

### 3-8 東北地方の地殻変動 Crustal Movements in the Tohoku District

国土地理院  
Geospatial Information Authority of Japan

#### [山形県沖の地震（6月18日）M6.7 GNSS]

第1図～第6図は、2019年6月18日に発生した山形県沖の地震の地殻変動に関する資料である。

第1図上段は、GNSS連続観測結果による水平変動ベクトル図である。固定局は大潟観測点（新潟県）である。第1図下段は、震源近傍の2観測点の3成分時系列グラフである。この地震に伴い、新潟山北観測点で北西に約5 cm等の地殻変動が観測された。地震後には顕著な余効変動は見られない。

第2図は、GNSSの1秒データのキネマティック解析で得られた新潟山北観測点での成分変化グラフである。6月18日22時22分頃の地震発生時に変位が生じていることが分かる。

#### [山形県沖の地震 SAR 干渉解析結果]

第3図は、「だいち2号」(ALOS-2) PALSAR-2データの干渉解析結果である。ノイズレベルながら、震央に近い陸域で衛星から遠ざかる変動が見られる。

#### [山形県沖の地震 震源断層モデル]

第4図は、電子基準点で得られた地殻変動に基づき矩形断層一様すべりを仮定して推定した震源断層モデルである。余震分布を参考に走向角を $40^\circ$ に固定した東に傾き下がる断層面を仮定して各パラメータを推定した。計算の結果、北東-南西走向で東に低角で傾き下がる断層面上における逆断層運動が求まった。推定された断層面の水平位置は、震源分布と整合しており、断層面上端は深さ約8 kmに位置する。モーメントマグニチュードは6.36（剛性率30 GPaを仮定）となった。

第5図は、第4図と同様の手法を用い、走向角を $220^\circ$ に固定した西に傾き下がる断層面を仮定して推定した震源断層モデルである。第4図のモデルと同様に、震源分布と整合する位置に断層面が推定され、地殻変動の観測値も同程度に説明できていることが分かる。地殻変動データのみでは、両者のモデルの優劣を判断することは難しい。

第6図は、震源断層モデルを用いてだいち2号のSAR干渉画像での位相変化量を計算し、観測結果と比較したものである。震央に近い陸域での衛星から遠ざかる向きの位相変化が再現されている。

#### [GNSS 東北地方太平洋沖地震後の変動ベクトル及び等変動量線図]

第7図～第23図は、東北地方太平洋沖地震後における水平・上下の地殻変動について、全期間の累積及び最近3か月間の変動を、福江観測点を固定局として示したものである。

第7図～第9図に示す地震後の累積の図には、2011年4月7日宮城県沖の地震（M7.2、最大震度6強、深さ約66 km、逆断層・スラブ内地震、地殻変動GNSSで水平約3 cm西南西と約5 cmの隆起）、2011年4月11日福島県浜通りの地震（M7.0、最大震度6弱、深さ約6 km、正断層、地殻変動GNSSで約30 cm水平と約50 cmの沈降、SARで約2 m）、2011年6月23日岩手県沖の地震（M6.9、

最大震度 5 弱，地殻変動東方向に約 1.5 cm)，2011 年 7 月 10 日三陸沖の地震（M7.3，深さ 34 km，最大震度 4，地殻変動西方向に約 5 mm，左横ずれ），2011 年 9 月 17 日岩手県沖の地震（M6.6，最大震度 4，プレート境界逆断層，地殻変動東方向に数 mm）等の影響が震源近傍の観測点で見られる。

第 7 図は地震後の全期間における水平変動の累積を示している。東日本全体で東北地方太平洋沖地震の震源域に向かう余効変動が観測されている。最大の変動量は，岩手川崎 A 観測点における約 149 cm である。

第 8 図～第 9 図は，地震後の全期間における上下変動の累積を，それぞれ，変動ベクトル図及び等値線図で示したものである。岩手県三陸沿岸と奥羽脊梁山脈付近で沈降が見られる一方，宮城県から千葉県の太平洋沿岸では隆起傾向が見られる。M 牡鹿観測点の約 62 cm の隆起のうちの約 5 cm は，2011 年 4 月 7 日の宮城県沖の地震によるものである。

第 10 図の最近 3 か月間の水平ベクトルには，東日本全体で東北地方太平洋沖地震の震源域に向かう変動が見られ，余効変動が継続していることが分かる。この期間における岩手川崎 A 観測点の変動量は 1.0 cm となっている。

第 11 図に最近 3 か月間の上下変動を示す。全体的に隆起の傾向が見られるが，余効変動の上下成分は小さくなってきており，3 か月間の変動ではノイズレベルとほぼ同等となっている。

#### [GNSS 連続観測 東北地方太平洋沖地震後]

第 12 図～第 17 図は，東北地方太平洋沖地震後の東日本における GNSS 連続観測時系列である。第 12 図の地図に示した太平洋岸の観測点 10 点と，その西側の観測点 10 点の合計 20 観測点について，第 13 図以降に東北地方太平洋沖地震後の期間の時系列を示す。各成分の縦軸は，本震直前の値をゼロとしており，地震時及び地震後の累積の変動量を表している。

第 13 図～第 17 図の各観測点の時系列では，東北地方太平洋沖地震の余効変動が減衰しながらも継続している様子が見られる。また，第 12 図の地図に示した各地震の影響が，震源近傍の観測点で見られる。

第 13 図～第 15 図上段に示す太平洋岸の 10 観測点では，(2) 岩泉 2 観測点と (3) 山田観測点を除き，地震直後から隆起が継続している。なお，岩泉 2 観測点及び山田観測点についても，2013 年以降はそれまでの沈降傾向が反転し，隆起となっている。

第 15 図下段～第 17 図の西側の観測点 10 点では，地震直後からの沈降，又は隆起が減衰しながらも継続している。

#### [GNSS 東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動速度]

第 18 図～第 23 図は，三隅観測点に対する宮古，山田，矢本，相馬 1，銚子，皆瀬観測点の変位と変動速度を時系列で示したものである。どの観測点においても，水平変動速度は徐々に減衰しつつあるが，地震前の速度には戻っておらず，余効変動が継続していることが分かる。上下変動速度は，銚子観測点では元の速度に戻りつつあるが，そのほかの宮古，山田，矢本，相馬 1 観測点は隆起傾向，皆瀬観測点は沈降傾向が続いている。

第 18 図の三隅－宮古基線及び第 19 図の三隅－山田基線の東西成分の速度に 2015 年初頭に見られる一時的な変化は，2015 年 2 月 17 日に発生した三陸沖の地震及び 2015 年 5 月 13 日に発生した宮城県沖の地震によるものである。

第 21 図の三隅－相馬 1 基線の東西成分・南北成分の速度に 2016 年末頃に見られる一時的な変化

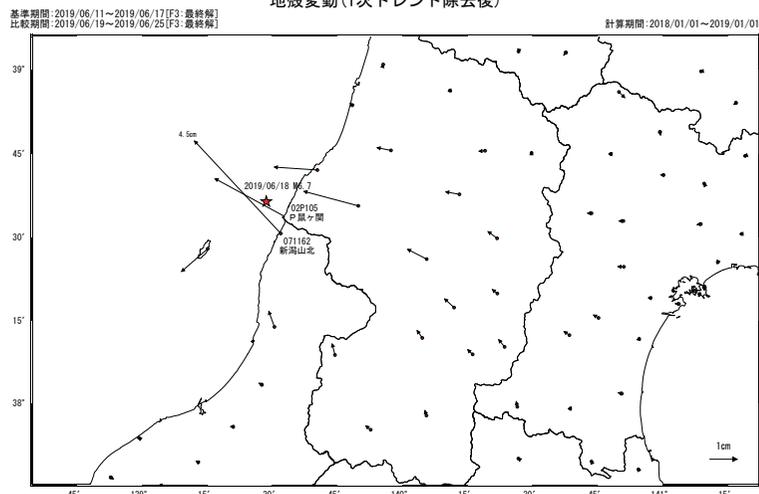
は、2016年11月22日に発生した福島県沖の地震によるものである。

第22図に示される三隅-銚子基線の変化のうち、南北成分の速度に2011年秋、2014年初頭及び2018年夏に見られる一時的な変化は、それぞれ2011年10月下旬頃から11月上旬頃まで、2014年1月上旬頃及び2018年6月頃に発生したSSEに伴う地殻変動の影響、東西成分速度の2012年3月頃に見られる一時的な変化は、2012年3月14日に発生した千葉県東方沖の地震(M6.1)によるものである。

