

## 2011年東北地方太平洋沖地震から発生した気圧波 Atmospheric pressure waves from the 2011 great off-Tohoku earthquake (Mw=9.0)

三雲 健<sup>1\*</sup>, \_\_\_\_\_<sup>2</sup>, 澁谷 拓郎<sup>3</sup>, 森井 亘<sup>4</sup>, 大川隆志<sup>5</sup>, 石原 靖<sup>6</sup>

MIKUMO, Takeshi<sup>1\*</sup>, Milton Garces<sup>2</sup>, SHIBUTANI, Takuo<sup>3</sup>, Wataru Morii<sup>4</sup>, Takashi Okawa<sup>5</sup>, ISHIHARA, Yasushi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 京都大学, <sup>2</sup> ハワイ大学, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所, <sup>5</sup> 気象庁精密地震観測室, <sup>6</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>Infrasound Lab., University of Hawaii, <sup>3</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>4</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>5</sup>Seismological Observatory, JMA, <sup>6</sup>IFREE, JAMSTEC

Atmospheric pressure waves were recorded within several hours after the great off-Tohoku earthquake by sensitive microbarographs not only at several stations on and around the Japanese Islands, but also at 9 International Monitoring System (IMS) stations in the distance range between 1,000 and 6,500 km. Some of the near-field observations have been interpreted as non-dispersive boundary waves propagated along the bottom boundary of the atmosphere (Arai, et al., 2011). In addition to these, characteristic waveforms with two strong pulses can be identified at 3 other Japanese near-field stations, which are supposed to come from two stages separated within several minutes in tectonic vertical deformation on the sea-floor. The far-field observations including those at stations in Alaska, Hawaii, Palau, Australia, Far East Russia, Mongolia, Central Asia, and Greenland, indicate weak dispersive wave trains involving low frequencies between 1.5 and 3.3 mHz (or periods from 11 to 5 min) with a group velocity between 346 and 376 m/s and amplitudes ranging between 0.5 to 3 Pa, depending on their locations. For these reasons, these low-frequency waves may be interpreted as acoustic-gravity waves excited by swelling and depression of the sea surface due to vertical sea-floor deformation, and propagating through the lower to middle atmosphere, as in the cases of the 1964 Alaskan and 2004 Sumatra-Andaman earthquakes. Assuming various source parameters, we calculate synthetic waveforms for several far-field stations by incorporating a realistic, standard thermal structure in the atmosphere up to an altitude of 220 km, and then compare them with the corresponding observations. The comparison provides estimates of possible ranges for the effective source dimension generating these atmospheric pressure waves, average uplift and subsidence of the sea-floor and their time constants.

We expect that the results may become further information independent from seismic, geodetic, and tsunami observations, to the source characteristics of this great earthquake.

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 気圧波

Keywords: 2011 off-Tohoku earthquake, Atmospheric pressure waves, near-field observations, far-field observations

## 2011年東北沖地震の弾性反発過程

### The elastic rebound process of the 2011 great Tohoku-Oki earthquake

深尾 良夫<sup>1\*</sup>, 堀 高峰<sup>1</sup>, 小平秀一<sup>1</sup>

FUKAO, Yoshio<sup>1\*</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup>IFREE/JAMSTEC

2011年東北沖地震においては、太平洋プレートの引きずりこみに対して上盤プレート（ウエッジ）が異常に大きく弾性反発した。この上盤ウエッジは、地震活動の活発な内側（陸側）セグメントと不活発な外側（海側）セグメントとからなる。今回の巨大地震がユニークなのは、普段は不活発な外側セグメントが異様に大きく弾性反発したことである。本講演では、この外側セグメントが比較的急に傾斜した海底と非常に低角なプレート境界面とで特徴付けられることを重視した弾性反発モデルを提案する。このモデルによれば、ウエッジの底面に働く引きずり応力を減少させるにつれて、ウエッジ内部では最初の水平圧縮状態から次第に差応力が減少していく。遂に差応力最小状態に達すると、ウエッジ内部は水平伸長状態に転じ差応力も増加に転ずる。即ち、底面に摩擦が働かない状態では上盤プレート内は水平伸長場にある。不活発な地震活動や正断層の卓越した反射構造イメージからは、地震サイクルスケールで均せば外側セグメントは差応力最小状態からやや水平伸長の状態にあること、従って水平圧縮場にある内側セグメントとは強く固着したセグメント境界を隔ててデカップルしていることが示唆される。2011年地震のときには、固着していたセグメント境界がはがれて外側セグメントに突然大きな負荷がかかり、それが外側セグメントの大きな滑りをもたらしたと考えられる。これに応じて外側セグメント内は、弱い水平伸長場から突然、強い水平圧縮場、最小差応力場、強い水平伸長場へと変化し、その影響は固着のはがれたセグメント境界を通して内側セグメント内にも伝わった。

以上、外側セグメントの独特の性質は、東北沖地震の弾性反発過程全体をも規定するものであった。

## 2011年東北地方太平洋沖地震に先行した地球潮汐による地震誘発現象とその特徴 Tidal triggering of earthquakes preceding the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

田中 佐千子<sup>1\*</sup>, 浅野 陽一<sup>1</sup>TANAKA, Sachiko<sup>1\*</sup>, ASANO, Youichi<sup>1</sup><sup>1</sup> 防災科研<sup>1</sup>NIED

大地震の発生に関連し、その震源域近傍で、本震発生に先立つ数年間に地球潮汐による地震誘発現象が顕著となる事例が報告されている (Tanaka et al., 2002a; Tanaka, 2010)。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.1) については、Mw 5.0以上のグローバルCMT解の解析から、本震発生直前の約10年間に、本震の震央を含む震源域北側の領域で、地球潮汐と地震発生との間に明瞭な相関が現れていたことが明らかになっている (田中, 2011)。本研究では、高感度・広帯域地震観測網を利用して高精度に推定したCMT解を用い、地震誘発現象の時空間変化とその特徴をより詳細に調査した。

用いた地震データは、防災科学技術研究所広帯域地震観測網 (F-net) の広帯域速度計及び高感度地震観測網 (Hi-net) に併設された高感度加速度計の記録を用いて得られたCMT解 (Asano et al., 2011) で、2003年6月から2011年10月までに発生したMw 4.0以上の地震2330個である。地球潮汐による応力変化は、Tanaka et al. (2002b)の方法に従い、海洋荷重の効果も含めて理論的に計算した。計算した理論地球潮汐から地震発生時刻の潮汐位相角を読み取り、Schuster (1897)の方法を用いて位相選択性の有無を検定した。この検定で得られるp値は帰無仮説「地震発生は地球潮汐の位相角によらない」を棄却する危険率を表す。

太平洋沖地震前の約8年間について、断層面上の剪断応力に対するp値の空間分布を調べた結果、いずれもp値の値は大きく、地球潮汐と地震発生との間に有意な相関は確認されなかった。しかし、マグニチュードの下限値を大きくすると、本震破壊域の北側部でp値の小さい領域が現れることが明らかになった。5%以下のp値は下限値を4.3以上とした場合に得られる。最も小さいp値 (0.19%) が確認されたのは下限値を4.8としたときで、本震の震央を取り囲む200km四方の領域 (領域A) に対応する。このとき、潮汐位相角はすべり方向の剪断応力が最大となる0度付近に集中する。領域Aについてp値の時間変化を調べた結果、本震発生に至るまで徐々に低下する傾向を示すことが明らかになった。今回調査した期間では、いずれも5%以下の値をとり、2003年以降、地球潮汐の影響は強まりながら、継続して存在していたことが示唆される。太平洋沖地震発生後の期間では、p値は50%と高い値をとり、地球潮汐の影響は消滅している。

同様の調査をプレート境界型の地震に限って行ったところ、時空間変化の特徴に明瞭な差異は確認されなかったが、太平洋沖地震前のp値は、全ての地震を用いた場合に比べて小さくなる傾向を示すことが明らかになった。プレート境界型の地震は、Asano et al. (2011)に従い、プレート境界面から深さ20km以内の逆断層型の地震で、走向195度、傾斜角13度、すべり角90度のダブルカップル解との最小回転角 (Kagan角) が35度以内のものとした。マグニチュードの下限値を4.8とした場合に領域Aで得られたp値は0.08%である。

