

「特集 地震予測と統計モデル」について

尾形 良彦[†] (オーガナイザー)

地震は複雑な現象ゆえ、その発生を決定論的に予知する特效薬は無く、確率予測の現実的な展開が模索されている。では、どのような確率予測が実現できるのだろうか。その展望の一端を示し研究戦略を提示するのが本特集の目標である。

大地震の発生予測の手掛かりになるのは各種の観測データの異常値であろう。しかし、それが大地震の前兆なのか、どの程度切迫性があるのかの識別には大きな不確かさが伴う。それゆえ、大地震の危険度を数量的に示す確率的予測が必要である。地震の発生予測において前兆現象と異常現象は明確に使い分ける必要がある。前者は既に大地震が起きてしまったからの概念であり、後者はデータの異常値が示す「前兆かもしれない異常現象」である。地震発生予測では先ず異常現象が前兆現象である確率が問題となる。たとえば「前震」は本震が起きてから認定されるもので明らかに前者の概念であり、直接予測にはつながらない。現時点で得られる地震群の性質を手掛かりに、それらが前震である確率を見積もる異常性の統計的判別が不可欠である。

大地震の確率予測の実用化には、各種観測の積み重ねによって「異常現象」を定義し、それらが「前兆」である確率を見積もり、その確率利得を求める必要がある。ここで確率利得とは「大地震発生の子測確率が基準の確率にくらべ何倍高くなるのか」という意味である。もとより、大地震を高い確率利得で予測するためには地震発生の仕組みや観測異常現象の包括的な研究が不可欠である。また一種類の異常現象では高い確率利得で予測するのは困難であろうが、いくつかの異常現象が重なって観測されれば確率利得は高めることができる。しかし、何の異常現象も観測されることなく、大地震が起きる場合も多く、現状では見逃し率が高い(予知率が低い)。予知率を高めるには、異常現象検出の高度化、すなわちモニタリングの高度化を目指す必要がある。長期、中期、短期、直前の異常現象を探し、各々の予測確率を見積もり、それらを組み合わせるのが有望な策である。ちなみに、前震活動は短期的前兆現象で、地震活動静穏化は中期的異常現象の代表例である。

国際的共同研究 Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) は、地震活動の標準モデルの開発を促し、確率予測の観点から性能を評価することを当初の目標としている。それは、地震活動、地殻変動、電磁気変動などの様々な観測異常に基づく各種の地震予測手法の有意性と確率利得を評価できる科学的なインフラ(共通基盤)を整備することでもある。CSEP は先ず、基準の確率予測を与えるために、世界の各地域に適合した標準相場の地震活動モデルの成立と、それらの改訂を進めようとしている。そもそも、何かしらの異常が認められたとき、それが来るべき大地震の前兆であるか否かの識別は容易でない。黒白の判別は不可能としても、この異常の出現は、この範囲この期間の大地震の発生確率を、基準のものと比べて、この程度まで増加させると言えるようになればよい。つまり、異常現象の大地震発生への前兆性や切迫性の不確かさを時空間的に見積もる必要があり、そのためには数多くの事例研究に基づく各種因果関係を組み込んだ確率予測モデルを構築しなければならない。もし有用な知見が組み込まれた新予測モデルが提案されれば、標準モデルと比較して、予測力が向上したか否かの評価ができる。

[†] 統計数理研究所 名誉教授：〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3

以上のことを統計地震学の言葉で端的に言うと、地震の確率予測の実用化のためには点過程の「条件つき強度関数」のモデル化を創意的に進める必要があるということになる。点過程は突発的な確率的事象を抽象化した数学的モデルであるが、なかでもその中心的概念である「条件付き強度関数」は事象発生の切迫度(確率の時間微分)の予測と直結している。筆者は因果性解析や危険度予測を含む各種の点過程モデルやベイズモデルなどがその中核になると考えている。

本特集の尾形論文は上記に述べた全体展望を詳しく解説している。次いで庄・尾形論文は確率予測の評価法とその意味を解説している。さらに、現状では確率予測までには至らない警報型予測が容易であることに鑑み、これらの予測結果に対する評価法についても解説している。熊澤論文は、地域性に合った標準の地震活動の点過程 ETAS モデル、それを基準にして相対的静穏化や活発化などの地震活動異常を炙り出す点過程の診断解析、および詳細な構造変化を捉えるベイズ型非正常 ETAS モデルについて詳説している。近江論文は余震活動のリアルタイム短期予測と中期予測について解説している。特にデータ欠損に起因する本震直後の業務予測の技術的な難しさを克服しており、すでに実用化に向けて大きく前進している。野村論文は、活断層やプレート境界の大地震の長期予測について、現状の業務予測を改善する提案を含んだ解説を与えている。またプレート境界で発生する小規模の「繰り返し地震」の発生間隔からそこでの「ゆっくり滑り」に起因する応力変化を可視化する時空間点過程モデルについて解説している。松浦・野田論文は GPS データから地震発生予測に不可欠な地殻の応力状態と強度分布に関する情報を導くベイズ型インバージョン解析について解説している。GPS 観測の時空間データから地殻活動異常や地震活動との関係を炙り出すために、地殻特性や歪の蓄積などの地域性に合った標準モデルを構築する指針となろう。最後に、岩田論文は地球潮汐などの周期的な応力変化と地震活動との相関の有無が、地殻の応力状態を知るための指標となり得ることを指摘し、地震発生との関連性について解説している。更に、相関を効率的に検出するための統計的 point 過程モデルに関する提言を行い、この分野の今後について展望している。

これらの論文を通じて言えることは、地殻という複雑系で生起する諸現象を解明し予測にかなげるには統計地震学の手法が欠かせないということである。データが膨大であればあるほど、本質的で確かな情報を抽出するために時間的空間的に非正常または不均質なモデルを考慮する必要がある。これらの統計モデルを用いた研究が避けられないようになってきた。逆問題や時空間モデルなどの大量の未知パラメータを含む大規模モデルを取り扱うにはベイズ法の助けが必要である。実際、各種データの膨大な情報をもとに地震活動の時空間的多様性を反映するモデルを構築するには階層的なベイズモデルを用いて解析・予測をする必要がある。従って、地震にかかわる統計学(統計地震学)抜きでは地震予測の研究自体が難しくなっている。このように、統計地震学は現在、地殻という複雑系の研究と地震予測にとって必須であることを理解していただきたいと思う。また本特集は複雑な現象の確率予測に接する一般の人達や地震予測に携わっている研究者や実務者の理解促進を希望する意図もある。なお本特集は URL <http://www.ism.ac.jp/editsec/toukei/tokeisuri-63j.html#NO1> で参照可能である。

最後に、本特集号の著者および査読者の皆様に深く感謝する。松浦充宏先生には編集委員としてご尽力いただいた。なお本特集は科研費 26240004「リアルタイム地震確率短期予測の実践と大地震の中期予測の実用化の研究」の一環として企画・出版されたものであることを付記する。