12-14 経験則から期待される大地震発生の確率:相場のレビュー Empirical Approaches for Forecasting the Probability of Large Earthquake Occurrence – Review of Performance

中谷 正生 (東京大学地震研究所)

Masao Nakatani (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

これこれの事象が観察されたあと一定の期間T内に、ある空間領域Rで、あるM以上の地震が 起きる確率QoNはいくらか? 「経験則による大地震発生の確率予測」とは、過去に「これこれ の事象」がおきた事例を集めて、何例中何回で地震が実際におきたかという実績(適中率)を調 べておき、次にその事象が観察されれば、Mいくつの地震がRTで発生する確率がQoNになった と発表する作業である.警報ON-OFF型の予測も、予測確率値がQoNとQoFFの二種しかないだけ で実質的には確率予測である.一方、いわゆる統計モデルでは「これこれの事象」を有無では なく程度で評価し、それに応じたQを数値(0と1の間のあらゆる値が許される)で出力するが、 これも純粋な経験則である.もちろん「これこれの事象」なしに地震が起きることもあり、地 域xの長期平均の大地震発生レート $\lambda_0(x)$ [発/単位時空]にRTを乗じて得られるベース確率Qo(x) よりQoNが大きくないと、その事象の観察は確率予測の濃淡を増す効果がない.M≥6の地震(以 下M6+)を対象に確率ゲインG=QoN/Qo(正確には λ_{ON}/λ_0)が有意に>1であると示されている経験 的な先行事象を用いた予測手法のR、T、QoN、G等を第1表にまとめた.これらの数値は予測情報 の活用を検討するために必須である.第1表の数字のうち、論文に陽に記されていないものを 私が算定したものについて、算定根拠を以下に示す.なお、QoNは正確には1-exp[- $\iint_{R,T}\lambda(x,t)dxdt$] だが、本稿では $\iint_{RT}\lambda(x,t)dxdt$ 、RTA、RTG λ_0 等で近似して簡易に算出した.

予知率は、上段に警報ONの時空におきた予測対象地震の個数/予測対象時空間に発生した予 測対象地震の総個数を示し、下段に[LL,UL]でその95%信頼区間を示した.後者は上段の分子、 分母の個数をRのbinom.test関数に入力して厳密二項分布による母比率の区間推定を行った結 果である.G (=予知率/警報分率)、Q_{ON}(=G×RT_{λ0})の区間は予知率の区間の承継である.

#1,2,3におけるRとTは,実際に出された警報の時空マップ(文献¹⁾の図6=日本周辺1985-2011の M8とMSc;文献²⁾の図4=日本周辺の1975-2003のRTP;文献³⁾のスライド13=同2003-2012)で ON-OFFがまとまって切り替わる時空領域の典型的なサイズをざっくり目測した.各手法で実 現しうる分解能(予報グリッドのサイズ)と同じか若干大きい.#1,2のGは文献⁴⁾の表1に記された 予知率と警報分率から求めたもので,全世界のM8+発生帯における平均的な値である.QoNは 日本周辺でのM8+の λ_0 を海溝沿いの予測対象域総延長約6000kmで0.15発/年とし,これに上述の Gを乗じた.#3のQoNは上述の警報マップからfalse alarmの割合をざっくり目測し,1から減じた.

#4は,先行した中地震からの距離・時間に応じて漸減するλ(*x*,*t*)を予測する⁵⁾が,ここでは, #11でこれを用いる時に採用されたRTに対する値(文献⁶⁾の表2)を示した.中地震自体のトリガ 効果も込みの数字である.

#6の警報分率は, 文献⁷⁾のGと予知率の値から警報分率=予知率/Gとして求めた.

#5,7,8のQ_{ON}はLL-ULの形で2つの数字を示してある.これらの手法は, 群発活動の特徴を量化し, それに応じて, その後に大きな地震がおきるだろう確率(すなわち, 今おきている群発活動が前震である確率)を数値出力するもので, 原理的には0から100%まで全てのQが出現しうる.

