

# 海底地殻変動観測（2013年）

## Seafloor Geodetic Observation in 2013

**Summary:** We have been carrying out seafloor geodetic observation for monitoring crustal deformation around offshore plate boundary regions, using the GPS-acoustic combination technique. This paper reports the summary and the observation results in 2013.

**Key words:** seafloor geodetic observation – crustal deformation

### 1. はじめに

海上保安庁海洋情報部では、GPS 測位と音響測距を組み合わせた方式による海底地殻変動観測の技術開発及び海底基準点の展開を行っている。本稿では、2013年までの観測結果について報告する。

### 2. 観測の概要及び解析手法

当部の実施している海底地殻変動観測の概念図を第1図に示す。観測には測量船を使用し、GPS 測位と音響測距を組み合わせることにより、海底に設置したミラータイプ音響トランスポンダ（海底局）の位置を精密に決定する。各海域には、水深と同程度の広さの海底に4台の海底局を設置しており、これらの海底局の重心位置（平均位置）を海底基準点と定義して、その位置を繰り返し測定している。

2008年末に、測量船のマストにGPSアンテナを、船底に音響トランスデューサをそれぞれ取り付け、航走しながらの観測（航走観測）を可能とした（川井・他、2009）。これにより、従来の漂流しながらの観測（漂流観測）と比較して、より高精度な観測が実現された（Sato et al., 2013）。

データ解析は、測量船の位置を決定するGPSキネマティック解析、測量船上のトランスデューサと海底局間の音波走時を求める音響解析、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。GPSキネマティック解析にはソフトウェア「IT」（Colombo, 1998）を、音響解析にはソフトウェア「sas」（富山、2003）を、局位置解析にはソフトウェア「SGOBS」（藤田・他、2004）を、それぞれ使用した。GPS解析時の陸上基準点には、国土地理院の電子基準点を使用した。また、局位置解析時には、精度向上のために、複数海底局の相対的な位置関係を不変として継続的な重心位置の変化を求める、一括解析による重心推定法（松本・他、2008）を用いた。

第2図に、2013年12月時点の海底基準点の位置を示す。なお、2013年より、東北大学大学院理学研究科との共同研究の枠組みの下、東北大学が設置した海底基準点（東北大08, 10, 11, 12, 14, 17, 18）における観測を開始した。また、三宅島西方の海底基準点は既に運用を終了していたが、平成25年4月17日に三宅島近海で発生した地震（M6.2）への対応として観測を実施した。三宅島西方の海底基準点の位置を、第3図に示す。第1表に、各海底基準点の位置に関する情報についてまとめた。

### 3. 観測結果

各海底基準点における 2013 年の観測実績は、第 2 表のとおりである。第 4 図に、日本海溝沿いの海底基準点における、北アメリカプレート（NUVEL-1A モデル：DeMets et al., 1994）に対する東北地方太平洋沖地震（M9.0, 2011 年 3 月 11 日発生）（以下、東北沖地震）以降の変位時系列を示す。ただし、観測が 1–3 回しか実施されていない東北大学設置の海底基準点については、時系列は示していない。第 5 図に、南海トラフ及び相模トラフ沿いの海底基準点における、ユーラシアプレート（NUVEL-1A モデル：DeMets et al., 1994）に対する 2006 年以降の変位時系列を示す。さらに、第 6 図に、三宅島西方の海底基準点における、ユーラシアプレート（NUVEL-1A モデル：DeMets et al., 1994）に対する変位時系列を示す。第 6 図については、平成 25 年 4 月 17 日の三宅島近海の地震（M6.2）に伴う海底の動きについての調査の報告であるので、より精度が高いと期待される航走観測の結果のみを示した。第 4 図の変位時系列は、それぞれの基準エポックからの相対変位量を東西・南北・上下成分ごとに、第 5 図及び 6 図の各変位時系列は東西・南北成分ごとに示している。

## 4. 考察

### 4. 1. 日本海溝沿いの海底基準点

釜石沖から銚子沖までの日本海溝沿いの海底基準点について、北アメリカプレートに対する東北沖地震後の累積変位を第 3 表及び第 7 図に示す。なお、第 7 図には比較のため国土地理院の陸上地殻変動観測結果（F3 解）も示している。東北沖地震発生時に 20 m を超える変位を観測した「宮城沖 1」及び「釜石沖 1」海底基準点（Sato et al., 2011）では、地震後の地殻変動として、西～西北西向きの変位が検出されている。一方、「宮城沖 2」海底基準点は南向きに、「釜石沖 2」海底基準点は北西向きの変位が検出されており、東北沖地震の震央周辺では複雑な地殻変動が見られる。また、震源域の南部に設置されている「福島沖」及び「銚子沖」海底基準点では東南東向きの変位が検出されており、時間とともに減衰している様子が見られる。これらの観測成果については、Watanabe et al. (2014) において議論されている。

### 4. 2. 南海トラフ及び相模トラフ沿いの海底基準点

日向灘から房総沖までの南海トラフ及び相模トラフ沿いの海底基準点についてユーラシアプレートに対する動きを調べると、東北沖地震以前は、多くの海底基準点で西～北西向きの変位が見られた。

東北沖地震の各海底基準点への影響を含め、東北沖地震後の変位について議論するために、今後も更なる観測データの蓄積が必要である。

### 4. 3. 三宅島西方の海底基準点

2013 年の三宅島西方海底基準点での観測の結果、三宅島西方 C 海底基準点については精度の範囲内において地殻変動は検出されなかった。一方、三宅島西方 A 及び B 海底基準点では、10 cm を超える変位が見られた。しかし、前回の観測（2011 年 5 月）から長い時間が経過しており、かつその間に東北沖地震の余効変動が変位量に影響を及ぼしうることを、また、特に三宅島西方 A では使用可能な海底局が 2 局に減っていたことなどを考慮すると、これらの結果が三宅島近海の地震に伴う有

