

2009年箱根火山群発地震活動の震源及びメカニズム解分布から明らかになった群発地震と断層構造・地殻内流体との関係 Fluid-induced swarm activity as revealed by precisely determined hypocenters and focal mechanisms of earthquakes

行竹 洋平^{1*}, 伊東博¹, 本多 亮¹, 原田 昌武¹, 棚田 俊收², 吉田 明夫¹

YUKUTAKE, Yohei^{1*}, Hiroshi Ito¹, HONDA, Ryou¹, HARADA, Masatake¹, TANADA, Toshikazu², YOSHIDA, Akio¹

¹ 神奈川県温泉地学研究所, ² 防災科学技術研究所

¹ Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, ² National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. はじめに

群発地震の発生過程に地殻流体が密接に関わっている可能性があることは、過去多くの研究で指摘されてきている(例えば、Sibson, 1996)。さらに、断層破砕帯で構成される亀裂系が、地殻内において高い透水性を持つ通路として、流体の移動に重要な役割を果たすと考えられている(Sibson, 1987)。しかしながら、群発地震の発生と地殻流体、および断層構造との関係を示す地震学的な観測データは乏しいのが現状である。本発表では、稠密地震観測網データを用いた、2009年箱根火山で発生した群発地震活動の詳細な震源およびメカニズム解分布の結果に基づいて、これらの関係についての考察を行う。

2. 箱根火山と群発地震

箱根火山では、過去にたびたび活発な群発地震活動が発生しており、中には強震や噴気域の拡大を伴った事例も報告されている。また、カルデラ内にはNaClに富む温泉が湧出しており、これらは地下深部に存在するマグマ起源の熱水が地下水と混合したものと解釈されている。また、深部からの高圧の熱水は群発地震の発生と密接に関係している可能性が指摘されてきた(Oki and Hirano, 1970; Matsuo et al., 1985)。

3. 震源及びメカニズム解分布

2009年8月4日から、箱根カルデラ内の湖尻周辺の領域で、地震活動が活発化した。8月4日から12日午前9時までの間において、連続波形記録を目視によりカウントした地震数は1780イベントにおよんだ。その中で、温泉地学研究所のルーチン処理により約1200イベントの震源位置を決定することができた。我々は、箱根カルデラ内およびその周辺域に展開されている、温泉地学研究所、防災科研 Hi-net、東大地震研、気象庁の定常観測点のほか、群発地震開始前から設置されていた20点の臨時観測点のデータを使用し、群発地震の震源およびメカニズム解を高精度に推定することを行った。震源決定には、Double Difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)を用いた。メカニズム解は決定精度を高めるため、P波初動極性データに加えて、P波ならびにSH波の振幅情報も合わせて用いて決定した。

これらの解析の結果、群発地震はほぼ鉛直な4枚の面上に集中して分布することが明らかになった。また、これらの面状の震源分布ゾーンの厚さはおよそ100mであり、この厚さは震源決定誤差を考慮に入れても有意である。地震のメカニズム解のほとんどは横ずれ断層型でそろっており、それらメカニズム解の節面の一つは震源が分布する面状ゾーンの走向とよく一致している。

さらに、地震活動域の時間的推移に着目すると、地震活動の初期において地震発生域が拡散的に広がっていったことが明らかになった。それら一連の地震が流体の拡散によりトリガーされたという仮定のもとに、震源の時間-空間分布からShapiro et al. (1997)の手法に従い流体の拡散係数(D)を推定すると、0.5~1.0m²/sという値がえられた。この値はダム貯水による誘発地震、注水実験に伴う誘発地震、他領域における群発地震活動から推定された地殻内での水の拡散係数(例えば、Simpson et al., 1988; Shapiro et al., 1997; Parotidis et al., 2003)と概ね一致する。

4. 議論

地震発生域が拡散的に広がっていく現象は、注水試験時に観測される誘発地震の拡散の特徴とよく一致していることから、群発地震は流体が拡散する過程で誘発されたことが示唆される。また、群発地震の震源が面状に分布していることから、群発地震は既存の断層破砕帯内で発生している可能性が考えられる。断層の長さや断層破砕帯の厚さの関係(Vemilje and Scholz, 1998)から、長さ1kmの断層を持つ破砕帯の厚さは100m程度と考えられ、これは解析から得られた群発地震の面状の震源分布ゾーンの厚さと調和的である。また、断層破砕帯は周辺の岩盤と比較して透水係数が高く、地殻内で流体の通路となる事が指摘されている。このことから、群発地震は高い透水性を持つ断層破砕帯内に存在する高圧の地殻内流体が拡散する過程でトリガーされたというモデルが考えられる。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所 Hi-net、東京大学地震研究所、気象庁観測点の地震波形記録を使用させていただき

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS29-01

会場:105

時間:5月21日 13:45-14:00

ました。

キーワード: 群発地震, 地殻流体, 断層構造, 震源分布, メカニズム解

Keywords: swarm earthquake, fluid, fault damage zone, hypocenter distribution, focal mechanism

断層の幾何学と破砕帯の分布・発達過程

Fault geometry affecting spatial distribution and evolution of fracture zones

丹羽 正和^{1*}

NIWA, Masakazu^{1*}

¹ 日本原子力研究開発機構

¹Japan Atomic Energy Agency

断層の発達過程と幾何形状との関係については、アナログ実験や破壊のシミュレーション、露頭スケールでの地質観察を中心とした研究に基づき数多くの議論がなされている。一方、2億年以上にわたり変動帯に位置し続けている日本列島では、複数の断層が相互に関連し、総延長が数10km余りに及ぶような断層帯を構成するケースが多い。断層帯において地震活動やそれに伴う岩盤の破壊・変形を議論する際には、地質図規模の広域的なスケールでの調査に基づき断層帯の発達過程を把握することが重要である(例えば、大橋・小林, 2008, 地質雑)。これらの知見は、将来の断層活動における破砕帯の広がりを予測・評価する上でも必要であり、放射性廃棄物の地層処分や液化天然ガスなどの地下備蓄といった分野にとっても重要な研究対象である。本講演では、破砕帯の分布・発達過程や、それらと断層帯の幾何形状との関係について明らかにするため、岐阜県の跡津川断層帯などにおいて実際に地質図規模(約20km四方)のスケールでの調査を行った事例(丹羽ほか, 2008, 地質雑; Niwa et al., 2011, Eng. Geol.)について紹介する。

