

# 東北地方太平洋沖地震について（速報）

2011年3月25日

防災科学技術研究所

理事長 岡田義光

## 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、3万人近くの死者・行方不明者を生じる未曾有の大災害となった。この地震の犠牲者に深く哀悼の意を表するとともに、被災された方々に心よりお見舞いを申し上げたい。

なお、この地震によって、福島第一原子力発電所では1号機から4号機までの冷却機能と閉じ込め機能に重大な障害を生じ、深刻な事態に陥った。これにより、一般の人々に大きな不安が広がると同時に、電力不足による前代未聞の計画停電が実施され、数多くの市民に多大なる混乱がもたらされた。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のような状況が生じ、ガソリンや食料品などの物資調達が困難になるなど、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。

ここでは、この東北地方太平洋沖地震（M9.0）の概略について、速報的な解説を行う。

## 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)。防災科学技術研究所の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。

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）、同17時30分にはM8.8（暫定値）と改められ、3月13日には最終的にM9.0と修正された。

この地震の発震機構解は、図1左上の

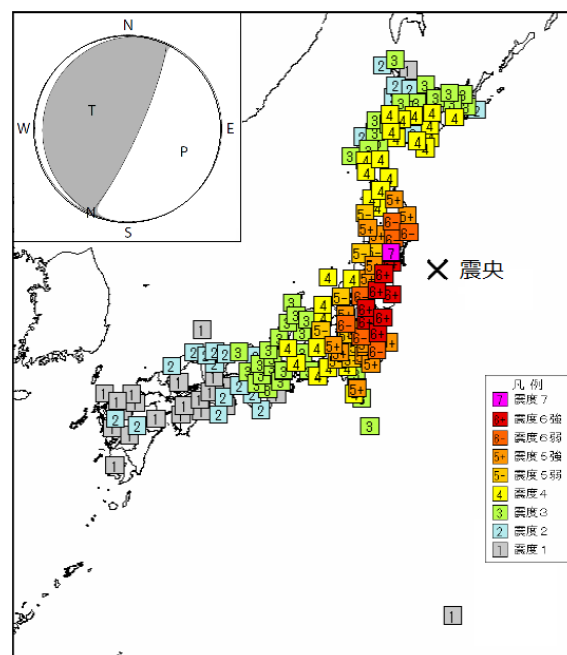


図1 2011年東北地方太平洋沖地震の発震機構解（左上）と震度分布（気象庁資料より合成）

ように西北西－東南東方向に圧力軸をもつ低角逆断層型というものである。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)。

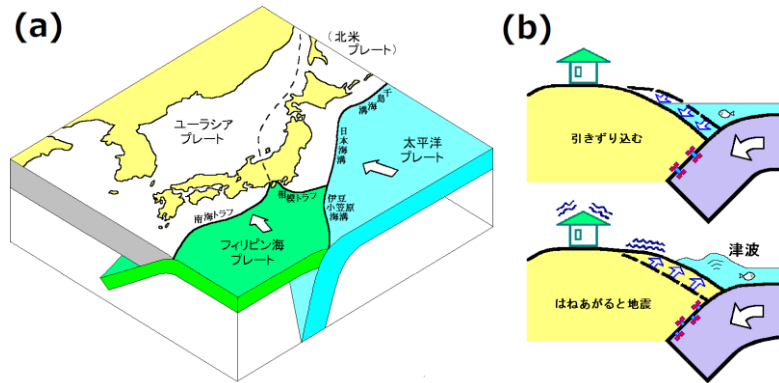


図 2 (a)日本列島周辺のプレート構造, (b)プレート沈み込みによる海溝型大地震発生の模式図

図 1 では震源が×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。これを断層面と呼び、この断層面の広がり、ずれの量の大きさが地震のマグニチュードを決定する。震源 (破壊の出発点) の真上の点を震央と呼び、断層面を地表に投影した部分を震源域と呼ぶ。

図 3 (b) は、今回の地震の概要を速報した米国地質調査所 (USGS) の資料である。三陸沖の星印が震央、四角の範囲が震源域を示しており、この南北約 500km、東西約 200km 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 20m 近くに達したものと見られている。

なお、この地震については、宮城県石巻市大田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。

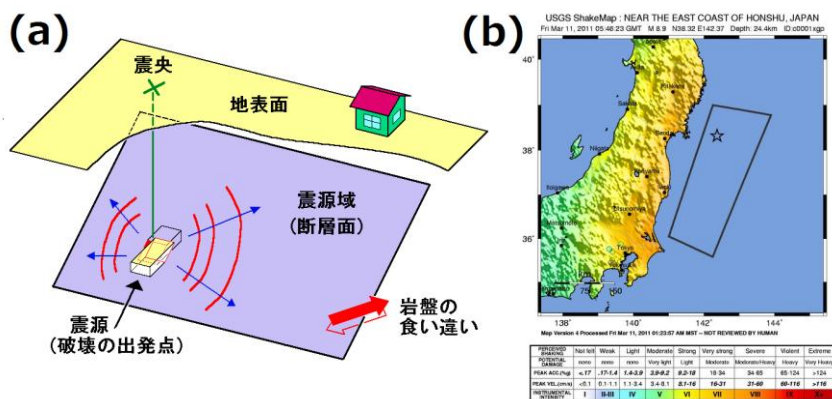


図 3 (a) 一般的な地震の発生様式 (断層運動), (b)米国 USGS による東北地方太平洋沖地震の概要図。陸上のカラーは震度の分布 (MM 震度階) を示す。

### 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、津波の規模も大変に大きかった。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。

岩手県の釜石、石巻、大船渡などでは、津波の第1波が14時46分、すなわち地震の発生と同時に到着し、最大波は15時20分前後、すなわち地震発生の際の約30分後にこれらの地を襲っている。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、岩手県の釜石で8.1m以上、大船渡で8.0m以上、福島県相馬で7.3m以上、茨城県大洗で4.2mなどの最大波高が記録されている。

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、15時30分には北海道太平洋沿岸と伊豆諸島、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。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。

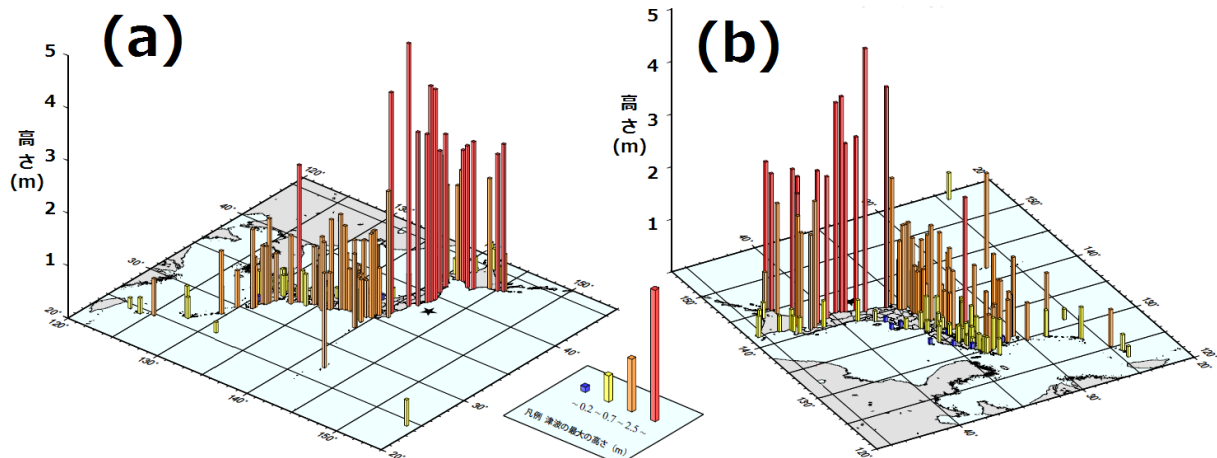


図4 (a)太平洋側、および(b)日本海側から見た津波最大波高の分布（気象庁資料に加筆合成）  
8m以上を記録した宮古、大船渡のデータは含まれていない。

### 4. 地殻変動

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、国土地理院のGPS観測網によって捉えられた、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4.4m、石巻市牡鹿では最大となる5.3m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1m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。

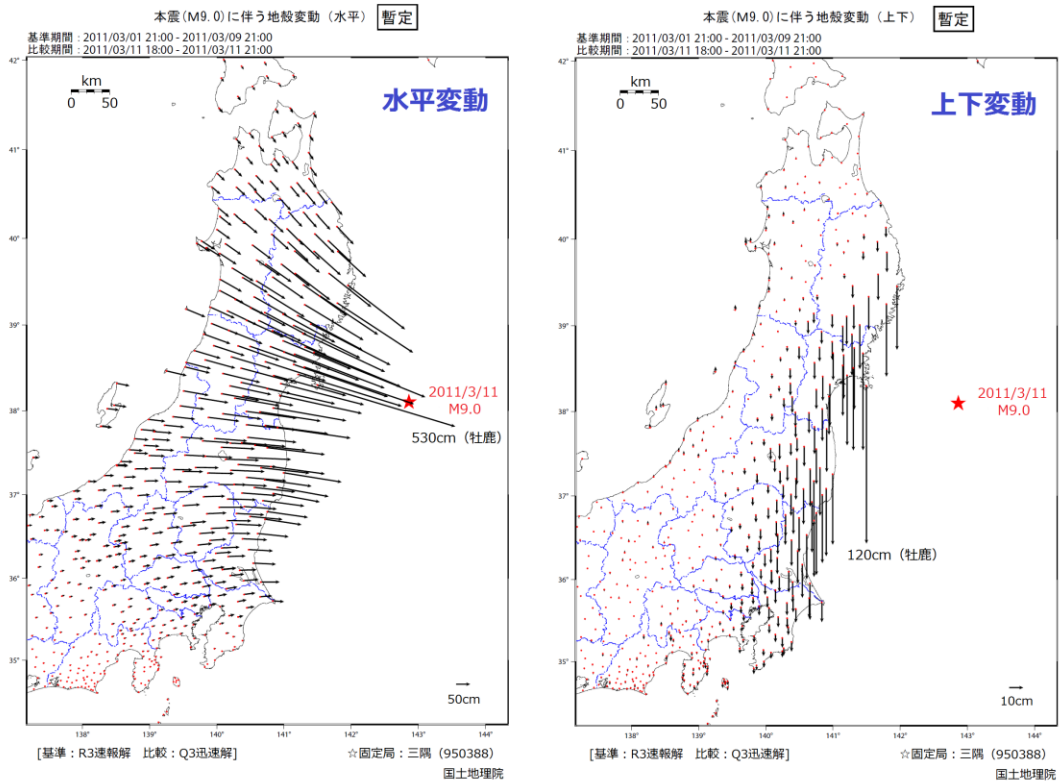


図5 東北地方太平洋沖地震に伴う東日本の地殻変動（国土地理院資料に加筆合成）

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 10cm におよぶ沈下を生じ、志津川では 75cm、牡鹿では最大となる 120cm の沈降が観測された。このように地盤が沈降したことによって、津波で入った海水は引きにくくなる状況となり、また、堤防や土地そのものが低くなったことで、次の津波への備えが弱体化する結果をもたらしている。

なお、図5によれば、東京も東へ 20cm ほど移動すると同時に、約 5cm 沈下したように見られる。また、国土地理院によれば、地震発生後も、東北地方から関東地方の広い範囲で東向きの地殻変動が継続して見られ、その大きさは岩手県山田町で 25 cm、千葉県銚子市で 17 cm など、大きいところでは 20 cm を超える余効変動が観測されているとのことである（3月19日現在）。

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6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理論的に求めたものである。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。

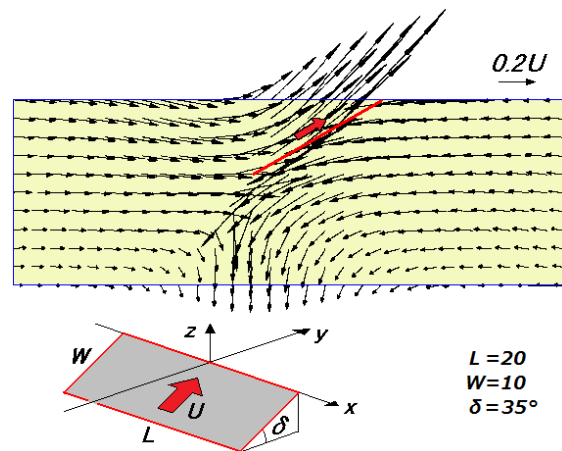


図6 逆断層による地表面（海底面）および地球内部の変形の様子（断層面に直交する面上での変位分布）

## 5. 余震活動

図 7 (a) は、東北地方太平洋沖地震の発生した 3 月 11 日から約 11 日間の間に発生した、本震と M5 以上の余震の震源分布を示す。宮城県沖の赤い丸印が本震の震源、橙色がその後発生した M7 級の地震、黄色が M6 級の地震の位置を示している。

余震は、岩手県沖から茨城県沖にかけての南北約 500km、東西約 200km ほどの範囲に密集しており、これは図 3 (b) に示した震源域の範囲に相当する。M9.0 の本震では、地下における破壊（岩盤のずれ）が赤丸印の震源位置からスタートし、北は岩手県沖まで、南は茨城県沖まで達して、巨大な切れ目状の断層面を形成した。数限りない余震は、いわば、この切り傷がズキズキするような形で発生している。

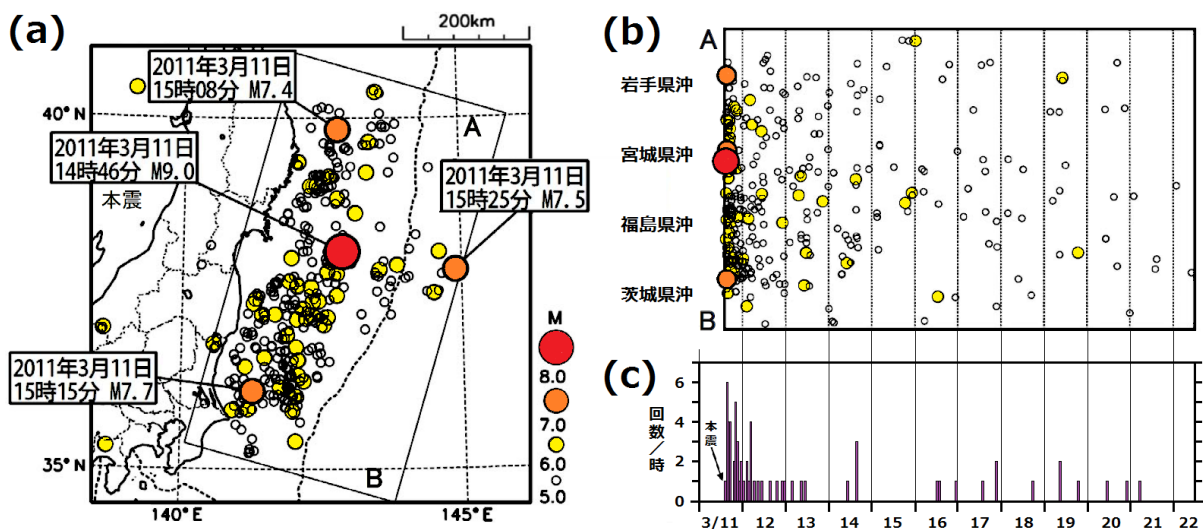


図 7 (a)本震および 3 月 11 日～22 日に発生した M5 以上の余震の分布, (b)矩形領域内で発生した地震の AB 方向に沿った時空間分布図, (c)震度 4 以上の有感地震の時間ごと回数の推移（気象庁資料に加筆合成）

このように本震の断層面付近で発生する余震は「狭義の余震」と呼ばれるが、一方、この震源域から遠く離れた場所でも、「広義の余震」と呼ばれる地震が発生している。これらは、本震の影響で誘発されたものと考えられ、本震翌日(3/12)の 03:59 に長野県北部(M6.7)、同 04:47 に秋田県沖(M6.4)、3/15 の 22:31 に静岡県東部(M6.4)と、強い地震が続発した。

長野県北部の地震では最大震度 6 強が長野県栄村で記録され、また、静岡県東部の地震でも静岡県富士宮市で震度 6 強が観測された。どちらも浅い内陸地震であるが、後者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なった。なお、図 7(a)に見られる震源の全体分布を図 2(a)のプレート構造図と見比べてみると、狭義の余震と広義の余震を含めた全体は、ちょうど北米プレートの縁をなぞって発生しているようにも見える。

図 7(b) は、同図(a) 内の長方形範囲で発生した地震の AB 方向に沿った時空間分布、図 7(c) は、最大震度 4 以上を記録した有感地震の時間ごとの回数の推移を示している。M7 級の余震は、本震発生後 20 分から 40 分間に M7.4, M7.7, M7.5 と 3 つが続発したのち発生していないが、本震発生後 11 日間の間に、M6 以上の地震の発生は 52 個、最大震度 4

以上の有感地震の発生回数は 64 回を数えている。ちなみに、今回の地震と同様、巨大な津波を生じた 2004 年 12 月のスマトラ島沖地震(M9.1)では、本震の 3.5 時間後に M7.1 の最大余震が発生し、また M6 以上の余震の発生回数は 65 回であった。

図 8 は、本震発生から 10 日間の M5 以上の余震の積算回数を、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（気象庁資料）である。今回は巨大な地震であり、震源域も広いため、これまでに例のないほど沢山の余震が発生していることがわかる。全体的な傾向としては、時々大き目のものを混じえながらも、余震の発生間隔は徐々に延び、発生数も少なくなっていくものと思われる。

