

年間
特集

2011年東北地方太平洋沖 地震とその教訓

松澤 暢¹

The 2011 Tohoku-oki earthquake and the lessons learned from it

Toru MATSUZAWA¹

Abstract

The 2011 Tohoku-oki earthquake ruptured a vast plate boundary area of about 500 km x 200 km, resulting in a slip of about 50 m near the trench. The reasons for such large slip include the fact that the slip penetrated the trench, the occurrence of the thermal pressurization, and small elastic constants in the shallow part. The reasons for the vast slip area can be explained by a hyper asperity model as well as a large strong patch model. The reasons why we could not foresee such a huge earthquake can be summed up in one sentence: we “overlearned” from the limited information we had. It is vital to learn from the Tohoku-oki earthquake, but we should not overlearn from it. Otherwise, the next M9 earthquake will be an “unexpected earthquake” again.

キーワード：東北地方太平洋沖地震，津波，過学習

Key words: Tohoku-oki earthquake, tsunami, overlearning

1. はじめに

東日本大震災から10年が経った。この震災では、行方不明者や震災関連死まで含めれば2万2千人以上の方々が犠牲となった。この未曾有の災害をもたらした2011年東北地方太平洋沖地震（以下、「東北沖地震」と呼ぶ）は、何故、どのように発生したのか？このような巨大な地震を何故、予見できなかったのか？本稿では、この超巨大地震につ

いて、今までにわかってきたことを整理し、次の大震災の軽減のために、この地震から何を教訓とすべきかを述べたい。

なお、この地震については、すでに優れたレビューがいくつも出ており（例えば Hasegawa and Yoshida, 2015; Hino, 2015; Lay, 2018），詳しくはそちらを参照されたい。

¹ 東北大学大学院理学研究科
Graduate School of Science, Tohoku University

2. 東北沖地震前の知見

2.1 海岸の沈降と隆起

東北沖地震の前、日本には約100年の測地測量のデータが蓄積されており、東北地方や北海道の太平洋沿岸はその間、ずっと沈降しつづけていた(例えば西村, 2012)。しかも、1973年根室沖地震や1978年宮城県沖地震といった沖合で起こったプレート境界型の大地震時にも、海岸は沈降していた(Kato, 1983)。一方、地形学的知見からは、太平洋沿岸は基本的に第四紀後期の数十万年については継続的な隆起を示していたことが知られていた(例えば宮内, 2001)。

また、Wesnowsky et al. (1982) は、第四紀における日本列島の歪速度を地質学的に求め、その値が測地学的に求めた歪速度より一桁小さいことを指摘した。彼らは、この違いは地質学的歪が永久変位(非弾性歪)を示すのに対して、測地学的歪が弾性歪を示していることに主として起因しており、測地学的歪はプレート境界型巨大地震によってそのほとんどは解消されるだろうという見解を示していた。

池田(1996, 2003)は、この歪速度と海岸の隆起・沈降に関する10万年から100万年スケールの地質学的知見と10年から100年スケールでの測地学的知見との食い違いは、100年を超える再来間隔での未知の超巨大地震によって解消されるという仮説を提示していた。

2.2 貞観地震と津波堆積物

「日本三代実録」という有名な古文書に、貞観11年(西暦869年)に、東北地方にあった国府の城に大きな被害が生じ、しかも巨大な津波に襲われたことが記載されていた。いわゆる「貞観地震」である。当時の国府は多賀城にあったが、大きな津波を引き起こすことで有名な三陸沖で巨大地震が生じて、多賀城に大きな津波が来るとは考えにくく、このような多賀城で大きな津波被害をもたらす地震として、仙台湾での巨大地震(羽鳥, 1998)や、宮城県沖から福島県沖にかけての海溝付近の津波地震(渡邊, 2000; Minoura et al., 2001)等が提案されていた。

この日本三代実録の記述には誇張が入っている可能性もあり、貞観地震の地震像をこの文書の解説だけで明らかにすることは困難であった。しかし、1990年頃の津波堆積物の調査により、仙台平野の海岸線から3 kmも内陸まで津波が来ていたことが明らかになった(阿部・他, 1990; Minoura and Nakaya, 1991)ことを契機として、津波堆積物の調査が精力的に行われるようになった。

特に、いわゆる「宮城県沖地震」が30年以内に発生する確率が99%という評価が地震調査委員会によって出されたことより、「宮城県沖地震における重点的調査観測」(以下、「宮城県沖重点調査観測」と呼ぶ)が文科省の委託により平成17年度~21年度(2005年度~2009年度)に行われるようになり、後述の海底観測等とともに、津波堆積物の徹底した調査が行われた。

この宮城県沖重点調査観測の結果、貞観地震の津波堆積物は、非常に広範囲かつ内陸奥深くまで分布していることが明らかになった。しかもシミュレーションの結果、この津波堆積物の分布は、宮城県沖から福島県沖に広がる幅広いプレート境界断層が滑ったことによるMw8.4またはそれ以上の規模の地震でなければ説明できないことが示された(佐竹・他, 2008; 行谷・他, 2010)。

この調査の結果、仙台平野は何度も津波に襲われていたことが明らかになり、一方、仙台平野はほとんどが耕作されているため、地表近くの最新イベントによる津波堆積物を見つけることが難しく、貞観地震のような規模の地震の再来間隔の推定は予想以上に困難であった。宮城県沖重点調査観測の最終報告は2010年に発表され、その中で、貞観地震のような巨大な津波を引き起こす地震は450年から800年程度の再来間隔で発生しており、最新イベントは室町時代に発生した可能性が高い事が示された(岡村・他, 2010)。

以上のような宮城県沖重点調査観測の結果を受けて、地震調査委員会は日本海溝沿いの地震の再評価を行った。2011年2月には草案がほぼ完成して、2011年4月に公表すべく準備を進めていた中で、2011年3月11日に東北沖地震が発生してしま

うこととなった。

2.3 プレート境界の固着とはがれ

日本の測地観測は1990年代半ばに GNSS 観測が導入されたことにより一変し、プレート境界の固着状況が GNSS 観測により把握できるようになった(例えば Suwa et al., 2006; Fig. 1)。また、プレート境界で発生する小さな繰り返し地震によっても、プレート境界の固着やゆっくりとした滑り状況が把握できるようになった(例えば Igarashi et al., 2003)。

ただし、陸上 GNSS 観測点だけのデータ解析では、海溝付近の分解能が無いため、海溝付近ではプレート境界は固着していないという仮定のもとに求めている研究が多いことに注意する必要がある。実際、宮城県沖の海溝付近が強く固着していると仮定しても、GNSS データの残差はほとんど変わらないことが明らかになっている(Loveless et al., 2011; Hashimoto et al., 2012)。繰り返し地震の解析においては、このような問題は

