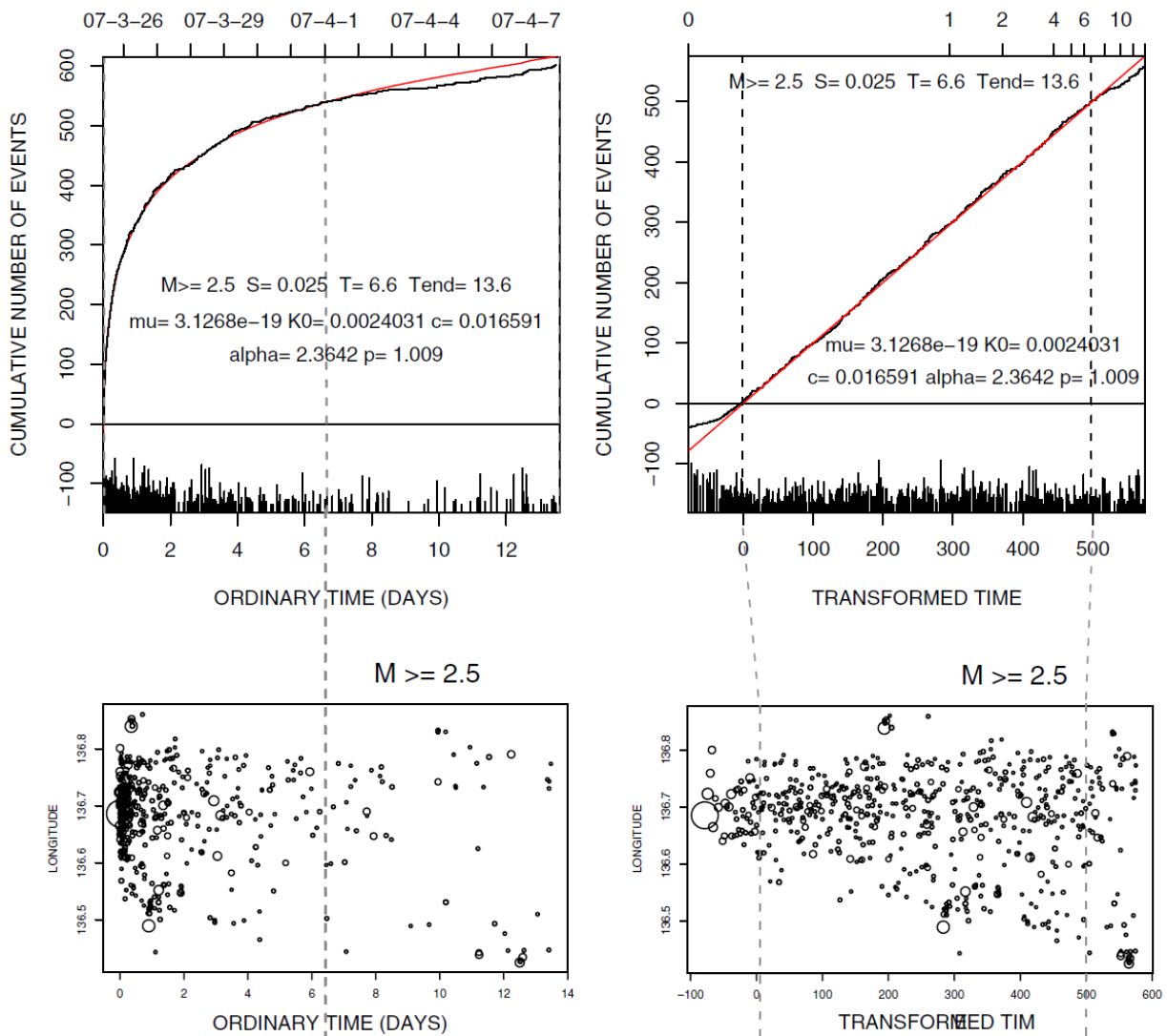
第 3 図 M7.6 能登半島地震の余震のデトレンド時空間配置。
 $M \geq 2$ (左) および $M \geq 3$ (右)。大森宇津式の残差時間 (上段: 本震から 1/30 までを当て嵌め) 対緯度、
 経度、深度の数密度分布をそれぞれ ABIC に基づくベイズ平滑化で推定。色票と等高線は単位面積あたりの
 数密度を表す。

Fig. 3 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.



