

断層ガウジにおける偏析の発生条件 Grain size segregation in a fault gouge model

伊藤 諒^{1*}
Ryo Itoh^{1*}

¹ 東京大学地震研究所
¹ Earthquake Research Institute

Chelungpu 断層ガウジでは、ガウジの大きい粒が上に、小さい粒が下に集中しているのが観測されている [Bouillier et al., 2009]。このような偏析の発生メカニズムとしては「kinetic sieving」と呼ばれる機構が現在知られており、その必要条件是重力と十分な空隙である。もし断層においてもこの機構で偏析が起こったとするならば、地震滑り時にはガウジの空隙率が非常に高かったことを意味する。もちろん一般に断層では 100MPa オーダの高圧がかかっているため空隙率は高くなれない。ただし、地震すべりの摩擦熱によって空隙流体の圧力が上昇する現象 (thermal pressurization) が起これば、断層にかかる実効圧力が小さくなり、空隙率は高くなりうる。したがって、ガウジの偏析は thermal pressurization の有力な証拠となると考えられている。

ただし、以上の推論は、「偏析を起こすメカニズムは kinetic sieving である」という仮定に基づくことに注意すべきである。最近になって、パイプ流において kinetic sieving では説明出来ない種類の偏析があることが発見された [Fan and Hill, 2011]。同種のメカニズムが断層すべりにおいても発現可能ならば、偏析の発生は必ずしも thermal pressurization を意味しなくなる。

本研究において示すことは、「空隙流体が存在せず、なおかつ十分な空隙がない場合でも偏析は発生する」ことである。用いる手法は 2 次元粒子シミュレーションであり、簡単のため断層ガウジは大小 2 種類の粒で構成された粉体とする。

まず母岩を動かして粉体に剪断をかけると、空隙率が高いほど偏析が発生し、一見、重力による kinetic sieving によって偏析が発生したかのようだが、一方で、偏析の有無は速度場の非線形性とも対応していた (速度場が非線形なときに偏析が発生)。どちらの要因が本質的であるか調べるために、非線形速度場を人工的に入れてシミュレーションを行ったところ、低空隙率においても偏析が発生した。極端な場合では 0.146 という低空隙率においても偏析が発生したことは特筆される。つまりガウジの偏析は必ずしも高空隙率を意味しない。空隙率の大小によらず、非線形速度場によって偏析が発生するのである。次に、2 粒子の質量と大きさを独立に変えてシミュレーションを行った。大きさが同じで質量だけ異なる場合では偏析が発生せず、質量が同じで大きさが異なる場合は偏析が発生した。ゆえに、ここでの偏析メカニズムは質量の違いで駆動されるのではなく、粒子のサイズの違いによって駆動されることを発見した。何れの場合においても、大きい粒子が速度勾配の大きい領域に集まる。したがって低空隙率での偏析発生に本質的な要因は、(1) 非線形速度場、および、(2) 粒子の (質量ではなく) サイズの大小である。

ただし、非線形速度場がなぜ・どのようにして、断層に形成されるのか、まだ分かっていない。粉体層における非線形速度場の形成メカニズム解明が将来の課題として残されている。

キーワード: 偏析, ガウジ, thermal pressurization, 非線形, 粉体
Keywords: segregation, gouge, thermal pressurization, non-linear, grain

超薄膜水による鉱物の摩擦係数低下とその安定性の検証

Water thin film: The effect on the frictional coefficient of minerals and the stability

佐久間 博^{1*}

Hiroshi Sakuma^{1*}

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

Introduction: Fluid/mineral interfaces have an effect on fault slips in the Earth's crust. Deformation of rocks in the Earth's crust is often localized within fault zones, and the slip behavior strongly depends on the frictional strength of these fault zones. Phyllosilicates (e.g., clay minerals and mica) are ubiquitous in natural fault zones and these layered-structure minerals can decrease the frictional strength of the fault zones. One of the reasons to explain the low frictional strength is the lubrication due to adsorbed and interlayer water molecules on these phyllosilicate minerals [1]. To know the lubrication properties and the stability of water on mineral surfaces is important to develop the fundamental physics of fault mechanics. Here we investigated the structure, dynamics and stability of water on the muscovite surfaces using classical molecular dynamics (MD) simulations, density functional theory (DFT) calculations, and x-ray crystal truncation rods (CTR) scattering measurements.

Methods: (1) Classical MD simulations: The interatomic potential models for muscovite, water, and ions were originally developed. These models succeeded to be applied to water/mineral interfaces [2]. (2) DFT calculations: The calculations were performed by the code Quantum-Espresso to know the stability of water confined between muscovite surfaces. (3) Surface x-ray scattering measurements: The measurements were carried out at Photon Factory, KEK, Japan (BL-4C) by using monochromatic x-rays of 11.0 keV.

Structure of aqueous NaCl/Muscovite interface [3]: The sub-Å-scale atomic distribution of muscovite surface in aqueous NaCl solution was measured as a function of the distance normal to the interface. The four distinguished peaks were observed at $z = 1.4, 2.8, 5.3,$ and 9 \AA in the NaCl solution. The electron-density oscillation decayed and disappeared at $z \approx 12 \text{ \AA}$. The oscillation of the electron density can be explained by the adsorbed hydrated Na^+ ions as the inner sphere complexes (IS).

Implications for the mechanism of lubrication: The radius of the first hydration shell of Na^+ ions adsorbed on the muscovite surface was extended over 4 \AA from the outermost oxygen layer of the mica surface. In the previous shear measurements of NaCl solution confined between muscovite surfaces [4], the increased viscosity and high lubricity were observed at a surface separation of $6 \pm 3 \text{ \AA}$, which corresponds to the distance of contact of the first hydration shell of Na^+ ions adsorbed on opposite muscovite surfaces. To realize water lubrication, the water molecules must be confined between the muscovite surfaces during the shear. In this context, the hydrated Na^+ ions adsorbed on the muscovite surface as IS could retain the water molecules around them due to the attractive coulomb forces and be a candidate for an effective lubricant between muscovite surfaces.

The stability of hydration shell: The stability of water around Na^+ ions at high temperature and pressure conditions was discussed by the combined methods of DFT calculations, the thermodynamics, and the shear measurements. The compressive differential stress larger than 1.7 GPa was necessary to squeeze out the water film.

References: [1] Morrow, C. A. et al (2000) GRL 27 815-818. [2] Sakuma, H. and Kawamura, K. (2011) GCA 75 63-81. [3] Sakuma, H. et al (2011) JPCC 115 15959. [4] Sakuma, H. et al (2006) PRL 96 046104.

キーワード: NaCl, 吸着水, 粘土鉱物, 雲母, 潤滑, サンアンドレアス断層

Keywords: NaCl, adsorbed water, clay minerals, mica, lubrication, San Andreas fault

Thermal pressurization と分岐断層の動的破壊伝播 Dynamic fault branching with thermal pressurization

浦田 優美^{1*}, Sebastien Hok², 福山 英一¹, Raul Madariaga²
Yumi Urata^{1*}, Sebastien Hok², Eiichi Fukuyama¹, Raul Madariaga²

¹ 防災科学技術研究所, ²Ecole Normale Supérieure, Paris

¹Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev., ²Ecole Normale Supérieure, Paris

We numerically investigate the effect of thermal pressurization (TP) on fault branch behavior during dynamic rupture propagation; a situation is likely to occur during large earthquakes at subduction interfaces.

We consider a 2-D mode II rupture that propagates along a planar main fault and encounters an intersection with a pre-existing branching fault. The fault system is in an infinite, homogenous, and elastic medium, and it is subjected to uniform external stresses. The friction coefficients and D_c are assumed to be uniform and the same on the two faults. The numerical algorithm is based on the 2-D boundary integral equation method (BIEM) using the integration kernels proposed by Tada and Madariaga (2001, IJNME). A rupture is initiated in a small patch on the main fault, and then proceeds spontaneously, governed by a slip-weakening law with the Coulomb failure criteria. On a fault with TP, we allow effective normal stress to vary with pore pressure change owing to frictional heating using the formulation of Bizzarri and Cocco (2006, JGR).

