

令和 5 年 9 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02008

研究課題名（和文）プレート境界断層の剪断強度変化と付加体構造の形成に与える影響の解明

研究課題名（英文）Shear-strength variation along subducting mega-thrust- their influence on the geometry of accretionary prism

研究代表者

山本 由弦（Yamamoto, Yuzuru）

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：10435753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：プレート境界断層の動的な鉱物・物性変化は、断層の剪断強度を大きく変化させ、沈み込み帯の形状や応力分布に影響を与えると期待される。本研究では、深度2-3 kmのプレート境界断層の剪断強度の変化を定量化し、これらが付加体主要構造の形成に不可欠な役割を担っているのか数値シミュレーションによって検証した。

その結果、は、従来考えられてきた「断層が弱い」モデルとは逆に、約240%剪断強度増加が確認された。は、の結果を数値実験から再現した上で従来の「砂箱実験」ではなく、大規模な「岩石沈み込み実験」を可能にした。さらに、上記剪断強度変化が付加プリズムの幾何学に大きな影響を与えることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の地震学では、岩石の種類によらず断層の剪断強度が一定であるとするバヤリー則がよく用いられてきた、今回示された、断層の方が240%もの剪断強度を獲得するという結果は、特に泥質岩で構成される沈み込み帯の破壊モデルを考える上で極めて重要である。

数値実験では、従来の「砂箱実験」ではなく、「岩石沈み込み実験」を可能にした。これによって、従来再現できなかった固結した岩石で構成される天然の沈み込み帯の変形挙動と、室内岩石力学試験の結果を初めて直接比較できるようになった。

研究成果の概要（英文）：Dynamic transition of minerals and/or physical properties associated with plate-boundary mega-thrusting should control architecture of plate subduction zones and stress distribution. In this study, (1) we quantified the dynamic variation of shear strength occurred 2-3 km burial depth in terms of geological and rock mechanical testing. Then, (2) we evaluated if this variation plays important rules for formation mechanisms of plate-boundary major structures. As the results, (1) we identified the shear strengthening occurred at the depth. This is the inverse results to the current knowledge: that is, fault zone is weaker than intact rocks. Also, (2) we imported the shear strengthening to the numerical simulation and successfully constructed the “numerical rock-box experiment” system, not s “sandbox experiment”. The result of the “rock-box experiment” shows that the major variation of shear strengthening is one of the major controlling factors for subduction-zone geometry.

研究分野：構造地質学

キーワード：プレート境界 スメクタイト イライト DEM バヤリー則

## 1. 研究開始当初の背景

プレートとともに海溝から沈み込んだ軟弱な堆積物が、いかにして巨大地震を起こす能力を獲得するのか？これは、造山帯形成と海溝型地震発生機構を研究する上で最も根本的な疑問の1つであり、未だ決着していない重要な問題である。

プレート境界断層の特殊性：一般に、断層は変形によって周辺岩石よりも強度が小さくなり、変形が局所化することが知られている。一方で堆積物が未固結の状態で沈み込むプレート境界断層は、変形によって堆積物の圧密が進行し、硬化していく。この沈み込み帯に特有な「変形岩石化作用」とも呼ぶべき現象は、以下の2つに大別される。

- ・ 間隙が減少し、粘土鉱物が転移して剪断強度が増加する（物理的圧密作用）
- ・ 間隙への鉱物の沈殿や圧密溶解劈開によってさらに岩石化する（化学的続成作用）

「変形岩石化作用」でもたらされたプレート境界断層の剪断強度変化を定量的に評価することは、海溝型地震の準備過程を物質的側面から明らかにすることに他ならない。しかしながら、「変形岩石化作用」が特に顕著であると考えられる深度 2-4 km のプレート境界断層を採取できていないことがネックとなり、連続的な評価ができていなかった。

一方で「変形岩石化作用」がもたらす断層の剪断強度変化を評価し、マクロな構造へ与える影響を議論するには、地質学的検討だけでは空間的な情報量に限界があり、付加体発達の全体像を把握することが困難である。沈み込み帯のマクロな構造を理解するための“伝統的な”アプローチとして、砂箱実験が知られている。粉状体としての砂は、地殻が示す複雑なレオロジーの特徴（Mohr-Coulomb の破壊基準、Dilation や弱体化）を有するため、沈み込み帯のアナログモデルとして、地質構造の形態やその形成過程を理解するために使われてきた。仮に砂の物性を自由にコントロールできるなら、砂箱実験を通じて局所的な断層の強度変化がもたらすマクロな構造変化を調べる事が可能である。しかしながら、実際の砂において物性をコントロールする事は難しく、また既往技術では層内を3次元に解析する事が難しい。そこで、DEM: Distinct Element Method による数値計算アプローチを行う事が有効となる。近年、数値計算技術の開発により（Furuichi and Nishiura, 2017）実際の砂と同スケールで3次元大規模 DEM 計算が行う事ができるようになった。これにより個々の粒子の詳細な運動から3次元構造全体を直接解像する事が可能となり、実際に Furuichi et.al. (2018) では、ミクロな物性の不均質性が、マクロな海溝軸方向に卓越する断層の波模様を説明する事を示した。よって、地質学的検討によるミクロな情報を十分に反映した DEM 沈み込み帯モデルを作成できれば、局所的な断層物性の変化がマクロな付加体構造に与える影響を明らかにできる

