

RSF則に基づいたダイナミックトリガーに関する数値シミュレーション

Numerical simulation of dynamic earthquake triggering based on rate- and state-dependent friction law

*吉田 真吾¹

*Shingo Yoshida¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Dieterich (1994)は、RSF則に基づいたバネ・ブロックモデルを仮定し、ある時点での滑り速度と不安定滑りに至るまでの時間の関係を求め、静的応力の変化により滑り速度が増加すると地震の発生が早められるというモデルを考案した。滑り速度の対数は静的応力変化と摩擦強度(状態変数で表される)との差に比例するので、地震波により動的応力が変動し摩擦強度が下がれば、静的応力変化がない場合でも地震がトリガーされる可能性がある。

円形アスペリティを仮定し、Nagata et al. (2012)により修正されたRSF則に基づいて数値シミュレーションを行なった。地震サイクルのある時点で、応力擾乱をサイン波1~数サイクルで与えると微小滑りが起こり、強度が下がる(滑り弱化)。摩擦パラメータ a と有効法線応力の積が小さいとき、擾乱の振幅が大きくなるにつれ、滑り速度の変化が大きくなり、地震滑りに至るまでの時間が短くなるという結果が得られた。静的応力も増加する場合は、当然、よりトリガーされやすくなるが、たとえ静的応力変化が負であっても、動的応力変化が大きければトリガーされることがあった。また、地震波が通過中に地震がトリガーされることも度々観測されているが、シミュレーションにおいても、応力変動が起こっている最中に地震が発生する場合が見られた。

Fig.1に地震滑りに至るまでの時間と、アスペリティ中央における滑り速度の増加量との関係を示す。赤は静的応力変化によるトリガー、青は動的応力変化によるトリガー、緑は両者が変化した場合のトリガーである。

キーワード：ダイナミック地震トリガー

Keywords: dynamic earthquake triggering

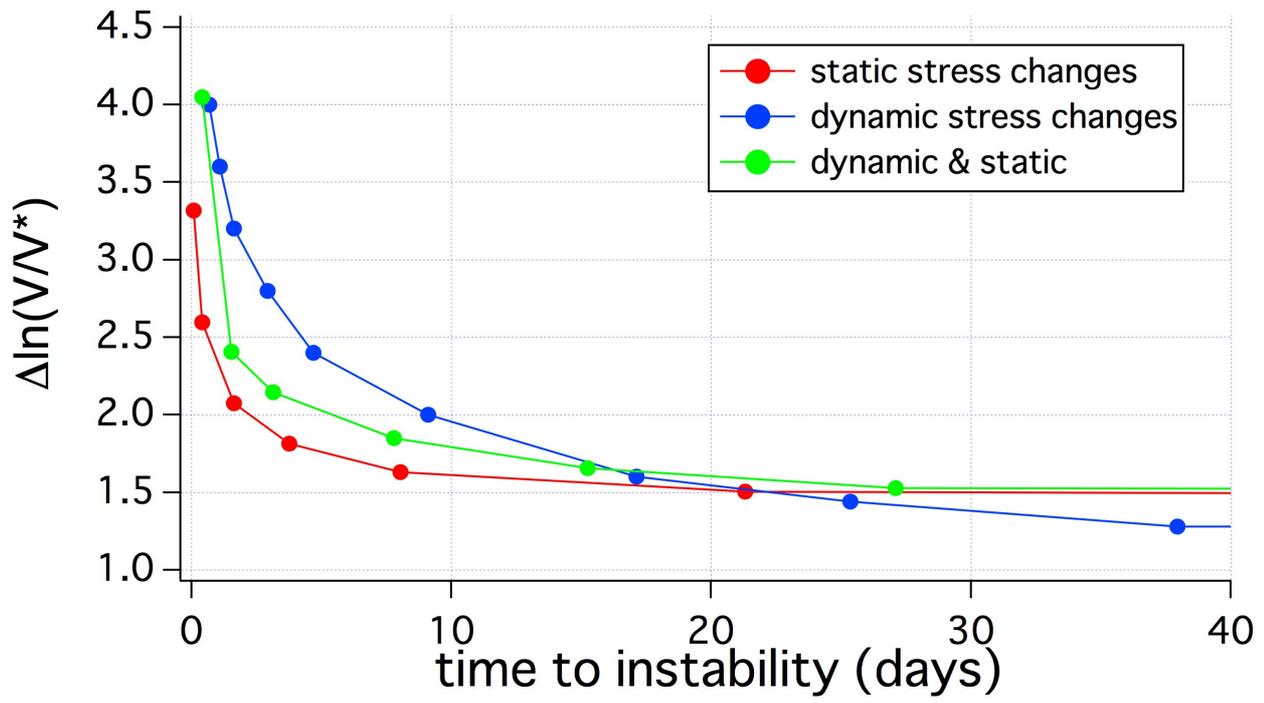


Fig.1

石英粒界水中の溶存イオン拡散特性の評価とその摩擦ヒーリング効果予測への応用

Evaluation of the diffusivity of dissolved ions through grain boundary of quartz and its application to the prediction of frictional healing

*西山 直毅¹、佐久間 博¹

*Naoki Nishiyama¹, Hiroshi Sakuma¹

1. 物質・材料研究機構 機能性粘土材料グループ

1. National Institute for Materials Science

断層面の滑りが停止してからの時間とともに摩擦強度が動摩擦の強度レベルから次第に大きくなる摩擦ヒーリング効果は、地震の周期やプレート境界の固着度に関わる重要な摩擦特性である。摩擦ヒーリング効果は、断層面の真の接触部が変形し、真実接触面積が増加することで引き起こされると考えられ、Dieterich and Kilgore (1994)によってガラス板どうしの真実接触面積が時間とともに増加する様子が観察された。

Slide-hold-slide (SHS) 試験 (e.g., Frye and Marone, 2002; Katayama et al., 2015) によれば、石英は粘土鉱物と比べて摩擦ヒーリング効果の大きい鉱物であり、摩擦ヒーリングが起こる上で水が不可欠である。さらに、摩擦ヒーリング効果は温度に依存する。例えば、摩擦ヒーリング効果の特徴の一つである強度回復が開始するカットオフ時間は、200°Cでは1.2E+3秒、927°Cでは5.9E+1秒と、温度によって大きく加速される (Nakatani and Scholtz (2004), Tenthorey and Cox (2006) のSHS試験結果を元に計算)。これは、高温・含水条件では圧力溶解 (溶解-沈殿クリープ) が活性になり、接触面積の増加が加速されたためと解釈されている (Tenthorey and Cox, 2006)。この解釈を定量的に検証するためには、圧力溶解による石英粒子の変形 (圧密) によって接触面積が増加する速度を正確に計算する必要がある。粒界水中の元素の拡散係数は、圧力溶解の変形速度の計算に不可欠であるが、実験から推定された報告値にばらつきがある (Renard et al., 2000)。そこで本研究では、分子動力学 (MD) 計算を用いて石英粒界水中の溶存元素の拡散係数を評価し、圧力溶解による接触面積の増加によって摩擦ヒーリング効果を説明できるかを検証した。

MD計算では、 α -石英(1010)面の末端酸素に水素を付けて水酸基とした表面を作成し、向き合わせた2枚の表面の間に水分子および溶存Si ($\text{Si}(\text{OH})_4$ 分子) を配置することで、石英粒界水を模した系を作成した。粒界がどの程度開いているかは応力によって変化することが予想され、石英の圧力溶解では粒界水の厚さとして0.5 nm以上が想定されている (Gundersen et al., 2002)。そこで、粒界水の厚さ0.5–2 nmについて溶存Siの拡散係数を計算した。温度は150, 200, 250, 300, 350°Cとした。計算には、MXDORTOを用いた。

得られた拡散係数と圧力溶解の物理モデルを用いて、先行研究のSHS試験 (Nakatani and Scholtz, 2004; Tenthorey and Cox, 2006) と同じ条件 (温度: 100–927°C、封圧: 60–250 MPa、流体圧: 10–200 MPa) において、静止時に石英粒子どうしの接触面積が圧力溶解によってどのように時間変化するかを計算した。摩擦強度の回復量 ΔT (MPa) が、増加した真実接触面積 ΔA_r (m^2) に比例すると仮定すると、 ΔT は $\Delta T = (\Delta A_r / A_0) C$ から推定できる。ここで、 A_0 は初期真実接触面積 (m^2)、 C は凝着力 (MPa) である。計算した ΔT と静止時間の関係から強度回復のカットオフ時間を求めたところ、200°Cでは9.4E+3秒、927°Cでは2.0E+2秒となり、SHS試験におけるカットオフ時間をおおよそ再現することができた。本研究で行った計算では、摩擦ヒーリング効果を時間、温度、有効圧、粒径の関数として表しているため、SHS試験では困難な長い時間スケールにおける断層の摩擦ヒーリング効果を予測する上で有用であると考えられる。

キーワード: 圧力溶解、摩擦ヒーリング効果、速度状態依存摩擦則

Keywords: Pressure solution, Frictional healing, Rate- and state-dependent friction law

Influence of swelling on frictional property of smectite gouge

*亀田 純¹、嶋本 利彦²、Ma Shengli²

*Jun Kameda¹, Toshihiko Shimamoto², Ma Shengli²

1. 北海道大学大学院理学研究院自然科学専攻、2. 中国地震局・地質研究所

1. Earth and Planetary System Science Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Geology, China Earthquake Administration

Smectite is a major component of shallow crustal fault gouges (Vrolijk and van der Pluijm, 1999), and is thought to have large influence on their slip behaviors (e.g., Moore and Lockner 2007; Oohashi et al. 2015). In this study we performed ring-shear friction experiments on water-saturated Na-montmorillonite powders to examine the influence of smectite swelling, one of typical features of smectite, on the frictional property of smectite gouges.

Experiments were conducted using a rotary-shear friction apparatus (Institute of Geology, China Earthquake Administration; Yao et al., 2011; Hou et al., 2012) with a variable electrolyte concentrations up to 3M NaCl under normal stresses of 1.0 and 2.0 MPa. The SWy-2 powder of 2.5 g and 0.75 g of waters with different salinities were placed and dropped between two solid-cylindrical specimens of Indian gabbro to make ~1 mm thick gouge layer, within a Teflon sleeve holding the gouge. Teflon friction was corrected using an intercept method (Mizoguchi et al. 2007).

The experiments demonstrate that the frictional coefficient shows a peak value at the onset of sliding (0.15~0.5), followed by a gradual decrease to less than 0.1 in all runs. The steady state frictional coefficient is dependent on salinity of pore water, and it is as low as ~0.01 when sheared with distilled water, whereas it increases to ~0.05 with 3M NaCl solution. According to the Gouy-Chapman (GC) theory (i.e., interparticle forces arising from the overlap of diffuse electric double layers between the charged plates), the higher swelling pressure is expected in lower salinity condition due to expansion of the diffuse double layers. The application of the extended GC theory proposed by Komine and Ogata (2004) predicts that in-situ swelling pressure of the present gouge sample saturated with distilled water reach as high as ~1.5 MPa, almost equivalent to the normal stress loaded during the test, while the interparticle force is rather attractive in the higher salinity conditions (1.0 and 3.0 M) caused by the enhancement of the van der Waals force. These results suggest that the swelling pressure can effectively reduce the effective normal stress exerting on the smectite platelets as argued by Chatterji and Morgenstern (1990), leading to the apparent reduction in the frictional coefficient at lower salinity conditions. Our experiments also indicate that frictional property of smectite-rich gouges is governed by pore fluid physico-chemical conditions in natural fault zones.

キーワード：スメクタイト、膨潤、摩擦実験

Keywords: smectite gouge, swelling, friction experiment

断層岩の地球化学分析による沈み込み帯断層の摩擦溶融履歴評価

Evaluation of frictional melting in subduction-zone faults on the basis of geochemical analyses of fault rocks

*石川 剛志¹、氏家 恒太郎²

*Tsuyoshi Ishikawa¹, Kohtaro Ujiie²

1. 海洋研究開発機構高知コア研究所、2. 筑波大学生命環境系

1. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

摩擦溶融で生じるシュードタキライトは、地震性断層岩であることの最も確実な証拠の1つとして知られており、沈み込み帯における地震滑りのダイナミクスを理解するための重要な材料となっている。摩擦溶融は断層岩の化学組成に影響を与えることが予期される。実際、Ujiie et al. (2007) は、四万十付加体興津・牟岐地域のメランジュ最上部に発達した断層中のシュードタキライトについて、ガラス質基質の主成分元素組成がイライトに近いことを示し、Honda et al. (2011)も、久礼地域におけるシュードタキライトを伴う断層滑り帯の全岩組成がイライト方向にシフトし、金属微量元素組成にも変化が生じていることを報告している。これらは断層帯中の粘土鉱物の溶融を示唆するとともに、断層岩の化学分析が地震断層帯における摩擦溶融の履歴の理解に有効である可能性を示している。

そこで本研究では、Ujiie et al. (2007) が報告した牟岐地域のシュードタキライトを含む断層岩試料について元素・同位体分析を行った。薄片作成部分と隣接した岩石チップの表面をPC制御のマイクロドリルで組織に沿って300~500 μm程度の深さで局所的に切削し、シュードタキライトと認定された黒色脈、その他の黒色脈、母岩について各部分から1 mg程度の試料を採取した。試料はHFによる酸分解を行った後、ICP-MSで主成分・微量元素濃度を、TIMSでSr同位体比を測定した。

分析の結果、Ujiie et al. (2007) が報告したガラス質基質が保存されたシュードタキライトは、主成分組成が母岩の各部分や全岩に比べてイライトの方向にシフトし、かつBe、Ti、Zr、Nb、Y、Th、U等の微量元素濃度が顕著に高いという明瞭な特徴を示した。また、微量元素については、化学的挙動が異なる多くの元素の濃度が元素-元素プロット上ですべて母岩の組成トレンドを外挿した位置に来るという特異な特徴が認められた。母岩の組成トレンドは主としてイライトに富む細粒部（上記の微量元素を多く含む）と石英・長石粒子（上記の微量元素をほとんど含まない）の混合で支配されている。したがって、イライトに富む細粒部が地震時に選択的にかつほぼ全溶融するような非平衡溶融をしたと考えればシュードタキライトの組成的特徴を合理的に説明できる。同じ黒色脈の延長上では基質が二次的変質により完全に粘土化している部分についても組成的特徴は同一であり、上記のような水で移動しにくい微量元素の組成は変質後も保存されることが示された。鏡下では認定できないものの、完全に粘土化した他の黒色脈の中にも微量元素の組成的特徴からかつてシュードタキライトであったと考えられるものが存在することが示された。さらに、これらの黒色脈には見かけのRb-Sr年代が大きく異なるものが存在し、複数の活動履歴が記録されている可能性も示された。

このように、シュードタキライトの組成的特徴は、生成後の度重なるイベントによる変形・破壊・変質を受けてもおお保存されることが期待できる。シュードタキライトはまれにしか生じないのか、それともまれにしか保存されないのかという議論が従来からあるが、断層岩の化学分析は、構造・組織の観察と併用することで、この問題の解決に糸口を与え、地震断層帯の発達と活動履歴を研究するための有用なツールになり得ると考えられる。

引用文献：

Ujiie, K., Yamaguchi, H. et al. (2007) *J. Struct. Geol.*, 29, 599-613.

Honda, G., Ishikawa, T. et al. (2011) *GRL*, 38, L06310.

キーワード：地震、断層岩、摩擦溶融、地球化学、沈み込み帯

Keywords: earthquakes, fault rocks, frictional melting, geochemistry, subduction zones

四国南西部 白亜系四万十付加体中に発達する巨大分岐断層の摩擦発熱温度評価

Estimation of frictional heating temperature of ancient mega-splay faults in the Cretaceous Shimanto accretionary complex, SW Japan

*大久 雅貴¹、向吉 秀樹¹、金木 俊也²、廣野 哲朗²

*Masaki Oku¹, Hideki Mukoyoshi¹, Shunya Kaneki², Tetsuro Hirono²

1. 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域、2. 大阪大学大学院理学研究科

1. Department of Geoscience Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, 2. Graduate school of science, Osaka University

海溝型の地震発生の要因としてプレート境界断層で発生する地震とプレート境界から分岐した巨大分岐断層の地震の二つが考えられている。世界中の地震は沈み込み帯で大部分が発生しているため海溝型地震のメカニズムを考えることは非常に重要である。地震のメカニズムを理解する上で、断層面に存在する断層岩の物質科学的な研究を行う必要がある。しかし、掘削などにより地震発生帯に存在するプレート境界断層及び巨大分岐断層を直接観察することは技術的に困難であるため、現生の地震発生領域の直接的な物質科学的な研究は実現していない。陸上付加体中には過去の地震発生帯の断層が発達しており、断層帯の科学的な特徴を明らかにすることに成功している。特に断層面で発生する摩擦発熱量はせん断応力と滑りの距離に依存するため、断層の温度履歴から滑りの規模を推定することができる。これまで先行研究によって四万十帯の巨大分岐断層からシュードタキライトが発見されており、シュードタキライト中の鉱物組成から650°C~1100°Cの摩擦発熱温度が見積もられている。一方、シュードタキライトが発見されていない断層についても同程度高温になっていた可能性があるが、摩擦発熱温度の見積りはなされていない。近年、断層岩に含まれる炭質物のラマン分光分析により摩擦発熱温度の推定が行われつつある。この手法を用いることにより、シュードタキライトを産しない断層においても摩擦発熱温度を見積もることができると考えられる。そこで本研究では、四国南西部白亜系四万十付加体に露出している巨大分岐断層を対象に、シュードタキライトを産しない断層中に含まれる炭質物のラマン分光分析を行い、摩擦発熱温度の推定を行うことを目的とした。

本研究地域は白亜系四万十北帯に位置しており、下津井層、久礼メランジ、野々川層が分布している。下津井層、野々川層はともに砂岩、頁岩で構成されており、久礼メランジは、泥岩基質中に砂岩、玄武岩などがブロック状に取り込まれている。

本研究ではラマン分光法による分析とともにルートマップの作成、露頭のスケッチ、薄片観察によって断層の構造記載を行っている。この地域ではNW走行の断層が卓越しており、主に30~60度のNE傾斜であった。また逆断層センスの複合面構造を持つ断層がいくつか確認できた。4ヶ所の断層でサンプリングを行い、それぞれF1~F4とし、研磨片と薄片を作成した。薄片はすべり面が最も集中していると思われる場所で作成した。ラマン分析は大阪大学のHoriba社製XploRAを使用し、薄片中の断層帯とその上位と下位の母岩の炭素を中心にラマン分析を行った。求められたラマン分析の値をDピークとGピークの強度比(ID/IG比)と面積比(AD/AG比)、ラマンスペクトルのグラフの形状に分けて解析を行った。解析には先行研究により同地域の母岩の炭質物の加熱実験を行っているラマン分析の値を比較参考として使用している。先行研究で報告されている加熱実験の結果では、ID/IGが600°Cまでは0.57~0.60程度の値で一定していて大きな変化がなく、700°Cを超えると急激に高くなる。断層帯のID/IG比とAD/AG比で、有意な変化を示さなかった断層は700°C以上の温度は経験していないことを示している。しかし、F1の断層において母岩と断層面のラマンスペクトルのグラフにおいて明瞭な変化を見ることができ、ラマンスペクトルのグラフは600°Cで加熱実験を行ったものと調和的であったため、地震時に600°Cの摩擦発熱温度を経験した可能性がある。

キーワード：巨大分岐断層、ラマン分析

Keywords: Mega splay fault, Raman analysis

シュードタキライトの炭質物ラマンスペクトルに基づいた温度異常検出と地震時剪断応力見積

Detection of increased heating and estimation of coseismic shear stress from Raman spectra of carbonaceous material in pseudotachylytes

*伊東 慶祐¹、氏家 恒太郎²、鍵 裕之³

*Keisuke Ito¹, Kohtaro Ujiie², Hiroyuki Kagi³

1. 筑波大学、2. 筑波大学生命環境系、3. 東京大学大学院理学系研究科付属地殻化学実験施設

1. University of Tsukuba, 2. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 3.

Geochemical Research Center, Graduate School of Science, The University of Tokyo

地震時の摩擦発熱検出は、断層強度を見積もる上で重要である。本研究では、地震性すべり時の断層における温度上昇を検出するために、泥質岩起源の天然及び実験シュードタキライトを対象として炭質物のラマン分光分析を行った。その結果、周囲の温度が280 °C以下の場合、シュードタキライトにおける炭質物熟成度増加を検出することが可能であることが明らかとなった。この炭質物熟成度増加は、すべり時間が僅か4–16 秒の間で起こり、シュードタキライトの変質（脱ガラス化・粘土化）後も保持される。高速摩擦実験データとラマンデータの比較に基づくと、平均剪断応力とシュードタキライトにおける炭質物のラマンスペクトルの間には負の強い相関関係が見られた。この相関関係から、天然のシュードタキライトが形成された地震時の平均剪断応力は1.8 MPaと見積もられた。この時、深度4–6 kmでの水平な断層における静水圧条件を仮定すると、摩擦係数は約0.03–0.05となる。本研究により、シュードタキライトにおける炭質物のラマン分光分析は、地震時の断層強度を見積るうえで有効であることが示された。

Ito, K., K. Ujiie, and H. Kagi (2017), Detection of increased heating and estimation of coseismic shear stress from Raman spectra of carbonaceous material in pseudotachylytes, *Geophys. Res. Lett.*, in press.