We reveal that TP can alter the rupture propagation paths in the cases where a dip angle of the main fault is shallow. The rupture propagation paths depend on the branching angle when TP is not in effect on either of the faults, as described by Kame et al. (2003, JGR). On the other hand, the ruptures propagate along the main fault in the cases with TP on the main fault, and ruptures propagate along the branch when TP is in effect on both faults. These features are observed, regardless of the branching angle. Thus, the dynamic rupture processes are strongly controlled by TP, compared with the branching angle.

Finally, we consider the case when free surface exists above the branch fault system. It should be noted that full space and half space computations are the same until the reflected waves from free surface arrive at the branch fault system. Therefore, the above discussion is valid for half space case as far as we focus on the branching. However, once the reflected waves from the free surface arrive at the branch fault, they promote the rupture propagation along the branch fault. In this case, the rupture can propagate along both faults by the existence of the free surface in addition to TP on the main fault.

キーワード: 分岐断層, 動的破壊, thermal pressurization

Keywords: fault branching, spontaneous ruptures, thermal pressurization

混合破壊モードを考慮した分岐断層形成の動的シミュレーション：天然断層との比較

Dynamic Simulation of Branch Fault Formation Considering Mixed Mode Rupture: Comparison with Natural Examples

安藤 亮輔^{1*}, 氏家 恒太郎², 斎藤 翼²
Ryosuke Ando^{1*}, Kohtaro Ujiie², Tsubasa Saito²

¹ 産業技術総合研究所, ² 筑波大学
¹Geological Survey of Japan, ²University of Tsukuba

We investigate the formation process of wing-crack like sequentially occurring branch faults. Such branch faults are found in field examples of exhumed fault rocks [e.g., Di Toro et al., 2005, Nature] and laboratory examples formed during dynamic rupture propagation [e.g., Griffith et al., 2009, Geology]. Recent theoretical studies suggested that the angles and lengths of branch faults reflect dynamic rupture processes of main faults, which the branches are grown from, and the rupture velocities [Rice et al., 2005, BSSA] and the length [Ando and Yamashita, 2007, JGR] of the main faults can be estimated by using these geometrical parameters. In fact, Di Toro et al. (2005) used the theory and the model of Rice et al. (2005) to infer the condition for exhumed branches filled by pseudotachylyte. However, these physical models lack some ingredients such as actual dislocations due to branching [Rice et al., 2005] or the mixed mode rupture [Ando and Yamashita, 2007]. In this study we extend the numerical simulation method developed by Ando and Yamashita (2007) using the boundary integral equation method (BIEM) in order to deal with the mode I rupture as well as the previously implemented mode II. We perform the spontaneous rupture simulation to track the self-chosen fault growth path under various conditions of model parameters including the rupture velocity, the frictional coefficients and the stress angle. The results are compared with the field example of the extension cracks branched from the 1-mm-thick ultracataclasite, which are found in the Late Cretaceous Shimanto accretionary complex in eastern Kyushu, southwest Japan. The extension cracks having the length of a few mm exhibit a peak in the distribution of the branch angles around 60 degrees from the ultracataclasite, which is much higher than the numerical prediction only considering the mode II with the Coulomb criterion, 30 degrees.

キーワード: 分岐断層, ウィングクラック, 断層帯, 高速破壊, 付加体, シミュレーション
Keywords: branch fault, wing crack, fault zone, dynamic rupture, accretionary complex, simulation

プレート沈み込み帯分岐断層の岩石物性と変形様式 延岡衝上断層掘削コアと物理 検層データを用いたダメージパラメータの定量化 Physical property transition and calculation of damage parameter of a fossilized subduc- tion zone megasplay fault

浜橋 真理^{1*}, 濱田 洋平², 木村 学¹, 山口 飛鳥³, 亀田 純¹, 斎藤 実篤², 福地 里菜⁴, 藤本 光一郎⁴, 橋本 善孝⁵, 比名 祥子⁶, 柴田 美緒⁵, 北村 有迅²

Mari Hamahashi^{1*}, Yohei Hamada², Gaku Kimura¹, Asuka Yamaguchi³, Jun Kameda¹, Saneatsu Saito², Rina Fukuchi⁴, Koichiro Fujimoto⁴, Yoshitaka Hashimoto⁵, Shoko Hina⁶, Mio Eida⁵, Yujin Kitamura²

¹ 東京大学, ² 独立行政法人海洋研究開発機構, ³ 東京大学大気海洋研究所, ⁴ 東京学芸大学, ⁵ 高知大学, ⁶ 朝日新聞社

¹The University of Tokyo, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ⁴Tokyo Gakugei University, ⁵Kochi University, ⁶The Asahi Shimbun

Subduction zone megasplay faults are known to cause great earthquakes and tsunamis and have been the subject of numerous geological and geophysical studies, but their initiation and evolution remains poorly constrained. Therefore, the Nobeoka Thrust in the Shimanto belt in Kyushu, a fossilized megasplay fault in ancient accretionary prism is studied to understand the mechanism of the megasplay fault. In this study, we investigate the physical property and deformation pattern of the Nobeoka Thrust from core description and logging data from the Nobeoka Thrust Drilling Project (2011).

The fracture zone (damage zone) observed in the hanging wall, fault core, and footwall of the Nobeoka Thrust have two types; cohesive/mineral vein filled fracture zones and brecciated fracture zones. The former causes high peak in resistivity and P and S-wave velocity while the latter causes rise in caliper and porosity, and drop in resistivity and P and S-wave velocity. These two types of fracture zones coexist and the brecciated zones are generally in the center of the main fracture zone, whereas the cohesive structures are distributed above and below the brecciated zones.

Here We assume that at the highest peaks in resistivity, strain is accumulating towards the main fracture zones, causing strain hardening, but eventually collapses to become strain weakening, at which point critical stress state is attained. Why does resistivity rise with strain accumulation (strain hardening), even though porosity does not show significant decrease and start to decrease after its maximum peak? Strain accumulation appears to cause strengthening, and rocks become more cohesive, and eventually, reach its yield point.

On the other hand, cross correlation with neutron porosity and resistivity at intervals of porosity increase in the fracture zones first shows sharp drop in resistivity in the lower porosity, but later once porosity reaches a certain value, decrease in resistivity becomes gradual, and porosity increase becomes more significant. Here, this porosity boundary is named <percolation threshold>.

We further set a hypothesis that the geometry and density of the cracks transit with strain accumulation. During strain hardening (resistivity increase), cracks are randomly distributed, and as number distribution increase, cracks will start to coalesce. Propagation of the cracks will occur after coalescence, and not until then would porosity start to increase. Once the geometry and distribution (distance ?between the crack) reach their critical values, and once they attain the <percolation threshold>, increase in porosity is observed. Here, We assume that this threshold corresponds with the transition in geometry (aspect ratio), size, and distribution of the cracks.

Motivated by these observations and hypotheses, I analyze what factors including the geometric attributes and distribution of cracks relate with the critical failure condition at the fracture zones in the hanging wall, footwall and main fault core of the Nobeoka Thrust. In this study, from lithology/structure data from core description and logging data, I extract number distribution as crack density, estimate crack geometry (aspect ratio of the crack: width(along depth)/diameter) from resistivity and porosity data, and parameterize these components to apply to percolation theory and damage mechanics (micromechanics) model of interactive wing cracks, which derives concepts from Griffith's crack theory that considers the effect of initially present microcracks, and critical stress formulated by inverse square root of crack length. To geometrically and physically investigate the development of fault mechanisms and evolution of the Nobeoka Thrust, I examine the dynamic transition with stress at the <resistivity peak> above the main fracture zone, <center> of the main fracture zone, and the <percolation threshold>.

