

## 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.

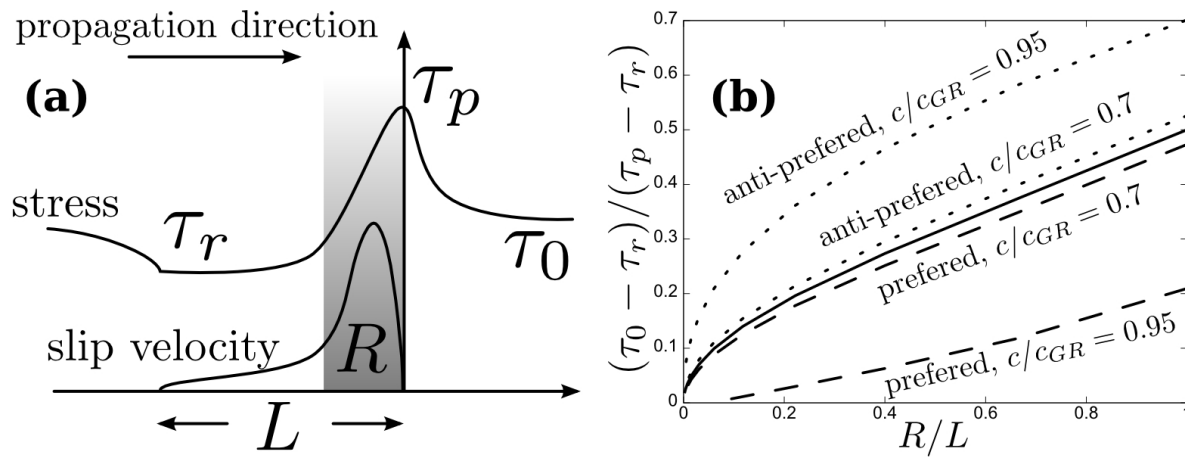
キーワード: 断層, 動的破壊, 媒質境界, スリップパルス, 解析解

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リング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リング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 Doppler 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, スケールリング, 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.

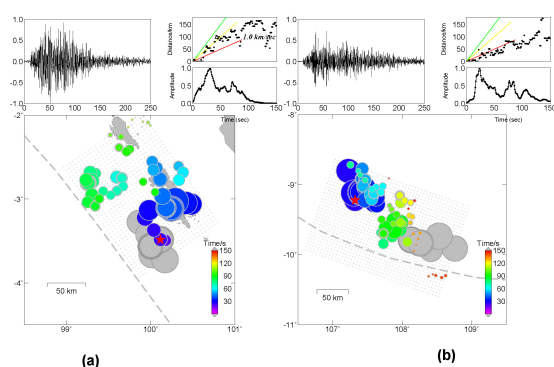
We use a back project method to analyze the July 17, 2006 Java (Mw 7.7) and October 25, 2010 Sumatra (Mw 7.8) earthquakes, using low- (0.03 to 0.05 Hz) and high frequency (1.0 to 10 Hz) Hi-net data. The results show that (1) the ruptures extended all the way to the trench with a relative slow rupture 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



## 損傷生成に関する無次元数によって特徴付けられる二次破壊の振る舞い Secondary faulting behavior characterized by nondimensional parameters associated with damage evolution

鈴木 岳人<sup>1\*</sup>  
SUZUKI, Takehito<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地惑  
<sup>1</sup>EPS, Univ. Tokyo

損傷（微小亀裂）生成の観点から、主断層の運動に伴って生成する二次破壊に見られる多様性を説明するため、無次元数を含む単純で統一的なモデルを構築する。二次破壊は、断層岩の破碎や分岐の発展のように、主断層より小さいスケールを持ってその周囲に生成するものとして定義され、損傷発展の結果生じたものであるとみなせる。それらはある時は単独で見られ、またある時は同時に観察されることがある。ここでは損傷の状態を表すものとして損傷テンソル  $D$  及び損傷によるエネルギー解放を表すエネルギー解放率テンソル  $Y$  を用い、そういった多様性を説明する。本枠組みでは、 $Y$  に対して仮定されるものとして、媒質の降伏基準  $Y_c$  も導入する。すなわち  $Y$  のある成分が  $Y_c$  を上回った時、媒質が降伏すると仮定する。また 2 次元断層を仮定する。

本枠組みでは応力の次元を持った三つの物質パラメータ  $\eta_2$ ,  $\eta_4$  及び  $Y_c$  が存在し、それらによって 2 つの無次元数が導出されることに注意する。ここで  $\eta_2$  は構成関係における損傷の「量」の効果を表し、 $\eta_4$  は構成関係における損傷の「向き」の効果を表す。無次元数  $\gamma = \eta_4 / \eta_2$  はそれゆえ損傷の分布が等方的なものからどれほど離れているかを表す指標となる。ここで損傷テンソルの固有値が、その固有ベクトルの方向を法線方向とする微小亀裂の数密度を表すことに注意する。損傷テンソル  $D$  の解析的な形から、 $\gamma = 0$  の時、その 2 つの固有値が等しいことが分かる。この時任意の方向の微小亀裂が生成されることになり、二次破壊としては無次元降伏基準  $Y_c^* = Y_c / \eta_2$  (2 つ目の無次元数) の値によらず等方的な破碎のみが起こると期待される。もし  $\gamma$  がゼロでなければ  $D$  の 2 つの固有値は異なり、 $\gamma$  の増加につれて微小亀裂の法線方向が揃ってくることになる。特に  $\gamma$  が無限大であれば、一つの固有値はゼロになり全ての微小亀裂が同じ法線方向を持つことになる。この時  $Y_c^*$  の値にほとんどよらず分岐が生成し、特に微小亀裂の方向の傾向は主断層面からの分岐発生との角度に関係している。しかし  $\gamma$  が中間の値の時、 $Y_c^*$  の値によって破碎と分岐の両者がどちらも現れることができ、特にそれを適当に選べば両者が同時に見られることもある。この時  $Y_c^*$  も二次破壊の振る舞いの決定に重要な役割を果たしていると言える。

無次元数  $\gamma$  と  $Y_c^*$  が、破碎のみか、分岐のみか、あるいは両者かという二次破壊の振る舞いの決定に重要な役割を果たしていると結論付けられる。 $\gamma$  の値が十分に小さければ、破碎のみが現れる。逆にそれが十分に大きければ分岐のみが現れる。これらの場合は  $\gamma$  のみによって場合分けされ、 $Y_c^*$  は系の振る舞いにほとんど影響を及ぼさない。破碎と分岐が同時に見られる場合は、 $\gamma$  と  $Y_c^*$  の両方の値によって特徴付けられる。

キーワード: 損傷テンソル, 無次元数, 破碎, 分岐

Keywords: damage tensor, nondimensional number, pulverization, branch development

## 境界積分方程式法による、媒質境界と交差する動的地震破壊のシミュレーション BIEM simulation for dynamic earthquake rupture that intersects with 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

Recently, seismic observations are getting more precise and have revealed heterogeneous structure near faults. For example, Kato et al. (2006, JGR) imaged the seismic structure in the source region of the 2004 Chuetsu earthquake and concluded that faults of the main shock and some major aftershocks are located near of material interfaces where seismic wave velocities change discontinuity. Moreover, Naoi et al. (2011, BSSA) analysed dynamic behaviour of a M2 earthquake that occurred in 2007 near a pre-installed observational network at the deep gold mine of South Africa and concluded that rupture extension of its fault stopped at very close to a material interface. Considering heterogeneous structures that exist universally in the Earth's crust, dynamic earthquake rupture will be affected by the existence of material interface. If fault intersects with the interface during its growth, the effect of material interface will be significant. The observational studies described above might support them.

