

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K18797

研究課題名（和文）数理的・計算科学的に適切な長時間プレート沈み込みシミュレーション手法の開発

研究課題名（英文）Development of a mathematical and computational model for long-term plate subduction

研究代表者

堀 高峰（Hori, Takane）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・センター長

研究者番号：00359176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、地質学的時間スケールでのプレート沈み込み現象を適切に計算できる手法を構築するとともに、その結果を地球物理学的时间スケールの計算での初期条件・境界条件に取り入れることを可能にすることである。固体地球を対象としたデジタルツインを構築する際の基礎となる考え方としてGNSSデータ解析で用いられる準拠楕円体そのもので地殻変動計算をすることとし、西南日本と東北日本を対象としてすべり応答関数計算を行うとともに、粘弾性構造を導入した。断層面沿いの応力評価については、長期的な沈み込みの計算をする上での今後の課題として、断層面のモデル化やモデル領域の端の扱い等の影響が見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的な意義として、GNSSデータ解析で用いられる準拠楕円体そのものをモデル化して地殻変動などを計算することを提案したことは、固体地球を対象としたデジタルツインを構築する際に、観測データと計算モデルに共通のフレームワークを用いるという意味で、基礎となる考え方として重要である。また、長期的な沈み込みのモデル化において、プレート境界断層でのすべり面における応力評価の困難さが改めて浮き彫りになった。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to construct a method that can appropriately calculate plate subduction phenomena on a geological time scale, and to incorporate the results into initial and boundary conditions for calculations on a geophysical time scale. We propose a basic idea when constructing a digital twin for the solid Earth is to calculate crustal deformation using the reference ellipsoid itself used in GNSS data analysis. Based on this idea, we calculate slip response functions for southwest Japan and northeast Japan, and a viscoelastic structure was introduced. Regarding stress evaluation along the fault plane, modeling of the fault plane and handling of the edges of the model space were found to be future issues in calculating long-term subduction.

研究分野：地震学

キーワード：沈み込み 準拠楕円体 粘弾性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、日本列島規模の高詳細3次元不均質構造での大規模計算ができるようになったことで、全球規模での計算にも到達できると考えた。その技術とプレートの長期的な沈み込みのモデルを組み合わせることで、全球スケールの有限要素モデルを構築し、日本列島周辺の複雑なプレートの沈み込みにもともなう境界条件を与える手法の開発を着想した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、数百万年を超える地質学的時間スケールでのプレート沈み込み現象を数理科学・計算科学の知見を活かして適切に計算できる手法を構築するとともに、その結果を地球物理学的時間スケール(数百年以内の巨大地震の繰り返し発生等)の計算での初期条件・境界条件に取り入れることを可能にすることである。そして、このような数理的・計算科学的に適切な問題設定での解析・計算を積み重ねることで、巨大地震の発生やその準備過程等の地殻活動のモニタリングと予測を、ここまでは最低限の数理的・計算科学的根拠があると示した上で社会に情報提供できるようにすること、さらに、その基盤となる数理計算固体地球科学分野を確立することが、本研究の最終的に目指す目標である。本研究によってそのための端緒を開くことを目指す。

3. 研究の方法

長距離断層変位に対する問題の定式化と高精度計算法の適用に取り組むことを目指し、長期的な沈み込みの定式化を検討する。

また、全球スケールのモデルを構築するための準備として、GNSS データ解析で用いられている準拋楕円体そのもので地殻変動の計算を行うような枠組みを構築する。これは投影による歪みの無い geometry での計算であり、世界の他の地域や全球に対しても適用できるものであり、固体地球を対象としたデジタルツインを構築する際の基礎になる。

この枠組みのもとで、日本列島を対象としたプレートの沈み込みにもともなう弾性変形ならびに粘弾性変形の計算を行うことにより、長期的な沈み込みの定式化ができた際に適用するための、地球物理学的時間スケールでの沈み込み帯のモデルの高度化を進める。

一方、全球スケールでのモデル化にあたっては、スペクトル要素法を用いた粘弾性応答計算を行っている米国の研究グループの協力を得るため、大学院生を招聘して共同研究を行う。

