

沈み込み帯の水理学的モデルに基づく間隙流体圧の定常解
Steady-State Pore-Fluid Pressure Based on Hydraulic Models in Subduction Zones

○金木 俊也・野田 博之
○Shunya KANEKI, Hiroyuki NODA

In subduction zones, the coincidence of high pore-fluid pressure (low effective pressure) and slow earthquakes has been reported. To quantitatively examine the causes of the local decrease in effective pressure P_e on the shallow section, we performed model calculations that incorporated mechanisms characteristic to subduction zones. Our basic model, which considers smectite dehydration and the mechanical effect of subduction, shows that the gradient of P_e remarkably decreases with depth, whereas the realistic fluid properties rule out nearly constant P_e at depth. We obtained a monotonic increase in P_e with depth. A locally decreased P_e was absent, despite considering fluid leakage to a splay fault. When permeability locally decreases, possibly owing to silica cementation, locally low P_e is realized there. The locally low permeability is thus a possible candidate for shallow slow earthquakes. The water release of dehydration may not be dominant, although dehydration promotes silica precipitation.

1. はじめに

脆性領域における岩石強度は、有効圧 P_e （静岩圧と間隙流体圧の差）の増加に伴って線形に増加する。Rice (1992) は、物性値一定の流体が鉛直横ずれ断層帯に沿って流れるモデルを考えて、断層帯の透水率が P_e の急激な減少関数である場合、深度の増加に伴って P_e がある値に漸近することを報告した。しかし、他のテクトニック場に適用可能なモデルは存在しない。

近年の観測網の発展・整備に伴い、世界中の沈み込み帯でスロー地震が報告されている (Obara & Kato, 2016)。スロー地震の発生は、震源域での高い間隙流体圧（低い P_e ）と関連付けて解釈されることが多い（例えば Kodaira et al., 2004）。局所的に低い P_e を境界条件として採用した地震サイクルシミュレーションからも、スロー地震の発生における低 P_e の重要性が示唆されている（例えば Liu & Rice, 2009）。 P_e が局所的に低くなる要因として、堆積物からの流体の供給や透水率の減少などが考えられる。これらの現象は、深部スロー地震の発生を解釈する際の定性的な議論に用いられてきた。深部のみならず浅部スロー地震について、同様の議論を定量的に行うためには、適切な水理学的モデルに基づくモデル計算を行う必要がある。

本研究では、沈み込み帯に適用可能な水理学的モデルを構築し、「何が浅部スロー地震の震源域の有効圧を下げるのか？」という疑問の答えに迫る。

2. 手法

本研究のモデルは、Rice (1992) の考え方を踏襲して構築されている。共通する仮定は以下の通りである：(1) 流体は地震発生層の下端から供給される、(2) 流体は透水率が高いチャンネルに沿ってのみ流れる、(3) 透水率は有効圧の急激な減少関数である。Rice (1992) は流体の物性値を深度によらない定数としたが、本モデルでは温度と流体圧の関数とした。これらに加えて、沈み込み帯に特徴的な過程として、沈み込みに伴う体積変化、スメクタイトの脱水、流体の移流を考慮して基本モデルを構築した。代表的な沈み込み帯として南海トラフ熊野沖に着目し、モデル計算に必要な物性値は、掘削コア試料の室内実験データを参照した。定常状態の仮定のもと、海溝での変数値を境界条件として数値積分を実施することで、一意な定常解を求めることができる。体積流量および岩種の境界値は拘束するのが困難なため、これらに関するパラメータスタディを行った。また、基本モデルに分岐断層への流体の分配もしくはシリカセメンテーションなどによる局所的な透水率の減少を表現する項を入れ込むことで、それぞれが有効圧分布に及ぼす定量的な影響についても調べた。

3. 結果・議論

図1左は、体積流量 $10^{-9.2} \text{ m s}^{-1}$ かつ泥岩の場合の基本モデルの解に加えて、Rice (1992) の解、沈

み込みが無い場合の解（沈み込み速度がゼロ）、脱水反応が無い場合の解（反応速度がゼロ）を示している。体積流量が大きすぎる場合、海溝直下で P_e が負になる一方、体積流量が小さすぎる場合、流量が負になって解が発散し、数値積分が深度 35 km まで到達できない。図 1 左のような物理的に妥当な解は、それら二つの場合の解の間の体積流量を、海溝での境界値として与えた場合にのみ得られた。この流量の範囲は、天然の沈み込み帯における流量測定の結果 (Solomon et al., 2009) と調和的であった。

