

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^{1*}Hiroyuki Fujiwara^{1*}¹ 防災科研¹ 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^{1*}Takahiko Uchide^{1*}¹ 京都大学防災研究所¹ 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^{1*}, 八木 勇治², リベラ ルイス³
Yukitoshi Fukahata^{1*}, Yuji Yagi², RIVERA, Luis³

¹ 京都大学防災研究所, ² 筑波大学大学院生命環境系, ³ ストラスブール大学
¹DPRI, Kyoto University, ²Life and Environ. Sci., Univ. Tsukuba, ³EOST, 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^{1*}, 山下 輝夫²

Takehito Suzuki^{1*}, Teruo Yamashita²

¹ 東大・理・地惑, ² 東大地震研

¹EPS, Univ. Tokyo, ²ERI, Univ. Tokyo

我々の一連の研究では、熱・流体圧・非弾性な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な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 ϕ_{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 ϕ 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 (ϕ_{1*} と ϕ_{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 ϕ^* の時刻無限大での値 ϕ_{f*} は ϕ_{1*} と 1 の間の値をとれないことが明らかになった (ϕ^* が 1 であるとは ϕ が上限に達したということである)。これは、 ϕ^* が ϕ_{1*} に達すると上述の加速が起こるためである。空隙率 ϕ_{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、 ϕ_{f*} は ϕ_{2*} 以下の値をとれないこともまた示された。空隙率 ϕ_{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^{1*}, 亀伸樹¹

Tetsuya Kusakabe^{1*}, Nobuki Kame¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ 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、 (η, ζ) 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 (η, ζ) 空間で明瞭に分かれた。

二つの破壊過程の ζ 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 η 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学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^{1*}, 井出 哲¹
Shintaro Tamura^{1*}, Satoshi Ide¹

¹ 東大・理・地惑

¹ 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^{1*}, 三井 雄太², 江崎 隼輝¹
Yuji Yagi^{1*}, Yuta Mitsui², Hayaki Ezaki¹

¹ 筑波大学生命環境系, ² 北海道大学

¹Life and Env. Sci., Univ. of Tsukuba, ²Sci., 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 (~ 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 (~ 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^{1*}, 日野 亮太¹, 飯沼 卓史², 伊藤 喜宏¹, 太田 雄策¹, 鈴木 秀市¹, 稲津 大祐³, 齊藤 竜彦³, 金田 義行⁴
Tatsuya Kubota^{1*}, Ryota Hino¹, Takeshi Iinuma², Yoshihiro Ito¹, Yusaku Ohta¹, Syuichi Suzuki¹, Daisuke Inazu³, Tatsuhiko Saito³, Yoshiyuki Kaneda⁴

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

¹Graduate School of Science, Tohoku University, ²International Research Institute of Disaster Science, ³National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ⁴Japan 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^{1*}, 竹中 博士², 原 辰彦³, 中村 武史⁴, 青木 尊之⁵

Taro Okamoto^{1*}, Hiroshi Takenaka², Tatsuhiko Hara³, Takeshi Nakamura⁴, Takayuki Aoki⁵

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

¹Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo Institute of Technology, ²Dept. Earth Planet. Sci., Kyushu University, ³IISEE, Building Research Institute, ⁴JAMSTEC, ⁵GSIC, 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¹, 瀧澤 一起^{1*}, 藤井 雄士郎²
Yusuke Yokota¹, Kazuki Koketsu^{1*}, Yushiro Fujii²

¹ 東京大学地震研究所, ² 建築研究所国際地震工学センター

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²International 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 4.2×10^{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^{1*}, 纈纈 一起¹, 三宅 弘恵¹, 金森 博雄²

Hiroaki Kobayashi^{1*}, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹, Hiroo Kanamori²

¹ 東京大学地震研究所, ² カリフォルニア工科大学

¹ERI, Univ. Tokyo, ²Caltech

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^{1*}, 山中 佳子¹

Masahiro Yoshimoto^{1*}, Yoshiko Yamanaka¹

¹ 名大・環境学

¹Environmental 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、アンダ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^{1*}, 井出 哲¹
Shimon Abe^{1*}, Satoshi Ide¹

¹ 東京大学・理・地球惑星科学専攻
¹Dept. 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^{1*}, Massa Marco³, Cotton Fabrice¹, Guilbert Jocelyn², Drouet Stephane¹, Pacor Francesca³, Traversa Paola⁴
Jean Letort^{1*}, Massa Marco³, Cotton Fabrice¹, Guilbert Jocelyn², Drouet Stephane¹, Pacor Francesca³, Traversa Paola⁴

¹ISTerre Universite de Grenoble 1, CNRS, F-38041 Grenoble, France., ²CEA/DAM/DIF, F-91297 Arpajon Cedex, France.,
³Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Italy., ⁴EDF, Aix en Provence, France
¹ISTerre Universite de Grenoble 1, CNRS, F-38041 Grenoble, France., ²CEA/DAM/DIF, F-91297 Arpajon Cedex, France.,
³Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Italy., ⁴EDF, 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^{1*}, 川方 裕則², 高橋 直樹³

Nana Yoshimitsu^{1*}, Hironori Kawakata², Naoki Takahashi³

¹ 東京大学地震研究所, ² 立命館大学, ³ 三井住友建設

¹Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ²Ritsumeikan University, ³Sumitomo 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、これまでに見つい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^{1*}, 中谷正生¹, 大槻 憲四郎², 矢部 康男², Thabang Kgarume³, Gilbert Morema⁴, Joachim Philipp⁵, Sifiso Khambule⁶, Thabang Masakale⁶, Luiz Ribeiro⁴, 森谷祐一², 村上 理⁷, 堀内 茂木⁸, 川方 裕則⁷, 吉光 奈奈⁷, 宮川幸治¹, 渡邊篤志¹, Tony Ward⁴, Ray Durrheim³, 小笠原 宏⁷

Makoto Naoi^{1*}, Masao Nakatani¹, Kenshiro Otsuki², Yasuo Yabe², Thabang Kgarume³, Gilbert Morema⁴, Joachim Philipp⁵, Sifiso Khambule⁶, Thabang Masakale⁶, Luiz Ribeiro⁴, Hirokazu Moriya², Osamu Murakami⁷, Shigeki Horiuchi⁸, Hironori Kawakata⁷, Nana Yoshimitsu⁷, Koji Miyakawa¹, Atsushi Watanabe¹, Tony Ward⁴, Ray Durrheim³, Hiroshi Ogasawara⁷

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

¹ Univ. of Tokyo, ² Tohoku Univ., ³ CSIR, ⁴ Seismogen, ⁵ GMuG, ⁶ OHMS, ⁷ Ritsumeikan Univ., ⁸ 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^{1*}, 福山 英一², 山下 太², 溝口 一生³

Tetsuhiro Togo^{1*}, Eiichi Fukuyama², Futoshi Yamashita², Kazuo Mizoguchi³

¹ 中国地震局地質研究所, ² 防災科学技術研究所, ³ 電力中央研究所

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

³Central 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 1.19×10^8 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/m². 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 m²/g at the first two experiments and it decreased with the increasing of the cumulative displacement to around 2.20 ± 0.49 m²/g and total surface energy of generated gouge was 37.3 to 627.0 J. Results show that grain crushing absorbed only 9.63×10^{-4} to 1.39×10^{-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¹, 山田 正太郎^{2*}, 野田 利弘²

Akira Asaoka¹, Shotaro Yamada^{2*}, Toshihiro Noda²

¹ 地震予知総合研究振興会, ² 名古屋大学

¹ Association for the Development of Earthquake Prediction, ² 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^{1), 2)}。

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 model³⁾ を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード *GEOASIA*⁴⁾ 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⁵⁾。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

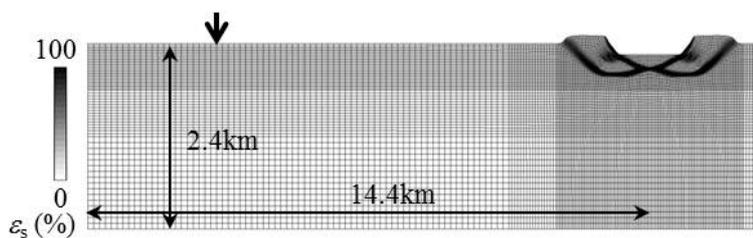


図1 ひずみの局所化を伴う地盤の破壊

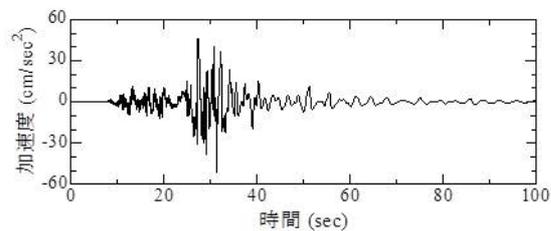


図2 破壊の衝撃による周辺地盤の振動
(図1の矢印部分；鉛直方向)

断層面の不均質性の性質; 断層帯のフラクタル幾何からの帰結 Fault plane heterogeneity determined by fractal geometry of fault zones

大槻 憲四郎^{1*}Kenshiro Otsuki^{1*}¹ 東北大学理学研究科地学専攻¹Dept. Geol., Graduate School of Science, Tohoku Univ.

