

10 - 4 地震データの欠測率を考慮したトカラ列島および鳥島近海の地震活動の解析 Analysis of seismic activity in near the Tokara Islands and the Torishima Island taking missing rates of earthquakes into account.

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

1. はじめに

静的に誘発 (static triggering) された続発地震が主な場合、通常の本震余震型活動が考えられる。これに対して、動的に誘発 (dynamic triggering) された群発型活動の成分が有意に含まれるかを確認したい。このための解析には非定常 ETAS モデル¹⁾

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

を用いる。このモデルの非定常性は (1) 式の第 1 項の背景強度 $\mu(t)$ と第 2 項の余震的誘発率 $K_0(t)$ のそれぞれの時間変化が含まれる。これらの係数変化の平滑化の最適化と、定数係数 (定常 ETAS モデル) に対する有意性を確かめるために赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) の最小化によりモデル比較を目指す。詳細は文献 1 を参照されたい。

背景強度関数 $\mu(t)$ は地震活動の対象領域内や周辺でのゆっくりすべりによる応力変化、または内在する断層系内での流体貫入による断層の弱化などを反映すると考えられる^{1,2,3)}。他方 $K(t_i)$ は領域内の先行地震 i による近傍断層群への応力増加による地震の連鎖効果 (余震生産性) を表す。非定常性が有意であれば、流体間隙水圧変化やスロースリップの関与の定量的な時間経過が反映されている。

ただし、大きな地震直後では、静的誘発も動的誘発も圧倒的に大きく作用する可能性が高いにもかかわらず、地震検知率が甚だしく低いため後続地震データの欠測率が大きい。それゆえデータの G-R 則の b 値とマグニチュードごとの欠測率をモデル化 (検出モデル)⁴⁾ して、下限マグニチュードを出来るだけ低く取り、非定常 ETAS モデルの局所的なデータ欠測による偏りを修復し、より高い精度の活動の推定を目論む⁵⁾。

本報告では、そのような方法論⁵⁾を述べた第 240 回地震予知連絡会以降に新たに発生した、遠方鳥島嶼部での、活動全体の検出率自身も低い 2 つの地震系列についての解析結果を報告する。

2. 鳥島近海の地震活動について

今回の地震発生領域 (第 1 図) では、これまで M6 クラスの地震を含む群発地震活動が間欠的に続発している。この領域で 2023 年 9 月 1 日以降の活動を解析した。1 週間程の全検出地震 140 件に基づいて調べた。まず特徴的なのは、結構深いところでの地震が見える。これは深さの精度の問題はあるにしても、70~80km ぐらいの深さにある程度の塊があったりしているということは一つのポイントとして考慮しておく必要がある。

検出モデル⁴⁾から導かれた第 2 図 b,c によれば、全観測時間区間を通して検出率は一定である。特に σ 値が一定なのは近接観測網が定常で地震活動範囲より可なり広いためであろう。しかし b 値 (第 2 図 a) については活動前半で減少して M6.5 の最大地震後に増加している。ほぼ完全な検出地震マグニチュード (97.5% 以上の検出率; 第 2 図 b の緑曲線) は M4.8 以上である。しかし、これでは 7 地震数にしかならない。そこで下限マグニチュードを下げて、M3.8 以上の 99 地震について、

検出率（第 2 図 d）を考慮して非定常 ETAS モデルに当てはめた（参考文献 5 参照）。

第 1 表の ABIC 値は定常 ETAS モデル（第 3 図上段パネル）よりも、バックグラウンド μ 値が変化している非定常 ETAS モデル（第 3 図下段パネル）の方が遥かに当てはまりの良いことを示している（ Δ ABIC = -33.5）。特に背景強度 $\mu(t)$ の変化は数日間で約 10 倍のオーダーで増加・減少を繰り返している。一方、地震同士のトリガー効果 $K(t)$ は定数 2×10^{-6} で、極めて小さく、第 3 図下段の縦スケール枠には無い。これらから、第 1 図にあるように震源分布がフィリピン海プレートに潜り込んでいる太平洋プレート上面からのマグマ上昇に絡む火山性の流体圧の変動による群発地震活動を示唆していると推察される（類似の解析結果は文献 6 および 7 参照）。

