

東日本
大震災
速報

2011年東日本大震災：本震・誘発地震・情報

橋本 学*

1. はじめに

2011年(平成23年)3月11日14時46分(JST)頃、宮城県はるか沖合を震源とする巨大地震が発生し、20mを超える津波や震度6強から7の強い揺れにより、東北から関東にかけて死者・行方不明者計約24,000名(5月19日現在)を含む甚大な被害をもたらした。さらに、福島第一原子力発電所の冷却機能が津波により完全に破壊されるという事態も生じ、我が国の歴史生まれに見る大災害となった。

政府の地震調査委員会は、宮城県沖において1978年の地震と同程度の地震発生の可能性を指摘していた(地震調査委員会, 2000)が、実際に発生した地震は予想を遥かに超える規模のものであった。この問題に関する総括なしでは、地震科学は次のステップへ進むことはできない。とはいえ、まずは今回の本震とそれに引き続く日本列島内の活動は一体どのような物であったか、認識を共有することが第一歩である。しかしながら、現在世界の研究者が競って研究を進めているため、本小論でこれを尽くすことは不可能である。現時点の成果のほんの一部を紹介するに留まる。

今回の地震は、緊急地震速報が導入されて初めての巨大地震であった。長期評価の問題点も含め、今回の震災を契機に浮かび上がった地震に関する情報・評価の問題について議論する。

2. どんな地震だったのか?

東北日本下には日本海溝から太平洋プレートが

沈み込んでおり、このプレートとオホーツク(あるいは北米)プレートとの間の相対運動により、地震・地殻変動が生じている。今回の地震もプレート間地震であり、低角逆断層型のCMT解が求まっている(図1; Harvard University Global CMT Project, 2011)。太平洋海域に求まっている地震のうち、本震と同じ低角逆断層型の地震が顕著な余震であり、余震域は岩手県沖から茨城県沖にまで広がっている。最大余震は、3月11日15時15分頃に茨城県沖

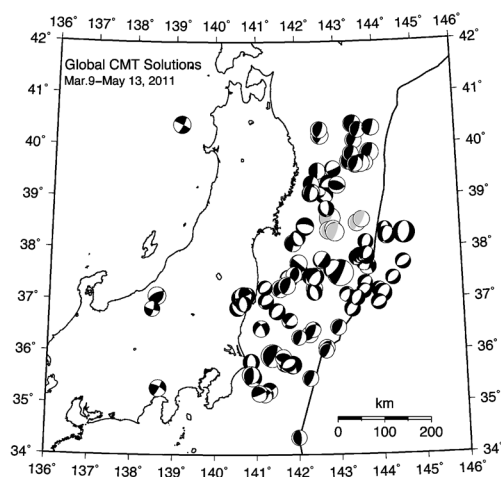


図1 2011年3月9日から東日本で発生した主な地震のCMT解。3月9～10日の地震は灰色で表示している。震源球の大きさはMwに比例しており、最も大きいものが本震を示す(Harvard University Global CMT Project (2011)のデータより作成)。

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

で発生した Mw7.7 である。また、日本海溝周辺で正断層型の CMT 解を持つ地震も発生しており、この内 3 月 11 日 15 時 25 分頃には Mw7.5 の地震が海溝軸からさらに沖合で発生した。図 2 は、気象庁一元化震源の震央を本震の前後で分けてプロットしたものである。南北約 500 km、東西約 200 km の領域で余震が発生しており、Mw9.0 の断層面の大きさが推定できる。本震発生前後の地震の分布を比べると、以下の 3 点に気付く。

- 1) 本震発生前の 3 月 9 ~ 10 日に M7.3, M6.8 など比較的規模の大きい地震の発生が相次いだ。これらの地震の活動域には余震がほとんど発生していない。
- 2) 本震発生後、深さ 100 km より深い地震の活動が低下した。
- 3) 本州内陸部で誘発地震活動が認められるが、これらの活動域では本震発生前の地震活動が低い。

2) 3) は、本震の発生により日本列島とその周辺の応力場が大きく変化したことを示唆している。ただし、用いた震源データは現時点の暫定解である。本震直後の夥しい余震の発生や、観測網の障

害による検知能力の低下により、見かけ上活動が低下した可能性もある。今後の精査を待ちたい。

さて、3 月 11 日 14 時 46 分の本震の震源過程はどのようなものであったのか？まず、強震動波形を見てみよう。図 3 (b) は、防災科学技術研究所の KiK-net の東北～関東地方の観測点におけるエンベロープ波形を北から順番に並べたものである(後藤, 2011)。東北地方の観測点では 2 つの波群が認められ、これらが宮城県付近から南北両方向へ伝播している様子がわかる。これに対して、福島県から南の観測点では顕著な波群は 1 つしか見られない。また、2 番目の波群が福島県付近に伝わった頃(図中の 120 秒付近)から、福島県あたりから北に向けて伝播する波群も認められる。これらの観察結果を総合すると、大きな破壊は 3 つあり、最初の 2 つは宮城県沖で発生し、2 番目波群が伝わった後福島県沖で新しい破壊が誘発されたと考えられる。

