

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14385

研究課題名(和文)連続地震波形記録を用いた準リアルタイム余震活動予測手法の開発

研究課題名(英文)Development of the quasi-real-time forecasting scheme of aftershock activity using continuous seismograms

研究代表者

澤崎 郁 (SAWAZAKI, KAORU)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波火山ネットワークセンター・特別研究員

研究者番号：30707170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：大地震の直後には地震計記録上で多くの余震による地震波が重なり合い、地震の検出が困難となるため、地震の震源、発生時刻、規模を記載する地震カタログに多くの欠測が生じる。そのため、大地震直後は地震カタログを用いた余震活動の統計的予測が著しく困難となり、余震活動の見通しを迅速かつ正確に予測することが困難となる。本研究では、稀な事象の発生確率を扱う「極値統計学」を地震計記録に適用することで、地震観測地点における任意の期間内での任意の値以上の揺れが生じる確率を、大地震発生から数時間以内で提供できることを、理論・観測の両面から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震後の地震活動の推移予測は、被災者にとって最も重大な関心事の一つである。大地震直後から得られる揺れの予測情報を適切に利用することで、復旧活動の効率化や避難生活の質の向上を図ることができると考えられる。本研究では、地震カタログではなく地震計による揺れの記録そのものに極値統計解析を施すことで、大地震発生後数時間以内(従来法では1週間を要した)に科学的根拠に基づく揺れの予測情報を提供できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Due to the overlap of waveforms from many aftershocks, earthquake detection tends to be very difficult in the early period after a large earthquake. This makes it difficult to forecast aftershock activity in the early period. In this study, I proposed a scheme to forecast exceedance probability of maximum amplitude due to aftershocks by applying the "extreme value statistics" to a continuous seismogram. I confirmed the usefulness of the proposed scheme that will be effective within a few hours of a large earthquake from both the theoretical and observational verifications.

研究分野：地震学

キーワード：極値統計解析 連続地震計記録 区間最大振幅 最大振幅超過確率 余震

1. 研究開始当初の背景

大地震直後には非常に多くの余震が起こり、その余震による地震波が地震計記録上で重なり合う(図 a)。通常、震源および発震時刻は P 波と S 波の到達時刻を、マグニチュードは最大振幅の空間分布を用いて決められるが、地震計記録上で地震波が重なり合う場合はこれらの処理に支障をきたし、震源、発震時刻、マグニチュード等の「震源要素」を決めることが非常に困難となる。したがって、大地震直後には震源要素を記載した「地震カタログ」の質・量が共に顕著に劣化することが知られている¹⁾。

この地震カタログの劣化のため、現在気象庁においては、実際の余震活動状況に基づく余震予測情報を提供できるまでに、大地震の発生から概ね 1 週間程度を要するとしている²⁾。しかし、一般に余震活動は大地震直後に最も活発であり、時間が経つほどに低下する。人命救助においては発災から 72 時間以内の行動が極めて重要とされている³⁾ほか、適切な余震の見通し情報が得られない中で繰り返し揺れにさらされ続けることで、被災者の心身に不調をきたすこともある⁴⁾。これらの事情から、発災後なるべく早い段階で余震活動の今後の見通しを適切に伝えることが、発災後の初期対応や復旧・復興活動を円滑に進める上で極めて重要と考えられる。

大地震直後からの余震予測を目指した研究として、近年、地震カタログの欠落の度合いを考慮したベイズ統計に基づく余震予測法が開発されている^{5,6)}。この手法は不完全な地震カタログにも適用可能であるため、大地震発生後数時間以内からその後の余震活動の大まかな傾向を予測できる手法として注目されている。しかし、現時点では地震活動の空間分布を予測するには至っておらず、地震による各地点での揺れの推移予測もまだ開発途上にある。

