

## 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へと移り変わる。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 pre-cut 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



## ETASパラメータの推定アルゴリズムによるバラつき

## Variability in ETAS parameters depending on estimation algorithms

\*三井 雄太<sup>1</sup>、片岡 純<sup>2</sup>\*Yuta Mitsui<sup>1</sup>, Jun Kataoka<sup>2</sup>

1.静岡大学理学部地球科学科、2.元・静岡大学理学部地球科学科

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

ETASモデル(Ogata, 1988)により、ある領域における地震の発生系列から余震の影響を取り除いた定常地震活動度  $\mu$  を推定することができる。例として、Llenos et al. (2009)は、ゆっくり変形による応力率の増大が  $\mu$  にのみ影響を与え、余震の発生を特徴づけるETASモデルの他のパラメータ( $K, \alpha, c, p$ )には無関係であることを示した。Ide et al. (2013)など、いくつかの研究がこの考えを応用した。Kataoka and Mitsui (2015, JpGU)は、日本周辺の複数の領域でこの方法をテストし、2011年東北地震直後の富士山周辺でのマグマの貫入や、いくつかの沈み込み帯でのスロースリップイベント、あるいは大地震後のアフタースリップの減衰を示唆する結果を得た。

我々は、上記のパラメータ推定ではOgata(2006)によるSASeis2006を用いた。SASeis2006では、DFP法と呼ばれる準ニュートン法の一つを用いたパラメータ推定が行われている。しかし、Kasahara and Yagi (2015, SSJ)は、ニュートン法に基づく新たな推定アルゴリズムを構築し、特に初期値依存性の面でSASeis2006に改善の余地があることを示した。

これを踏まえ、本研究では、パラメータ推定に複数の手法を導入し、パラメータ推定結果がどの程度バラつきについて検討を行った。具体的には、SASeis2006に加えて以下の4つの推定手法を用い、同じ初期値を与えて結果を比較した：(1)滑降シンプレックス法 (2)共役勾配法 (3)拘束条件付き準ニュートン法(全てのパラメータが0.01~10の範囲内) (4)ニュートン法。地震活動のデータセットとして、気象庁震源カタログにおけるマグニチュード2以上の地震を用いた。時間範囲は1998~2014年の期間で1年ごとに取り、空間範囲は1993年北海道南西沖地震および2003年十勝沖地震の震源域周辺とした。

結果として、まず、場合によっては解が収束しないことがわかった。このようなケースは、上記のうちSASeis2006および(4)のニュートン法でよく見られた。その他、以下の3つのことがわかった。[1]手法による  $\mu$  の推定値のバラつきは小さく、最大値/最小値で大きくても1.8倍程度であった。[2]  $\mu$  以外のパラメータの推定値のバラつきは大きく、最大値/最小値で10倍以上というケースが頻繁に生じた。[3]各手法で推定されたパラメータの対数尤度を比較すると、最大尤度を示したのはニュートン法が約65%と圧倒的に多く、次いで共役勾配法、滑降シンプレックス法となった。

キーワード：地震活動、ETASモデル、パラメータ推定

Keywords: Seismicity, ETAS model, Parameter estimation

## 紀伊半島南東沖の地震の余震活動の異変(2008/10,2014/10)で分かったトラフ周辺の応力構造とその推移

Mutation('08/10,'14/10) of aftershock activity of the 2004 off Kii Peninsula E.q., and Stress structure around the Trough

\*間瀬 博文<sup>1</sup>

\*Hirofumi Mase<sup>1</sup>

1.なし

1.none

(図面を参照のこと、海底地形名等は便宜上命名した)東進する中国地方下のマントルが近畿地方下の沈み込みスラブの縁を押すので横ずれ右回転で這い上がろうとする(1)。この力はトラフ南側の杭の如き二つの海山に集中するが2004年の地震で「杭」の北側が破壊したため「杭」への伝達ルートが「北から」が「北西から」に転換した(2)。現在も続く余震は本震の割れ残りの消化から北西からの力によるものへと変化しているはずである。(3)の成果を尊重し気象庁一元化震源(4)を予め全体的に南東方向に10kmシフトさせてしまい(深度はそのまま)その経時変化を研究した。

図1に断面の切断位置と記入地震の存在範囲を示す。図2は図1の要部を1.5倍拡大(45度右回転)し'08~'09年の震源を記入した平面図でそのY-Y'断面が図3である。同様に'14~'15年の震源を記入した平断面が図4と図5で図6(y-y'断面)を添えている。図7はx-x'断面に関し'06~'15年の震源の分布の概略を示す。海底地形の情報は全て(5)より得た。海山EMから北西に延びる谷地形(valley)は余震を堰き止める縁切り構造のようだ。この走向は余震分布がなす面の傾斜方向に調和的でもありY-Y'断面の切断方向に採用した。余震分布がなす面は応力伝達面と考える。

変動は'08年10月の初めに発生した(図2,3参照)。平面では海山の前方での発生が主だったが海山間の空間も含めて南方へ突進した印象である。この空間は圧力が増大したであろう。10月最初の6個を発生順に結んだが海山EMの前方に直線を得た。Y-Y'断面切断方向は妥当である。北西-南東方向で両海山に集中している力を北西圧縮力NWF(W),NWF(E)と名付ける(本震前は北圧縮力NF(W),NF(E))。断面では('07年のtrendも記入したが)屈曲形成で耐えそして限界に達した様子が伺える。応力伝達面が挫屈した領域は平面では膨らんだ地形(両者黒色破線、scr)故常習なのであろう。挫屈後スラリと下方へ伸びた新たな面に変わりNWF(W),NWF(E)は新伝達面を生んだ。海山にとり応力集中する位置が突然20km以上落下した。以上を'08/10短絡と呼ぶ。

2回目の変動('14/10短絡)は'14年10月の初めである(図4,5,6参照)。前月までに両海山の前で浅い位置のもの(scwとsceで示す)が生じ応力伝達面が波打った(比較用に図6に'09年の分布を記入)のは前触れであろう。10月のものに発生日を添付(図4)し隣り合うものを線で結んだ。重要なものには発生順に番号を付けた(マル6の3個は翌月発生)。すると海山EMの前に伸びる線(マル3-1-5-6)と海山WMから発し立体交差で上側を直交しようとする線(マル2-4)が現れた。前者はNWF(E)の新た伝達面で明らかにscrを避け浅部を通過後急降下してEMに達する。それでもNWF(W)と共に'08/10短絡とは逆の上昇である。後者(マル2-4)に関する圧縮力を合成圧縮力SWF(W),SWF(E)と呼ぶ。

北圧縮力NFは0でその反作用SFは現在減少中、北西圧縮力NWFは最大でその反作用SEFは現在増加中と考えられ両海山に働く力はSF,NWF,SEFの合力でSWFである(図8参照)。杭は結局周囲の地面が支える。海山は変位により海底から反作用を獲得するので作用力の急な変化には追従が遅れる。両海山は独立性に大差がありSWF(W)とSWF(E)の方向大きさにも差があろう。(以下図7参照)'08/10短絡後(2期,3期)両海山の間は圧力が増加しているのでSWF(W)がWMを押す方向はさらに圧力が高まり効果的に破壊を誘発する。これが応力伝達面(線)(マル2-4)が出現した背景でSWF(W)とNWF(E)は立体交差した(3期)。「08/10短絡~'14/10短絡(2期)では出現を確認してないがSWF(W)とNWF(E)は深度50km付近での平面交差である。震源域内のプレート内の応力場は収束(北西)方向にほぼ直交するとの指摘(6)はSWF(W)が原因の起震応力をとらえたものと解釈できる。但し北西圧縮力NWF(W),NWF(E)があればこそその北東-南西方向応力場である。

(1)間瀬/JpGU2014/SSS29-P10 (2)間瀬/JpGU2015/SSS30-P01 (3)気象庁/山崎他/海底地震計を用いた2004年紀伊半島南東沖の地震の余震観測/気象研究所報告第59巻65-82頁平成20年10月 (4)AIST/地下構造可視化システム

/気象庁震源カタログ/≧M1 (5)海保海洋情報部/プレート境界域の精密海底地形図 (6)JAMSTEC/中野他 /SSJ2014秋/A22-07/2004年紀伊半島沖地震のメカニズム

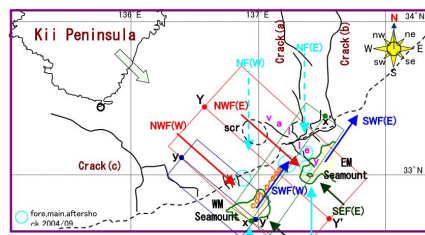


Fig.1 Plane chart

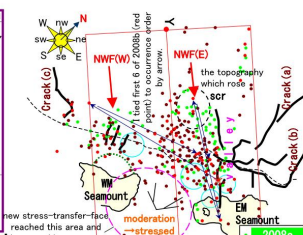


Fig.2 Plane chart (08-09)

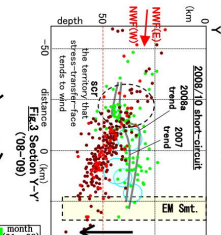


Fig.3 Section x-x'

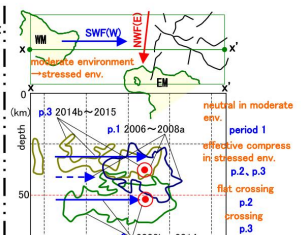


Fig.7 Section x-x'

Stress which operates on Seamount

| name | direction          | size until 2004/09 | size after 2004/09 | cause of appearance       |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| NF   | from the north     | biggest            | 0                  | edge of slave is repelled |
| SF   | from the south     | biggest            | It decreases       | reaction of NF            |
| NWF  | from the northwest | 0                  | biggest            | edge of slave is repelled |
| SEF  | from the southeast | 0                  | It increases       | reaction of NWF           |
| SWF  | It's changing      | -                  | It's changing      | resultant of SF,NWF,SEF   |

Fig.8

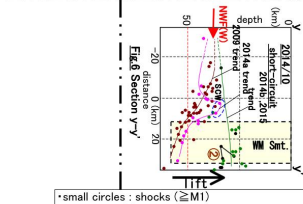
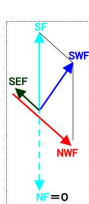


Fig.8 Section y-y'

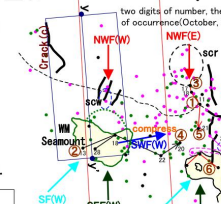


Fig.4 Plane chart (14-15)

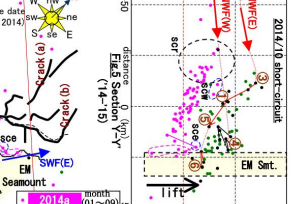


Fig.5 Section y-y'

\*small circles : shocks (≧M1)  
 referable to (4)/shifted 10km to the southeast  
 \*about sea bottom (shape line) extracted from (5)

## 変位空間勾配解析に基づく東北日本沈み込み帯におけるプレート間カップリングの周期的変化および変動周期の深さ依存性の検出

Depth-dependent periodic change in the interplate coupling at NE Japan inferred from spatial gradient of velocity field

\*飯沼 卓史<sup>1</sup>

\*Takeshi Iinuma<sup>1</sup>

### 1. 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

島弧における陸上GNSS観測に基づいて推定される地表での変位速度場には、海溝またはトラフから沈み込む海側のプレートと島弧の位置する陸側のプレートとの境界における、プレート間の固着によってもたらされる変形が含まれている。日本列島においては、国土地理院の展開するGEONETに属するものをはじめとする、諸大学・諸機関の設置したGNSS観測点が列島規模の稠密GNSS連続観測網をなしており、取得されたデータから求められる地殻変動場を用いて、プレート境界面のどこがどれくらいの強さで固着しているのかを推定する試みがこれまで数多くなされてきた [例えば, Ito et al., 1999, 2000; Mazzoti et al., 2000; Nishimura et al., 2004; Suwa et al., 2006; Hashimoto et al., 2009; Loveless and Meade, 2010など]。しかしながら、特に東北日本においては、太平洋プレートの沈み込みが始まる日本海溝は陸域から遠く (200 km以上) 離れているため、陸上に設置された観測点で取得される測地学的データに基づいて、海底下に位置するプレート境界面上でのプレート間固着域および固着強度の分布を、海溝軸に直交する方向に解像することは必ずしも簡単ではない。

