

## アジョイント法による準動的地震滑り面及び余効滑りの面の摩擦パラメータ同時推定 (II)

### Simultaneous estimation of frictional parameters on earthquake and afterslip rupture areas using an adjoint method(II)

日吉 善久<sup>1\*</sup>, 杉浦望実<sup>1</sup>, 石川洋一<sup>1</sup>, 加納 将行<sup>2</sup>, 宮崎 真一<sup>2</sup>, 平原 和朗<sup>2</sup>, 堀 高峰<sup>1</sup>

HIYOSHI, yoshihisa<sup>1\*</sup>, Nozomi Sugiura<sup>1</sup>, Youichi Ishikawa<sup>1</sup>, KANO, Masayuki<sup>2</sup>, MIYAZAKI, Shin'ichi<sup>2</sup>, HIRAHARA, Kazuro<sup>2</sup>, HORI, Takane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Geophysics, Kyoto Univ.

地震サイクルシミュレーションは、断層面上の多様な破壊現象が相互に関係しながら時間・空間的に繰り返し発生する状況を再現し、更なる破壊現象の予測を行なうことを目的としている。

現実には則した予測を行うためには、観測による情報を地震サイクルシミュレーションへと反映させる必要がある。Kano(2011)は、2003年十勝沖地震を2種類の滑り面(準動的地震すべり及び余効すべり)へとモデル化し、4次元変分法により観測値(すべり速度)を同化する双子実験から、余効すべり面の摩擦パラメータ推定を行った。

我々はこの双子実験を更に準動的地震すべり面の摩擦パラメータ推定へと拡張し、準動的地震すべり面及び余効すべり面の摩擦パラメータに観測情報を反映することで地震サイクルシミュレーションの予測精度向上を目指している。

この拡張のために、順方向すべり速度計算( $t$ 可変の5次元ルンゲクッタ法 (Press et al., 1993))に利用した可変計算時間刻み( $t$ )をそのまま利用できる4次元変分法データ同化システムを開発した。

この $t$ 可変データ同化システムにより時定数の大きく異なる破壊現象の組み合わせを同一の時間窓内で同化することが可能となった。その結果、地震すべり面及び余効すべり面の摩擦パラメータの推定が可能となると共に、地震すべり及び余効すべりの依存関係を考慮した解析が可能となった。

このような破壊現象の組み合わせとして以下2タイプの双子実験を実施した。

(1). 準動的地震すべりの初期フェーズ及び後期フェーズの連続データ同化:

$t$ 可変4次元変分法データ同化を採用した双子実験では、すべりの初期フェーズと後期フェーズとを連結した滑り速度時系列全体の任意の時刻に、観測データを同化できる。従って、データ同化時間窓位置と摩擦パラメータの拘束範囲との関係が時系列全体の中で把握可能となった。その結果として、準動的地震すべり面の摩擦パラメータ全てを拘束するためには、すべり速度時系列の減速部分に加えて、加速部分に観測データを同化することが必要であることが分かった。更に、線形モデルを用いた感度解析( $dV/da, dV/db, dV/dL$ )に於いても、加速部分に強い感度があることを確認した。

(2). 準動的地震すべり及び余効すべりの同時データ同化:

地震サイクルの1サイクル(準動的地震すべり及び余効すべりを含むが、次の地震を含まない)に対し、地震すべり面の各摩擦パラメータの初期値に5~10%の摂動を与える双子実験を実施し、各摩擦パラメータを真値との誤差1%以下の精度で回収できることを確認した。これは、第一推定値が真値の5~10%の範囲にあるならば、このデータ同化手法による収束解が真値である可能性が高いことを意味している。

本発表では $t$ 可変4次元変分法データ同化の利点とその限界について議論を行う。

キーワード: 地震サイクルシミュレーション, 摩擦パラメータ, アジョイント法, データ同化

Keywords: earthquake cycle simulation, frictional coefficient, adjoint method, data assimilation

## 媒質境界を伝播する定常的パルス破壊の非特異的解の数理解析 Mathematical analysis of the non-singular solution for steady state dynamic slip pulse problem on a bimaterial interface

