

## 滑り端伝播における自発的な静摩擦力の発現と動摩擦力の消失

## Spontaneous Emergence of Static Friction Force and Vanishment of Dynamic Friction Force in Slip Front Propagation

\*鈴木 岳人<sup>1</sup>、松川 宏<sup>1</sup>\*Takehito Suzuki<sup>1</sup>, Hiroshi Matsukawa<sup>1</sup>

1.青山学院大学理工学部物理・数理学科

1.Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University

滑り速度に非線形に依存する摩擦則の下での滑り端の伝播において、自発的な静摩擦の発現と動摩擦の消滅を示す。基板上のブロックを考え、滑り出すようx軸方向に加重する。ブロックは $z>0$ の半無限の領域を占める均質等方な媒質であるとし、基板は $z=0$ 上の剛体平面であるとする。 $x$ が $\infty$ でのブロックの滑りはゼロに固定し、 $x$ が $-\infty$ の点に加重して滑りを起こす。ここでは滑り速度の二次関数となる摩擦則を採用し、定常状態の滑り分布の解析解を得る：摩擦力 $\tau$ は $-av^2 + 2abv$ で与えられるとする。ここで $v$ は滑り速度であり、 $a$ と $b$ は定数である。この摩擦則の下では、滑り速度の増加に伴って速度強化から速度弱化作へに移り変わる。これにより摩擦力が滑り速度の一価関数となり、解析的取り扱いが可能となる。またここでは静摩擦の存在を先見的には仮定していないことにも注意する。

この系で滑りと歪の定常状態の解析解が得られ、それによって加重点での歪 $p_{inf} (<0)$ と滑り端の伝播速度 $c$ の間に関係があることが示された： $|p_{inf}|=2b/c$ 。また定常状態が存在するためには $c$ はブロックの弾性波速度 $v_e$ よりも小さくなければならない、ということも示された。これらの結果により $p_{inf}$ はある臨界値を持つことが分かる。 $|p_{inf}|<2b/v_e$ ならば定常的な滑りの伝播は現れず、時間と共に滑りが減衰してしまう。一方 $|p_{inf}|>2b/v_e$ ならば定常状態が存在する。これらの臨界的振る舞いから、静摩擦力が自発的に発現していると言える。巨視的な静摩擦力は $2bE_1/v_e$  ( $E_1$ はYoung率) で与えられる。

ここで得られた解析解は、加重点での滑り速度が $2b$ で与えられることも示している。これは摩擦力が加重点でゼロになることを意味する。すなわち、その点で動摩擦が自発的に消滅していることも明らかになったのである。

キーワード：静摩擦力、動摩擦力、非線形な摩擦則、解析解、滑り端の伝播

Keywords: Static Friction Force, Dynamic Friction Force, Nonlinear Friction Law, Analytical Solution, Slip Front Propagation

## 数論的アプローチによる地震活動のモデル化（その2）

## An arithmetic approach for modeling of seismic activity, No.2

\*藤原 広行<sup>1</sup>\*Hiroyuki Fujiwara<sup>1</sup>

1.防災科学技術研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

発生間隔がランダムで規模別発生頻度がG-R則に従うような地震活動を数理モデルとして表現するため、藤原（2014）は「数論的地震活動モデル」を提案し、素数を用いた地震活動モデルを定式化した。「数論的地震活動モデル」は、地震活動と素数分布との現象論的な類似性から類推されたものであるが、単なる偶然ではなく、その背後に何らかの数理物理的な意味付けが存在する可能性がある。

「地震」と「数」の世界に対して、下記のような対応を考えてみる。 $p_i$ を*i*番目の素数とし、その素数に対応する指標として素数の出現間隔  $p_i - p_{i-1}$ をとる。*i*番目に発生する地震を $e_i$ とし、その発生時刻を $T(e_i)$ 、地震モーメントを $M_0(e_i)$ としたとき、下記の関係式が成り立つと仮定する。

$$T(e_i) = p_i$$

$$\log(M_0(e_i)) = p_i - p_{i-1}$$

この対応関係に対して、数値実験を行うことにより、G-R則に類似した性質が得られる。この対応によって得られるモデルを「数論的地震活動モデル」と呼ぶ。「数論的地震活動モデル」における「地震」は、素数分布論の研究対象である「素数」そのものであり、地震発生予測は素数の出現予測と同値なものとなる。

素数分布に関しては、Riemann明示公式が知られている。Riemann明示公式とは、Riemannゼータ関数の零点を用いて、ある与えられた数以下の素数の個数を示した式である。「数論的地震活動モデル」においては、Riemann明示公式が地震発生の予測式を与える。Riemann明示公式の両辺を形式的に微分し、Riemann予想を仮定することにより得られる式においては、左辺に現れる各デルタ関数が地震発生時に対応しており、右辺においては、それらがRiemannゼータ関数の零点により周波数が規定されるある種の波動の無限個の重ね合わせで表現されている。

本研究では、この「数論的地震活動モデル」に対して物理的解釈を与えることを目的として以下のアプローチで検討を行っている。

- (1) Riemann明示公式を跡公式と見なし、その背後にある数理構造を探る。
- (2) 非可換幾何学や保型形式・保型表現を利用して、「数論的地震活動モデル」を説明できる力学系の構築に挑戦する。

(1)に関しては、Riemann面上での幾何学と調和解析を結びつけるSelberg跡公式と呼ばれるものが知られており、幾何サイドにおける素元に関する和が、スペクトルサイドにおける固有値に関する和に等しいことが示されている。跡公式は、2つの異なる概念を結びつける等式とみなすことができ、数理物理的なモデリングにおいて重要な役割を果たすと考えられる。ここでは、Selberg跡公式との類似性に着目してRiemann明示公式のある種の跡公式としてとらえることにより、その背後にある数理構造について、関連する既存の研究の調査を行った。

(2)に関しては、上記のアプローチの手始めとして、物理分野で研究が進められている共形場理論の持つ数理構造と数論の分野で研究が進められている保型形式・保型表現の類似性に着目した検討を行う。具体的な方向性としては、アデル空間上での保型形式・保型表現を考察することにより力学系を構成し、その固有値問題として「地震」をとらえるための準備研究を進めている。

なお、上記に述べた研究のアプローチは、数論の研究対象である「素数」と物理現象である「地震」を結びつける橋を構築することである。このような試みは、数論の分野においては、Langlandsプログラムとして知られた方法論であり、近年、数論と理論物理の間でもそうした考え方を拡張する研究が進められている。

本研究は、上記課題の解決に向けての準備研究の段階にある。素数分布に関しては、Riemann 予想など数論に

おける歴史的な未解決問題も存在している。講演では、今後の研究構想を中心に発表予定である。

#### 参考文献

藤原広行(2014) : 数論的地震活動モデル, 地震, vol.66, 67-71.

キーワード : 数論、素数、地震、ラングランズ・プログラム

Keywords: Number Theory, Prime number, Earthquake, Langlands program

南アフリカ大深度金鉱山の地質断層上で観測されたRepeating Earthquakeの出現と消失  
Emergence and disappearance of repeating earthquakes on a geological fault in a deep gold mine in South Africa

\*山口 純弥<sup>1</sup>、直井 誠<sup>1</sup>、中谷 正生<sup>2</sup>、森谷 祐一<sup>3</sup>、Kgarume Thabang<sup>4</sup>、五十嵐 俊博<sup>2</sup>、村上 理<sup>5</sup>、Masakale Thabang<sup>6</sup>、矢部 康男<sup>3</sup>、大槻 憲四郎<sup>3</sup>、川方 裕則<sup>7</sup>、石田 毅<sup>1</sup>、Ward Anthony<sup>8</sup>、Durrheim Ray<sup>4,9</sup>、小笠原 宏<sup>7</sup>  
\*Junya Yamaguchi<sup>1</sup>, Makoto Naoi<sup>1</sup>, Masao Nakatani<sup>2</sup>, Moriya Hirokazu<sup>3</sup>, Thabang Kgarume<sup>4</sup>, Toshihiro Igarashi<sup>2</sup>, Osamu Murakami<sup>5</sup>, Thabang Masakale<sup>6</sup>, Yasuo Yabe<sup>3</sup>, Kenshiro Otsuki<sup>3</sup>, Hironori Kawakata<sup>7</sup>, Tsuyoshi Ishida<sup>1</sup>, Anthony Ward<sup>8</sup>, Ray Durrheim<sup>4,9</sup>, Hiroshi Ogasawara<sup>7</sup>

1.京都大学、2.東京大学、3.東北大学、4.CSIR、5.東濃地震科学研究所、6.OHMS、7.立命館大学、8.SeismoGen、9.Wits大学

1. Kyoto University , 2.The University of Tokyo, 3.Tohoku University , 4.CSIR, 5.Tono Research Institute of Earthquake Science, 6.OHMS, 7.Ritsumeikan University, 8.SeismoGen, 9.University of the Witwatersrand, Johannesburg

採掘による応力集中が原因でM 3程度までの誘発地震が多発する南アフリカCooke 4金鉱山地下1 kmにおいて、ある地質断層を取り囲むように、高感度AEセンサ30台、加速度計7台を埋設し、微小破壊 (Acoustic Emission; 以下AE) の観測を行った (Naoi et al. 2014) . Naoi et al. (2015) は、この観測で得られた2ヶ月間のデータを解析し、この断層上で $-5.1 \leq M_w \leq -3.6$ のRepeating earthquakeが発生していることを明らかにした。本研究では解析期間を14ヶ月間に延長し、これらのRepeaterのより長期の挙動を調べた。

まず、同断層沿いで2011年4月7日から2012年5月30日までの約14ヶ月間に発生した5869個のAEに対して波形相関を用いた走時差の再読み取りを行い、Double-Difference法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を用いて震源を再決定した。得られた再決定震源のうち、面状の分布を示す震源の近似面から3 m以内に震源が求まった3735個のイベントを以降の解析対象とした。これら3735イベントのうち、震源間距離が2 m以内となる全ての震源ペアに対して波形の相互相関係数を計算し、そのとき稼働していた観測点の2割以上で相互相関係数が0.9以上かつ、マグニチュードから推定したイベントの破壊域がよく重なるものをRepeaterペアと認定した。最後に、互いに共通のイベントを持つRepeater ペアをグルーピングした。この解析によって、全部で308個のRepeater groupが見つかり、3735イベント中1328イベント (35.6%) がRepeaterと認定された。最大のgroupは45個の震源で構成されており、非常に多くの繰り返しを確認できた。

