3. 研究報告

3.1 地震活動データを用いた長期予測手法の高度化（サブテーマ 1）

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　地震活動データを用いた長期予測手法の高度化

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所附属地震予知研究センター	教授	加藤　愛太郎
国立研究開発法人防災科学技術研究所巨大地変災害研究領域地震津波防災研究部門	主任研究員	久保　久彦
国立研究開発法人防災科学技術研究所巨大地変災害研究領域地震津波防災研究部門	契約研究員	上田　拓

(c) 業務の目的

複数の余震除去手法によって推定される定常的地震活動度の比較研究、一元化処理開始以前の地震カタログの収集・整理・特性比較、AI を用いた地震カタログの改善等を行い、地震活動データから長期的な定常的地震活動度を評価することによって内陸地震の長期発生確率の計算手法を高度化する。

(d) 3 か年の年次実施業務の要約

1) 令和 7 年度：

既存の余震除去手法の理論的整理を進めるとともに、実データへの適用に向けた準備を行った。各機関が一元化処理開始以前に作成した地震カタログの収集・整理を行った。特定の内陸域をテストケースとし、機械学習モデル等を用いて連続波形記録から地震イベントを自動的に抽出した。

2) 令和 8 年度：

前年度に検討した余震除去手法を実データに適用し、手法の違いが地震活動の予測結果に与える影響を定量的に評価する。前年度に収集・整理した地震カタログの特性比較を行う。前年度の解析で認定された地震イベントに対して、波形相互相関法を用いて相対走時差データを作成し、それをもとに相対震源決定を実施する。

3) 令和 9 年度：

過年度までの成果を基に、地震活動データを用いた地震発生確率の試算を行う。多様な地震活動データや異なるデータ処理方法によって算出された地震発生確率分布を比較し、それらが空間解像度などに与える影響を評価する。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

既存の余震除去手法である「時空間ウィンドウ法」、「Nearest Neighbor Distance 法」、「HIST-ETAS モデル」の理論的整理を進めた。HIST-ETAS モデルについて実データへの適用を行い、定常的地震活動度を試算した。また、気象庁一元化処理開始前の震源カタログである気象庁カタログ・防災科学技術研究所関東・東海地域地震観測網による地震カタログ・国立大学観測網地震カタログを収集・整理し、それらのカタログの特性比較を行った。さらに、中国地方を対象として、機械学習モデルを用いて連続波形データから地震カタログを構築し、気象庁カタログとの比較を行った。その結果、一元化処理震源カタログに自動処理結果が掲載される以前の期間において、微小地震活動の時空間分布の把握が改善されることを確認した。

(b) 業務の実施方法

既存の余震除去手法の先行研究（e.g., Gardner and Knopoff, 1974; Ogata, 2004; Zaliapin and Ben-Zion, 2013）を確認し、理論的整理を進めた。また、HIST-ETAS モデル（Ogata et al., 2021）を気象庁一元化処理震源カタログに適用し、定常的地震活動度を試算した。日本海側での震源決定精度を考慮し、太平洋側で 25 km 以浅、日本海側で 60 km 以浅の地震を使用した。1983～2023 年の活動について HIST-ETAS モデルのパラメータを推定した。1919～1982 年の活動は発生履歴として考慮した。M5.0 以上と M4.5 以上の地震からなる 2 つのデータセットにそれぞれ適用し、定常的地震活動度の空間分布を評価した。

気象庁による一元化処理震源カタログの構築開始以前の震源カタログとして、令和 7 年度は気象庁カタログ（e.g., 石川，2002；気象庁，2025)、防災科学技術研究所関東・東海地域地震観測網による地震カタログ（KT カタログ）(e.g., 岡田・他，2000；野口・他，2003)、国立大学観測網地震カタログ（JUNEC）(e.g., 坪井・他，1989）を収集し、共通のフォーマットに変換した。さらに、これらのカタログの全体的な傾向を調べるために、1985 年 7 月から 1997 年 9 月までに関東・中部地方の内陸域で発生した地震を対象とし、年毎にイベント数・完全性マグニチュード（Mc)・b 値を比較した。SeismoStats（Mirwald et al., 2025）を用いて、Mc は Kolmogorov-Smirnov method（Clauset et al., 2009; Mizrahi et al., 2021）によって、b 値は最尤法によって推定した。

