

弾性プレートモデルから推定される沈み込み帯のせん断応力分布 Shear stress distributions of a subduction zone as inferred from elastic plate models

吉田 満^{1*}
YOSHIDA, Mitsuru^{1*}

¹ なし
¹ none

地震発生帯のせん断応力や破壊強度を理解することは地震発生メカニズムを究明する上で重要である。本稿では沈み込み帯付近の弾性体としての海洋プレートと大陸プレートのせん断応力分布を2次元有限要素法による平面ひずみの問題としてモデル解析する。弾性プレートモデルUMB-Plate(図)は海洋プレート(Plate 1)、大陸プレート(Plate 2)、上部マントル(LMS)と2つの遷移層、Plate 1とPlate 2の間のプレート境界層(PB)及びLMSとPlate 1の間の上部マントル境界層(UMB)から構成される。2つの遷移層は沈み込み帯付近の低粘性層に対応する。

Plate 1、Plate 2とLMSのヤング率(E)、ポアソン比(ν)は西南日本における地震サイクルシミュレーションの研究(堀・他, 2004)に使われたものを用いる。ヤング率は剛性率Gから公式 $E=2(1+\nu)G$ (戸川, 1980)を基に計算される。ゴム状弾性の軟鋼のヤング率(理化学辞典, 1988)と弾性ゴムのポアソン比(理科年表, 2002)がPBとUMBに使われる。UMB-Plateのサイズはx-, y-方向にそれぞれ625、325 mmで、厚さは2 mmである。図には長さが20万倍されたスケール表示もある。4.7 Mpaのリッジ押し力に相当する水平圧縮力1.4 tonがPlate 1の左側に加えられる。Plate 2の右側は固定される。Plate 1の右側は最初は応力解放として仮定される。沈み込む海洋プレート(Plate 1)の傾角は浅部サイトCとIの間で10度、より深部サイトIとXの間で27度である。サイトIは収束境界である。

モデルUMB-Plateに対して計算されたせん断応力はPBの上側のPlate 2では全体として正でPlate 1ではほとんど負を示す。サイトCの下の深さ10-30 kmのPlate 1の内部で正のせん断応力を示しているのは注目すべきである。サイトIの近くのPlate 2の端で最大せん断応力1.095 MPaを示している。高せん断応力領域は同様に30 kmより浅部でPBの上部に位置したスラスト帯に分布している。最小せん断応力 -2.8×10^{-6} MPaを示す領域は深さ55 km近くのUMBの下部に位置する。降伏条件(Kikuchi and Wada, 2004)の1つでせん断ひずみエネルギーにより定義されるミーゼス応力はサイトIの下のPlate 2の左側でやはり最大で19.25 MPaを示している。

モデルUMB-Plateは日本島弧の特定の地域を表していない。しかしながら、海洋プレートの厚さ30 km、長さ60 kmは西南日本の東海地域の地殻と上部マントルの垂直断面にむしろ近い。もしスラブが短いならば、スラブ内の地震メカニズムは負のせん断応力場に起こる正断層を示しやすく、沈み込む海洋プレートの上部の大陸プレートのスラスト帯は正のせん断応力場で起こる低角逆断層で特徴づけられる(瀬野, 2001)。計算されたせん断応力分布は上述の地震発生層の地震メカニズムと調和的にみえる。沈み込む海洋プレートの負の浮力の効果を調べる為にスラブ引っ張り力に相当する下方向引っ張り力をPlate 1の右側に加えると、せん断応力はPlate 1の沈み込む内部で正の領域が増し、Plate 2の内部で負の領域が増す傾向にある。

図. 弾性プレートモデルUMB-Plateの構成図と媒質の弾性定数。

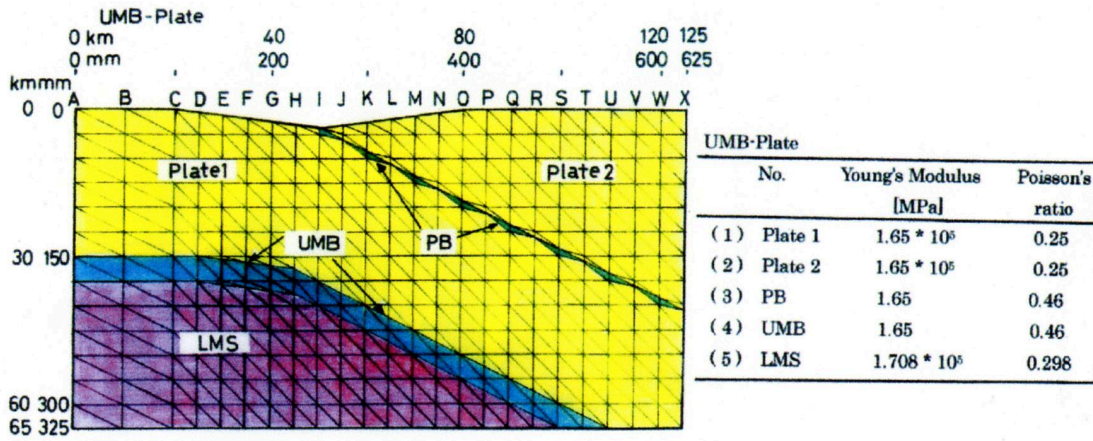
キーワード: せん断応力、沈み込み帯、弾性プレートモデル、2次元有限要素法
Keywords: Shear stress, Subduction zone, Elastic plate model, 2D FEM

キーワード: せん断応力、沈み込み帯、弾性プレートモデル、2次元有限要素法
Keywords: shear stress, subduction zone, elastic plate model, 2D FEM

SSS30-01

会場:A05

時間:5月25日09:00-09:15



スペクトル要素法を用いた動的効果を含む2次元 in-plane 地震サイクルシミュレーション手法の開発 Two-dimensional fully dynamic spectral-element simulations of long-term in-plane shear fault slip

清水 宏幸¹; Kaneko Yoshihiro²; 平原 和朗^{1*}
SHIMIZU, Hiroyuki¹; KANEKO, Yoshihiro²; HIRAHARA, Kazuro^{1*}

¹ 京都大学大学院理学研究科, ²GNS サイエンス
¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²GNS Science

今日に至るまで、地震サイクルシミュレーションが行われ、過去の地震発生履歴を説明してきた (eg. Tse and Rice 1986; Stuart, 1988)。その多くは、Rice(1993)で提唱された放射減衰項によって運動方程式の慣性項を近似する、準動的な定式化によって行われている。これは、慣性項の効果を全て考慮する動的定式化は CPU・メモリのコストが膨大なためである。一方、Lapusta et al. (2000, 2009)は動的効果を含み、地震性・非地震性のすべりから核形成過程まで、地震サイクルの全てを詳細に計算できる手法を開発した。その結果によれば、動的定式化によるシミュレーション結果は準動的定式化による結果と大きく異なり、繰り返し間隔や破壊開始点の相違など、地震サイクルの質的变化も生じることが示された (Thomas et al., 2014)。しかし、これらのモデルはスペクトル境界積分法に基づいており、簡単な断層モデルにしか適用できない。したがって、このような動的効果を含んだシミュレーションは沈み込み帯で発生するプレート間地震に対しては行われていない。

これまでの研究から、沈み込み帯におけるプレート間地震のような逆断層では、地震時に地球の自由表面との相互作用により断層の法線応力が変化することが知られている。こういった法線応力の変化は地震時の破壊過程に影響を及ぼすだけでなく、地震後の残留応力の変化によって長期的な地震のサイクルにも影響すると考えられる。したがって、傾斜断層による効果と動的効果の両方を含んだシミュレーションを行うことは重要と考えられる。

近年、Kaneko et al. (2011)において、動的な SEM (スペクトル要素法)と準静的な SEM のスイッチ型のスキームを用いることで動的効果を含んだ anti-plane の地震サイクルシミュレーション手法が開発された。本研究においては動的破壊コード SEM2DPACK (Ampuero, 2002)を拡張し、手法を実装した。また、プレート間地震を2次元的に取り扱うには in-plane な断層モデルを仮定するのが適切であるから、in-plane に適用できるよう手法の拡張を行った。In-plane な断層モデルにおいては、Kaneko et al. (2011)の anti-plane な断層モデルにおいては省略されていた断層垂直方向の変位を考慮する必要がある。このような断層垂直方向の変位は境界要素法などの手法では暗に考慮されているが、スペクトル要素法などの領域解法では陽に更新する必要がある。

本研究では拡張した手法を用いて、簡単な弾性体中の平面断層モデルを仮定して地震サイクルシミュレーションを行った。本研究のモデルは Kaneko et al. (2011; Fig.2)のモデルと同様であるが、in-plane 断層として扱っている。また、準静的スキームの代わりに準動的スキームを用いている。断層の境界条件としては速度と状態に依存する摩擦則を用いており、断層の両端には一定速度ですべる速度境界を設定している。本研究では開発したコードの正しさを評価するため、異なる空間的な離散化の細かさでのシミュレーション結果が変わらないことを確かめた。また、臨界核形成サイズを等しく設定した anti-plane のモデルと結果を比較することで地震サイクルの挙動について検証を行っている。準動的定式化と動的定式化の違いに関してはすでに anti-plane、3次元の場合で検証が行われているが (e.g. Lapusta et al., 2000; Lapusta and Liu 2009)、本研究でも純粋な in-plane 問題に関して同様の結果を得た。

本研究では地表を含む傾斜断層のモデルについても、同手法の適用を行っている。2011年東北地方太平洋沖地震を模した、均質半無限弾性体中の非対称な20度の傾斜断層モデルを仮定し、1つの地震イベントの動的破壊過程シミュレーションに成功している。また、地表と交差する対称な90度の傾斜断層モデルにおいて、地震サイクルのシミュレーションを行うことにも成功している。しかし、傾斜断層を扱う場合、現状では地震間の準動的取り扱いにまだ困難があり、発表ではそのことについても議論する。

キーワード: 地震サイクルシミュレーション, 動的シミュレーション, 速度・状態依存摩擦則, スペクトル要素法, プレート間地震

Keywords: computational seismology, earthquake cycle, rate and state friction law, spectral element method, fully dynamic, interplate earthquake

速度及び状態依存摩擦則に基づく釜石沖繰り返し地震の発生時の予測実験 Forecast experiments using friction law on occurrence times of the Kamaishi repeating earthquakes

吉田 真吾^{1*}; 加藤 尚之¹; 福田 淳一¹
YOSHIDA, Shingo^{1*}; KATO, Naoyuki¹; FUKUDA, Jun'ichi¹

¹ 東大地震研

¹ERI, Univ. Tokyo

Uchida et al. (2014)によると、釜石沖のプレート境界では、2011年東北地方太平洋沖地震が発生する前はM4.9程度の地震が比較的規則的に発生していたが、東北沖地震後、発生間隔が短くなり、また、マグニチュードが一時的に大きくなってM6クラスの地震も発生した。Uchida et al. (2014)は、このような推移は条件付き安定である大パッチの中に不安定な小パッチが存在するモデルなどで説明できるだろうと推察している。Yoshida, Kato, and Fukuda(2015)はそのようなモデルに基づき、Fukuda et al. (2013)によって求められた釜石沖地震震源域での余効滑りを仮定し、Nagata 則を用いて数値シミュレーションを行った。その結果、本震前には小パッチのみで地震を繰り返すが、本震後は余効滑りにより条件付き安定であるパッチ全体でM6クラスの地震が起こりうることを示した。また、計算された地震の発生時はある程度観測と一致していた。

本講演では、数値シミュレーションにより釜石沖繰り返し地震の発生時の予測実験を試行する。東北沖地震後、これまでに11回の繰り返し地震が発生した。10番目までの地震の発生時をある程度再現できるようにパラメータを調整し、ある基準で評価して予測に使えるようなモデルを選ぶ。それらについて、次の11番目の地震の発生時を計算し、平均操作を行い予測値とする。物理モデルとして不十分な点はかなりあるが、過去の地震の発生時が再現できていれば、将来の地震、特に直後の地震の発生時についてはある程度近い値が得られるかもしれない。どのような基準でモデルを評価するのが妥当かは今後検討するが、予測という観点からは10番目の地震の発生時の再現性を重視するのがよさそうに思われる。また、どのような平均操作により推定するのが妥当か、などについても考察し、シミュレーションを予測に取り入れる際の課題を整理する。

キーワード: 釜石沖繰り返し地震, 発生時, 予測実験, 数値シミュレーション, 速度及び状態依存摩擦則, 余効すべり

Keywords: Kamaishi repeaters, occurrence time, prediction experiment, numerical simulation, rate and state dependent friction law, afterslip

データ同化窓の設定と感度解析 Adequate Emplacement of the Data Assimilation Window and Sensitivity Analysis

日吉 善久^{1*}; 杉浦 望実¹; 堀 高峰¹
HIYOSHI, Yoshihisa^{1*}; SUGIURA, Nozomi¹; HORI, Takane¹

¹ 海洋研究開発機構
¹JAMSTEC

Comprehension of fault behavior in earthquake sequence inevitably requires to elucidate frictional properties on slip interfaces. One of the good candidates to grasp the properties is data assimilation.