得られたrepeater groupには、14ヶ月の間活動を続けたgroup (Type A)もあつたが、観測期間中に新たに活動が始まるgroupや (Type B) , 途中で活動が停止するgroup (Type C) も見つかった。10 m程度の範囲にわたってType B, あるいはType Cしかみられない領域が見つかっており、それぞれ、マクロなslow slipが新しく開始した場所、停止した場所に対応すると考えられる。一方、Type A-Cが、数m程度の狭い領域に混在している場所も存在した。また、このような場所で起こるType Cの複数のGroupで、Mwが時間とともに低下するものがみつけた。このような領域におけるRepeaterの出現は、クリープの進展による断層面上の突起部のかみ合わせが新たに生じたり、摩耗などによって解消する過程といった、不安定なパッチの形成・消失に対応している可能性がある。

キーワード：微小破壊、誘発地震、繰り返し地震

Keywords: Acoustic Emission, Induced Earthquake, Repeating Earthquake

## 実験室での破壊開始と伝播の特徴

## Characteristics of Rupture Initiation and Propagation in the Lab

\*福山 英一<sup>1</sup>、山下 太<sup>1</sup>、Xu Shiqing<sup>1</sup>、溝口 一生<sup>2,1</sup>、滝沢 茂<sup>1</sup>、川方 裕則<sup>3,1</sup>

\*Eiichi Fukuyama<sup>1</sup>, Futoshi Yamashita<sup>1</sup>, Shiqing Xu<sup>1</sup>, Kazuo Mizoguchi<sup>2,1</sup>, Shigeru Takizawa<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>3,1</sup>

1.防災科学技術研究所、2.電力中央研究所、3.立命館大学

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry, 3.Ritsumeikan Univ.

We have conducted large-scale bi-axial shear friction experiments using the NIED large-scale shaking table (e.g. Fukuyama et al., 2014, Yamashita et al., 2015). One of the main targets of these experiments was to investigate the rupture initiation and acceleration process of the stick slip events, which are proxies of natural earthquakes (hereafter, we call them labquakes). The experiments were done under constant loading rate conditions of between 0.01 and 0.1 mm/s under the normal stress of between 1.3 and 6.7 MPa. The rock sample is made of metagabbro from India. We compiled the results obtained in the series of experiments and discuss what we understood and what we need to understand. There are some key observations as follows. 1) We sometimes observed labquakes that did not reach the end of the rock sample. Such labquakes are more similar to the natural earthquakes in a sense that the total stiffness was controlled by the surrounding rock materials. In these events, highest stress drop occurred at the beginning while termination of the rupture was rather gradual. 2) Mainshocks were preceded by the precursory slow slip and/or foreshocks. Sometimes, foreshock activity dominates but in most cases, precursory slip occurred just before mainshocks. 3) The foreshocks tend to be more often observed when the sliding surface was pre-damaged due to previous fast sliding so that more gouge particles were generated under the same loading conditions. 4) After the friction experiment, many grooves were observed on the sliding surface, in which gouge particles were filled. The area where precursory slow slips occur does not have many grooves comparing to the other area, suggesting that slow slip might initiate mainly on the smooth surface where no grooves were created. 5) The hypocenters of the labquakes were located at the edge of the grooves based on the AE sensor array data. This suggests that grooves were created at the initial acceleration stage of the rupture. Based on the above observations, we are constructing the rupture model. And there are several issues that we do not clearly understand. a) Under what conditions, foreshock activity dominates? b) When gouge particles and grooves are created? c) Why precursory slip starts to occur at some point on the fault and expand to both slip perpendicular and slip parallel directions? These key questions will help to solve the rupture dynamics that occurred during the large-scale rock friction experiments.

キーワード：破壊伝播、摩擦実験

Keywords: rupture propagation, friction experiments

ALOS-2干渉SARデータから得られた2015年ネパール（Gorkha）地震の地殻変動と震源断層モデル  
Crustal deformation and Fault Model for the 2015 Nepal (Gorkha) Earthquake obtained from  
ALOS-2 SAR Interferometry data

\*小林 知勝<sup>1</sup>、森下 遊<sup>1</sup>、矢来 博司<sup>1</sup>

\*Tomokazu Kobayashi<sup>1</sup>, Yu Morishita<sup>1</sup>, Hiroshi Yarai<sup>1</sup>

1.国土交通省国土地理院

1.GSI of Japan

2015年4月25日、ネパールでMw7.8（USGS）の地震が発生した。その約2週間後の5月12日には、本震の震源域の東端付近で、Mw7.3の最大余震が発生した。本研究では、ALOS-2のSAR干渉解析で得られた地殻変動とそれを用いて推定した滑り分布モデルについて発表する。

本解析では、2014年にJAXAにより打ち上げられたLバンド合成開口レーダー衛星であるALOS-2のデータを用いた。ALOS-2はScanSARと呼ばれる350km幅を一度に観測できるモードを搭載している。ALOS-2では、ScanSARモードによる干渉処理が標準的に可能になったことから、広い領域に及ぶと考えられる本地震の地殻変動の計測には最適な観測データである。このScanSARデータを用いた干渉解析を実施したことが本研究の特長の1つとなっている。

ScanSARを用いた干渉処理により本地震に伴う広域の地殻変動が検出された。地表変位は東西約160kmに広がり、変動域の南部では衛星に近づく変位が、北部では衛星から遠ざかる変位が観測された。最大の変動はカトマンズの東20-30kmの位置に見られた。北行及び南行の干渉データから、準上下成分を計算したところ、約1.4mの隆起が見積もられた。

本震と最大余震を含む南行軌道のScanSAR-ScanSAR干渉データと北行軌道のstrip-ScanSAR干渉データに加え、本震のみを含む南行軌道のScanSAR-ScanSAR干渉データとカトマンズを含む北行軌道のstrip-strip干渉データ、最大余震のみを含む南行軌道のScanSAR-ScanSAR干渉データの3種類のデータセットを作成し、それぞれの震源断層モデル推定を実施した。走向角が290度、傾斜角が10度の10km四方の矩形断層で構成された長さ220km幅150kmの断層を仮定して、インバージョンにより滑りを推定した。得られた震源断層モデルの特徴は以下の通りである。本震を含むデータの解析から、カトマンズの北東20-30kmの領域の直下に、最大6m超の滑りが推定された。滑りの中心域は、震源から東南東に約80kmの位置に見られ、震源周辺の滑りは相対的に小さい。震源の西側には大きな滑りが見られないことから、破壊は震源から東方向に進んだと考えられる。滑りはほぼ純粋な逆断層滑りで、深部の滑りにはやや右横ずれが含まれる。滑りは断層上端から傾斜方向50-100kmの帯状の領域に見られ、約100kmを超えると、有意な滑りは見られなくなる。このことは、これより深部ではプレート間の固着が弱く非地震性の滑りが卓越するとする多くの先行研究の結果と調和的である。本震と最大余震を両方含む滑り分布モデルから見積もられる地震モーメントは $7.0 \times 10^{20}$  Nm (Mw7.8)である。なお、本震及び最大余震のみを含むデータから求められた地震モーメントはそれぞれ、 $6.1 \times 10^{20}$  Nm (Mw7.8)及び $1.1 \times 10^{20}$  Nm (Mw7.3)である。

本震と最大余震を含むデータから得られた滑り分布を詳細に見ると、本震の滑り領域の東端で発生した最大余震のすぐ西隣に、不自然に滑りが欠如した半径10km程度の領域が認められる。本震及び最大余震による滑りにより、この領域は逆断層滑りを促進する強い剪断応力にさらされていると考えられる。この滑りの欠損が、地震を起こすような瞬間的な滑りで解放されるか非地震性滑りで解放されるかは不明であるが、この領域でも4m程度の滑りが発生すると仮定すると、Mw7程度に相当する滑りが今後発生する可能性があると考えられる。

謝辞：本研究で用いたALOS-2データは、地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ（地震WG）を通じて、（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けました。原初データの所有権はJAXAにあります。SAR干渉解析にASTER GDEMを使用しました。ASTER GDEMの原データは経済産業省及びNASAに帰属します。

キーワード：地殻変動、InSAR、滑り分布

Keywords: Crustal deformation, InSAR, Slip Distribution

## 東北沖沈み込みプレート境界物質の摩擦挙動と地震発生

Frictional properties of materials along Tohoku subduction plate boundaries and implications for fault motion

\*澤井 みち代<sup>1</sup>、Niemeijer André<sup>2</sup>、廣瀬 文洋<sup>3</sup>、Spiers Christopher<sup>2</sup>

\*Michiyo Sawai<sup>1</sup>, André R Niemeijer<sup>2</sup>, Takehiro Hirose<sup>3</sup>, Christopher J Spiers<sup>2</sup>

1.千葉大学大学院理学研究科、2.ユトレヒト大学、3.JAMSTEC・高知コア研究所

1.Chiba University, 2.Utrecht University, 3.Kochi / JAMSTEC

The 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) nucleated at 24 km depth along the plate boundary. Moreover, episodic tremor and slow slip events occurred just before the 2011 Tohoku-oki earthquake on a shallow portion (less than 20 km depth) in the Tohoku subduction zone (e.g., Ito et al., 2013). The frictional properties of rocks composed of a subducting oceanic plate exert important controls on the various slip behavior from aseismic to seismogenic slip. However, frictional properties of the rocks to model such subduction earthquakes are poorly understood. We thus conducted friction experiments using a rotary shear apparatus on powders of blueschist (probably distributed at the Tohoku seismogenic zone) and smectite-rich pelagic sediments (present along the shallow portion of the Tohoku plate boundary (Chester et al 2013)). Experiments were performed at temperatures of 20-400°C, effective normal stresses of 25-200 MPa and pore fluid pressures of 25-200 MPa. We investigated the effects of temperature, effective normal stress and slip rate on the rate and state friction parameter ( $a-b$ ) by conducting velocity-stepping experiments with velocity range from 0.1 to 100  $\mu\text{m/s}$ .

Blueschist gouges show a positive ( $a-b$ ) values at 22°C which decrease to become negative with increasing temperature. At 200°C, the behavior is velocity weakening and shows negative ( $a-b$ ) values. At 300°C, the gouges show neutral to positive values of ( $a-b$ ), showing larger ( $a-b$ ) values than at 200°C. ( $a-b$ ) values slightly decrease again at 400°C. There is also effective normal stress dependence. The gouges exhibit a transition from velocity-strengthening to velocity-weakening with decreasing effective normal stress. Observed ( $a-b$ ) values decrease with decreasing effective normal stress because of an increase in  $b$  with decreasing effective normal stress. Our results suggest that increasing pore pressure is a key factor for nucleating slip leading to both megathrust and slow earthquakes.

