

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

プレート境界地震のための地殻活動予測シミュレーション・データ同化システムの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

イ. 地殻活動予測シミュレーションの高度化

(5) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、第2次計画までに開発された地殻活動予測シミュレーションモデルをさらに改良し発展させるとともに、地震活動、地殻変動等の観測データの情報をシミュレーションに取り入れるためのデータ同化システムのプロトタイプを開発し、プレート境界地震の発生履歴の再現やプレート境界の摩擦特性の推定等を行う。さらに、これらのシステムおよびモニタリングシステムを構成要素とする地震発生予測システムの全体像を設計し、プロトタイプシステムを実際のデータに適用してプレート境界におけるすべりの時空間発展や地震発生を予測するデータ同化・予測実験を行う。こうした研究を通して本格的な地震発生予測システムの構築に向けて準備を整える。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

(a) 地殻活動予測シミュレーションモデルの開発研究および予測実験

日本列島全域を対象とした地震発生シミュレーションの為に数値計算コードの改良と最適化を行なう。また、プレート境界面の摩擦特性の推定に向けた地殻変動解析モデルの構築を進める。

また、沈み込むプレートの3次元形状を考慮し、規模依存の破壊エネルギー摩擦特性分布を用いた、半無限均質弾性媒質中における南海トラフおよび千島海溝巨大地震発生サイクルシミュレーションを行い、歴史地震に見られる、大きな発生間隔・規模・東西セグメントの破壊時間差を再現するモデル作成を行うとともに、シミュレーションコードの高速化を進める。さらに、すべり応答関数計算を高度化するため、GeoFEMコードを改良して均質粘弾性媒質モデル作成の効率化を図る。

一方、これまでのシミュレーションであまり考慮されていなかった、応力や摩擦パラメータ等の短波長不均一が地震サイクルや予測に及ぼす影響をシミュレーションにより調べる。

さらに、プレート境界と内陸地震の相互作用の理解と活動度予測のための、計算効率の高い不連続体セルモデルシミュレーションモデル構築において、成層粘弾性媒質中でのすべり応答関数を用いた粘弾性地震発生サイクルシミュレーションに取り掛かる。

平成 21 年度は、南海トラフ、日本海溝、千島海溝等のプレート境界を対象に、シミュレーションモデルを作成する。フォワード計算により、応力相互作用の評価を行う。

平成 22 年度は、不均質粘弾性構造、動的破壊過程、プレート境界地震と内陸地震の相互作用等を考慮して、モデルの高度化を進める。相互作用評価を継続する。

平成 23 年度は、モデル高度化を継続する。過去の大地震発生系列を再現するシミュレーションにより、摩擦特性等を推定する。近年の大地震の破壊過程、余効すべり過程のシミュレーションにより、摩擦特性等を推定する。

平成 24 年度は、シミュレーションによる摩擦特性等の推定の継続。プレート境界と内陸の相互作用のシミュレーション。摩擦パラメータ推定の不確定性が予測精度に及ぼす影響の評価を行う。

平成 25 年度は、これまでに推定された摩擦パラメータ等に基づき、予測シミュレーションを試行する。予測シミュレーションの誤差を評価する。シミュレーションに基づき、西南日本内陸の地震活動の変化について議論する。

(b) 地殻変動データを用いたデータ同化手法の開発と同化実験

プレート境界地震の余効すべりなどゆっくりとした断層運動を対象として、GPS データなど地殻変動データから、速度・状態依存摩擦構成則で用いられる摩擦パラメータや、すべり速度等の初期値を推定する手法を開発する。単純なバネ・ブロックモデルや複数のセルモデルを用いた研究を進めるとともに、2次元の連続体モデル（1次元断層）による解析手法について検討する。

平成 21 年度は、地殻活動予測システムの全体設計、パラメータ最適化手法、逐次データ同化手法の検討を行う。

平成 22 年度は、地殻活動予測システムの全体設計を完了し、パラメータ最適化手法、逐次データ同化手法の開発、試験を行う。

平成 23 年度は、データ同化の解析事例を増やし、手法の高度化を行う。

平成 24 年度は、予測シミュレーションと連携したデータ同化実験のためのシステム開発を行う。

平成 25 年度は、予測シミュレーションとデータ同化システムを連携させた予測システムのプロトタイプを稼働させる。

(c) 地震活動データの活用手法の開発

繰り返し地震をもれなく抽出し、すべり量分布の推定の精度を上げるため、幅広い規模の地震に適用できる新たな繰り返し地震抽出基準の策定を行う。具体的には、釜石沖等のすでに知られていて、現在の波形相似性の基準では抽出されない中規模繰り返し地震を用い、波形の相似性からこれらの繰り返し地震を同定できる基準を調べる（解析周波数帯、ウィンドウ等の工夫）。次に、この基準を用い、過去の波形記録を系統的に探索する。

関東地方及び東海・東南海地域の微小地震活動度の長期的変化を高信頼度で推定する。そのためには、時間的・空間的に均質な地震カタログを作成する必要がある。東京大学地震研究所の微小地震観測網で 1994 年から 2007 年までに観測された M3 以上の地震の震源と M の再決定を実施する。その際、使用する観測点は 1994 年当時の配置に固定し、新しい観測点を導入したことによる影響を除去する。（北大・地震研）

