

海底地殻変動観測(2011年)

Seafloor Geodetic Observation in 2011

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 2011.

Key words: seafloor geodetic observation – crustal deformation

1. はじめに

海上保安庁海洋情報部では、キネマティックGPS (KGPS) と音響測距の組み合わせ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、2011年までの観測結果について報告する。なお、2011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(M9.0)後に実施した緊急観測の実績を含む。

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、KGPS及び音響測距を組み合わせることにより、海底に設置した海底基準点の位置を決定する。2008年末に、測量船「明洋」にKGPSアンテナをマスト、音響トランスデューサを船底に取り付けた(川井・他, 2009)。これにより、航走しながらの観測が可能となり、従来と比較してより短時間で高精度に観測できるようになった(佐藤・他, 2009)。また、2010年12月に同様の装置を測量船「拓洋」に搭載した(氏原・成田, 2012)。

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に設置した3~4台の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複数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。ここで、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。

第2図に、2011年12月末現在の海底基準点の位置を示す。2011年から2012年にかけて実施した海底基準点増設等に伴い、(旧)「常磐沖」を「銚子沖」、(旧)「熊野灘」を「熊野灘1」へ、(旧)「潮岬沖1」を「熊野灘3」へ、(旧)「潮岬沖2」を「潮岬沖」へ、(旧)「室戸岬沖」を「室戸沖2」へとそれぞれ名称を変更した。今後は新名称を用いて報告を行う。

3. 観測結果

各観測点の2011年における観測実績は第1表のとおりである。

2011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(M9.0)(以下「同地震」とする)に伴い、震央に近い宮城沖~釜石沖の海底基準点で東南東方向に最大24mの地殻変動が観測された。また、陸上のGNSS局の観測結果から南海トラフ沿いの陸上基準点でも数cmの変動が観測されるなど、日本列島全体で同地震に伴う変動があったことがわかっている。そのため、観測結果を(1)同地震発生前、(2)同地震に伴う変動、(3)地震後の変動の3つに分けて報告する。

3.1 東北地方太平洋沖地震発生前までの移動速度

観測データが蓄積された海底基準点について、重心推定法（松本, 2008）を使用し線形回帰により求めたユーラシアプレート安定域に対する同地震発生前までの水平方向の速度ベクトルを第3図及び第2表に、各海底基準点の時系列を第4図に示す（海上保安庁, 2012）。ただし、2004年9月5日の紀伊半島南東沖地震（M7.4, M6.9）により、下里水路観測所本土基準点が西へ0.9cm、南へ1.5cm移動していることが確認されていることから、第4図では同地震以前の解析結果についてこの変動分を補正している。

日本海溝沿いの基準点では、宮城沖で約5~6cm/年の速度で西北西に移動しており、福島沖で2.0cm/年の速度でほぼ西向きに移動しているという結果が得られており、「宮城沖2」及び「宮城沖1」海底基準点における移動速度は、陸上の電子基準点における移動速度（3~4cm/年）や「福島沖」海底基準点の移動速度と比べて有意に大きく、両海底基準点の周辺では固着が強く、ひずみを蓄積していたことが示唆される。

また、相模湾から南海トラフ沿いの海底基準点ではとも西~北西の方向に約2~5cm/年の速度で移動しているという結果が得られており、場所によって移動速度が違うことが示唆される。

3.2 東北地方太平洋沖地震発生前後の変動

釜石沖から相模湾にかけての海底基準点について、下里に対する同地震時における変動ベクトルを第5図に、同地震前後の各海底基準点の時系列を第6図に示す（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隆起しており、その他釜石沖から銚子沖にかけての各観測点で東南東への移動が確認された（第5図）。24mという水平変動量は陸上で観測された最大変動量（電子基準点「牡鹿」で約5.3m）の4倍以上に相当する。「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という大きい変動が観測されたことから、震源周辺の広い範囲において大きな滑りがあったことが示唆される。また、「宮城沖1」及び「宮城沖2」の観測結果と電子基準点「牡鹿」の観測値を比較すると、陸側から海溝側に向かい水平変動量が増加していることがわかる。さらに、上下変動は「宮城沖2」と「宮城沖1」の間で「沈降」から「隆起」へと変化しており、上下方向の変位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と考えられる。

3.3 東北地方太平洋沖地震発後の変動

釜石沖から銚子沖までの海底基準点について、ユーラシアプレート安定域に対する地震後の累積変動ベクトルを第7図に、各海底基準点の時系列を第8図に示す。同地震発後、「宮城沖1」海底基準点は西北西向きに移動し、「宮城沖2」は南向きに移動している。一方、「福島沖」及び「銚子沖」では東南東向きの余効変動が見られており、陸上のGNSS観測結果と概ね整合的である。「釜石沖2」及び「釜石沖1」では大きな変動は見られていない。

参考文献

Colombo, O. L: Long-Distance Kinematic GPS, in “GPS for Geodesy 2nd Edition”, Springer, 537-568, (1998).

藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一郎: 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, (2004).

石川直史, 藤田雅之: 海底地殻変動観測における局位置解析手法と精度の向上について, 海洋情報部研究報告, 41, 27-34, (2005).

海上保安庁: 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, (2011)

海上保安庁: 東北地方太平洋沖地震前までの海底地殻変動観測結果(再解析), 地震予知連絡会会報, 88, 143-149, (2012)

川井仁一, 浅倉宜矢, 松本良浩, 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, (2009).

佐藤まりこ, 浅倉宜矢, 齋藤宏彰: 船底トランスデューサによる航走海底地殻変動観測の評価(速報), 海洋情報部技報, 27, 56-65, (2009)

Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, A. Asada: Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake, Science, 332, 1395, doi:10.1126/science.1207401, (2011).

Sengoku, A.: A plate motion study using Ajisai SLR data, Earth Planets Space, 50, 611-627, (1998).

富山新一: 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, (2003).

氏原直人, 成田誉孝: 測量船「拓洋」への海底地殻変動観測装置設置について(速報), 海洋情報部研究報告, 48, 85-90, (2012).

■「宮城沖2」海底基準点は、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」(平成14～16年度)の一環として設置したものである。

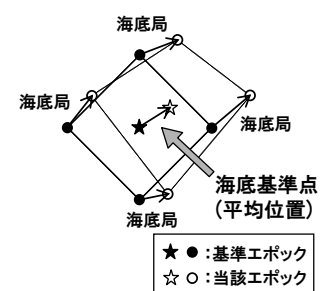
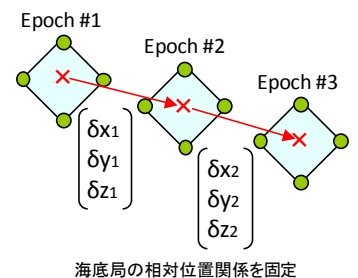
■解析に用いた KGPS 陸上基準点の一部は、国土地理院の電子基準点であり、1秒データを提供していただいている。また、この観測は、東京大学生産技術研究所との技術協力のもとに実施している。

■第4図,第8図について

- ・図は、海底基準点の位置(複数個の海底局の平均位置)を基準からの差として示している。
- ・図では重心推定法(松本ほか, 2008)を使用して解析を実施している。全エポックのデータから4台の海底局の相対位置関係を決定し、その位置関係を固定して各エポックの重心(4台の海底局の平均位置)の位置変化(東西・南北・上下)を推定している(右図)。
- ・各海底基準点の位置は、当庁の本土基準点である下里(SLR観測局)を基準として決定している。図では各海底基準点の位置を下里のユーラシアプレート安定域に対する速度(291°, 3.2cm/年; Sengoku(1998); SLRグローバル解析による)で補正し、ユーラシアプレート安定域に対する速度として示している。

■第6図について

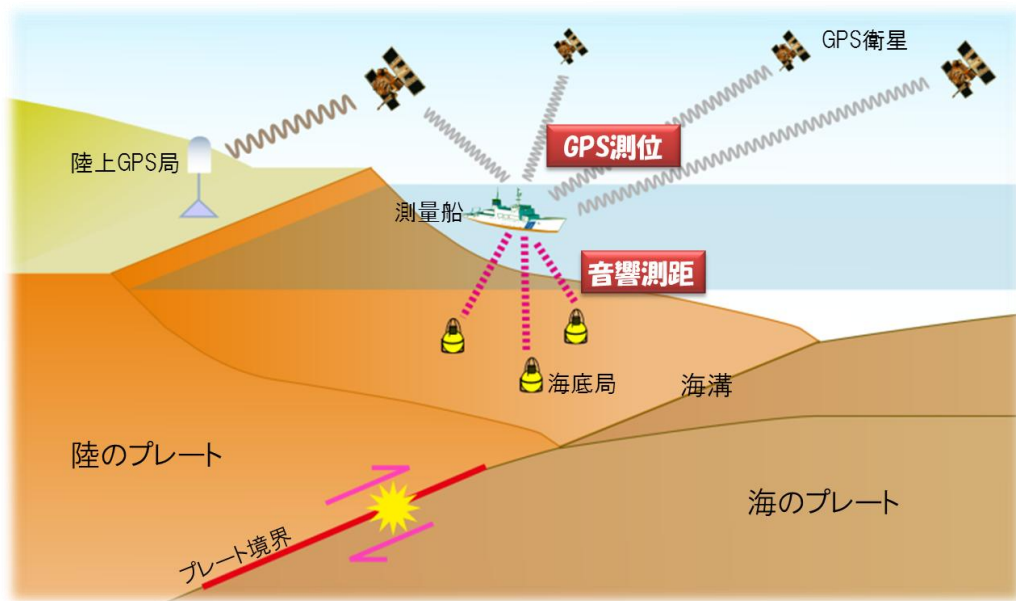
- ・図は、海底基準点の位置(複数個の海底局の平均位置)を基準エポックからの差として示している。
- ・エラーバーは、個々の海底局の基準エポックからのばらつきRMSを図示したもので、海底局間の相対位置関係の安定性を示す指標である。
- ・各海底基準点の位置は、当庁の本土基準点である下里(SLR観測局)を基準として決定している。



