

大きな地震連鎖の確率予測をどう求めるか

統計数理研究所 尾形良彦

確率に対する理解が社会に浸透していない状況では、確率的情報をどう扱うかは難しいかもしれませんが、リアルタイムで地震データなどを発信できるようになった現在では、リアルタイム予測も望まれています。様々な統計モデルを用いた確率予測について「統計地震学」(統計数理, 2015) はあえてそれらを独自のテーマとしています。本稿では、昭和の南海トラフ巨大地震などを例に、整備すべき予測の課題を解説します。

1. 連発型「余震」のリアルタイム確率予測

わが国では 1995 年阪神淡路震災以来、余震の発生確率(地震調査委員会 1998) が公表・発信されてきました。これはマグニチュードの GR 則および余震減衰の大森・宇津則を使っています。これらの統計的法則のパラメタ値は全国一律でなく余震列固有で、これがリアルタイムの直後予測を難しくしています。事実 M7 クラスの本震でも余震総数が数倍以上違ったりします。

2016 年の熊本の連鎖地震以来、数値的な予測の公表が控えられて、「大地震発生後 1 週間程度は同規模の後続地震に注意」といった情報の出方になっています。

米国では 2019 年に同様な連鎖大地震がカリフォルニア州 Ridgecrest で 18 時間経過後に起きましたが、USGS はモデルを再推定して確率予測を続行し公表しています。ただし、十分なデータ数を確保するために後続の本震後 3 日ほど経ってから公表されました。この地震の余震の欠測規模がかなり大きかったためです。

欠測余震データを考慮したモデル.

本震後 1 日以内に大きな余震を含め大半が発生しています。そのため、仮にリアルタイムで確率予測を出すためには、ひと工夫が必要です。まずマグニチュード値ごとに検出率を予測し、GR 則を掛け合わせ、余震の頻度分布を推定します(Ogata & Katsura 1993)。これによって、大きな地震の直後からの検出能力の低下による欠損データから、真の余震発生率を理論的に補完し、同時に b 値も推定し、本震直後からの確率予測に使います。

例えば Ogata & Omi (2020) によれば、熊本地震や Ridgecrest 地震の場合、本震よりも大きな余震が発生する確率は、通常の余震活動に比べて有意に大きな値になっています。事実、後発の本震の大余震に関する確率も、前者ものより有意に小さいものになっています。

国内に於いて、過去 5 年間の M6 以上の 14 例の大地震について、Hi-net の未編集データに基づく準リアルタイム予測によると「本震より大きな余震が 24 時間以内に起きる確率」は熊本前

震の場合が 30% であるのに対し、他の 13 例は高々 10% で、多くの場合は数% でした(汐見ほか 2022)。

ETAS モデルでは、地震の続発性から、大森宇津モデルよりも、大余震が起きる予測確率も増えます。そこで、本震直後からの余震の欠測を克服して、ETAS モデルの真の活動度を示しました(尾形, 2024; 尾形・熊澤, 2023)。

大地震直後、刻々と変わる検出確率を推定し、リアルタイムで安定的に予測実装することが望まれます。

ETAS モデルシミュレーション長期予測.

ここで改めて強調しますが、ETAS モデルはマグニチュードデータを外生変数として使います。通常、ETAS のシミュレーション実験では GR 則の独立系列データが使われていますが、非 GR 則のマグニチュード列で予測を求める試みがあります。

UCERF3-ETAS 法(US Geological Survey, 2022) は中期および長期予測を実施するものです。それはカリフォルニア各地の地震断層区分に対して固有地震の特性マグニチュード分布、そして時空間 ETAS モデル用のマグニチュード列に対しては上限付きの GR 分布を考慮します。その上で、活断層地震発生率の BPT 更新過程(たとえば地震調査委員会 2001 参照) と時空間 ETAS を組み合わせ、シミュレーションによる大量の地震発生を繰り返し、誘発実験例を集めた確率予測です。

例えば、サンアンドレアス断層の一部が破断するといった仮想的な地震が発生した後の、ロサンゼルスやサンフランシスコ周辺に及ぶ地震活動の中・長期予測を得ます。また、Ridgecrest 地震で、周辺の断層セグメントの破壊にまで及ぶシナリオの予測確率を求めています(Field & Milner 2018)。