中国地方に展開されている基盤的地震観測網（約 130 点）の連続波形データに対し、PhaseNet（Zhu and Beroza, 2019）による自動位相読み取りと、イベント検出アルゴリズム（Zhang et al., 2019）を適用することで、微小地震の検出を行った。次に、検出された各イベントについて、走時データを用いて hypomh（Hirata and Matsu'ura, 1987）により震源決定を行い、推定誤差等の情報を取得した。そのうえで、水平方向・鉛直方向の位置誤差、rms 残差、震央から 30 km 以内における P 波・S 波のピック数に基づき、精度の高い震源を選別した。さらに、砕石場の位置情報及び震央近傍の波形記録を参照し、砕石発破などの人工震源を除去した。最後に、一元化処理震源カタログに自動処理結果が掲載される前後におけるカタログの改善度を評価するため、2009～2010 年及び 2024～2025 年の 2 期間を対象として解析を実施した。

（c）業務の成果

既存の余震除去手法について理論的整理を行った結果、各手法が異なる特徴を有することが明らかとなった。具体的には、「時空間ウィンドウ法」は前震や群発地震が除去されにくい一方で、「Nearest Neighbor Distance 法」は前震の影響により本震が余震として除去され得るほか、群発地震も除去されやすい傾向を持つ。また、「HIST-ETAS モデル」は定常的地震活動度を連続場として推定可能である。さらに、HIST-ETAS モデルにより推定した定常的地震活動度の空間分布について、M5.0 以上（図 1）と M4.5 以上（図 2）を比較したところ、大局的な傾向は概ね一致した。一方で、M4.5 以上の場合は対象とする地震数が増加するため、空間解像度が向上する結果が得られた。

カタログ特性の比較結果（図 3、図 4、図 5）から、イベント数及び頻度–マグニチュード分布にはカタログ間で明瞭な差異が認められた。KT カタログは最もイベント数が多く、Mc は約 2、b 値は約 1 で安定して推定された。これに対し、JUNEC カタログはイベント数が最も少なく、Mc 及び b 値はいずれも時間変動が大きかった。このようなイベント数の少なさや Mc の不安定性は、カタログに収録される地震のマグニチュード下限の影響が大きいと考えられる。一方で、b 値の平均的な振る舞いは KT カタログと概ね類似していた。イベント数が 2 番目に多い気象庁カタログでは、Mc の時間変動は比較的大きいものの、KT カタログよりも小さい b 値（0.7～0.8 程度）が安定して推定された。

機械学習モデル等を用いて連続波形記録から地震イベントを自動抽出した結果、一元化処理震源カタログに自動処理結果が掲載される以前の 2009～2010 年の期間においては、山陰ひずみ・地震集中帯に沿う地震数が約 7 割増加した。また、地震集中帯における空間分布の連続性の観点からも、地震カタログの改善が確認された（図 6）。一方で、自動処理結果が掲載されるようになった後の 2024～2025 年の期間においては、地震カタログの顕著な改善は認められなかった（図 7）。