On the other hand, almost all dynamic rupture simulations for understanding fault mechanics are based on an assumption that rupture propagates in a homogeneous medium or along a material interface. That is to say, past studies have not treated intersection of dynamic rupture behaviour with material interfaces. This might be due to difficulty and immaturity of numerical techniques to simulate dynamic rupture behaviour. A front of dynamically extending fault radiates strong perturbation of stress, so that quite high accuracy is required for the simulation. Additionally, faults are sometimes non-planar and this should be taken into account. In a framework of elasticity, one of the best techniques that meets these requirements is the Boundary Integral Equation Method (BIEM) developed by Tada and Yamashita (1997, GJI). BIEM requires analytical expression of non-hyper singular response function of an ambient system generated by slip of each discretized fault element. Previous studies, however, have derived the response function only for an infinite homogeneous medium.

In this study, we consider the intersection of dynamic rupture behaviour with material interfaces. First, in order to do so, we derive the non-hyper singular response function of two welded elastic 2-D half-spaces, which is referred to as "bimaterial", due to an anti-plane dynamic crack. Difficulty of the derivation of response function is resolved by treating 2-D Green's function as complex function and using the Cagniard de-Hoop's method. This analytical solution can be considered as a response of bimaterial when uniform slip rate is given on a finite planar fault. Hence this solution itself can be employed as a benchmark for a numerical simulation of a fault with uniform slip rate embedded in bimaterial. Next, we actually execute BIEM simulation by using this solution. We find that a distinct phenomenon appears on the fault after the rupture front intersects with the interface. In other words, a significant slip rate change occurs at the intersection and it propagates back towards the rupture nucleation point. Especially, on the case that the rupture extends towards more rigid material from more compliant material, this perturbation can be seen as temporal reduction of slip rate. Considering velocity weakening friction law, this implies that fault behaviour could be complex because the reduction of slip rate generates increase of friction, so that slip may stop after the rupture front intersects with the interface.

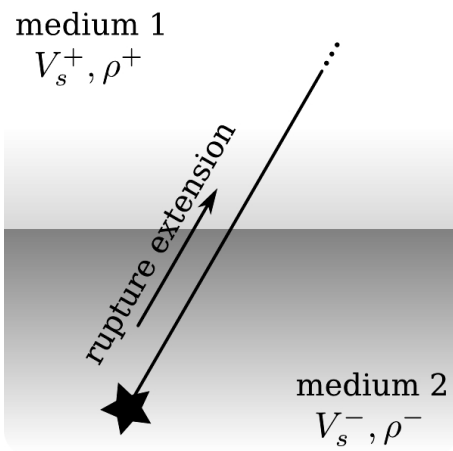
キーワード: 断層, 動的破壊, 媒質境界, 境界積分方程式法, シミュレーション

Keywords: fault, dynamic rupture, bimaterial interface, Boundary Integral Element Method, numerical simulation

SSS28-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 17:15-18:30



## 修正された滑り速度と状態に依存する摩擦構成則を用いた応力トリガリング Stress triggering with modified rate- and state-dependent friction law

藤田 哲史<sup>1\*</sup>, 亀 伸樹<sup>1</sup>, 中谷 正生<sup>1</sup>

FUJITA, Satoshi<sup>1\*</sup>, KAME, Nobuki<sup>1</sup>, Masao Nakatani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 地震研究所

<sup>1</sup>ERI, The University of Tokyo.

Rate- and state-dependent friction law (RSF) has been recently revised by Nagata et al. [2012]: its frictional parameters were replaced by experimentally corrected values in the constitutive equation and a shear stress weakening effect was incorporated in the state evolution equation. It can quantitatively simulate any kinds of rock friction data observed in hold-slide tests and velocity-step tests. Based on the revised RSF, we here re-investigated the mechanics of frictional slip on earthquake faults responsible for stress triggering because they might be wrongly inferred from the earlier flawed RSFs such as the slowness law.

Seismicity is considered as a sequence of earthquake nucleation events, which are controlled by loading history and fault frictional property. Dieterich [1994] modeled aftershock seismicity, a major part of earthquake clustering, based on the derived RSF. In his modeling, he consider an accelerating process of the slip on a fault caused by a spontaneous stress step and analytically derived time to instability. However, the aftershock productivity and duration predicted are much lower and much longer than those of observation.

Here we reconstruct the aftershock model by using the revised RSF recently proposed in order to examine how the defects in the original model are modified. Analytic derivation of the time to instability is not available in the revised RSF and we have to simulate slip acceleration process of fault population and measure the time from a stress step to instability.

Our simulation results show that the aftershock productivity with the revised RSF is around 2.0 times larger than the original, and the durations are 3 times shorter (stress step :10MPa). Our reconstruction with the revised RSF can not fill the gap between the theory and observation.

キーワード: 余震, 岩石摩擦

Keywords: aftershock, rate- state-dependent friction, triggering

## プレート境界地震の破壊開始点における破壊エネルギーの推定 Estimation of fracture energies at the rupture nucleation points of large interplate earthquakes

加藤 尚之<sup>1\*</sup>

KATO, Naoyuki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

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

Numerical simulations of recurrence of large interplate earthquakes at a subduction zone are conducted by using a rate- and state-dependent friction law to estimate fracture energies at the rupture nucleation points of large interplate earthquakes. Shear stress is concentrated near the deeper edge of a locked zone of a plate boundary and seismic rupture occurs when the energy release rate by rupture extension becomes larger than the fracture energy. The stress concentration at the deeper edge is expected to increase with aseismic slip amount at the deep aseismic slip zone, and the aseismic slip amount at the occurrence of a large interplate earthquake is equal to  $V_{pl} T_r$ , where  $V_{pl}$  is the relative plate velocity and  $T_r$  is the recurrence interval of interplate earthquakes. The fracture energy  $G_c$  at the rupture nucleation point is measured for each simulated earthquake from the relation between shear stress and slip distance. Simulation results for various values of friction parameters and effective normal stress indicate that  $G_c$  is proportional to the square of  $V_{pl} T_r$ , suggesting that  $G_c$  of interplate earthquakes can be estimated from  $V_{pl} T_r$ . The fracture energy  $G_c$  at the rupture nucleation points of M8 class Nankai earthquakes, which took place along the Nankai trough, southwestern Japan, every 100 years, is estimated to be 0.1 to 1 MJ/m<sup>2</sup>. This estimated value seems to be significantly smaller than the reported  $G_c$  values of large earthquakes in the literature. This is probably because the estimated  $G_c$  value in the present study is for the rupture nucleation point, while  $G_c$  has been estimated from dynamic modeling of developed rupture processes in many cases. The fracture energy may increase as rupture propagates because of off fault plastic deformation and/or secondary ruptures near the propagating crack tip.  $G_c$  of the 2011 Tohoku-oki earthquake of magnitude 9.0 is on the order of 10 MJ/m<sup>2</sup>, which is much larger than that estimated for the Nankai earthquakes. The region with the large fracture energy controls a very long recurrence interval and enables the accumulation of large strain energy.

キーワード: 地震サイクル, 破壊エネルギー, プレート境界地震, 応力集中

Keywords: earthquake cycle, fracture energy, interplate earthquake, stress concentration

## 簡単な地震モデルにおける頻度の大偏差関数のスケーリングと相図

## A scaling approach and a phase map of the large deviation function for frequency in a simple model of earthquakes

光藤 哲也<sup>1\*</sup>, 加藤尚之<sup>1</sup>

MITSUDO, Tetsuya<sup>1\*</sup>, Naoyuki Kato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

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

Statistical indices for characterizing earthquake are important for understanding the mechanism of earthquakes. The Gutenberg-Richter (GR) law for the earthquake magnitude is well established in seismology and it is well known that the b-value depends on time and space. However in the tail part of the distribution which corresponds to large magnitudes, the functional form is still a subject of concern not only because we want to know how frequent the large earthquakes occur but also because we have insufficient data of large earthquakes. Moreover, the estimation of frequency or probability of rare events like disastrous earthquakes is a big concern from the hazard assessment point of view.

