

## 論文内容の要旨

論文題目      Experimental study of frictional behaviors  
                  using acoustic in-situ monitoring of frictional interface

(内部状態の音響的その場観察を用いた  
摩擦インターフェイスの物理的挙動に関する実験的研究)

氏名            永田 広平

### 1. はじめに

断層面のすべり運動を理解し、予測するためには、面のすべり履歴に伴って複雑に変化する摩擦強度の挙動を知ることが一つの重要な要素となる。断層運動を表現する際にしばしば用いられる速度・状態依存摩擦則[Dieterich, 1979; Ruina, 1983]では、応力と速度の関係を示す構成則に加えて、摩擦強度の変化を記述する発展則を用いて面のすべり運動を表現する。このうち、構成則については近年その物理的背景が明らかにされている[Heslot et al., 1994; Nakatani, 2001]のに対し、発展則については、いくつかの表現が提案されているものの、いずれも室内実験のデータを完全には説明できないことが知られている[e.g., Beeler et al., 1994]。速度・状態依存摩擦則を断層構成則として用いる場合、採用する発展則によって予測される断層運動の様子が定性的に異なる[e.g., Rice & Ben-Zion, 1996; Kato & Hirasawa, 1999; Ampuero & Rubin, 2008]ことも知られており、正しい発展則を得ることは地震学的にも重要な課題である。これまで実験室レベルにおいてさえも発展則についての議論が進展しなかった主な理由として、発展則を導出する上での拘束条件が、実験で観察された剪断応力の変化だけであったという点が挙げられる。摩擦則の背景に、摩擦強度がインターフェイスの真実接触面積に比例する[Bowden & Tabor, 1964; Dieterich, 1979]という基本的なコンセプトがある以上、正しい発展則を得るための一つの道筋として、真実接触面積に関連する物理量を測定し、発展則をより直接的な拘束条件のもとで精密化するという方法が考えられる。本論文ではまず、Kendall & Tabor (1971)によって提案された摩擦インターフェイスの接触状態についての音響的観察手法により、岩石間の摩擦強度の変化がその場観察できることを示す(2)。これに関連して(3)では、音響的観察と摩擦強度の直接比較を行うため、摩擦強度の推定に必要な構成則パラメータを推定するための新たな手法を提案する。その後、剪断応力だけでなく観察された摩擦強度の変化を同時に説明するために、既存の発展則に修正を加える(4)。最後に、岩石間にガウジ層を挟むより自然断層の状態に近い模擬断層について、音響的手法から得られる摩擦実験中のインターフェイス内部状態の変化の様子を示し、摩擦強度の変化についての新たな知見を得る(5)。

## 2. 弾性波を用いた断層面接触状態の観察

摩擦強度が面の接触状態に依存することはよく知られているが、これと同じように弾性波の透過率も面の接触具合に依存して変化する[e.g., Yoshioka & Iwasa, 2006]. このため透過弾性波の振幅を観測することにより摩擦強度の変化が追えることが期待される. 実際, 図 1 に示すような実験構成により摩擦実験中の透過振幅の変化を測定すると, 準静的接触時間の対数に比例した振幅の増加, すべりに伴う振幅の減少といった予想される摩擦強度の変化と非常によく似た振幅の変化が観察される[Nagata, 2008]. ただし, 弾性波透過率と摩擦強度の定量的な比較を行うには, 剪断応力 ( $\tau$ ) と速度 ( $V$ ) の構成関係  $V = V_* \exp\left(\frac{\tau - \Phi}{a\sigma}\right)$  から真実接触面積に比例すると考えられる摩擦強度  $\Phi = \tau - a\sigma \ln(V/V_*)$  を推定するために, 構成則パラメータ  $a$  を決定する必要がある. ( $\sigma$ : 法線応力,  $V_*$ : 任意の基準速度)