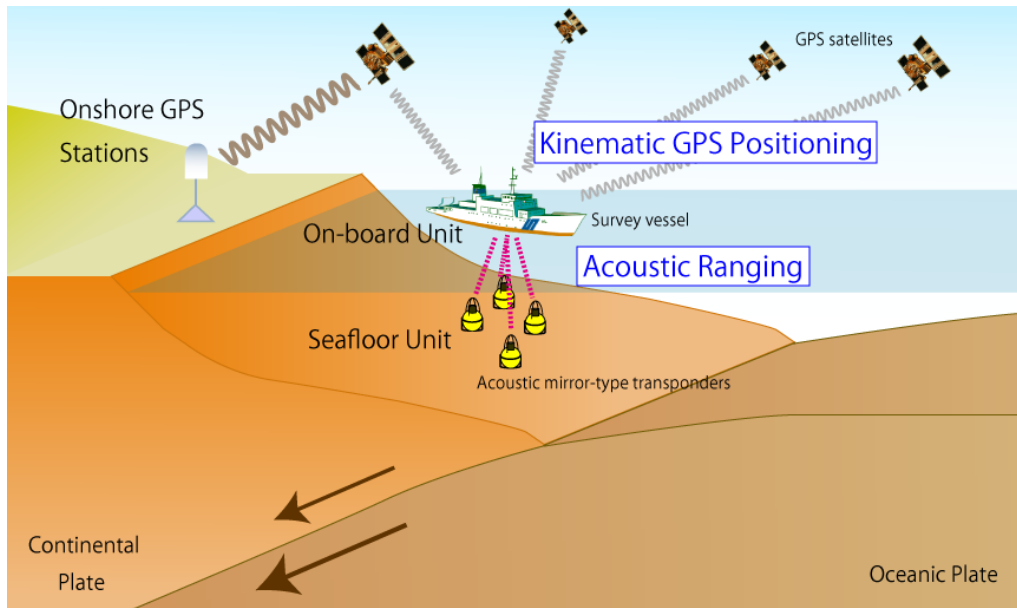
意な変位を捉えたものであるかを判断することは難しいと言える。

## 謝辞

観測の技術開発は、東京大学生産技術研究所との共同研究の枠組みの下、実施している。国土地理院には、電子基準点1秒データを提供していただいている。

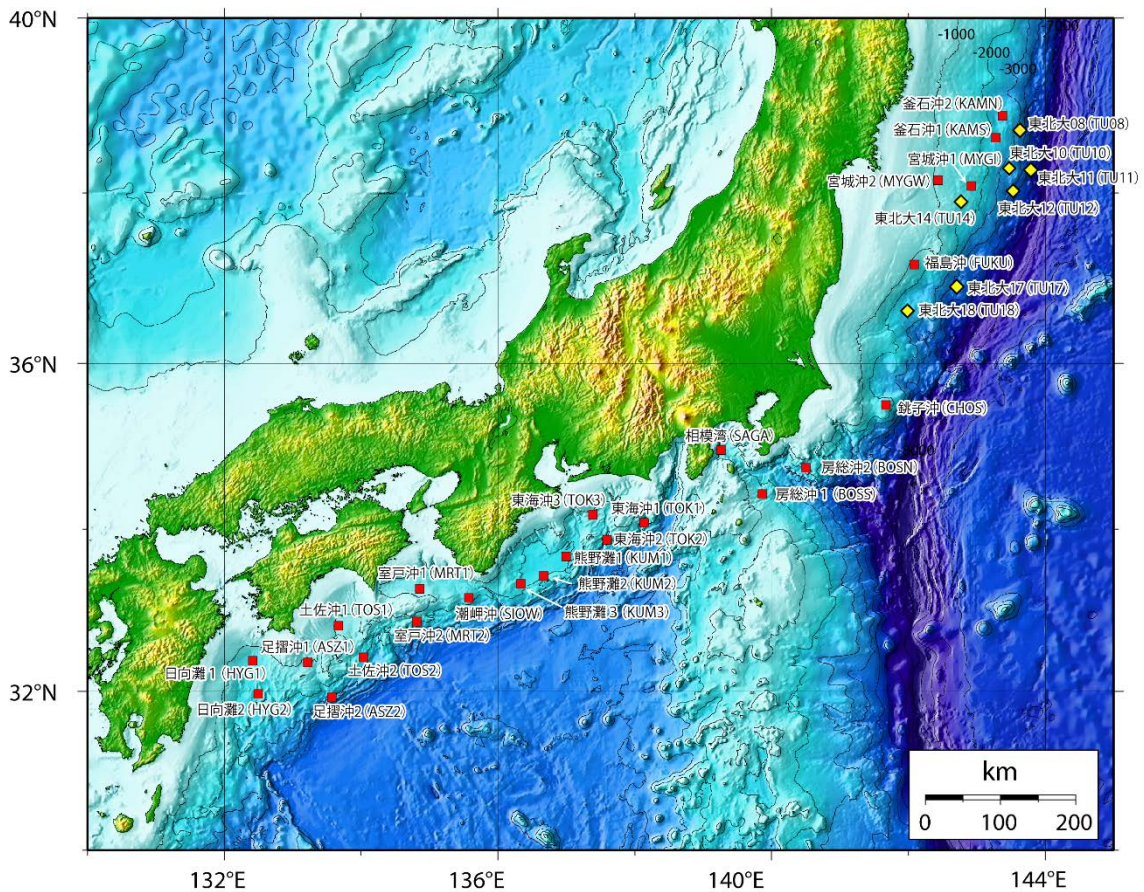
## 参考文献

- Colombo, O. L (1998), Long-Distance Kinematic GPS, in “GPS for Geodesy 2nd Edition”, Springer, 537-568.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus and S. Stein (1994), Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res.*
- 藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一朗 (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.
- 川井仁一, 浅倉宜矢, 松本良浩 (2009), 測量船「明洋」への海底地殻変動観測用送受波器の船底装備について, *海洋情報部技報*, 27, 50-55.
- 松本良浩, 藤田雅之, 石川直史 (2008), 海底地殻変動観測における複数エポック一括局位置解析手法の導入, *海洋情報部技報*, 26, 16-22.
- Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, A. Asada (2011), Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Science*, 332, 1395, doi:10.1126/science.1207401.
- Sato, M., M. Fujita, Y. Matsumoto, H. Saito, T. Ishikawa and T. Asakura (2013), Improvement of GPS/acoustic seafloor positioning precision through controlling the ship's track line, *J. Geod.*, 87, 825-842, doi:10.1007/s00190-013-0649-9.
- 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.
- Watanabe, S., M. Sato, M. Fujita, T. Ishikawa, Y. Yokota and N. Ujihara and A. Asada (2014), Evidence of viscoelastic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation, *Geophysical Research Letters*, 41, 5789-5796, doi:10.1002/2014GL061134.



