

9-4 日向灘沖南部の余震活動について

Aftershock activity in the southern part off the coast of Hyuganada

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

・はじめに

日向灘沖南部では、昨年から今年初頭にかけて、2024 年 8 月 8 日の M7.1 と 2025 年 1 月 13 日の M6.6 という二つの大規模地震が発生した。これらの本震・余震活動に加え、同地域における 1996 年の類似した地震活動時系列（10 月 19 日 M6.9, 12 月 3 日 M6.7）を対象に、大森・宇津モデル、ETAS モデル^{1,2)} および非定常 ETAS³⁾ の各種点過程モデル、さらに時空間点密度平滑化法^{4,5)} を用いて、大森・宇津モデルの累積関数でデトレンドされた、最大余震に向かう特徴的な余震のマイグレーションを解析した。

上記の両ケースとも、定常 ETAS モデルの一次余震と二次余震活動におけるパラメータ値の違いにも関わらず、非定常 ETAS モデルによる時間変化は全データ区間でも累積図に一致している。非定常 ETAS モデルの背景活動度の変化から、日向灘沖南部ではゆっくりすべりや流体貫入などの非地震事象の関与が疑われる。

さらに日向灘沖の地震と九州内陸部の地震の相関的な対応について議論した。

・方法

各点過程モデルを定義する強度関数は以下の通り。

$$\text{大森・宇津モデル： } \lambda(t) = \mu + \frac{K_0}{(t+c)^p} \quad (1)$$

$$\text{ETAS モデル： } \lambda_\theta(t|H_t) = \mu + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} \frac{K_0 \exp(\alpha(M_i - M_0))}{(t - t_i + c)^p} \quad (2)$$

$$\text{非定常 ETAS モデル： } \lambda_\theta(t|H_t) = \mu(t) + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} \frac{K_0(t_i) \exp(\alpha(M_i - M_0))}{(t - t_i + c)^p} \quad (3)$$

ここで、モデルのあてはめは下限マグニチュード (M_0) 以上の地震が一様に観測されている前提で運用される。そのため、合理的な推定には適切な M_0 の設定が重要である。ただし、本震直後には M_0 を超える地震が欠測する場合があります。注意が必要である。データの適用区間は以下の様な分割

$$\begin{array}{ccccccc} & \text{予備期間} & & \text{対象期間} & & \text{予測期間} & \\ & |-----| & & |-----| & & |-----| & \\ & 0 & & S & & T & & \text{Tend} \end{array} \quad (4)$$

に対して、本震直後の欠測データを含む期間 $[0, S]$ は以下の様に取り扱う。大森・宇津モデル (1) の場合は、本震に加えて推定ターゲット期間 $[S, T]$ の地震データのみを使用する。ETAS モデル (2) と (3) の場合では、予備期間 $[0, S]$ のデータを履歴 H_S として取り込み、それ以降をターゲット期間 $[S, T]$ としてモデルを適用する。これにより、バイアスのかからない推定関数を得ることが可能となる。

大森・宇津モデル (1) によって時間を変換してデトレンドした本震余震の時空間分データに時空間ポアソン過程を適用し、デロネ三角網上の局所線形強度関数を求める。解析では、最適ベイズ的平滑化^{4,5)} を用いて空間的变化を可視化した。

・解析データ

第 1 図に示すように、気象庁震源カタログによると、日向灘沖南部における 2024 年 8 月 8 日の M7.1 から 2025 年 2 月 1 日にかけての地震活動と、1996 年 10 月 19 日の M6.9 から 1997 年 7 月 31 日までの震源域が大まかに重なっている。このため、第 1 図の点線で囲まれた領域の地震活動を対象とした。解析における下限マグニチュードは、先行報告⁶⁾を参考に M2.2 と設定した。

・類似する時空間分布の特徴

第 2 図の左側パネルでは、2024 年 8 月 8 日 M7.1 地震後に東方で余震活動がまとまり、2025 年 1 月 13 日の最大余震 M6.6 まで、ほぼ大森・宇津減衰したことが確認される。一方、右側中段パネルの変換時空間パターンでは、本震 M7.1 から西方（深部）へ拡散し、その先に最大余震 M6.6 の震源が位置している。また、M6.6 地震はその余震活動から孤立しており、東方部（浅部）の主要クラスター（経度 $131.8^{\circ} \sim 132.0^{\circ}$ ）に重なる様に発生している。

同様の解析では、第 3 図右側中段の時空間変化パネルに示されるように、1996 年 10 月 19 日の M6.9 と、その最大余震である 1996 年 12 月 3 日の M6.7 への余震活動の拡散状況が、最近の状況と類似している。M6.9 の余震分布は 2024 年の主要クラスターと重なり、西方（深部）へ拡散した先に M6.7 が位置している（第 3 図）。その後、M6.7 の余震活動は東方（浅部）へ展開し、M6.9 の主要クラスター領域の方に戻る動きが確認される。ただし、2025 年 M6.6 の活動とは異なり、M7.6 の余震活動が極めて低調である。

こうした余震の変換時間の時空間拡散現象^{4,7,8)}は予測上有用な異常現象として注目される。

・より精緻な活動変化の推定について

2024 年の M7.1 から最大余震 M6.6、1996 年の M6.9 から最大余震 M6.7 までの解析結果を第 4 図と第 5 図に示した。いずれも非定常 ETAS モデルが定常 ETAS モデルより ABIC がそれぞれ 25.7、31.1 と有意に改善している。特に非定常 ETAS モデルでは時間変化がデータの累積図にほぼ一致し、本震後に高めに推定される背景強度 $\mu(t)$ が徐々に低下し安定する経過が見られる。この結果は、本震直後の流体貫入の関与が示唆される。

