12 - 10 連続地震計記録を用いた余震による最大振幅の予測について On a forecast of maximum amplitudes due to aftershocks using continuous seismograms

澤崎 郁 (防災科学技術研究所)

Sawazaki Kaoru (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1. はじめに

従来の余震活動予測では,地震カタログの解析に基づき,ある期間中にある値以上のマグニチュ ードの地震が発生する確率を予測する.しかし,余震活動予測においては,マグニチュードだけで はなく揺れの予測まで行うことが防災上重要である.揺れは地震動記録そのものであるため,地震 動記録の統計的特徴を抽出することにより,カタログを介さずに将来の余震による揺れを予測でき る可能性がある.本報告では,大地震発生直後の連続地震動記録に,非定常 Frechet 分布と呼ばれる 確率分布をあてはめ,カタログを介さずに各観測点での余震による最大振幅を予測する手法を提案 する.

2. 非定常 Frechet 分布

2016年熊本地震の震源域周辺に展開されている Hi-net 観測点 25 点を解析対象とする.第1 図に 示すように,熊本地震の本震発生時から1分ごとに各時間窓内での上下動記録の最大振幅を計算 し,これを区間最大振幅(IMA)とした.この IMA は,本震からの経過時間 t が IMA をとる時間幅 T よりも十分長い,二次余震を考慮しない,対数最大振幅とマグニチュードとの関係が線形,など の条件の下で,

$$g(z,t) = ATt^{-p} \exp\left[-\frac{AT}{m}t^{-p}z^{-m}\right]z^{-m-1} \quad (1)$$

と表される確率分布に従い推移する.この分布は非定常 Frechet 分布とよばれる極値分布の一種であり¹⁾, A, p, m o 3 個のパラメータで分布が特徴づけられる.Aは分布のスケールを, pは分布の時間減衰の早さを, mは分布の形状を決める.Aは単位時間あたりの地震発生数や震源距離, 地盤増幅特性などに依存する.pは大森一宇津公式のp値に相当する.mは Gutenberg – Richter 式のb値と, 対数最大振幅とマグニチュードとを直線近似した場合の比例係数に依存する.

3. IMA の推移

第2図に,熊本地震の本震の震源に近い N.TYNH 観測点と,M6級の余震が1.6時間後と2.5時間後に発生した阿蘇地方に設置されている N.NMNH 観測点における IMA の推移を示す.N.TYNH では本震発生時から単調に IMA が減衰する.それに対し N.NMNH では,1.6時間後と2.5時間後に M6級余震による強い IMA が観測され,その後二次余震による IMA が続き,複雑な時間推移を示す. 背景のカラースケールは,3時間分の IMA に最尤法により(1)式をあてはめて得られた確率分布で ある.N.TYNH と比較して N.NMNH はフィッティングが悪く,二次余震系列を考慮しない(1)式で は十分に合わせきれないことが分かる.

4. 非定常 Frechet 分布のパラメータ推定値

第3図は, A, p, m 値を本震発生から1時間ごとに推定し、その時間変化を示したものである. A 値 は観測点ごとに大きく異なるが、その理由の一つはA 値がもともと震源距離など観測点に依存する 性質を持つためである. A 値は特に最初の数時間での時間変動が大きいが、これは最初の数時間に 大分や阿蘇など本震の震源域以外の場所で広く地震活動が誘発され、時空間的に複雑な活動分布を 示したことに起因すると考えられる. p 値も観測点ごとに大きくばらつくが、特に大規模な余震の 影響を強く受けた N.NMNH では、3 時間後に非常に小さいp 値を観測している. これは大規模な余 震と二次余震による IMA に(1) 式をそのままあてはめたため、見かけ上時間減衰が極端に小さく推 定されたためと考えられる. 大森一宇津式では通常、時間減衰が始まる時刻を調整する c 値を導入 し, c 値が大地震直後のカタログの欠損の影響などを吸収する²¹が、本研究ではカタログを使わな いため c 値を考慮しなくてよいと仮定し、c=0とみなしている. しかし、熊本地震のように大規模 な誘発地震活動を伴う場合、c 値が本震直後の活発な二次余震活動を反映するという解釈もあり³¹、 それを考慮しないことが N.NMNH における不自然なフィッティングとして現れている可能性があ る. 今後、何らかの方法で二次余震の影響を考慮する定式化が必要である. m 値は3時間後以降は 観測点依存性、時間変化とも小さい.

