

GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う
地震時の地殻変動と震源断層モデル
Coseismic Deformation and Fault Model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku
Earthquake, Based on GEONET

地理地殻活動研究センター 水藤 尚・西村卓也・小沢慎三郎・小林知勝・飛田幹男・
今給黎哲郎

Geography and Crustal Dynamics Research Center Hisashi SUITO, Takuya NISHIMURA,
Shinzaburo OZAWA, Tomokazu KOBAYASHI, Mikio TOBITA and Tetsuro IMAKIIRE

測地観測センター 原 慎一郎・矢来博司・矢萩智裕・木村久夫・川元智司

Geodetic Observation Center Shinichiro HARA, Hiroshi YARAI, Toshihiro YAHAGI,
Hisao KIMURA and Satoshi KAWAMOTO

要 旨

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震(以下、「東北地方太平洋沖地震」という.)の発生に伴って GPS 連続観測網 (GEONET) によって北海道から九州北部に至る広範囲に渡って地殻変動が観測された。牡鹿半島に設置されている観測点で最大 5 m を超える水平変位を記録し、秋田県、岩手県、宮城県、山形県、新潟県、福島県、茨城県の 7 県で 1 m を超える水平変位が観測された。また、牡鹿半島では 1 m を超える沈降が観測され、岩手県から千葉県にかけての太平洋側の広い範囲に渡って 10cm 以上の沈降が観測された。これらの観測データを基に推定された震源断層モデルから今回の地震を引き起こした断層の主要なすべり域は岩手県沖から茨城県沖に至る南北に約 400km、東西に幅約 150km と広範囲に及ぶことが分かった。また断層すべりは場所によっては 20m を超え、算出されたモーメントマグニチュード (M_w) は 9.0 であった。

1. はじめに

本稿では、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、国土地理院が運用する GPS 連続観測網 (GEONET) によって観測された地震時の地殻変動及び推定した地震時の震源断層モデルに関して、主としてウェブページを通じて公表・公開した解析結果を基に報告する。

2. 地震時の地殻変動

GEONET で定常的に解析している座標値には、時間の早い順に、迅速解 (以下、「Q3 解」という.)、速報解 (以下、「R3 解」という.)、最終解 (以下、「F3 解」という.) の 3 種類がある。Q3 解は 6 時間分のデータから 3 時間ごとに、R3 解は 24 時間分のデータから 1 日ごとに、F3 解は同じく 24 時間分のデータから約 2 週間後に、それぞれ座標値を算出しており、位置精度は後に解析されるものほど高い。また

大地震等発生時には、緊急解析として、数時間分のデータから超迅速解 (以下、「S3 解」という.) として座標値を算出している (中川ほか, 2009)。このうち F3 解は日々の座標値解として、各電子基準点の観測データ (RINEX ファイル) とともに公開している (<http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>)。ここでは、S3 解及び R3 解に基づく結果、Q3 解及び R3 解に基づく結果及び F3 解に基づく結果の 3 つのケースでの地震時の地殻変動について報告する。

