

複数のアスペリティをもつゲル同士のすべり素過程 Slip processes of gels with multiple asperities

山口 哲生^{1*}
YAMAGUCHI, Tetsuo^{1*}

¹九州大学
¹Kyushu University

複数のアスペリティをもつ弾性体同士を互いに接触させてせん断を加えたとき、どのようにすべりを起こすのか、という問題は、地震発生の素過程を理解するためには極めて重要かつ本質的な問題である。特に、「そもそもアスペリティとは何か?」「複数のアスペリティはいかに連動するか?」「アスペリティが階層的に配置されているとき、小アスペリティから大アスペリティにどのように破壊が継承されるか?」といった、2011年以降度々議論されている問題は、上記の疑問と密接に関連している。しかしながら、それに着目した研究は非常に少なく、実験研究に関しては皆無に近いのが現状である。そこで今回は、研究の第一歩として、やわらかい弾性体であるゲル材料の表面に複数の凹凸(アスペリティ)を作り、それらを互いにすべらせる実験を行なった。試料は、予め表面加に機械加工をしておいたプラスチック製の型にシリコーンゲル(CY-52-276, 東レダウコーニング, A液:B液=1:4, せん断弾性率 $G = 100$ kPa程度)を流し込み、90℃で5時間加熱して硬化させた。ゲルの高さおよびすべり方向の長さは100mm, 奥行き方向(厚み)は20mmである。次に、作成したゲルを固定するため、摩擦面の反対側の面を土台となるガラス板に接触させ、上述のゲルを接触面に流し込み、再び加熱・硬化させて接着した。できたガラス板付きのゲルは、その後ジグに固定し、(垂直荷重ではなく)垂直変位を一定に保ったまま、一定速度 $V (= 1 \mu\text{m/s} - 1\text{mm/s})$ ですべり面に沿って変位させ、すべり挙動をビデオカメラで観察した。その結果、すべりイベントは凹凸の配置および密度に強く依存し、高速にすべりが伝播する様子やゆっくりすべりなどが観察された。詳細は当日報告する。

キーワード: アスペリティ, 素過程, ゲル, 高速破壊, ゆっくりすべり, ランダムネス
Keywords: asperity, elementary process, gel, fast rupture, slow slip, randomness

断層ガウジにおける粒子サイズの偏析 Grain size segregation in a fault gouge

伊藤 諒^{1*}; 波多野 恭弘¹

ITO, Ryo^{1*}; HATANNO, Takahiro¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

断層ガウジの構造は地震滑り中の多くの情報を含んでいると考えられている。1999年に集集地震が発生したチェルンブ断層ガウジでは、粒子サイズの偏析が見つかった [Boulier et al. G³ 10, Q03016 (2009)]。粒子サイズの偏析には十分な空隙が必要であり、粒子サイズの偏析はガウジ流動化の証拠と考えられていた。また、長い変位 (~12m) と垂直抗力 (~2MPa) を与えた実験室の摩擦実験でも、粒子サイズの偏析が見つかった [Ujiie and Tsutsumi GRL 37, L24310 (2010)]。ここでは、ガウジ流動化によって粒子サイズの偏析が発生するかどうかを知るために、断層ガウジのモデルを作って数値計算を行った。その結果、1MPaの垂直抗力、1m/sの速度という条件では0.1sで偏析が完了した。偏析は重力がなくても発生しており、偏析が発生するかどうかを決定するのは非線形な速度勾配であった。粉体が降伏応力を受けても偏析が発生しており、偏析が発生していてもガウジ流動化が発生しているとは言えない。

キーワード: 偏析, 断層ガウジ, 非線形速度勾配

Keywords: segregation, fault gouge, nonlinear velocity gradient

Friction of granular layer at seismic slip rates - Effect of wall disturbances Friction of granular layer at seismic slip rates - Effect of wall disturbances

桑野 修^{1*}; 中谷 正生²; 波多野 恭弘²; 阪口 秀¹

KUWANO, Osamu^{1*}; NAKATANI, Masao²; HATANNO, Takahiro²; SAKAGUCHI, Hide¹

¹ 独立行政法人海洋研究開発機構, ² 東大地震研

¹MAT/JAMSTEC, ²ERI, Univ. of Tokyo

A natural fault has the cataclasite core zone, along which shear deformation concentrates. Rheology of these granular matters thus provides us an important insight in considering the nature of friction on faults from a microscopic point of view. In the past two decades, experiments conducted at sub - seismic to seismic slip rates (mm/s to m/s) revealed two remarkable phenomena of high-velocity rock friction; very long critical slip distance (D_c) of the order of 1-10m/s and the considerable weakening due to mechanochemical effects by frictional heating. Recently, Chambon et al.[2006, JGR] conducted friction experiment with very large shear displacement experiment on a thick granular layer, and reported significant slip-weakening behavior active over decimetric slip distances. However, the relation between long D_c observed in a thick granular layer and long D_c in the high-velocity friction is still not clear. We designed laboratory experiments to explore transient responses of a thick granular layer following a step change in slip velocity at seismic slip rates. We use simple particle and choose relatively low normal stress to exclude the possible mechanochemical effects caused by frictional heat. We find that friction coefficient and layer thickness show similar response that is symmetry with respect to velocity changes, and D_c is of the order of 10m. It appears that these responses are attributed to dynamics of granular matter. We report effect of wall boundary disturbance on the transient responses of granular layer.

