

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。以下では平成25年度の研究により得られた成果の概要について述べるとともに、5年間の計画全体の到達度について総括する。

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、地震発生の物理過程を考慮した数値シミュレーションに観測網から得られるデータを取り込んで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きた。

予測シミュレーションの改良・高度化について、平成25年度は、階層型行列を用いることにより省メモリ化・高速化した地震発生サイクルシミュレーション手法を東北地方太平洋沖地震や1968年十勝沖地震震源域に適用した(名古屋大学[課題番号:1702], Ohtani et al., 2014)。この手法は、プレート境界を分割したセル数 N に対してメモリ量が $O(N)$ で、計算量が $O(N \log N)$ で済むため、これらがともに $O(N^2)$ で増加する通常の計算よりも大規模シミュレーションに適した計算手法である。また、海溝や陸側斜面など地表面の起伏の影響を適切に考慮できるよう、任意形状の地表面を持つ半無限媒質に対するすべり応答関数の計算法を開発した(図1, 名古屋大学[課題番号:1702], 大谷・平原, 2013)。

一方、南海トラフの巨大地震やスロースリップについて、観測事実を再現するようなシミュレーションの開発も進んだ。多様な発生様式を示す南海トラフ巨大地震や長期的スロースリップを再現するようなモデルが構築され、前兆すべりの検出や津波地震の発生の可能性が検討された(図2, 気象庁[課題番号:7023], Hirose and Maeda, 2013)。また、四国における短期および長期のスロースリップを再現するモデルを構築した(図3, 防災科学技術研究所[課題番号:3004], Matsuzawa et al., 2013)。

データ同化システムの開発については、これまでアジョイント法やマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた断層の摩擦パラメータ推定手法の開発を進めてきた。平成25年度は、推定された摩擦パラメータを用いて観測データとの比較計算を行うための3次元物理モデルの構築を行った。摩擦パラメータがプレート境界面で一定という仮定で余効すべりを計算すると、観測結果との間で系統的な差が生じており、摩擦パラメータ $(a-b)\sigma$ の空間変化やすべり速度依存性を考慮する必要性が示唆された(図4, 名古屋大学[課題番号:1702], Fukuda et al., 2013)。また、有限要素法を用いて3次元不均質構造やアセノスフェアの粘弾性を考慮した変

位応答関数を計算することにより、東北地方太平洋沖地震の地震時および地震後のすべり分布を推定したところ、粘弾性緩和の考慮の有無によって推定される余効すべりの分布が大きく異なる結果が得られた。今後のデータ同化を考える上で大変重要な知見が得られたと言える（図5、名古屋大学〔課題番号：1702〕、鈴木・他、2013）。

また、海域のプレート境界面におけるすべり・固着分布を推定する手法として、プレート境界の繰り返し地震を活用する手法の開発を進めてきた。平成25年度は、関東地方における太平洋プレートおよびフィリピン海プレートの境界面のすべり速度が東北地方太平洋沖地震後に一旦加速し、その後プレートの相対運動速度まで低下していること、2011年東北地方太平洋沖地震の破壊開始点付近では、本震の10年ほど前からスロースリップが時々生じ、すべり域の移動を繰り返しながら最終的な破壊に至る様子が推定され（図6、名古屋大学〔課題番号：1702〕、内田・他、2014）、巨大地震発生に至る過程の貴重な観測データとして、今後の地震発生シミュレーションで役立てられるものと期待できる。

この5年間の成果を、本研究項目の2つの柱であるシミュレーションとデータ同化の観点からまとめてみる。まず、シミュレーションに関しては、速度・状態依存摩擦構成則に基づくシミュレーションを大規模に行うための計算技術が開発され、セル数20万程度のモデルを用いてM9クラスの巨大地震を含む地震サイクルの再現に成功した。また、パラメータを注意深く最適化することにより、長期と短期のスロースリップイベントの再現に成功するなど、モデルの適用範囲は着実に広がった。また、すべりと時間に依存する摩擦構成則を用いたシミュレーションでは、準静的な応力蓄積と動的な断層破壊を連携させた地震サイクルのシミュレーションを複数サイクルにわたって行うことに成功し（名古屋大学〔課題番号：1702〕、Hashimoto et al., 2013）、地震サイクルのシミュレーションの基礎的技術はほぼ揃ってきた。一方、データ同化に関しては、測地データを用いた摩擦パラメータの推定手法が開発され、実際の観測データをある程度再現可能なパラメータを推定することができた。また、リアルタイムで得られる地殻変動データをシミュレーション結果と比較することで、モデルの絞り込みを行う粒子フィルタの手法が開発され、模擬データを用いた予測実験にも成功した。いまだ実データによる実験には至っていないが、そうした試みが現実的な目標として射程内に入ってきたと言える。プレート境界のすべりや地殻内の応力状態の指標として相似地震や地震活動を利用するための基礎的研究も進展した（名古屋大学〔課題番号：1702〕、Katsumata and Sakai, 2013, Uchida and Matsuzawa, 2013）。

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きた。

本研究では、内陸地震の発生サイクルのモデル化、地震サイクルにおける間隙流体圧の効果の検討、有限要素法を用いて不均質構造を考慮した地震サイクルモデル構築、破壊現象の時空統計性に関する検討などを実施してきた。内陸地震発生サイクルのモデル化においては、中部地域を対象に深さ50kmまでの不均質レオロジー構造モデルを作成し、57の活断層を組み込んで、5万年間におよぶ長期の地殻変動をシミュレーションすることが可能となり、部分的にはあるが観測事実と整合的な結果が得られた（図7、産業技術総合研究所〔課題番号：5003〕、Cho and Kuwahara, 2013a, 2013b, 長・桑原, 2013）。

間隙流体圧の効果については、地震時の摩擦発熱による間隙流体圧上昇（Thermal Pressurization、以下 TP）の効果を組み込んだ3次元準動的地震発生シミュレーションを日本海溝沿いから千島海溝南部まで広げ、M8クラスの大地震と M8.8クラスの巨大地震の再現を行った。また、スロースリップイベント同期し、逆方向に伝播する微動が、流体拡散による小規模のすべりの励起によって生じることが明らかとなった（東京大学地震研究所〔課題番号：1405〕, Suzuki and Yamashita, 2014）。