Recently Kano et al. (2013) developed a methodology for applying an adjoint-based data assimilation method to constrain some of the frictional properties on a simplified fault model with synthetic afterslip observation data. They found that all the frictional parameters were optimized when both acceleration and deceleration phases of the observed slip-rate data were assimilated. Importance of their finding is that an adequate emplacement of the assimilation time window plays one of the key roles to optimize the frictional parameters.

In this research, we attempt to find where the assimilation time window should be placed on to constrain all the frictional parameters. It could be acceptable that the assimilation time window should cover portions of the slip rate time series having the highest sensitivity to perturbations of the frictional properties. To ensure the above notion, we make theoretical and numerical approaches.

First, we set a simplified fault model with a rate- and state-dependent law and an aging law, sketching characteristics of the long-term slow slip events (SSEs) recurring on the plate interface beneath the Bungo Channel in southwest Japan.

For searching the portions of the highest sensitivity, we take a first variation of the governing equations of the SSE model. This algebraic manipulation shows that the highest sensitivity appears in the acceleration phase of the slip rate time series.

We then make a series of synthetic data assimilation experiments to examine whether or not the highest sensitivity portion offer an adequate assimilation window. The experiments employ an adjoint data assimilation method to constrain frictional parameters of the Bungo SSE model with synthetic slip rate observation data.

In our presentation, we will demonstrate the results of the experiments that the acceleration part of the slip rate is expected to be necessary to retrieve all the frictional parameters on the slip interfaces.

Combining the results of the mathematical formulation and the synthetic data assimilation experiments, we may confirm that an adequate assimilation time window spans the portions having the highest sensitivity to perturbations of the frictional parameters. Also, the distribution of the sensitivities in the slip rate time series could be obtained as a priori knowledge through the algebraic manipulation of the governing equations.

キーワード: データ同化, 感度解析, アジョイント法
Keywords: data assimilation, sensitivity analysis, adjoint method

断層滑りの空間分布と滑り速度関数のパワースペクトル密度の関係 Power spectral density of slip distribution and slip rate function

平野 史朗^{1*}; 八木 勇治²
HIRANO, Shiro^{1*}; YAGI, Yuji²

¹ 筑波大学システム情報系, ² 筑波大学生命環境系
¹University of Tsukuba, ²University of Tsukuba

In view of energetics, earthquake faulting is a physical process that part of cumulated strain (i.e., potential) energy is converted into radiated (i.e., kinetic) energy. We have revealed that the potential energy and kinetic energy can be represented by quite similar spectral integrals although the former is with respect to spatial wavenumber and the latter is with respect to frequency[1]. In other words, power spectral densities (PSD) of the potential energy, which is correlated to slip distribution[2], and kinetic energy, which is correlated to slip rate function, are related to each other. This seems to be reasonable qualitatively because shorter wavelength components of the slip distribution should generate higher frequency contents of the seismic wave. To investigate this relationship quantitatively, we model spatio-temporal distribution of slip rate function on the fault and show that PSD of slip distribution and PSD of slip rate function should have the similar form. In our model, the distribution of slip rate function is represented as spatial distribution of peak slip velocity multiplied by a characteristic slip rate function that arises when the rupture front arrives at each point; this is an extension of the Haskell model. We find that the PSDs are proportional to a PSD of distribution of the peak slip velocity even if the distribution is quite heterogeneous and rupture velocity has perturbation in space. This suggests that the PSD of the slip distribution, which is hardly analyzed due to poor resolution of slip inversion analyses, can be roughly estimated by using the PSD of slip rate function of an ideal point source. Additionally, our model of the characterized slip rate function is consistent with a result of dynamic simulation of spontaneous rupture propagation along a rough fault[3]. Hence we suggest a simple method to estimate not only heterogeneity of slip distribution but also roughness of faults.

References

- [1] Hirano, S., & Yagi, Y., 2014, Dependence of Seismic Energy on Higher Wavenumber Components, *AGU Fall Meeting*, S53B-4505.
- [2] Mai, P.M., & Beroza, G.C., 2002, A Spatial Random Field Model to Characterize Complexity in Earthquake Slip, *J. Geophys. Res.*, **107**(B11) 2308.
- [3] Trugman, D.T., & Dunham, E.M., 2014, A 2D Pseudodynamic Rupture Model Generator for Earthquakes on Geometrically Complex Faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **104**(1) 95-112

Keywords: Slip inversion, Power spectral density, Earthquake energy budget, Heterogeneous fault

フラクタルな断層帯の幾何と静的応力降下のスケール依存性 Fractal fault zone geometry and scale-dependent static stress drop

大槻 憲四郎^{1*}
 OTSUKI, Kenshiro^{1*}

¹ 東北大学理学研究科地学専攻
¹Department of Geology, Graduate School of Science, Tohoku Univ.

既に報告したように、断層帯の幾何はセグメントとジョグを構造要素として階層的に自己相似である (Fig.1a)。そのため、地震断層の長さ、平均すべり量、地震モーメントと間によく知られた関係は破綻している。地震時のすべり量分布もジョグに階層的に pinning されてスペクトル分布を示す (Fig.1b)。今回は、断層トレースとすべり量分布のデータが充実している 21 個の横ずれ型地表地震断層を解析し、平均静的応力降下 $\Delta\sigma$ が L_0 とともに減少することを示す。

解析の留意点 1

(L, D_{max}) の断層の D_{av} が $\pi D_{max}/4$ であれば、 $\Delta\sigma = C\pi D_{max}/4L$
 (L/n, D_{max}) の断層セグメントが n 個連なった断層でも $D_{av} = \pi D_{max}/4$ だが、 $\Delta\sigma$ は $nC\pi D_{max}/4L$
 [記号 断層長:L, すべり量の最大値: D_{max} と平均値: D_{av} , 静的応力降下: $\Delta\sigma$, 比例定数:C]

解析の留意点 2

各断層セグメントのすべり量分布 D_x を以下の 2 つで近似する。
 摩擦抵抗が均質な場合 $D_x = 2(1-\nu)/G \times (\sigma_{yx}^r - \sigma_{yx}^c) \times (a^2 - x^2)^{0.5}$
 摩擦抵抗が一定勾配の場合 $D_x = (1-\nu)/G \times (2\sigma_{yx}^r - \sigma_{yx}^c(x/a)) \times (a^2 - x^2)^{0.5}$
 [記号 断層セグメントの半長:a, ポアッソン比: ν , リモート stress: σ_{xy}^r , 摩擦抵抗: σ_{xy}^c]

解析の留意点 3

$L_s(i,j) < W_s$ のセグメントに関しては $\Delta\sigma_{av}(i,j) = (7\pi G/8)(D_{av}(i,j)/L_s(i,j))$
 $L_s(i,j) > W_s$ のセグメントに関しては $\Delta\sigma_{av}(i,j) = (2G/\pi)(D_{av}(i,j)/W_s)$
 長さ L_0 の断層全体の静的応力降下の平均値は $\Delta\sigma = (\sum \Delta\sigma_{av}(i,j)L_s(i,j))/L_0$
 [記号 階層ランク i の j 番目のセグメントに関して、セグメント長: $L_s(i,j)$, 平均すべり量: $D_{av}(i,j)$, 静的応力降下: $\Delta\sigma_{av}(i,j)$, 地震発生層の厚さ: W_s , 剛性率:G]

解析結果

全 21 個のデータのうちの 17 個に関しては以下の式に回帰される (Fig.1c).
 $\Delta\sigma = 79.0 L_0^{-0.519}$ (単位は km と MPa)

キーワード: 静的応力降下, スケール依存性, 断層帯幾何, 階層的自己相似
 Keywords: static stress drop, scale dependence, fault zone geometry, hierarchically selfsimilar

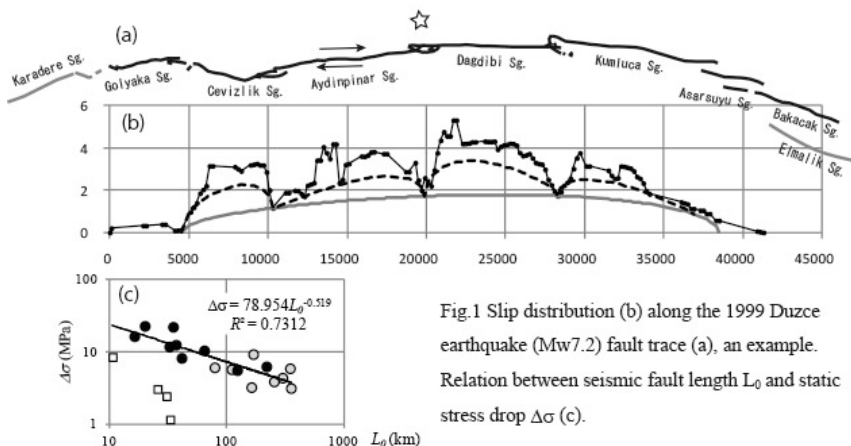


Fig.1 Slip distribution (b) along the 1999 Duzce earthquake (Mw7.2) fault trace (a), an example. Relation between seismic fault length L_0 and static stress drop $\Delta\sigma$ (c).