第 1 図 海底地殻変動観測の概念図

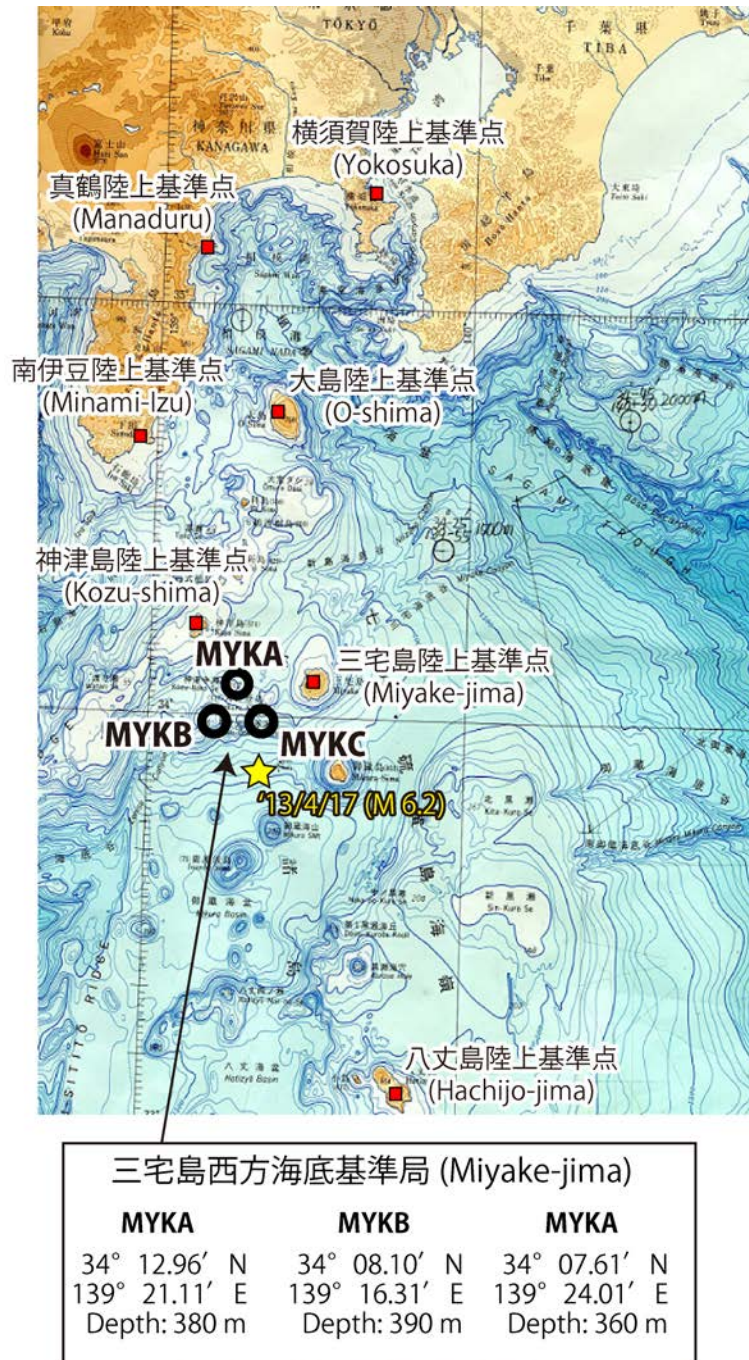
Figure 1. Schematic picture of GPS-acoustic ranging seafloor geodetic observation



第 2 図 海底基準点配置図 (2013 年 12 月時点)

Figure 2. Locations of the seafloor reference sites (Dec., 2012). The red and yellow squares indicate the sites deployed by the groups of the Japan Coast Guard and the Tohoku University, respectively.





第3図 三宅島西方の海底基準点配置図

**Figure 3.** Locations of the seafloor reference sites western off Miyake-jima Island. The open circles and the red squares indicate the seafloor sites and the terrestrial GNSS sites, respectively. The yellow star indicates the hypocenter of the earthquake (M6.2) occurred on April 17, 2013.

第1表 海底基準点の位置 (2013年12月時点)

Table 1. Positions of the seafloor reference sites

Site	Code	Latitude	Longitude	Depth [m]
釜石沖 2	KAMN	38-53.2 N	143-21.8 E	2300
釜石沖 1	KAMS	38-38.2 N	143-15.8 E	2200
宮城沖 2	MYGW	38-09.0 N	142-26.0 E	1100
宮城沖 1	MYGI	38-05.0 N	142-55.0 E	1670
福島沖	FUKU	37-10.0 N	142-05.0 E	1200
銚子沖	CHOS	35-30.2 N	141-40.2 E	1500
房総沖 2	BOSN	34-45.0 N	140-30.0 E	1900
房総沖 1	BOSS	34-25.8 N	139-51.9 E	1450
相模湾	SAGA	34-57.6 N	139-15.8 E	1340
東海沖 1	TOK1	34-05.1 N	143-08.0 E	2400
東海沖 2	TOK2	33-52.6 N	137-35.7 E	1600
東海沖 3	TOK3	34-10.8 N	137-23.2 E	1200
熊野灘 1	KUM1	33-40.2 N	136-59.8 E	2000
熊野灘 2	KUM2	33-26.0 N	136-40.0 E	2000
熊野灘 3	KUM3	33-20.0 N	136-20.0 E	2000
潮岬沖	SLOW	33-09.6 N	135-34.3 E	1550
室戸沖 1	MRT1	33-21.0 N	134-56.7 E	1350
室戸沖 2	MRT2	32-52.3 N	143-48.8 E	1400
土佐沖 1	TOS1	32- 49.0 N	133-40.0 E	1050
土佐沖 2	TOS2	32- 25.7 N	134-01.9 E	1770
足摺沖 1	ASZ1	32-22.1 N	133-13.2 E	1100
足摺沖 2	ASZ2	31-55.9 N	133-34.6 E	2940
日向灘 1	HYG1	32-23.0 N	132-25.0 E	1640
日向灘 2	HYG2	31-58.4 N	132-29.7 E	1960
東北大 08	TU08	38-43.2N	143-38.6E	3479
東北大 10	TU10	38-18.0N	143-29.0E	3271
東北大 11	TU11	38-16.0N	143-48.0E	5558
東北大 12	TU12	38-01.2 N	143-32.0 E	4370
東北大 14	TU14	37-53.5 N	142-46.5 E	1310
東北大 17	TU17	36-54.0N	142-43.0E	4223
東北大 18	TU18	36-37.0N	141-59.0E	2487

第2表 各海底基準点における2013年の観測実績（数字は取得した音響測距データ数）

Table 2. Number of ranging data obtained in each observation

Site	Code	2013				
		1/11~2/1	1/24~2/8	4/21	5/26~6/11	6/24~7/10
釜石沖2	KAMN					5429
釜石沖1	KAMS		9420*			8016*
宮城沖2	MYGW		5088			4828
宮城沖1	MYGI		5488			5482
福島沖	FUKU					5307
銚子沖	CHOS					4911
房総沖2	BOSN					
房総沖1	BOSS					
相模湾	SAGA					
東海沖1	TOK1	1231*			7838*	
東海沖2	TOK2				5192	
東海沖3	TOK3	5637			5574	
熊野灘1	KUM1				5696	
熊野灘2	KUM2	5237			5686	
熊野灘3	KUM3				5672	
潮岬沖	SIOW	5129*			5419	
室戸沖1	MRT1				5555	
室戸沖2	MRT2	5614			5422	
土佐沖1	TOS1	5227				
土佐沖2	TOS2	4883			5177	
足摺沖1	ASZ1	4893				
足摺沖2	ASZ2	5176				
日向灘1	HYG1	5346				
日向灘2	HYG2	5397				
東北大08	TU08					3884
東北大10	TU10					3630
東北大11	TU11					695
東北大12	TU12		720			3585
東北大14	TU14		5070			
東北大17	TU17					3504
東北大18	TU18		1044			
三宅島西方A	MYKA			333		
三宅島西方B	MYKB			355		
三宅島西方C	MYKC			3862		