プレート境界型の地震について、西側傾斜の節面を断層面とし、法線応力及びクーロン応力の影響も調査した。この調査では、領域Aにおいて太平洋沖地震前の期間に発生した地震に注目し、マグニチュードの下限値は4.8とした。法線応力に対するp値は1.1%で、剪断応力と比べて大きい値が得られた。また、地震は圧縮応力が最大となる位相角±180度付近に集中しており、すべりを抑制する位相角に対応する。摩擦係数を変化させながら、クーロン応力に対してp値を求めた結果、摩擦係数の値が小さいほどp値は小さく、摩擦係数0 (剪断応力のみ) の場合に最も小さいp値が得られた。この地域の地震発生において、剪断応力成分が支配的な役割を果たしていることが示唆される。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 地球潮汐, 地震誘発現象, 先行現象

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, earth tide, earthquake triggering, precursor

## 2011年東北地方太平洋沖地震：震源断層の地震学的イメージ Seismic image of coseismic fault extending from the hypocenter to the trench axis by the 2011 Tohoku-oki earthquake

小平 秀一<sup>1\*</sup>, 野 徹雄<sup>1</sup>, 中村 恭之<sup>1</sup>, 富士原 敏也<sup>1</sup>, 海宝 由佳<sup>1</sup>, 高橋 成実<sup>1</sup>, 金田 義行<sup>1</sup>

KODAIRA, Shuichi<sup>1\*</sup>, NO, Tetsuo<sup>1</sup>, NAKAMURA, Yasuyuki<sup>1</sup>, FUJIWARA, Toshiya<sup>1</sup>, KAIHO, Yuka<sup>1</sup>, TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>, KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The large tsunami followed the 2011 Tohoku-oki Earthquake is believed to be caused by a fault rupture extending from around 20 km deep at the plate boundary to a shallow part of the subduction zone at the Japan Trench, on the basis of seismic wave, tsunami and geodetic data. Those observations may indicate a need to revise a conceptual model of a subduction seismogenic zone which proposed a shallow part of subduction zone is aseismic slip zone. In order to examine a coseismic fault between the hypocenter and the trench axis, we processed seismic and bathymetry data acquired during a rapid response geophysical cruise soon after the earthquake, from 14th to 30th March in 2011, by using JAMSTEC R/V Kaire. From the seismic image, the plate interface can be traced down to around 20 km deep where the fault rupture was initiated. The angle of the plate interface seems to become low from the up-dip of the hypocenter at around 15 km deep. This variation of subduction angle is consistent with a seismic velocity image previously obtained by wide-angle OBS data. The seismic image of the up-dip end is characterized by a reflective zone slightly above the oceanic crust and a wedge-shaped structure which called a frontal prism. A weak reflector slightly above oceanic crust at the base of the frontal prism can be traced to the trench axis. In addition, comparing the seismic image of the trench-filled sediment obtained before and after the earthquake shows a seismological evidence of a co-seismic fault rupture extending along the plate boundary to the seafloor at the trench; i.e., the seismic image of the trench-filled sediment after the earthquake shows a compressional structure with several reverse faults branching from the master fault which reaches the trench axis. This result shows that a shallow part of a plate interface can be a seismic slip zone and that slip to the trench along the plate boundary is a cause of a large tsunami.

Keywords: Tohoku-oki earthquake, seismic image, fault, trench axis

## 海底地震観測による2011年東北地方太平洋沖地震の震源近傍の地震活動 Hypocenter distribution around the 2011 Tohoku-Oki earthquake by using Ocean Bottom Seismographic data

鈴木 健介<sup>1\*</sup>, 日野亮太<sup>1</sup>, 伊藤喜宏<sup>1</sup>, 山本揚二郎<sup>2</sup>, 鈴木秀市<sup>1</sup>, 藤本博己<sup>1</sup>, 篠原雅尚<sup>3</sup>, 阿部正雄<sup>4</sup>, 河原田義春<sup>4</sup>, 長谷川洋平<sup>4</sup>, 金田義行<sup>2</sup>

SUZUKI, Kensuke<sup>1\*</sup>, HINO Ryota<sup>1</sup>, ITO Yoshihiro<sup>1</sup>, YAMAMOTO Yojiro<sup>2</sup>, SUZUKI Syuichi<sup>1</sup>, Fujimoto Hiromi<sup>1</sup>, SHINOHARA Masanao<sup>3</sup>, ABE Masao<sup>4</sup>, KAWAHARADA Yoshiharu<sup>4</sup>, HASEGAWA Yohei<sup>4</sup>, KANEDA Yoshiyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所, <sup>4</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>4</sup>Japan Meteorological Agency

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の破壊開始点かつ主破壊域の1つである宮城県沖は約40年周期でM7.5程度のプレート境界型地震が繰り返し発生する領域と考えられていた。2002年以降、我々は宮城県沖において海底地震計(Ocean Bottom Seismometer: OBS)の設置・回収を繰り返すことによって連続的な海底地震観測網を構築してきた。連続的な海底地震観測によって、前震、本震、余震といった一連の地震活動を本震震源近傍で捉えることができた。この海底地震観測によって海溝型地震の発生メカニズムを考える上で重要となる地震活動の時空間変化および構造との比較といった詳細な議論が可能な震源分布を得ることができる。

Suzuki et al. (2011)は、本震の発生時前後に本震の破壊開始点近傍を含んだ領域において設置されていたOBSと陸上観測点のデータを併合処理し、宮城県沖において詳細な震源分布を推定をおこなった。しかし、本震発生後、余震活動が活発であるためにデータ量が膨大となり小地震のデータ処理が難しく、余震についてはM3.5以上の地震のみを再決定の対象にしている。そこで、我々は、M3.5以下の地震のデータを彼らの用いたデータに加えて震源の再決定をおこなった。OBSに記録された波形から読み取られた到達時刻には堆積層補正を施したデータを用いて、一次元地震波速度構造において震源決定をおこなった。この震源を初期震源として宮城県沖において得られている三次元地震波速度構造(Yamamoto et al., 2011)を用いて再決定をおこなった。

本震は気象庁によって推定されている震央よりもやや陸側に再決定され、沈み込むプレート境界と上盤側のモホ面とが交差している近傍に位置する。本震よりも海溝軸よりであり、海洋性地殻が大陸性地殻と接触しているプレート境界近傍において活発な前震活動が発生している。この前震活動は、宮城県沖におけるプレート境界型地震の活動域の上端付近で始まり、本震2日前に発生した最大前震(M7.3)後に急激に活発化するとともに本震へ向けての震央の移動が見られる。本震の発生を境に震源深さ分布に大きな変化がみとれる。本震の地震時すべりが大きな領域においては、ほとんどプレート境界型地震は発生していない。一方、上盤・下盤側のプレート内において本震発生前にはほとんどみられなかった地震活動が発生している。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 海底地震観測, 震源分布, 前震, 余震

Keywords: Tohoku-Oki earthquake, OBS, hypocenter distribution, foreshock, aftershock

## 有限要素法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震による地殻内変形 Finite element analysis for modeling the crustal deformation caused by the 2011 Tohoku-Oki earthquake

伊藤 喜宏<sup>1\*</sup>, 芝崎 文一郎<sup>2</sup>, 柄谷和輝<sup>3</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 中島 淳一<sup>1</sup>

ITO, Yoshihiro<sup>1\*</sup>, SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>2</sup>, Kazuteru Garatani<sup>3</sup>, HINO, Ryota<sup>1</sup>, NAKAJIMA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 建築研究所, <sup>3</sup> 伊藤忠テクノソリューションズ

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Building Research Institute, <sup>3</sup>ITOCHU Techno-Solutions Corporation

We performed a finite element analysis for constructing a two-dimensional model of the deformation due to the 2011 Tohoku-Oki earthquake, taking into account the realistic subsurface structure and topography. We used a finite element code developed using GeoFEM. The two-dimensional cross section considered in the finite element analysis was perpendicular to the Japan Trench. This profile also transects an area of huge coseismic slip with the slip magnitude exceeding 60 m. Two-dimensional model of the crust, mantle wedge structures, and subducting slab geometry were developed on the basis of an offshore seismic reflection survey (Ito et al., 2005) and high-precision seismic tomography profile of the crust, mantle wedge structures, and subducting slab in this region (Nakajima et al., 2009). Rock density in each mesh is calculated from the P-wave velocity using the laboratory measurements of P-wave velocity and density reported by Ludwig et al. (1970). Assuming  $V_p/V_s$  ratios of 2.20, 1.90, 1.73, and 1.76 in the frontal prism, oceanic crust, continental crust, and mantle, respectively, we calculated their Poisson ratio and Young's modulus. First, we calculate the crustal deformation assuming a uniform slip model, following Ito et al. (2011). In this model, the updip of the fault reached the trench and the downdip was 80 km away from the trench; the slip magnitude was 80 m uniformly. The numerical results show an uplift of 8 m and a displacement of 75 m at a point 20 km away from the trench; however, the observed values of the uplift and displacement at this point were 5 m and 60 m, respectively. One of the reasons of this discrepancy was the difference between fault geometries; Ito et al. (2011) considered simple fault geometry with a constant slope angle of  $3^\circ$ , while our model adopts realistic curved fault geometry, taking into consideration the upper surface of the subducting plate. The other reason is the difference between the elasticity values of the frontal wedge and subducting plate; the vertical displacement increases by 10 percents near the trench if we assume homogeneous elasticity within the whole region. In future, we will develop a suitable model that can simulate crustal deformation consistent with the displacement as obtained by ocean-bottom as well as on-shore observations.

