

## 数論幾何的アプローチによる地震活動のモデル化の試み An arithmetic geometrical approach for modeling of seismic activity

藤原 広行<sup>1\*</sup>

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

<sup>1</sup> 防災科研

<sup>1</sup> NIED

あるひとまとまりの地震発生場の中で発生する地震は、時空間的に見て離散的なものであり、本震・余震系列を除けば一見個々に独立した存在のようにも見える。しかし、全体としてみた時には、G-R 則のように規模別頻度分布がべき乗則に従うなど、独立して無関係に存在するように見える地震群の背後にそれら全体を統制している法則が存在していることがわかる。

同様の現象が「数」の世界でも観察される。最も基本的な事例は、整数の中に存在する素数の分布である。素数の分布に関しては未解決の問題も多数残されているが、古くは平方剰余の相互法則など、一見無関係に存在しているように見える素数の間に不思議な関係が成り立つことが発見されており、類体論に代表されるような深みのある数の構造に関する理論体系が構築されている。さらに、近年では「数」を幾何学的対象として捉える「数論幾何」の発展により多くの知見が得られつつある。数論幾何は、多項式のゼロ点の集まりからなる代数多様体の研究を目的とした代数幾何学において開発されたスキーム理論を「数」に適用することにより発展したものであり、「数」の世界を全体として統制する不思議な法則を明らかにしている。

これら全く無関係に見える「地震」と「数」の世界に対して、下記のような対応を考える。 $p_i$  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  $M_o(e_i)$  としたとき、下記の関係式が成り立つと仮定する。

$$T(e_i) = p_i,$$

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

数値実験を行うことにより、この対応関係から G-R 則に類似した性質が得られることがわかる。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」と呼ぶことにする。

こうした観察を踏まえ、ある地震発生場で発生する地震を「数」と対応させることにより、「数論的地震活動モデル」をスキーム理論の対象とみなすことができる。これにより、数論幾何との類似性から、地震活動を全体として統制している法則に関する知見を得ることが期待される。なお、上記対応関係では特別な境界条件を持たない無限に広がる空間の中で1点から破壊が開始し、次第に領域全体に拡大するような破壊に伴う「地震」をイメージしている。物理モデルとしてより現実的な境界条件を与えることは、「数」を拡大したり制限したりすることに対応すると考えられるが、これらはより一般化された「数」を対象としたスキーム理論により取り扱うことができると期待される。また、逆に、「数論的地震活動モデル」により「数」に意味付を行うことにより、例えば、「双子素数は無限に存在する」という数学上の未解決問題は、上記モデルにおいて「最小規模の地震は無限に発生する」という地震活動モデルの持つ性質に関する問題に置き換えられることがわかる。

キーワード: 素数, 数論幾何, G-R 則, 地震

Keywords: prime, arithmetic geometry, Gutenberg-Richter relation, earthquake

### 3次元振動極性を用いた震央推定法の開発と動的誘発地震への適用 Development of an epicenter estimation method using 3D polarity and its application to dynamic triggering events

内出 崇彦<sup>1\*</sup>Takahiko Uchide<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 京都大学防災研究所<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

近年、地震観測網の発展、計算機能力の向上を背景にして、低周波地震や遠地の大地震からの地震波が通過している最中に動的に誘発された地震といった、P波とS波の到達時を検出することが困難な地震の震源を決定する方法が数多く提案されている [e.g., Obara, 2002; Kao et al., 2005; Shelly et al., 2007]。

本研究では新たに、各観測点での振動極性を用いた震央推定法を提案する。基本的な考え方は以下の通りである。まず、各観測点の地震計記録から直線的な極性を持つ信号を見つけ出す。それをP波によるものとして振動極性が地震波の到来方向に一致すると仮定して、各観測点から震央へ方向を求める。最後に、各観測点の情報を総合して、震央を求める。このような方法は、使用できる観測点が少ない場合に、通常震源決定を確認する意味で用いられることがあるが、本研究ではこの手順を自動で行う。なお、本研究では2011年東北地方太平洋沖地震による飛騨地方での動的誘発地震を対象として研究を行う。当面の目標は、手動検出で得られた動的誘発地震カタログ [Miyazawa, 2011] より多くの地震を検出することに置く。

振動極性の推定には、水平成分のほかに上下成分も使用し、実部を原信号、虚部をそのヒルベルト変換で構成した解析信号を用いた Vidale [1986] の手法を適用する。水平成分だけを用いた場合 [内出, 日本地震学会秋季大会, 2012] は到来方向に180度の不確実性が残るのに対して、上下成分を用いた上で、地震波が下方から入射すると仮定すると、そのような不確実性は消える。まず、解析を安定させるため、解析信号を作った後にその移動平均を取る。各時刻について、各成分の解析信号の分散共分散行列  $C(t)$  をつくり、その固有ベクトルと固有値を求める。最大固有値に対応する固有ベクトルが主たる振動方向を表わし、その極性の強さは、固有値  $a_1 > a_2 > a_3$  を用いて、 $P_s = 1 - (a_2 + a_3)/a_1$  で表わすこととする。なお、最大固有値地震波が上方から入射する固有ベクトルが得られたら、傾斜角の符号を変え、方位角を180度動かし、下方から入射した解を採用する。

当然、振動極性と震央方向が完全には一致しない。その原因として、(1) 地下の地震波速度構造の水平不均質や (2) 地震計の設置方位のずれ、(3) S波その他の波が直線的な極性を示してしまった場合などが考えられる。ここで、(1) と (2) の影響を定量的に調べるために、気象庁一元化処理震源カタログから飛騨地方で発生した多数の地震を抽出して、気象庁一元化処理検出値によるP波到達時から0.5秒間の地震波形の振動極性を調べ、震央方向との差を取った。その結果、多くの観測点では、振動極性と震央方向の差の平均は5度以内、標準偏差が5-10度の正規分布によく従っていたが、一部の観測点では平均が大きすぎていたことがわかった。

各観測点の振動極性を各時刻で求めた後、震央をグリッドサーチによって推定する。グリッドサーチの際に考慮する要因は、(a) グリッドから観測点までP波が届くのにかかる時間、(b) 観測点からグリッドへの方位と振動極性から推定された震央方向との差、(c) 極性の強さ  $P_s$  の3つである。これらを総合して評価関数を構成して、震央となるべき位置と時間を探索する。

まずはこの手法を飛騨地方で単独で発生した地震に適用する。気象庁一元化処理カタログに記載されているM2程度の地震の波形に4HzでハイパスフィルタをかけたHi-netと京大防災研の速度波形データに対し、本手法による解析を実施したところ、気象庁一元化処理震源とほぼ同じ位置に求まった。観測網の外側の地震ではゴーストが生じやすいという現象も確認した。

次に、2011年東北地方太平洋沖地震からの地震波が飛騨地方を通過している際の地震波記録に対して本手法を適用した。一般に、高周波帯域の地震波は非弾性減衰が激しいため、遠方からの大地震の地震波の影響は小さく、近地の地震からの地震波が見やすい。そのため、本研究でも4Hzでハイパスフィルタをかけたデータを使用する。その結果、多数のイベントが見つかった。そのうちの一部は既にMiyazawa [2011] によって報告されているものであったが、それ以外のイベントも見られた。

本研究によって、動的誘発地震のカタログは改善され、動的誘発地震の研究の基礎情報として使われることになる。さらに、本研究は、自動震源決定や水平不均質構造の解析など、他の地震学的研究にも寄与することが期待される。

キーワード: 震央決定法, 3次元振動極性, 飛騨地方, 動的誘発地震, 2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: Epicenter determination method, 3D polarity of motion, Hida, Dynamic triggering of earthquakes, the 2011 Tohoku earthquake

## Back-projection 法の理論的背景と time-reversal 及びインバース問題の解との関係 Theoretical background of back-projection imaging and its relation to time-reversal and inverse solutions

