

jh190046-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。

# 本研究の流れの概要

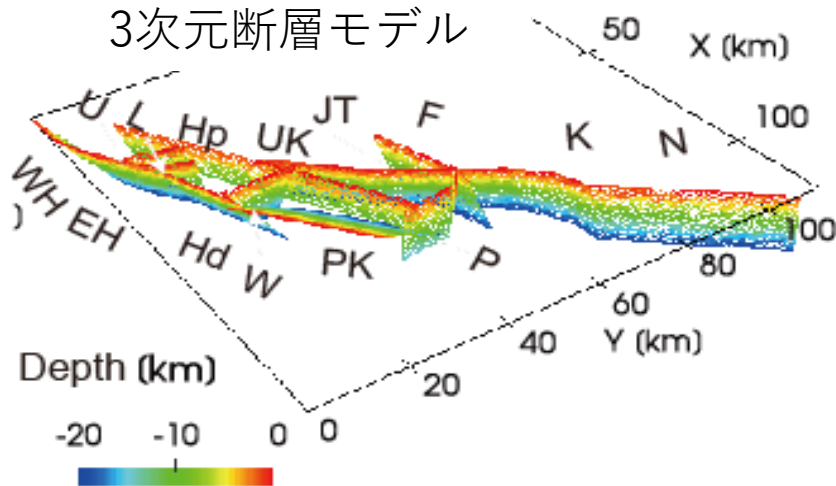
地震発生 の 全過程 の 3次元モデル化

- 動的地震破壊伝播
- 地震サイクル

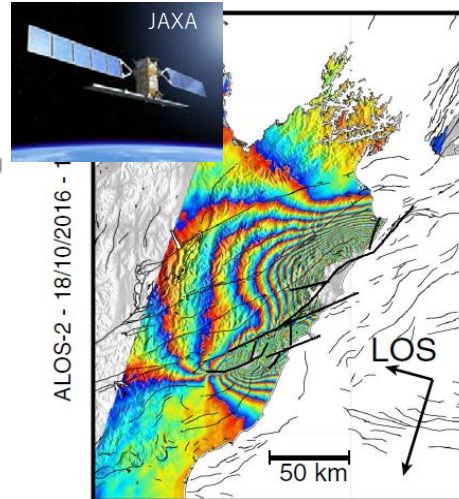
階層行列法(HACApK)による  
大規模・高効率技術の開発  
～**動弾性**境界積分方程式法への拡張

観測データによるモデル検証と改良

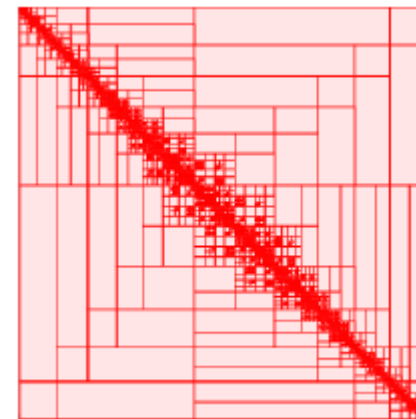
標準モデルの構築  
モデルの大規模化



人工衛星観測データ  
地震計観測網データ



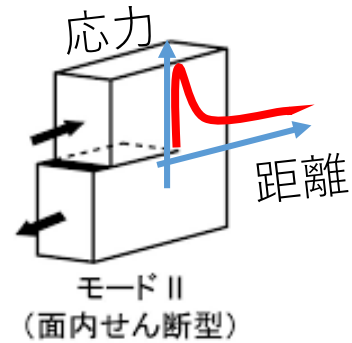
積分核行列の高精度  
階層的近似  $O(N \log N)$



日本列島スケールへの応用



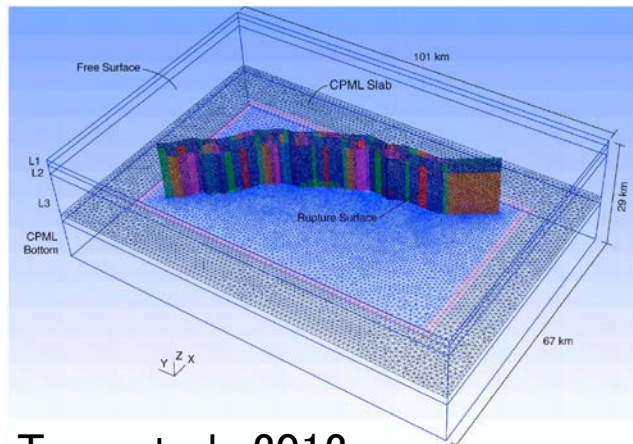
# 境界積分方程式法 (BIEM・BEM) は破壊力学に強い



- 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

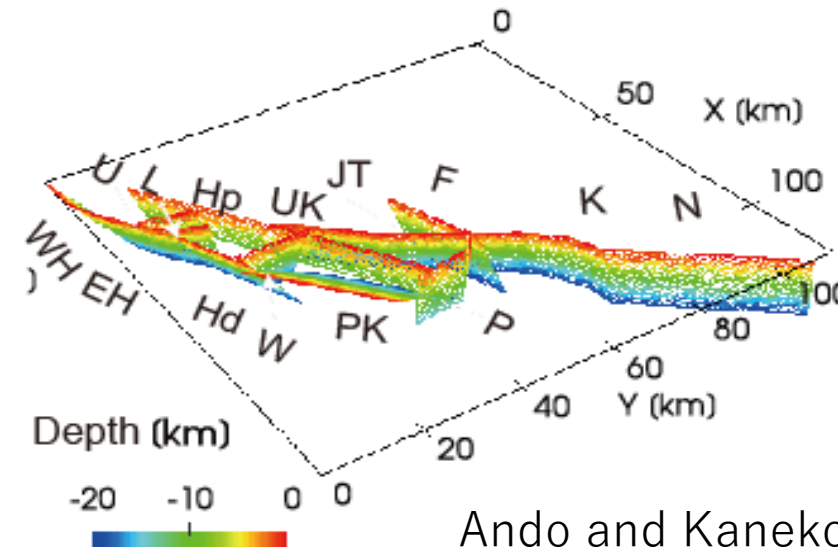
- 断層周辺でのメッシュ詳細化
  - 有限媒質・吸収境界
- メッシュ生成の複雑化, 計算コスト増加



