

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17789

研究課題名(和文)海溝型巨大地震発生の理解と予測を目指した粘弾性地震発生サイクルシミュレーション

研究課題名(英文) Earthquake cycle simulation considering viscoelastic relaxation aiming for understanding and forecasting earthquake occurrence

研究代表者

大谷 真紀子(Ohtani, Makiko)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：80759689

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：非線形粘弾性媒質中を考慮した地震発生サイクルシミュレーション実施に向け、非弾性ひずみを等価外力として扱うことで粘弾性媒質の効果を弾性体中のグリーン関数を用いて考慮する方法(等価体積力法)に、密行列圧縮手法であるH行列法を導入し、高速計算法を構築した。これにより粘弾性領域の離散セル数Nに対して計算量は $O(N^2)$ から $O(N\log N)$ に削減された。粘弾性計算の例として、2018年北海道胆振東部地震発生後の粘弾性応力緩和変形によるクーロン応力変化(CFF)の推移を、胆振東部地震周辺の断層で評価した。また、データ同化手法を用いて、巨大地震後の地殻変動から地下の粘性構造を推定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、巨大地震発生の理解と予測を目指し、実際の巨大地震発生領域を対象として地下の粘弾性領域における応力緩和の影響を考慮した大規模地震発生サイクルシミュレーションを実施するために、計算手法の開発を行った。本手法は比較的小さい計算コストで、断層の三次元幾何形状、非線形粘弾性や不均質な粘性構造等複雑な地下の状態をある程度反映することができる。また実際にシミュレーションを実施するのに必要となる地下の粘弾性構造を、モデルとデータの両方に依拠するデータ同化手法によって推定する手法の枠組みを作成した。今後本手法を拡張すれば、地震発生後の余効変動に含まれる各成分の切り分けにも役立つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：For realizing 3D earthquake cycle simulation considering the non-linear viscoelastic relaxation, I constructed a fast-computation method. I used the body-force method that takes into account the viscoelastic response using the stress-strain Green's function in the elastic medium and applied the H-matrices method that compresses dense matrices. The computational amount is reduced from $O(N^2)$ to $O(N\log N)$ by applying the H-matrices method, where N is the number of discretized cells of the viscoelastic region. Using the body-force method, I evaluated the Coulomb stress change (CFF) by the viscoelastic deformation after the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake. I also developed the method of estimating the viscoelastic structure under the ground from the viscoelastic deformation data after large earthquakes using a data-assimilation method.

研究分野：地震学

キーワード：地震発生サイクル 粘弾性 等価体積力法 H行列法 EnKF法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

プレート境界では巨大地震震源域の近隣で、スロー地震等小さなスケールのすべり現象が密に観測されている。その活動は巨大地震震源域の状態を反映し、巨大地震発生予測に繋がる知見を得られる可能性がある。しかしながら地震の現代的な観測が行われ始めたのはここ数十年であり、巨大地震のように数百年と長い間隔の現象との相互作用を観測のみを基に調べることは不可能である。そこで、シミュレーションによるアプローチが行われている。地震発生サイクルシミュレーション(ECS; Earthquake Cycle Simulation)では、プレート沈み込みに駆動される断層面上の応力・摩擦状態を評価することで、応力蓄積過程から地震発生・発展まで、すべての期間の断層面上の状態を追う。すべりの不均質を断層面上の摩擦不均質として扱い、南海トラフ沿い等で、巨大地震と深部低周波地震等との相互作用が ECS を用いて調べられている。

通常 ECS では計算コストを削減するために、計算精度が高く比較的計算量の少ない境界要素法(BIEM)を用い、弾性媒質を仮定し慣性項を近似する準動的時間発展スキーム(Rice, 1993)による計算が行われる。しかしながら、ECS が数百～千年で繰り返す M9 地震を視野に入れざるを得ない今の地震学の状態においては、粘弾性応力緩和の効果が無視できない。マントルウェッジ等周辺媒質の粘弾性緩和時間よりも長い、数百年の再来間隔を持つ巨大地震サイクルにおいては、粘弾性の効果が地震発生の場所と時期に影響を与えると考えられる。例えば南海・東南海・東海地震については、その発生タイミングと内陸活断層の活動との関係が指摘されており(Hori and Oike, 1996)、将来的に海溝型巨大地震サイクルと内陸地震との相互作用を検証する上でも粘弾性応答は重要な役割を果たす(Shikakura et al., 2014)。地震発生機構の解明・発生予測には、実際の巨大地震発生領域を対象としたより現実的な断層面幾何形状や地下の粘性構造を導入し、粘弾性緩和応答を考慮した ECS が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、巨大地震を含む多様なすべり現象の相互作用をシミュレーションにより調べるために、粘弾性緩和を考慮した三次元大規模 ECS を構築する。BIEM において粘弾性応答を考慮して応力を評価するには、断層滑りに対する粘弾性応答の履歴積分が必要であり(図1)、通常よく用いられる弾性体を仮定した ECS に比べて計算量が大きい。実際の巨大地震発生領域を扱うには、現実的な断層幾何形状や地下の三次元粘弾性構造を考慮する必要があるため大規模になることは避けられず、図1のような三次元大規模粘弾性 ECS を行うには計算の高速化を達成する必要がある。