### 山形県沖の地震(6月18日 M6.7)前後の観測データ

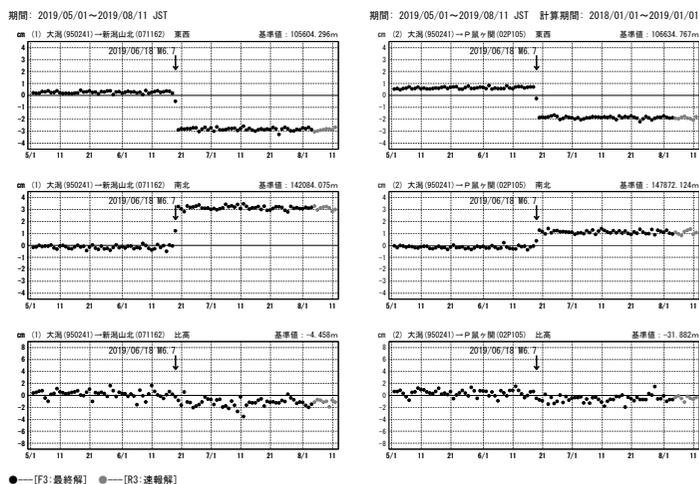
この地震に伴い地殻変動が観測された。

地殻変動(1次トレンド除去後)



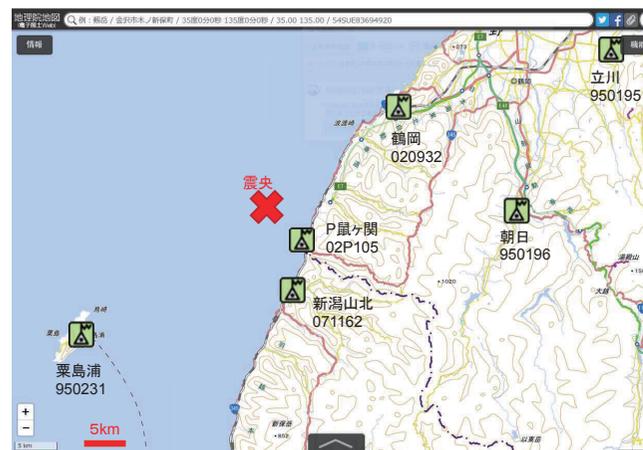
☆ 固定局: 大湯 (950241) ☆ 震央

#### 1次トレンド除去後グラフ

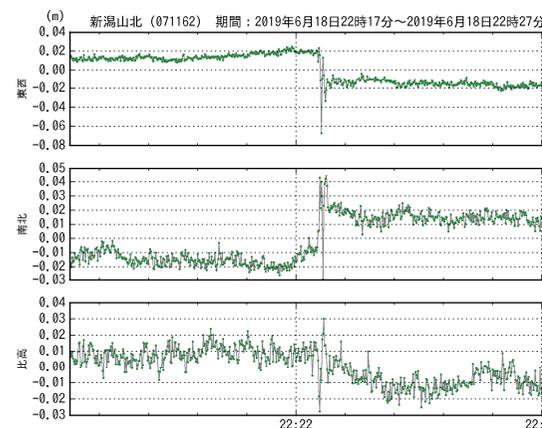


●—[F3:最終解] ●—[R3:速報解]

### 電子基準点 観測点配置図



### 基線変化グラフ 新潟山北 (071162)



令和元年6月18日 22時22分頃 (JST) 地震発生

第1図 山形県沖の地震(2019年6月18日, M6.7)に伴う地殻変動: 水平変動・3成分時系列グラフ (1/2)

Fig. 1 Crustal deformation associated with 2019 Yamagata Earthquake (2019/6/18, M6.7): horizontal displacement and 3 components time series.(1/2)

第2図 山形県沖の地震(2019年6月18日, M6.7)に伴う地殻変動: 水平変動・3成分時系列グラフ (2/2)

Fig. 2 Crustal deformation associated with 2019 Yamagata Earthquake (2019/6/18, M6.7): horizontal displacement and 3 components time series.(2/2)

山形県沖の地震 (6月18日 M6.7)  
「だいち2号」による SAR 干渉解析結果

ノイズレベルながら衛星から遠ざかる変動が見られます。

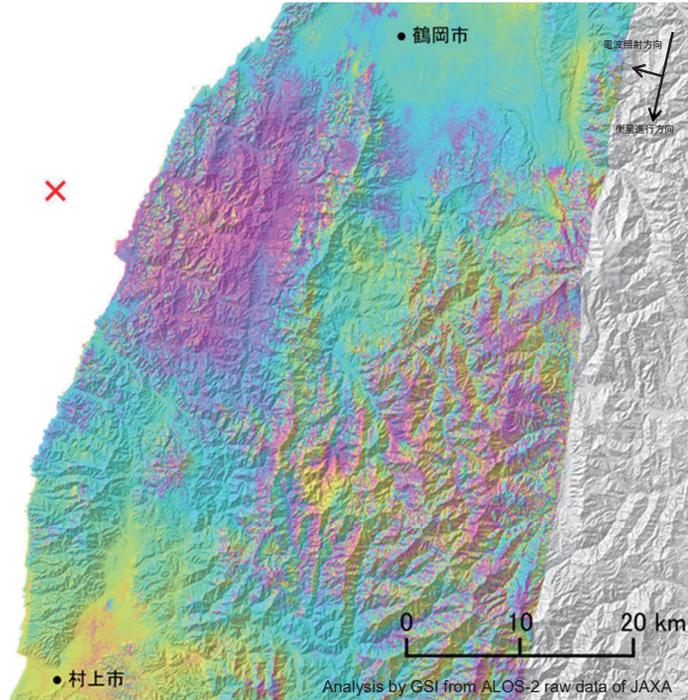
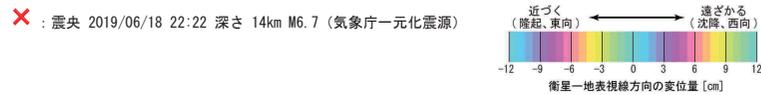


図1 2015年11月28日~2019年6月22日11:35 衛星進行方向 南行、電波照射方向 右、入射角 50.7°



本成果は、地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの活動を通して得られたものである。

第3図 山形県沖の地震 SAR干渉解析結果  
Fig. 3 Synthetic Aperture Radar (SAR) interferograms result of 2019 Yamagata Earthquake.

山形県沖の地震の震源断層モデル

GNSS で観測された地殻変動を基に推定された震源断層モデル (矩形断層一様滑り) の特徴は以下の通りである。

- 1) 北東-南西走向で東に傾き下がる低角の断層面上における逆断層運動が推定される。
- 2) 推定された断層面の水平位置は、震源分布と整合している。
- 3) 上端は深さ約 8 km (断層上端) に位置する。
- 4) 推定されたモーメントマグニチュードは 6.4 である。

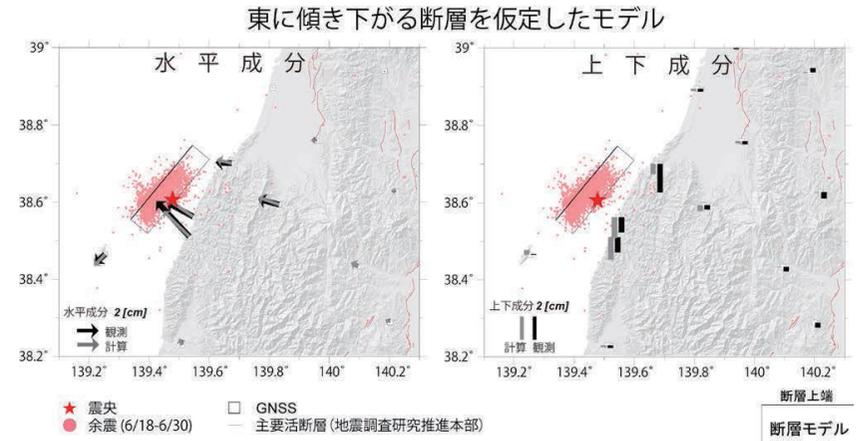


図1 東に傾き下がる断層面を仮定した場合の震源断層モデル。  
(左) 水平成分、(右) 上下成分。★印は震央、点は余震分布 (気象庁一元化震源を使用)。  
矩形は震源断層モデルを地表に投影した位置で、太い実線が断層上端。

