

1 (2) (2-1) 地震発生予測システム

「地震発生予測システム」計画推進部会長 鷺谷 威
(名古屋大学減災連携研究センター)

本研究計画では、科学的な地震発生予測の実現を目指して、2つの異なるアプローチを試みる。一つは地震発生の物理モデルに基づく予測であり、これまで開発を進めてきた地震発生予測シミュレーションをモニタリングシステムと有機的に結合し、予測システムの構築を進める。5ヶ年の研究でシステムの全体設計、プロトタイプシステムの構築、および予測シミュレーション手法の高度化を行う。もう一つのアプローチは、統計的手法に基づく地震活動予測の高度化である。検証に用いるデータベース等の共通基盤を整備し、異なる予測手法の比較実験を実施する。平成24年度の研究により得られた成果の概要を以下に述べる。

ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

本研究計画では、観測網から得られるデータの情報を取り込み、地震発生の物理過程を考慮した数値シミュレーションを通じて地震発生予測を行うシステムの構築を目指しており、それは地震予知研究における最重要課題として位置づけられている。目的達成のため、予測シミュレーションの改良・高度化とシミュレーションと観測システムを有機的に結合するデータ同化システムの開発を2つの柱として研究を実施している。

まず、予測シミュレーションの改良・高度化に関しては、2011年東北地方太平洋沖地震を発生させるサイクルシミュレーションのモデル領域を広げるとともに、階層型行列を用いたすべり応答関数の作成を並列化により計算を効率化した。日本列島周辺のプレート境界を1km間隔のメッシュでモデル化すると、セル数を現在の20万個程度から100万個のオーダーに増やす必要がある。中小規模の地震を扱うにはセルがさらに細分化されるため、計算の高速化を進める必要がある。また、粘弾性媒質中での地震サイクルシミュレーションには階層型行列を適用できないことが分かり、計算のさらなる高速化には別の工夫が必要である(名古屋大学[課題番号:1702], 平原・他, 2012)。

プレート境界で発生する地震サイクルのシミュレーションにより破壊開始点の破壊エネルギーを推定し、理論式と整合的な結果を得た。この結果によれば、南海トラフのM8級地震と東北地方太平洋沖地震の破壊開始点における破壊エネルギーは、それぞれ0.1-1MJ/m²、約10MJ/m²と見積もられた(図1, 名古屋大学[課題番号:1702], Kato, 2012)。

巨大地震の発生が懸念される南海トラフでは、近年の地震波構造探査等によって沈み込みプレート境界の形状や物性値の詳細な分布が明らかにされている。こうした構造モデルを用いた三次元のシミュレーションでプレート境界浅部のすべり挙動の摩擦パラメータに対する依存性を調べたところ、ある閾値を境としてプレート境界浅部の挙動が大きく変化することが分かった(海洋研究開発機構[課題番号:4001], Hyodo and Hori, 2013)。

南海トラフ巨大地震の50年前から10年後にかけて、西南日本で内陸地震活動が増すと言われている。日本列島の定常的な東西圧縮、南海トラフでの固着と地震発生に伴う粘弾性応答、さらに内陸地震発生を考慮してクーロン応力変化を計算した結果、南海トラフ巨大地震の発生前に逆断層型地震が、発生後に横ずれ型地震が多くなることが予測される(図2, 名古屋大学[課題番号:1702], 鹿倉・他, 2012)。

逆に、津波地震の可能性がある1605年慶長地震が内陸地震による応力擾乱で生じた可能性を検証する目的でシミュレーションを行った。その結果、内陸地震の発生がプレート境界地震に影響を与える可能性のあることが分かったが、プレート境界の浅部のみを破壊するような地震は発生しなかった(図3, 気象庁[課題番号:7023], 弘瀬・前田, 2012c)。また、南海トラフ沿いで短期および長期のスロースリップが繰り返し発生しているが、スロースリップ領域の広がりや摩擦パラメータについて検討を行い、長期と短期のスロースリップが共存するようなシミュレーションに成功した(図4, 防災科学技術研究所[課題番号:3004])。

