

12 - 6 第 225 回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行 06」の検討（概要）  
リアルタイム短期予測の実施と評価について  
**Summary of “Trials of experimental earthquake forecasts #06: Implementation  
and evaluation of real-time short-term forecasts”**

尾形良彦（統計数理研究所）

Yosihiko Ogata（The Institute of Statistical Mathematics）

地震の被害軽減に備えるために参考となるべき情報には、各地域での長期・中期・短期の様々な確率予測と、それらの合わせ技（多重確率予測）<sup>1,2)</sup>が考えられるが、地震の発生記録などの各種データが、リアルタイムで得られる現在、最も要請されるのは短期予測であろう。しかし「危険性が平時よりも高くなった」などの定性的な説明だけでは、現状に十分応えられたものと言えなくなってきた。起こりうる各シナリオに対して危険度を数量的に見積もった確率的予測を提示することが要請される。そのような予測能力の向上を目指すためには「予測実験の試行」を重ねて、予測結果を付加し、確率利得や情報量利得（対数尤度比）などを求め、有効性の評価や成績比較を行うことが肝心である。

今回の検討課題は、前震の確率予測、本震直後の余震の確率予測や最大震度予測、そして時間・空間の地震活動予測や地震活動の異常検出など、短期予測について以下の課題の試行、結果の評価など現状報告講演を企画した。報告内容は以下のとおりであった。

#### 報告の概要

##### (A) 前震予測.

或る地域で中規模の地震が起き始めたとき、順次、これが余震を伴って無事終焉するのか、より大きな地震が起きるのかを、統計的に識別することである。その確率予測の試行と評価について報告していただいた。

前田憲二氏（気象研究所）は伊豆地域などの特定地域に対して現在まで実行中のリアルタイム前震予測結果をまとめた。評価として各地に適用した ETAS モデルと伊豆地域に適用した時空間 ETAS モデルによる合成カタログ（ただしマグニチュードは GR 則または切断 GR の独立列）と実際の JMA データとのもとで比較を行い、予知率、的中率および確率利得が有意に高いことを報告した。本震に至る時間的切迫率についても合成カタログのものより平均 4 倍以上になっている。

野村俊一氏（統計数理研究所）は全日本や全世界の前震予測の結果とその予測の評価のまとめを報告した。将来の本震のマグニチュードや本震発生までの時間間隔について、経験的に予測確率の変化を求め、それぞれの予測確率と実際の結果のクロス集計表から予測が有意であることを示した。また予測設定を特殊化して先行研究の前震予測方式との性能を比較した。さらに、前震確率に基づいたマグニチュード列の従属性が、独立同分布の GR 則より、情報量利得が国内外の地震とも有意に勝れていることを示した。

##### (B) リアルタイム余震予測.

大地震の直後には余震が多発するため、地震計記録上で波形が互いに重なり合い、震源決定を行うことが困難である。しかし実際には本震直後の最初の 1 日のうちに、大きな余震は全体の半数ほ

ど、連鎖する大地震も半分ほどの確率で起きる。したがって、地震発生 24 時間以内のできるだけ早い機会に、本震より大きな地震発生の可能性を含む、確率予報をすることが重要である。

近江崇弘氏（東京大学生産技術研究所）は、防災科学技術研究所の Hi-net の自動処理震源データを用いた余震活動予測の、最近数年間の内陸被害地震などについて、本震直後から 3 時間経過後のリアルタイム確率予報の試行が、その後編集されたデータに基づくものに比べて遜色なく機能していること、さらに事前に決められた標準（generic）予測モデルより有意に有効であることを示した。熊本地震の最初の余震活動の様に、本震よりも大きな地震が発生する確率は比較的大きな値（1 日確率で 30% 弱）であったが最近 2 年間の内陸部の被害地震（6 例）については 10% 以下であった。