実際の出力値はその時の地震活動によって毎回異り, Q₀よりやや高い程度のQ (ということは ~0)の時に大地震が起こることもあれば、数十%という非常に高い値の時に大地震が起こること もある.もちろん、地震活動のほとんどない時にいきなり大地震が起こること(実質的には見逃 し)もあり、その場合にはQの値がQo程度あるいはそれ以下のときに大地震が起きることになる. 本稿では、警報が立った場合にそれがどれくらい恐ろしい状況なのかを示す数字としてQoNを 用いたいので、常識的にみて各手法の特徴をよく活かせるような基準で警報をON-OFFすると 想定し, 警報ONの下で実際に大地震が起きた場合に地震直前に出ていたQの範囲をLL-ULとし て示した. #7,8では予測対象であった6つのM6+のうち顕著な直前前震活動がなく予測λ値が最 低であった(それでも>λ₀ではあったが)Northridge地震に関しては警報OFFと判断する(つまり見 逃す)と想定して,残りの5つの地震の直前に震央周辺のRTに予測されたλ(#7:文献⁸⁾の図Sup.8; #8:同図2)を目で積分してQ_{ON}とした. 警報ONとみなした5つの地震のうち最も高いQ_{ON}が出て いたケース(#7:Big Bear地震; #8:Superstition Hill地震)の値がUL, 最も低いQoNが出ていたケース (#7:Hector Mine地震; #8:Joshua Tree地震)がLLである. 警報OFFとみなしたNorthridge地震直前の 予測確率Qは#7で0.1%弱, #8で約0.02%となり, 警報ONとOFFをわける閾値をこれらとLLの間 に設定したことになる.これは後知恵だが、モルチャン図(文献⁸⁾の図3)から、Northridgeを警報 OFFにすることで警報分率が非常に低く抑えられることが見てとれ、自然な設定といえる.

なお、文献⁸⁾の表2には、震央を含む0.04°グリッドに出ていた確率値が記されているが、ほと んどの場合震央から数キロ離れたところにずっと高い確率が出ている。そこで、本稿では震央 からR(M6の震源サイズより10kmとした)内で最も高いλが出ていた地点を中心とした直径Rの 範囲でλを積分した値をQ_{0N}とした。予測の段階では、もちろん正確な震央はわからず、最も高 いλがでている地点の周辺に地震がおこる確率を発表するはずだから、ユーザー側からみたQ_{0N} として意味があるのは本稿の値である。警報ONとみなした5つのケースにおいて、特に高いλ は、#7,8いずれでも直径数km以内に強く局在しており、私のQ_{0N}算出はRの選択に敏感でない.

#6,7,8は, M6+を予測するための手法だが,本稿では十分恐しい地震についての数字を知りたいので,M6+の10個に1個くらいはM7+だろうと考えて,各手法が出すM6+に対するQ_{0N}を1/10した数字を,M7+に対するQ_{0N}としてQ_{0N}欄の下段に淡い太字で示した.

#8のG=38320は, Northridgeを警報OFFとみなす場合のRIモデルに対するGとして論文⁸⁾に記さ れた値である.対応する警報分率は,論文のモルチャン図ではほぼゼロとしか読みとれないが, 予知率が5/6(=83%)でG=38320であるから,手法#8の(RIで重みをつけた面積⁹⁾で測った)警報分 率は,予知率/ゲインで0.002%と求まる.

さて、#8は#7のETASが出力するλに、活動の集中度を評価して修正を加えたλを出力するも のである. 論文のモルチャン図にETAS(対RI)の結果は示されていないが、#8対ETASの結果は 示されており、ここから#7すなわちETAS(対RI)のGが求まる. #8でNorthridge以外の5つの地震 では警報ONにするような閾値をとった場合、#8対ETASのモルチャン図から、ETASのんで重み をつけた面積ではかった警報分率が11%と読みとれる. 警報が出ている地理的な場所は、先の #8対RIのモルチャン図で警報分率が0.002%と判明した部分と同じなので、ETASによる警報ON 域にはRIに対して11%/0.002%=5500倍の重みがかかっていると知れ、これがETAS(対RI)のGで ある. このGを用いて、#7の(RIで重みをつけた面積で測った)警報分率は、予知率/G=0.015%と 逆算できる. こうしてみると、#8対RIのG=38320という高成績は、ETASからのG数千倍の貢献 が主で、これに活動集中度の評価によるG+倍弱の上乗せがあったと解釈できる. 実際、彼等 が図3に示した#8対ETASのモルチャン図をNorthridge以外の5つに警報を出すという閾値(警報 分率11%の点)で読むと、#8対ETASのGは予知率83%/警報分率11%=7.6倍である.文献⁸⁾では#8 対ETASのGとして4.5倍という数字をあげているが、これはNorthridgeには警報を立てないとい う閾値操作を行わない場合の評価である.

