

jh210023-NAH

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

安藤亮輔（東京大学，理学系研究科）

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ダ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。

本研究の枠組み

地震発生全過程の3次元モデル化

- 動的地震破壊伝播
- 準動的地震シーケンス

観測データによるモデル検証と改良

階層行列法(HACApK)による

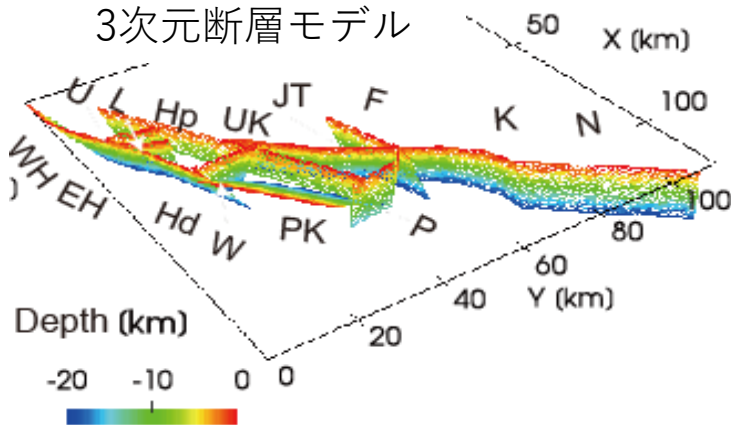
大規模・高効率技術の開発

～動弾性境界積分方程式法への拡張

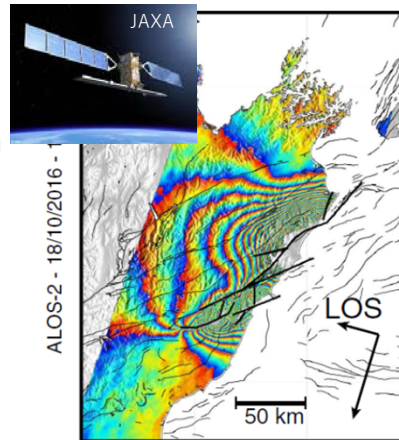
標準モデルの構築
モデルの大規模化



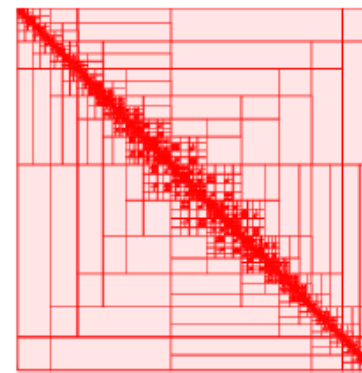
3次元断層モデル



人工衛星観測データ
地震計観測網データ



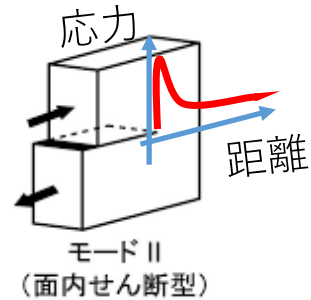
積分核行列の高精度
階層的近似 $O(N \log N)$



日本列島スケールへの応用