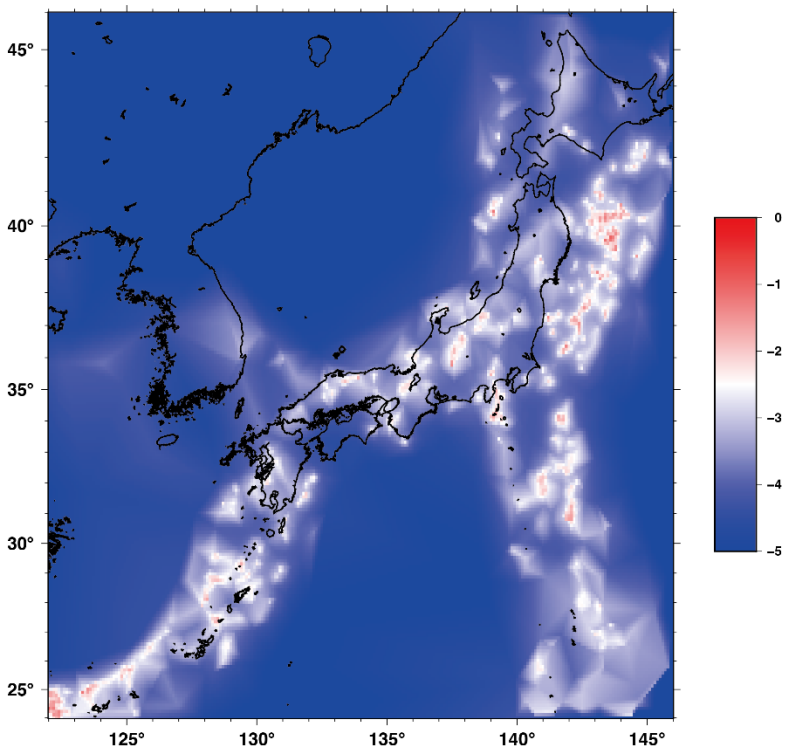


図 1 M5.0 以上の地震カタログを用いて推定した定常的地震活動度（($event/year$ /(0.1 × $0.1degree^2$))。常用対数表示。

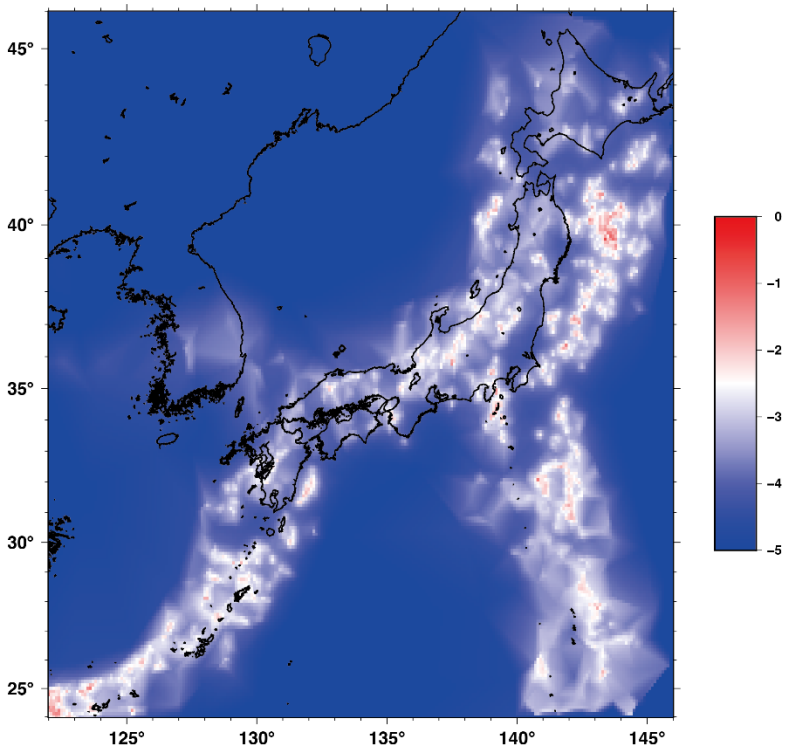


図 2 M4.5 以上の地震カタログを用いて推定した定常的地震活動度（$event/year$ /(0.1 × $0.1degree^2$))。GR 則の b=0.9 を仮定して、M5.0 以上の活動度として補正。常用対数表示。