Uchida et al. [2016, Science] は、陸上GNSS観測から得られる地表変位速度場の時空間変化を、小繰り返し地震の解析から推定されるプレート境界でのすべり速度の時空間変化と併せて用いることで、東北日本下に沈み込んでいる太平洋プレートと陸側のプレートとの境界において、1~6年程度の周期でスロースリップイベントが発生していることを明らかにした。同研究においては、1年の時間窓を1週間ずつずらして地表変位速度場を推定することで時間方向の変化を、また、海溝軸にほぼ直交する方向に設定された幅60 kmの帯状領域内に含まれる観測点における、水平変位の海溝軸からの距離に対する変化を変位の空間勾配として表現し、これを海溝軸に平行な方向に緯度にして0.1度ずつずらして求めることで空間方向の変化を検出している。水平変位の空間勾配が急であるほど、その帯状領域下でのプレート間の固着が強いことを利用して、固着強度の時間変化をモニタリングし、周期的なスロースリップの発生、すなわち固着強度の周期的変化を捉えたが、この手法では、その変化の生じている領域の位置を、海溝軸に直交する深さ方向に分解することはできず、また、固着強度が定量的にどの程度の大きさで変化しているのかを見積もることも困難であった。

一方で、Uchida et al. [2016] の小繰り返し地震の解析結果では、プレート境界面上で発生するスロースリップはその位置に応じた発生周期を持っていて、海溝軸に平行な方向に非一様であると同時に深さ方向にも変化しており、深部になるほど浅部に比して短い周期を持つ傾向を示している。そこで、本研究では、上下変位の変位勾配が、海岸線よりも深部に固着域が及んでいるか否かに応じてその符号が変化すること [飯沼・他, 2010, 日本測地学会第114回講演会] から、水平成分の変位勾配よりも上下変位の変位勾配がプレート境界の深い部分に対する感度を持つと考えて、各帯状領域における水平及び上下成分の変位勾配の時間変化の卓越周期を求めたところ、ほとんどの領域において、上下成分の変位勾配が短い卓越周期で変化していることが分かった。また、プレート境界での固着強度分布と、変位勾配を計算する際に使用する観測点の範囲とを変化させた数値計算テストを行ったところ、ある領域の固着強度の変化に対して、それ以外の領域の固着強度分布によらず、変位勾配の値が線形に変化することが確認できたので、これらについて報告する。また、今後、数値計算テストをより網羅的に行い、水平及び上下の変位勾配がプレート境界の現象について持つ感度を検定したうえで実データに適用し、固着強度の変化周期のプレート境界深度依存性並びに変化の大きさについての定量的評価を行う予定であり、本大会においてその結果の報告を行う。

キーワード：プレート間カップリング、GPS、東北日本、周期的変化、スロースリップイベント、2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: Interplate coupling, GPS, Northeast Japan, Slow slip event, mega-thrust earthquake, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

## 中央構造線の活動のモデル化に向けた西南日本の応力方向の詳細な空間分布の推定

## Spatial distribution of stress orientations in Southwestern Japan and its implication for the strength of the median tectonic line

\*吉田 圭佑<sup>1</sup>、福山 英一<sup>1</sup>\*Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Eiichi Fukuyama<sup>1</sup>

1. 独立行政法人 防災科学技術研究所 観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット

1. National research institute for earth science and disaster prevention

日本列島では、歴史的に多数の被害地震が発生し、甚大な被害を及ぼしてきた。西南日本には、M<sub>7</sub>規模以上の地震を発生させ得る活断層が多く分布していることが知られているが、その中でも活動した際に想定される被害の取り分け大きなものに、中央構造線がある。中央構造線に沿っては、GPSデータの解析により深部 ( $z > 15$  km)での非地震性のすべりが検出されており、浅部において地震発生に向けた応力集中が進行している可能性が指摘されている [Tabei et al., 2002]。歴史上、中央構造線沿いでは、M7を超えるような地震がセグメントに分かれて発生してきたことが知られているが、2011年 M9東北沖地震に見られたように、それらが連結して超大規模の地震を発生させ得る可能性は否定できない。

本研究では、中央構造線上を含めた西南日本に分布する活断層における地震発生のモデル化を目指して、まず、応力・摩擦パラメータを拘束する目的で、震源メカニズム解析を行った。

最初に、Hi-netにより読み取られた初動極性のデータを用いて、メカニズム解の推定を行った。2001-2015年の間に初動極性が15個以上読み取られた地震を対象にして、接面のグリッド・サーチにより、初動極性の9割が説明可能な接面のRMSが30°以下である25,882個のメカニズム解を求めた。多くはマグニチュード範囲0.5-3.0に含まれる。この数は、気象庁により求められている同じ期間のメカニズム解の数の10倍の量である。それらのメカニズム解のうち、深さ30 km以浅かつプレート境界よりも浅部で発生している地震14,460個を取り出し、応力場を求めるためのデータ・セットとした。

次に、それらのメカニズム解に対して応力テンソル・インバージョン法を適用し、応力方向の詳細な空間分布を調べた。まず、発生した全てのメカニズム解に対して、応力テンソル・インバージョン法 [Michael, 1987]を適用して、平均的な応力方向を求めた。その結果は、 $\sigma_1$ 軸が西北西-東南東を向く横ずれ断層型であった。従来から知られているように、フィリピン海プレートの沈み込みの方向およびGPSから求めた歪レートの最大短縮方向とは大きく異なる [e.g. Wang, 2000]。一つの可能性は、Townend & Zoback [2006]により提案されたような東日本と西日本の衝突による効果である。この応力の方向は、西南西-東北東走向を持つ中央構造線に対し、unfavorably-oriented [Sibson, 1985]である。

更に、応力方向の詳細な空間変化を調べる目的で次の3種類の計算を行った。(a)メカニズム解データをK-means法により300個のクラスターに分割、(b)領域を1°おきのメッシュで分割、(c)0.25°おきのグリッドに、近い10-30個のイベントを割り当て、応力テンソル・インバージョン法 [Gephart & Forsyth, 1984]を適用した。いずれの場合も、求まった $\sigma_1$ 軸が東西方向を向く領域がほとんどであった。ただし、山陰地方において、 $\sigma_1$ 軸は東西よりも、北西-南東方向を向く。その傾向は、Kawanishi et al. [2009]による臨時観測データを用いた推定結果と同様である。この領域は歪速度が局所的に高い領域に位置し (西村, 2014)、応力方向が歪速度の方向に近い。また、四国北部においても $\sigma_1$ 軸が北西-南東を向く。この領域は、中央構造線に沿って北側に傾斜した地震活動が見られる領域 [Sato et al. [2015]であるが、発生している地震のメカニズム解は多様性を持つようである。広島県中央部においては、 $\sigma_1$ 軸が南北に近く、周囲と顕著に異なる。ここでは地震の深さ下限も局所的に深い。紀伊半島においては、逆断層場も分布するが、その分布は、東北日本に見られるように [Yoshida et al., 2015]、標高と対応しているようにも見える。

中央構造線に沿って推定された $\sigma_1$ 軸の方向は、前述した四国中央北部を除いて東西方向であり、unfavorably-orientedである。Favorably-orientedなIntact rock ( $T=10$  MPa;  $\mu=0.75$ )での破壊よりも優先的に中央構造線がすべるために必要な見かけの摩擦係数の上限値を計算した。ほとんどのセグメントにおいて、その見かけの摩擦係数の上限値でさえ0.4を下回る。このことと観測されている微小地震・定常すべりを考え合わせると、中央構造線において、摩擦強度が弱まっている可能性が示唆される。

キーワード：中央構造線、応力、強度、地震活動

Keywords: The Median Tectonic line, stress, frictional strength, seismicity

## コア変形法による南アフリカ大深度金鉱山誘発地震震源域の応力状態の推定

Estimate of the stress state in earthquake source region in South African deep gold mine by DCDA

\*阿部 周平<sup>1</sup>、矢部 康男<sup>1</sup>、伊藤 高敏<sup>2</sup>、中谷 正生<sup>3</sup>、Gerhard Hofmann<sup>4</sup>、小笠原 宏<sup>5</sup>

\*Shuhei Abe<sup>1</sup>, Yasuo Yabe<sup>1</sup>, Takatoshi Ito<sup>2</sup>, Masao Nakatani<sup>3</sup>, Gerhard Hofmann<sup>4</sup>, Hiroshi Ogasawara<sup>5</sup>

1.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2.東北大学流体科学研究所、3.東京大学地震研究所、4.Senior Mine Seismologist Rock Engineering、5.立命館大学理工学部

1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Institute of Fluid Science, Tohoku University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.Senior Mine Seismologist Rock Engineering, 5.Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

はじめに：

地震の準備過程は、断層の強度と断層運動を駆動する応力場が、断層すべりを介して相互作用をしつつ時空間発展していく過程である。そのため、震源域の応力場とその時間発展の把握は、地震の準備過程を理解する上で極めて重要である。断層近傍の応力を直接測定することを目的として、これまでに多くの掘削研究が行われてきた。掘削による応力測定には、水圧破砕法や応力解放法といったその場測定法やAE法やDRAといったコア法が用いられてきた。いずれの測定法も、ある条件のもとでは有効であるが、どのような場合にも使える万能な技術は存在しない。特に、大深度掘削に適用可能な技術は限られている。

南アフリカ大深度金鉱山のひとつであるムポネン金鉱山の深さ3.3kmでは、厚さ約30mの斑禰岩ダイクを斜めに断ち切るようにMw 2.2の地震（以下、本震）が発生した。Yabe et al. (2013) では、本震発生の約1.5年後に震源断層を貫通する掘削を行い、孔壁のブレイクアウトと掘削コアのディスクングから、震源域の応力状態を推定した。しかし、この方法は震源域の応力状態がブレイクアウトやディスクングの発生条件（破壊基準）を満たすかどうかの判定に基づいて、応力値の上限や下限を与える、非常に粗い推定法である。

本研究では掘削コア試料にコア変形法（船戸・伊藤、2013）を適用しより高い分解能で差応力の推定を試みる。本震震源域では、母岩（珪岩）とダイクの物性調査のために本震発生の約7ヶ月前にも掘削が行われている。そこで、本震発生前に採取されたコア試料にもコア変形法を適用し、地震前後の応力場についても議論する。これらの結果から、大深度応力測定へのコア変形法の適用可能性についても検討する。

手法：

コア変形法とは、掘削で周りの岩盤から切り離された採掘コアが応力解放によって非等方的に膨張することを利用して、コア試料の断面形状から推定される差ひずみに弾性定数を乗じて、孔井直交面内の差応力を求める方法である。本研究では、本震前後の掘削孔から採取した、それぞれ7個のコア試料（いずれも長さは約30cm）の軸方向に約2cm間隔で設定した測線に沿って、2度刻みで直径を測定し、その方位依存性を求めた。

結果：

本震前のコア試料では7個中3個で、本震後では7個中5個で位相のそろった直径の方位依存性を検出した。直径の方位依存性の位相が測線ごと異なるコア試料は、掘削時にドリルビットのブレ等によって削られたと考えられるので、以下の議論から除外する。弾性定数は一軸圧縮試験で測定した。本震前の差応力はコア試料を採取した位置に依らず100MPa程度と見積もられた。本震後の推定値は母岩内および母岩とダイクの境界付近では約20MPa、境界から離れたダイク内では70MPa程度であった。本震後の差応力推定値は、Yabe et al. (2013) による推定範囲に含まれるが、最尤値よりは2倍以上大きい。

議論：

コア変形法では、掘削時の応力解放に伴うコアの膨張は弾性変形のみであると仮定している。しかし、本研究で用いたコア試料を採取した、地表から約3.3kmという大深度では被り圧だけでも約80MPaと大きなものであるため、応力解放に伴って非弾性変形が生じる可能性がある。そこで、差応力の推定値に非弾性変形が及ぼす影響を見積もるため、ダイクから採取した岩石試料の一軸クリープ試験を行った。さらに、一軸圧縮破壊試験および一軸引張破壊試験（ブラジリアンテスト）も行って、降伏直前の非弾性変形の程度を計測した。これらの



試験では、弾性変形に対する非弾性変形の割合は最大でも30%であった。このことから、Yabe et al. (2013)の最尤値に比べて2倍以上大きな差応力の推定値は、非弾性変形の影響ではなく、実際に差応力が大きいことを示していると言える。本震前の掘削で得られたコア試料から推定された差応力は、本震後のコア試料から推定した差応力よりも有意に大きい。しかし、二つの掘削孔は互いに傾斜が異なるため、差応力推定値を直接比較できない。そこで、グリッドサーチにより二つの推定結果を再現できる単一の応力状態が存在するかどうか検討した。主応力の方向はYabe et al. (2013)で推定されたものを仮定し、最大300MPaの主応力の範囲でグリッドサーチを行った。その結果、両者を同時に満足する主応力値は存在しなかった。ただし、本震前の掘削から地震発生までに約7ヶ月、本震から本震後の掘削までは約1.5年の時間があるので、本研究で検出した応力状態の変化は、本震の発生だけでなく採掘域の変化にも起因していることには注意が必要である。

結論：

本研究により、Yabe et al. (2013)で大まかな範囲が拘束されるだけであったMw2.2の地震の震源域の応力状態に対して、新たな制約を与えることができた。また、本震の前後に採取されたコア試料の解析から、コア変形法は応力の時間変化の検出にも有効であることを示した。

キーワード：南アフリカ大深度金鉱山、コア変形法

Keywords: South African deep gold mine, Diametrical Core Deformation Analysis

南アフリカ鉱山地域最大のM5.5地震断層の科学掘削に向けた、歪データと境界要素法による最大すべり域の推定

Searching largest displacement zone of the 2014 Orkney earthquake fault with strain data and using Map3Di for scientific drilling.

