

## 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か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、及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23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。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、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震発生を受け、地殻活動予測シミュレーションによる応力蓄積過程の検討を行った。日本海溝沿いにおいてGPSデータに基づいて推定された滑り欠損分布に基づいて応力蓄積及び動的破壊の過程をシミュレーションすることにより、本震時の破壊に類似した滑り分布が得られた。地震発生間隔を約1,000年と仮定すれば、M9.0相当の滑りが生じることが予想されており、様々な情報を勘案した総合的な解析が行えれば、地殻活動予測シミュレーションを活用することにより、巨大地震発生ポテンシャルの評価に迫っていた可能性がある(防災科学技術研究所[課題番号:3003], Hok et al., 2011)。

東北地方太平洋沖地震では、従来プレート境界が固着していなかったと考えられていた海溝軸付近まで断層破壊が及び、巨大津波の一因になったと考えられている。南海トラフ沿いでも、巨大地震のサイクルの中で時々海溝軸付近が大きなずれを起こしたケースがあることが推測されている。こうした現象のモデルとして、速度・状態依存則に基づく地震サイクルシミュレーションに階層的なアスペリティ分布を導入することにより、地震発生帯のみで破壊が生じる地震と、プレート境界の浅部及び深部に破壊が広がるような地震が交互に発生するような事例が示された(図1, 海洋研究開発機構[課題番号:4001])。また、南海トラフについては、プレート境界面上の摩擦パラメータの空間分布を適切に設定することで、巨大地震の同時発生と時間差発生が繰り返す様子を再現することができた(図2, 気象庁[課題番号:7023])。四国地域では、短期的なスロースリップと長期的なスロースリップが互いに隣接した領域で発生したことが知られているが、有効法線応力や摩擦パラメータの分布を適切に設定することにより、短期及び長期のスロースリップ挙動や、長期的スロースリップ発生時に短期的スロースリップが活発化するという両者の相互作用が再現できた(図3, 防災科学技術研究所[課題番号:3004])。

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滑りの時空間発展を追跡するために大規模計算が必要であり、その効率化を図るために、これまでに階層型行列(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てきた。

この計算手法を用いて、東北地方における巨大地震発生サイクルの再現を試みた。太平洋プレート上面の三次元形状を200,704個の三角セルで近似し、階層アスペリティモデル (Hori and Miyazaki, 2011) と浅部に強パッチを持つアスペリティモデル (Kato and Yoshida, 2011) の2つのモデルについて計算を実施した結果、いずれのモデルでも、M9クラスの超巨大地震発生サイクルの特徴を説明可能であることが分かった (図4, 名古屋大学[課題番号:1702], Ohtani, 2011)。

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る。平成23年度は、東北地方太平洋沖地震に関連して、測地データからプレート境界面上の滑り分布の推定について、三次元有限要素法を用いてプレート沈み込みに伴う不均質構造の影響を考慮し、また滑り分布の人為的な平滑化を避け、残差の相関に基づいて空間解像度を最適化する手法を開発・適用した(図5, 名古屋大学[課題番号:1702])。

これまで、長期的スロースリップの滑りの時空間発展の様子から、断層面上の摩擦特性として滑りまたは滑り速度と応力の関係を求める解析が行われていたが、手法や推定結果が十分検証されたとは言えなかった。そこで、過去に3回の長期的スロースリップが記録されている豊後水道周辺のGPSデータを用いて、同一の手法で3回のイベントそれぞれの滑りの時空間分布を推定し、更に断層面上の各点における摩擦特性を推定した。その結果、こうした手法で摩擦特性が安定して推定できること、スロースリップ域は弱い滑り弱化的性質を持つ一方、周囲に滑り強化域が存在し、摩擦特性の空間的变化でスロースリップの発生域が規定されていることが分かった (図6, 名古屋大学 [課題番号:1702], 若杉, 2012)。

アジョイント法を用いたデータ同化では、地表で観測されるGPSデータから、3つの独立した断層面上の摩擦パラメータを推定できることが示された。また、計算時間刻み可変の4次元変分法データ同化手法を開発し、滑りの加速から終了に至るまでの過程にデータ同化解析を適用することが可能となった (名古屋大学 [課題番号:1702])。

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小繰り返し地震の解析を実施した。東北地方太平洋沖地震の震源付近では、本震発生の約1か月前から前震と見られる活動が生じていたが、小繰り返し地震の解析により、本震の破壊開始点に向かうスロースリップの伝播が生じた可能性が明らかになった (図7, 名古屋大学 [課題番号:1702], Kato et al., 2012)。また、本震発生後には、関東地方の地下において、太平洋プレート及びフィリピン海プレート上面でプレート収束速度よりも速い滑りの生じていることが分かった (図8, 名古屋大学[課題番号:1702])。東北地方太平洋沖地震の発生後は、地震活動が非常に活発化した影響で、繰り返し発生する小地震を用いたプレート境界の滑り監視が困難になったが、前年度までに開発していた中規模の繰り返し地震を利用する解析手法を適用することで、余効滑りを反映する滑りの時空間的な変化を捉えることができた (図9, 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。

プレート境界の断層には間隙流体が存在しており、地震発生時の摩擦発熱等による間隙流体圧の変化は地震サイクルに顕著な影響をもたらす可能性があることが前年度までの研究で明らかとなっていた。このアイデアを用いて東北地方太平洋沖地震のような巨大地震発生のサイクルのモデルを作成した。プレート境界浅部の安定滑り領域内に地震時摩擦発熱による間隙流体圧上昇域を仮定して地震サイクルシミュレーションを行ったところ、プレート境界深部では数十年間隔でM7クラスの地震が発生

するのに対し、数百年周期で海溝軸付近まで破壊が及ぶ巨大地震の発生サイクルが再現できた(図10, 東京大学地震研究所 [課題番号:1405], Mitsui et al., 2012)。

一方、岩石の高速摩擦実験からは、高速度域で断層面の強度が著しく弱化的ることが報告されている。こうした性質を組み込んだシミュレーションによって、宮城・福島・茨城県沖のアスペリティの連動破壊を説明するモデルが示された(図11, 東京大学地震研究所 [課題番号:1405], Shibasaki et al., 2011)。この他にプレート境界浅部で有効法線応力が大きく特徴的滑り量が長い「強パッチ」を置くことで超巨大地震発生を説明するモデル(Kato and Yoshida, 2011)や、階層的なアスペリティ構造を仮定するモデル(Hori and Miyazaki, 2011)もあり、超巨大地震発生のメカニズムについては、複数の可能性があって原因を絞り込めていない。

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必要である。日本列島内陸の地殻応力場の生成要因について検討した結果、太平洋プレート及びフィリピン海プレートの沈み込みの影響に加え、伊豆の衝突及び日本海溝の西進の寄与を考慮する必要のあることが分かった(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及び評価手法がまちまちで、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23年度の検証実験では、1日予測テストクラスを92 ラウンド、3か月予測テストクラスを7 ラウンド、1年予測テストクラスに対して3 ラウンドの検証結果を得た。2009年11月から2010年10月までの1年予測テストクラスについては、関東地方を対象とするケースで、8個のモデル中2個が他のモデルよりも有意に優れた予測ができることが示された(図12, 東京大学地震研究所 [課題番号:1406])。一方、東北地方太平洋沖地震を含むテスト期間においては、いずれのモデルも地震発生数を過小評価してしまい、十分な予測性能が得られなかった。

前年度に構築した、前震の発生に基づく地震発生確率のリアルタイム予測システムにより、2011年3月9日に発生した三陸沖の地震(Mw7.2)及び同11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の震央付近で高い地震発生確率が予想されていたことが示された(図13, 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の関連を調べた結果、逆断層地震の発生域ではモホ面付近の下部地殻における地震波速度が低い場所でM6.0以上の地震が多いことが分かり、このことを考慮して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ところ、全体的な予測精度が向上した(気象庁 [課題番号:7012])。

