

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800257

研究課題名(和文) 厚いせん断帯の高速変形時の摩擦応答

研究課題名(英文) Relaxation processes of a thick granular layer at seismic slip rates

研究代表者

桑野 修 (KUWANO, Osamu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・研究員

研究者番号：30511969

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：臨界滑り量は破壊エネルギーを支配する主要因であるが、最近の実験では伝統的な低速滑りの実験で見出されるmm以下のものより何桁も大きな臨界滑り量をもつ現象が発見されている。これまでに研究代表者らは高速すべり域では粉体特有の多体粒子相互作用に支配される新たな摩擦メカニズムがあることを示してきた。本研究ではせん断速度1-3m/sの範囲の高速せん断領域で速度ステップ実験を実施し10mクラスの長大な臨界すべり量を持つ摩擦の緩和を見出した。この摩擦緩和はすべり速度がステップ状に減速した時も加速時と対称な応答を示し、それに対応して粉体層の厚みも変化していることから、粉体層の構造変化が関与していると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We conducted laboratory experiments designed to explore transient responses of a thick granular layer following a step change in slip velocity at seismic slip rates. Experiments were performed at constant normal stresses of 10- 30kPa using a ring shear apparatus with inner/outer diameters of 15mm/25mm. We measure the friction coefficient and thickness of glass beads layer at sliding velocities between 0.5 and 3 m/s. Experimental results show that the friction coefficient and layer thickness suddenly increases/decrease as sudden increase/decrease of sliding velocity and then exponentially decay to new steady state with characteristic slip length. We found that characteristic slip length is of the order of 10m. The response to a velocity step decreases simply symmetric to that to a velocity step increase.

研究分野：実験地震学

キーワード：断層 粉体 摩擦構成則

1. 研究開始当初の背景

大地震を起こす断層運動に関してここ10年以上問題とされているのは特性すべり量 D_c のギャップの問題である(嶋本ほか,2003,地学雑誌)。地震破壊のダイナミクスは断層の強度弱化量と強度弱化に必要な特性すべり量 D_c (図1)によって支配される。断層が高速破壊し大きな地震になるのか、それともゆっくり地震(Ide et al., 2006, Nature)になるのかは D_c で決まる(Yoshida and Kato, 2003, GRL)。また、地震破壊の前駆的すべり領域のサイズも D_c によって決まるとされている。このように地震学で重要な D_c であるが、その大きさは低速度(10^{-8} ~ 10^{-3} m/s)での岩石摩擦実験では 10^{-5} ~ 10^{-3} m であるのに対し、地震学的にはマグニチュード7程度の大地震で0.1~1mのオーダーであることが観測により明らかになっている(Ide and Takeo, 1997, JGR)。この室内実験と自然地震の D_c の数桁にも及ぶギャップが問題となってきた。

D_c のギャップは剪断帯の幅や長さの違いによる経験的なスケールリング則によって説明される事が多い(大中&松浦, 2002)。大中らの経験的スケールリング則では断層面粗さの特性波長と D_c が比例する。 D_c が1mの地震は1~100m規模の特性波長が存在すれば説明し得る。しかし、断層露頭をレーザーで直接計測した近年の研究(Sagy and Brodsky, 2007, Geology)では、累積変位量が1m以上の断層では摩擦によって特性波長の自己相似性が崩れていることが明らかになり、経験的スケールリングによる実験室からの外挿が適用できないことが分かってきた。

経験的スケールリング則とは別に、高速すべりに特異的な現象によって大地震の D_c が説明可能であるとする主張がなされている(嶋本ほか,2003,地学雑誌)。地震時の断層運動に匹敵するすべり速度1m/sオーダーで行われた高速摩擦実験では1~10mオーダーの D_c が報告されている。高速摩擦で D_c が長くなる原因については、種々の岩石・断層ガウジを用いた実験毎にゲルの生成説や鉱物の酸化を原因とする説のように、物質依存の個別的な解釈にとどまっている(DiToro et al., 2004, Nature; Han et al., 2007, Science)。高速摩擦実験で発見された長い D_c の物理素過程は解明されておらず、自然地震へ適用するのに不可欠なスケール依存性については未だ手付かずのままである。

通常の岩石摩擦実験で剪断層の厚み1mmオーダーであるが、Chambon et al.(2006,JGR)は、厚さ10cmの粉体層で剪断実験を行い、粉体層が厚い場合には D_c が数10cmにまで長くなることを示した。10cmの厚い粉体層で実験をした場合でも、ほとんどの歪みを担う剪断集中域(シアバンド)の幅はわずか数mmである。わずかにしか変形しないバルク領域の存在が長い D_c の原因と考えられているがそのメカニズムはまだ分かっていない。