深畑 幸俊<sup>1\*</sup>, 八木 勇治<sup>2</sup>, リベラ ルイス<sup>3</sup>  
Yukitoshi Fukahata<sup>1\*</sup>, Yuji Yagi<sup>2</sup>, RIVERA, Luis<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 筑波大学大学院生命環境系, <sup>3</sup> ストラスブール大学

<sup>1</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>2</sup>Life and Environ. Sci., Univ. Tsukuba, <sup>3</sup>EOST, University of Strasbourg

The back-projection (BP) method has become a popular tool to image the rupture process of large earthquakes since the success of Ishii et al. (2005), while it has not been clear what the BP image represents physically. We clarified the theoretical background of the back-projection (BP) imaging and related it to classical inverse solutions via the hybrid back-projection (HBP) imaging (Yagi et al., 2012). In the HBP method, which is mathematically almost equivalent to the time-reversal imaging, cross correlations of observed waveforms with the corresponding Green's functions are calculated. The key condition for BP to work well is that the Green's function is sufficiently closer to the delta function after stacking. Then, we found that the BP image represents the slip motion on the fault, and approximately equals to the least squares solution. In HBP, instead of the Green's function in BP, the stacked auto-correlation function of the Green's function must be close to the delta function to obtain a fine image. Because the auto-correlation function is usually closer to the delta function than the original function, we can expect that HBP works better than BP, if we can reasonably estimate the Green's function. With another condition that the stacked cross-correlation function of the Green's functions for different source locations is small enough, the HBP image is approximately equal to the least squares solution. If these assumption are not satisfied, however, the HBP image corresponds to a damped least squares solution with an extremely large damping parameter, which is clearly inferior to usual inverse solutions. We show some simple examples of numerical computation to check the validity of the above mentioned conditions implicitly assumed in the BP and HBP methods.

キーワード: Back projection, Time reversal, Inversion, least squares solution

Keywords: Back projection, Time reversal, Inversion, least squares solution

## 空隙発展則に関する無次元パラメータとその動的地震滑りへの影響 Nondimensional Controlling Parameter about Inelastic Porosity Evolution Law and its Effect on Dynamic Earthquake Slip

鈴木 岳人<sup>1\*</sup>, 山下 輝夫<sup>2</sup>

Takehito Suzuki<sup>1\*</sup>, Teruo Yamashita<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地惑, <sup>2</sup> 東大地震研

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

我々の一連の研究では、熱・流体圧・非弾性空隙生成の相互作用の効果が動的地震破壊過程にどのように影響するかを取り扱ってきた。そして1次元系の仮定のもと、系の振る舞いを支配する2つの無次元数  $Su$  と  $Su'$  を導いた。 $Su$  は流体圧変化に対する非弾性空隙生成の効果の発熱の効果に対する相対的な強さを表し、 $Su'$  はそれに対する流れの効果の発熱の効果に対する相対的な強さを表す。これらの無次元数に基づき、例えば通常地震とゆっくりした地震など、動的地震滑りの振る舞いの多様な側面を統一的に説明することができた。

しかしながら、我々のモデルでは空隙率の時間発展則として単純なものを仮定しているという問題があった。空隙の生成レートは滑り速度に比例しているとしてきたのである。観測的・実験的成果から、断層中の空隙率には上限  $\phi_{inf}$  が存在すると考えられてきている。我々のこれまでの枠組みは空隙率  $\phi$  が上限より十分小さい値までしか上昇しなかった場合を調べてきた、と理解されることになる。

我々は空隙率の上限を記述する新たな無次元数  $Su^{ul}$  を導入する。ここでは流体の流れを無視する、すなわち  $Su'=0$  であるとする。 $Su>1$  であれば、滑りの初期段階において空隙生成の効果が勝って流体圧が減少し、滑り速度を減少させる。その後には、2つの異なった滑りの振る舞いが考えられる。まず、ある  $Su$  と  $Su^{ul}$  の範囲では、滑りが加速して一定の滑り速度に漸近する場合が考えられる。これは空隙率が上昇して上限に近付き、流体圧（及び滑り速度）を減少させる効果が小さくなったために起こる。この場合は、thermal pressurization により、断層面に働いている剪断応力を最終的には全て解放する。一方、加速せずそのまま滑り速度がゼロに漸近して自発的に滑りが停止する場合も考えられる。これはこれまでのように空隙率の上昇量が小さく上限の効果が現れない場合である。高速の定常滑りと自発的な滑りの停止が、本モデルでは単一の枠組みで理解できた。

我々はまた系の振る舞いにかかわる2つの重要な空隙率 ( $\phi_{1*}$  と  $\phi_{2*}$ ) がモデル中に存在することを見出し、その解析解を  $Su$  と  $Su^{ul}$  の関数の形で示した。まず上限値で正規化された空隙率  $\phi^*$  の時刻無限大での値  $\phi_{f*}$  は  $\phi_{1*}$  と 1 の間の値をとれないことが明らかになった ( $\phi^*$  が 1 であるとは  $\phi$  が上限に達したということである)。これは、 $\phi^*$  が  $\phi_{1*}$  に達すると上述の加速が起こるためである。空隙率  $\phi_{1*}$  は加速と自発的な滑りを分ける臨界的な値であると言える。一方、 $\phi_{f*}$  は  $\phi_{2*}$  以下の値をとれないこともまた示された。空隙率  $\phi_{2*}$  の値は発熱で失われたエネルギーに係るため、天然断層で観察される空隙率はそのエネルギーの指標になり得ることが示唆される。

キーワード: 熱, 流体圧, 非弾性空隙率, 高速滑り, 自発的な滑りの停止

Keywords: heat, fluid pressure, inelastic porosity, high speed slip, spontaneous slip cessation

## 拡張境界積分方程式法の開発と不均質媒質中の地震破壊解析への応用 Development of extended BIEM and its application to earthquake dynamic rupture analysis in inhomogeneous media

日下部 哲也<sup>1\*</sup>, 亀伸樹<sup>1</sup>

Tetsuya Kusakabe<sup>1\*</sup>, Nobuki Kame<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo

我々はこれまで「現実的な構造不均質」において「非平面断層モデル」の解析を可能にする「拡張境界積分方程式法 (eXtended BIEM: XBIEM)」を提案してきた (Kame and Kusakabe, 2012)。モード III 型亀裂に対して、均質媒質中に仮想的な平面境界を導入して XBIEM を用いた解析を行い、既存の BIEM における解析結果と比較することで、手法の検証を行ってきた (Kusakabe and Kame, AGU, 2012)。本研究では、より詳細な計算チェックを行った後で、応用計算を実行する。

これまでに均質媒質中に仮想的な平面境界を導入した場合の検証を終えた。本研究では「現実的な構造不均質」を解析するために必要となる 1) 非平面境界と 2) 不均質媒質境界の二つ場合の検証を行った。1) のテストのため、均質媒質中において仮想的な非平面境界を導入した解析を行った。その結果、境界が非平面形状の場合においても、計算コードの有効性が確認できた。2) のテストを平面境界を持つ二層媒質中で行い、解析的に求めたグリーン関数を用いた結果 (Hirano, private communication) と比較した。その結果、媒質コントラストのある場合においても計算コードの有効性が確かめられた。

この十分に検証された計算コードを用いて初めて可能になる興味深い応用問題「媒質境界の剥離は主断層上の破壊の進展と停止にどのような力学的効果を持つか」を調べることにする。ここでは、二層媒質中において平面境界に直交する既存の主断層面を考える。動的破壊が一方の媒質中で開始し、境界に向かって自発的に成長するとする。境界での応力を評価し、破壊基準を満たす場合には、境界剥離を許して、動的破壊成長のシミュレーションを行った。ここでパラメタとして媒質速度比  $\eta = \beta_+ / \beta_-$  と破壊基準比  $\zeta = \tau^{\text{peak\_main}} / \tau^{\text{peak\_interface}}$  をとり、 $(\eta, \zeta)$  空間における網羅的なパラメタスタディを行った。結果、A) 主断層が境界を横切り進展を続ける場合と、B) 境界の破壊 (剥離) が副次的に励起され、これにより主断層の破壊進展が停止する場合、の二つの破壊進展過程が生じ、それぞれの破壊過程は  $(\eta, \zeta)$  空間で明瞭に分かれた。

