3-2 東北地方の地殻変動 Crustal Deformations in the Tohoku District

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

[福島県沖の地震(3月16日) M7.4 GNSS]

第1~5図は、2022年3月16日に発生した福島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.固定局は岩崎観測点(青森県)である.第1図下段から第2図は,震源近傍の観測点の3成分時系列グラフである.この地震に伴い,牡鹿半島の牡鹿観測点及びS石巻観測点で北に約3cmの変位と約2cmの隆起,宮城県南部の宮城川崎観測点や福島県北部の福島2観測点では東に約2cmの変位等,宮城県から福島県を中心に広い範囲で地殻変動が観測された.

第3図は, GNSS 連続観測結果による上下変動ベクトル図である.固定局は岩崎観測点(青森県) である.全体的にばらつきは大きいものの,牡鹿半島で約2cmの隆起が見られる.

[福島県沖の地震 震源断層モデル]

第4~5図は、電子基準点で得られた地殻変動に基づき、半無限均質弾性体中の矩形断層一様す べりを仮定し、MCMC 法を用いて推定した震源断層モデルに関する資料である。推定においては、 モーメントマグニチュードと断層面積がスラブ内地震のスケーリング則¹⁾に近づくよう拘束をかけ るとともに、モーメントマグニチュードと断層幅の関係式を適用した。

第4図は、計算の結果、北北東 - 南南西走向で東南東に傾き下がる断層面上における逆断層運動 として推定された震源断層モデルである.推定された断層面の水平位置は震源分布と概ね整合して いる.断層面の上端は深さ約40kmとプレート境界より浅く推定されたが、今回の推定では半無限 均質弾性体を仮定しており、深さが系統的にずれている可能性もある.モーメントマグニチュード は7.4 (剛性率75GPaを仮定)となった.

第5図は、コーナープロットと呼ばれる、モデルの2つのパラメータ間の相関関係を示す2次元 ヒストグラムである.ほとんどの組において、同心円状のガウス分布に近い分布を示し、パラメー タはほぼ独立に推定されていることを示す.一部の組では相関が見られるが、与えられた拘束条件 のもとで、各パラメータがよく推定されている.

[岩手県沖の地震(3月18日) M5.6 GNSS]

第6図は、2022年3月18日に発生した岩手県沖の地震の地殻変動に関する資料である。上段に 示す震源近傍の2観測点の基線について、下段に3成分時系列グラフを示している。この地震に伴 う顕著な地殻変動は見られない。

[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7~11 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7~9 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66km,逆断 層・スラブ内地震,地殻変動 GNSS で水平約 3cm 西南西と約 5cm 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 6km,正断層,地殻変動 GNSS で約 30cm 水平と約 50cm の沈降,SAR で約 2m),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 1.5cm),2011 年 7 月 10 日三陸沖の地震(M7.3,深さ 34km,最大震度 4,地殻変動西 方向に約 5mm,左横ずれ),2011 年 0 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.岩手川崎A観測点における変動量は約162cm である.

第8~9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.岩手県三陸北部沿岸と奥羽脊梁山脈付近で沈降が見られる一方,岩手県 南部から千葉県の太平洋沿岸では隆起傾向が見られる.M牡鹿観測点は,2022年3月16日の福島 県沖の地震に伴って約2cm隆起し,累計で約73cmの隆起となっている.

第10図の最近3か月間の水平ベクトルには、東北地方を中心に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1.4cmとなっている.

第11図に最近3か月間の上下変動を示す.2022年3月16日の福島県沖の地震に伴い, 牡鹿半島で約2cmの隆起が生じたほかは, ノイズレベルを超える変動は見られない.

[GNSS 連続観測 東北地方太平洋沖地震後]

第12~17 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13~17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13~15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図下段から第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後の地殻変動速度]

第18~23 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.水平変動速度は,銚子観測点の東西成分では元の速度に戻り つつあるが,それ以外の観測点では,徐々に減衰しつつあるものの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継続している.