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、沈み込み帯の深度 2-4 km と 5 km 以深に注目し、

断層岩の物質、力学検討によって、深度依存する剪断強度の変化を定量的に把握すること、

数十億粒子数の大規模 DEM による数値計算により、把握された剪断強度の変化が付加体全体のジオメトリー、応力分布、それにすべり様式に与える影響を評価すること、である。

## 3. 研究の方法

- 1) 異なる深度で形成された断層岩の変形様式と物質科学的变化を抽出する。

海底下 2-4 km の沈み込み帯変形がそのまま保存されている房総半島と、5 km 以深のそれが得られる紀伊半島と紀伊半島沖南海付加体に特に注目する。断層岩の構造地質学的検討から変形様式を記述し、鉱物と物性（間隙率、弾性波速度）の分析、それに力学試験（三軸試験）から物質学的検討を行う。力学実験は、断層が再活動するように方向を調整した円柱試料と、プレカット面に断層物質の粉末試料を充填した、2 種類を実施する。

2) 得られた剪断強度を大規模 DEM のモデル実験に導入し、沈み込み帯の大構造、応力分布、断層のすべり様式に与える影響を評価する。

地質体から得られた断層岩の剪断強度変化を DEM モデル実験に導入するにあたり、強度を粒子間の摩擦（ミクロ）に代表させて再現する事を試みる。具体的には、三軸試験を模したモデル実験により、剪断強度（マクロ）を再現できるように摩擦を調整する。これらのマクロな物性調整を行ったうえで、DEM による付加体形成実験を行う。ある閾値を超えた上載圧環境下で剪断変形が発生した場合に摩擦係数を増加させるなどして、マクロ構造への影響を調べる。摩擦係数を変化させなかった実験との比較によって、ある深度で発生する剪断強度の変化が従来の沈み込み帯モデル実験で再現できなかった OST や底づけ付加といった、沈み込み帯の大構造形成に役割を果たすのかを明らかにする。また、これら変化が付加体の応力分布様式（とくに断層周辺）に与える影響を評価するとともに、大構造形成時のトリガーとなるのか？それにすべり様式（Stick-slip、slow slip など）を解析する。

#### 4. 研究成果

1) 深度 2-4 km の付加体（房総半島）においては、断層内部だけが高密度化し、摩擦係数が大きくなるイライト化が進行している。断層岩および母岩の三軸試験を実施し、封圧 50 MPa までの強度試験を実施し、「剪断による約 240%の強度増加」を得た。

深度 5 km 前後の付加体試料を得るために、国際深海科学掘削計画（IODP）の Exp. 358 航海（2019 年～2020 年）に参加したほか、紀伊半島と四国の四万十帯において現地調査を実施した。残念ながら、同航海の掘削ではプレート境界に達することができなかったため、本研究ではの結果を数値シミュレーションに組み込むこととした。

2) 粒状体を扱う DEM（Discrete Element Method）モデルの拡張を行い、房総半島の母岩、断層岩の 3 軸力学試験結果の再現に成功した。具体的には、DEM モデルにおいて、要素間の粘着力を導入した。従来用いていた DEM モデルでは、要素の接触面に対して法線方向にのみ粘着力を実装していた。これは、コンクリートなどで見られる弱い降伏応力に対しては効果的であったが、50Mpa と高圧な岩石実験に現れる、降伏してから破断に至る挙動を再現するには不十分であった。接触面での接線方向にも粘着を考慮するように拡張を行ったことにより、DEM モデルにおけるミクロなせん断強度、粘着強度そして摩擦係数を調整することで、実試験において得られた内部摩擦角、粘着力、つまり破壊の包絡線、および、三軸圧縮試験での 0、30、50Mpa ひずみ 応力曲線の定量的な再現に成功した。

で得られた断層試料の三軸試験から明らかになった断層強度変化（約 2.4 倍の強度を獲得）を、DEM によって構成した「数値岩石実験」によって再現することに成功した。

この手法を大規模な沈み込み帯を模した数値実験に展開した。従来の「砂箱実験」ではなく、大規模な「岩石沈み込み帯実験」が可能になった。ここに、で見いだしたせん断による強度変化をインプットデータとして用いることで、変形による剪断強度変化が付加プリズムの幾何学に大きな影響を与えることを見いだした。これらの成果は、国際学術誌（Tectonophysics）に投稿

