

# 点過程モデルを用いた異常地震活動の研究：M7.6能登半島地震に至る群発地震活動の時空間変動と異常活動の解釈について

熊澤貴雄 統計数理研究所 リスク解析戦略研究センター 特任准教授  
尾形良彦 統計数理研究所 名誉教授

統計地震学は、地震の発生様式を記述する統計モデルや統計的推論手法を開発し、地震データから物理的メカニズムを定量的に理解し、高い確率利得で地震の確率予測をめざす学問である。自己励起型の条件付き強度関数で特徴付けられるHawkesモデルの一種、ETASモデル（定常ETASモデル）は、尾形による1988年の発表以来、当分野での標準的モデルとして広く適用されている。当モデルは全ての地震が後続する余震をそのマグニチュードに応じて誘発するという仮定を置く。すなわち、対象とする地震時系列のみから地震活動同士の静的誘発（static triggering）に基づく地震発生強度を推定する。

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

これを拡張した筆者等の非定常ETASモデルは、外部からの動的誘発（dynamic triggering）も含み、非地震的誘発効果を考慮した点が特徴である。このモデルは定常ETASモデル（1）の第1項の背景強度  $\mu$  と第2項の余震の誘発率  $K_0$  のそれぞれに独立に時間変動要素を加味し、これらの変化を赤池ベイズ情報量規準（ABIC）法で推定するものである。非定常ETASモデルは外部からの動的誘発（dynamic triggering）も含み、非地震的誘発効果を本質的に考慮した点が特徴である。この外部からの誘発効果はETASモデルではパラメータ  $\mu$ （背景強度）に含まれることから、この詳細な時間変動を調べることがスロースリップや間隙流体圧の変動を間接的に推定することに繋がると考えられる。これ等を始めとする幾つかの点過程モデルを用いて2020年末より始まった能登半島における一連の地震活動を解析した。

本発表の要点は以下の4点である。まず、群発地震開始地域の深部で、2022年初めに一連の加速的な群発地震活発化を検出し、それに伴うGNSS基線斜距離の同時的急増加と対比した。この時に流体の大規模な移動とゆっくりすべりが開始、それらが継続したと考えられる。

次に、M6.5地震の断層モデルの深部延長部で前駆的滑りを仮定した場合の応力変化と、地震活動変化や測地学的変動との対応関係に関して論じた。すなわち深部すべりを仮定した $\Delta$ CFS（クーロン応力変化）パターンは、一部の群発地震クラスターにおける静穏化、珠洲観測点を起点とする斜距離の増加トレンド、そして群発地震開始地域の地震群の東方

へのマイグレーションと矛盾しない。これらはいずれも2022年終わりから見られた変動であった。同様に、M5.4（22年6月19日）断層の事後的な滑りを仮定した $\Delta$ CFSパターンは、M5.4発生の後暫くして見られた群発地震の相対的静穏化と矛盾しない。

そして、M6.5（23年5月5日）とその最大余震M5.9は群発地震の数密度分布が低い領域で発生し、かつ本震周辺で纏まった数の前震が起こった点を指摘した。また、2022年のM5.4地震直後の最大余震であるM5.0から本震M6.5への主応力方向に沿う矩形領域における地震発生分布は深部から浅部への流体の移動またはスロースリップを示唆する。

最後にM6.5地震以降の活動に関しては、本震後0.4日間の解析では最大余震M5.9直前にその周辺地域で静穏化が見られた。より長期間の非定常ETASモデルによる解析から、M6.5以降に各地域の背景強度は大きく減少し、暫くして増大したことが分かった。またM7.6（24年1月1日）前に相対的静穏化が見られたことも示す。