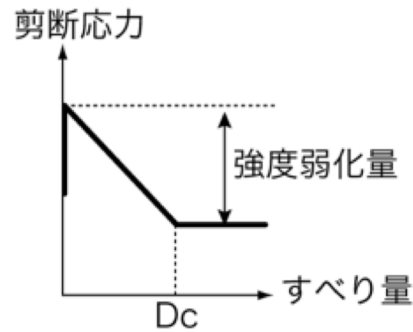


図1. 速度急変時(例えば静止状態から動き出す場合)の断層面上のすべりと応力の関係。強度弱化に必要なすべり量が D_c 。 D_c は断層の過渡的応答の特性距離である。

2. 研究の目的

本研究では、厚い粉体層の高速摩擦時の過渡的応答、すなわち D_c の速度依存性、層厚依存性を明らかにし、粉体層内部のその場観察と振動測定を組みあわせて、その物理メカニズムの解明を目指した。

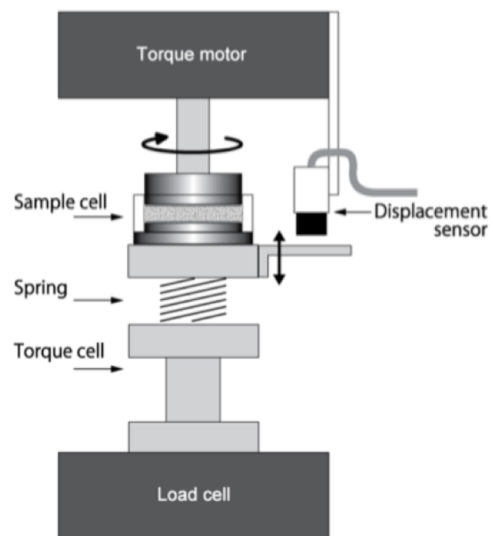
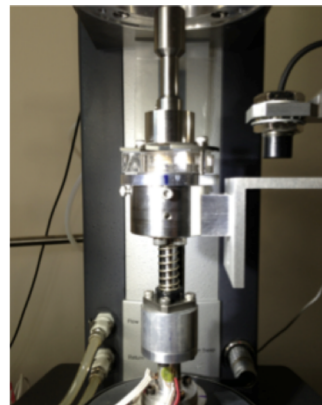


図2. 回転式摩擦試験機の写真と模式図。

3. 研究の方法

高速すべり(1m/s)を実現できる回転式試験機(図2)を用いて摩擦実験を行う。関与する物理過程をシンプルにするため粉体試料にはガラスビーズ(図3、平均粒径 270μ)を用いた。粉体試料は内径 $D_1=15\text{mm}$ 、外径 $D_2=25\text{mm}$ の同心円状のサンプルセル(図3)に詰めて剪断した。サンプルセルの上面(回転側)と下面(固定側)には、境界面でのすべりを避けるために、試料と同種の粒子を表面に1粒子層だけ接着した。サンプルセルの側面は透明な石英ガラス製で、粉体層内部を高速カメラで観察できるようになっている(図3)。

垂直荷重は 30kPa と低く設定することで、摩擦発熱の影響を極力排除する。この垂直荷重の条件ではガラスビーズの粉砕は起こらない。

速度ステップ時に垂直応力を一定に保つために、軸方向の支持にバネを導入した(図2)。

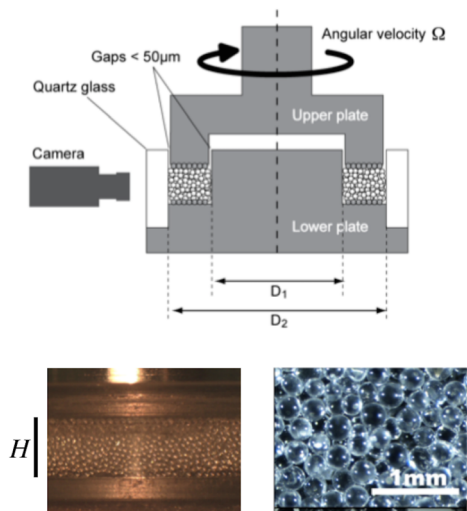


図3. (上) サンプルセルの模式図。(下左) 石英製の透明ジャケットを通した内部の観察。(下右) ガラスビーズ試料の写真。

4. 研究成果

- (1) 速度急変時の垂直応力の制御を改善した回転式粉体剪断試験機を用いてすべり速度 $1\text{--}3\text{m/s}$ の範囲の高速域での速度ステップ試験を実現した。粉体層の高速すべりにおいて 10m クラスの長大な臨界滑り量をもつ摩擦の緩和を見いだした(図4)。この摩擦緩和はすべり速度がステップ状に減速した時も加速時と対称な応答を示し、それに対応して粉体層の厚みも変化していることから、粉体層の構造変化が関与していると考えられる。