**** 検討 1 ****

断層(帯)面は本来的に不均質であり、それが地震の多様性の原因である。断層帯が断層セグメントとジョグから構成され、それらが階層的に自己相似であることは、実験で作った断層帯に関して既に報告した(Otsuki & Dilov, 2005, JGR)。これに地質学的な小断層、および地表に現れた横ずれ地震断層に関するデータを加え、幾何学パラメータ(セグメントの長さ $L_S(i)$ 、ジョグの長さ $L_J(i)$ と幅 $W_J(i)$ 、単位は m、 i は階層ランク)の相関を整理すると、 10^9 にわたる全スケール領域においては、以下のような規則性が見える。

$$L_S(i+1) = 0.348 L_S(i)^{0.994} \quad \text{approx.} \quad L_S(i+1) = 0.365 L_S(i) \quad \text{--- (1)}$$

$$W_J(i) = 0.0278 L_S(i)^{1.06} \quad \text{approx.} \quad W_J(i) = 0.0402 L_S(i) \quad \text{--- (2)}$$

$$W_J(i) = 0.191 L_J(i)^{0.990} \quad \text{approx.} \quad W_J(i) = 0.189 L_J(i) \quad \text{--- (3)}$$

これらは、断層帯の幾何学的不均質性のフラクタル次元が 2 であることを示す。しかし、上記の 3 つのデータセット毎には、式 (2) と (3) は $W_J(i) = b L_S(i)^H$ 、 $W_J(i) = a L_J(i)^A$ と表され、比例定数とべき数は以下の通り。

$$\text{実験の断層帯では} \quad b=0.00385, \quad H=0.642, \quad a=0.00694, \quad A=0.516$$

$$\text{地質学的な小断層では} \quad b=0.333, \quad H=0.763, \quad a=0.141, \quad A=0.558$$

$$\text{横ずれ地表断層では} \quad b=0.164, \quad H=0.853, \quad a=3.18, \quad A=0.665$$

**** 検討 2 ****

地震学者は G-R 則と地震動振幅のパワースペクトル密度の k^{-2} falloff 等の経験則を満足する不均質分布を探してきた (Madariaga, 1979, JGR; Andrews, 1980, JGR; Frankel, 1991, JGR など)。その結果は、静的応力降下一定なら、 $D=2$ であるという。他方、式 (1) と (2) からは相似次元は 2 である。上述の式 $W_J(i) = b L_S(i)^H$ の H はハースト指数に相当し、 H と D は $D=E+1-H$ で関係づけられる (E はユークリッド次元)。横ずれ地震断層に関しては $H=0.853$ であったので $D=2.15$ となる。Mai & Beroza (2002, JGR) は波形インバージョン等によるすべり分布のデータを解析し、平均的には $D=2.29$ 、 $H=0.75$ とした。これらは筆者の値とほぼ一致する。

**** 検討 3 ****

式 (1) は断層全体がまず大きく 3 つのセグメントに分割されていることを示す。他方、Mai & Beroza (2002, JGR) によれば、地震断層のすべり分布の相関距離は断層長さの約 $1/3$ であり、両者は全く調和的である。このような断層から発生する地震のサブイベントは主イベントの $1/3$ の長さスケールを持っているはずであるが、Bersenev (2001, JGR) の結果はほぼ期待通りである。これらのことは、断層面の幾何が不連続的(階層的)なフラクタルであることを示す。Ben-Zion & Rice (1995, JGR) によれば、現実的な複雑なすべりパターンを実現するには強く急激な不均質性が必要だというのが、セグメント+ジョグの階層構造はそれに相応しい。

**** 検討 4 ****

Scholz (1982, BSSA) は、横ずれ地震断層の長さが地震発生層の厚さより十分長くなっても、平均すべり量 U_m は長さ L_0 に比例するとした (L -model)。これは奇妙であり、議論が続いて来た。ところが、地表で測定した長い横ずれ地震断層の U_m と L_0 と関係は

$$U_m = 0.246 L_0^{0.46} \quad \text{--- (4)}$$

であり、べき数が 1 ではない。ジョグがすべりをピン止めするため stiffness が増加するので、すべりに対して有効な断層長さは $L_0^{0.461}$ に過ぎないのだと解釈される。近年の不均質断層面に関する数値実験 (Hillers & Wesnousky, 2008, BSSA; Dieterich & Smith, 2009, PAGEOPH など) は、この現象を再現している。

破壊表面エネルギーとの関係、断層帯の進化に関しては次の機会に発表する。

キーワード: 断層面, 幾何, フラクタル, 不均質性

Keywords: fault plane, geometry, fractal, heterogeneity

断層のステップ部における動的破壊の相互作用の数値シミュレーション Numerical simulations for interactions of dynamic rupture on fault step-over

金野 圭祐^{1*}, 吉岡 祥一²

Keisuke Kanano^{1*}, Shoichi Yoshioka²

¹ 神戸大・理・地球惑星, ² 神戸大・都市安全セ

¹Dept. of Earth and Planetary Sci., Kobe Univ, ²RCUSS, Kobe Univ

地表で見られる断層系は、屈曲・分岐・ステップなど大小さまざまな構造を持つ複数のセグメントから成り、その中でもステップ構造を持つ断層は、互いの断層の一部が重なり合っていることが多い。本研究では、断層破壊の動的シミュレーションにより、平行な複数の平面鉛直横ずれ断層における断層間の相互作用と、断層が重なり合う部分での破壊の停止について調べた。

手法は、Dalguer and Day (2007) の staggerd-grid split-node 法を用い、摩擦構成則は slip weakening を仮定した。初期応力場は一様、媒質は均質であるとした。3次元直交座標系を考え、 x 方向を断層に平行な方向、 y 方向を断層に直交する方向、 z 方向を深さ方向 ($z = 0\text{km}$ を地表) とした。 $-15\text{km} \leq x \leq 15\text{km}$, $y = 0\text{km}$, $0\text{km} \leq z \leq 15\text{km}$ を破壊可能な領域とし、これを第1断層と呼ぶことにする。第1断層内には初期破壊領域を設けた。 $-15\text{km} \leq x \leq 35\text{km}$, $0\text{km} \leq z \leq 15\text{km}$ を第2断層とし、断層間の距離を変えながら数値計算を行った。断層は左横ずれとし、伸長性ステップを考えた。

その結果、断層間の距離にかかわらず、第2断層の破壊は第1断層の端に位置する地点 ($x = 15\text{km}$ 付近) から励起された。第2断層で破壊が励起されると第1断層と同様、破壊領域は広がっていったが、オーバーラップした部分では第2断層上の破壊は自発的に停止した。これは第1断層のすべりの影響により、第2断層のオーバーラップ部分の剪断応力が低下し、破壊強度に達しにくくなるためであると考えられる。また、断層間の距離を変えた場合、断層間距離が小さいほど破壊は停止しやすく、大きいほど停止しにくいことがわかった。これは断層間距離が小さいほど第1断層のすべりによる応力低下の影響が大きいためであると考えられる。ただし、さらに断層間距離を大きくしていくと第2断層での破壊そのものが励起されなくなった。

キーワード: ステップ構造, 動的破壊シミュレーション, 破壊の停止, SGSN 法

Keywords: step-over, spontaneous rupture simulation, rupture stop, staggerd-grid split-node method

急激な載荷応力の増加に対して逆に安定化する摩擦すべり：応力依存項が組み込まれた修正RSF則の非直感的な予測

Slip stabilization, a counterintuitive slip response to a sudden buildup of loading stress, predicted by a revised rate

亀伸樹^{1*}, 藤田哲史¹, Nakatani Masao¹, 日下部哲也¹

Nobuki Kame^{1*}, Satoshi Fujita¹, Masao Nakatani¹, Tetsuya Kusakabe¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo

Motivated by the existing discrepancies between the model predictions of Dieterich (1994) and the observed aftershock seismicity, we re-examined aftershock triggering on faults obeying the recently revised RSF incorporated with a newly noticed stress-weakening effect (Nagata et al., 2012) that seems eventually free from contradictions with laboratory friction experiments. Time-to-instability analysis, which is necessary as a specific nucleation model to get on the original theoretical framework of Dieterich's aftershock modeling, was numerically conducted to derive the resultant aftershock sequences obeying the revised RSF. It was found that certain improvements towards common observations, in terms of raised seismicity and shortened delay before Omori decay. However, the improvements were far too small to resolve the huge quantitative gap in the characteristic stress (direct effect coefficient 'a' times 'normal stress') between laboratory values and what is inferred from observed aftershock sequences. On the other hand, through many numerical simulations of slip response to a stress step imposed at different timings in the seismic cycle, we noticed a counterintuitive behavior of the revised RSF. When a sufficiently large stress step is imposed at a timing somewhat before entering self-accelerating stage of the seismic cycle, the timing of earthquake can be delayed rather than advanced. In this case, the earthquake will occur after several oscillatory cycles resembling slow slip events, which might be usable as a marker for a fault at a certain stage in the seismic cycle. This behavior itself is a potentially important finding in earthquake mechanics and a laboratory confirmation of the counterintuitive response of a frictional fault to a stress step, which is an unintended prediction by the revised RSF, is desired in the near future.