キーワード：炭質物、ラマンスペクトル、シュードタキライト、摩擦発熱、地震時剪断応力

Keywords: carbonaceous material, Raman spectra, pseudotachylyte, frictional heating, coseismic shear stress

地震時の摩擦発熱に伴う炭質物の熱熟成反応における昇温速度の影響の実験的検証

Experimental evidence for effects of heating rate on thermal maturation process of carbonaceous materials during earthquake slip

*金木 俊也¹、廣野 哲朗¹

*Shunya Kaneki¹, Tetsuro Hirono¹

1. 大阪大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Osaka University

地震時に断層面で発生する摩擦発熱を定量的に推定することは、地震時の滑り挙動を理解する上で極めて重要である。炭質物の熱熟成反応は、最高温度に対して不可逆的に進行するため、有効な発熱指標であると報告されている。このような炭質物の熟成過程は、最高温度のみならず昇温速度や剪断歪にも影響を受けうることが指摘されている。特に昇温速度については、従来の先行研究で実施された地震時の摩擦発熱を模擬した加熱実験 ($\sim 1\text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$) と実際の地震時の昇温速度 (数 10 –数 $100\text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$) の間に大きな差異が存在するため、加熱実験で得られた結果をそのまま地震時の発熱温度推定に応用できないのではないかという問題があった。

本研究では、天然の断層試料から抽出した炭質物について、 $\sim 1\text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$ もしくは数 10 –数 $100\text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$ の異なる昇温速度で 100 – $1000\text{ }^\circ\text{C}$ の温度範囲で加熱実験を行い、加熱後試料について赤外分光・ラマン分光・py-GC/MS分析を行うことで、昇温速度が炭質物の熱熟成過程に及ぼす影響について調べた。その結果、高い昇温速度の加熱実験試料は、同じ温度まで加熱した低い昇温速度の試料と比較して、熟成度が低くなっていることがわかった。得られたデータを用いて、最高到達温度が $600\text{ }^\circ\text{C}$ であると報告されている過去のプレート境界断層の滑り面の温度履歴を再推定した結果、最高到達温度は $900\text{ }^\circ\text{C}$ 程度が妥当であることがわかった。これらの結果は、炭質物の熱熟成反応が昇温速度に強く支配されていることを示しており、今後断層温度履歴を推定する際は、その影響を考慮する必要があるだろう。

キーワード：摩擦発熱、炭質物、昇温速度、分光分析

Keywords: Frictional heat, Carbonaceous materials, Heating rate, Spectrometry

地震時の断層における炭質物熱熟成へのメカノケミカル効果の実験的検証 Mechanochemical effects on maturation of carbonaceous materials in faults during earthquakes

*市場 達矢¹、金木 俊也¹、廣野 哲朗¹、大橋 聖和²

*Ichiba Tatsuya¹, Shunya Kaneki¹, Tetsuro Hirono¹, Kiyokazu Oohashi²

1. 大阪大学大学院理学研究科、2. 山口大学理学部地球圏システム学科

1. Osaka University Graduate School of Science, 2. Yamaguchi University Faculty of Science Department of Geosphere Sciences

断層に含まれる炭質物の熟成度は、地震時の摩擦発熱、引いては剪断応力などの滑りパラメータの推定にあたり、極めて重要な情報である。ピトリナイト反射率に代表されるように、熟成度は最高履歴温度と強い相関があることが報告されている。しかし地震時の断層では、細粒化に伴う反応面積の増加や剪断に伴う結晶構造の変化などが生じるため、これらが熱熟成の進行度合いに影響する可能性がある。そこで、本研究では、炭質物の熱熟成におけるメカノケミカル効果について着目し、低速摩擦実験・加熱実験による地震性滑りの模擬および実験前後試料における分光分析を実施した。

実験には、岐阜県新日吉鉱山産の炭質物と石英を1:9の比率で混合し、山口大設置の高速摩擦試験機にて、軸荷重3.0 MPaのもと、1.0 mm / s、10 mの剪断を与えた。次に、熱重量示唆熱分析装置を用いて、剪断ダメージを与えた試料およびインタクトな試料にて、100~1000 °Cの高温処理を施した。その後、各試料において、顕微赤外分光器および顕微ラマン分光器を用いて、炭質物の分子構造分析を実施した。その結果、剪断ダメージの有無により、炭質物の熱熟成の進行度合いに変化が生じた。

以上の結果、剪断に伴うメカノケミカル効果により、炭質物の熱熟成が促進されたことが確認された。これは、従来の研究での温度推定は過剰評価していた可能性を示唆している。

キーワード：断層、炭質物、分光分析

Keywords: Fault, Carbonaceous materials, Spectroscopic analysis

地震時の断層における焼結現象およびその実験的再現

Sintering on a fault during an earthquake

土野池 直哉¹、*廣野 哲朗¹
TONOIKE NAOYA¹, *Tetsuro Hirono¹

1. 大阪大学 大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地震が発生すると摩擦発熱が生じ、断層面では岩石の融解または焼結が起こると考えられている。焼結とは、充填した粉末を融点より低い温度で加熱すると、粒子どうしが結合することで表面積が減少し、強度が増加する現象である。1999年台湾集集地震で活動したチェルンプ断層で確認された緻密な黒色物質を採取し電子顕微鏡を用いて観察した結果、粒子同士が結合する橋渡し構造の発達が発見されている。これは焼結の初期過程において典型的なネック構造の可能性がある。

しかし、このような構造が融解ではなく焼結によって生じうるかどうか実験的に検証・精査する必要がある。そこで本研究では、断層を構成する代表的な粘土鉱物であるモンモリロナイトとイライト、およびチェルンプ断層直近の母岩試料を用いて、地震時の条件を模擬した加熱実験を行い、それらの組織変化を調べた。加熱時間は30、90、180秒の3パターン、温度は600℃から1200℃の間で100℃刻みの7パターンである。その後、加熱試料を取り出し電子顕微鏡や粉末X線回折を用いて構造変化を調べた。

その結果、モンモリロナイトにおいて、TG-DSC測定の結果および10分間加熱試料を電子顕微鏡で観察したところ、800℃付近から焼結によると思われる構造変化が現れることが分かった。さらに、800℃において30秒、90秒、180秒加熱したところ、90秒加熱試料までは変化が見られず、180秒加熱試料では橋渡し構造に似た構造変化が確認できた。これらの変化は、チェルンプ断層における温度推定値800~900℃と整合的である。以上の結果、地震時には、断層では溶融のみならず焼結現象が生じている可能性が高く、さらに、これは地震後の断層の強度回復や次の地震時の滑り挙動に影響を与えるであろう。

キーワード：焼結、断層

Keywords: Sintering, Fault

Experimental measurements and numerical analyses about the temperature change of rocks with stress change

*Xiaoqiu Yang¹, Weiren Lin^{2,3}, Osamu Tadai⁴, Xin Zeng¹

1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 4. Marine Works Japan Ltd.

The temperature responses of rocks to stress changes are key to understanding temperature anomalies in geoscience phenomena such as earthquakes. We developed a new hydrostatic compression system in which the rock specimen center can achieve adiabatic conditions during the first ~10 s following rapid loading or unloading, and systematically measured the representative lithologies of several sedimentary, igneous and metamorphic rocks sampled from two seismogenic zones (the Longmenshan Fault Zone in Sichuan, and the Chelungpu Fault Zone (TCDP Hole-A) in Taiwan), and several quarries worldwide. And we built a finite element model of heat conduction to confirm the measured results of temperature response of rocks to stress change. The results show that: (1) the adiabatic pressure derivative of the temperature (β) for most crustal rocks is ~1.5 to 6.2 mK MPa⁻¹, (2) the temperature response of sedimentary rocks (~3.5 to 6.2 mK MPa⁻¹) is larger than that of igneous and metamorphic rocks (~2.5 to 3.2 mK MPa⁻¹), and (3) there is a good linear correlation between β (in mK MPa⁻¹) and the bulk modulus K (in GPa): $\beta = (-0.068 \cdot K + 5.69) \pm 0.4$, $R^2 = 0.85$. This empirical equation will be very useful for estimating the distribution of β in the crust, since K can be calculated when profiles of crustal density (ρ) and elastic wave velocities (V_p , V_s) are obtained from gravity surveys and seismic exploration.

Keywords: Adiabatic pressure derivative of temperature (β), Temperature response, Stress change, Hydrostatic compression system, Numerical simulating

Scaly fabrics and veins of the Mugi and Makimine mélanges

*Gabrielle Elizabeth Ramirez¹, Donald M Fisher¹, Gaku Kimura², Asuka Yamaguchi²

1. Department of Geosciences, Pennsylvania State University, University Park, PA, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

Ancient subduction fault zones provide a microstructural record of the plate boundary deformation associated with underthrusting. The Mugi and Makimine mélanges of the Shimanto Belt exhibit many of the characteristics associated with exposed ancient subduction fault zones worldwide, including: (1) σ_1 that is near orthogonal to the deformation fabric (2) microstructurally pervasive veins that record hydrofracturing and act as sinks for silica, calcite, and albite (3) cyclic fracturing and sealing recorded through crack-sealing and (4) evidence for local diffusion of silica sourced from web-like arrays of slip surfaces (i.e., scaly fabrics). We present microprobe observations of scaly fabrics and veins from two ancient subduction-related shear zones that represent the full temperature range of the seismogenic zone: 1) Mugi mélange lower (~130-150°C) and upper (~170-200°C) sections and 2) Makimine mélange (peak temperatures of ~340°C). The Mugi mélange is an underplated duplex consisting of two horses separated by an out of sequence thrust fault. The upper section is bounded at the top by a pseudotachylite-bearing paleodécollement. The Makimine mélange was underplated at the downdip limit of the seismogenic zone. The scaly fabrics and veins associated with these shear zones exhibit evidence for different geochemical reactions occurring as a function of depth and temperature. Upper Mugi (170-200 °C) has evidence for the incongruent pressure solution reaction of coarse grained albite in the matrix breaking down into illite in the shear zone (i.e. scaly fabric). Makimine (up to ~340 °C) has evidence for a different set of reactions that result in rutile and iron-oxide phases concentrated in the shear zone. Microstructural analyses of ancient subduction-related faults show differences with temperature that highlight the importance of establishing the geochemical processes and activation energies that contribute to slip, fracturing, and healing of rocks that underthrust the subduction interface.

Keywords: tectonic mélange, hydrofractures, seismogenic zone, earthquakes

地震マグニチュードとモーメントマグニチュード

—見掛の破壊エネルギーの破砕帯厚依存性—

Earthquake magnitude and moment magnitude:

Apparent fracture energy and damage zone thickness of faults

*山本 清彦

*Kiyohiko Yamamoto

はじめに：地震波エネルギー E_s とマグニチュード M_s の関係や地震モーメント M_o とモーメントマグニチュード M_w の関係は、通常、以下の式で表される。

$$\log E_s = 1.5M_s + 4.8 \quad (1)$$

$$\log M_o = 1.5M_w + 9.1 \quad (2)$$

以後ここでは、この式にほぼ従う地震を標準的な地震と呼ぶ。

日本海溝沿いに起こった比較的大きい地震では、 M_s が M_w より小さい。前学会で、山本は無有限長で均一な厚さの破砕帯断層模型を使ってこの差が地震波効率の違いによっている可能性を示した。一方、陸域の地震では $(M_j - M_w) > 0.2$ になる場合が多い。例えば1995兵庫県南部地震の (M_j, M_w) は(7.3, 6.9)、2000鳥取県西部地震は(7.3, 6.8)、2008年岩手・宮城内陸地震は(7.2, 6.8~6.9)であり、 $M_j = M_s$ とすると、いずれの地震も $(M_s - M_w) > 0.2$ である。厚さが均一な破砕帯断層模型によれば、標準的な地震の場合、地震波効率が0.8以下では $M_w > M_s$ 、それ以上では $M_s > M_w$ 、地震波効率が1のとき $(M_s - M_w) = 0.2$ である。したがって、標準的な地震で $(M_s - M_w) > 0.2$ は考えにくい。ここでは、 $(M_s - M_w) > 0.2$ になる要因を検討する。

見掛の破壊エネルギー：破砕帯断層模型とは断層を厚さのある破砕帯領域とアスペリティー (AS) 領域とから成るとした模型である。この模型では、すべり面が破砕帯領域に拡大する際、破砕帯に回転を生じさせる。見掛の破壊エネルギーはこの回転によって生じる断層面に垂直な変位が、法線応力になす仕事に等価である。この模型では、破砕帯は完全に緩和状態であり、ASの剛性率 μ と剪断破壊強度 t_f は母体のそれと等しい。断層の厚さが均一で、無限の断層長を持つ模型を「均一模型」、断層厚が不均一で断層長が有限な模型を「不均一模型」と呼ぶ。

結果：「均一模型」で地震波効率を1とすると、 $E_s = (\delta t / 2\mu) M_o$ が得られる。ここで、 δt は応力降下量である。したがって、 δt が大きければ、 $M_s - M_w > 0.2$ が満たされ得る。AS領域が断層面に占める割合 ϕ は、ASが破壊する時の弾性的剪断歪み量 $e_f = t_f / \mu$ と地震波効率だけで決まり、地震波効率が1の場合 $2xe_f$ である。よって $e_f = 10^{-2}$ のとき、 $\phi = 2 \times 10^{-2}$ である。 δt は常に $t_f \phi$ であるから、 $M_s - M_w > 0.2$ になる一つの可能性として、ASの剪断破壊強度が大きい場合があげられる。AS破壊時の歪 e_f を 1.5×10^{-2} とした場合、地震波効率が0.8のとき、 $(M_s - M_w)$ はおよそ0.2になる。これは、均一模型を採用した場合の可能性である。

より一般的には、断層は有限な長さを持ち、厚さも不均一であろう。破砕帯中にすべり面が拡大する時、その先端にはすべりによる変位が必要であろう。ここでは、その量をASの破壊に必要な臨界破損変位量と等価で、破砕帯中のいかなる場所においても同じであると仮定する。すなわち、すべり面の拡大に必要なすべり量は破砕帯厚に無関係に一定とする。この場合、破砕帯厚を小さくすると、単位面積当たりで、見かけの破壊エネルギーはASに蓄積されていた歪みエネルギーの2倍に近づくことが分かる。ある厚さの断層帯中のASが破壊するとすべり面ができ拡大が生じる。以上のことは、すべりの先端が狭い破砕帯領域に達すると、拡大が抑制される可能性を示している。それによって、同一寸法のASに対して生成される断層面の面積が、均一な破砕帯厚を持つ無限の断層の場合よりも小さく、応力降下量は大きくなるであろう。これが他の一つの可能性である。

考察：以下の場合に $(M_s - M_w) > 0.2$ が生じる。1) 標準的な地震では、地震波効率が0.8以上の場合。2) 平均応力降下量が標準的なものより大きい場合。応力降下量が大きくなる原因として、2-1) ASの剪断破壊強度が標準的な地震の場合に比べて大きい。2-2) 破砕帯の厚さがAS領域の外で小さいとき。(2-2)は断層

面が幾何学的に非一様である場合に相当する。内陸の地震で $(M_s - M_w) > 0.2$ になるのは、地震が発生する断層が、プレート境界にある断層よりも構造が複雑であること、より具体的には、断層の端の効果を無視できないことに起因していると考えられる。結論を得るには、断層の力学的構造や破壊伝播速度を知る必要がある。

キーワード：破壊エネルギー、地震波効率、マグニチュード、モーメントマグニチュード、破砕帯断層模型、臨界破損変位

Keywords: fracture energy, seismic efficiency, magnitude, moment magnitude, damage zone fault model, critical weakening displacement

Early recurrence of M \sim 6 intraplate earthquake (5.8 years) observed in northern Kanto region, Japan

*福島 洋¹、遠田 晋次¹、三浦 哲²

*Yo Fukushima¹, Shinji Toda¹, Satoshi Miura²

1. 東北大学災害科学国際研究所、2. 東北大学理学研究科

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

On 28 December 2016, an M \sim 6 normal fault earthquake occurred in the northern part of Ibaraki prefecture in Kanto region, Japan (hereafter called event B). This event was observed by the Japanese ALOS-2 satellite equipped with PALSAR-2, an L-band synthetic aperture radar (SAR). Interferometric SAR (InSAR) processing indicates clear displacement discontinuity line, directing approximately NW-SE. The amount of discontinuity is \sim 30cm in the line-of-sight (LOS) direction (approximately from East with incidence angle of 36 degrees). A preliminary inversion found a dip angle of 42 degrees with fault slip confined in the upper-most 5km in the crust.

