

12-10 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（建議）」における物理モデルに基づく地震発生予測

Studies on earthquake forecasting based on models of fault dynamics in a proposal for a new national research plan of generation of earthquakes and volcanic eruptions

日野亮太（東北大学災害科学国際研究所）

Ryota Hino, International Research Institute of Disaster Science,
Tohoku University

平成25年11月に地震および火山噴火に関する観測研究の次期5カ年の方向性を示すものとして、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」が建議された。この建議においては、地震・火山噴火の発生予測に目標をおいてきた従来の方針を改め、地震・火山噴火の発生による強震動や津波、溶岩や火山灰の噴出といった災害誘因の予測にまで対象を拡大することにより、地震や火山噴火に起因する災害を予知し、これを軽減することに目標が移された。こうした新しい建議の中にあつて、地震・火山噴火の発生予測に関する研究は、長期的な防災・減災対策の基礎となる発生頻度と規模の評価を行うものと、日本国内に整備された観測網のデータから地下の状態を把握しその推移を予測するものとに整理された。地震や火山噴火の確実な発生予測を行うことは、当面困難である一方で、予測情報は防災・減災に対して大きな波及効果をもつと期待できることから、予測の実現にむけた継続的な取り組みの必要性が指摘されている。ここでは、後者の地下の状態把握（モニタリング）に基づく予測のための研究のうち、断層すべりの物理モデルと観測データとの統合によるプレート境界地震の発生予測について、具体的にどのような観測研究が行われようとしているのかを概観する。

日本列島下に沈み込む太平洋プレートおよびフィリピン海プレートと上盤側の陸のプレートとの境界面に沿って、地震（高速なすべり）とその準備過程であるプレート間固着の他に、多様なすべり現象が発生していることが、基盤観測網が整備された結果得られた大量・高品位の地震・地殻変動観測データによって明らかにされ、データが蓄積されるにつれて、そうした活動の空間分布や時定数に規則性があることが認識されるようになった。たとえば、フィリピン海プレートが沈み込む西南日本沿いでは、プレート境界型大地震の発生域より深部側と浅部側の延長領域において、長期的スロースリップイベント（SSE）・短期的SSE・超低周波地震・低周波微動といった、特徴的時間スケールの異なる非地震性すべりイベントが、発生領域を異にして棲み分けるように発生していることが明らかとなっている。プレート間大地震と多様な非地震性すべりイベントのプレート境界面上での棲み分けは、面上での摩擦状態が空間的に変化していることを反映しており、摩擦則パラメータを空間変化させた物理モデルを用いた数値シミュレーションにより、観測された特徴の説明がされるようになってきた。こうした、観測上の発見とそれを説明しうる物理モデルの進化が、物理モデルに基づく地震発生予測を目指した研究の背景である。

発生直後には「想定外」と捉えられた2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）であっても、精力的な研究によって、その発生を再現できるような物理モデルがすでに多く提案されている。このことは、地震の発生過程を支配する物理法則の解明が、想定されていなかったような未知の地震現象も説明できる程度に進んでいることを示している。しかし、東北沖地震の発生を説明するため

に提案されたモデルに大きな多様性があることを考えると、物理法則を実際の地震発生場に落とし込むモデル化の過程に不完全な部分が残されており、それが物理モデルに基づく地震発生予測を実現するための最大の課題であって、この課題を克服することが今後の研究の主要な流れとなっている。

地震発生予測に用いる物理モデルの不完全さを軽減するためには、観測事実を説明できるようにモデルを絞り込む、という帰納的な手段しか考えられない、というのが現状であろう。その最大の原因は、プレート運動による歪の蓄積と解放の過程がもつべき時間スケールからみて、地震・地殻変動観測によるデータが蓄積できた期間ははるかに短く、物理モデルによって説明が可能となった既知の現象は、地震発生のサイクルの中で現れる事象のごく一部であるに違いないからである。そうした制約の中で物理モデルの進化の効率を高めるためには、プレート境界面上で発生するすべり現象の中でも繰り返し間隔の短いイベントに着目して、帰納的なモデル更新のサイクルを加速することが有効であると考えられる。こうしたことを背景として、非地震性すべりイベントが頻繁に発生する南海トラフと、東北沖地震の震源となった日本海溝沿いの地震発生帯の研究が、プレート間地震の予測研究の中心的な位置を占めることになる。

