

破砕帯震源模型からみた平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 An interpretation of the Tohoku Earthquake in terms of a damage zone/asperity model of faults

山本 清彦^{1*}YAMAMOTO, Kiyohiko^{1*}¹ なし¹ none

1. はじめに:我々は、震源パラメーターを断層の物理的な構造と関係づけることを目的に、破砕帯震源模型を提案した(2003 地震学会, 2006 地震学会)。ここでは、この模型を東北地方太平洋沖地震に適用し、断層帯(断層帯)の厚さとその地震の繰り返し時間を推定する。

2. 破砕帯震源模型:この模型では、断層帯はある厚みを持ち、断層面として見ると、破砕岩で埋め尽くされた破砕帯領域と母岩でできた asperity 領域からなる。破砕帯は動的な変形に対しては弾性的に振る舞うが、準静的な変形に対しては非圧縮であるが、剛性率を持たないと仮定する。したがって、断層帯にかかる法線応力は断層帯全体によって均等に支えられるが、剪断応力は asperity よってだけ支えられる。

無限媒質の中に長さ l で一様な厚さ t_d の断層帯を考える。 t_d と l には

$$t_d = 0.0016 * l$$

の関係がある。断層帯の歪が e_f に達すると、すなわち断層帯を挟む両壁の相対変位が

$$u_c = t_d * e_f$$

に達すると asperity が破壊し、その伝播に伴って断層帯内にはすべり面が生じる。以下では、 u_c を臨界変位、すべり面を(狭義の)断層面と呼ぶ。断層周囲の応力測定の結果から、断層面上の剪断応力は無視できる程度に小さいと仮定する。断層面が生じることで断層面上には断層帯に生じていた変位 u_c と破砕帯の外側に蓄えられていた歪による変位 u_b のすべり u ,

$$u = u_c + u_b$$

が生じる。

Asperity の面積 s と断層の面積 S の比 $f = s/S$ は、破壊時に asperity から解放されるエネルギー P_a と外側ブロックから解放されるエネルギー P_b の和が消費されるエネルギーに等しいという条件で決まる。消費されるエネルギーは破壊エネルギー W と地震波エネルギー E であり、 $E = h * P_b$ である。ここで、 h は地震波効率である。破壊エネルギー密度 w は、 $w = s_n * t_d * e_f^2$ で、破砕帯の厚さに比例する。これはすべり面の形成に伴って起こる破砕帯の回転による仕事に相当する。ここで s_n は断層面に対する法線応力。 P_b は断層面を半径 $l/2$ の円形として変位固定条件で求める。この断層の剪断強度は asperity 領域が断層面に占める面積の割合で決まるが、この割合はたかだか数%であると推定されている。

以上から、地震波エネルギー E_s 、平均変位 u_{bav} は以下のように書ける。

$$E = h * (8/7) * m * (l/2)^3 * (f * e_f)^2$$

$$u_{bav} = 8 * l * f * e_f / (7 * \pi)$$

ここで、 π は円周率、 m は母体の剛性率、また、最大変位 u_{bp} は平均変位の約 1.4 倍である。 f は h の関数である。さらに、 $h = 0.7$ の場合、以下の断層面積 S と M_s の近似的な関係が得られる。

$$M_s = \log(S) + 4.0$$

ここで M_s は地震波エネルギーから求められる地震規模という意味であり、 $h = 0.7$ では M_w より約 0.1 小さい。また、定数は h の関数で、4.0 は概略値である。

3. 東北地方太平洋沖地震(2011/3/11, $M_w 9.0$): 気象庁(2011)による余震域の寸法から断層長を約 500km、断層幅を約 200 km にとる。断層長から破砕帯厚は 800 m に求め、破壊時の asperity の歪を $e_f = 0.01$ とすると、臨界変位量 u_c は 8 m になる。地震波効率 $h = 0.7$ とすると、 u_{bav}/u_c は約 2.5 であり、破砕帯壁の相対変位量 u_b は平均 20m、最大 28m になる。これを実相対変位と呼ぶ。一方、地震波から期待される推定値は平均 17 m、最大 24 m である。これを見掛けの相対変位と呼ぶ。いずれの最大値もデータから得られている震源付近の値に近い。

実相対変位に臨界変位量を加えると、最大 36 m になる。これを同一地点で前回起こった地震以後に蓄積された相対変位量と考えると、プレート間の相対変位速度を 8 cm/yr として、約 450 年間の蓄積量に相当する。ここでは塑性変形による変位は考慮されていないので、これを再来時間と考えたと最短の時間であろう。このことはこの領域に、破砕帯に生じた歪を完全に解放するような地震が貞観地震(869年)以降に1回はあってもよいことを示している。

円形割れ目の面積をそのまま使うと M_s は約 9.3 になる。この地震の断層が地表に現れていることを考慮して、変位をそのままにして円形割れ目の面積の $1/2$ を断層面積とすると、 $M_s = 9.0$ が得られる。これは断層面が地表に表れたことの効果、虚像震源で近似してよいことを示唆している。

4. 結論:以上の結果は、地震の規模や地震の再来期間が asperity がある断層帯の厚さによって決められている可能性

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS39-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 13:45-15:15

を示唆している．このようなことから，破砕帯厚の分布を調べることはその断層で起こる地震の規模や再来時間を知るために重要である．

キーワード: 断層模型, 破砕帯, ウィークフォールト, 臨界変位, 東北地方太平洋沖地震, 再来時間

Keywords: fault model, damage zone, weak faults, critical distance, The Tohoku earthquake, recurrence time

2011年東北地方太平洋沖地震により動的に誘発された九州地方の地震 Dynamic triggering of earthquakes in Kyushu during the passage of seismic waves from the 2011 Tohoku earthquake

福井 海世^{1*}, 小林 励司¹, 後藤 和彦²
FUKUI, Miyo^{1*}, KOBAYASHI Reiji¹, GOTO Kazuhiko²

¹ 鹿児島大学理学部地球環境科学科, ² 鹿児島大学大学院理工学研究科附属南西島弧地震火山観測所
¹Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, ²Nansei-Toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University

During the passage of waves from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw 9.0) (hereafter, the 2011 Tohoku earthquake), early post-earthquakes were observed over the Japanese Islands (Miyazawa, 2011). In Kyushu, local events were also observed at that time. Such events have already been detected and located (Enescu et al., 2011; Hirose et al., 2011; Miyazawa, 2011; Obara and Matsuzawa, 2011). In this study, we detected triggered earthquakes more carefully. We then located hypocenter and tried to determine the focal mechanism solutions by using the P-wave polarities.

We detected events from seismograms recorded at 142 stations of Kagoshima University, Kyushu University, the Japan Meteorological Agency, and Hi-net in Kyushu. The time window is between 14:52 and 14:59 (JST) when the body and surface waves from the 2011 Tohoku earthquake run through Kyushu. The dominant periods of the body and surface waves from the 2011 Tohoku earthquake are much longer than those of the waves of local events because of higher attenuation of shorter-periods components for long-distance propagation (~1600 km). We tested several filters preliminarily, and we chose a band-pass filter of 16-32 Hz, which help us to pick arrival times of body waves easily. We used the HYPOMH program (Hirata and Matsu'ura, 1987) for hypocenter location with a 1D velocity structure model which is used for the routine hypocenter determination in Kagoshima University. We determined the focal mechanisms by using a program developed by Kobayashi and Nakanishi (1994).

We detected more than 30 earthquakes, and estimated 14 hypocenters and 4 focal mechanisms. These events distribute volcanic and high seismicity areas. This result is consistent with Miyazawa (2011). The focal depths

are shallow. The focal mechanisms differ from those of the background seismicity. We infer that the dynamic stress changes due to the seismic waves may differ from the background stress field.

東北地方太平洋沖地震 M9.0 の歪は太平洋プレート周縁隆起帯に蓄積 Strain of the East Japan Super Earthquake M9.0 have been accumulated around marginal swell of Pacific Plate

新妻 信明^{1*}

NIITSUMA, Nobuaki^{1*}

¹ 静岡大学理学部地球科学教室、仙台

¹Institute of Geosciences, Shizuoka University, Sendai

東日本巨大地震（2011年3月11日東北地方太平洋沖地震）はプレート運動によって起きたとの暗黙の了解があるが、そのプレートの力学であるプレートダイナミクスについて解析した結果を述べる。

東日本巨大地震 M9.0 の40分後に「日本海溝外」で M7.5 の正断層型余震が起こった。この地震は日本海溝沿いの沈み込み障害が外れ、太平洋プレートが沈み込み、裂けて起こった力学的に最も単純な「海溝外地震」である。

プレートを押す力と引く力の釣合いがプレートの破壊限界を超えて破壊すると「海溝外地震」が起こる。

気象庁が CMT (Centroid Moment Tensor) 解を公表している過去17年間の128「海溝外地震」の発震機構と初動震源位置を解析に使用した。

海溝側のスラブ引きによって起こる正断層型海溝外地震が128中95で、海嶺拡大などによるプレート押によって起こる逆断層型海溝外地震26を圧倒していることは、スラブ引きが太平洋プレート運動を駆動していることを示している。

東日本巨大地震前の日本海溝では、2005年11月15日の正断層型海溝外地震 M7.2 を最後として、逆断層型海溝外地震が2008年から2010年11月まで起こっており、沈み込み障害によるプレート押が優勢であった。

千島海溝と伊豆・小笠原海溝では2010年以後、正断層型海溝外地震のみが起こっており、プレート引優勢であった。日本海溝の両翼における太平洋プレート引が日本海溝の沈み込み障害を破壊したのが東日本巨大地震であり、障害が除かれて54もの正断層型海溝外地震が起こっている。強震波形解析によって求められた巨大地震のすべり分布（防災科技研, 2012）が海溝外地震分布と調和的であることは、巨大地震の歪が日本海溝の外側に蓄積していたことを示唆している。この巨大地震の歪は2005年以後日本海溝で発生した沈み込み障害が解除されることによって解放された。