二つの破壊過程の  $\zeta$  依存性については、境界の強度が強くなるほど主断層破壊が起きており、定性的考察と調和的である。一方の  $\eta$  依存性は、亀裂進展が軟らかい媒質へと向かう場合に主断層破壊が起き、硬い媒質に向かう場合には剥離が生じて主断層破壊を停止させるという傾向を示した。これについては、現時点で定性的な解釈はない段階である。我々の解析結果は、媒質コントラストが動力的な破壊過程に確かに影響を及ぼしていることを示しており、今後のさらなる研究が必要である。

キーワード: 動的破壊, 境界積分方程式法, 媒質境界, シミュレーション

Keywords: dynamic rupture, BIEM, bimaterial interface, simulation

## 沈み込み帯における低角逆断層と分岐断層の3次元動的破壊シミュレーション 3D dynamic rupture simulation of a subducting reverse fault and its branch fault

田村 慎太郎<sup>1\*</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>  
Shintaro Tamura<sup>1\*</sup>, Satoshi Ide<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地惑

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

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つの均質媒質からなる媒質境界断層（主断層）、上盤側にのびる分岐断層、および自由表面（海底面）を有限要素法を用いてモデル化し、すべり弱化則に従う断層の3次元破壊伝播シミュレーションを行う。プリズム型の有限要素を用いることで自由表面と分岐断層をモデル領域内でななめに入れ、主断層を水平に入れることによって沈み込み帯をモデル化する。沈み込みの角度と分岐角度は要素のアスペクト比を変えることでコントロールできるが、両者が同じ角度になってしまうという制約が残る。モデル領域の外周は吸収境界（Perfectly Matched Layer）に囲まれている。断層すべりはスプリットノード法で表現する。断層角度、初期応力場、媒質コントラスト、塑性変形の有無を変えて数値計算を行い、破壊伝播のふるまいや自由表面の変形場を求める。

主断層上に初期クラックを与えると破壊は自発的に進展を始める。主断層上の破壊が分岐断層に伝播するかどうかは分岐角度、応力場、媒質コントラストによって異なる。その傾向は、本研究とは異なるモデル（主断層が自由表面と並行）で計算した Tamura and Ide (2011) の結果と同じになる。一方、分岐断層のトレンチではシミュレーションの初期条件によらず、いずれのケースでも破壊が生じる。主断層上の破壊進展にともなう弾性波がトレンチで法線応力を下げることによってこの破壊が励起される。また、トレンチで励起された破壊はやがて深い側に伝播し始める。塑性変形がおきる条件下で同様の計算すると、分岐断層のトレンチから深い側への破壊伝播が抑制される。主断層と分岐断層に囲まれたウェッジ部分の変形量と断層面上のすべり量は分岐断層が破壊する場合の方が大きくなる。また、断層角度が低角の場合、上盤がやわらかい場合、応力降下量が大きい場合に変形量が大きくなる。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で分岐断層が破壊されていた場合、海溝軸付近の海底面が大きく変形して巨大津波を励起した可能性が考えられる。この際、海溝軸付近の大きな断層すべりと、深い側に戻るすべりの伝播をともなう。但しその量や空間分布は停止条件に依存する。

キーワード: 沈み込み帯の動的破壊モデル, 分岐断層, 塑性変形, 有限要素法

Keywords: dynamic rupture modeling in a subduction zone, branch fault, plastic yielding, FEM

## 津波地震と巨大地震の震源過程の違いについて Difference in the seismic rupture process between slow tsunami and megathrust earthquakes

八木 勇治<sup>1\*</sup>, 三井 雄太<sup>2</sup>, 江崎 隼輝<sup>1</sup>  
Yuji Yagi<sup>1\*</sup>, Yuta Mitsui<sup>2</sup>, Hayaki Ezaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境系, <sup>2</sup> 北海道大学

<sup>1</sup>Life and Env. Sci., Univ. of Tsukuba, <sup>2</sup>Sci., Hokkaido Univ.

After the 2011 Tohoku earthquake, we know that huge co-seismic slip can occur at shallow part of subduction zone where slow tsunami earthquakes have been detected (e.g. the 1986 Meiji-Sanriku earthquake). To understand the nature of megathrust earthquakes as well as slow tsunami earthquakes, it is important to investigate the slip behavior in the area. We estimated spatio-temporal slip-rate distribution of megathrust and slow tsunami earthquake using the a novel seismic source inversion method (Yagi and Fukahata, 2011, GJI) and a Hybrid Back-projection method (Yagi et al., 2012, EPSL), and then compared the observation results to simulation results using simplified fault models and the mechanism of thermal fluid pressurization. We inverted and projected the slip-rate function on fault for the 1992 Nicaragua slow tsunami earthquake, the 2006 Java slow tsunami earthquake, the 2010 Mentawai slow tsunami earthquake, and the 2011 Tohoku megathrust earthquake. In the slow tsunami earthquakes, we found a smooth and slow slip ( $\sim 0.1$  m/s) that continued over 50 s near the trench, while pulse-like slip was detected in and around the main-shock hypocenter. On the other hand, in the case of the 2011 Tohoku megathrust earthquake, we also found a smooth and fast slip ( $\sim 1.0$  m/s) that continued over 80 s near the trench. The slow tsunami and megathrust earthquakes have a release of seismic energy in the downdip area that triggered smooth slip in the updip area. The difference of slip-rate between the analyzed slow tsunami earthquakes and Tohoku megathrust earthquake may suggest the existence of a non-linear rupture characteristic in the shallowest megathrust faults. Next, we performed dynamic rupture simulations using simplified fault models. We found that small fluctuations of initial shear stress near a trench, within 1 MPa, lead to differences in seismic moment release greater than two orders of magnitude. Moderate slip events with trapezoidal source time functions appear to occupy a transition position, between shallow megathrust earthquakes with surface rupture and smaller ordinary earthquakes without surface rupture. We interpret this result as representing the differences in interplate slip between shallow megathrust earthquakes, tsunami earthquakes, and ordinary earthquakes in the same region. The observation and numerical simulation results suggest that the dynamic frictional weakening in the shallower segment plays a crucial role in the interaction between the deeper and the shallower segments.