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



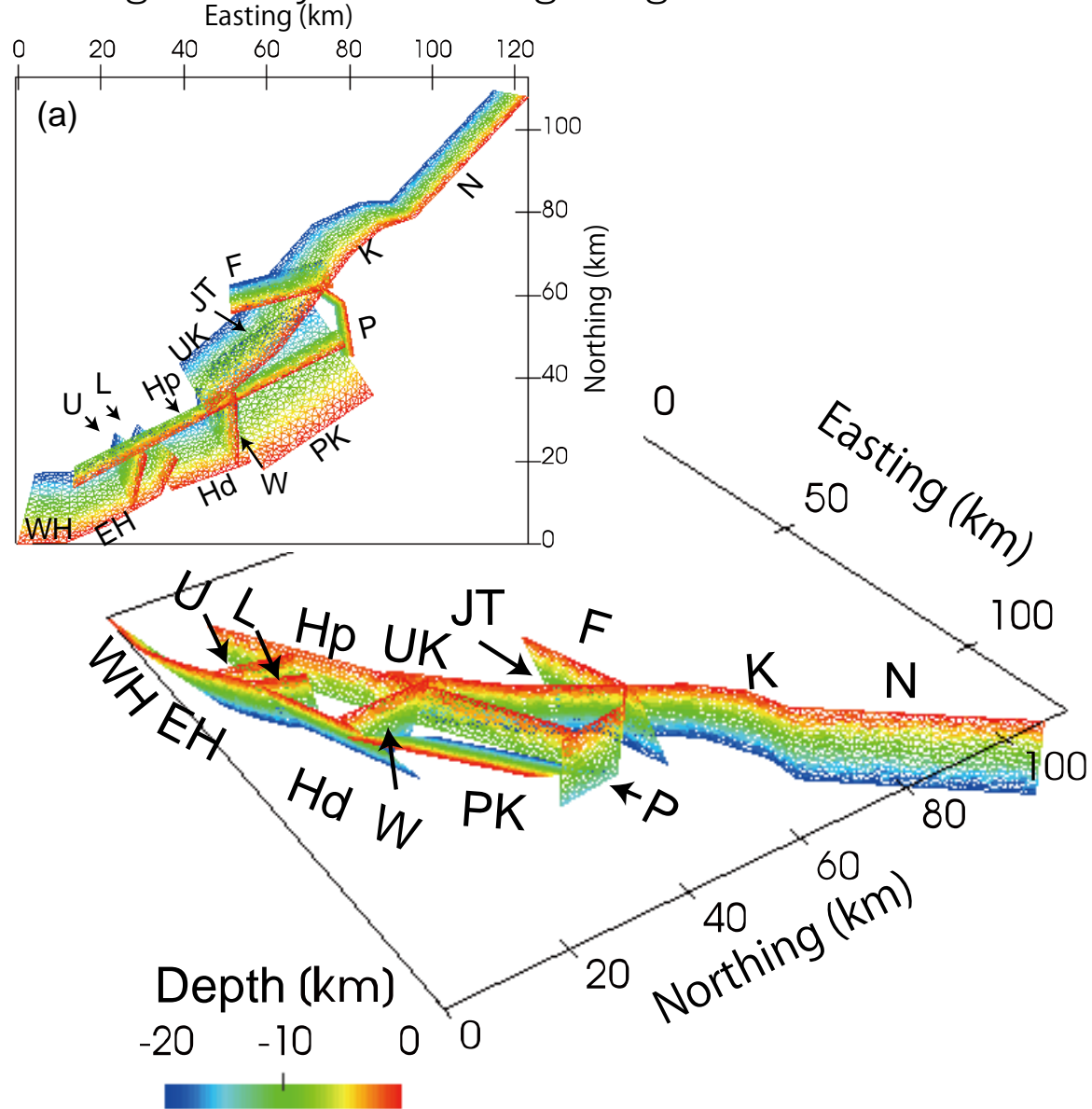
Ando and Kaneko, 2017

# 2019年度の実施内容

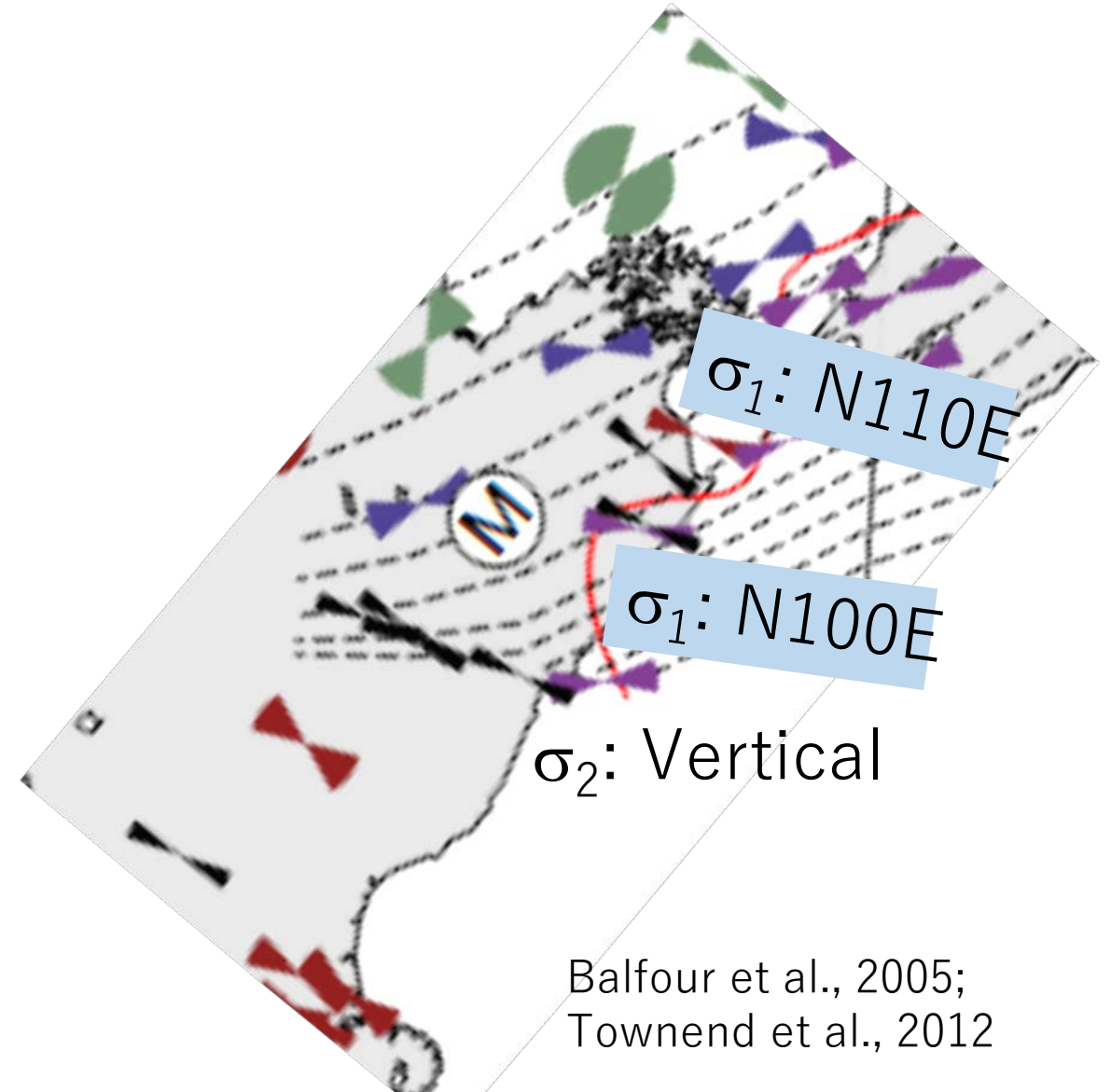
1. 地震発生現象の物理モデルの構築と検証
  - 2018年北海道胆振東部地震
    - Hisaka, Ando et al., 2019, Earth Planets Space
  - 2019年米国カリフォルニアの地震
    - Ando et al., 2019, Am. Geophys. Union Fall meeting
  - 2016年ニュージーランドの地震のモデル高度化
2. 時空間境界積分方程式法のアルゴリズム高速化
  - 動弾性積分核近似へのHACApKの適用と精度検証
  - 地震サイクルシミュレーションコードへのHACApKの実装

