

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 鷲谷 威
(名古屋大学大学院環境学研究科)

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、二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 22 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、観測データから得られる情報を取り込み、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。予測シミュレーションの改良・高度化、および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二つの柱として研究を実施している。

まず、地殻活動予測シミュレーションの開発においては、準静的な応力蓄積から破壊核形成を経て動的破壊へと至るプロセスから応力状態を引き継いで 2 サイクル目のシミュレーションを行うことに成功した。1968 年十勝沖地震の震源域を想定したシミュレーションを行った結果、2 サイクル目の初期には 1 サイクル目よりも急速に応力蓄積が生じ、結果的に 2 サイクル目では地震発生間隔が短縮される。これは、粘性緩和および粘性応力により駆動される余効すべりの影響である(図 1、名古屋大学 [課題番号 : 1702]、Hashimoto et al., 2011)。

予測シミュレーションでは、プレート境界面を表現する多数のセルですべりの時空間発展を追跡するために大規模計算が必要となり、その計算量およびメモリ量はセル数の二乗に比例する。また、摩擦パラメータの推定を行うには、異なるパラメータについて繰り返しシミュレーションを行う必要があるため、計算の高速化・省メモリ化が必須である。平成22年度は、階層型行列 (Hierarchical matrices : H-matrices) 法 (Hackbusch, 1999) の地震サイクルシミュレーションへの適用を試み、メモリ量を $O(N)$ 、計算量を $O(N) \sim O(N \log N)$ に省力化できることを示した (図 2、名古屋大学 [課題番号 : 1702]、Ohtani et al., 2011)。

シミュレーションによる具体的な観測事例を再現する試みの一つとして、紀伊・東海地域を対象とした 3 次元断層モデルとカットオフ速度を持つ速度・状態依存摩擦構成則を用いて、この地域で発生するゆっくり滑りのシミュレーションを行った。摩擦遷移領域よりも深部に高間隙圧を仮定し、ゆっくり滑り発生域ではカットオフ速度の効果が顕著になるように設定することで観測された事象が良く再現された (図 6、防災科研 [課題番号 : 3004]、Matsuzawa et al., 2010)。また、東海地域および豊後水道のゆっくり滑りを含む南海トラフの地震サイクル全体の特徴を再現可能な数値モデルが構築され、安政と昭和のケースのように、東海地震のアスペリティが 2 回に 1 回割れ残り、ゆっくり滑りの規模が東海地震のアスペリティの状態に影響されるという結果が得られた (気象庁 [課題番号 : 7023]、弘瀬・前田, 2010)。

現実に即したシミュレーションを行うために必要となるのがデータ同化であり、その一つの目的は、観測データに基づいて断層の摩擦パラメータを推定することである。摩擦パラメータの取り得る値を網羅的に調べるのは非効率であるため、少ない計算量で摩擦パラメータ推定を行う手法として、アジョイント法の検討を進めている。平成22年度は、1セルの単純なモデルについて、ゆっくり滑りが発生する条件で生成した模擬データを用いて摩擦パラメータの推定実験を行った。同化解析に用いるデータ範囲を変えてその影響を調べたところ、最初のゆっくり滑りですべり速度が最大となる時間近くまでのデータを使用することで、その後のすべり履歴が正しく予測されることが分かった。また、相当程度データを間引いて同化解析を行ってもすべり履歴の予測にはあまり大きく影響しない(図3、名古屋大学[課題番号:1702])。これらは、同化解析に使用するデータが現象の特徴を正しく表していれば、データ量を減らせることを表しており、現象の変化が緩やかで、新たな観測データを得たことによる情報利得が必ずしも大きくない固体地球現象の特徴が現れている。

データ同化は、観測データを用いて非線形の数値シミュレーションモデルにおけるパラメータ推定を確率的に行う枠組みであり、従来の逆問題解析の枠組みでは十分な扱いができなかった。平成22年度には、線形パラメータと非線形パラメータの両方を含む線形・非線形混合逆問題について効率的に事後確率分布を推定するアルゴリズムを開発し、大自由度の線形・非線形混合モデルに対してパラメータの不確定性の完全な定量化、先験情報の重み付け・複数のデータセット間の重み付けの客観的決定を行うことが可能になった。さらに、様々なモデルに対してこの手法が適用可能であることを示した(名古屋大学[課題番号:1702]、Fukuda and Johnson, 2010、Johnson and Fukuda, 2010)。これは、大自由度モデルや複数のデータセットを用いた大規模データ同化の実現につながる成果である。