キーワード: 津波地震, 巨大地震, 東北地方太平洋沖地震, すべり速度, ゆっくり滑り

Keywords: Slow tsunami earthquake, Megathrust earthquake, The Tohoku earthquake, Slip-rate, Slow slip

## 近地津波波形解析による2011年東北地方太平洋沖地震前震の震源断層モデル推定 Fault modeling of the foreshocks of the 2011 Tohoku-oki earthquake based on near-field tsunami observation

久保田 達矢<sup>1\*</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 飯沼 卓史<sup>2</sup>, 伊藤 喜宏<sup>1</sup>, 太田 雄策<sup>1</sup>, 鈴木 秀市<sup>1</sup>, 稲津 大祐<sup>3</sup>, 齊藤 竜彦<sup>3</sup>, 金田 義行<sup>4</sup>  
Tatsuya Kubota<sup>1\*</sup>, Ryota Hino<sup>1</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Yoshihiro Ito<sup>1</sup>, Yusaku Ohta<sup>1</sup>, Syuichi Suzuki<sup>1</sup>, Daisuke Inazu<sup>3</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>3</sup>, Yoshiyuki Kaneda<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>International Research Institute of Disaster Science, <sup>3</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>4</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2011年3月9日、宮城県沖を震源とする Mw7.3 の地震が起こった。この地震は2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の前震とされている。海底圧力計で観測された津波の最大振幅は15cm程度であり、最大10cm程度の海底上下変動が観測された。また、その翌日には、前震の震央の20kmほど南で Mw6.5 の地震が発生した。この地震は前震後、本震までに起こった中で最大の地震であり、なおかつ本震前に起こった中では Mw7.3 の前震に次いで最大のものである。海底の上下変動は1つの観測点でのみ観測され、4cmほどの隆起であった。また、観測された津波の最大振幅は3cm程度であった。本研究では、東北地方太平洋沖地震本震直前に発生したこれら2つの地震 (Mw7.3, Mw6.5) について、震源域直上に設置された海底圧力計によって観測された海底上下変動および津波の記録から地震時すべり分布を推定した。

インバージョンにより津波の波源を推定したところ、どちらの地震も低角逆断層型地震による海底上下変動と調和する初期波高分布のパターンが得られた。さらに、これらの地震について地震時すべり分布をインバージョンにより推定したところ、3月9日の地震については、震央の北西側、すなわち断層の深い側の40km × 40kmの領域にすべりが集中し、最大すべり量は1.0mとなり、推定されたすべりから計算されたマグニチュードは Mw7.3 となった。また、3月10日の地震についても同様に断層すべり分布を推定した結果、主なすべりは震央の西側に分布し、その大きさは走向方向に20km、傾斜方向に40kmと推定された。最大すべり量は0.2mとなり、マグニチュードを計算すると Mw6.6 となった。

10日の地震の主すべり域は、9日の地震の主破壊域のすぐ南側に分布し、9日の前震と本震の破壊開始点に挟まれるように推定された。これらの結果をこの期間の地震活動と比較することにより、9日の前震に伴う余効すべりが小さな余震を頻発させ、さらには10日の地震を引き起こし、その後さらに余効すべりが南へと伝播し、東北地方太平洋沖地震の発生に至ったという連鎖的な破壊が起こっていたことを示唆する。また、9日の前震の津波の波源域について、1981年に宮城県沖で発生した M7.0 の地震の津波波源域と比較したところ、1981年の破壊域が再破壊した、あるいはその破壊域は9日の前震の破壊域に含まれている可能性が高いことがわかった。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 前震活動, 津波

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Foreshocks, Tsunami



## 3次元グリーンテンソル波形によるインバージョンで推定した2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程 Rupture Process of The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Inferred by a Waveform Inversion Using 3D Green's Tensor Synthetics

岡元 太郎<sup>1\*</sup>, 竹中 博士<sup>2</sup>, 原 辰彦<sup>3</sup>, 中村 武史<sup>4</sup>, 青木 尊之<sup>5</sup>

Taro Okamoto<sup>1\*</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>2</sup>, Tatsuhiko Hara<sup>3</sup>, Takeshi Nakamura<sup>4</sup>, Takayuki Aoki<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 九州大学 地球惑星科学部門, <sup>3</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト, <sup>5</sup> 東京工業大学学術国際情報センター

<sup>1</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Kyushu University, <sup>3</sup>IISEE, Building Research Institute, <sup>4</sup>JAMSTEC, <sup>5</sup>GSIC, Tokyo Institute of Technology

The March 11, 2011 Tohoku-Oki earthquake (GCMT Mw9.1) generated strong ground motions and large tsunamis, and caused devastating damages in the northeastern Japan. Estimating the rupture process of this event is very important for understanding the geophysical condition of the generation of megathrust earthquakes and the mechanism of the excitation of the large tsunamis.

We present the rupture process analysis of the 2011 Tohoku-Oki earthquake by using a non-linear full-waveform inversion method in which the teleseismic and the strong motion seismograms are jointly used. We incorporate the effect of the near-source laterally heterogeneous structure on the synthetic Green's tensor waveforms because the solution can be erroneous one if the effect is not considered (e.g., if only a flat layered structure is used) [1]. For the teleseismic P-wave synthetics we use a 2.5-dimensional finite-difference method [2]. For the strong motion synthetics we use a full three-dimensional finite-difference method that incorporates topography, oceanic water layer, three-dimensional heterogeneity and attenuation. Our simulation is accelerated by the use of hundreds of GPUs used in parallel [3]. We use a GPU supercomputer, the TSUBAME-2.0 in Tokyo Institute of Technology.

As a preliminary analysis we computed Green's tensor synthetic waveforms for 31 teleseismic and 15 strong motion components. We used 640 GPUs of the TSUBAME supercomputer for the calculation of each strong motion synthetics. The inferred slip distribution has large slips near and around the JMA epicenter and has relatively less slips near the trench: the major rupture apparently migrate toward the north of the epicenter and the maximum slip is about 40 m. We will present results by incorporating more strong ground motion records and discuss the effect of the choice of the Green's tensor waveforms on the solutions.

[1] Okamoto and Takenaka, *Earth Planets Space*, 61, e17-e20, 2009.

[2] Takenaka and Okamoto, in *Seismic Waves, Research and Analysis*, ed. Kanao Masaki, Intech, 2012.

[3] Okamoto et al, in *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering*, ed. D.A. Yuen et al., Springer, 2013.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 破壊過程, 3次元差分法

Keywords: 2011 Tohoku-Oki earthquake, rupture process, 3D finite-difference method

## 東北地方太平洋沖地震: 統合震源モデルとその破壊過程 2011 Tohoku earthquake: Unified source model and its rupture process

横田 裕輔<sup>1</sup>, 瀧澤 一起<sup>1\*</sup>, 藤井 雄士郎<sup>2</sup>  
Yusuke Yokota<sup>1</sup>, Kazuki Koketsu<sup>1\*</sup>, Yushiro Fujii<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 建築研究所国際地震工学センター

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute

大震災を引き起こした 2011 年の東北地方太平洋沖地震は、世界で初めて強震と遠地、測地、津波の稠密ネットワークによって観測された超巨大地震である。我々はまずこれらネットワークで得られたデータセットの分解能を見るため、チェッカーボードテストを実行した。その結果から、個別データセットそれぞれは限られた分解能しか持っていないことがわかった。この限られた分解能を克服するため、Koketsu *et al.* (2011) は遠地と強震、測地のデータセットに対して 3 重の合同インバージョンを行い、統合震源モデル第 1 版を構築した。次に Yokota *et al.* (2011) は津波データセットを含めた全データセットに対して 4 重の合同インバージョンを行い、統合震源モデル第 1.5 版を決定した。

以上のインバージョンでは 1 次元速度構造に対して計算された 1 次元グリーン関数しか用いられなかったが、我々は 3 次元速度構造を考慮に入れて統合震源モデル第 2 版を構築した。これを実現するため、我々は有限要素法を用いて 3 次元グリーン関数を計算した。その後、それぞれのデータセットに対して独立に個別インバージョンを実行した。続いて、強震と測地、津波のデータセットに対して 3 重の合同インバージョンを行い、統合震源モデル第 2 版を得た。なお、遠地データセットはチェッカーボードテストにおいて低い分解能しか示さなかったため、これらのインバージョンは遠地データセットを除いて行われた。

統合震源モデル第 2 版では地震モーメントが  $4.2 \times 10^{22}$  Nm となり、これは  $M_w$  9.0 に相当する。このモデルは次のような破壊過程を明らかにした。破壊開始後 40 秒間の小さな破壊ののち、第 1 の主破壊が 2.0 km/s という遅い速度で日本海溝に向かって広がった。その 20 秒後に、第 2 の主破壊が 1.7 km/s というさらに遅い速度で始まり、それが 36 m の最大すべりを伴った卓越した破壊になった。さらにその後、第 3 の破壊が 2.5 km/s という速度で南に伝播して、中心的な役割を担うようになる。遅い破壊伝播速度や日本海溝に向かった第 1 の破壊は、この地震による災害の特徴を説明することができる。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 統合震源モデル, 破壊過程