平野 史朗<sup>1\*</sup>, 山下輝夫<sup>1</sup>

HIRANO, Shiro<sup>1\*</sup>, Teruo Yamashita<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Some major faults as represented by inter-plate faults and tectonic lines are known to be located on material interfaces whose origins are different each other. As an elasticity problem, earthquake occurring on such faults can be modelled by dynamic rupture propagation along an interface of welded two different elastic materials, which is referred to as "bimaterial". In fact, up to 30% difference in seismic wave velocities have been reported across the San Andreas and some major faults, and many researchers have investigated behaviour of such faults in many ways. Weertman (1980, JGR) analytically showed that in-plane rupture propagation along a material interface with a constant velocity changes normal stress on its slip plane in proportion to slip velocity unlike in homogeneous medium. Then, rupture propagating towards slip direction of more compliant material, which is referred to as "preferred direction", reduces normal stress and rupture towards another direction increases normal stress. This result suggests a possibility that some different phenomena may be observed depending on the propagation direction of rupture along material interface. After his work, many numerical simulations have been done. Such simulations have revealed that rupture towards preferred direction significantly increases slip velocity (Rubin & Ampuero 2007, JGR), or tends to propagate not as crack-like but as pulse-like rupture (Ampuero & Ben-Zion 2008, GJI).

On the other hand, analytical study in this field have not shown many major progresses after Weertman (1980) mainly because the analysis is highly complicated if we assume friction law dependent on normal stress change: note that the normal stress change depends on slip velocity if bimaterial is assumed. Significant results have been provided only by a few researches including Adams (2001, J. App. Mech.), and Adda-Bedia & Ben Amar (2003, J. Mech. Phys. Solids). They concluded that, as long as constant dynamic friction coefficient is assumed, only a singular solution is obtained, which represents divergence of normal stress. In general, however, analytical study plays a complementary role to numerical studies, so that progress in analytical study may be required in order to interpret results obtained by numerical studies.

In this study, we treat steady state slip pulse propagating on a bimaterial interface, construct an singular integral equation for this problem, and analyse its solution. First, we show that the singular solution obtained by previous studies yields finite energy release rate even though its singularity is, if rupture propagates towards the preferred direction, larger than the square root singularity appearing in the solution for homogeneous problem. Next, we analytically derive the condition to remove the singularity, namely the condition that the shear stress drops continuously from the peak value  $\tau_{p_0}$  to the residual value  $\tau_r$  at the pulse tip as illustrated in fig.(a);  $\tau_{0_0}$  is the background stress level. This condition is found to be a function of the stress ratio  $(\tau_{0_0} - \tau_r) / (\tau_{p_0} - \tau_r)$ , ratio  $R/L$ , propagation velocity of pulse  $c$  and propagation direction of pulse as shown in fig.(b), where  $L$  is a length of the pulse and  $R$  is a characteristic length of process zone. For a homogeneous medium, this condition have been derived by Rice et al. (2005, BSSA), which, however, does not depend on rupture velocity (solid line in fig. (b)). This result suggests that rupture towards the preferred direction requires small stress drop relative to rupture towards opposite direction if the same size of process zone is considered. That is to say, in a different point of view, rupture towards the preferred direction may generate larger process zone if the same value is assumes for the stress drop. We mention some physical implications and applicabilities of this result.

