

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が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。

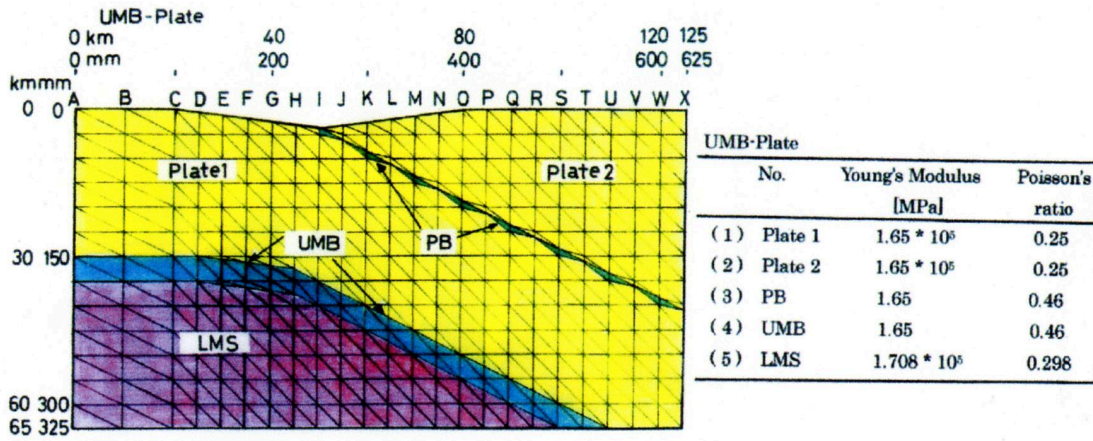
キーワード: せん断応力、沈み込み帯、弾性プレートモデル、2次元有限要素法
Keywords: Shear stress, Subduction zone, Elastic plate model, 2D FEM

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)。

$$\Delta\sigma = 79.0 L_0^{-0.519} \text{ (単位は km と MPa)}$$

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

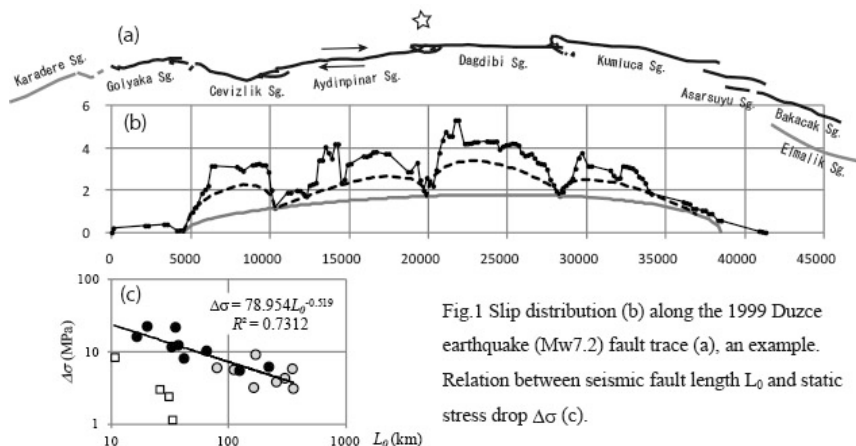


Fig.1 Slip distribution (b) along the 1999 Duzce earthquake (Mw7.2) fault trace (a), an example. Relation between seismic fault length L_0 and static stress drop $\Delta\sigma$ (c).

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

¹Earthquake 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学的震源モデル 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学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° 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° 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: 動力学的震源モデル, 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

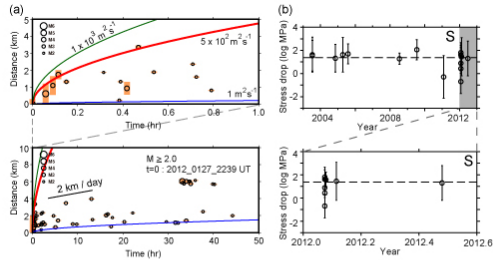


Fig. (a) Hypocentral distances from the first earthquake as a function of elapsed time less than an hour and 50 hours, with scales of source radii. Vertical orange bars indicate source dimensions calculated from estimated stress drops by S waves. Red curve with a diffusivity of $5.0 \times 10^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 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、 $\delta D/\delta^{18}O$ 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.

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

杭の如き応力集中を起こす南海トラフ沿い2つの海山～2004年紀伊半島南東沖の地震の真の意味～ Two seamounts in the near south of Nankai Trough concentrate stress like stake

間瀬 博文^{1*}
MASE, Hirofumi^{1*}

¹ 所属なし
¹ none

(図面を参照のこと スラブ名・海底地形名等は便宜上命名した)

南海トラフ地震の本質はスラブ内が潰れること、付加体がはがれること、スラブが横ずれ回転し這い上がることにあり、2004年紀伊半島南東沖の地震は1944年東南海地震の後始末の地震であると位置付けた(1)。後始末がなぜ60年後なのかとの指摘を受けたこともあり両地震の真の関係を探求したい。

図1に1944年のすべり量分布コンター(2)(プレート間地震を前提とするが大変参考になる)を、図2に2004年の本震のすべり量分布コンター(3)、前震・本震・大きな余震の震源の位置(4)、発生翌月7日までの余震分布(4)(範囲を点線で囲んだ)を表示した。

(1)～(5)よりほぼ明確な点を整理する。(A):すべり範囲に関し1944年はトラフに届かず、2004年はトラフに絡んだ状態で両者は相補的で重複が少ない。(以下2004年について)(B):北-南方向の圧縮力が原因である。(C):前震・本震・大きな余震はトラフに沿って分布しスラブ内を破壊した逆断層型が主である。(D):北西-南東方向に分布する余震は浅発で横ずれ型が多く、付加体や下盤の上層に大規模な横ずれ断層帯が存在する。(E):全てが亀裂(b)より西方に分布している。(F):亀裂(a)の南端の延長上で本震後2,3日に2つの大きな逆断層型余震が発生した。(G):前震の大すべりは震源近くの深い所で本震のそれは震源から離れた西方の浅い所であった(3)が結局両方の大すべりの位置は近い。

大すべり(G)のほぼ真北は大王崎で南には海山WMがあり圧縮力(B)はこの北-南線上で最大であったと見られる。右回転力(1)に由来する北からの力がトラフ付近の狭い範囲に集中するには、反作用の応力を集中させる杭のような存在がトラフのすぐ南に力学的に不可欠である。海山WMは正に「杭」であろう。直近で余震(F)が発生した海山EMも「杭」であろう。横ずれ断層帯(D)は東西2本の「杭」の間(影響が少ない)を通る。

邪魔な部分や衝突する部分が先々で簡単に潰れてくれるならスラブの右回転も容易である。2本の「杭」はスラブ右回転の前線が出くわす障害物でもある。特に、亀裂(a)、亀裂(b)の南端に対面している海山EMはスラブ右回転の半径や外周の位置の決定への関与が大きかろう。

(A)～(F)を考慮すれば1944年に割れ残ったトラフ付近の後始末が2004年になされたとの解釈はやはり妥当である。しかし大すべり(G)が海山WMの前で発生したのはどういう意味か。海山WMから狭い視野で真北を見れば大すべり(G)があり横ずれ断層帯(D)も横切るが、海山EMから同様に北を見ても(G)ほどの大すべりはなく(D)もない。力を伝達していた物質は海山WMの方がより減少したはずだから地震前に大きかった海山WMの応力は激減したことになる。相対的に海山EMが主となるがこの時点でとにかく北-南圧縮(B)は崩壊した。次に何が起こるか。両「杭」とも図面左斜め上方向の物質はまあ健在であるからその方向(北西)からの応力が急増する。