また、実際に粘弾性 ECS を実施するには地下の粘性構造を知る必要があるが、現状あまり分かっていない。

そこで本研究では、既存の粘弾性変形計算手法に対して密行列圧縮手法の一種である H 行列法を適用することで計算の高速化を行い、大規模粘弾性 ECS モデルを構築する。また巨大地震発生後の地殻変動から非線形粘弾性体や不均質粘性構造を取り扱える手法として、データ同化手法を用いた地下の粘性構造推定手法を開発する。

3. 研究の方法

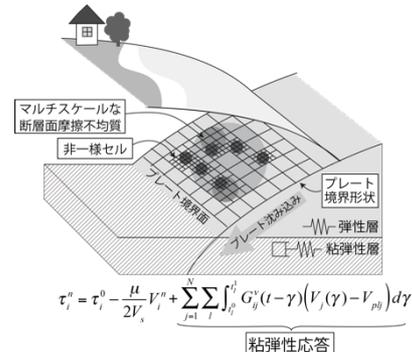
(1) 粘弾性 ECS

粘弾性変形の時間発展を評価する数値計算手法として、比較的計算量が少なく計算精度の高い BIEM をベースとした等価体積力法(Barbot & Fialko, 2010, Barbot et al., 2017)があり、不均質な粘性構造や非線形レオロジーを扱うことが可能である。等価体積力法では、非弾性変形する媒質中の全ひずみを弾性ひずみと非弾性ひずみに分解し、非弾性ひずみによる影響を準静的弾性体方程式の等価外力の形に置き換えることで、各セルの非弾性ひずみが作る応力場を、弾性体中のひずみ-応力の関係式を用いて計算する。粘弾性領域を離散化した各 $j (=1, \dots, N)$ 立方体セルでの非弾性歪み ϵ_j^i 、応力 τ_j^i 、また断層面を離散化した各 $i (=1, \dots, N_f)$ セルでの沈み込み方向のすべり量 u_i^f ・応力 τ_i^f とすると、応力 τ_j^i 及び τ_i^f は以下の式で表される。 \mathbf{K} は各場合弾性媒質のグリーン関数である。

$$\tau_i^v = \sum_{j=1}^{N_f} \mathbf{K}_{ij}^{f \rightarrow v} u_j^f + \sum_{j=1}^N \mathbf{K}_{ij}^{v \rightarrow v} \epsilon_j^i, \quad \tau_i^f = \sum_{j=1}^{N_f} \mathbf{K}_{ij}^{f \rightarrow f} u_j^f + \sum_{j=1}^N \mathbf{K}_{ij}^{v \rightarrow f} \epsilon_j^i$$

両者とも、右辺第一項が弾性体を仮定した場合の項であり、右辺第二項の粘弾性応答による寄与が加わる。粘弾性応答はその時刻の非弾性歪み量によって表され、従来の BIEM 手法と異なり履歴積分を必要としないため計算量が削減されている。各時刻の応力の計算律速部は右辺第二項で計算量 $O(N^2)$ を必要とする。実際の海溝型巨大地震を対象とした三次元大規模粘弾性 ECS の実施にはさらなる計算量の削減が望まれる。

本研究ではこれに H 行列法(Hackbush, 1999)を適用して計算の高速化を行った。H 行列法とは、対角部分に大きな値を持ち外側に行くに従っておよそ小さな値となるような行列に適用できる密行列圧縮手法である。対象とする行列を階層的な小行列に分割し、各小行列で比較的小さな



(図1) 粘弾性 ECS の概念図

固有値を持つ成分を落として情報量を下げることにより(低ランク化)、精度を高く保ちながらも効率的に圧縮する。上式の行列 \mathbf{K} をこの \mathbf{H} 行列化すると、圧縮した形式(\mathbf{H} 行列)のまま四則演算等ができ、計算が高速化される。