澤崎 郁氏（防災科学技術研究所）は震災地域と周辺部の各地点で、本震直後から連続地震計記録の局大振幅（分割小時間区間の最大振幅）列から大余震の確率的震度予測を考えた。具体的に Hi-net 地震計の余震波形記録の極大振幅データに対して、時変パラメータの極値分布族（非定常 Frechet 分布）を推定し、将来の局大振幅の確率分布を予測した。二次余震の効果を考慮していないことと、Hi-net 地震計の最大振幅の飽和のため、現時点では過大な予測をする偏差があるので、今後これらの課題を克服し実用化を目指すということであった。

### (C) 時・空間 ETAS モデルまたは非定常 ETAS モデルによる地震活動予測。

リアルタイムで得られる広域の地震活動度の推移について ETAS モデルが短・中期の確率予測にどう関わるかの現状について検討した。また、GNSS やひずみ計傾斜計データなどを使った地殻変動と地震活動予測との関係の研究は必要である。

西川友章氏（京都大学防災研究所）は、日本列島のプレート境界の地震活動について、各地域の標準 ETAS モデルをあてはめ、異常な地震活動（群発地震など）である確率を準リアルタイム（4 時間毎）で自動検出している。この試行を継続することで、同期するスロー地震や、それが大地震の前兆である経験確率を求めることを狙っている。モニター結果はホームページ上で公開し、2019 年 4 月から 9 月の半年間に熊本と種子島沖で群発地震を検出した。異常な地震活動は、巨大地震の前駆的活動のみならず、スロースリップや流体移動など様々な要因で多々発生するので、本モニタリングの検出異常が大地震の予測に役立つか否か評価するために継続する意味がある。

熊澤貴雄氏（東京大学地震研究所）はニュージーランド北島ヒ克蘭ギ沖、房総沖や茨城沖で、非定常 ETAS モデルの常時地震活動時変パラメータ  $m(t)$  が上昇する各ピークがスロー地震時に伴う群発地震活動に対応している例を示した。GNSS や体積歪みなどの測地学的異常変化と  $m(t)$  の変化との因果関係を考慮し、その予測の可能性について報告した。典型的な例として、伊豆東方沖においてマグマ上昇に伴う体積ひずみ計の較正済み記録の差分値から、群発地震活動の推移の  $m(t)$  予測が例外なく極めて良好であることを示した。

コンビーナ（尾形）から、階層的時空間 ETAS モデルに関する地震活動の短・中期予測結果例の資料が提出され、これらがリアルタイムで良好に実施できることが示された。すなわち、既に CSEP 日本で予測実験中の時空間 ETAS モデルによる余震の時空間予測（高精度版）の結果や、3 次元・時空間 ETAS モデル（東北沖地震の誘発効果を含む）による関東地域直下 100 km 深までの地震活動の予測結果が示された。

### 議論のまとめと補遺

予測に関する重点検討課題は 2010 年 6 月の第 187 回予知連の重点課題「地震活動について」に

始まり、以来「地震発生の予測実験の試行」と題する重点課題シリーズが、2013年の第200回予知連以来7年経過し今回で6回目となる。これまで多様な観点から地震予測とその評価に関する取り組みについて多くの報告があり、本年3月の予知連50周年記念講演会では確率予測の現状が取りまとめられた。今回の重点課題では、短期予測、リアルタイムモニタリングを中心に、新予測の提案、試行、結果の評価など、実用化に向けた課題を議論した。

(a) 前震予測. 前震などの異常の識別には経験的・統計的なアプローチに多く依存しており、最適モデルの作成には機械学習の分野からの参入も考えられるが、そのためにも確率予測の性能に関する評価基準を確立する必要がある。たとえば、天気予報の Brier score と違い、確率利得や情報利得は大きい地震と小さい地震の的中率の評価の明確な差別化が含まれている。比較対象となる基礎モデルとしては通常、計算し易い定常ポアソン過程、独立 GR 則またはその修正版などがあるが、今回は（時空間）ETAS モデルも採用されている。

