

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*}; HATANO, 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て行った. 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
IKAWA, 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

多孔質石膏標的に対する斜め衝突破壊実験 Experimental study on the oblique collisional disruption on porous gypsum target

松榮 一真^{1*}; 高野 翔太¹; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ¹

MATSUE, Kazuma^{1*}; TAKANO, Shota¹; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kobe University, Japan

はじめに

小惑星の多くは、惑星形成過程において、熱進化しつつ成長する天体が、高速度衝突により破壊して形成したと考えられている。天体の衝突破壊は、小惑星を形成を始めとする太陽系天体の形成・進化過程を明らかにする上で重要な物理過程であり、この物理過程は、天体の内部構造に強く依存している。例えば、空隙率が高い物質の場合、衝撃波の減衰率は大きくなり、衝突破壊強度は大きくなる(Arakawa et al., 2002)。天体の空隙率は、衝突破壊を決める重要なパラメータであるが、一方、近年の小惑星探査によって内部に空隙が存在する多孔質小惑星が多く発見されている。多孔質小惑星への衝突現象を理解するために、Okamoto and Arakawa(2009)は、多孔質石膏球への高速度衝突実験を行った。しかし、彼らは正面衝突の実験のみであり、実際の天体衝突において支配的な斜め衝突の実験は行っていない。そこで本研究では、石膏球への高速度斜め衝突実験を行い、Okamoto and Arakawa(2009)と比較し衝突破壊現象における衝突角度依存性について調べた。なお、本研究は第7回惑星科学実験実習の実験テーマである。

実験方法

衝突実験は、神戸大学の横型二段式軽ガス銃で行った。弾丸は直径4.75mmのポリカーボネート球、標的は直径70mmの石膏球を用いた。石膏の空隙率は61%、引張強度は1.0MPa、バルク音速は1.19km/sである。衝突速度(v_i)は4.0km/s、7.0km/sの2種類で行い、衝突角度 θ は15-90°とした。衝突角度は正面衝突を90°と定義している。衝突の様子を高速ビデオカメラで撮影し、破片速度を計測した。フレームレートは1万-10万コマ/s、シャッタースピードは1/5万-1/50万sとした。また、実験後に標的物質を回収し破片質量を計測した。

実験結果

衝突によって標的に与えられるエネルギー密度 $Q(=m_p v_i^2/2M_t)$ と衝突最大破片の関係を見ると、 θ が90°の正面衝突の結果は先行研究(Okamoto and Arakawa 2009)の結果と一致した。衝突角度依存性についてみると、正面衝突から多少斜め衝突になっても(θ が小さくなる)、衝突最大破片は、正面衝突の場合と大きく変わることはなかった。一方、 v_i が4km/sで θ が15,30°、 v_i が7km/sで θ が15°の時は、衝突破壊ではなくてクレーターが確認され、衝突最大破片は大きく変化した。回収した衝突破片の累積個数分布も、最大破片の場合と同じで、正面衝突近傍では θ が変化しても有意な差は見られなかった。一方、 $\theta=15, 30^\circ$ ($v_i=4\text{km/s}$)、 $\theta=15^\circ$ ($v_i=7\text{km/s}$)では、破片分布は大きく異なることがわかった。

斜め衝突の場合、衝突破壊に有効な運動エネルギーは、衝突面に垂直な法線速度成分であると考えられる。そこでエネルギー密度に対して $Q_c(=m_p v_i^2 \sin^2 \theta / 2M_t)$ を用いると、Okamoto and Arakawa 2009の結果と正面衝突付近の結果では、ほぼ一致する。このことから、斜め衝突による衝突破壊では、正面衝突近傍では衝突速度の法線成分が重要であることがわかった。しかしながら、 $\theta=45^\circ$ ($v_i=4\text{km/s}$)、 $\theta=30^\circ$ ($v_i=7\text{km/s}$)では、衝突最大破片と Q_c の傾向が大きく変化した。また、 Q_c が小さくても最大破片はほとんど変化しなかった。これは斜め衝突時の衝突角度が小さくなると、法線速度成分だけでなく、接線速度成分に起因する剪断応力が衝突破壊に影響するためだと考えられる。

キーワード: 衝突破壊現象, 斜め衝突, 空隙率

Keywords: collisional disruption, oblique impact, porosity

粉体対流とその小惑星表面更新のタイムスケールへの応用 Granular convection and its application to asteroidal resurfacing timescale