\*新旧海底局同時観測

\*Observation for the replacement of transponders

第2表 各海底基準点における2013年の観測実績（数字は取得した音響測距データ数）

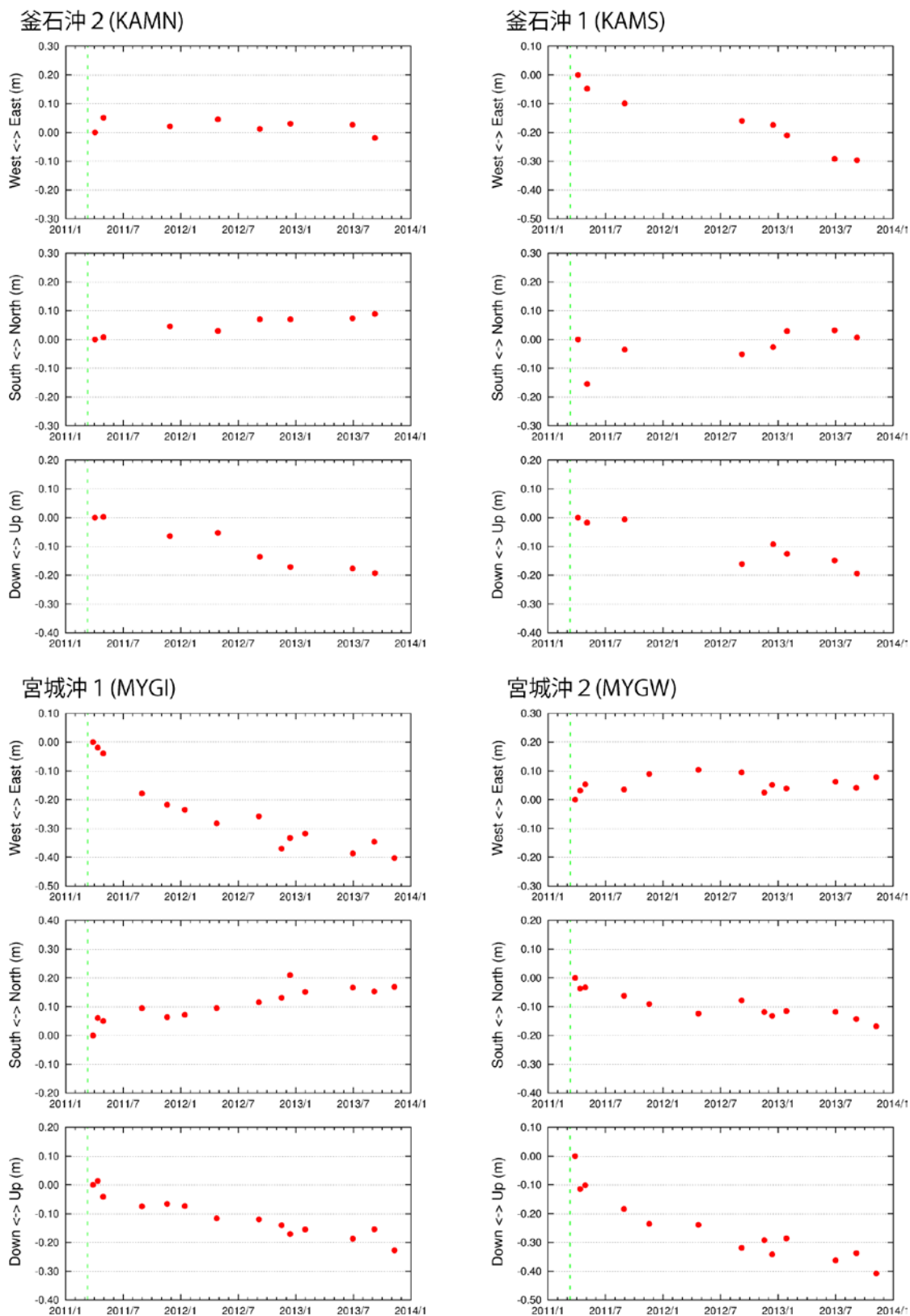
Table 2. Number of ranging data obtained in each observation (continued)

Site	Code	2013			
		7/1~7/16	9/4~9/20	11/6~11/19	11/16~12/2
釜石沖2	KAMN		5468		
釜石沖1	KAMS		5164		
宮城沖2	MYGW		4745	5928	
宮城沖1	MYGI		5235	5140	
福島沖	FUKU		5097		
銚子沖	CHOS		4891		
房総沖2	BOSN	8573*		8821(*2406)	
房総沖1	BOSS	5224		5228	
相模湾	SAGA	8128*			7865*
東海沖1	TOK1	7680*			7659*
東海沖2	TOK2				8027*
東海沖3	TOK3				5405
熊野灘1	KUM1	5589			
熊野灘2	KUM2				5564
熊野灘3	KUM3				5621
潮岬沖	SIOW				7233*
室戸沖1	MRT1				5213
室戸沖2	MRT2				6116
土佐沖1	TOS1	5612			
土佐沖2	TOS2				5010
足摺沖1	ASZ1	5049			
足摺沖2	ASZ2	5512			
日向灘1	HYG1	5542			
日向灘2	HYG2	5600			
東北大08	TU08		3828		
東北大10	TU10		3569		
東北大11	TU11				
東北大12	TU12		3523	4008	
東北大14	TU14		3500		
東北大17	TU17			3672	
東北大18	TU18				
三宅島西方A	MYKA				
三宅島西方B	MYKB				
三宅島西方C	MYKC				

\*新旧海底局同時観測

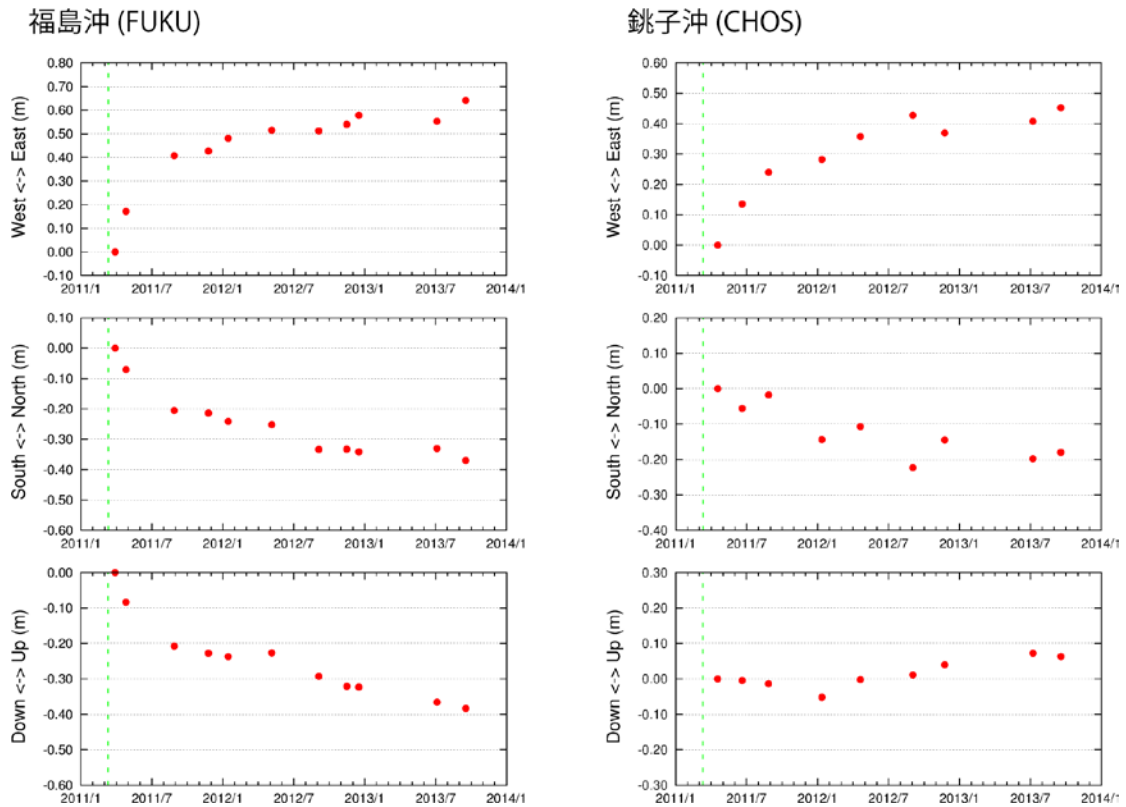
\*Observation for the replacement of transponders