\*石田 亮壮<sup>1</sup>、小笠原 宏<sup>1</sup>、小笠原 宏幸<sup>1</sup>、内浦 大海<sup>1</sup>、Durrheim Raymond<sup>2,3</sup>、Milev Alex<sup>3</sup>、大久保 慎人<sup>4</sup>、山口 照寛<sup>5</sup>

\*Akimasa Ishida<sup>1</sup>, Hiroshi Ogasawara<sup>1</sup>, Hiroyuki Ogasawara<sup>1</sup>, Taka Uchiura<sup>1</sup>, Raymond Durrheim<sup>2,3</sup>, Alex Milev<sup>3</sup>, Makoto OKUBO<sup>4</sup>, Teruhiro Yamaguchi<sup>5</sup>

1.立命館大学、2.Univ. Witwatersrand, South Africa、3.CSIR, South Africa、4.高知大学、5.北海道大学  
1.Ritsumeikan University , 2.Univ. Witwatersrand, South Africa, 3.CSIR, South Africa,, 4.Kouchi University, 5.Hokkaidou University

The largest event recorded in a South African gold mining region, a M5.5 earthquake took place near Orkney on 5 August 2014. This is one of the rare events as the main- and after-shocks were recorded by 46 geophones at 2-3 km depths, 3 Ishii borehole strain meters at 2.9km depth, and 17 surface strong motion meters at close distances. The upper edge of the planar distribution of aftershock activity dipping almost vertically was only some hundred meters below the sites where the strainmeters were installed at distances larger than a few tens of meters from tunnel. A scientific project is planned to drill into the 2014 Orkney earthquake fault from the localities near the strain meter sites. It is a rare opportunity to recover fault material and fractures, to measure stress, to monitor after drilling at the M5.5 seismic zone. The final purpose of our research is to understand how main rupture stopped and why aftershock have occurred in sequence as observed. For this purpose, we attempted to constrain the largest displacement zone of the 2014 Orkney earthquake fault that account for the observed co-seismic strain with Map3Di to suggest where to drill. We checked polarities of each component of the strainmeters by comparing the observed tidal change with theoretically calculated tide Gotic2 [Sato and Honda (1984)], modifying the polarities of a few components with problems. Identical responses were recorded with the three strainmeters to a M4 earthquake at a few km distance, whereas .much larger (up to 1e-5) and different responses were recorded to the M5.5 earthquake. We calculated strain change of each component of the three strain meters by assuming uniform fault slip over a rectangle area with a same aspect ratio of aftershock area with various areas using map3Di. We found the rectangular area with a uniform fault slip of 0.5 m can explain the observed magnitudes of strain changes. However, we haven't yet evaluated local effects that might cause discrepancies in each component of the three strainmeters. At Japan Geoscience Union Meeting 2016, we are going to make a follow-up report.

キーワード：南アフリカ、境界要素法、掘削計画、歪データ、地震発生場

Keywords: South Africa, Boundary element method, Drilling project, Strain data, Seismogenic zones

## 2009年箱根群発地震における応力降下量の時空間分布と地震発生メカニズム

Spatio-temporal variation of the stress drop revealed the generation and migration process of the 2009 swarm activity at Hakone volcano

\*藤岡 実悠<sup>1</sup>、行竹 洋平<sup>2</sup>、金 亜伊<sup>1</sup>

\*Miyu Fujioka<sup>1</sup>, Yohei Yukutake<sup>2</sup>, Ahyi KIM<sup>1</sup>

1.横浜市立大学、2.温泉地学研究所

1.yokohama city university, 2.Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

箱根火山は約40万年前から活動を始めた活火山である。現在でも火山活動が活発であり、しばしば有感地震を伴う活発な群発地震が観測される。こうした背景から、群発地震の発生メカニズムを明らかにすることは、火山防災の観点からも重要な意義がある。2009年8月4日から12日にかけて箱根で発生した群発地震は、高圧な流体が断層破砕帯内で拡散することによって誘発されたことが、高精度に求められた震源の時空間分布から定性的に示された[Yukutake *et al.*, 2011]。

そこで本研究では、この群発地震の応力降下量を求めることで、群発地震発生プロセスと流体との関連性について議論する。対象領域は火山地帯のため地殻構造が複雑であり、かつ地形の効果を考慮に入れる必要があるため理論的なグリーン関数の計算が困難である。そのため、応力降下量の推定には経験的グリーン関数法を用いて震源時間関数を見積もり、断層半径に換算する手法を用いた。本研究では、経験的グリーン関数の選出条件をマグニチュードの差が1以上、波形の相互相関係数が0.6以上、モーメントマグニチュードが1.5未満とした。モーメントマグニチュードの条件は立ち上がり時間とマグニチュードの依存性と計器特性から導いたものである。見積もられた応力降下量は一般的な地殻内地震と比べ低い値を示したことから、流体の陥入による有効法線応力の低下による群発地震発生プロセスが示唆された。さらに、応力降下量の値に時空間変化が見られ、震源の拡散とともに応力降下量の値が徐々に大きくなっていることがわかった。このことから2009年箱根群発地震の発生について、活動の初期は断層帯内への流体の貫入に伴う間隙水圧の上昇が主要因となり、その後は流体の拡散に伴い間隙水圧は低下する一方で初期に発生した群発地震による応力変化が関係している可能性が示唆された。本発表では上記の解析結果について報告し、2009年箱根群発地震の発生メカニズムについて考察する。

キーワード：箱根火山、群発地震、経験的グリーン関数法、応力降下量、流体陥入

Keywords: Hakone volcano, swarm earthquakes, empirical Green's function method, stress drop, invaginated the fluid

3次元及び2次元震源イメージングから推定した2014年伊予灘稍深発地震の初期段階の破壊過程  
Early rupture process of 14 March 2014 Iyo-Nada intermediate-depth earthquake inferred  
from 3D and 2D source imagings

\*宇佐美 貴政<sup>1</sup>、小松 正直<sup>1</sup>、竹中 博士<sup>1</sup>

\*Takamasa Usami<sup>1</sup>, Masanao Komatsu<sup>1</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>1</sup>

1.岡山大学大学院自然科学研究科

1.Graduate School of Natural and Technology, Okayama University

2014年3月14日に伊予灘で $M_{JMA}$  6.2の稍深発地震が発生した。震源の深さは78 kmで、この深さはフィリピン海プレートのスラブ内にあたる。本研究の目的は3次元及び2次元イメージング(back-projection)法を用いて発震後3秒間の地震開始初期の破壊過程を推定することである。解析には震央距離105 km以内にある気象庁、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所の高感度地震観測網観測点50点で記録された波形の上下動成分を使用した。3次元でのイメージングの結果、発震直後の震源位置(S)の他に、発震時から約0.7 s後の震源直近北上方(S1)、約2.2 s後の震源南方約9 km下方約6 km付近(S2)、約2.7 s後の震源東方約8 km下方約7 km付近(S3)の3箇所それぞれ地震波放射の大きな領域が見つかった。これらを説明するために、震源を通り気象庁初動発震機構解の走向22°E、傾斜角69°の節面を断層とする初期破壊断層面と、S2、S3を通り気象庁CMT解の走向244°E、傾斜角26°の節面を断層とする主破壊断層面の2つの断層面を有する断層モデルを提案する。また、それらの断層面を推定した2次元でのイメージングの結果から、主破壊断層面は震源の直下約7 kmの点を通ることがわかった。破壊過程としては次のように考えられる。まず震源で発生した破壊が四方に伝わり、発震時から約0.7 s後にS1の位置で大きなすべりを引き起こした。それとは別に、震源から南下方に進んだ破壊が主破壊断層面に乗り移った直後にS2の位置で、また下方に進んだ破壊が主破壊断層面に乗り移りそこからさらに東方に進んでS3の位置でそれぞれ大きな破壊を引き起こしたと考えられる。

謝辞：本研究には気象庁、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所の高感度地震観測網の観測記録を使用させていただきました。記して感謝いたします。

キーワード：初期破壊、主破壊、震源イメージング、2014年伊予灘稍深発地震

Keywords: Initial rupture, Main rupture, Source imaging, 2014 Iyo-Nada intermediate-depth earthquake

2012年1月28日に丹沢山地下において発生したM5.5の地震に見られたNon-DC成分の成因について  
What caused the unusual Non-DC component observed in the Jan. 28<sup>th</sup> 2012 Tanzawa  
earthquake?

\*佐藤 慎司<sup>1</sup>、金 亜伊<sup>1</sup>

\*Shinji Sato<sup>1</sup>, Ahyi KIM<sup>1</sup>

1.横浜市立大学

1.Yokohama City University

丹沢山地は常時地震活動が活発な地域として知られており、その東西で発生メカニズムが異なると考えられている。西丹沢においては伊豆の衝突の影響による地震が発生し、東丹沢においてはフィリピン海プレートの沈み込みに伴う影響により地震が発生している[Yukutake et al. 2012]。特に西丹沢ではこれまでにマグニチュード(M) 5以上の地震が幾度となく発生していて、その多くは前震を伴い、発震機構解は本震のそれとは異なっているという特徴がある。前震が発生する理由については様々な議論がなされており、まだ決定的な結論には至っていない。2012年1月に西丹沢において活発化した地震活動ではその本震、及び前震においてNon-DC成分であるCLVD成分が卓越していることが確認され、同程度のマグニチュードの余震においてはそれらの成分はほとんど見られなかった。これらの発震機構を理解することは、前震を伴う地震の発生場を明らかにする上で非常に重要であると考えられる。

本研究ではそれらの発震機構を明らかにしCLVD成分の成因について考えていくことを目的として、モーメントテンソル解析と震源時間関数解析を行った。本研究における主な結論について以下に、まとめる。震源位置の誤推定、観測点依存などの様々な角度から検証したが、それらのいずれも見せかけのCLVDを表す原因とは考えられなかった。震源時間関数解析においてはパルス状のものではない複雑な形状が得られ、丹沢山地下における複雑な断層帯の存在が示唆された。上述のような結果からCLVD成分の成因としては複雑な断層帯の存在による複数の断層破壊が関連している可能性が高いことが示された。本発表ではさらにモーメントテンソル解の時空間変化を明らかにし、丹沢山地下における複雑な断層帯と地震活動について議論したいと考える。

キーワード：丹沢山地、発震機構解、CLVD成分、モーメントテンソルインバージョン、震源時間関数

Keywords: Tanzawa mountain, mechanism, CLVD component, moment tensor inversion, moment rate  
function

## 2004年に釧路沖で発生した2つのM7クラス地震の破壊伝播の特徴

Characteristics of the rupture processes of two large earthquakes off the south-east Kushiro area in Hokkaido in 2004

\*佐川 朋之<sup>1</sup>、谷岡 勇市郎<sup>1</sup>、山田 卓司<sup>2</sup>

\*Tomoyuki Sagawa<sup>1</sup>, Yuichiro Tanioka<sup>1</sup>, Takuji Yamada<sup>2</sup>

1.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻地震学火山学講座地震火山研究観測センター、2.茨城大学理学部  
1.Institute of Seismology and Volcanology, Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Ibaragi University

本研究では、2004年11月と12月に発生した2つの釧路沖地震(Mw7.1とMw6.9)について、震源過程を解析した。この2つの地震は、太平洋プレート面上の互いに隣接する領域で起きたほぼ同じ規模の地震であり、8日間の時間差で発生した。この領域は、1961年にもM7規模の2つの地震が3ヶ月の時間差で起きた領域であり、1973年根室沖地震や2003年十勝沖地震に代表されるような、太平洋プレート面上で繰り返し発生するM8級の大地震の震源域に囲まれた領域である。よって、この2つの地震の特徴について調べることは、太平洋プレート面上の強度や応力などの複雑性を考える上でも重要である。