複数の断層からなる断層帯の場合、2つの断層同士が向かい合うステップ部では、著しい応力変化に起因する膨張または圧縮により、小断層や割れ目の発達程度が大きいことが指摘されている。特に、圧縮性のステップの場合は、破砕帯が広域的に広がるモデルも提示されている(Sibson, 1986, PAGEOPH)。本研究ではまず、圧縮性ステップにおける破砕帯の産状や広がりについて把握するための調査を行った。調査対象地域は跡津川断層西部で、空中写真判読および地質調査に基づき圧縮性ステップを認定した。破砕帯の詳細な露頭・鏡下記載からは、圧縮性ステップでは、断層トレスとほぼ平行な剪断面に加え、それらと大きく斜交する剪断面が顕著に発達する。これは、ステップ部において R_2 面(Davis et al., 1999, JSG)やdeformation band(Okubo and Schultz, 2006, Geol. Soc. Amer. Bull.)といった2次的な割れ目が特徴的に発達するという既往の研究と整合的である。また、割れ目密度が高く、岩石や鉱物の角礫化が進むものの、破砕岩片の剪断に伴う回転や変位の程度が小さく、大局的には配列性に乏しいという破砕帯の特徴は、Sibson(1986, PAGEOPH)などが概念モデルとして提示している圧縮性ステップの特徴と一致する。

さらに、地表地質調査の領域を広げることにより、破砕帯が広域的にどのような分布を示すのかを明らかにした。跡津川断層帯の場合、破砕帯は断層トレスから両側500m以内に集中する。これは、圧縮性ステップの有無にかかわらず傾向はほぼ同じである(つまり、ステップ部の内側では岩盤の破壊が著しいが、外側における破砕帯の発達の程度はほぼ一様である)。破砕帯の露頭・鏡下記載、X線回折などによる鉱物分析に基づくところ、破砕帯のほとんどは、より古い時代に地下深部で形成された葉片状カタクレサイトなどの破砕帯や岩脈などの既存の弱面を利用して繰り返し活動していることが分かる。

なお、幅2m以下の小規模な破砕帯は、断層トレスから両側500mより離れた地点にも散在する。これらの多くは、岩石に初生的に発達している節理や片理面などの弱面に沿って形成されており、地質図規模での連続性に乏しい。微細構造は、開口クラックを主とするネットワーク状のクラックの発達で特徴付けられ、顕著な剪断を伴わない単純破砕の産状を示す。変質鉱物はスメクタイトやカオリナイトが主であり、地下数kmより浅い環境下での形成を示唆する。これらの小規模な破砕帯の成因としては、低封圧化での応力解放や重力滑動などのノンテクトニックな要因に加え、断層トレスから離れた地点でもごくまれに発生するマグニチュード3~4以上の浅い地震が要因になっている可能性もある。

蛇紋岩の摩擦挙動に対する間隙水圧の影響

EFFECT OF PORE PRESSURE ON THE FRICTIONAL BEHAVIORS OF SERPENTINITE

岡崎 啓史^{1*}, 片山 郁夫¹, 高橋 美紀²

OKAZAKI, Keishi^{1*}, KATAYAMA, Ikuo¹, TAKAHASHI, Miki²

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 産総研 活断層・地震研究センター

¹Hiroshima University, ²Geological Survey of Japan, AIST

西南日本やカスケディアなどの比較的若く暖かいスラブが沈み込むような場所ではスロースリップイベント、超低周波地震、深部低周波微動などのスロー地震活動が非常に活発である。これらスロー地震の多くは地震発生域の下限付近もしくは下限より若干深部で帯状に分布し発生していることからプレート境界型地震との関連が注目されている。スロー地震の震源域は、地震波速度の低速異常や高ポアソン比で特徴づけられ、それらの発生領域には高間隙水圧下で蛇紋岩が存在することが示唆されている。蛇紋岩は古くから脱水脆性化説に注目されて多くの研究がなされているが、スロー地震発生域のような安定領域でなおかつ高間隙水圧条件を再現した変形実験はほとんど行われていない。このように観測的背景からスロー地震発生域のレオロジーは盛んに議論されているが、物質科学的背景からはスロー地震の発生メカニズムを検証するのに十分なデータは示されていない。そこで本研究では特に摩擦強度に対する間隙水圧の影響について定量的なデータの取得をめざした。

実験には広島大学に設置されているガス圧式高温高压変形試験機を用いた。この試験機は温度 800 以下、封圧および間隙水圧 200MPa 以下の条件で岩石の三軸変形・透水実験を行うことが出来る。試料には長崎県西彼杵変成帯から採取した間隙率およそ 0.1%の等方的なアンチグライト蛇紋岩を直径 20mm、長さ 40mm の円筒形に加工したものに 30°に傾斜した模擬断層面を入れたものを用いた。実験は室温にて軸変位速度 1 μ m/s、封圧 150MPa の条件で三軸摩擦試験を行い試料にかかる剪断応力を測定した。間隙圧は実験ごとに初期値を 50 から 145MPa に設定し、水およびアルゴンガスを用いることにより間隙流体依存性も調べた。