測地データに加えて小繰り返し地震のデータを用いて、余効すべりの時間発展を推定する手法を確立する。特に、異種データの重み付けや滑りの空間分布に対する penalty 項の与え方について種々検討を行い、最適なものを見いだす。

平成 21 年度は、波形の相関、詳細な震源決定や、発生間隔等をもとに、小繰り返し地震を抽出する最適な手法の開発を開発する。また、地震活動から応力変化を推定する手法を開発する。

平成 22 年度は、小繰り返し地震と GPS データを用いてプレート間すべりの推定を行う手法を開発する。また、地震活動データから応力変化の推定を試み、その有効性を検証する。

平成 23 年度は、開発した手法を用いて、プレート境界のすべりの時空間発展を推定する。また、推定された応力変化がプレート境界のすべりによるものと仮定して、すべりの時空間発展について知見を得る。

平成 24 年度は、地震活動データから推定されたすべり変化と数値シミュレーションを比較することにより、プレート境界の摩擦特性、応力について知見を得る。

平成 25 年度は、地震活動データを用いたデータ同化手法について検討する。

(7) 平成 22 年度成果の概要：

・地震サイクルシミュレーションモデルの開発（名大）

これまで、地震サイクル中の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の連成シミュレーションを行っていたが、動的破壊後に次のサイクルの応力蓄積へとつなぐ部分は実施できていなかった。1968 年十勝沖地震の震源域を想定して、1 サイクル目の動的破壊後の応力状態を受け渡して 2 サイクル目の解析を続けて行うことに成功した（図 1）。図 1 に示すように、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、その結果、地震発生間隔が 2 サイクル目では短縮される。2 サイクル目の初期に急速な応力蓄積が生じるのは主として粘性緩和（粘性応力により駆動される余効すべりも含む）の影響である。

・準静的地震発生サイクルシミュレーションコードの高速化（京大）

地震発生サイクルシミュレーションでは、プレート境界を N 個のセルに分割し、各セルでの運動方程式と摩擦則をカップルさせて、すべりの発展を追いかける。この際応力計算において、すべり応答関数行列とすべり速度ベクトル積を計算する必要があるが、その計算に必要なメモリ量および計算量は $O(N^2)$ である。南海トラフなどの大領域における地震発生サイクルシミュレーションでは N が大きく、計算時間および使用メモリの大きな大規模計算になる。また摩擦パラメータの推定（データ同化）等には、多くの繰り返し計算を必要とする。こういったことから、地震発生サイクルシミュレーション計算の高速化・省メモリ化が必須である。

22 年度は、階層型行列（Hierarchical matrices：H-matrices）法の適用を試みた。H-matrices（Hackbusch,1999）は、密行列を階層的な小行列に分解し、各小行列を低ランク行列で近似したもので、行列ベクトル積などの行列演算を小さなメモリ量で高速に行うことができる。Hori(2006)の地震サイクルシミュレーションコードに H-matrices 法を実装し、セルサイズ 106 まで調べた。図 2 に示すように、精度やメモリ量を制御するパラメータを適切に取る必要があるが、メモリ量は $O(N)$ 、計算量は 105 程度までは $O(N)$ 、それを越えると $O(N) \sim O(N \log N)$ となる（Ohtani et al.,2011）。H-matrices 法は、すべり応答関数がソースとレシーバセルの距離に応じて減衰する性質を持つてよく、FMM のように関数形に制限はなく、実装したコードでは、半無限均質媒質での三角要素セルに対するすべり応答関数を用いている。

・不均質粘弾性媒質中でのすべり応答関数の高度化（京大・地震研）

昨年度、粘弾性不均質媒質中でのすべり応答関数計算において、不均質粘弾性媒質モデル有限要素（FEM）モデル作成を必要とする必要がある。メッシュ作成が容易な 3 次元 4 面体要素および 2 次元問題に対する 2 次元 3 角形要素も扱えるようにも改良を行ったが不具合が生じたため改良作業を継続した。

・プレート境界地震と内陸地震の相互作用を含む不連続セルモデルシミュレーション（京大）

プレート境界地震と内陸地震の相互作用の理解と活動度予測のための、計算効率の高い不連続体セルモデルシミュレーションモデル構築する必要がある。そのため、昨年度は、成層粘弾性媒質中での点震源に対するすべり応答関数を用いて、矩形断層セルに対するすべり応答関数を効率よく計算する手法を開発した。今年度はプレートの定常沈み込みの効果の評価を行った。

・応力降下量の支配要因に関する検討（地震研）

地震の応力降下量の平均値は地震の規模によらずほぼ一定であるが、ばらつきが大きい。また、深さとともに法線応力が増大することから応力降下量の深さ依存性が予測されるが、観測データは明瞭な