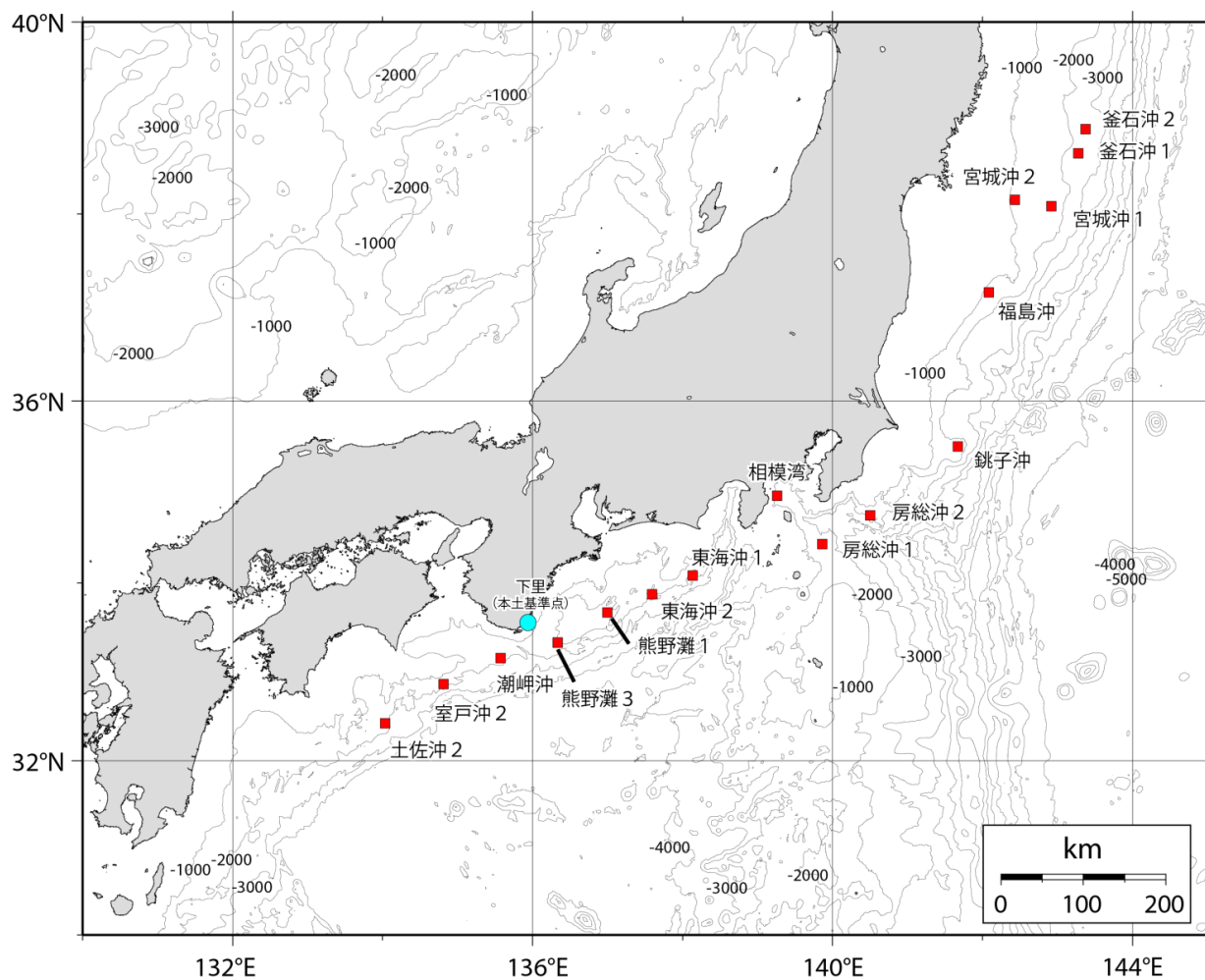
Seafloor Geodetic Observation in 2011

第1表 各海底基準点における2011年の観測実績

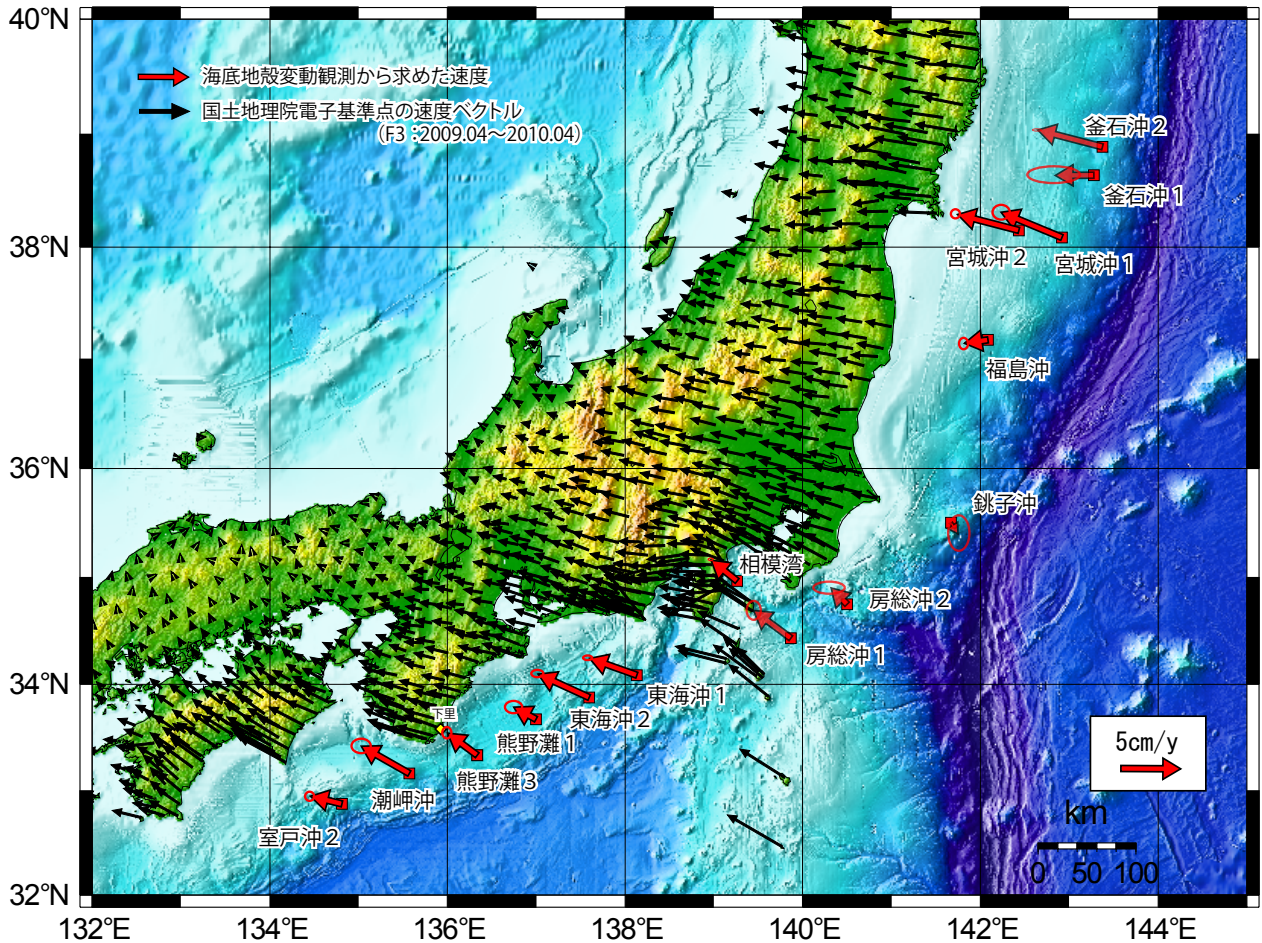
観測年月	観測点	船舶	ショット数	観測年月	観測点	船舶	ショット数
2011/01	熊野灘 1	明洋	5017	2011/06	東海沖 1	明洋	4772
	熊野灘 3	明洋	5033		東海沖 2	明洋	4961
	潮岬沖	明洋	5022		熊野灘 1	明洋	5060
	東海沖 2	明洋	5004		熊野灘 3	明洋	5060
	東海沖 1	明洋	1640		潮岬沖	明洋	4920
2011/02	福島沖	明洋	10405		室戸沖 2	明洋	5092
	宮城沖 1	明洋	11025		相模湾	明洋	5153
	宮城沖 2	明洋	4972		銚子沖	明洋	5133
	潮岬沖	拓洋	4884		銚子沖	明洋	5457
2011/03	相模湾	明洋	5398		2011/08	福島沖	明洋
	福島沖	明洋	1232	宮城沖 2		明洋	4992
	宮城沖 1	明洋	4024	宮城沖 1		明洋	5828
	宮城沖 2	明洋	2343	釜石沖 1		明洋	4177
2011/04	釜石沖 2	拓洋	1421	2011/11	釜石沖 2	明洋	5584
	釜石沖 1	拓洋	1310		宮城沖 1	明洋	11439
	宮城沖 1	明洋	2717		宮城沖 2	明洋	4807
	宮城沖 2	明洋	2424		福島沖	明洋	5336
	銚子沖	拓洋	4778		熊野灘 3	拓洋	6120
	房総沖 2	拓洋	3528		土佐沖 2	拓洋	6012
	房総沖 1	拓洋	3567		2011/12	東海沖 1	明洋
釜石沖 2	明洋	5479	東海沖 2	明洋		5705	
釜石沖 1	明洋	5196	熊野灘 3	明洋		9129	
宮城沖 1	明洋	5407	室戸沖 2	明洋		5789	
宮城沖 2	明洋	4736	土佐沖 2	明洋		4780	
福島沖	明洋	10826	潮岬沖	明洋		7135	
相模湾	明洋	5281					
三宅島A	明洋	909					
三宅島B	明洋	856					
三宅島C	明洋	778					