Keywords: 2011 Tohoku earthquake, unified source model, rupture process

## 1952年と2003年十勝沖地震の類似性と相違性 Similarities and differences of the 1952 and 2003 Tokachi-oki earthquakes

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

Hiroaki Kobayashi<sup>1\*</sup>, Kazuki Koketsu<sup>1</sup>, Hiroe Miyake<sup>1</sup>, Hiroo Kanamori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> カリ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年十勝沖地震は気象庁による震源位置がそれぞれ41.706 °N, 144.151 °E, 深さ54 km、41.779 °N, 144.079 °E, 深さ45 kmと決定されており、共にプレート境界の地震である。また、規模はそれぞれ $M_{JMA}$  8.2 (1952年)、 $M_{JMA}$  8.0 (2003年)とされている。これら二つの地震は、震源位置も非常に近く、規模も同程度であることから、この地域で繰り返し発生した巨大地震である可能性がある。

これまで、1952年十勝沖地震については、近地波形を用いた震源過程解析 (Yamanaka and Kikuchi, 2003) や津波波形を用いた震源解析 (Hirata *et al.*, 2003; Satake *et al.*, 2006) が行われているが、両者のすべり分布には相違点が見られていた。この原因として、近地波形記録の多くがS波到達後に振り切れてしまっており、近地波形のみでは十分な継続時間を解析できない点が挙げられる。

そこで、本研究では、1952年十勝沖地震について、近地波形に加えて、十分な継続時間を確保できる遠地波形を用いた解析を行うことにより、震源過程の全体像を把握すると共に、2003年十勝沖地震についても同様の手法を用いて解析を行った上で、両者を比較し、類似性と相違性を検討することを目的とした。

1952年については、波形のデジタルデータが存在しない。そのため、当時の地震計により記象紙に記録されている波形をデジタル化することによってデータを得た。2003年については、近地波形はK-NETから、遠地波形はIRIS-DMCから入手したものを使用した。その際、1952年の解析で使用する観測点と同一または、近傍の観測点を含むようにした。

まず、このようにして得られた波形を用いて、波形比較を行った。その結果、1952年は大きな二つのイベントから構成されており、一つ目のイベントによる波形は2003年のものと似ていることがわかった。また、波形の初動部分の比較から、1952年は小さなイベントが先行して起こっていたと推測された。

次に、近地波形と遠地波形のジョイントインバージョンによる震源過程解析を行った。その結果、波形比較から推測されていたように、1952年は二つのイベントから構成されており、最初に西側が破壊された後、東側に破壊が進展していることがわかった。西側のイベントの震源時間関数は、小イベントに伴う時間ずれを考慮すると、2003年のものとよく似ており、また、すべり領域もほぼ重なっていることが確認された。

以上より、1952年十勝沖地震の西側イベントと2003年十勝沖地震は繰り返し発生した巨大地震であると考えられる類似性を持っているが、1952年十勝沖地震の東側イベントと小イベントは2003年にない1952年に固有という相違性を示している。

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, 固有地震

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

## 遠地実体波を用いた 2004 年スマトラ島沖地震の震源過程解析 Rupture process of the 2004 Sumatra earthquake using teleseismic body waves

吉本 昌弘<sup>1\*</sup>, 山中 佳子<sup>1</sup>

Masahiro Yoshimoto<sup>1\*</sup>, Yoshiko Yamanaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名大・環境学

<sup>1</sup>Environmental Studies, Nagoya Univ

2004年スマトラ島沖地震は観測史上最も大きな地震の1つであり、断層長がおよそ1500km、震源時間は500秒以上と推定されている。この地震の破壊の全過程を明らかにするには、少なくとも震源時間以上の時間を用いてインバージョンを行う必要がある。しかし、従来多く行われてきた波線理論に基づく震源過程解析では後続波の計算が難しく、後続波が到達する前までの時間で区切って解析を行う等されていた。またこのような手法ではW phaseのような長周期の波は計算不可能であった。Ammon et al., (2005)ではこれらの波を計算できるSpectral Element Methodを用いて震源過程解析を行っているが、周期20-2000秒といった比較的長周期な実体波・表面波を用いるに留まっている。また、彼らはstrike方向にdip角の異なる3枚の平面断層を仮定しているが、strike方向に長いスマトラ沖地震はこの断層モデルでは大きな不連続を生み出してしまふ。

本研究では、短周期成分も含めて後続波も全て計算できるDirect Solution Method (DSM)を用いてより詳細な震源過程解析を行った。DSMの計算は竹内希氏(東大地震研)のプログラム(<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/takeuchi/software/>)を用いて計算を行った。地球モデルは球対称のIASP91(Kennett and Engdahl, 1991)を使用し、最大周波数1Hzまで計算を行っている。計算したグリーン関数はKikuchi et al. (2003)の波形インバージョン手法を用いてすべり分布を決定する。仮定した断層面はプレート境界をstrike方向に連続となるように矩形小断層を配置したHoechner et al., (2008)のものを用いた。

主な結果は以下の通りである:  $M_w = 9.1$ , 震源時間 = 500 sec, 破壊伝播速度 = 2.5-3.0km/s。計算された理論波形は後続波やW phaseを含め良く説明できている。推定された最も大きなすべりはスマトラ島南西から西にかけて位置する。Ammon et al., (2005)の解析ではスマトラ島南西の仮定した断層の継ぎ目ですべりの大きな不連続が見られるが、我々の結果では3°Nから6°Nまで連続的に大きくすべる結果となった。ニコバル島にもやや大きなすべりが2つほど存在するが、アングマン島ではほとんどすべらない結果となった。

## トンガ海溝付近の繰り返し地震の検出と短い繰り返し周期 Short recurrence intervals of repeating earthquakes in the Tonga subduction zone

阿部 史門<sup>1\*</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>  
Shimon Abe<sup>1\*</sup>, Satoshi Ide<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学・理・地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup>Dept. EPS, Univ. Tokyo

トンガ海溝はプレート収束速度が大きい沈み込み帯で地震活動も活発であり、海溝に沿ってプレート収束速度が大きく変化している。本研究ではこの地域における繰り返し地震を探索し、複数の繰り返し地震グループを同定した。

ANSS カタログより、トンガ地域の 1991-2011 年の M5 以上 60km 以浅のイベント 1399 個について、27 観測点の広帯域地震波形を IRIS DMC よりダウンロードし、0.02-4Hz のバンドパスフィルターをかけた。オーストラリアの観測点 CTAO の上下動波形に対して S 波の理論走時付近 800 秒間のウィンドウで相互相関関数を計算した。この相互相関係数の最大値が 0.9 より大きい 2 つの地震を繰り返し地震と判定した。さらに繰り返し間隔が大きく変化しない 11 組、45 個の地震を繰り返し地震と同定した。ほぼすべての地震は低角逆断層のメカニズムを持ち、ほとんどのグループでは観測点間相対相似のイベントによるずれは 0.5 秒未満である。これは典型的な地震サイズに比べて明らかに小さい。

各グループでの繰り返し間隔は地震サイズの割に短い。例えば 1993 年から 2011 年までに M 6 の地震が 5 回発生し、平均繰り返し間隔は 4.3 年となる。繰り返し周期を Nadeau and Johnson [1998] のスケール則を用いて規格化すると、トンガでの繰り返し間隔は東北日本やサンアンドレアスの繰り返し地震と比べて短い。この違いはプレート収束速度の違いで説明できる。

キーワード: 繰り返し地震, トンガ沈み込み帯  
Keywords: repeating earthquake, Tonga subduction zone

Earthquake depth estimations in the Po Plain (North Italy) using teleseismic data: influence on stress drop.

