jh200029-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

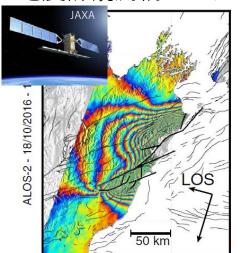
観測データによるモデル検証と改良

3次元断層モデル 50 x (km)

100 K N 100 K N 100 M PK P 80 60 40 Y (km)

100 PK P 80 60 40 Y (km)

人工衛星観測データ 地震計観測網データ



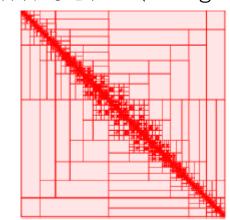
階層行列法(HACApK)による 大規模・高効率技術の開発

~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

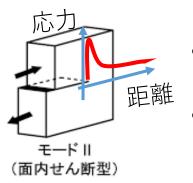


積分核行列の高精度 階層的近似 *O*(*N* Log*N*)





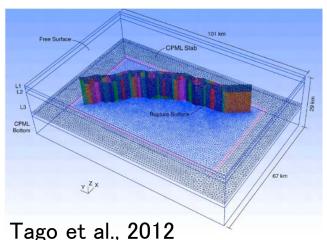
境界積分方程式法(BIEM・BEM)は破壊力学に強い



- 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

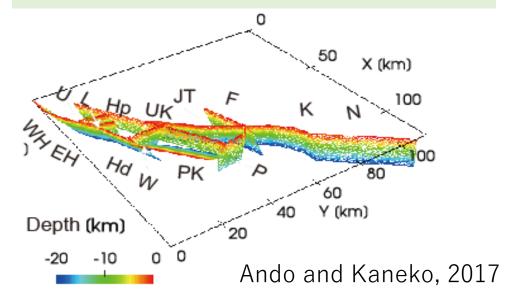
- 断層周辺でのメッシュ詳細化
- 有限媒質・吸収境界
- →メッシュ生成の複雑化, 計算コスト増加



Discontinous 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



2020年計画

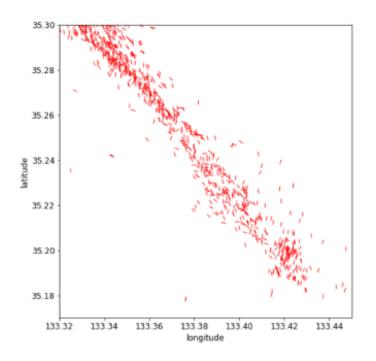
- 動的破壊過程(時空間-BIEMを使用)
 - 系統的な実地震モデルの構築と検証
 - 従来手法FDP-BIEM(O(№))の改良
 - 動的階層行列法(FDP=H-matrices)の開発
- 準静的地震サイクル(空間-BIEMを使用)
- →格子階層行列法に拡張されたHACApKを使用し、 大規模化を実現