# モデル化と検証の方法：地震前の観測データでモデルを設定

Fault geometry: Previous geological inference + InSAR



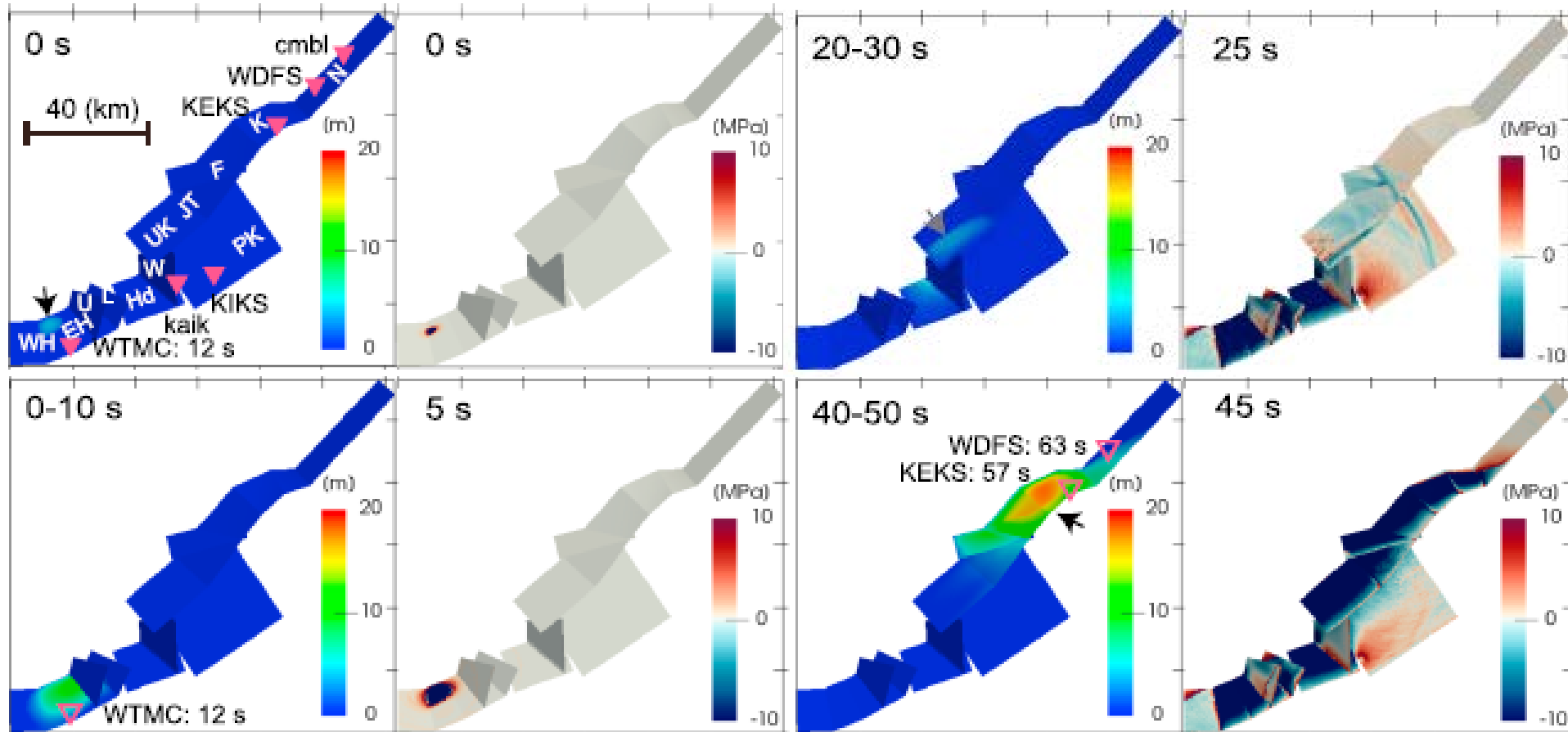
Regional stress field:  
Stress tensor inversions



Balfour et al., 2005;  
Townend et al., 2012

# 巨大地震の再現計算

断層のずれ量（左）と応力（右）の時間発展の様子  
断層面を上から見たところ



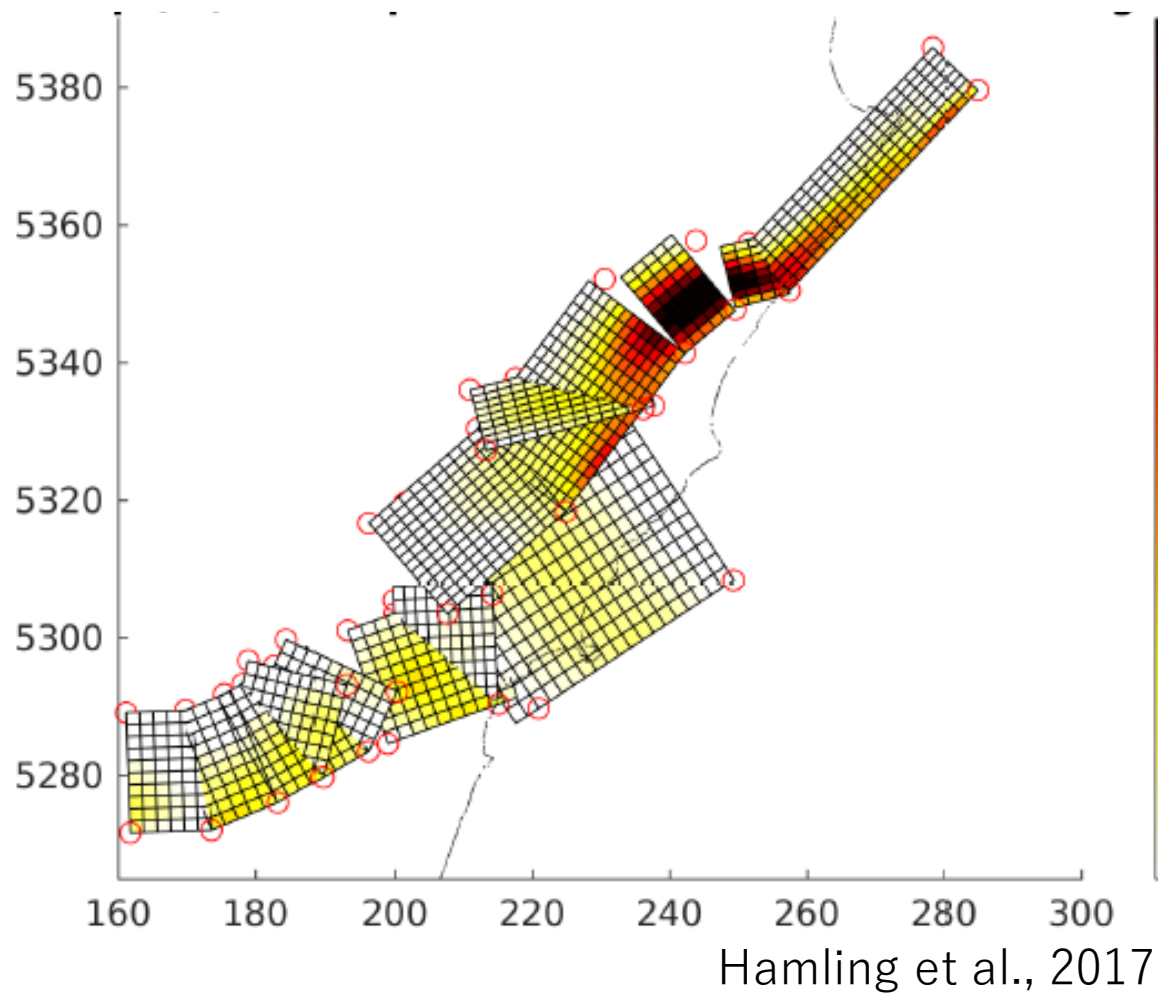
Ando and Kaneko (2018)