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 有限要素法, 海底観測, 地震時すべり

Keywords: The 2011 Tohoku-Oki earthquake, Finite element analysis, Ocean-bottom observation, Coseismic slip

## 海底圧力計が捉えた3月9日2011年東北地方太平洋沖地震前震による津波 Tsunami source model of the largest foreshock on March 9th of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

久保田 達矢<sup>1\*</sup>, 稲津 大祐<sup>1</sup>, 伊藤 喜宏<sup>1</sup>, 鈴木 秀市<sup>1</sup>, 齊藤 竜彦<sup>2</sup>, 鈴木 健介<sup>1</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>

KUBOTA, Tatsuya<sup>1\*</sup>, INAZU, Daisuke<sup>1</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>1</sup>, SUZUKI, Syuichi<sup>1</sup>, SAITO, Tatsuhiko<sup>2</sup>, SUZUKI, Kensuke<sup>1</sup>, HINO, Ryota<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

2011年3月9日、宮城県沖を震源とする Mjma7.3 の地震が起こった。地震発生時、東北大学では震源域直上に8台の海底圧力計を設置しており、この地震による津波および海底上下変動が捉えられた。圧力計が記録された津波の最大振幅は15cm程度であり、最大10cm程度の海底上下変動が捉えられた。

この地震は3月11日の東北地方太平洋沖地震の前震とされているが、前震のすべり分布を求め本心との関連を調べることは、本震発生に至る過程を知る手がかりを与えるものと期待される。そのため、前震の震源域にすべり量一定の矩形断層を仮定し津波のフォワード計算を行った。観測波形と計算波形のピークの到達時刻が合うように試行錯誤的に矩形断層の位置と大きさと変えた結果、地震波から求められたすべり分布 (Shao et al., 2011, GRL) 域とほぼ同位置に幅30km、長さ50kmの矩形断層を仮定した場合に津波の到達時刻はよく一致した。また、この仮定した矩形断層から地震モーメントを求めたところ  $M_0 = 8.3 \times 10^{19} \text{Nm}$  となり、マグニチュードに換算すると Mw7.2 となった。

今後は津波の波形について、単純な矩形断層ではなくインバージョンを行いより詳細なすべり分布を推定し、考察を行う。

キーワード: 津波, 2011年東北地方太平洋沖地震, 断層モデリング, 海底圧力計, 前震

Keywords: Tsunami, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Fault model, Ocean bottom pressure gauges, The largest foreshock

## 地震波トモグラフィーから見た2011年東北沖巨大地震系列の発生機構 Tomography of the Northeast Japan arc and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake sequence

趙 大鵬<sup>1\*</sup>

ZHAO, Dapeng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Tohoku University

We have investigated the detailed 3-D seismic structure of the crust and upper mantle under the NE Japan arc and its implications for the mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) sequence. Significant structural heterogeneities are revealed in the interplate megathrust zone under the NE Japan forearc. Three low-velocity (low-V) anomalies exist off Sanriku, off Fukushima and off Ibaraki. There is a correlation between the velocity variation and the distribution of large thrust-type earthquakes ( $M \geq 6.0$ ) that occurred from 1900 to 2011, including the major foreshock, mainshock and aftershocks of the 2011 Tohoku-oki earthquake. The low-V patches in the megathrust zone may contain subducted sediments and fluids associated with slab dehydration, thus the subducting Pacific plate and the overriding continental plate may become weakly coupled or even decoupled in the low-V areas. In contrast, the high-velocity (high-V) patches in the megathrust zone may result from subducted oceanic ridges, seamounts and other topographic highs on the Pacific seafloor that become asperities where the subducting Pacific plate and the overriding continental plate are strongly coupled. Thus tectonic stress tends to accumulate in these high-V areas for a relatively long time during subduction, leading to the nucleation of large and great earthquakes in those areas. The off-Miyagi high-V zone, where the Tohoku-oki mainshock and its largest foreshock occurred, corresponds to the area with large coseismic slip ( $> 25$  m) during the Tohoku-oki mainshock. This indicates that the off-Miyagi high-V zone is a large asperity (or a cluster of asperities) in the megathrust zone that ruptured during the Tohoku-oki mainshock.

High-resolution tomographic images of the crust and upper mantle in and around the area of the 2011 Iwaki earthquake (M 7.0) and the Fukushima nuclear power plant are determined by inverting a large number of high-quality arrival times with both the finite-frequency and ray tomography methods. The Iwaki earthquake and its aftershocks mainly occurred in a boundary zone with strong variations in seismic velocity and Poisson's ratio. Prominent low-velocity and high Poisson's ratio anomalies are revealed under the Iwaki source area and the Futaba fault zone, which may reflect fluids released from the dehydration of the subducting Pacific slab under NE Japan. The 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) caused static stress transfer in the overriding Okhotsk plate, resulting in the seismicity in the Iwaki source area that significantly increased immediately following the Tohoku-oki mainshock. This result suggests that the Iwaki earthquake was triggered by the ascending fluids from the Pacific slab dehydration and the stress variation induced by the Tohoku-oki mainshock. The similar structures under the Iwaki source area and the Futaba fault zone that is close to the Fukushima nuclear power plant suggest that the security of the nuclear power plant site should be strengthened to withstand potential large earthquakes in the future.

These results indicate that the rupture nucleations of the large events in the 2011 Tohoku-oki earthquake sequence, including the mainshock and major foreshocks and aftershocks, were controlled by the structural heterogeneities in the interplate megathrust zone and the over-riding continental plate.

キーワード: 巨大地震, スラブ, 流体, 活断層, トモグラフィー

Keywords: Great earthquakes, slab, fluids, active faults, seismic tomography



## 2011年東北地方太平洋沖地震の動的破壊の始まり Initiation of the dynamic rupture of the 2011 Tohoku earthquake

内出 崇彦<sup>1\*</sup>  
UCHIDE, Takahiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

2011年東北地方太平洋沖地震は浅部における40m以上と推定される断層すべりが特徴的で、それが巨大な津波を生み出し、甚大な災害を引き起こした。この地震の発生の理解のためには、応力蓄積のメカニズムと地震時の破壊過程を解明することが求められる。本研究では、浅部巨大すべりを引き起こす直前の過程である、破壊過程の初期段階に着目した。これについては既にいくつかの研究が行われている。Chu et al. (2011) は、初めの4秒間の地震波形を用いたCMTインバージョンによって、初めの4秒間の破壊過程がMw 4.9の逆断層イベントと等価であることを示した。Uchide et al (AGU, 2011) は、マルチスケール断層すべりインバージョン解析 (Uchide and Ide, 2007) によって初めの20秒間の破壊過程の詳細を調べ、初めの8秒間は破壊が東向きに伝播するのに対し、その後では西向きに伝播するという様子を明らかにした。断層すべり速度は1 m/s に達し、動的破壊過程が起こっているということを示唆している。

東北地方のHi-net観測点では、地動速度の振幅が段階的に大きくなっている様子がわかった。Hi-netのデータは20秒程度までは、どの点でも振り切れていない。また、震源-観測点距離が十分に遠いため、震源からS波として放射された波は入っておらず、解析には使いやすい。地動速度が段階的に上がるのは、初動のP波到達後、4秒程度と16秒程度である。初めの1秒間の速度振幅は、本震の近くで発生したM4程度 (Mw 4.3 - 4.9) の地震のものと同程度である。M4の地震を用いたデコンボリューション解析では、初めの0.5秒程度に小さなイベントが検出された。