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

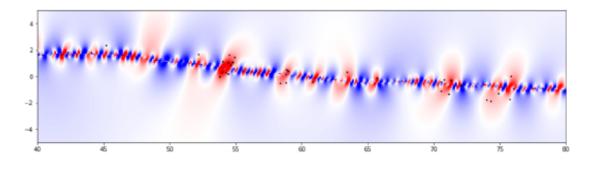
仮説

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

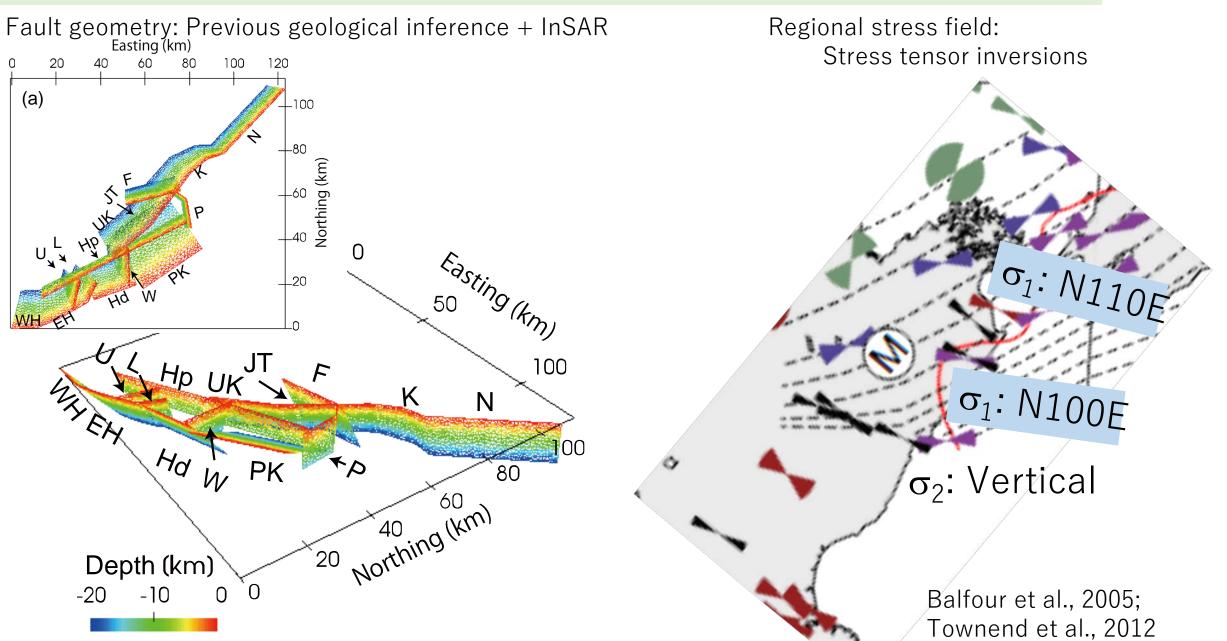


(余震を起こした断層の位置をクーロン応力と合わせて表示)

2019年度の実施内容

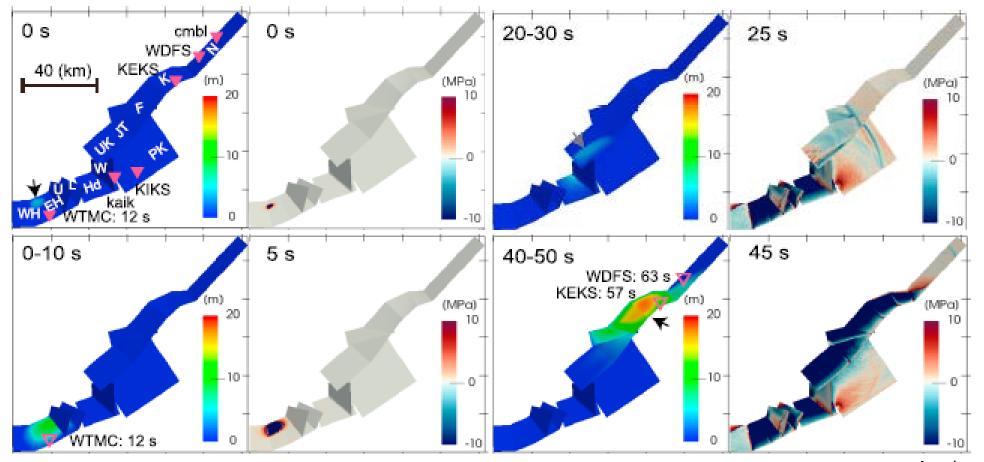
- 1. 地震発生現象の物理モデルの構築と検証
 - 2018年北海道胆振東部地震
 Hisaka, Ando et al., 2019, Earth Planets Space
 - 2019年米国カリフォルニアの地震 Ando et al., 2019, Am. Geophys. Union Fall meeting
 - 2016年ニュージーランドの地震のモデル高度化
- 2. 時空間境界積分方程式法のアルゴリズム高速化
 - 動弾性積分核近似へのHACApKの適用と精度検証
 - 地震サイクルシミュレーションコードへのHACApKの実装