2016年（マグニチュード7.9）ニュージーランド地震

- 観測史上最も複雑な断層形状を3次元で考慮
- 地震時の断層ずれ量分布と動的破壊パターンの再現に成功

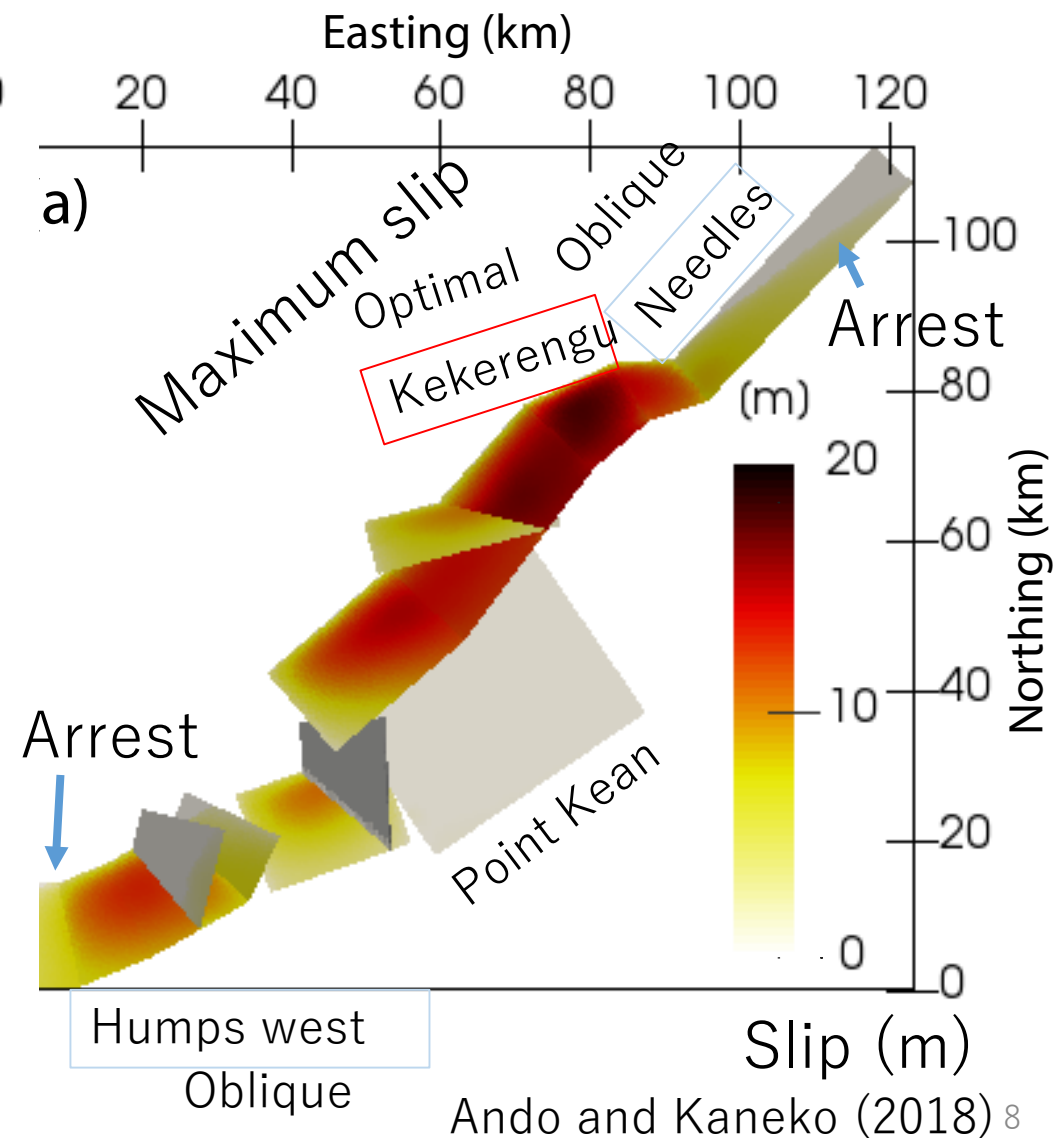
# 観測と計算の比較

InSAR Slip inversion



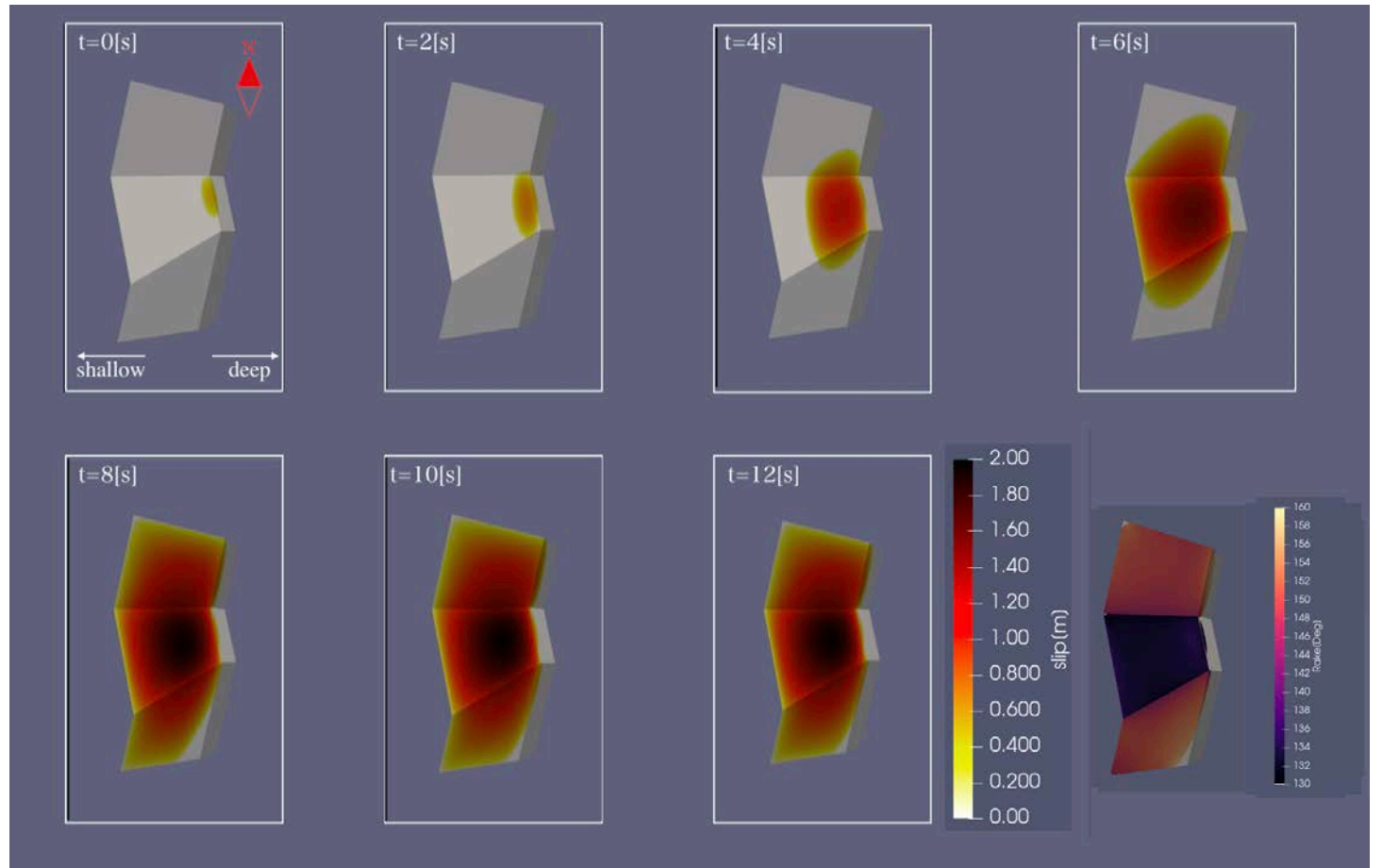
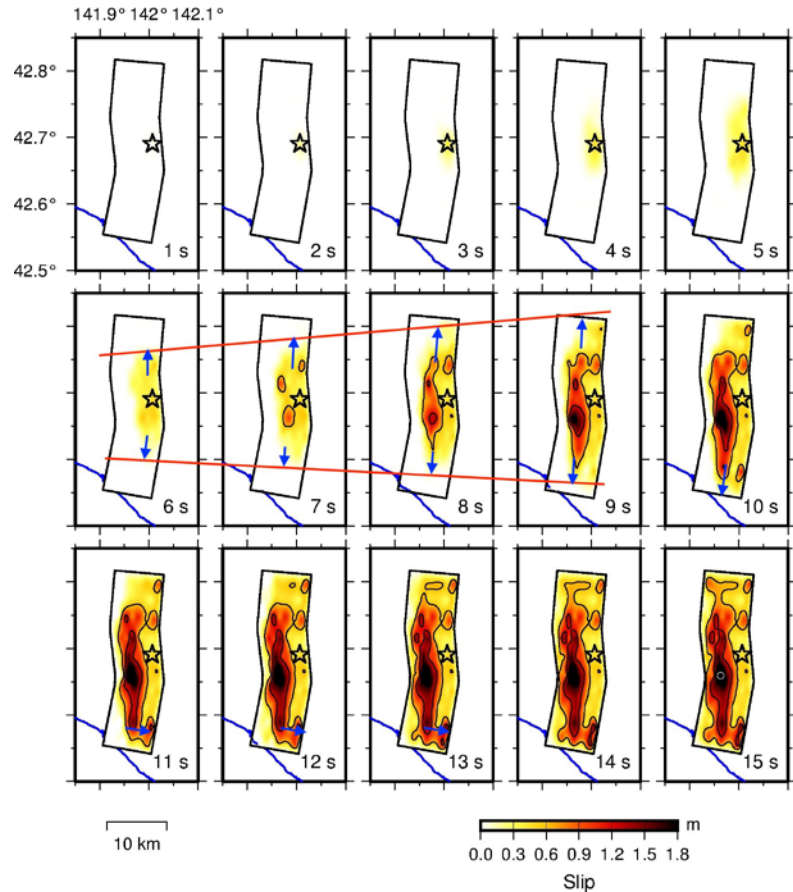
Slip distribution strongly reflect initial traction distribution = geometrical effect

