

時空間領域境界積分方程式法の 高速解法の開発と 巨大地震シミュレーションへの応用

代表：安藤亮輔（東大，理学系研究科）

副代表：伊田明弘（海洋研究開発機構）

星野哲也・塙敏博・河合直聡（東大情報基盤セ）

大谷真紀子（東大，地震研）・佐藤大祐（京大，
防災研）・小澤創（スタンフォード大）

研究の背景と目的

- 地震発生現象（弾性体中に存在する断層の摩擦・破壊）は、未だに標準的なモデルが確立されていない。現象の複雑性と実験・観測の困難性による
- 近年の高分解能な観測技術の発展により、物理モデルの検証に使用できるデータが出始めてきた。人工衛星を用いたレーザー地表観測技術など
- 弾性体の破壊問題には特異性を持つ応力集中という、数値的な困難が存在するため、高精度な境界積分方程式法（BIEM）が用いられるが、計算負荷が大変高い。



本研究では、巨大地震発生現象の物理モデルの構築とBIEMの高効率化手法の開発を目的とする。

本研究の概要

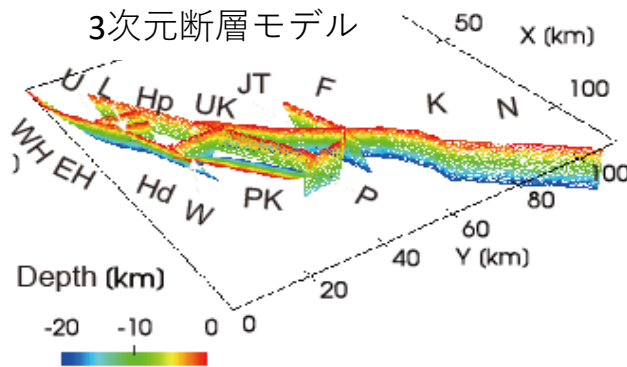
地震発生全過程の 3次元モデル化

- 動的地震破壊伝播
- 準動的地震サイクル

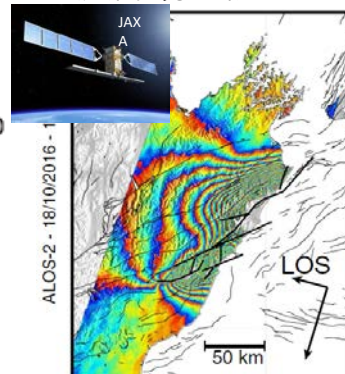
階層行列法(HACApK)による
大規模・高効率技術の開発
～空間・時空間境界積分方程式法への適用

観測データによるモデル検証と改良

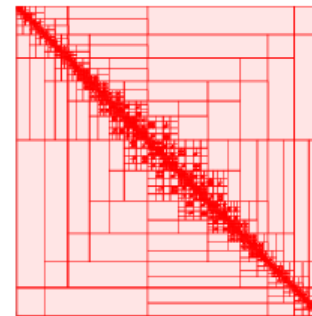
標準モデルの構築
モデルの大規模化



人工衛星観測データ
地震計観測網データ



積分核行列の高精度
階層的近似 $O(N \log N)$



日本列島スケールへの応用



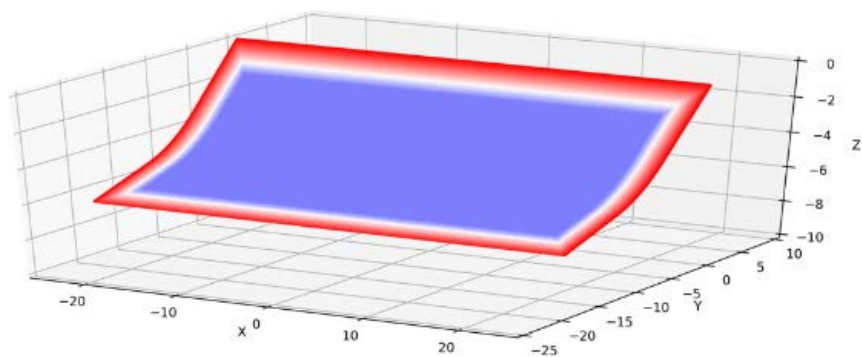
2022年計画

- 動的破壊過程（時空間-BIEMを使用）
 - 系統的な実地震モデルの構築と検証（2016年熊本地震など）
 - 従来手法FDP-BIEM($O(N^2)$)の改良
 - 動的階層行列法（FDP=H-matrices）の開発
- 準静的地震サイクル（空間-BIEMを使用）
 - 格子階層行列法の実装により 1万MPI並列以上でも性能が飽和しないアルゴリズムを使用し超大規模計算を実行
 - 西南日本の中央構造線断層の過去約1万年の地震発生履歴を計算
 - 東日本のモデル化に着手