ないが、繰り返し地震がまったく存在していない領域については、固着状況は把握できない。

このような GNSS や繰り返し地震の解析から、1990年代後半は宮城県沖から福島県沖にかけてプレート境界の固着は強かったが、2000年代に入ると、その固着が弱まってきたことが、多くの研究者によって指摘されている(例えば Suito et al., 2011; Uchida and Matsuzawa, 2013; Yokata and Koketsu, 2015)。この固着が弱まったことが、東北沖地震の前駆現象としての「固着のはがれ」の可能性があると解釈が、筆者を含め多くの研究者によってなされている。しかし、Katsumata et al. (2017) の地震活動の静穏化の研究によれば、1990年代の宮城県沖から福島県沖の活動は非常に低調であり、むしろこの期間だけが異常に固着が強かった可能性があることに留意する必要がある。

3. 東北沖地震の発生過程

3.1 本震発生直前の状況

東北沖地震の発生する1月前の2011年2月に、宮城県沖の海溝近くでは M5 級を最大とする群発地震活動が見られた。宮城県沖重点観測によって設置された海底観測点のデータ解析から、この群発地震は、Mw7.0 程度のスロースリップイベント(SSE)が発生したことによって引き起こされたことが明らかになった(Kato et al., 2013; Ito et al., 2013; Hino et al., 2014)。この SSE の発生により、その周辺には応力集中が進み、SSE 発生域の西縁から3月9日の M7.3 の前震の滑りが始まった(Ohta et al., 2012)。さらにこの前震は、その震源域の南側で大きな余効滑りを生じ、その余効滑り域の南端で、東北沖地震の滑りが開始して、大きな滑りが生じたことが明らかになっている。

つまり、2011年2月の SSE 以降、ゆっくりとした滑りと地震性滑りが交互にドミノ倒しのように生じて、東北沖地震の発生に繋がったことが海陸の観測データから明らかになったのである。

3.2 本震の滑り量分布

本震の滑り量分布は、様々な研究者が様々な

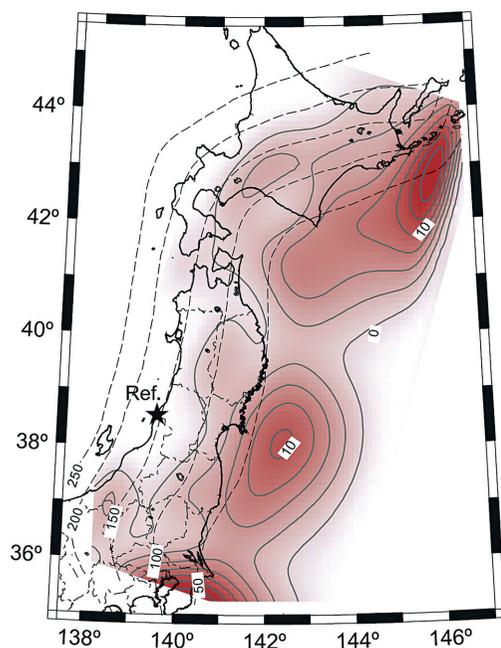


Fig. 1 Slip deficit rate distribution for the period from 1997 to 2001 (Suwa et al., 2006).

データを用いて調べている。当初は、遠地地震波形データ、近地強震動波形データ、測地観測データ、および津波観測データを用いた解析結果が大きく異なっていたため、多くの研究者を悩ませた（例えば Koketsu et al., 2011）。Lay (2011) はこの問題について、地震波形で求めた結果は基本的に地震モーメントの分布であり、津波や地殻変動で求めた分布は滑り量の分布であって、両者は真の剛性率分布を与えれば基本的に一致するはずであることを示した。

遠地の地震波形から一番丁寧に滑り量分布を求めたのは Yagi and Fukahata (2011a) であろう。彼らは海域の構造探査に基づく構造を採用し、ま

たグリーン関数の不確定性も考慮した新たな手法 (Yagi and Fukahata, 2011b) を用いて解析を行った。その結果を Fig. 2 に示す。

この Fig. 2a の左上に示したモーメント速度関数を見ると、この地震は約2分半ないし3分にわたってモーメントを解放し続け、破壊開始から70秒付近をピークとして、30秒付近と130秒付近にも小さな高まりがあることがわかる。実際、Fig. 2b の近地強震動波形を見ても、大きな振動が3回程度生じていたことがわかる。

この地震の前から音響結合方式 GNSS 測地観測が行われていた (Sato et al., 2011; Kido et al., 2011) ことにより、海陸の測地データを統合し

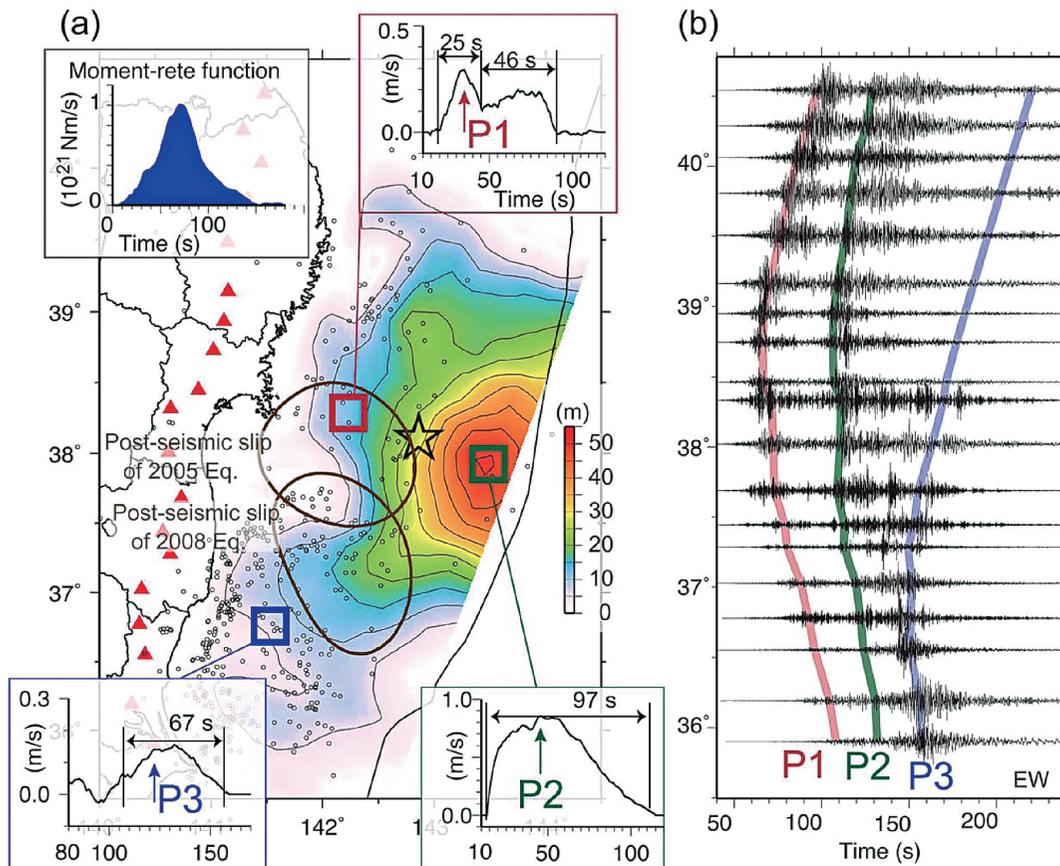


Fig. 2 Slip distribution and strong motion waveforms of the Tohoku-oki earthquake (Yagi and Fukahata, 2011a). (a) The slip distribution estimated from teleseismic P-wave data. Top left inset shows the moment-rate function, and other insets represent the slip-rate functions at respective color squares. (b) Strong ground motions observed at K-net stations.