キーワード: 付加体, 分岐断層, 物理検層, 岩石物性

Keywords: Accretionary prism, Megasplay fault, Geophysical logging, Physical property

Smooth stress drop under very heterogeneous background stress Smooth stress drop under very heterogeneous background stress

福山 英一^{1*}, 溝口 一生², 山下 太¹, 東郷 徹宏³, 川方 裕則⁴
Eiichi Fukuyama^{1*}, Kazuo Mizoguchi², Futoshi Yamashita¹, Tetsuhiro Togo³, Hironori Kawakata⁴

¹ 防災科研, ² 電中研, ³ 中国地震局地質研究所, ⁴ 立命館理工
¹NIED, ²CRIEPI, ³Inst. Geol. CEA, China, ⁴Ritsumei Univ.

There is a long lasting discussion why stress drop of an earthquake is uniform independent of its focal depth. This feature affects the friction law of earthquake rupture whether the absolute stress is important for the friction during an earthquake. Here, we propose a model that explains the seismological observation based on our recent experiments.

We conducted a series of large-scale biaxial rock friction experiments using the shaking table at NIED. Slip surface dimension is 1.5m in length and 0.5m in width. During the experiments, many stick slip events were observed by an array of strain gauges glued close to the slip surface at the side of the rock sample. Among them, we could capture many confined stick slip events whose rupture did not reach the edge of the sample. These events could be considered very similar situation as those of natural earthquakes. Mizoguchi et al. (2012) reported that the rupture length of these events seemed proportional to the amount of stress drop, suggesting a scaling relation between size and stress drop in the laboratory.

Here, we found that such confined events occurred under very heterogeneous stress environments. Such stress heterogeneity might come from the complicate geometry of sliding surface. However, during the confined event, the stress drops rather smoothly independent of the absolute stress level (since we know the initial stress state, we can measure the absolute stress). This feature suggests that the rupture propagation (or constitutive relation) is rather independent on the fluctuation of total stress field. In contrast, the amount of slip is considered rather continuous due to smooth stress drop distribution in space, which is quite reasonable in the theory of continuum medium. We think that this slip controlled feature could be a main reason for the constant stress drop observation in seismology.

鏡肌の微細組織と成因

Microstructures and formation process of slickenside

西脇 隆文^{1*}, 安東 淳一¹, 廣瀬 丈洋², 鍵 裕之³

Takafumi Nishiwaki^{1*}, Jun-ichi Ando¹, Takehiro Hirose², Hiroyuki Kagi³

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 独立行政法人 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 東京大学地球化学実験施設

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate school of science, Hiroshima University, ²Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Geochemical Laboratory, The University of Tokyo

はじめに: 断層運動の素過程は地表に露出する断層岩の微細組織観察によって理解する事が可能である。本研究が対象とする“鏡肌”は多くの断層で確認でき、滑らかな光沢を示す顕著な特徴を有する。その存在は古くから知られているが、成因や断層運動に与える影響に関してはほとんど理解されていない。そこで本研究では、天然の石灰岩中に発達した鏡肌を主に分析透過型電子顕微鏡 (ATEM)、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて観察し、その微細組織を明らかにする事を試みた。また、回転式高速摩擦試験機を用いて鏡肌の再現実験を行い、力学データと回収試料の微細組織観察から鏡肌の形成過程を考察した。

鏡肌試料: 観察に用いた鏡肌はスイスアルプス地方東部に分布する Glarus 衝上断層面上に発達するものである。Glarus 衝上断層は上盤の Helvet ナップが漸新世から中新世の間に水平距離で約 30 km から 40 km 北方に移動した世界最大級の衝上断層とされている。Glarus 衝上断層中には層厚 1 m ~ 2 m の石灰岩 (Lochseiten 石灰岩: LK) 層が狭在されており、鏡肌はこの LK 中に発達する。露頭観察を行ったスイス Glarus 州 Linthal では、風化を受けていない鏡肌は非常に強い光沢を有し、鏡肌面には平行に伸びる条線が発達する。

再現実験: 実験試料には Carrara marble (方解石: 99 vol%, 平均粒径: 160 μ m) を円筒形 (外径 25 mm, 内径 15 mm) に加工したものを使用した。実験条件はすべり速度が 0.10 m/s、垂直応力が 1.0-3.0 MPa、すべり変位量は最大 5 m とした。各実験の前に、低速度 (0.01 m/s)・低荷重 (0.3 MPa) で模擬断層面同士が平行になるまで回転させ、その後に実験を行った。

結果・考察: 鏡肌の観察の結果から、以下の事が明らかになった。1) 鏡肌は方解石の組成を持つ厚さ数十 nm の薄層である。2) この薄層は長径が数十 nm、アスペクト比約 0.1 の偏平な粒子から構成される。また、実験からは以下の事が明らかになった。3) 実験においても天然のものと同じ微細組織を持つ鏡肌が形成された。4) 鏡肌は比較的低速のすべり条件 (0.1 m/s) においても形成された。5) 鏡肌はすべり変位量と垂直応力が大きいほど広範囲に形成される。6) 垂直応力が大きいほど、短いすべり変位で鏡肌は形成される。7) 鏡肌の形成による摩擦強度の劇的な減少は見られない。8) 鏡肌の形成に先立ち、断層面上の凹凸が剪断によって破碎され細粒粉砕物が形成されている。鏡肌はこの細粒粉砕物上に発達している。以上の結果は、鏡肌は細粒粉砕物が剪断でさらに細粒化し、“トライボフィルム”と同様の剪断応力下での焼結現象を伴って形成される事を示唆している。現在は、実験により形成された鏡肌について SEM、TEM を用いて微細組織観察を進めている。

キーワード: 鏡肌, 断層運動, 微細組織, Glarus 衝上断層, 摩擦実験

Keywords: slickenside, faulting, microstructure, Glarus thrust, friction experiment

ESR スペクトル解析による黒色断層岩の成因診断

A diagnostic technique of the origin of dark fault rocks using ESR spectrum analysis

福地 龍郎^{1*}Tatsuro Fukuchi^{1*}¹ 山梨大学大学院教育学研究科¹Course of Science and Culture Education, Graduate School of Education, University of Yamanashi

断層帯には断層摩擦熱により固結・磁化した黒色の断層岩がしばしば観察される。黒色断層岩の磁気ソースとしては主に磁鉄鉱 (magnetite: Fe_3O_4) とマグヘマイト (maghemite: $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) が考えられる (Fukuchi, 2012) が、両者は結晶構造が類似している上、酸化または還元反応により遷移するので区別は困難である。磁気ソースが磁鉄鉱の場合、断層岩は還元的環境下で形成されたことを意味するのに対し、マグヘマイトの場合には酸化的環境下で形成されたことになるので、磁気ソースの特定は地震時に断層帯で起こっている酸化還元反応を解明する上で重要である。一方、断層帯からしばしば検出されるシデライト (siderite: FeCO_3) は、熱分解によりウスタイト (wustite: FeO) を経由して磁鉄鉱やマグヘマイトを生成することが知られており、黒色断層岩の磁気ソースにシデライトが関係している可能性がある。シデライトの熱分解生成物は酸素の存在度や温度により様相を著しく変化させる (Darken & Gurry, 1946) ので、シデライトの熱分解生成物を調べるためには真空度を制御した詳細な加熱実験が必要となる。そこで本研究では、温度や圧力 (真空度) 条件を変化させたシデライトの加熱実験を実施し、XRD 分析により熱分解生成物の鉱物同定を行うと共に、温度や圧力条件の違いによる ESR (電子スピン共鳴) 信号の線形 (lineshape) の変化をスペクトル解析により明らかにした。また、野島断層やその他の断層帯から採取した黒色断層岩の ESR 信号の線形のタイプから断層岩の成因診断を試みた。

