

GEONET による平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に引き続いて発生している余効変動と余効すべりモデル

Postseismic Deformation and Postseismic Slip Model Following 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・飛田幹男
 Geography and Crustal Dynamics Research Center Hisashi SUTO, Takuya NISHIMURA,
 Shinzaburo OZAWA and Mikio TOBITA
 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。）の発生直後から GPS 連続観測網（GEONET）によって大規模な余効変動が観測されており、地震発生後から 10 月末までの約 7.5 カ月間で最大約 79cm に達している。水平変動は地震時とほぼ同じ東方向に変動しているが、上下変動は地震時とは異なる分布を示している。地震時には太平洋側で大きく沈降したが、余効変動では岩手県沿岸の一部では地震時と同じく沈降が続いている一方、宮城県以南の太平洋沿岸では隆起が観測されており、10 月末までの約 7.5 カ月間で最大約 15cm に達している。これら地表での観測から地下での断層すべりを推定した結果、10 月末までの約 7.5 カ月間で岩手県沖では最大約 2.7m、銚子沖では最大約 1.0m のすべりが推定された。これらの余効すべりにより解放されたモーメントはモーメントマグニチュード (M_w) 8.55 に相当する。1960 年代にチリやアラスカで発生した M9 クラスの超巨大地震の余効変動は現在でも観測されており、東北地方太平洋沖地震の余効変動も今後数十年に渡り継続すると考えられる。引き続き余効変動及び余効すべりのモニタリングを行っていくとともに詳細な余効変動メカニズムの解析を行っていくことが重要である。

1. はじめに

本稿では、国土地理院が運用している GPS 連続観測網（GEONET）によって平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の発生後に観測されている地震後の地殻変動（余効変動）及びその結果から推定されたプレート境界面上の断層すべり（余効すべり）に関して報告する。地震時の地殻変動及びその断層モデルの推定等に関しては、本特集号の水藤ほか（2011）を参照されたい。