破壊現象の時空統計性に関する検討では、粉体層に固体固まりを陥入させた際の応答をアコースティックエミッションとして記録したところ、イベントサイズがべき分布となることが分かり、べき指数と構成粒子サイズの関係が明らかとなった（図 8, 東京大学地震研究所〔課題番号：1405〕, Matsuyama and Katsuragi, 2014）。

この5年間では、途中で東北地方太平洋沖地震が発生したこともあり、プレート境界浅部の浅い部分で非常に大きな断層すべりが生じるメカニズムとして TP が注目され、地震サイクルにおける間隙流体のモデルが多数検討され、理解が進んだことが特筆すべき成果である。

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きた。

平成 25 年度は、これまでの CSEP に関する成果の取りまとめを中心に行った。日本全域を対象とした3ヶ月間の予測では、提出されたモデルのすべてがテストをパスすることができず、地震活動予測モデルがまだ未成熟であることが浮き彫りとなった。しかし、公平な形でモデルの優劣を検証できる体制を構築するという本研究計画の目的はほぼ達せられたと言える。また、様々な検証を行う過程で、CSEP の各テストの癖や問題点も明らかにされており、それらを改良することが予測モデルの発展につながるものと期待できる（図 9, 東京大学地震研究所〔課題番号：1406〕）。

日本国内における前震活動を過去 14 年間について探したところ、内陸で発生した M4.5 以上の地震 124 個のうち 46 個が M1.0 以上の前震を伴っていたことが分かった（京都大学防災研究所〔課題番号：1802〕, Smyth et al., 2013）。

地震の規模別頻度分布に基づいて M5.0 以上の浅発地震の発生確率を与える MGR モデルを作成し、3次元地震波速度構造や応力場の情報を組み込むことでパフォーマンスの向上が見られた（図 10, 気象庁〔課題番号：7012〕）。また、日本海溝沿いと伊豆地域について前震活動に基づく地震発生予測モデルを作成したところ、日本海溝沿いでは予知率 25%、的中率 40%、伊豆地域では予知率 68%、的中率 23%という結果が得られ、予測手法の可能性が示された（図 11, 気象庁〔課題番号：7012〕）。

5年間を通してみると、CSEP のテスト結果に端的に現れているように、現状で実用に耐える、もしくはそうした期待を持てる地震活動予測モデルは存在しない。ただ、この5年間の研究を通して、異なるモデルを同一の基準で比較検証する体制が構築されたことは、今後の研究の発展につながる成果だと言える。

これまでの課題と今後の展望

以下では、これまで5年間の研究成果を踏まえ、これまでの課題と今後の展望について述べる。

本研究では、地震発生に至る物理過程を表す数値モデルを作成し、データ同化を通して数値モデルに現実を再現させることを通して将来の地震発生予測を行うシステムの構築を目指してきた。プレート境界における大地震の発生サイクルにとって必要不可欠な構成要素、すなわち、プレート運動による応力蓄積、すべり遅れの蓄積による応力集中、地震発生による断層破壊、断層の強度回復などを再現する数値モデルが複数作られ、地震発生に至る諸過程の概略が再現可能となっている。現実の大地震が発生する地球内部は、非常に不均質な構造を持ち、地震の破壊そのものも大変複雑である。これまでに作られた数値モデルは、そうした非常に自由度の大きい現象を再現することはできていないが、効率的な計算手法の開発や計算機の性能向上により、そうした障壁は少しずつ克服されつつある。また、摩擦発熱による間隙流体の圧力上昇といった地震サイクルに影響を及ぼし得る現象のモデル化も進んでおり、次世代の物理モデルにおいては標準的な現象として組み入れられることになると期待される。このように、地震発生過程の数値モデルという観点で研究は順調に進んでおり、比較的単純な事象を対象としたモデル構築は現実的な目標になってきている。

地震発生予測モデルを構築する上で問題となるのは、現象に対するモデルの一意性である。本質的に不均質、多自由度で、多様な振る舞いをする地震活動のモデル化においては、複数の異なるモデルが観測誤差の範囲内で同程度に観測データを説明してしまうことが十分起こり得る。そうした事態が生じた時に、どうやってモデルの取捨選択や最適化を行っていけば良いか。これはデータ同化の問題に他ならないが、実例を通してできるだけ多くの経験を積んでいくことが必要不可欠と考えられる。この5年間の研究において、プレート境界の摩擦パラメータの推定法、また逐次的に入ってくるデータを用いたモデル選択の方法などのデータ同化手法が開発され、主として模擬データを用いた検証が実施された。これまでのところ、摩擦パラメータの数を極力少なくした条件下では満足な解を得ることができているが、現実的な複雑な断層面を想定した時に同様な解析が可能にするためには、引き続き手法の開発・改良を継続していくことが必要である。

地震活動に基づく地震発生予測については、CSEP という予測モデルを評価する枠組みが構築されたことがこの5年間の重要な成果であり、今後この枠組みを維持し、改良・発展させていくことで、将来的により予測性能の高いモデルが出てくることを期待したい。

以上のように、この5年間で本研究は順調に進捗してきたと言えるが、この「順調な進捗」は、実用的な地震発生予測という最終目標が射程内に入ったことを意味していない。我々が対象としている震源断層は、現時点で現実的に扱える範囲よりもはるかに自由度が大きく、多様な空間スケールの不均質構造を有している。こうした震源断層について、実用に耐える精度で予測情報を生み出すための戦略は未だに描けておらず、そこに至る保証も与えられない。ただ、東北地方太平洋沖地震の経験からは、震源断層が地震規模に対応した階層構造を持つ可能性が示唆されており、そうした前提を認めるならば、特に M8 級以上の大規模地震の予測への道が開ける可能性がある。このように、科学的根拠に基づいて、できることとできないことを明確に区別した上で、可能性のある目標へ向けて、長期的および短期的な戦略を具体的に立てることが求められる。平成 26 年度から開始される「災害の軽減に貢献するた

