

平成21年5月19日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18740272  
 研究課題名（和文） 断層滑りの特徴とそのパラメータ依存性：  
 アナログ実験からのアプローチ  
 研究課題名（英文） Characteristics of fault slip and their parameter dependence:  
 An experimental approach  
 研究代表者  
 隅田 育郎（SUMITA IKURO）  
 金沢大学・自然システム学系・准教授  
 研究者番号：90334747

研究成果の概要：本研究では断層すべりの特徴を理解する基礎として粉粒体の固着すべりのパラメータ（粒径、間隙流体の粘性率、せん断速度）依存性を実験的に調べた。その結果、固着すべりが起きる際の応力降下量と応力降下がおきるイベントの時間間隔が粒径に対して比例増大すること、またクリープの程度が減少し、応力降下時に滑り方が滑り速度一定から滑り時間一定へと推移することが分かった。また間隙に粘性流体が入ると応力降下量は減少するものの、応力降下イベントの時間間隔が増大するため粒径効果と区別できること、そして臨界粘性率以上では粘性抵抗の効果が卓越し摩擦が増大することが分かった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	300,000	3,800,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：粉粒体、レオロジー、固着すべり、断層、摩擦、実験、粒径、間隙流体

## 1. 研究開始当初の背景

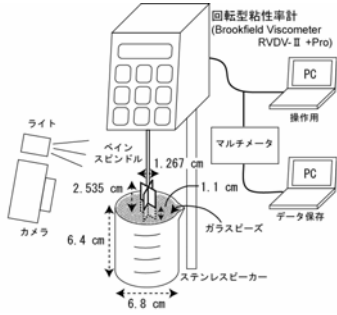
粉粒体摩擦については、これまで様々な実験が行われてきたが、粒径と間隙流体粘性についての系統的なパラメータスタディーは少ない。近年、地震学的及び測地学的観測から、断層面上の様々なスケールの凹凸（アスペリティ）及び間隙流体の影響が重要視されるようになってきており、これらが摩擦に与える影響を正確に知る必要性が出てきた。回転型粘性率計は一般的な測定機器であるが、従来は摩擦や固着すべりの研究には殆ど使われて来なかった。回転型粘性率計は法線応力を印加することができないものの、液体を容易に加えることができること、また定常状態が実現されるため、固着滑りの長期的な振る舞いを調べるのに適している。試験的に回転型粘性率を用いてガラスビーズを羽根型スピンドルを用いてせん断する予備実験

を行なったところ、実際に固着すべりが起きること、またその応力の時系列データが固着滑りに伴う応力の蓄積と降下ばかりでなく、その間のゆっくりと滑るクリープも記録できていることが分かった。以上を踏まえて本格的に系統的な粒径、間隙流体粘性を調べる実験を行なうことにした。

## 2. 研究の目的

本研究では、粉粒体の固着すべりの特徴が粒径、間隙流体粘性率、せん断速度に対してどのように依存しているかを定量的に明らかにし、これらの可変パラメータに対してスケール則を求めることを目的とする。そしてその結果に基づいて、応力時系列データのみから粒径と間隙流体粘性率依存性を区別するためには何に着目したら良いかを明らかにすることを目指す。