深さ依存性を示さないことが多い。これらの原因を調べるために数値シミュレーションを行った。モデル断層面にはたらく摩擦は速度状態依存摩擦則に従うものと仮定し、速度弱化の摩擦特性をもつアスペリティの周囲に速度強化の摩擦特性をもつ非地震性すべり領域を設定した。非地震性すべりの発生により、アスペリティ端には応力集中が生じる。応力集中が十分に大きくなり、エネルギー解放率が破壊エネルギーよりも大きくなると地震が発生することになる。応力降下量は地震発生時のアスペリティでの歪蓄積量に比例するので、破壊エネルギーが大きくなるほど応力降下量が大きくなることが予想される。断層面にかかる法線応力と速度状態依存摩擦則の特徴的すべり量を変化させてシミュレーションを行い、発生した地震の応力降下量を測定した。図3に、すべり弱化の臨界すべり量 Dc^* と応力降下量の関係を示す。大きいシンボルは、破壊がアスペリティ端近くで発生したことを示す。小さいシンボルは、破壊がアスペリティの中心付近で発生したことを示す。破壊がアスペリティ端近くで発生するときには、応力降下量は Dc^* に依存し、法線応力依存性は小さい。破壊がアスペリティの中心近くで発生するときには、応力降下量は Dc^* に依存せず、法線応力に比例する。

(b) 地殻変動データを用いたデータ同化手法の開発と同化実験

・測地データに基づくすべり欠損分布の推定（名大）

これまで、東北日本、西南日本のプレート境界について、GPS データの逆解析ですべり欠損分布を推定してきた。本年度新たに関東地方に関する推定を実施し、これまでに推定されたすべり欠損分布を重ねて表示し、互いに比較検討することで、すべり欠損分布から見た日本周辺のプレート境界の特徴が明らかになった（図4）。東北日本では 100km スケールのすべり欠損領域がとびとびに点在するのに対し、西南日本ではほとんど単一の長大なアスペリティが存在し、そのすべり欠損量は西に行くに従って大きくなる。こうした特徴がそれぞれの地域の地震活動と良く対応していることは言うまでも無い。

豊後水道ではこれまで 1997 年、2003 年、2010 年と 3 度のスロースリップが 6～7 年の間隔で発生し、スロースリップ発生時のすべり分布は良く調べられているが、スロースリップ間のすべり欠損に関する解析は行われていなかった。そこで、13 年におよぶ GPS 連続観測データからスロースリップの影響も含んだ長期の平均的な地殻変動速度およびスロースリップ間の地殻変動速度を推定し、それぞれを用いてすべり欠損分布を推定した。その結果、長期の平均的なすべり欠損では、スロースリップ領域にすべり欠損は見られず、スロースリップ間のすべり欠損は、スロースリップ領域にもすべり欠損が見られることが明らかとなった（図5上）。このことから、豊後水道のスロースリップ領域では、6～7 年の間隔で応力蓄積・解放が繰り返されており、このサイクルを超えた長期的な応力蓄積等は無いものと考えられる。

また、四国地域は大地震の地震時すべり、地震後の余効すべり、スロースリップが同一地域ですべて観測されている興味深い場所である。そこで、水準測量データや潮位データに基づいて 1946 年南海地震時の地震時すべり、その後の余効すべり、GPS データに基づいて豊後水道スロースリップのすべり分布を推定し、その空間分布の関係を調べた。これらは、同一の解析手法および同一のプレート境界形状を用いて行ったものであり、相互比較が可能である。解析の結果、1946 年南海地震直後の余効すべりは四国西部のプレート境界深さ 20-30km の範囲に集中し、スロースリップ領域とは棲み分けているように見える（図5下）。これらは、余効すべり域とスロースリップ領域が、同一の深さ範囲に位置するにも関わらず、異なる摩擦特性を有していることを示唆するものであり、この地域を対象とする地震サイクルシミュレーション等を行う際にも注意が必要である。

・アジョイント法によるデータ同化手法の開発（京大・名大）

京都大学では、地殻変動データから断層面上の断層パラメータを推定する手法として、アジョイント法を適用する方向で検討している。今年度から、2つのアスペリティの系において、一方のアスペリティが破壊、余効すべりが伝播し、もう一方のアスペリティで地震がトリガされる系に対する検討を開始した。今年度は1つのアスペリティから余効すべりが伝播する場合の、余効すべり領域の摩擦パラメータおよび初期時刻におけるすべり速度と状態変数の値の同時推定手法の構築を、アジョイント法に基づく双子実験（synthetic test）を行うことによって実施した。

2003年十勝沖地震をモデルケースとした。破壊領域を、1つの断層セルで近似し、周囲の余効すべり領域を10km四方のセルに分割した。そして、以下の手順で双子実験を行った。(1) 適当な摩擦パラメータと初期値を与え、破壊領域で地震が起こった後の、余効すべりのシミュレーションを行う。与えた摩擦パラメータと初期値の組み合わせを「真の解」と呼ぶ。(2) (1)で得られたすべり速度を観測データとする。(3) 「真の解」とは異なるパラメータから、アジョイント法により、データにもっとも適合するパラメータをiterativeに求める。

本研究では、データ同化に内在する問題点を明確にするため、観測データは断層面上のすべり速度であり、観測ノイズはない。余効すべり領域全体にわたって、摩擦パラメータは一樣。という仮定をおいている(より一般の場合の検討は次年度以降に行う)。

この結果、余効すべりの伝播の情報を用いれば、すべての摩擦パラメータが、真の値の1パーセント程度の範囲内に求まった。これはラグランジュ的に見た場合の伝播という過程が、オイラー的に見ると、余効すべりの開始・加速・減速・定常状態に戻る、という一連のプロセスから成っていることと、 a や L が空間的に一樣という強い拘束条件を用いていることの双方から期待される結果である。