シデライトの加熱実験は次の3種類の条件で実施した。実験1) 温度 350 °C, 圧力 0.5Pa, 加熱時間 0 ~ 180 分, 実験2) 温度 350 °C, 圧力 0.5Pa ~ 0.1MPa, 加熱時間 60 分, 実験3) 温度 20 ~ 1520 °C, 圧力 0.5Pa, 加熱時間 5 分。実験1では、シデライトの熱分解生成物は主に低結晶質あるいは非晶質のウスタイト及び磁鉄鉱で、加熱時間と共にウスタイトは消滅し、磁鉄鉱の結晶度が高くなることが判明した。実験1で生成した磁鉄鉱はウスタイトの不均化 (disproportionation) によると考えられる。実験2で得られるシデライトの熱分解生成物はより高い結晶度を示すウスタイト及び磁鉄鉱で、圧力が上昇するとウスタイトは消滅して磁鉄鉱の結晶度がさらに高くなり、2.1kPa では磁鉄鉱が消滅することが判明した。実験2で生成した磁鉄鉱はウスタイトの酸化によると考えられる。実験3では、<600 °C の加熱温度では実験1と同様の結果が得られたが、ウスタイトが熱力学的に安定な温度 (570 °C) を超える 600 °C では非常に高い結晶度を示すウスタイトのみが検出された。ウスタイトの融点 (1370 °C) を超える 1400 °C でウスタイトは減少し、1520 °C で新たに磁鉄鉱が出現することが判明した。この溶融起源の磁鉄鉱はウスタイトのメルトから晶出したと考えられる。

XRD 及び ESR 測定の結果、シデライトの熱分解生成物には、不均化起源、酸化起源及び溶融起源の磁鉄鉱が存在し、起源の違いにより ESR 信号の線形が変化することが明らかになった。ESR スペクトル解析を行った結果、不均化起源の低結晶質磁鉄鉱は g 値が 2.1 ~ 2.3 及び半値幅/ピーク幅比 (比) は 1.45 ~ 1.62 でガウス型 (1.177) とローレンツ型 (1.732) の中間型を示すのに対し、酸化起源の磁鉄鉱は g 値が 2.2 ~ 2.4 及び比が 1.10 ~ 1.30 でガウス型に近い線形を示すことが判明した。また、溶融起源磁鉄鉱は g 値が 2.2 ~ 2.3 であるが、比が 0.90 程度でガウス型よりも更に低くなることが判明した。野島断層の黒色断層岩は、g 値が 2.13 ~ 2.24 及び比が 1.423 ~ 1.487 で不均化起源の低結晶質磁鉄鉱と同様の値を示した。従って、野島断層の黒色断層岩には溶融や酸化は起こっておらず、還元環境下で 350 °C 以上の温度で瞬間的に生成されたと推定される。

引用文献

L. S. Darken & R. W. Gurry (1946) The system iron-oxygen. II. Equilibrium and thermodynamics of liquid oxide and other phases. *J. Am. Chem. Soc.*, 68, 798-816.

T. Fukuchi (2012) ESR techniques for the detection of seismic frictional heat. In: *Earthquake Research and Analysis: Seismology, Seismotectonics and Earthquake Geology* (ed. D'Amico Sebastiano). InTech-Open Access Publisher, 285-308.

キーワード: 電子スピン共鳴, ESR スペクトル, 摩擦熱, シデライト, ウスタイト, 磁鉄鉱

Keywords: electron spin resonance, ESR spectrum, frictional heat, siderite, wustite, magnetite

炭質物をもちいた新しい地震断層温度計の開発

A new fault-thermometer based on vitrinite maturation by frictional heat

北村 真奈美^{1*}, 向吉 秀樹², FULTON, Patrick M.³, 廣瀬 丈洋⁴Manami Kitamura^{1*}, Mukoyoshi Hideki², FULTON, Patrick M.³, Takehiro Hirose⁴

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² (株) マリン・ワーク・ジャパン, ³ カリフォルニア大学, ⁴ 独立行政法人 海洋研究開発機構高知コア研究所

¹Depart. of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ²Marine Works Japan Ltd., ³Depart. of Earth and Planetary Science, University of California Santa Cruz, ⁴Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC

大地震の発生時には断層が高速・大変位運動するため、断層内部に顕著な摩擦熱が発生する。その摩擦熱に起因した断層内部での物理化学プロセスによって、地震時の断層の動的すべり挙動（すべりはじめた断層が大地震に発展するかどうかを決める要因の一つ）が支配されていることが、今世紀に入って明らかとなってきた。このような観点から、地震時の摩擦発熱を検出して地震のダイナミクスを探ろうとする試みが、1999年台湾の集集地震、2008年中国の四川大地震、2011年東北地方太平洋沖地震直後の断層掘削孔を使った摩擦発熱の余熱計測によってなされている。また、地震性の断層すべりを起こした断層帯からも、強磁性反射波（Fukuchi et al., 2005）、微量元素と元素同位体（例えば Ishikawa et al., 2008）、粘土鉱物の変化（例えば Hirono et al., 2008）、ビトリナイト反射率（例えば Sakaguchi et al., 2011）などの手法によって断層摩擦発熱に起因する熱異常が検出されはじめている。この中でもビトリナイト反射率（ R_o ）と被熱温度との相関関係（e.g., Sweeney and Burnham, 1990）は古くから地質温度計として用いられている。しかし、これらの関係式は地質学的代スケールの被熱時間を仮定している。地震断層すべりは被熱時間が数秒から数十秒と非常に短く、不可逆反応なので、従来の R_o と温度の関係式から断層の発熱温度を求めることは難しいと考えられる。そこで我々は、数秒間の摩擦発熱を伴う地震性断層すべりによって R_o がどのように変化するかを、石英（90 wt%）とビトリナイト（10 wt%）の混合ガウジを用いた高速摩擦実験によって調べた。その結果、断層すべりに伴う短い発熱時間によっても、 R_o が指数関数にしたがって著しく上昇し、この摩擦発熱温度と R_o の相関関係が断層温度計として使えることがわかった。

この新しい地震断層温度計もちいて、四万十帯メランジュ帯内部に発達する断層帯および南海トラフ先端に発達する断層で確認された石炭の熱異常から、摩擦発熱の絶対温度を見積もって、そこから地震ダイナミクスを規定する地震時の断層の動的断層強度を推定することを試みた。調査した四万十帯内部に発達する断層帯は、母岩部分の R_o が約 1.2% であるのに比べて、厚さ約 8 mm の剪断集中帯を含む断層帯内部では R_o が 1.7-5.6% と非常に大きい値を示す。この R_o の熱異常を、1.3 m/s の石英-石炭実験から得られた断層温度計を使って、過去に起こった最大の地震の時の摩擦発熱温度を推定すると、630 となる。8 mm の剪断集中帯で地震時のすべり量を 15 m、断層岩の密度と熱容量を 2.3 kg/m^3 と 1.0 kJ/kg K とすると、地震時の剪断強度は 0.79 MPa となる。母岩の R_o が 1.2% なので最大埋没深度は 6 km 程度であると考えられるので、その深度で地震が起こったとして断層にかかる垂直応力は 76 MPa なので、地震時の動的摩擦係数は 0.01 程度になることがわかった。同様の解析を、南海トラフの巨大分岐断層先端部で確認された石炭の熱異常（ $R_o = 0.6\%$: Sakaguchi et al., 2011）に適応して、地震時の剪断強度と摩擦係数を推定するとそれぞれ 0.53 MPa と 0.18 となった。これらの結果は、地震時の高速すべり運動を再現した摩擦実験の結果（Di Toro et al., 2011）や、1999年の台湾集集地震の断層掘削孔の温度測定から解析された地震時の摩擦係数（Kano et al., 2006）とよく一致する。開発した断層温度計はまだ改良が必要なものの、このように天然の断層から地震時の断層パラメータを推測するツールになりえることがわかった。

キーワード: 断層, 摩擦発熱, ビトリナイト反射率, 炭質物, 地震

Keywords: fault, frictional heating, vitrinite reflectance, carbonaceous matter, Earthquake

ドレライト粉砕ガウジの低～高速摩擦特性

Frictional properties of comminuted dolerite gouges at low to high slip velocities

和田 純一^{1*}, 野田 博之², 岡崎 啓史³, 大橋 聖和¹, 北島 弘子⁴, 高橋 美紀⁴, 金川 久一¹

Jun-ichi Wada^{1*}, Hiroyuki Noda², Keishi Okazaki³, Kiyokazu Oohashi¹, Hiroko Kitajima⁴, Miki Takahashi⁴, Kyuichi Kanagawa¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 海洋研究開発機構, ³ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ⁴ 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター

¹ Graduate School of Science, Chiba University, ² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³ Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ⁴ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

ドレライト試料の粉砕時間と粉砕ガウジの低～高速摩擦特性との関係を検討した。鉄乳鉢で粉砕しふるいにかけた、粒径 500 μm 以下のドレライト粉砕試料をさらに自動瑪瑙乳鉢で粉砕し、10 分間、6 時間、12 時間、以後 12 時間毎に 60 時間まで粉砕した。粉末 X 線回折分析の結果、粉砕時間 10 分間の試料には非晶質物質は含まれず、粉砕時間 6~36 時間までは粉砕時間に応じて非晶質物質含有量が約 40 wt% まで増加するが、粉砕時間が 36 時間以上になると粉砕時間が長くなっても非晶質物質含有量は増減しなくなった。

まず広島大学の高温二軸試験機を使用して、粉砕時間 10 分間、24 時間および 60 時間のドレライト粉砕試料を室温および 120 $^{\circ}\text{C}$ 、垂直応力 20 MPa の下で変位速度を 2, 20 $\mu\text{m/s}$ の間でステップ状に変化させながら摩擦実験を行った。その結果、温度や粉砕時間に関わらず摩擦係数は 0.7 程度で大きな差は認められず、また変位速度の増加（低下）に伴い摩擦係数が低下（増加する）速度弱化的挙動を示した。室温の実験では粉砕時間が短いとすべり軟化的挙動を示し、粉砕時間の増加に伴いすべり硬化的挙動を示す傾向が認められたが、120 $^{\circ}\text{C}$ の実験では粉砕時間によらず定常すべりの挙動を示した。

次に、産業技術総合研究所の回転式低速・高速剪断試験機を使用して、粉砕時間 10 分間、12 時間および 60 時間のドレライト粉砕試料を室温、垂直応力 2 MPa の下で、変位速度 20 $\mu\text{m/s}$ ~1.3 m/s の範囲で摩擦実験を行った。その結果、粉砕時間によらず変位速度 4 cm/s 以下では変位速度によって摩擦係数は大きく変化しない (0.54~0.69) が、変位速度 4 cm/s 以上になると変位速度の増加に伴って急激に摩擦強度が低下した（変位速度 1.3 m/s では摩擦係数 0.2 程度）。また変位速度 1.3 cm/s 以下の同一変位速度では、粉砕時間 12 時間および 60 時間の試料の摩擦係数 (0.59~0.69) が粉砕時間 10 分間の試料の摩擦係数 (0.55~0.6) より大きく、一方変位速度 13 cm/s 以上の同一変位速度では逆に、前者の摩擦係数 (0.14~0.47) が後者の摩擦係数 (0.21~0.54) より小さくなる傾向が認められた。また、変位速度 20 $\mu\text{m/s}$ では、二軸試験機による室温の摩擦実験と同様に、粉砕時間が短いとすべり軟化的挙動を示し、粉砕時間の増加に伴いすべり硬化的挙動を示す傾向が認められた。

以上のような粉砕時間の違いによるドレライト粉砕ガウジの摩擦特性の違いは、非晶質物質に吸着した水分により統一的に説明することが可能である。非晶質物質は空気中の水分の吸着と帯電により破砕粒子周囲に豆石状に付着する傾向があり、粉砕時間が長い試料ほど非晶質物質を多く含むことから水分を多く吸着すると想定される。ガウジが水分を吸着すると摩擦強度が増大する (Mizoguchi et al., 2006, GRL) ことから、すべり面の温度が 100 $^{\circ}\text{C}$ 以下の場合には非晶質物質に水分が吸着し、その量が多い粉砕時間が長い試料ほど摩擦強度が大きくなると考えられる。一方、摩擦発熱によりすべり面の温度が 100 $^{\circ}\text{C}$ 以上になると非晶質物質に吸着した水分が失われるため、その量が多い粉砕時間が長い試料ほど摩擦強度が大きく低下すると考えられる。従って、変位速度が 4 cm/s に達した際にすべり面の温度が 100 $^{\circ}\text{C}$ 以上になった可能性が大きい。また、室温、変位速度 20 $\mu\text{m/s}$ で粉砕時間が短いとすべり軟化的挙動を示し、粉砕時間の増加に伴ってすべり硬化的挙動を示す傾向が認められるのは、非晶質物質への水分の吸着が実験中にも進行していることを示唆している。

キーワード: ドレライトガウジ, 非晶質物質, 低～高速摩擦特性

Keywords: Dolerite gouges, Amorphous phase, Frictional properties at low to high slip velocities

能登半島地震の前震活動と余震の移動

Foreshocks and migrations of early aftershocks for the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake

加藤 愛太郎^{1*}, 酒井 慎一¹

Aitaro Kato^{1*}, Shin'ichi Sakai¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ ERI University of Tokyo

It is crucial importance and challenging of extracting slip behavior on a fault from any earthquake catalogue. The JMA catalogue has been well constructed using continuous waveforms observed by a nationwide permanent seismic network. However, temporal changes in the completeness magnitude threshold of the JMA catalogue are sometimes problematic. Especially, small magnitude earthquakes tended to be masked by overlapping arrivals of waves from different earthquakes and incoherent noises. In order to investigate the high-resolution spatio-temporal variations of foreshocks and early aftershocks of the 2007 Noto Hanto earthquake, we applied a matched-filter technique to detect missing events with the use of continuous three-component velocity seismograms recorded by a dense network of continuous and highly-sensitive seismic stations. We identified three foreshocks within about 12 minutes prior to the initiation of the mainshock rupture. These foreshocks were relocated in the vicinity of the initiation point of the mainshock rupture, where a low-velocity and high-conductive body are imaged by previous studies [Kato et al., 2008; Kato et al., 2011; Yoshimura et al., 2008]. We found out that the newly detected aftershocks migrated in along-strike with logarithmic time since the mainshock origin. The early aftershock migration is significant toward the southwest direction. The post-seismic deformation suggests that afterslip occurred along the source fault plane [Hashimoto et al., 2008]. Thus, the aftershock migration with logarithmic time scale is likely explained by propagating afterslip.

階層アスペリティモデルにおける地震の始まり方の多様性

Diversity in the initial phase of dynamic earthquake rupture in multiscale asperity model

野田 博之^{1*}, Nakatani Masao², 堀 高峰¹

Hiroyuki Noda^{1*}, Masao Nakatani², Takane Hori¹

¹ 海洋研究開発機構、地球内部ダイナミクス領域, ² 東京大学、地震研究所

¹IFREE, JAMSTEC, ²ERI, The University of Tokyo

Seismological observations [e.g., Abercrombie and Rice, 2005] suggest that a larger earthquake has larger fracture energy G_c . One way to realize such scaling is to assume a hierarchical patchy distribution of G_c on a fault; there are patches of different sizes with different G_c so that a larger patch has larger G_c . Ide and Aochi [2005] conducted dynamic rupture simulations with such a distribution of weakening distance D_c in a linear slip-weakening law, initiating ruptures on the smallest patch which sometimes cascades into a larger scale. They suggested that the initial phase of a large earthquake is indistinguishable from that of a small earthquake. Noda et al., [submitted to JGR; 2012 SSJ annual meeting] conducted 3D simulations of sequence of earthquakes in a similar multiscale asperity model with a rate-and-state friction (RSF). Multiscale asperities were represented by a distribution of the state evolution distance in the aging version of RSF evolution law.