(2) データ同化手法を用いた粘性率推定手法

巨大地震後の地殻変動データから地下の粘性構造を推定する手法の開発を行う。本研究ではデータ同化手法のうち、逐次データ同化手法の一種である EnKF(アンサンブルカルマン)法を用いる。EnKF 法とは、推定するモデル変数・パラメタの確率分布を、力学モデルに従って時間発展する実現予報値の集合(アンサンブル)で近似的に表現する。データが得られる毎に、モデルによる予報値とデータの両者の確率分布を考慮した重み付けにより変数・パラメタ値をより尤もらしい値に更新し(同化)、時間の発展に伴って逐次的に変数・パラメタ値を更新していく手法である。EnKF の適用には物理変数の時間発展を評価する物理モデルが必要であるが、これには(1)で開発する粘弾性 ECS をそのまま使うことができる。

4. 研究成果

(1) 粘弾性 ECS

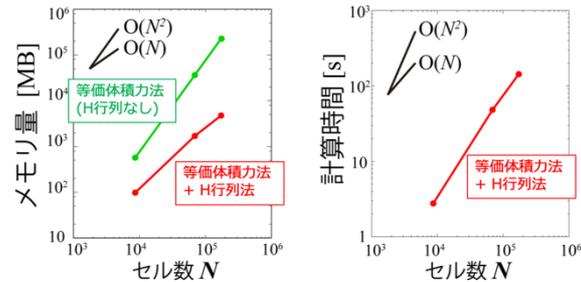
ここではまず \mathbf{H} 行列法を適用した等価体積法におけるメモリ量・計算時間の離散セル数 N 依存性を示す(①)。また例として、2018 年北海道胆振東部地震(胆振地震)発生後の周囲の地震発生ポテンシャルの変化を、地下の粘弾性応力緩和変形によるクーロン応力変化(ΔCFF)の推移として評価した結果を(②)に示す。

①等価体積法への \mathbf{H} 行列法導入による粘弾性応答計算高速化

弾性層と深さ 10km 以深 $100 \times 100 \times 130$ km に粘弾性体を設定したモデルを設定し、粘弾性セルのサイズを変化させて離散化粘弾性セル数 N を調節することで、ひずみ応答関数と非弾性ひずみの積にかかるメモリ量・計算量の N 依存性を調べた。

等価体積法では計算量は $O(N^2)$ であるが、 \mathbf{H} 行列法を適用することにより $O(M \log N)$ 程度に削減された(図 2)。例えば $N=69,120$ のとき単位非弾性ひずみに対する応力変化を表す

グリーン関数行列はメモリ量は 0.17 倍、計算時間は 0.05 倍となり、 \mathbf{H} 行列法の適用は有効である。また粘弾性領域として一様な粘性率を持つ線形粘弾性を仮定したモデルにおいて、弾性層中にある断層で地震発生後 10 年間の粘弾性変形による変位量は、従来の履歴積分を行う BIEM 法の解(Fukahata and Matsu'ura, 2006)と比べて十分な精度を有していることを確認した。

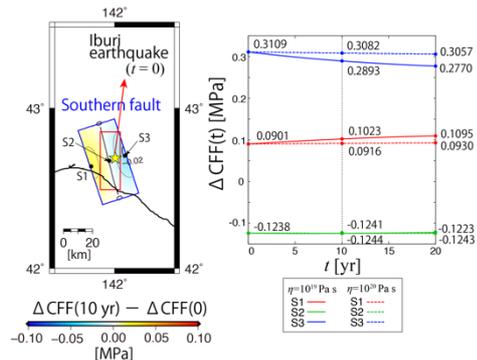


(図 2) メモリ量・計算時間のセル数 N 依存性

②北海道胆振東部地震の周囲の地震発生ポテンシャル

2018 年に発生した M6.7 北海道胆振東部地震(胆振地震)の近くには、主要活断層帯の一つである石狩低地東縁断層帯が存在する。また胆振地震の余震分布からは、本震断層の浅部延長部に未知の断層の存在が示唆される。本研究では胆振地震がこれらの想定地震断層に及ぼす影響を、クーロン応力変化(ΔCFF)の時間変化として評価した。 ΔCFF はイベントによって断層にかかる応力変化から計算され、 ΔCFF が正のとき断層の状態はイベント前よりも地震に近づいたと解釈される。 ΔCFF は通常均質弾性体を仮定して評価されるが、本研究では地下の粘弾性媒質領域での変形を考慮し、胆振地震後の ΔCFF を時間変化するものとして求めた点特徴的である。