The region has experienced swarm-like normal faulting activities after the occurrence of the 11 March 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake including an Mw6.6 event composed of complex ruptures on multiple faults (e.g., Fukushima et al., 2013, BSSA). One of such events was an M \sim 6 event on 19 March 2011 (hereafter called event A).

We performed InSAR analysis also for the event A using the data acquired by the ALOS satellite equipped with PALSAR radar. After removing the displacements caused by the Tohoku-oki earthquake, we obtained a remarkably similar displacement pattern for the event A as compared with the event B. Specifically, the locations of displacement discontinuity lines were almost identical, and the amount of displacement discontinuity was up to \sim 45cm for the event A and \sim 30cm for the event B. The displacement patterns were similar, both indicating southwestward normal faulting on a NW-SE striking fault, suggesting that the same fault ruptured. The slight larger displacement for event A indicates that this event was associated with slightly larger slip on the fault at least close to the ground. The InSAR data for the event A presumably includes the displacements associated with an Mj 5.7 event, which should be taken into account for further comparison.

Our result indicates that the same M \sim 6 fault can re-rupture in a very short time interval of 5.8 years. Two interpretations are possible as to the mechanism of the extremely early recurrence: 1) rapid loading of the fault occurred after the event A, possibly associated with the postseismic deformation due to the 2011 Tohoku-oki earthquake, and 2) stress level on the fault remained high after the event A, enabling further slip on the fault, without significant loading.

キーワード : InSAR、地殻変動、地震再来、地殻内地震

Keywords: InSAR, crustal deformation, earthquake recurrence, intraplate earthquake

地殻変動記録を用いたトランスディメンショナル震源インバージョンの開発

Development of trans-dimensional source inversion with geodetic data

*久保 久彦¹、鈴木 亘¹、野田 朱美¹、青井 真¹

*Hisahiko Kubo¹, Wataru Suzuki¹, Akemi Noda¹, Shin Aoi¹

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

本研究ではトランスディメンショナルインバージョンを用いて地殻変動記録から静的すべり分布を求める新たな震源過程解析手法の開発を行った。トランスディメンショナルインバージョンは地球物理学の分野で近年活用されてきており (e.g. Agostinetti and Malinverno 2010; Bodin et al. 2012; 2014; Hawkins and Sambridge 2015)、震源過程解析でも活用され始めている (e.g. Dettmer 2014)。震源過程解析にトランスディメンショナルインバージョンを導入する利点として、すべり平滑化の拘束条件を事前情報として必要としない点があげられる。すべり平滑化拘束条件は物理的に妥当な解を安定的に得るために広く用いられている。しかし、すべり平滑化拘束条件を使用することは震源過程解析の分解能を大きく低下させることにつながり、観測点分布が偏っているもしくは疎である場合、事前情報に大きく影響を受けた解を得ることが多い。また、モデルの不確定性を評価する際に有用なモデルパラメータの事後分布をマルコフ連鎖モンテカルロ法などによって直接取得することができる点も利点である。

本手法では断層面上のすべり分布がグリーン関数を通して観測点での静的変位と線形に結びついた線形観測方程式を考える。簡単のために、観測方程式の誤差はガウス分布に従い、個々で互いに独立であると仮定する。断層面上の静的すべり分布は個数可変のポロノイ分割を用いて表現する。解析で求める未知パラメータは、ポロノイ点数、ポロノイ点の断層面上での位置、個々のポロノイ点のすべり量である。また、Fukuda and Johnson (2008)およびKubo et al. (2016 GJI)に則って、非負すべりの拘束条件をこの逆問題に付加する。モデルパラメータの事後分布を得るために、リバーシブルジャンプマルコフ連鎖モンテカルロ法 (Green 1995)を用いる。同手法ではサンプリングステップ毎に、新たなポロノイ点の追加・既存のポロノイ点の削除・ポロノイ点の移動・ポロノイ点のすべり量の変更という四つの選択肢から一つをランダムに実行することでモデル更新していく。また、サンプリング効率の向上とパラメータ探索領域の拡充を図るために、パラレルテンパリングアルゴリズム (e.g. Sambridge 2013)を用いる。グリーン関数は半無限均質媒質を仮定したときの断層すべりによる理論静的変位をOkada (1992)によって計算する。

この新たに開発した解析手法を2015年ネパールGorkha地震 (Galetzka et al. 2015; Kubo et al. 2016 EPS)におけるGNSSの実記録に適用した。同地震におけるGNSS観測点分布は疎であるために、GNSS記録は断層すべりに対して限られた分解能しか持たないと考えられる。すべり平滑化拘束条件を用いた従来手法によって解析したところ、断層面全体にすべりが分布する解が得られた。他方で新たな手法を適用したところ、カトマンズの北に大きなすべりが存在し、それ以外の領域のすべりがゼロであるというシャープなすべり分布が得られた。また、データの合い具合は新手法のほうが良かった。この結果は、震源過程解析へのトランスディメンショナルインバージョンの導入がデータの説明に必要なすべりのみで構成される解の取得を可能とすることを示唆する。また、大きなすべりが推定された領域におけるすべりの事後分布から、複数の観測点に挟まれた領域での解のばらつきが小さい一方で、観測点から離れた領域での解のばらつきが大きいことが示された。この結果は震源過程解析に関する我々の直感的理解と整合する。

キーワード：震源インバージョン、トランスディメンショナルインバージョン、地殻変動記録

Keywords: Source inversion, Trans-dimensional inversion, Geodetic data

ポテンシーバックプロジェクション Potency Backprojection

*奥脇 亮¹、笠原 天人¹、八木 勇治²

*Ryo Okuwaki¹, Amato Kasahara¹, Yuji Yagi²

1. 筑波大学大学院生命環境科学研究科、2. 筑波大学大学院生命環境系

1. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 2. Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

バックプロジェクション (BP) 法は、P波理論走時を基に地震波形を波源に逆投影することで地震波の放射源の時空間分布を推定する手法として、2004年スマトラ・アングマン地震 (Mw 9.1) 以降多くの地震、とくにM8-9クラスの巨大地震に対して適用されてきた。ハイブリッドBP (HBP) 法は、観測波形間の相関を利用して地震波の放射源を探るBP法に代わって、グリーン関数と観測波形との相互相関を利用することで地震波の放射源の時空間分布を推定する手法である。グリーン関数に含まれるP波と後続波 (pP、sP波) の相対振幅および走時差を利用することでBP法の欠点であった逆投影イメージの深さ方向への解像度を向上させ、さらに後続波のダミーイメージを軽減することができる。地震波形あるいは地震波形とグリーン関数の相互相関関数の足し合わせにより波源の時空間分布を求めるBP/HBP法は、波形インバージョン法では扱いの難しい高周波の波源を求めることができる。高周波放射は、破壊伝播速度あるいは滑り速度の急激な変化を反映しており、巨大地震の破壊過程を理解するために、波形インバージョン法とBP/HBP法の統合的な解析が行われている。

BP/HBP法は、地震波形あるいは地震波形とグリーン関数の相互相関関数を足し合わせた要素震源を波源へ逆投影する手法であるため、求められたイメージの相対的なシグナル強度は、断層上のある要素震源から放射された地震波が、観測波形全体に占める割合に対応する。一般に震源近傍の剛性率は深さとともに増大するため、単位滑り速度に対するグリーン関数の振幅は要素震源の深さとともに増大し、BP/HBPイメージのシグナル強度はグリーン関数の振幅に依拠する深さ依存性を内包している。ただし、BP/HBP法による高周波イメージと波形インバージョン法により求まる滑り分布とを直接的に比較し、破壊特性の議論を行うためには、BP/HBPイメージのシグナル強度と滑り速度分布 (ポテンシーレート密度分布) とを対応させる必要がある。

本研究では、従来の定式化における正規化項を変更し、ポテンシーレート密度をイメージングする新たなBP/HBP法の定式化を提案する。BP法では各要素震源で理論走時分ずらした観測波形をグリーン関数P波の最大振幅で正規化、HBP法では各要素震源において観測波形とグリーン関数の相互相関関数をグリーン関数の自乗和で正規化して、全観測点分スタックし、各要素震源におけるシグナル強度を求める。本定式化では単位滑り速度に対するグリーン関数の振幅の深さ依存性が補正されるため、ポテンシーレート密度に対応したイメージを求めることができる。

新たな定式化の妥当性を検証するため、2015年チリ・イラペル地震 (Mw 8.3) を対象とした数値実験並びに実データを用いた解析を行った。数値実験では、同一のポテンシーを有した仮想的な点震源を断層上に複数個ランダムに配置して計算した理論波形に対して、提案手法を適用した。従来の定式化では、イメージのシグナル強度が深部ほど相対的に強くなる傾向が見られたが、新たな定式化では浅部におけるシグナル強度の低下が軽減され、入力したポテンシー分布を概ね再現することができた。ただし断層浅部の、P波と反射波との走時差が近接する要素震源では、逆投影されるシグナル強度が依然として小さくなる傾向がある。さらに、実データを用いた解析においても、数値実験で得られた結果と同様に、およそ25 km以浅の領域における相対シグナル強度が、従来の定式化に比べて高くなることがわかった。

本研究では、波形インバージョン法によって求まる滑り分布との直接的な比較が可能な、ポテンシーレート

密度のイメージングを行うBP/HBP法の定式化を提案した。本定式化は、沈み込み帯において発生する巨大地震の破壊過程に対して、BP/HBP法と波形インバージョン法の解析結果を統合し、破壊特性の比較・議論を行う際に有用と考えられる。

キーワード：バックプロジェクション、破壊進展イメージング、深さ依存性、震源過程、ポテンシー

Keywords: Backprojection, Imaging of rupture evolution, Depth dependence, Seismic source process, Potency

地表地震断層の現地調査データと遠地地震波を用いた震源過程解析: 2016年熊本地震への適用

Analysis of seismic source process during the 2016 Kumamoto earthquake by jointly using surface ruptures and teleseismic waveforms

*茅野 奎太¹、八木 勇治¹

*Keita Kayano¹, Yuji Yagi¹

1. 筑波大学

1. Tsukuba University

遠地実体波を用いたインバージョン解析は、震源過程の安定した解析手法として多くの地震に対して適用されてきた。しかし、波源が地表に近づくにつれ、遠地実体波として観測される波に含まれる直達波と地表からの反射波の走時差は小さくなるため、地表付近で継続時間の長い断層滑りが発生した場合、その滑りに対するシグナルは小さくなる。結果として、遠地実体波解析では地表付近の断層滑りを安定・高精度に求めることは難しい。一方で、表層での断層滑りは、地震後に生じた地表地震断層に見られる相対変位を測定することで、高精度に観測することができる。現地調査により地表での断層のずれが多くの地震に対して調べられていることを踏まえ、遠地実体波と現地調査データを統合した解析によって、近年発達したInSAR・GPSなどによる観測データが乏しい過去の地震の震源過程を推定することが可能となる。本研究では、2016年熊本地震 (M_{JMA} 7.3) に対し、遠地実体波と地表地震断層の現地調査データを組み合わせたジョイントインバージョン解析を行い、その有用性を検討した。

解析にはGlobal Seismographic Network (GSN) の27地点で観測された遠地実体波P波の上下動成分および、国内14大学・機関の活断層研究者により現地測定された、本震発生時に露出した地表地震断層の408地点での相対変位量 (Kumahara et al. 2016, JpGU) を使用した。現地調査データが持つ誤差は、各測定対象 (水路、畑の畦でのずれなど) の明瞭さに依存するため、その分散を一意に定めることが難しい。そこで、現地調査データと遠地実体波の統合に際して、データ間の相対的重み・先験的情報の分散を赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) を用いて決定した。断層面は、震源メカニズム解・余震分布・地表地震断層を参考として、日奈久・布田川断層帯に沿った平面断層モデル (走向 234° 、傾斜 64°) を仮定した。ここで、両断層帯の接合部を境に震源過程の時空間分布がどのように変化するかを詳細に記述するため、断層モデルを $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ の小断層に離散化し、各小断層での震源時間関数を表現したBスプライン関数を0.3秒間隔で49個配置した。現地調査データは断層モデル最上部の小断層に投影し、解析に使用した。

断層滑りの時空間分布から、各時間ステップでの主要な破壊は破壊開始後8秒まで、主に日奈久断層領域で見られ、この断層領域で主に右横ずれ滑りが卓越していることがわかる。また、破壊開始9秒後以降、主要な破壊は布田川断層領域へと移り、主に正断層を伴う右横ずれ滑りを生じながら次第に地表へ伝播したのち、破壊開始およそ15秒後に終息する。最終滑り分布からは、震源から北東10 km、深さ10kmの布田川断層領域で最大3 mの滑りが見られ、日奈久断層領域全体で右横ずれ、布田川断層領域全体で正断層を伴う右横ずれが確認できる。

遠地実体波のみを用いた結果と現地調査データを統合した結果で比較すると、地表付近の断層滑りの時空間分布に顕著な違いが見られる。1 km以浅に注目すると、遠地実体波のみの解析では破壊開始後7秒あたりで滑りが発生し、破壊開始後15秒にかけて布田川・日奈久両断層領域で常に滑りが生じているのに比べ、統合解析では、滑りの発生時刻が破壊開始後10秒あたりと遅く、滑り領域は時間とともに布田川断層領域へ遷移する様子がより明瞭に見える。統合解析から予測される理論波形は観測波形の特徴をよく捉えており、現地調査データを解析に利用したことにより、地表付近の最終滑り量・方向は遠地実体波のみの解析結果に比べ、地表地震断層でのずれの量・方向とより調和している。統合解析で見られる布田川断層領域表層への破壊伝播経路、地表付近での布田川断層への破壊の進展および、最終滑りの空間分布パターン・最大滑りが見られた深さは、詳細な断層形状

モデルをもとに行われた他の強震動地震波解析の結果や、現地調査データと同様に地表付近での断層滑りの情報を有するデータであるInSARデータを用いた解析結果と整合的である。本研究の結果は、遠地実体波に加え現地調査データを解析に利用することで、1枚の単純な平面断層モデルでも精度の良い断層滑り分布が得られることを示している。

キーワード：ABICを用いたジョイントインバージョン、現地調査データ、2016年熊本地震

Keywords: Joint inversion using ABIC, Field survey data, 2016 Kumamoto earthquake

山陰地方の下部地殻における3次元地震波速度構造

3D seismic velocity structure in the lower crust beneath the San-in district

*津田 寛大¹、飯尾 能久²、澁谷 拓郎²

*Hiroo Tsuda¹, Yoshihisa Iio², Takuo Shibutani²

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

・はじめに

山陰地方では、日本海沿岸に沿って長大な帯状の地震分布（山陰地方の地震帯）が見られる。また、この地震帯上で内陸大地震も多数発生している。なぜ、プレート境界から離れた山陰地方に地震分布が局在するのか？Iio et al. (2002, 2004)では、下部地殻に局所的に周囲より低粘性の領域（weak zone）が存在し、その直上に歪・応力が集中することで内陸地震が発生するというモデルが提案されている。そこで、山陰地方の地震帯直下の下部地殻にweak zoneが存在するかを検証するために、地震波走時トモグラフィーにより山陰地方の下部地殻における詳細な地震波速度構造を推定した。

・地震波走時トモグラフィー

トモグラフィーのプログラムには、FMTOMO (Rawlinson et al., 2006)を使用した。波線追跡には、波面法を用いた手法 (de Kool et al., 2006) が使われており、不均質が強い構造に対しても安定した波線追跡が可能である。トモグラフィーのデータには、Figure 1に示した解析領域内で発生した地震の気象庁一元化震源および検測値を使用した。加えて、フィリピン海スラブ (PHS) 内地震の手動読み取りデータも解析に使用した。PHS内地震から山陰地方の観測点への地震波の波線は、山陰地方の下部地殻を通過するため、それらを解析に使用することで山陰地方の下部地殻における解像度の向上が期待できる。ただし、それらはPHS内も通過するため、本解析においてはPHSの速度構造が重要になるが、本解析で使用したデータセットでPHSの速度構造をよく推定することは出来ない。そこで、あらかじめ、Figure 2に示した広い解析領域において、深い地震の走時データも使用したトモグラフィーを行い、大局的なPHSの速度構造を推定し、その結果を初期速度構造として使用した。

トモグラフィーの結果、山陰地方の地震帯直下の下部地殻に低速度域が存在することが分かった。岩石が低速度異常を示す要因として、高温であることや岩石中に流体が存在することなどが考えられるため、山陰地方の地震帯直下の下部地殻が低粘性（weak zone）であることが示唆される。すなわち、本研究の結果は、Iio et al. (2002, 2004)で提案されている内陸地震発生過程モデルを支持する結果であるといえる。

・謝辞：気象庁の一元化震源および検測値を使用させていただきました。また、防災科学技術研究所の定常観測点の波形データを使用させていただきました。

キーワード：トモグラフィー、山陰地方、下部地殻、内陸地震

Keywords: tomography, San-in district, lower crust, intraplate earthquake

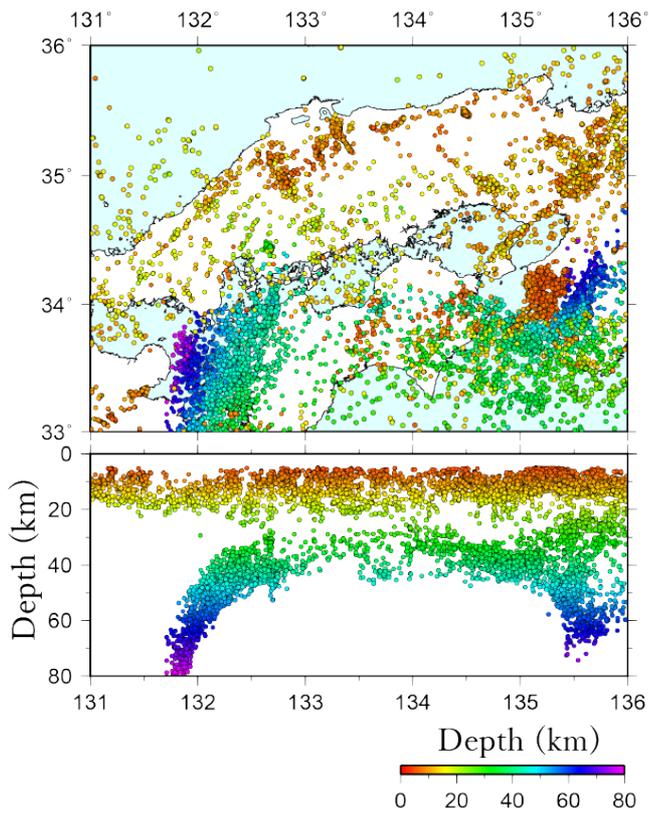


Figure 1 The distribution of earthquakes used in the tomography.