## 3. 構成則パラメータ $a$ の推定

構成則パラメータ  $a$  は, 面に加えられる応力とすべり速度の関係を定める係数である.  $\Phi$  一定のもとでの速度と剪断応力の変化を計測する理想的な実験ができれば,  $a$  の値を推定することができる. しかし  $\Phi$  一定という条件を実現することは難しく, 通常は  $\Phi$  の変化を発展則によって推定し, 補正を行う. この結果, 得られた  $a$  の値から求められる  $\Phi$  の変化は用いた発展則の性質を反映したものになってしまう. 現有の発展則がいずれも実験データを完全には説明できないことから, 本研究では, 発展則に頼らずに  $a$  の値をより直接的に推定するため, なるべく摩擦強度が変化しないような状況で応力と速度の関係を調べるための実験手法を考案した. これは, ごく低速の定常すべり状態から剪断応力をわずかにステップダウンさせて, その前後での応力, 速度の変化から  $a$  の値を推定するものである. この実験から得られた正しい  $a$  の値 ( $\sim 0.05$ ) は, 従来の手法で得られる値の3倍程度大きい. この値を用いて推定された摩擦強度の変化の様子は, 測定された弾性波透過率の変化とほぼ一致しており (図2), 弾性波による摩擦強度のその場観測が可能であることが示された.

## 4. 発展則の修正

前述のように, 現有の発展則は実験を正確には再現できないことがよく知られているが, 上記で発展則を用いずに推定した  $a$  の値を用いると実験データへのミスフィットはますます大きくなる. そこで, 得られた応力と摩擦強度の変化を正しく表現できるよう, 従来の発展則のうち, 物理的意味が明らかな Dieterich Law (=Slowness Law) [Ruina, 1983; Beeler et al., 1994] に修正を加えることを試みた. 実験データの詳細な観察からは, Dieterich Law で記述される強度変化量 (ヒーリングと slip-weakening) に加えて, 応力変化に伴う強度の変化が生じていることが示唆される. この応力変化に依存した強度変化の項を発展則に加えることにより, 実験で観察された様々なすべり履歴に伴う剪断応力, 摩擦強度の変化を同一のパラメータで同時によく説明で

きることが分かった（図 3）

## 5. ガウジ層を挟む模擬断層内部の状態についての音響的観察

インターフェイスの力学特性が固体同士の接触具合だけで決まる岩石間の摩擦とは異なり，ガウジ（破碎された岩石）からなる層を挟む摩擦インターフェイスにおいては，固体粒子同士の接触具合だけでなく，破碎物質により構成される幾何学的な内部構造の変化が，断層の強度や断層を透過する弾性波動に影響を与える．幾何学的な内部構造の変化に起因する，ガウジ層に特有の強度変化としては，slide-hold-slide 試験における hold 時の剪断応力に依存した強度回復が挙げられる[Nakatani, 1998]．また時間に依存した強度回復が，hold 時の剪断応力が低い時には見られなくなることが報告されている．本研究では，（2）で岩石間の摩擦インターフェイスに適用した音響的な手法を用いて，slide-hold-slide 試験中のガウジ層内部の接触状態の変化の様子を調べた．この結果，剪断応力に依存した強度回復と時間に依存した強度回復の両方に対応する透過振幅の増加が見られた．また，時間依存の振幅の増加は，hold 時の剪断応力に依存しないことが観察された．これらの観察は，同時に測定されたガウジ層の暑さの変化とも調和的である．Hold 時に時間とともに増加した振幅は，slide させるための载荷に伴って急激に減少する．これらの結果は，時間依存の強度回復が実は hold 時の剪断応力によらずに生じていること，また载荷過程で急激な弱化が生じていることを強く示唆しており，剪断応力の測定だけでは知ることのできない内部状態の変化を音響的手法により検出することができたと言える．

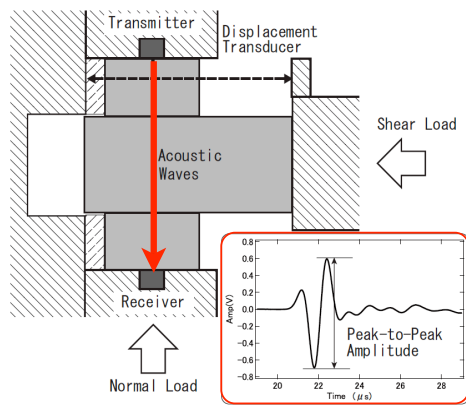


図 1, 実験構成と透過波形の例. サンプルは庵治花崗岩ですべり面は#600 で研磨してある. 1MHz サイン波を 1ms に 1 波ずつ送信し, 受信波のピーク-ピーク振幅を連続記録する.