て、Inuma et al. (2012) は、Fig. 3に示したような詳細な滑り量分布を得ている。遠地地震波形から推定した Yagi and Fukahata (2011a) の結果と、海陸の測地観測データから推定した Inuma et al. (2012) の結果には、どちらも海溝付近で50 m程度の大きな滑りがあり、陸に近い側では宮城県の金華山沖と福島県南部沖にも滑り量の大きな領域が伸びているという共通の特徴がある。

これらの特徴は、津波波形から、滑りの時間発展を考慮した解析を行った Satake et al. (2013) の結果でも見られる。しかし、Satake et al. (2013) の結果では、岩手県沖の海溝付近も大きく滑ったことが示されており、これは前述の2つの解析からは出てきておらず、津波データのみが示した結果となっている。彼らの結果によれば、この岩手県沖海溝付近の大きな滑りは、本震破壊開始から3分ないし4分後に生じていたことになるが、前述のとおり、遠地地震波形から推定されたモーメント速度関数の継続時間は最大でも3分程度までであり、このように遅れて大きな滑りが生じたと

は考えにくい。

宮城県沖の北緯38度付近で海溝軸を突き抜けた50 m以上の大きな滑りがあったことは、Fujiwara et al. (2011) による地震前と後のマルチビーム深淺測量結果の比較によっても明らかになった。一方、Fujiwara et al. (2017) は同様の比較を岩手県沖の海溝付近で行ったが、顕著な変位は検出できなかった。ただし、測定誤差から考えて、水平方向に20 m以下の変位があっても検出できないとしている。Nakamura et al. (2020) は、岩手県沖の海溝付近で構造探査を行い、斜面崩壊が生じた痕跡をいくつも発見した。残念ながらこれらが東北沖地震によって生じたかどうかはわからなかったが、少なくとも過去には、斜面崩壊によって津波が生じた可能性が高いと考えられ、三陸沖の津波地震の生成メカニズムを考えるうえで非常に重要な成果である。

一方、主破壊域の南端にあたる北緯37.5度付近でのマルチビーム深淺測量の結果から、Kodaira et al. (2020) は、この場所で東北沖地震のときに大きな変位が生じたという証拠は見当たらず、また北緯38度付近に見られたような海溝軸に溜まった堆積物内の変形 (Kodaira et al., 2012) も認められないことを示した。Bassett et al. (2016) は、海底地形や重力異常のデータから、海溝軸で北緯37.5度あたりから南西に延びて中央構造線に繋がる、上盤の構造境界があり、それより北側で大きな滑りが生じやすいと解釈した。実際、Fig. 2やFig. 3内の大滑り域は、彼らが求めた構造線より北側に分布しているように見え、これらの結果から、海溝を突き抜けるような大きな滑りは北緯37.5度より南側では存在していなかった可能性が高いように思われる。

前述のとおり、プレート境界の滑りは、宮城県沖の海溝近くで最も大きかったと推定される。一方、遠地で観測された短周期地震波は、もっと陸側で生じたことが明らかになっている (例えば Wang and Mori, 2011; Koper et al. 2011; Ishii, 2011)。日本国内の強震動加速度計から推定された強震動生成域 (Strong-Motion Generation Area; SMGA) も、やはり陸側に位置していることが明

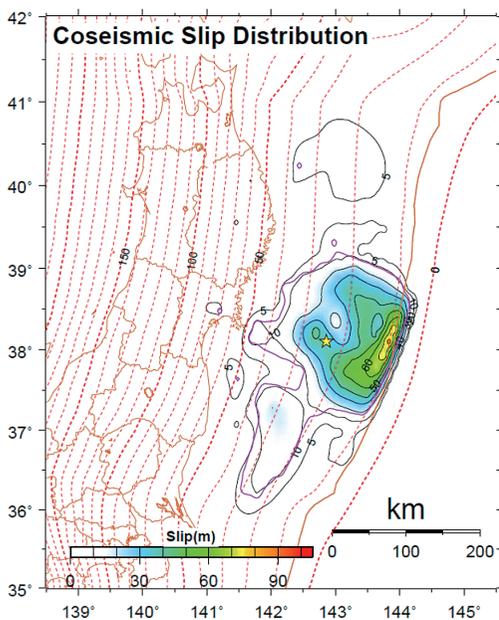


Fig. 3 Slip distribution of the Tohoku-oki earthquake estimated from terrestrial and seafloor geodetic data (Inuma et al., 2012).

らかになっている（例えば Kurahashi and Irikura, 2013）。今回の地震の津波被害と地震動被害が大きかったのは、巨大な断層運動であったことに加えて、海溝付近で大きな滑りが生じ、陸に近い側で短周期の地震波が生じたことが、主要な原因であると考えられる。

4. 東北沖地震の余震活動と余効変動

4.1 余震活動

気象庁（2021）による、本震発生後約10年間のM5以上の余震分布と主な地震のメカニズム解を Fig. 4に示す。今回のように、プレート境界で巨大な地震が発生した場合、応力集中により震源域の北側と南側のプレート境界で大きな余震が発生しやすくなると考えられる。実際に、プレート境界では、本震発生直後の15時8分に岩手県沖でM7.4の余震が発生したのち、17時16分に茨城県沖でM7.6の最大余震が発生した。

また、プレート境界型大地震がもたらす応力場の変化を考えれば、正断層型の地震が震源域東側の下盤（太平洋プレート）内と、西側の上盤（陸側プレート）内に発生しやすくなると考えられ、実際に、本震直後の15時25分に海溝軸

外側でM7.5、また福島県南東部の浅部で4月11日にM7.0の正断層型地震が発生するなど、数多くの正断層型地震が発生している（Asano et al., 2011）。

一方、震源域西部の太平洋プレート内部では、逆断層型の地震が発生しやすくなっており（Asano et al., 2011）、2011年4月7日に宮城県沖でM7.2、2021年2月13日に福島県沖でM7.3の逆断層型地震が太平洋プレート内（スラブ内）で発生した。これらのスラブ内地震は短周期が卓越して、しかも陸に近いところで発生したため、どちらも最大震度が6強となり、大きな被害を出した。

4.2 余効変動

国土地理院（2021a）による本震時の上下変動を Fig. 5に、また本震後10年間の余効変動による上下変動を Fig. 6に示す（国土地理院, 2021b）。また、海底測地データも加えた、本震時と余効変動の水平ベクトル図を Fig. 7に示す（Tomita et al., 2020）。

本震時に太平洋沿岸は大きく沈降したが、本震後に隆起してきており、一部はすでに本震前のレベルに戻ってきている。また、海底観測点は地震時に東に動いたものの、そのあと、ほとんどが西に動いている。このような海岸の隆起や海底の西向きの動きは余効滑りでは説明できず、基本的に粘性緩和の影響であると考えられる（例えば Sun et al., 2014; Freed et al., 2017）。