同様なシミュレーションで南海トラフの地震から内陸活断層破壊への誘発シナリオにも試みることができるかもしれません。

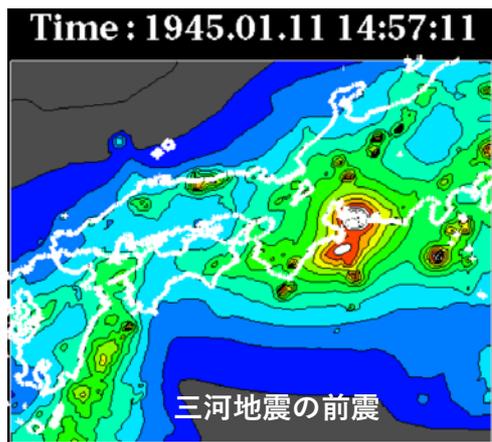
2. 回顧的地震予測の可能性: 昭和の南海トラフ地震前後の活動などをめぐって

時空間 ETAS の可視化で追う活動のシナリオ

次回の南海トラフの巨大地震の長期確率予測については議論のあるところですが、普段は地震活動が低く余震が少ない西南日本で、昭和初期には、様々なイベントが見られました。そこで、連鎖地震のシナリオや予測の参考のために昭和東南海や昭和南海の地震前後を扱ってみたいと思います（尾形 2003, Ogata 2004）。これらを出るだけ予測可能性の立場から議論し、連鎖地震の蓋然性を追求したい。

断層のずれによって地震が起き、周辺の別の断層に加わる応力は、常時蓄積されている応力より、はるかに大きいものです。大地震が起きて短時間で、周辺の地殻がワッと押し寄せたり引いたりしていることが見えます。そのため、或るところでは急に地震が活発になったり、活動中の余震が途端に静かになったりします。

「時空間 ETAS モデル」（Ogata 2022）は、どここの場所で活動度が高揚して、どここの場所が余震型の減衰をしているか、どここの場所で静穏化や活発化があるか、時間を追って動画で可視化できる、そういう統計モデルです。



前震型の確率

前兆（前駆）現象と異常現象（常時と違う状態、データ異常値など）は明確に使い分ける必要があります。地震予測では異常現象が前兆現象である確率が問題です。たとえば「前震」は本震が起きてから認定されるもので、後者の「前震かもしれない」地震の群の性質、たとえば時空間的な発生集中度やマグニチュード系列の増減などの違いを手掛かりとして前震の確率予測に結びつける統計的判別モデル（Ogata et al. 1996, 2018, Ogata & Katsura 2012）が必要です。

1944年東南海地震後の活動度を動画でモニターすると、その余震域と見える地域から離れた活動が三河地域に見えます。この地震列から「前震型」である確率を計算します。すなわち、この地震列の現時点までの最大マグニチュードより将来 0.5 以上大きい地震が発生する確

率です。本震前の三河地域の系列は、M4 以上が 8 個あり 5 番目の地震のマグニチュードは M5.7 でした。ここで、将来の地震につき「M6.2 以上」の地震が起きる確率は 5~9% の確率です。この地域での事前確率は 3% 以下ですから、通常より 2~3 倍ほどの確率利得ですが、被害リスクを考慮すれば、要注意と構えるべきです。

しかも、大地震の余震域境界部で認識された地震群が、隣の大地震の前震である確率利得はもっと高いと考えられます。実際、大地震の後、隣接地域で大地震が起きる条件付き確率を見積る統計的な解析結果から、以下のようなことが成り立ちます。すなわち、いったん大地震が起きると、その近辺に同程度以上の地震が起きる確率（単位面積当たり）は遠方のどこかに起きる場合よりも数倍大きいことが経験的統計（Ogata, 2001; 尾形, 2003）から示されます。

群発地震活動

さらに群発地震活動として注目した部分があります。それは紀伊半島南端付近の活動です。これは結果的には 1946 年南海地震の震央の北部にあたります。この地域では、東南海地震の余震の後、活動が減衰せずに、南海地震まで一貫して群発地震が発生していました。JMA 震源データだけでなく、潮岬測候所で捉えた 300 を超える有感地震の発生履歴（Ogata, 2004 参照）からも明らかです。この付近でスロースリップがあったかもしれません。現在なら GNSS インバージョンで判明するかもしれません。また非定常 ETAS モデル（Kumazawa & Ogata 2013）で、流体間隙圧やゆっくりすべりの関与の時間変化を可視化することができます。この群発地震やスロースリップに対して、それらが事後的なものか、前駆的なものかそれとも、常習的なものかを確率的に評価したいところです。