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20図の三隅-矢本基線及び第23図の三隅-皆瀬基線の東西成分の速度に2021年初頭及び2022年初頭に見られる一時的な変化は、2021年3月20日、2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震及び2022年3月16日に発生した福島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.また、東西成分の速度に2021年初頭及び2022年初頭に見られる一時的な変化は、2021年3月20日、2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震及び2022年3月16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月頃に発生した長期的SSEに伴う地殻変動の影響である.また,東西成分の速度に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.

[変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配 北海道~関東地方]

第24~26図は、GEONETの最終解(F5)から得られる変位速度分布から、プレート収束方向 に関する水平勾配を計算し、北海道地方から関東地方まで千島海溝と日本海溝の平均走向に沿った 水平勾配の分布を示したものである。各観測点について最近5年間の時系列から年周・半年周成分 と地震時等のオフセットを推定、除去し、最近1年間における水平、上下方向の変位の線形速度を 求め、プレート収束方向に沿った帯状領域毎に、水平方向(プレート収束方向)及び上下方向の変 位速度の空間分布から水平勾配を計算する。

この地域にある観測点は陸側プレート上だけに分布しているため、一般に、地震間でプレート間 固着していると、海溝に近いほど陸向きの速度が大きくかつ沈降速度が大きくなる.

第24図は,最近1年間における帯状領域毎の水平勾配のプロファイルである.水平方向の勾配は, 東北地方太平洋沖地震の震源に近いところでは海溝側ほど大きいが,それ以外の場所では逆向きに なっている.一方,上下方向では,東北地方から関東地方にかけた広い範囲で海溝側ほど隆起する 傾向が見られる.

第25 図は,水平勾配の時空間変化である.2011年以降,水平方向は北緯38°~41°付近,上 下方向は37°~40°付近で負から正に変化し,東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響と考えら れる.一方,北緯36°~38°付近の水平方向では,東北地方太平洋沖地震の後に一時正となった後, 負に変化しており,余効変動(粘性緩和)の影響とともに固着の回復が重なって見えている可能性 がある.

第26図の東北地方太平洋沖地震の前,及び直後の時期の結果と比較すると,第24図の最近の結 果では,東北地方太平洋沖地震の余効変動は小さくなっているとしても,これらの図と比べ第24 図では,広い範囲においていまだ地震前の状態には戻っていないことが分かる.

参考文献

1) Strasser, F. O., M. C. Arango, and J. J. Bommer (2010), Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude, *Seismol. Res. Lett.*, **81**, 941–950.



福島県沖の地震(3月16日 M7.4)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.

福島県沖の地震(2022年3月16日, M7.4)に伴う地殻変動:(上図)水平変動,(下図)3成分時系列 グラフ. 第1図

Crustal deformation associated with the M7.4 earthquake off the coast of Fukushima Prefecture on March 16, Fig. 1 2022: horizontal displacement (upper) and 3 components time series (lower).



第2図 福島県沖の地震(2022年3月16日, M7.4)に伴う地殻変動:3成分時系列グラフ.

Fig. 2 Crustal deformation associated with the M7.4 earthquake off the coast of Fukushima Prefecture on March 16, 2022: 3 components time series.





95

Fig. 3 Crustal deformation associated with the M7.4 earthquake off the coast of Fukushima Prefecture on March 16, 2022: vertical displacement.

