## 12 - 12 群発地震活動の非定常 ETAS モデルによる検出と測地学データに基づく 予測可能性について

## Detection of swarm activities by nonstationary ETAS model and their predictability based on geodetic data

東京大学地震研究所 統計数理研究所 Earthquake Research Institute, University of Tokyo The Institute of Statistical Mathematics

ゆっくりと断層が滑るスロースリップや、火山活動時の流体貫入などによる断層の弱化はしばし ば群発地震活動を誘発する. このタイプの地震活動は、地震の予測に一般的に使用される ETAS モ デルが想定する、時間的に先行する地震による誘発の連鎖とは異なる因果関係で発生するため、地 震カタログのみからの予測が困難であることが知られている. しかしながら、誘発源である地殻内 現象の測地学的データを用いることで、短期的な予測が可能になると考えられる. 鍵となるのは測 地学的データと地震活動の相関性をモデルで示すことであり、本報告ではベイズ法による非定常 ETAS モデル (Kumazawa and Ogata, 2013)<sup>1)</sup> で群発地震とスロースリップ、火山活動との時間的な相 関関係を示した.

ここで使用する非定常 ETAS モデル (1) は従来の ETAS モデルの背景地震活動  $\mu$  と余震発生強度  $K_0$  のパラメータが次のように時間 t に依存すると仮定し,これらをベイズ法で推定する.

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

他のパラメータ a, c, p は時間不変であり,周囲のテクトニックな地震活動に合わせて決定する.  $\mu(t)$  は対象領域の静的応力変化や断層弱化などに起因する,他の地震とは独立な地震発生率の変化 を示す.他方  $K_0(t_i)$  は各地震の連鎖効果の大小(余震生産性)を示すが,これを空間上にプロット すれば実際は時刻  $t_i$  に起きた地震 i の位置に依存することが分かる.

本課題の先行的な研究として,Kattamanchi et al. (2017)<sup>2)</sup> はカーネル法による非定常 ETAS モデル をニュージーランド北島東方沖の地震活動に適用し,常時地震活動  $\mu(t)$  と複数の GPS 観測点での スロースリップに対応する変動が同期していることを示した.一方で本報告ではベイズ法による非 定常 ETAS モデル (1) を房総半島沖,茨城沖,伊豆半島東方沖の群発地震活動を含む地震時系列に 適用し,先行研究で特定されたスロースリップ,または火山活動との時間的相関を調査した.

房総半島沖では 2 – 7 年周期で群発地震が発生していることが知られているが、この地域の太平 洋プレート内の地震活動(第1図 a)に対して非定常 ETAS モデル(1)で解析した結果、常時地震 活動 μ(t)のピークの多くが既知のスロースリップの発生時期 (2002, 2007, 2011, 2014, 2018; 防災科 技研 2011,2014,2018, Hirose et al. 2012, 2014, Reverso et al. 2016)と同期していることを示した(第1 図 c). 上記以外のμ(t)のピークは未知のスロースリップと関連している可能性がある. 2019 地震 学会の高木他のポスターによると、GNSS データによる断層面のグリッド探査インバージョンで小 さなスロースリップエベントが多数検出されている可能性が出てきた. 茨城沖(第2図 a)でも同 様に常時地震活動  $\mu$  (*t*)の複数のピークが推定されたが(第2図 c)、東北沖地震の発生前期間での ピークは Nishikawa and Ide (2018)が特定するスロースリップと対応する. 伊豆半島東方沖における 群発地震発生領域(第3図 a)での常時地震活動  $\mu$  (*t*)のピークは Kumazawa et al. (2016)が時期個別 的に解析したマグマ貫入に伴う体積ひずみ計の変動時期と一致した(第3図 c).

これらの,常時地震活動 µ(t)とスロースリップ・マグマ貫入との時間的な相関関係は,後者から前者の時間的な予測可能性を示唆する.また,適切な応答関係を考案することで,強度的な対応関係のモデル化が考えられる.この試みの成功例が,Kumazawa et al. (2016)で提案した,体積ひずみ変動から常時地震活動 µ(t)への応答モデルであった.そこでは体積ひずみ変動データは 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した上で地震のコサイスミックな短期変動量を取り除いたものを使用し,各群発地震発生期間での時間先行する体積ひずみ変動から常時地震活動 µ(t)の予測モデル(2)を提案したが,応答の強度的な精度向上にはひずみ計から群発地震発生位置(マグマ貫入位置)までの距離を組み込むことが必要であった(第4図).

$$\tilde{\mu}(t) = \left(q_1 + q_2/(q_3 + d(x, y))\right) \sum_{k=0}^{K} e^{-k\sigma} z_{t-k}$$
(2)

Zt-kは1時間刻みの体積歪の変化量, d(x,y)は群発地震の開始位置から体積ひずみ計までの距離, s,  $q_1, q_2, q_3$ は全ての群発地震活動について共通の定数とする.

本解析にかんして JMA カタログとソフトウェア TSEIS を使用した.