Dynamic simulation



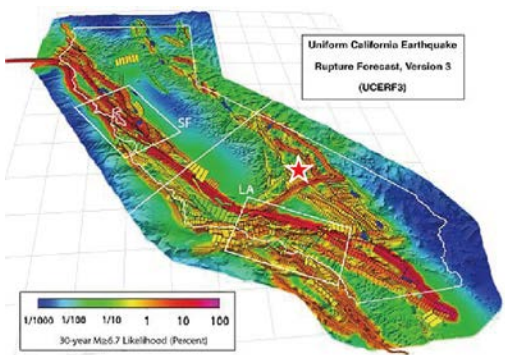


# 大地震の再現計算と検証： 2018年北海道胆振東部地震



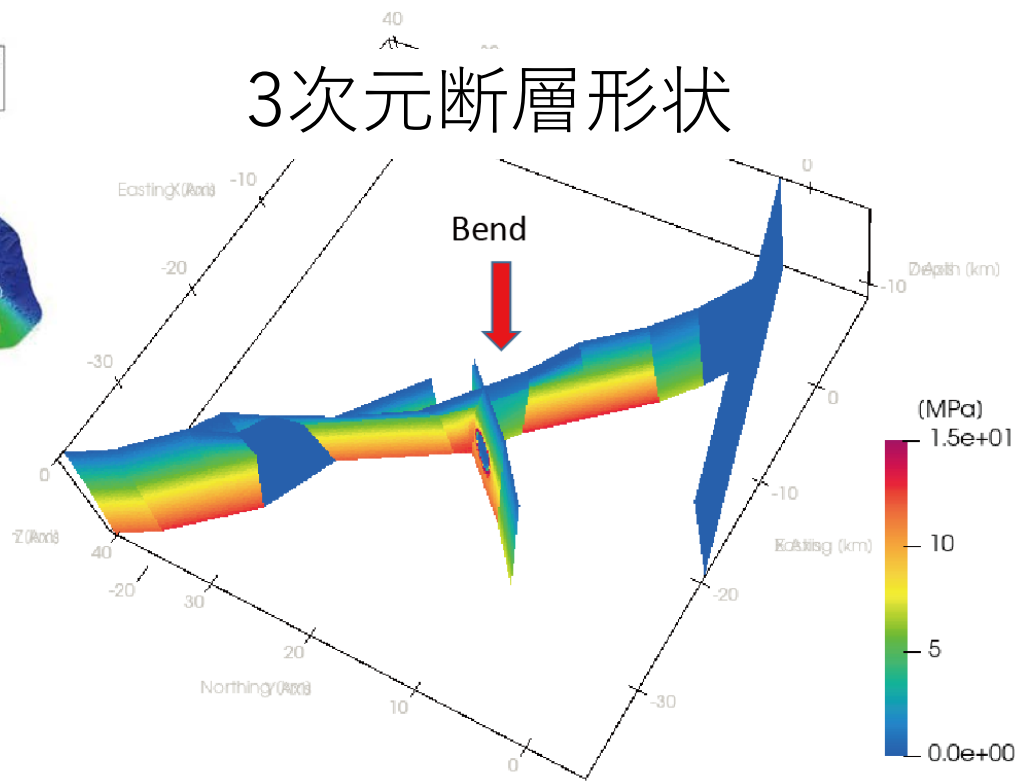
(左) 2018年北海道胆振東部地震に関する，Asano and Iwata (2019)による地震波データを用いた断層面上での破壊のインバージョン結果(すべり量)  
(右) 同地震に関する，地震波データを用いずに行った境界積分方程式法による動的破壊シミュレーション結果(すべり量，最終すべり角)