表1 東に傾き下がる断層面を仮定した場合の震源断層モデルパラメータ

経度 [°]	緯度 [°]	上端深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	滑り角 [°]	滑り量 [m]	M <sub>w</sub>
139.339 (0.028)	38.556 (0.018)	7.6 (2.2)	27.7 (4.9)	7.4 (2.3)	40	32 (7.4)	95 (5.2)	0.7 (0.3)	6.36

※1 矩形断層 1 枚での推定結果。位置は断層の左上端を示す。( ) 内は誤差を示す (1σ)。

※2 断層走向は震源分布を基に固定

※3 剛性率は 30GPa を仮定

第4図 山形県沖の地震 震源断層モデル (1/2)  
Fig. 4 Rectangular fault model of 2019 Yamagata Earthquake.(1/3)

西に傾き下がる断層面を仮定すると、高角の断層面が推定される。

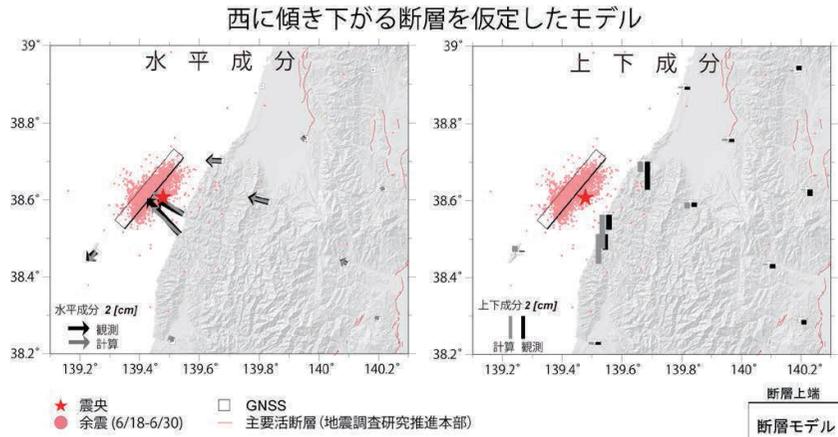


図2 西に傾き下がる断層面を仮定した場合の震源断層モデル。

(左) 水平成分、(右) 上下成分。★印は震央、点は余震分布(気象庁一元化震源を使用)。  
 矩形は震源断層モデルを地表に投影した位置で、太い実線が断層上端。

表2 西に傾き下がる断層面を仮定した場合の震源断層モデルパラメータ

経度 [°]	緯度 [°]	上端深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	滑り角 [°]	滑り量 [m]	$M_w$
139.548	38.710	8.4	26.7	9.1	220	65	100	0.6	6.36
(0.035)	(0.021)	(2.0)	(5.3)	(2.5)		(7.4)	(8.0)	(0.3)	

※1 矩形断層1枚での推定結果。位置は断層の左上端を示す。( )内は誤差を示す(1 $\sigma$ )。

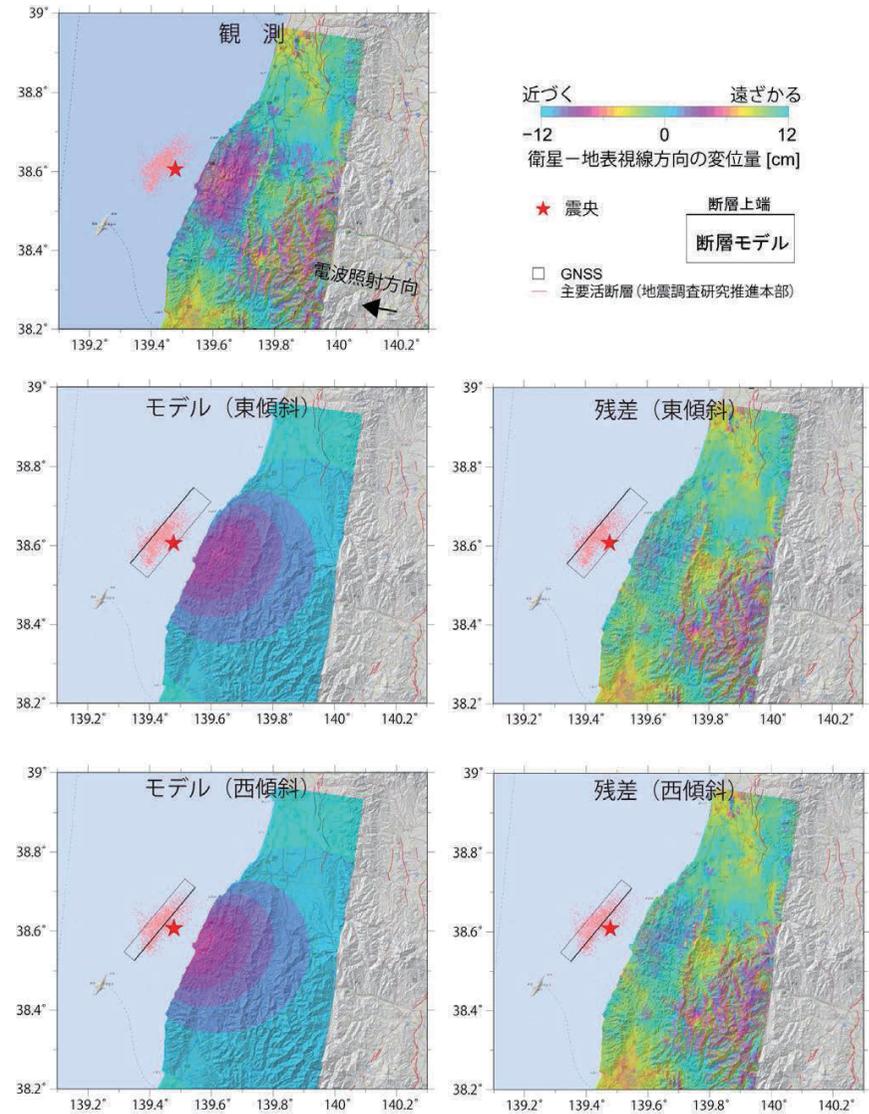
※2 断層走向は震源分布を基に固定

※3 剛性率は30GPaを仮定

第5図 山形県沖の地震 震源断層モデル(2/2)

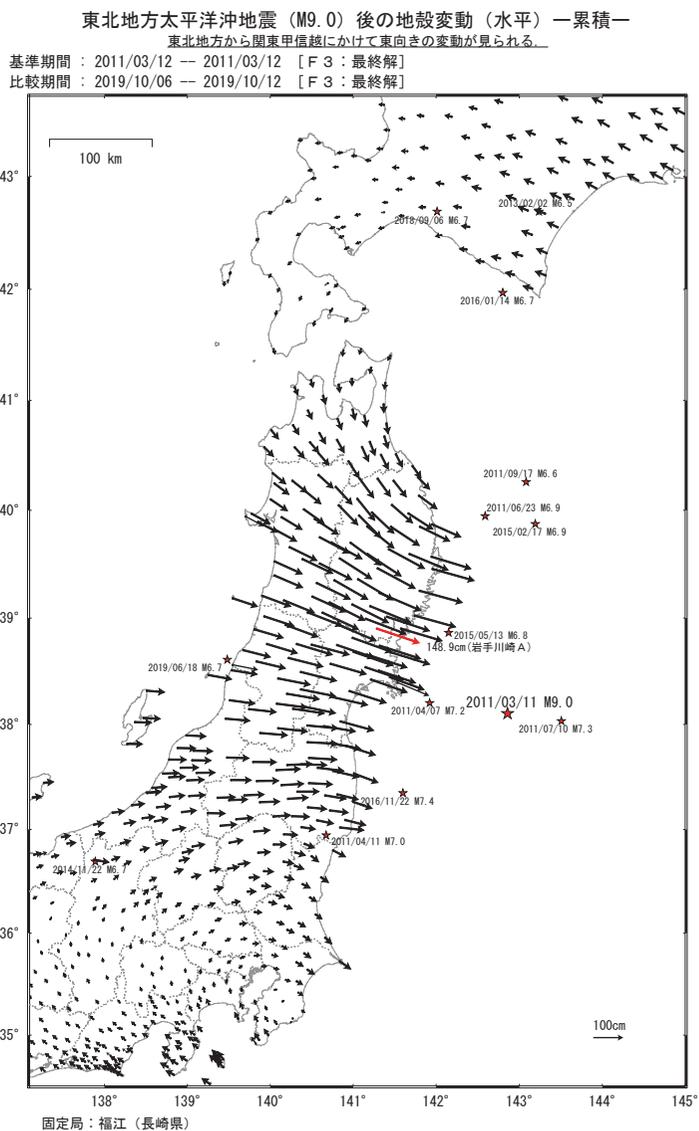
Fig. 5 Rectangular fault model of 2019 Yamagata Earthquake.(2/3)