Earthquake depth estimations in the Po Plain (North Italy) using teleseismic data: influence on stress drop.

Jean Letort<sup>1\*</sup>, Massa Marco<sup>3</sup>, Cotton Fabrice<sup>1</sup>, Guilbert Jocelyn<sup>2</sup>, Drouet Stephane<sup>1</sup>, Pacor Francesca<sup>3</sup>, Traversa Paola<sup>4</sup>  
Jean Letort<sup>1\*</sup>, Massa Marco<sup>3</sup>, Cotton Fabrice<sup>1</sup>, Guilbert Jocelyn<sup>2</sup>, Drouet Stephane<sup>1</sup>, Pacor Francesca<sup>3</sup>, Traversa Paola<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTerre Universite de Grenoble 1, CNRS, F-38041 Grenoble, France., <sup>2</sup>CEA/DAM/DIF, F-91297 Arpajon Cedex, France.,  
<sup>3</sup>Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Italy., <sup>4</sup>EDF, Aix en Provence, France  
<sup>1</sup>ISTerre Universite de Grenoble 1, CNRS, F-38041 Grenoble, France., <sup>2</sup>CEA/DAM/DIF, F-91297 Arpajon Cedex, France.,  
<sup>3</sup>Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Italy., <sup>4</sup>EDF, Aix en Provence, France

On May 2012, the central part of the Padano-Emiliana Plain (North Italy), has been shocked by a dramatic sequence of earthquakes, with highest Mw 6.0. These events were very shallow (~ 5-10 km) with low stress drops and large ground-motions amplitude have been observed in the fault area. On the opposite, on the last 25th and 27th January other two deeper moderate earthquakes (either with Mw 4.9) occurred in the same area (south of Parma). These two events made very few damages and no victims, but have been felt also far from the source, which could be explained by their important focal depths (33 and 65 km respectively). Hence, a study of depth influence on seismic properties is of great interest. However, Po plain is a very complex area, the largest alluvial basin of northern Italy, characterized by anomalous propagation dues to the variable thickness of quaternary alluvium and with complex Moho discontinuities (Appenines Moho, Alpine Moho and Ligurian Moho): depth estimation can be sometimes challenging. Recent seismicity studies proposed that a deeper subducting slab of Adriatic lithosphere could occur as well in this area and the question about the depth estimation resolution remains open.

Based on teleseismic dataset, we have used coherent depth phases detected on CTBTO arrays (comprehensive-test-ban treaty-organization), using cepstral methods as well as focal mechanism estimations from genetic algorithm inversions to constrain the depths of all recent events above magnitude 3.8 in this area. The use of the teleseismic records gives the opportunity to reduce uncertainties due to complex crustal propagations during regional depth estimations. Moreover, pmP reflexions, observable on some teleseismic records, prove that, at least one event, (January 27, 2012) occurred below the Moho discontinuity, strengthening the hypothesis of the active slab.

Then, we have focused on characterizing the link between depth and stress drop, as it is a crucial parameter for ground motion prediction models. Hence, In addition of our new improved depth catalog, good stress drops evaluations are needed. These stress drops have been extracted from source spectra (magnitudes and corner frequencies, assuming Brune 's model), using the regional North Italy dataset collected in the last years by the strong-motion network (RAIS, INGV). We have used an iterative Gauss-Newton method developed by Drouet et al. (2011), which aims to separate source, sites effects and propagation contributions in the acceleration spectra. Inverted attenuation parameters are similar to those estimated by Castro et al. (2013) and sites effects have been checked to be coherent with the H/V profiles from the RAIS web site (<http://rais.mi.ingv.it/>), which strongly validate the isolated source spectra, thus, the associated stress drops. Finally, depth and stress drop are shown to be strongly correlated as depth events show high stress drop. Hence, in the global aim to predict ground motions, it seems that depth should be taken account in a more systematic way; especially as new seismic equipments (for instance CTBTO arrays) afford now better resolution for this crucial parameter.

キーワード: depth, stress drop, teleseismic, Po Plain, parametric inversion, corner frequency

Keywords: depth, stress drop, teleseismic, Po Plain, parametric inversion, corner frequency

## 三軸条件下における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 Relationship between $f_c$ and $M_0$ for AE from continuous and broadband records under a triaxial compressive condition

吉光 奈奈<sup>1\*</sup>, 川方 裕則<sup>2</sup>, 高橋 直樹<sup>3</sup>

Nana Yoshimitsu<sup>1\*</sup>, Hironori Kawakata<sup>2</sup>, Naoki Takahashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 立命館大学, <sup>3</sup> 三井住友建設

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Ritsumeikan University, <sup>3</sup>Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.

これまでに、実験室における岩石の圧縮破壊試験から、試料内で発生する微小破壊 (Acoustic Emission; AE) を利用して断層の成長を詳細に調べる試みが行われてきた [例えば, Yanagidani et al., 1985; Lockner et al., 1991]。しかし、実験室で得られた知見を自然地震に応用するには、そもそも岩石試料内で発生する微小破壊と自然地震が同じ現象なのか否かを明らかにする必要がある。一般的に、破壊を特徴付けるためには、コーナー周波数や地震モーメントといった、破壊パラメタと呼ばれる破壊の力学的挙動を示す物理パラメタが用いられる。これまでに、マグニチュード-4程度の地震までについては、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スケールリング (三乗則) が規模によらず成立することが示されている [例えば, Abercrombie, 1995; Kwiatek et al., 2011]。しかし、より小規模な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。本研究の目的はAEが三乗則に従うかどうかを明らかにすることである。

過去の岩石破壊試験でAEの集録に用いられてきた圧電素子は、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破壊パラメタ推定には不適であった。そのため Sellers et al. [2003] は広帯域トランスデューサによるAE集録を実施し、破壊パラメタの推定を試みた。しかし、推定されたパラメタはAE単独での三乗則を満たしていなかった。その原因として、自然地震の発生する圧力環境とは異なる大気圧下での実験であったことや、高周波成分の波形較正が不十分であったことなどが考えられる。そこで本研究では、既存の実験技術では不可能であった封圧下での複数チャンネルによるAE集録を初めて実現し、スペクトル全体に較正を施すことによって、より信頼性の高いAEの破壊パラメタの推定を試みた。さらに、AE単独のコーナー周波数と地震モーメントがどのような関係を示すのかを調べるために、取りこぼしなく大小さまざまな規模のイベントを集録するための連続集録も実現した。

直径50 mm、高さ100 mmの円柱形のWesterly花崗岩について、試料の周囲7点と上下2点に新たに開発した耐圧容器に封入した広帯域圧電トランスデューサ (感度帯域: 100-2000 kHz) を配置し、約6時間に渡る三軸圧縮試験を実施した。サンプリングは20 MS/s、封圧は10 MPaで、差応力が破壊強度 (296 MPa) に達した後、46 MPa程度降下するまで載荷を継続し、急速に除荷して試料を回収した。得られた連続記録 (数回の1分以内の欠測を含む) に対してAICを用いたオートピックを実施し、最小二乗法により震源決定を行った。P波速度 (5700 m/s) は、差応力200 MPa時に試料内を透過させた波から推定した。実験全体で決定された震源6794個のうち、イベント発生レートが急激にあがった破壊強度後の2つの時間帯 (それぞれ約3分間) に発生したイベント群について、クラスタリングをおこなった。震源距離が2 mm以内で相互相関値 (BPF: 100-300 kHz) が0.8以上のイベント群を同一クラスタとみなし、2つの時間帯の最大クラスタに対して破壊パラメタの推定を実施した。

イベント波形のS波部分のスペクトルに対して、Yoshimitsu et al. [2012] と同様の手法で較正を行い、S波変位スペクトルを得た。4点以上でS/Nが2倍以上の記録が得られた1000個程度のイベントについて、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。