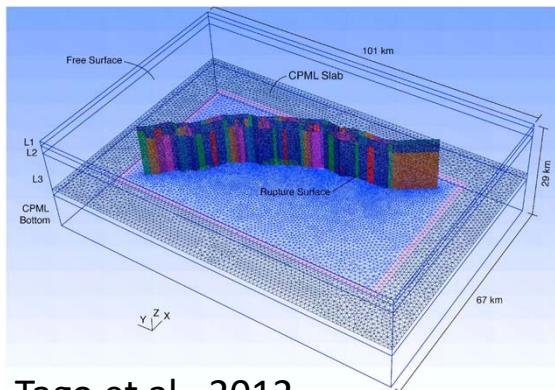
境界積分方程式法 (BIEM・BEM) は破壊力学に強い



- 破壊先端での応力の特異性 (応力集中)
- 破壊面での接触による摩擦の発生

FEMなど

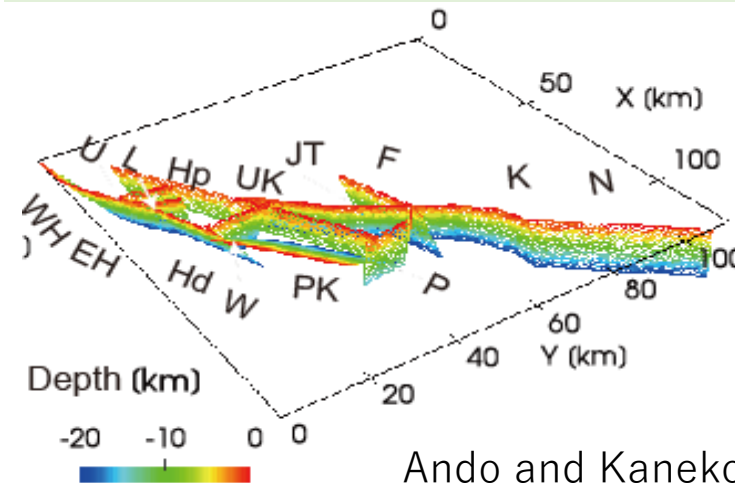
- 断層周辺でのメッシュ詳細化
 - 有限媒質・吸収境界
- メッシュ生成の複雑化, 計算コスト増加



Tago et al., 2012
Discontinuous Galerkin-FEM

BIEM

- 応力特異性と面上の応力を半解析的に扱う
 - 断層面のみの離散化
 - 無限・半無限媒質
- 複雑形状でも容易なメッシュ生成, 高精度



Ando and Kaneko, 2018

2021年計画

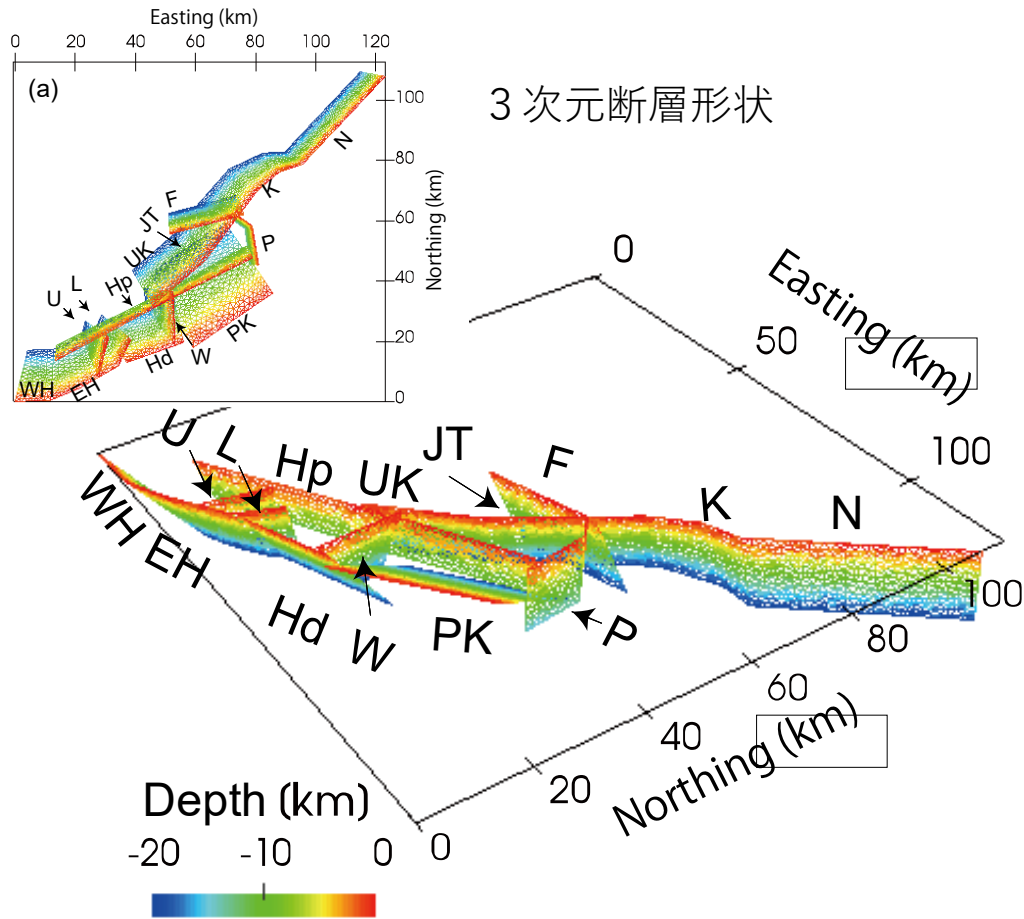
- 動的破壊過程（時空間-BIEMを使用）
 - 系統的な実地震モデルの構築と検証
 - 従来手法FDP-BIEM($O(N^2)$)の改良
 - 3D動的階層行列法（FDP=H-matrices）の開発
- 準静的地震サイクル（空間-BIEMを使用）
 - 格子階層行列法の実装と性能評価，チューニング
 - 実際の断層系のモデルの構築とシミュレーション