山田 智哉^{1*}; 安藤 滉祐¹; 諸田 智克¹; 桂木 洋光¹
YAMADA, Tomoya^{1*}; KOUSUKE, Ando¹; MOROTA, Tomokatsu¹; KATSURAGI, Hiroaki¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

近年、惑星探査機の調査により多くの小惑星表面は砂礫（レゴリス）や岩塊（ボルダー）に覆われていることが明らかにされてきた。特に小惑星イトカワでは、天体衝突起源の振動により表面レゴリスが流動化・分級したと考えられる地形が見つかった [1]。このレゴリスの流動化を説明する機構の一つとして粉体対流が注目されている [1]。また、粉体対流によるレゴリス粒子の移動・表面更新は、小惑星イトカワの比較的若い表面年代 1~8 Myr [2,3] を説明できるかもしれない。実際、地上の室内実験では、レゴリスのような粉体に鉛直振動を加えると粉体対流が発生することが知られている (e.g. [4])。しかし、イトカワをはじめとする小惑星のような微小重力環境下で生じる粉体対流の対流速度を見積もることを目指した定量的な粉体振動層の研究はまだ端緒にすぎたばかりである [5]。また、粉体対流による表面更新の可能性をそのタイムスケールにより議論した研究は皆無である。

この問題を解決するために、我々は室内実験を行い定常な鉛直振動を加えたガラスビーズ層の粉体対流速度を調べた。一般に室内実験で重力を変化させることは難しい。そこで、我々はスケージング解析により粉体対流の対流速度と重力加速度の満たす関係を求めた。その結果、粉体対流の速度はほぼ重力加速度に比例することが分かった [7]。この実験結果より、粉体対流は微小重力環境下においても発生し得るが、その速度は極めて小さくなる可能性が示唆された。このため、対流による表面更新のタイムスケールは非常に長くなることが予想される。

本研究では、さらに粉体対流による表面更新過程をモデル化し、レゴリス層を持つ一般の小惑星の対流による表面更新のタイムスケールの推定を試みた。このモデルでは、対流による表面更新過程を

1. インパクターがターゲット小惑星へ衝突する衝突段階
2. 衝突による地震動が発生する振動段階
3. 振動によって対流が発生する対流段階

の三つに分けた。衝突段階ではメインベルト小惑星 (MBA) における天体衝突頻度モデル [7] を用いてインパクターの個数分布と衝突頻度を、振動段階では小惑星の衝突励起地震モデル [8] を用いて振動加速度と振動継続時間を、対流段階では実験で求められた粉体対流速度のスケージング則 [6] を用いて対流速度をそれぞれ推定した。1~3 の各段階を統合し、小惑星上で起こるレゴリス対流による表面更新のタイムスケール T を小惑星直径 D^a の関数として求めた。

求めた T の表式に先行研究 [1, 7, 8] で標準として用いられている物性値 (衝突エネルギーから振動エネルギーへの変換効率: $\eta = 10^{14}$, 衝突励起地震の減衰の指標である Q 値: $Q=2000$ 等) を代入することで、小惑星の表面レゴリスが対流によって更新するために必要なタイムスケール T を求めた。結果、イトカワサイズの小惑星の場合 $T=9$ Myr となり、その表面のサンプルより示された表面年代 1~8 Myr [2,3] と同程度であることが分かった。更に、 $T=9$ Myr はイトカワの衝突寿命 (約 170 Myr [7]) より短い。すなわち、本研究により、イトカワのような小惑星表面においても対流による表面更新がその寿命内に十分に可能であることが明らかになったと言える。

- [1] H. Miyamoto et al., *Science* **316**, 1011 (2007).
- [2] K. Nagao et al., *Science* **333**, 1128-1131 (2011).
- [3] M. M. Meier et al., LPSC abstract #1247 (2014).
- [4] A. Garcimartin et al., *Physical Review E* **65**, 031303 (2002).
- [5] C. Gutteler et al., *Physical Review E* **86**, 050301 (2013).
- [6] T. M. Yamada and H. Katsuragi, *Planetary and Space Science* **100**, 79-86 (2014).
- [7] D. P. O'Brien and R. Greenberg, *Icarus* **178**, 179-212 (2005).
- [8] J. E. Richardson Jr. et al., *Icarus* **179**, 325-349 (2005)

キーワード: 粉体対流, レゴリス流動化, 小惑星, 表面更新
Keywords: granular convection, regolith fluidization, asteroid, resurface

障害物周りでの粉粒体の流れ場と出口における閉塞現象 Granular flow field around an obstacle and clogging at a bottleneck outlet