第1図 海底地殻変動観測の概念図



第2図 海底基準点の位置



第3図 東北地方太平洋沖地震発生前までの海底の動き（ユーラシアプレート安定域固定）

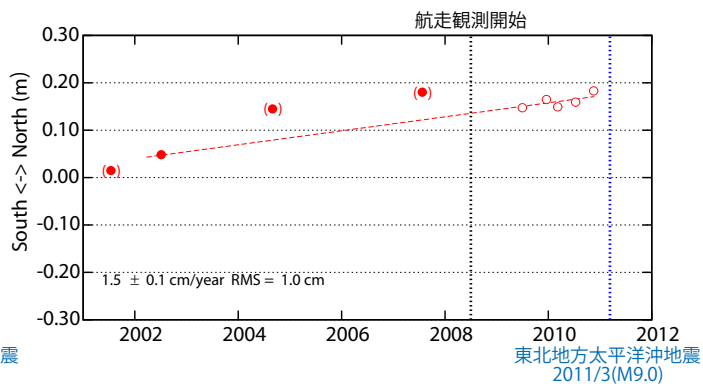
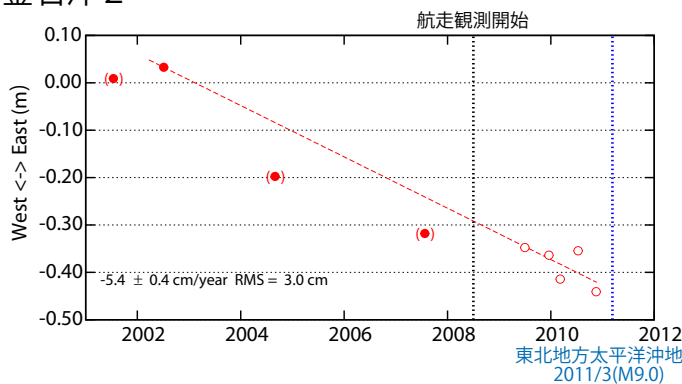
下里を基準として重心推定法（松本ほか、2008）にて解析した結果に、Sengoku (1998) で得られた下里の移動速度（ 291° , 3.2cm/year ）を補正して算出した。

基準点名	移動速度	方向	移動速度計算に使用した観測期間及び観測回数
釜石沖2	5.6cm/年	285°	2002.7~2010.11 (6回) (参考値)
釜石沖1	3.2cm/年	270°	2007.7~2010.11 (5回) (参考値)
宮城沖2	5.3cm/年	285°	2006.6~2010.11 (9回)
宮城沖1	7.8cm/年 5.5cm/年	290° 293°	2002.5~2005.8 (9回) 2005.8.16(M7.2)発生前まで 2006.12~2011.2 (9回) 2005.8.16(M7.2)発生後
福島沖	2.0cm/年	262°	2003.6~2011.2 (10回)
銚子沖	1.1cm/年	148°	2007.7~2010.7 (5回) (参考値)
房総沖2	1.9cm/年	316°	2007.9~2010.11 (6回) (参考値)
房総沖1	3.9cm/年	307°	2007.9~2010.11 (6回) (参考値)
相模湾	2.8cm/年	309°	2004.1~2011.3 (9回)
東海沖1	4.2cm/年	292°	2006.8~2010.12 (9回)
東海沖2	4.7cm/年	295°	2007.8~2011.1 (10回)
熊野灘1	2.1cm/年	299°	2007.8~2011.1 (7回)
熊野灘3	3.1cm/年	307°	2006.6~2011.1 (10回)
潮岬沖	4.6cm/年	301°	2007.8~2011.1 (8回)
室戸沖2	2.7cm/年	284°	2006.9~2010.12 (9回)

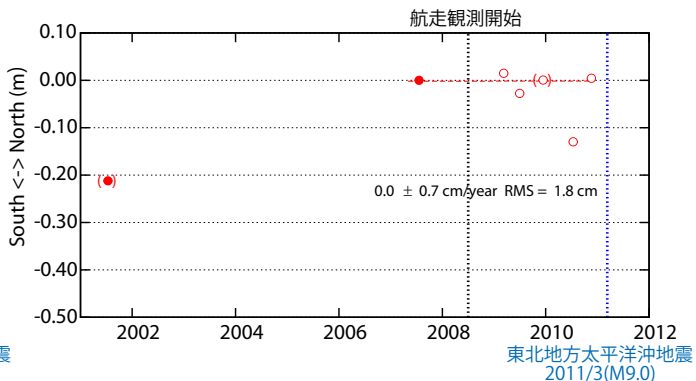
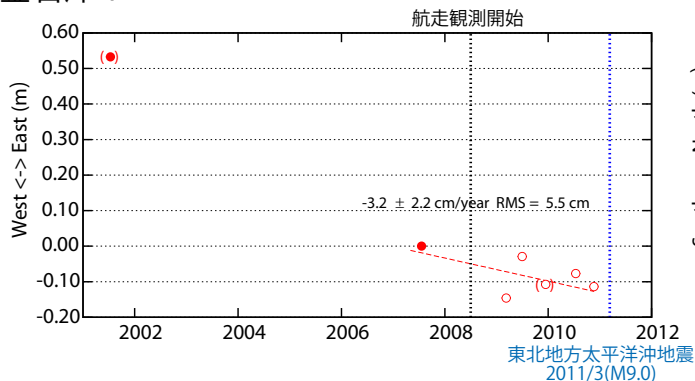
第2表 東北地方太平洋沖地震発生前までの海底の動き（ユーラシアプレート安定域固定）

下里を基準として重心推定法（松本ほか、2008）にて解析した結果に、Sengoku (1998) で得られた下里の移動速度（ 291° , 3.2cm/year ）を補正して算出した。

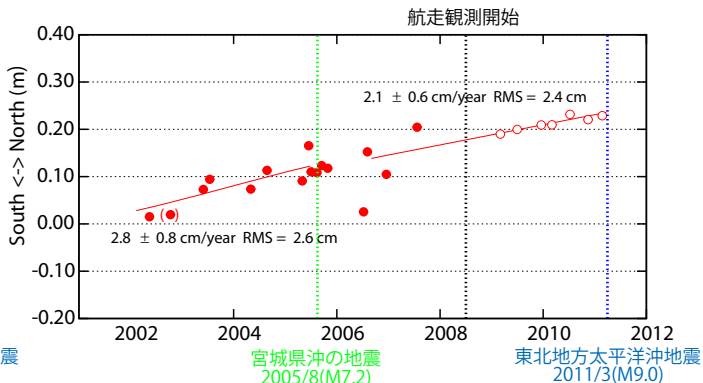
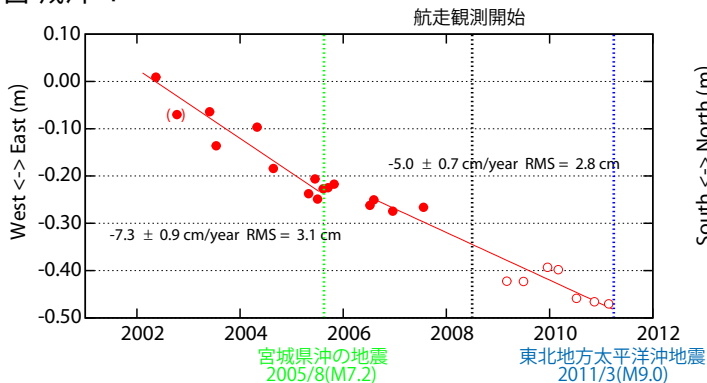
釜石沖 2



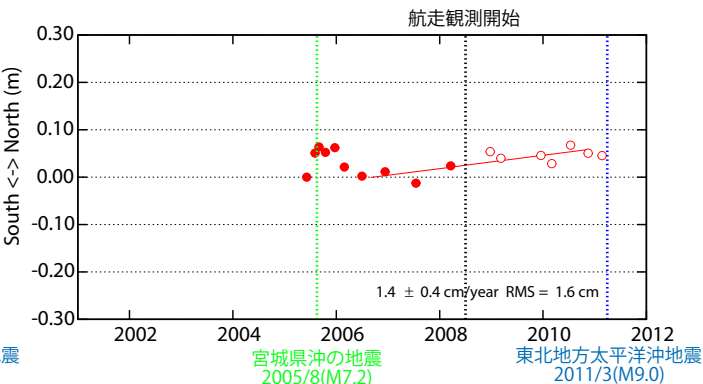
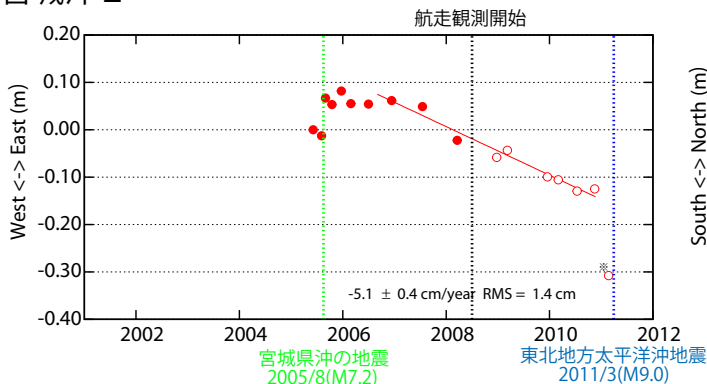
釜石沖 1