講演では、マルチスケール断層すべりインバージョン解析の結果や、それと2011年3月9日に発生したM7.3の前震から本震に至るまでの地震活動 (Ando and Imanishi, 2011) との比較を合わせて報告する。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 初期破壊過程, 地震波解析, マルチスケール断層すべりインバージョン解析  
Keywords: The 2011 Tohoku earthquake, Initial Rupture Process, Seismic Data Analysis, Multiscale Slip Inversion Analysis

## 1HzGPS データに基づく東北地方太平洋沖地震の初期の破壊過程への拘束 Constraints on early stage rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake from 1 Hz GPS data

深畑 幸俊<sup>1\*</sup>, 八木 勇治<sup>2</sup>, 宮崎 真一<sup>3</sup>

FUKAHATA, Yukitoshi<sup>1\*</sup>, YAGI, Yuji<sup>2</sup>, MIYAZAKI, Shin'ichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 筑波大学大学院 生命環境科学研究科, <sup>3</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>2</sup>Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, <sup>3</sup>Graduate school of Science, Kyoto University

From the comparison of observed 1 Hz GPS data with simple forward computation that evaluates near and intermediate field terms, we put constraints on the early stage rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake. Mainly based on the time difference in the onset of large eastward displacements at stations along the northern coast of the source region, we estimated that the first significant moment release started around 35 km west of the hypocenter determined by JMA. The moment release continues about from 20 s to 35 s after the initiation of the earthquake. Significant moment release around the hypocenter and in the near-trench region starts from 25 s and 35 s at earliest, respectively. Clear opposite motion that follows large eastward displacement observed at many stations is due to the intermediate S-wave term.

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 1HzGPS, 破壊過程, 近地項, 中間項

Keywords: 2011 Tohoku-oki earthquake, 1 Hz GPS, rupture process, near field term, intermediate term

## 遠地実体波解析から得られた2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程 Seismic Source Process of the 2011 Tohoku-oki Earthquake retrieved from tele-seismic body waveform

八木 勇治<sup>1\*</sup>, 中尾 篤史<sup>1</sup>  
YAGI, Yuji<sup>1\*</sup>, NAKAO, Atsushi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学

<sup>1</sup> Univ. of Tsukuba

2011年東北地方太平洋沖地震は、多くの研究者によって解析されているが、得られた震源過程モデルは解析者によって大きく異なり、本地震の震源過程の理解を妨げている。本研究では、グリーン関数の不確定性を考慮した震源インバージョンを用いて得られた断層滑りの時空間分布と、新たに開発した反射波の情報も利用するバックプロジェクション法で得られた波源分布を比較することによって、本地震の震源過程の特徴について議論する。

一般に、震源が浅い逆断層型地震の場合、従来のバックプロジェクション法では、P波より振幅が大きいsP波の影響を強く受けたイメージが得られることになる。本研究では、反射波の影響を軽減するだけでなく、反射波の情報を積極的に利用するバックプロジェクション法を開発した。具体的には、観測波形と、断層面上の各点のグリーン関数の相互相関関数を求め、次に、相互相関関数をスタックし、断層面上の各点におけるエネルギーの放出に関する関数を求める。この新しい手法をGSNとFDSNで観測された遠地実体波に適用した結果、従来の手法より明瞭な波源の分布を得ることができた(中尾・八木, 2012)。

得られた波源域とすべり量分布の時間変化(Yagi & Fukahata, 2011, GRL)とを比較すると、震源時から50秒までに、破壊域が震源の東西へと広がってゆくという点で、両者はよく一致する。特に、波形インバージョンから得られた海溝付近の大すべり領域の狭い領域で、地震開始後35秒から50秒までの間に大きな地震波が放出されていることが明らかになった。本領域は、50秒後には地震波をあまり放出しないが、その後もズルズルと滑り続ける。つまり、断層滑りが急加速した後、大きな地震波を励起すること無くズルズルと滑り続けていることを示す。この結果は、この海溝付近で摩擦熱等による間隙水圧の上昇などが原因で極端な強度弱が発生することにより、海溝付近で大きな断層すべり速度を伴うイベントが発生し、その後周辺に大破壊が伝播し、結果としてM9クラスの地震に発展したことを示唆する。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 震源過程, バックプロジェクション

Keywords: the 2011 Tohoku-oki Earthquake, Seismic Source Process, back-projection

## Source model of the 2011 great Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data Source model of the 2011 great Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data

Aditya Gusman<sup>1\*</sup>, Yuichiro Tanioka<sup>1</sup>, Shinichi Sakai<sup>2</sup>, Hiroaki Tsushima<sup>3</sup>  
GUSMAN, Aditya<sup>1\*</sup>, Yuichiro Tanioka<sup>1</sup>, Shinichi Sakai<sup>2</sup>, Hiroaki Tsushima<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>3</sup>Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>3</sup>Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

The slip distribution of the 11 March 2011 Tohoku earthquake is inferred from tsunami waveforms, GPS data, and seafloor crustal deformation data. The major slip region extends all the way to the trench, and the large slip area extends 250 km long and 160 km wide. The largest slip of 44 m is located up-dip of the hypocenter. The large slip amount, about 41 m, ruptured the plate interface near the trench. The seismic moment calculated from the estimated slip distribution is  $5.5 \times 10^{22}$  N m (Mw 9.1). The large tsunami due to the 2011 Tohoku earthquake is generated from those large slip areas near the trench. The additional uplift at the sedimentary wedge as suggested for the 1896 Sanriku earthquake may have occurred during the 2011 Tohoku earthquake, too.

キーワード: tsunami waveforms, GPS data, seafloor crustal deformation data, the 2011 Tohoku earthquake  
Keywords: tsunami waveforms, GPS data, seafloor crustal deformation data, the 2011 Tohoku earthquake

## 2.5次元差分法グリーン関数を用いた2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程解析 Rupture process analysis of the 2011 Tohoku-Oki earthquake using 2.5D finite-difference Green's functions

岡元 太郎<sup>1\*</sup>, 竹中 博士<sup>2</sup>, 原 辰彦<sup>3</sup>

OKAMOTO, Taro<sup>1\*</sup>, TAKENAKA, Hiroshi<sup>2</sup>, HARA, Tatsuhiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> 九州大学, <sup>3</sup> 建築研究所

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Kyushu University, <sup>3</sup>Building Research Institute

The March 11, 2011 Tohoku-Oki earthquake (GCMT Mw9.1) generated strong shaking reaching the maximum intensity (seven) on the JMA's scale and caused devastating tsunamis with run-up heights exceeding 30 m. Such ultra-large-sized earthquake of magnitude 9 was not expected to occur along the plate interface off the northeastern Japan. Thus it is very important to infer the rupture process of this event for understanding the geophysical condition of the generation of magnitude-9-class earthquake and the mechanism of the excitation of the large tsunamis.

We present the rupture process analysis of the 2011 Tohoku-Oki earthquake by using a non-linear teleseismic body waveform inversion method [1]. We incorporate the effect of the near-source laterally heterogeneous structure (including the ocean layer and sediments) on the waveforms by using a 2.5-dimensional finite difference method [2]. This is because the structural effect can lead to improper solutions if the effect is not considered (e.g., a flat layered structure is used) in generating the synthetic waveforms [1]. We use thirty one P-waveforms (vertical component of displacement) within the epicentral distance range from 30 degree to 90 degree. We remove the instrumental response from the raw-data and apply a bandpass-filter with corner frequencies of 0.2 Hz and 0.004 Hz (5 s to 250 s). The final sampling rate is 2 s.

The preliminary analysis by using the finite-difference Green's functions results in a heterogeneous rupture process with large slips off Miyagi prefecture, near and around the JMA epicenter. The maximum slip is about 45 m, and the moment magnitude is about 4.1e22 Nm (Mw 9.0). The results (large slips near the epicenter) is similar to that obtained by a joint inversion [3]. We will further discuss the differences in the solutions for different Green's functions: we will compare the results obtained by using the finite-difference Green's functions and those by using Green's functions computed for flat-layered near source structure model.

[1] Okamoto and Takenaka, Earth Planets Space, 61, e17-e20, 2009.