50mとも言われる東日本巨大地震の歪（防災科技研, 2012）が蓄積したのは、日本列島側であったのであろうか。日本列島側は不均質でこれだけ大きな歪を蓄積するには500kmから5000kmを必要とし幅が狭すぎる。検潮儀で計測されていた太平洋沿岸の年間約1cmの沈降が歪の蓄積と関係していると見られていたが、東日本巨大地震で更に数十cmも沈降した（池田・岡田, 2011）。巨大地震後には東北日本で逆断層型地震も起こっており、歪開放変動が認められない。慶長三陸津波（1611年）堆積物の解析では日本海溝と千島海溝を跨ぐ波源域が必要とされており（平川, 2012）、今回の津波についても太平洋側の波源域が必要とされている。

海溝に沈み込む海洋底の周縁に沿って周縁隆起帯 (Marginal Swell) があり (Dietz, 1954)、正の重力異常が認められている。この重力異常はプレートが海溝に沈み込む際にアイソスタシーに逆らって撓み隆起していることを示している。沈み込み障害などによって海溝における押し引きの釣合いが崩れた場合に、周縁隆起帯はその歪を撓みの中に充分蓄積することができ、プレート運動を安定化させている。海溝外地震の解析結果は、東日本巨大地震の歪が周縁隆起帯を持つ太平洋側に蓄積していたことを示している。宝永南海地震津波（1707年：岡村・松岡, 2012）や八重山地震津波（1771年：中村, 2012）の津波堆積物に対応する広大な波源域は南海トラフや琉球海溝に沿った周縁隆起帯により説明できるであろう。

結論

東日本巨大地震後と過去16年半の海溝外地震のプレートダイナミクス解析によって以下のことが明らかになった。

- 1) 太平洋プレート運動の駆動力は、スラブ引。
- 2) 東日本巨大地震で開放された歪は、太平洋プレートの周縁隆起帯に蓄積。
- 3) 東日本巨大地震の歪は、2005年以後日本海溝に発生した沈み込み障害が除去されて開放。
- 4) 日本海溝を挟む千島海溝、伊豆・小笠原海溝の優勢なスラブ引が沈み込み障害を除去。
- 5) 海洋プレート沈み込みに伴う撓みである周縁隆起帯はプレート運動を一定に保ち、地震の際の瞬間的な撓みの減少が巨大津波をもたらし、2011年東日本巨大地震津波・1611年慶長三陸地震津波・1707年宝永南海地震津波・1771年八重山地震津波の広大な波源域となる。

本講演内容：ホームページ <http://www.niitsuma-geolab.net> に公開中。

キーワード: 周縁隆起帯, 海溝外地震, プレートダイナミクス, 重力異常, スラブ引, 東北地方太平洋沖地震

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS39-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 13:45-15:15

Keywords: Marginal Swell, outer trench earthquake, plate dynamics, gravity anomaly, slab pull, East Japan Super Earthquake

2011年東北地方太平洋沖地震に先だって観測された海上重力変化 Sea surface gravity changes observed prior to March 11, 2011 Tohoku earthquake

坪井 誠司^{1*}, 中村 武史¹

TSUBOI, Seiji^{1*}, NAKAMURA, Takeshi¹

¹ 海洋研究開発機構

¹JAMSTEC

The 2011 Tohoku earthquake occurred at the subduction of oceanic tectonic plate, where we had no historical record of this size of huge earthquake. We have examined ship board geophysical observations conducted above the source rupture area if there are any indications of large slip before the earthquake. We have examined ship board geophysical observations conducted above the source rupture area if there are any indications of large slip before this earthquake. We have found that there were two cruises, which pass almost the same tracks above the source rupture area near the oceanic trench, where many researches indicate that there were coseismic large slip, and compared sea surface gravimeter measurements along these tracks. Sea surface gravity measurement conducted one month before the earthquake shows that there was an increase of sea surface gravity with about 10 mGal (1Gal=1cm/s²) compared to the sea surface gravity value measured three months before the earthquake. The measured gravity changes can be interpreted as a density increase along the fault surface of which time scale of evolution is about three months. This observation provides physical mechanism to explain how this large and slow slip can be generated along this fault

Keywords: The 2011 Tohoku, Japan Earthquake, Sea surface gravity measurements, Earthquake rupture process

2011年東北太平洋沖地震の震央付近における海底映像 Video image of seafloor near the epicenter of the 2011 Great Tohoku Earthquake

日野 亮太^{1*}, 鈴木 秀市¹, 久保田 達矢¹, 伊藤 喜宏¹, 藤本 博己¹

HINO, Ryota^{1*}, SUZUKI, Syuichi¹, KUBOTA, Tatsuya¹, ITO, Yoshihiro¹, FUJIMOTO, Hiromi¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

東北地方太平洋沖地震の震源近くの海底映像を紹介する。この映像はROVを用いて海底に設置されたOBPを回収する際に撮影されたものである。地震が発生したとき、震源域には約20台の海底地震計・水圧計が展開されていた。4月以降、我々はこれらの機材の回収を進めていたが、回収率が通常に比べ非常に低かった。回収された機材の多くには大量の泥が付着しており、こうした機材が泥に埋まって拘束されている可能性があったためにROVを用いた回収を試みた。回収のオペレーションは9月末に実施した。回収作業を行った観測点は震央のごく近くの4地点であった。いずれの地点においても明瞭な強震動や断層運動に起因するような顕著な地表面変形は認められなかった。海底は細粒の泥に覆われており、15 cm程度の厚さで堆積していた。堆積物は非常に柔らかくROVのフレームが簡単に埋もれてしまう程度で、海底水圧計のアンカー上にも積もっていた。圧力計の記録を見る限り、地震時の振動で堆積物中に沈み込んだとは考えにくく、地震時に巻き上げられた細粒の堆積物が海底に降り積もったものと考えられる。

キーワード: 海底映像, 海底観測機器

Keywords: video image of seafloor, ocean bottom instruments

宮城沖日本海溝軸部における高解像度反射法地震探査 High resolution seismic imaging in the trench axis area of the Japan trench off Miyagi

中村 恭之^{1*}, 三浦 誠一¹, 山下 幹也¹, 野 徹雄¹, 高橋 成実¹, 小平 秀一¹

NAKAMURA, Yasuyuki^{1*}, MIURA, Seiichi¹, YAMASHITA, Mikiya¹, NO, Tetsuo¹, TAKAHASHI, Narumi¹, KODAIRA, Shuichi¹

¹ 海洋研究開発機構

¹JAMSTEC

Since the great Tohoku earthquake occurred, we have conducted multichannel seismic surveys using tuned air gun array with large volume (7800 inch³) and long (~6 km) streamer cable to image the ruptured area in the landward slope of the Japan trench. Obtained seismic sections successfully delineated the structural characteristic. We also carried out a high resolution seismic survey using a cluster gun with smaller volume (320 inch³) and shorter (~1.3 km) streamer cable in the vicinity of the trench axis area. The survey was a part of the site survey for IODP Japan Trench Fast Earthquake Drilling Project, thus a 2-D grid lines with 500 m line spacing were planned to determine the best location of the drilling site. Due to the higher frequency contents of the source and denser spacing of hydrophones, we could obtain finer scale of the structural image. In the trench axis area, pelagic/hemiplegic sediments were folded and cut by reverse faults. A seaward dipping reflector, gently connecting the edge of the horst and the top of the graben, is imaged in the migrated section. We could obtain high resolution seismic images in the Japan trench area, despite the great depth of the seafloor, small volume of the source and short maximum offset of the streamer cable. However, any continuous reflectors are not imaged inside of the frontal prism, seaward of the "backstop" interface. This observation suggests that significant lithological boundary or well developed fault does not exist in the frontal prism of the Japan Trench.

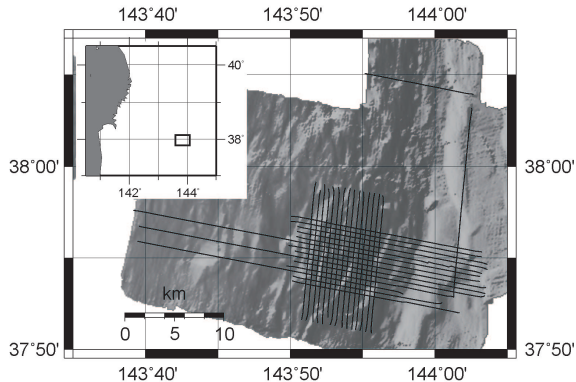


Fig. Survey lines of the high resolution MCS carried out during the KY11-E05 cruise.

房総半島沖の地震波速度構造

P-wave velocity structure in the southernmost source region of the 2011 Tohoku earthquakes, off the Boso Peninsula

中東 和夫^{1*}, 篠原 雅尚¹, 望月 公廣¹, 山田 知朗¹, 日野 亮太², 佐藤 利典³, 植平 賢司⁴, 伊藤 喜宏², 村井 芳夫⁵, 金沢 敏彦¹

NAKAHIGASHI, Kazuo^{1*}, SHINOHARA, Masanao¹, MOCHIZUKI, Kimihiro¹, YAMADA, Tomoaki¹, HINO, Ryota², SATO, Toshinori³, UEHIRA, Kenji⁴, ITO, Yoshihiro², MURAI, Yoshio⁵, KANAZAWA, Toshihiko¹

¹ 地震研究所, 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, ³ 千葉大学大学院理学研究科, ⁴ 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター, ⁵ 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

¹Earthquake Research Institute, ²RCPEV, Graduate School of Science, Tohoku University, ³Graduate School of Science, Chiba University, ⁴Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, ⁵Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

The Japan Trench (JT) is a plate convergent zone where the Pacific Plate (PAC) is subducting below the Japanese island. In the southern end part of the JT, there is a trench-trench-trench type triple junction. The Philippine Sea plate (PHS) is subducting northwestward from Sagami Trough and the PAC is subducting westward beneath the PHS from Japan and Izu-Bonin Trenches. The deep seismic structural information is important to understand the evolution of the triple junction. In 2008, a seismic experiment was conducted using ocean bottom seismometers and controlled sources comprising airguns and explosions in the off-Ibaraki and Boso Peninsula. This region is the southern edge of the rupture zone of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. We estimated the heterogeneous velocity structure beneath the landward slope of the southernmost JT by 2-D ray tracing. The crustal structure in the southern part of the profile is more heterogeneous than that of the northern part beneath the seismic survey profile. The subducting PHS is imaged beneath the southern part of profile. However, we could not obtain the distinct image of contact zone of PHS and PAC. It is conceivable that the contact zone of PHS and PAC has large heterogeneity resulting from strong deformation. We infer that the termination of the rupture of the 2011 Tohoku Earthquake and the large afterslip in the collision region are caused by this strong heterogeneity.

