

資料 1 1

第 2 0 6 回

地震予知連絡会資料

2 0 1 5 年 2 月 1 6 日

統計数理研究所

気象研究所

伊豆東部の群発地震活動の推移の短期予測について

Predicting changing rates of swarm activity by volumetric strain changes

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

気象研究所

Meteorological Research Institute

伊豆東部における群発地震発生領域（第1図）では総地震発生数とマグマ貫入量の指標となる地殻内体積歪みの観測量（東伊豆檜本観測点）との相関関係が知られている¹⁾。下記の非定常 ETAS モデル^{2, 3)}を用いて伊豆東部の群発地震活動を解析したところ、地震活動度の変動（単位時間あたりの地震数の時系列）よりも常時地震活動強度 $\mu(t)$ の変動の方が体積歪みの変動に対して優れて高い相関を持つことが解った。ここで体積歪みの変動データは BAYSEA やタンクモデルなどによって気圧、潮汐、降水量の影響を取り去り補正⁴⁾（たとえば第2図参照）した上で群発地震のコサイスマックな短期変動量（第4図参照）を取り除いたものである。

そこで、先行する補正済みの体積歪みの観測量時系列から ETAS モデルの常時地震活動強度を予測し、そのうえで群発地震の頻度の予測へと繋げる手法を提案する。ここで使用する非定常 ETAS モデルは

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

の様に ETAS モデルの常時地震活動 μ と余震発生強度 K_0 のパラメータが時間 t に依存するものである。常時地震活動のパラメータ変化 $\mu(t)$ と誘発効率 $K_0(t)$ は各群発地震活動のデータで推定する。他のパラメータはどの群発地震活動でも共通に $c = 0.00659$, $\alpha = 0.650$, $p = 1.44$ として固定しており、これらは第1図における全領域での1950年から1980年の $M \geq 4$ の地震発生系列から定常 ETAS モデルで推定したものである。

伊豆東部における1980年以降の主要な群発期間（第1図参照）においてこのモデルから推定された常時地震活動の変動 $\hat{\mu}(t)$ （第3図の赤線）は、地震後30秒間のコサイスマックの変動（第4図参照）を取り除いた、時間単位の補正体積歪みの変動 $\{z_t\}$ から半日前後ほど遅れて高い相関を示す（第1表参照）。そこで線形回帰

$$\hat{\mu}(t) = \beta_0 z_t + \beta_1 z_{t-1} + \beta_2 z_{t-2} + \cdots + \beta_M z_{t-M} + \varepsilon_M \quad (2)$$

を用いて群発期間での常時地震活動の変動の体積歪み変動 $\{z_t\}$ に関する回帰係数を求める (第5図の左図参照).

ここで先行する体積歪みと常時地震活動との回帰係数 β_s は概ね時間差 $s = 1, 2, \dots$, により指数的に減衰する (第5図の左図参照) ことが分かったので, 改めて各群発期間で次の2パラメータの回帰モデル

$$\mu(t) = \beta \int_{-\infty}^t e^{-\sigma s} dZ_{t-s} + \eta_t \approx \beta \sum_{k=0}^K e^{-\sigma k} z_{t-k} + \eta_t \quad (3)$$

で最小二乗法により指数関数の切片係数 β と減衰係数 σ を推定した (第5図の左図および第2表参照). 減衰係数は $\sigma = 0.078$ / 時 で概ね全ての群発地震に共通であるであるが, 切片係数 β は群発地震ごとに違うが, (第2表および第5図の左図参照). しかも, この β は体積ひずみ計設置位置と群発地震の開始位置 (x,y) との距離 $d(x,y)$ で

$$\beta(x,y) = 9.14 \times 10^6 + 1.41 \times 10^6 / (1.937 \times 10^3 + d(x,y)) \quad (4)$$

