

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 8 月 21 日現在

機関番号：62603

研究種目：若手研究（B）

研究期間：平成 22 年度～平成 24 年度

課題番号：22700299

研究課題名（和文）クラスタリングモデルに基づいて地震予知手法の改良

研究課題名（英文）Improving earthquake prediction algorithms based on earthquake clustering models

研究代表者

庄 建倉（ZHUANG JIANCANG）

統計数理研究所・モデリング研究系・准教授

研究者番号：70465920

研究成果の概要（和文）：

従来型の地震予測手法は、定常ポアソンモデルを帰無仮説モデルとして、地震活動異常を検定する。しかし実際には、地震活動には続発性がある、これは例えば ETAS モデルで良く記述・予測できることが実証されている。本研究では ETAS 地震クラスタリングモデルに基づいて様々な予測手法を改良した。

研究成果の概要（英文）：

It is commonly believed that seismicity is clustered. However, most of the conventional earthquake prediction/forecasting methods, that are also currently being widely used, determine anomalies implicitly or explicitly based on Poisson models. This study revises these methods into versions that extract useful precursory information based on clustering models.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	900000	270000	1170000
2011 年度	600000	180000	780000
2012 年度	600000	180000	780000
年度			
年度			
総計	2100000	630000	2730000

研究分野：情報科学

科研費の分科・細目：統計科学

キーワード：①クラスタリング ②地震予知 ③ETAS モデル ④RTL ⑤PI

⑥ギャンプリング評価法 ⑦前震 ⑧荷重・脱荷重応答比理論

1. 研究開始当初の背景

Pattern Informatics (PI)、M8、RTP (Reverse Tracing of Precursors)、RTL (region-time-length)、AMR

(Accelerating Moment Release) 等の多くの地震予知アルゴリズムは、入／出力システム式の形態をとる。これらの方法では、

いくつかの地震活動インデックス関数が地震発生データから計算される。これらのインデックス関数が通常のレベルを逸脱した場合に、大地震発生の警報が与えられる。

現在、ほとんどの研究者は、地震活動が単純に定常ポアソン過程として記述されるべきではないし、群れをなしていることをモデル化すべきであると考えている。しかし、従来型の予測方法は地震活動が、特に大地震の地震活動は、ポアソンモデルに従うという仮説に基づいて異常性を検定する。従って、地震データの続発性が明らかの場合、常に前処理ステップとして地震データを除群化してポアソン過程となるかを検定する。そのような除群化法は、大きな地震を中心とする時空間ウィンドウ内に発生する地震を全て削除するか、または、時空間距離を測って大きな地震に繋がっている地震を全て削除する。これらの方法は、経験的なもので、研究者によって主観的にパラメータが決められる。

Epidemic Type Aftershock Sequence

(ETAS) モデルが広く地震クラスターを記述するために使用されている ([10,11])。このモデルでは個々の地震は、それが他の地震と関係なく起きたもの（常時地震）であれ、あるいはそれ以前の地震によって誘発されたもの（誘発地震）であれ、ある種の確率的法則にしたがって未来の地震を誘発すると考える。地震が常時地震であるか、または以前の地震によって誘発されたものであるかどうかは確定的ではなく、ETAS モデルに基づいて確率的に記述されている。

2. 研究の目的

本研究の全体的な目的は、標準的な地震発生モデル (ETAS) の帰無仮説のもとに PI (pattern informatics), M8 および RTP (reverse traced precursor) アルゴリズム

などの、現在まで提案されている警報型地震予知方法の見直しによるアルゴリズムと手法を開発することである。

(1) これらのアルゴリズムはいずれも従来の除群化方法を用いているので、確率除群化法の下で、これらのアルゴリズムのパフォーマンスを比較する。

(2) これらのアルゴリズムと ETAS モデルを組み合わせることで、統計モデルを開発する。

3. 研究の方法

(1) 確率的除群法 或る地震が常時地震であるかまたは以前の地震によって誘発された地震であるかの確率を推定することができる。

(2) ETAS モデルに基づいて時間を変換して、変換時間領域での地震データに上記の地震予知アルゴリズムを適用する。

(3) マルチンゲールに基づく時空間点過程の残差分析の原理は庄 (2006) によって開発された。これらの技術は、モデルの改善に強力なツールであることが示されている。

4. 研究成果

(1) 地震群のいろいろの除群方法を総括し、それらの長所と短所を比較し、結果を Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis (CORSSA) に掲載した。関係するソフトウェアは CORSSA のウェブサイト公開した(図書[2])。