文献⁸は、#8を提案するものだが、その途中過程で作られたETASによる予報#7が数千倍という高いGを示したことも重要である.ETASで大地震の発生が予測されるとすれば、実際には、大地震が前震活動の余震として起きたにすぎない¹⁰⁾ことになり、前震活動を大地震直前の地下に特別な物理状態が出現したシグナルだと解釈する「前兆モデル」を必要としないからである.(ただし、#8はETASを確実に上回るGをもっているので、大地震に対してETAS的トリガ効果も寄与するが、それでは説明しきれない前兆的活動も実在することを示唆する).逆に、ETASで高いGが得られるなら、群発活動によるトリガ効果だけで大地震の予測に対してかなりの性能が得られることになるが、ETASの有効性が確立しているのは小地震の教の予測に関してであって、大地震の予測に使うには、予測された小地震のうちのある割合のものは実は大地震であろうという仮定(GR則など)が必要である.#7は予測対象の地震が6つしかなく、ETASを用いて大地震を予測することの経験的裏づけとしては弱い.これに関して、加州で1769-2011年におきた53個のM6.5+が、小地震を予測するのと同程度によくETASで説明されることが示されている¹¹⁾.また、1984年以降の9個のM6.5+直前のETASによるλは、4つについてはλ₀と大差がなく、残りの5つについてはその100倍から100万倍の高い値が出ている(文献¹¹⁾の図S9).

先述したように#5のQoNも,疑わしい群発活動があって実際に地震のおきたところに,実際 に出ていた確率値の範囲を示している.この手法は予測対象を大地震に限らず,その時点まで の群発活動の最大地震よりM0.45以上大きなものがおきる確率を予測するので,非常に多数の 地震で検証されており,出された予測確率値が実際に合っていることがクロス表で直接,しか もプロスペクティブに確認されている.ULを21.5%としたが,実際にはもっと高い確率値が出 ていた場合もある.しかし,高い確率値が出た例数は少く,文献¹²⁾の表5では予測確率15-100% をひまとめに評価している.そこで,15%以上の確率値が出ていたところで実際に本震がおき た割合である21.5%をULとした.同様に,ULの2.2%は,文献¹²⁾の表5で最も低い区分である予 測値0-2.5%のときに実際に地震がおきた割合である.なお,このクロス表の最低区間には確率 0が入っているが,この表は時空間的に近接した地震が2つ以上おきた場合についてのもの(これ を疑わしいとして着目する活動,即ち警報ONの基準とみなす)であり,最低でも0.01%程度,そ の後実際に本震がおきた場合に限れば,1%以上のQoNが予測されている(文献¹²⁾の図4a).また, この手法は大地震だけを対象にしたものではないが,実際にM6.5+が起きた場合だけに絞って も同程度の予測性能を示している(同図4b).

#9のRは彼等¹³⁾の予測グリッドの大きさである.彼等の定義したTEC値の異常度が100%を超 えた場合を警報ONとみなし,対象地震を20km以浅のM7+とした時の成績を示した.この条件 で予知率(異常の出現率)が特に高くなるT=1日を警報の有効期間として評価した.予知率,警報 分率,Gは論文中に書かれていた数字を検算し,丸め誤差と思われるものを微修正した上で示 した.Q_{0N}は,日本周辺でのM7+のλ₀を3発/年とし,Gを乗じた.