だいち2号 SAR 干渉解析結果との比較

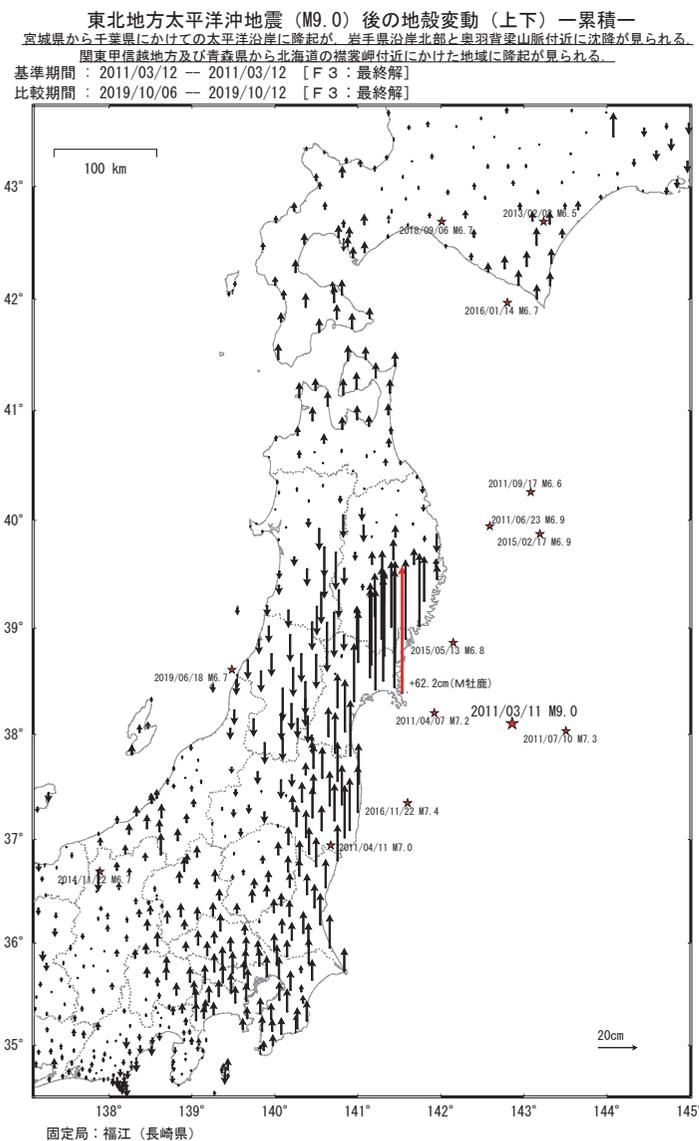


第6図 山形県沖の地震 震源断層モデルとSAR干渉解析結果との比較

Fig. 6 Rectangular fault model of 2019 Yamagata Earthquake.(3/3)

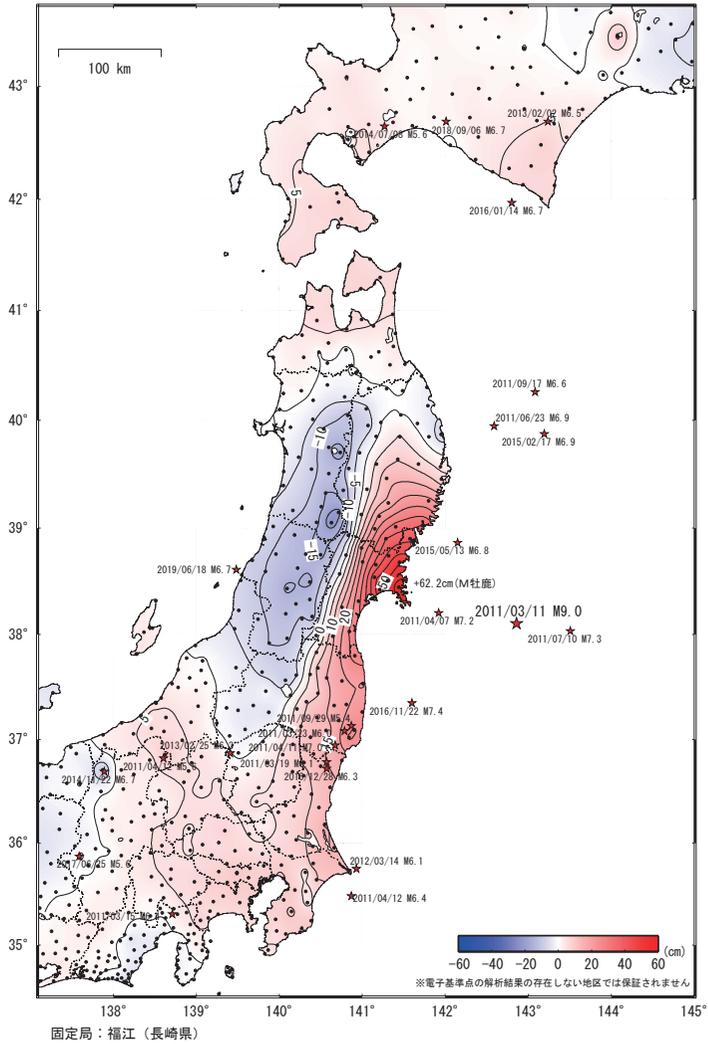


第7図 2011年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動 (水平)  
 Fig. 7 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (horizontal).



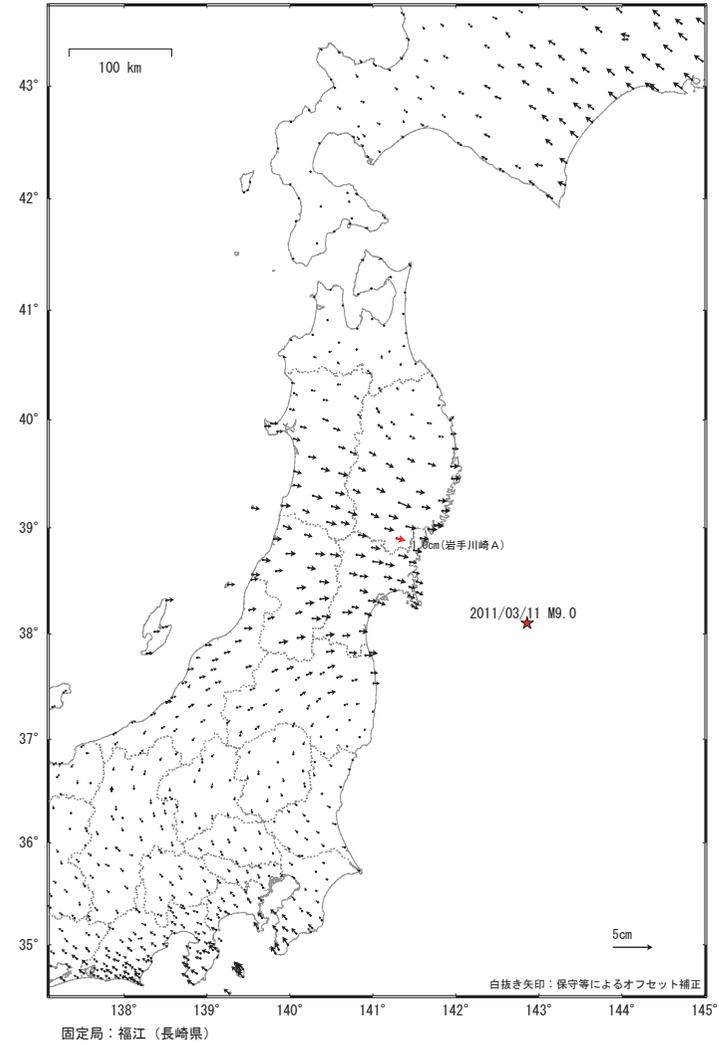
第8図 2011年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動 (上下)  
 Fig. 8 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical).

