

## 「2011年東北地方太平洋沖地震が与えた衝撃」

東北大学 地震・噴火予知研究観測センター 松澤 暢

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生したマグニチュード(M)9.0の東北地方太平洋沖地震とそれによって引き起こされた巨大な津波は各地に甚大な被害をもたらし、約2万人もの方々が亡くなられたり行方不明となっておられる。さらに、この地震と津波は原発事故という深刻な事態をも引き起こした。このような大きな被害をもたらした地震を、短期予測はおろか、その発生ポテンシャルすら予見できなかったことは、地震の予知研究を行っている者の一人として、大きな責任を感じている。

ここでは、最初に地震について簡単に説明した後、今回の地震の概要を述べて、この地震を何故予見することができなかつたのかを解説させていただく。なお、一般向けのさらに詳しい解説については松澤(2011)を参照してほしい。

### 2. 地震とプレート・テクトニクスとアスペリティ・モデル

「地震」とは、もともとは「大地が大きく揺れること」を意味するが、我々地震学者は、そのような揺れをもたらす、「地下の断層の急激な滑り現象」のことを「地震」と呼ぶことが多い。

地震が生じるエネルギーの大きさは、断層面積と滑り量の積にほぼ比例し、地震のマグニチュードは、地震のエネルギーの対数に概ね比例する。断層面積は断層面の長さとの積で与えられ、さらに通常は、断層面の長さとの積と滑り量は互いに比例関係にある。その概略を表1に示す。

この表のとおり、マグニチュードが2違うと、断層の長さも幅もすべり量も10倍違い、エネルギーは1,000倍も違う。発生が心配されていたM7級の宮城県沖地震と、M9の東北地方太平洋沖

地震はこのくらい違うのである。

このような巨大な地震が生じるメカニズムは、「プレート・テクトニクス」と呼ばれる学説で概ね説明でき

表1. 地震の大きさの概略

M	滑り量	断層の長さ	断層面積	例えば...
9	10m	500km	100,000km <sup>2</sup>	東北地方くらい
8	3m	150km	10,000km <sup>2</sup>	宮城県や岩手県くらい
7	1m	50km	1,000km <sup>2</sup>	佐渡島くらい
6	30cm	15km	100km <sup>2</sup>	猪苗代湖くらい
5	10cm	5km	10km <sup>2</sup>	金華山くらい
4	3cm	1.5km	1km <sup>2</sup>	皇居くらい
3	1cm	500m	0.1km <sup>2</sup>	東京ドーム2個くらい
2	3mm	150m	10,000m <sup>2</sup>	グラウンドくらい
1	1mm	50m	1,000m <sup>2</sup>	体育館くらい

\*すべての数値は倍～半分くらいのバラツキがあることに注意。

る。このプレート・テクトニクスにおいては、地球の表面は厚さが数十 km~100km 程度の十数枚の「プレート」と呼ばれる岩盤で覆われており、大きな地震のほとんどは、このプレート同士が衝突したり、すれ違ったりすることで生じると考えられている。東北地方には「太平洋プレート」と呼ばれるプレートが日本海溝から沈み込み、その際に上盤側の陸のプレートが引きずり込まれるが、やがて陸のプレートが跳ね上がって巨大な地震と津波を起こすと考えられている。今回の東北地方太平洋沖地震もまさしくそのようにして生じたことが、様々な観測から明らかになっている。

このようなプレートとプレートとの境界で起こる地震は「プレート境界型地震」あるいは「プレート境界地震」と呼ばれている。このプレート境界型地震については、最近 10 年程度の間急速に理解が進み、「アスペリティ・モデル」と呼ばれる仮説で概ね説明できると考えられるようになっていた。

このアスペリティ・モデルのオリジナルは 1980 年頃に作られた (Lay and Kanamori, 1980, 1981; Lay et al., 1982) が、最近の様々な観測や実験から改良が進められてきた。我々が考えていた新しいアスペリティ・モデルでは、地震性滑りが卓越する領域を「アスペリティ」と呼び、プレート境界上にはこのアスペリティがパッチ状に存在していて、その周りにはゆっくりとした滑り (非地震性すべり) が卓越するとしている (図 1)。