つまり2004年に、1944年以降の北-南圧縮(B)が北西-南東圧縮主体へ劇的に転換したのではないか。2004年は1944年の仕舞いだけでなく繰り返される東南海地震の「中間点」で圧縮方向を転換させ次回へ向けて実質的に踏み出す重大な役回りの恒例イベントではないか。

(1) 間瀬博文(2014)/JpGU2014/SSS29-P10

(2) 山中佳子(2004)/1944年東南海地震と1945年三河地震の震源過程/月刊地球/26/11/739-745

(3) 八木勇治(2004)/2004年9月5日記伊半島南東沖で発生した地震について/建築研

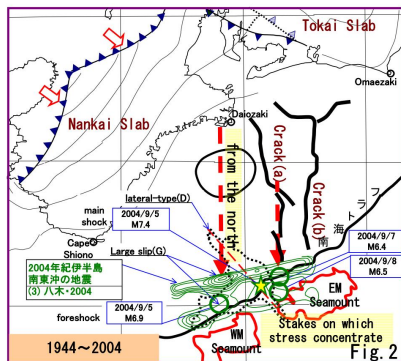
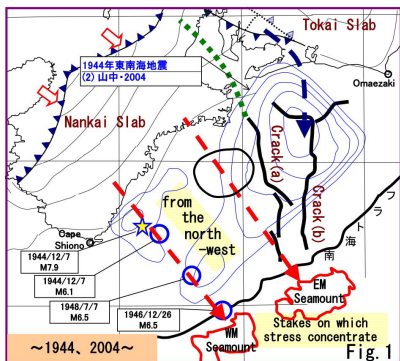
(4) 気象庁/地震・火山月報(防災編)/平成16年9月/特集2/図6-5(P64)等

(5) 金沢敏彦/紀伊半島沖〔三重県南東沖〕の地震/東大震研

SSS30-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 18:15-19:30



/About sea bottom
 (shape line)
 extracted from (6)/
 /About "Nankai Slab"
 (shape line, contour)
 referable to (7)/
 /About "Tokai Slab"
 (shape line, contour)
 referable to (8)/
 /About information on earthquake
 (All not mentioned specially)
 referable to (9)/
 Reference literature
 (2)山中佳子(2004)/1944年東南海地震と1945年三河地震の震源過程
 /月刊地球/26/11/739-745
 (3)八木英治(2004)/2004年9月5日記伊半島南東沖で発生した地震について/建築研
http://isee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/Japan20040905/Japan20040905_1.html
 (4)JMA/Monthly Report on Earthquakes and Volcanoes in Japan/September 2004/特集2/図6-5(P64)等
 (5)金沢敏彦/紀伊半島沖(三重県南東沖)の地震/東大震研
http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/history/2-3-8_in2004.pdf
 (6)JHOD/JCG/Sea-floor Topography of the Plate Boundaries
http://www1.kaiho.mlit.go.jp/jshin/sokuryo_E/sokuryo_E.html
 (7)木村昌三(2001)/1946年南海地震に關係する四国における地震活動の特徴(図2)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography/1889/110/4/110_4_581_article-char/ja/
 (8)Nagoya Univ./Structure of the Subducting Philippine Sea Slab
<http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/SEIS/slab/slab-3.html>
 (9)JMA/Monthly Report on Earthquakes and Volcanoes in Japan/September 2004/特集2/図7-1(P65)
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaikyo/index.html#monthly>

遠地実体波を用いた巨大地震の震源過程速報解析に向けて：波線理論によるグリーン関数の問題点とその影響の考察 Toward rapid source process analysis for great earthquake using teleseismic body waves

吉本 昌弘^{1*}; 山中 佳子¹
YOSHIMOTO, Masahiro^{1*}; YAMANAKA, Yoshiko¹

¹ 名古屋大学環境学研究科

¹ Environmental studies, Nagoya University

巨大地震の震源過程は、遠地実体波を用いることで、どの場所で発生した巨大地震でも今やほぼリアルタイムに解析をすることができるようになった。遠地実体波解析の多くは波線理論的な方法によってグリーン関数の計算を行っているが、そのような方法では以下に挙げる2つの問題が生じてしまう：1つはPP波などの後続波を全て計算することが難しいこと（近似的な計算は可能）、もう1つは短波長近似なので超長周期のW phaseの計算が不可能なことである。この問題を解決するため、我々はDirect Solution Methodで計算されたフルウェーブのグリーン関数を導入した。既に2004年スマトラ島沖地震(Yoshimoto and Yamanaka, EPS, 2014)や2010年チリ地震(吉本・山中, 地震学会2013)の解析を行ってきた。

波線理論で計算されたグリーン関数の問題点をより明瞭にするために、2011年東北地方太平洋沖地震の前震(Mw7.3)と2007年ソロモン諸島の地震(Mw8.1)についてもフルウェーブのグリーン関数を用いて遠地実体波解析を行い、同様の解析条件で波線理論によるグリーン関数を用いて解析をした結果との比較を行った。その結果、2011年東北沖の前震(Mw7.3)では結果にほぼ差は見られなかったが、2007年ソロモン地震(Mw8.1)では波線理論による結果ではフルウェーブのグリーン関数を用いた結果に比べて震源過程後半部でモーメント解放が小さくなってしまいう結果が得られた。同様の結果は2010年チリ地震(Mw8.8)でも得られている。この違いは、主には波線理論によるグリーン関数がW phaseを計算できないためであると考えられる。この結果は、たとえM8クラスの巨大地震であっても、W phaseが観測波形に顕著に観測されていればもはや波線理論で計算されたグリーン関数を使用することは妥当ではない可能性を示している。

フルウェーブグリーン関数は計算コストがかかるため、現在ではまだ震源過程速報解析に使用することは難しいかもしれない。震源過程速報解析などで波線理論によるグリーン関数を使用する場合も、可能な限りW phaseのP波付近に対する相対振幅が小さいような観測点を使用し解析をするべきである。そのような観測点を使用することが難しい場合は、長周期成分の影響の少ない速度波形での波形インバージョンを検討すべきであろう。

キーワード: 遠地実体波, グリーン関数, 波線理論, W phase, 巨大地震

Keywords: teleseismic body waves, Green's functions, ray theory, W phase, great earthquake

遠地実体波震源過程解析の自動化に向けた最適パラメータの考察 Optimization of Preset Parameters for Source Process Analysis with Teleseismic Body-Wave

藤田 健一^{1*}; 勝間田 明男¹; 迫田 浩司²; 清水 淳平²; 長谷川 嘉臣²

FUJITA, Kenichi^{1*}; KATSUMATA, Akio¹; SAKODA, Koji²; SHIMIZU, Jumpei²; HASEGAWA, Yoshiomi²

¹ 気象研究所, ² 気象庁

¹Meteorological Research Institute, ²Japan Meteorological Agency

1. はじめに

気象庁では世界で起きたおよそ Mw7.0 以上の地震について、遠地実体波震源過程解析を行い気象庁ホームページで解析結果を発表しているが、解析に使用するパラメータが多く、どの解析結果が最適なのか判断するのが難しい。そのため、イベントが発生してから結果を発表するまでに、多くの時間を要しているのが現状である。

このため、遠地実体波震源過程解析の迅速化及び自動化を目指し、解析に用いる最適パラメータを決めるために必要となるプロセスについて考察した。

今回、複数のイベントについて自動的にパラメータを設定して解析を行い、その結果と解析者が試行錯誤的にパラメータを変化させて解析した結果との比較を行った。そして、自動的にパラメータを設定する場合に生じる問題点を抽出し、改善策について検討する。