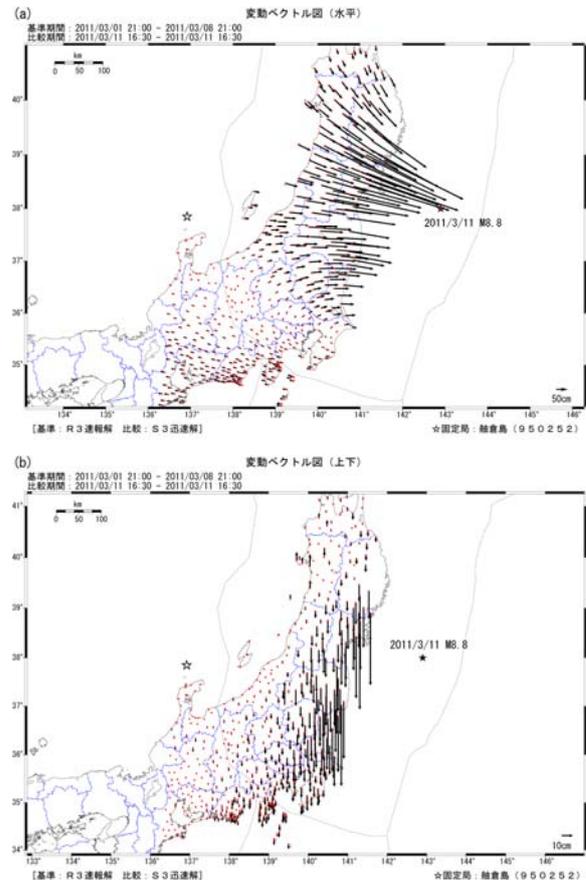


図-1 S3 解及び R3 解に基づく地震時の地殻変動。(a) 水平変動 (b) 上下変動

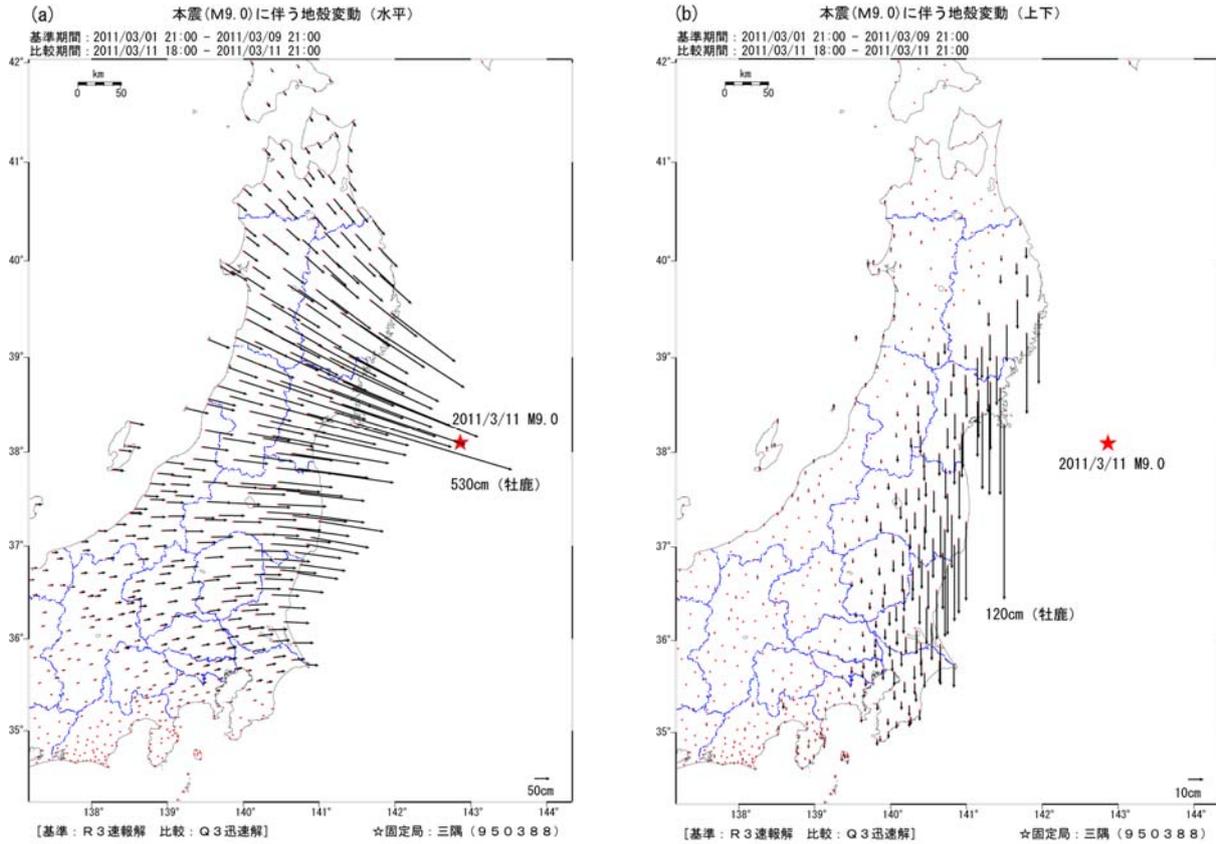


図-2 Q3解及びR3解に基づく地震時の地殻変動 (a) 水平変動 (b) 上下変動

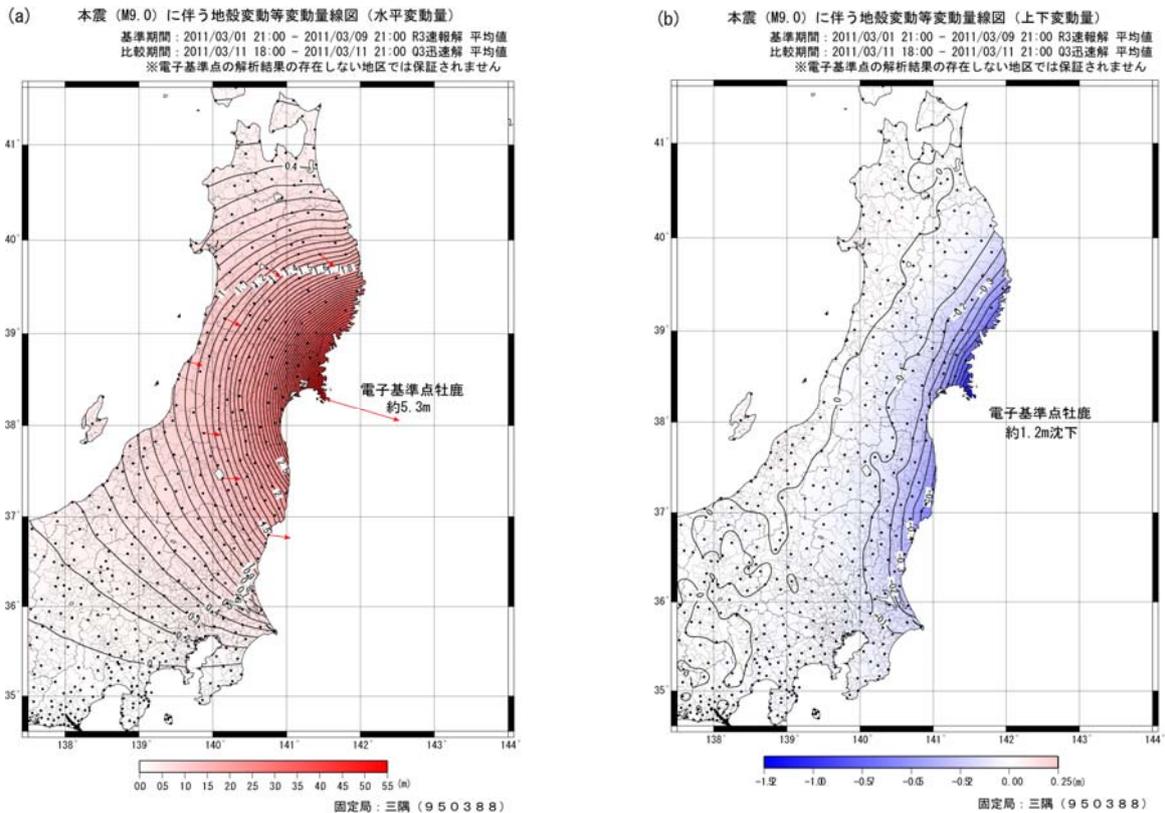


図-3 Q3解及びR3解に基づく地震に伴う地殻変動等変動量線図 (a) 水平変動 (b) 上下変動

表-1 本震及び本震直後に発生した主な余震

	日	時	M _j	発生場所
本震	3月11日	14時46分	9.0 (M _w)	東北地方太平洋沖
余震1	3月11日	15時08分	7.4	岩手県沖
余震2	3月11日	15時15分	7.6	茨城県沖
余震3	3月11日	15時25分	7.5	三陸沖