今回実施したパラメータスタディの範囲における基本モデルの解の中で、脱水反応による P_e への影響が最も大きい場合でも、 P_e は深度に対して単調増加であった。したがって、浅部スロー地震の震源域における局所的な低 P_e は、スメクタイトの脱水反応による流体圧変化では説明することができない。分岐断層の存在を考慮した場合（図 1 中央）、分岐断層へと流れる流量の増加に伴って P_e への影響は増加するものの、 P_e の局所的な減少は確認されなかった。シリカセメンテーションなどによる透水率の局所的な減少を考慮した場合（図 1 右）、その領域周辺において局所的な P_e の減少が確認され、透水率への影響が大きいほど P_e への影響も大きくなることがわかった。これらの結果から、透水率の局所的な減少によって局所的な P_e の減少が引き起こされることがわかった。

これは、Sibson (1992) が提案した fault valve モデルと調和的である。浅部スロー地震の発生に低 P_e が関連しているかは定かではない。仮にそうである場合、深部スロー地震の発生における定性的な解釈と同様に（例えば Audet & Bürgmann, 2014）、透水率の減少が浅部スロー地震の発生に重要な役割を果たしている可能性がある。

4. 結論

浅部スロー地震の震源域における有効圧の局所的な減少は、シリカセメンテーションなどによる透水率の局所的な減少で説明できることがわかった。脱水反応による流体圧変化は支配的ではないものの、反応によって放出されるシリカが有効圧の低下を促進する可能性がある。

引用文献

- Audet, P., & Bürgmann, R. (2014). *Nature*
 Kodaira, S. et al. (2004). *Science*
 Liu, Y., & Rice, J. R. (2009). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*
 Rice, J. R. (1992). *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks* (pp. 475–503)
 Sibson, R. H. (1992). *Tectonophysics*
 Solomon, E. A. et al. (2009). *Earth and Planetary Science Letters*

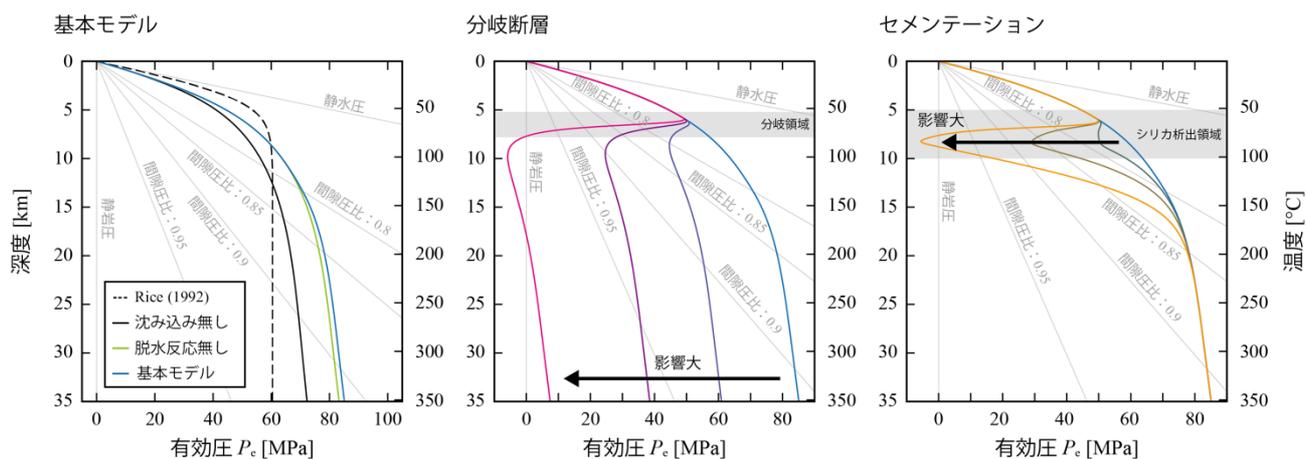


図 1 : モデル計算結果の例。(左) 基本モデル、(中央) 分岐断層への流体の分配を考慮したモデル、(右) セメンテーションによる局所的な透水率の減少を考慮したモデル。海溝での境界値は全て同じ（体積流量は $10^{-9.2} \text{ m s}^{-1}$ 、岩種は泥岩）。