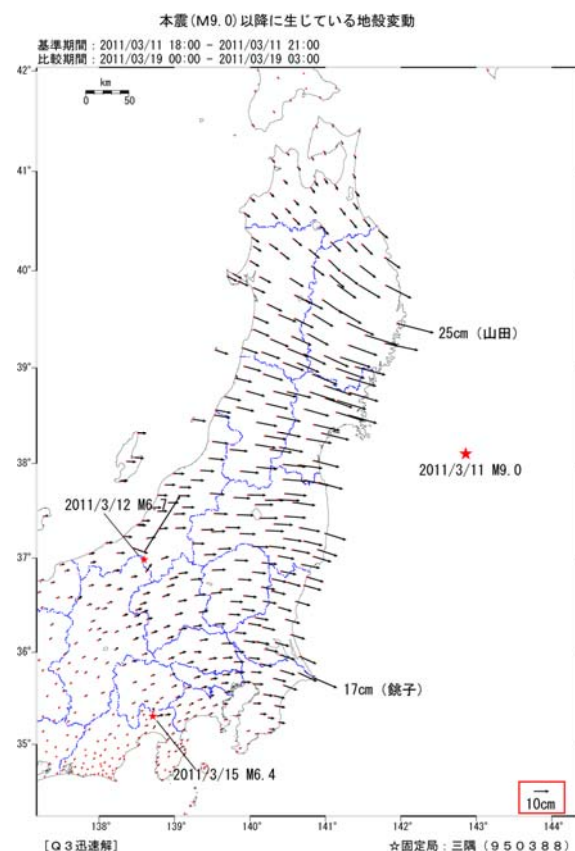
2. 地震後の地殻変動（余効変動）

地震に伴う大きな地殻変動に続き、地震発生直後

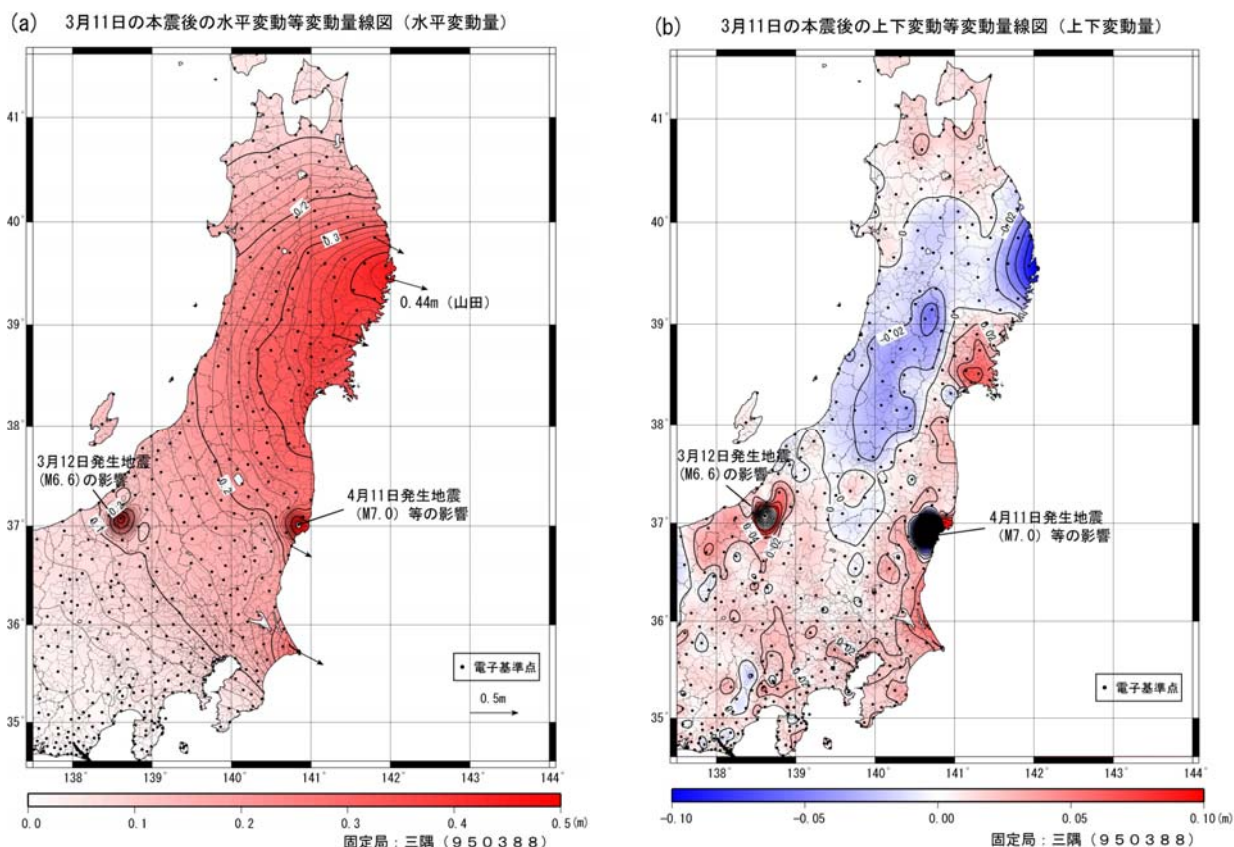
から広範囲で揺れを伴わない地殻変動（以下、「余効変動」という。）が観測されている。余効変動は、今回の地震に限って観測されている特別な変動ではなく、大規模な地震（M6～7 クラス以上）では海溝型、内陸直下型地震に区別なくこれまでも多くの地震発生後に観測されている。

