

2011年東北地方太平洋沖地震の概要

岡田 義光 *

Outline of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

Yoshimitsu OKADA

President

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

okada@bosai.go.jp

Abstract

In March 11, 2011, "off the Pacific coast of Tohoku Earthquake" occurred with magnitude 9.0, which recorded the largest in the history of seismic observation in Japan. The greatest disaster on record was brought by huge tsunami with nearly 20 thousand killed or missing people. Main shock was generated as an inter-plate thrust-type earthquake between Pacific and North American plates with a large focal area of about 500 km by 200 km. Associated with this earthquake, extensive crustal deformations were observed both at inland and at ocean bottom surrounding the focal region. Also a great number of aftershocks with a variety of focal mechanisms were generated in the wide area of eastern Japan. A number of fault models were proposed using strong-motion records, broadband seismic waveforms, tsunami, and crustal deformation. Although this earthquake was accompanied by a foreshock of M7.3 two days before, no alarm was issued to the following mega-quake. Nor the possibility of such a gigantic earthquake was estimated in the long-term forecast of the inter-plate earthquakes in the off Tohoku region. It is afraid that such a huge event will induce various hazardous phenomena in the surrounding region such as inter-plate earthquakes, outer-rise earthquakes, inland earthquakes, and volcanic eruptions.

Key words: 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Tsunami, Crustal deformation, Induced phenomena

1. はじめに

2011年3月11日、我が国の観測史上最大となるM9.0の「東北地方太平洋沖地震」が発生して巨大な津波が押し寄せ、2万人近くの死者・行方不明者を生じる未曾有の大災害となった。

この地震では、津波災害を筆頭として、内陸での地滑りや陥没などの土砂災害、埋立地等における激しい液状化、長周期地震動による超高層ビルの揺れ、大都市における大量の帰宅困難者の発生など、実に様々なタイプの災害が複合的に発生し、人命や財産は勿論、水道・電気・ガス・鉄道・道路などのライフラインに莫大な被害を生じる結果となった。

さらに、この地震により福島第一原子力発電所では1号機から4号機までの原子炉の冷却機能と閉じ込め機能に重大な障害を生じ、放射性物質の外部への拡散など深

刻な事態に陥った。これにより、近隣の住民に避難指示が出されたほか、広い範囲の人々に大きな不安が広がり、また電力不足による前代未聞の計画停電が実施されるなど、数多くの市民に多大なる混乱もたらされた。

このように地震災害と原子力災害が同時に発生したことによって、人々の間には半ばパニックに近い状況が生じ、一時はガソリンや食料品などの物資調達が困難になるなど、わが国がかつて経験したことのない様相の災害が市民生活に及んだ。

また、この地震が発生したことによって、東日本では広域にわたって非常に大きな地殻変動が生じ、これも一因となって、周辺の広い範囲において地震活動が活発化する現象が見られた。

ここでは、これらの地震、津波、地殻変動などの諸様相について概説し、提案された断層モデルのいくつかを

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 理事長

紹介するとともに、東北地方太平洋沖で従来考えられていた海溝型地震の長期予測の内容などについて解説する。また、このように巨大な地震の発生は、近隣地域での海溝型大地震、内陸の大地震、そして火山の噴火など、様々な地学現象を誘発することが懸念されるため、そのような誘発現象に関する諸問題についても言及する。

2. 本震

本震の発生は2011年3月11日14時46分で、宮城県栗原市で震度7が観測されたほか、岩手県から茨城県にかけての太平洋岸の広い範囲で震度6強や6弱の揺れが記録された(図1: 気象庁, 2011a)。防災科研(2011a)によれば、強震観測網で捉えられたこの地震による最大の加速度は栗原市築館における2,933ガル(三成分合成値)であった。震度7が我が国で観測されたのは1995年兵庫県南部地震(M7.3)、2004年新潟県中越地震(M6.8)に次いで3度目である。気象庁は、この地震を「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」と命名した(気象庁, 2011b)。

震源は牡鹿半島の東南東約130kmの三陸沖で、震源の深さは約24kmであった。気象庁より最初に発表された地震のマグニチュードはM7.9(速報値)であったが、その後、同日16時の記者発表ではM8.4(暫定値: 気象庁, 2011a)、同17時30分にはM8.8(暫定値: 気象庁, 2011c)と改められ、さらに3月13日には諸外国の地震観測データも用いて本震の破壊過程を詳細に解析した結果、最終的にM9.0と修正された(気象庁, 2011f)。M9.0は我が国の観測史上最大であり、最近100年間に世界で発生した大地震を見ても、1960年チリ地震(M9.5)、1964年アラスカ地震(M9.2)、2004年スマトラ島沖地震(M9.1)に次ぎ、1952年カムチャッカ地震(M9.0)と並ぶ4番目の大きさである(USGS, 2011a)。

この地震の発震機構解は、図1左上のように西北西-東南東方向に圧力軸をもつ低角逆断層型であり(気象庁, 2011f)、これは、今回の地震が、日本海溝から沈み込む海側プレート(太平洋プレート)に引きずり込まれた陸側プレ

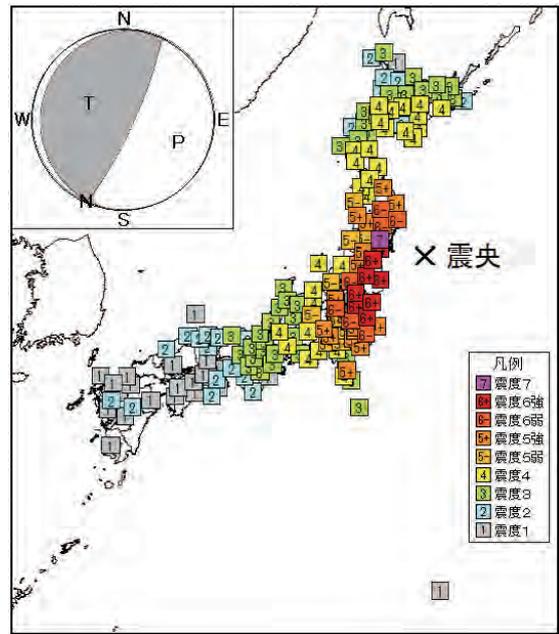


図1 2011年東北地方太平洋沖地震の発震機構解(左上)と震度分布(気象庁, 2011a, 2011fより合成)
Fig. 1 CMT of 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and intensity distribution (JMA, 2011a, 2011f).

ート(北米プレート)が跳ね返ることによって発生する、典型的な海溝型大地震のメカニズムであったことを示している(図2)。

図1では地震の発生場所が×印の点として示されているが、M9.0という巨大な地震のエネルギーがこの1点から放出されたわけではない。図3(a)は、一般的な地震の発生を示す模式図だが、地下の震源で始まった破壊(岩盤のずれ)は秒速3~4kmで周囲に伝播し、ほぼ平面状の切れ目を作る。この範囲を震源域(または断層面)と呼び、断層面の広がり、ずれの量の大きさが地震のマグニチュードを決定する。なお、震源(破壊の出発点)の真上の点は震央と呼ばれ、図1の×印は震央を示している。

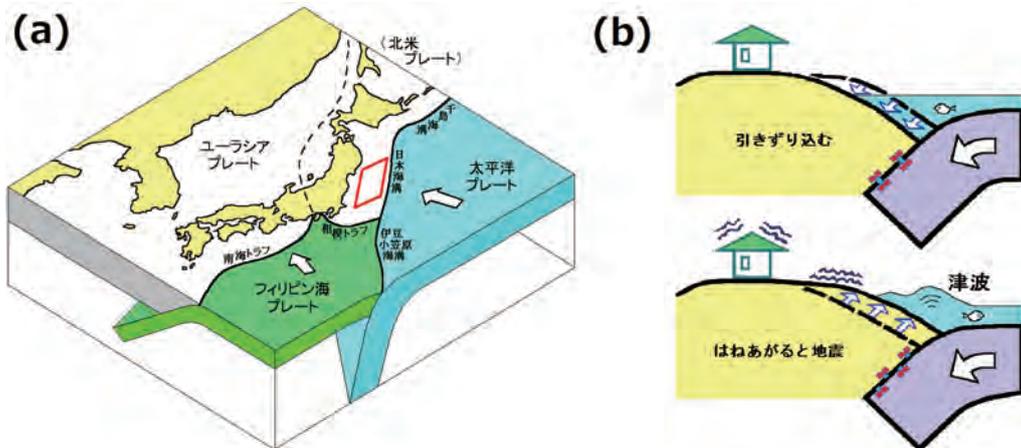


図2 (a)日本列島周辺のプレート構造、赤枠は今回の地震の断層面。(b)プレート沈み込みによる海溝型大地震発生モード図
Fig. 2 (a) Plate configuration around Japan and focal area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, (b) Generation mechanism of an inter-plate earthquake.

