

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

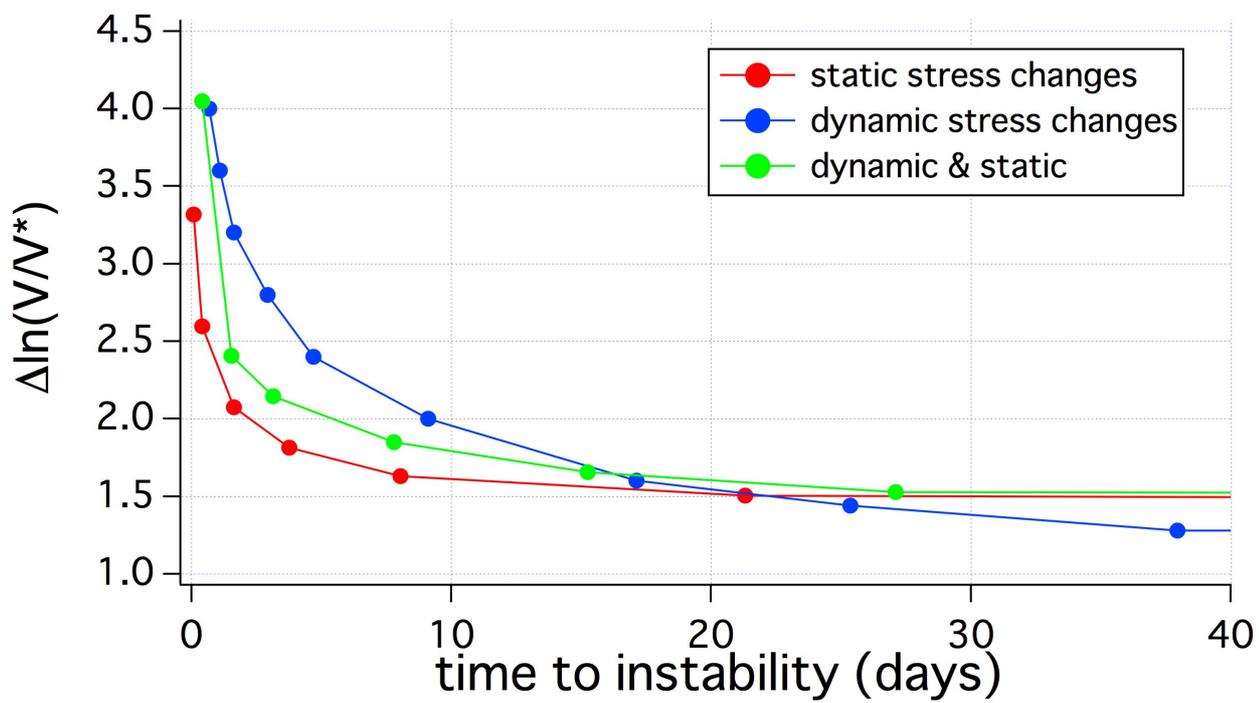


Fig.1

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った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はある。

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°Cから1200°Cの間で100°C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°C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°C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°C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

一見掛の破壊エネルギーの破砕帯厚依存性一

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と比較すると、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

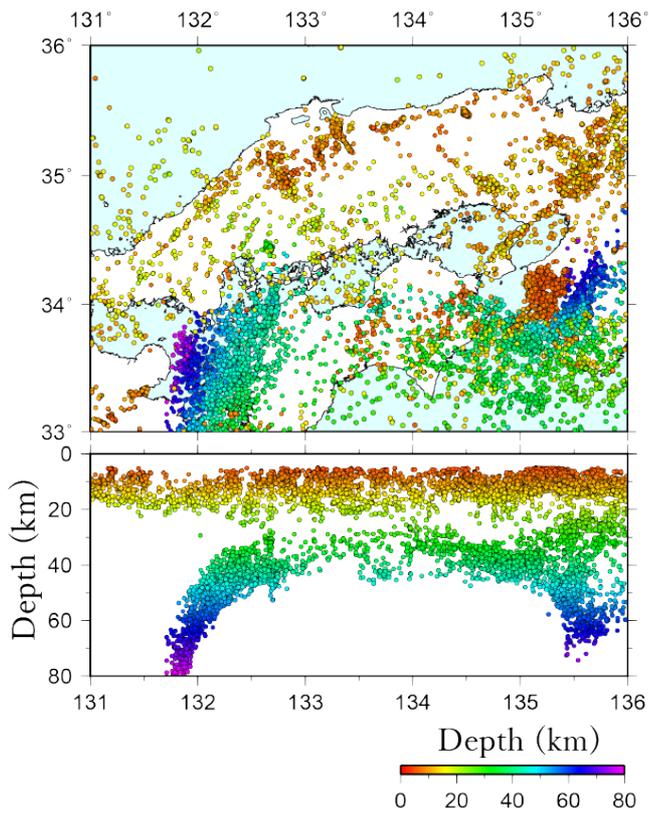


Figure 1 The distribution of earthquakes used in the tomography.