2. 1 余効変動の特徴

地震発生直後に停電等によりデータが取得できていなかった観測点について、その後の通信回線等の復旧に伴うデータの取得や現地でのデータ回収作業



図ー1 地震後の水平地殻変動（3月11日ー3月19日：Q3解）



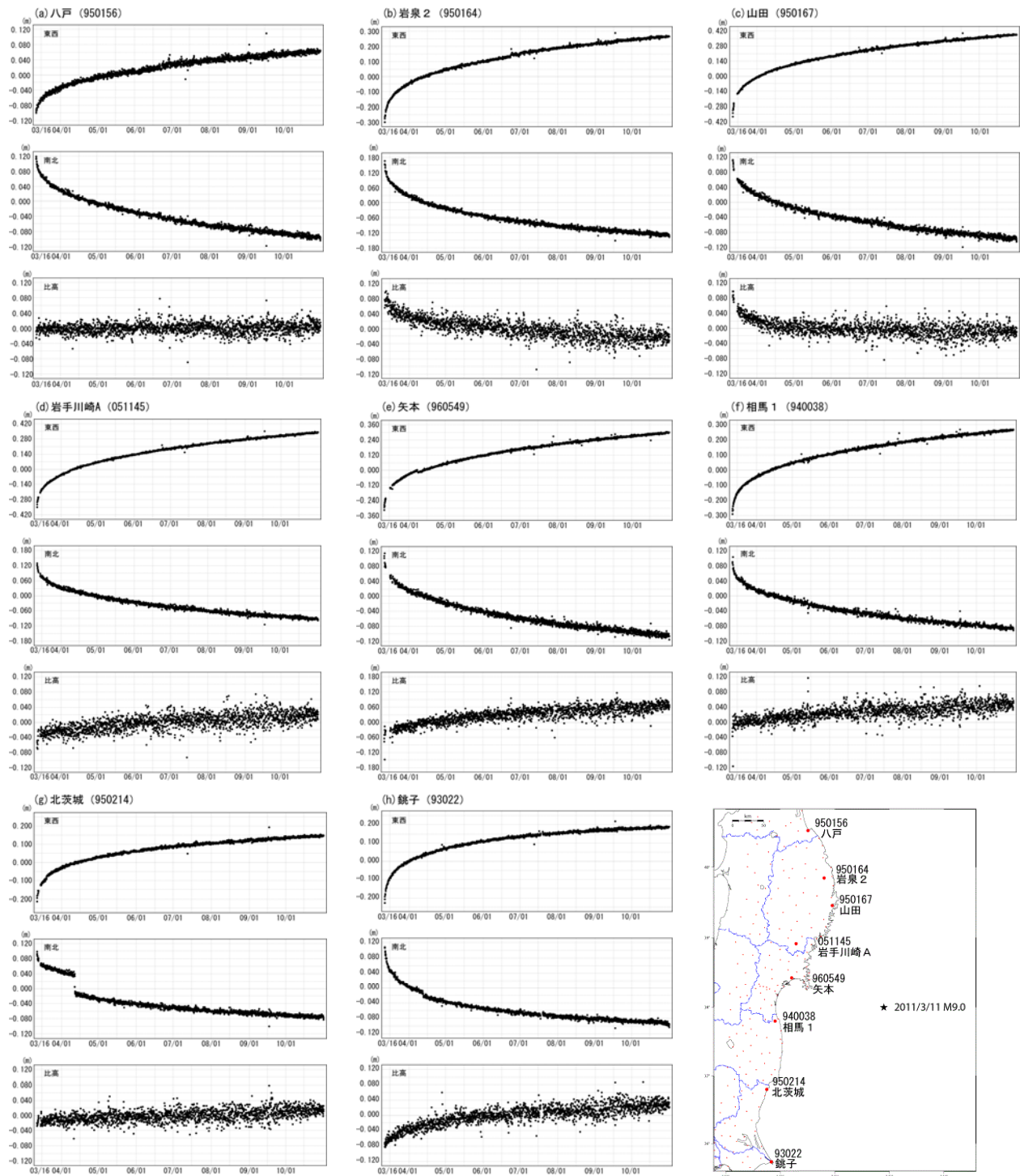
図－2 地震後の地殻変動等変動量線図（3月11日－4月17日：Q3解及びR3解）(a) 水平変動量 (b) 上下変動量

を行って再解析を行い、3月19日に地震時の地殻変動及びその後の余効変動の結果を公表した。このうち、余効変動分の結果を図－1に示す。基準期間は地震発生後3月11日18時と21時の2回分のQ3解の平均値、比較期間は3月19日0時と3時の2回分のQ3解の平均値とし、両者の約8日間の差を余効変動量として計算している。変動ベクトルを表示するための固定局は電子基準点「三隅」（島根県浜田市）である。図－1には、東北地方太平洋沖地震の余効変動に加えて余震や誘発地震に伴う地殻変動も含まれており、長野県・新潟県境付近や静岡県東部に局所的に大きく見られる地殻変動は、それぞれ3月12日に発生した長野県・新潟県境付近の地震（ $M_j6.7$ ）及び3月15日に発生した静岡県東部の地震（ $M_j6.4$ ）に伴うものである。余効変動に見られる特徴として、東北地方を中心に地震に伴う変動とほぼ同じ東向きの変動が卓越しており、地震発生後から3月19日までの間に最大で20cmを超える変動が観測された。