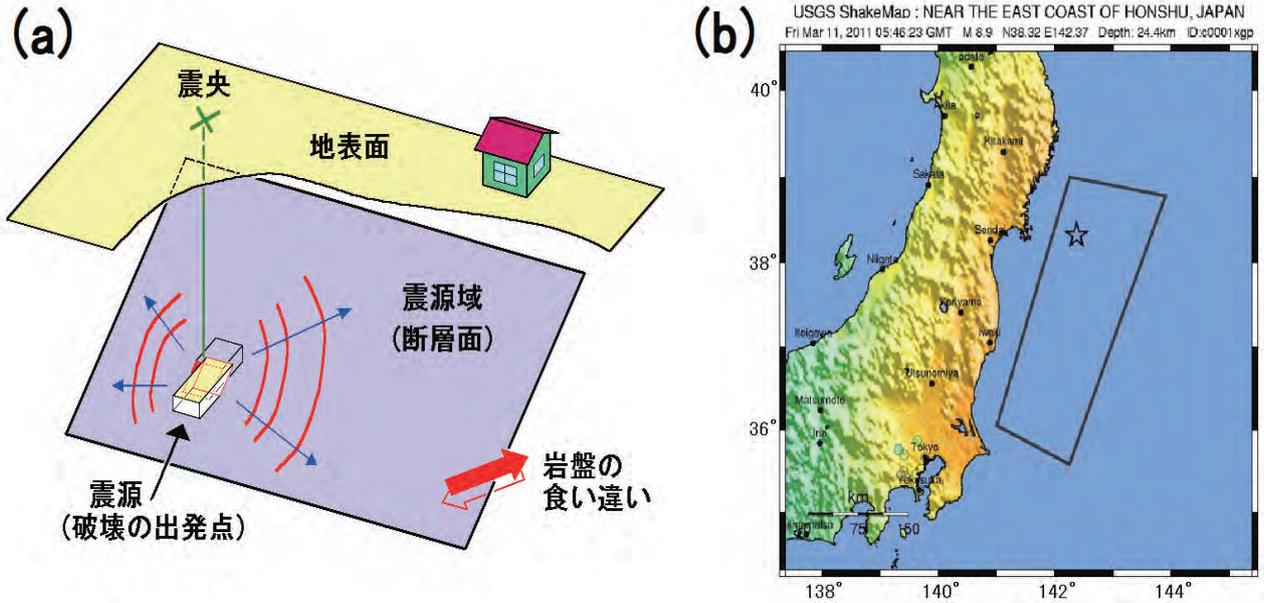


図3 (a)一般的な地震の発生様式(断層運動), (b)米国USGS(2011b)による東北地方太平洋沖地震の概要図。陸上の色分けは震度の分布(MM震度階)を示す。
Fig. 3 (a) General mechanism of earthquake generation (faulting motion), (b) Summary of 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Colors on land correspond to seismic intensity distribution in MM scale (USGS, 2011b).

図3(b)は、今回の地震の概要を速報した米国地質調査所の資料(USGS, 2011b)である。三陸沖の星印が震央、四角の範囲が震源域に対応しており、この南北約500 km、東西約200 kmの範囲が今回の地震に関与した領域である。本震の破壊は星印直下の震源から出発し、北は岩手県沖まで、南は茨城県沖にまで達し、岩盤のずれの量は大きいところで40～50 mに達したものと見られている。図2(a)では、この断層面が、西に傾き下がる太平洋プレートの上面境界に沿った赤色の矩形で示されている。

なお、この地震については、宮城県石巻市大狐で最初の地震波が検知されてから8.6秒後に緊急地震速報が発信され、警報発表から主要動の到達までは、仙台市中心部において約15秒、東京都心で約65秒の余裕があったとのことである(気象庁, 2011a)。

3. 津波

海溝型の大地震は大きな津波を伴うことが常であるが、今回の地震はM9.0という超巨大なものであったため、津波の規模も桁違いに大きかった。我が国では、北海道から沖縄にかけての太平洋沿岸で高い津波が観測されたほか、日本海、オホーツク海、東シナ海の沿岸でも津波が観測され、さらに、ハワイや北米・南米、および太平洋諸国にまで津波が到達した(気象庁, 2011d)。

岩手県の釜石、大船渡、石巻などでは、津波の第1波が14時46分、すなわち地震の発生とほぼ同時に10～20 cmの高さで到着し、最大波は15時20分前後、すなわち地震発生の約30分後にこれらの地を襲っている(気象庁, 2011a)。

図4は観測された全国の津波最大波高の分布を示しており(気象庁, 2011e)、三陸から北海道にかけて大きな波高値が記録されている。気象庁の実施したその後の痕跡調査等による結果も含めると、各地の検潮所における最大波高は青森県八戸で6.2 m、岩手県大船渡で11.8 m、釜石で9.3 m、久慈港で8.6 m、宮城県石巻市鮎川で7.7 m、仙台港で7.2 m、福島県相馬で8.9 m、茨城県大洗で4.2 mなどと報告されている。

一方、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2011)による津波痕跡調査結果によれば、今回の津波の最大遡上高は宮古市重茂姉吉で計測された40.5 mであり、この値はこれまで国内最高とされた1896年(明治)三陸地震の際の大船渡市三陸町綾里における遡上高38.2 mを更新した。なお、東京湾奥の隅田川晴海運河でも1.4 m前後の痕跡高が確認されている。

また、今回の津波は海岸沿いの集落や河口周辺から内陸に向けて数 km も浸入し、561 km²もの広い範囲を水没させた点が大きな特徴である(国土地理院, 2011b)。

気象庁では、地震発生から3分後の14時49分、岩手県、宮城県、福島県に津波警報(大津波)を発令した。そして15時14分には青森県太平洋沿岸、茨城県、千葉県九十九里・外房が、15時30分には北海道太平洋沿岸と伊豆諸島が、16時08分には青森県日本海沿岸、千葉県内房、小笠原諸島、相模湾・三浦半島、静岡県、和歌山県が次々と津波警報(大津波)の対象に加えられた(気象庁, 2011e)。その後は、海域ごとに推移を見ながら津波警報(津波)や津波注意報への切り替えがなされ、すべての警報・注意報が解除されたのは3月13日17時58分であった(気象庁, 2011g)。

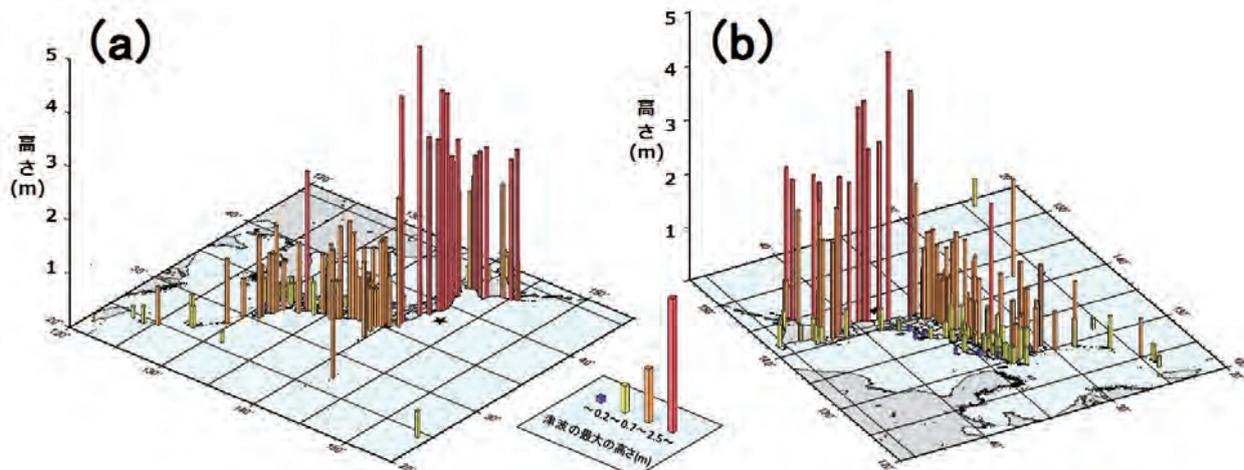


図4 (a)太平洋側、および(b)日本海側から見た津波最大波高の分布(気象庁, 2011eより合成)。のちに痕跡調査等により判明した最大波高のデータは含まれていない。

Fig. 4 Distribution of maximum height of tsunami viewed from (a) Pacific Ocean side and (b) Japan Sea side. (JMA, 2011e). The data traced by later investigation are not included.

気象庁による最初の大津波警報では、予想される津波の高さとして宮城県で6 m、岩手県と福島県で3 mと発表された。これは本震のマグニチュードの速報値がM7.9と推定されたことが原因であると思われるが、このような予想が結果的に住民の避難を遅らせたのではないかとの指摘を受け、気象庁では6月8日に「津波警報改善に向けた勉強会」をスタートさせ、9月12日に津波警報改善の方向性をとりまとめた。

東北地方の太平洋沿岸では、1896年(明治)三陸地震(M8.3)、1933年(昭和)三陸地震(M8.1)、1960年チリ地震津波など、これまでに何度も大きな津波災害に見舞われており、また平安時代の869年貞観地震(M8.3)では、海岸から3 km程度まで仙台平野内に浸入する大津波があったことが知られている(佐竹ほか, 2008)。今回の津波は、高さの点で1896年(明治)三陸津波に、また内陸への浸入距離の点で869年貞観地震に、それぞれ似た様相を示している。

4. 地殻変動

今回のM9.0という巨大地震は、地殻変動においても日本列島に大きな影響を与えた。図5は、国土地理院(2011a)がGPS観測網によって捉えた、この地震に伴う東日本の地殻変動の様子を示す。島根県の浜田市三隅を固定点として、東北日本の太平洋側は東南東方向に数m移動し、宮城県の南三陸町志津川で4.4 m、石巻市牡鹿では最大となる5.3 mの水平変動が観測された。これに対し、日本海側の移動量は1 m程度であり、東日本は全体が東西方向に大きく引き伸ばされたことになる。

