

Epidemic-Type Aftershock Sequence モデルを用いた新潟県中越地方の地震活動の時空間解析*

東北大学理学研究科 内田晴海・岡田知己・藤村遼太郎・田上綾香

1. はじめに

新潟県中越地域は日本海東縁地域でインバージョンテクトニクスが見られる領域であるとともに、新潟-神戸ひずみ集中帯に属する地域で、度々大規模な地震が発生している地域である(図1)。特に2004年10月に発生した新潟県中越地震は本震規模がM6.8であるのに対し、M6以上の余震が複数回見られ、余震活動が非常に活発な地震であった。一方で2007年に発生した新潟県中越沖地震は中越地震と同じM6.8の本震規模であったが、余震は中越地震ほど活発ではなかった(図2)。

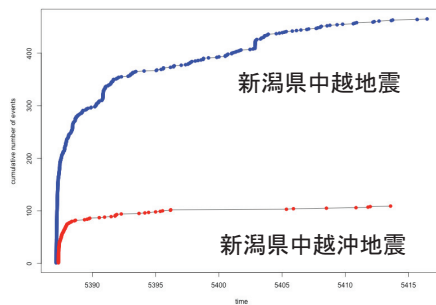
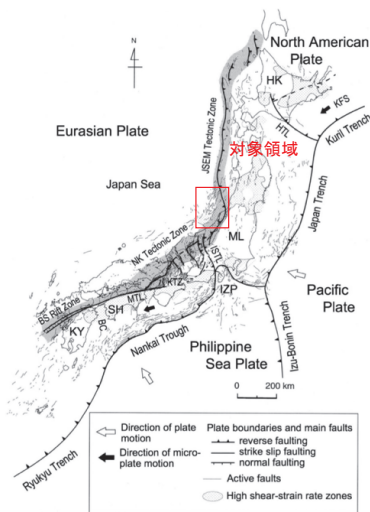


図2 本震後1ヶ月間の震源域でのM3以上の地震積算回数(気象庁カタログより作成)

青:新潟県中越地震 赤:新潟県中越沖地震

図1 日本列島のテクトニクス

(Terakawa & Matsu'ura, 2010 に加筆)

このような地震ごとの特徴は領域のテクトニクスや応力を反映していると考えられる。例として、クーロン応力変化(式1)がある。

$$\Delta CFF = \Delta\tau - \mu'\Delta\sigma \tag{1}$$

τ は剪断応力, μ' は間隙水圧を考慮した見かけの摩擦係数, σ は法線応力を示す。レシーバー断

*Spatiotemporal analysis of seismicity in Niigata Chuetsu region using the Epidemic-Type Aftershock Sequence model by Harumi Uchida, Tomomi Okada, Ryotaro Fujimura, and Ayaka Tagami

層のクーロン応力が正の時、レシーバー断層の滑りが促進され地震が活発になり、負の時には滑りが抑制され、地震が静穏化する (King et al., 1994)。

本研究では、ローカルなテクトニクスや応力の変化と地震活動の関係を明らかにするために、地震活動を統計的に表す Epidemic-Type Aftershock Sequence (ETAS) モデル (Ogata, 1988; 1998) を新潟県中越地方で発生した地震に適用し、モデルのパラメータの時空間変化やモデルと実際の地震活動との比較を行う。そして領域内の物理的な特徴と地震活動がどのように関係し、時空間変化しているかを考察する。

2. 手法

ETAS モデルとはある領域でランダムに発生する地震と、それによって誘発される余震を重ね合わせることで地震活動を表すモデルで、全ての地震が余震を持つという前提に基づいたものである。今回使用する時空間 ETAS モデルでは余震数の時間減衰に加えて距離減衰を考慮したモデルで、以下の式で表される。

$$\lambda_{\beta,\theta}(t, x, y, m|\mathcal{H}_t) = \nu_{\beta}(m)\lambda_{\theta}(t, x, y|\mathcal{H}_t) \quad (2)$$

$$\nu_{\beta}(m) = \beta \exp[-\beta(m - m_0)] \quad (3)$$

$$\lambda_{\theta}(t, x, y|\mathcal{H}_t) = \tilde{u}(x, y) + \sum_{i:t_i < t} \kappa_{A,\alpha}(m_i)g_{c,p}(t - t_i)f_{D,q,\gamma}(x - x_i, y - y_i; m_i) \quad (4)$$

ここで、

$$\tilde{u}(x, y) = \mu u(x, y) \quad (5)$$

$$\kappa_{A,\alpha}(m) = A \exp[\alpha(m - m_0)] \quad (6)$$

$$g_{c,p}(t - t_i) = \begin{cases} \frac{p-1}{c} \left(1 + \frac{t-t_i}{c}\right)^{-p} & t - t_i \geq 0 \\ 0 & t - t_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{D,q,\gamma}(x - x_i, y - y_i; m_i) = \frac{q-1}{\pi D \exp[\gamma(m_i - m_0)]} \left(1 + \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{D \exp[\gamma(m_i - m_0)]}\right)^{-q} \quad (8)$$