[2] Takenaka and Okamoto, in Seismic Waves, Research and Analysis, ed. Kanao Masaki, 305-326, Intech, 2012. (<http://www.intechopen.com/books/show/title/seismic-waves-research-and-analysis>)

[3] Koketsu et al., Earth Planet. Sci. Lett., 310, 480-487, 2011.

Keywords: 2011 Tohoku-oki earthquake, rupture process, waveform inversion, teleseismic wave, 2.5D finite-difference

## 東北地方太平洋沖地震における高周波地震波の輻射過程と主要すべりとの関係 Shallow high-frequency seismic radiation during the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Japan

熊谷 博之<sup>1\*</sup>, プリード ネルソン<sup>1</sup>, 福山 英一<sup>1</sup>, 青井 真<sup>1</sup>

KUMAGAI, Hiroyuki<sup>1\*</sup>, PULIDO, Nelson<sup>1</sup>, FUKUYAMA, Eiichi<sup>1</sup>, AOI, Shin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科研

<sup>1</sup>NIED

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の震源過程をKiK-netの高周波強震波形を用いて解析した。Kumagai et al. (2010)による高周波振幅を用いた手法を用いた震源決定を行った結果、地震の観測点が陸にしかない偏った観測点配置においては、見掛け上の震源が推定されることが数値実験の結果により分かった。本発表では、それら観測点配置による見掛け上の効果を抑えるアプローチを示すとともに、この新しいアプローチを用いた震源決定の結果を示す。さらに、F-netの強震計記録(周期50-170秒)のモーメントテンソルインバージョン結果(Kumagai et al., 2012)と比較することで、東北地方太平洋沖地震における高周波地震波の輻射過程と主要すべりとの関係を議論する。

### 2. 数値実験

Kumagai et al. (2010)の手法では、断層面上にグリッドノードを仮定し、それらのノードからS波の等方輻射を仮定した理論振幅と観測された高周波振幅のフィティングを行い、グリッドサーチにより最小残差点として震源を決定する。高周波では地震波の散乱により輻射分布が崩れ、等方的な振幅分布になると解釈されている。この手法において観測点が陸にしかない配置が、残差分布にどのような影響を及ぼすのかを調べるために数値実験を行った。S波の等方輻射を仮定し、リッカー波を用いて合成した各観測点での波形を用いて、上記の手法で残差分布を推定した結果、本来の入力点だけでなく、それ以外にも残差が見掛け上小さくなる領域が現れるが分かった。これらの見掛け上残差が小さい領域では、ノード点における振幅(初期振幅)が小さく求まる傾向があることが分かったため、初期振幅で重みをかけた残差を用いたところ、見掛け上の効果を抑えられることが分かった。

### 3. 結果

東北地方太平洋沖地震のKiK-netの高周波強震速度波形の5-10 Hzのエンベロープを用いて上記手法を適用したところ、初期振幅で重みをかけた残差分布では、日本海溝に近い浅部にのみ震源が推定され、約100秒の間に3つのイベントが検出された。最初の2つのイベントは約40秒の間隔で宮城県沖のほぼ同じ場所に震源が決まった。3つ目のイベントはそれらの南側(福島県沖)に震源が推定された。初期振幅の系列とF-netの強震波形によるインバージョンによる震源時間関数(Kumagai et al., 2012)を比較したところ、最初の高周波のイベントは、震源時間関数から推定される主要すべりよりも前に発生していた。さらに高周波の3つのイベントの震源の位置は、主要すべりの領域の南側にあることも分かった。

### 4. 議論

高周波の最初の2つのイベントがほぼ同じ位置に推定されたということは、これらが同じ面を破壊したとは考えにくく、この2つのイベントではプレート境界と派生断層(例えばバックストップ境界)といった違う面を破壊した可能性がある。Wendt et al. (2009)によるプレート境界と派生断層のシミュレーション結果や、高周波の最初のイベントが主要すべりよりも先に起こっていることを考慮すると、高周波の最初のイベントが派生断層を破壊し、その後プレート境界での主要すべりが発生した可能性が高い。さらに主要すべりに伴って高周波の第2イベントが主要すべりの南側のプレート境界で発生し、その後福島沖での高周波の第3イベントがトリガーされたと解釈できる。

### 引用文献

Kumagai, H., et al. (2010), Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches, *J. Geophys. Res.*, 115, B08303, doi:10.1029/2009JB006889.

Kumagai, H., N. Pulido, E. Fukuyama, and S. Aoi, Strong localized asperity of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Japan, *Earth*

# Japan Geoscience Union Meeting 2012

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

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS39-14

会場:国際会議室

時間:5月25日 15:30-15:45

Planets Space, 2012, in press.

Wendt, J., D. D. Oglesby, and E. Geist (2009), Tsunamis and splay fault dynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15303, doi: 10.1029/2009GL038295.

## 三次元グリーン関数を用いた2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程解析 Source process analysis of the 2011 Tohoku earthquake using the 3-D Green's functions

横田 裕輔<sup>1\*</sup>, 纈纈 一起<sup>1</sup>

YOKOTA, Yusuke<sup>1\*</sup>, KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2011年3月11日午後2時46分頃(JST)に発生した東北地方太平洋沖地震( $M_w \sim 9.0$ )は甚大な被害を発生させた。この地震に関しては、強震観測・遠地観測・地殻変動観測・津波観測によってさまざまなデータが得られており、それぞれのデータを用いてさまざまな震源モデルが提示されている。我々はYokota et al. [2011]において、強震波形・遠地波形・地殻変動・津波データのジョイントインバージョンにより震源過程を推定した。しかし我々の解析を含め、多くの解析では一次元的な速度構造を用いてグリーン関数を計算しており、プレートの沈み込み帯における三次元的な速度構造を反映していない。本発表では、三次元速度構造を用いて計算されたグリーン関数を用いた強震波形インバージョンによって、この地震の震源過程を再解析した結果を報告する。

三次元グリーン関数は、Koketsu et al. [2004], Ikegami et al. [2008]によって開発されたボクセル有限要素法を用いて計算した。速度構造には、JIVSMモデル[Koketsu et al., 2008]の三次元速度構造を使用した。Koketsu [1985]の手法によって計算された一次元グリーン関数と比較すると、特に日本海溝付近の小断層に対して得られた三次元グリーン関数には、多くの後続波が見られた。この後続波は海やプレート境界を長距離にわたって伝播することによって生成されたと考えられる。

このようにして得られた三次元グリーン関数を用いて強震波形インバージョンを行った。インバージョンにはHikima and Koketsu [2005]によって改良されたYoshida et al. [1996]の手法を用いた。三次元グリーン関数を用いた結果では、一次元グリーン関数を用いた結果に対して、すべり分布に違いが見られた。今後、他のデータに対しても同様の検討を実施する予定である。

謝辞

解析には防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net の観測データを使用させて頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 震源過程, 三次元速度構造, 強震動

Keywords: 2011 Tohoku earthquake, source process, 3-D velocity structure, strong motion



## Dynamic overshoot near the trench caused by a large asperity breaking at depth Dynamic overshoot near the trench caused by a large asperity breaking at depth

福山 英一<sup>1\*</sup>, Hok Sebastien<sup>2</sup>

FUKUYAMA, Eiichi<sup>1\*</sup>, HOK, Sebastien<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科研, <sup>2</sup>Ecole Normale Supérieure de Paris

<sup>1</sup>Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev., <sup>2</sup>Ecole Normale Supérieure de Paris

We investigated an earthquake generation model caused by subduction of a plate having a bumpy shaped interface geometry by a realistic numerical modeling of earthquake dynamic rupture. Bumpy shaped plate interfaces might be formed by subduction of old submarine volcanoes or seamounts. We assumed that during the inter-seismic period, slip only occurs outside the bump area and the stress is further accumulated inside the bump. Since we assumed a constant rate subduction as a long-term average, we could estimate roughly the amount of slip outside the bump during the inter-seismic period and then we could estimate the accumulated stress inside the bump. We constructed the initial stress distribution based on the stress change caused by the slip deficit distribution. We then constructed constitutive relations based on slip-weakening friction law. From the result of the computations, we found that large slip can occur between the free surface and the bump where very low stress is accumulated before the rupture. This is caused by the interaction between the free surface and the fault slip. At deeper side of the asperity, since the fault is sustained by the un-slipped zone, such slip overshoot never occurs. But at shallower side, when the rupture approaches the free surface, the fault becomes the un-sustained situation between the free surface and bump. In this region, such a large slip can occur without releasing large amount of stress. This idea could be applied for the interpretation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake where large amount of slip were observed at shallow depth near the trench.

