

# 物性不均質性・不確かさを考慮した信頼性の高い数値計算・パラメータ推定による固着・すべりの現状把握及び推移予測の統合的研究

飯沼 卓史 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

飯沼 卓史\*<sup>1</sup>, 縣 亮一郎\*<sup>2</sup>, 伊田 明弘\*<sup>3</sup>, 河合 直聡\*<sup>4</sup>, 堀 高峰\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター, \*<sup>2</sup> 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震発生帯研究センター, \*<sup>3</sup> 海洋研究開発機構付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター, \*<sup>4</sup> 名古屋大学 情報基盤センター

キーワード: 不均質構造, 有限要素法, グリーン関数, 地震サイクル, 積分方程式法

## 1. 大規模有限要素地殻変動計算プログラム・E-cycle FEM を用いた南海トラフ沿いのプレート境界及び分岐断層におけるすべり応答関数（グリーン関数）の計算

南海トラフにおけるプレートの固着・すべりの様子を海陸の地殻変動データから、その不確かさも含めて推定するシステムの構築を目指し、三次元不均質弾性構造モデルにもとづいて地殻変動を計算する手法を開発するため、昨年度までに構築した有限要素法モデルを基に、分岐断層の断層面及びプレート境界面におけるすべりに対する海底面並びに孔内センサー位置における変位応答及び変位の空間勾配応答グリーン関数を得るための計算を実施した。

南海トラフ沿いに構築された長期孔内観測点においては、海底面から深さ 500m 程度の位置にセンサーが設置されており、傾斜や歪、間隙水圧の観測を行っている。このうち間隙水圧については、孔内のセンサーによって観測された圧力変化と、孔口付近の海底に設置されたセンサーによって観測された圧力変化の差を取ることで、潮汐や海洋擾乱による変動を除去し、プレート境界面や分岐断層の断層面におけるすべりによる地殻変動（による間隙水圧変化）を抽出できている。しかしながら、この地殻変動データを基に、プレート境界面や分岐断層面におけるすべり分布を定量的に推定するには、これらの面でのすべりに対する、孔内センサー位置と孔口付近の海底面それぞれにおける変位及び変位の空間勾配応答グリーン関数が得られていなければならない。そのため有限要素法を用いて三次元不均質弾性構造を取り込んだ計算を行う際には、両者の位置の違いが応答の差に十分反映されるような高精細な有限要素メッシュを構築することが必要となる。そこで、今年度の本課題では、長期孔内観測点周辺の有限要素メッシュを局所的に高精細化する処理を施したうえで、プレート境界面及び分岐断層の断層面それぞれでのすべりに対する応答関数の計算を、ES4CPU を用いて実施した。異なるメッシュどうしでの比較用も含め、計算には約 1 万 1000 リソースセット時間を使用した。結果として、観測点ごく近傍にすべりを与えた場合以外では、海底面と孔内センサー位置とで変位・歪応答に顕著な違いは見られなかったものの、今後のイベントを解析するために必要なグリーン関数を得ることができた。

## 2. 動的コア割付けによる格子H行列演算の効率化

積分方程式法は、地震サイクル計算や断層の動的破壊シミュレーションなどで広く用いられている計算手法である。従来の積分方程式法では密行列・ベクトル計算が計算時間の多くを占めていた。格子H行列法は、この密行列に対する近似手法であり、積分方程式法に基づくシミュレーションの実施に必要な計算メモリ量および計算時間を大幅に低減させることができる。本研究では、格子H行列法の並列化時に課題となる、演算負荷のアンバランスを、動的コア割付けにより改善し、演算・電力性能改善に取り組んだ。

我々が開発する動的コア割付け方式（DCB）では、MPI/OpenMP で並列化されたアプリケーションを対象としており、プロセス毎の負荷の不均衡に合わせて、各プロセスに割り当てるコア数を変化させ、プロセスレベルの負荷の不均衡をコアレベルで均一化する（図 2）。この時に、全コアを使用して計算時間を短縮する RC モード（図 2(b)）と使用するコア数を減らして消費電力を削減する PA モード（図 2(c)）および、両方のポリシーを使用した Hybrid ポリシーを用意している。Hybrid ポリシーはマルチノードでの実行時に、演算量の多いノードでは RC モードを、少ないノードでは PA モードを適用、計算時間と消費電力の両方を削減する。図 3、4 は格子 H 行列法に DCB を適応した場合の計算時間および消費電力削減効果の評価した結果である。評価では ES4 の CPU ノードを 1～256 ノード（ノード当たり 4 プロセス）を使用した。また、格子 H 行列法で近似したモデルは 1188kp（メモリ使用量は全体で約 48GByte、負荷の不均衡は最大で 20 倍程度）であり、評価時に計算時間、消費電力を測定したのは、格子 H 行列ベクトル積 50 回である。なお、消費電力の測定には Powerstat コマンドを使用しており、RAPL から 1 秒当たりの電力を取得、積算している。DCB の RC や Hybrid など、計算時間短縮効果のあるポリシーを適用した結果、DCB を適用していない場合（図中の General）と比較して、計算時間を半分にする効果を確認できた。一方で、PA ポリシーや Hybrid ポリシーの適用による消費電力削減の効果は確認できず、これは Ryzen の省電力機能を生かしていない、または制限によるものと推察している。PA モードで消費電力を削減するためには、未使用コアへの共有電圧が制限される必要がある。実際に、Intel の Speed Step では未