このような粘性緩和による地殻変動は、本震時の滑り量分布に敏感であり（Sun and Wang, 2015）、逆にいえば、本震時に海底測地観測データが不十分であっても、本震後の余効変動を海底で広域かつ密に測定できれば、地震時の滑り量分布を評価できることになる。Tomita et al. (2020) はそのような観点で本震時の滑り量分布を Fig. 7bのように求めている。本震時に存在したデータだけで求めた滑り量分布（Fig. 7a）に比べて、特に海溝軸付近の解像度が改善されていることがわかる。

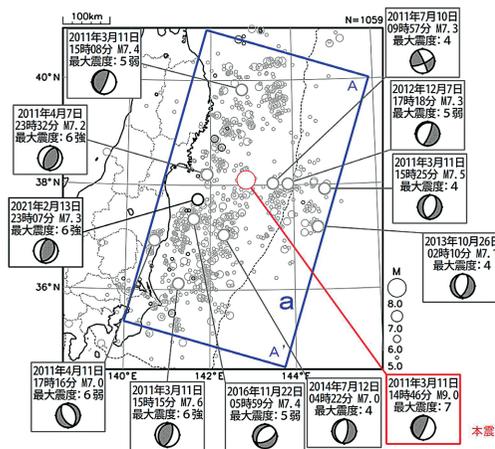


Fig. 4 Epicenter distribution of earthquakes with $M \geq 5$ for the period from 14:46, March 11, 2011 to February 28, 2021 (JMA, 2021). CMT solutions for major earthquakes are also shown.

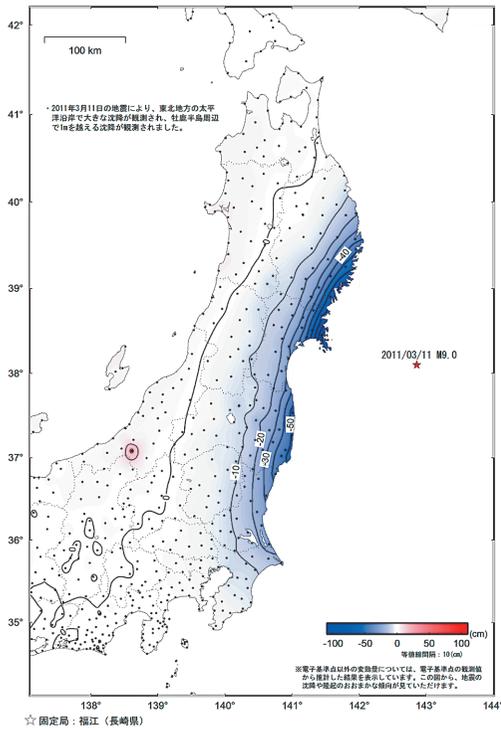


Fig. 5 Coseismic vertical displacement distribution at the Tohoku-oki earthquake estimated from GNSS data (GSI, 2021).

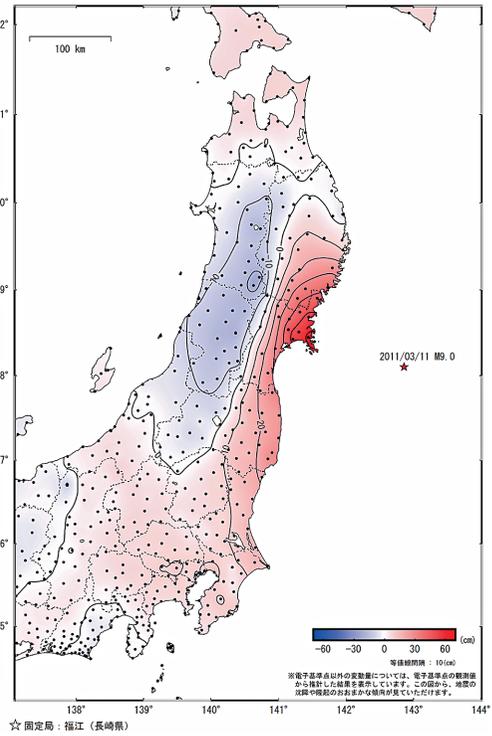


Fig. 6 Postseismic vertical displacement distribution for 10 years after the Tohoku-oki earthquake estimated from GNSS data (GSI, 2021).

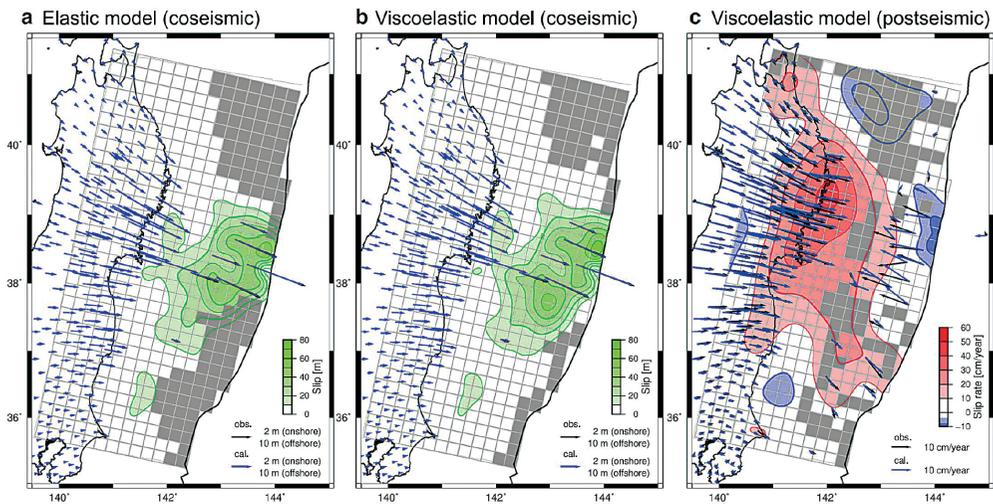


Fig. 7 Co- and post-seismic slip distributions estimated from terrestrial and seafloor geodetic data (Tomita et al., 2020). (a) and (b) Coseismic slip distributions estimated using elastic model and viscoelastic model, respectively. (c) Postseismic slip distribution using viscoelastic model. Black and blue vectors denote the observed and calculated horizontal displacements, respectively.