A circular rate-weakening patch, Patch L (radius R^L) has been modeled which has a smaller patch, Patch S (radius R^S), in it by the rim. Those patches have their nucleation radii, R_c^L and R_c^S for Patch L and Patch S respectively, which are determined by the RSF parameters. Here we shall call the ratio of the radii R^L/R^S the scale gap, and the ratio of the patch size to the nucleation size $R^L/R_c^L = R^S/R_c^S$ the brittleness of the system. Up to R_c^L or R_c^S , compact quasistatic nucleation basically follows $1/t_f$ acceleration where t_f is time to the earthquake, with amplitudes depending on the characteristic slip of state evolution of the patch. If the scale gap dominates, ruptures nucleated in Patch S cannot cascade up into a large earthquake spanning Patch L, and large earthquakes are necessarily preceded by large nucleation inside Patch L but out of Patch S. If the brittleness dominates, the ruptures nucleated in Patch S necessarily cascade up and span Patch L, and large quasistatic nucleation never occurs. If the brittleness and the scale gap are comparable, large earthquakes are initiated in a variety of ways in a single simulation. In short, a large nucleation always results in a large earthquake, while a small nucleation occasionally causes a large earthquake through cascade-up. These connections between the size of quasi-static nucleation and the eventual earthquake size were fully reported previously by us.

In the present talk, we focus on so-called 'initial phase', that is, the growth of moment release rate right after it has exceeded a threshold level set to define the onset of dynamic earthquake rupture. In most of our simulations, 'initial phase' correlates with the size of preceding quasi-static nucleation, not caring the eventual earthquake size. Initial phase is strong and short when the preceding quasistatic nucleation is small, while it is gentle and lasting long when preceded by large quasi-static nucleation, as argued previously [e.g., Shizazaki and Matsu'ura, 1998]. However, we also found cases where dynamic rupture of a large earthquake preceded by a large quasistatic nucleation began with a sharp quick initial phase. This happens when the large nucleation interacts with Patch S. The sharp initial phase in this case should be regarded as a frictional noise passive to the ongoing acceleration of large nucleation. This is conceptually distinct from the Patch S event that cascades up, though telling the difference without seeing the spatio-temporal evolution of slip may be difficult.

キーワード: 地震サイクル, 階層アスペリティ, 速度状態依存摩擦則

Keywords: Earthquake cycle, Multiscale asperity, Rate-state friction

高分子ゲルの摩擦実験におけるゆっくりすべりと巨大地震 Slow events and giant earthquakes in friction experiments of polymer gels

山口 哲生^{1*}, 堀 高峰², 阪口 秀²
Tetsuo Yamaguchi^{1*}, Takane Hori², Hide Sakaguchi²

¹九州大学大学院工学研究院機械工学部門, ²独立行政法人 海洋研究開発機構

¹Department of Mechanical Engineering, Kyushu University, ²JAMSTEC

はじめに

高分子ゲル(以下ゲルと呼ぶ)のようなやわらかい粘弾性体を用いて摩擦実験を行なうと,しばしば時空間的に不均一なスティック-スリップ運動が起こり(岩石とは異なり)微小サイズからサンプルサイズに至るまで連続的にGR則に従うようなスリップイベントを発生させることができる[1]。また,ゲル媒質のレオロジーをコントロールすることにより,高速すべりやゆっくりすべりなどの多様なすべり現象を再現することができる。本講演では,アナログ実験の簡単なレビューを行なった後,我々の最近の取り組みを紹介する。

実験

摩擦実験:一定荷重でアクリル樹脂(Plexiglass)ブロックをゲルプレートに押し付けた状態でゲルプレートを一定速度(10 μm/s)で水平移動させ,ブロック-ゲル間を摩擦させた。

試料:上側のブロックには,30mm(すべり方向)×100mm(直交方向)×20mm(厚み)のサイズのアクリル樹脂ブロックを用いた。また,下側のプレートとして,剛性率(貯蔵弾性率)がほぼ等しく,粘性(損失弾性率)の異なる数種類のシリコンゲル(SILPOT184・CY52-276混合物,東レダウコーニング,200mm×200mm×20mm(厚み))を作成した。

可視化:ゲル変位場の可視化のため,ビデオカメラでゲル表面近傍に多数配置したマーカー粒子の動きを撮影した。PIV(Particle Image Velocimetry)法を用いて画像処理を行なうことで,すべり素過程,イベントサイズの決定,イベント間の応力蓄積過程の解析などを行なった。

結果とまとめ

粘性の小さなゲルにおいては,弾性波を伴うすべりだけでなく,非地震性のゆっくりとしたすべりも起こった。また,巨大イベント間の応力蓄積過程においては,中小サイズのイベントが局所的な応力解放を行ないながら特徴的な応力分布を形成することで,巨大イベントを"準備"していることが分かった。一方,粘性の大きなゲルにおいては,持続時間Tと地震モーメントM₀とがT~M₀²(1/2)に従うゆっくりとしたすべりを生じた。

アナログ実験においては,実際の地震現象との整合性をよく議論するだけでなく,実験結果から思い切って予想してみることが大事である。本講演では,これまで明らかにされていないメカニズムについても取り上げてみたいと考えている。

参考文献

[1] T. Yamaguchi, M. Morishita, M. Doi, T. Hori, H. Sakaguchi, J.-P. Ampuero, JGR Solid Earth, 116, B12306 (2011).

キーワード: 地震, アナログ実験, スロースリップ, PIV, レオロジー

Keywords: earthquake, analog experiment, slow slip, PIV, rheology

2011年東北沖地震の高速な余効すべりから推定される摩擦すべりの安定性の低下 Reduction of frictional stability illuminated by rapid afterslip following the 2011 Tohoku- oki earthquake

福田 淳一^{1*}, 加藤 愛太郎¹, 加藤 尚之¹, 青木 陽介¹

Jun'ichi Fukuda^{1*}, Aitaro Kato¹, Naoyuki Kato¹, Yosuke Aoki¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Spatial and temporal variations of seismic and aseismic slip on plate boundary faults have been interpreted to result from spatially heterogeneous distribution of frictionally unstable, rate-weakening, regions and frictionally stable, rate-strengthening, regions. Spatial distribution of frictional stability is usually assumed to remain stationary with time and this assumption has been supported by a number of observations. However, experimental and modeling studies show that frictional stability is not a stationary feature but is variable depending on slip rate and that this nonstationary behavior is an important factor in controlling extent of earthquake ruptures and evolution of slip rate. Here we invert Global Positioning System (GPS) data following the 2011 moment magnitude (MW) 9.0 Tohoku-oki earthquake to derive spatial and temporal evolution of afterslip and postseismic shear stress changes on the plate interface. We find that rapid afterslip for the first 15 days and subsequent slower slip cannot be reproduced by slip on a rate-strengthening patch with stationary frictional stability but can be reconciled with reduced frictional stability at high slip rate during the early period and progressive increase in frictional stability with decrease in slip rate. The slip rate dependence of frictional stability is qualitatively similar to laboratory measurements for serpentinite. The reduced frictional stability at high slip rate could potentially control rupture extent of early interplate aftershocks by promoting significant rupture propagation into the rapid afterslip area.

2010年ニュージーランド・ダーフィールド地震再訪 Revisit of the 2010 Darfield, New Zealand, Earthquake

橋本 学^{1*}

Manabu Hashimoto^{1*}

¹ 京大防災研

¹DPRI, Kyoto University

2006年から2011年まで運用された我が国の陸域観測技術衛星「だいち」は、数々の地震や火山噴火の観測を行い、これらの活動に伴う地殻変動に関する貴重な情報を提供してくれた。この期間には、世界中で重要な内陸地震が発生しており、我々は「だいち」搭載の合成開口レーダー PALSAR を用いて検出している。

2010年9月3日、ニュージーランド南島クライストチャーチ西方を震源とする、Mw7.0の地震が発生した。この地震の震源域はカンタベリー平原の中央部に位置し、顕著な被害はなかった。この地震が発生する前のGNSのマップには活断層は認定されていないが、全体として東西走向の明瞭な地表地震断層が現れた。

PALSARによる緊急観測が実施され、1mを越える視線距離変化が検出された。地表地震断層に沿って、かなり複雑な干渉縞パターンが認められ、震源断層が複雑な形状をしていることがわかる。コヒーレンス画像を見ると、低コヒーレンス域として複雑に屈曲した地表地震断層が明瞭に確認できる。低コヒーレンス域の中央部に大きく屈曲した部分があり、現地の観測出得られた余震分布も複雑である。最終的に7枚の小断層を分布させて、フィッティングを行い、最大で5m程度のすべりを推定した。