使用コアへの供給電圧が下げられ、PA モード使用による消費電力削減の効果が確認できているが、地球シミュレータ 4 では PA モードの効果が確認できなかったところから、未使用コアへの共有電圧削減が有効ではないと判断する。

### 3. 推移予測のための地震発生サイクル計算

南海トラフ沿いでは、東海沖から紀伊半島沖を越えて四国沖までが一つの地震として発生したこともあれば、紀伊半島を境にして東と西に分かれて発生したこともある。後者（南海トラフ全体の約半分の領域で地震が発生するので半割れと呼ばれる）の場合、東西で分かれて発生する時間間隔は様々で、1 日半だったこともあれば、2 年以上のこともある。片方の地震が起こってから次の地震までの間隔を、海底地殻変動の観測データにもとづいて予測するための手法が提案されている。発生間隔が様々に異なる半割れのシミュレーションを行ない、半割れ後の断層滑りによる地殻変動を計算しておく。その中から真の場合を決めて誤差を与えることで模擬観測データを作り、それが半割れ後に一定時間間隔で得られた場合に、その模擬観測データと様々なシミュレーションでの地殻変動とを比較して残差を調べる。各シミュレーションでの次の地震までの時間間隔に対して、残差に応じた重みつき平均を求めることで、発生間隔を推定する。今回は、この手法を高度化するための課題として、地震後の地殻変動に含まれる粘弾性応答を考慮した数値実験を行なった。ES4 を用いて、この数値実験で必要となる真の場合と、それと比較するための複数の場合の計算を行った。図 5 に半割れの計算結果の一例を示した。発生間隔の異なる複数の場合を用意するために、図 6 において赤矢印で示された部分の摩擦パラメータが異なる場合を計算した。

これによって得られる半割れ地震後のゆっくり滑り (afterslip) について、一定時間間隔での各点の滑り量のデータを出力した。この滑り量のデータを、富岳で粘弾性構造モデルに入力することで、半割れ後の粘弾性も含めた DONET 観測点での地殻変動を計算し、真の場合との差を評価することで発生間隔を推定する数値実験を行った。

### 謝辞

本研究の一部 (FEM によるグリーン関数計算) は、文部科学省委託事業「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環としてとして実施されたものである。富岳を用いた粘弾性応答とその結果を用いた推移予測実験は東京大学地震研究所の方々 (藤田・金子・村上・市村) に実施頂いた。