3. トカラ列島の地震活動について

トカラ列島近海で第 4 図に示した小宝島付近の領域では、2020 年から、M5 以上（最大 M6.1）の 6 件の地震を含む、大規模小規模の 5 つほどの間欠的な地震群が続発していた。本年も 9 月 8 日から纏った地震活動があった。先ず今年の 9 月 30 日までの 4091 地震に基づいて検出率を調べた。大きな地震直後に欠測率が急上昇して捕捉率が下がっている（第 5 図 2 列目のパネル）ので、横軸を地震発生時でなく発生順序で見ると検出率経過の詳細が見える（第 5 図 4 列目のパネル）。このように第 5 図と以下に示す全ての図には、通常の時刻についての経過図のみならず、間欠的な集中発生部分を詳しく見るために、地震の発生順番についての経過図も併記する。

特に今年の活動の検出率は可なり悪いことが分かる。全区間を通して完全な下限マグニチュードは M3.4（第 5 図の緑曲線の最大値）であるが、そのような地震は僅か 145 件である。そこで下限マグニチュードを下げた M2.0 以上地震 2496 件を使い、それらの検出率（第 5 図 4 列目の下パネル）を考慮して、非定常 ETAS モデルを当てはめた（参考文献 5 参照）。

第 2 表の ABIC 値は、定常 ETAS モデル（第 6 図）よりも、バックグラウンド μ 値が変化している非定常 ETAS モデル（第 7 図）の方が、 Δ ABIC = -379.58 で、遥かに当てはまりの良いことを示している。特に、背景強度 $\mu(t)$ は 2020 年から増加し、2021 年 12 月の最大 M6.1 を含む地震群でピークに達し、その後減少したままである。この変化はスロースリップまたは流体圧増加などの何らかの非地震性要因を反映した群発地震活動と推察される。地震同士の静的トリガー効果 $K(t)$ は変動が小さいが、地震群内で急速な摂動をして、発生位置でのトリガー効果の違いを反映している。

謝辞。

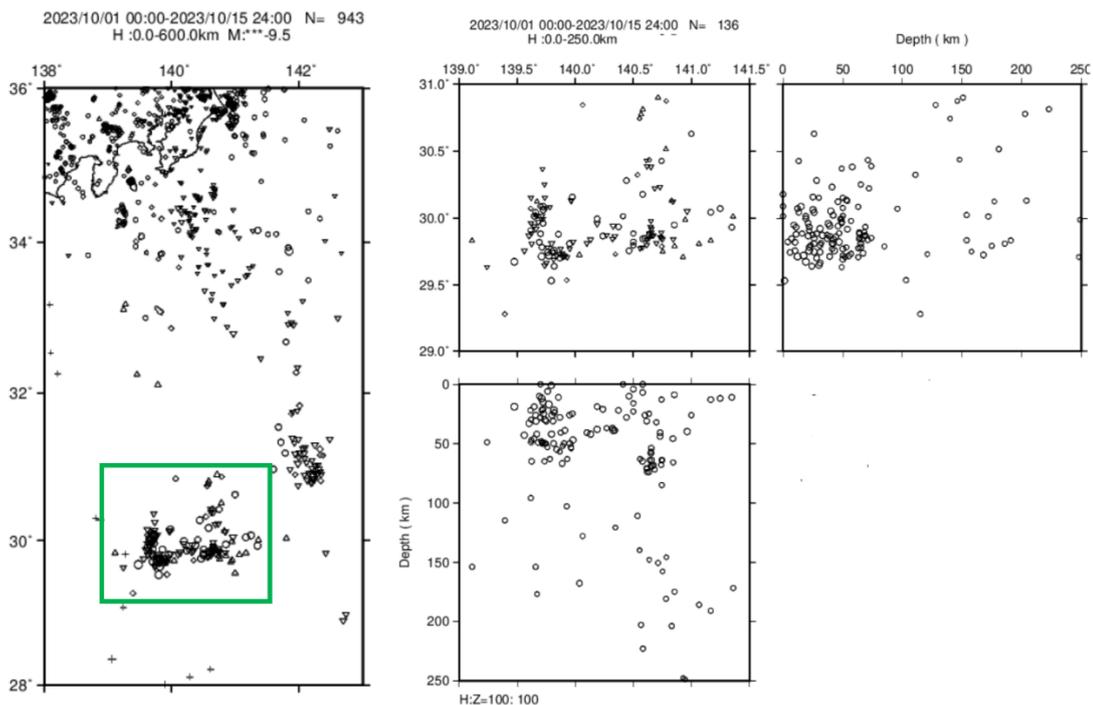
本解析に関して気象庁 PDE 震源カタログ、および地震活動可視化ソフト TSEIS を使用した。