4. 研究成果

2018年度から2019年度にかけては、長距離断層変位に対する問題の定式化と高精度計算法の適用に取り組むための定式化を検討するとともに、検討した定式化をベースに、単純な幾何学的設定でのコーディングを進めたが、長期的な沈み込み計算を実現するまでには至らなかった。

2020年度は、GNSSのデータ解析で用いられている準拋楕円体そのもので地殻変動のフォワード計算をするという、数理計算固体地球科学のベースとなる考え方を提案した(図1)。この考え方にもとづいた、東北日本と西南日本を対象とする有限要素モデルをそれぞれ構築し(図2)、断層での変位のくいちがいによる地表変位のグリーン関数計算を行った(Hori, Agata et al., 2021)。この際、3次元不均質地下構造としては、長周期地震動の計算に用いられている全国一次地下構造モデルを取り入れた(図3)。このように、地殻変動と地震波動の計算で構造を共通化するというこ

とも、デジタルツイン構築に向けた試みの一環である。

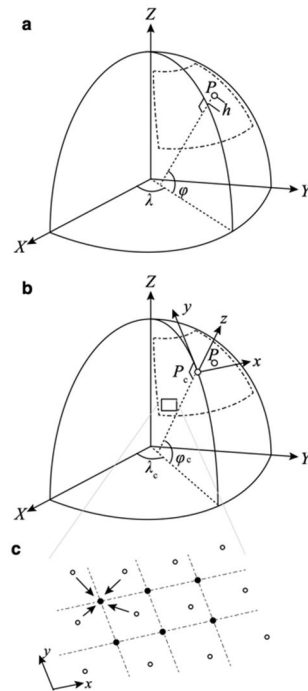


図1 用いた座標系の模式図。
a 準拋楕円体の1/8における座標系。b 局所的なモデルを構築する際の基準点付近の直交座標系。c データ点の与え方の模式図。(Hori, Agata et al., 2021)

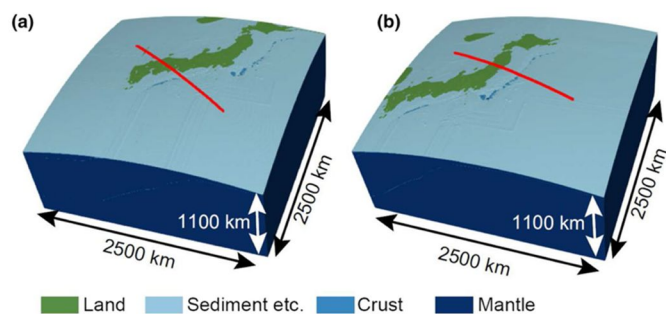


図2 有限要素モデルの全体像。赤線は図3の断面図の位置を示す。
(a) 西南日本。(b) 東北日本。(Hori, Agata et al., 2022)。

2021年度は、その発展として、西南日本を対象とした全国一次地下構造モデルをベースにした3次元不均質弾性地下構造に対して、粘弾性構造を導入した(図4)。

2022年度は、長時間沈み込み計算で、3次元構造を考慮する場合に必要な、全球スケールでの粘弾性応答計算の手法についての検討を行った。全国一次地下構造モデルをベースとした超大規模有限要素モデルのままでは、全球スケールでの長時間の沈み込み計算は、「富岳」等のパソコンに最適化したコードを用いても現実的ではない。そこで、スペクトル要素法を用いて、より単純な構造ではあるが、全球スケールを対象とした粘弾性応答計算を行なっている研究グループの協力を得ることとした。第一段階として、西南日本を対象とした全国一次地下構造モデルをベースに、高詳細モデルに比べて簡略化した3次元不均質粘弾性モデルを構築し、プレート境界断層でのすべりに対する地殻変動の粘弾性応答計算を実施した。

2023年度は、前年度からの継続で、スペクトル要素法を用いた粘弾性応答計算を行っているグループの協力を得るため、大学院生を米国から招聘し、共同研究を進めた。これにより、西南日本を対象とした全国一次地下構造モデルをベースにした3次元不均質粘弾性モデルに対して、応力評価を含む粘弾性応答計算を実施した。また、断層面沿いの応力評価の精度について、長期的な沈み込みの計算をする上での課題として、断層面のモデル化や領域の端の扱い等の影響が見出された。