速度状態依存摩擦則の非平衡熱力学的解釈
Non-equilibrium thermodynamical interpretation for rate- and state-dependent friction law

光井 能麻^{1*}; VAN, Peter¹; 波多野 恭弘²
MITSUI, Noa^{1*}; VAN, Peter¹; HATANO, Takahiro²

¹ ハンガリー科学アカデミー Wigner 物理学研究センター, ² 東京大学地震研究所

¹Wigner Research Centre for Physics, Hungarian Academy of Sciences, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The rate- and state-dependent friction law is based on the experimental results of rock sliding friction. This law unifies two types of rock experiment results; the first one is the time dependence of static coefficient of friction (Dieterich, 1972) and the second one is slip velocity dependence of the dynamic coefficient of friction (Dieterich, 1978). This law is reproduced by using two equations called as constitutive law and evolution law.

Several versions of evolution law have been proposed in order to reproduce the experimental data better. However, none of them are completely satisfied.

We analyze this rate- and state-dependent friction law for the velocity-step and the healing tests from a thermodynamic point of view. Assuming a logarithmic deviation from steady-state, both results are reproduced. The proposed system of equations is a unification of the classical models (Dieterich, 1979; Ruina, 1983).

キーワード: 摩擦, 構成則, 非平衡熱力学, 発展則

Keywords: friction, constitutive law, non-equilibrium thermodynamics, evolution law

衝撃せん断破壊に伴う各種岩石の発光について Luminous phenomena due to impact shear fracture of various rocks

榎本 祐嗣^{1*}; 山辺 典昭²; 水原 和行³; 森 誠之⁴
ENOMOTO, Yuji^{1*}; YAMABE, Noriaki²; MIZUHARA, Kazuyuki³; MORI, Shigeyuki⁴

¹ 信州大学 信州科学技術総合振興センター, ² 信州大学 繊維学部, ³ 東京電機大学工学部, ⁴ 岩手大学 工学部
¹Shinshu University, Shinshu Advance Science and Technology Center (SASTec), ²Shinshu University, Department of Textile Engineering, ³Tokyo Denki University, ⁴Iwate University, Department of Engineering

本震に限らず前震や余震においても、その震源域では衝撃的なせん断変形・破壊が起り、それに伴って電磁気/発光などの物理化学的現象が生じうる。発光のメカニズムを把握する目的で、シャルピー衝撃試験機を用いた各種岩石のせん断破壊に伴う発光を高感度 CCD カメラで観察した。岩石発光は地下では確認できないものの、地震に伴った山体崩壊時の目撃例が歴史地震史料から知ることができる(例えば、1707 宝永地震での五剣山の崩壊、1792 島原大変での眉山の崩壊、1909 江濃地震での伊吹山の崩壊など)。発光現象が見られたこれらの山の構成岩は、これまでラボ実験で多く使われてきた花崗岩とは限らない。むしろ凝灰岩や火砕岩などが多い(眉山など)一方で、石灰岩(伊吹山)などもある。

ラボ実験の条件は大気中室温、衝突速度 4.0m/s、衝突時の運動エネルギー 25J とし、衝撃時の発光を高感度 CCD カメラ (ISO 感度:25,600) を用い衝突前後約 1 秒間シャッター開放して撮影した。実験に用いた岩石種は、流紋岩、花崗岩、蛇紋岩、溶融凝灰岩、石灰石、ドロマイトなど 11 種類である。実験の結果、特に黒雲母を含む花崗岩や流紋岩に強い発光があったほか、石灰岩(伊吹山産)や火砕岩(眉山産)でも観察できたが、溶結凝灰岩、蛇紋岩、シラスは発光を確認できなかった。併行して行った黒雲母花崗岩からの熱刺激電子放射 (TSEE) 実験で黒雲母からの TSEE が顕著なことを確認した。さらに昇温脱ガス質量分析の結果、火砕岩には硫化水素などの可燃性ガスが検知された。これらの結果から判断すると、発光の原因は単一ではなく、イオン化・放電、熱ルミネッセンス、吸蔵可燃ガスの燃焼が考えられる。

キーワード: 発光現象, 岩石せん断破壊, 地震電磁気, シャルピー衝撃試験

Keywords: luminous phenomena, shear fracture of rocks, seismo-electromagnetic, Sharpyi impact test

Roweの法則を基にした摩擦の不安定性に関する統一的理解 Unified understanding of frictional instability based on Rowe's theory on constant minimum energy ratio

平田 萌々子^{1*}; 武藤 潤¹; 長濱 裕幸¹
HIRATA, Momoko^{1*}; MUTO, Jun¹; NAGAHAMA, Hiroyuki¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻
¹ Dept. Earth Science, Tohoku University

1. はじめに

摩擦の不安定性に関して、すべり速度・状態依存摩擦則（摩擦の速度応答性）や断層ガウジ層内に発達する剪断組織に着目した研究が多く行われてきた (e.g., Dieterich, 1979; Byerlee et al., 1978). また, Ikari et al. (2011) では摩擦の速度応答性が剪断組織の発達に伴い遷移するといったことが示唆された. ただし摩擦の速度応答性と剪断組織発達の関係の理論背景は明らかにされていない. その理論背景を理解するためには, 従来定性的に議論されてきた剪断組織発達を含む断層ガウジの変形過程を定量的に評価する必要がある. そこで, 本研究では粒状体の変形過程をエネルギーの観点から定量的に記述した Rowe のエネルギー比最小の法則 (Rowe, 1962) に着目する. さらに, ガス圧試験機を用いた模擬断層ガウジの摩擦実験を行い, 理論の適応性を検討する. 以上から, 摩擦の不安定性また粒状体の変形過程を解析力学および熱力学の観点から定量的に議論することを目的とする.