#### 課題と展望

これまでの研究により、プレート境界における大地震の発生サイクルに関連して、必要不可欠な構成要素を含む物理モデルが構築され、大地震発生に至る応力蓄積過程の基本的な状況は再現することが可能になった。また、従来の地震発生サイクルでは検討されてこなかった摩擦発熱による間隙流体圧上昇や非線形粘性等の効果の検討も進んできている。一部こうした効果も考慮することにより、2011

年3月11日東北地方太平洋沖地震のようなM9クラスの巨大地震の発生を説明するような地震サイクルシミュレーションも実施できた。このように、予測シミュレーション開発は順調に進捗しているが、こうしたモデルを用いた予測を実用化していくにあたっては依然多くの難題が待ち構えている。

一例として、M9地震を再現可能なモデルが構築できたと述べたが、現在は同じ現象を再現する全く異なるモデルが複数存在しており、観測データが時空間的に限られている現状では、それら複数のモデルのどれが正しいかについて判断することが困難な状況にある。また、現在のモデルは地球内部の不均質構造を十分に考慮したものとなっておらず、有限要素法を用いた変位や応力の応答関数計算を行う必要がある。現実に合わせてモデルの空間分解能を上げていくと、必要とされる大規模計算に現在の計算機性能が追いつかないという問題も出てくる。本研究で開発された階層型行列を活用した計算の高速化手法は、こうした問題を解決するために有効な手段と期待され、今後も手法の検証を進める必要がある。

プレート境界の摩擦パラメータを推定したり、予測シミュレーションを実際の状況に整合させたりするためにはデータ同化解析が必要となる。本研究により、アジョイント法をはじめとする解析手法の有効性が検証されているが、これまでの解析は、模擬データを作ったのと同じ条件で解析を行うなど、理想的な条件下での解析が殆どである。今後、実データについて求められた摩擦パラメータが予測性能を持つか検証していくことが必要である。また、プレート境界の摩擦パラメータは空間的に不均質に分布しており、これらを記述するためには、当然ながら多自由度のケースを扱える必要がある。こうした手法の拡張は今後の課題である。

このように、物理モデルに基づく地震発生予測システムの研究は、実用的な予測の実現にはほど遠いが、基礎研究としては着実に進展しており、東北地方太平洋沖地震の発生を受けてもその枠組みの大幅な変更は不要と考えられる。今後は、開発した手法を実データに適用するなど、課題の解決に向けて取り組む必要がある。計算機能力によって研究内容が制約されている面もあるため、扱う空間スケールに応じて考慮する要素を変えるなど、多面的な研究戦略を立てていくことが必要である。

一方、地震統計モデルに基づく地震発生予測については、複数のグループによる手法の改良が進められており、更にCSEPによるモデルの比較検証実験も順調に推移している。現状で予測実験の対象としているのは短期間で地震発生数が稼げるM4~5クラスであるが、今後より発生頻度の低い大規模地震の扱いについても特別な考慮が求められる。また、こうした地震活動の背景にある物理の解明や、物理的な予測シミュレーションとの連携といった課題も残されているが、これらについては現状で確たる見通しが立っていない。

また、こうした予測の試みが日本列島域またはその一部といった狭い範囲のみを対象としていることは懸念材料の一つである。2011年東北地方太平洋沖地震の発生後、日本の地震研究者がグローバルな視点を忘れていたのではないかと、といった批判があった。地震活動の解析などは、良質な地震カタログさえあれば世界中のどこについても適用可能なはずである。日本という限られた地域を対象とすることで手法が最適化できることは確かだが、それは時として局所最適化に陥る危険性も孕んでいることを常に肝に銘じておく必要があり、日本と同時に世界の他の地域に目を向ける視野の広さが求められる。これは日本の地震予知研究全般に当てはまる問題と言えよう。

## 参考文献

Abe, Y. and N. Kato, 2012, Complex earthquake cycle simulations using a two-degree-of-freedom spring-block model with a rate- and state-friction law, *Pure Appl. Geophys.*, in press.

- 長郁夫・桑原保人, 2011, 日本列島の応力蓄積過程をモデル化するための予備的解析, 活断層・古地震研究報告, 11, 331-350.
- Hatano, T., 2011, Rheology and dynamical heterogeneity in frictionless beads at jamming density, *J. Phys. Conf. Ser.* 319, 012011.
- Hatano, T. and O. Kuwano, 2011, Origin of the velocity-strengthening nature of granular friction, *Pure Appl. Geophys.* DOI: 10.1007/s00024-011-0409-9.
- Hirose, F., K. Miyaoka, N. Hayashimoto, T. Yamazaki, M. Nakamura, 2011, Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) -Seismicity: foreshocks, mainshock, aftershocks, and induced activity-, *Earth, Planets and Space*, 63, 513-518.
- 弘瀬冬樹・前田憲二, 2012, 東海地域の割れ残りと東海地域および豊後水道の長期的スロースリップイベントの再現, 地震予知連絡会会報, 87, 印刷中.
- Hok, S. and Fukuyama, E., 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.
- Hok, S., E. Fukuyama and H. Hashimoto, 2011, Dynamic rupture scenarios of anticipated Nankai-Tonankai earthquakes, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, B12319, doi:10.1029/2011JB008492.
- Hori, T., Miyazaki, S., 2011, A possible mechanism of M9 earthquake generation cycles in the area of repeating M7-8 earthquakes surrounded by aseismic sliding, *Earth Planets Space*, 63, 773-777.
- Imoto, M., 2011, Performance of a seismicity model for earthquakes in Japan (M~5.0) based on P-wave velocity anomalies, *Earth, Planets and Space*, 63, 289-299.
- Ito, T., K. Ozawa, T. Watanabe, and T. Sagiya, 2011, Slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake inferred from geodetic data, *earth Planets Space*, 63, 627-630.
- Kame, N. and T. Kusakabe, 2012, Proposal of extended boundary integral equation method for rupture dynamics interacting with medium interfaces, *J. Appl. Mech.*, in press.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake, *Science*, doi:10.1126/science.1215141.
- Kato, N., 2012, Dependence of earthquake stress drop on critical slip-weakening distance, *J. Geophys. Res.*, 117, B01301, doi:10.1029/2011JB008359.
- Kato, N. and S. Yoshida, 2011, A shallow strong patch model for the 2011 great Tohoku-oki earthquake: A numerical simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G04, doi:10.1029/2011GL048565.
- Kawamura, H., T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty, 2012, Statistical Physics of Fracture, Friction and Earthquake, *Rev. Mod. Phys.*, in press.
- 気象研究所 (弘瀬冬樹), 2011, 東北地方周辺におけるb 値の空間分布, 地震予知連絡会会報, 86, 83-86.
- Kuwano, O. and T. Hatano, 2011, Flash weakening is limited by granular dynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17305.
- Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata and K. Hirahara, 2012, Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 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*, 1456-1465, 4.
- Ohtani, M., Large-scale quasi-dynamic earthquake cycle simulation, 2012, Master Thesis, Graduate School of Science, Kyoto University.