また 2024 年の M7.1 とその最大余震 M6.6 は、マグニチュードに 0.5 の差にかかわらず、同度の余震が伴っている。第 6 図では、これらを ETAS モデルで個別に推定し、各地震から 0.01 日までを予備期間とした。両者のパラメータ値は概ね類似しているが、後者では α と p の値がやや高く、これは後者がやや深い位置に分布していることと関連している可能性がある。

第 7 図は、本震および最大余震を含む余震活動全体に非定常 ETAS モデルを適用した最良の結果を示す。ABIC 値は非定常 ETAS がそれぞれ 41.2 および 39.9 と大幅に改善している。第 4、5、6 図に示された通り、定常 ETAS モデルでは一次余震と二次余震活動のパラメータ値に差が見られる一方、非定常 ETAS モデルでは時間変化が全データ区間で累積図に一致している。この違いは主に非定常 ETAS モデル (3) の背景活動度 $\mu(t)$ の変化として現れ、日向灘沖南部ではゆっくりすべりや流体貫入といった非地震事象の関与が示唆される。

・日向灘沖の地震と九州内陸部の地震の対応について

宇津⁹⁾による指摘（602 頁参照）に基づき、第 8 図では日向灘沖の大地震前後に九州内陸部で相関的に発生した地震を追加説明している。1920 年以降の日向灘沖での M6.3 以上の地震と、その前

後半年間に九州内陸部で発生した M5.0 以上の単発の地震, または M3.0 以上の群発的に発生した地震活動を対応付けた結果を第 7 図に示した. 内陸地震が伴わなかったものも含めた. 今回の対象領域では, 1929 年の地震を除き, 各大地震に対して, 数ヶ月後に九州南部に内陸地震が伴っている. 2025 年 M6.6 の場合は日向灘の地震からほぼ半年経過しているため, 表中に疑問符を付記した. 一応の警戒を続ける必要があると考えられる.

本原稿の投稿日, 3 月 16 日 05:00, に M4.8 の地震が熊本県天草地方 (震度 4) で発生したことを付記しておく.

(熊澤貴雄, 尾形良彦)

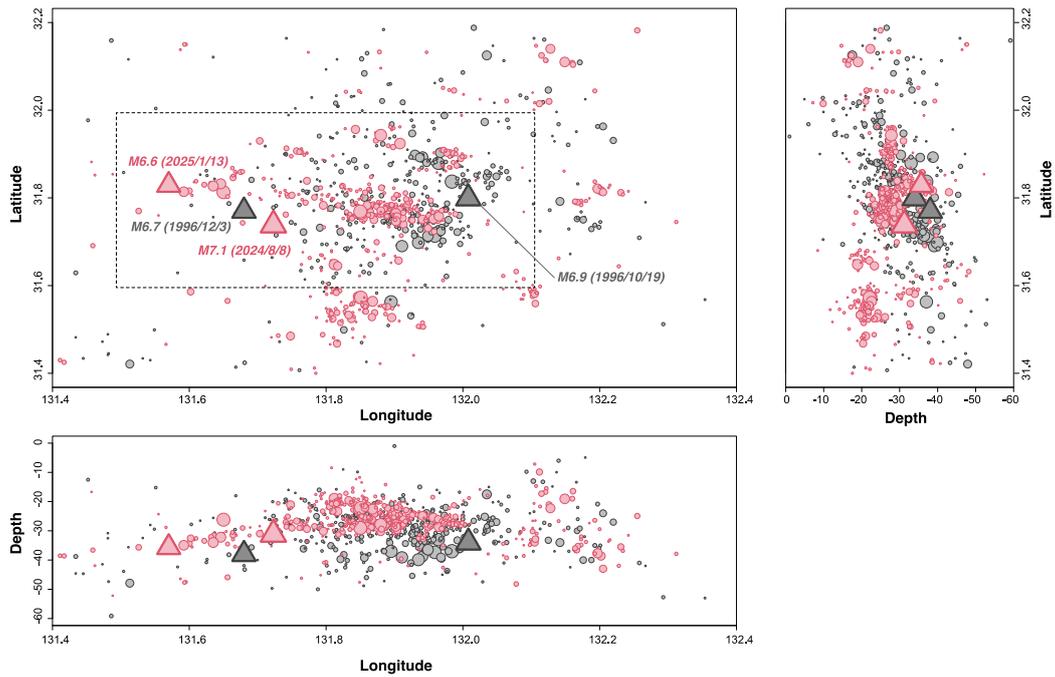
Takao Kumazawa, Yosihiko Ogata

謝辞

本解析に関して気象庁の PDE 震源カタログを用いた.

