

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動

— 海底地殻変動観測，GPS 観測，人工衛星レーザー測距観測 —

海洋調査課航法測地室

Crustal movements associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

— GPS/acoustic seafloor geodetic observation, GPS and SLR measurements —

Geodesy and Geophysics Office, Hydrographic Survey Division

Abstract

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, that occurred on March 11, 2011, caused huge crustal movement off the Pacific coast of northeastern Japan. The Hydrographic and Oceanographic Department of Japan (JHOD) detected co-seismic displacements associated with the earthquake by GPS/acoustic seafloor geodetic observation, GPS and SLR measurements. In particular, at the seafloor reference point just above the hypocenter, a huge displacement of about 24 m toward east-southeast was detected by the seafloor geodetic observation. The JHOD reported these observation results at governmental committees and pressed out them to public.

1 はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震 (M 9.0) (以下「東北地方太平洋沖地震」という) は、日本の観測史上最大となる大地震であり、強い地震動とともに巨大な津波を発生し、東北地方から関東地方の太平洋側を中心に大きな被害をもたらした。余震分布等からこの地震の震源域は長さ約 500 km、幅約 200 km にも及び、そのほとんどが海域に位置することがわかっている (気象庁仙台管区気象台, 2011)。

本稿では、海洋情報部が実施している海底地殻変動観測について、地震発生後の対応をまとめるとともに、同地震の震源域に設置されていた海底基準点で検出された海底地殻変動について報告する。併せて、海上保安庁所有の GPS 観測点及び人工衛星レーザー測距 (SLR) 観測点 (和歌山県下里) において観測された地殻変動についても報告する。

2 海底地殻変動観測

2.1 観測及び解析の概要

海洋情報部では、プレート境界で発生する地震を対象として海底の地殻変動をモニターするため、2000 年から日本海溝沿いや南海トラフ沿いを中心に海底基準点を設置し、海底地殻変動観測を実施している。平成 23 年 3 月時点の海底基準点位置及び名称を Fig.1 に示す。平成 23 年度に南海トラフに 9 点増設し、海底基準点の名称を一部変更したため (佐藤・藤田, 2012)、新名称を括弧内に示した。

海底地殻変動観測の概念図を Fig.2 に示す。観測には測量船を使用し、キネマティック GPS (KGPS) 測位と音響測距観測を組み合わせることにより、海底に設置した海底局の位置を決定する。測量船「明洋」及び「拓洋」には、GPS アンテナがマストに、音響トランスデューサーが船底に取り付けられており、海底局が設置されている海域を航走させながら音響測距観測を実施する。同時に、測量船の位置を求めるための GPS デー

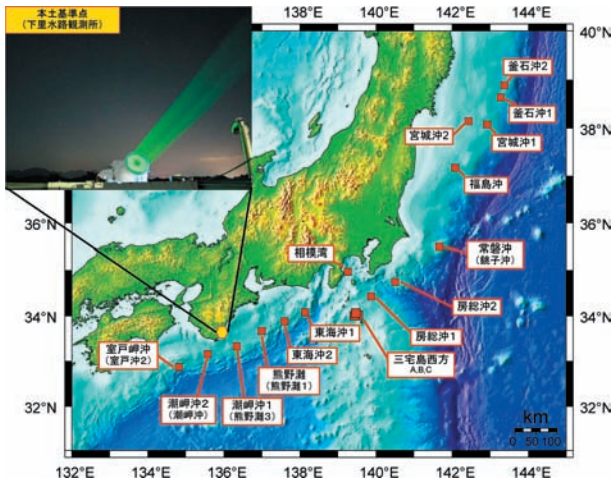


図1 海底基準点の配置図。

Fig.1 Locations of the seafloor reference points.

たと、GPS アンテナと音響トランスデューサの位置関係を把握するための動揺データを取得する。また、観測では、海中の音速構造を把握するため、数時間ごとにCTD等により水温、塩分の観測を行う。

データ解析は、船の位置を決定するKGPS解析、船に設置した音響トランスデューサと海底局間の音波の往復時間を求める音響解析、そして、これら2つの結果を結合して海底局の位置を求める局位置解析から成る。最終的には、局位置解析から得られる3-4台の海底局の重心位置(平均位置)を海底基準点の位置とする。

KGPS解析にはソフトウェア「IT」(Colombo, 1998)、音響測距解析にはソフトウェア「sas」(富山, 2003)、および局位置解析にはソフトウェア「SGOBS」(藤田・他, 2004)を使用した。

観測方法及び解析手法の詳細については、藤田(2006)及び佐藤・藤田(2012)を参照されたい。

2.2 東北地方太平洋沖地震発生後の対応

(1) 他機関の調査船による緊急観測の検討

海洋情報部では、東北地方太平洋沖地震発生後、震源近傍にある海底基準点において速やかに海底局の被害調査及び海底地殻変動観測を実施するため、観測機器を搭載している測量船による調

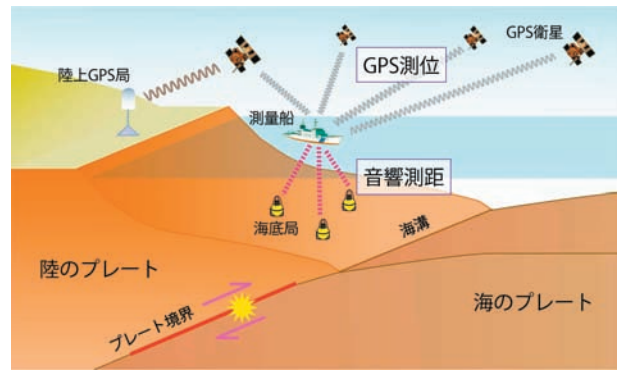


図2 GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測の概念図。

Fig.2 Schematic picture of GPS/acoustic seafloor geodetic observation.