実験中の剪断応力は変形が進むにつれて上昇しピークに至り、そして緩やかに減少して定常応力状態に至った。その後変形中に間隙水圧を急上昇させると剪断応力は緩やかに減少し、やがて新たな定常剪断応力状態に至った。同様に間隙水圧を急減少させた場合は剪断応力は緩やかに上昇し新たな定常剪断応力状態へ移行した。これら間隙水圧変化に対する剪断応力変化は有効圧(封圧-間隙水圧)変化と相関することから、クーロンの摩擦則及び有効圧の法則が成り立っていることを示している。剪断応力と有効圧の関係から摩擦係数を計算すると、間隙流体として水を使用した場合は摩擦係数 μ が 0.51、アルゴンを用いた場合は 0.66 と湿潤条件では乾燥条件(アルゴン)と比較して摩擦係数が 23%ほど小さくなった。これは結晶表面に水分子が付着し、薄層を形成して潤滑材のような働きをしているからだと推察される。

以上の結果から、間隙水圧の上昇に伴う有効圧の減少、水の存在による摩擦係数の低下、という 2 種類の蛇紋岩の強度を弱体化させる効果が確認できた。これは、沈み込み帯における水の不均一な分布や水の移動などによりプレート境界面の強度が部分的に弱体化している可能性を示唆している。このような不均一性がプレート境界面における地震やスロー地震を発生させるアスペリティの形成に関わっている可能性がある。

キーワード: 蛇紋岩, 間隙水圧, 摩擦係数, 変形実験, スロー地震

Keywords: Serpentinite, Pore pressure, Friction coefficient, Deformation experiment, Slow earthquakes

Thermal pressurization によって増加するすべり量と破壊伝播速度の抑制: ダイランシーの効果 Suppression of slip and rupture velocity increased by thermal pressurization: Effect of Dilatancy

浦田 優美^{1*}, 久家 慶子¹, 加瀬 祐子²
URATA, Yumi^{1*}, KUGE, Keiko¹, KASE, Yuko²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 産総研 活断層・地震研究センター
¹Dept. Geophysics, Kyoto Univ., ²AFERC, AIST

We investigate effect of dilatancy on dynamic ruptures with thermal pressurization (TP), taking into account a power law relationship between permeability and porosity, based on 3-D numerical simulations of spontaneous rupture propagation obeying a slip-weakening Coulomb failure criterion.

Effects of dilatancy on rupture propagation with TP were often investigated in 2-D numerical simulations, or with attention only to behaviors at a single point on a fault plane. Moreover, in the previous simulations, it has never been considered that permeability can change with porosity. Because the hydraulic diffusivity, which controls TP, is proportional to permeability, the changes in permeability along with porosity would affect TP and dynamic ruptures.

To consider changes in porosity and permeability in dynamic ruptures with TP, we solve the thermal and hydraulic diffusion equations with a porosity term by the finite-difference method. Our numerical algorithm for dynamic ruptures is based on the method by Kase and Kuge (2001). Pore pressure from the diffusion equations is included in effective normal stress, while slip velocity and shear stress give the heat source in the diffusion equations. In our model, the frictional heating and the processes of dilatancy occur within the shear zone. We consider both reversible and irreversible changes in the porosity (Segall and Rice, 2006), assuming that the irreversible change is proportional to the slip velocity. Permeability changes with the porosity, according to the power law by David et al. (1994). We put a square fault with the length of 4 km in the infinite medium. The fault is subjected to uniform external stresses.

We reveal that the slip amount decreases with increasing dilatancy coefficient or exponent of the power law, and the rupture velocity is predominantly suppressed by the coefficient. This is observed whether applied stresses are high or low. The deficit of the final slip concerned with the coefficient could be smaller as the fault size is larger.

透過波振幅を通して見たすべり弱化過程 Monitoring of slip weakening process using transmitted acoustic waves

福山 英一^{1*}, 山下 太¹, 溝口 一生², 東郷 徹宏¹

FUKUYAMA, Eiichi^{1*}, YAMASHITA, Futoshi¹, MIZOGUCHI, Kazuo², TOGO, Tetsuhiro¹

¹ 防災科学技術研究所, ² 電力中央研究所

¹Nat'l. Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev., ²Cent'l Res. Inst. Elec. Power Indst.

To investigate the physical process of slip weakening at subseismic slip rate, Fukuyama et al. (2011, JpGU; 2011, AGU) measured the transmitted acoustic waves during high slip velocity experiments. They concluded that at steady state after the slip exceeds the slip weakening distance, fluctuation of friction, which is typical for the gabbro rock sample at room humidity and room temperature, is controlled by the characteristic size of voids inside the gouge layer. In the experiment, two different proportional coefficients can be found between the friction and transmission coefficient. At beginning before the slip reached the slip weakening distance, the slope was steep, while at the steady state stage, slope became gentle. This difference might be caused by the different process between the weakening and steady state stages. Here, we theoretically investigate this difference. In the scattering theory, Q^{-1} value increases as a function of void size as well as a function of thickness of the gouge layer. In the steady state stage, we assumed that the thickness of the layer does not change. Here, we examine if the steep slope at slip weakening stage can be attributed to the growth of layer thickness or not. We conclude that the steep slope can be explained by the layer growth process. This technique enables us to investigate the generation process of the gouge layer, which might be an origin of the slip weakening process of slip at subseismic slip rate.

キーワード: すべり弱化, 透過波, 高速すべり摩擦, ガウジ層

Keywords: slip weakening, transmitted waves, high slip rate friction, gouge layer

中速・高速域における SAFOD・SDZ ガウジの摩擦挙動と BET 表面積の変化 Frictional behavior and BET surface-area changes of SAFOD SDZ gouge at intermediate to high-velocity regimes

澤井 みち代^{1*}, 嶋本 利彦², 廣瀬 丈洋³, 北島 弘子⁴, Thomas Mitchell⁵

SAWAI, Michiyo^{1*}, SHIMAMOTO, Toshihiko², HIROSE, Takehiro³, Hiroko Kitajima⁴, Thomas Mitchell⁵

¹ 広島大学, ² 中国地震局・地質研, ³ JAMSTEC, ⁴ Penn-State University, USA, ⁵ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy

¹ Hiroshima University, ² Institute of Geology, CEA, ³ JAMSTEC, ⁴ Penn-State University, USA, ⁵ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy

SAFOD 掘削はサンアンドレアス断層のクリープしている部分の南端近くに位置する Parkfield でおこなわれた。ボーリング孔のケーシングパイプのゆがみから中央変形帯 (CDZ) と南西変形帯 (SDZ) で断層クリープが進行していることが示されている。これらの部分からはサポナイト、タルクの存在が確認されている。一方、地震時の破壊はクリープ部分にも拡大したことが知られており、2004 年の地震では破壊は掘削点の約 3 km 南方で止まったものの、1857 年の巨大地震では掘削点よりも北西部まで破壊が伝わったと見積もられている。我々は少量の SDZ サンプルの提供を受けたので、本研究ではその内の 6 グラムの試料を使って、 10^{-5} to 1.3 m/s の中速・高速域で摩擦実験をおこなった。すでに報告されている低速下での摩擦実験の結果とあわせて、掘削地域におけるサンアンドレアス断層の多彩な挙動の起源について考察したい。実験では 1 g の試料をドレライトの母岩 (25 mm 径) に挟み、テフロンスリーブでガウジのものを防いで摩擦実験をおこなった。含水実験では 25 重量%の蒸留水を加えておこなった (排水実験)。中速域では変位速度をステップ状に減少・増加させて定常摩擦の速度依存性を調べた。 10^{-5} - 10^{-6} m/s の低速下では 0.1-0.2 の低い摩擦係数が報告されているが、本研究でも 10^{-5} m/s の速度ではほぼ同じ結果が得られた。しかし、定常摩擦は速度の増加とともに顕著に増加し、 10^{-2} m/s では 0.4 前後の摩擦係数が得られた。より高速下では速度の増加とともに顕著がすべり弱化的な性質を示すものの、速度依存性は中速域で顕著に大きくなることを示した (有効垂直は約 100 MPa で本研究より約 2 桁大きい)。中速域における本研究の結果は Mitchell らの結果とよく一致する。含水条件下の摩擦係数は無水条件下よりも中速域では約 0.05 程度低いが、高速下では顕著な違いはなかった。SAFOD・SDZ ガウジは、(1) 低速域における速度強化、(2) 中速域における顕著な速度強化、(3) 高速域における顕著な速度・すべり弱化的な性質をもっている。(1) と (2) の性質はクリープ運動を起こしていると考えられる。一方、他で発生した地震の破壊が到達して (2) の中速バリアを乗り越え、(3) の速度・すべり弱化的な性質によって、地震時の破壊がクリープ領域に拡大することが可能になる。モデリングによる検証を期待したい。

過去 10 年間、断層帯内部の破壊がどの程度エネルギーを吸収しているかが調べられてきた。ほとんどの研究では、断層運動にともなう断層破砕帯物質の粒径変化を測定することによってこのエネルギーを見積もってきた。本研究では、実験前後の BET 表面積を測定してこの問題を検討した。実験前には $3 \text{ m}^2/\text{g}$ であった表面積は、摩擦すべりにもなって無水条件下では 15-25 m^2/g に、含水条件下では 45-60 m^2/g に増加することが判明した (英文要旨の Fig. 1 参照)。この結果は、無水・含水ガウジではそれぞれ約 2% および 1% 以下の摩擦仕事による破壊による表面積の増加に使われたことを示す (表面エネルギーとしては雲母の表面エネルギー 0.38 J/m^2 を仮定)。どちらの場合も破砕物の破壊は重要なエネルギー吸収源にはならない。さらに、BET 表面積はすべり速度が高速であるほど、またエネルギー供給率 (power density) が高いほど減少する傾向が認められる (英文要旨の Fig. 1)。SEM 観察により高速下ではガウジ粒子が摩擦熱によって焼結していることが確認された。他の研究では地震性断層運動中に鉱物の熱分解が起こり、これに伴う熱吸収が破壊よりも遙かに大きいことも判明している。地震性断層運動時のエネルギー分配は、「破壊に伴う表面積増加」という単純な視点ではなく、よく複雑な断層内プロセスを考慮して調べる必要がある。

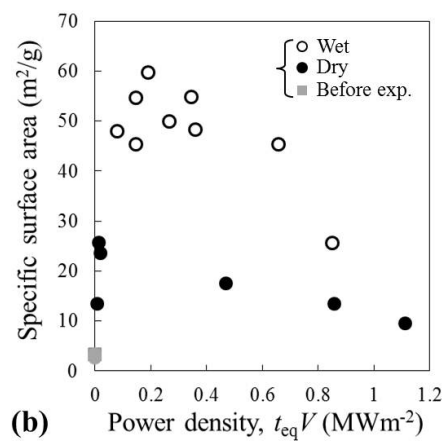
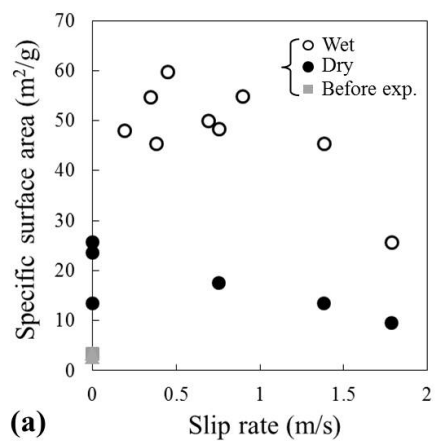
キーワード: BET surface area, Intermediate to high-velocity friction, SAFOD, Energetics of seismic fault motion

Keywords: BET surface area, Intermediate to high-velocity friction, SAFOD, Energetics of seismic fault motion

SSS29-06

会場:105

時間:5月21日 15:00-15:15



2011年東北地方太平洋沖地震に伴う東北日本の地殻不均質に起因するひずみ異常分布

Strain anomalies induced by 2011 Tohoku earthquake observed by means of a dense GPS network in NE Japan