広域応力変化（尾形 2003, Ogata 2004）

西南日本の地震活動時空間パターンで、最も顕著なのは和歌山市直下の 20 年間にわたる群発地震活動が、東南海地震直後に静穏化したことです。この時期は、空襲などによる戦争末期および戦後の検知の低下で、中央气象台（気象庁）カタログの均質性に疑義がありましたが、除群カタログによれば、全てのマグニチュード下限に対して検出率が時間的に変化せず、この静穏化は人為的なものでないことが分かります。

1970 年代以降に計算された、東南海・南海地震を含む、大地震の断層モデルやストレス場の研究結果によって、これらの連鎖地震前後の西日本で活発な 8 地域での事後（ポストサイスミック）の地震活動の変化に注目しました。それぞれ、応力変化と断層のすべり摩擦を含んだ ΔCFF を調べ、地震活動の増減を調べました。各地域の ΔCFF の

正值と負値と地震活動増減の変化は良く対応しています。すなわち、大地震を契機に、正の ΔCFF の地域では地震活動が活発化し、負の ΔCFF の地域では静穏化して見えます。

他方、和歌山市周辺域、兵庫県南部地域、四国東部地域などでは、東南海地震の前から静穏化しています。これは、たとえば東南海断層モデルの深部延長部（志摩半島直下）でスロースリップモデルを設定すれば説明できます。

地震の断層解が分かっているならば、その周辺での事前スロースリップの事後予測で、測地データや地震活動変化を解釈することはできます（Ogata, 2010b, 2011; 尾形, 2007, 2008）が、それでも精度の問題が付きまといます。

内陸部を含めて測地時系列からスロースリップの情報を事前に把握することは重要ですが、多くの場合、インバージョンが難しい。そこで、様々な場所のスロースリップを設定し、上記のようなフォワード推論で測地的変化や群発活動の変化と調和する尤もらしさを評価し、確率予測に繋げることが望まれます。

余震の相対的静穏化

ETAS モデルの予測どおりに順調に推移せずに、相対的に静穏化する場合は地震活動の異常現象と考えられています。余震列に限って解析したとき、相対的静穏化の場合は、将来新たな断層破壊を伴う大きな余震または大地震が起きる可能性が高い。例えば、南海地震の前後 30 年間に発生した西南日本の内陸型大地震の余震活動のうち、前者は北丹後地震を除く 5 例の余震活動には相対的静穏化が見られますが、後者 6 例の余震活動は軌道に乗っている。

そこで日本周辺の余震列を 76 例ほど調べると、相対的静穏化が確認できたのは半分ほどで、有意な静穏化を検出しても必ずしも大地震が間もなく近傍に発生するとは限りません。確率予測としてその何%が、どれくらい経って、どの辺りの大地震に結びつくでしょうか。相対的静穏化が長期間（例えば 3 ヶ月以上）に及ぶと、余震域近辺（たとえば 200 km 以内）で、6 年以内の期間に、本震と同規模以上の地震が起きる確率利得が、その他の場合より数倍以上であるという結果でした（Ogata 2001, 2017; 尾形 2016）。

静穏化のメカニズムについては諸説ありますが、筆者は応力（クーロンの破壊関数 CFF ）の減少が引き起こす静穏化を考えます。まず大地震の断層運動を源として周辺部で CFF が増加する領域では活発化するだけでなく、減少する領域では静穏化します。広域の相対的静穏化や余震活動の相対的静穏化も多数の潜在的な地震群の受け手の断層系での CFF の減少が余震や常時地震の発生を抑制していると考えます（Ogata, 2004, 2010a など）。ただし、これらには事前に

応力変化を引き起こす断層運動の源が分かっている場合が多く、筆者らは、破壊前の断層内または深部延長部分での、ゆっくりすべり

（slow slip）を仮定し、ETAS モデルによる地震活動異常や地殻変動データの変化のパターンを比べてきました（Ogata, 2007, 2010b, 2011; Kumazawa et al 2010; Kumazawa & Ogata, 2013）。