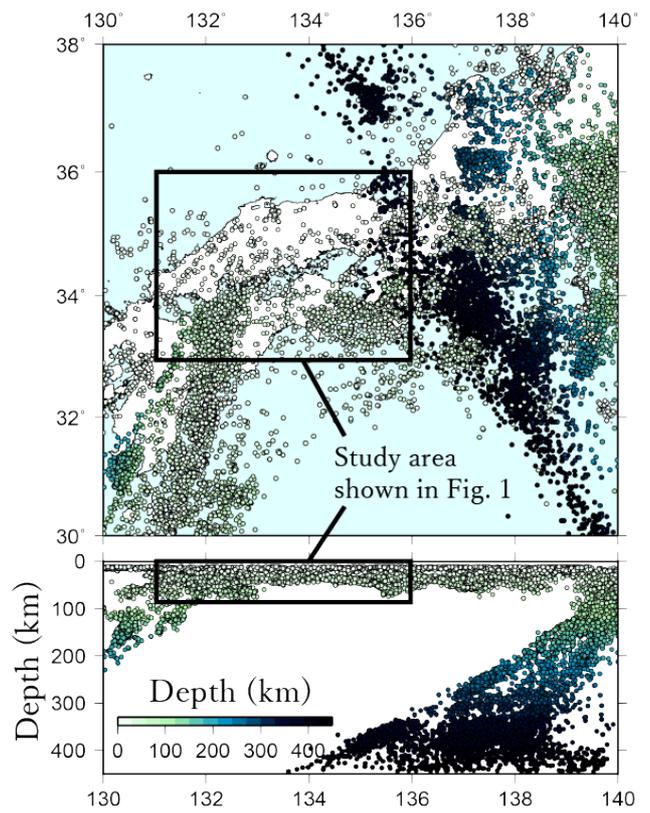


Figure 2 The distribution of earthquakes used for estimating rough velocity structure of an wide region which is used as an initial velocity model.

2011年東北沖地震で誘発された仙台大倉ダム周辺の群発地震活動—詳細な震源分布と微細断層構造

Swarm activity beneath Sendai-Okura Dam, NE Japan, induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake - Precise hypocenter distribution and fine fault structure

*吉田 圭佑¹、長谷川 昭¹

*Keisuke Yoshida¹, Akira Hasegawa¹

1. 東北大学理学研究科附属地震噴火予知研究観測センター

1. Tohoku University

1. はじめに

地震は、地球内部の弱面に働くせん断応力が摩擦強度に達したときに生じる。従って、地震を発生させる要因には大きく分けて2つ、すなわちせん断応力を増加させる効果と摩擦強度を低下させる効果とがある。

2011年東北沖地震後、日本列島の広い範囲にわたって地震活動が誘発されたが、それらの中には ΔCFF が減少したにも拘らず誘発されたものがある。それらの活動は、共通して、1) 震源の移動がみられる、2) 活動開始が東北沖地震の発生から数日~数週間遅れる、などの特徴を示すことから、東北沖地震に伴う東西伸長に起因して深部から上昇してきた流体による間隙圧の増加に伴って摩擦強度が低下したことにより引き起こされたと推定されている(吉田・他, 2012; Terakawa et al., 2013; Okada et al., 2015; Yoshida et al., 2016)。

本研究では、断層強度を低下させ地震を発生させる流体の挙動を詳細に調べる目的で、東北沖地震で誘発された仙台大倉ダム周辺の群発地震活動について、その震源分布と時間変化を詳細に調べた。この活動域の東に隣接した長町-利府断層の最深部では、1998年にM5.0の地震が発生している。地震後行われた臨時地震観測等により、震源域直下の地殻中部に顕著なS波反射面が存在し(Umino et al., 2002)、下部地殻には顕著な地震波低速度域が分布している(Nakajima et al., 2006) ことがわかっている。

この群発活動について、気象庁一元化カタログに記載されている2,485個の地震の震源分布を見てみると、やや東傾斜するものの、およそ4 kmほどの幅でcloud状に広がっており、migrationの詳細が明瞭には分からない。そこで本研究では、格段に高分解能の描像を得る目的で、地震波形の相関を用いて地震間の走時差を精密に求め、それに基づいて相対震源決定を行うことにした。

2. 方法・結果・議論

最初に、地震波形の相似性に基づいて地震群の分類を行った。震央距離20 km以内の観測点のうち3点以上で地震波形の相関係数が0.92を超える地震ペアが存在する場合、その2つの地震を「相似地震」とみなすことにした。そして、相似地震グループの少なくとも一つと相似な地震も相似地震とみなすこととして、その作業を繰り返した。その結果、30個以上の地震を含む相似地震グループが7つ得られた。

次に、震央間距離2 km以内の地震同士で、カタログ記載あるいは計算したP波とS波の相互相関関数を計算し、それが最大になるときの値と時間差を求めた。規格化した相関値が0.9以上の場合の時間差データを用いて、カタログS-P時間差を修正してみると、元々同一グループでS-P時間が最大0.2s程度ばらついていたものが、0.05s以内の範囲に集中するようになった。波形相関により得られた時間差データを、一元化震源記載のP、S波到達時刻データに加えて、Double-Difference法(Waldhauser & Ellsworth, 2002)を適用することにより、震源の再決定を行った。波形相関により得られた走時差残差は120msecから10 msecまで減少した。

その結果、震源は、やや東傾斜するcloud状にばらついた分布から、複数枚のsharpな面状構造へと大きく変化し、相似地震グループは、それぞれ共通する面に集中して分布するようになった。面の多くは西傾斜だが、なかには東傾斜や、水平方向に並ぶものもある。水平に並ぶ震源のメカニズム解を見てみると、節面の一つも水平方向を向き、この面に沿う断層運動で発生したことを示す。このような水平断層は、広域応力場から

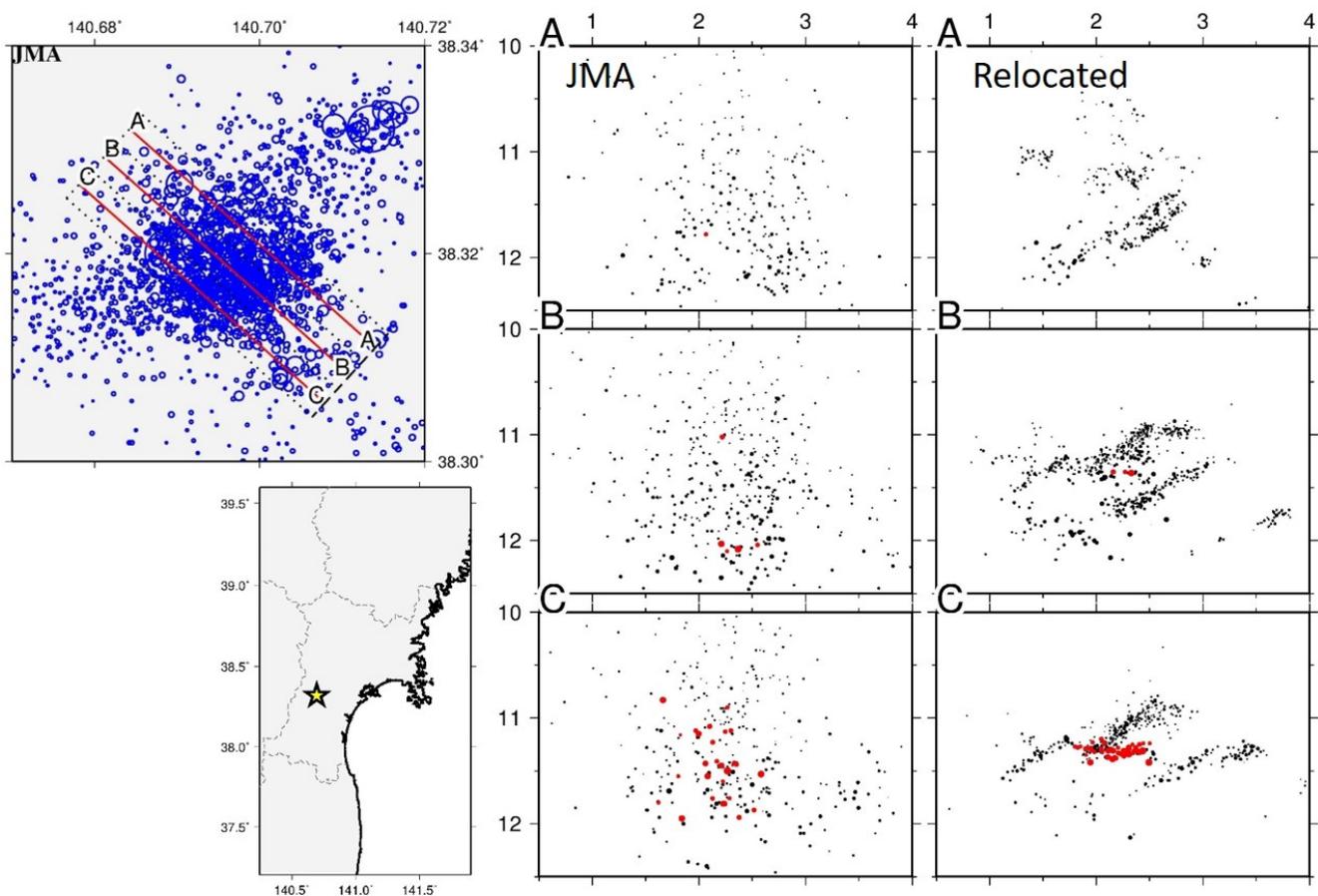
見て unfavorably-orientedであるため、震源のmigration同様、断層強度の低下を示唆する。震源のmigrationを、新たに再決定した震源分布で見ると、それらは面に沿って主に深い方から浅い方に移動することがわかった。直下のS波反射面から上昇した流体の移動経路を見ていると推定される。

3. まとめ

精密な震源再決定により、仙台大倉ダム周辺の群発地震活動の震源は、一元化震源にみられていたcloud状にばらついた分布とは大きく異なり、sharpな幾つもの面上に集中することが分かった。それらに沿って震源がmigrationしており、メカニズム解は、地震がこれらの面に沿う断層運動で発生していることを示している。東北沖地震による東西圧縮応力の低下で直下のS波反射面から上昇してきた流体による摩擦強度の低下が、この活動を引き起こしたと推定される。

キーワード：地殻流体、摩擦強度、2011年東北沖地震、群発地震

Keywords: crustal fluid, frictional strength, 2011 Tohoku-Oki earthquake, swarm



Record of slow slip instabilities in rocks: the role of silica redistribution in the behavior of subduction interfaces

*Donald M Fisher¹, Andrew Smye¹, Chris Marone¹, Asuka Yamaguchi²

1. Department of Geosciences, Penn State University, 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

We present observations from nine regional fault zones exposed in the ancient, sediment-dominated Kodiak and Shimanto accretionary complexes. There are characteristics common to all these examples that suggest a record of slow slip instabilities that deform the underthrusting footwall at a range of depths within and around the seismogenic zone. These fault zones, in some cases 10' s of m' s thick, have a block-and-matrix fabric but are structurally systematic, with evidence for a compactive strain path and simple shear along a web-like array of scaly slip surfaces in fine-grained lithologies. These slip-related microstructures are coincident with silica redistribution, with silica depletion along slip surfaces and precipitation of quartz and other silicates in veins within coarser clasts and along extensional jogs in slip surfaces.

The fault rocks contain several features that suggest a record of slow slip and quasi-dynamic fault motion: 1) scaly shears represent locations of diffusive mass transfer, suggesting linear viscous flow, a rheology favored by low strain rates, 2) there is clear evidence for repeated antitaxial and syntaxial cracking and sealing, in some examples directly related to slip on shear surfaces—an observation that is consistent with slip instabilities as it requires cyclic behavior rather than continuous creep, 3) the zone of deformation is wide, indicative of distributed shearing on many slip surfaces, with large slip distances and a strain hardening process on individual features, and 4) small (10' s of microns) magnitudes of slip during cracking and slip.

We propose a conceptual model for propagating, slow ruptures that move at rates dictated by shear processes within a zone of finite thickness. The fault rocks suggest that stress rises at the propagating front of a slow slip instability, leading to quasi-plastic failure in the form of scaly slip surfaces in the footwall. Development of slip surfaces represents a weakening mechanism due to loss of cohesion or alignment of phyllosilicates, but each slip surface subsequently hardens because of increases in normal stress associated with hydrofracturing or by the activation of a hardening mechanism such as pressure solution and ensuing reduction in fracture porosity. Thus, the development of a distributed scaly foliation and vein system leads to initial softening but has an inherent stabilization mechanism for putting on the breaks and keeping things slow.

Based on these observations, we construct a kinetic model to estimate the time required to seal fractures. This model accounts for the interplay between spatial gradients in chemical potential and pressure within a vein-rock system. Vein sealing is driven by diffusive redistribution of Si from solid-solid surfaces to undersaturated veins. The model predicts that healing of cracks in subduction zones occurs on secular time scales. Temperature exerts a primary control on healing rate and variations in the temperature structure of different convergent margins leads to a wide variability in sealing times. Correlation between plate age and the b-value of earthquake size distributions could reflect temperature through the kinetics of reactions and the healing rates of fractures. The evidence from ancient rocks for stress cycling, repeated fracturing, and thermally activated crack healing in underthrusting sediments could play an important role in modulating the behavior of the footwall of the subduction interface, and the spatial roughness in this behavior for different subduction zones could be an important control on seismicity.

Keywords: Slow slip, silica kinetics, earthquakes

地震学的観測および地質学的観察に基づいた西南日本における微動発生領域の厚さ

Constraining the thickness of tremor source region on the basis of seismological and geological observations in southwest Japan

*太田 和晃¹、伊藤 喜宏¹、氏家 恒太郎²、Fagereng Ake³、片上 智史¹、木下 貴裕²

*Kazuaki Ohta¹, Yoshihiro Ito¹, Kohtaro Ujiie², Ake Fagereng³, Satoshi Katakami¹, Takahiro Kinoshita²

1. 京都大学防災研究所、2. 筑波大学、3. Cardiff University

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. University of Tsukuba, 3. Cardiff University

近年の研究により、世界各地の沈み込み帯に発生する微動やスローリップといった一連のゆっくり地震はプレート境界で発生するせん断すべり現象であることがわかって来た(e.g. Ide et al., 2007). 地震波の解析から推定される微動の分布は震源決定誤差を含み、依然として深さ方向に数kmの幅を持っているが、地震学的な取り扱いの上ではこれらの発生領域は厚さを持たない面と見なされることが多い。一方で、最近の地質学的観察からは過去の微動活動の痕跡ではないかと考えられる地質記録が見つかっており、微動発生領域が数十mの厚みを持つことが提案されている(e.g. Ujiie et al., 2016, AGU Fall meeting). 微動が実際にどの程度の厚さの範囲で発生しているかを把握することは、微動を含むゆっくり地震の発生メカニズムを考える上で極めて重要である。本研究では、地震学・地質学双方のアプローチからこの微動発生領域の厚さの評価を試みた。

地震学的なアプローチとして、西南日本の四国地域に発生する深部微動の震源分布の厚みに着目し、微動震源の代表として微動を構成する低周波地震の震源分布を詳細に調べた。複数観測点の波形の相互相関係数の総和(NCC)に基づいたNCC震源決定法(Ohta and Ide, 2011)を四国地域のHi-net速度波形データに適用し、2004-2011年に気象庁によって検出された低周波地震およそ4000の内、2450の低周波地震の精密震源を得た。求まった震源分布は深さ方向に集中しており、沈み込むフィリピン海プレートの海洋モホ面形状(Shiomi et al., 2008)と調和的な傾きを持つ。我々はさらに、この震源分布に対してクラスター毎に最小二乗による多項式曲面近似を行い、震源と曲面との鉛直方向の偏差から震源分布の厚さを評価した。厚さはクラスターによって異なるが、およそ50 mから1700 mの範囲に求まった。

地質学的なアプローチとして、九州東部に位置する上部白亜系四万十付加体の槇峰メランジュに発達する石英充填せん断脈(quartz-filled shear vein)の分布を調べた。槇峰メランジュは過去の沈み込みプレート境界を構成していたと考えられており、すべりと流体移動を起こした断層がshear veinとして数多く保存されている。また、shear veinが集中する領域には塑性流動を受けて変形した引張性鉱物脈(extension vein)も見られ、流体移動を伴うせん断破壊と塑性変形が共存していたと考えられる。我々はshear veinが微動を発生させた断層であると考え、shear veinが集中する領域を微動の発生領域と見なして厚さを計測し、veinの数と長さの分布を調べた。その結果、劈開などの面構造に直交する方向に測ったshear veinの集中域の厚さは約60 mであった。集中域におけるveinの総数は1147で、shear veinの他に面構造に平行なextension veinも認められた。またshear veinの長さは1~7 mで大部分が1 m付近に分布していた。

地質学的に求められた厚さ(60 m)は、地震学的に求められた厚さ(50-1700 m)の範囲と調和的であり、このことはshear veinの集中する領域が微動発生領域であることを示唆する。shear veinの長さ分布(~1 m)は、地震学的に観測される微動やその他のゆっくり地震から想定される断層サイズ(>100 m)より小さいが、領域全体の变形により層内の多数の小断層がすべることでゆっくり地震を構成していると考えたと説明可能である。また、面構造に平行なextension veinの存在は間隙水圧が最小主応力より高いことを示しており、今後ゆっくり地震の震源メカニズムを評価する上で開口のメカニズムを考慮する必要があることを示唆している。

キーワード：微動、低周波地震、槇峰メランジュ、沈み込み帯

Keywords: tremor, low frequency earthquake, Makimine tectonic mélange, subduction zone

速度状態依存摩擦法則における長さ定数のスケーリング特性

Microscopic derivation of rate- and state-dependent friction and its scaling properties

*波多野 恭弘¹

*Takahiro Hatano¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

In this talk, a scaling argument is given for the the length constant in the rate- and state-dependent friction law.

In general, the dynamic friction coefficient is not the single-variable function of the sliding velocity, as friction involves some aging processes such as frictional healing. Therefore, one needs additional variables to describe the behavior of friction coefficient. In the simplest case, a single “state variable” is introduced to describe an aging process and the friction coefficient is described with the two variables: the sliding velocity and the state variable. This formulation is referred to as the rate- and state-dependent friction (RSF) law. It includes three important parameters and they determine the frictional stability/instability. Thus, it is widely used to understand earthquakes as the frictional instability. Unfortunately, to this date, the RSF is purely empirical and therefore one cannot judge its applicable limit. In addition, it is not clear at all how these important parameters are determined from (or related to) the physical entity of the fault surface.

Because the macroscopic friction force is supported by microscopic junctions of protrusions, any macroscopic friction law should be derived from constitutive laws of such microscopic junctions. With this procedure one can overview the micro-macro correspondence in friction and understand the physical meaning of phenomenological parameters in an macroscopic friction law. Here we carry out this program for the RSF law; i.e., we derive the RSF from constitutive laws of the microscopic junctions. Consequently, the microscopic expressions are given of the RSF parameters such as the relaxation length D_c . The system-size dependence of the relaxation length is discussed.