数論的アプローチによる地震活動のモデル化 An arithmetic approach for modeling of seismic activity

藤原 広行^{1*}
FUJIWARA, Hiroyuki^{1*}

¹ 防災科研
¹ NIED

発生間隔がランダムで規模別発生頻度がG-R則に従うような地震活動を数理モデルとして表現するため、藤原(2014)は「数論的地震活動モデル」を提案し、素数を用いた地震活動モデルを定式化した。「数論的地震活動モデル」は、地震活動と素数分布との現象論的な類似性から類推されたものであるが、単なる偶然ではなく、その背後に何らかの数理物理的な意味付けが存在する可能性があると考え、跡公式と呼ばれる関係式に着目し検討を実施している。本研究では、さらにこれらの考察を深め、アデール空間上での非可換幾何学を利用して、「数論的地震活動モデル」に物理的解釈を与えることを目指す。

「地震」と「数」の世界に対して、下記のような対応を考えてみる。 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 $Mo(e_i)$ としたとき、下記の関係式が成り立つと仮定する。

$$T(e_i) = p_i$$

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

この対応関係に対して、数値実験を行うことにより、G-R則に類似した性質が得られる。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。「数論的地震活動モデル」における「地震」は、素数分布論の研究対象である「素数」のものであり、地震発生予測は素数の出現予測と同値なものとなる。

跡公式は、ある種の作用素のトレース(跡)を2通りの方法で計算することにより得られる等式である。跡公式に共通する特徴は、幾何サイドにおける素数に関する和が、スペクトルサイドにおける固有値に関する和に等しいということである。跡公式のこうした特徴を一般化することにより、Riemannにより導かれた素数に関する明示公式も跡公式の1つとしてとらえることが可能である。Riemann明示公式を形式的に微分し、Riemann予想を仮定することにより得られる式においては、左辺に現れる各デルタ関数が地震発生時に対応しており、右辺においては、それらがRiemannゼータ関数の零点により周波数が規定されるある種の波動の無限個の重ね合わせで表現されている。不規則に出現する点過程は、数学的なモデリングにおいて扱いが難しいが、跡公式を用いることにより数学的な取り扱いが比較的簡単な連続関数の和として表現することが可能となる。このように、跡公式を用いることにより、一見とらえどころのない不規則な点過程を、ある種の力学系の固有値問題としてモデル化できることが期待される。

地震を場のエネルギーレベルの変化に対応する現象としてとらえ、地震発生場がある種の量子化された力学系を用いて表現することを考える。地震が発生する場のハミルトニアンを考え、地震発生をハミルトニアンに対する固有値問題として設定し、その固有値問題がゼータ関数と関連することがもし示されれば、地震活動と素数分布との類似性についての説明ができるのではないかと期待できる。素数の分布に関する研究においては、Hilbert-Polya予想の解決に向けて、ある種の量子化された力学系の固有値問題として素数分布と同値な関係にあるRiemannのゼータ関数の零点分布をとらえようとする研究が進んでいる。例えば、Connesは、アデール類の空間上で定義される2乗可積分な関数空間へのイデール類群の作用を考察することによりSelberg型の跡公式を導き、その跡公式が成立することとRiemann予想が成立することが同値であることを示した。また、Volovichは、*p*進量子力学を提唱し、アデール空間上への量子力学の拡張について考察している。それら研究の一環として、アデール空間上での調和振動子が導かれ、そのMellin変換がRiemannゼータ関数を用いて表現できることが示されている。このように、アデール空間上で力学系を構成しその固有値問題を定式化すると、それらは自然にRiemannゼータ関数と関連づけられることがわかる。

本研究では、アデール空間上への量子力学の拡張の考え方を参考にして、地震学の物理的な基礎を与える連続体力学に対して、その量子化(非可換化)に向けた基礎検討を試みる。これら基礎的な検討をもとに、アデール空間上での力学系の固有値問題として地震をとらえるための考察を実施する。

参考文献

藤原広行(2014):数論的地震活動モデル,地震, vol.66, 67-71.

キーワード: 数論, 素数, 地震, 跡公式, アデール

Keywords: number theory, prime number, earthquake, trace formula, adèle

流体の流れがない系における動的地震滑りの振る舞いの体系的理解 Systematic Understanding of Dynamic Earthquake Slip Process in the System without Fluid Flow

鈴木 岳人^{1*}; 山下 輝夫²
SUZUKI, Takehito^{1*}; YAMASHITA, Teruo²

¹ 青学大理工, ² 東大地震研
¹ Coll. Sci. & Eng., AGU, ² ERI, Univ. Tokyo

我々は熱・流体・空隙生成相互作用系を用いた枠組みを構築することにより、動的地震滑り過程の多様な側面を説明してきた。そこでは S_u , S_u' , T_a という3つの無次元数が見出された。特に S_u は、発熱の強さを基準とした空隙生成効果の流体圧変化における相対的強さを表す。過去の研究では、パラメータ範囲として $S_u > 1 - v_0^*$ のみを扱ってきた。ここで v_0^* は正規化された滑り速度 v^* の初期値である。この範囲においては、加速の場合と自発的停止の場合という2つの振る舞いが見出された。加速の場合は、初期の滑りの減速から加速に転じて高速滑りが達成され、一方自発的停止の場合は最終的な応力降下量がゼロになって滑りが停止してしまう。地震学的には、前者は解析に用いる周波数によりゆっくりとした立ち上がりのフェーズ (gradual acceleration phase, GAP) や主破壊直前の先行的イベントに見えるであろう。一方後者は2次元モデルを仮定したとすればパルスの滑りを示唆する。またそれら2つの場合は関数 G の値によって定量的に分類できることも明らかになった。 $G > 0$ なら加速が現れ、 $G < 0$ ならば自発的停止が現れるのである。本研究では $S_u < 1 - v_0^*$ のパラメータ範囲を取り扱う。

まず、正規化された滑り速度の定常状態の解はゼロか1しかないことが明らかになった。加えて、そのうちゼロの値を実現するためには、滑りの初期段階で減速が必要であることも見出した。一方、 $S_u < 1 - v_0^*$ の時、滑り速度の時間微分は常に正であることが解析的に示された。これらのことから、 $S_u < 1 - v_0^*$ の時は、加速の場合と同様に最終的には滑り速度が1になることが理解された。

$S_u < 1 - v_0^*$ では空隙生成よりも thermal pressurization が支配的であり、高速滑りと完全な応力降下が観測されることになる。その上、温度が断層岩の融点以下に抑えられることも明らかになった。これらの特徴は GAP 及び高速滑りを伴い、断層岩の融解を伴わない通常の地震を記述することになるが、これは $S_u > 1 - v_0^*$ で $G > 0$ の場合と同じである。また最終的な空隙率は上限以下なので、(i) 無視できない程度の空隙生成、及び (ii) 断層岩が融けない程度の温度上昇という、多くの地震に見られる2つの要請を同時に満足できる。これも $S_u > 1 - v_0^*$ の場合と同様である。ここでは流体拡散を考えていないが、それが無い系での振る舞いがすべての S_u の値に対する考察として統一的に理解された。

キーワード: 理論, 熱, 流体, 空隙生成, 非線形, 相互作用

Keywords: theory, heat, fluid pressure, pore creation, nonlinear, interaction

流体の流れによる低周波微動の発生 Generation of low-frequency tremor by fluid flow

櫻庭 中^{1*}
SAKURABA, Ataru^{1*}

¹ 東京大学大学院理学系研究科

¹ School of Science, University of Tokyo

We discuss the possibility that flow-induced instability along underground conduit or plane layer causes low-frequency tremor. One example is generation of volcanic tremor, which occurs before or during eruption and lasts more than a few minutes with oscillation period of 0.2-2 seconds (e.g., see Konstantinou and Schlindwein, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2002). Sakuraba and Yamauchi (*Earth Planets Space*, 2014) showed that a relatively slow magma flow speed of O(1) m/s through a plate-like dike of thickness of around 0.5 m can cause linear instability in flow perturbation and surrounding elastic wave field. The critical magma flow speed decreases in inverse proportion to the Rayleigh-wave wavelength propagating along the dike with flexural deformation. They concluded that natural dike lengths put constraint on the oscillation period, but a subsequent study suggests that a finite dike width may determine the longest wavelength that allows instability. A laboratory experiment is also ongoing to verify the above theoretical prediction that a viscous fluid flow through a plate-like conduit can create self-oscillations. Another example may be found in generation of non-volcanic deep tremor that occurs at subducting plate (Obara, *Science*, 2002). This is still a speculation motivated from a study by Kumaran, Fredrickson and Pincus (*J. Phys. II France*, 1994) who considered Couette flow between two parallel plates, one of which is rigid and the other is moving, but the medium between the plates is two-layered: a fluid layer is placed on a layer of soft (viscoelastic) material. They theoretically showed that flow-induced vibration can occur with a very small shear rate. In an idealized situation in which the solid layer extends infinitely, the critical speed of the moving plate decreases in inverse proportion to the characteristic length scale of the associated wave that propagates at a half the plate speed. Though we have not examined whether this model explain time scales of observations with reasonable physical and material properties, similarity between the above mentioned examples suggests that flow-induced instability may explain some of the tremor events.

Keywords: flow-induced vibration, volcanic tremor, non-volcanic deep tremor

High-resolution tremor locations reveal behaviors of secondary slow slip fronts in the context of the main front
High-resolution tremor locations reveal behaviors of secondary slow slip fronts in the context of the main front

PENG, Yajun^{1*} ; RUBIN, Allan¹
PENG, Yajun^{1*} ; RUBIN, Allan¹

¹Department of Geosciences, Princeton University

¹Department of Geosciences, Princeton University

Non-volcanic tremor is generally interpreted as the seismic manifestation of slow slip, and tremor locations have been used extensively to infer detailed behaviors of slow slip fronts due to higher spatial and temporal resolution over geodetic observations. Taking advantage of S-wave coherence among stations separated by roughly 10 km, we obtain high precision tremor locations in Cascadia using cross-station cross correlations, with either 3-station detectors (southern Vancouver), or 3-array detectors (Olympic Peninsula). We observe that near the main front, tremor migrations usually propagate along the main front, regardless of its orientation, and their recurrence intervals are too short to be tidally driven. Rapid tremor reversals (RTRs) originate from the main front, and sometimes start as migrations propagating along the main front. Although the occurrence of most of the RTRs appears to be correlated with high tidal shear stresses, we observe a few exceptions, which may suggest that the stress increase far behind the main front induced by secondary fronts at the main front is sometimes enough to initiate a RTR. Beneath Olympic peninsula, the spatial densities of tremor during the ETS and the inter-ETS events seem to be complementary, and RTRs do not often extend into regions that are de-stressed by the inter-ETS event.

Preliminary results of tremor locations beneath Guerrero, Mexico indicate that our method also performs well in this region. It seems that a tremor asperity about 50 km across ruptured quasi-periodically with a recurrence interval of ~3 months until the 2006 slow slip event drastically decreased it.

キーワード: Episodic tremor and slip, Cascadia subduction zone, Mexican subduction zone, Cross-station method
Keywords: Episodic tremor and slip, Cascadia subduction zone, Mexican subduction zone, Cross-station method

2014年長野県北部の地震の前震と余震の震源パラメータの特徴 Source parameters of foreshocks and aftershocks of 2014 Northern Nagano earthquake

今西 和俊^{1*}; 内出 崇彦¹
IMANISHI, Kazutoshi^{1*}; UCHIDE, Takahiko¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ Geological Survey of Japan, AIST

2014年11月22日、長野県北部を震源とするM 6.7の地震が発生し、神城断層の一部がずれ動いたことが報告されている。この地震の発生場の特徴を明らかにするため、本震の4日前から起こり始めた前震と余震活動について、震源決定と震源パラメータの推定を行った。

震源決定に際しては、この地域 の速度構造の不均質性を考慮し、浅部の速度値が異なる2つの一次元速度構造モデルを仮定し、観測点毎に適切なモデルを適用した。得られた震源分布を気象庁一元化震源と比較すると、東側に2km弱移動し、深さ方向に最大で5km程度浅くなった。全体として東傾斜が卓越しているが、震源域の中部から北部にかけては鉛直ないし西傾斜の分布も確認できる。前震活動は深さ3km前後に分布し、余震とは明らかに異なる北北西に傾斜した面に分布していた。前震の震源移動を見ると、深いところから開始し、徐々に浅いところに移動していき、最終的に本震の破壊開始点に至る様子が確認できた。

次に発震機構解の推定を行った。本研究ではP波初動極性に振幅情報を加味することで、M0.5以上の地震の解を安定して決定することができた。余震は横ずれ型や横ずれ成分に卓越する解が多いが、震源域南部では逆断層タイプが卓越している。この特徴は余震分布と概ね調和的である。前震の発震機構解は北北西傾斜の節面を持ち横ずれ成分に卓越する解が多く、こちらも震源分布と調和的である。興味深いことに、時間の経過とともに逆断層成分が増えていき、21日頃から本震のP波初動解に極めて類似したイベントが起こり始めている点である。気象庁一元化カタログには前震が56個含まれているが、直近の観測点であるHi-net白馬観測点のランニングスペクトルとS-P時刻を目視確認することで、400を超えるイベントを新たに検出できた。これらのイベントの震源決定と発震機構解の推定を行うことで、前震活動と本震発生との関係がさらに明らかになるものと期待できる。