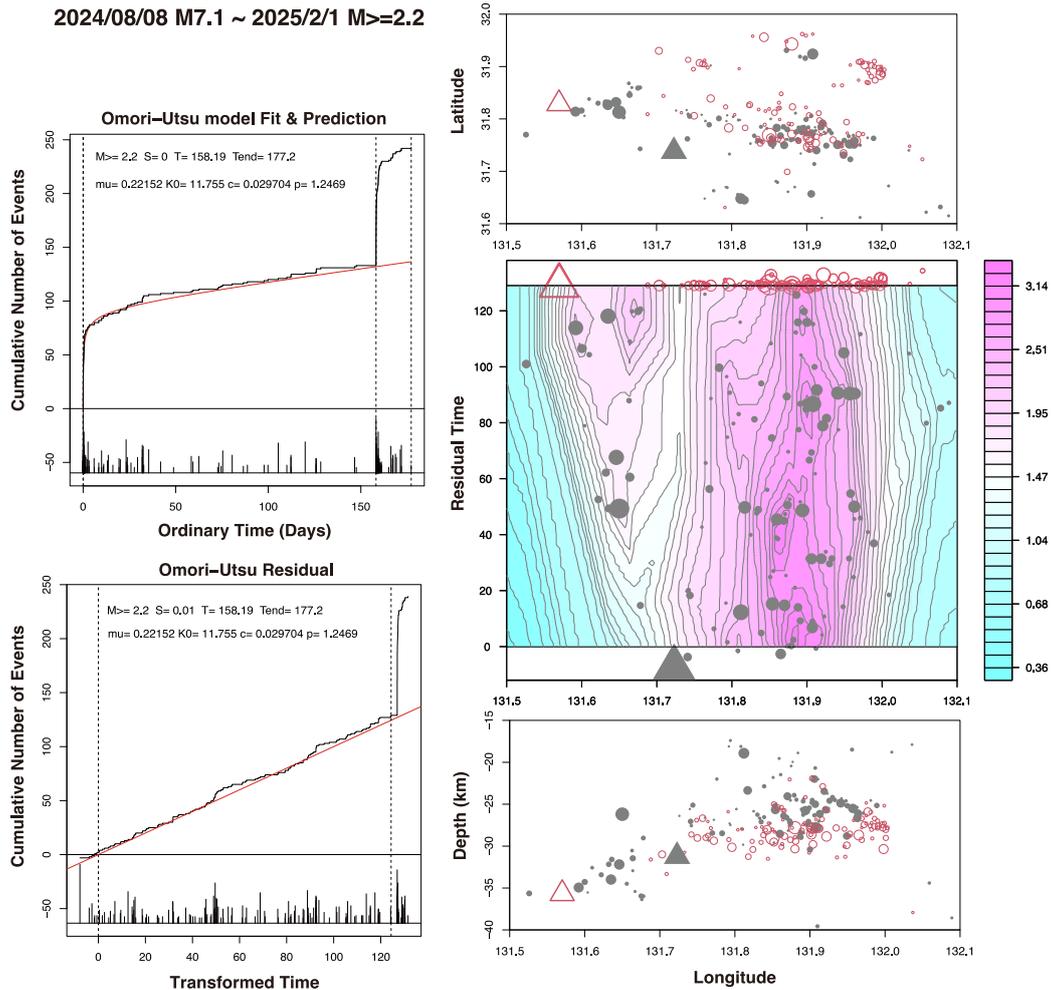
参考文献

- 1) Ogata, Y. (1988), *J. Am. Stat. Assoc.*, **83**, 9-27.
- 2) Ogata, Y. (1989), *Tectonophysics*, **169**, 159-174.
- 3) Kumazawa, T., Ogata Y (2013) , *J Geophys. Res.* **118** (12): 6165–6182.
<http://doi.wiley.com/10.1002/2013JB010259>
- 4) Ogata, Y. (2010), *Geophys. J. Int.*, **181** (3), doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04542.x.
- 5) 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
- 6) 気象庁 (2024), 第 245 回予知連会議資料 1, 150-153.
- 7) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2024) 予知連会報, **112** (6-4),
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou112/06_04.pdf.
- 8) Kumazawa and Ogata (2024) *Earth Planet Space*, **76** (164)
<https://link.springer.com/article/10.1186/s40623-024-02112-6>
- 9) 宇津徳治 (1999), *地震活動総説*, 東京大学出版会, 東京.



