

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

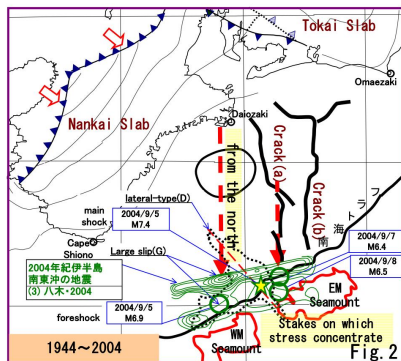
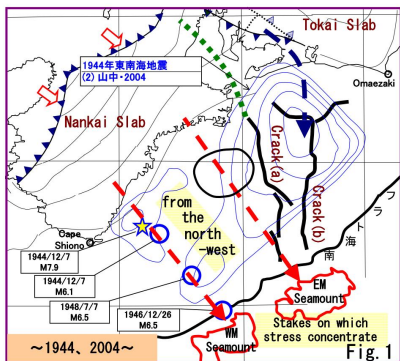
(4) 気象庁/地震・火山月報(防災編)/平成16年9月/特集2/図6-5(P64)等

(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/Seafloor 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

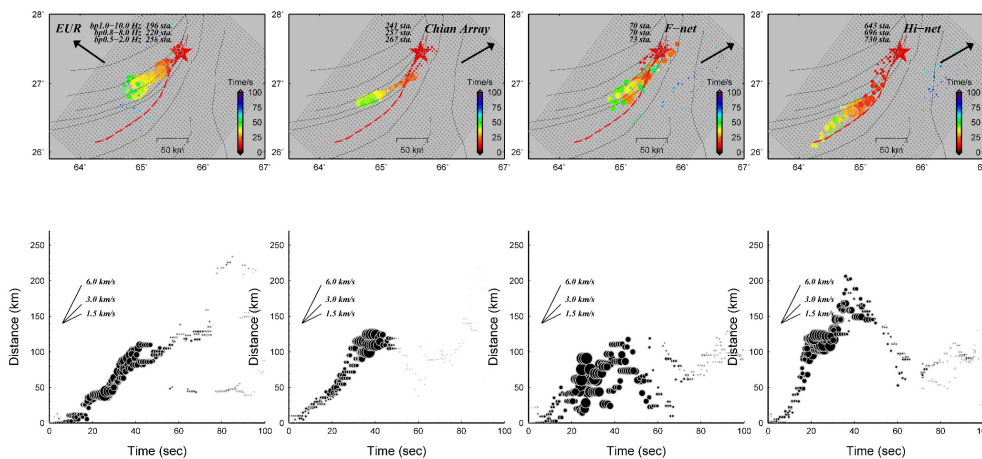
We analyzed the 24 September 2013 Pakistan earthquake (Mw 7.7) by back-projecting seismograms recorded by several large regional arrays in Japan, China, and Europe. The results show that the rupture propagated towards the southwest, and released most of the high frequency energy at 90-130 km southwest 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, Alexv⁶; 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。

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