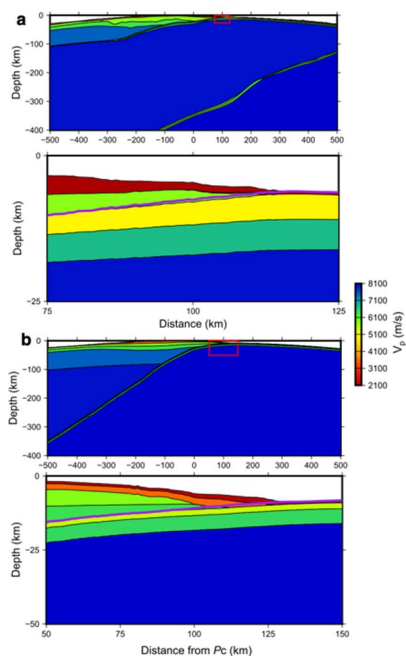


図3 有限要素モデルの断面。紫線はプレート境界を示す。
a (上) 西南日本の断面図。
(下) 四角内の拡大図。
b (上) 東北日本の断面図。
(下) 四角内の拡大図。
(Hori, Agata et al., 2021)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Mantle wedge	2.0×10^{18}	2.0×10^{18}	2.0×10^{18}	2.0×10^{18}	2.0×10^{18}
Oceanic mantle	2.0×10^{18}	2.0×10^{18}	1.0×10^{19}	1.0×10^{19}	1.0×10^{19}
LAB layer	2.0×10^{18}	elastic	1.0×10^{19}	elastic	2.5×10^{17}

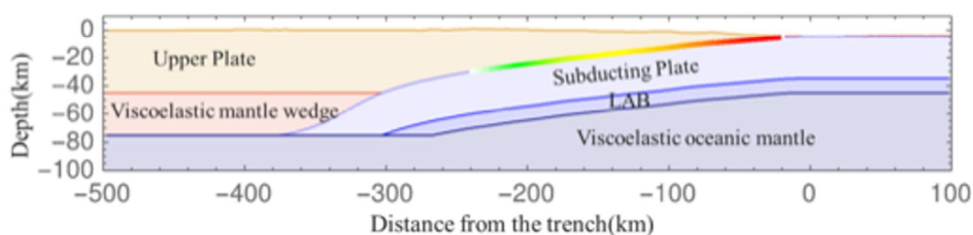


図4 簡略化した粘弾性構造の断面図。LABはLithosphere Asthenosphere Boundary。LABとviscoelastic mantle wedge、Viscoelastic oceanic mantleに粘弾性媒質であり、これらに上の表のような複数の粘性率を仮定して、応答の違いを調べた。

<引用文献>

Takane Hori, Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi and Takeshi Iinuma, High-fidelity elastic Green's functions for subduction zone models consistent with the global standard geodetic reference system, Earth, Planets and Space (2021) 73:41 <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01370-y>.

Takane Hori, Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi & Takeshi Iinuma, Correction: High-fidelity elastic Green's functions for subduction zone models consistent with the global standard geodetic reference system, Earth, Planets and Space (2022) 74:192 <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01735-x>.

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 2件）

1. 著者名 Hori Takane, Agata Ryoichiro, Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Yamaguchi Takuma, Iinuma Takeshi	4. 巻 73
2. 論文標題 High-fidelity elastic Green's functions for subduction zone models consistent with the global standard geodetic reference system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01370-y	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 -

1. 著者名 Hori Takane, Agata Ryoichiro, Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Yamaguchi Takuma, Iinuma Takeshi	4. 巻 74
2. 論文標題 Correction: High-fidelity elastic Green's functions for subduction zone models consistent with the global standard geodetic reference system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 192
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01735-x	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2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 堀 高峰
2. 発表標題 沈み込み帯プレート境界に沿った断層帯の構成関係についての検討
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀 高峰
2. 発表標題 High-fidelity elastic Green's functions for subduction zone models consistent with the global standard geodetic reference system - Concept and future issues -
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会（招待講演）
4. 発表年 2023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
研究協力者	縣 亮一郎 (Agata Ryoichiro) (80793679)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・研究員 (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------