東北地方の沖では、同じ場所ではほぼ同じ規模の小さな地震が繰り返して発生している地震群が多数見つかっており、「小繰り返し地震 (small repeating earthquake)」と呼ばれている (Matsuzawa et al., 2002 ; Igarashi et al., 2003; Uchida et al., 2003)。これらの地震は上記のアスペリティ・モデルで良く説明できる。また、大地震についても、たとえば 1968 年十勝沖地震と 1994 年三陸はるか沖地震の関係 (永井・他, 2001 ; Yamanaka and Kikuchi, 2004) も、このようなアスペリティ・モデルでうまく説明できる。

一方、福島県沖では、1938 年に M7 級の地震が続発したり (Abe, 1977)、869 年に貞観の地震と呼ばれる巨大な地震が発生していた (例えば、佐竹・他, 2008) ので、巨大な地震を発生させるポテンシャルがあることはわかっていたが、過去の大地震の履歴が良くわかっていなかった。仮に周期的に大地震が発生していたとしても、その間隔は東北地方北部の沖での同規模の地震よりも再来間隔が極めて長いと考えざるを得ず、単純なアスペリティ・モデルでは説明できなかった。このため、アスペリティ・モデルの改良が必要なのは認識されていて、そのために様々な研究が行われていた矢先に東北地方太平洋沖地震が起こってしまったことは痛恨の極みである。

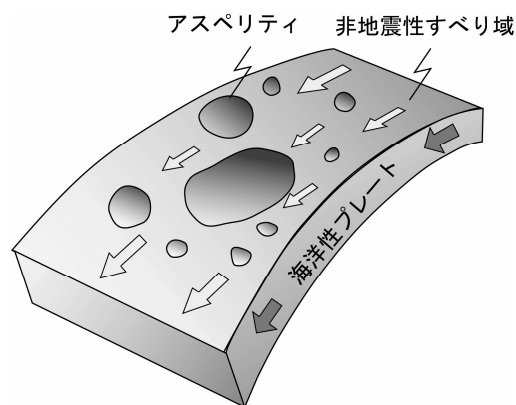


図 1. アスペリティ・モデルの概念図。

### 3. 東北地方太平洋沖地震

地震調査研究推進本部地震調査委員会（2000）で「宮城県沖地震の長期評価」が発表されたことから、宮城県沖についての調査観測が重要であるとの認識が高まり、2005年度から「宮城県沖地震における重点的調査観測」が実施されたことにより、今回の地震の震源域周辺では、海底地震計や海底地殻変動観測が本震発生前から行われていた。これにより、M9の地震発生前後の地殻変動が海底観測によって世界で初めて明瞭にとらえられたのである（Sato et al., 2011; Ito et al., 2011; Kido et al., 2011）。

津波は、海底が広域に渡って大きく隆起するときに海水が持ち上げられるために生じる。一方、海溝近くでは、プレートの沈み込み角度は低角となっているため、地震時の滑り量に比べて海底の隆起量はそれほど大きくはない。このため、海溝付近で津波を起こすような地震が生じた場合、プレート境界が大きく滑ったのではなく、プレート境界から浅部に分岐した断層が動いたり、海底地すべりによって津波が生じたと考えられることが多かった。今回の地震が生じた直後も、津波があまりに巨大であったために、海溝近くで分岐断層が動いたと考えた研究者が多かったが、海底地殻変動のデータ解析により、プレート境界が少なくとも50m程度は滑ったことが明らかになった。

この巨大な滑りは地震学者に大きな衝撃を与えた。プレート間の相対速度は年間8cm程度なので、単純計算でも600年分程度以上の滑り遅れを解消したことになり、そんなに長期に渡って、東北地方のプレート境界が滑り遅れを蓄積できるということが予想外であったからである。また、そのような大きな滑り遅れを蓄積したのが、海溝近くであった、ということも衝撃的であった。海溝近くでは沈み込んでまだ間もなく、海洋プレートと一緒に沈み込んだ堆積層が二つのプレートの間に入り込むため、海溝近くでプレート境界の強度はかなり小さく、大きな滑り遅れを蓄積できないとそれまでは考えられていた。このような有り得ないくらいの巨大な滑り遅れが、有り得ない場所に生じていた、ということに、世界中の地震学者は驚愕したのである。