中である。現在修正中であり、2023 年度の早い時期に公表が期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kamiya Nana, Yamamoto Yuzuru, Zhang Feng, Lin Weiren	4. 巻 29
2. 論文標題 Vitrinite reflectance and consolidation characteristics of the post middle Miocene Forearc Basin in central and eastern Boso Peninsula, central Japan: Implications for basin subsidence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12344	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 該当する
1. 著者名 Utsunomiya Masayuki, Yamamoto Yuzuru	4. 巻 246
2. 論文標題 Spatial Distribution of Mass Transport Deposits Deduced From High Resolution Stratigraphy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Monograph	6. 最初と最後の頁 57~69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/9781119500513.ch4	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 該当する
1. 著者名 Tsang Man-Yin, Bowden Stephen A., Wang Zhibin, Mohammed Abdalla, Tonai Satoshi, Muirhead David, Yang Kiho, Yamamoto Yuzuru, Kamiya Nana, Okutsu Natsumi, Hirose Takehiro, Kars Myriam, Schubotz Florence, Ijiri Akira, Yamada Yasuhiro, Kubo Yusuke, Morono Yuki, Inagaki Fumio, Heuer Verena B., Hinrichs Kai-Uwe	4. 巻 112
2. 論文標題 Hot fluids, burial metamorphism and thermal histories in the underthrust sediments at IODP 370 site C0023, Nankai Accretionary Complex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine and Petroleum Geology	6. 最初と最後の頁 104080~104080
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marpetgeo.2019.104080	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 該当する
1. 著者名 Tonai Satoshi, Kubo Yusuke, Tsang Man-Yin, Bowden Stephen, Ide Kotaro, Hirose Takehiro, Kamiya Nana, Yamamoto Yuzuru, Yang Kiho, Yamada Yasuhiro, Morono Yuki, Heuer Verena B., Inagaki Fumio, Expedition 370 Scientists	4. 巻 7
2. 論文標題 A New Method for Quality Control of Geological Cores by X-Ray Computed Tomography: Application in IODP Expedition 370	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2019.00117	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 該当する

1. 著者名 Kinoshita Masataka, Ijiri Akira, Haraguchi Satoru, Jimenez-Espejo Francisco Jose, Komai Nobuharu, Suga Hisami, Sugihara Takamitsu, Tanikawa Wataru, Hirose Takehiro, Hamada Yohei, Gupta Lallan P., Ahagon Naokazu, Masaki Yuka, Abe Natsue, Wu Hung Y., Nomura Shun, Lin Weiren, Yamamoto Yuzuru, Yamada Yasuhiro	4. 巻 108
2. 論文標題 Constraints on the fluid supply rate into and through gas hydrate reservoir systems as inferred from pore-water chloride and in situ temperature profiles, Krishna-Godavari Basin, India	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Marine and Petroleum Geology	6. 最初と最後の頁 368 ~ 376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marpetgeo.2018.12.049	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 該当する

1. 著者名 Tanikawa Wataru, Hirose Takehiro, Hamada Yohei, Gupta Lallan P., Ahagon Naokazu, Masaki Yuka, Abe Natsue, Wu Hung Y., Sugihara Takamitsu, Nomura Shun, Lin Weiren, Kinoshita Masataka, Yamamoto Yuzuru, Yamada Yasuhiro	4. 巻 108
2. 論文標題 Porosity, permeability, and grain size of sediment cores from gas-hydrate-bearing sites and their implication for overpressure in shallow argillaceous formations: Results from the national gas hydrate program expedition 02, Krishna-Godavari Basin, India	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Marine and Petroleum Geology	6. 最初と最後の頁 332 ~ 347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marpetgeo.2018.11.014	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 該当する

1. 著者名 Hirauchi Ken-ichi, Yamamoto Yuzuru, den Hartog Sabine A.M., Niemeijer Andr? R.	4. 巻 531
2. 論文標題 The role of metasomatic alteration on frictional properties of subduction thrusts: An example from a serpentinite body in the Franciscan Complex, California	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 115967 ~ 115967
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.115967	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 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Mikito Furuichi
2. 発表標題 Parallelization of DEPTH (DEM based Parallel multi physics simulator) for HPC
3. 学会等名 CCP-WSI Code Developers' Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Furuichi, D. Nishiura and Y. Yamamoto
2. 発表標題 A DEM model of triaxial compression test of fault and host rocks
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古市幹人
2. 発表標題 大規模個別要素法計算による粒状体応力幾何構造の解明
3. 学会等名 兵庫県立大学セミナーシリーズ「データ科学と計算科学の融合」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuzuru Yamamoto <sup>1</sup> , Shun Chiyonobu, Yohei Hamada
2. 発表標題 Lateral variation of seismic rupture along the out-of-sequence thrust in Boso Peninsula, central Japan: Preliminary report of the fault-zone drilling
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本由弦・千代延俊・濱田洋平
2. 発表標題 房総半島におけるOut-of-sequence thrustの側方追跡 石堂断層掘削報告
3. 学会等名 日本地質学会126年大会
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
研究分担者	古市 幹人  (Furuichi Mikito)  (50415981)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (数理科学・先端技術研究開発センター)・グループリーダー  (82706)	
研究分担者	西浦 泰介  (Nishiura Daisuke)  (60509719)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (数理科学・先端技術研究開発センター)・グループリーダー代理  (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		
米国	JRSO	ECORD	