

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04046

研究課題名（和文）地質学的アプローチによる新しい断層バルブモデルの構築

研究課題名（英文）A new fault-valve model based on a geological approach

研究代表者

大坪 誠 (Otsubo, Makoto)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究グループ長

研究者番号：70443174

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：四万十帯に発達する伸張性亀裂を充填する石英脈を対象に、石英脈形成の多孔質弾性モデルを用いたところ、伸張性亀裂の形成は最大8 kmの深さで全間隙水圧の最大で数%しか解放しないことを示し、巨大分岐断層付近の間隙水圧は地震サイクル全体を通して静岩圧に近かったことが明らかとなった。また、流体圧のうち最小主応力を超えた分と鉱物脈の間隔との関係に負の相関があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果は地震後の伸張性亀裂による間隙流体圧の低下が巨大分岐断層の断層強度を増加させるのにほとんど寄与せず、つまり、断層面付近は間隙流体圧が高い状態が維持されている可能性を示す。また、鉱物脈同士の間隔はスロー地震の発生サイクル内での間隙流体圧の過剰分の時間変化の結果である可能性があり、間隙流体圧の過剰分がスロー地震のサイズを規定する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Using the poroelastic model of quartz veins filling extensional fractures in the Shimanto Belt, the formation of extensional fractures releases at most a few percent of the total pore pressure at depths of up to 8 km, indicating that the pore pressure near giant branch faults was close to lithostatic pressure throughout the entire earthquake cycle. The pore water pressure near the giant bifurcation fault was close to the static rock pressure throughout the entire earthquake cycle. A negative correlation was found between the amount of fluid pressure that exceeded the minimum principal stress and the spacing of mineral veins.

研究分野：地質学

キーワード：南海トラフ 地震 鉱物脈 亀裂 流体移動 流体圧 スロー地震

### 1. 研究開始当初の背景

間隙水圧 ( $P_f$ ) は地震発生メカニズムを理解する上で重要なパラメータである。現地震発生サイクルにおいて、間隙水圧の蓄積は断層強度の低下を促し、低下した断層強度の状態では断層面へ応力が十分に蓄積した時に地震が発生する断層バルブモデルが提案されている (Sibson, 1992; 図 1)。

南海トラフではマグニチュード (M) 8 クラスの地震が繰り返し発生しており、今後も同規模の地震発生が想定されている。南海トラフ沿いの地震発生域の断層周辺には静岩圧に近い、非常に高い間隙水圧が推定されており、その断層強度は有効摩擦係数 ( $\mu'$ ) が 0.1 を下回るという非常に低い値と考えられている (間隙水圧比  $\nu = P_f/\sigma_v > 0.9$ ,  $\sigma_v$ : 静岩圧; Seno, 2009)。海溝近傍域では、巨大な海溝型地震 (例えば、2011 年東北地方太平洋沖地震, M9) の発生によるほぼ完全な応力解放の結果として逆断層型応力状態から正断層型応力状態に変化することが報告されている (Hasegawa et