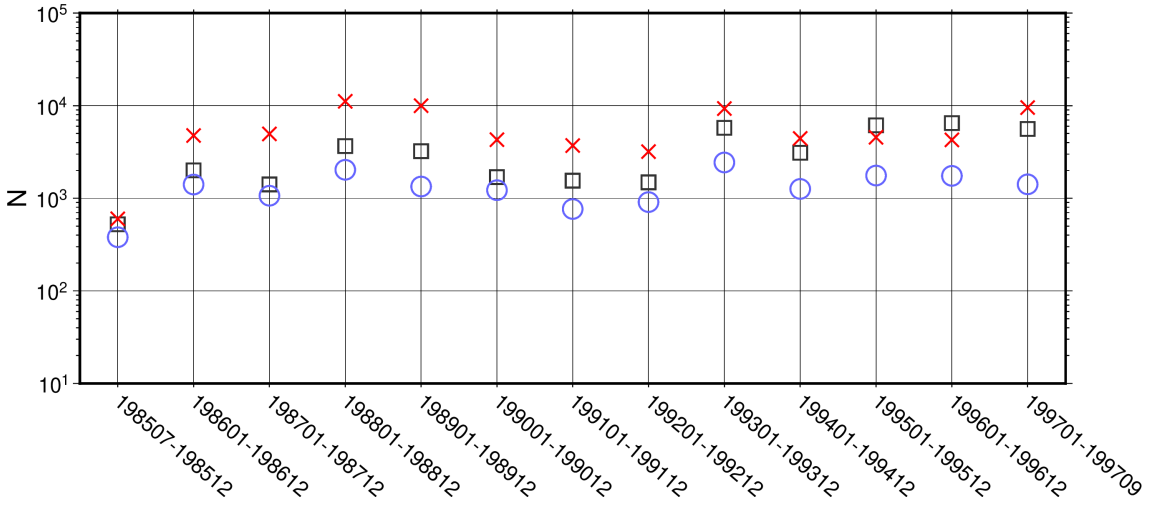


図 3　関東・中部地方内陸域における年毎のイベント数のカタログ間比較。黒色の□が気象庁カタログ、赤色×が KT カタログ、青色○が JUNEC を示す。

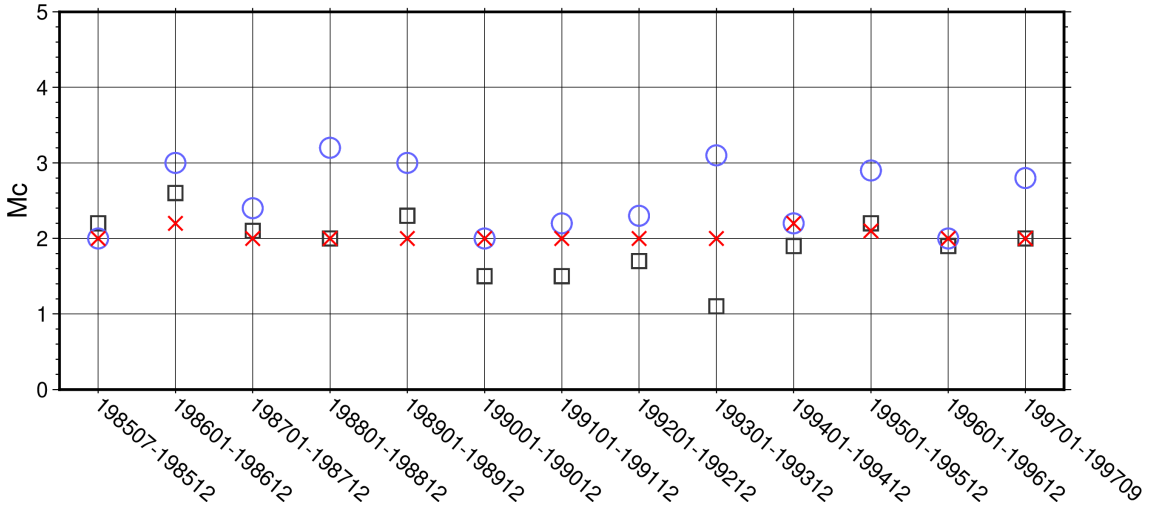