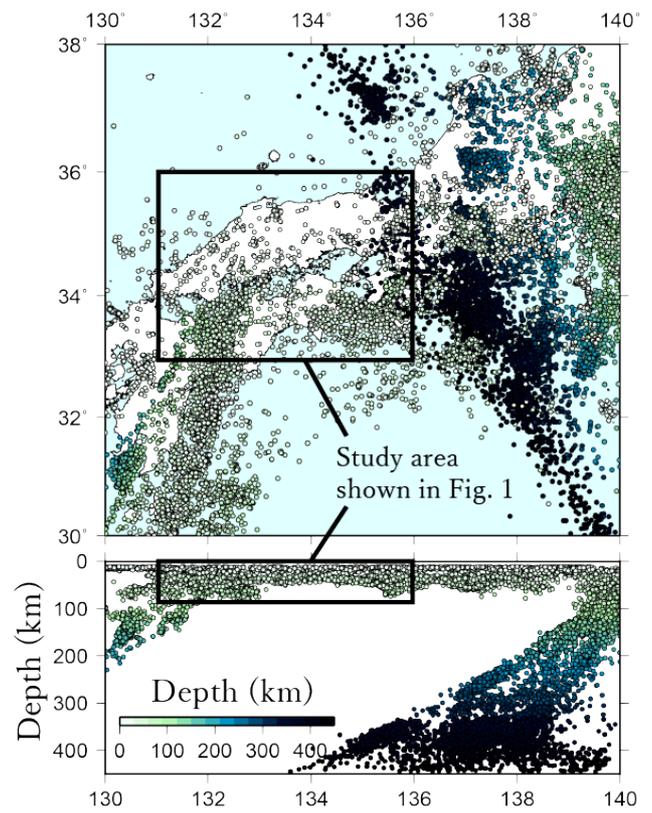


Figure 2 The distribution of earthquakes used for estimating rough velocity structure of an wide region which is used as an initial velocity model.

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

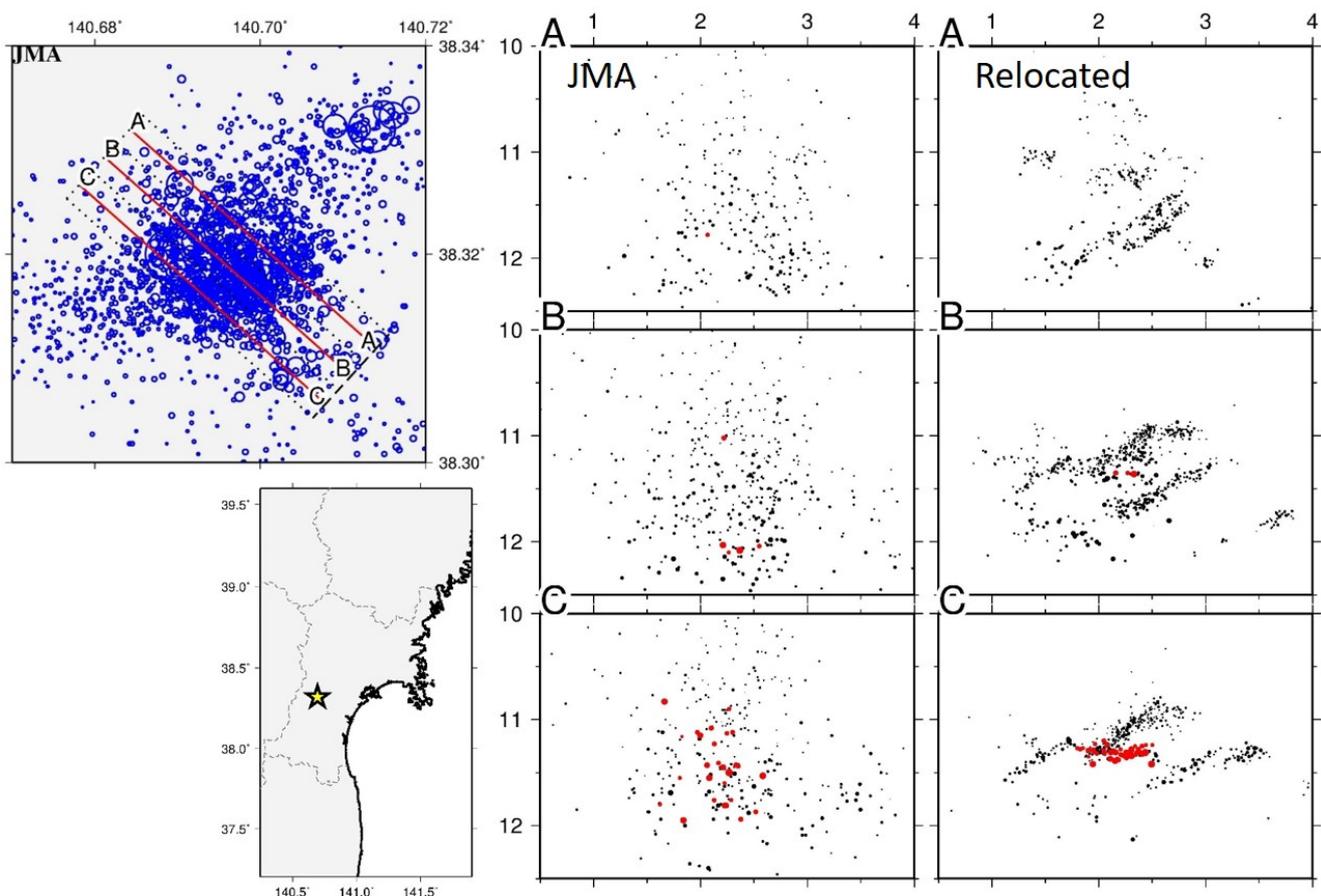
見て unfavorably-orientedであるため、震源のmigration同様、断層強度の低下を示唆する。震源のmigrationを、新たに再決定した震源分布で見ると、それらは面に沿って主に深い方から浅い方に移動することがわかった。直下のS波反射面から上昇した流体の移動経路を見ていると推定される。

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 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 a 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砕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