2つの釧路沖地震の特徴を調べるために、強震動波形(K-net)に経験則的グリーン関数法を用いて震源時間関数を取り出し、方位角に依存した破壊継続時間の変化、つまりディレクティビティ効果について検証を行った。その結果、11月の地震は同心円状に破壊が伝搬し、12月の地震は約8km北方に向けて破壊が伝搬した可能性が示唆された。また、余震の時空間的な分布から12月の地震は均一に応力が低下した可能性が示唆された。このことは、十勝沖地震(Mw8.0)の余効変動が起こった後11月の地震(Mw7.1)が発生し、それによって12月の地震(Mw6.9)が発生したが、1973年の根室沖地震(Mw7.4)の震源域を破壊するだけの応力増加は無かったため北向きに破壊が伝搬したことを示唆している。

キーワード：2004年釧路沖地震、震源過程

Keywords: 2004 Kushiro-oki earthquake, source process

## 2014年長野県北部の地震の動力的震源モデル（その3）

## Dynamic rupture model of the 2014 northern Nagano, central Japan, earthquake (Part 3)

\*加瀬 祐子<sup>1</sup>\*Yuko Kase<sup>1</sup>

1.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1.Geological Survey of Japan, AIST

2014年長野県北部の地震 ( $M_{JMA}6.7$ ) の動力的震源モデルについて、前回（加瀬，日本地震学会2015年秋期大会）に引き続いて検討した。この地震では、震源断層の南側半分では、神城断層に沿って地表地震断層が断続的に認められたが、震源断層の北側半分では観察されていない（勝部ほか，2015）。一方、強震波形を用いた震源インバージョンでは、すべりの大きい領域は、主に震源の北東側に求められている（浅野ほか，2015；小林ほか，2015；芝，2015；堀川，2015）。1枚もしくは平行な2枚の断層面を仮定する比較的単純な断層モデルでは、地表地震断層とすべり分布の特徴を共に説明することはできなかった（加瀬，2015）。そこで、発震機構解（気象庁，2014）とCMT解（防災科学技術研究所，2014）の違いに注目し、初期破壊面となる鉛直なセグメントが2つのセグメントの間にある断層モデルを検討した結果、本地震の震源過程を説明できる可能性があることが示された。

主破壊面の断層モデルと広域応力場は、加瀬（2015）と同じものを用いた。今西・内出（2015）が再決定した本震及び余震の分布と地殻変動データの解析結果（矢来ほか，2015）を参考に、走向 $N20^{\circ}E$ 、2 kmより浅い部分では東傾斜 $45^{\circ}$ 、深い部分では東傾斜 $60^{\circ}$ 、断層下端の深さ12 kmとした。震源インバージョンですべりの大きい領域に対応する震源北東側10.1 kmと、地表地震断層が認められる震源南西側13 kmの2つのセグメントから成るとし、断層全長は21.1 kmとした。震源は南西側セグメントにあり、2つのセグメントは2 kmオーバーラップして、2 km左ステップする。この断層モデルは、神城断層の地表トレースやCMT解（気象庁，2014；防災科学技術研究所，2014）とも調和的である。更に、2つのセグメントの間に、初期破壊面となる鉛直なセグメントを設定した。また、震源の北東側では顕著な地表地震断層が観察されていないことから、北側11.1 kmの範囲では、断層上端の深さを2 kmとした。

広域応力場は、テクトニックな応力場を考慮し、主応力は深さに比例、最大主応力の向きは $N60^{\circ}W$ （文部科学省ほか，2004）、応力比は0.42（文部科学省ほか，2004）、最小主応力の向きは鉛直方向で、大きさはかぶり圧に等しいとし、静水圧条件下にあるとした。また、断層周辺の地下構造モデル（防災科学技術研究所，2003）を参考に、深さ2 kmを境界とする2層構造を仮定した。

上記のモデルに対し、鉛直セグメント上に破壊開始点を置き、すべりに依存する摩擦構成則を仮定して、差分法（Kase，2010）により動的破壊過程を計算した。予察的な計算の結果からは、北東側セグメントの深部と南西側セグメントの浅部に破壊が進展しやすく、本地震の震源過程を説明できる可能性が示された。

キーワード：動力的震源モデル、2014年長野県北部の地震、数値シミュレーション

Keywords: dynamic rupture, 2014 northern Nagano earthquake, numerical simulation

遠地実体波震源過程解析によるすべり分布と震源の様々な特徴との関係性

Relationship between various Source Characteristics and Slip Distribution determined by Source Process Analysis with Teleseismic Body-Wave

\*藤田 健一<sup>1</sup>、勝間田 明男<sup>1</sup>、迫田 浩司<sup>2</sup>

\*Kenichi Fujita<sup>1</sup>, Akio Katsumata<sup>1</sup>, Koji Sakoda<sup>2</sup>

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。その結果、小断層や基底関数などのパラメータをスケーリング則に基づきイベントの規模に応じて設定することで、解析者によるパラメータの試行錯誤なしに遠地実体波震源過程解析を行うことができるようになった。そこで、解析に使用する観測点の選別及びP波初動の読み取りは手動で行いそれ以外のパラメータ設定などを自動的に行う準自動的な遠地実体波震源過程解析（準自動解析）について手動解析との解析結果の比較を行ったところ、イベントの規模によらず多くのイベントで手動解析と概ね同じような解析結果を得ることができた。しかし、一部のイベントでは準自動解析と手動解析のすべり分布に大きな違いが見られた。

このことから、何が原因で準自動解析及び手動解析によるすべり分布に違いが見られるのかを調べるため、すべり分布と余震分布や津波の波源域等との比較を行った。

また、すべり分布を最大余震の位置等と比較することでそこに何か関係性が見られるかどうかについても調べた。

今回の発表では、遠地実体波震源過程解析によるすべり分布と震源の様々な特徴の関係性について取りまとめたのでその結果を報告する。

### 2. 解析方法

計算プログラムは岩切 他 (2014) を使用した。観測波形はIRISの広帯域地震波形を使用し、イベントの規模に応じてサンプリング間隔とカットオフ周波数を設定した。破壊開始点は国内のイベントについては気象庁一元化震源の値を使用し、海外のイベントについては米国地質調査所 (USGS) の震源の値を使用した。断層面の走向、傾斜、すべり角は国内のイベントについては気象庁CMTの値を使用し、海外のイベントについてはGlobal CMT解 (GCMT) 等の値を使用した。断層面は破壊開始点を中央に設定し、イベントの規模に応じて小断層のサイズと数を設定した。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及び数をイベントの規模に応じて設定した。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IASP91のモデルを与え、震源付近ではCRUST2.0のモデルを与えた。時空間的なめらかさを与える拘束条件についてはABIC (Akaike (1980)) が最小となるパラメータを設定した。最大破壊伝播速度は経験的關係 (Geller (1976)) からS波速度の0.72倍として設定した。

### 3. 比較方法

(1) 解析で設定した各小断層における余震数を調べ、各小断層におけるすべり量との比較を行った。

(2) すべり分布から地表面や海底面における地殻変動量等を計算し、津波の波源域等との比較を行った。

(3) 最大余震の位置や、最大余震のすべり分布等を調べ、各小断層におけるすべり量との比較を行った。

謝辞：IRISの広帯域地震波形、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：震源過程解析、すべり分布

Keywords: Source Process Analysis, Slip Distribution

## 三陸沖から房総沖にかけての準動的地震発生サイクルシミュレーション Simulation of Recurring Earthquakes along the Japan Trench

\*藤田 健一<sup>1</sup>、弘瀬 冬樹<sup>1</sup>、前田 憲二<sup>1</sup>  
\*Kenichi Fujita<sup>1</sup>, Fuyuki Hirose<sup>1</sup>, Kenji Maeda<sup>1</sup>

1. 気象庁気象研究所  
1. Meteorological Research Institute

### 1. はじめに

三陸沖から房総沖にかけては規模 (M) 7-8クラスの地震が各領域で繰り返し発生していることが知られており、さらに2011年に東北地方太平洋沖地震が発生したことでM9クラスの地震も同様に繰り返し発生している可能性があることも分かった。

そこで、これらM7-9クラスの繰り返し発生する地震の規模及び発生周期 (T) を再現する地震発生シミュレーションモデルの作成を試みたのでその結果を報告する。

### 2. 解析方法

再現の対象とした繰り返し発生するプレート間地震は、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2011) の「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価 (第二版) について」を参考に、三陸北部の地震 (M<sup>8.0</sup>、T<sup>100</sup>年)、宮城県沖の地震 (M<sup>7.5</sup>、T<sup>40</sup>年)、三陸沖南部海溝寄りの地震 (M<sup>8.0</sup>、T<sup>110</sup>年)、茨城県沖の地震 (M<sup>7.0</sup>、T<sup>20</sup>年)、東北地方太平洋沖型の地震 (M<sup>9.0</sup>、T<sup>600</sup>年) とした。このほか、繰り返し性は明確ではないが特徴的な地震として、1896年に三陸沖の海溝寄りで発生した津波地震 (明治三陸地震)、1938年に福島県沖で続発した地震活動があり、これらについても再現を試みる。

地震発生サイクルをシミュレートするモデルには、地震波放射を考慮した弾性論 (Rice (1993)) から導かれる運動方程式及びすべり速度・状態依存摩擦構成則 (Dieterich (1979)) とその発展則 composite-law (Kato and Tullis (2001)) を用いた。解析領域はアスペリティが十分に含まれるように三陸沖から房総沖にかけての領域を設定した。三次元プレート境界の形状は Nakajima and Hasegawa (2006) に従い、1辺が約5 kmの三角形セル17,507個で表現した。陸に対する太平洋プレートの沈み込み速度は Wei and Seno (1998) 等を参考に、北 (8.2 cm/year) から南 (8.0 cm/year) へ徐々に小さくなるよう設定した。アスペリティの領域は中央防災会議 (2005) で設定された断層モデル等を参考に設定した。摩擦パラメータ (A, B, L) は各地震の規模及び周期を再現できるよう試行錯誤的に設定した。このとき、アスペリティの周囲の領域 (背景領域) が速度強化 (A - B > 0) であるモデル (背景安定すべり型モデル) と、背景領域が速度弱体化 (A - B < 0) であるモデル (階層型モデル) の2ケースをエンドメンバーとした。

### 3. 解析結果

現時点で、三陸沖から房総沖にかけてのM7-9クラスの繰り返し発生する地震について最も良く再現できたモデルでの規模や周期は、背景安定すべり型モデルで三陸北部の地震 (M<sup>8.0</sup>、T<sup>61-103</sup>年)、宮城県沖の地震 (M<sup>7.4</sup>、T<sup>30-74</sup>年)、三陸沖南部海溝寄りの地震 (M<sup>7.9</sup>、T<sup>104-130</sup>年)、茨城県沖の地震 (M<sup>6.8</sup>、T<sup>14-52</sup>年)、東北地方太平洋沖型の地震 (M<sup>8.3</sup>、T<sup>203-232</sup>年 (そのうちの数回に1回M8後半の地震)) であった。なお、三陸北部の地震の数年後に三陸沖の海溝寄りで地震が発生するケースが見られた。また、福島沖では複数のアスペリティが連続して地震となるケースが見られた。

一方の階層型モデルでは、三陸北部の地震 (M<sup>7.9</sup>、T<sup>66-140</sup>年)、宮城県沖の地震 (M<sup>7.3</sup>、T<sup>31-149</sup>年)、三陸沖南部海溝寄りの地震 (M<sup>7.8</sup>、T<sup>120-216</sup>年)、茨城県沖の地震 (M<sup>6.8</sup>、T<sup>9-51</sup>年)、東北地方太平洋沖型の地震 (M<sup>8.5</sup>、T<sup>294-526</sup>年 (そのうちの数回に1回M9の地震)) であった。なお、三陸沖の海溝寄りでは地震とならなかったが、福島沖では複数のアスペリティが連続して地震となるケースが見られた。

このとき、両モデルにおける各アスペリティは同じ領域を設定し同じ摩擦パラメータを与えていたが、地震の発生周期は階層型モデルの方が長くなった (ただし、東北地方太平洋沖型の地震直前における各アスペリティの周期は両モデルで概ね同じ)。これは、背景安定すべり型モデルに比べ階層型モデルの方が背景領域にお

ける地震間の定常的なすべり量が小さく、アスペリティへのローディングレートが小さいためと考えられる。  
 今後は、シミュレートされた東北地方太平洋沖型の地震をより実際の地震に近づけるために、海溝沿いのアスペリティを中心に摩擦パラメータなどのさらなる検討を行いたい。

キーワード：地震発生サイクルシミュレーション、東北地方太平洋沖地震

Keywords: Simulation of Recurring Earthquakes, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