To study further the frequency of large earthquakes, we adopt a large deviation function (LDF). The LDF is related to the probability of rare events which constitute the tail part of the distribution. In addition to the practical usefulness similar to that of log scale, the LDF is universal in the sense that it is an asymptotic form whenever the number of elements is large. In general it is difficult to calculate the exact form of the LDF. Recently, a population Monte Carlo method has been introduced to obtain the LDF of some cellular automaton models. Among those simple models, we adopt an one-dimensional forest-fire model, which can be understood as one of minimalist models for earthquakes. Recently, the configuration of ignition sites (trigger sites) is investigated in the 2D forest-fire model by Tejedor et.al.[1] where they limit and fix the trigger sites to represent various heterogeneous faults. They found that there exist some asperity regions where large earthquakes tend to occur in their models. The power-law line of the frequency distribution (GR law) is adopted as criterion for the definition of phases which are classified as subcritical, critical or supercritical.

In this study we numerically calculate the LDF for frequency in the 1D forest-fire model. The configuration dependence is examined by introducing four models of different numbers of trigger sites. A mean frequency distribution is calculated to make a phase map analogous to the one by Tejedor et.al. Among various earthquakes that occur in the model, for practical reasons, we focus on the characteristic earthquake which is the earthquake that break all the area. Next we numerically calculate the LDF for frequency of the characteristic earthquake. In all cases, the LDF display a peak structure around the mean frequency. Whether the scaled data of the LDF by the mean frequency fall on to a curve or not depends on parameters such as the number of trigger sites and the ratio between loading rate and triggering rate. When the scaling do not collapse, the system size dependence of the symmetric part differs from that of the anti-symmetric part in some region. We draw a phase map by comparing the LDF of the present model to that of the Poisson process. Finally we calculate the LDF from the real seismic catalogs and find that the LDF is different from that of the Poisson process.

[1] A.Tejedor, J.B.Gomez and A.F.Pacheco, Phys.Rev.E. 79 (2009) 0461021

Keywords: The Gutenberg-Richter law, Simulations, Scaling



## 脆性/塑性遷移領域における剪断帯の非対称性に関する考察 Rotational asymmetry of shear zone in brittle/ductile regime

塩味 悠也<sup>1\*</sup>, 田中 秀実<sup>1</sup>

SHIOMI, Yuya<sup>1\*</sup>, TANAKA, Hidemi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大 理 地惑

<sup>1</sup>Earth Planet Sci, Univ of Tokyo

応力を受けた岩石は、低温・高歪速度環境においては脆性的に割れて断層を作るが、高温・低歪速度環境においては延性的に変形して延性剪断帯を形成する。断層から延性剪断帯への、構造の空間的な移り変わりの様子への理解は、まだ十分ではない。延性剪断帯の一般的な模式図としては、Ramsay & Huber (1983) に代表されるような、最も変形が卓越している領域（以後、変形最大面）が延性剪断帯の厚さ方向の中心になるようなものが広く受け入れられている。しかし、天然の延性剪断帯を見てみると、必ずしも変形最大面が延性剪断帯の厚さ方向の中心にあるようなものばかりではなく、変形最大面が延性剪断帯の端に位置するような、いわば「非対称」なものも多く観察される。

こうした延性剪断帯の「非対称」性は、延性剪断帯の形成や断層と延性剪断帯の関係性に関する情報を含んでいる可能性がある。そこで我々は、延性剪断帯の非対称性を議論するために、「変形対称度」というパラメーターを適切に定義して延性剪断帯の非対称性を定量化することを目指す。

キーワード: 剪断帯, 非対称, 変形

Keywords: shear, asymmetry, deformation

## 数論的力学系を用いた G-R 則の解釈の試み Interpretation of the G-R law using an arithmetic dynamical system

藤原 広行<sup>1\*</sup>  
FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科研  
<sup>1</sup> NIED

地震規模と発生頻度に関する経験則として G-R 則が知られている。地震ハザード評価においては、特に、震源を特定しにくい地震のモデル化において、地震の規模別頻度に関しては G-R 則を用い、地震発生間隔に関してポアソン過程を仮定した地震活動モデルが、従来から用いられてきた。地震が臨界現象として、G-R 則に代表されるべき乗則に従うことはよく知られており、その現象論的な解釈もなされてきた。一方で、力学モデルに基づき、G-R 則を導出する試みは少ない。

ある境界条件が付加された系における臨界現象の振る舞いを知るためには、境界条件が無視できる環境下でみられる現象に対する現象論的な解釈を行うだけでは不十分である。G-R 則を産み出す力学系を構築できれば、それらに対して境界条件を付加した上での系の振る舞いについて物理的かつ定量的な考察が可能になると期待される。

以下では、単純化された地震活動モデルとして、ある領域内で発生する地震の規模、回数、発生間隔をパラメタライズすることを考える。なお、対象とする地震活動は独立なものを考え、本震・余震系列は考えない。

ここで、唐突ではあるが、 $p_i$  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を考える。

$M(p_i) = p_i - p_{i-1}$  とする。例として、最小の素数 2 から 500 万個の素数について、 $M(p_i)$  を縦軸に、 $p_i$  を横軸としてグラフを描いたところ、地震発生に関する MT 図とよく似たものが得られる。次に、それぞれの  $M(p_i)$  の値ごとに、それぞれの値をとる素数の数を調べ、 $M(p_i)$  を横軸に、出現数を縦軸にしてグラフを描くと、規模別地震発生個数の法則として有名な G-R 式と同様なべき乗則が得られることがわかる。この考察から、地震活動モデルを素数分布を用いてパラメタライズできる可能性があるのではないかと問題が提起できる。

一方、近年、数理物理学分野では、非可換幾何学の研究の一環として、数論的性質を持つ量子統計力学系としてポスト・コンヌ系と呼ばれるものが研究されている。ポスト・コンヌ系の特徴として、その系の分配関数が、リーマン・ゼータ関数となることが知られている。リーマン・ゼータ関数に対して、メルン変換というフーリエ変換と似た変換を施すことにより、素数分布に関する明示公式が得られる。リーマン・ゼータ関数の零点と明示公式を用いることにより、素数分布の性質が記述できる。

地震発生場をポスト・コンヌ系と関連づけることができ、系の時間発展、特に地震発生のモデル化を、分配関数に関する変換によって捕らえることができれば、G-R 則を産み出すような地震活動モデルを説明する力学系が得られる可能性がある。

### 参考文献

Bost, J.B. and A. Connes, Hecke algebras, type III factors and phase transitions with spontaneous symmetry breaking in number theory. *Selecta Math.* 1, 411-457, 1995.

Connes, A. and M. Marcolli, *Noncommutative Geometry, Quantum Fields, and Motives*, Colloquium Publications, Vol.55, American Mathematical Society, 2008.

キーワード: G-R 則, リーマン・ゼータ関数, リーマン明示公式, ポスト・コンヌ系, 分配関数, 素数  
Keywords: G-R law, Reimann zeta-function, explicit formula, Bost-Connes system, partition function, prime

## 釜石沖繰り返し地震の震源域で2011年東北地方太平洋沖地震後に発生したM5-6の地震の破壊過程

### The rupture process of M5-6 earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake in the focal area of the off-Kamaishi repeaters

島村 浩平<sup>1\*</sup>, 松澤 暢<sup>1</sup>, 岡田 知己<sup>1</sup>, 内田 直希<sup>1</sup>

SHIMAMURA, Kouhei<sup>1\*</sup>, MATSUZAWA, Toru<sup>1</sup>, OKADA, Tomomi<sup>1</sup>, UCHIDA, Naoki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理・予知セ

<sup>1</sup> RCPEV, Grad School of Sci, Tohoku Univ.