# 2019年米国カリフォルニアの地震

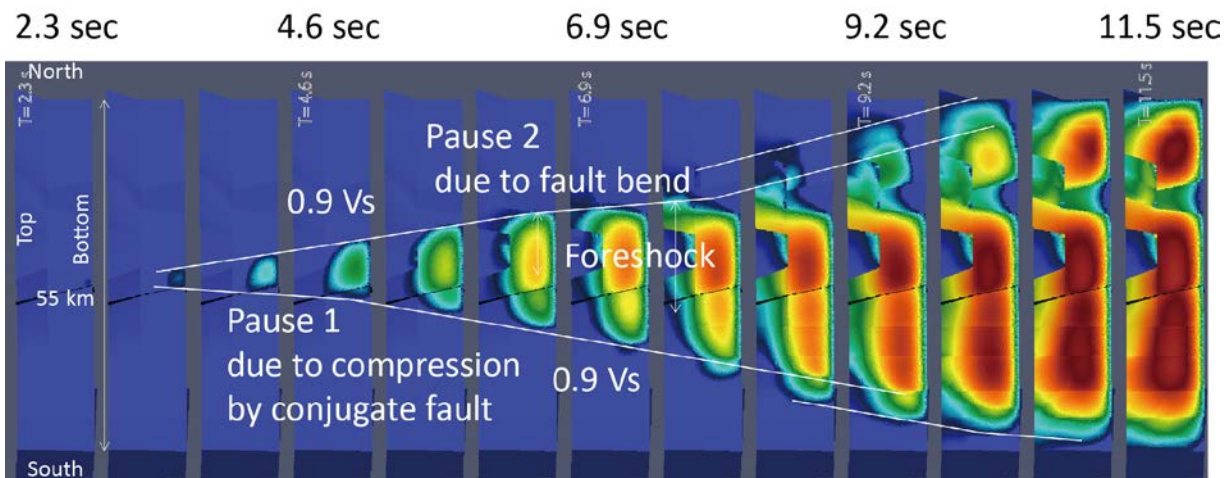


震源の位置

## 3次元断層形状

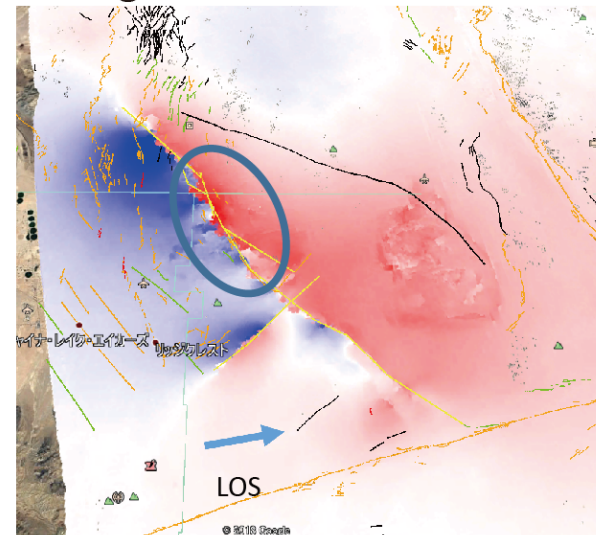


破壊伝播の様子

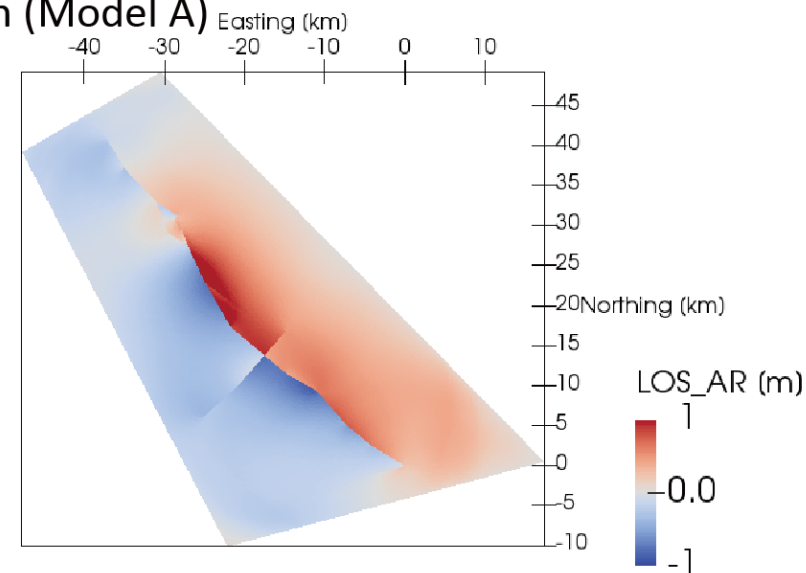


## 観測と計算の比較

InSAR (including foreshock and mainshock)



Simulation (Model A)



# 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

$$\mathbf{T}_i = \sum_j \mathbf{K}_{i,j} \mathbf{E}_j$$

応力 = 静的グリーン関数 \* 滑り  
→ 空間畳み込み  $O(N^2)$

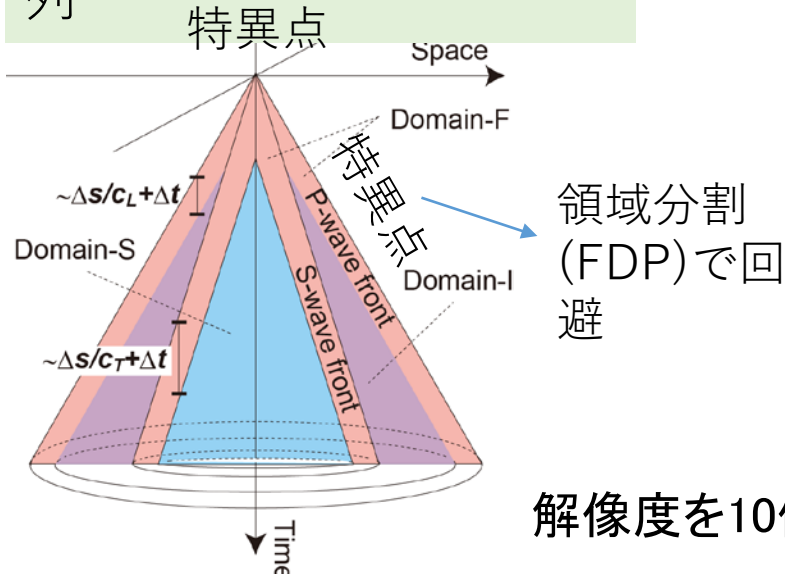
時空間 BIEM (ST-BIEM)  
波動の伝播(慣性)

$$\mathbf{T}_{i,n} = \sum_{j,m} \mathbf{K}_{i,j,m} \mathbf{D}_{j,n-m}$$

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

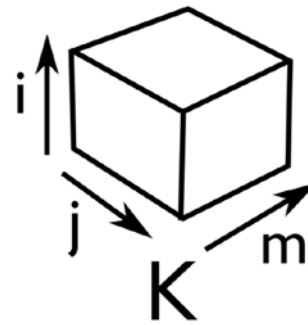
$ij=1,\dots,N$  とするとメモリと  
 $m=1,\dots,M$  畳み込み一回の計算量は