大園 真子^{1*}, 矢部 康男², 飯沼 卓史², 太田 雄策², 三浦 哲³, 立花 憲司², 佐藤 俊也², 出町 知嗣²

OHZONO, Mako^{1*}, YABE, Yasuo², IINUMA, Takeshi², OHTA, Yusaku², MIURA, Satoshi³, Kenji Tachibana², SATO, Toshiya², DEMACHI, Tomotsugu²

¹ 北海道大学地震火山研究観測センター, ² 東北大・理・予知セ, ³ 東京大学地震研究所

¹ ISV, Hokkaido University, ² RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ., ³ ERI, University of Tokyo

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0, 以下東北沖地震)による地震時の応力変化は, 東北地方の広域で地殻変動を引き起こした。この地震時地殻変動の観測値と, 等方均質弾性体内で断層が一樣に滑ったと仮定して Okada (1992) から計算した理論値との差は, 断層すべりの非一樣性や地殻の不均質性を表すと考えられる。本研究では, 大地震のすべりは, 広範囲でほぼ一樣に分布すると仮定し, この理論値と観測値の差にもとづいて, 地殻の不均質構造について議論する。

地震間の GPS 速度場から, 奥羽脊梁山地に沿ったひずみ集中帯の存在が知られている (Miura et al., 2004)。また, このひずみ集中帯の下では, 地震波トモグラフィの研究などから下部地殻の弾性強度が弱まっていることが示唆されている (例えば, Okada et al., 2010)。このことから, 奥羽脊梁山地ひずみ集中帯での, プレート収束に伴う東西短縮のひずみ異常は, 下部地殻の弱さに起因していると考えられている (Hasegawa et al., 2005)。この仮説が正しければ, ひずみ集中帯下の下部地殻は既に緩和しているので, 地震時の応力変化に対する変形は周辺よりも小さくなるはずである。

本研究では, 2011年東北沖地震時に東北地方に展開されていた GPS 観測網によって捉えられた地震時地殻変動の観測値と理論値の比較を行い, 東北地方内陸地殻の不均質性について検討する。

まず, 観測された変位場から, 半無限均質弾性媒質内の2枚の矩形断層からなる震源モデルを推定する。地殻の不均質に由来する変形の微弱な不均質を抽出するため, このモデルから計算した理論的な東西方向のひずみ場と各観測点の変位から求めた東西方向のひずみ場の残差(ひずみ残差)を求める。一方, 地震による応力変化は西に行くほど小さくなるため, 観測値と理論値のひずみ残差に系統的な変化が生じる可能性が予想される。これを補正するため, 理論的なひずみに対する観測されたひずみの比(ひずみ比)も求める。

これらの解析から推定されるひずみ異常と解釈は以下の通りである。(1) 全体的に観測値の伸長が理論値に対して, 東北地方の前弧側は不足(伸び足りない), 背弧側では過剰(伸び過ぎ)となる傾向が見られる。これは, 東北地方の前弧域と背弧域の弾性定数の違いを反映しているようである。(2) 奥羽脊梁山地に沿って, 理論値に対して観測値の伸長が不足する地域がある。先行研究で指摘されているような, 下部地殻の弱化的ためであると考えられる。(3) 同様に測地学データからひずみ集中帯として知られる新潟-神戸ひずみ集中帯では, 伸長が理論値よりも観測値の方が過剰となる傾向が見られる。同じひずみ集中帯であっても, 奥羽脊梁山地ひずみ集中帯とは異なる変形様式を持っていることが考えられる。

今後, これらの結果を検証するために, 具体的な数値を仮定した数値計算手法等を用いたシミュレーションを行う必要がある。

南海トラフ沈み込み帯での応力状態と変形機構 Stress state and deformation mechanism in the Nankai Trough subduction system

北島 弘子^{1*}, Demian Saffer¹
KITAJIMA, Hiroko^{1*}, Demian Saffer¹

¹ ペンシルバニア州立大学

¹The Pennsylvania State University

In subduction zones, the updip transition from aseismic to seismic slip behavior with increasing depth is coincident with porosity loss associated with consolidation, lithification, and diagenesis. Porosity decreases from ~80% within incoming sediments to less than 10% in subducted/accreted rocks at burial depths of a few to ~15km, as observed in the ancient accretionary prism outcrops. Stress states are one of the most important factors governing porosity loss, deformation modes, and fault strength, because in subduction systems where tectonic stress is large, sediments are subjected to complicated stress conditions in time and space. In the Nankai Trough, the input sediments on the subducting Philippine plate and shallower sediments in the modern accretionary prism have been recovered during the Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE) expeditions. In this study, we aim to understand the evolution of physical properties (porosity, permeability, and P-wave velocity) and sediment deformation in subduction systems by conducting deformation experiments on both the input sediments and the prism sediments from the Nankai Trough. We conducted ~30 uniaxial and triaxial (both triaxial compression and triaxial extension) deformation experiments on sediments recovered from different depths at different drill sites. Cylindrical samples were deformed by controlling confining pressure, axial stress, and pore pressure, and all pressures, axial displacement, and pore volume change were monitored. Permeability, and ultrasonic velocity were also measured during consolidation and deformation.

We deformed samples of Lower Shikoku Basin (LSB) silty-claystone (initial porosity of 44%) from Site C0011 are loaded under a range of different stress paths including isotropic loading, triaxial compression, and triaxial extension by controlling axial stress (up to 70 MPa), confining pressure (up to 70 MPa), and pore pressure (0.5-28 MPa). We find that the evolution of physical properties (porosity, permeability, and P-wave velocity) is dependent on both effective mean stress and differential stress. Differential stress enhances reduction in porosity and permeability and results in an increase in P-wave velocity. The relationship between defined by our experimental data is fit well by a Cam-Clay model, which describes elasto-plastic behavior of sediments. We also find that the input sediments at the reference sites (Site C0011 and Site C0012) are normally consolidated or slightly overconsolidated, whereas the prism sediments are highly overconsolidated. In particular, mudstones of similar age (Miocene) show a progressive increase in the degree of consolidation with a distance from the deformation front. This suggests tectonic stress (i.e., larger horizontal and differential stress within the accretionary prism) enhance further consolidation and porosity loss, and thus induce brittle faulting deformation rather than cataclastic flow deformation.