2. 1. 1 S3 解及び R3 解に基づく地震時の地殻変動

図-1は、地震後に作成した最初の変動ベクトル図であり、地震直後に開催された第220回地震調査委員会（臨時会）に資料として提出されたものである。地震発生前2011年3月1日～3月8日の8日間分のR3解の平均値と地震発生後の3月11日16時30分の1つのS3解（3月11日15時～18時の3時間分の観測データから座標値を算出）との差を地震時の変位として表示している。この時点では、変動ベクトルを表示するための固定局として電子基準点「舳倉島」(石川県輪島市)を用いた。この結果では、最大変位を記録した観測点は電子基準点「河北」(宮城県石巻市)で、水平変位約4.0m、上下方向(沈降)に約0.7mであった。しかし、図-1の作成に

より、固定局とした「舳倉島」が地震に伴い東向きに変位していることが明らかとなったため、これ以降に作成する資料では、固定局を電子基準点「三隅」(島根県浜田市)もしくは「福江」(長崎県五島市)に変更することとした。

2. 1. 2 Q3 解及び R3 解に基づく地震時の地殻変動

図-2は、Q3解及びR3解に基づく地震時の地殻変動を示している。地震直後から回線断等によりデータが取得できなくなった観測点のデータを回収して再解析を実施し(大島ほか, 2011), 3月19日に地震時の地殻変動として公表した結果である。なお、この時には同時に地震後の地殻変動についてもあわせて公表している。地震発生前2011年3月1日～3

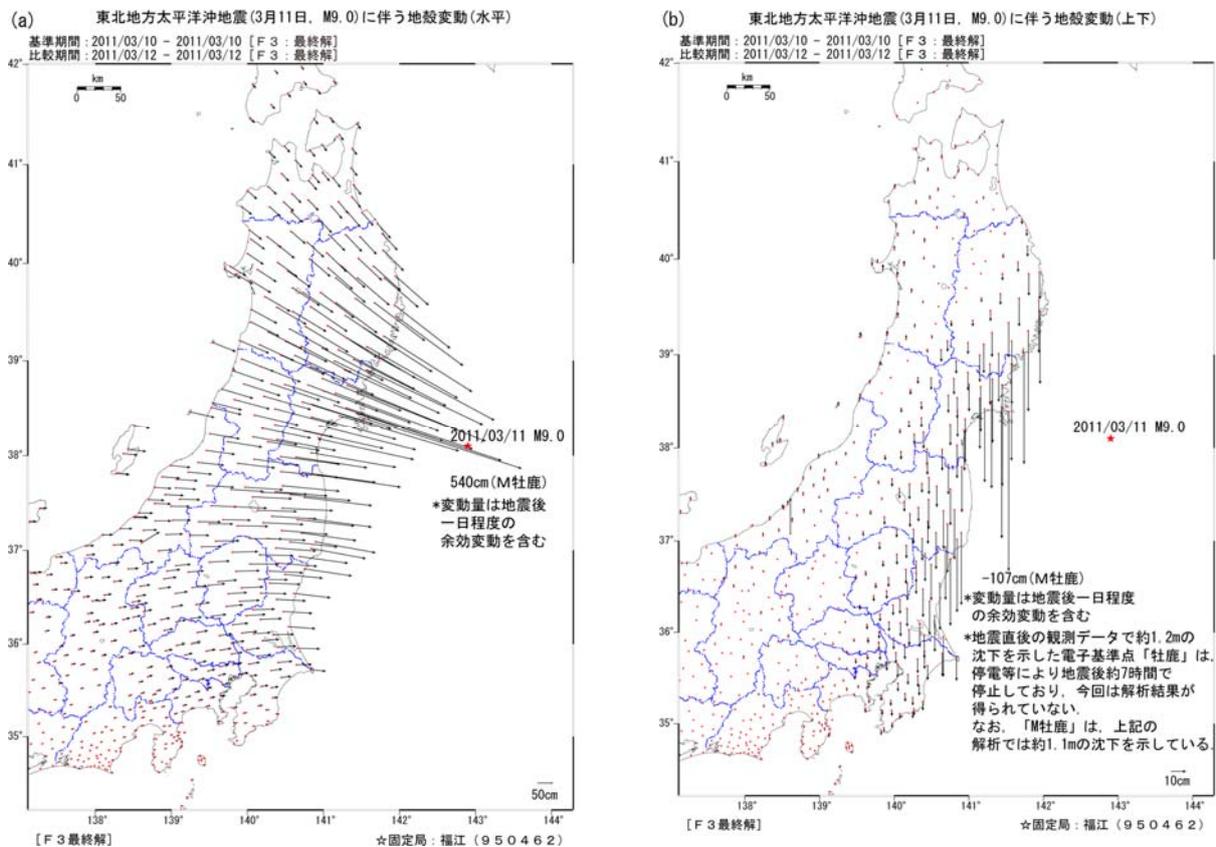
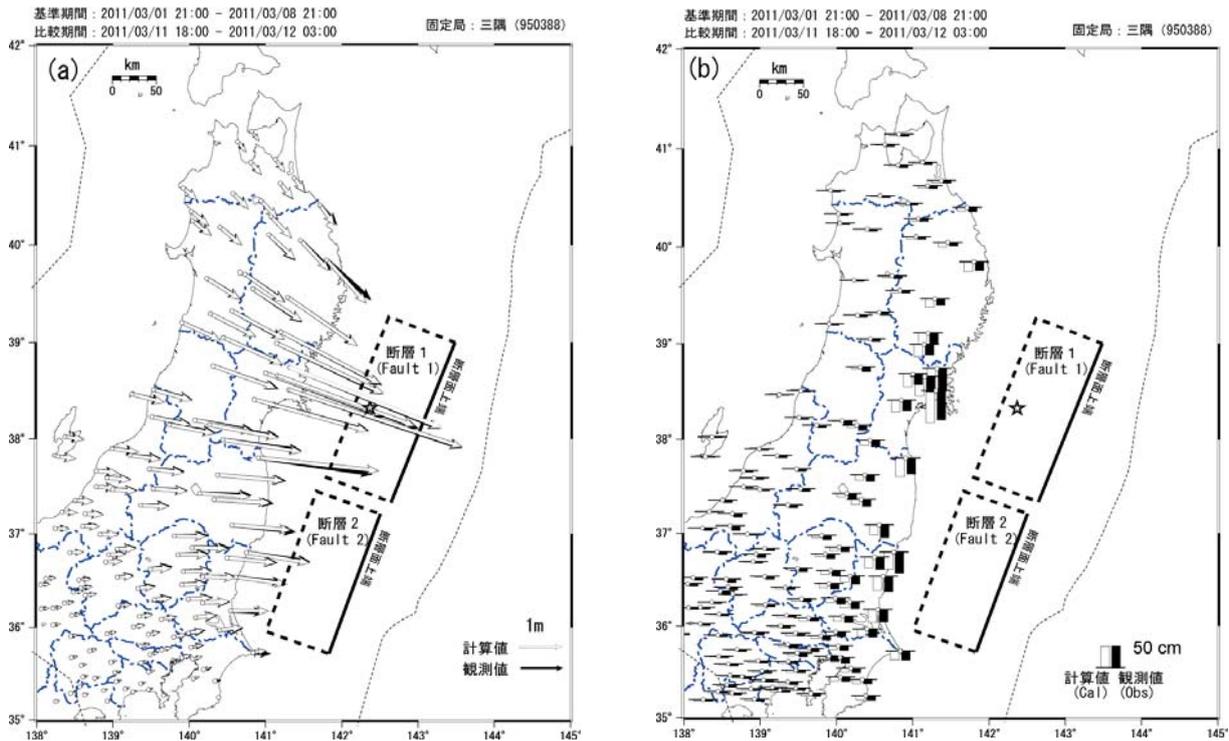