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



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



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

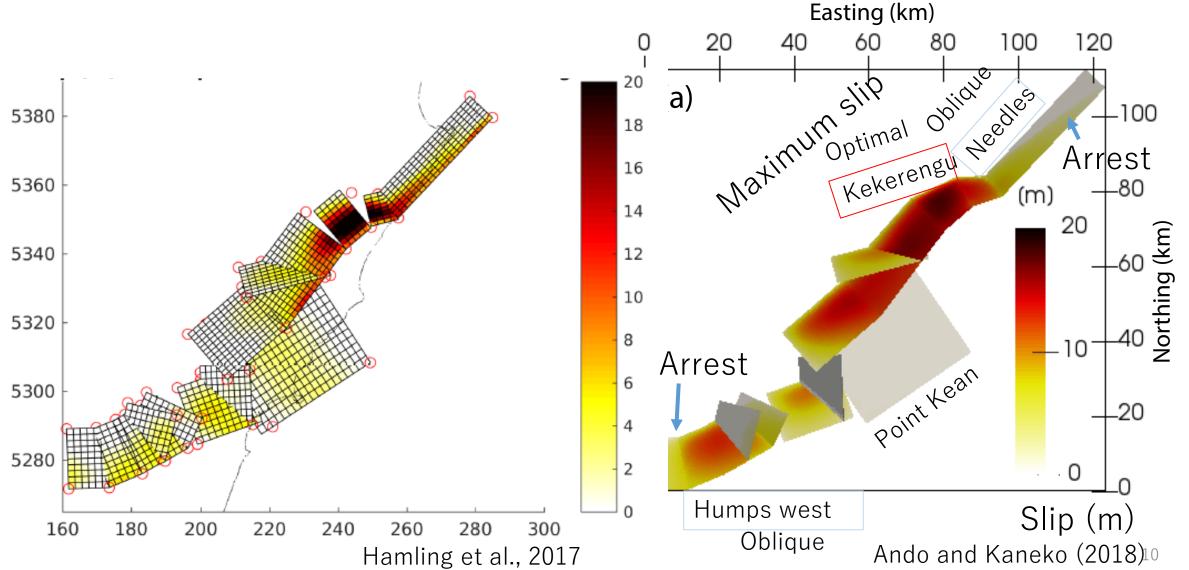
Ando and Kaneko (2018)

観測と計算の比較

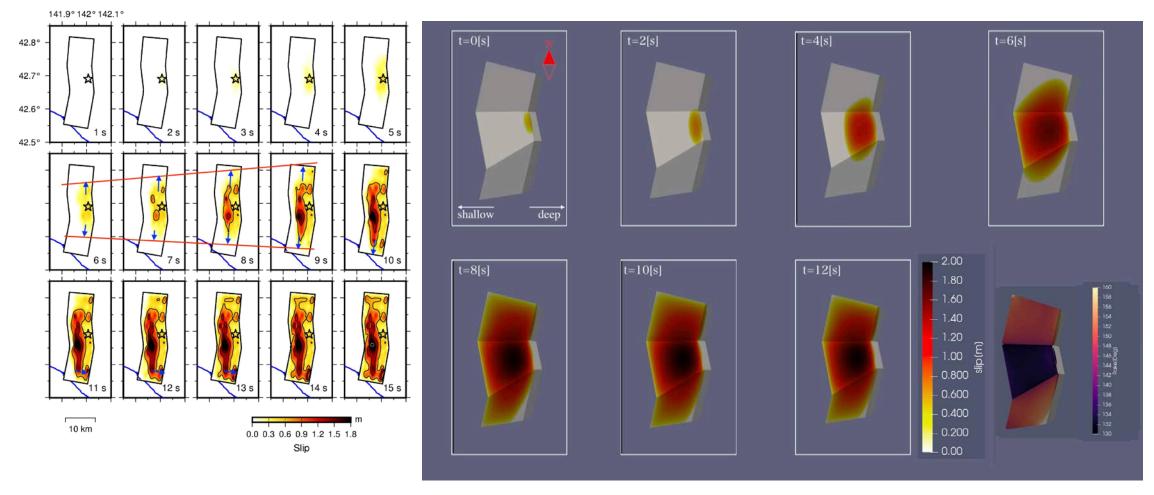
InSAR Slip inversion

Slip distribution strongly reflect initial traction distribution = geometrical effect