(2) クラスターモデルに基づいて荷重・脱荷重応答比理論を改良した。荷重・脱荷重応答比理論は、大地震を予測するために中国の地震学者によって開発され、広く使用されている。新 LURR 計算方案が原方案より良い結果を示す。この成果は Tectonophysics に掲載された。

(3) クラスタリングモデルによる前震の予測力の検証。イタリアとカリフォルニアの地震活動度の前震を統計的に研究した。結果は、観測された前震活動が、ETASモデルによって予想されるものと同じレベルであることを示した。結果は *Geophysical Research Letters* に掲載された。

(4) 本研究代表者が提案した地震予測のギャンブル評価法によって、中国地震局の年度ごとの大地震予報の成績を計算した。本研究では、さらに予測を向上させるための方法を提供した。結果は *Tectonophysics* に掲載された。

(5) GPS で記録された地盤変動の変化率は地震予測のために有用な情報があるかどうかを検証した。結果は、GPS 異常変化が地震によって引き起こされたものでなく、逆の因果性が成立して、地震を予測するにあたって、ポアソンモデルに比べて 2~4 の確率利得を与えることを示す。

Geophysical Research Letters に掲載予定。

(6) 地震発生の短期的な予測モデル ETAS に基づいて、与えられた時空間ウィンドウで最大マグニチュードの確率分布の計算に関連する理論や手法を提案した。この手法は、日本地域の 1926-2009 年間の地震活動データに応用した。この成果は *Research in Geophysics* に掲載された。

(7) 地震活動パターンから有用な物理的信号を抽出するために、ETAS モデルと確率除群法に基づいて、常時地震発生率の時間変動の推定手法を開発した。

Geophysical Journal International に掲載した。

(8) 特に群発地震活動がある地域で地震クラスターを判定するために、Cumulative rate analysis (CURATE) 除群法を開発した。 *Journal Geophysical Research* に掲載

された。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕 (計 19 件)

- [1] Ogata Y., Katsura K., Falcone G., Nanjo K. and Zhuang J. (2013) *Comprehensive and topical evaluations of earthquake forecasts in terms of number, time, space, and magnitude*. Submitted to BSSA, in press.
- [2] Wang T., Zhuang J., Kato N., and Bebbington M. (2013) *Assessing the potential improvement in short-term earthquake forecasts from incorporation of GPS data*. Submitted to GRL, in press.
- [3] Jacobs K. M., Smith E. G. C., Savage M. K., and Zhuang J. (2013) *Cumulative rate analysis: a clustering algorithm for swarm dominated catalogs*. **118**, 553-569. doi:10.1029/2012JB009222..
- [4] Nanjo, K. Z., Tsuruoka, H., Yokoi, S., Ogata, Y., Falcone, G., Hirata, N., Ishigaki, Y., Jordan, T. H., Kasahara, K., Obara, K., Schorlemmer, D., Shiomi, K. and Zhuang, J. (2012) *Predictability study on the aftershock sequence following the 2011 Tohoku-Oki, Japan, earthquake: first results*. **Geophysical Journal International**. 191(2), 653--658. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05626.x.
- [5] Zhuang, J. (2012) *Long-term earthquake forecasts based on the epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model for short-term clustering*. **Research in Geophysics**, 22, e6. doi:10.4081/rg.2012.e8.
- [6] Console, R., Yamaoka, K., and Zhuang, J. (2012) *Implementation of Short- and Medium-Term Earthquake Forecasts*. **International Journal of Geophysics**, 2012, 217923. doi:10.1155/2012/217923. Editorial of special issue: *Implementation of Short- and Medium-Term Earthquake Forecasts*, Console, R., Yamaoka, K., and Zhuang, J. (editors)
- [7] Zhuang, J.-C. and Jiang, C.-S. (2012) *Evaluation of the prediction performance of the Annual Consultation Meeting on Earthquake Tendency by using the*

