5-1 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(東伊豆楢本観測点)との有意な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 コサイスミックな短期変動量(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

$$\lambda_{\theta}(t \mid H_{t}) = \mu(t) + \sum_{\{i: S < t_{i} < t\}} \frac{K_{0}(t_{i})e^{\alpha(M_{i} - M_{z})}}{\left(t - t_{i} + c\right)^{p}}$$
(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 ≥ 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秒間のコサイスミックの変動 (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

$$\hat{\mu}(t) = \beta_0 z_t + \beta_1 z_{t-1} + \beta_2 z_{t-2} + \dots + \beta_M z_{t-M} + \varepsilon_M$$
(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)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 βs は概ね時間差s = I, 2, ...,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

$$\mu(t) = \beta \int_{-\infty}^{t} e^{-\sigma s} dZ_{t-s} + \eta_t \approx \beta \sum_{k=0}^{K} e^{-\sigma k} z_{t-k} + \eta_t$$
(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(第2表および第5図の左図参照).しかも、この β は、体積ひずみ計の位置と群発地震の開始の位置 (x,y) の距離 d(x,y) に対して、

$$\beta(x,y) = 9.14 \times 10^6 + 1.41 \times 10^6 / (1.937 \times 10^3 + d(x,y))$$
(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 (x,y) が分かれば, 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 K₀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,78, 93-158.



- 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≥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 $(139.0508^{\circ}\text{E}, 34.8025^{\circ}\text{N})$. (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,M4以上の地震後40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).M4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 40 seconds after the events. Log linear model $log(strain) \sim -34.81 + 3.23M$ is shown by the dashed line.

- 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 1Maximum 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.

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 μ(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応答の強さの切片係数 β(x,y)(縦軸)と,体積歪み計から群発地震発生の 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.

第2表 第3式のパラメータ推定値

	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

Table 2Estimates of the coefficients in Equation 3



- 図 6 (各対パネル上) 非定常 ETAS モデルによる常時地震活動推定値(黒; 第5図の赤線に同じ) と体積歪みから平均的な応答関数(本文第3式のβ(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応答関数から推定した 常時地震活動(赤). (各対パネル下)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 (red 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 μ (*t*) with (2) and (3), respectively. The colors correspond to the corresponding upper panels.