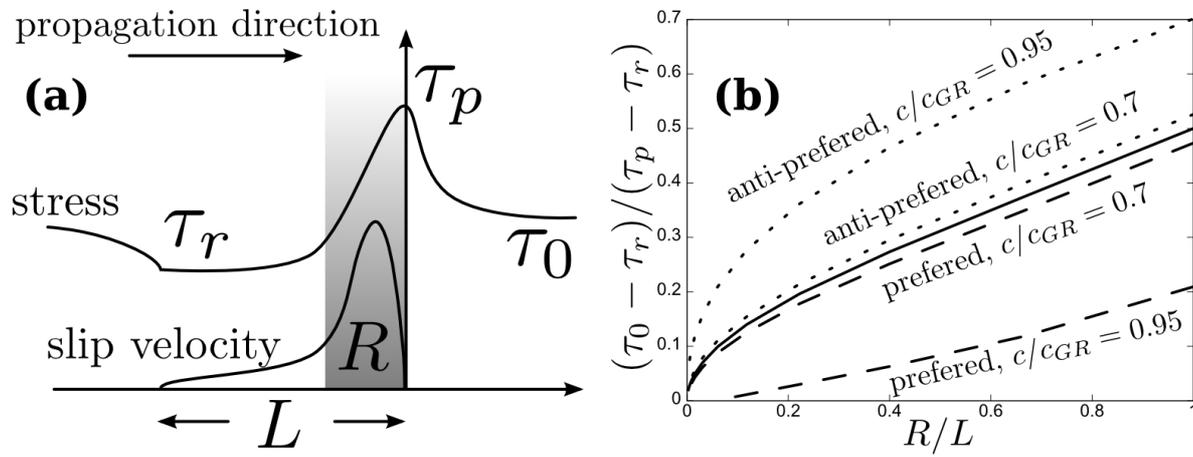
キーワード: 断層, 動的破壊, 媒質境界, スリップパルス, 解析解

Keywords: fault, dynamic rupture, bimaterial interface, slip pulse, analytical solution

SSS28-02

会場:201A

時間:5月24日 14:15-14:30



## 低角逆断層の3D動的破壊シミュレーション 3D dynamic rupture process on a shallow-dipping reverse fault

田村 慎太郎<sup>1\*</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>

TAMURA, Shintaro<sup>1\*</sup>, IDE, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地惑

<sup>1</sup>EPS, Univ. of Tokyo

東北地方太平洋沖地震の破壊過程においては日本海溝の近くでの大きなすべり量と、破壊すべりの深部への伝播が特筆すべき特徴である。これらを地震の動的破壊過程として説明することは巨大海溝型地震の巨視的物理過程を理解する上で重要であり、今後、破壊進展や津波生成の予測評価に役立つ知見となる。本研究では2層媒質境界上の低角逆断層と自由表面を3次元有限要素法を用いてモデル化し、すべり弱化則に従う動的破壊進展の数値計算を行った。本研究では初期のモデルとして、上盤(大陸プレート)と下盤(海洋プレート)の2つの均質媒質と直線からなる媒質境界断層、そして一様な初期応力場を考え、初期クラックから自発的に進展する剪断破壊のシミュレーションを行う。媒質上端が自由表面になっておりそれ以外は Perfectly Matched Layer を用いた吸収境界に囲まれている。断層の上端は自由表面に達しているものとする。破壊が自由表面に達すると反射波の影響で断層面上の法線応力と剪断応力が減少する。さらに自由表面からの反射波が再び媒質境界で反射し多重反射が起きる。この影響は低角の断層ほど強い。また、破壊が自由表面に達するとすべり速度が大きく上昇した後に深い側に反射して戻っていく。この深い側に戻るスリップパルスは上下媒質のP波速度で伝播し、東北沖地震のディレクティビティに対応すると考えられる。断層面上のすべり分布は自由表面近傍の浅い側にもっとも大きなすべり量を持ち、いくつかの地震波インバージョン研究と調和的な結果になる。自由表面の変形場は媒質の組み合わせや断層の角度によって異なる。上盤の媒質がやわらかい場合、上盤の上下方向変形量が下盤よりもずっと大きくなる。本研究で行ったシミュレーションから、東北地方太平洋沖地震の地震破壊が断層面の浅部に近づいた時に法線応力、剪断応力が大きく減少したと考えられる。但しその量や空間分布は停止条件に依存する。また、巨大津波を起こした原因の一つとして、上盤側がやわらかい媒質で低角の媒質境界断層という海底面変動量が大きくなる状況下で地震が発生したことがあげられる。

キーワード: 動的破壊問題, トレンチの破壊, 低角逆断層, 3次元 FEM

Keywords: dynamic rupture propagation, break of the trench, shallow-dipping reverse fault, 3D FEM

## Thermal pressurization を考慮した動的破壊伝播：間隙水の相変化に伴う水物性の変化の効果

### Dynamic ruptures with thermal pressurization: Effect of changes in physical properties due to phase transition of water

浦田 優美<sup>1\*</sup>, 久家 慶子<sup>1</sup>, 加瀬 祐子<sup>2</sup>

URATA, Yumi<sup>1\*</sup>, KUGE, Keiko<sup>1</sup>, KASE, Yuko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 産総研 活断層・地震研究センター