In the case of Smectite-rich pelagic sediments, the simulated gouges show negative values of ( $a-b$ ) at low temperatures of 20-50°C, except at the highest slip rate of 0.1 mm/s, and neutral or slightly negative values of ( $a-b$ ) at temperatures of 50-100°C. However, at temperature of >150°C the gouges show positive values of ( $a-b$ ) under almost all velocity conditions tested. The trend of ( $a-b$ ) seems to be identical with that of  $a$ , and  $b$  shows an inverse relationship with ( $a-b$ ). Slow slip events are considered to be able to nucleate under conditions where ( $a-b$ ) value is negative but close to zero. These conditions are met at temperatures of 50-100°C in our experiments, which is consistent with temperature conditions under which slow slip events occur along the plate boundary at the Japan Trench. The frictional properties of the pelagic sediments explain well the observed distributions of slow slip events in Tohoku subduction zone.



## 東北日本における周期的スロースリップとプレート境界地震

## Periodic slow slip and megathrust zone earthquakes in northeastern Japan

\*内田 直希<sup>1</sup>、飯沼 卓史<sup>2</sup>、ロバート ナドー<sup>3</sup>、ローランド バーグマン<sup>3</sup>、日野 亮太<sup>1</sup>

\*Naoki Uchida<sup>1</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Robert Nadeau<sup>3</sup>, Roland Bürgmann<sup>3</sup>, Ryota Hino<sup>1</sup>

1.東北大学大学院理学研究科、2.国立研究開発法人海洋研究開発機構、3.カリフォルニア大学バークレー校  
1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and  
Technology, 3.University of California, Berkeley

北海道～関東地方の沖合のプレート境界断層で、準周期的にスロースリップが発生していることを繰り返し地震および地殻変動データから発見した。広域にわたる周期的スロースリップは、これまで北海道・東北地方の太平洋プレート上では知られていなかったが、今回発見されたものは、この領域の広い範囲に分布し、発生間隔は地域によって異なるが、1～6年の場所が多かった。スロースリップの発生に同期して同地域でのM5以上の規模の大きな地震の活動が活発化しており、東北地方太平洋沖地震が発生した時期にも、三陸沖ではスロースリップが発生していた。このような対応関係の原因を探るために、M5以上の地震の前の繰り返し地震の活動を検討した結果、スロースリップが比較的大きな地震を誘発している可能性が高いことがわかった。周期的なスロースリップが発生しているときに大地震が起こりやすくなる傾向を活用すれば、それを地震・地殻変動観測で検知することによって、大地震発生時期の予測の高度化に貢献できる可能性がある。

キーワード：スロースリップ、繰り返し地震、プレート境界地震

Keywords: slow slip, repeating earthquakes, interplate earthquakes

## 2014年長野県北部の地震に伴う地殻変動と断層モデル

## Coseismic and postseismic deformation and a fault model of the 2014 Northern Nagano Prefecture Earthquake

\*矢来 博司<sup>1</sup>、小林 知勝<sup>1</sup>、森下 遊<sup>1</sup>、飛田 幹男<sup>1</sup>、山田 晋也<sup>1</sup>\*Hiroshi Yarai<sup>1</sup>, Tomokazu Kobayashi<sup>1</sup>, Yu Morishita<sup>1</sup>, Mikio Tobita<sup>1</sup>, Shinya Yamada<sup>1</sup>

1. 国土地理院

1. Geospatial Information Authority of Japan

はじめに

2014年長野県北部の地震（M6.7）は、糸魚川－静岡構造線断層帯に属する神城断層が活動した地震である。この地震では、震源域南部で地表地震断層が現れるなど、顕著な地殻変動が観測された。この地震に伴う地殻変動や地震時の断層運動を詳細に把握することは、活断層の長期評価を考える上でも重要である。

本震による地殻変動

この地震に伴う地殻変動が、GNSS連続観測点網（GEONET）およびALOS-2（だいち2号）により捉えられた。GEONETでは、震源に最も近い白馬観測点で約29cmの南東方向への変位、約13cmの沈降が観測された。また、周辺の観測点でも、震源域の北西側で南東方向、南東側で北西方向に1cm程度の地殻変動が観測された。GEONETの観測点密度は平均で20km程度の間隔であり、GEONETだけでは今回の地震に伴う地殻変動を十分に把握できたとはいえない。

ALOS-2（だいち2号）のデータを用いたSAR干渉解析により、地震に伴う地殻変動が空間的に詳細に明らかになった。解析に用いたデータは、南行軌道の右方向と左方向からの観測データ、及び北行軌道の右方向からの観測データである。SAR干渉解析からは、神城断層の北部で20km程度の東傾斜の断層が破壊したこと、左横ずれ成分を含む逆断層運動であったこと、震央近くでは、神城断層に沿って約10kmにわたり最大約1mに達する変動が生じたこと、等が明らかとなった。また、変位量分布から、本震の断層面は浅部で低角、深部で高角であると推測された。

また、SAR干渉解析に加え、ピクセルオフセット法によりレンジ、アジマス方向それぞれの成分の地表変位の計測を行った。3方向以上の変位量データが得られたことで、地殻変動の三次元成分の空間分布を求めることができた。神城断層近傍で変位量が大きく、1m以上の隆起量が得られた。

本震の断層モデル

GEONETによる地殻変動データおよびALOS-2データのSAR干渉解析結果に基づき、断層面上の滑り分布の推定を行った。

断層のジオメトリは、干渉画像から推測された、浅部側で低角、深部側で高角となる折れ曲がった断層面を仮定し、断層面の浅部の上端を地表地震断層の位置に合わせた。断層面の傾斜については複数のパラメータを試み、観測結果を最も良く説明する組み合わせとして、断層面の傾斜を、2kmより浅部（浅部セグメント）ではやや低角の40°、2kmより深部（深部セグメント）ではやや高角の60°と設定した。

推定の結果、全体としては左横ずれ成分を含む逆断層滑りが推定され、浅部セグメントの南部で1m以上の大きな滑りが得られた。また、深部セグメントでは、本震の震源付近を中心として1m程度の滑りが推定された。それに対し、浅部セグメントの北部では顕著な滑りは見られなかった。

余効変動

本震に伴う地殻変動に引き続き、余効変動が震源域周辺で観測されている。

震源域周辺のGEONETの観測結果から、余効変動は震源域を挟んで北西－南東方向の短縮を示し、地震時の変位の特徴と類似している。ほとんどの観測点では地震後3か月程度で変動がほぼ見られなくなったが、震源域に最も近い白馬観測点では2015年11月時点でも変動が継続しているように見え、変位量は約1.8cmとなっている。

また、ALOS-2データのSAR干渉解析により、震源域近傍での余効変動が捉えられた。地震後に北行軌道から観測されたデータ（2014年11月28日と2015年6月26日）のSAR干渉解析を行った結果、地震に伴って最も大きな変位が観測された震源域南部において、衛星に近づく向きに4～5cm程度の変位を検出した。変位が検出された領域は、地震時に出現した地表地震断層の上盤側にあたり、変位の向きは地震時の変位と同様である。南行軌道か

らの観測データでは顕著な地殻変動は見られなかった。従って、検出された変動は、隆起及び西方向への変位と考えられる。

なお、地表地震断層に沿っては、位相の不連続は明瞭には見られず、地震後には顕著なずれは生じていないと考えられる。

#### 謝辞

本研究で用いたALOS-2 データは、地震予知連絡会SAR 解析ワーキンググループ（地震WG）を通じて、（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けました。原初データの所有権はJAXA にあります。

キーワード：2014年長野県北部の地震、だいち2号、干渉SAR、地震時変動、余効変動

Keywords: 2014 Northern Nagano prefecture earthquake , ALOS-2, InSAR, coseismic deformation, postseismic deformation

3次元分岐断層シミュレーションによる2014年長野県北部の地震の動的破壊過程  
3D branching fault simulation for dynamic rupture process of 2014 Northern Nagano  
Prefecture Earthquake

\*安藤 亮輔<sup>1</sup>、今西 和俊<sup>2</sup>

\*Ryosuke Ando<sup>1</sup>, Kazutoshi Imanishi<sup>2</sup>

1.東京大学大学院理学系研究科、2.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1.Graduate School of Science, University of Tokyo, 2.National Institute of Advanced Industrial  
Science and Technology, GSJ

The 2014,  $M_w$ 6.2, Northern Nagano Prefecture Earthquake broke the Kamishiro fault, which constitutes the northern end of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line (ISTL). Associated with this earthquake, several characteristic phenomena indicate the complex configuration of this earthquake processes, as indicative of immaturity of the fault owing to low activity of ISTL at this end section. One of such is found in the surface ruptures, where the offsets were observed to be nearly 1 m for the southern half of the source area, while such surface ruptures were not identified for the northern half. This surface observation consists with the surface displacement distribution inferred from InSAR analysis, suggesting the large slip areas concentrated at near the ground surface on the southern half and at a deeper depth on the northern half, respectively. The surface break is suggested to be a temporally stable structure for a geomorphologic time scale overlapping preexisting fault scarps, and moreover, cumulative fault slip has found by trenching surveys. Another characteristic observation is that the first motion solution of the focal mechanism exhibits nearly pure strike slip faulting, while the centroid moment tensor does the reverse faulting with considerable a non-double couple component. The focal mechanisms of the foreshocks, aftershocks and the spatial distributions of them show the geometry of the source fault is composed of a dipping main-fault and a nearly vertical branch fault.

In this study, we consider this inferred complex fault geometry and carry out the fully dynamic 3 dimensional rupture simulation to understand the factors controlling the observed spatially and temporally heterogeneous features in the rupture process. We give the constraints of the applied stress based on the stress tensor inversion conducted for the focal mechanisms of small earthquake occurred in this region before this earthquake sequence; the maximum principle stress axis is determined to be horizontal oriented at ENE-WSW as the overall direction of the main-fault strike is nearly N-S. The determined stress ratio  $(S_2-S_3)/(S_1-S_3)$  is also considered as a constraint together with the assumption of the vertical stress is in the lithostatic condition.