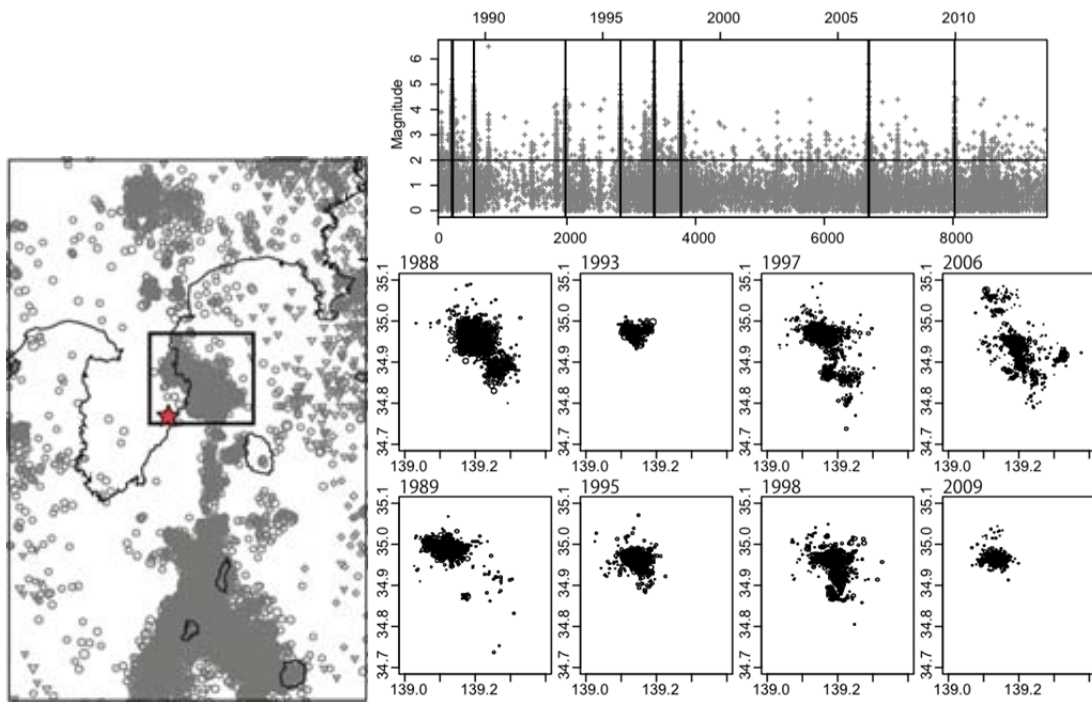
の様に精度良く反比例関数で表記できることが分かった (第5図の右図参照).

したがって, 群発地震の開始位置が分かれば, 上式の応答関数 (3) によって1日程前からの体積ひずみ計データから現在の常時地震活動度が精度良く推定できる (第6図の各上段図参照). さらに伊豆東部の群発地震活動の平均的な K_0 によって非定常 ETAS モデル (1) を用いて群発地震活動自体の推移について予測が可能となる (第6図の各下段図参照).

(熊澤貴雄・尾形良彦・木村一洋・前田憲二・小林昭夫)

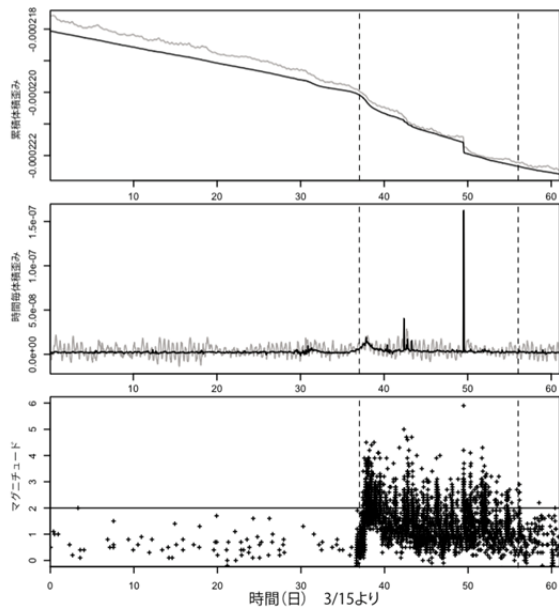
文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2010) 「伊豆東部の地震活動の予測手法」報告書 <http://www.jishin.go.jp/main/yosoku/izu/index.htm>
- 2) Kumazawa, T. and Ogata, Y. (2013) *J. Geophys. Res.* **118**, 6165-6182.
- 3) Kumazawa, T. and Ogata, Y. (2014) *Ann. Appl. Statist.*, **8**, 1825-1852.
- 4) 木村一洋, 露木貴裕, 菅沼一成, 長谷川浩, 見須裕美, 藤田健一 (2014) 験震時報 第78巻, 第3-4号掲載予定.