Reference

Kame, N., Fujita, S., Nakatani, M. and Kusakabe, T., Effects of a revised rate- and state-dependent friction law on aftershock triggering model, *Tectonophysics* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.11.028>

摩擦パラメータの相似性と応力降下量について Dependence of earthquake stress drop on scaling of frictional parameters

吉田 真吾^{1*}, 加藤 尚之¹

Shingo Yoshida^{1*}, Naoyuki Kato¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ERI, Univ. Tokyo

吉田・加藤 (2005) は、様々な半径 r をもつアスペリティが分布しており、地震時にはひとつのアスペリティだけが破壊するという非常に単純化した場合について、前駆すべりと最終的な破壊域のサイズとの関係について議論した。速度及び状態依存摩擦則 (RSF) を仮定し、臨界すべり量を L とする。ふたつのエンドメンバーとして L が r に比例する場合と、 L が r によらず一定の場合を考える。前者の場合、大きな地震の前には大きな前駆すべりが起こる。一方、 L が一定であれば、前駆すべりの大きさは、最終的な地震の規模にほとんど依存しない。地震の開始と終わりだけを考えた場合は、両者とも原理的に起こりうるように思えるが、今回は地震サイクルにどのような違いが生ずるか調べるために、円形アスペリティを仮定した地震発生サイクルの 3 次元数値シミュレーションを行った。

簡単な考察により、 L が r に比例し、かつアスペリティでの $N(b-a)$ が同じ値をもつなら、応力降下量は最終的な破壊域のサイズ R によらないことを示せる。ただし、 a, b は RSF の摩擦パラメータ、 σ は法線応力である。 L が一定の場合については、暫定的な結果ではあるが、数値シミュレーションにより応力降下量が $R^{-0.43}$ に比例することがわかった。 L が r に比例して大きくなる場合に比べ、破壊エネルギーが小さいので応力がそれほど蓄積する前に地震が発生するためである。このような傾向は中規模以上の自然地震では示されていない。なお Kato (2012) も、2 次元シミュレーションの結果、及び破壊力学的考察に基づき、破壊エネルギーが地震規模によらない場合は応力降下量が $R^{-0.5}$ に比例することを指摘している。

キーワード: 応力降下量, 相似性, 速度及び状態依存摩擦則, アスペリティ

Keywords: stress drop, scaling, rate- and state-dependent friction law, asperity

孤立したアスペリティでの複雑な地震サイクル Complicated recurrence of slip events on a uniform circular asperity

加藤 尚之^{1*}
Naoyuki Kato^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Numerical simulation of repeated occurrence of slip events on a fault patch (asperity) is conducted to understand the mechanism of irregular sequence of slip events. The fault is uniformly shear loaded at a constant rate, and frictional stress acting on the fault is assumed to obey a rate- and state-dependent friction (RSF) law. A circular patch with velocity-weakening frictional property is embedded in a fault with velocity-strengthening frictional property elsewhere. A numerical simulation is conducted by varying the characteristic slip distance L of the RSF law. Slip behavior changes as L increases. When L is small, seismic slip events (earthquakes) repeatedly occur at a constant time interval. As L increases, recurrence of slip events becomes complex. Period doubled slip pattern, where seismic and aseismic slip events alternately occur, multiperiodic pattern, and aperiodic patterns occur. At the same time, slip tends to be aseismic with increasing L . The distributions of shear stress on the fault before the slip events are variable because of variations of the residual stress in the preceding slip event and aseismic sliding during an interseismic period. This variation in shear stress causes the complex sequence of slip events. Iteration maps of the recurrence intervals of slip events are examined by taking a plot of T_i versus T_{i+1} , where T_i denotes the time interval between the i th and $(i+1)$ th slip events. Each iteration map for aperiodic sequence of slip events is expressed by a simple curve, suggesting that the occurrence time of the next event is predictable from the previous time interval and the slip event sequence exhibits deterministic chaos. To compare the simulation result of sequence of slip events on a velocity-weakening patch embedded in a velocity-strengthening region, a numerical simulation of slip on a velocity-weakening patch enclosed by unbreakable barrier. In this case, no complex recurrence of slip events is observed. When L is smaller than a critical value, seismic slip events repeatedly occur at a constant interval. On the other hand, stable sliding occurs when L is larger than the critical value. This result indicates that the complex slip behavior for a velocity-weakening patch embedded in a velocity-strengthening region comes from the interaction between the velocity-weakening and velocity-strengthening regions.

キーワード: 地震サイクル, アスペリティ, カオス, シミュレーション, 摩擦

Keywords: earthquake cycle, asperity, chaos, simulation, friction

プレート境界すべりのアンサンブル予測にもとづくプレート境界地震発生予測システムの構築

Earthquake forecasting system based on sequential data assimilation of the slip on the plate boundary

堀 高峰^{1*}, 宮崎真一², 兵藤 守¹, 中田 令子¹, 金田 義行¹

Takane Hori^{1*}, Shin'ichi Miyazaki², Mamoru Hyodo¹, Ryoko Nakata¹, Yoshiyuki Kaneda¹

¹ 海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジェクト, ² 京都大学大学院理学研究科

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ² Graduate School of Science, Kyoto University

本研究では、プレート境界でのすべりの時空間変化の数理モデルと地表変位をデータとした観測方程式を用いた地震発生予測システムの構築を進めている。数理モデルにもとづいた様々なシナリオ計算を、京コンピュータや地球シミュレータによる、多数のパラメタセットの同時数値シミュレーションによって行い、シミュレーション結果のデータベースを構築する。また、逐次データ同化手法の一種である SIS を適用して、シミュレーション結果と観測データとの合い具合による重み付けを行なう。その適用例として、数値実験で東南海地震の発生時期や、東南海地震後から南海地震発生までの間隔推定を行うとともに、実データへの適用として、地震発生サイクルシミュレーションの地震間の地殻変動と GPS データとの比較を行った。まだ限られたシナリオのみの計算ではあるが、過去十数年の平均的な地殻変動と整合する結果が得られている。

2011年 Mw9.0 東北地震に伴ったスーパーサブイベントの可能性 A hypothesis of a super subevent associated with the 2011 Mw9.0 Tohoku Earthquake

川崎 一朗^{1*}, 石井 紘¹, 浅井 康広¹
Ichiro Kawasaki^{1*}, Hiroshi Ishii¹, Yasuhiro Asai¹

¹ 東濃地震科学研究所

¹Tono Research Institute of Earthquake Science

川崎・他(2012)は、国内のほぼ800km以内の多くのGPS観測点の変位波形は、単純な箱形断層モデルによる半無限媒質の理論合成波形と大まかに合うことを示した。しかし、次の未解決の問題が残ったので、下述の解析をおこなった。なお、川崎・他(2012)の箱形モデルは、Koketsu et al. (2011)のDモデルを下敷きにしたものである。(問題点1)西日本一帯の観測点の顕著なU成分の説明できない。特に関東一帯ではU成分が卓越する。(問題点2)東濃地震科学研究所の陶史の森観測点の応力記録上の、S波主要動から20~30秒ほど遅れで到達する、パルス幅10秒~20秒の後続波(主要動よりも振幅大)が説明できない。

図1は、N90W、N125W、N145Wの3つの方向のGPS観測点の変位波形(黒)と川崎・他(2012)のモデルによる理論合成波形(赤)を、S波速度3.8km/sで補正して、震源に近い順に並べたものである。0秒がJMAが決めた発震時によるS波の到達時刻である。70秒と95秒の補助線の間、3つの方向に共通に、主破壊による理論合成波形から外れたパルス幅25秒~30秒、振幅数10cmの大きな後続SH波が走り抜けたことが分かる。3.8km/sで伝わるのでラブ波ではない。後続SH波は3つの方向で同じ時間遅れで到達しているため、後続SH波の震央は、主アスペリティ内か、極近傍である。