現実に即したシミュレーションを行うためにはデータ同化が必要である。そのため、本研究では観測データを用いてシミュレーションに必要な物理量を推定する手法や逐次的なデータ解析により、シミュレーションを現実の変化に追従させるための手法の開発を進めている。

東北地方太平洋沖地震の余効すべりに基づいてプレート境界の摩擦パラメータを推定したところ、剪断応力の速度依存性が時間的に一定ではなく、摩擦パラメータがすべり速度に依存するか、断層面の有効法線応力が時間変化するという2つの可能性があることが分かった(名古屋大学[課題番号:1702], Fukuda et al., 2012)。

地殻変動データに対してアジョイント法を適用し、断層面上の摩擦パラメータを推定する手法の開発を行っている。従来よりも細かい小断層を用いることで余効すべりの伝播を表現できるようにして、2003年十勝沖地震から2004年釧路沖地震に至る一連の過程を模した数値実験を行った。その結果、摩擦パラメータが初期値から真の値に近い値に修正され、釧路沖地震の発生時期の予測も改善された(名古屋大学[課題番号:1702], 加納・他, 2013)。

測地データから推定されるプレート境界面のすべり欠損分布はプレート境界の真の固着状態を直接対応していない。固着域ですべり0、非固着域で応力0と単純に仮定し、与えられた固着域分布に対する地表変位の計算を行い、こうして得られた理論地表変位からすべり欠損分布を推定すると、固着域として過大評価となることが分かる。この方法を日本海溝沿いと南海トラフ沿いの2地域に適用し、2011年以前の東北地方では固着域の面積比がおよそ30~60%と推定されるのに対し、南海トラフでは60~100%と、固着の度合いがより高いと推定された(図5, 名古屋大学[課題番号:1702], Hirai and Sagiya, 2013)。

さらに、地殻変動データに加えて、地震学的なデータの情報を予測シミュレーションに取り込むための基礎研究として地震活動データの解析を実施している。関東および東海・東南海地域で震源および規模を再決定して得られた均質な地震カタログから、2005年から2007年にかけて関東地方南部における地震活動活発化と銚子沖の静穏化が同時発生していることを見出した。GPSデータを精査すると、この地震活動変化に伴う水平変動が検出され、長期スロースリップが発生したと推測される。地震活動データはスロースリップの指標としても使える可能性が示された(図6, 名古屋大学[課題番号:1702], Katsumata, 2013)。

一方、日本海溝沿いでは繰り返し地震を用いたプレート境界すべりの研究が進められ、東北地方太平洋沖地震前の3年間をそれ以前の12年間に比べると、本震のすべり域およびその近傍ですべり速度が大きかったこと、地震後は本震すべり域の周辺で余効すべりが起きていることを見出された(図7, 名古屋大学[課題番号:1702], Uchida et al., 2013)。また、本震後に発生したプレート境界型地震活動の空間分布を用いると、本震時の大すべり域の広がりを推定することができた(図8, 名古屋大学[課題番号:1702])。

イ. 地殻活動予測シミュレーションの高度化

現在開発を進めている地震発生予測システムでは単純化された地震サイクルを仮定しており、地震発生に影響する様々な要素が考慮されていない。そうした要素を将来地震発生予測システムに組み込むための基礎的な研究を進めている。

東北地方太平洋沖地震で数十mもの巨大な断層すべりが起きたメカニズムとして、地震時の摩擦発熱による間隙流体圧上昇 (Thermal pressurization, 以下TP) の影響が提案されている。こうした効果は大地震サイクルそのものに影響を与えるため、二次元シミュレーションを行い、地震時すべりや応力降下量、地震発生間隔がTPの働く領域の深さおよび間隙流体拡散係数に依存することを示した (図9, 東京大学地震研究所 [課題番号: 1405], Mitsui et al., 2012)。また、TPを考慮に加えて浅部に大規模なアスペリティを設定することで、日本海溝においてM7クラスとM9クラスの地震が再現できることを示した (図10, 東京大学地震研究所 [課題番号: 1405])。断層内の流体は、スロースリップの発生にも寄与すると考えられている。断層に沿った流体移動を考慮することで、スロースリップおよびスロースリップと同期し逆方向に伝播する微動の伝播速度を再現することに成功した (図11, 東京大学地震研究所 [課題番号: 1405], Yamashita, 2013)。