図 4 関東・中部地方内陸域における年毎の Mc のカタログ間比較。黒色の□が気象庁カタログ、赤色×が KT カタログ、青色○が JUNEC を示す。

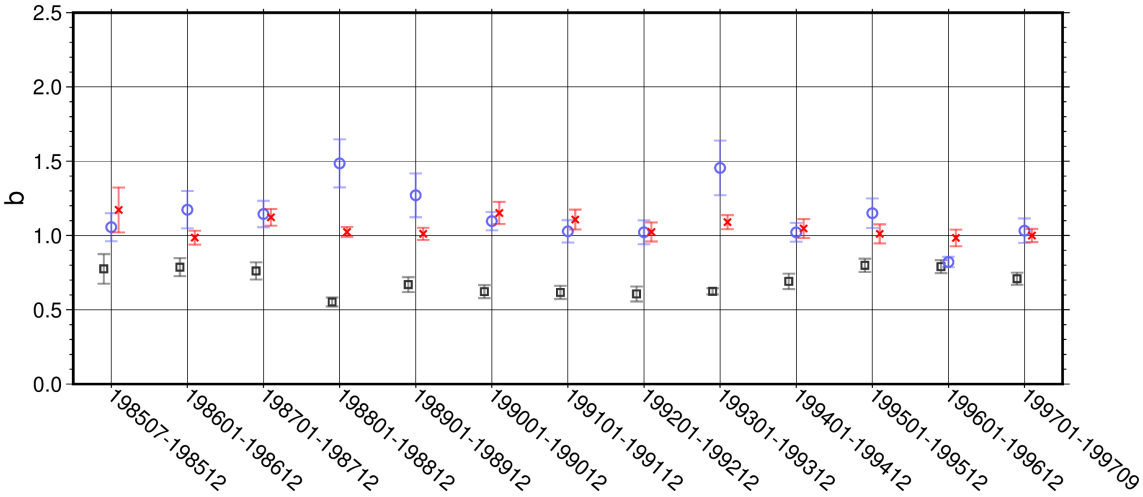


図 5 関東・中部地方内陸域における年毎の b 値のカタログ間比較。黒色の□が気象庁カタログ、赤色×が KT カタログ、青色○が JUNEC を示す。エラーバーは 95%信頼区間を示す。