ある時刻 t 、ある地点 (x, y) での地震発生確率が $\lambda(t, x, y, m|\mathcal{H}_t)$ で表され、 \mathcal{H}_t は実際の地震活動を表す項である。また今回は Gutenberg-Richter 則 (式 3) (Gutenberg & Richter, 1944) を考慮したモデルを考える。

ETAS パラメータは、 μ が背景地震活動率、 A が余震の生産性、 α が本震のマグニチュードに余震数がどの程度依存するかを表す係数、 c は本震発生後に地震が余震系列に乗るまでの時間、 p は余震の時間減衰の強さを表し、 c, p は大森-宇津則に基づく。また、 K, q, γ は余震数の距離減衰を示し、本震から距離が離れるほど地震数が少なくなるという仮定を表している。今回使用するモデルでは余震の距離減衰は本震から等方的であると仮定する。

この ETAS パラメータの推定には A. Jalilian (2019) のパッケージを使用し、Davidon-Fletcher-Powell (DFP) 法 (Fletcher & Powell, 1963) を用いて ETAS モデルの最尤推定を行った。データは新潟県中越地震が領域の中心付近にくるような $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ の領域で 1990-2020 年に発生した M3 以上、深さ 0-40 km の気象庁一元化震源を使用した (図 3)。

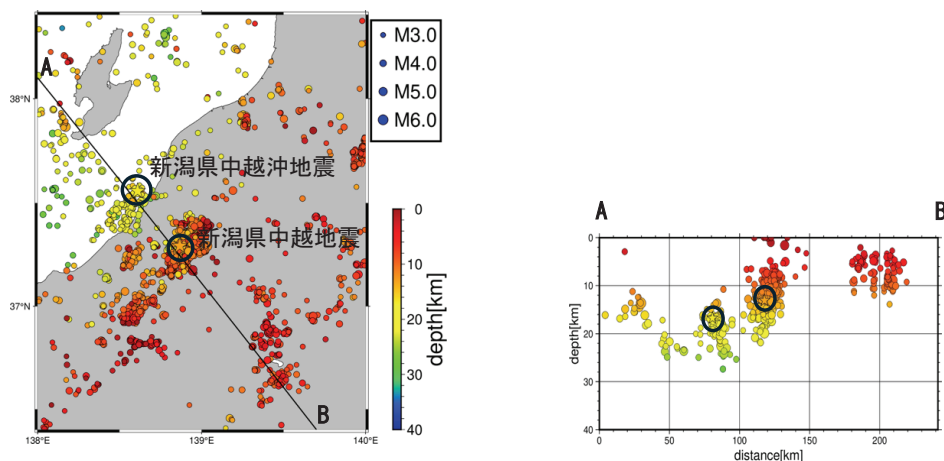


図3 使用した震源の分布

また、今回パラメータを推定するターゲット期間の前10年間分は補完イベント期間として扱い、補完イベント期間に発生した地震がターゲット期間に地震を誘発すると仮定して推定を行った。クーロン応力の変化の推定には Toda et al. (2011) の Coulomb 3.3 を使用した。

3. 結果

本解析の結果、新潟県中越地震以前では実際の地震活動と ETAS モデルはよく合う結果であったが、新潟県中越地震を含む時系列・新潟県中越沖地震を含む時系列では実際の地震活動に対してモデルが大きく下回る結果となった。東北地方太平洋沖地震が発生した 2011/03/11 を含む期間には、その翌日に長野県北部で M6.7 の地震が発生し、2011/03/11 以降に栃木県北部や福島県北西部で群発的な地震活動が見られた。上記の活発な地震活動が見られて以降、モデルは実際の地震活動を過小評価した (図 4)。また、ETAS パラメータの時間変化について、中越地震が発生した期間では b 値および背景地震活動率の低下が見られ、中越沖地震が発生した期間では余震の生産性の低下と α, q, γ の上昇が見られた。2010-2014 年の、長野県北部地震や栃木県・福島県での群発的な地震活動が発生した期間では背景地震活動率・余震の生産性の上昇が見られた (図 5)。

4. 議論

新潟県中越地震を含む期間でのモデルの過小評価について考察する。図 5 [b] に示すように、新潟県中越地震発生直後には本震周辺で M6 以上の余震が複数回発生したことで b 値が一時的に大きく低下している。一方で、本研究では 2003 年 10 月から 2007 年の中越沖地震が発生する前までの期間をターゲットとしており、比較的長期間でパラメータを推定していることから、本震直後の b 値が小さい期間の地震を過小評価している可能性がある。