図－2に、地震発生後から4月17日までの地殻変動等変動量線図を示す。この結果から、水平変動量については、約35日間で東北地方を中心に最大約40cm強の地殻変動が観測され、また上下変動量については、地震時には太平洋側で大きく沈降したものの、余効変動では、岩手県の太平洋側で沈降・宮城県以南の太平洋側では隆起といった傾向が確認され

た。なお、図－1に示した変動ベクトル図と同じく、図－2の地殻変動等変動量線図にも余震や誘発地震の影響が含まれている。長野県・新潟県境付近と福島県いわき市付近での局所的に見られる大きな変動量は、それぞれ前述した3月12日の長野県・新潟県境付近の地震（ $M_j6.7$ ）、及び4月11日の福島県浜通りの地震（ $M_j7.0$ ）に伴うものである。

測地観測センターでは、太平洋沿岸に沿って設置されている電子基準点8点の地震直前からの座標時系列グラフ（図－3）を3月19日からホームページに公開し、その後毎日更新している。これらの時系列から、余効変動が地震直後に最も大きく、その後徐々に減衰していく様子がわかる。水平成分、上下成分ともに現在も変動は継続しているものの、その量は非常に小さくなってきている。また、余効変動の方向（例えば、東向きの傾向や沈降もしくは隆起）は地震直後から変わっていない。なお、電子基準点「矢本」（宮城県東松島市）及び「北茨城」（茨城県北茨城市）の時系列に見られる顕著なステップは、余効変動ではなく、それぞれ4月7日の宮城県沖の地震（ $M_j7.2$ ）、4月11日の福島県浜通りの地震（ $M_j7.0$ ）に伴うものである。

