

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様に見える。

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。

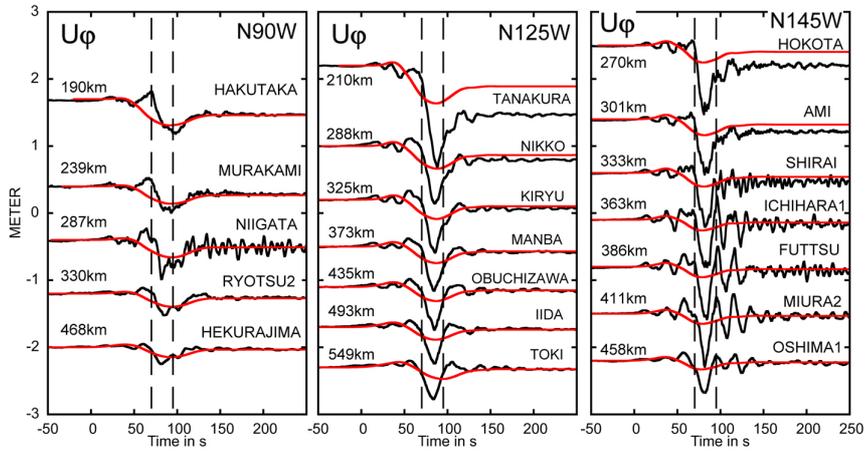
キーワード: 2011年東北地震, サブイベント, GPS1秒サンプリング記録, 応力連続記録, 滑り速度

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) 破砕 (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, 1 kHz 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

¹Earthquake 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炭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, 炭酸塩岩貯留層, 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