2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究課題では、大地震直後から準リアルタイムに余震活動を予測する手法の開発を目標に掲げた。当初は、地震計記録の逆伝播解析により余震による高周波エネルギー輻射量を推定^{7,8)}し、その統計的特徴から余震活動の推移を予測する計画であった。しかし、余震発生域に対して地震観測点の分布が偏る場合にこの手法がうまくいかないことが明らかとなったため、課題遂行の途中で目標を修正し、地震計記録そのものの統計分析から、その地震計の設置地点における将来の揺れの予測を行うことを新たな目標に掲げた。具体的には、大地震発生後数時間以内に、各観測点で任意の値以上の最大振幅が任意の期間内に発生する確率(超過確率)を、極値統計理論を用いて評価することを試みた。

3. 研究の方法

極値統計理論は、めったに起こることはないが起こると大惨事をもたらす低頻度かつ極端な現象がしたがう統計則を扱う学問である。多くの統計分析においては、扱う対象の平均値および標準偏差を問題とする一方で、極値統計理論においては、対象の平均的振る舞いはあまり重要ではなく、任意期間中に出現する最大値(あるいは最小値)がしたがう統計則こそが重要となる。例えば、日降水量の統計においては年間「平均値」よりも年間「最大値」の方が防災上はるかに重要であるが、このような問題に対して極値統計理論が適用される。地震、洪水、火山噴火等のような「平均値」という概念を持たない自然現象の統計解析や、株価の変動のような社会現象の予測においても、極値統計理論が良く用いられる⁹⁾。

本研究では、地震計で記録された揺れの記録を一定時間間隔ごとに分割し、それぞれの区間の最大値(区間最大振幅。図 b 参照)がしたがう確率分布をまず導いた。次に、その確率分布を支配するパラメータを最尤法により推定し、推定したパラメータを用いて、観測地点での将来の揺れの超過確率を予測する手法を開発した。最後に、この予測法を 2008 年岩手・宮城内陸地震を記録した Hi-net 地震計記録に適用し、その有効性を検証した¹⁰⁾。