後続S波を主破壊面上の副アスペリティとして説明できないかどうかを最初に検討したが、低角逆断層はほとんどSH波を出さないため、副アスペリティとして解釈する余地は無いように思われる。後続SH波をもたらした副破壊は、主破壊と異なって横ずれ成分が卓越する別の断層と考える他は無い。後続SH波の符号は山形方向を境に逆転するので、副破壊のメカニズムを仮に垂直横ずれ断層とすると、走向は~N60Eか、~N150Eである。上盤内の走向N60Wの垂直横ずれ断層を出発モデルに、試行錯誤で以下の断層モデルを求めた。走向N145E、断層の傾き85°、滑りの方向15°(東西圧縮左横ずれ)、断層の下端の深さ40km、断層の長さ30km、幅20km、食い違い200m、破壊伝搬速度~2.5km/s(東北端から南西端へのユニラテラル)、ライズタイム15秒、地震モーメント 5.3×10^{21} Nm (Mw8.4)。このモデルによる理論合成波形は、後続SH波の特徴を大まかに説明し、問題点1と2は、大まかに解決されたと言える。

主断層での滑り速度は1~2m/秒で、通常の内陸型地震の滑り速度と同程度である。一方、サブイベントの滑り速度は~10m/s、応力解放は100MPaと、桁違いに大きいので、このサブイベントをスーパーサブイベントと呼びたい。

主破壊による地震動が大きい方向では、スーパーサブイベントによる地震動の分離が困難で、主破壊による地震動に埋もれており、得られたモデルの曖昧さは大きく、大幅な改訂も必要かもしれない。しかし、パルス幅25秒~30秒と数10cmの大きな振幅を同時に説明するためには、「滑り域が小さく、その割に滑り量が極めて大きい巨大地震」という特異性は変わらないと思われる。

断層面の傾きとずれの方向を決めるとき、応力記録上のパルスはほぼ10秒の後続波群と、8kmしか離れていない土岐観測点の周期ほぼ25秒の変位波形を同時に合わせることによって、GPS変位波形のみを解析するときよりも時間軸を拘束し、発進機構も拘束する。

後続SH波に付随して、房総半島と相模湾沿岸部では、周期20秒、peak-to-peak振幅40cmほどの数サイクルの繰り返し振動波形が出現する。震央により近い北茨城と銚田で小振幅のフェイズが房総半島と相模湾沿岸で共鳴して桁違いに大きな振幅になったように思われる。この共鳴は、荒川沈降帯では顕著ではない。

もう一つは、荒川沈降帯と千葉県中央部(末住吉層の分布域)で顕著な周期5秒程度の長周期地震動である。振幅は最大peak-to-peak 10cm。関東以外でも、県庁が所在する沖積平野では多くの場所で出現している。

Yue and Lay (2011)は、normal mode superpositionによって理論合成波形を作り、GPS1秒記録の解析を行ったが、観測記録に25秒のローパスフィルターを掛け、43 high signal-to-noise ratio stationsを選んでおり、その結果、後続SH波は無視されてしまっているように見える。

2011年Mw9.0東北地震は、あらっばく言えば、気象庁が決めた発震時(14時46分18秒)から40秒遅れで起こった、150kmx100kmの空間的スケール、滑り量~50mの主破壊(Mw9.0)と、さらに20秒遅れて主破壊域直下のスラブ内の30kmx20kmの規模、滑り量~200mのスーパーサブイベント(Mw8.4)の2要素から成り立っているように見える。

GPS1秒データを提供し、多くの点で協力を頂いた国土地理院の西村卓也博士に感謝します。

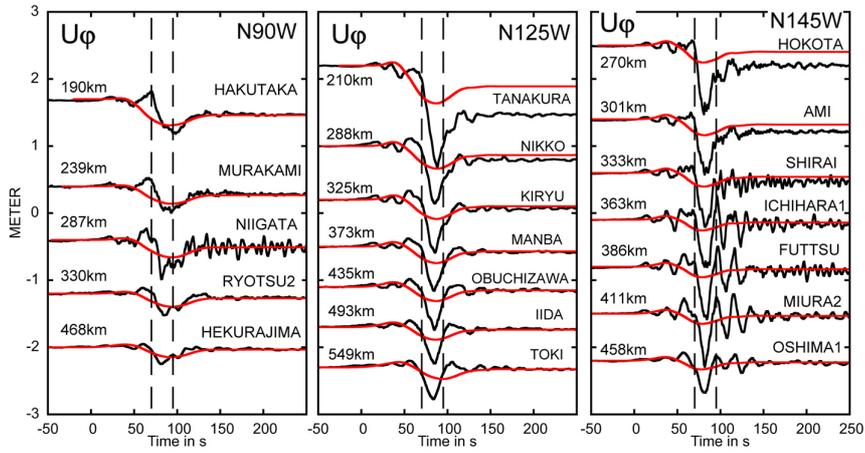
キーワード: 2011年東北地震, サブイベント, GPS1秒サンプリング記録, 応力連続記録, 滑り速度

Keywords: 2011 Tohoku earthquake, subevent, GPS high sampling data, Continuous stress records, dislocation velocity

SSS28-P07

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 18:15-19:30



2011 東日本沖 Mw9 地震エネルギーの発生 Earthquake Energy Generation of Mw9 East Japan Off 2011

南雲 昭三郎^{1*}

Shozaburo Nagumo^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. 論旨

一体何が起こったのか。この2011・3・11 東日本沖 Mw9 大地震は！この素朴な驚きを考察する。この論説は次の2つの見解を提示する。(1) Mw 9 の大エネルギー放出は Volume source (体積震源) によるものであり、断層地震論の断層面震源 (plane source) によるものではない。(2) Mw9 の大エネルギー放出は大規模な応力調節の活動であって、プレート境界面のアスペリティ (固着域) の滑りによるものではない。何故か！解は次の Mw9 特有な観測事実に見出される。

2. 体積震源の示徴

(2-1) 3 発の地震波大放 (東北・南関東縦断ラインアップ地震記録)。(2-2) 長い地震波エネルギー放出継続時間 (震源時間関数)。(2-3) 広大な震源域 (200km × 500km)。(2-4) 海洋マンツルの活動 (OBS 観測)。

3. Volume source の形成のメカニズム

何故 Volume source なのか！地震波の発生は Body Force (物体力) の発生であり、歪エネルギーの解放 (Release) である (弾性論)。これらが起こる 3 次元領域が Volume source (体積震源) と呼ばれる。

Body Force は地震波を生成する。断層地震論でも Equivalent Body force (等価物体力) を用いている (Aki & Richard)。その Body Force の発生は弾性体内部の応力の消失によって生ずる。その消失の原因の一つは、孔隙・クラックの圧潰 (crash) によると考えられ、もう一つは或る領域の周りに作用している拘束圧の低下によると考えられる。

何故なら。まず、地質岩体は含孔隙ひび割れ弾性体とみなされる。この地質岩体は重力及び構造運動の初期応力下にあり、増分変形を受け、内部の無数の孔隙・ひび割れの周辺には増分応力の集積が生じている。突然或る領域の孔隙・クラックが圧潰すると、その集積応力が消失する。集積応力の消失が Body Force の発生である。その領域の体積についてみれば、拘束圧の低下である (グリーンのテンソル発散定理)。すなわち地震の発生である。Volume source の形成である。

4. 広域 Volume source 形成

Mw9 という広域 (200km × 500km) の歪エネルギーの解放はどのように形成されたのか？海溝を挟んで両側斜面下の地殻・マンツル内部には、斜面に起因する自重圧力傾度に従い、海溝軸へ向って水平方向の力が作用している。海溝西側ではマンツルに島弧岩体の荷重がかかっている。そこには沈み込みと呼ばれる撓み変形と挫屈変形が生じている。海溝軸付近では更に、エクロジャイト化や蛇紋岩化などマンツル岩石の変成作用によると考えられる上向きの力、また下向きの力が作用しているであろう。

このような水平力による挫屈変形は上下力を受けて弾性不安定性を生じる (Biot, Incremental deformation)。そこには局部的に応力が集中し、その集積が大きい所が幾つもブロック状に存在し、広域に応力不均衡 (imbalance) を生じていたであろう。ブロック状境界のまわりには、長い年月に応力集積が高まる。何処かに一旦岩体破壊が起こると、集積応力が一挙に解放され、等価物体力が発生する。その集積エネルギーの解放は一つのブロックに限られず幾つものブロックが次々と破壊されてゆく。大地震の発生である。広域 volume source の形成である。

5. Mw9 という大規模な応力調節の活動のプロセス

広い領域 (200km × 500km) がどのようにして震源域となったのか？先ず岩体の大規模な挫屈破壊 (buckling fracture) が起こった。この挫屈破壊は海洋マンツル内部の撓み変形と挫屈変形の大きな処に起こり始めた。このマンツル岩体を割

るような破壊は地殻にも及んだ。この岩体破壊によって岩体の分離 (detachment) が生じた。ブロック的分離である。岩体のブロック的分離によって、岩体は周囲からの拘束から解放され、岩体の崩壊 (collapse) 破碎 (fracturing and crash) が生じた。これらのプロセスが最初の東北沖 2 発の地震波の大放出であろう。