For the numerical simulation, we employed newly developed efficient algorithm for the 3D dynamic boundary integral equation method, called the First Domain Partitioning Method (FDPM) (Ando, 2016, submitted). This method allow us to fully consider the 3D fault geometry together with the ground free surface effect. Each run of the simulation is completed in a few minutes with 48 cores and 15 GB of memory for the following model size: element sizes  $\sim 0.5$  km, number of elements  $\sim 2,000$  and time steps  $\sim 400$ .

We performed a series of parameter studies over the stress states concerning its uncertainty in the dynamic rupture simulation. We found, under a certain range of parameter sets, the rupture initiated on the vertical branch fault and then propagated to the dipping main-fault. We further obtained the slip distribution, which is dominated by the strike slip component on the branch-fault and by the reverse components on the main-fault as expected from the orientations of the faults and the principle stresses. In these cases, the reverse faulting slip shows the maximum on the shallow part of the main-fault above the hypocenter, presenting the similarity with the emergence of the

observed surface break. The vertical branch-fault existing below the main-fault on the foot wall side seems to contribute the large slip at a depth on the northern half of the source area.

キーワード：長野県北部の地震、3次元断層形状、動的破壊伝播シミュレーション

Keywords: Northern Nagano Prefecture Earthquake, 3D fault geometry, Dynamic rupture propagation simulation

## 粘土鉱物の脱水反応による不安定すべりの実験的検証

## Verification of unstable sliding behavior during dehydration of clay minerals as elevated temperature

\*久保 達郎<sup>1</sup>、片山 郁夫<sup>1</sup>\*Tatsuro Kubo<sup>1</sup>, Ikuo Katayama<sup>1</sup>

1. 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

1. Department of Earth and Planetary Systems Science Hiroshima University

[はじめに] 沈み込み帯に伴う非地震発生領域と地震発生帯との境界は地震発生帯の上限(updip limit)と呼ばれ、津波発生に関わるなど、浅部の地震発生メカニズムの解明は防災の観点から極めて重要である。地震発生帯の上限を決める要因は諸説あるが、その中の一つにスメクタイトーイライト相転移があり、粘土鉱物の変化に伴い非地震性の安定すべりから地震性の不安定すべりへとすべり挙動を深さによって変化し、地震発生帯が形成されると考えられている(Hyndman et al., 1997)。これまでの実験的な結果では粘土鉱物の摩擦特性は層間の含水量に強く依存し、層間の含水量が減ることで地震性のすべり挙動を引き起こす可能性が示唆されている(Ikari et al., 2007)。しかしながら、先行研究は室温下で定常状態での摩擦特性を観察したものであり、脱水反応の過程の中で刻々と起きる層間構造の変化を見たものではない。沈み込み帯では温度上昇と同時に脱水反応も進行しているため、脱水のプロセスに伴う摩擦挙動を議論することが必要であると考えられる。そこで、本研究では昇温摩擦実験を行い粘土鉱物の層間水がまさに脱水を起こしている環境下で摩擦特性がどのように応答するかを調べ、脱水と地震発生との関連性を議論することを目的とした。

[実験手法] 広島大学設置の高温二軸摩擦試験機を用いて、粉末状の疑似断層物質を二つのガブロブロックの間にはさみ摩擦実験を行うdouble-direct shearといわれる手法をとった。疑似断層物質として用いた試料はCa型のモンモリロナイトを用いた。垂直応力は油圧式手押しポンプで制御しながら加重をかけていきすべての実験において60 MPaに統一した。鉛直方向(剪断方向)の加重はモーターとギアシステムを用いており、ギアシステムにより様々な速度比で減速された回転運動を、ボールネジを用いて鉛直方向の往復運動に変換することで載荷した。本研究の実験手法において独創的な点は摩擦実験の最中に一定の昇温速度でサンプルの温度を上げていながら摩擦実験を行ない、脱水中の摩擦特性の変化を観察するところにある。また脱水反応は熱活性化過程であり、反応のカイネティクスが関係してくることが予想できる。従って、本研究では1, 3, 10 °C/min.の3種類の異なる昇温速度を設定し、その際のすべり速度はそれぞれ0.6, 1.2, 3.0 μm/sで実験を行なった。

[結果, 考察] Ca型のモンモリロナイトを10 °C/min.の昇温速度で温度上昇させたところ、低温から高温になるに従って、摩擦挙動は3つの領域に分けられる遷移を示した。(1)摩擦係数が減少する領域、(2)摩擦係数が上昇する領域、(3)スティック-スリップ(不安定すべり)が観察される領域の3つである。特筆すべきは高温域でスティック-スリップと呼ばれる地震性の摩擦挙動を示したところにある。これは脱水に伴い摩擦特性が変化したことを表しており、粘土鉱物の脱水と地震発生の関連性を示唆するものである。しかしながら、スティック-スリップを開始した温度は320 °C付近であり層間水の脱水が最も顕著に起こる温度(~150 °C)と比べるとはるかに高い値を示した。これは脱水のカイネティクスによるところが大きく、昇温速度を遅くし、1 °C/min.の昇温速度で実験を行なったところ低温側(T>193 °C)でスティック-スリップが観察される傾向を示した。それぞれの摩擦特性の異なった領域は脱水のプロセスと次のように関連していると考えられる。(1)の領域では、粘土鉱物粒子間に存在する水が膨張することによって粘土鉱物の粒間の間隙水圧を上昇させ、摩擦係数が減少したのではないかと考えられる。(2)の領域では、上昇した間隙水圧によって局所的に剪断が起こり断層ガウジ内の水が排水されるための流路が確保され、含水量が減少したことによる固着の効果が間隙水圧を上昇させる効果を上回ったため摩擦係数は上昇したと考えられる。(3)の領域では、脱水に伴い、スティック-スリップを観察したが、Rabinowicz (1956)で示されるすべりの不安定条件を満たすことによって、地震性のすべりが起こったと考えられる。昇温実験中に特に変化したと考えられるパラメータは臨界すべり距離: Dcであり、脱水を経て粒子サイズが小さくなったことが臨界すべり距離を短くした原因ではないかと考えられる。以上のことから、断層物質、特に粘土鉱物の層間水の脱水プロセスが摩擦特性に与える影響は大きく、地震発生帯の上限のような非常にゆっくりとした昇温速度(10<sup>-10</sup> °C/min.程度)で、排水の系を持つ天然の環境下での地震発生に対し

て、粘土鉱物の脱水が重要な役割を担うと考えられる。

キーワード：脱水の効果、摩擦特性、粘土鉱物、温度上昇、固着-すべり

Keywords: effect of dehydration, friction property, clay minerals, elevated temperature, stick-slip

## 群発地震の誘発・駆動機構

## Triggering and driving mechanisms of earthquake swarm

\*山下 輝夫<sup>1</sup>\*Teruo Yamashita<sup>1</sup>

## 1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Earthquake swarms usually occur in volcanic areas, geothermal fields and oceanic ridges. Detailed seismological observations suggest that swarm activity is driven by the flow of fluid, at least, at an initial stage of activity (e.g., Yukutake et al., 2011). Hence, it is believed that high-pressure fluids are involved in the generation of earthquake swarm. However, recent geodetic observations suggest a possibility that aseismically evolving fault drives earthquake swarm activity (e.g., Takada and Furuya, 2010). Aseismic slip is, however, known to be induced by the injection of high-pressure fluid (e.g., Scotti and Cornet, 1994), so that aseismic slip evolution may be related to the existence of high-pressure fluid. It will therefore be indispensable to assume high-pressure fluid in the modeling of earthquake swarm. We may be able to consider the following two contrasting models (models 1 and 2) for the triggering and driving of earthquake swarm if the medium is saturated with fluid. Substantial local pressurization of pore fluid is assumed in model 1. If the crustal stress is near a critical level, ruptures triggered by the fluid pressurization will soon begin unstable growth according to linear fracture mechanics. Such ruptures will be regarded as ordinary earthquakes. Hence, we will have to assume highly under-stressed media and long-sustained supply of high-pressure fluid in model 1. However, model 1 has a weakness that how aseismic slip evolution is coupled with swarm activity is not clear. Although we do not assume local pressurization of fluid or highly under-stressed media in model 2, the fault zone is assumed to be permeated with high-pressure fluid. In such model, we will have to introduce some mechanism to suppress the accelerated rupture growth. One of the mechanisms that have strong compatibility with the existence of high-pressure fluid will be slip-induced dilatancy coupled with fluid flow, which is introduced in model 2. If the slip-induced dilatancy plays a dominant role, we do not necessarily require the local pressurization of fluid to trigger earthquake swarm. What is required for the triggering is the occurrence of small-size seed event. Fluid pressure lowers suddenly in the slip zone concurrently with the occurrence of the seed event if the degree of slip-induced dilatancy is large enough. Since the decrease in the fluid pressure raises the friction, the seed crack does not begin the growth soon after the nucleation. However, the dilatancy induces the fluid inflow from the surrounding medium, which gradually elevates the fluid pressure in the slip zone. This can trigger and drive the aseismic extension of slip zone if the stress state is near a critical level. The rate of aseismic extension depends on the balance between the fluid inflow rate and degree of slip-induced dilatancy. Spatial heterogeneity in the degree of slip-induced dilatancy or fracture strength gives rise to small-scale dynamic events, which will be a model for seismic swarm activity. We theoretically study the generation mechanism of earthquake swarm, assuming model 2, in this study. We analyze quasi-static extension of 2D crack in a linear poroelastic medium saturated with fluid. The dilatancy is assumed to increase with the slip evolution. We assume near-critical stress state, Coulomb's friction coupled with the effective normal stress and Darcy's law for the fluid flow. Our calculation shows that the moment evolution is proportional to  $t^{1/2}$  for any values of the model parameters, which contrasts with the classical solution for dynamic crack growth, which is proportional to  $t^2$  (Kostrov, 1964), where  $t$  is time. The expansion rates of aseismic slip zone are larger for higher diffusivities and lower degree of dilatancy. If the



slip-induced dilatancy is locally negligible, small-scale dynamic slip is triggered at the advancing edge of aseismic slip zone, which is regarded as the occurrence of seismic event.

キーワード：群発地震、流体、ダイラタンシー

Keywords: earthquake swarm, fluid, dilatancy

## 現実的な誤差モデルを考慮した震源過程解析

## A Source Inversion Method with Realistic Error Model

\*笠原 天人<sup>1</sup>、八木 勇治<sup>2</sup>\*Amato Kasahara<sup>1</sup>, Yuji Yagi<sup>2</sup>

1.筑波大学大学院生命環境科学研究科、2.筑波大学生命環境系

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

Use of a proper likelihood function through incorporation of modeling error and a realistic noise model are essential part of a source inversion analysis, because the shape of the likelihood function affects choice of hyperparameters, the maximum a posteriori (MAP) estimate and its uncertainty estimate. We propose an empirical Bayes method for kinematic linear source inversion with physically based modeling error and realistic noise covariance.