反射法探査による東北沖太平洋プレート内部の不均質構造

Structural discontinuities inside the Pacific plate offshore the Tohoku region, revealed by seismic reflection imaging

パナヨトプロス ヤニス^{1*}, 笠原 敬司¹, 平田 直¹, 阿部 進², 加藤 政史², 中川 茂樹¹, 加藤 愛太郎¹, 小原 一成¹, 武田 哲也³

PANAYOTOPOULOS, Yannis^{1*}, KASAHARA, Keiji¹, HIRATA, Naoshi¹, ABE, Susumu², KATOU, Masafumi², NAKAGAWA, Shigeki¹, KATO, Aitaro¹, OBARA, Kazushige¹, TAKEDA, Tetsuya³

¹ 東京大学地震研究所, ² 地球科学総合研究所, ³ 防災科学技術研究所

¹Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ²JGI, Inc., ³National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

We have investigated the material properties and the tectonic processes that govern the Pacific plate just before it is subducted in the Japan Trench Subduction zone. We reprocessed the 500 km long data retrieved by the summer 1991 seismic survey offshore of the Boso peninsula and Tohoku regions and produced a high resolution image of the Pacific plate crust and Mantle lithosphere beneath it. We have conducted a CMP gather analysis combining 18828 traces and applied a first arrival mute at almost every 4 shots. Consecutively we applied NMO corrections after determining stacking velocity values every 30 CMP gathers, which is equivalent to every 800 m along the profile. The corrected traces enabled us to retrieve a high resolution image of the sediments deposited on the Pacific plate. The upper part of the plate is characterized by a thick sequence of sediments offshore of the Boso peninsula that becomes progressively thinner towards the north in the region offshore the Tohoku region. This could be due to the geometry of the profile, since the southern part is further away from the trench than the north. Offshore Tohoku the sediments are possibly eroded and redeposit inside the trench by down going currents. Our profile intersects with a seamount range that is currently subducting under the Japan Trench. The sedimentary sequence on the Pacific plate around this range is disturbed by a thick sequence of possibly volcanic origin sediments derived from the seamount range. The sedimentary units offshore Boso peninsula display an uplift of several hundred meters. This could suggest that the area of the Pacific plate behind the triple junction point with the Japanese Arc and Philippine Sea plate is under a compressive regime.

キーワード: 東北, 反射法, 太平洋プレート

Keywords: Tohoku, Reflection, Pacific plate

海底地震観測網による2011年東北地方太平洋沖地震の余震分布

Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake revealed by ocean bottom seismogr

篠原 雅尚^{1*}, 町田 祐弥¹, 山田 知朗¹, 中東 和夫¹, 真保 敬¹, 望月 公廣¹, 村井 芳夫², 日野 亮太³, 伊藤 喜宏³, 佐藤 利典⁴, 塩原 肇¹, 植平 賢司⁵, 八木原 寛⁶, 尾鼻 浩一郎⁷, 高橋 成実⁷, 小平 秀一⁷, 平田 賢治⁸, 対馬 弘晃⁸, 岩崎 貴哉¹
SHINOHARA, Masanao^{1*}, MACHIDA, Yuya¹, YAMADA, Tomoaki¹, NAKAHIGASHI, Kazuo¹, SHINBO, Takashi¹, MOCHIZUKI, Kimihiro¹, MURAI, Yoshio², HINO, Ryota³, ITO, Yoshihiro³, SATO, Toshinori⁴, SHIOBARA, Hajime¹, UEHIRA, Kenji⁵, YAKIWARA, Hiroshi⁶, OBANA, Koichiro⁷, TAKAHASHI, Narumi⁷, KODAIRA, Shuichi⁷, HIRATA, Kenji⁸, TSUSHIMA, Hiroaki⁸, IWASAKI, Takaya¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 北海道大学大学院理学研究院, ³ 東北大学大学院理学研究科, ⁴ 千葉大学大学院理学研究科, ⁵ 九州大学大学院理学研究院, ⁶ 鹿児島大学理学部, ⁷ 海洋研究開発機構, ⁸ 気象庁気象研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Graduate School of Science, Hokkaido University, ³Graduate School of Science, Tohoku University, ⁴Graduate School of Science, Chiba University, ⁵Graduate School of Sciences, Kyushu University, ⁶Faculty of Science, Kagoshima University, ⁷Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ⁸Meteorological research Institute, Japan Meteorological Agency

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake occurred at the plate boundary between the Pacific plate and the landward plate on March 11, 2011, and has a magnitude of 9. Many aftershocks occurred following the mainshock. To obtain a precise aftershock distribution is important for understanding of mechanism of the earthquake generation. In order to study the aftershock activity of this event, we carried out extensive sea floor aftershock observation using more than 100 ocean bottom seismometers just after the mainshock. Deployment and recovery of the OBS were repeated four times, and we use the data from more than 70 OBSs just after the mainshock to the middle of June, 2011. We selected 1908 events whose epicenter is located below the OBS network from the JMA earthquake catalog, and P and S-wave arrival times were picked from the OBS data. Hypocenters were estimated by a maximum-likelihood estimation technique and one dimensional velocity structures was modeled using the results of previous refraction study in the study region. Thickness of sedimentary layers changes at each OBS site was evaluated and the estimated travel times by the location program was corrected. A precise aftershock distribution for approximately three months in the whole source area, with an emphasis on depths of events, using the OBS data was obtained. The OBS networks located 1005 earthquakes with a high spatial resolution. The epicenter distribution is not uniform. In the epicenter distribution, the aftershocks may be divided into a number of clusters from a geometrical view point. The aftershocks form a plane dipping landward in the whole area. Comparing our results to velocity structures by marine seismic surveys, there is no aftershock along the plate boundary in the region off Miyagi, where a large slip during the mainshock is estimated. A plate coupling in this region may change due to occurrence of the mainshock. Activity of aftershocks within the landward plate above the source region is high and many aftershocks within the landward plate have normal fault type or strike-slip type mechanism. On the other hand, many events with reverse fault (thrust) type mechanism occur along the plate boundary. Within the subducting oceanic plate, most of earthquakes has normal fault type or strike-slip type mechanism. The stress field in and around the sources region of the 2011 mainshock changes as a results of the mainshock.

2011年東北地方太平洋沖地震の海溝軸近傍の余震活動 Near-trench aftershock activity of the 2011 Tohoku-oki earthquake

尾鼻 浩一郎^{1*}, 篠原 雅尚², 山田 知朗², 植平 賢司³, 日野 亮太⁴, 中村 恭之¹, 三浦 誠一¹, 野 徹雄¹, 小平 秀一¹, 高橋 成実¹
OBANA, Koichiro^{1*}, SHINOHARA, Masanao², YAMADA, Tomoaki², UEHIRA, Kenji³, HINO, Ryota⁴, NAKAMURA, Yasuyuki¹,
MIURA, Seiichi¹, NO, Tetsuo¹, KODAIRA, Shuichi¹, TAKAHASHI, Narumi¹

¹ 海洋研究開発機構, ² 東京大学地震研究所, ³ 九大・理院・地震火山センター, ⁴ 東北大学大学院理学研究科
¹JAMSTEC, ²ERI, Univ. Tokyo, ³SEVO, Kyushu Univ., ⁴Tohoku Univ.

After the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquakes, normal-fault type aftershock activity have been observed both in the overriding plate and incoming/subducting Pacific plate near the trench axis [e.g., Asano et al., 2011]. Several tens of meters slip along the plate boundary occurred near the trench axis during the 2011 Tohoku-Oki earthquake [e.g., Fujiwara et al., 2011]. This large co-seismic displacement reached to the trench axis. The normal-faulting aftershocks near the trench axis are likely caused by a tensional stress due to such large slips along the plate boundary. Detail distribution of the aftershocks near the trench axis and their focal mechanisms are important information for considering the large co-seismic displacement along the plate boundary reaching to the trench axis and crustal structures near the trench axis.

We conducted ocean bottom seismograph (OBS) observations using 10 OBSs near the Japan Trench from August to October 2011. These OBSs were deployed on the landward slope including the area, where the several tens of meters co-seismic displacement was observed, with approximately 10 km separation in horizontal. In addition to these OBSs, we used OBSs deployed for aftershock observations continued from soon after the 2011 Tohoku-Oki earthquake [Shinohara et al., 2011]. Preliminary results of the hypocenter locations show that several earthquakes occurred within the overriding plate. These earthquakes may relate to the normal fault system in the overriding plate. On the other hand, other earthquakes are located mainly in the subducting oceanic crust. We will discuss relationships among aftershock activity near the trench axis, crustal structures obtained from the active seismic surveys, and large co-seismic displacement reaching to the trench axis.