査のみならず、他機関の調査船を用いた調査の実施を検討した。しかしながら、調査船への観測用支柱の取り付け作業の困難さや、観測時間等の問題から実現には至らず、港湾の被害調査を実施した測量船「明洋」及び「拓洋」の回航時等を利用して調査及び観測を実施することとした。

(2) 海底局の被害調査及び臨時観測

3月24日及び25日に、測量船「拓洋」により、釜石沖から福島沖にかけての海底局の被害調査を実施した。その後、3月27日から30日に、測量船「明洋」により、「宮城沖1」、「宮城沖2」及び「福島沖」海底基準点において観測を、「常磐沖」海底基準点において被害調査を実施した。

これらの結果、平成22年11月に新たに投入した「宮城沖1」の北局を除く全ての海底局から応答信号を確認することができたが、いくつかの海底局では、受信信号が方向によって弱くなる現象が見られた。このような現象は地震前にはなかったことから、これらの海底局は地震により傾いたことが示唆される。

測量船「明洋」で取得した観測データは、基地入港後すぐにデータ解析を行い、入港翌日の4月1日に、「宮城沖1」海底基準点が地震前と比べて東南東に約24m移動、約3m隆起したという速報結果を得た(「4. 観測結果」参照)。

この結果は、陸上のGPS観測で検出されてい

表1 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後に実施された海底基準点の観測実績.

Table 1 List of seafloor geodetic observations conducted at the seafloor reference points after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

海底基準点	被害調査 (拓洋) 3/24-25	臨時① (明洋) 3/27-30	臨時② (拓洋) 4/3-5	臨時③ (明洋) 4/12-13	臨時④ (拓洋) 4/18-20	臨時⑤ (明洋) 4/26-5/8
釜石沖2	△		○			○
釜石沖1	△		○			○
宮城沖2	△	○		○		○
宮城沖1	△	○		○		○
福島沖	△	○				○
常磐沖		△			○	
房総沖2					○	
房総沖1					○	
相模湾						○

△:被害調査のみ

○:被害調査及び観測

た地殻変動量よりはるかに大きく、地震による地殻変動量として最大規模のものであったことから、4月6日に「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～」と題して広報を実施した。

その後、測量船「拓洋」により4月3日-5日に「釜石沖1」及び「釜石沖2」海底基準点で観測を行ったのをはじめ、各海底基準点において地震による地殻変動を求めるための観測を実施した。一通りの観測が終了した後は、余効変動等の地震後の海底の動きを監視するため、繰り返し観測を実施している。5月までに行われた臨時観測の実績をTable 1に示す。

得られた解析結果については、適宜、地震調査研究推進本部地震調査委員会や地震予知連絡会等で報告した。また、釜石沖から福島沖までの観測結果については、米国の学術雑誌「Science」に掲載された(Sato et al., 2011)。

2.3 観測結果

Fig. 3に地震発生前後の各海底基準点の位置座標の時系列を、Table 2及びFig. 4に、地震前後

の位置座標から求めた各海底基準点の地震による変位量を示す(Sato et al., 2011; 海上保安庁, 2011)。

震央付近に位置する「宮城沖1」海底基準点では、東南東へ約24m移動し、約3m隆起しているほか、釜石沖から銚子沖までの全ての太平洋沿岸の海底基準点において東南東方向への移動が確認された。24mという水平変位量は陸上の国土地理院電子基準点において観測された最大変位量(電子基準点「牡鹿」で約5.3m; 国土地理院(2011))の4倍以上に相当する。さらに、「宮城沖1」から約70km北に位置する「釜石沖1」においても約23mもの変位が観測されたことから、震源周辺の広い範囲において20m以上の大きな地殻変動があったことが示唆される。

また、震央から遠い「福島沖」, 「常磐沖(新名: 銚子沖)」海底基準点ではそれぞれ東南東方向に約5m及び約1.3mの変位が検出された。なお、房総沖及び東海沖以西の海底基準点では、地震前後で有意な変位は検出されていない。