遠藤 圭太^{1*}; 桂木 洋光¹
ENDO, Keita^{1*}; KATSURAGI, Hiroaki¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

流動状態にある粉粒体は、ボトルネックとなる出口でアーチ構造を形成して閉塞を起こすことがある。出口幅が粉粒体直径の約6倍以上になると閉塞現象が生じないことが経験的に知られているが、その流量は様々なパラメータに依存して変化する。例えば、流れの中に障害物があると閉塞の発生率が減少することがある [1]。そのため、障害物による粉粒体流の流れ場への影響を解明することで、粉粒体の閉塞現象の理解を深めることができると考えられる。また、このような現象の理解は、群衆の避難行動のような人々の流れをコントロールする建築物の構造設計などへも応用されることが期待される。この場合、避難する人々の流れを粉粒体の流れと見なせる。加えて、閉塞現象やアーチ構造形成のような粉粒体特有の非線形的な振る舞いは、地滑りや雪崩などの様々な地球物理現象にも関係すると考えられる。

本研究では、粉粒体の重力による出口流と障害物を用いた簡単な実験を行った。まず、2次元セル内に円盤状の障害物を挿入し、セルを直径 6.35 mm のステンレス球で満たす。そして、セルの下部中央に設けた小さな出口を開放し、出口へ向かう粉粒体流を作る。この粉粒体流の流れ場と流量、そして障害物にかかる抵抗力を高速度カメラとロードセルを用いて計測する。このようにして、出口の大きさと障害物距離をパラメータとした時、流れ場や流量がそれらのパラメータにどのように依存するかを実験的に調べる。

高速度カメラで撮影した粉粒体流の動画から、障害物を挿入することにより交互流が発生して空間的に非一様（非対称）な流れ場が生じる様子が観察された。一方で、出口からの流量がほぼ定常であることも明らかになった。この動画から流れ場をさらに粒子追跡法（PTV法）により解析した。PTV法を用いることで、個々の粒子の軌跡を追うことが可能となる。出口付近と障害物上部の左側、右側の3つの領域に分け、それぞれの領域における流れ場と粒子の充填率の時間変化を算出する。さらに、PTVデータから個々についての平均二乗変位（MSD）を計算する。

本発表では、これらの量と粉粒体流の流量や障害物にかかる抵抗力などの物理量との関係について議論する。さらに、出口幅や障害物距離などのパラメータの依存性から、障害物が粉粒体流の流れ場にどのように影響するかを解明していく。

[1] I. Zuriguel *et al.*, Physical Review Letters **107**, 278001 (2011)

キーワード: 粉粒体流, 閉塞, 障害物, 粒子追跡法, 平均二乗平均

Keywords: granular flow, clogging, obstacle, particle tracking velocimetry, mean square displacement

粒子画像分析法による粉碎粒子の粒子サイズおよび粒子形態特性評価に関する可能性検討 Feasibility Study of Morphological Characterization to Comminuted Particles by A Particle Characterization Approach

笹倉 大督^{1*}; 早内 愛子¹; 桑野 修²
SASAKURA, Daisuke^{1*}; HAYAUCHI, Aiko¹; KUWANO, Osamu²

¹ スペクトリス株式会社 マルバーン事業部, ² 独立行政法人海洋研究開発機構

¹Malvern instruments A division of Spectris Co., Ltd., ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. 諸言

断層破碎帯は断層ガウジと呼ばれる過去の断層破壊による粉碎、摩耗によって生成された粉体粒子でみだされている。断層ガウジの粒子径分布や形状は、断層の摩擦抵抗に影響するだろうし、過去の断層運動による破碎様式やその度合いを知る手がかりになるだろう。実際に断層破碎帯における粒径分布はべき分布となることが知られており、ベキの指数(フラクタル次元)は破碎のメカニズムや破碎の進行度を反映していると考えられている。また、粒子サイズ分布測定から過去の断層運動による破壊エネルギーを見積もる試みもなされている。今回、粉碎方法や粉碎の度合いと粒子サイズおよび形状の関係を調べるため、模擬粒子を用いていくつかの粉碎実験を行ったので報告する。今回、粉碎方法や粉碎の度合いと粒子サイズおよび形状の関係を調べるため、模擬粒子を用いていくつかの粉碎実験を行ったので報告する。