発表においては応力降下量の推定も行い、前震と余震の性質の違いや空間分布の特徴についても議論する。

謝辞：解析には防災科研(Hi-net)、気象庁、東大地震研、京大防災研のデータを使用させていただきました。記して感謝致します。

キーワード: 長野県北部の地震, 震源パラメータ, 前震, 余震

Keywords: Northern Nagano earthquake, source parameter, foreshock, aftershock

2014年長野県北部の地震の震源過程 Source process of the 2014 Northern Nagano earthquake

小林 広明^{1*}; 瀧 一起¹; 三宅 弘恵¹
KOBAYASHI, Hiroaki^{1*}; KOKETSU, Kazuki¹; MIYAKE, Hiroe¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2014年11月22日に長野県北部を震源とするMj6.7の地震が発生した。この地震では、長野県内において、震源直近の白馬村を含む5観測点で震度5強、小谷村など4観測点で震度6弱が観測され、重軽傷者は46名に上り、また、1500棟以上の建物に被害が生じた。GCMTなどによって求められた震源メカニズム解は、非DC成分を20%ほど持った横ずれ成分を含む逆断層である。震源断層に関しては、地震後に各機関が現地調査を行ったところ、地表断層が確認され、そのトレースが既知である神城断層のものと概ね一致する事から、神城断層が動いたと考えられている。この断層は日本国内で最も大きな断層帯の一つである糸魚川-静岡構造線断層帯の北部部分にあり、この地震の震源過程を知ることは重要である。本研究では、強震波形と測地データを用いてこの地震について震源過程解析を行った。

この地域はK-NET、KiK-netに加えて、SK-netおよび地震研設置の強震観測点が存在し、密な観測がなされている。今回は、その中より15地点45成分を使用した。解析には、加速度波形を積分し、0.02~0.4 Hzのバンドパスフィルタを通した後、0.25 sにリサンプリングした速度波形を用いた。測地観測点はGEONETより9地点を選択した。解析には、F3解(中川・他, 2009)の日々の座標値を用い、GEONET白馬を固定点とした後、地震前後2~6日の5日間の平均値の差を地震による地殻変動量として用いた。GEONET白馬は上下成分も顕著な変動があるため、3成分を使用した。その他の点に関してはノイズのため水平2成分のみを使用した。

インバージョン手法はYoshida et al. (1996) および Hikima and Koketsu (2005) の方法を用いた。強震グリーン関数の計算には、Kohketsu (1985) の方法を用い、その際使用する水平成層構造は全国1次地下構造モデル[JIVSM](Koketsu et al., 2008, 2012)における各観測点直下の構造に準拠して作成した。測地グリーン関数の計算にはZhu and Rivera (2002) の方法を用い、水平成層構造はGEONET白馬直下の構造を各観測点に対して使用した。断層は2km × 2kmの小断層を13 × 7個置くことで表現した。その際、地表断層位置と余震分布を考慮に入れて走向と傾斜を設定し、すべり角は逆断層から左横ずれ断層を表現できるよう45 ± 45で可変とした。

解析の結果、最大すべり領域は破壊開始点より北東深部に求まった。浅部にも断層走向に沿ってすべりが求まり、特にGEONET白馬近傍に大きなすべりが求められた。GEONET白馬近傍には最大の地表変位が確認されている地点があり、整合性がとれていると考えられる。しかしながら、今回求められたすべりベクトルの総和から求まるメカニズム解は非DC成分をほとんど持たず、GCMTなどで求められている約20%程度の非DC成分を説明することはできていない。この点に関しては今後の課題である。

キーワード: 2014年長野県北部の地震, 震源過程, 震源インバージョン

Keywords: 2014 Northern Nagano earthquake, source process, source inversion

2014年長野県北部の地震の動力的震源モデル Dynamic rupture model of the 2014 northern Nagano, central Japan, earthquake

加瀬 祐子^{1*}
KASE, Yuko^{1*}

¹産総研 活断層・火山研究部門
¹Geological Survey of Japan, AIST

2014年11月22日に発生した長野県北部の地震($M_{JMA}6.7$)は、地殻変動から、震源断層の長さは約20 kmと推定される(国土地理院, 2015)。その南半分は既知の神城断層とよく一致し、地表地震断層も神城断層に沿って断続的に認められた(勝部ほか, 本大会)。神城断層は、糸魚川-静岡構造線断層帯北部に位置し、今回の地震で活動したと推定される領域の南側に未破壊の領域を残し、松本盆地東縁断層帯に連なる。糸魚川-静岡構造線断層帯の各断層の連動、非連動のメカニズムを解明するための第一歩として、長野県北部の地震の動力的震源モデルを構築した。

余震分布(気象庁, 2014; 防災科学技術研究所, 2014)や地殻変動(国土地理院, 2015)の広がりから、断層の長さは22 km, 断層下端の深さは15 kmとした。断層の走向は、余震分布と既知の神城断層の走向(文部科学省ほか, 2004)を参考に $N10^{\circ} E$ とした。傾斜角は、CMT解(気象庁, 2014; 防災科学技術研究所, 2014)と余震分布を参考に東傾斜 60° としたが、地殻変動データの解析で、2 kmより浅い部分ではやや低角であるという結果が得られている(矢来, 2015)ことから、2 km以浅の傾斜角を 45° とした。また、神城断層南部は地表まで達しているが、北部では顕著な地表地震断層が観察されていないことから、地殻変動の広がりも考慮して、北側11.9 kmでは、断層上端の深さを2 kmとした。その結果、断層の幅は、南側で17.8 km, 北側で15 kmとなった。広域応力場は、テクトニックな応力場を考慮し、主応力は深さに比例、最大主応力の向きは $N65^{\circ} W$ (文部科学省ほか, 2004)、応力比は0.30(文部科学省ほか, 2004)、最小主応力の向きは鉛直方向で、大きさはかぶり圧に等しいとし、静水圧条件下にあるとした。また、断層周辺の地下構造モデル(防災科学技術研究所, 2003)を参考に、深さ2 kmを境界とする2層構造を仮定した。1層目は堆積層に相当するため、応力降下量は0とした。上記のモデルに対し、震源(気象庁, 2014)を破壊開始点とし、すべりに依存する摩擦構成則を仮定して、差分法(Kase, 2010)により動的破壊過程を計算し、地震モーメントが観測値と調和的になる平均的な応力降下量を探索した。

平均的な応力降下量を3.3 MPaとすると、地震モーメントが 6.21×10^{18} Nm, $M_w6.5$ となり、CMT解よりやや大きめではあるが、概ね調和的な値が得られた。モデルが比較的均質であることを反映し、破壊は震源からなめらかに伝播するが、深さ2 kmに達した後は、破壊速度は極端に遅くなる。これは2 kmより浅い領域の応力降下量を0としたことによる。すべり量の最大値は約2 m, 地表変位の最大値は約1.1 mとなり、観察された地表変位(廣内ほか, 2014)とも調和的である。

キーワード: 動力的震源モデル, 2014年長野県北部の地震, 神城断層, 数値シミュレーション
Keywords: dynamic rupture, 2014 northern Nagano earthquake, Kamishiro fault, numerical simulation

Fault strength in Marmara region inferred from the geometry of the principle stress axes and fault orientations

Fault strength in Marmara region inferred from the geometry of the principle stress axes and fault orientations

PINAR, Ali^{1*} ; COSKUN, Zeynep¹ ; MERT, Aydin¹ ; KALAFAT, Dogan¹
PINAR, Ali^{1*} ; COSKUN, Zeynep¹ ; MERT, Aydin¹ ; KALAFAT, Dogan¹

¹Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute

¹Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute

The general consensus based on historical earthquake data suggests that the last major moment release on the Prince's islands fault was in 1766 which in turn points out an increased seismic risk for Istanbul Metropolitan area considering the fact that most of the 20 mm/yr GPS derived slip rate for the region is accommodated mostly by that fault segment.

The orientation of the Prince's islands fault segment overlaps with the NW-SE direction of the maximum principle stress axis derived from the focal mechanism solutions of the large and moderate sized earthquakes occurred in the Marmara region. As such, the NW-SE trending fault segment translates the motion between the two E-W trending branches of the North Anatolian fault zone; one extending from the Gulf of Izmit towards C?narc?k basin and the other extending between offshore Bak?rkoy and Silivri.

The basic relation between the orientation of the maximum and minimum principal stress axes, the shear and normal stresses, and the orientation of a fault provides clue on the strength of a fault, i.e., its frictional coefficient. Here, the angle between the fault normal and maximum compressive stress axis is a key parameter where fault normal and fault parallel maximum compressive stress might be a necessary and sufficient condition for a creeping event. That relation also implies that when the trend of the sigma-1 axis is close to the strike of the fault the shear stress acting on the fault plane approaches zero. On the other hand, the ratio between the shear and normal stresses acting on a fault plane is proportional to the coefficient of frictional coefficient of the fault. Accordingly, the geometry between the Prince's islands fault segment and a maximum principal stress axis matches a weak fault model.

キーワード: stress tensor, fault orientation, frictional coefficient

Keywords: stress tensor, fault orientation, frictional coefficient

福島県浜通り・茨城県北部における震源スペクトルの高周波数帯での落ち込み指数 High-frequency falloff exponent of source spectra: Case of Fukushima-Hamadori and northern Ibaraki area

内出 崇彦^{1*}; 今西 和俊¹
UCHIDE, Takahiko^{1*}; IMANISHI, Kazutoshi¹

¹ 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門
¹ Geological Survey of Japan, AIST

モーメントスペクトル(震源スペクトル)は、震源過程を特徴づけるのによく用いられてきた。標準的なモデルとして用いられるオメガ²乗は、低周波帯で平坦、高周波帯で周波数の⁻²乗に比例して落ち込むという特徴を持つ。それらの低周波帯と高周波帯を境するコーナー周波数は、震源過程の特徴的な時間の逆数に対応し、すなわち震源の大きさを示し、代表的な応力降下量の推定に使われる。

高周波数帯の落ち込みの指数も、震源を特徴づけるパラメータであると考えられる。指数²が多くの場合に使われるが、²以外の指数もときどき報告されている [e.g., Venkataraman et al., 2006; Allmann and Shearer, 2009]。内出ほか [日本地震学会秋季大会, 2014] は、福島県浜通りと茨城県北部で発生した地震を Shearer et al. [2006] の手法で解析し、周波数の^{-1.6}乗に比例する落ち込みを指摘している。その一方で、Uchide et al. [JGR, 2014] は東北地方太平洋沖の M 3.0 - 4.5 の地震について、指数²が適当であるとしている。このような結果は他の手法も用いて確認すべきであるため、本研究ではスペクトル比法を用いて福島県浜通りと茨城県北部で発生した地震を解析した。

結果を安定させるために、P波の後続波も用いた複数の時間窓の結果を重合する方法 [Imanishi and Ellsworth, 2006] を採用した。さらに、複数観測点での3成分の観測波形の結果から、各周波数における中央値を代表的なスペクトル比とすることとした。そして、高周波数帯での落ち込み指数と、解析対象地震とその近辺で発生した小さい地震(EGF地震)のコーナー周波数とそれらの地震の地震モーメントの比をグリッドサーチで求めた。

結果、コーナー周波数と落ち込み指数の間にはトレードオフが見られるため、単独のスペクトル比だけからそれらを推定することは難しい。そこで、本研究では、同一の解析対象地震に対して、複数のEGF地震とのスペクトル比を用いて、落ち込み指数と解析対象地震のコーナー周波数を共通のものとして求めることとした。これまでのところ、いくつかの地震については、²より小さい指数が推定されている。講演では、高周波数落ち込み指数の意味についても議論する。

キーワード: 地震, スペクトル解析, スペクトル比
Keywords: earthquake, spectral study, spectral ratio

低応力降下量と震源の移動が示唆する2012年丹沢山地クラスター地震活動の原因 Earthquake cluster activity beneath Tanzawa Mountains in 2012: Migration with a small stress drop

山田 卓司^{1*}; 行竹 洋平²; 寺川 寿子³; 新井 隆太⁴

YAMADA, Takuji^{1*}; YUKUTAKE, Yohei²; TERAKAWA, Toshiko³; ARAI, Ryuta⁴

¹ 北大地震火山センター, ² 神奈川県温泉地学研究所, ³ 名大地震火山研究センター, ⁴ 海洋研究開発機構地震津波海域観測研究開発センター

¹ Inst. Seismol. and Volc., Hokkaido Univ., ² Hot Springs Res. Inst. of Kanagawa Pref., ³ Earthq. and Volc. Res. Center, Nagoya Univ., ⁴ Japan Agency Marine-Earth Science and Technology

An earthquake cluster activity took place beneath the Tanzawa Mountains, which is located NE of Mt. Fuji, Japan, with a depth of 20 km at the end of January, 2012. The activity began at 22:39 UT on 27 January and included 78 earthquakes with $M \geq 2.0$ in the area within 50 hours. Five of them had magnitudes greater than 4.0 and the largest one was $M5.4$.