図-4 F3 解に基づく地震時の地殻変動 (a) 水平変動 (b) 上下変動



図ー5 矩形断層モデル（暫定版）と地震時の地殻変動の観測値と計算値の比較 (a) 水平変動 (b) 上下変動

月9日までの9日間分の R3 解の平均値と地震発生後の3月11日18時と21時の2つのQ3解の平均値の差を地震時の変位とみなして表示しており、固定局は電子基準点「三隅」としている。

この変動ベクトル図には 2011 年 3 月 9 日に発生した三陸沖の地震 ($M_j7.3$)、本震直後に発生した M7 クラスの3つの地震(表ー1)、そして本震後5時間弱の余効変動の影響が含まれていることに注意が必要である。また、2. 1. 3で述べる通り、固定局として用いた「三隅」でも東方向に数 cm の変動が考えられるため、若干の過小評価をしている点にも注意が必要である。

Q3 解及び R3 解に基づいた結果で最大変位を記録した観測点は、電子基準点「牡鹿」(宮城県石巻市)で、水平変位約 5.3m、上下方向(沈降)に約 1.2 mであった。また、図ー3に示す等変動量線図から、水平方向に 1 mを超える変動量が観測されたのは、秋田県、岩手県、宮城県、山形県、新潟県、福島県、茨城県の7県にわたっている。上下方向では、牡鹿半島の 1 mを超える沈降を最大として、岩手県、宮

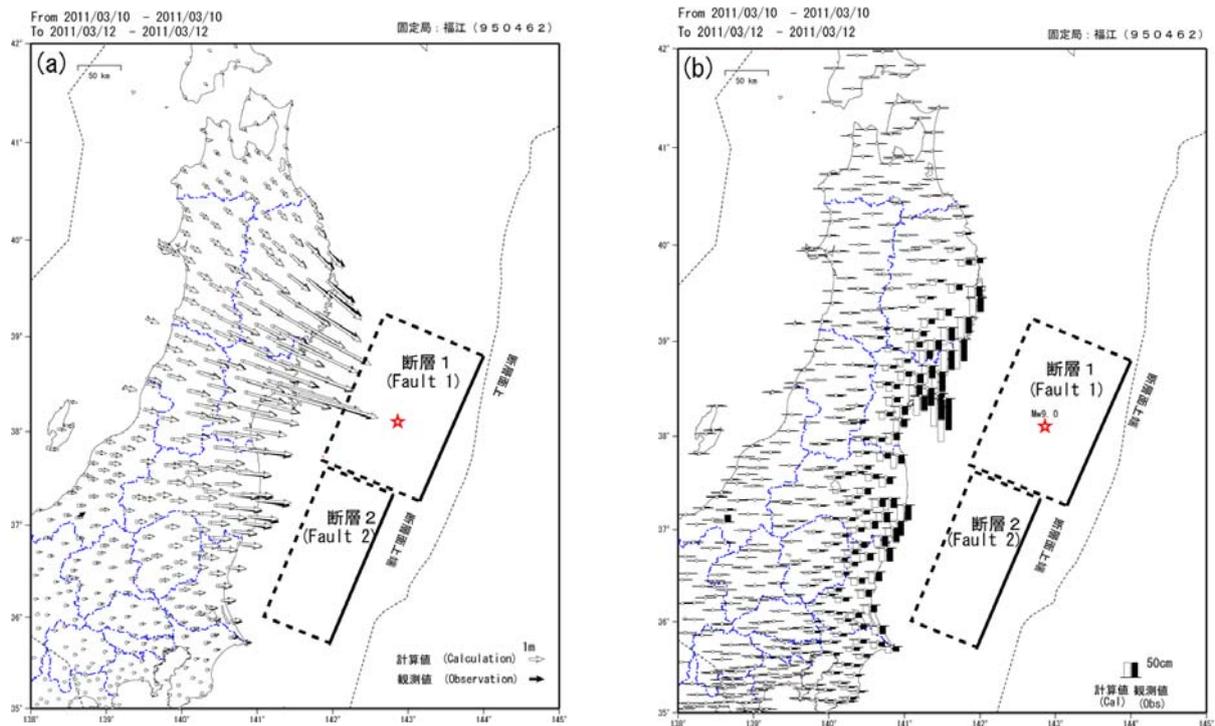
城県、福島県、茨城県、千葉県の太平洋側の広い範囲で 10cm 以上の沈降が観測されている。一方で、日本海側では数 cm の隆起が観測されている。