めの地震火山観測研究計画」の実施内容を見る限りでは、こうした科学的な議論がどこまで尽くされているのかが判然とせず、科学研究の計画として見ると大いに不満が残る。関係する研究グループに対しては、10年、20年先までを見据えた長期的なロードマップとそれを5年単位に分割した短期的な研究計画とを早期に作成することを進言する。

東日本大震災では、大部分の地震研究者の想像を超える巨大な地震・津波が発生し、多くの研究者がこれまで築き上げてきたアイデアを打ち砕いた。地震予知のような絵空事でなく、防災・減災にすぐに役立つような研究に集中すべき、といった圧力も研究者コミュニティの内外から強まった。もちろん、そうした実用的な研究は重要であり、できることはどんどん進めるべきであるが、一方で、理学としての地震学が防災・減災に最も貢献し得るのは、精度の高い将来予測を通してに他ならない。地震発生予測の高度化、地震予知の実現こそ、地震学による「災害の軽減」に対する最大の貢献に他ならず、この研究計画全体の根幹もそこに置かれるべきである。将来、予知や予測といった旗印を下ろすようなことになれば、この研究計画全体の存在意義が問われることになるだろう。

成果リスト

- Cho, I. and Y. Kuwahara, 2013a, Modeling of a three-dimensional thermal structure in the lower crust for numerical simulations of crustal deformation of the Japanese Islands, *Earth Planets Space*, 65, 855-861.
- Cho, I. and Y. Kuwahara, 2013b, Numerical simulation of crustal deformation using a three-dimensional viscoelastic crustal structure model for the Japanese Islands under east-west compression, *Earth Planets Space*, 65, 1041-1046.
- 長郁夫・桑原保人, 2013, 日本列島の地殻温度構造と粘弾性構造の3次元モデルおよび地殻活動シミュレーションに関する数値データ, 地質調査総合センター研究資料集, 586.
- Fukuda, J., A. Kato, N. Kato, and Y. Aoki, 2013, Are the frictional properties of creeping faults persistent? Evidence from rapid afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3613-3617, doi:10.1002/grl.50713.
- Hashimoto, C., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, 2013, Physics-based 3-D simulation for earthquake generation cycles at plate interfaces in subduction zones, *Pure Appl. Geophys.*, doi: 10.1007/s00024-013-0716-4.
- Hirose, F., and K. Maeda, 2013, Simulation of recurring earthquakes along the Nankai trough and their relationship to the Tokai long-term slow slip events taking into account the effect of locally elevated pore pressure and subducting ridges, *J. Geophys. Res.*, 118, 1-18, doi:10.1002/jgrb.50287.
- Katsumata, K., and S. Sakai, 2013, Seismic quiescence and activation anomalies from 2005 to 2008 beneath the Kanto district, central Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, 65, 1463-1475.
- Matsuyama, K., and H. Katsuragi, 2014, Power law statistics of force and acoustic emission from a slowly penetrated granular bed, *Nonlin. Processes Geophys.*, 21, 1-8.

- Matsuzawa, T., B. Shibasaki, K. Obara, and H. Hirose, 2013, Comprehensive model of short- and long-term slow slip events in the Shikoku region of Japan, incorporating a realistic plate configuration, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5125-5130.
- 大谷真紀子・平原和朗, 2013, 地表面形状が地震発生サイクルに与える影響, 日本地震学会2013年度秋季大会, P1-45.
- Ohtani M., K. Hirahara, T. Hori and M. Hyodo, 2014, Observed change in plate coupling close to the rupture initiation area before the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake: implications from an earthquake cycle model, *Geophys. Res. Lett.*, DOI: 10.1002/2013GL058751, 2014.
- Smyth, C., M. Yamada, and J. Mori, 2012, Earthquake forecast enrichment scores, *Research in Geophysics*, doi:10.408/rg2012.e2.
- 鈴木翔太・伊藤武男・里嘉千茂・兵藤守, 2013, 3次元地下構造を考慮した有限要素法による2011年東北沖地震の粘弾性応答, 日本地震学会秋季大会.
- Suzuki, T. and T. Yamashita, 2014, Effects of Shear Heating, Slip-Induced Dilatancy and Fluid Flow on Diversity of 1-D Dynamic Earthquake Slip, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Uchida, N., and T. Matsuzawa, 2013, Pre- and post-seismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 374, 81-91, doi:10.1016/j.epsl.2013.05.021.
- 内田直希・伊藤喜宏・加藤愛太郎・太田雄策, 2014, 東北地震から3年: 東北地方太平洋沖地震前にみられたスロースリップ, *なみふる*, 97, 印刷中.

(課題番号 : 1702 図 1)

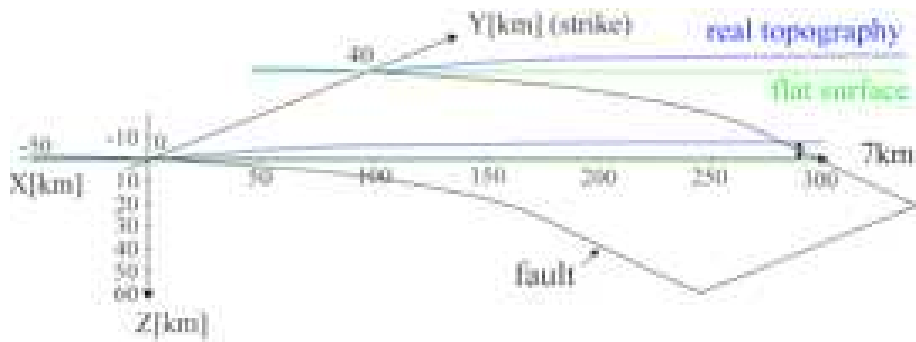


図 1 : 日本海溝に沈み込む太平洋プレートを模したモデル (大谷・平原, 2013)。水深7km の日本海溝をZ=0km とし、深さ方向にZ 軸、プレート走行方向にY 軸をとっている。青線が海底地形を表す。走行方向には構造は一様とする簡単化を行っている。

(課題番号 : 7023 図 1)