キーワード: Dynamic rupture, Slip overshoot, Bumpy fault

Keywords: Dynamic rupture, Slip overshoot, Bumpy fault

動力学シミュレーションに基づいた東北地震の発生過程に関する1つのシナリオ: M7級地震による応力集中と間隙流体の摩擦発熱  
 A mechanical scenario for the occurrence of the Tohoku earthquake: stress concentration and thermal fluid pressurization

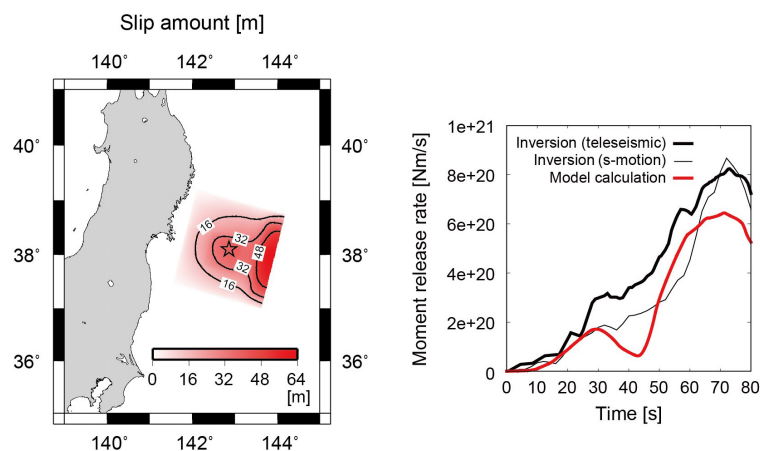
三井 雄太<sup>1\*</sup>, 飯尾 能久<sup>2</sup>, 深畑 幸俊<sup>2</sup>  
 MITSUI, Yuta<sup>1\*</sup>, IIO, Yoshihisa<sup>2</sup>, FUKAHATA, Yukitoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北大理, <sup>2</sup> 京大防災研  
<sup>1</sup>Sci. Hokkaido Univ., <sup>2</sup>DPRI, Kyoto Univ.

As a preliminary result, Mitsui and Iio (2011, EPS) proposed a scenario of the generation mechanism of the 2011 Tohoku earthquake on March 11, referring to geophysical observation data; the M7-class earthquake, which had occurred on March 9 after the active period of M7-class earthquakes and afterslip, might trigger the M9 Tohoku Earthquake through its afterslip. Similar scenarios had been also presented by several researches. Mitsui and Iio also implied that some mechanisms, such as thermal pressurization of pore fluid (TP) on the fault plane, caused extremely large slip in the northern part of the M9 fault to propagate the seismic rupture over the whole fault. On the basis of this way of thinking, Mitsui et al. (accepted, EPSL) modeled an M9 earthquake cycle, including M7-class earthquakes, with the TP mechanism near the trench. Although several different models for the generation process of the Tohoku earthquake had been proposed, our concept provides a good explanation for the occurrence of the Tohoku earthquake.

Moreover, here, we perform dynamic rupture simulations for better understanding the generation process of the 2011 Tohoku earthquake. We construct a fault model to assimilate the moment release in the seismic slip inversions. It also reflects the estimation of shear stress changes before the Tohoku earthquake, due to the four M7-class earthquakes during 2003-2011 (Iio and Matsuzawa, submitted). We assume a dynamic weakening mechanism of TP to represent nonlinear weakening friction. The simulation result implies the following things about the 2011 Tohoku earthquake. (1) The rupture around the hypocenter was enhanced by the stress accumulation due to the preceding M7-class earthquakes. (2) The enhanced rupture triggered the TP mechanism in the near-trench area to cause nearly total stress release, which promoted the rupture throughout a wide region including the source areas of the M7-class earthquakes and a surrounding conditionally stable area. (3) Without sufficient stress accumulation, the moment release of the Tohoku earthquake ended as an M8-class earthquake. (4) TP in the near-trench area should be effective but moderate (depending on the size of the TP area).

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 流体の熱的加圧, 応力集中, 動的破壊シミュレーション  
 Keywords: The 2011 Tohoku earthquake, thermal fluid pressurization, stress concentration, dynamic rupture simulation



## 高速摩擦挙動を考慮した東北地方太平洋沖地震の3次元発生サイクルモデル 先行するすべりと余効すべり

### 3D modeling of the cycle of a Tohoku-oki earthquake considering high-velocity friction: preceding and postseismic slips

芝崎 文一郎<sup>1\*</sup>, 堤 昭人<sup>2</sup>, 氏家 恒太郎<sup>3</sup>, 嶋本 利彦<sup>4</sup>, 伊藤 喜宏<sup>5</sup>

SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>1\*</sup>, TSUTSUMI, Akito<sup>2</sup>, UJIIE, Kohtarō<sup>3</sup>, SHIMAMOTO, Toshihiko<sup>4</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学系研究科, <sup>3</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科, <sup>4</sup> 中国国家地震局地質研究所, <sup>5</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>IISEE, Building Research Institute, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>University of Tsukuba, <sup>4</sup>China Earthquake Administration, <sup>5</sup>Tohoku University

The preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku-oki earthquake were investigated in detail by several authors. Suito et al. (2011) reported that preceding aseismic slips began occurring in the off Miyagi to off Ibaraki region in 2004, along with M7-class earthquakes. After the 2011 Tohoku-oki earthquake, postseismic slips occurred in an area where coseismic slips were not significant (Ozawa et al., 2012). The occurrences of preceding, coseismic and postseismic slips are controlled by friction properties. The present study investigates preceding and postseismic slips, by using the model developed by Shibazaki et al. (2011). They performed 3D quasi-dynamic modeling of the cycle of a megathrust earthquake in the offshore Tohoku region, Japan, using a rate- and state-dependent friction law with two state variables that exhibits strong velocity weakening at high slip velocities. They set several asperities where velocity weakening occurred at low to intermediate slip velocities. Outside the asperities, velocity strengthening occurred at low to intermediate slip velocities. At high slip velocities, strong velocity weakening with large displacements occurred both within and outside the asperities.

The results of numerical simulations showed that, before the occurrence of M9 class events, M7.5 class earthquakes occurred in the off Miyagi, Fukushima, and Ibaraki regions. Slip velocities increased significantly in the region surrounding strong asperities. M9 class earthquakes initiated around the strong asperities. Following the main event, postseismic slips occurred at the deeper part of the seismogenic zone. In the region that is located below the northern shallow rupture area of the simulated Tohoku-oki earthquake, large postseismic slips occurred. In the off Miyagi region, postseismic slips occurred in the deep area where coseismic slip was small. On the other hand, in the off Fukushima and off Ibaraki regions, small postseismic slips occurred in the region between asperities. The distribution of postseismic slips obtained by our simulation is roughly consistent with the observed actual distribution (Ozawa et al., 2012). In the present model, we set the velocity-strengthening region in the off Ibaraki region close to the Japan Trench. Therefore, significant postseismic slips occurred in the off Ibaraki region close to the trench. If the frictional property in this region is stable, large postseismic slips will be detected by the observation of ocean bottom crustal deformation.

