

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01318

研究課題名(和文) 変成反応を考慮した沈み込み帯から地球深部へ至るプレート境界のレオロジー構造

研究課題名(英文) Rheology of the plate interface from shallow to deep subduction zone: effects of fluids and prograde metamorphism

研究代表者

岡崎 啓史 (OKAZAKI, Keishi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・研究員

研究者番号：90784257

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではプレート境界に存在すると考えられる物質(=変成岩)の力学特性が沈み込みに伴う連続的な変成反応によってどのように変化するのか高温高压岩石変形実験により調べた。本研究により沈み込みに伴う変成反応は低摩擦係数を示す含水鉱物の存在量を減らすため、変成反応の進行とともに強度が上がる事がわかった。一方で、変成反応に伴う間隙流体の増加は、水の量および間隙水圧を増加させ、プレート境界の強度を減少させる事がわかった。以上の結果より、沈み込み帯で通常考えられている間隙水圧の不均一性よりも、間隙水の量の不均一性の方が沈み込み帯におけるすべり挙動の多様性に大きな影響を与えることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沈み込み帯のプレート境界では、スロー地震と呼ばれる地震(1m/s)とプレート沈み込み速度(1nm/s)の間の変形現象が起こっており、スロー地震発生域では地震波観測などにより水の存在が示唆されている。本研究でおこなった高温高压岩石変形実験から高温高压環境でさらに水が多量に存在するような場所では岩石が延性的に変形するだけでなく「水が並ぶ」ことにより破壊も同時に起こることがわかった。本研究からは、沈み込み帯で通常考えられている間隙水圧の不均一性よりも、水の量の不均一性の方が沈み込み帯における変形挙動の多様性をもたらしている可能性があることが示唆される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated how the rheological properties of materials existing at plate boundaries (i.e., metamorphic rocks) are changed by continuous metamorphic reactions associated with subduction using high-temperature, high-pressure rock deformation experiments. We found that the strength of the metamorphic rocks increases with the progress of metamorphism due to the decrease the amount of hydrous minerals by metamorphic reactions. On the other hand, the increase in pore fluid associated with metamorphic reactions increases the amount of water as well as the pore fluid pressure, which decreases the strength of the plate boundary. This study reveals that heterogeneity in water volume may be more responsible for the diversity of slip behavior in subduction zones than heterogeneity in pore water pressure.

研究分野：岩石変形学

キーワード：沈み込み帯 地震 スロー地震 レオロジー 断層 岩石変形実験

1. 研究開始当初の背景

プレート境界は地球表層から深部まで続く物質境界であると同時に変形集中帯であり反応集中帯でもある。プレート境界ではプレートの生成・沈み込み (~nm/s) や地震 (~m/s) だけでなくそれらの中間速度の変形であるスロー地震 (~ μ m/s) まで観測されている。このような変形速度が数桁にも及ぶ多様な変形挙動に流体と岩石-流体反応の関与が指摘されているがほとんど分かっていなかった。実際に深部スロー地震 (Episodic tremor and slip: ETS など) が発生している沈み込み帯のマントルウェッジ先端では高 V_p/V_s 比 (>2) の領域が確認されている (Audet & Bürgmann, 2014)。このような高 V_p/V_s 比は含水鉱物の存在だけでは説明できず、高間隙率・高間隙水圧の存在が指摘されている (Peacock et al., 2011)。一般に地下 30 km (~1 GPa) より深いような高温高压条件では塑性流動 (定常すべり) が卓越し破壊は抑制されてしまうので、上述のような地震・スロー地震といった多様なすべり挙動を深部で引き起こすためには通常の塑性流動や破壊に加えて特別なメカニズムが必要である。つまり一般的な鉱物 (石英、カンラン石) の定常的な摩擦や流動だけでなく、温度構造や沈み込み角度、含水量の違いに起因する多様な岩石の変成反応 (岩石-水- CO_2 反応・鉱物の相変化など) を考慮したプレート境界のレオロジーを理解する必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は沈み込み帯プレート境界に存在すると考えられる物質 (堆積岩、海洋地殻、マントル) の力学特性が水流体下及び変成反応によってどのように変化するのか解明することである。特に水流体下での (脆性的、塑性的挙動を問わず) 変形集中帯形成メカニズムと弱化過程について研究する。鉱物の塑性的 (非地震性の定常すべり) な変形を再現する実験は非常にたくさんあるが高压での破壊現象についての研究は非常に少ない。その理由として、地球地下深部の高温高压条件を再現する固体圧変形試験機では応力の測定精度も応答性も悪く、また精度を上げようとすると実験の難易度が非常に高くなることがあげられる。そこで本研究では改良型 Griggs 型の高温高压岩石変形試験機を新たに開発し、流体の存在する環境で促進される多様な断層すべり (地震、スロー地震、クリープ) の再現を目指した。