2. 方法

解析は岩切 他 (2014) のプログラムを使用した。観測波形は IRIS の広帯域地震波形に 0.002~0.125Hz のバンドパスフィルターを適用して使用した。破壊開始点の位置は、国内のイベントについては気象庁一元化震源の値を使用し、海外のイベントについては米国地質調査所 (USGS) の震源の値を使用した。破壊開始点の深さは気象庁 CMT の値を使用した。仮定する断層面は破壊開始点を断層面の中央に設定し、イベントの大きさ (Mw) に応じてスケーリング則から小断層のサイズと数を設定した。走向、傾斜、すべり角は気象庁 CMT の値を使用した。各小断層のグリーン関数の計算に用いる地下速度構造には IASP91 のモデルを与え、震源付近では CRUST2.0 のモデルを与えた。震源時間関数は二等辺三角形の基底関数を立ち上がり時間 2.0 秒として設定し、基底関数の数はイベントの大きさに応じて設定した。時空間的なめらかさを与える拘束条件については、ABIC(Akaike(1980)) が最小となるパラメータを設定した。最大破壊速度は経験的關係 (Geller(1976)) から S 波速度の 0.72 倍として設定した。

謝辞: IRIS の広帯域地震波形、IASP91 及び CRUST2.0 の地下速度構造モデルを用いました。記して感謝致します。

キーワード: 震源過程, 最適パラメータ, 自動化

Keywords: source process, optimized preset parameters, automation

近地波形を用いた地震波エネルギー推定手法の検討 Consideration of the Method to Estimate the Radiated Seismic Energy from Regional Seismic Waveforms

木内 亮太^{1*}; Mori James¹
KIUCHI, Ryota^{1*}; MORI, James¹

¹ 京都大学防災研究所

¹ DPRI, Kyoto University

The total released strain energy during an earthquake is divided into frictional energy, fracture energy, and radiated seismic energy. In these 3 components, we can estimate only the radiated seismic energy directly from the seismic waveform, and that characterizes the dynamic source property. There are large variations of radiated seismic energy from previous energy estimate studies, although it is difficult to estimate it due to the contribution from a wide frequency spectrum. One of the probable factors of this variation is focal mechanism dependence of radiated seismic energy from teleseismic waveforms (e.g., Choy and Boatwright, 1995; Convers and Newman, 2011). However, there are 2 additional questions from these studies. 1. These results were obtained only from P wave energy assuming a ratio between P wave energy and S wave energy. Teleseismic S waves often overlap with other phases, and attenuate more strongly than P waves, so it is difficult to measure the S-wave energy directly. The ratio of P to S radiated energy is not well known. 2. The focal mechanism dependence has been shown only for large earthquakes ($M_w > 6$), it seems that this characteristic has not been observed for small and moderate earthquakes.

For the purpose of investigating these questions, we need to estimate and compare the radiated seismic energies correctly from several different phases. As an example, we focus on a moderate earthquake (June 14, 2008 at 12:27, M_w 4.9 from F-net) that occurred just after 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake. In this study we estimate the radiated seismic energy from regional P waves, S waves, and S wave coda using an empirical Green's function (EGF) method. The regional waveform data are recorded at stations of Hi-net. Firstly, using cross correlation, we select an EGF event that is highly correlated with the target event. Secondly, we deconvolve the seismograms in frequency domain with a multitaper method (Prieto et al., 2009), and check the waveform in time domain. Thirdly, we fit the obtained spectrum to an omega square model (Brune, 1970, 1971) to estimate the corner frequency. In addition, we try to vary the value of the power for the high-frequency fall-off. Finally, we calculate the radiated seismic energy using these spectra.

Acknowledgement

The regional waveform data of Hi-net and focal mechanisms of F-net were provided by NIED.

キーワード: 地震波エネルギー, 中規模地震

Keywords: Seismic radiated energy, Moderate earthquake

S-net 観測点を用いた震源決定シミュレーション Simulation of hypocenter determination by using S-net stations

眞保 敬^{1*}; 植平 賢司¹; 金沢 敏彦¹; 望月 将志¹; 藤本 博己¹; 野口 伸一¹; 功刀 卓¹; 汐見 勝彦¹;
青井 真¹; 関口 涉次¹; 松本 拓己¹; 岡田 義光¹; 篠原 雅尚²; 山田 知朗²
SHIMBO, Takashi^{1*}; UEHIRA, Kenji¹; KANAZAWA, Toshihiko¹; MOCHIZUKI, Masashi¹; FUJIMOTO, Hiromi¹;
NOGUCHI, Shin-ichi¹; KUNUGI, Takashi¹; SHIOMI, Katsuhiko¹; AOI, Shin¹; SEKIGUCHI, Shoji¹;
MATSUMOTO, Takumi¹; OKADA, Yoshimitsu¹; SHINOHARA, Masanao²; YAMADA, Tomoaki²

¹ 防災科学技術研究所, ² 東大地震研

¹NIED, ²ERI

海底下で発生する地震や津波を観測するために、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) の整備事業を 2011 年から開始した。S-net は房総沖から北海道沖まで 150 の観測点を設置し、その設置間隔は東西方向 (海溝軸に直角方向) 約 30km、南北方向 (海溝軸に平行方向) 約 50-60km である。S-net の整備により、津波警報や緊急地震速報をこれまでよりも早く発表することが可能になる。海底下で発生する地震を解明するためには、海底下における震源分布、発震機構解、地震波速度構造や応力場等を高精度で求め、沈み込むプレートと地震発生域との関係や、プレート間におけるひずみの蓄積過程等を調べる必要がある。これらを詳細に調べるためには、海底下で発生する地震を精度よく決定することが必須である。

本研究では、S-net による震源決定精度を理解するために、海底下で発生する地震から S-net 観測点までの理論走時を用いることにより、震源決定のシミュレーションを行った。シミュレーションに用いた震源は、自己浮上式海底地震計 (OBS) で決定された 2011 年太平洋沖地震震源域南部で発生した余震 99 個 (Shinohara et al., 2011) である。これらの震源から S-net 観測点までの理論走時を計算し、各観測点の地震波の到達時刻を求めた。そして、その到達時刻を用いて震源再決定を行った。この時、理論走時計算と震源再決定に用いた速度構造は、S-net 設置海域で行われた構造調査の結果を参考に仮定した。本研究によるシミュレーションによって決定された震源と OBS によって決定された震源の位置の差は、1km 程度である。また、Hi-net 観測点でも同様の震源決定シミュレーションを行った。この時、理論走時計算と震源決定に用いた速度構造は、関東・東海地域で震源決定に用いられた速度構造 (鶴川ほか, 1984) を用いた。その結果、いくつかの震源は、OBS によって決定された震源よりも 5km 以上深くなった。これは、陸上観測点のみでは十分な震源決定精度が得られないことを意味する。

The M 7.7 September 24, 2013 Pakistan earthquake: comparison of back-projection images and field data
 The M 7.7 September 24, 2013 Pakistan earthquake: comparison of back-projection images and field data

WANG, Dun^{1*}; MORI, James²; KAWAKATSU, Hitoshi¹
 WANG, Dun^{1*}; MORI, James²; KAWAKATSU, Hitoshi¹