キーワード：摩擦法則、臨界滑り長

Keywords: friction law, critical slip distance

Deformation experiment on quartz aggregates with high water contents at high pressure and temperature

*岡崎 啓史^{1,2}、Hirth Greg²

*Keishi Okazaki^{1,2}, Greg Hirth²

1. 海洋研究開発機構、2. ブラウン大学

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Brown University

Large earthquakes typically nucleate near the depth limit of seismogenic zones. In these areas, high V_p/V_s ratios are commonly observed, indicating the presence of high pore fluid pressures. Thus, it is important to understand how the water content (both water in the crystal and in the pores) and the pore structure affect the rheology of polycrystalline materials.

We conducted deformation experiments on quartz aggregates using a Griggs-type deformation apparatus. Samples were hot-pressed from silica gels, which contain ~9 weight percent water within the amorphous structure and absorbed on the surface. Hydrostatic experiments within the alpha-quartz stability field at a pressure of 1.5 GPa and 900°C indicate that hot-pressed samples are composed of quartz and no relict of amorphous material is present. The average grain size and porosity of the hot-pressed aggregates is about 6 μm and 0.23, respectively. The grain shape is equigranular and no crystallographic preferred orientation (CPO) is observed.

Initial results from general shear experiments on the hot-pressed quartz aggregates at the equivalent strain rate of 1.5×10^{-4} 1/s, a pressure of 1.5 GPa and 900°C show very low strength (equivalent stress of 140 MPa) and nominally steady state flow at shear strains up to 3.5. The samples show weak CPO; a-axis of quartz aligned parallel to the P direction. We also found an evidence for strain localization along R_1 reidel shears, which structure is characterized by high porosity zones. In contrast, deformation experiments on cores of quartzite show dislocation creep at this pressure/temperature condition. The stress exponent n is 2.8–3.4 indicating that the dislocation creep of quartz presumably controls the overall rate-behavior in the quartz shear zone. The measured stress from the new experiments is significantly lower than predicted by the wet quartz flow law (e.g., Hirth et al., 2001). The low flow stress and R_1 reidel shear zones suggest that the stress enhancement process (Hirth and Kohlstedt, 1995) is activated by the high volume amount of water or perhaps the effective pressure law is still applicable and the sample deforms by a semi-brittle flow process.

キーワード：脆性-塑性転移、変形集中、地震

Keywords: brittle-ductile transition, strain localization, earthquake

断層岩類を用いた剪断帯の変形条件の推定：足助剪断帯の例

Determination of the deformation conditions of the shear zone using fault rocks: an example for the Asuke Shear Zone

*金井 拓人¹*Takuto Kanai¹

1. 早稲田大学大学院創造理工学研究科

1. Graduate school of creative science and engineering, Waseda University

はじめに

足助剪断帯は愛知県豊田市足助町を中心としてNE-SW方向に約14kmにわたって発達する。剪断帯の母岩は領家帯の伊奈川花崗閃緑岩である。剪断帯には全体にカタクレサイトが分布し、中心部の約4.5kmの範囲ではシュードタキライトやマイロナイトも分布する(酒巻ほか, 2006)。線構造と非対称微小構造から推定される剪断センスは正断層成分をもつ左ずれを示す。今回、新たにマイロナイトの面構造と線構造の方向分布を利用した古応力解析を行ったので、その結果をふまえて足助剪断帯の変形条件と古応力場について検討した。

1. 足助剪断帯の運動をもたらした古応力方向の推定

マイロナイト線構造は剪断帯の変位方向と平行になると考えられており(Simpson, 1986), Wallace-Bott仮説が成り立つとすれば、剪断センスの判定ができるマイロナイトの面構造および線構造は小断層のすべりデータと同様に応力解析に利用することができる。剪断帯中のマイロナイトの面構造の姿勢はENE-WSW走向で約70° N傾斜を示し、線構造は40-50° NWに沈下を示す。Hough変換による応力逆解法(Yamaji et al., 2006)を用いて古応力解析を行った結果、最尤解として、 σ_1 軸の走向/沈下角が183°/63°, σ_3 軸の走向/沈下角が310°/14°, 応力比 $\phi=0.56$ が得られた。

2. マイロナイトの変形環境の推定

マイロナイトからは動的再結晶石英の結晶格子定向配列(LPO)パターンおよび粒度分布を利用した変形条件の推定が行われている。Z集中を示すc軸LPOパターンから300-400°Cの変形温度が、平均粒径から110-130 MPaの差応力が推定されている(Kanai and Takagi, 2016)。

3. 方解石変形双晶を用いた古応力方向、変形環境の推定

方解石変形双晶を利用するとマイロナイトと異なる手法によって古応力解析を行うことができる。シュードタキライト中の杏仁状構造を充填する方解石の変形双晶からは、 σ_1 軸の走向/沈下角が228°/55°, σ_3 軸の走向/沈下角が320°/1°, $\phi=0.78$ の最尤解が推定されている(Kanai and Takagi, 2016)。変形双晶の形態から推定される双晶変形の変形温度(Burkhard, 1993)は150-200°Cを示し、双晶率から推定される差応力(Yamaji, 2015)は40-80 MPaを示す。

議論とまとめ

マイロナイトと方解石変形双晶から推定された応力テンソルのミスフィット角は23.1°と比較的小さい値を示した。すなわち、変形温度、差応力や変形の規模に違いがあるにもかかわらずマイロナイトと方解石から推定された主応力軸は同様の方向を示している。このことは、方解石変形双晶のような微細変形構造からでも、数10km規模の剪断帯を形成した古応力の方向を推定できる可能性を示唆している。

伊奈川花崗閃緑岩の冷却曲線(山崎, 2013)およびシュードタキライト中のジルコンフィッシュトラック年代(Murakami et al., 2006)と変形温度の関係から変形の時期を推定すると、マイロナイト化は約70 Ma, 方解石の双晶変形は約50 Maとなる。足助剪断帯には脆性破碎したマイロナイトなど複数の変形を示唆する断層岩類が産出しているが、小剪断帯の姿勢はどの露頭でもおおむね一致しており、複数の変形時期でも古応力場はあまり変化しなかったと考えられる。すなわち足助剪断帯は、70-50 Maの間、 σ_3 軸がNW-SEでほぼ水平、 σ_1 軸がS~SSWに約60°沈下を示す古応力場で形成されたと考えられる。

文献

- Burkhard, M., 1993, *Jour. Struct. Geol.*, **15**, 351-368.
Kanai, T. and Takagi, H., 2016, *Jour. Struct. Geol.*, **85**, 154-167.
Murakami, M., Kosler, J., Takagi, H. and Tagami, T., 2006, *Tectonophysics*, **424**, 99-107.
酒巻秀彰・島田耕史・高木秀雄, 2006, 地質雑, **112**, 519-530.
Simpson, S., 1986, *Jour. Geol. Ed.* **34**, 246-261.
Yamaji, A., 2015, *Jour. Struct. Geol.*, **72**, 83-95.
Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006, *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 980-990.
山崎 徹, 2013, 地質雑, **119**, 421-431.

キーワード：足助剪断帯、マイロナイト、古応力解析

Keywords: Asume Shear Zone, mylonite, paleostress analysis

地震波形と津波波形を用いた1938年と2016年福島県沖の地震の解析 Seismic and tsunami waveform analyses for the 1938 and 2016 Off Fukushima earthquake sequence

*室谷 智子¹、佐竹 健治²

*Satoko Murotani¹, Kenji Satake²

1. 国立科学博物館、2. 東京大学地震研究所

1. National Museum of Nature and Science, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1938年5月と11月に福島県東方沖（塩屋沖）で発生した M_{JMA} 6.9-7.5の一連の地震は、2011年東北地方太平洋沖地震やその余震が発生するまで、この地域で知られた唯一のM7クラスの地震であった。これらの地震の震源近くで、2016年11月22日に M_{JMA} 7.4の地震が発生した。これらの地震の震源過程を明らかにするため、地震波形と津波波形を用いて再解析を行っている。室谷ほか（2004, 地震学会）は、仙台、新潟、前橋、水戸、本郷の近地地震波形を用い、5/23（イベント1： M_w 7.6, 断層サイズ 60 km x 70 km）、11/5（イベント2： M_w 7.9, 断層サイズ 80 km x 60 km）、11/5（イベント3： M_w 7.8, 断層サイズ 90 km x 60 km）の地震の不均質すべり分布を推定した。今回これらのすべり分布を用いて、Christchurch, De Bilt, Pasadena, Pulkovoの遠地地震波形を計算し、観測波形と比較した。その結果、全てのイベントにおいて、計算波形の振幅が観測波形の振幅よりも数倍から十数倍大きかった。また、イベント2に関しては鷺坂・伊藤（1939, 験震時報）より八戸、鮎川、宮古、尾島、小名浜の津波波形記録を読み取ることができたため、近地波形から得られたすべり分布を用いて津波波形を計算して比較したところ、観測波形よりも振幅がかなり大きかった。遠地地震波と津波の観測記録からは、近地地震波インバージョンより得られたすべり量や M_w が過大評価であったと考えられる。1938年11月6日には M_{JMA} 7.4の正断層地震（Abe, 1977, Tectonophysics）が発生しているが（イベント4）、2016年のイベントも、気象庁やUSGSによって M_w 6.9の正断層地震であるとされている。そこで、2016年と1938年のイベントの遠地波形と津波波形の比較を行った。津波波形は3観測点（宮古、鮎川、小名浜）のみでの比較であったが、波形は似ていなかった。一方で、Christchurch, De Bilt, Pasadena, Pulkovoでの遠地地震波形の比較は、振幅は1938年の方が大きい。波形の位相は良く似ていた。 M_{JMA} は両者とも同じであるが、Abe（1977）によるイベント4の M_w は7.7と推定されており、かなりの差がある。津波到達時刻による逆伝播図から推定される波源域を比較しても、1938年に比べて2016年の波源域はかなり小さい。この地震波形の振幅の違いは、 M_w の差によるものと考えられる。以上の結果に加え、1938年の一連の地震について、不均質速度構造を考慮した近地波形インバージョンによるすべり分布の再解析についても紹介する。

本研究は、JSPS科研費JP16H01838の助成によって行った。

キーワード：1938年・2016年福島県沖の地震、震源過程、地震・津波波形

Keywords: 1938 and 2016 Off Fukushima earthquake, Source process, seismic and tsunami waveforms

断層すべり分布のスケーリング則に基づいた自動遠地実体波震源過程解析から得られるすべり量分布

Fault Slip Distribution determined by Automated Source Process Analysis with Teleseismic Body-Wave based on Scaling Relationships Derived from Fault Slip Distributions

*藤田 健一¹、勝間田 明男¹、岩切 一宏²、田中 美穂²

*Kenichi Fujita¹, Akio Katsumata¹, Iwakiri Kazuhiro², Miho Tanaka²

1. 気象庁気象研究所、2. 気象庁

1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency

1. はじめに

これまで、気象庁がホームページ上で解析結果を公表している遠地実体波震源過程解析の迅速化及び自動化を目指し、解析に用いる最適パラメータを決めるために必要となるプロセスについて考察を行ってきた。まず、解析に用いる小断層の大きさ及び断層面全体の大きさを断層すべり分布のスケーリング則に基づいて地震の規模に応じて設定し、多くの地震で断層面内に全破壊領域が収まることを確認した。つぎに、サンプリング間隔や基底関数の立ち上がり時間を小断層の大きさに基づいて設定し、必要以上に時空間的に細かいパラメータが与えられることによる解の不安定(局所的に大きなすべりが得られてしまう等)をある程度回避して解析できることを確認した。さらに、そのほかのパラメータも経験的に知られている値等を用いることで、震源データ及び断層パラメータから解析に用いる全てのパラメータを設定可能であることを確認した。

今回は、これまでよりも詳細に地震の規模に応じてパラメータを設定し解析を行った(Mが0.1変わるとに全てのパラメータを設定)。さらに、解析に使用する観測点を観測波形のS/N比や観測点の分布などから自動的に選別し、P波初動の読み取りを自動震源決定で用いられる自動検出プログラムを使用することで、遠地実体波震源過程解析の全工程を自動的に行った。今回の発表では、こうして得られた過去に世界で発生したM7.5以上の地震のすべり量分布を取りまとめ、その検証のため余震分布等との比較を行った結果を報告する。

2. 解析方法

計算プログラムはKikuchi and Kanamori [2003] の解析プログラムの一部改変を行った岩切 他 [2014] のプログラムを使用した。観測波形はIRISの広帯域地震波形を使用し、地震の規模に応じてサンプリング間隔等を設定した。震源データは国内の地震については気象庁一元化震源の値を使用し、海外の地震についてはUSGSの震源の値を使用した。断層パラメータは国内の地震については気象庁CMTの値を使用し、海外の地震についてはUSGSのW-phase Moment Tensorの値を使用した。断層面は破壊開始点を中央に設定し(地上面あるいは海底面より上に出る小断層はカット)、地震の規模に応じて小断層の大きさを設定した(小断層の数は固定)。小断層における震源時間関数は二等辺三角形の基底関数の立ち上がり時間を地震の規模に応じて設定した(基底関数の数は固定)。解析時間は破壊開始点から破壊フロントが最も端の小断層に到達するのに要する時間と小断層における破壊許容時間(断層すべり分布のスケーリング則から得られる平均的なすべり量と経験的に知られているすべり速度から決定)の和として設定した。各小断層のグリーン関数の計算に用いる地下速度構造にはCRUST2.0とIASP91を組み合わせたモデルを与えた。時空間的なめらかさを与える拘束条件については空間的滑らかさを決める超パラメータ β と時間的滑らかさを決める超パラメータ α の25通りの組み合わせ($\beta=0.1, 0.3, 0.9, 2.7, 8.1$ 、 $\alpha=0.1, 0.3, 0.9, 2.7, 8.1$)から、ABIC [Akaike [1980]] の値が最小となる β と α を設定した。最大破壊伝播速度はUSGSが解析した過去のM7.5以上の地震における平均的な破壊伝播速度(概ね破壊開始点付近のS波速度の0.3~0.7倍)を参考に破壊開始点付近におけるS波速度の0.7倍を設定した。

なお、各パラメータを断層すべり分布のスケーリング則に基づいて設定するために用いる地震の規模につい

では、気象庁CMTのMwやUSGSのW-phase Moment TensorのMwwよりも0.1~0.2程度大きい値とした方が良好な解析結果 (ABICが小さい) となるが多かった。このことから、MwまたはMwwの値をそれぞれ+0.0、+0.1、+0.2、+0.3とした場合の解析を行い、その中で最も1観測点あたりのABICの値が小さくなった結果を最終的な解とした。

3. すべり量分布の検証方法

- (1) 断層面付近の余震分布を調べ、すべり量分布との比較を行った。
- (2) 小断層上における余震の規模から推定される地震モーメントの総和を調べ、すべり量 (モーメント解放量) 分布との比較を行った。
- (3) 津波波源が推定されている地震については、津波波源とすべり量分布との比較を行った。

4. 結果

全工程を自動的に行った解析で、多くの地震でその余震域内あるいは隣接した領域に破壊域が現れることが確認できた。また、規模の大きな余震は全破壊領域と接するような位置に発生する傾向があることや、余震の規模から推定される地震モーメントの総和と本震時のモーメント解放量が相補的な関係となっている事例がいくつか見られた。

謝辞：IRISの広帯域地震波形、USGSの解析データ、IASP91及びCRUST2.0の地下速度構造モデルを用いました。記して感謝致します。

キーワード：自動震源過程解析、スケーリング則、余震分布

Keywords: Automated Source Process Analysis, Scaling Relationships, Aftershock Distribution

2016年鳥取県中部地震の動的断層破壊シミュレーション

Dynamic rupture simulations for the 2016 Tottoriken-chubu earthquake

*佐藤 圭介¹、吉岡 祥一²、青地 秀雄^{3,4}

*Keisuke Sato¹, Shoichi Yoshioka², Hideo Aochi^{3,4}

1. 神戸大学 理学研究科、2. 神戸大学 都市安全研究センター/理学研究科、3. パリ高等師範学校 地質学教室、4. フランス地質調査所

1. Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security/Graduate School of Science, Kobe University, 3. Ecole Normale Supérieure Paris, Geological Laboratory, Paris, France, 4. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orleans, France

本研究では、2016年10月に発生した鳥取県中部地震（M6.6）の動的断層破壊のシミュレーションを行った。動的断層破壊の計算には境界積分方程式法を、摩擦構成則としてすべり弱体化則を用いた。鉛直な矩形断層を仮定し、その上端の深さ 0.5 km、断層のサイズ 19.5 km × 18 km、左横ずれ断層運動とした。また、破壊開始点はHi-net自動処理震源の位置とし、そこから破壊が広がっていくモデルを構築した。ここでは、小林 他（2016）による、観測された地震波形のインヴァージョンによって得られたすべり量分布と調和的になるような、すべり弱体化則における初期応力と臨界すべり弱体化距離の動的破壊パラメータの空間分布を求めることを目的とした。

インヴァージョンによって得られたすべり量分布は、震源直上付近の断層面の中央部にすべり量の大きな領域がみられ、最大すべり量は1.3 mであった。また1秒ごとのすべり量分布を見ると、破壊開始から1秒までの間に大きなすべりが生じており、このときの最大すべり量は1.27 mであった。

はじめに、初期応力と臨界すべり弱体化距離について、断層面上で一様な値を与えて動的断層破壊シミュレーションを行った。初期応力は10 MPa、臨界すべり弱体化距離は0.25 m、破壊強度は20 MPa、残留応力は0 MPaとした。シミュレーションによって得られた最終すべり量分布では、断層面のほとんどの領域ですべりがみられ、最大すべり量は4.4 mであった。断層面上で動的破壊パラメータが均質の場合には、インヴァージョンによって得られたすべり量の空間的な不均質性を再現することは不可能である。そのため、ここでは初期応力と臨界すべり弱体化距離について、空間的な不均質性を導入する。

まず、初期応力分布を推定するために、インヴァージョンによって得られた最終すべり量分布をもとに、断層面を断層面上中央部のすべり量の大きい領域とそれ以外の2つの領域に分割した。残留応力はいずれも0 MPa、破壊強度は20 MPa、臨界すべり弱体化距離の値を0.25 mと2つの領域で固定し、これらの領域の初期応力の値を推定した。この目的のため、ここでは、すべり量の小さな領域の初期応力を2 MPaとし、すべり量の大きな領域での初期応力を5~15 MPaの範囲で変化させ、シミュレーションとインヴァージョンで得られた最終すべり量分布の残差が最小になるような初期応力の値を試行錯誤的に求めた。その結果、すべり量の大きい領域の初期応力の値は10 MPaと求まった。