第 1 図. (左地図) 伊豆東部群発地震の発生領域 (内側矩形). 赤星印は東伊豆奈良本観測点. (右図) 1980 年からの地震活動の MT 図と主要な群発地震 ($M \geq 3.0$) の震央図.

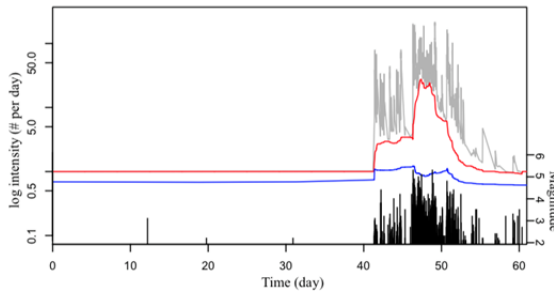
Fig. 1. (Left panel) Eastern Izu swarm region (Inner rectangle). Red star indicates the volumetric strain meter located at (139.0508°E , 34.8025°N). (Top right panel) Magnitude vs time plot of the seismicity during 1980~2012 with $M \geq 3.0$. (Right panels) Epicenters of the major swarms.



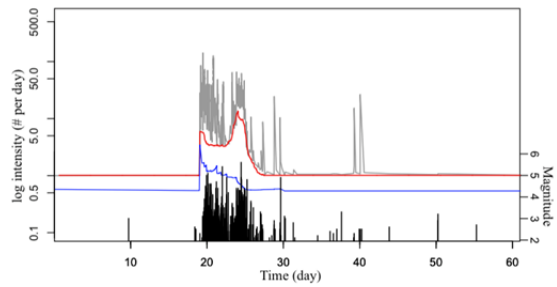
第2図. 1998年の群発地震期間での体積歪みの変動（上段図）とその時間ごとの体積歪みの階差（中段図）でスパイクは地震時の変化. 灰色は粗観測量であり, 黒は気圧, 潮汐, 降水量の補正がされたもの. (下段図) 群発地震の M-T 図.

Fig. 2. Upper and middle panel shows observed volumetric strain and the differences during the 1998 swarm period. Gray and black lines represent raw and corrected data, respectively; spikes are due to coseismic effect. Bottom panel shows M-T diagram of the swarm.

