

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・西村卓也

○Kai KOYAMA, Tomoaki NISHIKAWA, Takuya NISHIMURA

Foreshock acceleration has been studied as a precursor to large earthquakes. Bouchon et al. (2013) observed an acceleration of seismic activity just before many large earthquakes occurred at plate boundaries. However, Bouchon et al. (2013) have been criticized for inadequately accounting for the effects of earthquake clustering (Felzer et al., 2015). We investigated foreshock activity before large earthquakes globally using the ETAS model (Ogata, 1988), a standard statistical model of seismicity. Based on previous rock experiments (e.g., McLaskey, 2019), we incorporated a new term (similar to the inverse Omori law) representing the accelerating foreshock activity leading to a mainshock into the ETAS model. We applied the model to seismicity preceding 366 M 6.5 or larger earthquakes from 2000 to 2024 in the ANSS earthquake catalog. Results show approximately only 2% of the large earthquakes exhibited significant foreshock acceleration. Similar findings were obtained using Japan's JMA catalog.

1. はじめに

大地震の前駆現象に関する研究は、地震の予測可能性を議論する上で極めて重要である。特に、大地震前に発生する前震活動は、これまで活発に研究されてきた。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。さらに、数値シミュレーションや室内岩石実験においても、大地震の直前に前震発生数が加速度的に増加することが示唆されている (McLaskey, 2019; Ito & Kaneko, 2023 など)。

本研究は、世界標準の地震活動統計モデルである ETAS モデル (Ogata, 1988) を用いて、大地震前の前震活動について全世界的調査を実施した。本発表では、その結果と本研究の前震活動の加速現象への解釈について説明する。

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、

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{t > t_i} \frac{K \exp(\alpha(M_i - M_0))}{(t - t_i + c)^p}$$

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、数値シミュレーションや岩石実験の結果 (McLaskey, 2019 など) を参考に、大地震前の前震活動の加速を表す以下の項を新たに ETAS モデルに加えた。

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

この項は、逆大森則に類似しており、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_{eq} 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、前震活動の特徴を定量化する新たな指標を定義した。まず、地震発生時刻における地震発生レート ($\lambda(t)$: 定常な背景レート、余震発生レート、前震発生レートの合計) のうちの前震項 (上記の $f(t)$) の割合を評価することで、「前震確率」 (各地震が前震項から生じた確率)

$$\rho_f(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} \times 100 \%$$

を定義し、その値を各地震に対して計算した。次に、計算された前震確率が 50% を上回る地震を前震と定義し、その個数を「前震個数」とした。ま

た、本震発生時刻から遡り、全前震の半数が含まれる期間を「前震 50%期間」と定義し、前震活動の特徴づける時定数とみなした。以降の解析では、前震個数と前震 50%期間を用いて、前震活動を定量化する。

本研究は、上記の新たなモデルと指標を、ANSS 地震カタログに記載されている、2000 年から 2024 年に発生した全世界の M6.5 以上の大地震(366 個)に適用した。具体的には、大地震の震央から 100km 以内で、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解析した。ここで、解析対象とは別の大地震の余震活動による影響を排除するため、Maeda (1996)の余震活動継続時間に関する式を用いて、対象の大地震が、それよりも大きな地震の余震活動期間内に発生していた場合は、解析から除外した。

Large earthquakes with accelerating foreshock activity

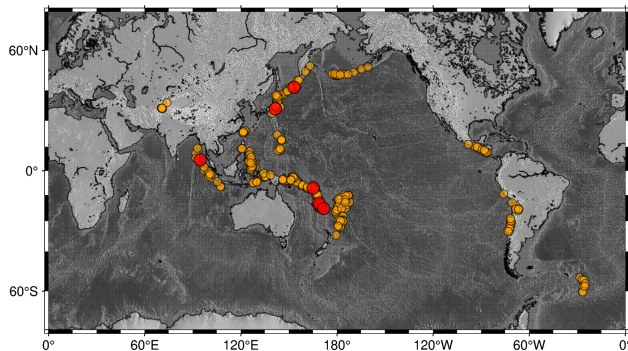


図 1. 解析した 366 個の大地震（オレンジ）と顕著な前震の加速を示した大地震（赤）の分布図

3. 結果・結論

解析した 366 個の大地震のうち、8 個（約 2.2%）の大地震の前に、前震活動の加速現象と解釈できる活動が観察された。ここでは、前震個数が 5 個以上、前震 50%期間が 10 日未満となった前震活動を、顕著な加速を示すものと評価した。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、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, $q=1.7$)。また、バヌアツ沈み込み帯では、前震活動の加速現象と解釈できる現象が、他にも多数見られた。

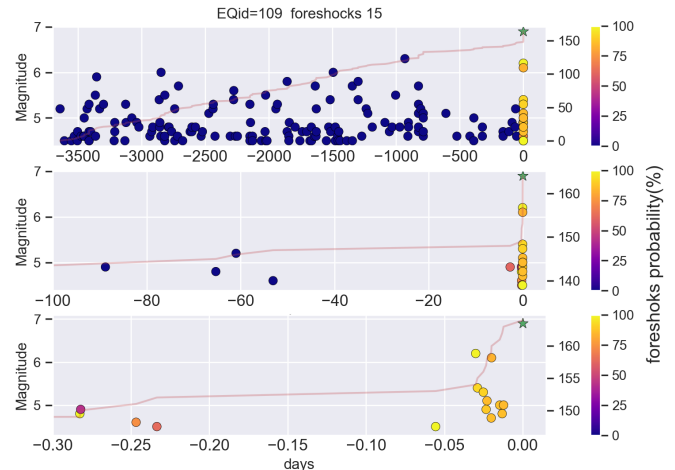


図 2. 2008 年茨城沖地震における解析結果。上から本震前 10 年、100 日、0.3 日分の M-T 図を示しており、各地震が前震確率で色分けされている。モデルによって、本震（緑の星）直前の地震活動が加速する前震と評価されている。

上記の解析に加えて、地震活動の加速現象が大地震前に特有の現象であるか検証するために、ランダムに抽出した地震前の地震活動に対しても同様の解析を現在実施した。また、加速現象の偶然性を評価するため、ETAS モデルから合成された地震カタログに対しても同様の解析を行なった。

解析の結果、本研究では大地震前の前震の加速現象について、大地震前に特有の前兆現象ではないが、単なる地震の連鎖から生まれる偶然の加速とも考えにくい、特別なプロセスによって引き起こされる現象である可能性が高いと結論づけている。また、本研究では JMA 地震カタログについても同様の解析を行い、世界の大地震に対する解析と同様の結果が得られた。