First we relocated hypocenters by using the double difference method and found that earthquakes of the cluster activity migrated away from the first earthquake of the activity. The migration was consistent with the fluid diffusion and could be characterized as following two patterns. Earthquakes that occurred within an hour of the first earthquake had a migration speed similar to that of non-volcanic tremors. On the other hand, those occurred between an hour and 50 hours from the first earthquake of the activity showed a migration with a similar speed to the activity of induced earthquakes due to water-injection experiments. These results suggest that the cluster activity would be triggered by a slow slip and fluid diffusion. We confirmed that this migration would not be an apparent one by numerical simulations.

We then analyzed stress drops of 16 earthquakes with $M \geq 3.5$ that occurred from July, 2003 to June, 2012 in the area of the activity. Earthquakes that occurred before and after the cluster activity had stable values of stress drop with 30 MPa estimated by the equation of Madariaga (1976), or 5 MPa by Brune (1970). On the other hand, earthquakes of the cluster activity included ones with significantly small stress drops. A hypothesis that the cluster activity was associated with fluid explains both the migration of hypocenters and small stress drops of the cluster activity. This is because the shear strength on a fault can be decreased due to the pore pressure of the fluid. This hypothesis is also supported by the fact that earthquakes before and after the cluster activity had similar values of stress drop and that structural studies indicated the existence of little fluid in the region, suggesting that the activity was triggered by a different mechanism from the other earthquakes in the same region. The most plausible explanation is that there is a little fluid in a closed system beneath the Tanzawa Mountains which is undetectable by structural observations.

Acknowledgments: We used waveforms at stations of Hi-net (NIED), Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture, Univ. of Tokyo, and JMA, as well as the seismograph network called the MeSO-net, which has been developed under the "Special Project for Earthquake Disaster Mitigation in the Tokyo Metropolitan Area" since 2007. We also used arrival times of P and S waves determined by JMA. Figures were created using Genetic Mapping Tool.

Keywords: Tanzawa Mountains, earthquake cluster activity, migration, stress drop, fluid, pore pressure

SSS30-16

会場:A05

時間:5月25日14:45-15:00

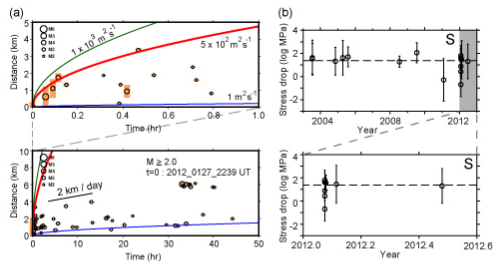


Fig. (a) Hypocentral distances from the first earthquake as a function of elapsed time less than an hour and 50 hours, with scales of source radii. Vertical orange bars indicate source dimensions calculated from estimated stress drops by S waves. Red curve with a diffusivity of $5.0 \times 10^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ explains the data better than the other values (green and blue lines) for time < 1 hr. The seismicity for $1 \leq t \leq 50$ hrs shows a migration with a speed of 2 km a day. (b) Estimated stress drops from S waves as a function of time. Black horizontal broken lines indicate average stress drops of earthquakes that occurred before and after the cluster activity. Results after January 2012 are also shown in the lower panel.

比抵抗構造と地下水同位体比測定から推測する 2011 年富士山 Mw5.9 地震の発生メカニズム Resistivity structure and $3\text{He}/4\text{He}$ ratios around the focal zone of the 2011 Mw 5.9 earthquake beneath Mt. Fuji, Japan

相澤 広記^{1*}; 角野 浩史²; 上嶋 誠³; 山谷 祐介⁴; 長谷 英彰⁵; 大野 正夫¹; 高橋 正明⁴; 風早 康平⁴;
Rung-Arunwan Tawat⁶; 小川 康雄⁷
AIZAWA, Koki^{1*}; SUMINO, Hirochika²; UYESHIMA, Makoto³; YAMAYA, Yusuke⁴; HASE, Hideaki⁵;
OHNO, Masao¹; TAKAHASHI, Masaaki⁴; KAZAHAYA, Kohei⁴; RUNG-ARUNWAN, Tawat⁶; OGAWA, Yasuo⁷

¹九州大学地震火山観測研究センター, ²東京大学地殻化学実験施設, ³東京大学地震研究所, ⁴産業技術総合研究所, ⁵地熱技術開発, ⁶Mahidol 大学, ⁷東京工業大学火山流体研究センター

¹Kyushu University, ²Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo, ³ERI, University of Tokyo, ⁴AIST, ⁵GERD, ⁶Mahidol University, ⁷KSVO, TITECH

東北太平洋沖地震発生の 4 日後、2011 年 3 月 15 日に富士山南斜面直下で Mw 5.9 の地震が発生した (Fujita et al., 2013)。この地震はその発生時期と、それまでの富士山周辺における地震活動が低調であったことを考慮すると、東北太平洋沖地震に誘発された地震と考えられる。大地震が発生するとその周辺では静的応力変化によって地震が起りやすくなる。しかしながら富士山周辺で計算される ΔCFF は、地震を誘発する閾値 (Hardebeck et al., 1998) と考えられている 0.01MPa と同程度であり (Toda et al., 2011)、静的応力変化が地震発生に本質的に寄与したかどうかは分からない。静的応力変化の他に地震を誘発するメカニズムとして地震の揺れによる動的誘発がある。東北太平洋沖地震では静的応力変化が無視できるほどの遠地でも地震が誘発されており (van der Elst et al., 2013)、より震源に近い富士山でも動的誘発による寄与があるはずである。本発表では震源域周辺の比抵抗構造と同位体比測定の結果を示し誘発地震の発生メカニズムについて考察したい。

データ

同位体比測定は地下水中に含まれるヘリウムガスの同位体比、および地下水を構成する水の酸素-水素同位体比を測定した。富士山周辺では天然の温泉は存在しないが、深度 1000~2000 m の掘削により温泉水の汲み上げが行われている。これらの温泉施設を 2010 年の 2~3 月に 15 か所訪問しサンプリングを行った。また、温泉水だけでなく表層の冷たい湧水も同時期に 8 か所でサンプリングした。得られた試料を $3\text{He}/4\text{He}$ 比は東京大学地殻化学施設にて、 $\delta D/\delta^{18}\text{O}$ 比は産業技術総合研究所にて分析した。

比抵抗構造は MT 法によって推定した。まず 2009 年に深さ 3km までの構造を推定する目的で AMT (10000~1Hz) 探査、続いて Mw5.9 地震発生後の 2011 年 6~11 月および 2012 年 4~5 月に、震源域周辺の深部比抵抗構造を推定する目的で広帯域 MT (200~0.001Hz) 探査を行った。さらに 2002~2003 年に富士山を北東-南西方向に横断する測線で実施された広帯域 MT 探査のデータ (Aizawa et al., 2004) も解析に利用した。2011 年 Mw5.9 地震前後で同じ場所で測定した MT データを比較したが、その特徴はほぼ一致し有意な変化は見られなかった。そのため、地震による比抵抗構造の変化は無視できるとして、得られたすべてのデータを用いて 2 次元、3 次元構造解析を行った。

結果

MT 法によって推定されたやや深部 (深さ 3~10km) の低比抵抗体、誘発された地震、深度 1000~2000 m の掘削温泉の同位体比 ($3\text{He}/4\text{He}$ 比、マグマ性ヘリウム濃度) に空間的な一致が見られた。このことから地震は地下水のネットワークが発達した低比抵抗体中で誘発され、それにはマグマ性のガスが重要な役割を果たしていることが示唆された。

東北日本における巨大プレート境界型地震の地震波放射特性の空間変化－2011年東北沖地震及び2011年茨城県沖地震の例から－ Spatial variation of seismic radiation properties for large interplate earthquakes in north-east Japan

久保久彦^{1*}; 岩田知孝²; 浅野公之²; 青井真¹
KUBO, Hisahiko^{1*}; IWATA, Tomotaka²; ASANO, Kimiyuki²; AOI, Shin¹

¹ 独立行政法人防災科学技術研究所, ² 京都大学防災研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Kubo et al. (2014, AGU) constructed kinematic source models for the 2011 Tohoku-oki earthquake (M_w 9.1) in multi successive period-bands using strong-motion data, and discussed the period-dependent seismic radiation and broadband source characteristics for this event based on the spatial difference of the slip velocity function for each period-band. This multi period-band source modeling has an advantage that this method provides the direct comparison among source models in multi period-bands. In this study, we investigate the period-dependent seismic radiation for the 2011 Ibaraki-oki earthquake (M_w 7.9), which is the largest aftershock of the 2011 Tohoku-oki earthquake, using the same procedure as Kubo et al. (2014, AGU) in order to compare the rupture behaviors of these earthquakes and take the first step for the discussion on the spatial variation of seismic radiation properties for large interplate earthquakes in northeast Japan.

The analysis period-bands for the 2011 Ibaraki-oki earthquake is 5-10 s, 10-25 s, and 25-50 s. The source model for each period-band is estimated by the fully Bayesian kinematic source inversion with the multi-time-window method (Kubo et al., 2014, SSSJ). Three components of strong-motion velocity waveforms at 15 stations of K-NET, KiK-net, and F-net of NIED are used in this analysis. Green's functions are calculated by the FDM (GMS; Aoi & Fujiwara, 1999) with a 3D velocity structure model (JIVSM; Koketsu et al., 2012). The validity of the 3D velocity structure model used for the 3D Green's functions was confirmed through waveform comparisons for $M \sim 6$ events. A curved fault model is constructed based on the shape of the plate boundary of JIVSM, and then is divided into 144 subfaults of approximately 10 km \times 10 km. The slip time history of each subfault is represented by a series of nine smoothed-ramp functions with 4.0 s width, each of which is put with 2.0 s lag. The first time-window triggering velocity of 2.0 km/s is selected so as to minimize the residual of strong-motion data fitting in the period-band of 5-50 s.

The estimated rupture process in the period-band of the 5-10 s differs from those estimated in the period-bands of 10-25 s and 25-50 s. The source models in period-bands of 10-25 s and 25-50 s have large slips in the shallow area south and southeast of the hypocenter, while large slips for the source model in the period-band of 5-10 s are located in the deep area which is approximately 30 km west of the hypocenter. This means that these regions mainly radiated the long-period (10-25 s and 25-50 s) and relatively-short-period (5-10 s) waves, respectively. These results indicate that the 2011 Ibaraki-oki earthquake had an along-dip variation in its seismic radiation, which is consistent with the along-dip segmentation of interplate fault suggested by Lay et al. (2012).

The comparison of the results for the 2011 Tohoku and the 2011 Ibaraki earthquakes indicates that the seismic radiation for both events was segmented along the dip direction: short- and long-period seismic waves were predominantly radiated from the deep and shallow regions, respectively. However, the deep off-Miyagi region during the 2011 Tohoku earthquake radiated not only short- but also long-period waves, and this implies the possibility of the spatial variation of seismic radiation property in northeast Japan. This is also supported by previous studies which have noted different seismic radiation properties among other large interplate earthquakes in the northeast Japan, although the details of the seismic radiation for the other earthquakes are not clear and it is necessary to apply the multi period-band source modeling to these events.