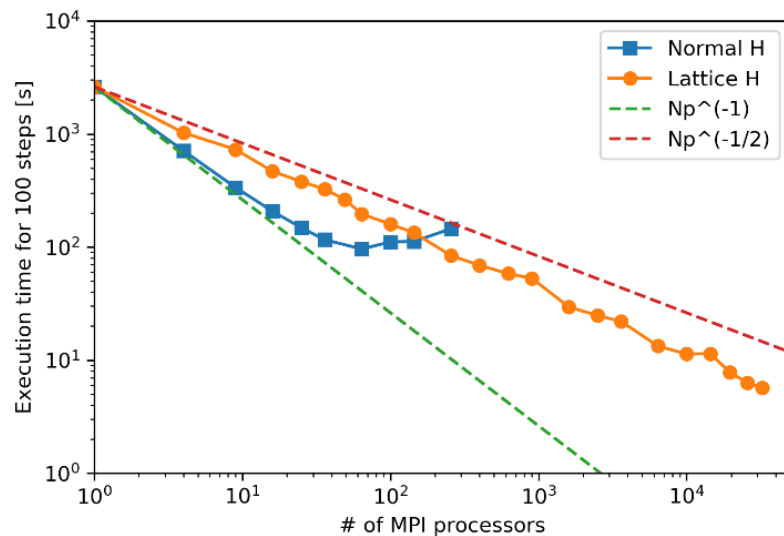
2021年の成果

地震サイクルシミュレーション に格子階層行列法を実装

1万MPI並列以上でも並列化効率が飽和しない高効率を実現



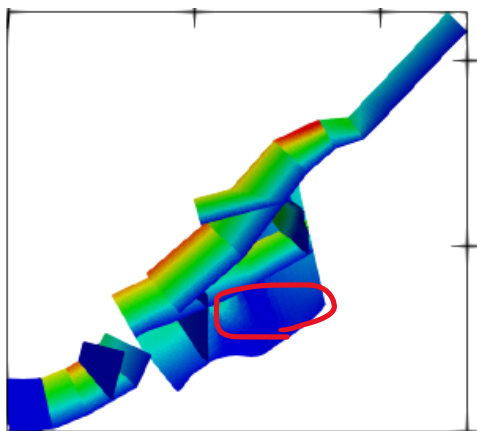
シミュレーションに考慮した断層モデル
プレート境界断層等の屈曲した形状を模擬



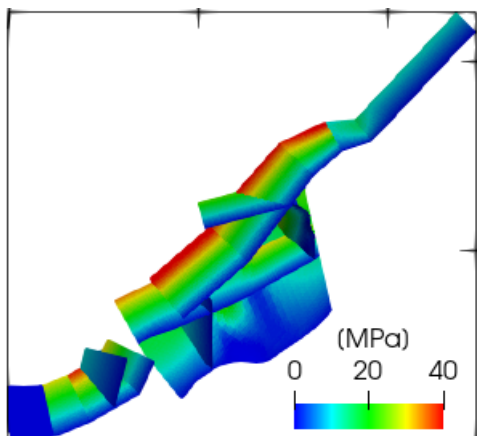
100時間ステップあたりの計算時間
通常の階層行列法（青）では100並列程度で並列化性能が飽和するが、格子階層行列法（橙）では1万以上でも飽和していない