### 3. 研究の方法

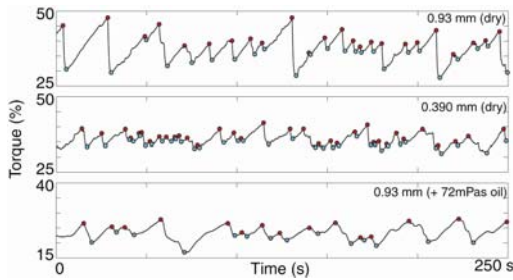


本研究では左図のような回転型粘性率計を用いる。粉粒体としては粒径が0.2-1.3mm(9種)のガラスビーズを用いる。間隙流体

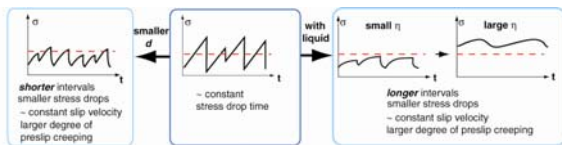
としては空気以外は0.82-11400mPas(7種)のシリコンオイルを用いる。10Hzでサンプリングした応力データはパソコンに記録され、定常状態とみなすことの出来る時間範囲を用いて、応力降下イベントを判定し、最大、最小応力、応力降下量、そしてクリープの特徴を解析した。また、せん断が起きているガラスビーズ層をビーカーの上部から30秒間隔でデジタルカメラを用いて撮影を行なった。そして30秒ごとの差分画像を足し合わせることで、可動域の範囲を測定した。

### 4. 研究成果

下図に応力の時系列データの例を示す。ここで1トルク%は2.17Paに相当し、赤丸、青丸はそれぞれ1イベントの最大、最小応力値を示す。この図から分かるように粒径が大きくなると、最大応力、応力降下量が増大し、それに伴い応力降下イベントの時間間隔が長くなる。一方で、間隙流体の粘性率が大きくなると、応力降下量は減少するが、イベントの時間間隔が長くなる事が分かる。

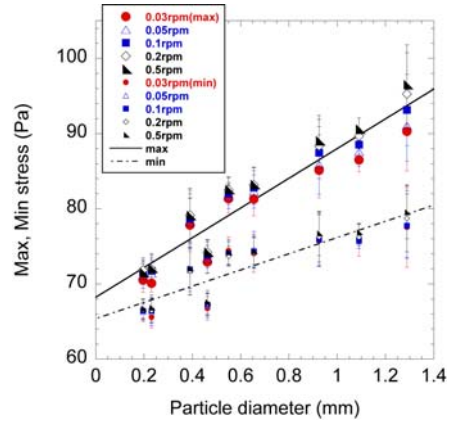


即ちこの性質を用いて、粒径と粘性効果を区別できることを示している。以上の定性的な振る舞いの変化は下図のようにまとめられる。

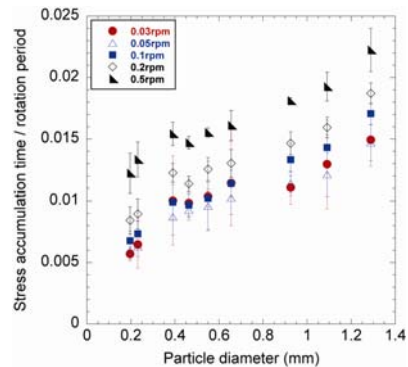


次に9種類の粒径で実験を行なった結果、最大、最小応力と応力降下量は粒径に比例することが分かった。特に、最大応力(静止摩擦)の方が最小応力(動摩擦)よりも粒径依

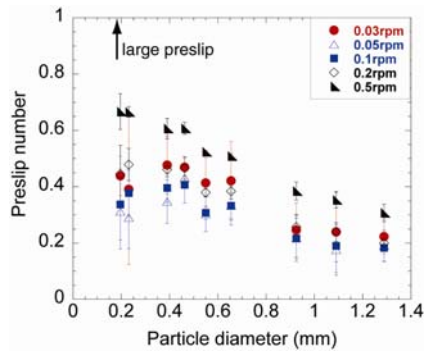
存性が顕著であった。これは応力降下を伴うような滑りを開始させるためには、大きな粒程粉体層を「掘り起こす」力が余計に必要なためであると解釈される。また応力降下量は最大応力の約10%であることも分かった。本実験より5桁以上高い法線応力が印加された破砕物質を含む岩石摩擦実験(Anthony & Marone, 2005)においても同じような結果が得られており、これは粉粒体の摩擦の一般的な性質であることを示唆している。