- gambling score*, **Chinese Journal of Geophysics** (in Chinese with English abstract), **55**: 1695-1709.
doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.026.
- [8] Peng, Y., Zhou S., Zhuang J. and Shi J. (2012) *An approach to detect the abnormal seismicity increase in Southwestern China triggered co-seismically by 2004 Sumatra Mw 9.2 earthquake*. **Geophysical Journal International**, **189**: 1734-1740. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05456.x.
- [9] Parsons T., Ogata Y., Zhuang J. and Geist E. L. (2012) *Evaluation of static stress change forecasting with prospective and blind tests*. **Geophysical Journal International**, **188**: 1425-1440. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05343.x
- [10] Zhuang J. and Jiang C, (2012) *Scoring annual earthquake predictions in China*. **Tectonophysics**, **524-525**: 155-164. doi:10.1016/j.tecto.2011.12.033.
- [11] Zechar J. D., Hardebeck J. L., Michael A. J., Naylor M., Steacy S., Wiemer S., Zhuang J., and the CORSSA working group, (2011). *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, **Seismological Research Letters**, **82**: 686-690, doi: 10.1785/gssrl.82.5.686.
- [12] Zhang L.-P. and Zhuang J. (2011) *An improved version of the Load/Unload Response Ratio method for forecasting strong aftershocks*. **Tectonophysics**, **509**, 191-197,
- [13] Marzocchi W. and Zhuang J., (2011) *Statistics between mainshocks and foreshocks in Italy and Southern California*. **Geophysical Research Letters**, **38**, L09310, doi:10.1029/2011GL047165.
- [14] 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.
- [15] Wang, Q., Jackson D. D., and Zhuang J. (2010). *Missing links in earthquake clustering models*. **Geophysical Research Letters**, **37**, L21307, doi:10.1029/2010GL044858.
- [16] Zechar J. D. and Zhuang J., (2010), *Risk and return: evaluating Reverse Tracing of Precursors earthquake predictions* **Geophysical Journal International**, **182**, 1319--1326, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04666.x.
- [17] Wang, Q., Jackson D. D., and Zhuang J. (2010). *Are spontaneous earthquakes stationary in California?* **J. Geophys. Res.**, **115**, B08310, doi:10.1029/2009JB007031.
- [18] Jiang C. S. and Zhuang J. C. (2010). *Evaluation of background seismicity and potential source zones of strong earthquakes in the Sichuan-Yunnan region*. **Chinese Journal of Geophysics** (in Chinese with English abstract), **53**(2): doi:10.3969/j.issn.001-5733.2010.02.00.
- [19] Zhuang J. (2010) *Gambling scores for earthquake predictions and forecasts*. **Geophysical Journal International**. **181**: 382-390. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04496.x
- [学会発表] (計 25 件)
- [1] 庄 建倉 (2013). Estimating the maximum magnitude by using the G-R law, background seismicity, and earthquake clustering structures, 共同利用研究集会「室内実験と数値実験から探る地震活動の物理」, 東京大学地震研究所, 2013年3月5日.
- [2] 庄 建倉 (2012). Testing significance of earthquake precursors against earthquake clustering models, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, 函館市, 2012 年 10 月 19 日, 一般講演.
- [3] Ting Wang*, Zhuang, J., Kato, T. (2012). Exploratory analysis of earthquake precursory information in GPS measurements, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, 函館市, 2012 年 10 月 18 日, 一般講演.

- [4] 庄 建倉 (2012). On the criticality of a type of branching processes, 2012 年度統計関連学会連合大会, 札幌市, 2012 年 9 月 10 日, 一般講演.
- [5] Zhuang, J.*, Harte, D. and Werner, M. (2012). On the Criticality of Branching Models for Earthquake Occurrences, AOGS – AGU (WPGM) Joint Assembly, Singapore, 2012 年 8 月 17 日, 一般講演.
- [6] 庄 建倉 (2012). Long-term earthquake forecasts based on short-term earthquake clustering models, 東京大学地震研究所第 3 回研究集会「地震活動の評価に基づく地震発生予測システム - 東北地方太平洋沖地震前後の地震発生予測-」, 東京大学地震研究所, 2012 年 7 月 12 日.
- [7] Zhuang, J. (2012). First-and Second-order Residual Analysis of Spatiotemporal Point Processes and Applications In Model Evaluation, The 2nd Institute of Mathematical Statistics Asia Pacific Rim Meeting, つくば市, 2012 年 7 月 3 日.
- [8] Zhuang, J. (2012). Scoring Annual Earthquake Predictions in China, SCEC CSEP Workshop: Final Evaluation of the Regional Earthquake Likelihood Models (RELM) Experiment and the Future of Earthquake Forecasting, Rancho Mirage, CA, アメリカ合衆国, 2012 年 6 月 7 日, 招待講演.
- [9] 庄 建倉 (2012). 短期クラスタリングの ETAS モデルに基づく長期地震予測, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉市, 2012 年 5 月 25 日.
- [10] Zhuang, J. (2012). On the criticality of branching models for earthquake occurrences, 国際シンポジウム「Statistical modeling and real-time probability forecasting for earthquakes」, 統計数理研究所, 東京都, 2012 年 3 月 13 日, 招待講演.
- [11] Zhuang, J. (2011). Testing significance of earthquake precursors: Against complete randomness? Or against earthquake clustering models?, 2011 AGU Fall Meeting, サンフランシスコ, アメリカ合衆国, 2011 年 12 月 7 日, 一般講演.
- [12] 庄 建倉 (2011). Long-term probability forecasts based on background seismicity, 日本地震学会 2011 年秋季大会, 静岡県コンベンションアーツセンター・グランシップ, 静岡市, 2011 年 10 月 13 日, 一般講演.
- [13] Zhuang, J. (2011). Towards dynamic earthquake hazard models: Real time probability forecasts + Early warning + Attenuation models + Cite-condition database, CSEP(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability) Workshop, ETH Zurich, スイス連邦, 2011 年 10 月 3 日, 一般講演.
- [14] Zhuang, J. (2011). Foreshocks and the Bath law explained by earthquake clustering models, ESF Research Conferences “Continuing Challenges in Earthquake Dynamics: New Methods for Observing and Modelling a Multi-Scale System”, Obergurgl, オーストリア共和国, 2011 年 9 月 28 日, 一般講演.
- [15] 庄 建倉 (2011). Next-day earthquake forecasts for the Japan region generated by using a statistical model, 2011 年度統計関連学会連合大会, 福岡市, 2011 年 9 月 7 日, 一般講演.
- [16] Zhuang, J., Vere-Jones, D., Ogata, Y. and Marzocchi, W. (2011). Foreshock phenomena and the Båth law implied by generic earthquake clustering, 7th International Workshop on Statistical Seismology (Statsei7), Santorini, ギリシャ共和国, 2011 年 5 月 26 日, 招待講演.
- [17] Zhuang, J.* (2010). Purposes and methods of scoring earthquake forecasts, 2010 AGU Fall Meeting, サンフランシスコ, アメリカ合衆国, 2010 年 12 月 15 日, ポスター発表.