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 3次元地震発生サイクルモデル, 高速摩擦, 先行するすべり, 余効すべり

Keywords: the 2011 Tohoku-oki earthquake, 3D earthquake cycle model, high-velocity friction, preceding slip, postseismic slip

## 日本海溝沿いのスーパーサイクルの同定とシミュレーション Identification and simulation of seismic supercycles along the Japan Trench including the 2011 Tohoku earthquake

瀧 一 起<sup>1\*</sup>, 横田 裕輔<sup>1</sup>, 加藤 尚之<sup>1</sup>, 加藤 照之<sup>1</sup>

KOKETSU, Kazuki<sup>1\*</sup>, YOKOTA, Yusuke<sup>1</sup>, KATO, Naoyuki<sup>1</sup>, KATO, Teruyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

太平洋プレートが東北地方の下に沈み込む地域において、M9.0の超巨大地震である東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）が2011年3月11日に発生した。国による地震ハザード評価（1995年兵庫県南部地震以降に政府がはじめた長期評価・地震動評価）はこの地震を予見することに失敗したが、その理由は超巨大地震のスーパーサイクルが日本海溝沿いにはこれまで同定されてこなかったからである。たとえば、このハザード評価ではM7から8の通常地震サイクルが宮城県沖の領域に同定され、次のM7地震の高い発生確率が報告されていただけであった。

日本政府は地震ハザード評価のプログラムとは別に、国土全体を覆うような高密度のGPS観測網を、やはり1995年兵庫県南部地震以降、構築してきた。この観測網から得られる東北地震以前の静穏期のデータを用いて、プレート間カップリングによる陸側プレートの引きずり込み、いわゆるバックスリップを算出することができる。得られたバックスリップ分布を東北地震の本震すべり分布と比較すると、両者はよく似ていることがわかった。バックスリップの大きな領域はこれまでM7から8の通常地震サイクルに関連があると考えられてきたが、この結果は大バックスリップ域が超巨大地震のスーパーサイクルに関連していることを示している。

宮城県沖の領域では本震時すべりとバックスリップから、本震時モーメント解放量と年間モーメント蓄積量がそれぞれ $15 \times 10^{21}$  Nm および  $0.04 \times 10^{21}$  Nm/year と見積もられる。また、ときどき起こる通常サイクルの地震も蓄積されたモーメントの一部を解放するので、こうした地震などをコンパイルして総計のモーメント解放量を計算すると  $5 \times 10^{21}$  Nm となった。以上のモーメント解放と年間モーメント蓄積量から、スーパーサイクルの周期は約500年と求まる。

しかし、869年貞観の地震が一回前の超巨大地震とすると、このスーパーサイクル周期は短過ぎる。コンパイルされた地震の中では、1611年慶長地震が貞観の地震と東北地震の間の隠れた候補だろう。この地震に対しては、非常に大きな津波被害があったことが古文書などに記載されている。869年からの時系列グラフを描いてみると、それが3つの超巨大地震でほとんど支配されていることがわかる。

次に、このように同定されたスーパーサイクルと通常サイクルの数値シミュレーションを実行した。高い effective normal stress と長い characteristic slip distance を伴った strong patch (asperity) をプレート境界の浅い部分に仮定する。この strong patch は、数百年周期でプレート境界全体を破壊するような超巨大地震の発生をコントロールしている。このモデルは東北地震の浅い部分のすべりと、深い部分のバックスリップや通常地震の繰り返しをよく説明している。

キーワード: 東北地震, 超巨大地震, スーパーサイクル, シミュレーション, バックスリップ

Keywords: Tohoku earthquake, megathrust earthquake, supercycle, simulation, back slip

## 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<sup>1\*</sup>YAMAMOTO, Kiyohiko<sup>1\*</sup><sup>1</sup> なし<sup>1</sup> 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、破砕帯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、 $\pi$  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、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、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<sup>1\*</sup>, 小林 励司<sup>1</sup>, 後藤 和彦<sup>2</sup>  
FUKUI, Miyo<sup>1\*</sup>, KOBAYASHI Reiji<sup>1</sup>, GOTO Kazuhiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学理学部地球環境科学科, <sup>2</sup> 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  
<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, <sup>2</sup>Nansei-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<sup>1\*</sup>

NIITSUMA, Nobuaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学部地球科学教室、仙台

<sup>1</sup>Institute 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<sup>1\*</sup>, 中村 武史<sup>1</sup>

TSUBOI, Seiji<sup>1\*</sup>, NAKAMURA, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

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/s<sup>2</sup>) 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<sup>1\*</sup>, 鈴木 秀市<sup>1</sup>, 久保田 達矢<sup>1</sup>, 伊藤 喜宏<sup>1</sup>, 藤本 博己<sup>1</sup>

HINO, Ryota<sup>1\*</sup>, SUZUKI, Syuichi<sup>1</sup>, KUBOTA, Tatsuya<sup>1</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>1</sup>, FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> 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<sup>1\*</sup>, 三浦 誠一<sup>1</sup>, 山下 幹也<sup>1</sup>, 野 徹雄<sup>1</sup>, 高橋 成実<sup>1</sup>, 小平 秀一<sup>1</sup>  
NAKAMURA, Yasuyuki<sup>1\*</sup>, MIURA, Seiichi<sup>1</sup>, YAMASHITA, Mikiya<sup>1</sup>, NO, Tetsuo<sup>1</sup>, TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>, KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

Since the great Tohoku earthquake occurred, we have conducted multichannel seismic surveys using tuned air gun array with large volume (7800 inch<sup>3</sup>) 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 inch<sup>3</sup>) 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.

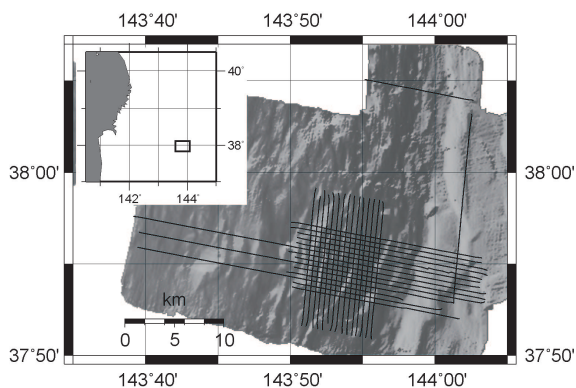


Fig. Survey lines of the high resolution MCS carried out during the KY11-E05 cruise.

## 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<sup>1\*</sup>, 篠原 雅尚<sup>1</sup>, 望月 公廣<sup>1</sup>, 山田 知朗<sup>1</sup>, 日野 亮太<sup>2</sup>, 佐藤 利典<sup>3</sup>, 植平 賢司<sup>4</sup>, 伊藤 喜宏<sup>2</sup>, 村井 芳夫<sup>5</sup>, 金沢 敏彦<sup>1</sup>

NAKAHIGASHI, Kazuo<sup>1\*</sup>, SHINOHARA, Masanao<sup>1</sup>, MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>1</sup>, YAMADA, Tomoaki<sup>1</sup>, HINO, Ryota<sup>2</sup>, SATO, Toshinori<sup>3</sup>, UEHIRA, Kenji<sup>4</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>2</sup>, MURAI, Yoshio<sup>5</sup>, KANAZAWA, Toshihiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 地震研究所, <sup>2</sup> 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, <sup>3</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>4</sup> 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, <sup>5</sup> 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

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, <sup>2</sup>RCPEV, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>4</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>5</sup>Institute 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<sup>1\*</sup>, 笠原 敬司<sup>1</sup>, 平田 直<sup>1</sup>, 阿部 進<sup>2</sup>, 加藤 政史<sup>2</sup>, 中川 茂樹<sup>1</sup>, 加藤 愛太郎<sup>1</sup>, 小原 一成<sup>1</sup>, 武田 哲也<sup>3</sup>