<sup>1</sup>Dept. Geophysics, Kyoto Univ., <sup>2</sup>AFERC, AIST

Phase transitions of pore water have never been considered in dynamic rupture simulations to investigate effect of thermal pressurization (TP), although they can control TP. From our 3-D numerical simulations of dynamic rupture propagation including TP in the absence of any phase transition processes of water, we predict, for a strike-slip fault under depth-dependent stress in the semi-infinite medium, that frictional heating and TP are likely to change liquid pore water into supercritical pore water. The transition from liquid to supercritical phase causes changes in viscosity, compressibility, and thermal expansion of water by a few orders of magnitude, which can affect diffusion of pore pressure. Accordingly, we performed numerical simulations of dynamic ruptures with TP, taking into account the physical properties varying with pressure and temperature of pore water. The characteristics of the rupture were examined under uniform stress in the infinite medium. The results suggest that the varying physical properties suppress the total slip amount when stresses are high at depth and shear zone thickness is small. When spatial variations of the fluid density and viscosity are allowed in the diffusion equation of pore water, the total slip amount decreases further. The results also suggest that TP reduces temperature rise in a fault zone less effectively, compared to that estimated with constant physical properties. It has been considered that TP works more effectively in thinner shear zone. Our simulations, however, show that the transition from liquid to supercritical phase can produce situations violating the relationship.

## ソースイメージングで捉えた隣接断層面への破壊の乗り移りとバリア：2000年鳥取県西部地震と2009年駿河湾地震の場合 Imaging rupture transfer to another fault plane: the 2000 Western Tottori and the 2009 Sagami-bay earthquakes

小野 浩介<sup>1</sup>, 後藤 史紀<sup>1\*</sup>, 竹中 博士<sup>2</sup>

ONO, Kosuke<sup>1</sup>, GOTO, Fuminori<sup>1\*</sup>, TAKENAKA, Hiroshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

一般に震源断層の破壊過程は非常に複雑であり、断層が複数面からなることや断層が一度に破壊することなく準備過程が存在することなどが最近に研究によって明らかにされている。本研究では、1995年兵庫県南部地震以降稠密な強震観測網が飛躍的に整備されて発生した2000年鳥取県西部地震(Mjma7.3)と特に観測点密度の高い地域で比較的最近発生した2009年駿河湾地震(Mjma6.5)の破壊初期ステージにおける複雑性について調べる。2000年鳥取県西部地震も2009年駿河湾地震も震源断層が複数の断層面から構成されていることが先行研究によってわかっており、ここでは特に1枚目の断層から2枚目の断層に乗り移る過程に着目する。稠密な強震観測網の強震波形データのP波部に初期破壊段階のイメージングに特化したソースイメージング法(Takenaka et al, 2009, EPS)を適用し、1枚目の断層面から2枚目の断層面に乗り移る過程をP波の放射強度分布によって可視化した。今回イメージング法は観測点分布の偏りを補正し空間精度を向上させる改良を行っている。イメージング結果は、両地震ともに2枚の断層面のつなぎ目付近に沿って強い放射強度を示しており、断層面間の破壊の乗り移りに係る現象ととらえることができる。詳細な解析の結果以下のことが分かった。2000年鳥取県西部地震では、1枚目の断層面(初期破壊面)は鉛直に近いが、2枚目の断層面は傾斜が緩やかで、そのつなぎ目付近が初めバリアとして働き破壊の南東方向への進行が妨げられていた。破壊開始2.7秒後に主破壊がつなぎ目付近で始まり、破壊開始後3秒過ぎ辺りでバリアを破壊して2枚目の断層面(主破壊面)へ破壊が伝わった。また、2009年駿河湾地震では、イメージング像は1枚目の断層面(南東傾斜の断層面)では初め震源付近に強い放射強度分布があったが、その後2枚目の断層面(北東傾斜の断層面)との交線(つなぎ目)に沿って非常に強い放射スポットがupdip方向に移動している。その間、2枚の断層面では破壊開始約1秒後に1枚目断層の震源の南西付近から破壊が乗り移り、さらに破壊開始1.5秒後に震源の南南東からも破壊が2枚目断層面に乗り移り、非常に強い放射を伴いながら1枚目の断層面とのつなぎ目に沿って走行方向(updip方向)に伝わっていった。後者の伝播は上述した1枚目の断層面(2枚目断層面との)つなぎ目に見られたものと同じである。1枚目断層面から2枚目断層面への乗り移りに伴って、それまでバリアとなっていた両断層間のつなぎ目が破壊され、高い放射強度分布となって見えているものと解釈できる。

謝辞：防災科学技術研究所(K-NET, KiK-net, F-net)、首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)、気象庁の強震記録を使用いたしました。記して感謝いたします。

