

地震時の摩擦発熱に伴う断層帯での化学反応を考慮した
変形集中帯の移動に関する数値実験

Numerical experiments on migration of a shear-localized zone incorporating chemical reactions in a
fault zone induced by frictional heating during seismic slip

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

Frictional heating during seismic slip can induce chemical reactions in a fault zone. Platt et al. (2015) demonstrated through numerical modeling that thermal decomposition of minerals can supply additional fluid to a system, change pore-fluid pressure, and affect strain localization. Further numerical experiments by Platt et al. (2014) and Rice et al. (2015) employing longer slip duration showed the occurrence of migration of a shear-localized zone. Although this behavior was attributed to fluid diffusion and depletion of reactant, detailed mechanisms have not been examined. In this study, we developed a code that reproduces the modeling results consistent with those of Platt et al. (2015). We reconfirmed the migration behavior of a shear-localized zone, which can be attributed to the growth of numerical error during calculations. Spatially heterogeneous initial conditions result in physically sound migration of a shear-localized zone, allowing us to obtain a unique solution that can be regarded as an approximation of the analytical solution for this problem.

1. はじめに

地震時の断層帯では、高速滑りに伴う摩擦熱によって鉱物の化学反応が進行する場合がある。反応後の鉱物は、高速滑りの痕跡として断層岩中に残るため、物質科学的な断層研究を行う上で重要な情報となりうる。これまで、多くの天然断層（例えば Yamaguchi et al., 2011）や室内実験試料（例えば Collettini et al., 2013）において、断層帯における化学反応の進行が確認されてきた。

一方、断層滑りのモデル計算において、化学反応の効果が考慮されることは比較的稀である。Platt et al. (2015)は、左右対称な系を仮定し、滑りの初期段階（見かけの歪量が 15 以下）における断層帯の高速滑りのモデル計算を行った。その結果、透水係数が十分低い条件下では、既存の間隙流体および鉱物の化学反応によって供給される新たな流体の圧力上昇によって、断層帯の中心にピークを持つ変形集中帯の厚みが数十マイクロメートルまで薄くなることを報告した。Platt et al. (2014)および Rice et al. (2015)は、Platt et al. (2015)と同じモデルを用いた数値計算をより長い時間スケールで行い、ある時刻において変形集中帯のピーク位置が断層中心から移動し始めることを報告した。この挙動は、流体の拡散および未反応の鉱物の枯渇

によって引き起こされたと説明されているが、その原理について詳細には調べられていない。

本研究の最終目的は、化学反応を考慮した断層帯の高速滑りのモデル計算結果と、実際の断層岩中の化学分析結果との比較を行うことである。その第一段階として、上述の変形集中帯の移動に関する数値実験を行ったので、本発表ではその結果について報告する。

2. 手法

Platt et al. (2015)の断層帯の高速滑りモデルで考慮されている機構は、慣性と体積力を無視した連続体の運動方程式（準静的過程；力学平衡）、速度依存の摩擦構成則、微小変形を仮定した流体の質量保存則、エネルギー保存則、反応速度論に従う鉱物の化学反応である。本研究では Platt et al. (2015)に倣い、代表的な化学反応として方解石の熱分解反応に着目した。時間について一次の前進差分、空間について二次の中心差分をとった数値積分を、上述の機構を表現した偏微分方程式について実行することで、Platt et al. (2015)の計算結果を再現するコードを自作した。

3. 結果と議論

再開発したコードを用いた数値実験の結果、Platt et al. (2014)および Rice et al. (2015)によって報告された変形集中帯の移動が再確認された。左右対称な一次元モデルについて左右対称な初期条件の元で数値計算を行ったにも関わらず、左右非対称な数値解が生じた事は、左右対称な解がある時点で不安定化し、数値誤差の増大が解を選択している事を示唆する。すなわち、左右非対称な変形集中帯の移動が観測されたこれらの数値解は、今回のモデルの解析解に対する適切な近似解として扱うことができないと言える。「物性値・初期状態が一樣」といった単純な条件の問題設定では、滑り速度履歴や応力履歴を与えても、高速滑り後の解の空間分布は一意には定まらないといえる。