（尾形良彦, OGATA Yosihiko）

参考文献

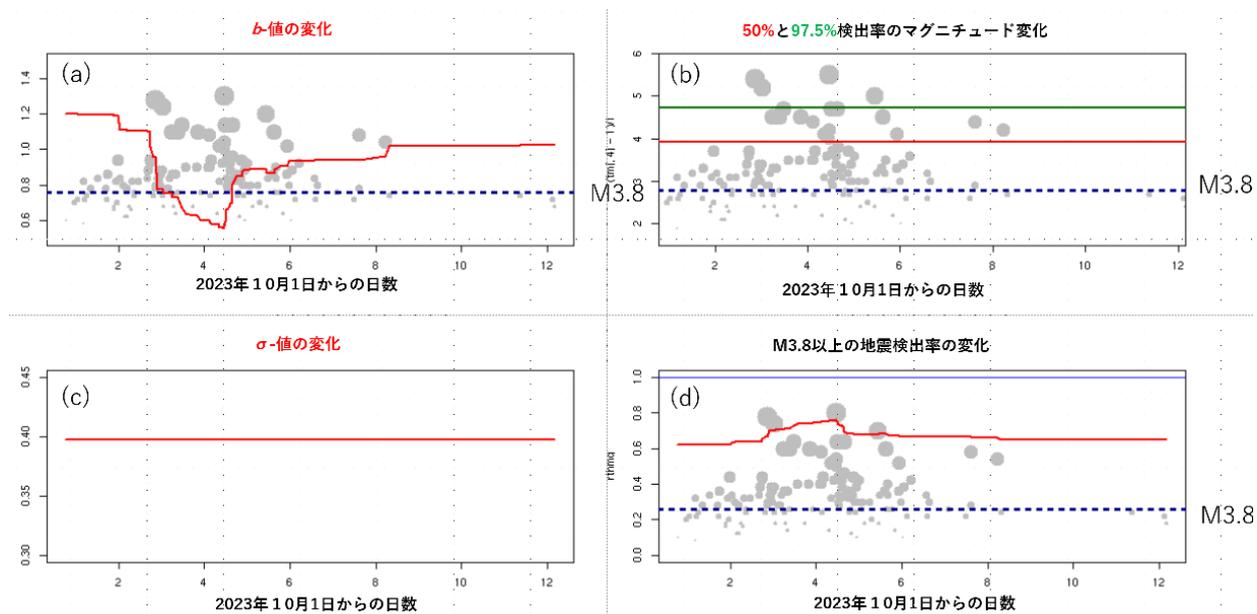
- 1) Kumazawa, T. and Ogata, Y. (2013) *J. Geophys. Res.*, **118**, 6165–6182.
<https://doi.org/10.1002/2013JB010259>
- 2) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2023) 予知連会報 109 (7-2)
https://cais.gsi.go.jp/VOCHIREN/report/kaihou109/07_02.pdf
- 3) Kumazawa, T., Ogata, Y. and Tsuruoka, H. (2019) *Earth, Planets and Space*, **71** (130)
<https://doi.org/10.1186/s40623-019-1102-y>

- 4) Ogata, Y. and Katsura, K. (1993) *Geophys. J. Int.*, **113**, 727–738.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb04663.x>
- 5) 尾形良彦, 熊澤貴雄 (2023) 第 111 巻予知連会報に掲載予定.
<https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/index111.html>
- 6) Kumazawa et al. (2016) *EPSL* **442**, 51-60
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.049>
- 7) 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2021) 予知連会報 106 (7-2)
https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou106/07_02.pdf



第 1 図 2023 年 10 月の鳥島付近の群発地震活動。震央と深さ分布

Fig. 1 Earthquake swarm activity around Torishima Island in October 2023. Epicenters and depth distribution.