2020年度の実施内容

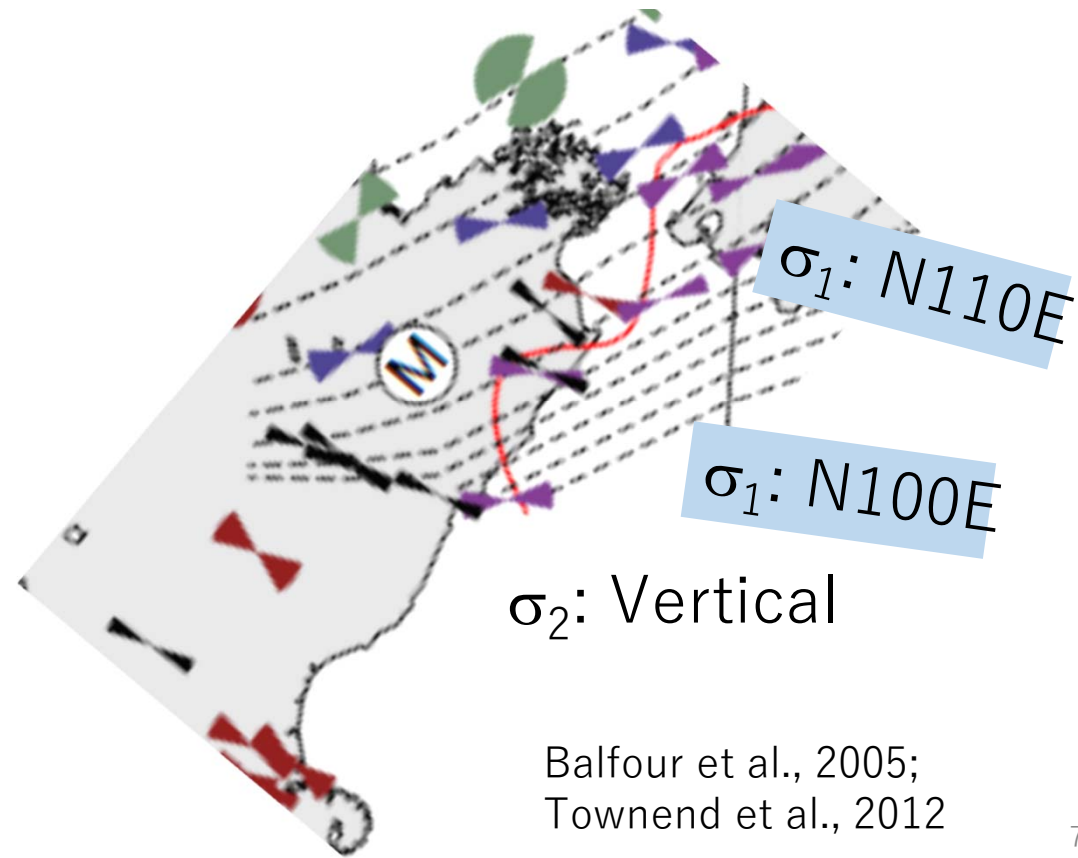
1. 地震時動的破壊過程の物理モデル構築と検証
 - ・ 2016年ニュージーランドの地震のモデル高度化
 - ・ 2011年福島県浜通りの地震のモデル化
2. 時空間境界積分方程式法のアルゴリズム高速化
 - ・ 動弾性積分核近似へのHACApKの適用と性能検証（久河，修論）
3. 地震シーケンスシミュレーション
 - ・ 格子H行列の実装
 - ・ 余震発生過程のモデル化