The colored noise effects have been incorporated into analyses of Interferometric Synthetic Aperture Rader (InSAR) and global navigation satellite system (GNSS) data. Recently, effects of colored noise for centroid moment tensor (CMT) inversion were also discussed. However, the colored noise effects were usually ignored in source inversion analyses. In the proposed method, a noise covariance matrix is constructed from continuous records before P arrivals and uncertainty of phase picking.

In earlier studies, both amplitude of noise and a weight of a priori information were treated as hyperparameters. In the proposed method, we reformulated the marginal likelihood function to use the known noise covariance matrix estimated from data before P arrivals and phase picking errors. As we are not able to know the true Earth structure, the calculated Green's functions contain modeling error, and incorporation of the modeling error is unavoidable for the source inversion analysis. Preceding studies approximated effects of modeling error by additional multivariate Gaussian noise (model noise) for data. One of the advantages of the previous approach is its simplicity. As a posterior probability distribution should still be a multivariate normal distribution, MAP estimation and its uncertainty estimation are straightforward. However, even when assuming multivariate Gaussian error for the elements in the coefficient matrix, it is shown that the theoretical likelihood function is a skewed function and not a multivariate normal distribution function. Thus, the previous approach biases the MAP estimate and potentially affect choice of hyperparameters. We propose another approach, which does not use model noise approximation, to incorporate effects of modeling error into source inversion analysis. In the present approach, the Earth structure is assumed to be a random variable, which follows a known probability distribution. Then, the Earth structure is marginalized to obtain a posterior probability distribution of the source process. The proposed approach naturally incorporates associations of modeling errors for different type of data (e.g. seismic waveforms and surface displacements). As the marginalization is not analytically possible in most cases, we use a Monte-Carlo method and obtain the posterior probability distribution as a finite mixture of multivariate normal distributions. The MAP estimate is obtained by using a numerical optimization technique.

キーワード：震源過程解析、経験ベイズ法、モデル誤差

Keywords: Source inversion, Empirical Bayes method, Modeling error

## 複雑ネットワーク上のOlami-Feder-Christensenモデルの統計的性質

## Statistical Properties of the Olami-Feder-Christensen Model on the Complex Network

\*田中 宏樹<sup>1</sup>、波多野 恭弘<sup>1</sup>\*Hiroki Tanaka<sup>1</sup>, Takahiro Hatano<sup>1</sup>

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, Tokyo University

As a statistical model of seismicity, Olami-Feder-Christensen (OFC) model, which is thought to represent the stress distribution on the fault plane, has been studied and found that the model reproduces statistical properties similar to the real earthquakes including Gutenberg-Richter law and Omori formula for aftershock sequence. In most cases, OFC model has been studied on two-dimensional lattice, and the system is uniform in the sense that the cells are under the same condition. On the other hand, it is well known that earthquakes occur spatially non-uniformly. Recent studies showed that the network constructed by connecting the epicenters of successive earthquakes behaves as a Barabasi-Albert (BA) type scale-free network. Therefore in this study we simply incorporate such a spatial non-uniformity by thinking the OFC model on BA scale-free network and examine the statistical properties. This model includes two parameters; one is for the model construction, and the other is the dissipation-rate between nodes during stress redistribution. We mainly study the dissipation-rate dependence of statistical properties.

As a result, it is found that the magnitude frequency obeys nearly power law as well as the GR law, regardless of the dissipation-rate. Furthermore, by changing the dissipation-rate, the statistical behavior varies and is roughly categorized into three types; (1) Mainshock-Aftershock, (2) Foreshock-Mainshock-Aftershock, and (3) Stationary sequences. Especially first two behaviors are similar to the characteristic intermittent-clustering behavior of earthquakes.

Characteristic feature of this model is that even if the node has largest degree, sometimes multiple-releases occur in one event. During such a large event (regarded as the mainshock) stress redistribution is repeated between large degree nodes and overwhelmingly many smaller nodes. Therefore, as almost all nodes in the network are involved in the mainshock, aftershocks in this model are not considered to be the events releasing the remaining stresses which are not released by the mainshock.

In order to understand the role of aftershocks in this model, we propose a roughness parameter, which is thought to reflect the non-uniformity of stresses on the network, to make clear the total behavior of OFC model. With this parameter we found that aftershocks are not thought to be the events in order to release remaining stress at the edge of the mainshock rupture zone, but to be the process that nodes interact and cooperate to return to a stable roughness level specific to the construction of the network.

## メートル級岩石試料の高い仕事率における急激な摩擦強度低下

Unexpectedly rapid decrease of meter-sized rock friction at high work rate

\*山下 太<sup>1</sup>、福山 英一<sup>1</sup>、溝口 一生<sup>2</sup>、滝沢 茂<sup>1</sup>、Xu Shiqing<sup>1</sup>、川方 裕則<sup>3</sup>\*Futoshi Yamashita<sup>1</sup>, Eiichi Fukuyama<sup>1</sup>, Kazuo Mizoguchi<sup>2</sup>, Shigeru Takizawa<sup>1</sup>, Shiqing Xu<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>3</sup>

1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.一般財団法人電力中央研究所、3.立命館大学

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry, 3.Ritsumeikan University

防災科学技術研究所における大型二軸摩擦実験によって示された、メートル級岩石試料の高い仕事率における急激な摩擦強度低下に関して報告する。本実験では、接触面積が長さ1.5 m、幅0.1 mとなる一対のメートル級インド産変はんれい岩を試料として用い、最大垂直応力6.7 MPa、最大載荷速度 $3 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ の条件下で摩擦実験をおこなった。実験の結果、これまでにセンチメートルサイズの実験で報告されていた(Di Toro *et al.*, 2011, Nature)のと同様に岩石摩擦の仕事率依存性を確認したが、メートルサイズの岩石摩擦は $10^{-2} \text{ MJm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の仕事率から減少を始めることを発見した。この値は絶対値としては依然として高いものの、センチメートルサイズの岩石試料と比較すると桁小さな仕事率である。各メートルサイズの実験後、断層面上には局所化したダメージ(条線)が出現しており、その中と周辺にガウジが分布していることを確認した。特に条線上のガウジは激しく粉砕され、周辺の断層面に比べて盛り上がっていた。力学的、視覚的、物質的観察により、すべりにともなって発生した断層面上の応力不均質がメートルおよびセンチメートルサイズでの摩擦特性の違いを説明できると示唆され、次の様なモデルが考えられた。すなわち、周囲に比べわずかに大きな応力集中をしている領域があり、そこでは摩擦すべりによりその周辺に比べてより多くのガウジが生成されるため、結果としてその領域の応力集中がさらに大きくなるというものである。断層面全体のせん断応力は主にその応力集中領域によって支えられているため、その領域が高い仕事率によって急速に弱化することで巨視的な摩擦強度の急激な低下が発生すると予想される。このモデルの妥当性を確認するため、局所的にはセンチメートルサイズの岩石試料で観測された摩擦特性に従うとの仮定の下で数値シミュレーションを実施したところ、メートルサイズの岩石試料で観測された巨視的な摩擦特性を再現できた。このようなすべりにともなう不均質化は自然環境において一般的と考えられるため、本研究で示された、センチメートルサイズの結果から予測される仕事率より低い仕事率での急激な摩擦低下を考慮に入れる必要があると考えられる。本講演に関する詳細は、Yamashita *et al.* (2015, Nature)に記載されている。

キーワード：岩石摩擦、スケール依存性、仕事率

Keywords: Rock friction, Scale dependence, Work rate

## 炭質物のラマンスペクトルを用いた断層における摩擦発熱検出

Detection of frictional heating on faults using Raman spectra of carbonaceous material

\*氏家 恒太郎<sup>1,2</sup>、田畑 皓輝<sup>1</sup>、瀬瀬 佑衣<sup>3</sup>、鍵 裕之<sup>4</sup>、林 為人<sup>5</sup>\*Kohtarō Ujiie<sup>1,2</sup>, Hiroki Tabata<sup>1</sup>, Yui Kouketsu<sup>3</sup>, Hiroyuki Kagi<sup>4</sup>, Weiren Lin<sup>5</sup>

1.筑波大学生命環境系、2.海洋研究開発機構海洋掘削科学研究開発センター、3.名古屋大学大学院環境学研究科、4.東京大学大学院理学系研究科附属地球化学実験施設、5.海洋研究開発機構高知コア研究所

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

Development Center for Ocean Drilling Science, Japan Agency for Marine-Earth Science and

Technology, 3.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4.Geochemical

Laboratory, Graduate School of Science, University of Tokyo, 5.Kochi Institute for Core Sample

Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The detection of frictional heating on faults is a key to assessing coseismic shear stress and frictional work during earthquakes. Raman spectra of carbonaceous material (RSCM) have been widely used as a geothermometer on sedimentary and metamorphic rocks. We examined whether RSCM can be useful to detect increased temperatures associated with frictional heating on faults. The studied fault rocks are a few millimeters-thick pseudotachylyte derived from chert, 10 cm-thick cataclasite marked by fragments of chert in the carbonaceous mudstone matrix, and ~1 mm-thick pseudotachylyte derived from argillaceous rock, which are distributed in the exhumed accretionary complexes in the Mino-Tamba and Shimanto Belts, Japan. The results indicate that the intensity ratio of D1 and D2 Raman bands ( $I_{D1}/I_{D2}$ ) markedly increase in pseudotachylytes, while increased  $I_{D1}/I_{D2}$  is absent in the cataclasite. The increased  $I_{D1}/I_{D2}$  values in pseudotachylytes are considered to represent coal maturation associated with increased heating along the localized slipping zone of less than a few millimeters thick. The absence of increased  $I_{D1}/I_{D2}$  values in the cataclasite may reflect the restricted temperature rise, which is consistent with distributed shearing along the 10 cm-thick slipping zone. The  $I_{D1}/I_{D2}$  values are also increased in the chert within ~2 mm from the upper boundary of the pseudotachylyte and drop to the background level >2 mm away from the upper boundary. In contrast, the increased  $I_{D1}/I_{D2}$  values are not observed in the chert below the pseudotachylyte and the argillaceous rocks above and below the pseudotachylyte. The measurements of thermal properties suggest that coal maturation in the chert within ~2 mm from the upper boundary of the pseudotachylyte is attributed to the higher thermal diffusivity in the hanging wall chert relative to the footwall chert and the argillaceous rock. The increased  $I_{D1}/I_{D2}$  values in pseudotachylytes and the chert within ~2 mm from the upper boundary of the pseudotachylyte indicate that coal maturation can occur during short-lived thermal events such as frictional heating on faults. Therefore, RSCM is useful to detect frictional heating. However, the conventional RSCM geothermometer cannot apply for the estimation of peak temperature during frictional heating on faults, because the maximum temperature determined from the RSCM geothermometer is well below the minimum temperatures recorded in the pseudotachylytes. The reaction kinetics incorporating the effects of rapid heating is necessary to establish frictional heating thermometer on faults.