一方、上下方向では、海溝軸に直交する「宮城沖2」と「宮城沖1」で海溝軸に向かって「沈

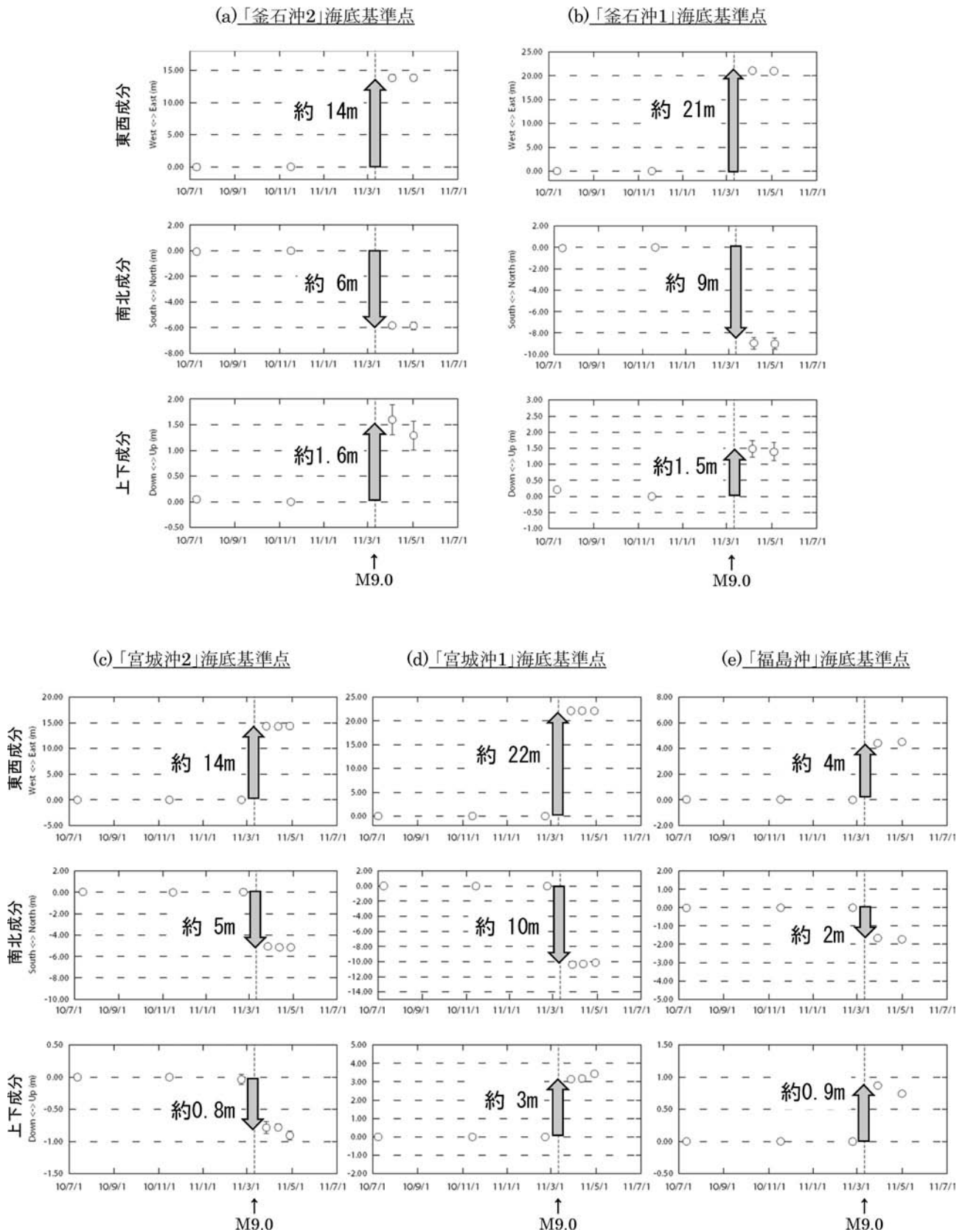
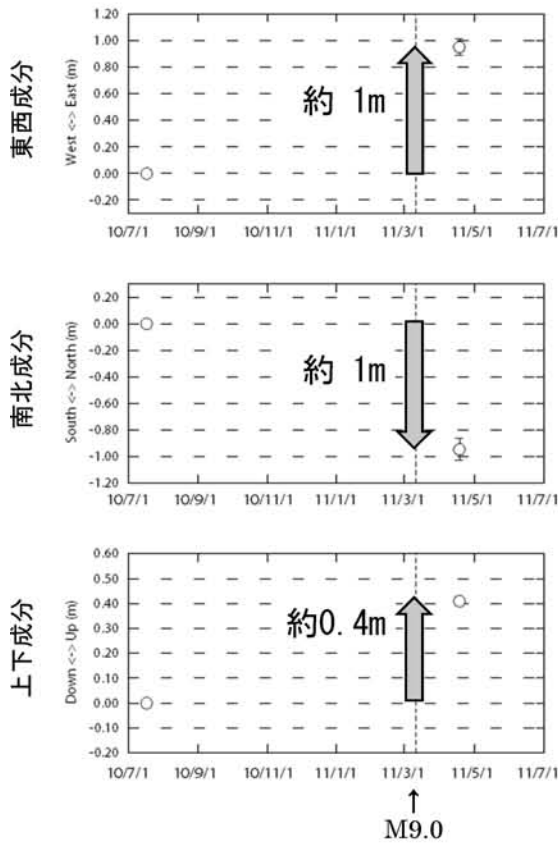


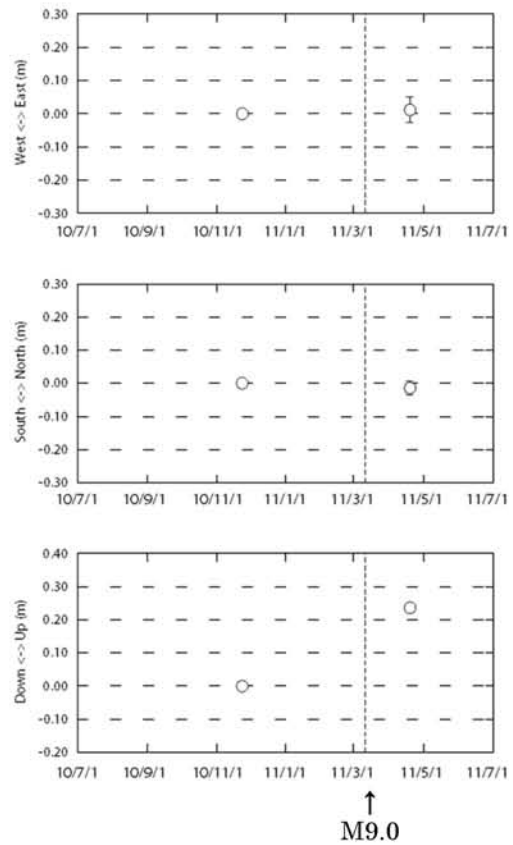
図3 各海底基準点の位置座標時系列 (2010年7月-2011年5月).