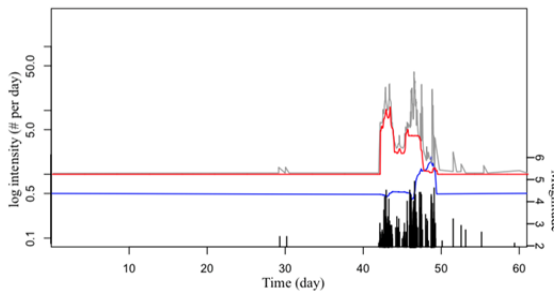
1988



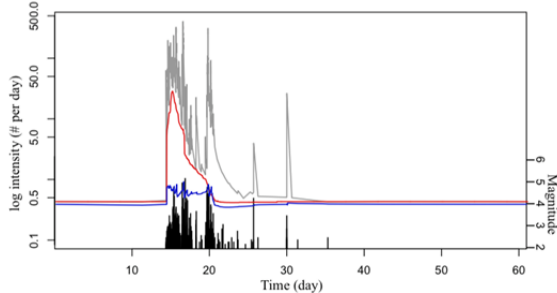
1989



1993

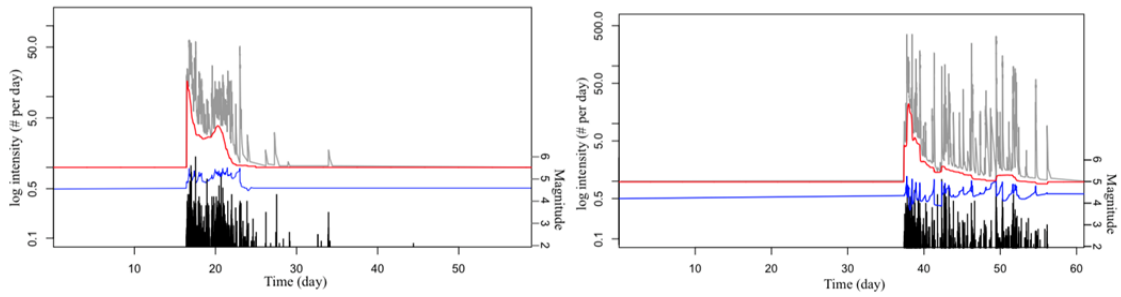


1995



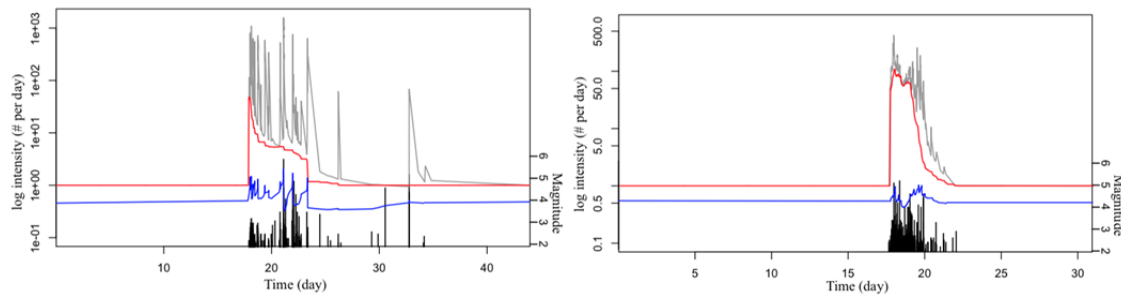
1997

1998



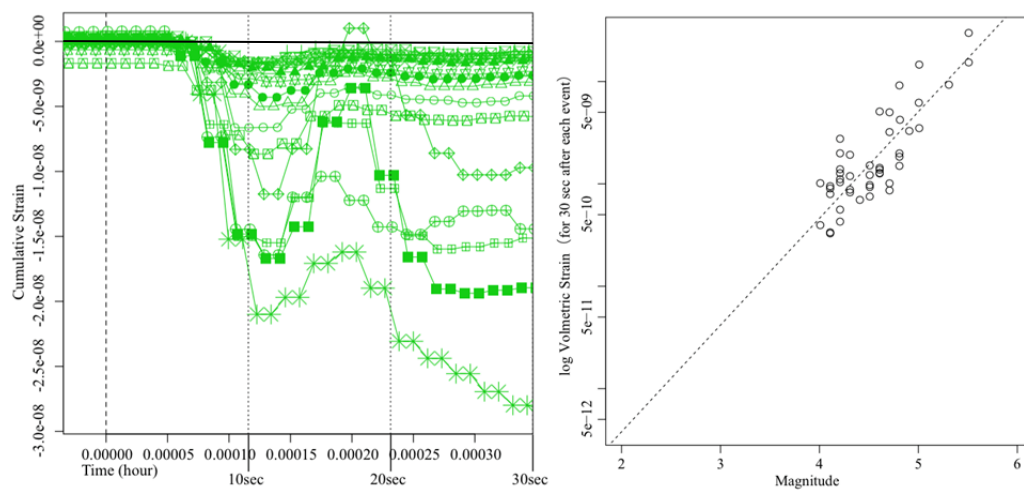
2006

2009



第3図. 主な群発地震活動 ($M \geq 3.0$) の非定常 ETAS モデルによる常時活動度 $\mu(t)$ (赤線) と地震誘発率の強度 $K_0(t)$ (青線) の推定量. 灰色曲線は非定常 ETAS のモデルによる群発地震の発生率 $\lambda(t | H_t)$ を表す. M-T 図を除き全て縦軸は対数スケールである.

Fig. 3. Estimates of the non-stationary ETAS model (gray), the background rate (red) and aftershock productivity (blue) for respective swarm activity; all the curves are in logarithmic scale except for M-T plots in the bottom.