東北地方太平洋沖地震 (M9.0) 後の地殻変動 (上下) - 累積 -  
 宮城県から千葉県にかけての太平洋沿岸に隆起が、岩手県沿岸北部と奥羽脊梁山脈付近に沈降が見られる。  
 関東甲信越地方及び青森県から北海道の襟裳岬付近にかけての地域に隆起が見られる。  
 基準期間：2011/03/12 - 2011/03/12 [F3：最終解]  
 比較期間：2019/10/06 - 2019/10/12 [F3：最終解]

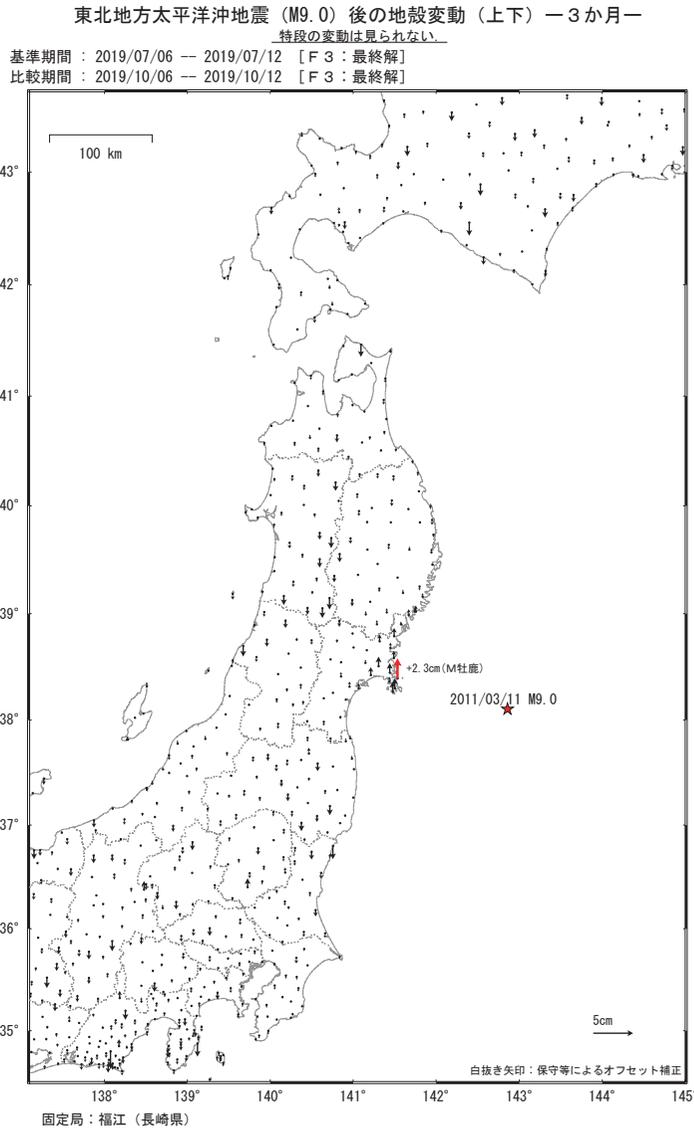


第9図 2011年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動 (上下, コンター)  
 Fig. 9 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical, contour).

東北地方太平洋沖地震 (M9.0) 後の地殻変動 (水平) - 3か月 -  
 東北地方を中心に東向きの変動が見られる。  
 基準期間：2019/07/06 - 2019/07/12 [F3：最終解]  
 比較期間：2019/10/06 - 2019/10/12 [F3：最終解]

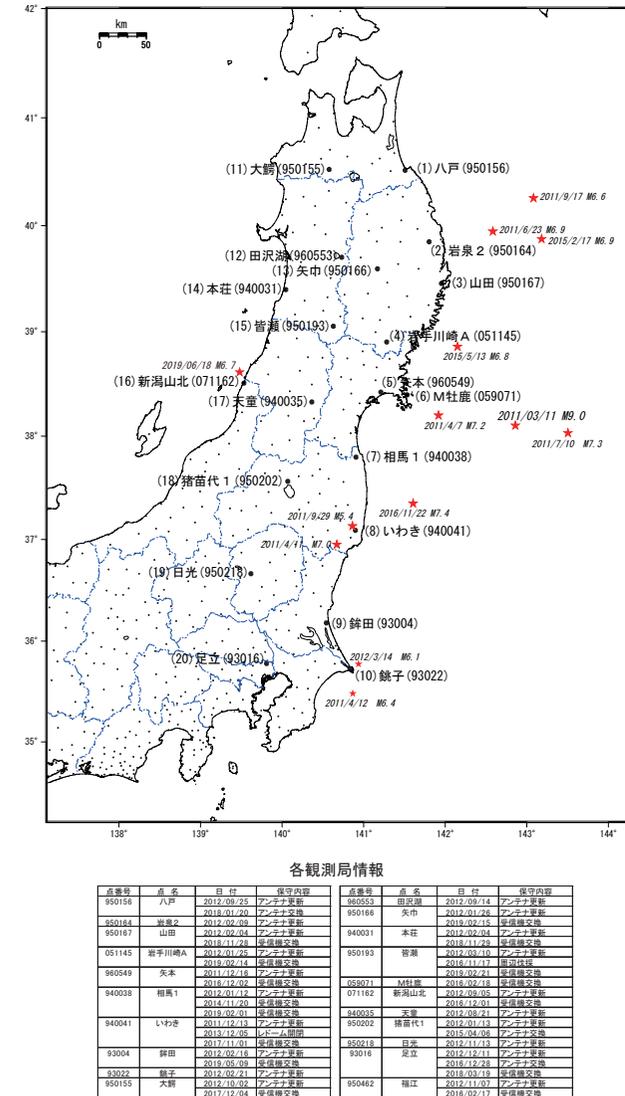


第10図 2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動 (最近3か月, 水平)  
 Fig. 10 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake for three months (horizontal).



第11図 2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動 (最近3か月, 上下)  
 Fig. 11 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake for three months (vertical).

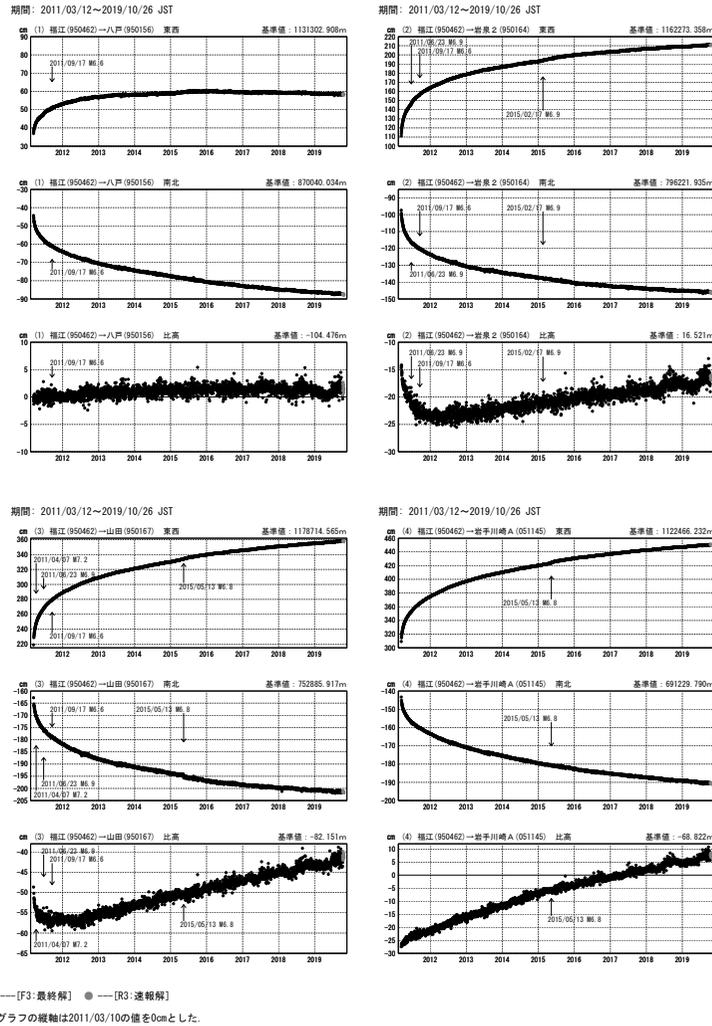
平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動 (時系列) 配点図



第12図 東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動 (時系列) 配点図及び保守状況  
 Fig. 12 Time series of crustal deformation before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Site location map and history of maintenance).