2. 1. 3 F3 解に基づく地震時の地殻変動

F3 解の解析は 24 時間分(日本時間 9 時から翌日 9 時まで)のデータから日々の座標値を算出している。また、GPS の軌道情報として国際 GNSS 事業(IGS)から観測週約 2 週間後に提供される最終暦を用いている。GEONET の定常解析の中では最も位置精度がよいこと、解析が約 2 週間後であるため欠測点のデータ回収後に解析できること等の理由から、通常は F3 解から求めた地殻変動量を最終結果としている。地震時の変位として、3月10日と3月12日の F3 解の差を計算した結果を図ー4に示す。3月12日の座標値は、3月12日9時から3月13日9時までのデータを使用しているため、図ー4に示されている地殻変動には、本震に加え、本震直後に発生した M7 クラスの3つの地震(表ー1)による地殻変動、本震後約 30 時間分の余効変動が含まれている点に注

表ー2 矩形断層モデル（暫定版）の推定された断層パラメータ

	緯度	経度	深さ km	長さ km	幅 km	走向	傾斜	すべり角	すべり量 m	M_w
断層 1	39.00°	143.49°	10.0	199.0	84.7	201.8°	18.1°	96.7°	27.7	8.7
断層 2	37.21°	142.51°	10.1	176.3	81.8	200.8°	14.7°	81.3°	5.9	8.2



図－6 矩形断層モデル（最終版）と地震時の地殻変動の観測値と計算値の比較 (a) 水平変動 (b) 上下変動

意が必要である。また、変動ベクトルを表示するための固定局は電子基準点「福江」としている。これは、地震後のR3解を用いて検討した結果、電子基準点「三隅」においても東方向に2 cm弱の変動が生じていたことが分かったためである。

F3 解に基づいた結果で最大変位を記録したのはGPS 機動連続観測点「M 牡鹿」（宮城県石巻市）で、東南東方向に約 5.4m, 上下方向に約 1.1mの沈降であった。2. 1. 2で述べたQ3 解及びR3 解に基づく地震時の地殻変動で最大変位を記録した電子基準点「牡鹿」は、停電等により地震後約7時間で停止しており、F3 解の解析では座標値が得られていない。

水平変位量に関しては、国土地理院が日本全国でGPS 連続観測を開始して以来（1994年10月以降）最大の値であった。なお、今回の地震以前においては、2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震（ $M_j7.2$ ）に伴い、震源断層直上に設置されていた電子基準点「栗駒2」（宮城県栗原市）で観測された約

1.5mが最大であった。今回の地震と同じ型の海溝型地震に限れば、2003年9月26日に発生した十勝沖地震（ $M_j8.0$ ）による地殻変動で観測された、電子基準点「広尾」（北海道広尾郡広尾町）における南東方向の約1 mが最大であった。上下変位に関しては、岩手・宮城内陸地震時に電子基準点「栗駒2」で観測された約2.1mの隆起が最大であり、今回の約1.1 mの沈降はこれに次ぐ上下変位量であった。なお、沈降量としては最大値である。

3. 震源断層モデルの推定

前章までに述べた地震時の地殻変動データを用いた、矩形断層モデル、すべり分布モデルの推定結果について報告する。F3 解に基づく断層モデル（3. 1. 2及び3. 2. 2）は前章で紹介した地震時の地殻変動データと同じデータを用いている。しかし、暫定版として公開した断層モデル（3. 1. 1及び3. 2. 1）では、比較期間が異なるデータを用い

表－3 矩形断層モデル（最終版）の推定された断層パラメータ

	緯度	経度	深さ km	長さ km	幅 km	走向	傾斜	すべり角	すべり量 m	M_w
断層 1	38.80°	144.00°	5.1	186.2	128.5	203.5°	15.8°	100.8°	24.7	8.8
断層 2	37.33°	142.80°	17.0	193.9	87.9	203.4°	14.7°	83.2°	6.1	8.3

ているので注意して頂きたい。また、用いた固定局も暫定版では電子基準点「三隅」であり、F3 解に基づく断層モデルでは電子基準点「福江」である。

3. 1 矩形断層モデル

計算が容易であり、大まかに地震の規模やすべり域の広がりや推定できることから、地震発生後の地殻変動が検出された初期の段階では速報的に、断層面上での一様なすべりを仮定した矩形断層モデルを作成し、公表・公開している。地震の規模が小さく、観測される地殻変動が小さい場合などでは、すべり分布を推定するのに十分な解像度が得られないため、矩形断層モデルが利用されることが多い。矩形断層モデルは、詳細な断層すべりの分布を表せないが、推定結果であるモデルパラメータがシンプルで利用しやすいという特徴がある。矩形断層モデルは、断層面 1 枚で近似されることが多いが、今回のような巨大な地震の場合や複雑な断層形状をしている場合には、複数の断層面で近似されることがある。今回の巨大地震の場合、1 枚の断層近似では福島県以南の変動が再現しにくく、暫定版、最終版の両モデルとも北側と南側の 2 枚の断層で近似されることとなった。

3. 1. 1 矩形断層モデル (暫定版)

3 月 13 日に公開した矩形断層モデル(暫定版)は、Q3 解及び R3 解の結果に基づくものである(図-5)。断層モデル作成時点では、震央に近い観測点では周辺域の停電等のためにデータが取得・回収できていない観測点が多い。また、図中に表示している震央は気象庁の値ではなく、米国地質調査所 (USGS) の値を使用している。断層モデルの推定に用いた地殻変動データは、地震発生前 2011 年 3 月 1 日～3 月 8 日までの 8 日間分の R3 解の平均値と地震発生後の 3 月 11 日 18 時～3 月 12 日 3 時までの 4 つの Q3 解の平均値の差を地震時の変位とみなしたものである。断層モデルの推定には Matsu'ura and Hasegawa (1987) の推定手法を用いた。推定された断層面の形状は、日本海溝に沿った 2 枚の長方形で近似され、総延長約 400km、幅 80～85km で、上端部の深さが約 10km の西に傾き下がる断層面が推定された。すべり量は北側の断層で約 28m、南側の断層で約 6 m と推定された(表-2)。この断層モデルから推定されるモーメントマグニチュードは約 8.8 である。

3. 1. 2 矩形断層モデル (最終版)

F3 解の結果に基づき 4 月 22 日には、最終解に基づく矩形断層モデル(最終版)を公開した(図-6)。地震発生直後は停電等で通信が途絶えていた観測点や現地回収によりデータを取得した観測点等が加わ