名古屋大学では、アジョイント法を用いたデータ同化手法について、スロースリップの地震サイクルを対象として検討を実施した。対象としたモデルは1セルの単純なもので、スロースリップが発生する条件でシミュレーションを行い、得られたすべり速度にノイズを加えた人工データを用いて摩擦パラメータ推定を行った。同化解析に用いるデータ範囲を変えると、最初のスロースリップイベントですべり速度が最大となる付近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り、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ことが分かった(図6)。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、データ量を減らしても良いことを表しており、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たものと考えられる。

・確率論的方法に基づく線形・非線形混合インバージョン手法の開発(地震研)

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行う枠組みであり、本質的には非線形逆問題である。インバージョン解析手法は最適なモデルパラメータを推定する最適化の枠組みと、確率分布を用いて先験的情報やパラメータの不確定性を定量化する確率論的(ベイズ的)枠組みに分けられる。観測データやモデルの不確定性を考慮した予測システムを構築するためには、確率論的な枠組みで非線形逆問題の解を求める手法を確立することが重要である。従来、確率論的な枠組みは、モデルが線形で誤差分布や先験情報がガウス分布で表わされる場合のみ定式化されてきた(Yabuki and Matsu'ura, 1992)。最近、確率論的な定式化は非線形・非ガウス逆問題に拡張・一般化された(Fukuda and Johnson, 2008; Fukuda et al., 2009)。これらの定式化では、大自由度モデルを用いた場合に事後確率分布の推定効率が低下するという問題点がある。今年度は、非線形・非ガウス逆問題のうち、線形パラメータと非線形パラメータを両方含む線形・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た(Fukuda and Johnson, 2010)。この手法により、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(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。

(c) 地震活動データの活用手法の開発

・小繰り返し地震抽出のための手法検討(東北大)

前年度に岩手県釜石沖の地震クラスターを用いて策定した、地震の規模に合った周波数帯域での波形相関解析を行う新たな手法を、東北日本沈み込み帯の中規模地震に適用した。M4.5以上の地震については、これまでの手法では7系列しか同定できなかったが、新しい手法を適用することにより67系列の繰り返し地震グループ(最大マグニチュード6.2)の同定に成功した(図7)。これによりプレー

ト境界における幅広い規模範囲のアスペリティの分布とそこでのすべり履歴が明らかになり、シミュレーションにおけるすべりの時空間変化のデータ同化に向けて前進することができた。

・相似地震解析によるプレート固着状態の検出（東大地震研）

プレート間すべりの時間・空間的变化を推定するために、日本列島全域に展開されているテレメータ地震観測点で観測された地震波形データの蓄積を行い、小繰り返し地震群の抽出を行った。その結果、比較的定常的な時間間隔で発生する地震群が、琉球海溝から沈み込むフィリピン海プレートおよび、千島海溝-日本海溝から沈み込む太平洋プレートの上部境界で多数見つかった（図8）。一方、内陸側で発生する地震群のほとんどはバースト的に発生していた。定常的に繰り返す地震群から推定されたすべり速度は、各地域のプレート間固着状態を反映した時間・空間的变化の特徴を示していた。東北日本弧では、大地震の余効すべりの発生によるすべり速度の時空間変化が見られる一方、琉球弧は、解析期間を通してプレート間の相対運動速度とほぼ一致していた。南海トラフでは定常的に発生する小繰り返し地震がほとんど見られず、固着が強い状態を示していた。さらに、地震発生場のより詳細なすべり、応力変化の情報抽出をめざし、震源情報を用いた地震クラスターの自動抽出を行い、地震クラスター毎の地震活動変化を見ることを可能にした。その結果、他のクラスターとは孤立し、定常的に発生する小繰り返し地震を多数含む地震クラスターを三陸沿岸地域と先島諸島周辺のプレート境界で数多く発見した。中でも波照間島沖合に位置する地震クラスターの地震発生時系列は、隣接地域で規則的に発生するスロースリップイベントと部分的に同期しており、プレート間固着状態の変化との関連性が示唆された。

・均質な地震カタログに基づく地震活動評価（北大）

地震活動の長期変化から広域応力場の時間変化を検出するために、1994年1月1日から2007年12月31日までの間に関東地方および東海・東南海地域で発生したMJMA=3.4の地震の震源およびMを再決定した。再決定には、東京大学地震研究所が関東甲信越に展開している微小地震観測点、名古屋大学と東北大学が展開している観測点、および気象庁の東海沖と房総沖の海底地震計など、合計23か所を使用した。記録された約700個のイベント波形ファイルのP波・S波到着時と最大振幅を、全て手動により注意深く再検出し、それらのデータを使用して震源とMを再決定した。選定した23か所の観測点は期間中に観測条件が変化していないこと、再検測は検測経験豊富な一人の作業員が行ったことなどから、作成された地震カタログは時間的・空間的に極めて均質であると考えられる（図9）。

その結果、2005年8月から2007年12月にかけての約2年半、茨城県南部から東京湾にかけて顕著な地震活動の活発化が、銚子沖では顕著な静穏化が観測された。これらの顕著な地震活動度変化は、2008年5月8日に茨城県沖で発生した地震（M7.0とM6.4）の前兆現象であった可能性がある。