2011年東北地方太平洋沖地震の滑り量遷移域における海底地震計を用いた余震の高精度震源再決定 Precise aftershock relocation of the 2011 Tohoku earthquake and its relation to regional slip distribution

仲谷 幸浩^{1*}, 矢部 優², 望月 公廣¹, 塩原 肇¹, 町田 祐弥¹, 中東 和夫¹, 山田 知朗¹, 植平 賢司³, 八木原 寛⁴, 平田 賢治⁵, 小平 秀一⁶, 篠原 雅尚¹

NAKATANI, Yukihiro^{1*}, YABE, Suguru², MOCHIZUKI, Kimihiro¹, SHIOBARA, Hajime¹, MACHIDA, Yuya¹, NAKAHIGASHI, Kazuo¹, YAMADA, Tomoaki¹, UEHIRA, Kenji³, YAKIWARA, Hiroshi⁴, HIRATA, Kenji⁵, KODAIRA, Shuichi⁶, SHINOHARA, Masanao¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 東京大学大学院理学系研究科, ³ 九州大学地震火山観測研究センター, ⁴ 鹿児島大学大学院理工学研究科, ⁵ 気象庁気象研究所, ⁶ 海洋研究開発機構

¹ERI., Univ. Tokyo, ²Dept. EPS, Univ. Tokyo, ³SEVO, Kyushu Univ., ⁴GSSE., Kagoshima Univ., ⁵MRI, JMA, ⁶JAMSTEC

2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の特筆すべき特徴の一つとして、海溝軸周辺に至るプレート境界浅部での大きな地震性滑りが起こったことが挙げられる。このような今まで知られていなかった特徴を持つ地震の性質を理解する上で、正確な余震分布を知ることは不可欠である。特に、本震時の滑り量分布と余震活動域とを比較し、その対応関係を把握することは、本震の破壊過程の解明にとって重要な手掛かりとなり得る。

そこで本研究では、本震時の最大断層滑り量から小さな滑り量へと遷移する領域である、北緯 37 度から 38 度にかけてのおよそ 150km x 150km の領域で海底地震計によって観測された余震について、気象庁カタログに基づいて切り出し、その震源を高い精度で再決定した。そして、得られた余震分布と本震時の滑り量との関係を考察した。使用した海底地震計は観測点間隔約 25km で設置された計 20 台、観測期間は 2011 年 3 月 28 日から 2011 年 7 月 12 日である。

解析手法としてはまず、それぞれの余震について、各観測点における P 波、S 波、および堆積層下面で変換された PS 変換波の到達時刻の読み取りを行い、hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) を用いて震源決定を行った。この時、PS 変換波と P 波との到達時間差から決定された、各観測点における観測点補正値を適用した。ここで得られた震源を初期震源とし、既存の速度構造断面 (Miura et al., 2003) を参照して決めた一次元速度構造を用いて、hypoDD (Waldhauser and Ellsworth, 2000) により最終的な余震分布を求めた。

震源再決定の結果、本観測域北方での構造探査断面 (Miura et al., 2005) との比較を行うと、大陸プレートと沈み込んでいく太平洋プレートとのプレート境界の内、20km 以浅では余震活動が低調であることがわかった。一方で、20km 以深のプレート境界や上盤である大陸プレートの地殻内では余震が活発に発生していることもわかった。本震時に断層が大きく滑ったと考えられている領域では、余震活動が低調である傾向が見られる。さらに、滑り量が大きい領域の上端周辺に位置する海溝軸近くの海洋モホ面付近には、クラスタ状に余震が起こっていることも確認された。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 余震, 滑り量分布, 沈み込み帯, 海底地震計

Keywords: the 2011 Tohoku earthquake, aftershock, slip distribution, subduction, ocean bottom seismometer

2011年東北日本太平洋沖地震の震源域に沈み込むスラブ深部構造 Deep structure of subducted slab beneath the seismogenic zone of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

山本 揚二郎^{1*}, 尾鼻 浩一郎¹, 鈴木 健介², 日野 亮太², 伊藤 喜宏², 篠原 雅尚³, 小平 秀一¹, 金田 義行¹, 村井 芳夫⁴, 佐藤 利典⁵, 植平 賢司⁶, 八木原 寛⁷, 平田 賢治⁸
YAMAMOTO, Yojiro^{1*}, OBANA, Koichiro¹, SUZUKI, Kensuke², HINO, Ryota², ITO, Yoshihiro², SHINOHARA, Masanao³, KODAIRA, Shuichi¹, KANEDA, Yoshiyuki¹, MURAI, Yoshio⁴, SATO, Toshinori⁵, UEHIRA, Kenji⁶, YAKIWARA, Hiroshi⁷, HIRATA, Kenji⁸

¹ 海洋研究開発機構, ² 東北大学地震・噴火予知研究観測センター, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 北海道大学地震火山研究観測センター, ⁵ 千葉大学大学院理学研究科, ⁶ 九州大学地震火山観測研究センター, ⁷ 鹿児島大学南西島弧地震火山観測所, ⁸ 気象研究所

¹JAMSTEC, ²RCPEV, Graduate School of Science, Tohoku University, ³ERI, University of Tokyo, ⁴ISV, Faculty of Science, Hokkaido University, ⁵Graduate School of Science, Chiba University, ⁶SEVO, Faculty of Sciences, Kyushu University, ⁷Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University, ⁸MRI

The coseismic rupture area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake has estimated over the wide region from the coastline to near the Japan Trench [e.g., Ide et al., 2011]. Several kinds of studies, such as tsunami source inversion [e.g., Fujii et al., 2011], submarine topography [Fujiwara et al., 2011] and seafloor displacement observation [Sato et al., 2011; Ito et al., 2011; Kido et al., 2011], showed consistent results. However, the structural image just beneath the largest coseismic slip area was unclear since the observation areas of previous ocean bottom seismographs (OBSs) in this region were limited and there were few OBSs near the Japan Trench. The resolved area of Yamamoto et al. [2011] was limited to within about 100 km from the coastal line, and the main shock of the 2011 earthquake located out of resolved area. To understand the relationship between coseismic rupture behavior and structural heterogeneities, it is necessary to know the seismic velocity structure of the subducted slab crust and mantle near the trench axis.

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology has conducted the aftershock observation at outer rise from May 2011 to June 2011. From this observation, more than 1,000 earthquakes were detected [Obana et al., 2012]. These aftershocks included the relatively large ($M > 3$) earthquakes, and their travel time data were also obtained at land seismic stations. In addition, Tohoku University deployed some OBSs in the landward slope of Japan Trench at the same time [Suzuki et al., 2012]. Combining these OBS dataset and land seismic data, we could obtain the travel time data between the coastal area and outer rise area with high accuracy of hypocenter locations.

In this study, we perform a three-dimensional seismic tomography from Miyagi Prefecture to outer-rise region by tomoFDD [Zhang and Thurber, 2006]. For the preliminary analysis, we estimate the P-wave velocity structure by using a part of dataset. For initial velocity model, we adopted the three-dimensional model of Yamamoto et al. [2011] for landward slope area and one-dimensional model of Obana et al. [2012] for outer rise area. Our results indicate that the velocity of uppermost slab mantle from 143 degrees E to the trench axis is relatively slower than that in outer rise and coastal area. This result seems to be independence from initial velocity model from some test calculations. On the other hand, our present dataset has few OBSs on the landward slope near the trench axis. We will add the dataset of joint observation conducted by Universities (Hokkaido, Tohoku, Chiba, Tokyo, Kyushu, and Kagoshima), JAMSTEC, and Meteorological Research Institute to obtain more detail structural image.

平成 23 年東北地方太平洋沖地震発生後の地震クラスター地震活動・小繰り返し地震活動の特徴

Seismic activities of earthquake clusters and small repeating earthquakes in Japan after the 2011 Tohoku earthquake

五十嵐 俊博^{1*}

IGARASHI, Toshihiro^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ERI, Univ. of Tokyo

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9.0) was the largest earthquake in recorded history in Japan. The coseismic slip expanded into the areas covered the occurrence areas of interplate earthquakes off Iwate to off Ibaraki, northeastern Japan. For the impact of this earthquake, the seismic activities in and around the source regions have changed significantly. In this study, I investigated spatio-temporal changes of seismic activities of earthquake clusters and small repeating earthquakes in Japan after the mainshock. Furthermore, I estimate the space-time characteristics of the interplate slip from sequences of small repeating earthquakes.

I have already reported slip-rates in the 21st century before the 2011 mainshock at the upper boundaries of the subducting plates. The resultant slip-rates correspond to relative plate motion in the Ryukyu arc. In contrast, they indicated slip deficits in the northeastern Japan arc. There were few postseismic slips following the 2005 off Miyagi prefecture earthquake (M7.2), which located near the hypocenter of the 2011 mainshock. On the other hand, slip deficits were slightly decreased in the southern shallow part of the northeastern Japan after postseismic slips following the 2003 off Miyagi earthquake (M6.8), the 2008 off Ibaraki earthquake (M7.0), and the 2008 off Fukushima earthquake (M6.9). Furthermore, I identified quasi-static slips associated with foreshocks off Miyagi that started from 2011.

After the 2011 mainshock, I detect many small repeating earthquakes. They distributed in the northern, southern and deeper part of the source region. Small repeating earthquakes with relatively long recurrence intervals occurred just after the 2011 mainshock. The cumulative slips are consistent to the value estimated by GPS data analysis in the northwestern deeper part. My result also suggests postseismic slips at the trench-side of the southeastern part. On the other hand, I can not detect small repeating earthquakes in some areas of source region. Distributions of small repeating earthquakes may suggest zero or slightly slipped areas in the 2011 mainshock and the largest aftershock. Some of small repeating earthquakes are burst-type sequences which occurred only after the 2011 mainshock. Observed seismograms may be distorted by the multiplicity of the waves to come from various locations, the seismic velocity changes at the propagation path or site, or changes of physical properties at the plate interface. I also detected many small repeating earthquakes beneath the Kanto district. They suggest induced interplate slips at the subducting Philippine Sea plate and the subducting Pacific plates. In other areas, I can not identify noticeable velocity increases.

Furthermore, I automatically extracted earthquake clusters by using the unified JMA hypocenter catalogue and investigated seismicity changes before and after the mainshock at each earthquake cluster. As a result, I identified that seismic activities after the mainshock have become active in the deeper part of the source region. The largest earthquakes in the analysis period have occurred in some clusters including small repeating earthquakes after the 2011 mainshock. In addition, they activate in several areas around the Kanto, Tokai, and Ryukyu areas of the Philippine Sea plate, and the inland shallow part of eastern Japan. On the other hand, seismic activities decrease with some clusters in the source areas and many intra-plate clusters in intermediate-depths. It suggests the large effects of interplate large slips and stress changes at the mainshock and/or postseismic slip. We should pay attention to future activities to investigate whether physical property at these areas has changed or not.