一方、上下変動としては、東北地方太平洋側の広い範囲で数10 cmにおよぶ沈下を生じ、志津川では75 cm、牡鹿では最大となる120 cmの沈下が観測された。このよう

に地盤が沈降したことによって、一部地域では津波で入った海水が引きにくくなり、また大潮のたびに冠水するような状況を生じさせた。さらに、堤防や土地そのものが低くなったことにより、次の津波や高潮への備えを弱体化させる結果をもたらした。

図5によれば、つくば市は東へ50 cmほど移動し、約10 cmの沈下、東京でも東へ20 cmほど移動すると同時に、約5 cm沈下したように見られる。また、国土地理院によれば、地震が発生した後も東北地方から関東地方の広い範囲で東向きに余効的な地殻変動が継続して見られ、10月31日現在、その大きさは最大で約79 cmに達している。また上下変動についても宮城県から銚子にかけては数cm~10 cmの反転隆起、三陸海岸では10 cm程度のさらなる沈下が報告されている(国土地理院, 2011d)。

次に図6は、今回の地震に伴って検出された海底での地殻変動の様子を示す(海上保安庁, 2011)。たまたま震源の直上には海底基準点：宮城沖1が設置されており、GPSと音響測深を用いた再測定の結果、東南東方向へ約24 mの水平変動と約3 mの隆起という巨大な地殻変動が確認された。このほかの海底基準点においても、東南東へ5~20 mの水平変動と0.8~1.5 mの上下変動が観測されている。

上記のような地殻変動は、震源域で生じた低角逆断層運動がその原因となっている。図7は、低角逆断層によって地表面(海底面)および地球内部がどのように変形するかをOkada(1992)に基づいて理論的に求め、断層面に直交する平面(y-z面)上での変位ベクトル分布として示したものである。断層の方向に地表面が引き寄せられ、断層面の直上は大きく隆起して津波を引き起こす一方、陸側では地面が沈降する様子がよくわかる。

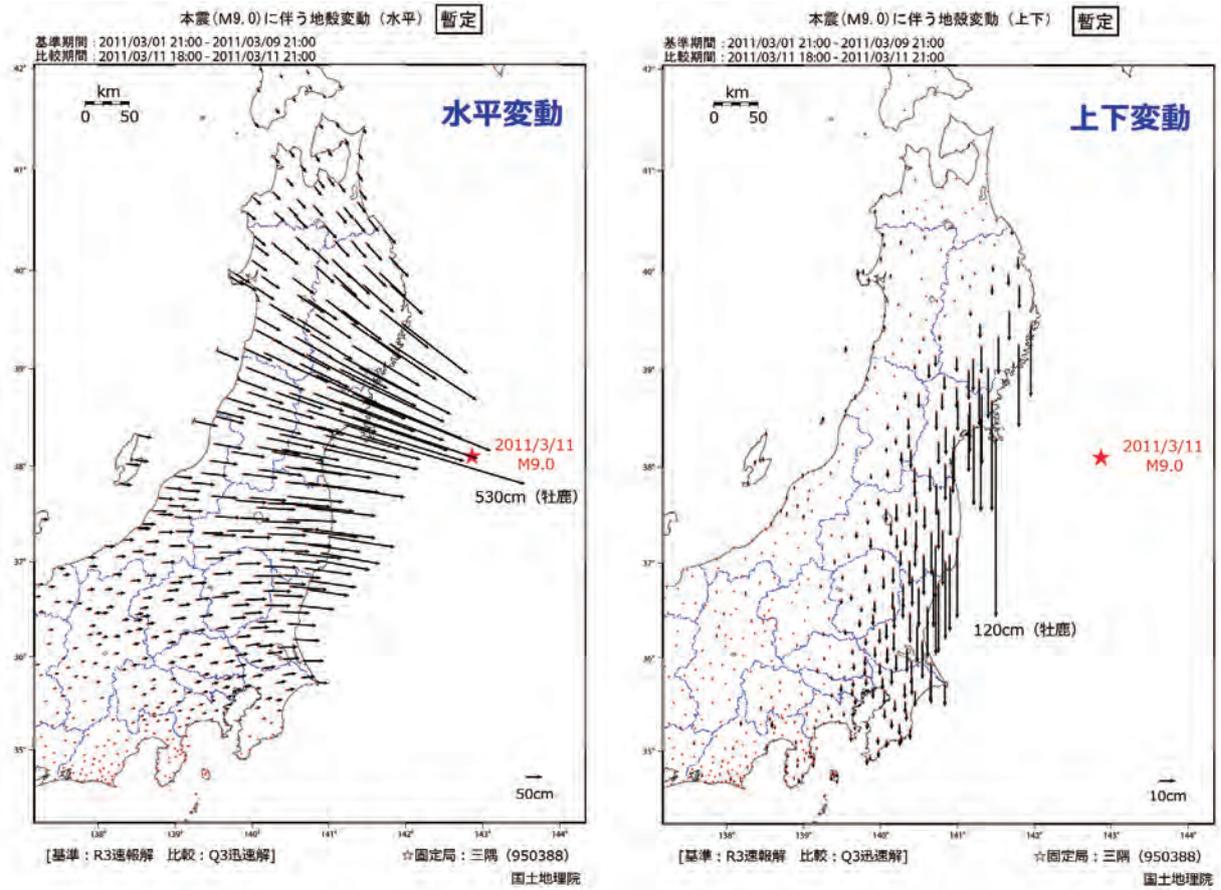


図5 東北地方太平洋沖地震に伴う東日本の地殻変動(国土地理院, 2011a に加筆合成)
 Fig. 5 Crustal deformation associated to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (GSI, 2011a).

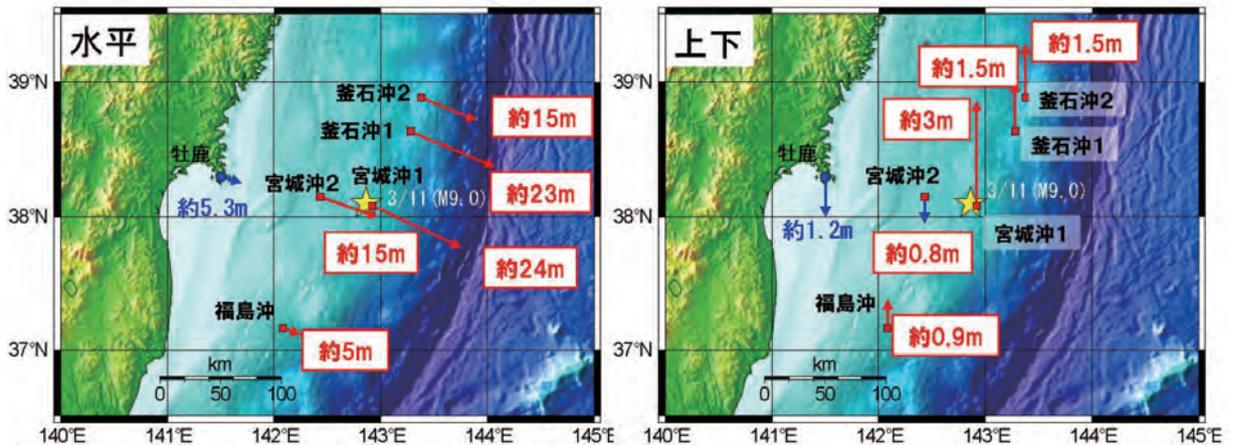


図6 東北地方太平洋沖地震に伴う海底地殻変動(海上保安庁, 2011 に加筆). 星印は震央を示す.
 Fig. 6 Sea bed crustal deformation associated to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (JCG, 2011).

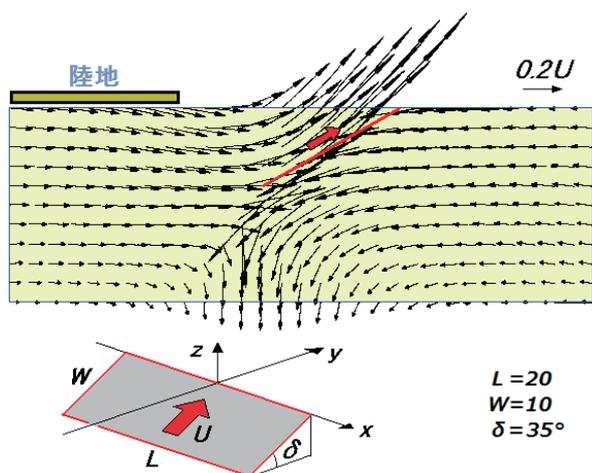


図7 逆断層による地表面(海底面)および地球内部の変形の様子(断層面に直交する面上での変位分布)
 Fig. 7 Deformation of ground surface (sea bottom) and the inside of the earth associated to a reverse faulting. Displacement vectors are displayed on the plane perpendicular to the fault surface.