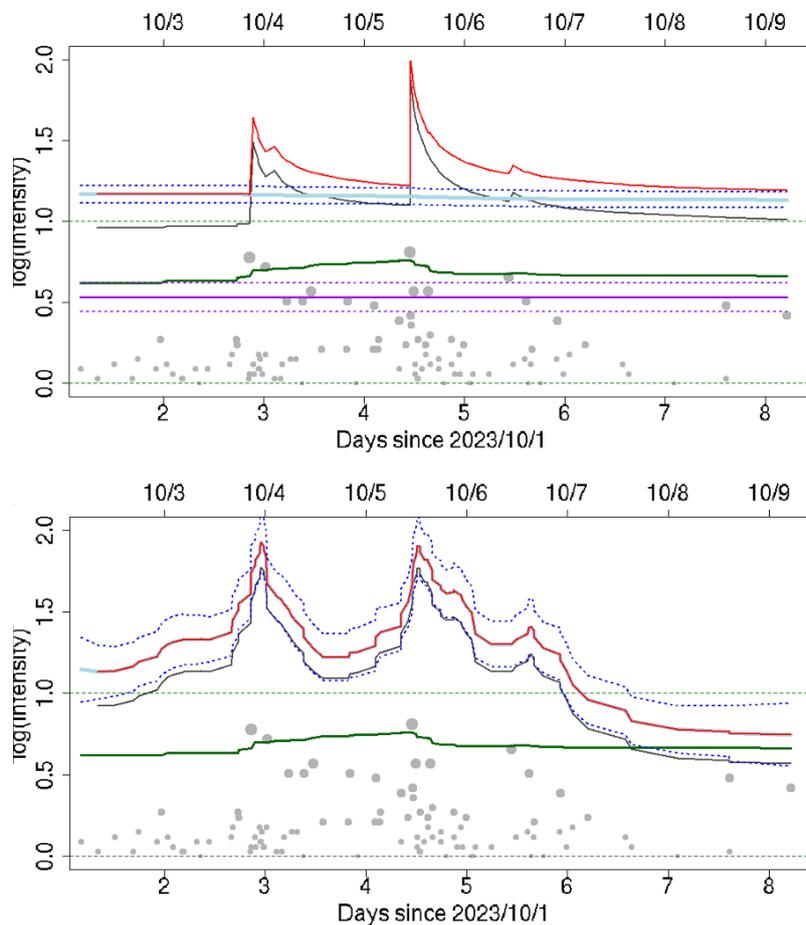
第 2 図 マグニチュード検出率分布モデルの 3 パラメータ推定図。(a) b 値, (b) μ 値, (c) σ 値, の赤線。(b) の緑曲線は $\mu+2\sigma$ で 97.5% の検出率。(d) 赤曲線は $M \geq 3.8$ 地震の検出率。灰色円盤は検出された地震の M-T 図。

Fig. 2 Estimated detection magnitude distribution model. (a) b values, (b) μ values, and (c) σ values is red line, respectively. The green curve in (b) shows 97.5% detection rate of $\mu+2\sigma$. (d) Red curve is detection rates for $M \geq 3.8$ earthquakes. Gray disks are M-T diagrams of detected earthquakes.

第 1 表 非定常 ETAS の平滑化重みの ABIC 値の行列表. 行は μ 値の平滑化重み, 列は K 値の平滑化重み, 但し平滑化重み値は 10 の累乗.

