

巨大地震発生後の亀裂形成による排水は地震が起こるための水圧に影響を与えるか？

大坪 誠¹⁾

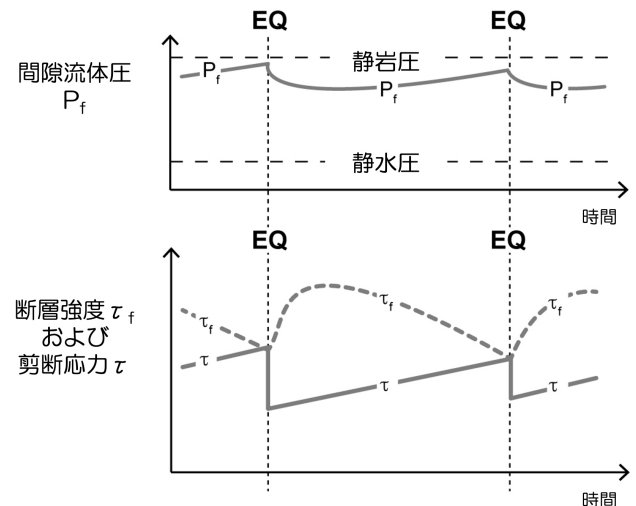
※本稿は2020年8月に、産業技術総合研究所地質調査総合センターが行ったプレス発表を修正・加筆したものです。

1. はじめに

日本列島周辺では複数のプレート(地球の表面を覆う、十数枚の厚さ30~100 kmほどの岩盤のことで、地殻とマントルの最上部を合わせたもの)が接していて、地震災害リスクを検討する上で、南海トラフをはじめとするプレート境界での巨大地震の発生メカニズムを解明することは非常に重要です。特に南海トラフでは駿河湾から日向灘沖にかけてのプレート境界を震源域として、約100~150年間隔で巨大地震が繰り返し発生しており(地震調査推進本部, 2013)、今後の地震発生に向けて早急な減災・防災への対策が求められています。また南海トラフでは近年研究が活発なスロー地震とよばれるゆっくりとした地震も発生しています。プレート境界での巨大地震も、スロー地震も、それらの地震の発生にはプレート境界の水の存在が鍵になっています。測地学・地震学的観点から、プレートの境界での巨大地震の発生メカニズムの検討が進んでいますが、同時に物質科学的な観点からのプレートの境界での巨大地震の発生メカニズムの解明も進める必要があります。南海トラフから沈み込んだプレート境界の日本列島直下付近で発生する地震の発生メカニズムを検討する一環で、活断層・火山研究部門、地質情報研究部門、アメリカ地質調査所、東京大学大気海洋研究所および東京海洋大学の共同研究の成果として「Localized fluid discharge by tensile cracking during the post-seismic period in subduction zones」というタイトルの論文が、2020年8月3日付でScientific Reports誌にオンライン版として公開されました(Otsubo *et al.*, 2020)。今回はその成果について紹介します。

2. プレート境界付近の地震と水圧の関係

プレート境界付近の岩石内部の水圧(間隙水圧)が静岩圧(その深度に対応する地圧)に近い圧力にまで高まると地震が発生する条件が整うと考えられています(第1図)。これは間隙水圧の変化と地震発生の関係を説明したモデル

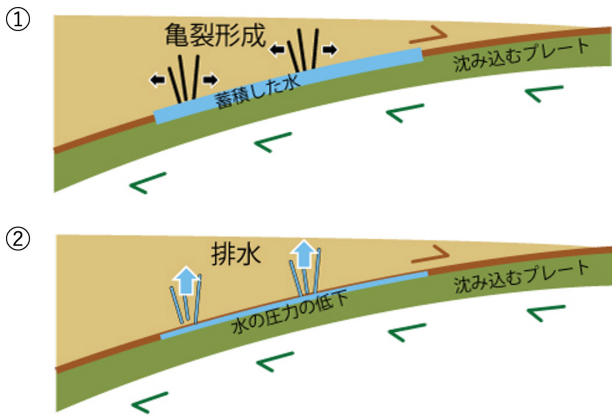


第1図 間隙水圧の変化と地震発生の関係を説明したモデル(Fault-valveモデル)。Sibson (1992)を一部改変。断層周辺での水圧上昇は、断層が動こうとすることに対する抵抗力(断層強度)が相対的に低下することで地震の発生に繋がると考えられています。

