

統計モデルを用いた大地震前の前震活動加速現象に関する全世界的調査 Global investigation of foreshock acceleration prior to large earthquakes

○小山 凱・西川 友章
○Kai KOYAMA, Tomoaki NISHIKAWA

Predicting large earthquakes remains a major challenge in geoscience. Accelerating preslip and associated foreshock activity have been proposed as potential precursors, yet their frequency and whether they are unique to large earthquakes remain unclear. Here, we statistically analyze seismic activity preceding large earthquakes worldwide using an extended ETAS model with an acceleration term. We find that significant foreshock acceleration is rare, occurring before only 3–4% of large earthquakes. Comparisons with randomly selected seismic activity and synthetic catalogs demonstrate that the observed acceleration cannot be explained by aftershock cascades alone, suggesting contributions from aseismic processes, and it also occurs at similar rates during periods not followed by large earthquakes. These findings suggest that the preslip-based forecasting framework supported by theory, observation, and experiments has important limitations. In future studies on earthquake forecasting, a key issue is whether it is possible to accurately distinguish accelerations that lead to large earthquakes from those that do not.

1. はじめに

大地震の予測は地球科学における重要な課題であり、大地震直前に生じるとされる準静的な断層すべり（プレスリップ）や、それに伴う前震活動の加速は、有力な前駆現象として注目されてきた。例えば、Bouchon et al. (2013)は、環太平洋のプレート境界で発生する大地震の多くで、その直前に前震発生数が加速度的に増加したと主張した。また、Nishikawa & Ide (2018)は、2008年に茨城県沖で発生したM6.9のプレート境界地震の数日前に、加速的な前震の群発活動があったと報告している。しかし、前震活動の加速現象がどの程度の頻度で発生するのか、またそれが大地震前に特有の現象であるかについては、未だ明らかになっていない。この問題の解決のため、本研究では、世界標準の地震活動統計モデルであるETASモデル（Ogata, 1988）に、数値シミュレーションおよび岩石実験の結果に基づく前震活動の加速項を新たに導入した拡張モデル（ETAS-Aモデル）を構築した。そして、全世界の地震活動データから、大地震前の前震活動加速現象を網羅的に検出するとともに、この現象の地震予測への有用性を評価した。

2. 手法・データ

ETASモデルは、以下の式で表される世界標準の地震統計モデルであり、

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{t > t_i} \frac{K \exp(\alpha(M_i - M_c))}{(t - t_i + c)^p}$$

ある時刻の地震発生レート $\lambda(t)$ を、第一項の定常的な地震発生レートと、第二項の余震発生レートの和で表す。ここで、 t_i , M_i , M_c は、それぞれ i 番目の地震の発生時刻、マグニチュードと最小のマグニチュードを表す。また、 μ , K , α , c , p はモデルのパラメータである。本研究では、シミュレーションや岩石実験の結果（Yabe & Ide, 2018; Marty et al, 2023）を参考に、前震活動の加速を明示的に示す以下の項 $f(t)$ を新たにETASモデルに加え、ETAS-Aモデルを構築した。

$$f(t) = \frac{L}{(T_{LEQ} - t + d)^q}$$

この項は、大地震（本震）発生時刻に至るまでの地震発生レートの加速を記述する。ここで、 t は時刻、 T_{LEQ} は本震発生時刻、 L , d , q は新たなモデルパラメータである。

さらに、本研究は、上記のモデルに基づき、各地震が前震項から生じた確率を表す「前震確率」を定義し、前震確率が50%を上回る地震を前震と定義した。各地震系列における前震の個数を表

す「前震個数」、前震の先行時間の中央値を表す「前震 50%期間」を算出することによって、前震活動の加速現象を定量的に評価した。

本研究では、上記のモデルと指標を、ANSS 地震カタログに記載されている、全世界の M6.5 以上の大地震に適用した。それぞれの大地震の震央から 100km 以内、大地震前の 10 年以内に発生した M4.5 以上の地震の活動を抽出し、最尤法によりモデルパラメータを求めることで、それぞれの大地震について前震個数、前震 50%期間を算出し、評価した。さらに、日本、台湾における高精度な地震カタログについても、M6.0 以上の大地震について同様に解析を行なった。