岩手県釜石沖のプレート境界では、M<sup>4.8</sup>の地震が約5.5年の発生間隔で繰り返し発生していることが知られている(釜石沖繰り返し地震)。この規則性は、少なくとも1957年以降、50年以上に渡って保たれて来た。従って、釜石沖繰り返し地震は、同一のアスペリティの繰り返し破壊によって引き起こされていると考えられている(Matsuzawa et al., 1999, 2002; Okada et al., 2003; Uchida et al., 2007; Shimamura et al. 2011a)。また、少なくとも1957年以降、釜石沖繰り返し地震の周辺では、それ自身よりも規模の大きい地震は起こっていない。ところが、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(M<sup>9.0</sup>)後に、数日から数ヶ月の間隔でM5-6の地震が、釜石沖繰り返し地震の震源域またはその近傍(気象庁一元化震源で1-2km)で発生している(内田, 2011; [http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/info/topics/20110311\\_news/index.html](http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/info/topics/20110311_news/index.html))。M5-6という規模から推定される破壊域の広がり(数-10km)から考えると、これらのM5-6の地震は釜石沖繰り返し地震のアスペリティを破壊した可能性が高い。

そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震後に発生したM5-6の地震と釜石沖繰り返し地震との関係を明らかにすることを目的として、震源決定と地震波形インバージョンを行った。なお、M5-6の地震のうち、2011年3月20日に発生した地震(M<sup>5.9</sup>)については、日本地震学会2011年度秋季大会において報告した(島村・他, 2011)。また、2011年3月20日(M<sup>5.9</sup>)、4月1日(M<sup>6.0</sup>)、4月13日(M<sup>5.5</sup>)、4月29日(M<sup>4.8</sup>)に発生した地震については、AGU FALL MEETING 2011において報告している(Shimamura et al., 2011b)。本研究では、島村・他(2011)とShimamura et al. (2011b)で報告された地震に加えて、5月31日(M<sup>5.3</sup>)、7月11日(M<sup>5.0</sup>)、9月23日(M<sup>5.0</sup>)に発生した地震の破壊過程を推定・比較したので、報告する。

本研究で得られた結果は以下の通り(ただし、4月1日の地震(M<sup>6.0</sup>)は除く)。東北地方太平洋沖地震後に発生したM5-6の地震は、釜石沖繰り返し地震の震源から1-2kmしか離れておらず、釜石沖繰り返し地震のアスペリティと周辺の領域を破壊した。これらの結果は、島村・他(2011)とShimamura et al. (2011b)で報告されている結果と同様の結果である。

従って、本研究の結果は、島村・他(2011)とShimamura et al. (2011b)の考察を支持するものであると判断し、解析結果を説明するモデルとして、以下に述べるモデルを提案する。これまでには、速度強化域の中に釜石沖繰り返し地震のアスペリティに相当する速度弱化域が孤立的に存在しているというモデルが提案されている(例えば、Uchida et al., 2005)。このモデルでは、上記の2つ目の結果、すなわち釜石沖繰り返し地震のアスペリティ周辺の領域が地震性すべりを起こしたという結果を説明出来ない。そこで本研究で提案するモデルには、速度強化域の中に分布しているのは速度弱化域だけでなく、Scholz (1990) や Boatwright and Cocco (1996) で述べられている“条件付き安定領域(速度弱化域であるが、摩擦パラメーター a-b がゼロに近い値)”も分布していることを取り入れる。この条件付き安定領域は普段は非地震的にすべっているが、応力擾乱が作用すると地震的にすべることがある(加藤, 1996)。従って、東北地方太平洋沖地震後に発生したM5-6の地震では、釜石沖繰り返し地震のアスペリティに加えて、周囲に分布する条件付き安定領域も地震的にすべったとすれば、観測結果を説明出来る。実際、釜石沖繰り返し地震の震源域周辺は、東北地方太平洋沖地震の余効すべりが最も大きな領域であると推定されており(Ozawa et al., 2011; 国土地理院, 2011)、その応力擾乱が作用したと推測される。

本研究では、防災技術科学研究所のK-NETとKiK-netのデータを使用致しました。記して感謝致します。

キーワード: 繰り返し地震, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: repeating earthquakes, the 2011 Tohoku earthquake

## 東北地方太平洋沖地震後の中規模固有地震活動からわかること Seismic activity of medium-scale characteristic earthquakes after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

鎌谷 紀子<sup>1\*</sup>, 勝間田 明男<sup>2</sup>

KAMAYA, Noriko<sup>1\*</sup>, KATSUMATA, Akio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象大学校, <sup>2</sup> 気象研究所

<sup>1</sup>Meteorological College, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute, JMA

東北地方太平洋沖地震後、日本周辺の地震活動が活発になっている。東北地方太平洋沖地震の震源域周辺には多くの中規模固有地震 (M4 ~ M7 程度) の発生域がある。これらの固有地震活動は東北地方太平洋沖地震後にどうなったのか。

本研究では、時間的規則性・空間的近接性・規模および地震波形の相似性に着目して鎌谷・他 (2011) が検出した中規模固有地震について、東北地方太平洋沖地震後の活動状況を調査した。検出された中規模固有地震活動のうち、東日本のものは 31 グループである。これらのうち、震央分布図および MT 図によって、東北地方太平洋沖地震後に固有地震候補が発生している可能性があるとして判断できたのは 9 グループであった。地震波形が取得できたものについて「1 観測点以上のどれか 1 成分以上で、相関係数が 0.8 以上かつコヒーレンスが 0.8 以上」もしくは「1 観測点以上のどれか 1 成分以上でコヒーレンスが 0.9 以上」というものを調べたところ、下北半島東方沖 (2011 年 10 月 7 日 11 時 51 分、M5.0、最大震度 3)、種市沖 A (2012 年 1 月 28 日 09 時 22 分、M5.7、最大震度 4、このイベントは種市沖 B の可能性もある)、種市沖 B (2011 年 5 月 8 日 05 時 52 分、M5.7、最大震度 4)、釜石沖 (2011 年 4 月 29 日 15 時 54 分、M4.8、最大震度 4 など多数、最新は 2012 年 1 月 9 日 07 時 13 分、M5.1、最大震度 3)、牡鹿半島沖 (2011 年 8 月 17 日 12 時 05 分、M5.1、最大震度 4)、いわき沖 (2011 年 7 月 8 日 3 時 35 分、M5.6、最大震度 4)、日立 (2011 年 9 月 10 日 15 時 00 分、M4.8、最大震度 4)、茨城沖 (2011 年 3 月 11 日 15 時 15 分、M7.7、最大震度 6 強)、香取 (2011 年 3 月 16 日 22 時 39 分、M5.4、最大震度 4) で最新活動が発生したことが確認できた。大きな余効変動 (国土地理院, 2011) が発生しているとされる釜石沖では、これまでの釜石沖固有地震のマグニチュード M5.0 を超える規模の地震が発生するなど活発な地震活動になっている。

東北地方太平洋沖地震の震源域に近い固有地震活動グループでは、最新活動が発生しているものが多い。これらは本来の発生時期よりも早いタイミングで発生しているものが多く、東北地方太平洋沖地震に誘発されたと考えられる。一方、厚岸沖など、震源域から離れている固有地震グループでは固有地震候補が発生していない。また、日立や種市沖 A など、震源域に近くても本来の発生時期まで時間的余裕があるグループは、東北地方太平洋沖地震直後には最新活動を発生させていなかったが、半年 ~ 1 年ほど経過した後に最新活動を発生させている。これは、余効変動により歪の蓄積が十分に行われた結果であると考えられる。これらのことから、大地震に誘発される固有地震は、大地震の震源域に近く、且つ、歪が十分蓄積されている必要があると考えられる。

キーワード: 固有地震, 繰り返し地震, 相関係数, コヒーレンス, 種市沖, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: Characteristic earthquake, Recurrent earthquake, Correlation coefficient, Coherence, Off Taneichi, the Great East Japan earthquake

## 東北地方太平洋沖地震後の種市沖の固有地震活動

### Characteristic Earthquake Sequences off Taneichi after the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

森田 裕貴<sup>1\*</sup>, 鎌谷 紀子<sup>1</sup>, 勝間田 明男<sup>2</sup>

MORITA, Yuuki<sup>1\*</sup>, KAMAYA, Noriko<sup>1</sup>, KATSUMATA, Akio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象大学校, <sup>2</sup> 気象研究所

<sup>1</sup>Meteorological college, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute

平成 23 年 (2011) 東北地方太平洋沖地震 (M9.0) が 3 月 11 日に発生した。この領域では、固有地震が多く検出されている。固有地震とは、同じ領域を定期的に破壊する、その領域で最大規模の地震である。本研究では、平成 23 年 (2011) 東北地方太平洋沖地震の震源域周辺に存在し、発生時期が近いと考えられていた種市沖の固有地震について、東北地方太平洋沖地震後の活動を調べた。