プレート境界の地震と比較して、内陸部における地殻変形や地震発生のシミュレーションは遅れている。温度構造等に基づいて作成した日本列島のレオロジー構造 (Cho and Kuwahara, 2012) を用いて有限要素法のモデルを作成し、プレート運動等に基づく境界条件を与えて長期変形のシミュレーションを行った (図12, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5003])。

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測

地震活動の特徴や地震発生の統計モデル・物理モデルに基づいて、将来の地震活動を確率的に予測する様々な試みが行われている。しかし、従来の研究では、解析対象とする地震カタログがまちまちで、公平な手法間の比較が十分に行われてこなかった。そこで、地震活動予測手法の比較検証を目的とする国際研究プロジェクトCSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability) が進められている。本研究計画では CSEPへの取り組みを計画の一部と位置づけ、地震発生予測のアルゴリズム開発やモデルの比較を進めている (Tsuruoka et al., 2012)。平成24年度は、CSEPにおける標準的な予測手法の評価方法に加え、局所的な活動が発生し易い日本の地震活動の特徴を踏まえ、地震の空間分布予測性能に関する新たな評価手法として「マッチスコア」を開発した。この手法で求められるマッチスコアはL-testで用いられる対数尤度と相関があり空間分布予測性能の評価指標として有用である (図13, 東京大学地震研究所 [課題番号: 1406], 鶴岡, 2012)。

前震の発生確率に基づき地震発生確率をリアルタイム予測するシステムを開発し、自動的に更新している。例として、2012年11月19日の根室沖の地震 (M_w 5.2) が、発生1時間前に発生確率が高いとされていた場所で発生したことが分かる (図14, 京都大学防災研究所 [課題番号: 1802])。また、地震発生予測の正確さを評価する新たな統合的指標を提案した (Smyth et al., 2012)。

また、地震活動データの解析から、房総半島では、b値がスロースリップの繰り返しに伴う応力変化に対応していることが分かった (図15, 弘瀬・前田, 2012a)。さらに、M7.0以上の地震前後の η 値の時間変化の解析から、大地震発生前に、規模別頻度分布がGutenberg-Richter則から外れる傾向にあることが見出された (気象庁 [課題番号: 7012], 弘瀬・前田, 2012b)。

課題と展望

地震活動に基づく確率予測に関しては、CSEPの取り組みが順調に続けられており、これを継続することで有用な知見が得られるものと期待される。この取り組みを続けていく上では、元になる地震カタログの再検討が重要な課題として挙げられる。また、地震活動の背景に潜む物理そのものに未解明の部分が多く、現象理解の研究も進めていく必要がある。

物理モデルに基づく予測システムの構築に向けては、シミュレーション、モニタリング、データ同化それぞれの部分で着実に研究は進んでいる。最初にも述べたように、本研究計画が目指すのは、地震発生予測シミュレーションをモニタリングシステムと有機的に結合した予測システムの構築である。上でまとめた成果は、依然として予測システムの構成要素に関するものが多く、予測システムの姿が見えて来ているとは言い難い。

目に見えた成果には至っていないが、予測システムのプロトタイプの研究は進められている。そこでの基本的な考え方は、予測システムによる定常的なモニタリングの補助である。日本列島には陸上のGPS観測網に加え、海域にも連続監視可能な海底圧力計などが設置されつつあり、地殻活動のリアルタイムモニタリングは現実的に可能である。しかし、こうした観測データに何らかの変化が起きた時、その後の推移を予測するには何らかの物理モデルを導入する必要がある。最新のデータは刻一刻と追加されていくので、それに応じてより確からしい将来予測を提供していくことがデータ監視を担当する機関には求められる。この時、その場で計算を開始して毎回推移予測を行うのではなく、予め多数のケースについて計算を実施しておき、観測されたデータと整合する結果を抽出して予測の一助とすることは十分可能であり、実用的な価値がある。現時点までのデータに基づいて、将来起こり得る事象の確率分布が提示できれば、それは科学的な予測と呼ぶに値するものであり、観測網の拡充やモデルの改良によって、予測精度は改善されていくものと期待される。平成25年度は現計画の最終年度であるが、上述したような内容の予測システムのプロトタイプを提示することを予定している。ただし、ここで提示できるものには実用性は期待できず、今後長い時間をかけて経験を積み重ねることにより、初めて実用的な価値が生まれる。そのため、関係する組織、研究者全体に、観測網とデータ同化のシステム全体を長い時間をかけて育て上げていく覚悟が必要である。気象の数値予報のシステムが数十年にわたる努力で今日の姿に至っていることは改めて言うまでもない。関係者はこうした努力を維持していくための戦略的思考が求められていることを改めて肝に銘じるべきだろう。