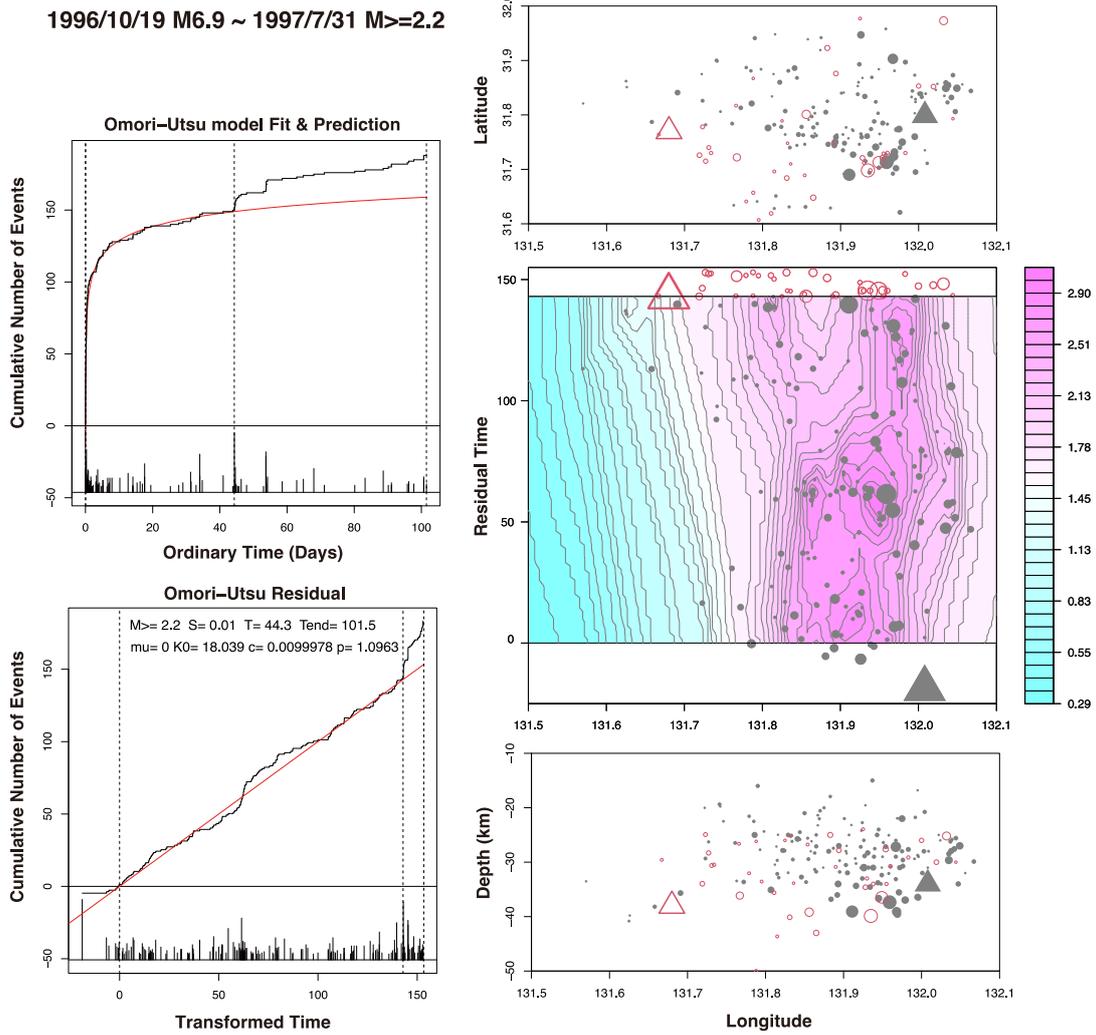
第 1 図 対象領域と震源分布．灰色円盤は 1996 年 10 月 19 日から 1997 年 7 月 31 日まで，ピンク色円盤は 2024 年 8 月 8 日から 2025 年 2 月 1 日までの地震を示す．下限マグニチュードは 2.0 である．

Fig. 1 Target Area and Hypocenter Distribution. Gray discs indicate earthquakes from October 19, 1996, to July 31, 1997. Pink discs indicate earthquakes from August 8, 2024, to February 1, 2025. The minimum magnitude is 2.0.



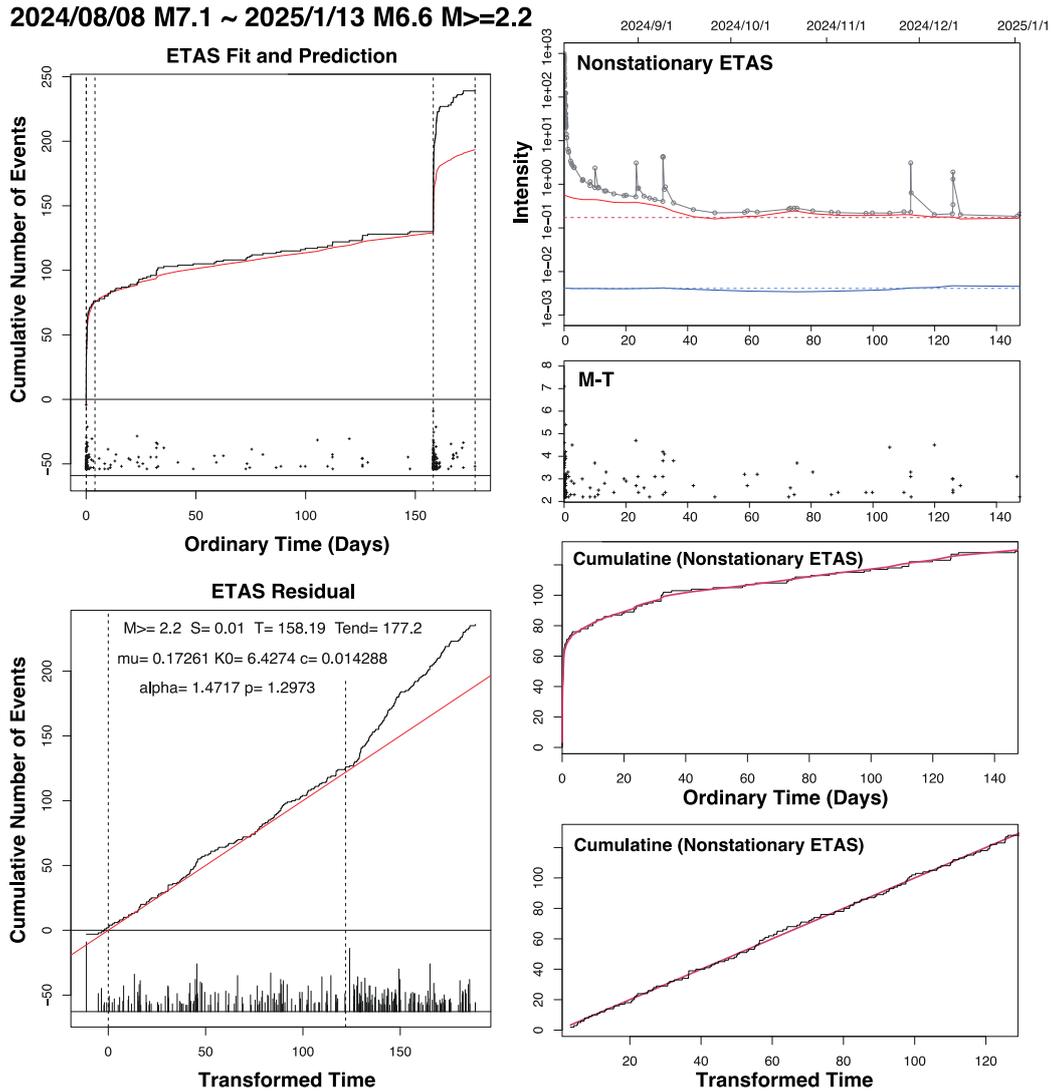
第 2 図 2024 年 8 月 8 日の M7.1 から 2025 年 2 月 1 日までの地震活動。左側は大森・宇津推定（赤線）。ターゲット期間は本震 M7.1 の 0.01 日後から最大余震 M6.6 の直前まで、 $[S, T] = [0.01, 158.19]$ 日。この変換時間（左側下図の横軸）は右側中段パネルの縦軸に使用。配色と等高線はターゲット期間中の単位面積あたりの地震数を表し、灰色円盤は本震 M7.1 から最大余震 M6.6 の直前まで、赤丸は M6.6 以降の活動、三角形はそれぞれ M7.1 と M6.6 を表す。上段図は緯度-経度分布、下段図は緯度-深度分布を示す。