- Okada, M., N. Uchida, S. Aoki, 2011, Statistical forecasts and tests for small interplate repeating earthquakes along the Japan Trench, *Earth, Planets and Space*, in press.
- Park, J. O., Kodaira, S., 2012, Seismic reflection and bathymetric evidences for the Nankai earthquake rupture across a stable segment-boundary, *EPS*, 64, in press.
- Shibazaki, B., T. Matsuzawa, A. Tsutsumi, K. Ujiie, A. Hasegawa, and Y. Ito, 2011, 3D modeling of the cycle of a great Tohoku-oki earthquake, considering frictional behavior at low to high slip velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21305, doi:10.1029/2011GL049308.
- Smyth, C., J. Mori, M. Yamada, 2011, Investigating the Distributions of Differences between Mainshock and Foreshock Magnitude, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, doi:10.1785/0120110110.
- Smyth, C., M. Yamada, J. Mori, 2012, Earthquake forecast enrichment scores, *Research in Geophysics*, 2:e2.
- Tsuji, T., Dvorkin, J., Mavko, G., Nakata, N., Matsuoka, T., Nakanishi, A., Kodaira, S., and Nishizawa, O., 2011,  $V_p/V_s$  ratio and shear-wave splitting in the Nankai Trough seismogenic zone: Insights into effective stress, pore pressure and sediment consolidation, *Geophysics*, 76, WA71-WA82.
- Uchida, N., and T. Matsuzawa, 2011, Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data, *Earth Planets Space*, 63, 675-679, doi:10.5047/eps.2011.07.006.
- 若杉貴浩, 2012, Frictional properties of the Bungo Channel slow slip region deduced from geodetic data, 名古屋大学修士論文.
- Yamashita, T. and Suzuki, T., 2011, Dynamic modeling of slow slip coupled with tremor, *J. Geophys. Res.*, 116, B05301, doi:10.1029/2010JB008136.
- Yin, J., N. Kato, T. Miyatake, K. Hirahara, T. Hori, and M. Hyodo, 2012, Assessment of the finite element solutions for 3D spontaneous rupture using GeoFEM, *Earth Planets Space*, in press.
- Yoshida, S. and N. Kato, 2011, Pore pressure distribution along plate interface that causes a shallow asperity of the 2011 great Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G13, doi:10.1029/2011GL048902.

(課題番号 : 4001 図 1)

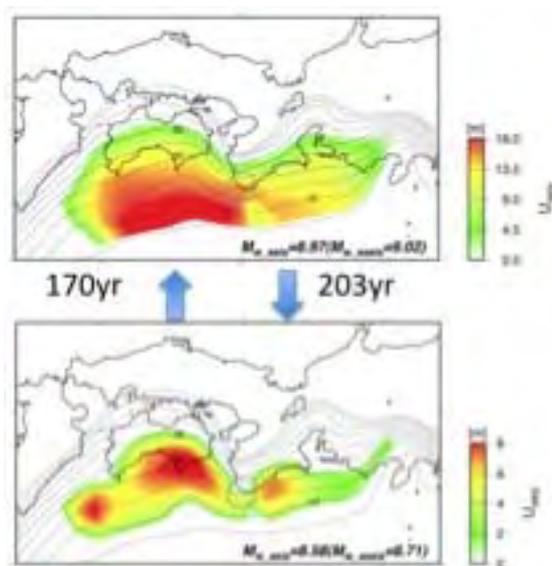
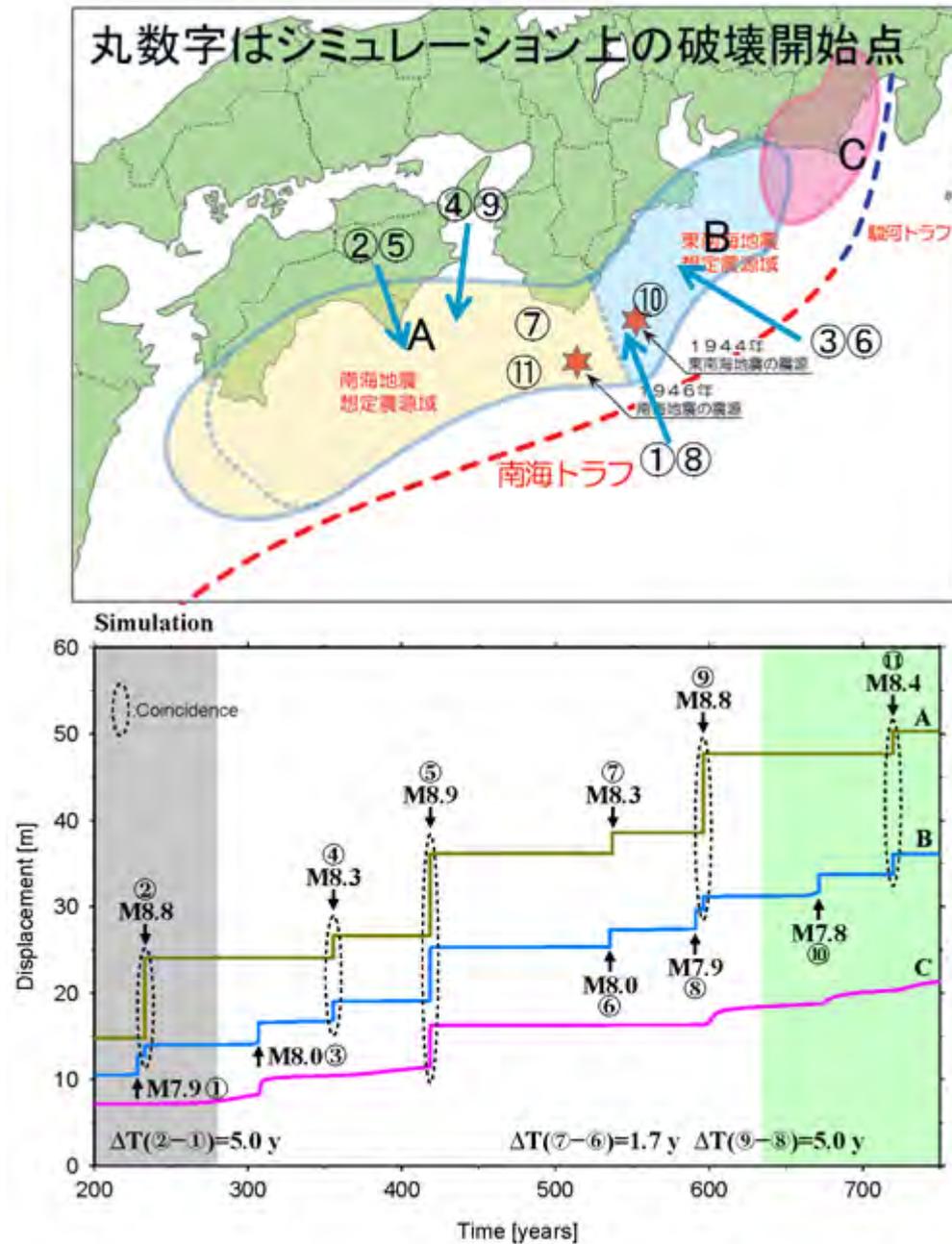


図 1 地震時の滑り分布と発生間隔.

シミュレーションの結果得られた地震時の滑り分布と発生間隔。地震発生帯のみずべる場合と、浅部・深部延長に広がる場合とが交互に生じる（海洋研究開発機構 [課題番号：4001]）。



(課題番号：7023 図2)

図2 シミュレーション結果.

