

# 沈み込み帯の地震サイクルシミュレーション :断層滑りと流体移動 の相互作用

## Earthquake cycle simulations in subduction zones: interplay between faulting and fluid transfer

スタンフォード大学 小澤 創  
研究期間 2023年4月1日～2024年3月31日  
滞在研究機関 Department of Geophysics, Stanford University  
Stanford, CA 94305, United States  
共同研究者等 Prof. Eric M. Dunham  
区分 個人 B

Geophysical and geological studies provide evidence for cyclic changes in fault-zone pore fluid pressure that synchronize with or at least modulate seismic cycles. A hypothesized mechanism for this behavior is fault valving arising from temporal changes in fault zone permeability. In our study, we investigate the coupled dynamics of rate and state friction, along-fault fluid flow, and permeability evolution. Permeability decreases with time, and increases with slip. Linear stability analysis shows that steady slip with constant fluid flow along the fault zone is unstable to perturbations, even for velocity-strengthening friction with no state evolution, if the background flow is sufficiently high. We refer to this instability as the “fault valve instability.” The propagation speed of the fluid pressure and slip pulse can be much higher than expected from linear pressure diffusion, and it scales with permeability enhancement. Two-dimensional simulations with spatially uniform properties show that the fault valve instability develops into slow slip events, in the form of aseismic slip pulses that propagate in the direction of fluid flow. We also perform earthquake sequence simulations on a megathrust fault, taking into account depth-dependent frictional and hydrological properties. The simulations produce quasi-periodic slow slip events from the fault valve instability below the seismogenic zone, in both velocity-weakening and velocity-strengthening regions, for a wide range of effective normal stresses. A separation of slow slip events from the seismogenic zone, which is observed in some subduction zones, is reproduced when assuming a fluid sink around the mantle wedge corner.

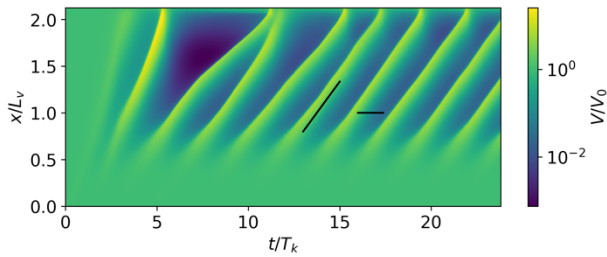
### 研究目的

流体の存在は地震とスロースリップの発生に大きな影響を及ぼしていることがさまざまな観測から提案されている。さらに理解を深めるためには定量的な予言能力のあるモデルが必要である。私は、山田科学振興財団の支援を受けて、スタンフォード大学において流体と地震発生に関わる幾つかのモデリング・数値シミュレーション研究を行った。

### 研究経過

断層は周囲の岩石に比べて、多くの亀裂を含み、流体を通しやすいことから、地殻中の主要な流体の経

路になっている。したがって、地殻の流体の流れを理解するためには、断層の透水係数を知る必要がある。断層内の透水係数は時間的に一定ではなく、断層の状態に依存して変化すると考えられている。地震間には透水係数が減少し、地震中には増加する。これにより、流体圧は断層滑りとカップルし、さらに断層の摩擦強度を支配し、流体輸送と断層滑りの間に複雑な相互作用が予想される。私はこの「断層バルブ」システムについて、線形安定性解析を行い、断層に流れる流体の量が十分に大きい場合に不安定滑りが発生することを発見した。

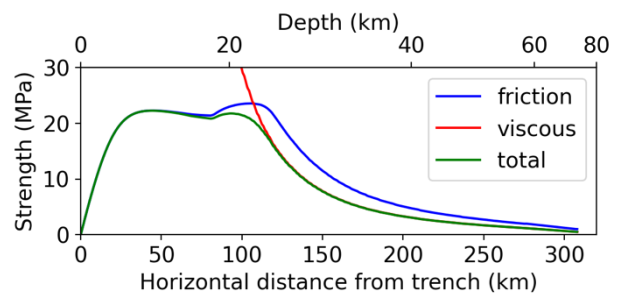


**Fig 1** Numerical simulation of periodic aseismic slip with the fault valving mechanism. The horizontal axis is dimensionless time and vertical axis is the dimensionless location. The color indicates the dimensionless slip rate.