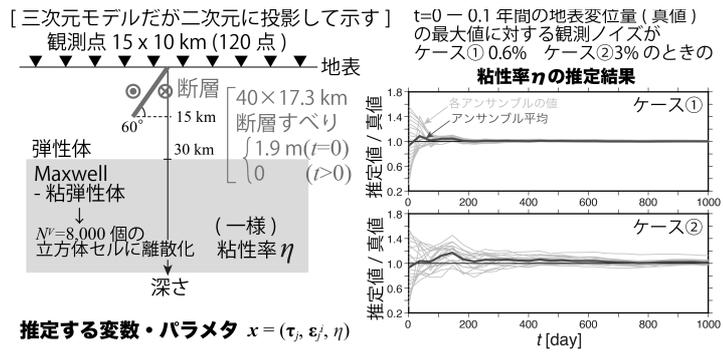
粘弾性層として線形粘弾性帯を仮定したところ(粘性率 $10^{19}, 10^{20}$ [Pa·s] 一様)、低地東縁断層帯では、地震時も地震後もずっと ΔCFF が増加し続ける地点が存在し、粘弾性変形による ΔCFF 変化は、地震後 10 年間で、地震が誘発される基準値と考えられている 0.01MPa を超える地点もあることが分かった。また本研究では弾性層厚さの空間変化(Cho and Kuwahara, 2013)を考慮したが、考慮しないものと比べて想定地震断層での ΔCFF 変化に大きな違いは現れない事を見出した。



(図 3) 胆振地震発生後の周囲での応力変化

(2) データ同化手法を用いた粘性率推定手法の開発

EnKF における同化モデルにおいて、断層での地震時すべりが既知でかつ余効すべりがゼロであるとした場合に、地下の粘弾性体の粘性率及び粘弾性変形の時間発展を推定する手法を構築し、一様な粘性を仮定した数値実験を行った(図4)。地表面の変位量に二つの異なる大きさのノイズ (ケース① ②)を加えて観測データの模擬データを作成して同化実験を行ったところ、両ケースで、粘性率のアンサンブル平均(推定値)が真値近くの値近づき、粘性率の推定に成功した。今後どの程度粘性構造の不均質を推定できるか等を調べる必要がある。



(図4) EnKF を用いた地下の粘性率推定の数値実験

<引用文献>

- ① Barbot, S., and Y. Fialko, A unified continuum representation of post-seismic relaxation mechanisms: semi-analytic models of afterslip, poroelastic rebound and viscoelastic flow. *Geophysical Journal International*, 182(3), 1124-1140, 2010.
- ② Barbot, B., J. D. P. Moore, and V. Lambert, Displacement and stress associated with distributed anelastic deformation in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107, pp. 821-855, 2017.
- ③ Cho, I. and Kuwahara, Y. (2013). Numerical simulation of crustal deformation using a three-dimensional viscoelastic crustal structure model for the Japanese islands under east-west compression. *Earth, Planets and Space*, 65(9), 1041-1046.
- ④ Fukahata, Y. and M. Matsu'ura, Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem, *Geophysical Journal International*, 166, 418-434, 2006.
- ⑤ Hackbusch, W. A Sparse Matrix Arithmetic Based on H-Matrices, Part I: Introduction to H-Matrices, *Computing*, 62(2), 89-108, 1999.
- ⑥ Hori, T., and K. Oike (1996), A statistical model of temporal variation of seismicity in the inner zone of southwest Japan related to the great interplate earthquakes along the Nankai Trough, *J. Phys. Earth*, 44, 349-356.
- ⑦ Rice, J. R. (1993). Spatio-temporal complexity of slip on a fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B6), 9885-9907.
- ⑧ Shikakura, Y., Fukahata, Y., & Hirahara, K. (2014). Long-term changes in the Coulomb failure function on inland active faults in southwest Japan due to east-west compression and interplate earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1), 502-518.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ohtani Makiko, Kame Nobuki, Nakatani Masao	4. 巻 124
2. 論文標題 Nucleation of Characteristic Earthquakes in Simulated Cycles Involving Deep Huge Slow Slip Events	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1822 ~ 1837
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB016156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Makiko Ohtani, Kazutoshi Imanishi	4. 巻 71
2. 論文標題 Seismic potential around the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake assessed considering the viscoelastic relaxation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-019-1036-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Makiko Ohtani, Kazuro Hirahara
2. 発表標題 Stress change due to the large earthquake along the Nankai Trough, SW Japan, in a viscoelastic medium
3. 学会等名 AOGS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷真紀子, 平原和朗
2. 発表標題 Application of H-matrices method to the evaluation of the post-seismic relaxation
3. 学会等名 2018年度地球惑星連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷真紀子、今西和俊
2. 発表標題 2018年北海道胆振東部地震による石狩低地東縁断層帯の CFFの時間変化
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷真紀子・平原和朗
2. 発表標題 粘弾性媒質中の応力計算におけるH行列法適用
3. 学会等名 日本地震学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makiko Ohtani and Kazuro Hirahara
2. 発表標題 Application of H-matrices method to the calculation of stress field in a viscoelastic medium
3. 学会等名 2017AGU Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大谷真紀子
2. 発表標題 EnKFによる粘弾性変形および粘性構造の推定 - 数値実験
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----