このことは、国土地理院の GPS 連続観測網(GEONET) データからも推察できる。図 4 は、岩手県から茨城県までの GEONET 観測点のデー

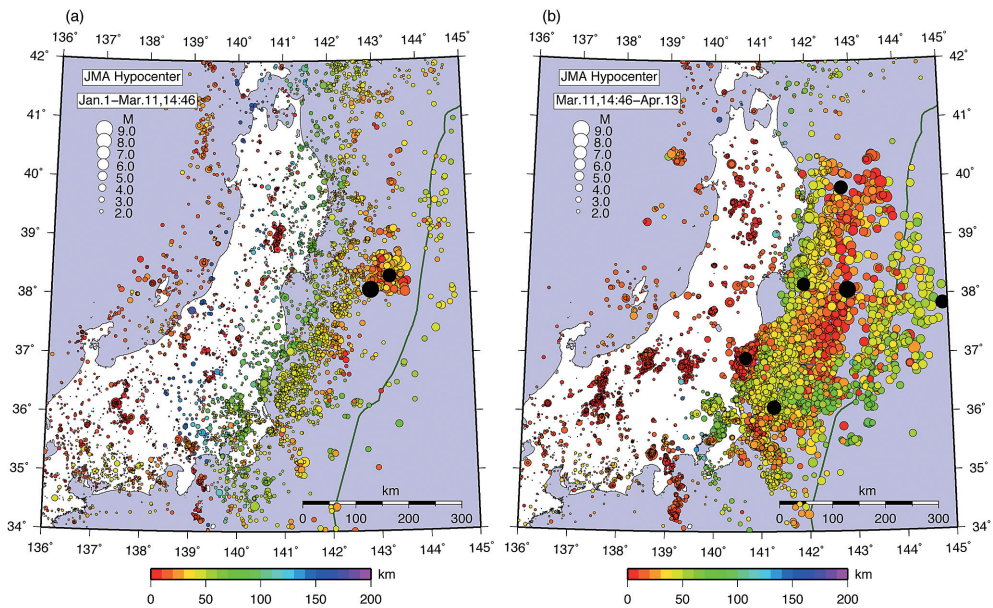


図 2 3 月 11 日 14 時 46 分の本震発生で区切った東日本の震央分布。(a) 2011 年 1 月 1 日から 3 月 11 日の本震まで。(b) 3 月 11 日の本震発生から 4 月 13 日まで。気象庁一元化震源を使用。黒い●は Mw7.0 以上の地震を示す。最も大きいものが本震の震央。緑線は、海溝軸を示す。

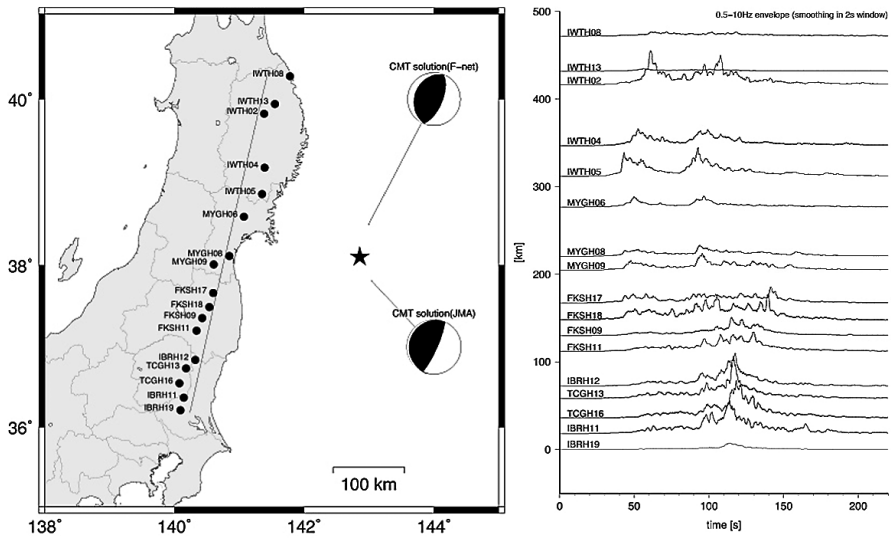


図3 防災科学技術研究所 KiK-net の南北に配列する観測点のエンベロープ波形（東西成分）（後藤，2011）。左図中の青丸が観測点の位置を示す。CMT 解は USGS（2011）によるもの。