2. 実験

乾式粒子画像分析装置 Morphologi G3-SE(Malvern Instruments) を用いて粉碎粒子のサイズおよび形状を粒子径 $1 \mu\text{m}$ - $1000 \mu\text{m}$ の範囲で測定した。分散は乾式分散ユニット (SDU) により乾燥粉体の状態で実施された。 $1 \mu\text{m}$ 以下の粒子径も測定可能なレーザー回折粒度分布測定装置による粒子径分布測定結果と比較し、乾式粒子画像分析装置による粒子サイズ分布測定の有効性についても検討する。

キーワード: 断層ガウジ, 粒子径, 粒子形状, 粉碎, フラクタル次元

Keywords: Fault gouge, Particle size, Particls Shape, Comminution, Fractal Distributions

浮力駆動されるクラックの形・伝播様式・速度のパラメータ依存性 Shape, propagation style and velocity of a buoyancy-driven crack : a parameter study

竹口 いくみ^{1*}; 隅田 育郎¹
TAKEGUCHI, Izumi^{1*}; SUMITA, Ikuro¹

¹ 金沢大学大学院自然科学研究科
¹ Kanazawa University

はじめに: マグマが上昇する過程で周囲の岩石のレオロジーは変化する。このためアセノスフェアでは粘性変形しマグマはダイアピルとして上昇する一方、リソスフェアでは弾性破壊しダイク貫入により上昇する (Rubin, 1995)。それでは粘性変形と弾性破壊の遷移領域ではマグマはどのように上昇するのだろうか。私達は寒天の硬さを幅広く変えたモデル実験によりこの遷移領域における浮力駆動されるクラックの研究を進めている (Sumita and Ota, 2011)。本発表ではクラックの形、伝播様式、速度に着目して主としてマグマの粘性率が粘弾性体中のマグマ輸送に与える影響について調べた実験結果について報告する。

実験方法: (1) 使用する寒天のレオロジー測定、(2) 注入実験、の2つを行う。注入実験は直径 160mm、長さ 250、500mm のアクリル円柱内の寒天 (母岩) に CsCl 水溶液に増粘剤を加えたもの (マグマ) を上部からシリンジを用いて注入して行う。その際、注入する体積を 1ml、注入速度を 1ml/s に固定し、寒天との密度差は 0.580 と 0.770g/ml の2通りで行った。実験パラメータとして寒天の濃度を 0.06~0.5wt%、注入流体の粘性率を 10^{-3} ~1300Pa·s と6桁変化させた。寒天の濃度は1桁変えることで降伏応力が3桁、剛性率が2桁変化する。クリープ試験により濃度の高い寒天 (> 0.1wt%) はバネとフォークトモデルを直列につないだ粘弾性モデル、低い寒天 (< 0.1wt%) はバーガーズモデルで近似できる。実験は直交する2方向と容器下方からビデオカメラで撮影し、観察する。以下、粘性率とは注入流体のものを指す。

結果: クラックの形・伝播様式・速度に着目して以下の3つのレジームに分けた。I: 形が2D(板状)であり、直進し、停止距離が短い。クラックの伝播距離 (z) を時間の冪乗則の形 ($z \propto t^n$) で求めた冪の値 (n) は $n \sim 1/5$ であり、速度が粘性率 (η) に対して $1/\eta$ に比例する傾向を持つ。II: 形が2Dと3D(頭が膨れたもの)の遷移状であり、伝播中に曲がるか、蛇行し、伝播則の冪は $1/3 < n < 1$ である。蛇行するものは粘性率を上げると、蛇行の振幅が小さくなり直線的となる。これは Sumita and Ota (2011) で報告された注入流体の密度を小さくした場合と同じ傾向である。速度はIとIIIとの中間である。III: クラックの形は3Dであり、直進し、停止距離は長い。伝播則の冪は $n \sim 1$ であり、速度は粘性率にあまり依存しない。

考察: IとII、IIとIIIのレジーム境界は、大局的には無次元の浮力 $B = -(\Delta \rho g V^{1/3})/G$ ($\Delta \rho$: 密度差、 g : 重力加速度、 V : クラック頭の体積) で決まる。レジーム I-IIは $B \sim 1$ 程度で遷移する。ただしより詳しくは流体の粘性率が大きくなると、臨界 B 値が大きくなる傾向がある。これは粘性率が大きくなるとクラックの伝播速度が遅くなり、クラックの尾に流体が残りがやすく、クラック頭の体積が小さくなり、実効的な B 値が小さくなるためと理解できる。クラックの伝播速度はIのレジームではチャンネルフロー速度 ($n=1/3$: Taisne et al. (2011)) と同程度かそれ以下、IIIのレジームではストークス沈降速度 ($n=1$) 及び横波速度と同程度であり、IIのレジームではその中間であった。従って一定体積、密度下では、粘性率が高い程、レジーム I から III に移行するに従い、速度が大きく増大する。また以上の結果は流体の速度、母岩の変形速度ばかりでなく、破壊伝播速度 (~横波速度) が律速していることを示している。実際、既存のクラックがある場合、伝播速度は既存のクラックがない場合に比べて速くなることを確認した。レジーム II を特徴付ける伝播経路の蛇行は粘性率が高くなると消滅した。これは蛇行が起きるためには $B \sim 1$ に加えて、臨界速度 (あるいは臨界レイノルズ数) が存在することを示唆している。