2. 理論背景

ブロックスライダーなどの系の安定性は減衰の非線形効果によって支配される (e.g., Thompson, 1982). すなわち安定すべりは系が減衰を受けた結果である. 一方, 負の減衰すなわち自励振動が発生するとき, 不安定すべりがもたらされる. こうした振る舞いは減衰係数によって決定され, 減衰係数が正のとき系は安定的に振る舞う. さらに, 系の運動方程式より, 変位は減衰係数によってコントロールされることは明らかである. 減衰係数は, 系に作用する摩擦力に由来する. つまり, 減衰係数の正負は摩擦力の向きを意味している. ここで, 摩擦の速度応答性は, 摩擦係数に由来するものであることから, 接線方向の力 (摩擦力) と垂直方向の力の比で表現されると考えた. 従って, 摩擦の速度応答性が減衰係数と密接に関連することは明白である. さらに, 新関・佐武 (1981) および Landau and Lifshitz (1976) より, 系に蓄積されるエネルギーとエネルギー比 (系に供給されるエネルギーと外部に対して消費されるエネルギーの比) との関係性が得られた. これらの結果より, エネルギー比と系の安定性との関連付けを行うことが可能となり, エネルギー比が取りうる値が明らかとなった. エネルギー比が1より大きな値となると, 系は安定的な挙動を示し, エネルギー比が0以上1未満であるとき系は不安定的な挙動を示す.

3. 摩擦実験

本研究では, ガス圧試験機を用いた模擬断層ガウジ (石英) の摩擦実験を12回実施した. 封圧は140-180 MPaである. 試料には直径20 mm, 長さ40 mmの円柱状斑れい岩を長軸から50度の方向でプレカットし, 石英ガウジを0.1もしくは0.2 g封入したものである. 歪速度は一定 ($10^{-3}/s$) である. 最大及び最小圧縮軸方向のガウジのエネルギー (応力×歪速度) を測定するためにガウジ直上に歪ゲージを3枚設置した. 所定の封圧に到達した後, 載荷と載荷停止を繰り返した. 載荷停止は差応力が190, 450, 640, 800 MPaに達した時点で実施した. 4回載荷・載荷停止を反復させた後は歪ゲージが切れる, もしくは不安定すべりが発生するまで載荷した. 歪ゲージが切れた場合には新たに歪ゲージを設置し直し, 再度同様の操作を行った.

4. 実験結果及び議論

摩擦実験の結果, 試料が外部に対して成すエネルギーは外部から供給されるエネルギーと線形関係にあることが分かった. すなわちガウジのエネルギー比は一定値をとる. これは Rowe の法則と整合する. つまり, 模擬断層ガウジは Rowe の法則に従って変形が進行することが明らかとなった. ただし, より詳細にみると各応力状態に応じてエネルギー比の変化が認められた. これは各応力状態における粒子配列を反映するものと考えられる. なぜならば, エネルギー比は内部摩擦角の関数としても表現されるからである. 熱力学の観点よりエネルギー比の変化は減衰係数の変化を意味している. さらに上述の通り, 摩擦の速度応答性は減衰係数の変化と密接に関連する. すなわち, 歪の局所化による組織発達がエネルギー比の変化をもたらす, 最終的に摩擦の不安定性が変化することが明らかとなった.

5. 結論

理論的・実験的に摩擦の不安定性を検討した. その結果, これまで関係性が示唆されたもののその理論背景が明らかにされていなかった摩擦の速度応答性と剪断組織発達との関係性について, Rowe の法則を基にして減衰係数を仲介することでその物理的またエネルギー論的背景を明らかにすることができた.

キーワード: 摩擦の不安定性, 模擬断層ガウジ, 摩擦実験, ガス圧試験機, Rowe のエネルギー比最小の法則

SCG59-06

会場:106

時間:5月28日 09:00-09:15

Keywords: frictional instability, simulated fault gouge, friction experiments, a gas-medium apparatus, Rowe's theory on constant minimum energy ratio

鉛直加振下における粒子・液体系の流動化条件：粘性率依存性 Effect of liquid viscosity on the shaking condition required for the granular medium fluidization

隅田 育郎^{1*}; 安田 奈央¹
SUMITA, Ikuro^{1*}; YASUDA, Nao¹

¹ 金沢大学大学院 自然科学研究科

¹ Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University

液体で飽和した粒子層が地震の振動により液状化、流動化することは良く知られている。堆積物中に見られる「火炎構造」もこのようにして形成したと考えられている。実際、上層が細粒で下層が粗粒な2層からなる液体に浸された粒子層を鉛直方向に振動させると「火炎構造」が形成される。これは上層の低浸透率層の直下で液体が一時的に貯留されるため、重力不安定が起きるためである。私達はこのような系について加速度、周波数の組み合わせをそれぞれ2桁、3桁と幅広く変えた振動実験を行い、「火炎構造」が出来るためには臨界加速度があること、そしてこの臨界加速度が周波数に依存し、約100 Hzで極小となることを示した(Yasuda & Sumita, 2014)。類似した現象は、より高粘性のマグマの場合でも起きる可能性がある。本発表では、Yasuda & Sumita (2014)と同様の実験を高粘性の場合について行い、流動化条件を求めた結果について報告する。