データ同化のもう一つの役割は、刻々と送られてくるデータを処理して、逐次的な予測を行うことである。こうした観点から、東南海地震発生後に南海地震が発生する場合の海底地殻変動観測データの同化実験を実施した。南海トラフの地震発生サイクルシミュレーション結果を用いて、東南海地震後から南海地震発生に至るまでの海底地殻変動(2点)の模擬データを作成し、解析に使用した。東南海地震と南海地震の発生間隔が5.1日および249.8日の場合の模擬データに対して、粒子フィルターを用いた逐次同化により二つの地震の発生間隔を推定した結果、ノイズの影響による推定誤差が、データの増加にしたがって減っていくことが定量的に示された(図4、海洋研究開発機構[課題番号:4001])。この結果は、十分な観測情報を予測シミュレーションにリアルタイムで提供できれば、的確な地震発生予測を行える可能性を示すものである。

予測シミュレーション実現のためには、実際に同化させるデータの検討も必要不可欠である。これまでGPSを始めとする地殻変動データについての検討は進んでいるが、地震学的なデータの活用手法はまだ確立していない。こうした観点で注目されているのはプレート境界で発生する小繰り返し地震である。日本列島全域のデータを精査して小繰り返し地震を抽出し、琉球海溝沿いおよび千島海溝 日本海溝沿いにおいて、比較的安定した時間間隔で発生する地震群を見出した。小繰り返し地震群から推定されるすべり速度は、琉球弧ではプレート間の相対運動速度にほぼ一致するが、東北日本弧では大地震の余効すべりに伴う時空間変化が見られた。さらに、震源情報を用いた地震クラスターの自動抽出を行い、波照間島沖合では、ゆっくり滑りに同期した地震クラスターの活動も見出した(名古屋大学[課題番号:1702]、Igarashi, 2010)。

一方、地震観測データに基づいて地殻内の応力を直接推定する方法の開発も進められている。平成22年度には、地震メカニズム解を用いて3次元的な流体圧分布を推定する手法をイタリアで発生

したラクイラ地震のデータに適用し、一連の地震活動が流体に駆動された可能性を示した（図5、名古屋大学〔課題番号：1702〕、Terakawa et al., 2010）。将来的には、モーメントテンソルの逆解析等で推定される応力場（Terakawa and Matsu'ura, 2010）に流体圧分布を加味することで、地震発生条件の判断が可能となる可能性がある。

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。

現在のシミュレーションでは考慮されていない断層帯の間隙の効果についてシミュレーションによる影響評価を行った。熱多孔質弾性体中に断層を仮定し、摩擦発熱やすべりによる空隙の生成、流体・熱の拡散を考慮した計算を行ったところ、空隙生成率が十分に大きい時にゆっくり滑りと同期した微動が起きることが分かった。一方、圧力溶解等の化学変化により沈殿物が生じると間隙体積が減少し流体圧が上昇する。こうした効果は断層を安定化させるとともに、見かけのすべり速度が増加して外部から加えたローディング速度を越えてしまう。ダイラタンシーを考慮して間隙圧を下げることににより、こうした問題が解決できることが明らかになった（東京大学地震研究所〔課題番号：1405〕）。

一方、地震活動解析への応用を視野に、AEの時空統計性の背後にあるメカニズム解明を目的としたシミュレーション研究を行った。AEの大きさ・頻度分布はジャミング転移点と呼ばれるある臨界密度においてのみベキ則になること、また、再来時間の分布関数を表す冪指数が下限マグニチュードに依存することを発見した。これらは、離散モデルにおけるAE活動が自己組織化臨界ではなく、ジャミング転移点という特定の分岐点における揺らぎの増大であることを示している。さらに、AEイベントのダイナミクスに基づいた摩擦構成法則を理論的に導出した（東京大学地震研究所〔課題番号：1405〕）。

現在の計画で目指しているのはプレート境界地震の予測システムであるが、将来的には内陸地震を含めたシステムの検討が求められる。そうした枠組みを作るには日本列島規模で粘性・強度分布をモデル化することが必要となる。温度構造の推定結果等に基づいて、弾性層と単一の粘性係数をもつ粘性層の2層に単純化したモデルを構築して有限要素法解析を行った結果、新潟-神戸ひずみ集中帯付近にひずみ速度の大きい領域が現れる等、現実の観測データと調和的な結果が得られた（産総研〔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論的に予測する試みが行われており、様々な予測手法が提案されてきた。しかし、従来のこうした研究では、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して、CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability)と呼ばれる国際研究プロジェクトが進められている。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。