Fig. 3 Time series of the estimated positions of the seafloor reference points for the period from Jul. 2010 to May 2011.

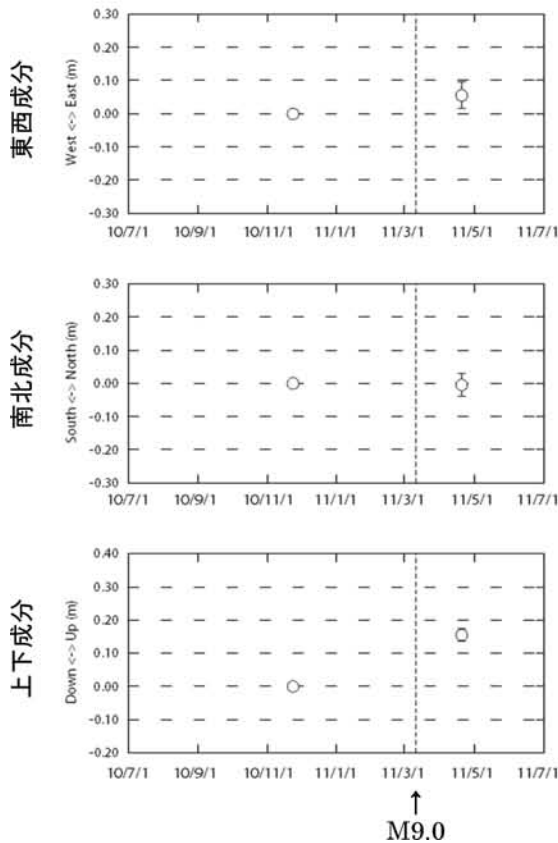
(f) 「常磐沖」海底基準点



(g) 「房総沖2」海底基準点



(h) 「房総沖1」海底基準点



(i) 「相模湾」海底基準点

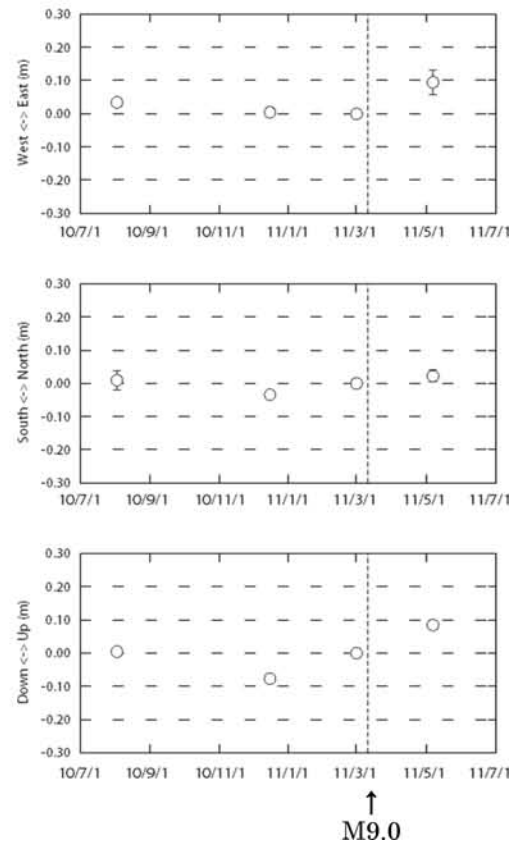


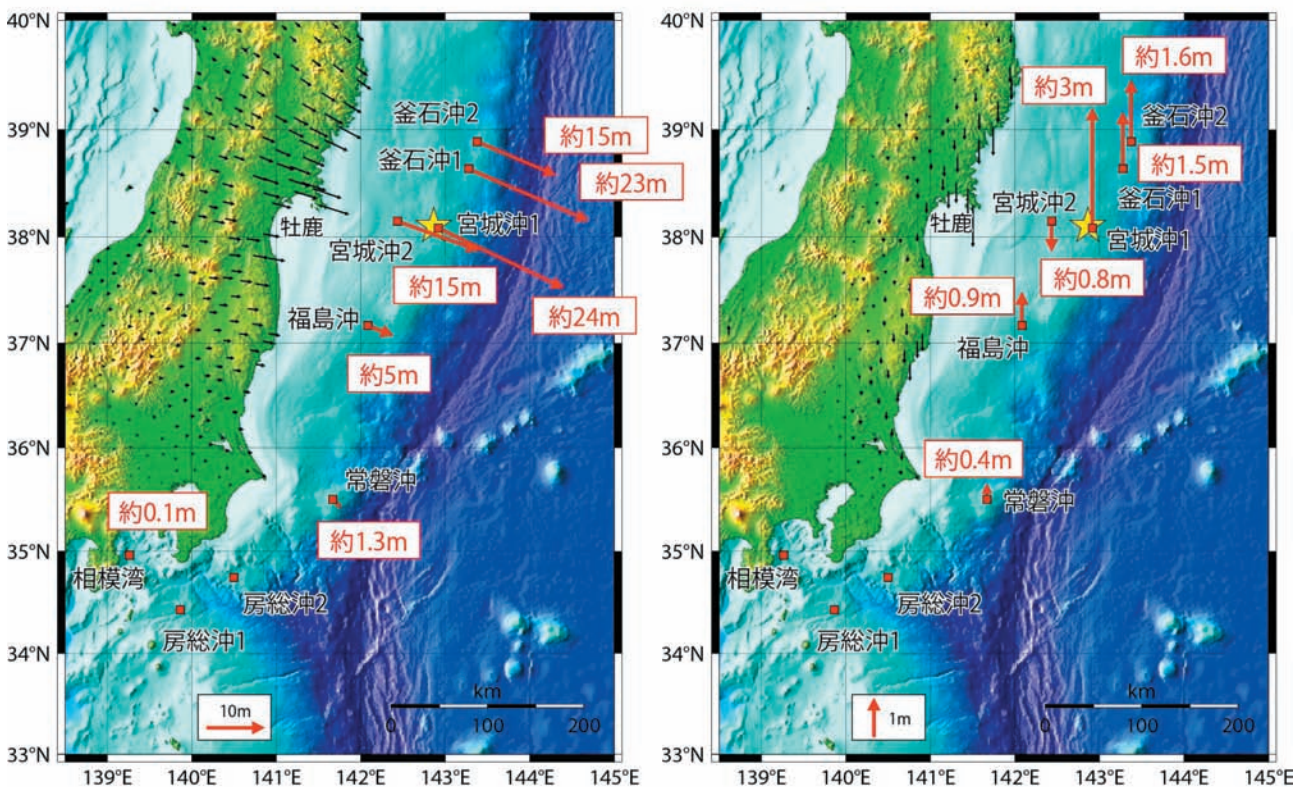
表2 各海底基準点の平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による変位量.

Table 2 Horizontal and vertical co-seismic displacements at the seafloor reference points associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

海底基準点	水平変動量	上下変動量
釜石沖2	東南東へ約15m	約1.6mの隆起
釜石沖1	東南東へ約23m	約1.5mの隆起
宮城沖2	東南東へ約15m	約0.8mの沈降
宮城沖1	東南東へ約24m	約3mの隆起
福島沖	東南東へ約5m	約0.9mの隆起
常磐沖	東南東へ約1.3m	約0.4mの隆起
房総沖2	—	—
房総沖1	—	—
相模湾	東北東へ約0.1m	—

(a) 水平成分

(b) 上下成分



- (red) : 海底地殻変動観測から求めた移動量
- (black) : 国土地理院の電子基準点の速度ベクトル
(基準期間: 2011/02/23-03/09, 比較期間: 2011/03/26-04/09)
- ★ : 2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の震央

図4 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による海底変位:(a)水平成分,(b)上下成分.

Fig. 4 Co-seismic displacements at the seafloor reference points associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on Mar. 11, 2011: (a) horizontal components and (b) vertical components.

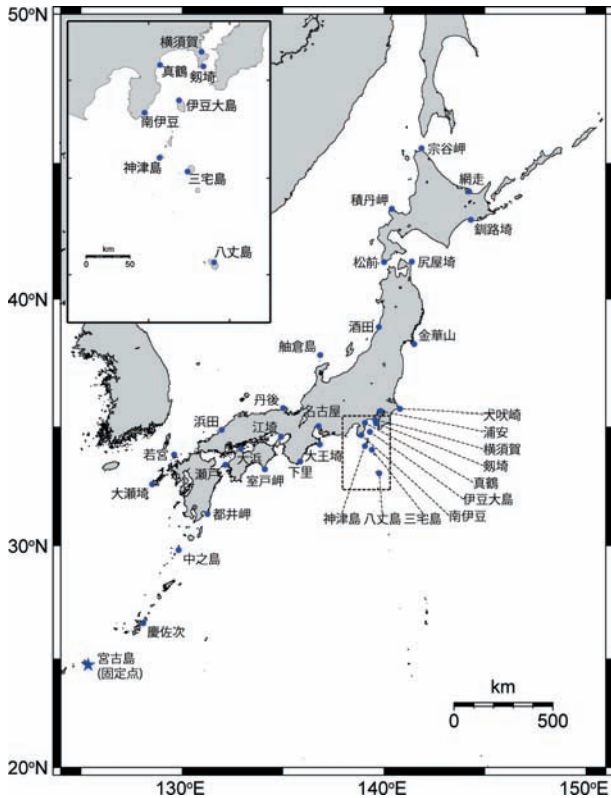


図5 南関東のGPS観測局及びDGPS局の配置図
Fig. 5 Locations of GPS stations in the Izu islands and DGPS stations.

降」から「隆起」へと変化している様子が捉えられた。この動きは、プレート境界地震による陸側プレートの跳ね上がりから予想される上下変位と整合的であり、上下方向の移動量がゼロであったヒンジラインが両基準点の間に存在していることが示唆される。

これらの結果は、陸上のGPS観測結果と合わせて、地震時のプレート境界でのすべり分布の推定に大きく貢献し、今回の地震の発生メカニズムを理解する上で、大変貴重な情報となった。

3 地殻変動監視 (GPS) 観測

3.1 観測及び解析の概要

海洋情報部では、南関東における地殻変動を監視するため、伊豆大島、真鶴、横須賀、南伊豆、神津島、三宅島及び八丈島において、GPS連続観測を実施している。また、海上保安庁交通部ディファレンシャルGPSセンターが運用している全国27箇所のDGPS局のGPSデータについ

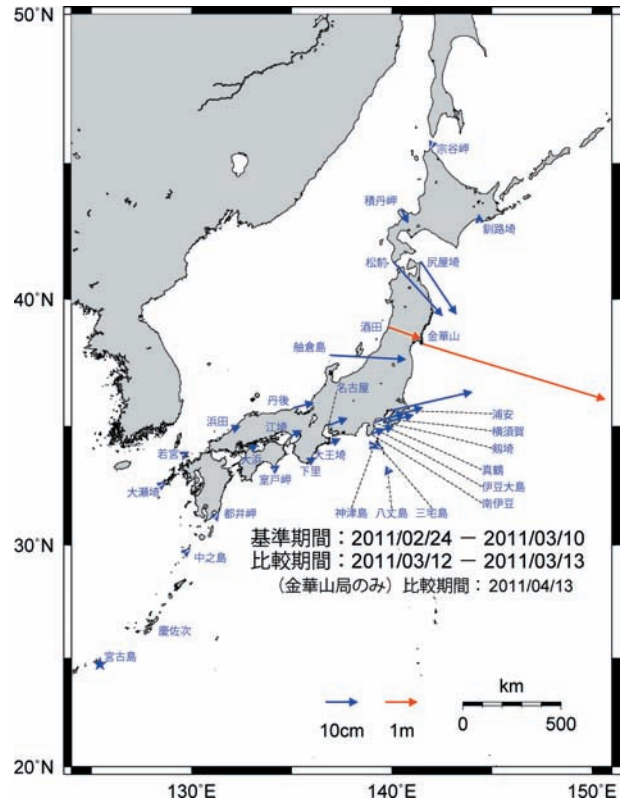


図6 南関東のGPS観測局及びDGPS局における、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による水平変位。固定局は、宮古島DGPS局(図中の星印)。
Fig. 6 Horizontal co-seismic displacements at GPS stations associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, relative to the Miyako-Jima GPS station (shown with a solid star).

ても解析を行い、広域の地殻変動を監視している。海洋情報部のGPS観測局及びDGPS局の配置をFig. 5に示す。

解析は、精密基線解析ソフトウェアBernese Ver. 5.0を使用し、第五管区海上保安本部下里水路観測所本土基準点(和歌山県東牟婁郡那智勝浦町)(以下、「下里」という)を基準として各GPS局との基線を求めた。GPS衛星の軌道暦はIGS最終暦を使用した。

解析は、精密基線解析ソフトウェアBernese Ver. 5.0を使用し、第五管区海上保安本部下里水路観測所本土基準点(和歌山県東牟婁郡那智勝浦町)(以下、「下里」という)を基準として各GPS局との基線を求めた。GPS衛星の軌道暦はIGS最終暦を使用した。

3.2 観測結果

南関東のGPS観測局及びDGPS局について、2011年2月24日-3月10日を基準期間、東北地方太平洋沖地震直後の2011年3月12日-3月

13日を比較期間とし、各期間の平均値の差から固定点を宮古島（沖縄県）として地殻変動量を求めた（Fig. 6）. 金華山局では地震直後の停電により、データが取得できなかったため、同局の比較期間は2011年4月13日である。このため、金華山局の変動量には約1ヶ月の余効変動が含まれていることに注意する必要がある。また、瀬戸局については、基準期間と比較期間の間にアンテナを移設したため、ベクトルを表示していない。

この地震に伴い、東北地方を中心に、日本列島全土におよぶ地殻変動が発生したことがわかる。最大の変位量を観測したのは、震源に一番近い金華山局で、東南東に約5.9 mの水平変位を観測した。先に述べたように、金華山局の変位量には約1ヶ月の余効変動が含まれているが、金華山局の西方約6 kmに位置する電子基準点「牡鹿」では本震による地殻変動として約5.3 m、その後2011年4月18日頃までの余効変動として約33 cmが報告されており（国土地理院, 2011）、金華山局では電子基準点「牡鹿」よりも大きな地殻変動があったことが示唆される。金華山局は電子基準点「牡鹿」よりも震源に近いところに位置しており、これらの結果は震源に近づくほど地殻変動量が大きいことを示している。

4 人工衛星レーザー測距（SLR）観測

4.1 観測及び解析の概要

第五管区海上保安本部下里水路観測所（Fig. 1及びFig. 5）では、海洋測地網の構築・維持を目的として、1982年から人工衛星レーザー測距（SLR）観測を実施している。

人工衛星レーザー測距観測は、地上の観測局から人工衛星に向けてレーザー光を発射し、レーザー光が人工衛星に搭載されている反射鏡で反射して戻ってくるまでの往復時間を計測する観測で、地球の周りを周回する人工衛星の動きに合わせて追尾観測を実施する。得られたデータを世界中のSLR観測局のデータ（グローバルデータ）と一緒に解析することにより、下里の地球重心に対する位置を求めることができる。