We also apply our observed experimental relationship between P-wave velocity and stress state to estimate in situ stress state and pore pressure within a well-defined low-velocity zone (LVZ) identified in the outer accretionary wedge [Park et al., 2010]. This LVZ is located at ~3 km depth, immediately above the decollement and extends from 15-35 km from the trench. Our lab data constrain the in situ vertical effective stress to be 7-14 MPa, effective maximum horizontal stress of 28-35 MPa, and excess pore pressure of 23-16 MPa. This corresponds to a value of the pore pressure ratio $\lambda^* = 0.53-0.77$. This technique to estimate the in-situ stress from the empirical relationship between P-wave velocity and stress states can be further tested in the future drilling to the deeper accretionary complex and the plate boundary faults.

キーワード: subduction zone, IODP, NanTroSEIZE, deformation

Keywords: subduction zone, IODP, NanTroSEIZE, deformation

脆性塑性遷移を考慮に入れた地震サイクルモデル Earthquake sequence simulations accounting for brittle-plastic transition

野田 博之^{1*}, 嶋本 利彦²

NODA, Hiroyuki^{1*}, SHIMAMOTO, Toshihiko²

¹ 海洋研究開発機構, ² 中国地震局

¹JAMSTEC, ²China Earthquake Administration

In understanding sequences of earthquakes from the point of view of mechanics and structural geology on the fault rocks, brittle-plastic transition of rocks is of great importance as evidenced by field observations of repeated overprinting of pseudotachylyte (frictional melting) and mylonitic (ductile) deformations [e.g., Lin et al., 2005]. Near the down-dip limit of the earthquake ruptures which produce such fault rocks, mylonitic deformation which takes place dominantly during interseismic periods probably affects the stress accumulation process in the shallower brittle zone where earthquakes nucleate. Earthquake generation process is often discussed in terms of the rate-dependency of the frictional resistance of a fault [e.g., Tse and Rice, 1986]. On the other hand, the brittle-plastic transitions are typically expressed as a strength profile across the crust [e.g., Goetz and Evans, 1979]. Given the rate-strengthening characteristics of ductile plastic deformation, these two pictures are closely related to each other [e.g., Sholtz, 1988]. Quantitative discussion by actually solving or simulating sequences of earthquakes on a fault accounting for brittle-plastic transition is required to connect mechanics and structural geology on the fault-rocks.

Recent development of an empirical constitutive equation of a shear zone accounting for brittle-plastic transition (friction-to-flow law) [Shimamoto, 2004, JpGU meeting, Noda and Shimamoto, 2012] enables us simulating sequences of earthquakes consistently with the Brace-Goetz strength profile. The fault model [e.g., Kawamoto and Shimamoto, 1997] which is conceptually constructed based on experimental studies is realized in numerical simulations in which both long-term tectonic loading and coseismic inertial effects are fully accounted for [e.g., Lapusta et al., 2000]. By referring the investigation of the texture of experimental specimens [e.g., Hiraga and Shimamoto, 1987], we can discuss expected fault rock structures after simulations of earthquake sequences. We will also discuss the similarities and differences between the earthquake sequences produced by the logarithmic rate- and state-dependent friction law and the rate- and state-dependent friction-to-flow law.

キーワード: 地震サイクル, 脆性塑性遷移

Keywords: Sequence of earthquakes, Brittle-plastic transition

かんらん岩の衝撃圧縮実験：深発地震震源過程解明に向けての試験的研究 A shock-compression experiment of peridotites: toward a better understanding of focal mechanics of deep earthquakes

小畑 正明^{1*}, 真下 茂², 陳 黎亮², 上田匡将¹

OBATA, Masaaki^{1*}, Tsutomu Mashimo², Liliang Chen², Tadamasu Ueda¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 熊本大学 衝撃・極限環境研究センター

¹Kyoto University, ²Kumamoto University

塑性変形が卓越するとされる上部マントル深部でも岩石破壊で始まる断層運動で地震が発生することは依然として固体地球科学上の謎として残されている。封圧下で断層運動が起これば断層面での摩擦発熱で断層面が急速に温度上昇し、岩石が溶融することが期待される。一旦メルト層が断層面にそって発生すると、これが潤滑剤の役割をはたして応力が急速に解放され、これが大地震発生につながる (e.g., Kanamori et al., 1998)。このような岩石の溶融が実際に起こることは過去の地震によって生じた塩基性シュードタキライトの存在によって知ることができる (e.g., Ueda et al, 2008)。岩石の摩擦発熱による溶融実験は回転試験器の開発により国の内外で 1990 年代頃から盛んに行われるようになってきたが、これらの実験は、二つの岩石テストピースを押しつけて、高速回転で滑らせて発熱するもので、かけられる封圧は実験装置の制約からせいぜい数十 MPa, という制約があった。これではマントルでの地震発生の条件を再現したことにはならない。本研究では平成 23 年度から新しい試みとして熊本大学 衝撃・極限環境研究センターにおいて火薬銃を用いた衝撃圧縮実験により、岩石を瞬間的に一軸圧縮することで岩石内に剪断破断面を作り、生じた剪断面の組織観察を行うという実験を始めている。火薬銃において飛翔体の素材 (Cu, Al, W) とサイズ、飛翔体のスピード (1-2 km/s) を調整することでサンプルに 10-20GPa の圧力をかけることが可能である。こまでに天然のかんらん岩 (幌満) とかんらん石単結晶を用いた実験を行い、回収サンプルには多数の剪断面 (小断層群) が発達していることが確認できている。剪断面には様々な圧碎組織が発達するが、現在のところ溶融を示す明瞭な組織的徴候は見つかっていない。講演ではその実験方法の概要と実験戦略を述べ、これまでに得られている回収サンプル、特にかんらん石単結晶を用いた実験結果の報告を行う。

Kanamori, H. Anderson, D. L. and Heaton, T. H. (1998): Frictional melting during the rupture of the 1994 Bolivian earthquakes, *Science*, 279, 839-842.