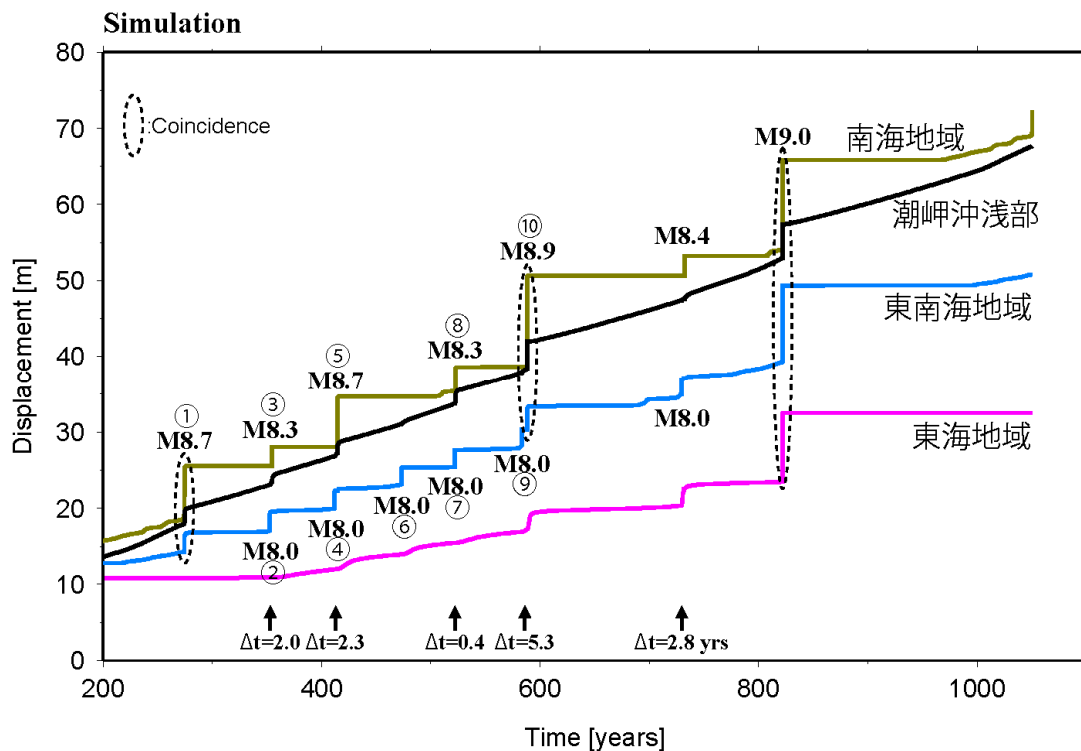


図 2 : プレート境界面上の4地点における変位の時間変化。破線楕円は同時破壊を、矢印は時間差を持つ破壊を示す。複雑な発生パターンが現れていることがみてとれる。

(課題番号 : 3004 図)

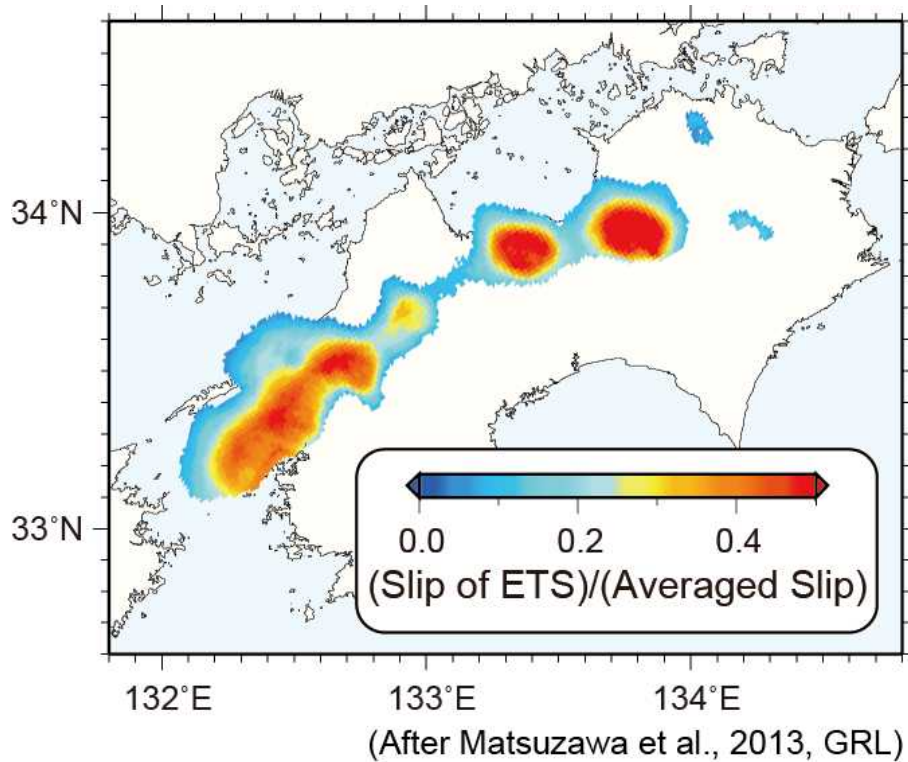


図 3 : 短期的SSE によるすべり量と長期間平均したすべり量の比
 数値計算(Matsuzawa et al., 2013) によって得られた、四国地域における短期的SSEによるすべり量と
 長期間平均したすべり量の比の分布を示す。

(課題番号 : 1702 図 6)