宮城沖 1



宮城沖 2



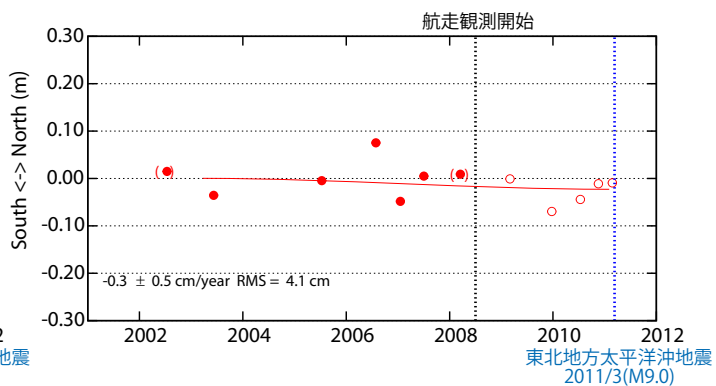
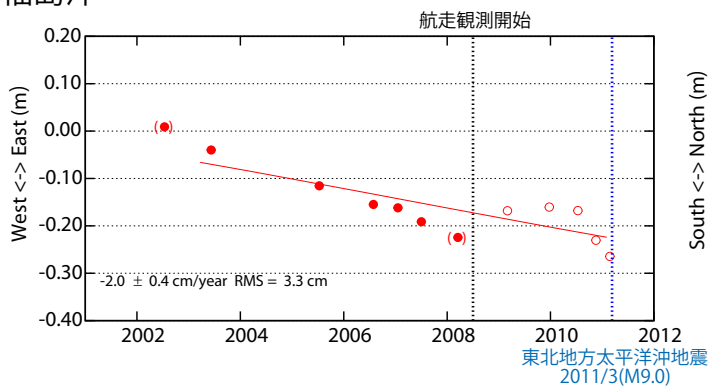
※ 2011年2月の結果のずれは、西局のデータ異常によるものであり、線形回帰には使用していない。

- 漂流観測
- 航走観測
- () 参考値 (データ数が少ない)

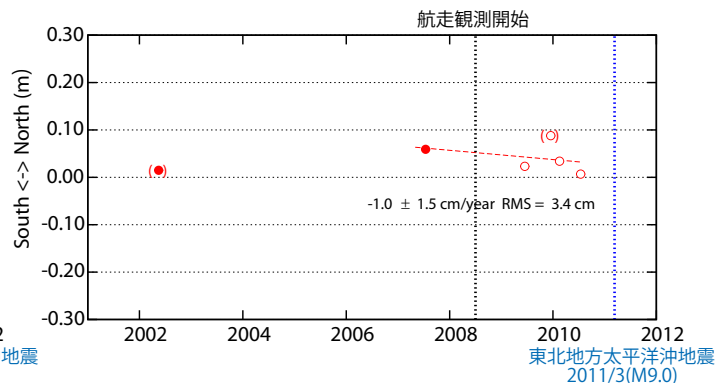
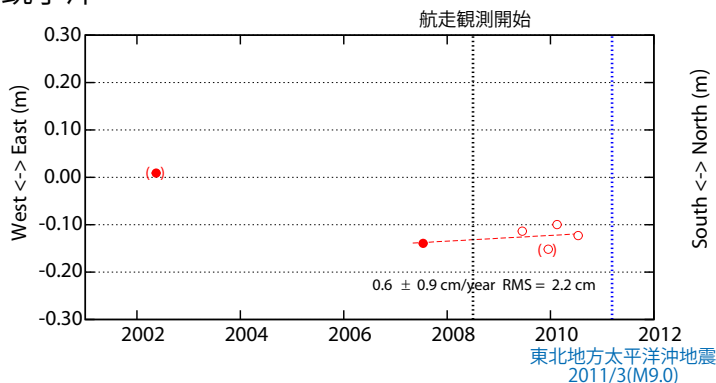
第4図 各海底基準点の局位置解の時系列 (ユーラシアプレート安定域固定)

下里を基準として重心推定法 (松本ほか, 2008) にて解析した結果に、Sengoku (1998) で得られた下里の移動速度 (291°, 3.2cm/year) を補正して算出した。

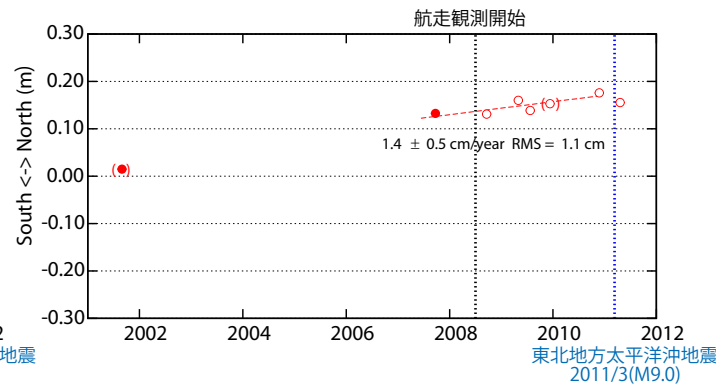
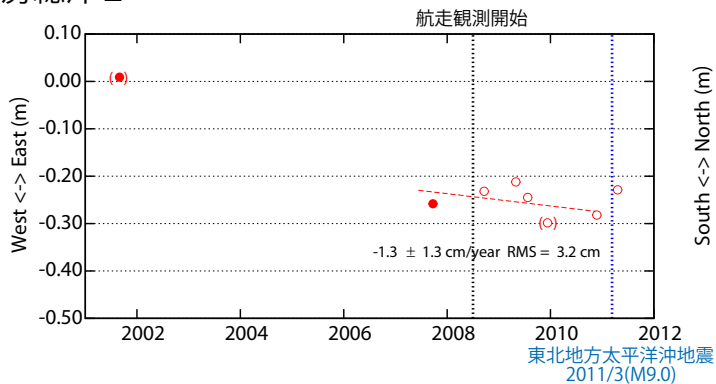
福島沖



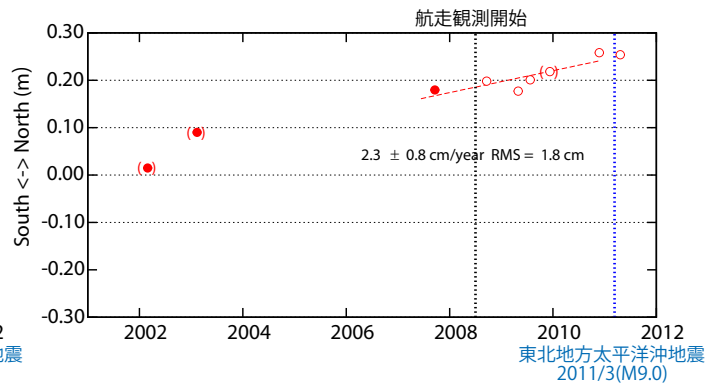
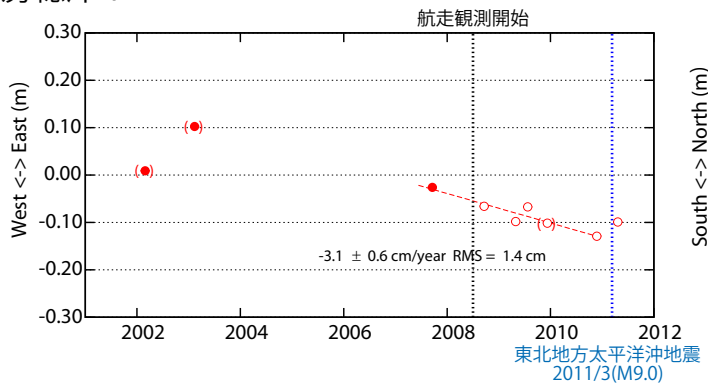
銚子沖