本稿で使用したデータは、米国の測地衛星「LAGEOS-1」及び「LAGEOS-2」のグローバルSLRデータ（2010年7月-2011年12月）で、解析にはNASAゴダード宇宙飛行センターで開発されたGEODYN-II/SOLVEを使用した。解析についての詳細は、藤田・他（1998）、松下・他（2005）を参照されたい。

4.2 観測結果

Fig. 7に、LAGEOSのSLRグローバルデータから求めた下里の位置座標時系列を示す。1ヶ月解は各月のSLRデータから求めた位置座標、3ヶ月解は東北地方太平洋沖地震が発生した3月を除くFig. 7の赤の破線で区切った3ヶ月分のSLRデータから求めた位置座標で、それぞれ期間の中心の日の座標値を示している。地震前後の3ヶ月解の平均値の差から下里における変位量として、東へ2.8 cm、北へ1.4 cm、上へ0.4 cmが得られた。

得られた水平方向の変位ベクトルをFig. 8に示す。なお、図には、同観測所内にあるGPS観測における地震前後の変位量（東へ2.1 cm、北へ1.2 cm、下へ0.1 cm；基準期間：2月24日-3月10日、比較期間：3月12日-3月26日）も併せて示した。

SLR観測結果とGPS観測結果を比べると、変位量はやや異なるものの、方向は一致しており、下里では東北地方太平洋沖地震に伴って2~3 cmの地殻変動があったことが示唆される。

5 まとめ

海洋情報部が実施している海底地殻変動観測、陸上のGPS局及びDGPS局を用いた地殻変動監視観測及び人工衛星レーザー測距観測から求めた東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動について報告した。

特に、同地震の震源のほぼ真上に位置する「宮城沖1」海底基準点では、水平に約24 m、約3 m隆起という陸上と比較してはるかに大きな地殻変動を検出した。この結果は、プレート境界で巨大

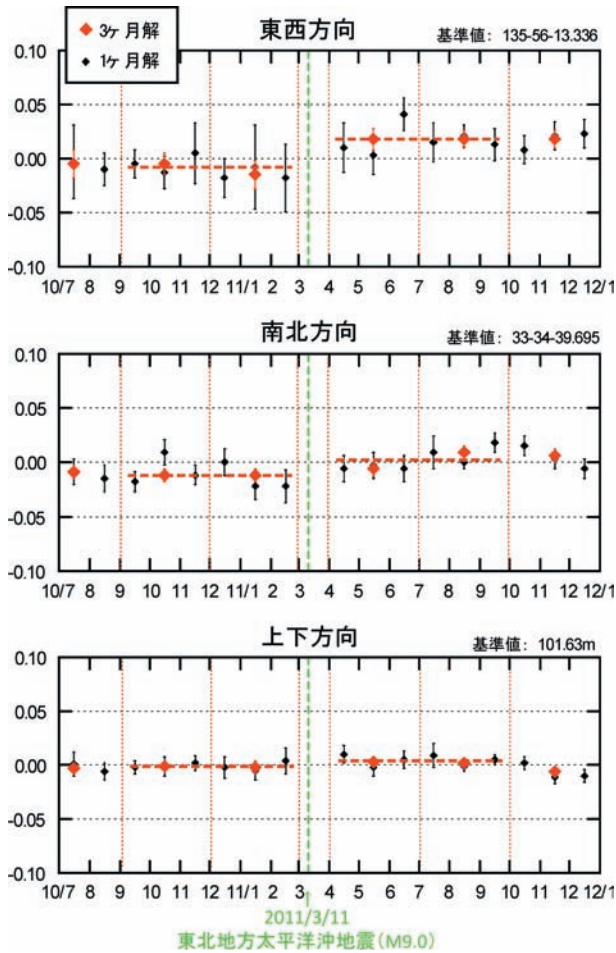


図7 SLRグローバルデータから求めた下里SLR局の位置座標時系列。黒色と赤色のプロットは、それぞれ1ヶ月解、3ヶ月解を示す。

Fig. 7 Time series of the estimated coordinates of Shimosato station. Black and red diamond shapes show monthly and quarterly solutions, respectively.

なすべりがあったことを示唆する貴重な観測データとして、東北地方太平洋沖地震の発生メカニズムの理解に貢献し、海域で直接地殻変動を測る重要性を再認識させることとなった。

得られた観測結果については、随時、地震調査研究推進本部地震調査委員会や地震予知連絡会等に報告するとともに、海底地殻変動観測結果について広報を実施した。

今後も地殻変動観測を継続的に実施し、地震後の地殻の動きを監視していく。

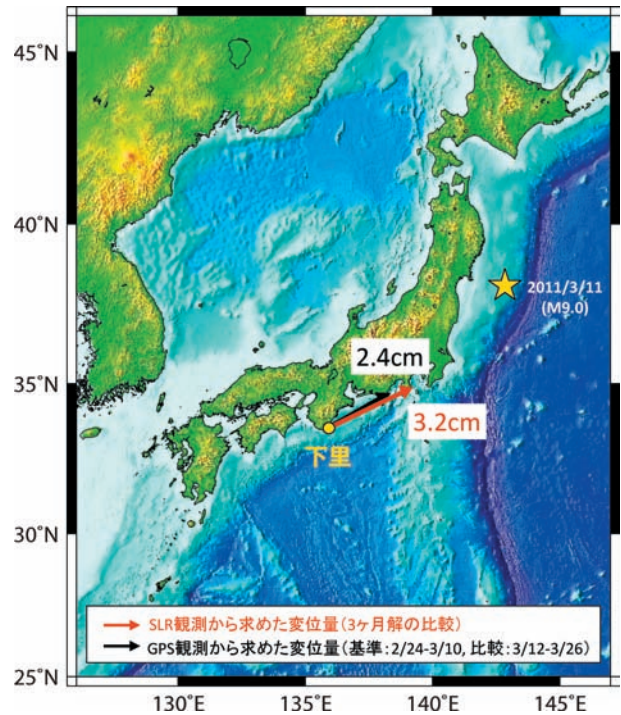


図8 下里SLR局における、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による水平変位。赤色と黒色の矢印は、それぞれSLR観測、GPS観測の結果を示す。黄色の星印は、本震の震央を示す。