各クラスタに含まれるモーメントマグニチュード-8から-7程度のイベントについて、得られたコーナー周波数と地震モーメントの値は、AE単独で三乗則を満たしていた。さらにこれらは、これまでに見つかっている自然地震の破壊パラメタが持つ三乗則の延長上に位置していた。2つのクラスタで破壊パラメタの値に顕著な差は見られず、応力降下量は0.4 MPaから12 MPaの間に分布していた。

この結果により、岩石試料内での破壊の性質が自然地震と一致することが明らかになり、実験室で得られる知見を自然環境へ適用できる期待が高まった。

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, AE, 岩石破壊実験

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

## 南アフリカ金鉱山地下 1km 深で観察された既存弱面に密集する高 b 値の微小破壊 Microruptures concentrating on pre-existing planes at 1 km depth in a South African gold mine and their high b-values

直井 誠<sup>1\*</sup>, 中谷正生<sup>1</sup>, 大槻 憲四郎<sup>2</sup>, 矢部 康男<sup>2</sup>, Thabang Kgarume<sup>3</sup>, Gilbert Morema<sup>4</sup>, Joachim Philipp<sup>5</sup>, Sifiso Khambule<sup>6</sup>, Thabang Masakale<sup>6</sup>, Luiz Ribeiro<sup>4</sup>, 森谷祐一<sup>2</sup>, 村上 理<sup>7</sup>, 堀内 茂木<sup>8</sup>, 川方 裕則<sup>7</sup>, 吉光 奈奈<sup>7</sup>, 宮川幸治<sup>1</sup>, 渡邊篤志<sup>1</sup>, Tony Ward<sup>4</sup>, Ray Durrheim<sup>3</sup>, 小笠原 宏<sup>7</sup>

Makoto Naoi<sup>1\*</sup>, Masao Nakatani<sup>1</sup>, Kenshiro Otsuki<sup>2</sup>, Yasuo Yabe<sup>2</sup>, Thabang Kgarume<sup>3</sup>, Gilbert Morema<sup>4</sup>, Joachim Philipp<sup>5</sup>, Sifiso Khambule<sup>6</sup>, Thabang Masakale<sup>6</sup>, Luiz Ribeiro<sup>4</sup>, Hirokazu Moriya<sup>2</sup>, Osamu Murakami<sup>7</sup>, Shigeki Horiuchi<sup>8</sup>, Hironori Kawakata<sup>7</sup>, Nana Yoshimitsu<sup>7</sup>, Koji Miyakawa<sup>1</sup>, Atsushi Watanabe<sup>1</sup>, Tony Ward<sup>4</sup>, Ray Durrheim<sup>3</sup>, Hiroshi Ogasawara<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 東北大学, <sup>3</sup> CSIR, <sup>4</sup> Seismogen, <sup>5</sup> GMuG, <sup>6</sup> OHMS, <sup>7</sup> Ritsumeikan Univ., <sup>8</sup> Home seismometer corp.

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

平板状鉱脈の採掘による応力集中で最大 M3 級程度の地震が誘発される, 南アフリカ Cooke 4 shaft (旧 Ezulwini 鉱山) の地表下 1 km に, Mw -5 以下の破壊まで検知可能な Acoustic Emission (AE) 観測網を展開し, 観測を行なっている. 直井・他 (2012; 地震学会ポスター発表) では, 約 2 ヶ月間に収録された波形データに対して, 自動震源決定処理 (堀内・他, 2011) と, Mw の推定を行い, 365,237 イベントからなる AE カタログを作成し, このうち約 90% が採掘空洞直近で発生 (以下, stope cluster) しているのに対して, 残りの 10% のほとんどは複数の平面状クラスタ (以下 planar cluster) に属していることを示した. また, stope cluster の AE については, そのサイズ分布が, 採掘発破直後 1 分間であっても, 1 日以上経過した後であっても, b 値がおよそ 1.3 の GR 則に従うことを示された. 我々の AE 観測網 (検知限界 Mw -1 程度) の記録からは Mw -3.7 から 0 の範囲で, また, 解析領域・期間を広げた, 鉱山がルーチ的に運用している地震観測網データの解析からは Mw -1.2 から 1 の範囲で b=1.3 の GR 則に従っていた. このことは, Stope cluster のイベントは, Mw -3.7 から 1 の範囲で b=1.3 の単一の GR 則に従うサイズ分布をもつポピュレーションであることを示唆する.

本発表では, Planar cluster の AE 活動とそのサイズ分布について報告する. Planar cluster の中からその広がり大きいものを選び出し, 10 m から 80 m の広がりを持つものを 7 つ同定した. それぞれのクラスタは, 採掘前線から 20 m ~ 70 m の位置に存在し, 314 個から 8667 個の AE からなる. 7 つのクラスタのうち, 1 つは観測網を貫くように走っている既知の地質断層 (Zebra 断層) に重なっており, 別の 2 つについては, AE の震源分布から同定されたクラスタと我々がアクセス可能な坑道との交点で, Joint と思われる弱面が観察された. 残りのクラスタも既存弱面に関連した活動と思われる. これらは本研究で観察した 2 ヶ月の間は定期的に活動しており, また, 観測網周辺の採掘が始まった 2009 年以降, 鉱山地震観測では各 planar cluster 付近でクラスタの広がりと同程度の破壊サイズをもつようなイベントの発生は検知されていないので, planar cluster の活動は大きなイベントの余震ではなく定期的なものと考えられる. これら 7 つの planar cluster に対して Double Difference 法による相対震源決定を行い, その震源分布を観察したところ, 薄いところでは 50 cm 程度の厚みの中にほとんどの震源が集まる, 強く密集した面状分布を示していることがわかった. 分布は非常にハイコントラストで, ステップオーバー, ブランチなどに対応すると思われる震源の並びを示すものもみられた. 7 つの planar cluster を構成する AE の 99.8% は, Mw -2 以下のイベントであり, 非常に小さな AE まで観測しないと存在が確認できないクラスタである. 特に先述した Zebra 断層を描き出すように発生している AE については, その最大 Mw が -3.0 であった. また, Planar cluster のサイズ分布はどのクラスタでもべき乗則に従うが, その傾き (b 値) は 1.38 から 2.19 という, 先述した stope cluster に対する b 値の典型的な値 (1.3) に比べて高い値を示す事がわかった.

Planar cluster の特徴である極端な面的集中は, 活断層周辺の定期的微小地震活動の特徴 (e.g., Liu et al. 2003; Hauksson 2010) とは必ずしも一致しない. Stope cluster に対しては自然地震に対して典型的に観察される b 値 ( $b \sim 1$ ) に比較的近い値が観察されたのに対して, Planar cluster が異なる b 値を示したことは, stope cluster・自然地震に対する b 値がどちらも三次元体積中の様々な弱面のサイズ分布を反映しているのに対し, planar cluster の AE はひとつの巨視的弱面のもつ下位不規則構造 (例えば面の粗さ) を反映する微小破壊, すなわち, 通常の微小地震とは別のポピュレーションとみることが適切かもしれない.

キーワード: 微小破壊, 地震活動, 南アフリカ金鉱山

Keywords: Acoustic Emission, seismicity, South African deep gold mine



## 大型二軸試験機によるスティックスリップ時のガウジ生成に消費されるエネルギーの見積もり Energy Partition to Gouge Generation during Stick-slip as Studied by a New Large Biaxial Friction Ap

東郷 徹宏<sup>1\*</sup>, 福山 英一<sup>2</sup>, 山下 太<sup>2</sup>, 溝口 一生<sup>3</sup>

Tetsuhiro Togo<sup>1\*</sup>, Eiichi Fukuyama<sup>2</sup>, Futoshi Yamashita<sup>2</sup>, Kazuo Mizoguchi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国地震局地質研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所, <sup>3</sup> 電力中央研究所

<sup>1</sup>Institute of Geology, China Earthquake Administration, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,

<sup>3</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry

To determine how much of the frictional energy consume in generating fault gouge and breccia is important because this fraction will affect the energy used for frictional heating which in turn can affect the mechanical properties of a fault during seismic fault motion. In addition, it is geologically important to understand the formation and developing process of the mature fault zones.