2022 年3月16日福島県沖の地震の震源断層モデル

基準期間:2022/03/08 09:00:00~2022/03/15 08:59:59[F5:最終解]JST 比較期間:2022/03/17 09:00:00~2022/03/24 08:59:59[F5:最終解]JST 固定局:岩崎(950154)



図 推定された震源断層モデル

- (上)矩形実線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。矢印は観測値(黒)及び計算値(赤)の水平成分。矩形破線(赤)は2011年4月7日の宮城県沖の地震の震源断層モデル(国土地理院)。矩形破線(紫)は2016年11月22日の福島県沖の地震の震源断層モデル(国土地理院)。矩形破線(緑)は2021年2月13日福島県沖の地震の震源断層モデル(国土地理院)。矩形破線(青)は2021年3月20日宮城県沖の地震の震源断層モデル(国土地理院)。矩形破線(橙)は2021年5月1日宮城県沖の地震の震源断層モデル(国土地理院)。
- (下)傾斜方向(A-B)に射影した断層面(太線)及び震源分布(点)。横軸は傾き下がる方向を正にとっている。実線はプレート境界面(Nakajima and Hasegawa, 2006, Kita et al., 2010)。

☆印は震央、点は震源分布(気象庁波形相関DD法)、2022 年3月16日23時34分~3月23日23時59分。

表	推定された震源断層モデルパラメータ
11	1日に C10/2 辰/小町/一百 ヒノノレハノノ ノ

[°] [°] [km] [km] [km] [°] [°] [°] [m] 141.367 37.635 39.5 56.3 37.2 15.8 52.0 94.3 0.97 7.30	経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量	M
141 367 37 635 39 5 56 3 37 2 15 8 52 0 94 3 0 97 7 3	[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]	IVIW
	141.367	37.635	39.5	56.3	37.2	15.8	52.0	94.3	0.97	7.38
(0.031) (0.039) (2.3) (6.9) (0.6) (1.0) (2.0) (3.4) (0.14) (0.02)	(0.031)	(0.039)	(2.3)	(6.9)	(0.6)	(1.0)	(2.0)	(3.4)	(0.14)	(0.02)

· マルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法を用いてモデルパラメータを推定した。

・ 位置は断層の左上端を示す。括弧内は誤差(1σ)を示す。

・ M.と断層面積がスラブ内地震のスケーリング則(Strasser et al., 2010)に近づくよう拘束

M_wの計算においては、剛性率を75 GPaと仮定

第4図 福島県沖の地震(2022年3月16日, M7.4)の震源断層モデル.

Fig. 4 Rectangular fault model of the M7.4 earthquake off the coast of Fukushima Prefecture on March 16, 2022.

[·] スラブ内地震のスケーリング則(Strasser et al., 2010)の Mw と断層幅の関係式を適用

【参考】鉛直成分



矢印は観測値(黒)及び計算値(赤)の鉛直成分。

【参考】事後確率分布(コーナープロット)



第5図 福島県沖の地震(2022年3月16日, M7.4)の震源断層モデルモデルパラメータのコーナープロット. Fig. 5 Corner plot of estimated parameters for the MCMC rectangular fault modeling in Fig.4.



第6図 岩手県沖の地震(2022年3月18日, M5.6)前後の観測データ:(上図)基線図,(下図)3成分時系列 グラフ.

Fig. 6 Results of continuous GNSS measurements before and after the M5.6 earthquake off the coast of Iwate Prefecture on March 18, 2022: baseline map (upper) and 3 components time series (lower).



東北地方太平洋沖地震(M9.0)後の地殻変動(水平)一累積一

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).





Fig. 8 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical).



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).





Fig. 10 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake for recent 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 recent 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