(上) 破壊開始点, (下) 上図のA (南海地域), B (東南海地域) 及びC (東海地域) におけるプレート境界面上の変位の時間変化。破線楕円は同時に破壊したことを示す。(1) 東南海地震の5年後に, (2) 南海地震 (ただし, 東南海の一部も再び破壊) が発生。(3) 東南海地震が単独で発生。(4) 東南海・南海地震が一度に発生。(5) 南海・東南海・東海地震が一度に発生。(6) 東南海地震の1.7年後に, (7) 南海地震が発生。(8) 東南海地震の5年後に, (9) 南海地震 (ただし, 東南海の一部も再び破壊) が発生。(10) 東南海地震が単独で発生。(11) 東南海・南海地震が一度に発生。(気象庁 [課題番号：7023])

(課題番号：3004 図2)

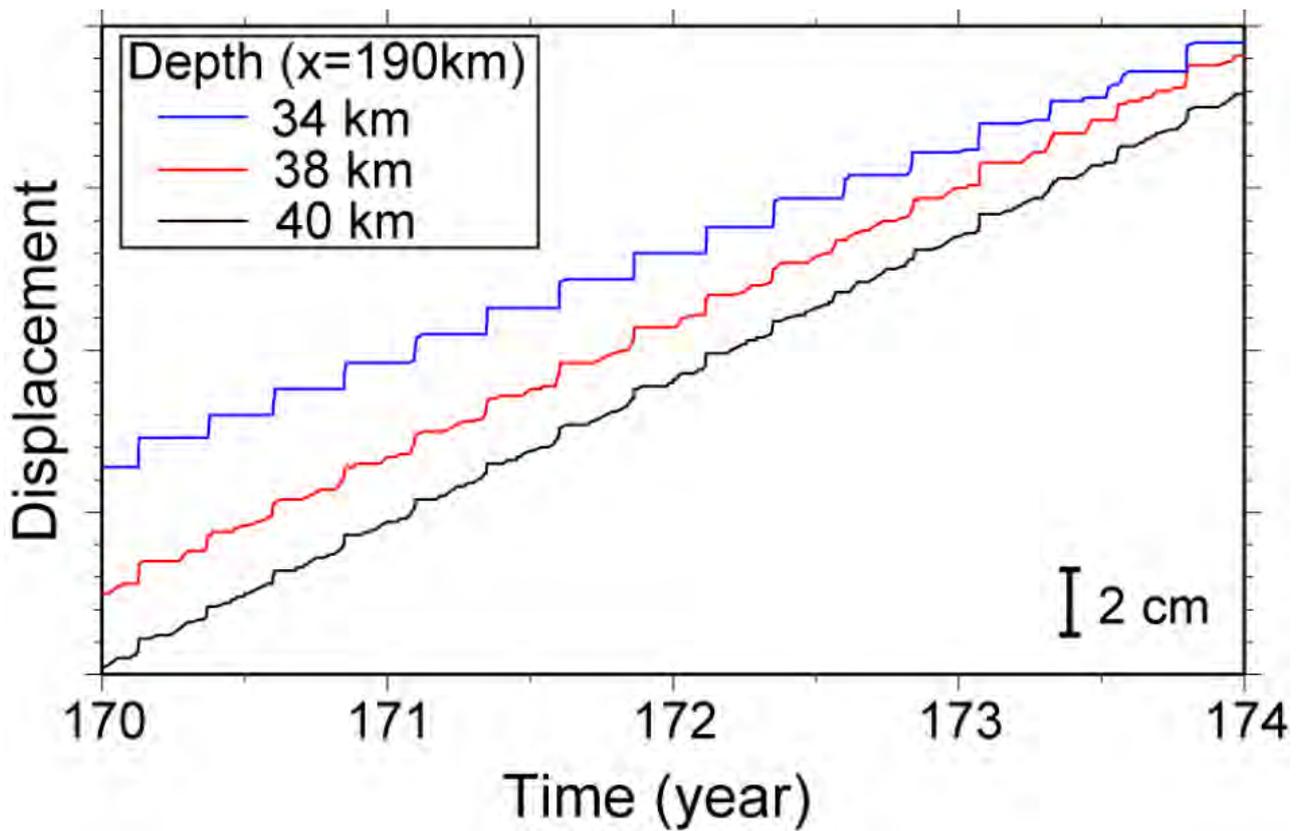


図3 短期的スロースリップイベント発生領域内の各深さにおける滑り挙動（防災科学技術研究所 [課題番号：3004]）

（課題番号：1702 図3）

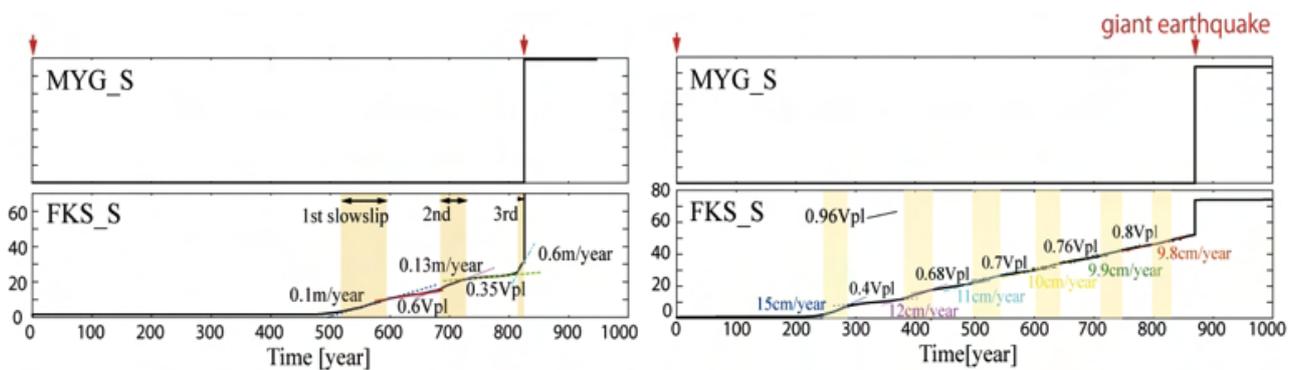


図4 超巨大地震サイクル中での宮城沖浅部と福島沖浅部における積算滑りの時間発展。左図は階層アスペリティモデル，右図は強パッチアスペリティモデル。（名古屋大学 [課題番号：1702]，Ohtani, 2012）。