(熊澤貴雄,尾形良彦)

## 参考文献

- Kumazawa T, Ogata Y (2013), Quantitative description of induced seismic activ- ity before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake by nonstationary ETAS models: NONSTATIONARY ETAS MODEL. J Geophys Res Solid Earth 118(12):6165–6182. http://doi.wiley.com/10.1002/2013JB010259.
- Kattamanchi, S., R.K.Tiwari, and D.S. Ramesh (2017), Non-stationary ETAS to model earthquake occurrences affected by episodic aseismic transients. *Earth Planets Space* 69, 157 (2017) doi:10.1186/ s40623-017-0741-0.
- 3) 防災科学技術研究所 (2011), 房総半島沖スロースリップイベントと深部底付け作用, 連絡会報, 85, 12-18.
- 4) 防災科学技術研究所 (2014), 2014 年 1 月房総半島沖スロースリップイベント, 連絡会報, 92, 108-116.
- 5) 防災科学技術研究所 (2018), 房総半島沖スロースリップイベント (2018 年 6 月), 連絡会報, 101, 4-2.
- 6) Hirose, H., H. Kimura, B. Enescu, and S. Aoi (2012), Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, *Proc. Nat. Acad. Sci.* USA, 109(38), 15,157–15,161.
- 7) Hirose, H., T. Matsuzawa, T. Kimura, and H. Kimura (2014), The Boso slow slip events in 2007 and

2011 as a driving process for the accom- panying earthquake swarm, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2778–2785.

- Reverso, T., D. Marsan, A. Helmstetter, and B. Enescu (2016), Background seismicity in Boso Peninsula, Japan: Long-term acceleration, and relationship with slow slip events, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5671– 5679.
- 9) Gardonio, B., Marsan, D., Socquet, A., Bouchon, M., Jara, J., Sun, Q., & Campillo, M. (2018). Revisiting slow slip events occurrence in Boso Peninsula, Japan, combining GPS data and repeating earthquakes analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 1502–1515.
- 10) Nishikawa, T., & Ide, S. (2018). Recurring slow slip events and earthquake nucleation in the source region of the M 7 Ibaraki-Oki earthquakes revealed by earthquake swarm and foreshock activity. *Journal* of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 7950–7968.
- 11) Kumazawa T, Ogata Y, Kimura K, Maeda K, Kobayashi A (2016), Background rates of swarm earthquakes that are synchronized with volumetric strain changes. *Earth Planet Sci Lett* 442:51–60. http://linkinghub.elsevier.com/ retrieve/pii/S0012821X16300747.



- 第1図 房総半島沖の群発地震と常時地震活動強度 µ (t)の推定.
   (a) 震央分布.枠内の地震活動を解析.(b) モデル(1) による λ (t) (灰), µ (t) (赤)の推定.(c) µ (t) と 2σ エラーバー.矢印は先行研究が特定するスロースリップの発生時期を示す(緑:文献(3)~(8),青:文献(9),黄色:文献(1)).(d) M-T 図.
- Fig. 1 Estimation of the background seismicity μ(t) of the swarm earthquakes off the Boso Peninsula
  (a) Epicenter distribution. Events within the polygonal region are used. (b) Gray curve is the estimatation for λ (t) of model (1), red curve is for μ(t). (c) Estimated μ(t) with 2σ error bars. Arrows indicate the time of occurrence of slow slip identified by previous studies (green: reference (3) to (8), blue: reference (9), yellow: reference (1)). (D) MT diagram.



- 第2図 茨城沖の群発地震と常時地震活動強度 μ(t)の推定. (a) 震央分布.枠内の地震活動を解析.(b) モデル(1) によるλ(t)(灰),μ(t)(赤)の推定.(c) 推定μ(t) と 2σエラーバー.緑矢印は先行研究(文献(10))が特定するスロースリップの発生時期を示す.青矢印は東 北沖地震発生時.(d)M-T 図.
- Fig. 2 Estimation of the background seismicity μ(t) of the swarm earthquakes off the Ibaraki prefecture.
  (a) Epicenter distribution. Events within the square region are used. (b) Gray curve is the estimatation for λ (t) of model (1), red curve is for μ(t). (c) Estimated μ(t) with 2σ error bars. Green arrows indicate the time of occurrence of slow slip identified by reference (10). Blue arrow indicates the occurrence of Tohoku-Oki earthquake. (d) MT diagram.



- 第3図 伊豆半島東方沖の群発地震と常時地震活動強度 μ(t)の推定. (a) 震央分布.枠内の地震活動を解析.(b) モデル(1) によるλ(t)(灰),μ(t)(赤)の推定.(c) 推定 μ(t) と 2σ エラーバー.矢印は先行研究(文献(11))で調査した主要火山活動時期を示す.(d) M-T 図.
- Fig. 3 Estimation of the background seismicity μ(t) of the swarm earthquakes off east of Izu Peninsula
  (a) Epicenter distribution. Events within the square region are used. (b) Gray curve is the estimatation for λ (t) of model
  (1), red curve is for μ(t). (c) Estimated μ(t) with 2σ error bars. Arrows indicate the time of occurrence of major volcanic events investigated by previous studies (11). (d) MT diagram.



第4図 伊豆半島東方沖の群発地震での非定常 ETAS モデル(1) によるµ(t)の推定(黒) とモデル(2) による体 積ひずみからの推定µ(t)(赤). 横軸はそれぞれ群発地震の開始時を時刻0とする.

Fig. 4 The background seismicity estimations by model (1) (black) and by model (2) (red) for the swarm activities in the off east of Izu peninsula.