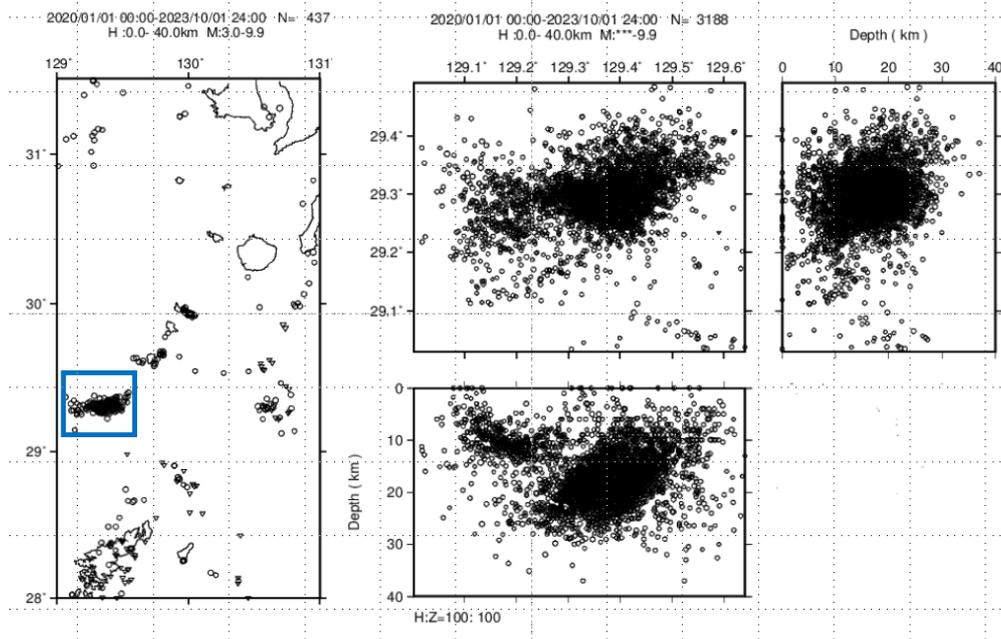
Table 1 Matrix table of ABIC values for the smoothing weights for non-stationary ETAS, where the row stand for the weight to μ -value smoothing, and the columns stands for those of K , respectively; where the smoothing weight values are powers of 10.

Δ ABIC	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	203.9	200.3	204.6	205.1	207.1	206.8	201.9	225.1	201.7	204.3	225.1	225.1
1	53.7	53.7	54.6	57.0	57.7	54.9	53.5	4.4	53.2	55.4	57.8	24.5
2	6.6	0.6	32.8	5.5	4.6	1.3	0.0	1.0	0.0	22.6	3.2	22.6