房総沖2



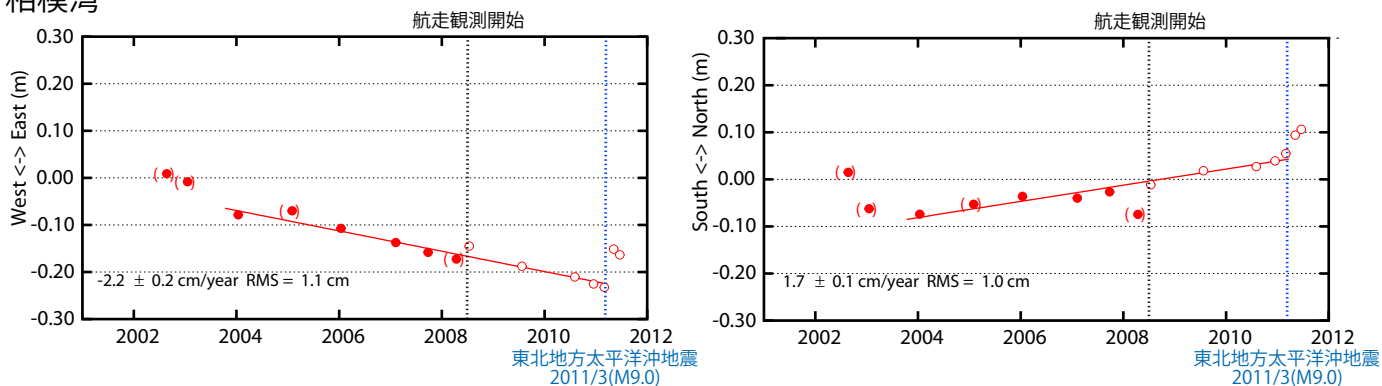
房総沖1



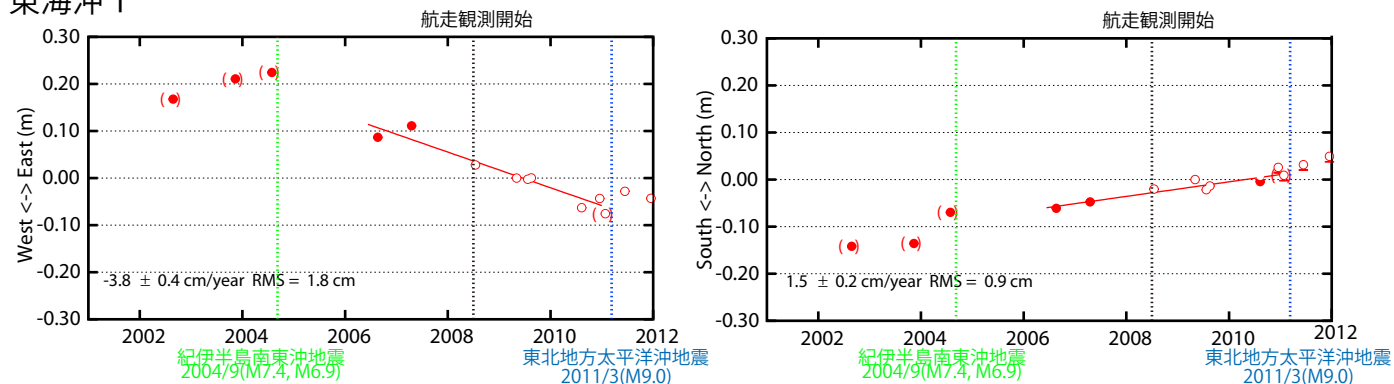
- 漂流観測
- 航走観測
- () 参考値 (データ数が少ない)

第4図 各海底基準点の局位置解の時系列(つづき)(ユーラシアプレート安定域固定)

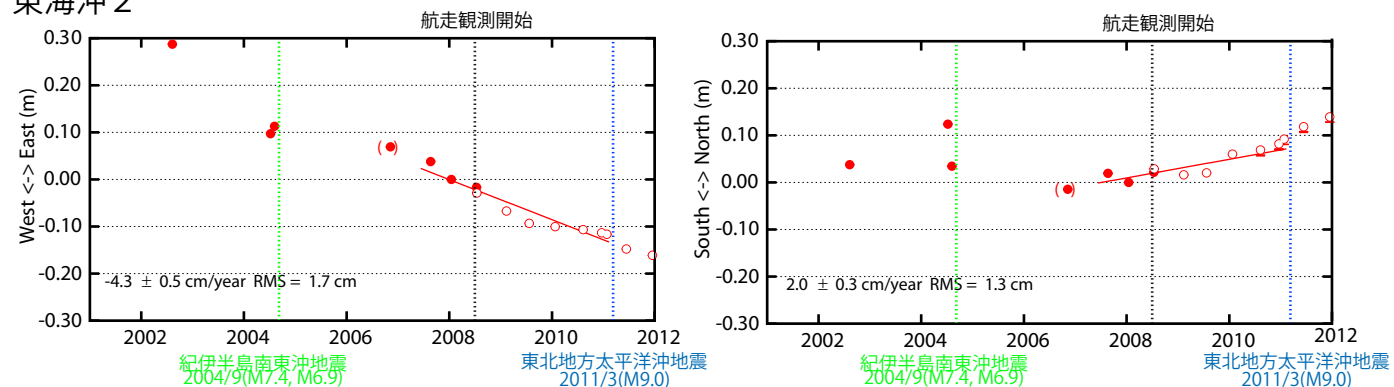
相模湾



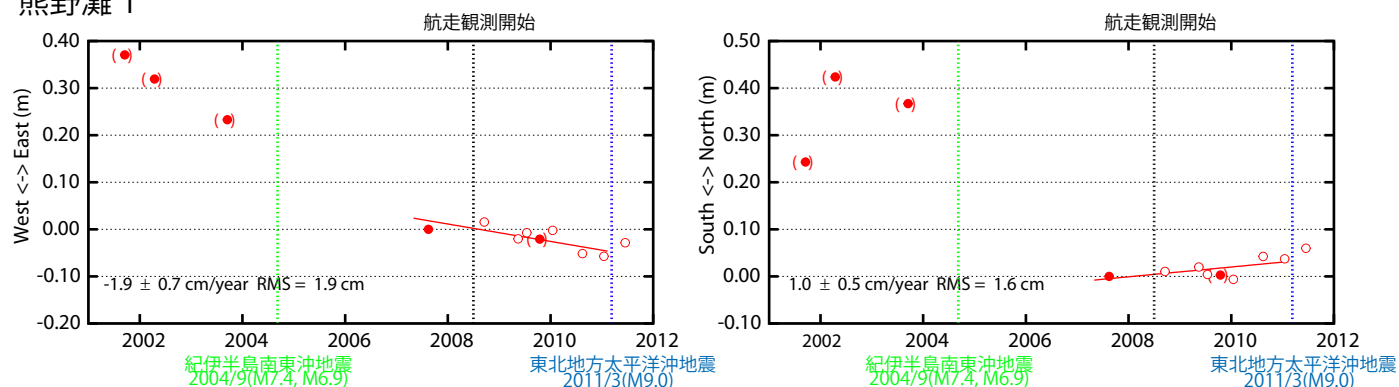
東海沖 1



東海沖 2



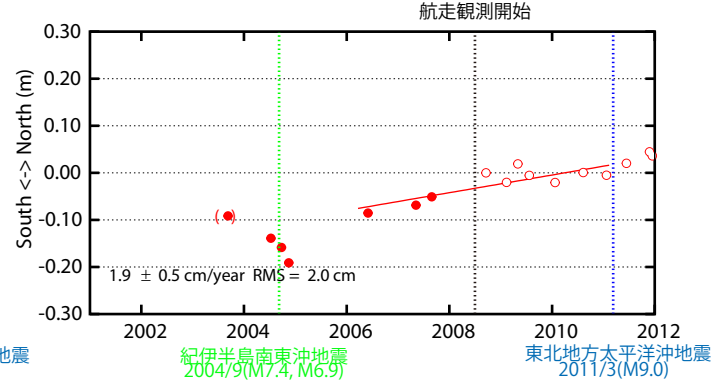
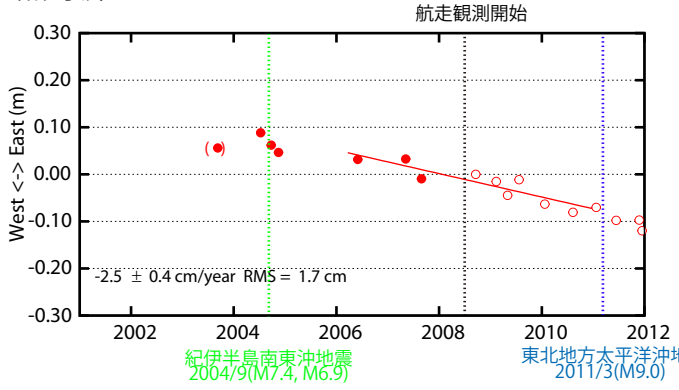
熊野灘 1



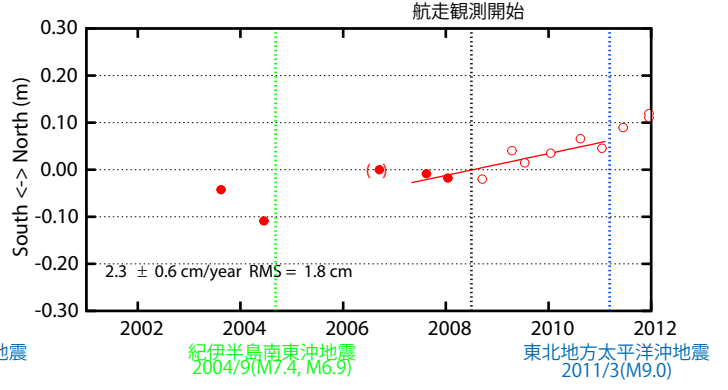
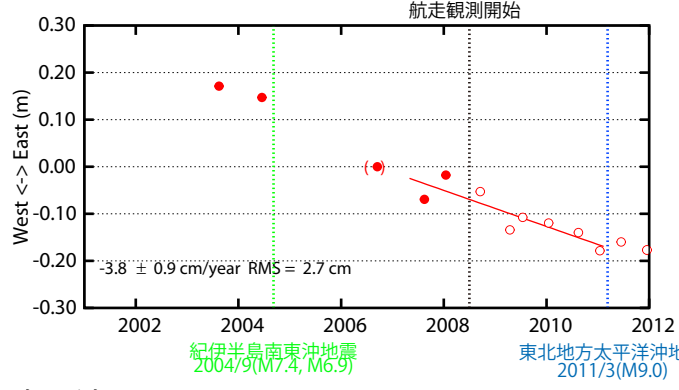
- 漂流観測
- 航走観測
- () 参考値 (データ数が少ない)