[Acknowledgments] The strong-motion data recorded by K-NET, KiK-net, and F-net of NIED was used for this analysis.

Keywords: Spatial variation of seismic radiation property, Large interplate earthquakes in northeast Japan, Multi period-band source modeling, Strong-motion data, The 2011 Tohoku-oki earthquake, The 2011 Ibaraki-oki earthquake

東北沖地震後の急速な応力回復から示される巨大地震発生の不規則性 Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the 2011 Tohoku-oki earthquake

Tormann Thessa¹ ; Enescu Bogdan^{2*} ; Woessner Jochen¹ ; Wiemer Stefan¹
TORMANN, Thessa¹ ; ENESCU, Bogdan^{2*} ; WOESSNER, Jochen¹ ; WIEMER, Stefan¹

¹ スイス連邦工科大学チューリッヒ校, ² 筑波大学生命環境系
¹ETH Zurich, Swiss, ²Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

Constraining the recurrence of megathrust earthquakes is genuinely important for hazard assessment and mitigation. The prevailing approach to model such events worldwide relies on the segmentation of the subduction zone and quasi-periodic recurrence due to constant tectonic loading. In this study, we have used the earthquake catalog of the Japan Meteorological Agency (JMA) and analyzed events recorded along a 1,000-km-long section of the subducting Pacific Plate beneath Japan since 1998 to map the relative frequency of small to large earthquakes, expressed by the slope of the frequency-magnitude distribution of earthquakes (the so-called b-value). Evidence from laboratory experiments, numerical modeling and natural seismicity indicates that the b-value is negatively correlated with the differential stress.

Our analysis reveals that the spatial distribution of b-values reflects well the tectonic processes accompanying plate motion. However, there is no evidence of distinct earthquake-generation regions along the megathrust, associated with the so-called "characteristic earthquakes".

Nevertheless, we show that parts of the plate interface that ruptured during the 2011 Tohoku-oki earthquake were highly stressed in the years leading up to the earthquake, as expressed by mapped, very low regional b-values. Although the stress was largely released during the 2011 rupture, thus leading to an increase in b-values immediately after the megathrust event, the stress levels (i.e., b-values) quickly recovered to pre-megaquake levels within just a few years. This suggests that the megathrust zone is likely ready for large earthquakes any time with a low but on average constant probability.

Our results imply that large earthquakes may not have a characteristic location, size or recurrence interval, and might therefore occur more randomly distributed in time. The findings also bring strong evidence that the size distribution of earthquakes is sensitive to stress variations and its careful monitoring can improve the seismic hazard assessment of the megathrust zone.

Reference:

Thessa Tormann, Bogdan Enescu, Jochen Woessner, Stefan Wiemer, Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake, *Nature Geoscience*, **8**, 152-158, doi:10.1038/ngeo2343, 2015.

キーワード: 東北沖地震, 地震サイクル, 地震活動, b 値, 差応力

Keywords: Tohoku-oki earthquake, earthquake cycle, seismicity, b-value, differential stress

Radiated and Frictional Energy of the 2011 Tohoku-oki Earthquake Radiated and Frictional Energy of the 2011 Tohoku-oki Earthquake

MORI, James^{1*}

MORI, James^{1*}

¹Kyoto University DPRI

¹Kyoto University DPRI

The Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) estimated the level of dynamic friction on the shallow portion of the fault that had the very large slip during the 2011 Tohoku-oki earthquake. From both laboratory experiments on the fault zone material and temperature measurements across the fault zone, the shear stress during the earthquake rupture was estimated to be about 0.6 MPa at 820 meters below the sea floor (including the water depth this is equivalent to about 3.5 km of rock overburden). This shear stress corresponds to a coefficient of friction of about 0.1. Combining these results with estimates of the radiated energy, show that the ratio of frictional heat to radiated energy is less than 1.0 for the shallow portion of the fault. These estimates are related to the large slip portion of the earthquake in the shallow region of the megathrust and are not representative of the deeper portions of the earthquake rupture area. Averages for the whole earthquake suggest that the ratio of frictional heat to radiated energy is much larger (about 10) and similar to values inferred for typical earthquakes. This implies there is a significant difference in the energy partition between the shallow portion (with large slip) and the deeper portions (moderate slip) of the subduction fault. The shallow/deep portion of the fault produces relatively more/less radiated energy compared to the frictional heat.

キーワード: earthquake source, energy, Tohoku-oki earthquake, friction, radiated energy

Keywords: earthquake source, energy, Tohoku-oki earthquake, friction, radiated energy

東北沖繰り返し地震の地震波エネルギー推定とその時空間変化 Estimation of Radiated Seismic Energy of Repeating Earthquakes in Northeastern Japan and its Spatio-Temporal Variation

荒 諒理^{1*}; 井出 哲¹; 内田 直希²
ARA, Masamichi^{1*}; IDE, Satoshi¹; UCHIDA, Naoki²

¹ 東京大学理学系研究科, ² 東北大学理学研究科
¹The Univ. of Tokyo, ²Tohoku University

プレート境界面で発生する地震活動は、微小地震から超巨大を含む通常地震に加え、これらとはスケール則の異なる津波地震やスロー地震など多様である。しかし、多様な地震現象が示される中でも、例えば津波地震の震源領域は比較的浅い領域に来ることが分かっているし、さらに2011年の東北沖地震のような広い震源域をもつ巨大地震については深い領域で高周波の地震波がより多く放出されたことも確認されている [Ide et al., 2011]。従って、東北沖のプレート境界には断層面の性質に空間的な不均質が存在すると考えられる。断層面の不均質性を議論する上で、地震の破壊過程を反映する動的な震源パラメータである地震波エネルギーが役立つだろう。プレート境界面近傍で発生する様々な地震の中でも、準静的な滑り域に囲まれた固着域が周りの非地震性滑りに追いつくために地震を起こすという比較的シンプルなメカニズムで説明される繰り返し地震は、震源が確実にプレート境界面上に存在すると考えられること合わせて、プレート境界面上で発生する地震の物理機構について理解する手がかりになることが期待される。繰り返し地震は東北沖で多数検出されており、東北沖地震の直後に地震の規模の増加、発生間隔の短縮といった変化が見られた。このような変化が起きている際に、地震の震源過程の変化を検討するのは地震の物理機構を調べる上で役に立つ可能性がある。そこで本研究では、東北沖で発生した繰り返し地震の地震波エネルギーを推定し、その時空間変化を調べた。

本研究では Uchida and Matsuzawa [2013] によって検出された繰り返し地震 160 イベント、計 52 グループの地震波エネルギーを推定した。これらの地震は東北沖地震をまたいで活動しており、グループによっては地震前後に規模の増加、発生間隔の短縮といった変化がみられた。地震波エネルギーの推定には、Mayeda et al. [2003] によって開発されたコーダ波を用いた地震波振幅の推定手法、及び Baltay et al. [2010] によって開発された地震波スペクトル、地震波エネルギーの推定手法を改変して用いた。改変の際に、これまで十分に議論されてこなかった地震波エネルギーの推定誤差についても定量的に評価できるように計算を線形化した。

大きな空間的特徴として、scaled energy (地震波エネルギーと地震モーメントの比) は震源の深さに正の依存性を示すという結果が得られた。これは既往研究と整合的な結果である。釜石沖のグループでは東北沖地震の直後に scaled energy がいったん低下してから徐々に増加した。同じタイミングで地震モーメントが増加、減少しており、これは東北沖地震後に固着域周辺の条件付き安定領域まですべりが拡大したためと考えられている (Uchida et al. [2015])。本研究の結果と合わせると、その条件付き安定領域では破壊エネルギーの割合が大きいことが示唆される。

また、地震波エネルギーの大きさには断層の強度が関係する。従って、プレート境界面地震の物理機構を考える上で、繰り返し地震の発生間隔は基本的な情報であり、断層面の healing の影響が地震波エネルギーの大きさに関係すると想像される。本研究では、一部グループや領域において、scaled energy と発生間隔に正の依存性が確認されたが、一般的傾向とはいえない。

2011年東北地方太平洋沖地震の余効すべりに伴う小繰り返し地震の出現・規模変化・消失 Emergence, moment change and disappearance of small repeating earthquakes following the 2011 Tohoku earthquake

畠山 範重^{1*}; 内田 直希¹; 松澤 暢¹
HATAKEYAMA, Norishige^{1*}; UCHIDA, Naoki¹; MATSUZAWA, Toru¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

ほぼ同じ場所で繰り返し発生する性質を持つ小繰り返し地震は、断層面の小固着域が繰り返し破壊することにより発生すると考えられている。しかし、固着域の詳細な構造や、規模や繰り返し間隔の不規則性の原因については不明なことが多い。

Chen et al. (2010) と Uchida et al. (2015) は、それぞれ Parkfield と東北沖で、大地震の余効すべり域において、本震後の小繰り返し地震のマグニチュードが系統的に大きくなった事例を報告している。このようなふるまいの解釈の1つとしては、余効すべりにより小繰り返し地震を発生させる固着域への loading rate が速くなったことによって、固着域の周囲に存在する条件付き安定領域が地震性すべりを起こすようになり、地震時すべり域が大きくなったことが考えられる。条件付き安定領域のふるまいがこのような応力擾乱によってどのように変化するかを知ることは、プレート境界地震の発生メカニズムを解明するために重要である。

本研究では、岩手県宮古市沖の小領域について震源再決定を行い、2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）前後における地震活動の経時的变化の特徴を調べた。小領域は、深さ約40kmのプレート境界付近で発生している繰り返し地震クラスターを中心として設定した。また、この地域は東北沖地震による余効すべりが非常に大きかったと考えられている (e.g., Ozawa et al., 2012)。

震源再決定には、Double Difference 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を用いた。はじめに、気象庁の読み取り値を用いて比較的広域の震源を再決定した上で、クラスターに含まれる地震を選定した。次に、選定した地震について、波形のクロススペクトルにより求めた到達時刻差を用いて、より高精度に震源再決定を行った。

東北沖地震以前は、M2.5-2.9の地震 (Group A) がほぼ同じ場所で繰り返し発生しており、その繰り返し間隔は9~12ヶ月程度で安定していた。また、その周りおよそ5kmでは、M2.0以上の地震は発生していなかった。

東北沖地震以後、地震活動に以下の3つの大きな変化が見られた。

(1) 東北沖地震以前に繰り返し発生していた Group A と同じ場所で、M3.0を超える地震が非常に短い時間間隔で繰り返し発生するようになった (2011年3月から12月の間に11回)。

(2) 東北沖地震以前に地震が発生していなかった領域で、東北沖地震後に繰り返し地震が発生するようになった。具体的には、Group Aの北西でM3.2-3.9の地震 (Group B)、北東でM2.2-4.4の地震 (Group C) が発生していた。Group A-Cのセントロイドは、互いに1km以内に存在していた。

(3) これらの繰り返し地震は時間の経過とともにマグニチュードが小さくなっていく傾向があった。また、Group Cは、2012年1月1日のM2.2の地震を境に起こらなくなった。

(1)の現象は、Chen et al. (2010) や Uchida et al. (2015) でも報告されており、loading rate が速くなったことにより、東北沖地震以前に地震時すべりを起こしていた領域に加えて、その周りの条件付き安定領域も一緒にすべったと考えられる。(2)の現象は、今回新たに見つかった現象で、東北沖地震前は非地震性すべりのみが生じており、地震性すべりを起こさなかった条件付き安定領域が、loading rate が速くなったことによって地震性すべりを起こすようになったと解釈できる。(3)の現象は、本震からの経時的な loading rate の減速と共に、条件付き安定領域の中で地震性すべりを起こす部分が小さくなっていったことを示すと考えられる。