り、図-5 に示す暫定版のモデルに比べると、使用した観測点が格段に増えている。断層モデルの推定に用いた地殻変動データは、2. 1. 3 で紹介した F3 解に基づく地震時の変位データである。推定手法は暫定版と同じく Matsu'ura and Hasegawa (1987) の手法を用いている。最終的に推定された矩形断層モデルの断層面の形状は、日本海溝に沿った 2 枚の長方形で近似され、総延長約 380km、幅が約 90～130km で、西に傾き下がる断層面が推定された。北側の断層で幅が広く、すべり量は約 25m、南側の断層で約 6 m と推定された。(表-3)。この断層モデルから推定されるモーメントマグニチュードは約 8.9 である。

3. 2 すべり分布モデル

3. 2. 1 すべり分布モデル (暫定版)

矩形断層モデル(暫定版)の公開に引き続いて翌日の 3 月 14 日にすべり分布モデル(暫定版)を公開した(図-7)。すべり分布の推定に用いたデータは、3. 1. 1 で紹介した矩形断層モデル(暫定版)と同じデータである。すべり分布の推定には Yabuki and Matsu'ura (1992) の手法を用いた。推定されたすべり分布の特徴は、宮城県沖の震央 (USGS の震央) 付近を中心に最大 24.5m のすべりが推定された。すべり量が 4 m を超える範囲は南北に 400km、東西に 150km に及んでいる。このすべり分布モデルから計算される海域を含めた上下変動によると、岩手県から茨城県にかけての太平洋沿岸で大きな沈降が想定された(図-8)。すべり分布モデル推定時点では、3. 1. 1 でも述べたが、多くの観測点で解析結果が得られておらず(データそのものが未回収)、3 月 14 日時点で解析結果が得られ、断層モデルの推定に使用した観測点数は 141 点であった(図-9)。

3. 2. 2 F3 解に基づくすべり分布モデル

F3 解の結果に基づき 4 月 21 日には、最終解に基づくすべり分布モデルを公開した(図-10)。すべり分布モデル(暫定版)の推定の際に使用した観測点は 141 点であったが、F3 解に基づくすべり分布モデルの推定に使用した観測点数は 388 点であり、使用した観測点数は倍以上となった(図-12)。すべり分布の推定に用いた地殻変動データは、3. 1. 2 で紹介した矩形断層モデル(最終版)と同じデータである。すべり分布の推定手法は暫定版と同じく Yabuki and Matsu'ura (1992) の手法を用いている。推定されたすべり分布の特徴は、暫定版から大きく変わってはいないが、推定された最大すべり量は、宮城県沖の震央(気象庁の震央)付近において 27.6 m で、暫定版に比べると若干大きく推定された。このすべり分布モデルから計算される上下変動による

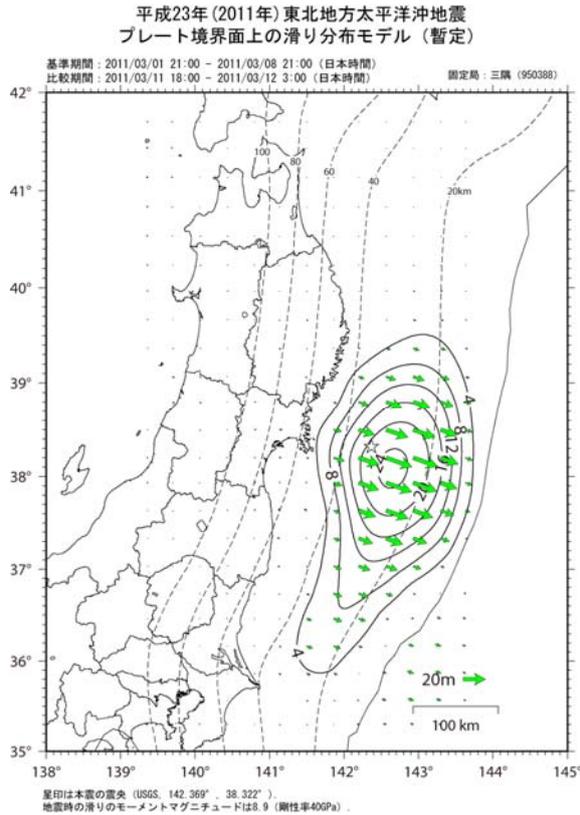


図-7 すべり分布モデル(暫定版)