## 断層岩中の硫化鉱物・流体沈殿グラファイトにもとづく酸化還元環境の推定

The estimation of redox state based on the fluid-deposited graphite and sulfide minerals in fault rocks

\*中村 佳博<sup>1</sup>、Satish-Kumar Madhusoodhan<sup>2</sup>、豊島 剛志<sup>2</sup>

\*Yoshihiro Nakamura<sup>1</sup>, Madhusoodhan Satish-Kumar<sup>2</sup>, Tsuyoshi Toyoshima<sup>2</sup>

1.新潟大学自然科学研究科、2.新潟大学理学部地質科学科

1.Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 2.Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

The redox state in fault rocks provide valuable information on the physicochemical properties related to the fluids during seismic activity (O'hara and Huggins, 2005). However, there are very few studies on direct clues for fluid activities obtained from fluid inclusion (Boullier et al. 2001) and estimation of fluid contents using micro-FTIR (Famin et al. 2008). It is usually difficult to distinguish between syngenetic and postgenetic fluid activities from altered and hydrated fault rocks and pseudotachylytes that indicate paleo-seismic activity (Kirkpatrick and Rowe 2013).

Here we focus on carbon- and sulfur-bearing minerals in fault zones in order to understand the dynamic changes of oxygen fugacity ( $fO_2$ ) and sulfur fugacity ( $fS_2$ ). The study area, located in the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan, is a metasedimentary unit where cataclasites, ultracataclasites and two different types of pseudotachylytes; Pst I and Pst II are distributed. Pyrrhotite ( $N[FeS] = 0.92-0.94$ ) + Kfs assemblage is found in Pst I matrix, whereas biotite microlite + Kfs assemblages with fluid deposited graphite is only found in Pst II matrix. The fluid deposited graphite is only observed in the Pst II matrix, which was generated at around 1200 degree C, and characterized by the breakdown of plagioclase and apatite. The carbon isotope composition of the fluid deposited graphite were between -18.2 and -25.4 permil, shifting the carbon isotope values of +2 ~ +3 permil from the metamorphic graphite in protolith, cataclasite and Pst I. Our observations suggest that the graphite and sulfide minerals converted to COHS fluids by frictional melting, and then reprecipitate as secondary minerals under favorable  $fO_2$ - $fS_2$  environments. In order to assess the redox state, we attempt to estimate the  $P$ - $T$ - $fO_2$ - $fS_2$  phase diagram during frictional melting. The thermal decomposition of biotite coexisting with graphite and sulfide minerals are deduced as:

Annite in biotite + 3Pyrite + 1.5Graphite = Sanidine + 6Pyrrhotite + H<sub>2</sub>O + 1.5 CO<sub>2</sub>

The breakdown of biotite changes the redox state to the more oxidation state at ranges between delta FMQ +0.5 ~ + 3.0. Under a high-temperature condition (> 1200 degree C), biotite microlite + Kfs with fluid deposited graphite are usually observed instead of pyrrhotite in pseudotachylytes. This suggests the negative shift to biotite stability field by lowering  $fS_2$  and  $fO_2$ . In addition, using the positive 2~3 permil shift by carbon isotope fractionation, the calculated  $xCO_2$  ( $= CO_2 / CH_4 + CO_2$ ) ranges between 0.12 and 0.03. The calculated  $fO_2$  is evaluated between -21.6 and -22.0 log<sub>10</sub> units, suggesting the CH<sub>4</sub> dominant fluid based on the estimated ideal fluid mixing model. When the fluid composition encounters the graphite saturation surface in COH diagram by supersaturation, the fluid deposited graphite begins to precipitate with hydrous silicates such as hydroxyapatite and titanite, and shift the large carbon isotope fractionation by small fluctuation in  $xH_2O$ . Such precipitation model is in good agreement with the microtextural observations in pseudotachylyte matrix. The most important implication of our finding is that the redox state in both types of pseudotachylytes are controlled by graphite breakdown. Our finding of fluid deposited graphite in pseudotachylytes suggest that sediments can produce the COHS fluids by frictional melting and the

graphite play as a reducing agent in fault rocks.

References: Boullier et al. (2001), JGR, 106, 21965-21977. Famin et al. (2008), EPSL, 265, 487-497.  
Kirkpatrick and Rowe, (2013), JSG, 52, 183-198. O'hara and Huggins (2005), CMP, 148, 602-614.

キーワード：グラファイト、炭素安定同位体、シュードタキライト、酸化還元状態

Keywords: Graphite, Stable carbon isotope , Pseudotachylyte, Redox state

南アフリカ金鉱山の地震観測網による2014年オークニー地震の余震分布と発震機構解  
 Aftershock distribution and focal mechanisms of 2014  $M_w$ 5.4 Orkney earthquake, South Africa, by using underground seismic networks in gold mines

\*今西 和俊<sup>1</sup>、小笠原 宏<sup>2</sup>、矢部 康男<sup>3</sup>、堀内 茂木<sup>4</sup>、大久保 慎人<sup>5</sup>、村上 理<sup>6</sup>

\*Kazutoshi Imanishi<sup>1</sup>, Hiroshi Ogasawara<sup>2</sup>, Yasuo Yabe<sup>3</sup>, Shigeki Horiuchi<sup>4</sup>, Makoto OKUBO<sup>5</sup>, Osamu Murakami<sup>6</sup>

1.産業技術総合研究所、2.立命館大学工学部、3.東北大学大学院理学研究科付属地震・噴火予知研究観測センター、4.株式会社ホームサイスマメータ、5.高知大学教育研究部自然科学系理学部門、6.地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 3.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 4.Home Seismometer Corporation, 5.National Science Cluster, Kochi University, 6.Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

The  $M_w$ 5.4 Orkney earthquake occurred on August 5, 2014, near Orkney town, South Africa. The mainshock and aftershocks were recorded by underground networks in gold mines, which are composed of 46 three-component geophones installed at 2-3 km depths. The sampling rate is 6 kHz. The observed waveforms have high signal-to-noise ratios and contain higher frequency components up to at least 1 kHz, which provide the opportunity for precise determination of aftershock distribution and source parameters. We determined hypocenters of 2000+ aftershocks by automatic earthquake location software from Home Seismometer Corp. (Horiuchi et al., 2011). Aftershocks distributed at depths from about 4 to 7 km forming a 8 km-long in the NNW-SSE direction. The distribution agrees with one of nodal planes of the mainshock focal mechanism, suggesting that the mainshock represents a left lateral strike-slip fault. Aftershock focal mechanisms were determined from P-wave polarity data as well as body wave amplitudes. As a preliminary analysis, we analyzed aftershocks with at least 15 P-wave polarities and obtained 137 well-determined solutions. Most of aftershocks show a pure strike-slip mechanism that is similar to the mainshock. We also found some aftershocks whose P- and T- axis deviates from the general trend and contain normal or reverse faulting components. These events seem to distribute at the middle and the north of the aftershock distribution, suggesting the existence of local stress heterogeneity. Further analysis of aftershocks is needed to elucidate whether the heterogeneity was caused by stress changes due to the mainshock and/or associated with locally formed pre-mainshock stress regime.

Acknowledgements. The seismic network used in this study is operated by Anglogold Ashanti and Open House Management Solutions. The data processing was performed by Institute of Mine Seismology. The data ownership belongs to Anglogold Ashanti.

キーワード：2014年オークニー地震、金鉱山、南アフリカ、余震分布、発震機構解

Keywords: 2014  $M_w$ 5.4 Orkney earthquake, Gold mines, South africa, Aftershock distribution, Focal mechanism



## 固着すべり振動子の周期外力への応答 (2)

## Responses of Stick-Slip Oscillator to Periodically External Forces (2)

\*平原 和朗<sup>1</sup>\*Kazuro Hirahara<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室

1. Department of Geophysics, Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyoto University

古くから、地震活動の周期性や季節性について、その統計的優位性に関する多くの研究がなされてきた。また、最近では、その発生要因まで含めた研究が現れている。そういった研究として、例えば、潮汐による断層面での応力変化を考慮した地震活動と地球・海洋潮汐との相関 (Tsuruoka & Ohtake, 2002)、プレート境界固着域深部で発生する低周波微動活動と海洋潮汐との相関 (Nakata et al., 2008) とその経験的非線形応答式の提唱 (Ide & Tanaka, 2014)、大地震の活動と月の長期運動 (8.85年) との相関と潮汐効果の増幅機構の提唱 (Tanaka, 2014)、およびこれまで論じられてきた南海トラフにおける巨大地震発生時期の季節性 (Mogi, 1969; Ohtake & Nakahara, 1999) に加え、月の長期運動 (18.61年) との相関の指摘 (Ide & Tanaka, 2014)、が挙げられる。また、最近、東北日本プレート境界において1-6年の周期を持つ繰り返し地震群が存し、そのゆっくりすべりが大きな地震をトリガーしているという指摘がなされている (Uchida et al., 2016)。

このように、ゆっくりすべり (SSE) から大地震に至る地震活動には周期性が見られる。またプレート境界や内陸で繰り返し発生する地震には発生サイクルというリズムと連動破壊と言った現象が見られる。前者の周期性を地球・海洋潮汐といった周期的外力に対する固着・すべり振動子の同期現象として、また後者の地震発生サイクルを、アスペリティ内の固着・すべり振動子間の相互作用から生じる集団同期現象、連動破壊をアスペリティ間の破壊の同期現象とみなし、岩石実験から得られた速度・状態依存摩擦則に基づく地震発生シミュレーションと非線形科学分野で生まれた同期理論 (例えば、Kuramoto, 1984) を用いて、新たな地震活動・地震発生サイクルモデルを構築し、地震活動予測を目指す目的で基礎的な研究を開始した。