引用文献:

- Rubin, A. M., 1995, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 23, 287-336.
- Sumita, I. and Y. Ota, 2011. Earth Planet. Sci. Lett., 304, 337-346.
- Taisne, B. et al., 2011, Bull. Volcanol., 73, 191-204.

キーワード: マグマ上昇, クラック伝播, 粘弾性, 流体粘性率, 浮力
Keywords: magma ascent, crack propagation, viscoelasticity, fluid viscosity, buoyancy

三軸圧縮破壊試験における庵治花崗岩の弾性波速度測定 Measurements of elastic wave velocity of Aji granite on triaxial compression fracture test

財間 寛太^{1*}; 片山 郁夫¹
ZAIMA, Kanta^{1*}; KATAYAMA, Ikuo¹

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima university

弾性波速度は地下構造を把握するための重要な物性のひとつである。特に地熱発電では、地熱流体がトラップされた地熱貯留層の評価において重要な役割を担っている。さらに水圧破碎によって形成される人工的な地熱貯留層の評価においても欠かせない物性である。弾性波速度は空隙率、クラックの形状や分布、流体の有無などその状況によって変化する。これまでは封圧に対する速度変化 (Nur and Simmons, 1969) や岩石の破壊過程での速度変化 (Bonner, 1974) など様々な実験結果がえられている。実験室でこれらの変化を調べることは地下構造のデータの解釈、つまり地熱貯留層・人工貯留層の評価につながる。本研究では間隙水圧をかけた状態での破壊過程の速度変化を調べ、水圧破碎においての人工貯留層評価につなげることを目的として、卒業研究では広島大学の容器内変形透水試験機による弾性波速度測定システムを改良し、乾燥状態での破壊過程の弾性波速度変化を調べた。

試料には庵治花崗岩を円柱形に成形したものをを用いて、試料の上側に圧電素子を配置するパルス反射法、試料の上下に圧電素子を配置する透過法 (σ_1 方向)、試料の側面に直接圧電素子をはりつける透過法 (σ_3 方向) の3つを試した。これら3つの方法でそれぞれ封圧 10-200MPa で弾性波速度を測定したところ、それぞれの測定法で封圧の上昇に伴う圧密効果による弾性波速度の増加を確認することができた。しかし、パルス反射法、透過法 (σ_1 方向) においては波の減衰が大きく、空隙の多い低圧下や試料の長さが長くなると速度を算出できず、破壊実験で用いる長さ 40mm の試料ではこれらの測定方法を用いることができない。これに対して透過法 (σ_3 方向) では、圧電素子を試料に直接貼り付けるために圧電素子を再利用できないが、他の2つの測定方法と比べて波の減衰を最小限に抑えることが可能である。

以上の結果から透過法 (σ_3 方向) を用いて破壊中の庵治花崗岩の弾性波速度の測定を行った。この破壊実験は容器内変形透水試験機のサーボによる載荷システムを用いて、封圧 20MPa、変位速度 0.01mm/min で一定に保ち行った。間隙水圧は 0MPa である。サンプルには庵治花崗岩を長さ 40mm、直径 20mm、また側面に圧電素子ををはる加工を行ったものを用いた。破壊応力のおよそ 1/5 までは弾性波速度の増加がみられ、そこから徐々に速度変化がなくなり破壊応力のおよそ 1/3 を超えるあたりから速度が減少に転じる。これはまず、既存のマイクロクラックの閉鎖によって速度が増加し、その後徐々にサンプル内に新たなクラックが生成することで速度変化が減少に転じ、このクラックの生成の効果がより強くなることで速度が急激に減少すると考えられる。つまり、この速度の減少はダイラタンシーの効果で説明することが可能である。また、本実験においては S 波の振動方向を最大圧縮軸に対して垂直にしているため、 V_s の増加は σ_3 方向に伸びているクラックの閉鎖に強く影響を受けていると考えられる。

キーワード: 弾性波速度, 地熱貯留層, 水圧破碎, ダイラタンシー

Keywords: elastic wave velocity, geothermal fluid reservoir, hydraulic fracturing, dilatancy

かんらん石-輝石多結晶体における鉱物混合層の形成と歪み弱化 Rheological weakening due to phase mixing of olivine + orthopyroxene

田阪 美樹^{1*}; Zimmerman Mark¹; Kohlstedt David¹
TASAKA, Miki^{1*}; ZIMMERMAN, Mark¹; KOHLSTEDT, David¹

¹ ミネソタ大学

¹University of Minnesota

The formation of well-mixed, fine-grained, poly-phase rocks may lead to strain localization and play a key role in the development of the lithosphere asthenosphere boundary (LAB). To understand the mixing process in the olivine + orthopyroxene rocks, we have conducted torsion experiments on samples of iron-rich olivine + orthopyroxene aggregates at a temperature of 1200 °C and a pressure of 300MPa. We fabricated the samples with grain sizes significantly larger than the steady state grain size. The samples were deformed to total shear strains up to $\gamma = 17$. We conducted two series of torsion experiments, the first at fixed strain rate to different strains and the second at different strain rates to the same strain.

The stress exponent of $n \approx 3$ and grain size exponent of $p \approx 1$ were determined from a least-squares fit to the strain rate, stress and grain size data using a power-law creep equation; these values of n and p indicate that our samples deformed by dislocation-accommodated grain boundary sliding. Dynamic recrystallization occurred with significant grain size reduction of both phases in deformed samples. Well-mixed microstructures develop in samples deformed to higher strains at faster strain rates, whereas elongated olivine and pyroxene grains without a mixed texture are observed at lower strain and strain rate. Mixing of the olivine and orthopyroxene phases occurs due to a contribution of interface-reaction-limited diffusion (IRLD) creep [Sundberg and Cooper, 2008]. This IRDL creep process involves diffusion of metal oxides along phase boundaries oriented perpendicular to σ_1 to boundaries parallel to σ_1 resulting in the formation of new pyroxene grains along boundaries perpendicular to σ_1 and olivine grains along boundaries parallel to σ_1 . Grain size reduction due to dynamic recrystallization of olivine and orthopyroxene enhance the rate of this process.

Keywords: olivine, opx, deformation, mixing process

高圧条件下におけるアコースティックエミッション測定の新技術開発 Technical developments on acoustic emissions monitoring at high pressures

大内 智博^{1*}; 雷 興林²; 肥後 祐司³; 丹下 慶範³; 入船 徹男¹
OHUCHI, Tomohiro^{1*}; LEI, Xinglin²; HIGO, Yuji³; TANGE, Yoshinori³; IRIFUNE, Tetsuo¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ² 産業技術総合研究所, ³ 高輝度光科学研究センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ³Japan Synchrotron Radiation Institute

The subduction zone produces a major fraction of the Earth's seismic activity. Intermediate-depth earthquakes within the subducting slab form a double seismic zone. The cause of intraslab seismicity have been attributed to dehydration of hydrous minerals (e.g., Peacock, 2001). Brittle fracture associating dilatancy is difficult at high pressures (i.e., depths at which intermediate-depth and deep-focus earthquakes occur), although dilatancy prior to failure usually occurs in the case of shallow-depth earthquakes.

At deeper depths, dehydration embrittlement (i.e., hydrofracturing) is expected to play an important role in failure of rocks because the overall volume change of the dehydration reaction is positive and thus pore pressure can be increased (e.g., Raleigh and Paterson, 1965). However, experimental results on dehydration embrittlement of antigorite are controversial. Dobson et al. (2002) conducted a series of experiments on dehydration of antigorite, and they reported that dehydration of antigorite associates acoustic emission (AE) when the dehydration reaction is positive. Even though the volume change becomes strongly negative above 2 GPa, Jung et al. (2004) reported that brittle failure of antigorite occurs at pressures up to 6 GPa. Recently, Gasc et al. (2011) reported that no detectable AEs through dehydration of antigorite-rich serpentinite. Therefore, the cause of intermediate-depth earthquakes is still unclear.

In some of subduction zones, a significant activity of deep-focus earthquakes has been reported (e.g., Kirby et al., 1996). It has been proposed that deep-focus earthquakes are triggered by an instability faulting caused by olivine phase transformations (Kirby et al., 1991; Green et al., 1992). Schubnel et al. (2013) conducted deformation experiments on germanium olivine (Mg₂GeO₄) at 2-5 GPa and 1000-1250 K, and they observed many AEs generated in the sample. Schubnel et al. (2013) discussed that fractures nucleated at the onset of the olivine-to-spinel transition.

To investigate the brittle properties of rocks, determination of AE source is critical. In the community of high-pressure rock physics, Green et al. (1992) conducted AE monitoring by using a Griggs apparatus combined with an AE sensor. Dobson et al. (2002, 2004) and Jung et al. (2006) adopted 2 or 4 AE sensors to a multianvil apparatus. However, the position of AE source has not been determined in the experiments because of not enough number of sensors used in the experiments. De Ronde et al. (2007) adopted 8 AE sensors to a multianvil apparatus and they succeeded to determine the position of AE sources. Recently, Gasc et al. (2011) succeeded to develop an experimental setup that allows determining the position of AE source by using DIA-type multianvil apparatus combined with 6 AE sensors. Schubnel et al. (2013) adopted the experimental setup reported by Gasc et al. (2011) to a D-DIA apparatus installed at a synchrotron facility, and they succeeded to measure strain and stress of the sample and AE signals. We have developed an experimental setup that is optimized for the determination of the position of AE source in a synchrotron D-DIA apparatus. We will report some preliminary experimental results on AE monitoring under the upper mantle conditions.

Keywords: acoustic emission, high pressure, earthquake

中性子と AE 信号同時測定による岩石の変形メカニズムの研究 Study of rock deformation mechanism using neutron diffraction technique and AE signal measurement

阿部 淳^{1*}; 関根 孝太郎²; ハルヨ ステファヌス³; ゴン ウー³; 相澤 一也³
ABE, Jun^{1*}; SEKINE, Kotaro²; HARJO, Stefanus³; GONG, Wu³; AIZAWA, Kazuya³

¹ 一般財団法人 総合科学研究機構, ² 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, ³ 独立行政法人 日本原子力研究開発機構

¹CROSS-Tokai, ²JOGMEC, ³JAEA

Acoustic emission (AE) is defined as a transient elastic wave generated by the rapid release of energy within a material. Crack initiation and slipping generated inside rock materials are all detectable with the measurement of AE signals, and therefore such measurement helps to research the underlying mechanism of macroscopic deformation. On the other hand, strain gauge is commonly used to measure strain in rock. In recent years, diffraction techniques for investigating strain in engineering materials have been developed. Strain measurements using diffraction technique are based on Bragg's law. Strain value can be estimated from the changes of lattice parameter.

Accumulation of macro strain in rock samples is generally caused by lattice strain as well as grain boundary shearing and pore collapse generated inside the rock, which would be detectable as AE events. Therefore, simultaneous using of neutron diffraction technique and AE signal measurements should provide us with new insight into rock deformation and fracturing mechanism. In order to study deformation mechanism of geological materials under uni-axial compression, neutron diffraction patterns and AE signal have been measured simultaneously.

Berea sandstone and calcarenite are used as a specimen. Main composed mineral of Berea sandstone is quartz (SiO₂), and that of calcarenite is calcite (CaCO₃) with minor apatite. Berea sandstone was compressed uniaxially up to 35.6 MPa with two-cycle compression. Calcite was compressed until the specimen fractured at 16.4 MPa. Lattice strain measurements using neutron diffraction technique were performed at the Engineering Materials Diffractometer "TAKUMI" in J-PARC/MLF. The diffractometer have been designed to investigate the stress-strain state of engineering materials (e.g. steel) using a pulsed neutron beam. Macroscopic strain was recorded using a strain gauge attached to the rock specimen surface. AE signal measurements were conducted using USB AE NODE (PHYSICAL ACOUSTIC CORP.) with a miniature AE sensor (Micro30) attached to a compression jig.

Macroscopic strain of both rock materials was greater than lattice strain. Inside rock specimens, mineral grain slip and pore collapse might be generated under compression. These changes would induce macroscopic deformation of the rock specimens. In addition, AE signals which might be derived from these changes in the internal structure of the rock specimens were detected. Parameters of AE signals might be a function of the amount of grain-boundary shear and/or the degree of resistance to deformation. And the frequency characteristics of AE signals depend on rock type. This difference between rock types might be related to the deformation mechanism of the rock specimens.

キーワード: 中性子回折, 格子ひずみ, AE 信号, 一軸圧縮, 岩石の変形

Keywords: neutron diffraction, lattice strain, AE, uni-axial compression, rock deformation

熱水条件下におけるかんらん岩の高圧変形実験：リソスフェアの強度弱化における含水反応の効果 High-pressure deformation experiments on olivine-orthopyroxene aggregates under hydrothermal conditions

福島久美^{1*}; 平内健一¹; 木戸正紀²; 武藤潤²

FUKUSHIMA, Kumi^{1*}; HIRAUCHI, Ken-ichi¹; KIDO, Masanori²; MUTO, Jun²

¹ 静岡大学大学院理学研究科地球科学専攻, ² 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Department of Geosciences, Graduate School of Science, Shizuoka University, ²Department of Earth Sciences, Tohoku University

沈み込みはトランスフォーム断層などの既存の弱面を元にして発生すると考えられているが、この弱面の強度は数値モデルによると摩擦係数が0.05以下であることを必要とする。これは深度30 kmにおける断層強度が50 MPa以下であることを意味する。しかしながら、かんらん石の摩擦強度、転位クリープから推定される強度は約700 MPaとなり、しきい値を大きく逸脱する。これまでに、断層強度を低下させるメカニズムとして、流体やメルト、拡散クリープ、蛇紋岩化などが候補に挙げられてきた。蛇紋岩化はかんらん岩が水と反応することによって生じ、トランスフォーム断層などの海洋マントルまで海水が入り込むことが可能な領域で起こる。これまでの変形実験では、蛇紋石がかんらん石と比較して様々な温度圧力条件において強度が低いことを明らかにしている。しかしながら、高温高圧下におけるかんらん岩の含水反応のカイネティクスやかんらん岩の強度が含水反応の進行に伴ってどのように変化するのかについては、ほとんど明らかになっていない。

そこで本研究では、Griggs型固体圧式変形装置を用いて熱水条件下でかんらん岩ガウジの単純剪断変形実験を行った。出発物質はサン・カルロス産かんらん石とタンザニア産斜方輝石の粉末試料を用いて、ハルツバージャイトを想定した7:3の割合で混合した。実験条件は温度500 °C、封圧1.0 GPaで、一定の剪断歪速度(剪断歪速度 $5.9 \times 10^{-5} \sim 4.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)で行った。その結果、全ての剪断歪速度条件下において応力-歪曲線は同様の挙動を示した。まず、弾性変形が起こり最大剪断応力(350~400 MPa)に達した後、10~120分間かけて応力が60~150 MPa降下した。その後定常状態の変形がしばらく続くが、1回目と比較してゆっくりとした応力降下が再び起こり定常状態に至った。さらに最終的な強度は剪断歪速度の低下に伴い減少し、最も遅い剪断歪速度($4.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)における最小強度は30 MPaとなった。実験後の試料には剪断歪量の増加に伴いR₁面、B面、Y面などの複合面構造が発達していた。また、変形後の試料では出発物質粒子が粒子間結合していた。剪断面近傍では出発物質の粒径減少が認められ、粒界を埋めるように滑石が生成していた。さらに、剪断面にも滑石は生成し、生成量は変形時間あるいは剪断歪量の増加に伴い増加した。

実験初期においてガウジ試料は溶解-沈殿プロセスにより粒子間結合が生じるため強度が増加し、その後、強度が臨界点を超えると局所すべりが発生すると考えられる。1回目の急激な応力降下の間、剪断歪速度は増加していることから、不安定すべりが起こっていたと考えられる。また、2回目の緩やかな応力降下は剪断面に沿った滑石の生成および増加に起因すると考えられる。本実験において蛇紋石ではなく滑石が生成した理由として、400 °C以上の高温下において斜方輝石がかんらん石と比較して優先的に溶解し、「斜方輝石 → かんらん石 + SiO₂」および「斜方輝石 + SiO₂ + H₂O → 滑石」という反応が連続して起こったことに起因すると考えられる。本実験における最小強度(30 MPa)は深度30 kmを想定したかんらん石、蛇紋石の摩擦強度と比較して低く、摩擦係数が0.05以下である沈み込み可能強度である50 MPaの範囲に収まる。天然におけるハルツバージャイトにおいても、滑石が生成する反応は斜方輝石を完全に消費するまで起こり、その後は蛇紋石が形成されると考えられる。このことから本研究における反応プロセスは含水反応初期にみられるプロセスであると考えられる。したがって、高温高圧下における断層強度の初期の弱化プロセスにおいて、かんらん岩の熱水反応による滑石生成の影響が示唆される。

キーワード: かんらん石, 斜方輝石, 滑石, 含水反応, 強度弱化, 沈み込み開始

Keywords: olivine, orthopyroxene, talc, hydration reaction, strength weakening, subduction initiation