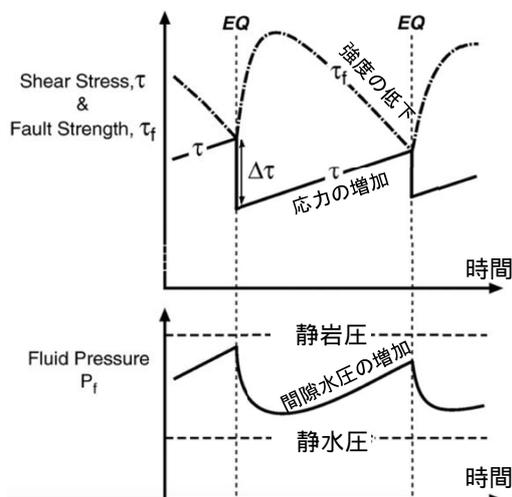


図 1 断層バルブモデル (Sibson, 1992)。

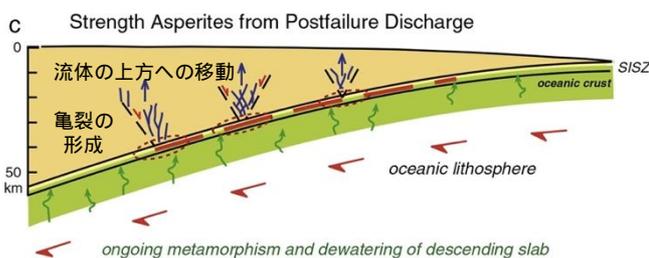


図 2 地震後の引っ張り亀裂による上方排水機構 (Sibson, 2013)。

al., 2012)。水文学的研究により、プレート境界周辺での上方排水機構が提案されている (Sibson, 2013; 図 2)。これは、地震後の正断層型応力状態による伸長変形 (引っ張り亀裂や正断層) が上方への排水を促し、地震前までに蓄積していた非常に高い間隙水圧が低下して断層強度が再び増加するモデルである。

### 2. 研究の目的

本研究では南海トラフに沿ったプレート境界付近での地震後の伸長変形による上方排水機構に注目する。上方排水機構によるプレート境界付近での間隙水圧の低下量については、世界のどの沈み込み帯でもこれまで評価が行われていない。本研究では「地震サイクル期間内にプレート境界付近の間隙水圧の変化が小さい場合、プレート境界の有効摩擦係数は小さい状態 (例えば、 $\mu' < 0.1$ ) を維持する。」と仮説を立てる。このような高間隙水圧かつ摩擦係数が小さい状態下でのプレート境界周辺における応力蓄積のプロセスは明らかにされていない。

本研究は、海溝型巨大地震発生前後での断層周辺における間隙水圧の時間変化と地震発生後のプレート境界に沿った断層強度の回復量を推定し、南海トラフ地震評価のための基礎資料を提供することを目的とする。

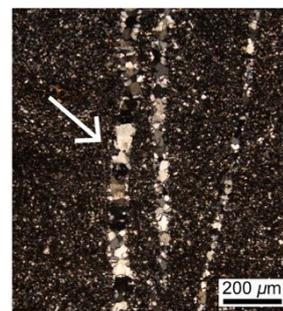


図 3 亀裂を埋める石英脈 (矢印)。

### 3. 研究の方法

沈み込み帯での岩石中の流体通路の痕跡である石英脈 (図 3) に焦点を当てる。流体から石英の析出によって石英脈は形成されるが、間隙水圧が岩石中の亀裂に作用する垂直応力を超えた状態で流体は亀裂中に流入する。つまり、石英脈は間隙水圧が最小主応力を超える時に形成される (Jolly and Sanderson, 1997)。本研究では、この高い圧力の水が引っ張り亀裂に流入後はモール・クーロンの式に従って、クラックが閉じるまでに間隙水圧の過剰圧 ( $P_0 = P_f - \sigma_3$ ,  $\sigma_3$ : 最小主応力) がゼロにまで減少すると仮定し、地震発生前と後の間隙水圧をそれぞれ  $P_f^{Pre}$  と  $P_f^{Post}$  ( $P_f^{Pre} = P_f$ ,  $P_f^{Post} = P_f - P_0$ ) とする。地震サイクル期間内で最も間隙水圧が高い時期が  $P_f^{Pre}$  であり、最も低い時期が  $P_f^{Post}$  である。本研究では間隙水圧の過剰圧を推定するために多孔質弾性体モデルを採用する。間隙水圧の過剰圧と岩石の弾性的な性質には、石英脈の開口幅  $W$  と長さ  $L$  の比が  $W/L = (P_0/2(1 - \nu^2))/E$  [式 1] という関係がある (Gudmundsson, 1999)。ここで  $E$  は石英脈周辺の岩石のポアソン比とヤング率である。[式 1] で求めた過剰圧から  $P_f^{Pre}$  と  $P_f^{Post}$  の 2 つの状態の間隙水圧比  $\nu$  が明らかになれば、有効摩擦係数 ( $\mu'$ ) を求める式  $\mu' = \mu_0(1 - \nu)$

[式 2]を使って地震後のプレート境界周辺での上方排水による断層強度回復量が推定可能となる ( $\mu_0$ : 静止摩擦係数, 0.4~0.7).