キーワード: 平成 23 年東北地方太平洋沖地震, 地震クラスター, 小繰り返し地震

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, earthquake cluster, small repeating earthquake

2011 東北地方太平洋沖地震震源域の地震活動特性 ~ 釜石沖地震との比較を基にして Seismic activity in the focal area of the 2011 Tohoku earthquake in comparison with off- Kamaishi repeating earthquakes

内田 直希^{1*}, 松澤 暢¹

UCHIDA, Naoki^{1*}, MATSUZAWA, Toru¹

¹ 東北大学理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

岩手県釜石沖の繰り返し地震(たとえば, Matsuzawa et al., 2001; Uchida et al. 2012)では, 繰り返し地震のアスペリティおよび地震サイクルについて以下のようなことが知られている. 1) アスペリティは階層構造をなす. 2) 地震サイクルの間の地震活動はアスペリティの端で比較的活発である. 一方, 中心付近でも不活発であるが地震活動がある. 3) アスペリティ内での地震活動は本震後不活発でサイクルの後半に活発である. 4) アスペリティの端の地震から中央部に向かって小地震が連鎖して発生することがある. このような特徴は, アスペリティとその周囲のプレート境界面の固着率の違いや地震サイクルにおけるアスペリティの固着のはがれを表していると考えられる. したがって, もしこれら 1~4 の特徴が将来地震を起こすアスペリティの特徴とすれば, 規模は大きく違いますが 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域でも同様な現象が起きている可能性がある. そこで, 過去の地震データをもとに東北地方太平洋沖地震の震源域の地震活動特性について調べた.

まず, 1930 年以降の地震活動を見ると, 2011 年の地震のすべり域内に M7 程度以下のプレート境界地震がいくつか発生しており, 釜石沖と同様に 2011 年の地震の震源域も階層構造をしていることが明らかである(特徴 1). また大地震のすべり域(Yamanaka and Kikuchi, 2004; 室谷・他, 2003; 山中, 2011)をコンパイルすると, 過去の M7 クラスの地震の多くは 2011 年の大すべり域(例えば Iinuma et al., 2011)の周囲で起きていることが分かった. 特に宮城県沖では, すべり域深部で繰り返し地震が発生していることが分かっている. これは, 釜石沖のアスペリティの端で比較的頻繁に起きる小地震の活動とよく似ている. 一方, すべり域の中心に近い 1981 年(M7.0)および 2011 年(M7.3)のプレート境界地震は, 釜石沖の比較的不活発なアスペリティ中心近くの活動と対応すると考えることもできる(特徴 2). 2011 年東北地方太平洋沖地震後の繰り返し地震や低角逆断層型地震(Asano et al., 2011)は, 大すべり域では不活発である. 地震観測データが存在する期間は, M9 クラスの地震の再来間隔(400~800 年, 地震調査委員会, 2011)に比べ小さいことに注意が必要であるが, 釜石沖やその他の中規模繰り返し地震に見られるような地震サイクルにおけるアスペリティ内の地震活動の時間変化(特徴 3)が東北地方太平洋沖地震の震源域にも存在する可能性がある.

また, 大すべり域の外側で起きた地震のいくつかについては, 複数の地震が連続して起こることがあり, 一連の活動の中で 2011 年の大すべり域から遠い側から近い側に向かってその震源やすべり域が移動しているように見える(例えば 1938 年福島県沖や 1968 年三陸沖の活動). このような地震活動は, 地震サイクルの間に発生するアスペリティ外部から内部へのすべりの浸み込みを表している可能性がある. 同様の地震活動が, 岩手県釜石沖の地震クラスタでも見られており(特徴 4), 震源の移動パターンが固着域の中心を知る上で重要な指標となる可能性がある.

さらに, 2011 年東北地方太平洋沖地震の場合は, 震源域が小さい釜石沖では難しい震源域周辺の詳細な準静的すべりの時空間変化を小繰り返し地震から推定することができる. 2011 年東北地方太平洋沖地震のすべり域に対応する場所では, 2008 年前後に福島県沖~宮城県沖での固着の緩みが推定されていた(Uchida et al., 2009; 東北大学理学研究科, 2010). また, 2011 年 3 月 9 日の地震(M7.3)の余震の中にも多くの繰り返し地震が見られた. これらもアスペリティ内での固着のゆるみを表している可能性がある. 積算すべりデータに基づく広域・プレート境界型地震発生域下限近くまでの高カップリング率, 海溝近くの無繰り返し地震活動領域なども巨大地震・大すべり欠損域の存在場所の特徴である可能性がある.

上記の結果は, 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域での地震活動が, 釜石沖の繰り返し地震と多くの共通の特徴を持っていることを示している. これは繰り返し地震を含む地震活動の特徴の抽出により将来地震を起こす場所をあらかじめ知ることができる可能性を示唆する. このような特徴(の一部)は他から影響を受けにくいシンプルな系のみで成り立つものである可能性があるが, もし多くの固着域に普遍的な特徴として見いだされれば, 来るべき巨大地震のアスペリティの同定に繋がり, 地震発生機構の理解の進展のみならず地震災害軽減のためにも大変重要であると考えられる.

キーワード: 2011 東北地方太平洋沖地震, 小繰り返し地震

2つ山をもった2011年東北地方太平洋沖地震のすべり分布と前震および余震活動との関係

Twin-peaks slip distribution of the 2011 Tohoku Earthquake and its relation to the foreshock and aftershock activities

佐藤 魂夫^{1*}, 平塚 晋也¹

SATO, Tamao^{1*}, HIRATSUKA, Shinya¹

¹ 弘前大学理工学研究科

¹ Department of Earth and Environmental Sciences, Hirosaki University

Previously, Hiratsuka and Sato (2011) investigated the Coulomb stress change for the hypothetical receiver faults to evaluate the effect of the 2011 Tohoku Earthquake on aftershocks and future earthquake probabilities. They assumed the slip distribution determined immediately after the event using the GEONET data by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI). The slip distribution gives the area of maximum slip lying almost halfway between the coast line and trench. Based on the calculated Coulomb stress changes, Hiratsuka and Sato (2011) suggested that the normal-fault aftershocks near the Japan Trench should occur within the subducted Pacific plate whereas the normal-fault aftershocks on the west of approximately 20 km depth contour of the plate interface should occur in the crust above the plate interface. Later, Sato and Hiratsuka (2011) evaluated the Coulomb stress change for the 81 larger aftershocks of which fault plane solutions are provided by Nettles et al. (2011). There they used the slip distributions determined using the GEONET data by themselves. As different slip distributions were obtained from inversion of the GEONET data depending on the strength of constraints put on the initial slip distribution, they compared the Coulomb stress change calculated for two extreme cases, that is, a slip distribution with the area of maximum slip shifted toward the land and a slip distribution with the area of maximum slip shifted toward the trench. The comparison indicated that the aftershock focal mechanism distribution is better explained by the slip distribution with the area of maximum slip shifted toward the trench. During the course of these previous studies, it was suggested that the slip distribution of the 2011 might be better constrained by considering the aftershock focal mechanism distribution as well.

In this paper, we investigate the level of consistency between the slip distribution of the 2011 Tohoku Earthquake and the aftershock distribution more closely. Since more accurate slip distribution is desirable for that purpose, we determine the slip distribution by using the coseismic displacements observed at the ocean bottom sites as well as the GEONET data. The fault geometry is assumed to be the same as that of Sato and Hiratsuka (2011). The slip distribution thus obtained is characterized by the two peaks of slip separated by a relatively low-slip zone extending in east-west direction off the border of Miyagi and Iwate Prefectures. This feature is robust and well constrained by the combination of the GEONET and ocean-bottom observations. Looking closely at the aftershock distribution near the trench, we find the place where the aftershock distribution protrudes from the trench toward the land (not towards the sea). This place coincides with the low-slip zone sandwiched by the two peaks of slip. Moreover, major seismic activities prior to the 2011 Tohoku earthquake since 1978 Off-Miyagi earthquake are distributed along the low-slip zones sandwiched by the two peaks of slip. Based on the analyses of stress field due to the slip distribution with the two peaks of slip, we investigate the cause of the interesting correlation described above.

Keywords: Subduction zone, Great earthquake, Coulomb stress change, Aftershock activity, Foreshock activity

東北地方太平洋沖地震の震源周辺で発生した地震のS波エンベロープ伸張 Envelope broadening of S-waves from earthquakes near the hypocenter of the Tohoku-Oki earthquake.

長谷川 和也^{1*}, 日野 亮太¹, 伊藤 喜宏¹, 鈴木 健介¹, 海野 徳仁¹

HASEGAWA, Kazuya^{1*}, HINO, Ryota¹, ITO, Yoshihiro¹, SUZUKI, Kensuke¹, UMINO, Norihito¹

¹ 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

¹ Graduate school of Science, Tohoku Univ.