種市沖には、グループ A とグループ B という M6.0 程度の固有地震が存在し、歪みが十分蓄積されているグループ B の地震の発生時期が近いと考えられていた。1944 年、1960 年、1976 年、1993 年に発生した地震は、グループ B の地震であると考えられている。それらの地震とはほぼ同じ領域で東北地方太平洋沖地震後の 2011 年 5 月 8 日に M5.7 の地震が発生した。この地震がグループ B と同じ領域を破壊している固有地震であるか調べるため、波形の相関係数を算出した。

使用したデータは、これらの地震の震源に近く、1960 年 8 月 1 日以降移転を行っていない盛岡観測点と八戸観測点で観測された 1960 年以降の地震波形の上下動成分である。アナログ波形はマイクロフィルムに記録されている図情報を手作業で読み取り、円弧補正を施してデジタル化した。全ての波形にローパスフィルターを通し、コーナー周波数以上の高周波成分を除去して比較した。相関係数を算出する基準としたのは、1993 年の地震のデジタル波形である。

1960 年の地震のアナログ波形は記録がかすれていて読み取ることができなかった。1976 年の地震のアナログ波形と基準波形との相関係数は、盛岡観測点では 0.76、八戸観測点では 0.72 となった。アナログ波形を手で読み取ることにより、相関係数は低下すると考えられるので、同一の地震 (1993 年) のアナログ波形とデジタル波形との相関係数を算出してみた。その結果は 0.81 となり、約 20% 程度相関が低くなることがわかった。このことから、前述の 1976 年の地震と基準波形との相関係数 (0.7 程度) はかなり高いと言える。2011 年の地震のデジタル波形と基準波形との相関係数は、盛岡観測点では 0.86、八戸観測点では 0.92 と非常に高かった。一方、グループ A との相関係数は、盛岡観測点における波形の場合、0.37 から 0.66 と小さいものであった。このことから、岩手県種市沖で発生するグループ B とされていた地震は固有地震であることと、2011 年 5 月 8 日に種市沖で発生した地震が東北地方太平洋沖地震後に発生したグループ B の最新活動であることが確認できた。

ところで、はっきりと区別できるはずの固有地震であるグループ A とグループ B の地震との相関係数は、八戸観測点で 0.75 から 0.85 と高いことが判明した。これは種市沖のグループ B の固有地震は八戸観測点の方向へ破壊が進んだことが原因と考えられる。実際、八戸観測点の方が、盛岡観測点での波形より、高周波数成分が卓越していることを確認した。

種市沖グループ B のマグニチュードを調べると、巨大地震の余効変動を受けたと考えられる期間後は小さくなっており、結果として固着率が低く算出されることがわかった。その原因は、種市沖グループ B の震源域内が、固着した部分と非地震性すべりを行っている部分が存在する構造になっており、余効変動の影響を受けて非地震性すべりを行っている領域が広がり、結果として通常高速すべりをする固着部分が小さくなるからであろうと考えられる。

更新過程小標本論対数正規分布モデルを用いると、過去の発生間隔 (1944/03/10, 1960/08/13, 1976/07/08, 1993/02/25, 2011/05/08) より、種市沖 B グループの次の地震は 2026 年 10 月から 2029 年 5 月までの間に 70 % の確率で発生すると考えられる (基準日: 2012 年 2 月 1 日)。東北地方太平洋沖地震の余効変動により次の地震の発生が促進された可能性があるが、余効変動は非地震性すべり領域を拡大させることのみ働き、次の固有地震の発生を早めることなく、次回は規模の小さい地震が発生する可能性もあると考えられる。

キーワード: 固有地震, 東北地方太平洋沖地震, 余効変動, 発生確率, 種市沖, 相関

Keywords: Characteristic Earthquake, the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, after slip, probability, off Taneichi, correlation

## 近畿・中国・四国地方における繰り返し相似地震の調査

### Investigation of repeating and recurrent earthquakes in the Kinki, Chugoku and Shikoku districts

長谷川 嘉臣<sup>1\*</sup>

HASEGAWA, Yoshiomi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪管区気象台 地震火山課

<sup>1</sup>Osaka District Meteorological Observatory

固有地震・繰り返し地震・相似地震についての研究は盛んに行われており、釜石沖 (Matsuzawa *et al.*, 2002) や宮古島近海 (溜淵・他, 2010) をはじめとして、日本各地 (中村・他, 2010、鎌谷・他, 2011) で繰り返し相似地震が検出されている。このように繰り返し相似地震活動は東北地方や沖縄地方で多く見つかっているが、近畿・中国・四国地方ではそのような活動はまだ見つかっていない。本研究では、鎌谷・他 (2010, 2011) および鎌谷・勝間田 (2011) の手法をアレンジして、近畿・中国・四国地方における繰り返し相似地震活動の検出を試みた。

調査は、近畿・中国・四国地方およびその周辺で 1923 年 8 月 1 日～2012 年 1 月 31 日に発生した M3.0 以上の地震について行った。まず、緯度経度の差 2 分以内、深さの差 10km 以内、マグニチュードの差 0.5 以内の地震グループを取り出した後、グループ内で時間的に隣り合う 3 つのイベントを順次取り出し、それらのマグニチュードの平均  $M_{av}$  と発生間隔の平均  $T_{av}$  を求めた。震源の深さが 20km 以浅の地震については、発生時期順に並べて時間的に隣り合う 3 つのイベントを順次取り出し、1 番目と 2 番目及び 2 番目と 3 番目の地震の発生間隔と  $T_{av}$  との差が 1 年以内、1 番目と 2 番目及び 2 番目と 3 番目の地震の発生間隔の差が 1 年以内、1 番目と 2 番目及び 2 番目と 3 番目の地震のマグニチュードと  $M_{av}$  との差が 0.5 以内のものを抽出することにより、時間的規則性を持つ単独クラスターを検出した。震源の深さが 20km より深い地震については、 $M_{av}$  と Hanks and Kanamori (1979) によるマグニチュードと地震モーメントの関係式、Nadeau and Johnson (1998) による地震モーメントとすべり量の関係式および南海トラフにおけるフィリピン海プレートの沈み込み速度 (4.9～6.3cm/year; Wei and Seno, 1998、6.2～6.9cm/year; Miyazaki and Heki, 2001) から、マグニチュード  $M_{av}$  の地震の発生間隔の最小推定値  $T_{min}$  と最大推定値  $T_{max}$  を求め、1 番目と 2 番目及び 2 番目と 3 番目の地震の発生間隔が  $T_{min} - t_1 \sim T_{max} + t_2$  の範囲にあり、かつ  $T_{av}$  との差が 1 年以内、1 番目と 2 番目及び 3 番目の地震のマグニチュードと  $M_{av}$  との差が 0.5 以内のものを抽出することにより、時間的規則性を持つ単独クラスターを検出した。ここで、 $t_1, t_2$  はプレートの沈み込み速度の揺らぎを補正する係数である。なお、群発地震や余震を除くため、地震発生間隔が半年以内のものは除いた。抽出された地震は、気象庁一元化震源に基づいて震央分布と地震活動経過を確認し、繰り返し地震である可能性があるかと判断できたものを繰り返し相似地震候補とした。最後に、繰り返し相似地震候補について地震波形を取得して、グループ内の他地震とのコヒーレンスを算出した。

時間的規則性・空間的接近性・規模に基づいて検出された繰り返し相似地震候補グループは 16 個で、それらのうち、地震波形を取得でき、コヒーレンスが計算できた地震グループは 6 個であった。鎌谷・他 (2011) に倣い、これらの地震グループにおいて「1 観測点以上のどれか 1 成分以上でコヒーレンスが 0.9 以上」というものを調査したが、得られたコヒーレンス値はいずれもこれを満たしておらず、波形の見た目も相似ではなかった。この結果から、今回検出した地震グループは繰り返し相似地震グループではなかったと考えられる。