Loading rate の違いによるプレート境界のすべり様式の変化は、規模の変化だけではなく、時には繰り返し地震の出現や消失をも引き起こすようだ。このことは、東北沖のプレート境界のモデル化に大きな制約を与えるものである。

謝辞: 本研究では、気象庁一元化カタログを使用しました。また、東北大学の観測点に加え、防災科学技術研究所のHi-net、北海道大、弘前大の観測点で得られた波形を使用しました。

キーワード: 繰り返し地震, 2011年東北沖地震, 震源再決定, 条件付き安定領域, 余効すべり

Keywords: repeating earthquake, 2011 Tohoku earthquake, hypocenter relocation, conditionally stable region, afterslip

2014年3月14日伊予灘稍深発地震の初期段階の破壊過程 Early rupture process of the 14 March 2014 Iyo-Nada intermediate-depth earthquake

齋藤 衛¹; 小松 正直^{2*}; 竹中 博士²
SAITO, Mamoru¹; KOMATSU, Masanao^{2*}; TAKENAKA, Hiroshi²

¹ 岡山大学理学部, ² 岡山大学大学院自然科学研究科
¹Okayama University, ²Okayama University

2014年3月14日に伊予灘で M_{JMA} 6.2の稍深発地震が発生した。震源の深さは78 kmで、フィリピン海プレートのスラブ内で発生した地震である。本研究では、この地震について、発震後5秒間程度の比較的破壊初期段階の震源過程を明らかにする。観測波形記録には、初動Pの後に特徴的な三つの相P1, P2, P3が見られる。振幅は後ろの相ほど大きい。本研究では、初動Pと三つの相の到達時刻から、各相の発生位置および時刻を推定した。震央距離105 km以内に配置されている気象庁、防災科研、産総研、九州大学の各観測網の52観測点の高感度波形(地動速度)の上下動成分を使用し、初動及び各相の到達時刻を読み取った。各相の押し引きを、気象庁の初動発震機構解(strike slipタイプ)およびCMT解(逆断層タイプ)に比較したところ、P1相は前者に、P2相およびP3相は後者に対応し、それぞれ初期破壊相、主破壊相であると考えられる。各相と初動Pの到達時刻差を用いて、各相の発生位置および時刻をTakenaka *et al.* (2006, EPS)の二次元探索法またはその三次元拡張版により推定した。その結果、PおよびP1相の発生地点は初動発震機構解の走向N22° E、傾斜角69°のほぼ東傾斜の断層面上にあり、P2相およびP3相の発生地点はCMT解の走向N244° E、傾斜角26°のほぼ北傾斜の断層面上にあることが分かった。2つの断層面は交差し、初期破壊から主破壊にかけて破壊が乗り移った、もしくは主破壊断層面の破壊を誘発したと考えられる。各相の破壊開始時刻に着目すると、発震時から0.49秒後に初期破壊断層面のイベントによってP1相が生じ、その後、破壊は初期破壊断層面と交差する主破壊断層面に移る、もしくは誘発し、発震時から1.82秒後に主破壊断層面上でP2相を放射するイベントが発生した。さらに、発震時から3.3秒後にP3相を放射した比較的大きなイベントが発生した。以上が、推定した本稍深発地震の初期段階の破壊過程である。

キーワード: 震源過程, 初期破壊, 主破壊, 伊予灘
Keywords: Rupture process, Initial rupture, Main rupture, Iyo-Nada

Evolution of rupture style with total fault displacement: insight from meter-scale direct shear experiments

Evolution of rupture style with total fault displacement: insight from meter-scale direct shear experiments

XU, Shiqing^{1*}; FUKUYAMA, Eiichi¹; YAMASHITA, Futoshi¹; MIZOGUCHI, Kazuo²; TAKIZAWA, Shigeru³; KAWAKATA, Hironori⁴

XU, Shiqing^{1*}; FUKUYAMA, Eiichi¹; YAMASHITA, Futoshi¹; MIZOGUCHI, Kazuo²; TAKIZAWA, Shigeru³; KAWAKATA, Hironori⁴

¹Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev., ²Centr. Res. Inst. Elect. Pow. Ind., ³University of Tsukuba, ⁴Ritsumeikan University
¹Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev., ²Centr. Res. Inst. Elect. Pow. Ind., ³University of Tsukuba, ⁴Ritsumeikan University

We report results with Indian metagabbro ($V_s=3.62$ km/s) that are obtained from a series of meter-scale direct shear experiments conducted at NIED. We focus on strain gage array data of stick-slip events loaded with 0.01 mm/s and under 6.7 MPa normal stress, and find the following: (1) During the early stage when the contact surface is relatively intact with less than 10 mm total displacement, ruptures mainly behave as slow-slip events (10 to 100 m/s). (2) With the accumulation of total fault displacement (up to several tens of mm), grooves indicative of strongly coupled local patches (i.e. asperities) are generated along the sliding surface, which are primarily elongated along the loading direction and are accompanied by notable gouge formation. The rest part of the surface continues being polished, indicated by a contrast in light reflectivity with respect to the initial level. At this stage, rupture speeds start to increase but are still well below the shear wave speed ($\sim 1/4V_s$). (3) After long enough total fault displacement (>500 mm), grooves and gouges of a sufficient amount are generated. The corresponding ruptures show, following a slow nucleation phase, fast propagation with speed comparable to the shear wave speed. Detailed strain data analysis shows that the above rupture style evolution is associated with an increasing efficiency in releasing the stored strain energy along the synthetic fault, which may have been facilitated by powder lubrication (Reches and Lockner, 2010) only after the formation of certain amount of gouges. Our study highlights the role of (evolving) fault surface properties in controlling propagation style of dynamic ruptures. It also calls for the need to conduct large-scale friction experiments over long displacement to better approximate natural fault conditions.

キーワード: Friction experiments, Dynamic rupture propagation, Fault lubrication

Keywords: Friction experiments, Dynamic rupture propagation, Fault lubrication

Cohesive Zone Length of Gabbro at Supershear Rupture Velocity (2) Cohesive Zone Length of Gabbro at Supershear Rupture Velocity (2)

福山 英一^{1*}; Xu Shiqing¹; 溝口 一生²; 山下 太¹
FUKUYAMA, Eiichi^{1*}; XU, Shiqing¹; MIZOGUCHI, Kazuo²; YAMASHITA, Futoshi¹

¹ 防災科学技術研究所, ² 電力中央研究所

¹Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev. (NIED), ²Cntr. Res. Inst. Elect. Pow. Ind. (CRIEPI)

We investigated the shear strain field ahead of a supershear rupture. The strain array data along the sliding fault interfaces was obtained during large-scale biaxial friction experiments conducted at NIED in March 2013. These friction experiments were done using a pair of meter-scale metagabbro rock specimens whose simulated fault area was 1.5m x 0.1m. 2.6MPa normal stress was applied with loading velocity of 0.1mm/s. Along the fault edge parallel to the slip direction, 32 2-component semi-conductor strain gauges were installed at an interval of 50mm and 10mm off the fault. The data are conditioned by high frequency strain amplifiers (<0.5MHz) and continuously recorded at an interval of 1MHz with 16-bit resolution. Many stick-slip events were observed in this experiment. We chose unilateral rupture events in which foreshocks did not precede ahead of the main rupture and that propagated with supershear rupture velocity. One of the reasons for this selection was to improve the quality of observed data because the strain field ahead of the supershear rupture was not contaminated by elastic waves. Focusing on the rupture front, stress concentration was observed and sharp stress drop occurred immediately inside the rupture. We converted the temporal variation of strain to spatial variation of strain and picked up the peak strain and zero-crossing strain locations to measure the cohesive zone length. By compiling the stick-slip events, the cohesive zone length is 10 ~20 mm. We could not see any systematic variation at the location but the cohesive zone length scattered between the events. We found that the cohesive zone length decreases with the total amount of slip as well as the rupture velocity increases, especially larger than $\sqrt{2}$ times the shear wave velocity. This feature is more or less consistent with the theoretical prediction of Broberg (1999).

キーワード: cohesive zone, earthquake rupture, friction experiment, supershear rupture
Keywords: cohesive zone, earthquake rupture, friction experiment, supershear rupture

岩塩ガウジのスティック・スリップ挙動に対する塑性の効果 Effects of plasticity on stick-slip behaviors of halite gouge

平内 健一^{1*}; 吉田 佳明¹; 矢部 康男²; 武藤 潤³

HIRAUCHI, Ken-ichi^{1*}; YOSHIDA, Yoshiaki¹; YABE, Yasuo²; MUTO, Jun³

¹ 静岡大学大学院理学研究科地球科学専攻, ² 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター, ³ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Department of Geosciences, Graduate School of Science, Shizuoka University, ²Graduate School of Science, Tohoku University, ³Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University

Non-volcanic tremors in subduction zones and San Andreas are known to be located near the bottom edge of the seismogenic zone. Assuming that the occurrence of ordinary earthquakes is inhibited by the onset of crystal plasticity in rock-forming minerals (e.g., quartz and feldspar), this implies that tremor activity occurs at the depth of a transition between brittle and ductile deformation. Previous studies of rock friction (Shimamoto, 1986, *Science*; Noda and Shimamoto, 2010, *GRL*) have already indicated that halite is a good candidate to explore the effects of plasticity on frictional behavior in laboratory, because with increasing normal stress (σ_n), the deformation mechanism of halite changes from frictional sliding to dislocation creep even at room temperature. However, it remains unclear how plasticity affects stick-slip behaviors of halite, including stress-drop magnitude, recurrence interval, frictional velocity dependence ($a-b$), and rupture propagation process.

To explore the effects of plasticity on stick-slip behavior, we conducted friction experiments on halite gouges at room temperature, constant normal stresses of 10 to 120 MPa, and sliding velocities of 1 or 10 $\mu\text{m/s}$, using a large biaxial testing machine installed at Tohoku University. Seven strain gauges were mounted on a forcing block at 23 mm intervals along the fault. For each experiment, we recorded more than 50 stick-slip events in total. At sliding velocity of 1 $\mu\text{m/s}$, the magnitude of stress drop increased from 1 MPa at $\sigma_n = 10$ MPa to 3 MPa at $\sigma_n = 30$ MPa, while decreasing to 0.5 MPa at $\sigma_n = 120$ MPa. The stick-slip recurrence interval at the same sliding velocity decreased from 20 s at $\sigma_n = 10$ MPa to 4 s at $\sigma_n = 120$ MPa. ($a-b$) values decreased from -0.005 at $\sigma_n = 10$ MPa to -0.025 at $\sigma_n = 40$ MPa, while remarkably increasing to 0.015 at $\sigma_n = 120$ MPa. Critical length (L_c) at which unstable, fast rupture propagation ($>10\% V_s$) starts seems to increase with increasing σ_n .

Our experimental results indicate that the stick-slip behavior of halite fault gouges dramatically changes with increasing degree of plasticity, i.e., sharp, large stick-slip events in brittle regime evolve to smooth, small oscillations in semi-ductile (plastic) regime. Source characteristics of the small oscillations with sustained slow rupture may be linked to those of slow earthquakes such as non-volcanic tremors. It is well known that extremely low effective normal stress on the fault is the primary control on the occurrence of slow earthquakes. Furthermore, we suggest that the onset of plasticity in minerals, leading to an increase in ($a-b$), also facilitates the emergence of such slow transient creep events.

キーワード: 摩擦実験, 岩塩, 非火山性微動, 塑性, 破壊伝播, スティック・スリップ

Keywords: friction experiments, halite, non-volcanic tremor, plasticity, rupture propagation, stick slip

2014年オークニー地震 (ML5.5) の震源破壊過程 Source Process of the 2014 ML5.5 Orkney earthquake, South Africa

大久保 慎人^{1*}; Cichowicz Artur²; Birch Denver²; 小笠原 宏³; 村上 理³; 堀内 茂木⁴
OKUBO, Makoto^{1*}; CICHOWICZ, Artur²; BIRCH, Denver²; OGASAWARA, Hiroshi³; MURAKAMI, Osamu³;
HORIUCHI, Shigeki⁴

¹ 東濃地震科研, ²CGS, ³立命館大理工, ⁴ホームサイスマメーター

¹TRIES, ADEP, ²Council for Geoscience, ³Ritsumeikan Univ., ⁴Home Seismometer Corp.