平成22年度は、検証実験は3予測領域・4予測期間の計12クラスに合計91の地震予測モデルが参加して第1回地震発生予測検証実験を実施した。そのうち日本全体陸域部の3ヶ月予測結果に基づいて各地震発生予測モデルを評価したところ、九つの予測モデルのうち三つが有意な予測性能を持

つものと判断された。一方、関東地方を対象とする予測ではすべての予測モデルが評価テストをパスできなかった（図7、東京大学地震研究所〔課題番号：1406〕）。

日本周辺の地震活動データの解析から、大地震発生前に前震が発生する頻度が、二つの地震がランダムに発生する確率よりもはるかに大きいことが分かった。このことを利用し、ある地震が大地震の前震である確率をリアルタイムで予測するシステムを構築した（京都大学防災研究所〔課題番号：1802〕）。

また、地震波速度構造と地震活動との関係に基づいてグリッド毎の速度構造を地震発生率に変換し、地震の規模別頻度分布に基づく地震発生予測モデルを改良した。その結果、全体的な予測精度向上が見られた（気象庁〔課題番号：7012〕、Hirose and Maeda, 2011）。

課題と展望

平成22年度までの研究により、準静的な応力蓄積と断層の動的破壊の連成シミュレーションにより地震サイクルの計算を行うことが可能となった。従来から行われてきた速度・状態依存摩擦法則による地震サイクルシミュレーションとは異なる考えに基づく予測シミュレーションが可能となったことで、同一の事象についても2種類のシミュレーションを行って相互の比較検証が行えるようになったことは大変重要である。ただ、現在までに行った計算では、現実的なプレート形状を仮定しているものの、アスペリティの空間分布については十分な空間解像度を持つモデルにはなっていない。より現実的な問題設定に基づく計算を行い、摩擦パラメータの最適化を行うためには大量のモデル計算が必要となるため、シミュレーション計算の高速化が必須の課題であるが、今年度試行に成功した階層型行列を活用するなど計算高速化の取り組みを一層強化する必要がある。

データ同化による摩擦パラメータの推定は、アジョイント法の数値実験によって一定の成果が得られている。今後、大規模問題で検証を進めていくことが必要であるが、膨大な量のデータを処理する際には、計算規模や計算時間の制約が問題となってくる可能性がある。また、観測システムからのデータ入力による逐次同化の実験の取り組みも始まり有望な結果が得られつつあるが、様々な事例について多数の検証を進めていくことが今後の課題となる。

地震学的なデータの利用の観点では、小繰り返し地震の全国的な分布が明らかとなり、そこから推定されるすべり速度とプレート運動速度の対応も見えてきたので、こうした情報をGPSデータと組み合わせたすべりの時空間分布推定を今後進めていく必要がある。一方、CMTデータ解析による応力場や、今年度開発された手法により推定された流体圧に関する情報の活用手法を検討していくことも今後の課題である。

確率モデルによる地震発生予測の面では、CSEPの活動が本格的に開始され、予測モデルの比較検証結果も公開されるなど順調に実験が進んでいる。検証実験を通してそれぞれのモデルに改良が加えられ、予測性能が向上していくことが期待される。

参考文献

- Fukuda, J., and K. M. Johnson, 2010, Mixed linear-non-linear inversion of crustal deformation data: Bayesian inference of model, weighting and regularization parameters, *Geophys. J. Int.*, 181, 1441-1458.
- Hashimoto, C., Fukuyama, E., Terakawa, T., Sagiya, T., Nakajima, K., Sato, T., and Matsu'ura, M., 2010, Development of a predictive simulation system for crustal activities in and around Japan -VII, Annual Report of the Earth Simulator Center, the Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.
- Hatano, T., 2010, Critical scaling of granular rheology, *Progr. Theoretical Phys. Suppl.*, 184, 143-152.