地震時動的破壊過程の物理モデル構築と検証

- 2016年カイコウラ（ニュージーランド）地震対象に実施
- 観測で拘束された3次元断層形状と応力場の情報を考慮しモデル構築
- 動的破壊シミュレーションを実施



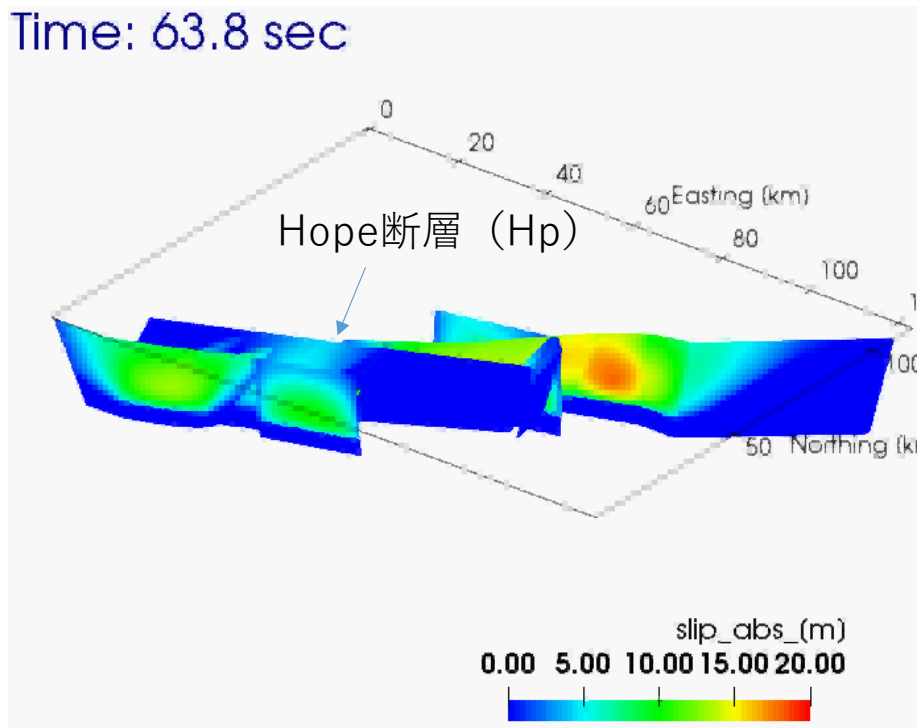
観測された領域に加わる応力の空間分布



地震時動的破壊過程の物理モデル構築と検証：応力パラメタの不確実性の評価

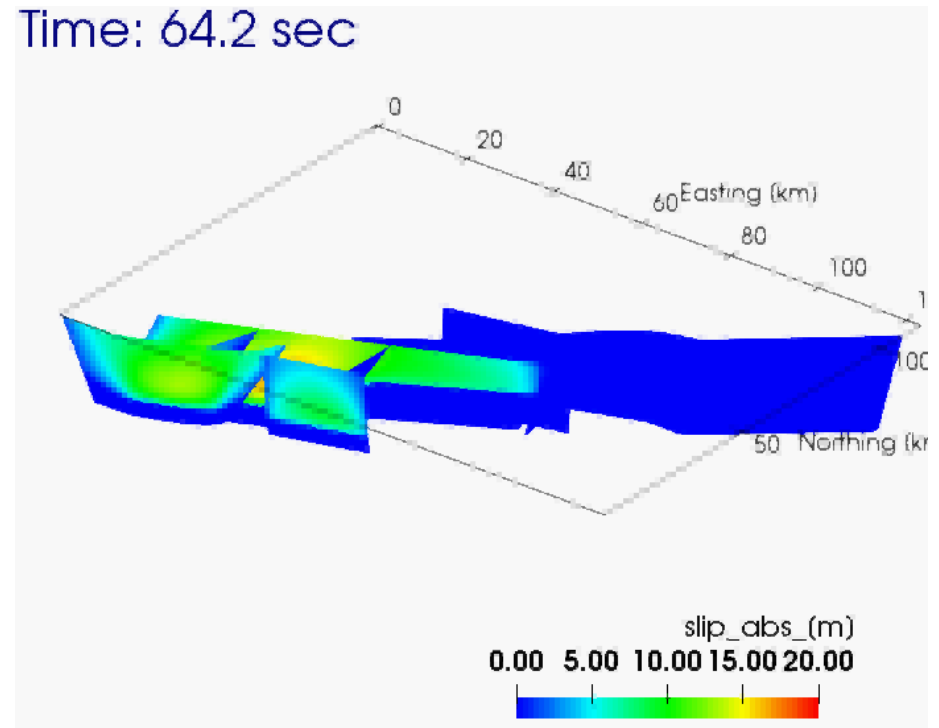
- 応力蓄積率：活断層に加わる応力について、破壊満期の値を100%とした割合。前回の地震からの経過時間等で決まり、観測的な拘束が難しい。
- Hope断層の応力蓄積率をパラメタとした破壊シナリオの検討と応力蓄積率の推定を行った
- FDPM使用 ($O(N^2)$)。OFPの256ノード2.5時間。要素数46,000, タイムステップ数2,700