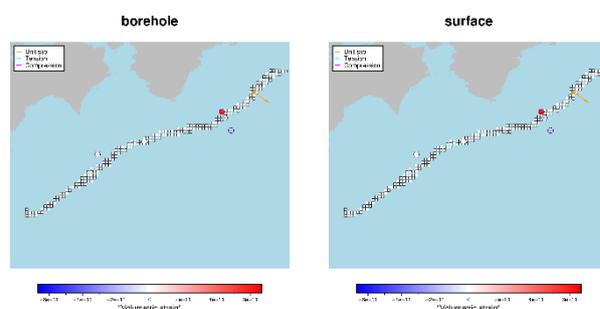


図 1. 分岐断層面上のあるノードにすべりを与えた際の海底面及び孔内センサー位置における変位・歪応答。

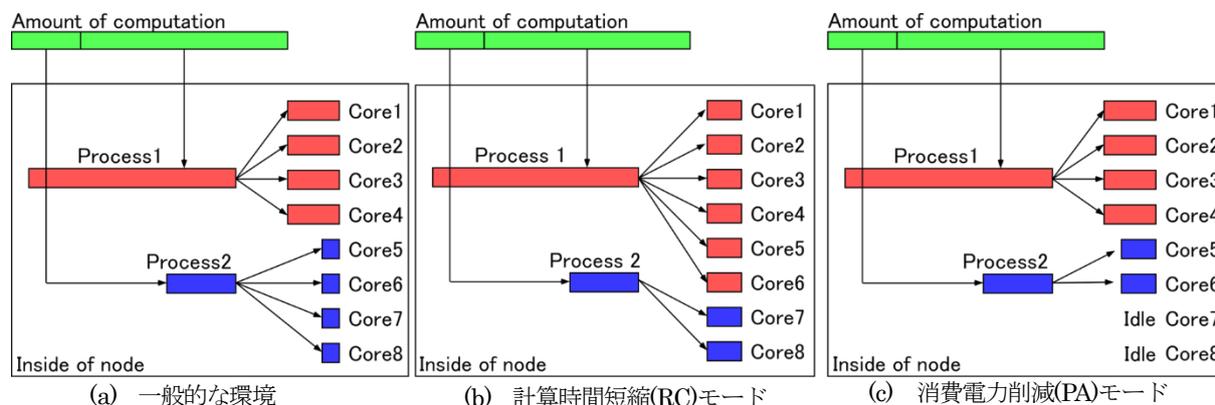


図 2. 動的コア割り付け(DCB)の概要図

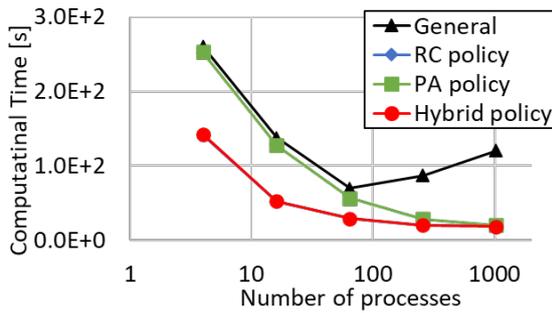


図 3. DCB の計算時間短縮効果

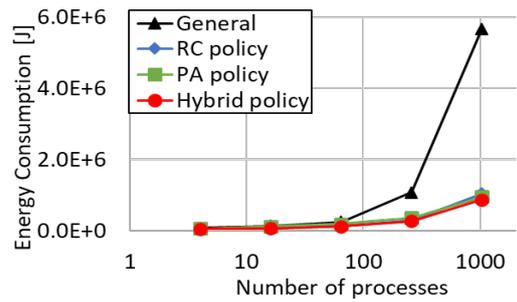


図 4. DCB の消費電力削減効果

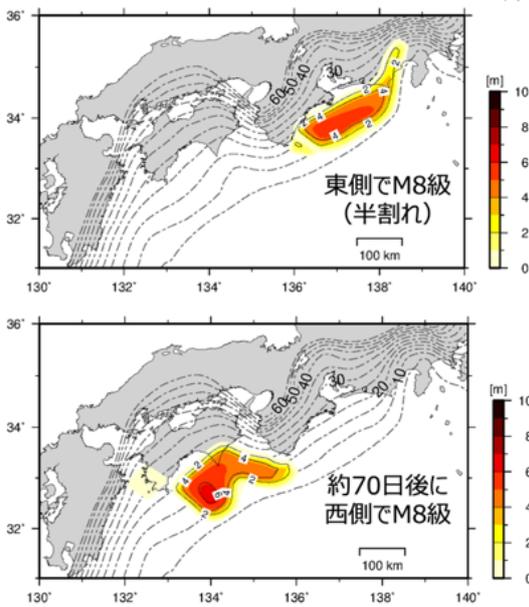


図 5 半割れの地震時滑り分布の例。

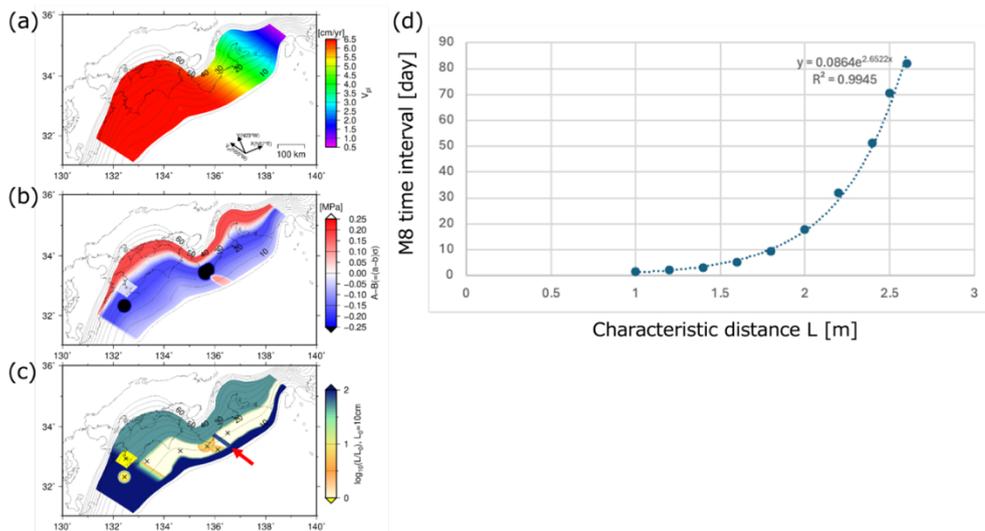


図 6 (a) 地震サイクルシミュレーションのパラメータのうち、プレート沈み込み速度の空間分布。(b) 摩擦パラメータ A-B の空間分布。(c) 摩擦パラメータ特徴的滑り距離 L の空間分布。赤矢印で示した部分の L の値を変化させて複数のシミュレーションを実施。(d) L の値を変化させた場合の半割れ後の M8 発生までの時間間隔変化の例。