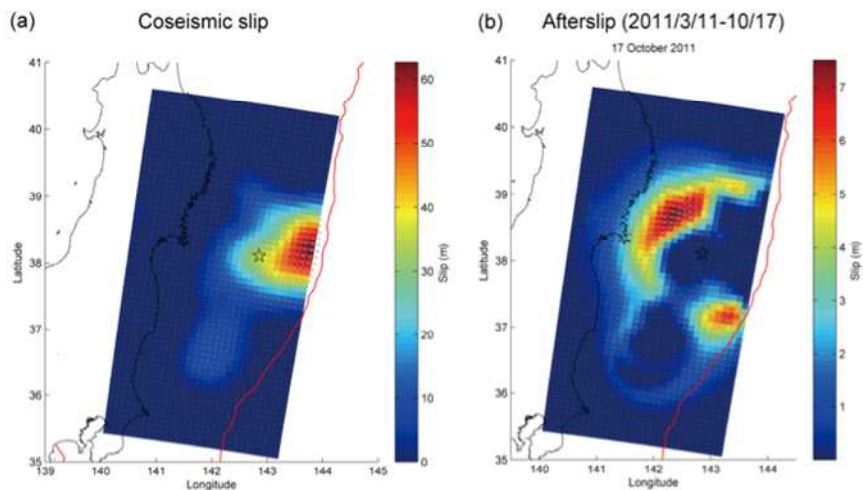


図 4 : 余効すべりから推定した摩擦パラメータによるすべり分布の再現。
 (a) GPSデータのインバージョンから推定された2011 年東北地方太平洋沖地震のすべり分布。余効すべりのシミュレーションの初期条件を計算するために使用した。
 (b) 摩擦構成則に基づくシミュレーションから計算された余効すべりのすべり分布(2011/3/11-10/17)。

(課題番号 : 1702 図 7)

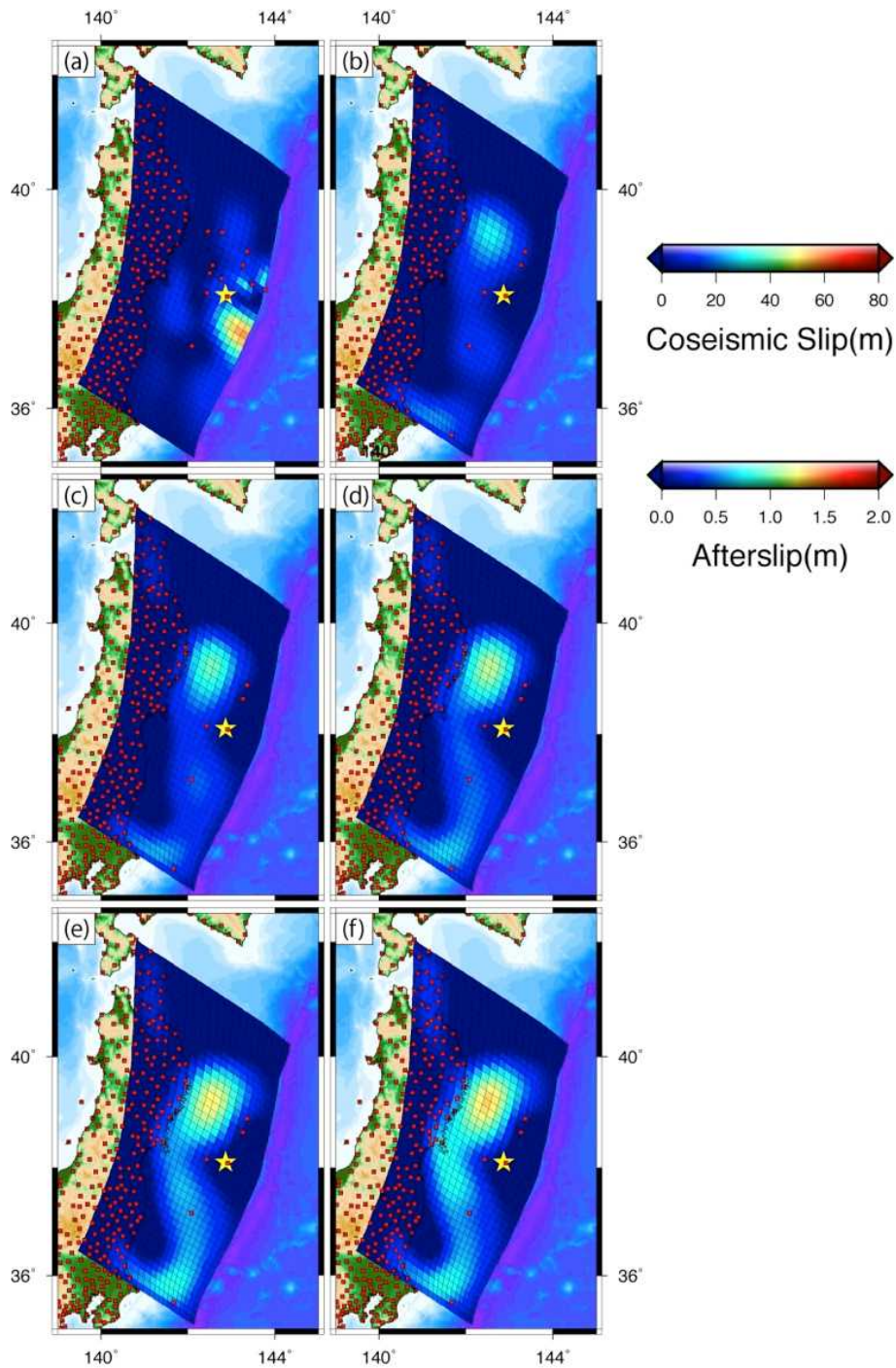


図 5 : 粘弾性応答関数を用いたインバージョン結果。

(a) 地震時のすべり分布。(b-f) は積算された余効すべり分布。(b)地震後0.5年、(c)地震後1年、(d)地震後1.5年、(e)地震後2年、(f)地震後2.5年。

(課題番号 : 1702 図 8)