### 4. 何故M9の地震を予見できなかったのか

1950年代から1960年代にかけて発生したM9の巨大地震は、若いプレートの沈み込み帯で発生している例が多かったため、プレートの沈み込み方と地震の起こり方に相関があると考えた「比較沈み込み学」（Ruff and Kanamori, 1980）が展開された。この比較沈み込み学では、若いプレートが沈み込めば浮力が働いて、上盤側である陸のプレートとの固着が強くなって大きな地震を生じやすいが、古いプレートは冷たくて重いので沈み込みやすく、上盤側と強くは固着できないと考えられていた。東北地方南部のように1億年以上もの古いプレートが沈み込んでいる場所で、M9の地震が発生している例は過去に知られていなかったため、この領域は固着が弱くて、M9の地震はおろか、M8の地震すらめったに起こせないと考えられていた。

一方、1990年代末から2000年代初頭にかけてのGPSデータの解析から、東北地方中央部から南部にかけての領域では、陸地が毎年2cm程度短縮しており、これがすべてプレート境界の固着状況に原因があると考えて解析すると、宮城県沖から福島県沖にかけての領域が、ほぼ100%固着しているという結果が得られていた (Suwa et al., 2006)。しかし、このような固着が長期に渡って続くのであれば、陸地は100年間に2mも短縮するはずであるが、国土地理院の約100年の測地測量の結果では、東北地方内陸は、東西短縮というよりほぼニュートラルかむしろ伸張が卓越する結果が得られていた (橋本, 1990 ; 石川・橋本, 1999)。このことは、仮に一時的にプレート境界の固着が強まって歪エネルギーを蓄えても、それは100年以内の再来間隔で生じるM7~M8弱の地震で解消されることを示唆していた。なお、明治の三角測量は精度が低いのでこのような議論ができない、という意見もあるが、東北地方以外では、このような伸張は卓越しておらず、東北地方だけに系統的誤差が入り込むのは考えにくい。

また、図2で示したように、今回の震源域である宮城県沖から福島県沖にかけて (図2の実線の楕円内) は、ように、普段の地震活動が、国内で最も高い領域であり、このような場所は固着が弱いために、小さな地震を頻繁に発生させて、滑り遅れを解消させていると考えられた。実際、M8級の地震が繰り返し発生していたことが知られている南海トラフ沿い (図2の破線の楕円内) では、普段の地震活動は極めて低調であり、これはプレート境界が強く固着していて、滑り遅れを蓄積していると考えれば説明が可能であったため、南海トラフ沿いよりも大きな地震が、宮城沖~福島沖で近い将来に発生するとは考えられなかった。

さらに、図3に示したように、前述の小繰り返し地震がこの領域では活発に生じており、一方、南海トラフ沿いでは小繰り返し地震は極めて少ない。小繰り返し地震は、その周りのプレート境界がゆっくり滑ることによってアスペリティに応力が集中して発生すると考えられているため、小繰り返し地震が活発に発生している領域は、ゆっくりとした滑りも生じている領域