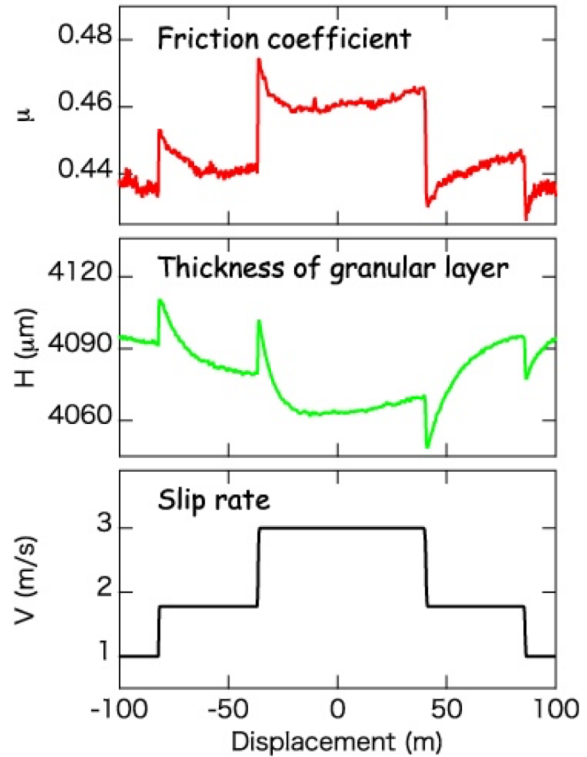


図4. 厚い粉体層での速度ステップ試験。上から摩擦係数、層厚、すべり速度。横軸はすべり変位。

速度急変に対する瞬間的応答の大きさは粉体層の厚みにほとんど依存しないが、緩和量は層が厚いほど大きいことが分かった。したがって層全体にわたる多体粒子系の応答が緩和過程を支配している可能性が高い。

- (2) 粉体層に剪断を与える回転プレートには粉体層の粒子と同じ粒子を剪断プレートの表面に接着した。そうして用意した剪断プレートの粗さの特徴的な短波長成分は粒子径が決めているが、長波長の粗さには個体差があった。長波長の粗さの違いによって速度ステップの応答に違いが出ることを確認した。壁面粗さの影響を詳細に調べるため、切削加工により壁面の形状をデザインした剪断プレートを作成した。せん断プレートに長波長の段差が無い場合には大きな摩擦緩和がみられなかった。壁面からの擾乱による振動強度が長い緩和には必要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

- (1) 桑野修、中谷正生、波多野恭弘、阪口秀、Friction of granular layer at seismic slip rates - Effect of wall disturbances、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 5 月 27 日、幕張メッセ(千葉県千葉市)
- (2) 桑野修、中谷正生、波多野恭弘、阪口秀、粉体層の摩擦応答に及ぼす壁面粗さの影響、日本地震学会 2014 年秋季大会、2014 年 11 月 24 日、朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
- (3) 桑野修、中谷正生、波多野恭弘、阪口秀、高速剪断される粉体層の緩和過程と粉体層厚、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 30 日、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
- (4) O. Kuwano, Masao Nakatani, Takahiro Hatano, Hide Sakaguchi, Relaxation processes of a thick granular layer at seismic slip rates, 2013 AGU Fall Meeting, 2013.12.9, Moscone Center (San Francisco CA, USA)
- (5) 桑野修、中谷正生、波多野恭弘、阪口秀、高速すべり速度ステップ実験で観察された長い Dc、日本地震学会 2013 年秋季大会、2013 年 10 月 9 日、神奈川県民ホール(神奈川県横浜市)
- (6) 桑野修、中谷正生、波多野恭弘、阪口秀、高速剪断される厚い粉体層の緩和過程、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 23 日、幕張メッセ(千葉県千葉市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑野 修 (KUWANO, Osamu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・
数理科学・先端技術研究分野・研究員
研究者番号：30511969