これによって岩体の剛性率は失われ、流動化 (fluidization) し、流動化した岩体は岩体流動 (rock flow) を起こす。流動といっても、岩体流動は岩体全体の重力ポテンシャルが低下するような形状変化である。その運動は側方へ押し出るようなものであり、恰も将棋倒しのように伝播するものであろう、この岩体流動はその先端部や周囲に力を及ぼす。それが第 3 発目震源域南部の地震波大放出に至ったのであろう。以上のような一連のプロセスが広域にわたる応力不均衡をなす大規模な応力調節の活動である。

(Ide et al.2011) の震源過程に調和するモデル ~ 3.11 と宮城沖地震の関係 ~ Model that harmonizes with the rupture process of (Ide et al.2011)–Relation between 3.11 and off-Miyagi-earthquakes–

間瀬 博文^{1*}Hirofumi Mase^{1*}¹ 所属なし¹ none

3.11 超巨大地震の震央を通る、海岸から海溝までの宮城県沖の断面のモデルを提示した。ウェッジを上盤、沈み込みプレートとそれ以下を下盤として粘土でかたどった。それらを重ね合わせ左右(東西)から同じ力で押す実験を行った。境界の割れ(すべり)は深部より始まり浅部に向け「割れ前線」が上昇し、その後突然浅部の先端部が一気に剥がれることで境界全体の「一斉すべり」が発生した。これはモデルが、宮城県沖の特徴と1千年で3.11に至る過程を再現したものと考えた。(以上(1))また、この断面付近で発生した過去の顕著な地震42件の分析分類意味付けも行った(2)。3.11自体のすべり分布・破壊過程は(3)を重視している。モデルが(3)や過去の観測事実と調和すれば良い。

その後の実験でA)B)が明らかになった。A)「一斉すべり」は、すべりが「震源」でスタートし深部浅部双方へ向け伝播している。B)ウェッジの最深部は滑り上がるよりも下盤の斜面を押し潰そうとした。その斜面に剥離紙を挟んでみた。その効果の大小が「一斉すべり」に至る時間経過や終了時の全体的なすべり量に影響を与えた。つまり深部に於いて、下盤が上盤に対してスムーズに沈み込めなければイベントが停滞したり不完全燃焼に終わる。

(3)(4)からはC)D)E)が読み取れた。女川町を起点にほぼ南へ北緯38度線に達するまでの50km余りの直線Lを考える。C)すべり速度の時間変化図(40,60,75秒)で、南北からの回り込みは許すものの、直線Lで一旦伝播が堰き止められ、その後(90秒)最深部でのすべりが一気に生じたように見える(3)。D)同様に気仙沼~南三陸のすぐ沖合でも伝播が一旦停止したように見える(3)。E)仙台湾下の二重地震面に関し、上側地震面が大きく乱れその斜め下方に下側地震が集中している(4)。

A)は期待した最大の成果で当然(3)にも調和する。B)とC)E)は調和的である。したがって直線Lの midpoint と震央を通る直線、つまりは「~仙台市~震央~」の直線が宮城県沖の圧縮システムの「中心軸」と言えよう。D)の位置は「中心軸」から少し離れるが、この付近で発生したプレート内地震で境界面まで亀裂が生じたようだ(5)。D)は下盤の沈み込みを主体とする伝播がこの亀裂で一旦吸収された故と考えられ、基本要因はC)と同様である。

宮城県沖(の)地震発生の力学は説明したが実験(1)では「一斉すべり」直前の膠着状態が長く続いたので地震はその間に起こる“あだ花”と解釈した(2)。しかし以下の事実があった。(a)膠着状態は簡単に短くすることができたB)。(b)1936年以降の宮城県沖(の)地震の震源を外れた深部でのすべりが大きかった(3)。(c)異常に浅発の[1933M7.1]を除けば、ア[1936M7.4]イ[1937M7.1]ウ[1978M7.4]エ[2005/8M7.2]オ[2005/12M6.6]カ[2010/4M5.5]がほぼ「中心軸」上を発生順に3.11震央に接近(各震央と3.11震央までのおよその距離(km)はア73イ76ウ63エ52オ45カ40)している(気象庁月報及び(2))。

これらの震源の並びは境界面に一致しておらず(2)、さらに3.11震源までは依然距離を残している。しかしどの地震も相当な範囲に本震が拡がり多くの余震も付随するので、震源付近は勿論遙か先方の境界面まで割って剥離させている可能性がある。宮城県沖(の)地震は「割れ前線」上昇そのものではなからうか。

気象庁月報(1997/10~2011/02)「東北地方の震央分布図」中の「中心軸」両側25km以内の帯状地帯に注目した。孤立散在するものを無視し、発生にまとまりが見られる範囲を楕円で囲みその右端の経度の変化をグラフ化した。楕円に主観が入る余地はあるがデータが161個もあり大きな傾向はつかめるであろう。グラフは出入を伴いながらも着実に地震の東進を示し2010/11には明確に3.11の震央を越えた。この間のエ、オ、カの発生はグラフと調和的であった。

(1)[間瀬博文] 日本地震学会講演予稿集 2012 秋季大会 P2-75

(2)[間瀬博文] 同上発表原稿/<http://homepage3.nifty.com/hmase/upload120927web.htm>

(3)[井出哲] 東北沖地震の二面性-浅部のすべり過ぎと深部の高周波震動-/<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2011/12.html>

(4)[気象庁] 平成20年10月地震・火山月報(防災編)/10月30日宮城県沖の地震/領域a内の断面図

(5)[気象庁] 平成15年5月地震・火山月報(防災編)/特集1/2003年5月26日に発生した宮城沖の地震について

複雑な震源過程を有する地震の解析手法開発と2012年12月7日三陸沖の地震への適用

Development of Complex Seismic Source Inversion Method: Application to December 7, 2012 Sanriku-oki Earthquake

笠原 天人^{1*}, 八木 勇治¹
Amato Kasahara^{1*}, Yuji Yagi¹

¹ 筑波大学生命環境

¹Life and Env. Sci., Univ. of Tsukuba

震源過程は、震源域の応力状態や物性を推定する上で重要な情報であるが、地下に存在する震源断層の地震時の振る舞いを直接的に観測することは難しい。したがって、地球表層で観測される地球物理学的データから震源過程を求めるインバージョン手法が、Trifunac (1974) 以降多数提案されてきた。それらの手法の多くは、解析時に震源断層の形状を与える必要があり、通常は単純な平面断層が仮定されてきた。一方で、地表断層トレースの調査によって断層の形状は、折れ曲がりや枝分かれを伴う複雑な形状をしていることがわかっている。また、初動の震源メカニズム解とセントロイドモーメントテンソル (CMT) 解が異なる地震や、CMT 解が大きな Compensated Linear Vector Dipole 成分を伴う地震の存在は、地下の断層形状が複雑であることを示唆する。

一般に、不適切な断層形状を仮定してインバージョンをおこなうと、バイアスのかかった結果がえられ、解釈を誤る可能性が高まる。この問題を軽減するためには、震源過程だけでなく断層形状も同時に求めることが望ましい。本研究では、詳細な断層形状を与えずに震源過程を解析できる手法を開発した。この時、震源過程は震源断層を囲む領域内におけるモーメント開放の時空間分布として定式化され、震源断層の位置は解析によってモーメント解放密度の高い領域として求まる。

まず、開発された手法が正しく動作するかを確認するために、数値実験をおこなった。その結果、同時に異なるメカニズム解を持つサブイベントを設定した場合でも、メカニズム解やモーメント開放量分布を再現できることが確認できた。次に、2012年12月7日に三陸沖の日本海溝付近で発生した地震 (Mw 7.3) の実データへの適用をおこなった。解析の結果、逆断層型と正断層型のイベントが時空間的にきわめて近い位置で発生したことを示唆する解を得た。主な破壊域は、逆断層型のメカニズム解が卓越する震源の東側深部のパッチと、正断層型のメカニズム解が卓越する震源西側浅部のパッチの2カ所に分けられる。正断層型のパッチの下限は、約40 kmであり、Obana et al., (2012) により求められた2011年東北地方太平洋沖地震後のこの地域の正断層型地震の発生下限とほぼ一致する。震源を挟んで逆断層型と正断層型のパッチが活動したこと、震源付近でのモーメント開放がほとんどみられないことから、応力的にニュートラルに近い場で破壊が開始したことがわかる。また、2つのパッチの破壊がほぼ同時刻に開始したことから、本地震は、応力的にほとんどニュートラルな領域で破壊が開始し、深部では逆断層型、浅部では正断層型という応力場に調和的な破壊が引き起こされたことが示唆される。ただし、このような特異な震源像が、他の地震で報告された例は稀であり、より詳細な検討が必要である。

キーワード: 震源過程, インバージョン, 2012年12月7日三陸沖地震

Keywords: source process, inversion, December 7, 2012 Sanriku-oki earthquake

IBM(Isochrones Backprojection Method)を用いた岐阜県美濃東部の地震(2011/12/14 13:01 Mj5.1)の震源破壊過程の推定 Source mechanism of the eastern Mino earthquake (Mj 5.1) with Isochron Backprojection Method