#10の警報分率は≪10%としてあるが、この10%という数字は、東北地震前の三週間に対して、 巨大地震前のVTEC時系列の折れ曲り現象を判定したのと同じ客観検出アルゴリズムを適用し て評価した同形態の異常の出現頻度¹⁴⁾に基く.この期間のうち二週間は宇宙が荒天で、また、 前兆と目された異常とは違い,LSTIDと思われる移動性から宇宙起源と判定できるものが多い. よって、10%の警報分率は明らかな過剰評価なので≪10%とした.G及びQ_{ON}の≫は,警報分率 の≪の承継である.Q_{ON}の計算には、#1,2と同じ日本付近でのM8+のλ₀を仮定した.false alarm の多くは宇宙起源で移動性等に着目して除去できるが、宇宙起源でなく原理的に除去不可能な 異常の出現頻度は調べられておらず、実用価値のあるレベルまで改善可能なものかは分からな い.むしろ、#10で刮目すべきは予知率の高さ(12/12)、異常パターンの再現性、そして、振幅 がMに依存するという点である.このような特徴を併せ持つ先行現象は、私の知る限りこれだ けである.これらの特徴は、地震の数十分前に、今から起きる地震の大きさを決めてしまうよ うな物理状態が地下に出現することを示唆し、(地震の大きさは動的破壊の最中にいつバリアに 出くわすかで実質偶然に決まるものだから)決定論的な予知につながるような直前準備過程は 実在しなかろうという考えを覆す¹⁵⁾.なお、対象Mを~8+と~をつけたのは、異常の振幅が背景 TECに依存するという事情を汲む.厳密には、Mw8.2+に対して予知率10/10, Mw8-では異常が 見えないことが多いが、背景TECの特に強い日におきたMw7.8に対しては2/2である.

#11は、多数の地震での成績評価ではなく、熊本地震の本震(2016年4月16日, M7.3)に対して経 験則を適用してQ_{ON}を求めた、いわば経験則による確率予測の実戦演習例である.長期(ERCに よる九州中部の30年予測の半値)、中期(2005年及び2016年のM7地震の余震静穏化, #4)、短期(本 震の28時間前のM6.5から始まった地震活動の前震確率, #5,11')の三種の先行現象を独立事象と 仮定し、それぞれから得られるGの掛算で高いQ_{ON}が実現している.Gは論文⁶の表3のQ_{ON}と表2 のλ₀から求めた.LL-ULの形で2つの数字を示したが、これは検討された二種のλ₀値に対応する. また、用いられた先行現象で最も短いTをもつ#5は、T=30日に対して確立されたものなので、 T=1日に対する数字は、参考値として下段に淡い太字で示した.#11'のGは、論文⁶の表2のQ_{ON} と表2のλ₀から求めた.#11で最もGを嫁いだのは前震(#11')だが、それ単独では数百倍に留まる.

参考文献

- 1) Kossobokov, V.G. (2011), Are Mega Earthquakes Predictable?, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 46, 951–961, doi:10.1134/S0001433811080032.
- Shebalin, P. et al. (2004), Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M = 8.1 A case history, EPS, 56, 715-724.
- 3) Shebalin, P. (2012), Large-scale short-term seismicity activation prior to the strongest earthquakes in and near Japan and Kurile Islands, EMSEV 2012, Gotemba, Oct. 1-4.
- 4) Kossobokov, V.G. (2017), Testing an Earthquake Prediction Algorithm: The 2016 New Zeal and and Chile Earthquakes, PAGEOPH, 174, 1845-1854, doi: 10.1007/s00024-017-1543-9.
- 5) Ogata, Y. (2001), Increased probability of large earthquakes near aftershock regions with relative quiescence, JGR, 106, 8729-8744.
- 6) Ogata, Y. (2017), Forecasting of a Large Earthquake: An Outlook of the Research, SRL, 88, 1117-1126, doi: 10.1785/0220170006.
- 7)前田憲二・弘瀬冬樹 (2016),前震活動に基づく地震発生の経験的予測,予知連会報,95,415-419.
- 8) Lippiello, E., et al. (2012), Spatial organization of foreshocks as a tool to forecast large earthquakes, Scientific Reports, 2:846, doi: 10.1038/srep00846.