5. 最大振幅の予測結果

第4図に,N.TYNHとN.NMNH観測点における,24時間以内の10%および90%最大振幅予測の 推移と,実際に観測された最大振幅との比較を示す.N.TYNHにおいては本震発生から3時間後,8 時間後,24時間後の予測ほぼ全てにおいて,観測された最大振幅値が予測最大振幅の10-90%確率 幅の中で推移している.一方,N.NMNHにおいては,特に3時間後の予測では観測最大振幅が予測 最大振幅の90%確率線を大きく下回り,最大振幅が過大評価されている.これは,第3図に示した ように,小さく見積もりすぎたp値をそのまま予測に用いたことによるものである.これに加えて, Hi-net 地震計記録の飽和⁴のため観測される最大振幅に上限(第4図の飽和ライン)が生じること も,過大評価の原因となる.さらに,Hi-netの観測可能帯域が有限であることから,定数とみなして いるm値が実際にはマグニチュードに依存し,大きな地震では大きく,小さい地震では小さくなる と考えられる.その場合,小振幅を用いて推定されたm値を大振幅の予測にそのまま用いると,や はり最大振幅が過大評価される可能性がある.

6. まとめと今後の課題

本報告では、非定常 Frechet 分布を IMA に適用して、観測点ごとの余震による最大振幅を予測す る手法の概要を紹介した.この手法はカタログを必要としないため、大地震の直後などカタログ整 備が不十分な時間帯や場所においてもリアルタイムの解析が可能である.したがって、カタログの 欠損を考慮する方法⁵⁾とは全く異なる観点から早期余震予測を行う手法とも位置付けられる.また、 マグニチュードではなく防災上のニーズに直結する地震動最大振幅を、地震動予測式を用いること なく予測できるという特色がある.さらに、1つの観測記録のみから観測地点での地震動予測を行 うため、複数の地震計からなるネットワークを必要とせず、実装が容易である点も本手法の特色で ある.一方で、この手法を適用するにあたっては、連続かつリアルタイムの地震観測が大地震後も 停電の影響を受けず継続して行えることが必須である.また、現状では予測が過大評価される傾向 にあり、その原因と考えられる機械的・物理的要因による飽和の問題や二次余震の扱いなどを、今 後検討し,改良する必要がある.

参考文献

- 高橋倫也・志村隆彰(2016), IMS シリーズ:進化する統計数理5「極値統計学」,統計数理研 究所編,近代科学社, pp.262.
- 2) Utsu, T., Y. Ogata, and R. S. Matsu'ura (1995), The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, J. Phys. Earth, 43(1), 1-33.
- 3) Yamakawa, N. (1968), Foreshocks, aftershocks and earthquake swarms (IV)-Frequency decrease of aftershocks in its initial and later stages, Pap. Met. Geophys., 19, 109-119.
- 4) 汐見勝彦,小原一成,笠原敬司 (2005),防災科研 Hi-net 地震計の飽和とその簡易判定,地震, 第2輯, 57(4), 451-461.
- 5) Omi, T., Y. Ogata, K. Shiomi, B. Enescu, K. Sawazaki, and K. Aihara (2016), Automatic aftershock forecasting: A test using real-time seismicity data in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 106(6), 2450-2458.



第1図 連続地震動記録から区間最大振幅(IMA)を計算する手順の模式図.赤矢印が区間最大振幅の発生時刻を 表す.

Fig. 1 Schematic illustration of computing Interval Maximum Amplitude (IMA) from a continuous seismogram. Red arrows indicate picking times of IMAs.



- 第2図 熊本地震の本震発生後3時間分の, Hi-net 観測点 (a) N.TYNH および (b) N.NMNH における IMA の推移.カ ラースケールは,3時間分の IMA にフィッティングして得られた非定常 Frechet 分布. 図中に示す A, p, m の値は最尤推定値.
- Fig. 2 (a) Time-lapse of IMAs after the 2016 Kumamoto earthquake ($M_J7.3$) recorded at Hi-net stations (a) N.TYNH and (b) N.NMNH. The background color scale represents the Non-stationary Frechet distribution fitted to the observed IMAs. Values of the maximum likelihood estimates (A, p, m) are written in each figure.



- 第3図 (a) A 値, (b) p 値, (c) m 値の推定値の時間変化.赤丸,青丸,白丸はそれぞれ N.TYNH, N.NMNH, その他の 観測点での推定結果を示す.
- Fig. 3 Time-lapse of estimated (a) *A*-, (b) *p*-, and (c) *m*-values. Red, blue, and white circles represent estimates for N.TYNH, N.NMNH, and other stations, respectively.



- 第4図 (a) N.TYNH および (b) N.NMNH 観測点における,本震発生後3時間(赤),8時間(橙),および24時間時点での,発生確率10%(上)および90%(下)に相当する予測最大振幅(実線)と,実際に観測された最大振幅(丸)との比較.黒点線は汐見他(2005)を参考に算出した Hi-net 上下動地震計の飽和振幅.
- Fig. 4 Comparison between forecasted (solid curves) and observed (circles) maximum amplitudes at stations (a) N.TYNH and (b) N.NMNH. Red, orange, and blue colors correspond to the forecasts evaluated at 3, 8, and 24 hours after the mainshock, respectively. Two curves for each color represent forecasts of maximum amplitudes with respect to 10% and 90% probabilities. Black dotted line indicates amplitude of saturation for Hi-net vertical seismograms.