3. 研究の方法

本研究で作成した新型の改良 Griggs 型試験機および米国ブラウン大学に設置されている Griggs 型試験機を用いた高温高压岩石変形実験をおこなった。まず、沈み込み帯プレート境界に存在すると考えられる岩石の変成作用による力学挙動の変化を調べるために、四国三波川帯で採取された緑色片岩相および緑簾石角閃岩相に相当する変成作用を受けた塩基性片岩およびドミニカ共和国で採取された緑泥石に富む緑泥石片岩の三種類の変成条件が異なる変成岩の変形実験を封圧 750–1500 MPa, 温度 300–600°C, 軸歪速度 10^{-6} – 10^{-4} s $^{-1}$ の実験条件でおこなった。次にプレート境界のレオロジーに対する水の影響を調べるために、含水量を系統的に変化させた高温高压岩石変形実験を封圧 1000–1500 MPa, 温度 600–900°C, 軸歪速度 10^{-6} – 10^{-4} s $^{-1}$, 含水率 1–25 vol.% の実験条件でおこなった。

4. 研究成果

(1) 沈み込み帯に産する変成岩の変形実験

変形実験により、塩基性片岩は変成反応の進行とともに強度が上昇することがわかった。これは低摩擦係数を示す鉱物である緑泥石の量が変成反応の進行とともに減少することが原因と考えられる。含水マントル物質である蛇紋岩と比較すると、沈み込みに伴う変成反応の進行とともに塩基性片岩などで構成される沈み込む海洋地殻の強度は、蛇紋岩の強度をマントルウェッジに相当する深さで超えるようになる。これはマントルウェッジ周辺において、プレート境界に相当する変形集中帯が海洋プレート内からマントルウェッジ内にスイッチすることを意味する。

回収試料の微細組織観察と力学データから推察される変成岩の変形メカニズムに注目すると、緑泥石片岩を含めた全ての試料において見かけの摩擦係数は一般的な造岩鉱物の摩擦係数 (0.6–0.85) より低い、0.35 以下であった。しかし、強度の封圧依存性が明瞭に観察された。これは試料の主要な変形メカニズムが脆性 (摩擦) 変形であることを意味している。緑泥石片岩の光学顕微鏡観察 (直交ニコル+鋭敏色検板) では明瞭な結晶選択配向が観察された。一般に結晶選択配向の形成に関しては結晶塑性変形 (転位クリープ) が起こっていることが原因であると考えられるが、本研究では明瞭な結晶塑性変形の形跡は発見できなかった。このことから本研究で得られた回収試料中の結晶選択配向は緑泥石の板状の結晶が脆性変形中に剪断方向 (もしくは主応力軸から垂直方向) へ並ぶ形状選択配向の結果であると考えられる。これは、変成岩の一種である結晶片岩では結晶選択配向が見られることが一般的であるが、結晶選択配向のあるなしでは結晶片岩の変形メカニズムについての拘束はあまり得られない可能性があることを意味している。

緑簾石角閃岩の実験では温度 500°C の条件において歪み集中が卓越し鏡肌をもつ断層が形成された。断層面は非常に滑らかで断層面状には摩耗物も存在しない一方で、断層面直下には 1 μ m

以下の細粒物で構成される断層ガウジ帯が形成されていた。変成岩の上昇にはその変成岩と周りの岩石との境界断層が形成される必要があるが、このような変成岩中に形成されるような鏡肌断層は変成岩の上昇過程において大きな役割を担っている可能性がある。以上の研究成果は2019年に *Tectonophysics* 誌において報告済みである (Okazaki & Hirth, 2019)。