地震前の変動を知るために、2007年からのPALSARの画像をStaMPSにより時系列解析を行った。その結果、地震時の画像でコヒーレンスが低い領域に、視線距離伸長が見られる。特に、中心部の屈曲部には相似形の視線距離伸長の分布が見られる。ただし、断層から離れた領域にも視線距離伸長のシグナルが検出されるので、震源断層の運動と関係づけるのは留保する。ただし、地表を覆う堆積層の変動と基盤構造が相関を持つ例が報告されているので、そのような基盤構造を形成する断層が活動した可能性は残っている。

キーワード: InSAR, PALSAR, InSAR time series analysis, ダーフィールド地震, ニュージーランド, 内陸地震

Keywords: InSAR, PALSAR, InSAR time series analysis, Darfield earthquake, New Zealand, inland earthquake

3次元X線CTを用いた岩石試料の割れ目のフラクタル幾何学的特性 Fractal characteristic of fracture in glass or rock mineral by 3D X-ray CT measurement

八巻 淳子^{1*}, 武藤 潤¹, 長濱 裕幸¹, 佐々木 治², 鹿納 晴尚²
Junko Yamaki^{1*}, Jun Muto¹, Hiroyuki Nagahama¹, Osamu Sasaki², Harumasa Kano²

¹ 東北大学理学研究科地学専攻, ² 東北大学学術資源研究公開センター総合学術博物館

¹Department of Earth Science, Tohoku University, ²Tohoku University Museum

岩盤の割れ目系は、その地域の地震活動などに大きな影響を与えるため(例えば Oncel *et al.*, 2001; Dieterich and Richards-Dinger, 2010)、割れ目分布の複雑さを捉えることは重要である。近年、フラクタル幾何学を用いて、割れ目系の複雑さを捉える研究が多くなされてきたが、そのほとんどは平面の割れ目トレースや地表面の断層分布の解析に留まっている(Ohno and Kojima, 1992; Sukumono *et al.*, 1997 など)。実際の割れ目は空間的に広がっているうえに、断層破砕帯の成長パターンをはじめとする多くの地学的特徴は、統計的に自己アフィンであるため(Turcotte, 1989; Nagahama, 1994)、割れ目の空間的な広がりを捉えその異方性を考慮した測定が必要である。

そこで本研究では、X線コンピュータ断層撮影(CT)法を用いて、実験的に破壊した岩石試料における割れ目のフラクタル幾何学的特性を、異方性に着目して調べることを目的とした。試料は、ホウケイ酸ガラス、単結晶石英を用いた。ガラスは長さ12.7 mm、直径6.0 mm、石英は長さ7.5 mm、直径3.0 mmで、それぞれ円柱状に成形した。破壊実験には、固体圧(Grggs型)変形試験機を用いた。封圧は大気圧(一軸圧縮)および300 MPa、軸変位速度は 5.0×10^{-4} /s、圧媒体に鉛を用いて室温で実験を行った。ガラス試料は、差応力約3.2 GPaで脆性破壊し、試料下部に破壊が集中して粉砕化した。石英試料は、封圧300 MPaにおいて、差応力約7 GPaで脆性破壊し、試料上部に破壊が集中した。石英試料の一軸圧縮では差応力約2.5 GPaで脆性破壊し、試料下部が粉砕化した。得られた試料は、X線CTを用いて空間解像度 $3 \times 10 \mu\text{m}$ 、X線源は111~121 kV, 61~111 μA で撮影を行った。画像処理ソフトにはImageJを用いた。圧縮方向(ϵ_1)に垂直および平行に撮影された各画像において、Box-Counting法を用いた割れ目の空間占有率(D_{BC})と破砕粒子の粒径分布についてのフラクタル次元(D_{PSD})を求めた。

封圧300 MPaで破壊したガラス試料において、割れ目の空間分布はフラクタルであった。 ϵ_1 と平行な各画像の解析では、 D_{BC} は画像の切り出す方向と解析位置によらず1.4~1.6に集中した。一方、 ϵ_1 に垂直な画像の解析では、粉砕が激しくなる下部に向かって、1.1から1.7まで増加した。同様に、一軸圧縮によって試料下部が粉砕破壊した単結晶石英の破砕粒子の粒径分布もフラクタルであり、 ϵ_1 に垂直な面における D_{PSD} は、0.8から3.1と、破砕が激しい下部ほど高い値を示した。破壊面形状のフラクタル次元と破壊エネルギー密度は比例関係であることから(Nagahama and Yoshii, 1994)、比較的均質な物質であるガラスや単結晶の石英においても、破壊エネルギー分布の不均質性が生じている可能性を示唆している。また、ガラス試料の薄片において、SEMを用いて、 D_{BC} と D_{PSD} の比較を行ったところ破砕粒子の粒径が1~100 μm の範囲でどちらにおいてもフラクタル性が認められた。その関係は $2D_{BC} = D_{PSD}$ となり、割れ目の等方性を仮定している長濱(1992)の理論式 $2D_{BC} = D_{PSD} + 1$ と一致しない。

以上のことから、割れ目分布には異方性があり、解析面方向が異なるフラクタル次元を比較する際には、異方性を考慮する必要がある。

キーワード: フラクタル, X線CT画像, 異方性, 破砕幾何学

Keywords: fractal, 3D X-ray CT images, anisotropy, fracture geometry

横ずれ活断層沿いに発達した断層破砕帯の空間分布と構造特徴:有馬一高槻構造線活断層帯を例に

Spatial variations in fault zone structures along strike-slip faults: an example from active faults in southwest Japan

林 愛明^{1*}, 山下和彦²

Aiming Lin^{1*}, Katsuhiko Yamashita²

¹ 京都大学大学院地球惑星科学専攻地球物理学教室, ² 株式会社ジーベック

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto Univ., ²GEEBEC Ltd

最近、福井県大飯と敦賀、新潟県柏崎刈羽および青森県東原原子力発電所の敷地に活断層破砕帯が存在する可能性があることが指摘され、大きな社会的・経済的な問題となっている。地表に現れている活断層が地殻深部の震源断層と繋がっているため、地震の際、震源断層の破壊が地表にまで伝播し、地表の断層も一緒に動く。そのため、断層破砕帯の真上の建物は岩盤のずれとともに破壊される。地表地震断層のほとんどは既存の活断層とその周辺域に現れるため、活断層破砕帯の調査は、地震発生メカニズムの解明や防災上においては非常重要である。本講演では、有馬一高槻構造線活断層沿いに発達する断層破砕帯の空間分布と断層岩特徴を報告するとともに、活断層破砕帯の形成メカニズムを考察する。

Active faults and related fault-zone structures that form at shallow depths within the upper crust are closely related to the long-term seismic faulting history of seismogenic faults (e.g., Lin, 1999, 2008; Sibson, 2003; Lin et al., 2010). Accordingly, the analysis of deformation structures along active fault zones provides important information in reconstructing the long-term seismic faulting behavior of active faults and in understanding the tectonic environment and history of such faults.

This study presents a case study on the structures of strike-slip fault zones of the Arima-Takatsuki Tectonic Line (ATTL) and Rokko-Awaji Fault Zone (RAFZ), which consist of multiple right-lateral strike-slip active faults in southwest Japan. The formation mechanisms of damage zone and their tectonic implications are discussed.