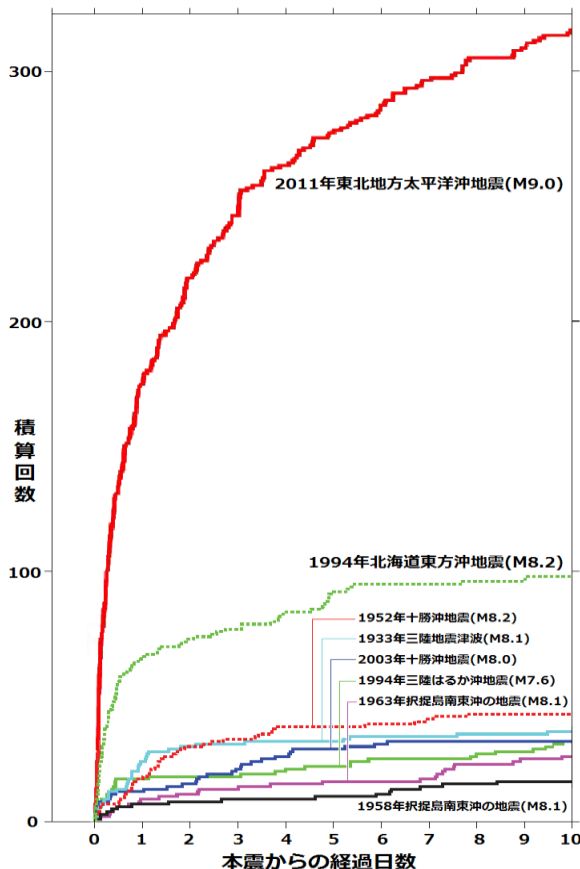


図 8 本震発生後 10 日間の M5 以上の余震の積算回数と、過去の海溝型地震との比較（気象庁資料に加筆合成）

## 6. 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 9)。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。

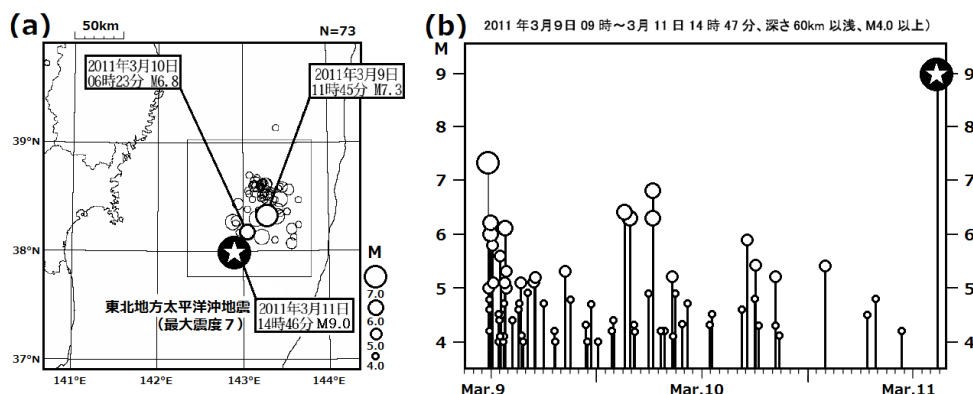


図 9 3 月 9 日三陸沖の地震(M7.3)とその余震活動、および、東北地方太平洋沖地震(星印)の位置。(a)は震源分布、(b)は M-T 図を示す。(気象庁資料に加筆合成)

## 7. 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 10 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 年間に於ける地震発生確率、および平均発生間隔は表 1 のように評価されていた。

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による）

| 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<br>80%~90% | 105 年程度   |
| 宮城県沖                | M7.5 前後           |                 |           |
| 福島県沖                | M7.4 前後 (複数地震が続発) | 99%             | 37 年      |
| 茨城県沖                | M6.7~M7.2         | 7%程度以下          | 400 年以上   |
| 房総沖                 | (過去に大地震がなく評価不能)   |                 |           |
| 三陸沖北部から<br>房総沖の海溝寄り | M8.2 前後 (津波地震)    | 20%程度           | 133 年程度   |
|                     | M8.2 前後 (正断層型地震)  | 4%~7%           | 400~750 年 |

「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。次いで本年 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、殆どの人が想像できなかった。

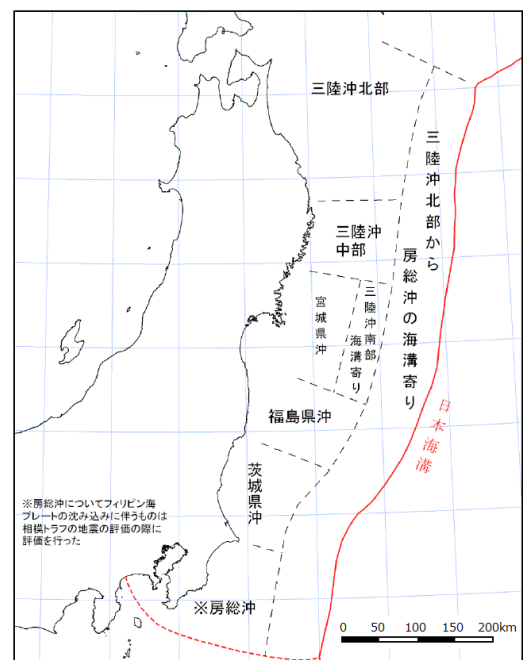


図 10 東日本太平洋沖における海溝型地震の発生領域分け（地震調査研究推進本部による）

## 8. 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。

### (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場合が多いことが知られている。たとえば、1854 年(安政)東海地震(M8.4)とその 32 時間後の(安政)南海地震(M8.4)、1944 年東南海地震(M7.9)と 1946 年南海地震(M8.0)、2004 年 12 月スマトラ島沖地震(M9.1)と翌年 3 月にその東隣りで起こったニアス島沖地震(M8.4)、2010 年 9 月ニュージーランドのカンタベリー地震(M7.3)と翌年 2 月のクライストチャーチ地震(M6.3)など、数多くの例がある。

今回の地震にあてはめると、南北 500km の断層面の北方延長と南方延長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。ところが、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。少なくとも半年から 1 年くらいは、この海域での地震に対して警戒をすべきであろう。

### (2) 内陸地震の誘発

5 節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 級の地震が相次いだ。

図 11 は、本震発生の翌日から 1 週間の期間に東日本で発生した地震の震源分布を示しているが、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、同図の D に示す福島・茨城県境の浅発地震活動がある。ここは、普段ほとんど地震活動の見られない場所であるが、今回は M6 級地震を含む活発な地震活動が生起して

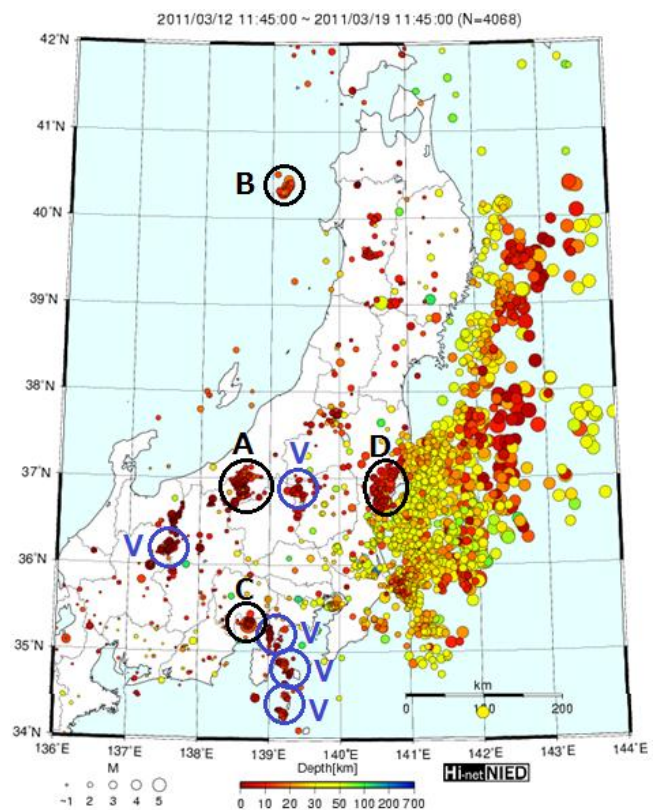


図 11 今回の地震発生の翌日から 1 週間の期間における東日本の地震活動（防災科研 Hi-net の自動処理震源による）。A,B,C,D は M6 級を含む浅発地震活動、V は火山関連の地震活動を示す。



おり、何度か震度 5 強の揺れも記録されている。地震の発震機構解は東西方向に張力軸を有する正断層型が多いことから、4 節で述べた東西伸張の地殻変動が関係している可能性が高い。

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、1896 年 6 月（明治）三陸の津波地震(M8.2)と、同年 8 月に岩手・秋田県境付近で発生した陸羽地震(M7.2) のペアがよく知られている。

### （3）火山活動の誘発

図 11 では、A～D のほかに、V と記した地域で地震活動の活発化が見られた。これらはいずれも中部地方の火山に関係した活動であり、日光白根山、焼岳・乗鞍岳、箱根山、伊豆大島、新島・神津島に該当している。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。

元来、火山地帯は力学的に弱い構造を有しており、刺激を受けやすい場所と言われている。なお、中部地方のみならず、九州の火山でも東北地方太平洋沖地震のあとに火山性地震の活動が高まったとの報告がある。ただし、いずれの火山についても、噴火に結びつくような表面現象は観測されていない。

海溝型巨大地震と火山との連動では、1707 年(宝永)東海・南海地震(M8.4)の 49 日後に富士山が大噴火し、宝永火口を作った例が有名である。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は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。