・地震メカニズムトモグラフィー法による流体圧分布の推定

Terakawa et al. (2010) は、地震のメカニズム解から地殻内の3次元流体圧分布を直接推定する画期的な解析法を開発した。地震メカニズムトモグラフィー（Focal mechanism tomography, FMT）と呼ばれるこの手法は、地震すべりは標準的な摩擦係数によるクーロンの破壊規準に支配されるという古典的な物理法則から出発し、応力場に対する断層面の向きを調べることにより、その地震を駆動した間隙流体圧を推定する。そして、個々の地震データから離散的に得られた間隙流体圧の値に対し、ABICを用いたインバージョン解析のテクニックを適用することにより、3次元の流体圧分布を推定誤差と共に推定することが可能となる。この手法を2009年イタリア・ラクイラ地震に伴う地震のデータに適用し、実際に観測された地震のデータから、震源域の詳細な流体圧分布を世界に先駆けて推定することに成功した（図10）。解析の結果、ラクイラ地震震源域には、深さ7~10km付近に静水圧状態を20-40MPa近く上回る高圧流体が存在することがわかった。得られた流体圧分布の形や地震活動の時間発展を調べたところ、これらの地震活動は、高圧流体域からの流体拡散に伴う既存断層面の強度の低下により駆動されたものであると考えられる。

（8）平成22年度の成果に関連の深いもので、平成22年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Fukuda, J., and K. M. Johnson, Mixed linear-non-linear inversion of crustal deformation data: Bayesian

- inference of model, weighting and regularization parameters, *Geophys. J. Int.*, 181, 1441-1458, 2010.
- Hashimoto, C., Fukuyama, E., and Matsu'ura, M., Physics-based 3-D simulation for the entire process of earthquake generation at plate interfaces in subduction zones, *Geophys. J. Int.*, submitted.
- Hashimoto, C., Fukuyama, E., Terakawa, T., Sagiya, T., Nakajima, K., Sato, T., and Matsu'ura, M., 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, 2010.
- Igarashi, T., Spatial changes of inter-plate coupling inferred from sequences of small repeating earthquakes in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L20304, doi:10.1029/2010GL044609, 2010.
- Johnson, K. M., and J. Fukuda, 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, 2010.
- 加納将行・宮崎真一・伊藤耕介・平原和朗, 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, 2010.
- 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.
- Terakawa, T. and M. Matsu'ura, 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from CMT data of seismic events, *Tectonics*, 29, TC6008, doi:10.1029/2009TC002626, 2010.
- Terakawa, T., A. Zoporowski, B. Galvan, and S. A. Miller, High pressure fluid at hypo-central depths in the L' Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms, *Geology*, 38, 995-998, 2010.

(9) 平成 23 年度実施計画の概要：

(a) 地殻活動予測シミュレーションモデルの開発研究および予測実験

日本列島のすべり欠損分布からプレート境界の摩擦特性推定を進め、列島規模で準静的応力蓄積と動的破壊の連成地震サイクルシミュレーションの開発を進める。また、シミュレーションの高速化のための検討を進め、摩擦特性の不均一性が地震サイクルの不規則性に及ぼす影響を数値シミュレーションにより調べる。

(b) 地殻変動データを用いたデータ同化手法の開発と同化実験

これまで GPS データの解析から断層面の摩擦特性の推定が行われているが、繰り返し発生したスロースリップの解析を行うことで、その再現性について調査する。アジョイント法を用いたデータ同化の検討をさらに進める。また、モデルの自由度、摩擦法則、初期条件についての仮定が摩擦パラメータの推定値やそれを用いた断層すべりの予測に及ぼす影響を明らかにする。

こうした検討を参考にしながら、GPS データを用いた逐次同化システムの開発を進める。

(c) 地震活動データの活用手法の開発

繰り返し地震クラスターを用いて、地震活動データに基づくプレート境界のすべり、応力変化推定の検討を続ける。また、地震規模を M3.3 以上に下げ、東海・東南海地域および周辺域の再検測作業を行い地震活動度変化の検出精度を向上させる。これらに加え、CMT データ逆解析手法により推定される応力場の予測シミュレーションへの活用方法について検討する。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