3. 結果

解析の結果、顕著な前震活動の加速が確認されたのは全体の 3-4%の大地震に限られた。例えば、Nishikawa & Ide (2018)で解析された、日本海溝沈み込み帯における 2008 年の茨城県沖の地震や (図 1)、2008 年にバヌアツ沈み込み帯で発生した M7.3 のプレート境界地震は、特に顕著な前震活動の加速を示した。2008 年の茨城県沖の地震は前震個数 15 個、前震 50%期間 0.025 日を記録し ($L=0.42$, $d=0.042$ days, $q=2.1$)、2008 年のバヌアツの地震は前震個数 10 個、前震 50%期間 0.05 日を記録した ($L=0.73$, $d=0.061$ days, $q=1.7$)。

さらに、ランダムに抽出した地震前の地震活動との比較から、加速現象が大地震前以外の期間にも同程度の頻度で発生していることがわかった。一方で、合成地震カタログの解析により、観測された加速は、余震活動の連鎖による見かけの加

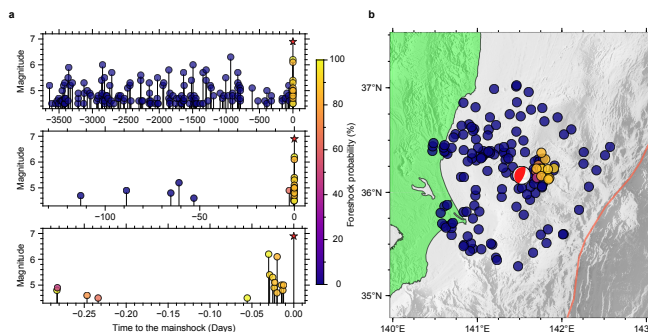


図 1 大地震前に観測された前震活動加速の一例 (2008 年 M6.9 茨城県沖地震)。加速した地震活動の MT 図と、空間分布を示す。

速では説明できず、その発生にスロースリップ等の非地震性現象が関与していることが強く示唆された。日本および台湾における高精度な地震カタログを用いた解析でも、これらと同様の結果が得られた。

4. 議論・結論

本研究では、前震活動の加速項を新たに導入し、拡張した ETAS モデルを用いて大地震前の前震活動加速現象を定量的に評価することで、前震活動の加速現象が稀にしか観測されない現象であることを明らかにした。さらに、同様の加速現象は、大地震を伴わない期間にも同程度の割合で発生していることがわかった。この結果から、前震活動の加速現象の多くは、プレスリップに起因する普遍的な前駆現象というよりも、大地震の発生とは無関係に生じるスロースリップなどの非地震性すべりによって引き起こされていると考えられる (図 2)。本研究の結果は、観測、実験、シミュレーションに基づき、大地震の最も有力な前駆現象の一つと考えられてきた前震活動加速現象が、大地震の予測において限定的な有効性しか持たないことを示唆する。今後の地震予測研究においては、大地震に至る加速現象と、大地震に至らない大多数の加速現象とを正確に識別することが、重大な課題となる。

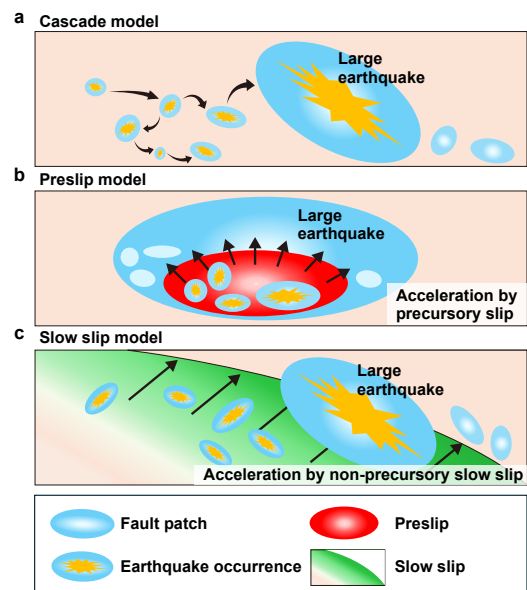


図 2 前震活動の物理的メカニズムの概念図。