ところで、松原 (2006) によれば西日本では小規模な相似地震が多数検出されており、特に日向灘での活動が顕著である。また、山下・他 (2009) によれば 1 年以上の活動間隔を持つ相似地震は四国～豊後水道にかけては見つかっていない。これらのことと調査結果から、近畿・中国・四国地方では、小規模な相似地震は存在すると考えられるが、中規模またはそれ以上の繰り返し相似地震が存在する可能性は低いと思われる。しかしながら、今回調査した地域において、相似地震の繰り返し間隔が釜石沖固有地震のような安定した再来周期ではない可能性もあるため、さらなる調査が必要である。なお、今後は調査対象地域を日向灘まで広げて調査を継続する予定である。

キーワード: 繰り返し地震, 相似地震, コヒーレンス, 近畿地方, 中国地方, 四国地方

Keywords: recurrent earthquake, repeating earthquake, coherence, Kinki district, Chugoku district, Shikoku district

## 中・小地震を用いた大地震の大すべり域事前推定の試み 2003年十勝沖地震を例として Estimation of areas with a large slip of the next a large earthquake from the stress drop of small earthquakes

齋藤 悠<sup>1\*</sup>, 山田 卓司<sup>1</sup>  
SAITO, Yu<sup>1\*</sup>, YAMADA, Takuji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学地震火山研究観測センター

<sup>1</sup> Inst. of Seismology and Volcanology, Hokkaido Univ.

### 1. はじめに

地震の応力降下量は、断層面の強度と動摩擦応力の差を表す一つの指標である。先行研究により、2004年パークフィールド地震 (Mw6.0) の震源域で起きた小地震は大きな応力降下量を持っていること [Allmann and Shearer, 2007]、ハワイ島キホロ湾地震 (Mw6.7) の断層面上で起きる小地震のうち、キホロ湾地震の大すべり域で起きる小地震の応力降下量が多いこと [Yamada *et al.*, 2010] が報告されている。これらの結果は、大地震の大すべり域では恒常的に強度と動摩擦応力の差が大きく、小地震の応力降下量を解析することによってあらかじめ大すべり域を予測することができる可能性を示唆している。

一方、十勝地方の太平洋沖では、1915年 (M7) [内閣府 HP ([http://www.bousai.go.jp/hnj/dbindex/database/02/06/hnj0206\\_07.htm](http://www.bousai.go.jp/hnj/dbindex/database/02/06/hnj0206_07.htm))]、1952年 (Mw7.8)、2003年 (Mw8.0) [例えば Yamanaka and Kikuchi (2003)] と約50年おきにM7以上の地震が発生している。先行研究から、2003年十勝沖地震 (以下2003年本震とする) には2つの大きな特徴を持つことが明らかになっている。すなわち、2003年の地震では1952年の震源域の深部半分がすべったということ [例えば Yamanaka and Kikuchi (2003)] と、本震後に本震でのすべりを囲むような顕著な余効すべりが観測されたこと [例えば Miyazaki *et al.* (2004)] である。

本研究では、十勝沖で発生した小地震の応力降下量を解析し、その結果を2003年本震のすべり分布および余効すべり分布と比較することにより、Allmann and Shearer (2007) や Yamada *et al.* (2010) で示唆された結果が十勝沖でも見られるのかを検討する。

### 2. 解析手法と結果

Hi-netの観測波形を用いて、2002年6月から2010年12月に十勝沖で発生した $4.0 < M < 5.0$ の423個の地震について、応力降下量を解析した。解析に際しては、 $3.0 < M < 3.2$ の小地震のうち、解析対称の地震に最も近い地震の波形を経験的グリーン関数とし、観測されたスペクトルがBoatwright(1978)のオメガ2乗モデルに従うと仮定してコーナー周波数を求めた。次に、Madariaga(1976)の円形断層モデルを用いて、コーナー周波数から応力降下量を推定した。その結果、応力降下量は3MPa前後となった地震が多いが、中には0.01MPaや100MPaのオーダーとなった地震も存在する。

### 3. 考察

現段階では、結果のばらつきが非常に大きい。これは、解析に使用した観測点が少ない地震が多いためと考えられる。今後、各地震について丁寧に波形を精査した上で、小地震の応力降下量の分布と2003年本震におけるすべり分布や余効変動分布を比較し、その関連性について議論する予定である。

### 謝辞:

本研究では、Hi-netのデータ (<http://www.hinet.bosai.go.jp/>) を使わせていただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 応力降下量, 大すべり域, 小地震

Keywords: stress drop, area with a large slip, small earthquake

## 1952年と2003年十勝沖地震の震源過程 (2) Rupture process of the 1952 and 2003 Tokachi-oki earthquakes (2)

小林 広明<sup>1\*</sup>, 嶺 纈 一起<sup>1</sup>, 三宅 弘恵<sup>1</sup>, 金森 博雄<sup>2</sup>

KOBAYASHI, Hiroaki<sup>1\*</sup>, KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>, MIYAKE, Hiroe<sup>1</sup>, Hiroo Kanamori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> カルフォルニア工科大学

<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Caltech

北海道太平洋側の千島海溝沿いでは、これまで多くの被害地震が発生してきた。これらの地震のうち、1952年十勝沖地震と2003年十勝沖地震は震源位置(気象庁による)がそれぞれ41.706°N, 144.151°E, 深さ54km, 41.778°N, 144.078°E, 深さ45kmと非常に近く、同じ震源域で繰り返し発生しているプレート境界地震である可能性が高い。

我々はこれまで、これら二つの地震について、Kikuchi *et al.* (2003) の手法を用いて遠地実体波インバージョンによる震源過程解析を行った。その結果、1952年と2003年に比べ  $M_w$  が8.3と大きく、1952年と2003年では震源過程がやや異なるということがわかっている。今回は、1952年十勝沖地震の新たな波形が入手できたため、それをインバージョンの波形に加え、Yoshida *et al.* (1996) の方法による波形インバージョンを行った。また、全国1次地下構造モデル(Koketsu *et al.*, 2008)における太平洋プレート境界面を考慮して、断層面を再考した。今回の解析では、断層パラメータとして、2003年については走行238°、傾斜20°、破壊開始点深さ21km、1952年については2003年と走行傾斜は等しく、破壊開始点深さ17kmを用いている。断層の大きさについては各地震とも10km間隔で小断層を17×14個置いた。

1952年の波形データセットについては、当時の地震計によって紙に記録された波形の画像から、ベクタライズソフトを用いてデジタルデータ化した後、0.5秒間隔にリサンプリングした。その後、計器補正を施し、0.01(もしくは0.02)~0.2 Hzのバンドパスフィルタを通して波形を得た。インバージョンではP波のみを11地点19成分を使用している。2003年のデータセットについてはIRIS DMCから得られるものを使用した。その際、1952年で使用する観測点と同地点または、近傍の地点を含むようにした。インバージョンではSH波も含め30地点34成分を使用した。

震源インバージョン解析の結果、1952年は  $M_w$  8.3、最大すべり6.2m、2003年は  $M_w$  8.2、最大すべり7mとなった。両者を比較してみると、すべりが最大となる地点が1952年と2003年でほぼ同じであった。また、1952年の震源過程では2003年では見られない、釧路沖の浅い部分のすべりが推定され、震源時間関数からも確認できる。このすべりはSatake *et al.* (2006) の1952年の津波波形インバージョンによって得られているすべり分布においても見られる。すなわち、1952年は2003年のすべり領域に加え、釧路沖の津波源を含んだ地震であったのではないかと考えられる。

今後は近地波形も用いて、ジョイントインバージョンを行い、詳細を確認する予定である。

キーワード: 震源過程, インバージョン, 1952年十勝沖地震, 2003年十勝沖地震, 繰り返し地震

Keywords: source process, inversion, the 1952 Tokachi-oki earthquake, the 2003 Tokachi-oki earthquake, recurrent earthquakes



## 遠地P波の最大変位振幅と高周波震動継続時間の比とスローネスパラメターの比較 Comparison of the ratio of maximum displacement amplitude to HFER duration to the slowness parameter