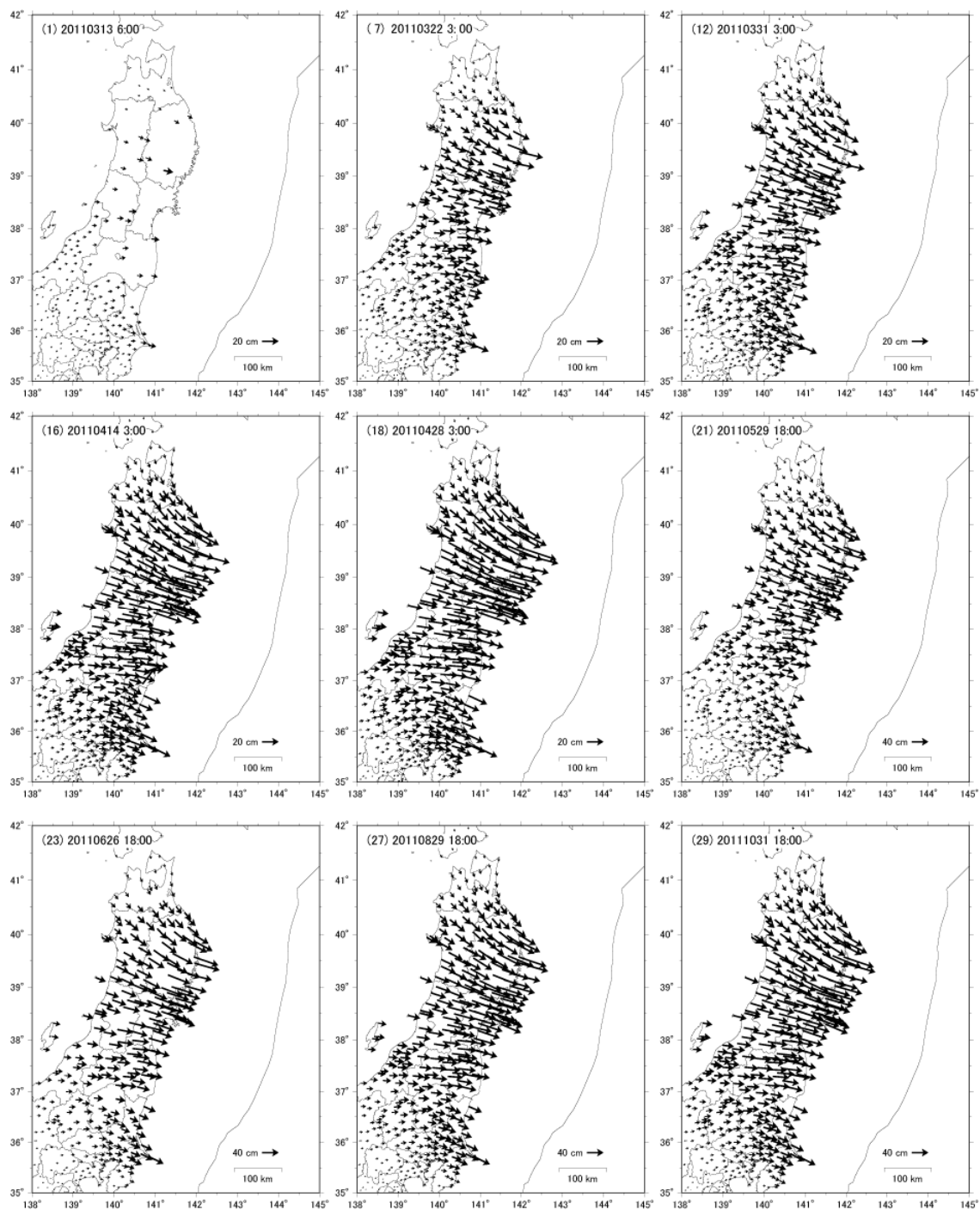


図－3 地震後の地殻変動時系列（2011/03/11－2011/10/31：Q3 解）

2. 2 余効変動のモニタリング

地理地殻活動研究センター地殻変動研究室では、地震発生後から2011年11月末に至るまで、Q3解に基づく余効変動及びその主要な変動メカニズムである余効すべりの推定結果を、ホームページを通じて公開してきている。3月13日から3月末まではほぼ毎日、4月からは週に2回、5月からは月2回、そして9月からは月に1回の頻度で更新を行ってき

ている。これまでにホームページで公開した水平及び上下変動ベクトルから抜粋したものを図－4、図－5に示す。変動ベクトルを表示するための固定局は電子基準点「三隅」である。変動ベクトルを算出するための基準期間は、いずれも地震発生後一目のQ3解の座標値(2011年3月11日18時)としている。比較期間については、5月12日までに公開した変動ベクトルは、それぞれQ3解1点の座標値であったが、

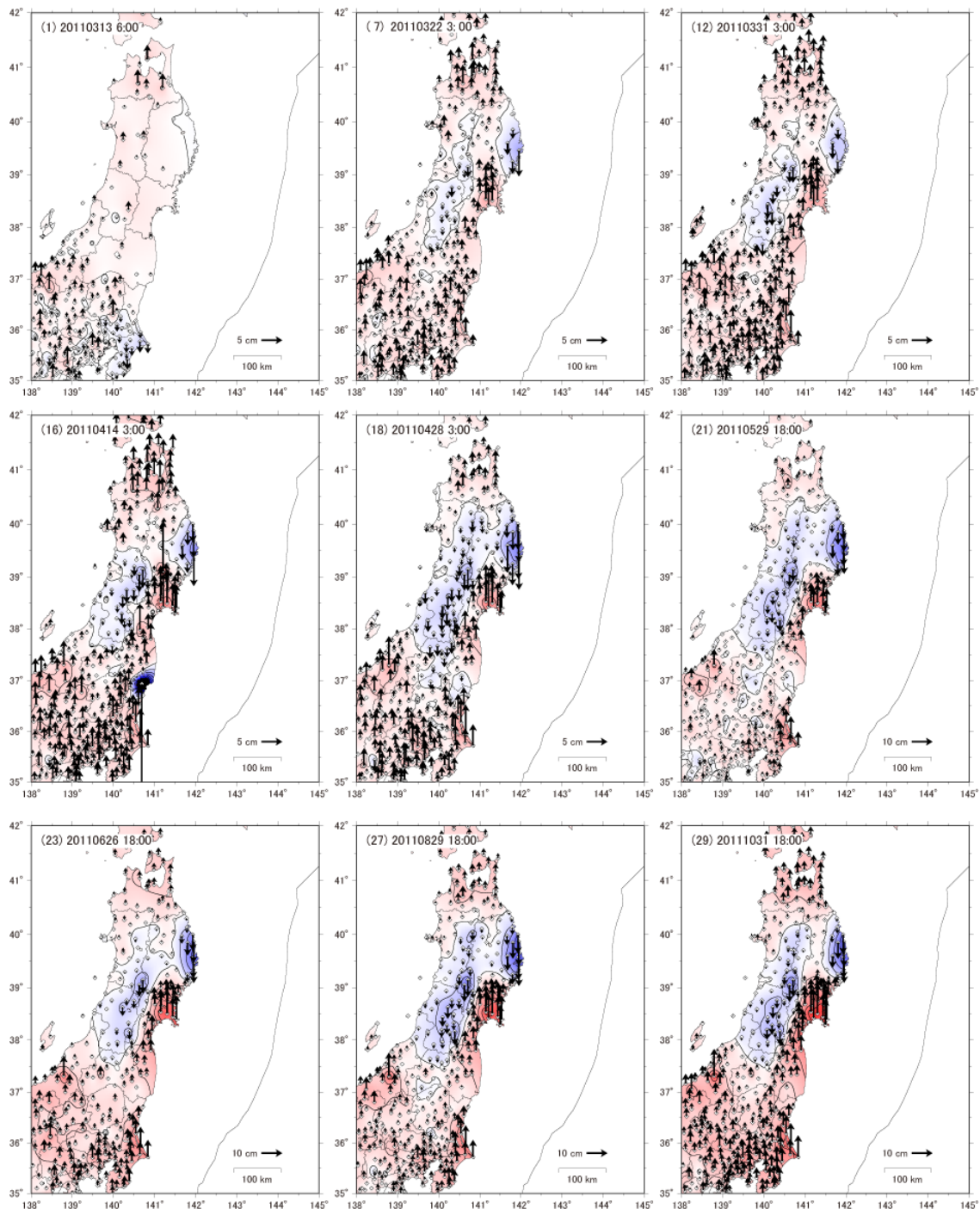


図－4 地震後の地殻変動（水平変動）

5月29日以降の変動ベクトルについては、S/N比の低下を考慮して、Q3解7点分の平均値としている。例えば、10月31日18時とあるのは、10月31日9時、12時、15時、18時、21時、11月1日0時、3時の7点分のQ3解の平均値から算出した座標値である。ここに示している余効変動には、期間内に発生した余震もしくは誘発地震による地殻変動の影響が含まれている。数mm～数cm程度の地殻変動が確認されている余震もしくは誘発地震のリストを表一

1に示す。

2011年10月31日時点での最大変位量は電子基準点「山田」（岩手県山田町）で約79cmに達している。上下変動では、GPS機動連続観測点「M牡鹿」（宮城県石巻市）で約15cmの隆起，電子基準点「岩泉1」（岩手県岩泉町）で約12cmの沈降である。2.1でも紹介したが、水平変動に関しては、地震時とほぼ同じ東から南東方向への変動が地震直後から継続している。上下変動については、地震時には東北地方