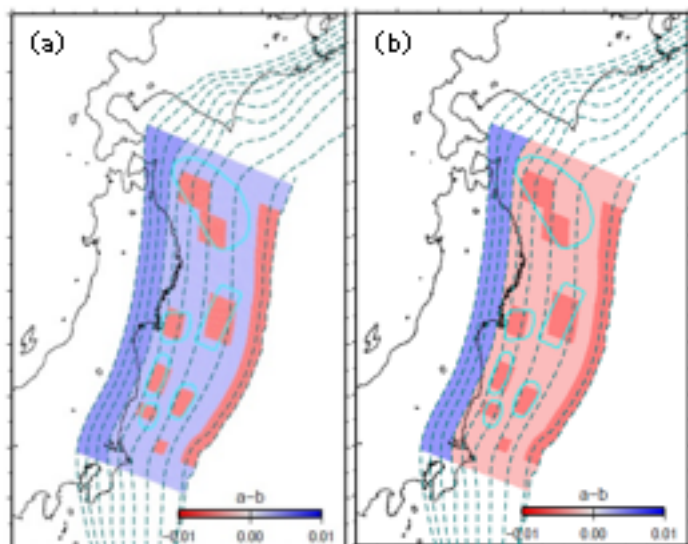


Figure 1. Friction parameter (a - b) (a) background stable slip model (b) hierarchical model

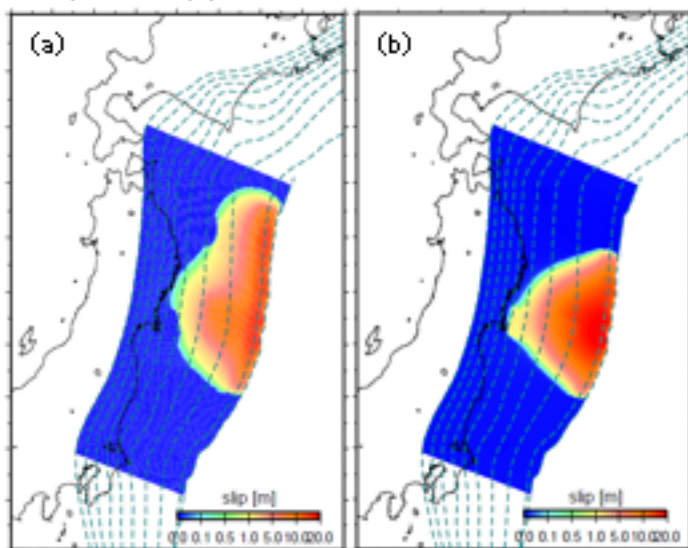


Figure 2. Slip distribution (a) background stable slip model (b) hierarchical model

## 南海トラフ巨大地震サイクルシミュレーション —熱的加圧による速度弱化を考慮した離散セルモデルの準動的数値計算—

Simulation of the Nankai earthquake cycle -Quasi-dynamic discrete-cell model incorporating rate-weakening due to thermal pressurization-

\*尾崎 勇吾<sup>1</sup>、平原 和朗<sup>1</sup>

\*Yugo Ozaki<sup>1</sup>, Kazuro Hirahara<sup>1</sup>

1.京都大学大学院理学研究課

1.Graduate School of Science, Kyoto University

フィリピン海プレートが沈み込む南海トラフでは繰り返し大規模な地震が発生しており、今世紀前半に西南日本に大きな被害をもたらす巨大地震の発生が危惧されている。繰り返し間隔は90年から250年と大きく変化する。四国沖から東海沖までのびる震源域は5つのセグメントに分けられ、5つのセグメント全てが連動破壊する場合、或いはあるセグメントが遅れて破壊したり、また破壊しない場合がある、といった非常に多様な地震発生を繰り返す (Ishibashi, 2004)。また瀬野 [2012]は地震歴を見直して、震源域では主に地震波、津波および地殻変動を生じさせる領域が階層的に存在しており、また南海トラフ巨大地震は地震領域が安政地震の特徴を持つかまたは宝永地震の特徴を持つかで安政型および宝永型に分類されると提唱している。提唱されたモデルは複雑な南海トラフ地震発生履歴を理解する一つの見方といえるが、更なる検証が必要であろう。このように複雑な南海トラフ地震の発生様式を解明するための一つの手法として、地震サイクルシミュレーションが考えられる。

本研究では、断層面上のみを離散化する境界要素法的解法を用い、速度状態依存摩擦則に従いプレート運動を原動力とする地震サイクルシミュレーションを行なう。摩擦パラメータの空間不均質性を考慮するだけでは上記の複雑な南海トラフの地震歴を再現することは難しく、別の新しい影響を考慮することが求められる。Noda and Lapusta [2010]では地震時の摩擦発熱により断層帯中の流体、間隙流体の圧力が増加する熱的加圧という現象に焦点を当て、熱的加圧に関わるパラメータの空間非一様性を断層面上で考慮することで2つのパッチの相互作用を表現している。本研究ではこの性質を南海トラフの設定に適用し、その複雑な地震歴を再現することを最終目的とする。彼らは動的破壊過程まで含めているが、本研究では計算コストの関係で慣性項を近似した準動的計算スキームを用いる。この点で以下に述べる熱的加圧の効果は過小評価になっている可能性があるが、今後の問題としたい。

熱的加圧による間隙流体圧の時間変化を考慮した場合、地震時の法線応力が増大し摩擦力が減少する。これにより未考慮時と比べて一度のイベントで地震性すべりする量が増加し地震再来周期が長くなる。この熱的加圧の計算にはBizzari and Cocco [2012]で提唱された畳み込み積分の形式を採用することで拡散方程式をそのまま解く場合に比べて時間刻み幅を比較的大きく取ることができる。しかし、履歴積分による計算コストは依然として大きく、断層セル間の相互作用の計算量と相まって、南海トラフのような広域断層を連続体としてそのまま計算することは現状では難しい。そこで、今回はMitsui and Hirahara [2004]で計算された南海トラフをバネ-ブロックモデルによって表現した手法を参考に、計算負担の比較的軽微なモデル計算を行い上述の熱的加圧を考慮した概念モデルにより、地震歴の再現性の評価を行った。このモデルではブロックを南海トラフの5つのセグメントに見立て、dip角などのそれぞれのセグメントに固有の性質をブロックごとに適用する。今回の研究では要素同士の弾性相互作用をバネではなくOkada [1992]による半無限均質弾性媒質中でのすべり応答関数によって表現する離散セルモデルとして計算する。合計セル数5では相互作用をほぼ表現できないため、走行方向のセル分割数ある程度増やして計算を行う。特定のセルにのみ熱的加圧を考慮し、摩擦パラメータの設定と合わせて様々なサイクルパターンを作り出し、南海トラフの地震歴に合致するようなイベントの再現を目指す。この際重要になるのは、熱的加圧を考慮するセル数を減らすことで計算負担を可能な限り削減することである。連続体モデルで計算する場合に今回の概念モデルと得られた結果を参考にすることで南海トラフの地震歴を実用的に、精度よく再現できることが期待される。

キーワード：南海トラフ、地震サイクルシミュレーション、境界要素法、間隙流体圧、熱的加圧

Keywords: Nankai Trough, simulation of earthquake cycle, a boundary elementary method, pore fluid pressure, thermal pressurization

## 南海トラフ巨大地震発生域深部で発生する大きな前兆すべりのモデル化

Simulated precursory large aseismic slip at the deeper extension of the seismic region along the Nankai Trough, SW Japan

\*大谷 真紀子<sup>1</sup>、亀 伸樹<sup>1</sup>、中谷 正生<sup>1</sup>

\*Makiko Ohtani<sup>1</sup>, Nobuki Kame<sup>1</sup>, Masao Nakatani<sup>1</sup>

## 1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

At the subduction zone along the Nankai Trough, SW Japan, large earthquakes around M8 had occurred repeatedly. Their intervals (around 100–200 years) have been identified precisely from old historical documents combined with geological surveys (*Sangawa, 2011*). The most recent events occurred in 1944 (the Showa To-Nankai EQ.) and 1946 (the Showa Nankai EQ.) when modern satellite geodetic networks had not been developed yet.

The existence of short-term aseismic processes before the 1944 and 1946 events has been inferred from the leveling or interview records. Two-times level difference measurements showed the displacement of north down before the 1944 event (*Mogi, 1986*), and the water level of some wells were reported to have dropped before the 1946 event (*Sato, 1982*). These phenomena were observed within several days before the earthquakes, and each could have been caused by 2 m slip on the plate interface at the deeper extension of the seismic region before each event (*Linde and Sacks, 2002*).

In this study, we simulate the cycle of large earthquakes in a quasi-dynamic 2D model to investigate aseismic slip acceleration in the deeper extension of seismic fault. We consider a flat plate interface with a shallow dipping angle of 15° for the depth 0–60 km mimicking the Nankai Trough. Following *Nakatani and Scholz (2006)* and *Yoshida et al. (2013)*, we introduce an intrinsic cut-off time for healing into the state evolution law of the rate-and-state friction. The intrinsic time leads to a corresponding cut-off velocity ( $V_{cx}$ ) beyond which velocity strengthening occurs. We assume that  $V_{cx}$  is depth dependent ( $1-10^{-9}$  m/s). We show that this depth variation in  $V_{cx}$  can possibly produce large aseismic slip.

In our simulation, the bottom part of the fault below the deeper extension exhibits a constant slip rate loaded by a subducting plate velocity (4.5 cm/year). This bottom slip drives the adjacent deeper locked part and aseismic slip starts to accelerate. Because of the introduction of low  $V_{cx}$  there, the slip cannot monotonously accelerate to seismic slip at the same depth. Instead, the aseismic slip propagates to the shallower part where the slip accelerates following the increasingly higher  $V_{cx}$  at the depth, and finally reaches to seismic slip at the shallow part with the large  $V_{cx}$ . The seismic slip starting at shallow part then propagates bilaterally to the shallower and deeper parts, and develops into a large earthquake. For example, the point at 20 km depth starts to slip aseismically 5.4 days before the earthquake and 54% of the slip occurs as the precursory aseismic slip. The deeper part produces the longer-lasting aseismic slip with the smaller velocity.

This simulated aseismic slip may correspond to the several-days precursors of the 1944/1946 events. Our results also suggest that the observed short-term aseismic slip acceleration is a part of the longer-term aseismic slip that has started at deeper parts, which may be detected at the next To-nankai/Nankai earthquakes with the help of recently installed modern observation networks (Do-Net, Hi-Net, and GEONET) around the Nankai region.

This study was supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan, under its Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program.

キーワード：南海トラフ、前兆すべり、サイクルシミュレーション  
Keywords: Nankai Trough, precursory slip, cycle simulation

## 潮汐の影響を考慮したスロースリップイベントの数値シミュレーション

Numerical simulation of slow slip events, considering the effect of earth tide

\*松澤 孝紀<sup>1</sup>、田中 愛幸<sup>2</sup>、芝崎 文一郎<sup>3</sup>\*Takanori Matsuzawa<sup>1</sup>, Yoshiyuki Tanaka<sup>2</sup>, Bunichiro Shibazaki<sup>3</sup>

1.国立研究開発法人 防災科学技術研究所、2.東京大学 地震研究所、3.国立研究開発法人 建築研究所  
1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Building Reserach Institute

南海トラフにおける短期的スロースリップイベント(SSE)の発生は、地球潮汐の応力変化に影響されていることが指摘されている(例えば、Nakata et al., 2008; Tanaka and Ide, 2014)。また、数値シミュレーションにおいては、SSE発生時の潮汐による影響について、研究が行なわれている(Hawthorne and Rubin, 2013)。我々は、これまで地震サイクルにおけるSSE発生挙動についての数値シミュレーションを行ってきており(例えば、Matsuzawa et al., 2010)、発生間隔がプレート間地震サイクルの後半において短くなる可能性を指摘している。本研究では、潮汐による応力擾乱が加わった場合について、地震サイクルにおける短期的SSEの発生挙動の数値シミュレーションによる評価を試みた。

数値モデルとしては、Matsuzawa et al. (2010)と同様に40,000個の矩形要素で表される平板の沈み込みプレート形状を仮定し、摩擦則としてはカットオフ速度をもったすべり速度・状態依存則を用いた。短期的SSE領域以深では、カットオフ速度が遅く( $10^{-6.5}$  m/s)、有効法線応力が低くなるパラメータ分布を仮定した。以下では、潮汐の応力変化について、剪断・法線応力ともピーク間で2kPaの振幅で、剪断応力最大と法線応力最小の時間が同期する位相をもつ、M2分潮の周期(約12.42時間)の正弦波の応力擾乱を全域に与えた場合の結果を紹介する。

この潮汐を入れた場合の数値シミュレーション結果においては、プレート間地震の発生間隔が、例えば最初の地震と2番目の地震間について、潮汐を入れない場合の106.5年から106.2年に、2番目の地震と3番目の地震間については、106.5年から105.9年に、それぞれ若干の短縮がみられた。これは、潮汐による応力擾乱の影響が地震発生サイクルにも及ぶ可能性を示唆する。