応力蓄積率74%の場合



Hope断層は一部のみ破壊
→実際の2016年に発生した地震を再現

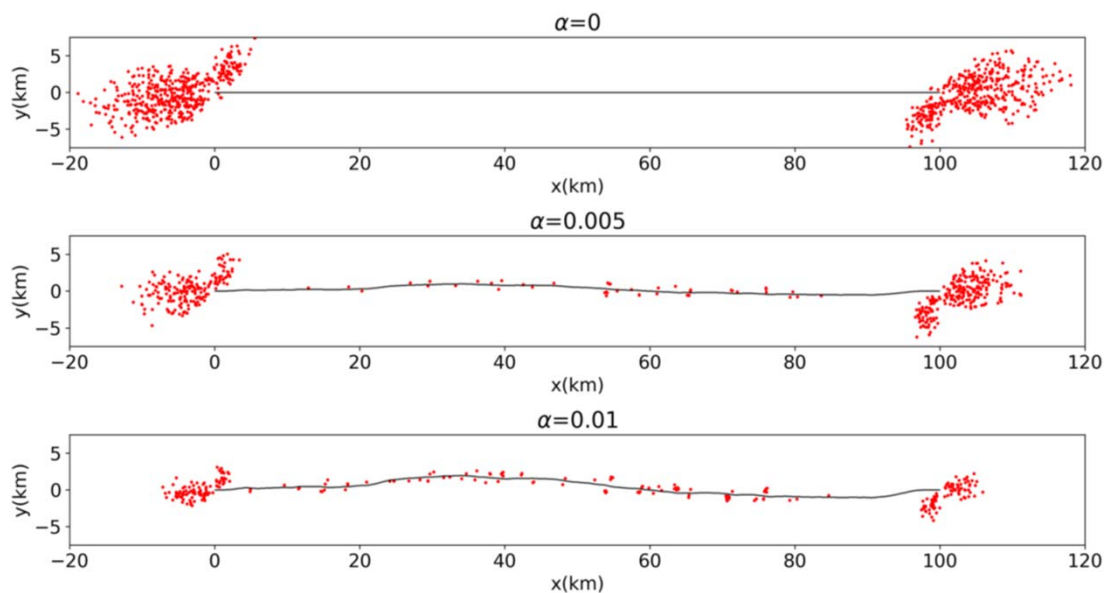
応力蓄積率100%の場合



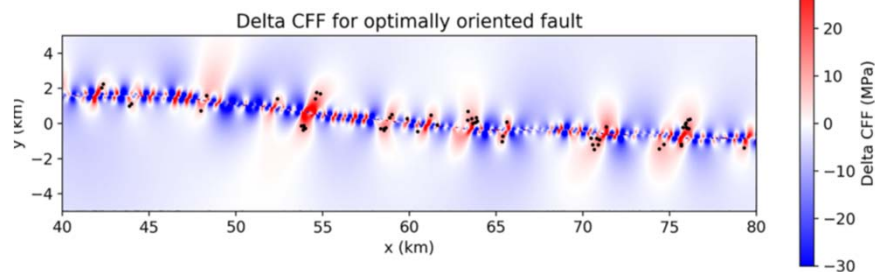
Hope断層は全体が破壊し、北東側の断層への破壊伝播は抑制

余震発生過程の準動的シミュレーション

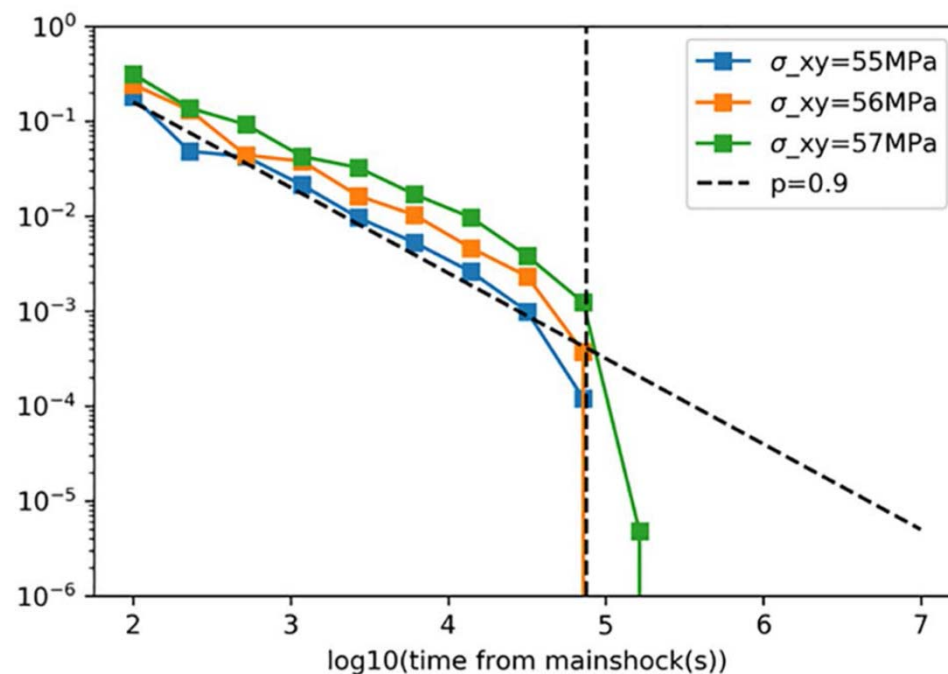
計算で求めた余震の空間分布



非平面断層で生じた本震の影響で、断層周辺に生じた応力変化量の空間分布



計算で求めた余震発生数の時間依存性