高粘性流体として15 mPasのグリセリン水溶液を用いる。この場合ストークス沈降速度は水の1/17となるため、対応して振動時間を17倍長くした。振動の加速度、周波数を変えて実験を行ったところ、「火炎構造」が出来るための臨界加速度が水の場合と同じく100 Hzで極小になることが分かった。その一方で高粘性の場合には水の場合と比較して臨界加速度値が小さくなることが分かった。また不安定の波長が短くなり、ストークス沈降の違いをスケールすると不安定の成長速度がむしろ速くなることが分かった。

「火炎構造」が出来るための臨界加速度が100 Hzで最小になることは重力不安定が成長するために十分な液体が2層境界で貯留されるためには、振動のエネルギーとジャークの両方が臨界値以上であることが必要と考えたと説明出来る。粘性が高い程、臨界加速度が小さくなることは流体潤滑の効果と理解出来る。実際、レオメータを用いて粒子・液体系をせん断したところ、高粘性流体で飽和した場合の方が低応力で液状化することを確認した。本実験で起きた重力不安定は低粘性、低密度の薄い液体の層の上に高粘性(粘性率が低粘性層の ϵ 倍)、高密度の厚い粒子層がある場合と近似することが出来る。この場合、不安定の波長(λ)は $\lambda \propto \epsilon^{1/3}$ とスケールされることが線形論から分かっている。この結果を応用すると、高粘性の場合に λ が短くなることは、粘性が大きくなるに伴い、 ϵ が小さくなると考えると説明できる。 ϵ が小さくなることは、高粘性になる程、粒子層が液状化しやすい事実と整合的である。

本実験は高粘性の液体で浸された粒子・流体系では流体潤滑により、振動が十分長い時間継続すれば、流動化が水の場合よりもかえって起き易くなることを示している。これは地震による結晶を含むマグマの液状化、及び誘発噴火にも効果的に働く可能性がある。

引用文献

Yasuda, N., Sumita, I., 2014, Shaking conditions required for flame structure formation in a water-immersed granular medium, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1:13.

キーワード: 地震, 液状化, 流動化, マグマ, 誘発噴火, 振動実験

Keywords: earthquakes, liquefaction, fluidization, magma, triggered eruption, shaking experiments

可視化した応力鎖の解析による粉体層における締固め現象の理解 Understanding characteristics of the granular compaction by analyzing visualized stress chain

飯川直樹^{1*}; バンディ マヘッシュ²; 桂木 洋光¹
IIKAWA, Naoki^{1*}; BANDI, Mahesh²; KATSURAGI, Hiroaki¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科, ²沖縄科学技術大学院大学
¹Nagoya University, Environment, ²OIST

Granular material is defined by an ensemble of many solid grains. Although the grains composing granular material are solid, granular material sometimes behaves like fluid [1]. The rheological property of granular matter is very complex in general. Granular matter deeply relates to various phenomena occurring on the earth and planetary environments. For example, an avalanche or a liquefaction of ground caused by vibration such as earthquake relates to the complex nature of granular behavior. In this study, we focus on the granular compaction induced by vibration. Granular compaction is a peculiar phenomenon observed in various granular related behaviors, it is usually defined by the increase of the packing fraction of a granular bed.

To reveal the granular behavior, researchers have carried out various experiments. As a result, deeper understandings for the granular behaviors have been obtained. However, these understandings have not yet been perfect. In general, image analyses and data acquisition by sensors are used to investigate the granular behavior. For example, we can measure the packing fraction or the particle velocity in granular material from the former method [2]. In addition, the data such as pressure or acoustic wave on granular material can be obtained from the latter method [3]. However, we cannot completely understand the characteristics of individual particles from these macroscopic quantities. By using photoelastic discs, recent studies succeed in measuring the force applied to particle at each contact point and the stress distribution in a bulk granular material, so-called stress chain in the case of two dimension [4].

In this study, we carry out the experiment of tapping-induced granular compaction using photoelastic discs for granular material to understand granular compaction. In the experiment, we add vertical tapping to photoelastic discs piled layer in two-dimension (2D) experimental vessel. For this experiment, we use 2D experimental vessel made of acrylic plates and fill it with bidisperse photoelastic discs. To lead to the granular compaction, we tap the experimental vessel by using an electromagnetic vibrator. We systematically vary the tapping condition, the duration of tapping impulse and applied maximum acceleration. As a result, the degree of granular compaction varies depending on tapping condition. By taking and analyzing pictures of this 2D experimental vessel in the bright and dark fields at initial and tapped states, we obtain following results.

- (1) Although both the packing fraction and total internal forces in the granular pile increase by the tapping, the latter saturates more quickly than the former.
- (2) The applied forces on each particle become large, but the total length of the stress chain is almost constant during the granular compaction caused by tapping.
- (3) The degree of granular compaction strongly depends on the applied maximum acceleration rather than the number of tapping or the duration of the tapping pulse.

Reference

- [1] Jaeger, H. M., Nagel, S. R., and Behringer, R. P. (1996). "Granular solids, liquids, and gases." *Rev. Mod. Phys.*, 68, 1259-1273.
- [2] Philippe, P. and Bideau, D. (2002). "Compaction dynamics of a granular medium under vertical tapping." *Euro. Phys. Lett.*, 60, 677.
- [3] Matsuyama, K. and Katsuragi, H. (2014). "Power law statistics of force and acoustic emission from a slowly penetrated granular bed." *Nonlinear Processes in Geophysics*, 21, 1-8.
- [4] Bandi, M. M. and Rivera, M. K. and Krzakala, F. and Ecke, R. E. (2013). "Fragility and hysteretic creep in frictional granular jamming." *Phys. Rev. E.*, 87, 042205.