短期的SSEの発生間隔については、潮汐の有無にかかわらず地震サイクル間で減少を示し、顕著な差異はみられなかった。なお、ここでのSSEは、各要素上ですべり速度が沈み込み速度の2倍を超えた期間に5mm以上のすべり量があった場合とし、その開始時間を各要素上でのSSEの発生時として検出した。SSEと潮汐の位相の関係については、その発生時が、剪断応力が最大かつ法線応力が最小となる潮汐の位相を中心に分布する結果が得られた。剪断応力最大から-30度から30度の位相の範囲内に発生時が入る割合は、地震後5~35年目、35~65年目、65~95年目について、それぞれ22.7%、22.7%、22.2%となった。いずれも一様な発生から期待される16.7%よりは、やや高い値となっており、潮汐による応力変化がSSEの発生に一定の寄与をもつことは言える。しかしながら、発生サイクルにおける変化は明瞭ではない。

キーワード：スロースリップイベント、数値シミュレーション、地球潮汐

Keywords: Slow slip event, Numerical simulation, Earth tide



## 岩石の弾性波速度に対する間隙圧および亀裂分布の影響：スロースリップ発生領域で見られる高Vp/Vs比の解釈

Dependencies of pore pressure and fracture distribution on elastic wave velocities for thermally cracked rocks : Implications for high Vp/Vs zone related to slow slip events along plate boundary

西村 佳也<sup>1</sup>、\*上原 真一<sup>2</sup>、溝口 一生<sup>3</sup>、瀬戸 滉平<sup>2</sup>、河島 憲司<sup>2</sup>

Kaya Nishimura<sup>1</sup>, \*Shinichi Uehara<sup>2</sup>, Kazuo Mizoguchi<sup>3</sup>, Kohei Seto<sup>2</sup>, Kenji Kawashima<sup>2</sup>

1.東邦大学大学院理学研究科、2.東邦大学理学部、3.電力中央研究所

1.Graduate School of Science, Toho University, 2.Faculty of Science, Toho University, 3.Central Research Institute of Electric Power Industry

Seismic studies have found that there are high Vp/Vs ratio regions in oceanic crusts at subducting oceanic plates (e.g., Cascadia (2.0-2.8) (Audet et al., 2009), Nankai trough (> 2.03) (Kodaira et al., 2004)), and the correlations between the location of high Vp/Vs and slow slip zone have been pointed out by several studies. Christensen (1984) indicated that high pore pressure may cause high Vp/Vs. It is also known that Vp/Vs also depends on porosity or pore structures (fracture distributions). However, the relationships between Vp/Vs, pore pressure, porosity and fracture distribution have not been investigated in detail for rocks composing oceanic crusts.

This study reports the results of measurements of Vp and Vs (transmission method) at controlled confining and pore pressure and estimation of Vp/Vs ratio for thermally cracked dolerite and relation between Vp/Vs, pore pressure and fracture distributions. Confining pressure was constant (50 MPa) and pore pressure was decreased from 49 to 0.1 MPa and then increased to 49 MPa. We did measurement with an intact rock specimen (0.5% in porosity) and the rock specimens heated under 300, 500 and 700°C for 24 hours (2.1%, 3.4% and 3.5% in porosity, respectively). Rock specimens heated under 500 and 700°C were reddish in color, which suggested a possibility that not only cracking but also oxidizations of rock forming minerals might affect elastic velocities. Therefore, we operated elastic velocity measurements under atmospheric pressure with rock specimens heated under 500 and 700°C at air (an oxygen concentration is around 21%) and at nitrogen conditions (an oxygen concentration is less than 0.5%), and revealed that the effect of oxidization on Vp/Vs is several times less than the effect of heating-temperature conditions.

In this experiments, for the intact rock specimen and specimen heated under 300°C, Vp and Vs was almost constant at any pore pressure, and for specimen heated under 300°C, Vp/Vs was 1.7 to 1.8, which is less than the high Vp/Vs ratio observed at oceanic crusts of subducting plates. On the other hand, for specimens thermally cracked under 500 and 700°C, Vp/Vs increased as pore pressure was increased (effective pressure was decreased), and was more than 2 when pore pressure was over 40 MPa and 30 MPa, respectively. This results indicate that Vp/Vs is not over 2 unless porosity is larger enough (approximately 3% for the results in this study), even if pore pressure is higher. We also observed fractures in the specimens by using a microscope, and measured fracture densities. The fracture densities for the specimens heated under 500 and 700°C were larger than that of the intact rock specimen. There was no clear difference on the fracture density between the specimens heated under 500 and 700°C, but microscope observations revealed that there was differences on fracture distributions such that fine net-like fracture distributions or networks of intra-mineral fractures were observed more for the specimen heated under 700°C than that under 500°C. These features on fracture distributions might affect elastic velocities. In general, high Vp/Vs near slow slip zones tends to be simply interpreted as high pore pressure, but it may also be influenced by porosity and features of fracture distributions.

This work was supported by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (Grant Number 26400492) .

キーワード：高Vp/Vs、室内実験、亀裂密度、高間隙圧

Keywords: high Vp/Vs, laboratory experiment, fracture density, high pore pressure

大型二軸摩擦実験において示された断層面の成熟度がスロースリップの活動に与える影響  
Effect of fault surface evolution on slow slip behaviors in large-scale biaxial experiments

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

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

より現実に近い条件下において主破壊に先行する準備過程を調べるため、防災科学技術研究所が所有する大型二軸摩擦試験機を用いたスティックスリップ実験をおこなった。岩石試料として接触面が長さ1.5 m、幅0.1 mとなる二つの直方形の変はんれい岩を用いた。複数の実験を同じ岩石試料を用いて繰り返しおこなったため、断層面の粗さは摩擦すべりによって発達していった。垂直応力6.7 MPa、载荷速度0.01 mm/sの条件下において3回1組で連続した実験をおこなったが、それぞれの実験ごとに全ての摩耗物を取り除いた。断層面の成熟度を加速させるため、各組の実験の間に高速の载荷速度かつ長距離のすべり距離の実験をおこなった。その結果、異なる3つ成熟度ステージI, II, IIIにおける実験結果を得た。全ての実験において多数のスティックスリップイベントが観測され、その数は断層の成熟度とともに増加する傾向にあった。断層沿いに設置したひずみゲージアレイの記録から、せん断応力降下のゆっくりとした伝播が確認された。これは主破壊の前のスロースリップに起因するものと考えられる。スロースリップが始まった場所と主破壊に対する相対的な時刻を調べたところ、その時空間分布が断層面の成熟度に依存して変化していることが明らかとなった。ステージIではその分布は時間的にも空間的にも単調であったが、ステージIIおよびIIIでは相対的なすべり開始時刻にばらつきが生じていた。また、ステージIおよびIIでは、すべり開始場所が初期垂直圧力の分布と調和的であることが分かった。この初期圧力分布は感圧紙 (Fujifilm PRESCALE LW) を用いて各実験の直前に測定されたもので、スロースリップは初期圧力が極小値を示す場所からすべり始めていた。一方、ステージIIIにおいてはすべり開始場所と初期圧力との間にそのような関係は確認できなかったが、一部の開始場所は摩擦すべり中に生成された摩耗物の分布と調和的であった。これらの結果は断層面が成熟するにつれてスロースリップの振る舞いが複雑になることを示唆している。

キーワード：スロースリップ、断層成熟度、摩擦実験

Keywords: Slow slip, Fault evolution, Friction experiment

## 斑レイ岩の中-高速度域速度急変実験において観察された過渡的摩擦挙動

## Transient Frictional Behavior Observed in the Velocity-Stepping Test of Gabbro Conducted at Intermediate to High Slip Velocities

\*中野 龍二<sup>1</sup>、堤 昭人<sup>1</sup>\*Ryuji Nakano<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

Since Brace and Byerlee [1966] suggested that frictional stick-slip sliding plays an important role in seismic faulting, a number of friction experiments have been carried out. One of the greatest achievements is a proposal of rate- and state-dependent friction constitutive law by Dieterich [1978]. This law has been widely used for simulating earthquake cycles, but the law was originally proposed at low slip velocities of the order of  $\text{sub-mms}^{-1}$ , and it has not been clarified whether rate- and state-dependent friction constitutive law can be applied to frictional phenomena at seismic faulting slip velocities (the order of  $\text{ms}^{-1}$ ).

In this study, we modified a rotary-shear friction apparatus at Kyoto University and performed a series of intermediate to high slip velocity friction experiment with velocity stepping by using this apparatus. In this experiment, we used a pair of hollow cylindrical gabbro blocks with an inner-diameter of 26 mm and an outer-diameter of 40 mm, and changed the rotation rate of the servomotor in this apparatus from one value to another; hereinafter we call the former value *IRPM* and the difference value between the former and the latter *ΔRPM*, respectively. We selected all the combinations of *IRPM* and *ΔRPM* throughout this experiment: a value of *IRPM* of either 10, 20, 50 or 100 RPM, and a value of *ΔRPM* of either 30, 80, 150, 200, 300 or 400 RPM. This experiment was carried out under a constant normal stress of 1.5 MPa.

The friction response to the imposed slip velocity steps is characterized by two strength peaks and slip-weakening phases that follow each of the peaks. Typical behavior of the transient was observed in the tests conducted at an *IRPM* value of 20 RPM and a *ΔRPM* value of 200 RPM. Rotation rate overshoots the target value once and is converged to the value while oscillating because of high value of the speed loop gain integration time constant of the servomotor in this apparatus during this experiment. Considering this servomotor behavior, the first strength peak is reached while the rotation rate is accelerating, and the second peak is reached when the rotation rate reaches its peak value. Interestingly to note, the transient behavior of friction response recorded in this study is similar to those observed in friction melting experiments [e.g., Hirose and Shimamoto, 2005]. There are many kinds of friction constitutive law, but existing friction constitutive laws may not describe this behavior. A constitutive model for frictional sliding that is capable of describing the transient behavior observed at intermediate to high slip velocity tests in this study is required to be developed.

キーワード：摩擦実験、摩擦構成則、中-高すべり速度

Keywords: Friction experiment, Friction constitutive law, Intermediate to high slip velocity

## 沈み込み前後の海洋地殻物質の摩擦特性

## Frictional properties of pre- and post-subducting oceanic basement rocks

小濱 賢<sup>1</sup>、\*北村 有迅<sup>2</sup>、堤 昭人<sup>3</sup>Ken Kohama<sup>1</sup>, \*Yujin Kitamura<sup>2</sup>, Akito Tsutsumi<sup>3</sup>

1.鹿児島大学理学部地球環境科学科、2.鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻、3.京都大学大学院理学研究科

1.Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University,

2.Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering,

Kagoshima University, 3.Graduate School of Science, Kyoto University

On the faults in the subduction plate boundary, fault slips when the shear stress exceeds the strength of the rock interface between the hanging and footwall. Seismic slip is associated when the frictional strength decreases with the slip. The up-dip limit of the seismogenic zone coincides with the stepping down of the décollement to the oceanic basement. Seismogenic process is thought to undergo in the upper part of the oceanic crust (Kimura and Ludden, 1995; Bangs et al., 2009). Tectonic mélanges of the Shimanto belt which is formed along the plate boundary fault zone (Kitamura et al., 2005) contains basalts with cataclastic shear zones. To understand the seismogenic process, therefore, basalts are key material and it is essential to know their frictional properties. Here we performed frictional experiment on the basalts from pre-subduction drilled core in the Nankai trough and post-subduction outcrop in the Shimanto belt.

We performed friction experiments using the rotary shear, an intermediate to high velocity frictional testing apparatus in Kyoto University. Basalt samples were taken from IODP Expedition 333 Site C0012 as pre-subduction materials (C12G8R, C12G10R) and from the Mugi tectonic mélange as postsubduction material (MBN-3). We performed constant low velocity test with normal stress of 2 MPa and rotational speed of 0.012 r.p.m with all three samples, and velocity stepping test to evaluate the velocity dependence with two samples (C12G8R, MBN-3) with normal stresses of 2 MPa and 5 MPa.

Results of the constant low velocity test showed the steady frictional coefficient of C12G8R, C12G10R and MBN-3 ranging from 0.70 to 0.84 (average 0.76), from 0.60 to 0.79 (ave. 0.67) and from 0.50 to 0.63 (ave. 0.57), respectively. On the velocity stepping tests, C12G8R and MBN-3 with normal stress of 2 MPa showed neutral dependence of the friction coefficient to the velocity. But, C12G8R with normal stress of 5 MPa showed velocity strengthening behavior and MBN-3 with normal stress of 5 MPa showed velocity weakening behavior.