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

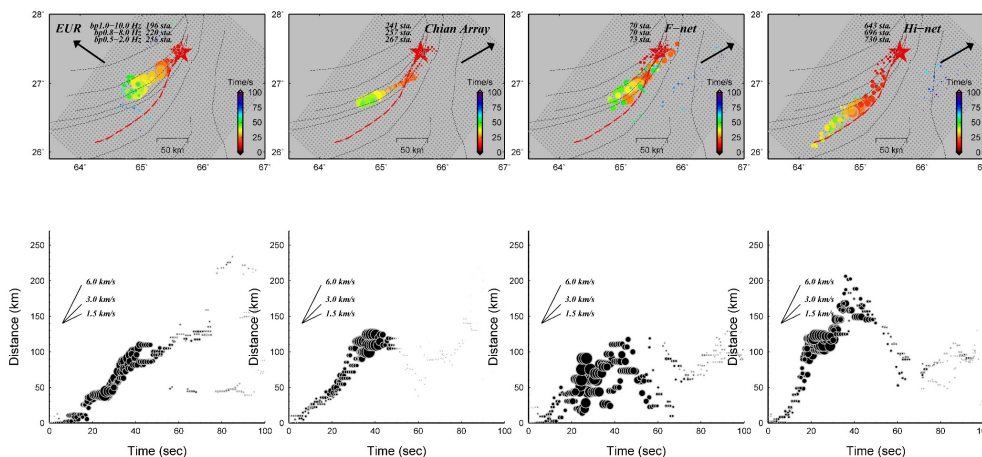
We analyzed the 24 September 2013 Pakistan earthquake (Mw 7.7) by back-projecting seismograms recorded by several large regional arrays in Japan, China, and Europe. The results show that the rupture propagated towards the southwest, and released most of the high frequency energy at 90-130 km southwest of the epicenter around 20-40 s after the initiation. This rupture pattern is significantly different from the northward propagation which would have been expected from the aftershock distribution. High frequency images suggest that the average rupture speed is 4.0 to 5.0 km/s. The rupture speed seems relatively slow (1.0 to 2.0 km/s) for the first 10-15s, and then increased to fast, possibly supershear (4.0 to 6.0 km/s). Relatively lower frequency images show a lower rupture speed of 3.0 to 3.5 km/s (Figure 1).

A comparison of rupture traces determined by the back-projection and a geodetic study provides a good test for resolution of the back-projection method. Given a correct epicenter location, results derived from seismograms recorded in Hi-net, show a very accurate location of the surface trace with an uncertainty of 10-20 km.

Figure caption

Figure 1 Timings and amplitudes for the stack with the maximum correlation at each time step (1 s) showing in the map (top) and as a function of time derived from data recorded in Europe, China, and Japan (from left to right) filtered in several high frequency bands (bottom). Here the distance is measured in a straight line from the relocated epicenter.

キーワード: source process, back-projection, slip model, rupture speed
 Keywords: source process, back-projection, slip model, rupture speed



三次元グリーン関数と屈曲断層モデルを用いた1923年関東地震の震源過程解析 Source process analysis of the 1923 Kanto earthquake using 3-D Green's functions and a curved fault model

尹 淳恵^{1*}; 纈 纈 一起²; 小林 励司³

YUN, Sunhe^{1*}; KOKETSU, Kazuki²; KOBAYASHI, Reiji³

¹ 東京大学地震研究所/伊藤忠テクノソリューションズ, ² 東京大学地震研究所, ³ 鹿児島大学大学院理工学研究科

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo/Itochu techno-solutions, ² Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ³ Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

1923年9月1日に発生した関東地震は、震源域に陸域直下を含んでおり、関東地方を中心に甚大な被害をもたらした。この地震は、フィリピン海プレートが大陸プレートの下に沈み込む相模トラフに沿って発生した、プレート境界地震である。大きな震度が震源域の直上のみならず、震源域から離れた地域でも観測され、関東平野の複雑な三次元構造の影響が示唆されている。本研究では、関東平野の構造が地震動に与える影響を十分に評価するため、全国一次地下構造モデル (Koketsu et al., 2008) を導入して求めた三次元グリーン関数を用いて、震源過程解析を行った。なお、用いた全国一次地下構造モデルは、東京湾や千葉県北部の直下では堆積層の厚さが3km以上に及び、関東平野の複雑な三次元構造が反映されたモデルである。観測データは地殻変動、遠地波形、強震波形を用いた。断層モデルにはSato et al. (2005) と同じ平面断層と、同じ緯度・経度で深さをフィリピン海プレート上面に沿って設定し直した屈曲断層を仮定した。

最初に、半無限構造・一次元速度構造・三次元速度構造の3つのモデルを仮定してグリーン関数を計算した。得られた3種類のグリーン関数を比較すると、三次元速度構造モデルを用いて計算したグリーン関数は、水平成分・鉛直成分共に振幅が大きく、継続時間が長かった。特に後続波の増幅が顕著であり、剛性が小さくかつ複雑な三次元構造の堆積層を伝播した影響と考えられる。震源過程解析として、まず上記3種類のグリーン関数と地殻変動データおよび平面断層モデルを用いた。3つの結果はどれも地殻変動の再現性が高く、すべりが大きな領域の分布も似ていた。しかし地震モーメントは、三次元グリーン関数を用いた結果の方が、半無限や一次元グリーン関数の結果よりも小さかった。このことは、堆積層の増幅効果は、地殻変動データのみでの震源過程解析にも影響を与えることを示唆している。次に地殻変動、遠地波形、近地波形データおよび平面断層モデルを用いて、震源過程解析を行った。すべりの大きな領域の分布は半無限・一次元グリーン関数を用いたSato et al. (2005)の結果と似ていたが、三次元グリーン関数を用いた本研究の結果の方が全体的にすべり量は小さく、地震モーメントも小さかった。また、一次元グリーン関数では再現の難しかった近地波形の後続波については、三次元グリーン関数を用いることにより良く再現できるようになった。さらに、地殻変動、遠地波形、近地波形データおよび屈曲断層モデルを用いて震源過程解析を行った。その結果、平面断層モデルの結果に比べて、西側の大きなすべりがプレート境界の浅い南西方向に移動し震源から離れた領域に求まった。最大すべり量は平面断層の結果よりも大きく、地震モーメントも大きかった。このことは、屈曲断層モデルが平面断層モデルよりも全体的に数km深い位置に設定されていることによって、グリーン関数が小さくなった影響だと考えられる。

本研究の平面断層モデルによる結果とSato et al. (2005)の結果では、西側のすべりの大きな領域が余震の多く発生していた領域に求まった。しかし本研究の屈曲断層モデルの結果では、西側のすべりの大きな領域が余震の比較的少ない領域に求まっており、すべり分布と余震分布の関係において過去の研究と整合的である。一方、破壊の進展過程は平面断層モデルと屈曲断層モデルの結果で似ており、プレート境界上のでっぱった領域から始まった破壊が、発生から約20秒間はプレート境界の浅い南の方向に、その後約20秒間はプレート境界の窪んだ東の方向に進んだという結果になった。

本研究により、堆積層が厚く複雑な三次元構造の関東平野直下で発生した地震の場合、速度構造は強震波形のみならず地殻変動にも影響を与えること、半無限・一次元構造モデルを用いた震源過程インバージョンは、すべり量・地震モーメントを過大評価する可能性があることが示唆された。また、一次元グリーン関数では再現の難しかった強震波形の後続波をより良く再現できるようになり、三次元グリーン関数を用いることの有用性が明らかになった。さらに、屈曲断層モデルを用いた結果は、本震のすべり分布と余震分布に関する定説に合うことが分かった。

キーワード: 震源過程解析, 三次元グリーン関数, 関東平野

Keywords: source process inversion, 3-D Green's function, Kanto basin

M2 級鉱山誘発地震群の震源域での弾性境界要素法応力解析による地震発生の再現と Mohr-Coulomb 破壊基準の拘束 Reproduction of M₂ earthquakes by elastic Boundary Element modelling and constraint of Mohr-Coulomb failure criterion