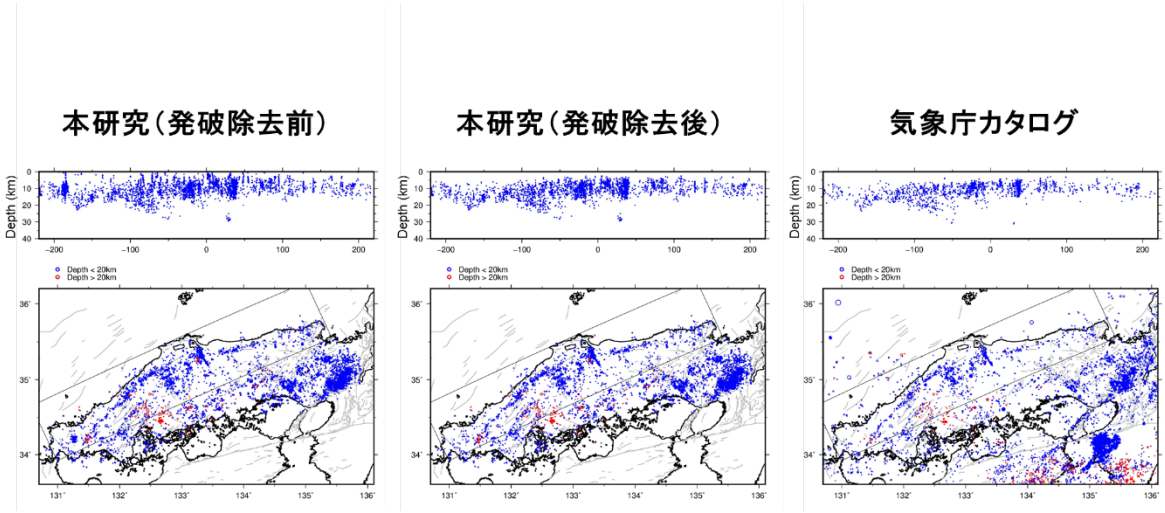


図 6 中国地方を対象とした 2010 年 1 月 1 日～12 月 31 日の期間の震央分布図（青色・赤色丸印は、深さ 20 km 以浅、20 km 以深の震央を表す）。上図は山陰地震集中帯に沿う深さ断面図を示す。左から、発破除去前のカタログ、発破除去後のカタログ、気象庁カタログの分布を表す。灰色の線は活断層の地表トレース（活断層研究会, 1991）を示す。

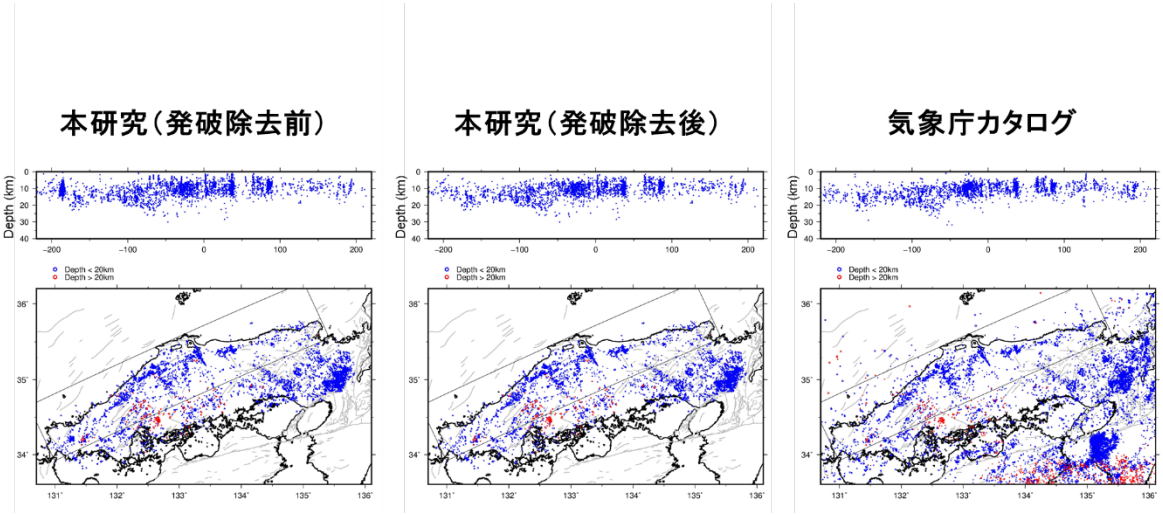


図 7 中国地方を対象とした 2024 年 1 月 1 日～12 月 31 日の期間の震央分布図（青色・赤色丸印は、深さ 20 km 以浅、20 km 以深の震央を表す）。上図は山陰地震集中帯に沿う深さ断面図を示す。左から、発破除去前のカタログ、発破除去後のカタログ、気象庁カタログの分布を表す。灰色の線は活断層の地表トレース（活断層研究会, 1991）を示す。