- Hatano, T., 2010, Constitutive law of dense granular matter, J. Physics, Conference Series 258, 012006, doi:10.1088/1742-6596/258/1/012006.
- Hirose, F., and K. Maeda, 2011, Earthquake Forecast Models for Inland Japan Based on the G-R Law and the Modified G-R Law, Earth Planets Space (in press).
- 弘瀬冬樹・前田憲二, 2010, 東海地域の割れ残りと長期スローイベントとの関係, 地震予知連絡会会報, 84, 547-549.
- Hok, S. and E. Fukuyama, 2011, A new BIEM for rupture dynamics in half-space and its application to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, Geophys. J. Int., 184, 301-324.
- Hori, T. and S. Miyazaki, 2010, Hierarchical asperity model for multiscale characteristic earthquakes: a numerical study for the off-Kamaishi earthquake sequence in the NE Japan subduction zone, Geophys. Res. Lett., 37, L10304, doi:10.1029/2010GL042669.
- Igarashi, T., 2010, Spatial changes of inter-plate coupling inferred from sequences of small repeating earthquakes in Japan, Geophys. Res. Lett., 37, L20304, doi:10.1029/2010GL044609.
- Imanishi et al., 2011, Depth - dependent stress field in and around the Atotsugawa fault, central Japan, deduced from microearthquake focal mechanisms: Evidence for localized aseismic deformation in the downward extension of the fault, J. Geophys. Res., 114, doi:10.1029/2010JB007900.
- Imoto, M., 2011, Performance of a seismicity model for earthquakes in Japan ($M > 5.0$) based on P-wave velocity anomalies, Earth, Planets Space (in press).
- Johnson, K. M., and J. Fukuda, 2010, New methods for estimating the spatial distribution of locked asperities and stress-driven interseismic creep on faults with application to the San Francisco Bay Area, California, J. Geophys. Res., 115, B12408, doi:10.1029/2010JB007703.
- 加納将行・宮崎真一・伊藤耕介・平原和朗, 2010, 余効すべり人工データを用いたアジョイント法による摩擦パラメータ・初期値の推定, 地震2, 62, 57-69.
- Matsuzawa, T., H. Hirose, B. Shibazaki, K. Obara, 2010, Modeling short- and long-term slow slip events in the seismic cycles of large subduction earthquakes, J. Geophys. Res., 115, B12301, doi:10.1029/2010JB007566.
- Mitsui, N., T. Hori, S. Miyazaki, and K. Nakamura, 2010, Constraining interplate frictional parameters by using limited terms of synthetic observation data for afterslip: a preliminary test of data assimilation, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 58, 113-120.
- Nanjo, K. Z., T. Ishibe, H. Tsuruoka, D. Schorlemmer, Y. Ishigaki, and N. Hirata, 2010, Analysis of completeness magnitude and seismic network coverage for Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 100, 6, 3261-3268.
- Nanjo, K. Z., H. Tsuruoka, N. Hirata, and T. H. Jordan, 2011, Overview of the first earthquake forecast testing experiment in Japan, Earth Planets Space (in press).
- Ohtani, M., K. Hirahara, Y. Takahashi, T. Hori, M. Hyodo, H. Nakashima and T. Iwashita, 2011, Fast computation of quasi-dynamic earthquake cycle simulation with Hierarchical Matrices, Procedia Computer Science (in press).
- Sasaki, 2011, T., Data assimilation for earthquake cycle simulations: estimation of frictional parameters on a plate boundary with geodetic data, Master dissertation, Nagoya University.
- Shibazaki, B., S. Bu, T. Matsuzawa, H. Hirose, 2010, Modeling the activity of short-term slow slip events along deep subduction interfaces beneath Shikoku, southwest Japan, J. Geophys. Res., 115, B00A19, doi:10.1029/2008JB006057.
- Smyth, C. and J. Mori, 2011, Modelling temporal variations of seismicity parameters to forecast seismicity rates in Japan, Earth Planets Space (in press).

- Smyth, C., J. Mori, C. Jiang, 2010, Model Ensembles for Prediction of Wenchuan Aftershock Activity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2532-2538, doi: 10.1785/0120090300.
- Terakawa, T. and M. Matsu 'ura, 2010, 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from CMT data of seismic events, *Tectonics*, 29, TC6008, doi:10.1029/2009TC002626.
- Terakawa, T., A. Zoprowski, B. Galvan, and S. A. Miller, 2010, High pressure fluid at hypo-central depths in the L 'Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms, *Geology*, 38, 995-998.
- Yamashina, K. and K. Z. Nanjo, 2011, An improved relative intensity model for earthquake forecast in Japan, *Earth Planets Space* (in press).