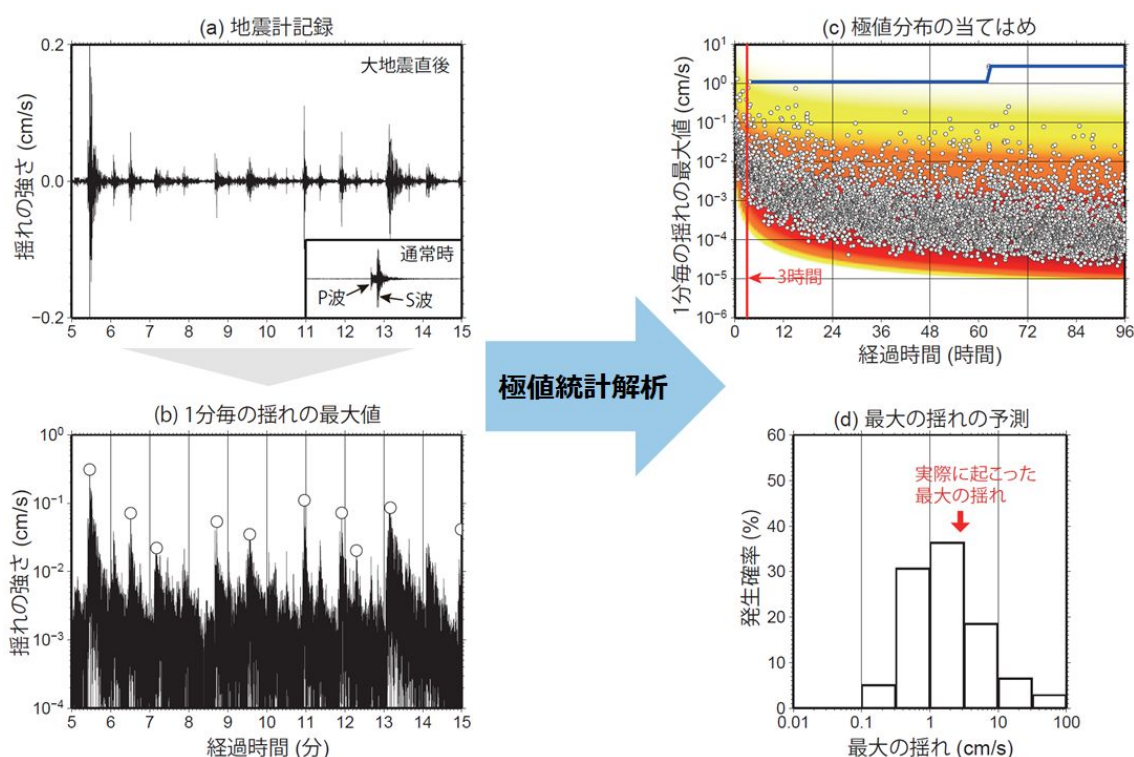
4. 研究成果

理論的検証の結果、大地震直後の揺れの区間最大振幅は「非定常 Frechet 分布」と呼ばれる確率分布に従うことが明らかとなった。Frechet 分布は一定区間内の最大値がしたがう極値分布(負の Weibull 分布, Gumbel 分布, Frechet 分布の三種類)の一つであり、元の分布がべき乗則などの裾の重い分布にしたがう場合にその区間最大値がしたがう分布である。非定常 Frechet 分布を支配するパラメータは、地震の活発さや震源距離を反映する A 値、地震活動度の時間減衰を表す p 値(大森・宇津則の p 値と同じ)、揺れの強さの規模別頻度分布を反映する m 値(Gutenberg-Richter 則の b 値と関係する)および地震計記録の下限を支配する x_{\min} 値の 4 個である。

次に、2008 年岩手・宮城内陸地震の発生後 3 時間に観測された Hi-net 地震計記録を用いて、

その区間最大振幅に非定常 Frechet 分布を当てはめ、最尤法によりこれら 4 個のパラメータを推定した(図 c)。震源近傍の 4 観測点における推定の結果、いずれの観測点でも p 値は 1 前後、m 値は 2 前後の値となった。これらのパラメータを用いて地震発生後 4 日間の最大振幅の超過確率を推定し、実際に 4 日以内に観測された最大振幅と比較した結果、観測された最大振幅に相当する超過確率は、4 観測点で 31%から 82%の範囲に含まれた(図 d)。このことは、予測が過大評価も過小評価もせず、概ね正常な範囲内に収まったことを意味する。なお、本震と同程度以上の揺れが 4 日以内に生じる確率は、4 観測点で 2%から 17%とかなり低い値を示し、実際に本震以上の揺れはいずれの観測点でも生じなかった。

本研究においては、極値統計解析に基づく余震による揺れの予測法を開発し、各地震観測点での揺れの予測を、大地震直後から数時間以内に提供可能であることを実証した。ただし、この予測法は余震発生頻度が大森 宇津公式に従い減衰することを仮定しているため、余震群が大きな余震に伴う 2 次余震を含んだり群発的な活動を示す場合には、必ずしも適用できないと考えられる。今後はこれらの特殊な余震活動時の予測法の開発に取り組むほか、普段の地震活動からの発生確率の倍率の予測や、観測点を置いていない場所での予測法の開発などに取り組む予定である。



図．極値統計解析の流れ。

引用文献

- (1) Kagan, Y. Y. (2004), Short-term properties of earthquake catalogs and models of earthquake source, Bull. Seismol. Soc. Am., 94 1207–1228, DOI:10.1785/012003098.
- (2) 地震調査研究推進本部 (2016), 大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方, https://www.jishin.go.jp/reports/research_report/yosoku_info/
- (3) 神戸市消防局 (1995), 阪神・淡路大震災における消防活動の記録：神戸市域、神戸市防災安全公社, 168pp.
- (4) Becker, J. S., S. H. Potter, S. K. McBride, A. Wein, E. E. H. Doyle, and D. Paton (2019), When the earth doesn't stop shaking: How experiences over time influenced information needs, communication, and interpretation of aftershock information during the Canterbury Earthquake Sequence, New Zealand. International Journal of Disaster Risk Reduction, 34 397–411, DOI:10.1016/j.ijdr.2018.12.009.
- (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. Seismol. Soc. Am., 106 2450–2458, DOI:10.1785/0120160100.
- (6) Omi, T., Y. Ogata, K. Shiomi, B. Enescu, K. Sawazaki, and K. Aihara (2019), Implementation of a real-time system for automatic aftershock forecasting in Japan, Seismol. Res. Lett., 90 242–250, DOI:10.1785/0220180213.