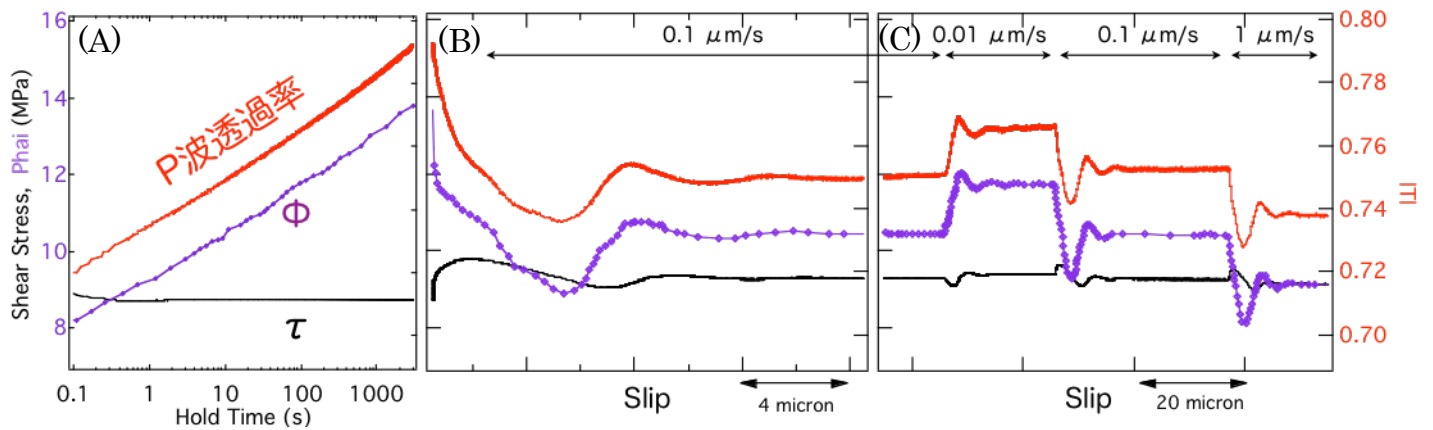


図 2, 法線応力 10MPa で行った実験中の様々なすべり履歴に伴う剪断応力, 摩擦強度, P 波透過率の変化. (A) 一定剪断応力下での準静的接触. (B) 準静的接触後のすべり始め. (C) いくつかの速度での定常すべり

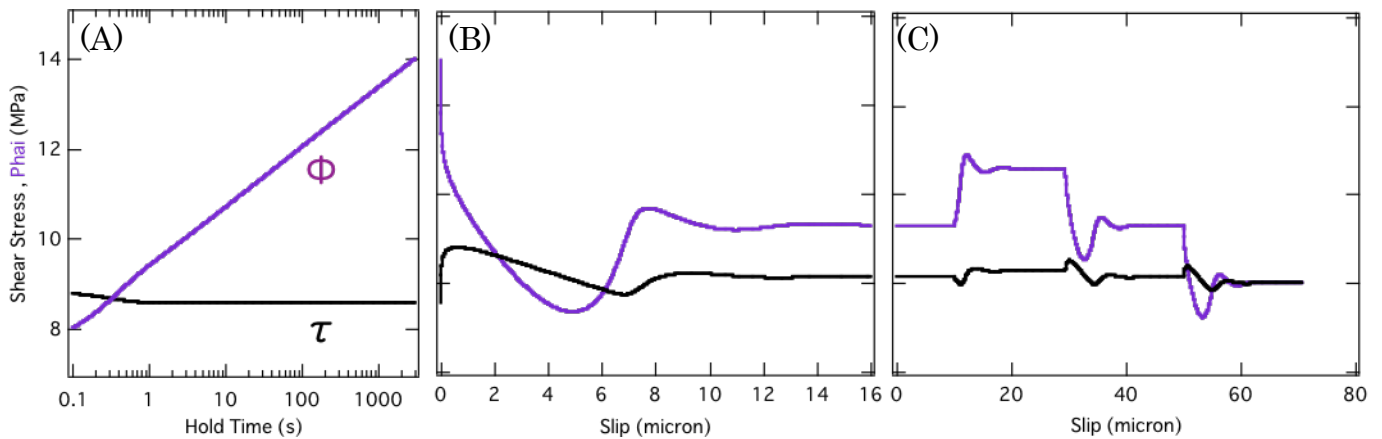


図 3, 応力依存項を加えた発展則を用いたシミュレーションの結果. 载荷条件は図 2 と同様.