（課題番号：1702 図6）

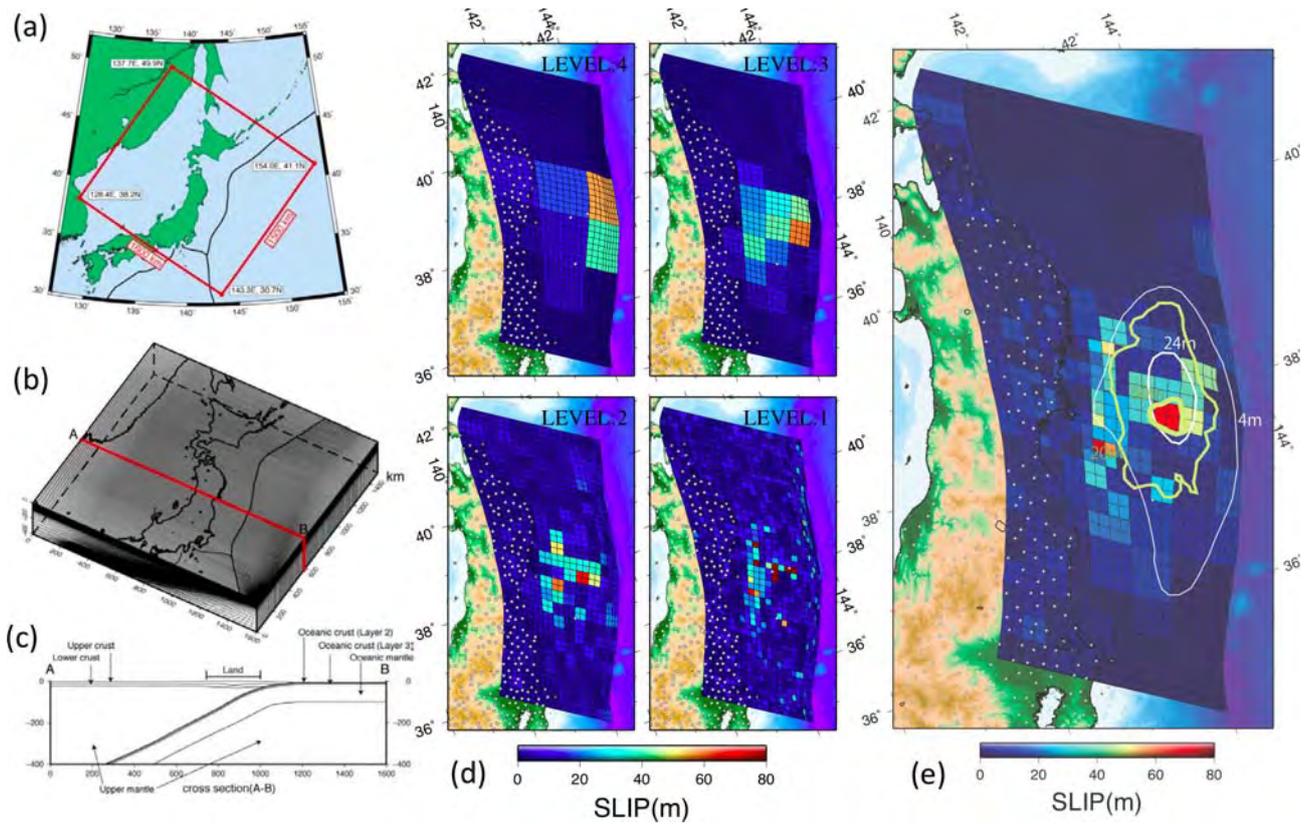


図5 不均質構造を考慮した東北地方太平洋沖地震の断層滑り分布. (a)FEM のモデル領域. (b) モデル領域のFEM メッシュの鳥瞰図. (c) 断面図. (d) 解像度を変化させた場合の滑り分布. (e) 空間解像度の最適化後の断層滑り分布. 滑り分布を示すコンターはOzawa et al. (2011) (白)及びSimons et al. (2011) (緑). (名古屋大学 [課題番号 : 1702] ) .

(課題番号 : 1702 図5)

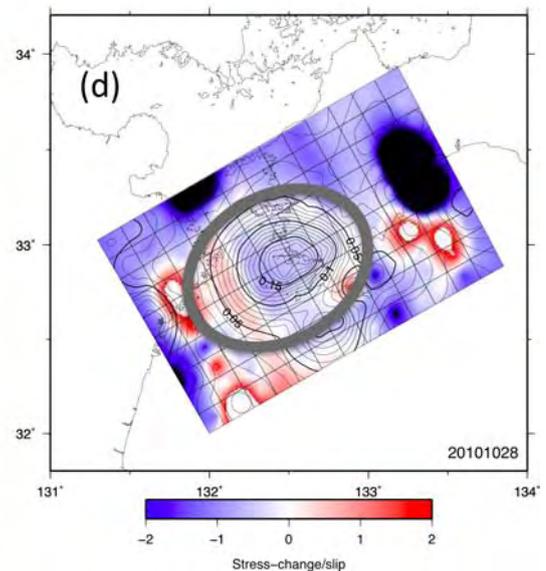
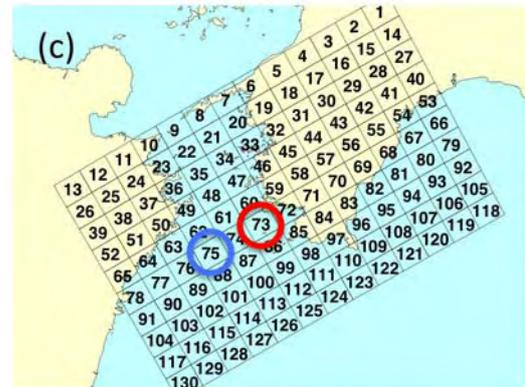
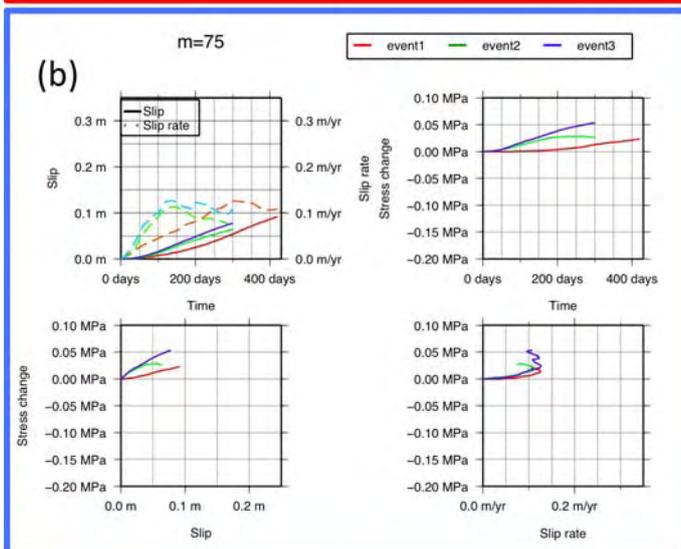
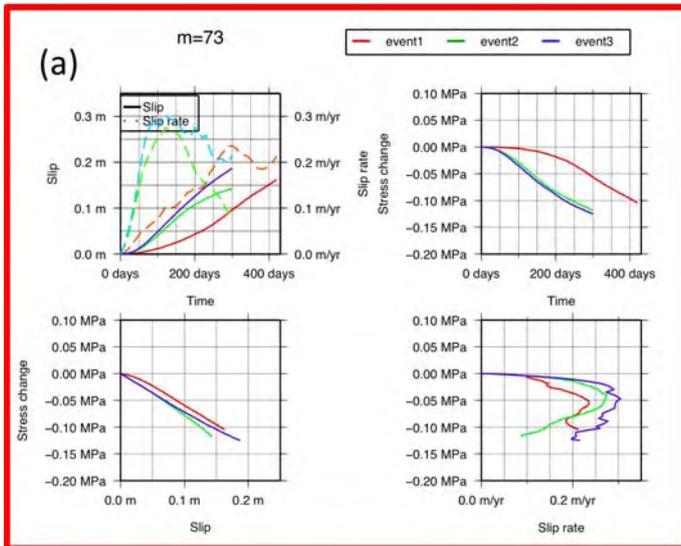


図6 GPS データから推定した豊後水道スロースリップ域の摩擦特性。(a) 滑り域の中央部に近い滑り弱  
化領域における摩擦特性。滑りの時間変化、滑り速度の時間変化、滑り-応力関係、滑り速度-応力関係  
を3回のイベントから求めた結果を重ねて表示している。(b) 滑り域縁辺  
部の滑り境界域における摩擦特性。(c) 解析に使用した断層面と例示した滑り域の場所。(d) 滑り-応力  
間の比例係数の分布。滑りが5cm を越える灰色の楕円内部で信頼できる値が得られている。青で示された  
中央部の滑り弱  
化域の回りに赤で示された滑り強化域が存在している。(名古屋大学 [課題番号: 1702] ,  
若杉, 2012)

(課題番号: 1702 図7)

