

## 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

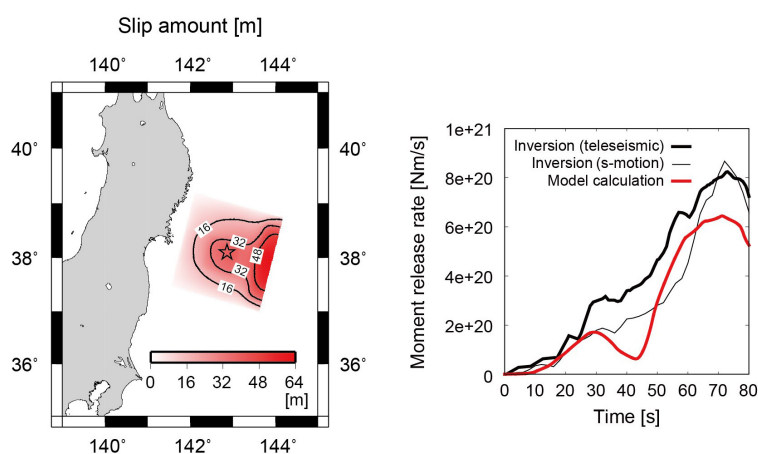
<sup>1</sup>Sci. Hokkaido Univ., <sup>2</sup>DPRI, Kyoto Univ.

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