この結果を地震サイクルシミュレーションにより確認し、不安定滑りは、パルス的なスロースリップの形態を取ることが明らかになった (Fig 1)。このために、境界要素法と有限差分法を組み合わせたソフトウェアを新たに開発し、オープンソースとして github 上で公開した。さらに同じモデルを沈み込み帯に適用して、地下から十分な流体が供給される場合に地震発生帯深部で発生するスロースリップを再現することに成功した。この成果については、論文を投稿中である (誌上発表 2)。

上記のモデルで仮定された流体供給量が妥当かは、地質学的・岩石学的に検証する必要がある。また、より一般的に、プレート境界にどれくらいの流体が (どのような形態で) 存在し、断層の強度を決めるかは沈み込み帯研究における重要な問いである。そこで私は、カスケード沈み込み帯における温度構造モデルを用いて、沈み込む海洋地殻において、岩石の変成脱水作用から供給される水の量をワシントン大学の Cailey B. Condit 教授と協力して行った。さらに、この結果に、ダルシー則を用いた水理学的なモデルを組み合わせることで、プレート境界に沿った流体圧を推定した。得られた流体圧はごく浅い部分では静水圧に一致するが、深部では静岩圧に漸近する。これらは、地震学的観測及び地質学的観察による推察と整合的である。このモデルでは、粘性クリープによる間隙のコンパクションと滑りによる間隙率の増加 (ダイラタンシー) を仮定しそのバランスで定常的な流体圧と間隙率を推定している。粘性クリープは剪断変形も起こすため、流体圧のモデリングは同時に脆性塑性転移深さも見積もっており、従来の流体圧を仮定したモデルに比べて高度なセルフコンシステンシーを実現した (Fig 2)。

さらに、この定常状態モデルを非定常状態に拡張するために、地震サイクルシミュレーションを行った。そして、地質学的に得られている巨大地震繰り返し間隔及び、滑り到達範囲を説明するパラメータ範囲を制約した。また、摩擦パラメータが速度弱化的である場合多くの破壊は定常状態モデルで推察される脆性塑性転移深さよりもはるかに深く到達することが明らかになった。1700 年に発生した巨大地震では、海岸線の隆起の記録から破壊は深さ 20 キロ程度で停止したことがわかっており、この結果は深さ 20 キロ以上で速度強化摩擦が必要なことを示唆している。



**Fig 2** Calculated frictional and viscous strengths along the northern Cascadia subduction zone.

スタンフォード大学で研究するほか、2023 年 6 月から 7 月にかけて 4 週間、UC バークレーにて CIDER Summer Program 2023 (Causes and consequences of fluid and magma transport at plate boundaries) に参加し、沈み込み帯のダイナミクスに関わる物理的・化学的理解を深めた。また、グループプロジェクトとして、カスケード沈み込み帯の地震活動のモデリングに取り組み、米国内の各地の若手研究者と交流を深めた。10 月には 1 週間フランスコルシカ島で CARGÈSE 2023 School on subduction zone processes に参加し、本研究プロジェクトの途中成果に関して講演を行った。12 月にはサンフランシスコで開かれた AGU Fall Meeting で講演を行った。2024 年 3 月にはカナダモントリオールで、沈み込み帯の流体に関わるワークショップに参加し、研究成果について講演した。そのほか、期間内にアメリカ地質調査所、カリフォルニア大学サンタクルーズ校、マギル大学、南カリフォルニア大学を訪れて、当該プロジェクトに関するセミナーを行った。

## 考察

今後は、今回の研究成果を、日本を含む世界各地の沈み込み帯に適用し、地域比較を行いたい。また、現在3次元バージョンのコーディングも進行中であり、断層バルブ不安定が3次元中でどのように現れるかという興味深い問題に取り組む予定である。さらに、複雑な断層形状を導入して、能登半島地震のような群発地震のモデリングも行いたい。

## 研究の発表

### 口頭発表

1. So Ozawa, Yuyun Yang, Eric M. Dunham, "Fault Valve Instability: A mechanism for slow slip", JpGU Meeting 2023, May 2023
2. So Ozawa, "Earthquake cycle simulations with pore pressure evolution accounting for metamorphic fluid

production and fault valving", Cargese School on Subduction Zone Processes, Cargese, France, October 2023

3. So Ozawa, Cailey B. Condit, Eric M. Dunham, "Modeling of effective normal stress and shear strength along megathrusts from integration of fluid production by metamorphic dehydration of the oceanic plate, updip fluid flow, and viscous flow laws." AGU Fall Meeting 2023, December 2023

### 誌上発表

1. So Ozawa, Yuyun Yang, Eric M. Dunham (under review), "Fault Valve Instability: A mechanism for slow slip events"  
DOI:10.22541/essoar.171291623.31088922/v1