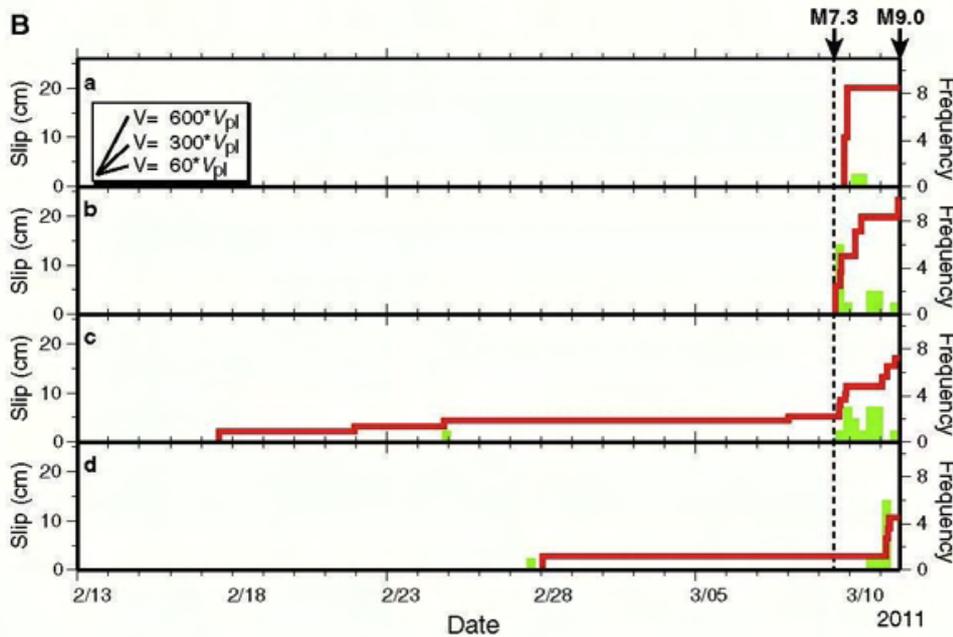
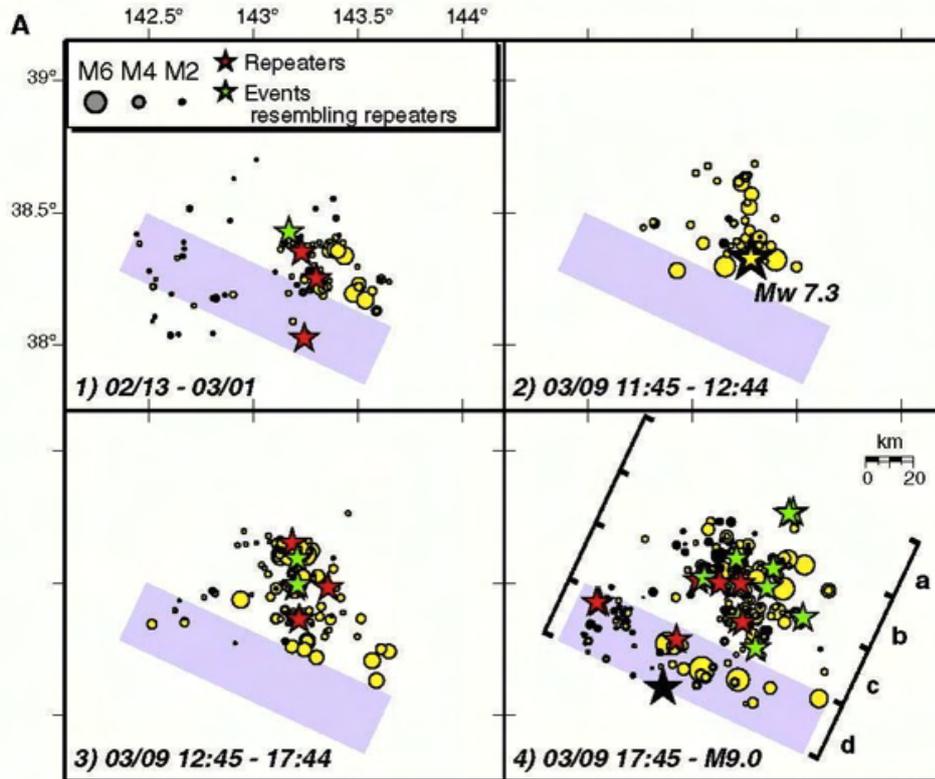


図7 2度のスロースリップ伝播を示す時空間変化

(A) 検出された地震の震源分布。赤、緑、黒、黄色の星印はそれぞれ、気象庁震源に記載された小繰り返し地震、新たに検出した小繰り返し地震と類似したイベント、東北地方太平洋沖地震の破壊開始点、最大前震を示す。紫色の枠は、地震活動移動領域である。(B) 図A の4 領域における準静的滑りの時間変化(赤線)。小繰り返し地震と類似したイベントの発生頻度を緑色の棒グラフで示す。陸域部だけの日本全体・3 か月予測にエントリーされたモデルの発生予測マップ(名古屋大学[課題番号:1702], Kato et al., 2012)

(課題番号:1702 図8)