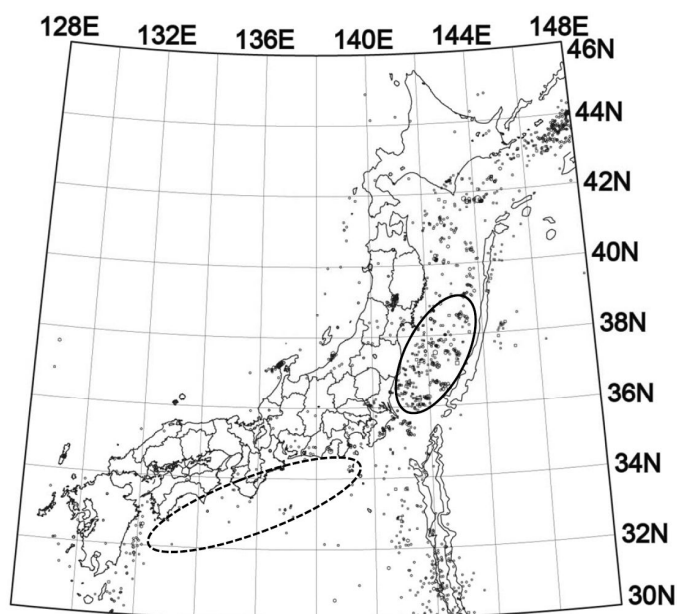


図2. 気象庁一元化震源データによる、2006年~2010年の期間に発生した深さ60km以浅のM4以上の地震の震央分布。

であることを示しており、このことも、この地域で巨大な地震が発生しにくいと考えられた理由の一つである。

さらに、この領域で発生する M6 以上の地震は大きな余効滑り（地震のあとに生じるゆっくりとした滑り）を伴うことが多く、このことも、この領域の固着がそれほど大きくないことを示唆していた（Suito et al., 2011）。

GPS データから、1990 年代から 2000 年代初頭頃にかけて福島県沖のプレート境界の固着が強いように見えていた（Suwa et al., 2006）が、2000 年代後半以降の GPS データからは、宮城県沖から福島県沖の固着状況はかなり緩んでいるという結果が得られていた（西村, 2012）。この GPS から見て固着の強い時期では、福島県沖の地震活動は極めて低調で、2000 年代後半からもとの活動度に戻ったことから、むしろ、GPS で固着が強く見えていた時期が異常であり、2000 年代後半のほうが、福島県沖の普段のプレート境界の状態なのだろうと考えていた。

## 5. 何故 M9 の地震が発生し得たのか？

前節で述べたように、東北地方太平洋沖の強度はかなり弱いと考えられる。実際、今回の地震の前のプレート境界にかかっていた応力は 20MPa 程度であったと推定されている（Hasegawa et al., 2011）。そのような場所で、何故 M9 の地震が発生し得たのであろうか？

この問題については、現在、論争中であり、局所的に強度が非常に強かったとするモデル（Kato and Yoshida, 2011）や、条件付き安定領域（普段はゆっくりとした滑りが生じるが、大きな応力擾乱があったときだけ地震性滑りを起こせる領域）が広域に存在していたとするモデル（Hori and Miyazaki, 2011）等が考えられている。ただし、これらは対立仮説ではなく共存できるモデルであることに注意する必要がある。どのモデルが一番本質的であるかどうかは、今後明らかになっていくと考えられるが、いずれにしても M9 の地震を起こす必要条件として、広域に滑り遅れが生じていなければならない。

飯尾・他（2011）は、今回の地震のように断層面が巨大であれば、大きな滑り遅れが生じて歪エネルギーを蓄積しても、断層面での剪断応力はそれほど大きくなり、逆に言えば、断層面積が大きければ、強度が小さくても地震時に大きな滑りが生じうることを示し

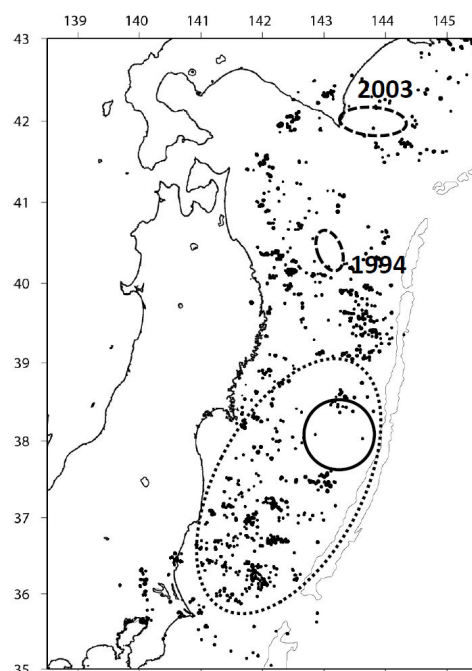


図 3. 小繰り返し地震の分布（Uchida and Matsuzawa, 2011）。東北地方太平洋沖の震源域と主破壊域の概略を点線楕円と実線丸で示す。破線楕円は 1994 年三陸はるか沖地震と 2003 年十勝沖地震の主破壊域（Yamanaka and Kikuchi, 2003, 2004）を示す。