内浦 大海^{1*}; ホフマン グラード²; ウィギンス ミッチ³; ストーン ヴァウター³; ンダバ ピンキー³; プロッツ ジャネール³; レネガン パトリック³; イェルマス ハリル⁴; ツヴァリヴァザ タワンダ⁴; ムガディ シヤンダ⁴; カーペイド アンドリュウ⁴; ダーハイム レイモンド⁵; ミレフ アレックス⁶; 小笠原 宏⁷; 矢部 康男⁸; 加藤 春實⁹

UCHIURA, Taka^{1*}; HOFMANN, Gerhard²; WIGGINS, Mitch³; STONE, Wouter³; NDABA, Pinkie³; PLOTZ, Janelle³; LENEGAN, Patrick³; YILMAZ, Halil⁴; ZVARIVADZA, Tawanda⁴; MNGADI, Siyanda⁴; CARPEDE, Andrew⁴; DURRHEIM, Raymond⁵; MILEV, Alex⁶; OGASAWARA, Hiroshi⁷; YABE, Yasuo⁸; KATO, Harumi⁹

¹立命館大学, ²Anglogold Ashanti, ³Sibanye Gold, ⁴ヴィットウォーターズランド大学, ⁵CSIR / ヴィットウォーターズランド大学 / SATREPS, ⁶CSIR, ⁷立命館大学 / SATREPS, ⁸東北大学 / SATREPS, ⁹株式会社 3D 地科学研究所

¹Ritsumeikan University, ²Anglogold Ashanti, ³Sibanye Gold, ⁴Witwatersrand University, ⁵CSIR / Witwatersrand University / SATREPS, ⁶CSIR, ⁷Ritsumeikan University / SATREPS, ⁸Tohoku University / SATREPS, ⁹3D Geoscience, Inc.

JST-JICA SATREPS「鉱山での地震被害低減のための観測研究」プロジェクトの観測サイトの1つである鉱山のサイト付近で、M 2 級地震が複数発生している。このサイトには3台の石井式3成分歪計が埋設され100Hz連続収録されており、比較的連続性の良いデータが2011年12月以来得られている。このサイトにはAEネットワークはないが、CSIRの4台の14Hz Geophoneが間隔100m未満で埋設されており、鉱山地震観測網(観測点間隔>約500m)の震源決定精度不足を補うことができる。また、約3km離れたTau Tona 鉱山で較正された初期応力モデルや、同鉱山の約1km離れた地点で実測された応力を参考にできる。観測サイトで計器埋設のための9本(総延長約340m)のドリリングで得られたコアは、Witwatersrand 大鉱山学部で弾性率と強度の測定が行われた。

本研究では、サイトから183m~351mのところを2013年12月と2014年1月、8月に発生した、それぞれ、1個と1個、2個、計4個のM2級の地震について、弾性境界要素法応力解析ソフトMap3Dでの再現、および、震源でのMohr-Coulomb破壊基準の拘束を試みた。Map3Dでは、薄板状の採掘や地質構造を、変位不連続面や仮想力ブロックで3次的にCAD表現することができ、断層に相当する変位不連続要素に強度のピーク値・残留値を割り当て、応力がその強度に達したときに、断層上に生じる弾塑性的すべり量を計算することができる。そのすべり量と範囲はピーク強度と残留強度との差によって決まる。

Hofmannら(2012)は、Map3Dを用いて2007年12月にJAGUARS(Nakataniら2008)の観測サイトであるMponeng 鉱山のPink and Green ダイクで発生したMw2.2の震源の応力場と強度を議論した。JAGUARSは、鉱山地震観測網よりも格段に正確な地震の破壊面(Yabeら2009; Naoiら2011)をAEで描き出し、Hofmannら(2012)はそれが超過剪断応力(ESS)が最大の面であることを確認した。また、実際に発生した地震の時期やすべり範囲をMap3Dで再現できる断層強度パラメータを拘束することにも成功した。本研究が対象としている鉱山にはAE観測網がないが、Map3Dで推定されるESS最大の面の位置を参考にすることによって、一定の根拠を持って震源の応力と強度を議論できると期待される。

本研究では4個のM2級の地震について、ESSが最大の面をグリッドサーチし、その面上の法線応力・剪断応力・モーメントの破壊基準パラメータを検討することによって、計算機上での地震発生の再現を試みた。本研究では、初期応力場(採掘前の応力場)には隣のTau Tona 鉱山のデータ(Hofmannら2013)を用いた。また、採掘開始前に我々が観測サイトで行った9本のドリリングの際に観察されたブレイクアウトとコアディスクキングの特徴を、この初期応力とMap3Dでほぼ再現できることを確認した。鉱山の既存の採掘跡のうち2013年1月以降のものを毎月の採掘前線の前進がわかるようにモデルし、ESSが高い領域は約20度で傾斜する薄板状の採掘跡に平行に発達すると予想されるので、震源位置を通り、その走向が採掘跡のDip方向と一致する複数の面を10度刻みのRoll角(Roll角軸は板状採掘跡に平行)で設定し、ESSが最大の面をグリッドサーチした。

結果、4つのうちの3つの推定地震断層面上の、地震直前の法線応力に対する剪断応力の合成プロットは、一本の破壊基準直線ではほぼ説明可能であったが、強度はHofmannら(2012)の基準直線よりも数MPa大きかった。残り1つの推定断層上のそれは、Hofmannら(2012)とほぼ等しい基準直線と調和的であった。これらの結果は、観測サイトの実際の応力場が我々のMap3D予測よりずれていたり、震源位置が無垢な岩盤であったか既存弱面が存在したかによったりすることによる可能性がある。

今後の研究では、震源域での応力擾乱源や既存弱面の有無の調査などや石井式歪計との比較解析を進め、連合大会ではその経過を報告する。

SSS30-P08

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 18:15-19:30

キーワード: モール・クーロン破壊基準, 大深度南アフリカ金鉱山, 弾性境界要素法応力解析, 震源の応力
Keywords: Mohr-Coulomb failure criterion, Deep South African mines, Elastic Boundary Element modelling, Stress in seismic zone

発震機構解から推定する地震断層の応力状態検出の試み —警固断層帯への適用— Detection state of stress at a fault from focal mechanism data ? application to Kego fault-

松本 聡^{1*}; 宮崎 真大¹; 清水 洋¹
MATSUMOTO, Satoshi^{1*}; MIYAZAKI, Masahiro¹; SHIMIZU, Hiroshi¹

¹九州大学地震火山センター

¹Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu Univ.

地震発生域においては地震発生のポテンシャルを評価することが大変重要である。特に、断層帯に応力が集中しているか否かを検出することはその評価にとって重要なアプローチである。松本・ほか(2014秋・地震学会)では、検出する手法を提案し、2013年淡路島の地震の断層には、地震発生前に応力が集中していたことを示した。本研究ではこの手法を用いて2005年福岡県西方沖地震の余震および周辺の微小地震の発震機構解を解析し、警固断層において応力集中の検出を試みた。解析ではAsano & Iwata (2006)による本震および最大余震のすべり分布と等価なモーメントテンソルおよび警固断層にM7クラスのアスペリティに相当する広がりを持つ左横ずれ断層に等価なモーメントテンソルを与え、本震、最大余震、将来の警固断層地震の応力集中検出を試みた。モーメントテンソルはその絶対値を推定することは困難であるために、領域の差応力で規格化したものを推定した。その結果、本震・最大余震断層においてはそれぞれの地震発生前に応力集中が見られたものの、警固断層においては顕著な応力集中が見られなかった。この解釈として、1)断層だけではなく領域全体の差応力が高く、集中が見られにくい、2)警固断層には応力が集中していない、という二つの解釈が成り立つ。ただし、断層周辺の地震活動度に検出能力が左右されることから、今後のデータの蓄積を行い、精度向上を目指す必要がある。