キーワード: 粉体, 応力鎖, 締固め, 光弾性

Keywords: granular matter, stress chain, granular compaction, photoelasticity

珪長質マグマの粘性流動と摩擦すべり：火山の噴火様式の多様性に対する意義 Transition between frictional sliding and viscous flow in magmatic fractured zone

奥村 聡^{1*}; 上杉 健太郎²; 中村 美千彦¹; 佐々木 理¹

OKUMURA, Satoshi^{1*}; UESUGI, Kentaro²; NAKAMURA, Michihiko¹; SASAKI, Osamu¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 高輝度光科学研究センター

¹Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Japan Synchrotron Radiation Research Institute

火道内を上昇する珪長質マグマ中では変形が集中し、その領域では脆性破壊が起こる (e.g., Dingwell, 1996 Science). このような変形集中が火道壁付近で起こり破砕帯が形成されると、弱い破砕帯を利用して急激なマグマの上昇が可能となる (Okumura et al., 2013 EPSL). さらに、変形は脱ガス効率を大きく上昇させるので、逆に変形集中帯の形成が、内部の変形・脱ガスを抑制し爆発性を維持させる。一方で、そのような潤滑作用が抑えられマグマが均質に流動すると、変形による脱ガス効率の促進によって内部のマグマが緻密化し溶岩が形成される。このような緻密なマグマの形成は、溶岩噴出へとつながるだけでなく、後から上昇してくるマグマに対する蓋となり過剰圧を発生させ小規模な爆発噴火を引き起こすかもしれない。このようにマグマ破砕帯の流動特性を理解することは噴火様式の多様性の原因を解明するために不可欠であるが、破砕帯が粘性流動するか摩擦すべりするかを決定づけている要因は明らかにされていない。本研究では、高温高压変形実験装置を放射光 X 線ビームライン (BL20B2) と組み合わせることでマグマの変形を直接観察しマグマ破砕帯の流動様式を明らかにすることを目的とした。ここでは二つのタイプの実験を行った。一つ目は、変形集中と破砕帯の形成を観察するための実験で、出発物質にはコア状の流紋岩組成ガラスを用いた。二つ目の実験では、破砕帯の流動様式、つまり粘性流動するか、摩擦すべりするかを直接観察するためにガラス粉体 (75-250 μm) を用いた変形実験を行った。変形実験はピストン回転型試験機を用いて、温度が 800-900 °C、軸圧が < 20MPa の条件で行った。ピストンの回転速度は、0.1~10rpm で、すべり速度に直すと $2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ となる。粘性流動した場合の歪速度は最大で 1 s^{-1} となる。また実験温度は用いた出発物質のガラス転移点 (~600 °C) よりも高温である。一つ目の実験より、初め試料全体にクラックが入り、その後ピストン付近へ変形が集中すること、変形集中帯では破砕が進行し破砕帯が形成されるなどが分かった。また、速度一定下では、一旦破砕帯が形成されるとヒーリングせず、摩擦すべりに支配されることが示された。二つ目の実験より、ガウジの流動様式は温度、変形速度、軸圧に依存し、高温、低速度、高軸圧ほど粘性流動が支配的になることが分かった。例えば、摩擦すべり条件下で変形速度だけを低下させていくと粘性流動へと変化した。本研究で明らかになった粘性流動と摩擦すべりの変化条件を火道上昇するマグマに適用すると、火道浅部での破壊帯形成と摩擦すべりはマグマ上昇の潤滑剤となりえることが分かる。一方で、上昇中に破砕帯がヒーリングすると、マグマ上昇にブレーキがかかるため溶岩噴出や、破砕とブレーキが繰り返せば周期的なマグマの上昇を引き起こすかもしれない。

キーワード: 珪長質マグマ, 粘性流動, 摩擦すべり, X 線ラジオグラフィ

Keywords: Silicic magma, Viscous flow, Frictional sliding, X-ray radiography

エイジングサスペンションの流動不安定 Shear-induced instability of an aging suspension

黒川 愛香^{1*}; ビダル ヴァレリー²; ディボ ティボ³; マンネビル セバスチャン²; 栗田 敬¹
KUROKAWA, Aika^{1*}; VIDAL, Valerie²; DIVOUX, Thibaut³; MANNEVILLE, Sebastien²; KURITA, Kei¹

¹ 東京大学地震研究所, ² リヨン高等師範学校, ³ ポールパスカル研究センター

¹Earthquake Research Institute, ²Ecole Normale Supérieure de Lyon, ³Centre de Recherche Paul Pascal

In general, magma is one of typical examples of complex fluids. First of all it is a multi-phase mixture of contrasting physical properties. The volume fraction can easily change with the environmental conditions so that interactions between the constituent phases are highly variable. The characteristics make the magma complex. Rheology is an intrinsic property characterizing the complex fluid. Magma also exhibits non-Newtonian behaviors such as the existence of yield stress [M. Saar et al., 2001], shear-thinning [H. Sato, 2005], thixotropy, which is a kind of aging property [H. Ishibashi and H. Sato, 2007], and shear localization [S. Okumura et al., 2013, A. Hale and H. Muhlans, 2007] under certain conditions. Consequently magma flow is expected to be unstable by control of complex rheology and it might be related volcanic oscillation phenomena such as volcanic tremor. However there are few studies, which focus on flow behaviors caused by the complex characteristics of magma rheology so far since it is difficult to control flow in magma and obtain reproducible results at high pressure and high temperature.