1968年十勝沖地震 (M=8.2) の震源域における 応力蓄積－解放過程：第2サイクル

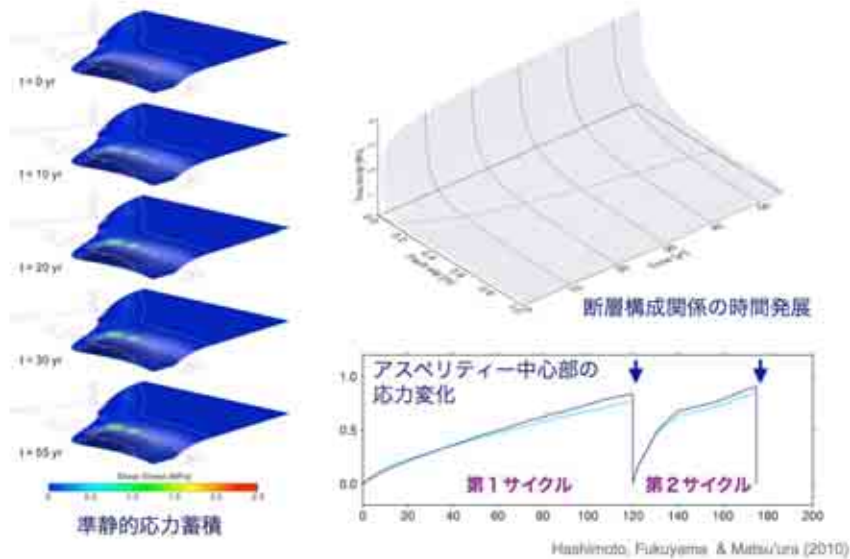


図1. 準静的応力蓄積・破壊核形成と動的破壊の連成シミュレーションによる1968 年十勝沖地震震源域の2サイクル目の応力時空間変化（左）、断層摩擦関係の時間発展（右上）、および2サイクル分の応力変化（右下）（名古屋大学〔課題番号：1702〕）。

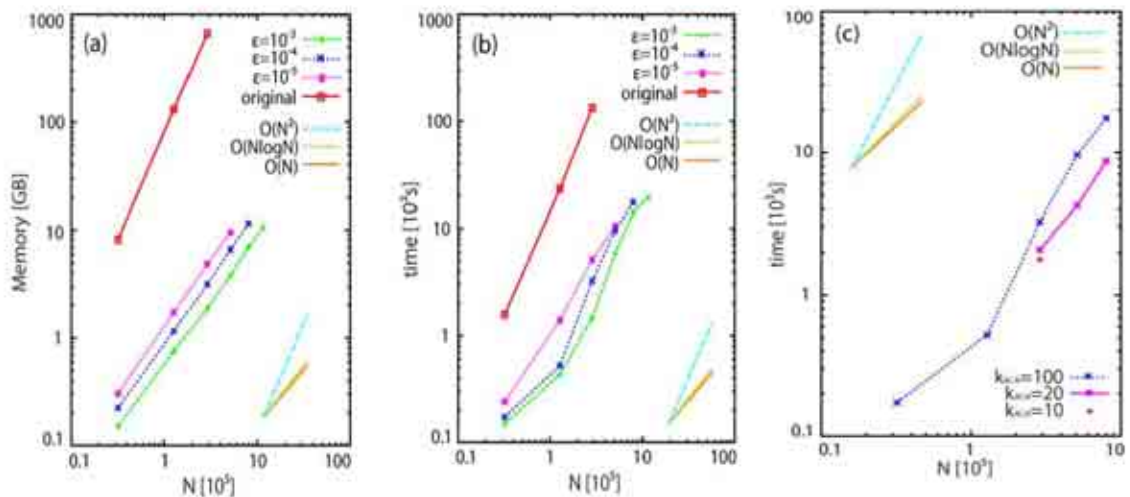


図2. セルサイズ(N) に対するメモリ量(a) および計算時間(b, c) の増大。

階層型行列 (Hierarchical matrices : H-matrices) を適用しない場合 (赤) はメモリ・計算量とも $O(N^2)$ 。各行列の近似精度を決める ε に対して、H-matricesを用いた場合メモリ量はほぼ $O(N)$ 。計算時間は $N=10^5$ あたりまで $O(N)$ であるが、それ以上で急増する。この時最外側小行列のランクが大きくなっている。近似精度 ε はシミュレーションより 10^{-4} を要求されるが、その場合、最外側小行列のランクを決める $k_{ACA}=20$ に設定してもシミュレーション結果は変わらず計算時間を抑えられる ($O(N \log N)$) 程度) (名古屋大学〔課題番号：1702〕、Ohtani et al., 2011)。