測地的課題

現状では事前のスロースリップの検出は、かなり難しいようです。GEONET 観測網は世界に類が無いほど一様で密に配置されていますが、中小地震が至る所で頻発しており、測地時系列には地震時のみならず前後のすべりによる地殻変動が複雑に混ざり合っています。

それらを効率的に分離判別する時空間モデルや解析法を開発することが急がれます。そのうえで、前駆的すべりという前兆現象をとらえることができれば中期・短期的地震予測に有望です。けれども常習的なすべりがある場合も考えれば、どの程度の割合で大地震前のすべりなのかを統計的に識別しなければいけない。それらの地域性もあるだろうし、どういうすべりだったらこのぐらい確率利得が増えるとか、そういう例を地震の観測結果に対比して定量的（統計的）に研究しなければなりません。

3. むすび

ある異常観測が大きな地震につながる確率が普段に比べて何倍（確率利得）くらいになるか、そして大きな地震が何日後にどの辺で起き易いかといったことを確率利得の時空間関数

（危険拡大度; 尾形 2021）で表現したい。その際、空振り率が高くても、見逃し率が低い観測データの異常現象を多数見出してデータベースを蓄積することです。見逃し率を小さくする為には広域の包括的な調査が不可欠です。異常現象の大地震発生への前兆性や切迫性の危険拡大度を時空間的に求める必要があります。

それも一つの異常現象で無く複数の異常現象がとらえられれば、それらを組み合わせることで確率が高まります。このような研究を進めていくことが重要です。一種類の異常現象では高い確率利得を出すことは困難でしょうが、いくつかの異常現象が重なって観測されれば確率は高められます（尾形 2016, 2021; Ogata, 2017）。これには数多くの事例を調査しなければなりません。それらをどの様に組み込んで、相場のモデルを超える確率予測を実現するのが課題で有望な策です。