キーワード: 2000年鳥取県西部地震, 初期破壊, 主破壊, 震源過程, 強震動, 2009年駿河湾地震

Keywords: 2000 Western Tottori earthquake, initial rupture, main rupture, source process, strong motion, 2009 Suruga-bay earthquake

## 広帯域連続集録から得られた AE のコーナー周波数と地震モーメントの関係 (2) Relationship between corner frequency and seismic moment for AE from continuous and broadband records (2)

吉光 奈奈<sup>1\*</sup>, 川方 裕則<sup>2</sup>, 高橋 直樹<sup>3</sup>  
YOSHIMITSU, Nana<sup>1\*</sup>, KAWAKATA, Hironori<sup>2</sup>, Naoki Takahashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>立命館大学, <sup>2</sup>立命館大学, <sup>3</sup>三井住友建設株式会社

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, <sup>2</sup>College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, <sup>3</sup>Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.

### はじめに

さまざまな規模の地震について、震源パラメタがどのようにスケール依存するかということは、破壊の特性を知る上で重要な問題である。これまでの研究から、 $M_w - 2$  程度までの地震について、コーナー周波数が地震モーメントの-3乗に比例するという関係(三乗則)が示されている。しかし、岩石破壊実験時に発生するさらに小さい破壊(Acoustic emission; AE)についてもこの関係が成り立つかどうかは、まだはっきりとわかっていない。

過去の岩石破壊実験で AE の集録に用いられてきた圧電素子(PZT)は共振が強く、特定の帯域でのみ感度が高いという特徴があり、スペクトル解析による震源パラメタ推定には不適であった。Sellers et al. (2003) は、大気圧下で行われた破壊試験時に広帯域集録された AE 波形から震源パラメタ推定を行い、AE の震源パラメタが自然地震におけるスケール則の延長上に位置することを示唆した。しかし、彼らの AE 集録はトリガ方式であり、トリガ後のマスクタイムに隠れた AE や、振幅の小さい AE を取りこぼしていた可能性があった。また、周波数に依存しない感度補正しか行われておらず、トランスデューサの特性が適正に除去されていたとはいえなかった。Yoshimitsu et al. (2011) では、これらの問題を解決するために、広帯域・連続で岩石の一軸圧縮試験に伴う AE の集録を行い、震源パラメタの推定を行い、AE のコーナー周波数と地震モーメントがこれまでに示唆されてきた三乗のスケール関係の延長上に位置するという結果を得た。ただし、Sellers et al. (2003) や Yoshimitsu et al. (2011) の結果からは、AE 単独で三乗則を満たすかどうかははっきりとしなかった。本研究では、Yoshimitsu et al. (2011) の結果が試料に特有なものなのか否か、また AE 単独で三乗則を満たすのかを調べるために、計測を高度化して圧縮破壊試験を行い、震源パラメタ推定を行った。

### 実験

直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱形の Westerly 花崗岩について、軸と平行方向の 6 面(60度毎、10 mm 幅)を研磨し、試料の上端面から 25 mm の位置に 3 個、下端面から 25 mm の位置に 3 個、保護用のチタン製ケースに入れた広帯域圧電トランスデューサ(感度帯域:100 - 1000 kHz)をエレクトロン・ワックスにより貼付した。さらに、感度の違いと帯域の違いを比較するため、2 つの広帯域圧電トランスデューサに隣接させて、上下端面から 15 mm の位置に従来型の PZT(中心周波数: 500 kHz)を貼付した。試料上下に取り付けた金属容器内にも各 1 個ずつの広帯域圧電トランスデューサを配置し、実験を行った。室温・乾燥・大気圧下で、破壊強度(468 MPa)に達するまで一軸での載荷を制御下で継続し、その後急速に除荷して試料を回収した。試験中に数回、各トランスデューサに矩形波を与えて透過波を計測し、試料内の速度推定を行った。さらに、レーザードップラー振動計で圧電トランスデューサ表面の振動を計測し、広帯域圧電トランスデューサの特性を推定した。