5. 断層モデル

東北地方太平洋沖地震については、種々のデータに基づいて様々な断層モデルが提出されている。主要なデータ源としては、短周期から長周期の順に近地強震記録、遠地広帯域地震記録、津波記録、地殻変動記録がある。

この地震に関する断層モデルの探求は現在多くの研究者によって鋭意進められているところであるが、ここではその幾つかについて紹介する。

5.1 強震記録に基づく断層モデル

Suzuki *et al.* (2011) は、日本全国の K-NET および KiK-net 観測点から得られた強震記録を用いて、今回の地震の震源過程を推定している。図8(a)は、設定された断層面(走行 N195°E, 傾斜 13°, 大きさ 510 km × 210 km) 上のすべり分布を地表に投影した図であり、星印は破壊開始点(震源)を示している。すべり量は震源の周辺から海溝寄りの浅部で大きく、最大のすべり量は 48 m であったと推定している(詳しくは本報告の別稿参照)。

5.2 広帯域地震記録に基づく断層モデル

八木(2011)は、FDSN(デジタル地震観測網連盟)およびGSN(世界地震観測網)により記録された全世界の広帯域地震波形記録を用いてインバージョン解析を行い、図8(b)に示すようなすべり量分布の断層モデルを提出している。断層面の走行は N200°E, 傾斜 12°, すべり角 85° としており、すべり量は震源付近と福島・茨城県沖で大きく、海溝寄り浅部での最大すべり量は約 49 m と推定している。

5.3 津波記録に基づく断層モデル

Fujii *et al.* (2011) は、国内の検潮所記録に加え、米国海洋大気圏局(NOAA)の深海底津波計、日本沿岸の海底津波計(海洋研究開発機構、東京大学地震研究所)、国土交通省港湾局によるGPS波浪計などで観測された津波波形記録を用いてインバージョン解析を行った結果、図9(a)に示すようなすべり量分布を得た。

モデルは走行 N193°E, 傾斜 14°, すべり角 81°, 大きさ 50 km × 50 km の小断層面 40 枚を組み合わせたものであり、海溝付近で 40 m 以上の大きなすべり量が求められたほか、震源付近で約 30 m, 陸側の深い領域でも 10 ~ 20 m の大きなすべりがあったものと推定している。

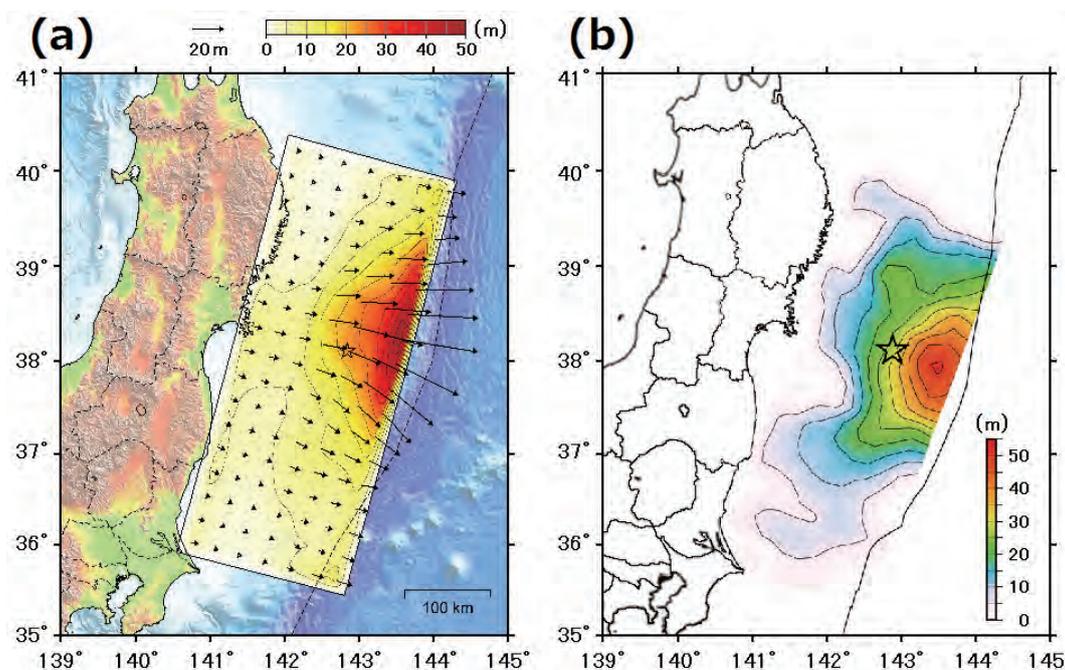


図8 (a)強震記録, (b)広帯域地震記録に基づく本震のすべり量分布(Suzuki *et al.*, 2011; 八木, 2011)。星印は震央を示す。
 Fig. 8 Slip models of the main shock based on (a) strong motion records and (b) broadband seismic records (Suzuki *et al.*, 2011; Yagi, 2011). A star denotes the epicenter.

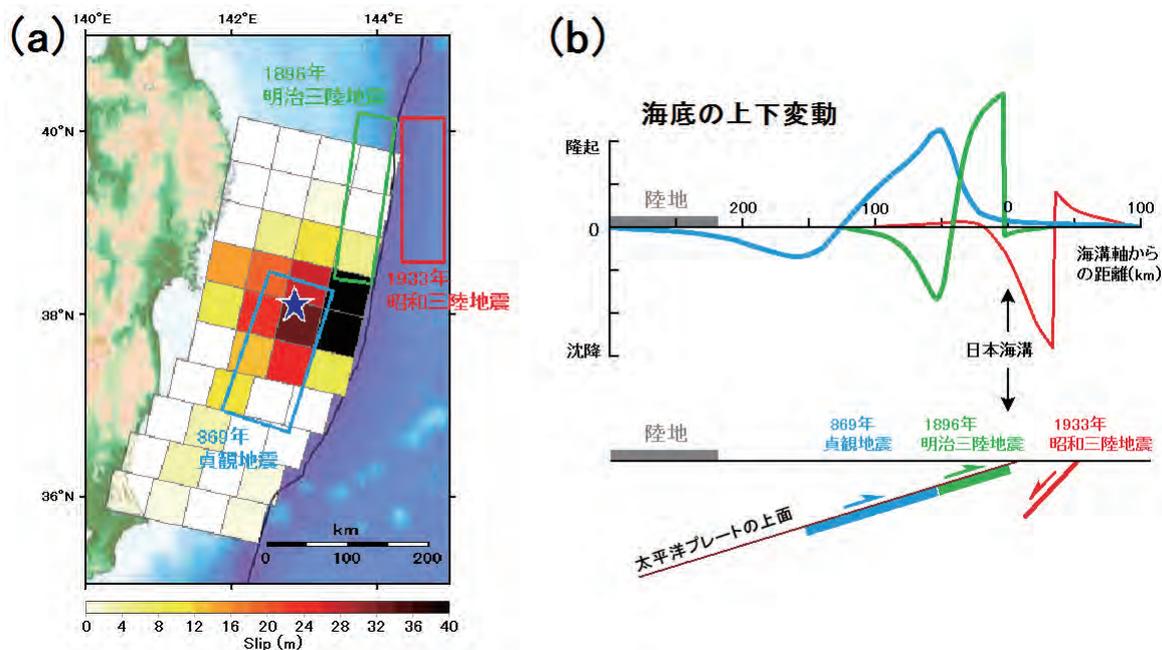


図9 (a) 津波記録に基づく本震のすべり量分布(Fujii *et al.*, 2011)と869年貞観地震, 1896年および1933年三陸地震の断層モデル, 星印は震央を示す. (b) 過去の地震による海底の上下変動(佐竹ほか, 2011)

Fig. 9 Slip model of the main shock based on tsunami records compared to the fault models of 869, 1896, and 1933 earthquakes. A star denotes epicenter. (Fujii *et al.*, 2011) (b) Vertical displacement profiles due to past earthquakes (Satake *et al.*, 2011).

図9(a)には, 869年貞観地震, 1896年(明治)三陸地震, および1933年(昭和)三陸地震の断層モデルも示されており, 図9(b)は, これらのモデルによって海底に生じる上下変動のパターンの違いを示す. 1933年(昭和)三陸地震は日本海溝の外側で起きた正断層型のいわゆるアウトワライズ地震であるが, 869年貞観地震および1896年(明治)三陸地震は, それぞれプレート境界の深部および浅部で発生した低角逆断層型地震である.

陸寄り深部での逆断層は波長の長い海面変動を生じ, 内陸深くに津波侵入をもたらすのに対し, 日本海溝に近い浅部での逆断層は短波長で大振幅の津波を生じる. 今回観測された津波波形はこの両者の特徴を併せ持つことから, 佐竹ほか(2011)は, 今回の地震が貞観地震型と明治三陸地震型の同時発生であったとの解釈を行っている.

5.4 地殻変動記録に基づく断層モデル

国土地理院(2011c)は, GPS観測網から得られた地殻変動データを説明するため, 図10(a)のような断層モデルを提出した. このモデルは, 以下のような諸元を有する2枚の均質断層よりなっているが, すべり量は断層1の方が圧倒的に大きい.

<断層1> 走行 N203°E, 傾斜 16°, すべり角 101°, 大きさ 186 km × 129 km, すべり量 24.7 m

<断層2> 走行 N203°E, 傾斜 15°, すべり角 83°, 大きさ 194 km × 88 km, すべり量 6.1 m

次に図10(b)は, GPSデータに海底地殻変動データも加えてインバージョン解析を行い, プレート境界面上の

すべり量分布を求めた不均質断層モデルである(国土地理院・海上保安庁, 2011). このモデルでは, 震源から海溝寄りの浅部で50 mを越す大きな断層すべりがあったことが推定されている.

また図10(c)は, GPSデータによる地震時の地殻変動および10月31日までの余効変動についてモデル化した結果を示している(国土地理院, 2011d). 余効変動のすべり量は陸寄りの深部を中心に本震の1/10程度で, 全体ではM8.5程度のモーメント解放があったとしている.

6. 余震活動

図11(a)は, 東北地方太平洋沖地震が発生した3月11日から5月13日までの約2か月間に東日本で発生した, 深さ90 km以浅, M5以上の地震の震源分布(気象庁, 2011h), およびM7以上の地震の発震機構解を示す. 宮城県沖の赤い丸印が本震の震源(①), 橙色がその後発生したM7級の地震(発生順に②~⑥), 黄色がM6級の地震の位置を示している.

海域に密集する余震は岩手県沖から茨城県沖にかけての南北約500 km, 東西約200 kmの範囲に分布しており, これらの大部分は, 本震でできた巨大な断層面の近傍で発生した, いわゆる「狭義の余震」である.

一方, これらの「狭義の余震」とは別に, 震源域から遠く離れた内陸部のいくつかの場所においても, 本震の影響で誘発されたと考えられる「広義の余震」が広い範囲で発生した. 本震発生翌日の3月12日03:59には長野県

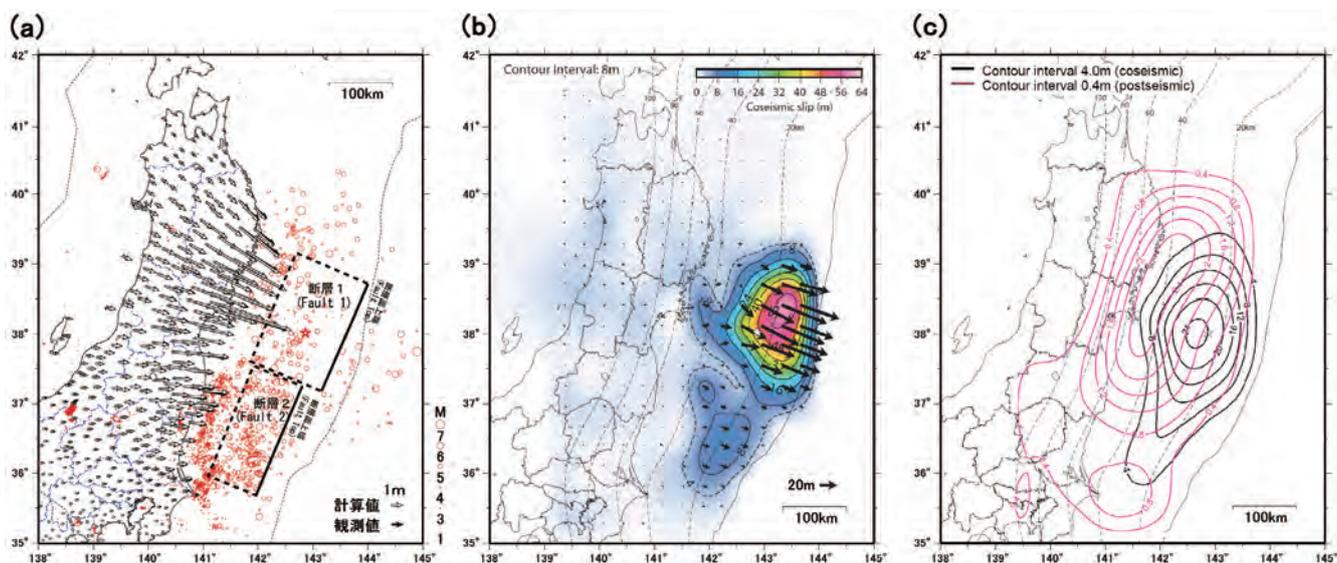


図10 (a) GPSデータに基づく本震の断層モデル。星印は震央、赤丸は余震を示す(国土地理院, 2011c), (b) GPS および海底地殻変動データに基づく本震のすべり量分布(国土地理院・海上保安庁, 2011), (c) GPSデータに基づく地震時地殻変動および10月31日までの余効変動に対するすべり量分布(国土地理院, 2011d)

Fig. 10 (a) Fault model of the main shock based on GPS data. A star denotes epicenter and red circles show aftershocks (GSI, 2011c). (b) Slip model of the main shock based on GPS and sea bed crustal deformation data (GSI and JCG, 2011). (c) Slip models for coseismic and post-seismic crustal deformations based on GPS data (GSI, 2011d).

北部でM6.7の浅発地震が生起し、長野県栄村で震度6強が記録された(図11のA: 防災科研, 2011b)。また、同日04:47には日本海の秋田県沖合でもM6.4の地震が発生した(図11のB)。

次いで3月15日22:31には静岡県東部でM6.4の地震が発生し、富士宮市で震度6強の揺れが観測された(図11のC: 防災科研, 2011c)。この地震の震源は富士山ほぼ直下の深さ14kmに位置し、想定東海地震の震源域に近いことが問題とされたが、発震機構解は横ずれ断層型であり、フィリピン海プレートの内部で発生した地震であることから、東海地震への関連は薄いものと判断された。

なお、これらの続発した「広義の余震」の分布を図2(a)と見比べてみると、これらは東日本を載せた北米プレートの西縁をなぞって発生しているようにも見られる。

図11(b)は、図11(a)内の矩形範囲内で発生した地震のPQ方向に沿った時空間分布、また図11(c)は、最大震度4以上を記録した有感地震の日別回数の推移を示している(気象庁, 2011h)。M7級の余震は、本震発生後20分から40分の間にM7.4, M7.7, M7.5と3つが続発したのち、4月7日に宮城県すぐ沖合のやや深いところでM7.1、本震発生からちょうど1か月の4月11日に福島県東部のごく浅いところでM7.0の地震が発生した。なお、有感地震の発生回数は本震発生後減少していったが、4月11日夕刻以降は再び増加した。これは、福島県東部で発生したM7.0の浅発地震が非常に活発な余震(本震から見れば孫の余震)を伴ったためである。本震発生から10月6日12時までの約7か月間における最大震度4以上の有感地震回数は209回を数えたと報告されている(気象庁, 2011i)。

次に図12は、図11(a)の矩形領域内で本震発生から10日間および約7か月間に発生したM5以上の余震の積算個数を、過去の海溝型地震における余震積算回数と比較したものである(気象庁, 2011i)。10月6日12時までの積算個数は、M5以上が579個、M6以上が96個、M7以上が6個と報告されている。なお、6番目のM7級余震は、7月10日に本震のすぐ東側で発生したM7.3の地震である。

通常のM8級海溝型地震が7か月間に伴うM5以上の余震は50~70個程度であり、これまでに最大の余震活動を伴った1994年北海道東方沖地震(M8.2)でも150個程度であったのに比べると、今回の余震数はその4~5倍にも達している。これは、今回の地震が巨大であり、震源域もM8級地震の4~5倍と非常に広がったため、かつて例のないほど沢山の余震が発生したと思われる。

7. M7級余震の発生メカニズム

図13は、図11の①~⑥で示されたM7級地震について、その発生機構を模式的に示したものである。本震①とその直後に震源域の北端と南端で発生した余震②, ③はプレート境界の低角逆断層型だが、日本海溝の外側で発生した④は正断層型である。これは、海側プレートの沈み込みによって海溝外側のアウターライズと呼ばれる場所に伸張力が働いた結果であると考えられ、1933年(昭和)三陸地震(M8.1)もこれと同じメカニズムで発生している。

次に、宮城県すぐ沖合のやや深部で発生した余震⑤は、これとは逆に、沈み込んだ海側プレートの深部に圧縮力が働き、逆断層として応力を解放させたプレート内地震であると考えられる。同様のメカニズムをもった地震と

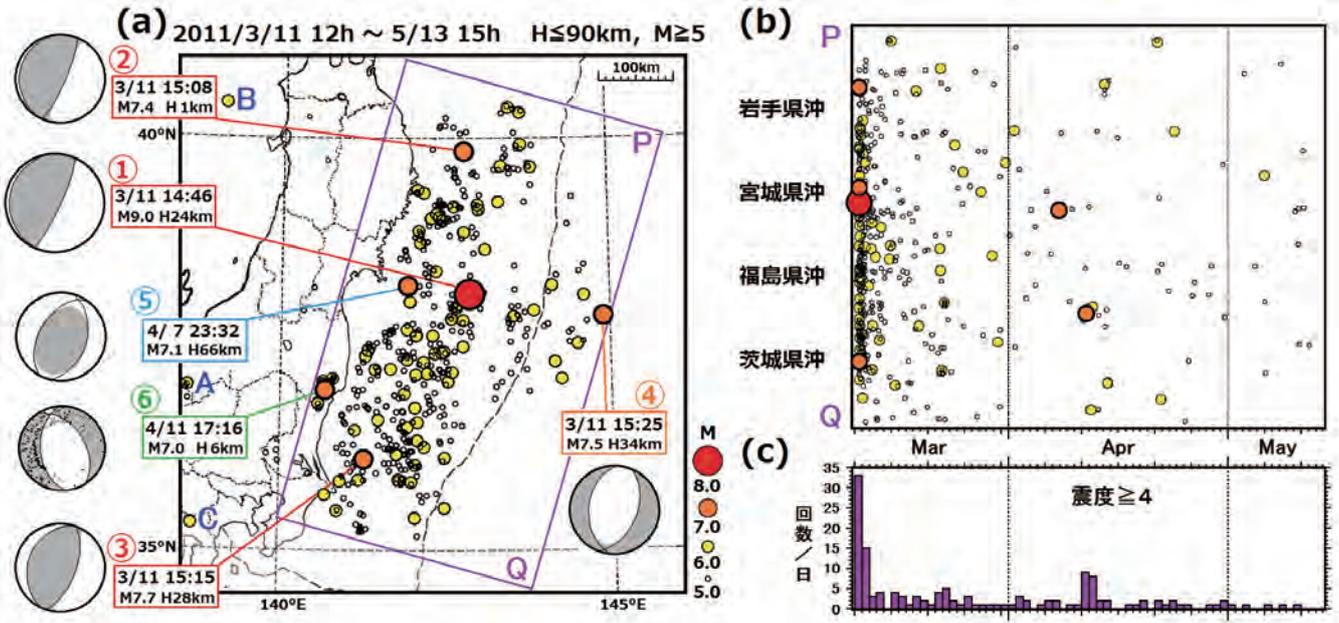


図 11 (a) 3/11 12 時～ 5/13 15 時に発生した本震と M5 以上の余震分布, および M7 以上の地震の発震機構解. A, B, C は M6 級の広義の余震, (b) 矩形領域 PQ 内の地震の時空間分布図, (c) 震度 4 以上の有感地震の日別回数の推移 (気象庁, 2011h)

Fig. 11 (a) Distribution of main shock and the aftershocks of M5 or larger which occurred in the period, 12:00 Mar.11 to 15:00 May 13. A, B and C denote M6-class aftershocks in a wide sense. (b) Space-time plot of the aftershocks occurred in the rectangle PQ in (a), (c) Daily number of the events with seismic intensity 4 or larger (JMA, 2011h).

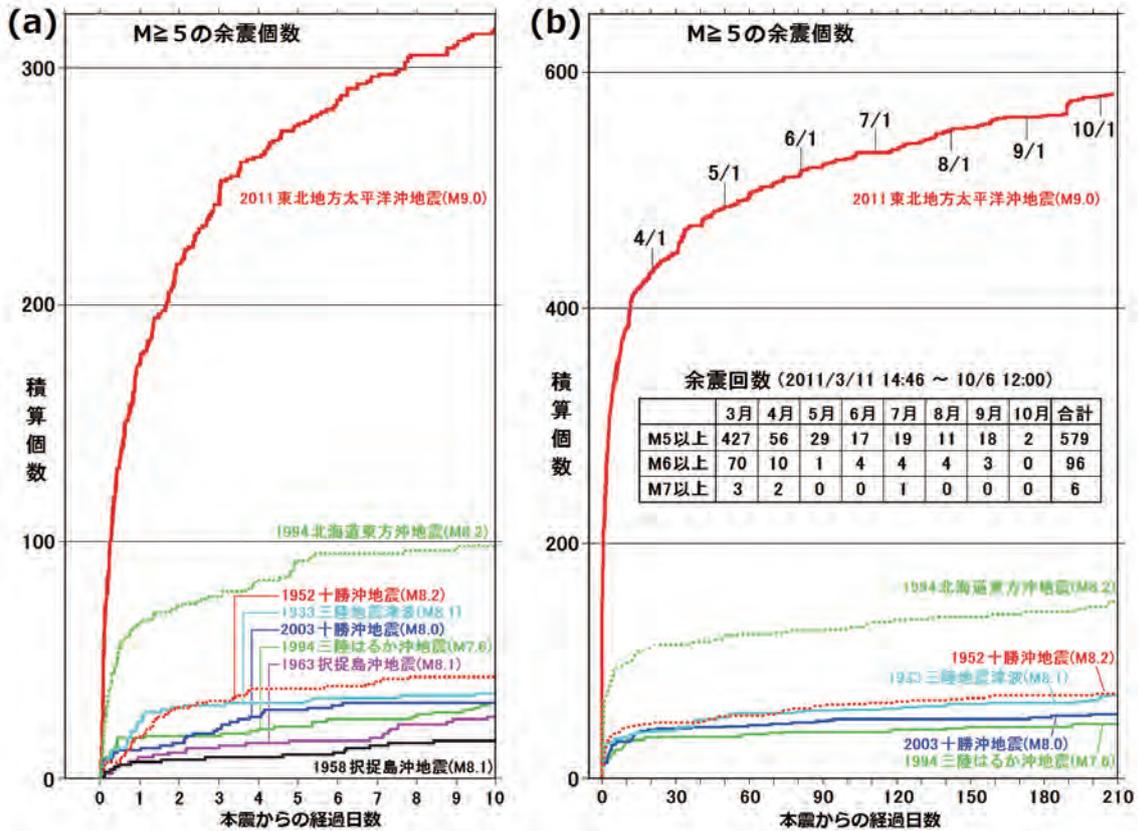


図 12 本震から (a) 10 日間および (b) 7 か月間に発生した M5 以上の余震の積算個数と, 過去の例との比較 (気象庁, 2011i)

Fig. 12 Cumulative number of the aftershocks of M5 or larger within (a) 10 days and (b) 7 months after the main shock compared to the inter-plate earthquakes in the past (JMA, 2011i)

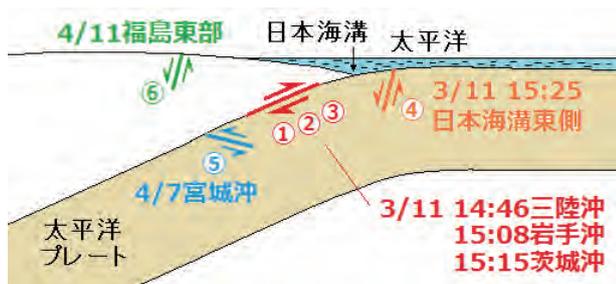


図13 図11に①～⑥で示された本震および5つのM7級余震の発生機構を示す模式図

Fig. 13 Fault mechanism of the main shock and M7-class aftershocks denoted as ①～⑥ in Fig.11.

しては、太平洋プレート内の深さ約100kmでほぼ水平な断層面を生じた1993年釧路沖地震(M7.8)が知られている。

一方、福島県東部のごく浅部で発生した余震⑥は、地殻変動の項で述べた通り、陸側プレートが東西に大きく伸張したことによって励起された正断層型地震である。

8. 前震活動

東北地方太平洋沖地震(M9.0)が発生する2日前の3月9日11時45分、宮城県のはるか沖合でM7.3の地震が発生し、翌日のM6.8の地震を含んで活発な余震活動があった(図14: 気象庁, 2011a)。この地震により最大震度5強が記録され、また津波注意報が発令されて、大船渡、釜石などでは高さ0.5mほどの津波が観測された。これらの地震活動があった場所は、今回の巨大地震の震源のすぐ北隣りであり、結果的にはM9.0の地震の前震活動であったものと考えられる。

しかし、通常、M7.3といえば単独で発生する立派な大地震であり、これが次に続くより巨大な地震につながると想像することは、なかなか困難であったと思われる。

9. 長期予測

今回の巨大地震の震源域を含む東日本太平洋沖における海溝型地震については、地震調査研究推進本部の地震調査委員会によって、その長期発生予測がなされていた。その際に対象となった海域の領域分けは図15に示すとおりであり、各々の海域において発生が予想される地震のマグニチュード、今後30年間における地震発生確率、および平均発生間隔は表1のように評価されていた(地震調査研究推進本部, 2011)。

この中で「宮城県沖」は、過去200年間に1793年(M8.2)、1835年(M7.3)、1861年(M7.4)、1897年(M7.4)、1936年(M7.4)、1978年(M7.4)と6回の地震が平均37.1年間隔で繰り返されており、今後30年間の発生確率は99%という我が国で最も高い値であった。なお、1793年の地震(M8.2)は、さらに沖合の「三陸沖南部海溝寄り」が連動した地震と考えられている。

この「宮城県沖」では、2005年8月にM7.2の地震が発生したが、予想されたM7.5には達しなかったため、まだ警戒を緩めることはできないとの評価がなされていた。次いで今回の本震発生2日前の2011年3月9日には、沖合の「三陸沖南部海溝寄り」の海域でM7.3の地震が発生した。この時は、これによって「宮城県沖」と「三陸沖南部海溝寄り」が連動するM8級の大地震の危険性はやや薄らいだとも考えられていた。

ところが、結果的にはこの地震が前震となって今回のM9.0の地震が発生し、その巻き込んだ領域は、「三陸沖中部」から「茨城県沖」までの5海域、そして「三陸沖北部から房総沖の海溝寄り」までを含む超巨大なものとなった。歴史的には、平安時代の869年(貞観)に、大きな津波を伴った三陸沖巨大地震(M8.3)があり、多賀城下で溺死1,000などの被害があったことは知られていたものの、それが現世に再現する、またはそれを上回る地震が起こるとは、殆どの研究者が想像できなかった。

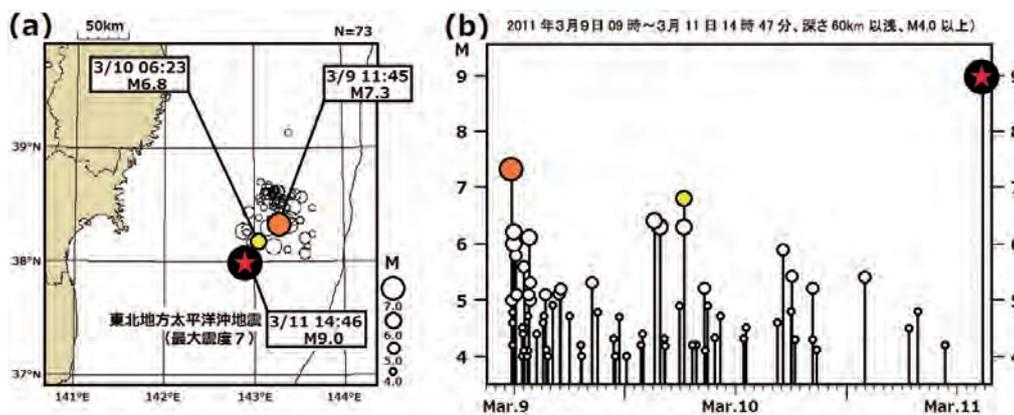


図14 3月9日三陸沖の地震(M7.3)とその余震活動、および東北地方太平洋沖地震(星印)。(a)は震央分布、(b)はM-T図を示す(気象庁, 2011a)

Fig. 14 (a) Epicentral distribution and (b) M-T diagram of the off Sanriku earthquake of March 9 (M7.3) and its aftershocks (JMA, 2011a). A star denotes the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M9.0).



図 15 東日本太平洋沖における海溝型地震の発生領域区分 (地震調査研究推進本部, 2011)

Fig. 15 Division of the region of subduction-zone earthquakes off the Pacific coast of the eastern Japan (HERP, 2011)

10. 誘発現象の問題

東北地方太平洋沖地震は M9.0 という超巨大な地震であり、大きな地殻変動によるひずみ変化が周辺に及んだと考えられる。この影響によって、広域にわたり様々な地学現象が誘発されることが懸念される。

10.1 海溝型巨大地震の誘発

大きな地震が発生すると、本震の断層面の延長部において同様の地震が連鎖的に起こる事実がしばしば報告されている。たとえば、わが国では 1854 年 12 月 23 日 (安政) 東海地震 (M8.4) とその 32 時間後の (安政) 南海地震

(M8.4), および 1944 年 12 月 7 日東南海地震 (M7.9) とその 2 年後の 1946 年 12 月 21 日南海地震 (M8.0) のペアがよく知られている。また、2004 年 12 月 26 日スマトラ島沖地震 (M9.1) では、翌年 3 月 29 日にその南東隣りで起こったニアス島沖地震 (M8.4) の誘発が, McCloskey *et al.* (2005) によって予め予想されたなど、数多くの例がある。

断層面の両端延長部分で、本震と同じ発震機構を有する地震の発生を促すクーロン破壊応力が大きくなることは、弾性論による理論的な計算でも裏付けられている。

このような連鎖的誘発現象は、海溝型地震同士のみならず活断層で起こる内陸型地震同士でも知られており、トルコの北アナトリア断層で 1939 年 (M7.8), 1942 年 (M6.9), 1943 年 (M6.3), 1944 年 (M7.6) と順番に西へ破壊域が移っていった例は有名である (Stein *et al.*, 1997)。同じアナトリア断層上で発生した 1999 年 8 月 17 日イズミット地震 (M7.4) でも、3 か月後の 11 月 12 日には東隣りでデュジェ地震 (M7.2) が発生した (Hubert-Ferrari *et al.*, 2000)。最近の例では、2010 年 9 月 4 日ニュージーランドのカンタベリー地震 (M7.3) の約 6 か月後、本震の断層面の東方延長部でクライストチャーチ地震 (M6.3) が 2011 年 2 月 22 日に発生している。

今回の地震にあてはめると、南北 500 km の断層面の北隣りと南隣りが要注意ということになるが、北方の「三陸沖北部」では 1968 年十勝沖地震 (M7.9) や 1994 年三陸はるか沖地震 (M7.5) がすでに発生しているのに対し、南方の「房総沖」では、長い間大きな地震の発生がない。過去には、今から 334 年前に 1677 年 (延宝) 房総沖地震 (M8.0) が発生し、千葉から茨城の沿岸に津波が押し寄せて死者 200 名を数えたとの記録がある。しばらくの間はこの海域での地震に対して警戒をすべきであろう。

10.2 アウターライズ地震の誘発

今回の震源域の東側では、アウターライズ地震の発生にも注意が必要である。本震の 40 分後にはすでにこのタイプの地震 M7.5 (図 11, 図 13 の④) が発生しているが、M8 級の地震の発生も警戒せねばならない。

表 1 東日本太平洋沖における海溝型地震の長期発生予測 (地震調査研究推進本部, 2011)

Table 1 Long-term forecast of subduction-zone earthquakes off the Pacific coast of the eastern Japan (HERP, 2011)

海 域	予想されるマグニチュード	今後 30 年以内の発生確率	平均発生間隔
三陸沖北部	M8.0 前後	0.5%~10%	約 97 年
三陸沖中部	(過去に大地震がなく評価不能)		
三陸沖南部海溝寄り	M7.7 前後	連動時は M8.0 前後	80%~90%
宮城県沖	M7.5 前後		99%
福島県沖	M7.4 前後 (複数地震が続発)	7%程度以下	400 年以上
茨城県沖	M6.7 ~ M7.2	90%程度以上	約 21 年
房総沖	(過去に大地震がなく評価不能)		
三陸沖北部から	M8.2 前後 (津波地震)	20%程度	133 年程度
房総沖の海溝寄り	M8.2 前後 (正断層型地震)	4%~7%	400~750 年

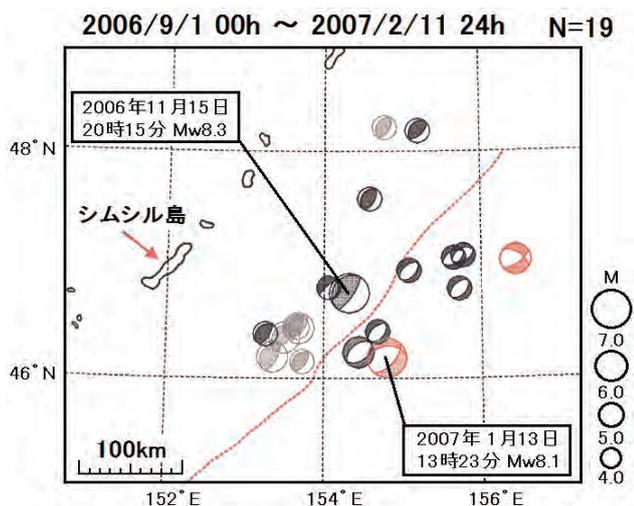


図 16 2006年11月千島列島シムシル島沖の地震が誘発した2007年1月のアウターライズ地震(気象庁, 2007)

Fig. 16 Earthquake in Kurile Islands of 2006 Nov. and accompanied outer-rise earthquake of 2007 Jan. (JMA, 2007)

わが国では、1933年3月3日の(昭和)三陸地震がアウターライズ地震の典型例として知られているが、この地震は1896年6月15日の(明治)三陸地震に誘発されたとする考え方もある。

最近では、2006年11月15日に千島列島シムシル島沖で発生したプレート境界の逆断層型地震(Mw8.3)が、その約2か月後、2007年1月13日に千島海溝の外側でMw8.1の正断層型地震を伴った例がある(図16:気象庁, 2007)。

10.3 内陸地震の誘発

6章の余震活動の項で述べたとおり、東北地方太平洋沖地震(M9.0)の発生後、内陸側においても「広義の余震」と呼ばれる地震が連発し、本震翌日の3月12日には03:59に長野県北部でM6.7、同04:47に秋田県沖でM6.4、3月15日の22:31には静岡県東部でM6.4と、M6級の地震が相次いで発生した。

図17は、防災科研Hi-netによって、本震の発生した日から1週間の期間に東日本で検知された地震の震源分布を示した図であるが、この中のA, B, Cが上記3つのM6級地震とその余震に対応している。このほかに内陸で目立つ活動として、図17のDに示す福島・茨城県境付近の浅発地震活動がある(防災科研, 2011d)。

領域Dの地震は海域の「狭義の余震」と重なって見えるが、震源の深さはごく浅く、本震の断層面からは遠く離れた活動である。この付近は従来ほとんど地震活動の見られなかった場所であるが、今回の地震の発生直後からM6級を含む活発な地震活動が生起し、4月11日にはM7.0の地震(図11, 図13の⑥)が発生して、地表断層の出現も確認された(石山ほか, 2011)。これらの地震の発震機構解は、そのほとんどが東西方向に張力軸を有する正断層型であり、4章で述べた東西伸張の地殻変動がその原因であると考えられる。

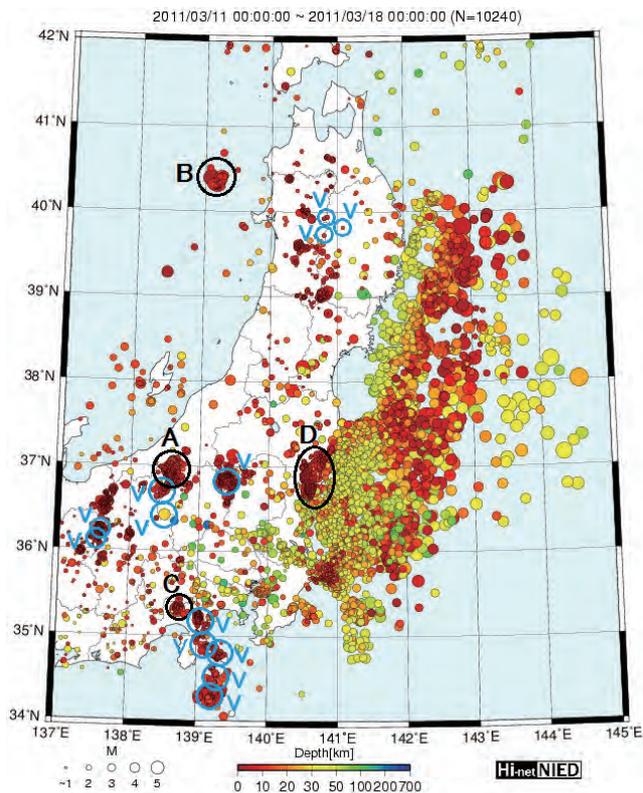


図 17 今回の地震の発生した日から1週間の期間における東日本の地震活動(防災科研Hi-netによる)。A, B, C, DはM6級を含む浅発地震活動、Vは火山関連の地震活動を示す。

Fig. 17 Seismic activity in the eastern Japan detected by NIED Hi-net in the period of 1 week from the day of the main shock. A, B, C and D are shallow inland activities including M6 events, while V are related to volcanic activities.