- 9) Zechar, J.D. and T.H. Jordan (2008), Testing alarm-based earthquake predictions, GJI, 172, 715-724, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03676.x
- 10) Helmstetter, A. et al. (2003), Mainshocks are aftershocks of conditional foreshocks: How do foreshock statistical properties emerge from aftershock laws, JGR, 108, doi: 10.1029/2002JB001991.
- 11) Hardebeck, J.L. (2013), Appendix S-Constraining Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS)
 Parameters from the Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 3 Catalog and
 Validating the ETAS Model for Magnitude 6.5 or Greater Earthquakes, USGS Open-File Rept.
 2013-1165-S and California Geol. Surv. Special Rept. 228-S.
- 12) Ogata, Y. and K. Katsura (2012), Prospective foreshock forecast experiment during the last 17 years, GJI, 191, 1237-1244, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05645.x.
- 13) Le, H. et al. (2011), A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002–2010, JGR-A, 116, doi:10.1029/2010JA015781.
- 14) Heki, K. and Y. Enomoto (2015), Mw dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements, JGR-A, 120, 7006–7020, doi:10.1002/2015JA021353.
- 15)日置幸介 (2018),前兆は地震直前に電離圏に現れる,パリティ「地震のメカニズム解明-本 当に地震予知はナンセンス?」, accepted.

 Table. 1
 Performance of various empirical methods for mid-term to immediate forecasting of large earthquakes.

	データ *はprospective	М	R, km	т	適中率 (Q _{ON})	警報分率 [†] 地域補正済	予知率	Gain [†] 地域補正済
#1. M8 Kossobokov 2017	広域地震活動 世界, 1992-2016*	8+	~1000	~6年	33 [27, 57]% 日本のλ₀を仮定	29.8%†	15/23 [43, 84]%	2.2 [†] [1.8, 3.8]
#2. MSc Kossobokov 2017	広域地震活動 世界, 1992-2016*	8+	~500	~6年	20 [10, 32]% 日本のλ₀を仮定	14.8%†	9/23 [20, 62]%	2.6 [†] [1.3, 4.1]
#3. RTP Shebalin 6 2004, Shebalin 2012	広域地震活動 日本, 1975-2011*	7+	~1000	~9ヶ月	~50%	7.7%	14/15 [68, 99]%	12 [8.8, 13]
#4. 余震静穏化 Ogata 2001, 2017	余震活動 日本, 1926-2000	7+	200	1年	2%			~10
#5. 前震な確率 Ogataら 2012	群発活動 日本, 1994-2011*	Δ0.45+	30	30日	2.2 - 21.5%			
#6. 前震識別 前田ら 2016	群発活動 三陸, 1994-2011	6+ 7+	50	4日	13/44 = 30% 3%	0.1%	11/29 [21, 58]%	380 [210, 580]
#7. ETASに閾値 Lippielloら 2012	地震活動 南加, 1987-1999	6+ 7+	10	1日	0.2 - 2% 0.02 - 0.2%	0.015%†	5/6 [36, 99]%	5500 [†] [2400, 6600]
#8. 前震な確率 Lippielloら 2012	群発活動 南加, 1987-1999	6+ 7+	10	1日	1.5 - 25% 0.15 - 2.5%	0.002%†	5/6 [36, 99]%	38320 [†] [18000,49500]
#9. GIM TEC LeG 2011	GIM TEC 世界, 2002-2010	浅7+	300	1日	0.07% 日本のλ₀を仮定	4.4%	10/65 [8, 26]%	3.5 [1.7, 5.9]
#10. GNSS TEC Hekiら 2015, 日置 2018	GNSS TEC 世界, 1992-2016	~8+	400	1時間	≫ 0.001% 日本のλ₀を仮定	« 10%	12/12 [74,100]%	» 10
#11. ゲイン掛算	長,中,短期	₆ 7+	90	30日	39 - 79%			2200-9600†
Ogata 2017	熊周, 1923-2016			1日	2 - 10%			3400-37000†
#11'. 前震のみ	短期 1002 0016 7+	7+	90	30日	5%	_		290-620 [†]
Ogata 2017	账问,1923-2016			1日	0.17%			290-630