(2) プレート境界のレオロジーに対する含水量の効果

プレート境界のレオロジーに対する含水量の効果を調べるために石英模擬断層試料中の水の量を変化させて高温高压下において岩石を変形させた。その結果、粒間に存在する水はその圧力効果 (=有効圧を下げるなど) だけでなく存在すること自体が岩石の強度を大きく減少させることがわかった。また、その効果は粒間に存在する水の量と石英-水の二面角の関数として記述でき、岩石の強度に対する水の量 (水/岩石比) と水の圧力 (間隙水圧) の効果を独立で見極め、それぞれを定式化することに成功した。脆性変形においては、水の量は有効圧則 ($P_e = P_c - \alpha P_p$; P_e, P_c, P_p, α はそれぞれ有効圧、封圧、間隙水圧、間隙水圧定数) における α に影響を与えることがわかった。また、結晶塑性変形においても、間隙水圧定数 α を用いてカンラン岩-メルトなどでも確認される応力集中効果(stress enhancement)と同じように記述できることがわかった。実験結果は、脆性-塑性遷移領域のすべての実験条件において間隙水圧=封圧で間隙水圧定数 α が含水量によって変化すると仮定した場合に最もよく説明できる (図1)。

このように、水の量の効果は岩石の脆性変形と結晶塑性変形の両方に影響を及ぼし、特に深部スロー地震発生域に相当すると考えられる脆性-塑性遷移領域においては水に富むせん断面に特徴付けられる S-C'マイロナイト様の構造を作ることがわかった (図2)。S-C'マイロナイト構造ができる実験条件では試料の微小な破壊音であるアコースティックエミッションも観測されたことから水の存在に伴う弱化和 S-C'構造の形成が深部スロー地震の発生メカニズムに関わっている可能性がある。本研究からは沈み込み帯で通常考えられている間隙水圧の不均一性よりも、間隙水の量の不均一性の方が沈み込み帯におけるすべり挙動の多様性をもたらしている可能性が高いことを明らかにすることができた。本研究成果についてもすでに報告済みである (French et al., 2019; Okazaki et al., 2021)。