4.3 今後の見通し

最大余震は、本震のマグニチュードより1小さいことが多いが、M8の余震はまだ発生しておらず、特に今回の震源域の北側と南側の隣接領域および海溝軸外側でM8の最大余震が起こる可能性があることに留意する必要がある。海溝軸外側のM8地震としては、1933年の昭和三陸地震が有名であるが、これは1896年の明治三陸地震がプレート境界で発生したために、海溝軸外側で張力が大きくなり、正断層型の巨大地震が発生したと考えれば説明がつく。この二つの地震は、37年も離れているが、再来間隔が600年程度と考えられている東北沖地震の40年後にM8の最大余震が発生しても、なんの不思議もない。

また、東北沖のプレート境界は普段の地震活動のレベルが高いので、全体の余震数だけ見れば、東北沖地震発生前のレベルに近づくのが比較的早いように見えるが、実際には主破壊域内の地震活動が本震前より下がったことにより、その周辺での高い地震活動が相殺されているだけであり(気象庁, 2021)、本震前と同じ状態に戻るにはかなりの時間がかかると考えられる。

1978年宮城県沖地震の震源域は、東北沖地震の際にも滑っているため、しばらくは1978年型のいわゆる「宮城県沖地震」は起きにくいと考えやすいが、Fig. 7cで示したように、その周りの余効滑りが大きいために、そこでの応力増加レートが大きく、東北沖地震から40年も経たないうちに次の「宮城県沖地震」が発生する可能性が高いことがNakata et al. (2016)によって示されており、陸に近い場所でのプレート境界型の大地震についても、注意が必要である。

さらに、プレート内の普段の応力レートは小さいのに、東北沖地震で大きな応力レートが付加されたことになるので、普段よりもプレート内で大きな地震が起こりやすくなっていることにも留意する必要がある(遠田, 2020)。大きな津波をもたらすアウターライズの地震のみならず、前述の2011年4月7日の宮城県沖の地震や、2021年2月13日の福島県沖のように陸に近い太平洋プレート内の地震は、強震動による被害が出やすく、今後

もこのようなプレート内部の余震が起こる可能性が高いことに注意が必要である。

地殻変動については、今後もしばらくは隆起が継続すると考えられる。粘弾性構造を考慮したSasajima et al. (2019)のシミュレーションによれば、約600年間隔でM9の地震が起こるとした場合、現在の海岸線の隆起は次第に減速しながらも200年以上続き、やがて沈降に転じて、約600年後には東北沖地震直前のレベルに戻って、次のM9地震を迎えることになる。このことは、東北沖地震前の100年間に我々が経験した東北地方とはまったく異なる状態が、今後少なくとも200年程度は続くことを意味するので、東北沖地震前の経験則を東北沖地震後に適用する際には慎重になる必要がある。

5. 巨大な地震が発生した理由

5.1 海溝付近の大きな滑り

前述のとおり、津波観測データや海底測地データ、マルチビーム深浅測量の結果は、海溝付近のプレート境界が50 m以上滑り、かつその滑りが海溝を突き抜けたことを示している。このような大きな滑りが生じた理由としては、いくつかの要因があると考えられている。

まず、東北沖地震直後にIODP (Integrated Ocean Drilling Program) のJFAST (the Japan Trench Fast Drilling Project) による海溝近くの掘削結果から、大きな滑りを起こしたプレート境界断層はスメクタイトに富んだ遠洋性粘土層の厚さ5 m以下の破碎帯として形成されていることが明らかになった(Chester et al., 2013)。この領域から得られた岩石試料の高速摩擦実験(Ujii et al., 2013)と、孔内温度計測の結果(Fulton et al., 2013)から、この断層が高速滑りを起こしたときの摩擦係数は0.08と非常に小さいことが示された。このような低い摩擦係数は、主としてthermal pressurization (例えばMitsui et al., 2013)によって生じたと考えられている。Fujie et al. (2020)は、このような遠洋性粘土層は海溝軸すぐ外側の北緯39.5度付近ではほとんど見られなくなっていることを明らかにし、これはこの付近の

ブチスポット (Hirano et al., 2006) の存在に起因すると解釈した。このような遠洋性粘土層が海溝付近の大きな滑りの発生の必要条件であれば、北緯39.5度付近でこの層が見られなくなっていることは、海溝付近の大きな滑りが北緯39度以北で、マルチビーム深淺探査では明らかになっていないことと整合的である。

このような遠洋性粘土層の摩擦係数の低下によって断層が滑りやすくなり、その滑りが海溝を突き抜けると、上盤側でその滑りを押し戻そうとする部分がなくなる。このため、滑りが海溝を突き抜けたこと自体が、滑りを大きくした要因の一つと考えられる (Ide et al., 2011)。

また、海溝軸近傍の岩盤は弾性定数が小さいため、約8 cm/年で沈み込む太平洋プレートに伴って上盤が600年かけて50 mも引きずり込まれても、プレート境界にかかるせん断応力はそれほど大きくならないと考えられる。そして、東北沖地震発生時に、その引きずり込まれた上盤が約600年ぶりに跳ね上がったと考えれば、海溝付近の50 mもの滑りは説明可能である (Lay, 2011)。

5.2 広大な破壊域

M9という大きな地震になった理由として、他よりも強度が大きく、面積も大きな速度弱化領域があった (Kato and Yoshida, 2011) ことは、おそらく間違いないと思われる。強度が大きいのであっても、東北沖のプレート境界の本震前のせん断応力は10MPa程度以下と見積もられており (Hasegawa et al., 2011, 2012; 深畑・他, 2012)、たいした強度ではない。

このような低強度で約600年も持ちこたえられたのは不思議に思えるかもしれないが、固着域の幅が100 km近くあれば、1000年近く固着していてもせん断応力は10MPa程度しか増加しない (飯尾・松澤, 2012)。前述のとおり、強度の高い領域の海溝側で弾性定数が小さければ、その強度がさらに小さくても、長期間、断層が滑らなくても不思議ではない。

破壊域が大きくなったもう一つの理由として、速度弱化領域において、摩擦パラメータが階層

的構造をしていたことが考えられる。Hori and Miyazaki (2011) は、東北沖の速度弱化域では、特徴的滑り量 (d_c ; Dieterich, 1979) が大きい領域の中に、 d_c が小さい領域 (regular asperity) が点在しており、全体が滑ったときにM9の地震となり、後者のみが滑ったときにはM7やM8の地震になると考え、このような階層的速度弱化域全体を hyper asperity と呼んだ。

実際、このようなモデルでシミュレーションをすると、普段はM7~M8程度の地震が繰り返し発生して、 d_c が大きい領域はむしろバリアのようになって破壊はそれ以上には広がらない。しかし、滑り速度がやや大きい領域が hyper asperity の縁から少しずつつ内部に広がってくる、いわゆる「固着のはがれ」と呼ばれる現象が広域に生じてくると、regular asperity で始まった破壊は、いつものM7~M8規模ではとどまらず、広大な hyper asperity 全体が破壊することを、彼らはシミュレーションで示した。

今回の地震に関しては、滑り量の大きな領域は宮城県沖に限られており、これについては、そこに高い強度のパッチがあったとする、Kato and Yoshida (2011) のモデルで説明できる。しかし、滑り域はそこから普段の地震活動も活発であった福島県沖から茨城県沖まで広がっており、このことは Hori and Miyazaki (2011) の hyper asperity モデルでうまく説明できる。

6. 東北沖地震の教訓

6.1 過学習の危険性

1970年代から1980年代にかけて比較沈み込み帯学が盛んになり、若いプレートが沈み込んでいる場所では、海洋プレートに働く浮力が強いためにプレート境界が強く固着して大きな地震が起りやすくなる (Kanamori, 1977)、また、プレート収束速度が大きい沈み込み帯では、水平方向に強く押し付けあうので、やはりプレート境界が強く固着して大きな地震が起りやすい (Ruff and Kanamori, 1980) と考えられていた。