We have used the large biaxial machine newly constructed in National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), Tsukuba (Fukuyama et al. 2012 and Yamashita et al. 2012). This machine is developed to bridge a scale-gap between natural earthquakes (~km) and conventional laboratory experiments (~mm). The machine is built on the shaking table and used the hydraulic actuator of the table as the shear loading jack.

We have conducted seven biaxial friction experiments on Indian gabbro at average slip rates of 1.09 to 110 mm/sec, at normal stresses of 0.66 to 1.32 MPa and with displacements to around 0.42 m. Rectangular specimens of 1.5 \* 0.5 \* 0.5 m and 2.0 \* 0.5 \* 0.5 m with the surface irregularity less than 24 microns are used. The same specimens are repeatedly used in all experiments but the generated gouge was collected in each experiment by using the brush to measure the surface energy.

All experiments showed violent stick slip events except for the first run ( $v = 1.09$  mm/s, normal stress = 0.67 MPa) where a stick-slip amplitude increased from small to moderate values with increasing displacement. Overshooting of shear stress occurred during some stick-slip events at slip rates of 10 mm/s and 100 mm/s; that is, shear stresses dropped down to negative values during some stick-slip events. The entire stiffness of the apparatus and shaking table was determined as  $1.19 \times 10^8$  N/m by using shear force drop ( $dF$ ) and the displacement during slipping stage ( $dD$ ) in each stick-slip event suggested by Shimamoto et al. (1980). This value is consistent with the quasi-static analysis.

The energy fraction of the gouge generation is determined by the surface energy of gouge divided by the frictional energy during each experiment (Togo and Shimamoto, 2012). Specific frictional energy in each experiment was obtained by the integration of the shear stress multiply displacement and the values were 0.18 to 5.16 MJ/m<sup>2</sup>. Total surface energy of generated gouge in each experiment ( $E_A$ ) was obtained the following equation.

$$E_A = A_{BET} * r * m$$

Where  $A_{BET}$  is the specific surface area of generated gouge,  $r$  is the surface free energy and  $m$  is the mass of the generated gouge. Specific surface area was measured by the BET surface area using a BELSORP-mini made by BEL Japan, Inc. with nitrogen as adsorbate. Specific surface area of the generated gouge showed high value of 5.29+-0.59 m<sup>2</sup>/g at the first two experiments and it decreased with the increasing of the cumulative displacement to around 2.20+-0.49 m<sup>2</sup>/g and total surface energy of generated gouge was 37.3 to 627.0 J. Results show that grain crushing absorbed only  $9.63 \times 10^{-4}$  to  $1.39 \times 10^{-1}$  % of frictional work. Thus, host rock wearing and gouge generation is unlikely to be an important energy sink at least for mature faults with well-developed slip zone.

## 地表面載荷による地盤の破壊現象と破壊に伴う振動の発生に関する数値解析 Numerical analysis of failure of soil ground due to surface loading and generation of vibration induced by the failure

浅岡 顕<sup>1</sup>, 山田 正太郎<sup>2\*</sup>, 野田 利弘<sup>2</sup>

Akira Asaoka<sup>1</sup>, Shotaro Yamada<sup>2\*</sup>, Toshihiro Noda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 地震予知総合研究振興会, <sup>2</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup> Association for the Development of Earthquake Prediction, <sup>2</sup> Nagoya University

地盤力学ではこれまで、地盤を連続体近似した上で、計算力学的手法を用いて、地盤の破壊現象をひずみの局所化を伴う進行性破壊として取り扱ってきた。予めすべり面を与件として設定する解析とは異なり、地盤がどのような箇所に変形の局所化を生じ、それが時間、空間的にどう伝搬してゆくかを主たる議論の対象としてきた<sup>1), 2)</sup>。

本研究では、このような手法に則り、地盤の破壊問題の一例として、地盤工学で言う「支持力問題」を取り上げ、地盤破壊時に生じる地盤の振動（加速度運動）の特徴を調べる。計算には、土の骨格構造の働きを内包する弾塑性構成式 SYS Cam-clay model<sup>3)</sup> を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード *GEOASIA*<sup>4)</sup> を用いた。この解析コードは速度型の運動方程式を忠実に時間積分して運動を求める動的問題にも対応可能な解析手法である。

変位制御載荷時に、ひずみの局所化による円弧すべり破壊にあわせて、支持荷重の低下を引き起こすような地盤に対し、荷重制御で載荷を行ってみたところ、変位制御の荷重ピーク以降に加速度運動を伴う動的な破壊現象が発生した。このとき、破壊の衝撃によって周辺地盤に不規則な振動が現れる様子が計算された<sup>5)</sup>。この振動は、土木、建築で現れる長さスケールの破壊では、きわめて高周波数の成分が卓越する。この点に着目して、解析対象を300倍（高さ8m×幅96mから高さ2.4km×幅24.8km）にスケールアップして解析を行ってみたところ、破壊によって発生する周辺地盤の振動は、最大加速度に大きな変化がないまま、卓越周期が0.2～0.3秒程度から5～8秒程度に長周期化することが分かった。口頭発表では、上記荷重低下につながる滑り域（破壊域）でのせん断応力の降下量についても、算出される大きさを示す。

大規模なプレートの海底大深度沈み込み（潜り込み）域において、近年、地盤材料が採取されるようになってきている。著者らはまだその地盤材料に触れたことはないが、将来その材料の破壊前後の性状が、地盤力学でどの程度説明できるか、このような計算によって調べてゆきたい。

### 参考文献：

- 1) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (1994): Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, **34**(1), 91-106.
- 2) Noda, T., Yamada, S. and Asaoka, A. (2005): Elasto-plastic behavior of naturally deposited clay during/after sampling, *Soils and Foundations*, **45**(1), 51-64.
- 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, **42**(5), 47-57.
- 4) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, **48**(6), 771-790.
- 5) Noda, T., Xu, B. and Asaoka, A. Acceleration generation due to strain localization of saturated clay specimen based on dynamic soil-water coupled finite deformation analysis, *Soils and Foundations*, to be submitted.

キーワード: 進行性破壊, 振動, 連続体, 弾塑性地盤力学, 慣性力

Keywords: progressive failure, vibration, soil ground, elasto-plastic geo-mechanics, inertial force

SSS28-18

会場:303

時間:5月23日 11:45-12:00

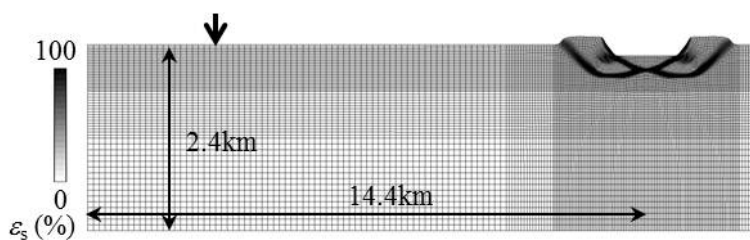


図1 ひずみの局所化を伴う地盤の破壊

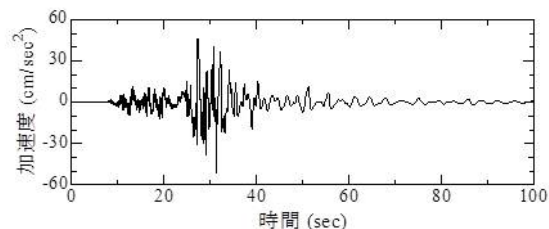


図2 破壊の衝撃による周辺地盤の振動  
(図1の矢印部分；鉛直方向)