Field investigations reveal spatial variations in fault zone structures along strike-slip active faults of the ATTL and the Rokko-Awaji Fault Zone (RAFZ) of southwest Japan, which together form a left-stepping geometric pattern. The fault zones are composed of damage zones dominated by fractured host rocks, non-foliated and foliated cataclasites, and a fault core zone that consists of cataclastic rocks including fault gouge and fault breccia. The fault damage zones of the ATTL are characterized by subsidiary faults and fractures that are asymmetrically developed on each side of the main fault. The width of the damage zone varies along faults developed within granitic rocks of the ATTL and RAFZ, from ~50 to ~1000 m. In contrast, the width of the damage zone within rhyolitic tuff on the northwestern side of the ATTL varies from ~30 to ~100 m. The fault core zone is generally concentrated in a narrow zone of ~0.5 to ~5 m in width, consisting mainly of pulverized cataclastic rocks that lack the primary cohesion of the host rocks, including a narrow zone of fault gouge (<0.5 m) and fault-breccia zones either side of the fault. The present results indicate that spatial variations in the width of the damage zone and the asymmetric distribution of damage zones across the studied strike-slip faults are caused by local concentrations in compressive stress within an overstep area between left-stepping strike-slip faults of the ATTL and RAFZ. The findings demonstrate that fault zone structures and the spatial distribution of damage zone are strongly affected by the geometric patterns of strike-slip faults.

References:

Lin, A., Ren, Z., Kumahara, Y., 2010. Structural analysis of the coseismic shear zone of the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, China. *Journal of Structural Geology*, 32, 781-791, DOI:10.1016/j.jsg.2010.05.004

Lin, A., Yamashita, K., Tanaka, M., 2013a. Repeated seismic slips recorded in ultracataclastic veins along active faults of the Arima-Takatsuki Tectonic Line, southwestern Japan. *Journal of Structural Geology*, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2013.01.005>.

Lin, A., Toda, T., Rao, G., Tsuchihashi, S., Yan, B., 2013c. Structural analysis of coseismic normal fault zones of the Mw 6.6 Fukushima earthquake, northeast Japan. *Bulletin of Seismological Society of America*, 103, in press, doi:10.17850/0120120111.

キーワード: 有馬一高槻構造線, 横ずれ活断層, 断層破砕帯, カタクレーサイト, 断層ガウジ, 断層角礫

Keywords: Arima-Takatsuki Tectonic Line, strike-slip active fault, fault damage zone, cataclastic rock, fault gouge, fault breccia

カタクレーサイトかんらん岩捕獲岩の記載岩石学的特徴 Petrological characteristics of cataclastic peridotite xenolith from NE Japan

武内 美佑紀^{1*}, 荒井章司¹
Miyuki Takeuchi^{1*}, ARAI, Syoji¹

¹ 金沢大学自然科学研究科

¹School of Natural System, Kanazawa University

かんらん岩捕獲岩は、火山直下のマントル物質そのものとして、たくさんの岩石学研究が行われてきた。その中で激しく変形を受けたと考えられるマイロナイト的な組織を示すものが得られることがあり(例えば、Basu, 1977; Yang et al., 2010)、これらの変形組織については、しばしばマントル内での延性せん断帯で形成されたと考えられている(例えば、Xu et al., 1993)。今回、東北日本弧、一ノ目瀉から、これらとは異なる変形組織を示すかんらん岩捕獲岩を見出した。この岩石の形成について議論したい。

この捕獲岩は粗粒な粒子(最大 1.3 mm)と細粒な粒子(最小 1 μ m)からなり、構成鉱物はかんらん石と斜方輝石、単斜輝石、スピネル、角閃石である。比較的粗粒なかんらん石がしばしば破断したり、輝石やスピネルの粒子が破砕され筋状に伸長して分布している。粗粒な粒子は角ばっており、マイロナイト中のように伸長していない。一定以上のサイズの粒子について面積を測定した結果、累積分布は両対数表示で直線的で、破砕物に特徴的な分布を示した(例えば、Turcotte, 1986)。これらの粗粒な鉱物の化学組成は、一般的な、比較的変形量の少ない粗粒な一ノ目瀉かんらん岩(レールゾライト)と同じ組成である。かんらん石は Fo 値 90.0 程度、スピネルの Cr# は 0.20 程度で、単斜輝石は LREE に枯渇した左下がりの REE パターンを示す。

一ノ目瀉から見出される一般的なレールゾライトと比較して鉱物組み合わせと鉱物化学組成が変わらないこと、低温でできる二次的な鉱物(例えば、蛇紋岩)を含んでいないことから、このかんらん岩捕獲岩は一ノ目瀉深部のかんらん岩がマントル内で破砕されたものであり、マントル条件でも脆性破壊が起こると示す。

一方で、細粒部には異なる組成を示すかんらん石や輝石が存在する。筋状に分布するかんらん石はしばしば粗粒なかんらん石と同じ組成のコアとそれより Fo 値が高く、CaO 含有量が高いリムを有する。また、高温組成(最大 1200 程度)を示す輝石がまばらに分布する。高温の単斜輝石が斜方輝石を包有する場もある。細粒のかんらん石粒子は外形によらず Mg、Ca に富むリムを有することから、細粒な鉱物は破砕と同時に、その後形成されたものと考えられる。破砕で発生した摩擦熱による部分的な融解が起こり、かんらん石は溶け残り、一部の輝石はメルトから晶出した可能性がある。

キーワード: かんらん岩, カタクレーサイト, 捕獲岩, マントル

Keywords: peridotite, cataclastic, xenolith, mantle

測地観測データと粘弾性緩和のモデリング Geodetic observation and modeling of viscoelastic relaxation

田中 愛幸^{1*}

Yoshiyuki Tanaka^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

測地観測データから、マンツルのレオロジーが推定されている。そのための代表的な現象としてポストグレイシャルリバウンドがある。氷河の消長を地球表層の荷重の時空間変動と見なし、それによるマンツルの粘弾性緩和がモデル化される。モデルから計算される地殻変動や重力変化を観測データと比較することで、仮定したレオロジーの妥当性を評価する。この結果、例えばマックスウェルの粘弾性を仮定してマンツルの粘性を 10^{21} 乗程度(数千年の緩和時間に相当)とすると、現在も継続しているスカンジナビアやカナダの年間1cm程度の隆起を説明することができる。同じことが地震による長期的な余効変動に対しても行われている。違いは、余効変動の方が扱う時間スケールが短い(数年から数百年)ということと、境界条件として表層荷重の代わりに地震時のディスロケーションを与えることである。このような時間スケールの違いが生じるのは、前者がよりグローバルな平均に近いような粘性を反映するのに対し、後者が沈み込み帯付近のより局所的なより低い粘性を反映しているためと考えられる。

本講演では、余効変動の測地観測データとの比較における粘弾性緩和のモデリングにおける実際的な観点からの課題を、例をあげながら解説する。一つはモデル自体におけるものである。例えば、測地データとの比較では、上に述べたマックスウェル粘弾性のような比較的簡単なものが用いられてきた。また、非圧縮性の仮定も多く用いられてきた。その理由は、モデル化が容易であったからであろう。最近、圧縮性を取り入れたり非線形なレオロジーを用いたりした計算も行われてきつつある。不均質構造を考慮するのに優れた有限要素法も用いられるようになってきたが、自己重力の効果がすべてのモデルで取り入れられてはいない。しかし、自己重力の有無により計算される変動に大きな差が出るのが指摘されている。もう一つは、余効変動のメカニズムが、粘弾性緩和だけではなく、余効すべりなどの他のメカニズムも重ね合わせられていることである。余効すべりと粘弾性緩和の分離をより容易にする一つの手法として、著者らが開発した、GRACE衛星重力データを用いたモデリングの結果を示す。この手法は、球体の地球モデルを用いることで自己重力の効果や曲率の影響を正確に取り入れることができ、M9クラスの地震による広範囲に及ぶ変動をモデル化し、重力データと比較するのに適している。手法を2004年スマトラ島地震前後のGRACEデータに適用したところ、余効すべりと粘弾性の両方が地震直後の数ヶ月とその後の数年間に、それぞれ見えていることが分かった。今後、東北地方太平洋沖地震に同じ手法を適用することで、東北日本下の粘性を推定することが可能になるとと思われる。その際、実験室で求められているようなレオロジーを同手法に組み込むことができれば、物質科学と結びつけられた、より堅固な物理モデルを構築することが可能となるかもしれない。

キーワード: 粘弾性緩和, 余効変動, 地殻変動, 衛星重力, 地震サイクル

Keywords: viscoelastic relaxation, post-seismic deformation, crustal deformation, satellite gravity, earthquake cycle