このうち、プレート収束速度と、その沈み込み帯における地震の最大規模との相関は、Stein and

Okal (2007) によって否定されたが、まだ海洋性プレートの年齢と最大規模との相関は残っているように見えた。

世界的に見れば、東北地方に沈み込む太平洋プレートの年齢は平均よりも古く、日本海溝でのプレート収束速度は速いほうのグループに属している。もし、最大規模と海洋性プレートの年齢との相関が否定されて、プレート収束速度との相関が残っていたなら、東北沖も M9 地震が起こる可能性が高いということが指摘されていたはずだが、そうはならなかった。

また、海洋プレート表面の堆積物が、海溝から沈み込むときに剥ぎ取られて海溝に溜まっていく場合と、海洋プレートと一緒に陸のプレートの下に沈み込んでいく場合があり、前者は「付加型」、後者は「造構性侵食型」の沈み込み帯と呼ばれている。Bilek (2010) は、それまで知られている M9 地震は、すべて付加型の沈み込み帯で生じていたことを指摘していた。日本海溝は典型的な造構性侵食型と考えられており、彼女の論文が出版された翌年に発生した東北沖地震は、地震学者が知る限り、造構性侵食型の沈み込み帯で起こった最初の M9 地震となった。

最近はやりの機械学習では、同じデータを計算機に繰り返し学習させると、何度も学習させるほどそのデータについては正解率が上がるが、あまり学習させすぎると、別のデータについては、逆に正解率が下がることが知られていて、この現象は「過学習」と呼ばれている。

巨大地震に限ったとしても、世界中のデータが揃っているのは、最近のせいぜい100年分くらいしかなく、知られている M9 地震は10個に満たない。沈み込み帯に関わる様々なパラメータのうち、このような限られたデータと相関の高いパラメータを丹念に探しだすことは過学習になりかねず、これから起こる地震についての「正解率」は逆に下がってしまう危険性ははらんでいる。

結局、Stein and Okal (2007) や McCaffrey (2007) が主張したように、M9 地震の統計的性質を議論するには100年は短すぎるのである。そのような限られたデータから何らかの法則が見いだせたと

しても、それを新たなデータに適用した場合に正解率が高いとは限らないことに十分な注意を払う必要がある。今回の東北沖地震は、大規模な観測網が整備された近傍で発生した初めての M9 地震であり、そこから得られる情報は非常に貴重である。しかし、そこから過剰に学習してしまうと、次の M9 地震はまた「想定外」となってしまうだろう。それだけは何としても避けなければならない。

6.2 単純化の危険性

地球科学において低頻度事象について得られたデータや大規模プロジェクトによって得られたデータは、希少価値が高い。まったくデータが無い状態で予測や評価を行うよりも、たとえ僅かであってもデータに基づいた予測・評価のほうが信頼度が高いことは言うまでもない。

しかし、地球科学的データは、本質的に多様性も地域性も大きく、限られたデータからの演繹にどの程度の一般性があるのかについては、細心の注意が必要である。母集団内の多様性が大きいということは、そこから僅かの数だけ選び出したサンプルには、母集団が持っている「傾向」が見て取れる場合がありうることを意味する。現実問題としては、今まで得られているデータに応じて、ベイズ推定的に事前確率分布を作り上げるしかないが、そこに大きな不確実性があることは忘れてはならない。

また、たとえ現状で得られているサンプルの統計的性質と、母集団の統計的性質が良く一致していたとしても、そこから推定される将来像は、あくまでも期待値でしかなく、実現値としては、非常に大きな多様性がありうることも忘れてはならない。そもそも地球科学的データは多様性が大きくて、そこになんらかの法則性があったとしても、必ず「アウト라이어」が存在し、そのようなアウトライアーを無視した災害対策は、また新たな「想定外」を生み出して、大きな被害をもたらすことになる (Kanamori, 2014)。

一方、このようなアウトライアーまで考慮して災害対策を行うことは、費用対効果の観点からも

住民の生活の質の観点からも否定的側面が大きい
ため、実際には行政的な対応は困難であろう。それ
でも、アウトライアーがもし起こったら何が
生じうるのか、事前に検討を行っておくことは
可能であり、それを行えるのは研究者だけであ
る。たとえば、M10の地震が起こる可能性は極め
て低いものの、絶対に起こらないとは言えない以
上、そのような地震が生じたときに何が起こり
うるのかの検討だけは進めておいたほうが良い
(Matsuzawa, 2014)。

7. おわりに

東北沖地震の発生は、世界中の地震学者に大き
な衝撃を与えた。日本の地震学者は貞観地震のこ
とについて知ってはいたが、それはせいぜい M8
クラスであり、M9まで達するとは思っていなかつ
たし、プレート境界が50 mも滑るなどとは考え
たこともなかった。

しかし、貞観地震の津波堆積物を M9地震のモ
デルで説明することも可能であるし、幅広い断層
が滑って生じた津波に、海溝付近で50 mも滑っ
て生じた津波が重なっていたとしても、津波堆積
物の分布は変わらない。我々はデータを説明でき
るモデルのうち、一番ありそうなモデルを採用す
るしかないが、災害軽減のためにはそれだけでは
不十分であり、どのくらい極端なモデルでもデー
タが説明できるか、よく吟味を行うことが必要で
ある。

一方、今回の地震の発生がもう5年遅かったら、
状況はかなり変わっていたと思う。貞観地震を踏
まえた地震調査委員会による新しい評価が2011年
4月に公表され、宮城県の平野部の海岸3 km 離
れた場所までも津波が来る可能性がある、という
周知が5年もあればできたらう。また宮城県沖で、
想定宮城県沖地震震源域近傍の海底測地観測点の
西向き変位速度が東側の観測点よりも小さかった
のは、2005年の宮城県沖の地震の余効変動が続
いていたからであると思込んでしまっていたが、
もう5年あれば、想定宮城県沖地震の震源域より
も、海溝近くのほうが歪エネルギーを蓄積してい
るということに研究者は気が付いていたはずであ

る。

そのような評価が十分に住民に伝わってい
れば、犠牲者を少しは減らせたように思う。そう
であれば、いろいろと反省すべきことは数多くあ
るものの、我々が行ってきたことは、完全に間違
っていたわけではないはずである。多くの批判を考
慮しながら、我々は前に進み、さらなる減災を模
索しないとイケない。そうでなければ、犠牲とな
られた方々に申し訳が立たない。

参考文献

- 阿部 壽・菅野喜貞・千釜 章：仙台平野における
貞観11年(869年)三陸津波の痕跡高の推定, 地
震2, Vol. 43, pp.513-525, 1990.
- Asano, Y., T. Saito, Y. Ito, K. Shiomi, H. Hirose, T.
Matsumoto, S. Aoi, S. Hori and S. Sekiguchi:
Spatial distribution and focal mechanisms of
aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of
Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, Vol.
63, pp.669-673, 2011.
- Bassett, D., D.T. Sandwell, F. Fialko and A.B. Watts:
Upper-plate controls on co-seismic slip in the 2011
magnitude 9.0 Tohoku-oki earthquake, Nature,
Vol. 531, pp.92-96, 2016.
- Bilek, S.L.: The role of subduction erosion on
seismicity, Geology, Vol. 38, pp.479-480, 2010.
- Chester, F.M., C. Rowe, K. Ujiie, J. Kirkpatrick, C.
Regalla, F. Remitti, J.C. Moore, V. Toy, M. Wofson-
Schwehr, S. Bose, J. Kameda, J.J. Mori, E.E.
Brodsky, N. Eguchi, S. Toczko, Expedition 343
and 343T Scientists: Structure and composition of
the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-
Oki earthquake, Science, Vol. 342, pp.1208-1211,
2013.
- Dieterich, J.H.: Modeling of rock friction 1.
Experimental results and constitutive equations, J.
Geophys. Res., Vol.84, pp.2161-2168, 1979.
- Freed, A.M., A. Hashima, T.W. Becker, D.A. Okaya, H.
Sato and Y. Hatanaka: Resolving depth-dependent
subduction zone viscosity and afterslip from
postseismic displacements following the 2011
Tohoku-oki, Japan earthquake, Earth Planet. Sci.
Lett., Vol. 459, pp.279-290, 2017.
- Fujie, G., S. Kodaira, Y. Nakamura, J.P. Morgan, A.
Dannowski, M. Thorwart, I. Grevemeyer and S.