### 解析・結果

実験終了から 2 分程度前の時間帯について連続波形を調べ、振幅異常が見られた波形のうち、AE 波形と思われるものの初動(P 波到達時刻)を手動で読み取り、最小二乗法により震源決定を行った。P 波速度(円筒軸方向; 5420 m/s、動径方向; 5430 m/s)は、実験開始前に試料内を透過させた波から推定された値を用いた。イベント波形の S 波部分のスペクトルから圧電トランスデューサの周波数特性を除去することで較正を行い、解析に使用する S 波変位スペクトルを得た。

複数のトランスデューサで S/N の高い記録が得られているイベントについて、得られた変位スペクトルの低周波振幅レベル、S 波速度、震源距離を用いて、地震モーメントとコーナー周波数を推定した。得られたコーナー周波数と地震モーメントの値は、Yoshimitsu et al. (2011) によるものと近い値であり、これまでに見つかっている三乗則の延長上に位置した。このことから、個体による震源パラメタのばらつきは大きくないことがわかった。さらに、AE が単独で三乗則を満たすか否かについて検討を進める。

キーワード: コーナー周波数, 地震モーメント, スケーリング, アコースティックエミッション, 岩石破壊試験

Keywords: corner frequency, seismic moment, scaling, AE, rock fracture experiment

## 南アフリカ金鉱山地下 1km 深における多点 AE 観測と 2 つの M0 級地震に関連する AE 活動

### AE measurements at 1 km depth in a deep South African gold mine and their activities related to two M0 earthquakes

直井 誠<sup>1\*</sup>, 中谷正生<sup>1</sup>, Joachim Philipp<sup>2</sup>, 堀内 茂木<sup>3</sup>, 大槻 憲四郎<sup>4</sup>, Thabang Kgarume<sup>5</sup>, Gilbert Morema<sup>6</sup>, Sifiso Khambule<sup>7</sup>, Thabang Masakale<sup>7</sup>, 宮川幸治<sup>1</sup>, 渡邊篤志<sup>1</sup>, 森谷祐一<sup>4</sup>, 村上理<sup>8</sup>, 矢部 康男<sup>4</sup>, 川方 裕則<sup>8</sup>, 吉光 奈奈<sup>8</sup>, 小笠原 宏<sup>8</sup>, NAOI, Makoto<sup>1\*</sup>, Masao Nakatani<sup>1</sup>, Joachim Philipp<sup>2</sup>, HORIUCHI, Shigeki<sup>3</sup>, OTSUKI, Kenshiro<sup>4</sup>, Thabang Kgarume<sup>5</sup>, Gilbert Morema<sup>6</sup>, Sifiso Khambule<sup>7</sup>, Thabang Masakale<sup>7</sup>, Koji Miyakawa<sup>1</sup>, Atsushi Watanabe<sup>1</sup>, Moriya Hirokazu<sup>4</sup>, Osamu Murakami<sup>8</sup>, YABE, Yasuo<sup>4</sup>, KAWAKATA, Hironori<sup>8</sup>, YOSHIMITSU, Nana<sup>8</sup>, OGASAWARA, Hiroshi<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> GMuG, <sup>3</sup> (株) ホームサイスマメータ, <sup>4</sup> 東北大学, <sup>5</sup> CSIR, <sup>6</sup> Seismogen, <sup>7</sup> OHMS, <sup>8</sup> 立命館大学

<sup>1</sup> Univ. of Tokyo, <sup>2</sup> GMuG, <sup>3</sup> Home seismometer corp., <sup>4</sup> Tohoku univ., <sup>5</sup> CSIR, <sup>6</sup> Seismogen, <sup>7</sup> OHMS, <sup>8</sup> Ritsumeikan univ.

南アフリカ Euzlwini 金鉱山の地下 1km 深に AE センサ 28 台, 加速度計 6 台 (25kHz 加速度計 3 台, 10kHz 加速度計 3 台) を埋設し,  $M_w > -5$  の微小破壊 (AE) をターゲットにした観測 (500 kHz sampling トリガ収録) を行っている。2011 年の 7 月にはセンサ埋設がほぼ終了し, 本格的な観測がスタートした。2010 年の観測開始から 2011 年 10 月末時点まで, 約 640 万トリガ分の波形が収録されており, 鉱山内のドリリングをはじめとする Working noise を除いても, 100 万個のオーダーのイベント波形が存在する。このうち, 2011 年 8 月 17 日から 9 月 23 日のデータに対して, 走時自動検出処理プログラム (堀内・他・日本地球惑星科学連合 2011 年大会) で走時読み取り・震源決定を行い, P 波の走時読み取り数が 10 個以上, RMS 走時残差が 0.2ms 以内の基準を満たした 22 万個の AE イベントについて震源分布を確認した。AE イベントの 90% 以上は鉱脈採掘によって形成される薄板状空洞の前線に集中しており, 採掘による応力集中によって大量の AE が発生していることが確認された。また, 採掘前線から離れた場所でも数百個?数千個の AE によって構成される, 20m ~ 100m の広がりを持つ面状のクラスタが複数観測された。このうち 3 つは, 我々, あるいは鉱山の調査によって存在が知られている地質断層と調和的な震源の並びを示しており, 既存弱面に関連した活動であることは確実である。他の面状分布もこれまで知られていなかった既存弱面を描き出していると思われる。一方, 採掘前線とこれら複数の面状分布を構成する AE 活動以外の場所で, 独立して発生する AE はほとんどみられなかった。