- (7) Sawazaki, K., and B. Enescu (2014), Imaging the high-frequency energy radiation process of a main shock and its early aftershock sequence: The case of the 2008 Iwate–Miyagi Nairiku earthquake, Japan, *J. Geophys. Res. B Solid Earth*, 119 4729–4746, DOI:10.1002/2013JB010539.
- (8) Sawazaki, K., H. Nakahara, and K. Shiomi (2016). Preliminary estimation of high-frequency (4–20 Hz) energy released from the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake sequence, *Earth Planets Space*, 68 1–12, DOI:10.1186/s40623-016-0557-3.
- (9) Coles, S., J. Bawa, L. Trenner, and P. Dorazio (2001), *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer, London, 208 pp.
- (10) Sawazaki, K. (2021), Early forecast of maximum amplitude due to aftershocks by applying extreme value statistics to a single continuous seismogram, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 111(5) 2825-2845. DOI:10.1785/0120200365.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 澤崎郁	4. 巻 103
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地震予知連絡会会報	6. 最初と最後の頁 369,373
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sawazaki Kaoru, Saito Tatsuhiko, Shiomi Katsuhiko	4. 巻 123
2. 論文標題 Shallow Temporal Changes in S Wave Velocity and Polarization Anisotropy Associated With the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 9899, 9913
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JB016261	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sawazaki Kaoru	4. 巻 111(5)
2. 論文標題 Early Forecast of Maximum Amplitude due to Aftershocks by Applying Extreme Value Statistics to a Single Continuous Seismogram	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 2825, 2845
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1785/0120200365	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 澤崎郁
2. 発表標題 連続地震動記録を用いた余震による最大振幅および閾値超過振幅数の早期予測
3. 学会等名 日本地震学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sawazaki Kaoru
2. 発表標題 A forecast of peak ground motion due to aftershocks based on the extreme-value analysis of seismograms
3. 学会等名 SSA Annual Meeting, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sawazaki Kaoru
2. 発表標題 An extreme-value analysis of seismograms designed for early forecast of aftershocks
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤崎郁
2. 発表標題 連続地震動記録の区間最大振幅がしたがう確率密度関数の導出
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤崎郁
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第225回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行06」の検討 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤崎郁
2. 発表標題 連続地震動記録から地震動最大振幅を予測する理論的背景について
3. 学会等名 日本における地震活動に基づく地震発生予測検証実験 (CSEP-Japan)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤崎 郁
2. 発表標題 地震計記録の極値解析に基づく余震による最大振幅の予測
3. 学会等名 CSEP-Japan (日本における地震活動に基づく地震発生予測検証実験) 研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤崎 郁
2. 発表標題 余震による地震動最大振幅の頻度分布と時間変化
3. 学会等名 日本地震学会2018年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤崎郁
2. 発表標題 エンペロープ逆伝播法に基づく余震からのエネルギー輻射量分布の即時推定
3. 学会等名 日本地震学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sawazaki Kaoru
2. 発表標題 A new method for early aftershock forecasting and its application to the 2016 Kumamoto earthquakes, Japan
3. 学会等名 The 8th International Workshop on Natural Disaster Reduction and Management among Japan-Taiwan-Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sawazaki Kaoru, Shiomi Katsuhiko
2. 発表標題 On high-frequency energy release by aftershocks of several inland large earthquakes in Japan
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究成果の日本語解説ページ https://quake.tn.bosai.go.jp/~sawa/Sawazaki_2021_BSSA/Sawazaki_2021_BSSA.html</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------