今回の2報告でも、独立なマグニチュード列で生成された ETAS 合成データより気象庁や PDE マグニチュード列の実データの方が、前震予測結果が、それぞれの評価基準で卓越していることが実証されている。また、数件の先行研究もあるが、今回の報告例でも前震のマグニチュード列予測モデルの評価が、独立の GR 則に基づくものより優れていることが示された。

結果的に大地震が不意打ち的に起きる（予知率が極めて低い）ことを避けるためには、低い適中率でも出来るだけ前兆予備軍として多くの異常現象を発掘する必要がある。そのために、的中率が低くとも地域的に限らず与えたい。また下限マグニチュード（後者は日本周辺では M4）を下げれば予知率が上がり、内陸部に適用する価値がある。

さらに、ほぼ場所が特定されており短期的予測ということもあり、一般に確率利得は高いが、前震の予測の多くは小標本に基づくので、多種類の予測を並列的に使い、確率予測の偏りを含むバラツキも知りたい。仮定や設定や計算手法によって確率はばらつく。それらのばらつきを前提に多くの手法で確率予報と結果を記録し、CSEP プロジェクトの様に、今後リアルタイムで継続され評価されることを期待する。

(b) 余震予測. これまでの10例ほどの余震の早期予測から本震（と思われていた地震）よりも大きな地震（2016年熊本地震や2019年 California Ridgecrest 地震）の確率予測は、それなりに大きな確率になっているので、前震の予測としても参考になる。自動処理震源データを用いたリアルタイムの余震活動予測が今後も継続するので、試行を重ね、実用化に至ることが期待される。情報の一般公開についてはカリフォルニア（USGS）やニュージーランド（GNS）での先行事例があるが、日本に於ける早期予測の公開のあり方についても、場合によっては社会学的識者も参画して、議論を始める必要がある。

地震動の連続記録の極値は Frechet 分布となることが知られているが、Hi-net の地震計の振幅飽和があるというなら、報告された偏りは、どのようなものか KiK-net や K-net の記録と比べて統計的な補正が可能か否かを調べる価値があるかもしれない。また減衰する Frechet 分布族の非定常性の時変パラメータ化に関して改善の余地がありはしないか検討したい。全日本で実用化するなら多数の震度計に関して同様な研究は望まれる。

(c) ETAS. 地震活動の地域別の標準 ETAS モデルの平時の変化からの外れを量的に示すこともつ

て異常を定義し、例外なくモニターすることで、スロー地震や大地震前の前駆的活動の予測をするための事例を積み重ねることは、少なくとも予知率を高める意味がある。同様に測地計測量に対して既知の諸因子による較正を施したターゲット経時変化の標準モデルをたて、平時の変化からの外れに基づいて予測率を高め、予知に繋がりそうな知見や異常事象を定量的な予測に結び付ける必要がある。そして地震発生危険度の変動を量的に示す必要がある。そのため定常 ETAS モデルで再現し辛さの確率時系列の算定や非定常 ETAS モデルの  $m$  値の時間変化で検出することで群発地震の検出が考えられるが、それらが流体効果などの多様な未知の物理学的地質学的諸要因に基づくと思われるので、それらの予測識別の研究が進まなければ、大地震の的中率向上には繋がらないだろう。しかし、それらの評価のためには、多数の事例の積み重ねが可能である。的中率が低い場合には前兆の識別には大きな不確定さが伴うので、予測を積み重ね、低いなりに安定した的中率の経験分布（範囲など）を求める必要がある。その上で各地域での長期・中期・短期の様々な確率予測と、それらの合わせ技（多重確率予測）<sup>1,2)</sup>を有効に実施すべきである。

#### 参考文献

- 1) 統計数理研究所, 熊本 M7.3 地震の確率予測の試算, 連絡会報 96 (12-23), 658-661.
- 2) Ogata, Y. (2017). Forecasting of a Large Earthquake: An Outlook of the Research, *Seism. Res. Lett.*, 88 (4), 1117-1126, doi:10.1785/0220170006.