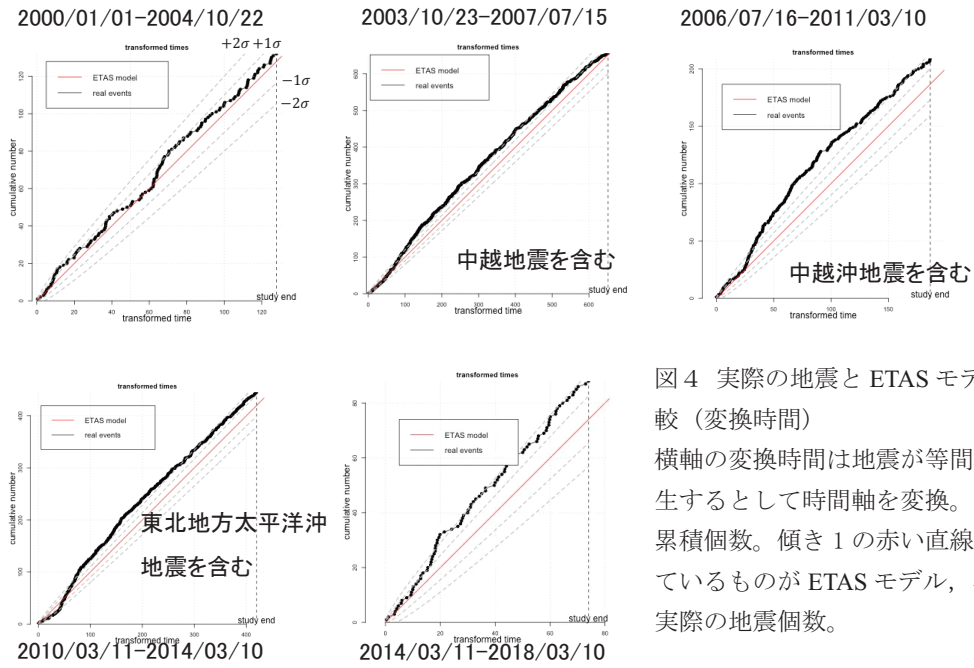


図4 実際の地震と ETAS モデルの比較 (変換時間)

横軸の変換時間は地震が等間隔に発生するとして時間軸を変換。縦軸は累積個数。傾き 1 の赤い直線で示しているものが ETAS モデル、黒点が実際の地震個数。

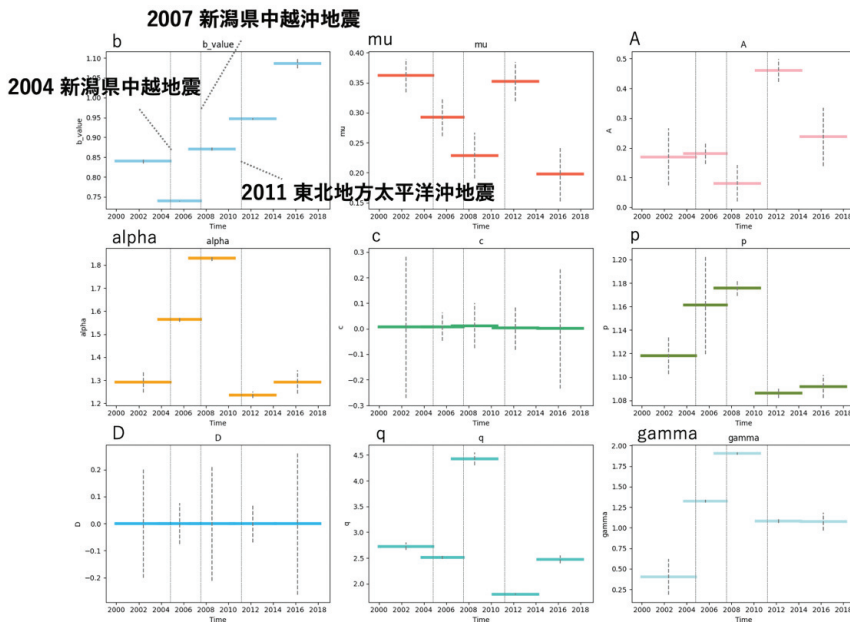


図5 ETAS パラメータの時間変化

新潟県中越沖地震は新潟県中越地震に比べて余震数が少ないが、余震の生産性 (図5 [A]) が新潟県中越沖地震を含む期間で低下したことを反映していると考えられる。これについて、中越地震の断層による中越沖地震の断層面 (国土地理院, 2007) 上でのクーロン応力の変化を調べる