Fig. 2 Seismic activity from August 8, 2024 (M7.1), to February 1, 2025. (Left panel) Omori-Utsu estimation (red line). Target period: 0.01 days post-mainshock (M7.1) to just before the largest aftershock (M6.6), $[S, T] = [0.01, 158.19]$ days. The converted time (bottom left panel, x-axis) is used as the vertical axis for the spatiotemporal point density distribution of longitude in the middle right panel. Colors and contours show earthquakes per unit area during the target period. Gray discs: activities from the mainshock (M7.1) to just before the largest aftershock (M6.6). Red circles: post-M6.6 activities. Triangles represent M7.1 and M6.6. Upper and lower plots: latitude-longitude and latitude-depth distributions, respectively.



第 3 図 1996 年 10 月 19 日 M6.9 から 1997 年 7 月 31 日までの地震活動の時空間分布. 第 2 図と同様の形式. ターゲット期間は本震の 0.01 日後から 1996 年 12 月 3 日の最大余震 M6.7 直前までの $[S, T] = [0.01, 44.3]$ 日である. 灰色の円盤は M6.9 から M6.7 の活動を, 赤丸はそれ以降の活動を表す. 三角形はそれぞれ M6.9 と M6.7 を示す.

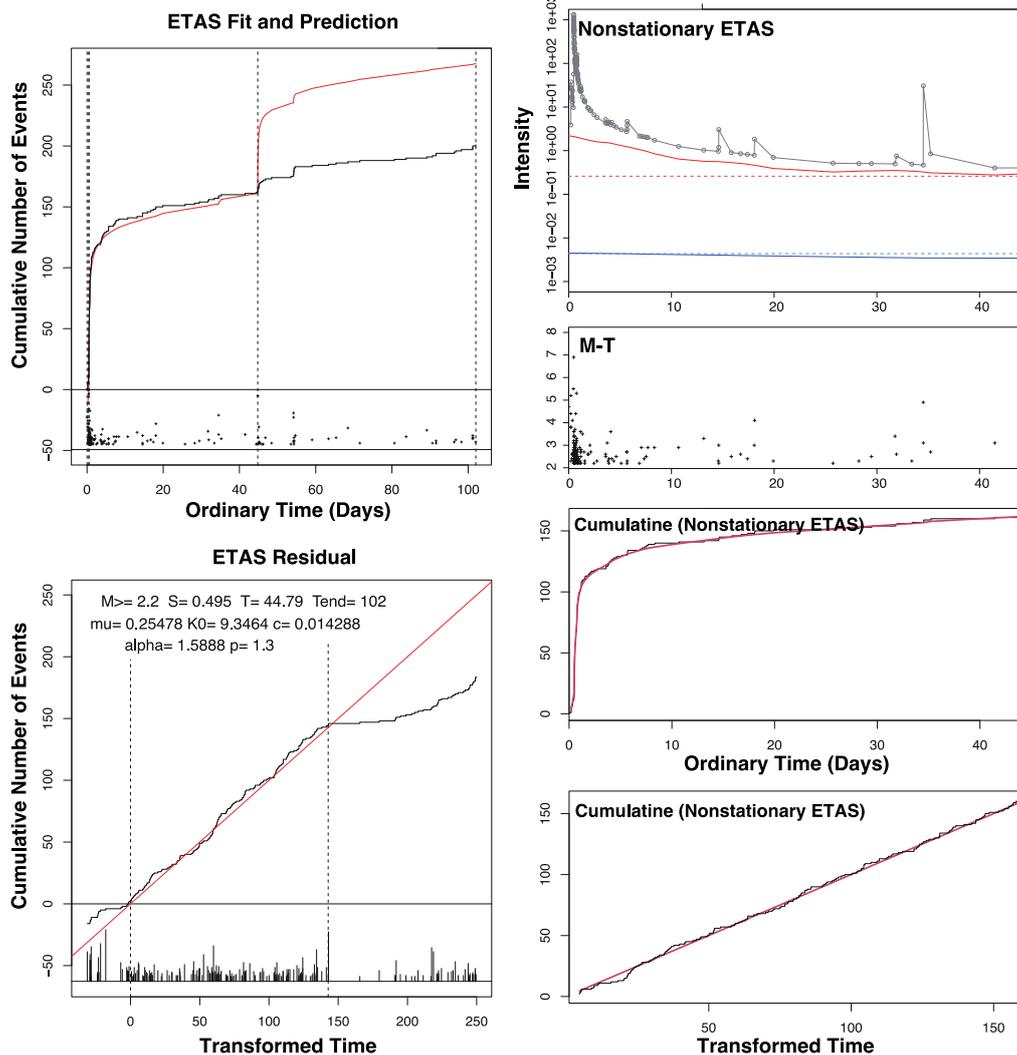
Fig. 3 Spatiotemporal distribution of seismic activity from the M6.9 earthquake on October 19, 1996, to July 31, 1997. The format is the same as in Fig. 2. The target period is from 0.01 days after the mainshock to just before the largest aftershock (M6.7) on December 3, 1996, $[S, T] = [0.01, 44.3]$ days. Gray discs represent activities from M6.9 to M6.7, and red circles indicate activities after M6.7. Triangles represent M6.9 and M6.7, respectively.