次に、臨界すべり弱体化距離の値の空間分布を推定した。この目的のため、すべり量の小さい領域の臨界すべり弱体化距離の値を0.25 mとし、すべり量の大きい領域を断層の深さ方向に4つ（うち1つは破壊開始点を含むよう）に分割し、それぞれの領域の臨界すべり弱体化距離を0.20~0.30 mの範囲で変化させ、シミュレーションとインヴァージョンで得られた1秒ごとのすべり量分布の残差が、それぞれのタイムステップで最小になるような臨界すべり弱体化距離の値の空間分布を試行錯誤的に求めた。その結果、破壊開始点から地表に向かうにつれ、臨界すべり弱体化距離の値が大きくなるような傾向がみられた。

すべり量分布と、シミュレーションで得られた初期応力と臨界すべり弱体化距離の不均質分布を比較すると、すべり量の大きな領域での初期応力は、すべり量の小さな領域のそれよりも大きく、臨界すべり弱体化距離の値は、破壊開始点付近の領域では他の領域よりも小さいモデルが望ましいことがわかった。

キーワード：動的破壊シミュレーション、鳥取県中部地震

Keywords: dynamic rupture simulation, Tottoriken-chubu earthquake

南海トラフ沿い巨大地震のシミュレーション：不均質なすべり欠損レート分布と昭和東南海・南海地震のすべり分布の再現の試み

Simulation of Great Earthquakes along the Nankai Trough: An Attempt at Simulation of Heterogeneous Slip Deficit Rate Distribution and Slip Distributions of the Showa Tonankai / Nankai Earthquakes

*弘瀬 冬樹¹、前田 憲二¹、藤田 健一¹、小林 昭夫¹

*Fuyuki Hirose¹, Kenji Maeda¹, Kenichi Fujita¹, Akio Kobayashi¹

1. 気象研究所地震津波研究部

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute

1. はじめに

近年、陸上GNSSデータだけでなく海底GPS/Aデータも併用して、南海トラフ沿いのプレート境界面におけるすべり欠損レートが推定され、これまで考えられていたよりも不均質な分布をしていることが明らかとなった [例えば, Yokota et al., 2016, Nature; Nishimura et al., 2016, AGU]。そこで本研究では、この最新のすべり欠損レート分布を再現するとともに、比較的良好にわかっている昭和東南海・南海地震時のすべり分布 [Baba & Cummins, 2005, GRL] も再現するモデル（速度-状態依存摩擦構成則に基づいたプレート境界面における3次元数値シミュレーションモデル）の構築を目指した。

2. 各種パラメータ

摩擦パラメータ a はSawai et al. [2016, GRL]を参考に0.005一定とした。摩擦パラメータ $(a-b)$ はトラフから深さ30 kmまでを負、それ以深を正とし、過去の南海トラフ沿い地震の再来間隔を考慮して試行錯誤的に決めた。有効法線応力は30 MPaを基本とし、すべり欠損レートが大きな四国沖や海山が沈み込んでいる東海沖（昭和東南海時に破壊していない領域）には35-60 MPaを与えた。特徴的すべり量 L については、昭和東南海・南海地震時のすべり分布に合わせて0.05-0.20 mを与え、小すべり欠損レートが推定されている領域には7.5 mを与えた。プレート収束速度は解析領域の西端で5.5 cm/y、東端で1.0 cm/y [Nishimura et al., 2016, AGU] を与えた。

3. 結果

予備的な結果であるが、 M_w 7.9-8.6の地震が発生間隔90-120年で現れ、東側の破壊についてみると、①御前崎の手前で停止（宝永地震型）、②全破壊（安政東海地震型）、③浜名湖の手前で停止（昭和東南海地震型）、西側の破壊についてみると、④日向灘も含めて全破壊（宝永地震型）、⑤四国沖（安政地震型）、⑥四国沿岸（昭和南海地震型）が現れた。さらに西側が先に破壊するパターン（明応地震型）も現れた。東南海と南海の発生間隔は0.7-1.6年であった。地震間には、紀伊半島沖や四国東部沖に小すべり欠損レート分布が現れた。このように個別にみれば各地震と類似の破壊パターンは現れ、昭和東南海・南海地震だけでなくそれ以外の地震のすべり分布や不均質なすべり欠損レート分布についてもある程度は再現できた。しかし、時系列の再現には至っていないため、さらなるパラメータ調整が必要である。

キーワード：南海トラフ、シミュレーション、すべり欠損レート分布、昭和東南海・南海地震

Keywords: Nankai trough, Simulation, Slip deficit rate distribution, Showa Tonankai / Nankai Earthquakes

間隙弾性と粘弾性を考慮した2003年十勝沖地震と2004年釧路沖地震の余効すべり分布

Afterslip distribution of the 2003 Tokachi Earthquake and the 2004 Kushiro Earthquakes using poroelastic and viscoelastic media

*小林 琢磨¹、佐藤 利典¹

*Takuma Kobayashi¹, Toshinori Sato¹

1. 千葉大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Chiba University

1. はじめに

プレート間の巨大地震に対してGNSSなどのデータから地震時のすべりやその後の余効すべりを求めることは、プレート境界面の摩擦特性を知る上で重要である。また、2003年十勝沖地震に対する2004年釧路沖地震、2011年東北地震の3月9日の前震に対する11日の本震のように地震後の余効すべりが次の地震を誘発しているのではないとも言われている。地震後の地表の余効変動には、余効すべりによる変動のほかに粘性緩和による変動や間隙弾性による変動が含まれる。余効すべり分布を正確に求めるためには、粘性緩和と間隙弾性の効果を見積もる必要がある。本講演では、2003年十勝沖地震、2004年釧路沖地震に対して間隙弾性と粘弾性も考慮した構造を用いて余効すべり分布を求め、2003年十勝沖地震の余効すべりがどのように2004年釧路沖地震に影響したかについて述べる。

2. 使用データと解析方法

GNSSのデータとして、国土地理院「電子基準点日々の座標値(F3解)」を使用した。解析方法は、間隙弾性については、非排水時の変形と排水時の変形を用いて変動を評価し、粘弾性変動については、地震時すべりに対応するものだけでなく、地震後の余効すべりに対する粘弾性変動も考慮した（詳しくは、Lubis et al. GJI 2013を参照）。

3. 結果

2003年十勝沖地震後の余効すべりは、十勝沖の地震時すべり域の東側でプレート境界の深いところと浅いところにすべりが集中している結果となった。このすべりは、釧路沖地震の地震時すべり域を避けて、より東側まで分布しているように見える。また、釧路沖地震すべり域の西側には、十勝沖地震後から釧路沖地震後以降にかけてほとんどすべっていない領域があるようである。

謝辞

GNSSのデータとして、国土地理院「電子基準点日々の座標値(F3解)」を使用しました。記して感謝します。

キーワード：余効すべり、間隙弾性、粘弾性、2003年十勝沖地震、2004年釧路沖地震

Keywords: Afterslip, poroelasticity, viscoelasticity, 2003 Tokachi Earthquake, 2004 Kushiro Earthquakes

Comparison between postseismic slip immediately after large earthquakes in northeastern Japan

*森上 竣介¹、三井 雄太²

*Shunsuke Morikami¹, Yuta Mitsui²

1. 静岡大学総合科学技術研究科、2. 静岡大学理学部地球科学科

1. Department of Geosciences, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Department of Geosciences, Shizuoka University

In general, postseismic deformation after large earthquakes consists of afterslip and asthenospheric viscoelastic relaxation. Many studies have estimated both effects from year-scale data. Alternatively, we focus on temporal evolution of postseismic deformation, which is almost due to afterslip, following large interplate earthquakes in northeastern Japan (2003 Tokachi-oki, 2005 Miyagi-oki, 2011 Tohoku-oki (March 9), and 2011 Tohoku-oki (March 11)). We obtain surface deformation data at an interval of 30 seconds about 2 days after the earthquakes, from RINEX files of GNSS data, using GSILIB. We invert slip velocities of sub faults at the plate interface from the surface deformation data. First, we find that early afterslip velocities positively correlate with magnitude of the mainshock. Second, we find that the early afterslip velocities are approximately 4 orders of magnitude lower than mean seismic slip velocities of their mainshock. Next, the early afterslips tend to decay almost linearly with time during the investigation periods.

キーワード：余効すべり、全地球測位衛星システム、すべり速度

Keywords: afterslip, GNSS, slip velocity

御嶽山周辺の群発地震発生域の間隙流体圧分布の再評価

Reestimation of pore fluid pressure fields in the region with intensive swarm activity around Mt. Ontake volcano

*寺川 寿子¹

*Toshiko Terakawa¹

1. 名古屋大学, 大学院環境学研究科, 附属地震火山研究センター

1. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Overpressurized fluids in the Earth's crust have been increasingly implicated to play an important role to earthquake generation by decreasing fault strength (e.g., Hubert and Rubey, 1959). However, it is difficult to directly measure pore fluid pressures in the crust. The focal mechanism tomography (the FMT) is an inversion method to estimate 3-D pore fluid pressure fields by mapping focal mechanism solutions (fault strike, dip angle, and slip angle) of seismicity on the 3-D Mohr diagram for a given tectonic stress field (Terakawa et al., 2010). Validity and applicability of the method are demonstrated by analyzing seismicity induced by fluid injection experiments (where the history of fluid pressures is known) in the Basel Enhanced Geothermal System, Switzerland (Terakawa et al., 2012; Terakawa 2014). On the other hand, in applications of the method to natural earthquakes there was no way to validate results of pore fluid pressures (Terakawa et al., 2010; Terakawa et al., 2013).

In this study we reevaluated the 3-D pore fluid pressure field in the flank of Mt. Ontake in Terakawa et al. (2013). The previous study applied the FMT method to microseismic activity around Mt. Ontake, and estimated overpressurized fluid reservoirs with a peak of 100-150 MPa (with estimation errors of 20 MPa) at depths between 5 and 12 km in the southeast and east flanks of the mountain, assuming a tectonic stress field with 10-20 km resolution inferred from events with $M > 3$ (Terakawa and Matsu'ura, 2010). In this study we analyzed the same data set as that in Terakawa et al. (2013), assuming a regional stress field with 5 km resolution inferred from smaller events with $M > 1$ (Terakawa et al., 2016). The pore pressure field obtained in this study is consistent with the former one in the north flank of Mt. Ontake, but discrepancy is large in the southeast and east flanks. The peak pore fluid pressure in this study is by > 30 MPa smaller than the former one. In the southeast and east flanks difference of the two stress patterns assumed in the two analyses is the largest, although in the two stress patterns the maximum compressive principal stress axes are commonly in the direction of the northwest-southeast. The estimation errors in pore fluid pressures are attributed to both accuracy of the stress pattern and focal mechanism solutions. The level of the pore fluid pressures in the previous study may be overestimated. We reconsider the estimation errors of the stress patterns, and estimate appropriate pore pressure triggering swarm activity.

キーワード：間隙流体圧場、地震、応力場

Keywords: pore fluid pressures, earthquake, stress field

Stress condition around M6.5 earthquake fault of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*光岡 郁穂¹、松本 聡²、山下 裕亮³、中元 真美⁴、宮崎 真大³、酒井 慎一⁵、飯尾 能久³、2016年熊本地震 合同地震観測グループ

*Ayaho Mitsuoka¹, Satoshi Matsumoto², Yusuke Yamashita³, Manami Nakamoto⁴, Masahiro Miyazaki³, Shin'ichi Sakai⁵, Yoshihisa Iio³, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1. 九州大学、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、3. 京都大学防災研究所、4. 国立極地研究所、5. 東京大学地震研究所

1. Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. National Institute of Polar Research, 5. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

The 2016 Kumamoto earthquake sequence occurred at Hinagu and Futagawa fault zones under tectonic stress condition of strike slip or normal fault type. First large earthquake with magnitude 6.5 on April 14, 2016 was located at Hinagu fault zone with high seismic activity prior to the event. The stress condition around the fault zone is important to understand the generation of the earthquake. Especially, it is a key factor estimating the spatial variation of stress field at the depth of the hypocenter.

In this study, we estimated the deviatoric stress field and the stress ratio around Hinagu fault zone from focal mechanisms. We used the method estimating it from seismic moment tensor data (Matsumoto, 2016). The data were selected from focal mechanisms of earthquakes occurring from May 2016 to December 2016 at a depth range of 0-20km. We found that the stress field with strike-slip fault regime at the 0-5km depth area. This principal direction is similar to commonly observed in Kyushu Island, Japan. However, the stress field in the area deeper than 5km was in normal fault regime. The maximum principal compressional stress was close to the moderate one at the area. This area corresponds to the co-seismic large slip area estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data (Asano and Iwata, 2016). This suggests that the spatial change in the stress could be caused by decreasing the differential stress at the area deeper than 5km. The stress field around Hinagu fault zone was in strike-slip regime before the occurrence of the M6.5 event and changed to normal fault stress type due to the slip of the event.

Searching significant displacement zone of Orkney earthquake fault by forward and inversion analysis with strain data observed at very close distance

*安富 達就¹、小笠原 宏²、石田 亮壮²、小笠原 宏幸²、ダーヒム レイモンド³、ミレブ アレックス⁴、大久保 慎人⁵、山口 照寛⁶、Mori James¹

*Tatunari Yasutomi¹, Hiroshi Ogasawara², Akimasa Ishida², Hiroyuki Ogasawara², Raymond Durrheim³, Alex Milev⁴, Makoto OKUBO⁵, Teruhiro Yamaguchi⁶, James Mori¹

1. 京都大学、2. 立命館大学、3. Wits大学、4. CSIR、5. 高知大学、6. 北海道大学

1. Kyoto university, 2. Ritsumeikan university, 3. Univ.Witwaterarand, South Africa, 4. CSIR, South Africa, 5. Kouchi university, 6. Hokkaidou university

The largest event recorded in a South African gold mining region, a M5.5 earthquake took place near Orkney, South Africa on 5 August 2014. This is one of the rare events as the main- and after-shocks were recorded by 46 geophones and 3 Ishii borehole strain meters at 2 - 3 km depths with epicentral distances, $\Delta < \text{several km}$, and 17 surface strong motion meters with $\Delta < 20 \text{ km}$. The upper edge of the planar aftershock activity dipping almost vertically was only some hundred meters below the sites where the strainmeters were installed. As the M5.5 seismic rupture is located within a range drillable from gold mine workings at depth, ICDP approved a project to drill into the seismogenic zones. Moyer et al. (2016 SCEC) inverted surface strong motion data, suggesting significant fault slip even at the mining horizon, while there was no seismic rupture mapped or there were three strainmeters installed. So, the three strainmeters can contribute to constrain the configuration of the seismic rupture. As population of the aftershocks varies in space significantly, we expect a possibility to discuss a relationship the fault slip and the aftershocks.

These strainmeters were apart each other about 150 m only. However, their strain changes had different polarities while the other M4 strain changes with a similar hypocentral distance was the same. So, this information can constrain the location and configuration of the M5.5 fault critically.

First, we conducted a forward analysis by assuming a point source with the mechanism same as macroscopic one of the M5.5 faulting at a distance of a few km. However, no difference in polarity in strain change was seen, suggesting that the effect of a finite size of the source with an edge much nearer than the point source had to be taken into account. We are attempting to invert the slip distribution on a source with a finite size together with surface strong motion data. We will report on the results at the meeting.

キーワード：南アフリカ、誘発地震、インバージョン

Keywords: South Africa, induced earth quake, inversion

地震の先行時間とテルツァギの圧密理論

Terzaghi's theory of consolidation and precursory time of earthquakes

*金子 尚人¹、長濱 裕幸¹

*Naoto Kaneko¹, Hiroyuki Nagahama¹

1. 東北大学

1. Tohoku University

一般的に、地震時における大きな繰返し剪断力で地盤変形や沈下が発生する。それによって、1995年の兵庫県南部地震や2003年の十勝沖地震において、深刻な液状化や地盤沈下が引き起こされた。土質力学の分野では、テルツァギの圧密理論を用いて地盤沈下が説明できる。テルツァギは歪の概念を圧密方程式へ導入した。一方で、地震予測に対して拡散方程式のような式において先行時間とマグニチュードの密接な関係から、比抵抗や地殻変動のような先行現象を説明することができる。しかしながら、地震学的に衝撃を与えたその拡散方程式のような式がどのようにして導き出されたかという根拠は不明瞭である。そこで我々は静水圧の概念による式よりも、圧密現象の観点から間隙比に注目し、はじめに前提として土の限界状態について言及した。その結果、（ダイレイタンスーと間隙比に関連した）圧密の概念は、飽和地盤での比抵抗を十分に説明できるものであることが明らかになった。従来、地震学と土質力学は独立している分野であるが、本研究において地震予測のゴールへの先行研究と両分野へのバトンとしたい。ここで、我々は飽和地盤の沈下過程の本質が上記と関係することを示す。

なお、本研究は、下記doiに示す論文より2016年に発表されたものである。

doi: <http://dx.doi.org/10.9790/1684-1304054446>

キーワード：圧密、ダイレイタンスー、地震、多孔質媒質方程式、先行時間

Keywords: Consolidation, Dilatancy, Earthquake, Porous medium equation, Precursory time

室内水圧破砕実験時に発生するAcoustic Emissionに対するモーメントテンソル解析の試み

Moment tensor analysis of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory experiments

*直井 誠¹、西原 健吾¹、山本 和畝¹、矢野 俊介¹、藤戸 航¹、陳 友晴¹、石田 毅¹、川方 裕則²、赤井 崇嗣³、黒澤 功³

*Makoto Naoi¹, Kengo Nishihara¹, Kazune Yamamoto¹, Shunsuke Yano¹, Wataru Fujito¹, Youqing CHEN¹, Tsuyoshi Ishida¹, Hironori Kawakata², Takashi Akai³, Isao Kurosawa³

1. 京都大学、2. 立命館大学、3. 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University, 3. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

水圧破砕技術は、高温岩体地熱開発やシェールガス・オイル開発に利用されており、造成された亀裂のモニタリングにはしばしば地震観測が用いられる。水圧破砕を円孔周りの応力集中問題として考えた場合、造成されるき裂は最大圧縮軸に沿う開口型になると予想されるが、実際の生産現場で観測された微小地震の解析では、せん断型が支配的との報告が多くなされている (e.g., Maxwell, 2013)。例えば、シェールガス・オイルの開発では、造成き裂の閉塞を防ぐためにプロパントと呼ばれる亀裂支持剤を注入するが、引張型の地震が支配的であればプロパントがより入りやすいと考えられ、水圧破砕時に発生する地震の震源メカニズムを調べることは重要である。しかし、実際の生産現場では、コストの問題からメカニズム解を十分拘束できる観測網が展開できない場合が多く、はっきりとした結論を出すのが難しい。

本研究では一軸圧縮下で花崗岩試料を用いた室内水圧破砕実験を行い、実験時に生じる微小破壊 (Acoustic Emission; AE) を十分な数のAEセンサで計測し、これにモーメントテンソル解析を適用することを試みた。AEセンサは一般に特性が複雑であり、また、個々のセンサの接着状態が感度に与える影響の補正が難しいために、振幅を精度良く測定する必要があるモーメントテンソル解析は困難である。本研究では、実験開始直前に各AEセンサから他のAEセンサに波を発振するという試験をあらゆるセンサの組み合わせで実施し、得られた振幅値からセンサの感度係数を逆解析で求めるキャリブレーション手法 (e.g., Kwiatek et al. 2013) を適用することで、接着状態が感度に与える影響を評価・補正した振幅データを用いて、モーメントテンソル解析を実施した。解析の結果得られたモーメントテンソル解を、Knopoff and Randall (1970) の手法で等方成分、剪断成分、CLVD成分に分解し、いずれかの成分が50%以上を占める場合に等方 (圧縮・爆発) 型、剪断型、CLVD (開口・閉合) 型と分類したところ、剪断成分が卓越するイベントが20%–55%を占めたのに対し、開口成分や閉合成分が卓越する解も10–20%程度得られた。また、CLVD成分が卓越する解の開口軸を調べたところ、古典的な理論で予測される載荷軸沿いの開口亀裂を示唆する解が支配的であった。

キーワード：アコースティック・エミッション、水圧破砕、モーメント・テンソル

Keywords: Acoustic Emission, Hydraulic fracturing, Moment tensor

二軸圧縮試験機を用いたSlow Slipに伴う透過波の振幅変化の検出 Response of Transmitted-wave Amplitude to a Biaxial Compressive Experiment

*植村 美優¹、伊藤 喜宏²、太田 和晃²、片山 郁夫³

*Miyuu Uemura¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Ikuo Katayama³

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所、3. 広島大学

1. Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Hiroshima University

Active and passive seismic monitoring approaches, such as active seismic survey and seismic interferometry, for phenomena on subducting plate interfaces, especially slow earthquakes, are one of technically feasible ways to measure strain accumulation and release in subduction zones. A laboratory experiment is one of the effective approaches to unravel the mechanism. Some previous studies, reporting on laboratory experiments using rocks, have described results on the response of amplitude and velocity reductions to failure occurrence (e.g., Lockner et al., 1977; Yoshimitsu et al., 2009). Additionally, some previous studies, which imitated slow slip events in the laboratory setting, have reported on velocity reductions before and after a slow stick-slip event (Nagata et al., 2008; Scuderi et al., 2016). Here we show a response of amplitude in transmitted waves to the occurrence of slow slip in a biaxial compressive experiment.