鉱山の地質調査で見つかった断層と調和的な走向を持つあるクラスタでは, 9/21 日にイベントレートが急増し, 大森公式に従う AE 活動の減衰が確認された。この面状分布を構成する 4645 個の AE 震源に対して,  $-square$  モデルを観測スペクトルにフィッティングして  $M_w$  を推定したところ, 午前 6 時 50 分に  $M_w$  0.0, 7 時 1 分に  $M_w$  -0.2 の比較的大きな地震が発生していることがわかった。 $M_w$  0.0 以前の AE 活動 (2955 個) の時空間分布からは,  $M_w$  0.0 破壊開始点周辺への AE 活動の集中やイベントレートの明白な上昇は確認できず, むしろやや AE 活動が低調なところで  $M_w$  0.0 が発生したように見えた。 $M_w$  0.0 発生から 5 分間の余震域と  $M_w$  -0.2 の発生から 5 分間の余震域・ $M_w$  0.0 以前の AE 活動域を比較したところ,  $M_w$  0.0 前の活動は走行方向に 90m, 傾斜方向に 60m の広がりを持っていたのに対し,  $M_w$  0.0,  $M_w$  -0.2 の余震域は直径 10~15m 程度の広がりしか持っていなかった。二つの M0 級地震は既存弱面の AE 活動域の一部のみを壊したように見える。また, 7 時 1 分の  $M_w$  -0.2 の破壊開始点は, 6 時 50 分の  $M_w$  0.0 の余震域の端に位置していた。最初の  $M_w$  0.0 の破壊によってその破壊域の端に応力集中が生じ, 2 つ目の  $M_w$  -0.2 が誘発されたと考えられる。Rubin and Gillard (2000) はサンアンドレアス断層上で発生する M0.5-M3.5 の地震を調べ, 極めて近距離で連続して発生する地震の震源間距離の下限が, 最初のイベントの想定破壊半径に対応することから, 地震の破壊端の応力集中でトリガーされるイベントの存在を指摘したが, それを直接観察できたと考えられる。

キーワード: 南アフリカ金鉱山, アコースティックエミッション, 余震, トリガリング

Keywords: South African gold mines, Acoustic Emission, aftershocks, triggering

## 津波地震の震源過程とその前後の正断層型地震の活動変化

## Rupture processes of the tsunami earthquakes and seismic activity of the normal-faulting earthquake

江崎 隼輝<sup>1\*</sup>, 八木 勇治<sup>1</sup>  
EZAKI, Hayaki<sup>1\*</sup>, YAGI, Yuji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科

<sup>1</sup>Life and Env. Sci., Univ. of Tsukuba

津波地震は、比較的短い周期の地震波の振幅から推定したマグニチュードから予測される以上の大津波が発生する地震である。津波地震の多くは沈み込みプレート境界の浅部で発生していると考えられているが、その詳細な震源過程について統一的に解析された例はまだ少ない。津波地震が発生する領域での地震の震源特性を理解することは津波被害の軽減をする上でも重要である。一方で、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では多くの研究者が海溝近傍の浅い領域で大きな滑りが発生していることを指摘しており、海溝型巨大地震を議論する上でもこの領域での破壊特性を理解する必要がある。