For this reason, instead of using real magma but by using analog material this study aims to reveal possible control of complex rheology in magma flow dynamics. We particularly focus on shear-induced instability of the suspension such as shear-banding phenomena to drive unstable and oscillatory flows. As an analog material we utilized an aging suspension of fine silica particles (Ludox TM-40, Aldrich) with salt water. The suspension is known to have yield stress, aging behavior and thixotropic natures [Moller et al., 2008], which can be an analog for the magma complexity. A series of rheological experiments with the use of a rheometer (AR1000, TA Instrument) and 1D and 2D ultrasonic speckle velocimetry (USV) [S. Manneville, 2004] have achieved to observe global rheology and local velocity profiles in the flow simultaneously. By results from the experiments under various conditions changing applied shear rate and aging time, we conclude that the flow behavior can be divided into three types; fluidization, unstable shear banding, and stable shear banding. In the cases of fluidization and unstable shear banding, shear stress fluctuates when the width of shear band and slip velocity show large shift. In this way, it was revealed that fluctuation of shear stress could occur in this kind of suspension and both shear-banding and wall-slip are responsible for driving the shear-induced global instability.

Keywords: aging, rheology, suspension, shear band

柱状節理形成過程における熱弾性の基本的側面 Fundamental aspects of the thermo-elasticity in the columnar joint formation

寅丸 敦志^{1*}; 濱田 藍¹
TORAMARU, Atsushi^{1*}; HAMADA, Ai¹

¹九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

Columnar joints form as a result of unidirectional propagation of cooling and the consequent thermal contraction. So far in interpreting the columnar regular structures at nature, two hypotheses are assumed about the fracture threshold and propagation direction: 1) fractures take place at a certain temperature, that is, at the isothermal surface corresponding to the yield strength (fracture threshold hypothesis). 2) fractures propagate perpendicular to the isothermal surface (propagation direction hypothesis). However, those hypotheses have not been proved on the basis of the thermo-elastic theory. In this paper, we analytically show, using the thermo-elastic theory in 2D, that these two hypotheses are correct under the specific circumstances. Firstly we derive the relation between the stress field and temperature field in terms of principal stress difference, stress invariant and temperature. From the relation, we understand that the principal stress difference contributing to the crack initiation is exactly equivalent to a certain temperature when the minimum principal stress is small enough. The temperature corresponding to the crack initiation, which is determined by the yield strength, defines the fracture isotherm or crack front. Secondly we derive the direction of maximum extension on the fracture isotherm as function of azimuthal angle. If the stress is completely released in the region where fracturing already occurred and cracks are present, that is, where temperature is less than fracturing temperature, then the shear stress on the fracture isotherm must be zero, and one of principal stress is perpendicular to the fracture isotherm and another principal stress is along the fracture isotherm. These geometric relations naturally mean that the direction of maximum extension is perpendicular to the fracture isotherm. Numerical calculations well explain morphological features derived from our analog experiments, indicating that two hypotheses work correctly in real systems.

キーワード: 柱状節理, 熱弾性, 熱応力

Keywords: columnar joint, thermo-elasticity, thermal stress

アナログ実験による entablature の素形態の再現 Analogue experiments of reproducing morphological features of entablature in columnar joints

濱田 藍^{1*}; 寅丸 敦志²

HAMADA, Ai^{1*}; TORAMARU, Atsushi²

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, ²九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

There are various types of morphological features in columnar joints, i.e. column width, column configurations (straight or curved) and the directions of developed columns. We have conducted analogue experiments by use of potato starch and water mixture to reproduce morphological characteristics of entablature and we have found the following two results: 1) when the desiccation rate increases instantaneously on the half way of columns development, the number of columns increases by column nucleation, 2) the direction of developing columns is perpendicular to the isopleth surface of the same water concentration with the exception under particular circumstances of stress field. In order to observe the time evolution of column development in the case of the spatially inhomogeneous desiccation rate, we used the X-ray CT (MCT 225 made by Nikon, owned by Fukuoka Industrial Technology Center) at a certain interval of time during the development of columns. We prepared potato starch and distilled water mixture with the same mass 150g each in a plastic cylindrical container. The light source (60 W lamp) is located at 3 cm above the surface of mixture thereby the thermal heterogeneity on the surface is made due to the highest desiccation rate just below the lamp and the lowest desiccation rate at the edge of circular sample surface. We took the X-ray CT images every 2 or 3 hours during the daytime to observe the change of water distribution by the gray scale intensity together with crack developments in the mixture with time. As a result, there is a higher brightness area like a crescentic shape at upper part of the mixture, which indicates lower concentration of water than at lower part, before the initial generation of cracks on the surface of the mixture. The area in which cracks develop coincidentally take a similar crescentic shape. The lower area below the crack front indicates homogeneous brightness. The crack front advanced to the depth with keeping its crescentic shape and cracks developed not perpendicular to the crack front, indicating the discrepancy with the theoretical prediction for the crack direction under the simple condition. This discrepancy may be caused by the mechanical effect at the edge of the plastic container. In addition, we conducted the experiments in the case of drying from 3 non-parallel surfaces which provide spatially homogeneous desiccation rate each. We put the mixture into a triangular prism shaped metal frame. Two sides are dried through the membrane (surface B and C) and the other top side is dried directly on the air (surface A). We conducted experiments in the cases that the angle θ between surfaces B and C is 60 degree and 90 degree each. As a result, when θ is 90 degree, columnar joints developed from surface A, B and C simultaneously merge in the center of the mixture with curved structure which are fan-like structure at the edge of the triangle. From the comparison with the theoretical results, the characteristics of curved structure can be explained by the condition that a crack propagates perpendicular to the iso-concentration surface. We will investigate the interaction of columns developed from different directions in terms of angles between the desiccation surfaces as a parameter.