Dynamic simulation

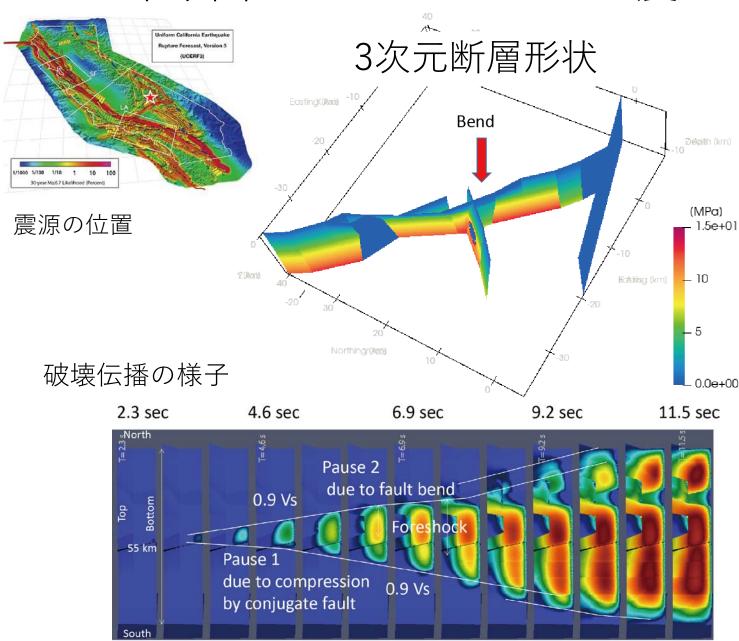


大地震の再現計算と検証: 2018年北海道胆振東部地震



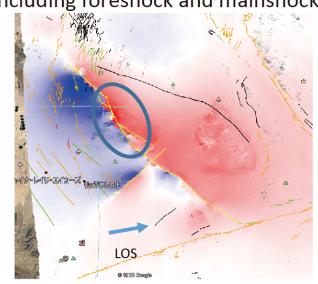
(左) 2018年北海道胆振東部地震に関する, Asano and Iwata (2019)による地震波データを用いた断層面上での破壊のインバージョン結果(すべり量) (右) 同地震に関する, 地震波データを用いずに行った境界積分方程式法による動的破壊シミュレーション結果(すべり量, 最終すべり角)

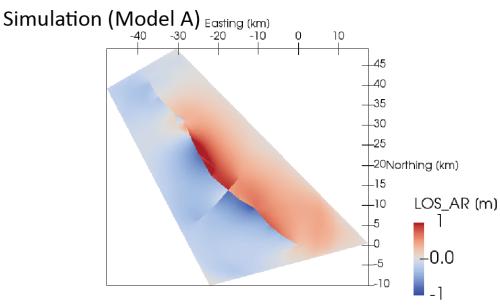
2019年米国カリフォルニアの地震



観測と計算の比較

InSAR (including foreshock and mainshock)





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 * 滑り

→空間畳み込み O(N²)

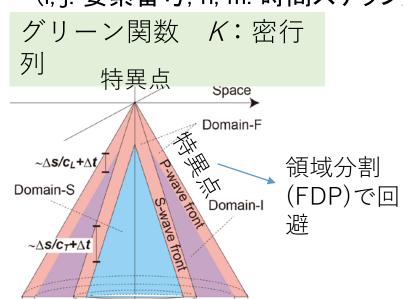
時空間 BIEM (ST-BIEM) 波動の伝播(慣性)

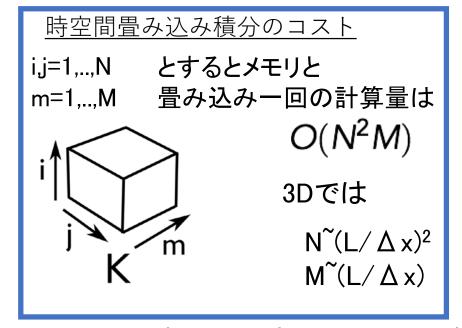
$$\mathbf{T}_{i,n} = \sum_{j,m} \mathbf{K}_{i,j,m} \mathbf{D}_{j,n-m}$$

応力 = グリーン関数 * 滑り速度の時刻歴

→時空間畳み込み*O*(*№ M*)