た。つまり、溜まっていた歪エネルギーを全部解放して M9 の地震を起こす場合には、幅広いプレート境界であれば、その歪エネルギーを蓄積するためにそれほどの強度を必要としないのである。

これまで、若いプレートの沈み込みで M9 の地震が多いように見えたのは、若いプレートは軽くて沈み込みにくいから浮力が働いて上盤との固着が強いからだと考えられていたが、実は、若いプレートほど沈み込みにくいためにプレートの沈み込み角度が浅くなり、このためにプレート境界型地震が発生しうる領域の幅が広がっていたことのほうが重要であった可能性がある。東北地方に沈み込む太平洋プレートは年齢の割には低角（30 度以内）で沈み込んでおり、またプレートが古くて冷たく、かつ沈み込み速度も速いために、プレート境界型地震発生域の下限も通常の沈み込み帯よりも深くて約 60km にまで達している。さらに、GPS から見られる弱い固着まで含めると、深さ 100km 近くまで緩やかに固着していることになり、結果として、「固着領域」の幅は 200km 以上と極めて広い。Ruff and Kanamori (1980) が主張したように M9 の発生ポテンシャルと海洋プレートの年齢や沈み込み速度に相関があるとしても、それは固着の強さの違いが本質ではなくて、固着領域の幅の違いが本質であった可能性がある。

以上を総合すると、次のような地震像が考えられる。

今回の地震を生じたプレート境界では、条件付き安定領域が広く存在していて、その中にところどころ、不安定領域が存在し、宮城県沖の海溝近くには特に摩擦抵抗が大きくて巨大な不安定領域があった。条件付き安定領域は、時々ゆっくりと滑り、その中の小さな不安定領域で、小繰り返し地震を含むプレート境界型地震を発生させていた。このためにプレート境界の地震活動も活発に見えた。東北地方では、この領域の幅が約 200km と極めて広いために、数十 m の地震時滑りを生じうるくらいに歪エネルギーを蓄積しても、断層面に働く平均剪断応力はそれほど大きくはならなかった。

このような状態に 100 年くらい前に達していて、最近の 100 年間に増加した分の歪エネルギーは、M7 や M8 弱程度の地震の発生で解消してしまったので、この間の内陸の歪は増加しなかったように見えた。このように普段は、地震が生じてても応力降下量が 3MPa 程度なので、プレート境界の滑りはそれほど大きくなかったが、今回は例外的にプレート境界の剪断応力がゼロになるくらいまでの滑りは生じたと考えれば M9 の地震発生は説明可能である。このような巨大な滑りが生じた理由としては、海溝近くにあった巨大な不安定域がついに破壊して、摩擦熱による間隙水圧の上昇のために強度が急激に減少する **thermal pressurization** と呼ばれる現象が生じた (Mitsui and Iio, 2011) り、また海溝まで滑りが突き抜けた等によって **dynamic overshoot** (滑り過ぎ) が生じた (Ide et al., 2011) などが考えられている。これらも対立仮説ではないので、両方が生じた可能性もある。

## 6. 終わりに

前節のように考えれば、普段も地震活動が活発で、M6 程度の地震で大きな余効滑りを生

じるような東北地方南部の東方沖で M9 が生じたことや、最近 100 年の測地測量のデータで内陸に歪が蓄積していなかったように見える理由も説明できる。その場合、我々が犯した大きな過ちは、(1) プレート境界の強度が弱いように見えたことから M9 の地震は起こせないものと判断したこと、(2) 100 年の測地測量のデータからプレート境界で大きな歪エネルギーは蓄積されていないと判断したこと、(3) すべり遅れの大きな領域が海溝近くに存在するとは考えなかったこと、が挙げられる。

このうち (3) については、10 年前まではその検証すら不可能であったが、最近、海底地殻変動観測がようやく軌道に乗ってきたので、今から 10 年後であったら、海溝近くでも固着域があることに気が付いた可能性があり、その意味でも残念でならない。アスペリティ・モデルが正しければ、大きな地震の主破壊域と小繰り返し地震の分布は基本的には相補的な関係になるはずで、実際、図 3 に示したように、これまでの大きな地震の主破壊域 (破線楕円) は、小繰り返し地震の少ないところで発生していた。今回の地震の主破壊域 (実線丸) では、小繰り返し地震がやはり少ないところであったので、大きな地震の主破壊域となる可能性を検討したことはあったが、海溝近くは非地震的に滑っているという思い込みがあったため、ここでは小繰り返し地震を起こせるような小さなアスペリティすら無いと判断してしまっていたのである。