第 4 図 2024 年 8 月 8 日 M7.1 から 2025 年 1 月 13 日までの定常および非定常 ETAS モデルの推定。左側パネルは定常 ETAS モデルの推定（赤曲線）。ターゲット期間： $[S, T] = [0.01, 158.19]$ 日。右側パネルは非定常 ETAS モデルの推定結果で、本震 M7.1 から最大余震 M6.6 直前までの期間が対象である。上段には赤曲線 $\mu(t)$ 、青曲線 $K0(t)$ 、および黒曲線は (3) 式の強度関数 $\lambda_{\theta}(t|H_t)$ 。2 段目には M-T プロット、3 段目は非定常 ETAS モデルの累積曲線（赤）、4 段目は変換時間の経験累積関数、理論累積曲線（赤線）。

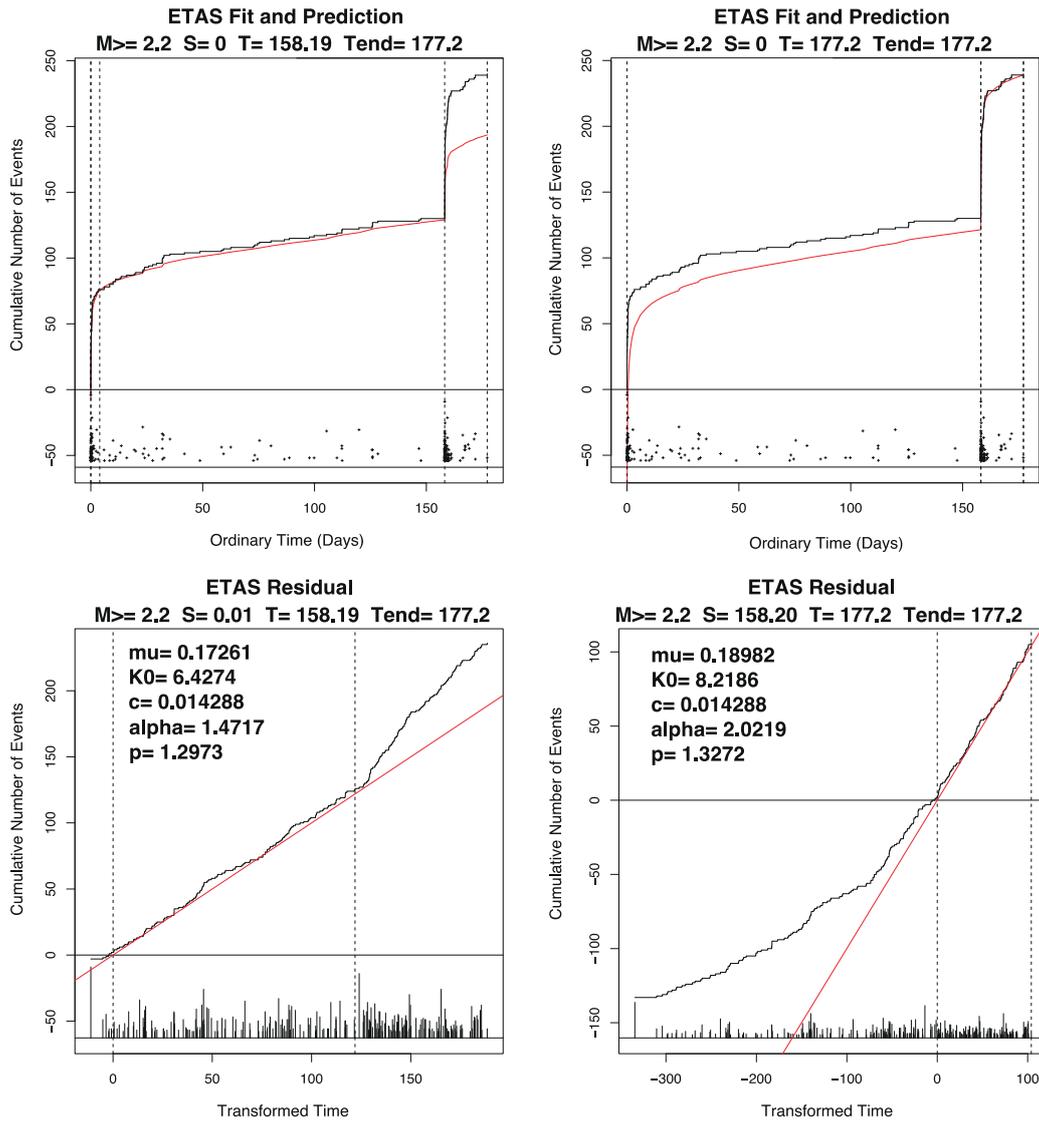
Fig. 4 Stationary and Non-stationary ETAS Models from August 8, 2024 (M7.1), to January 13, 2025. (Left panel) Stationary ETAS model (red curve). Target period: $[S, T] = [0.01, 158.19]$ days. (Right panel) Non-stationary ETAS model. Period: M7.1 to just before M6.6. Upper panel: red curve - $\mu(t)$, blue curve - $K0(t)$, black curve - intensity function $\lambda_{\theta}(t|H_t)$. Second panel: M-T plot. Third panel: non-stationary ETAS model cumulative curve (red). Fourth panel: empirical cumulative function of converted time, with theoretical cumulative curve (red line).