プレート境界地震の発生メカニズムを解明するためには地震波を用いて震源過程を求めることが一つの有力な手法であるが、この領域で発生する巨大地震では構造の不均一や海底地形による多重反射した波の影響のためグリーン関数の不確定性によるモデリング誤差の影響が大きくなりやすい。この問題を解決するために、本研究では安定した解を得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 (Yagi & Fukahata, 2011, GJI) を GSN、FDSN で観測された遠地実体波 (P 波) に適用し、津波地震の詳細な震源破壊過程を求めた。

この波形インバージョン法を用いて、地震観測網が世界的に整備された 1990 年以降に発生した Mw7.5 以上のプレート間大地震の中から震源深さ 20km 以浅の津波地震の可能性をもつ大地震について解析を行った。その結果、1992 年 Nicaragua 地震、2006 年 Java 地震、2010 年 Mentawai 地震の 3 つの地震で震源から海溝付近で長い滑り継続時間が継続するという特徴を得た。滑り速度の最大値は 0.1m/sec 程度と、一般的な地震の 10 分の 1 程であるが、長い継続時間を持つために、最終的な滑り量は 1-5 m 程度となる。結果として、励起する地震波エネルギーは小さいが、海底の地殻変動は大規模となる。また、これらの地震は震源全体のモーメント速度関数が台形の様な形となることも特徴的である。

津波地震の特徴を理解するために、過去にプレート境界で発生した巨大地震の震源域での正断層型地震の活動変化を調べた。その結果、津波地震の領域で大きく滑った地震の後には震源域付近で正断層型地震が活発化し、アウターライズ域だけでなくプレート間地震で大きく滑った領域の周辺でも卓越することが分かった。このような地震活動の変化は東北地方太平洋沖地震でも同様の現象を確認することができる。長い震源時間関数と正断層型の地震活動の変化は、プレート境界浅部に蓄積された絶対歪みが部分的に解放された可能性があることを示唆する。この 3 つの地震の平均応力降下は約 0.3MPa であることを考えると、津波地震が発生する場の強度は他の領域と比して一桁小さい可能性がある。

キーワード: 津波地震, 震源過程, グリーン関数の不確定性, 正断層型地震

Keywords: tsunami earthquake, source process, uncertainty of Green's function, normal-faulting earthquake

## Tsunami Earthquakes and Their Unusual Source Character

Dun Wang<sup>1\*</sup>, James Mori<sup>1</sup>  
WANG, Dun<sup>1\*</sup>, MORI, James<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University  
<sup>1</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Updip limit of seismicity observed worldwide suggests that there is an upper transition from seismic to aseismic faulting for subduction zones, which prohibits large slip near the trench during earthquakes. Here we show, however, large amount of slip during two tsunami earthquakes are located near trench.

We use a back project method to analyze the July 17, 2006 Java (Mw 7.7) and October 25, 2010 Sumatra (Mw 7.8) earthquakes, using low- (0.03 to 0.05 Hz) and high frequency (1.0 to 10 Hz) Hi-net data. The results show that (1) the ruptures extended all the way to the trench with a relative slow rupture velocity (1.0 to 1.5 km/s), and (2) released large slips at shallow portion of the source regions (Figure 1). The source durations of 100~150 s are much longer than usual earthquakes. The large near-trench slips are coincident with the tsunami generation areas, as identified by tsunami waveform inversion and field investigation.

The correlation between seamounts and tsunami earthquake locations indicates that seamounts, which represent seafloor roughness, could be capable of increasing the locking of the subducting interface for the shallow portion of the thrust zone.

Understanding the updip locking for the shallow region of subduction zones is important for understanding tsunami earthquake mechanisms and their occurrence intervals. It is difficult to infer the updip locking from onshore observations as it may overlook the potential hazard from tsunami earthquakes. We suggest the importance of seafloor roughness and offshore observation for understanding tsunami earthquakes.

Figure 1. (a) 2010 Sumatra earthquake. Top show the seismograms recorded at station HMNH, the stacked amplitude curve and rupture velocity. The red, yellow and green lines present a rupture velocity of 1.0, 2.0, and 3.0 km/s, respectively. Bottom shows the locations, timing and amplitudes of the maximum amplitudes for the high frequency band. Red star shows the epicenter. The gray solid circles indicate the low frequency centroids. (b) Same results for the 2006 Java tsunami earthquake.

キーワード: 2006 Java earthquake, 2010 Mentawai earthquake, tsunami, seamounts, rupture process  
Keywords: 2006 Java earthquake, 2010 Mentawai earthquake, tsunami, seamounts, rupture process