キーワード: 応力場, 応力集中, 発震機構解, 警固断層

Keywords: stress field, state of stress, focal mechanism, Kego fault

稠密合同余震観測データを用いて推定した2008年岩手・宮城内陸地震余震の応力降下量：断層強度との比較 Estimates of stress drop in the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi nairiku earthquake

吉田 圭佑^{1*}; 長谷川 昭²; 岡田 知己²; 内田 直希²
YOSHIDA, Keisuke^{1*}; HASEGAWA, Akira²; OKADA, Tomomi²; UCHIDA, Naoki²

¹ 防災科学技術研究所, ² 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター
¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Tohoku University

地震は、地球内部で増加した偏差応力を急激な食い違いにより解消する自然現象である。この際に、断層面に沿って減少するせん断応力の大きさは、地震学的に推定可能であり、応力降下量と呼ばれている。応力降下量は、地震サイクルを考える上で重要なパラメータの一つであると言える。しかしながら、その推定のために多くの仮定を必要とすることや、計算に必要とするコーナー周波数の誤差の影響が大きいことなどの理由で、一般に精度の高い推定が困難な量でもある。そのため、地震時の応力降下量の大小が何に規定されているのかどうかは、それほど良く分かっていない。

応力降下量について、一つ予想されるのは、地震が発生する際のせん断応力・断層強度の絶対量と関係する可能性である。実際、応力降下量が、断層の摩擦強度を低下させる間隙水圧が高いと予想される熱水地域に近づくほど低くなるという報告もある (Chen and Shearer, 2011)。通常、摩擦強度の推定も非常に困難であるが、応力場が均一とみなされる領域内では、メカニズム解が示す震源断層の向きからその相対的な大きさを見積もることができる。

本研究では、本震発生から半年間、合同稠密余震観測網が展開されていた2008年岩手・宮城内陸地震震源域で発生した余震に対して、稠密地震観測データを用いた multi-window スペクトル比法 (Imanishi and Ellsworth, 2006) により、応力降下量の高精度推定を行い、摩擦強度との比較を行う。震源域の応力方向は、Yoshida et al., (2014a, EPS), Yoshida et al., (2014b, JGR) により推定されている。Yoshida et al., (2014a, EPS) では、応力テンソル・インバージョン法に基き、震源域全域の応力状態を一様と仮定 (応力 A)、あるいは水平方向に20分割し (応力 B)、そのそれぞれの応力方向の推定を行っている。また、Yoshida et al., (2014b, JGR) では、メカニズム解の位置ごとに周辺の応力方向を推定し (応力 C)、さらに本震前後の主応力軸の回転に基づき、偏差応力テンソルの推定も行っている (応力 D)。

応力降下量を推定する対象としたのは、震源域で発生した $M(JMA) > 1.0$ の地震である。まず、観測速度波形3成分それぞれに対し、S波到達の0.2秒前から2秒間を取った時間窓を後方に1秒ずつずらしながら、3つの波形窓を得た。そして、その各々に対して速度スペクトルを計算した。ここで、ノイズの指標として、P波到達前の波形から同様にして求めたスペクトルを用いることにし、マグニチュードから予想されるコーナー周波数付近で $S/N > 5$ 以上のスペクトルのみをデータ・セットに加えた。次に、スペクトルを求めた各地震 (master event) に対して、1 km の範囲内の別の地震 (slave events) との間に、各観測点のスペクトル比を計算した。その際、震源には、Yoshida et al. (2014) により、臨時観測点を用いた Double-difference 法により再決定された位置を用いた。各観測点に集積したスペクトル比をスタックした後、Boatwright (1978) により求められた理論スペクトル比とのフィッティングにより、master event と slave events それぞれのコーナー周波数を求めた。この際、二つの地震の地震モーメントが近い、またはフィッティングが悪くコーナー周波数が不明瞭であった結果はデータ・セットから除外した。そして、各 master event に対して得られたコーナー周波数を用いて、Sato and Hirasawa (1973), Eshelby (1957) による関係式に基づき、応力降下量の推定を行った。その結果、761個の地震に対して、応力降下量を求めることができた。推定された応力降下量の平均値は 5.1 MPa, 中央値は 4.5 MPa である。個々の応力降下量の推定値はばらつくものの、平均的な応力降下量は、深さと共に増加する傾向が見られた。

断層強度と応力降下量の比較を行うために、まず、応力 A, B, C の主軸方向・応力比を用いて、各地震断層面の摩擦強度の相対値を見積もった。そのいずれの場合も、相対的な摩擦強度の大きさが増加するほど、平均的な応力降下量も増加する傾向が得られた。さらに、応力 D の偏差応力テンソルを用いて、各地震断層面の摩擦強度を求め、同様の比較を行った。この場合も、摩擦強度の増加に従い平均的な応力降下量も増加する傾向が得られた。これらのことは、地震時の断層面上の応力解放量が、その摩擦強度・せん断応力の大きさと相関することを意味すると考えられる。

キーワード: 応力降下量, 応力テンソルインバージョン, 摩擦強度, メカニズム解
Keywords: stress drop, stress tensor inversion, frictional strength, focal mechanism

四国における深部微動の潮汐応力への応答：Schuster 検定による分析 Deep tremors response to tidal stress in western Japan: Analysis by Schuster's test

菊地 淳仁^{1*}; 矢部 優¹; 井出 哲¹; 田中 愛幸²
KIKUCHI, Junji^{1*}; YABE, Suguru¹; IDE, Satoshi¹; TANAKA, Yoshiyuki²

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学地震研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

紀伊半島から四国地方にかけての沈み込み帯では深部テクトニック微動が頻繁に発生しており、それぞれの微動は小さなせん断すべりであり、局所的なプレート運動を反映していると考えられる。微動が発生する条件を知ることはプレートの挙動を考えるうえで非常に重要である。岡山県南部では微動発生率と潮汐には強い相関があることが知られている [Ide & Tanaka, 2014]。そこで本研究では海洋潮汐および固体潮汐によるプレート境界上での応力変動を計算し、四国の微動に対して Schuster 検定 [e.g., Tsuruoka et al., 1995] を用いて潮汐起源の応力変動に対する応答を定量的に検証した。

四国全域において大局的なプレート沈み込みの方向から低角逆断層 (strike -120°, dip 15°, rake 90°) を仮定して、緯度経度 0.1° ごとに深さ 30 km での法線応力・剪断応力の計算を行った。NAO.99b [Matsumoto et al., 2000] を用いて理論海洋潮汐を求め、グリーン関数 [Okubo & Tsuji, 2001] を掛け併せ、海洋潮汐による応力テンソルを求めた。また固体潮汐による応力テンソルを Tamura [1987] のポテンシャルを用いて求めた。微動カタログには Idehara et al. [2014] を使用し、2004/04/01~2013/03/31 の9年間分のデータについて解析を行った。応力計算地点から緯度経度それぞれ±0.1° の範囲の微動を用いて分析した。

Schuster 検定では、微動発生時刻直近の応力最大時刻を 0°、その前後の応力最小時刻を -180°, 180° と設定し、微動発生時の位相角を決定する。全ての微動に対して位相角を決定して微動が応力変動とは関係なくランダムで発生する危険率 p を計算し有意性を検証する。一般的に p が小さいほど統計的に有意であり、通常 1% 程度が有意性の目安になる。

地域によって微動の潮汐への応答にはかなりの違いがみられた。例えば香川県では 20km 離れた二つの同程度の規模の微動クラスターで異なる応答が見られた。西側のクラスターでは $p=7.6e-44$ の顕著な潮汐応力依存性がみられた、一方東側のクラスターでは位相角のピークが二つ出ており依存性ははっきりしない。しかし東部のクラスターに対して、断層パラメータを変化させて応力を計算したところ、strike-slip に近い断層パラメータの場合、位相角のピークが一つとなった。このことは、四国東部地下のプレート境界の構造は複雑で、局所的に微動発生メカニズムが異なる可能性を示唆している。