初期値の不確実性を考慮した動的破壊モデルの検証

3次元動的破壊シミュレーションに用いた応力モデルの例

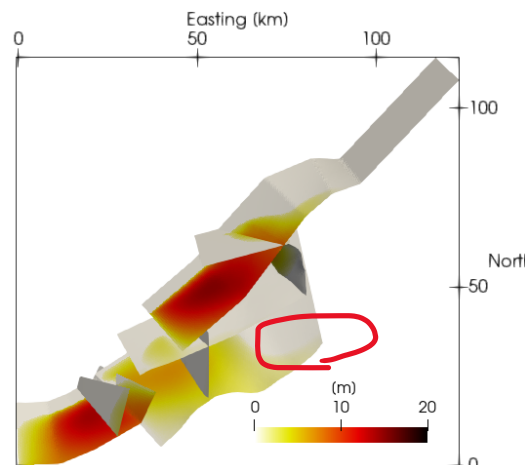


計算には地震前観測から推定した主応力比を用いて初期条件を決定する。推定値の不確実性の範囲内でパラメタスタディーを実施。

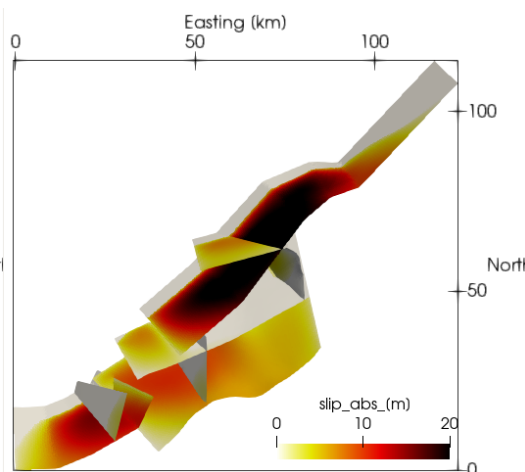


特に赤丸を付けた断層の応力状態が異なり、上図の場合で低応力、下図で高応力となることが分かる。

異なる応力条件で得られた地震時断層滑りの空間分布

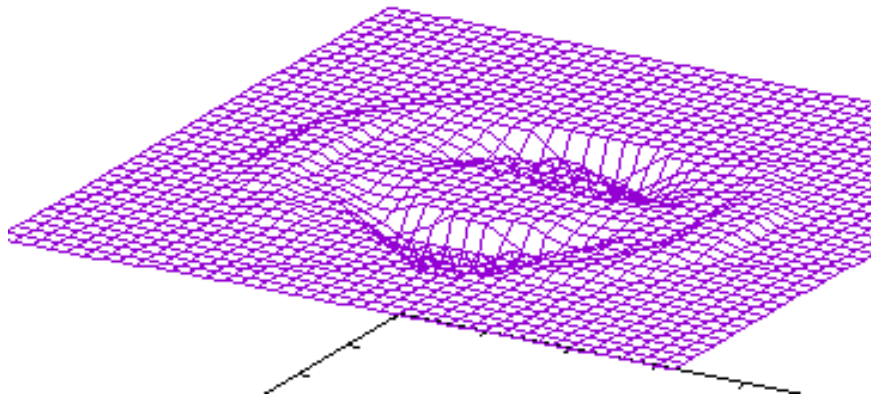


地震時断層滑り（1回の破壊での滑り）を地震時観測データと比較すると、上図の場合の再現性が高いことが確認できた。

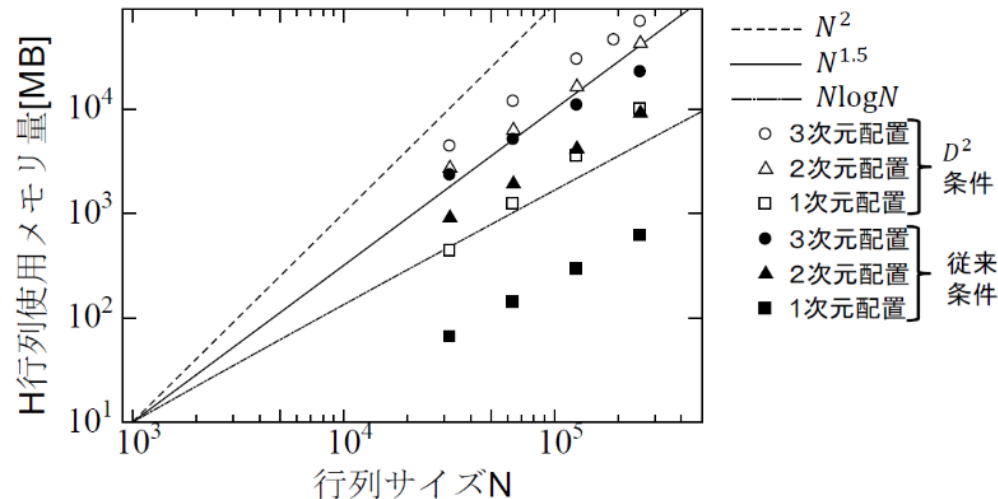


動的（時空間）境界要素法の効率化手法開発

- 静的（空間）境界要素法について成功している階層行列法を動的（時空間）境界要素法に拡張するためのFDP=H行列法の手法開発を行っている
- 点震源から放射される変位波動場の計算アルゴリズムに本手法を適用するコードを開発した
- 数値実験により計算効率を調べたところ、 $O(N \log N)$ - $O(N^{1.5})$ 程度と階層行列適用前の $O(N^2)$ より有意な効率化が実現することが分かった



FDP=H行列法で計算した変位波動場のスナップショット



FDP=H行列法における行列サイズ（要素数N）とメモリ使用量の関係
階層行列での許容条件に従来条件と新しいD2条件を考慮し比較した