1996/10/19 M6.9 ~ 1996/12/3 M6.7 $M \geq 2.2$



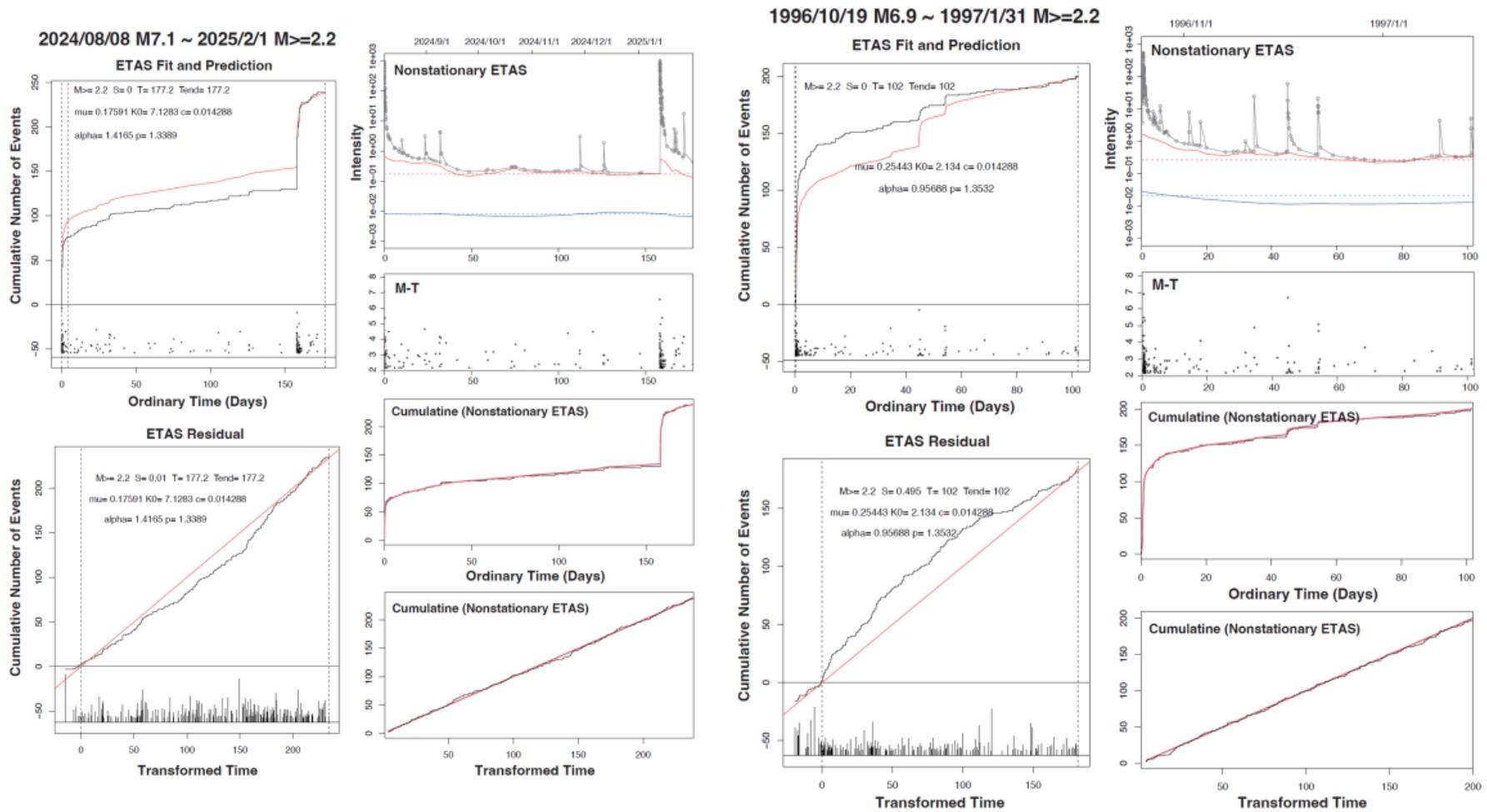
第 5 図 1996 年 10 月 19 日から 1997 年 7 月 31 日までの ETAS 及び非定常 ETAS の推定。第 4 図と同じ形式。(左側) ETAS モデルの推定 (赤線)。データは 1996 年 10 月 19 日 0 時からで、M6.9 の前震部分を含む。ターゲット期間は M6.9 の 0.01 日後から M6.7 の直前まで、 $[S, T] = [0.495, 44.79]$ 日。(右側) 非定常 ETAS モデルの推定。期間は M6.7 の直前までを表している。

Fig. 5 Estimation of ETAS and non-stationary ETAS from October 19, 1996, to July 31, 1997. The format is the same as in Figure 4. (Left panel) Estimation of the ETAS model (red line). Data start from 0:00 on October 19, 1996, including the foreshock part of M6.9. The target period is from 0.01 days after M6.9 to just before M6.7, i.e., $[S, T] = [0.495, 44.79]$, used as the reference. (Right panel) Estimation of the non-stationary ETAS model. The period is until just before M6.7.