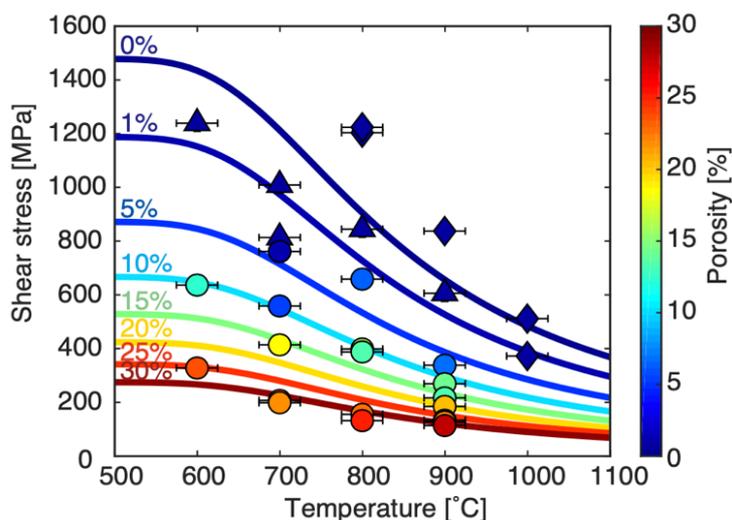


図1. 水を多量に含む石英せん断体の剪断応力、温度、含水量の関係 (Okazaki et al., 2021より)。

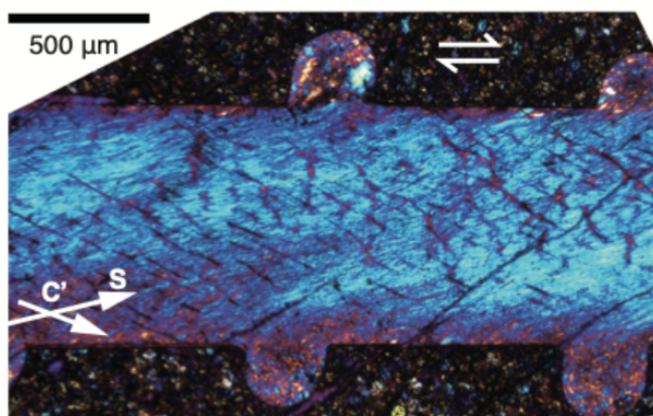


図2. 脆性-塑性遷移領域における水を5vol%含む実験回収試料の薄片写真 (クロスニコル+検板: Okazaki et al., 2021より)。

文献

- Audet, P., & Bürgmann, R. (2014). Possible control of subduction zone slow-earthquake periodicity by silica enrichment. *Nature*, *510*(7505), 389.
- French, M. E., Hirth, G., & Okazaki, K. (2019). Fracture-Induced Pore Fluid Pressure Weakening and Dehydration of Serpentinite. *Tectonophysics*, 228168.
- Okazaki, K., Burdette, E., & Hirth, G. (2021). Rheology of the fluid oversaturated fault zones at the brittle-plastic transition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2020JB020804. <https://doi.org/10.1029/2020JB020804>
- Okazaki, K., & Hirth, G. (2019). Deformation of mafic schists from subducted oceanic crust at high pressure and temperature conditions. *Tectonophysics*, 228217.
- Peacock, S. M., Christensen, N. I., Bostock, M. G., & Audet, P. (2011). High pore pressures and porosity at 35 km depth in the Cascadia subduction zone. *Geology*, *39*(5), 471-474. <https://doi.org/10.1130/g31649.1>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Okazaki Keishi, Burdette Eric, Hirth Greg	4. 巻 126
2. 論文標題 Rheology of the Fluid Oversaturated Fault Zones at the Brittle Plastic Transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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） 10.1029/2020JB020804	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 Okazaki Keishi, Hirth Greg	4. 巻 774
2. 論文標題 Deformation of mafic schists from subducted oceanic crust at high pressure and temperature conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 228217 ~ 228217
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tecto.2019.228217	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 French Melodie E., Hirth Greg, Okazaki Keishi	4. 巻 767
2. 論文標題 Fracture-induced pore fluid pressure weakening and dehydration of serpentinite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 228168 ~ 228168
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tecto.2019.228168	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 Katayama Ikuo, Abe Natsue, Hatakeyama Kohei, Akamatsu Yuya, Okazaki Keishi, Ulven Ole Ivar, Hong Gilbert, Zhu Wenlu, Cordonnier Benoit, Michibayashi Katsuyoshi, Godard Marguerite, Kelemen Peter, the Oman Drilling Project Phase 2 Science Party	4. 巻 125
2. 論文標題 Permeability Profiles Across the Crust Mantle Sections in the Oman Drilling Project Inferred From Dry and Wet Resistivity Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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） 10.1029/2019JB018698	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 Kelemen Peter B., Keishi Okazaki (著者24人中5番目)、et al.	4. 巻 127
2. 論文標題 Listvenite Formation During Mass Transfer into the Leading Edge of the Mantle Wedge: Initial Results from Oman Drilling Project Hole BT1B	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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) 10.1029/2021JB022352	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 Okazaki Keishi, Michibayashi Katsuyoshi, Hatakeyama Kohei, Abe Natsue, Johnson Kevin T. M., Kelemen Peter B., the Oman Drilling Project Science Team	4. 巻 126
2. 論文標題 Major Mineral Fraction and Physical Properties of Carbonated Peridotite (Listvenite) From ICDP Oman Drilling Project Hole BT1B Inferred From X Ray CT Core Images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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) 10.1029/2021JB022719	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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Okazaki Keishi, Burdette Eric, Hirth Greg
2. 発表標題 Effects of water fraction on strengths and microstructures of quartz aggregates at the brittle plastic transition
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田 博之, 岡崎 啓史
2. 発表標題 剪断帯内の変形の幾何を考慮した脆性・塑性遷移域の断層構成則
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Okazaki Keishi, Burdette Eric, Hirth Greg
2. 発表標題 Rheology of the fluid oversaturated simulated quartz shear zone at the brittle-ductile transition
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡崎 啓史, 武藤 潤, 濱田 洋平, 谷川 亘, 廣瀬 丈洋
2. 発表標題 巨大地震発生域下限の温度・圧力・間隙水圧条件を再現できる新しい固体圧岩石変形試験機の開発
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keishi Okazaki, Eric Burdette, Greg Hirth
2. 発表標題 Rheology of the fluid oversaturated quartz shear zone at the brittle-ductile transition
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡崎 啓史, 片山 郁夫, 山口 飛鳥
2. 発表標題 半遠洋性堆積物の続成作用に伴う摩擦・透水特性の変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keishi Okazaki, Eric Burdette, Greg Hirth
2. 発表標題 Effects of the aqueous fluid and porosity on the rheology of quartz aggregates at the brittle-plastic transition
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 / MR23A-06 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keishi Okazaki
2. 発表標題 Experimental investigation of dehydration weakening and embrittlement of hydrous minerals
3. 学会等名 Intermediate and Deep Earthquakes: Observation and Modeling /College de France, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keishi Okazaki, Eric Burdette, Greg Hirth
2. 発表標題 Rheology of the fluid-overpressured quartz shear zone at the brittle-plastic transition: effects of the aqueous fluid and porosity
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会 / SCG53-24 (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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	ブラウン大学	テキサス大学オースティン校	