大久保 慎人^{1*}, 雑賀 敦¹

Makoto OKUBO^{1*}, Atsushi Saiga¹

¹ 東濃地震科研

¹ TRIES, ADEP

公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所が運用を行っている超高密度地震観測網 [青木・他, (1999), 大久保 (2011)] の直下において, 2011年12月14日13:01にMj5.1の地震(岐阜県美濃東部の地震)が発生した。この地震はフィリピン海プレートのスラブ内(スラブモホ付近; 深さ約48km)で発生し, 正断層型のメカニズムを持った地震であった。また, 過減衰型加速度計(ミットヨ社製 JEP-6B3)と10kHz サンプリングロガー(シモレックス社製 SC-ADH10K)による高周波地震動観測では, この地震による地震動には, 1kHz 付近までの高周波成分が含まれていることが報告されている [大久保, (2012)]。

本研究では震源域直上に高密度に分布する地震観測網の利点を生かし, 地震の震源破壊過程を明確にするために Isochrones Backprojection 法(以下, IBM)を用いて岐阜県美濃東部の地震の震源破壊過程の推定を行った。IBM(たとえば, Festa and Zollo 2006, Pulido *et al.*, 2008)を用いることで, 震源近傍で得られた高周波の地震動波形から直接破壊過程を推定可能である。

解析には本震震源より65km以内にある, TRIES 超高密度地震観測網(HDSN)の地震動観測点といくつかのHinet 観測点で得られた地震動波形から本震主破壊のS波初動を読み取った。HDSNの加速度波形とHinetの速度波形からS波の加速度振幅変化を計算し, IBMの入力データとした。震源近傍の地震波速度構造として, Matsubara *et al.* (2008)の3次元速度構造から読み取ったP波速度とP波S波の速度比(1.73)を用いて4.4km/sのS波速度を得た。また, 解析を行う際には, 1. 破壊伝搬速度はS波速度を超えない。2. 破壊は松田の式(松田, 1975)によって得られる断層長以上には伸展しないと仮定した。

講演では, 本震の震源破壊過程, それと東傾斜する断層面上, 本震より深い位置に分布している余震との位置関係について議論する。

キーワード: 震源破壊過程, 主破壊, S波波形振幅, 高密度地震観測, 高周波地震動

Keywords: source mechanism, main rupture, s waveform, dense seismometer array, high frequency seismic motion

アウターライズ深部の逆断層型地震に誘発された浅部の正断層型地震 -2012年12月7日の三陸沖の地震 (Mj7.4) -

A deep revers outer-rise earthquake triggered a shallow normal outer-rise earthquake - The 2012 Off-Sanriku earthquake -

原田 智也^{1*}, 室谷 智子¹, 佐竹 健治¹
Tomoya Harada^{1*}, Satoko Murotani¹, Kenji Satake¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

2012年三陸沖のアウターライズ地震 (Mj7.4) について, 遠地実体波解析によるメカニズム解の推定を行った. その結果, まずアウターライズの深部で逆断層型の地震 (イベント1) が発生し, その約20秒後にアウターライズ浅部で正断層型の地震 (イベント2) が発生したことが分かった. それぞれのイベントについてすべり分布の推定を試みたところ, イベント1については破壊開始点周辺にすべりが得られ, イベント2については破壊開始点の両側に大きな目玉が見られるようなすべり分布が得られた. さらに, イベント1のすべり分布によるイベント2の高角の節面に対する静的クーロン応力変化 (CFF) を推定した結果, イベント2は CFFが正の範囲で発生したことが分かった. したがって, イベント2はイベント1によって誘発されて発生した可能性が高いと考えられる.

2011年東北地方太平洋沖地震の発生以後, 日本海溝のアウターライズ付近では正断層型の地震が多発している. 本研究では, 2012年12月7日に発生したアウターライズ地震について Kikuchi and Kanamori (2003) の遠地実体波解析プログラムによるメカニズムの推定を行った. 使用したデータは, IRIS-DMC から収集した震央距離 30°-90° の73観測点で得られた広帯域P波波形の上下動成分である. 2つの三角形パルスを設定してメカニズムを推定したところ, アウターライズ深部で発生した逆断層型の地震 (イベント1) と, イベント1の破壊開始約20秒後にアウターライズ浅部で発生した正断層型の地震 (イベント2) のサブイベントが得られた. 全体の地震モーメントは 8.8×10^{19} Nm (Mw7.2) で, 逆断層型 (深さ56 km) と正断層型 (逆断層型のイベントから南西の方向へ20 km, 深さ6 km) のメカニズムの地震モーメントは, それぞれ 5.9×10^{19} Nm (Mw7.1), 7.8×10^{19} Nm (Mw7.2) であった. Quick CMT カタログでは, 逆断層型の地震 (144.09°E, 38.01°N, Mw7.2, 深さ58 km) と, 12秒後の正断層型の地震 (143.83E, 37.77E, Mw7.2, 深さ20 km) の, 2つのCMT解が公表されている.

次に, 2つのイベントに対して, 求められたメカニズム解に基づいた波形インバージョンによってすべり分布を求めた. その際, 2つのイベントの点震源の位置をそれぞれの破壊開始点と仮定した. イベント1 (走向171.8°, 傾斜57.3°, すべり角68.5°) については, 破壊開始点周辺にすべりが得られ, 最大すべり量は2.52 m, 平均すべり量は0.43 mとなった. イベント2 (走向23.7°, 傾斜76.3°, すべり角-94.5°) に関しては, 観測波形からイベント1による理論波形を取り除いた波形について, イベント2の破壊開始以降 (20秒以降) の波形を用いた解析を行った. その結果, 破壊開始点の両側に大きな目玉が見られるようなすべり分布が得られ, 最大すべり量は2.35 m, 平均すべり量は0.82 mとなった.

最後に, イベント2がイベント1によって誘発されたのかどうかを確かめるために, イベント1のすべり分布を用いてイベント2の高角の節面に対する CFF を, Okada (1992) により計算した. その結果, CFF は, イベント1より浅い方向で広範囲にわたって正に求まり, イベント2は CFFが正の範囲で発生したことが分かった. したがって, イベント2はイベント1によって誘発されて発生した可能性が高いと考えられる.

今後, 余震の分布パターンと2つのイベントによる応力変化との関係について検討するために, マスターイベント法などによる本震と余震との相対震源の高精度再決定と余震のメカニズム解の推定を行い, イベント1・2によって計算された CFF との比較を行う予定である.

キーワード: アウターライズ地震, 遠地実体波解析, すべり量分布, CFF

Keywords: outer-rise earthquake, tele-seismic body-wave analysis, coseismic slip distribution, dCFF

MeSO-net を用いた中規模地震の破壊過程の解析 Rupture Process of Moderate-Size Earthquakes by the MeSO-net

西澤 航¹, 村越 匠^{1*}, 岩瀬 康行¹, 江口 孝雄¹, 酒井 慎一¹, 中川 茂樹², 平田 直², 本多 亮³, 木村 尚紀⁴

Ko Nishizawa¹, Takumi Murakoshi^{1*}, Yasuyuki Iwase¹, Takao Eguchi¹, Shin'ichi Sakai¹, Shigeki Nakagawa², Naoshi Hirata², Ryou Honda³, Hisanori Kimura⁴

¹ 防衛大学校, ² 東大地震研, ³ 神奈川県温泉地学研究所, ⁴ 防災科学技術研究所

¹National Defense Academy, ²ERI, Univ. of Tokyo, ³Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, ⁴NIED

これまで M5 程度の中規模地震の震源における破壊過程は、既存の地震観測網 (K-net など) の観測点間隔が 20km またはそれ以上であることもありバックプロジェクション法による解析事例はなかった。そこで、本研究では稠密地震観測網である MeSO-net の地震波形データを用いたバックプロジェクション法により、中規模地震の破壊過程の解析を試みた。解析には、MeSO-net の観測点の整備が完了した 2011 年 12 月から 2012 年 11 月までの期間に関東地方で発生した中規模地震を選び、それらの P 波初動の上下動成分の波形データを用いた。その際、観測波形の相関を良くするため震央距離 40km から 70km の観測点を選択した。

本研究で解析した地震の一例として、2012 年 9 月 14 日 2 時 22 分の M 5.1 の地震をあげる。この地震の震源は北緯 35.9 °, 東経 140.6 °, 深さ 42 km である。その発震機構解の 1 節面を走向 50 ° / 傾斜 83 ° とし、もう 1 つの節面を、走向 238 ° / 傾斜 7 ° とした。バンドパスフィルタは 1.0Hz ~ 3.0Hz, 振幅を平均化するウィンドウは 0.5 秒間として、バックプロジェクション法による破壊過程の解析を行った。解析の結果、平均破壊速度は約 4.0km/s で南西方向へ進み、破壊は約 1.0 秒間で停止した。破壊面積については約 10km² と推定された。これは M5 の地震により破壊される断層の面積の一般的な数値と矛盾しない。他の M5 程度の地震についても、同様に破壊の時空間分布を捉えることができた。また、観測点密度が破壊過程の時空間イメージの結果に及ぼす影響をみるため、MeSO-net の稠密地震観測網を使用した場合と K-net 使用した場合で比較を行った。その結果、M5 級の中規模地震を解析する場合は、MeSO-net 程度の稠密観測点データが必要であることもわかった。