第 4 図 各海底基準点の局位置解の時系列 (つづき) (ユーラシアプレート安定域固定)

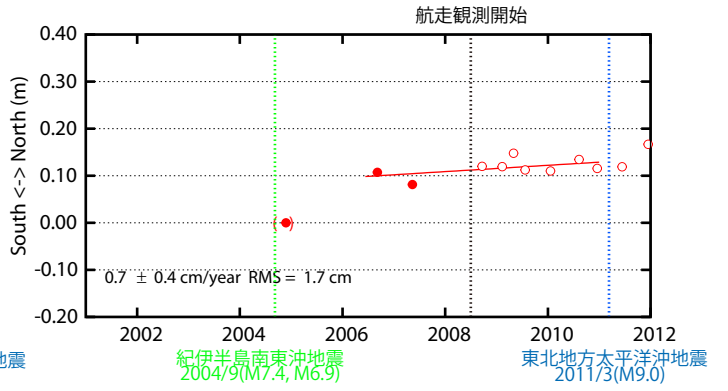
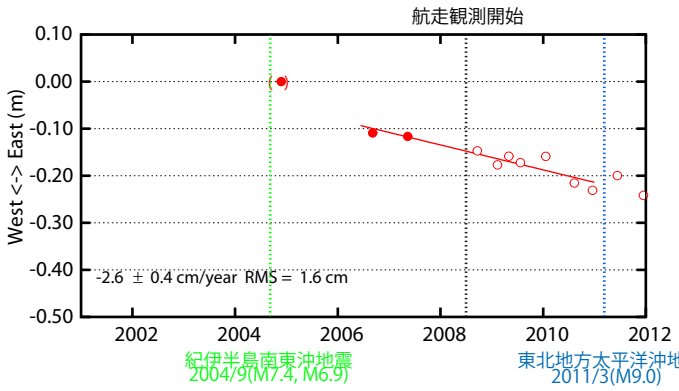
熊野灘 3



潮岬沖

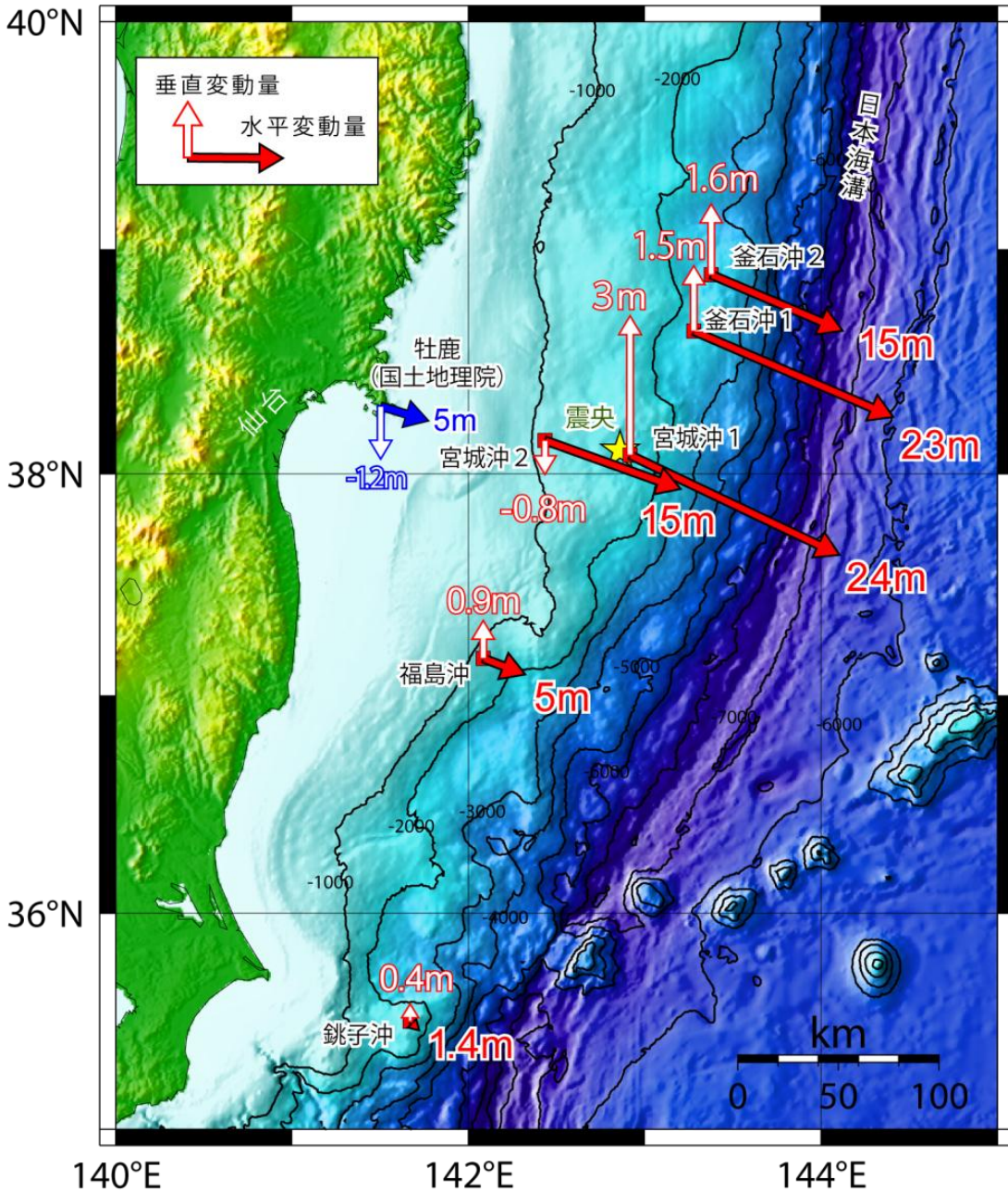


室戸沖 2



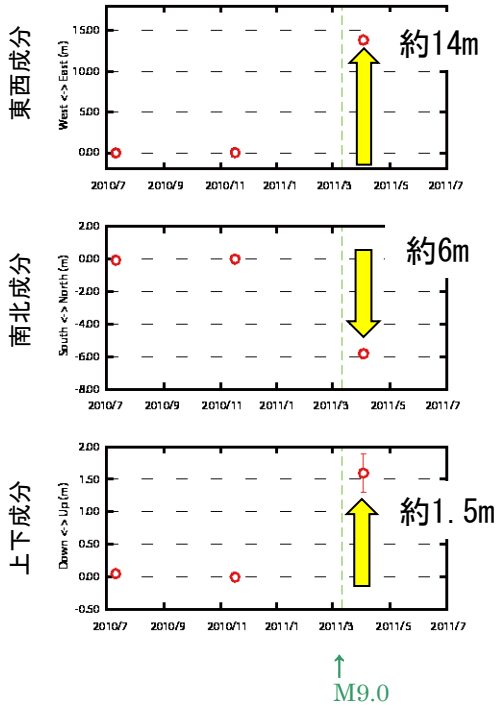
- 漂流観測
- 航走観測
- () 参考値 (データ数が少ない)

第 4 図 各海底基準点の局位置解の時系列 (つづき) (ユーラシアプレート安定域固定)

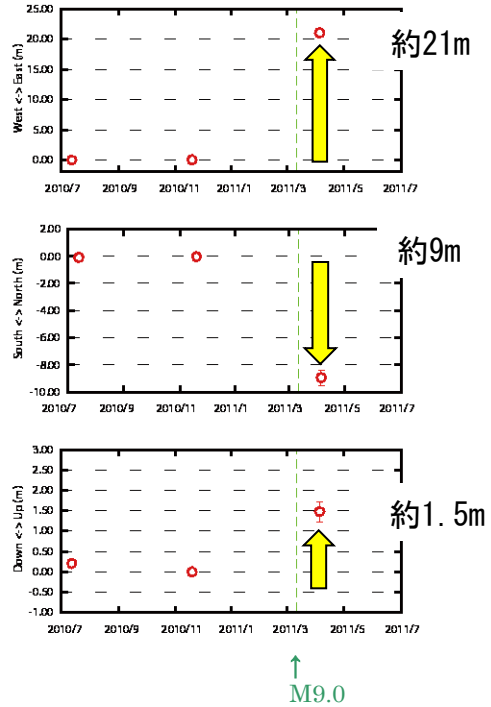


第5図 東北地方太平洋地震発生後の海底の動き (ユーラシアプレート安定域固定)