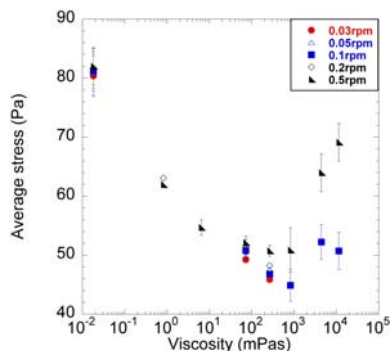
また、最大応力が粒径に比例する結果、応力が蓄積する時間の長さも粒径に比例増大することが分かった。



次に応力蓄積時、及び応力解放時におけるクリープの程度を定量化するために、新たに2つの無次元数を導入し、その粒径及び粘性率依存性を調べた。その結果、この無次元数が系統的に粒径、粘性率に対して変化することが分かった。この無次元数(例えば Preslip number)は、実際の断層滑りを特徴付ける際にも利用できる可能性がある。また、粒径が小さくなるか、あるいは間隙流体粘性率が增大すれば、応力降下時の滑り方が滑り時間一定から滑り速度一定へと遷移することが分かった。この性質は、近年発見された断層のゆっくりした滑りを説明する候補となりうる。



次に間隙流体の粘性率を増加させた時のせん断に必要な平均応力の結果について下に示す。ここで粒径、せん断速度は一定であり、左端のデータ点は空気中のものである。この図は、せん断応力を極小にする粘性率が存在することを示している。間隙が空気の状態から流体の粘性率を増加させると、粒同士の間に入り、粒同士の間の摩擦を減らすため、せん断に必要な応力は減少する。しかし臨界粘性率を超過すると粒同士の間の接触はなくなり、粘性抵抗が主な摩擦源になるため、せん断応力は増加に転ずる。この図は工学的に知られている軸受の潤滑機構と良く似ている。軸受けの場合には、潤滑圧と加重との比を表す無次元数であるゾンマーフェルト数が1前後で摩擦が極小になることが示している。そこで、同様に本実験においてせん断応力を極小にする粘性率において粒径を長さスケールとしてゾンマーフェルト数を評価した。その結果、ゾンマーフェルト数は0.4となり、軸受けの場合として知られている1に近い値となった。この結果は、粉粒体も軸受けと同様に潤滑されることを示している。



本実験では、半径方向に厚い粉粒体層をせん断しているため、スピンドルから離れた部分における粉粒体は動いていない。粉粒体の可動範囲はパラメータに対してどのように決まっているかを調べるために、前述した画像解析方法を用いて、せん断が起きている層の厚さを測定した。その結果、せん断層の厚さは粒径に伴って厚くなるが、粒径でスケールすると、粒径に伴って薄くなるのが分かつ

た。これは粒径が増大することにより、クリープの程度が小さくなることと関係があることを示唆している。

本実験は、実際の断層と破碎帯を単純化したモデル実験であるが、粒径と粘性率依存について最も系統的に調べた研究の一つと言える。現在、様々な断層滑りのシミュレーションに用いられている摩擦構成則は、粒径や間隙流体粘性率の効果があらわには入っていない。本実験結果は、少なくともこれら2つの効果は摩擦特性を大きく変えることを示している。また本実験は断層ガウジ物質の破碎の進行に伴い、小さな滑り（地震）が頻発することを示唆しており、これは例えば、2004年-2005年のセントヘレンス火山における周期的な地震の周期の変化の原因かも知れない。また地下水の流出入や摩擦熱によるメルトの発生によって、破碎帯に液体が混在する可能性がありえる。本実験は、このような液体の存在は滑り速度を遅くするために効果的であることを示すと同時に、滑りを起こすために必要なせん断応力を極小にする粘性率があることを示している。

以上の結果は、Higashi & Sumita (2009)として公表し、また地球惑星科学連合大会(2006年、2009年)、アメリカ地球物理学連合秋季学会(2007年)において発表した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