図－5 地震後の地殻変動（上下変動）

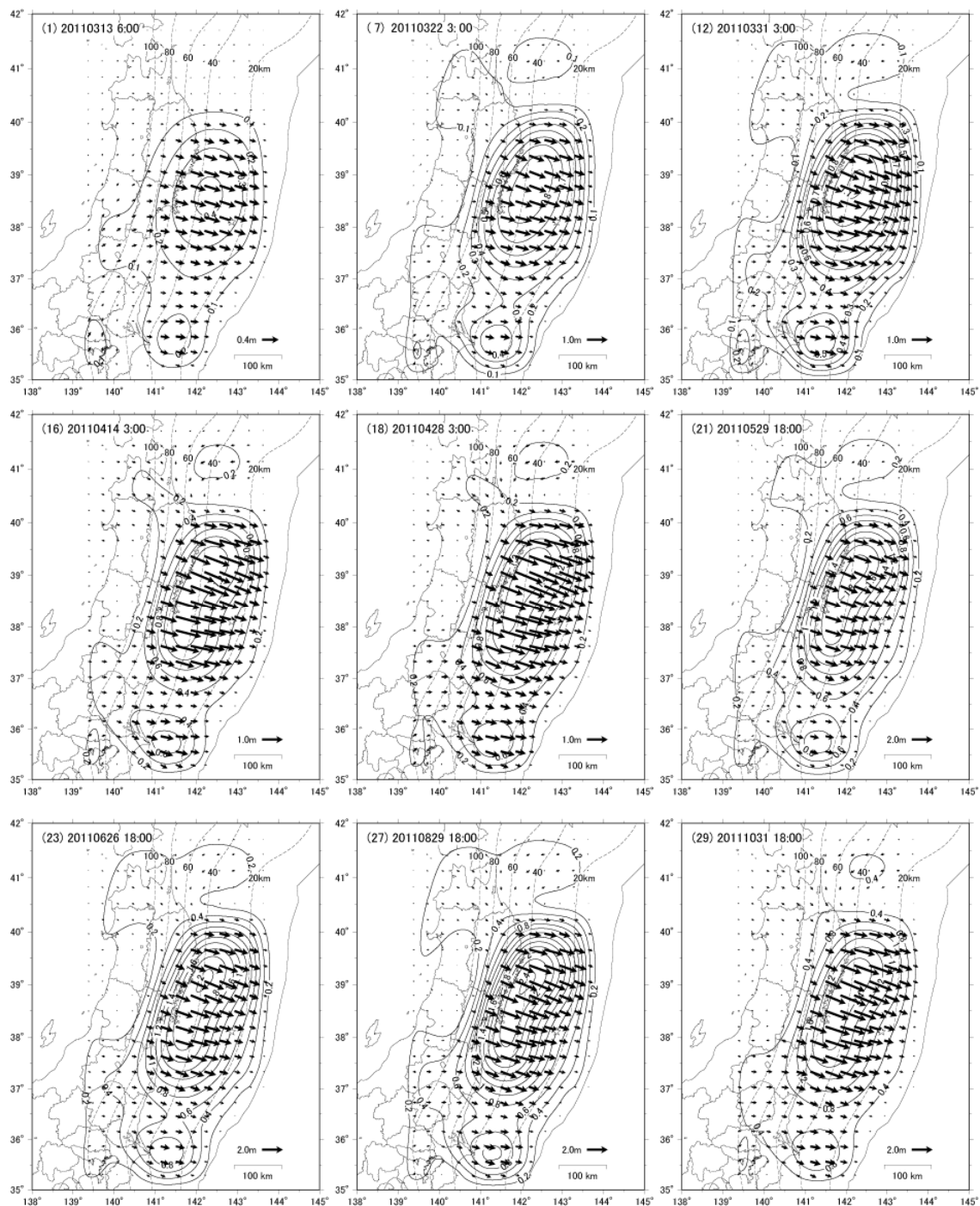
の太平洋側，関東全域にかけて沈降であったが，余効変動では，岩手県の太平洋側と秋田県と山形県の内陸部で沈降が生じ，宮城県以南の千葉県に至るまでの太平洋側では隆起が観測されており，地震時の変動とは異なる分布を示している．現在までのところ，これらの傾向に変化は見られていない．

3. プレート境界面上のすべり分布の推定

大地震発生後に引き続いて観測される余効変動の発生メカニズムは余効すべり，粘弾性緩和，間隙弾

性緩和の大きく3つの原因が提唱されている．今後のデータの蓄積により，これら3つの余効変動メカニズムの影響を詳細に再検討する必要があるであろうが，ここでは主要なメカニズムと考えられる余効すべりのみを考え，その推定結果を報告する．

これまでにホームページで公開した余効すべりのすべり分布の推定結果から抜粋したものを図－6に示す．推定に使用した観測値は図－4，図－5に示す変動ベクトルで，推定した期間も同じである．すべり分布の推定には Yabuki and Matsu'ura (1992) の



図－6 余効すべり分布

手法を用いている。2011年10月31日時点での最大すべり量は、岩手県沖で約2.7m、銚子沖で約1.0mである。これらの余効すべりにより解放されたモーメントはモーメントマグニチュードで8.55相当に達している。現在までの所、余効すべり域の顕著な移動は見られていない。

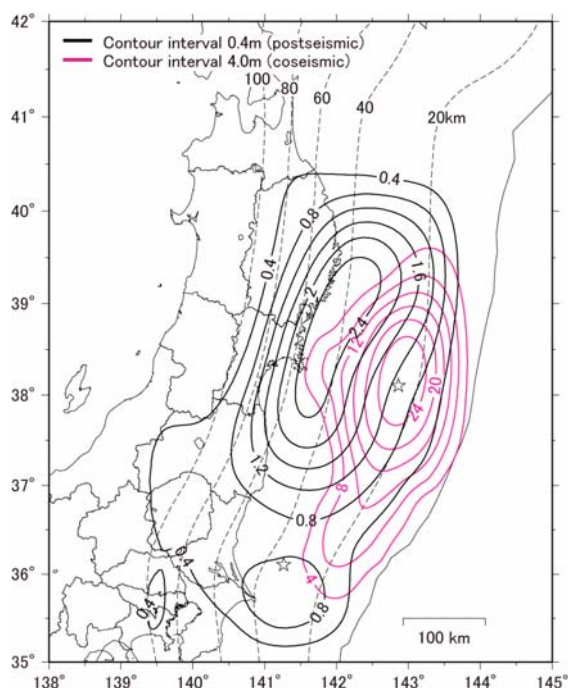
図－7に示す10月31日までのデータから推定した余効すべり分布と地震時のすべり分布(水藤ほか, 2011)との比較から、余効すべりの中心は本震時のすべりの中心よりも陸側、あるいはプレート境界面