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（1）

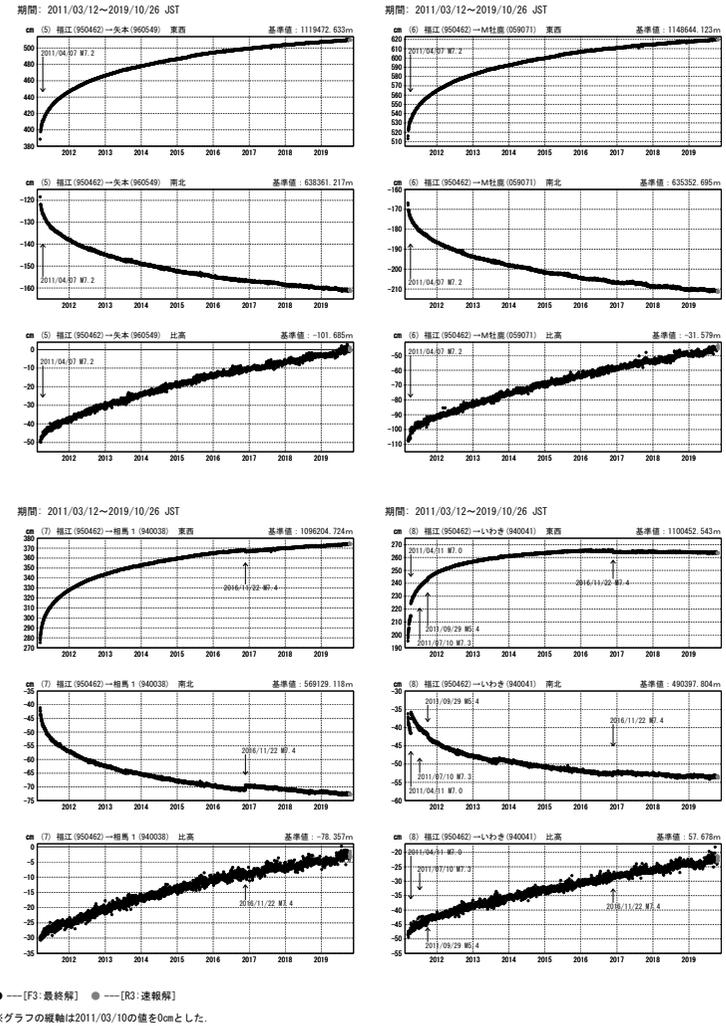
成分変化グラフ



第13図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（1/5）  
Fig. 13 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (1/5).

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（2）

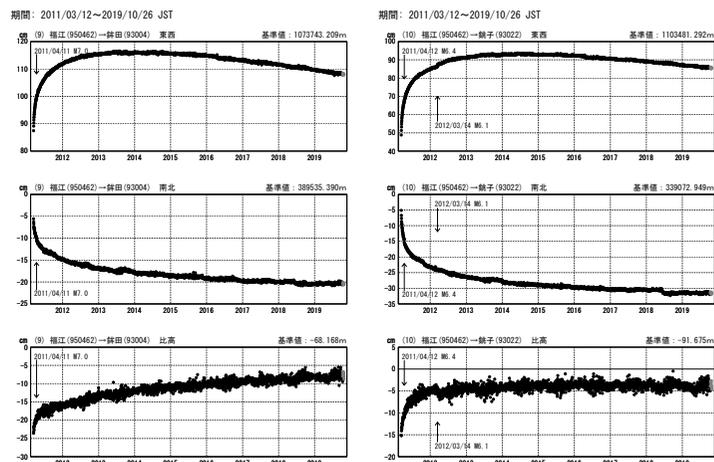
成分変化グラフ



第14図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（2/5）  
Fig. 14 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (2/5).

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（3）

成分変化グラフ

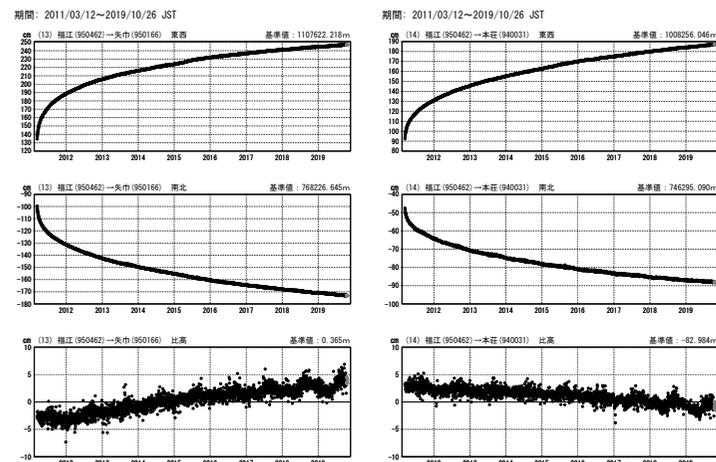


●—[F3:最終解] ●—[R3:速報解]  
※グラフの縦軸は2011/03/10の値を0cmとした。

第15図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（3/5）  
Fig. 15 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (3/5).

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（4）

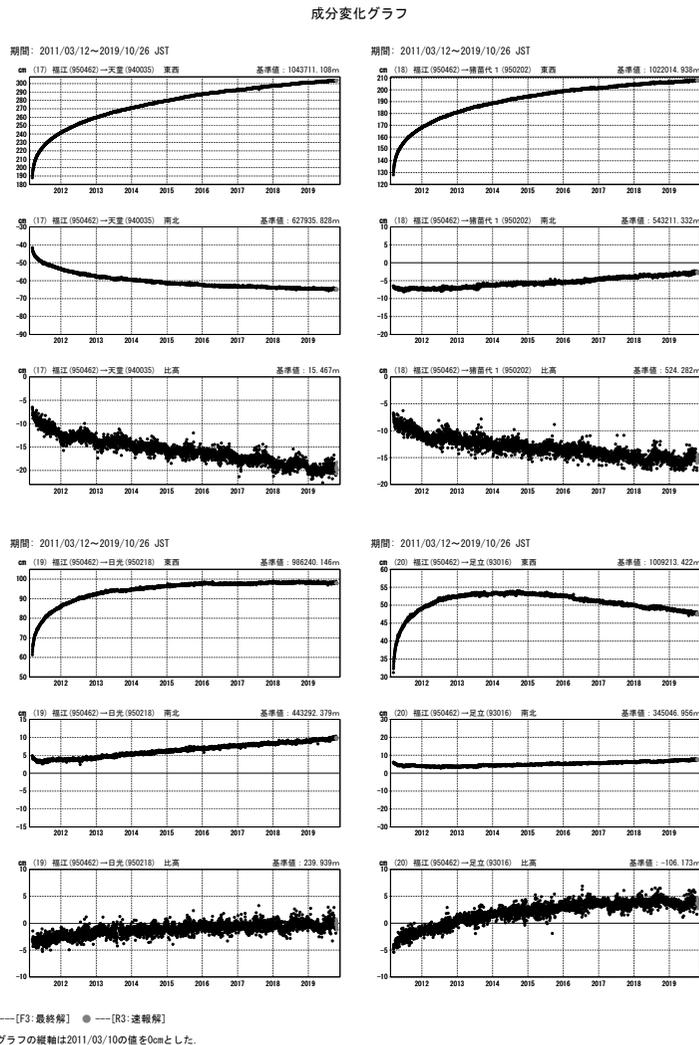
成分変化グラフ



●—[F3:最終解] ●—[R3:速報解]  
※グラフの縦軸は2011/03/10の値を0cmとした。

第16図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（4/5）  
Fig. 16 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (4/5).