3	79.6	46.6	35.9	35.9	27.0	25.1	24.6	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5
4	116.0	78.5	41.5	36.8	33.4	30.6	29.7	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5
9												33.5



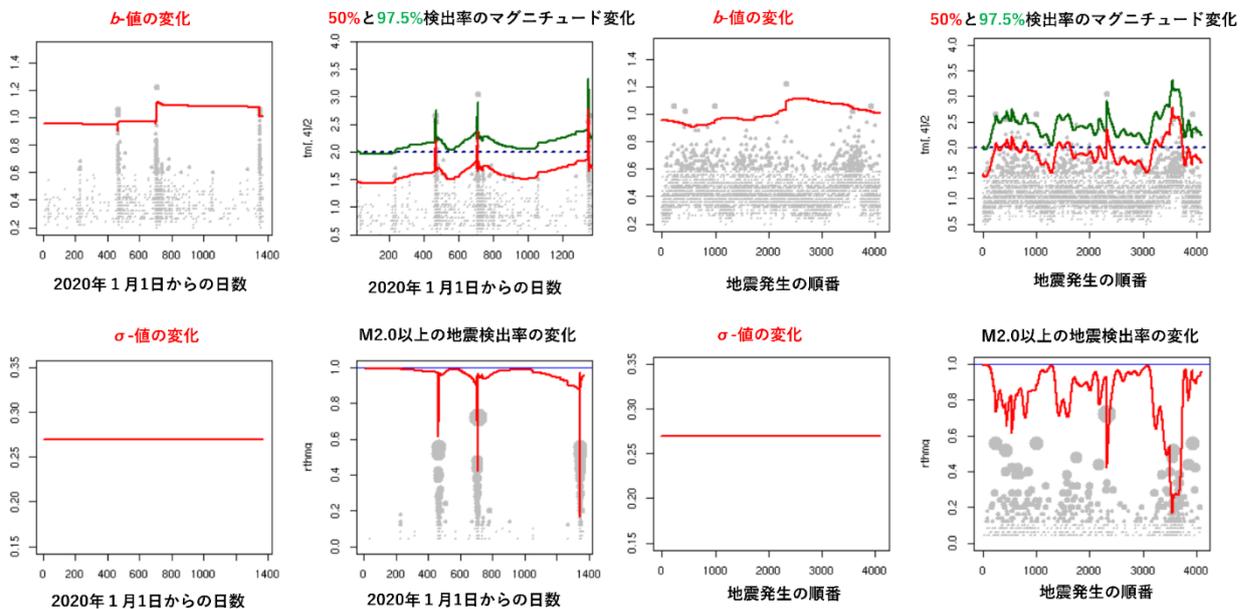
第 3 図 鳥島付近の群発地震活動に各地震の検出確率を推定して ETAS モデルと併せたモデルの推定. 赤色曲線は $M \geq 2$ 地震の潜在的活動強度関数の推定値 (常用対数), 青色曲線はバックグラウンド強度の誤差 (常用対数), 紫水平線は K 値とその誤差. 灰色曲線は検出された地震の強度関数の推定値 (常用対数), 緑色曲線は $M \geq 2$ 地震の検出率 (0.0 ~ 1.0 の線形スケール), 灰色の円盤は $M \geq 2$ 余震の M-T 図. 上段パネルが定常 ETAS モデル, 下段パネルが最適非定常 ETAS モデル. 下段のパネルでは K 値は極めて小さく, 下段の縦スケール枠には描かなかった.