この問題を解決する手段の一つとして、予め初期条件の対称性を崩すことを試みた。代表的な初期条件として、初期反応率を空間不均質とした場合の解について調べた。初期反応率が空間座標の線形関数であるとした場合、時間ステップ数の増加に伴って変形集中帯のピークが初期反応率が低い側へと移動する挙動が確認された(図1)。これは、断層中心の両隣のグリッドで初期反応率が異

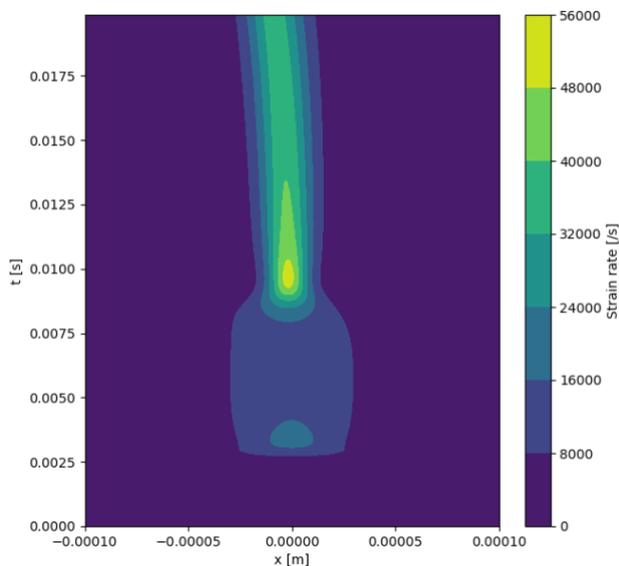


図 1. 左右非対称な初期反応率を設定した場合の数値解の歪速度の時空間発展。

なる場合、より反応率が低いグリッドにおいて反応が進行しやすいため、断層強度がより弱化する事で変形集中のピークがそちらに移動するためであると物理的に解釈できる。移動が発生した解の収束性テストを実施した結果、空間グリッドのサイズについて二次のオーダーで数値誤差が小さくなる事が確認された(図2)。これは、二次の中心差分を取ったことによって生じる数値誤差の理論値と調和的である。これらの結果から、初期設定で対称性を崩してやることにより、解の一意性が担保された問題設定となり、本モデルの数値解を解析解の近似として扱う事ができる様になると言える。

4. 引用文献

Colletini et al. (2013) *Geology*

Platt et al. (2014) *AGU abstract*

Platt et al. (2015) *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*

Rice et al. (2015) *EGU abstract*

Yamaguchi et al. (2011) *Geology*

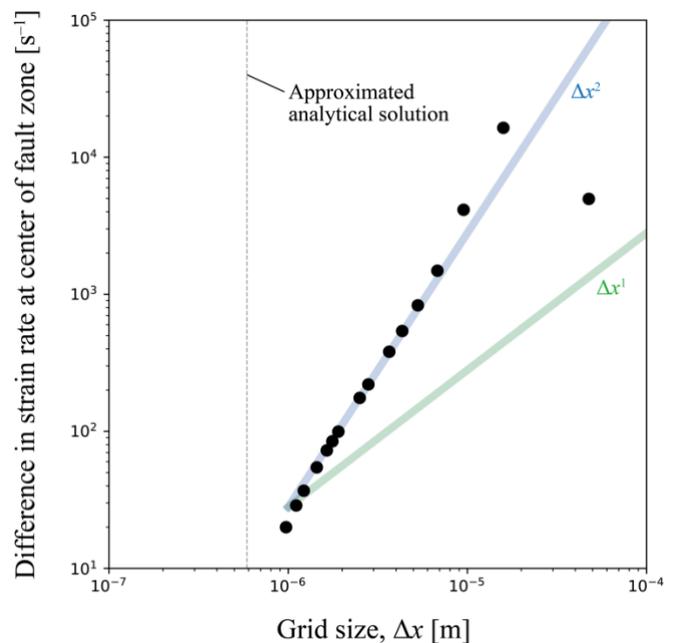


図 2. 収束性テストの結果。