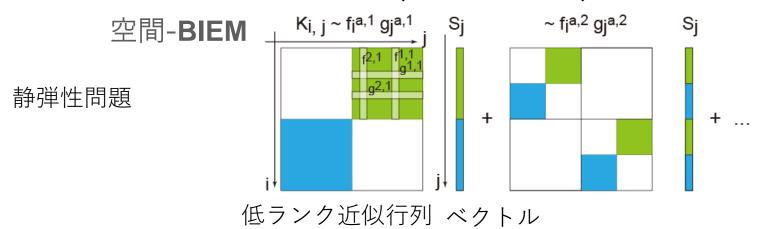
(i, j: 要素番号, n, m: 時間ステップ)





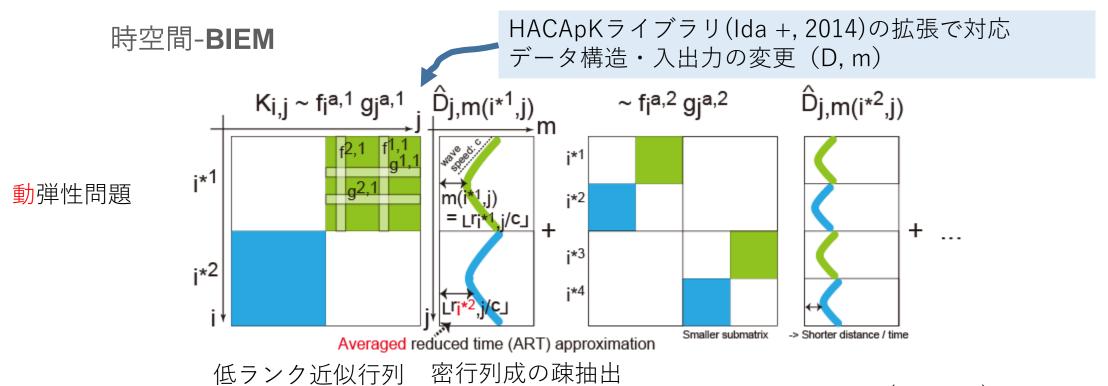
解像度を10倍するとNは100倍、Mは10倍、コストは10万倍

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



領域分割(FDP)

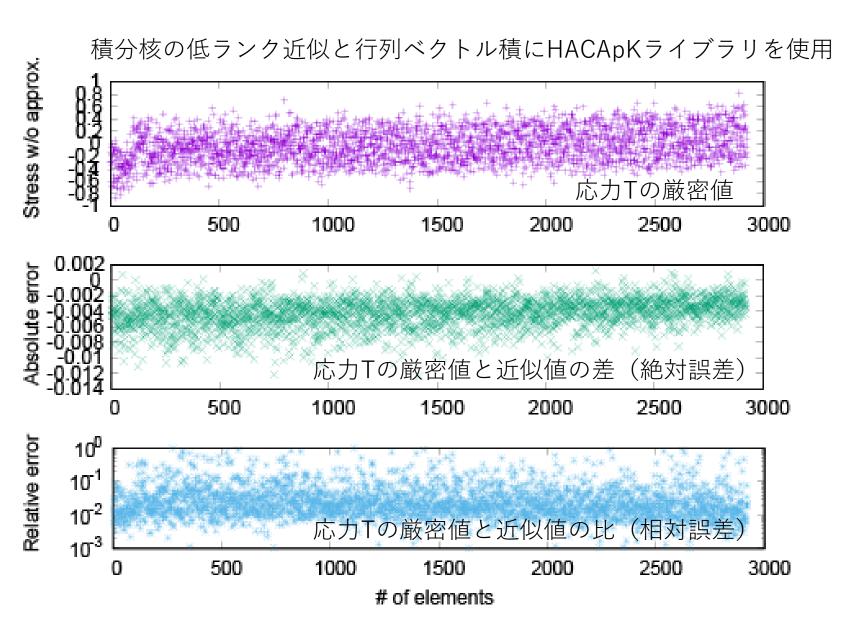
→空間依存のみに変換



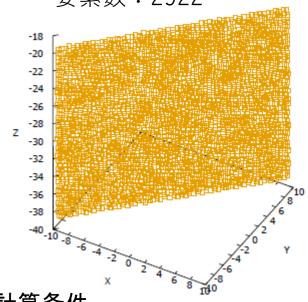
→ベクトル

Sato and Ando, 2019 (revising)

階層行列化した時空間BIEMの精度検証



考慮した断層形状 要素数:2922



計算条件 Ti=KijDj

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