キーワード: 深部テクトニック微動, 潮汐, Schuster 検定, 南海トラフ, 四国
Keywords: deep tectonic tremors, tide, Schuster's test, Nankai Trough, Shikoku

2011年10月に発生した黒部湖周辺の地震活動の特徴 Seismicity Activation around the Kurobe Dam Reservoir in Oct. 2011

佐藤 和悦^{1*}; 金 亜伊¹; 大見 士朗²
SATO, Takanobu^{1*}; KIM, Ahyi¹; OHMI, Shiro²

¹ 横浜市立大学, ² 京都大学防災研究所

¹Yokohama City University, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震直後より飛騨山脈の大部分で地震活動が活発化し、一ヶ月以上継続した。しかし同年10月に富山県東部に位置する黒部湖周辺で三月の活動以上に活発な地震活動が観測された。この活発化の範囲は限定的で、その他の地域では見られなかった。また、地震活動が活発化した地域では活断層は特に認められておらず、マグニチュード5以上の地震が発生したのは1960年代に行われたダム湖への貯水に伴う地震活動以来約50年ぶりである。

そこで本研究ではまず地震活動が発生した断層の特定のために、2011年3月から11月の間に黒部湖周辺で発生したマグニチュード1.5以上の地震222個に対して震源の再決定と発震機構解の推定を行った。震源再決定後、分布の概形はそのまま東-東北東方向に約1.5km移動した。震源の深さは、分布中央付近から緯度が高くなるにつれて浅くなるような分布(分布A)と、M3.9以上の地震を含む緯度に関係なく深さ1.5-2km程度に定まった分布(分布B)の2種類の分布がみられた。発震機構解の結果から分布Aでは走向が160-175°、分布Bでは走向が180-195°を示し、地震活動はこれら2つの断層で発生したと考えられる。また2011年10月に地震活動が活発化した原因の解明のためにクーロンの破壊応力変化を求めたところ、10月3日M3.9の地震により5日M5.4の地震が、M5.4の地震により7分後のM5.2の地震がそれぞれ誘発されやすい環境にあることが示唆された。またその後の地震活動はM5.4とM5.2による余震活動であることで説明できる。しかし10月3日M3.9の地震発生原因については、10月以前に発生した地震によるクーロンの破壊応力変化だけでは説明できないことから、動的応力変化及び間隙水圧の上昇の有無について検証を行った。本発表では上記の解析と検証について報告し、地震活動が黒部湖付近で活発化した因果関係の有無について議論する。

キーワード: 地震活動, 静的クーロン応力変化, 動的応力変化, 間隙水圧, S波異方性, 飛騨山脈

Keywords: Seismic activity, Coulomb failure stress change, Dynamic stress change, Pore water pressure, Shear wave anisotropy, Hida mountains

小地震を考慮した準動的な地震サイクルシミュレーションコードの開発 Development of the quasi-dynamic cycle simulation code including both great and small earthquakes

高崎 圭祐^{1*}; 平原 和朗¹; 大谷 真紀子¹

TAKASAKI, Keisuke^{1*}; HIRAHARA, Kazuro¹; OHTANI, Makiko¹

¹ 京都大学理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kyoto University

地震の規模と発生頻度は Gutenberg-Richter (GR) 則によって表される。このグラフの傾き b は地域によって異なる値を取り、また時間変化することが知られている。 b 値が増加すると、小さな地震が相対的に増加し、逆に減少すると、大きな地震の数が相対的に増加する。

Nanjo et al. (2012) は 2011 年東北地方太平洋沖地震や 2004 年スマトラ島沖地震で、巨大地震前の長期間にわたって b 値が減少していったことを報告している。巨大地震発生に至る b 値の減少は、巨大地震の発生前の前兆現象とも考えられ、巨大地震の発生予測に役立つ可能性がある。

一方、Tormann et al. (2015) は東北地方太平洋沖地震後に増加した b 値が減少し、現在は巨大地震発生前の水準に戻っていることを指摘している。

このように b 値が巨大地震前後で変動している様子が観測されている。 b 値の変動のメカニズムは明らかではないが、 b 値の変化が応力場を反映しているのではないかと考えられ、小さな地震が巨大地震発生に何らかの影響をもたらしているのではないかと考えられる。また、 b 値の変動の物理的メカニズムを明らかにし、今後 b 値がどのように変動しうのかを知ることで巨大地震発生の予測につながる可能性がある。そのためには、巨大地震だけでなく、現実に発生している小さな地震まで含む、現状を模した地震サイクルシミュレーションを行い、巨大地震前の b 値の時空間的変動を再現することが必要である。

現在の速度状態依存摩擦則に基づく地震サイクルシミュレーションでは、地震時変動の時間スケールと地震間変動の時間スケールに大きな違いがあるため、時間可変の Runge-Kutta 法を用いている。この手法ではすべり速度が大きい時には、細かい time-step で計算が行われ、すべり速度が小さい時には、大きな time-step で計算が行われる。

また、現状の地震サイクルシミュレーションは、規模の大きい地震のみの再現がほとんどで、大小様々な地震を再現したシミュレーションはほとんど行われていない。それは、GR 則に従う発生頻度の高い規模の小さな地震を含んだ計算を行うと、絶えず地震が発生している状況になり、常に細かい time-step で計算を行うこととなり、計算コストがかかるからである。より現実的な地震サイクルシミュレーションを実現するには、特に小さな地震の計算コストを下げる必要がある。

このように b 値の時空間変動を数値シミュレーションで再現するには、計算コストを減らすことが最重要課題である。本研究では、地震サイクルシミュレーションの計算には、放射減衰項を用いた準動的な近似 (Rice, 1993) を用いた境界要素法による計算を行った。この計算において、time-step の問題の他に、すべり応答関数行列とすべり速度ベクトルの掛算もまた計算コストの点で問題となる。プレート境界面を N 個の小断層セルに分割すると、演算回数は $O(N^2)$ となる。巨大地震から小さな地震まで含む計算では N は非常に大きくなり、計算量は膨大となる。Ohtani et al. (2011) では H-matrices 法を地震サイクルの計算に適用し、メモリや計算時間を $O(N)$ - $O(N \log N)$ に削減することに成功している。本研究でも H-matrices 法を適用することで、行列ベクトル積の計算コストの削減を図る。

先に述べたように、巨大地震だけでなく多数の小さな地震発生までをも再現するサイクルのシミュレーションを行う場合、どの時間においても、いずれかの領域が比較的大きなすべり速度を持つ。時間可変の Runge-Kutta 法を用いた計算では常に細かい time-step で地震サイクルの計算をしなければならず、計算コストが高くなってしまふ。この問題を回避するために、RSQSim (Dieterich and Richards-Dinger, 2010) コードが開発されているが、本研究では、大きな地震は従来の準動的なサイクル計算を行い、小さな地震については例えば以下のように簡略化することを考える。すなわち、小さな地震の発生場所が、ある一定の応力値に達すると、その場所の応力を解放させ、小さな地震の発生場所及びその周囲に、解放した応力に応じたすべり及びすべり速度を与える。

今回の発表では、この計算手法の検証を行い、その問題点及び今後の展望に関して述べる。

キーワード: 地震サイクル, 数値シミュレーション, ゲーテンベルク・リヒター則, 高速化

Keywords: earthquake cycle, numerical simulation, Gutenberg-Richter law, fast computation

数値シミュレーションから推定される2011年東北地方太平洋沖地震後の宮城県沖地震の発生間隔(その2) Recurrence intervals of Miyagi-oki earthquakes after the 2011 Tohoku-oki earthquake based on numerical simulations (II)