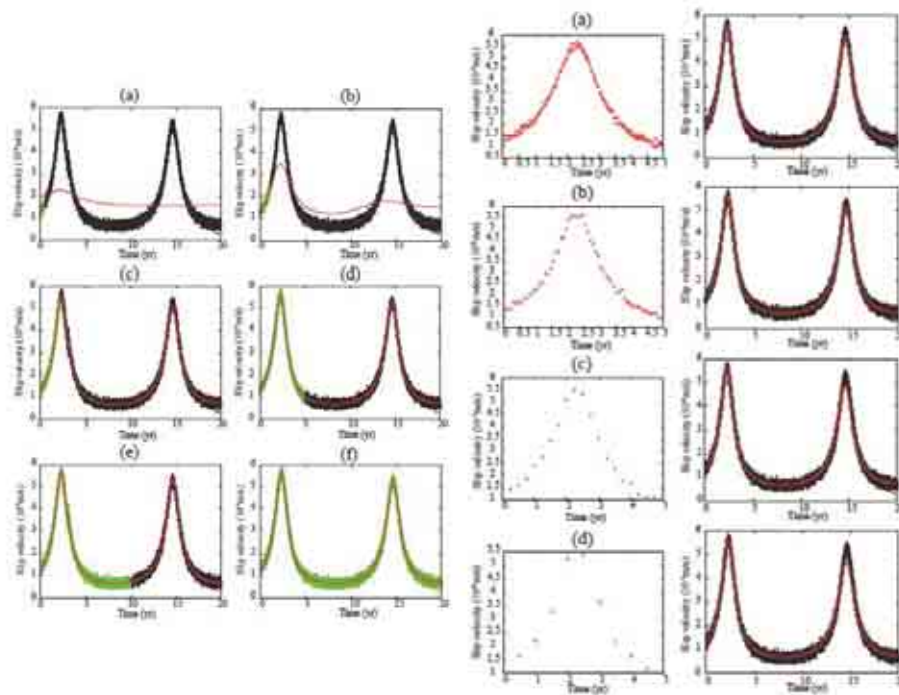


図3. アジョイント法により推定された摩擦パラメータを用いたシミュレーションと解析に用いた模擬データの比較。左は同化解析に用いるデータ量（緑で示すデータ）を変化させた場合、右は解析に使用するデータのサンプリングを変えた場合（名古屋大学[課題番号：1702]、Sasaki, 2011）。