各観測局情報

点番号	点 名	日付	保守内容	点番号	点 名	日付	保守内容	点番号	点 名	日付	保守内容
950156	八戸	2012/09/25	アンテナ更新	93022	銚子	2012/02/21	アンテナ更新	071162	新潟山北	2012/09/05	アンテナ更新
		2018/01/20	アンテナ交換			2020/01/30	受信機交換			2016/12/01	受信機交換
		2020/10/06	アンテナ更新	950155	大鰐	2012/10/02	アンテナ更新	940035	天童	2012/08/21	アンテナ更新
		2021/10/14	受信機交換			2017/12/04	受信機交換			2020/11/18	アンテナ交換
950164	岩泉2	2012/02/09	アンテナ更新	960553	田沢湖	2012/09/14	アンテナ更新			2020/11/18	受信機交換
950167	山田	2012/02/04	アンテナ更新	950166	矢巾	2012/01/26	アンテナ更新			2020/11/30	アンテナ更新
		2018/11/28	受信機交換			2019/02/15	受信機交換	950202	猪苗代1	2012/01/13	アンテナ更新
051145	岩手川崎A	2012/01/25	アンテナ更新			2019/12/10	アンテナ交換			2015/04/06	アンテナ交換
		2019/02/14	受信機交換	940031	本荘	2012/02/04	アンテナ更新			2019/11/22	周辺伐採
960549	矢本	2011/12/16	アンテナ更新			2018/11/29	受信機交換			2020/11/25	受信機交換
		2016/12/02	受信機交換	950193	皆瀬	2012/03/10	アンテナ更新	950218	日光	2012/11/13	アンテナ更新
		2019/11/13	周辺伐採			2016/11/17	周辺伐採	93016	足立	2012/12/11	アンテナ更新
940038	相馬1	2012/01/12	アンテナ更新			2019/02/21	受信機交換			2016/12/28	アンテナ交換
		2014/11/20	受信機交換	059071	M牡鹿	2016/02/18	受信機交換			2018/03/19	受信機交換
		2019/02/01	受信機交換			2019/10/16	受信機交換			2021/12/09	受信機交換
940041	いわき	2011/12/13	アンテナ更新			2019/10/31	周辺伐採	950462	福江	2012/11/07	アンテナ更新
		2013/12/05	レドーム開閉			2020/11/17	アンテナ更新			2016/02/17	受信機交換
		2017/11/01	受信機交換			2020/11/17	レドーム交換			2021/02/04	受信機交換
93004	鉾田	2012/02/16	アンテナ更新								
		2019/05/09	受信機交換	1							
1		2021/01/07	アンテナ交換	1							
1	1	2021/12/14	爲信機な換								

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

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

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 for recent 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(5)



成分変化グラフ

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).



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 deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Miyako station.



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 deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Yamada station.



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).



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 deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Souma-1 station.









-115 -



- 変位速度を計算している。
- データ期間内に発生した地震や保守作業によるオフセットは除去している。
- 幅±30kmの各帯状領域内の観測点から変位速度の空間勾配を計算している(速度の基準は三隅)。水平 成分は、プレート収束方向(北海道:N120°E、東北~関東地方:N105°E)の速度から計算している。
- 速度勾配は、海溝側ほど海溝方向、隆起の速度が大きくなる場合を正(海側)にとっている。
- ・ 本解析は、海洋研究開発機構 飯沼卓史氏から提供頂いたプログラム(Iinuma 2018)を使用している。

第24図 変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配.

Fig. 24 Spatial (trench-parallel) variations of the displacement rate gradients in the direction of plate convergence: horizontal and vertical rate components are shown with bars in red and blue, respectively.



変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配の時系列 (北海道~関東地方)

各帯状領域の中心線が経度140°と交わる点の緯度を、横軸にとっている
海溝側ほど海溝方向、隆起の速度が大きくなる場合を正にとっている。

第25図 変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配(時系列).

Fig. 25 Spatio-temporal variations of the displacement rate gradients in the direction of plate convergence: horizontal (vertical) rate components are shown on top (bottom) panel.

変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配 (北海道~関東地方)比較用



- ・ 左の図は、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前の5年間の期間で推定した変位速度の 空間勾配を表す。
 ・ 右の図は、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震直後の1年間の期間で推定した変位速度の
- ・ 石の図は、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震直後の1年間の期間で推定した変位速度の 空間勾配を表す。

第26図 変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配(比較用).

Fig. 26 Spatial (trench-parallel) variations of the displacement rate gradients in the direction of plate convergence: (left) for five-year period of time before, and (right) for one year right after, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.