中田 令子^{1*}; 有吉 慶介¹; 兵藤 守¹; 堀 高峰¹
NAKATA, Ryoko^{1*}; ARIYOSHI, Keisuke¹; HYODO, Mamoru¹; HORI, Takane¹

¹ 海洋研究開発機構
¹JAMSTEC

東北地方の日本海溝沿いの地域では、太平洋プレートの沈み込みに伴い、M7前後の地震が過去に多く発生している。2011年3月11日に発生したM9.0の地震(東北地方太平洋沖地震:本震)では、過去のM7前後の地震の震源域も含め、広範囲に破壊が及んだ。宮城県沖では、30~40年の再来間隔でM7.1~7.4の地震が繰り返し発生したことが知られている(1936年・1978年・2005年8月など)[地震調査研究推進本部, 2011]。2005年の地震から5.5年しか経過していなかったが、本震時のすべり量は、過去に単独で宮城県沖地震が発生した時よりも大きな値が見積もられている。さらに、余効すべりは、単独の宮城県沖地震と同程度かそれ以上のすべり量が、本震後現在までに推定されている。福島県沖では、本震時の挙動は宮城県沖と共通の特徴を示しているが、宮城県沖とは過去のすべり履歴は異なる。1938年にM7.4前後の地震が3回発生して以来、M>7の地震は発生していないが、M<7の地震は時々発生している(最近では2008年7月M6.9、2010年3月M6.7)。茨城県沖は、本震時の破壊域にはあまり含まれていないが、本震の約30分後にM7.6の最大余震が発生した。2008年5月に発生したM7.0の地震のように、20~30年の再来間隔でM7前後の地震が繰り返し発生している茨城県沖では、この余震は、過去にこの地域で知られている地震の中で最大である。

過去の宮城県沖地震震源域内のすべり量の収支だけに着目すると、少なくともこれまでと同様の再来間隔が経過するまでは、次の同規模の地震は発生しないと考えられる。しかし、本震時には、過去の宮城県沖地震震源域を含めた広い領域で大きくすべっているため、今後、宮城県沖での地震発生準備過程として、どのように応力の蓄積・解放が進むかは単純な問題ではない。この問題は、composite law [Kato & Tullis, 2001]を用いた地震発生サイクル数値シミュレーションの先行研究によってすでに検討されてきた[Kato & Yoshida, 2011; Ohtani et al., 2014]が、どちらの結果も、本震時の宮城県沖地震に相当する深部パッチでのすべりが、観測から推定されている値に比べて大きい。中田他[2014, 地震学会]では、本震時の宮城県沖のすべり量が観測と同程度になるシナリオで、本震後の宮城県沖地震の再来間隔を検討した。数値計算ではOhtani et al. [2014]と同様の手法とプレート形状を用いたが、強度の時間発展にはaging lawを用いた。また、地震波の放射によるエネルギー減衰を準動的に近似するダンピング係数は0.3とした。さらに、本震のすべり域に広範囲にわたって、周囲よりもやや強めの摩擦不均質(B-Aが大、Lが小)を与えた。福島県沖以南はモデル化しなかったが、宮城県沖地震・前震・本震発生に関する特徴をある程度定量的に再現することができた。その結果、Kato & Yoshida [2011]と同様、本震以前の再来間隔よりも短い間隔でこれまでと同規模の宮城県沖地震が発生していた[中田他, 2014]。しかしこのモデルでは、本震すべり域の南側(福島県沖~茨城県沖)で、観測とは異なる大きな余効すべり(10m以上)が発生していた。

そこで本研究では、福島県沖と茨城県沖にも、宮城県沖と類似した摩擦特性を持つパッチを1つずつ仮定してモデルを修正し、本震後の宮城県沖地震について再検討した。その結果、南側での大きな余効すべりがなくなり、観測されたような余効すべり分布が得られるようになった。さらに、福島県沖での本震時の挙動や茨城県沖での余震発生なども、観測と定量的に比較できるモデルを得つつある。現時点での結果では、本震以前の再来間隔よりも短い間隔で、これまでと同規模の宮城県沖地震が発生している。これは、中田他[2014]と同様であり、本研究で新たに想定した福島県沖と茨城県沖のパッチは、宮城県沖における本震時や本震後の挙動には顕著な影響を及ぼさないことを示唆するものである。

東北地方日本海溝沿いにおける宮城県沖での地震活動については、今後も様々なモデルで検討を続けるとともに、すでに固着している領域があるか、すべり欠損がどの程度蓄積しているかなどを観測からおさえることも必要である。また、防災・減災の観点から、宮城県沖地震だけでなく、余効すべりが生じている領域でのM7クラスの地震の発生可能性について想定に入れておく必要もあると考える。

謝辞:本研究は文科省の「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の補助を受けて行われました。数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。

入力振動に対する砂山の挙動を調べる実験装置の改良—地すべり発生メカニズム解明に向けて—
Improvement of an experimental equipment for vibrating a sand-pile -For understanding the mechanism of landslides-

中山 雅之^{1*}; 川方 裕則¹
NAKAYAMA, Masayuki^{1*}; KAWAKATA, Hironori¹

¹ 立命館大学
¹Ritsumeikan Univ.

一般に、地すべり現象について、多くの場合その発生誘因は地震動や降雨である。例えば、2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震では、荒砥沢ダム付近で地震動による大規模地すべりが発生した。しかし、地震動による地すべりは、土塊（土砂・岩塊）の凝着や土塊に含まれる水の挙動、周囲の地形などの複合的な影響によってその規模や挙動などが異なるため、その発生メカニズムはよく分かっていない。

Yoshioka (2003) では、砂山に対して砂粒を落下させることで、その崩壊の規模別頻度分布が詳しく調べられた。中山ほか (2014, 地震学会) は、地震動による地すべりの発生メカニズムを解明するために、砂山に振動を加えることができる簡易な実験装置を用いて室内実験を行った。大まかな実験方法は以下の通りである。まず、底を切り抜いたペットボトルに孔をあけたキャップを取り付け、スタンドに固定した。ゴム製の土台の上に透明なアクリル容器を設置し、スタンドに固定されたペットボトルから砂を自由落下させ、底面の直径が 60 mm 程度、高さが 20 mm 程度の砂山を作成した。次に、あらかじめアクリル容器に貼り付けておいた分解済みの市販のプザーから音波信号を出し、砂山に対して振動を与えた。振動を与える前後の様子を写真および動画で撮影し、振動に対する砂山の挙動を調べた。振動数を変更することができないものの、プザーから砂山に振動を与えたところ、斜面表面の砂粒がパラパラと落下していく様子と、表面の砂が斜面に沿ってズルズルと滑っていく様子の 2通りの崩壊が見られた。しかし、中には崩壊が発生しない場合もあった。

本研究では、さらに解析を進め、プザーから発せられる音は、砂山の位置の違いなどにより、振幅の大小だけでなく振動数のばらつきがあらわれることを明らかにした。さらに、容器の形状の影響により容器を伝播する振動には腹と節が生じることがわかった。また、崩壊過程の詳細を調べるためには、動画、画像の時空間分解能が不十分であることもわかった。

これらの課題を解決するために、実験装置の改良を試みる。具体的には、音量と振動数を変えることができる音源を使用できるようにするとともに、砂山を作成する台の形状についても検討する。さらに、ハイスピードカメラの導入を行い、時空間分解能を上げ、崩壊過程を詳しく調べられるようにする。

謝辞

研究を行うにあたり、京都大学防災研究所の土井一生博士、三井住友建設株式会社の高橋直樹博士より、助言と協力をいただき、ここに感謝の意を表する。

キーワード: 地すべり
Keywords: landslide