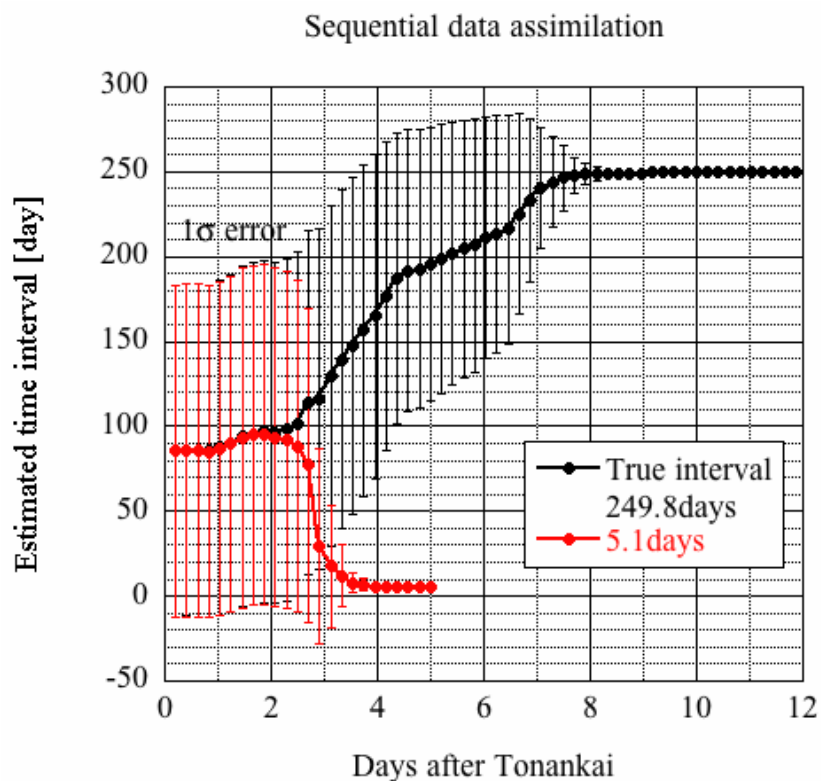


図4. 逐次データ同化実験

逐次データ同化の数値実験によって得られた東南海地震と南海地震の発生間隔の推定結果。平均値と標準偏差を示す（海洋研究開発機構[課題番号：4001]）。

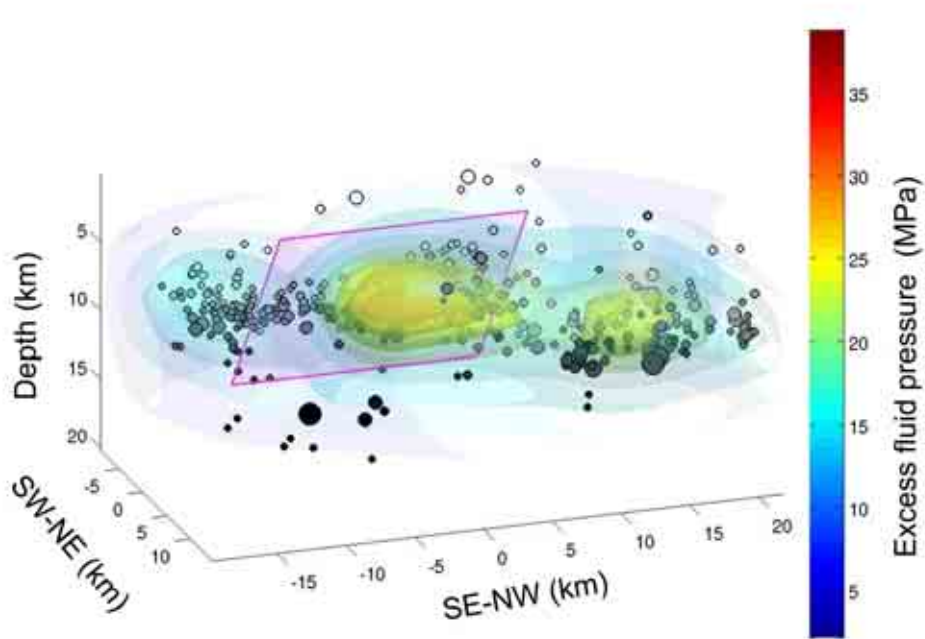


図5. 地震メカニズムトモグラフィー法で求めたラクイラ地震震源域付近の流体圧分布と震源分布（名古屋大学 [課題番号：1702]、Terakawa et al., 2010）。