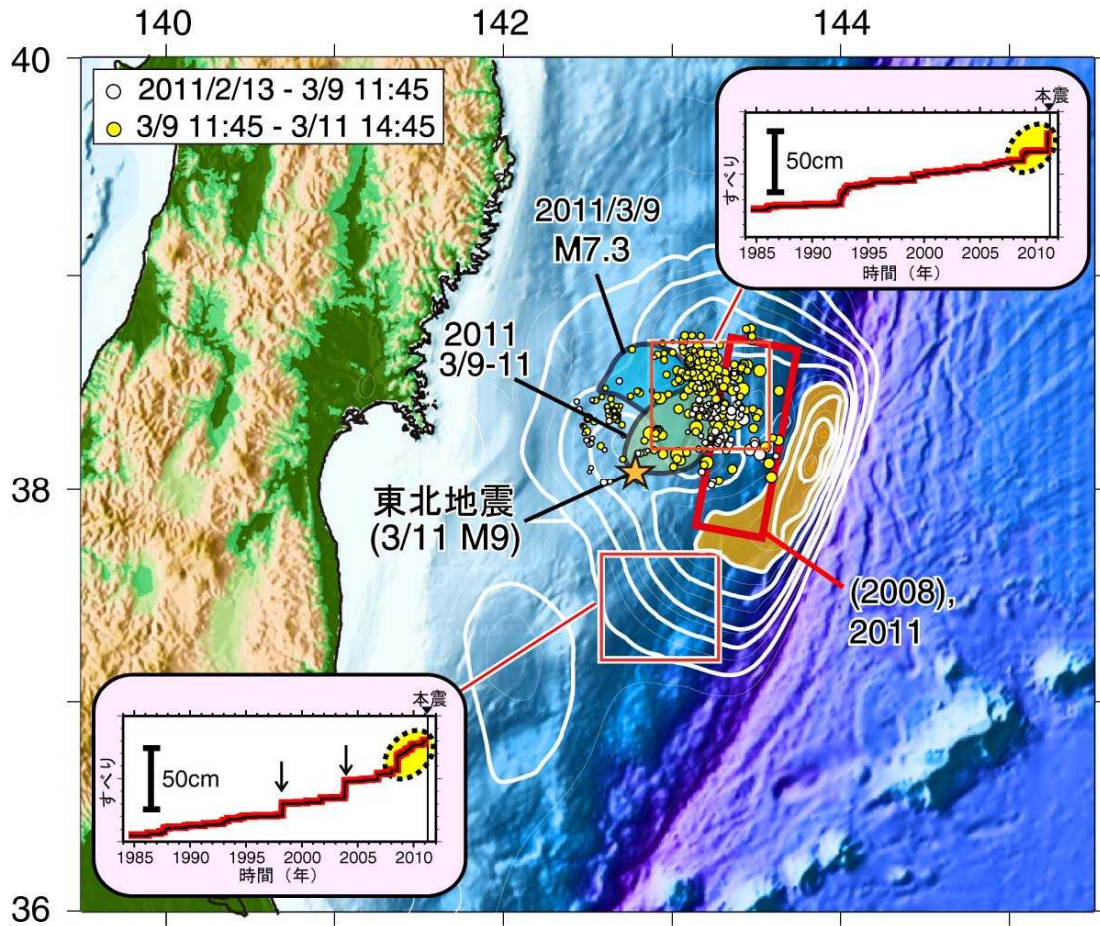


図6： 東北地震前に震源域周辺でみられた様々なすべり（内田・他, 2014 を改変）。赤細線の四角領域でのすべりは小繰り返し地震によるもの（Uchida and Matsuzawa, 2013）、赤太線矩形領域でのすべりは、海底圧力、陸上ひずみデータによるもの（Ito et al., 2013）、白と黄色の丸は、3月9日前と後の地震活動（Kato et al., 2012）、青と緑の領域は、水圧計のデータおよび陸上GPSデータによる3月9日の前震の地震時すべりとその後の余効すべり（Ohta et al., 2012）を示す。図中の日付はそれぞれのイベントの発生時、橙色星は本震の震央、白いコンターはInuma et al., (2012)による本震のすべり分布を示す。

（課題番号：5003 図2）

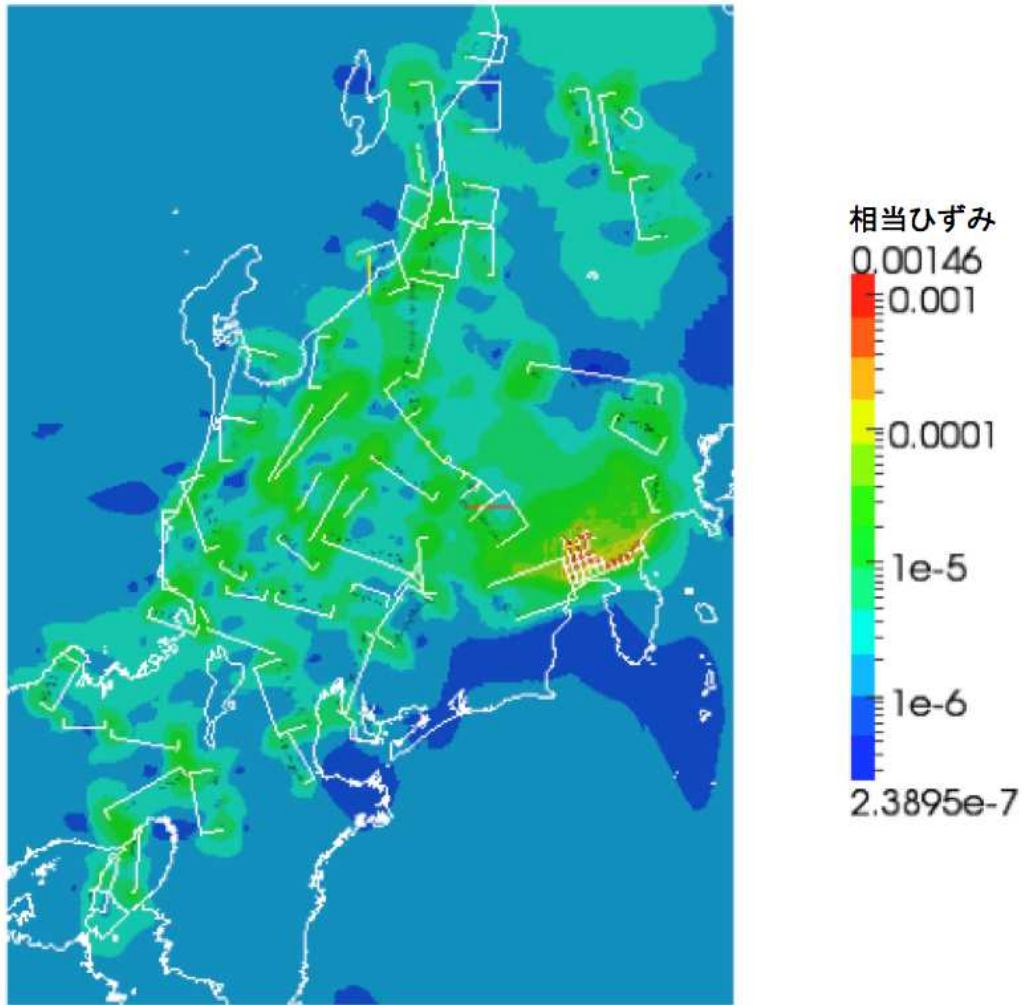


図 7 : 東西圧縮と伊豆の衝突によるD90の深さでの定常の相当ひずみ速度(単位は/100 年)。D90は深さ方向の地震の頻度分布で浅い方からの積算が全体の90%になる深さ。