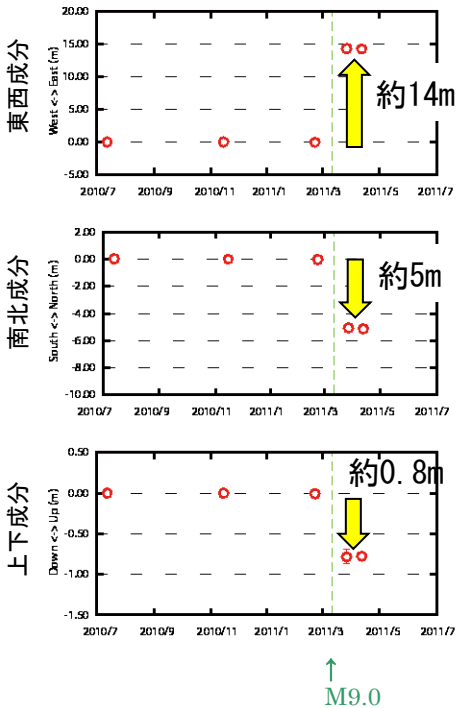
(a) 「釜石沖2」海底基準点



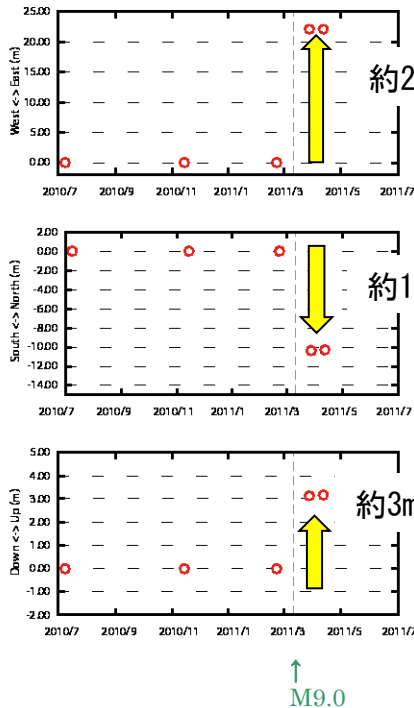
(b) 「釜石沖1」海底基準点



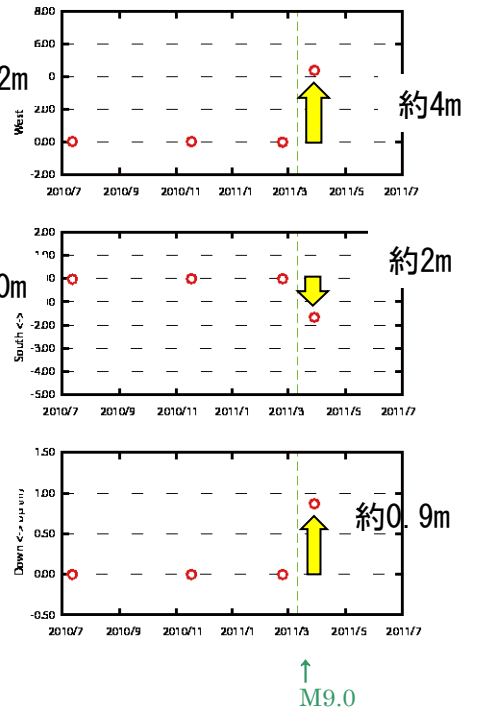
(c) 「宮城沖2」海底基準点



(d) 「宮城沖1」海底基準点

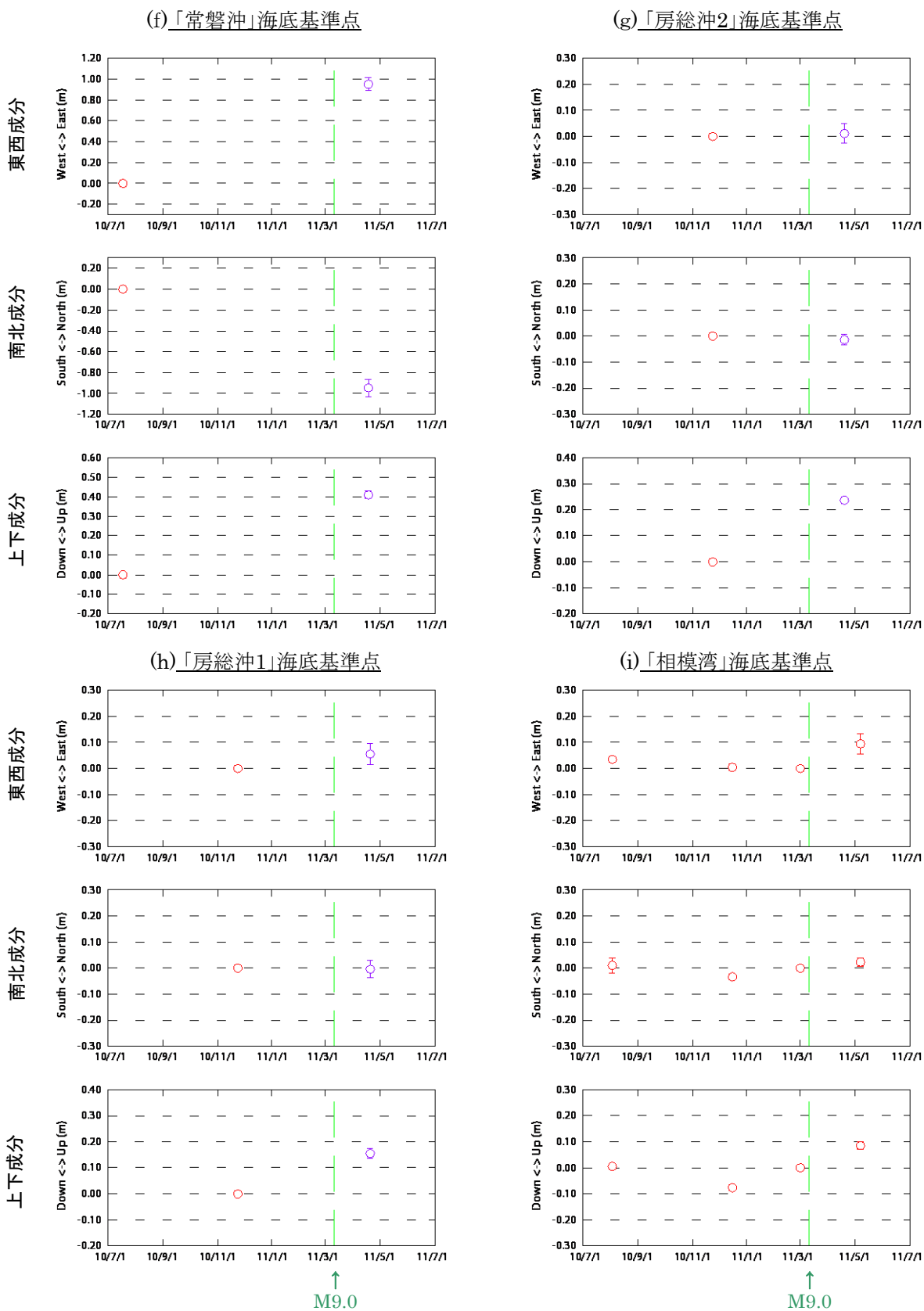


(e) 「福島沖」海底基準点



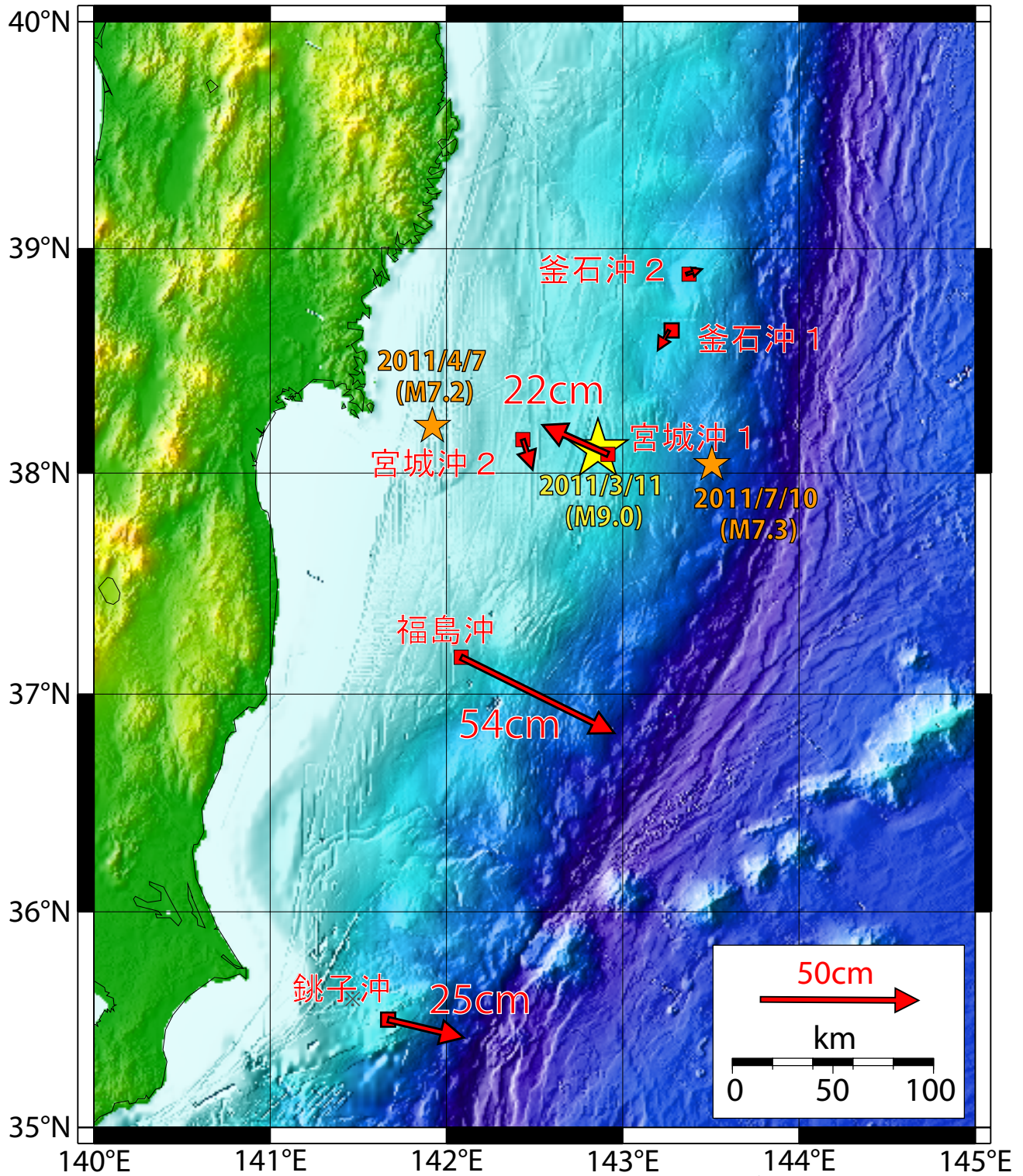
第6図 地震前後の各海底基準点の位置変化(ユーラシアプレート安定域固定)