地震の経験則である、余震の時間減衰式（大森則）を再現し、断層周辺に分布する余震の発生機構を明らかにした. Ozawa and Ando (2021)

階層行列法(HACApK)による大規模・高効率技術の開発

境界積分方程式法の定式化と計算コスト

空間 BIEM
力の釣り合い

$$T_i = \sum_j K_{i,j} E_j$$

応力 = 静的グリーン関数 * 滑応力

→空間畳み込み $O(N^2)$

時空間 BIEM (ST-BIEM)
波動の伝播 (慣性)

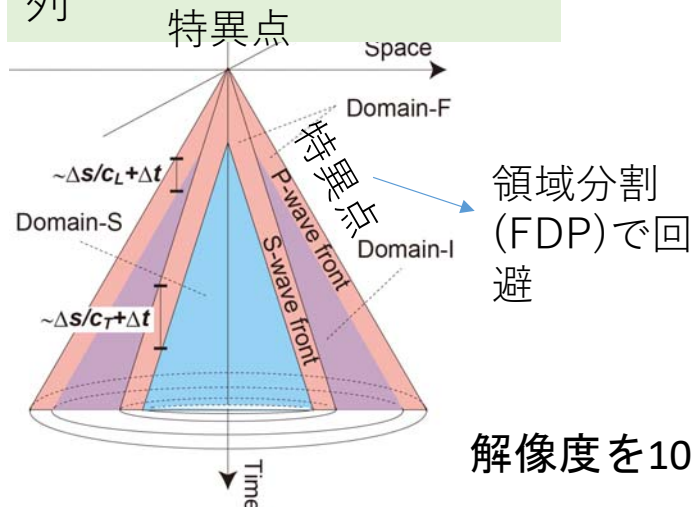
$$T_{i,n} = \sum_{j,m} K_{i,j,m} D_{j,n-m}$$