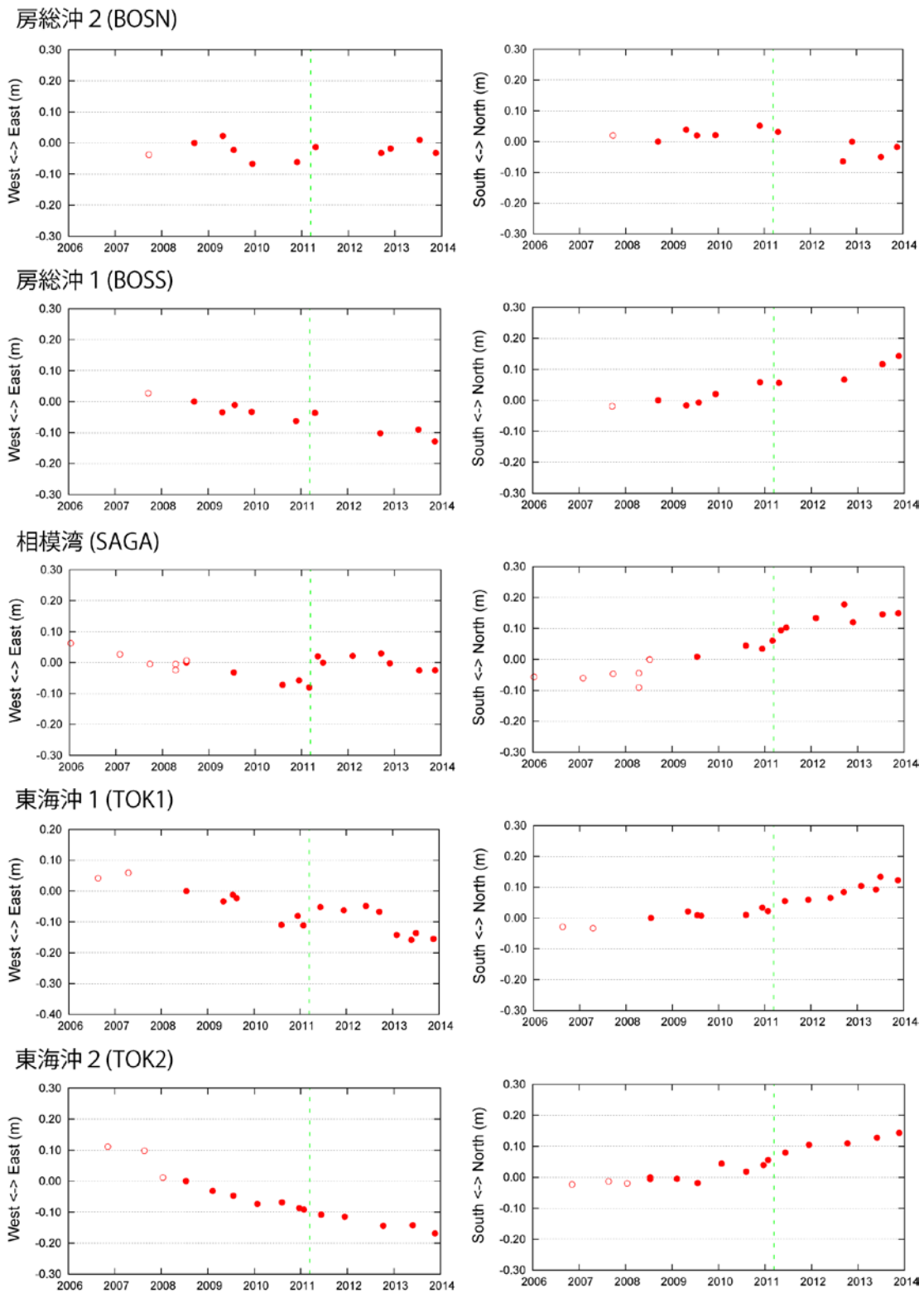
第4図 各海底基準点における変位時系列 (北アメリカプレート固定). グラフ中の緑線は東北地方太平洋沖地震を示す.

Figure 4. Time series of the estimated positions of array centroid at the seafloor sites after the 2011 Tohoku-oki earthquake relative to the stable part of the North American plate. The green dashed lines indicate the occurrence time of the Tohoku-Oki earthquake (M9.0).