なお、過去に海溝型巨大地震と内陸の大地震が連動した例としては、1854年12月の(安政)東海・南海地震(M8.4)とその約1年後の1855年11月11日安政江戸地震(M6.9)のペア、1896年6月15日の(明治)三陸地震(M8.5)とその約2か月後の同年8月31日に岩手・秋田県境付近で発生した陸羽地震(M7.2)のペア、1944年12月7日東南海地震(M7.9)とその約2か月後の1945年1月13日三河地震(M6.8)のペアなどが、よく知られている。

10.4 火山噴火の誘発

図17では、領域A~Dのほかに、Vと記した地域でも地震活動の活発化が見られた。これらはいずれも東北から関東・中部地方に分布する火山に関係した活動であり、北から順に秋田焼山、岩手山、秋田駒ヶ岳、日光白根山、草津白根山、浅間山、焼岳・乗鞍岳、箱根山、伊豆東部火山群、伊豆大島、新島、神津島がこれに該当している。また、Cについても、富士山のほぼ直下で発生した地震活動である。

これらを含め、北海道から九州までの全国では計20の火山でこの地震のあとに火山性地震の活動が高まったと報告されている。ただし、いずれの火山についても、噴

火の兆候となる火山性微動や低周波地震、そして異常な表面現象などは観測されておらず、誘発された地震活動は徐々に終息へと向かった。

元来、火山地帯は力学的に弱い構造を有しており、外部からの刺激を受けやすい場所と言われている。過去に海溝型巨大地震と火山活動が連動した事例としては、1707年10月28日に発生した(宝永)東海・南海地震(M8.4)の49日後の12月16日に富士山が大噴火して宝永火口を作った例が有名である。また、青木ヶ原樹海の溶岩流を噴出した富士山の864年6月貞観大噴火の5年後に、東北地方で津波を起こした869年5月26日貞観地震(M8.3)が発生し、その2年後の871年4月8日には鳥海山が噴火している。

外国の例では、1960年5月22日チリ地震(M9.5)の2日後にチリ南部のプジェウエ火山が噴火し、同火山は2010年2月27日チリ地震(M8.8)後の2011年6月にも再び噴火した。また、1990年7月16日フィリピン地震(M7.8)の約1年後の1991年6月3日にはピナツポ火山の大噴火があり、さらに2004年12月26日スマトラ島沖地震(M9.1)では、数か月間にわたって周辺の10以上の火山で地震活動が活発化し、3か月半後の2005年4月12日にはスマトラ島のタラン火山が、また1年半後の2006年5月にはジャワ島のメラピ火山が噴火した。

今回のように超巨大な地震が起こったあと、周辺でどのような現象が発生するのかが予断を許さない状況であり、今後とも注意深く活動を見守っていく必要がある。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所(2011a)：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による強震動。 http://www.bosai.go.jp/news/oshirase/20110315_01.pdf
- 2) 防災科学技術研究所(2011b)：2011年3月12日・4月12日長野県北部の地震。 <http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/n-nagano110312/>
- 3) 防災科学技術研究所(2011c)：2011年3月15日静岡県東部の地震。 <http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/e-shizuoka110315/>
- 4) 防災科学技術研究所(2011d)：東北地方太平洋沖地震以降の茨城県北部・福島県東部の地震活動。 <http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/n-ibaraki110319/>
- 5) Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M., and Kanazawa, T. (2011): Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 815-820.
- 6) Hubert-Ferrari, A., Barka, A., Jcques, E., Nalbant, S., Meyer, B., Armijo, R., Tapponnier, P., and King, G. C. P. (2000): Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 Izmit earthquake. *Nature*, **404**, 269-273.
- 7) 石山達也・佐藤比呂志・伊藤谷生・杉戸信彦・越後智雄・加藤直子・今泉俊文(2011)：2011年4月11日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層について。 http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/fukushimahamadoori/
- 8) 地震調査研究推進本部(2011)：海溝型地震の長期評価。 http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.htm
- 9) 海上保安庁(2011)：東北地方太平洋沖地震に伴う海底の動き～海底地殻変動観測結果～。 <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/jishin/11tohoku/index.html>
- 10) 気象庁(2007)：千島列島東方の地震について(2006年11月15日Mj7.9および2007年1月13日Mj8.2)。地震予知連絡会会報, **78**, 67-85.
- 11) 気象庁(2011a)：平成23年3月11日14時46分頃の三陸沖の地震について。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11b/201103111600.html>.
- 12) 気象庁(2011b)：平成23年3月11日14時46分頃の三陸沖の地震について(第2報)。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11c/201103111620.html>
- 13) 気象庁(2011c)：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の地震の規模について(第3報)。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11d/201103111730.html>
- 14) 気象庁(2011d)：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第11報)。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/12i/201103121700.html>
- 15) 気象庁(2011e)：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第14報)。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13a/201103130900.html>
- 16) 気象庁(2011f)：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第15報)。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/201103131255.html>
- 17) 気象庁(2011g)：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第16報)。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13c/201103131830.html>
- 18) 気象庁(2011h)：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第43報)。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1105/13b/201105131700.html>
- 19) 気象庁(2011i)：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第57報)。 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1110/06e/201110061600.html>
- 20) 国土地理院(2011a)：GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動。 http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikaku_kansi40005.html
- 21) 国土地理院(2011b)：津波による浸水範囲の面積(概略値)について(第5報)。 <http://www.gsi.go.jp/common/000059939.pdf>
- 22) 国土地理院(2011c)：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル。 <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>
- 23) 国土地理院(2011d)：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の地震後の変動と滑り分布モデル(暫定)。 <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110314-index.html>
- 24) 国土地理院・海上保安庁(2011)：陸域GPS観測と海底地殻変動観測の両結果に基づくプレート境界面上の

- 地震時のすべり分布モデル. <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110520-index.html>
- 25) McCloskey, J., Nalbant, S. S., and Steacy, S. (2005) : Indonesian earthquake: Earthquake risk from co-seismic stress. *Nature*, **434**, 291.
- 26) Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- 27) 佐竹健治・行谷佑一・山木 滋(2008) : 石巻・仙台平野における869年貞観津波の数値シミュレーション. 活断層・古地震研究報告, **8**, 71-89.
- 28) 佐竹健治・酒井慎一・藤井雄士郎・篠原雅尚・金沢敏彦(2011) : 東北地方太平洋沖地震の津波波源. *科学*, **81**, 407-410.
- 29) Suzuki, W., Aoi, S., Sekiguchi, H., and Kunugi, T. (2011) : Rupture process of the 2011 Tohoku - Oki mega - thrust earthquake (M9.0) inverted from strong - motion data. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G16, doi:10.1029/2011GL049136
- 30) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2011) : 海岸工学委員会東北地方太平洋沖地震津波情報. <http://www.coastal.jp/tjt/>
- 31) Stein, R. S., Barka, A. A., and Dieterich, J. H. (1997): Progressive failure on the north Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J., Inter.*, **128**, 594-604.
- 32) USGS (2011a) : Largest Earthquakes in the World Since 1900. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10_largest_world.php
- 33) USGS (2011b) : Shake Map: near the east coast of Honshu, Japan. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/c0001xgp/>
- 34) 八木勇治(2011) : 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(Ver.4). <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/Tohoku/>

(2011年10月24日原稿受付,
2011年11月7日改稿受付,
2011年11月7日原稿受理)

要 旨

2011年3月11日,我が国の観測史上最大となるM9.0の「東北地方太平洋沖地震」が発生して巨大な津波が押し寄せ,2万人近くの死者・行方不明者を生じる未曾有の大災害となった.本震は太平洋プレートと北米プレートの境界で発生した低角逆断層型地震であり,震源域の大きさは500km×200kmという巨大なものであった.この地震に伴って,震源域周辺では陸域でも海底でも大きな地殻変動が観測され,また様々な発震機構解をもつ大量の余震が東日本の広域にわたって発生した.なお,この地震に関しては強震動,広帯域地震波形,津波,地殻変動データに基づいて様々な断層モデルが提出されている.この地震の2日前にはM7.3の前震が発生したが,次に続く大地震の前兆であるとは想像されなかった.また,東北地方沖合における海溝型地震の長期発生予測においても,このような巨大地震の発生は想定されていなかった.このような巨大地震の発生は,近隣地域での海溝型大地震やアウターライズ地震,内陸の大地震,そして火山の噴火など,さまざまな地学現象を誘発することが懸念される.

キーワード : 2011年東北地方太平洋沖地震, 津波, 地殻変動, 誘発現象