Ueda, T., Obata, M., Di Toro, G., Ozawa, K. and Kanagawa, K. (2008) Mantle earthquakes frozen in mylonitized ultramafic pseudotachylytes of spinel-lherzolite facies. *Geology*, 36, 607-610.

キーワード: 衝撃圧縮実験, 深発地震, 摩擦溶融, かんらん岩, 震源過程

Keywords: shock melting, deep earthquake, frictional melting, peridotite, earthquake source mechanics

アルパイン断層掘削プロジェクトの成果速報 Drilling the Alpine Fault: Preliminary project report

福田 惇一^{1*}, 廣野 哲朗², 奥平 敬元³, 石川 剛志⁴, 佐藤 比呂志⁵, Rupert Sutherland⁶, John Townend⁷, Virginia Toy⁸
FUKUDA, Jun-ichi^{1*}, HIRONO, Tetsuro², OKUDAIRA, Takamoto³, ISHIKAWA, Tsuyoshi⁴, SATO, Hiroshi⁵, Rupert Sutherland⁶,
John Townend⁷, Virginia Toy⁸

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ³ 大阪市立大学大学院理学研究科地球学教室, ⁴ 海洋研究開発機構高知コア研究所, ⁵ 東京大学地震研究所地震予知研究推進センター, ⁶ GNS Science, ⁷ Victoria University, ⁸ University of Otago

¹ Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University, ² Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, ³ Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University, ⁴ Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ⁵ Earthquake Prediction Research Center, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ⁶ GNS Science, ⁷ Victoria University, ⁸ University of Otago

アルパイン断層はニュージーランド南島西部, オーストラリア-太平洋プレート境界に発達する右横ずれ逆断層で, 200-400年周期で大規模な地震を引き起こすことが知られている(最近では1717年, 想定されているMw7.9)。断層周辺部に存在する変形岩の岩相分布は断層運動像と共に古くから研究されており(例えばNorris and Cooper, 2007, AGU), 近年では断層周囲における変形岩の微細組織および変形機構について, Toy et al. (2008, JSG) で石英のファブリック測定からその優勢すべり系が議論されるようになってきた。また, Stern et al. (2001, Geology) による地震波探査から断層内部における流体の存在も示唆されている。同断層は地下20-30kmからの上昇速度が6-9 mm/yrと速く(Little et al., 2005, GJI), そのため地表近傍でも現在地下で活動している構造を反映していると考えられる。

同断層掘削計画(Deep Fault Drilling Project; DFDP)は主として, (1) 造山運動発達機構, (2) 脆性塑性遷移変形機構 (3) 地震発生過程について理解するため行われている。このことに則してより具体的には, (a) 断層域の応力, 流体圧, 透水性や温度, (b) 歪局所化とその変形機構, (c) センチメートルからキロメートルスケールでの地震波速度構造, (d) 各鉱物の変形機構(格子定向配列; LPOの発達)や反応(例えば緑泥石化), (e) 変成流体の寄与, (f) スリップゾーンやその周囲のダメージゾーンの厚み, (g) ゆっくり滑りや低周波微動の可能性, (h) シュードタキライトの発達と元素移動, について研究することが提案されており, 我々日本チームは特に(c), (d), (h)について担当することになっている。

同断層掘削は2010年より計画され, 2011年1月より掘削が開始された。昨年2月には150mまでの掘削したDFDP-1が終了し, 掘削試料リクエストを経て, 試料が配布された。現在DFDP-2での掘削が進行中で, これはアルパイン断層まで到達する1500mを掘削予定であり, 2012年4月に掘削終了予定である。そして, DFDP-2からは国際陸上科学掘削計画(ICDP)として実施された。本発表では同断層掘削計画の概要並びにその成果速報について報告する。

キーワード: ICPD, J-DESC, 日本チームの担当

Keywords: ICPD, J-DESC, contributions of Japanese team

龍門山断層帯の内部構造と高速摩擦挙動：研究の現状

Internal structures and high-velocity frictional properties of Longmenshan fault zone: the current status of researches

嶋本 利彦^{1*}, 馬 勝利¹, 姚 路¹, 侯 林峰¹, 東郷 徹宏²

SHIMAMOTO, Toshihiko^{1*}, Shengli Ma¹, Lu Yao¹, Linfeng Hou¹, TOGO, Tetsuhiro²

¹ 中国地震局地質研究所, ² 防災科学技術研究所

¹Institute of Geology, China Earthquake Administration, ²NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)

壊滅的な Wenchuan 地震 (2008 年 Mw 7.9) に伴って龍門山断層沿いに 280 km におよぶ地表断層が形成された。Wenchuan 地震断層科学掘削計画 (WFSD) は 2 年前に始まったが、この掘削は野島断層とチェルンブ断層の掘削に続いて、大地震後に地震断層を掘削する 3 番目のプロジェクトになった。龍門山断層研究の有利な点は、同地域にはマイロナイトなどの深部断層岩が露出しており、地表断層露頭、掘削コア、深部断層岩の研究を総合することによって、断層浅部から深部に至る断層モデルを構築できる可能性があることである。WFSD 掘削の最初の成果は 2010 年秋の AGU で報告されたが、掘削そのものは現在でも進行中である。しかし、残念ながら WFSD 掘削コアは物性測定用にはまだ公開されていない。そこで中国地震局地質研究所では、5 カ所で Beichuan-Yingxiu fault の浅部掘削をおこない、同時に数カ所の露頭で断層帯の内部構造と摩擦の性質を調べている。ここでは、Hongkou, Pingxi, Xiaojiaqiao での断層露頭、Shenxigou での浅部掘削コアで調べた断層帯の内部構造と高速摩擦実験の結果を報告する。断層ガウジの挙動は同じ露頭から採取した試料でもかなりことになっており、これらの結果に基づいて断層帯の不均一性について論じたい。WFSD コアが入手できれば、その摩擦挙動についても報告したい。