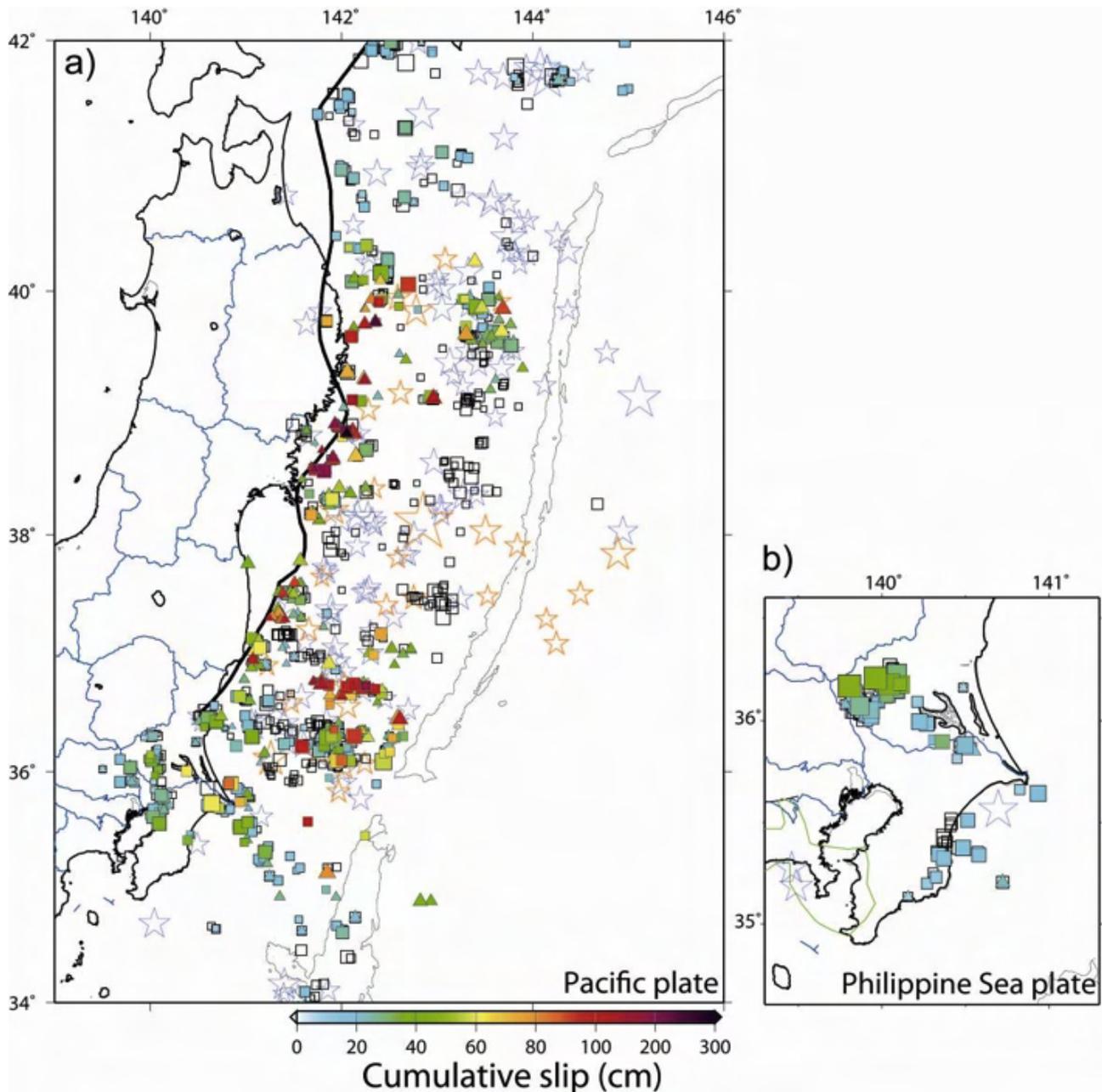


図8 平成23年東北地方太平洋沖地震発生後小繰り返し地震の発生状況とその積算滑り  
 a) 太平洋プレート。b) フィリピン海プレート。定常的に発生する小繰り返し地震群を四角，バースト型地震群を三角で示す。青，橙色の星印はそれぞれ，東北地方太平洋沖地震の前後に発生したM6.5以上の地震を示す（2011年末まで）。（名古屋大学〔課題番号：1702〕）

（課題番号：1702 図9）

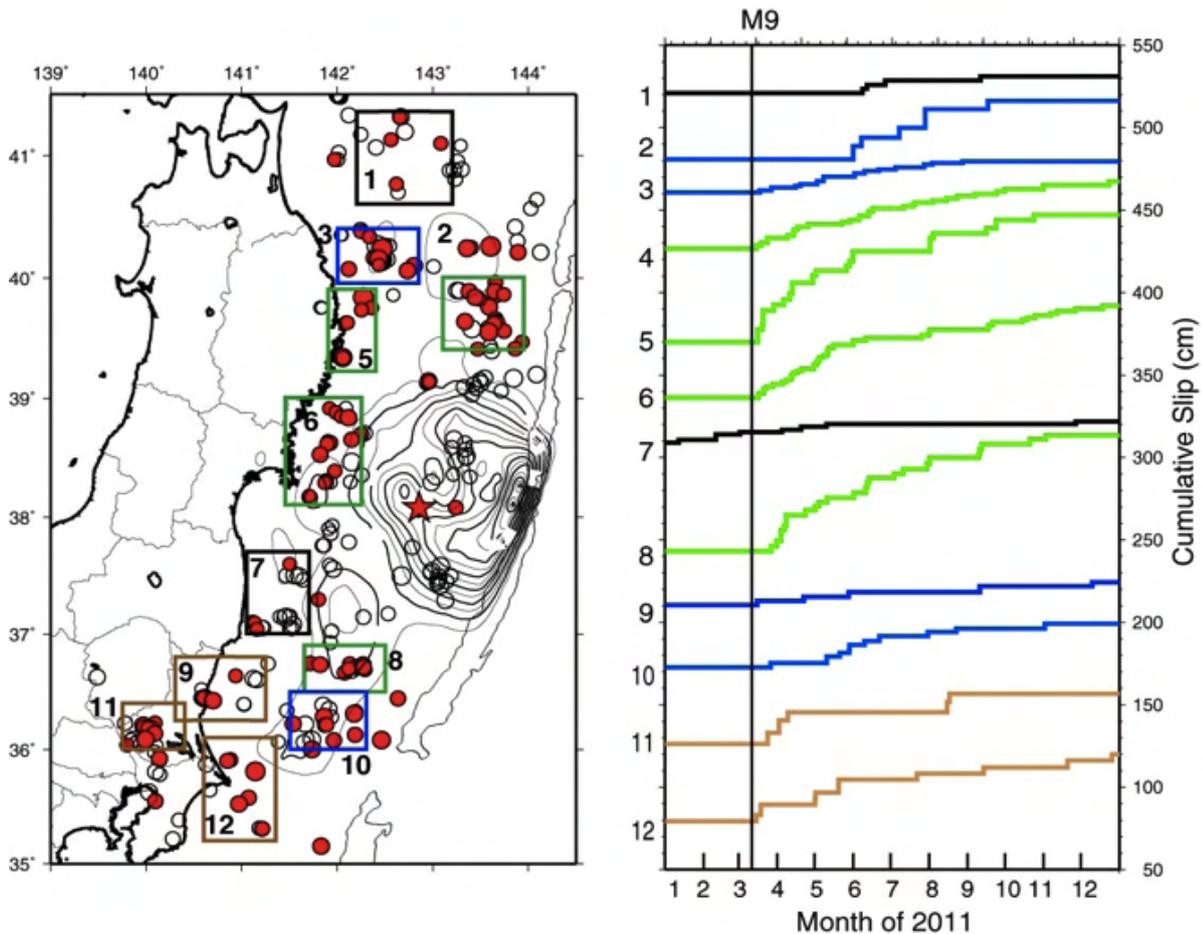


図9 M4以上の繰り返し地震により推定した2011年東北地方太平洋沖地震後の余効滑りの時空間変化。左図の矩形領域1-12内の繰り返し地震グループの平均の積算滑りを右図で示した。左図の丸は繰り返し地震グループの位置でそのうち赤色は2011年東北地方太平洋沖地震以降に活動したグループ、コンターはIinuma et al. (2011)による地震時滑りの分布、赤星は本震の震央。(名古屋大学 [課題番号: 1702])。

(課題番号: 1405 図3)

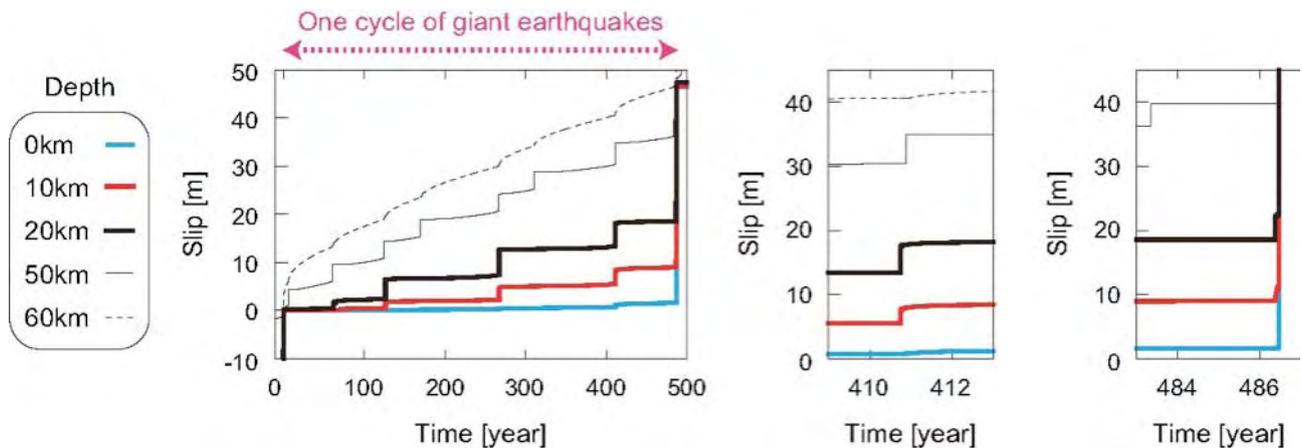


図10 超巨大地震サイクル中での、各深さ(0, 10, 20, 50, 60km)における積算滑り量(左図)、410年(中図)、超巨大地震発生直前(右図)の拡大図。深さ0, 10kmはTP領域、20kmがAsperity1, 50kmはAsperity2, 60kmは深部安定滑り域に対応する。ここでは、間隙流体拡散係数 $\omega = 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $D_{tp}=10\text{km}$ の場合を示している。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1405], Mitsui et al., 2012)。