- [18] Marzocchi, W.* and Zhuang, J. (2010). Foreshock statistics in Italy, 2010 AGU Fall Meeting, サンフランシスコ, アメリカ合衆国, 2010年12月16日, 一般講演.
- [19] Wang, Q.,* Jackson, D.D., Schoenberg, R. and Zhuang, J. (2010). Uncertainties of Parameter Estimates in Earthquake Clustering Models, 2010 AGU Fall Meeting, サンフランシスコ, アメリカ合衆国, 2010年12月16日, 一般講演.
- [20] Zhuang, J. and Ogata, Y. (2010). Maximum weighted likelihood estimates for spatiotemporal point processes, 「時空間現象データに対する統計科学モデルの構築及び解析に関する組織的研究」国際シンポジウム, 鎌倉市, 2010年11月4日.
- [21] Zhuang, J.* and Ogata, Y. (2010). Evaluating performance of earthquake prediction relative to a baseline model through gambling scoring, 東京大学地震研究所研究集会「地震活動の評価に基づく地震発生予測システム: 標準予測モデルの構築へ向けて」, 京都府宇治市, 2010年11月2日.
- [22] 庄 建倉 (2010). A database of stochastic declustered catalogs, 日本地震学会2010年秋季大会, 広島市, 2010年10月28日.
- [23] 庄 建倉, 尾形良彦 (2010). 大地震予測の評価のための相場確率, 日本地震学会2010年秋季大会, 広島市, 2010年10月29日, ポスター発表.
- [24] 庄 建倉 (2010). 予測のギャンブリング評価法, 2010年度統計関連学会連合大会, 東京, 2010年9月6日.
- [25] Zhuang, J., Zechar, J.D., Jiang, C., Console, R., Murru, M. and Falcone, G. (2010). Applications of the gambling score in evaluating earthquake predictions and forecasts, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 千葉市, 2010年5月24日.

[図書] (計4件)

- [1] Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D., Ma L., and Guan H. (2013) *Statistical modeling of earthquake occurrences based on external geophysical observations: with an illustrative application to the ultra-low frequency ground electric signals observed in the Beijing region*. In **Imaging, Modeling and Assimilation in Seismology - Volume II**, edited by Li Y., Germany: De Gruyter.
- [2] Zhuang, J., Harte, D, Werner, M.J., Hainzl, S. and Zhou, S. (2012) *Basic models of seismicity: temporal models* **Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis**, doi:10.5078/corssa-79905851.
- [3] van Stiphout T., Zhuang J., and Marsan D. (2012) *Seismicity declustering*, **Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis**, doi:10.5078/corssa-52382934.
- [4] Zhuang J., Werner M.J., Hainzl S., Harte D., and Zhou S. (2011) *Basic models of seismicity: spatiotemporal models*, **Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis**, doi:10.5078/corssa-07487583. A

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.corssa.org/>

<http://bemlar.ism.ac.jp/zhuang/>

<http://www.ism.ac.jp/~ogata/Ssg/ssg.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

庄 建倉 (ZHUANG JIANCANG)

研究者番号 : 70465920

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

()

研究者番号 :