The constant low velocity tests revealed that the frictional coefficient of MBN-3 is lower than those of C12G8R/C12G10R. This implies that the post-subduction basalt is essentially weaker. From the results of velocity stepping tests, pre-subducting basalt (C12G8R) without preexisting gouge on the interface (5 MPa, menu 1) showed notable velocity strengthening. Other runs at 5 MPa are velocity neutral or strengthening. On the other hand, post subducting basalt (MBN-3) showed velocity weakening at 5 MPa, menu 1 and 2. These results suggest that the subducting oceanic crust progressively changes its frictional property that enables the rocks to be potent in seismogenesis may leading to the stepping down of the décollement to the oceanic basement at the up-dip limit of seismogenic zone.

## Reference

BANGS, N. L. B., et al. Broad, weak regions of the Nankai Megathrust and implications for shallow coseismic slip. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284.1: 44-49.

KIMURA, Gaku; LUDDEN, John. Peeling oceanic crust in subduction zones. *Geology*, 1995, 23.3: 217-220.

KITAMURA, Yujin, et al. Mélange and its seismogenic roof décollement: a plate boundary fault rock in the subduction zone—an example from the Shimanto Belt, Japan. *Tectonics*, 2005, 24.5.

キーワード：南海トラフ、四万十帯、摩擦実験、玄武岩、速度弱化

Keywords: Nankai Trough, Shimanto Belt, Frictional experiment, basalt, velocity weakening

## 石英質岩の摩擦弱化過程における断層表面の状態変化

## Evolution of fault surface state during frictional weakening of quartz rocks

\*飯田 大貴<sup>1</sup>、堤 昭人<sup>1</sup>\*Hirotaka Iida<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

中-高速のすべり速度域において、摩擦溶融、thermal pressurization、flash heating等、高い摩擦熱を要因とするさまざまな摩擦強度弱化の機構が提唱されている。近年、ノヴァキュライトやクォーツアイトなどの石英質岩が、1 mm/s >という比較的低いすべり速度域において摩擦弱化を起こすことがGoldsby and Tullis [2002]、Di Toro et al. [2004]等によって報告され、摩擦発熱を必要としない弱化現象として注目を集めている。Goldsby and Tullis [2002]等は摩擦表面に形成される水和化非晶質シリカのガウジがこの弱化の原因であると説明したが、弱化開始時においてガウジが水和化、非晶質化を起こしていることは確認されていない。本研究では、弱化の進行に伴い摩擦表面でどのようなプロセスが進行するかを調べることを目的とし、摩擦表面の状態変化、表面に形成されるガウジの非晶質化の二点についてそれぞれ観察、分析を行った。実験は京都大学の回転式中-高速摩擦試験機を使用し行った。実験試料には人工水晶とチャートの二種類の試料を用いた。実験の垂直応力、すべり速度条件は、先行研究と摩擦データの比較を行うことを目的とし、Hayashi and Tsutsumi [2010]と同じ条件である、垂直応力1.5 MPa、すべり速度105 mm/s、10.5 mm/s、1.05 mm/sという値に設定した。実験の結果、人工水晶、チャートの両試料について、105 mm/s、10.5 mm/s、1.05 mm/sの速度条件で、実験開始直後にすべり距離に依存する摩擦のすべり弱化が確認された。また、両試料について、10.5 mm/s、1.05 mm/sの速度条件で、すべり弱化終了後に断層部の厚さ変化を伴う摩擦係数の変動が起こることが確認された。本研究での実験結果から得られたすべり弱化距離とHayashi and Tsutsumi [2010]で報告されたすべり弱化距離の比較を行ったところ、本研究でのすべり弱化距離の方が一桁以上小さいという結果が得られた。この差の原因は、本研究においてのみ実験準備の段階で行われた摩擦表面の片当たりの解消作業であると推定される。各速度において摩擦データを測定した他、105 mm/sの実験開始時のすべり弱化に注目し、弱化過程におけるいくつかのすべり距離で実験を終了し、実体顕微鏡、SEMによる摩擦表面の観察を行った。観察の結果、ほぼすべての試料の摩擦表面において、試料のせん断方向側がめくれ上がった100~300 μmほどの特徴的な非対称構造が形成されていることが確認された。XRD分析の結果、弱化後大変位せん断を経験したチャートにおいてのみ非晶質化を示す $2\theta=20\sim30^\circ$ に現れる幅広いピークが確認された。Hayashi and Tsutsumi [2010]のXRD分析では、弱化後に大変位せん断を経験したのものについて、人工水晶、チャートともに非晶質化が確認されている。本研究での結果はこれと異なる。Goldsby and Tullis [2002]は石英質岩の弱化の原因は摩擦表面に形成される水和化非晶質シリカのガウジであると説明している。本研究におけるXRD分析の結果から、すべり弱化中、弱化終了直後のすべり距離においてはガウジの非晶質化は起こっていない可能性が示された。

## 大型岩石試料のスティックスリップ試験中に発生した前震活動

## Foreshock activity during stick-slip experiments of large rock samples

\*辻村 優志<sup>1</sup>、川方 裕則<sup>1</sup>、福山 英一<sup>2</sup>、山下 太<sup>2</sup>、徐 世慶<sup>2</sup>、溝口 一生<sup>2,3</sup>、滝沢 茂<sup>2</sup>、平野 史朗<sup>1</sup>

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

1.立命館大学、2.防災科学技術研究所、3.電力中央研究所

1.Ritsumeikan University, 2.NIED, 3.CRIEPI

For inland earthquakes such as the 2007 Noto Hanto earthquake (Doi and Kawakata, 2013) and the 2008 Iwate-Miyagi earthquake (Doi and Kawakata, 2012), foreshocks were reported to occur in the vicinity of main shock hypocenter. Moreover, for interplate earthquakes such as the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Kato, et al., 2012) and 2014 Iquique earthquake in Chile (Yagi et al., 2014), migration of foreshocks toward the main shock hypocenter was detected in one month before the main shock. In order to understand the generation mechanism of foreshocks, it is important to investigate under what environments foreshocks occur.

Since 2012, stick-slip experiments have been carried out using a large-scale biaxial friction apparatus at NIED (e.g., Fukuyama et al., 2014). Based on the experimental result that foreshocks were detected only in the later period of each run, Kawakata et al. (2014) suggested that the foreshocks occur only after the generation of gouge. In this study, we carried out a series of stick-slip experiments with and without pre-existing gouge along a fault plane to confirm if fault gouge affects the foreshock activity. When foreshocks are detected, we estimate the hypocenter locations of foreshocks.

We used two rectangular metagabbro blocks to make the simulated fault plane, whose dimension was 1500 mm long and 500 mm wide. The experiments were conducted under normal stress of 1.33 MPa and loading speed of 0.01 mm/s up to approximate slip amount of 8 mm. During each experiment, we continuously measured elastic waves to detect foreshocks. The sensor distribution is shown in the figure below. Gouge materials were prepared naturally during preceding experiments whose sliding speed was as high as 1 mm/s.

To roughly detect foreshock activity, we calculated cumulative amplitude of continuous waveform data every 0.01 seconds. During an experiment without pre-existing gouge materials (LB13-004), a few foreshocks were detected. On the other hand, during an experiment with pre-existing gouge materials (LB13-007), much more foreshocks were detected. Then we estimated hypocenters of foreshocks for a stick-slip event (event 44) in LB13-007. Although the initial phases of the main shock were contaminated due to the coda wave signals of preceding foreshocks, the hypocenter of the main shock was roughly estimated near the right end of the fault plane. Foreshocks began to occur in the left half of the fault plane, but most of later foreshocks occurred near the right end. Therefore, we confirmed that foreshock activity was high when gouge materials were present along a fault plane, and found a similar hypocenter migration of foreshocks toward the main shock hypocenter, which was reported for interplate earthquakes.

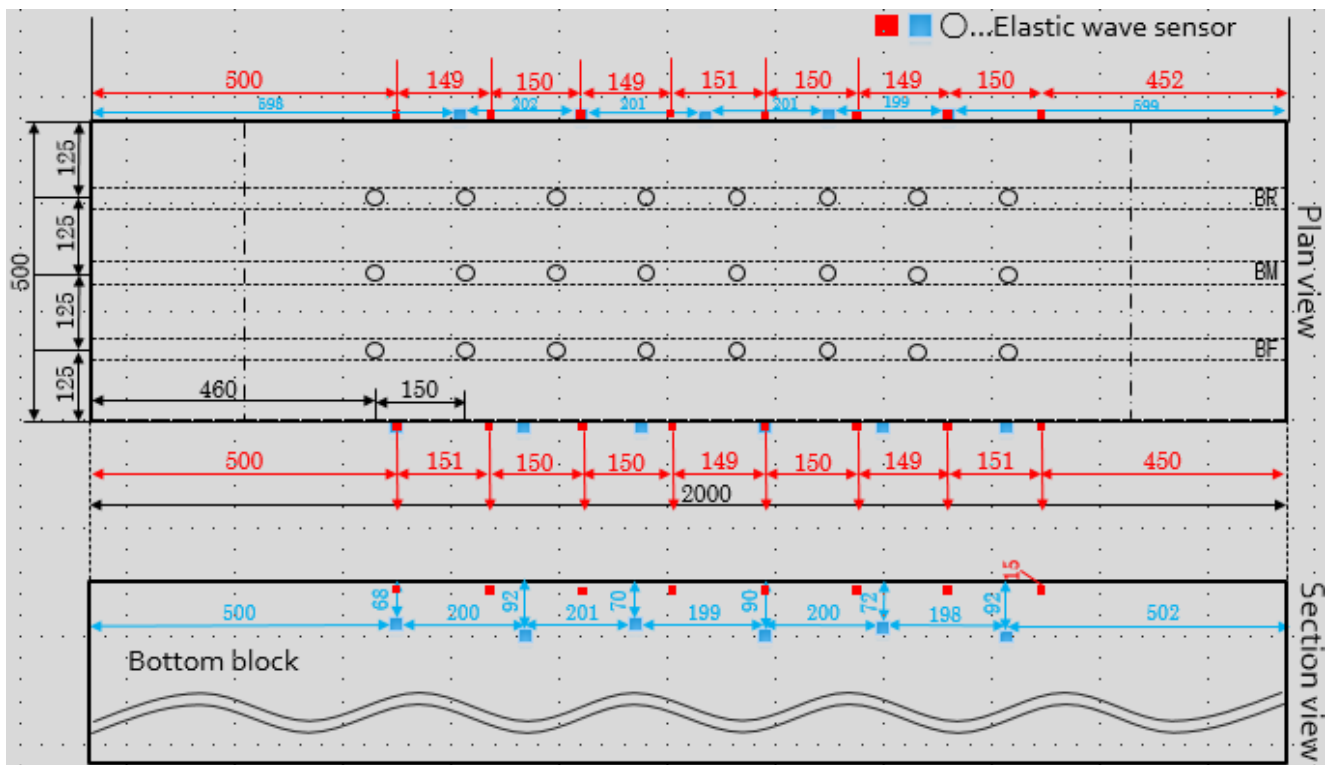
In the future, we shall examine the data obtained from other experiments to confirm if the aforementioned features are common.

Acknowledgments: This work was supported by NIED research project "Development of monitoring and forecasting technology for crustal activity" and JSPS KAKENHI Grant Number 23340131.

キーワード：大型二軸せん断実験、前震活動、断層ガウジ



Keywords: large-scale biaxial experiments, foreshock activity, fault gouge



間隙水圧一定条件下の大変位剪断摩擦実験におけるスメクタイトを含むガウジの摩擦性質  
Frictional behavior of smectite-bearing fault gouges in large displacement frictional experiments under constant pore pressure

河合 智章<sup>1</sup>、\*堤 昭人<sup>1</sup>

Tomoaki Kawai<sup>1</sup>, \*Akito Tsutsumi<sup>1</sup>

1.Graduate School of Science, Kyoto University

1.Graduate School of Science, Kyoto University

Frictional properties of smectite-bearing material at large displacements should provide valuable information for the stability of slip in the shallow parts of subduction zone faults. However, most of the previous experiments are limited by the amount of displacement that can be achieved and the frictional behavior at large displacements remains poorly understood. In this study, we have conducted large displacement friction experiments on mixtures of montmorillonite and quartz at constant pore pressure. Our purpose of this study is to investigate the correlations between gouge textures and frictional velocity dependence of smectite-bearing faults.

We examined frictional behavior and internal textures of simulated gouge samples composed of montmorillonite/quartz mixtures. Two different compositions of the gouges were tested: mixtures of montmorillonite/quartz = 20/80 (abbreviated as Mnt20/Qtz80) and 40/60 wt% (Mnt40/Qtz60), respectively. We sheared the gouges in rotary shear to displacements of more than 1 m at a normal stress of 10 MPa and at a constant pore pressure of 5 MPa. During the shearing, these gouges were subjected to velocity step changes to examine the velocity dependence of friction for a range of slip velocities  $v$  from 0.003 to 0.3 mm/s.