(課題番号 : 1405 図 4)

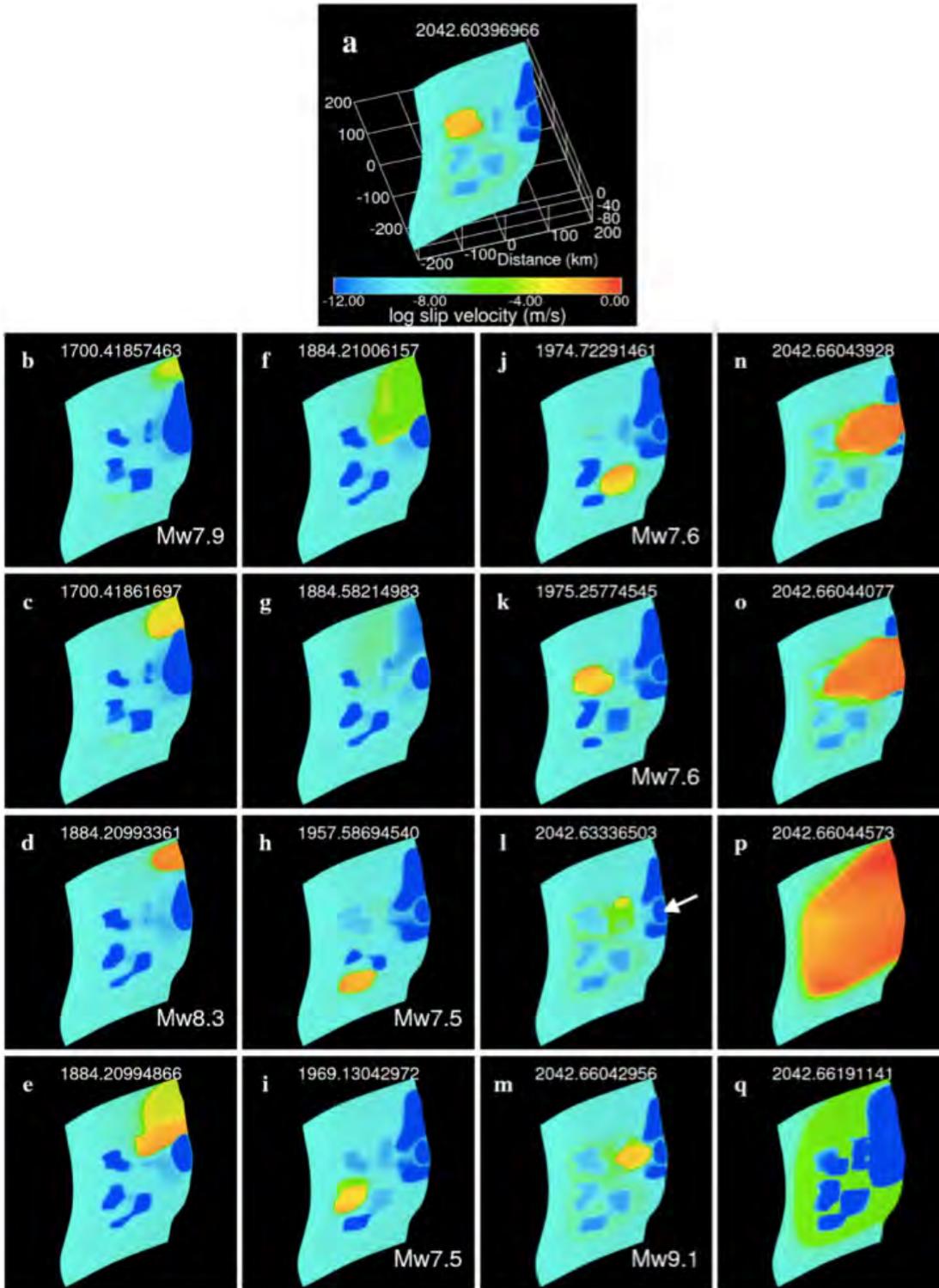


図11 東北地方太平洋沖地震発生サイクルシミュレーションにより得られた滑り速度. a に空間スケールと滑り速度のスケールが示されている. b-g : 三陸沖地震, h : 茨城県沖地震, i, j : 福島県沖地震, k : 宮城県沖地震, m-q : 東北地方太平洋沖地震. 数字は経過時間 (年) を示す. (東京大学地震研究所 [課題番号 : 1405] , Shibazaki et al., 2011) .

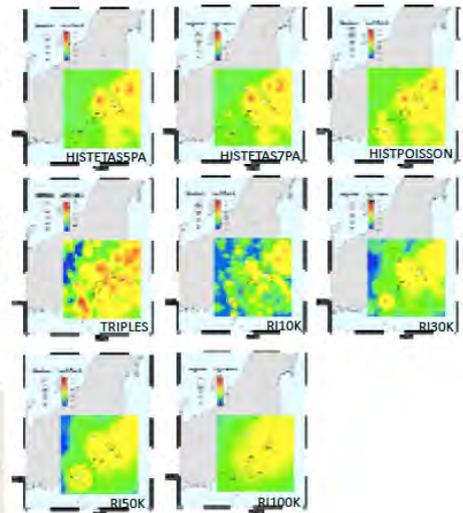
(課題番号 : 1406 図 2)

1st round Kanto 2009.11.1-2010.10.31

Model	LL	CL-test		L-test		N-test		M-test		S-test		Forecast number	Fore/Obs in number
		$\chi$	$\gamma$	$\gamma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\kappa$	$\zeta$					
HISTPOISSON	-32.4	0.948	0.937	0.924	0.164	0.942	0.838	7.1	1.8				
R110K	-32.8	0.926	0.490	0.522	0.672	0.923	0.513	3.8	0.9				
R130K	-36	0.882	0.501	0.522	0.672	0.928	0.281	3.8	0.9				
R150K	-36.6	0.911	0.495	0.522	0.672	0.931	0.233	3.8	0.9				
R1100K	-38.1	0.822	0.507	0.522	0.672	0.941	0.076	3.8	0.9				
HISTETAS7PA	-38.9	0.385	0.846	0.928	0.156	0.945	0.016	7.2	1.8				
HISTETAS5PA	-40.4	0.191	0.842	0.928	0.156	0.994	0.005	7.2	1.8				
TRIPLE-S	-41.9	0.971	1.000	1.000	0.000	0.931	0.694	19.1	4.8				

R-test	1	2	3	4	5	6	7	8
1.HISTPOISSON		0.182	0.581	0.640	0.658	0.998	0.997	0.730
2.R110K	0.052		0.793	0.749	0.818	0.869	0.916	0.325
3.R130K	0.001	0.000		0.632	0.794	0.623	0.875	0.061
4.R150K	0.003	0.005	0.111		0.890	0.400	0.774	0.043
5.R1100K	0.001	0.000	0.011	0.021		0.131	0.346	0.006
6.HISTETAS7PA	0.000	0.000	0.013	0.022	0.071		0.985	0.038
7.HISTETAS5PA	0.000	0.000	0.000	0.001	0.017	0.001		0.018
8.TRIPLE-S	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	



【表の見方】

- 赤字は、有意水準（0.025）以下のスコアを示し、rejectを意味する
- 黄色いラインは、CL, L, N, M, S-testを全てパスした あるいは R-testで全てパスしたことを示す
- R-test表上段の番号は、表の左端の各モデルの番号を示す。例えば、Kantoで 1.HISTPOISSON 対8(青い四角)は 黒字である。HISTPOISSONは8より優れている と読む。
- LLは対数尤度を示す

図12 1st round Kanto の空間予測図と実測値（東京大学地震研究所 [課題番号：1406]）。