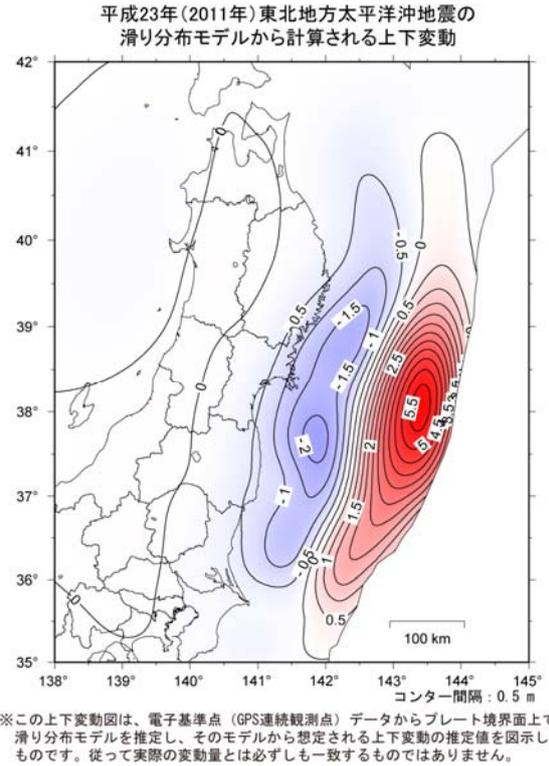


図-8 すべり分布モデル(暫定版)から計算される上下変動

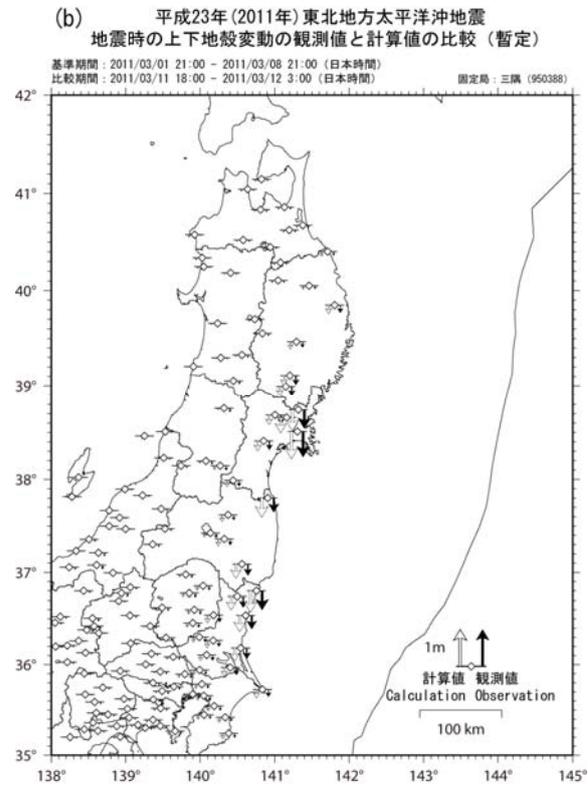
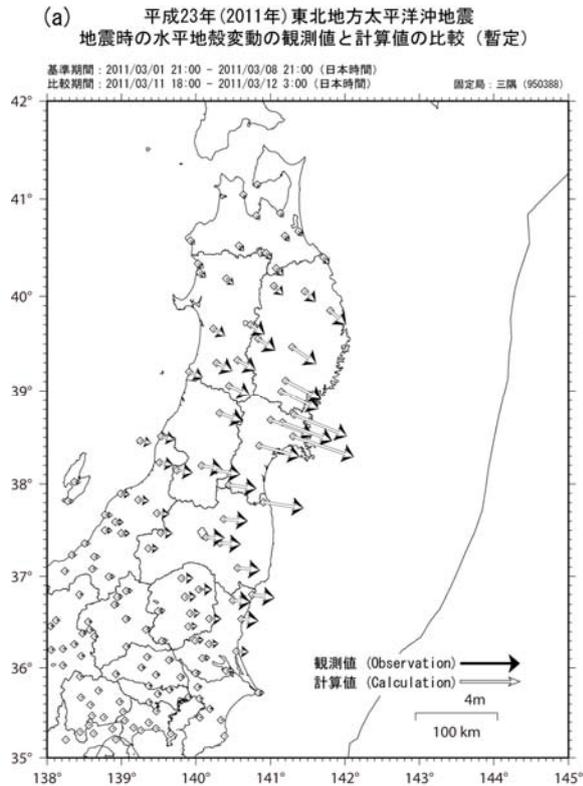