(課題番号 : 1405 図 7)

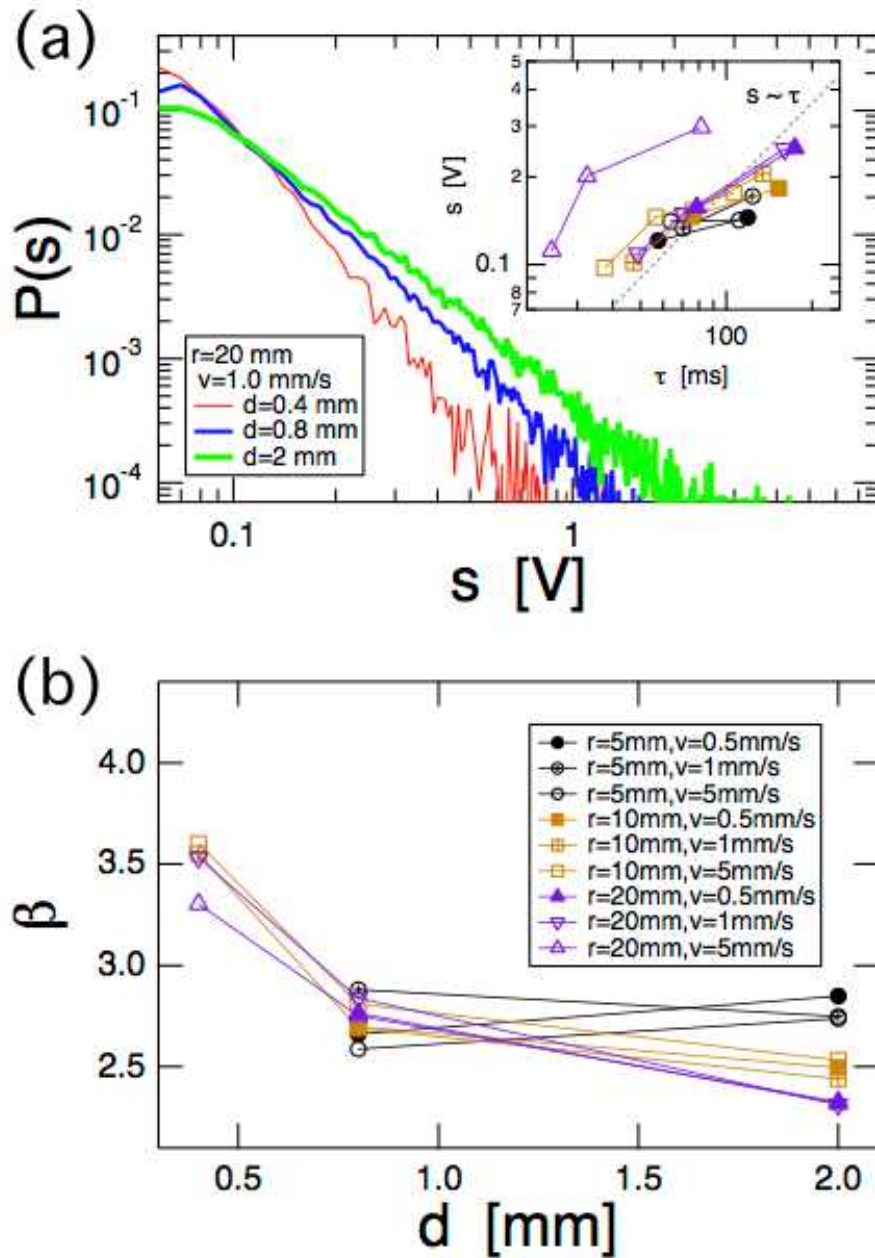


図 8 : (a) 粉体中のAE強度の頻度分布、(b) 粒径とAE強度頻度分布の傾きとの関係。

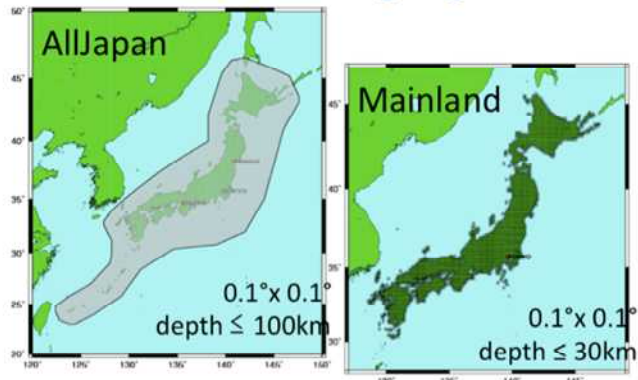
(課題番号 : 1406 図 1)

Rules of CSEP-Japan

Test class

1-day	$4 \leq M \leq 9$
3-month	$4 \leq M \leq 9$
1-year	$5 \leq M \leq 9$
3-year	$5 \leq M \leq 9$

Testing region



Evaluation

significance level 2.5%

test	
L	Likelihood of distributions of magnitude, number and place
CL	Conditional L-test
N	Event number
M	Magnitude distribution
S	Spatial distribution
W/T	Pair-wise comparison between forecasts

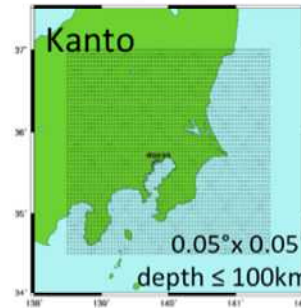


図 9 : 日本の地震予測検証実験のルール。

(課題番号 : 7012 図 1)

