

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年の方が大きいですが、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 Ca²⁺ 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 ~ 3600 s and ~ 32500 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1MPa、すべり速度1-300mm/s、各速度におけるすべり量10-20m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、1mm/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、30mm/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、1-30mm/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100mm/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300mm/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 ,
Universite 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。