Results of the experiments reveal influences of the composition, displacements and slip velocities on the frictional behavior. Both Mnt20/Qtz80 and Mnt40/Qtz60 gouges show slip-hardening behavior. Positive friction velocity dependence was observed in both gouges at short displacement for all the tested slip velocities. At large displacement ( $v > 30$  mm), Mnt20/Qtz80 gouge shows negative friction velocity dependence for all the tested slip velocities. On the contrary, friction of Mnt40/Qtz60 gouge exhibits negative velocity dependence for lower velocities (0.003 mm/s to 0.03 mm/s) and positive velocity dependence for higher velocity stepping (0.03 mm/s to 0.3 mm/s). The SEM observation of the Mnt20/Qtz80 gouge reveals that montmorillonite particles are agglomerated initially to form montmorillonite-filled matrix domains. With continued displacement, the agglomerated distribution of montmorillonite becomes to be disaggregated; eventually the montmorillonite particles are incorporated into the fine-grained matrix of the gouge. Grain size of quartz decreases with displacement, during which change the grain shape of the quartz becomes to be more rounded. It appears that increasing degree of size reduction of quartz grains and a more scatter distribution of montmorillonite particles correlate with a more negative velocity dependence of friction.

キーワード：摩擦速度依存性、モンモリロナイト、大変位

Keywords: velocity dependence of friction, montmorillonite, large displacements

## シュードタキライト黒色化の実験的検証

## Experimental demonstration for blackening of pseudotachylyte

\*中野 友貴<sup>1</sup>、金木 俊也<sup>1</sup>、廣野 哲朗<sup>1</sup>

\*Yuki Nakano<sup>1</sup>, Shunya Kaneki<sup>1</sup>, Tetsuro Hirono<sup>1</sup>

1.大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

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

地震時の摩擦溶融によって形成されると考えられるシュードタキライトは、黒色だけでなく緑黒色および灰黒色を呈することもある。その色の原因は、鉱物組成や断層の滑りパラメータ（温度など）および環境条件に関係すると考えられるが、それらの関連性はほとんど研究されていない。そこで、本研究では、石英・アルバイト・黒雲母・緑泥石を用いた人工試料を準備し、高温加熱炉にて、シュードタキライト生成の模擬実験を実施した。その結果、1300℃加熱させた石英とアルバイトの混合試料では有意な黒色化を示さなかったのに対し、黒雲母10 wt.%および（もしくは）緑泥石10 wt.%を混合させた試料では、顕著な黒色化を呈した。実験試料のSEM-EDS観察の結果、鉄を含む鉱物の存在が黒色化に大きく寄与していると推定される。

キーワード：シュードタキライト、黒色化

Keywords: pseudotachylyte, blackening

下部地殻の塑性領域におけるシュードタキライトの形成：中央オーストラリアWoodroffe衝上断層からの証拠

Formation of pseudotachylyte in the lower crust plastic regimes: Evidence from the Woodroffe thrust, central Australia

\*佐津川 貴子<sup>1</sup>、林 愛明<sup>1</sup>

\*Takako Satsukawa<sup>1</sup>, Aiming Lin<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, Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University

Most reported fault-related pseudotachylytes are cataclasite-related, which have formed at shallow depths in brittle dominated seismogenic fault zones by both frictional melting and crushing mechanisms. Pseudotachylyte has also been described in association with mylonitic rocks having formed in deep-level fault shear zones within the semi-brittle to crystal-plastic regimes. However, the mechanism of coseismic shear zone formation in the lower crust is still poorly understood. A >3.0 km-wide pseudotachylyte generation zone including a 1.5 km-wide mylonitized shear zone marked by large volumes of sub-mm- to cm-scale pseudotachylyte veins is developed along the Woodroffe thrust (central Australia) (Lin et al., 2005; Lin, 2008). The pseudotachylytes display typical melt-origin features, including rounded and embayed clasts, spherulitic and dendritic microlites, and flow structures within a fine-grained matrix. Three types of pseudotachylyte are identified on the basis of deformation texture, vein morphology, and host rock lithology: cataclasite-related (C-Pt), mylonite-related (M-Pt), and ultramylonite-related (Um-Pt). The textural and structural relationships between these pseudotachylyte veins and wall rocks indicate multiple stages of pseudotachylyte veins that formed at different times and depths.

Preliminary works have been performed by Lin et al. (2005) and Lin (2008), which have reported large volumes of coexisting C-Pt, M-Pt, and Um-Pt in cataclastic and mylonitic rocks within individual shear zones along the Woodroffe thrust. The M-Pt and Um-Pt veins contain distinct evidence of ductile deformation, including flattened and aligned fragments of host rocks that were re-oriented parallel to the foliation within the mylonite and ultramylonite, as evidenced from the continuity of the foliation between the host rock and vein fragments. These M-Pt and Um-Pt veins generally cut across the mylonitic foliation, and can locally be traced back to parent veins oriented parallel to the mylonitic foliation. These overprinting structural relationships indicate that repeated pseudotachylyte-generating events occurred within the crystal-plastic dominated shear zone and that the pseudotachylyte veins themselves were mylonitized during ongoing plastic deformation. Here, we describe the microstructural and chemical characteristics of pseudotachylytes and discuss the processes leading to coseismic shear zone formation in the lower crust.

References:

Lin, A. et al., 2005, Propagation of seismic slip from brittle to ductile crust: Evidence from pseudotachylyte of the Woodroffe thrust, central Australia. *Tectonophysics* 402, 21-35.

Lin, A., 2008. Seismic slip in the lower crust, inferred from granulite-related pseudotachylyte in the Woodroffe thrust, central Australia. *Pure and Applied Geophysics*, 165, 215-233.

キーワード：シュードタキライト、マイロナイト、ウルトラマイロナイト

Keywords: pseudotachylyte, mylonite, ultramylonite

和歌山県日高川層群に発達する過去のプレート境界断層の構造地質学的・鉱物学的特徴  
Structural and mineralogical characteristics of an ancient plate boundary fault in the  
Hidakagawa Formation, Kii Peninsula, Japan

\*小川 文彰<sup>1</sup>、加藤 尚希<sup>1</sup>、土野池 直哉<sup>1</sup>、朝山 暁<sup>1</sup>、金木 俊也<sup>1</sup>、中野 友貴<sup>1</sup>、廣野 哲朗<sup>1</sup>

\*Takeaki Ogawa<sup>1</sup>, Naoki Kato<sup>1</sup>, Naoya Tonoike<sup>1</sup>, Satoru Asayama<sup>1</sup>, Shunya Kaneki<sup>1</sup>, Yuki Nakano<sup>1</sup>, Tetsuro Hirono<sup>1</sup>

1.大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

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

プレート沈み込み巨大地震の滑り挙動を解明するために、四国四万十帯を初め、多くの付加体にて、そこに発達する過去のプレート境界断層の様々な調査が実施されている。しかし、紀伊半島西岸では、層序学的・変形構造区分などの調査は実施されているが、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四万十帯日高川層群三尾地域に分布するメラングジュユニットに着目し、フィールド現地での地質図と変形構造区分図の作成、断層試料の微小構造観察と鉱物組成定量分析を実施した。

その結果、露頭にて高い直線性を持つ断層の滑り面において、鉱物粒子の細粒化、葉状構造、溶融の痕跡、鉱物組成の有意な変化が確認された。これらより、この滑り面は非常に強い剪断と高温を経験していると考えられる。周囲の母岩の最高履歴温度の情報についてはまだ分析中であるため、断層の温度上昇量を見積もることは出来ないが、今後は、分析を進め、地震時の滑りパラメータの定量的推定を目指したい。

キーワード：プレート境界断層、付加体、南海トラフ

Keywords: plate boundary fault, accretionary prism, Nankai trough

## 島根県中部群発微小地震分布域に見られる断層系の分布とその特徴

Distribution and characters of fault system in micro earthquake swarm area in central part of the Shimane Prefecture, southwest Japan

\*向吉 秀樹<sup>1</sup>、武島 正幸

\*Hideki Mukoyoshi<sup>1</sup>, Masayuki Takeshima

1. 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域

1. Department of Geoscience Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University

島根県中部三瓶山周辺から広島県三次市にかけて、1950年頃から現在にかけてマグニチュード(M) 5クラスの地震が6回発生している。この地域では近年においても、地震活動に伴うとされる無感地震が数多く観測されている。この群発微小地震は、2000年鳥取県西部地震(M 7.3)の余震分布とほぼ平行に北西方向に帯状に分布する。この帯状に分布する群発微小地震は、伏在する活断層の存在を示している可能性が高いと考えられる。しかし、この地域においてこれまでに活断層の報告はなされておらず、また、微小地震の分布と地質学的背景との関係についても明らかにはされていない。そこで本研究では、島根県中部群発微小地震分布域の1地域である、島根県飯南町獅子周辺において地表地質踏査を行い、微小地震分布域周辺における地質構造および断層系の分布の把握、それらの断層岩の特徴を明らかにすることを目的として調査を行った。

本調査地域には古第三紀の赤名花崗閃緑岩および石見花崗岩、八神火山岩類(服部ほか, 1983)が分布する。赤名花崗閃緑岩および石見花崗岩中には、これらを貫く玄武岩~安山岩質岩脈、流紋岩質~アプライト質の岩脈がよく発達する。

調査の結果、100本を超える断層が調査範囲において確認された。断層の姿勢は大きく北東走向高角北傾斜と西北西走向高角南傾斜の2方向に分けられる。北東走向高角北傾斜の断層は、赤名花崗閃緑岩と石見花崗岩を境する断層をはじめ、花崗岩類と岩脈との境界部など岩相境界に発達するものが多い。断層には厚さ数 mm~数10 cmの白色、淡緑色、褐色の断層ガウジを挟む。一部の断層においては、厚さ数10 cm~数 mのカタクレサイトを伴うものも見られる。特に赤名花崗閃緑岩と石見花崗岩を境する断層は、厚さ約10 cmの淡緑色の断層ガウジ、厚さ数約1mのカタクレサイト、赤名花崗閃緑岩および石見花崗岩の数10 cm~1 m程度の岩片を含む幅約20 mの変形・変質帯からなる。変質帯中には部分的に酸性岩の岩脈が見られる箇所があるが、岩脈には破砕や変形などの構造は見られない。一方、西北西走向高角南傾斜の断層は、花崗岩類と岩脈姿勢に関係なく、岩脈を切って発達するものが多い。また、断層中にカタクレサイトは含まれておらず、厚さ数 mm~数 cmの白色、淡緑色、褐色の断層ガウジを挟むという特徴を持つ。

本調査で確認された断層のうち、北東走向の断層は厚い断層ガウジやカタクレサイトを伴い、全般的に規模が大きい。しかし、その姿勢は群発地震の分布の方向とは異なっている。また、変形・変質帯内に貫入する貫入岩に破砕や変形も見られない。このことから、これらの断層は花崗岩類貫入後の古い地質時代に形成されたものであり、現在の応力場で形成されたものではないと考えられる。一方、西北西走向の断層については、岩相境界や貫入岩の姿勢と無関係に発達している。また、ほとんどの断層が厚さ数 mm~数 cm程度の薄い断層ガウジを伴っている。この断層の姿勢および断層ガウジの産状は、2000年鳥取県西部地震の余震域に見られる西北西走向の断層の特徴と非常に類似している(小林ほか, 2003; 相澤ほか, 2006)。この西北西走向の断層の分布については、2000年鳥取県西部地震の断層においては、断層が未発達の段階にあり、北西走向の深部断層の左横ずれの断層活動に伴い、右雁行する小規模なリーデル剪断面(R1面)が地表に現れたものと解釈されている。(井上ほか, 2002; 小林ほか, 2003など)。本調査地域に見られる西北西走向の断層も、断層ガウジの規模、地震分布と断層の走向の関係から、現在の応力場において、地表付近で形成された小規模なR1面に該当する可能性がある。

島根県中部の群発地震発生域における地質踏査および断層岩の記載より、群発地震発生域に北東走向と西南西走向の2種類の断層系が発達することが明らかとなった。このうち北東走向の断層は古い地質時代に形成されたものであると考えられる。また、西北西走向の断層は、現在の応力場に近い場所で形成された発達段階初期の小規模な断層群を見ている可能性がある。今後、より広範囲な地質踏査による断層分布の解明と、断層の構造

解析により、本調査地域周辺で観測される群発微小地震と地表で見られる断層の関係について明らかになると考えられる。