（d）結論並びに今後の課題

既存の余震除去手法について理論的な特徴を整理した。HIST-ETAS モデルを実データに適用し、下限のマグニチュードを下げることで、定常的地震活動度の空間解像度が向上することが示唆された。今後は 3 つの余震除去手法を実データに適用し、手法の違いが地震活動の予測結果に与える影響を定量的に評価する。

また、令和 7 年度に実施した地震カタログ特性の比較により、異なる地震カタログ間に内在する特性差が、定常的地震活動度の推定、ひいては内陸地震の長期評価に無視できない影響を与えることが示唆された。今後は、地震活動の空間分布に着目したカタログ間の比較をさらに進める。

さらに、中国地方の基盤的地震観測網で取得された連続波形データに対して機械学習モデルによる自動読み取りを適用し、地震カタログを構築した。その結果、一元化処理震源カタログに自動処理結果が掲載される以前の期間においては、山陰ひずみ・地震集中帯に沿う地震数が約 7 割増加し、空間分布の連続性の観点からもカタログの改善が確認された。一方で、自動処理結果が掲載されるようになった後の期間においては、顕著な改善は認められなかった。今後は、地震カタログの改善と震源再決定により高精度地震カタログの構築を進める。

（e）引用文献

Clauset, A., C. R. Shalizi, and M. E. J. Newman, Power-Law Distributions in Empirical Data, SIAM Review, 51(4), 661-703, 2009.

Gardner, J. K., L. Knopoff, Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, Bull. Seismol. Soc. Am., 64(5), 1363-1367, 1974.

Hirata, N. and M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, Phys. Earth Planet. Inter., 47, 50-61, 1987.
石川有三, 気象庁地震観測網と処理システムの変遷, 日本地震学会ニュースレター, 13(5), 30-33, 2002.
活断層研究会, 新編日本の活断層:分布図と資料, 東京大学出版会, 437, 1991.
気象庁, 気象庁の地震カタログの解説, https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/data/hypo/relocate.html, 2025.
Mirwald, A., N. Schmid, L. Mizrahi, M. Han, A. Rohnacher, V. A. Ritz, and S. Wiemer, SeismoStats: a python package for statistical seismology, arXiv preprint arXiv:2511.04521, 2025.
Mizrahi, L., S. Nandan, and S. Wiemer, The Effect of Declustering on the Size Distribution of Mainshocks, Seismol. Res. Lett., 92(4), 2333-2342, 2021.
野口伸一・増子徳道・関東東海地殻活動観測研究グループ, 関東・東海地域地震観測網による震源の時空間分布と規模分布について－特別研究「関東・東海地域における地震活動に関する研究」観測成果のまとめ（その 5）－, 防災科学技術研究所研究資料, 239, 1-71, 2003.
Ogata, Y., Space-time model for regional seismicity and detection of crustal stress changes, J. Geophys. Res., 109, B03308, 2004.
Ogata, Y., K. Katsura, M. Tanemura, D. Harte, and J. Zhuang, Hierarchical space-time point-process models (HIST-PPM): software documentation and codes, Computer Science Monographs, 35, 2021.
岡田義光・松村正三・野口伸一, 関東・東海地域地殻活動観測網の稼動状況－特別研究「関東・東海地域における地殻活動に関する研究」観測成果のまとめ（その 1）－, 防災科学技術研究所研究資料, 208, 57 pp., 2000.
坪井誠二・纐纈一起・鷹野澄・宮武隆・阿部勝征・萩原幸男, 国立大学観測網地震カタログの震源決定処理, 地震 2, 42, 277-284, 1989.
Zaliapin, I. and Y. Ben-Zion, Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 118, 2847-2864, 2013.
Zhang, M., W. L. Ellsworth, and G. C. Beroza, Rapid earthquake association and location, Seismol. Res. Lett., 90(6), 2276-2284, 2019.
Zhu, W. and G. C. Beroza, PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method, Geophys. J. Int., 216(1), 261-273, 2019.