滑応力 = グリーン関数 * 滑り速度の時刻歴

→時空間畳み込み $O(N^2 M)$

(i, j: 要素番号, n, m: 時間ステップ)

グリーン関数 K : 密行列



時空間畳み込み積分のコスト

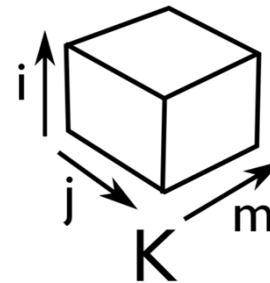
$i, j = 1, \dots, N$ とするとメモリと
 $m = 1, \dots, M$ 畳み込み一回の計算量は

$$O(N^2 M)$$

3Dでは

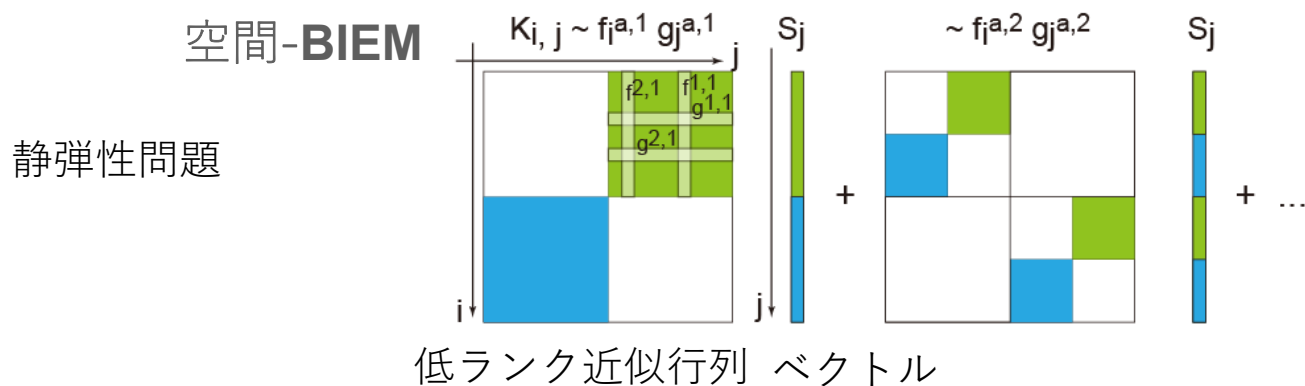
$$N \sim (L/\Delta x)^2$$

$$M \sim (L/\Delta x)$$



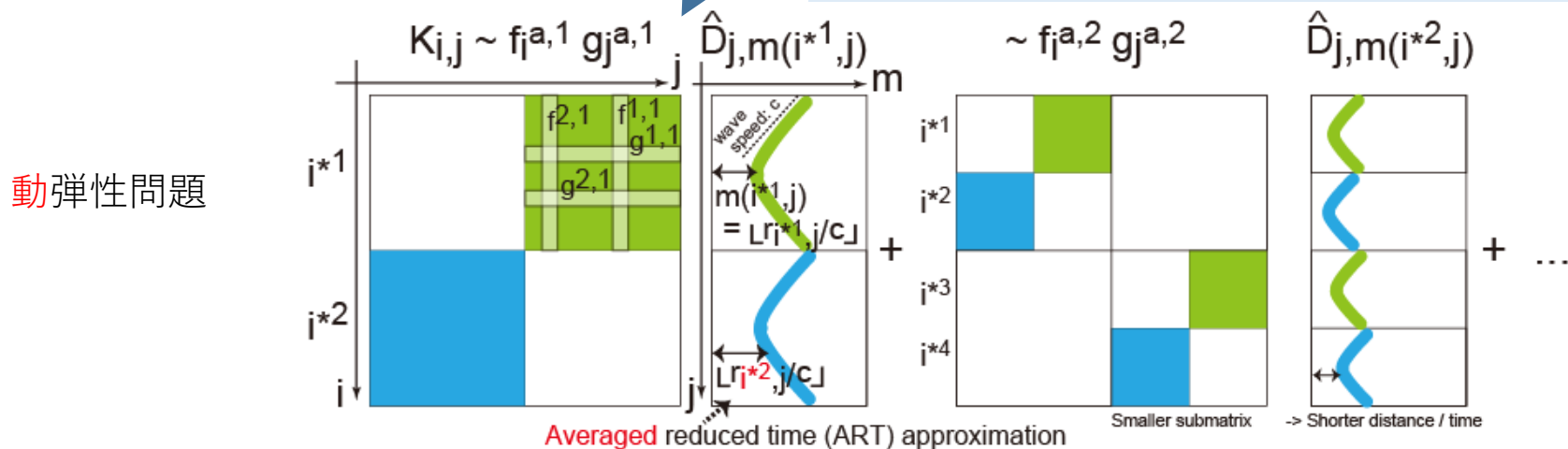
解像度を10倍するとNは100倍、Mは10倍、コストは10万倍

時空間-BIEMへの階層行列 (H-matrices) 導入: FDP=H-matricesの開発



時空間-BIEM

HACApKライブラリ (Iida +, 2014) の拡張で対応
データ構造・入出力の変更 (D, m)



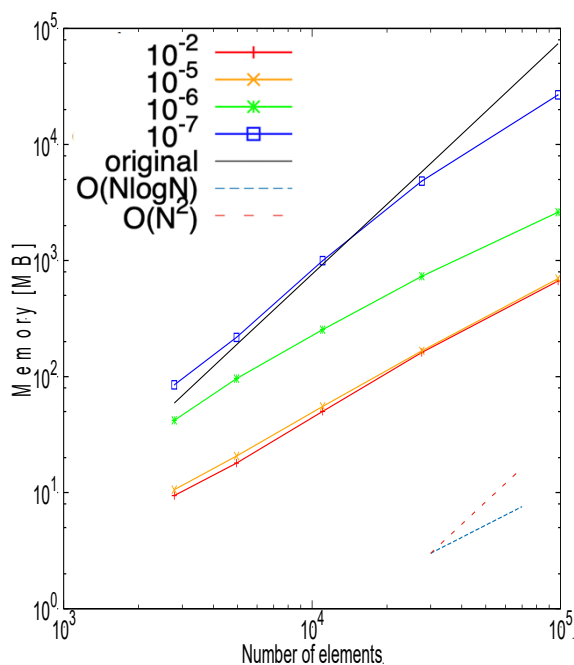