Sugiura et al. (2014) は、速度状態依存摩擦則に従う連結バネ・スライダモデルでの同期現状を調べているが、周期的外力への応答はまだ調べられていない。そこで、平原 (2015) (日本地震学会2015年秋季大会) では、固着すべりを繰り返しすべり1自由度のバネスライダ振動子に周期的外力が加わる場合の系の応答を報告した。本発表はその続報である。

平原 (2015) では、地震サイクル中の応力変化の1/10、1/100の振幅をもつ周期的外力が加わる時、外力の振動数を  $f_e$ 、変化した系の振動数を  $f_c$  とすると、 $f_e:f_c=m:n$  ( $m, n$  は互いに素な正の整数) となる  $m:n$  同期現象 (悪魔の階段と呼ばれる) が見られた。潮汐による振幅は数 kPa ~ 10 kPa 程度であり、応力変化の小さな SSE には潮汐による周期外力による同期が見られる可能性を示唆した。

本発表では、同期理論で用いられている位相応答曲線を数値シミュレーションにより求め、 $m:n$  同期における同期幅といった現象についての説明を試みる。次に単一の振動数でなく複数の振動数を持つ外力への応答を見る。あるていど実際の地球・海洋潮汐モデルに基づく外力を用いて検討を試みる。更に、上記の同期現象とは別に、本研究では非同期現象においても興味深い現象が確認されたので報告する。すなわち、 $m:n$  同期以外の非同期外力の場合、繰り返し間隔が大きくばらつく現象が見られた。南海トラフ地震を模した繰り返し周期 (自然周期  $T_0$ ) 112年をもつ固着すべり振動子に自然周期以上の周期を持つ外力を加えると、1:1同期を示す  $T_e=117$ 年の外力から2倍の周期まで周期を増やしていくと、繰り返し間隔の標準偏差がゼロから17-18年に増大する現象が見られた。なおこの場合、系の平均的周期は最初の自然周期とは大きく異なる。SSEや地震活動の観測された周期性にはある程度のばらつきが見られる場合が多い。また南海トラフ巨大地震の発生間隔が200年~90年とばらついているように、地震サイクルにも繰り返し間隔に大きな変化が見られる。本研究で得られた非同期現象がどのようにこういった現象の解明に役立つかは不明であるが、興味深い現象である。

キーワード：固着すべり振動子、同期、リズム、外力、地震サイクルシミュレーション

Keywords: Stick-Slip Oscillator, Synchronization, Rhythm, External Force, Earthquake Cycle Simulation

## 苦鉄質変成ガウジの摩擦特性：南海トラフのスロー地震における意味

## Frictional properties of mafic metamorphic gouges: Implication for slow earthquakes along the Nankai Trough

\*岡本 あゆみ<sup>1</sup>、Niemeijer André R.<sup>2</sup>、Spiers Christopher J.<sup>2</sup>、竹下 徹<sup>1</sup>\*Ayumi S. Okamoto<sup>1</sup>, André R. Niemeijer<sup>2</sup>, Christopher J. Spiers<sup>2</sup>, Toru Takeshita<sup>1</sup>

1.北海道大学大学院理学院、2.Faculty of Geosciences, Utrecht University

1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Faculty of Geosciences, Utrecht University

プレート収束境界の一つである南海トラフでは、巨大地震とスロー地震の両方が~30 kmのほぼ同じ深さで確認されている。プレート収束境界には付加体を構成する堆積物や、海洋地殻・上部マントルを構成する苦鉄質・超苦鉄質岩など多様な物質が存在する。沈み込み帯で発生する地震のメカニズムを理解し、温度や間隙圧比などの影響を議論するためには、各物質の物性を知ることが必要である。本研究では沈み込むフィリピン海プレート上部の海洋地殻を考えるが、これらを構成する岩石の鉱物組み合わせが変成作用によって徐々に、また部分的に変化していくことに注意する必要がある。南海トラフに沈み込むフィリピン海プレートの海洋地殻は、その温度-深さプロファイル (Yoshioka *et al.* 2013) より、深さ~10-20 kmでは prehnite-pumpellyite (PP) 相から prehnite-actinolite (PA) 相および緑色片岩 (GS) 相程度、~20-30 km ではGS相から緑簾石青色片岩 (eBS) 相または緑簾石角閃岩 (eAM) 相程度の変成作用を受けていると推測される (変成相は Hacker *et al.* 2003より)。天然の緑色片岩や青色片岩の変形組織の観察からは、比較的粒径の大きい緑簾石や角閃石、単斜輝石、不透明鉱物の周囲を細粒角閃石と緑泥石が埋めていることが明らかとなった。これら細粒鉱物集合体は主に微小破壊と圧力溶解クリープによって大きく変形していると考えられ、これらに変形が集中することによってそのほかの鉱物 (e.g. 緑簾石, 単斜輝石) が剛体のようにふるまっていると推察される。

本研究では上記の観察事実に基づき、GS相程度の変成条件下での細粒鉱物集合体を模倣するため、アクチノ閃石 (Act, ~85 %) + 緑泥石 (Chl, ~15 %) 混合物を用いて摩擦実験を行った。実験は熱水式回転せん断試験機 (Utrecht Univ.) を用いて、有効垂直応力 ( $\sigma_n^{\text{eff}}$ ) 50-200 MPa, 間隙水圧 ( $P_f$ ) 50-200 MPa, 温度 ( $T$ ) 22.5-600°C, すべり速度 ( $V$ ) 0.0003-0.1 mm/sで行われた。その結果、 $T = 200-400^\circ\text{C}$ では、摩擦の速度依存性を示すパラメータ ( $a-b$ ) は  $\sigma_n^{\text{eff}}$  と  $P_f$  の両方の影響を受けていることが確認された。また低速度の場合は ( $a-b$ )は負だが、 $V$ の増加に伴って正に変化することがわかった。

最も遅い速度レンジ ( $V = 0.0003 - 0.001$  mm/s) での ( $a-b$ ),  $\sigma_n^{\text{eff}}$  と  $P_f$  の経験式を重回帰分析より求め、南海トラフの  $P$ - $T$ 条件に外挿し、( $a-b$ )と間隙圧比 ( $\lambda = P_f / (\sigma_n^{\text{eff}} + P_f)$ ) や垂直応力の関係を推測した。その結果、Act+Chlガウジでの不安定すべりや速度弱化的ためには、 $\lambda = \sim 0.92-0.95$ を超える間隙圧比が必要であることが示された。しかしながら、( $a-b$ )は $V$ の増加に伴って変化する傾向も示しているため、不安定すべりは変成作用によって形成されたAct + Chl混合層中で高間隙水圧の場合に起こる可能性があるものの、加速に伴って安定すべりへと転じ、大きな破壊イベントに発展することなく停止すると考えられる。Act + Chlガウジは結果としてスロー地震となる低速度ですべり、おそらく異なる鉱物組み合わせおよび組織を持つ近接した非変形の岩体 (つまりアスペリティ) に応力を集中させると考えられる。

キーワード：変成岩、海洋地殻、摩擦挙動、南海トラフ、角閃石、間隙圧比

Keywords: metamorphic rock, oceanic crust, frictional behavior, Nankai Trough, amphibole, pore pressure ratio

コスタリカ沖海洋プレート上で採取された生物起源堆積物の摩擦特性と剪断組織の関係  
Correlation between frictional properties and deformation textures in frictional experiments on the biogenic sediment collected from the oceanic plate offshore Costa Rica

\*並木 由香<sup>1</sup>、堤 昭人<sup>1</sup>

\*Yuka Namiki<sup>1</sup>, Akito Tsutsumi<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

巨大地震をはじめ、スロースリップやサイレント地震など様々なタイプの地震がプレート沈み込み帯において観測されている。プレート境界断層物質の摩擦特性は、このような様々なすべり挙動に大きな影響を与えると考えられている(Bilek and Lay, 1998 など)。近年、特に南海トラフの粘土質堆積物については研究が進み、その摩擦特性が明らかになってきた (Brown et al., 2003 など)。しかし、粘土質堆積物以外の沈み込み帯のプレート境界断層物質の摩擦特性はほとんど明らかにされていない。本研究は、海洋底の広い地域に分布する生物起源堆積物に着目し、摩擦実験によってその摩擦特性を明らかにすることを目的としている。本研究では、IODPのExp. 334およびExp. 344においてコスタリカ沖ココスプレート上で採取された中米海溝に持ち込まれる珪質・石灰質軟泥を用いて摩擦実験を行った。

これまでの研究で、珪質・石灰質軟泥は粘土質堆積物とは異なる以下のような摩擦特性を示すことが明らかになってきた：①0.6—0.8という高い摩擦係数の定常値を示す。②0.0028—0.28 mm/sの速度域で摩擦が負の速度依存性を、0.28—2.8 mm/sの速度域で正の速度依存性を示す。②のように摩擦が負のすべり速度依存性を示すという特徴は、珪質・石灰質軟泥中の断層部分で開始するすべりが不安定すべりとなる可能性を示唆しており重要である(Namiki et al., 2014)。

このような特徴的な摩擦特性を示す要因を探るため、珪質・石灰質軟泥の組成の端成分である非晶質シリカを用いて摩擦実験を行った。天然試料中の粒径や生物の殻の複雑な形状を保持する非晶質シリカの性質を調べるために、酸処理により珪質・石灰質軟泥中のカルサイトを除去することで得た非晶質シリカを実験に使用した。非晶質シリカは以下の摩擦特性を示した：①およそ0.6という高い摩擦の定常値を示す。②0.0028—2.8 mm/sの速度域で摩擦が負の速度依存性を示す。①より、組成の端成分である非晶質シリカが珪質・石灰質軟泥に近い摩擦強度を示すことが明らかになった。また、②は珪質・石灰質軟泥の摩擦が数mm/sで正の速度依存性を示すのは、非晶質シリカとカルサイトの混合による影響であることを示唆している。

上記のような摩擦特性を示した試料の実験後の組織を、SEMを用いて観察した。0.28—2.8 mm/sの速度域で摩擦が正の速度依存性を示した珪質・石灰質軟泥では、珪質および石灰質な生物殻の剪断帯に対して約30°斜交した定向配列が観察された。すべりの局所化は見られず、断層帯全体に渡って変形構造が分布している。一方、0.0028—2.8 mm/sの速度域で摩擦が負の速度依存性を示した非晶質シリカでは、定向配列のある領域とない領域が観察された。定向配列のない領域には丸みを帯びた非晶質シリカが分布している。この領域の非晶質シリカには生物殻の形状が見られない。定向配列のある領域には剪断帯に対して10°~ 20°斜交した割れ目が複数発達している。また、この割れ目と同じ方向に配列したシリカも観察された。Ikari et al. (2013) は摩擦が負の速度依存性を示した石灰質堆積物の実験後試料ではリーデル剪断が卓越していたと報告しており、本研究の非晶質シリカでもリーデル剪断が発達したと考えられる。