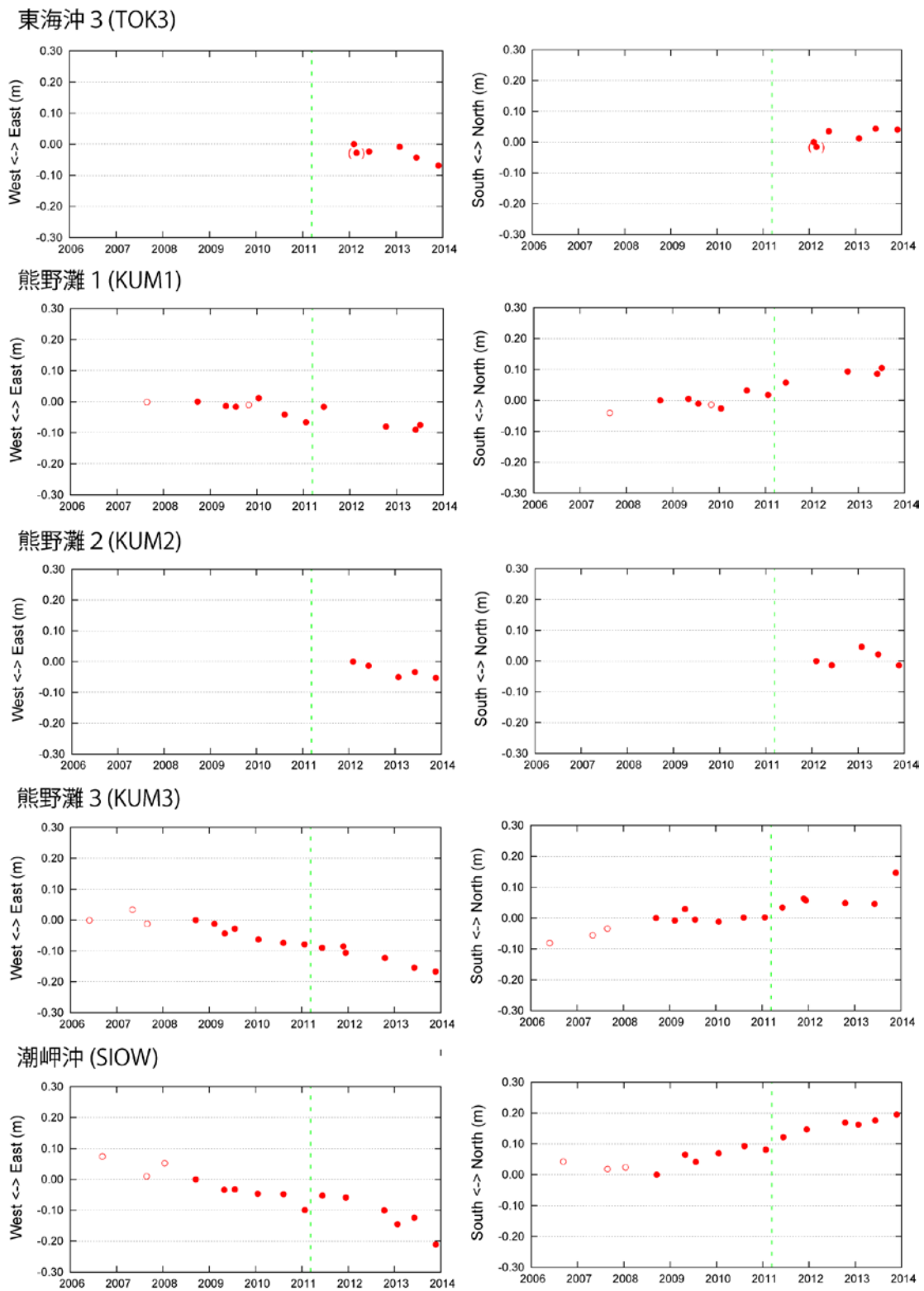
第 4 図 各海底基準点における変位時系列 (北アメリカプレート固定). グラフ中の緑線は東北地方太平洋沖地震を示す.

Figure 4. Time series of the estimated positions of array centroid at the seafloor sites after the 2011 Tohoku-oki earthquake relative to the stable part of the North American plate (continued).



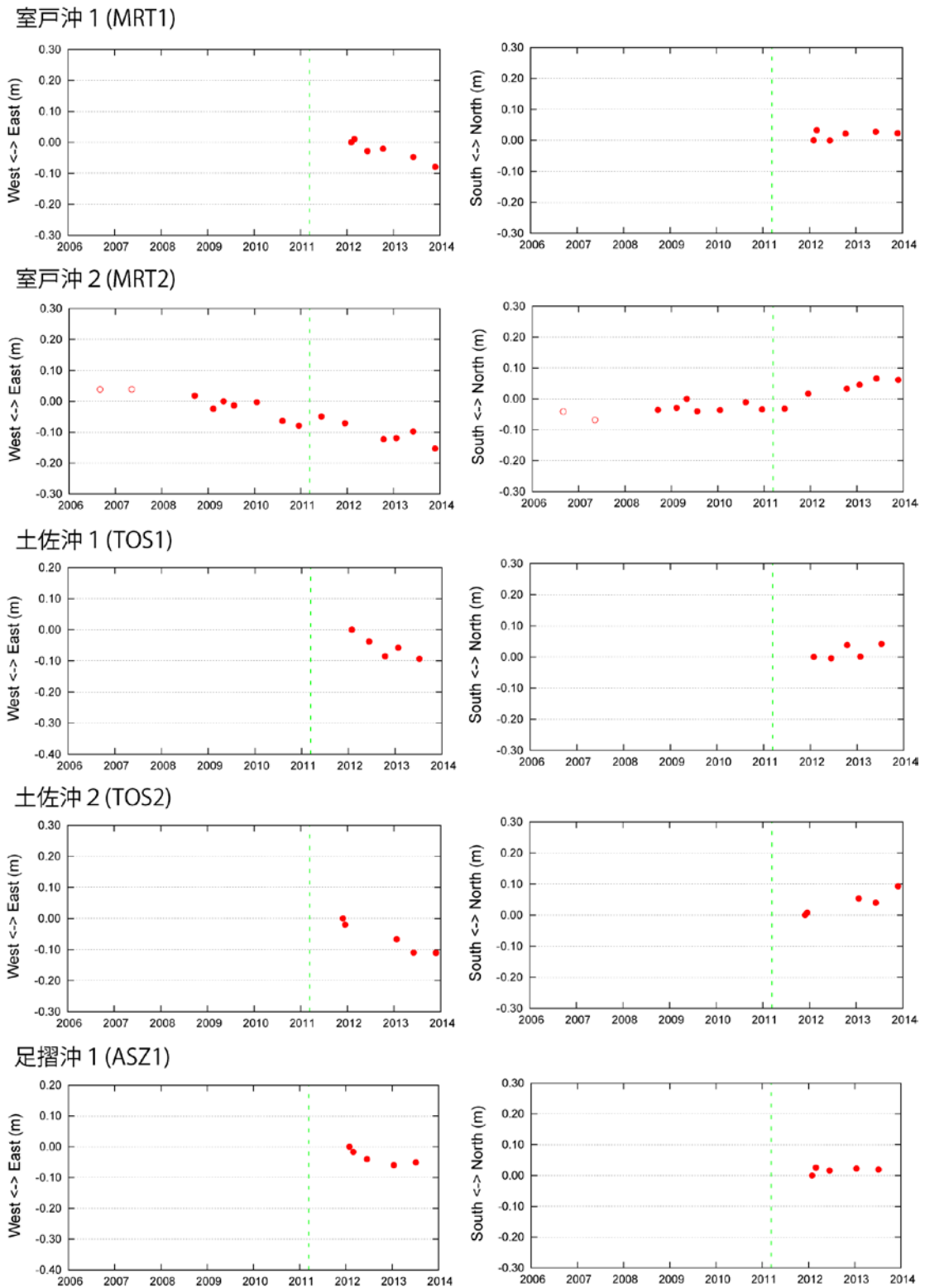
第5図 各海底基準点における変位時系列（ユーラシアプレート固定）．グラフ中の緑線は東北地方太平洋沖地震を示す．また，赤丸と白丸は，それぞれ航走観測，漂流観測による結果を示す．

**Figure 5.** Time series of the estimated positions of array centroid at the seafloor sites relative to the stable part of the Eurasian plate. The green dashed lines indicate the occurrence time of the Tohoku-Oki earthquake (M9.0). The solid and open circles indicate the results obtained by the sailing observation and the drifting observation, respectively.