低ランク近似行列
領域分割(FDP)
→空間依存のみに変換

密行列成の疎抽出
→ベクトル

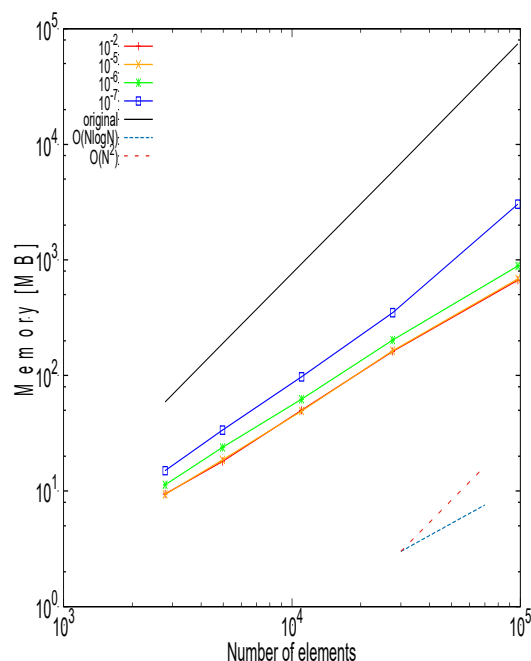
Sato and Ando, 2021 (submitted)

3次元応力積分核に対する階層行列法の性能検証 要求メモリの要素数依存性

ドメインFp ($1/r^2$)



ドメインS ($1/r^3$)



計算条件

- ・平面断層で離散化サイズを変更することで要素数変化
- ・Domain FpとSの応力積分核
- ・相対誤差 $\varepsilon_{ACA} = 10^{-2}, 10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}$ での要求メモリ量を測定

結果

- ・低精度の場合、少ない要素数でも $O(N \log N)$ 、高精度の場合では要素数が大きい場合に $O(N \log N)$
- ・ドメインFp,Sで同傾向だが定量的な違い

課題も明らかに

- ・距離減衰に付加される方位依存性の影響
- ・遠地、近地項の減衰指数の違い

久河 (2021, 修士論文, 東大理学系)