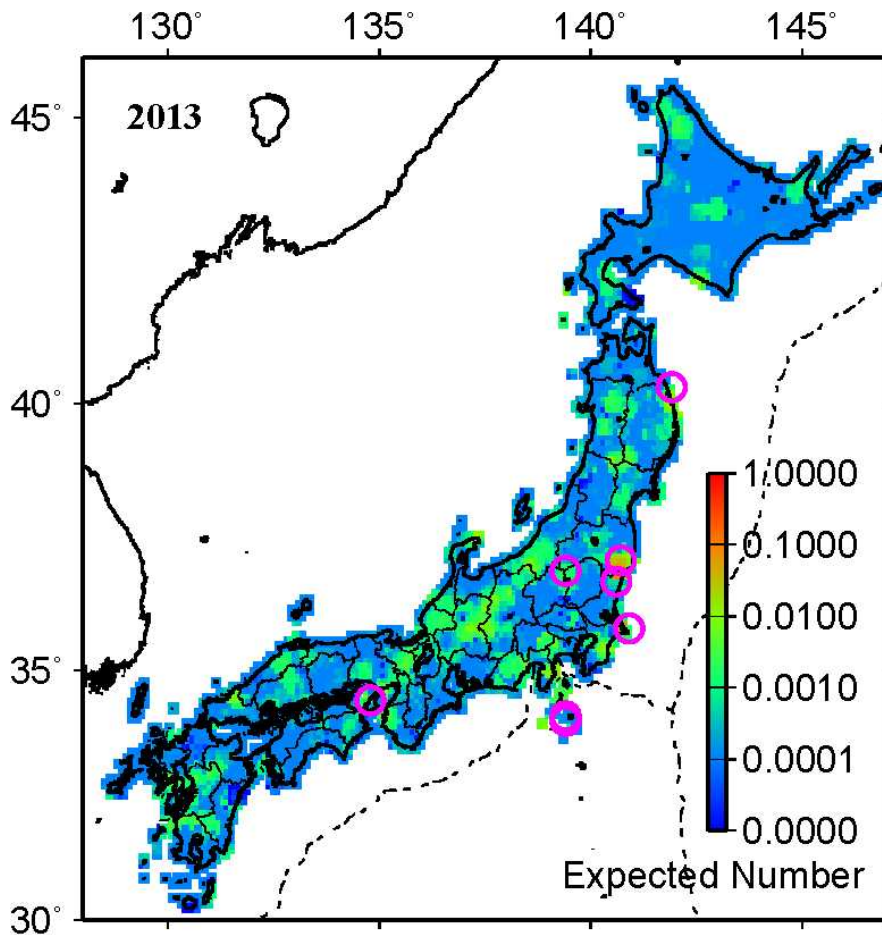


図10： MGR モデルによる2013年一年間の対象地震（M5.0以上、30km以浅、内陸）の期待値と観測値（紫丸）。総数は予測5.64個に対して観測9個であった。

（課題番号：7012 図2）

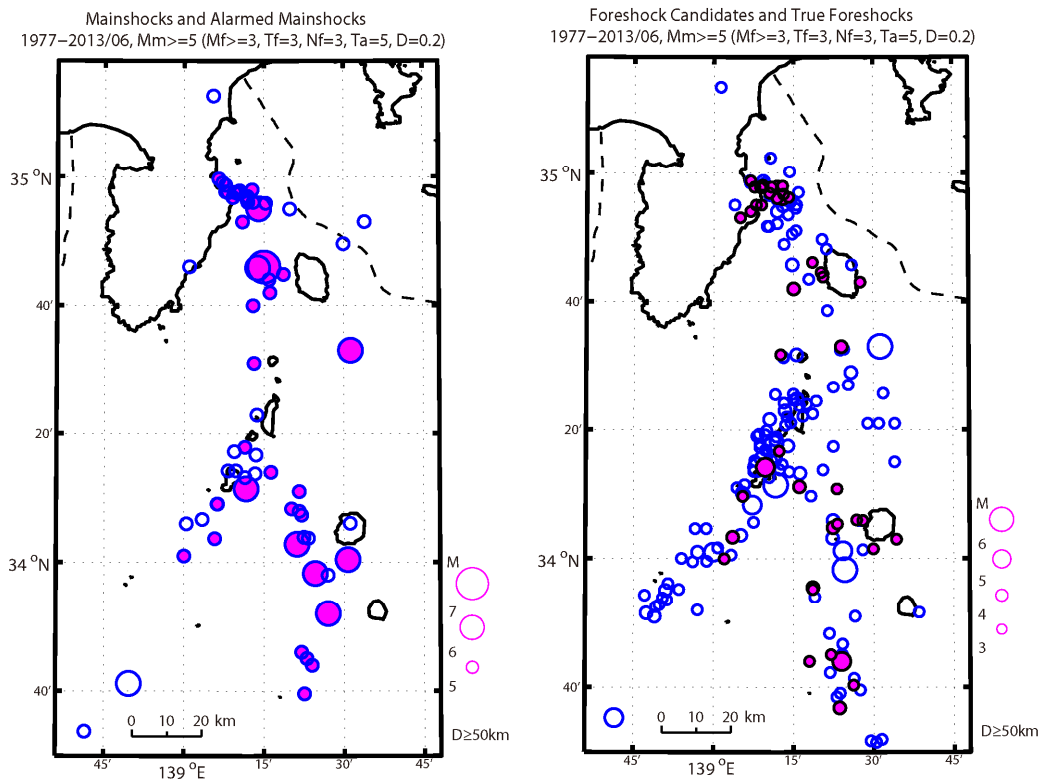


図11： 1977年から2013年6月までの期間における最適パラメータによって同期間の本震（M5.0以上）を予測した場合の結果。

（左図）M5.0以上の本震（○）と予測された本震（●）の分布。予知率は68%（=44/65）。

（右図）前震候補（○）と本震を伴った真の前震（●）の分布。適中率は23%（=46/196）。