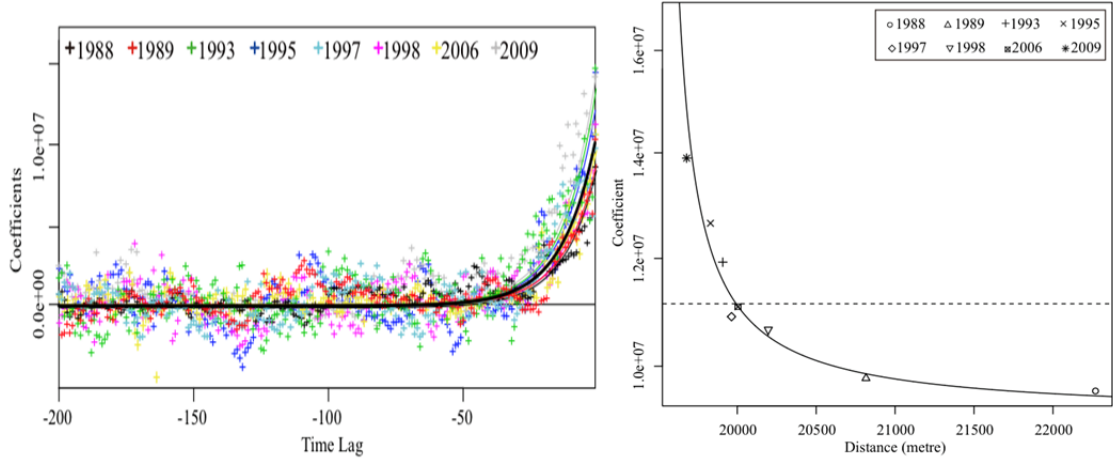
第 4 図. (左図) 1998 年の群発地震期間での, M 4 以上の地震後 30 秒間の体積歪み累積変動量. (右図) マグニチュード (横軸) と地震後 30 秒間の体積歪み累積変動量 (縦軸は対数表示). M 4 以下の地震の影響は回帰モデルより推定する.

Fig. 4. Magnitudes v.s. the logarithm of the volumetric strain changes in 30 seconds after the events. Log linear model $\log(\text{strain}) \sim -34.81 + 3.23M$ is shown by the dashed line.

Max cross-Correlation in hours lag	Strain vs # events	Strain vs $\mu(t)$	Strain vs # declustered event
1988	0.50 (0)	0.56 (-15)	0.50 (-10)
1989	0.51 (-1)	0.53 (-14)	0.51 (-6)
1993	0.51 (0)	0.70 (-15)	0.62 (-3)
1995	0.44 (0)	0.53 (-13)	0.46 (-11)
1997	0.50 (-5)	0.54 (-13)	0.51 (-5)
1998	0.47 (0)	0.55 (-13)	0.50 (-8)
2006	0.38 (0)	0.57 (-13)	0.49 (-12)
2009	0.52 (-7)	0.58 (-14)	0.55 (-10)

第 1 表. 体積歪みデータと, 時間毎地震数, 非定常 ETAS 常時地震活動, 定常 ETAS モデルの除群後の地震, それぞれとの相関係数の最大値. 括弧内は体積歪みに先行する時間数でマイナスの値は体積歪みが地震活動に先行することを示す.

Table 1. Maximum cross correlation of the strain time series against numbers of swarm events per hour, against background rates per hour estimated by the non-stationary ETAS model (1), and against numbers of the background events by the stochastic declustering algorithm using the stationary ETAS model. Numbers in the brackets are lime-lags in hours; minus values indicate that the strain values precede the events in hours.



第 5 図. (左図) 各群発地震期間における, 先行する体積歪みの常時地震活動の変動 $\hat{\mu}(t)$ に対する回帰係数 (本文第 2 式) を重ね合わせたもの. 横軸は体積歪みとの時間差を表す. 太黒曲線は全体の係数から最小二乗法で推定した指数関数曲線 (第 3 式) であり, 各色の細曲線が各群発地震それぞれの係数から推定した指数関数を表す. (右図) 体積歪みから常時地震活動への応答関数反応の強さの切片係数 $\beta(x,y)$ (縦軸) と, 体積歪み計から群発地震発生 of 初期の位置までの距離 d (横軸) $\beta(x,y) = 9.14 \times 10^6 + 1.41 \times 10^6 / (1.937 \times 10^3 + d(x,y))$. 群発地震活動の開始位置として初期 20 個の地震の発生位置の平均値を用いた.