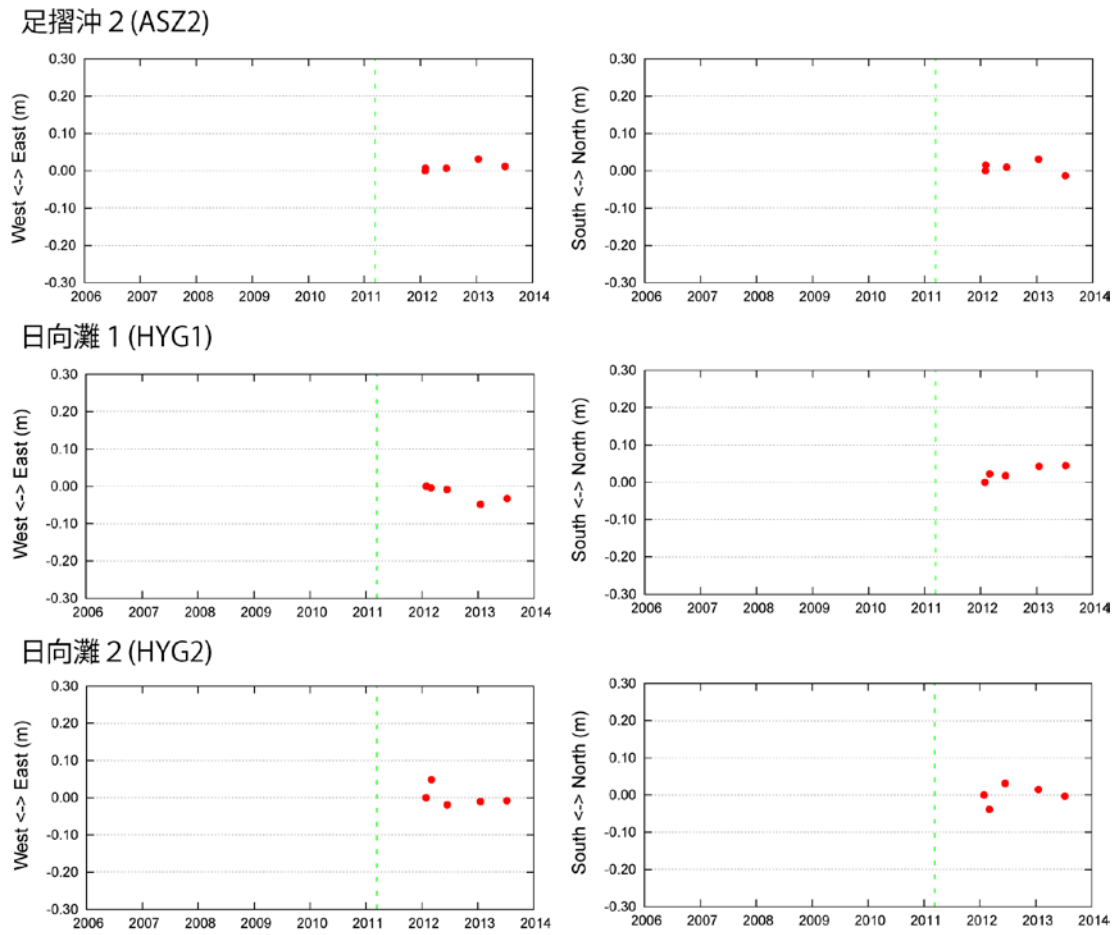
第5図 各海底基準点における変位時系列 (ユーラシアプレート固定). グラフ中の緑線は東北地方太平洋沖地震を示す. また, 赤丸と白丸は, それぞれ航走観測, 漂流観測による結果を示す.

Figure 5. Time series of the estimated positions of array centroid at the seafloor sites relative to the stable part of the Eurasian plate (continued).



第5図 各海底基準点における変位時系列 (ユーラシアプレート固定). グラフ中の緑線は東北地方太平洋沖地震を示す. また, 赤丸と白丸は, それぞれ航走観測, 漂流観測による結果を示す.

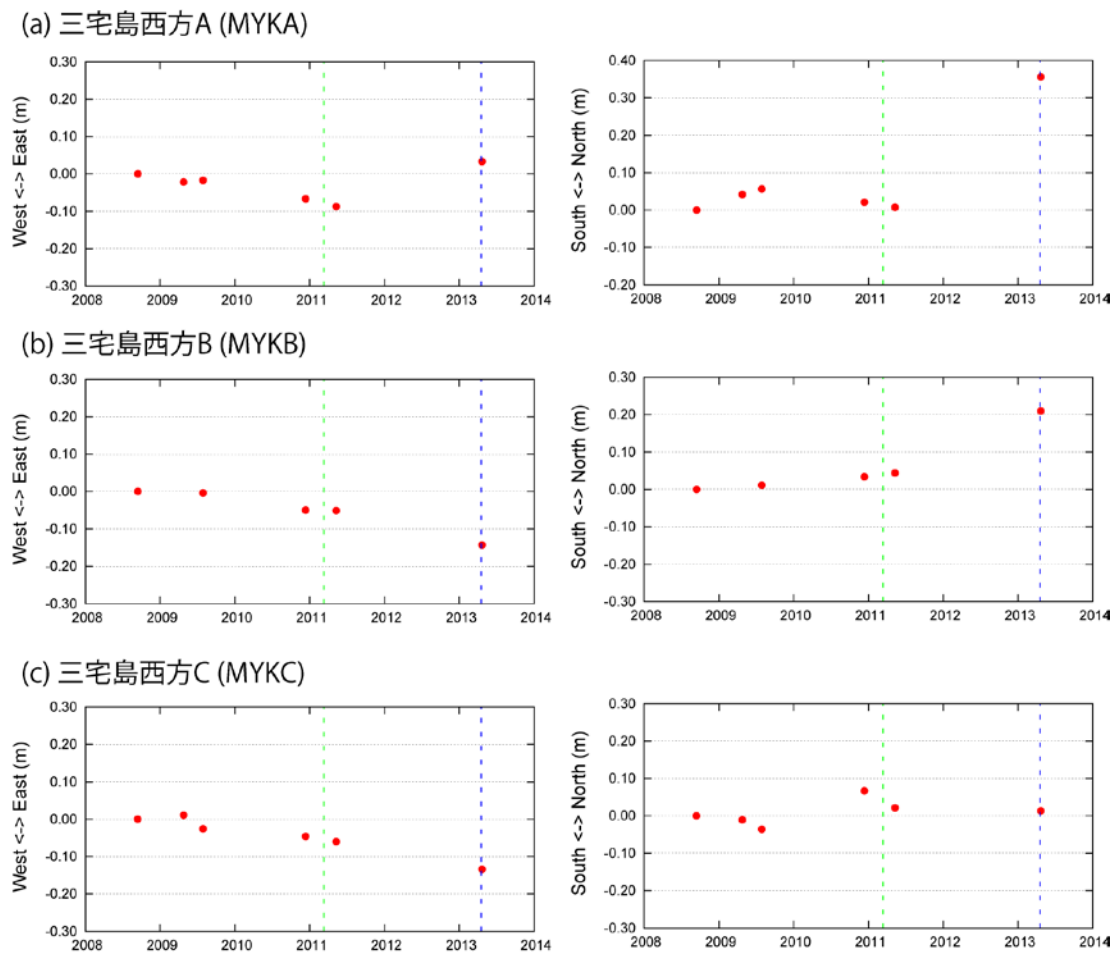
Figure 5. Time series of the estimated positions of array centroid at the seafloor sites relative to the stable part of the Eurasian plate (continued).