原辰彦<sup>1\*</sup>, 西村直樹<sup>2</sup>

HARA, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>, NISHIMURA, Naoki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人 建築研究所 国際地震工学センター, <sup>2</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科地球進化科学専攻  
<sup>1</sup>IISEE/BRI, <sup>2</sup>Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

Hara (2007, EPS, 59, 561-565) suggested a possibility to distinguish tsunami earthquakes using the ratio of the contribution of the maximum displacement amplitude (with distance correction) in the magnitude formula of Hara (2007, EPS, 59, 227-231) to that of high frequency energy radiation (HFER) duration. In this study, we calculate common logarithms of ratios of maximum displacement amplitudes of teleseismic P waves (with distance correction) to their HFER durations for a set of large shallow earthquakes. Then, we compare them to the slowness parameters, which are defined by common logarithms of ratios of radiated seismic energy to seismic moment (Newman and Okal, 1998, JGR, 103, 26,885-26,898), determined by Newman and Okal (1998), Lomax et al. (2007, GJI, 170, 1195-1209), and Lomax and Michelini (2009, GJI, 176, 200-214). We find a good correlation between these two ratios. Since the slowness parameter is demonstrated to be effective to identify tsunami earthquakes (i.e., the slowness parameter is deficient for tsunami earthquakes), the ratio of the maximum displacement amplitude to its HFER duration for teleseismic P waves is useful to distinguish tsunami earthquakes.

キーワード: 高周波震動継続時間, 津波地震, スローネスパラメター

Keywords: high frequency energy radiation duration, tsunami earthquake, slowness parameter

## 遠地 P 波の高周波震動継続時間から推定される 1994 年三陸はるか沖地震と 2003 年十勝沖地震の地震破壊伝播 Rupture propagations inferred from HFER durations for the 1994 far east off Sanriku and 2003 Tokachi-oki earthquakes

原辰彦<sup>1\*</sup>

HARA, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人 建築研究所 国際地震工学センター

<sup>1</sup> IISEE/BRI

Hara (2011, EPS, 63, 525-528) showed a clear azimuthal dependence of high frequency energy radiation (HFER) durations measured from teleseismic P waves for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. He suggested that it reflected the rupture propagation that generated high frequency energies. In this study, we investigated whether such azimuthal dependences were observed for the 1994 far east off Sanriku earthquake (Mw 7.7) and the 2003 Tokachi-oki earthquake (Mw 8.3). We applied the measurement procedure of high frequency energy radiation duration of Hara (2007, EPS, 59, 227-231) to these earthquakes, and found their azimuthal dependences. We calculated high frequency energy radiation durations referring to previous rupture process models of these earthquakes, and compared them to the observed high frequency energy radiation durations. For the 1994 far east off Sanriku earthquake, we found a good correlation between them. For the 2003 Tokachi-oki earthquake, although the observed azimuthal dependence is consistent with the direction of the rupture propagation, there is a substantial difference between their absolute values, which needs further detailed analyses.

キーワード: 高周波震動継続時間, 地震破壊伝播, 方位角依存性

Keywords: high frequency energy radiation duration, rupture propagation, azimuthal dependence

## 2011年駿河湾地震 (M6.2) の初期破壊 Initial rupture of the 2011 Suruga-bay, Japan, earthquake (M6.2)

後藤 史紀<sup>1</sup>, 竹中 博士<sup>2\*</sup>, 中村 武史<sup>3</sup>

GOTO, Fuminori<sup>1</sup>, TAKENAKA, Hiroshi<sup>2\*</sup>, NAKAMURA, Takeshi<sup>3</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>3</sup>(独) 日本海洋研究開発機構 横浜研究所

<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, <sup>3</sup>JAMSTEC

駿河湾は駿河トラフを境に東側の伊豆半島を含めたフィリピン海プレートと西側のユーラシアプレートから成り立ち、駿河トラフからフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に向かって年間数センチの速度で北西方向に沈み込んでいる。また、一部は2つのプレート境界で発生すると考えられている東海地震の想定震源域にも含まれている。このような地域で2009年8月11日に6.5、2011年8月1日に6.2の地震が発生した。震源の深さから共にフィリピン海プレート内部で発生した地震である。本研究では、2011年に起きた地震(以降2011年駿河湾地震と呼ぶ)の解析結果について報告する。この地震では静岡県東伊豆町、焼津市、静岡市駿河区で震度5弱を観測している(気象庁)。近年の密な観測網により、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も明らかになっている。駿河湾周辺にも密な観測網が発達しており、この地震についてK-NET、KiK-net、F-net、気象庁や近隣自治体の震度計観測点などで強震記録が得られている。本研究では、2011年駿河湾地震におけるこれらの強震記録P波部を用いて、この地震の発震後初期段階における震源過程を推定した。2011年駿河湾地震の観測波形には、初期破壊相と主破壊相が現れている。それぞれの押し引き分布を用いてメカニズム解を推定した結果、初期破壊面は横ずれ型、主破壊面は逆断層型であることが分かった。また、初期破壊は主破壊の約0.8秒前に始まっており、初期破壊開始点と主破壊開始点(気象庁一元化震源)の位置関係は駿河トラフとほぼ平行である。2011年駿河湾地震で見られた横ずれ断層型から逆断層型へ移行するタイプの地震の例として1990年に小田原で起きた地震(M5.1)があり、初期破壊の存在が確認されている(Ishida and Kikuchi, 1992, GRL)。この地震は2011年駿河湾地震の震源とは伊豆半島を介して対象の位置にあたる相模トラフのフィリピン海プレート内部で発生している。この地震は、マグニチュードも今回に比べて小さいが、相模トラフと駿河トラフにおいてこのような共通点があることは興味深い。

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。また、福岡管区気象台の東田進也氏と石原和彦氏には本地震の気象庁一元化震源と初動解についてご教示いただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 初期破壊, 主破壊, 震源過程, 2011年駿河湾地震

Keywords: initial rupture, main rupture, source process, 2011 Suruga-bay earthquake

## バックプロジェクション法を用いた2012年1月1日鳥島近海地震(M7.0)の震源過程 Rupture Process of Torishima-Kinkai Earthquake(M7.0) on 1 January, 2012 by Back Projection Method

西澤航<sup>1\*</sup>, 村越匠<sup>1</sup>

NISHIZAWA, Ko<sup>1\*</sup>, MURAKOSHI, Takumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防衛大学校

<sup>1</sup> National Defense Academy

2012年1月1日、鳥島近海でM7.0(最大震度4)の地震が発生した。気象庁によると震源は北緯31.256°、東経138.339°、深さは397kmであった。またこの地震は、太平洋プレートがフィリピン海プレートに沈み込む方向に圧力軸を持つ型であり、太平洋プレート内部で破壊が発生した。今回の地震断層では最近40年間はM7級の地震は発生していない。気象庁の遠地実体波による波形インバージョン法による解析では、断層は長さ約25km、幅20km、走向6°、傾斜84°、滑り角-73°であった。最大滑り量は約1.0m、破壊継続時間は15秒間であった。主な滑りは初期破壊開始点より深い所にあり、断層面の中では2つのエリアで大きい滑りを見られるという特徴があった。

本研究は、遠地実体波を用いバックプロジェクション法の解析を行う。波形インバージョン法では震源パラメータは初期情報が必要となるが、バックプロジェクション法では破壊伝播のイメージを観測波形から直接計算することができるため、破壊速度関数等の未知のパラメータを仮定する必要がなく、空間の動的変化の高い解析が可能である。解析データとしてアメリカにあるアレイ観測網であるUSArrayの波形データを用いた。USArrayは10年前から設置されアメリカ合衆国の全域で約400台の広帯域地震計から成る。本発表では、3次元的な断層の形状を考慮し震源過程の解析を行うことで破壊伝播の様子を解析し、その詳細について報告する。

キーワード: バックプロジェクション法, 震源過程, 鳥島近海地震

Keywords: back projection method, rupture process, Torishima-Kinkai Earthquake

## 後続波の情報を使用する新しいバックプロジェクション法 New back-projection method to use depth phases' information

中尾 篤史<sup>1\*</sup>, 八木 勇治<sup>1</sup>  
NAKAO, Atsushi<sup>1\*</sup>, YAGI, Yuji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学・生命環境