(Fault-valveモデル, Sibson, 1992)として構造地質学や地震学分野で広く用いられています。このFault-valveモデルを用いながら、「①地震後に形成された断層周辺の引張り亀裂は排水を促進する流路となる。②そのことで蓄積していた水圧が低下して断層面の摩擦が上昇して断層が滑りにくくなる。」という考えが提案されています(第2図; Sibson, 2013)。しかしながら、水圧が地震後に実際にどの程度が低下するか?についてはよく分かっていませんでした。そこで、私たちは、過去にプレートの境界付近で巨大地震が発生したとされ、南海トラフのプレート境界付近の様子に類似している痕跡が陸上に露出している宮崎県の延岡衝上断層の周辺に分布する亀裂を埋める石英脈(第3図)に注目しました。今回、石英脈ができるまでの亀裂内部の水圧変化を考慮した亀裂モデルを用いることによって、海溝型巨大地震の発生前後での水圧の変化を求めて、プレートの境界付近に蓄積される水圧とプレート境界付近の断層の滑りやすさの関係を調べました。

1) 産総研 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

キーワード: 亀裂, 海溝型地震, 流体移動, 沈み込み帯

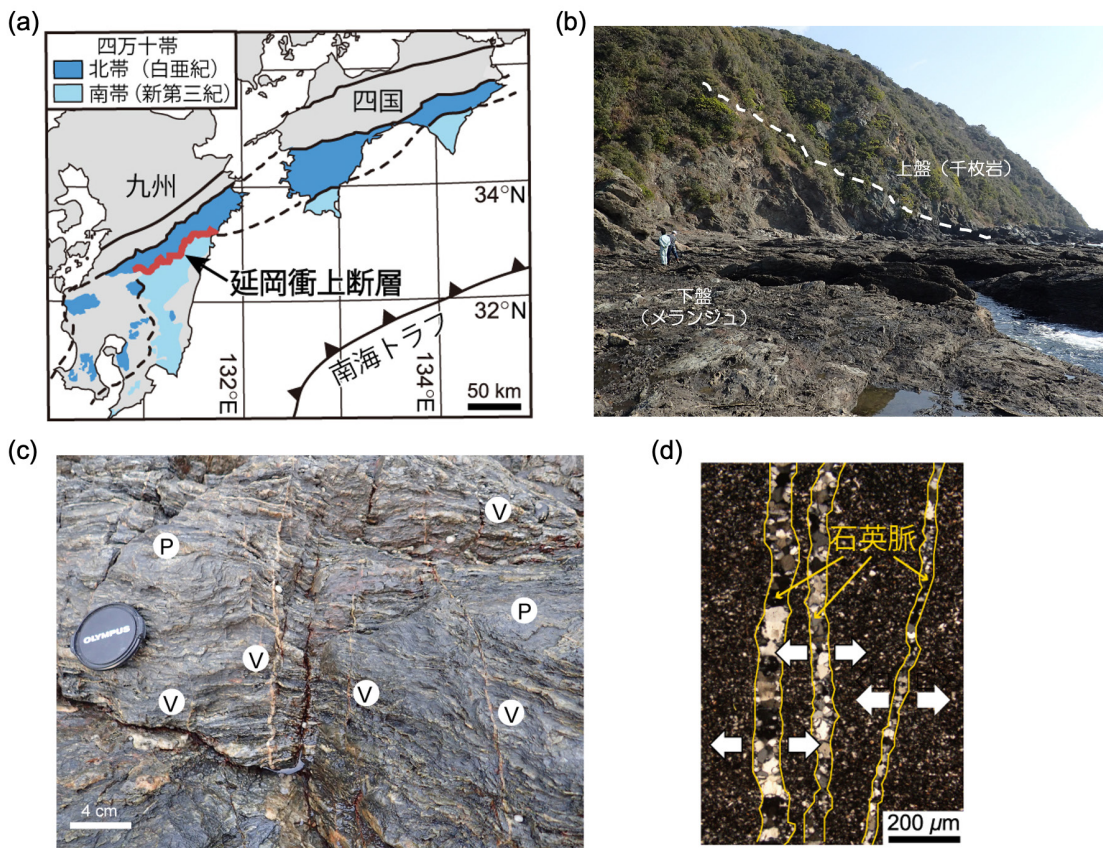


第2図 巨大地震発生後の亀裂形成による排水の模式図。Sibson (2013) を一部改変。①巨大地震発生後に亀裂ができた様子。②亀裂を介してプレート境界付近の水が排水されることによって断層周辺の間隙水圧が低下する様子。

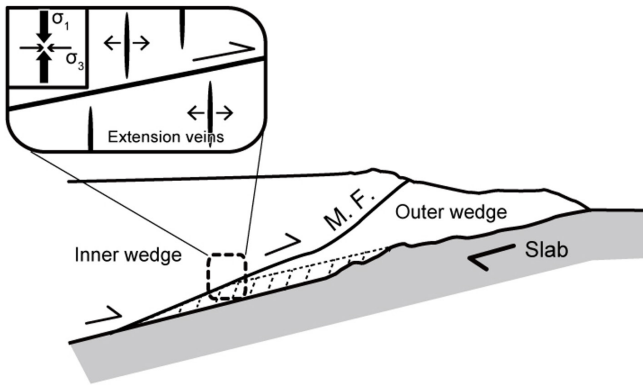
3. 陸上露頭で観察される鉱物脈

宮崎県延岡市の海岸(第3図 a, b)で、延岡衝上断層の周辺に分布する亀裂を埋める石英脈(第3図 c)を800条ほど観察しました(地質学では鉱物脈は「条」と数えるのが一

般的です)。延岡衝上断層は四万十帯の北帯(白亜紀)と南帯(古第三紀)を境する大規模な断層です。ここで観察した亀裂はすべて力が亀裂面に直交に働く引っ張り亀裂のみでした(第3図 d)。つまり、剪断のある亀裂は認められませんでした。これらの引っ張り亀裂は、岩石に働く最小圧縮応力軸の方向(σ_3 軸方向)に直交する向きに形成されると考えられています。引っ張り亀裂形成時の最小圧縮応力軸の方向が延岡衝上断層が運動した方向と合うことから、これらの引っ張り亀裂は延岡衝上断層の運動後(地震発生後)に形成されたことが提案されています(第4図, 例えば, Otsubo *et al.*, 2016)。これは、延岡衝上断層が動いた方向に岩体が引っ張られたことによるものと考えられています。このような延岡衝上断層の周辺での応力場の時間変化が2011年東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9)の発生前後の応力場の変化に似ていることを示しています。大規模な地震が発生すると断層周辺の応力場が大きく変化することが2011年東北地方太平洋沖地震以外にも報告されています。



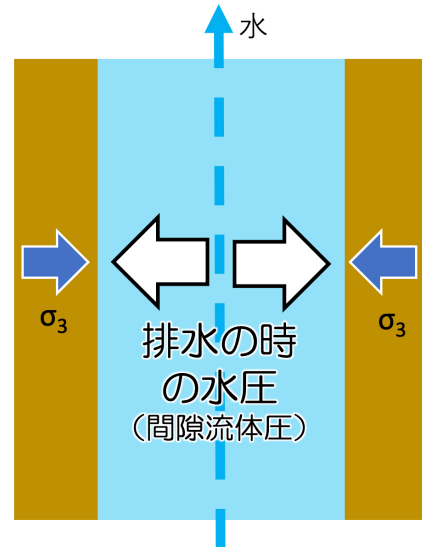
第3図 (a)九州-四国の地質概略図と延岡衝上断層。村田(1998)を一部改変。(b)延岡衝上断層を観察できる海岸の露頭写真。(c)延岡衝上断層周辺の石英脈の写真。(d)延岡衝上断層周辺の石英脈の薄片試料の偏光顕微鏡写真。



第4図 延岡衝上断層が動いた後に形成される引っ張り亀裂と鉱物脈の模式図. Otsubo et al. (2016) を一部改変.

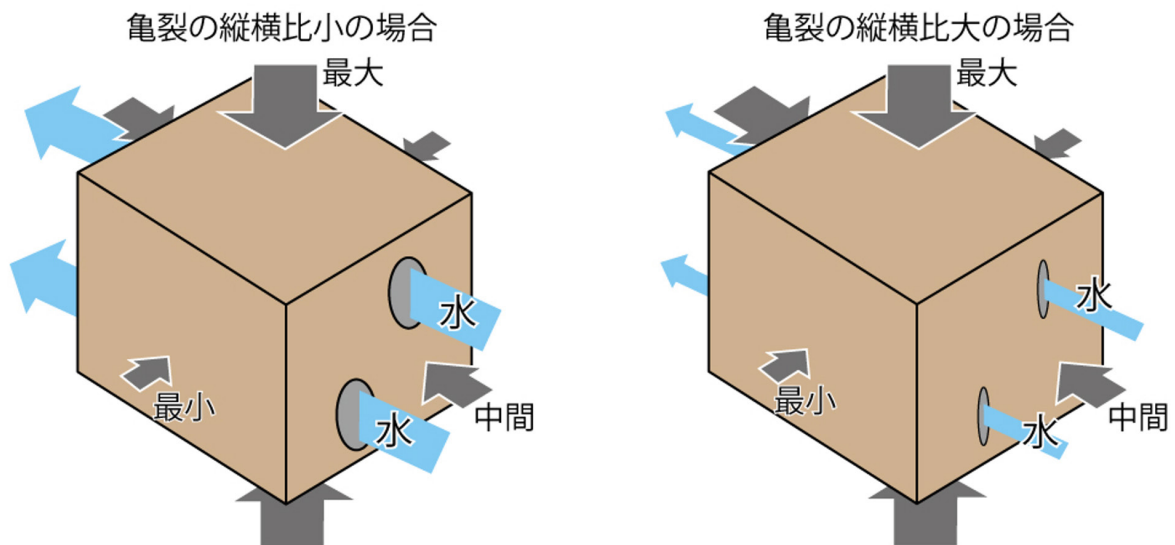
4. 亀裂を埋める鉱物脈の形成プロセス

亀裂を埋める鉱物脈は過去に岩石内の亀裂を流れた水の痕跡です。この鉱物脈は開口した亀裂を埋めたものですが、元々の開口した亀裂は亀裂が開いた際の水の圧力が岩石に働く最小圧縮応力(σ_3)を超える時に形成されます(第5図)。これは、亀裂が開いた際の水の圧力が岩石に働く最小圧縮応力(σ_3)を超えなければ、亀裂が開くことを維持できないからです。 σ_3 を超える分の間隙水圧のことを私たちは余剰間隙流体圧(Pore fluid overpressure, ΔPf)と呼びます。石英の脈は、石英つまりシリカが溶け込んだ水が亀裂の中を流れていくなかで石英が亀裂の中に沈澱して形成されます。



第5図 引っ張り亀裂中に水が流れる時の岩石に働く応力と間隙水圧の関係を示す模式図。亀裂中の水の圧力が岩石に働く σ_3 を下回ると亀裂は閉じるが、その時までには亀裂は石英の沈殿で埋められる。亀裂が閉じる際に流体圧は余剰間隙流体圧分が減圧すると考えています。

私たちの研究では、余剰間隙流体圧の推定に多孔質弾性体モデルを利用しました。このモデルでは、鉱物脈の縦横比(アスペクト比)は亀裂が開く際の σ_3 を超える分の間隙水圧(余剰間隙流体圧)と母岩のヤング率に依存します(Gudmundsson, 1999)。この多孔質弾性体モデルに基づくと、亀裂が開いた際に排水される水の圧力の大きさ(余剰間隙流体圧の大きさ)が大きいほど亀裂の空隙は円に近



第6図 亀裂モデルに基づく、岩石に亀裂が開いた際に排水される水の圧力の大きさと亀裂の縦横比の関係。

づきます(実際は楕円状の隙間, 第6図)。さらに亀裂が縦横まんべんなく開くためには岩石の固さも関係します(Gudmundsson, 1999)。私たちの研究では鉱物脈の長さや幅は海岸露頭と薄片観察から取得し, 岩石の硬さを示すヤング率は岩石破壊実験から取得しました。

5. 明らかになった亀裂形成と間隙流体圧

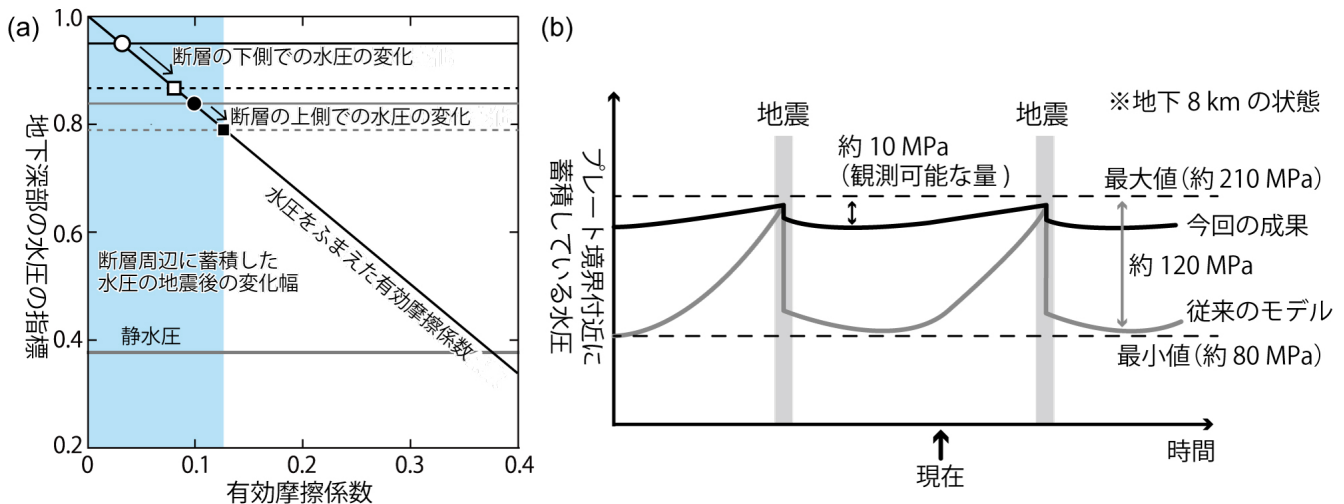
Gudmundsson (1999) の多孔質弾性体モデルによると, 延岡衝上断層の周辺での引っ張り亀裂が形成される際の余剰間隙流体圧は約 10 MPa でした。つまり, 亀裂中に働く水圧が岩石に働く σ_3 の大きさより 10 MPa 大きい状態となります。岩石の密度を 2700 kg/m^3 と仮定すると, 地下約 8 km の環境では約 10 MPa の水圧低下は間隙水圧全体の約 8% に相当します。

亀裂中の水の圧力が岩石に働く σ_3 を下回ると亀裂は閉じてしまいますが, その時には亀裂は間隙流体から沈殿した石英で埋まっています。亀裂は閉じる際に流体圧は余剰間隙流体圧分が減圧します。つまり, 亀裂形成によって, 余剰間隙流体圧分が変化するという事です。そこで, 延岡衝上断層に沿った有効摩擦係数に関して流体圧の変化の前後に注目すると, 引っ張り亀裂の形成によって間隙流体圧が小さくなった後(第7図aの白四角や黒四角)の有効摩擦係数は0.15以下でした(第7図a)。これは一般的な断層の摩擦係数0.6をはるかに下回っており, 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可能性があります。

地下で地震時に生じる亀裂が開いて閉じる現象は岩石中の間隙水圧を上昇させ, 断層周辺での水圧上昇は地震に直接繋がります。間隙水圧の変化と地震発生の関係を説明したモデル(Fault-valve モデル, Sibson, 1992)では間隙流体圧変化の定量的な議論は多くありませんでした。このFault-valveモデルでは一般的に引っ張り亀裂発生によって静岩圧から静水圧まで大きく変化するといわれており, その変化量は地下8 kmでは約120 MPaです。私たちの研究で明らかにした間隙水圧の変化量が約10 MPaだったことは, これまで考えられてきた変化は大きすぎる可能性があります(第7図b)。

6. 南海トラフのプレート境界付近での水圧の状態は?

本研究によって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ることが分かりました。このことは, 現在の南海トラフの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)の発生後に現在までの間に亀裂で排水された後の状態であることを示唆しています。亀裂の形成で解放された分の水圧が今後時間をかけて静岩圧近くまで増加していくと次の巨大地震が発生する条件が整うこととなります。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と考えられていますが, 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



第7図 (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と (b) 繰り返す地震が起こる条件と水圧の関係。私たちの研究成果からは, プレート境界で地震が発生するサイクルの中ではプレート境界付近での水圧はある程度高い状態が維持されていると考えています。

はすでに存在するため、プレート境界付近で 10 MPa 程度の変動であれば観測することが可能かもしれません。

7. おわりに

以上が、私たちの成果の紹介です。南海トラフのプレート境界付近の様子に類似している陸上露頭に注目したこと、鉱物形成と岩石力学を組み合わせたアプローチを採用したこと、が今回紹介した研究の特色です。私たちは、この研究の成果は南海トラフで次の巨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すものと考えています。なお、この研究成果をもとにしたインタビュー記事が講談社 Bluebacks「ブルーバックス探検隊が行く」に掲載されました (<https://gendai.ismedia.jp/articles/-/75870>)。

文 献

Gudmundsson, A. (1999) Fluid pressure and stress drop in fault zones. *Geophysical Research Letters*, **26**, 115–118.
地震調査推進本部 (2013) 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版) について. https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm (閲覧日: 2021 年 11 月 30 日)

村田明広 (1998) 四万十帯のデュープレックスと低角ナック構造. *地質学論集*, **50**, 147–158.
Otsubo, M., Miyakawa, A., Kawasaki, R., Sato, K., Yamaguchi, A., Kimura, G. (2016) Variation of stress and pore fluid pressure using vein orientation along seismogenic megasplay fault - example of Nobeoka Thrust, southwestern Japan. *Island Arc*, **25**, 421–432.
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*, **211**, 283–293.
Sibson, R. H. (1992) Implications of fault-valve behavior for rupture nucleation and recurrence. *Tectonophysics*, **18**, 1031–1042.
Sibson, R. H. (2013) Stress switching in subduction forearcs: Implications for overpressure containment and strength cycling on megathrusts. *Tectonophysics*, **600**, 142–152.

OTSUBO Makoto (2022) How does the drainage due to fractures after the large earthquakes affect the pore fluid pressure for the next earthquake occurrences?

(受付: 2021 年 11 月 30 日)