東北日本前弧域で発生する地震を東北地方の陸上観測点で観測したとき、S波のエンベロープ形状が震源の深さに依存して変化することが Gamage et al. (2009) や古賀 (2010) により示された。スラブ内地震に比べると、プレート境界近傍で発生する地震の方が顕著にS波のエンベロープ形状が時間軸方向に進展していて、S波振幅の最大値はS波初動到達時刻に比べて大幅に遅れる傾向を示す。2011年3月11日に宮城県沖を震源として2011年東北地方太平洋沖地震(以下、本震)が発生した。本震が発生する前までは、震源周辺ではプレート境界近傍で発生する低角逆断層型地震が卓越していたが、本震の発生後は、これらの地震の発生頻度が大幅に減少していることが発震機構解の解析で示された(Asano et al., 2011)。このような震源深さ分布の変化を反映して、この領域で発生する地震の波形記録のS波エンベロープも本震前後で変化していることが予想される。

本研究では、東北地方前弧側に位置する陸上観測点の3成分1Hz速度型地震計で記録された地震波形データの水平動2成分を用いてRMSエンベロープを合成した。水平動2成分の速度波形記録にバンドパスフィルタをかけ、2-4、4-8、8-16、16-32Hzの各周波数帯に分けたあと、水平動2成分の二乗振幅の和を平滑化し、その平方根を取ることでRMSエンベロープを作成した。得られた波形エンベロープをみると、本震直前に活発化した前震を含む地震の多くはブロードな波形エンベロープを示しており、これらの特徴は古賀(2010)が指摘したプレート境界近傍で発生する地震の波形エンベロープのそれと一致する。本震後に発生した地震の波形エンベロープには、顕著な伸張を伴わないものも多く認められ、このことは余震活動にスラブ内の地震活動が含まれている可能性を示している。一方、顕著なS波エンベロープ伸張を示す地震も依然として観測されている。低角逆断層型地震の活動度が低下していることを考えると、本震発生後の地震のうちS波エンベロープ伸張を示す地震はプレート境界より上の陸側プレート内部で発生したものである可能性がある。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, プレート境界地震, プレート内地震, Sコーダ波

Keywords: the Tohoku-Oki earthquake, interplate earthquake, intraplate earthquake, S coda wave

2011年東北地方太平洋沖地震のマルチタイムウィンドウ津波波形インバージョン Multiple time-window tsunami waveform inversion of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake

藤井 雄士郎^{1*}, 佐竹 健治², 原田 智也², 行谷 佑一³

FUJII, Yushiro^{1*}, SATAKE, Kenji², HARADA, Tomoya², NAMEGAYA, Yuichi³

¹ 建築研究所 国際地震工学センター, ² 東京大学 地震研究所, ³ 産業技術総合研究所 活断層地震研究センター

¹International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ³Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

We performed a multiple time-window analysis of tsunami waveform inversion for the 11 March 2011 off Pacific coast of Tohoku earthquake (M 9.0), and estimated the slip distribution. The 2011 tsunami was recorded instrumentally on coastal tide or wave gauges and offshore gauges such as ocean bottom pressure (OBP) and GPS wave gauges. The offshore gauge records within the source area showed two-stage tsunami waveforms which have a gradual increase of water level followed by an impulsive wave. The coastal run-up and inundation heights were also measured by many researchers, and the large peak appeared around Miyako in Iwate prefecture. Our previous result of tsunami waveform inversion (Fujii et al., 2011, Earth Planets and Space) assuming a simultaneous rupture of subfaults indicated that the largest slip of about 48 m occurred near the trench axis off Miyagi. However, the computed coastal tsunami heights from this model show a peak on northern Miyagi coast and did not reproduce the distribution of the measured tsunami heights.

In this study, we adopted multiple time windows on each subfault for the tsunami waveform inversion analysis assuming a constant rupture velocity in order to estimate the slip distribution both in space and time. This inversion scheme allows us to estimate a time delay of slip on each subfault after the rupture front arrived at an edge with the assumed velocity. The number of time windows is five for each subfault. Each time window has a duration of 30 s as a rise time of slip. We added four more subfaults at the northern end of the subfault model introduced by Fujii et al. (2011), and also used tsunami waveform records at more gauges than the previous study. In total, we used 11 OBP gauges, 10 GPS wave gauges and 32 coastal tide or wave gauges. The observed tsunami waveform data were resampled at an interval of 12 s to be used for the inversion. The new result indicates that the fault slip propagated from the epicenter and took about 3 minutes to reach the northern and southern ends of the source area. The large slip along the Japan trench axis is more extended than the previous result, with the maximum slip of 36 m. The slips along northern trench are about 10 m and more. The computed coastal tsunami heights from the updated model with delayed slips show another peak on central Iwate coast, where the largest tsunami heights were measured. We also computed tsunami inundation areas in Sendai and Ishinomaki plains and found that they explain the distribution of the 869 Jogan tsunami deposits. While we previously proposed the fault models of the Jogan earthquake (Satake et al., 2008; Namegaya et al., 2010, An. Rep. Active Fault and Paleearthq. Res.), the 869 source could have been the same as the 2011 source.

キーワード: 2011年東北地震, 津波波形インバージョン, マルチタイムウィンドウ, 沿岸津波波高, 浸水計算

Keywords: 2011 Tohoku earthquake, Tsunami waveform inversion, Multiple time windows, Coastal tsunami height, Inundation modeling

3月9日に発生した東北地方太平洋沖地震の前震 (Mw7.3) の津波波形解析 Tsunami waveform analysis of the foreshock (Mw7.3) of the great Tohoku-oki earthquake

福岡光輝¹, 谷岡 勇市郎^{1*}, Gusman Aditya¹, 酒井 慎一²

Mitsuteru Fukuoka¹, TANIOKA, Yuichiro^{1*}, GUSMAN, Aditya¹, SAKAI, Shin'ichi²

¹ 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター, ² 東京大学地震研究所

¹Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo

On March 9, 2011, the largest foreshock (Mw7.3) occurred before the 2011 great Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). The epicenter of the foreshock was located about 60 km northeast from the epicenter of the 2011 great Tohoku-oki earthquake. The tsunami was generated by this foreshock and observed by two ocean bottom pressure gauges, TM1 and TM1, off Kamaishi and three GPS buoys operated by the Nationwide Ocean Wave Information Network for Port and Harbors (NOWPHAS). In this paper, we estimate the fault model which explains the observed tsunami waveforms. The tsunami is numerically computed by solving the linear long-wave equations. We assumed that the fault parameters, strike=188.1 degree, dip=12.0 degree, rake=73.3 degree. The fault length and width are varied to find the best fault model which explains the five observed tsunami waveforms. The best fault model we found has a length of 40 km and a width of 55 km and is located northwest from the epicenter. In other words, the epicenter is located almost southeast corner of the fault model. The estimated slip amount by comparing the observed tsunami waveforms with the computed ones is 1.25m. The calculated seismic moment is 1.27×10^{20} Nm (Mw 7.3) which is similar to the seismic moment estimated by JMA using teleseismic body-waves, 1.34×10^{20} Nm. One day aftershocks of this foreshock occurred mostly north from the epicenter. Our estimated fault model is consistent with the one-day aftershock distribution. Kato et al. (2012, Science) suggested that the propagation of slow slip from the epicenter of the foreshock to the epicenter of the mainshock of the 2011 great Tohoku-oki earthquake. Our estimated fault model also indicates that the foreshock did not rupture the plate interface located south of the epicenter where the slow slip occurred after the foreshock.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震前震, 津波波形解析, 断層モデル

Keywords: foreshock of the 2011 Tohoku-oki earthquake, tsunami waveform analysis, fault model

2011年東北地方太平洋沖地震直後に日本海で発生した海面微小振動の原因 Origin of the surface vibrations of the Sea of Japan generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

岩井 麻樹^{1*}, 室谷 智子¹, 鶴岡 弘¹, 篠原 雅尚¹, 佐竹 健治¹

IWAI, Maki^{1*}, MUROTANI, Satoko¹, TSURUOKA, Hiroshi¹, SHINOHARA, Masanao¹, SATAKE, Kenji¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ ERI, the Univ. of Tokyo

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震発生直後から、日本海側の検潮所で数十cmの微小振動が観測された。本研究では太平洋側の検潮記録や海底水圧計、GPS波浪計のデータを用いて得られた波源モデルに基づく津波シミュレーションによって、この微小振動の再現を試みた。その結果、海底地殻の鉛直変位だけでなく、水平方向の変位と海底地形による影響も初期条件に加えることによって、日本海側の微小振動を再現することができた。

この地震により、津波が発生した。記録によれば9m以上の津波が、地震発生後30分程で東北地方の太平洋側を襲い、沿岸部に甚大な被害をもたらした。

同時に、日本海側の検潮所でも地震直後から微小振動が記録された。日本海側の検潮所の記録から、潮汐等のトレンドを除去すると、地震直後から短波長(数分周期)で、10cmほどの振幅で振動していると考えられる。また、観測データで津波は約2時間後に津軽海峡を經由していることから推測すると、この微小振動は津軽海峡を經由してきた津波とは別の現象であると推測される。

通常津波が長波であること、地殻変動が津波の伝播に比べて瞬時に変化することから、津波の数値計算の初期条件、つまり水面の変位は、海底の鉛直方向の変位と同じだと仮定している場合が多い。海底が平ら、ゆるい斜面ならこの仮定は妥当である。しかし、Tanioka and Satake(1996)は、海底が急な斜面、または、海底に段差がある場合、海底の鉛直方向だけでなく水平方向の変位も数値計算で考慮する必要があるとしている。本研究では、海底地殻の水平方向変位と海底地形も考慮することで、日本海の水位変化を計算する。

津波シミュレーションでは、海底地形は日本近海の30秒グリッド水深データ(JTOPO30)で北緯30-46度、東経128-148度の範囲を計算した。断層のすべりは40枚の矩形断層を仮定して津波波形インバージョンにより求めたFujii et al.(2011)を用いた。地殻変動はOkada(1985)の有限矩形断層の解析解を用いる。地殻変動を海面変動の初期条件にして、線形長波方程式を差分法により時間発展させ、シミュレーションにより得られた各地点での波形を、観測で得られた波形と比較した。

その結果、日本海側では、鉛直方向のみの場合、長周期の変動は再現されるが、地震直後の微小振動は発生しなかった。一方、海底の水平方向変位も考慮した場合、日本海側では地震直後に微小振動が発生した。また、太平洋側では海底の水平方向変位を考慮すると、多少振幅が大きくなった。しかし、大きな波形の変化は見られなかった。

水深の変化は日本海全体に存在するが、特に振幅が大きい振動は秋田・佐渡沖のみで観測されている。これは、断層と平行に海底地形の段差が存在していること、日本海の中では上の地域が断層に近いので、地殻変動が相対的に大きいことが理由として挙げられる。太平洋側でほとんど変化が見られなかったのは、地殻変動の水平方向の変位よりも鉛直方向の変位の影響が勝るためである。