An earthquake occurred at 12:22:33 SAST (10:22:33 UT) on 5 August, with the epicenter near Orkney town near gold mines in the Klerksdorp district in the North West province of South Africa. The Council for Geoscience (CGS) in South Africa reported that the magnitude was $M_L 5.5$. As a quick preliminary report, USGS estimated a left lateral fault mechanism and a focal depth of 5.0 km. CGS revised its depth to 4.7 km using the dense cluster network data. CGS also reported 84 aftershocks on 5 August and 31 aftershocks on 6 August, with magnitudes of 1.0 to 3.8 on the Richter scale. According to the CGS, this earthquake was the biggest recorded earthquake in the gold mining districts in South African history.

In this study, we analyzed the main shock waveforms and aftershock distribution to understand the rupture process of this earthquake. At the time of the 2014 Orkney earthquake, 17 strong motion surface stations were in operation and continuous acceleration seismograms were obtained with 24-bit and 200 Hz sampling. First, we picked P and S wave arrival times of the main shock and found two sets of phases in those seismograms. One belongs to a smaller event that occurred at a depth of 4.1 km (5.6 km below ground surface; BGS) with a magnitude less than 3. The other event started 0.3 seconds later with a larger magnitude slightly (1 km) north of the first one and at a depth of 4.2 km depth (5.7 km BGS). It seemed appears that the smaller initial rupture was leading led to a larger main rupture. According to the S wave velocity structure of in the Klerksdorp area, the S wave of the initial rupture can would have been able to reach to get to the hypocenter of the main rupture hypocenter, just in time. Thus, it seems that appears as though the initial rupture's S wave had initiated the main rupture.

Next, we applied hypoDD (Waldhauser & Ellsworth, 2000), the Double-Difference earthquake location algorithm, to P and S wave arrival times of the aftershocks, as well as to the initial and main ruptures of the main shock. We found spatial gaps in the deep parts of the aftershock distribution. These seem to correspond to the initial and main rupture hypocenters. We also found a horizontal seismic gap at a depth of 3.5 km BGS. Shallow events located above this seismic gap may have been caused by the $M_L 5.5$ coseismic stress change and the existence of high mining rock stress. These might not be aftershocks since the gold mine leaf reaches up to a depth of 3.5 km.

According to Matsuda's law (Matsuda, 1975), the extent of a $M_L 5.5$ earthquake fault can be 2-3 km (maximum for unidirectional rupture), main rupture could reach 2.5 km BGS. However, the existence of the horizontal seismicity gap and rupture extension at the same depth may imply that the main rupture did not reach 3.5 km BGS.

キーワード: SATREPS, 初期破壊, Klerksdorp, ダブルディファレンス

Keywords: SATREPS, initial rupture, Klerksdorp, double difference hypocenter location

Mitigation of the rockburst risk in deep South African gold mines Mitigation of the rockburst risk in deep South African gold mines

DURRHEIM, Raymond^{1*}; MILEV, Alexander²; KGARUME, Thabang²; BRINK, Van zyl²; CICHOWICZ, Artur³; OGASAWARA, Hiroshi⁴
DURRHEIM, Raymond^{1*}; MILEV, Alexander²; KGARUME, Thabang²; BRINK, Van zyl²; CICHOWICZ, Artur³; OGASAWARA, Hiroshi⁴

¹CSIR, South Africa, ²University of the Witwatersrand, South Africa, ³Council for Geoscience, South Africa, ⁴Ritsumeikan University, Japan, ⁵SATREPS

¹CSIR, South Africa, ²University of the Witwatersrand, South Africa, ³Council for Geoscience, South Africa, ⁴Ritsumeikan University, Japan, ⁵SATREPS

Earthquakes pose a significant risk to workers in deep and overstressed mines, such as South African gold mines. A 5-year collaborative project entitled OBSERVATIONAL STUDIES IN SOUTH AFRICAN MINES TO MITIGATE SEISMIC RISKS was launched in August 2010 to gain knowledge, develop and transfer technology, and build capacity. It was funded by the JST-JICA Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS).

Rockbursts are seismic events that cause damage to underground workings. Strategies to mitigate the risk posed by rockbursts can be divided into three categories: prevention, protection and prediction. In this paper we will discuss the contribution made by the SATREPS project to these strategies.

Research sites were established at three deep gold mines: Cooke #4 Shaft, Hlanganani and Moab Khotsong. Boreholes were drilled to locate faults accurately that were considered capable of producing mining-induced seismic events. A variety of sensors were installed to monitor the quasi-static deformation of the rock mass, the accumulation of strain, tilt changes during the seismic event and post seismic creep phase, and changes in dynamic stress produced by the propagation of the rupture front. The Council for Geoscience (CGS) deployed 10 surface seismic stations in the Far West Rand district where the Cooke #4 and Hlanganani mines are situated. The CGS also manages a 25-station network established in the Klerksdorp district where the Moab-Khotsong mine is situated. SATREPS also provided a Kinematics Antelope Seismic Processing System to handle the large volume of data being acquired by the networks and the Horiuchi algorithm to automatically pick P- and S-arrival time and locate events.

By prevention, we mean a reduction in the occurrence of damaging seismic events. This is achieved by optimizing the design and sequence of extraction. Rock properties and the stress field are essential inputs. The SATREPS project has made a significant contribution to the mine design capability by adapting and transferring of the Compact Conical Borehole Overcoring (CCBO) stress measurement technique. Stress measurements, together with observations of borehole breakouts and discing of borehole core and seismic source parameters, are used to calibrate numerical models of mining layouts and sequences.

By protection, we mean the creation of rockburst-resistant excavations. As part of the SATREPS project we have studied the state of the rockwall in stopes near the research sites, measured the response of the rockmass to mining, and studied the performance of support elements and systems. In a complementary project, CSIR is developing various technologies to enable the stability of the hangingwall to be mapped prior to the entry of miners. These include robust closure and ground motion meters, thermal and acoustic mapping of hangingwall stability, and a robotic platform to carry these devices.

By prediction, we mean the reliable and timely forecasting of rockbursts so that mine workers may take refuge. We have used the unprecedented volume of high quality data gathered at the SATREPS sites to search for forerunners of seismic events. While we have gained new insights into the development of mining-induced fractures and the nucleation of seismic events, and studied variations in seismic parameters such as the b-value, we have not yet found a reliable precursory signal that can be used to raise an alarm.

Other lasting benefits of the SATREPS project include: (1) the enhancement of the National Seismograph Network, and (2) opportunities for several young South African researchers to visit Japanese institutes and gain experience in high-level research. The SATREPS project has been an extremely valuable contribution to researchers and practitioners working in deep South African mines, and we are grateful for the contributions of many dedicated Japanese scientists and the support of the Japanese government through JST and JICA.

Japan Geoscience Union Meeting 2015

(May 24th - 28th at Makuhari, Chiba, Japan)

©2015. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS30-28

会場:A05

時間:5月26日 09:15-09:30

キーワード: Mining induced seismicity, rockbursts, deep mines, South Africa, mitigation
Keywords: Mining induced seismicity, rockbursts, deep mines, South Africa, mitigation

Routine Estimation of Source Parameters of Mining-Related Earthquakes Routine Estimation of Source Parameters of Mining-Related Earthquakes

CICHOWICZ, Artur^{1*}; BIRCH, Denver¹; MIYAKE, Hiroe²; HORIUCHI, Shigeki³; OGASAWARA, Hiroshi⁴; DURRHEIM, Raymond⁵; CGS, Technical team⁶; THE SATREPS, Research group.⁷
CICHOWICZ, Artur^{1*}; BIRCH, Denver¹; MIYAKE, Hiroe²; HORIUCHI, Shigeki³; OGASAWARA, Hiroshi⁴; DURRHEIM, Raymond⁵; CGS, Technical team⁶; THE SATREPS, Research group.⁷

¹Council for Geoscience, South Africa / SATREPS, ²The University of Tokyo, Japan / SATREPS, ³Home Seismometer Corporation, Japan, ⁴Ritsumeikan University, Japan / SATREPS, ⁵University of the Witwatersrand and CSIR, South Africa / SATREPS, ⁶Council for Geoscience, South Africa, ⁷SATREPS (JST-JICA Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development)

¹Council for Geoscience, South Africa / SATREPS, ²The University of Tokyo, Japan / SATREPS, ³Home Seismometer Corporation, Japan, ⁴Ritsumeikan University, Japan / SATREPS, ⁵University of the Witwatersrand and CSIR, South Africa / SATREPS, ⁶Council for Geoscience, South Africa, ⁷SATREPS (JST-JICA Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development)

Mining in the Witwatersrand region of South Africa has led to induced seismicity. Seismicity is concentrated in several clusters associated with current mining production and flooding in abandoned mining voids. Starting in 2010, a surface network consisting of over 60 strong ground motion seismograph stations was installed in three clusters. Automatic earthquake location software from Home Seismometer Corp. based on an automatic location algorithm developed by Dr. Horiuchi was used to locate the large number of aftershocks quickly and accurately. Software for the estimation of seismic source spectral parameters was developed. The software is robust and most of the processing is performed automatically in a batch mode. A catalogue of a few thousand earthquakes was created and the spectral parameters of the events were estimated. Systematic shifts in the range of the spectral parameters for the three clusters were observed. Fluid-induced seismic events have a much smaller static stress drop (0.02- 5MPa) compared to areas where active mining is present (0.1-40MPa). The scalar seismic moment varied from 10^{10} to 10^{14} Nm for the fluid-induced seismicity cluster and for active mining it varied from 10^{10} to 10^{15} Nm. The relationships between static stress drop and scalar seismic moment undoubtedly show that the stress drop increases with seismic moment. Nevertheless, the scattering of the static or apparent stress drop around a fixed seismic moment spans roughly 1.5 -2.0 orders of magnitude.

An unexpectedly large earthquake of magnitude M_L 5.5 (M_w 5.3) was recorded in a district where active mining is currently taking place. Spectral analysis was performed in the frequency range 0.2 - 80Hz. An assumed quality factor of $Q=400$ was used. This value is used by underground mining networks. $Kappa$ was set to 0.005. Analyzed waveforms were restricted to those recorded at small distances (2-20km) to reduce the effect of a possible error associated with the correction for path effects. The distribution of aftershocks located in the first 24 hours indicates the length of rupture zone to be roughly 6 km; however, spectral analysis of the entire S-wave group shows a maximum source size of approximately 2 km (S-wave corner frequency 1-1.3Hz). Visual inspection of the waveform clearly shows three sub-events. The first one is small followed by two stronger sub-events with similar pulse durations. The two strong sub-events occur about 0.5 sec apart. Analysis of the main event and aftershocks showed that the main event had a static stress drop of 35-45MPa, while the biggest aftershocks recorded in the first 10 days have static stress drops of 25-30MPa, and the largest aftershocks recorded in the next 10 days have static stress drops in the range 7-10MPa. The aftershocks with the largest static stress drops are distributed across the entire 6 km rupture zone. The relationship between stress drop and scalar seismic moment for all the aftershocks showed that the stress drop increases with seismic moment. The static stress drop varies in the range from 0.1 to 40MPa and scalar seismic moment varies from 10^{10} to 10^{14} Nm. The main event appears as a strong outlier with large scalar seismic moments of 2.6×10^{16} - 10^{17} Nm on the three components.

キーワード: spectral source parameters, induced seismicity, routine processing, static stress drop
Keywords: spectral source parameters, induced seismicity, routine processing, static stress drop