- Miura: Spatial variations of incoming sediments at the northeastern Japan arc and their implications for megathrust earthquakes, *Geology*, Vol.48, pp.614-619, 2020.
- Fujiwara, T., S. Kodaira, T. No, Y. Kaiho, N. Takahashi and Y. Kaneda: The 2011 Tohoku-oki earthquake: displacement reaching the trench axis, *Science*, Vol. 334, p.1240, 2011.
- Fujiwara, T., C.d.S. Ferreira, A.K. Bachmann, M. Strasser, G. Wefer, T. Sun, T. Kanamatsu and S. Kodaira: Seafloor displacement after the 2011 Tohoku-oki earthquake in the northern Japan Trench examined by repeated bathymetric surveys, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 44, pp.11833-11839, 2017.
- 深畑幸俊・八木勇治・三井雄太：2011年東北地方太平洋沖地震による絶対歪の解放：遠地実体波インバージョン解析と動的摩擦弱化，*地質学雑誌*，Vol. 118, pp.396-409, 2012.
- Fulton, P.M., E.E. Brodsky, Y. Kano, J. Mori, F. Chester, T. Ishikawa, R.N. Harris, W. Lin, N. Eguchi, S. Toczko, Expedition 343, 343T, and KR13-08 Scientists: Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements, *Science*, Vol. 342, pp.1214-1217, 2013.
- Hasegawa, A., K. Yoshida and T. Okada: Nearly complete stress drop in the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.703-707, 2011.
- Hasegawa, A., K. Yoshida, Y. Asano, T. Okada, T. Iinuma and Y. Ito: Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 355-356, pp.231-243, 2012.
- Hasegawa, A., and K. Yoshida: Preceding seismic activity and slow slip events in the source area of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake: a review, *Geosci. Lett.*, Vol. 2, 6, 2015.
- Hashimoto, C., A. Noda and M. Matsu'ura: The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity, *Geophys. J. Int.*, Vol. 189, pp.1-5, 2012.
- 羽鳥徳太郎：貞観11年(869年)宮城多賀城津波の推定波源域，*月刊地球号外*，Vol. 15, pp.167-171, 1998.
- Hino, R., D. Inazu, Y. Ohta, Y. Ito, S. Suzuki, T. Iinuma, Y. Osada, M. Kido, H. Fujimoto and Y. Kaneda: Was the 2011 Tohoku-oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter, *Mar. Geophys. Res.*, Vol. 35, pp.181-190, 2014.
- Hino, R.: An overview of the Mw 9, 11 March 2011, Tohoku earthquake, In: Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre, Thatcham, United Kingdom, Vol. 48, pp.100-132, 2015.
- Hirano, N., E. Takahashi, J. Yamamoto, N. Abe, S.P.Ingle, I. Kaneoka, T. Hirata, J. Kimura, T. Ishii, Y. Ogawa, S. Machida and K. Suyehiro: Volcanism in response to plate flexure, *Science*, Vol. 313, pp.1426-1428, 2006.
- Hori, T. and S. Miyazaki: A possible mechanism of M 9 earthquake generation cycles in the area of repeating M 7-8 earthquakes surrounded by aseismic sliding, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.773-777, 2011.
- Ide, S., A. Baltay and G.C. Beroza: Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, Vol.332, pp.1426-1429, 2011.
- Igarashi, T., T. Matsuzawa and A. Hasegawa: Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. B5, 2249, doi:10.1029/2002JB001920, 2003.
- 池田安隆：活断層研究と日本列島の現在のテクトニクス，*活断層研究*，Vol. 15, pp.93-99, 1996.
- 池田安隆：地学的歪速度と測地学的歪速度の矛盾，*月刊地球*，Vol. 25, No. 2, pp. 125-129, 2003.
- Iinuma T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto and S. Miura: Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 117, B07409, 2012.
- 飯尾能久・松澤 暢：東北地方太平洋沖地震の発生過程：なぜM9が発生したのか？，*地質学雑誌*，Vol. 118, pp.248-277, 2012.
- Ishii, M.: High-frequency rupture properties of the Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.609-614, 2011.
- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D.

- Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji and J. Ashi: Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, Vol.600, pp.14–26, 2013.
- Kanamori, H.: Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications, In: *Island arcs, deep sea trenches, and back-arc basins* (Ed. M. Talwai and W.C. Pitman III), AGU, Vol. 1, pp.163–174, 1977.
- Kanamori, H.: The diversity of large earthquakes and its implications for hazard mitigation, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 42, pp.7–26, 2014.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa and N. Hirata: Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake, *Science*, Vol. 335, pp.705–708, 2012.
- Kato, N. and S. Yoshida: A shallow strong patch model for the 2011 great Tohoku-oki earthquake: a numerical simulation, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L00G04, 2011.
- Kato, T.: Secular and earthquake-related vertical crustal movements in Japan as deduced from tidal records (1981–1981), *Tectonophysics*, Vol.97, pp.183–200, 1983.
- Katsumata, K.: Long-term seismic quiescences and great earthquakes in and around the Japan subduction zone between 1975 and 2012, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 174, pp.2427–2442, 2017.
- Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino and Y. Ito: Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L24303, 2011.
- 気象庁: 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について～10年間の地震活動～, 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」以降の地震活動の評価, 地震調査委員会, pp.3–23, 2021.
- Kodaira, S., T. No, Y. Nakamura, T. Fujiwara, Y. Kaiho, S. Miura, N. Takahashi, Y. Kaneda and A. Taira: Coseismic fault rupture at the trench axis during the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature Geosci.*, Vol. 5, pp.646–650, 2012.
- Kodaira, S., T. Fujiwara, G. Fujie, Y. Nakamura and T. Kanamatsu: Large coseismic slip to the trench during the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 48, pp.321–343, 2020.
- Koketsu, K., Y. Yokota, N. Nishimura, Y. Yagi, S. Miyazaki, K. Satake, Y. Fujii, H. Miyake, S. Sakai, Y. Yamanaka and T. Okada: A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 310, pp.480–487, 2011.
- 国土地理院: 東北地方太平洋沖地震(M9.0)前後の地殻変動(上下) – 本震前後 –, 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」以降の地震活動の評価, 地震調査委員会, p.29., 2021a.
- 国土地理院: 東北地方太平洋沖地震(M9.0)後の地殻変動(上下) – 本震翌日から10年間の累積前後 –, 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」以降の地震活動の評価, 地震調査委員会, p.32., 2021b.
- Koper, K.D., A.R. Hutko and T. Lay: Along-dip variation of teleseismic short-period radiation from the 11 March 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0), *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L21309, 2011.
- Kurahashi, S. and K. Irikura: Short-period source model of the 2011 Mw 9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 103, pp.1373–1393, 2013.
- Lay, T., C.J. Ammon, H. Kanamori, L. Xue and M.J. Kim: Possible large near-trench slip during the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.687–692, 2011.
- Lay, T.: A review of the rupture characteristics of the 2011 Tohoku-oki Mw 9.1 earthquake, *Tectonophysics*, Vol. 733, pp.4–36, 2018.
- Loveless, J.P. and B.J. Meade: Spatial correlation of interseismic coupling and coseismic rupture extent of the 2011 Mw=9.0 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L17306, 2011.
- Matsuzawa, T.: The largest earthquakes we should prepare for, *J. Disaster Res.*, Vol. 9, pp.248–251, 2014.
- McCaffrey, R.: The next great earthquake, *Science*, Vol. 315, pp.1675–1676, 2007.
- Minoura, K. and S. Nakaya: Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan, *J. Geology*, Vol. 99, pp.265–287, 1991.
- 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, *J. Natural Disaster Sci.*, Vol. 23, pp.83-88, 2001.
- Mitsui, Y., Y. Iio and Y. Fukahata: A scenario for the generation process of the 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: role of stress concentration and thermal fluid pressurization, *Earth Planets Space*, Vol. 64, pp.1177-1187, 2013.
- 宮内崇裕：1/5万図幅，八戸東部図幅，階上岳図幅，久慈図幅，陸中大野図幅，陸中野田図幅，岩泉図幅，田老図幅，宮古図幅，トドヶ崎図幅，日本の海成段丘アトラス（小池一之・町田洋編），東京大学出版会，105p.+CD-ROM 3枚，2001.
- Nakamura, Y., T. Fujiwara, S. Kodaira, S. Miura and K. Obana: Correlation of frontal prism structures and slope failures near the trench axis with shallow megathrust slip at the Japan Trench, *Sci. Rep.*, Vol. 10, 11607, 2020.
- Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo and K. Ariyoshi: Possible scenarios for occurrence of M~7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, *Sci. Rep.*, Vol. 6, 25704, 2016.
- 行谷佑一・佐竹健治・山木 滋：宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における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，Vol. 10, pp.1-21, 2010.
- 西村卓也：測地観測データに基づく東北日本の最近120年間の地殻変動，地質学雑誌，Vol. 118, pp.278-293, 2012.
- Ohta, Y., R. Hino, D. Inazu, M. Ohzono, Y. Ito, M. Mishina, T. Iinuma, J. Nakajima, Y. Osada, H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi and S. Miura: Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, *Japan. Geophys. Res. Lett.*, Vol. 39, L16304, 2012.
- 岡村行信・佐竹健治・宍倉正展・藤原 治・澤井祐紀・小松原純子・藤野滋弘・行谷佑一・藤井雄士郎・T. Aung：地質調査・津波シミュレーションにもとづく地震発生履歴に関する研究，宮城県沖地震における重点的調査観測 平成17-21年度 統括成果報告書，文部科学省，pp.186-268, 2010.
- Ruff, L. and H. Kanamori: Seismicity and the subduction process, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 23, pp.240-252, 1980.
- Sasajima, R., B. Shibazaki, H. Iwamori, T. Nishimura and Y. Nakai: Mechanism of subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a gigantic earthquake cycle, *Sci. Rep.*, Vol. 9, 5726, 2019.
- 佐竹健治・行谷佑一・山木 滋：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，Vol. 8, pp.71-89, 2008.
- Satake, K., Y. Fujii, T. Harada and Y. Namegaya: Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 103, pp.1473-1492, 2013.
- Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki and A. Asada: Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, Vol. 332, p.1395, 2011.
- Stein, S. and E.A. Okal: Ultralong period seismic study of the December 2004 Indian Ocean earthquake and implications for regional tectonics and the subduction process, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 97, pp.S279-S295, 2007.
- Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire and S. Ozawa: Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.615-619, 2011.
- Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Miura, Y. Ohta and Y. Hu: Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature*, Vol. 514, pp.84-87, 2014.
- Sun, T. and K. Wang: Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, Vol. 120, pp.1329-1344, 2015.
- Suwa, Y., S. Miura, A. Hasegawa, T. Sato and K. Tachibana: Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, B04402, 2006.
- 遠田晋次：余震はいつまで続くか，地震ジャーナル，Vol. 70, pp.11-19, 2020.
- Tomita, F., T. Iinuma, Y. Ohta, R. Hino, M. Kido and N. Uchida: Improvement on spatial resolution of a coseismic slip distribution using postseismic geodetic data through a viscoelastic inversion,

- Earth Planets Space, Vol. 72, 84, 2020.
- Uchida, N. and T. Matsuzawa: Pre- and post-seismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 374, pp.81–91, 2013.
- Ujiie, K., H. Tanaka, T. Saito, A. Tsutsumi, J.J. Mori, J. Kameda, E.E. Brodsky, F.M. Chester, N. Eguichi, S. Toczko, Expedition 343 and 343T Scientists: Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments, *Science*, Vol. 342, pp.1211–1214, 2013.
- Wang, D. and J. Mori: Rupture process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) as imaged with back-projection of teleseismic P-waves, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.603–607, 2011.
- 渡邊偉夫：貞観十一年（869年）地震・津波と推定される津波の波源域（総括），*歴史地震*，Vol. 16, pp.59–77, 2000.
- Wesnousky, S.G., C.H. Scholz and K. Shimazaki: Deformation of an island arc: Rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from seismicity and Quaternary fault data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, pp.6829–6852, 1982.
- Yagi, Y. and Y. Fukahata: Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L19307, 2011a.
- Yagi, Y. and Y. Fukahata: Introduction of uncertainty of Green's function into waveform inversion for seismic source processes, *Geophys. J. Int.*, Vol. 186, pp.711–720, 2011b.
- Yokota, Y. and K. Koketsu: A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, *Nature Comm.*, Vol.6, 5934, 2015.

(投稿受理：令和3年3月19日)

要 旨

2011年東北地方太平洋沖地震では、約500 km × 200 kmの広大なプレート境界域が破壊され、海溝付近で約50 mもの滑りが生じた。このような大きな滑りが発生した理由としては、滑りが海溝を貫通したこと、**thermal pressurization**の発生、浅部の弾性定数が小さかったこと等が挙げられる。広大な滑り域の理由は、大きな高強度パッチモデルや**hyper asperity**モデルで説明できる。このような巨大な地震を予見できなかった理由を一言で言えば、限られた情報から「過学習」してしまったからである。東北地方太平洋沖地震から学ぶことは重要だが、学びすぎてはいけない。さもなくば、次のM9の地震はまた「想定外の地震」になってしまう。