上の深い側に寄っていることがわかる。本震時に大きくすべった所よりもその周辺で余効すべりが大きくなることは、過去の大地震の際にも指摘されており、今回の巨大地震後の余効すべりでもほぼ同じ結果が得られている。本震のすべり領域の南端よりさらに南側の銚子付近にもう一つの余効すべりのピークが見られる。この銚子付近のすべりは、本震直後15時15分に茨城県沖で発生した $M_j7.6$ の余震の余効すべりであると考えられる。

地震時には太平洋側で大きく沈降したが、地震後

表－1 本震後に発生した主な余震もしくは誘発地震

日	時	M _j	発生場所
3月11日	15時08分	7.4	岩手県沖
3月11日	15時15分	7.6	茨城県沖
3月11日	15時25分	7.5	三陸沖
3月12日	03時59分	6.7	長野県・新潟県境付近
3月15日	22時31分	6.4	静岡県東部
3月19日	18時56分	6.1	茨城県北部
3月23日	07時12分	6.0	福島県浜通り
4月7日	23時32分	7.2	宮城県沖
4月11日	17時16分	7.0	福島県浜通り
4月12日	08時08分	6.4	千葉県東方沖
6月23日	06時51分	6.9	岩手県沖
7月10日	09時57分	7.3	三陸沖
9月17日	04時26分	6.6	岩手県沖



図－7 地震時と余効すべり分布の比較

の変動では隆起している場所もあり，地震時と地震後の上下変動は異なる分布を示している．地震時すべりのピークは，宮城県沖の深さ 20km 付近にあったが，余効すべりでは宮城県以南の海岸付近，深さ 40km 付近にすべりのピークが推定され，地下での逆断層すべりによる地表での隆起域と沈降域の境界が本震時よりも西側に移り，本震時に大きく沈降した領域で隆起が起きているものと考えられる．

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直後から，GEONET によって大規模な余効変

動が観測されている．この余効変動は，今回の地震に限って観測されている特別な変動ではなく，これまでも大規模な地震の発生後には観測されている変動である．地震発生後から 10 月末までの約 7.5 ヶ月間で余効変動は最大で約 79cm に達し，岩手県から千葉県に至る太平洋沿岸の広い範囲で 50cm を超える大きな余効変動が観測されている．余効変動の方向として，水平変動はほぼ地震時と同じ東方向に変動しているが，上下変動は地震時とは異なる分布が観測されている．地震時には太平洋沿岸で大きく沈降したが，余効変動では岩手県沿岸の一部では地震時と同じく沈降が続いている一方，宮城県以南の太平洋沿岸では隆起が続いている．これら余効変動の観測結果から地下での断層すべり量を推定した結果，地震発生後から 10 月末までの約 7.5 ヶ月間で岩手県沖では最大約 2.7m，銚子沖で最大約 1.0m のすべりが推定された．これら余効すべりにより解放されたモーメントはモーメントマグニチュード 8.55 相当に達している．1960 年代にチリやアラスカで発生した M9 クラスの超巨大地震の余効変動は現在でも観測されており，今回の地震に伴う余効変動も今後数十年程度は続くと考えられる．

今後，余効変動で沈降が続いている地域でも隆起に転じ，長い年月をかけて地震に伴う太平洋沿岸の沈降量が回復するのか，地震に伴う地殻変動だけでなく余効変動による他の地震や火山活動等への影響があるのか等，今回の地震が我々に与えた課題は様々にある．今後も引き続き余効変動及び余効すべりのモニタリングを行い，より詳細な余効変動メカニズムの解析等の研究を続けていく．

参 考 文 献

- 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, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司 (2011): 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, 国土地理院時報, 122, 29-37.
- 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.