参考文献

Cho, I. and Y. Kuwahara, Constraints on the three-dimensional thermal structure of the lower crust in the Japanese Islands, EPS, accepted, 2012.

Fukuda, J., Y. Aoki, T. Kato, and N. Kato, Evolution of afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake, 2012 AGU Fall Meeting, T13F-2695, San Francisco, USA, 2012.

平原和朗・大谷真紀子・鹿倉洋介・兵藤守・堀高峰・橋間昭徳, 漸化型メモリ変数法を用いた粘弾性媒質における地震発生サイクルシミュレーション, 日本地震学会2012年秋季大会, P2-68, 函館, 2012.

Hirai, T., and T. Sagiya, Biased geodetic inference on asperity distribution on a subducted plate interface: a quantitative study, *Earth Planets Space*, in press, 2013.

弘瀬冬樹・前田憲二, 房総半島沖で繰り返すスロースリップとb値の時間変化との関係, 日本地球惑星科学連合2012年大会, SSS030-P09, 2012a.

弘瀬冬樹・前田憲二, 2012, 大地震前に現れるG-R則からの逸脱について～その2～, 日本地震学会2012年秋季大会, P1-68, 2012b.

弘瀬冬樹・前田憲二, 四国中央構造線断層帯の活動と1605年慶長津波地震との関係, 日本地震学会2012年秋季大会, P2-72, 2012c.

Hyodo, M. and T. Hori: Re-examination of possible great interplate earthquake scenarios in the Nankai Trough, southwest Japan, based on recent findings and numerical simulations, *Tectonophys.*, accepted, 2013.

加納将行・宮崎真一・伊藤耕介・平原和朗, An adjoint data assimilation method for optimizing frictional parameters on the afterslip area, データ同化ワークショップ, 2013.

Kato, N., Fracture energies at the rupture nucleation points of large interplate earthquakes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 353-354, 190-197, 2012.

Katsumata, K., Detection of a small slow slip event beneath the Kanto district, central Honshu, Japan by modeling a pair of seismic quiescence and activation anomalies and GPS data, *Earth Planets and Space*, submitted, 2013.

Mitsui, Y., Y. Iio, and Y. Fukahata, A scenario for the generation process of the 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: Role of stress concentration and thermal pressurization, *Earth Planets Space*, 64, 1177-1187, 2012.

鹿倉洋介・深畑幸俊・平原和朗, プレート運動と地震発生に伴う西南日本内陸活断層の長期的な破壊関数の変化, 日本地球惑星科学連合2012年大会, SSS38-11, 千葉, 2012.

Smyth, C., M. Yamada, J. Mori, Earthquake forecast enrichment scores, *Research in Geophysics*, doi:10.408/rg2012.e2, 2012.

Tsuruoka, H., N. Hirata, D. Schorlemmer, F. Euchner, K.Z. Nanjo and T.H. Jordan, CSEP Testing Center and the first results of the earthquake forecast testing experiment in Japan, *Earth Planets Space*, 64, 8, 661-671, 2012.

鶴岡 弘, 評価手法マッチスコアの提案, 日本地震学会2012年度秋季大会, 函館(日本), 2012年10月16日～19日, 2012.

Uchida, N., T. Matsuzawa, Pre- and post-seismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, *Earth Planet. Sci. Lett.*, under revision, 2013.

Yamashita, T., Generation of slow slip coupled with tremor due to fluid flow along a fault, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1093/gji/ggs117, 2013.