名古屋大学大学院環境学研究科：鷺谷威、橋本千尋、伊藤武男

他機関との共同研究の有無：有

東京大学地震研究所：加藤尚之、加藤照之、五十嵐俊博、福田淳一

京都大学大学院理学研究科：平原和朗、宮崎真一

京都大学防災研究所 橋本学

東北大学大学院理学研究科：内田直希、松澤暢
北海道大学大学院理学研究院：勝俣啓
海洋研究開発機構 堀高峰

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：名古屋大学大学院環境学研究科

電話：052-789-3046

e-mail：web-master@seis.nagoya-u.ac.jp

URL：http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/

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

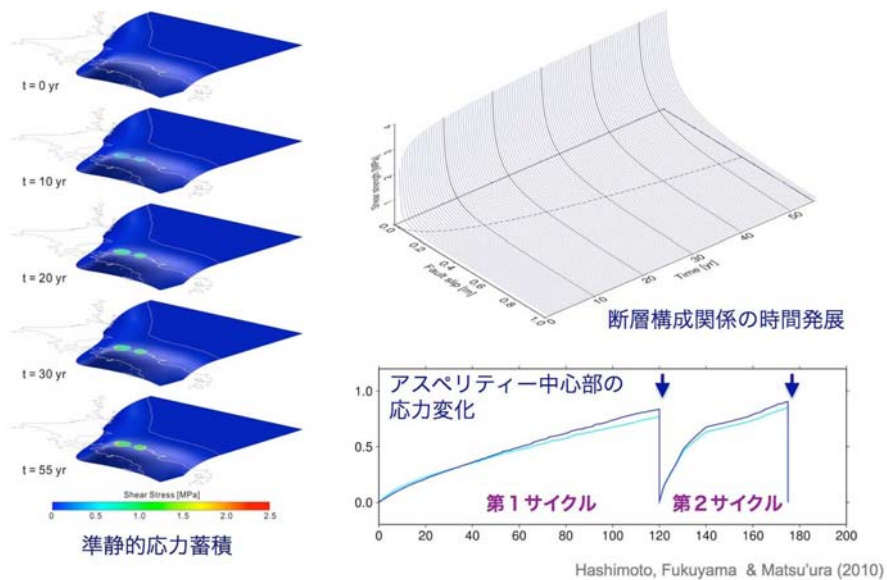


図1 準静的応力蓄積・破壊核形成と動的破壊の連成シミュレーションによる1968年十勝沖地震震源域の2サイクル目の応力時空間変化(左)、断層摩擦関係の時間発展(右上)、および2サイクル分の応力変化(右下)

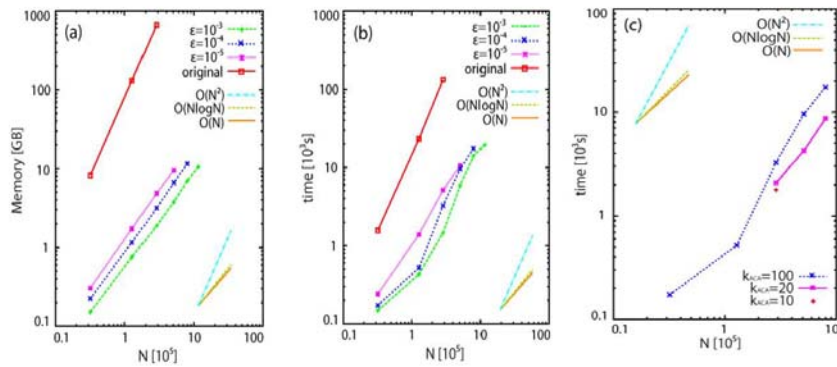


図2 セルサイズ (N) に対するメモリ量 (a) および計算時間 (b) の増大。

H-matrices を適用しない場合 (赤) はメモリ・計算量とも $O(N*N)$ 。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 $N=105$ 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ことが分かった。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 $kACA=20$ 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) ことが分かった (c) (Ohtani et al.,2011)。

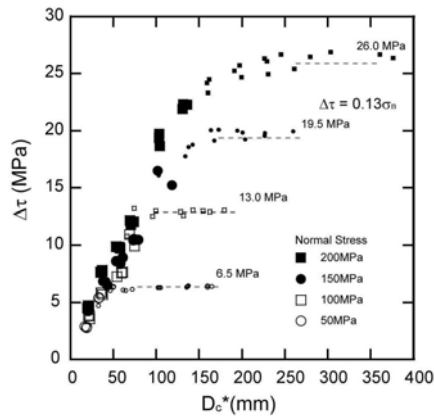


図3. シミュレーションで発生した地震の応力降下量 $\Delta \tau$ とすべり弱化的臨界すべり量 D_c^* の関係。

D_c^* は動的破壊開始点のせん断応力とすべり量の関係から推定した。大きいシンボルと小さいシンボルは、それぞれ、破壊がアスペリティ端近くで発生した場合、破壊がアスペリティの中心付近で発生した場合を示す。