#### 4. 研究成果

Gudmundsson (1999)のモデルに従って、地震が起こる深さでの断層周辺に蓄積する水圧の変動を見積もったところ、延岡衝上断層周辺の引っ張り亀裂の形成時には、亀裂を通じた排水によって地下約8 kmの深さで10 MPa程度の圧力を解放していたことが初めて定量的に明らかとなった (Otsubo et al., 2020). これは従来モデルによる圧力の減少 (深さ約8 kmで120 MPa程度)と比べて非常に小さい (図4). すなわち、深さ約8 kmにあるプレートの境界付近に蓄積する水は、地震によって亀裂が形成されても従来考えられているよりも高い圧力を常に維持しており、地震後に解放された水圧は地震前の最大8%程度であったことが判明した. 延岡衝上断層に沿った有効摩擦係数は、引っ張り亀裂の形成によって水圧が小さくなった後でも0.15以下であったことが解放された水圧から見積もられた (図5). これは一般的な断層の摩擦係数0.6をはるかに下回ることから、地震後に亀裂が生じて、水が亀裂を通じて排水されても、プレートの境界付近の断層面の摩擦は低いままであったと考えられる.

本研究により延岡衝上断層周辺で見積もられた地震後の水圧は、現在の南海トラフのプレート境界付近 (深さ8 km程度)における水圧の状態とほぼ同じであった (Otsubo et al., 2020). このことは、プレートの境界付近 (深さ8 km程度)に蓄積している水圧は、南海トラフで生じた直近の大地震 (1946年南海地震)の発生以後、現在までの間に亀裂で排水された状態であることを示唆している. 亀裂形成で解放された分の水圧が今後静岩圧近くまで増加していくと次の大地震が発生する条件が整うこととなる. 従来考えられてきた120 MPa程度の水圧の変動は現在の技術では観測することは困難であるが、今回の成果で示したような10 MPa規模の水圧変動をモニタリングするための技術はすでに存在するため、10 MPa程度の変動であれば観測することが可能である. 本研究の成果は、南海トラフで次の大地震が起こるまでのモニタリング指標に水圧変化を加えることで、地震発生予測の精度が上がる可能性を示している.

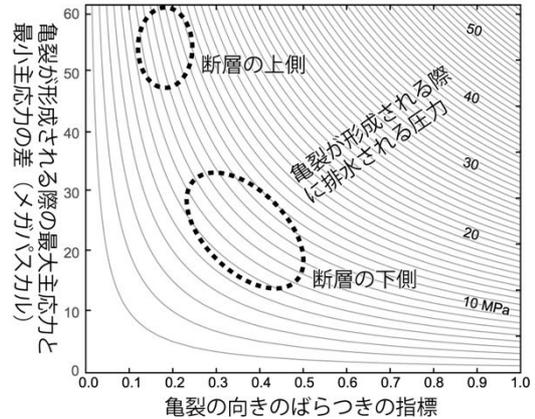


図4 Gudmundsson (1999)のモデルに基づく地震後に亀裂が形成される際に排水により減少する圧力の範囲 (黒色点線の部分).