Keywords: columnar joints, analogue experiment, entablature, morphological features

氷・岩石混合物のレオロジーに関する実験的研究：宇宙雪氷学的応用 Experimental study on the rheology of ice-rock mixtures: Implications for cosmoglaciology

保井 みなみ^{1*}; 荒川 政彦¹YASUI, Minami^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹¹ 神戸大学大学院理学研究科¹ Graduate School of Science, Kobe University

太陽系に存在する氷天体は、その形状、密度、表面地形が多様性に富んでいる。例えば、木星以遠の氷衛星の密度は、そのサイズにより 300~3000kg/m³ と変化し、密度が小さいと残存空隙率を保持しており、密度が大きいと氷と岩石が混合していると考えられている。また氷衛星は、その成長過程において重力が増大し、天体内部の応力が構成物質の強度を超えると、塑性変形や脆性破壊を起こして、いびつ形状から重力的に最も安定な球形へと変化すると考えられている。さらに巨大氷衛星や火星極域の表層には、地球上でも見られるような氷河地形や、極めて大規模な断層地形が観測される。この様に、氷天体の密度・形状変化や表層地形のテクトニクスは、それらの構成物質のレオロジーや破壊により支配される。

氷天体の進化過程や表層地形のテクトニクスに関連したレオロジーの研究は、主に純氷を用いて行われてきた。特に純氷の流動則は、室内実験や野外観測によって、その温度依存性や結晶サイズ依存性が詳細に調べられている。しかし、実際の氷天体は氷と岩石が様々な含有率で混合し、さらに小さな氷天体には内部に空隙が残存すると考えられている。さらに氷天体の温度は、表面温度は放射平衡温度から推定できるが、内部温度は表面温度よりも高く、その温度分布はその氷天体の熱史から推測するしかない。従って、氷衛星や火星極域の進化過程及び表層地形のテクトニクスを研究するためには、氷・岩石混合物のレオロジーをできるだけ広いパラメータ範囲で調べ、その依存性を系統的に明らかにする必要がある。そこで本研究では、氷・岩石混合物の静的変形実験を行い、レオロジー特性の中でも惑星科学的に重要である流動則に対する岩石含有率、空隙率、温度依存性を系統的に調べた。

試料は、市販氷を直径 710 μ m 以下に砕いた氷粒子と直径 1 μ m のアモルファスシリカビーズを混ぜて作成した。空隙率を変化させるため、試料は 2 種類の方法で作成した。1つは真密度試料と呼び、空隙率を 0% とするために氷粒子とシリカビーズの混合粉末に水を混ぜて作成した。シリカ体積含有率は 0~0.63vol.% と変化させた。もう 1つは多孔質試料と呼び、水を使わずに氷粒子とシリカビーズの混合粉末を圧密して作成した。シリカ質量含有率は 0, 30, 50wt.%、空隙率は 0~25% と変化させた。実験は、北海道大学低温科学研究所の低温室内に設置された変形試験機を用いて行った。温度は -10 $^{\circ}$ C から -25 $^{\circ}$ C とし、等歪速度一軸圧縮実験を歪速度 $8.7 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$ から $8.3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の範囲で行った。

実験では、得られる応力-歪み曲線上の最大応力 σ_{max} と歪速度 $d\epsilon/dt$ の関係から、流動則 $d\epsilon/dt = A_0 \exp(-Q/RT) \sigma_{max}^n$ を決定し、そのシリカ含有率、空隙率、温度依存性を調べた。シリカ含有率依存性については、真密度試料と多孔質試料でその依存性が異なった。真密度試料については、シリカ含有率の増加とともに最大応力が大きくなった。一方、多孔質試料については、シリカ含有率の増加とともに最大応力が小さくなった。空隙率依存性及び温度依存性については、空隙率が増加するほど、温度が上昇するほど、最大応力は小さくなった。これらの結果から、流動則のパラメータ A_0 , Q , n を求めることができる。その結果、ベキ指数 n と活性化エネルギー Q はシリカ含有率のみに依存することがわかった。ベキ指数 n は、シリカ体積含有率が 0.15 以上になると純氷 ($n=3$) の約 2 倍大きくなった。活性化エネルギー Q は、シリカ含有率の増加とともに大きくなった。一方、定数 A_0 はシリカ含有率と空隙率に依存し、 $A_0 = B \exp(\alpha\phi)$ (ϕ は空隙率、 B と α はシリカ含有率のみに依存するパラメータ) と表されることがわかった。

氷・シリカ混合物の変形モード(脆性破壊-塑性変形境界)について調べた結果、真密度試料のシリカ体積含有率が 0.29 以上になると塑性変形から脆性破壊へと変化することがわかった。またその脆性-塑性境界の温度は -20 $^{\circ}$ C で、純氷よりも 30~50 $^{\circ}$ C 高いことが分かった。最後にこの結果を用いて、氷天体(特に断層地形が観察される氷衛星)表面の変形形態を制約することができた。