We used three stainless steel blocks (a center block and side blocks) and held Ca⁺ montmorillonite powder as simulated fault gauge between each of the center blocks and the side one. We used piezoelectric elements as transmitters, putting them on the center block, while putting three receivers on the side blocks, which are aligned along the loading direction and placed at an interval of 10 mm. We ran a series of slide-hold-slide experiments. In the initial run, the center block slid first at 1.5 $\mu\text{m/s}$ for 5 mm, and the block was then held stationary for 1000 s. In the second run and the third run, the block was held stationary for $\sim 3600\text{s}$ and $\sim 32500\text{s}$ on second and third runs, respectively. The sliding was resumed with the same velocity and the same displacement as the first run. After the third hold, the sliding was continued with the same velocity until reaching 2mm of displacement, thus achieving 17 mm displacement in total. We recorded the transmitted waveforms for every 1mm displacement during the sliding period, and every 100 seconds during the holding period, as well as just before and after the holding period.

The preliminary results show that the transmitted-wave amplitude recovered in accordance with the logarithm of the elapsed time during the hold, and that the rate of amplitude reduction is on average about $\sim 10\%$ just after holding periods at all the receivers. The recovery and reduction of amplitude observed for the transmitted waves could be due to change of frictional contact on interface due to the occurrence of sliding.

キーワード：二軸圧縮試験、スロースリップ

Keywords: biaxial compressive test, slow slip

アルゴン雰囲気下におけるドレライトの中速摩擦特性に対する温度効果

Temperature-dependent frictional strength of dolerite in an argon atmosphere

*横山 湧紀¹、村山 寛樹¹、金川 久一¹、澤井 みち代¹

*yokoyama yuuki¹, Hiroki Murayama¹, Kyuichi Kanagawa¹, Michiyo Sawai¹

1. 千葉大学

1. Chiba University

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。この発熱によって、断層内の物質が瞬時に熔融や熱分解をすることで、断層が著しく弱くなることが90年代以降明らかとなってきた（例えばTsutsumi and Shimamoto, 1997やDi Toro et al., 2011）。地震時の断層挙動に対する温度の重要性は広く認識されてきたが、震源核が形成され地震発生時のすべり速度に至るまでの中速度領域（数mm/s～数cm/s）に対する温度効果の見積もりはこれまで数例しかなく（Noda et al., 2011）、すべり速度依存性に与える背景温度の効果は明らかではない。またYao et al. (2015) では、熱伝導率の異なる母岩に同じ断層ガウジを挟み高速摩擦実験をおこなった結果、熱伝導率の違いによって摩擦係数が大きく異なることが示された。これは断層周辺の温度環境が、すべり速度の速い領域において断層摩擦強度に大きな効果を示す可能性があることを示唆するものである。そこで本研究では、高温条件下での中速摩擦実験を実施し、岩石の摩擦特性が背景温度の変化に伴いどのように変化するかを検証した。

実験には比較的熱破壊に強いベルファスト産ドレライトを使用し、千葉大学設置の回転式高温摩擦試験機を用いた。地下の断層は酸素に乏しい環境下にあることを考慮し、アルゴン雰囲気下（酸素濃度0.2%程度）で、垂直応力1 MPa、すべり速度1 - 300 mm/s、各速度におけるすべり量10 - 20 mの条件で実験をおこなった。温度は高周波コイルによって加熱し、20°C - 500°Cの温度範囲で力学挙動にどのような変化が見られるかを調べた。

20°Cおよび100°Cでは、1 mm/sで約0.81 - 0.83の値を示した摩擦係数は、速度が上昇するにつれ速度弱性の傾向を示し、30 mm/sでは約0.73の値を示した。それに対して300°C以上では、わずかに速度弱性の傾向を示すものの、1 - 30 mm/sの比較的低速範囲では摩擦係数はおよそ0.81 - 0.85の値を示し大きな変化が見られなかった。しかしすべり速度100 mm/sになると20°Cおよび100°Cでは摩擦係数がわずかに上昇し速度強化の性質を示したのに対し（ $\mu = 0.75 - 0.79$ ）、300°C以上では明瞭な速度弱性の傾向を示した（ $\mu = 0.67 - 0.76$ ）。さらに300 mm/sになるとすべての温度条件で摩擦係数が低下し、その低下量は背景温度が高くなるほど大きくなることがわかった（摩擦低下量 $\mu = 0.1 - 0.38$ ）。つまりドレライトの摩擦特性はすべり速度だけでなく背景温度の影響を大きく受け、高温条件下では断層が著しく弱くなる速度が低速側にシフトすることが考えられる。これは、地震が発生し破壊が伝播する際に、より温度が高い深部へと先に破壊が伝播する可能性があることを示唆するものである。実際に2011年東北沖太平洋沖地震時にそうした挙動が確認されたことを鑑みても（Ide et al., 2011）、中速・高速領域での断層強度に対する温度効果を明らかにすることは、地下深部の破壊伝播をより現実的に理解する上で重要な要素の1つとなると考えられる。

キーワード：摩擦、温度効果、ドレライト

Keywords: friction, temperature dependence, dolerite

中速すべり領域の断層運動に伴う模擬断層の透水性変動（間隙流体に水を用いた場合）

Dynamic water permeability change of simulated fault induced by moderate velocity friction

*谷川 亘¹

*Wataru Tanikawa¹

1. 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kochi Institute for Core Sample Research

Co-seismic events induce sudden changes in pore pressure, flow rate, and fluid chemistry at depth. These temporal transitions could be explained by water permeability changes of fault zones at depth during earthquakes, and change in permeability in fault zone also plays an important role in dynamic processes. Considerable change of permeability may occur during the transition from coseismic to post-seismic period, though the change is not well documented. Therefore, I designed the laboratory system to measure the change of water permeability during low to high velocity friction tests using simulated fault rocks. Similar permeability-friction tests were conducted in the past studies (Tanikawa et al., 2012, 2014). However, the previous tests were conducted by using nitrogen gas as pore fluid, and slip rate was not so high compared to dynamic fault motions.

In this study, Belfast dolerite and Aji granite were used as test specimens. For each experiment, two 20-mm-long hollow cylindrical specimens with 40 mm and 16.5 mm outer and inner diameters, respectively, were used. To measure the permeability, radial flow from the inner wall to the outer wall of the specimen was induced by applying a differential pre pressure between inner and outer walls. 0.1 to 0.8 MPa of constant pore pressure was applied from the inner wall, and water flowing out from the outer wall was released to the atmosphere. I applied constant normal stress of 2 MPa and constant rotation speed from 0.1 to 100 rpm (0.001 to 0.1 m/s) for a slip displacement of 1 to 10 m.

The result shows that permeability (flow rate) increased suddenly at the onset of sliding by a factor of more than two, and the rate of increase was nearly proportional to permeability before sliding. After sliding, permeability was decreased gradually with time, and had almost stabilized within few minutes. To compare the permeability before and after sliding, higher velocity friction (>0.03 m/s) results in the increase of permeability, and slower velocity friction induced the permeability reduction. This transition appears to be related to velocity dependent friction behavior, as velocity weakening was observed at above 0.03 m/s of slip velocity. Permeability reduction and velocity weakening behavior at slower velocity regime is probably explained by gouge compaction and gouge friction. On the other hand, high velocity friction will produce thermal pressurization, flash heating, and thermal cracking, therefore, the transition process of water permeability for high velocity friction would be more complicated than slow velocity friction.

キーワード：透水性、摩擦係数、断層

Keywords: permeability, friction coefficient, fault

大気中およびアルゴン雰囲気下における中速域のめのうの摩擦強度 Frictional strength of agate at intermediate slip rates in air and argon atmospheres

*村山 寛樹¹、金川 久一¹、澤井 みち代¹、廣瀬 丈洋²

*Hiroki Murayama¹, Kyuichi Kanagawa¹, Michiyo Sawai¹, Takehiro Hirose²

1. 千葉大学大学院理学研究科、2. 海洋研究開発機構高知コア研究所

1. Graduate School of Science, Chiba University, 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Frictional strength of quartz rocks is known to be extraordinary low at subseismic slip rates ranging from 1 mm/s to 10 cm/s, and this weakening has been ascribed to the hydration of comminuted material, i.e., silica gel formation (e.g., Goldsby and Tullis, 2002; Di Toro et al., 2004; Hayashi and Tsutsumi, 2010). If so, frictional strength of quartz rocks at dry conditions would not significantly decrease at those slip rates, because the hydration of comminuted material would be prevented. In order to testify this hypothesis, we conducted rotary-shear friction experiments on agate samples at a normal stress of 1.5 MPa and intermediate slip rates of 1 cm/s and 10 cm/s, i.e., at the same conditions as those of experiments done by Hayashi and Tsutsumi (2010), but in humid-air and dry-argon atmospheres, and compared frictional strengths in humid and dry conditions.

At a slip rate of 1 cm/s, frictional strength in both atmospheres did not change much with displacement so that friction coefficients after displacements of ≈ 180 m were as high as ≈ 0.7 . In contrast at a slip rate of 10 cm/s, frictional strength in both atmospheres significantly decreased with displacement, and friction coefficients after displacements of ≈ 250 m became as low as ≈ 0.25 , although significant fluctuations in frictional strength were observed throughout the experiments. Thus our results show that frictional strength of agate at a given slip rate does not differ between humid and dry conditions, and therefore cast doubt about weakening of quartz rocks caused by the hydration of comminuted material. Since we observed flashes along the slip surface during experiments at a slip rate of 10 cm/s, significant weakening of agate at this slip rate is likely due to the flash heating of asperities. We monitored thermal images during experiments in air at both slip rates of 1 cm/s and 10 cm/s, and will also report the relationship between frictional strength and the slip-surface temperature.

キーワード：摩擦強度、めのう、大気中、アルゴン雰囲気

Keywords: frictional strength, agate, in air, argon atmosphere

中速すべりにおける石英質岩のすべり弱化過程で模擬断層表面に形成されるせん断組織

evolution of localized shear texture on a simulated fault surface of quartz rocks during slip-weakening process at a intermediate slip velocity

*飯田 大貴¹

*Hiroataka Iida¹

1. 京都大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

Siliceous rocks such as novaculite and quartzite display dramatic weakening of frictional strength at slip velocities of >1 mm/s [Goldsby and Tullis, 2002; Di Toro et al., 2004]. It is known that hydrated amorphous silica gouges form on the fault surface in the intermediate-high velocity frictional slip [Hayashi and Tsutsumi, 2010]. Goldsby and Tullis [2002] suggested that the silica gel layer made of very fine amorphous silica particles causes the frictional weakening. However, there are few reports focused on the state of these silica gouges during the slip-weakening process. In this study, to better understand the state of the fault surface during the slip-weakening, SEM observations of the fault surface and section and XRD analyses of the silica gouge were performed.

All the experiments in this study were conducted using a rotary-shear, intermediate-to high-velocity friction testing machine in Kyoto University. The samples used for the friction experiments were single crystal of quartz (a synthetic crystal). A pair of solid cylinders with a ring-shaped end surface (inner and outer diameter of 5 mm and 25 mm) was cored from the samples. Experiments were carried out at a constant normal stress of 1.5 MPa and a slip velocity of 105 mm/s condition.

As an experimental result, slip-weakening occurred at the initial 0.2–0.3 m of the sliding and the value of friction coefficient dropped from the peak value 0.6 to residual value 0.2. The peak friction showed $\log(t)$ healing [Dieterich, 1972]. Whole of the fault surfaces of the specimens were completely covered with white, fine-grained gouges after the experiments. SEM observations showed that 100–300 μm size of plate-like structures had been formed on the surface. The surfaces of these structures were very smooth and flat. These structures were teared from the surface into a shear direction. SEM observations of the fault section revealed that a continuous shear plane had been formed at the center of the fault zone. Along and parallel to this shear plane, approximate 1.5 μm -thick layers had piled up and formed foliation structures. Similarities in size and direction of the planes suggest that these piled layer structures should correspond to the plate-like structures found on the fault surface.

XRD analyses of the fault gouge revealed that amorphization of gouges had already been occurred during the slip-weakening.

キーワード：石英、弱化、構造、非晶質、回復、ガウジ

Keywords: quartz, weakening, structure, amorphous, healing, gouge

マイロナイト中の再結晶石英のカソードルミネッセンス・スペクトル特性 Cathodoluminescence spectra properties of recrystallized quartz in mylonite.

*田野 孝太郎^{1,2}、金井 拓人¹、綿貫 峻介¹、高木 秀雄¹

*Kotaro Tano^{1,2}, Takuto Kanai¹, Shunsuke Watanuki¹, Hideo Takagi¹

1. 早稲田大学、2. 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構

1. Waseda Univ., 2. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

石英は結晶内の格子欠陥や不純物元素の存在によってカソードルミネッセンス (CL) 発光の特性をもつ。マイロナイトに対しCL像観察を行った研究例として、Shimamoto et al. (1991), Morales et al. (2011), Kidder et al. (2013) などがある。一方、CLスペクトルをHunt (2013) で総括された発光原因ごとに分離し、マイロナイト化の影響について検討した研究は報告されていない。そこで本研究では、マイロナイト化に伴う再結晶石英の細粒化とCLスペクトルとの関連性について検討した。使用した試料は青森県白神山地西部入良川および三重県の中央構造線北方に分布する白垂紀花崗岩類を原岩とするマイロナイトを対象とし、剪断帯に直交するルートにおいて、CLスペクトルの特徴の変化を調べた。

石英のCLスペクトルは主に青色領域の波長420 nm、赤色領域の620 nm付近にピークをもつブロードなバンドスペクトルであり、この2つのバンドの相対的な強度の違いにより、紫-赤色の様々な発光を呈す。本研究ではSEM-CLを用いて、各試料に含まれる石英のスペクトルを測定し、得られたスペクトルデータに対し、主成分分析を行った。また、Hunt (2013) で総括された発光原因に対応する波長を用い、得られたスペクトルを9つのVoigt関数からなる混合Voigt関数にフィッティングしてピーク分離を行った。各Voigt関数の中心波長は発光原因が知られている380, 420, 450, 500, 580, 620, 650, 705 nmと発光原因は不明だがピークが存在する730-800 nmの合計9つに設定し、分離された各ピークの混合係数を求めた。

主成分分析の結果、すべての試料について第一主成分 (PC1) は全体的な発光強度、第二主成分 (PC2) は青側と赤側の発光強度の比を表すパラメーターとなった。なお、PC2は全体の発光強度の影響も受けるため、各試料のスペクトルを面積が等しくなるように規格化し、規格化したスペクトルにPC2の固有ベクトルを乗じることでPC2としてのスコア (PC2') を求めた。

入良川と三重のマイロナイトに共通する結果として、PC1スコアでは発光強度に試料間のばらつきが見られたが、PC2' スコアから母岩から剪断帯の中心に向かって再結晶石英の粒径が小さくなるほど赤側 (580-650 nm) の発光が相対的に強くなる結果を示した。入良川マイロナイトの変形時の温度に全体的に大きな変化は示さず、350-450°Cと推定される (綿貫ほか, 2017) ことから、PC2' の明瞭な変化は、変形温度の変化に依存するものではないと考えられる。ピーク分離の結果、再結晶石英の粒径減少に伴い、380, 420, 450 nmについては各混合係数が減少、620 nmについてはその混合係数が増加する傾向が見られた。これらの結果から、マイロナイト化が強くなるにつれて、不純物元素として青側の発光をもたらすAl, Tiが減少した可能性、または、赤側の発光をもたらす非架橋酸素空孔中心 (NBOHC)が増加した可能性が考えられる。NBOHCはOH⁻結合の欠陥に起因すると報告されており (Götze et al., 2001), マイロナイト化の進行によってこの欠陥が増加した可能性が考えられる。今後は、マイロナイト化の進行に伴う石英中のこれらの格子欠陥の実態を明確にする必要がある。

文献

Götze, J., Plötze, M., and Habermann, D., 2001, *Mineralogy and Petrology*, **71**, 225-250.

Hunt, A. M. W., 2013, *Jour. Arch. Sci.*, **40**, 2902-2912.

Kidder, S., Avouac, J. P., and Chan, Y. C., 2013, *Solid Earth*, **4**, 1-21.

Morales, L. F. G., Mainprice, D., Lloyd, G. E., and Law, R. D., 2011, *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, **360**, 151-174.

Shimamoto, T., Kanaori, Y., and Asai, K., 1991, *Jour. Struct. Geol.* **13**, 967-973.

綿貫峻介・金井拓人・坂秀憲・高木秀雄, 2017, *地質学雑誌*, **123**, (印刷中).