以上の考えも現段階では仮説に過ぎず、これに固執しすぎることは、また新たな間違いを生じる危険性もある。このような反省と自覚のもと、北海道南東沖や南海トラフ沿いとといった他の巨大地震発生域での最大規模の推定を間違えないように、今後さらに検討を進めていく必要がある。

## 引用文献

- Abe, K., Tectonic implications of the large Shioya-Oki earthquake of 1938, *Tectonophys.*, **41**, 269-289, 1977.
- 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*, **63**, 703-707, doi:10.5047/eps.2011.06.007, 2011.
- 橋本学, 測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪速度 (I) : 本州・四国・九州, *地震*, **43**, 13-26, 1990.
- Hori, T., and S. Miyazaki, A possible mechanism of M9 earthquake generation cycles in the area of repeating M7~8 earthquakes surrounded by aseismic sliding, *Earth Planets Space*, **63**, 773-777, doi:10.5047/eps.2011.06.022, 2011.
- Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza, Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, **332**, 1426-1429, doi:10.1126/science.1207020, 2011.
- Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, Repeating earthquakes and interplate

- aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JB001920, 2003.
- 飯尾能久・松澤暢・佐藤まりこ, 海底地殻変動データから推定される東北地方太平洋沖地震前の固着状態, *日本地震学会講演予稿集 2011 年度秋季大会*, P1-14, 161, 2011.
- 石川典彦・橋本学, 測地測量により求めた日本の地震間の平均的な地殻水平ひずみ速度 (II), *地震* **2**, **52**, 299-315, 1999.
- Ito, Y., T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, H. Tsushima, R. Hino, and H. Fujimoto, Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G05, doi:10.1029/2011GL048355, 2011.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 宮城県沖地震の長期評価, <http://www.jishin.go.jp/main/chousa/00nov4/miyagi.htm>, 2000.
- Kato, N., and S. Yoshida, A shallow strong patch model for the 2011 great Tohoku-oki earthquake: A numerical simulation, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G04, doi:10.1029/2011GL048565, 2011.
- 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.*, **38**, L24303, doi:10.1029/2011GL050057, 2011
- Lay, T., and H. Kanamori, Earthquake doublets in the Solomon Islands, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **21**, 283-304, 1980.
- Lay, T., and H. Kanamori, An asperity model of large earthquake sequences, in “*Earthquake Prediction - An International Review*” ed. by D. W. Simpson and P. G. Richards, Maurice Ewing Series, 4, AGU Geophys. Mono., Washington D.C., 579-592, 1981.
- Lay, T., H. Kanamori, and L. Ruff, The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes, *Earthquake Pred. Res.*, **1**, 3-71, 1982.
- 松澤暢, なぜ東北日本沈み込み帯でM9の地震が発生しえたのか? -われわれはどこで間違えたのか?, *科学*, **81**, 1020-1026, 2011.
- Matsuzawa, T., T. Igarashi and A. Hasegawa, Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.10129/2001GL014632, 2002.
- Mitsui, Y., and Y. Iio, How did the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake start and grow? The role of a conditionally stable area, *Earth Planets Space*, **63**, 755-759, doi:10.5047/eps.2011.05.007, 2011.
- 永井理子・菊地正幸・山中佳子, 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究, *地震* **2**, **54**, 267-280, 2001.



- 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*, 投稿中, 2012.
- Ruff, L., and H. Kanamori, Seismicity and the subduction process, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **23**, 240-252, 1980.
- 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*, **8**, 71-89, 2008.
- 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*, **332**, 1395, doi:10.1126/science.1207401, 2011.
- 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*, **63**, 615-619, doi:10.5047/eps.2011.06.053, 2011.
- 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.*, **11**, B04402, doi:10.1029/2004JB003203, 2006.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL017452, 2003.
- Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, **109**, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.