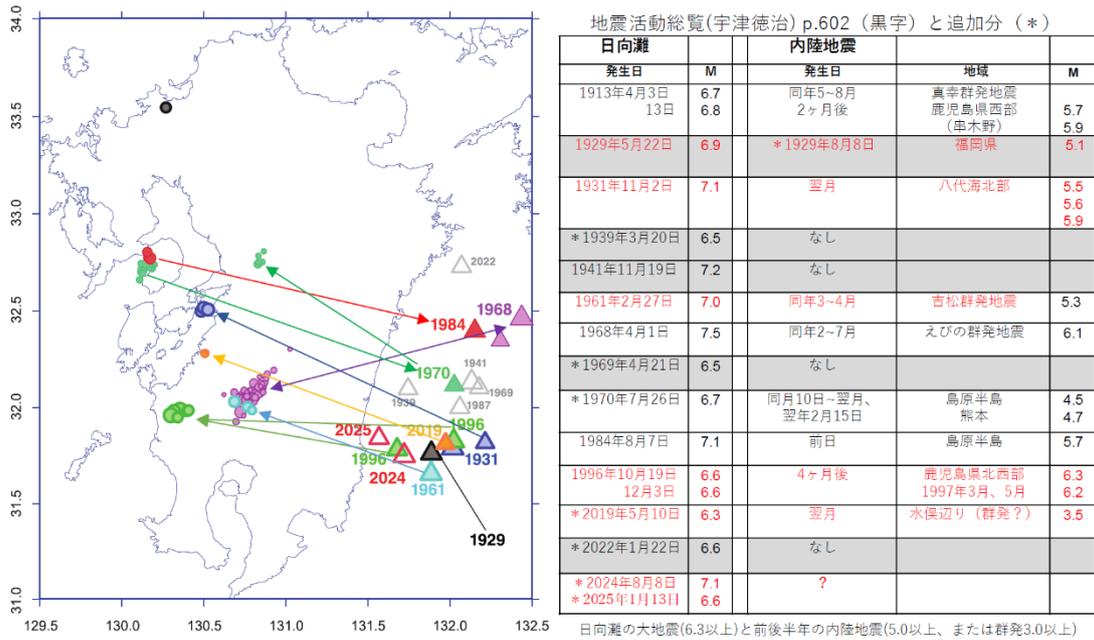
第 6 図 2024 年 8 月 8 日の M7.1 と 2025 年の M6.6 の余震を含む定常 ETAS 推定. ターゲット期間の開始時間 S_0 は、それぞれ M7.1 および M6.6 の 0.01 日後に設定した. 左側パネルは M7.1 から M6.6 までを、右側パネルは M6.6 以降を示している.

Fig. 6 Stationary ETAS Estimation Including Aftershocks of M7.1 on August 8, 2024, and M6.6 in 2025. The start time (S_0) of the target period is 0.01 days after M7.1 and M6.6 events. (Left panels) From M7.1 to M6.6. (Right panels) After M6.6.



第7図 全区間に同一モデルを適用した結果。第1列および3列は定常ETASモデル。第2列および4列は非定常ETASモデルを示している。形式は第4、5、6図と同様である。ABIC値は定常ETASモデルより非定常ETASがそれぞれ41.2、39.9改善している。

Fig. 7 Results of fitting the same model to the entire period. The first and third columns represent the stationary ETAS model. The second and fourth columns represent the non-stationary ETAS model. The format is the same as in Figures 4, 5, and 6. The ABIC values indicate improvements of 41.2 and 39.9, respectively, with the non-stationary ETAS model.



第 8 図 日向灘沖と内陸部の地震の対応. 左側では, 三角印が日向灘の M6.3 以上の地震, 円盤が内陸部の地震を示し, 同色は時間的な対応を表していることを示す. 灰色の白抜き三角印は対応する内陸地震が見当たらない事例を示す. また, 今回解析した日向灘沖地震と対応する半年前後の内陸地震を矢印で示した. 右側には, 宇津⁹⁾の指摘および今回追加した地震の発生時期, 場所, マグニチュードを表にまとめている. 追加分には * 印を付記し, 本解析の領域の地震は赤字で, 内陸地震が伴わないものはシャドウを付けた.

Fig. 8 Correlation between earthquakes in Hyuganada and inland areas. (Left panel) Triangles represent earthquakes of M6.3 or larger in Hyuganada, while discs represent inland earthquakes. Matching colors indicate temporal correlation. Gray triangles without fill indicate no corresponding inland earthquake. Arrows denote Hyuganada earthquakes analyzed and corresponding inland earthquakes within six months. (Right panel) Table of occurrence times, locations, and magnitudes of earthquakes based on Utsu's indications and additions. Asterisks indicate added earthquakes. Earthquakes within the current analysis area are shown in red. Shaded entries indicate no corresponding inland earthquake.