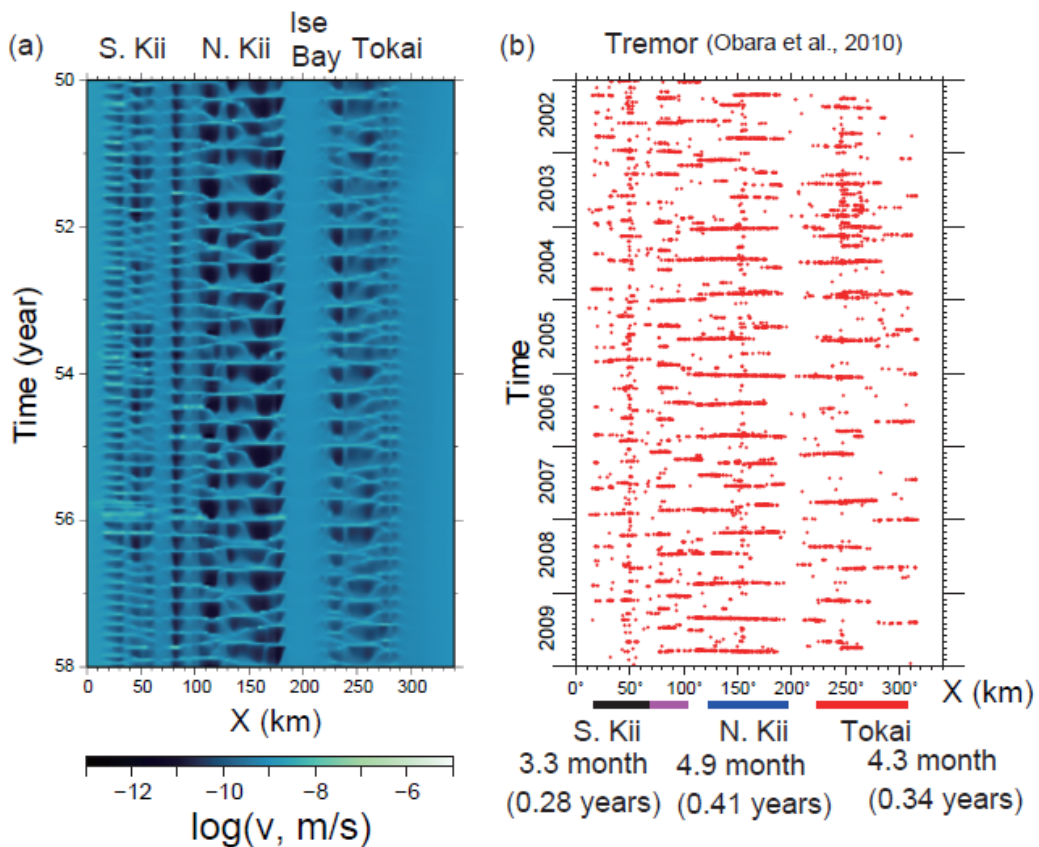


図6. シミュレーションによる深さ30 km でのすべり速度の変化。横方向に線状に明るくなっているところがゆっくり滑り。短期的ゆっくり滑りが、いくつかのセグメントごとに数ヶ月周期で発生している（Matsuzawa et al., 2010）。右はObara et al. (2010) によって得られた紀伊・東海地域における微動活動の時系列図（防災科研 [課題番号：3004] ）。

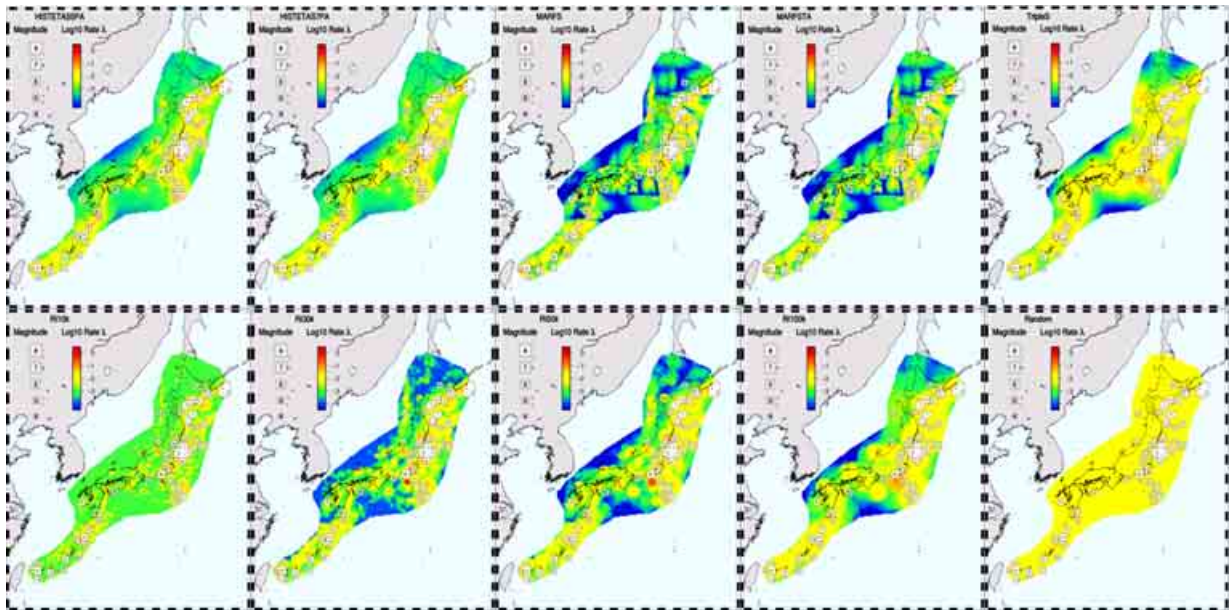


図7. 国際研究プロジェクトCSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability)にエントリーされた陸域部だけの日本全体・3 か月予測モデルの発生予測マップ(東京大学地震研究所[課題番号：1406])