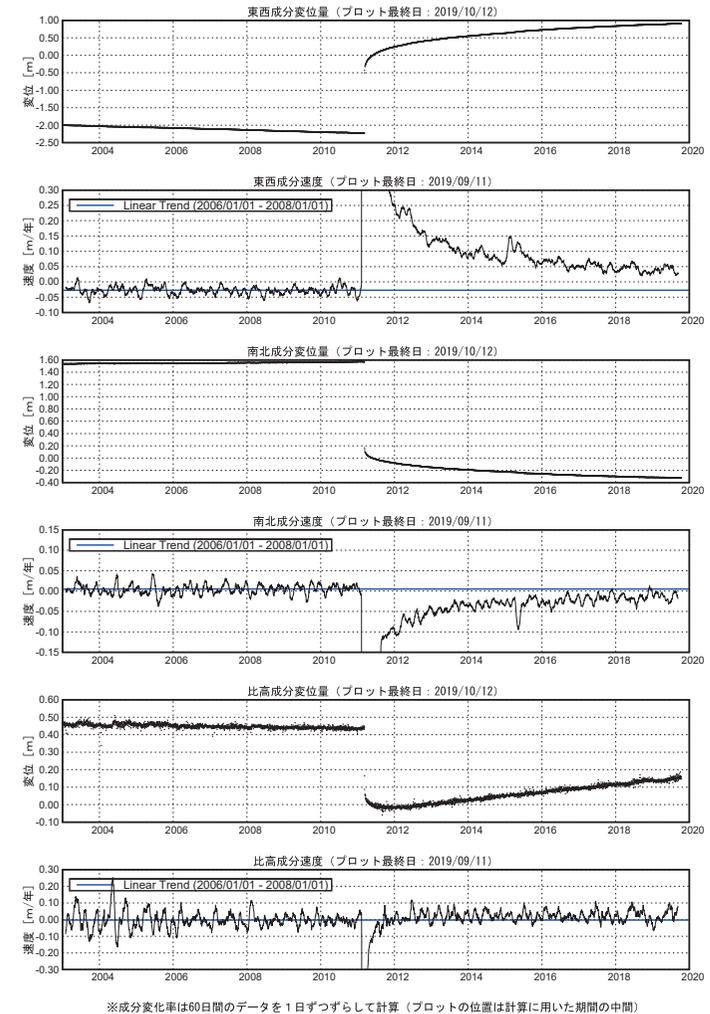
平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（5）



第17図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動（5/5）  
Fig. 17 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (5/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動

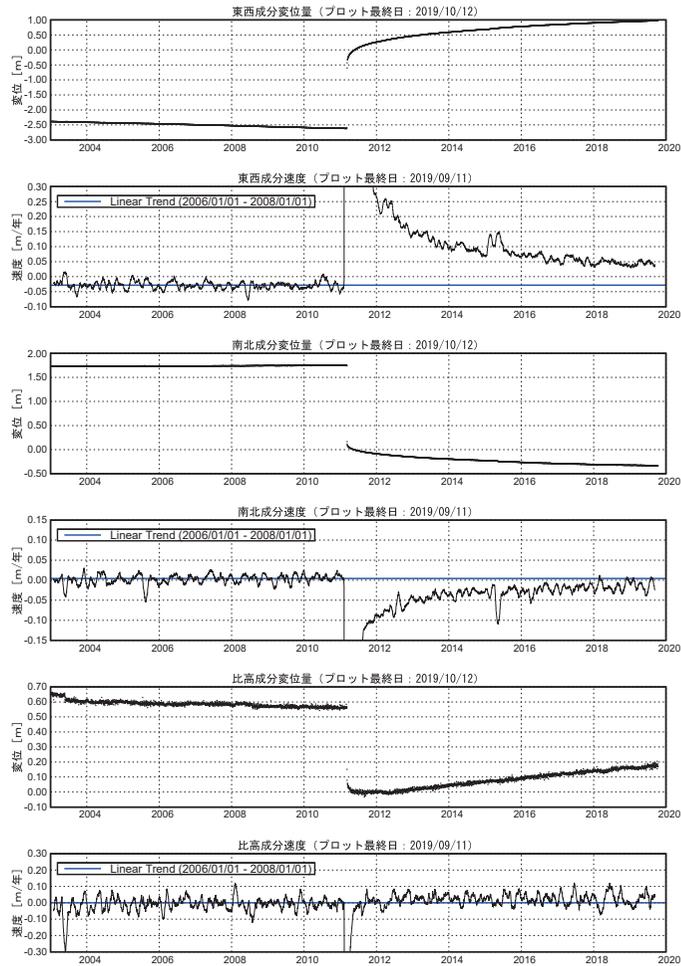
東北地方太平洋沖地震後に沈降し、その後隆起に転じた。  
2015年2月17日に発生した三陸沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる。  
2015年5月13日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる。  
三隅 (950388) -- 宮古 (940028) 間の成分変位と速度グラフ



第18図 東北地方太平洋岸のGEONET観測点における地殻変動速度の変化（宮古観測点・時系列）  
Fig. 18 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Miyako site) (1/6).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動

東北地方太平洋沖地震後に沈降し、その後隆起に転じた。  
 2015年2月17日に発生した三陸沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる。  
 2015年5月13日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる。  
 三隅(950388) -- 山田(950167) 間の成分変位と速度グラフ



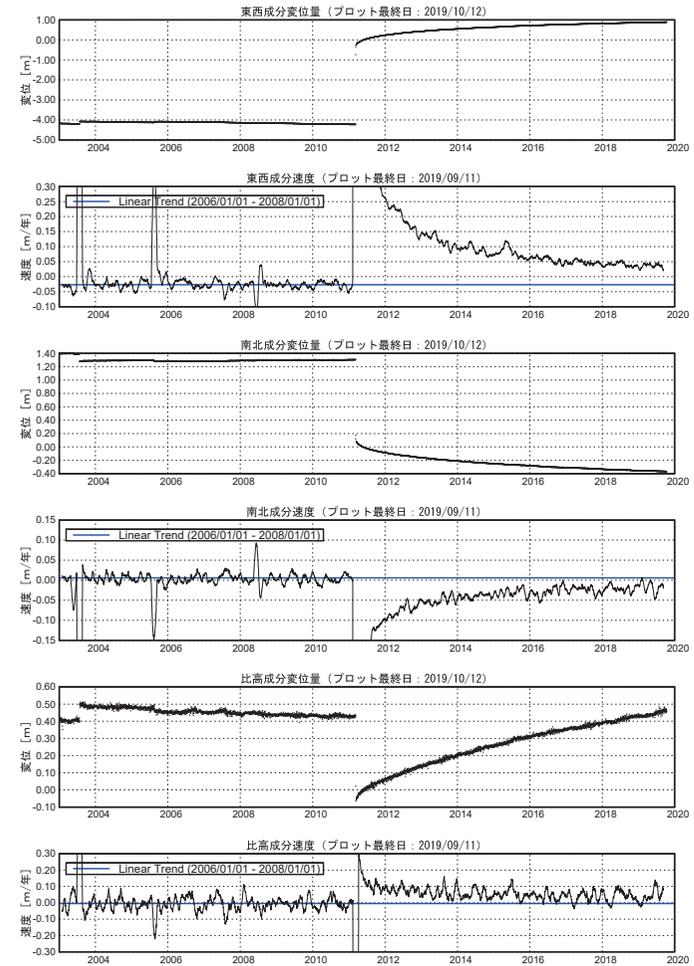
※成分変化率は60日間のデータを1日ずつずらして計算（プロットの位置は計算に用いた期間の中間）

第19図 東北地方太平洋岸のGEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (山田観測点・時系列)

Fig. 19 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Yamada site) (2/6).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動

東北地方太平洋沖地震発生前の変動速度には戻っていない。  
 2015年5月13日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる。  
 三隅(950388) -- 矢本(960549) 間の成分変位と速度グラフ

