

地震間の対話の理解と地震活動確率予測の展望

Understanding the conversations among earthquakes and developing probability earthquake forecasting models

モデリング研究系 庄 建倉 (Jianchang Zhuang)

地震は地震波形記録図の中では観測地での地震動を示す連続なパルス波形である。地震カタログの中では、各地震は地震波形を解析して生成された地震の位置、深さ、大きさ、震源機構、記録精度などの情報を記録した一列の数字で表示される。しかし、現実ではこれらの地震、特に陸上または沖合の大地震は人類に生命や財産の莫大な損失をもたらす。正確な地震予知を達成することは長年にわたる人類の願いである。

現代の地震学的研究結果によれば、地震の発生は自己組織化された臨界現象であり、単一の地震の規模とタイミングを正確に予測することは非常に困難である [1]。しかし、個々の地震は完全に独立していない。地震と地震の間には「対話」がある。地震の前後にはしばしば前震と余震がある。同時に、これらの大地震は元の断層のコロンボ応力分布を変化させ、余震の分布に影響を与え、その後の大地震の発生を遅らせたり、早めたりする。同時に、地震断層では高応力状態にあるとき様々な異常が発生する。したがって、地震活動は完全にランダム、予測不可能ではない。これらの予測可能なコンポーネントの解明は、将来の地震リスクの推定、防災政策の制定、震災後救助に大きな影響を与える。

地震活動において、どの成分を予測でき、どの成分を予測できないのか？地震活動の予測可能な最大の成分は地震のクラスタリングである。地震学者はこれらのクラスタの特徴について深く研究し、多く経験則を得ることができた。ETAS モデルは、これらの経験則の統合に基づいて提案した [2]。このモデルでは各地震は特定の確率ルールに従って自らのクラスタを誘発する。これらの確率ルールは既存の経験則である [2,3]。今日既に、地震活動の最も大きな予測成分を定量化する確率モデル、特に地震活動の仮説検定および他のモデルの予測評価の標準相場モデルはかなり成功している。同時に ETAS モデルは地震予測の確率モデルでもあり、カリフォルニア地震予知プログラム (UCERF3) で採択された。

ETAS モデルの予測レベルを改善する、すなわちその予測の確率利得を改善させるには多くの方法が存在する。例えば、本来の ETAS モデルを 2 次元震央から 3 次元震源版 [4,5] に、点震源から有限断層源 [6,7] に拡張すると、モデルはより詳細になり、より高い確率利得予測を得ることができる。地震活動データの以外の GPS 変形データ、ULF 地電位信号、地磁気信号など他の地球物理観測データと組み合わせると、より高い確率利得予測が得られる。これらの現象の大部分が地震の前兆であるかどうかは論争があり、客観的な評価が非常に重要である。ETAS モデルは現在までの地震活動の最良の定量化モデルであることが証明され、外部前兆の励起効果を組み合わせた新しい ETAS モデルが提案されている [8,9]。

ETAS モデルの推定手法も大きく発展した。確率除群法、確率再構築法、ベイズノンパラメトリック推定手法の開発は、犯罪、テロ事件、森林火災などの地震以外の自然現象や社会現象の研究のため、より広い Hawkes モデルにも適用される [10]。他の応用分野における予測理論や手法の開発は、地震の確率予測に応用することもできる。

参 考 文 献

- [1]Zhuang, J., D. Wang, and M. Matsu'ura (2016) Features of the earthquake source process simulated by Vere-Jones' branching crack model. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Volume 106. doi:10.1785/0120150337.
- [2]Ogata, Y., 1988. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J. Am. Stat. Assoc.*, 83(401), 9-27.
- [3]Zhuang J., Ogata Y. and Vere-Jones D. (2002). Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences. *Journal of the American Statistical Association*, 97: 369-380.
- [4]Guo, Y., Zhuang, J., and Zhou, S. (2015) A hypocentral version of the space-time ETAS model. *Geophysical Journal International*, 203: 366-372. doi: 10.1093/gji/ggv319.
- [5]Guo, Y., J. Zhuang, and N. Hirata (2018) Modeling and forecasting 3D-hypocenter seismicity in the Kanto region. *Geophysical Journal International*, 214: 520-530. doi:10.1093/gji/ggy154.
- [6] Guo, Y., Zhuang J., Hirata N., Zhou S. (2017) Heterogeneity of direct aftershock productivity of the main shock rupture. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 122, 5288-5305 doi:10.1002/2017JB014064.
- [7] Zhuang, J., M. Murru, G. Falcone, Y. Guo (2019) An extensive study of clustering features of seismicity in Italy from 2005 to 2016. *Geophysical Journal International*. 216:302-318. doi:10.1093/gji/ggy428.
- [8] Zhuang J., (2011) , Next-day earthquake forecasts for the Japan region generated by the ETAS model. *Earth Planets Space*, 63, 207-216. doi:10.5047/eps.2010.12.010. [pdf] doi:10.1029/2003JB002879.
- [9] Zhuang, J., M. Matsu'ura, P. Han (2019) Critical zone of the branching crack model for earthquakes: inherent randomness, earthquake predictability, and precursor modelling. Submitted to *Europhysics*, in Revision
- [10] Zhuang, J., J. Mateu (2018) A semi-parametric spatiotemporal Hawkes-type point process model with periodic background for crime data. Accepted by *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. A*.