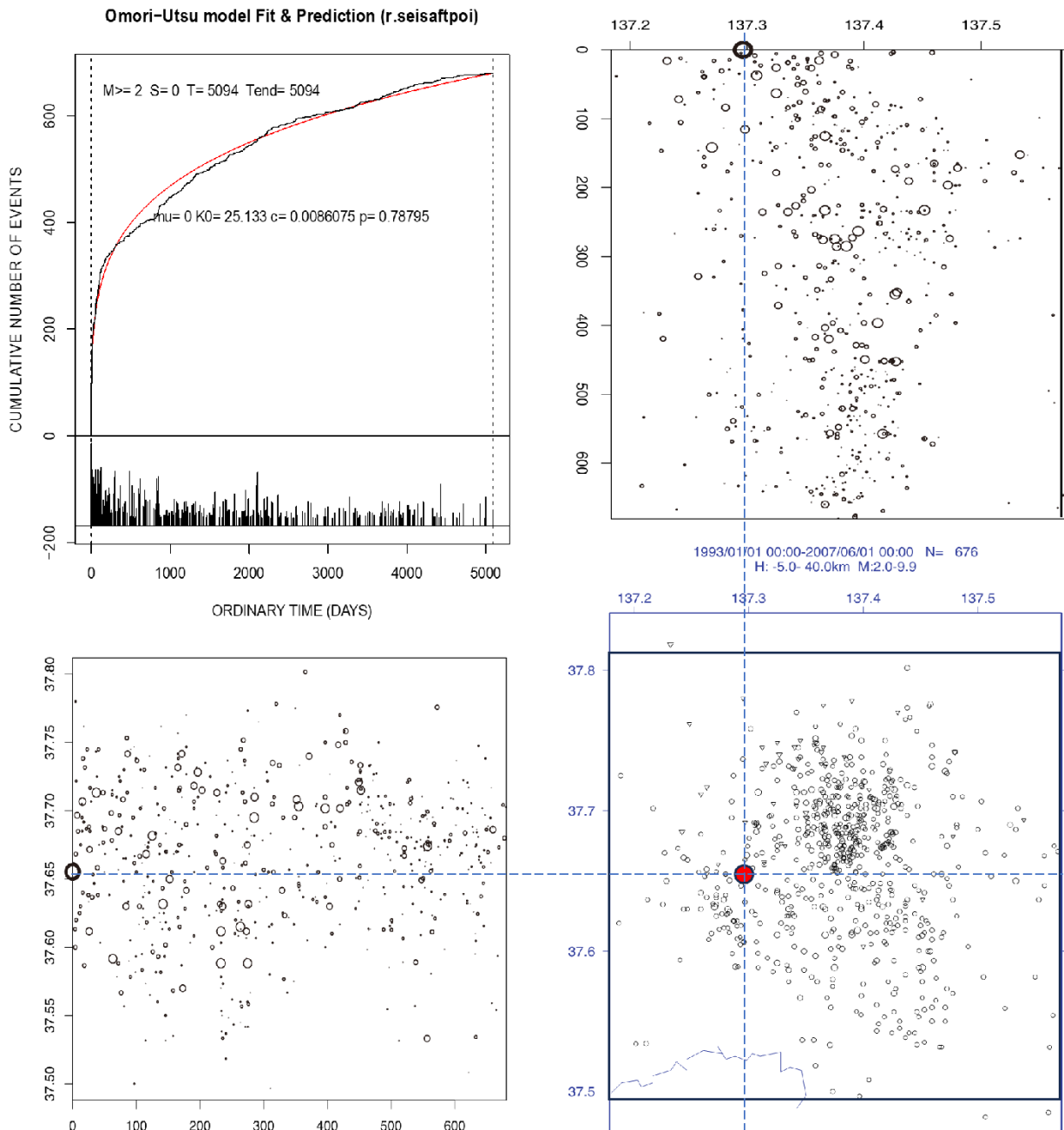
第 4 図 2023 年 M6.5 能登地震の余震のデトレンド時空間分布.
 左側パネルの赤線は本震から最大余震 M5.9 までを大森宇津式で当てはめ M7.6 まで延長した累積曲線とその時間変換. 右側は変換時間対緯度および対経度プロット. 三角は M7.6 震央を表す.

Fig. 4 Spatio-temporal plot of the detrended aftershocks of the 2023 M6.5 Okunoto earthquake. The red line in the left panel shows the cumulative curve from the main shock to the maximum aftershock M5.9, extended to M7.6 by fitting the Omori-Utsu formula, and its time transformation. The right panel is a plot of the transformation time versus latitude and longitude.



第 5 図 2007 年能登半島地震の余震活動の同年 4 月 8 日 (M4.7 最大余震) までの MT 図と累積関数。赤い累積曲線は本震後 3 月末までの余震データに ETAS モデルをあてはめて、残りの期間を予測した理論的累積曲線。横軸は左上図が通常的时间推移で、右側図が ETAS モデルによる変換時間。下段は経度に投影した震央図。

Fig. 5 MT plot and cumulative function of the aftershock activity of the 2007 Noto Peninsula earthquake up to April 8 of the same year (the largest aftershock of M4.7). The red accumulation curve is a theoretical accumulation curve based on the ETAS model applied to aftershock data through the end of March after the main earthquake. The upper left panel shows the normal time trend, and the right panel shows the time as converted by the ETAS model. The bottom panels show the epicenter projected in longitude.



第 6 図 1993 年 M6.6 能登半島沖地震の MT 図と累積関数，余震震央とデトレンド時空間プロット。1993 年から 2007 年 5 月まで $M \geq 2.0$ で深さ 40km までを示しており，赤曲線は大森宇津式による $M \geq 2.0$ 余震の理論累積数，○印は本震位置を示している。

Fig. 6 MT diagram of the 1993 M6.6 Noto Peninsula earthquake with accumulation functions, aftershock epicenters and detrended spatio-temporal plots. $M \geq 2.0$ from 1993 to May 2007 to a depth of 40 km. The red curve indicates the theoretical cumulative number of $M \geq 2.0$ aftershocks based on the Omori-Utsu formula, and the red circle indicates the location of the main shock.