Fig. 8 Horizontal co-seismic displacement at Shimosato associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Red and black arrows show displacements observed by SLR and GPS measurements, respectively. A yellow star shows the epicenter of the earthquake.

謝 辞

KGPS解析の陸上基準点データとして、国土地理院のGEONETデータを提供していただきました。「宮城沖2」海底基準点は、平成16年に文部科学省のプロジェクト「宮城県沖地震に関するパイロット的な重点的調査観測」により設置されました。記して感謝いたします。

本報告は、氏原直人、大市一芳(海洋調査課航法測地室)及び佐藤まりこ(技術・国際課海洋研究室)が作成しました。

参考文献

Colombo, O. L (1998), Long-Distance Kinematic GPS, in "GPS for Geodesy 2nd Edition", edited

by Teunissen, P. J. G. and Kleusberg, A,
pp. 537-568, Springer, Berlin.

藤田雅之・久保岡俊宏・池田信広 (1998), NASA
の衛星データ解析ソフトウェア「GEODYN-
II」の導入, **水路部技報**, 15, 5-10.

藤田雅之・佐藤まりこ・矢吹哲一郎 (2004), 海
底地殻変動観測における局位置解析ソフト
ウェアの開発, **海洋情報部技報**, 22, 42-49.

藤田雅之 (2006), GPS/音響測距結合方式によ
る海底地殻変動観測～海上保安庁の取り組み
(レビュー)～, **海洋情報部研究報告**, 42,
1-14.

海上保安庁 (2011), 海底地殻変動観測結果から
得られた平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平
洋沖地震発生前後の海底の動き, **地震予知連
絡会会報**, 86, 284-293.

気象庁仙台管区气象台 (2011), 東北地方とその
周辺の地震活動 (2010 年 11 月～2011 年 5
月), **地震予知連絡会会報**, 86, 45-52.

国土地理院 (2011), 東北地方の地殻変動, **地震
予知連絡会会報**, 86, 184-272.

松下 優・藤田雅之・佐藤まりこ (2005), SLR
データ解析におけるモデルの更新とその評
価, **海洋情報部技報**, 23, 73-77.

Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M.
Fujita, M. Mochizuki, A. Asada (2011), Dis-
placement Above the Hypocenter of the 2011
Tohoku-Oki Earthquake, **Science**, 332, 1395,
doi: 10.1126/science.1207401.

佐藤まりこ・藤田雅之 (2012), GPS/音響測距
結合方式による海底地殻変動観測技術の進展
—この 10 年の歩み—, **海洋情報部研究報
告**, 48, 26-40.

富山新一 (2003), 海底地殻変動観測における音
響解析, **海洋情報部技報**, 21, 67-72.

要 旨

平成 23 年 3 月 11 日に発生した平成 23 年 (2011
年) 東北地方太平洋沖地震は, 東北地方及び関東
地方の太平洋沿岸に大きな地殻変動をもたらした。
海洋情報部では, 海底地殻変動観測, 南関東
の GPS 局及び DGPS 局を用いた地殻変動監視観
測, 及び人工衛星レーザー測距 (SLR) 観測の
データから同地震に伴う地殻変動を検出した。特
に海底地殻変動観測では, 震源のほぼ真上に位置
する「宮城沖 1」海底基準点で東南東方向に約 24
m 移動し, 約 3 m 隆起したという, 陸上での変
動と比較してはるかに大きな変動を観測した。こ
れらの解析結果について, 政府の各種委員会等に
報告するとともに, 広報を実施した。

海底地殻変動観測担当者

大門肇, 成田誉孝*1, 池田信広*1, 吉田茂, 石川
直史*2, 氏原直人, 大橋美紗子, 渡邊俊一, 緒
方克司 (海洋調査課航法測地室)

佐藤まりこ (技術・国際課海洋研究室)

加藤正治, 佐々木高文 (海洋調査課大陸棚調査
室)

三枝隼*3 (海洋調査課)

測量船「明洋」乗組員, 測量船「拓洋」乗組員

(臨時観測要員を含む)

地殻変動監視 (GPS) 観測担当者

成田誉孝*1, 池田信広*1, 大橋美紗子, 大市一芳
(海洋調査課航法測地室)

人工衛星レーザー測距 (SLR) 観測担当者

鈴木充広*4, 黒川隆司, 尾形淳, 山田圭佑*5, 松
永智也 (第五管区海上保安本部下里水路観測
所)

大門肇 (海洋調査課航法測地室)

佐藤まりこ (技術・国際課海洋研究室)

*1 現職 航海情報課

*2 現職 海上保安大学校

*3 現職 海洋調査課航法測地室

*4 現職 第五管区海上保安本部海洋情報部

*5 現職 第一管区海上保安本部海洋情報部