日本列島周辺域のプレート境界のすべり遅れ速度分布

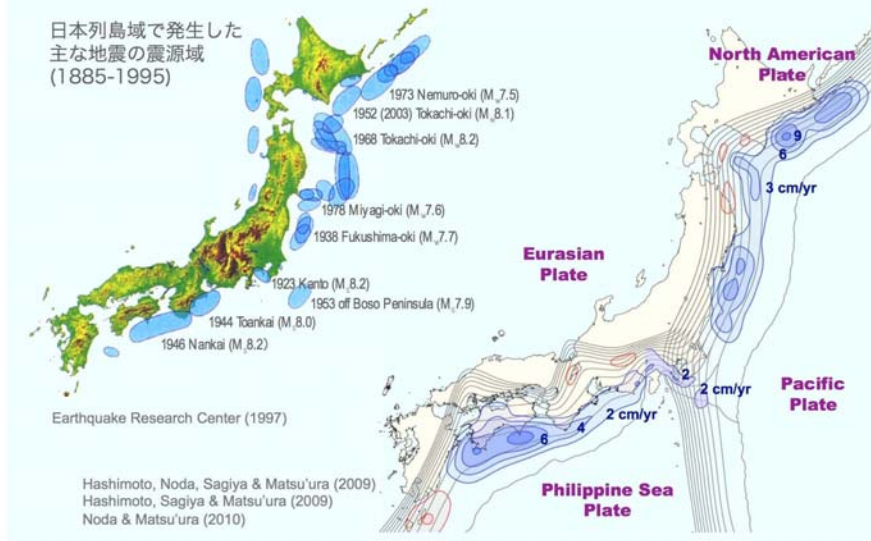


図4 GPSデータの逆解析により推定した日本列島周辺のプレート境界のすべり欠損分布。

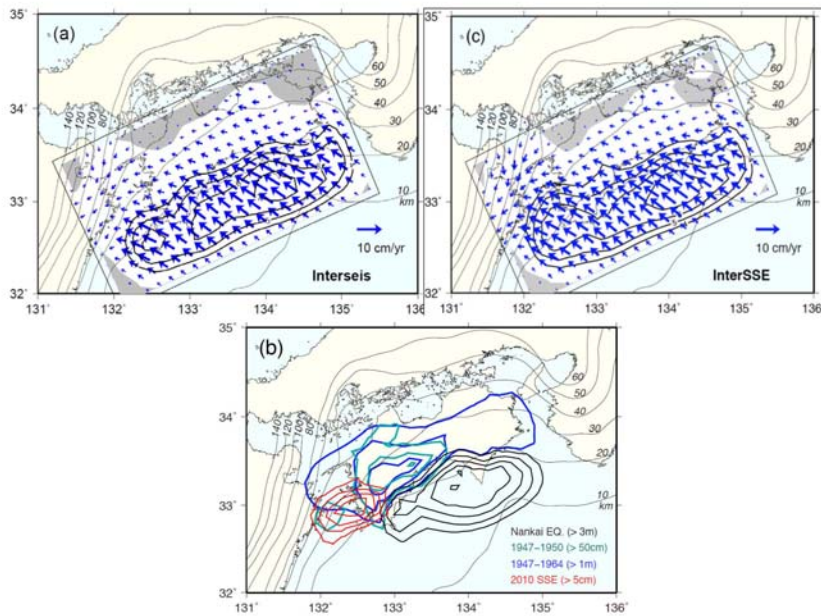


図5 測地データから推定した四国地方のすべり・すべり欠損分布。

(左上) 四国・豊後水道地域における長期の平均的なすべり欠損分布。(右上) スロースリップ間のすべり欠損分布。(下) 1946年南海地震の地震時すべり、余効すべり、およびスロースリップの空間分布。