Fig. 3 Estimation of the model together with the ETAS model by estimating the probability of detection for each earthquake in the seismic swarm activity around Torishima Island. Red curves are estimates of the potential intensity function of $M \geq 2$ earthquakes (normal logarithm), blue curves are errors in background intensity (normal logarithm), and purple horizontal lines are K values and their errors. The gray curve is the estimated intensity function of detected earthquakes (normal logarithm), the green curve is the detection rate of $M \geq 2$ earthquakes (linear scale of 0.0 ~ 1.0), and the gray disks are M-T diagrams for $M \geq 2$ aftershocks. The upper panel is the steady-state ETAS model and the lower panel is the optimal unsteady ETAS model. In the lower panel, the K value is extremely small and were not drawn in the lower vertical scale frame.



第 4 図 トカラ列島近海の地震群. 震央と深さ分布

Fig. 4 Epicenter map of the earthquake near the Tokara Archipelago. Epicenters and depth distribution.



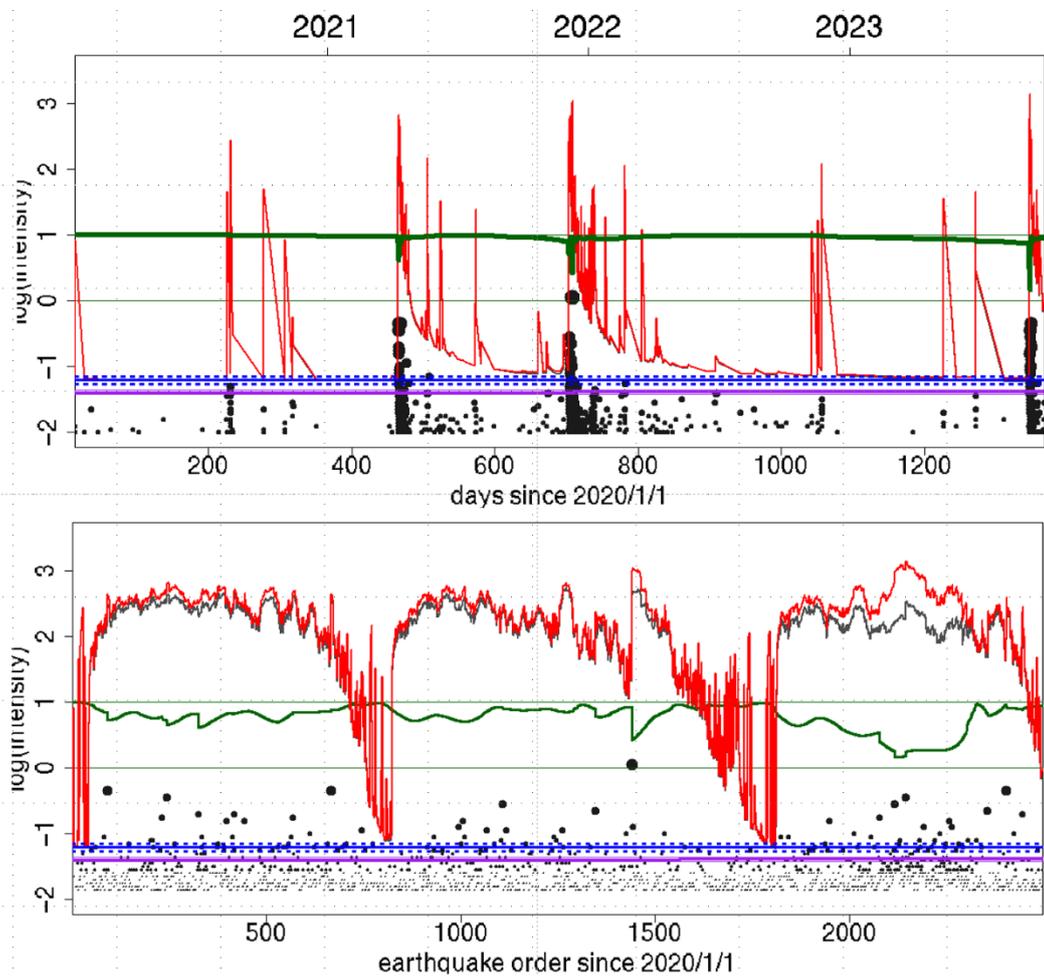
第 5 図 マグニチュード検出率分布モデルの推定図. 左側 4 パネルのフォーマットは第 2 図と同じ. 右側 4 パネルは左側 4 パネルの横軸を発生順番に替えたもの. 灰色円盤は検出された地震の M-T 図.

Fig. 5 Magnitude detection rate distribution model estimates. The format of the four panels on the left is the same as in Figure 2. The four panels on the right side replace the horizontal axis of the four panels on the left side with the order of occurrence. The gray disks are M-T diagrams of detected earthquakes.

第 2 表 非定常 ETAS の平滑化の重みに対する ABIC 相対値. 行列のフォーマットは第 1 表に同じ.