$$O(N^2 M)$$

3Dでは

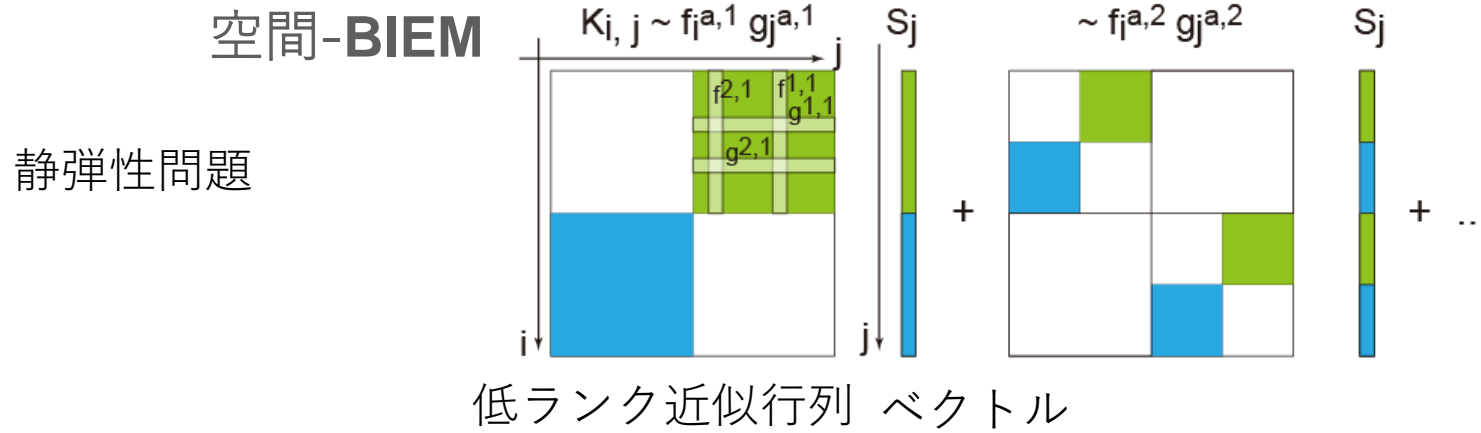
$$N \sim (L/\Delta x)^2$$

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



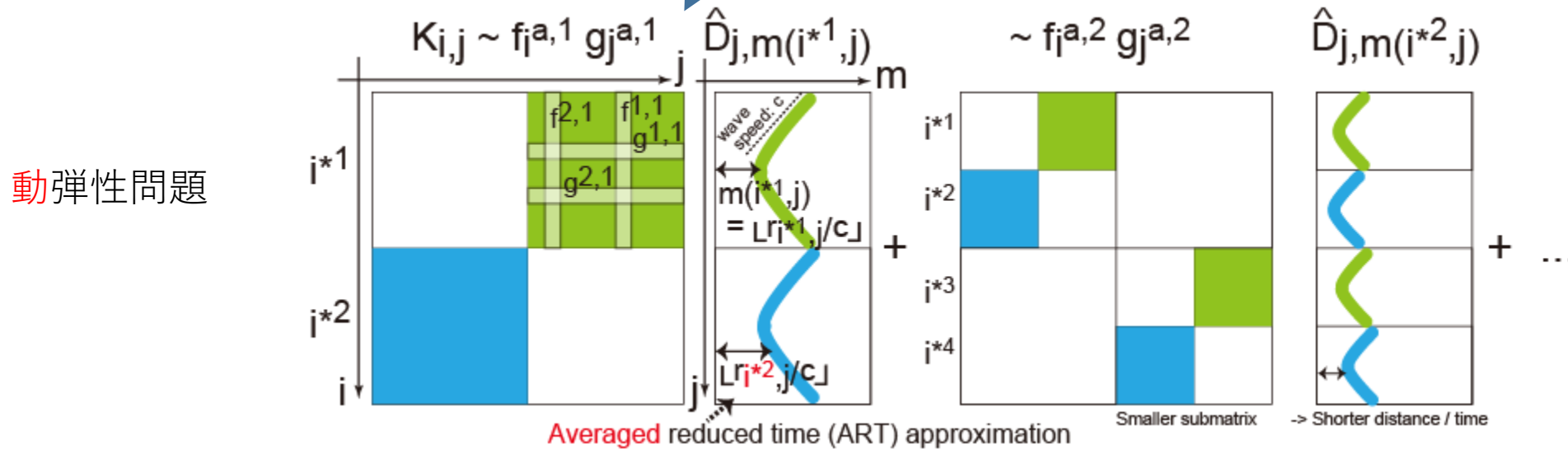
解像度を10倍するとNは100倍、Mは10倍、コストは10万倍

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



## 時空間-BIEM

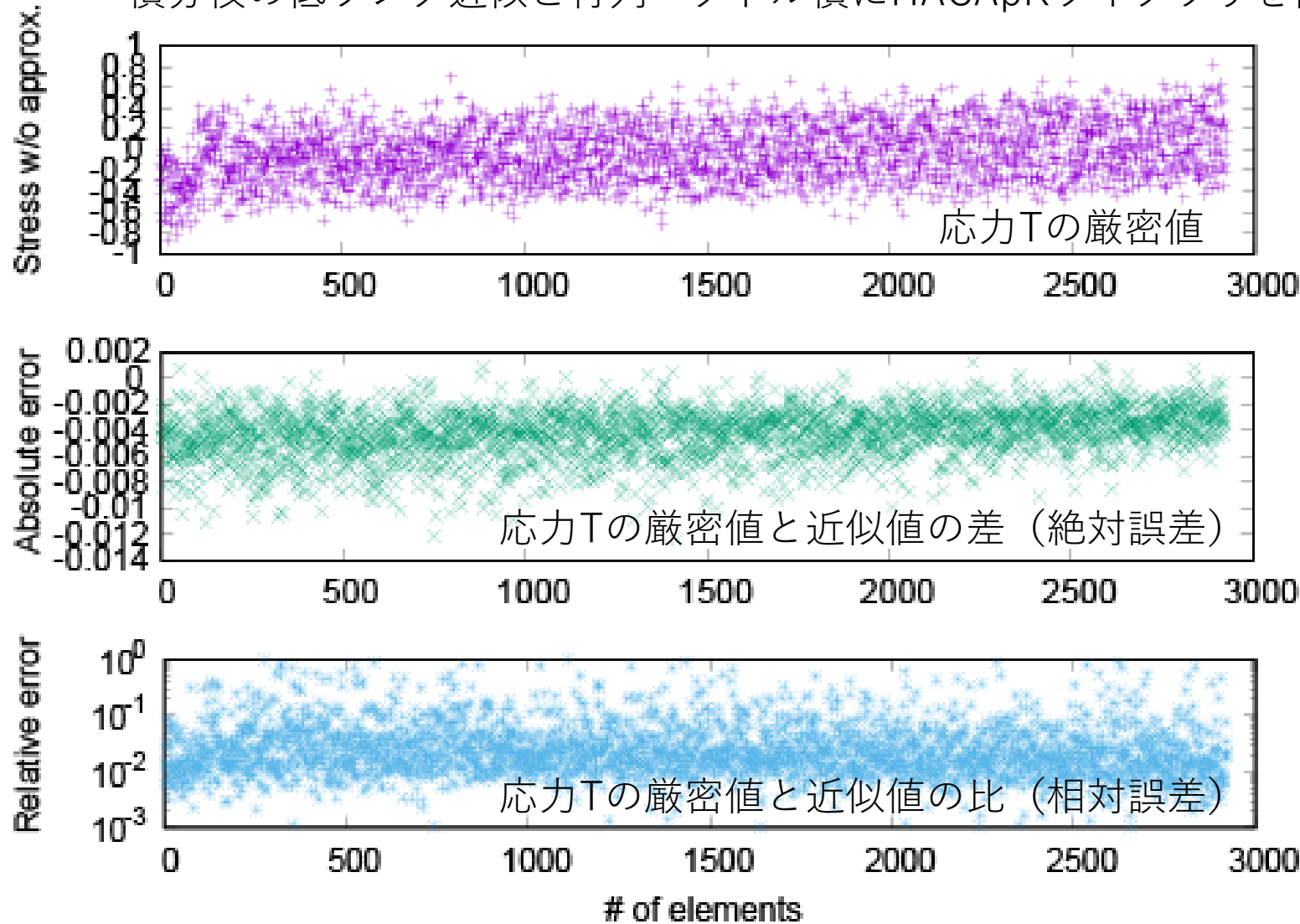
HACApKライブラリ (Iida +, 2014) の拡張で対応  
データ構造・入出力の変更 (D, m)