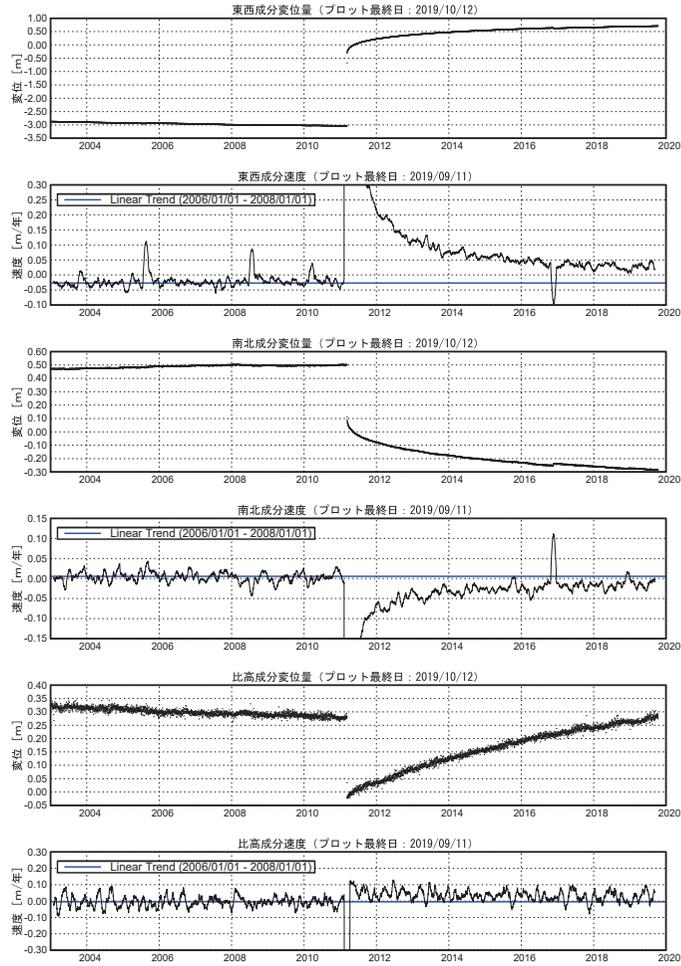


※成分変化率は60日間のデータを1日ずつずらして計算（プロットの位置は計算に用いた期間の中間）

第20図 東北地方太平洋岸のGEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (矢本観測点・時系列)

Fig. 20 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Yamoto site) (3/6).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動  
 東北地方太平洋沖地震発生前の変動速度には戻っていない  
 2016年11月22日に発生した福島県沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる。  
 三隅(950388) — 相馬1(940038) 間の成分変位と速度グラフ

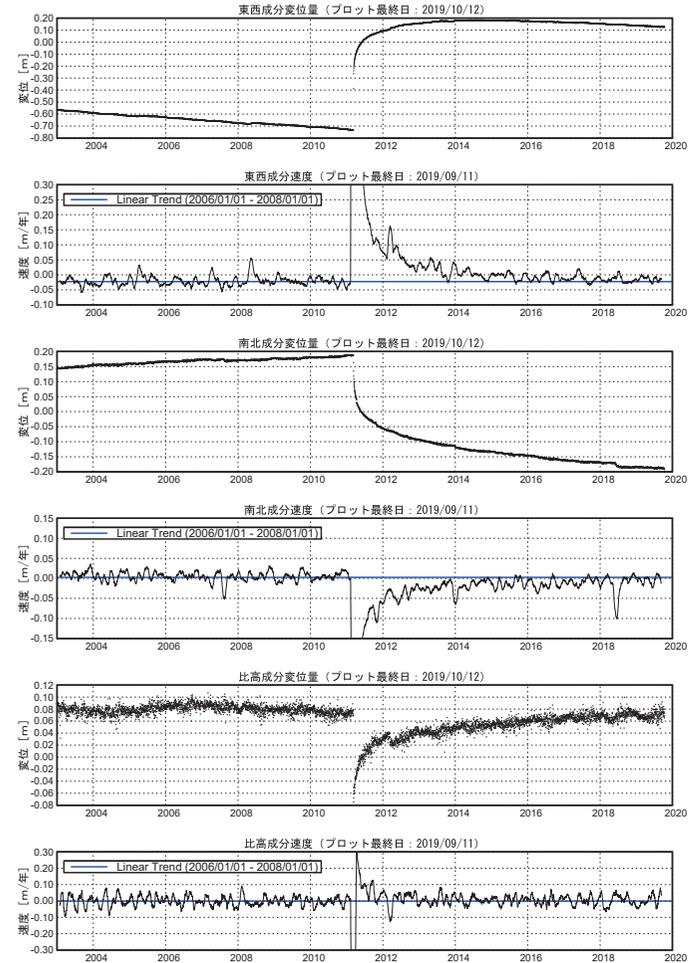


※成分変化率は60日間のデータを1日ずつずらして計算 (プロットの位置は計算に用いた期間の中間)

第21図 東北地方太平洋岸のGEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (相馬1観測点・時系列)

Fig. 21 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Souma 1 site) (4/6).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動  
 上下成分については東北地方太平洋沖地震発生前の変動速度に戻ってきたが、水平成分については戻っていない  
 2011年10月下旬頃、2014年1月上旬頃、2018年6月上旬頃に房総半島で発生したスロースリップ現象に伴う地殻変動の影響が見られる。  
 2012年3月14日に発生した千葉県東方沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる。  
 三隅(950388) — 銚子(93022) 間の成分変位と速度グラフ



※成分変化率は60日間のデータを1日ずつずらして計算 (プロットの位置は計算に用いた期間の中間)

第22図 東北地方太平洋岸のGEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (銚子観測点・時系列)

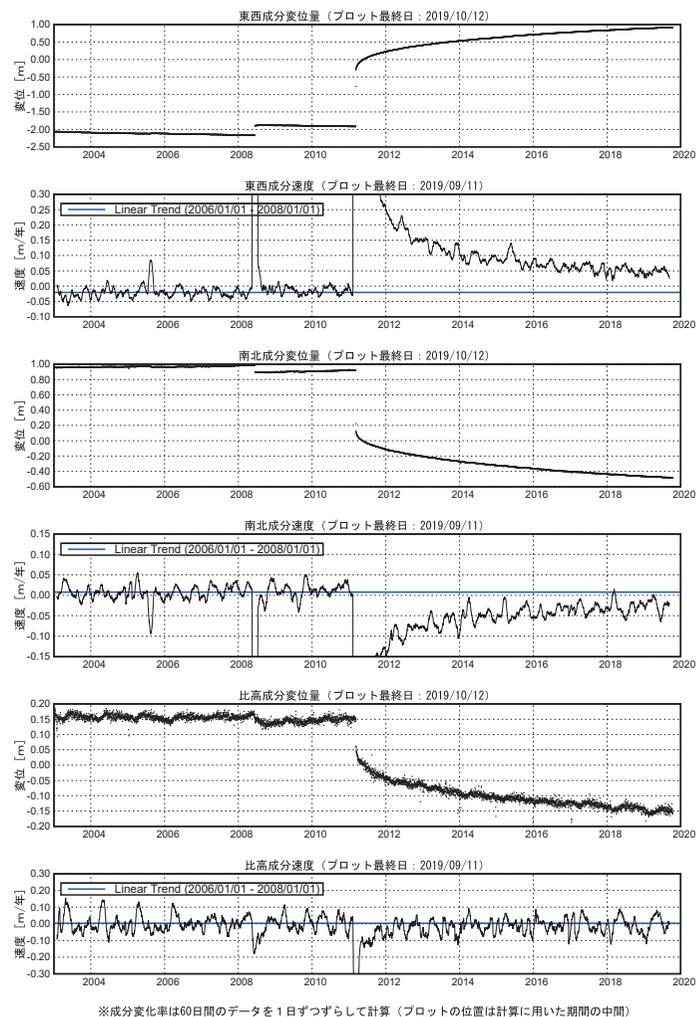
Fig. 22 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Choshi site) (5/6).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動

東北地方太平洋沖地震発生前の変動速度には異ってない

2015年5月13日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる

三隅 (950388) — 皆瀬 (950193) 間の成分変位と速度グラフ



第23図 東北地方太平洋岸のGEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (皆瀬観測点・時系列)

Fig. 23 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Minase site) (6/6).