1. Higashi, N. and I. Sumita, 2009, Experiments on granular rheology: effects of particle size and fluid viscosity, *J. Geophys. Res.*, 114, B04413, doi.10.1029/2008JB005999.(査読あり)
2. Sumita, I. and M. Manga, 2008, Suspension rheology under oscillatory shear and its geophysical implications, *Earth Planet Sci. Lett.* 269, 467-476 (査読あり)
3. Sato, M. and I. Sumita, 2007, Experiments on gravitational phase separation of binary immiscible fluids, *J. Fluid Mech.*, 591, 289-319 (査読あり)
4. Sumita, I. and M. I. Bergman, 2007, Inner-Core Dynamics, Schubert, G. (ed.) in *Treatise on Geophysics*, vol 8.10 pp.299-318. Oxford: Elsevier Ltd. (査読あり)
5. Matsumoto, N., Namiki, A. and I. Sumita, 2006, Influence of basal thermal anomaly on mantle convection, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 157, 208-222 (査読あり)

[学会発表] (計16件)

1. 小林、隅田、並木、高粘性流体中の気泡の振動・破裂で生じる空振の実験的研究、2008年度日本火山学会秋季大会、2008.10.11

岩手大学工学部

2. 隅田、マントル・外核・内核間の熱的相互作用：室内実験からの示唆、(招待講演)、2008年度日本地球化学会年会、2008.9.19、東大教養学部
3. 北村、隅田、乱流ブルームの形状進化に関する実験的研究、日本流体力学会年会2008、2008.9.4、神戸大学工学部
4. Sumita, I., Manga, M., Suspension rheology under oscillatory shear and its implications to remote triggering of earthquakes and eruptions, IAVCEI 2008, General Assembly, 2008.8.18, Reykjavik, Iceland.
5. 澁谷、隅田、液体中における粉粒体崩壊の実験、地球惑星科学連合2008年大会、2008.5.26、千葉幕張
6. 北村、隅田、乱流ブルームの形状進化：実験的アプローチ、地球惑星科学連合2008年大会、2008.5.25、千葉幕張
7. Sumita, I., Thermal coupling between the mantle, outer core and inner core: an experimental model, 2007 AGU fall meeting, 2007.12.12, San Francisco, USA.
8. Higashi, N., Sumita, I., Shear experiments of granular materials and implications for fault slip, 2007 AGU fall meeting, San Francisco, 2007.12.11, USA.
9. Sato, M., Sumita, I., Control of the volumetric and viscosity ratios of iron-silicate emulsion on the core formation process, 2007 AGU fall meeting, 2007.12.10, San Francisco, USA.
10. 北村、隅田、フラクタル次元を用いたブルーム進化のモデル実験、地球惑星科学連合2007年大会、2007.5.23、千葉幕張
11. 小林、隅田、室内火山モデルにおける脱ガス過程のモニタリング、地球惑星科学連合2007年大会、2007.5.22、千葉幕張
12. 隅田、回転球殻熱対流実験から得られる外核の流れ場への示唆、(招待講演)、地球電磁気・惑星圏学会第120回総会・講演会、相模原市産業会館、2006.11.4
13. 長山、隅田、フォームの超音波測定：予備的結果、地球惑星科学連合2006年大会、2006.5.15、千葉幕張
14. 東、隅田、回転型粘性率計を使ったスティックスリップ運動の実験、地球惑星科学連合2006年大会、2006.5.15、千葉幕張
15. 隅田、回転球殻熱対流の実験：レビュー、(招待講演)、地球惑星科学連合2006年大会、2006.5.14、千葉幕張
16. 隅田、マンガ、固体粒子を含む粘性流体の周期的変形に対するレオロジー、地球惑星科学連合2006年大会、2006.5.15、千葉幕張

[その他]

研究グループのホームページ

<http://hakusan.s.kanazawa-u.ac.jp/~sumita/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

隅田 育郎 (SUMITA IKURO)

金沢大学・自然システム学系・准教授

研究者番号：90334747