PANAYOTOPOULOS, Yannis<sup>1\*</sup>, KASAHARA, Keiji<sup>1</sup>, HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>, ABE, Susumu<sup>2</sup>, KATOU, Masafumi<sup>2</sup>, NAKAGAWA, Shigeki<sup>1</sup>, KATO, Aitaro<sup>1</sup>, OBARA, Kazushige<sup>1</sup>, TAKEDA, Tetsuya<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 地球科学総合研究所, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>JGI, Inc., <sup>3</sup>National 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<sup>1\*</sup>, 町田 祐弥<sup>1</sup>, 山田 知朗<sup>1</sup>, 中東 和夫<sup>1</sup>, 真保 敬<sup>1</sup>, 望月 公廣<sup>1</sup>, 村井 芳夫<sup>2</sup>, 日野 亮太<sup>3</sup>, 伊藤 喜宏<sup>3</sup>, 佐藤 利典<sup>4</sup>, 塩原 肇<sup>1</sup>, 植平 賢司<sup>5</sup>, 八木原 寛<sup>6</sup>, 尾鼻 浩一郎<sup>7</sup>, 高橋 成実<sup>7</sup>, 小平 秀一<sup>7</sup>, 平田 賢治<sup>8</sup>, 対馬 弘晃<sup>8</sup>, 岩崎 貴哉<sup>1</sup>  
SHINOHARA, Masanao<sup>1\*</sup>, MACHIDA, Yuya<sup>1</sup>, YAMADA, Tomoaki<sup>1</sup>, NAKAHIGASHI, Kazuo<sup>1</sup>, SHINBO, Takashi<sup>1</sup>, MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>1</sup>, MURAI, Yoshio<sup>2</sup>, HINO, Ryota<sup>3</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>3</sup>, SATO, Toshinori<sup>4</sup>, SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>, UEHIRA, Kenji<sup>5</sup>, YAKIWARA, Hiroshi<sup>6</sup>, OBANA, Koichiro<sup>7</sup>, TAKAHASHI, Narumi<sup>7</sup>, KODAIRA, Shuichi<sup>7</sup>, HIRATA, Kenji<sup>8</sup>, TSUSHIMA, Hiroaki<sup>8</sup>, IWASAKI, Takaya<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>5</sup>Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>6</sup>Faculty of Science, Kagoshima University, <sup>7</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>8</sup>Meteorological 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<sup>1\*</sup>, 篠原 雅尚<sup>2</sup>, 山田 知朗<sup>2</sup>, 植平 賢司<sup>3</sup>, 日野 亮太<sup>4</sup>, 中村 恭之<sup>1</sup>, 三浦 誠一<sup>1</sup>, 野 徹雄<sup>1</sup>, 小平 秀一<sup>1</sup>, 高橋 成実<sup>1</sup>  
OBANA, Koichiro<sup>1\*</sup>, SHINOHARA, Masanao<sup>2</sup>, YAMADA, Tomoaki<sup>2</sup>, UEHIRA, Kenji<sup>3</sup>, HINO, Ryota<sup>4</sup>, NAKAMURA, Yasuyuki<sup>1</sup>,  
MIURA, Seiichi<sup>1</sup>, NO, Tetsuo<sup>1</sup>, KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>, TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 九大・理院・地震火山センター, <sup>4</sup> 東北大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI, Univ. Tokyo, <sup>3</sup>SEVO, Kyushu Univ., <sup>4</sup>Tohoku 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<sup>1\*</sup>, 矢部 優<sup>2</sup>, 望月 公廣<sup>1</sup>, 塩原 肇<sup>1</sup>, 町田 祐弥<sup>1</sup>, 中東 和夫<sup>1</sup>, 山田 知朗<sup>1</sup>, 植平 賢司<sup>3</sup>, 八木原 寛<sup>4</sup>, 平田 賢治<sup>5</sup>, 小平 秀一<sup>6</sup>, 篠原 雅尚<sup>1</sup>

NAKATANI, Yukihiro<sup>1\*</sup>, YABE, Suguru<sup>2</sup>, MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>1</sup>, SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>, MACHIDA, Yuya<sup>1</sup>, NAKAHIGASHI, Kazuo<sup>1</sup>, YAMADA, Tomoaki<sup>1</sup>, UEHIRA, Kenji<sup>3</sup>, YAKIWARA, Hiroshi<sup>4</sup>, HIRATA, Kenji<sup>5</sup>, KODAIRA, Shuichi<sup>6</sup>, SHINOHARA, Masanao<sup>1</sup>

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

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

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る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<sup>1\*</sup>, 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>, 鈴木 健介<sup>2</sup>, 日野 亮太<sup>2</sup>, 伊藤 喜宏<sup>2</sup>, 篠原 雅尚<sup>3</sup>, 小平 秀一<sup>1</sup>, 金田 義行<sup>1</sup>, 村井 芳夫<sup>4</sup>, 佐藤 利典<sup>5</sup>, 植平 賢司<sup>6</sup>, 八木原 寛<sup>7</sup>, 平田 賢治<sup>8</sup>  
YAMAMOTO, Yojiro<sup>1\*</sup>, OBANA, Koichiro<sup>1</sup>, SUZUKI, Kensuke<sup>2</sup>, HINO, Ryota<sup>2</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>2</sup>, SHINOHARA, Masanao<sup>3</sup>, KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>, KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>, MURAI, Yoshio<sup>4</sup>, SATO, Toshinori<sup>5</sup>, UEHIRA, Kenji<sup>6</sup>, YAKIWARA, Hiroshi<sup>7</sup>, HIRATA, Kenji<sup>8</sup>

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

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

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<sup>1\*</sup>

IGARASHI, Toshihiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>ERI, 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<sup>1\*</sup>, 松澤 暢<sup>1</sup>

UCHIDA, Naoki<sup>1\*</sup>, MATSUZAWA, Toru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学研究科

<sup>1</sup> 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<sup>1\*</sup>, 平塚 晋也<sup>1</sup>

SATO, Tamao<sup>1\*</sup>, HIRATSUKA, Shinya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 弘前大学理工学研究科

<sup>1</sup> 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<sup>1\*</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 伊藤 喜宏<sup>1</sup>, 鈴木 健介<sup>1</sup>, 海野 徳仁<sup>1</sup>

HASEGAWA, Kazuya<sup>1\*</sup>, HINO, Ryota<sup>1</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>1</sup>, SUZUKI, Kensuke<sup>1</sup>, UMINO, Norihito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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<sup>1\*</sup>, 佐竹 健治<sup>2</sup>, 原田 智也<sup>2</sup>, 行谷 佑一<sup>3</sup>

FUJII, Yushiro<sup>1\*</sup>, SATAKE, Kenji<sup>2</sup>, HARADA, Tomoya<sup>2</sup>, NAMEGAYA, Yuichi<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>3</sup>Geological 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 Paleoearthq. 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<sup>1</sup>, 谷岡 勇市郎<sup>1\*</sup>, Gusman Aditya<sup>1</sup>, 酒井 慎一<sup>2</sup>

Mitsuteru Fukuoka<sup>1</sup>, TANIOKA, Yuichiro<sup>1\*</sup>, GUSMAN, Aditya<sup>1</sup>, SAKAI, Shin'ichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, <sup>2</sup>Earthquake 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  $1.27 \times 10^{20}$  Nm (Mw 7.3) which is similar to the seismic moment estimated by JMA using teleseismic body-waves,  $1.34 \times 10^{20}$  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<sup>1\*</sup>, 室谷 智子<sup>1</sup>, 鶴岡 弘<sup>1</sup>, 篠原 雅尚<sup>1</sup>, 佐竹 健治<sup>1</sup>

IWAI, Maki<sup>1\*</sup>, MUROTANI, Satoko<sup>1</sup>, TSURUOKA, Hiroshi<sup>1</sup>, SHINOHARA, Masanao<sup>1</sup>, SATAKE, Kenji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>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<sup>1</sup>, 蓬田 清<sup>1\*</sup>

HAYASHI, Manako<sup>1</sup>, YOMOGIDA, Kiyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北大・理・地球惑星ダイナミクス

<sup>1</sup>Earth & 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<sup>1\*</sup>, 武村 雅之<sup>1</sup>, 広谷 浄<sup>2</sup>, 石川 和也<sup>2</sup>

KANDA, Katsuhisa<sup>1\*</sup>, TAKEMURA, Masayuki<sup>1</sup>, Kiyoshi Hirotsu<sup>2</sup>, ISHIKAWA, Kazuya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>小堀鐸二研究所, <sup>2</sup>東北電力

<sup>1</sup>Kobori Research Complex Inc., <sup>2</sup>Tohoku 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年の地震は大分重なっているが、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<sup>1\*</sup>, 筧 楽磨<sup>1</sup>, 干場 充之<sup>2</sup>

KUBO, Hisahiko<sup>1\*</sup>, KAKEHI, Yasumaro<sup>1</sup>, HOSHIBA, Mitsuyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学, <sup>2</sup> 気象研究所

<sup>1</sup>Kobe University, <sup>2</sup>Meteorological 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  $3.4 \times 10^{22}$  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<sup>1\*</sup>, 飯尾 能久<sup>1</sup>, 深畑 幸俊<sup>1</sup>

CHIBA, Keita<sup>1\*</sup>, IIO, Yoshihisa<sup>1</sup>, FUKAHATA, Yukitoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>DPRI, 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<sup>1\*</sup>

SHIMIZU, Ichiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department 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<sup>1\*</sup>, 平原 和朗<sup>1</sup>, 堀 高峰<sup>2</sup>, 兵藤 守<sup>2</sup>

OHTANI, Makiko<sup>1\*</sup>, HIRAHARA, Kazuro<sup>1</sup>, HORI, Takane<sup>2</sup>, HYODO, Mamoru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Grad. School Science, Kyoto University, <sup>2</sup> 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 ~ -0.95 MPa 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