東北地方太平洋沖地震発生直後における日本海側の微小振動を再現したが、波形はあまり合っていない。観測点付近に関して、時間発展させるにあたり非線形項を無視していること、緯度経度にして30秒の格子間隔で数値計算しているからだと考えられる。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 津波, 日本海, 海底の水平方向変位

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, tsunami, the Sea of Japan, horizontal displacement of ocean bottom

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動記録からみた高周波励起領域の多様性 Variability of high-frequency excitation patches estimated by strong-motion data for the 2011 Tohoku-Oki earthquake

林 真奈子¹, 蓬田 清^{1*}

HAYASHI, Manako¹, YOMOGIDA, Kiyoshi^{1*}

¹ 北大・理・地球惑星ダイナミクス

¹Earth & Planet. Dynamics, Hokkaido University

2011年東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震と呼ぶ)における太平洋岸に沿ってのK-netおよびKiK-netの強震動加速度波形記録を用いて、断層面上での複数の高周波地震波の励起領域について、その周波数特性を定量的に比較した。まず、元の加速度波形記録を2回時間積分することで、静的成分を含む変位波形記録を得た。その際に微妙なゼロ基準線のずれが生じると静的成分は正しく得られないので、いくつかの補正法を適用した所、Iwan et al. (1985)の方法が安定した結果を与えることがわかった。得られた変位波形記録は数メートルを越えるステップ状の静的変位を示したが、加速度波形記録に明瞭な複数のウェーブレットに別れている場合には、複数のステップの変位記録となった。

それぞれのウェーブレットはこの地震の断層面上の孤立した高周波励起領域と考えられ、その静的変位成分の大きさは地震モーメントを表わすと考えられる。そこで、それぞれのウェーブレットの加速度記録の高周波成分(1Hz以上)と静的変位成分のステップの大きさの比を各観測点で求め、ウェーブレット毎の比を比較した。加速度記録においては考えている時間ウィンドウ内での二乗平均平方根をパラメータとした。震源付近の宮城県の観測点の波形では2つのウェーブレットが顕著だが、上述の高周波/低周波の比を比較すると、第2ウェーブレットの方が高周波励起が約3倍大きいことが明らかになった。このウェーブレットは震央より海側の海溝軸付近の浅い部分の滑りと考えられており(Yoshida et al., 2011)、通常の断層運動よりもはるかに滑らかな挙動をしたことがわかる。ただし、高周波成分が弱いながらも十分に励起されているので、いわゆる非弾性的な断層運動を伴う「津波地震」ではない。

また、南の福島県から茨城県北部の観測点の記録には2分以上遅れて、振幅は小さいが明瞭なウェーブレットが見られる。この部分の静的変位は小さく、高周波地震波のみが卓越して励起された領域を示す。上述の比では約4?5倍も標準的なウェーブレットよりも高周波成分のみ大きい。これはHonda et al. (2011)の強震動アレイ記録で際立って認められた、1938年塩屋沖地震群(Abe, 1977)のアスペリティに対応していると考えられる。

このように、東北沖地震はその地震モーメントに比べてさまざまな強さの高周波領域が共存する複雑な破壊過程であることが示された。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 高周波地震波励起, 強震動加速度記録, 静的変位量

Keywords: 2011 Tohoku-Oki earthquake, excitation of high-frequency seismic waves, strong-motion accelerograms, static displacement

震度分布に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の短周期地震波発生域 High-frequency rupture areas during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake inferred from seismic intensity

神田 克久^{1*}, 武村 雅之¹, 広谷 浄², 石川 和也²

KANDA, Katsuhisa^{1*}, TAKEMURA, Masayuki¹, Kiyoshi Hirotsu², ISHIKAWA, Kazuya²

¹小堀鐸二研究所, ²東北電力

¹Kobori Research Complex Inc., ²Tohoku Electric Power Co., Inc.

震度インバージョン解析を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震の短周期地震波発生域を明らかにした。その際、東北地方で観測された宮城県沖を震源とする第1波群と第2波群を分離して求めた計測震度分布に基づいて、2つの分離した短周期地震波発生域が得られた。同時に、本震全体の震度分布を震度インバージョン解析すると、宮城県沖と茨城県沖北部に2つの短周期地震波発生域が求められた。宮城県沖は東北地方で観測された2つの波群の短周期地震波発生域が重なったもので、茨城県沖北部は3番目の短周期地震波発生域と考えられ、これを合わせて、短周期地震動に関する震源過程を分析した。

第1波群及び第2波群の短周期地震波発生域は、共に宮城県沖の震央の西の陸地寄りに位置し大部分は重なる。ただし、第1波群は北側の三陸沖南部まで延び、第2波群より若干宮城県の陸地寄りあり、若干の位置の違いが見られた。短周期地震波発生域の解析結果は、岩手県や青森県の太平洋沿岸の震度は第1波群の方が若干大きく、宮城県の震度が第2波群の方が若干大きいことを反映している。ただし、震度インバージョン解析から推定された地震規模はMI=8.0で同じである。

1861年以降の歴史的な宮城県沖地震と短周期地震波発生域を比較すると、第1波群および第2波群ともに重なりがみられる。特に1936年および2005年の地震は大部分が重なっているが、1861年、1897年および1978年の地震はより陸地寄りに位置している。海溝軸近傍と連動した宮城県沖地震と言われていた1793年寛政地震についても被害から推定されている震度分布を用いたインバージョン解析を行うと、その短周期地震波発生域は、第1波群の位置と類似している結果となった。推定された地震規模についてもMI=8.1で第1波群と同程度である。宮城県沖のプレート境界では、1793年の地震から2011年東北地方太平洋沖地震まで合わせて考えると、同じような地震が繰り返してきたのではなく、多様な地震が歴史的に発生してきたと判断される。

次に、既発表の震源過程と2011年東北地方太平洋沖地震の短周期地震波発生域を比較する。強震動をシミュレーションするために提案された三つの特性震源モデルのSMGAと短周期地震波発生域を比較すると、Kurahashi and Irikura (2011)のSMGAが破壊の順番と位置から一番類似している。短周期地震動に関連した震源過程と考えられる遠地記録のP波に基づくバックプロジェクション法によるZhang et al. (2011)の結果と短周期地震波発生域を重ね合わせると、宮城県沖の第1波群の震源は破壊開始から約60秒まで宮城県沖から北側に進行し、第2波群の震源は宮城県沖の沈み込み方向から福島県沖に進み、最後の3番目の震源は南側に向かって茨城県沖まで進行したことよることが分かった。Koketsu et al. (2011)が遠地や近地の実体波記録などから推定したすべりの震源過程と比較すると、宮城県沖の第1波群の短周期地震波発生域は震源近傍でゆっくり広がる破壊に対応している。第2波群の短周期地震波発生域は、海溝軸近傍の津波を生じさせた破壊に伴う地震発生後70秒後前後の内陸に向かう大きなすべりに対応している。その後向きを変えて南側に破壊が進行し、茨城県沖北部で最後の短周期地震波発生域が生じたと考えられる。第2と第3の短周期地震波発生域のエネルギー中心は、すべりの大きい領域のそれぞれの破壊の終端部と概ね対応している。これは、南海トラフ沿いなど発生した歴史的なプレート境界地震でもよく見られた特性である [武村・神田 (2008)]

キーワード: 震度インバージョン, 短周期地震動, 2011年東北地方太平洋沖地震, 宮城県沖地震, 1793年寛政地震, 震源過程
Keywords: seismic intensity, inversion analysis, high frequency, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, historical earthquake off Miyagi Prefecture, source process

遠地実体波と地殻変動データを用いたジョイントインバージョンによる2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程の解析 Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake inverted from teleseismic body waves and geodetic data

久保 久彦^{1*}, 筧 楽磨¹, 干場 充之²

KUBO, Hisahiko^{1*}, KAKEHI, Yasumaro¹, HOSHIBA, Mitsuyuki²

¹ 神戸大学, ² 気象研究所

¹Kobe University, ²Meteorological Research Institute

2011年東北地方太平洋沖地震の定量的な震源像を得るために、遠地実体波と地殻変動データを用いた震源インバージョンにより、震源過程を解析した。可能な限りの客観性と一意性を持つモデルを推定するために、次の7点を本研究では行った。(1)本研究で用いた multiple time window analysis において、推定される震源モデルに大きな影響を与える解析条件である、各サブフォルトの最大すべり継続時間 T_{sd} および first time window の伝播速度 V_{ftw} を可能な限り客観的に決定した。(2)遠地実体波と地殻変動データを用いたジョイントインバージョンを行った。(3)実際のプレート境界の三次元形状を考慮した、震源断層面および破壊開始点の位置を用いた。(4)プレート境界の上盤側の地下構造が水平方向(沈み込み方向)に不均質であることを考慮し、傾斜方向に位置が異なるサブフォルトごとに一次元地下構造を構築し、それを用いて遠地実体波の Green 関数の計算を行った。(5)プレート境界上において海溝軸まで破壊が及んでいることを考慮した smoothing constraint を用いた。(6)地殻変動データには陸域の地殻変動データだけでなく、海域の地殻変動データも用いた。(7)理論テストを通して、異なるデータセット間の重みを決定した。

解析の結果、震源断層面全体で解放された地震モーメントは 3.4×10^{22} Nm ($M_w=9.0$) と推定された。また、震源断層面の破壊開始点から浅い領域にかけて、最大すべり量が 43m である大きなすべりの領域が推定された。この大きなすべりの領域は岩手県南部沖から福島県沖にかけて、走向方向に広がっている。浅く、海溝軸に近い領域において大きなすべりが推定されたことは、津波データを用いて推定された震源モデルや海底地形変化の解析と整合的である。推定された全体の破壊継続時間は約 150 秒である。破壊開始点から浅い領域への破壊の伝播速度は約 2 km/s と推定された。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 震源過程, ジョイントインバージョン, 遠地実体波, 地殻変動データ