キーワード：石英、カソードルミネッセンス、マイロナイト

Keywords: Quartz, Cathodoluminescence, Mylonite

Raman spectra of carbonaceous materials within the black fault rocks in Kodiak accretionary complex

*山口 飛鳥¹、Raimbourg Hugues²

*Asuka Yamaguchi¹, Raimbourg Hugues²

1. 東京大学大気海洋研究所、2. オルレアン大学

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Institut des Sciences de la Terre d'Orleans, Université d'Orleans

Estimation of frictional heat generated in the principal slip zone (PSZ) of a fault is a key to understand fault mechanics. Recently, analyses on carbonaceous material (CM) such as vitrinite reflectance and Raman spectroscopy, which were widely used as geothermometer, have been applied to fault rocks and products of friction experiments (e.g Sakaguchi et al., 2011; Kitamura et al., 2012; Furuichi et al., 2015; Kaneki et al., 2016; Kouketsu et al., 2017). Raman spectroscopy of CM has an advantage in 2-dimensional mapping, and therefore useful for quantifying high temperature zone along PSZ generated by thermal diffusion of frictional heat. However, distribution of Raman spectra of CM within a PSZ has not considered well. In this presentation, we show the result of Raman spectra of CM within the PSZ of the Pasagshak Point Thrust in the Kodiak accretionary prism. The thrust is characterized by ultrafine-grained black fault rocks (BFR) including weakly molten pseudotachylyte formed during seismic slips (Rowe et al., 2005; Meneghini et al., 2010; Yamaguchi et al., 2014).

Raman spectra were obtained using a Renishaw InVIA Reflex microspectrometer (ISTO-BRGM; Orléans) with 514 nm laser. The laser beam power at sample surface was set to ~0.5 mW. Analysis was performed to traverse internal textures of the BFR. Spectra was decomposed into five peaks, center positions around 1350 cm⁻¹ (D1, D3 and D4) and graphite bands centered around 1580-1600 cm⁻¹ (D2 and G).

Microstructures of the BFR were observed under cathodoluminescence microscope.

Although D1-band develops within the crystalline microlayers of aphanitic BFR, which is thought to be melt-origin pseudotachylyte (Meneghini et al., 2010), development of G-band was not detected even in the crystalline microlayers. This observation suggest that Raman spectra of CM do not reach the equilibrium in the case of short-time heating, as pointed out by Nakamura et al. (2017). An alternative possibility is that Kodiak BFR has formed temperatures of <400 degrees C, without frictional melt.

スイスMont-Terri地下研究施設における主断層ガウジの摩擦特性と微細構造

Frictional Properties and Microstructures of Main Fault Gouge of Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland

*青木 和弘¹、瀬下 和芳¹、酒井 亨²、亀高 正男²、嶋本 利彦³、Ma Shengli³、Yao Lu³

*Kazuhiro Aoki¹, Kazuyoshi Seshimo¹, Toru Sakai², Masao Kametaka², Toshihiko Shimamoto³, Shengli Ma³, Lu Yao³

1. 日本原子力研究開発機構、2. ダイヤコンサルタント、3. Institute of Geology, China Earthquake Administration
1. Japan Atomic Energy Agency, 2. Dia Consultants, 3. Institute of Geology, China Earthquake Administration

スイスMont Terri地下研究施設の主断層ガウジのコアの摩擦試験を行い、実験後の試料の微細構造を観察した。試料は地表から約260m深度の地下坑道から掘削した垂直試錐孔BSF1号孔の深度47.2mと37.3mおよびBSF-2号孔の深度36.7m, 37.1m, 41.4m, 44.6mの合計6個のコアである。試験機は、中国地震局地質研究所が所有する回転剪断式低速・高速摩擦試験機を用いた。試験条件は、室温下で無水及び含水条件下で、垂直応力は3.95~4.0MPa, すべり速度は0.2 microns/s~2.1mm/sとし、ホスト試料として岩石に近い挙動を示すTiAlV合金製ピストンを用い、低速・中速摩擦試験を実施して摩擦の速度依存性などを求めた。なお、テフロン・スリーブを用いてガウジを封入したので、実験は排水条件下で行った。試験後の試料を回収して、日本電子製JCM-6000を用いてSEM(Scanning electron microscope) 観察を行った。

主な調査結果は次のとおりである。

- 1) 試験に用いた泥岩の定常およびほぼ定常摩擦係数は、含水条件下では0.1から0.3、無水条件下では0.5から0.7という値が得られた。無水条件下では含水条件下の約2倍の大きさである。
- 2) BFS-1号孔の深度37.3mの試料のみ含水で0.55から0.77、無水で0.45から0.78という摩擦係数を示し、含水と無水で差がなかった。この試料は鱗片状を呈する断層岩で、粘土含有量が33%以下で、他の試料(67から73%)と比較して特徴的に少ない。
- 3) 摩擦レジームとしては、すべての試料でわずかな速度強化ないし速度依存性のない低速度レジームと、明らかな速度強化で特徴づけられる中速度レジームとに分類された。
- 4) 変形したガウジは、回転ピストンと固定ピストン周辺で明瞭な条線を伴うスリッペンサイド表面をもつスリップゾーンが認められた。

キーワード：摩擦試験、モンテリ地下研究施設、摩擦係数、反射電子像

Keywords: friction experiment, Mont Terri Rock Laboratory, friction coefficient, back scattered electron image

福島県南相馬市に発達する社地神剪断帯のマイロナイトを利用した変形条件の推定

Determination of the deformation conditions of the Shajigami Shear Zone developed in Fukushima Prefecture, northeast Japan, based on deformation microstructures of mylonites

*綿貫 峻介¹、久末 修也¹、金井 拓人¹、高木 秀雄¹

*Shunsuke Watanuki¹, Shuya Hisasue¹, Takuto Kanai¹, Hideo Takagi¹

1. 早稲田大学

1. Waseda University

福島県南相馬市の阿武隈東縁構造帯（南部北上帯）には北東-南西方向に延びる剪断帯が発達しており、社地神剪断帯と呼ばれている（山元ほか，1989）。剪断帯中央部の社地神断層に沿って東側に花崗閃緑岩が、西側に石灰岩が分布しており、共に変形を受けている。久田・高木（1992）は断層岩の変形構造から、花崗閃緑岩マイロナイトは左ずれを示し、花崗閃緑岩カタクレサイトと石灰岩マイロナイトは右ずれを示すことを報告している。今回、SEM-EBSD法により測定した花崗閃緑岩マイロナイト中の再結晶石英および石灰岩マイロナイト中の再結晶方解石の格子定向配列（以下LPO）パターンと粒径分布に基づいて変形条件を推定したので、報告する。

花崗閃緑岩マイロナイトの多くはマイロナイト化に重複してカタクレサイトを被っている。マイロナイトの非対称構造は左ずれを示す。マイロナイト試料の再結晶石英粒子（平均粒径13.8-21.1 μm）の結晶方位は、多くの試料でrhom<a>すべりとprism<a>すべりに起因する集中を示した。推定した優先すべり系は、c軸の集中パターンであるタイプクロスガードルとY集中の中間に対応している。変形微細構造とLPOパターンから、このマイロナイトは400 °C前後の環境で変形したと推定できる（竹下，1996; Passchier and Trouw, 2005）。

石灰岩マイロナイトは、社地神断層に近い試料ほど強くマイロナイト化しており、いずれも右ずれを示す。ただし、一部の石灰岩マイロナイト中の方解石ポーフィロクラスト内部に、左ずれの運動が保存されている。再結晶方解石粒子（平均粒径16.9-46.9 μm）のc軸はZ方向から10-20°程度時計回りに回転した方向に集中し、a軸はガードル状に集中する。マイロナイト中の方解石には双晶の屈曲が認められ、200 °C以上で変形したと考えられる（Burkhard, 1993）。

花崗閃緑岩の角閃石K-Ar年代は105 Maであり（資源エネルギー庁，1990），400 °C前後での変形はそれ以後に生じたと考えられる。また、花崗閃緑岩カタクレサイトがホルンフェルス化していることから、その熱源は阿武隈帯の新期花崗岩類に求められ、石灰岩マイロナイトの変形は90 Ma以前であると考えられている（久田・高木，1992）。以上より、社地神剪断帯の花崗閃緑岩は、105 Ma以降に400 °C前後の環境で花崗閃緑岩が左横ずれのマイロナイト化を受けた。その後、応力方向が変化した結果右横ずれ変形に転換し、90 Maまでに200-300 °Cの環境で石灰岩のマイロナイト化と花崗閃緑岩のカタクレサイト化が生じたと推定できる。

文献

Burkhard, 1993, *Jour. Struct. Geol.*, **15**, 351-368.

久田 司・高木秀雄, 1992, *地質雑*, **98**, 137-154.

Passchier, C. W. and Trouw, R. A. J., 2005, Springer, Berlin, 366p.

資源エネルギー庁, 1990, 資源エネルギー庁, 116p.

竹下 徹, 1996, *地質雑*, **102**, 211-222.

山元孝広・久保和也・滝沢文教, 1989, *地質雑*, **95**, 701-710.

キーワード：社地神剪断帯、マイロナイト、格子定向配列

Keywords: Shajigami Shear Zone, Mylonite, Lattice preferred orientation

序列外スラスト分岐断層近傍の割れ目分布の特徴：三浦半島浅間断層を例として

Distribution and characteristics of fractures in the vicinity of spray fault branching off from out of sequence thrust: a case of the Sengen fault, Miura Peninsula

*村木 昌弘¹、上原 真一²

*Masahiro Muraki¹, Shinichi Uehara²

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科 自然環境学専攻 自然環境変動学分野、2. 東邦大学 理学部 生命圏環境科学科

1. The University of Tokyo National Environmental Changes Department of National Environmental Studies Graduate School of Frontier Science, 2. Toho University Faculty of Science Department of Environmental Science

断層面上の間隙流体は断層運動に影響を与えるため、断層周辺の流体の挙動を理解することは、地震の発生メカニズムの解明において重要である。プレート沈み込み帯では、付加体の形成に伴い、デコルマから序列外スラスト（OST）が派生することがあるが、OSTが堆積物中より絞り出された流体の流路となることわかっていない。付加体が形成されている所では、付加体の形成に伴う側方圧縮により、堆積物中から流体が絞り出され、高間隙水圧が発生しやすくなると考えられる。高圧状態の間隙水は周辺岩石の割れ目に流れ込むと考えられるが、断層周辺には断層活動の影響によって形成されたと考えられる割れ目が多く存在し、流体移動の痕跡であるカルサイトなどの鉱物脈（空隙に鉱物が埋められた割れ目）がOST沿いの地表面露頭に観察されることがある。以上のことから、OST沿いの割れ目の分布や特徴を調べることは、OST近傍での流体の挙動の評価において重要である。本研究では神奈川県三浦半島南端に位置するOSTと考えられる城ヶ島スラストの分岐断層である浅間断層を対象に、その周辺の割れ目の分布と特徴の調査を行った。また断層周辺の鉱物脈の方向分布にビンガム分布をフィッティングすることで応力状態を推定する岩脈法（山路, [1]）を用いて、古応力解析および間隙水圧の推定を行った。

浅間断層は、走向がN 84°W、傾斜が70°Nの逆断層である。浅間断層の中心部付近では、黒色ガウジ（幅：約1 cm）・断層角礫（上盤側に幅20 m程度）・剪断帯（下盤側）を確認し、断層中心部（断層ガウジ、断層角礫）の幅が約20 mあることを確かめた。顕微鏡観察より、鉱物の配列が断層面に平行にそろっている様子を断層ガウジで確認でき、断層角礫は断層面から斜めに断層ガウジと同様の様子が確認できた。50 cm四方の枠組みを用いて割れ目密度を測定したが、断層中心部付近で密度が大きく、断層面から約100 m離れるまで割れ目密度が減少している事が確認でき、約100 m以遠では割れ目密度の減少はほとんど見られなかった。よって、ダメージゾーンと呼ばれる断層近傍の割れ目帯を断層面から約100 mとした。ダメージゾーンの内部の割れ目の走向は、それ以外の部分に比べて上盤側ではN10°~40°W方向に集中していて、断層の走向に近いことを確認した。下盤側は調査範囲が限られていて、断層中心部から約100 m以内の領域までしか割れ目を測定できなかったが、割れ目の走向はN50°~80°Wの方向に集中していて、上盤側と同様に断層の走向に近いことを確認した。このことは、ダメージゾーンが断層に伴って発達したことを示唆すると考えられる。浅間断層の上盤側では、断層に沿って100 m以内に炭酸塩鉱物脈が認められる事がYamamoto et al.[2]より報告されているが、現地での調査より、断層面から上盤側に約80~200 m離れた範囲の間で多くの鉱物脈を確認した。鉱物種はカルサイトであると考えられ、N50°~80°Eの走向の鉱物脈がやや多い傾向が見られた。また、岩脈法の結果より浅間断層周辺はNNE-SSW方向伸長の正断層型応力場とNNW-SSE方向圧縮の逆断層型応力場を経験していると推定し、間隙水圧は逆断層型応力場の時の方が正断層型応力場の時よりも高かったことが確認された。

[1] 山路（2012）地質学雑誌, 第118巻, 第6号, 335-350

[2] Yamamoto et al. (2005) TECTONICS, VOL, 24, TC5008

キーワード： 序列外スラスト、ダメージゾーン、古応力解析、間隙水圧

Keywords: out-of-sequence-thrust, damage zone, Paleostress analyses, pore pressure

和歌山県日高川層群に発達する巨大分岐断層の構造地質学的・鉱物学的・地球化学的特徴

Structural, mineralogical, and geochemical characteristics of an ancient megasplay fault in the Hidakagawa Formation, Kii Peninsula

*小川 丈彰¹、石川 剛志²、金木 俊也¹、廣野 哲朗¹

*Takeaki Ogawa¹, Tsuyoshi Ishikawa², Shunya Kaneki¹, Tetsuro Hirono¹

1. 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、2. 海洋研究開発機構高知コア研究所

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

プレート沈み込み巨大地震の断層滑り挙動を解明するために、四国四万十帯を初め、九州四万十帯などで、精力的な研究が実施されている。その滑り挙動は、岩石の組成にも大きく依存するため、海溝軸に沿った広範囲での調査が重要である。しかし、紀伊半島西岸の付加地質体に発達する断層岩の分析は未だ実施されていない。そこで、本研究では和歌山県西部、三尾地域に分布する日高川層群中のメランジュユニットに着目し、現地での地質図と変形構造区分図の作成、埋没深度推定、断層岩の微小構造観察、鉱物組成定量分析、および主要・微量元素分析を実施した。

その結果、母岩中の炭質物のラマン温度計より、埋没深度は3~4 kmであり、高い直線性を持つ断層を境に、埋没深度差が確認された。これは、大きな累積変位量を示唆する。さらに、この断層では、鉱物粒子の細粒化、葉状構造、溶融の痕跡、鉱物組成・主元素組成・微量元素組成の有意な変化が確認された。特に、微量元素組成の変化は高温状態(>350 °C)での流体-岩石相互作用を示した。以上より、本地域に発達する断層は非常に強い剪断・高温を経験しているかつての巨大分岐断層であると考えられる。発表では、これらの情報をさらに精査、考察し、地震時の滑り挙動と滑りパラメータについても報告する予定である。

キーワード：付加体、微量元素、流体岩石相互作用、巨大分岐断層、四万十帯

Keywords: accretionary prism, trace-element, fluid-rock interaction, megasplay fault, Shimanto belt

延岡衝上断層をはさむボーリングコアの主要・微量元素の規定的要因 Prescribed factor of major and trace elements composition presumed by the borehole core sample of Nobeoka thrust

*長谷川 亮太¹、山口 飛鳥¹、北村 有迅²、石川 剛志³、福地 里菜¹、芦 寿一郎¹

*Hasegawa Ryota¹, Asuka Yamaguchi¹, Yujin Kitamura², Tsuyoshi Ishikawa³, Rina Fukuchi¹, Juichiro Ashi¹

1. 東京大学新領域創成科学研究科 / 大気海洋研究所、2. 鹿児島大学大学院理工学研究科、3. 海洋研究開発機構高知コア研究所

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science and Engineering KAGOSHIMA UNIVERSITY, 3. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

沈み込み帯においてプレート境界から分岐する巨大分岐断層は、津波を伴う地震の発生源であると考えられている。延岡衝上断層は、日本列島に帯状に配列する付加体のひとつである九州四万十帯を北帯(白亜系および古第三系)と南帯(古-新第三系)に二分する低角衝上断層であり、過去に海底下で巨大地震を発生させた衝上断層であると言われている。上盤と下盤で顕著な岩相・変成度の違いが見られ、輝炭反射率から見積もられた上盤下盤それぞれの最高比熱は320~330°C、250~270°Cであり、大きな温度差が見られる。断層の変位によりこの温度差が形成されたと仮定すると、断層の総変位量は10 km程と推定される (Kondo et al., 2005)。

2011年に行われた延岡衝上断層掘削計画 (NOBELL) によりこの断層を貫くコア試料が採取され、以降その試料を用いた様々な分析が行われている。本研究では、延岡衝上断層掘削計画により採取された試料を用いて、深度ごとの化学組成分析を行い、プレート境界より派生する巨大分岐断層の断層運動にともなう元素、鉱物組成の変化から、断層運動と間隙流体との相互作用を明らかにする。主要元素と微量元素の分析に加え、鉱物組成の分析を行うことで断層運動時の構成元素、鉱物の二点からアプローチを行う。

高知コアセンター設置のXRF (Rigaku ZSX), ICP-MS (Agilent 7700x ICP-MS) を用いて断層帯中軸部 (principal slip zone; PSZ) から採取した38のサンプルから主要・微量元素をそれぞれ測定した。主要元素分析の結果の値に対して主成分分析を行った結果、PSZ内でSi, Na の減少とそれに伴うKの増加が認められた。これは熱水変質に伴う曹長石のイライト化反応の可能性を示唆している。Fukuchi et al. (2014) は、同ボーリングコアを用いたイライトの結晶化度の分析の結果から、断層帯におけるイライトの結晶化度は熱水による相互作用に影響される可能性を示した。ボーリングコアのXRDを使った鉱物組成と主成分分析の結果を比較すると、イライトの増減は確認できなかったものの、PSZにおける曹長石の消失が確認された。

また、ほぼ全ての元素がPSZ直上において大きく値が変動していた。微量元素には熱水と敏感に反応する元素が多く、断層運動時にPSZ直上で岩石と高温流体との反応が起こったことが想定される。しかし厳密には数センチ単位でピークを示す元素が異なり、PSZ上部では炭酸塩鉱物の濃集が起こったほか、その位置から3cm下では流体との相互作用が起こりやすいCsがピークを示すなど各元素により特徴的なピークを示していた。

本研究結果から断層運動時の流体の岩石に対し起こり得る影響について明らかとなったが、剪断面沿いで起こる断層運動時の元素や鉱物組成の変化を明らかにするには、今後更に細かいスケールでかつ適切な位置からのサンプリングと分析を行う必要があると考えられる。