図-9 すべり分布モデル(暫定版)による地震時の地殻変動の観測値と計算値の比較 (a) 水平変動 (b) 上下変動

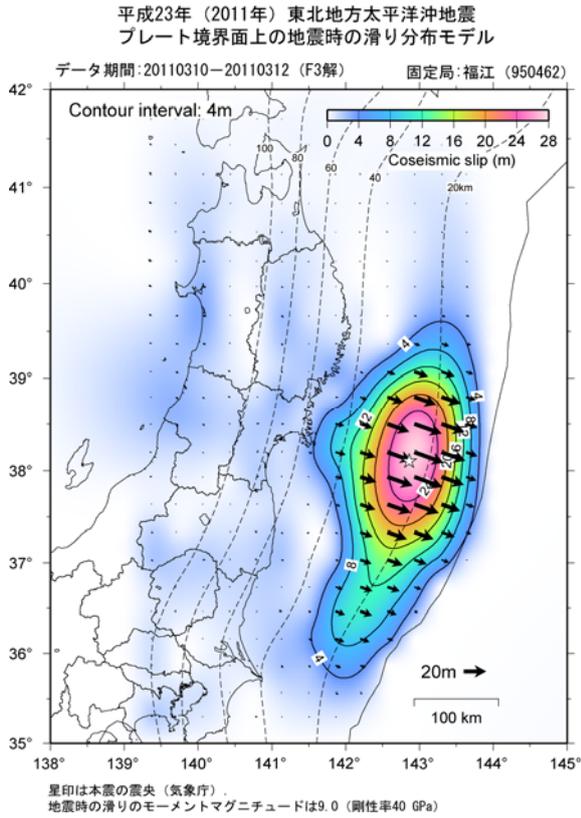


図-10 F3解に基づくすべり分布モデル

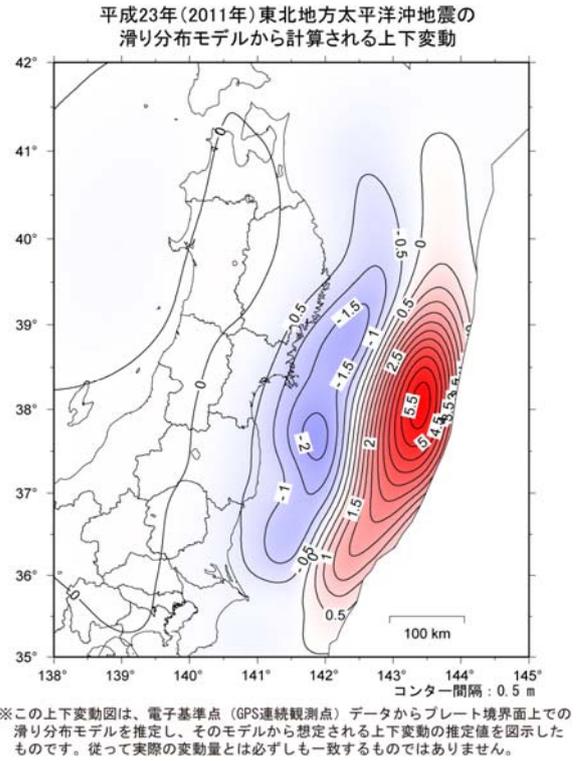


図-11 F3解に基づくすべり分布モデルから計算される上下変動

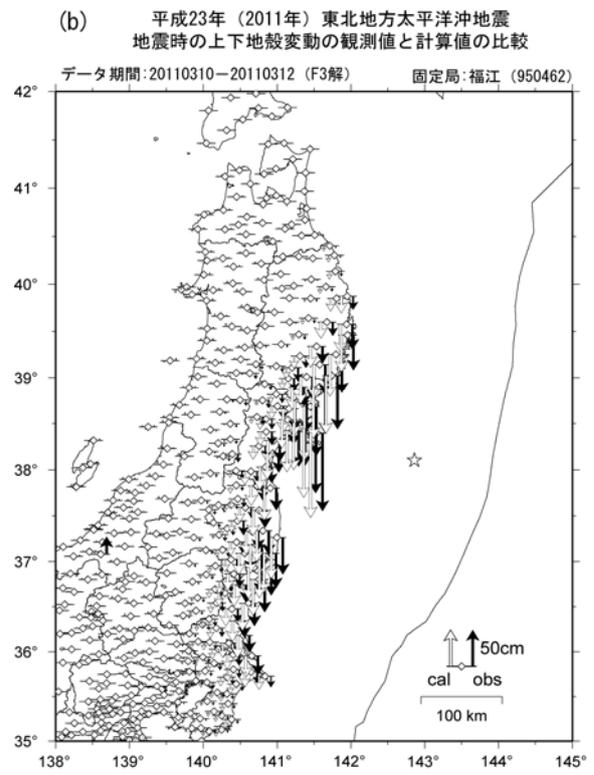
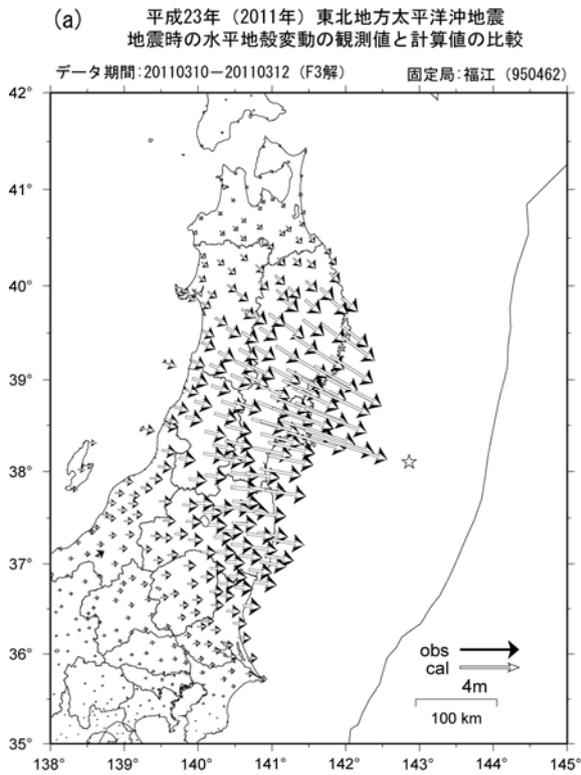


図-12 F3解に基づくすべり分布モデルによる地震時の地殻変動の観測値と計算値の比較 (a) 水平変動 (b) 上下変動

と、岩手県から茨城県にかけての太平洋沿岸で大きな沈降が想定されるとともに、海域で最大隆起量が6m弱と想定された(図-11)。

4. まとめ

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、国土地理院が日本全国でGPS連続観測を開始して以来最大となる5mを超える水平変位が観測されたほか、7県にわたり1mを超える地殻変動が観測された。また、岩手県から茨城県にかけての太平洋沿岸を中心に数十cmの沈降が観測されており、津波被害の拡大につながったと考えられるほか、高潮による被害が懸念される。観測された地殻変動より推定された断層モデルから、今回の地震の震源域は南北に約400km、東西に約150kmに及ぶ巨大なもので、最大すべり量も20mを超えることが判明した。

現行GEONETの定常解析や緊急解析では、少なくとも地震発生後数時間分以上のデータが必要であるため、現状の解析では本震発生後数時間以内に大きな

余震が発生しても、本震と余震に伴う地殻変動の分離をすることができない。また、巨大地震発生の際には、地震発生後数時間の内にcmを超える余効変動が発生しており、地震時の地殻変動と余効変動も分離をすることが困難である。30秒サンプリングのデータを使用したキネマティック解析から本震と余震や本震と直後の余効変動とをそれぞれ分離した研究成果も報告されており(例えば、Nishimura et al., 2011)、今後こうしたより短期間のデータから精度の高い解析を定常的に行う手法について検討し、地震の大きさ(マグニチュード)や断層モデルを迅速に提供していくことが必要である。また、GEONETで地殻変動量を算出する際には、誤差を軽減するため固定局を設定して計算しているが、今回の地震では地殻変動の範囲が広域にわたり、変動量を算出するための固定局の設定を何度か変更する必要が生じたため、当初は実際の変動量よりも過小評価していた可能性があった。地殻変動の情報は防災や断層モデル推定等に用いられる重要なデータであり、適切な固定局の選定方法についても今後の教訓としたい。

参考文献

- 大島健一, 三浦優司, 影山勇雄, 古屋有希子, 矢萩智裕, 丸山一司(2011):平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震によるGPS観測施設・験潮場の被災状況及び復旧対応, 国土地理院時報, 122, 113-125.
- M. Matsu'ura and Y. Hasegawa (1987): A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints, Phys. Earth Planet. Inter., 47, 179-187.
- 中川弘之, 豊福隆史, 小谷京湖, 宮原伐折羅, 岩下知真子, 川元智司, 畑中雄樹, 宗包浩志, 石本正芳, 湯通堂亨, 石倉信広, 菅原安広(2009):GPS連続観測システム(GEONET)の新しい解析戦略(第4版)によるルーチン解析システムの構築について, 国土地理院時報, 118, 1-8.
- T. Nishimura, H. Munekane and H. Yarai (2011): The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks observed by GEONET, Earth Planets Space, 63, 631-636.
- T. Yabuki and M. Matsu'ura (1992): Geodetic data inversion using Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, Geophys. J. Int., 109, 363-375.