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, rupture process, joint inversion, teleseismic body waves, geodetic data

東北地方太平洋沖地震震源域の詳細な応力場; モーメント解放分布との関連 Detailed stress fields in the focal region of the Tohoku Earthquake; Implication for the distribution of moment release

千葉 慶太^{1*}, 飯尾 能久¹, 深畑 幸俊¹

CHIBA, Keita^{1*}, IIO, Yoshihisa¹, FUKAHATA, Yukitoshi¹

¹ 京都大学防災研究所

¹DPRI, Kyoto Univ.,

2011年3月11日、Mw9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。この本震前後のメカニズム解分布と応力場の解析はこの地震の発生メカニズムを解明する上で極めて重要である。本研究ではF-netデータを用いて本震前後(1997年1月1日~2011年9月27日)の震源域のメカニズム解分布を調べ、さらに多重逆解法(Otsubo et al.,2008)による応力インバージョンを行い、応力場の解析を行った。その結果、メカニズム解の分布からAsano et al.(2011)が指摘しているように本震前は震源域全域にわたって逆断層型の地震が発生しているのに対し、本震後は、特に上盤側では正断層型の地震が数多く発生している点、深部ではメカニズム解の変化がなかったことなどが確認された。また、応力インバージョンの解析からも深部では本震前後で逆断層型の応力場であったのに対し、やや浅部では本震前は逆断層型、本震後は正断層型の応力場が確認された。これはプレートやや浅部においてプレート間の絶対強度が低かったことを示すものと考えられる(Hasegawa et al.,2011; Yagi and Fukahata, 2011)。

さらに宮城県沖の海溝軸近傍浅部ではプレート境界下盤側に南北方向にP軸を持つ横ずれ型の地震が確認された。そこで本震に伴う応力変化をOkada(1992)を用いて本震近傍、海溝軸近傍それぞれにモーメント解放のピークを持つ二種類のすべりモデルで計算した。その結果、本震近傍にモーメント解放のピークを持つすべりモデルで宮城県沖の海溝軸近傍下盤側の南北方向のP軸を持つ地震が説明可能であることがわかった。このようにメカニズム解分布と本震による応力変化から本震のモーメント解放分布により制約を加えることが出来ると考えられる。

Keywords: focal mechanism, stress inversion, multiple inverse method, fault model, seismic moment release, stress change

東北日本 M9 地震の震源断層強度 Strength of the M9 Tohoku Earthquake generating fault

清水 以知子^{1*}

SHIMIZU, Ichiko^{1*}

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Science, University of Tokyo

2011年の東北地方太平洋沖地震(M9)は、“想定”宮城県沖地震のアスペリティより浅いプレート面上(深さ20数km)で発生した。本震はこれまでのM7級の宮城県沖地震のアスペリティとともに、その周囲の安定すべりを起こしていると考えられてきた領域をも破壊した。M9地震の震源域は、それまで小繰り返し地震が殆ど起こらないことから安定すべりを起こしていると考えられてきたが、新しい見積もりはこの地域のプレート間カップリングが比較的強かったことを示している(Uchida & Matsuzawa, 2011, EPS)。それでは、従来考えられてきた宮城県沖地震のアスペリティと、3月11日の地震の震源域では何が違ったのだろうか。また、小繰り返し地震がほとんどない場所でM9地震が起こったのは何故だろうか。

地球物理学的観測(Ito et al., 2005, GRL; Miura et al., 2005, Tectonophysics)からは、M9東北地震や1978年の宮城県沖地震の震源近傍に、沈み込んだ海山が存在することが示唆される。深部のウェッジマントルに接する海山は従来のアスペリティに対応し、地殻部分の未破壊の海山はバリアとして摩擦すべりをロックする働きがあったと考えられる。

そこで、沈み込むスラブの上面が厚さ2-3kmの珪質堆積物と玄武岩質の海山からなると仮定して、東北日本のプレート間逆断層の強度エンベロープを描いた。珪質堆積物の高温レオロジーには細粒石英岩の転位クリープの流動則を用いた。従来のアスペリティにおける繰り返し地震は、玄武岩(あるいはガブロ)質岩石とウェットな石英のレオロジーの大きなコントラストによると考えられる。M9地震の震源は、ウェットな石英の脆性-延性転移領域の上限付近に相当する。本震では海山の崩壊を契機として、強度の大きい脆性-延性転移領域の破壊が一気に進み、震源断層全体がすべったというシナリオが考えられる。断層深部への地震性すべりの拡大は、脆性-延性転移領域における流動・摩擦物性の速度依存性によって理解できる。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, アスペリティ, レオロジー, 沈み込み帯, 摩擦構成則, 海山

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, asperity, rheology, subduction zone, frictional law, seamount

福島沖における固着の変化を含む東北地方太平洋沖地震発生サイクルシミュレーション Simulations of the 2011 Tohoku giant earthquake cycle including the change of plate coupling in Off-Fukushima

大谷 真紀子^{1*}, 平原 和朗¹, 堀 高峰², 兵藤 守²

OHTANI, Makiko^{1*}, HIRAHARA, Kazuro¹, HORI, Takane², HYODO, Mamoru²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 海洋研究開発機構

¹ Grad. School Science, Kyoto University, ² JAMSTEC

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は宮城沖から茨城沖に至る広大な領域を破壊した Mw9.0 の超巨大地震である。最大すべり量は 60m に達し、特に大きいすべりは宮城沖の浅部に局所化している [国土地理院, 2011]。また、このように大きな地震が 400 年 ~ 800 年間隔で発生していることが津波堆積物の調査より分かっている [澤井・他, 2010]。この超巨大地震破壊領域には、少なくとも最近百数十年間、再来間隔数十年で発生していた Mw7 級の地震の震源域が含まれている。深部宮城沖では約 30 ~ 40 年に一度 [Yamanaka and Kikuchi, 2004]、茨城沖では約 28 年に一度 Mw7 級の地震が発生している。また福島沖では、1997 年から 2000 年に比べて、2007 年から 2010 年ではすべり欠損率の低下が観測されており [国土地理院, 2011]、これは超巨大地震発生直前の準備段階の一部を示しているのではないかと指摘もなされている。

これらの特徴をもつ東北地方太平洋沖地震に対して、現在複数の発生サイクルモデルがたてられている。階層アスペリティ (HA) モデル [Hori and Miyazaki, 2011] では超巨大地震破壊領域全体が不安定な摩擦特性を持つと設定することで長い再来間隔及び大きなすべり量の地震を再現している。[Kato and Yoshida, 2011] は宮城沖を仮定した二次元断層モデルにおいて、アスペリティの周囲が安定すべりを起こす従来のアスペリティ (SA) モデルを仮定し、強く固着するアスペリティ (強アスペリティ) を浅部に設定することで長い再来間隔及び大きなすべり量の地震を再現している。これらのモデルの違いは、超巨大地震破壊領域の摩擦特性にある。本研究では、これら両モデルを各々仮定した三次元準動的な地震発生シミュレーションを行い、両者の比較を行った。

計算では、馬場・他 [2006] の三次元プレート形状を断層面と仮定し、N=200,704 個の三角小断層に離散化した。各小断層面上で慣性の項を近似した運動方程式と摩擦方程式の連立方程式をたて、適応刻み幅制御 5 次 Runge-Kutta 法 [Press, 1996] で時間発展を計算した。摩擦の式としては速度状態依存摩擦構成則 (Composite law [Kato and Tullis, 2001]) を用いた。また、計算の高速化を図るために H-matrices 法を用いた近似計算を行っている [Ohtani et al., 2011]。

両モデルにおいて、深部宮城沖及び茨城沖に A-B 負で常に不安定すべりを起こすアスペリティを、浅部宮城沖に A-B=-0.8 ~ -0.95MPa と強く固着するアスペリティを設定した。HA モデルでは超巨大地震破壊領域全体が地震を起こしうるポテンシャルを持つように A-B 負に設定したが、SA モデルでは上記アスペリティの周囲は常に安定すべりを生ずる A-B 正に設定した。また、SA モデルでは福島沖で複雑なふるまいを示すように A-B 負の不均質を設定した。なお、本研究では宮城沖から茨城沖のみを考慮し、その南北の地域については考えていない。

シミュレーションの結果両モデルで、超巨大地震の長い再来間隔及び広大で特に大きいすべりが局所化した地震時すべり分布、内部の再来間隔数十年の Mw7 級地震など、観測された東北地方太平洋沖地震サイクルの特徴を再現することができた。大きなすべりの局所化は、宮城沖浅部に強アスペリティを設定したためである。HA モデルにおいては、この浅部の強アスペリティを設定しなくても長い再来間隔及び大きなすべりを再現することは可能である。しかしながら、この場合、すべりは宮城沖浅部から茨城沖浅部にかけて広がり、大きなすべりの局所化を再現するには浅部に強く固着するアスペリティの設定が必要であることが分かった。

超巨大地震後、HA モデルでは超巨大地震破壊領域全体が固着するのに対し、SA モデルでは A-B 負のアスペリティ以外の領域は余効すべりの後定常すべりにおちつく。この両者の違いは超巨大地震直後の M7 級地震の発生や超巨大地震間の各地点の固着状態・定常すべり速度の変化においても違いを生じさせた。つまり、顕著な違いは超巨大地震発生後にみられ、両モデルの妥当性は今後のプレート間固着を観測することで検証できると考えられる。

福島沖では超巨大地震前にプレート間固着のはがれが観測されているが、本研究では両モデルにおいて福島沖でスロースリップが繰り返し発生する結果が得られ、これがはがれの原因である可能性がある。繰り返し発生するのは、浅部の強アスペリティで十分応力蓄積するまで超巨大地震が発生しないからであり、両モデルにおいてスロースリップの発生が超巨大地震直前の準備段階の一部であるとはいえない。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 地震サイクル, 福島沖

Keywords: Tohoku earthquake, cycle, Off-Fukushima