南海トラフ沿いで発生する非地震性すべりイベントのなかでも、比較的規模が大きい日向灘 SSE と房総沖 SSE は、これまでに発生したイベントの発生間隔を前提にすると、今後5年の間に次のイベントが発生する可能性が高く、予測モデルを進化させる貴重な機会であると捉えることができ、これを待ち受けるような集中観測（「待ち受け観測」）を基本とした研究が提案されている。対象を絞り込んで観測資源を投入することにより、効果的にモデル改善に必要なデータが得られると期待できる。さらに、従来の地震活動や地殻変動の時空間変化の推移をモニタするだけでなく、地下構造や重力場・電磁場の変動といったさらに多岐にわたるモニタリングが試行できる、というのも「待ち受け観測」のメリットである。地震発生が切迫していると評価されていた宮城県沖での海底観測は、こうした「待ち受け観測」の前駆的な形態であって、まだ実績の乏しかった海底地殻変動によるデータが、結果的に東北沖地震の震源像の理解や地震発生前後に震源付近で発生する現象の捕捉に重要な役割を果たしたことを考えると、多項目の「待ち受け観測」がプレート間でのすべり現象のモデル更新に果たす役割は大きいと期待できる。また、これらの SSE の発生時期に、低周波微動や浅部超低周波地震の活発化（日向灘）や、小繰り返し地震を含む地震活動の活発化（房総沖）で見られることが知られている。こうした異なる場所で発生し異なる時定数で特徴付けられるすべり現象の相互作用のモデル化が現在進められており、そうした最新のモデルによって、次に起こる SSE に付随する各種イベントの相互作用の推移をどの程度予測できるのかは、おおいに注目される。

東北沖地震の震源域やその周辺は、余効すべりと断層強度回復とが競合した状態にあると考えられる。東北沖地震の発生過程を説明する複数のモデルは、東北沖地震に相当する巨大地震後での断層の振る舞いに大きな相違があり、震源域で実際に観測される現象を把握することは地震発生を予測するための物理モデルの範囲を絞り込む上で重要な役割を果たす。また、東北地震発生以前には、10年程度の時間スケールでの固着強度の低下や、約2ヶ月前に SSE が発生したこと、また前震活動中のゆっくりすべりの伝播など、注目すべき現象が観測されているほか、地震発生後には浅部低周波地震の活動が見られるようになったという報告もあり、日本海溝沿いでも断層すべりの発生様式に多様性があることが認知されるようになりつつある。南海トラフと異なり、日本海溝沿いでのすべりイベントの多様性については、それを十分に説明できるモデルの構築が行われておらず、今後の研究の重要な課題といえる。一方で、東北沖地震発生前の各種のゆっくりすべりは、相互に作用

し合いながら巨大地震発生のきっかけを作った可能性もあって、西南日本での研究ともあわせて、こうしたゆっくりすべり発生の予測研究は、大地震の発生予測につながるものである。そういう意味では、今後東北沖での観測結果をベースにした物理モデル改良と同時に、その物理モデルと東北沖地震前の観測データを用いた、東北沖地震発生に至る過程の *retrospective* な予測の試行は重要な研究の方向性であろう。

一方で、現行の物理モデルと実時間のモニタリング結果を活用した予測の試行も進めなくてはならない。予測に用いる物理モデルには、モデルそのものに多様性があるばかりでなく、ある一つのモデルをとってみても、その特性を決定づけるパラメタの値やその空間分布の中には、地下構造探査などで定めることが難しいものが多く含まれる。こうした多種多様なモデルに基づく予測は大きなばらつきをもつため、個別の予測値の信頼度は必ずしも高くない。しかし、予測結果とモニタリングとの比較から、両者の適合度の低いもの（予測性能が低いもの）の淘汰を繰り返すことによって、予測結果を絞り込むことが可能となる。従来のモデルを構築し更新することを目的とした研究と異なり、予測の試行においては、予測結果とモニタリングとの比較が系統的に行われる必要がある。予測結果のモニタリング観測結果への適合度から、予測に用いたモデル（パラメタ）の絞り込みを行うための方法の開発は、こうした研究での重要な着手点である。

予測の試行に必要な「系統的な比較」は個別の研究グループで取り組むのは必ずしも容易ではなく、コミュニティとして協調して検討すべき課題もある。たとえば、予測される断層すべりの時空間発展は直接観測されないので、予測値と観測量とをつなぐスキームを明確化しなければならない。比較を行う際に異種の観測量間での重みはどうするのか、予測値と観測量とを比較する際に必要となる地下構造モデルや地震規模と断層すべり量との関係などの不確定性をどのようにモデルの予測性能評価に反映させるのか、などは、なかでも特に重要な課題であろう。

本稿では予測の試行に向けて、予測モデルの高度化やモニタリング結果に基づくモデルの性能評価に関する研究の動向に主眼をおいたが、モデルの性能評価に使うことができるモニタリング項目を増やすための観測研究もまた、今後の研究で注力すべきテーマである。地震活動から応力場や断層面上でのすべり方向のゆらぎなどの空間分布が与えられれば（時間変動は大きくはないが）、モデルに対する重要な制約を与えだろう。海溝軸を跨ぐような基線長の連続観測が可能となれば、プレート間相対運動速度という、予測結果と直接比較可能な観測量を手にすることができるようになる。

（日野亮太）