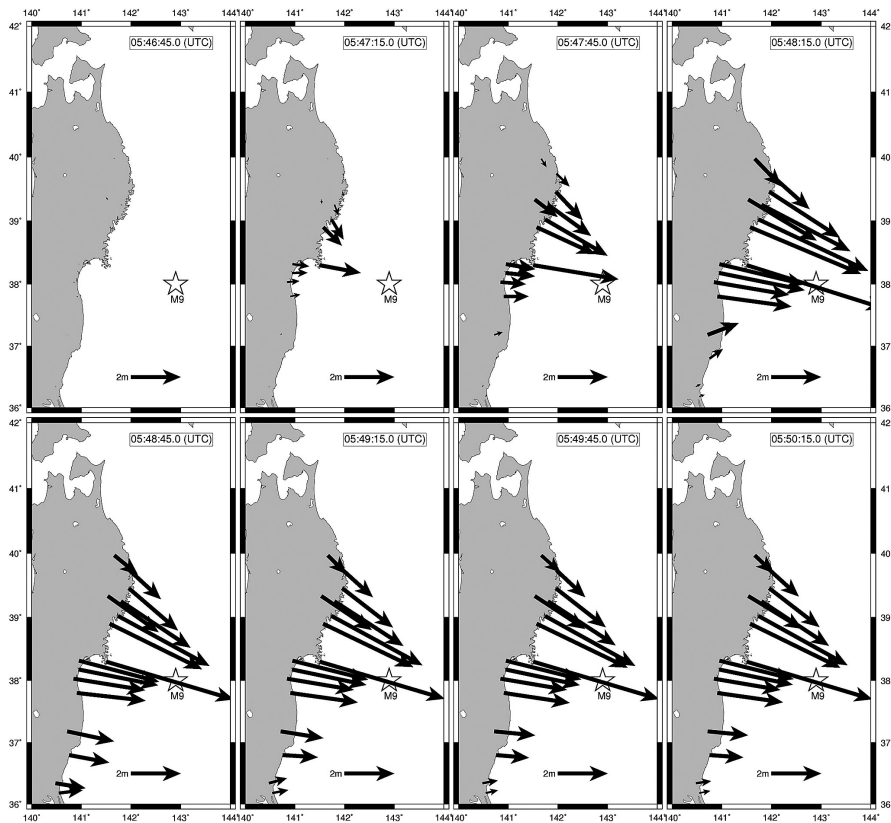


図4 キネマティック解析で得られた GEONET 観測点の30秒ごとの累積変位。

タにキネマティック解析を適用し、30秒ごとの累積水平変位を示したものである。解析には、高須・笠井（2005）による GpsTools を用いた。宮城県から岩手県南部の観測点は、14時47分15秒までに変位を開始しているが、福島県以南の観測点に変位はまだ見られない。30秒後、岩手県南部の観測点の変位は南東から東南東方向へ向きを変えていることがわかる。主たる破壊域が移動した可能性がある。福島県の観測点はこの頃に変位を始めたが、その方向は北東である。すなわち、14時48分15秒ころまでは、顕著なすべりは宮城県沖で生じていた。しかし、14時48分45秒になると、福島県以南の観測点は一斉に東南東方向へ向きを変えており、この時点までに茨城県沖で大きなすべりが発生したことを示唆する。なお、牡鹿半島先端の観測点（牡鹿）などに見られるように、14時48分15秒に変位が最大となり、その後の30秒間で少し戻っていることがわかる。最大変位には、動的

な変位が重畳しているものと考えられる。

ところで、地震動の分布に特徴はあるだろうか？図5は、KiK-net 観測点での最大加速度の分布である（後藤，2011）。岩手県北部では200gal程度であるのに対し、宮城県から茨城県にかけて500gal以上の大きい加速度が観測されている。特に、茨城県で900galを超える加速度が観測されていることが注目される。

巨大海溝型地震であるため、長周期地震動の発生が懸念された。東京・新宿の超高層ビル街が揺れている映像がインターネット上で紹介されていたが（例えば、<http://www.youtube.com/watch?v=UVLMli-duMw>）、幸い顕著な被害は報告されていない。実際観測された地震動を見ると、周期2～30秒の波動が認められる（図6）。継続時間も400秒を超えている（防災科学技術研究所，2011a）。

この地震に伴って、日本列島に大きな地殻変動が生じた。図7は、GEONETのデータをキネマ

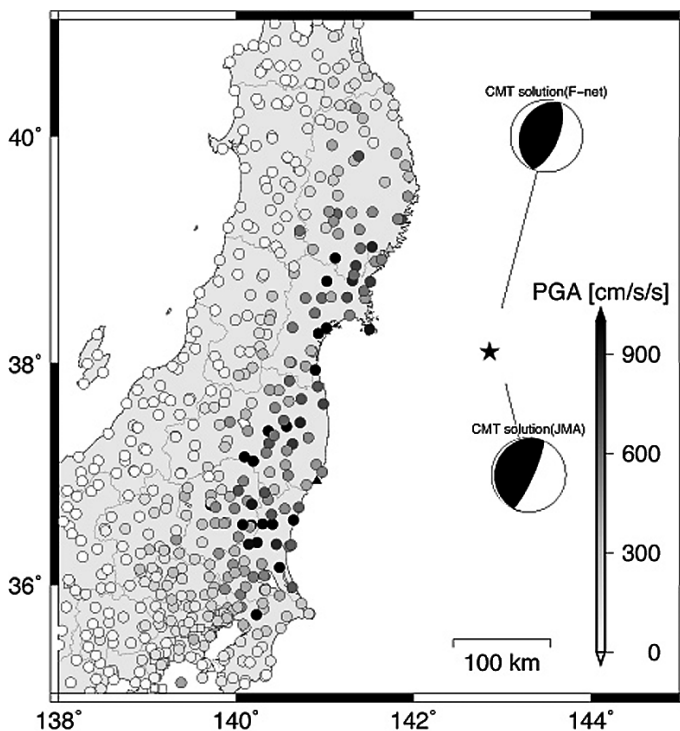


図5 最大加速度の分布（防災科学技術研究所，東京大学地震研究所，産業技術総合研究所，国土技術政策総合研究所のデータに基づく）（後藤，2011）。

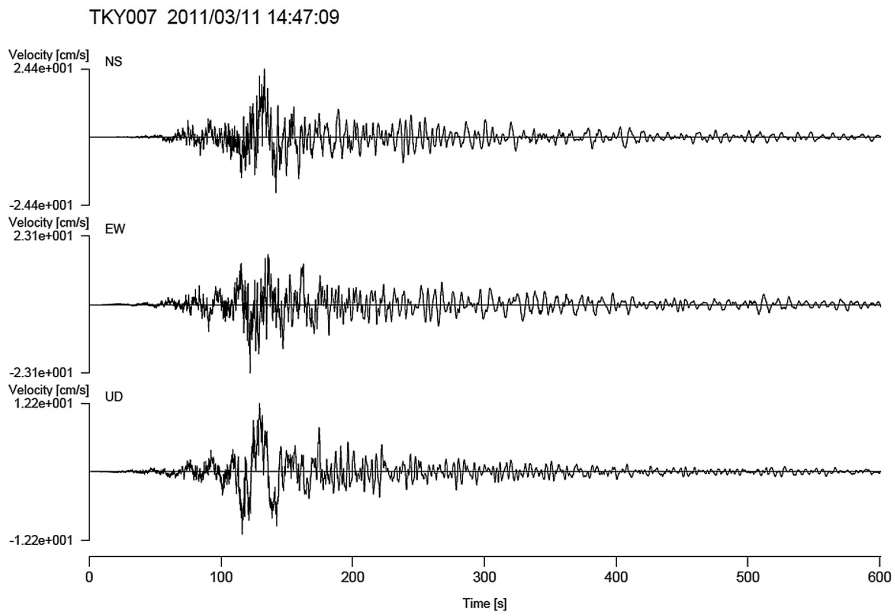


図6 防災科学技術研究所 K-net 新宿の速度波形。上から、南北、東西および上下成分 (防災科学技術研究所, 2011 a)。

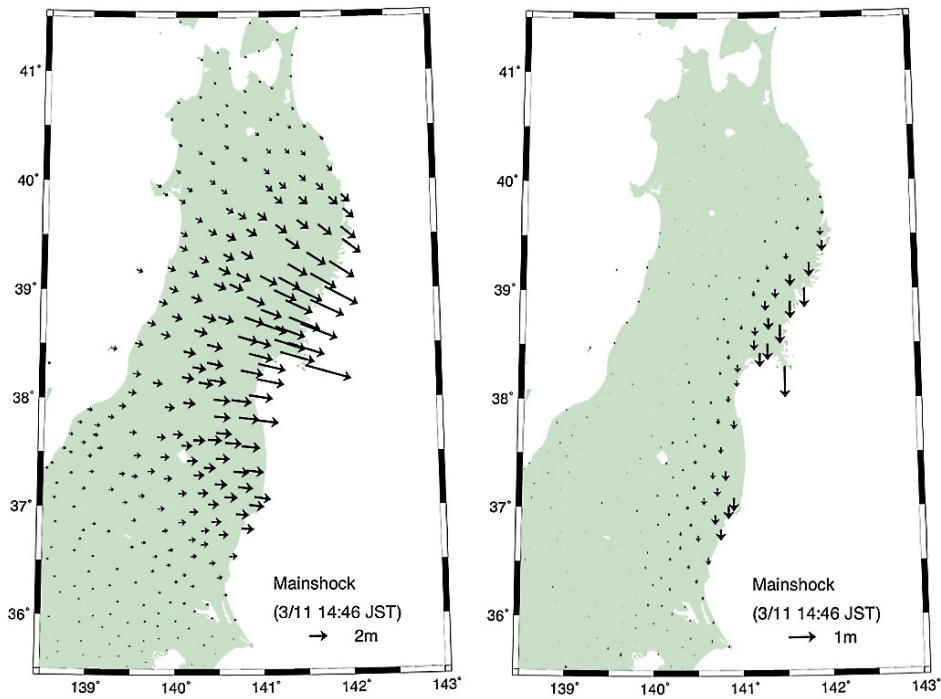


図7 GEONET 観測データからキネマティック解析手法を用いて推定した本震の地震時変位。(左) 水平成分, (右) 上下成分 (宮崎, 2011)。

ティック解析し、図5に見られるような動的な変位が十分収まった後の位置と地震前の位置の差を取って推定した本震時の変位である(宮崎, 2011)。約30分後に茨城県沖で最大余震が発生しているが、図7にはその変位が含まれていない。

牡鹿半島先端の牡鹿観測点の変位が最大で、東南東方向へ約5.2m移動し、約1.1m沈降した。その他、岩手県から福島県の観測点が2m以上南東ないしは東へ移動し、太平洋岸に近い観測点ほど大きく沈降した。なお、海上保安庁(2011)と

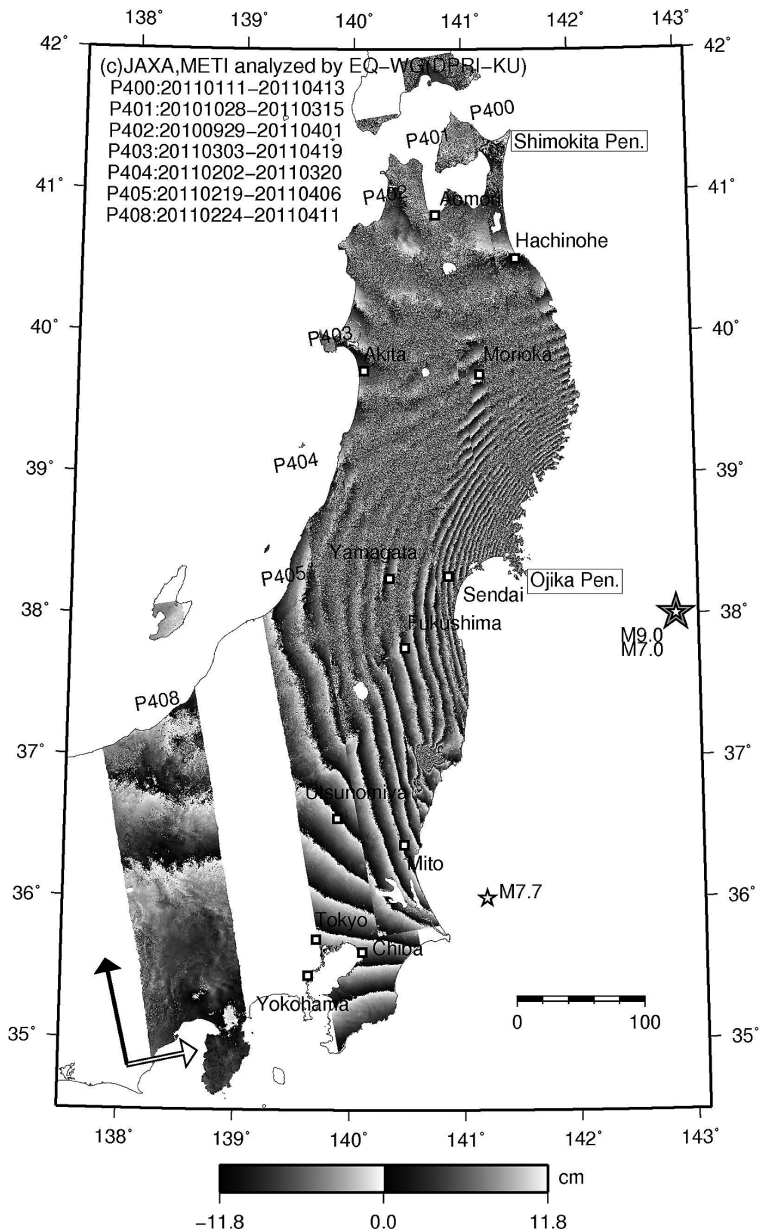


図8 陸域観測技術衛星「だいち」搭載 PALSAR 干渉画像。

東北大学 (2011) は GPS-音響結合法による震源域直上の海底基準点の測位の結果、それぞれ24mと31mの変位を観測している。このように、今回の地震により日本列島が東方向に大きく変位し、かつ太平洋岸を中心に大きく沈降したことが明らかである。

なお、防災科学技術研究所のHi-net傾斜計の記録などには、本震発生に先行する変動は観測されていない (防災科学技術研究所, 2011b)。

図8は、陸域観測技術衛星「だいち」搭載の合成開口レーダーPALSAR画像の解析で得られた東日本の地殻変動である。非常に多くの干渉縞が認められ、大きな地殻変動が東日本一帯に発生したことがわかる。下北半島付近を基準にすると牡鹿半島先端が約3.5m衛星から遠ざかった。図8においては、衛星は西南西方向仰角約50°の上空から地表を観測しているので、この結果は牡鹿半島の東方向への移動あるいは沈降を示し、量的にもGPS観測結果と調和する。

このように地震波や地殻変動のデータ、さらには津波など、極めて多くの良質の観測データが得られており、これらを用いて震源断層運動を推定する試みが、世界中の研究者によりなされている。図9に、そのほんの一部を示す。図9(a)は遠地実体波解析から得られたすべり分布 (八木・西村,

2011)、図9(b)は図7のGPS観測点の変位から推定したすべり分布 (宮崎, 2011)、図9(c)は津波データとGPS変位のジョイント・インバージョンにより推定したすべり分布 (谷岡, 2011)、図9(d)はGPS観測点の変位と遠地実体波からジョイント・インバージョンで推定したすべり分布 (Wei et al., 2011) である。結果がやや異なるのは、用いるデータの持つ解像度の違いによる。すなわち、GPSの精度は高いが、陸にしか観測点がないため沿岸から遠く離れた領域の解像度はほとんどない。津波は主として上下変動に感度が高い。地震波は時刻歴を捉えることができるが、観測データの分布やモデルの仮定に大きく影響される。というように、それぞれ一長一短がある。しかし、4つの結果に共通して、東経143°、北緯38°付近に約25~35mのすべりのピークがあり、さらにすべりが10mを超える領域が海溝軸に平行に北緯36°~40°の範囲に広がっている。前述のすべりのピークの陸側に震央があることから、宮城県東方沖から破壊が始まり、引き続いて日本海溝の近くで30m前後の大きなすべりが起きた。この大きなすべりに引き続いて、10mを超えるすべりを三陸沖から福島・茨城県沖までの非常に広い範囲で引き起こしたと考えられる。

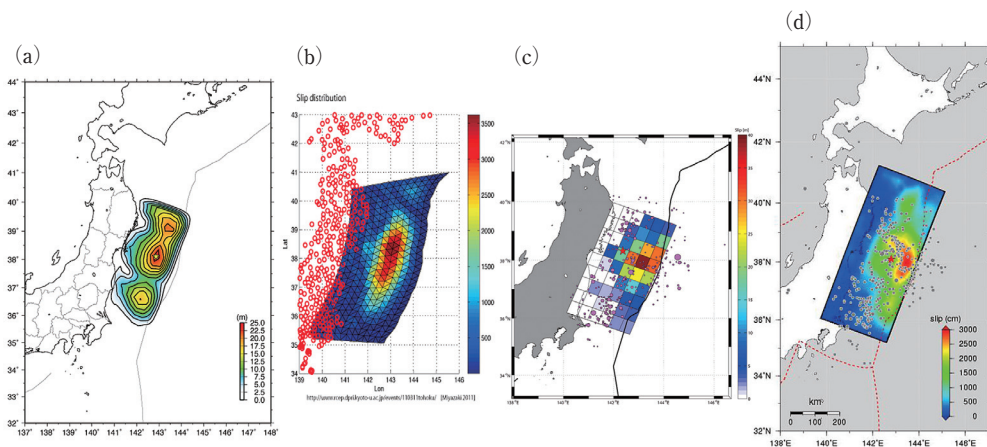


図9 種々のデータに基づく本震のすべり分布。(a)遠地実体波から推定されたモデル (八木, 2011)、(b)GPSによる地震時変位から推定されたモデル (宮崎, 2011)、(c)津波波形とGPS変位から推定されたモデル (谷岡, 2011)、(d)遠地実体波とGPS変位から推定されたモデル (Wei et al., 2011)。

3. 誘発された地震活動

図2(b)の本震発生後の震央分布には、本州内陸の非常に広い地域で誘発された地震活動が認められる。このうち、3月12日の長野県北部、15日の静岡県東部、19日の茨城県北部、23日と4月11日の福島県南部において M_{\max} が6.0以上の地震が発生し、死者も含む被害が発生した。図8の干渉画像を見ると、本震による地殻変動を示す大きな縞に重畳して、これらの地震に伴う局所的な乱れが認められる。図2(a)の本震発生前の震央分布と比較すると、誘発された地震は本震発生前には地震活動が低い地域で起きているように見える。特に、茨城県北部・福島県南部の地震は、これまでほとんど活動が見られなかった地域で起きたものであり、ほとんどの地震が東西方向の張力が卓越する正断層型のCMT解を持つ(防災科学技術研究所, 2011c)。図7から明らかなように、本震により本州が強く東西方向に引っ張られたため、本州内陸の応力分布が変化してしまったものと考えられる。M9クラスの巨大地震発生後、震源域周辺の地殻の状態が発生前に戻するには、数10年の時間が必要であるとの指摘がある(例えば、Wang et al., 2002; Hu et al., 2004; Larsen et al., 2003)。このため、本州内陸の地震活動もすぐに収まるとは考えにくく、注意深く監視を続けていかなければならない。

4. 地震に関する情報の問題

前節までにおいて、観測された地震活動・地殻変動を概観してきた。この節では、地震に関する情報にまつわる問題を議論する。

4.1 緊急地震速報と津波警報の問題

2007年(平成19年)より導入された気象庁の緊急地震速報は、P波とS波の伝播時間差を用いて、主要動であるS波到達前に特定の地点の震度と到達時刻を知らせるというものである。3月11日の本震に際しても緊急地震速報は発表された(気象庁, 2011a)。本震発生後の8.6秒後の14時46分48.8秒に警報が発表されているが、この時の推定マグニチュードは7.2、最大震度は4であった。その

後時間の経過とともにデータが増えるに従って、マグニチュードも最大震度も増加していった。本震発生105秒後に出された第14報によると、マグニチュードが8.1、最大震度は宮城県中部で5弱から6弱程度と推定されている。実際新幹線などは無事に停車し、大きな事故は発生しなかったもので、この点では緊急地震速報はうまく機能したと言える。しかし、マグニチュードが8.1、最大震度が6弱と、実際の現象の大幅な過小評価であった。この問題は、緊急地震速報が点震源を仮定してマグニチュードを計算することに起因する本質的な問題である。巨大地震に対しては有限断層長を考慮した緊急地震速報の開発が進められているが(例えば、Yamada et al., 2007; Yamada and Heaton, 2008)、残念ながら今回の地震には間に合わなかった。

一方、本震以降の緊急地震速報は大幅な精度低下を見ることになった。3月11日から4月28日までの間に、70回緊急地震速報(警報)が発表されたが44回において、対象地域内で震度2以下となった。本震前は、17回のうち5回であった。これは、本震に伴う停電や観測・通信施設の被害により使用できる観測点数が減ったこと、広域にわたる余震・誘発地震活動のため異なる場所で非常に短い時間間隔で地震が発生したこと、が影響したとされている(気象庁, 2011b)。緊急地震速報は鉄道などに広く活用されている公共インフラであり、非常時にこそ正常に作動することが期待される。したがって、本震による停電等に影響されないようなバックアップ体制の整備が課題として浮かび上がった。なお、最大震度5弱以上を観測した地震46回のうち26回には、緊急地震速報(警報)が発表されている。この割合は、本震前の18回のうち10回という実績と同等であることを付け加えておく。

新聞報道によると、最初の津波警報に示された岩手、福島で3 m、宮城で6 mの予想波高の数値を自治体が避難を呼びかける際に用いたことから、迅速に避難行動を起こさなかった住民がいたという(朝日新聞, <http://www.asahi.com/paper/editorial/20110502.html>)。緊急地震速報にせよ、津波警報にせよ、限られた時間内に限られたデータで予測

することの困難さゆえ、大きな不確定性を持つ情報を提供せざるを得ない。しかし、公的な機関が出す情報であるがために、住民は頼ってしまう。これらの情報の精度向上は不可欠であるが、伝え方に関してもっと配慮が必要ではなかっただろうか？

4.2 長期評価

政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会は、宮城県沖や日本海溝沿いで発生する海溝型地震について、過去の地震活動や歴史史料・津波堆積物調査等の成果に基づいて評価していた。このうち、宮城県沖を震源とする地震については、「地震発生の可能性は、年々高まっており、今後20年程度以内(2020年頃まで)に次の地震が起こる可能性が高いと考えられる。また、地震の規模は、単独の場合にはM7.5前後、連動した場合にはM8.0前後となると考えられる。但し、次の活動が単独の場合となるか連動した場合となるかは、現状では判断できない」と評価していた(地震調査委員会, 2000)。日本海溝沿いで発生する地震の評価においては、三陸南部海溝寄りでは今後30年間にM7.7程度の地震の発生が80~90%とされていた(地震調査委員会, 2009)。2011年3月11日の本震は、震源は宮城県沖~三陸南部海溝よりにあり、図9に見られる30mを超えるすべりも、その一部がこの領域に重なる。しかし、すべりが南北へ伝播し、福島県~茨城県沖の震源域まで連動して破壊したため、おそらくダイナミックな効果もあって、本震の規模は予想をはるかに超えるものになってしまった。

なぜ、震源域の連動破壊が考えられてこなかったのか？2004年のスマトラ-アンダマン地震は複数の震源域が連動破壊したことにより、M9.2程度の巨大地震となったことがわかっていたが(例えば, Tsai et al., 2005; Hashimoto et al., 2006), この経験が活かされなかった。以下の3つの理由が考えられる。

1) データの不足

地震調査委員会の報告では、評価に用いた歴史

地震のリストがあるが、日本海溝沿いの地震に関しては、1611年の地震が最古のものである(地震調査委員会, 2009)。869年の貞観地震に関する研究成果(例えば, Minoura et al., 2001)は、残念ながら評価に反映されていない。すなわち、多数の震源域が連動した地震のデータが無かったのである。統計的に有意な情報を得るためには、数十を超えるサンプルを得る必要がある。しかし、巨大地震の繰り返しが100年のオーダーになる以上、10以下の限られたサンプルで評価せざるを得ない。このような評価をどのように地震防災に役立てるか？依然大きな課題である。

2) スマトラとの地域的特徴の違い

スマトラ-アンダマン地震が発生した地域と東北日本では、同じプレートの沈み込み帯であるものの、その特徴(海洋プレートの年代、沈み込むプレートの運動方向、沈み込み角度、背弧海盆の存在等)が異なる。東北日本では、最近の高度な観測網のおかげで、微小地震活動やGPSデータから太平洋プレートと陸側プレートの固着の強さが推定されていた(例えば, Nishimura et al., 2000; Matsuzawa et al., 2004)。それによると、福島県~茨城県沖では固着が弱く、これらの領域でM8級の地震が発生していないことと整合していた。そのため、多くの地震学者は日本海溝でのM9の発生は非現実的と考えてきた。しかし、今回の地震では福島県~茨城県沖においても10mを超えるすべりを起こしており、M7級の地震を起こしながらもひずみエネルギーを蓄積してきたことが明らかとなった。沈み込み帯におけるひずみエネルギーを蓄積するメカニズムを考え直す必要がある。

3) 「固有地震」という考え

地震調査委員会は、過去の研究成果に基づいて、日本海溝に沿っていくつかの小領域に分割し、それぞれの領域での地震発生確率を計算してきた(図10)。これには「固有地震」という考えが強く反映されている。「固有地震」とは、特定の震源域ではその広さに応じた大きさの地震が発生

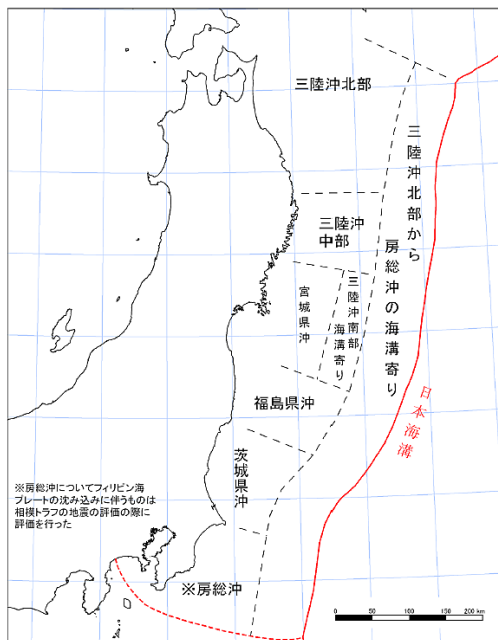


図10 地震調査委員会が長期評価に用いた震源域区分（地震調査委員会，2000）

し、規則的に繰り返す、というものである。この考えは地震の発生予測可能性を強く意識した考えである。日本海溝沿いでは、過去の大地震による地震波の解析から、大地震が同じ領域で同程度のすべりを起こしてきたことが示され、これを支持してきた（例えば、Yamanaka and Kikuchi, 2004）。一方、地震の発生に関する対極的な考えに、自己組織化臨界現象がある（例えば、Bak and Tang, 1989）。地震の規模別頻度分布に対するグーテンベルグ-リヒター則（以下、G-R則）を説明するアイデアで、震源域間の相互作用によりG-R則を説明できるという考えである。しかし、自己組織化臨界現象は地震発生の予測可能性を否定する。南海地震を含む南海トラフ沿いの地震の規模別頻度分布が必ずしもG-R則に乗らないことから、日本では「固有地震」の考えが有力視され、長期評価の基本的な考え方として採用されてきた。しかし、現実に複数の震源域が連動破壊する地震が発生した以上、批判的な検証は不可避である。研究の現状に鑑みると長い時間はかかるけれども、断層破壊の連動というダイナミック

な物理過程の理解を組み込んだ評価手法を開発することが求められよう。

5. 今後の地震防災にむけて

2011年3月11日の東日本大震災は、M9という未だ経験したことが無かった巨大地震による災害であった。残念ながら、地震発生前にM9の地震発生可能性に関する真摯な議論はほとんどなかった。各地の対策も1896年三陸津波地震や1960年チリ地震津波といった既往の津波災害を基づいたものであったため、結果として大被害を招いた。このことは経験科学である地震科学の限界を示し、研究者の一人として無力感を感じる。しかし、研究者は思考停止することは許されず、①起こった現象を理解し、②それに基づいてこれまでの対策をチェックし、③将来への指針を示す責務がある。この際、全ての前提を取り払った上で議論することが肝要である。

3月11日の本震発生に先行する地殻変動は観測されていない。2003年の十勝沖地震の前にも、先行する地殻変動は観測されなかった。これらの事実は重い。海溝型地震の前駆の変動を捉え、災害軽減に役立てるとする戦略は立て直しが必要である。「東海地震」対策も当然この対象となるべきであり、早急な検討が求められる。長期評価も「東海地震」対策も、いずれも地震科学の成果から生み出された施策であった。地震科学の責任は重い。

謝辞

原稿の改訂にあたり、渋谷拓郎氏、福島洋氏、高田陽一郎氏、奥村晃史氏、青木元氏に有益なコメントをいただきました。また、後藤浩之氏、宮崎真一氏には図版を提供いただいた。図2の作成に用いた気象庁一元化震源データは、防災科学技術研究所、気象庁、国立大学の観測データに加え、2011年東北地方太平洋沖地震合同観測グループが設置したデータも使用されています。図8の作成に用いたALOS/PALSAR画像は、「陸域観測技術衛星による防災利用実証実験」地震WG（事務局：国土地理院）を通じて提供されました。ここ

に感謝いたします。なお、ALOS/PALSAR 画像の所有権は、宇宙航空開発研究機構と経済産業省にあります。

最後に、東日本大震災による多くの犠牲者のご冥福をお祈りするとともに、被災された皆様へ心よりお見舞い申し上げます。

参考文献

- 朝日新聞：大津波の教訓-自分の命を誰が守るか、2011年5月2日付け朝刊社説、<http://www.asahi.com/paper/editorial20110502.html>, 2011年5月3日。
- Bak, P., and C. Tang: Earthquakes as a self-organized critical phenomenon, *J. Geophys. Res.*, Vol.94, pp.15635-15637, 1989.
- 地震調査委員会：宮城県沖地震の評価、平成12年11月27日地震調査研究推進本部地震調査委員会発表、http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.htm#miyagi, 2000年11月27日。
- 地震調査委員会：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価の一部改訂について、平成21年3月9日地震調査研究推進本部地震調査委員会発表、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09mar_sanriku/index.htm, 2009年3月9日。
- 後藤浩之：地震及び地震動の特性，土木学会東日本大震災被害調査団（地震工学委員会）緊急地震被害調査報告書（暫定版），<http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/Chapter4.pdf>, 2011.
- Harvard University Global CMT Project: <http://www.globalcmt.org/>, 2011年5月3日。
- Hashimoto, M., C. Nithiwatthn, M. Hashizume, S. Takemoto, H. Takiguchi, Y. Fukuda, and K. Fujimori: Crustal deformations associated with the great Sumatra-Andaman earthquake deduced from continuous GPS observation, *Earth Planets Space*, Vol.58, pp.127-139, 2006
- Hu, Y., K. Wang, J. He, J. Klotz, and G. Khazaradze: Three-dimensional viscoelastic finite element model for postseismic deformation of the great 1960 Chile earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, B12403, doi:10.1029/2004JB003163, 2004.
- 海上保安庁海洋情報部：宮城県沖の海底が24メートル動く～東北地方太平洋沖地震に伴う海底の動き～，http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KIKAKU/press/2011/H230406_miyagi.pdf, 2011年4月6日。
- 気象庁：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/kaisetsu201103111600.pdf>, 平成23年3月11日16時00分発表。
- 気象庁：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震以降の緊急地震速報（警報）の発表状況について（第2報），http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/28b/eew_hyouka_2.pdf, 平成23年4月28日発表。
- Larsen, C.F. Echelmeyer, K.A. Freymueller, J.T. and Motyka, R.J.: Tide gauge records of uplift along the northern Pacific-North American plate boundary, 1937 to 2001, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, B4, 2216, doi:10.1029/2001JB001685, 2003.
- Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, and A. Hasegawa, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, Vol.56, pp.803-811, 2004.
- Minoura, K., F. Imamura, D. Sugawara, Y. Kono, and T. Iwashita: The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 23, No.2, pp.83-88, 2001.
- 宮崎真一：GPS キネマティック解析による地震時変位（水平）または（鉛直），<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/events/110311tohoku/miyazaki/index.html>, 2011年5月3日。
- 防災科学技術研究所：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, 2011年5月3日。
- 防災科学技術研究所：第224回地震調査委員会提出資料，平成23年4月11日。
- 防災科学技術研究所：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/>, 2011年5月3日。
- Nishimura, T., S. Miura, K. Tachibana, K. Hashimoto, T. Sato, S. Hori, E. Murakami, T. Kono, K. Nida, M. Mishina, T. Hirasawa, and H. Miyazaki: Distribution of seismic coupling on the subducting plate boundary in northeastern Japan inferred from GPS observations, *Tectonophysics*, Vol.323, pp.217-238, 2000.
- 高須知二・笠井晶二：GPS 衛星軌道及び時計準リアルタイム推定アルゴリズムの開発及びその評価，2005年地球惑星科学関連学会合同大会，2005。

- 谷岡勇市郎：2011年東北太平洋沖地震の津波波形およびGPSデータの同時インバージョン解析結果, <http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/ev-news-flash/>, 2011年5月3日.
- 東北大学, 平成23年4月26日地震予知連絡会(臨時会)提出資料, 2011.
- Tsai, V., M. Nettles, G. Ekstrom, and A.M. Dziewonski: Multiple CMT source analysis of the 2004 Sumatra earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.32, L17304, doi:10.1029/2005GL023813, 2005.
- U.S. Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/>, 2011年5月20日.
- Wang, K.J. He, and H. Dragert: Postseismic deformation of long-rupture (~900km) great subduction earthquakes and mantle viscosity, *Seismol. Res. Lett.*, Vol.73, pp.235, 2002.
- Wei, S., A. Sladen, and the ARIA group (Caltech-JPL): Updated result 3/11/2011 (Mw9.0), Tohoku-oki, Japan, http://tectonics.caltech.edu/slip_history/2011_taiheiyo-oki/index.html, 2011年5月3日.
- 八木勇治・西村直樹：2011年3月東北地方太平洋沖地震(暫定Ver3), <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/Tohoku/>, 2011年5月3日.
- Yamada, M. and T. Heaton: Real-time Estimation of Fault Rupture Extent using Envelopes of Acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, No.98-2, pp.607-619, 2008.
- Yamada, M., T. Heaton, and J. Beck: Real-Time Estimation of Fault Rupture Extent Using Near-Source versus Far-Source Classification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, No.97-6, pp.1890-1910, 2007.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi: Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.

(投稿受理：平成23年5月13日)