キーワード: バックプロジェクション法, 破壊過程, MeSO-net, 中規模地震

Keywords: back-projection method, rupture process, MeSO-net, moderate-size earthquake

近地・遠地波形を用いた地震波エネルギーの推定 Estimation of Radiated Seismic Energy from Regional and Teleseismic Waveforms

木内 亮太^{1*}, James Mori¹
Ryota Kiuchi^{1*}, MORI, James¹

¹ 京都大学防災研究所
¹DPRI, Kyoto University

Radiated seismic energy from the seismic sources is a fundamental parameter for understanding source physics, but it has a large uncertainty. Therefore, it is important to compare different methods for estimating the radiated energy. Especially, we are interested in studying the apparent stress (rigidity multiplied by the ratio between radiated energy and seismic moment) of strike-slip earthquakes in the oceanic lithosphere, because it is often high (Choy and McGarr, 2002). However, this result is obtained from teleseismic P waves, and it is often difficult to correct for the radiation pattern of nodal arrivals, therefore, the estimated apparent stress may have a large variations.

In this study, we estimated the radiated energy for two large strike-slip earthquakes in Japan, the 2000 western Tottori earthquake (Mw 6.7) and the 2005 West off Fukuoka Prefecture earthquake (Mw 6.6), using both regional (less than 100km) and teleseismic (30deg < delta < 90deg) waveforms. To estimate the energy correctly, it is necessary to account for source effects (e.g., radiation pattern) and path effects (e.g., attenuation). We use only P waves for the teleseismic waveform, because of the strong attenuation of teleseismic S waves and interference with other phases. For the teleseismic waveforms we need to account not only direct P but also depth phase, pP and sP (Boatwright and Choy, 1986).

The results show that the radiated energy of two earthquakes are not high. We will examine the each data carefully, and evaluate the differences in results from the different teleseismic and locally recorded data.

キーワード: 地震波エネルギー, 見かけ応力, 横ずれ型地震
Keywords: radiated energy, apparent stress, strike-slip earthquake

Aftershocks Properties of the 2010 ML 6.4 Jiashian earthquake in Southern Taiwan Aftershocks Properties of the 2010 ML 6.4 Jiashian earthquake in Southern Taiwan

Chi-Chia Tang^{1*}, Cheng-Horng Lin¹

Chi-Chia Tang^{1*}, Cheng-Horng Lin¹

¹Institute of Earth Sciences, Academia Sinica

¹Institute of Earth Sciences, Academia Sinica

Large earthquakes often occur in unexpected locations and are followed by numerous aftershocks. Nevertheless, the aftershock properties of large earthquakes are not usually discovered in detail because a significant portion of aftershock sequences is missing in existing earthquake catalogues, mainly due to overlapping arrivals of seismic waves from these events. We examined waveform data of aftershocks of the 2010 ML 6.4 Jiashian earthquake recorded by the 19 stations of the Central Weather Bureau Seismic Network. We utilize a matched filter technique which Peng and Zhao (2009) used in detecting early aftershocks to discovery missing aftershocks. We use waveforms of 574 aftershocks as templates and scanned three-day data since the original time of mainshock. We identify ~ 4 times more aftershocks than listed in the catalogue of Central Weather Bureau. We find that newly detected events mainly concentrated within first 24 hours and most of them occurred with magnitudes < 2.0. The aftershocks migrated westward from the epicenter of mainshock, ~ 90 degree counterclockwise from the trend of adjacent faults. The seismicity rate of detected aftershocks is proportional to the inverse of time since the mainshock following the Omori Law.

キーワード: Aftershock, Jiashian, Taiwan

Keywords: Aftershock, Jiashian, Taiwan

アジョイント法による余効すべり域の摩擦パラメタの推定 An Adjoint Data Assimilation Method for Optimizing Frictional Parameters on the After-slip Area

加納 将行^{1*}, 宮崎 真一¹, 伊藤 耕介², 平原 和朗¹
Masayuki Kano^{1*}, Shin'ichi Miyazaki¹, Kosuke Ito², Kazuro Hirahara¹

¹ 京都大学, ² 海洋研究開発機構
¹Kyoto Univ., ²JAMSTEC

Afterslip sometimes triggers another earthquake in the time-scale of days to several years. Thus it may be possible to predict the occurrence of such a triggered earthquake by simulating the spatio-temporal evolution of afterslip with the estimated frictional parameters. To demonstrate the feasibility of this idea, we consider a plate interface model where afterslip propagates between two asperities following a rate and state friction law and adopt an adjoint data assimilation method to optimize frictional parameters. Synthetic observation data are sampled as the slip velocities on the plate interface during 20 days. It is found that 1) all frictional parameters are optimized if data set consist not only of the early phase of afterslip or acceleration, but also of decaying phase or deceleration and 2) that the prediction of the timing of the triggered earthquake is improved by using adjusted frictional parameters.

キーワード: 余効すべり, 摩擦パラメタ, データ同化
Keywords: afterslip, frictional parameters, data assimilation

水圧破砕によって誘発された地震の震源特性: 経験的グリーン関数を用いた解析からの考察

Source Parameter Study of Hydraulic Fracturing induced Microearthquakes using Empirical Green's functions

金 亜伊^{1*}, 飯田周平¹, RUTLEDGE, James²
Ahyi KIM^{1*}, IIDA, Shuhei¹, RUTLEDGE, James²

¹ 横浜市立大学, ² シュルンベルジェ

¹Yokohama City University, ²Schlumberger

Hydraulic fracturing is a technique used to allow economic production of gas and oil from low-permeability reservoirs. The technique is also used to enhance geothermal energy development. Currently, microseismicity induced by the fluid injection is routinely monitored to map the fracture growth process in real-time. A natural development is to characterize the mechanism of the microearthquakes. Understanding source characteristics of these events is expected to provide a better understanding of the fracturing process and the influence of pre-existing structures controlling the distribution of events. Although several focal mechanism studies have been done in gas and geothermal field, its estimation is often biased due to various errors. Often the most significant difficulty in retrieving the source parameters in these monitoring studies is from poor azimuthal coverage. To avoid these uncertainties in this study, we estimate the source parameters using the empirical Green's function (eGf) analysis. The eGf approach is advantageous because it can be performed with one receiver, and requires no assumption of geologic model. We deconvolve the smaller event from the larger events recorded at the same receiver to obtain the source time functions of the larger events. We use the source-time functions to fit the seismic moment and corner frequency of the source-time spectra using a least-squares curve fit to the f_2 spectra. The data we use were recorded during a hydraulic fracture imaging test in the Carthage Cotton Valley gas field of east Texas using two multi-level, three-component geophone arrays deployed in nearby monitoring wells. The treatments monitored include gel-proppant treatments using high viscosity fluids and low-viscosity water frac treatments. In this study we apply the eGf method to the events precisely relocated from two injection stages ($-2.4 < M_w < -0.6$). Preliminary result indicates source spectra of most events agree well with double couple event. We also examine the correlation of the corner frequency and seismic moment to investigate whether those events follows the self-similarity observed in tectonic events.

キーワード: 水圧破砕, 微小地震, 経験的グリーン関数, 震源スペクトル, 震源特性, スケーリング則

Keywords: Hydraulic fracturing, Microearthquakes, Empirical Green's function, Source spectra, Source characteristics, Scaling Law

三軸圧縮応力下の岩石の AE 活動に及ぼす封圧の周期的微小変動の影響 - b 値変動との比較 -

AE in rock under triaxial compression with small perturbation of confining pressure - Comparison with b-value variation-

佐藤 隆司^{1*}, 雷 興林¹
Takashi Satoh^{1*}, Xinglin Lei¹

¹ 産業技術総合研究所

¹GSJ/AIST

潮汐, ダム水位変化, 近傍での地震の発生や大地震の地震波の通過などによる応力の微小変化が地震活動に影響を及ぼすことが知られている。Tanaka (2010, 2012) は, 2004 年 Sumatra 地震 (Mw9.0) および 2011 年東北太平洋沖地震 (Mw9.1) の 10 年ほど前から地震発生と地球潮汐の相関が顕著になり, 本震発生後には相関がなくなったこと, 本震震源近傍で相関が特に高くなったことを示した。一方, Nanjo et al. (2012) はこれらの地震前後の b 値の時空間分布を調べ, Tanaka (2010, 2012) が示した地球潮汐と地震活動との相関と類似の変化があったことを示した。

我々は岩石破壊試験中に発生する AE を使って微小応力変化の地震活動に及ぼす影響を実験的に調べている。これまでに, 野島断層近傍で掘削された花崗岩試料 (佐藤・雷 (2010)) および人工的に作った亀裂を有する Westerly 花崗岩試料 (佐藤・雷 (2012)) を用いた三軸圧縮破壊実験において, 封圧に周期的な微小変動を与えた時の AE 活動への影響について報告した。これらの報告では主に AE 発生数に着目して解析を行ったが, Nanjo et al. (2012) の結果を受け, AE 活動と封圧変動の相関の変化と b 値変動の比較を行った。その結果, AE 活動と封圧変動の相関の増加と b 値の減少が時間的に比較的良く対応することが分かった。これは, 上記の M9 クラスの地震前後に見られた変化と調和的である。

<参考文献>

Nanjo et al., 2012, GRL, vol.39, L20304, doi:10.1029/2012GL052997.