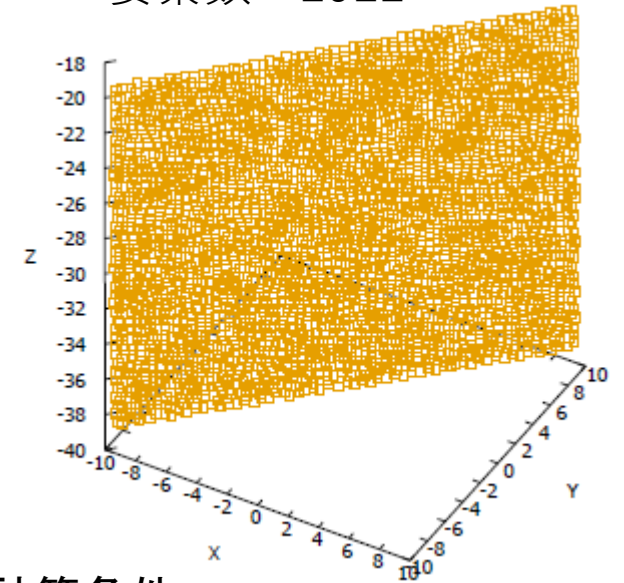
- 1 低ランク近似行列 領域分割(FDP) →空間依存のみに変換
  - 2 密行列成の疎抽出 →ベクトル
- Sato and Ando, 2019 (revising)

# 階層行列化した時空間BIEMの精度検証

積分核の低ランク近似と行列ベクトル積にHACApKライブラリを使用



考慮した断層形状  
要素数：2922



計算条件

$$T_i = K_{ij} D_j$$

積分核：Kij

→ 動的積分核の波動先端項

滑り速度：Dj

→ テストのため[-1:1]の乱数

メモリ消費量：20%に削減

# まとめ

## 2019年度の実施内容

1. 地震発生現象の物理モデルの構築と検証
  - 2018年北海道胆振東部地震
  - 2016年ニュージーランドの地震のモデル高度化
  - 2019年米国カリフォルニアの地震

地震観測データに基づいて推定された断層破壊過程の、大局的な特徴を、シミュレーションで再現できた。シミュレーションでは、観測地震波形などの地震時の観測データを用いたチューニングはしていない。

今後、近年発生した大地震について、系統的なモデル化と検証の事例を積み重ね、標準モデルの確立に近づける。

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の適用と精度検証
  - 地震サイクルシミュレーションコードへのHACApKの実装

# 2020年計画

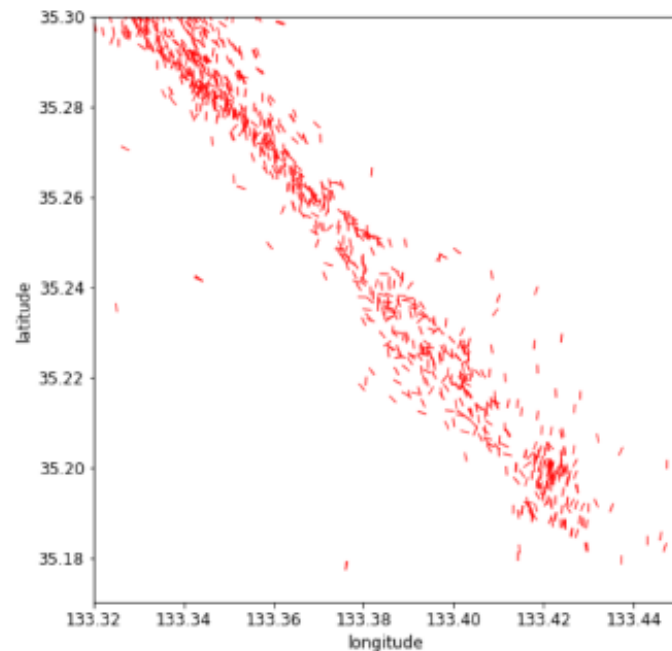
- 動的破壊過程（時空間-BIEMを使用）
  - 系統的な実地震モデルの構築と検証
  - 従来手法FDP-BIEM( $O(N^2)$ )の改良
  - 動的階層行列法（FDP=H-matrices）の開発
- 準静的地震サイクル（空間-BIEMを使用）  
→格子階層行列法に拡張されたHACApKを使用し、  
大規模化を実現

# 準静的過程の例：余震発生過程

なぜ余震は本震の断層に沿って幅を持って発生するのか  
なぜ余震の断層の向きには多様性があるのか

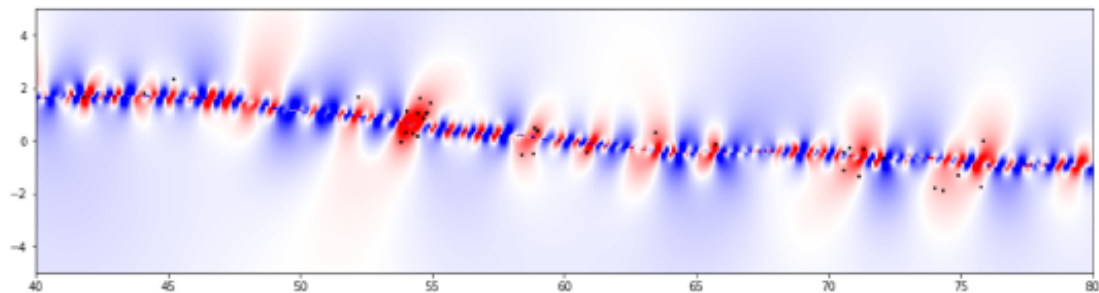
## 仮説

凸凹した本震の震源断層の滑りによって周りの応力場に不均質性が生じ、応力が増加した場所に存在する小断層で余震が起きる



2000年鳥取県西部地震の余震の空間分布

この仮説を大規模な地震サイクルシミュレーションによって検証



(余震を起こした断層の位置をクーロン応力と合わせて表示)