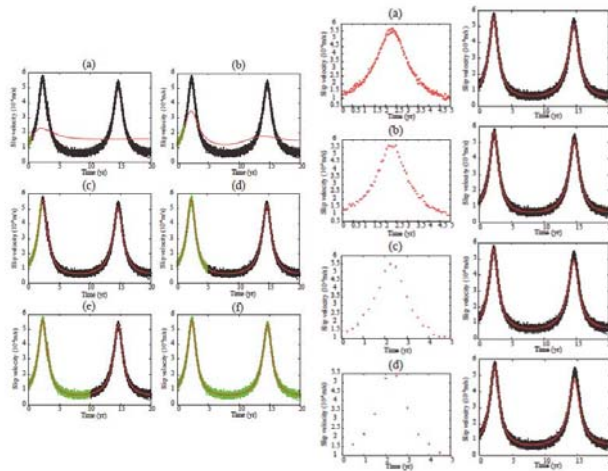


図6 アジョイント法により推定された摩擦パラメータを用いたシミュレーションと解析に用いた模擬データの比較。

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。

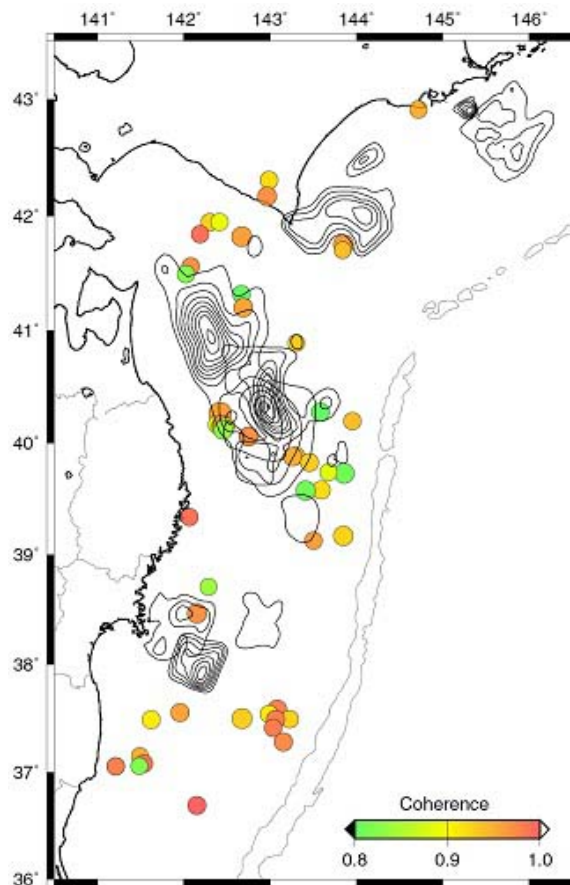


図7 M4.5以上の繰り返し地震の分布。

色はグループごとの平均コヒーレンス値を示す。コンターは Yamanaka and Kikuchi, 2003; 2004 による大地震のすべり分布を示す。

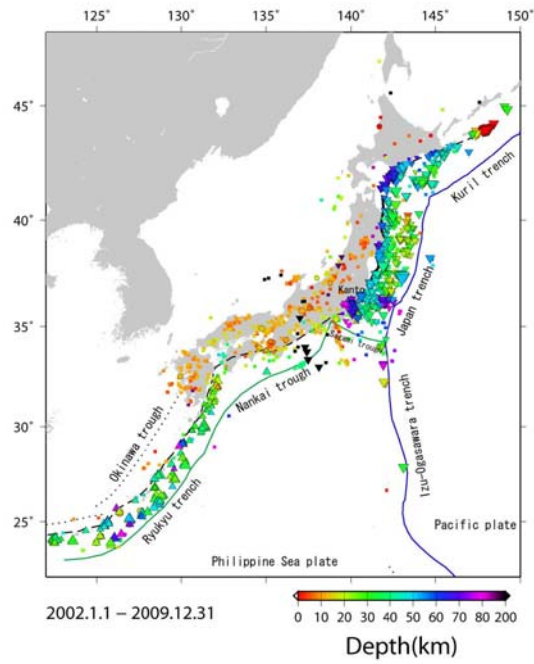


図8 日本列島で発生する小繰り返し地震の空間分布（2002年1月～2009年12月）。
 フィリピン海プレート、太平洋プレート、内陸地域で定常的に発生した地震群の発生場所をそれぞれ三角、逆三角、丸で示す。四角はバースト型地震群を表す。

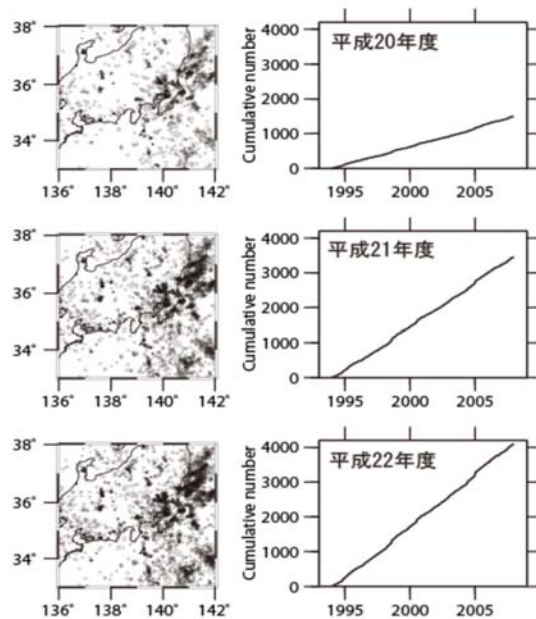


図9 再検出した地震の震央分布と積算度数。

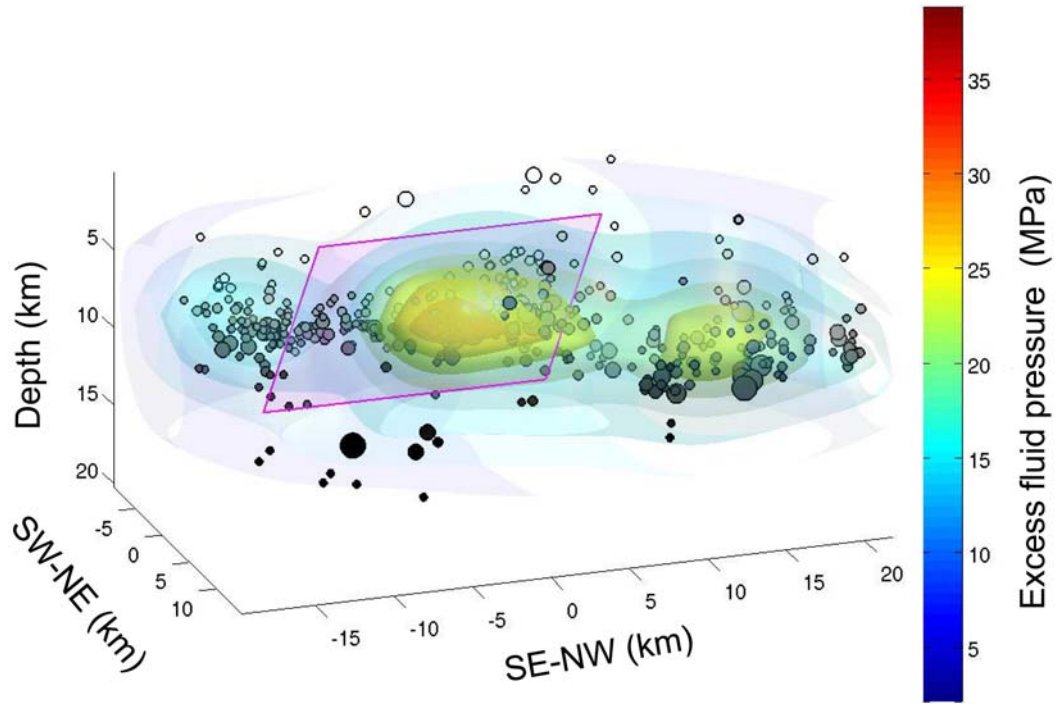


図 10 FMT 法で求めたラクイラ地震震源域付近の流体圧分布と震源分布。