佐藤・雷, 2010, 日本地震学会 2010 年度秋季大会, C11-04.

佐藤・雷, 2012, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, D31-3.

Tanaka, 2010, GRL, vol.37, L02301, doi:10.1029/2009GL041581.

Tanaka, 2012, GRL, vol.39, L00G26, doi:10.1029/2012GL051179.

キーワード: 周期的微小応力変動, AE 活動, b 値

Keywords: Small periodic stress perturbation, AE activity, b-value

中国四川盆地南西部碳酸塩岩貯留層における注水誘発地震の発生過程 A detailed view of the injection-induced seismicity in a carbonate gas reservoir in South-western Sichuan Basin, China

雷興林^{1*}, 馬勝利², 陳文康³, Chunmei Pang³, Jie Zeng³, Bing Jiang³
Xinglin Lei^{1*}, Shengli Ma², Wenkang³, Chunmei Pang³, Jie Zeng³, Bing Jiang³

¹ 産業技術総合研究所, ² 中国地震局地質研究所, ³ 自貢地震局

¹Geological Survey of Japan, AIST, Japan, ²Institute of Geology, China Earthquake Administration, ³Zigong Earthquake Administration

Seismicity at a gas reservoir located in the relatively stable Sichuan Basin, China, mirrors the injection pressure of unwanted water, suggesting that the seismicity is injection induced. Injection under high pressure on a routine basis began on 9 Jan. 2009, and continued to July 2011. During the injection period, over 120,000 m³ of water was pumped under a wellhead pressure of up to 6.2 MPa into the limestone formation of Permian 2.45 to 2.55 km beneath the surface. The injection induced more than 7,000 surface recorded earthquakes, including 2 M4+ (the largest one was ML4.4), 20 M3+, and more than 100 M2+ events. Data observed by a nearby local seismic network and five temporal stations provide a detailed view of the spatio-temporal distribution of the induced earthquakes. Most events were limited to depths ranging from 2.5 to 3.5 km, which is consistent with the limestone formation of Permian. In a map view, hypocenters are concentrated in a NNW extended ellipsoidal zone approximately 6 km long and approximately 2 km wide centered approximately 1 km northwest of the injection well.

The spatio-temporal distribution and other statistical results indicate that the triggered seismicity is characterized by four typical phases, which reflect the patterns of the injection rate and wellhead pressure. The largest ML4.4 events occurred when the wellhead pressure reached 0.9 MPa at the very beginning of injection. Various factors, such as the shear mechanism, the pattern of hypocenter distribution, and the fractal dimensions, indicate that the induced seismicity in the region resulted from the reactivation of pre-existing faults. Injected fluids diffuse outward along pre-existing faults, which were originally stressed, weakening the faults and leading to their reactivation. The intersections of a set of conjugate fractures are particularly suitable for fluid flowing. Some relatively large dipped faults likely bound the outward fluid flow and provide paths for upward leakage and downward flow.

The overall migration front follows a typical pore-pressure diffusion curve with a hydraulic diffusivity of 0.1 m²/s. There are also some fast responses of seismicity on pressure change reflecting pore-pressure diffusion along the surface of pre-existing faults with a hydraulic diffusivity on the order of 1 to 10 m²/s. Multi sources of evidence, such as the shear mechanism, pattern of hypocenter distribution, and small elevated pore pressure as compared with the least principal stress in the region show that the induced earthquakes occurred as a result of lowering of the effective normal stress on known or unknown pre-existing blind faults.

キーワード: 注水誘発地震, ガス田, 碳酸塩岩貯留層, ETAS モデル, 間隙圧

Keywords: Injection-induced seismicity, Gas field, Carbonate Reservoir, ETAS model, Pore-pressure

南アフリカ金鉱山 M1.5 地震極近傍の応力測定

In-situ stress measurement at the closest proximity of an M1.5 earthquake at Tau Tona gold mine in South Africa

小笠原 宏^{1*}, Gerhard Hofmann², 加藤春實³, Chris Stander², Gilbert Morema⁴, Trevor Clements⁵, Phil Piper⁵
Hiroshi Ogasawara^{1*}, Gerhard Hofmann², Harumi Kato³, Chris Stander², Gilbert Morema⁴, Trevor Clements⁵, Phil Piper⁵

¹立命館大学理工学部, ²Anglogold Ashanti Ltd. Rock Engineering, ³明間ボーリング(株), ⁴Seisimogen CC, ⁵Ground Work Ltd.

¹College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, ²Anglogold Ashanti Ltd. Rock Engineering, ³Akema Boring Ltd., ⁴Seisimogen CC, ⁵Ground Work Ltd.

In-situ stress measurements were successfully carried out in close proximity to a M1.5 damaging seismic event at 104 level (about 2950 m depth) at Tau Tona gold mine in South Africa. This event occurred on 3 December 2012, and on the 6th and 7th of February 2013, three overcoring stress measurements were done. The seismic event took place almost at the end of a pilot tunnel (see a photo attached), and significant dynamic rock mass ejection from the sidewall of the tunnel occurred. Elastic numerical modelling did not indicate any anomalous stress levels, but due to the severity of the damage it was important to better understand prevailing stress conditions. Stress measurement methods commonly used in South Africa (e.g. CSIR triaxial cell method or CSIRO HI method) was not suitable for such high stress conditions or adverse drilling conditions.

We used the BX CCBO technique (60mm diameter CCBO overcoring), a downsized version of the Compact Conic Borehole-end Overcoring technique (76mm diameter overcoring; Sakaguchi et al. 1992; Sugawara and Obara 1999; ISRM suggested). For overcoring, 6-15m BX pilot holes are drilled from tunnels at depths. Tools are used allowing implementation of the technique for typical South African geological drilling setups with small pneumatic machines. The procedure was first proven effective in South African gold mine conditions in 2011, on 98 L at Moab Khotsoeng Mine (about 3.0km depth) at an area with supposed minimal mining perturbation (Ogasawara et al. J. SAIMM 2012). The technique was also implemented on 28 and 29th of January 2013 at Mponeng Gold Mine, 120L (an about 3350 m depth) also at an area with least mining stress perturbation.

At both the 3.0km-deep site at Moab Khotsoeng mine and the 3.4km-deep site at Mponeng mine, the measured maximum principal stress was consistent with overburden pressure. The determined orientations of intermediate principal stress (the horizontal maximum principal stress) and its ratio to the maximum principal stress was also consistent with the stress fields that well accounted for the fault slip mechanisms of nearby M2-4 earthquakes in the mines (e.g. Hofmann and Murphy 2007; Hofmann and Scheepers 2010).

At the moment, we have to wait for lab test for elastic modulus of the cores recovered from the measurement hole. However, if we used a typical elastic modulus for the lithology of the site, the measured stress at 104L (about 3.0km depth with least mining) at Tau Tona was much larger than the measured stress at 120L (a 3.4km depth with least mining) at Mponeng mine.

No in-situ stress measurements have been carried out close to the area of the damaging seismic event before, and hence no stress information was available towards mitigating seismic risk. It was proven that the BX CCBO technique can be implemented in adverse underground conditions - high stress and limited shift working hours in the South African gold mines. We hope that stress measurement can be done regularly together with a pilot geological drilling program, prior to advancing the pilot tunnel, which will fundamentally contribute to mitigate seismic risk in South African gold mines.

We were very much encouraged to make additional plans to see more detailed of stress distribution of seismic sources in South African gold mines.

These measurements were funded by JST-JICA SATREPS and Anglogold Ashanti Ltd.

Photo. The M1.5 seismic damage at a pilot tunnel at 104L at Tau Tona, at the closest proximity of which the BX CCBO in-situ stress measurement was carried out. Harumi Kato and Gerhard Hofmann look at a potential rupture plane on the side wall. Photo by Hiroshi Ogasawara.

キーワード: 現場応力測定, 震源極近傍, 南アフリカ金鉱山, BX 円錐ひずみ法

Keywords: In-situ stress measurement, Closest proximity of a hypocenter, South African gold mine, BX CCBO technique

SSS28-P20

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 18:15-19:30