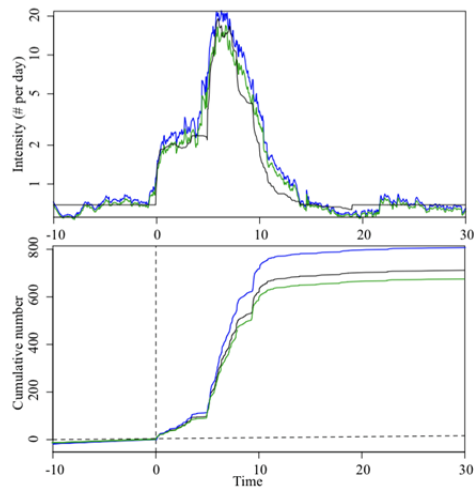
Fig. 5. (Left panel) Coefficients of the regression in Equation (2) regarding time lag up to $i = 200$ hours. Each color corresponds to respective swarm period. The colored solid curve shows the response function of the coefficient: $\bar{\beta}_i = \beta(x,y)\exp(-\sigma i)$ estimated by the least squares, from the coefficients β_i of the corresponding color. The thick black curve is the response function from all swarm periods. (Right panel) The parameter value $\beta_{x,y}$ of each swarms plotted against the distance r of the onsets (average distance of the first 20 events). The curve shows the relation $\beta(x,y) = 9.14 \times 10^6 + 1.41 \times 10^6 / (1.937 \times 10^3 + d(x,y))$ estimated by the least squares. The horizontal dashed line is the average 1.16.

	Total	1988	1989	1993	1995	1997	1998	2006	2009
$\beta(x,y) \times 10^7$	1.16	0.95	0.99	1.19	1.28	1.10	1.06	1.11	1.39
σ	0.078	0.074	0.080	0.074	0.081	0.074	0.080	0.078	0.078

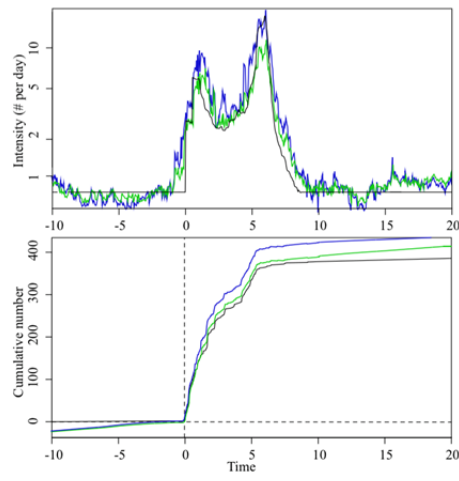
第 2 表. 第 3 式のパラメータ推定値

Table 2. Estimates of the coefficients in Equation 3

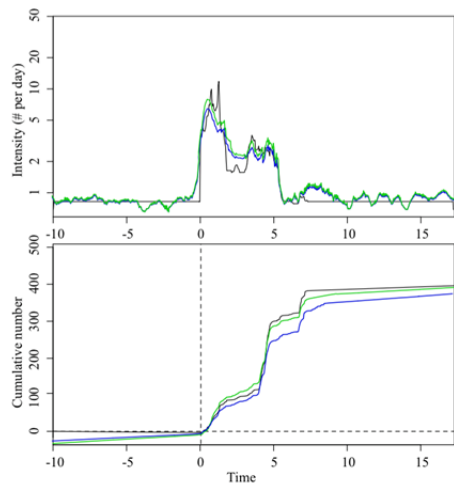
1988



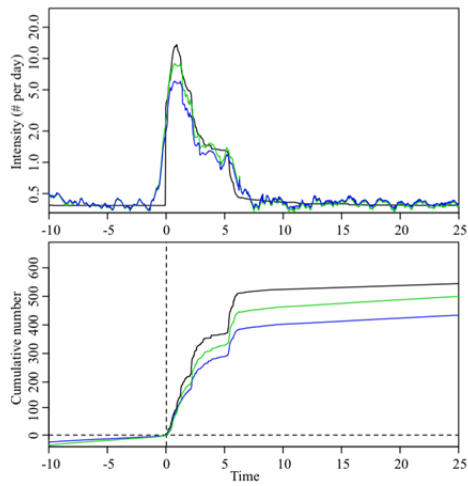
1989



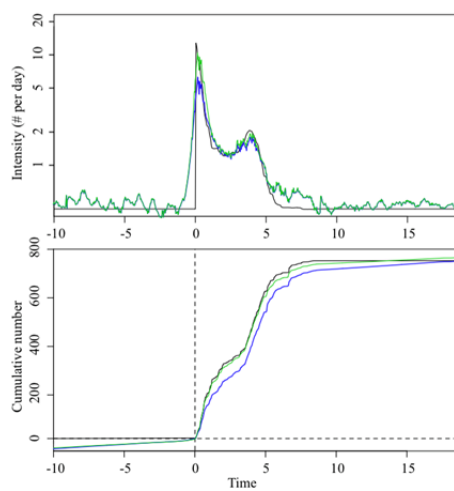
1993



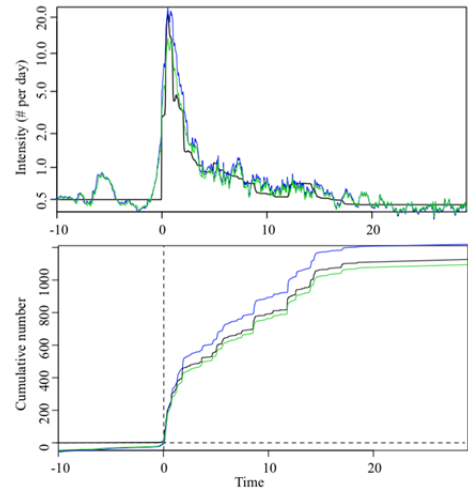
1995



1997



1998



2006

2009

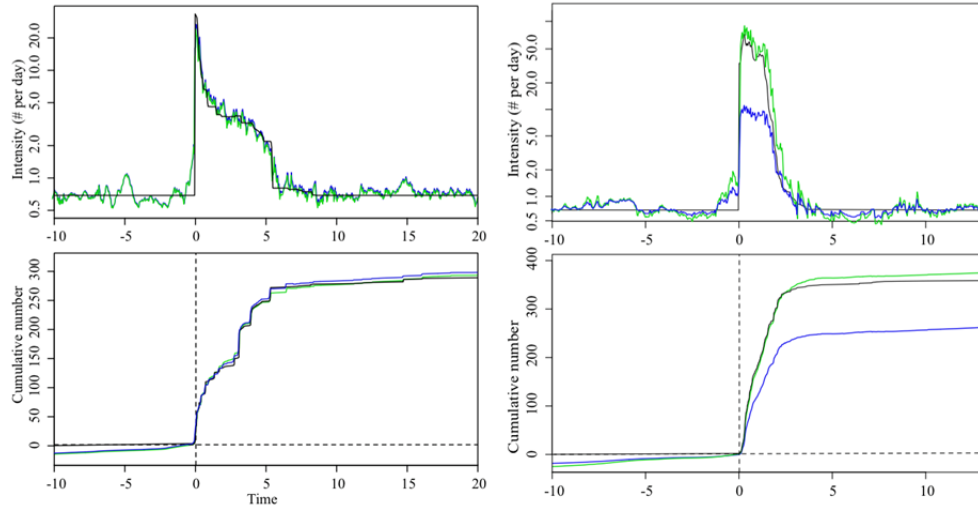


図 6. (上) 非定常 ETAS モデルによる常時地震活動推定値 (黒; 第 5 図の赤線と同じ) と体積歪みから平均的な反応関数 (本文第 3 式の $\beta(x,y)$ は位置に依存しない) を用いて推定した常時地震活動 (青), および群発開始位置によって補正をかけた反応関数から推定した常時地震活動 (緑). (下) 上で推定した常時地震活動とリファレンスパラメータ (表 1) を用いた, ETAS モデルによる地震発生累積回数の期待値 (予測値). 色は上パネルに対応する.

Fig. 6. The upper panels show the background rates (black curve; same as the red curves in Figure 5) estimated from the non-stationary ETAS model (1), those (blue curves) estimated from linear regression in (2) for all the swarm cases, and those (green curves) predicted from the equation in (3) for respective swarm activity; all the curves are in logarithmic scale. The lower panels show the cumulative numbers of swarms (black); estimated and predicted cumulative swarms by the non-stationary ETAS model with the $\mu(t)$ with (2) and (3), respectively. The colors correspond to the corresponding upper panels.