第5図 各海底基準点における変位時系列 (ユーラシアプレート固定). グラフ中の緑線は東北地方太平洋沖地震を示す.

Figure 5. Time series of the estimated positions of array centroid at the seafloor sites relative to the stable part of the Eurasian plate (continued).





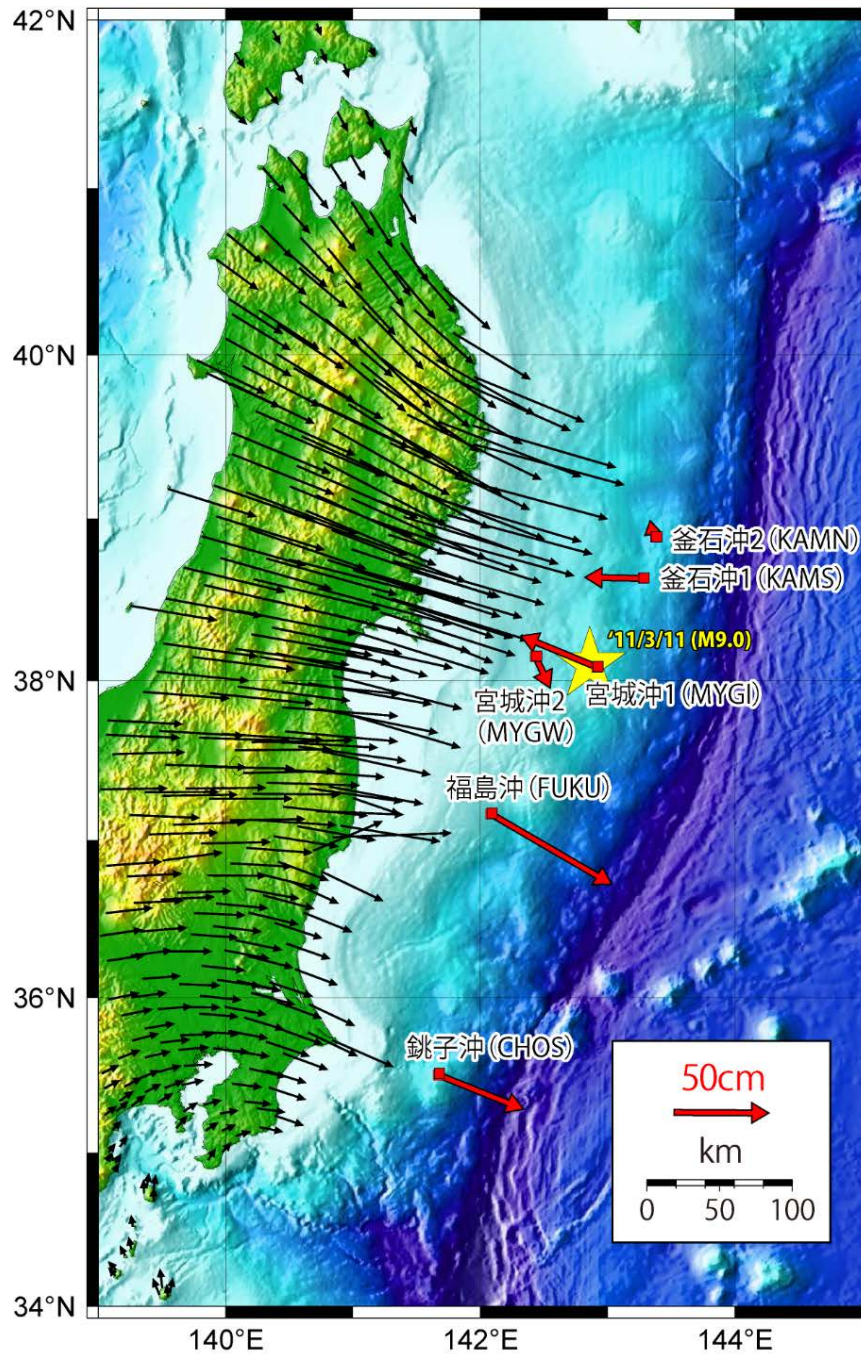
第 6 図 三宅島西方の海底基準点における変位時系列 (ユーラシアプレート固定). グラフ中の緑線は東北地方太平洋沖地震を, 青線は三宅島近海の地震をそれぞれ示す.

**Figure 6.** Time series of the estimated positions of array centroid at the seafloor sites off Miyakejima Island relative to the stable part of the Eurasian plate. The green and blue dashed lines indicate the occurrence time of the Tohoku-Oki earthquake (M9.0) and the earthquake (M6.2) occurred on April 17, 2013, respectively.

第 3 表 東北地方太平洋沖地震後の水平変位 (北アメリカプレート固定)

**Table 3.** Displacements at the seafloor sites along the Japan Trench relative to the North American plate

観測点 Station	コード Code	基準エポック Reference Epoch	比較エポック Latest Epoch	水平変位量 Horizontal Displacement
釜石沖2	KAMN	2011/4/3	2013/ 9/ 9	9 cm
釜石沖1	KAMS	2011/4/5	2013/ 9/10	30 cm
宮城沖1	MYGI	2011/3/28	2013/11/ 9	44 cm
宮城沖2	MYGW	2011/3/27	2013/11/ 7	19 cm
福島沖	FUKU	2011/3/29	2013/ 9/17	74 cm
銚子沖	CHOS	2011/4/18	2013/ 9/18	49 cm



第7図 東北地方太平洋沖地震後の変位（北アメリカプレート固定）。赤の矢印は、海上保安庁の海底基準点における地震後の変位（期間は第3表参照）、黒の矢印は、国土地理院の電子基準点における地震後の変位（2011年4月～2013年11月）を示す。黄の星印は東北沖地震の震央位置を示す。図中の変位には、余震による地殻変動が含まれている。

**Figure 7.** Cumulative displacements in horizontal components after the 2011 Tohoku-oki earthquake at the seafloor sites along the Japan Trench relative to the North American plate. The observation periods are indicated in Table 3. The red and black arrows indicate the displacements at the seafloor sites and the terrestrial sites deployed by Geospatial Information Authority of Japan, respectively.