{ ---:2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(M9.0) }



第6図 地震前後の各海底基準点の位置変化(つづき) (ユーラシアプレート安定域固定)

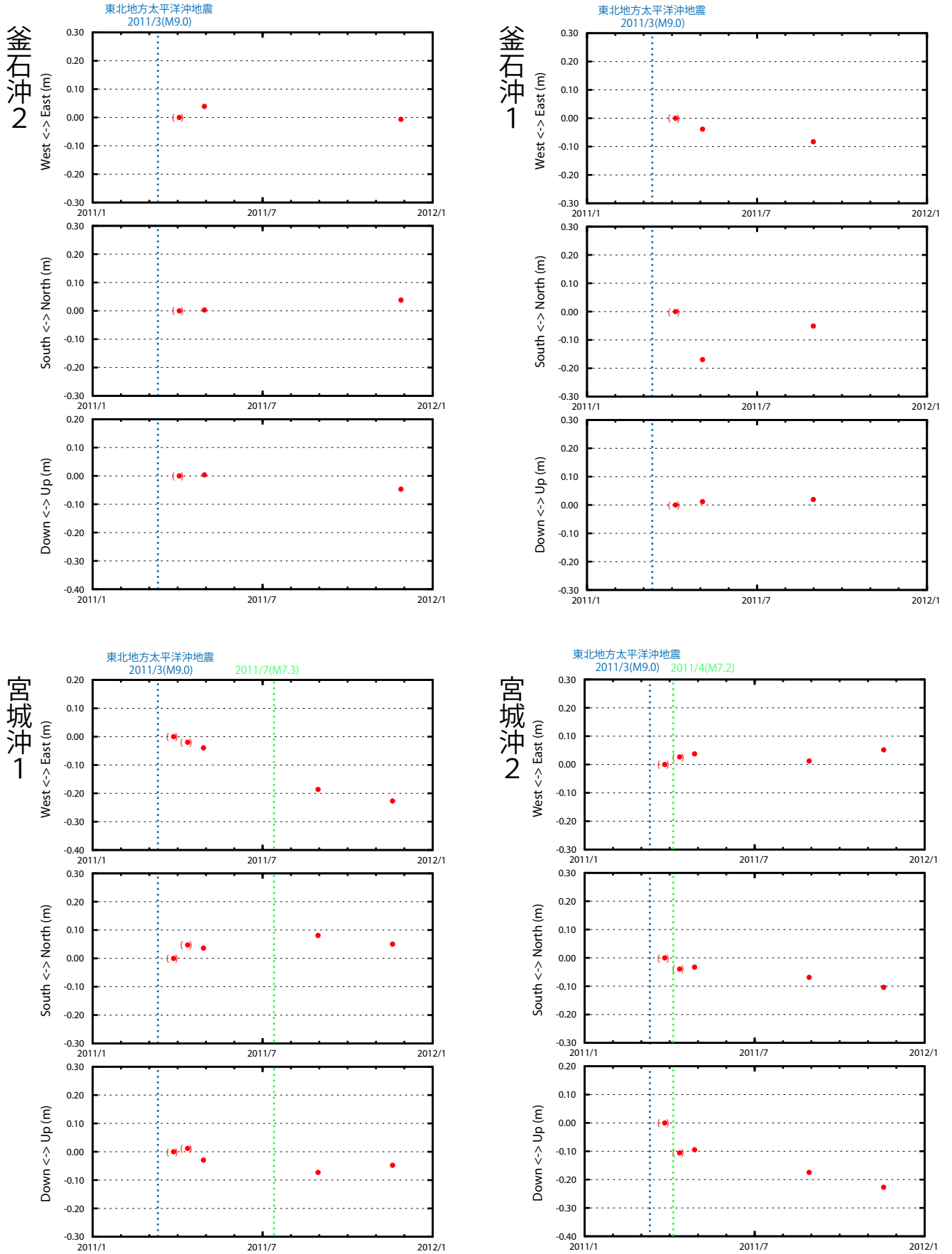
- - - : 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震 (M9.0)
- : 測量船「明洋」による航走観測
- : 測量船「拓洋」による航走観測



第7図 東北地方太平洋地震発生後の海底の動き(ユーラシアプレート安定域固定)

海底基準点	観測期間	移動量
釜石沖 2	4月 3日 ~ 11月27日	5cm
釜石沖 1	4月 5日 ~ 8月31日	7cm
宮城沖 1	3月28日 ~ 11月22日	22cm
宮城沖 2	3月27日 ~ 11月19日	10cm
福島沖	3月29日 ~ 11月24日	54cm
銚子沖	4月18日 ~ 8月27日	25cm

第3表 東北地方太平洋地震発生後の海底の動き(ユーラシアプレート安定域固定)

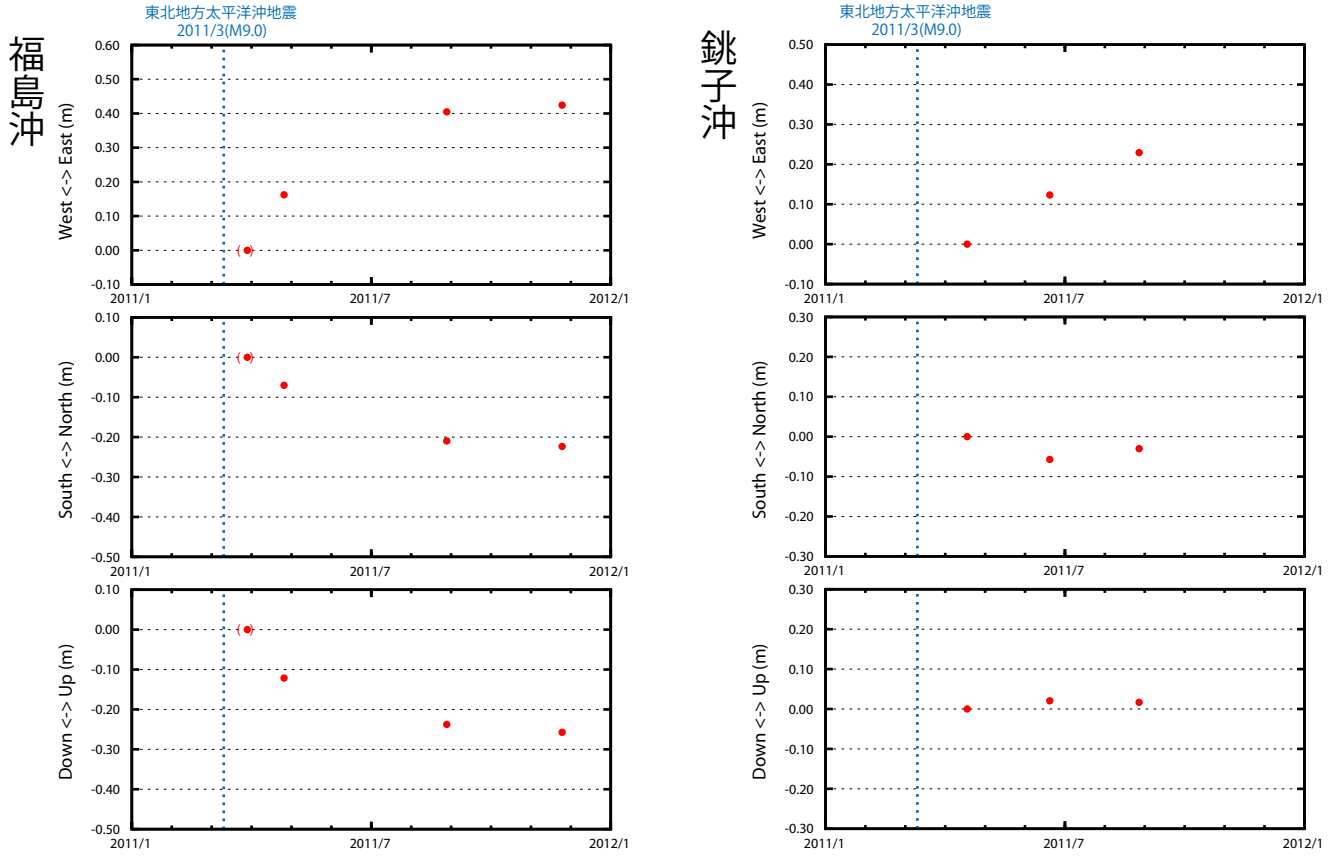


第 8 図 地震後の各海底基準点の位置変化 (ユーラシアプレート安定域固定)

下里を基準として重心推定法 (松本ほか、2008) にて解析した結果に、Sengoku (1998) で得られた

下里の移動速度 (291° , 3.2cm/year) を補正して算出した。

グラフ中の青点線は東北地方太平洋沖地震、緑点線は観測点近傍で起きた主な余震を示す。



第 8 図 地震後の各海底基準点の位置変化 (つづき) (ユーラシアプレート安定域固定)