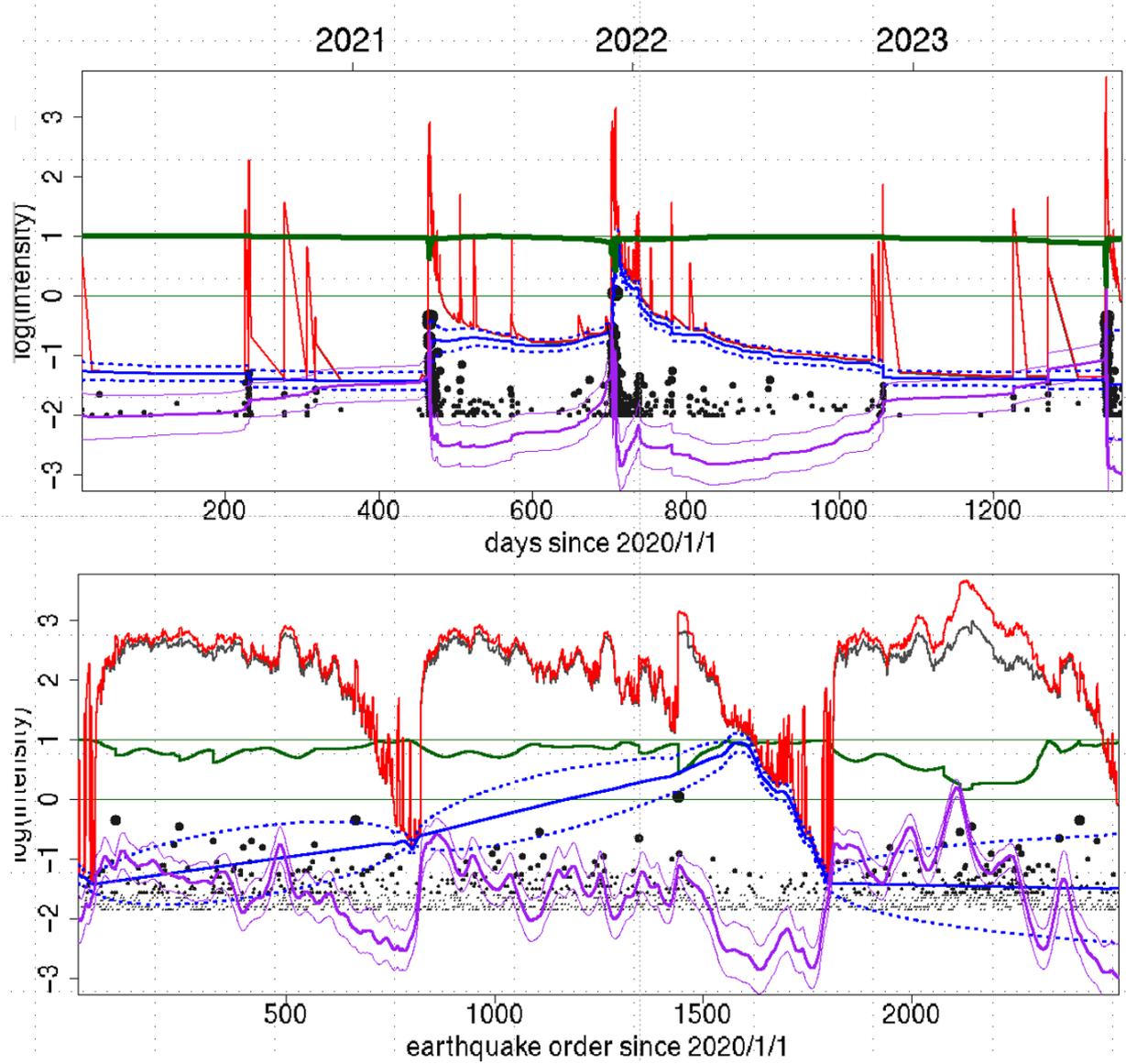
Table 2 Table of the ABIC's relative values for smoothing weights for non-stationary ETAS model. The format of the matrix is the same as in Table 1.

	1	2	3	4	5	9
1	1343.45	1050.62	958.17	986.26	1465.56	
2	710.73	179.17	92.27	126.86	318.30	
3	775.58	127.27	0.00	65.26	211.85	
4	828.65	163.40	28.99	89.02	225.41	
5	844.76	177.03	40.51	98.39	232.62	
9						379.58



第 6 図 トカラ列島付近の群発地震活動について $M \geq 2.0$ 定常 ETAS モデルの推定. 赤色曲線は $M \geq 2$ 地震の潜在活動強度関数の推定値 (常用対数), 灰色曲線は検出地震の活動強度関数の推定値 (常用対数), 誤差付き青色曲線はバックグラウンド強度 (常用対数), 緑色曲線は $M \geq 2$ 地震の検出率 (0~1 の線形スケール), 灰色の円は $M \geq 2$ 余震のマグニチュード (線形スケール). 水平軸は, 上段パネルが 2020 年 1 月 1 日からの経過日数, 下段パネルが地震の順番で描き直した. $m(t)$ 値は 10 倍のものを示している.

Fig. 6 Estimation of the $M \geq 2.0$ optimal unsteady ETAS model for cluster seismicity near the Tokara Islands. The red curve is the estimated latent activity intensity function for $M \geq 2$ earthquakes (normal log scale), the gray curve is the estimated activity intensity function for detected earthquakes (log), the blue curve with error is the background intensity (log scale), the green curve is the detection rate for $M \geq 2$ earthquakes (0~1 linear scale), and the gray circles are magnitudes of $M \geq 2$ aftershocks (linear scale). Horizontal axes are redrawn in the order of days elapsed since January 1, 2020 in the upper panel and earthquakes in the lower panel.



第 7 図 トカラ列島付近の $M \geq 2.0$ 群発地震活動の最適非定常 ETAS モデルの推定。各色曲線は第 5 図に同じ。

Fig. 7 Estimation of the optimal unsteady ETAS model for $M \geq 2.0$ group seismicity near the Tokara Islands. Each color curve is the same as in Figure 5.