キーワード：摩擦実験、剪断組織、CRISP

Keywords: Frictional experiments, Shear structure, CRISP

## 地殻不均質と地震-2011年長野県北部地震

The effect of heterogeneous crust on earthquakes:a case study of the 2011 North Nagano earthquake

\*宮武 隆<sup>1</sup>

\*Takashi Miyatake<sup>1</sup>

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

## はじめに

地殻構造の不均質が地殻内応力を不均質にし、その結果地震が発生すると考えることは自然であろう。地震前の応力は長期の現象なので、弾性だけでなくマントルや地殻下部の粘弾性効果が重要になるはずであるが、高地震波速度構造地塊に断層アスペリティ位置が重なるという研究結果、および、粘弾性効果は下部地殻が主に受け持っていると考えられることから、地震断層の深さでは弾性も重要であろうと考える。このような考えのもと、2004年中越地震の震源域の3次元構造が中越地震アスペリティ部分に高応力降下を発生しうることが差分法を用いた3次元応力解析からわかっている (Miyatake, 2014)。今回は2011年長野県北部地震に対し予備的な解析を行う。

## 構造と震源過程

3次元地下構造はMatsubara et al(2008)を、震源過程は気象庁の暫定モデル (2012) を用いた。応力計算は格子間隔100mの3次元差分法であり、対象領域は100x100x50(km<sup>3</sup>)である。なお境界領域の水平主応力方向に単位強制変位を与え他の面はフリー条件を課す。地表面は自由表面、底面はアセノスフェアがviscousであることを考慮して自由境界条件を課した。

## 結果

上記計算において、強制変位の絶対値は不明なので応力絶対値ではなく断層せん断応力と断層直応力の比だけを議論する。なおこの値は、大まかには断層直交応力で規格化した応力降下量に対応するので、本稿では序報として、この分布に注目する。

## 結果

断層域にアスペリティになり得る応力降下域と思われる高応力比が対応しているように見えることがわかった。ただし速度構造解析の解像度が震源過程インバージョンの解像度に比べてかなり粗いためか、高応力比部分はかなり広がっていた。

キーワード：地殻構造、断層応力、アスペリティ

Keywords: crustal structure, fault stress, asperity

## 脆性・塑性遷移における有効応力則：岩塩を用いたアナログ実験

## The Effective Stress Law at a Brittle-Plastic Transition: Analogue Experiments with Halite Gouge Layers

\*野田 博之<sup>1</sup>、高橋 美紀<sup>2</sup>\*Hiroyuki Noda<sup>1</sup>, Miki Takahashi<sup>2</sup>

1.海洋研究開発機構、2.産業技術総合研究所

1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

We investigated the effect of pore pressure  $P_f$  near the brittle-plastic transition (BPT) for a halite (NaCl) shear zone. Our series of precut friction experiments with a gas-medium apparatus with temperature  $T \leq 200^\circ\text{C}$ , confining gas pressure  $P_c \leq 150$  MPa, and  $P_f \leq 140$  MPa revealed that a tanh connection between the brittle and plastic regimes works well even at elevated  $P_f$ , with a coefficient for  $P_f$  in an effective stress law  $\alpha$  being unity. Plastic deformation around the real contacts independent of the mean stress results in  $\alpha=1$  regardless of the ratio of the real contact area  $A_r/A$ . The functional dependency of the shear strength on the effective normal stress may deviate from a linear dependency with increasing  $A_r/A$ . The present findings support a smooth transition in a hypothetical steady-state strength profile around a BPT, providing new insights in geologically obtained paleo-stress data in exhumed mylonitic shear zones.

キーワード：有効応力則、脆性・塑性遷移、摩擦実験

Keywords: Effective stress law, Brittle-plastic transition, Friction experiment

## 2015年チリ・イラペル地震における傾斜方向のジグザグな破壊エピソード

## Rupture process during the 2015 Illapel Chile earthquake: Zigzag-along-dip rupture episodes

\*奥脇 亮<sup>1</sup>、八木 勇治<sup>1</sup>\*Ryo Okuwaki<sup>1</sup>, Yuji Yagi<sup>1</sup>

1. 筑波大学大学院生命環境科学研究科

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

2015年9月16日チリ中央北部イラペル沖においてMw 8.3の巨大地震が発生した。Global CMTカタログのメカニズム解は低角逆断層型を示しており、沈み込むナスカプレートと南アメリカプレートの境界で発生した地震と考えられる。GPS観測によって震源域周辺のプレート間の固着率はほぼ100%と見積もられており、発生が予期されていた地震であった。また震源域北部および北東部では1997年から1998年にかけて非地震性すべりに伴うM6程度の群発地震活動が活性化しており、2015年イラペル地震の震源域で直近に発生した1943年チリ・イラペル地震(Ms 7.9)以降、プレート間に蓄積してきた歪みが時空間的に不均一に解放されてきた地域で発生した地震といえる。地震時の破壊履歴を求めるために、グリーン関数の不確定性を考慮した波形インバージョン法および高周波の励起源を高精度に推定するHybrid backprojection (HBP) 法を遠地実体波P波に適用し、すべり分布と高周波(0.3-2.0 Hz)の励起分布を比較することで幅広い周波数帯域をカバーする震源過程モデルを構築した。大局的な破壊過程は、北方向へのユニラテラルな破壊伝播、および津波の励起に寄与した震源から北西72 kmに位置するアスペリティ破壊で特徴づけられるが、破壊挙動を詳細に追ってみると、断層の傾斜方向へジグザグに破壊が進行する、初期破壊と主破壊2つの複雑な破壊エピソードをもつことがわかった。破壊開始から約25秒間は穏やかなモーメント解放を伴いながら、破壊フロントは震源から主に断層浅部へと北西方向に推移する破壊挙動を示している(初期破壊)。破壊開始27秒後、破壊フロントは断層深部に移動し、強い高周波励起イベントの発生を皮切りに、破壊は再び断層の深部から浅部へと北西方向に移動しながら大きな断層すべりをもたらす。約90秒で破壊は停止する(主破壊)。高周波の励起源は断層すべりの深部縁辺部に分布しており、2010年チリ・マウレ地震や他の沈み込み型巨大地震の観測結果と整合的な分布を示している。高周波の励起は破壊伝播速度あるいはすべり速度の急変を反映していると考えられるが、断層深部で発生した強い高周波の励起イベントは破壊伝播の加速を反映しており、2回目の破壊エピソードをトリガした可能性をもつ。破壊域終端は1997-1998年に活発化した群発地震領域に位置しており、破壊停止時にみられる高周波の弱励起は巨大地震発生領域と群発地震発生領域の摩擦特性あるいは応力状態の遷移域に破壊フロントが突入し破壊伝播速度が緩やかに減速したことを示唆している。

キーワード：巨大地震の複雑な破壊進展、バックプロジェクション、波形インバージョン

Keywords: complex rupture process during megathrust earthquake, backprojection, kinematic waveform inversion

## 地殻応力の大きさと不均一について

## On the magnitude and heterogeneity of crustal stress

\*飯尾 能久<sup>1</sup>\*Yoshihisa Iio<sup>1</sup>

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

## 1. はじめに

地殻応力は、地震の発生や地殻の変形を考える上で非常に重要なパラメータである。しかし、地殻深部のせん断応力の大きさ(以下、絶対応力と呼ぶ)を推定することは非常に難しい。その理由としては、1)地震時の変動が応力の絶対値ではなく変化分だけに依存すること、2)地震データから断層のすべり方向を決定して応力場を推定する手法では主応力の方位と相対値しか推定出来ないこと、3)地表から応力を直接測定可能なのは通常は深さ数kmまでであること、などが挙げられる。

そのため、これまで絶対応力は岩石の摩擦実験の結果から類推されていた。例えば、通常の岩石の摩擦係数である0.6程度を用いて推定すると、深さ10-15 km程度での地殻内の絶対応力は数百MPaと非常に大きく、地震による変化分はそのごく一部に過ぎない。

一方、サンアンドレアス断層において、地殻熱流量や応力に関するデータから、絶対応力は岩石摩擦強度よりはるかに小さい可能性が示された。この実験結果と観測結果との相違は「地殻応力問題」とよばれ、1970年代から米国を中心に大きな論争を巻き起こしているが、今もなお未解決である。

## 2. 絶対応力の大きさと不均一

東北沖地震後、秋田県などで、地震を起こした応力の主軸の方向が有意に変化しているという報告がなされた(Yoshida et al., 2012)。このことは、絶対応力と地震による変化分が同程度であること、つまり、絶対応力レベルが低い可能性を示唆している。しかしながら、秋田県における東北沖地震による応力変化の量はせいぜい1 MPa程度であり、通常の地震の応力降下量と同程度かむしろ小さいため、この報告には強い反対意見がある。地殻内の応力は大きな空間的不均質を持つものであり、外部からの擾乱があると、それに調和的な応力場が顕在化することにより、見かけ上、主応力軸の向きが変化したように見えるというものである(Smith and Heaton, 2011)。彼らは、絶対応力の平均レベルは大きく、かつ不均質が大きいと考えている。

## 3. 応力の不均質はどの程度あり得るか？

このように、現状では絶対応力が大きい、小さいという両方の考え方が存在している。そこで、現実には地殻上部では、応力の不均質はどの程度あり得るかを、理論的に検討してみた。均質な弾性体であれば、内部に応力の不均質を生じさせることは難しいので、不均質として、ランダムな方向に分布している摩擦強度が非常に小さい多数の断層面を仮定した。その断層面が完全に応力解放することにより、どの程度の応力の不均質が生じるかを検討してみた訳である。その結果、クラック密度が1の場合、つまり、単位体積あたりに単位長さの断層が1つあるという、多数の断層がある場合においても、最大圧縮応力の空間変化は非常に小さいことが分かった。これは、断層先端の応力集中域の大きさが、断層の長さに比べてずっと小さいことに関係している。このことは、地殻内の応力不均質は大きく成り得ないことを示唆している。

キーワード：地殻応力、不均一、地震発生域

Keywords: crustal stress, heterogeneity, seismogenic region