キーワード: 龍門山断層, 四川大地震, 断層レオロジー, 高速摩擦, 断層岩, 地震発生機構

Keywords: Longmenshan fault, Wenchuan earthquake, Fault rheology, High-velocity friction, Fault rock, Earthquake mechanism

加熱と粉砕による粘土鉱物の非晶質化と断層すべり

Amorphization of clay minerals by thermal and mechanochemical processes, and its implications for seismic faulting

藤本 光一郎^{1*}

FUJIMOTO, Koichiro^{1*}

¹ 東京学芸大学

¹Tokyo Gakugei University

断層におけるナノ粒子や非晶質物質の存在は断層のすべり特性に影響を与えることから注目を集めてきた。一方、粘土鉱物は断層コアに普遍的に存在するが、加熱や機械的粉砕によって比較的容易に非晶質化することが知られている。本研究では、代表的な粘土鉱物であるカオリナイトとサポナイトの非晶質化について加熱と粉砕の二つの過程を検討した。

加熱はマッフル炉で大気雰囲気下で数十分～数時間、一定温度で加熱した。粉砕は遊星型ボールミルを用い、1～9時間、毎分400回転で粉砕した。処理後の試料はX線回折により特徴的なピーク強度の変化から非晶質化率（分解率）を評価した。

加熱実験：カオリナイトは470℃ではおよそ80分、560℃では16分で、800℃では2分以内、1000℃では1分以内で非晶質化した。また、サポナイトは680℃では約5000分、710℃では約300分、800℃では60分以内で分解してエンスタタイトに変化した。カオリナイトの非晶質化の活性化エネルギーは、98kJ/molとなり、これはカオリナイトの水溶液中への溶解の活性化エネルギーと近い値である。また、熱分析の一種であるDSCによって反応エネルギーを求めたところ、昇温速度によって若干の違いはあるが、およそ120kJ/molと求められた。

粉砕実験：カオリナイトはおよそ180分、サポナイトは540分ではほぼ完全にピークが消え非晶質化した。粉砕容器内で発生する衝突エネルギーは近似的には5.3J/sと見積もられ、それがすべて非晶質化に用いられるとすれば、試料1kgの非晶質化に必要なエネルギーはカオリナイトは9550kJ/kg、サポナイトは28700kJ/kgと見積もられた。

大地震においては、数十秒のすべり時間で1000℃近い温度上昇が見込まれる。また、断層岩の粒径解析などから大地震の破壊エネルギーは断層物質1あたりになると1000～10000kJ/kgとなる。カオリナイトは大地震の破壊エネルギーによって非晶質化される可能性がある。一方でサポナイトはカオリナイトよりは非晶質化されにくいことが示唆された。これは台湾チエルンブ断層での観察結果(Hirono et al., 2008)と調和的である。実際の地震性すべりにおいては摩擦発熱と機械的粉砕、さらには水の関与も考えられることから、それぞれの寄与を検討する必要がある。

キーワード: 粘土鉱物, 非晶質, メカノケミカル, 摩擦発熱, 断層運動

Keywords: clay minerals, amorphous, mechanochemical, frictional heating, faulting

コサイスミック化学反応におけるメカノケミカル効果 Mechanochemical effect on chemical reactions during earthquake slip

廣野 哲朗^{1*}, 谷川 亘², 石川 剛志², 亀田 純³, 福田 惇一⁴

HIRONO, Tetsuro^{1*}, TANIKAWA, Wataru², ISHIKAWA, Tsuyoshi², KAMEDA, Jun³, FUKUDA, Jun-ichi⁴

¹ 大阪大学, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 東京大学, ⁴ 東北大学大学院理学研究科地球学専攻地圏進化学講座

¹Osaka University, ²JAMSTEC-Kochi, ³University of Tokyo, ⁴Dept. of Earth Sciences, Tohoku Univ,

地震時での断層における摩擦滑りは温度上昇を引き起こし、常温では起きえない化学反応を促進、これによって吸熱や化学的反應条件の変化が引き起こされ、そもそもの温度上昇に影響を与える。また、反応によって外部に放出される水素元素や水分子、二酸化炭素ガスは、化学的環境条件の変化や thermal pressurization へのアシスト効果を引き起こし、断層の摩擦滑り挙動そのものへも影響を与える。ついで、摩擦滑りによる粉砕化と摩耗は、破壊エネルギーの消費と表面積の増加を引き起こし、これらの過程も温度上昇や化学反応の進行にも影響を与える。このように、地震時に断層で生じる様々なプロセス・機構が互いに影響を及ぼし合い、滑り挙動に複雑に影響を与えていることが明らかになってきた。しかし、滑りに伴う粉砕・摩耗が、このような一連のプロセスに与える影響は未だ十分に精査されていない。そこで、本研究では、コサイスミック化学反応におけるメカノケミカルな効果を検証するために、高速摩擦試験機を用いた粘土鉱物（イライト）の剪断実験と、実験前後試料の熱分析、X線回折分析、全反射型赤外分光分析、粒度分析を実施した。

その結果、試料に与えるエネルギー密度（剪断応力 × 滑り距離 / slip zone の厚さ）が大きいほど、イライトの非晶質化が進行し、さらにこれと平行して脱 OH 反応の活性化エネルギーが減少することが明らかになった。活性化エネルギーの低下は、反応がより低温から進行し易くなることと同義である。そのため、粘土鉱物に滑りが生じた場合、滑りに伴う非晶質化が進行、このメカノケミカルな効果によって、より低温にて脱 OH 反応が進行、外部に水を放出し、thermal pressurization のアシストを引き起こすという一連のプロセスが発生しうることを意味する。今回の実例はイライトだけであるが、地震時にはメカノケミカルな効果が各種の化学反応に強く影響を与えうることが予想される。