と、中越沖地震の震源域周辺の地震発生層では負となることがわかった（図6）。

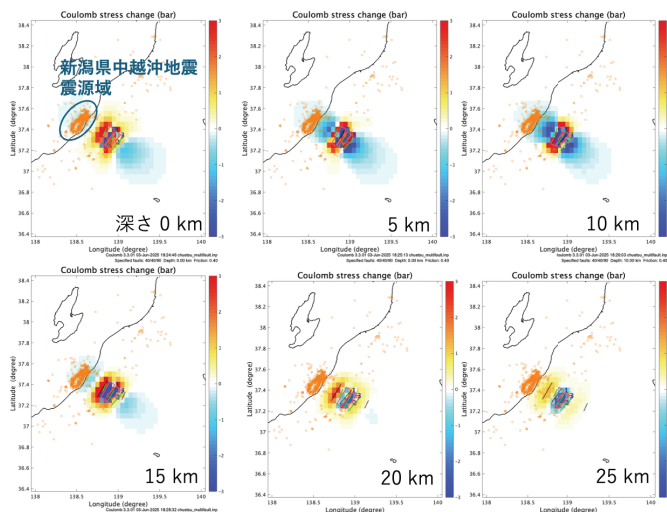


図6 新潟県中越沖地震の最大断層面をレシーバーとした時の
中越地震の断層滑りによる深さごとのクーロン応力変化

2011/03/11 を含む期間については、地震活動が活発化した長野県北部地域、栃木県北部地域、福島県北西部地域に対してそれぞれ ETAS モデルをフィッティングした。結果として、長野県北部地域はモデルと実際の地震活動はよく合ったが、栃木県北部・福島県北西部地域ではモデルが実際の地震活動に対し大きく下回ることが明らかになった。これは群発地震が発生している期間において背景地震活動率が増加している場合、背景地震活動率を定常とするモデルではモデルが実際の地震個数を過小評価するという Llenos et al. (2009) の結果と整合的であり、一方で長野県北部地域のような本震-余震系列を ETAS モデルがよく表すことができることを示す。

5. 結論

本研究では、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震、および東北地方太平洋沖地震後に地震活動が活発化した地域を対象に、ETAS モデルによる地震活動の再現性とクーロン応力変化との関係を検討した。

新潟県中越地震では、 b 値の一時的な低下に伴う余震活動の活発化に対して、ETAS モデルが地震活動を過小評価する傾向が認められた。一方、震源域では背景地震活動率および余震の生産性の上昇が推定され、これらはクーロン応力の上昇と整合的である。新潟県中越沖地震の余震域は、中越地震によってクーロン応力が低下した領域に位置し、背景地震活動率および余震の生産性はいずれも中越地震に比べて低く推定された。この結果はクーロン応力低下の影響を反映している可能性がある。また、中越地震を補完イベント期間として設定した場合には、活発な余震活動が定常的な背景地震として扱われ、地震活動の過大評価が生じ得る点に注意が必要である。東北地方太平洋沖地震後に地震活動が活発化した地域では、群発地震を含む時系列において、広域・長期間で推定したモデルと実際の地震活動が一致しない期間が確認された。群発的な活動が卓越する領域では背景地震活動率の増加が推定され、この傾向は先行研究と整合的である。

謝辞：本研究では、気象庁による一元化震源データを使用しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) King, G. C. P., Stein, R. S., & Lin, J. (1994), Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 935–953.
- 2) Ogata, Y. (1988), Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Journal of the American Statistical Association*, 83(401), 9–27.
- 3) Ogata, Y. (1998), Space–time point-process models for earthquake occurrences, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 50(2), 379–402.
- 4) Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944), Frequency of earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 185–188.
- 5) Terakawa, T., & Matsu'ura, M. (2010), The 3-D tectonic stress field in Japan inferred from centroid moment tensor data inversion, *Geophysical Journal International*, 181(2), 1068–1086.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04539.x>
- 6) Jalilian, A. (2019), ETAS: An R package for fitting the Epidemic-Type Aftershock Sequence model, R package.
- 7) Fletcher, R., & Powell, M. J. D. (1963), A rapidly convergent descent method for minimization, *The Computer Journal*, 6(2), 163–168. <https://doi.org/10.1093/comjnl/6.2.163>
- 8) Toda, S., Stein, R. S., Sevilgen, V., & Lin, J. (2011), Coulomb 3.3: A MATLAB package for calculating stress changes on faults and earthquake triggering, *Seismological Research Letters*, 82(4), 520–530.
<https://doi.org/10.1785/gssrl.82.4.520>
- 9) 国土地理院 (2004). “2004 (平成 16) 年新潟県中越地震”, <https://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic041023.html>
- 10) 国土地理院 (2007) “平成 19 年新潟県中越沖地震 推定された主要な滑り面の概念図”, <https://www.gsi.go.jp/common/000040143.pdf>
- 11) Llenos, A. L., McGuire, J. J., & Ogata, Y. (2009), Modeling seismic swarms triggered by earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 114, B05301. <https://doi.org/10.1029/2008JB005939>