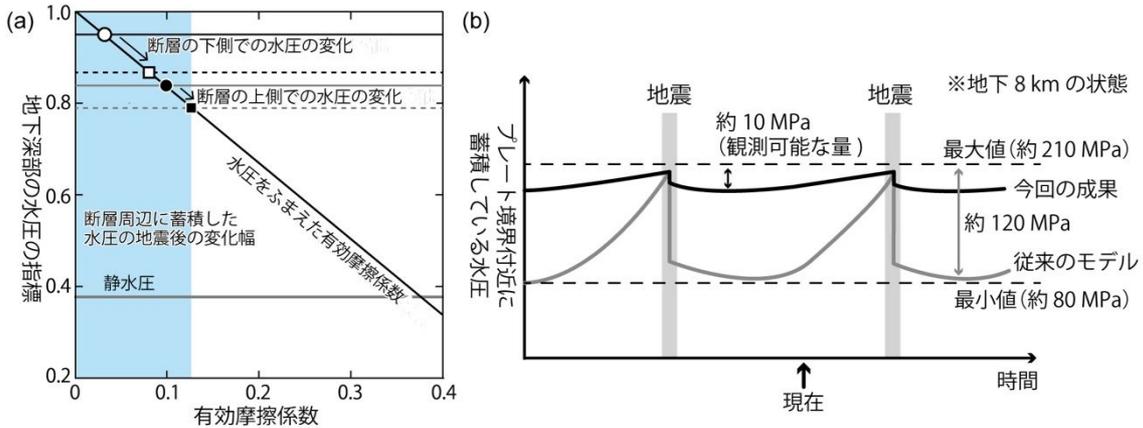


図5 (a)延岡衝上断層周辺に蓄積していた水圧の地震前後での変化, (b)繰り返す地震が起こる条件と水圧の関係.

#### 引用文献

- Gudmundsson, A. (1999) Fluid pressure and stress drop in fault zones. *Geophys. Res. Lett.* 26, 115-118.
- Hasegawa, A. et al. (2012) Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.* 355-356, 231-243.
- Jolly, R. J. H., Sanderson, D. J. (1997) A Mohr circle construction for the opening of a pre-existing fracture. *J. Struct. Geol.* 19, 887-892.
- Otsubo, M., Hardebeck, J., Miyakawa, A., Yamaguchi, A., Kimura, G. (2020) Localized fluid discharge by tensile cracking during the post-seismic period in subduction

- zones. *Scientific Reports*, 10:12281.
- Seno, T. (2009) Determination of the pore-fluid pressure ratio at seismogenic megathrusts in subduction zones: implications for strength of asperities and Andean-type mountain building. *J. Geophys. Res.* 114, B05405.
- Sibson, R. H. (1992) Implications of fault-valve behavior for rupture nucleation and recurrence. *Tectonophys.* 18, 1031-1042.
- Sibson, R. H. (2013) Stress switching in subduction forearcs: Implications for overpressure containment and strength cycling on megathrusts. *Tectonophys.* 600, 142-152.

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 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Maeda, S., Toda, S., Matsuzawa, T., Otsubo, M. and Matsumoto, T.	4. 巻 73
2. 論文標題 Influence of crustal lithology and the thermal state on microseismicity in the Wakayama region, southern Honshu, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 173
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01503-3	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 Otsubo Makoto, Hardebeck Jeanne L., Miyakawa Ayumu, Yamaguchi Asuka, Kimura Gaku	4. 巻 10
2. 論文標題 Localized fluid discharge by tensile cracking during the post-seismic period in subduction zones	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12281
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-68418-z	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

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大坪 誠, 氏家恒太郎, 最首花恵, 宮川歩夢
2. 発表標題 メランジュ面構造に平行な伸長石英脈から見積もられたスロー地震発生サイクル中の間隙流体圧の時間変化
3. 学会等名 日本地質学会2021年大会（日本地質学会第128年学術大会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Otsubo, M., Ujiie, K., Saishu, H., Miyakawa, A., Yamaguchi, A.
2. 発表標題 Temporal changes in pore fluid pressure during slow earthquake cycle estimated from foliation-parallel extension cracking
3. 学会等名 European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hosono, H., Takemura, T., Asahina, D., Otsubo, M.
2. 発表標題 Application of permeability tensor theory to understand paleo-fluid behavior around the out-of-sequence thrust based on observable veins geometric information
3. 学会等名 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細野日向子, 竹村貴人, 朝比奈大輔, 大坪 誠
2. 発表標題 鉱物脈の姿勢情報から推定する分岐断層沿いの流体挙動－宮崎県延岡衝上断層での透水係数の推定－
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細野日向子, 竹村貴人, 朝比奈大輔, 大坪 誠
2. 発表標題 分岐断層の陸上アナログから推定するダメージゾーンにおける地震発生後の固有透水係数
3. 学会等名 日本地質学会2021年大会 (日本地質学会第128年学術大会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>プレスリリース：プレート境界付近に存在する水は地震後も高い圧力を保持 (2020/08/03)  <a href="https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20200803/pr20200803.html">https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20200803/pr20200803.html</a></p>
---

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
---------	---------