参考文献

Field EH & Milner KR, 2018, Candidate products for

- operational earthquake forecasting illustrated using the Hay Wired Planning Scenario, including one very quick (and not-so-dirty) hazard-map option, *Seis. Res. Lett.* **89** <https://doi.org/10.1785/0220170241>
- Kumazawa T, Ogata Y & Toda S, 2010, Precursory seismic anomalies and transient crustal deformation prior to the 2008 Mw = 6.9 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, B10312, doi:10.1029/2010JB007567.
- Kumazawa T & Ogata Y, 2013, Quantitative description of induced seismic activity before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake by nonstationary ETAS models, *J. Geophys. Res.*, **118**; doi:10.1002/2013JB010259
- Kumazawa et al., 2016, Background rates of swarm earthquakes that are synchronized with volumetric strain changes, *Earth Planet. Sci. Lett.* **442**, 51-60; <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.049>
- 熊澤貴雄, 尾形良彦, 2021, 長野・岐阜・福井県境付近の群発地震活動について, *予知連会報* **106** (7-2) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou106/07_02.pdf
- 熊澤貴雄, 尾形良彦, 2022, 非定常 ETAS モデルから見える能登半島群発地震活動の地域的変化, *予知連会報* **107** (7-4) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou107/07_04.pdf
- Ogata Y, 2001, Increased probability of large earthquakes near aftershock regions with relative quiescence J. *Geophys. Res.* 106 (B5), 8729-8744; <https://doi.org/10.1029/2000JB900400>
- 尾形良彦, 2003, 1944 東南海地震および 1946 南海地震前後の西南日本における地震活動変化について, *予知連絡会報*, **70** (7-3), 378-383. <http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou70/07-03.pdf>
- Ogata Y, 2004, Seismicity quiescence and activation in western Japan associated with the 1944 and 1946 great earthquakes near the Nankai trough, *J. Geophys. Res.*, **109** (B4), <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2003JB002634>
- 尾形良彦, 2007, 能登半島周辺の地震活動と地殻変動について, *予知連絡会報*, **78** (7-11) http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou78/07_11.pdf
- Ogata Y, 2007, Seismicity and geodetic anomalies in a wide area preceding the Niigata-Ken-Chuetsu earthquake of 23 October 2004, central Japan, *J. Geophys. Res.*, 112, B10301, doi:10.1029/2006JB004697.
- 尾形良彦, 2008, 2007 年中越沖地震の余震活動および周辺部の地震活動と地殻変動について, *予知連絡会報* **79** (7-3), http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/07_03.pdf
- Ogata Y, 2010a, Space-time heterogeneity in aftershock activity, *Geophys. J. Int.* **181** doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04542.x
- Ogata Y, 2010b, Anomalies of seismic activity and transient crustal deformations preceding the 2005 M7.0 earthquake west of Fukuoka, *PAGEOPH* 167, 1115-1127, doi:10.1007/s00024-010-0096-y.
- Ogata, Y. (2011). Pre-seismic anomalies in seismicity and crustal deformation: case studies of the 2007 Noto Hanto earthquake of M6.9 and the 2007 Chuetsu-oki earthquake of M6.8 after the 2004 Chuetsu earthquake of M6.8, *Geophys. J. Int.* **186** (1) 331-348, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05033.x,
- 尾形良彦 2016, 熊本 M7.3 地震の確率予測の試算, *予知連会報* **96** (12-23) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou96/12_23.pdf
- Ogata Y 2017, Forecasting of a large earthquake: an outlook of the research. *Seismol. Res. Lett.*, **88**, 1-10. doi: 10.1785/0220170006
- Ogata Y, 2017, Statistics of earthquake activity: models and methods for earthquake predictability studies, *Annu Rev Earth Planet Sci* **45**: 497-527 <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-earth-063016-015918>
- 尾形良彦, 2021, 階層的時空間 ETAS モデルに基づく短期・中期・長期予測および背景率予測: 自動予測の開発に向けて, *予知連会報* **105** (12-10), https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou105/12_10.pdf
- Ogata Y, 2022, Prediction and validation of short-to-long-term earthquake probabilities in inland Japan using the hierarchical space-time ETAS and space-time Poisson process models *Earth, Planets, Space*, **74**: 110 <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01669-4>
- 尾形良彦, 2024, 地震データの欠測率を考慮したトカラ列島および鳥島近海の地震活動の解析, *予知連会報* **111** (10-4).
- Ogata Y & Katsura K, 1993, Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogues, *Geophys. J. Int.*, **113** (3); <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb04663.x>
- Ogata Y, Utsu, T., & Katsura K, 1996, Statistical discrimination of foreshocks from other earthquake clusters, *Geophys. J. Int.*, 127, 17-30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb01531.x>
- Ogata Y & Katsura K, 2012, Prospective foreshock forecast experiment during the last 17 years, *Geophys. J. Int.* **191** (3); doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05645.x
- Ogata Y & Katsura K, 2014, Comparing foreshock characteristics and foreshock forecasting in observed and simulated earthquake catalogs, *J. Geophys. Res.*, **119** (11), doi:10.1002/2014JB011250
- Ogata Y et al., 2018, Exploring magnitude forecasting of the next earthquake, *Seismol. Res. Lett.* **89** (4), doi: 10.1785/0220180034
- Ogata Y & Omi T, 2020, Statistical monitoring and early forecasting of the earthquake sequence: Case studies after the 2019 M 6.4 Searles Valley Earthquake, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **110** (4); <https://doi.org/10.1785/0120200023>
- 尾形良彦, 熊澤貴雄, 2024, 系統的な欠測を伴う地震カタログから実際の活動率変化の推定: M6.5 能登半島地震の余震活動について, *予知連会報* **111**(6-2)
- Omi T et al., 2013, Estimating the ETAS model from an early aftershock sequence, *Geophys Res. Lett.* doi:10.1002/2013GL058958
- 汐見勝彦, 近江崇宏, 尾形良彦, 澤崎郁, 2022, リアルタイム余震活動予測システム: 最近 5 年間の予測実績と検証, *JpGU [SSS11-P01]*
- 統計数理, 2015, 特集「地震予測と統計モデル」 <https://www.ism.ac.jp/editsec/toukei/index.html>
- US Geological Survey, 2022, UCERF3 ETAS, <http://wgcep.org/UCERF3-ETAS.html>
- 地震調査委員会, (1998) 予測の確率評価手法について, <https://www.jishin.go.jp/main/yoshin2/yoshin2.htm>
- 地震調査委員会, 2001, 長期的な地震発生確率の評価手法について https://www.jishin.go.jp/reports/research_report/choukihyoka_01b/
- Kumazawa T, Ogata Y & Toda S, 2020, Wide-area seismicity anomalies before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. J. Int.*, 223 (2) 1304-1312, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa356>.