キーワード: 火星極域, 氷衛星, 氷・岩石混合物, 空隙率, 流動則, 脆性破壊-塑性変形境界

Keywords: Mars polar regions, icy satellites, ice-rock mixtures, porosity, flow law, brittle-ductile boundary

融点近傍における多結晶体の弾性・非弾性・粘性 Elasticity, anelasticity, and viscosity of a polycrystalline material at near-solidus temperatures

山内 初希^{1*}; 武井 康子¹
YAMAUCHI, Hatsuki^{1*}; TAKEI, Yasuko¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震波速度・減衰構造から地球内部の温度・粒径・メルト分布などの情報を引き出すためには、地震波帯域を含む広い周波数での岩石の非弾性を理解する必要がある。特に、上部マントルの低速度・高減衰を解釈するためには、メルトが非弾性に与える影響を理解することが重要である。

地震波帯域での非弾性は、岩石試料（オリビン多結晶）や、そのアナログ試料を使った強制振動実験によって測定されている。岩石を使った高温での実験は困難でデータが少ないため、これを補う目的で、我々はアナログ試料を用いて実験を行っている。オリビン多結晶のアナログとして有機物のボルネオール多結晶を、また、部分熔融したオリビン+バサルト系のアナログとしてボルネオール+ジフェニルアミン系を用いている。ボルネオールとジフェニルアミンは共融系をなし、 $T_m = 43^\circ\text{C}$ で部分熔融する。そのメルト形状は、オリビン+バサルト系のものとよく似ている。

これまで、岩石試料やアナログ試料を使って、さまざまな温度 T ・粒径 d ・メルト量 ϕ の条件下で、地震波帯域の Q^{-1} が測定されてきた。その結果、さまざまな条件で測定した Q^{-1} データを、それぞれの試料のマクスウェル周波数 f_M で規格化した周波数 f/f_M に対してプロットすると、それが $Q^{-1}(f/f_M)$ と表される1本のマスターカーブ上にあることが示された (McCarthy et al., 2011)。しかし、これまでの Q^{-1} データは上部マントルでの規格化地震波帯域 ($10^6 \leq f/f_M \leq 10^9$) に届いていないため、マスターカーブが地震波に適用可能かはわからなかった。最近のアナログ試料を使った実験では、規格化した地震波帯域に届くデータの取得に成功した (Takei et al., 2014)。そして、低い f/f_M では Q^{-1} がマスターカーブによくのるが、高い f/f_M では Q^{-1} が温度や粒径によってばらつくことが示された。そのばらつきには、温度が試料の融点 T_m に近いほど、あるいは粒径が大きいほど Q^{-1} が増大する向きにマスターカーブからずれるという系統性が見られた。また、それらのデータは全て融点よりも低い温度 ($T/T_m \leq 0.93$) のものであり、その結果は融点近傍ではメルトがなくても地震波が低速度・高減衰となる可能性を示すものであった。さらに温度を上げてメルトが生じると Q^{-1} はどのように変化するかを詳しく調べるためには、融点を越えた温度までの実験が必要である。

本研究では、ボルネオール+ジフェニルアミン系から成る、粒径とメルト量の異なる4つの試料で、融点直下から直上までの温度範囲で ($0.88 \leq T/T_m \leq 1.01$)、非弾性を測定した。また、非弾性メカニズムの理解のためには広い周波数に及ぶ物性の理解が必要なため、同じ温度条件で粘性と超音波帯域での弾性も測定した。特に、融点の前後で弾性・非弾性・粘性がどのように変化するかを注目した。

メルトの発生に伴う急激な粒成長を防ぐために、物性測定の前に融点以上で試料の粒成長を行った。このような実験手法の改良を加えたことにより、弾性・非弾性・粘性の温度依存性を、融点直下から直上までの温度範囲において詳細にとらえることができた。超音波帯域の弾性波速度には、メルトの発生に伴ってポロエラスティック効果による不連続な低下が起こった。一方、強制振動実験で得られたこれより低周波数の非弾性は、融点直下から直上まで連続的に増大した。そして粘性は、融点直下から直上まで連続的に減少した。これらの結果に基づき、非弾性を無次元量 f/f_M と T/T_m で定式化し、上部マントルへ応用した。地震波帯域における非弾性は、融点直下から直上まで連続的に増大し、融点近傍ではメルトがなくても地震波の低速度・高減衰が予想される。さらに、本研究の結果は、融点の前後で減衰は連続的に変化するのに対して、メルトが生じると速度にはポロエラスティック効果による不連続な低下が起こることを示唆する。

これまでに粒径やメルト量の異なる4つの試料で非弾性を測定し、上述のように温度依存性については詳細に調べることができたが、粒径やメルト量依存性を十分にとらえることができていない。その理由は、部分熔融を経験した試料の物性にはさまざまなヒステリシス効果が見られ、非弾性の粒径やメルト量依存性がマスクされてしまったためである。今後は、部分熔融を経験していない試料で融点直下での実験を行うことでヒステリシス効果のないデータを取得し、非弾性の粒径とメルト量依存性を明らかにし、上記の定式化を改善する計画である。

キーワード: 非弾性, 地震波減衰, メルト

Keywords: anelasticity, seismic attenuation, melt