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

2004年スマトラ島沖地震のイメージングに成功して以降 (Ishii et al., 2005), バックプロジェクションは巨大浅発地震にたびたび適用されるようになった。2011年東北沖地震に対しては比類なきほど多くのバックプロジェクション解析がなされ、いずれの解析結果も、震源時から90秒頃まで震源近傍で著しく高周波が放射されたのち、それが150秒頃にかけて南下する、という破壊過程を示した。しかし、震源インバージョンにより判明した30-50秒頃の海溝軸付近の浅部における大すべり (e.g. Yagi and Fukahata, 2011) に至るまでの破壊過程が明瞭に現れておらず、バックプロジェクションの結果をもとに断層上で起きたことを議論することは困難であるようにも見える。

現行の遠地実体波を用いたバックプロジェクションの一番の問題点は、観測波形の振幅を破壊の大きさとして断層面に投影する際に、P波の走時のみを用いる点である。ゆえに、震源域が浅く逆断層型地震の場合には、sP相などの振幅の大きい反射波により震源像が不鮮明になることが予想される。そこで私たちは、観測波形と理論グリーン関数の相互相関関数を計算し、それらを震源域に投影することで、波源域を特定する手法を提案する。つまり、真に地震波を放出した震源グリッドであれば、各相の走時がその点の理論走時とよく一致するので、波源がより特定でき、かつ後続波の影響を受けにくくなる、と考える。

この手法を、FDSNとGSNの全方位の88観測点に記録された2011年東北沖地震の上下動速度波形に適用した。新手法と従来の手法を同じ条件下で実行したところ、新手法では、従来の手法に比べ、時間・空間に対してより狭い範囲に波源域が求まった。後続波で深さを特定できるために、傾斜方向の分解能が高まった点と、後続波をダミーの波源域として投影されにくくなった点により震源像が改善したと考えられる。さらに、従来の手法では、エネルギーの放出関数は各ノットで10-20秒程度の遅れを伴い、かつピークが牡鹿半島寄りに移る傾向があることが明らかになった。この結果は、従来の解析では、P波のみならず、sP波も震源域に強く投影されてしまうことを示唆する。実際、相互相関関数のプロジェクト結果は、Yagi and Fukahata (2011) で得られたすべりの時間発展と調和的である。

バックプロジェクション法の利点は、モデル化に伴って膨大な未知パラメータを推定せねばならない波形インバージョンに比べ、理論がシンプルである点であり、ゆえに解析者ごとに解が異なる要因が少ない点である。しかし、他の波相が重ならない深発地震を除いては、解析者は同じようなバイアスを受けた解を求め、それをもとに議論をするという問題が生ずる。私たちの手法は、後続波の影響を利用する点で従来のバックプロジェクションより優れており、インバージョンで得られたすべりモデルの妥当性を検証するための、強力なツールとなるであろう。

キーワード: バックプロジェクション, 破壊過程, 後続波, 2011年東北地方太平洋沖地震, 相互相関

Keywords: back-projection, rupture process, depth phase, the 2011 Tohoku-Oki earthquake, cross correlation

## マルチフラクタルを用いた断層すべり量分布のダウンスケーリングに関する基礎的研究

### Basic study on downscaling of a slip distribution by using multifractal

吉田 知江<sup>1\*</sup>, 葛葉 泰久<sup>1</sup>

YOSHIDA, tomoe<sup>1\*</sup>, KUZUHA, Yasuhisa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 三重大学大学院生物資源学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Bioresources, Mie University

マルチフラクタルを利用して地震の断層面でのすべり分布をダウンスケーリングする手法の可能性について検討した。解析データとして、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震の10種類のすべり分布 (Finite-Source Rupture Model Database (<http://www.seismo.ethz.ch/static/srcmod/Homepage.html>) から入手した9種類のモデルと、著者らが Kikuchi(2003) を用いて求めたモデル) を使った。

解析手法は以下の通りである。

1. 上記10種類のデータを用いてスペクトル解析を行う。これはフラクタル性を確認する為の解析で、この解析だけではデータがモノフラクタル (図形) かマルチフラクタル (測度) かは分からない。フラクタル性を有する場合、 $E(k)=k^{-\alpha}$  が成立する。つまり、横軸に波数、縦軸にパワーをとってデータをプロットすると、右下がりの直線で近似できる。ただし、ここで、データ数が十分に確保できる「走向方向のデータ」を一次元解析する。

2. マルチフラクタル性を確認する為に、Lavalley (1991) が開発したDTM (double trace moment) 手法を使ってマルチフラクタル性を示すパラメータ  $\alpha$  と、測度の疎ら度を示すパラメータ  $C1$  を求める。この結果、 $\alpha$  が0でなければ、データはマルチフラクタル性を示していると考えられる。ここでも、「走向方向のデータ」を一次元解析する。

スペクトル解析の結果、10データ全てがフラクタル性を示していた。つまり、この段階で、すべり量分布はモノフラクタルもしくはマルチフラクタルであると考えられた。次に、DTMを行ったが、DTMを適用するためには、データ長が最低32ないし64(2のべき乗個) 必要なため、その条件を満たしている Ide and Takeo (1996) のデータのみ解析した。結果は  $\alpha = 1.19$ ,  $C1 = 0.06$  となり、マルチフラクタル性を有していることがわかった。

以上により、マルチフラクタルモデルによるシミュレーションで断層すべり分布をダウンスケーリングすることが可能であると考えた。

キーワード: すべり量分布, マルチフラクタル, スケーリング, DTM, スペクトル解析, ダウンスケーリング

Keywords: slip distribution, multifractal, scaling, double trace moment, spectral analysis, downscaling

## 東北地方太平洋沖地震に伴う山陰地方の温泉水の水温変化特性

### Coseismic hot spring water temperature changes of the Tohoku earthquake at the observation stations in San-in district

進藤 嵩史<sup>1\*</sup>, 桑野 雄一<sup>1</sup>, 野口 竜也<sup>1</sup>, 香川 敬生<sup>1</sup>, 西田 良平<sup>2</sup>, 小泉 尚嗣<sup>3</sup>

SHINDO, takashi<sup>1\*</sup>, Kuwano Yuiti<sup>1</sup>, NOGUCHI, Tatsuya<sup>1</sup>, KAGAWA, Takao<sup>1</sup>, NISHIDA, Ryohei<sup>2</sup>, KOIZUMI, Naoji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 鳥取大学工学部, <sup>2</sup> 放送大学, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>tottori university faculty of engineering, <sup>2</sup>the open university of japan, <sup>3</sup>aist

2000年鳥取県西部地震後の2002年より山陰地方では15地点の温泉水の水温(0.01 精度)・水位観測を実施しており、2008年12月より8点で水温・水位観測を継続している。そのうち数地点においてM6以上の地震後に変化がみられている。今回の東北地方太平洋沖地震では、地震後2日以内に、急激な水温の上昇が、岩井温泉(約1.86℃)、奥津温泉(約0.11℃)、湯谷温泉(約0.18℃)、吉岡温泉(約0.28℃)で、急激な水温の低下が鷺の湯温泉(約0.23℃)でみられた。その後、岩井温泉、鷺の湯温泉、湯谷温泉では水温が上昇する傾向がみられ、吉岡温泉では水温が低下する傾向がみられる。水温上昇の最大値は、岩井温泉では+2.40℃、鷺の湯温泉では+1.32℃、湯谷温泉では+0.81℃、吉岡温泉では+0.28℃、奥津温泉では+0.11℃であった。また、湯谷温泉と吉岡温泉では約2ヶ月前から水温が減少傾向のトレンドから一定になっていた。また、両温泉は地震前の水温のトレンド変化の特徴、トレンド変化の開始時期、地震後の水温変化の特徴、過去に起きた四川地震、福岡県北西沖地震に伴う変化の特徴などで類似することがわかった。

キーワード: 温泉, 水温変化, 山陰地域, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: hot spring, temperature changes, San-in district, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake